

鋼 I 桁橋の腐食した桁端部の耐荷力と  
その簡易評価法に関する研究

Study on Ultimate Strength and Its Simple Evaluation Method  
for Corroded Damaged Steel Girder Ends

2015 年 9 月

大阪市立大学大学院 工学研究科

うすくら まこと  
臼倉 誠

## 目 次

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 鋼 I 桁橋桁端部の腐食損傷の現状	2
1.2.1 腐食損傷の傾向と形態	2
1.2.2 実務者の対応	4
1.3 鋼 I 桁橋の桁端部の規定の整理	5
1.3.1 支点上補剛材の設計に関する規定	5
1.3.2 規定の変遷	8
1.3.3 腐食した桁端部の照査方法	11
1.4 本研究に関連する既往研究	12
1.4.1 腐食した鋼 I 桁橋の耐荷力に関する研究の整理	12
1.4.2 桁端部の耐荷力評価法に関する研究の整理	15
1.4.3 海外での腐食した桁端部の状況	15
1.5 本研究の目的	16
1.6 本論文の構成	17
参考文献	
2. 腐食時の桁端下端部の耐荷力特性の解明	23
2.1 まえがき	23
2.2 FEM解析方法	23
2.2.1 解析モデル	23
2.2.2 解析ケース	27
2.3 FEM解析モデルの特性および検証	32
2.3.1 载荷条件と初期たわみの影響	32
2.3.2 スカーラップの影響	33
2.3.3 支点部の拘束の影響	33
2.3.4 異種材質の影響	34
2.3.5 解析モデルの有効性	35
2.4 腐食モデルのパラメトリック解析	36
2.4.1 材質別欠損の影響	36

2.4.2	下フランジの拘束効果による影響	39
2.4.3	欠損位置による傾向	40
2.4.4	ソールプレートの形状による影響	41
2.4.5	ウェブおよび補剛材の欠損幅の影響	42
2.4.6	ウェブおよび補剛材の欠損高の影響	46
2.5	まとめ	49

参考文献

3.	腐食した桁端部の耐荷力特性を踏まえた崩壊プロセスからの分類とその分析	52
3.1	まえがき	52
3.2	崩壊モードの分類に用いたパラメトリック解析	53
3.2.1	解析モデル	53
3.2.2	解析ケース	53
3.3	崩壊タイプの分類	55
3.3.1	崩壊タイプの分類方法および分類結果	55
3.3.2	崩壊タイプの特徴	57
3.4	崩壊タイプの分析	61
3.4.1	非線形開始点	61
3.4.2	最大荷重	63
3.4.3	最大荷重以降	64
3.5	損傷状態の違いが与える影響	64
3.6	まとめ	65

参考文献

4.	腐食した桁端部の耐荷力挙動に与える支点偏心の影響	68
4.1	まえがき	68
4.2	腐食した桁端部の耐荷力挙動に与える支点偏心の影響	68
4.2.1	解析概要	68
4.2.2	解析ケース	69
4.2.3	解析結果	69
4.2.4	解析の分析・考察	72
4.3	まとめ	77

参考文献

5.	簡易耐荷力評価方法の提案	78
5.1	まえがき	78
5.2	道路橋示方書の許容値を使用した終局耐力照査	79
5.2.1	設計耐力の設定	79
5.2.2	設計耐力による検討結果	81
5.2.3	健全時の設計耐力による検討	82
5.2.4	設計耐力の評価法の検討	82
5.3	腐食損傷を有する鋼 I 桁端部の耐力推定方法に関する一検討	86
5.3.1	腐食影響図	86
5.3.2	腐食損傷を有する桁端部の終局耐力の分析	100
5.3.3	耐荷力推定方法の検討	105
5.3.4	健全時の終局耐力と桁反力の関係	110
5.4	崩壊プロセスに基づいた腐食した桁端部の耐荷力評価の検討	113
5.4.1	構造パラメータの抽出	113
5.4.2	解析検討	116
5.4.3	解析結果	118
5.4.4	崩壊モードの分析	120
5.4.5	崩壊モードを踏まえた耐荷力評価	121
5.5	簡易評価方法	123
5.5.1	簡易耐荷力評価式の使い分け	123
5.5.2	簡易評価法（応急補修）	123
5.5.3	簡易評価法（恒久補修）	126
5.6	まとめ	131
参考文献		
6.	結論	134
6.1	本研究の成果	134
6.2	今後の課題	137

## 謝辞

本論文に関する著者の発表論文

## 付録

- 1 腐食した桁端下端部の実務者の対応のヒアリング
- 2 腐食損傷を有する桁端部の終局耐力の算出例について

## 要 旨

本研究では、今後、老朽化し増加する橋梁構造物に対して、残存耐力を積極的に活用する維持管理社会になることを見越し、腐食した鋼I桁橋の桁端部の様々な腐食損傷に対する残存耐力を把握するとともに、その崩壊に至るまでの過程を把握する崩壊メカニズムを解明することを目的としている。さらに、実務者に有益な様々な構造諸元や欠損状態を踏まえた簡易耐荷力評価式を提案することを目的とした。本論文は、第6章から構成されており、各章で得られた主な結論を要約すると、以下の通りである。

第1章では、腐食した鋼橋I桁の桁端部について、国土技術政策総合研究所が整理した腐食の傾向、腐食形態、および腐食した桁端部に対する実務者のヒアリング結果をもとに実状を把握した。また、腐食した鋼橋I桁の桁端部の照査に用いている道路橋示方書における規定とその変遷および照査方法を整理し、腐食した桁端部の照査における課題を抽出した。また、既往の研究成果において述べられている様々な耐荷力評価や耐荷力評価式を整理した。

第2章では、腐食した桁端部の耐荷力特性を把握するために、桁端部をモデル化したFEM解析を実施した。モデルを検証するために、载荷条件、初期たわみ、スカーラップ、支点部拘束をパラメータにしてモデルの特性を把握し、既往の実験と変形モードを比較するとともに、他の研究で行われた解析結果と最大荷重を比較した。さらに、健全時モデルを用いて異種材質の影響を確認した。これらの検討を踏まえて、桁端下端部について、統計的に多いタイプの腐食損傷に着目し、それを反映させたパラメトリック解析を実施した。ここでは、材質、下フランジによる拘束効果、欠損位置、ソールプレート形状の違い、腐食による欠損幅への影響、腐食による欠損高の影響を検討し、各損傷状態における耐荷力低下の程度と耐荷力特性を明らかにした。

第3章では、桁端下端部が腐食した場合のパラメトリック解析から得られた結果を分析し、腐食した桁端部の耐荷力特性を踏まえて崩壊タイプを分類した。崩壊タイプは欠損位置に依存し、一部のケースでは欠損高にも依存していることを示した。次に、分類したタイプを非線形開始点、最大荷重時、最大荷重後に着目し分析し、桁端部の損傷時の崩壊メカニズムを明らかにした。

第4章では、東日本大震災では、鋼製支承よりピンが脱落して支点位置が移動した被害が報告されていたことを踏まえて、地震等によって、支点位置が偏心することも考え、ウェブの支点が偏心したケースに着目して、崩壊タイプに分類し、崩壊メカニズムを明らかにした。

第5章では、実務での適用を考慮して3つの簡易の耐力評価を提案した。1つ目は、道路橋示方書で規定される全体座屈、局部座屈、支圧状態の許容応力度に基づく手法である。2つ目は、既往の研究結果をもとに腐食損傷による終局耐力の低下率を一元化した分布図を作成し、その分布図から算出される耐荷力低下の下限値をもとに耐力推定式を提案した。3つ目は、欠損位置によって、崩壊モードが決定される特性を活用し、崩壊モード毎に既往の耐荷力評価式を利用して評価できる簡易評価手法を提案した。さらに、終局耐力と使用限界強度の関係を示し、「腐食損傷した桁端部の耐力余裕と座屈発生による荷重低下のリスク」に着目した簡易評価法を提案した。

第6章では、本論文で得られた結論をまとめ、簡易評価法における今後の課題を示した。

## 本論文で用いた主な記号および用語

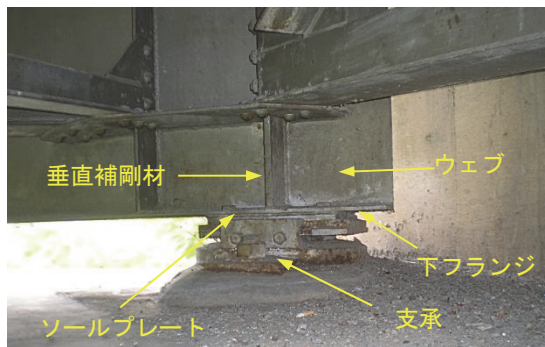
### 主な記号

$A_{ew}$	: ウェブの有効断面積
$A_{es}$	: 支点上補剛材の有効断面積
$A_{wd}$	: 欠損部を考慮したウェブの軸圧縮応力の断面積
$A_{sd}$	: 欠損部を考慮した支点上補剛材の軸圧縮応力の断面積
$B_s$	: 支点上補剛材の幅
$E$	: ヤング係数
$L_w$	: 桁端側ウェブの張出し長さ
$P_d$	: 設計耐力
$P_0$	: 非線形開始点の荷重
$P_u$	: 損傷時の終局耐力
$P_{Hu}$	: 健全時の終局耐力
$P_{max}$	: 各損傷時の最大荷重
$P_{(max-)int}$	: 健全時（ベースモデル）の最大荷重
$P_s$	: 健全時のせん断耐荷力
$P_{Hs}$	: 損傷時のせん断耐荷力
$P_y$	: 構造諸元から設定する支点部の降伏耐力
$P_{Hy}$	: 健全時の支点部の降伏耐力
$R$	: 圧縮を受ける板要素の幅厚比パラメータ
$R_s$	: 支点上補剛材における圧縮を受ける板要素の幅厚比パラメータ
$R_w$	: 桁端部のウェブにおける圧縮を受ける板要素の幅厚比パラメータ
$W$	: パネル幅
$h_w$	: ウェブ高（桁高）
$k_b$	: 座屈係数
$k\tau$	: せん断に対する座屈係数
$l$	: 有効座屈長
$r$	: 断面二次半径（ウェブ中心）
$t_0$	: 設計板厚
$t_w$	: ウェブの板厚
$t_s$	: 支点上補剛材の板厚
$w_D$	: 欠損幅
$\alpha$	: アスペクト比

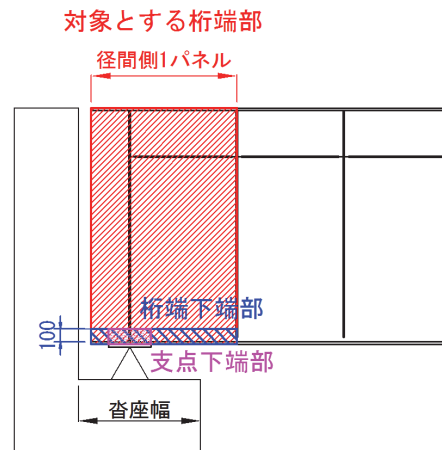
$\gamma_y$	: 軸方向圧縮応力度に対する安全率(=1.7)
$\gamma_{by}$	: 支圧応力度に対する安全率(1.7/1.5=1.13)
$\kappa_\tau$	: せん断耐荷力に対する座屈係数
$\bar{\lambda}$	: 支点部 細長比パラメータ
$\lambda_s$	: せん断座屈 座屈パラメータ
$\nu$	: ポアソン比
$\sigma_{ba}$	: 支圧応力度に対する許容値
$\sigma_{bas}$	: 補剛材の支圧応力度に対する上限値
$\sigma_{baw}$	: ウェブの支圧応力度に対する上限値
$\sigma_{ca}$	: 許容軸方向圧縮応力度
$\sigma_{cag}$	: 局部座屈を考慮しないウェブの許容軸方向圧縮応力度
$\sigma_{cal}$	: 局部座屈に対する許容応力度
$\sigma_{cals}$	: 支点上補剛材の局部座屈に対する許容応力度
$\sigma_{cao}$	: 許容軸方向圧縮応力度の上限値
$\sigma_{caow}$	: 局部座屈を考慮しないウェブの許容軸方向圧縮応力度の上限値
$\sigma_{cas}$	: 支点上補剛材の許容軸方向圧縮応力度
$\sigma_{caw}$	: ウェブの許容軸方向圧縮応力度
$\sigma_y$	: 材料の降伏点
$\sigma_{yw}$	: ウェブの降伏点の公称値(N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{ys}$	: 支点上補剛材の降伏点の公称値(N/mm <sup>2</sup> )
$\tau_{cr}$	: ウェブのせん断座屈強度

## 主な用語

桁端部 : 鋼I桁橋の「ウェブ」、「支点上補剛材」、「水平補剛材」、「上フランジ」、「下フランジ」、「ソールプレート」とする。桁端部の範囲は下部構造の沓座幅（縁端拡幅部を含む）から桁端を示す。なお、沓座幅がウェブの1パネルよりも狭い場合には、ウェブ1パネル分を範囲とする（縁端拡幅部を含む）。



支点部の状況



桁端部の範囲

桁端下部 : 桁端部の下部部

支点上下部 : ソールプレートの範囲程度の桁端部の下部部

十字柱 : 道路橋示方書で決められている荷重集中点の補剛材として設計するウェブおよび支点上補剛材から成る柱

径間側ウェブ : 補剛材取付部から1パネル目のウェブ

桁端側ウェブ : 補剛材取付部から桁端側のウェブ

有効断面積 : 道路橋示方書の荷重集中点の補剛材の考え方に準拠し、支点上補剛材は全断面積とし、ウェブは有効幅を支点上補剛材取付部からウェブ板厚  $t_w$  の24倍とする

崩壊モード : 最大荷重時の変形性状

崩壊プロセス : 荷重が載荷され最大荷重を超えて荷重低下に至るまでの過程

崩壊タイプ : 崩壊モードおよび崩壊プロセスを踏まえて、分類したタイプ

イベント : 崩壊プロセスで座屈が発生する段階や状態が変化する段階

非線形開始点 : 荷重-変位曲線において、初期勾配から勾配が変化する点

せん断座屈 : 径間側ウェブのパネルに発生するせん断座屈

局部座屈 : 支点上下部の交差部（スカーラップ）から発生、または、パネルの端部から発生するウェブや支点上補剛材の板要素の局部的な座屈

局部座屈の連続化 : ウェブ端部から発生する局部座屈が支点部付近まで進展し、支点上下部の座屈と連続化する状態



柱の全体座屈	: ウェブおよび支点上補剛材の十字柱で発生した全体座屈
塑性化領域の連続化	: 支点部から発生する塑性化領域とウェブ端部から発生する塑性化領域が桁端下端部で連続化する状態
弾性限界点	: いずれかの要素が降伏応力に達した時の強度
全塑性限界点	: 下フランジに接しているウェブパネルにおいて、降伏領域がウェブパネルの有効範囲に達する時の強度
局部座屈発生点	: 支点上付近の桁端下端部において局部座屈が発生する時の強度
桁反力	: 1 支承あたり受け持つ荷重 (活荷重+死荷重)
設計耐力	: 道路橋示方書の規定の許容値の上限値に安全率を掛けた耐荷力
設計降伏耐力	: 残存断面積と材料の降伏点を掛け合わせることで、構造諸元から設定できる降伏耐力
終局耐力	: 終局限界状態における耐荷力 (支点部耐荷力, せん断耐荷力, 曲げ耐荷力)
荷重低下	: 耐力そのものが低下する状態
耐力 (の) 低下	: 健全時の終局耐力に対する損傷時の終局耐力を比べて低下したこと
耐力余裕	: 終局耐力に対する耐力の余裕

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

鋼橋の桁端部は、凍結防止剤の飛散や局所的な漏水の影響や伸縮装置からの漏水などによる要因により、腐食しやすい部位・部材として着目され続けている。昭和50年2月に発行された首都高速道路の点検補修に関する調査研究報告書<sup>1)</sup>では、すでにプレートガーター橋の支承付近桁端部の激しい腐食に対して補修例が示されている。平成16年橋梁定期点検要領(案)<sup>2)</sup>に準拠した直轄国道の定期点検データを整理した結果によると、部材が一様に腐食することはまれであり、桁端部等の腐食環境の劣る部位では局部的に著しい腐食損傷が生じることが多いことが明るみにされている<sup>3)</sup>。写真-1.1.1や写真-1.1.2は桁端部の腐食損傷の例であるが、このように下端部が完全欠損している場合もある。平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震では、桁端部で局部的に著しい腐食を生じていた鋼橋の主桁が大きく損傷して桁の崩壊が懸念される状態となった事例が報告されている<sup>4)</sup>。



写真-1.1.1 腐食の状況



写真-1.1.2 腐食の状況

近年、鋼橋の維持管理に対し、防食や当て板補強対策に関する規定および文献が多くある。例えば、鋼道路橋防食便覧(2014)<sup>5)</sup>では、鋼道路橋塗装便覧(1990)<sup>6)</sup>と鋼道路橋塗装・防食便覧(2009)<sup>7)</sup>の内容を統廃合し、近年の技術開発、調査研究成果を取り入れ、かつ鋼道路橋における設計、施工、維持管理の実情を踏まえた留意事項等を見直し、鋼道路橋に発生する腐食損傷を防止し、安全性と長期耐久性の確保を基本方針として、とりまとめられている。土木研究所では、鋼橋桁端部の腐食対策<sup>8)</sup>を検討し、腐食による局部的な断面欠損に対する簡易当て板補強方法を提案し、鋼橋桁端部に腐食が見られた際の影響評価方法と補修・補強工法の選定方法について骨子案を示している。一方で、道路橋補修・補強事例集(2009年版)<sup>9)</sup>で鋼Iげた橋の飛来塩分による腐食への当て板補強による対策法を示している。また、腐食した部材を用いて実験的に耐荷力を把握しようとする研究も近年行なわれ、腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル(2009)<sup>10)</sup>にその一部はとりまとめられている。このように、鋼橋の桁端部の防食設計法、耐久性設計法、補修設計法に関して、徐々に整理されつつある。道路管理者の中には、近年、予防保全の観点から桁端部に着目して健全時の状態から補強を進めている場合もある。

しかしながら一方で、平成26年7月に道路法が改正され、橋梁等の道路構造物は、国が定める

統一的な基準により 5 年に 1 回の頻度で近接目視により点検を行うことを受けて、初めて初回点検を迎える橋梁もある。また、実際に、補修補強設計を実施しているものの、対策工事を実施できないで、次の点検を迎える橋梁もある。このように限られた予算の中で対応する橋梁には、より耐力の余裕を積極的に利用していく検討や必要最小限の対策が求められていることも実情としてある。

本研究では、このような背景から、耐荷力の要求レベルの設定および維持管理区分を検討する上での判断材料を提供することも視野に入れて、鋼 I 桁橋の腐食した桁端部の耐荷力とその簡易評価法の提案に関する研究に取り組むこととした。

## 1.2 鋼I桁橋桁端部の腐食損傷の現状

### 1.2.1 腐食損傷の傾向と形態

国土技術政策総合研究所では、直轄国道の鋼道路橋の点検データを収集し、整理しているので、これらのデータを参考に桁端部の腐食損傷の傾向と局部腐食に関する傾向を整理する。

#### (1) 腐食損傷の傾向

国土技術政策総合研究所では、鋼道路橋の点検データを収集し、平成 16 年点検要領による点検結果が 2 回分ある 6,021 橋のデータをもとに鋼橋の劣化の特徴を分析している<sup>1)</sup>。その中で桁端部の主な腐食損傷に関連する内容の傾向として「鈹桁橋は箱桁橋よりも進展が早い」、「鈹桁橋の A、B 塗装系と C 塗装系では、損傷程度の比率の変化傾向が両者で大きく異なっており、A、B 塗装系では、ある時点の評価 a のものが 10 年～15 年経過すると橋梁数の割合がほぼ半減する一方で、最悪評価の e まで悪化するものは 50 年後でも 10%程度に留まる予測結果となった。一方で、C 塗装系では評価 a が半減するのに約 30 年を要するが、50 年後に最悪評価の e まで悪化するものは 20%程度に及び、C 塗装系では健全なままで推移する場合と早期に状態が悪化する場合に大別される傾向がある。」、「中間部と端部の比較では、塗装系によらず、外桁の桁端部で比較的多く腐食が発生している。」、「外桁と内桁の比較では、中間部と端部の関係ほどの顕著な差はなく、腐食環境の違いは端部と中間部ほど大きくない。」、「塩害地区と非塩害地区の違いは、塩害地区とそれ以外の地区での橋で腐食進展速度に著しい差はみられ、防食機能の劣化の場合と比べても塩分の影響は極めて大きい。」などと整理されている。

#### (2) 腐食損傷の形態

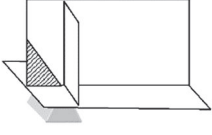
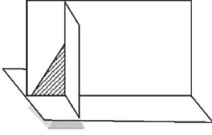
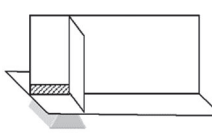
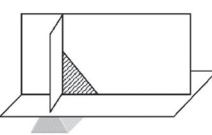
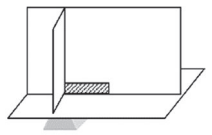
国土技術政策総合研究所では、鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究<sup>3)</sup>により、直轄橋梁の既存の定期点検データから腐食が発生している鋼橋の支点部の状況が写真データにより確認できる 62 ケースを分析対象として、そのパターン分けを行っている。部材ごとの腐食形態（ウェブ、下フランジ、補剛材各部材）の分析結果を a)～c) に、それらの各部材の腐食形態を組み合わせた分析結果を d) に抜粋する。

##### a) ウェブ

ウェブの腐食形態を表-1.2.1 に整理する。支点上補剛材より橋台側（以後、桁端側とする）は、桁端側を頂点とする三角形、補剛材側を頂点とする三角形及び下フランジ近傍だけが腐食している 3 パターンに分類された。また、支点上補剛材より支間中央側（以後、径間側とする）は補剛材側を頂点とする三角形と下フランジ近傍だけが腐食している 2 パターンに分類された。支点よ

り桁端側のみに補剛材が頂点となる三角形の腐食パターンが現れるのは、伸縮装置部からの漏水や橋台パラペットの影響と考えられる。また、支点部の部位が全体的に腐食するのではなく、支点部の部位外周部から腐食進行し、局部的に著しくなっていく傾向にあることがわかる。

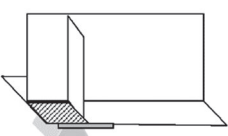
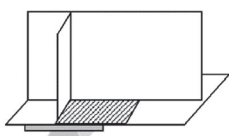
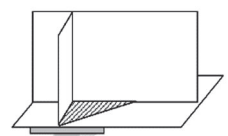
表-1.2.1 ウェブの腐食形態<sup>3)</sup>

桁端側ウェブ (事例数: 25)			径間側ウェブ (事例数: 27)	
				
橋台側から三角形の腐食 (8/25)	補剛材側から三角形の腐食 (7/25)	下フランジとの取合の腐食 (10/25)	補剛材側から三角形の腐食 (10/27)	下フランジとの取合の腐食 (17/27)

### b) 下フランジ

下フランジの腐食形態を表-1.2.2に整理する。支点より桁端側の腐食の形態は、腐食しているものはほぼ全体が腐食しているものがほとんどであった。これは支点部の部位が狭く腐食の原因と考えられる滞水や塵埃の堆積が補剛材で仕切られたフランジ上面の狭い範囲で常に生じるために早期に腐食が全体にわたってしまうものと考えられる。支点より径間側では、支点上補剛材及びウェブ面から下フランジ全体が腐食しているものと垂直補剛材およびウェブ面を結ぶ三角形の2パターンに分類された。支間中央部への広がりは限定的なものとなり、支点近傍に集中して腐食が生じている。

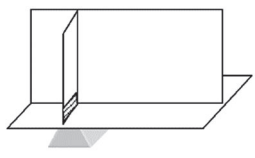
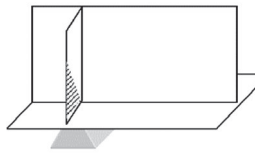
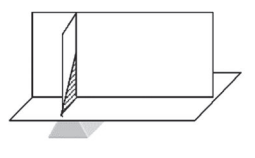
表-1.2.2 下フランジの腐食形態<sup>3)</sup>

支点より桁端側 (事例数: 11)	支点より径間側 (事例数: 28)	
		
下フランジ全体の腐食 (11/11)	下フランジ全体の腐食 (24/28)	ウェブ及び補剛材の取合から三角形の腐食 (4/28)

### c) 支点上補剛材

支点上補剛材の腐食形態を表-1.2.3に整理する。ウェブ面を頂点とする三角形、ウェブ面の逆を頂点とする三角形及び下フランジ近傍だけが腐食しているものの3パターンに分類された。最も頻度が高いのは下縁の下フランジ近傍だけが著しく腐食するパターンであり、結露水や雨水などの滞水による腐食環境の悪化の影響が大きいことを伺わせる。ウェブ側を頂点とする三角形の腐食パターンについては、開放された空間の自由端側で腐食が著しくなっているが、これは下フランジの溶接及び補剛材の自由縁で塗装が薄いなど塗装品質が劣っていることの影響が考えられる。

表-1.2.3 支点上補剛材の腐食形態<sup>3)</sup>

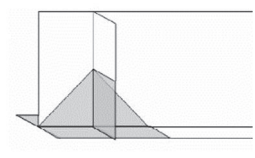
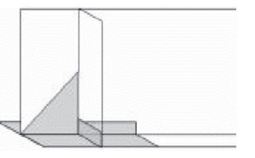
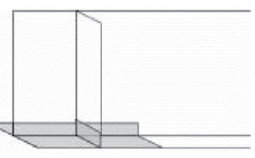
支点上補剛材（事例数：25）		
		
下フランジ取合の腐食 (19/25)	補剛材内側から三角形の腐食 (4/25)	補剛材ウェブ側から三角形の腐食 (1/25)

#### d) 支点部全体の腐食形態

直轄国道の橋梁の平成 16 年定期点検要領に準拠した定期点検データから腐食が発生している鋼橋の桁端部では、以下の腐食形態の傾向があることが示された。

- ・桁端部にある程度以上進行した腐食が生じる場合、桁の端部全体が腐食する例は比較的少なく、補剛材や下フランジなどで区切られた部位毎に取り合い部となる溶接線近傍や部材の自由縁から極めて限られた範囲で腐食が集中的に進展する傾向にある。
- ・桁端部の腐食パターンは、表-1.2.4 に示す 3 つの形態で全体の過半数である 65%程度を占めた。

表-1.2.4 支点部全体の腐食形態<sup>3)</sup>

全体腐食パターン		
		
事例数 3/20 (15%)	事例数 4/20 (20%)	事例数 6/20 (30%)

#### 1.2.2 実務者の対応

これまで多くの実務者が、腐食損傷している桁端部について補修の有無や補修補強対策を検討している。ここでは、腐食損傷している桁端部について、「恒久補修時」および「応急補修時」に実務者がどのような判断をし、どのように対応していたかを把握するために、実務者に対してヒアリングを実施した。「恒久補修時」とは、損傷した状態を元の状態まで回復させる補修を行うことであり、「応急補修時」とは、一時的に対策を行い、損傷はあるが通常の交通を許容できる状態まで戻すことを意図としている。ヒアリング対象者は、点検・補修設計の業務を担っている実務者、現場で対策工法を検討するファブリケーター、補修・補強工事を行う設計者を対象とした。

まず、「点検時や補修・補強対策するための調査において、腐食した桁端部に遭遇した際に困ったこと」についてヒアリングをした。その結果、道路管理者からは耐荷力評価や補修・補強の判断において、定量的な情報が求められているのに対して、実務者は少ない情報で耐荷力評価や補修・補強対策を検討しなければならないことを確認した。

次に、腐食した桁端部の恒久補修時の判断の目安についてヒアリングをした。その結果、定性的に判断している実務者が多く、腐食損傷程度が大きい場合には定量的に判断していた。この定性的な判断は、点検における判定区分や部材の断面欠損率が道路管理者で決められている規定の程度を超えた場合や実務者が経験的に定めた断面欠損率を超えた場合などとしている。定量的な判断に用いる照査の許容値は、許容応力度が用いられていた。

次に、腐食した桁端部の応急補修時の判断の目安についてヒアリングした。この時のとは、一時的に対策を行い、損傷はあるが通常の交通を許容できる状態まで戻すことを意図した。その結果、恒久補修時の判断の目安と同様に、定性的に判断している実務者が多く、ケースによっては定量的に判断していた。この定性的な判断は、部材の状態（完全欠損している場合、疲労亀裂と思われる塗装割れが確認された場合、局部座屈が確認された場合など）により判断していた。定量的な判断に用いる照査の許容値は、許容応力度（部材の最小値もしくは累加強度）×有効断面積が用いられていた。

これらのヒアリングの結果からでは、評価方法や補修補強時の判断の判定は、道路管理者や橋梁の状況によって様々な対応をしていた。また、定量的な判断が求められているにも関わらず、実際は定性的に判断していることが多く、さらには、定量的に判断している場合においても、耐力特性を踏まえて検討していなかった。

### 1.3 鋼 I 桁橋の桁端部の規定の整理

道路橋における桁端部の支点上補剛材の設計は、平成24年度に改訂された道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編（以後、平成24年 道路橋示方書とする）<sup>12)</sup>では、荷重集中点の構造として定められ、柱として設計すること、ウェブの有効断面の考え方などが規定されている。しかしながら、桁端下端部の腐食損傷時においては、柱としての全体座屈よりも、支点上のウェブあるいは支点上補剛材から構成される桁端下端部の局部座屈に影響することが考えられ、柱としての全体座屈には至らない可能性がある。

ここでは、現行の桁端部の支点上補剛材の設計に関する規定とその変遷を整理および現行の照査方法を整理し、桁端下端部が腐食した場合の設計方法について示す。

#### 1.3.1 支点上補剛材の設計に関する規定

平成24年道路橋示方書の支点上補剛材の設計に関する規定を、補剛材断面の決定法を中心に表-1.3.1 にまとめる。さらに、鋼道路橋設計便覧<sup>13)</sup>において、柱の有効座屈長を実際のウェブの高さの1/2 にした理由として、平成24年道路橋示方書とは異なる記述が見られたのであわせて表中に示す。なお、道路橋示方書は平成14年<sup>14)</sup>に性能規定に変更になった。この結果、仕様規定の従来の設計法は、この性能規定の中で、いわゆる、みなし規定として使用できるようになっている。ここでは、従来の設計法について述べる。

##### (1) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編（平成 24 年）<sup>12)</sup>

平成 24 年道路橋示方書では、支点上補剛材は、図-1.3.1 に示すように柱として設計され、その有効断面として、補剛材の全断面積とウェブについては支点上に配置された補剛材の前後のウェブの板厚の 12 倍ずつ、計  $24t_w$  の面積が考慮されている。柱の有効座屈長は、応力分布を三角形と

仮定して、ウェブ高さの半分で設計することが示されている。この他、全有効断面積は、補剛材の断面積の1.7倍に制限され、かつ、補剛材はウェブ両側に配置されることが基本となっている。

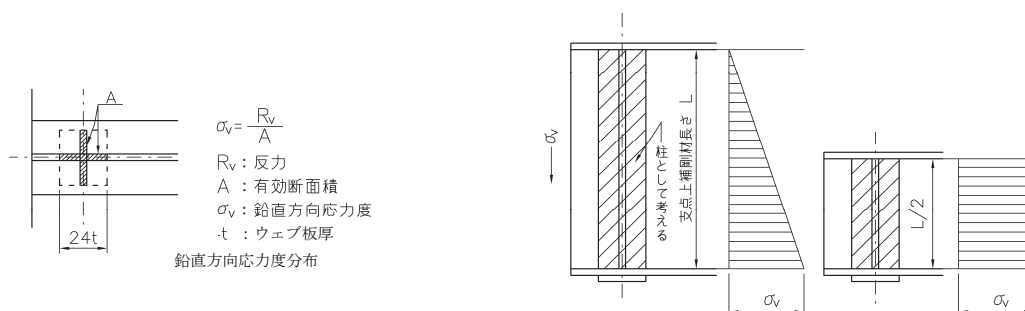


図-1.3.1 支点上補剛材の設計モデル

支圧応力度の照査は、平成24年道路橋示方書では、解説にスカーラップが大きい場合等に照査することが示されているが、有効断面の取り方は明確に示されていない。なお、この支圧応力度の照査は、図-1.3.2に示すようにスカーラップが大きい場合(a)の他、下フランジ幅の制約で断面が小さくなる場合(b)などで必要となる。

ここで、柱として設計する場合の許容軸方向圧縮応力度は、H24道路橋示方書 鋼橋編 3.2.1 構造用鋼材の許容応力度の項で、以下の式で求めることが規定されている。

$$\sigma_{ca} = \sigma_{cag} \cdot \sigma_{cal} / \sigma_{cao} \quad (1.2.1)$$

$\sigma_{ca}$  : 許容軸方向圧縮応力度

$\sigma_{cag}$  : 局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度

$\sigma_{cal}$  : 局部座屈に対する許容応力度

$\sigma_{cao}$  : 局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度の上限値

支圧応力度に対する照査に用いる許容値 $\sigma_{ba}$ は、平成24年道路橋示方書 3.2.1に規定する許容応力度に対して照査することが規定されている。一般に、許容応力度として鋼板と鋼板との間の支圧応力度に対する許容値が用いられ、これは $\sigma_{cao}$ の1.5倍で、材料だけで決まる値である。

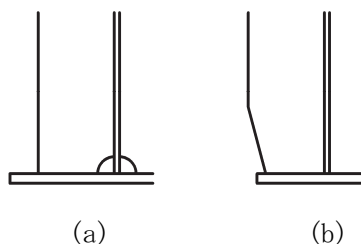


図-1.3.2 支点上補剛材の設計モデル

表-1.3.1 支点上補剛材に関する規定類の比較<sup>11), 12)</sup>

適用示方書 【改訂年度】	道路橋示方書同解説・鋼橋編 【平成 24 年 3 月】	鋼道路橋設計便覧 【昭和 55 年 6 月】	
性能規定	【鋼桁の主桁の支点並びに床桁、縦桁及び対傾構等の取付部等のような荷重集中点では、集中荷重に対する安全性が確保できる構造としなければならない。】	特に記載がない。	
支点上補剛材の設計 (座屈応力に対する照査)	照査方法	【荷重集中点の垂直補剛材は軸方向圧縮力を受ける柱として設計する】	・「軸力を受ける座屈長 $h/2$ の直線部材の柱の座屈に対する照査である。」と説明されている。
	支点上補剛材の幅	【フランジの両縁に達するまで延ばすのを原則とする】	特に記載がない。
	腹板の有効面積の範囲	【補剛材取付部から両側にそれぞれ腹板厚の 12 倍までとする】 ・解説に「溶接桁の場合は腹板も下フランジに密着しているので、柱としての断面の計算には腹板の一部も有効に働くと考えてよいことにしている。」と記載されている。 ・解説に「腹板の有効幅は材質等によって変動するが設計の簡略化のため全ての材質に対して板厚の 24 倍と規定している。」と記載されている。 【全有効断面積は補剛材の断面積の 1.7 倍を超えてはならない】 ・解説に「支承に最も近い箇所では腹板の前記有効幅がまだ働いておらず、ほとんど補剛材の断面積によって反力に耐えなければならないことを考慮したためである。」と記載されている。	・「垂直補剛材の座屈応力に対する照査は、腹板 24 t の部分を有効断面として昭和 55 道路橋示方書に従って行なう。」と記載されている。 ・「全有効断面積は補剛材断面積の 1.7 倍以下でなければならない。」
	柱の有効座屈長	【有効座屈長は桁高の $1/2$ とする】 ・解説に「応力の分布は荷重集中点で最大となる三角形と仮定し、有効座屈長は桁高の $1/2$ をとることとしている。」と記載されている。	・「照査は軸力を受ける座屈長 $h/2$ の直線部材の柱の座屈に対する照査である。」ことが記載され「座屈長 $h/2$ のところに「両端固定の条件」が示されている。そのため「上下端のスカールラップなどによる断面欠損を考慮しなくてもよい」と記載されている。
補剛材下端面の 支圧応力度 に対する照査	・解説に「補剛材下端に特に大きなスカールラップを設ける場合には、支圧応力度を 3.2.1 に規定する許容応力度に対して照査する必要がある。」と記載されている。 ・なお、支圧に対する許容応力度としては、一般に、板と板の間の支圧に対する許容値が採用され、局部座屈に対する許容応力度の上限限の 1.5 倍の値が採用されている。	・「補剛材の下端におけるスカールラップによる断面減少を考慮しなければならない。」 ・「通常の支点上垂直補剛材の下端は、スカールラップを溶接によりうめもどすことにより、有効断面を確保する方法がとられている。」	

(2) 鋼道路橋設計便覧 (昭和55年)<sup>13)</sup>

柱の有効座屈長を実際のウェブの高さの  $1/2$  にした理由として、道路橋示方書では、応力分布形状が三角形であることを示し、鋼道路橋設計便覧では、柱の両端固定支持であることを示している。両者の解釈は異なるものの、規定を作成する段階で、安全側にモデル化を行ってきたこともあり、特にこれまで問題が生じていないものと考えられる。また、同便覧では、柱としての設計において垂直補剛材の高さ方向の中央部で所要剛度を持つてよいことが書かれている。



### 1.3.2 規定の変遷

平成24年道路橋示方書による支点上補剛材の規定「有効断面積」と「有効座屈長」に関する考え方は、昭和30年代に規定された示方書から変更されていない。ここでは、これらの規定の変遷を確認し、設定された根拠を把握する。また、荷重集中点の補剛材の設計に関係する規定として、「支点上補剛材の形状」、「ウェブの板厚」、「応力分担」、「支圧応力」および「支点上補剛材の材質」の変遷についても整理する。ウェブと支点上補剛材が異種材質であることから、「支点上補剛材の材質」も項目として挙げる。

#### (1) 有効断面積

溶接橋における荷重集中点を柱として設計する場合の有効断面積は、昭和32年溶接鋼道路橋示方書<sup>15)</sup>から平成24年道路橋示方書<sup>12)</sup>まで変わっておらず、支点上補剛材とウェブの厚さの24倍の範囲の断面積としている。なお、昭和15年電弧溶接鋼道路橋設計及製作示方書案は入手できず有効断面積の規定は確認できていない。

昭和32年溶接鋼道路橋示方書 荷重集中点における補剛材39条の解説<sup>15)</sup>には、「プレートガーターの支点においては、特別な理由がない限り腹板の両側に設けなければならない」と記載されている。また、「荷重集中点の補剛材を柱として計算する場合の有効断面積には、リベット接合と異なり、腹板の一部を考慮してよいわけであるが、これは溶接プレートガーターの腹板の端部とフランジは互に密着しており、また補剛材と腹板とが完全に一体となっているからであり、実験結果からもこのようにいうことができる。ただし、腹板の厚さの24倍の範囲でも、ソールプレートの外に出る部分は有効断面積とみなすことはできない。」と記載がある。この当時にも実験によりウェブの有効幅を検討されたことが読み取れる。この39条に、「補剛材の自由突出幅と厚さの関係について、鋼道路橋設計示方書96条・97条の規定に準用して、支点上に設ける補剛材においては、自由突出幅は厚さの12倍以下としなければならない（一部省略）」と規定されていることから、ウェブ両側の24倍の範囲の規定については、自由突出幅と厚さの関係から決定されたものと推測する。ちなみに、この96条の解説には、「補剛材の突出脚の厚さが、その幅に比べて小さすぎると、補剛材が局部的に座屈するおそれがある（以後省略）」と記載されており、リベット橋の補剛材の突出幅に対する規定を用いてウェブの幅を設定する根拠としている。また、この時、局部座屈をしない幅として、有効幅を設定していることが読み取れる。この規定は、昭和39年溶接鋼道路橋示方書<sup>16)</sup>もほぼ同じ内容で記載されている。

表-1.3.2は昭和48年道路橋示方書に示す圧縮力を受ける自由突出部の板厚を示したものである。また、昭和48年道路橋示方書8.7<sup>17)</sup>では、「部材の終局耐力を考慮した場合、その部材の板厚は局部座屈が少なくとも降伏点まで起こらないという条件から決めなければならない」とあり、十字柱や周辺支持板の断面を用いて実験を行い、終局耐力 $\sigma_{cr}$  = 部材の降伏点 $\sigma_y$ となる範囲を調べて式を得て、最小板厚を決定している。図-1.3.3は板による耐荷力曲線に示すように、十字柱の実験断面では、かなり広いばらつきがあることを示している。ウェブの有効幅は、その圧縮を受ける板の幅厚比の制限をもとに設定している。

表-1.3.2 圧縮力を受ける自由突出部の板厚<sup>17)</sup>

鋼種	板厚 (t)
SS41 SM41 SMA41	b/13
SS50 SM50	b/12
SM50Y SM53 SMA50	b/11
SM58 SMA58	b/10

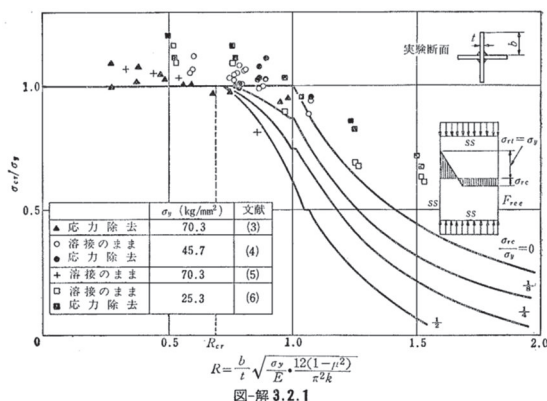


図-1.3.3 板による耐荷力曲線<sup>17)</sup>

さらに、解説には、「この値はSM41において、腹板厚の26倍となり、より強度の高い材質を用いた場合は、理論的には幾分小さくなるが、腹板が続いていることなどを考えれば十分安全であると考えられるので、設計の簡略化のためすべての材質に対して24倍と規定した。」と規定されている。昭和48年道路橋示方書で有効幅の規定を見直したものの、実験結果や設計の簡略化を考慮して、ウェブの有効幅が変更されなかったものと思われる。これ以降から平成24年の道路橋示方書に至るまで、記載内容がほとんど変更されていない。

## (2) 柱の有効座屈長

支点上補剛材の有効座屈長の規定は、昭和15年の鋼道路橋設計示方書（案）補剛材 第93条<sup>18)</sup>より記載されている。昭和15年～平成24年道路橋示方書<sup>12)</sup>まで、有効座屈長は桁高の1/2という考え方は一貫している。この桁高1/2という考え方は、昭和15年 道路橋設計示方書（案）第93条では長柱公式中の両端固定の条件より1/2と設定しているのに対して、昭和48年道路橋示方書8.7からは「荷重集中点が最大となる三角形分布により決定している」と記載されており、その考え方は異なっている。

昭和39年溶接鋼道路橋示方書39条<sup>16)</sup>には、「鋼道路橋設計示方書100条を適用するものとし、座屈の方向として腹板の面内については考える必要はない」としている。

有効座屈長に関する検討は、中井ら<sup>19)</sup>が、プレート・ガーター端支点上補剛材の耐荷力を調べるために実験桁を製作し、破壊実験を行い合理的な設計法を探るための検討を行なっている。その結果、「端支点上補剛材に発生する軸方向圧縮ひずみは、終局状態に至るまでほぼ三角形分布を呈し、曲げひずみは終局状態において端支点上補剛材中央付近で最大となった。」また、「実測された変位とひずみの分布から、はり一柱モデルの有効座屈長  $l$  とすると  $l=0.71b$ （端支点上補剛材の長さ： $b$ ）と計算された。」という結果を得ている。なお、同じ文献によると、この値はスイス技術者協会のSia（Swiss Society of Engineers and Architects）の基準値0.7に近い値であることも述べられている。

## (3) 支点上補剛材の形状

昭和32年溶接鋼道路橋示方書 荷重集中点における補剛材 39条<sup>15)</sup>には、「荷重集中点に設ける補剛材は、腹板の両側に設置するのがよい」と規定され、解説においては「プレートガーターの支点においては、特別な理由がない限り腹板の両側に設置しなければならない」とあり、昭和

48年道路橋示方書 8.7<sup>17)</sup>からは、「必ず腹板の両側に補剛材を設ける」よう規定され、昭和55年道路橋示方書 8.7<sup>20)</sup>からは「両側に対称に設けることを原則とする」と規定され、その規定で平成24年道路橋示方書 11.5<sup>12)</sup>に至っている。昭和39年溶接道路橋示方書から徐々に厳しく規定されていることが読み取れる。

支点上補剛材の幅の規定は、昭和48年道路橋示方書 8.7<sup>17)</sup>から加わり、「できるだけフランジの縁に達するまで延ばすのがよい」と規定されていたが、昭和55年道路橋示方書 8.7<sup>19)</sup>からは「フランジの両縁に達するまで延ばすのを原則とする」と規定され、その規定で平成24年道路橋示方書 11.5<sup>12)</sup>に至っている。このように昭和48年～昭和55年の道路橋示方書から平成24年道路橋示方書において、この規定は変更されていない。

#### (4) ウェブの板厚

昭和48年道路橋示方書<sup>17)</sup>から平成24年道路橋示方書<sup>12)</sup>まで変更されていない。昭和48年道路橋示方書 8.7の解説によると、「プレートガーターの腹板は座屈をしてからもなお相当程度まで大きい耐荷力を示すため、各国ともこの安全率を軸方向圧縮力を受ける部材での座屈安全率よりも低くとしているが、ここで用いた安全率も我国で行なわれた多くの実験結果に基づき定めたものである。すなわち、腹板の弾性座屈応力度を基準におく従来の考え方を改め、プレートガーター橋の極限耐荷力を基準と考えたものである」と述べられている。このように昭和48年道路橋示方書以前の規定では、腹板の弾性座屈応力度を基準におき、プレートガーター橋の極限耐荷力を基準とする考え方であったことが読み取れる。

#### (5) 応力分配

平成24年道路橋示方書 11.5<sup>12)</sup>では「垂直補剛材と腹板との連結を設計する場合、支点上等のようにフランジを通して集中荷重が作用する場合には、腹板と垂直補剛材が作用する場合には、腹板と垂直補剛材との応力の分担が必ずしも明確ではないので、安全側をとって全集中荷重を垂直補剛材が受け持つと仮定するように規定している。」とある。この規定は昭和48年道路橋示方書 8.7<sup>17)</sup>にもほぼ同様の規定があるが、それ以前の示方書には見られない。この応力分配の考え方は、昭和48年道路橋示方書からこの考え方が変わっていない。

#### (6) 支圧応力

平成24年道路橋示方書 11.5<sup>12)</sup>では「補剛材下端に特に大きなスカーラップを設ける場合には、支圧応力度を 3.2.1 に規定する許容応力度に対して照査する必要がある。」とある。この規定は昭和48年道路橋示方書 8.7<sup>17)</sup>にもほぼ同様の規定があるが、それ以前の示方書には見られない。この支圧応力度の考え方は昭和48年道路橋示方書からこの考え方が変わっていない。

#### (7) 支点上補剛材の材質

昭和48年道路橋示方書 8.5.4<sup>17)</sup>より、「垂直補剛材の鋼種は、腹板の鋼種にかかわらず、SS41級の鋼種を用いてよい」とされ、平成2年道路橋示方書 8.5.2<sup>21)</sup>まで変わらず規定されていたが、平成8年道路橋示方書 8.5.2<sup>22)</sup>においてSS400の橋梁への適用を非溶接部材限定されたために、SS400級からSM400級に変更して平成24年道路橋示方書 11.4.4に至っている。

#### (8) まとめ

(1)～(7)で荷重集中点の補剛材に関する規定の変遷を整理したが、多くの規定が昭和48年～昭和55年道路橋示方書に規定された内容からほとんど変わらずに現在に至っていた。これらの

規定は、主として新設時を想定しており、腐食損傷により欠損した状況に関する規定はなかった。荷重集中点の設計は、昭和 15 年 鋼道路橋設計示方書（案）<sup>16)</sup> から、軸方向圧縮力を受ける柱として設計する方針は現在まで変わっていないものの、昭和 48 年道路橋示方書<sup>17)</sup> の規定からは、応力の分布となる三角形を仮定していることを示した。

### 1.3.3 腐食した桁端部の照査方法

腐食した桁端部の照査では、1.3.2 で整理した道路橋示方書の規定を適用している。以下に道路橋示方書の規定を用いて腐食した桁端部の照査している手順を示す。なお、この照査方法に関する規定および文献がないので一つの例として示す。

手順 1：既存の計算書、図書または標準設計の構造諸元等を参考に設計反力  $S$ （死荷重、活荷重）を算出する。

手順 2：例えば、**図-1.3.3** に示すような残存断面（支点上補剛材の面積+ウェブ面積  $24t_w \times t_w$ （ $t_w$  はウェブ板厚）から欠損範囲の面積を差し引いた面積）を算出する。次に、断面二次半径  $r_x$  を式 (1.3.1) より算出し、有効座屈長  $1/2$  として細長比  $\lambda$  を算出し、式 (1.3.2) に示すように柱の全体座屈の影響範囲であるかを確認する。その後、柱の全体座屈と局部座屈を連成した許容軸方向圧縮応力度を設定する。この時、使用する材質は、低材質の支点上補剛材とする。

手順 3：式 (1.3.3) に示すように連成座屈による照査式をもとに許容値内に収まっているかを確認する。

手順 4：式 (1.3.4) に示すように欠損量が大きい場合は、支圧応力度に対する照査も行なう。

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_d}} \quad (1.3.1)$$

$$\lambda_x = \frac{\ell}{2 \times r_x} \quad (1.3.2)$$

$$\sigma_c = S / A_d \leq \sigma_{ca} \quad (1.3.3)$$

$$\sigma_b = S / A_d \leq \sigma_b \quad (1.3.4)$$

- $S$  : 合計せん断力
- $A_d$  : 欠損部を控除した有効断面積
- $I_x$  : 断面二次モーメント
- $r_x$  : 断面二次半径
- $\ell$  : 桁高
- $\lambda_x$  : 細長比
- $\sigma_{ca}$  : 許容軸方向圧縮応力度 式 (1.2.1) 参照
- $\sigma_b$  : 許容支圧応力度

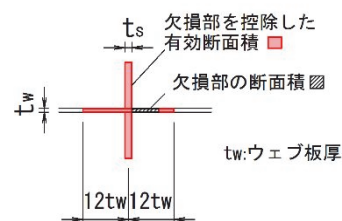


図-1.3.3 欠損部を控除した有効断面積  $A_d$  の模式図<sup>16)</sup>

この腐食損傷時の照査方法は、新設設計に用いられている方法と同じであり、恒久補修の判断だけでなく、応急補修の判断の検討にも用いられている。実際には、新設設計時に大きく余裕を取らずに、支点上補剛材の必要最小板厚を決定していることが多く、許容値に対して満足しない場合が多いのが実情である。

## 1.4 本研究に関連する既往研究

### 1.4.1 腐食した鋼 I 桁橋の耐荷力に関する研究の整理

#### (1) 腐食した鋼 I 桁橋の耐荷力特性

腐食損傷した鋼 I 桁橋の桁端下端部の耐荷力特性の解明に向けて、様々な研究が実施されている。玉越ら<sup>3)</sup>は、代表的な腐食パターンによる板厚減少などの鋼部材の損傷が生じる場合、橋の性能にどのような影響が生じるのかを明らかにするために、モデル損傷を設定して、座屈固有値解析により、腐食の形態による耐荷力への影響およびソールプレートの影響について解析した。その結果、支点直上載荷に対しては、支点部の柱構造で形成している垂直補剛材に大きな腐食がある場合には、比較的少ない板厚減少であっても、耐荷力が低下する可能性があり、腐食の進行による耐荷力への影響としては座屈耐荷力の低下が支配的になることを示した。また、比較的多く発生していた表-1.2.4に示す3つのケースの腐食形態についてシェルモデルで解析を行った結果、腐食の形態よりも腐食による板厚の減少が耐荷力に大きな影響を及ぼし、板厚の減少量が、50%~75%にかけて座屈固有値を大きく低下させることを示した。一方、ソールプレートの影響を考慮した場合、比較的多く発生している腐食形態での影響は、ソールプレートがある場合と大きな違いは見られなかったこと、および、ソールプレートによる拘束効果は、下フランジの腐食範囲が、ソールプレートを跨ぐか否かで影響が大きく現れることを示した。

腐食した鋼 I 桁橋の終局耐力に関する既往研究は、着目している耐荷力により、載荷条件などの条件が変わる。ここでは、支間中央載荷における支点部耐荷力、支点直上載荷における支点部耐荷力、せん断耐荷力、および曲げ耐荷力があり、以下にそれぞれの力に着目して述べる。

支間中央載荷で桁端部の支点部耐荷力を把握するための実験および解析において、Khurramら<sup>23)</sup>は桁端部の耐力低下に影響があると考えられる損傷(補剛材両側欠損, 補剛材両側欠損+ウェブ径間側部分欠損, 補剛材両側欠損+ウェブ桁端側全欠損)に対して、欠損位置, 板厚, および欠損高を対象にパラメトリック解析を実施し、最大荷重とその時の損傷モード(Normal buckling, Local buckling, Crippling, Crushing)に分けて示している。丹波ら<sup>24)</sup>は、阪神高速道路の本線において現在も供用中の鋼I桁の中から、供用開始年次が古く、実験載荷装置の制約から比較的桁高の小さい橋梁を選定し、桁端側ウェブが全欠損し、端補剛材の両側が減厚した欠損タイプにより載荷実験を行い、腐食損傷供試体の最大荷重は、健全供試体の最大荷重の約50%に低下したことを示している。文献25では、本論文の解析モデルとほぼ同様のモデルを用いて、支承タイプ、フランジ板厚、ウェブ欠損幅、および欠損高等の条件を変更したパラメトリック解析を実施し、健全桁の最大荷重からの低下率を示している。

支点直上載荷の桁端部の実験および解析において、Voら<sup>26)</sup>は腐食した実鋼橋の桁端部を検討し、圧縮強度の低下は、断面減少率の線形関係で評価できることを示している。濱田ら<sup>27)</sup>は腐食を模擬した桁端部のモデル供試体を用いて、圧縮載荷実験を行い、局所的な腐食の場合は、耐力低下

率は断面積の減少率に比べて小さいことを示している。さらに、実験の結果から得られた最大耐荷力と各条件（支圧応力度，全体座屈，局部座屈（有効座屈長 $l/2$ ，桁高））で計算した設計耐荷力との比を示し，腐食した最大耐荷力に対して，健全桁として計算した場合には1.6倍程度，腐食を考慮して算定した設計耐荷力では，2倍以上の耐荷力があることを示している。Khurramら<sup>28)</sup>は，補剛材両側欠損パターンを設定して，板厚および欠損高を対象にパラメトリック解析を行い，健全桁の最大荷重からの低下率を示し，減厚率によって損傷モードNormal buckling（減厚率25%）：Local buckling（減厚率25～75%），Crippling（減厚率75～100%）が異なることを示している。山口（栄）ら<sup>29)</sup>は支点部近傍で様々な損傷を想定し，欠損位置，板厚，および欠損高を対象にパラメトリック解析を実施し，健全桁の最大荷重からの耐力低下率を示し，腐食発生箇所により支点部耐荷力に及ぼす影響は大きく異なることやいずれの腐食モデルでも，腐食領域付近で大きな変形を生じて破壊に至ることを示している。

せん断耐荷力の桁端部の実験および解析において，海田ら<sup>30)</sup>は，実橋のリベット橋のプレートガーター橋を用いてせん断強度試験および解析を実施し，腐食による板厚中央面の変化が0～1mmの範囲では，せん断強度に与える影響は小さいことを示している。また，人工的に作成した腐食表面を用いた解析モデルの強度は，実験から得られた実際の腐食ウェブの極限強度とよく一致したことを示している。Voら<sup>31)</sup>は，腐食がウェブのせん断座屈に及ぼす影響を把握するため，実橋において比較的腐食しやすい支点部近傍のウェブに着目し，そのせん断耐荷力について，腐食を模擬した載荷実験および弾塑性有限変位解析を行った。その結果，局部的板厚の減少に伴い，最大荷重が線形的に低下するが，断面減少が進行することによって，座屈荷重の低下率が大きくなる傾向があることを示している。中山ら<sup>32)</sup>は，径間側ウェブに縦型腐食と横型腐食，複合型腐食の孔食を設けた桁の載荷実験および弾塑性有限変位解析を行い，ウェブに孔食をもつ桁のせん断耐荷力について，耐力低下は8%程度と小さくなることを示し，孔食の長さが短い場合は，耐荷力がほとんど低下しないことを示している。また，孔食の長さが高さ方向および幅方向に長くなると，端部のウェブや端補剛材の変形によって終局を迎えることを示している。劉ら<sup>33)</sup>は，端部パネルにおいて局部腐食を有する鋼桁を対象に，腐食形状および腐食領域のウェブ厚をパラメータとし，弾塑性有限要素解析を行い，残存せん断耐荷力の変化について検討し，上フランジから支承部に向けて縦長方形の局部腐食が発生した場合，せん断耐荷力が必ず低下すること，他の腐食タイプでは断面欠損が生じてもただちに耐荷力の低下とならないことを示している。Kimら<sup>34)</sup>は，径間側ウェブに腐食高さ，板厚を変えたせん断載荷実験を行い，最大荷重と斜張力場のモードを示している。減厚した場合は健全時の最大荷重から最大10%程度低下し，径間側ウェブの下端部が全欠損した場合には20%程度低下することを示している。Ahnら<sup>35)</sup>は，径間側ウェブに腐食形態（三角形，全欠損），腐食高さ，残存板厚等の条件を変更したパラメトリック解析を実施し，健全桁の最大荷重からの低下率および変位図を示している。腐食形態が三角形の場合はほとんど耐荷力が低下せず，径間側ウェブの下端部が全欠損した場合には15%程度低下している。さらに，Ahnら<sup>36)</sup>は，径間側ウェブにウェブ厚，アスペクト比，腐食高さ，残存板厚，支承条件等の条件を変更したパラメトリック解析を実施し，健全桁の最大荷重からの低下率を示している。Khurramら<sup>37)</sup>は桁端下端部に腐食形態，腐食高さ，残存板厚を変更したパラメトリック解析を実施し，損傷別に最大荷重を示している。

下里ら<sup>38)</sup>は約30年間腐食状態にある無塗装仕様の対候性鋼プレートガーターの暴露橋を用いて、比較的広範囲に腐食している鋼橋の腐食劣化メカニズムの解明および腐食減厚に対するせん断耐荷力の評価を検討している。

曲げ耐荷力の桁端部の実験および解析において、海田ら<sup>39)</sup>は、実際に供用後撤去されたプレートガーターの曲げ強度実験を行い、腐食したプレートガーターの終局曲げ挙動を調べ、フランジの腐食部でフランジのねじれ座屈が発生して崩壊したことを示している。

長坂ら<sup>40)</sup>は、建設から30年経過した耐候性鋼橋梁の腐食減耗特性について把握するために、桁端部が腐食した既設鋼橋の荷重載荷実験を行っている。さらに、荷重載荷実験とFEMの整合をもとに、腐食実態を模擬したFEMによる保有耐荷力の評価を行い、活荷重および風荷重による発生応力度は、全て弾性範囲内であることを示している。有山ら<sup>41)</sup>は、主桁の桁端部の腐食に着目し、全橋FEM解析を行い、複数ある主桁のうち一部の主桁の桁端部に腐食を有する場合、腐食した主桁の桁端部を補うように健全な主桁の桁端部が荷重を分担するため、鉛直方向、橋軸方向、橋軸直角方向いずれに対しても橋梁システムとしての耐荷力は腐食した桁端単体の耐荷力を大きく上回ることを示している。また、橋軸直角方向においては、4本の主桁のうち1本または2本の主桁の桁端部が腐食していても、他の健全な主桁の桁端部が橋軸直角方向の水平荷重を分担するため、橋梁システムとしての耐荷力はほとんど低下しないことも示している。

このように、耐荷力毎に腐食損傷によって耐荷力が低下する傾向が実験や解析により検討が進められ、徐々に腐食した桁端部の耐荷力特性が解明されてきている。しかしながら、環境によって桁端部の腐食形態が様々であり、対象とする桁の構造諸元が現場により様々であることも踏まえ、これらの研究成果が十分に実務に適用されていないのも実状である。

## (2) 腐食した鋼 I 桁橋の解析モデルについて

腐食した実橋の耐荷力を精度よく評価するためには、実橋で不可避な、溶接ひずみや残留応力などを考慮すること必要である。玉川ら<sup>42)</sup>は、腐食に伴う体積欠損過程における力学挙動の変化が考慮できる解析法をシェル要素に対して提案し、その解析法の定式化を示すとともに、その妥当性を弾性範囲内で検討した。さらに、玉川ら<sup>43)</sup>は、腐食の解析方法に着目し、死荷重下で徐々に板厚を減厚させ、供用下にある主桁の腐食過程を再現した方法と腐食過程を無視し、無載荷で一度に減厚を与えた方法の解析を実施し、曲げやせん断力作用下では、腐食減厚に伴う部材に内在する死荷重応力や溶接残留応力の再配分が桁の変形挙動や耐荷力に及ぼす影響は小さいことを示している。また、小室ら<sup>44)</sup>は、自由突出板を対象に、3次元弾塑性有限要素法によるパラメトリック解析を実施し、モンテカルロ・シミュレーションによる限界強度の統計量を算定し、幅厚比パラメータ ( $R$ )  $< 0.7$ の領域では、圧縮側の残留応力が限界領域に与える影響は非常に小さいことを示している。このように、徐々に腐食したプレートガーターや桁端部の構成要素に関わる自由突出板に関する残留応力の影響について研究されてきているが、現時点では確立されているとは言い難い。そのためか腐食した解析モデルに用いる残留応力は、文献45などをもとに、溶接による残留応力を導入している場合が多い。

一般的に用いられる鋼 I 桁橋はウェブと支点上補剛材が異種材質である。異種材質に関する文献として、金ら<sup>46)</sup>は、高Mn非磁性鋼と一般構造用鋼とで組み立てた異種鋼材十字柱接合柱の自由突出板に着目し、その力学特性を検討した。その結果、異種鋼材で組み立てたMn突出板の終

局強度は同種鋼材で組み立てたMn 突出板の終局強度に対して10%程度小さくなることを示し、さらに、各々の突出板はその鋼種に応じた応力-変位で挙動をすることを示している。

#### 1.4.2 桁端部の耐荷力評価法に関する研究の整理

文献 10 では、耐荷力評価のための指標が整理されている。ここで、プレートガーター橋に関連する評価式と評価指標を抽出し、さらに文献 10 にない前節の解析および実験の結果を利用して、腐食損傷を有する桁端部の終局耐力を評価する式<sup>23), 26), 27)</sup>を追加し、表-1.4.1 に整理する。また、これらの研究内容は、以下の通りである。文献 47 は、支点部補剛材を有しない鉄桁の端ウェブパネルをウェブの支圧強度に、3 辺単純支持 1 辺自由の境界条件を有する板の理論を用いて評価している。野上ら<sup>48)</sup>は、腐食減厚に伴う合成 I 桁及び I 断面柱を用いて、代表的な腐食形態として、部材の下フランジ上面が全面腐食した解析を、場合と局部腐食した場合を対象にパラメトリック解析を実施し、残存耐荷力を評価している。Vo ら<sup>26)</sup>は、支点直上载荷の解析結果を利用して、柱の最小断面（端補剛材および腹板の有効幅の範囲）での残存断面積比率に対する最大荷重減少比率を図化し、ほぼ比例して低下することを示している。Khurram ら<sup>23)</sup>は、損傷ケース毎に損傷板厚率と損傷高さ率をパラメータとする支点部耐荷力の残存耐荷力の評価式を提案している。海田ら<sup>30)</sup>は、腐食した鋼板の極限せん断強度は、平均板厚を用いて幅厚比パラメータを求めることにより、腐食の無い鋼板の座屈強度曲線から推定できることを示している。Khurram ら<sup>37)</sup>は、損傷板厚率と損傷高さ率をパラメータとするせん断耐荷力の残存耐荷力の評価式を提案している。

