

①

回復クリープの影響を考慮した鋼・コンクリート
合成桁橋の経時挙動に関する研究

平成 4 年 9 月

くり た あき みつ
栗 田 章 光

は し が き

筆者が鋼・コンクリート合成桁橋（以下、合成桁と略記する）の経時挙動の解析に興味を抱くようになったのは、大阪工業大学大学院に在学中の頃である。当時の赤尾親助教授から、合成桁のクリープ・乾燥収縮解析に関する安宅の解析方法を詳しく教わった。その後、赤尾教授は、安宅の方法を改良した解析方法（基礎式は、Dischingerの方法である）を考え出された。そのとき、助手であった筆者は、数値計算や実験の手伝いを専ら引き受けていた。赤尾の方法は昭和48年2月に改訂された道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編、第9章合成げたの設計基準として採用され、この分野の研究は、筆者にとって一応終了したかに思えた。

しかしながら、筆者が昭和57年の9月から1年間にわたりドイツのポーフム大学・構造工学研究所のK.Roik教授の処へ留学したところ、ヨーロッパでは、Dischingerの方法によるクリープの解析方法はすでに古い理論に属するものであることがわかった。すなわち、コンクリートのクリープひずみは、塑性ひずみばかりでなく、回復性のある遅れ弾性ひずみと非回復性のフローひずみとの2つから成り立っているとの学説が、ヨーロッパで定着しつつあった。

帰国後、昭和61年には大阪工業大学・構造実験センターが完成し、同センター長の岡村宏一教授のはからいで、大型でしかも精度のよいクリープ、および乾燥収縮の実験が可能となった。これを契機として、鋼・コンクリート合成構造のクリープ、および乾燥収縮に関する実験と解析とを本格的に始めた。そうこうしていると、わが国でも新しい考え方にもとづく合成桁や合成柱が使われ始めだした。そのような社会の動向に対処すべく、土木学会では、鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドラインを作成することになり、筆者もその執筆やとりまとめの作業に参加した。

その後、実験結果や基本原理を踏え、遅れ弾性クリープとその回復性とを考慮した合成桁のより厳密なクリープの解を求め得るようになった。これらの結果を本研究ではまとめたもので、その内容としては、クリープの解析のみならず、乾燥収縮の解析も取り扱っている。そして、乾燥収縮の解析では、従来から不明瞭であった乾燥収縮に伴うクリープ係数の経時挙動に及ぼす影響を明らかにした。また、鋼材の拘束を受けるコンクリート部材のクリープ係数と乾燥収縮量とに関するデータベースも作成し、解析、および設計のための資料を作成した。

これらの詳細は本文に譲ることとするが、今後、本研究で得られた成果が実際の合成桁の設計に取り入れられ、実用に供されるようになれば幸いである。

平成4年9月

栗田 章光

目 次

はしがき

主な記号の一覧

第 1 章 緒 論

| | |
|--------------------------------|---|
| 1. 1 鋼・コンクリート合成桁の経時挙動に関する既往の研究 | 1 |
| (1) クリープの解析法 | 1 |
| (2) 乾燥収縮の解析法 | 5 |
| (3) リラクセーションの解析法 | 6 |
| 1. 2 本論文の目的 | 7 |
| 1. 3 本論文の概要 | 8 |
| 参考文献 | 9 |

第 2 章 合成桁のクリープ、および乾燥収縮解析の基礎

| | |
|---------------------------------------|----|
| 2. 1 まえがき | 13 |
| 2. 2 合成桁の分担断面力 | 14 |
| 2. 3 クリープ解析の基礎 | 15 |
| (1) コンクリートのクリープ現象とその定式化 | 15 |
| (2) 回復クリープを考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係式 | 19 |
| (3) コンクリートの応力緩和を考慮したクリープ係数 η の誘導 | 22 |
| (4) リラクセーション係数 ρ_{NK} の誘導 | 24 |
| (5) 持続曲げモーメントが作用する場合のクリープの解 | 26 |
| (6) 持続軸方向力が作用する場合のクリープの解 | 30 |
| (7) プレキャスト床版を用いた合成桁のクリープの解 | 31 |
| (8) 数値計算による検討とその考察 | 33 |
| 2. 4 乾燥収縮解析の基礎 | 36 |
| (1) コンクリートの乾燥収縮現象とその定式化 | 36 |
| (2) 乾燥収縮の解析におけるコンクリートの応力-ひずみ関係式 | 37 |

- (3) コンクリートの乾燥収縮とクリープ係数の関係 39
- (4) 乾燥収縮の解 41
- (5) 数値計算による検討とその考察 43
- 2. 5 単純合成桁の経時挙動の解析 44
 - (1) 解析法 44
 - (2) 数値計算による検討とその考察 46
- 2. 6 まとめ 50
 - 参考文献 51

第3章 合成桁のクリープ、および乾燥収縮に関する実験的研究

- 3. 1 まえがき 53
- 3. 2 実験橋梁の概要 54
 - (1) 本橋の設計概要 54
 - (2) 本橋の特徴 56
 - (3) プレストレスの導入、および解放に対する現場計測結果 57
 - (4) 経時挙動の解析による予測 60
- 3. 3 室内実験 61
 - (1) 実験概要 61
 - (2) 実験結果とその考察 64
 - (3) 道路橋示方書の規定値との比較 66
- 3. 4 現場実験 67
 - (1) 経時挙動の測定方法 67
 - (2) 測定結果とその考察 68
- 3. 5 まとめ 71
 - 参考文献 72

第4章 鋼・コンクリート合成構造のクリープ、および乾燥収縮に関するデータベースの構築

- 4. 1 まえがき 73
- 4. 2 データベースの構成 74

- (1) 対象とする構造物の分類 74
- (2) データベースの入力項目 75
- (3) データベースとアプリケーションプログラムとの構成 77
- (4) データベースの出力項目 77
- 4. 3 データの処理方法 78
 - (1) 解析モデル 79
 - (2) 応力が与えられたときのひずみの解 80
 - (3) 応力に関するパラメータの同定法 81
 - (4) ひずみに関するパラメータの同定法 84
- 4. 4 使用例 84
 - (1) PC版のクリープとその同定結果 84
 - (2) コンクリート柱と合成柱との乾燥収縮ひずみの比較 85
- 4. 5 まとめ 87
 - 参考文献 87

第5章 クリープ、および乾燥収縮の数値解析法と連続合成桁橋への適用

- 5. 1 まえがき 89
- 5. 2 弾性荷重法 89
 - (1) 分担断面力の変化量 90
 - (2) 弾性方程式とその解 92
 - (3) 合成断面に作用する断面力 94
 - (4) 2径間連続合成桁に対する数値解析結果とその考察 95
- 5. 3 剛性マトリックス法 98
 - (1) 剛性方程式 98
 - (2) 持続外力による任意断面の時刻 t_1 における分担断面力の計算 101
 - (3) 各節点における分担断面力の変化量の計算 103
 - (4) クリープ、および乾燥収縮に対する荷重項 103
 - (5) クリープ、および乾燥収縮による構造全体系における断面力の変化量の計算 105

| | |
|--|-----|
| (6) 数値計算の手順 | 105 |
| (7) 多径間連続合成桁に対する数値解析結果とその考察 | 108 |
| 5. 4 パラメトリック解析 | 110 |
| (1) パラメータの抽出 | 110 |
| (2) 合成桁の断面構成比 α の影響 | 112 |
| (3) フロークリープ係数 $\phi_{\pm\infty}$ の影響 | 112 |
| (4) 初期載荷材齢 t_1 の影響 | 114 |
| (5) 乾燥収縮量 $\varepsilon_{s\infty}$ の影響 | 114 |
| (6) 乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_s(\infty)$ の影響 | 115 |
| 5. 5 まとめ | 117 |
| 参考文献 | 118 |
| 第6章 結 論 | 121 |
| 謝 辞 | 124 |
| 本論文に関する筆者の発表論文 | 125 |

主な記号の一覧

(1) 材料の特性

- E_b : コンクリートのヤング係数 (kgf/cm^2)
 E_s : 鋼のヤング係数 (kgf/cm^2)
 E_p : PC鋼材のヤング係数 (kgf/cm^2)
 $n = E_s / E_b$: 鋼とコンクリートとのヤング係数比
 $n_p = E_p / E_b$: PC鋼材とコンクリートとのヤング係数比
 ϕ_v : 遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数 (回復クリープ係数)
 ϕ_{\pm} : フローひずみに対するクリープ係数
 $\beta_v(t-t_1)$: 持続荷重載荷後の経過日数 ($t-t_1$) に関する遅れ弾性ひずみの時間関数
 $\beta_{\pm}(t)$: コンクリートの材齢 t 、および部材の仮想厚さに関するフローひずみの時間関数
 $\eta = \rho_{NK}(\phi_v + \phi_{\pm})$: コンクリートの応力緩和を考慮したクリープ係数
 ε_s : コンクリートの乾燥収縮量
 $\beta_e(t)$: コンクリートの材齢 t 、および部材の仮想厚さに関する乾燥収縮の時間関数
 ϕ_e : コンクリートの乾燥収縮に伴うクリープ係数

(2) 断面定数

i) コンクリート断面

- A_b : コンクリート床版の総断面積 (cm^2)
 I_b : コンクリート床版のその図心軸に関する断面二次モーメント (cm^4)
 a_b : 合成桁の図心Vからコンクリート床版図心Bに至るまでの距離 (cm)

ii) 鋼断面

- A_s : 鋼断面の断面積 (cm^2)
 I_s : 鋼桁のその図心軸に関する断面二次モーメント (cm^4)
 a_s : 合成桁の図心Vから鋼桁の図心Sに至るまでの距離 (cm)
 $a = a_b + a_s$: コンクリート床版と鋼桁との図心間の距離 (cm)

A_p : PC鋼材の断面積 (cm^2)

iii) 合成断面

A_v : 合成桁の鋼に換算した断面積 (cm^2)

I_v : 合成桁のその図心軸に関する鋼に換算した断面二次モーメント (cm^4)

(3) 特性値

$\alpha = A_b I_e / A_v I_v$: 合成桁の断面構成比

ρ : Trostの方法によるリラクセーション係数

ρ_D : Dischingerの方法によるリラクセーション係数

ρ_{NK} : 中井・栗田の方法によるリラクセーション係数

k_1 : 遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数の進行に関する係数

k_2 : フローひずみに対するクリープ係数の進行に関する係数

$\beta(t) = \phi_e(t) / \phi_e(\infty)$: コンクリートの乾燥収縮の進行度

$D_1 = \{E_b A_b / E_e I_e\} a$ ($1/\text{cm}$)

$D_2 = \{E_b A_b / E_e I_v\} a_b$ ($1/\text{cm}$)

$D_N = E_b A_b / E_e A_e$: コンクリート床版と鋼桁との伸び剛度比

$D_M = E_b I_b / E_e I_e$: コンクリート床版と鋼桁との曲げ剛度比

$D_v = E_b I_b / E_e I_v$: コンクリート床版と合成桁との曲げ剛度比

$D_N' = E_b A_b / E_e A_v$: コンクリート床版と合成桁との伸び剛度比

(4) 軸方向力、および曲げモーメント

i) 総断面力

P_{d,t_1} : 時刻 t_1 において合成断面に作用する持続軸方向力 (kgf)

M_{d,t_1} : 時刻 t_1 において合成断面に作用する持続曲げモーメント ($\text{kgf} \cdot \text{cm}$)

$N_{v,t}$: 時刻 t において合成断面に作用する軸方向力 (kgf)

$M_{v,t}$: 時刻 t において合成断面に作用する曲げモーメント ($\text{kgf} \cdot \text{cm}$)

$\Delta N_{v,t-t_1}$: 時刻 t_1 から t までの軸方向力の変化量 (kgf)

$\Delta M_{v,t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでの曲げモーメントの変化量 ($\text{kgf} \cdot \text{cm}$)

ii) 分担断面力

N_{b,t_1} : 時刻 t_1 におけるコンクリート床版の分担軸方向力 (kgf)

M_{b,t_1} : 時刻 t_1 におけるコンクリート床版の分担曲げモーメント ($\text{kgf} \cdot \text{cm}$)

N_{e,t_1} : 時刻 t_1 における鋼桁の分担軸方向力 (kgf)

M_{e,t_1} : 時刻 t_1 における鋼桁の分担曲げモーメント ($\text{kgf} \cdot \text{cm}$)

$\Delta N_{b,t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでのコンクリート床版の分担軸方向力の変化量 (kgf)

$\Delta M_{b,t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでのコンクリート床版の分担曲げモーメントの変化量 ($\text{kgf} \cdot \text{cm}$)

$\Delta N_{e,t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでの鋼桁の分担軸方向力の変化量 (kgf)

$\Delta M_{e,t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでの鋼桁の分担曲げモーメントの変化量 ($\text{kgf} \cdot \text{cm}$)

断面力の変化量につける上添字 (例, $\Delta N_{b,t-t_1}^T$) の意味は、次のとおりである。

T : 断面力の変化量の合計

0 : 静定系における断面力の変化量

1 : 不静定力の変化に伴う断面力の変化量

a : 断面力の変化量に関する近似解

' : 回復クリープを無視した場合の解

(5) 応力

σ_{t_1} : 時刻 t_1 におけるコンクリートの応力度 (kgf/cm^2)

$\Delta \sigma_{t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでに変化するコンクリートの応力度 (kgf/cm^2)

σ_{e,t_1} : 時刻 t_1 における鋼の応力度 (kgf/cm^2)

$\Delta \sigma_{e,t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでに変化する鋼の応力度 (kgf/cm^2)

(6) ひずみ

- ε_{b, t_1} : 時刻 t_1 におけるコンクリートのひずみ
- $\Delta \varepsilon_{b, t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでに变化するコンクリートのひずみ
- ε_{s, t_1} : 時刻 t_1 における鋼のひずみ
- $\Delta \varepsilon_{s, t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでに变化する鋼のひずみ

(7) 曲率

- θ_{b, t_1} : 時刻 t_1 におけるコンクリート床版の曲率
- $\Delta \theta_{b, t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでに变化するコンクリート床版の曲率
- θ_{s, t_1} : 時刻 t_1 における鋼桁の曲率
- $\Delta \theta_{s, t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでに变化する鋼桁の曲率

(8) マトリックス、およびベクトル

- $[\delta^{ij}]$: 弾性方程式による方法におけるたわみ性マトリックス
- $\{\Delta X^i\}$: 弾性方程式による方法における不静定力の变化量のベクトル
- $\{Q^i\}$: 弾性方程式による方法における荷重項ベクトル
- f : 剛性マトリックスによる方法における荷重項ベクトル
- δ : 剛性マトリックスによる方法における変位ベクトル
- K : 剛性マトリックス

第 1 章

緒 論

1. 1 鋼・コンクリート合成桁の経時挙動解析に関する既往の研究

鋼・コンクリート合成桁（以下、合成桁と略記する）においては、コンクリートのクリープや乾燥収縮、ならびにプレストレス導入のための鋼材（以下、PC鋼材と略記する）のリラクセーションによって、応力の再配分、プレストレスの損失、および付加的な変位などが生じる。これらの現象は、一般に、座屈安定性の問題を除いて、合成桁の終局限界状態、たとえば終局耐荷力に何ら影響を及ぼさないものである。

しかし、コンクリート床版のひび割れの発生の有無、コンクリート床版と鋼桁との過大なズレ、または桁のたわみなどの使用限界状態を照査する際には、クリープ、および乾燥収縮などによる合成桁の経時挙動の解析が不可欠である。

とくに、合成構造、あるいは混合構造の斜張橋のように、架設が進むにしたがって構造系が変化してゆく場合、各架設段階におけるクリープ、および乾燥収縮による応力・変位の解析を逐次行う必要がある。

(1) クリープの解析法

1930年代に、時間依存問題とみなしてコンクリートの応力-ひずみ関係式を初めて確立したのは、Dischinger^{1, 1)}である。Dischingerは、当時、建設される機会が多かった鉄筋コンクリートアーチ橋の経時挙動を、その応力-ひずみ関係式を用いて解析した。その後、Dischingerによって導かれた微分方程式は、合成桁やプレストレストコンクリート桁（以下、PC桁と略記する）の経時挙動の解析に応用されるようになった。当時のコンクリートのクリープ現象に対する基本的な考え方は、クリープひずみが非回復のフローひずみのみで構成されるという仮定に立脚していた。この仮定は、回復を考慮した遅れ弾性クリープ（回復クリープ）現象の知見が普及する1970年頃まで使用されてきた。

それら今日までに提案されてきた合成桁のクリープ解析法は、次のように分類

・整理される^{1, 2)}。

i) Sattler^{1, 3)}による経時挙動を直接微分方程式で解く方法

ii) Fritz^{1, 4)}による仮想(換算)ヤング係数の概念を用いる方法

iii) Trost^{1, 5)}による代数表示式を用いる方法

まず、i)のSattlerの方法は、Dischingerが導いた微分方程式を合成桁のクリープ解析に拡張し、分担断面力の変化量をより厳格に算定しようとしたものである。この方法による場合、微分方程式を直接解く必要があるため、高次の不静定構造物を解析する際には、煩雑な数値解析を行わなければならない。Sontagの方法^{1, 6)}も、i)の範ちゅうに属するものである。一方、わが国では、Sattlerの方法を改良した彦坂^{1, 7)}の解法が発表されている。すなわち、Sattlerの方法では、合成桁の中間支点モーメントを不静定量に選び、連立微分方程式の解を求めている。これに対し、彦坂の方法では、クリープが生じない鋼桁の中間支点の曲げモーメントを不静定量に選ぶことによって、解式を簡素化し、かつSattlerの方法と同程度の精度の解が得られるように工夫した点に特徴がある。これらの解法では、遅れ弾性クリープの影響が考慮されていない。

つぎに、ii)のFritzの方法は、時間の経過とともに変化するコンクリートの見かけのヤング係数 E_b' をクリープ係数 ϕ 、合成桁の断面構成比、および載荷状態の考慮のもとに、

$$E_b' = E_b / (1 + \phi \phi) \quad (1.1)$$

なる形で表されるものとし、これによってクリープを解析しようとした点に特徴がある。ここに、 ϕ は合成桁の断面構成比、および載荷状態に関する係数である。Blaszowskiの方法^{1, 8)}も、ii)の範ちゅうに入る。これらいずれの解法でも、遅れ弾性クリープは、考慮されていない。また、橋の方法^{1, 6)}は、Sontagの方法と仮想ヤング係数法とを組み合わせた解法で、1960年代のわが国の連続合成桁橋の設計計算によく用いられた。

さらに、iii)のTrostの方法は、リラクセーション係数を導入した代数式表示のコンクリートの応力-ひずみ関係式を用いた解法である。この方法では、初めて遅れ弾性クリープの項が考慮されている。このようなTrostの方法による応力-ひずみ関係式は、取扱いが容易で、実用計算に適している。安宅の方法^{1, 8)}もiii)の範ちゅうに入るものであるが、遅れ弾性クリープは、考慮されていない。なお、

わが国の現行の道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編^{1, 10)}の9章に記載された合成桁の解説には、安宅の方法を改良した小野の方法^{1, 9)}が示されている。一方、栗田・赤尾^{1, 11)}は、Trostの方法にもとづくクリープの汎用解析法を提案している。すなわち、この方法では、Trostによる応力-ひずみ関係式を用い、合成桁とPC桁とを対象にして、マトリックス構造解析法を用い、クリープの解析を行おうとするものである。

また、Haensel^{1, 12)}は、遅れ弾性クリープひずみが持続荷重の載荷と同時に発生すると仮定するRüschの方法^{1, 13)}(別名、改良Dischinger法と呼ばれている)にもとづき、総断面力法を用いたクリープの簡易解析法を提案した。この方法は、現在、ドイツにおける合成桁の設計に多く利用されている。

以上に示したように、Trostの方法では、遅れ弾性クリープの影響が正確に考慮に入れられている。しかし、Haenselの方法では、簡易な形で取り入れられているにすぎない。また、双方とも、回復クリープの影響までは、考慮に入れていない。したがって、合成桁のクリープ解析を厳格に行うためには、回復クリープの影響も解明しておく必要がある。

他方、プレストレストコンクリートの分野では、若狭・伊沢^{1, 14)}によって、遅れ弾性クリープを考慮したPC桁の不静定力の計算法が提案されている。そして、星埜・佐伯^{1, 15)}は、PC斜張橋のクリープの解析に、遅れ弾性クリープと回復クリープとを考慮した反復計算法を提案している。また、建築構造物のPC梁のクリープを対象として渡辺・六車^{1, 16)}は、遅れ弾性クリープと回復クリープとの影響を数値解析によって示している。

さらに、合成桁のクリープ解析については、中井・栗田^{1, 17), 1, 18)}によって、渡辺・六車の基礎式を用い回復クリープの影響が初めて解析的に解明されている。

以上に紹介した各種のクリープ解析法を、代数式的表示で示せば、表-1.1のとおりまとめられる^{1, 19)}。

この表からわかるように、Dischingerの方法を除く4つの方法においては、変化応力度の項における ϕ の取扱いに差異が現れている。そして、改良Dischinger法では、遅れ弾性ひずみによるクリープが最大限に評価されている。また、星埜・佐伯の方法では、 ϕ が改良Dischinger法よりもさらに過大に評価されている。一方、Trostの方法では、これら4つの方法のうち、 ϕ の影響が中井・栗田の方法と

表-1.1 各解析法における応力-ひずみ関係式の比較

| 解析方法 | 基礎式 |
|-------------------------------|---|
| Dischingerの方法 | $\Delta \varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} (\phi_f(t) - \phi_f(t_1)) + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} [1 + \rho_D (\phi_f(t) - \phi_f(t_1))]]$ |
| 改良Dischingerの方法 (Rüschの方法) | $\Delta \varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} [1 + \phi_v(t-t_1) + \rho_R \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}]]$ |
| Trostの方法 | $\Delta \varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} [(1 + \rho [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}])]]$ |
| 星壁・佐伯の方法 | $\Delta \varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} [1 + \phi_v(t-t_1) + \frac{1}{2} [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}]]]$ |
| 中井・栗田の方法 | $\Delta \varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} [1 + \rho_{NK} [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}]]]$ |

同様に最も低く評価されている。Dischingerの方法では、これら ϕ_v の影響が全く考慮されていない。さらに、中井・栗田の方法では、全てのクリープひずみとコンクリートの応力緩和とを同時に考慮したリラクセーション係数 ρ_{NK} が新たに定められている。このように、各解析法では、それぞれ異なったリラクセーション係数が定められている。

最後に、クリープ解析の際の断面力の取扱い方について解析方法を分類すると、以下の2つの方法に大別される。すなわち、その1つの方法は、Sattlerがクリープ解析を行うときに使用した方法で、コンクリート床版と鋼桁とのそれぞれ個別の断面に作用する軸方向力と曲げモーメントとに分けて解析する分担断面力法 (Teilschnittgroßverfahren)である。この方法はクリープを厳格に取り扱うほとんどの解法で用いられている。もう1つの方法は、作用軸方向力と曲げモーメントとをすべての合成断面に受け持たせて解析する総断面力法 (Gesamtschnittgroßverfahren)である。上で示した安宅の方法、Haenselの方法、および栗田・赤尾の方法などは、この方法によって解析している。

(2) 乾燥収縮の解析法

合成桁橋の乾燥収縮の解析法としては、Sattlerの方法^{1.3)}を基本として、今日まではほぼ一貫して同じ方法が採用されてきた。すなわち、コンクリートの乾燥収縮の進行は、クリープ係数の進行と相似であるとみなす仮定が用いられてきた。また、乾燥収縮に伴うクリープの係数は、持続応力に対するクリープ係数と同じ値をもつものとして取り扱われてきた。前者の仮定は、1970年版のCEP-FIP指針^{1.20)}の改訂を発端に、乾燥収縮に対する独自の進行曲線が示されるまで、ほとんどの場合に使用され続けてきた。また、後者の仮定は、乾燥収縮による理論上の変化応力が実測値よりも大きくなることから、かなり長い間使用されてきた。しかし、1965年のわが国の鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針^{1.21)}の改訂に伴い、以前よりも大きなクリープ係数値、すなわち

$$\phi_s(\infty) = 2.0 \phi_{s\infty} \quad (1.2)$$

が用いられるようになった。ところが、この係数2.0の根拠は、まだ明確にされていない。

その後、1978年に、渡辺・宮本・小嶋^{1, 22)}は、剛性マトリックスを用いた連続合成桁の乾燥収縮の解析法を提案している。その方法の特徴は、剛性マトリックスを用いることによって、Sattlerの解法のような複雑な弾性方程式を解くことを回避した点にあり、変断面連続合成桁橋も容易に対応することができる。しかし、その研究における乾燥収縮の現象の取扱いは、Sattlerの方法と何ら変わるところがない。

一方、乾燥収縮量に関する規定も、明確でない。そのため、鉄筋やP C鋼材などにより内部拘束を受けるコンクリート部材の正確な乾燥収縮量の予測値が、乾燥収縮によるクリープの解析のために必要となってくる。とくに、プレキャスト床版を用いた合成桁を設計する際は、プレキャスト床版の製作ヤードや現場において仮置き期間があることを考慮すると、通常の現場打ち床版よりも、はるかに小さい乾燥収縮量を見込むことによって、その形式の有利性が十分に発揮されると考えられる。

いずれにしても、合成桁橋の乾燥収縮解析法に関する既往の研究成果は、クリープの解析法に比べ極端に少なく、かつまだ明確にされていない点が多々残されているのが現状である。

(3) リラクセーションの解析法

合成桁橋の経時挙動に及ぼすP C鋼材のリラクセーションに関する研究は、ほとんど見当たらない。一般に、設計の実務におけるこの問題への対応は、リラクセーション率(3~5%)を考慮して単純に導入プレストレス力を高めるか、あるいは導入プレストレス力の減少量を

$$\Delta P = \gamma P \quad (1.3)$$

によって評価しているのが現状である。ここに、

P : P C鋼材への導入プレストレス力 (tf)

γ : P C鋼材のリラクセーション率 (%)

ΔP : P C鋼材への導入プレストレス力の損失量 (tf)

P C鋼材のリラクセーションの影響の解析も、コンクリートのクリープ現象と同様にリラクセーションの現象を定式化して行うことができる。ところが、P C鋼材のリラクセーション率は、3~5%^{1, 10)}程度の小さい値である。そのため、この値を用いて厳密な解析を行っても、略算法による値と大きな差異が生じないことが、容易に理解される。したがって、合成桁橋のリラクセーション解析だけを対象にした論文があまり見当たらないのも、当然である。

しかし、渡辺・林ら^{1, 23)}は、1988年にプレキャスト床版を用いた合成桁のクリープ・リラクセーションの解析法を発表している。この論文における合成桁の経時挙動は、コンクリート床版を3要素で構成された粘弾性体と仮定し、数値ラプラス変換を用いて解析されている。したがって、コンクリート床版のクリープの現象とその中に配置されるP C鋼材のリラクセーション現象を同時にとらえたものであり、2つの現象を分離して、それらの影響を個別に評価することは、試みられていない。

いずれにしても、合成桁橋の経時挙動に与えるP C鋼材のリラクセーションの影響は、先に述べた略算法で十分に対応することが可能である。近い将来、FRPなどの新素材が合成桁橋への緊張材として利用される場合には、厳密なリラクセーションの解析が必要になるかもしれない。ちなみに、アラミド繊維を用いたFRPの30年間にわたるリラクセーション率は、14%程度もあるといわれている^{1, 24)}。

1.2 本論文の目的

前節で紹介した既往の研究における種々な問題点を解明するため、本論文では、すべてのクリープひずみを考慮した合成桁のより忠実なクリープの解析法を示すとともに、合成桁のクリープの解析において回復クリープの影響を調べる。

そのため、まず回復クリープの考え方を明確にして、遅れ弾性クリープ、フロークリープ、ならびに回復クリープの解析上の取扱い方を詳細に示す。つぎに、任意の時刻tにおけるコンクリートの応力-ひずみ関係を誘導し、考察を加える。ここで、遅れ弾性クリープ、フロークリープ、および回復クリープとコンクリートの応力緩和とを考慮した新しいクリープ係数 η を本論文で新たに導入する。こ

の係数 η は、Troostの方法によるリラクセーション係数 ρ と容易に関係付けられることを示す。したがって、本論文の方法によるリラクセーション係数 ρ_{NK} も誘導し、数値計算を通じて、Troostの方法による係数 ρ との関係も明確にする。

つぎに、上記の応力-ひずみ関係式にもとづき、分担断面力法による合成桁のクリープの解を求める。その際、持続荷重としては、プレストレス力を含む持続軸方向力、および持続曲げモーメントを載荷させるものとする。そして、実用計算のためのクリープの近似解も、本論文で示す。

また、本論文では、乾燥収縮解析において不明瞭のまま取り扱われてきた乾燥収縮に伴うクリープ係数の影響を評価する。

さらに、本解析法の妥当性を検討するため、実橋の約2年間にわたるひずみ測定結果と解析値との比較・検討を行う。

なお、各種の鋼・コンクリート合成構造物の経時挙動解析に供するため、鋼材拘束を受けるコンクリート部材のクリープ係数と乾燥収縮とに関するデータベースを構築する。

最後に、合成桁の経時挙動の解析に汎用性をもたせるため、剛性マトリックスを用いた経時挙動解析法を示すと同時に、パラメトリック解析を実施して、フロークリープ係数 $\phi_{f\infty}$ 、断面構成比 α 、初期載荷材齢 t_1 、および収縮に伴うクリープ係数 ϕ_{∞} などのパラメーターが、合成桁の経時挙動に及ぼす影響も調べる。

1. 3 本論文の概要

前節の研究目的で述べた数々の不明確な点を解明するため、まず本論文の第2章では、クリープ、および乾燥収縮の解析方法について考察し、静定系の合成桁について数値計算を行って、解析方法の妥当性を検討する。本章での主要点は、次のとおりである。

- i) クリープ解析においては、回復クリープ現象の解析上の取扱いを明確化するとともに、それを含むコンクリートの応力-ひずみ関係式を誘導する。その結果、コンクリートの応力緩和を考慮したクリープ係数 η を新たに定める。そして、リラクセーション係数 ρ_{NK} も誘導し、TroostやDischingerの方法と本論文の方法との関係を対比する。

- ii) 通常の場合打ちRC床版はもちろん、プレキャスト床版を用いた合成桁のクリープの解析法を示す。
- iii) これらのクリープの解析においては、回復クリープの影響を考慮する。
- iv) 乾燥収縮解析においては、今日まで不明瞭であった乾燥収縮に伴うクリープ係数 ϕ_{∞} の取り扱い方に焦点を当てて検討する。
- v) また、これら乾燥収縮の解析においては、クリープ係数の影響を数値計算によって評価する。

つぎに、第3章では、プレキャスト床版を用いて施工された2径間連続合成箱桁橋を対象に行った室内、および現場における長期間にわたる経時挙動の実測結果を示すと同時に、解析値と測定値とを比較して、本論文の解析方法による実橋の経時挙動解析の妥当性を検討する。

そして、第4章では、鋼材による種々な拘束を受けるコンクリート部材のクリープ係数と乾燥収縮量とに関するデータベースの構築方法、およびデータの処理方法を示す。このデータベースは、将来、新しい鋼・コンクリート合成構造物が開発されたとき、それらの経時挙動を解析・予測する際に不可欠となる基本データを提供しようとするものである。

また、第5章では、第2章で展開したクリープ、および乾燥収縮の解析法を、連続合成桁橋の経時挙動の解析法に拡張する。そのため、高次の不静定構造物の解析が容易に行えるように、マトリックス構造解析法を導入する。そして、パラメトリック解析を行い、連続合成桁橋の経時挙動に及ぼす各種パラメータの影響を評価し、考察を加える。さらに、今後、わが国でも採用される気運にある多径間連続合成桁橋の経時挙動についても検討する。

最後に、第6章では、本論文で得られた結論をまとめる。

参 考 文 献

- 1.1) Dischinger, F.: Untersuchungen über die Knicksicherheit, die elastische Verformung und das Kriechen des Betons bei Bogenbrücken, Der Bauingenieur, Jahrg. 18, Heft 33/34, S. 487, Heft 35/36, S. 538 und Heft 39/40, S. 595, 1937.

- 1.2) Roik, K.: Stahlbau Handbuch, Für Studium und Praxis, Band 1, Stahlbau-Verlags-GmbH, 1982.
- 1.3) Sattler, K.: Theorie der Verbundkonstruktionen, Band 1-2, Verlag Wilhelm & Sohn, 1959.
- 1.4) Fritz, B.: Verbundträger, Berechnungsverfahren für die Brückenbau-praxis, Springer-Verlag, 1961.
- 1.5) Trost, H.: Zur Berechnung von Stahlverbundträgern im Gebrauchszustand auf Grund neuerer Erkenntnisse des viskoelastischen Verhaltens des Betons, Der Stahlbau, Jahrg. 37, Heft 11, S. 321, 1968.
- 1.6) 橋 善雄 : 連続合成桁橋、理工図書、1966年.
- 1.7) 彦坂 熙 : 変断面連続合成桁橋のクリープおよび収縮応力解析、土木学会論文報告集第199号、pp. 21~31, 1972年.
- 1.8) Yasumi, M.: Simplified Treatment according to F. Chickoki of the Effect of Creep and Shrinkage in Composite Girders, Technology Reports of the Osaka University., Vol. 15, pp. 103~122, 1965.
- 1.9) 小野精一 : 単純および連続合成げたの応力計算法に関する2, 3の考察、橋梁と基礎、Vol. 5、No. 6、pp. 7~11, 1971年.
- 1.10) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説、I 共通編、II 鋼橋編、丸善、1990年.
- 1.11) 栗田章光・赤尾親助 : マトリックス法による鋼コンクリート合成構造の乾燥収縮・クリープ解析、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp. 49~56, 1986年.
- 1.12) Haensel, J. : Effect of Creep and Shrinkage in Composite Construction, Technical Reports NO. 75-12, Institut für KIB, Ruhr Universität Bochum, 1975.
- 1.13) Rüschi, H. und Jungwirth, D. : Stahlbeton-Spannbeton, Band 2, Werner Verlag, 1976.
- 1.14) 若狭忠雄・伊沢 閑 : 遅れ弾性ひずみを考慮したコンクリートのクリープにより発生する不静定力の計算法について (I)、橋梁、Vol. 16、NO. 4、pp. 44~51、1980年.

- 1.15) 星埜正明・佐伯彰一 : コンクリート斜張橋のクリープ解析、土木学会論文報告集、第295号、pp. 103~113、1980年.
- 1.16) 渡辺誠一・六車 熙 : コンクリートのクリープひずみに関する一考察 - 遅れ弾性および回復クリープのPC静定部材のクリープ解析に及ぼす影響 -、日本建築学会構造系論文報告集、第402号、pp. 71~78、1989年.
- 1.17) 栗田章光・中井 博 : 回復クリープを考慮した鋼・コンクリート合成桁のクリープ解析、構造工学論文集 Vol. 37A、土木学会、pp. 1407~1418、1991年.
- 1.18) Kurita, A. and Nakai, H. : An Analysis for Long-Term Behavior of Steel-Concrete Composite Girders by Taking Account of Creep Recovery, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 9, NO. 2, pp. 117s~128s, 1992.
- 1.19) 中井 博・栗田章光 : 鋼・コンクリート合成構造のクリープ・乾燥収縮解析における種々の基礎式に関する一考察、構造工学論文集、Vol. 36A、土木学会、pp. 1275~1284、1990年.
- 1.20) プレストレストコンクリート技術協会・日本コンクリート会議 : コンクリート構造物設計施工国際指針 (Recommandations internationales pour le calcul et l'execution des ouvrages en beton, CEB/FIP, 1970)、鹿島出版会、1971年.
- 1.21) 日本道路協会 : 鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針、丸善、1965年.
- 1.22) 渡辺 昇・宮本 裕・小嶋初徳 : 剛性マトリックスによる連続合成桁の乾燥収縮および温度差応力解析、橋梁と基礎、Vol. 12, NO. 6, pp. 13~17, 1978年.
- 1.23) Watanabe, E., Hayashi, K., Takenaka, H. and Nakai, H. : On Creep and Relaxation of Composite Girders with Precast Prestressed Concrete Slabs, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 5, No. 1, JSCE, pp. 71s~79s, 1988.
- 1.24) 水谷 淳・則武邦具・中井裕司・益子博志 : AFRP ロッドを緊張材に適用した実証橋の設計施工、JCIシンポジウム、プレストレスの原理・技術の有効利用論文集、日本コンクリート工学協会、pp. 187~192、1991年.

第 2 章

合成桁のクリープ、および
乾燥収縮解析の基礎

第2章 合成桁のクリープ、および乾燥収縮解析の基礎

2.1 まえがき

前章では、合成桁のクリープ、乾燥収縮、およびリラクセーションの解析法に関する既往の研究成果を紹介し、今後、検討すべき課題を示した。その要点は、クリープ、乾燥収縮、およびリラクセーションをどのように取り扱い、どのように厳格に解析するかという点に集約された。すなわち、持続荷重のもとにおけるコンクリートの特性に関する比較的最近の知見である遅れ弾性ひずみに対するクリープと回復クリープ、および乾燥収縮の取扱い方であり、それらの考慮の有無によって解析方法、ならびに解析結果が違ってくることが代表的な5つの解析方法で示した。

本章では、これらのクリープ、および乾燥収縮をできるだけ厳格に解析するための基本的な取扱い方を示す。

そのため、まずコンクリートのクリープに関する基礎事項について示すとともに、回復クリープを解析にのせるための取扱いを明確化したコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。ついで、リラクセーションを考慮して本論文で新たに導びかれたクリープ係数 η を、Troostによるリラクセーション係数と類似させた解式として表す。さらに、最も基本的な荷重状態のもとにおける合成桁の断面力を、分担断面力法にもとづいて求められたクリープの厳格な解を示す。以上の解析法の妥当性を検討するため、数値解析を行って、回復クリープを無視した現行の道路橋示方書・同解説Ⅱの鋼橋編に示されているクリープの解析方法(Dischingerの解法)と回復クリープを厳格に考慮した本論文の解法による結果とを比較し、考察を加える。そして、上述の厳密解を簡略化し、RC床版を用いた一般的な合成桁に持続して曲げモーメント、あるいは軸方向力が作用するときの実用的なクリープの解析式を示す。また、プレキャスト床版を用いた合成桁のクリープの実用解も示す。

クリープの解析法について、乾燥収縮についても、できるだけ厳格な解析を行うため、まずコンクリートの応力-ひずみ関係に立脚した取扱い法を示す。つぎに、乾燥収縮量の定式化を行ったのち、単純合成桁の乾燥収縮の実用解を示し、

数値解析も行って見て、その妥当性を検討する。ここでは、乾燥収縮に伴うクリープ係数の取扱いについて考察する。

なお、本章で取扱う合成桁は、コンクリート床版と鋼桁との間にズレが生じない完全な合成作用を呈するものと仮定し、また外的に静定な合成桁のクリープ、および乾燥収縮の解析に限定している。連続合成桁のような外的に不静定な構造系のクリープの解析法、ならびに乾燥収縮の解析法については、第5章にそれらの詳細を示す。また、解析に際しては平面保持の仮定とコンクリート床版の有効幅が一定であるとの仮定を用いる。

2.2 合成桁の分担断面力^{2.1)}

図-2.1に示すように、ある時刻 t_1 において持続軸方向力 P_{d,t_1} と持続曲げモーメント M_{d,t_1} とが合成桁の図心 V に作用するとき、コンクリート床版と鋼桁との分担断面力 N_{b,t_1} , M_{b,t_1} , N_{s,t_1} , および M_{s,t_1} は、力のつり合い条件式、および変位の適合条件式より、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} N_{b,t_1} &= \frac{A_b}{nA_v} P_{d,t_1} + \frac{A_s a_s}{I_v} M_{d,t_1}, & M_{b,t_1} &= \frac{I_b}{nI_v} M_{d,t_1} \\ N_{s,t_1} &= \frac{A_s}{A_v} P_{d,t_1} - \frac{A_s a_s}{I_v} M_{d,t_1}, & M_{s,t_1} &= \frac{I_s}{I_v} M_{d,t_1} \end{aligned} \right\} (2.1)_{1-4}$$

ここで、上記の断面力の符号は、図-2.1の矢印の向きを、それぞれ正としている。また、鋼に換算された合成桁の断面積、および断面二次モーメントは、それぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} A_v &= A_b / n + A_s \\ I_v &= (A_b a_b^2 + I_b) / n + A_s a_s^2 + I_s \end{aligned} \right\} (2.2)_{1-2}$$

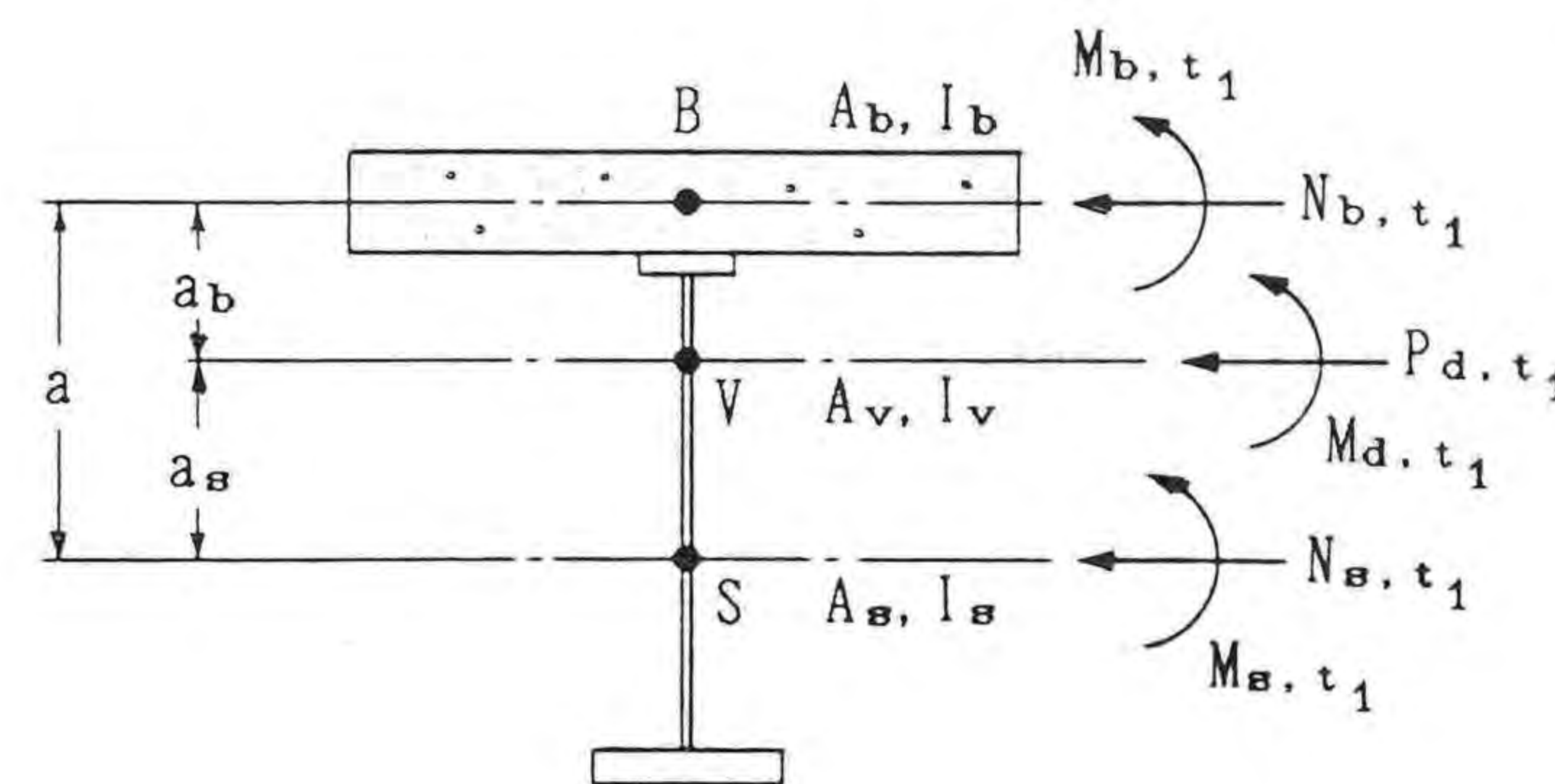


図-2.1 時刻 t_1 における合成桁の分担断面力

2.3 クリープ解析の基礎

(1) コンクリートのクリープ現象とその定式化^{2.2)}

a. 一定応力もとでのコンクリートのひずみ

いま、図-2.2(a)に示すように、コンクリートが材齢 t_1 で一定の持続応力 σ_{t_1} を受け、材齢 t_2 でその応力が除荷される場合を考える。一定の応力度 σ_{t_1} のもとにおけるコンクリートのひずみの経時変化 ε_{t-t_1} は、 $t_1 < t < t_2$ において、次式の3つの成分によって表すことができる。

$$\varepsilon_{t-t_1} = \varepsilon_e + \varepsilon_{k,t-t_1} + \varepsilon_{s,t-t_1} \quad (2.3)$$

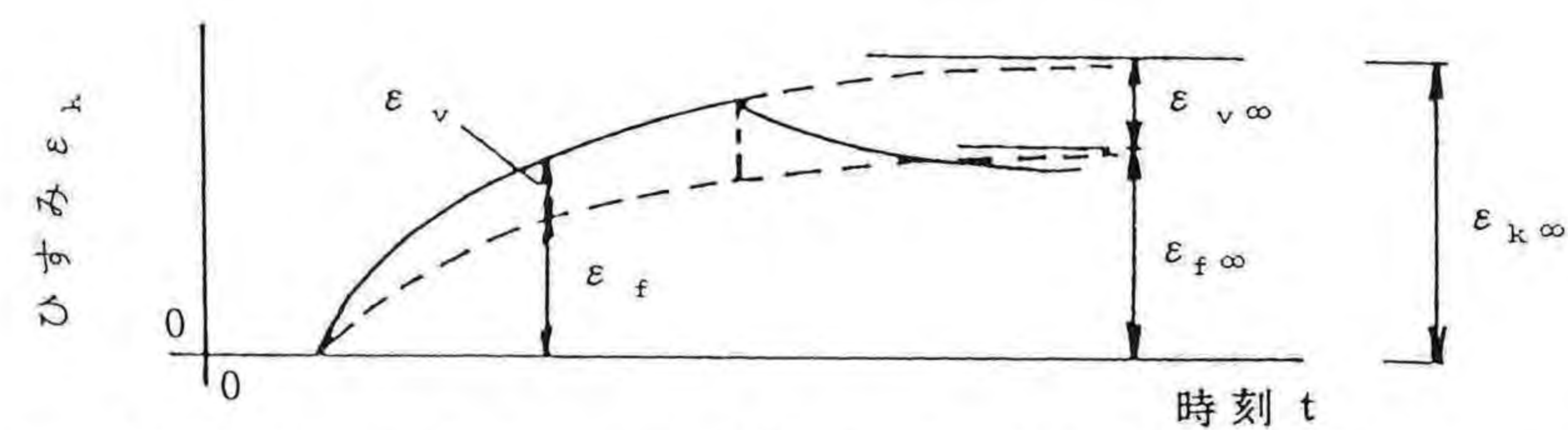
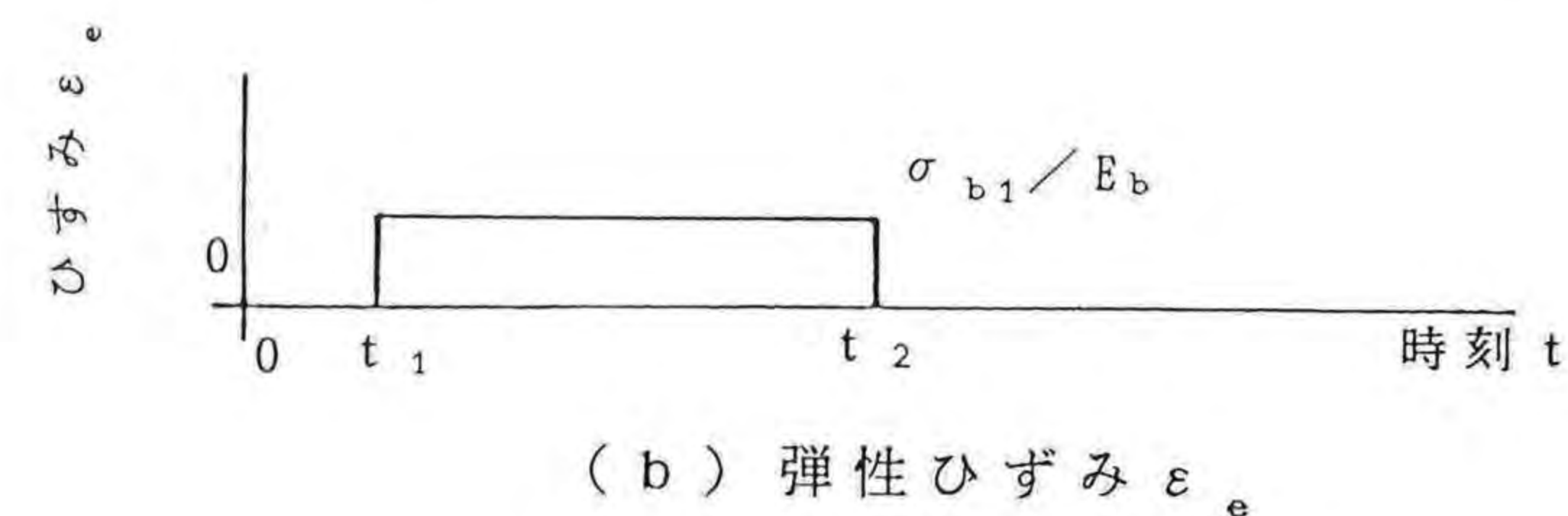
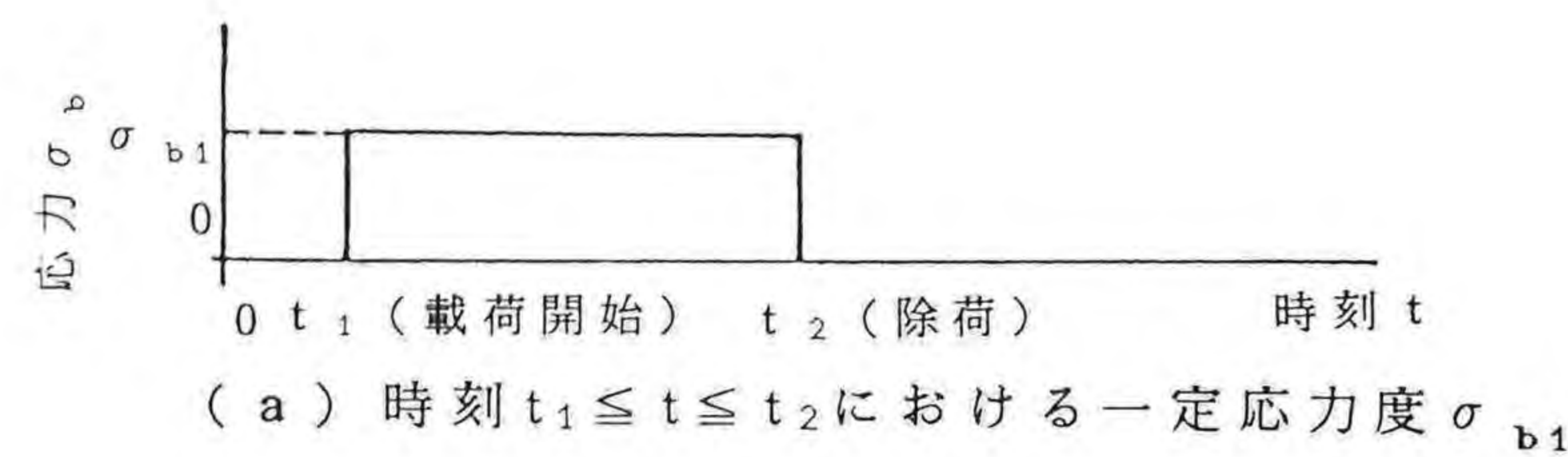
まず、項 ε_e は、時間に無関係な一定の弾性ひずみ

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \quad (2.4)$$

にほかならない。

つぎに、 $\varepsilon_{k,t-t_1}$ は、クリープひずみで、Davis-Glanville^{2.4)}の法則により、弾性ひずみ ε_e にクリープ係数 ϕ_{t-t_1} を乗じて求めることができる。すなわち、

$$\varepsilon_{k, t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \phi_{t-t_1} \quad (2.5)$$