#### 1.4.3 海外での腐食した桁端部の状況

海外における腐食した桁端部の状況を整理する。文献 49~54 によると桁端部に腐食が発生している。オーストラリアの規定の例では、リベット橋における桁端部付近の腐食の損傷に対して、局部腐食を伴った中間および支点上補剛材の補修方法を示している<sup>49)</sup>。アメリカの規定の例では、桁端部付近の腐食の損傷に対して、腐食部を取り除き、新しい鋼プレートを溶接する補修方法を示している<sup>50), 51)</sup>。また、高力ボルトによる当て板補強による補修方法も示している<sup>52), 53)</sup>。ニュージーランドの規定の例では、十字断面積の損失は構造の強度に影響を与えない場合でも補修する必要があると述べられている<sup>54)</sup>。以上より、海外でも腐食した桁端部の損傷があり、当て板補強等の補修対策を実施していた。



表-1.4.1 鋼 I 桁橋に関連する耐荷力評価式<sup>23), 26), 30), 37), 47), 48)</sup>

評価耐荷力	評価式と評価指標	文献	備考
ウェブの 支圧強度	$F_{ult} = k \cdot \frac{\pi^2 E}{12 \cdot (1-\nu^2) (b/t_w)}$ $k$ : 座屈係数 (=1.28) $\nu$ : ポアソン比 $b$ : 支点部ウェブの長さ $t_w$ : ウェブの厚さ	(47)	鈹桁の端ウェブパネル
圧縮耐力	(全面均一腐食モデル) $P_{ct}/P_y = 0.996 - 0.805 \cdot \alpha_{min}$ $P_{ct}/P_{ycro} = 1 - 0.833 \cdot \alpha_{min}$ $\alpha_{min}$ : 最小断面欠損率 (耐荷力曲線) $P_{ct}/P_y = (0.186 \lambda^3 - 0.657 \lambda^2 + 0.179 \lambda + 1)$	(48)	解析 (腐食形態モデルを 5 モデルに分類)
圧縮強度	$P_{ult}/P_H = A/A_H$ $A/A_H$ : 最小断面での残存断面積比率	(26)	実験 載荷位置: 支点直上載荷
	$P_{ult}/P_H = \left[ 1 - \frac{(1-R_t)^b}{a + (1-R_t)^b} \right]$ $R_t = t_{min}/t_o$ (断面欠損率) $R_d = D_h/d \times 100$ (腐食高さ率) $t_{min}$ : 腐食領域の最小板厚 $t_o$ : 設計板厚 $D_h$ : 腐食領域の高さ $d$ : 鋼桁の高さ (支点上補剛材のみ腐食した場合) $a = 2.25 \cdot R_d^{-0.46}$ $b = 4.95 \cdot R_d^{-0.37}$ (支点上補剛材とウェブが腐食した場合) $a = 0.45$ $b = 7.65 \cdot R_d^{-0.56}$	(23)	解析 載荷位置: 支間中央載荷
せん断耐荷力	(せん断座屈強度曲線 幅厚比パラメータ) $R = h/t \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot (1-\nu^2)}{\pi^2 k}}$ 代表板厚: $t = t_{avg}$	(30)	プレートガーター橋 実験, 解析
	(支点上補剛材のみ腐食した場合) $P_{ult}/P_H = 1.15 \cdot R_{t,avg} - \frac{R_d}{83} + 0.375$ (支点上補剛材とウェブが腐食した場合) $P_{ult}/P_H = 2.55 \cdot R_{t,avg} - \frac{R_d}{42.5}$ $R_{t,avg} = t_{avg}/t_o$ (断面欠損率) $R_d = D_h/d \times 100$ (腐食高さ率) $t_{min}$ : 腐食領域の最小板厚 $t_o$ : 設計板厚 $D_h$ : 腐食領域の高さ $d$ : 鋼桁の高さ	(37)	解析

### 1.5 本研究の目的

本研究では、今後、老朽化し増加する橋梁構造物に対して、残存耐荷力を積極的に活用する維持管理社会になることを見越し、腐食した鋼 I 桁橋の桁端部の様々な腐食損傷に対する終局耐力を把握するとともに、その崩壊に至るまでの過程を把握する崩壊メカニズムを解明することを目的としている。また、東日本大震災では、鋼製支承よりピンが脱落して支点位置が移動した被害

が報告されていたことを踏まえて、腐食した桁端部の支点部が偏心した場合の耐荷力が低下するリスクやその崩壊メカニズムを示すことも目的とする。さらに、様々な構造諸元や欠損状態を踏まえた簡易耐荷力評価式を提案するとともに、残存耐荷力を評価する方法を提案することを目的とした。以下に本研究で解決すべき課題を表-1.5.1に示す。

表-1.5.1 本研究の課題

課題 1	腐食した桁端部の耐荷力特性の解明
課題 2	腐食した桁端部の崩壊メカニズムの解明
課題 3	腐食した桁端部の支点偏心の影響の解明
課題 4	腐食した桁端部の簡易耐荷力評価法の提案

課題 1 を解決するために、腐食した鋼 I 桁橋の桁端部の様々な腐食損傷（欠損位置、ウェブ欠損幅、欠損高）および 構造パラメータ（異種材質やソールプレートの形状）を変更した桁端部の 1 主桁をモデル化した FEM 解析を用いて、腐食損傷や耐荷力の低下に及ぼす影響を示し、耐荷力特性を解明する。

課題2を解決するために、腐食した桁端部による欠損位置、欠損高さ、欠損幅等の条件による影響を、崩壊モード（最大荷重時の変形性状）と崩壊プロセス（荷重が載荷され最大荷重を超えて荷重低下に至るまでの過程）とを分析し、崩壊タイプに分類する。また、非線形開始点、最大荷重、最大荷重以降に着目し、桁端部の損傷時の崩壊メカニズムを解明する。特に、道路橋示方書の規定にある3つの項目（ウェブの有効幅、終局強度の座屈の現象、柱の有効座屈長）に着目して崩壊メカニズムを解明する。

課題 3 を解決するために、腐食によりウェブに断面欠損が生じた桁端部の支点偏心をした FEM 解析を実施し、支点偏心に伴う耐力低下の影響を整理する。また、これらの支点偏心したケースの崩壊プロセスと崩壊モードを明らかにし、崩壊メカニズムを解明する、

課題 4 を解決するために、実務での適用を考慮して、3 つの簡易的に耐荷力を算出できる手法を検討する。一つ目は、道路橋示方書で規定される全体座屈、局部座屈、支圧状態の許容応力度に基づく評価手法、二つ目は、既往の研究成果を利用する手法、三つ目は、崩壊モード毎に既往の耐荷力評価式を利用する手法を提案する。その上で、応急補修時や恒久補修時に利用されることを想定した簡易評価法を提案する。

## 1.6 本論文の構成

本論文は、これらの研究課題を解決する第 1 章から第 6 章で構成される。図-1.6.1 に、研究の背景と流れを示す。

第 1 章「序論」は、腐食した鋼橋 I 桁の桁端部について、国土技術政策総合研究所が整理した腐食の傾向、腐食形態、および腐食した桁端部に対する実務者のヒアリング結果をもとに実状を整理する。また、腐食した鋼橋 I 桁の桁端部の照査に用いている道路橋示方書における規定とその変遷および照査方法を整理する。また、既往の研究成果で提案されている様々な耐荷力評価や耐

荷力評価式を整理する。その上で、研究の目的、研究課題を述べる。最後に、本論文の構成とその概要を述べる。

**第2章「腐食時の桁端下端部の耐荷力特性の解明」**は、腐食した桁端部の耐荷力特性を把握するために、桁端部をモデル化した FEM 解析を実施した。載荷条件、初期たわみ、スカーラップ、支点部拘束をパラメータにしてモデルの特性を把握し、既往の実験と変形モードを比較するとともに、他の研究で行われた解析結果と最大荷重を比較する。さらに、健全時モデルを用いて異種材質の影響を確認する。これらの検討を踏まえて、桁端下端部について、統計的に多いタイプの腐食損傷に着目し、それを反映させたパラメトリック解析を実施する。ここでは、材質、下フランジによる拘束効果、欠損位置、ソールプレート形状の違い、腐食による欠損幅への影響、腐食による欠損高の影響を検討し、各損傷状態における耐力低下の程度と耐荷力特性を明らかにする。

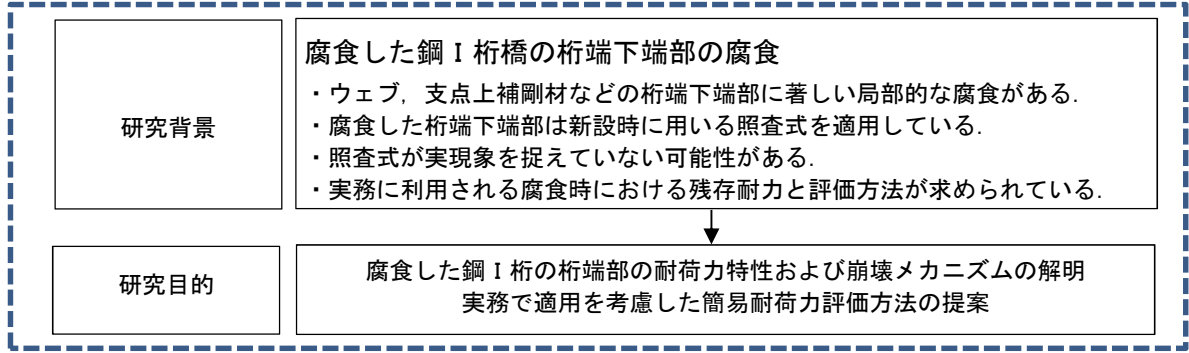
**第3章「腐食した桁端下端部の耐荷力特性を踏まえた崩壊プロセスからの分類と分析」**は、第2章の解析結果を利用して、桁端下端部が腐食した場合のパラメトリック解析から得られた結果を分析し、その結果をもとに、腐食した桁端部の耐荷力特性を踏まえて崩壊タイプを分類する。さらに、分類したタイプを非線形開始点、最大荷重時、最大荷重後に着目し、桁端部の損傷時の崩壊メカニズムを検討する。

**第4章「腐食した桁端部の桁端下端部の耐荷力挙動に与える支点偏心の影響」**は、腐食により断面欠損が生じた桁端部の支点偏心に伴う耐力低下を把握する。また、第3章の崩壊タイプの分類に基づき、支点偏心したケースを分類し、さらに、限界強度を設定し、その強度を用いて、支点偏心した耐力低下による崩壊メカニズムを分析する。

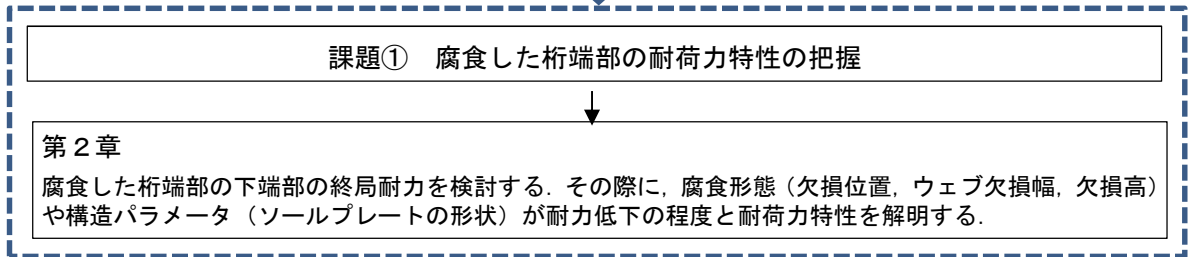
**第5章「簡易耐荷力評価式の提案」**は、実務で適用することを見越して、簡易の耐荷力評価式について3つの手法で提案する。1つ目は、道路橋示方書で示す公称値を用いて全体座屈、局部座屈、支圧応力度による設計耐力を算出する手法である。各欠損ケースの解析による耐荷力と設計耐力を比較する。2つ目は、既往の研究結果をもとに算出された終局耐力の低下率と構造諸元や腐食損傷程度を軸にとって終局耐力の低下を把握できる分布図を作成し、その分布図から算出される耐力低下の下限値をもとに耐荷力推定式を提案する。3つ目は、第3章で検討した腐食した桁端部の崩壊プロセスに影響を与えたと考えられる構造パラメータを抽出し、標準設計の構造諸元の分布を把握し、解析ケースで必要な範囲を設定する。追加した解析結果をもとに、道路橋示方書の許容応力度法的设计で用いられている耐荷力式をベースとし、崩壊モード毎にパラメータを変更した既往の耐荷力評価式を提案する。さらに、応急補修時に利用されることを想定し、終局耐力と使用限界強度の関係を示した上で、「腐食損傷した桁端部の耐力余裕と座屈発生による荷重低下のリスク」に着目した簡易評価法を提案する。また、恒久補修時に利用されることを想定し、非線形開始点の荷重と最大荷重と設計耐力との関係を示した上で、「腐食損傷した桁端部の設計耐力の荷重余裕と設計耐力の判定結果の危険性」に着目した簡易評価法を提案する。

**第6章「結論」**は、本論文で得られた結論をまとめ、今後の課題を記載している。

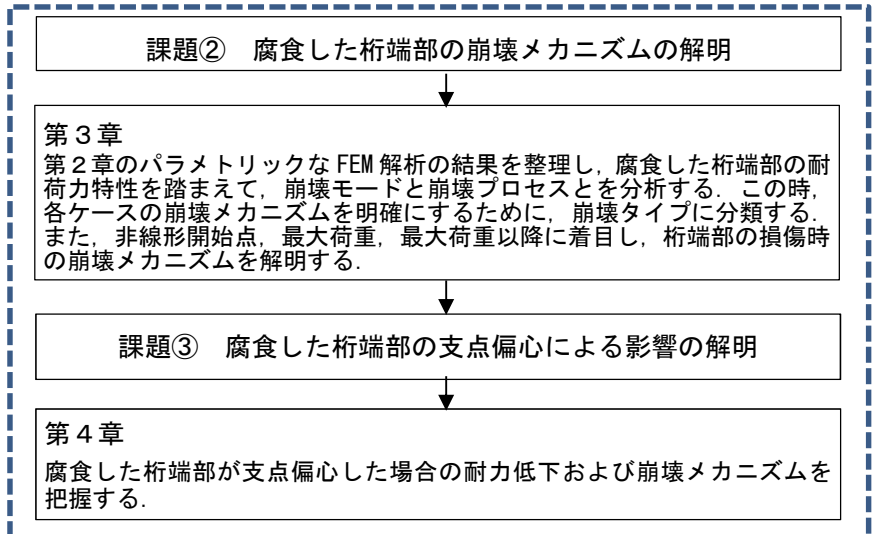
## 研究背景と研究目的（第1章）



## 耐力特性の解明（第2章）



## 崩壊メカニズムの解明（第3章、第4章）



## 簡易耐力評価方法の提案（第5章）

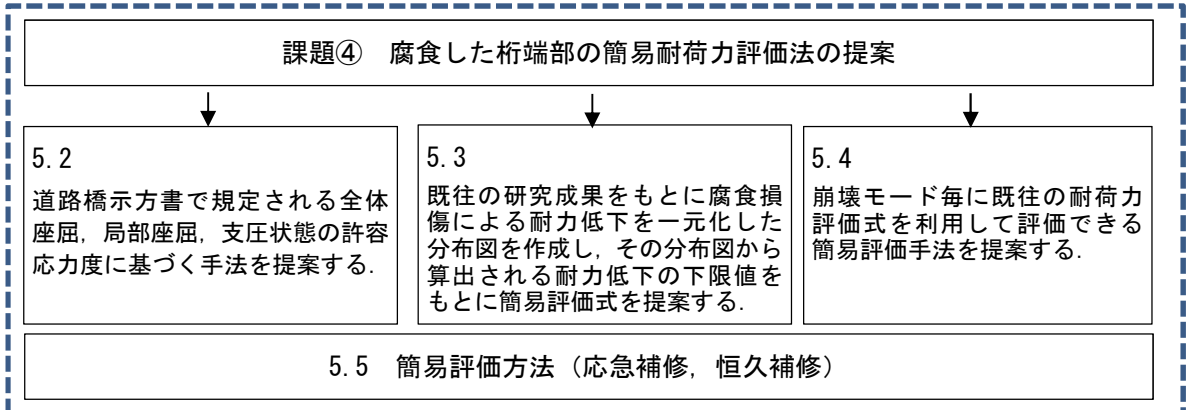


図-1.6.1 研究の背景と流れ

## 参考文献

- 1) 首都高速道路の点検補修に関する調査研究報告書（Ⅱ），首都高速道路協会，1975.3
- 2) 国土交通省 国道・防災課：橋梁定期点検要領（案），2004.3
- 3) 玉越隆史，中洲啓太，石尾真理，武田達也，水津紀陽：鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究，国土技術政策総合研究所資料 No.294，国土交通省 国土技術政策総合研究所，2006
- 4) 国土技術政策総合研究所，（独）土木研究所：平成16年（2004年）新潟県中越地震土木施設災害調査報告，国総研 第27号 土木研究所報告 No.203，2006.1
- 5) （公社）日本道路協会：鋼道路橋防食便覧，2014.3
- 6) （社）日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，1990.6
- 7) （社）日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2009.12
- 8) 独立行政法人 土木研究所 構造物メンテナンスセンター：土木研究所資料 鋼橋桁端部の腐食対策に関する研究，2010.3
- 9) （社）日本道路協会：道路橋補修・補強事例集，2009.10
- 10) 鋼構造委員会：腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル，鋼構造シリーズ 18，土木学会，2009.
- 11) 玉越隆史，横井芳輝，石尾真理：全国規模の鋼道路橋点検データに基づく鋼橋の劣化の特徴，鋼構造論文集，第21巻，第82号，pp.99-113，2014.6
- 12) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2012.3
- 13) （社）日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，1980.6
- 14) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2002.3
- 15) （社）日本道路協会：溶接鋼道路橋示方書解説，1957.6
- 16) 鋼道路橋設計示方書案解説，1940.6
- 17) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1973.2
- 18) （社）日本道路協会：溶接鋼道路橋示方書解説，1964.5
- 19) 中井博，総田完治，阪野雅則：プレート・ガーター端支点上補剛材の耐荷力の実験と解析，構造工学論文集 Vol.32A,pp.399-410,1986.3
- 20) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1980.2
- 21) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，1996.3
- 22) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，1990.3
- 23) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada : Experimental and Numerical Evaluation of Bearing Capacity of Steel Plate Girder Affected by End Panel Corrosion, *International Journal of Steel Structures*, Vol.14, No.3, pp.659-676, 2014, ERRATUM Vol. 15, No.1, pp.245, 2015.
- 24) 丹波寛夫，橋本国太郎，田中大介，杉浦邦征：腐食した鋼桁端部の当て板補修に関する実験的検討，構造工学論文集 vol.60A, pp. 94-104, 2014年3月
- 25) 東海構造研究グループ：平成24年度活動報告集 第6回定期研究会 WG成果報告，2012.
- 26) Vo Thanh Hung, 永澤洋，佐々木栄一，市川篤司，名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710/I-60, pp.141-151, 2002.7

- 27) 濱田哲, 佐々木栄一, 狛裕幸, 町田恵津子, 紀平寛: 局部的腐食を模擬した鋼桁端部の圧縮強度に関する実験, 鋼構造年次論文報告集 第17巻, pp.731-738, 2009.11
- 28) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Kihira, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada: Analytical demonstrations to assess residual bearing capacities of steel plate girder ends with stiffeners damaged by corrosion, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.10, No.1, pp.69-79, 2012.
- 29) 山口栄輝, 赤木利彰: 腐食した鋼I桁の支点部耐力に関する考察, 構造工学論文集 Vol.59A, pp.80-90, 2013.3
- 30) 海田辰将, 藤井堅, 原考志, 中村秀治, 宇野谷実: 腐食鋼板のせん断耐力とその評価法, 構造工学論文集 vol.50A, pp.121-130, 2004.3
- 31) Vo Thanh Hung, 佐々木栄一, 市川篤司, 三木千壽: 腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験および解析, 構造工学論文集 vol.48A, pp.1099-1105, 2002.3
- 32) 中山太士, 木村元哉, 石川敏之, 松井繁之: ウェブ孔食をもつ鋼桁のせん断耐荷力: ウェブ孔食をもつ鋼桁のせん断耐荷力, 構造工学論文集 Vol.52A, pp.49-56, 2006.3
- 33) 劉翠平, 宮下剛, 長井正嗣: 端部パネルの局部腐食をもつI形断桁のせん断耐力に関する考察, 構造工学論文集 Vol.57A, pp.715-723, 2011.3
- 34) In-Tae Kim, Myoung-Jin Lee, Jin-Hee Ahn, Shigenobu Kainuma: Experimental evaluation of shear buckling behaviors and strength of locally corroded web, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.83, pp.75-89, 2013.
- 35) Jin-Hee Ahn, Shigenobu Kainuma, In-Tae Kim: Shear failure behaviors of a web panel with local corrosion depending on web boundary conditions, *Thin-Walled Structures*, Vol.73, pp.302-317, 2013.
- 36) Jin-Hee Ahn, In-Tae Kim, Shigenobu Kainuma, Myoung-Jin Lee: Residual shear strength of steel plate girder due to web local corrosion, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.83, pp.198-212, 2013.
- 37) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada: Finite Element Investigation of Shear Capacity of Locally Corroded End Panel of Steel Plate Girder, *International Journal of Steel Structures*, Vol.13, No.4, pp.623-633, 2013.
- 38) 下里 哲弘, 有住 康則, 押川 渡, 小野 秀一, 玉城 喜章: 鋼橋の腐食劣化メカニズムの解明と耐久性診断に関する研究, 新道路技術会議, 成果報告レポート No.21-5, 2012.
- 39) 海田辰将, 藤井堅, 宮下雅史, 宇野谷実, 中村秀治: 腐食したプレートガーターの残存曲げ強度に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.51A, pp.139-148, 2005.3
- 40) 長坂 康史, 塚原 雄介, 高橋 鴻, 下里 哲弘: 桁端部が腐食した既設鋼橋の荷重載荷試験と耐荷力評価
- 41) 有山大地: 腐食した既設鋼I桁端部の性能評価とそれに基づく合理的な補修法に関する解析的研究, 大阪市立大学大学院修士論文, 2016.3
- 42) 玉川新吾, 三好崇夫: シェル要素を用いた鋼板腐食に伴う体積欠損過程の有限要素解析法について, 応用力学論文集 Vol.10, pp.955-962, 2007.8
- 43) 玉川新吾, 金裕哲: 既設プレートガーター橋主桁耐荷力に及ぼす腐食過程の影響, 鋼構造論文集第18巻第69号, pp.41-69, 2011.3

- 44) 小室雅人, 奥井義昭, 野阪克義, 宮下剛, 野上邦栄, 長井正嗣: 初期たわみと残留応力の統計データをを用いた自由突出板の限界強度に関する数値解析的検討, 構造工学論文集 Vol.60A, pp.80-93, 2014.3
- 45) 鋼構造委員会: 座屈設計ガイドライン 改訂第2版, 鋼構造シリーズ12, 土木学会, 2005
- 46) 金裕哲, 田原英俊, 中地映司, 堀川浩甫: 異種鋼材十字接合柱自由突出板の終局強度, 鋼構造論文集, 第8巻第30号, pp.15-21, 2001.6
- 47) J. R. Kayser and A. S. Nowak: Capacity loss due to corrosion in steel-girder bridges, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.115, No.6, pp.1525-1537, 1989
- 48) 野上 邦栄, 山沢 哲也, 小栗友紀, 加藤 美幸: 腐食減厚に伴う合成 I 桁及び I 断面柱の残存耐力評価に関する一考察, 構造工学論文集 vol.47A, pp.93-102,2001.3
- 49) Australian Rail Track Corporation ltd : Structures Repair Guidelines, EGH-09-01, 2010
- 50) FHWA : Bridge Maintenance, Superstructure, Course No, S05-006
- 51) FLDOT : BRIDGE MAINTENANCE AND REPAIR HANDBOOK
- 52) GADOT : Bridge Structure Maintenance And Rehabilitation Repair Manual, 2012
- 53) IOWA STATE UNIVERSITY : Evaluation of Appropriate Maintenance Repair and Rehabilitation Methods for Iowa Bridges, 2003
- 54) Transit New Zealand:Bridge Inspection And Maintenance Manual, 2001

## 第2章 腐食時の桁端下端部の耐荷力特性の解明

### 2.1 まえがき

本章では、腐食した桁端下端部の耐荷力特性を解明する方法として、桁端部のウェブと支点上補剛材の下端に着目し、腐食により断面が欠損（板厚ゼロ）する場合をモデル化し、腐食による桁端下端部の各位置の断面欠損が支点付近の静的耐荷力に与える影響を弾塑性有限変位解析によって把握する。まず、健全時の解析モデルを用いて、载荷条件、初期たわみ、スカーラップ、支点部拘束条件をパラメータにして解析を実施し、健全時の桁端部の特性を把握する。次に、ウェブと支点上補剛材の材質をパラメータにして、ウェブおよび支点上補剛材による異種材質の桁端部の特性を把握する。これらの検討結果を踏まえて、同じ载荷条件での実験結果と比較し変形モードを確認し、本モデルとほぼ同じモデルで解析しているケースの最大荷重の結果を比較する。

桁端部の特性を把握した上で、桁端下端部の腐食について、統計的に多いタイプ（ウェブおよび支点上補剛材）の腐食損傷に着目し、腐食損傷のパラメータと構造パラメータを変更した弾塑性有限変位解析を行う。ここでは、腐食損傷のパラメータとして、欠損位置、ウェブ欠損幅、欠損高を検討する。構造パラメータは、材質の影響、下フランジによる拘束効果の影響、ソールプレート形状の違いによる影響（固定支承と可動支承の比較）を検討し、腐食状態における耐荷力低下の程度と耐荷力特性の解明を図る。

### 2.2 FEM解析方法

道路橋示方書<sup>1)</sup>で設計された標準的な橋梁の構造について、健全な場合と腐食による断面欠損（板厚をゼロと仮定）がある場合に対して、汎用有限要素解析コードABAQUS<sup>2)</sup>を用いて弾塑性有限変位解析を行った。

#### 2.2.1 解析モデル

##### (1) モデルの対象橋梁

実務設計で一般的に参考および適用されてきた、平成6年版の標準設計<sup>3)</sup>から、主要幹線道路橋に対する単純プレートガーダー橋（設計番号0240）の内桁を検討対象とした。なお、対象橋梁の4主桁のうち、支点部におけるウェブの荷重分担の割合が大きいと考えられる支点上補剛材の板厚が薄い桁（内桁）を対象としている。

対象橋梁の一般図を図-2.2.1に、設計条件を表-2.2.1に、解析対象とした桁端部の主な構造諸元を表-2.2.2に、座屈に関する構造パラメータを表-2.2.3にそれぞれ示す。圧縮を受ける板要素の幅厚比パラメータ  $R$  は式(2.2.1a)、(2.2.1b)より求めた。この時、支点上補剛材、図-2.2.1(c)の  $\beta$  の桁端側ウェブにおける座屈係数  $k_b$  は、3辺単純支持1辺自由の板を想定している。

式(2.2.2)は支点部の降伏耐力  $P_r$  を示し、支点上補剛材取り付け部から径間側および桁端側にそれぞれウェブ板厚の12倍としたウェブの有効幅にウェブの板厚を乗じたウェブの有効断面積（ $24 t_w \cdot t_w$  ※  $t_w$ : ウェブの板厚）と支点上補剛材の全断面積に各部材の降伏応力度値を乗じて足し合わせた累加強度値である。



図-2.2.1(c)の $\alpha$ の範囲のせん断座屈パラメータ $\lambda_s$ は式(2.2.3)より求めた。この時、径間側ウェブの座屈係数 $k_r$ は、垂直補剛材、水平補剛材、下フランジの4辺による周辺単純支持板を想定して設定している。

式(2.2.2)より求めた支点部の設計降伏耐力 $P_y$ および式(2.2.4a)~(2.2.4c)より求めたせん断耐荷力 $P_s$ を表-2.2.4に示す。

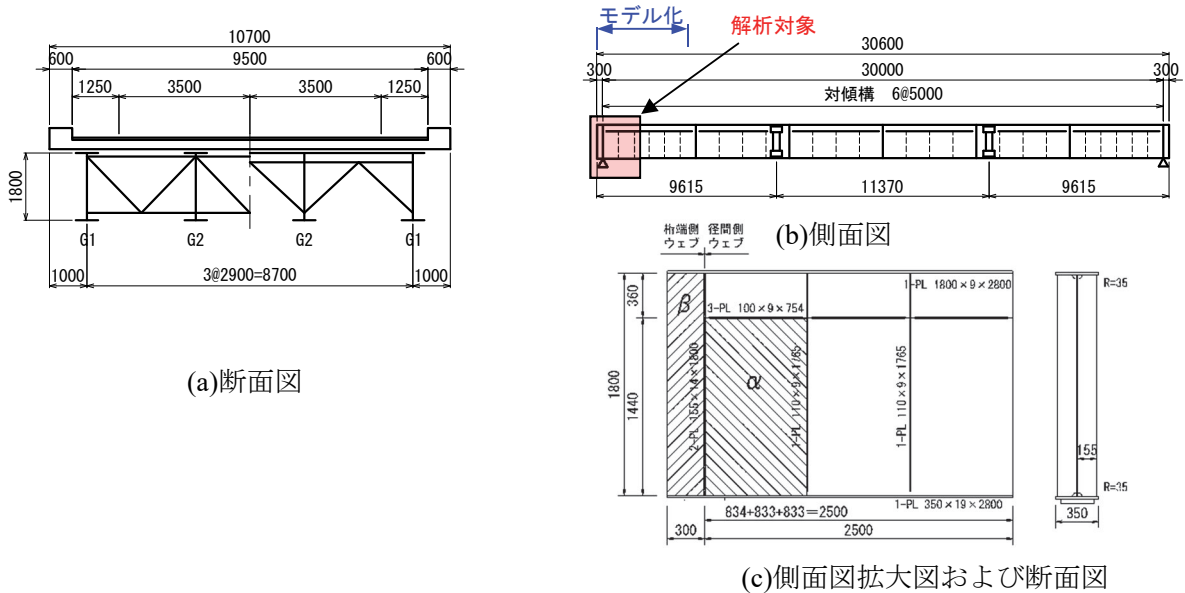


図-2.2.1 対象橋梁一般図

表-2.2.1 対象橋梁の設計条件

支間(m)	30
幅員(m)	9.5
斜角(度)	90
活荷重	B活荷重
雪荷重(kgf/m <sup>2</sup> )	なし
床版厚(mm)	250
舗装厚(mm)	80

表-2.2.2 解析対象とした桁端部の主な構造諸元と材質

	形状(mm)	厚さ(mm)	材質
支点上補剛材	155×1800	14	SS400
ウェブ板厚	—	9	SM490Y
固定側ソールプレート	330×270	22	SS400
可動側ソールプレート	440×270	22	SS400

表-2.2.3 座屈に関する構造パラメータ

支点部	柱の座屈	細長比パラメータ $\lambda$	0.105
支点上補剛材	板要素の座屈	アスペクト比 $\alpha$	0.086
		幅厚比パラメータ $R_s$	0.613
桁端側ウェブ	板要素の座屈	アスペクト比 $\alpha$	0.167
		幅厚比パラメータ $R_w$	2.267
径間側ウェブ	せん断座屈	アスペクト比 $\alpha$	0.579
		座屈パラメータ $\lambda_s$	1.205

表-2.2.4 支点部の設計降伏耐力 $P_{Hy}$

およびせん断耐荷力 $P_s$

支点部の設計降伏耐力 $P_{Hy}$	1,770(kN)
せん断耐荷力 $P_s$	1,825(kN)

$$R = \frac{1}{\pi} \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k_b}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2.2.1a)$$

$$k_b = 4.00 \quad (\text{周辺単純支持板})$$

$$= 0.425 \quad (\text{3辺単純支持1辺自由の板}) \quad (2.2.1b)$$

$$P_y = \sigma_{caow} \cdot \gamma_y \cdot A_{ew} + \sigma_{caos} \cdot \gamma_y \cdot A_{es} \quad (2.2.2)$$

$$\bar{\lambda}_s = \sqrt{(\tau / \tau_{cr})} \quad (2.2.3)$$

$$\tau_{cr} = k_\tau \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2 \quad (2.2.4a)$$

$$k_\tau = 4.00 + 5.34 / \alpha^2 \quad (\alpha \leq 1) \quad (2.2.4b)$$

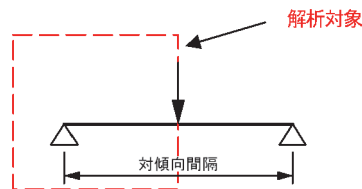
$$P_s = \tau_{cr} \cdot h_w \cdot t_w \quad (2.2.4c)$$

ここに、 $\sigma_{caow}$ ：局部座屈を考慮しないウェブの許容軸方向圧縮応力度の上限値(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{caos}$ ：局部座屈を考慮しない支点上補剛材の許容軸方向圧縮応力度の上限値 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\gamma_y$ ：安全率(=1.7)、 $A_{ew}$ ：ウェブの有効断面積(mm<sup>2</sup>)、 $A_{es}$ ：支点上補剛材の有効断面積(mm<sup>2</sup>)、 $\tau_{cr}$ ：径間側ウェブのせん断座屈強度、 $k_\tau$ ：せん断に対する座屈係数、 $E$ ：ヤング係数、 $\alpha$ ：アスペクト比、 $\nu$ ：ポアソン比、 $h_w$ ：ウェブ高をそれぞれ示す。

## (2) 解析モデル

検討対象の支点上付近の構造諸元を変えないことを条件に、桁端にせん断力が生じるように、**図-2.2.2**に示すように端対傾構から隣接する中間対傾構間隔を支間とする単純桁としてモデル化した。モデル化に当たっては現行の設計法の考え方を以下のように解釈し設定した。対象部分は、支点上補剛材と主桁ウェブで構成される十字柱の軸圧縮部材として設計される。この際、支点部は、**図-1.3.1**に示すようなその軸応力が下端で最大の三角形分布とすることを仮定し、支点部の応力状態を反映させている。したがって、桁端部の耐荷力を評価する際に载荷位置を支点部とするのではなく、支間中央に設定した（以後、支間中央载荷とする）。また、支間の設定は、支間中央に集中荷重を载荷した場合、支点上のせん断力は支間長が変化しても変わらず、また、曲げモーメントもゼロで一定であることから、支間長が対象部の耐荷力に与える影響は少ないものと考え、最小限の支間長である対傾構間隔を支間とした。また、端支点上補剛材の崩壊状態をできるだけ忠実に表したはり-柱モデルによる実験結果<sup>4)</sup>では、終局状態に至るまで三角形分布を呈していたことも参考としている。

支点付近の桁そのものの耐荷力を把握するため、対傾構等を除き、垂直補剛材、水平補剛材、およびソールプレートを残したモデルとしている。



**図-2.2.2** 解析モデルの概要

## (3) 初期不整

初期不整（残留応力および初期たわみ）を考慮することは、耐荷力の評価において重要であり、かつ必要と考える。

文献5～10において残留応力を考慮した解析が実施されているが、断面欠損を有する場合の残留応力については未解明であり、適切な数値モデルを設定できないこと、また、解析によって断面欠

損を再現し、残留応力を求めることの困難さなどから信頼性の高い解析の実施が困難であると考えた。本解析では、解析における残留応力は、本解析の主な目的である第3章に示す崩壊メカニズムの解明にあり、本研究の一連の研究の初期段階にあること、また、連続した構造体の断面内でつりあっているひずみで、腐食などで断面欠損（板厚ゼロ）を起こすと連続体が部分的に不連続になりそこで拘束関係がなくなり、力を発生するひずみは解放されると考えられること、これらを理由に残留応力は考慮せずに解析を行うことにした。

初期たわみの影響は、2.2.2 (3) 健全なタイプを用いて検証する。

#### (4) 支持条件と載荷方法

図-2.2.2のモデルをハーフモデルで解析し、支持条件は、対傾構間隔を支間長とした。単純桁の中央面（図-2.2.3中のオレンジ色の線部）を水平方向に固定し、対称条件を与えた。支点部は、線支承を想定し、支点上補剛材の直下に、ソールプレート幅にわたり回転端とする境界条件を与えた。線支承は腐食していることを想定し、可動支承による影響は考慮していない。

載荷位置は、両垂直補剛材の直上とし、フランジ幅にわたって載荷板を介して線荷重を載荷した（図-2.2.3の赤矢印）。なお、支点位置直上に載荷するタイプ（図-2.2.3の青矢印）により載荷位置の影響を検討した。以後、この載荷を支点直上載荷とする。

初期たわみの影響を検証したモデルは、図-2.2.3(b)のピンク点線に示すように支点上の垂直補剛材の自由端に橋軸方向に桁高1/2を頂点とした面外変形が生じるように設定した。この面外変形の向きは、支点对して点対称になるように、片側の支点上補剛材はウェブの径間側に、もう片側の支点上補剛材には、ウェブ桁端側に設定した。初期たわみは、製作誤差の許容値（垂直補剛材の幅  $B = 1/100$ ）を設置した。

欠損部において、載荷によって鋼材間の接触が生じる可能性があったため、ウェブ欠損ケースおよび補剛材欠損ケースに対して接触要素を用いて解析した。この結果、いずれのケースも最大荷重後に接触し、荷重が約1割増加する結果が得られたが、ここでは、安全側の評価が可能と考え、接触要素を使用せずに解析した結果を用いて検討した。

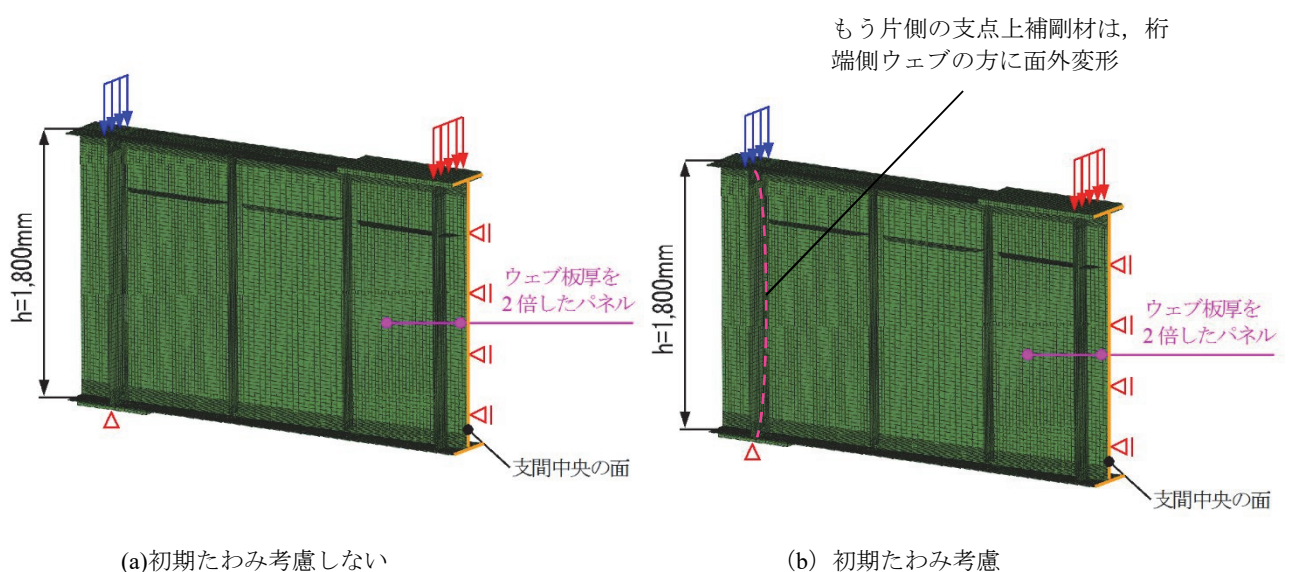


図-2.2.3 載荷モデルの概要

## (5) 有限要素と断面欠損のモデル化

ソールプレートと載荷板はソリッド要素とし、それ以外はすべてシェル要素でモデル化した。ソリッド要素としたソールプレートと載荷板は、弾性体とした。弾塑性とすることも検討したが、線支承を想定するなど境界条件を厳しくしているため、本解析モデルでは塑性化を許さないモデルとした。

要素の大きさは、 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ の正方形を基本とし、要素分割は、支点上補剛材は幅方向に14分割、高さ方向に175分割、ウェブパネル（支点上補剛材に一番近いパネル）は幅方向に83分割、高さ方向に176分割、上下フランジは長さ方向に280分割、幅方向に35分割とした。要素の大きさおよび分割は、実験結果と解析結果を比較し、解析モデルの妥当性を検証した耐荷性能に関する文献5の要素の大きさの設定を参考に決定している。また、要素の大きさを10mm単位とすることで欠損位置および欠損高さを設定しやすくすることも意図している。損傷箇所は、減厚ではなく断面欠損とし、その欠損部では要素が存在しない。

## (6) 材料構成則

本解析に用いた応力ひずみ関係は、本論文の目的が、支点部の断面欠損位置による影響を相对比较することを考慮して、図-2.2.4に示すように、バイリニアの応力ひずみ関係とし、降伏関数にはvon Misesの降伏関数を用いた。

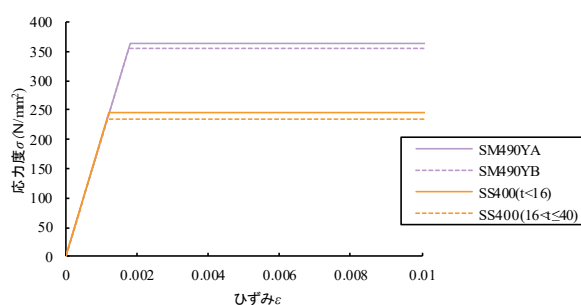


図-2.2.4 鋼部材の応力度-ひずみ曲線

## 2.2.2 解析ケース

### (1) 欠損パターン

桁端下部の腐食による断面欠損が桁端の耐荷力に及ぼす影響を把握するため、文献11を参考に腐食位置として図-2.2.5 (b)~(f)の5つのモデルを設定した。これらの設定方法を以下に示す。

ウェブは、補剛材の前後で腐食状況が異なることが考えられる。すなわち、径間側ウェブでは、海岸橋や河川橋などで、水域から湿度の多い風の吹き付けや飛来塩分を受け止める可能性が高い。また、応力集中による疲労亀裂の視点から考えて、支点上からの腐食範囲がソールプレート内に収まっている場合と、超えている場合とがある。一方、桁端側ウェブでは、伸縮装置からの漏水による腐食がよく発見され、腐食範囲が桁端まで及んでいる場合と及んでいない場合とがある。

また、支点上補剛材は、風通し、雨水による洗浄などで、外桁の内側と外側で異なること、内桁では両側が同条件になる可能性が高い。以上より、図-2.2.5に示すように、ウェブ径間側部分欠損 (b)、ウェブ桁端側部分欠損 (c)、ウェブ桁端側全欠損 (d)、補剛材片側欠損ケース (e) と補剛材両側欠損タイプ (f) のモデルを設定した。

ソールプレートより内側の下フランジの欠損では、ソールプレートを介して応力が伝達される

と考え、下フランジの欠損は対象としない。

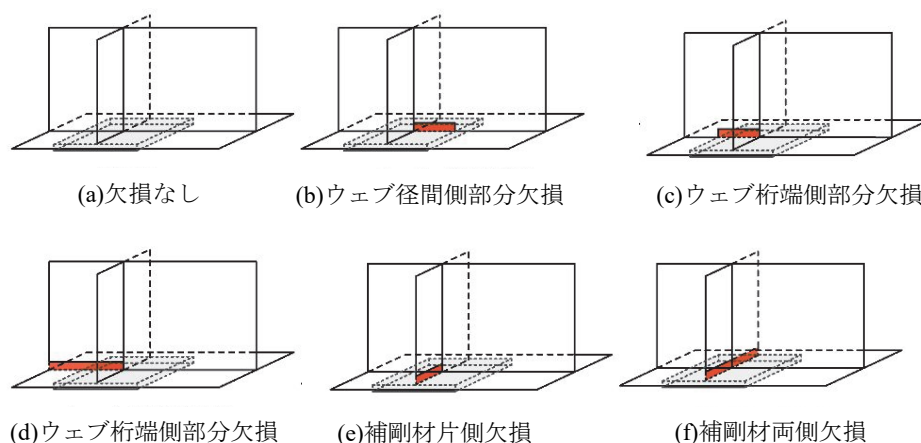


図-2.2.5 欠損なしと欠損位置のパターンの模式図

## (2) 解析ケース

解析ケースは、本章のまえがきにもあるように、解析モデルの特性、異種材質の桁端部の耐荷性能、腐食モデルのパラメトリック解析による影響と検討する目的毎に設定した。なお、解析ケースを比較するにあたり、基本となるケースを設定した。この基本となるモデルは、健全（欠損なし）、支間中央載荷、構造諸元通りスカーラップがある状態、初期たわみなしのモデルとし、このモデルを「健全時（ベースモデル）」と呼ぶことにした。

### a) 解析モデルの特性：載荷条件、スカーラップおよび初期たわみの影響

解析モデルの特性の分析は、載荷条件、スカーラップ、初期たわみをパラメータにした表-2.2.4に示すような解析ケースを設定した。

本解析は支間中央載荷をベースとするが、解析モデルの特性を整理するために、支点直上載荷も設定した。これにより、桁そのものが耐荷力を有すると仮定とした載荷条件である支間中央載荷と荷重集中点について軸方向圧縮力を受ける柱として設計することとした条件の支点直上載荷を比較する。残存耐荷力を積極的に活用することを目的とした本研究においては、支点直上載荷は、桁支点上にトレーラのような重車両の輪重が全て支点部に作用することがないことから、かなり安全側であると考えている。

スカーラップ（ $R=35$ ）は、設けたタイプと埋め戻したタイプの2つを設定した。平成6年度の標準設計<sup>2)</sup>では、スカーラップを設けることを基本としており、高度経済成長期に竣工された橋梁の多くにスカーラップが設置されていると想定し設定した。また、近年では、部材の各部への雨水等の水分の滞留防止の有効な構造として使用されている<sup>12)</sup>。一方、平成24年 道路橋示方書<sup>1)</sup>では、スカーラップの埋め戻しに関する規定はないが、支点部は埋戻して設計していることが多いことや、交通量の多い首都高速道路や阪神高速道路の標準図や設計要領<sup>13)~15)</sup>では、溶接で埋めることが記載されているので、スカーラップを埋めたタイプを設定した。

初期たわみは、図-2.2.3の(b)に示すように初期たわみがあるタイプとないタイプを設けた。また、腐食による支点部の拘束の影響も考えられたので、「健全時（ベースモデル）」の支点部の境界条件について回転自由のタイプと回転固定のタイプを設定した。

表-2.2.4 載荷条件，スカーラップ，初期たわみの影響

	荷重載荷位置	スカーラップ	初期たわみ	欠損幅 (mm)	欠損高 (mm)	材 質	ソールプレート
健全時モデル*	支点直上	あり	あり	0	0	SM490Y SS400	270×22×330 (固定支承側)
			なし	0	0		
		なし	あり	0	0		
			なし	0	0		
	支間中央*	あり*	あり	0	0	SM490Y SS400	270×22×330 (固定支承側)
			なし*	0	0		
		なし	あり	0	0		
			なし	0	0		

※「健全時（ベースモデル）」とする。

b) 異種材質の桁端部の耐荷性能：材質の影響

対象橋梁では，補剛材がSS400材で，ウェブはSM490Y材である．材料の違いが耐荷性能に与える影響を検討するために，表-2.2.5に示すように対象橋梁の材質の組み合わせの他に，補剛材およびウェブが双方ともSS400材のタイプおよび双方ともSM490Y材のタイプを設定した．

表-2.2.5 材質の組み合わせ

	タイプ1	タイプ2	タイプ3
	対象橋梁	全て SS400	全て SM490Y
補剛材	SS400	SS400	SM490Y
ウェブ	SM490Y	SS400	SM490Y

c) 腐食したモデルのパラメトリック解析1：[パラメータ] 欠損位置，材質

図-2.2.5(b), (d), (e), (f)に示す4つの腐食位置に対して，欠損位置と材質の違いによる耐荷力特性を把握するために，欠損高を10mmに限定し，欠損タイプと「健全なケース（欠損なし）」を設定した．材料の組み合わせは，2.2.2 (2) b)での設定と同様に，表-2.2.5に示す通りとした．また，これらの材質の組み合わせに対して，表-2.2.6に示すような検討ケースとした．

損傷時のケースの名称は，欠損位置，欠損高および欠損幅によるパラメータに由来している．ケース名の末尾の（ ）内の文字は，欠損高および欠損幅を示し，欠損高はHx (x: 欠損高(mm))，欠損幅はWy (y: 欠損幅(mm)) で表している．なお，表中の欠損幅と欠損高は，支点上補剛材とウェブと下フランジが交差する点からの範囲および下フランジ上面からの範囲をそれぞれ示す．

d) 腐食したモデルのパラメトリック解析2：

[パラメータ] 欠損位置，材質，下フランジの拘束効果による影響（ソールプレートの形状）

下フランジの拘束が桁端部の耐荷力に及ぼす影響を検討するために，表-2.2.6の解析ケースに，ソールプレートの厚さを35mmとし，ソールプレートの長さを500mmにして，下フランジの拘束効果を高めた．ウェブ桁端側部分欠損の影響を確認するために，「ウェブ桁端側部分欠損(H10W130)」を追加し，腐食位置を図-2.2.5(b)～(f)に示す5つとした．この損傷時のケースの名称の設定は，2.2.2 (2) c) での設定と同様である．

表-2.2.6 解析ケースの内訳およびその名称とパラメータ (その1)

	荷重載荷位置	欠損幅 (mm)	欠損高 (mm)	材 質		ソールプレート
				ウェブ	補剛材	
欠損なし	支間中央	0	0	SM490Y	SS400	270×22×330 (固定支承側)
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
補剛材片側欠損 (H10)	"	155	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
補剛材両側欠損 (H10)	"	155×2	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
ウェブ径間側部分欠損 (H10Wy)	"	130	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
	"	190	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
ウェブ桁端側全欠損 (H10W300)	"	300	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	

表-2.2.7 解析ケースの内訳およびその名称とパラメータ (その2)

	荷重載荷位置	欠損幅 (mm)	欠損高 (mm)	材 質		ソールプレート
				ウェブ	補剛材	
欠損なし	支間中央	0	0	SM490Y	SS400	270×22×330 (固定支承側) および 270×35×500
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
補剛材片側欠損 (H10)	"	155	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
補剛材両側欠損 (H10)	"	155×2	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
ウェブ径間側部分欠損 (H10Wy)	"	130	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
	"	190	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
ウェブ桁端側部分欠損 (H10W130)	"	130	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	
ウェブ桁端側全欠損 (H10W300)	"	300	10	SM490Y	SS400	
				SM490Y	SM490Y	
				SS400	SS400	

e) 腐食したモデルのパラメトリック解析3 :

[パラメータ] ソールプレート, 欠損位置, ウェブ欠損幅, 欠損高

固定支承側のソールプレート長さ (330mm) と可動支承側のソールプレート長さ (440mm) の2つを設定した. 表-2.2.7の解析ケースに, 「ウェブ径間側部分欠損 (W250, W300)」と「ウェ

「桁端側部分欠損 (W190, W250)」を追加した。このウェブの欠損幅は、固定側支承および可動側支承のソールプレート長さから±30mmの欠損ケースと桁端側ウェブが全欠損した場合に該当する300mmを対象とした。図-2.2.6の欠損幅は全て支点中心からの距離で表示している。欠損高は、10mm, 30mm, 100mmとする3つのタイプを設定した。欠損高30mmはスカーラップ (R=35の高さ) の影響を確認するためのものであり、欠損高100mm は著者らが現場で確認した中で最も高い損傷高を参考に設定した。

これらの解析ケースのまとめを表-2.2.8 に示す。なお、この損傷時のケースの名称の設定は、2.2.2 (2) c)での設定と同様である。

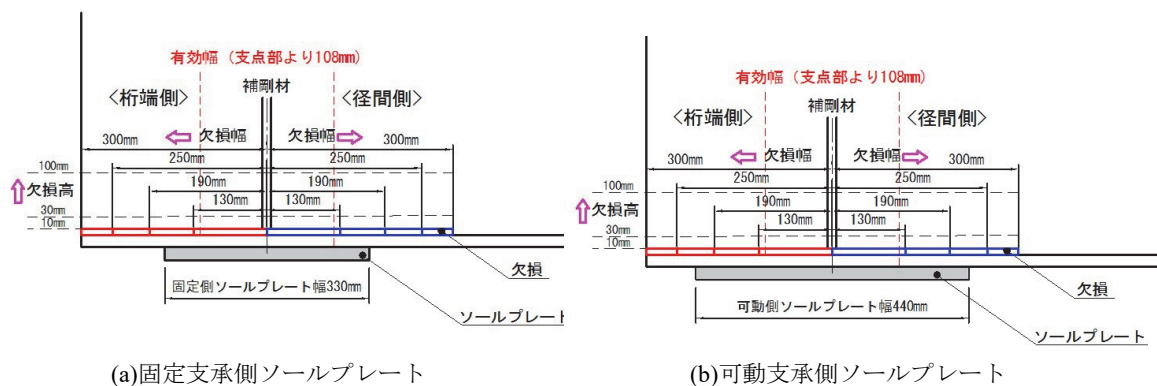


図-2.2.6 ウェブの欠損幅のケース

表-2.2.8 解析ケースの内訳およびその名称とパラメータ (その3)

ケース名		パラメータ	荷重 載荷 位置	欠損高 H(mm)	欠損幅 W(mm)	スカー ラップ	ソール プレート
健全時	健全時 (ベースモデル)	支間	0	0	有	固定	
		中央	0	0	無	可動	
	健全時(スカーラップなし)	直上	0	0	有	固定	
損傷時	補剛材片側欠損 (Hx)	支間	10, 30, 100	155	有	固定	
		中央	10	155	無	可動	
	補剛材両側欠損 (Hx)	支間	10, 30, 100	155	有	固定	
		中央	10	155	無	可動	
	ウェブ径間側 部分欠損 (HxWy)	支間	10, 30, 100	130	有	固定	
			10	130	無	可動	
		中央	10, 30, 100	190	有	固定	
			10	190	無	可動	
		支間	10, 30, 100	250	有	固定	
			10	250	無	可動	
	中央	10, 30, 100	300	有	固定		
		10	300	無	可動		
ウェブ桁端側 部分欠損 (HxWy)	支間	10, 30, 100	130	有	固定		
		10	130	無	可動		
	中央	10, 30, 100	190	有	固定		
		10	190	無	可動		
支間	10, 30, 100	250	有	固定			
	10	250	無	可動			



## 2.3 FEM解析モデルの特性の把握

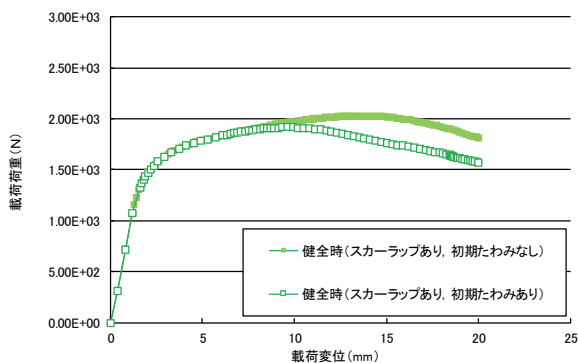
まずは、健全時モデルを用いて、荷重条件、初期たわみ、スカーラップの影響、支点部の拘束の影響を確認し、解析モデルの特性を整理する。次に、本解析モデルを既往の荷重実験および他の解析モデルと比較し、本解析モデルの最大荷重や変形モードの特性を把握する。

### 2.3.1 荷重条件と初期たわみの影響

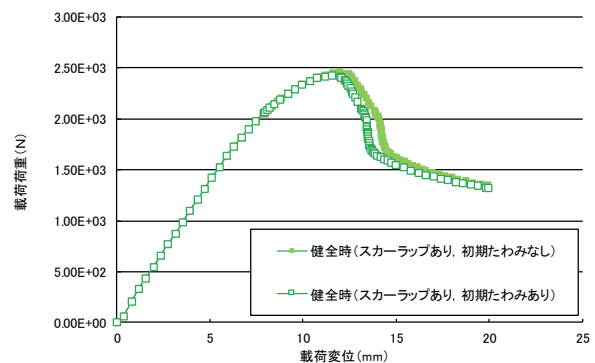
スカーラップがある条件で、荷重条件（支点直上荷重と支間中央荷重）別に初期たわみの影響を比較した最大荷重を表-2.3.1に示す。さらに、その時の荷重-変位曲線を図-2.3.1、初期たわみを考慮していない応力コンター図を図-2.3.2に示す。荷重条件の違いで、傾向が異なる荷重-変位曲線が見られた。(a)の支点直上荷重では、支間中央荷重に比べて始点から変位に対する荷重増加が大きく、荷重変位2mm付近から緩やかに増加し最大荷重に至っている。一方(b)の支間中央荷重では、始点から変位に対する荷重増加は(a)の曲線に対して緩やかである。荷重変位12mm付近で最

表-2.3.1 初期たわみによる最大荷重

	最大荷重 (kN)	
	支点直上荷重	支間中央荷重
初期たわみあり	1,917	2,428
初期たわみなし	2,033	2,467

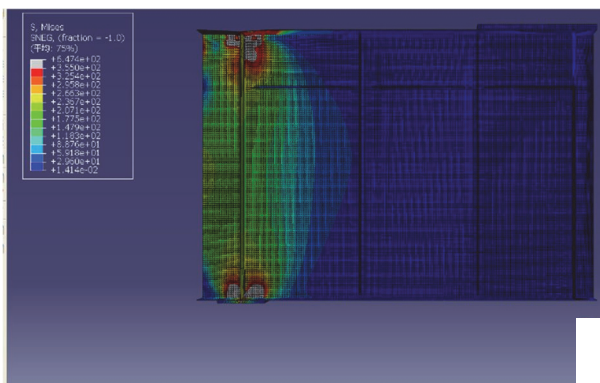


(a) 支点直上荷重

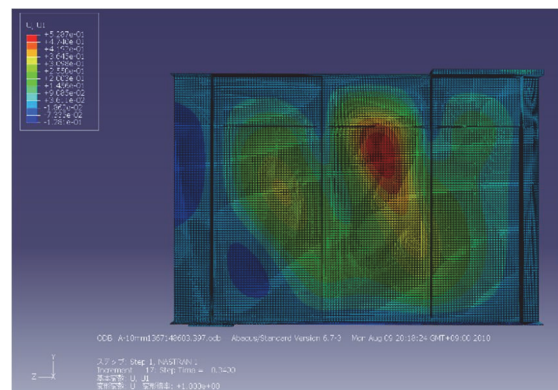


(b) 支間中央荷重

図-2.3.1 初期たわみの違いによる荷重-変位曲線の比較



(a) 支点直上荷重



(b) 支間中央荷重

図-2.3.2 荷重条件の違いによる応力コンター図（最大荷重時）

大荷重に至り、その後に急激な荷重低下が見られる。荷重条件によって荷重-変位曲線の傾きが異なるのは、挙動の範囲の違いであり、支間中央載荷の方がその挙動の範囲が広いために、変位の増加量が大きいと考えられる。支間中央載荷の荷重-変位曲線でみられる最大荷重後の荷重の急低下は、支点部が座屈した影響と考えられる。支間中央載荷の最大荷重と支点直上載荷の最大荷重を比較すると約 1.3 倍程度増加していた。

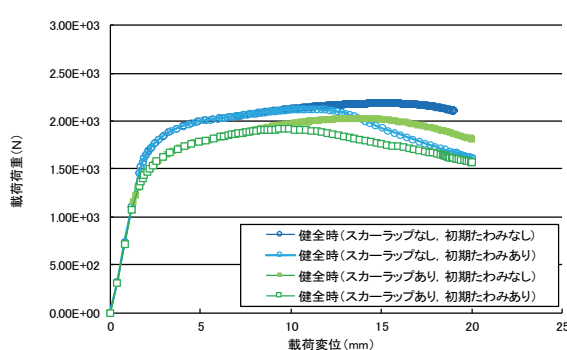
初期たわみを考慮した場合、支点直上載荷の場合では約 5.7%低下、支間中央載荷の場合では約 1.6%低下していた。補剛材に初期たわみを入れたモデルでは、支間中央載荷の方が支点直上載荷に比べて耐荷力の低下が小さかった。また、初期たわみの有無で荷重-変位曲線を比較すると、支間中央載荷ではほぼ同じ過程であり、支点直上載荷では、弾性域を超えて、載荷変位 10mm 程度までは同じであった。桁 1 本モデルにおいて、支間中央載荷では、径間側パネルにせん断座屈が生じやすく、支点部にねじりが発生し座屈が発生しやすい状態になったと考えられる。これらのことから、支間中央載荷の健全時モデルでは、初期たわみの影響は小さいと考えられる。

### 2.3.2 スカーラップの影響

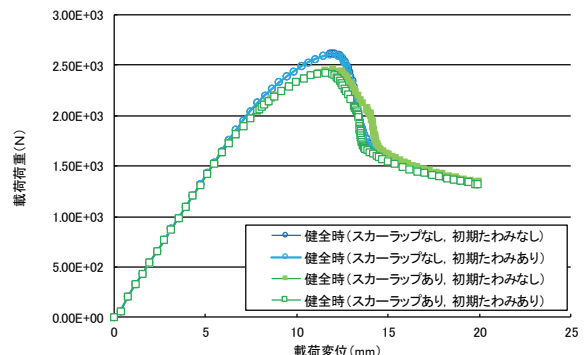
支点直上載荷と支間中央載荷の結果を比較して、スカーラップによる影響を確認した。荷重-変位曲線は図-2.3.3 の通りであり、最大荷重は表-2.3.2 に整理した。その結果、支間中央載荷のタイプのスカーラップを設置しない影響は、初期たわみがある場合：7%上昇（支点直上載荷の場合 11%上昇）初期たわみがない場合：6%上昇（支点直上載荷の場合 8%上昇）であり、スカーラップによる影響は、支点直上載荷のタイプよりも最大荷重の増加率が小さい。また、スカーラップを設置しないことで、下端部の剛性が高まり、耐荷力が増加していることを示した。

表-2.3.2 初期たわみおよびスカーラップの有無による最大荷重

	初期たわみ	最大荷重 (kN)	
		支間中央載荷	支点直上載荷
スカーラップ (なし)	あり	2,610	1,917
	なし	2,615	2,033
スカーラップ (あり)	あり	2,428	2,127
	なし	2,467	2,189



(a) 支点直上載荷



(b) 支間中央載荷

図-2.3.3 スカーラップの有無による荷重-変位曲線の比較

### 2.3.3 支点部の拘束の影響

支点部の拘束の影響を確認するために、支点中央載荷において、支承条件が回転自由と回転固

定のタイプで比較した。この回転自由のタイプは、「健全時（ベースモデル）」のケースである。荷重-変位曲線およびその最大荷重を比較した結果を図-2.3.4に示す。荷重-変位曲線では、二つのタイプはほぼ似たような傾向を示していた。最大荷重の比率では、支承条件を回転固定にした方が回転自由のケースに比べ3%程度の耐荷力増加にとどまり、両者の違いは少なかった。