(c) 回復成分 ε_v とフロー成分 ε_f との和としてのクリープひずみ ε_k

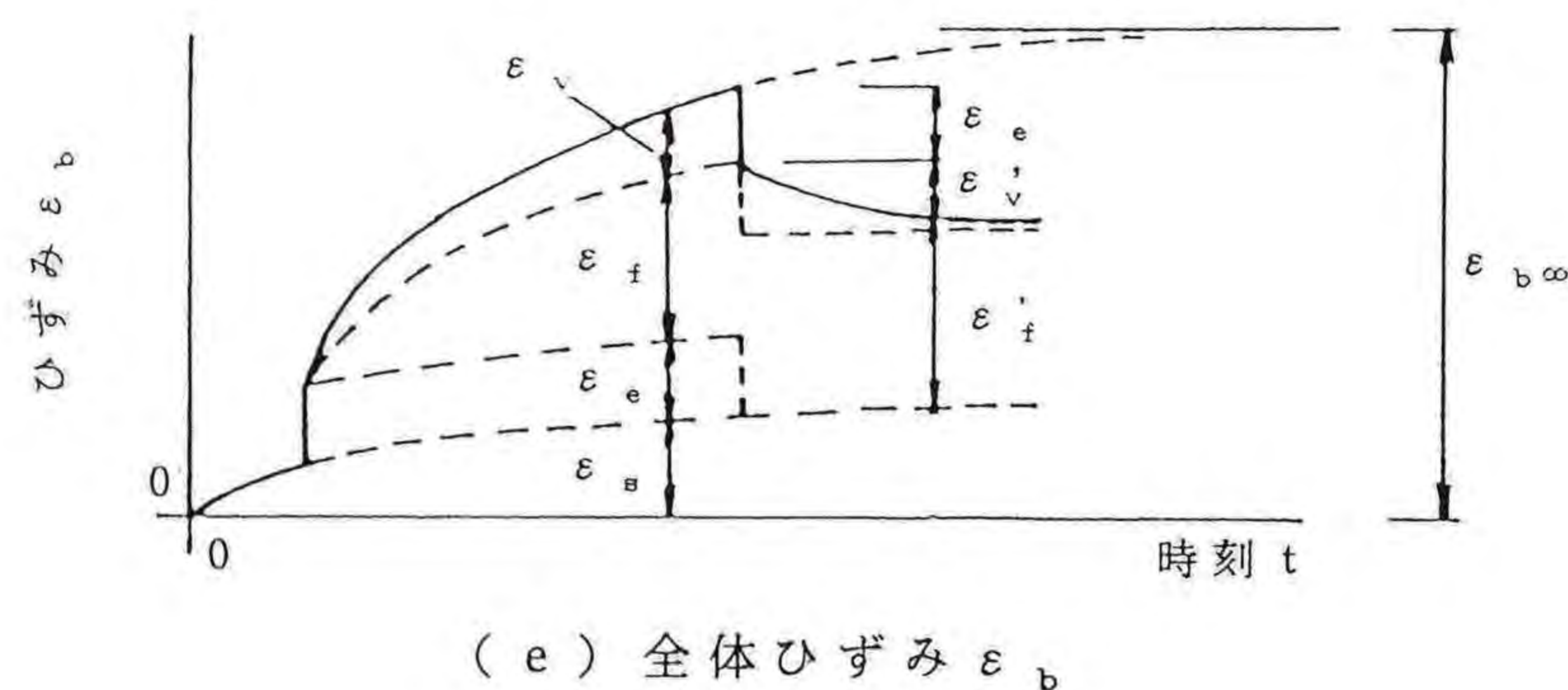
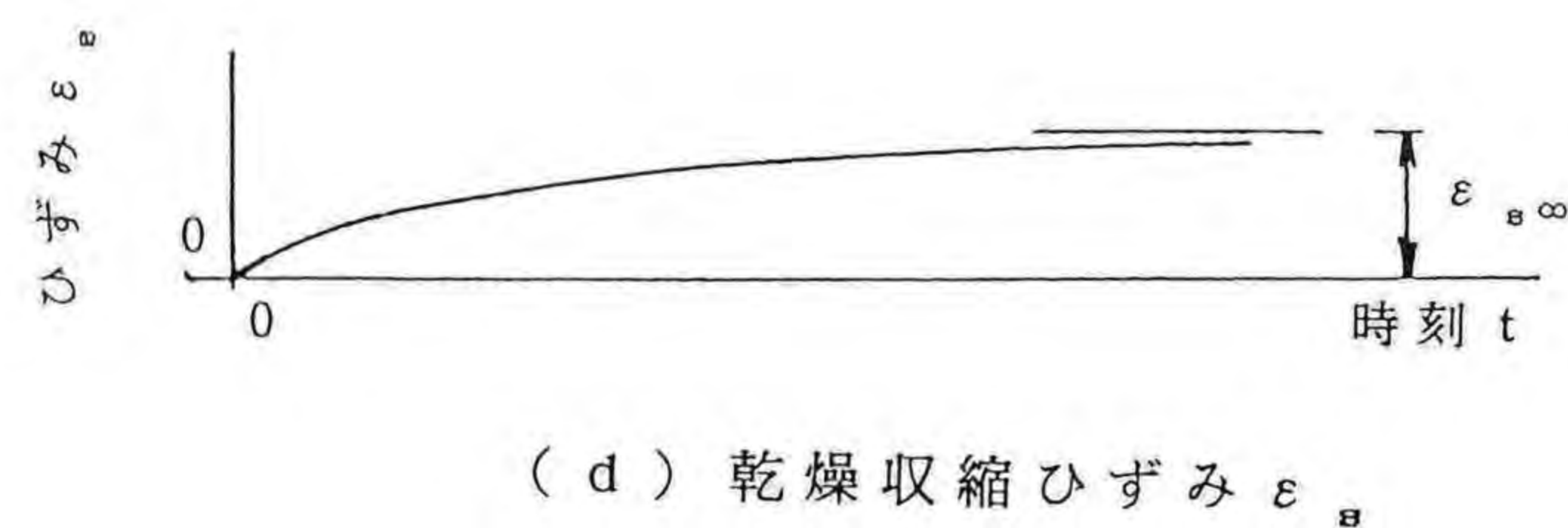


図-2.2 一定応力のもとにおけるコンクリートひずみの経時変化

ここで、クリープひずみ $\varepsilon_{k, t-t_1}$ は、図-2.2(c)に示されるように、2つのひずみ成分の和として表される。そのうちの1つは、応力を解放すると、回復する性質をもつクリープひずみで、遅れ弾性ひずみ ε_v と呼ばれている。また、他の1つは、塑性的性質をもつフローひずみ ε_f である。したがって、式(2.5)中のクリープ係数 ϕ_{t-t_1} は、これらの特性を考慮して、次の2つのクリープ係数の和として設計規準類で規定されている^{2, 3)}。

$$\phi_{t-t_1} = \phi_v \beta_v(t-t_1) + \phi_f \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_1) \} \quad (2.6)$$

ここに、

ϕ_v : 遅れ弾性ひずみに対する基本のクリープ係数(回復クリープ係数)

で、一般に0.4の値が用いられている。

ϕ_f : フローひずみに対する基本のクリープ係数で、構造物の置かれた環境条件に応じて規定されている。

$\beta_v(t-t_1)$: 荷重後の有効経過日数に関する遅れ弾性ひずみの時間関数である。

$\beta_f(t)$: コンクリートの有効材齢 t 、および部材の仮想厚さに関するフローひずみの時間関数で、時刻 t_1 に荷重されたときの時刻 t における値は、遅れ弾性ひずみのように $\beta_v(t-t_1)$ とならず、Whitneyの法則^{2, 4)}にしたがい、式(2.6)に示したように、 $\{ \beta_f(t) - \beta_f(t_1) \}$ となることに留意する必要がある。

t_1, t : それぞれ荷重時およびクリープ係数の値を算出する時点におけるコンクリートの有効材齢を意味する。

さらに、項 $\varepsilon_{s, t-t_1}$ は乾燥収縮ひずみであり、上と同様に一般表示すると、次式で表される。

$$\varepsilon_{s, t-t_1} = \varepsilon_{s\infty} \{ \beta_s(t) - \beta_s(t_1) \} \quad (2.7)$$

ここに、

$\varepsilon_{s\infty}$: 基本収縮ひずみ量で、構造物の環境条件に応じて規定される。

$\beta_s(t)$: コンクリートの有効材齢、および部材の仮想厚さに関する収縮

ひずみの時間関数である。

したがって、図-2.2(a)の载荷条件もとにおけるコンクリートひずみの経時変化は、これらの3つのひずみ成分を重ね合わせて、図-2.2(e)のように図化される。とくに、クリープの解析を行うとき、式(2.6)に含まれる遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数 ϕ_v の取扱いが重要な課題である。

b. 除荷がある場合のクリープ係数の取扱い

図-2.2に示されたように、材齢 t_2 で除荷された場合の時刻 $t > t_2$ におけるクリープ係数 ϕ_{t-t_1} としては、一般に、次式で表したものがクリープ解析にとり入れられている。

$$\phi_{t-t_1} = \phi_v \beta_v(t_2-t_1) + \phi_f \{ \beta_f(t_2) - \beta_f(t_1) \} - \frac{\phi_v \beta(t_2-t_1)}{\phi_{v\infty}} \phi_v \beta(t-t_2) \quad (2.8)$$

すなわち、除荷後の挙動は、遅れ弾性成分に対するクリープ係数を減じることによって、クリープ解析が行われる。ここに、 $\phi_{v\infty}$ は、時刻 $t=\infty$ における $\phi_v \beta(t-t_2)$ の値である。

c. 载荷時の材齢が異なるいくつかの持続応力が载荷される場合のクリープひずみ

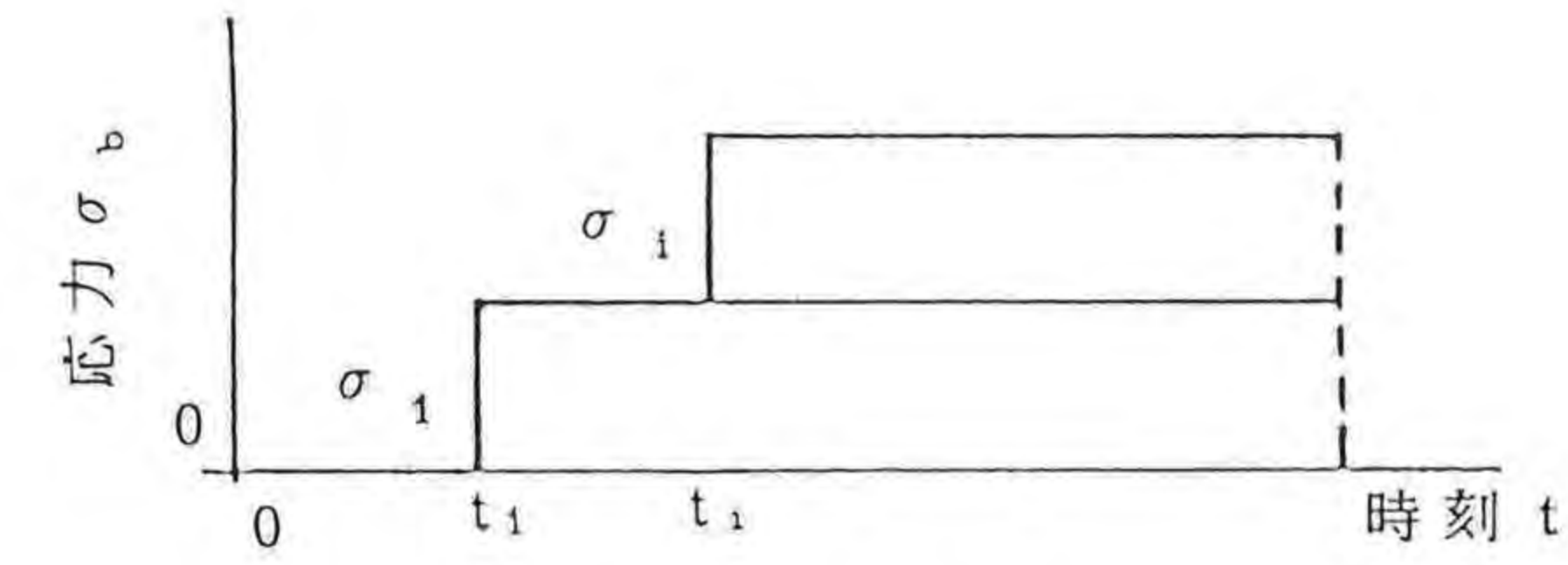
载荷材齢が異なるいくつかの持続応力が载荷される場合、弾性ひずみと同様に、クリープひずみに対しても、一般に重ね合わせの原理が適用されている。その一例を、図-2.3に示す。すなわち、同図では、材齢 t_1 で σ_{t_1} が载荷され、その後、材齢 t_i で次の持続応力 σ_{t_i} が载荷された場合の2つのひずみの経時変化とその重ね合わせた結果とが示されている。

この場合、時刻 $t > t_i$ におけるコンクリートのひずみ ε_{t-t_1} は、収縮ひずみを除けば、

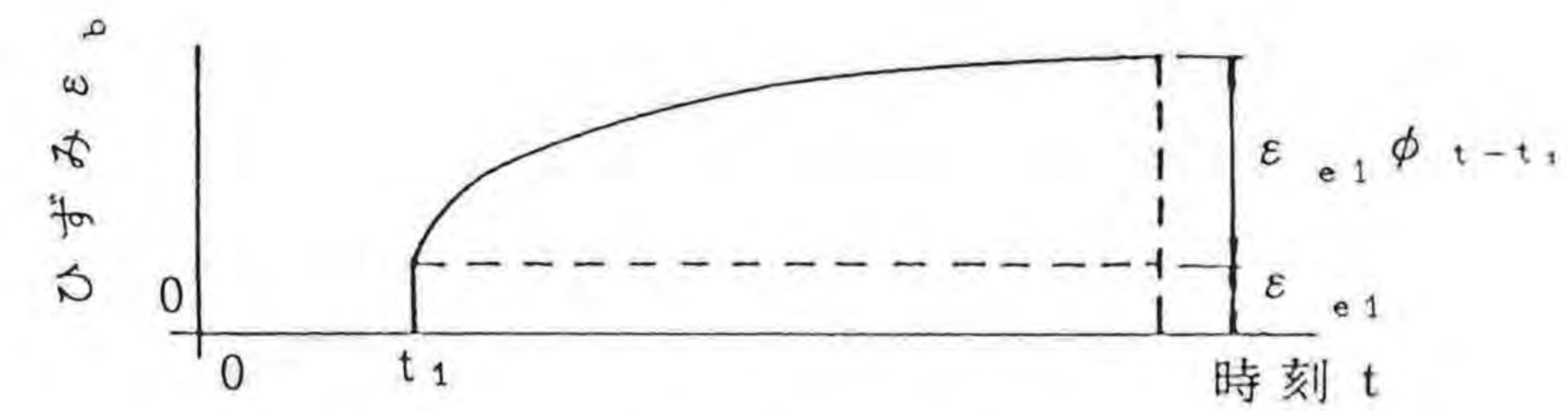
$$\varepsilon_{t-t_1} = \varepsilon_{e1} \{ 1 + \phi_{t-t_1} \} + \varepsilon_{e2} \{ 1 + \phi_{t-t_1} \} \quad (2.9)$$

と表すことができる。ここに、係数 ϕ_{t-t_1} 、および ϕ_{t-t_1} は、それぞれ σ_{t_1} および

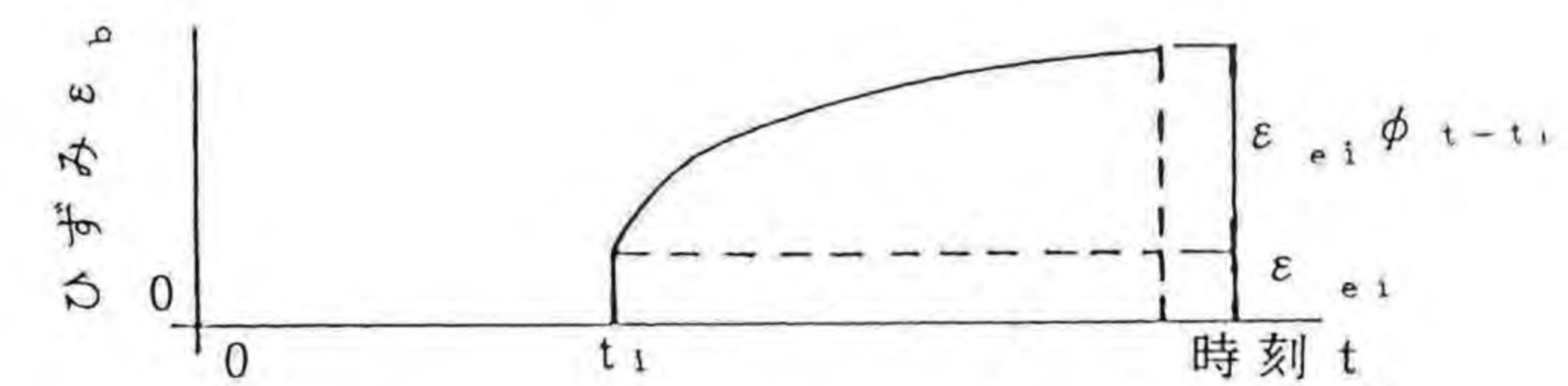
σ_{t_i} に対するクリープ係数を意味している。



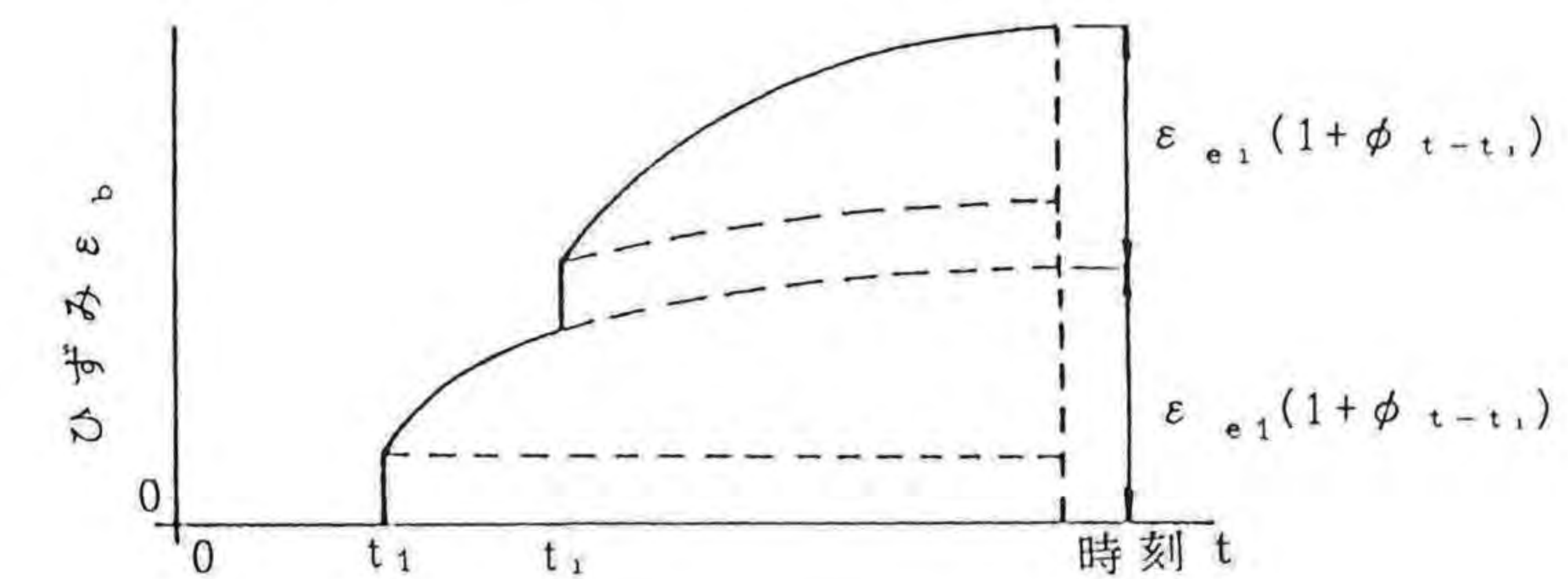
(a) 2種類の持続応力の载荷



(b) σ_1 によるひずみ変化



(c) σ_i によるひずみ変化



(d) ひずみの重ね合わせ

図-2.3 2つの持続応力が作用する場合のひずみの取扱い

(2) 回復クリープを考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係式^{2.1), 2.4)}

回復クリープは、一般に、急激な荷重(応力)の除荷(解放)によってのみ生じるものと考えられてきた。荷重の除荷の実例としては、死荷重の除去、プレストレス力の解放、あるいは支点移動などによる応力解放などが挙げられる。

ある構造物のコンクリート部材内に存在する圧縮応力が、上記の原因で応力解放を受けたとき、その後の応力(ひずみ)、および変位の挙動の解析には、回復クリープの影響を考慮する必要がある。これが、一般的な回復クリープに対する考え方である。

しかし、何らかの方法、あるいは原因で持続応力を受けたコンクリート部材は、そのクリープ現象によってたえず応力緩和が生じ、常に応力が漸減している。したがって、この漸減する応力に対しても、急激な応力解放と同様に、回復クリープの影響を考慮することが不可欠となる。

それゆえ、以下では、漸減する応力に対して回復クリープを考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。

a. クリープ係数の表示方法

時刻 t_1 で荷重を載荷し、時刻 t_2 でその荷重を除荷した場合の時刻 $t > t_2$ におけるクリープ係数 ϕ_{t-t_1} は、式(2.8)の表現を簡略化して、次のように表される。

$$\phi_{t-t_1} = \phi_v(t_2-t_1) + \{\phi_f(t_2) - \phi_f(t_1)\} - \frac{\phi_v(t_2-t_1)}{\phi_{v\infty}} \phi_v(t-t_2) \quad (2.10)$$

ここに、

ϕ_v : 遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数で、時刻 $t = \infty$ における ϕ_v は $\phi_{v\infty}$ と表示する。

ϕ_f : フローひずみに対するクリープ係数で、時刻 $t = \infty$ における ϕ_f は $\phi_{f\infty}$ と表示する。

そして、上式の右辺第3項目のクリープ係数には、 $\phi_v(t_2-t_1)/\phi_{v\infty}$ なる係数が乗じられている。これは、クリープ係数の表示を便宜上、回復クリープの進行が遅れ弾性ひずみに対するクリープ曲線に相似であると仮定しているためである。

また、式(2.10)の右辺の第1項目と第2項目とのクリープ係数は、当初応力 σ

t_1 、およびその変化応力 $\Delta\sigma_{t-t_1}$ に対して適用されるものである。

最後の第3項目のクリープ係数は、除荷後の応力 σ_{t_2} 、およびその変化応力 $\Delta\sigma_{t-t_2}$ に対して適用され、解析上の基本となるコンクリートの回復クリープを考慮した応力-ひずみ関係が導ける。

b. コンクリート応力が漸減する場合の応力-ひずみ関係

図-2.4に示すように、ある時刻 t_1 で応力 σ_{t_1} が作用し、その直後から応力が時間の経過とともに連続的に減少する状態を考える。いま、時刻 t における応力 (σ_{t-t_1}) を、

$$\sigma_{t-t_1} = \sigma_{t_1} - \Delta\sigma_{t-t_1} \quad (2.11)$$

とおく。ここに、 $\Delta\sigma_{t-t_1}$ は、時刻 t_1 から t に至るまでに変化する応力で、 σ_{t_1} とともに圧縮応力を正と仮定する。

すると、図-2.4を参照して、時刻 t におけるコンクリートのひずみ変化 ($\Delta\varepsilon_{t-t_1}$) は、式(2.10)のクリープ係数を用いて、次のように表せる。

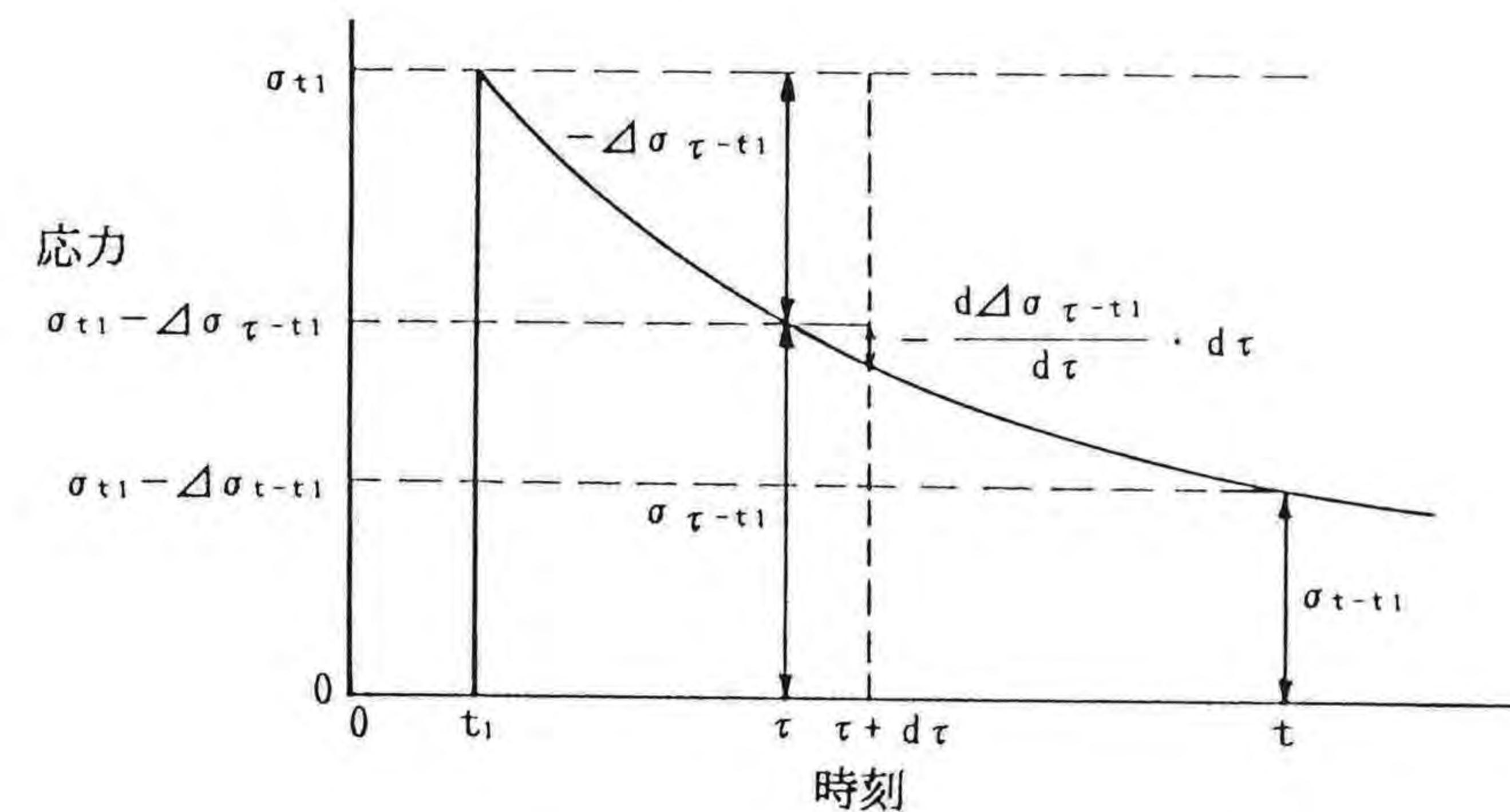


図-2.4 漸減するコンクリート応力

$$\Delta\varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t-t_1}}{E_b} [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta\sigma_{t-t_1}}{E_b} - \frac{1}{E_b}$$