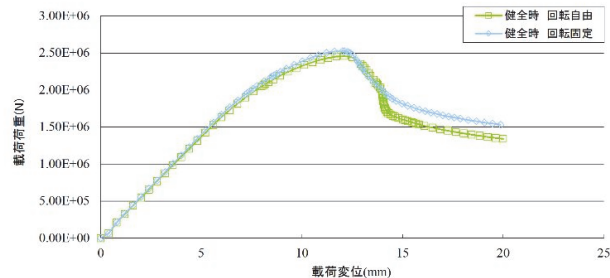
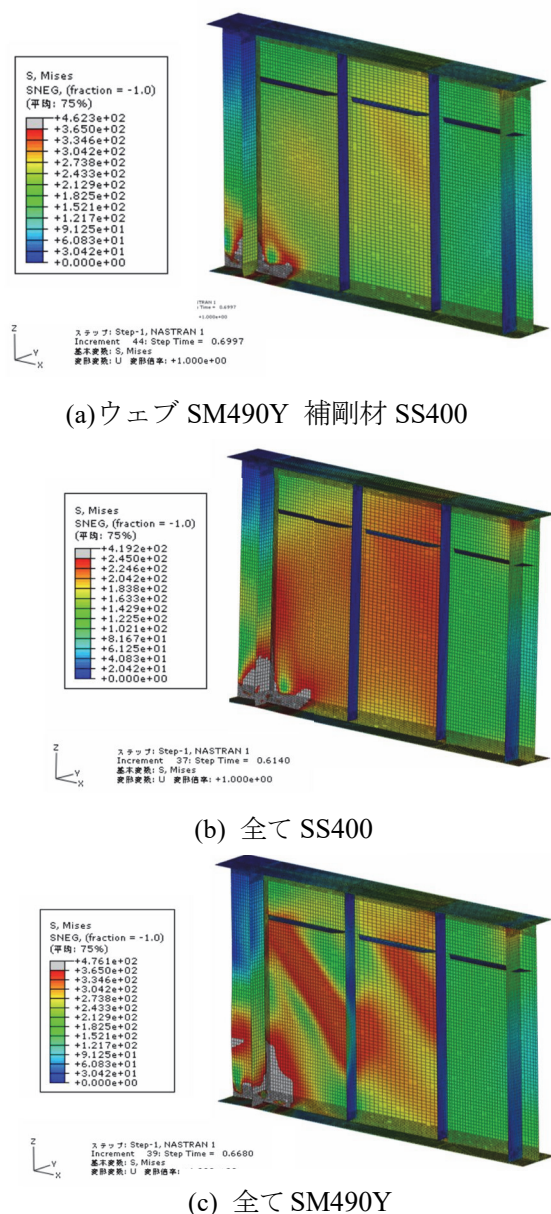


図-2.3.4 支承条件を変えた各モデルの荷重-変位曲線

### 2.3.4 異種材質の影響

標準設計で用いている構造諸元の部材（支点上補剛材とウェブ）の材質は、異種材質である。異種材質の影響を確認するために、材質の組合せが異なる3タイプ（ウェブSM490Y 補剛材SS400のタイプ（対象橋梁）、全てSS400のタイプ、全てSM490Yのタイプ）の解析を実施した。健全モデルの最大荷重から荷重が5%低下時の解析モデルのMises相当応力コンター図と変形図を図-2.3.5に示す。凡例の応力による色の区分は、基本的には、灰色の部分降伏の範囲である。ただし、対象橋梁の材質の混在タイプ(a)の補剛材は黄色より上のランクの色の部分が降伏範囲になる。これらの解析結果による最大荷重 $P_{max}$ と対象橋梁の最大荷重 $P_{max-int}$ に対する最大荷重の割合 $P_{max}$ と有効断面積と材料の降伏点を掛け合わせることで算出することが可能な式(2.3.1)を用いて算



(a)ウェブ SM490Y 補剛材 SS400

(b) 全て SS400

(c) 全て SM490Y

表-2.3.3 材料別最大荷重および設計降伏耐力

	最大荷重 (kN) $P_{max}$	$P_{max-int}$ / $P_{max}$	降伏耐力 (kN) $P_y$	$P_{Hy}$ / $P_y$
ウェブ SM490Y 補剛材 SS400	2,320	1.00	1,710	1.00
全て SS400	1,940	0.84	1,477	0.86
全て SM490Y	2,640	1.14	2,231	1.30

$P_{max-int}$  : 対象橋梁の最大荷重,  $P_{max}$  : 各最大荷重

$P_{Hy}$  : 対象橋梁の降伏耐力,  $P_y$  : 各降伏耐力

図-2.3.5 材質別健全時モデルの最大荷重 (mises 応力コンター図)

出した設計降伏耐力 $P_y$ と対象橋梁の設計降伏耐力 $P_{fy}$ に対する設計降伏耐力 $P_y$ の割合を表-2.3.3に示す。すべてのケースで下端部が降伏ないし、局部座屈を起こして最大荷重に達しているが、補剛材もウェブもSM490Yであるケースのウェブの応力状態は他の2ケースと比べて異なっており、ウェブのせん断座屈が発生していた。その結果、対象橋梁のタイプの最大荷重を1.0とした場合、全てSS400のタイプでは0.84、全てSM490Yのタイプでは1.14であった。各々のタイプでは対象橋梁の最大荷重に対して1割以上の差が生じた。

対象橋梁のタイプの設計降伏耐力を1.0とした場合、全てSS400のタイプでは0.86、全てSM490Yのタイプでは1.30であった。この設計降伏耐力においても、各々のタイプは対象橋梁の設計降伏耐力に対して1割以上の差があった。

表-2.3.4に各材質のケースによる最大荷重の差の関係と各材質の降伏点の差と有効断面積を掛け合わせた荷重の差の関係を示す。その結果、両者の関係は比較的近く、材質の影響がそのまま最大荷重に反映されていることを確認できた。以上より、材質の強度が耐荷力へ影響を及ぼしていることを確認した。

表-2.3.4 材質別の耐力の差の関係

	最大荷重(kN)	設計降伏耐力(kN)
ウェブ SM490Y 補剛材 SS400 と全て SS400 の差	320	233
全て SM490Y と全て SS400 の差	700	754

$$P_y = \sigma_{caw} \cdot \gamma_y \cdot A_{ew} + \sigma_{cas} \cdot \gamma_y \cdot A_{es} \quad (2.3.1)$$

$P_y$  : 構造諸元から設定する支点部の設計降伏耐力

$\sigma_{caw}$  : ウェブの許容軸方向圧縮応力度の上限値(N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cas}$  : 補剛材の許容軸方向圧縮応力度の上限値(N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma_y$  : 安全率(= 1.7)

$A_{ew}$  : ウェブの有効断面積(mm<sup>2</sup>) ※有効幅は $24t_w$  ( $t_w$ : ウェブ板厚)

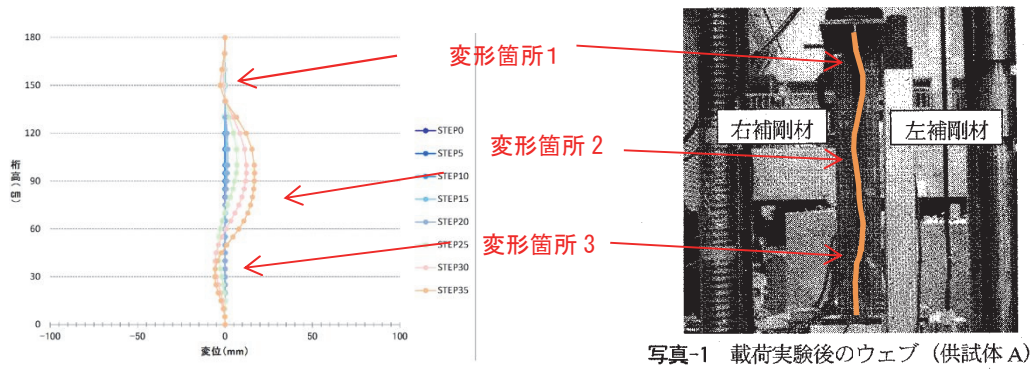
$A_{es}$  : 支点上補剛材の有効断面積(mm<sup>2</sup>)

### 2.3.5 解析モデルの有効性

この解析モデルを確認する一つの方法として、既往の研究成果の変形モードと解析の変形モードを比較する。比較した既往の研究成果の変形モードは、文献16の健全時における支点直上載荷の載荷実験である。文献16の載荷実験の結果では、桁端側ウェブは著しい変形をし、補剛材は明瞭な変形はないものの、ひずみが確認された。

支点上補剛材に初期たわみを考慮した支点直上載荷の最大荷重時の桁端側ウェブの変形モードと文献16の載荷実験後の桁端側ウェブの形状を比較した結果を図-2.3.6に示す。

これらを比較した結果、桁端側ウェブの変形モードは近かった。また、ウェブに対して、幅厚比が大きい支点上補剛材では変形が小さいことは一致した。桁端部をモデル化した支点直上載荷による本解析結果と実験結果とでは、比較的近い変形モードであったと考えられる。



(a) 解析結果

(b) 実験<sup>10)</sup>

図-2.3.6 最大荷重時の変形モードの比較 (桁端側ウェブ)

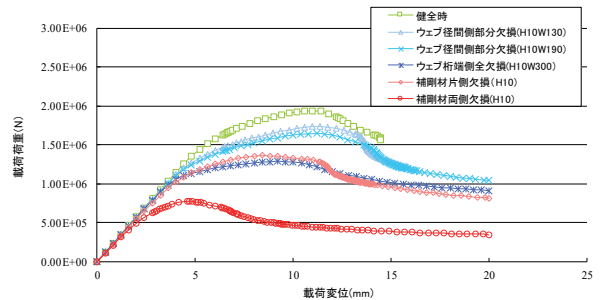
さらに、文献 17 では、本解析モデルの構造諸元、境界条件および荷重条件を利用し、全ての部材の材質 SS400 とし、スカーラップをなくした条件で解析している。その最大荷重を比較した結果、本解析では、 $P_{max-int}=1,940(KN)$ であり、文献 17 の解析では  $P_{max-int}=1,874(KN)$ であり、両者は 3% 程度の差であった。これらの結果より本解析モデルが有効であると結論づけた。

## 2.4 腐食モデルのパラメトリック解析

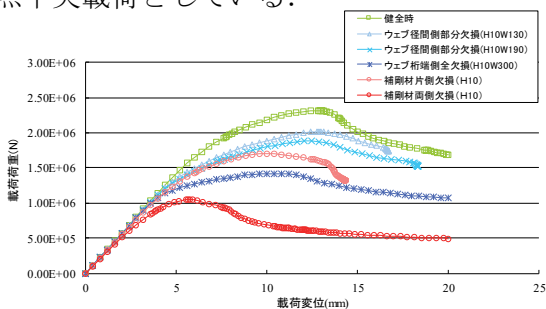
### 2.4.1 材質別欠損の影響

#### (1) 荷重-変位曲線

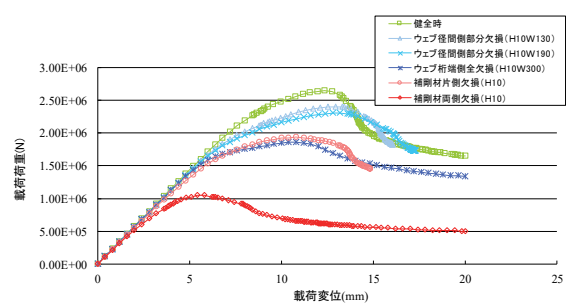
欠損範囲として高さ方向に 10mm とした図-2.2.5 (b), (d), (e), (f) の 4 タイプの欠損タイプと健全なモデルの荷重-変位曲線を、表-2.2.5 の 3 つの材質タイプに対して、図-2.4.1 (a)~(c) に示す。図中の縦軸は荷重であり、支点反力に相当する。また、横軸は荷重点の鉛直方向変位である。荷重位置は支点中央荷重としている。



(b) 全て SS400



(a) ウェブ SM490Y, 補剛材 SS400



(c) 全て SM490Y

図-2.4.1 荷重-変位曲線 (高さ 10mm の欠損による耐荷力への影響)

#### (2) 最大荷重

各ケースの最大荷重を表-2.4.1 に示す。その上で、桁端部の腐食により欠損した場合の耐荷力への影響の検討をそれぞれの解析値を用いて健全なケースに対する耐荷力低下を検討した。表中

の健全モデルに対する各ケースの最大荷重の割合を図-2.4.2 に示す。

表-2.4.1 最大荷重

材質	項目	単位	健全	ウェブ欠損			補剛材欠損	
				径間側 (H10W130)	径間側 (H10W190)	桁端側 (H10W300)	片側 (H10)	両側 (H10)
ウェブSM490Y 補剛材SS400	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	2,320	2,010	1,880	1,420	1,710	1,050
	$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	0.87	0.81	0.61	0.74	0.45
SS400	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	1,930	1,730	1,640	1,290	1,360	770
	$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	0.90	0.85	0.67	0.70	0.40
SM490Y	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	2,640	2,400	2,300	1,850	1,930	1,040
	$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	0.91	0.87	0.70	0.73	0.39

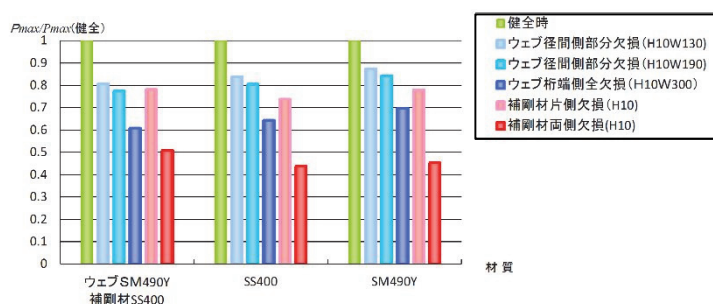


図-2.4.2 健全モデルに対する各ケースの最大荷重の割合

解析によって得られた最大荷重は、「ウェブ径間側部分欠損 (H10W130)」、「ウェブ径間側部分欠損 (H10W190)」、「補剛材片側欠損 (H10)」、「ウェブ桁端側全欠損 (H10)」、「補剛材両側欠損 (H10)」の順に小さい。この傾向は、材質によらず同様の結果となった。断面欠損した各ケースの健全なケースに対する耐荷力は、補剛材両側欠損 (H10) では、健全なケースの4割程度になるケースもあり、耐荷力が著しく低下する結果となった。これに対して、補剛材が片側欠損しても7割の耐荷力を保持している。一方、ウェブ径間側部分欠損は、ソールプレートより広い範囲が欠損しても約8割の耐荷力があるという結果になった。これに対して、ウェブ桁端側全欠損ケースは、約6割に低下する結果になった。

### (3) 応力状態の検討

対象橋梁 (補剛材SS400 ウェブSM490Y) の各ケースに対する最大荷重時から5%荷重が低下した時の支点付近のMises 相当応力コンター図と変形図を表-2.4.2 に示す。表中には、同様に最大荷重時から荷重が5%低下した時と最大荷重の50%荷重載荷時のZ 軸 (鉛直) 方向の応力コンター図と変形図も示した。Z 軸 (鉛直) 方向の応力コンターは、ウェブにおける軸圧縮応力の範囲を確認するために添付している。

Mises 相当応力コンター図における灰色の部分は降伏点に達した領域であるが、これらの図を見ると、どの結果もウェブの塑性域が大きい。このことから耐荷力に対するウェブの貢献度が大きいことがわかる。

図-2.4.2 より、「ウェブ桁端側全欠損 (H10W300) ケース」の方が、「ウェブ径間側部分欠損

表-2.4.2 応力コンター図と変形図※（対象橋梁：補剛材 SS400，ウェブ SM490Y）※変形倍率 2 倍

	Mises 相当応力コンター 最大荷重から 5%低下時	z 軸方向応力コンター	
		最大荷重から 5%低下時	最大荷重の 50%時
ベースモデル			
ウェブ径間側部分欠損 (H10W130)			
ウェブ径間側部分欠損 (H10W190)			
ウェブ桁端側全欠損 (H10W300)			
補剛材片側欠損 (H10)			
補剛材両側欠損 (H10)			

(H10W130, H10W190) ケース」よりも最大荷重が低下している。この理由として、桁端側ウェブの断面欠損の範囲が大きいこと、下端が完全に切れることで、桁端側ウェブ側の下フランジによる支持が期待できない状態となることが考えられる。

表-2.4.2 のコンター図より、ウェブ径間側部分欠損ケースでは、桁端側ウェブの他に、残っている径間側ウェブでも応力伝達が行われている。一方、ソールプレートの範囲を超えて欠損しているウェブ径間側欠損ケースは、ソールプレートの範囲内に欠損が収まっているウェブ径間側欠損ケースと比較してそれほど耐荷力は低下しない結果が得られた。この理由として、ここで示した最大荷重時の塑性域などの応力状態から、桁端側の耐荷力の寄与が大きいこと、ソールプレートより外側のウェブでも下フランジへの応力伝達に寄与していることが考えられる。

#### (4) 補剛材の応力状態の検討

対象橋梁では、ウェブ (SM490Y) と補剛材(SS400)の材質が異なり、補剛材の降伏状況が視覚的に把握しにくいいため、図-2.4.3に全てSS400 と全てSM490Y のタイプで、降伏域が補剛材にも広がっている状況を示す。

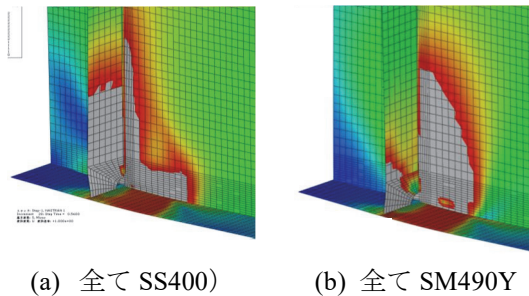


図-2.4.3 補剛材の塑性化 (ウェブ桁端側全欠損)

#### 2.4.2 下フランジの拘束効果による影響

下フランジの拘束が桁端の耐荷力に及ぼす影響を検討するため、ソールプレート形状 (270×35×500) を変更することで下フランジの拘束効果を表現して解析を行った。解析により得られた最大荷重を表-2.4.3 に示す。また、それらの最大荷重の比較を図-2.4.4 に示す。縦軸の比率は、ソールプレート (270×35×500) の場合の最大荷重をソールプレート (270×22×330) の場合の最大荷重で除した値である。

表-2.4.3 解析結果 (最大荷重) 一覧

ソールプレート	材質	項目	単位	健全	ウェブ欠損				補剛材欠損	
					径間側 (H10W130)	径間側 (H10W190)	桁端側 (H10W130)	桁端側 (H10W300)	片側 (H10)	両側 (H10)
270 × 22 × 330	ウェブSM490Y 補剛材SS400	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	2,320	2,010	1,880	2,020	1,420	1,710	1,050
		$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	0.87	0.81	0.87	0.76	0.74	0.45
270 × 35 × 500	SS400	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	1,930	1,730	1,640	1,750	1,290	1,360	770
		$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	0.90	0.85	0.91	0.79	0.70	0.40
270 × 35 × 500	SM490Y	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	2,640	2,400	2,300	2,360	1,850	1,930	1,040
		$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	0.91	0.87	0.89	0.80	0.73	0.39
270 × 35 × 500	ウェブSM490Y 補剛材SS400	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	2,480	2,000	1,920	—	1,510	1,940	1,260
		$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	0.81	0.77	—	0.79	0.78	0.51
270 × 35 × 500	SS400	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	2,100	1,760	1,690	1,760	1,350	1,550	920
		$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	0.84	0.80	0.84	0.80	0.74	0.44
270 × 35 × 500	SM490Y	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	2,780	2,430	2,340	2,380	1,940	2,170	1,260
		$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	0.87	0.84	0.86	0.83	0.78	0.45



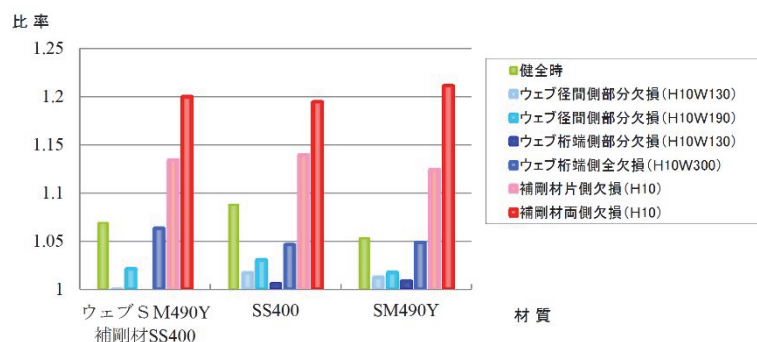


図-2.4.4 ソールプレートの形状による最大荷重の比較

ソールプレートの板厚を 35mm に、橋軸方向の長さを 500mm としたタイプにおいて、健全なケースでは、対象橋梁(補剛材のみ SS400)のケースは 7%, 全て SS400 のケースは 9%, 全て SM490Y のケースは 5% 最大荷重がそれぞれ増加した。一方、損傷時のケースでは、ウェブ欠損の場合 0~6%, 補剛材片側欠損の場合 13% 程度、補剛材両側欠損の場合 20% 程度それぞれ増加し、その増加量にはばらつきがあった。補剛材欠損のケースで最大荷重に大きな増加が見られたのは、剛性が高い下フランジの範囲が拡大し、支点上補剛材の拘束効果を高めたことによると考えられる。

このように、ソールプレートの形状を変更して剛性を上げることで、ウェブ径間側欠損はほぼ同等の最大荷重、その他のケースにおいても最大荷重の増加が見られたので、下フランジの拘束効果の影響があることを確認した。本解析では、線支承を想定した境界条件を用いているが、ゴム支承や面接触支承を想定した境界条件に変更した場合には、最大荷重が増加するものと想定される。

### 2.4.3 欠損位置による傾向

固定側ソールプレートの形状および可動側ソールプレートの形状をもとに、欠損位置別の荷重-変位曲線を図-2.4.5にそれぞれ示す。载荷荷重を縦軸、载荷点の鉛直方向変位を横軸にプロットしている。さらに、その荷重-変位曲線より得られた最大荷重を表-2.4.4 にまとめて示す。

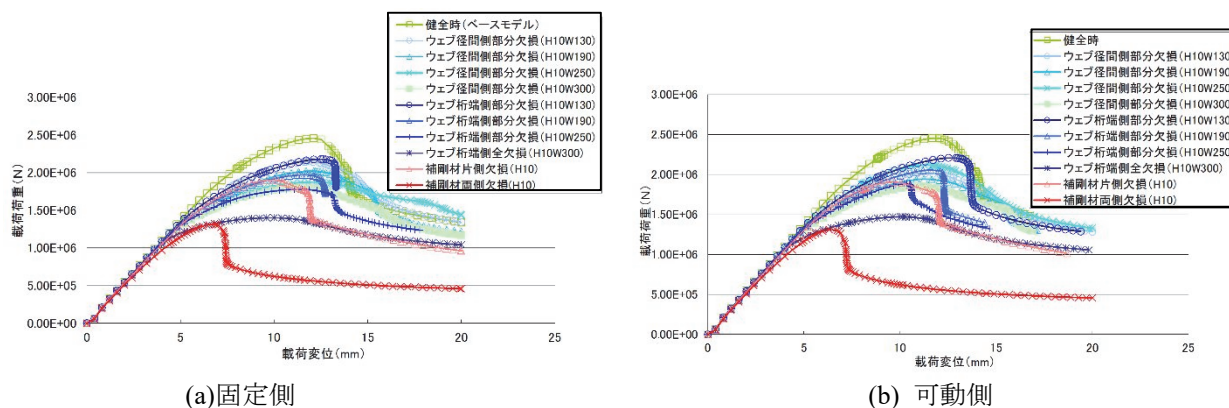


図-2.4.5 荷重-変位曲線

表-2.4.4 最大荷重の比較

1) 固定側ソールプレート(270×22×330)の最大荷重および $P_{max}/P_{max-int}$

欠損高	項目	荷重 載荷位置 欠損位置 欠損幅	健全 ベース モデル	支間中央										補剛材欠損		支 点 直 上 健 全 - 0mm	
				ウェブ欠損										片側	両側		
				径間側				桁端側									
				0mm	130mm	190mm	250mm	300mm	130mm	190mm	250mm	300mm	130mm	190mm	250mm		300mm
0mm	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	2,460	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10mm	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	—	2,150	2,020	1,880	1,810	2,180	1,970	1,780	1,400	1,900	1,320	2,030	—	—	—
	$P_{max}/P_{max-int}$		—	0.87	0.82	0.76	0.74	0.89	0.80	0.72	0.57	0.77	0.54	0.83	—	—	—
30mm	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	—	2,130	2,000	—	—	2,130	1,890	1,740	1,370	1,900	1,310	—	—	—	—
	$P_{max}/P_{max-int}$		—	0.87	0.81	—	—	0.87	0.77	0.71	0.56	0.77	0.53	—	—	—	—
100mm	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	—	1,830	1,780	—	—	1,830	1,680	1,630	1,260	1,720	1,290	—	—	—	—
	$P_{max}/P_{max-int}$		—	0.74	0.72	—	—	0.74	0.68	0.66	0.51	0.70	0.52	—	—	—	—

2) 可動側ソールプレート(270×22×440)の最大荷重および $P_{max}/P_{max-int}$

欠損高	項目	欠損位置 欠損幅	健全	ウェブ欠損										補剛材欠損			
				径間側				桁端側						片側	両側		
				0mm	130mm	190mm	250mm	300mm	130mm	190mm	250mm	300mm					
				0mm	130mm	190mm	250mm	300mm	130mm	190mm	250mm	300mm					
0mm	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	2,450	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	$P_{max}/P_{max-int}$		1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10mm	$P_{max}$ [最大荷重]	kN	—	2,120	2,020	1,940	1,850	2,210	2,060	1,890	1,470	1,910	1,310	—	—	—	—
	$P_{max}/P_{max-int}$		—	0.87	0.82	0.79	0.76	0.90	0.84	0.77	0.60	0.78	0.53	—	—	—	—

上段： $P_{max}$  (kN)， 下段： $P_{max}/P_{max-int}$  ■：健全時（ベースモデル）  
 $P_{max}$ ：最大荷重， $P_{max-int}$ ：健全時（ベースモデル）の最大荷重

さらに、各欠損ケースの荷重-変位特性の違いを明確にするため、健全時（ベースモデル）、ウェブ径間側部分欠損ケースとウェブ桁端側部分欠損の代表的なもの各1つ、ウェブ桁端側全欠損および補剛材片側欠損、補剛材両側欠損を図-2.4.5より抽出し、その結果を図-2.4.6に示す。

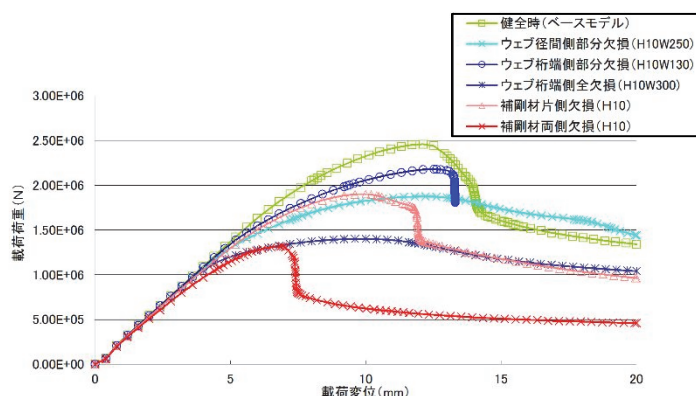


図-2.4.6 荷重-変位曲線（傾向）

ウェブ径間側部分欠損の場合、最大荷重後の荷重低下が比較的なだらかであるのに対し、ウェブ桁端側部分欠損の場合では約1割～2割の急激な荷重低下が見られる。なお、ウェブ桁端側全欠損では、健全時（ベースモデル）に比べ最大荷重が約6割程度低いが、最大荷重後の急激な荷重低下は見られない。補剛材片側欠損の場合では、健全時（ベースモデル）に比べ約3割程度低下し、補剛材両側欠損では、健全時（ベースモデル）に比べ約5割程度低下し、最大荷重後に急激な荷重低下が見られた。

#### 2.4.4 ソールプレートの形状による影響

固定側（270×22×330）のケースと可動側（270×22×440）のケースの解析結果について、健全時と各欠損モデル（欠損高10mm）の最大荷重を比較して図-2.4.7に示す。

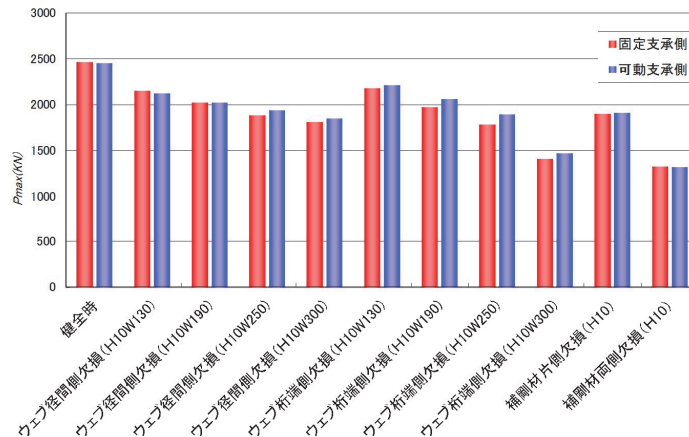


図-2.4.7 ソールプレートの形状の違いによる最大荷重

可動側と固定側の両ケースの違いは、健全時、ウェブ径間側部分欠損、補剛材片側欠損、補剛材両側欠損の各モデルで0~1%、ウェブ桁端側部分・全欠損で2~5%と、その差は最も大きいものでも5%程度であった。一方、耐荷力増加の割合については、ウェブ桁端側欠損 (H10W250) が最も大きくなった。ソールプレートの形状が長さ方向に異なっても、耐荷力に大きく差が生じなかったのは、支点部の拘束状態に大きな違いが生じなかったことが要因と考えられる。

#### 2.4.5 ウェブおよび補剛材の欠損幅の影響

各欠損ケースの最大荷重を、健全時（ベースモデル）の最大荷重で除した耐荷力低下率とウェブ欠損幅の関係を示したものが、図-2.4.8(a)であり、補剛材欠損位置との関係で示したものが図-2.4.8(b)である。欠損高は10mm、固定側ソールプレートを有しているモデルを対象とした。

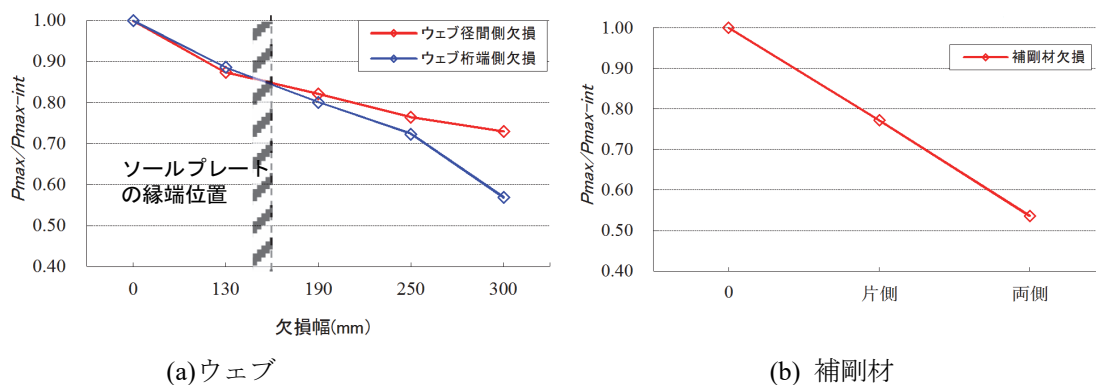


図-2.4.8 欠損範囲と最大荷重の関係

対象とした固定側ソールプレートで、欠損高 10mm のケースでは、すべてウェブおよび支点上補剛材の下端部が降伏、および局部座屈を起し、最大荷重に達した。また、ウェブの欠損範囲が増加しても、桁端側ウェブが全欠損しなければその耐荷力は健全時（ベースモデル）に対して70%程度にとどまっていた。桁端側のウェブの端部が少しでも残っていることが耐荷力に大きく寄与していることが読み取れる。

図-2.4.9は、ウェブおよび補剛材の欠損断面積による耐荷力低下率を示した図である。「ウェブ桁端側全欠損ケース」を除いて、欠損断面積と耐荷力がほぼ比例関係にあることが読み取れる。

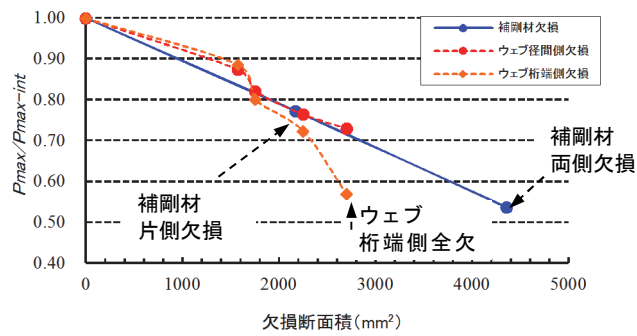


図-2.4.9 欠損断面積増加と耐荷力の関係

この欠損幅と耐荷力の関係について、最大荷重時の応力状態とあわせて考察するため、ウェブ径間側部分欠損ケース、ウェブ桁端側部分欠損・全欠損ケース、補剛材欠損ケースに分けて、表-2.4.5～表-2.4.7にそれぞれ、最大荷重時の応力コンター図と $P_{max}/P_{max-int}$ を示し、応力状態の傾向をまとめた。まず、降伏領域を中心とした応力状態および局部座屈の形状に焦点をあて、各ケースの崩壊を分析し、その後に最大荷重到達時の欠損幅と応力状態の関係から、その耐荷力特性について考察した。

#### (1) ウェブ径間側欠損

ウェブ径間側部分欠損ケースの崩壊は、桁端側ウェブと径間側ウェブの欠損部に隣接する支間側の部分の降伏で始まり、その領域が荷重の増加とともに徐々に拡大した。最大荷重後もさらに降伏領域は拡大するが、径間側ウェブと桁端側ウェブの降伏領域が連続化することはなかった。なお、最大荷重時から、ソールプレートに隣接する下フランジ部の支間部付近にも一部降伏が確認された。当然ながら、補剛材は降伏点がウェブより低いために、降伏している。最大荷重時における補剛材の応力コンター図を図-2.4.10に示す。

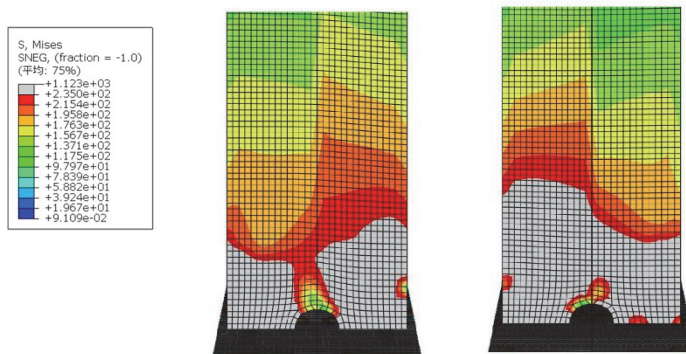


図-2.4.10 最大荷重時における補剛材の応力コンター図

表-2.4.5 ウェブ径間側の欠損幅の増加に伴う降伏領域の変化（欠損高：10mm）

欠損幅	欠損なし	欠損幅130mm (ソールプレート端より内側)	欠損幅190mm (ソールプレート端より外側)	欠損幅250mm (ソールプレート端より外側)
応力コンター図				
耐荷力低下率	1	0.87	0.82	0.76
$\frac{P_{max}}{P_{max-int}}$ 欠損幅(mm)	0	130	190	250
最大荷重時の状態	ウェブ	径間側と桁端側とで結合状態		
	径間側	降伏領域が径間側と桁端側で2箇所に分かれる		
	桁端側	大 → 小 欠損幅が大きくなるにつれ降伏領域が狭くなる		
	下フランジ	小 ← 大 欠損幅が大きくなるにつれ応力(赤い部分)範囲が広がる		

※Mises 相当応力コンター図（変形倍率 5 倍）

欠損部

局部座屈のモードは、最大荷重付近からウェブおよび補剛材にわずかな局部座屈がみられ、降伏領域の増加とともに徐々にその局部座屈の発生範囲が拡大した。欠損範囲の違いにより局部座屈が発生する起点が異なっており、欠損範囲がソールプレートの内側の場合には桁端部から発生していたのに対し、欠損範囲がソールプレートの外側まで大きくなった場合は、支点部から発生していた。

表-2.4.5 に示すように最大荷重時における各欠損ケースを比較した場合において、局部座屈が発生した位置は径間側ウェブよりもソールプレートで支持している桁端側ウェブに顕著にみられた。欠損範囲の拡大に伴い最大荷重が低下し、径間側ウェブの降伏領域が減少していた。一方、下フランジにおける赤い応力レンジ（降伏まで至らないが大きな軸圧縮応力が作用している範囲）の領域がソールプレートより内側の欠損ケースでは、ソールプレートの範囲内に留まっているのに対して、ソールプレートより外側の欠損ケースでは、ソールプレートより外側の広範囲に増大し、下フランジを介して伝達される力が大きくなっていることが確認された。このことから、ウェブのせん断耐荷力が低下するが、下フランジに荷重が分配されるため、桁端部としての極端な耐荷力低下を起さなかったと考えられる。なお、欠損幅がソールプレートの範囲を少し超えた場合には、桁端側ウェブの降伏領域が増大する傾向が見られたものの、より欠損幅が大きくなる場合には、降伏領域が減少し、耐荷力も低下していた。

欠損範囲がソールプレートの内側または外側にあるかにより、局部座屈が発生する位置および下フランジへの応力影響範囲が大きく変化していた。このことから、ソールプレートの荷重伝達への寄与が大きいことが確認できた。

## (2) ウェブ桁端側欠損

ウェブ桁端側部分欠損ケースの崩壊は、径間側ウェブと桁端側ウェブの欠損部に隣接した部分に降伏領域が発生し、その領域が荷重の増大とともに広がり、最大荷重に至る段階で、図-2.4.5

および図-2.4.6 に示すような急激な荷重低下が確認された。最大荷重時には、ウェブ端部の欠損部からわずかな変形が発生し、降伏領域の増加に従い、補剛材および径間側ウェブにも局部座屈が発生した。欠損範囲がソールプレートの内側の場合には、ソールプレートを介して応力が伝達され、桁端側ウェブが降伏したのに対し、欠損範囲がソールプレートの外側の場合には、ウェブの端部から降伏が生じていた。ウェブ桁端側全欠損ケースは、径間側ウェブのみ降伏し、序々に降伏領域が拡大した。

表-2.4.6に示すように、各欠損ケースの最大荷重時を比較した場合に、局部座屈は、径間側ウェブよりも欠損している桁端側ウェブに顕著に生じ、ウェブ径間側部分欠損ケースよりも補剛材および下フランジの変形が顕著に見られた。補剛材は、ウェブ径間側部分欠損ケースよりも、ウェブ桁端側部分欠損ケースの方が耐荷力への寄与が大きいことがわかる。下フランジの変形が大きいのは、面外剛性の小さいフランジ板の自由突出部に荷重がかかる状態が形成され、片持ち梁の先端に荷重がかかるような構造になるため、変形が大きくなるものと考えられる。

表-2.4.6 ウェブ桁端側の欠損幅の増加に伴う降伏領域の変化一覧（欠損高：10mm）

欠損幅	欠損なし	欠損幅130mm (ソールプレート端より内側)	欠損幅190mm (ソールプレート端より外側)	欠損幅250mm (ソールプレート端より外側)	欠損幅300mm (全欠損)	
応力コンター図						
耐荷力低下 $P_{max}/P_{max-int}$	1	0.89	0.8	0.72	0.57	
欠損幅(mm)	0	130	190	250	300	
最大荷重状態の	ウェブ	径間側と桁端側とで結合状態		降伏領域が径間側と桁端側で2箇所に分かれる		
	径間側	大	小	降伏領域に大きな差が生じない		
	桁端側	大				小
	下フランジ	小	大			全欠損した場合、応力伝達がない

※Mises 相当応力コンター図（変形倍率5倍）

欠損部

なお、ウェブ桁端側全欠損の場合は、耐荷力の低下とともに、径間側ウェブおよび補剛材に大きな局部座屈が発生しており、桁端部ウェブの耐荷力に対する寄与が大きいことを示した。

欠損範囲の拡大に伴い最大荷重が低下し、桁端側ウェブの降伏領域が減少した。降伏領域の減少とともに、桁端側ウェブの下フランジのソールプレートおよびソールプレート外側の径間側の下フランジに赤い応力の部分が増加した。ウェブの耐荷力低下とともに、下フランジに荷重分配が行われているものと考えられる。また、欠損範囲が小さいケースでは、下フランジにおける赤い応力の範囲は、ウェブ径間側部分欠損と比較した場合よりも、ウェブ桁端側部分欠損の方が広がっている。

欠損範囲がソールプレートの内側、外側にあるかにより、下フランジへの応力影響範囲が大きく変化していることから、ウェブ径間側部分欠損と同様、ソールプレートが耐荷力に寄与していると考えられる。

### (3) 補剛材欠損

補剛材欠損ケースは、支点部に近い径間側および桁端側ウェブから降伏が発生し、その領域が拡大した。最大荷重後、降伏領域が桁端部まで拡大した。最大荷重後は、図-2.4.5、図-2.4.6に示すように急激な荷重低下が確認された。

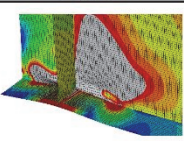
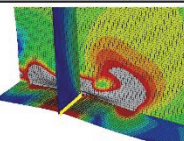
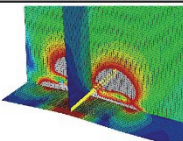


局部座屈のモードは、補剛材片側欠損ではウェブ欠損と類似しており、下端部で局部座屈が生じていた。一方、補剛材両側欠損の場合、下端部だけでなく、桁高の高い位置まで座屈が発生していた。


表-2.4.7に示すように、最大荷重時における各欠損ケースを比較した場合において、欠損範囲の拡大に伴い、最大荷重が低下し、ウェブ（径間側および桁端側）の降伏領域が狭くなっていた。

一方、下フランジにおける赤い応力の範囲には大きな変化が見られなかった。これは補剛材欠損分の支持する面積の減少がそのまま最大荷重の低下と降伏領域の減少に繋がったと考える。

両側欠損では、補剛材が欠損した部分には応力が伝達されず、また、欠損した部分に局部座屈が生じている。

表-2.4.7 補剛材の欠損範囲の増加に伴う降伏領域の変化一覧（欠損高：10mm）

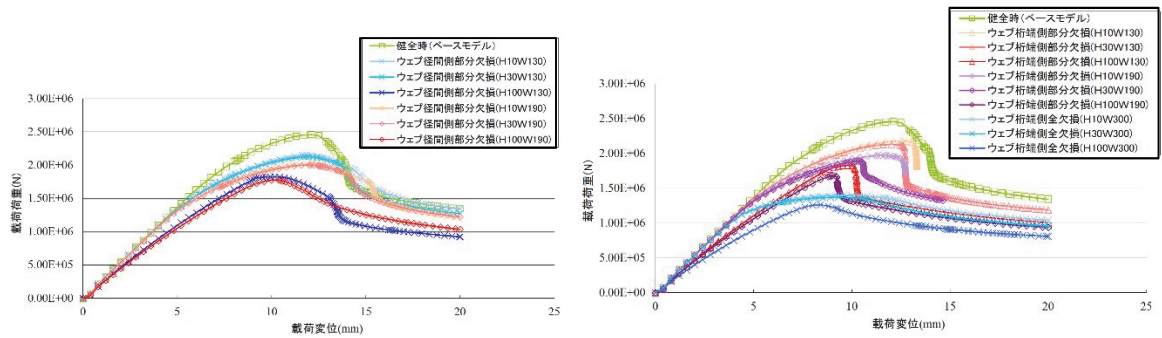
欠損幅		欠損なし	片側欠損	両側欠損
応力コンター図				
耐 荷 力 低 下 率	$P_{max}/P_{max-int}$	1	0.77	0.54
	欠損幅(mm)	0	片側	両側
最 大 荷 重 時 の 状 態	ウェブ	大  小 欠損範囲が大きくなるにつれ降伏領域が狭くなる		
	下フランジ	 降伏領域に大きな差が生じない		

※Mises 相当応力コンター図（変形倍率 5 倍） 欠損部 

### 2.4.6 ウェブおよび補剛材の欠損高の影響

固定側ソールプレートで、ウェブ径間側部分欠損の2ケース、ウェブ桁端側部分欠損の3 ケース、ウェブ桁端側全欠損の1ケース、補剛材片側欠損の1ケース、補剛材両側欠損の1ケースの計8ケースに対して、高さを10mm、30mm、100mmとしてパラメトリック解析を行い、欠損高の耐力への影響を検討した。ウェブの欠損位置を、径間側ウェブ桁端側ウェブに分けた場合の荷重-変位曲線を図-2.4.11に、補剛材欠損ケースの荷重-変位曲線を図-2.4.12に示す。

図-2.4.12より、ウェブ欠損ケースにおける荷重-変位曲線の傾向として、欠損高が増加するにつれて載荷変位が小さい段階で最大荷重に達し、それに伴い最大荷重が低下している。



(a)ベースモデル+ウェブ径間側部分欠損 (b)ベースモデル+ウェブ桁端側部分欠損・全欠損

図-2.4.11 荷重-変位曲線（ウェブ欠損時）

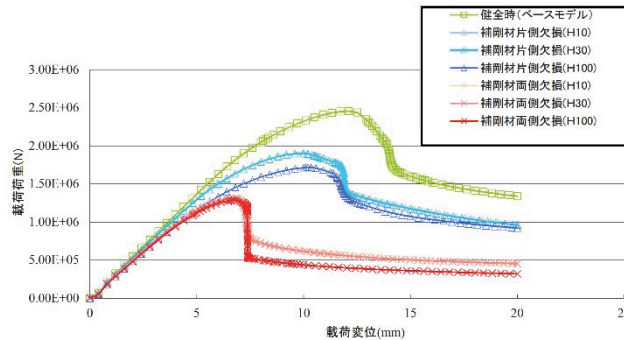


図-2.4.12 荷重-変位曲線（補剛材欠損時）

ウェブ桁端側全欠損以外では、ウェブ径間側部分欠損よりウェブ桁端側部分欠損の方が、最大荷重に達した後、急激な荷重低下をしている。ただし、ウェブ桁端側全欠損のケースでは急激な荷重低下は見られない。この結果について、各欠損ケースの健全時（ベースモデル）に対する耐荷力低下率で表し、低下率と欠損高の関係を示したものが図-2.4.13である。ウェブ桁端側全欠損と補剛材両側欠損ケースは、欠損高10mmの段階で約50%に大きく低下するが、30mm、100mmと欠損高が大きく変化しても、低下率の変化は小さい。一方、その他の欠損しているケースは、10mmから30mmの低下率はほぼ横ばいで、ほとんど変化しないが、100mmで低下が見られた。しかしながら、この場合、低下率は欠損高が100mmでも低下率は、健全モデルに対して70%程度にとどまっている。

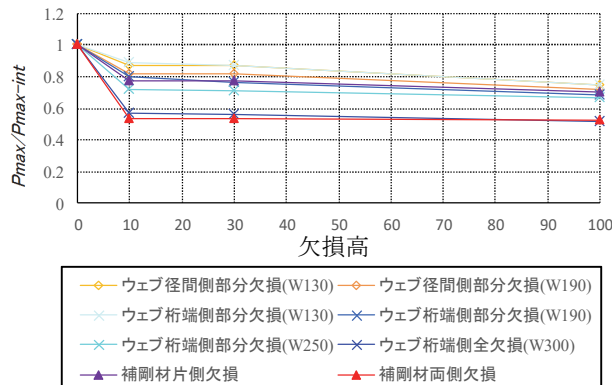


図-2.4.13 欠損高の違いによる最大荷重の低下率



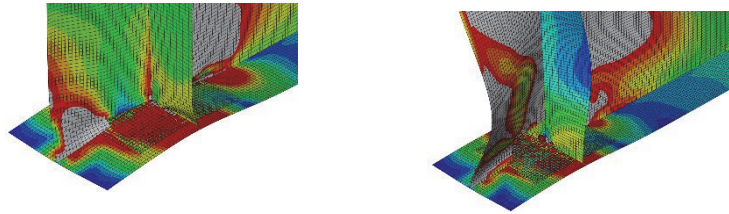


図-2.4.14 欠損高の違いによる局部座屈のモード  
※Mises 相当応力コンター図 (変形倍率5倍)

ウェブ桁端側全欠損および補剛材両側欠損以外の場合では、応力コンター図においても欠損高10mm, 30mm と100mm との間に最大荷重に違いが確認された。

図-2.4.14 に示すように、欠損高10mmおよび30mmの欠損高の場合は、下フランジより約100mm以下の位置において座屈の頂点部が見られ、欠損高100mmの欠損の場合は、座屈頂点部が下フランジより約300mm~400mmの位置に見られた。図-2.4.15 (右) にウェブ桁端側全欠損ケース、図-2.4.15 (右) にウェブ桁端側部分欠損ケースの応力コンター図を示す

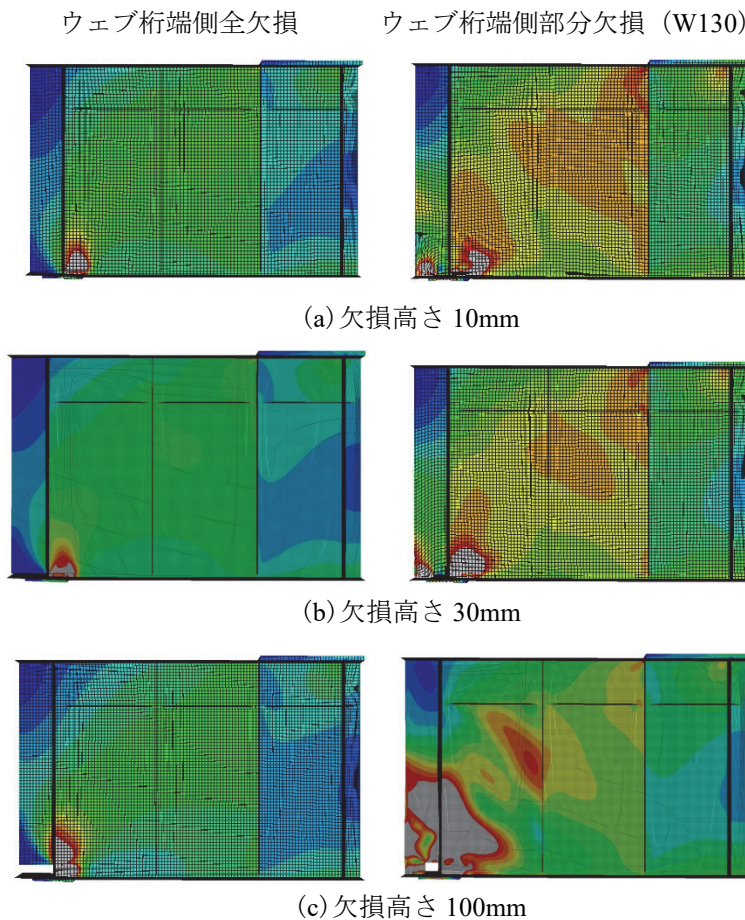


図-2.4.16 欠損高の違いによるMises 相当応力コンター図 (最大荷重時)

ウェブ桁端側全欠損ケースでは、100mmの欠損高の場合でも欠損高10mm、30mmと同様の局部座屈を現している。これらのケースは、支持する部材が欠損しているため、2辺支持状態の崩壊モードではなく、支持している箇所が集中している状態になっていると考える。これらの現象の違いは、最大荷重時の降伏領域の範囲においても現れている。なお、補剛材両側欠損ケースもウェブ桁端側全欠損ケースと同様に欠損高により異なっていた。

一方、ウェブ桁端側部分欠損ケースでは、欠損高が低い場合（30mmまで）には3辺支持状態による局部座屈にとどまっているのに対して、欠損高100mmの場合、2辺支持状態によるウェブ全体の崩壊モードとなっており、欠損高が低いケースとは別の崩壊モードが生じている。

以上より、欠損高に関わらず、崩壊モードが大きく変化しないウェブ桁端側全欠損ケースおよび補剛材両側欠損ケースと、欠損高10mm～30mmと欠損高が100mmとでは異なる崩壊モードを示す2つの崩壊モードの存在を示した。

## 2.5 まとめ

本章では、桁端部をモデル化したFEM解析を実施した。荷重条件、初期たわみ、スカーラップ、支点部拘束をパラメータにしてモデルの特性を把握し、既往研究の実験や解析結果を比較することで本解析モデルの有効性を示した。また、健全時モデルを用いて異種材質の影響を確認した。これらの検討を踏まえて、桁端下端部について、統計的に多いタイプの腐食損傷に着目し、それを反映させたパラメトリック解析を実施した。本章の検討で得られた結果を以下にまとめる。

### 1) 健全モデルの特性の把握

- ・荷重条件の違いでは、支点直上荷重よりも中支間中央荷重の方が約1.3倍程度、耐荷力増加した。
- ・健全モデルの特性において、支間中央荷重の条件では初期たわみの影響および回転拘束による耐荷力に与える影響は小さいことを示した。さらに、スカーラップがない場合には、最大8%程度、耐荷力が増加することを示した。
- ・支点直上荷重において、本解析モデルと既往の実験結果の変形モードが比較的近い形状であった。また、本解析モデルの結果と構造諸元がほぼ同じ条件で解析した結果を比較し、最大荷重の差が3%程度に留まっていたことを確認し、本解析モデルが有効であると結論づけた。

### 2) 異種材質による影響

- ・異種材質の影響を検討するために、ウェブSM490Y 補剛材SS400、全て補剛材SS400、全てSM490Yの解析を行った。各材質のケースによる最大荷重の差の関係と各材質の降伏点の差と有効断面積を掛け合わせた荷重の差の関係が近かった。この結果より、材質の強度が耐荷力へ影響を及ぼしていることを確認した。

### 3) 腐食による影響（パラメータ：欠損量）

- ・欠損位置では、ウェブ径間側部分欠損、補剛材片側欠損、ウェブ桁端側部分欠損、ウェブ桁端側全欠損、補剛材両側欠損の順に最大荷重が低下していた。ウェブ桁端側全欠損ケースを除いて、欠損断面積の減少率に対して耐荷力の低下率はほぼ比例関係にあった。
- ・ウェブ欠損幅の増大に伴い、最大荷重が低下していた。径間側ウェブと桁端側ウェブで同じ欠損幅で耐荷力を比較した場合に、ソールプレート内側までの欠損幅では耐荷力に大きな差がなかったが、欠損幅がソールプレート外側まで及んだ場合には、ウェブ径間側部分欠損よりもウェブ桁

端側部分欠損の耐荷力の低下率が増加した。欠損幅が300mmになった場合には、ウェブ径間側部分欠損の健全時に対する最大荷重の低下率に対して、ウェブ桁端側全欠損の健全時に対する最大荷重の低下率との差は20%近くになり、低下率の差がより顕著になった。補剛材は、欠損断面積の減少率に対して耐荷力の低下率はほぼ比例関係にあった。

・補剛材が両側欠損したケースや桁端側ウェブが全欠損したケースでは、欠損高に関わらず健全なモデルに対して最大荷重が約5割～6割に低下する。ウェブが部分欠損したケースや補剛材片側欠損したケースでは、欠損高10mm, 30mmと100mmで崩壊モードおよび耐荷力に違いが見られた。欠損高10mm, 30mmでは、下フランジよりおおよそ100mmの高さの位置に座屈の腹が発生し変形の範囲が下端部に限定されており、健全なモデルの最大荷重に対して約1割～3割程度に低下していたのに対して、欠損高100mmでは、下フランジよりおおよそ300mm～400mmの高さの位置に座屈の腹が発生し変形の範囲が桁端部の広く、健全なモデルの最大荷重に対して約2.5割～3.5割程度に低下していた。

#### 4) 腐食による影響（構造パラメータ：ソールプレート）

・ソールプレートの形状の違いについて、最大荷重の差は大きい場合でも5%程度にとどまった。  
・ソールプレートを厚く、厚くおよび長くすることにより、下フランジの拘束効果を上げて解析した結果、いずれのケースでも最大荷重が増加した。特に支点上補剛材が欠損した時による影響が大きく、両側欠損したケースでは、最大荷重が20%程度増加した。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2012.3
- 2) 全日本建設技術協会：建設省制定 土木構造物標準設計，1994.
- 3) Dassult Systems Simulia：ABAQUS 6.7 User's Manual，2008.
- 4) 中井博，総田完治，阪野雅則：プレート・ガーター端支点上補剛材の耐荷力の実験と解析，構造工学論文集 Vol.32A,pp.399-410,1986.3
- 5) Vo Tanh Hung, 永澤洋, 佐々木栄一, 市川篤司, 名取暢：腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷実験および解析，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.141-151，2002.7
- 6) 劉翠平, 宮下剛, 長井正嗣:端部パネルの局部腐食をもつI形断桁のせん断耐力に関する考察，構造工学論文集 Vol.57A. pp.715-723，2011.3
- 7) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Kihira, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada: Analytical demonstrations to assess residual bearing capacities of steel plate girder ends with stiffeners damaged by corrosion, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.10, No.1, pp.69-79, 2012.
- 8) 山口栄輝, 赤木利彰：腐食した鋼I桁の支点部耐力に関する考察，構造工学論文集 Vol.59A, pp.80-90, 2013.3
- 9) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada: Finite Element Investigation of Shear Capacity of Locally Corroded End Panel of Steel Plate Girder, *International Journal of Steel Structures*, Vol.13, No.4, pp.623-633, 2013.
- 10) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada: Experimental and Numerical Evaluation of Bearing Capacity of Steel Plate Girder Affected by End Panel Corrosion, *International*

*Journal of Steel Structures*, Vol.14, No.3, pp.659-676, 2014, ERRATUM Vol. 15, No.1, pp.245, 2015.

- 11) 玉越隆史, 中洲啓太, 石尾真理, 武田達也, 水津紀陽: 鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究: 国土技術政策総合研究所資料 No. 294, 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 2006.
- 12) (公社) 日本道路協会: 鋼道路橋防食便覧, 2014.3
- 13) (財) 首都高速道路厚生会, 鋼構造物標準図集, 1994.2
- 14) 首都高速道路公団: 首都高速道路, 橋梁構造物設計要領Ⅱ-33-34, 2003.5
- 15) 阪神高速道路公団: 鋼構造物標準図集, 1991.4
- 16) 濱田哲, 佐々木栄一, 粕裕幸, 町田恵津子, 紀平寛: 局部的腐食を模擬した鋼桁端部の圧縮強度に関する実験, 鋼構造年次論文報告集 第17巻, pp.731-738, 2009.11
- 17) 東海構造研究グループ: 平成24年度活動報告集 第6回定期研究会 WG成果報告, 2012.

### 第3章 腐食した桁端下端部の耐荷力特性を踏まえた 崩壊プロセスからの分類とその分析

#### 3.1 まえがき

腐食によって桁端下端部が断面欠損した場合の補修の必要性の判断や対策工法の提案には、桁端部の最大荷重の低下率や最大荷重時の変形性状（以後、崩壊モードと略す）を把握するだけでなく、設計耐力との関係を把握することや荷重が載荷され最大荷重を超えて荷重低下に至るまでの過程（以後、崩壊プロセスと略す）を把握することが重要である。

一方、腐食した桁端下端部を有する桁端部の耐荷力特性の解明に向けて、腐食した桁端下端部を有する桁端部の耐荷力に関する研究成果は蓄積されている。また、崩壊モードが示されている研究成果もある。例えば、濱田ら<sup>1)</sup>は、支点部近傍の損傷を想定して支点直上載荷実験を実施し、桁端側ウェブが面外変形し支点上補剛材に局部座屈が発生していることを確認している。また、Khurram<sup>2)</sup>らは、支間中央載荷<sup>2)</sup>および支点直上載荷<sup>3)</sup>それぞれの条件で、支点部近傍で様々な損傷を想定し、欠損位置、板厚、および欠損高を対象にパラメトリック解析を実施し、各損傷ケースの崩壊モードに対して4つの損傷モード（Normal Buckling, Local Buckling, Crushing, Crippling）を確認している。支点直上載荷における解析結果では、残存板厚が多い場合はNormal Bucklingであり、残存板厚が少ない場合はCripplingであり、その間の板厚はLocal Bucklingという損傷モードであったと述べられている。一方、支間中央載荷でも、支点直上載荷と似たような損傷モードであり、さらに、板厚が薄く欠損高が低い場合は、Crushingという損傷モードであったと述べられている。

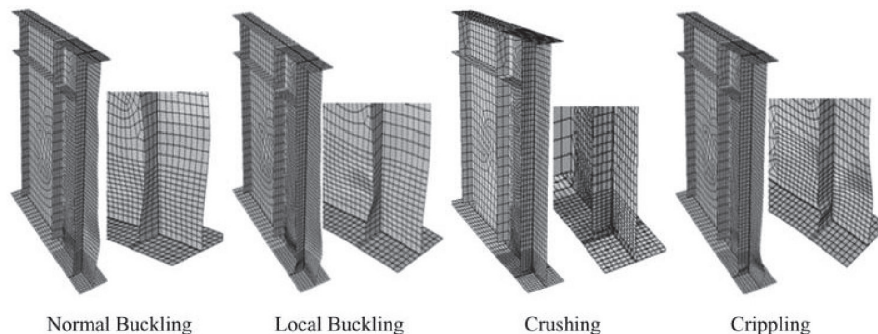


図-3.1.1 様々な崩壊モード<sup>2)</sup>

終局時に至る前に座屈が発生し、座屈発生の順序およびその拘束条件の変化が支点部の崩壊モードを形成していると考えている。そのため、崩壊モードに至るための崩壊プロセスを把握する必要がある。また、道路橋示方書の規定では、柱として設計しているために、腐食した際の支点部の崩壊モードと道路橋示方書の考え方を比較できるように整理する必要がある。

本章では、第2章で実施したパラメトリック解析の結果を整理し、第2章で示した腐食した桁端部の耐荷力特性を明確にするために、崩壊モードと崩壊プロセスとを分析し、崩壊タイプとして分類する。さらに、非線形開始点、最大荷重時、最大荷重後に着目し、損傷状態の違いが崩壊タイプに与える影響を分析し、損傷した桁端部の崩壊メカニズムを検討する。

## 3.2 崩壊モードの分類に用いたパラメトリック解析

### 3.2.1 解析モデル

#### (1) 対象橋梁

2.2.1 で述べた対象橋梁「平成 6 年版の標準設計から、主要幹線道路に対する単純プレートガーダー橋（設計番号 0240）」<sup>4)</sup> を検討対象とした。対象橋梁の支間長は、一般的な橋梁支間である 30m を設定している。

#### (2) 解析モデル

解析には、2.2 で述べた汎用有限要素解析コード ABAQUS<sup>5)</sup> による弾塑性有限変位解析である。軸方向圧縮応力および曲げ圧縮応力を受ける実際の桁端部の载荷状態に近くなるように、端対傾構から隣接する対傾構間を支間とする単純桁としてモデル化した。

2.3.1 の結果より、支間中央载荷では、初期たわみの有無による最大荷重の差が小さく、初期たわみの影響が小さかったことから、その影響は小さいと判断し、本検討では初期たわみは考慮していない。また、残留応力は、2.2.1 (3) で述べた理由により、残留応力は考慮していない。

#### (3) 支持条件と载荷方法

支持条件、载荷方法および支承タイプは、2.2.1 (4) で示した通りである。対傾構間隔を支間とした桁の中央の断面に対称条件を与えた。载荷は、垂直補剛材の直上に载荷板(板厚 35mm)を介して、フランジ幅に線荷重を与えた。

支承タイプは、支持する範囲が狭く、欠損の影響が大きく現れる線支承を対象とし、支点上補剛材の直下に、ソールプレート幅にわたって回転自由の境界条件を与えた。

#### (4) 有限要素

要素の設定、要素の大きさ、および要素分割は2.2.1 (5) で示した通り、ソールプレートと载荷板はソリッド要素とし、それ以外はすべてシェル要素でモデル化した。ソリッド要素としたソールプレートと载荷板は、弾性体とした。要素の大きさは、10mm×10mm の正方形を基本とし、要素分割は、支点上補剛材は幅方向に14 分割、高さ方向に175 分割、ウェブパネル（支点上補剛材が一番近いパネル）は幅方向に83 分割、高さ方向に176 分割、上下フランジは長さ方向に280 分割、幅方向に35 分割とした。損傷箇所は、減厚ではなく断面欠損とし、その欠損部では要素が存在しない。

#### (5) 材料構成則

本解析に用いた応力-ひずみ関係は、支点部の断面欠損位置による影響を相対比較することであるから、2.2.1 (6) で示した通り、バイリニアの応力ひずみ関係とし、降伏関数には von Mises の降伏関数を用いた。

### 3.2.2 解析ケース

解析ケースは、2.2 で実施した解析のうち、表-3.2.1 に示すように、健全時モデルと支点上補剛材またはウェブの欠損位置に着目した損傷時のモデルを設けた。これらの欠損に対して、欠損幅、欠損高、スカーラップおよびソールプレートをパラメータとした解析ケースを 40 ケース設定した。

健全時のケースの名称は、健全（欠損なし）、支間中央载荷、スカーラップありのモデルを「健

全時（ベースモデル）」とし、「健全時（ベースモデル）」のスカールアップがない場合を「健全時（スカールアップなし）」とし、健全時（ベースモデル）の載荷条件を支点直上載荷とした場合を「健全時（直上載荷）」とする。

損傷時のケースの名称は、欠損位置、欠損高および欠損幅によるパラメータに由来している。ケース名の末尾の（ ）内の文字は、欠損高および欠損幅を示し、欠損高は Hx (x: 欠損高(mm))、欠損幅は Wy (y: 欠損幅(mm)) で表している。なお、表中の欠損幅と欠損高は、支点上補剛材とウェブと下フランジが交差する点からの範囲および下フランジ上面からの範囲をそれぞれ示す。

表-3.2.1 解析ケースの内訳およびその名称とパラメータ

ケース名		パラメータ	荷重 載荷 位置	欠損高 x(mm)	欠損幅 y(mm)	スカ ラップ	ソール プレート
健全時	健全時（ベースモデル）		支間 中央	0	0	有	固定
	健全時(スカールアップなし)		〃	〃	0	〃	可動
	健全時(スカールアップなし)		〃	0	0	無	固定
	健全時（直上載荷）		直上	0	0	有	固定
損傷時	補剛材片側欠損 (Hx)		支間 中央	10, 30, 100	155	有	固定
				10	〃	〃	可動
	補剛材両側欠損 (Hx)		〃	10, 30, 100	155	〃	固定
				10	〃	〃	可動
	ウェブ径間側部分欠損 (HxWy)	〃	〃	10, 30, 100	130	〃	固定
					10	〃	〃
		〃	〃	10, 30, 100	190	〃	固定
					10	〃	〃
		〃	〃	10	250	〃	固定
					〃	〃	〃
	〃	〃	10	300	〃	固定	
				〃	〃	〃	可動
	ウェブ桁端側部分欠損 (HxWy)	〃	〃	10, 30, 100	130	〃	固定
					10	〃	〃
		〃	〃	10, 30, 100	190	〃	固定
					10	〃	〃
〃	〃	10, 30, 100	250	〃	固定		
			10	〃	〃	可動	
ウェブ桁端側全欠損 (Hx)	〃	〃	10, 30, 100	300	〃	固定	
				10	〃	〃	可動

欠損位置は、図-3.2.1に示すように、健全なモデル（欠損なし）と5つの異なる欠損モデルを設定した。これらの欠損位置は、腐食した桁端部の傾向を整理している文献6を参考にした。支点上補剛材の欠損幅は、部材の全幅(155mm)とした。ウェブの欠損幅は、固定側ソールプレート長さ(330mm)および可動ソールプレート長さ(440mm)からそれぞれ±30mmの欠損ケースと桁端側ウェブが全欠損した場合に該当する300mmを対象とした。文献7の解析結果より、有効幅(12 $t_w$ =108mm)以下のウェブ欠損ケースは、最大荷重がほとんど低下していないことから、本解析では有効幅以下のウェブ欠損幅のケースは設定していない。

ソールプレートの長さは、固定支承のソールプレート長さ(330mm)を基本とした。ただし、最大荷重や桁端下端部に発生する局部座屈や塑性化領域の範囲に与える影響を確認するために、

欠損高 10mm モデルに対してのみ可動支承側のソールプレート長さ (440mm) の解析も行った。

欠損高は 10mm, 30mm, 100mm とする 3 タイプを設定した。欠損高 30mm はスカーラップ (R=35 の高さ) の影響を確認するためのものであり、欠損高 100mm は著者らが現場で確認した中で最も高い損傷高を参考に設定した。

支点上補剛材のスカーラップは、平成 6 年版の標準設計<sup>4)</sup> の図面通りに設けた。スカーラップの有無による影響を確認するため、健全時のケースのみスカーラップがないモデルを設定している。

下フランジの損傷は、文献 7 の解析結果より、下フランジを減厚しても最大荷重の低下率が小さかったことから、下フランジの欠損は考慮していない。

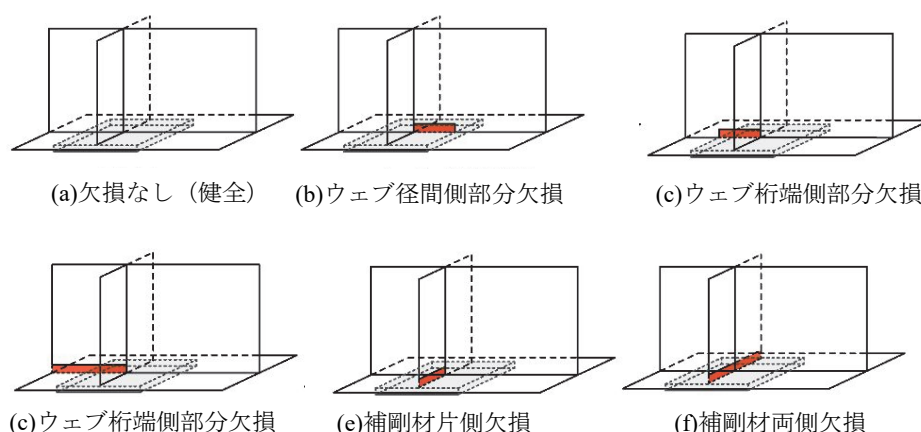


図-3.2.1 欠損なしと欠損位置のパターンの模式図

### 3.3 崩壊タイプの分類

#### 3.3.1 崩壊タイプの分類方法および分類結果

崩壊メカニズムを把握するために、解析結果を崩壊プロセス (荷重が載荷され最大荷重を超えて荷重低下に至るまでの過程) および崩壊モード (最大荷重時の変形状) の視点から分析し、崩壊タイプを分類した。その際、次の3点「線形性が失われる点 (非線形開始点)」、「座屈が発生する点 (面外変形が大きく進展する点)」および「支点部から拡大する塑性化領域がウェブ端部まで連続する点」のイベントとの関連にも着目した。イベントの種類とその説明を表-3.3.1に示す。

なお、柱の全体座屈の「柱」は、道路橋示方書で決められている荷重集中点の補剛材として設計で考えられるウェブおよび支点上補剛材から成る十字柱とし、「全体座屈」は、支点上補剛材取付部 (ウェブと支点上補剛材の交差部) の変形に着目して判断した。また、この非線形開始点は、荷重-変位曲線において、始点からの傾きをステップ毎に確認し、前ステップから傾きが大きく変わる (荷重が大きく増加する) ステップにおける載荷荷重とした。

解析結果の分析方法は、図-3.3.1に示すように荷重-変位曲線にイベントをプロットして解析ケース毎の崩壊プロセスを把握し、表-3.3.3に示すように、最大荷重時の座屈の発生位置や変位図、塑性化領域の広がり方を整理して崩壊モードを把握した。これらの解析結果を整理し、図-3.3.2に示すように崩壊プロセスの違いを明らかにし、表-3.3.2および表-3.3.3に示すように6つの崩壊タイプに分類した。



表-3.3.1 本論文で対象としたイベントとその説明

イベント		説明	
非線形開始点		荷重-変位曲線において、初期勾配から勾配が変化する点	
座屈の発生	せん断座屈	径間側ウェブのパネルに発生するせん断座屈	<p>(a)塑性化領域の連続化</p>
	局部座屈	支点下端部の交差部（スカーラップ）から発生、または、パネルの端部から発生するウェブや支点上補剛材の板要素の局部的な座屈	
	局部座屈の連続化	ウェブ端部から発生する局部座屈が支点部付近まで進展し、支点下端部の座屈と連続化する状態	
	柱の全体座屈	ウェブおよび支点上補剛材の十字柱で発生した全体座屈	
塑性化領域の連続化		支点部から発生する塑性化領域とウェブ端部から発生する塑性化領域が桁端下部で連続化する状態	<p>(b)局部座屈の連続化</p>

分類にあたっては、崩壊モードが柱の全体座屈であるケースと局部座屈に留まっているケースに分類した。なお、崩壊モードが柱の全体座屈で境界条件が異なっている場合は、別のタイプとした。

崩壊タイプの名称は崩壊モードの支配要因のイベントおよびその境界条件（または、その発生位置）に由来している。タイプ名の末尾の（ ）内の文字は、崩壊モードの支配要因が柱の全体座屈の場合は境界条件を示し、局部座屈の場合は面外変形の最大位置を示している。

崩壊タイプは、欠損位置に依存し、さらに、ウェブのいずれかが部分欠損しているケースは欠損高にも依存していた。なお、ウェブの欠損幅、ソールプレートの形状、スカーラップの有無による崩壊タイプの違いは見られなかった。崩壊タイプ毎の特徴は、3.3.3(2)で説明する。

崩壊タイプ別にイベントをプロットした荷重-変位曲線を図-3.3.1に示す。図-3.3.1(a)~(f)の荷重-変位曲線は、それぞれのタイプの代表的なケースを「健全時（ベースモデル）」と比較して示す。イベント名の末尾は、局部座屈の腹の位置を示す。座屈の腹の位置による区分を図-3.3.2

表-3.3.2 崩壊タイプと解析ケース

タイプ	崩壊モード	欠損位置	解析ケース
1	柱の全体座屈 (一端固定-他端回転バネ支持)	欠損なし 図-3.2.1(a)	健全時(ベースモデル) 健全時(スカーラップなし)
2	局部座屈の連続化 (桁端側ウェブ下端部)	ウェブ径間側・ 桁端側部分欠損 図-3.2.1(b)(c)	ウェブ径間側部分欠損(H10Wy, H30Wy) ウェブ桁端側部分欠損(H10Wy, H30Wy)
3	柱の全体座屈 (両端固定支持)		ウェブ径間側部分欠損(H100Wy) ウェブ桁端側部分欠損(H100Wy)
4	柱の全体座屈 (両端ピン支持)	補剛材片側欠損 図-3.2.1(e)	補剛材片側欠損 (H10, H30, H100)
5	局部座屈(補剛材の下端部)	ウェブ桁端側全欠損 図-3.2.1(d)	ウェブ桁端側全欠損(H10, H30, H100)
6	柱の全体座屈 (一端固定-他端ピン支持)	補剛材両側欠損 図-3.2.1(f)	補剛材両側欠損(H10, H30, H100)

に示す。径間側ウェブの支点下端部に腹がある場合は $w\alpha$ 、桁端側ウェブの支点下端部に腹がある場合は $w\beta$ 、支点上補剛材の支点下端部に腹がある場合は $s\gamma$ とする。また、支点下端部より高い位置に腹がある場合では、径間側ウェブを $w\alpha$ 、桁端側ウェブを $w\beta$ 、支点上補剛材を $s\gamma$ とする。さらに、座屈の腹の高さを下フランジから100mm～600mm程度は「下」、600mm～1,100mm程度は「中」、1,100mm～1,800mm程度は「上」で示す。

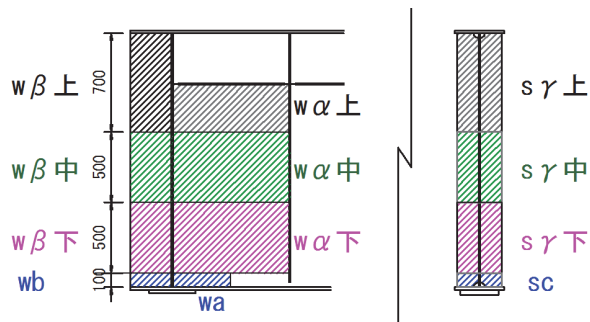


図-3.3.2 座屈の腹の位置による区分

表-3.3.3 にタイプ別の崩壊モード（最大荷重時の変形状）の整理を示す。表中の面外変位などの図については、代表ケースを載せている。(a)の座屈の腹の位置は、面外変位の頂点（最大変位）の位置とし、腹の位置の番号は、座屈発生順序を示している。せん断座屈は支点部での座屈と区別するために、緑色で塗りつぶしている。(b)のウェブの面外変形（交差部）は、支点上補剛材取付部（交差部）におけるウェブの面外変形を示す。(c)の変位図（平面図）は、腹の位置の面外変位を示し、下フランジの上面からの高さによって色で識別している。すなわち、下端部（0mm～100mm程度）は青色、下部（100mm～600mm程度）はピンク色、桁の中間部・上部（600mm～1,300mm程度）は緑色で表現している。また、(d)の最右欄の上段は、*mises* 応力コンター図を示し、下段の i)～xii)の値は各タイプの最大荷重の「健全時（ベースモデル）」に対する低下率を示す。

タイプ別の崩壊プロセスを図-3.3.4 に示す。最大荷重前は、荷重-変位曲線の非線形開始点（青枠で示す）、せん断座屈および柱の全体座屈の発生を A 段階、支点下端部に発生する局部座屈の発生を B 段階、桁端側ウェブから発生する局部座屈の発生を C 段階の 4 つの段階に着目している。各段階におけるイベントの名称の（ ）内の文字は、図-3.3.3 と同様に図-3.3.2 に示す通りである。

### 3.3.2 崩壊タイプの特徴

#### (1) タイプ1：柱の全体座屈（一端固定-他端回転バネ支持）

「健全時（ベースモデル）」の崩壊プロセスは、径間側ウェブにせん断座屈および桁端側ウェブに桁下からおおよそ1,200mmの位置を腹にした局部座屈、ウェブと支点上補剛材の支点下端部に局部座屈、桁端側ウェブに桁下からおおよそ300mmの位置を腹にした局部座屈の順に発生していた。その後、表-3.3.3 (a) [タイプ1] の挿図に示すように桁端下端部の塑性化領域が連続化し、支点下端部を回転バネ支持とする支点部における柱の全体座屈が発生し、最大荷重に到達した。

「健全時（スカーラップなし）」の崩壊プロセスは、径間側ウェブにせん断座屈、桁端側ウェブに局部座屈の順に発生していた。その後、表-3.3.1の挿図（a）に示すように支点上補剛材の下端部を腹とする局部座屈が発生し、支点部における柱が全体座屈し、最大荷重に到達した。

スカーラップの有無により、局部座屈が発生する位置は異なるものの、支点部における柱の全体座屈による崩壊モードは同じであった。

#### （2）タイプ2：局部座屈の連続化（桁端側ウェブ下端部）

崩壊プロセスは、表-3.3.3（a）[タイプ2]の挿図に示すように、径間側ウェブにせん断座屈、支点下端部に局部座屈、桁端側ウェブの下端部に局部座屈の順に発生していた。その後、桁端側ウェブの下端部から発生した局部座屈の変形が支点部付近まで進展することで、表-3.3.1の挿図

（b）で示すように桁端側ウェブの局部座屈が連続化し、最大荷重に到達した。このタイプの変形は桁端下端部に集中していることが特徴である。

#### （3）タイプ3：柱の全体座屈（両端固定支持）

崩壊プロセスは、表-3.3.3（a）[タイプ3]の挿図に示すように、径間側ウェブにせん断座屈が発生し、桁端側ウェブの端部に桁高半分の位置を腹にして局部座屈が発生し、その変形が支点部まで進展した。その後、支点上補剛材に局部座屈が発生し、支点の上下端部を固定支持とする支点部における柱の全体座屈が発生し、最大荷重に到達した。支点下端部に局部座屈が発生しておらず、下端部を固定支持とする柱の全体座屈とした。

#### （4）タイプ4：柱の全体座屈（両端ピン支持）

H10、H30のケースの崩壊プロセスは、表-3.3.3（a）[タイプ4]の挿図に示すように、最初に、支点部において、上下端部をピン支持とする支点部における柱の全体座屈が発生し、支点下端部のウェブに局部座屈、桁端側ウェブの桁高半分の位置を腹にした局部座屈の順に発生していた。その後、表-3.3.1の挿図（a）に示すように、桁端下端部の塑性化領域が連続化し、支点上補剛材の下端部に局部座屈が発生し、柱の全体座屈の変形が進展し、最大荷重に到達した。

H100のケースは、H10、H30とほぼ同様に、最初に、支点部において、上下端部をピン支持とする支点部における柱の全体座屈が発生し、最大荷重時には、その変形が進展していた。このケースは、H10、H30のケースと比べて支点部における柱の全体座屈の変形量が大きく、ねじり変形を伴っていた。

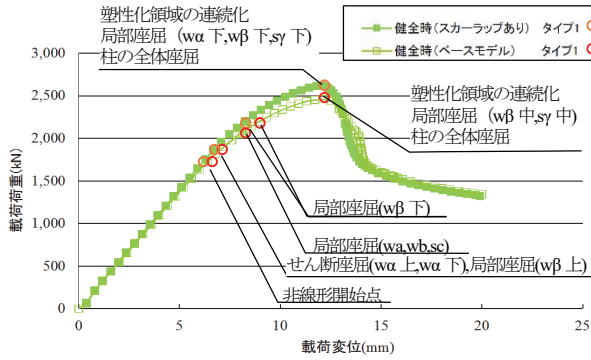
最大荷重前での崩壊プロセスにおいて、H10、H30のケースとH100のケースで局部座屈が発生する位置が異なるものの、支点部における柱の全体座屈による崩壊モードは同じであった。

#### （5）タイプ5：局部座屈（補剛材の下端部）

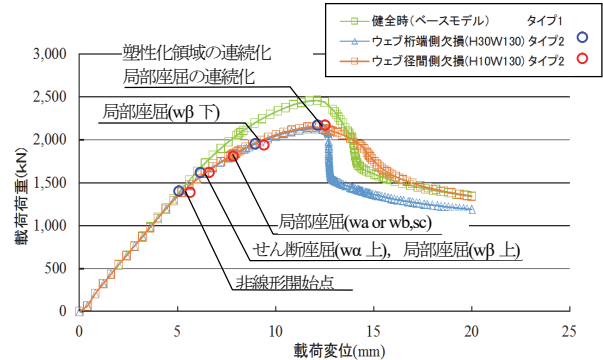
崩壊プロセスは、表-3.3.3（a）[タイプ5]の挿図に示すように、径間側ウェブの下端部に局部座屈、支点上補剛材の下端部に局部座屈の順に発生し、最大荷重に到達した。最大荷重時の塑性化領域はソールプレート長さ程度まで拡大していた。H100のケースは、H10、H30のケースに比べて、荷重-変位曲線の初期勾配が緩く、非線形開始点後に、載荷変位量が増大せず、径間側ウェブおよび支点上補剛材に局部座屈が発生していた。

(6) タイプ6：柱の全体座屈（一端固定-他端ピン支持）

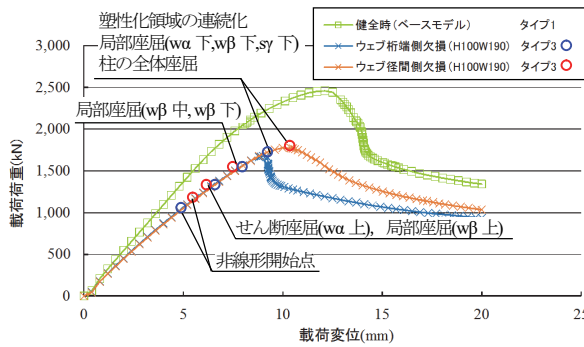
崩壊プロセスは、表-8(a) [タイプ 6] の挿図に示すように、ウェブの支点下端部に局部座屈、桁端側ウェブに局部座屈の順に発生していた。その後、桁端側ウェブの局部座屈の変形が支点部まで進展し、支点下端部をピン支持とする支点部における柱の全体座屈が発生し、最大荷重に到



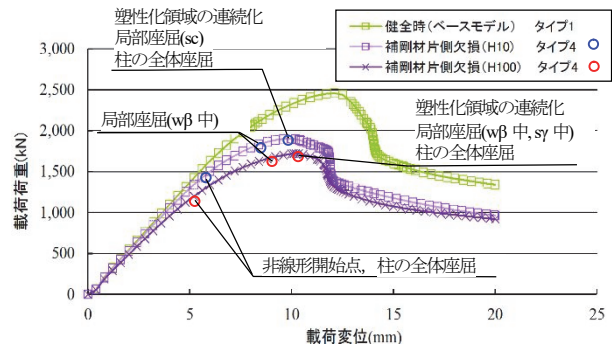
(a) タイプ1：柱の全体座屈  
（一端固定-他端回転バネ支持）



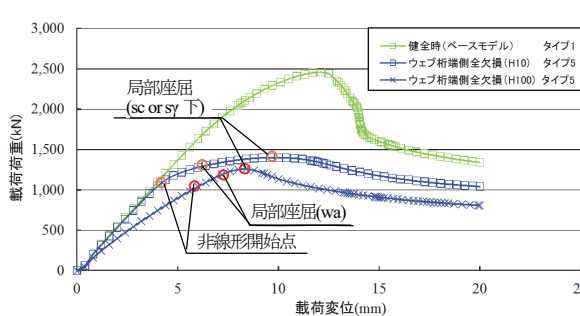
(b) タイプ2：局部座屈の連続化  
（桁端側ウェブ下端部）



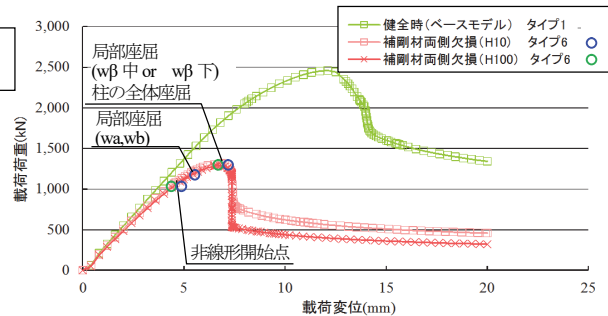
(c) タイプ3：柱の全体座屈（両端固定支持）



(d) タイプ4：柱の全体座屈（両端ピン支持）



(e) タイプ5：局部座屈（補剛材の下端部）



(f) タイプ6：柱の全体座屈（一端固定-他端ピン支持）

図-3.3.3 タイプ別にイベントをプロットした荷重-変位曲線

表-3.3.3 タイプ別の崩壊モード（最大荷重時の変形性状）の整理

崩壊タイプと壊モード 該当する解析ケース	(a)座屈の腹の位置と発生順序	(b)ウェブの面外変形 (交差部)	(c)変位図 (平面図)	(d)mises 応力コンター図 耐力低下率 $P_{max} / P_{max-int}$
<b>[タイプ1]</b> 柱の全体座屈 (一端固定 -他端回転/バネ支持) i)健全時(ベースモデル) ii)健全時 (スカーラップなし)	<p>健全時 (ベースモデル)</p>	<p>桁高 (mm)</p> <p>変位量 (mm)</p> <p>A-A</p>	<p>(桁端側)</p> <p>350 (mm)</p> <p>(径間側)</p>	<p>i) 1.00 ii) 1.06</p>
<b>[タイプ2]</b> 局部座屈の連続化 (桁端側ウェブ下端部) iii)ウェブ径間側部分欠損 (H10Wy, H30Wy) iv)ウェブ桁端側部分欠損 (H10Wy, H30Wy)	<p>ウェブ径間側部分欠損 (H30W190)</p>	<p>桁高 (mm)</p> <p>変位量 (mm)</p>	<p>350 (mm)</p>	<p>iii) 0.74~0.87 iv) 0.71~0.90</p>
<b>[タイプ3]</b> 柱の全体座屈 (両端固定支持) v)ウェブ径間側部分欠損 (H100Wy) vi)ウェブ桁端側部分欠損 (H100Wy)	<p>ウェブ径間側部分欠損 (H100W130)</p>	<p>桁高 (mm)</p> <p>変位量 (mm)</p>	<p>350 (mm)</p>	<p>v) 0.72~0.74 vi) 0.66~0.74</p>
<b>[タイプ4]</b> 柱の全体座屈 (両端ピン支持) vii)補剛材片側欠損 (H10, H30) viii)補剛材片側欠損 (H100)	<p>補剛材片側欠損 (H100)</p>	<p>桁高 (mm)</p> <p>変位量 (mm)</p>	<p>350 (mm)</p>	<p>vii) 0.77~0.78 viii) 0.7</p>
<b>[タイプ5]</b> 局部座屈 (補剛材の下端部) ix)ウェブ桁端側全欠損 (H10, H30) x)ウェブ桁端側全欠損 (H100)	<p>ウェブ桁端側全欠損 (H30)</p>	<p>桁高 (mm)</p> <p>変位量 (mm)</p>	<p>350 (mm)</p>	<p>ix) 0.56~0.60 x) 0.52</p>
<b>[タイプ6]</b> 柱の全体座屈 (一端固定-他端ピン支持) xi)補剛材両側欠損 (H10, H30) xii)補剛材両側欠損 (H100)	<p>補剛材両側欠損 (H100)</p>	<p>桁高 (mm)</p> <p>変位量 (mm)</p>	<p>350 (mm)</p>	<p>xi) 0.53~0.54 xii) 0.52</p>
凡例	<p>変位量 5mm以下 (赤)</p> <p>変位量 5~10mm (青)</p> <p>変位量 10mm以上 (緑)</p> <p>せん断座屈 (赤)</p> <p>せん断座屈 (青)</p> <p>欠損箇所 (緑)</p> <p>赤色: [側面図]手前に変形, [正面図]桁が端側に変形</p> <p>青色: [側面図]奥に変形, [正面図]径間側に変形</p> <p>腹の位置にある「番号」は、座屈発生順序を示す。</p>	—	フランジ上面からの高さ ■ 中間部・上部 (600mm~300mm) ■ 下部 (100mm~600mm) ■ 下端部 (0mm~100mm) ※変形倍率5倍	■: ウェブの塑性化領域 (355N/mm <sup>2</sup> ) ---: 有効幅 $24t_w$ の範囲 $P_{max}$ : 最大荷重 $P_{max-int}$ : 健全時 (ベースモデル) の最大荷重

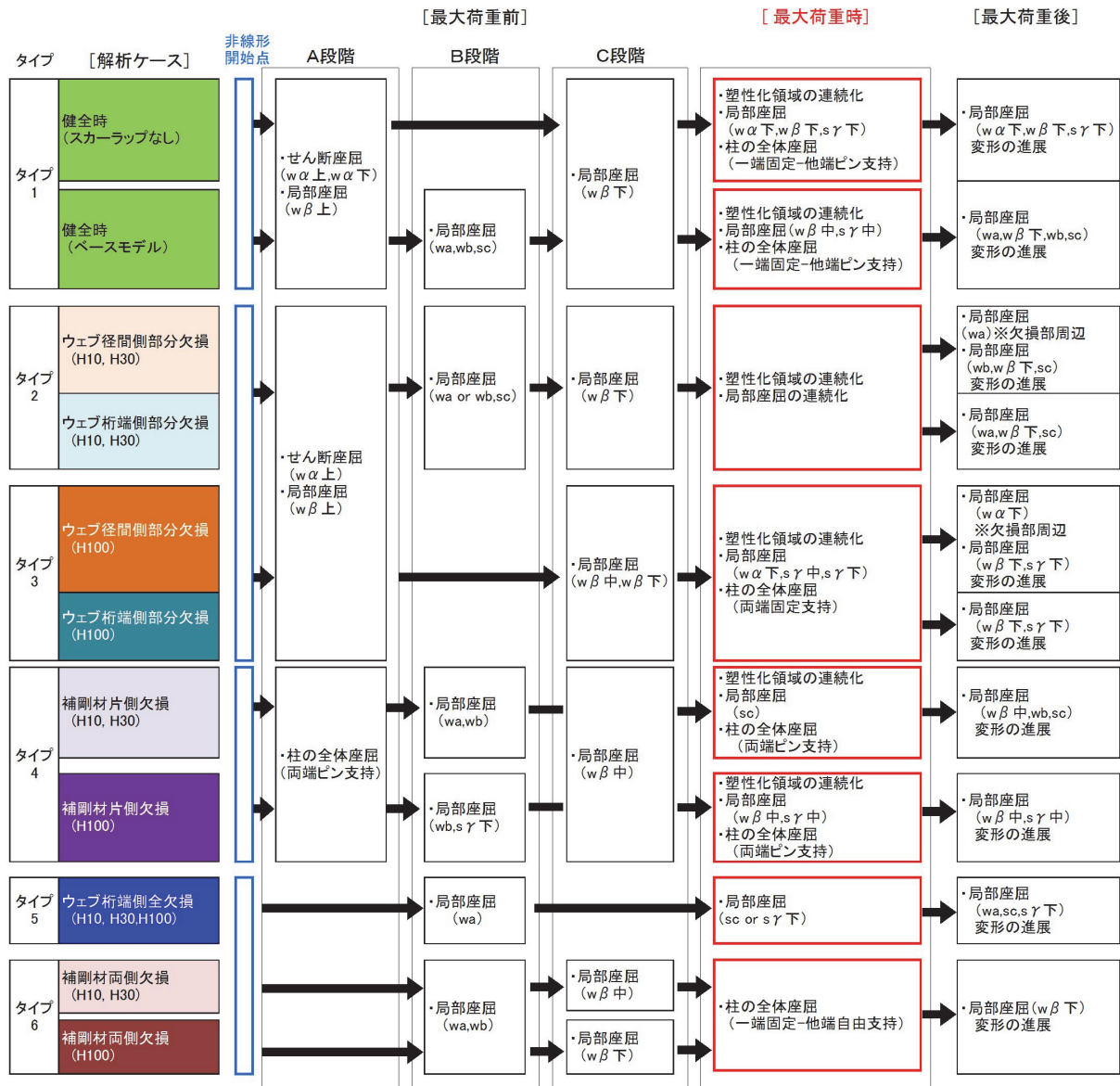


図-3.3.4 崩壊プロセス

### 3.4 崩壊タイプの分析

#### 3.4.1 非線形開始点

非線形開始点の荷重 $P_0$ と欠損部を考慮し、式(2.2.3)を用いて算出した支点部の設計降伏耐力 $P_y$ 、さらに、荷重 $P_0$ と各損傷時の最大荷重 $P_{max}$ に対する比および健全時(ベースモデル)の最大荷重 $P_{max-int}$ に対する比を表-3.4.1に整理する。

タイプ1では、図-3.4.1(a)に示すように、ウェブの塑性化領域は非対称の分布をしており、桁端側ウェブでは80mm程度まで塑性化し、径間側ウェブでは有効幅より広い範囲が塑性化した時に非線形開始点に到達した。

タイプ2およびタイプ3では、支点上補剛材の全幅および健全な側のウェブ交差部から50mm程度の範囲でそれぞれ塑性化した時に、非線形開始点に到達した。

タイプ4では、支点上補剛材が広範囲で塑性化し、図-3.4.1(b)に示すように、径間側および桁端側ウェブが交差部から60mm~80mm程度の範囲で塑性化した時に非線形開始点に到達した。

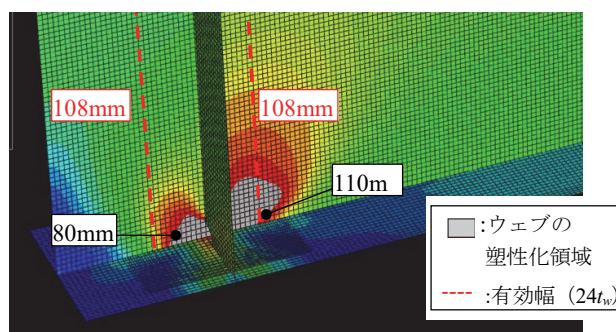
タイプ5では, 支点上補剛材の全幅および健全な側のウェブが30mm~40mm程度の範囲で塑性化した時に非線形開始点に到達した.

タイプ6では, 径間側および桁端側ウェブが交差部から110mm~130mm程度の範囲で塑性化した時に非線形開始点に到達した.

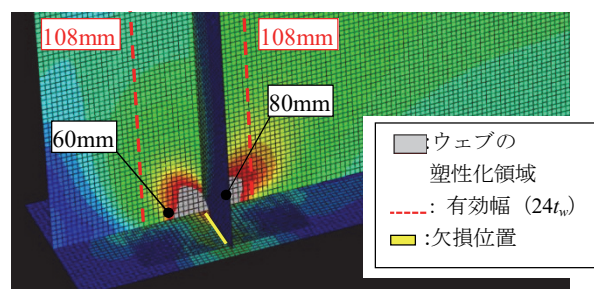
非線形開始点において, タイプ2, 3, 5のようにウェブが部分欠損している場合および支点上補剛材が片側欠損しているタイプ4では, 塑性化領域が道路橋示方書で規定される有効幅より狭く, 支点上補剛材が両側欠損しているタイプ6では, 塑性化領域が有効幅より広がった. ウェブの塑性化領域の範囲の違いは, 支点部の部材の拘束条件の違いが主な要因として考えられる.

表-3.4.1 非線形開始点の荷重

	非線形開始点の荷重 $P_0$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_0/P_{max}$	$P_0/P_{max-int}$
タイプ 1	1,730~1,760	1,710	0.67~0.71	0.70~0.72
タイプ 2	1,160~1,300	1,365	0.58~0.67	0.48~0.52
タイプ 3	910~1,290	1,365	0.67~0.70	0.37~0.52
タイプ 4	1,120~1,340	1,200	0.67~0.75	0.46~0.59
タイプ 5	1,050~1,090	1,365	0.71~0.87	0.43~0.44
タイプ 6	1,050~1,110	690	0.80~0.88	0.43~0.47



(a)タイプ 1



(b)タイプ 4

図-3.4.1 非線形開始点時のウェブの mises 応力コンター図

### 3.4.2 最大荷重

各タイプの最大荷重に対する「健全時（ベースモデル）」の最大荷重の比を図-3.4.2 に示す。図-3.4.2 の赤線は「健全時（ベースモデル）」の支点部の設計降伏耐力であり、式(2.2.3)によって求めている。

タイプ1では、断面欠損がなく、荷重分担が可能なウェブの範囲が広い。このタイプのスカーラップがない場合の最大荷重は、「健全時（ベースモデル）」の最大荷重に対して5%程度増加していた。これは、スカーラップがないことで、その範囲の圧縮応力が作用する面積が増加したことが主たる要因と考えられる。

損傷時の最大荷重は、断面欠損によって与えられる面積減少の影響（以下、断面欠損による影響と略す）を受けるタイプ（タイプ2, 6）、断面欠損による影響および支点部の拘束状態の低下の影響を受けるタイプ（タイプ3）、断面欠損による影響およびウェブ面外の付加曲げの影響を受けるタイプ（タイプ4）、断面欠損による影響およびウェブ面内の付加曲げの影響を受けるタイプ（タイプ5）の4つに分類できた。

タイプ2, 6では、支点部における変形が桁端下端部に集中している。これらの変形は、支点下端部の拘束状態の低下に影響を与えていると思われるが限定的であるために、支点部全体の柱としての耐力には大きく影響を与えていないと考えられる。そのため、タイプ2, 6は、断面欠損による圧縮応力が作用する面積の減少により、最大荷重が「健全時（ベースモデル）」の90%~71%、54%~52%にそれぞれ低下したと考えられる。

タイプ3では、ウェブ部分欠損の欠損高が100mmの場合、支点部における柱の全体座屈が発生している。これは、支点部の拘束状態の低下による影響が大きいと考えられる。この支点部の拘束状態の低下や断面欠損による圧縮応力が作用する面積の減少により最大荷重が「健全時（ベースモデル）」の74%~66%に低下したと考えられる。

タイプ4では、断面欠損によって欠損していない支点上補剛材側への偏心により、それが付加曲げの影響を受けて、支点部における柱の全体座屈が発生していた。その後、最大荷重時には、欠損していない支点上補剛材が局部座屈するまで、支点部における柱の全体座屈による変形が大きく進展し、ウェブの圧縮応力が作用する面積も拡大したと考えられる。これらの影響により、最大荷重が「健全時（ベースモデル）」の78%~70%に低下したと考えられる。

タイプ5では、径間側ウェブに作用する圧縮応力の範囲が狭い。これは、桁端側ウェブが全欠損により、径間側ウェブに付加曲げが発生し、径間側ウェブに局部座屈が発生したことが要因と考えられる。これらの影響により、最大荷重が「健全時（ベースモデル）」の60%~51%に低下したと考えられる。

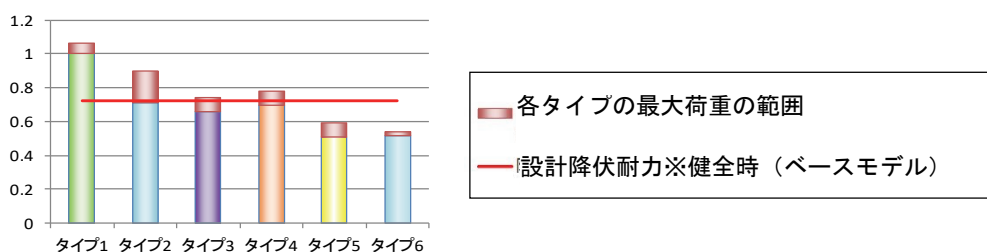


図-3.4.2 各タイプの最大荷重に対する「健全時（ベースモデル）」の最大荷重の比



### 3.4.3 最大荷重以降

最大荷重以降については、図-3.3.3の荷重-変位曲線に示すように、最大荷重後にほとんど荷重低下を示さないタイプ（タイプ5）、急激に荷重低下したタイプ（タイプ1、4、6タイプ2、3の中の桁端側ウェブが欠損したケース）および緩やかに荷重低下したタイプ（タイプ2、3の中の径間側ウェブが欠損したケース）の3つに分類できた。緩やかに荷重低下したタイプは、20mm程度まで変位した場合、最大荷重後に急激に荷重低下したタイプとほとんど耐荷力が同程度まで低下することを踏まえて、ほとんど荷重低下を示さないタイプと区別している。

タイプ5は、健全時のモデルの半分程度の耐荷力で、局部座屈で最大荷重に達している。最大荷重後の耐荷力は、急激な荷重低下をもたらす柱の全体座屈が発生しなかったために、ほとんど荷重低下しなかったと考えられる。

タイプ1、4は、支点下端部が塑性化し、支点下端部がピン支持に近い拘束状態になり、柱が全体座屈することで、急激に荷重低下したと考えられる。タイプ2、3のウェブ桁端側部分欠損ケースは、支点下端部がピン支持に近い拘束状態になり、さらに、桁端側ウェブの欠損により、桁端側ウェブの拘束状態が「健全時（ベースモデル）」よりも弱くなるために、桁端側ウェブの端部から発生する局部座屈による変形が支点部に進展し、急激に荷重低下したと考えられる。また、タイプ6は、支点上補剛材による拘束がないために、支点下端部のウェブの変形が進展し、急激に荷重低下したと考えられる。

タイプ2、3のウェブ径間側部分欠損ケースは、最大荷重後において、「健全時（ベースモデル）」よりも欠損部周辺の径間側ウェブの方が局部座屈による変形が大きい。径間側ウェブにおける拘束により、緩やかに荷重低下したと考えられる。

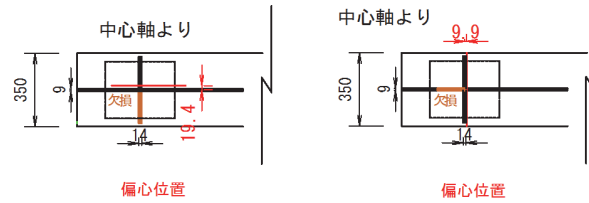
## 3.5 損傷状態の違いが与える影響

### (1) 欠損位置

支点反力の作用位置と欠損による断面の図心の偏心量を整理したものを図-3.5.1に示す。偏心量は式(2.2.3)で示す全有効断面積 ( $A_{ew} + A_{es}$ ) に対して計算している。図-3.5.1(a)に示すように、片側の支点上補剛材が欠損しているタイプ4では欠損の断面主軸の位置の変化は20mm程度であり、ウェブの板厚9mmに対して大きい。一方、図-3.5.1(b)に示すように、本解析で対象としているウェブが部分欠損しているタイプでは、ウェブの欠損幅に関わらず、欠損による断面主軸の位置の変化は10mm程度であり、その量は小さかった。また、ウェブ面外の剛性よりも、ウェブ面内の剛性の方が大きく、橋軸方向の偏心の影響は小さいと考えられる。そのため、タイプ2、3のようなウェブが部分欠損しているケースでは、偏心による影響は小さいと考えられる。

ただし、桁端側ウェブが全欠損しているタイプ5では、桁端側ウェブと下フランジによる拘束がなく、欠損も大きいことから、偏心による影響を受けていると考えられる。

一方、補剛材が片側欠損しているタイプ4では、支点上補剛材への付加曲げにより、桁端側ウェブ端部まで進展するねじり変形が発生している。このことから、支点上補剛材の面内の剛性はウェブの面外の剛性に対して大きく、橋軸直角方向の偏心による影響を受けていると考えられる。



(a)補剛材片側欠損時 (タイプ4)      (b)ウェブ欠損時 (タイプ2~3)

図-3.5.1 偏心量の整理

## (2) 欠損高

欠損高10mmと30mmで崩壊プロセスおよび崩壊モードに違いは見られなかった。これは欠損高10mmと30mmのタイプが、スカーラップ (R=35mm) 高より低い欠損であり、支点部の拘束状態に差が生じず、崩壊プロセスに大きな差が生じなかったためと考えられる。欠損高30mm以下と100mmによる違いは、ウェブ部分欠損において、崩壊プロセスおよび崩壊モードに影響は見られたが、その他の欠損しているタイプでは、欠損位置による影響の方が大きい傾向が見られた。欠損高30mm以下でウェブが部分欠損しているタイプ2では、最大荷重前に図-3.5.2に示すようにスカーラップ (R=35mm) の箇所から局部座屈が発生し、最大荷重時には支点下端部に高さ30mm程度を腹にした局部座屈が発生していた。一方、欠損高100mmのタイプ3は、高さ30mm程度を腹にした局部座屈は発生せず、ウェブ端部および支点上補剛材の端部において、桁下から100mm以上の箇所を腹にした局部座屈が発生していた。これらの局部座屈の発生の違いは、欠損高の違いにより、欠損に伴う支点部の拘束状態が変化するためと考えられる。

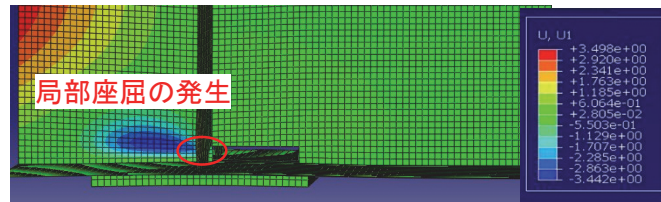


図-3.5.2 局部座屈の発生を示すウェブの変位コンター図

## 3.6 まとめ

本章では、第2章で実施した解析結果を利用して、桁端部の腐食欠損と崩壊モードおよび崩壊プロセスの関係を把握し、それらの分類を行うことを目的とし、代表的な構造諸元を有する桁端部を再現した解析モデルを用いて検討した。そのため、桁端下端部が腐食した場合のパラメトリック解析から得られた結果を分析し、腐食した桁端部の耐荷力特性を踏まえて崩壊タイプを分類した。さらに、構造パラメータの違いが崩壊タイプに与える影響を分析することで、桁端部の損傷時の崩壊メカニズムを検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 崩壊プロセスや崩壊モードに着目し、解析ケースを6つの崩壊タイプに分類した。崩壊タイプは欠損位置に依存し、さらに、ウェブが部分的に欠損している場合では欠損高にも依存してい

た。

- 2) タイプ毎の崩壊モードの支配要因は、柱の全体座屈と局部座屈に分類された。柱の全体座屈が崩壊モードの支配要因の場合は、「健全なケース」では一端固定-他端回転バネ支持、「ウェブ部分欠損ケース（欠損高：100mm）」では両端固定支持、「補剛材片側欠損ケース」では両端ピン支持、「補剛材両側欠損ケース」では一端固定-他端ピン支持の4つの支持条件に分けられた。

一方、局部座屈が崩壊モードの支配要因の場合は、桁端側ウェブ下端部に局部座屈が連続化した「ウェブ部分欠損ケース（欠損高：30mm以下）」および支点上補剛材の下端部が局部座屈した「ウェブ桁端側全欠損ケース」に分けられた。

- 3) 損傷時において、道路橋示方書の規定で示される有効断面積と弾性限界点における軸圧縮応力の関係を示すために、非線形開始点を設けた。この非線形開始点において、いずれのケースも支点上補剛材がほぼ全幅で塑性化していた。一方、ウェブの塑性化進展領域が異なり、ウェブが欠損しているケースや支点上補剛材が片側欠損しているケースでは、塑性化領域は道路橋示方書で規定される有効幅より狭く、支点上補剛材が両側欠損しているケースでは有効幅より広がっていた。
- 4) 損傷時の最大荷重について、「ウェブ部分欠損ケース（欠損高30mm以下）」および「補剛材両側欠損ケース」は、主に断面欠損による影響を受けるタイプ、「ウェブ部分欠損ケース（欠損高100mm）」は、断面欠損による影響および支点部の拘束状態の低下の影響を受けるタイプ、「補剛材片側欠損ケース」は、断面欠損による影響およびウェブ面外の付加曲げの影響を受けるタイプ、「ウェブ桁端側全欠損ケース」は、断面欠損による影響およびウェブ面内の付加曲げの影響を受けるタイプの4つに分類された。「健全時（ベースモデル）」に対する最大荷重の低下の程度は、タイプ毎で異なり、基本は断面減少による影響が大きい。拘束状態の低下がみられた場合には、断面減少の影響にさらに10%程度耐力低下し、ウェブ面内の付加曲げの影響を大きく受ける場合には、断面減少の影響にさらに20%程度耐力低下することを示した。
- 5) 最大荷重後の挙動は、支点部における柱の全体座屈の発生の有無および支点部の拘束条件の違いにより、ケース毎に違いが現れた。「ウェブ桁端側全欠損ケース」は、健全時のモデルの半分程度の耐荷力であり、最大荷重到達後はほとんど荷重低下しなかった。「ウェブ桁端側部分欠損ケース」や「補剛材両側欠損ケース」は、急激な荷重低下がみられ、「ウェブ径間側部分欠損ケース」は、緩やかな荷重低下が見られた。
- 6) 「ウェブ桁端側全欠損ケース」および「補剛材片側欠損ケース」は、付加曲げによる影響が現れた。また、ウェブ部分欠損しているケースは、支点部の拘束状態の強さの違いにより、欠損高30mm以下と欠損高100mmで崩壊プロセスおよび崩壊モードの違いが見られた。

## 参考文献

- 1) 濱田哲，佐々木栄一，粕裕幸，町田恵津子，紀平寛：局部的腐食を模擬した鋼桁端部の圧縮強度に関する実験，鋼構造年次論文報告集 第17巻，2009.11
- 2) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada : Experimental and Numerical Evaluation of Bearing Capacity of Steel Plate Girder Affected by End Panel Corrosion, *International*

*Journal of Steel Structures*, Vol.14, No.3, pp.659-676, 2014, ERRATUM Vol. 15, No.1, pp.245, 2015.

- 3) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Kihira, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada : Analytical demonstrations to assess residual bearing capacities of steel plate girder ends with stiffeners damaged by corrosion, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.10, No.1, pp.69–79, 2012.
- 4) 全日本建設技術協会：建設省制定 土木構造物標準設計，1994.
- 5) Dassult Systems Simulia : ABAQUS 6.7 User's Manual, 2008.
- 6) 玉越隆史，中洲啓太，石尾真理，武田達也，水津紀陽：鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究：国土技術政策総合研究所資料 No.294，国土交通省 国土技術政策総合研究所，2006.
- 7) 東海構造研究グループ：平成 24 年度活動報告集 第 6 回定期研究会 WG 成果報告，2012.

## 第4章 腐食した桁端部の耐荷力挙動に与える支点偏心の影響

### 4.1 まえがき

東日本大震災では、写真-4.1.1に示すように鋼製支承よりピンが脱落して支点位置が移動した被害が報告されている<sup>1)</sup>。さらに、新潟県中越地震では、主桁端部の腐食の激しい部分で損傷が生じた被害が報告されている<sup>2)</sup>。これらの報告を踏まえて地震等により、腐食して断面欠損が生じている桁端下部においても支点位置が偏心し、支点移動に伴い耐荷力が低下することが考えられる。

そこで、腐食により断面欠損が生じた桁端部の支点偏心に伴う耐力低下を把握する。この時、使用する偏心量は、最低移動されると想定される常時における計算移動量とし50mmとした。この常時における計算移動量(50mm)は、温度変化と桁の活荷重によるたわみを考慮した常時の水平移動量のである。また、第3章の崩壊タイプの分類に基づき、支点偏心したケースを分類し、さらに、限界強度を設定し、その強度を用いて、支点偏心した場合の耐力低下による崩壊メカニズムを分析する。



写真-4.1.1 支点移動の状況<sup>1)</sup>



写真-4.1.2 腐食で損傷した状況<sup>2)</sup>

### 4.2 腐食した桁端部の耐荷力挙動に与える支点偏心の影響

#### 4.2.1 解析概要

##### (1) 解析対象

一般的なモデル橋梁として、平成6年版の標準設計の主要幹線道路橋の単純プレートガーダー橋(設計番号0240)<sup>3)</sup>を採用した。これは、第2章および第3章で利用したモデルと同じである。

##### (2) 解析モデル

第2章および第3章で利用した解析モデルと同じであり、支点上付近の構造諸元を変えないことを条件に、対象橋梁の桁端部にせん断力が支配的に載荷されるよ

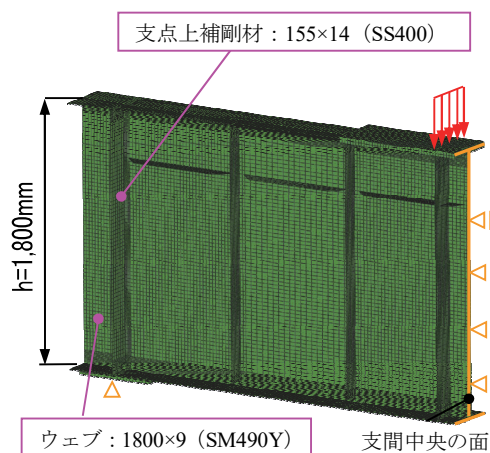


図-4.2.1 解析モデルの概要

うに、端対傾構から隣接する中央対傾構間を支間とする単純桁としてモデル化した。使用要素は、ソールプレートと載荷板をソリッド要素（弾性体）とし、それ以外は、すべて4節点低減積分シェル要素とした。なお、欠損箇所は要素を設定しないことでモデル化した。

### (3) 境界条件と載荷方法

第2章および第3章で利用した境界条件と載荷方法と同じであり、対傾構間隔を支間とした桁の中央断面（図-4.2.1中のオレンジ色の線部）には、支間中央に対する対称条件を与え、支点部は線支承を想定し、ソールプレート幅にわたり回転端とする境界条件を与えた。載荷方法は、図-4.2.1の赤矢印に示すように、支間中央の垂直補剛材の直上にフランジ幅にわたって載荷板を介して線荷重を載荷した。

## 4.2.2 解析ケース

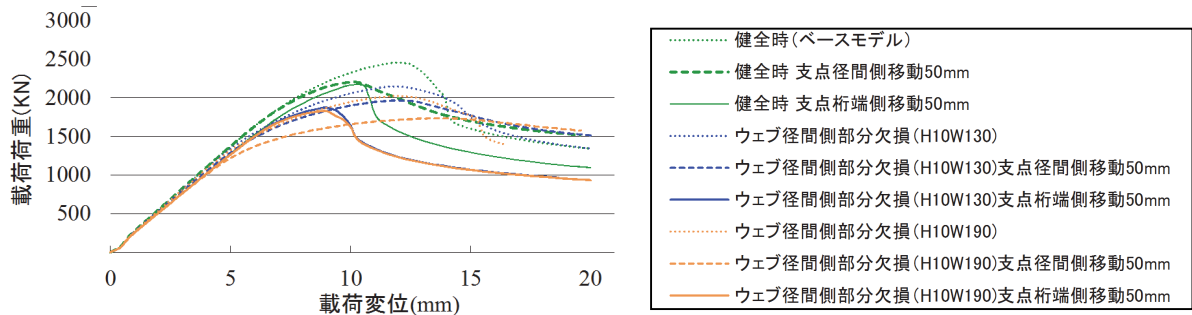
本章では、健全時のケース、ウェブ径間側部分欠損の2ケースおよびウェブ桁端側部分欠損の3ケースの計6ケースに対して、支点位置が偏心しないケース、支点位置を径間側に50mm偏心させたケース、桁端側に50mm偏心させたケースを設定した。欠損幅（130mm, 190mm）は、ソールプレート幅（165mm）より内側30mm、外側30mm程度の幅として設定し、偏心位置50mmは、標準設計に記載されている計算移動量（50mm）<sup>4)</sup>より設定した。なお、ウェブが欠損したケースの欠損高は10mmとして統一した。これらの検討したケースを表-4.2.1に示す。

表-4.2.1 検討ケース

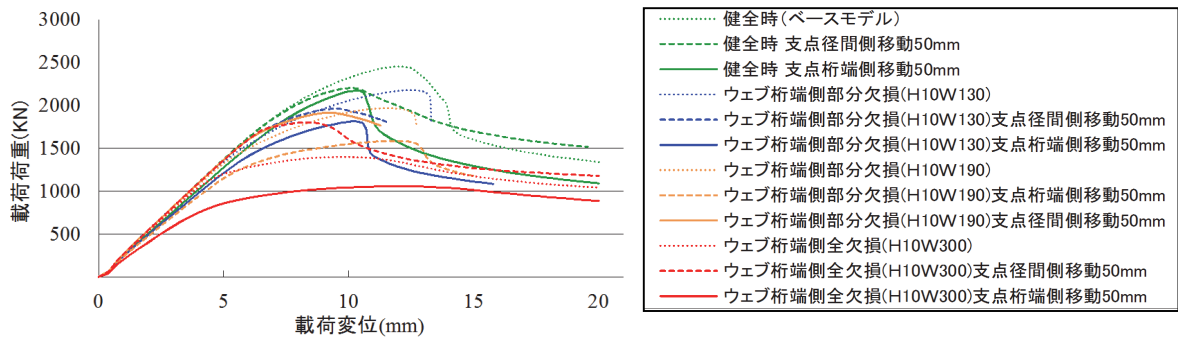
	荷重載荷位置	欠損幅(mm)	欠損高(mm)	支点偏心	備考
健全時	支間中央	0	0	偏心なし	ベースモデル
				径間側偏心 50mm	
				桁端側偏心 50mm	
ウェブ径間側 部分欠損 (H10Wy)	"	130	10	偏心なし	
				径間側偏心 50mm	
				桁端側偏心 50mm	
	"	190	10	偏心なし	
				径間側偏心 50mm	
				桁端側偏心 50mm	
ウェブ桁端側 部分欠損 (H10Wy)	"	130	10	偏心なし	
				径間側偏心 50mm	
				桁端側偏心 50mm	
	"	130	10	偏心なし	
				径間側偏心 50mm	
				桁端側偏心 50mm	
ウェブ 桁端側全欠損 (H10W300)	"	300	10	偏心なし	
				径間側偏心 50mm	
				桁端側偏心 50mm	

## 4.2.3 解析結果

解析より得られた荷重-変位曲線を、欠損位置（ウェブ径間側部分欠損、ウェブ桁端側部分・全欠損）にわけて図-4.2.2に示す。



(a)ウェブ径間側部分欠損ケース



(b)ウェブ桁端側部分・全欠損ケース

図-4.2.2 荷重-変位曲線

最大荷重一覧と最大荷重時のMises相当応力コンター図をそれぞれ表-4.2.2および表-4.2.3に示す。

表-4.2.2 支点偏心による最大荷重時の解析結果一覧

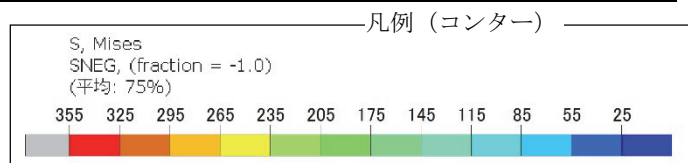
欠損幅	健全時	ウェブ径間側部分欠損		ウェブ桁端側部分欠損		
		H10W130	H10W190	H10W130	H10W190	H10W300
径間側に偏心	$P_{max}=2,210(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.90$ 	$P_{max}=1,970(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.80$ 	$P_{max}=1,730(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.70$ 	$P_{max}=1,970(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.80$ 	$P_{max}=1,910(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.78$ 	$P_{max}=1,800(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.73$ 
支点偏心なし	$P_{max}=2,460(\text{kN})$ $P_{int}/P_{int}=1.0$ 	$P_{max}=2,150(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.87$ 	$P_{max}=2,020(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.82$ 	$P_{max}=2,180(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.89$ 	$P_{max}=1,970(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.80$ 	$P_{max}=1,400(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.57$ 
桁端側に偏心	$P_{max}=2,170(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.88$ 	$P_{max}=1,870(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.76$ 	$P_{max}=1,830(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.74$ 	$P_{max}=1,820(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.74$ 	$P_{max}=1,590(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.65$ 	$P_{max}=1,060(\text{kN})$ $P/P_{int}=0.43$ 

※ $P$ =最大荷重,  $P_{int}$ =欠損なく, 支点偏心がないモデル,  $P/P_{int} = P_{max}/P_{max-int}$

表-4.2.3 最大荷重時の Mises 相当応力のコンター図

		支点：桁端側に偏心	支点：偏心なし	支点：径間側に偏心
健全時		$P/P_{int}=0.88$ 	$P/P_{int}=1.0$ 	$P/P_{int}=0.9$ 
ウェブ 径間側 欠損	130 mm	$P/P_{int}=0.76$ 	$P/P_{int}=0.87$ 	$P/P_{int}=0.80$ 
	190 mm	$P/P_{int}=0.74$ 	$P/P_{int}=0.82$ 	$P/P_{int}=0.70$ 
ウェブ 桁端側 欠損	130 mm	$P/P_{int}=0.74$ 	$P/P_{int}=0.89$ 	$P/P_{int}=0.80$ 
	190 mm	$P/P_{int}=0.65$ 	$P/P_{int}=0.80$ 	$P/P_{int}=0.78$ 
	300 mm	$P/P_{int}=0.43$ 	$P/P_{int}=0.57$ 	$P/P_{int}=0.73$ 

※ $P$ =最大荷重,  $P/P_{int}=P_{max}/P_{max-int}$





健全時（ベースモデル）の場合、支点が径間側あるいは桁端側のどちらに偏心しても、支点が偏心していない健全時と比べて10%程度の耐力低下がみられた。また、欠損したケースでは、径間側あるいは桁端側のどちらが欠損した場合でも、径間側に支点偏心することで、健全時に比べて耐力が20%～30%程度低下した。一方、欠損したケースで桁端側に支点偏心した場合は、ウェブ径間側部分欠損（H10W130、H10W190）およびウェブ桁端側部分欠損（H10W130）では健全時に比べて25%程度の耐力低下であったが、ウェブ桁端側部分欠損（H10W190）では健全時に対して35%程度、ウェブ桁端側全欠損（H10W300）は50%以上の耐力低下が見られた。

また、同じ欠損量のケースで支点偏心による耐力低下を比較すると、ウェブ桁端側部分欠損（H10W190）では、径間側に支点が偏心しても支点が偏心していない場合の耐力と大差がみられず、また、ウェブ桁端側全欠損（H10W300）では、径間側に支点が偏心することで支点が偏心していない場合と比べて最大荷重が15%程度上昇する傾向が見られた。この理由については、4.2.4(2)で後述する。なお、その他のケースでは、支点が偏心することで支点が偏心しないケースに比べて最大荷重が概ね10%程度低下する傾向が見られた。

#### 4.2.4 解析の分析・考察

##### (1) 崩壊タイプの分類

ここでは、解析より得られた変形図および応力分布図を詳細に分析し、全ケースの崩壊タイプを第3章で設定した崩壊タイプに分類した。分類した崩壊プロセスのフローを図-4.2.3に示す。なお、第3章の崩壊プロセスにおいて、支点下端部の局部座屈に伴うねじり変形を一つにまとめて整理していたが、ここでは、支点偏心による影響を明確にするために、ねじり変形を一つのイベントとして整理する。

この分類における最大荷重時のウェブの変位コンター図を表-4.2.4に示す。また、最大荷重ごとの崩壊メカニズムを表-4.2.5に示す。

崩壊タイプは、タイプ1, 2, 5の3つのタイプに大別でき、タイプ1および2は、挙動の範囲が段階的に分けられることから、それぞれ2つのタイプに分類した。

- ・タイプ1 : 柱の全体座屈（一端固定-他端ピン支持）※ウェブ-点対称
- ・タイプ1-2 : 柱の全体座屈（一端固定-他端ピン支持）※ウェブ-非対称
- ・タイプ2 : 局部座屈の連続化（桁端側ウェブ下端部）※ウェブ-非対称
- ・タイプ2-2 : 局部座屈の連続化（桁端側ウェブ下端部）※ウェブ-非対称, タイプ2より限定的
- ・タイプ5 : 局部座屈（補剛材の下端部）

これらの崩壊タイプの特徴は以下の通りである。

タイプ1は、「健全時（ベースモデル）」が該当する。欠損や支点偏心による付加曲げの影響がないため、支点位置に対して対称的な変形を示した。その挙動は①径間側ウェブにおけるせん断座屈、②支点部にねじり変形、③桁端下端部の局部座屈、④桁端側ウェブの局部座屈、⑤柱の全体座屈の順に発生し崩壊していた。この支点部のねじり変形、桁端下端部の局部座屈から柱の全体座屈に至るまでの挙動として、ウェブおよび補剛材が段階的に下端部に局部座屈が生じて、支点部にねじり現象をもたらせ、ウェブおよび補剛材の全ての下端部の要素が局部座屈することで、

ねじり変形をもとに戻すようなモードを示した。また、タイプ 1-2 では、健全時 偏心ありが該当する。このタイプは、偏心によってタイプ 1 の下端部の局部座屈によるねじり現象が元に戻らず、非対称的に柱の全体座屈を招いて崩壊タイプである。

タイプ 2 は、ねじり変形を伴いながら、支点偏心やウェブ欠損などの要因によって一部に変形が集中した対称性が弱いケースである。傾向として、径間側ウェブパネルにせん断座屈に伴う斜張力場の形成が弱いケース程、耐荷力が低下していた。また、桁端側ウェブの局部座屈が支配的になりにくい境界条件をもつケースほど最大荷重が高くなり、桁端側ウェブ（3 辺単純支持 1 辺自由の境界条件）の局部座屈が発生しているケースほど耐力低下率が高い傾向にあった。タイプ 2-2 はウェブ桁端側部分欠損（H10W190）（桁端側支点偏心）が該当するが、タイプ 2 よりもさらに挙動の範囲が、ウェブ桁端側に限定されていた。

タイプ 5 はウェブ桁端側全欠損（H10W300）（支点偏心なし、桁端側支点偏心）であるが、せん断座屈やねじり変形が生じずに欠損部付近の局部座屈のみ発生し崩壊タイプである。