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^t \frac{d\Delta\sigma_{\tau-t_1}}{d\tau} \left\{ \phi_v(\tau-t_1) - \frac{\phi_v(\tau-t_1)}{\phi_{v\infty}} \phi_v(t-t_1) \right\} d\tau \\ & - \frac{1}{E_b} \int_{t_1}^t \frac{d\Delta\sigma_{\tau-t_1}}{d\tau} \left\{ \phi_f(\tau) - \phi_f(t_1) \right\} d\tau \end{aligned}$$

上式の右辺第3項目、および第4項目の積分を実行して整理すると、コンクリート応力が漸減する場合の応力-ひずみ関係の基礎式、すなわち

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{t-t_1} = & \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \left[\phi_v(t-t_1) + \left\{ \phi_f(t) - \phi_f(t_1) \right\} \right] + \frac{\Delta\sigma_{t-t_1}}{E_b} + \frac{1}{E_b} \\ & \cdot \int_{t_1}^t \Delta\sigma_{\tau-t_1} \frac{d\phi_v(\tau-t_1)}{d\tau} d\tau + \frac{1}{E_b} \int_{t_1}^t \Delta\sigma_{\tau-t_1} \frac{d\phi_f(\tau)}{d\tau} d\tau \\ & - \frac{1}{E_b \phi_{v\infty}} \int_{t_1}^t \Delta\sigma_{\tau-t_1} \frac{d\left\{ \phi_v(\tau-t_1) \phi_v(t-\tau) \right\}}{d\tau} d\tau \quad (2.12) \end{aligned}$$

が得られる。上式の右辺第5項目は、回復クリープの影響を表す項である。したがって、回復クリープの影響を無視して解析する場合には、この項を省略することができる。また、Dischingerの方法のように、遅れ弾性に対するクリープも無視して解析する場合には、 ϕ_v のついた項を全て削除することができる。以下のクリープ解析においては、コンクリートの応力-ひずみ関係として上式の全ての項を考慮したものを基礎式として用いる。

(3) コンクリートの応力緩和を考慮したクリープ係数 η の誘導

いま、式(2.12)を書き替えて、

$$\Delta\varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \left[\phi_v(t-t_1) + \left\{ \phi_f(t) - \phi_f(t_1) \right\} \right] + \frac{\Delta\sigma_{t-t_1}}{E_b} (1+\eta) \quad (2.13)$$

とおけば、係数 η は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \eta = & \frac{1}{\Delta\sigma_{t-t_1}} \left[\int_{t_1}^t \Delta\sigma_{\tau-t_1} \frac{d\phi_v(\tau-t_1)}{d\tau} d\tau + \int_{t_1}^t \Delta\sigma_{\tau-t_1} \frac{d\phi_f(\tau)}{d\tau} d\tau \right. \\ & \left. - \frac{1}{\phi_{v\infty}} \int_{t_1}^t \Delta\sigma_{\tau-t_1} \frac{d\left\{ \phi_v(\tau-t_1) \phi_v(t-\tau) \right\}}{d\tau} d\tau \right] \quad (2.14) \end{aligned}$$

さて、この係数 η を求めるため、次の2つの仮定を設ける。すなわち、

- i) クリープの進行は、指数関数で表されるものとする。
- ii) また、応力の変化量は、クリープの進行と相似である。

これらの仮定より、

$$\left. \begin{aligned} \phi_v(t) &= \phi_{v\infty} (1 - e^{-k_1 t}), \quad \phi_f(t) = \phi_{f\infty} (1 - e^{-k_2 t}) \\ \phi(t-t_1) &= \phi_{v\infty} \{1 - e^{-k_1(t-t_1)}\} + \phi_{f\infty} (e^{-k_2 t_1} - e^{-k_2 t}) \\ \Delta\sigma_{\tau-t_1} &= \Delta\sigma_{t-t_1} \frac{\phi(\tau-t_1)}{\phi(t-t_1)} \end{aligned} \right\} (2.15)_{1-4}$$

とおくことができる。ここに、係数 k_1 、および k_2 は、それぞれのクリープ曲線の特性を表す無次元パラメータである。

そこで、上式を式(2.14)の η の式の右辺に代入して積分を実行すれば、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \eta = & \frac{1}{2} \phi(t-t_1) + \frac{\phi_{v\infty}}{\phi(t-t_1)} \left[\frac{1}{2} \phi_{v\infty} \{1 - e^{-2k_1(t-t_1)} - 2k_1(t-t_1) \right. \\ & \cdot e^{-k_1(t-t_1)} \} + \phi_{f\infty} \left\{ \frac{k_1}{k_1 - k_2} (e^{-k_1(t-t_1)} - e^{-k_2 t_1} - e^{-k_2 t}) \right. \\ & \left. \left. + \frac{k_1}{k_1 + k_2} (e^{-k_2 t_1} - e^{-k_1(t-t_1)} - e^{-k_2 t}) \right\} \right] \quad (2.16) \end{aligned}$$

ところで、回復クリープを無視した場合に対応する係数 η' は、式(2.12)で右辺の第5項目を無視し、上と同様な式の展開を行うと、次式が得られる。

$$\eta' = \frac{1}{2} \phi(t-t_1) \quad (2.17)$$

この結果をコンクリートの応力-ひずみ曲線で整理すれば、

$$\varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \{1 + \phi(t-t_1)\} + \frac{\Delta\sigma_{t-t_1}}{E_b} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \phi(t-t_1) \right\} \quad (2.18)$$

と表される。この式は、道路橋示方書・同解説Ⅱの鋼橋編^{2.3)}の解説に示されているDischingerの方法による応力-ひずみ関係にほかならない。

(4) リラクゼーション係数 ρ_{NK} の誘導

本解析法による係数 η は、Troostの方法^{2.5)}におけるリラクゼーション関数 ρ と対応づけられる。すなわち、Troostの方法では、式(2.12)を、

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{t-t_1} &= \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} \\ &\quad \cdot [1 + \rho [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}]] \\ &= \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \phi(t-t_1) + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} \{1 + \rho \phi(t-t_1)\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

とおいている。この解析法においては、式(2.13)を書き替えば、

$$\Delta \varepsilon_{t-t_1} = \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \phi(t-t_1) + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} \{1 + \eta\} \quad (2.20)$$

と表される。そして、上式と式(2.19)とを比較すれば、係数 η は、応力緩和を考慮したクリープ係数を意味していることがわかる。

したがって、本論文の解析法においても、コンクリートの応力-ひずみ関係をTroostによる提案式(2.19)の形で表示すれば、本解析法におけるリラクゼーション係数 ρ_{NK} が、次式のように与えられる。

$$\eta = \rho_{NK} \phi(t-t_1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \rho_{NK} &= \frac{1}{2} \frac{\phi_{v\infty}}{\{\phi(t-t_1)\}^2} \left[\frac{1}{2} \phi_{v\infty} \{1 - e^{-2k_1(t-t_1)} - 2k_1(t-t_1)\} \right. \\ &\quad \cdot e^{-k_1(t-t_1)} + \phi_{f\infty} \left\{ \frac{k_1}{k_1 - k_2} (e^{-k_1(t-t_1) - k_2 t_1} - e^{-k_2 t}) \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{k_1}{k_1 + k_2} (e^{-k_2 t_1} - e^{-k_1(t-t_1) - k_2 t}) \right\} \right] \end{aligned} \quad (2.21)$$

それゆえ、時刻 $t = \infty$ におけるリラクゼーション係数 $\rho_{NK, \infty}$ は、

$$\rho_{NK, \infty} = \frac{1}{2} + \frac{\phi_{v\infty}}{\phi(\infty)^2} \left(\frac{1}{2} \phi_{v\infty} + \phi_{f\infty} \frac{k_1}{k_1 + k_2} e^{-k_2 t_1} \right) \quad (2.22)$$

と書ける。

一例として、筆者らのクリープに関する実測データ^{2.6)}から求められたクリープ係数を用い、リラクゼーション係数 ρ_{NK} の数値解析結果を示したものが、図-2.5である。ここで、計算条件は、表-2.1のとおりとしている。

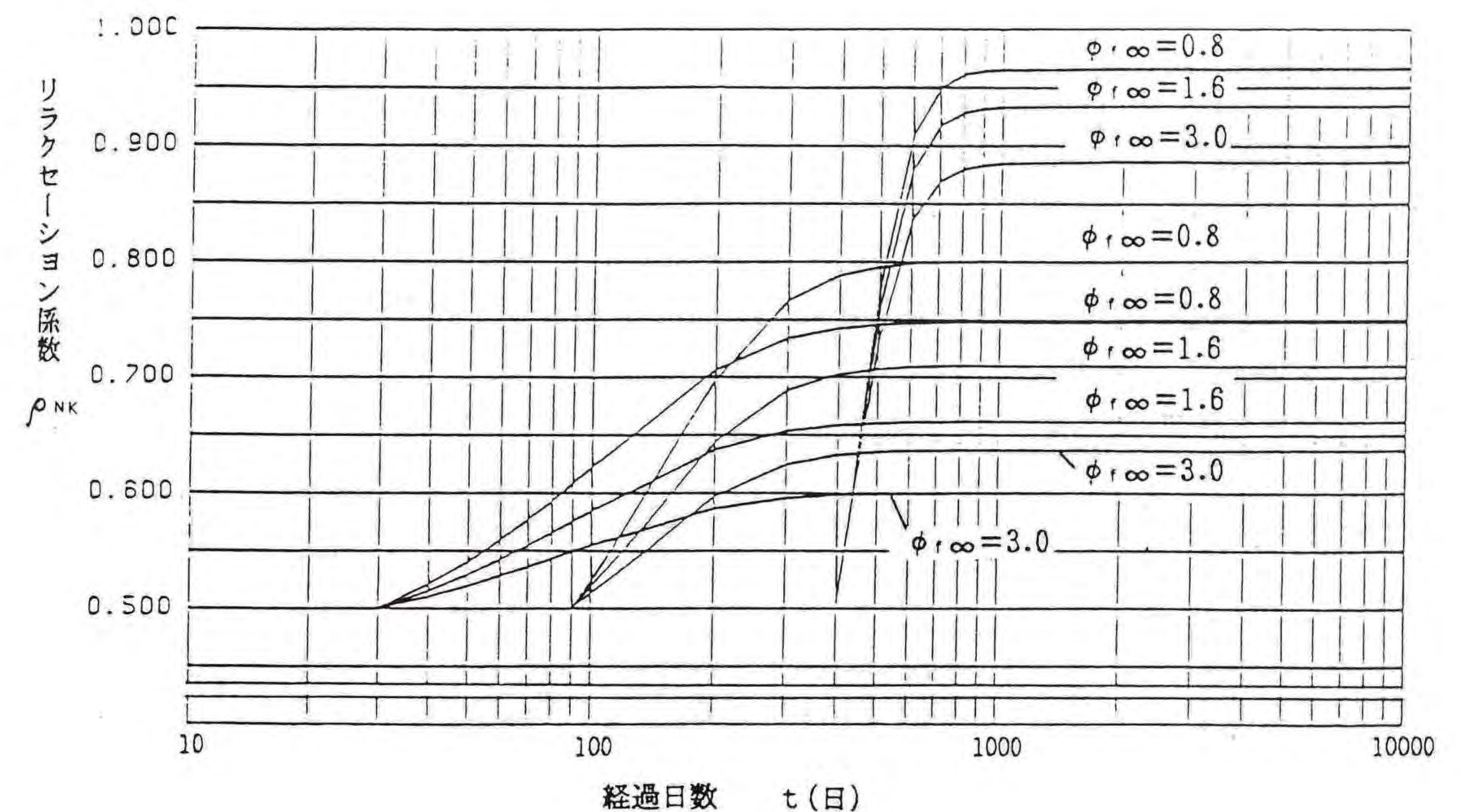


図-2.5 リラクゼーション係数 ρ_{NK} の数値解析結果

表-2.1 計算条件

| パラメータ、および初期荷材齢 | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| $\phi_{v\infty} = 0.4$ (一定) | $\phi_{f\infty} = 0.8 \sim 3.0$ |
| $k_1 = 0.02000$ | $k_2 = 0.00670$ |
| $t_1 = 30$ 日, 90 日, および 400 日 | |

上図から明らかなように、初期荷重の日数が遅くなるのに伴って、 ρ_{NK} の値は、大きくなる。また、初期荷重の日数が同じであっても、クリープ係数が小さくなるのに伴って、 ρ_{NK} の値は大きくなる。とくに、初期荷重材齢 $t_1=30$ 日、また $\phi_{f\infty}=1.6$ 、および $\phi_{v\infty}=0.4$ という一般的な条件の場合、 ρ_{NK} の値は、最終的な設計用値として、0.65程度の値をとることがわかる。

(5) 持続曲げモーメントが作用する場合のクリープの解

a. 力のつり合い式

持続曲げモーメント荷重時の時刻 $t=t_1$ における力のつり合い式は、図-2.6を参照すれば、次式で表される。

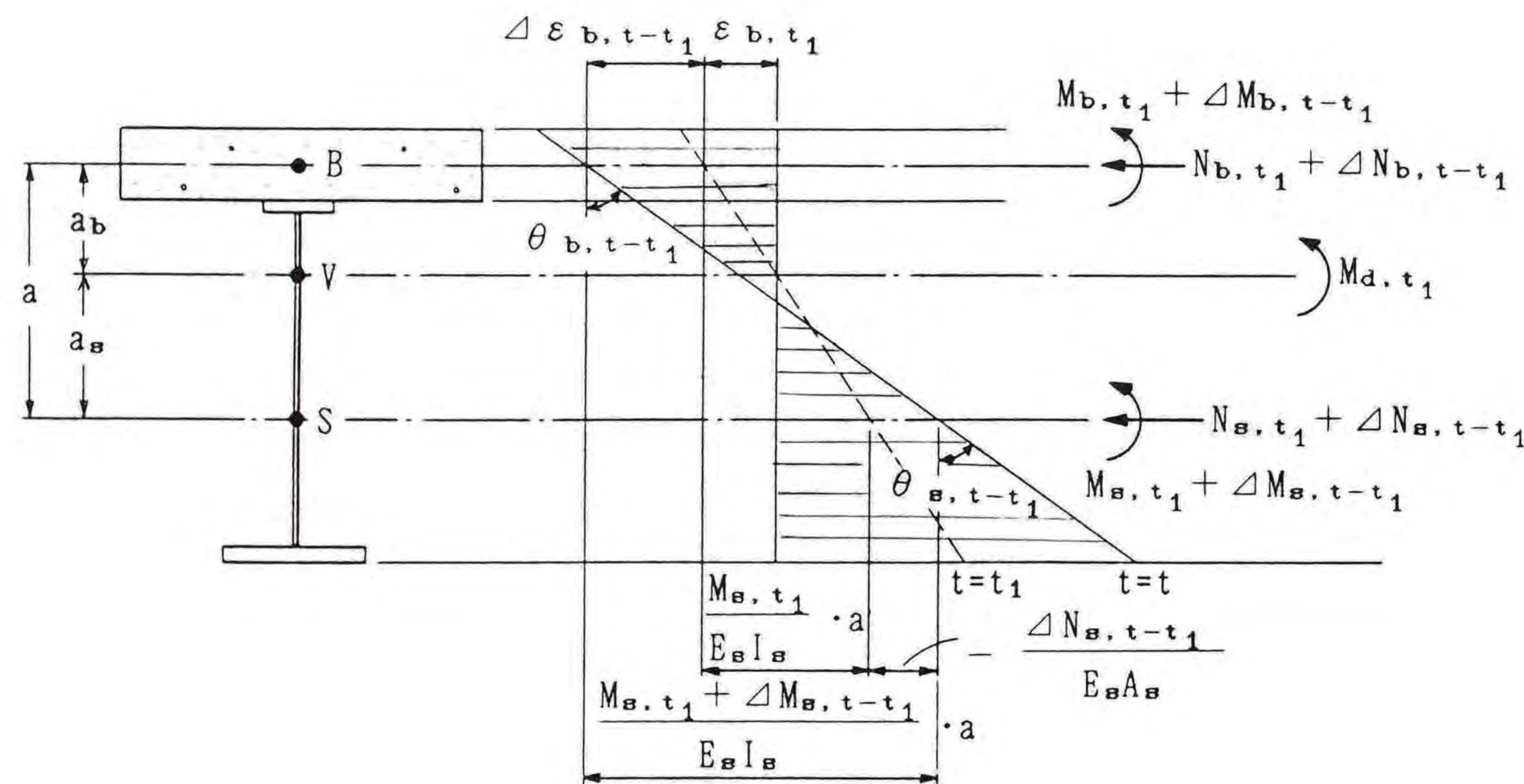


図-2.6 持続曲げモーメント M_{d,t_1} が作用する場合のひずみ分布とその変動

$$\left. \begin{aligned} N_{b,t_1} + N_{s,t_1} &= 0 \\ M_{b,t_1} + N_{b,t_1} a + M_{s,t_1} &= M_{d,t_1} \end{aligned} \right\} (2.23)_{1-2}$$

同様に、時刻 $t=t$ における力のつり合い式は、

$$\left. \Delta N_{b,t-t_1} + \Delta N_{s,t-t_1} = 0 \right\}$$

$$\Delta M_{b,t-t_1} + \Delta N_{b,t-t_1} a + \Delta M_{s,t-t_1} = 0 \quad (2.24)_{1-2}$$

となる。ここで、新しい記号は、次のとおりとっている。

$\Delta N_{b,t-t_1}$ 、 $\Delta M_{b,t-t_1}$: それぞれ時刻 t_1 から t に至るまでに変化するコンクリート床版の分担軸方向力、および分担曲げモーメント
 $\Delta N_{s,t-t_1}$ 、 $\Delta M_{s,t-t_1}$: それぞれ時刻 t_1 から t に至るまでに変化する鋼桁の分担軸方向力、および分担曲げモーメント

b. 時刻 t_1 から t に至るまでのひずみ、および曲率の変化

コンクリート床版の図心 B における軸力の変化量は、 $\Delta N_{b,t-t_1}$ である。このことから、式(2.12)における $\Delta \sigma_{t-t_1}$ は、 $\Delta N_{b,t-t_1} / A_b$ で、また荷重当初の弾性ひずみ σ_{t_1} / E_b は、 $M_{d,t_1} a_b / (E_b I_v)$ と表せる。

したがって、コンクリート床版の図心 B におけるひずみ変化量 $\Delta \varepsilon_{b,t-t_1}$ は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{b,t-t_1} &= \frac{M_{d,t_1}}{E_b I_v} a_b [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta N_{b,t-t_1}}{E_b A_b} \\ &+ \frac{1}{E_b} \int_{t_1}^t \frac{\Delta N_{b,\tau-t_1}}{A_b} \frac{d\phi_v(\tau-t_1)}{d\tau} d\tau + \frac{1}{E_b} \int_{t_1}^t \frac{\Delta N_{b,\tau-t_1}}{A_b} \\ &\cdot \frac{d\phi_f(\tau)}{d\tau} d\tau - \frac{1}{E_b \phi_{v\infty}} \int_{t_1}^t \frac{\Delta N_{b,\tau-t_1}}{A_b} \\ &\cdot \frac{d\{\phi_v(\tau-t_1)\phi_v(t-\tau)\}}{d\tau} d\tau \end{aligned} \quad (2.25)$$

一方、鋼桁のひずみ変化 $\Delta \varepsilon_{s,t-t_1}$ は、図-2.6に示すコンクリート床版の図心 B で考えると、次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_{s,t-t_1} &= \frac{M_{s,t_1} + \Delta M_{s,t-t_1}}{E_s I_s} a - \left\{ \frac{M_{s,t_1}}{E_s I_s} a \frac{\Delta N_{s,t-t_1}}{E_s A_s} \right\} \\ &= \frac{\Delta M_{s,t-t_1}}{E_s I_s} a - \frac{\Delta N_{s,t-t_1}}{E_s A_s} \end{aligned} \quad (2.26)$$

同様に、コンクリート床版、および鋼桁の曲率変化は、それぞれ次のように求められる。

$$\Delta \theta_{b, t-t_1} = \frac{M_{b, t_1}}{E_b I_b} [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] + \frac{\Delta M_{b, t-t_1}}{E_b I_b} + \int_{t_1}^t \frac{\Delta M_{b, \tau-t_1}}{E_b I_b} \frac{d\phi_v(\tau-t_1)}{d\tau} d\tau + \int_{t_1}^t \frac{\Delta M_{b, \tau-t_1}}{E_b I_b} \frac{d\phi_f(\tau)}{d\tau} d\tau - \frac{1}{\phi_{v\infty}} \int_{t_1}^t \frac{\Delta M_{b, \tau-t_1}}{E_b I_b} \frac{d\{\phi_v(\tau-t_1) + \phi_v(t-\tau)\}}{d\tau} d\tau \quad (2.27)$$

$$\Delta \theta_{s, t-t_1} = \frac{\Delta M_{s, t-t_1}}{E_s I_s} \quad (2.28)$$

c. ひずみ、および曲率の適合条件式

時刻tにおいて、次の条件式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_{b, t-t_1} &= \Delta \varepsilon_{s, t-t_1} \\ \Delta \theta_{b, t-t_1} &= \Delta \theta_{s, t-t_1} \end{aligned} \right\} (2.29)_{1-2}$$

d. クリープの解

式(2.25)~(2.28)を、式(2.29)に代入する。すると、その式と式(2.24)とによって未知量 $\Delta N_{b, t-t_1}$ 、 $\Delta M_{b, t-t_1}$ 、 $\Delta N_{s, t-t_1}$ 、および $\Delta M_{s, t-t_1}$ に関する連立方程式が得られる。その連立方程式を解けば、分担断面力の変化量、すなわち

$$\Delta N_{b, t-t_1} = -\Delta N_{s, t-t_1} = -\frac{D_2(1-\eta_M+D_M)-D_1D_v}{(1-\eta_N+D_N+D_1a)(1-\eta_M+D_M)-D_1D_{Ma}} M_{a, t_1} \phi(t-t_1) \quad (2.30)$$

$$\Delta M_{b, t-t_1} = -\frac{D_v(1-\eta_N+D_N+D_1a)-D_2D_{Ma}}{(1-\eta_N+D_N+D_1a)(1-\eta_M+D_M)-D_1D_{Ma}} M_{a, t_1} \phi(t-t_1) \quad (2.31)$$

$$\Delta M_{s, t-t_1} = -(\Delta N_{b, t-t_1} a + \Delta M_{b, t-t_1}) \quad (2.32)$$

が得られる。

ここに、剛度比は、

$$D_1 = \frac{E_b A_b}{E_s I_s} a, \quad D_2 = \frac{E_b A_b}{E_s I_v} a_b, \quad D_N = \frac{E_b A_b}{E_s A_s}, \quad D_M = \frac{E_b I_b}{E_s I_s}, \quad D_v = \frac{E_b I_b}{E_s I_v} \quad (2.33)_{1-5}$$

にとり、係数 η_N 、および η_M は、

$$\eta_N = \frac{1}{\Delta N_{b, t-t_1}} \left[-\int_{t_1}^t \Delta N_{b, \tau-t_1} \frac{d\phi_v(\tau-t_1)}{d\tau} d\tau - \int_{t_1}^t \Delta N_{b, \tau-t_1} \frac{d\phi_f(\tau)}{d\tau} d\tau + \frac{1}{\phi_{v\infty}} \int_{t_1}^t \Delta N_{b, \tau-t_1} \frac{d\{\phi_v(\tau-t_1)\phi_v(t-\tau)\}}{d\tau} d\tau \right]$$

$$\eta_M = \frac{1}{\Delta M_{b, t-t_1}} \left[-\int_{t_1}^t \Delta M_{b, \tau-t_1} \frac{d\phi_v(\tau-t_1)}{d\tau} d\tau - \int_{t_1}^t \Delta M_{b, \tau-t_1} \frac{d\phi_f(\tau)}{d\tau} d\tau + \frac{1}{\phi_{v\infty}} \int_{t_1}^t \Delta M_{b, \tau-t_1} \frac{d\{\phi_v(\tau-t_1)\phi_v(t-\tau)\}}{d\tau} d\tau \right] \quad (2.34)_{1-2}$$

のようにとる。そして、 $\phi(t-t_1)$ は、次のようにおく。

$$\phi(t-t_1) = [\phi_v(t-t_1) + \{\phi_f(t) - \phi_f(t_1)\}] \quad (2.35)$$

また、クリープの進行に関する式(2.15)₁₋₃の仮定と、分担断面力の変化量に関する次の仮定、すなわち

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{b, \tau-t_1} &= \Delta N_{b, t-t_1} \frac{\phi(\tau-t_1)}{\phi_v(t-t_1)} \\ \Delta M_{b, \tau-t_1} &= \Delta M_{b, t-t_1} \frac{\phi(\tau-t_1)}{\phi_v(t-t_1)} \end{aligned} \right\} (2.36)_{1-2}$$

を用いると、係数 η_N 、および η_M は、

$$\eta_N = \eta_M = -\eta \quad (2.37)$$

となる。ここに、係数 η は、すでに式(2.16)で与えられたものである。

(6) 持続軸方向力が作用する場合のクリープの解

図-2.7に示すように、時刻 t_1 に持続軸方向力 P_{d,t_1} が合成桁の図心 V に作用した場合の時刻 t_1 から t に至るまでの分担断面力の変化量 $\Delta N_{b,t-t_1}$ 、 $\Delta M_{b,t-t_1}$ 、および $\Delta M_{s,t-t_1}$ は、回復クリープを考慮した曲げの場合と同様な式の展開を行うことによって、次式のように与えられる。