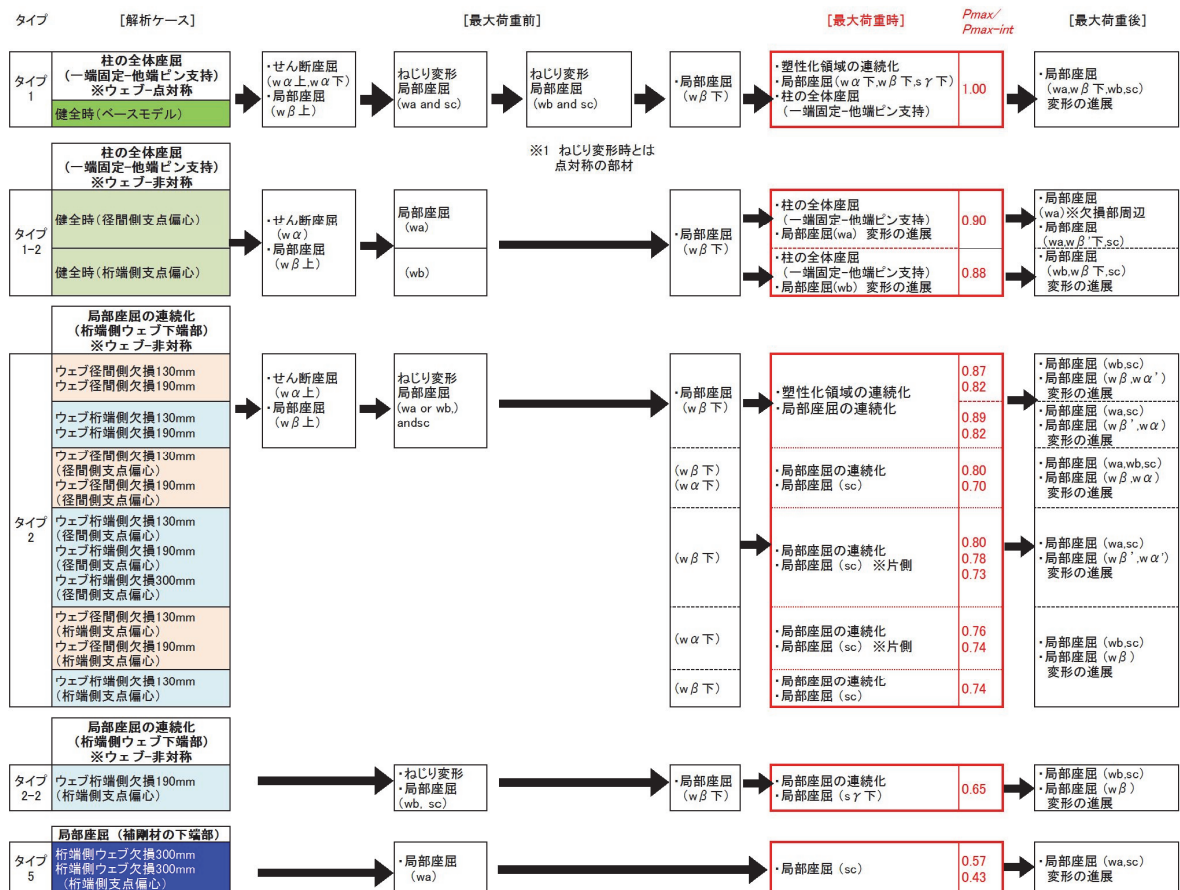


図-4.2.3 支点偏心を考慮した崩壊プロセス (': 支配的ではないことを示す)

表-4.2.4 変位コンター図 崩壊モード

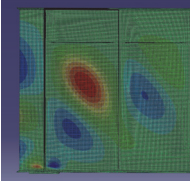
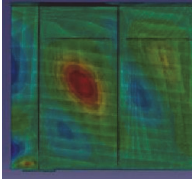
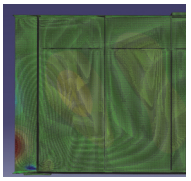
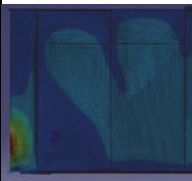
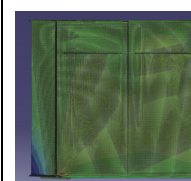
	タイプ1	タイプ1-2	タイプ2	タイプ2-2	タイプ5
	柱の全体座屈	柱の全体座屈	局部座屈の連続化 (桁端側ウェブ下端部)	局部座屈の連続化 (桁端側ウェブ)	局部座屈 (補剛材の下端部)
	支点位置に対して 対称モード	非対称モード	非対称モード	非対称モード	
崩壊モード (最大荷重)					
ケース	・健全時 (ベースモデル)	・健全時 (支点偏心)	・タイプ2-2,5以外の ウェブ欠損	・ウェブ桁端側部分 欠損(H10W190) (桁端側支点偏心)	・ウェブ桁端側全欠損 (H10W300)(偏心なし) ・ウェブ桁端側全欠損 (H10W300) (桁端側支点偏心)

表-4.2.5 崩壊タイプ一覧

耐力低下の比 崩壊タイプ	該当するケース	崩壊メカニズムの傾向
$P/P_{int}=1.0$	・健全時 (ベースモデル), 偏心なしケース	<ul style="list-style-type: none"> <li>・径間側ウェブパネルにせん断座屈が生じた後, 斜張力場が形成され, 桁端下端部の局部座屈 (径間側および桁端側) が生じ, 桁端側の局部座屈から柱の全体座屈より崩壊</li> <li>・ウェブは支点を軸に対称的である。</li> </ul>
・タイプ1		
$P/P_{int}=0.9$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・健全時, 偏心するケース</li> <li>・ウェブ径間側部分欠損(H10W130), 偏心なし</li> <li>・ウェブ桁端側部分欠損(H10W130), 偏心なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・径間側ウェブパネルにせん断座屈が生じた後, 斜張力場が形成され, 桁端下端部の局部座屈が生じ, 柱の全体座屈し崩壊。</li> <li>・支点を軸に非対称である。</li> </ul>
$P/P_{int}=0.8$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ウェブ径間側部分欠損(H10W130), 径間側に偏心</li> <li>・ウェブ桁端側部分欠損(H10W190), 偏心なし</li> <li>・ウェブ桁端側部分欠損(H10W190), 径間側に偏心</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・径間側ウェブパネルにせん断座屈が生じた後, 弱い斜張力場が形成され, 桁端下端部の局部座屈と桁端側ウェブの局部座屈により崩壊 (径間側もしくは, 両側で変形)</li> </ul>
$P/P_{int}=0.75$ 程度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ウェブ径間側部分欠損(H10W190), 桁端側に偏心</li> <li>・ウェブ桁端側部分欠損(H10W130), 桁端側に偏心</li> <li>・ウェブ桁端側全欠損(H10W300), 径間側に偏心</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・径間側ウェブパネルに支配的でないせん断座屈が生じた後, 桁端下端部の局部座屈 (桁端側) よりウェブの局部座屈が支配的になり崩壊</li> </ul>
$P/P_{int}=0.7\sim 0.65$	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ウェブ径間側部分欠損(H10W190), 径間側に偏心</li> <li>・ウェブ桁端側部分欠損(H10W190), 桁端側に偏心</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・欠損位置に支点があるため, 応力が支点到に伝達できず, 支点ない側でのウェブ下端部で局部座屈が発生し崩壊</li> </ul>
$P/P_{int}=0.65$ 以下	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ウェブ桁端側全欠損(H10W300), 桁端側に偏心</li> <li>・ウェブ桁端側全欠損(H10W300), 偏心なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・せん断座屈に至らず, 欠損部付近の局部座屈により崩壊</li> </ul>
タイプ5		

※ $P$ =最大荷重,  $P/P_{int}=P_{max}/P_{max-int}$

## (2) 崩壊モードを踏まえた支点偏心の影響

表-4.2.3 および表-4.2.4 に示した崩壊モードの図より、偏心の有無をケース毎で比較した結果、大きく傾向の違いが現れたケースは、以下の通りである。

- ・健全時（径間側偏心，桁端側偏心）

前節で述べたように、支点偏心によって、ねじり変形を元に戻す挙動の有無によって、対称性の崩壊と非対称性の崩壊という違いがみられた。

- ・ウェブ桁端側全欠損(H10W300)（径間側支点偏心）

ウェブ桁端側全欠損(H10W300)（支点偏心なし）は、欠損部付近の局部座屈による限定的な崩壊であるが、径間側に支点が偏心することで、径間側ウェブに応力が伝達できる条件となったため、支点部に応力が伝達できる条件となり、桁端側ウェブによる局部座屈が崩壊となった。なお、応力が伝達できる条件となったことで、径間側ウェブのパネルにせん断座屈が生ずることや耐荷力が15%程度上昇するなどウェブ桁端側部分欠損(H10W130)および(H10W190)（径間側支点偏心）のケースに近づく挙動を示した。

- ・ウェブ桁端側部分欠損(H10W190)（桁端側支点偏心）

欠損部に支点があることで、支点部に応力が伝達しにくい状態が生じたため、偏心しないケースと異なった挙動を示した。

## (3) 支点偏心による耐力低下の分析・考察

支点部に確実に応力伝達される境界条件の有無によって耐荷力に違いが見られた。その特性の違いは、表-4.2.3の塑性領域の広がり方の違いからもわかる。支点部付近の広い範囲で降伏領域が広がっているケースでは、支点部に確実に荷重が伝達されていたことから、桁下部の剛性が高く、最大荷重が高くなっていた。逆に、欠損がある位置に支点が偏心しているケース（径間側部分欠損(H10W190)径間側偏心や桁端側部分欠損(H10W190)桁端側偏心）では、支点部に確実に荷重が伝達されない状況であることから、最大荷重が低くなっていた。

支点が偏心することにより、支点直上のウェブ下端部に応力が集中するために局部座屈が発生しやすくなり、その局部座屈が支点部まで影響し、剛性を低下させ耐力低下をしていた。

桁端側ウェブが190mm以上欠損し、支点位置が桁端側に偏心したケースおよびウェブ桁端側全欠損（偏心なし）ケースでは、ウェブパネルにせん断座屈が発生する前に、欠損部付近が局所的に降伏して崩壊していた。したがって、支点偏心によって、支点に応力伝達できない状況になれば、挙動は局所的に示す結果となった。

## (4) 崩壊タイプ毎の限界強度

桁端部の崩壊メカニズムを把握するために解析結果から各限界強度（弾性限界点，全塑性限界点，局部座屈発生点）を整理した。支点偏心により、局部座屈が発生するよりも先に降伏の影響を受けると考え、限界強度による視点で分析することとした。なお、ここでは、これらの限界強度を以下のように定義した。

- a) 弾性限界点 : いずれかの要素が降伏応力に達した時の強度 (図-4.2.4)
- b) 全塑性限界点 : 下フランジに接しているウェブパネルにおいて、降伏領域がウェブパネルの有効範囲に達する時の強度 (図-4.2.5)
- c) 局部座屈発生点 : 支点上付近の桁端下端部において局部座屈が発生する時の強度 (図-4.2.6)

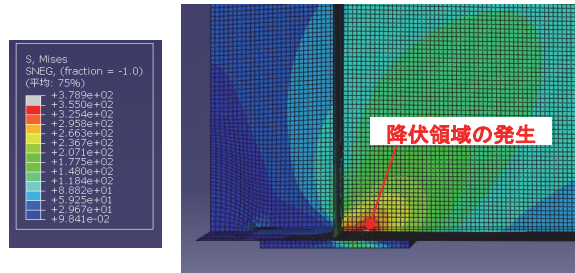


図-4.2.4 弾性限界点の例  
(Mises 相当応力コンター図)

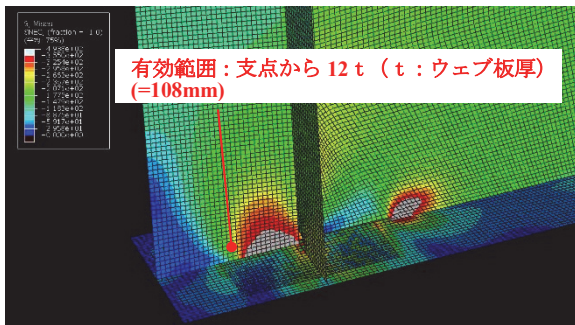


図-4.2.5 全塑性限界点の例  
(Mises 相当応力コンター図)

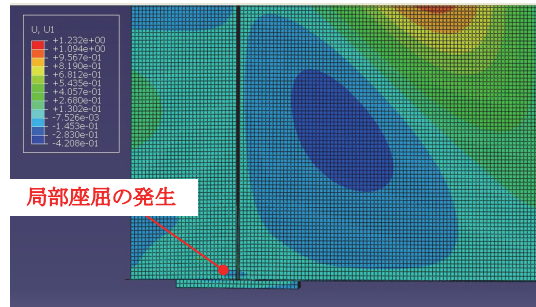


図-4.2.6 局部座屈発生点の例  
(面外方向変位コンター図)

これらの定義のもと整理した各限界状態における強度割合を図-4.2.7 に示す。

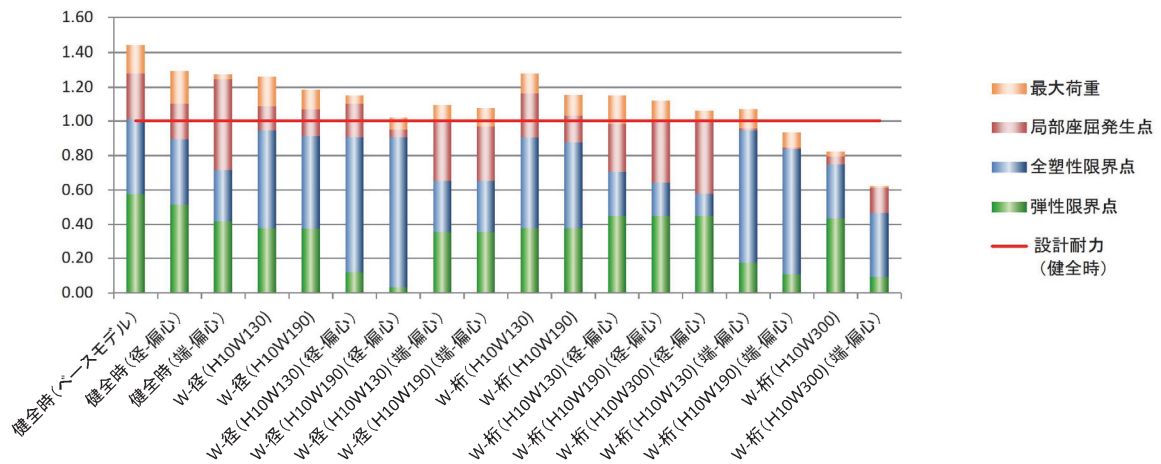


図-4.2.7 限界状態毎の強度割合

弾性限界点は、2つの傾向がみられた。欠損部に支点があるケース（ウェブ径間側部分欠損で径間側に支点偏心したケースやウェブ桁端側部分欠損で桁端側に支点偏心したケース）では、弾性限界点が100～200(kN)程度と低い傾向がみられたが、これは降伏した要素の境界条件と関係が深く、欠損部と下フランジが接しているウェブの荷重集中点による局所的な降伏である。一方、それ以外のケースは、おおよそ600～1,000(kN)程度であり、図-4.2.2の荷重-変位曲線ではおおよそ非線形開始点に位置しているように思われる。

欠損箇所と反対側に支点が偏心したケース（ウェブ径間側部分欠損で桁端側に支点偏心したケースやウェブ桁端側部分欠損で径間側に支点偏心したケース）にみられるような全塑性限界点が低いケースは、片側ウェブに応力が集中する状況から生じた結果と考えられる。ちなみに、塑性域がソールプレート付近まで達した段階付近でスカーラップ付近から局部座屈が発生しており、そこからねじり変形が発生することからも、耐力低下の支配要因は下端部の全塑性の広がりよりも局部座屈の発生によるものと考えられる。

偏心したケースの方が局部座屈発生点から最大荷重に至る段階が早いことから、支点偏心による応力集中によって発生する局部座屈が桁端部の崩壊を導く支配要因であることが考えられる。

#### 4.3 まとめ

本章では、支点位置が偏心することを考慮し、腐食により断面欠損が生じた桁端部の支点偏心に伴う耐力低下と崩壊メカニズムを詳細に分析、分類して整理した。

- 1) 欠損範囲が同一のケースで、支点が偏心する場合には、支点偏心していないケースと比較して、ウェブ径間側部分欠損では最大12%程度、ウェブ桁端側部分欠損では最大15%程度の耐力低下が見られた。なお、ウェブ桁端側全欠損で桁端側に支点位置が偏心した場合には、健全時に比べて50%以下の耐力低下がみられた。また、支点偏心したケースにおいて欠損幅がソールプレートよりも内側であれば設計降伏耐力を確保できることを示した。
- 2) 第3章で設定した崩壊タイプの分類をもとに偏心した解析ケースを分類した。「健全なケース」では、一端固定-他端回転バネ支持、局部座屈が崩壊モードの支配要因の場合は、桁端側ウェブ下端部に局部座屈が連続化した「ウェブ部分欠損ケース」および支点上補剛材の下端部が局部座屈した「ウェブ桁端側全欠損ケース」に分けられた。ウェブ桁端側欠損300mm（径間側に支点偏心した場合）を除き、支点偏心に関わらず同じ崩壊タイプに分類された。
- 3) 崩壊プロセスを踏まえて、崩壊メカニズムを示した。支点偏心により、一部の部材が変形し、支点を軸に非対称となるような挙動が確認された。また、ウェブ桁端側全欠損（支点偏心なし、桁端側支点偏心）の場合を除き、全てのケースでウェブの局部座屈による影響が支点部に及ぼすことで崩壊していた。
- 4) 解析ケースを4つのイベント「弾性限界点」、「全塑性限界点」、「局部座屈発生点」、「最大荷重」に着目して分析した。欠損側に偏心した場合、降伏領域が発生しやすい状態になり、健全なウェブ部材に偏心した場合には、その片側ウェブに応力が集中し、ウェブに局部座屈が発生しやすい状態になっていた。

#### 参考文献

- 1) (社)日本橋梁建設協会：東日本大震災 橋梁被害調査報告（改訂版）,2012
- 2) 国土技術政策総合研究所, (独) 土木研究所：平成16年（2004年）新潟県中越地震土木施設災害調査報告, 国総研 第27号 土木研究所報告No.203, 2006.1
- 3) 建設省：土木構造物標準設計, 全日本建設技術協会, 1994
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋支承標準設計（すべり支承編）,1993.5

## 第5章 簡易耐荷力評価方法の提案

### 5.1 まえがき

鋼 I 桁端部の腐食した桁端部の耐荷力特性を把握する研究や実験・解析結果から算出した終局耐力の評価算出式の提案を行う研究がなされており、徐々に腐食した桁端部の耐荷力特性は把握されつつある。

しかしながら一方で、維持修繕業務では、実験・解析との腐食形態の相違や構造諸元の相違により、腐食による桁端部の断面欠損時における補修の必要性の判断は、未だ定性的な判断によるところが多い。限られた予算の中で必要な対策を行うためには、新設時の耐力余裕を積極的に利用していくことが必要と考えられ、この視点を踏まえて耐力の回復レベル（要求レベル）を設定することが合理的であると考えられる。

本章では、現場の情報や構造諸元から対策の要否を判断できる資料の作成に向けて、実務で適用することを見越して、3つの簡易の耐荷力評価を提案する。

1つ目は、道路橋示方書<sup>1)</sup>に規定されている全体座屈、局部座屈、支圧状態の許容応力度に基づく手法を用いて検討する。健全および腐食したケースの解析結果の最大荷重と設計耐力（道路橋示方書の規定の許容値の上限値に安全率を掛けた耐荷力）を比較し、これらの関係を把握する。2つ目は、これまで得られた損傷を有する鋼 I 桁端部の耐荷力に関する検討成果を活用した検討を行なう。既往の研究結果をもとに算出された終局耐力の低下率と構造諸元や腐食損傷程度を軸にとって終局耐力の低下を把握できる分布図（以下、腐食影響図とする）を作成し、その分布図から算出される耐力低下の下限値をもとに耐荷力推定式を提案する。さらに、腐食損傷を有する桁端部の補修対策の判断の資料とするために、健全時の終局耐力と設計降伏耐力ならびに桁反力との関係を整理する。

3つ目は、第2章で実施した弾塑性有限変位解析の結果を分析して、桁端部の崩壊に影響する構造パラメータを抽出し、昭和53年度版<sup>2)</sup>と平成6年度版<sup>3)</sup>の標準設計等の桁端部の構造諸元を分析し、これらの結果を踏まえて、構造パラメータを変えた解析ケースを追加する。欠損位置によって、崩壊モードが決定される特性を活用し、崩壊モード毎に既往の耐荷力評価式を利用して評価できる簡易評価手法を提案する。

さらに、応急補修時に利用されることを想定し、終局耐力と使用限界強度の関係を示した上で、「腐食損傷した桁端部の耐力余裕と座屈発生による耐力低下のリスク」に着目した簡易評価法を提案する。また、恒久補修時に利用されることを想定し、非線形開始点の荷重と設計耐力との関係を示した上で、「腐食損傷した桁端部の荷重余裕と設計耐力の適正評価」に着目した簡易評価法を提案する。

## 5.2 道路橋示方書の許容値を使用した終局耐力照査

### 5.2.1 設計耐力の設定

支点上補剛材の下端部の照査方法を検討するため、式(5.2.1)に示すウェブと支点上補剛材の累加強度で評価する設計降伏耐力の式をベースに、H24道路橋示方書<sup>1)</sup>を基にパラメータを変更して算出して、解析結果を評価した。

$$P_d = A_{es} \times \sigma_{cals} \times \gamma_y + A_{ew} \times \sigma_{caow} \times \gamma_y \quad (5.2.1)$$

$A_{ew}$	: 補剛材の有効断面積
$A_{es}$	: ウェブの有効断面積 ( $24 t_w \times t_w$ )
$\sigma_{cals}$	: 補剛材の局部座屈に対する許容応力度の上限値 (SS400:140 N/mm <sup>2</sup> , SM490Y:210 N/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_{caow}$	: ウェブの局部座屈を考慮しない許容軸圧縮応力度の上限値 (SS400:140 N/mm <sup>2</sup> , SM490Y:187 N/mm <sup>2</sup> )
$\gamma_y$	: 安全率 (=1.7)

以下に4つの検討方法を示す。

1つ目の検討方法(検討1)は、支圧応力度に対する許容値から耐力算出する設計耐力(ウェブ有効幅:  $24 t_w$ )  $P_d$ である。軸方向圧縮応力度( $\sigma_{caw}, \sigma_{cas}$ )のパラメータを支圧応力度( $\sigma_{baw}, \sigma_{bas}$ )に変更し、さらに、軸方向圧縮応力度の安全率( $\gamma_y$ )のパラメータを支圧応力度の安全率( $\gamma_{by}$ )に変更した。支圧応力度に対する許容値については、1.13 (=1.7/1.5)を掛けて降伏応力度として設計耐力を求める。

2つ目の検討方法(検討2)は、材質の降伏点が低い補剛材に対して局部座屈による許容値から耐力算出する設計耐力(ウェブ有効幅:  $24 t_w$ )  $P_d$ であり、ウェブの軸方向圧縮応力度( $\sigma_{caw}$ )のパラメータを補剛材の軸方向圧縮応力度( $\sigma_{cas}$ )に変更した。

3つ目の検討方法(検討3)は、連成座屈(局部座屈を考慮)による許容値から耐力算出する設計耐力(ウェブ有効幅:  $24 t_w$ )  $P_d$ である。設計において一般に採用される安全側の視点から、各部材(ウェブと補剛材)の小さい方の許容値に基づいて全断面の耐荷力を求めたタイプも検討する。ウェブの軸方向圧縮応力度( $\sigma_{caw}$ )のパラメータをウェブの局部座屈を考慮しない許容軸方向応力度( $\sigma_{caow}$ )に変更し、補剛材の軸方向圧縮応力度( $\sigma_{cas}$ )のパラメータを補剛材の局部座屈に対する許容応力度( $\sigma_{cals}$ )に変更した。支点上補剛材は、柱として設計されているので、座屈に対する許容値からも耐荷力を算定して検討する。ここでは、柱の全体座屈を支配する細長比 $l/r$ が、座屈に対する許容値の上限値を採用できる値であることを確認した上で、局部座屈を考慮し累加強度として耐荷力を算出する。局部座屈の考慮にあたっては、補剛材は断面形状と材質によって、局部座屈を起こす可能性があるため $b_s/t_s$ を求めて許容値を算出するが、ウェブについては、その局部座屈の上限



値が採用できるように、有効断面として $24 t_w$ を採用しているため、上限値を用いて耐荷力を計算する。

4つ目の検討方法（検討4）は、連成座屈（局部座屈を考慮）による許容値から耐力算出する設計耐力（ウェブ有効幅：ソールプレート幅） $P_d$ である。より合理的な評価方法を検討するため、有効断面積を算出する際の有効幅としてソールプレート幅を採用する検討タイプを設けた。ウェブ、補剛材の軸方向圧縮応力度は3つ目の検討方法と同様に変更し、ウェブの有効幅（ $24 t_w$ ）のパラメータをソールプレート長さに変更したものである。

いずれの設計耐力は、欠損を考慮して求めるが、全有効断面積が補剛材の1.7倍以下という規定は考慮せずに算出した。

以上の4つの検討タイプを表-5.2.1にまとめて示す。

表-5.2.1 下端部の耐荷力評価方法検討タイプ

検討タイプ	ウェブの有効幅	許容値	
		ウェブ	補剛材
支圧応力 ( $24 t_w$ )	$24 t_w$	$\sigma_{ba}$	$\sigma_{ba}$
座屈最小値 ( $24 t_w$ )	$24 t_w$	最小値	
局部座屈 ( $24 t_w$ )	$24 t_w$	$\sigma_{cao}$	$\sigma_{cal}$
局部座屈 ソールプレート幅	soleplate	$\sigma_{cao}$	$\sigma_{cal}$

$\sigma_{ba}$ : 支圧応力度に対する許容値

最小値：ウェブは $\sigma_{cao}$ , 補剛材は $\sigma_{cal}$ を算出し、小さい方の値で全断面の耐荷力を求める。

設計耐力を計算するにあたって使用した基本的な設計値を表-5.2.2と表-5.2.3に示す。細長比 $l/r$ は11.5となるため、柱としての軸方向圧縮応力度の許容値はすべて上限値を採用する。一方、自由突出板の局部座屈に対する許容応力度は、 $b_s/t_s$ が11.1となるため、SS400材は上限値 $140\text{N/mm}^2$ を採用できるが、 $b_s/t_s > 10.5$ となるため、低減される領域となり、SM490Y材では $187\text{N/mm}^2$ に低減される。

表-5.2.2 座屈に関連する設計諸元

柱（ウェブと補剛材）		細長比 $l/r$	許容値		幅厚比 $b_s/t_s$
$l$	$r$		$b_s$	$t_s$	
900	78	11.5	155	14	11.1

$l$ : 有効座屈長（ウェブ高さの1/2）

$R$ : 断面二次半径（ウェブ中心）

$b_s$ : 補剛材の幅

$t_s$ : 補剛材の板厚

表-5.2.3 各材質の許容応力度

	SS400	SM490Y
細長比 $l/r$	18 以下 上限値	15 以下 上限値
断面二次半径 $r$ ( $l=900$ )	50mm 以上 上限値	60mm 以上 上限値
$\sigma_{cal}$ ( $b_s/t_s=11.1$ )	140 N/mm <sup>2</sup>	187 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{cao}$ (上限値)	140 N/mm <sup>2</sup>	210 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{ba}$	210 N/mm <sup>2</sup>	315 N/mm <sup>2</sup>

5.2.2 設計耐力による検討結果

各ケースの解析結果（最大荷重 $P_{max}$ ），前節で計算した4つの設計耐力 $P_d$ ，検討1；支圧応力度（有効幅： $24t_w$ ），検討2；ウェブと補剛材の材質が異なるので最小値の座屈耐荷力（有効幅： $24t_w$ ），検討3；ウェブと補剛材の材質で座屈耐荷力（有効幅： $24t_w$ ），検討4；ウェブと補剛材の材質で座屈耐荷力（有効幅：ソールプレート幅）および解析値 $P_{max}$ をこの4つの設計耐力 $P_d$ で割った値 $P_{max}/P_d$ を表-5.2.4にまとめた。

表-5.2.4には、各解析値を健全時の基準設計耐力（茶色）で割った値（水色）も示した。なお、基準設計耐力は、表-5.2.1の局部座屈（ $24t_w$ ）を用いた。

表-5.2.4 最大荷重（解析値） $P_{max}$ と設計耐力 $P_d$

材質	項目	単位	健全	ウェブ欠損			補剛材欠損		
				径間側 (H10W130)	径間側 (H10W190)	桁端側 (H10W300)	片側	両側	
ウェブ SM490Y 補剛材 SS400	$P_{max}$	最大荷重	kN	2,320	2,010	1,880	1,420	1,710	1,050
	$P_d$	支圧応力 ( $24t_w$ )	kN	1,722	1,376	1,376	1,376	1,207	692
		座屈最小値( $24t_w$ )	kN	1,496	1,264	1,264	1,264	979	463
		局部座屈 ( $24t_w$ )	kN	1,726	1,380	1,380	1,380	1,210	694
		局部座屈(ソールプレート幅)	kN	2,093	1,563	1,563	1,563	1,577	1,060
	$P_{max}/P_d$	(局部座屈 ( $24t_w$ ) 健全)		1.34	1.16	1.09	0.82	0.99	0.61
	$P_{max}/P_d$	支圧応力 ( $24t_w$ )		1.35	1.46	1.37	1.03	1.42	1.52
		座屈最小値( $24t_w$ )		1.55	1.59	1.49	1.12	1.75	2.27
		局部座屈 ( $24t_w$ )		1.34	1.46	1.36	1.03	1.41	1.51
		局部座屈(ソールプレート幅)		1.11	1.29	1.20	0.91	1.08	0.99
SS400	$P_{max}$	最大荷重	kN	1,930	1,730	1,640	1,290	1,360	770
	$P_d$	支圧応力 ( $24t_w$ )	kN	1,491	1,261	1,261	1,261	976	461
		座屈最小値( $24t_w$ )	kN	1,496	1,264	1,264	1,264	979	463
		局部座屈 ( $24t_w$ )	kN	1,496	1,264	1,264	1,264	979	463
		局部座屈(ソールプレート幅)	kN	1,740	1,386	1,386	1,386	1,223	707
	$P_{max}/P_d$	(局部座屈 ( $24t_w$ ) 健全)		1.29	1.16	1.10	0.86	0.91	0.51
	$P_{max}/P_d$	支圧応力 ( $24t_w$ )		1.29	1.37	1.30	1.02	1.39	1.67
		座屈最小値 ( $24t_w$ )		1.29	1.37	1.30	1.02	1.39	1.66
		局部座屈 ( $24t_w$ )		1.29	1.37	1.30	1.02	1.39	1.66
		局部座屈(ソールプレート幅)		1.11	1.25	1.18	0.93	1.11	1.09
SM490Y	$P_{max}$	最大荷重	kN	2,640	2,400	2,300	1,850	1,930	1,040
	$P_d$	支圧応力 ( $24t_w$ )	kN	2,237	1,891	1,891	1,891	1,464	692
		座屈最小値 ( $24t_w$ )	kN	1,998	1,689	1,689	1,689	1,308	618
		局部座屈 ( $24t_w$ )	kN	2,074	1,727	1,727	1,727	1,384	694
		局部座屈(ソールプレート幅)	kN	2,440	1,910	1,910	1,910	1,750	1,060
	$P_{max}/P_d$	(局部座屈 ( $24t_w$ ) 健全)		1.27	1.16	1.11	0.89	0.93	0.50
	$P_{max}/P_d$	支圧応力 ( $24t_w$ )		1.18	1.27	1.22	0.98	1.32	1.50
		座屈最小値( $24t_w$ )		1.32	1.42	1.36	1.10	1.48	1.68
		局部座屈 ( $24t_w$ )		1.27	1.39	1.33	1.07	1.39	1.50
		局部座屈(ソールプレート幅)		1.08	1.26	1.20	0.97	1.10	0.98

### 5.2.3 健全時の設計耐力による検討

各解析値を式(5.2.1)で求めた健全時の設計耐力(設計降伏耐力) $P_d$ で割った値を図にすると図-5.2.1のようになる。

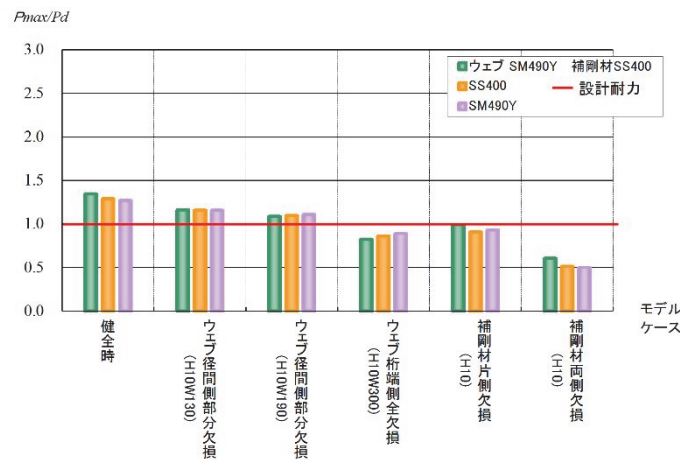


図-5.2.1 設計耐力(局部座屈(24tw)健全時)との比較

健全時モデルの解析値は、道路橋示方書に基づいて計算した設計降伏耐力 $P_d = 1,726(\text{kN})$ の約1.34倍となった。この健全時の解析結果を基準耐荷力として比較すると、図-5.2.1に示すように補剛材両側欠損ケースでは基準設計耐力の40%前後に、ウェブ桁端側欠損ケースでは60~70%に、補剛材片側欠損ケースでは約70%に、ウェブ径間側部分欠損ケースでは、80~90%に低下している。しかしながら、設計耐力との比較では、ウェブ径間側部分欠損ケースでは断面欠損しても、 $P_{max}/P_d$ は、1.0以上となり、健全時の設計耐力は確保されているという結果になった。また、補剛材両側欠損ケースでは、補剛材断面積がゼロであるにもかかわらず、設計耐力の50%の耐荷力を示している。

以上のことから、耐荷力に対するウェブの寄与は従来考えられたものより大きいことが考えられ、補剛材の下端が断面欠損しても、支点直上の耐荷力は補剛材の断面積に比例して低下するものではないと考えられる。

### 5.2.4 設計耐力の評価法の検討

#### (1) 検討1: 支圧応力(24tw)

各解析値を式(5.2.2)で求めた支圧応力に対する許容値から求めた設計耐力と比較すると図-5.2.2のようになる。

$$P_d = A_{es} \times \sigma_{bas} \times \gamma_{by} + A_{ew} \times \sigma_{basw} \times \gamma_{by} \quad (5.2.2)$$

$A_{es}$  : 補剛材の有効断面積

$A_{ew}$  : ウェブの有効断面積 (24tw×tw)

$\sigma_{bas}$  : 補剛材の支圧応力度の上限値

(SS400:210N/mm<sup>2</sup>, SM490Y:315N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{basw}$  : ウェブの支圧応力度の上限値

(SS400:210N/mm<sup>2</sup>, SM490Y:315N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma_{by}$  : 安全率 (=1.13)

この図から分かるように、 $P_{max}/P_d$  が材質タイプに対してばらつきが見られ、かつ、欠損ケースに対してもばらつきがあることがわかる。第3章表-3.3.3において、最大荷重時において、降伏と局部座屈を起こしており、この影響を考慮できないために生じるものと考えられる。すなわち、支圧応力度に対する許容値は材料強度の降伏点から決められているため、局部座屈の影響を考慮することができない。また、H24道路橋示方書において第1章表-1.3.1に示すように、板と板の支圧に対して設定された許容値でもあるため、対象部分の構造に対する適用性について検討する余地があるものと考えられる。

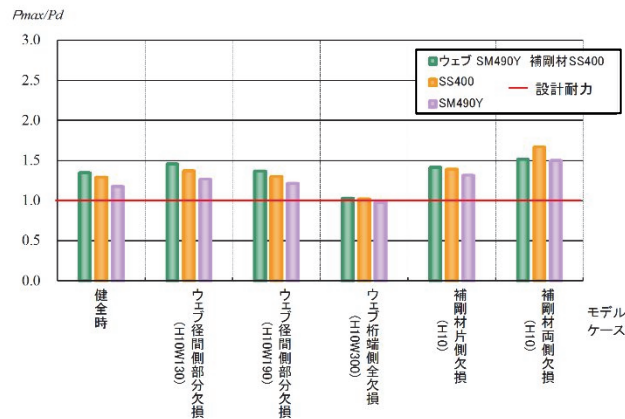


図-5.2.2 設計耐力（支圧応力（24 t<sub>w</sub>））との比較

## (2) 検討2：座屈最小値（24 t<sub>w</sub>）

各解析値を式(5.2.3) (5.2.4) で求めた最小値で求めた安全側の設計耐力（座屈最小値24 t<sub>w</sub>）と比較した結果を図-5.2.3 に示す。

[ 全てSS400材，補剛材SS400材 ウェブSM490Y材 ]

$$P_d = A_{es} \times \sigma_{cals} \times \gamma_y + A_{ew} \times \sigma_{cals} \times \gamma_y \quad (5.2.3)$$

[ 全てSM490Y材 ]

$$P_d = A_{es} \times \sigma_{caos} \times \gamma_y + A_{ew} \times \sigma_{caos} \times \gamma_y \quad (5.2.4)$$

$A_{es}$  : 補剛材の有効断面積

$A_{ew}$  : ウェブの有効断面積（24 t<sub>w</sub> × t<sub>w</sub>）

$\sigma_{cals}$  : 補剛材の局部座屈に対する許容応力度の上限値（=140N/mm<sup>2</sup>）

$\sigma_{caos}$  : 補剛材の局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度の上限値  
（=187N/mm<sup>2</sup>）

$\gamma_y$  : 安全率（=1.7）

この図からわかるように、材質ケースに対してばらつきが非常に大きい。ウェブ SM490Y材、補剛材SS400材のケースでは、ウェブ（SM490Y）の高い強度を合理的に評価できていないためと考えられる。

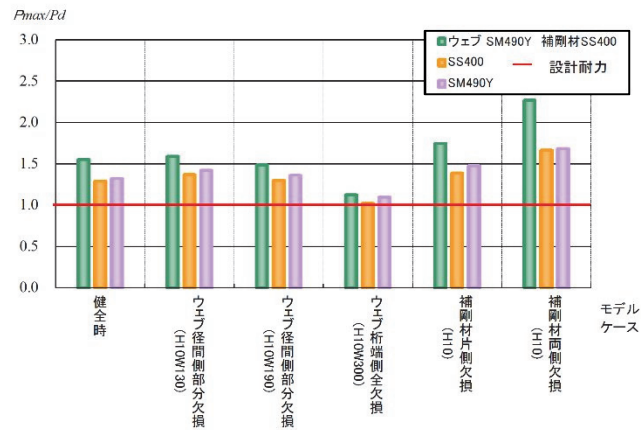


図-5.2.3 設計耐力（座屈最小値（24 t<sub>w</sub>））との比較

### (3) 検討3：局部座屈（24 t<sub>w</sub>）

各解析値を、式(5.2.5)で求めた局部座屈を考慮した設計耐力（局部座屈(24 t<sub>w</sub>)）と比較した結果を図-5.2.4に示す。

$$P_d = A_{es} \times \sigma_{cals} \times \gamma_y + A_{ew} \times \sigma_{caow} \times \gamma_y \quad (5.2.5)$$

$A_{es}$  : 補剛材の有効断面積

$A_{ew}$  : ウェブの有効断面積（24 t<sub>w</sub> × t<sub>w</sub>）

$\sigma_{cals}$  : 補剛材の局部座屈に対する許容応力度の上限値  
 (SS400:140 N/mm<sup>2</sup>, SM490Y:187 N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{caow}$  : ウェブの局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度の上限値  
 (SS400:140 N/mm<sup>2</sup>, SM490Y:210 N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma_y$  : 安全率（=1.7）

材質ケース間のばらつきは、支圧応力度に対する許容値による評価より若干小さくなっている。

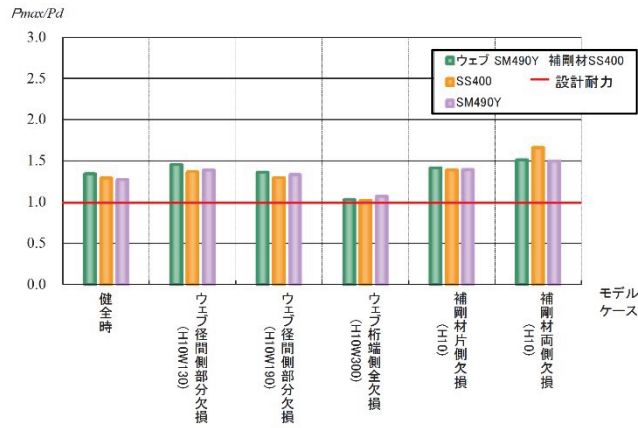


図-5.2.4 設計耐力（局部座屈（24 t<sub>w</sub>））との比較

#### (4) 検討4：局部座屈（ソールプレート幅）

各解析値をウェブの有効断面を固定支承のソールプレート幅として式(5.2.6)で求めた設計耐力（局部座屈（ソールプレート幅））と比較した図が図-5.2.5である。

$$P_d = A_{es} \times \sigma_{cals} \times \gamma_y + A_{ew} \times \sigma_{caow} \times \gamma_y \quad (5.2.6)$$

- $A_{es}$  : 補剛材の有効断面積
- $A_{ew}$  : ウェブの有効断面積 (24 t<sub>w</sub> × l<sub>soleplate</sub>:ソールプレート幅)
- $\sigma_{cals}$  : 補剛材の局部座屈に対する許容応力度の上限値  
(SS400:140 N/mm<sup>2</sup>, SM490Y:187 N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{caow}$  : ウェブの局部座屈を考慮しない許容応力度の上限値  
(SS400:140 N/mm<sup>2</sup>, SM490Y:210 N/mm<sup>2</sup>)
- $\gamma_y$  : 安全率 (= 1.7)

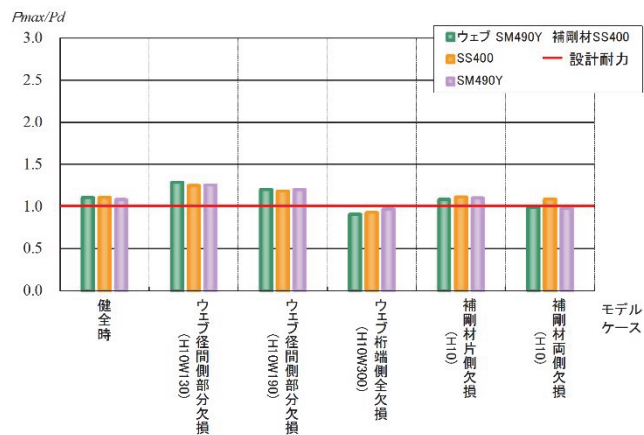


図-5.2.5 設計耐力（ソールプレート幅）との比較

図からわかるように、断面欠損ケースによるばらつきが小さくなるとともに、健全時の  $P_{max}/P_d$  が1.0 に近づいている。このことから、本検討で対象とした構造諸元を有する桁端部では、ウェブの有効幅として、標準設計で採用されている固定側のソールプレート範囲程度 ( $b/t_w=330\text{mm}/2/9\text{mm}=18.3$  で約  $18 t_w$  ( $36 t_w$ )) を採用することで合理的な設計法になる可能性が考えられる。

一方、ウェブは実際の構造を考えると連続性があり、隣り合う2 辺（補剛材と下フランジ）によって拘束されている。両縁支持板では、SM490Y 材でも  $b/t_w$  は31.6 まで上限値がとれる。

合理的な照査方法を確立するためには、こうした視点から、ウェブの有効幅を再考することが望まれる。

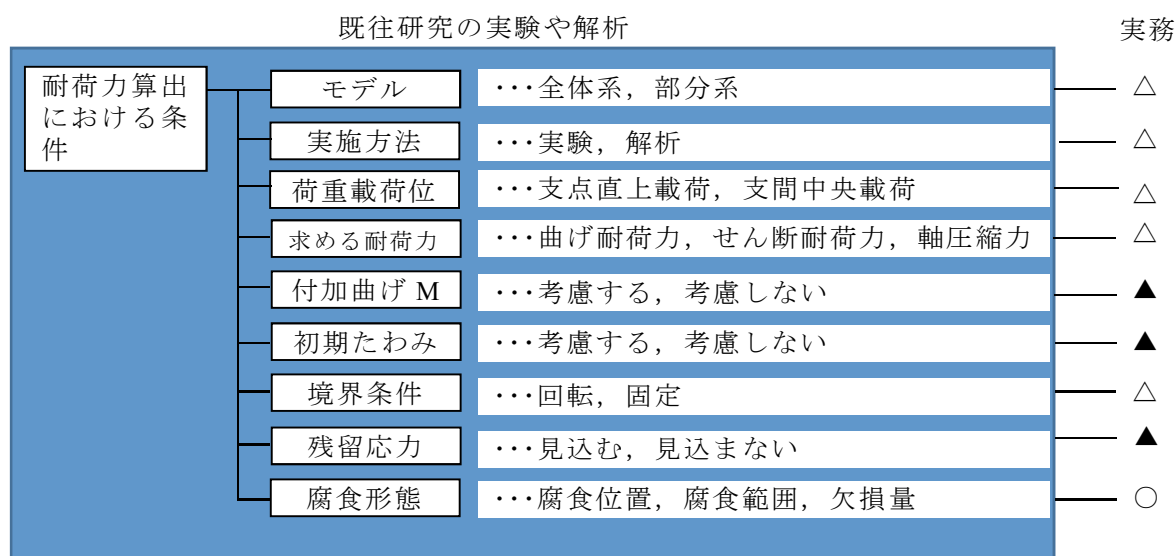
### 5.3 腐食損傷を有する鋼I桁端部の耐荷力推定方法に関する一検討

#### 5.3.1 腐食影響図

##### (1) 用いた研究成果と整理方法（影響図の作成方法）

既往の研究結果をもとに腐食損傷を有する鋼I桁端部の耐荷力に関する検討成果を活用した耐荷力推定方法を検討する。第2章～第4章では、ウェブ欠損と補剛材片側欠損、補剛材両側欠損の腐食形態に限定しているため、他の既往研究成果の腐食形態を利用することで、耐荷力の推定式に汎用性が拡大すると考える。

点検時において、桁端下端部に腐食損傷が確認された場合、点検・補修一括業務を除いて一般的には、腐食損傷程度から定性的な判断に基づいて診断を行い、耐荷力を算出しない場合が多い。一方、既往研究の実験や解析では、モデル、境界条件、初期たわみ、



※○：点検・補修設計・補強設計において、必ず考慮する条件

△：補修設計・補強設計において、必要に応じて解析を行い、耐荷力算出において考慮する条件

▲：補修設計・補強設計において、必要に応じて解析を行い、より詳細に検討する際に必要な条件

図-5.3.1 耐荷力算出における条件に対する実務での利用するパラメータ

残留応力など細かい条件設定した上で耐荷力を算出している<sup>5)~17)</sup>。これらの研究における桁端下端部の腐食損傷の設定では、現場の腐食形態を踏まえた代表的な腐食損傷モデル、個々の実際の腐食桁を基に設定した腐食損傷モデル、最も大きい腐食損傷モデルなどが設定されている。主な条件を整理すると図-5.3.1の通りである。

腐食影響図を作成するにあたって用いた既往研究の実験や解析では、桁端部の腐食損傷を設定して終局耐力すなわち最大荷重を求めている。ここで示す終局耐力は、支点部耐力とせん断耐力を考えており、支点部耐力は、支点上補剛材とウェブの十字柱の耐力とし、せん断耐力は、主として支点上補剛材に隣接している支間中央側のウェブでの耐力としている。

ここでは、損傷時の終局耐力  $P_u$  と損傷時の設計降伏耐力  $P_y$  (有効断面積を基に計算した設計基準耐力) の関係および残存板厚  $t$  との関係腐食影響図を描いて検討する。

腐食影響図の作成では、解析や実験から得られた損傷時の終局耐力、損傷時の設計降伏耐力および残存板厚については、同一モデルで比較し、それぞれの健全時の値 ( $P_{Hu}$ ,  $P_{Hy}$ ,  $t_0$ ) に対する百分率で無次元化して示す。この  $P_{Hu}$  は解析や実験から得られた最大荷重を示す。

終局耐力を縦軸にとり、設計降伏耐力、残存板厚は横軸にとる。右に行くほど、腐食による断面減少が大きい図となっている。

腐食影響図では、損傷モデルの欠損高さ、欠損幅、腐食形態についても検討できるような欠損高さ率 ( $h_D$ : 欠損高/ $H$ : 桁高)、欠損幅率 ( $w_D$ : 欠損幅/ $W$ : パネル幅)、腐食形態で損傷モデルを分類し、欠損高さ率については色で、欠損幅率は記号の大きさ、腐食形態は記号の種類で識別した記号をプロットして各試験結果を影響図にまとめて示した。

用いた研究成果の載荷方法は、支点中央載荷と支点直上載荷の2種類があった。前者は桁の支点部の耐力であり、後者は支点部の柱としての耐力である。両者の意味合いが異なることから、それぞれ別の腐食影響図を作成する。各パラメータの詳細な説明を以下に示す。

#### a) 設計降伏耐力の低下率 ( $P_y$ : 損傷時の設計降伏耐力/ $P_{Hy}$ : 健全時の設計降伏耐力)

$P_y$  は残存断面積と材料の降伏点を掛け合わせることで、構造諸元から設定できる設計降伏耐力である。 $P_y/P_{Hy}$  は健全時に対する損傷時の設計降伏耐力の低下率を示す。損傷時の設計降伏耐力は、損傷を考慮した有効断面積(残存断面積)を用いて算出式(5.3.1)を用いて算出する。この残存断面積は、現場で計測した残存板厚と残存幅を用いて算出する。便宜上、残存板厚や残存幅は、安全側の最小値を適用するが、局部的に完全欠損している場合は、その範囲を計測した結果の断面積を用いる。

$$P_y = \sigma_{yw} \cdot A_{ew} + \sigma_{ys} \cdot A_{es} \quad (5.3.1)$$

$P_y$  : 構造諸元から設定する設計降伏耐力

$\sigma_{yw}$  : ウェブの降伏点の公称値(N/mm<sup>2</sup>)



$\sigma_{ys}$  : 支点上補剛材の降伏点の公称値(N/mm<sup>2</sup>)

$A_{ew}$  : ウェブの有効断面積(mm<sup>2</sup>)

※有効幅は  $24t_w$  ( $t_w$ : ウェブ板厚)

$A_{es}$  : 支点上補剛材の有効断面積(mm<sup>2</sup>)

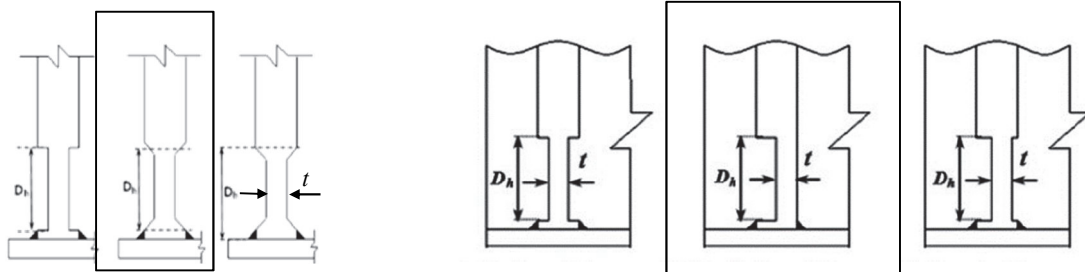
ウェブと支点上補剛材から成る十字柱断面における各々の突出板は、文献4では、その鋼種に応じた応力-変位で挙動していることが示されている。また、第2章でも同様のことが示されている。これらの結果より、設計降伏耐力の算出式は、十字柱におけるウェブの有効断面積と降伏応力の積と支点上補剛材の有効断面積と降伏応力の積を足し合わせた累加強度で算出することにした。

腐食損傷を伴う対象部の終局耐力は降伏域の広がり、局部座屈、柱の座屈、ウェブのせん断座屈など複数の要因が関係しあって決定される。ここで用いる基準耐荷力式は柱としてモデル化して用いられる有効断面積を用いられている。しかしながら、支点上補剛材は降伏点まで局部座屈を発生させないように、幅厚比 ( $b/t$ ) が決められることを考えると、ほぼソールプレート内にある対象断面の各部材の全降伏耐力を足しあわせて累加強度で局部座屈の影響も概略は把握できると考えた。式(5.3.1)の有効断面積の計算は、道路橋示方書<sup>22)</sup>の荷重集中点の補剛材の考え方に準拠し、支点上補剛材は全断面積とし、ウェブは有効幅を支点上補剛材取付部からウェブ板厚  $t_w$  の24倍とする。

#### b) 残存板厚率 ( $t$ : 残存板厚/ $t_0$ : 設計板厚)

健全時の板厚に対する欠損の割合を残存板厚率とする(図-5.3.2)。Khurramらは、損傷跡の違いによる影響<sup>5)</sup>(図-5.3.2(a))と減肉方法の違いによる影響<sup>6)</sup>(図-5.3.2(b))を検討した。図-5.3.2の□で囲んだケースが異なる2ケースと比較して終局耐力の低下率は最大2.2%程度大きくなる傾向があったため、損傷跡の違いや減肉方法の違いは区別せずと同じ残存板厚率として取り扱うこととした。

残存板厚は現場計測し、便宜上、安全側の最小板厚を適用する。また、ウェブと支点上補剛材で残存板厚率が異なる場合は、残存板厚率が小さい方を採用した。



(a) 損傷跡の違い<sup>5)</sup>

(b) 減肉方法の違い<sup>6)</sup>

例) 健全桁の板厚  $t_0$  が 14 mm で、損傷部の板厚  $t$  が 7 mm の場合 :  $t/t_0 = 7/14 = 1/2 = 50$  (%)

図-5.3.2 残存板厚率の算出例

c) 欠損高さ率 ( $h_D$ : 欠損高/ $H$ : 桁高)

欠損高さ率は、桁高に対する損傷高の割合を示す。ここで提案する腐食影響図では、割合の程度は、図-5.3.3に示す算出例のように色で表現する。5%未満を●、5%~10%未満を●、10%~20%未満を●、20%~40%未満を●、40%以上を●で表す。

欠損高の分類では、実際に現場で多く見受けられる微小なケースとして5%未満を設定し、まれに見受けられる100mm以下の欠損高を対象に5%~10%未満とした。さらに、文献7では、10%、20%、40%の解析検討をしていることから、その分類を利用して、10%~20%未満、20%~40%未満、40%以上と設定した。

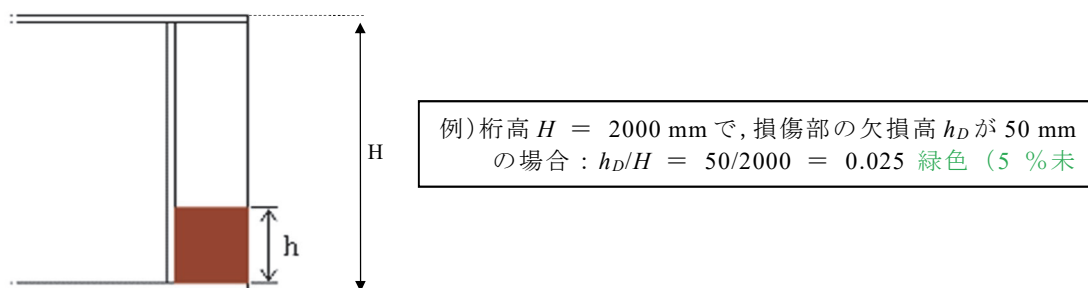


図-5.3.3 欠損高の算出例

d) 欠損幅率 ( $w_D$ : 欠損幅 /  $W$ : パネル幅)

欠損幅率は、1パネルの幅に対する欠損幅の割合を示す。このパネルは、支点上補剛材がウェブに取付く交差部から1パネル目を示す。割合の程度は、図-5.3.4をもとに形状の大きさを表現する。30%未満を4pt (例: ●)、30%~50%未満を6pt (例: ●)、50%~100%未満を8pt (例: ●)、100%を10pt (例: ●) とした。

欠損幅率の分類では、ウェブに着目し、主としてソールプレート内側相当の欠損幅を想定して30%未満とし、ソールプレート外側まで広がった欠損幅を30%~50%未満とした。さらに、全て欠損した場合を100%とし、それ以外の欠損幅を50%~100%未満とした。

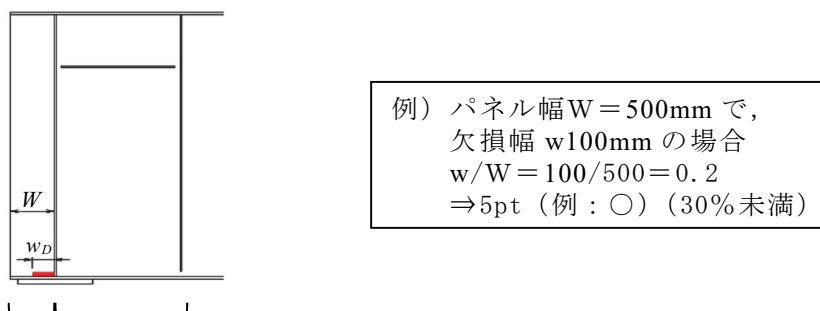
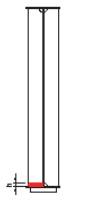


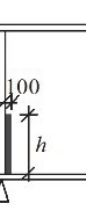

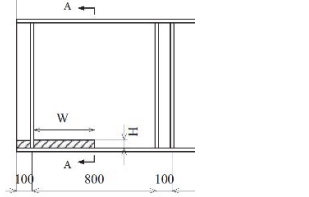
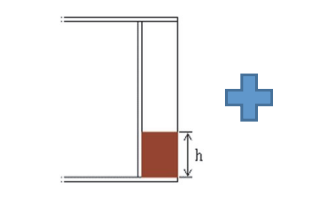
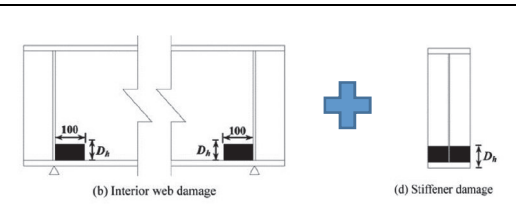
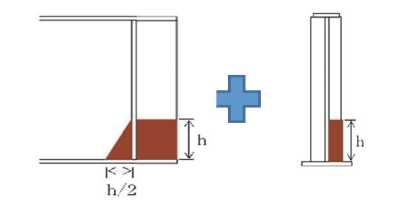
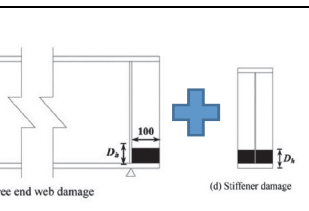
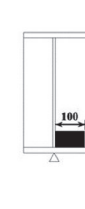
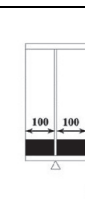
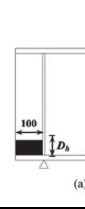
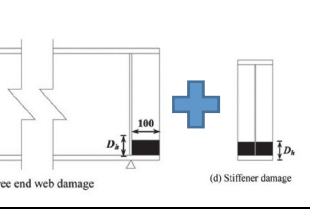
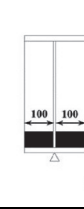



図-5.3.4 欠損幅の算出例 ( ┌ ┐ は1パネルを示す)

f) 腐食形態

腐食形態は、実験・解析で実施された表-5.3.1に示す支点上補剛材およびウェブが腐食した全パターン（10パターン）を設定し、腐食形態を表内に示す記号で表現する。ここで、複数の部材が欠損している場合は塗りつぶした記号を、一部材が欠損している場合は塗りつぶさない記号を用いた。

表-5.3.1 腐食形態の設定

<p>(a)補剛材片側欠損 (△)</p> 	<p>(b)補剛材両側欠損 (◇, *※)</p> 	<p>(c)ウェブ径間側欠損 (○, □※)</p> 	<p>(d)ウェブ桁端側欠損 (□)</p> 
<p>(e)ウェブ両側欠損 (□, ×※)</p> 	<p>(f)ウェブ片側欠損 + 補剛材片側欠損 (▲)</p> 	<p>(g)ウェブ両側欠損 + 補剛材片側欠損 (▲)</p> 	<p>(h)ウェブ径間側欠損 + 補剛材両側欠損 (◆)</p> 
<p>(i)ウェブ桁端側欠損 + 補剛材両側欠損 (●, +※)</p> 	<p>(j)ウェブ両側欠損 + 補剛材両側欠損 (■)</p> 	<p>(a) Free end web damage</p> 	<p>(b) Interior web damage</p> 
<p>(c) Free end web damage</p> 	<p>(d) Stiffener damage</p> 	<p>(c) Free end web damage</p> 	<p>(d) Stiffener damage</p> 

※表中の\*, +, ×, □ は実験

(2) 腐食影響図の適用範囲（データの収集条件）

a) 下フランジの腐食損傷

文献8では、下フランジの残存板厚率を60%程度減少させて解析した結果、最大荷重の低下率は最大でも7%程度の低下率に留まっていた。これらの結果を踏まえて、下フランジの損傷は、一部の孔食による局部腐食、または、30%以下の残存板厚率の全面腐食に留まっている程度を対象とする。

b) 腐食形状が三角形の場合

径間側ウェブの腐食形態が三角形をモデルとした文献9では、その欠損幅を2倍に拡大させて解析した結果、最大荷重の低下率は最大でも5%程度の低下率に留まっていた。また、文献10では、径間側ウェブの腐食形態が三角形で、せん断耐荷力に着目して解析

した結果、健全時の最大荷重からほとんど低下していなかった。これらの結果より、径間側ウェブの腐食形態は、形態を多少変更しても評価に与える影響は小さいと考えた。以上より、三角形の腐食形態を便宜上、図-5.3.5に示すような三角形の各頂点を最大値とする長方形の形状 $\square$ として、欠損高と欠損幅を設定する。

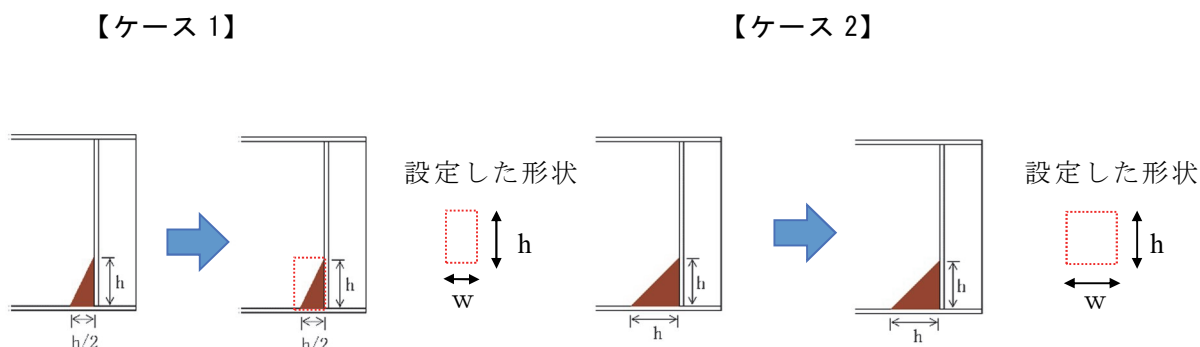


図-5.3.5 腐食形状の設定

### c) 腐食影響図の作成条件

極力多くのデータを収集するとともに、特殊な条件あるいは材料の違いなどで終局耐力と腐食損傷との関係を把握できないと考えられるため、この2つの視点から以下の条件でデータを収集した。

- ・原則として軟鋼で構成された構造を対象とする。
- ・載荷荷重は鉛直荷重を対象とする。
- ・実験と解析の双方の研究を対象とする。
- ・全体モデルと部分モデルの双方を対象とする。
- ・モデルはシェル要素でもソリッドでも収集する。
- ・付加曲げモーメントを考慮している場合も収集する。
- ・初期たわみ、残留応力を考慮するしない関係なく収集する。
- ・支承モデルは、線支承、BP 支承、ゴム支承など全てを対象とする。
- ・補強条件：当て板補強を取り付けることで、終局耐力が増大するので、ない場合を想定する。
- ・支承部の補剛材は支点上補剛材 1 本の構造を対象とする。

### d) 補強リブ

図-5.3.6 に示すように補強リブが設置されているケースの有効断面積は、欠損に伴う割合が小さく、構造諸元から算出する設計降伏耐力の低下率には大きく反映されない。そのため、式(5.3.1)をもとに算出する設計降伏耐力をパラメータとする腐食影響図は補強リブを対象としない。

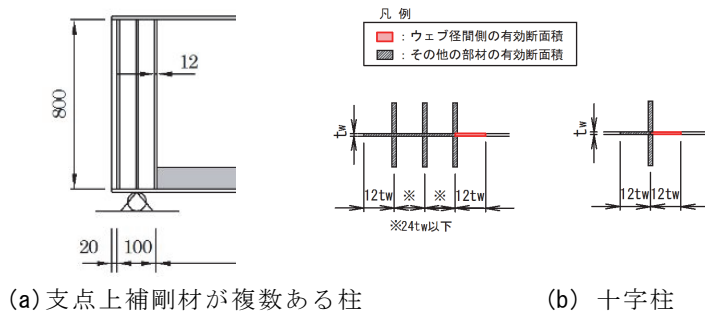


図-5.3.6 設計降伏耐力算出における有効断面積の設定

### (3) 腐食影響図の作成

前節までの条件を踏まえて、第2章の解析モデルと文献5～17にある実験結果と解析結果の終局耐力を用いて、腐食損傷をした場合の終局耐力と基本耐力との関係を図-5.3.7～図-5.3.10)に示す。図-5.3.7および図-5.3.9には、支間中央載荷のデータを用いた図を、図-5.3.8および図-5.3.10には、支点直上載荷のデータを用いた図を示す。

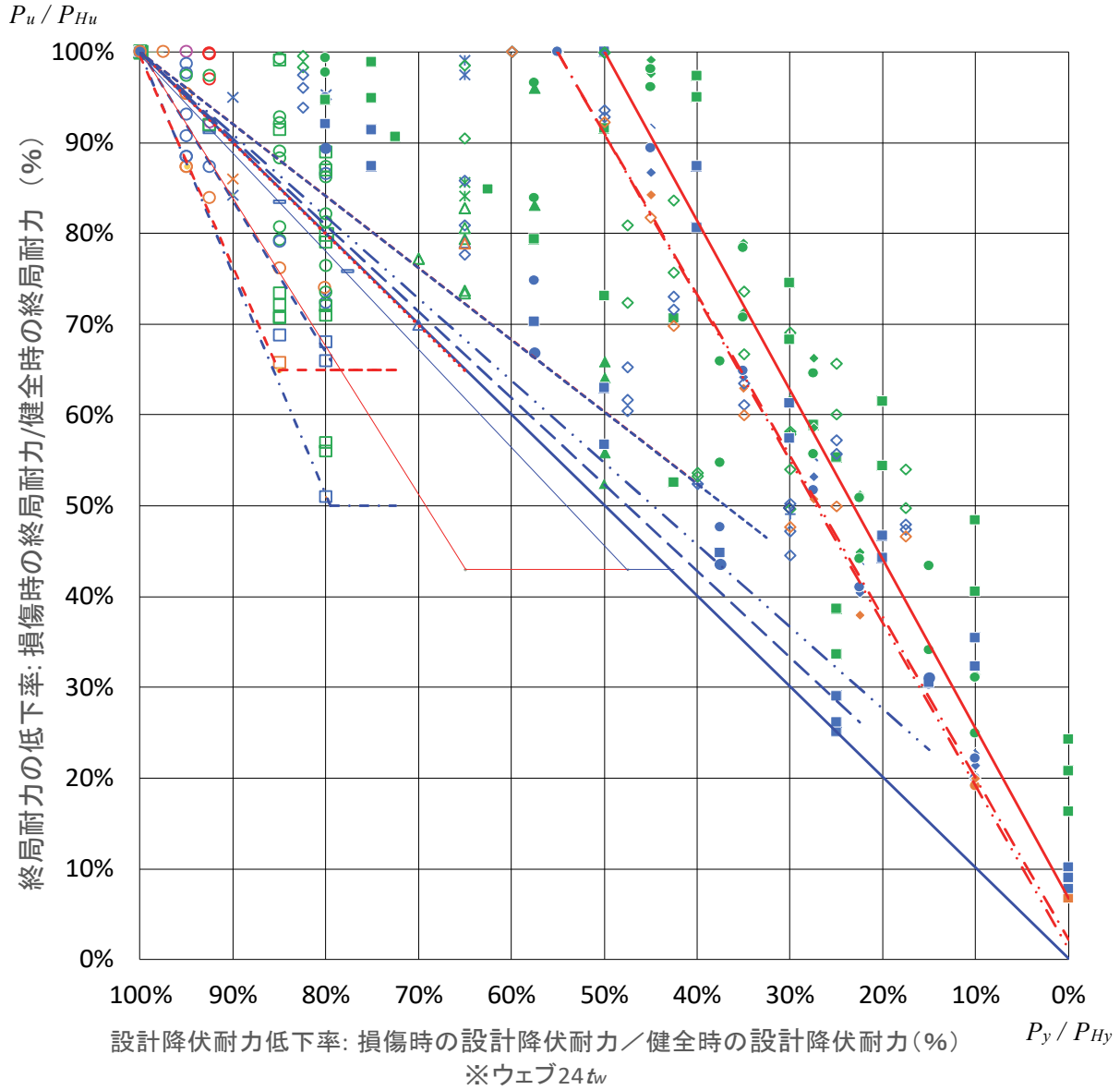
これらの図中には、様々なモデルが混在しているが、欠損ケース毎に分析してそれぞれの傾向を示すとともに、適用できる範囲を示すことで、腐食影響図に示される下限値や低下率を示すことが可能と考えた。欠損ケースごとに耐力低下率の下限値のラインを示す。この下限値は、収集データの下限値を示す。支点部耐荷力については青線で、せん断耐荷力については赤色で示す。

図-5.3.7と図-5.3.8では、終局耐力の低下率に対して設計降伏耐力の低下率が大きいケースを抽出し、低下率が大きい点と健全時の終局耐力の点を直線で結んでいる。第2章の解析モデルと文献5、6の解析結果では、欠損ケースの終局耐力時には、支点上補剛材などの支点部の部材が座屈していた。支点部の部材が大きく変形した時の耐荷力が支点部耐荷力と考えられることから、桁端部の終局耐力と支点部の設計降伏耐力とは関係性がある。以上より、構造諸元から算出される設計降伏耐力の低下率をパラメータとする腐食影響図においても、下限値ラインを直線で表現する。

図-5.3.9と図-5.3.10では、残存板厚率が0%の完全欠損時の点と健全時の終局耐力の点を直線で結んでいる。なお、残存板厚率が0%のケースがない場合には、終局耐力の低下率に対して残存板厚率が大きいケースを抽出し、残存板厚率が大きい点と健全時の終局耐力の点を直線で結んでいる。

健全な部材は軸方向圧縮応力が下フランジに作用することから、欠損ケースによっては設計降伏耐力がゼロにならない場合がある。そこで、下限値ラインの終局耐力の最小値を以下のように設定した。なお、下限値ラインの終局耐力の最小値は標準設計の範囲での最小値である。

まず、表-5.3.2に示すように、文献3の平成6年度の標準設計の全構造諸元(206ケース)および文献2の昭和53年度の標準設計の全構造諸元(281ケース)を用いて、欠

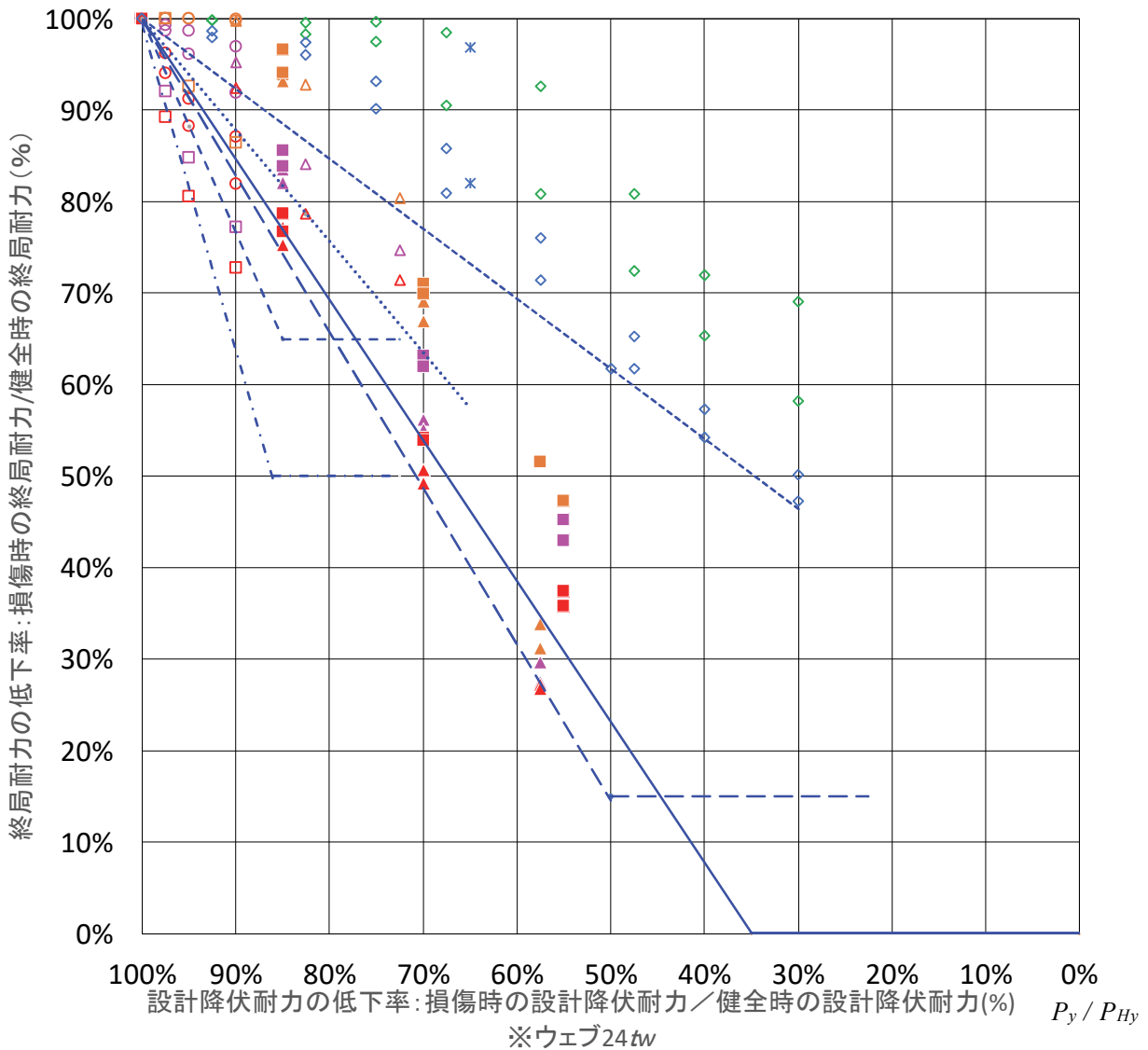


凡例

欠損ケース	欠損ケース	終局耐力の下限値 (推定線)	推定線の色の内訳	欠損ケース	支間中央載荷条件
[解析] a) 補剛材片側欠損	[解析] a) △	.....	[中央径間載荷条件]	[解析] a)	N = 11 [文献7,8,10]
[解析] b) 補剛材両側欠損	[解析] b) ◇	-----	青線: 支点部耐力	[解析] b)	N = 60 [文献7,8,10,12,20]
[実験] b) 補剛材両側欠損	[実験] b) *	-----	青線: せん断耐力	[実験] b)	N = 4 [文献20]
[解析] c) ウェブ径間側欠損	[解析] c) ○	-----		[解析] c)	N = 68 [文献7~10,12,16,17,20]
[実験] c) ウェブ径間側欠損	[実験] c) ○	-----		[実験] c)	N = 0 [文献15]
[解析] d) ウェブ桁端側欠損	[解析] d) □	-----		[解析] d)	N = 22 [文献7,8,10]
[実験] d) ウェブ桁端側欠損	[実験] d) □	-----		[実験] d)	N = 5 [文献18]
[解析] e) ウェブ両側欠損	[解析] e) ×	-----		[解析] e)	N = 3 [文献20]
[実験] e) ウェブ両側欠損	[実験] e) ×	-----		[実験] e)	N = 6 [文献10]
[解析] f) ウェブ片側欠損+補剛材片側欠損	[解析] f) ▲	-----	欠損高さ	[解析] f)	N = 0 [文献10]
[解析] g) ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損	[解析] g) ▲	-----	欠損高さ率: 5%未満	[解析] g)	N = 6
[解析] h) ウェブ径間側欠損+補剛材両側欠損	[解析] h) ◆	-----	欠損高さ率: 5~10%未満	[解析] h)	N = 30 [文献12]
[解析] i) ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損	[解析] i) ●	-----	欠損高さ率: 10~20%未満	[解析] i)	N = 50 [文献12,20]
[実験] i) ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損	[実験] i) ●	-----	欠損高さ率: 20~40%未満	[実験] i)	N = 1 [文献19]
[解析] j) ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損	[解析] j) ■	-----	欠損高さ率: 40%以上	[解析] j)	N = 59 [文献10,12,20]

図-5.3.7 腐食影響図(終局耐力の低下率, 設計降伏耐力の低下率, 支間中央載荷)

$P_u / P_{Hu}$

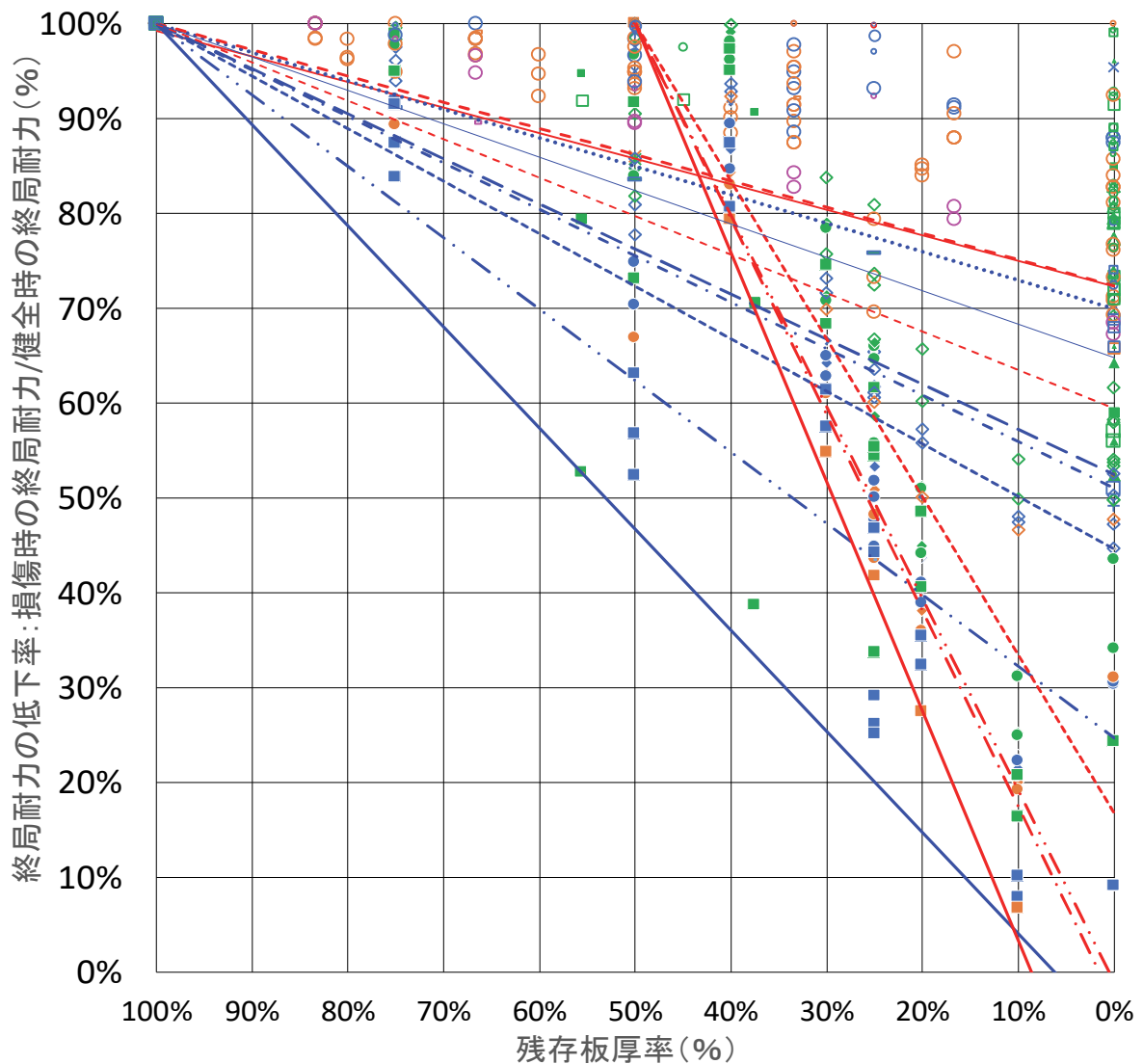


凡例

欠損ケース	欠損ケース	終局耐力の下限値 (推定線)	推定線の色の内訳	欠損ケース	支点直上載荷 データ数 該当する文献
[解析] a) 補剛材片側欠損	△ [解析] a)	.....	[支点直上載荷] 青線: 支点部耐力	[解析] a)	N = 9 [文献13]
[解析] b) 補剛材両側欠損	◇ [解析] b)	-----		[解析] b)	N = 36 [文献11]
[実験] b) 補剛材両側欠損	* [実験] b)	-----		[実験] b)	N = 2 [文献6]
[解析] c) ウェブ径間側欠損	○ [解析] c)	-----		[解析] c)	N = 18 [文献13]
[実験] c) ウェブ径間側欠損	□ [実験] c)	-----		[実験] c)	N = 0
[解析] d) ウェブ先端側欠損	□ [解析] d)	-----		[解析] d)	N = 9 [文献13]
[解析] e) ウェブ両側欠損	□ [解析] e)	-----		[実験] e)	N = 0
[実験] e) ウェブ両側欠損	× [実験] e)	-----		[解析] e)	N = 0
[解析] f) ウェブ片側欠損+補剛材片側欠損	▲ [解析] f)	-----		[解析] f)	N = 0
[解析] g) ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損	▲ [解析] g)	-----		[解析] g)	N = 18 [文献13]
[解析] h) ウェブ径間側欠損+補剛材両側欠損	● [解析] h)	-----		[解析] h)	N = 0
[解析] i) ウェブ先端側欠損+補剛材両側欠損	● [解析] i)	-----		[解析] i)	N = 0
[実験] i) ウェブ先端側欠損+補剛材両側欠損	+ [実験] i)	-----		[実験] i)	N = 0
[解析] j) ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損	■ [解析] j)	-----		[解析] j)	N = 18 [文献11]

図-5.3.8 腐食影響図(終局耐力の低下率, 設計降伏耐力の低下率, 支点直上載荷)

$$P_u / P_{Hu}$$

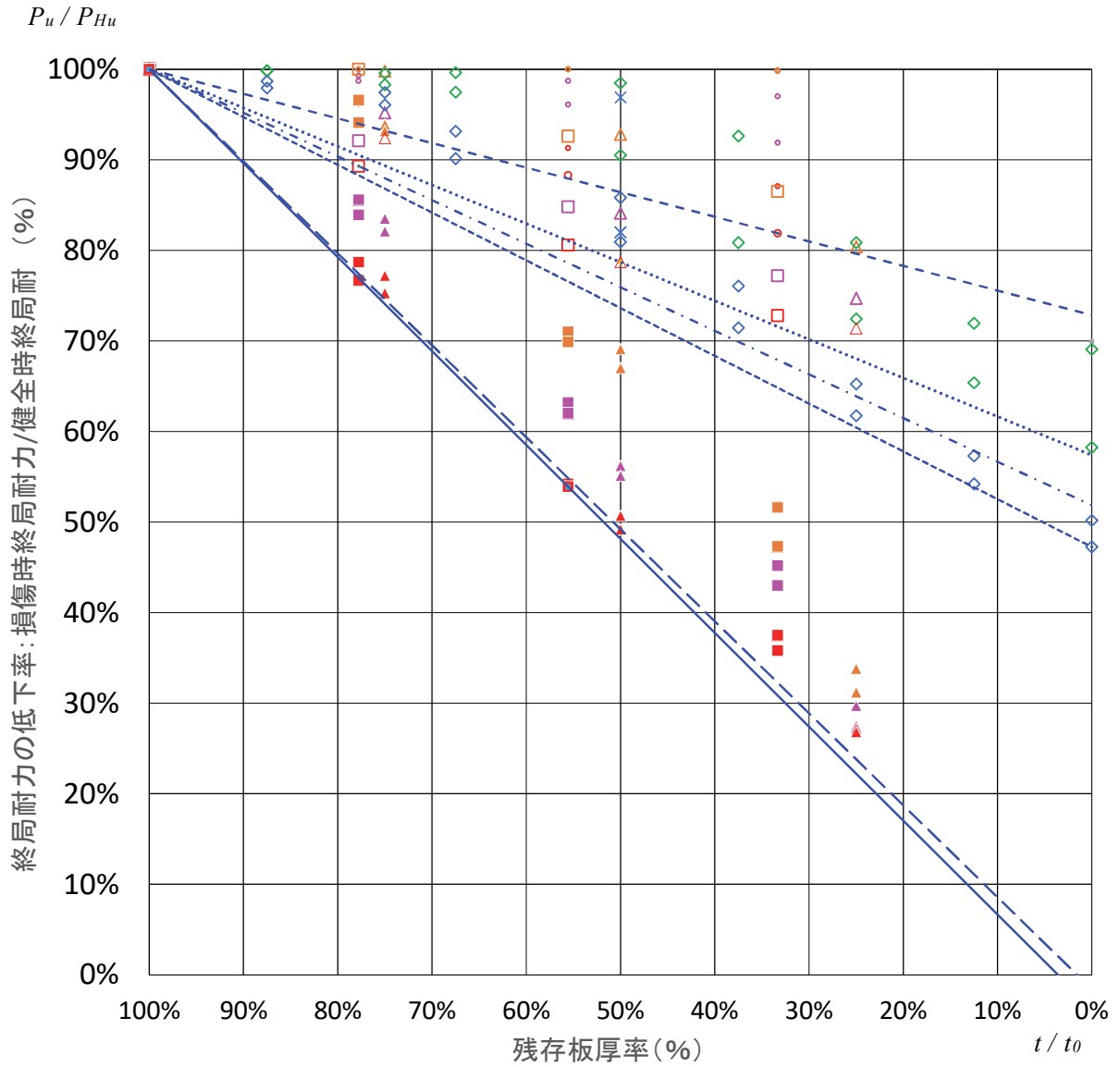


凡例

欠損ケース	欠損ケース	終局耐力の下限値 (推定線)	推定線の色の内訳	欠損ケース	支間中央載荷条件
[解析] a) 補剛材片側欠損	△ [解析] a)	.....	[中央径間載荷条件] 青線: 支点部耐力 青線: せん断耐力	[解析] a)	N = 11 [文献7.8,10]
[解析] b) 補剛材両側欠損	◇ [解析] b)	-----		[解析] b)	N = 60 [文献7.8,10,12,20]
[実験] b) 補剛材両側欠損	* [実験] b)	-----	欠損高さ 欠損高さ率: 5%未満 ● 色 欠損高さ率: 5~10%未満 ● 色 欠損高さ率: 10~20%未満 ● 色 欠損高さ率: 20~40%未満 ● 色 欠損高さ率: 40%以上 ● 色	[実験] b)	N = 4 [文献20]
[解析] c) ウェブ径間側欠損	○ [解析] c)	-----		[解析] c)	N = 149 [文献7~10,12,16,17,20]
[実験] c) ウェブ径間側欠損	○ [実験] c)	-----	欠損幅 欠損幅: 30%未満 4pt ○ 欠損幅: 30~50%未満 6pt ○ 欠損幅: 50~100%未満 8pt ○ 欠損幅: 100% 10pt ○	[実験] c)	N = 4 [文献15]
[解析] d) ウェブ桁端側欠損	□ [解析] d)	-----		[解析] d)	N = 22 [文献7.8,10]
[実験] d) ウェブ桁端側欠損	□ [実験] d)	-----	[実験] d)	N = 5 [文献18]	
[解析] e) ウェブ両側欠損	× [解析] e)	-----	[解析] e)	N = 3 [文献20]	
[実験] e) ウェブ両側欠損	× [実験] e)	-----	[実験] e)	N = 6 [文献10]	
[解析] f) ウェブ片側欠損+補剛材片側欠損	▲ [解析] f)	-----	[解析] f)	N = 0	
[解析] g) ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損	▲ [解析] g)	-----	[解析] g)	N = 30 [文献12]	
[解析] h) ウェブ径間側欠損+補剛材両側欠損	● [解析] h)	-----	[解析] h)	N = 50 [文献12,20]	
[解析] i) ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損	● [解析] i)	-----	[解析] i)	N = 1 [文献19]	
[実験] i) ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損	● [実験] i)	-----	[実験] i)	N = 59 [文献10,12,20]	
[解析] j) ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損	■ [解析] j)	-----	[解析] j)	N = 404	

図-5.3.9 腐食影響図(終局耐力の低下率, 残存板厚率, 支間中央載荷)





凡例

欠損ケース	欠損ケース	終局耐力の下限値 (推定線)	推定線の色の内訳	欠損ケース	支点直上載荷 データ数 該当する文献
[解析] a) 補剛材片側欠損	△	.....	[支点直上載荷] 青線: 支点部耐力	[解析] a)	N = 9 [文献13]
[解析] b) 補剛材両側欠損	◇	-----		[解析] b)	N = 36 [文献11]
[実験] b) 補剛材両側欠損	*	-----		[実験] b)	N = 2 [文献6]
[解析] c) ウェブ径間側欠損	○	-----		[解析] c)	N = 18 [文献13]
[実験] c) ウェブ径間側欠損	□	-----		[実験] c)	N = 0
[解析] d) ウェブ桁端側欠損	□	-----		[解析] d)	N = 9 [文献13]
[実験] e) ウェブ両側欠損	×	-----		[実験] e)	N = 0
[解析] f) ウェブ片側欠損+補剛材片側欠損	▲	-----		[解析] f)	N = 0
[解析] g) ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損	▲	-----		[解析] g)	N = 0
[解析] h) ウェブ径間側欠損+補剛材両側欠損	◆	-----		[解析] h)	N = 18 [文献13]
[解析] i) ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損	●	-----		[解析] i)	N = 0
[実験] i) ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損	+	-----		[実験] i)	N = 0
[解析] j) ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損	■	-----		[解析] j)	N = 18 [文献11]

欠損高さ	
欠損高さ率: 5%未満	●色
欠損高さ率: 5~10%未満	●色
欠損高さ率: 10~20%未満	●色
欠損高さ率: 20~40%未満	●色
欠損高さ率: 40%以上	●色

欠損幅	
欠損幅: 30%未満	4pt ○
欠損幅: 30~50%未満	6pt ○
欠損幅: 50~100%未満	8pt ○
欠損幅: 100%	10pt ○

図-5.3.10 腐食影響図(終局耐力の低下率, 残存板厚率, 支点直上載荷)

損ケースごとの設計降伏耐力の低下率  $P_y / P_{Hy}$  の最大値と最小値を示し、構造諸元の違いによる設計降伏耐力の低下率のばらつきを分析した。なお、平成6年度の標準設計は、合成げたから非合成げたへの主桁構造の変更および設計自動車荷重の引き上げなどの設計基準の改訂に伴い、昭和53年度の標準設計より改定されたものであり、平成6年度の標準設計での支点上補剛材の断面積が占める割合は柱としての全有効断面積に対して大きい傾向にある。この設計降伏耐力の低下率は健全時の設計降伏耐力  $P_{Hy}$  に対して損傷した部材が完全欠損した場合の設計降伏耐力  $P_y$  を表す。表-5.3.2 および表-5.3.3 の設計降伏耐力の低下率  $P_y / P_{Hy}$  の最大値と最小値を比較すると、ウェブまたは支点上補剛材の板厚の違いより、最大25%程度の差が現れていた。この表-5.3.2 および表-5.3.3 の設計降伏耐力の低下率  $P_y / P_{Hy}$  の最小値をもとに、各欠損ケースにおける設計降伏耐力の低下率の最小の割合を設定した。次に、設計降伏耐力の低下率と終局耐力が比例関係にあると仮定し、表-5.3.2 および表-5.3.3 の設計降伏耐力の低下率  $P_y / P_{Hy}$  の最小値および载荷条件の違いも含めて最も終局耐力が低いケースをもとに、各欠損ケースの耐力低下率の下限值ラインの最小の割合を設定した。さらに、設計降伏耐力の低下率に対して終局耐力の低下率が大きい欠損ケースでは、下限値ラインの最小の割合を表-5.3.2 および表-5.3.3 の設計降伏耐力の最小値として補完した。

腐食影響図の作成で用いたデータ数は、支間中央载荷では404個(残存板厚率をパラメータとする場合319個)、支点直上载荷では110個であり、支点直上载荷の方が比較的欠損高が高いデータが集まっている。

以下に、文献2および文献3の標準設計より、ケース毎の健全時の設計降伏耐力に対する損傷時の設計降伏耐力の分布図を示す。縦軸は健全時の設計降伏耐力に対する損傷時の設計降伏耐力を示し、横軸は径間長を示す。平成6年度の標準設計における分布図は図-5.3.11に示し、昭和53年度の標準設計における分布図は図-5.3.12に示す。これらの図における凡例内の記号は、表-5.3.1に示す腐食形態を示す。

表-5.3.2 健全時の設計降伏耐力に対する損傷時の設計降伏耐力の関係  
平成6年度 標準設計 (各206欠損ケース)

欠損ケース	$P_y / P_{Hy}$			
	最大	最小	平均	分散
(a)補剛材片側欠損(△)	0.76	0.67	0.70	0.02
(b)補剛材両側欠損(◇,*)	0.52	0.33	0.40	0.04
(c)ウェブ径間側欠損(○,□)	0.83	0.74	0.80	0.02
(d)ウェブ桁端側欠損(□)				
(e)ウェブ両側欠損(□,×)	0.67	0.48	0.60	0.04
(f)ウェブ片側欠損+補剛材片側欠損(▲)	0.50	0.50	0.50	0.00
(g)ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損(▲)	0.33	0.24	0.30	0.02
(h)ウェブ径間側欠損+補剛材両側欠損(◆)	0.26	0.17	0.20	0.02
(i)ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損(●,+)				
(j)ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損(■)	0.00	0.00	0.00	0.00

※凡例内の記号は、表-5.3.2の腐食形態の記号を示す

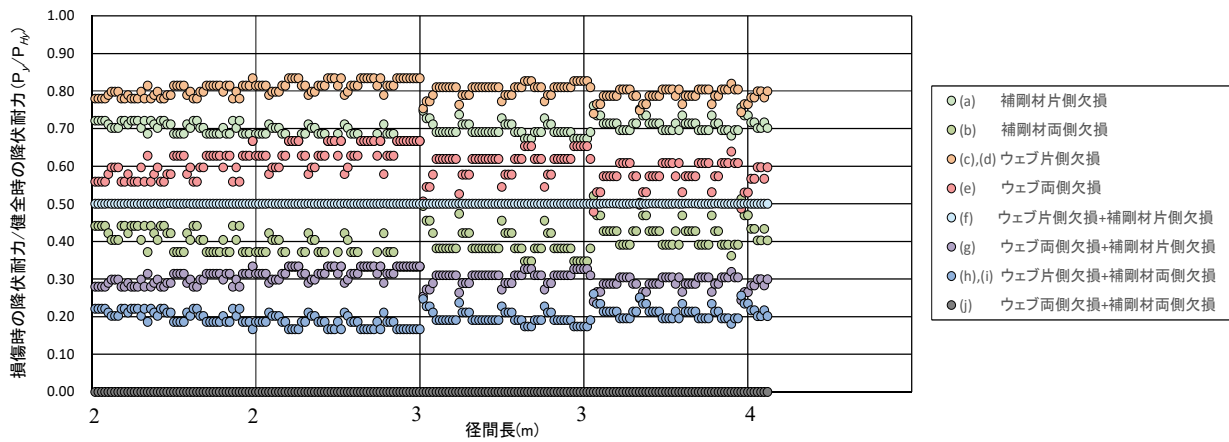


図-5.3.11 健全時の設計降伏耐力に対する損傷時の設計降伏耐力の関係

表-5.3.3 健全時の設計降伏耐力に対する損傷時の設計降伏耐力の関係  
昭和 53 年度 標準設計 (各 281 欠損ケース)

欠損ケース	$P_y / P_{Hy}$			
	最大	最小	平均	分散
(a)補剛材片側欠損 (△)	0.78	0.66	0.72	0.03
(b)補剛材両側欠損 (◇, *)	0.57	0.33	0.45	0.05
(c)ウェブ径間側欠損 (○, □)	0.84	0.72	0.77	0.03
(d)ウェブ桁端側欠損 (□)				
(e)ウェブ両側欠損 (□, ×)	0.68	0.43	0.55	0.05
(f)ウェブ片側欠損+補剛材片側欠損 (▲)	0.50	0.50	0.50	0.00
(g)ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損 (▲)	0.34	0.22	0.28	0.02
(h)ウェブ径間側欠損+補剛材両側欠損 (◆)	0.28	0.16	0.22	0.03
(i)ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損 (●, +)				
(j)ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損 (■)	0.00	0.00	0.00	0.00

※凡例内の記号は、表-5.3.2の腐食形態の記号を示す

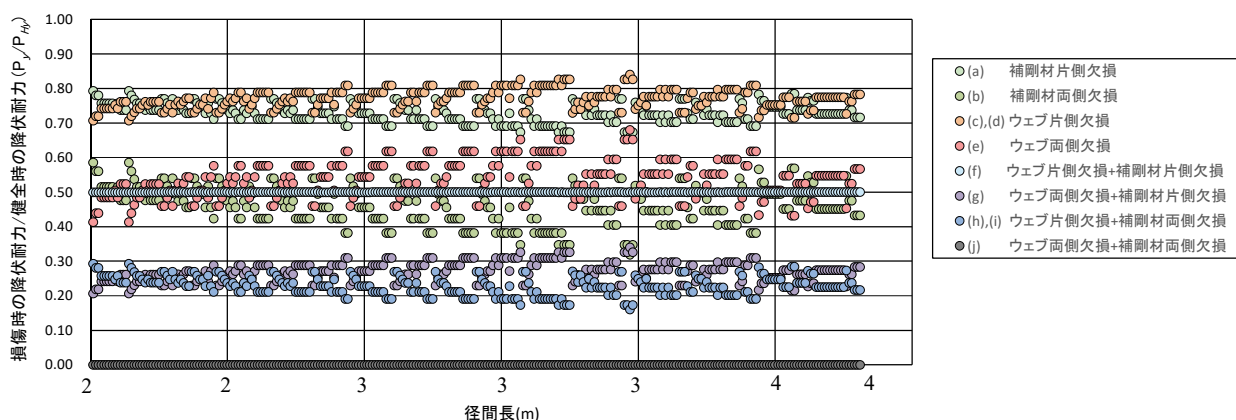


図-5.3.12 健全時の設計降伏耐力に対する損傷時の設計降伏耐力の関係

### 5.3.2 腐食損傷を有する桁端部の終局耐力の分析

#### (1) 終局耐力低下の傾向分析

##### a) 設計降伏耐力の低下率，支間中央載荷（図-5.3.7）

設計降伏耐力の低下率に対して終局耐力の低下率が大きい場合は、表-5.3.1に示す(c)ウェブ径間側欠損ケース、(d)ウェブ桁端側欠損ケース、(e)ウェブ両側欠損ケースであり、ウェブの欠損幅が有効幅を越えてソールプレート幅よりも大きい場合である。これらのケースは、設計降伏耐力の低下率が大きい、健全時の終局耐力の43%程度で耐力低下はとまる。

その他のケースでは、終局耐力の低下率と設計降伏耐力の低下率の下限値がほぼ正比例の関係にあった。この下限値は、ウェブと支点上補剛材が複合的に損傷し、かつ、欠損高さ率が高いケースが該当している。欠損高さ率が5%未満であれば、終局耐力の低下率に対する設計降伏耐力の低下率が小さい。一方、せん断耐荷力は、赤色の下限値ラインが示すように欠損ケースによっては、設計降伏耐力の低下率の50%程度となつてから耐荷力が低下する場合がある。

##### b) 設計降伏耐力の低下率，支点直上載荷（図-5.3.8）

支間中央載荷よりも支点直上載荷の方が、設計降伏耐力の低下率に対する終局耐力の低下率が大きい。欠損することで急激に耐力が低下しているケースは、橙色から赤色に多く分布しており、欠損高さ率が10%以上欠損しているケースが多い。

一方、欠損高さ率が小さい場合やウェブあるいは支点上補剛材などの部材が単独で損傷している場合は、設計降伏耐力の低下率が大きくても、健全時の終局耐力の45%程度が下限値である。

##### c) 残存板厚率，支間中央載荷（図-5.3.9）

ウェブや支点上補剛材などの部材が単独で損傷している場合は、完全欠損（残存板厚率0%）の場合でも健全時の終局耐力の43%程度はある。

ウェブと支点上補剛材が複合的に損傷し、欠損高が10%未満の場合の下限値は、完全欠損時の終局耐力を0とした比例式に近似している。

完全欠損時でも耐力低下にばらつきが見られる。これは、腐食影響図が損傷の大きい一部材の残存板厚率を捉えており、損傷が小さい部材の応力の再配分や欠損幅について考慮されていないからである。

文献13では、せん断耐荷力の低下率を検討しており、残存板厚率が50%以下となつて初めて耐力が低下している。文献13では、その理由を塑性拘束による影響であると示されている。

##### d) 残存板厚率，支点直上載荷（図-5.3.10）

ウェブの両側と支点上補剛材が複合的に欠損した場合の下限値は、完全欠損時の終局耐力を0とした比例式に近似している。さらに、ウェブや支点上補剛材など、部材が単独で欠損し、欠損高が10%以下の場合の下限値は、完全に欠損した場合でも健全時の45%程度の終局耐力はある。

(2) 終局耐力の低下の分析（腐食形態ごとの傾向）

腐食影響図をもとに、腐食形態ごとの終局耐力の下限値の傾向を表-5.3.4に整理した。表-5.3.4 (a)は設計降伏耐力の低下率が70%と50%の時の終局耐力の下限値を示す。また、表-5.3.4 (b)は残存板厚率が50%と0%（完全欠損）となる時の終局耐力の下限値を示す。表中の( $\tau$ )は、せん断耐荷力の低下率を示す。着目した低下率が存在しない解析ケースでは、各下限値に対して下限値ラインを内挿した線上の点（※1印）と下限値ラインを外挿した線上の点（※2印）における耐力低下率を示した。なお、ウェブ径間側欠損やウェブ桁端側欠損ケースは、全有効断面積に対して欠損断面積の割合が小さいために、設計降伏耐力の低下率が70%に低下しない。

以上より、表-5.3.4から、腐食形態によって終局耐力が異なっていることが分かる。

表-5.3.4 欠損ケースごとの残存耐荷力の下限値

（※1印は下限値の内挿から算出、※2印は下限値の外挿から算出）

(a) 設計降伏耐力の低下率に対する終局耐力の低下率

ケース	記号	欠損ケース 腐食形態		設計降伏耐力が70%低下した場合				設計降伏耐力が50%低下した場合			
				支径中央載荷		支点直上載荷		支径中央載荷		支点直上載荷	
		ウェブ	補剛材	欠損高さ率	耐力低下率	欠損高さ率	耐力低下率	欠損高さ率	低下率	欠損高さ率	耐力低下率
a)	△	-	片側	6%以下	70%	10%以下 40%以下	79% ※2 63% ※2	-	-	-	-
b)	◇, *	-	両側	10%以下	77% ※1	7%以下	77% ※1	8%以下 10%以下	60% ※1 92% ( $\tau$ )	7%以下	63% ※1
c)	○, □	径間側	-	-	-	-	-	-	-	-	-
d)	□	桁端側	-	-	-	-	-	-	-	-	-
e)	□, ×	両側	-	8%以下 6%以下	67% ※2 52% ( $\tau$ ) ※2	-	-	8%以下 6%以下	46% ※2 43% ( $\tau$ ) ※2	-	-
f)	▲	片側	片側	1.6%以下	72% ※1	-	-	1.6%以下	52%	-	-
g)	▲	両側	片側	-	-	10%以下 40%以下	67% 49%	-	-	10%以下 40%以下	19% ※2 15% ※2
h)	◆	径間側	両側	10%以下	100% ( $\tau$ )	-	-	10%以下	91% ( $\tau$ ) ※1	-	-
i)	●, +	桁端側	両側	8%以下	74% ※1 100% ( $\tau$ )	-	-	8%以下	55% ※1 91% ( $\tau$ ) ※1	-	-
j)	■	両側	両側	8%以下 10%以下	70% ※1 100% ( $\tau$ )	10%以下 40%以下	70% 54%	8%以下 10%以下	50% ※1 100% ( $\tau$ )	10%以下 40%以下	41% ※2 23% ※2

(b) 残存板厚率の低下率に対する終局耐力の低下率

ケース	記号	欠損ケース 腐食形態		半分欠損した場合(残存板厚率50%)				完全欠損の場合(残存板厚率0%)			
				支径中央載荷		支点直上載荷		支径中央載荷		支点直上載荷	
		ウェブ	補剛材	欠損高さ率	耐力低下率	欠損高さ率	耐力低下率	欠損高さ率	耐力低下率	欠損高さ率	耐力低下率
a)	△	-	片側	6%以下	85% ※1	10%以下 40%以下	93% 79%	6%以下	70%	10%以下 40%以下	74% ※2 57% ※2
b)	◇, *	-	両側	8%以下 10%以下	78% 100% ( $\tau$ )	7%以下	81%	8%以下 10%以下	45% 17% ( $\tau$ ) ※2	7%以下	47%
c)	○, □	径間側	-	5%以下 6%以下 25%以下	86% ※1 97% ( $\tau$ ) 89% ( $\tau$ )	10%以下 40%以下	99% ※1 86% ※1	5%以下 6%以下 25%以下	72% 88% ( $\tau$ ) 67% ( $\tau$ )	10%以下 40%以下	99% ※2 73% ※2
d)	□	桁端側	-	5%以下	75% ※1	10%以下 40%以下	90% ※2 76% ※2	5%以下	51%	10%以下 40%以下	80% ※2 52% ※2
e)	□, ×	両側	-	8%以下 6%以下	84% 84% ( $\tau$ )	-	-	8%以下 6%以下	65% ※2 73% ( $\tau$ )	-	-
f)	▲	片側	片側	1.6%以下	76% ※1	-	-	1.6%以下	52%	-	-
g)	▲	両側	片側	-	-	10%以下 40%以下	67% 49%	-	-	10%以下 40%以下	8% ※2 0% ※2
h)	◆	径間側	両側	10%以下	100% ( $\tau$ )	-	-	10%以下	0% ( $\tau$ ) ※2	-	-
i)	●, +	桁端側	両側	8%以下 10%以下	67% 100% ( $\tau$ )	-	-	8%以下 10%以下	30% 0% ( $\tau$ ) ※2	-	-
j)	■	両側	両側	8%以下 10%以下	47% ※2 100% ( $\tau$ )	10%以下 40%以下	67% ※2 48% ※2	8%以下 10%以下	9% 0% ( $\tau$ ) ※2	10%以下 40%以下	0% ※2 0% ※2

### (3) 終局耐力分布の傾向

腐食影響図をもとに終局耐力の分布を分析する。各欠損ケースの終局耐力の低下率にはばらつきが見られ、終局耐力の低下率が最も大きい下限値ラインは、欠損高さ率が大きいケースが該当していた。一方で、欠損高さ率が小さい場合や欠損箇所がウェブ欠損のみなど腐食の範囲が狭い場合には、耐力低下への影響が小さかった。

設計降伏耐力の低下率と終局耐力の低下率の関係について分析する。設計降伏耐力と終局耐力の低下率の下限値が同程度となるケースは、支間中央載荷では支点上補剛材が単独に欠損しているケース、ウェブと支点上補剛材が複合的に欠損しているケースで見られ、支点直上載荷では補剛材両側欠損ケースで見られた。これは、各欠損ケースが設計降伏耐力後から終局耐力に至るまで、軸方向圧縮応力度が作用するウェブの範囲がほぼ一定の割合で拡大し、設計降伏耐力と終局耐力の低下率が同程度だったと考えられる。一方で、終局耐力の低下率に対して設計降伏耐力の低下率が小さいケースは、支間中央載荷ではウェブ欠損ケースに見られ、支点直上載荷では多くの欠損ケースで見られた。この支間中央載荷のウェブ欠損ケースでは、設計降伏耐力後は板厚が薄いウェブが局部座屈して、さらに支点上補剛材が座屈したために軸方向圧縮応力度が作用するウェブの範囲が拡大せず、設計降伏耐力の低下率に対して終局耐力の低下率が大きい結果になったと考えられる。一方、支点直上載荷における欠損ケースも設計降伏耐力後は軸方向圧縮応力度が作用するウェブの範囲がソールプレート幅程度に限定され、終局耐力の低下率に対して設計降伏耐力の低下率が小さい結果になったと考えられる。

残存板厚率と終局耐力の低下率の関係について分析する。支間中央載荷や支点直上載荷のいずれの条件においても、残存板厚率と終局耐力の低下率の下限値は、概ね同じ程度の割合で減少する比例関係にあったものの、残存板厚率に対して、終局耐力の低下率が大きいケースが若干見られた。この残存板厚率に対して終局耐力の低下率が大きいケースは、支点上補剛材の残存板厚率とウェブの残存板厚率が異なるケースである。

### (4) ウェブ桁端側全欠損の傾向

図-5.3.13 は、桁端側のウェブ部材に欠損があるケースを抜粋してプロットした腐食影響図である。図中の○（ピンク丸）で囲まれた記号が桁端側のウェブ部材が全欠損のケースであり、その他のプロットした記号は、桁端側のウェブ部材に残存幅または残厚があるケースである。ウェブ桁端側欠損ケースにおいて、桁端側ウェブ部材が全欠損しているケースが、終局耐力の低下率に対して設計降伏耐力の低下率が小さいので、桁端側のウェブ部材が完全に欠損することの影響は大きいと考えられる。

一方、支点上補剛材と桁端側のウェブが複合的に欠損しているケースにおいて、桁端側ウェブが全欠損したケースと残厚があるケースでは、この両軸の耐力低下率の関係はほぼ比例にあったので、単独で桁端側ウェブ部材が欠損するケースに比べて、桁端側のウェブ部材が完全に欠損する影響は小さいと思われる。

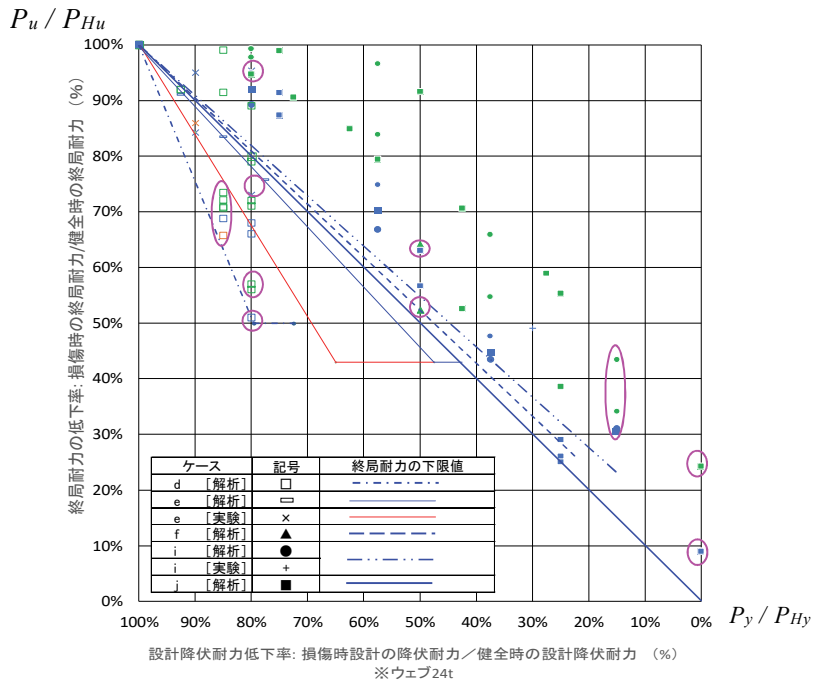


図-5.3.13 腐食影響図における桁端側ウェブの影響（支点中央載荷）

#### (4) 実験値と解析値の比較

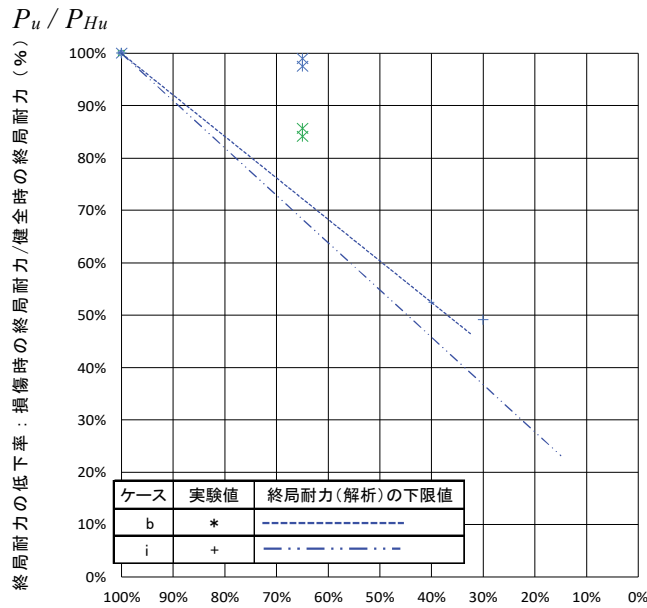
実験と解析の両方が実施されている損傷ケースについて、腐食影響図をもとに、耐力の低下率を比較する。支間中央載荷で実験値と解析値があるケースは、支点上耐荷力において欠損ケース b および i であり（図-5.3.14）、せん断耐荷力において欠損ケース c である（図-5.3.15）。図-5.3.14～図-5.3.16 は、図-5.3.7～図-5.3.10 の腐食影響図のうち、実験値と解析値の比較分析に関連する箇所を抜粋したものである。

欠損ケース b の実験結果（記号：\*）は、文献 6 のデータである。これは、欠損高が 20 mm と 60 mm で、残存板厚率を 50 % としたケースであり、欠損ケース b の下限値ラインよりも終局耐力が高い位置に分布している。ここでは、構造諸元、応力分配の相違、塑性拘束等の影響もあると考えられるが、欠損ケース b の下限値ライン上の解析ケースの欠損高が 100 mm であることから、欠損高の相違によって、実験値の終局耐力の低下率の方が下限値ラインに対して小さくなることを示している。

一方、欠損ケース i の実験結果（記号：+）は、文献 13 のデータである。これは、欠損高が 100 mm であり、支点上補剛材は 25 mm の板厚に対して 6 mm が残存し、かつ、ウェブ桁端側が全て欠損している。この実験データは欠損ケース i の下限値ラインよりも小さい位置にある。

この下限値ライン対象の解析ケースは、欠損高が 100mm であり、支点上補剛材は 12 mm の板厚に対して 3 mm が残存し、かつ、桁端側ウェブは 6 mm の板厚に対して 1.5 mm が残存するウェブおよび支点上補剛材の板厚が均一の割合で減少しているケースである。支点上補剛材の欠損部材の耐荷力の相違によって、実験値の終局耐力の低下率の方が下限値ラインに対して小さくなることを示している。





設計降伏耐力の低下率：損傷時の設計降伏耐力/健全時の設計降伏耐力 (%)  $P_y / P_{Hy}$

図-5.3.14 腐食影響図における実験値および解析値の比較  
(支間中央載荷 (設計降伏耐力の低下率))

せん断耐荷力における欠損ケース i の実験結果 (記号:  $\square$ ) は, 文献 14 のデータである. 残存板厚率が 75% (残存板厚 4mm / 設計板厚 6mm) の耐荷力が低いケースは, 欠損高が 200 mm であり, 欠損ケース c の下限値ラインよりも終局耐力がやや高い位置に分布している. 欠損ケース c の下限値ラインに使用した解析ケースは, 実験値のデータと同じアスペクト比であり, 残存板厚率が 25% (残存板厚 1.5mm / 設計板厚 4mm) である. ここでも塑性拘束など様々な影響があると考えられるが, せん断耐荷力において, 残存板厚の相違によって, 実験値の終局耐力の低下率の方が下限値ラインに対して小さくなることを示している.

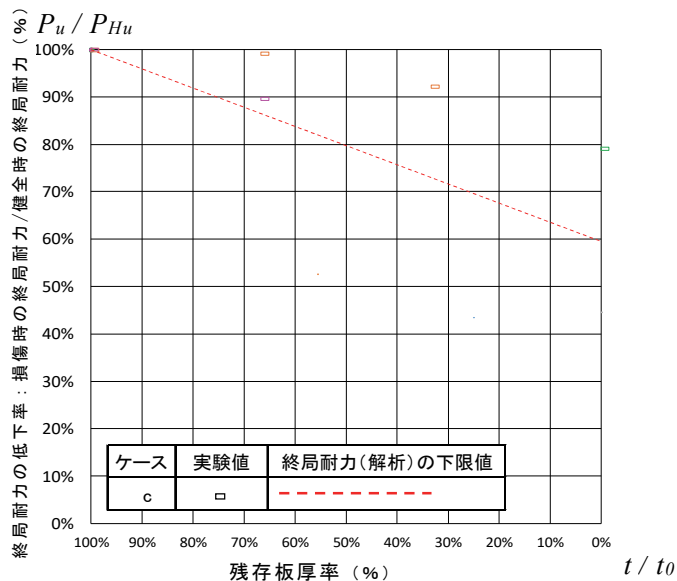


図-5.3.15 腐食影響図における実験値および解析値の比較(支間中央載荷(残存板厚率))

支点直上載荷で実験値と解析値があるケースは、欠損ケース b である (図-5.3.16)。この実験結果 (記号：\*) は、文献 12 のデータであり、支点上補剛材を 60 mm の欠損高にわたって残存板厚率を 50 %としたケースであり、ケース b の下限値ラインよりも終局耐力が高い位置に分布している。なお、これらの実験データのうち終局耐力が大きい方は両面から局部的に切削したケースである。下限値ラインに使用した解析ケースの欠損高が 80 mm であることから、実験値の終局耐力の低下率の方が下限値ラインに対して小さくなることを示している。

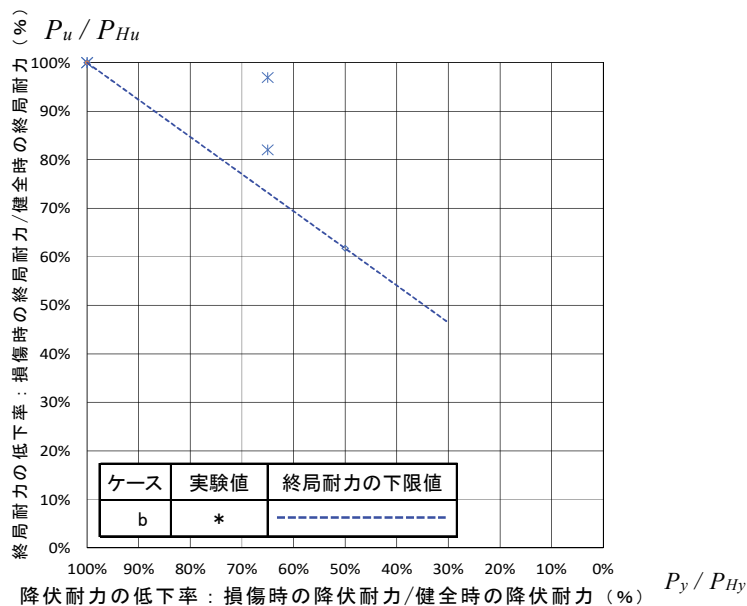


図-5.3.16 腐食影響区における実験値および解析値の比較  
 支点直上載荷 (設計降伏耐力の低下率)

以上より、腐食影響区の解析における下限値ラインは、既往の研究における実験結果よりも安全側 (大きな終局耐力の低下) の結果を与えることが分かった。よって、腐食影響区では両者を分け隔てることなく同じように扱えると考えられる。

### 5.3.3 耐力推定方法の検討

#### (1) 耐力推定式の考え方

実務への適用を想定し、腐食影響区を利用して、健全時の終局耐力からの低下率を把握する推定方法を検討する。腐食影響区には、様々なモデルが混在しているが、欠損ケースにより耐力低下率の傾向が異なることを示し、かつ、各ケースの下限値を用いているので、標準設計における適用範囲においては簡易的に推定式として示すことは可能と考えた。

現場計測を通じて桁端下部にある全部材の腐食損傷程度が把握できる場合を想定して設計降伏耐力をパラメータとした推定式を基本式として提案する。また、対象橋梁によっては、付属物や落橋防止構造等による桁端部に設置されている周辺の施設によって現場計測の障害となる場合や橋梁点検車等に乗って作業する時に計測可能な部材が限ら

れる場合がある。そこで、これらの現場の状況によって、桁端下端部の全部材の腐食損傷程度が把握できない場合を想定した推定式も提案する。なお、推定式は 5.3.2 (3) に示すように、桁端側ウェブが単独で部分的に欠損した場合と全欠損した場合とで耐力低下の違いがあることを考慮し、桁端側ウェブ全欠損ケースと桁端側ウェブ部分欠損ケースに分けて推定式を提案する。

桁端下端部の腐食損傷程度が把握（推定）できる場合は、欠損幅と欠損厚を考慮した設計降伏耐力の低下率の腐食影響図を利用する。基本となる推定式としては、実際の桁端部の载荷状態（L 荷重）に近い支点上補剛材が取付く荷重集中点で軸方向圧縮応力が最大となり、三角形の応力分布を示す支間中央载荷条件の腐食影響図を利用する。予算が少ない地方自治体などでは、より実際の耐力評価が求められる場合があり、そのような時に用いる载荷条件である。

一方、T 荷重を想定する場合は、支点部に軸方向圧縮応力が载荷すると考えて、支点直上载荷条件の腐食影響図を利用する。支点部の狭い範囲で荷重を負担していることを想定した安全側の評価時に用いる条件である。また、桁端部の全部材の腐食損傷程度が把握（推定）できない場合は、残存減厚率をパラメータとする。残存減厚率をパラメータとした場合の载荷条件の違いは、設計降伏耐力の低下率と同様の考え方で活荷重を想定し、条件に適した腐食影響図を利用する。

これらの条件を踏まえて、耐荷力推定式に用いる 4 つ腐食影響図を図-5.3.17～図-5.3.20 に示す。なお、腐食影響図には、腐食形態に応じた下限値の線が引かれており、下限値を厳密に把握することが可能である。しかし、実務への適用に向けて、推定式の数をも少なくするため、類似した腐食形態に対しては耐荷力推定式を極力まとめるようにした。

## (2) 耐荷力推定式の検討

### a) 基本推定式（その 1）

桁端下端部の腐食損傷程度が把握（推定）でき、支間中央载荷の場合は、図-5.3.17 を用いる。ウェブ部材のみ欠損しているケースは、ウェブの有効幅以上に軸方向圧縮応力が下フランジに作用していると考えて、設計降伏耐力の低下率に対する終局耐力の低下率が大きい関係を表す式とする。ウェブ両側欠損ケースは式(5.3.2a) , (5.3.2b)とし、ウェブ桁端側全欠損ケースは式(5.3.2c) , (5.3.2d)とし、ウェブ桁端側部分欠損ケースおよびウェブ径間側欠損ケースは、式(5.3.2e) , (5.3.2f) とする。ウェブ両側欠損ケースを  $P_u/P_{Hu} = 0.43$  としたのは、ウェブが完全に欠損しても支点上補剛材が健全であるならば、最低でも終局耐力の 43 %程度は耐荷力があることを意味する。また、ウェブ桁端側全欠損ケースは、支点上補剛材および径間側ウェブが健全であれば最低でも終局耐力の 50 %程度は耐荷力があることを意味する。ウェブ桁端側全欠損ケースおよびウェブ径間側欠損ケースは、桁端側ウェブが全欠損せず、ウェブ径間側が全欠損しても最低でも終局耐力の 65 %程度は耐荷力があることを意味する。これらの式は、ウェブ桁端側全欠損ケースの傾きとし、各ウェブの欠損ケースの値を下限値として活用している。

その他の欠損ケースの場合は、終局耐力の低下率と降伏耐力の低下率が概ね比例関係にあることから式(5.3.2g)とする。この式では、ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損ケースの傾きおよび下限値を活用している。

【ウェブ両側欠損ケース】

$$P_u / P_{Hu} = 1 - 2.5 (1 - P_y / P_{Hy}) \quad [P_y / P_{Hy} \geq 77 \%] \quad (5.3.2a)$$

$$= 0.43 \quad [77 \% > P_y / P_{Hy} \geq 43 \%] \quad (5.3.2b)$$

【ウェブ桁端側全欠損ケース】

$$P_u / P_{Hu} = 1 - 2.5 (1 - P_y / P_{Hy}) \quad [P_y / P_{Hy} \geq 80 \%] \quad (5.3.2c)$$

$$= 0.50 \quad [80 \% > P_y / P_{Hy} \geq 72 \%] \quad (5.3.2d)$$

【ウェブ径間側欠損ケース、ウェブ桁端側部分欠損ケース】

$$P_u / P_{Hu} = 1 - 2.5 (1 - P_y / P_{Hy}) \quad [P_y / P_{Hy} \geq 86 \%] \quad (5.3.2e)$$

$$= 0.65 \quad [86 \% > P_y / P_{Hy} \geq 72 \%] \quad (5.3.2f)$$

【その他の欠損ケース】

$$P_u / P_{Hu} = P_y / P_{Hy} \quad [P_y / P_{Hy} \geq 0 \%] \quad (5.3.2g)$$

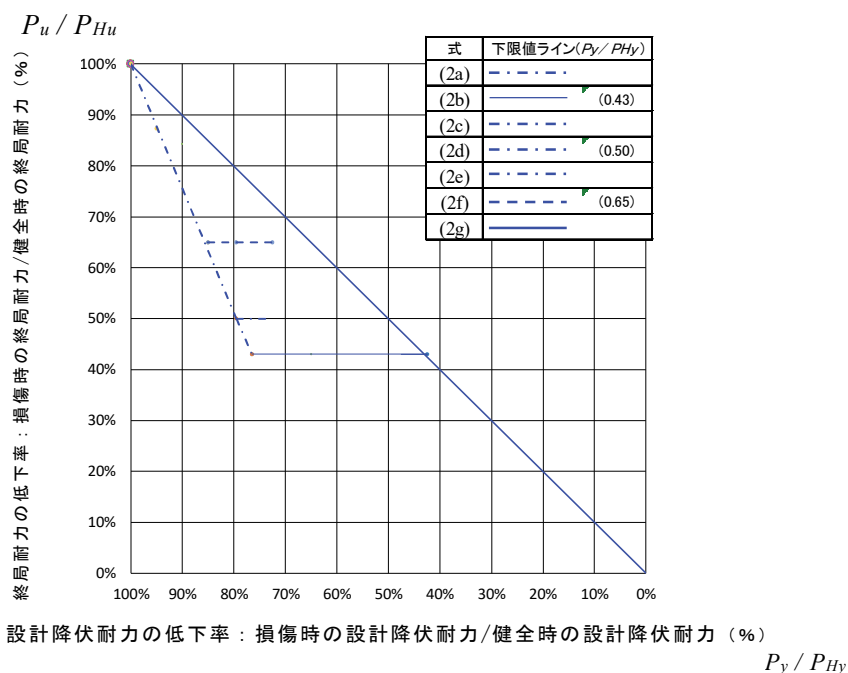


図-5.3.17 腐食影響図における基本推定式の下限值ライン  
(設計降伏耐力の低下率、支間中央載荷)

b) 基本推定式 (その2)

桁端下端部の腐食損傷程度が把握 (推定) でき、支点直上載荷の場合は、図-5.3.18を用いる。補剛材両側欠損ケースは、終局耐力の低下率と降伏耐力の低下率の下限値をとって式(5.3.3a)とし、ウェブ桁端側全欠損ケースは、式(5.3.3b), (5.3.3c)とし、ウェブ径間側欠損ケースおよびウェブ桁端側部分欠損は、式(5.3.3d), (5.3.3e)とする。これらの式は、それぞれの欠損ケースの傾きおよび下限値を活用している。それ以外の欠損ケー

スは式(5.3.3f), (5.3.3g)とする. これらの式は, ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損ケースの傾きとし, ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損ケースの値を下限値として活用している. 式(5.3.3c), (5.3.3e), (5.3.3g)の数值は, 前節と同様に損傷部材を除く健全な部材の耐荷力を意味する.