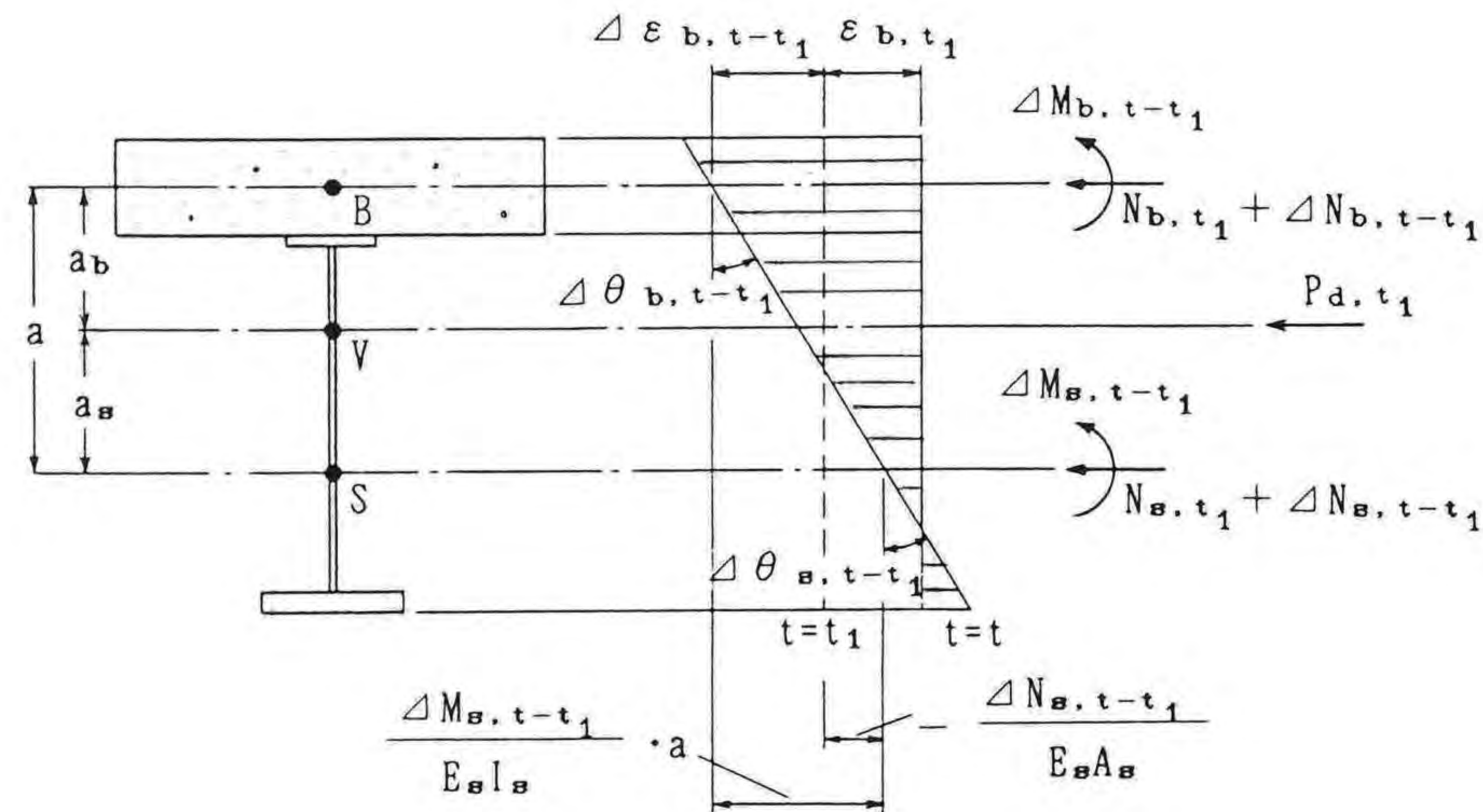


図-2.7 持続軸方向力 P_{d,t_1} が作用する場合のひずみ分布とその変動

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{b,t-t_1} &= - \frac{(1+\eta+D_M)D_N'}{(1+\eta)(1+\eta+D_N+D_M+D_1a)+D_N D_M} P_{d,t_1} \phi(t-t_1) \\ &= -\Delta N_{s,t-t_1} \\ \Delta M_{b,t-t_1} &= - \frac{D_M D_N' a}{(1+\eta)(1+\eta+D_N+D_M+D_1a)+D_N D_M} P_{d,t_1} \phi(t-t_1) \\ \Delta M_{s,t-t_1} &= - (\Delta N_{b,t-t_1} a + \Delta M_{b,t-t_1}) \end{aligned} \right\} (2.38)_{1-3}$$

ここに、 $D_N' = E_b A_b / (E_s A_s)$ で、 D_1 、 D_N 、および D_M は、式(2.33)で与えられるものである。そして、係数 η も、式(2.16)と同じものである。

(7) プレキャスト床版を用いた合成桁のクリープの解^{2.7)}

プレキャスト床版を用いて、それにプレストレスを導入する合成桁^{2.8)・2.9)}においては、まず最初に、プレキャストコンクリート床版にのみプレストレスが導入され、その後、鋼桁と合成されて合成断面が形成される。したがって、本工法におけるコンクリート床版のクリープに伴う各分担断面力の変化量は、図-2.8を参照し、力のつり合い条件式、および変位の適合条件式より、式(2.43)₁₋₅で求めることができる。

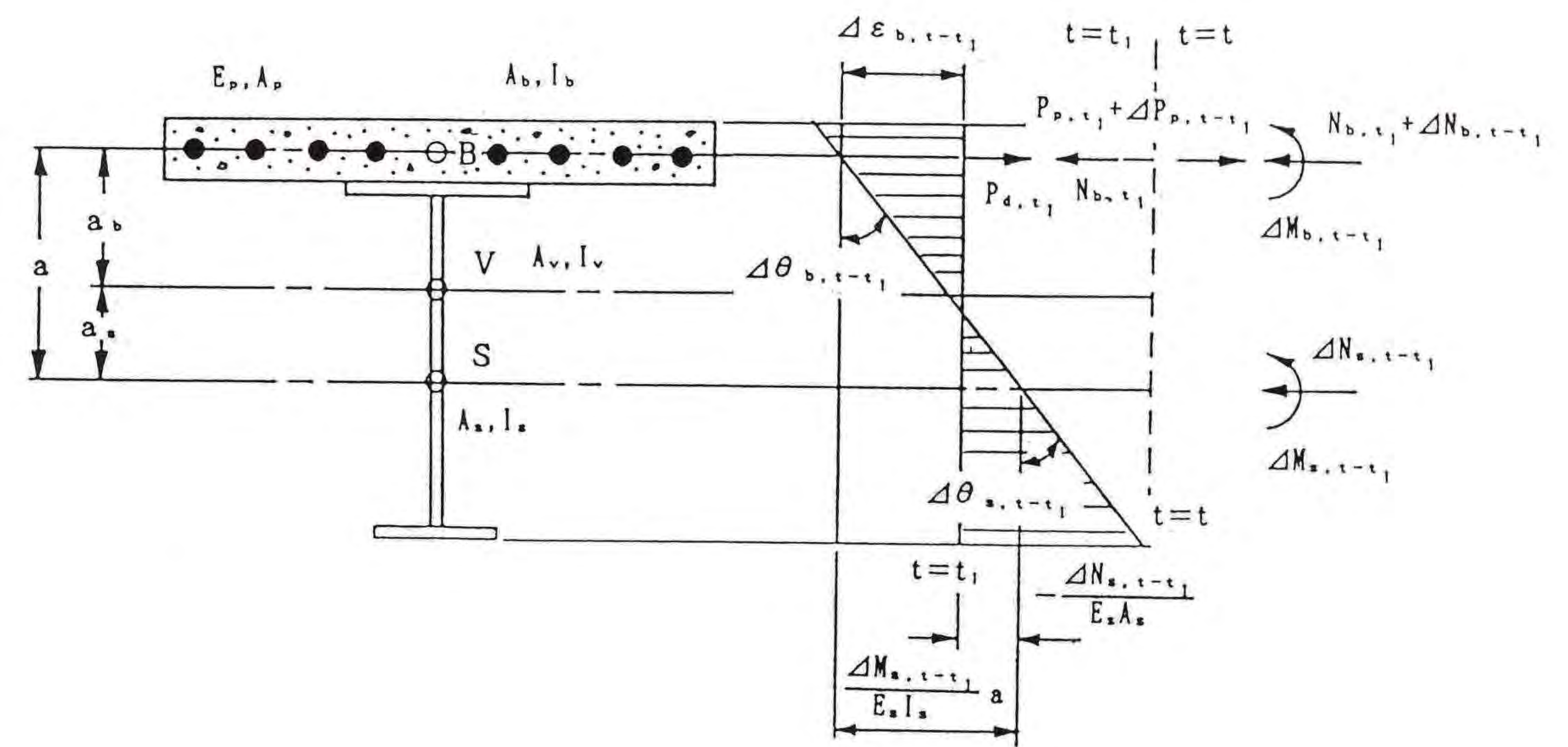


図-2.8 プレキャスト床版を用いて、それにプレストレスを導入する合成桁のひずみ分布(クリープ)

a. 力のつり合い式

i) $t=t_1$ のとき

$$N_{b,t_1} = P_{p,t_1} \quad (2.39)$$

ii) $t=t$ のとき

$$\Delta N_{b,t-t_1} + \Delta N_{s,t-t_1} = \Delta P_{p,t-t_1}$$

$$\left. \right\} (2.40)_{1-2}$$

$$\Delta M_{b, t-t_1} + \Delta M_{s, t-t_1} - \Delta N_{s, t-t_1} a = 0$$

b. 変位の適合条件式

i) ひずみ (コンクリート床版の図心Bにおいて)

$$\Delta \varepsilon_{b, t-t_1} = \Delta \varepsilon_{p, t-t_1} = \Delta \varepsilon_{s, t-t_1} \quad (2.41)$$

ii) 曲率

$$\Delta \theta_{b, t-t_1} = \Delta \theta_{s, t-t_1} \quad (2.42)$$

c. 各分担断面力の変化量

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{p, t-t_1} &= \delta_1 / \delta_0 \\ \Delta N_{b, t-t_1} &= \delta_2 / \delta_0 \\ \Delta M_{b, t-t_1} &= \delta_3 / \delta_0 \\ \Delta N_{s, t-t_1} &= \Delta P_{p, t-t_1} - \Delta N_{b, t-t_1} \\ \Delta M_{s, t-t_1} &= \Delta P_{s, t-t_1} a - \Delta N_{b, t-t_1} \end{aligned} \right\} (2.43)_{1-5}$$

ここで、各記号は、次のようにとっている。

N_{b, t_1} : 時刻 t_1 におけるコンクリート床版の分担軸方向力

P_{p, t_1} : 時刻 t_1 においてPC鋼材に作用する力

$\Delta \varepsilon_{b, t-t_1}$ 、 $\Delta \theta_{b, t-t_1}$: それぞれ時刻 t_1 から t に至るまでのコンクリート床版のひずみ、および曲率変化

$\Delta \varepsilon_{s, t-t_1}$ 、 $\Delta \theta_{s, t-t_1}$: それぞれ時刻 t_1 から t に至るまでの鋼桁のひずみ、および曲率変化

$\Delta \varepsilon_{p, t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでのPC鋼材のひずみ変化

$\Delta P_{p, t-t_1}$: 時刻 t_1 から t に至るまでのPC鋼材の変化張力

$\Delta N_{b, t-t_1}$ 、 $\Delta M_{b, t-t_1}$: それぞれ時刻 t_1 から t に至るまでのコンクリート床版の分担軸方向力、および分担曲げモーメントの変化量

$\Delta N_{s, t-t_1}$ 、 $\Delta M_{s, t-t_1}$: それぞれ時刻 t_1 から t に至るまでの鋼桁の分担軸方向力、および分担曲げモーメントの変化量

また、

$$\left. \begin{aligned} \delta_0 &= (1+\eta + D_M) \{ D_P(1+\eta + D_N + D_{1a}) + (1+\eta)(D_N + D_{1a}) \} - D_N D_{1a} \\ &\quad \cdot (1+\eta + D_P) \\ \delta_1 &= - \{ (1+\eta + D_M)(D_N + D_{1a}) + D_M D_{1a} \} P_{p, t_1} \phi(t-t_1) \\ \delta_2 &= - \{ (1+\eta + D_M)(D_P + D_N + D_{1a}) - D_M D_{1a} \} P_{p, t_1} \phi(t-t_1) \\ \delta_3 &= D_P D_M a P_{p, t_1} \phi(t-t_1) \end{aligned} \right\} (2.44)_{1-4}$$

である。ここに、剛度比 D_1 、 D_M 、 D_N 、 D_V 、および係数 η は、それぞれ式(2.33)、および式(2.16)で示されたものである。

(8) . 数値計算による検討とその考察

以上に述べた本解法の妥当性を検討するため、Fritzら^{2.5), 2.10)}が用いた図-2.9に示す合成桁断面を対象に数値解析を行った。一例として、この断面に時刻 $t_1=0$ で、曲げモーメント $M_{a, 0}=1,105 \text{ tf}\cdot\text{m}$ が作用する場合の時刻 $t=\infty$ における分担断面力の変化量を計算する。

その際、クリープ係数、および断面定数等は、表-2.2のとおりである。

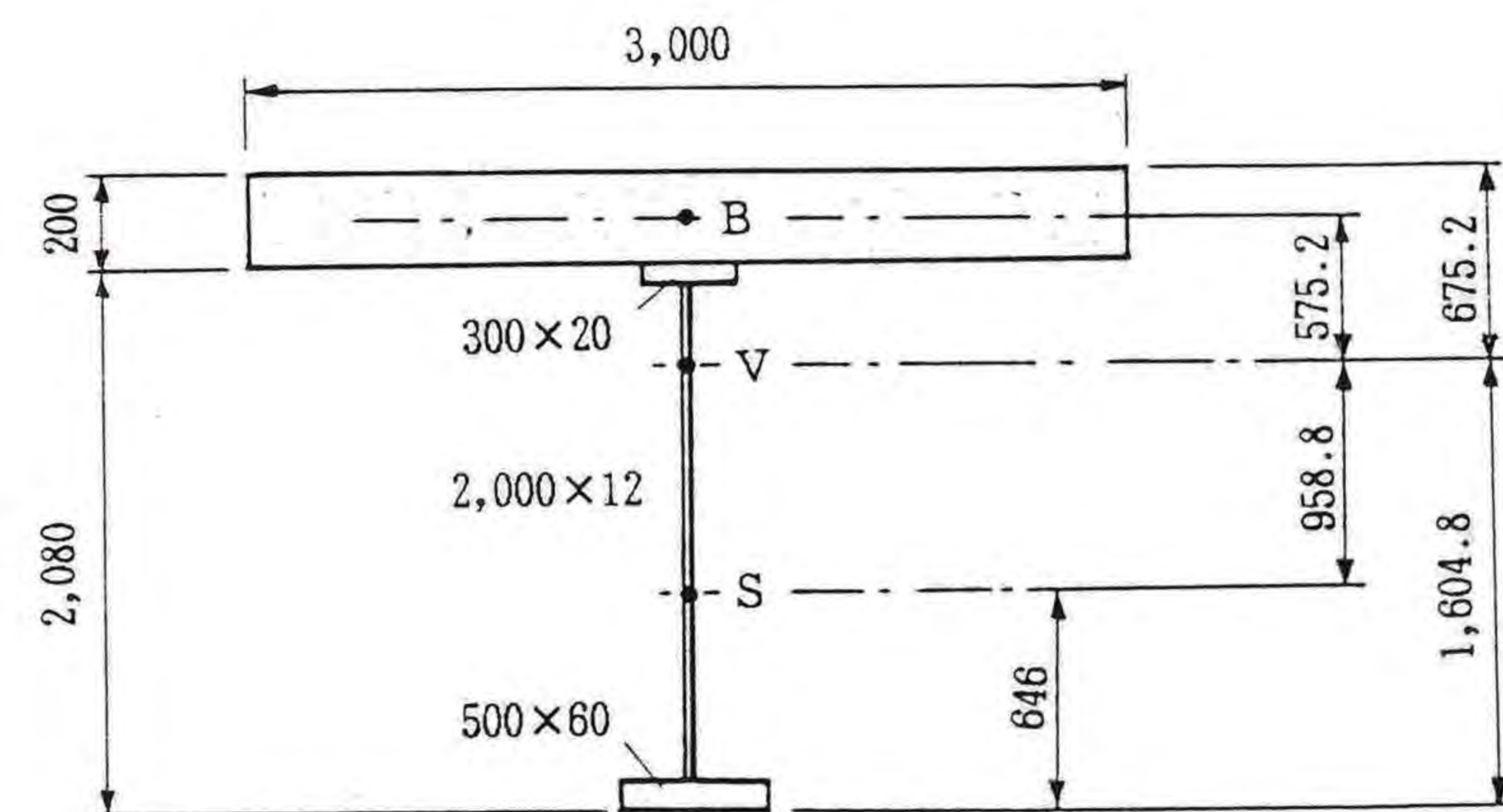


図-2.9 断面形状、および寸法(単位: mm)

表-2.2 計算条件

| パラメーター、断面諸定数、および剛度比 | |
|---|--|
| $\phi_{v\infty} = 0.4$ | $\phi_{f\infty} = 1.6$ |
| $k_1 = 0.0200$ | $k_2 = 0.00670$ |
| $E_b = 3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ | $E_a = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ |
| $I_b = 2.0 \times 10^5 \text{ cm}^4$ | $A_b = 6.0 \times 10^3 \text{ cm}^2$ |
| $I_a = 3.5673 \times 10^6 \text{ cm}^4$ | $A_a = 6.0 \times 10^2 \text{ cm}^2$ |
| $I_v = 1.2425 \times 10^7 \text{ cm}^4$ | $A_v = 1.6 \times 10^3 \text{ cm}^2$ |
| $a_a = 95.88 \text{ cm}$ | $a_b = 57.52 \text{ cm}$ |
| $a = a_b + a_a = 153.40 \text{ cm}$ | $D_N = 1.66667$, および $D_M = 0.00934$ |
| $D_1 = 0.04300 (1/\text{cm})$, $D_2 = 0.00463 (1/\text{cm})$, および $D_v = 0.00268$ | |
| $\eta = 1.27133$ | $\eta' = 1.00000$ |

(1 kgf/cm² = 0.098 MPa)

計算結果は、他の解法による結果とともに、表-2.3にまとめてある。なお、この表中で本論文の解法の近似解とは、次のように求められたものである。すなわち、剛度比 $D_1 \sim D_v$ の数値から明らかなように、式(2.30)、および(2.31)においては、

$$D_2(1+\eta+D_N) \gg D_1D_v \quad , \quad (1+\eta+D_N+D_1a)(1+\eta+D_M) \gg D_1D_Ma$$

である。そのため、式(2.30)、および(2.31)の近似解は、

$$\left. \begin{aligned} \Delta N'_{b,t-t_1} &= - \frac{D_2}{1+\eta+D_N+D_1a} M_{a,t_1} \phi(t-t_1) \\ \Delta M'_{b,t-t_1} &= - \frac{D_v(1+\eta+D_N+D_1a) - D_2D_Ma}{(1+\eta+D_N+D_1a)(1+\eta+D_M)} M_{a,t_1} \phi(t-t_1) \end{aligned} \right\} (2.45)_{1-2}$$

と表される。

表-2.3 分担断面力の変化量の数値計算結果

| 分担断面力 の変化量 | 回復クリープを考慮 | | | | | 回復クリープを無視 | | | |
|---|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|
| | ① Trost の解法 | 本解法 | | ① | ③ | ④ Dischinger. の解法 | ⑤ | ⑤ | ⑤ |
| | | ②厳密解 | ③近似解 | ② | ② | | ④ | ② | |
| $\Delta N_{o,\infty} \text{ (tf)}$ | -94.2* | -96.3 | -97.1 | 0.978 | 1.008 | -98.6* | -98.7 | 1.001 | 1.025 |
| $\Delta M_{b,\infty} \text{ (tf}\cdot\text{m)}$ | -1.67 | -1.99 | -1.99 | 0.839 | 1.000 | -1.94 | -2.24 | 1.155 | 1.126 |
| $\Delta M_{s,\infty} \text{ (tf}\cdot\text{m)}$ | 146.2 | 149.7 | 151.0 | 0.977 | 1.009 | 153.2 | 153.6 | 1.003 | 1.026 |

*: 原論文における符号を変えてある。 注: 1 tf = 9.8 kN, 1 tf·m = 9.8 kN·m

上表に示す計算結果から、以下のことがいえる。

- i) 回復クリープを考慮した本論文の解法とTrostによる解法とを比較すれば、本論文の解法による結果は、Trostによる解法の計算結果よりも僅かながら断面力の変化量を大き目に与える。この原因としては、仮定されたクリープの進行曲線の形状の相違によるものと考えられる。
- ii) また、とくにコンクリート床版の分担曲げモーメントの差異が大きい。これは、Trostの解法によると、剛度比 D_M (コンクリート床版と鋼桁との曲げ剛度比)が0.05以下の場合、 $\Delta M_{b,t-t_1}$ が著しく小さくなるとみなして、この項を力のつり合い式(本論文の解法では、式(2.23)₂に対応する)の中で無視して式を展開しているためである。ちなみに、本論文の解法では、このような近似を全く行っていない。回復クリープを無視したDischingerの解法でも、 $\Delta M_{b,t-t_1}$ は、Trostの解法と同じ取扱いをしている。
- iii) 本計算例で選定した標準的な合成桁の断面形状の場合、本論文の近似解法は、厳密解より安全側で、しかもよい精度の解を与えるといえる。
- iv) クリープ解析において回復クリープの影響を無視した場合の断面力の変化量は、回復クリープを考慮する場合よりも約3%~13%大き目の値が得られる。

したがって、回復クリープの影響を無視した場合、使用状態のもとにおける応力、および変位の使用限界状態の照査に対して、不利な結果を与える。

2. 4 乾燥収縮解析の基礎

(1) コンクリートの乾燥収縮現象とその定式化

コンクリートの乾燥収縮ひずみの進行は、数多くの実験結果によると、指数関数とみなして精度よく近似することができる^{2.6), 2.11)}。

したがって、図-2.2(d)で示された任意の時刻 t における乾燥収縮ひずみは、次のように表される。

$$\varepsilon_{s,t} = \varepsilon_{s\infty} (1 - e^{-k_s t}) \quad (2.46)$$

ここに、

- $\varepsilon_{s,t}$: 時刻 t までの乾燥収縮ひずみ
- $\varepsilon_{s\infty}$: 乾燥収縮ひずみの最終値
- k_s : 乾燥収縮ひずみの進行過程を表す無次元係数

また、コンクリートの乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_s(t)$ は、現時点でも不明な部分が多いが、一般に、収縮の進行と同じ経路をたどるという仮定が用いられている。そのため、任意の時刻 t におけるクリープ係数は、式(2.46)と同形の次式で表すことができる。

$$\phi_s(t) = \phi_s(\infty) (1 - e^{-k_s t})$$

ここに、

- $\phi_s(t)$: 時刻 t における乾燥収縮に伴うクリープ係数
- $\phi_s(\infty)$: 時刻 $t=\infty$ における乾燥収縮に伴うクリープ係数

それゆえ、式(2.46)と式(2.47)とから、乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_{s,t}$ は、クリープ係数の関数として表される。

$$\varepsilon_{s,t} = \varepsilon_{s\infty} \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \quad (2.48)$$

さらに、時刻 t_1 から t に至るまでの間の乾燥収縮ひずみ $(\varepsilon_{s,t-t_1})$ は、次式で表すことができる。

$$\varepsilon_{s,t-t_1} = \varepsilon_{s\infty} \frac{\phi_s(t) - \phi_s(t_1)}{\phi_s(\infty)} \quad (2.49)$$

(2) 乾燥収縮の解析におけるコンクリートの応力-ひずみ関係式

時刻 t_1 から t に至るまでの間の乾燥収縮ひずみの表示式として、式(2.49)を用いる。そして、応力の変化を、式(2.11)と同様に、次式で表す。

$$\sigma_{t-t_1} = \sigma_{t_1} + \Delta\sigma_{t-t_1} \quad (2.50)$$

いま、図-2.10に示すように、時刻 t_1 で応力 σ_{t_1} が作用しており、その後、応力が増加する場合を考える。この場合の時刻 $t=t_1$ から $t=t$ に至るまでに変化するコンクリートひずみ $\Delta\varepsilon_{s,t-t_1}$ は、次式で表される。

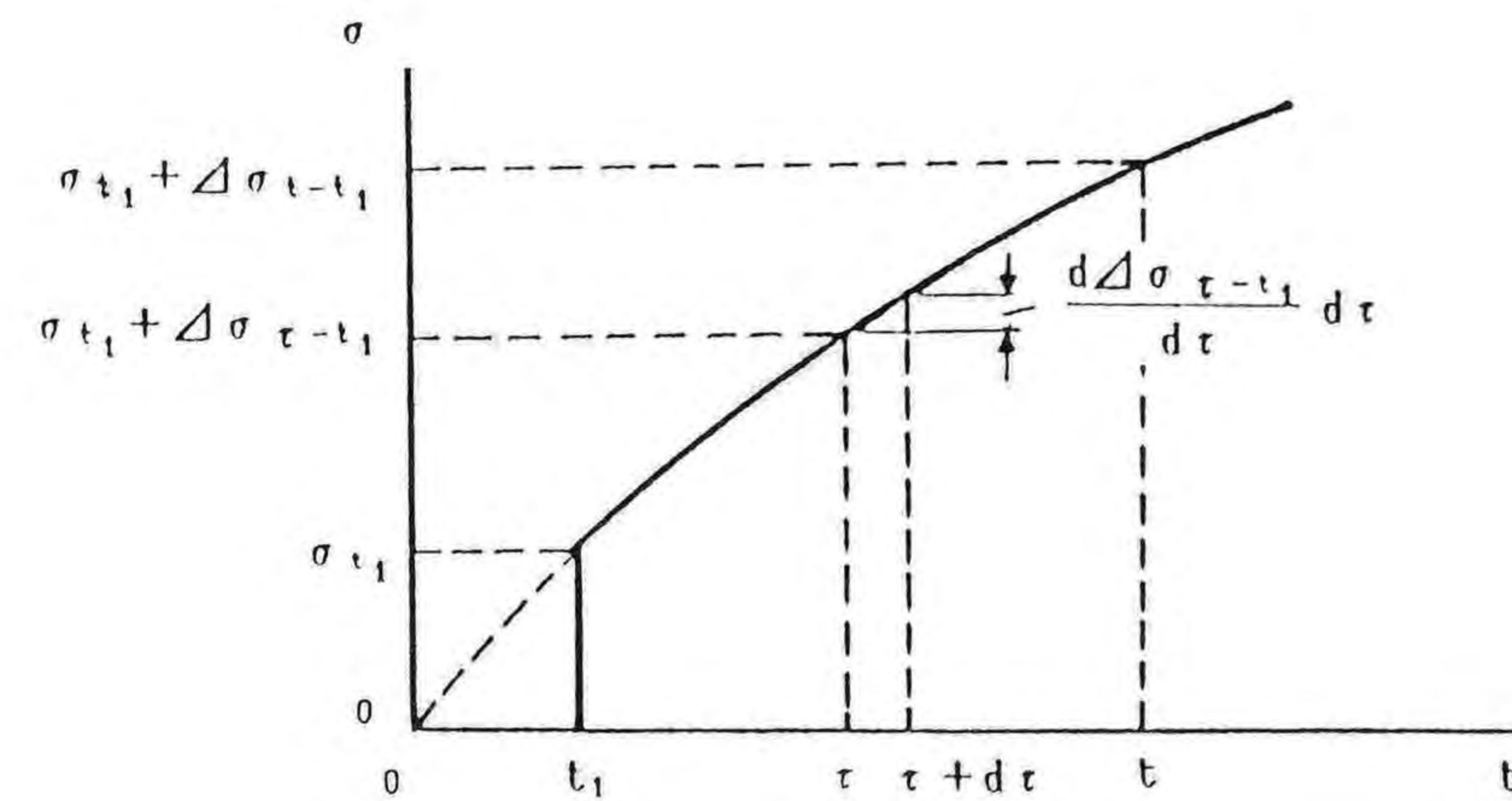


図-2.10 乾燥収縮による応力の変化

$$\begin{aligned}
\Delta \varepsilon_{s, t-t_1} &= \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \{ \phi_s(t) - \phi_s(t_1) \} + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} \\
&+ \frac{1}{E_b} \int_{t_1}^t \frac{d\Delta \sigma_{\tau-t_1}}{d\tau} \{ \phi_s(t) - \phi_s(\tau) \} d\tau \\
&+ \varepsilon_{s, \infty} \frac{\phi_s(t) - \phi_s(t_1)}{\phi_s(\infty)} \\
&= \frac{\sigma_{t_1}}{E_b} \{ \phi_s(t) - \phi_s(t_1) \} + \frac{\Delta \sigma_{t-t_1}}{E_b} \\
&+ \frac{1}{E_b} \int_{t_1}^t \Delta \sigma_{\tau-t_1} \frac{d\phi_s(\tau)}{d\tau} d\tau \\
&+ \varepsilon_{s, \infty} \frac{\phi_s(t) - \phi_s(t_1)}{\phi_s(\infty)} \quad (2.51)
\end{aligned}$$

ここで、乾燥収縮において、初期着目材齢が $t_1=0$ であるので、式(2.51)は、

$$\Delta \varepsilon_{s, t} = \frac{\Delta \sigma_t}{E_b} + \frac{1}{E_b} \int_0^t \Delta \sigma_{\tau-t_1} \frac{d\phi_s(\tau)}{d\tau} d\tau + \varepsilon_{s, \infty} \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \quad (2.52)$$

となる。また、乾燥収縮による応力の変動量を、式(2.15)₄と同様に、収縮に伴うクリープ係数の進行と相似とみなし、

$$\Delta \sigma_{\tau} = \Delta \sigma_t \frac{\phi_s(\tau)}{\phi_s(t)} \quad (2.53)$$

と仮定する。乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_s(t)$ は、すでに式(2.47)で表されている。

したがって、式(2.47)と式(2.53)とを式(2.52)に代入し整理すれば、乾燥収縮によるひずみの変化量 $\Delta \varepsilon_{s, t}$ は、

$$\Delta \varepsilon_{s, t} = \frac{\Delta \sigma_t}{E_b} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \phi_s(t) \right\} + \varepsilon_{s, \infty} \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \quad (2.54)$$

で与えられる。

(3) コンクリートの乾燥収縮とクリープ係数の関係^{2.12)}

コンクリートの乾燥収縮量は、その配合はもちろんのこと、構造部材の形状・寸法、および構造物が置かれた周辺の湿度、ならびに温度などの影響を受ける。したがって、解析の際には、それらの影響を考慮した乾燥収縮量を用いる必要がある。

プレーンコンクリートの自由乾燥収縮量は、一般に、 $200 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ の範囲にある^{2.11)}。しかし、合成構造物に使用される圧縮強度 300 kgf/cm^2 程度のコンクリートであれば、その値は 400×10^{-6} 程度だといわれている。一般的な合成桁の場合、鉄筋コンクリート床版は、通常 $p=1.5 \sim 2.0\%$ 程度の鉄筋を有している。そのためコンクリートの自由乾燥収縮量は、鉄筋の拘束によりかなり減少する。したがって、設計規準では、鉄筋の拘束をある程度考慮した乾燥収縮の値を規定している。その一例として、図-2.11に示す解析モデルを用いてコンクリートの乾燥収縮の鉄筋による拘束の程度を計算してみると、以下のようになる。

いま、任意の時刻 t におけるコンクリートの自由乾燥収縮量を $\varepsilon_s(t)$ とし、コンクリート部分、および鉄筋に作用する軸方向力をそれぞれ $N_c(t)$ 、および $N_r(t)$ とする。すると、ひずみの適合条件式、および力のつり合い式から、次式が成立する。

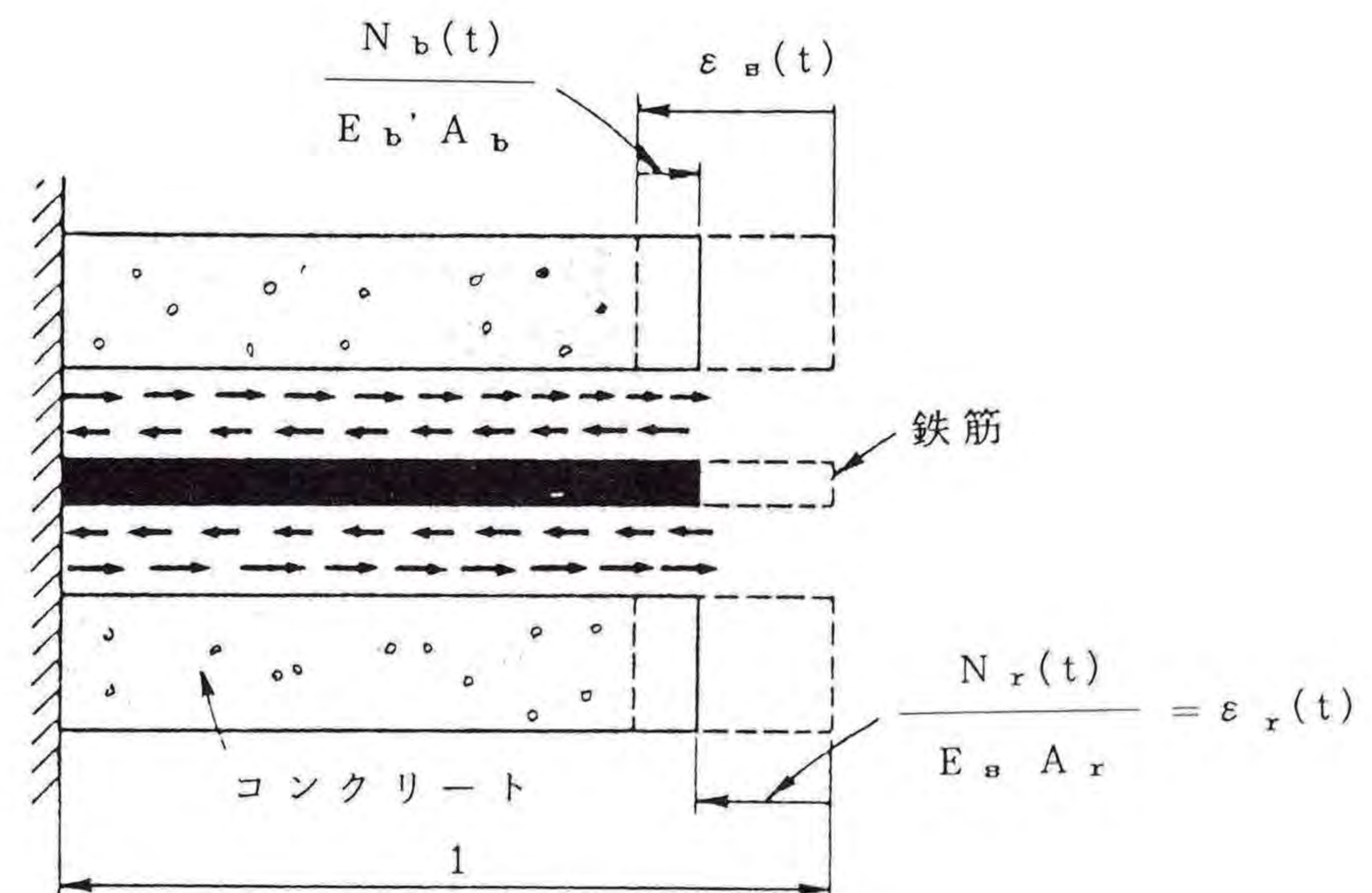


図-2.11 拘束を受けるコンクリートの乾燥収縮解析モデル

$$\varepsilon_{\text{c}}(t) - \frac{N_{\text{b}}(t)}{E_{\text{b}}' A_{\text{b}}} = \frac{N_{\text{r}}(t)}{E_{\text{s}} A_{\text{r}}} = \varepsilon_{\text{r}}(t) \quad (2.55)$$

$$N_{\text{b}}(t) = N_{\text{r}}(t) \quad (2.56)$$

ここに、 E_{b}' は、クリープ作用を考慮したコンクリートのヤング係数で、式(2.54)からリラクセーション係数 ρ_{D} とクリープ係数 $\phi_{\text{c}}(t)$ とを用いて、

$$E_{\text{b}}' = \frac{E_{\text{b}}}{1 + \rho_{\text{D}} \phi_{\text{c}}(t)} \quad (2.57)$$

で表される。また、

E_{s} : 鉄筋のヤング係数 (kgf/cm²)

A_{b} : コンクリートの断面積 (cm²)

A_{r} : 鉄筋の断面積 (cm²)

である。

そこで、式(2.55)、および(2.56)から、任意の時刻 t における鉄筋のひずみ、すなわち拘束を受けたコンクリートの乾燥収縮量を求めると、次のように与えられる。

$$\varepsilon_{\text{r}}(t) = \frac{\varepsilon_{\text{c}}(t)}{1 + n'p} \quad (2.58)$$

ここに、

$n' = E_{\text{s}}/E_{\text{b}}'$: 鉄筋とコンクリートとのヤング係数比

$p = A_{\text{r}}/A_{\text{b}}$: 鉄筋比

したがって、設計に用いるべき乾燥収縮量の無限大値 ε_{c}' は、

$$\varepsilon_{\text{c}}' = \varepsilon_{\text{r}}(\infty) = \frac{\varepsilon_{\text{c}}(\infty)}{1 + n'p} \quad (2.59)$$

と表される。表-2.4の計算条件のもとで鉄筋の拘束による ε_{c}' への影響を示したのが、図-2.12である。

表-2.4 計算条件

| 項目 | 数値 |
|---|---|
| $E_{\text{b}} = 3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ | $E_{\text{s}} = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ |
| $\rho = 0.5$ | $\phi = 2.0 \sim 6.0$ |
| $p = 0.5 \sim 3.0\%$ | $\varepsilon_{\text{c}\infty} = 400 \times 10^{-6}$ |

注: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$

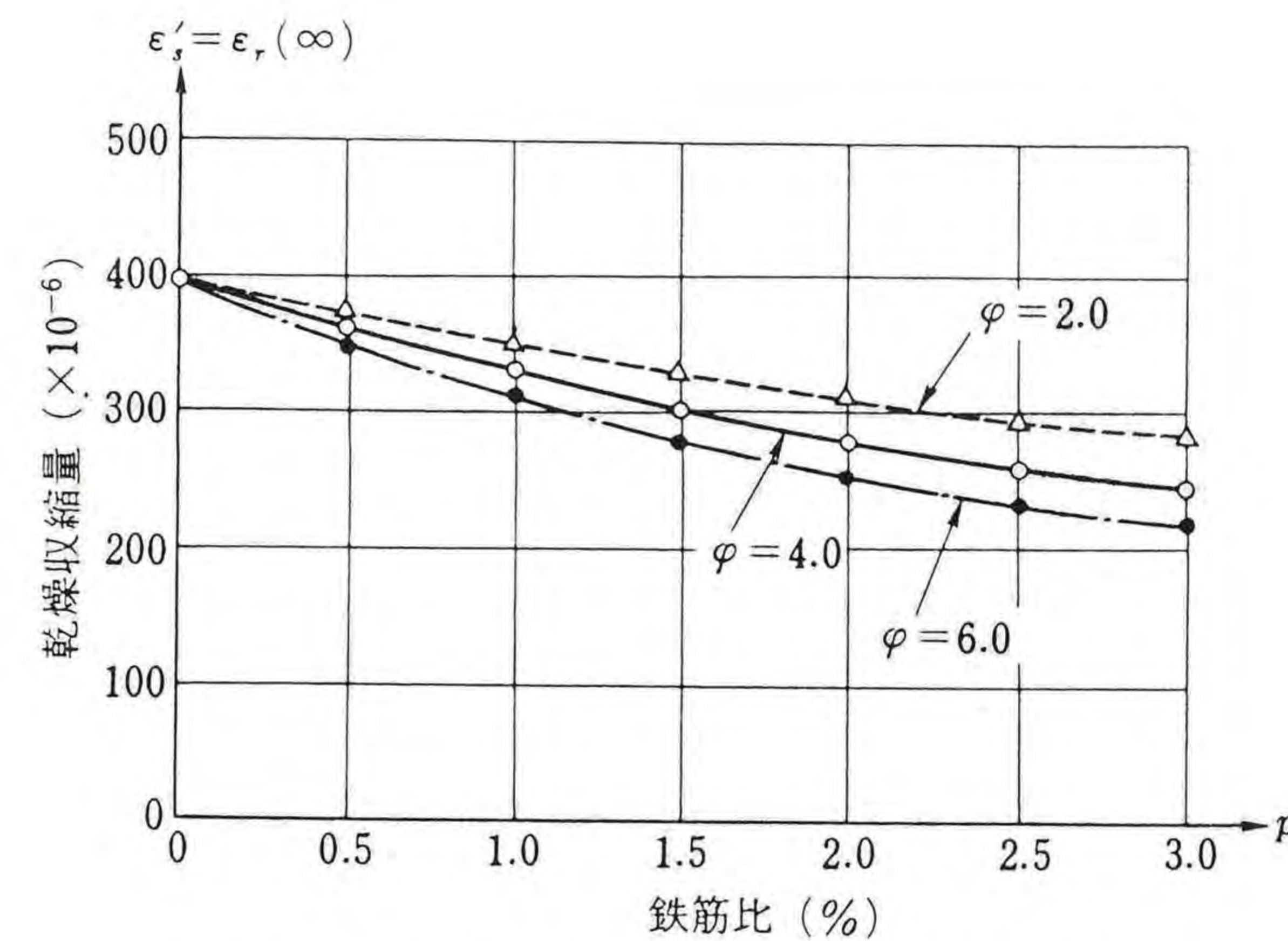


図-2.12 乾燥収縮量と鉄筋比との関係

この図によると、自由乾燥収縮量が 400×10^{-6} で、 $\phi_{\text{c}}(\infty) = 4.0$ 、および $p = 2\%$ の場合、鉄筋コンクリートとしての乾燥収縮量 ε_{c}' は、約 28×10^{-5} となる。そのため、現行の道路橋示方書・同解説Ⅱの鋼橋編では、 $\varepsilon_{\text{c}}' = 20 \times 10^{-5}$ と $\phi_{\text{c}}(\infty) = 4.0$ とが設計用値として規定されている。

(4) 乾燥収縮の解^{2.7)}

上述のクリープ解と同様に、図-2.13に示す合成桁のひずみ状態を参照し、コンクリート床版の乾燥収縮に伴う各分担断面力の変化量を求める。

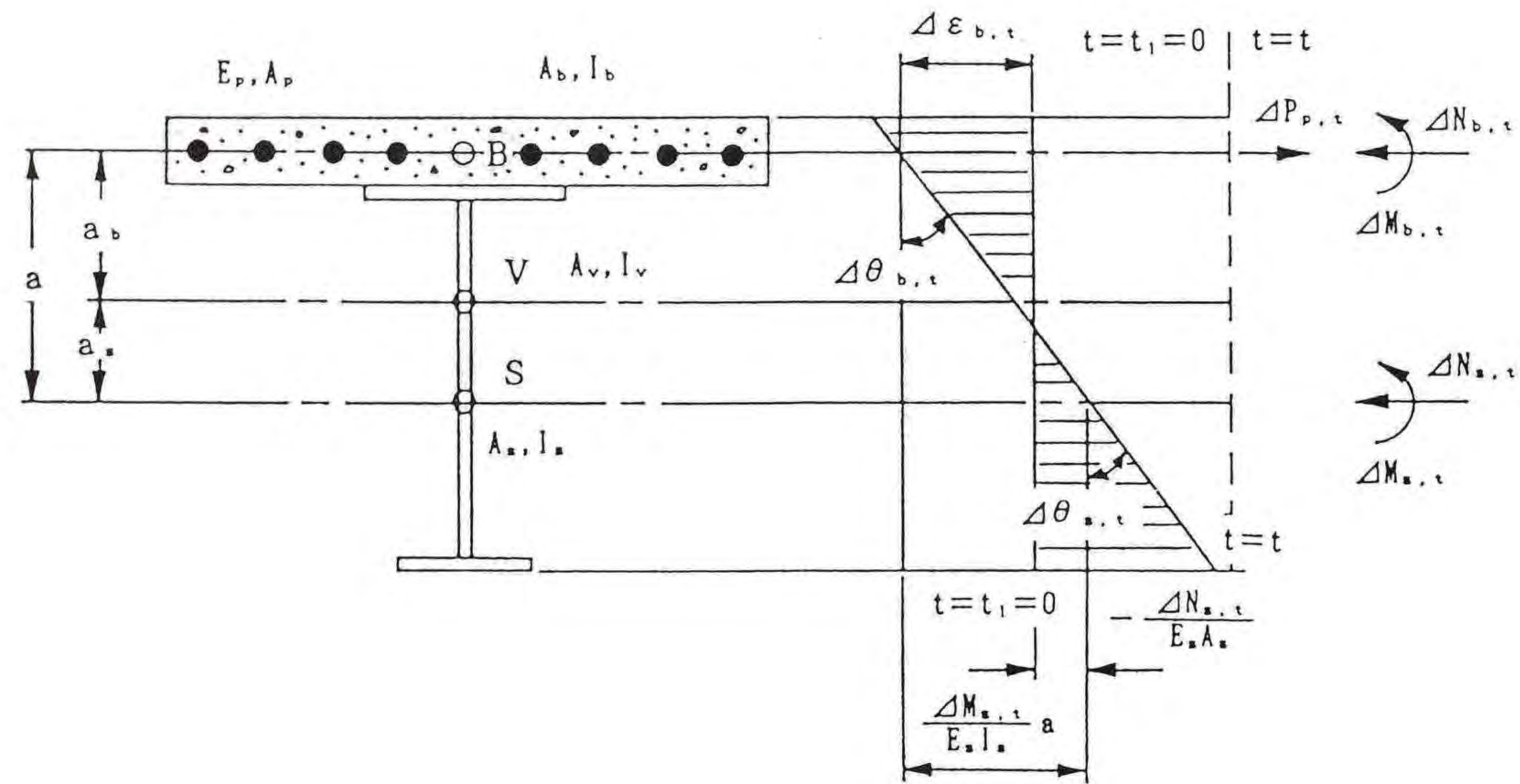


図-2.13 乾燥収縮に伴う合成桁のひずみ分布
(プレキャスト床版を用いた合成桁)

a. 力のつり合い式

時刻 $t_1=0$ においては、全く力が作用していないので、任意の時刻 $t=t$ の場合についての力のつり合い式をたてると、次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{b,t} + \Delta N_{s,t} &= \Delta P_{p,t} \\ \Delta M_{b,t} + \Delta M_{s,t} - \Delta N_{s,t} a &= 0 \end{aligned} \right\} (2.60)_{1-2}$$

b. 変位の適合条件

i) ひずみ (コンクリート床版の図心 B において)

$$\Delta \varepsilon_{b,t} = \Delta \varepsilon_{p,t} = \Delta \varepsilon_{s,t} \quad (2.61)$$

ii) 曲率

$$\Delta \theta_{b,t} = \Delta \theta_{s,t} \quad (2.62)$$

c. 各分担断面力の変化量

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{p,t} &= \delta'_1 / \delta'_0 \\ \Delta N_{b,t} &= \delta'_2 / \delta'_0 \\ \Delta M_{b,t} &= \delta'_3 / \delta'_0 \\ \Delta N_{s,t} &= \Delta P_{p,t} - \Delta N_{b,t} \\ \Delta M_{s,t} &= \Delta N_{s,t} a - \Delta M_{b,t} \end{aligned} \right\} (2.63)_{1-5}$$

ここで、 $\Delta P_{p,t}$, $\Delta N_{b,t}$, $\Delta M_{b,t}$, $\Delta N_{s,t}$ および $\Delta M_{s,t}$ は、それぞれクリープの解のところで示したものと同一である。また、 δ'_0 , δ'_1 , δ'_2 , および δ'_3 は、それぞれ

$$\left. \begin{aligned} \delta'_0 &= (1 + \eta_D + D_M) \{ D_P (1 + \eta_D + D_N + D_1 a) + (1 + \eta_D) (D_N + D_1 a) \} - D_M D_1 (1 + a \eta_D + D_P) \\ \delta'_1 &= - \{ (1 + \eta_D + D_M) (D_N + D_1 a) - D_M D_1 a \} P_s \gamma(t) \\ \delta'_2 &= - \{ (1 + \eta_D + D_M) (D_P + D_N + D_1 a) - D_M D_1 a \} P_s \gamma(t) \\ \delta'_3 &= D_P D_M a P_s \gamma(t) \end{aligned} \right\} (2.64)_{1-4}$$

と置いたものである。さらに、

$$\left. \begin{aligned} \eta_D &= \frac{\phi_s(t)}{2} \\ \gamma(t) &= \frac{\phi_s(t)}{\phi_s(\infty)} \\ P_s &= \varepsilon_{s\infty} E_b A_b \end{aligned} \right\} (2.65)_{1-3}$$

である。

(5) 数値計算による検討とその考察

前掲の図-2.9で示された断面を対象にして行った数値計算結果を、以下に示す。その際の計算条件は、次のとおりである。

$$\varepsilon_{s\infty} = 25 \times 10^{-5}, \phi_s(\infty) = 2.0$$

それらの数値計算結果を、各種の解析方法と比較して示したものが、表-2.5に示されている。

表-2.5 乾燥収縮による分担断面力の変化量の比較

| 解析方法 | 分担断面力の変化量 | | | | | |
|-----------------|----------------------------|-------|------------------------------|-----|------------------------------|-------|
| | $\Delta N_{b,\infty}$ (tf) | | $\Delta M_{b,\infty}$ (tf·m) | | $\Delta M_{s,\infty}$ (tf·m) | |
| ① 本論文の解法 | -49.7 | ①/① | 0.304 | ①/① | 75.9 | ①/① |
| | | 1.000 | | | | 1.000 |
| ② Trostの解法 | -48.8 | ②/① | 0.257 | ②/① | 74.6 | ②/① |
| | | 0.982 | | | | 0.845 |
| ③ Fritzの解法 | -51.1 | ③/① | 0.358 | ③/① | 78.1 | ③/① |
| | | 1.028 | | | | 1.178 |
| ④ Dischingerの解法 | -51.1 | ④/① | 0.317 | ④/① | 78.1 | ④/① |
| | | 1.028 | | | | 1.043 |

注：1 tf = 9.8 kN , 1 tf·m = 9.8 kN·m

この表から明らかなように、本論文による解析法によって求められた数値計算結果は、他の解法による結果とほぼ同じ値を与えている。

2. 5 単純合成桁の経時挙動の解析

(1) 解析法

先節までに示されたクリープ、および乾燥収縮の解は、着目断面に作用する持続軸方向力 P_{a,t_1} と曲げモーメント M_{a,t_1} が既知であるとの仮定にもとづき求められたものである。したがって、単純合成桁橋の解析を行うに当たっては、まず持続外力によって各断面に作用する軸方向力と曲げモーメントを求める必要がある。

つぎに、各着目断面に対し、クリープの場合は式(2.30)～式(2.32)によって、

また乾燥収縮の場合は式(2.63)～式(2.65)によって、分担断面力の変化量を求めることができる。その結果、応力の変化量は、次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_{b,t-t_1} &= \frac{\Delta N_{b,t-t_1}}{A_b} + \frac{\Delta M_{b,t-t_1}}{I_b} y_b \\ \Delta \sigma_{s,t-t_1} &= \frac{\Delta N_{s,t-t_1}}{A_s} + \frac{\Delta M_{s,t-t_1}}{I_s} y_s \end{aligned} \right\} (2.66)_{1-2}$$

ここに、

$\Delta \sigma_{b,t-t_1}$: 時刻 $t=t_1$ から $t=t$ に至るまでのコンクリート床版の応力変化量

$\Delta \sigma_{s,t-t_1}$: 時刻 $t=t_1$ から $t=t$ に至るまでの鋼桁の応力変化量

y_b : コンクリート床版の図心から着目位置に至るまでの距離（上向きを正にとる）

y_s : 鋼桁の図心から着目位置に至るまでの距離（上向きを正にとる）

さらに、桁のたわみ、および軸方向の変位の変化量は、それぞれ次の弾性荷重を用いて計算することができる。

a. 桁のたわみ変化量

$$\frac{\Delta M_{s,t-t_1}}{E_s I_s}, \text{あるいは} \frac{\Delta M_{b,t-t_1}}{E_b I_b} \quad (2.67)_{1-2}$$

b. 桁の軸方向変位の変化量

コンクリート床版の図心 B において :

$$\frac{\Delta N_{b,t-t_1}}{E_b A_b} \quad (2.68)$$

鋼桁の図心 S において :

$$\frac{\Delta N_{s,t-t_1}}{E_s A_s} \quad (2.69)$$

(2) 数値計算による検討とその考察

以上に示した解析法を用いて、プレキャスト床版を用いた図-2.14に示す合成桁^{2.9)}を対象に、クリープ、および乾燥収縮に伴う各分担断面力の変化量に着目して、数値解析を行った。解析の際に用いた諸条件を、表-2.6に示す。