【補剛材両側欠損ケース】

$$P_u / P_{Hu} = 1 - 0.78 (1 - P_y / P_{Hy}) \quad [P_y / P_{Hy} \geq 30 \%] \quad (5.3.3a)$$

【ウェブ桁端側全欠損ケース】

$$P_u / P_{Hu} = 1 - 3.33 (1 - P_y / P_{Hy}) \quad [P_y / P_{Hy} \geq 85 \%] \quad (5.3.3b)$$

$$= 0.5 \quad [85 \% > P_y / P_{Hy} \geq 72 \%] \quad (5.3.3c)$$

【ウェブ径間側欠損ケース, ウェブ桁端側部分欠損ケース】

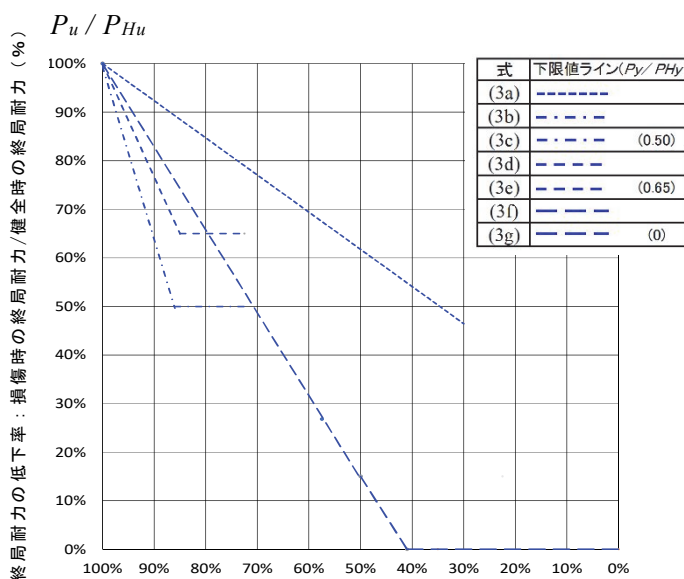
$$P_u / P_{Hu} = 1 - 2.33 (1 - P_y / P_{Hy}) \quad [P_y / P_{Hy} \geq 85 \%] \quad (5.3.3d)$$

$$P_u / P_{Hu} = 0.65 \quad [85 \% > P_y / P_{Hy} \geq 72 \%] \quad (5.3.3e)$$

【その他の欠損ケース】

$$P_u / P_{Hu} = 1 - 1.70 (1 - P_y / P_{Hy}) \quad [P_y / P_{Hy} \geq 41 \%] \quad (5.3.3f)$$

$$= 0 \quad [41 \% > P_y / P_{Hy}] \quad (5.3.3g)$$



設計降伏耐力の低下率：損傷時の設計降伏耐力/健全時の設計降伏耐力 (%)

図-5.3.18 腐食影響図における基本推定式の下限值ライン  $P_y / P_{Hy}$

(設計降伏耐力の低下率, 支点直上載荷)

c) 基本推定式 (その3)

桁端下端部の桁端部の全部材の腐食損傷程度が把握できず, 支間中央載荷の場合には, 図-5.3.19を用いる. 全欠損ケースにおいて, 式(5.3.4a)とする. 文献 10, 11, 17における解析モデルでは, 径間側ウェブのアスペクト比を 1.0 として桁端部のせん断耐荷力

を検討している。さらに、文献 2, 3 では、径間側ウェブの最大アスペクト比は標準設計を基にした 1.04 であり、せん断座屈が発生しないようにアスペクト比を設定している。これらのデータより、径間側ウェブのアスペクト比が 1.0 程度以上となる場合は、支点部耐力よりもせん断耐力が低下する可能性があると考えられる。その場合は、別途、文献 18 で求められる baslar 式などのせん断耐力の式を適用して照査する。

$$P_u / P_{Hu} = (1-\alpha) \cdot (t_{\min} / t_0) + \alpha \quad [100 \% > t_{\min} / t_0 \geq 0 \%] \quad (5.3.4a)$$

$t_{\min}$  : 腐食領域の最小板厚(mm)

$t_0$  : 設計板厚(mm)

上式の  $\alpha$  は、支間中央載荷条件において損傷している部材が完全欠損した場合の耐力を意味する。 $\alpha$  は補剛材片側欠損ケース、ウェブ径間側欠損ケース（支点部耐力）※は 0.70 とし、補剛材両側欠損ケース※、ウェブ桁端側欠損ケース、ウェブ両側欠損ケース、ウェブ片側欠損+補剛材片側欠損ケースは 0.43 とし、ウェブ片側欠損+補剛材両側欠損ケース※は 0.25 とし、ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損ケース※は 0 とする。ただし、ウェブ径間側欠損ケース（せん断耐力）※は 0.6 とする。上記に示す※印は  $\alpha$  を採用した欠損ケースを示す。

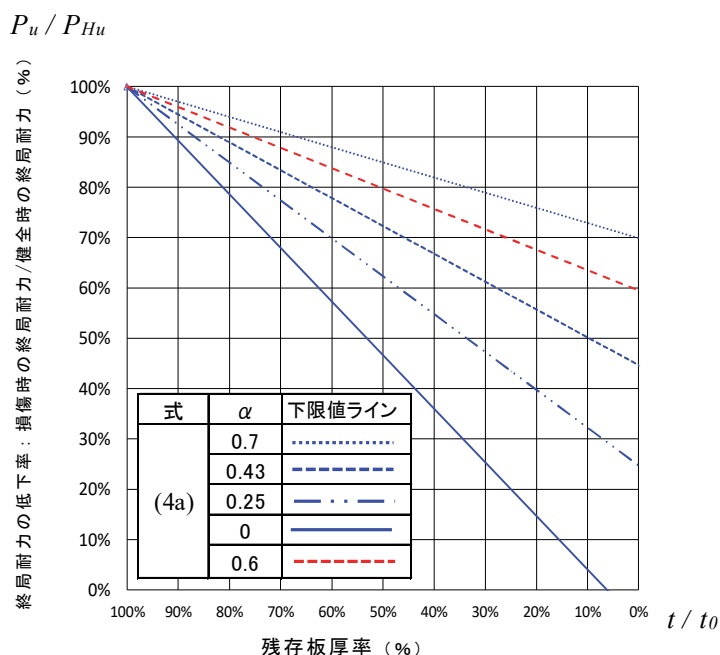


図-5.3.19 腐食影響図における基本推定式の下限值ライン  
(残存板厚率, 支間中央載荷)

#### d) 基本推定式 (その 4)

桁端下端部の全部材の腐食損傷程度が把握できず、支点直上載荷の場合は、図-5.3.20 を用いる。全欠損ケースに対して式(5.3.4a)を用いる。ただし、 $\alpha$  は前節と異なり、ウェブ径間側欠損ケース※は 0.70、補剛材片側欠損ケース※、補剛材両側欠損ケース、ウェブ

桁端側欠損ケースは 0.43 とし，ウェブ両側欠損＋補剛材片側欠損ケースおよびウェブ両側欠損＋補剛材両側欠損ケース※は 0 とする．上記に示す※印は  $\alpha$  を採用した欠損ケースを示す．

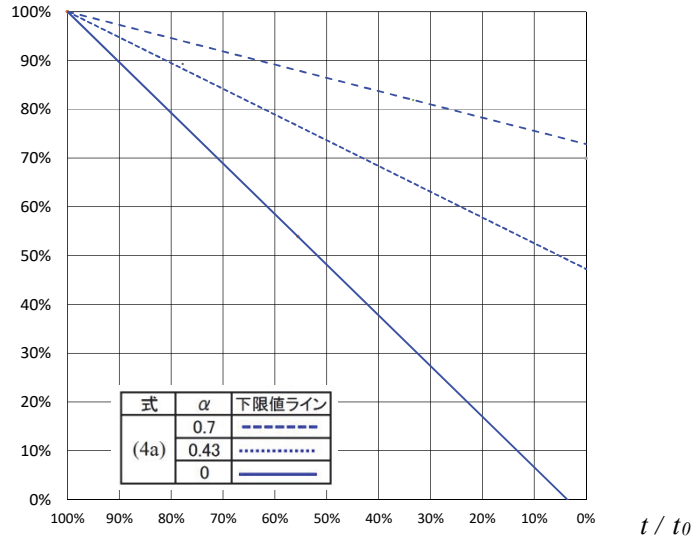


図-5.3.20 腐食影響図における基本推定式の下限值ライン  
(残存板厚率，支点直上載荷)

#### 5.3.4 健全時の終局耐力と桁反力の関係

腐食損傷を有する桁端部の補修対策の要否を判断するためには，健全時の構造諸元から算出できる支点部の設計降伏耐力ならびに死荷重と活荷重を合計した桁反力（設計反力）と腐食影響図の原点に位置する健全時の終局耐力との関係性（安全率）を把握する必要がある．桁反力に対する健全時の終局耐力との割合を算出するためのデータが少ないことから，既往の実験および解析データによる健全時の終局耐力と構造諸元から算出できる支点部の設計降伏耐力との関係を整理し，さらに，支点部の設計降伏耐力と桁反力との関係を整理することで，健全時の終局耐力に対する桁反力の安全率を推定した．

はじめに，健全時の終局耐力と設計降伏耐力との関係を整理する．荷重-変位曲線および構造諸元が明確に把握できる文献<sup>5)～8), 12), 14), 15), 16)</sup>のモデルを表-5.3.5に整理して，それらのモデルの構造諸元を表-5.3.6に整理した．さらに，構造諸元から算出した設計降伏耐力を実験あるいは解析結果から得られた荷重-変位曲線上にプロットした(図-5.3.21)．図中の●が式(5.3.1)を用いて，材料の公称値と構造諸元から算出した設計降伏耐力である．参考に，実験で用いられた材料の降伏点を適用した算出した結果■もプロットしている．

構造諸元から算出できる健全時の設計降伏耐力と解析や実験から算出した健全時の終局耐力との関係を表-5.3.7に示す．表-5.3.7では，支間中央載荷の  $P_{Hu}/P_{Hy}$  では解析値 1.43～1.78 [実験値 1.46～1.54] であり，支点直上載荷の条件の  $P_{Hu}/P_{Hy}$  では解析値 1.19～1.73 [実験値 1.45～1.64] であった．図-5.3.21の No.1 と No.8 の No.1, No.3, No.8

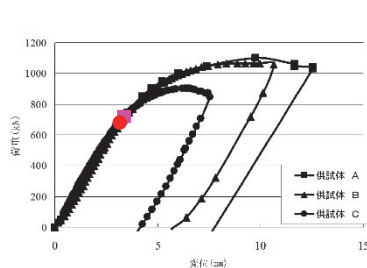
表-5.3.5 構造諸元を把握できた既往の研究のモデルの整理

	文 献	方 法	荷重載荷位置	スカーラップ	備 考
No.1	[2009] <sup>12)</sup>	実験	支点直上載荷	なし	日本海沿岸 100m の橋梁の 2/3 スケール
No.2	[2012] <sup>5)</sup>	解析・実験	支点直上載荷	なし	日本海沿岸 100m の橋梁の 2/3 スケール
No.3	[2014] <sup>6)</sup>	解析・実験	支間中央載荷	なし	日本海沿岸 100m の橋梁の 2/3 スケール
No.4	本解析モデル	解析	支間中央載荷	あり	平成6年版の標準設計, 主要幹線道路橋 <sup>3)</sup> 単純プレートガーダー橋 (設計番号0240) 径間長30m, 内桁, 固定端, 初期不整考慮しない.
No.5	本解析モデル	解析	支間中央載荷	あり	No.4 の橋梁の可動端
No.6	本解析モデル	解析	支点直上載荷	あり	No.4 の橋梁と同じ
No.7	[2013] <sup>7)</sup>	解析	支点直上載荷	なし	日本橋梁建設協会: 合成桁の設計例と解説, 2000. の設計例で使用された橋梁
No.8	[2014] <sup>13)</sup>	実験	1 パネル径間側	なし	阪神高速道路の本線において現在も供用中の鋼I桁の中から, 供用年次が古く, 比較的桁高の小さい橋梁, 1969年(昭和44年)10月に竣工した鋼I桁(橋長24m, 幅員17.7m, RC床版厚180mm, 6主桁)

表-5.3.6 文献のモデルの構造諸元の整理

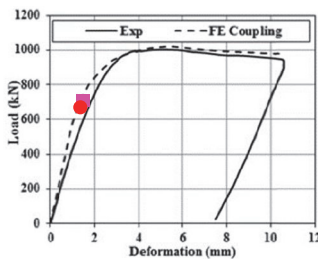
	年度	補剛材						ウェブ					
		材質	幅 (mm)	厚 (mm)	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	有効面積 (mm <sup>2</sup> )	材質	有効幅 (mm)	厚 (mm)	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	有効面積 (mm <sup>2</sup> )
No.1	2009	SS400	77	12	140	235[250]	1848	SS400	72	6	140	235[240]	864
No.2	2012	SS400	80	12	140	235[250]	1920	SS400	72	6	140	235[240]	864
No.3	2014	SS400	80	12	140	235[250]	1920	SS400	72	6	140	235[240]	864
No.4	2011	SS400	155	14	140	235	4340	SM490Y	108	9	210	355	1944
No.5	2011	SS400	155	14	140	235	4340	SM490Y	108	9	210	355	1944
No.6	2011	SS400	155	14	140	235	4340	SM490Y	108	9	210	355	1944
No.7	2013	SS400	170	16	140	235	5440	SS400	108	9	140	235	1944
No.8	2014	SM400A	100	25	140	235[259.5]	5000	SM490A	108	9	185	315[399.5]	1944

※許容応力度や降伏点は公称値を記載している. 実験によって算出された値は[ ]で記載している.



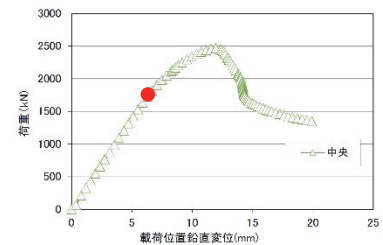
(a)モデル No.1<sup>12)</sup>

●  $P_{Hy} = 637(\text{kN})$ , ■  $P_{Hy} = 668(\text{kN})$



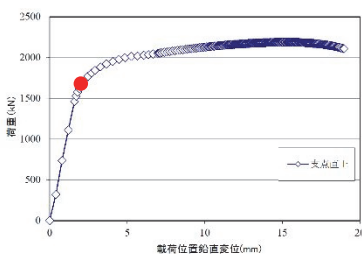
(b)モデル No.3<sup>6)</sup>

●  $P_{Hy} = 654(\text{kN})$ , ■  $P_{Hy} = 687(\text{kN})$



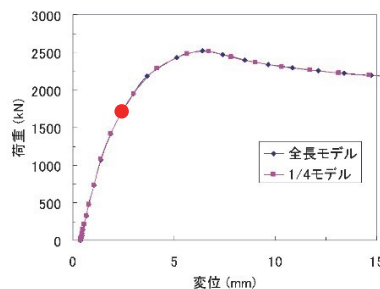
(c)モデル No.4,5

●  $P_{Hy} = 1,710(\text{kN})$



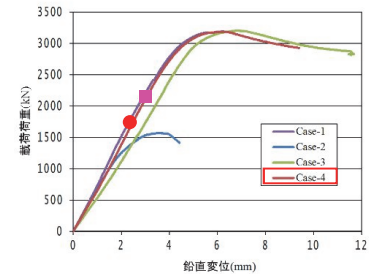
(d)モデル No.6

●  $P_{Hy} = 1,710(\text{kN})$



(e)モデル No.7<sup>7)</sup>

●  $P_{Hy} = 1,735(\text{kN})$



(f)モデル No.8<sup>13)</sup>

●  $P_{Hy} 1,787(\text{kN})$ , ■  $P_{Hy} = 2,074(\text{kN})$

図-5.3.21 健全モデルにおける荷重-変位曲線と終局耐力の関係(縦軸: 荷重, 横軸: 変位)



は、実験結果であり、 $P_{Hu}/P_{Hy}$  は解析値よりも小さい。これは公称値を用いた材料の降伏点よりも実鋼材の降伏点が高かったためと考えられる。

表-5.3.7 健全時の終局耐力，設計降伏耐力の関係（無次元化）

	$P_{Hu}/P_{Hy}$	载荷条件
No.1	1.73 [1.64]	支点直上载荷
No.2	1.53 [1.45]	支点直上载荷
No.3	1.54 [1.46]	支間中央载荷
No.4	1.44	支間中央载荷
No.5	1.43	支間中央载荷
No.6	1.19	支点直上载荷
No.7	1.46	支点直上载荷
No.8	1.78 [1.54]	支間中央载荷

$P_{Hu}$  : 健全時の終局耐力 /  $P_{Hy}$  : 健全時の降伏耐力 ※実験によって算出された値は [ ] で記載している。

ほぼ同じ構造諸元で载荷条件だけ変更した No.1,2 と No.3, No.4, 5 と No.6 を比較すると、前者は载荷条件による違いは小さく、健全時の終局耐力は設計降伏耐力の 154 %であった。後者は载荷条件に差があり、支間中央载荷において、健全時の終局耐力は設計降伏耐力の 144 %であるが、支点直上载荷における健全時の終局耐力は設計降伏耐力の 119 %であった。

構造諸元から算出した設計降伏耐力と健全時の終局耐力の差が小さいことは、設計降伏耐力に対して健全時の終局耐力の安全率を低く設定できるという点で安全側であると考えられる。ここでは、設計降伏耐力と終局耐力の関係には、ばらつきがあるものの、両方の耐力を把握している二つのモデルのうち、 $P_{Hu}/P_{Hy}$  の差が小さい方の結果を代表例として提示する。健全時の設計降伏耐力に対する終局耐力は、支間中央载荷では  $P_{Hu}/P_{Hy} = 1.45$  程度、支点直上载荷（スカーラップなし）では  $P_{Hu}/P_{Hy} = 1.2$  程度の関係がある。

次いで、桁反力（設計反力）と健全時の終局耐力の関係を整理する。建設時の構造余裕を把握するには、損傷時の終局耐力の低下率だけでなく、健全時の終局耐力（腐食影響図における原点での耐力）を把握する必要がある。

これらの関係は、健全時の終局耐力および桁反力( $P_{HD}$ )が把握できる文献 7), 8), 14) の桁の解析結果(No.4~6)を用いる。ここで、この桁の桁反力を  $P_{HDb}$ 、健全時の構造諸元から算出できる設計降伏耐力を  $P_{Hyb}$ 、健全時の終局耐力を  $P_{Hub}$  と表す。さらに、文献 3) の平成 6 年度の標準設計の構造諸元を利用して、この桁の桁反力を抽出するとともに図-5.3.22 に示すような桁反力と健全時健全時の構造諸元から算出できる設計降伏耐力の関係を分布図（全 3,456 ケース）に整理し、桁反力と健全時の構造諸元から算出できる設計降伏耐力の割合を求める。図-5.3.22 の  $P_{Hy} / P_{HD} = 1.7$  の赤線は必要耐力を示し、青線は桁反力（設計反力）を示す。

本解析モデルの桁反力に対する健全時の終局耐力は、支間中央载荷（No.4,5）では  $P_{Hub}/P_{HDb} = 2,460(\text{kN}) / 860(\text{kN}) = 2.86$  であり、支点直上载荷時（No.6）では  $P_{Hub}/P_{HDb} = 2,020(\text{kN}) / 860(\text{kN}) = 2.35$  であった。

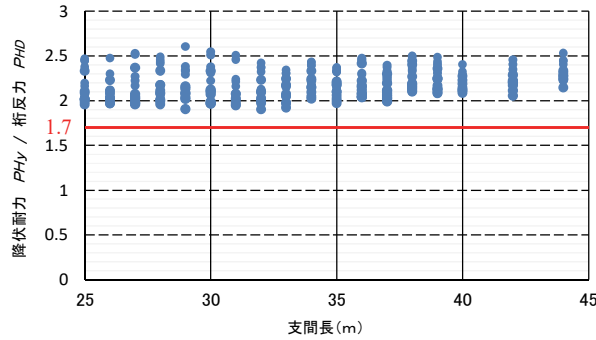


図-5.3.22 健全時における設計降伏耐力と桁反力の関係  
(赤線：桁反力が許容軸圧縮応力度の上限値における安全率)

一方で、図-5.3.22の結果より、平成6年度の標準設計のケースの  $P_{Hy} / P_{HD}$  は1.90～2.61であった。本解析モデルの桁反力と設計降伏耐力の関係  $P_{Hyb} / P_{HDb}$  は、 $1.99 = 1,710(\text{kN}) / 860(\text{kN})$ であることから、図-5.3.22の分布図の比較的低い位置に該当する。各载荷時の  $P_{Hub} / P_{HDb}$  にこの標準設計のケースの  $P_{Hy} / P_{HD} = 1.90 \sim 2.61$  の範囲を考慮して  $P_{Hu} / P_{HD}$  を推定すると、支間中央载荷では  $P_{Hu} / P_{HD} = 2.74 \sim 3.75$  程度、支点直上载荷では  $P_{Hu} / P_{HD} = 2.24 \sim 3.07$  程度に多く分布していると考えられる。

#### 5.4 崩壊プロセスに基づいた桁端部の耐力評価の検討

本節は、第3章の分析結果を利用して、崩壊プロセスに影響を与えた構造パラメータを抽出し、この構造パラメータを変更して解析を行い、構造パラメータによる影響を把握する。この時、構造パラメータの範囲は、昭和53年度版<sup>2)</sup>と平成6年度版の標準設計<sup>3)</sup>等の桁端部の構造諸元を基に決定する。これらの検討を基に、既往の健全時の耐荷力評価式を利用して、腐食した桁端部の耐荷力評価を提案する。

##### 5.4.1 構造パラメータの抽出方法

###### (1) 構造パラメータの抽出

第3章の解析結果の分析を利用して、この検討結果より、柱として全体座屈に至って崩壊しているタイプと局部座屈に留まっているタイプに分類できた。桁端部の崩壊に影響する構造パラメータとして、次に示す4つを抽出し、その抽出理由を簡単に述べる。

- ・「桁端側ウェブの張出し長さ ( $L_w$ ) と幅厚比パラメータ ( $R_w$ )」: 桁端側ウェブの端部から発生した局部座屈による変形が、支点部付近まで進展して支点部の部材が座屈しているケースがあった。
- ・「径間側ウェブのアスペクト比 ( $\alpha$ )」: 欠損ケースにおいても、せん断座屈が発生しているケースがあった。
- ・「支点上補剛材の設計降伏耐力の割合 ( $P_{sy} / P_y$ )」: ウェブおよび支点上補剛材の十字柱断面における各々の板は、その鋼種に応じた応力-変位で挙動していた。
- ・「支点上補剛材の幅厚比パラメータ ( $R_s$ )」: ほとんどのケースにおいて、支点上補剛材が局部座

屈し崩壊していた。

## (2) 構造パラメータの分布

第3章の崩壊プロセスの検討に用いたモデルが平成6年度版の主要幹線道路を想定した1構造諸元であり，その他の構造諸元についても最大荷重および崩壊プロセスの傾向を把握することが望ましいと考えた．そこで，解析モデルを設定するために，昭和53年度版<sup>2)</sup> および平成6年度版の標準設計<sup>3)</sup> の構造諸元をもとに把握した．

対象とする構造は，多くの橋梁が建設された年代の設計・計画する上で参考としたと考えられる昭和53年度版の標準設計<sup>2)</sup> の全桁（全281タイプ）および平成6年度版の標準設計<sup>3)</sup> の全桁（全206タイプ）による単純プレートガーダー橋の桁端部とした．

### a) 桁端側ウェブの張出し長さ ( $L_w$ ) および幅厚比パラメータ ( $R_w$ )

標準設計<sup>2), 3)</sup> では，桁端側ウェブの張出し長さ  $L_w$  は 300mm で統一している．この張出し長さ  $L_w$  300mm およびウェブ片側の有効幅にあたる  $12t_w$  ( $t_w$ :ウェブの板厚) について，自由端を有する境界条件に対して  $k=0.43$  を用いて，式 (5.4.1) より計算して求めた桁端側ウェブパネルの幅厚比パラメータ  $R_w$  を表-5.4.1 に示す．対象とした標準設計では，ウェブの鋼材の材質は，SM490Y ( $\sigma_y = 355\text{N/mm}^2$ ) である．また，幅厚比パラメータ  $R_w$  を縦軸に，支間長を横軸とした分布図を図-5.4.1 に示す．

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}} \quad (5.4.1)$$

- $b$  : 板幅(mm)
- $t$  : 板厚(mm)
- $\sigma_y$  : 鋼材の降伏点(N/mm<sup>2</sup>)
- $E$  : ヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)
- $\mu$  : ポアソン比
- $k_b$  : 座屈係数 (自由突出板0.43)

表-5.4.1 桁端側ウェブパネルの幅厚比パラメータ

ウェブ板厚 $t_w$ (mm)	幅厚比パラメータ $R_w$		材質
	$b=300\text{mm}$	$b=12t$	
9	2.254	0.811	SM490Y
10	2.028	0.811	SM490Y
11	1.844	0.811	SM490Y
12	1.690	0.811	SM490Y

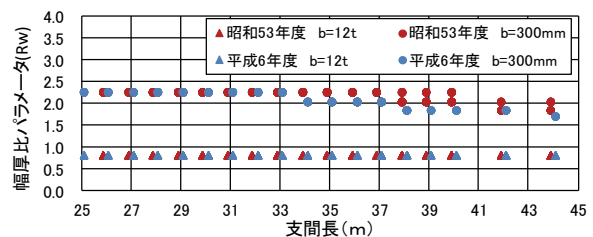


図-5.4.1 桁端側ウェブパネルの幅厚比パラメータ

文献 19 では，プレートガーダー形式の桁端部の張出し長さは，支間長 30m~40m の場合は 350mm~500mm 程度，支間長 40m~50m の場合は 400mm~500mm 程度を目安にしている．

### b) 径間側ウェブのアスペクト比 ( $\alpha$ )

支点上補剛材から 1 パネル目の径間側ウェブのアスペクト比  $\alpha$  について，縦軸をアスペクト比  $\alpha$ ，横軸を支間長として，その分布図を図-5.4.2 に示す．また，アスペクト比の求め方を図-5.4.3

に示す。

平成6年度版のAspect比の方が小さい傾向が見られた。また、平成6年度版においてAspect比にばらつきがあるのは、大型車交通量および斜角に合わせて1パネルの幅を変えているためと考えられる。

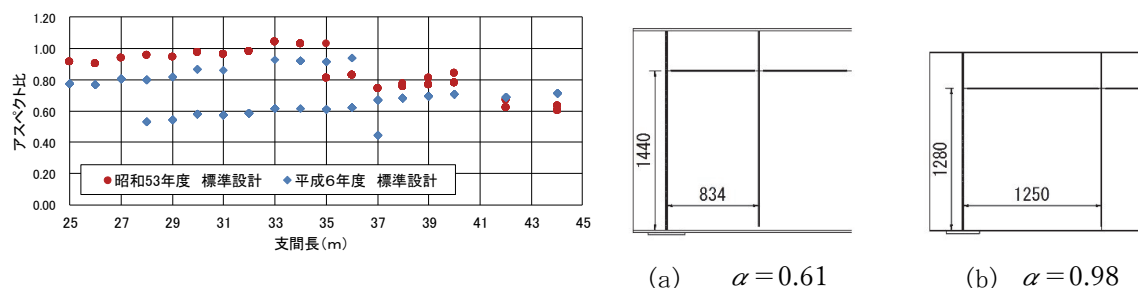


図-5.4.2 径間側ウェブパネルのアスペクト比 図-5.4.3 標準設計におけるアスペクト比の求め方

### c) 支点上補剛材の設計降伏耐力の割合 ( $P_{sy} / P_y$ )

ここでは、柱の設計降伏耐力  $P_y$  として、構造諸元をもとに有効断面積と材料の降伏点を掛け合わせることで算出できる累加強度式(5.4.2)を採用する。この式で算出される十字柱の設計降伏耐力  $P_y$  に対する式 (5.4.3) で算出される支点上補剛材の設計降伏耐力  $P_{sy}$  の割合  $P_{sy} / P_y$  により、支点上補剛材の設計降伏耐力の割合を把握する。これら設計の降伏耐力の割合の分布図を図-5.4.4 に示す。また、各規定の上下限值に対する支上部の構造諸元を図-5.4.5 に示す。

$$P_{sy} = \sigma_{caw} \cdot \nu \cdot A_{ew} \quad (5.4.2)$$

$$P_s = \sigma_{caw} \cdot \nu \cdot A_{ew} + \sigma_{cas} \cdot \nu \cdot A_{es} \quad (5.4.3)$$

$P_{sy}$  : 構造諸元から設定する支点上補剛材の設計降伏耐力

$P_y$  : 構造諸元から設定する設計降伏耐力

$\sigma_{caw}$  : ウェブの許容軸方向圧縮応力度の上限値(N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{cas}$  : 支点上補剛材の許容軸方向圧縮応力度の上限値(N/mm<sup>2</sup>)

$\nu$  : 安全率 (=1.7)

$A_{ew}$  : ウェブの有効断面積(mm<sup>2</sup>) ※有効幅は  $24 t_w$

$A_{es}$  : 補剛材の有効断面積(mm<sup>2</sup>)

支間長が短い場合、昭和53年度版に対し、平成6年度版の方が支点上補剛材の設計降伏耐力の割合が大きい傾向がある。

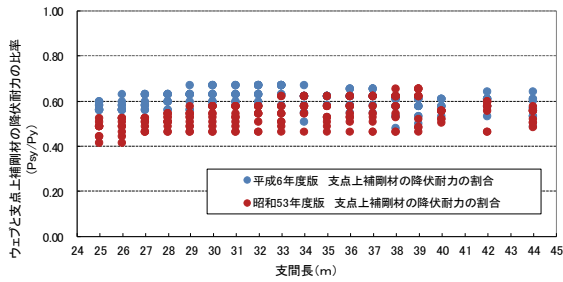


図-5.4.4 支点上補剛材の設計降伏耐力の関係

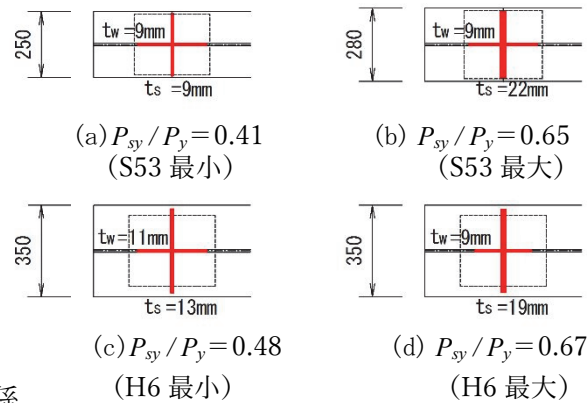


図-5.4.5 標準設計における支点部の構造諸元

※赤い範囲：有効断面積（ウェブ有効幅： $24t_w$ ）

#### d) 支点上補剛材の幅厚比パラメータ ( $R_s$ )

支点上補剛材の場合の幅厚比パラメータ  $R_s$  について、自由端を有する境界条件に対して  $k=0.43$  を用いて、式 (5.4.1) により計算した幅厚比パラメータ  $R_s$  を縦軸に、支間長を横軸として図-5.4.6 に示す。この支点上補剛材の鋼材の材質は、SS400 ( $\sigma_y=235\text{N/mm}^2$ ) である。表-5.4.2 に得られた支点上補剛材の幅厚比パラメータを示す。

表-5.4.2 支点上補剛材の幅厚比パラメータ

支点上補剛材 板厚 $t_s$ (mm)	板幅 $b$ (mm)	幅厚比パラメータ $R_s$	材質
S53	9	0.703	SS400
	22	0.313	SS400
H6	12	0.711	SS400
	14 <sup>※</sup>	0.609	SS400
	25	0.341	SS400

※文献 本解析モデル

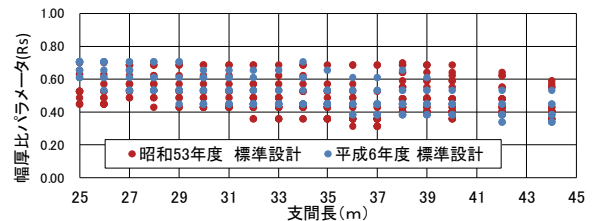


図-5.4.6 支点上補剛材の幅厚比パラメータ

昭和 53 年度版の標準設計に用いられた支点上補剛材の板幅は平成 6 年度版よりも小さいが、両方の年度ともに幅厚比パラメータ  $R_s$  は、約 0.3~0.7 の範囲にばらついて分布している。従って、ほとんどの  $R_s$  は 0.7 以下で、道路橋示方書<sup>り</sup>で規定された局部座屈により低減されない領域に該当している。

## 5.4.2 解析検討

### (1) 解析概要

第 2 章および第 3 章で用いた解析モデルと同様に、支点上付近の構造諸元を変えないことを条件に、対象橋梁の桁端部にせん断力が支配的に載荷されるように、端対傾構から隣接する対傾構間を支間とする単純桁としてモデル化した。使用要素、載荷条件、境界条件は第 2 章の通りであ

る。解析モデルは、このベースモデルの支間長を変えず、構造諸元のうち、桁端側ウェブの張出し長さ、径間側ウェブのアスペクト比、支点上補剛材の板厚および板幅を変更し、汎用有限要素解析 ABAQUS<sup>20)</sup> を用いて弾塑性有限変位解析を行った。

## (2) 解析ケース

5.4.1 (2) 構造パラメータの分布を踏まえて、径間側ウェブのアスペクト比 ( $\alpha$ )、桁端側ウェブの張出し長さ ( $L_w$ )、支点上補剛材の設計降伏耐力の割合 ( $P_{sy}/P_y$ ) の上限値および下限値を押さえて、解析ケースを設定した。この支点上補剛材の設計降伏耐力の割合の変更は、支点上補剛材の厚さおよび幅を変更して行った。この結果、 $R_s$  (0.449~0.703) も変化し、 $P_{sy}/P_y$  を変化させた解析で  $R_s$  を把握できることが分かった。

### [検討 1]

桁端側ウェブの張出し長さについて、ベースモデル  $L_w = 300\text{mm}$  に対して、 $L_w = 500\text{mm}$  とした。第 2 章の結果を参考に、ウェブ欠損よりも支点上補剛材の欠損による影響が大きいと考え、支点上補剛材の欠損のみとした。さらに、この補剛材欠損ケースでは、欠損高による影響が小さかったので、欠損高が最も高い 100mm を対象にした。これらの解析ケースを表-5.4.3 に示す。

### [検討 2]

径間側ウェブのアスペクト比について、ベースモデル  $\alpha = 0.58$  に対して、下限値  $\alpha = 0.45$  と上限値 1.04 と設定した。欠損位置と欠損高の設定の考え方は、検討 1 と同様である。これらの解析ケースを表-5.4.4 に示す。なお、この時の桁端側ウェブの張出し長さは  $L_w = 300\text{mm}$  とする。

### [検討 3]

支点上補剛材の設計降伏耐力の割合について、最大値  $P_{sy}/P_y = 0.67$  ( $t_w = 9\text{mm}$ ,  $t_s = 19\text{mm}$ ,  $B_s = 155\text{mm}$ ) と最小値  $P_{sy}/P_y = 0.41$  ( $t_w = 9\text{mm}$ ,  $t_s = 9\text{mm}$ ,  $B_s = 115\text{mm}$ ) の 2 タイプに対して、各欠損ケースを設定する (計 20 ケース)。第 2 章において、欠損高 10 mm と 30mm とではほぼ同じ傾向が見られたので欠損高 10mm に集約し、欠損高を 10mm, 100mm を対象に解析した。これらの解析ケースを表-5.4.5 に示す。なお、この時の桁端側ウェブの張出し長さは  $L_w = 300\text{mm}$ 、径間側ウェブのアスペクト比  $\alpha = 0.58$ 、桁端側ウェブおよび径間側ウェブの欠損幅は 190mm とした。

表-5.4.3 解析ケース(桁端側ウェブの張出し長さ)

$L_w$ (mm)	欠損ケース	欠損高
500	欠損なし	0
	補剛材片側欠損	100
	補剛材両側欠損	100

表-5.4.4 解析ケース(径間側ウェブのアスペクト比)

$\alpha$	欠損ケース	欠損高
0.45	欠損なし	0
	補剛材片側欠損	100
	補剛材両側欠損	100
1.04	欠損なし	0
	補剛材片側欠損	100
	補剛材両側欠損	100

表-5.4.5 解析ケース(設計降伏耐力比)

$P_{sy}/P_y$	欠損ケース	欠損高
0.41	欠損なし	0
	補剛材片側欠損	10,100
	補剛材両側欠損	10,100
	ウェブ径間側部分欠損	10,100
	ウェブ桁端側部分欠損	10,100
	ウェブ桁端側全欠損	100
0.67	欠損なし	0
	補剛材片側欠損	10,100
	補剛材両側欠損	10,100
	ウェブ径間側部分欠損	10,100
	ウェブ桁端側部分欠損	10,100
	ウェブ桁端側全欠損	100

### 5.4.3 解析結果

#### (1) 桁端側ウェブの張出し長

桁端側ウェブの張出し長さを変更して解析して得られた最大荷重を表-5.4.6に示す。補剛材片側欠損（欠損高 100mm）の場合は、張出し長さ  $L_w=300\text{mm}$  に対して  $L_w=500\text{mm}$  の場合、全て大きくなる結果となり、最大 12%程度増加であった。これは、桁端側ウェブが上下フランジに拘束されている範囲の増加による影響と考えられる。

表-5.4.6 最大荷重（パラメータ：桁端側ウェブ張出し長）

欠損位置	欠損高 (mm)	最大荷重(KN)	
		張出し 300mm	張出し 500mm
欠損なし	0	2,460	2,520
補剛材片側欠損	100	1,720	1,920
補剛材両側欠損	100	1,310	1,320

グレーの色は、第3章で既の実施した解析ケースを示す。

#### (2) 径間側ウェブのアスペクト比

すでに得られている  $\alpha=0.58$  と解析した径間側ウェブのアスペクト比の下限值  $\alpha=0.45$  と上限値 1.04 に対して、補剛材片側欠損ケース（欠損高 100mm）と補剛材両側欠損（欠損高 100mm）を解析した荷重-変位曲線を図-5.4.7に示す。また得られた最大荷重を表-5.4.7に示す。

アスペクト比  $\alpha=0.58$  のタイプの最大荷重と  $\alpha=0.45$  のタイプの最大荷重を比較した結果、各ケースともに、最大 3%程度の差であり、同じような荷重-変位曲線を示していた。一方、 $\alpha=0.58$  のタイプの最大荷重と  $\alpha=1.04$  のタイプの最大荷重を比較した結果、最大 10%程度の差があった。また、健全時のケースでは、 $\alpha=1.04$  のタイプの最大荷重後は、 $\alpha=0.58$  のタイプに対して比較的緩やかな曲線であったのに対して、補剛材片側欠損ケースでは、最大荷重後に急激な低下が見られた。

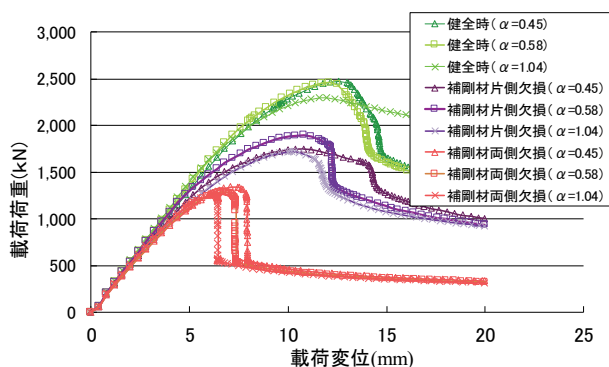


図-5.4.7 荷重-変位曲線

(径間側ウェブのアスペクト比)

表-5.4.7 最大荷重（パラメータ：アスペクト比）

欠損位置	欠損高 (mm)	最大荷重(KN)		
		0.45	0.58	1.04
欠損なし	0	2,480	2460	2,300
補剛材片側欠損	100	1,750	1,720	1,890
補剛材両側欠損	100	1,340	1,310	1,260

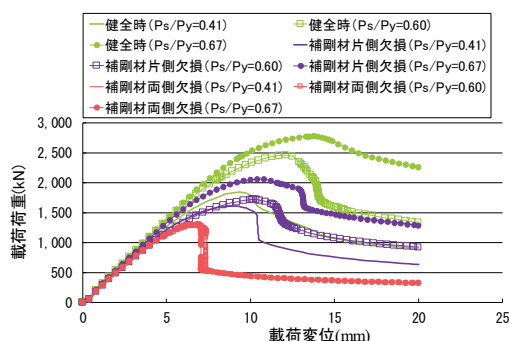
グレーの色は、第2章で既の実施した解析ケースを示す。

アスペクト比  $\alpha=0.58$  のタイプの最大荷重と  $\alpha=0.45$  のタイプの最大荷重を比較した結果、各ケースともに、最大 3% 程度の差であり、同じような挙動をしていた。一方、 $\alpha=0.58$  のタイプの最大荷重と  $\alpha=1.04$  のタイプの最大荷重を比較した結果、最大 10% 程度の差であった。健全時のケースについて  $\alpha=0.58$  の場合、最大荷重後に急激に荷重低下しているのに対して、 $\alpha=1.04$  の場合、最大荷重後は比較的緩やかであった。これは、 $\alpha=0.58$  のケースが柱として全体座屈が発生して最大荷重に至っているのに対して、 $\alpha=1.04$  のケースでは、柱としての全体座屈に加えてせん断座屈が発生しているためである。なお、最大荷重が 10% 程度以下であったことから、せん断座屈よりも柱としての全体座屈による影響が大きいと考えられる。一方、補剛材が欠損した場合には、最大荷重後に急激に荷重低下していたので、せん断座屈よりも柱の全体座屈が卓越していたと考えられる。

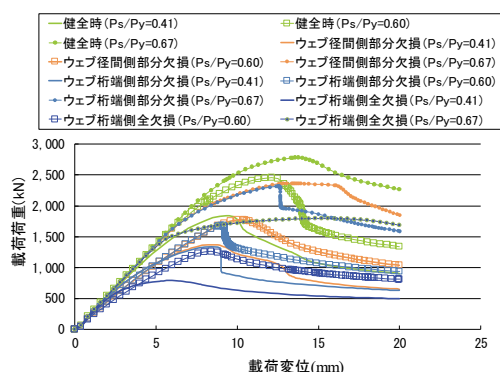
### (3) 支点上補剛材の設計降伏耐力の割合

第 3 章の解析結果  $P_{sy}/P_y=0.60$  と支点上補剛材の幅と厚さを変えた支点上補剛材の割合の下限值  $P_{sy}/P_y=0.41$  と上限値  $P_{sy}/P_y=0.67$  に対して、解析した荷重-変位曲線を図-5.4.8 に示す。また、得られた最大荷重を表-5.4.8 に示す。

健全時および補剛材片側欠損の最大荷重は、 $P_{sy}/P_y=0.67$  から 0.41 にほぼ正比例で低下していた。これは、支点上補剛材の割合がそのまま反映され、支点上補剛材の断面構成による影響の大きさを示す。一方、補剛材両側欠損ケースは同じウェブ厚であるために、荷重-変位曲線および最大荷重はほとんど同じであった。



(a) 健全時+補剛材欠損



(b) 健全時+ウェブ欠損

図-5.4.8 荷重-変位曲線 (設計降伏耐力)

表-5.4.8 最大荷重 (パラメータ: 設計降伏耐力)

欠損ケース	欠損高	最大荷重(KN)			
		$P_{sy}/P_y$ 0.41	$P_{sy}/P_y$ 0.60	$P_{sy}/P_y$ 0.67	
欠損なし	0	1,840	2,460	2,780	
補剛材	片側欠損	10	1,620	1,900	2,070
		100	0.88	0.77	0.74
	両側欠損	10	1,610	1,720	2,060
		100	0.88	0.70	0.74
	両側欠損	10	1,330	1,320	1,320
		100	0.72	0.54	0.47
ウェブ	径間側部分欠損 (190mm)	10	1,420	2,020	2,430
		100	0.77	0.82	0.87
	桁端側部分欠損 (190mm)	10	1,370	1,780	2,370
		100	0.74	0.72	0.85
	桁端側部分欠損 (190mm)	10	1,370	1,970	2,390
		100	0.74	0.80	0.86
桁端側全欠損	100	1,340	1,680	2,320	
桁端側全欠損	100	0.73	0.68	0.83	
桁端側全欠損	100	789	1,260	1,800	
桁端側全欠損	100	0.43	0.51	0.65	

グレーの色は、第 2 章で既実施した解析ケースを示す。黄色は、各健全時のケースから欠損時の最大荷重を割った値



ウェブ欠損は、欠損ケース毎で比較すると最大荷重に至るまでいずれのタイプも似たような放物線であった。そのうち、ウェブ桁端側部分欠損は最大荷重後に急低下していた。

支点上補剛材の設計降伏耐力の割合  $P_{sy}/P_y$  が大きいケースにおいて、最大荷重以降の変形の進展が緩やかであった。これは、支点上補剛材の比率の影響であり、支点上補剛材の剛性が高くなった影響と考えられる。このため、荷重-変位曲線では、最大荷重後も緩やかに荷重低下している。

ウェブ部分欠損において、 $P_{sy}/P_y=0.60$  のケースでは、欠損高に違いがあったが、 $P_{sy}/P_y=0.41$  と  $P_{sy}/P_y=0.67$  にケースでは、欠損高に違いが見られなかった。これは、支点上補剛材とウェブの剛性の違いによるものと考えられる。ウェブに対して支点上補剛材の剛性の方が同程度、もしくは大きい場合には、欠損高よりも欠損位置に大きく影響されると思われる。

健全時および補剛材片側欠損は、荷重-変位曲線における最大荷重は、ほぼ、正比例で低下していた。補剛材両側欠損タイプはウェブ厚が同じであるために、荷重-変位曲線および最大荷重は同じであった。

ウェブ部分欠損は、いずれのケースも似たような放物線の荷重-変位曲線であり、ウェブ桁端側部分欠損は、最大荷重後に急激に荷重低下していた。ウェブ桁端側全欠損は、いずれのケースも似たような放物線を示していた。

ウェブ部分欠損において、 $P_{sy}/P_y=0.60$  のケースにおいて、欠損高に違いがあったものの、 $P_{sy}/P_y=0.41$  と  $P_{sy}/P_y=0.67$  においては、欠損高に違いが見られなかった。これは、補剛材とウェブの剛性の違いによるものと考えられ、ウェブに対して補剛材の剛性の方が同じ、もしくは大きい場合には、欠損高よりも欠損位置に大きく左右されているものと思われる。

#### 5.4.4 崩壊モードの分析

構造パラメータを変更した場合においても、欠損タイプ毎で同じ崩壊モードを示していた。せん断座屈が発生しても、支点部耐荷力が低いために、崩壊モードは支点部で決定していた。欠損ケース毎で得られた崩壊モードを以下に示す。

ウェブ部分欠損ケースは、桁端側ウェブの局部座屈が誘因となって十字柱の4辺が局部座屈することにより崩壊していた。ウェブ桁端側全欠損ケースは、3辺が局部座屈することにより崩壊していた。補剛材欠損ケースは、柱としての全体座屈で崩壊していた。その現象は荷重-変位曲線にも現れ、最大荷重後に急激に荷重低下していた。

この柱としての全体座屈は、欠損タイプにより境界条件が異なり、補剛材片側欠損のケースは両端ピン支持の形状に近く、補剛材両側欠損のケースは、一端固定-他端ピン支持に近い形状をしていた。

一方、健全時のケースは、一部、構造パラメータの影響を受けている傾向が見られた。アスペクト比の場合においては、 $\alpha=0.58$  のタイプが柱としての全体座屈が発生して最大荷重に至っているのに対して、 $\alpha=1.04$  のタイプでは、柱としての全体座屈に加えてせん断座屈が発生していた。このため、荷重-変位曲線では、最大荷重後も緩やかに荷重低下している。なお、健全時のケースは、柱としての全体座屈が発生し、その境界条件は、一端固定-他端回転バネ支持に近い形状であった。

## 5.4.5 崩壊モードを踏まえた耐荷力評価

### (1) 評価の方針

5.4.3 で支点上補剛材の設計降伏耐力の割合の図において耐荷力にばらつきが見られたので、構造諸元から耐荷力評価を把握するために、道路橋示方書の許容応力度法の設計で用いられている耐荷力式をベースとした評価式を用いて、解析結果の最大荷重の評価を試みる。最大荷重時において、ほとんどのケースで、支点上補剛材の全幅で軸圧縮応力が発生していた。また、ウェブの軸圧縮応力は、支点上補剛材が大きく局部座屈するか、もしくは柱としての全体座屈が発生するまで拡大していた。そのため、耐荷力の評価はウェブの軸圧縮応力の範囲に着目することで可能と考えた。

解析結果を分析した結果、ウェブの軸圧縮応力の载荷範囲には、主に2つの傾向が見られた。一つはウェブ桁端側全欠損ケースで、軸圧縮応力の载荷範囲は補剛材取付部からソールプレート程度165mm程度まで見られた。この値は、式(5.4.1)より逆算して算出すると $R_w=0.4$ 程度に該当する。それ以外のケースの軸圧縮応力の载荷範囲は、ばらつきが見られるものの、支点部から各250mm程度まで見られた。この値は、式(5.4.1)より逆算して算出すると $R_w=0.6$ 程度に該当する。

解析で得られたウェブの軸圧縮応力の範囲と各ケースの算出値（ウェブ桁端側全欠損ケース： $R_w=0.4$ 、それ以外のケース、 $R_w=0.6$ としての幅）の割合を図-5.4.9に示す。解析値の概ね $\pm 25\%$ 以内であった。

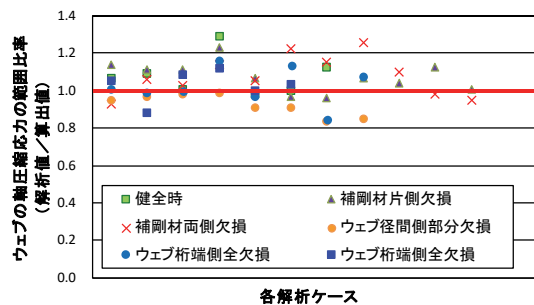


図-5.4.9 ウェブの軸圧縮応力の範囲  
解析値と算出値の比較

評価式は、軸圧縮応力の範囲に別々の降伏点をそれぞれ乗じて足し合わせた累加強度に対して座屈強度式によって耐荷力を低減させた評価式である。崩壊モードが局部座屈の場合には式(5.4.4)、(5.4.5)を用いる。一方、崩壊モードが柱としての全体座屈の場合には、式(5.4.6)、(5.4.7)を用いる。座屈強度式は、道路橋示方書<sup>1)</sup>に規定する基準耐荷力曲線の下限值の式を用いた。

#### 【崩壊モード：局部座屈の場合の座屈強度式】

$$P_{max} = \sigma_{cr}/\sigma_y \cdot \sigma_{caw} \cdot v \cdot A_{wd} + \sigma_{cr}/\sigma_y \cdot \sigma_{cas} \cdot v \cdot A_{sd} \quad (5.4.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cr}/\sigma_y &= 1.0 && (R \leq 0.7) \\ \sigma_{cr}/\sigma_y &= 0.5 / R^2 && (0.7 < R) \end{aligned} \right\} \quad (5.4.5)$$

#### 【崩壊モード：柱としての全体座屈の座屈強度式】

$$P_{max} = (\sigma_{caw} \cdot v \cdot A_{wd} + \sigma_{cas} \cdot v \cdot A_{sd}) \cdot \sigma_{cr}/\sigma_y \quad (5.4.6)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cr}/\sigma_y &= 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \sigma_{cr}/\sigma_y &= 1.109 - 0.545\bar{\lambda} & (0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 1.0) \end{aligned} \right\} \quad (5.4.7)$$

$$\bar{\lambda} = h_w \cdot l / r \quad (5.4.8)$$

- $\sigma_{caw}$  : ウェブの許容応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{cas}$  : 支点上補剛材の許容応力度(N/mm<sup>2</sup>)
- $\gamma_y$  : 安全率 (=1.7)
- $A_{wd}$  : 欠損部を考慮したウェブの軸圧縮応力の断面積(mm<sup>2</sup>)
- $A_{sd}$  : 欠損部を考慮した支点上補剛材の軸圧縮応力の断面積(mm<sup>2</sup>)
- $R$  : 幅厚比パラメータ
- $\bar{\lambda}$  : 支点部の細長比パラメータ
- $h_w$  : 桁高
- $r$  : 欠損部を考慮した断面二次半径

ここで、支点上補剛材は自由突出板の場合(座屈係数  $k=0.43$ )とする。桁端側ウェブは自由突出板であるが、ウェブに対して上下フランジによる拘束性が高いと考え、両端支持板の場合(座屈係数  $k=4.0$ )とした。また、径間側ウェブは連続していることを考慮して両端支持板の場合とした。

軸圧縮応力の範囲は、ウェブ桁端側全欠損ケースは式 (5.4.1) に  $R_w=0.4$  の場合の  $b$  の値を使用し、それ以外のケースは、式 (5.4.1) に  $R_w=0.6$  の場合の  $b$  の値を使用する。ウェブ欠損の場合はこの  $b$  の値からその範囲を控除する。

有効座屈長  $l$  は、基本柱の座屈形状から設定した。健全時のケースは一端固定-他端回転バネ支持 ( $l=0.7$ ) とし、補剛材片側欠損のケースは、両端ピン支持 ( $l=1.0$ ) とした。補剛材両側欠損のケースは、一端固定-他端ピン支持のような形状はみられたが、両端ピン支持と同等以上の有効座屈長になると考え ( $l=1.0$ ) とした。

断面二次半径は、補剛材の材質の降伏点を用いることを基本とするが、補剛材両側欠損の場合はウェブの材質の降伏点を用いている。

## (2) 評価結果

解析から得られた最大荷重に対して、評価式により得られた耐荷力の割合を図-5.4.10に示す。ウェブ桁端側全欠損ケースの解析値は、評価値に対し小さく、それ以外は、評価値より大きい傾向を示し、その違いは、25%以内であった。

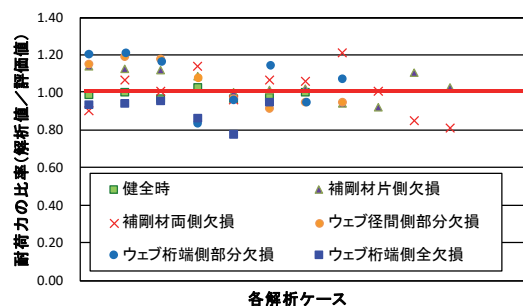


図-5.4.10 解析値と評価値の比較

## 5.5 簡易評価方法

### 5.5.1 簡易耐荷力評価式の使い分け（案）

本章では、実務での適用を考慮して3つの簡易の耐荷力評価を提案した。評価法1：許容応力度に基づく手法，評価法2：終局耐力低下の分布図の下限值に基づく評価式，評価法3：崩壊モード毎の評価手法である。

評価法1は、緊急時に道路橋示方書を用いて最も簡易的に評価することが望まれる場合を想定している。ただし、許容応力度の規格値を使用しているため、その精度は高いとはいえない。

評価法2は、これまで蓄積された研究成果の終局耐力の下限值であり、終局耐力を算出する場合には、現段階で実用性が最も高いと考えられる。他に、許容応力度を超えた恒久補修対象橋梁の優先順位付けにも使用可能と考えられる。

評価法3は、終局耐力だけでなく、桁端部周辺部材の局部座屈の発生の有無など損傷形態や弱部を考慮した対策工法の検討に利用できると考えられる。崩壊プロセスを踏まえて崩壊モードを形成していることを考えると、危険な部位部材が発見しやすいと考える。なお、この評価法3の精度が向上することで、個別の主桁の評価が可能になると考える。

### 5.5.2 簡易評価法（応急補修）

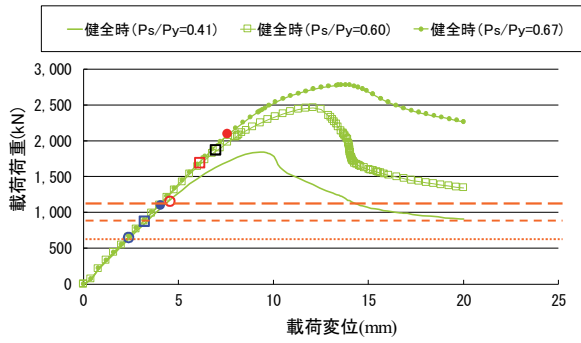
応急補修時の評価などに用いられることを踏まえて、腐食損傷した桁端部の耐力余裕と座屈発生による荷重低下のリスクを踏まえた評価手法を提案する。

#### (1) 使用限界状態と終局状態の比較

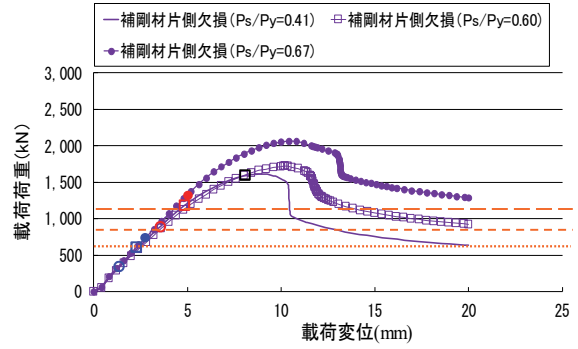
使用限界状態と終局状態の比較を行う。道路橋示方書で示す許容軸圧縮応力（支点上補剛材の材料に有効断面積を掛け合わせた値） $P_e$ とウェブ（ $24t_w$ の範囲）と補剛材の残存面積に対して別々の降伏点をそれぞれ乗じて足し合わせた累加強度の設計降伏耐力（使用限界状態の耐力） $P_y$ と解析で得られた耐荷力の関係を健全時および欠損ケース毎に図-5.5.1に示す。なお、ウェブ桁端側全欠損ケースの設計降伏耐力は、橋軸方向への偏心および支点上補剛材と径間側ウェブの3辺支持の影響より、スカーラップの範囲の軸圧縮応力が小さくなり、スカーラップの範囲の面積を控除している。各ケースの設計降伏耐力 $P_y$ における軸圧縮応力の範囲について、支点上補剛材は全幅とし、ウェブは有効幅（ $24t_w$ ）としている。

図-5.5.1の結果、これらの設計降伏耐力 $P_y$ は、いずれのケースも局部座屈発生点よりも低い位置にあった。これは、ウェブの軸圧縮応力の幅が有効幅以上に拡大した段階で局部座屈が発生することを意味しているものと考えられる。

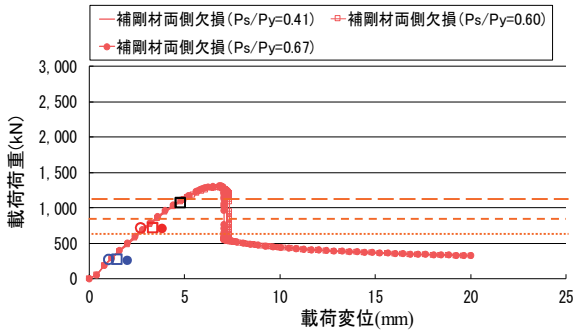
欠損ケース毎の設計耐力に対する終局耐力（解析値）を図-5.5.2に示す。ウェブ桁端側全欠損ケースは $P_y/P_u=0.8\sim 0.9$ 程度であり、支点部において補剛材の割合が増大した場合は $P_y/P_u=0.8$ 程度であり、減少した場合は $P_y/P_u=0.9$ 程度であった。その他の欠損ケースは $P_y/P_u=0.5\sim 0.7$ 程度であった。