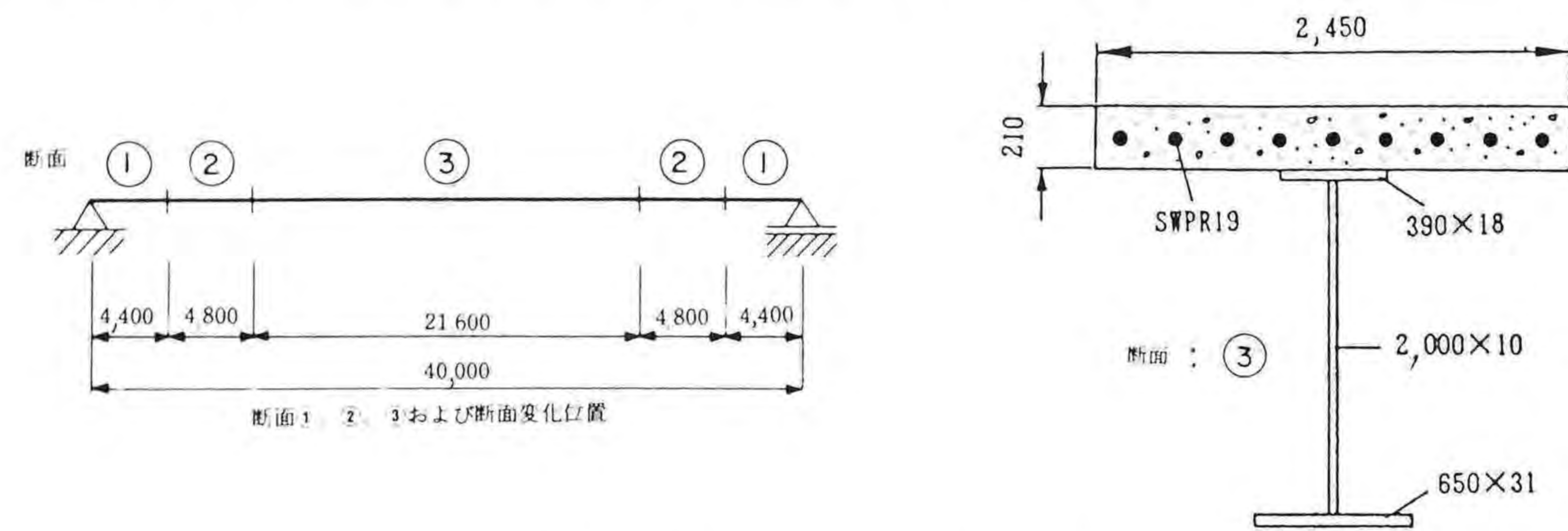


図-2.14 合成桁の断面形状・寸法 (単位: mm)

表-2.6 解析条件

| 項目 | 数値 |
|---|-----------------------|
| 合成後死荷重 W_d (tf/m) | 1.320 |
| 導入プレストレス P_i (tf) | 411.6 |
| 解放プレストレス P_r (tf) | 257.0 |
| コンクリートの弾性係数 E_c (kgf/cm ²) | 3.0×10^5 |
| 鋼材の弾性係数 E_s, E_p (kgf/cm ²) | 2.1×10^6 |
| 最終乾燥収縮量 ϵ_{sh} | 23.8×10^{-5} |

注: 1 tf = 9.8 kN ; 1kgf/cm² = 0.098 MPa

数値解析は、パラメータとして、断面構成比 α 、クリープ係数 ϕ 、プレストレス導入材齢 t_0 、および解放材齢 t_1 を選び、パラメトリック解析を行った。表-2.7には、それらの値の詳細を示す。

表-2.7 各種パラメーターの値

| 構造形式 | 単純桁 | | |
|------------------------------------|-----------------------|-------|---------|
| | ① | ② | ③ |
| 断面位置 | | | |
| $\alpha = \frac{I_s A_p}{I_c A_c}$ | 0.082 | 0.098 | 0.13 |
| k_1 | 0.0393 | | 0.02 |
| k_2 | 0.00472 | | 0.00671 |
| $\phi_{v\infty}$ | 0.24 | | 0.40 |
| $\phi_{f\infty}$ | 0.66 | | 2.0 |
| t_0 | 150日 | | 60日 |
| t_1 | 153日 | | 63日 |
| $\epsilon_{sh\infty}$ | 23.8×10^{-6} | | |

また、クリープ係数の値に関しては、道路橋示方書の進行曲線^{2.3)}、および実物大のプレキャストPC床版について行った室内実験の値^{2.13), 2.14)}を用いた。数値計算は、本論文の2.3、および2.4で示した解と直接剛性法(この詳細については、第5章参照)とで定式化したプログラムを用いて、クリープと乾燥収縮に分けて、パラメトリック解析を行った。

クリープに関する数値解析結果としては、図-2.15に断面構成比と導入軸力の損失率との関係を、図-2.16に断面構成比とコンクリート床版の分担軸方向力の変化率との関係を、また図-2.17に断面構成比と鋼桁の分担曲げモーメントの変化率との関係を、それぞれクリープ係数値、および初期載荷材齢を種々変化させた場合について示した。

一方、乾燥収縮に関しては、図-2.18に断面構成比 α とコンクリート床版の分担軸方向力の変化量との関係としてプロットした。

これらの図から、以下のことがいえる。

- i) クリープによる導入軸方向力の損失率は、断面構成比 α の増加に伴い大きくなる。その値は、道路橋示方書の規定値の場合で約35~48%、また室内実験結果の値を用いた場合で約18~26%となっている。
- ii) 合成桁の断面構成比 α とクリープに伴う各分担断面力の変化率との関係は、断面構成比が増加するのに伴って、コンクリート床版、および鋼桁とも増加している。そして、その傾向は、コンクリート床版よりも鋼桁のほうが著しい。

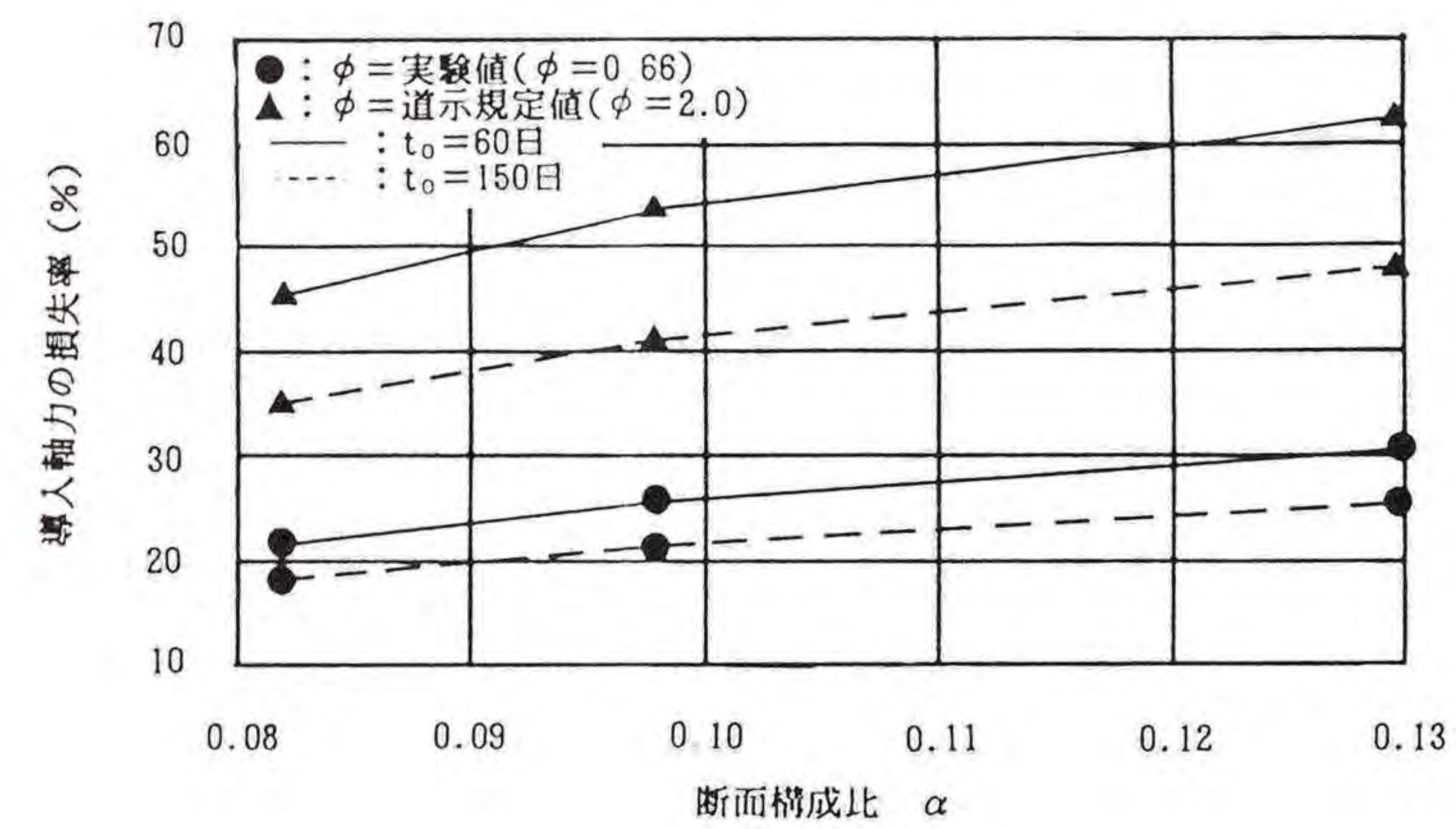


図-2.15 導入軸方向力の損失率 ($t=\infty$)

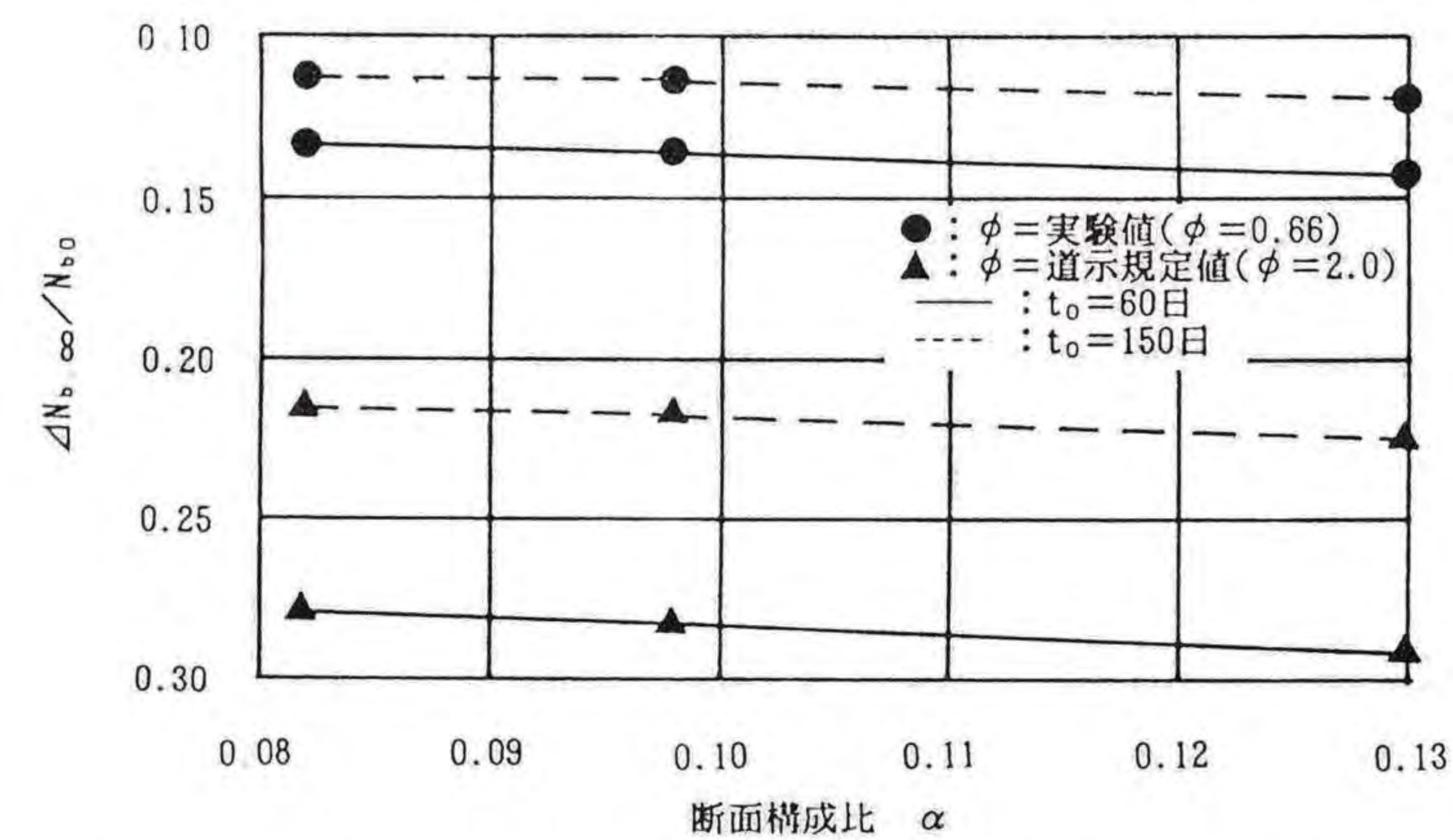


図-2.16 コンクリート床版の分担軸方向力の変化率 ($t=\infty$)

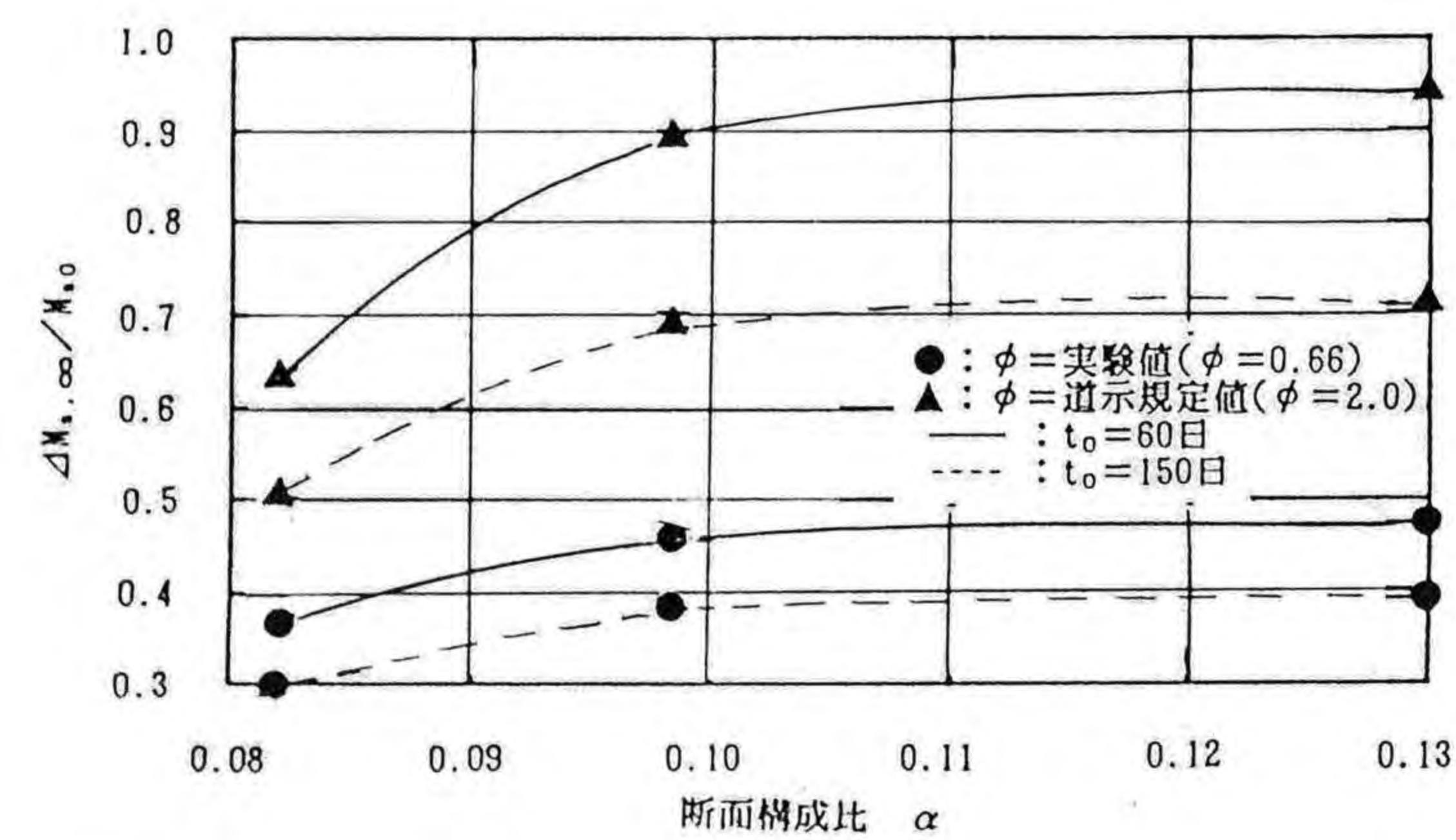


図-2.17 鋼桁の分担曲げモーメントの変化率 ($t=\infty$)

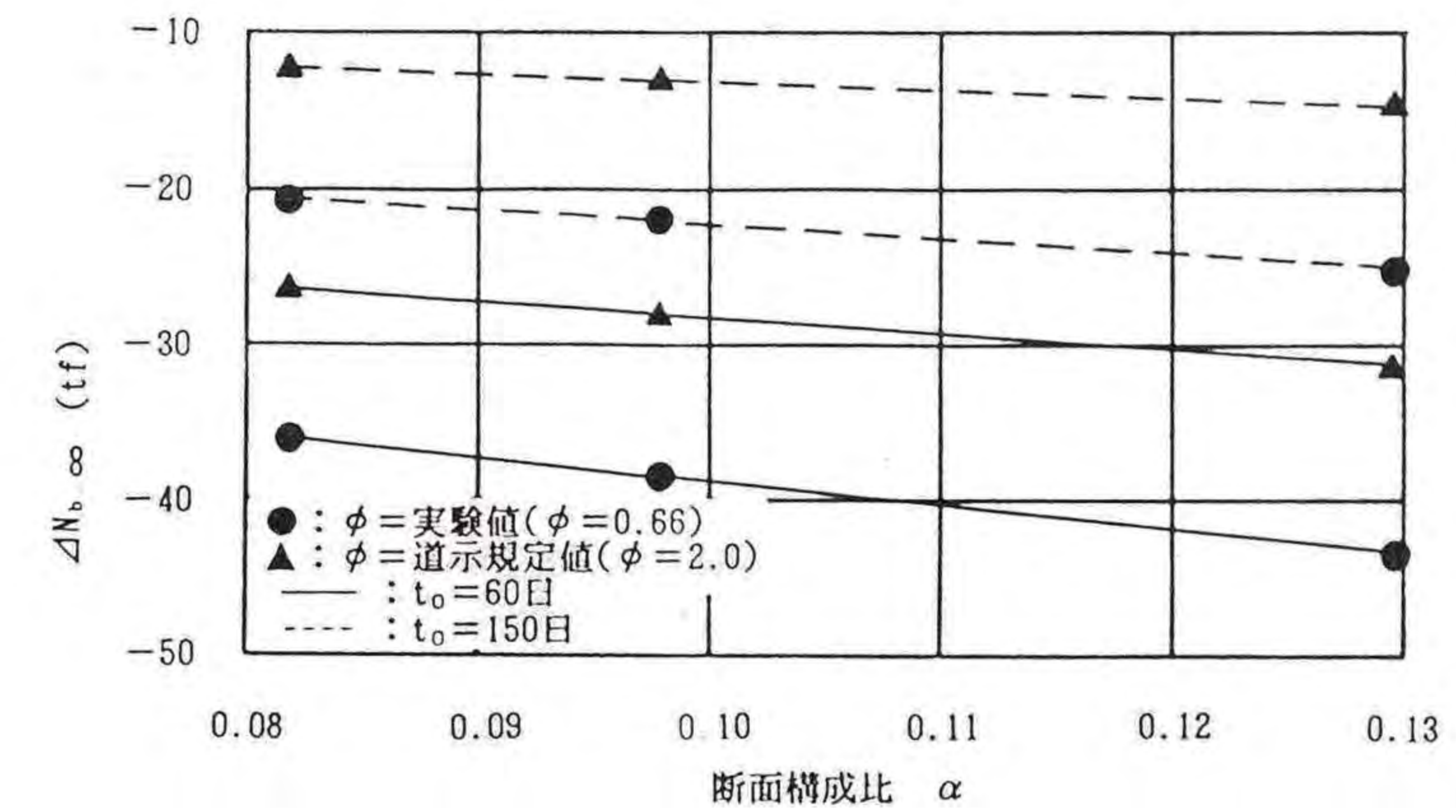


図-2.18 乾燥収縮に伴うコンクリート床版の分担軸方向力の変化量

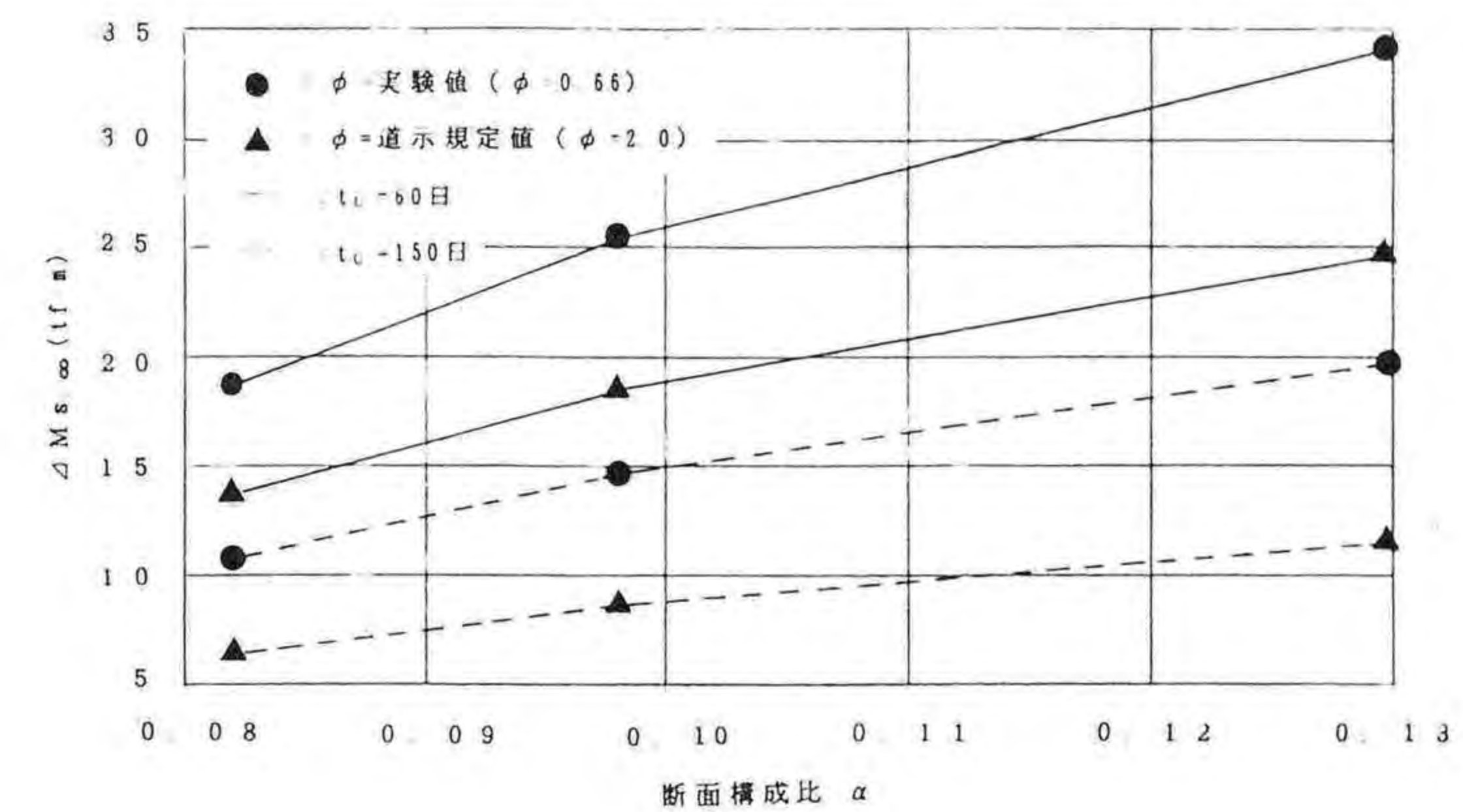


図-2.19 乾燥収縮に伴う鋼桁の分担曲げモーメントの変化量

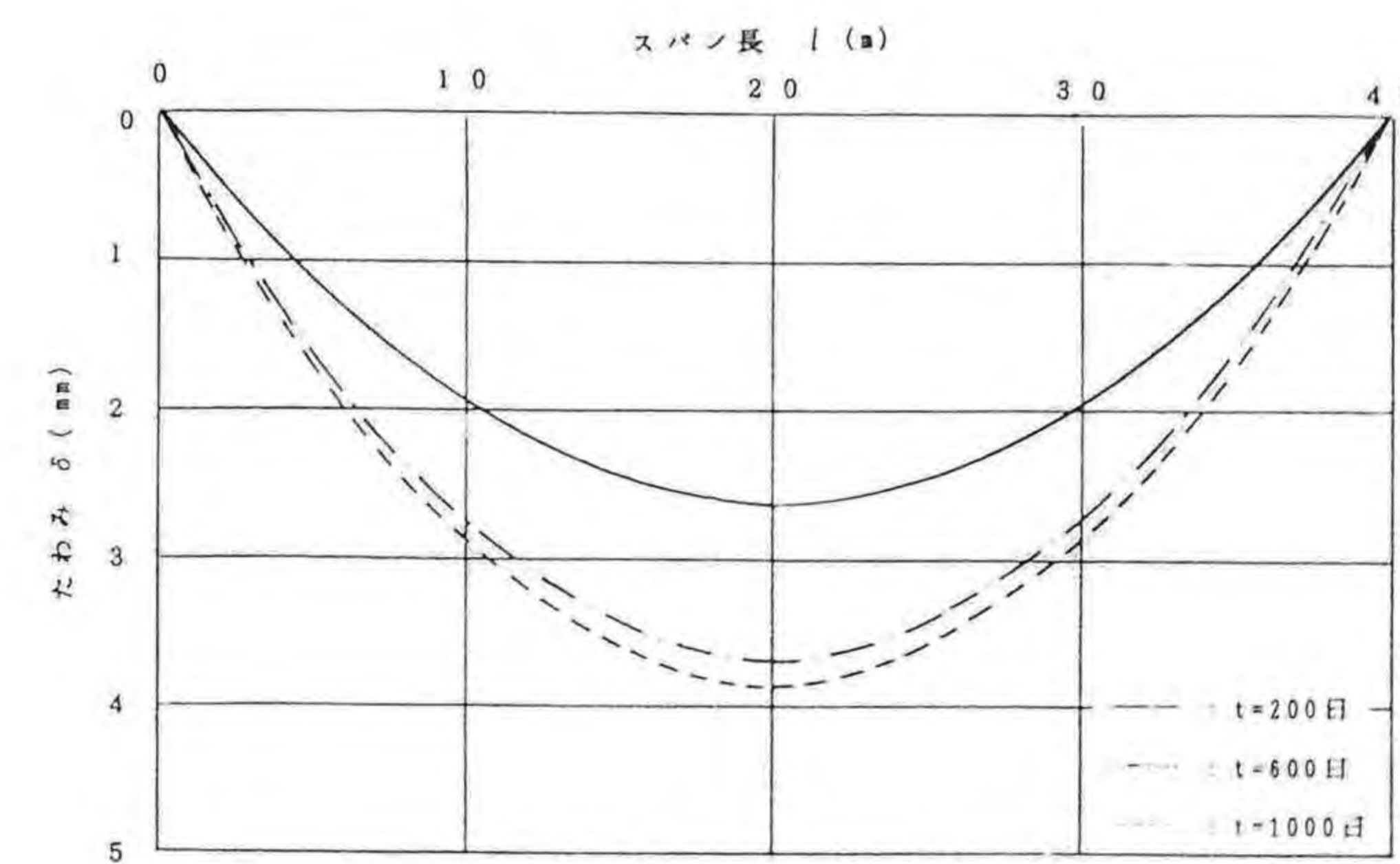


図-2.20 クリープ、および乾燥収縮による合成桁のたわみ変化

- iii) クリープ係数の値を道路橋示方書の規定値と室内実験結果の値とを用いた解析結果で比較した場合、各分担断面力の変化率は、道路橋示方書の規定値を用いた場合よりも、室内実験結果の値を用いた場合のほうが小さい。
- iv) また、初期載荷材齢を変化させて比較した場合、 $t_0=60$ 日の場合よりも、 $t_0=150$ 日の場合のほうがクリープに伴う各分担断面力の変化率は小さくなる。すなわち、床版打設からプレストレス導入に至るまでの期間が長くなるほど、クリープが緩和されて、有利になることがわかる。
- v) 乾燥収縮に伴う断面構成比と各分担断面力の変化量の関係についてコンクリート床版の分担軸方向力について調べてみると、断面構成比 α の増加に伴い、その変化量も増加する。また、乾燥収縮に伴うクリープ係数値が増加するほど、各分担断面力の変化量は、減少する。