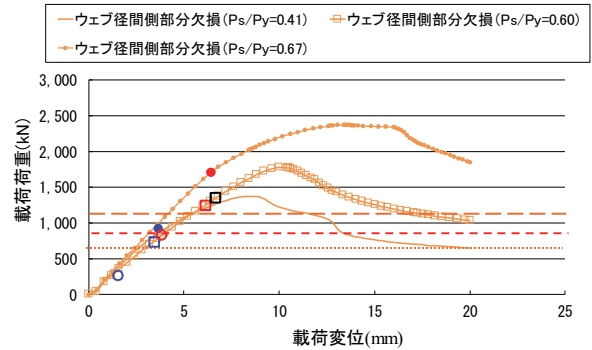
(a)健全なケース



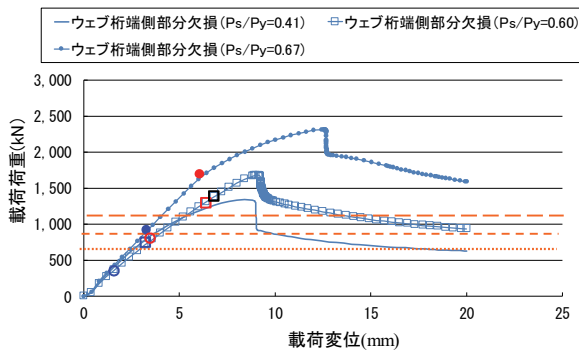
(b) 補剛材片側欠損ケース



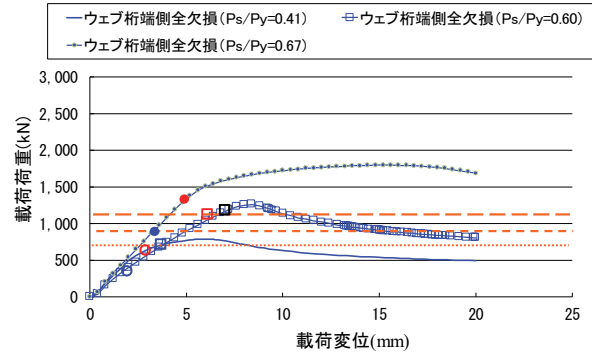
(c) 補剛材両側欠損ケース



(d) ウェブ径間側部分欠損ケース



(e) ウェブ桁端側部分欠損ケース



(f) ウェブ桁端側全欠損ケース

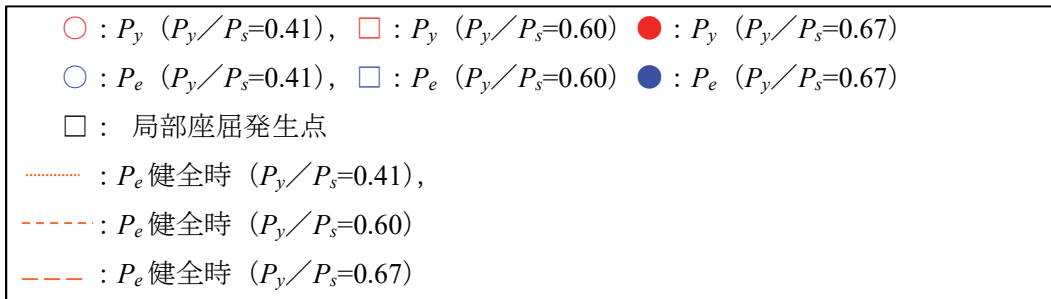


図-5.5.1 荷重-変位曲線 許容軸圧縮応力と設計降伏耐力と終局耐力の関係

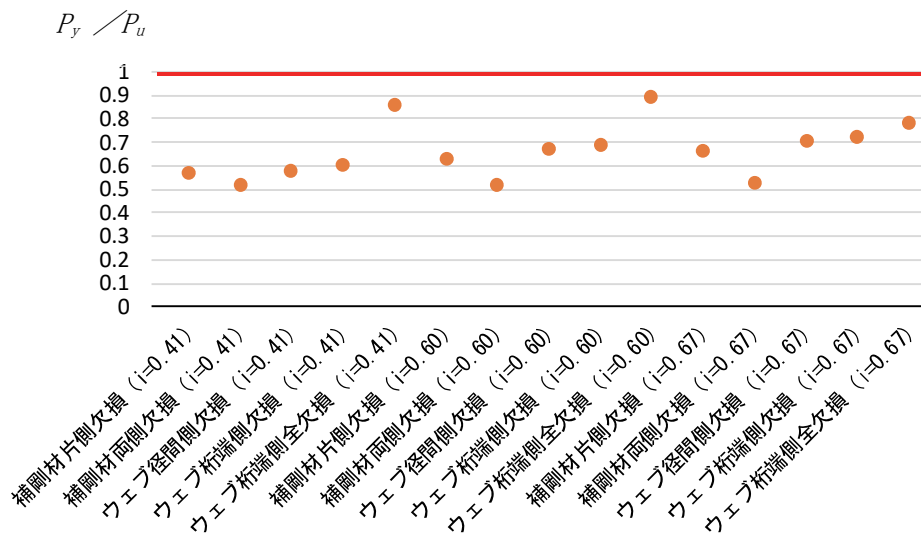


図-5.5.2 設計降伏耐力と終局耐力（解析値）の関係

## (2) 終局状態後の荷重低下の整理

第3章では、最大荷重後に急激に荷重低下したタイプ、ほとんど荷重低下を示さないタイプと緩やかに荷重低下したタイプの3つに分類できたことを示した。分類した結果は以下の通りである。座屈が発生することで、急激に荷重低下のリスクがあるタイプとそうでないタイプがある。

- ・急激に荷重低下を示したタイプ

- ：「ウェブ桁端側部分損ケース」，「補剛材片側欠損ケース」，「補剛材両側欠損ケース」

- ・ほとんど荷重低下を示さないタイプ、穏やかに荷重低下を示したタイプ

- ：「ウェブ桁端側全欠損ケース」，「ウェブ径間側部分損ケース」

## (3) 応急補修時の評価方針

(1) および(2)の結果を踏まえて、腐食損傷した桁端部の耐力余裕と座屈発生による耐荷力低下のリスクを踏まえた評価手法を提案する。

手順1：腐食損傷した桁端部の耐力余裕：局部座屈が発生しない損傷時の設計降伏耐力を基準の耐力とし、これらの損傷時の設計降伏耐力  $P_y$  に対して、桁反力（不明であれば、道路橋示方書で示す許容軸圧縮応力の上限値）  $P_e$  を照査してその割合を示す。この照査した結果、桁反力に満たない場合は「耐力余裕（少）」とし、桁反力を満足する場合は、「耐力余裕（多）」とする

手順2：座屈発生による荷重低下のリスク：表-5.5.2に示す通り、急激に荷重低下を示したタイプを座屈発生時の荷重低下のリスク（大）とし、その他のタイプを座屈発生時の荷重低下のリスク（小）とする。

「腐食損傷した桁端部の耐力余裕」，「座屈発生による荷重低下のリスク」の2つの指標をもとに、最終的に4つのカテゴリーに分類する。

- ・耐力余裕（多），座屈発生時の荷重低下のリスク（大）
- ・耐力余裕（多），座屈発生時の荷重低下のリスク（小）
- ・耐力余裕（小），座屈発生時の荷重低下のリスク（大）
- ・耐力余裕（小），座屈発生時の荷重低下のリスク（小）

これらの割合と座屈発生による急激な荷重低下の有無によるカテゴリー分けをもとに 5.4.4 に整理した解析結果をプロットした図を図-5.5.3 に示す。

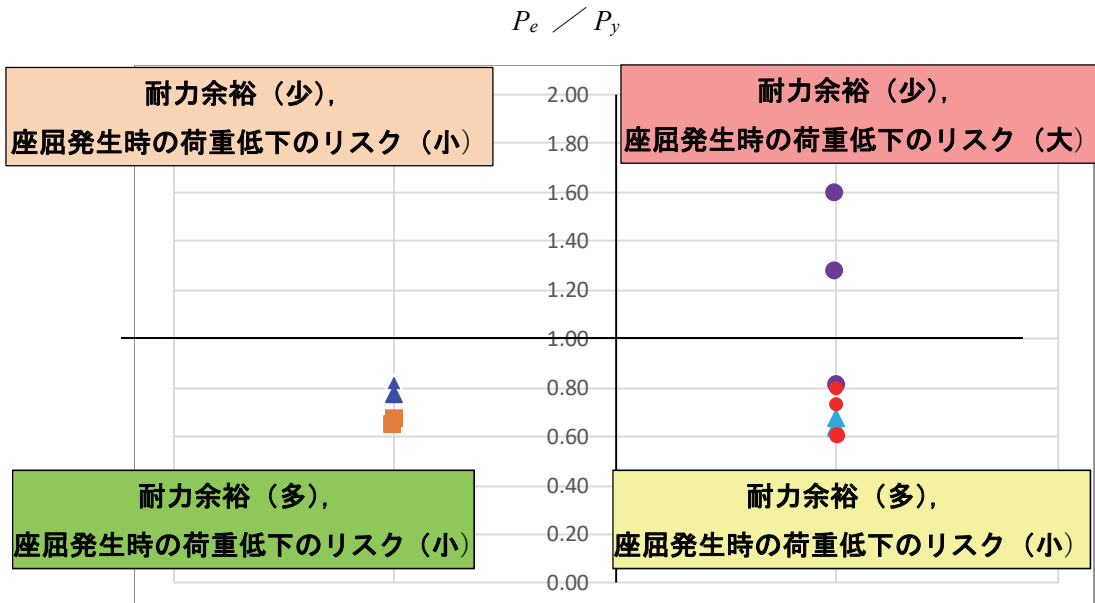


図-5.5.3 応急補修時の簡易評価法（カテゴリー分け）

検討した結果を以下に整理する。

- ・耐力余裕（多），座屈発生時の耐力余裕のリスク（大）⇒なし
  - ・耐力余裕（多），座屈発生時の耐力余裕のリスク（小）⇒補剛材片側欠損ケース●  
ウェブ桁端側部分欠損ケース▲
  - ・耐力余裕（少），座屈発生時の耐力余裕のリスク（大）⇒補剛材両側欠損ケース●
  - ・耐力余裕（少），座屈発生時の耐力余裕のリスク（小）⇒ウェブ桁端側全欠損ケース▲※  
⇒ウェブ径間側部分欠損ケース■
- ※ただし，終局耐力に対する余裕はない。

これらのカテゴリーに分けて簡易評価することで，補修の緊急度に着目した維持管理区分を判断する材料になると考えられる。

### 5.5.3 簡易評価法（恒久補修）

#### (1) 非線形開始点の荷重と最大荷重と設計耐力の比較

まず，恒久補修時の評価で使用されることを踏まえて，第3章で得られた解析結果による非線形開始点の荷重と最大荷重と実際の設計耐力の比較を行う。

実務において、恒久補修は、終局耐力よりも許容軸方向圧縮応力度を用いて照査している。また、異種材質で構成される支点部の場合、低材質である支点上補剛材の許容軸圧縮応力度の上限値を許容値として照査を行っていることが多い。このことから、本評価でも、支点上補剛材の許容軸圧縮応力度の上限値を許容値として評価を行う。

なお、ここでは、支点上補剛材の許容軸圧縮応力度の上限値を「健全時の設計耐力」とし、式(5.5.1)で示すウェブと支点上補剛材の許容応力度の累加強度の上限値を「健全時の設計耐力（累加強度）」とする。これらの欠損分の面積を控除した応力度をそれぞれ、「欠損時の設計耐力」、「欠損時の設計耐力（累加強度）」とする。

ここで、健全時の設計耐力に対し、健全時の設計耐力（累加強度）、第3章の解析で得られた非線形開始点の荷重および最大荷重、さらには欠損時の設計耐力、欠損時の設計耐力（累加強度）との関係を図5-5-4に示す。

$$P_d = A_{es} \times \sigma_{cals} + A_{ew} \times \sigma_{caow} \quad (5.5.1)$$

$A_{ew}$  : 支点上補剛材の有効断面積

$A_{es}$  : ウェブの有効断面積 ( $24 t_w \times t_w$ )

$\sigma_{cals}$  : 補剛材の局部座屈に対する許容応力度の上限値  
(SS400:140N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{caow}$  : ウェブの局部座屈を考慮しない許容軸圧縮応力度の上限値  
(SM490Y:210N/mm<sup>2</sup>)

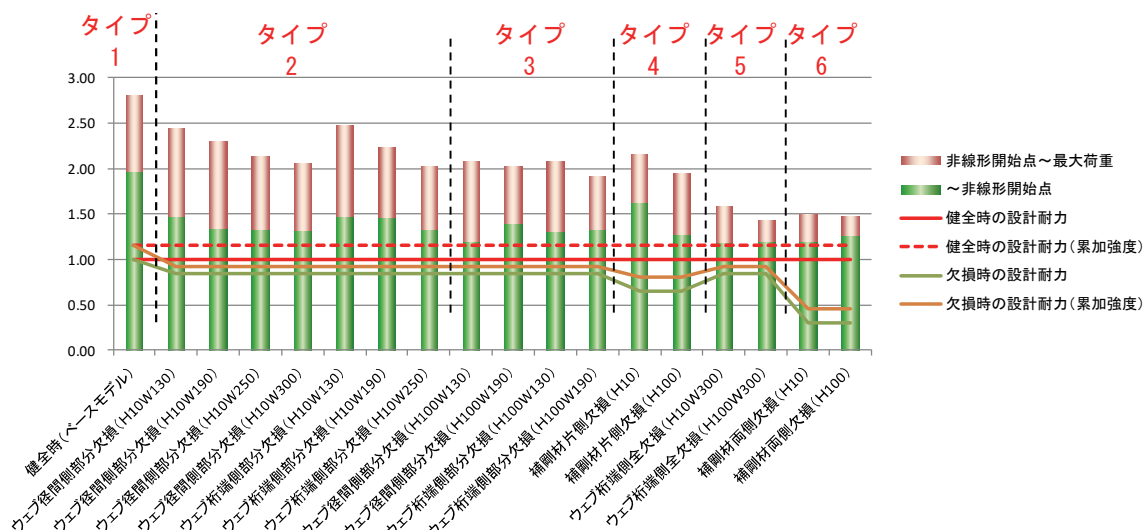


図5-5-4 非線形開始点の荷重，最大荷重と実際の設計耐力の関係

図5-5-4より読み取れた結果を利用し、非線形開始点の荷重と健全時の設計耐力の比較を行った。その結果、すべてのケースで健全時の設計耐力が非線形開始点の荷重よりも下回った。これにより、健全時の設計耐力の段階では、弾性状態であることが示された。さらには、非線形開始点の荷重と健全時の設計耐力（累加強度）で比較を行ったが、これも全てのケースにおいて、健



全時の設計耐力（累加強度）が非線形開始点の荷重よりも下回っており、健全時の設計耐力（累加強度）の段階でも弾性状態であることが示された。

次に、健全時・欠損時の設計耐力と非線形開始点の荷重を比較した。欠損時の設計耐力は、実際に設計で用いる欠損した際の耐力低下の状態を想定している。

タイプ2～3では、健全時と欠損時の設計耐力の関係は一定ある。今回対象とした欠損量は、すべてウェブの有効幅を超えているために、ウェブ欠損量の増加およびウェブ欠損高の増加に伴い、健全時の設計耐力に対する非線形開始点の荷重の割合は減少していた。タイプ4は、タイプ2やタイプ3と比べて、健全時の設計耐力に対する欠損時の設計耐力が低かった。これは、支点上補剛材が有効断面積に占める割合が大きいことによる。タイプ5は、タイプ2やタイプ3と同様に、健全時の設計耐力と欠損時の設計耐力の関係は一定あるが、非線形開始点の荷重は健全時の設計耐力および欠損時の設計耐力と近い関係にあった。タイプ6では、タイプ5と同様に非線形開始点の荷重と健全時の設計耐力では近い関係にあるものの、健全時の設計耐力に対する欠損時の設計耐力は低かった。

## (2) 恒久補修時の評価方針

恒久補修の評価では、(1)の結果を利用し、解析結果から得られた欠損ケースが有する崩壊の特性（荷重余裕）と点検者や診断者が従来の道路橋示方書で判定している結果による安全性の度合い（設計耐力の判定結果の危険性）で評価することにした。

欠損ケースが有する崩壊の特性とは、許容応力度の上限値（必要耐力）が、局部座屈が発生する挙動である非線形開始点の荷重に対する荷重余裕の程度と非線形開始点から最大荷重に至るまでの耐力余裕の程度を示したものである。一方、判定している結果の安全性の度合いとは、非線形開始点に対して判定に用いる欠損時（有効断面積）の荷重を厳しく判定しているかの有無である。

崩壊の特性として、2つの点に着目した。一つ目は、健全時の設計耐力に対して非線形開始点（荷重により変形する点）の荷重余裕の程度であり、二つ目は、その非線形開始点に対して最大荷重までの余裕の程度である。

表5.5.1に示すように、これらをそれぞれ、「多」、「中」、「少」で分類した。評価区分の境界の値について、以下の考えで設定した。

非線形開始点までの荷重余裕については、補剛材欠損（欠損高100mm）が「少」となること、および補剛材片側欠損（H10）やベースモデルが非線形開始点の荷重が大きいたことから「多」とし、それらが境界となるように定性的に設定した。また、最大荷重までの耐力余裕は、ウェブ桁端側全欠損が「少」となること、ウェブの欠損範囲が大きい場合を「多」とし、それらが境界となるように定性的に設定した。

表-5.5.1 恒久補修における評価区分

	【非線形開始点までの荷重余裕】 非線形開始点の荷重 ／健全時の設計耐力	【最大荷重までの耐力余裕】 (最大荷重-非線形開始点の荷重) ／健全時の設計耐力
余裕が多い(多)	1.5以上	0.7以上
余裕がある(中)	1.3～1.5	0.5～0.7
余裕が少ない(少)	1.3未満	0.5以下

その上で、非線形開始点の荷重と欠損時の設計耐力を比較し、設計耐力が実際の変形が大きく生じると推定される荷重との差をもって、設計耐力の判定結果の危険性を評価する。表 5.5.2 に示すように、これらをそれぞれ、「多」、「少」で分類した。評価区分の境界である 1.5 の値は、ソールプレートを超えてウェブ欠損したケースが、柱として有効断面積から大きく超えた状態の境界値を参考にして定性的に設定した。

これらを踏まえて、腐食損傷した桁端部の設計耐力の荷重余裕と設計耐力の判定結果の危険性を指標とした評価の考え方一覧を表 5.5.3 に示す。

表-5.5.2 判定結果の危険性における評価区分

	【判定結果の危険性】 非線形開始点の荷重／欠損時の設計耐力
(多)	1.5 以上
(少)	1.5 未満

表-5.5.3 評価の考え方

崩壊の特性		判定結果 の危険性		判定	
非線形開始点 までの荷重余裕	最大荷重 までの耐力余裕				
多	多	少	⇒	危険性（低）適正評価	$\eta$
中	多	少	⇒	危険性（有）適正評価	$\eta$
少	多	少	⇒	危険性（高）適正評価	$\beta$
多	中	少	⇒	危険性（低）適正評価	$\eta$
中	中	少	⇒	危険性（有）適正評価	$\eta$
少	中	少	⇒	危険性（有）適正評価	$\eta$
多	少	少	⇒	危険性（有）適正評価	$\eta$
中	少	少	⇒	危険性（高）適正評価	$\beta$
少	少	少	⇒	危険性（高）適正評価	$\beta$
多	多	多	⇒	危険性（低）過小評価	$\gamma$
中	多	多	⇒	危険性（有）過小評価	$\gamma$
少	多	多	⇒	危険性（高）過小評価	$\alpha$
多	中	多	⇒	危険性（低）過小評価	$\gamma$
中	中	多	⇒	危険性（有）過小評価	$\gamma$
少	中	多	⇒	危険性（有）過小評価	$\gamma$
多	少	多	⇒	危険性（有）過小評価	$\gamma$
中	少	多	⇒	危険性（高）過小評価	$\alpha$
少	少	少	⇒	危険性（高）過小評価	$\alpha$

凡 例

$\alpha$	欠損に伴う危険性が高いが、その危険性の評価が低い場合
$\beta$	欠損に伴う危険性が高いものの、その危険性の評価が適正の場合
$\gamma$	欠損に伴う危険性があるものの、その危険性の評価が低い場合
$\eta$	欠損に伴う危険性があるものの、もしくはなくその危険性の評価が適正の場合

これらを踏まえて検討した結果を以下に表-5.5.4に整理する.

表-5.5.4 検討ケースにおける崩壊特性と判定結果の危険性

検討 ケース	崩壊の特性		判定結果 の危険性		評価
	非線形開始点 までの荷重余裕	最大荷重 までの耐力余裕			
健全時 (ベースモデル)	多 (1.97)	多 (0.83)	少 (1.70)	⇒	危険性 (なし) 適正評価
ウェブ径間側部分欠損ケース (H10W130)	中 (1.47)	多 (0.98)	少 (1.59)	⇒	危険性 (低) 適正評価
ウェブ径間側部分欠損ケース (H10W190)	中 (1.34)	多 (0.95)	有 (1.45)	⇒	危険性 (低) <b>過小評価</b>
ウェブ径間側部分欠損ケース (H10W250)	中 (1.33)	多 (0.81)	有 (1.44)	⇒	危険性 (低) <b>過小評価</b>
ウェブ径間側部分欠損ケース (H10W300)	中 (1.32)	多 (0.74)	有 (1.43)	⇒	危険性 (低) <b>過小評価</b>
ウェブ桁端側部分欠損ケース (H10W130)	中 (1.47)	多 (1.01)	少 (1.59)	⇒	危険性 (低) 適正評価
ウェブ桁端側部分欠損ケース (H10W190)	中 (1.45)	多 (0.78)	少 (1.58)	⇒	危険性 (低) 適正評価
ウェブ桁端側部分欠損ケース (H10W250)	中 (1.33)	中 (0.69)	有 (1.44)	⇒	危険性 (低) <b>過小評価</b>
ウェブ径間側部分欠損ケース (H100W130)	少 (1.20)	多 (0.88)	有 (1.31)	⇒	危険性 (有) <b>過小評価</b>
ウェブ径間側部分欠損ケース (H100W190)	中 (1.40)	中 (0.63)	少 (1.52)	⇒	危険性 (低) 適正評価
ウェブ桁端側部分欠損ケース (H100W130)	中 (1.31)	多 (0.77)	有 (1.42)	⇒	危険性 (低) <b>過小評価</b>
ウェブ桁端側部分欠損ケース (H100W190)	中 (1.33)	中 (0.58)	有 (1.44)	⇒	危険性 (低) <b>過小評価</b>
補剛材片側欠損ケース (H10)	多 (1.63)	中 (0.53)	少 (2.01)	⇒	危険性 (低) 適正評価
補剛材片側欠損ケース (H100)	少 (1.27)	中 (0.68)	少 (1.57)	⇒	危険性 (有) 適正評価
ウェブ桁端側全欠損ケース (H10W300)	少 (1.19)	少 (0.40)	有 (1.29)	⇒	危険性 (高) <b>過小評価</b>
ウェブ桁端側全欠損ケース (H100W300)	少 (1.20)	少 (0.23)	有 (1.31)	⇒	危険性 (高) <b>過小評価</b>
補剛材両側欠損ケース (H10)	少 (1.20)	少 (0.30)	少 (2.60)	⇒	危険性 (高) 適正評価
補剛材両側欠損ケース (H100)	少 (1.26)	少 (0.20)	少 (2.72)	⇒	危険性 (高) 適正評価

恒久補修時については、表-5.5.5に示すように評価結果に分類された。

表-5.5.5 恒久補修における評価結果

分類結果		該当するケース
$\alpha$	欠損に伴う危険性が高いが、その危険性の評価が低い場合	ウェブ桁端側全欠損ケース (H10W300) ウェブ桁端側全欠損ケース (H100W300)
$\beta$	欠損に伴う危険性が高いものの、その危険性の評価が適正の場合	補剛材片側欠損ケース (H100) 補剛材両側欠損ケース (H10) 補剛材両側欠損ケース (H100) ウェブ径間側部分欠損ケース (H100W130)
$\gamma$	欠損に伴う危険性が低いものの、その危険性の評価が低い場合	ウェブ径間側部分欠損ケース (H10W190) ウェブ径間側部分欠損ケース (H10W250) ウェブ径間側部分欠損ケース (H10W300) ウェブ桁端側部分欠損ケース (H10W250) ウェブ径間側部分欠損ケース (H100W190) ウェブ桁端側部分欠損ケース (H100W130) ウェブ桁端側部分欠損ケース (H100W250)
$\eta$	欠損に伴う危険性が低い、もしくはなくその危険性の評価が適正の場合	健全時 (ベースモデル) ウェブ径間側部分欠損ケース (H10W130) ウェブ桁端側部分欠損ケース (H10W130) ウェブ桁端側部分欠損ケース (H10W190) ウェブ桁端側部分欠損ケース (H10W190) 補剛材片側欠損ケース (H10)

## 5.6 まとめ

本章では、実務での適用を考慮して3つの簡易の耐荷力評価を提案した。一つ目は、道路橋示方書で規定される全体座屈、局部座屈、支圧状態の許容応力度に基づく手法である。二つ目は、既往の研究結果をもとに腐食損傷による終局耐力の低下率を一元化した分布図を作成し、その分布図から算出される耐力低下の下限値をもとに耐荷力推定式を提案した。三つ目は、欠損位置によって、おおよその崩壊モードが決定される特性を活用し、崩壊モード毎に既往の耐荷力評価式を利用して評価できる簡易評価式を提案した。さらに、終局耐力と使用限界強度の関係を示し、「腐食損傷した桁端部の耐力余裕と座屈発生による荷重低下のリスク」に着目した簡易評価法を提案した。また、恒久補修時に利用されることを想定し、非線形開始点の荷重と設計耐力との関係を示した上で、「腐食損傷した桁端部の荷重余裕と設計耐力の適正評価」に着目した簡易評価法を提案した。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 道路橋示方書の許容応力度を利用して算出した4つの設計耐力のうち、局部座屈を考慮した評価で、ウェブの有効幅を固定側ソールプレート幅まで適用した設計耐力が、欠損した場合の終局耐力と近くなった。
- 2) 第2章で検討した解析結果および既往の研究成果を用いて、終局耐力の低下率、構造諸元から設定できる設計降伏耐力の低下率、残存板厚率、欠損高さ率、欠損幅率、および腐食形態によるパラメータを抽出し、載荷条件別に腐食損傷による桁端部の耐荷力の低下率をプロットした分布図を作成し、腐食損傷した終局耐力の低下率を一元化した。その分布図をもとに、腐食形態別に設定した終局耐力の下限値(直線)を利用し、載荷条件(支間中央載荷、支点直上載荷)、腐食形態のパラメータ(構造諸元から算出できる設計降伏耐力の低下率や残存板厚率)に応じ

て使い分けることが可能な4つの条件毎の簡易的な耐荷力推定式を提案した。

- 3) 「桁端側ウェブの張出し長さ」, 「径間側ウェブのアスペクト比」, 「支点上補剛材の設計降伏耐力の割合」の上下限值を変更して解析した結果, 支点上補剛材の断面構成の影響が最も耐荷力に影響を与えていることを示した。さらに, 欠損したケースにおいて, 構造パラメータを変更しても, 第3章で分類した崩壊モードはほとんど変わらなかった。その上で, 欠損位置によって, おおよそその崩壊モードが決定される特性を活用し, 崩壊モード毎に既往の耐荷力評価式を利用して評価できる簡易評価式を提案した。その結果, 解析結果の最大荷重に対して, 耐荷力は25%以内で評価できた。
- 4) 上記の提案した3つの簡易の耐荷力評価法の精度を示し, それぞれの用途を示した。
- 5) 終局耐力と使用限界強度の関係を示し, 「腐食損傷した桁端部の耐力余裕と座屈発生による荷重低下のリスク」に着目し, 使用限界状態で求められる設計耐力に対する健全時の設計降伏耐力との割合で「腐食損傷した桁端部の耐力余裕」を示し, さらに, 座屈発生による急激な荷重低下の有無により「座屈発生による荷重低下のリスク」を示し, この2つの指標をもとに, 最終的に4つのカテゴリーにおける応急補修時の簡易評価法を提案した。
- 6) 非線形開始点の荷重と最大荷重と設計耐力の比較を示し, 「腐食損傷した桁端部の設計耐力の荷重余裕と設計耐力の判定結果の危険性」に着目し, 健全時の設計耐力に対して非線形開始点(荷重により変形する点)の荷重余裕の程度とその非線形開始点に対して最大荷重までの余裕の程度により, 「腐食損傷した桁端部の設計耐力の荷重余裕」を示し, さらに, 解析で得られた非線形開始点の荷重と欠損時の設計耐力の差により「設計耐力の判定結果の危険性」を示し, この2つの指標をもとに, 最終的に4つのカテゴリーにおける恒久補修時の簡易評価法を提案した。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，2012.3.
- 2) 全日本建設技術協会：建設省制定 土木構造物標準設計第23巻，1994.
- 3) 全日本建設技術協会：建設省制定 土木構造物標準設計第23巻，1979.
- 4) 金裕哲他3名：異種鋼材十字接合柱自由突出板の終局強度，鋼構造論文集，第8巻，30号，pp.15-2，2001.
- 5) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Kihira, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada : Analytical demonstrations to assess residual bearing capacities of steel plate girder ends with stiffeners damaged by corrosion, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.10, No.1, pp.69-79, 2012.
- 6) Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada, : Experimental and Numerical Evaluation of Bearing Capacity of Steel Plate Girder Affected by End Panel Corrosion, *International Journal of Steel Structures*, Vol.14, No.3, pp.659-676, 2014, ERRATUM Vol. 15, No.1, pp.245, 2015.
- 7) 山口栄輝, 赤木利彰：腐食した鋼I桁の支点部耐力に関する考察，構造工学論文集 A, Vol.59A, pp.80-90, 2013.
- 8) 東海構造研究グループ：平成24年度活動報告集 第6回定期研究会 WG成果報告，2012.
- 9) Jin-Hee Ahn, In-Tae Kim, Shigenobu Kainuma, Myoung-Jin Lee : Residual shear strength of steel

- plate girder due to web local corrosion , *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.83, pp.198-212, 2013.
- 10)劉翠平, 宮下剛, 長井正嗣 : 端部パネルの局部腐食をもつ I 形断面桁のせん断耐力に関する考察, 構造工学論文集 A, Vol.57A, pp.715-723, 2011.
  - 11)Nauman Khurram, Eiichi Sasaki, Hiroshi Katsuchi and Hitoshi Yamada : Finite Element Investigation of Shear Capacity of LocallyCorroded End Panel of Steel Plate Girder,*International Journal of Steel Structures*, Vol.13, No.4, pp.623-633, 2013.
  - 12)濱田哲, 佐々木栄一, 粕裕幸, 町田恵津子, 紀平寛 : 局部的腐食を模擬した鋼桁端部の圧縮強度に関する実験, 日本鋼構造協会 鋼構造年次論文報告集 第 17 卷 pp.731-738, 2009.11
  - 13)丹波寛夫, 橋本国太郎, 田中大介, 杉浦邦征 : 腐食した鋼桁端部の当て板補修に関する実験的検討, 構造工学論文集 A, Vol.60A, pp.99-104, 2014.
  - 14)In-Tae Kim, Myoung-Jin Lee, Jin-Hee Ahn, Shigenobu Kainuma : Experimental evaluation of shear buckling behaviors and strength of locally corroded web, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.83, pp.75-89, 2013.
  - 15)Jin-Hee Ahn, Shigenobu Kainuma , In-Tae Kim : Shear failure behaviors of a web panel with local corrosion depending on web boundary conditions, *Thin-Walled Structures*, Vol.73, pp.302-317, 2013.
  - 16)奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 小出宣夫, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣 : 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察, 構造工学論文集 A, Vol.60A, pp.541-553, 2014.
  - 17)中山太士, 木村元哉, 石川敏之, 松井繁之 : ウェブ孔食をもつ鋼桁のせん断耐荷力 : ウェブ孔食をもつ鋼桁のせん断耐荷力, 構造工学論文集 Vol.52A. pp.49-56, 2006.3
  - 18)鋼構造委員会 : 座屈設計ガイドライン 改訂第2版, 鋼構造シリーズ12, 土木学会, 2005
  - 19)中部地方整備局 : 道路設計要領 (設計編) , 2015.3
  - 20)Dassault Systems : Abaqus Online Documentation,2013

## 第6章 結論

### 6.1 本研究の成果

本研究では、鋼道路橋の桁端部の下端部が腐食した鋼 I 桁橋を対象とし、桁端部の様々な腐食損傷に対する残存耐荷力を把握し、その崩壊に至るまでの過程を把握する崩壊メカニズムを解明した。また、腐食した桁端部の支点部が偏心した場合の耐力低下するリスクやその崩壊メカニズムを示した。さらに、様々な構造諸元や欠損状態を踏まえた簡易耐荷力評価式を提案し、恒久補修時と応急補修時の評価方法を提案した。各章で得られた結論を以下にまとめる。

第1章では、本研究の背景として、まず、鋼橋 I 桁橋桁端部の腐食損傷の現状とそれに対する点検または設計をしている実務者の実態と腐食損傷している桁端部を評価に用いる規定について述べた。さらに、本研究に関連する既往の研究について述べ、本研究の目的を明確にした。

第2章では、標準設計の設計諸元をもとに、桁端のウェブと支点上補剛材の下端の腐食による本章では、桁端部をモデル化したFEM解析を実施した。载荷条件、初期たわみ、スカーラップ、支点部拘束をパラメータにしてモデルの特性を把握し、既往研究の実験や解析結果を比較することで本解析モデルの有効性を示した。また、健全時モデルを用いて異種材質の影響を確認する。これらの検討を踏まえて、桁端下端部について、統計的に多いタイプの腐食損傷に着目し、それを反映させたパラメトリック解析を実施した。

- 1) 健全モデルにおいて、载荷条件の違いでは、支点直上载荷よりも支間中央载荷の方が約1.3倍程度、耐荷力増加することを示し、また、支間中央载荷の条件では初期たわみの影響および回転拘束による耐荷力に与える影響は小さいこと、さらに、スカーラップがない場合には、最大8%程度、耐荷力が増加することを示すことで健全時モデルの特性を把握した。また、本解析モデルと既往の実験結果の変形モードがおよび既往の解析結果の最大荷重を比較し、ともに本解析モデルが有効であると結論づけた。
- 2) 異種材質の影響を検討するために、ウェブSM490Y 補剛材SS400、全て補剛材SS400、全てSM490Yの解析を行い、各材質のケースによる最大荷重の差の関係と各材質の降伏点の差と有効断面積を掛け合わせた荷重の差の関係が近いことを示すことで、材質の強度が耐荷力へ影響を及ぼしていることを示した。
- 3) 腐食による欠損位置では、ウェブ径間側部分欠損、補剛材片側欠損、ウェブ桁端側部分欠損、ウェブ桁端側全欠損、補剛材両側欠損の順に最大荷重が低下していた。ウェブ桁端側全欠損ケースを除いて、欠損断面積の減少率に対して耐荷力の低下率はほぼ比例関係にあることを示した。また、ウェブ欠損幅の増大に伴い、最大荷重が低下していた。補剛材が両側欠損したケースや桁端側ウェブが全欠損したケースでは、欠損高に関わらず健全なモデルに対して最大荷重が約5割～6割に低下する。ウェブが部分欠損したケースや補剛材片側欠損したケースでは、欠損高10mm、30mmと100mmで崩壊モードおよび耐荷力に違いがあることを示した。
- 4) ソールプレートの形状の違いについて、最大荷重の差は大きい場合でも5%程度にとどまった。

また、ソールプレートの板厚を厚くおよび長くすることにより、下フランジの拘束効果を上げて解析した結果、いずれのケースでも最大荷重が増加した。特に支点上補剛材が欠損した時による影響が大きく、両側欠損したケースでは、最大荷重が20%程度増加した。

第3章では、第2章で実施した解析結果を利用して、桁端下端部が腐食した場合のパラメトリック解析から得られた結果を分析し、腐食した桁端部の耐力特性を踏まえて崩壊タイプを分類した。分類したタイプを非線形開始点、最大荷重時、最大荷重後に着目し、さらに、損傷状態の違いが崩壊タイプに与える影響を分析することで、桁端部の損傷時の崩壊メカニズムを検討した。

- 1) 崩壊プロセスや崩壊モードに着目し、解析ケースを6つの崩壊タイプに分類した。崩壊タイプは欠損位置に依存し、さらに、ウェブが部分的に欠損している場合では欠損高にも依存していた。
- 2) タイプ毎の崩壊モードの支配要因は、柱の全体座屈と局部座屈に分類された。柱の全体座屈が崩壊モードの支配要因の場合は、「健全なケース」では一端固定-他端回転バネ支持、「ウェブ部分欠損ケース（欠損高：100mm）」では両端固定支持、「補剛材片側欠損ケース」では両端ピン支持、「補剛材両側欠損ケース」では一端固定-他端ピン支持の4つの支持条件に分けられた。一方、局部座屈が崩壊モードの支配要因の場合は、桁端側ウェブ下端部に局部座屈が連続化した「ウェブ部分欠損ケース（欠損高：30mm以下）」および支点上補剛材の下端部が局部座屈した「ウェブ桁端側全欠損ケース」に分けられた。
- 3) 損傷時において、道路橋示方書の規定で示される有効断面積と弾性限界点における軸圧縮応力の関係を示すために、非線形開始点を設けた。この非線形開始点において、いずれのケースも支点上補剛材がほぼ全幅で塑性化していた。一方、ウェブの塑性化進展領域が異なり、ウェブが欠損しているケースや支点上補剛材が片側欠損しているケースでは、塑性化領域は道路橋示方書で規定される有効幅より狭く、支点上補剛材が両側欠損しているケースでは有効幅より広がっていた。
- 4) 損傷時の最大荷重について、「ウェブ部分欠損ケース（欠損高30mm以下）」および「補剛材両側欠損ケース」は、主に断面欠損による影響を受けるタイプ、「ウェブ部分欠損ケース（欠損高100mm）」は、断面欠損による影響および支点部の拘束状態の低下の影響を受けるタイプ、「補剛材片側欠損ケース」は、断面欠損による影響およびウェブ面外の付加曲げの影響を受けるタイプ、「ウェブ桁端側全欠損ケース」は、断面欠損による影響およびウェブ面内の付加曲げの影響を受けるタイプの4つに分類された。「健全時（ベースモデル）」に対する最大荷重の低下の程度は、タイプ毎で異なり、基本は断面減少による影響が大きいが、拘束状態の低下がみられた場合には、断面減少の影響にさらに10%程度耐力低下し、ウェブ面内の付加曲げの影響を大きく受ける場合には、断面減少の影響にさらに20%程度耐力低下することを示した。
- 5) 最大荷重後の挙動は、支点部における柱の全体座屈の発生の有無および支点部の拘束条件の違いにより、ケース毎に違いが現れた。「ウェブ桁端側全欠損ケース」は、健全時のモデルの半分程度の耐荷力であり、最大荷重到達後はほとんど荷重低下しなかった。「ウェブ桁端側部分欠損ケース」や「補剛材両側欠損ケース」は、急激な荷重低下がみられ、「ウェブ径間側部分欠損ケース」は、緩やかな荷重低下が見られた。



- 6) 「ウェブ桁端側全欠損ケース」および「補剛材片側欠損ケース」は、付加曲げによる影響が現れた。また、ウェブ部分欠損しているケースは、支点部の拘束状態の強さの違いにより、欠損高30mm以下と欠損高100mmで崩壊プロセスおよび崩壊モードに違いが見られた。

第4章では、支点位置が偏心することを考慮し、腐食により断面欠損が生じた桁端部の支点偏心に伴う耐荷力低下と崩壊メカニズムを詳細に分析、分類して整理した。

- 1) 欠損範囲が同一のケースで、支点が偏心する場合には、支点偏心していないケースと比較して、ウェブ径間側部分欠損では最大12%程度、ウェブ桁端側部分欠損では最大15%程度の耐力低下が見られた。なお、ウェブ桁端側全欠損で桁端側に支点位置が偏心した場合には、健全時に比べて50%以下の耐力低下がみられた。また、支点偏心したケースにおいて欠損幅がソールプレートよりも内側であれば設計降伏耐力を確保できることを示した。
- 2) 第3章で設定した崩壊タイプの分類をもとに偏心した解析ケースを分類した。「健全なケース」では、一端固定-他端回転バネ支持、局部座屈が崩壊モードの支配要因の場合は、桁端側ウェブ下端部に局部座屈が連続化した「ウェブ部分欠損ケース」および支点上補剛材の下端部が局部座屈した「ウェブ桁端側全欠損ケース」に分けられた。ウェブ桁端側欠損300mm（径間側に支点偏心した場合）を除き、支点偏心に関わらず同じ崩壊タイプに分類された。
- 3) 崩壊プロセスを踏まえて、崩壊メカニズムを示した。支点偏心により、一部の部材が変形し、支点を軸に非対称となるような挙動が確認された。また、ウェブ桁端側全欠損（支点偏心なし、桁端側支点偏心）の場合を除き、全てのケースでウェブの局部座屈による影響が支点部に及ぼすことで崩壊していた。
- 4) 解析ケースを4つのイベント「弾性限界点」、「全塑性限界点」、「局部座屈発生点」、「最大荷重」に着目して分析した。欠損側に偏心した場合、降伏領域が発生しやすい状態になり、健全なウェブ部材に偏心した場合には、その片側ウェブに応力が集中し、ウェブに局部座屈が発生しやすい状態になっていた。

第5章では、実務での適用を考慮して3つの簡易の耐荷力評価を提案した。一つ目は、道路橋示方書で規定される全体座屈、局部座屈、支圧状態の許容応力度に基づく手法である。2つ目は、既往の研究結果をもとに腐食損傷による終局耐力の低下率を一元化した分布図を作成し、その分布図から算出される耐荷力低下の下限値をもとに耐荷力推定式を提案した。3つ目は、欠損位置によって、およそその崩壊モードが決定される特性を活用し、崩壊モード毎に既往の耐荷力評価式を利用して評価できる簡易評価式を提案した。さらに、終局耐力と使用限界強度の関係を示し、「腐食損傷した桁端部の耐力余裕と座屈発生による荷重低下のリスク」に着目した簡易評価法を提案した。得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 道路橋示方書の許容応力度を利用して算出した4つの設計耐力のうち、局部座屈を考慮した評価で、ウェブの有効幅を固定側ソールプレートの幅まで適用した設計耐力が、欠損した場合の終局耐力と近くなった。
- 2) 第2章で検討した解析結果および既往の研究成果を用いて、終局耐力の低下率、構造諸元から

設定できる設計降伏耐力の低下率，残存板厚率，欠損高さ率，欠損幅率，および腐食形態によるパラメータを抽出し，載荷条件別に腐食損傷による桁端部の耐力の低下率をプロットした分布図を作成し，腐食損傷した終局耐力の低下率を一元化した．その分布図をもとに，腐食形態別に設定した終局耐力の下限値（直線）を利用し，載荷条件（支間中央載荷，支点直上載荷），腐食形態のパラメータ（構造諸元から算出できる設計降伏耐力の低下率や残存板厚率）に応じて使い分けることが可能な4つの条件毎の簡易的な耐力推定式を提案した．

- 3) 「桁端側ウェブの張出し長さ」，「径間側ウェブのアスペクト比」，「支点上補剛材の設計降伏耐力の割合」の上下限界値を変更して解析した結果，支点上補剛材の断面構成の影響が最も耐力に影響を与えていることを示した．さらに，欠損したケースにおいて，構造パラメータを変更しても，**第3章**で分類した崩壊モードはほとんど変わらなかった．その上で，欠損位置によって，およそその崩壊モードが決定される特性を活用し，崩壊モード毎に既往の耐力評価式を利用して評価できる簡易評価式を提案した．その結果，解析結果の最大荷重に対して，耐力は**25%**以内で評価できた．
- 4) 上記の提案した3つの簡易の耐力評価法の精度を示し，それぞれの用途を示した．
- 5) 終局耐力と使用限界強度の関係を示し，「腐食損傷した桁端部の耐力余裕と座屈発生による荷重低下のリスク」に着目し，使用限界状態で求められる設計耐力に対する健全時の設計降伏耐力との割合で「腐食損傷した桁端部の耐力余裕」を示し，さらに，座屈発生による急激な荷重低下の有無により「座屈発生による荷重低下のリスク」を示し，この2つの指標をもとに，最終的に4つのカテゴリーにわたる簡易評価法を提案した．
- 6) 非線形開始点の荷重と最大荷重と設計耐力の比較を示し，「腐食損傷した桁端部の設計耐力の荷重余裕と設計耐力の判定結果の危険性」に着目し，健全時の設計耐力に対して非線形開始点（荷重により変形する点）の荷重余裕の程度とその非線形開始点に対して最大荷重までの余裕の程度により，「腐食損傷した桁端部の設計耐力の荷重余裕」を示し，さらに，解析で得られた非線形開始点の荷重と欠損時の設計耐力の差により「設計耐力の判定結果の危険性」を示し，この2つの指標をもとに，最終的に4つのカテゴリーにわたる恒久補修時の簡易評価法を提案した．

最後に，**第6章**では，本研究により得られた結論と今後の課題をまとめた．

## 6.2 今後の課題

以上の研究結果をもとに，解析モデルにおける検討と簡易耐力評価法とその評価法に基づいた対策工法について今後の課題を以下に挙げる．

- 1) 本解析モデルは，境界条件を厳しく設定しているが，残留応力による影響，支承における可動条件による影響，ソールプレートの要素設定，鋼材の構成則の影響など未解明な条件もある．これらの条件による影響を確認した上で，評価法の適用範囲を検討する必要がある．
- 2) 道路橋示方書の許容応力度を利用した評価手法  
欠損高 10mmおよび腐食形態を完全欠損に限定して検討している．その他の腐食形態においても検討し，道路橋示方書の許容応力度を利用した評価手法の精度を検討する必要がある．

### 3) 腐食損傷した終局耐力の低下率を一元化した分布図

この分布は、既往文献のデータを基に作成しているために、腐食形態によってはデータ数が少ない場合や腐食形態がない場合がある。また、外挿によって下限値ラインを推定している欠損ケースや耐荷力をレベルにして推定している欠損ケースがある。これらの不足していると考えられるデータを補い、下限値の設定を確認し、構造的な検討を行なうことで、より精度が高い分布図に更新し、下限値の式を検討する必要がある。

### 4) 崩壊モードごとの桁端部の耐荷力評価手法

実際の現場では、欠損よりも減厚している場合があり、その場合には、同じ欠損位置であっても崩壊モードが異なる可能性がある。欠損位置が支配的な場合の評価はおおよそ適用する式が決定しているが、ウェブと補剛材の組み合わせによっては、欠損高が支配的になる損傷パターンがある。これらの特性を把握して、より精度の高い評価式を提案する必要がある。

### 5) 終局耐力と設計降伏耐力の関係

腐食の損傷程度によっては、道路橋示方書の許容応力度法による照査で、許容値を満足しない場合がある。その場合、交通規制や応急補修の必要性を判断する状況があり、桁端部の残存耐荷力の有無の検討が必要となる場合がある。損傷時の終局耐力と桁反力の関係を示すことも一つの判断材料になると考える。そのために、健全時の終局耐力と構造諸元から算出できる降伏耐力との関係について、より多くのデータを収集し、その関係性をより明確にする必要がある。

### 6) 現場への適用性

桁端下端部を対象として検討したが、現場では桁端下端部の腐食だけでなく、支承などの周辺部材と複合で腐食損傷している場合や疲労との複合で損傷している場合がある。より現場で適用できるように、周辺部材等の影響や疲労との複合要因についても考慮して検討する必要がある。

### 7) 対策工法

腐食損傷した桁端下端部の補修工法は、損傷が大きい場合には当て板補強や補強リブを取付けた対策を行なうことが多い。しかしながら、桁端部付近には落橋防止システムなど様々な付属物があり、補修補強ができない場合がある。崩壊プロセスの分析などを利用して、腐食時における桁端部の対策工法を検討する必要がある。

## 謝 辞

本論文は、研究を進めるにあたり多くの方々から貴重なご指導やご協力を賜りました。

本研究を進めるにあたり、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました大阪市立大学大学院 山口 隆司 教授には衷心より謝意を表します。また、大阪市立大学大学院 鬼頭 宏明 教授、角掛久雄准教授には、本論文をまとめるにあたり種々のご助言を賜りましたことに、厚く御礼を申し上げます。

三ツ木 幸子氏には、大阪市立大学に入学するきっかけを与えて頂き、さらに桁端部の腐食、座屈に関して様々なご教示、ご助言、資料の提供など多大なるご協力をいただきました。ここに記して、御礼を申し上げます。京都大学松村政秀准教授、鈴木康夫助教には、鋼橋の基礎から研究に至るまで、様々なご教示頂きました。こころより感謝とお礼申し上げます。

鋼橋技術研究会では、山梨大学大学院 杉山俊幸教授（補修補強設計部会 部会長）、名古屋大学大学院 北根安雄准教授（多視点からの補修補強部会 部会長）、東京工業大学大学院 佐々木栄一准教授、長岡科学技術大学 宮下剛准教授、および部会員の皆様から桁端部の腐食および維持管理に関して有益な情報やご意見を頂くことができました。御礼を申し上げます。

大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻橋梁工学研究室に在学された修了生諸兄、卒業生諸兄、大学院生諸氏、ならびに学部生諸君には、研究の手伝いだけでなく、様々な面でご協力頂きました。石川工業高等専門学校 高井俊和講師、豊田雄介（現：高速道路総合技術研究所(株)）、木村聡（現：(株)横河住金ブリッジ）、舟山耕平氏、研究に対するご助言ご協力をいただきました。ここに記して、感謝申し上げます。

本論文は著者が東京コンサルタンツ株式会社に在職しながら、業務のなかとりまとめたものです。大阪市立大学への入学の機会を与えて頂きました東京コンサルタンツ株式会社 村西隆之代表取締役社長、同原木功東日本支社長、堀秀夫（当時：技術監理センター長）に、こころより感謝とお礼を申し上げます。入学後も、継続して就学の機会を与えて頂きました東京コンサルタンツ株式会社松尾修技術本部長、稲田栄作支店長に、ここより感謝とお礼を申し上げます。業務のやりくりして頂いた小村辰彦技術本部次長、大野一成技術4部部長および構造部の方々には、業務遂行において迷惑をおかけしました。ここに感謝とお礼を申し上げます。また、橋本拓己福井支店長はじめ、多くの会社の方々にご支援および配慮を頂きました。ここに記して、感謝申し上げます。

このように本論文は、数多くの方々からのご指導やご協力を頂くことによりまとめることができました。ここに全ての方々のお名前を挙げることはできませんが、心より感謝申し上げます。最後に、研究生活を支えてくれた妻に感謝いたします。

## 本論文に関する著者の公表論文

1. 臼倉誠, 金銅晃久, 山口隆司, 畠中彬, 三ツ木幸子: 下端部が腐食した桁端部の耐力評価に関する 2, 3 の考察, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, I-528, 2010.9
2. 臼倉誠, 山口隆司, 豊田雄介, 三ツ木幸子, 金銅晃久: 鈹桁端部の支点上のウェブと補剛材の下端腐食範囲の違いがその耐力特性に及ぼす影響, 構造工学論文集 Vol.57A, pp.724-734, 2011.3
3. Makoto USUKURA, Takashi YAMAGUCHI, Yasuo SUZUKI, and Yukiko MITSUGI, Strength Evaluation For A Corroded Damaged Steel Girder End Considering Its Collapse Mechanism, Proceedings of the Thirteenth EAST ASIA-Pacific Conference on Structure Engineering and Construction (EASEC-13), D-2-3・8pages, Sep.2013
4. Makoto Usukura, Takashi YAMAGUCHI, Classification of based on the Collapse Mechanism for a Corroded Damaged Steel Girder End, Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University, Vol.54・pp.31-36, Dec.2013
5. 臼倉誠, 山口隆司, 松村政秀, 三ツ木幸子, 木村聡: 下端部が腐食した桁端部の崩壊メカニズムの分類および考察, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, I-172, 2012.9
6. 臼倉誠, 山口隆司, 鈴木康夫, 三ツ木幸子: 腐食した桁端下端部の崩壊メカニズムの整理, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, I-359, 2013.9
7. 臼倉誠, 山口隆司, 鈴木康夫, 三ツ木幸子: 腐食した桁端部の耐力特性を踏まえた崩壊プロセスからの分類とその分析, 土木学会論文集
8. 臼倉誠, 山口隆司, 鈴木康夫, 三ツ木幸子: 腐食した桁端部の耐力挙動に与える支点偏心の影響, 鋼構造シンポジウム, 鋼構造年次論文報告集, 第 21 巻, pp.193-200, 2013.11  
[査読あり]
9. 臼倉誠, 金銅晃久, 山口隆司, 畠中彬, 三ツ木幸子, 橋本国太郎, 杉浦邦征: 鋼道路橋の腐食した桁端の耐力特性とその設計法に関する 2, 3 の考察, 構造工学論文集 Vol.56A, pp.722-732, 2010.3
10. 臼倉誠, 宮下剛, 佐々木栄一, 三ツ木幸子, 山崎努, 杉山俊幸, 腐食損傷を有する鋼 I 桁端部の耐力推定方法に関する一検討, 土木学会論文集
11. 臼倉誠, 山口隆司, 舟山耕平, 三ツ木幸子, 崩壊プロセスに基づいた腐食した桁端部の耐力評価の検討, 鋼構造年次論文報告集, 第 24 巻, pp.359-366, 2016.11,

## 付録

### 1. 腐食した桁端下端部の実務者の対応のヒアリング

これまで多くの実務者（点検者・設計者）が、腐食損傷している桁端部について補修の有無や補修補強対策を検討している。ここでは、これまで点検者・設計者が腐食損傷している桁端部について、どのような判断をし、どのように対応していたかを把握するために、点検者・設計者に対してヒアリングを実施した。質問の内容は以下の通りである。なお、このヒアリングは、鋼橋技術研究会 補修補強設計部会の中で、著者が実施した内容である。

#### [質問内容]

- 質問 1) 点検時や補修・補強対策時における腐食した桁端部に遭遇した際に困ったこと  
質問 2) 腐食した桁端部の恒久補修時の判断の目安について質問した。  
質問 3) 腐食した桁端部の応急補修時の判断の目安は

質問 1) に対する回答：腐食した桁端部に遭遇した際に困ったこと

以下に質問 1 に対する実務者の回答を整理する。

- ・桁端部の腐食が甚大だったので、交通規制をかけて様子を見ることを道路管理者に提案した。ただし、交通規制の有無を判断するための桁端部損傷による定量的な根拠を求められた。
- ・桁端部までのアプローチがなく、正確に損傷が把握できない状態で、補修の可否を求められた。
- ・腐食状態が様々なので、部材の損傷に対して既往のどの残存耐荷力評価式を適用すればよいかわからなかった。
- ・補強された、あて板補強とともに桁端部の本部材が腐食していたので、正確な耐力が把握できず、実際に桁端部の耐荷力の有無が判断できなかった。
- ・設計計算書や図面がない状態での補修の可否を道路管理者に求められた。

質問 2) に対する回答：腐食した桁端部の恒久補修時の判断

以下に質問 2 に対する実務者の回答を整理する。

表-1 恒久補修時の実務者の対応

	恒久補修時の判断	判断に用いる拠り所
A	定期点検で腐食 C, E 判定とされた箇所において, 建設時図面に記載されている板厚と比較し, 5%以上の減厚があれば, 補修候補とする.	平成 24 年 道示 p.436 「鋼板の厚さは JIS G 3193(中略)(一)側の許容差が公称板厚の 5%以内にならない」
B	定期点検で腐食 C, E 判定とされた箇所において, 板厚を測定し, 支圧応力度および軸圧縮応力度で照査を行い, 許容応力度を超過した場合に, 補修候補とする. ※使用鋼種が不明の場合には鋼種を予測している.	平成 24 年 道示 p.327 <sup>4)</sup>
C	定期点検で腐食 C, E 判定とされた箇所において, 板厚を測定し, 減肉が 30%以上であれば, 補修候補とする. ※ただし, 以下のことを実施することが前提. ・腐食の誘因となる塩水が伝達しないように, 伸縮装置が健全であること. ・定期的に点検を実施していること ・腐食箇所が局所的であり, 足場の設置した場合, 不経済にならないこと.	FEM 解析の結果より, 終局耐力が当初の設計耐力よりも大きく上回ることを提示し, 「道路管理者」の判断により設定.
D	断面欠損が生じる, 局部座屈, 亀裂等がある場合には, 補修候補とする. ただし, 以下のことを実施することが前提 ・板厚計測による判断 (根拠) は難しいため, 板厚計測の結果が根拠になることは少ない. [補足] 地震時は想定しない. 常時においては満足していると考え, 塗装塗替えが多い.	橋梁定期点検結果において緊急性を要する判定 (IV=E1, E2) されている場合を補修候補とする.
E	機能の低下があり, 対策の必要がある損傷 (Aランク相当) さび・腐食の Aランク: 断面欠損が部材厚の10%以上ある場合	阪神高速道路(株)HP より ※阪神高速道路の長期維持管理及び更新に関する技術検討委員会 (第 1 回)

質問 3) に対する回答: 腐食した桁端部の応急補修時の判断

以下に質問 3 に対する実務者の回答を整理する.

表-2 応急補修時の実務者の対応

	応急補修時の判断	備考
A	部材が完全欠損していれば, 応急補修候補とする.	-
B	目視で確認できる変状があり, 照査を行い, 減厚した部材で設定した降伏耐力が, 当初の設計耐力よりも下回っていれば, 応急補修候補とする.	降伏耐力算出 =部材の最小値の許容応力度×1.7×有効面積 ※補剛材の許容応力度×1.7
Y	目視で確認できる変状があり, 照査を行い, 減厚した部材で設定した降伏耐力が, 当初の設計耐力よりも下回っていれば, 応急補修候補とする.	降伏耐力算出 =許容応力度×1.7 (累加強度) ×有効面積
H	目視で確認できる変状があり, 減厚した上に, 疲労亀裂と思われる塗装割れが確認された場合に応急補修候補とする.	-
Θ	目視で確認できる変状があり, 実応力を計測した判断 (ひずみ計測) で異常値が確認された場合に応急補修候補とする.	-
Y	目視で確認できる局部座屈が確認された場合に応急補修候補とする.	-

## 2. 腐食損傷を有する桁端部の終局耐力の算出例について

本章 5.3 で提案した基本推定式(その1)および(その2)を用いて、腐食損傷を有する桁端部の終局耐力の算出例を示す。

### a) 事例 A

事例Aの構造諸元を以下に示す。

- ・支点上補剛材 (SS400), 板厚: 16(mm), 幅: 115(mm)
- ・主桁ウェブ (SM490Y), 板厚: 9(mm)

事例Aの腐食範囲を図-2Aに示す。また、各部材の残存板厚率を以下に示す。なお、残存板厚率は、便宜上、安全側の最小値を適用する。

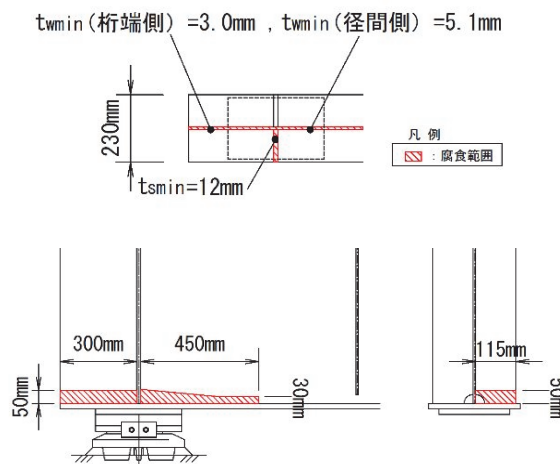


図-2. A1 事例 A1 における腐食範囲

- ・支点上補剛材 (右) の残存板厚率 (最小): 16.0(mm)
- ・支点上補剛材 (左) の残存板厚率 (最小): 12.0(mm)
- ・主桁ウェブ径間側の残存板厚率 (最小): 5.1(mm)
- ・主桁ウェブ桁端側の残存板厚率 (最小): 3.0(mm)

手順1: 支点上補剛材にL荷重が作用していることを想定する。この桁は、腐食損傷程度が把握でき、腐食形態が図-2. A1に示すように「ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損」である。以上より、基本推定式(その1)より検討する。

手順2: 健全時および損傷時の設計降伏耐力を式(5.3.1)により算出する。

$$P_{Hy} = 355 \cdot 1,944 + 210 \cdot 3,680 = 1,460 \text{ (kN)} \quad (2A1a)$$

$$A_{hew} : 24 \cdot 9 \cdot 9 = 1,944 \text{ (mm)} \quad (2A1b)$$

$$A_{hes} : 115 \cdot 16 \cdot 2 = 3,680 \text{ (mm)} \quad (2A1c)$$

$$\sigma_{yw} = 355 \text{ (N/mm}^2\text{)}, \sigma_{ys} = 210 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$



損傷時の設計降伏耐力は以下の通りである.

$$P_{Ay} = 355 \cdot 874.8 + 210 \cdot 2,990 = 1,020 \text{ (kN)} \quad (2A1d)$$

$$A_{Aew} : 12 \cdot 9 \cdot 5.1 + 12 \cdot 9 \cdot 3 = 874.8(\text{mm}^2) \quad (2A1e)$$

$$A_{Aes} : 115 \cdot 16 + 115 \cdot 12 = 3,220(\text{mm}^2) \quad (2A1f)$$

手順3 : 上式よりこの桁端部の設計降伏耐力の低下率を算出する.

$$P_{Ay} / P_{Hy} = 990 / 1,460 = 0.68 \quad (2A1g)$$

手順4 : 式(5.3.2g)より終局耐力を算出する.

$$P_{Au} / P_{Hu} = P_{Ay} / P_{Hy} = 0.68 \quad (2A1h)$$

手順5 : 支間中央載荷時の条件における健全時の終局耐力は5.3の結果より, 設計降伏耐力の2.7/1.7と仮定する.

$$P_{Hu} = P_{Hy} \cdot 2.7 / 1.7 = 2,320 \quad (2A1i)$$

手順6 : 損傷時終局耐力を算出し, 健全時の降伏耐力と比較する.

$$P_{Hu} \cdot 0.68 = 1,570 > 1,460 \quad (2A1j)$$

以上の結果より, 事例A1の桁端部の損傷時終局耐力の下限値は, 健全時の終局耐力の68%程度に減少していると推定され, 設計降伏耐力(設計基準耐力)を有していることから, 耐力の視点では応急補修の必要性は低いと判断される.

## b) 事例 A2

事例A2の構造諸元は事例A1の構造諸元と同じである. 以下にその諸元を示す. 事例A2の腐食範囲を図-2.A2に示す. また, 各部材の残存板厚率を以下に示す. なお, 残存板厚率は, 便宜上, 安全側の最小値を適用する.

- ・支点上補剛材(右)の残存板厚率(最小) : 15.0(mm)
- ・支点上補剛材(左)の残存板厚率(最小) : 14.0(mm)
- ・主桁ウェブ径間側の残存板厚率(最小) : 3.0(mm)
- ・主桁ウェブ桁端側の残存板厚率(最小) : 0.0(mm)

手順1 : 支点上補剛材にT荷重が作用していることを想定する. この桁は, 腐食損傷程度が把握でき, 腐食形態が図-2.A2に示すように「ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損」である. 以上より, 基本推定式(その2)より検討する.

手順2 : 健全時の降伏耐力は, 構造諸元が事例Aと同じなので, 式(2A1a)より算出した値を利用する.

また、損傷時の設計降伏耐力は事例A1と同様の方法で式(2A1a)により算出する。

健全時の降伏耐力は以下の通りである。

$$P_{Hy} = 1,460 \text{ (kN)} \quad (2A2a)$$

損傷時の降伏耐力は以下の通りである。

$$P_{By} = 355 \cdot 324 + 210 \cdot 3,335 = 820 \text{ (kN)} \quad (2A2b)$$

$$A_{Bew} : 12 \cdot 9 \cdot 3 + 12 \cdot 9 \cdot 0 = 324 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2A2c)$$

$$A_{Bes} : 115 \cdot 15 + 115 \cdot 14 = 3,335 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2A2d)$$

手順3：上式より降伏耐力の低下率を算出する。

$$P_{By} / P_{Hy} = 820 / 1,460 = 0.56 \quad (2A2e)$$

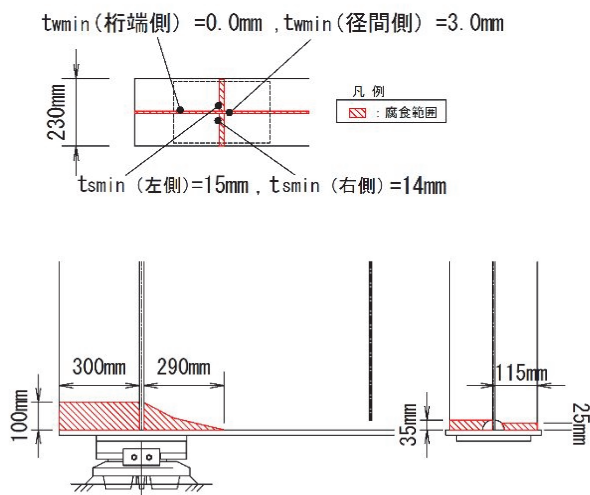


図-2.A2 事例 A2 における腐食範囲

手順4：式(5.3.3f)より終局耐力を算出する。

$$P_{Bu} / P_{Hu} = 1 - 1.70 (1 - P_{By} / P_{Hy}) = 0.25 \quad (2A2f)$$

手順5：支点直上載荷時の条件における健全時の終局耐力は、第5章の結果より、降伏耐力の2.2/1.7と仮定する。

$$P_{Hu} = P_{Hy} \cdot 2.2 / 1.7 = 1,890 \quad (2A2g)$$

手順6：損傷時終局耐力を算出し、桁反力と比較する。

$$P_{Hu} \cdot 0.25 = 470 < 860 \quad (2A2h)$$

以上の結果より、事例A2の桁端部の損傷時終局耐力の下限値は、健全時の終局耐力の25%程度に減少していると推定され、桁反力よりも大幅に下回っていることから応急補修が必要と判断される。