2. 6 まとめ

本章では、まずコンクリートの回復クリープを正確に考慮し、かつTroostの方法よりも厳格にコンクリート床版の分担曲げモーメントの変化量(移行量)を取扱うことができるクリープの解析法を示した。つぎに、標準的な合成桁を対象に数値計算を実施し、従来から提案されている解析方法による計算結果と比較し、考察を加えた。

これらクリープ解析に関する結果を要約すると、次のようにまとめられる。

- i) 本論文の解析法においては、式(2.16)で示されるリラクセーションを考慮したクリープ係数 η が解析上、主要な要素となる。もちろん、この係数 η は、遅れ弾性クリープ、フロークリープ、および回復クリープからなるクリープ係数とリラクセーション係数 ρ_{NK} とに容易に分離することができる。
- ii) クリープの解析において、回復クリープを考慮した場合の分担断面力の変化量は、回復クリープを無視する場合よりも、僅かながら設計上有利な結果を与える。
- iii) 実用性を考慮して、本論文の解析法にもとづく近似解法も示した。この近似解法は、標準的な合成桁の場合、厳密解よりも安全側で、しかも精度のよい解を与える。

- iv) 普通のRC床版を用いた合成桁はもちろん、プレキャスト床版を用いて施工される合成桁のクリープの解も示した。

さらに、乾燥収縮の解析法に関してもその基本的な取扱い方を示し、また実用的な解析法も示した。そして、本論文の解析方法による計算結果は、他の解法による結果とほぼ同じ値が得られることが確かめられた。また、若干の数値解析を通じて、乾燥収縮に伴うクリープ係数の影響も評価した。

最後に、プレキャスト床版を用いて施工された単純合成桁橋を対象に、経時挙動の解析を行い、導入軸方向力の損失率、分担断面力の変化の変化量、ならびに、たわみの変化量などを評価した。

参 考 文 献

- 2.1) 栗田章光・中井 博：回復クリープを考慮した鋼・コンクリート合成桁のクリープ解析、構造工学論文集 Vol.37A、土木学会、pp.1407~1418、1991年。
- 2.2) 中井 博・栗田章光：鋼・コンクリート合成構造のクリープ・乾燥収縮解析における種々の基礎式に関する一考察、構造工学論文集Vol.36A、土木学会、pp.1275~1284、1990年。
- 2.3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I 共通編、II 鋼橋編、丸善、1990年。
- 2.4) 渡辺誠一・六車 熙：コンクリートのクリプひずみに関する一考察—遅れ弾性および回復クリープのPC静定部材のクリープ解析に及ぼす影響—、日本建築学会構造系論文報告集、第402号、pp.71~78、1989年。
- 2.5) Trost, H: Zur Berechnung von Stahlverbundtragern im Gebrauchszustand auf Grund neuerer Erkenntnisse des viskoelastische Verhaltens des Betons, Der Stahlbau, Jahrg., 37, Heft 11, S.321~331, 1986.

- 2.6) 中井 博・栗田章光・L. 一ノ瀬 伯子：コンクリート合成構造物の応力・変形解析のためのクリープ係数と乾燥収縮量に関するデータベースの作成、構造工学論文集、Vol.37A、土木学会、pp.1397~1406、1991年。
- 2.7) 中井 博・栗田章光・瀬野靖久：PPCS工法による鋼・コンクリート合成桁の経時挙動解析、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、第16巻、日本鋼構造協会、pp.249~254、1992年。
- 2.8) Takenaka,H.Kisida,H.and Nakai,H.: A study on New Composite Girder using Prestressed Precast Concrete Slab by PPCS Method, Der Stahlbau Jahrg.55, Heft 6, 1986.
- 2.9) 中井 博編・栗田章光分担執筆：プレキャスト床版合成桁の設計・施工、森北出版、1988年。
- 2.10) Fritz,B : Verbundträger, Berechnungsverfahren für die Brückenbau-praxis, Springer-Verlag, 1961.
- 2.11) 岡田 清編：最新コンクリート工学、国民科学社、1986年。
- 2.12) 池田尚次編・栗田章光分担執筆：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、構造工学シリーズ3、土木学会、pp.74~75、1989年。
- 2.13) 中井博・栗田章光・瀬野靖久：鋼材の拘束を受けるコンクリート部材の回復クリープ現象に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.38A、土木学会、pp.1321~1328、1992年。
- 2.14) 中井博・栗田章光・亀井正博・瀬野靖久：プレキャストPC版の回復クリープに関する実験的研究、平成4年度土木学会・関西支部年次学術講演会、I-2, pp. I-2-1~I-2-2、1992年。

第3章

合成桁のクリープ、および乾燥収縮に関する実験的研究

第3章 合成桁のクリープ、および乾燥収縮に関する実験的研究

3.1 まえがき

わが国の道路橋の鉄筋コンクリート床版(RC床版)に関しては、現在、様々な損傷事例が数多く報告されており、橋梁の維持・管理の面から、橋梁技術者にとって深刻な問題となってきた。

従来、道路橋のRC床版は、大部分が現場で施工されてきており、気温や湿度などの自然条件のほか、今日的な課題である施工に携わる現場の労働者の人的条件などにより、ある一定基準以上の品質を現場で確保することが困難な状況にある。そこで、この問題に取り組むための種々な研究・開発が進められており、それらのうちRC床版の急速施工や耐久性の向上、現場工期の短縮化、あるいはコンクリート打設用の型枠が不必要な都市の建設を推進するという面から、プレキャスト床版を用いた合成桁橋が脚光を浴びるようになってきた。この種の橋梁の設計・施工のために、1987年、道路橋示方書^{3.1)}との整合性を保った「プレキャスト床版合成桁の設計・施工指針(案)」^{3.2)}が土木学会関西支部で作成された。さらに、それらの普及・発展を期するため、筆者も分担執筆した著書^{3.3)}も、1988年に発行されている。

プレキャスト床版を用いた合成桁橋の施工実績は、今日までに道路橋で10数橋程度あるが、そのいずれもが単純桁形式のものであった。そして、連続合成桁の設計・施工実績は、まだ数例の歩道橋にとどまっている。一方、非合成の連続桁橋を対象とした「プレキャスト床版を用いた連続桁橋の設計・施工要領(案)」^{3.4)}が、1988年に阪神高速道路公団によって作成された。しかし、その実施例としては、同公団の高石ランプにおいて採用された3径間連続非合成桁橋が一例あるのみである。したがって、この種のプレキャスト床版を用いた橋梁の普及を図るためには、道路橋において連続合成桁を建設するための研究・開発が不可欠となってきた。

1989年6月、大阪市旭区内に大阪市建設局によって建設された菅原城北大橋アプローチ橋には、現場作業の省力化、および工期の短縮とともに、橋下空間の街路の建築限界や交通状況などを考慮して、この種のプレキャスト床版を用いた2径間

連続合成桁が本格的な道路橋として採用された。本橋のプレキャスト床版には、橋軸、および幅員両方向にプレストレスが導入されている。今回のような道路橋は、わが国で設計・施工例がなく、中でもクリープ、および乾燥収縮に伴う主桁の経時挙動に関しては、ほとんどその特性が実測によって明確にされていないのが現状である。

そこで、本章では、この種の新形式の橋梁の設計・施工法の特徴を、まず紹介する。つぎに、クリープと乾燥収縮特性とに関して2年間にわたり行ってきた室内、および現場での計測結果、ならびに解析結果を示し、それらの特性について考察する。

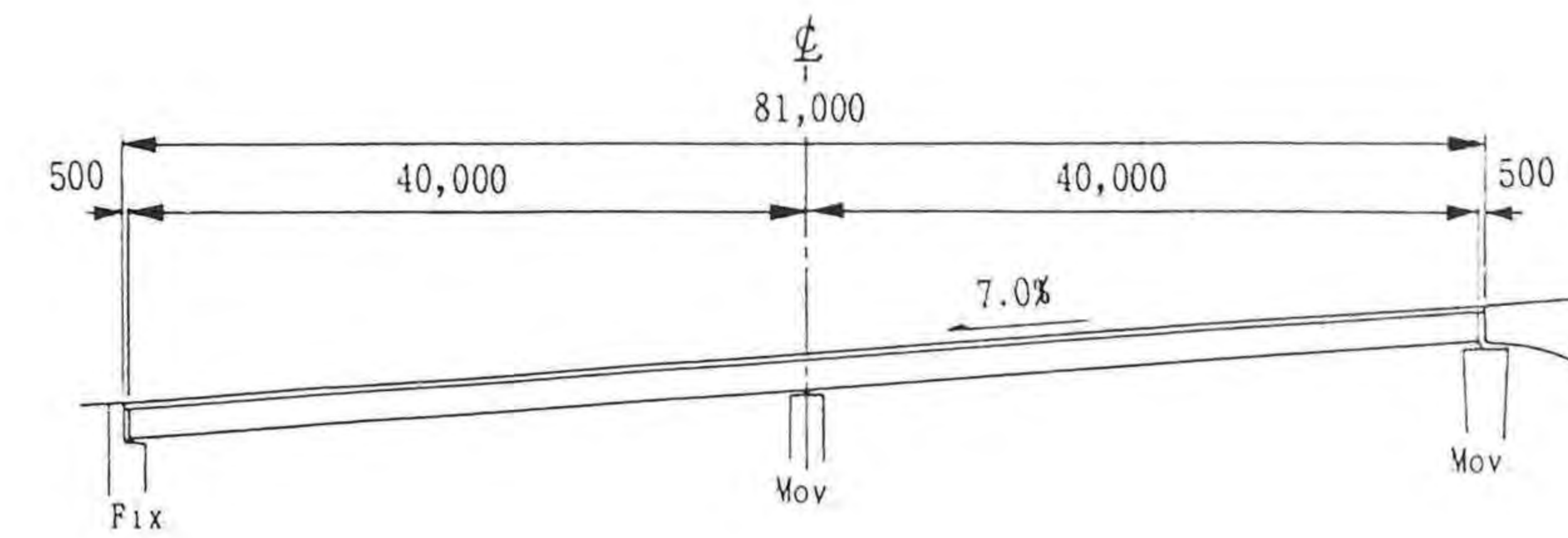
3.2 実験橋梁の概要

(1) 本橋の設計概要

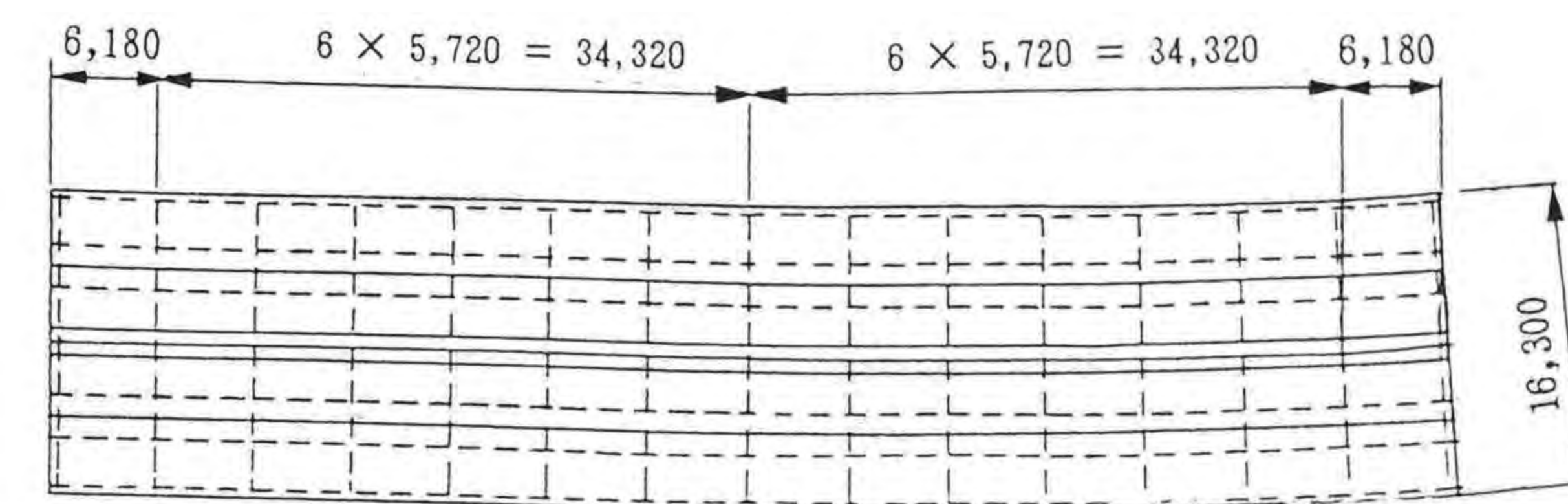
本橋の一般図を図-3.1に、また設計条件を表-3.1に示す。

表-3.1 設計条件

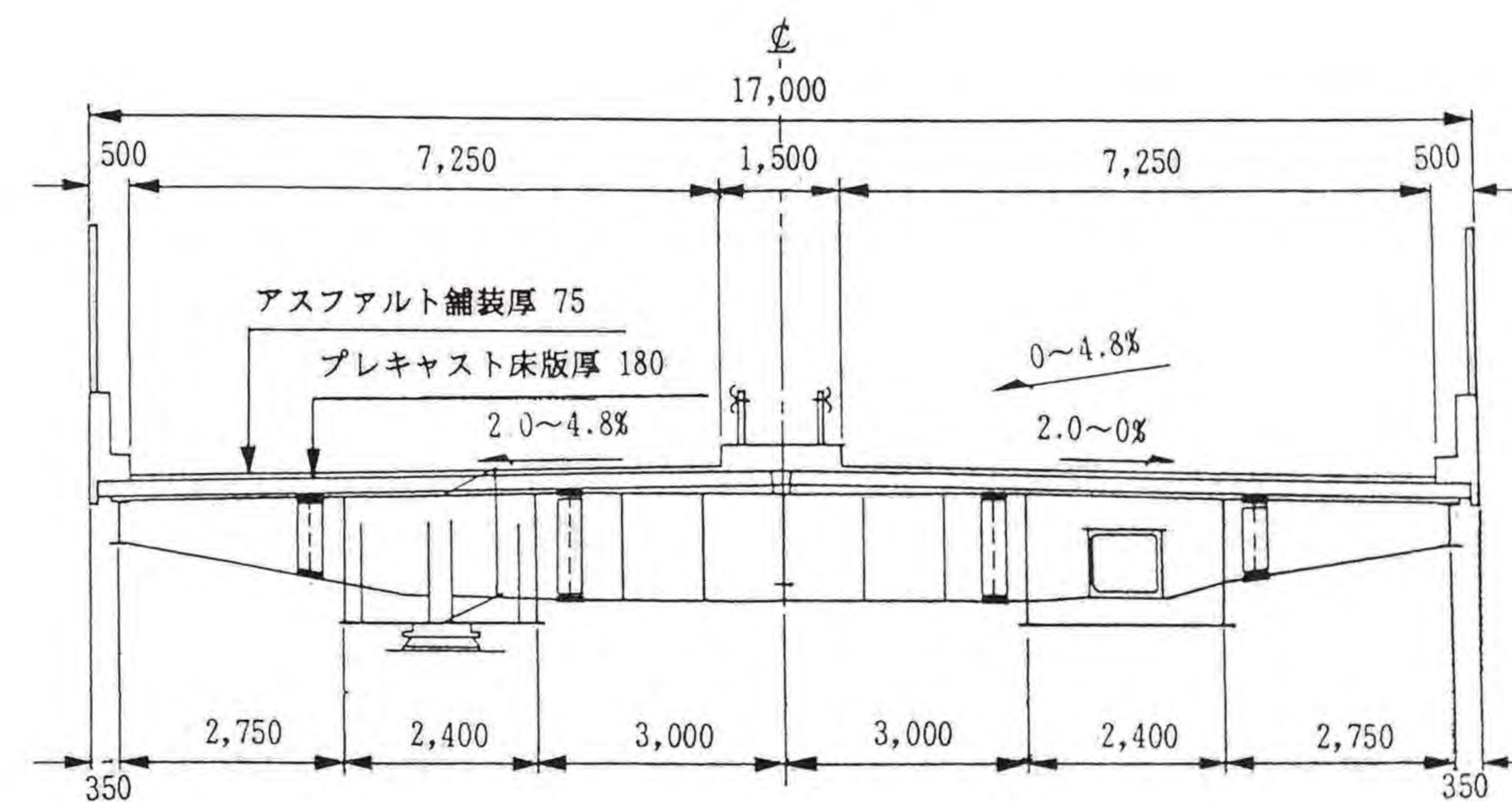
| 項目 | その内容 |
|-----------|--|
| 橋種 | 2径間連続合成箱桁橋 |
| 橋格 | 1等橋(TL-20) |
| 橋長 | 81.0 m |
| 支間 | 40.0m+40.0m |
| 幅員 | 総幅員 17.0 m |
| 桁高 | 1.5m(箱桁中心) |
| 使用鋼材 | SM490YA, SM490YB, およびSS400 |
| 床版 | プレキャスト床版の厚さ18.0 cm |
| コンクリートの強度 | $\sigma_{ck}=600 \text{ kgf/cm}^2$ |
| クリープ係数 | 2.0 |
| 乾燥収縮量 | 12×10^{-5} |
| P C 鋼材 | SWPR7A, およびSWPR19 |
| 適用基準 | 道路橋示方書・同解説 I ~ III ^{3.1)} 、およびプレキャスト床版合成桁橋指針(案) ^{3.2)} |



(a) 側面図



(b) 平面図



(i) 端部

(ii) 中間部

(c) 断面図

図-3.1 菅原城北大橋アプローチ橋の一般図(寸法単位: mm)

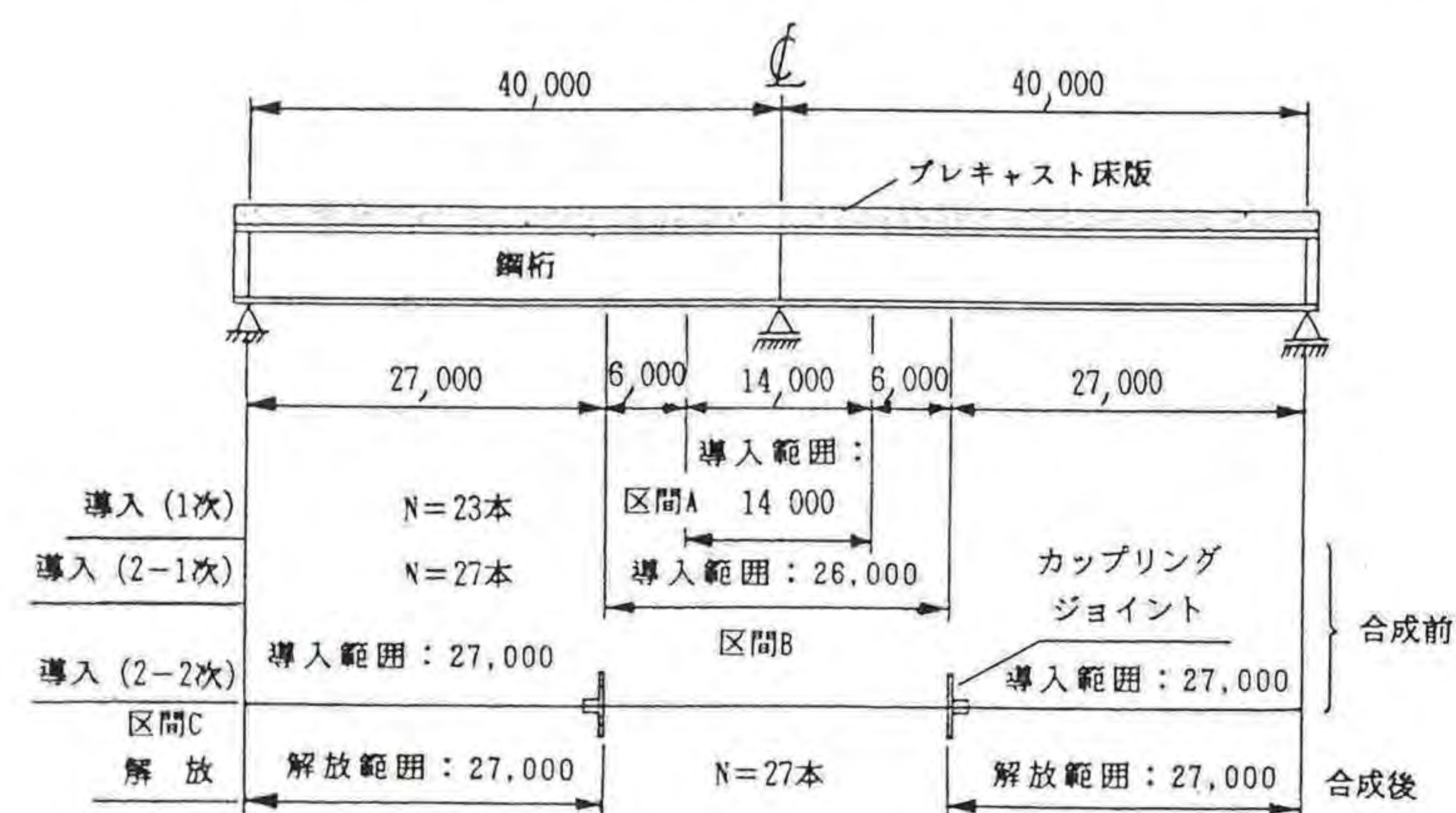
(2) 本橋の特徴

本橋は、プレキャスト床版を用いた2径間連続合成箱桁の本格的な道路橋である。その設計・施工には、いわゆるPPCS工法^{3.5), 3.6)}が採用されている。

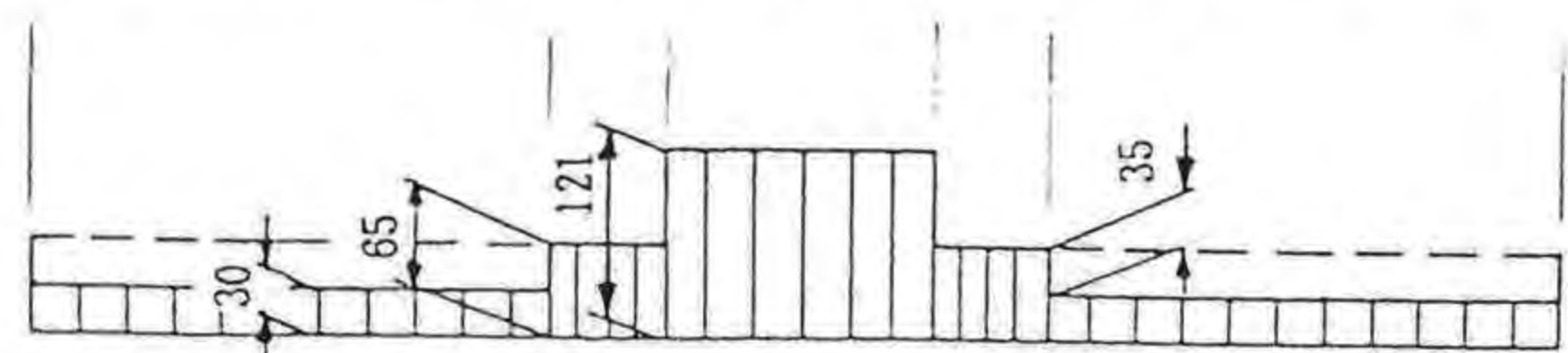
すなわち、プレキャスト床版には幅員方向にプレテンション方式でプレストレス力が、また橋軸方向にはポストテンション方式でプレストレス力が導入されている。橋軸方向のプレストレス量は、中間支点近傍のプレキャスト床版内に引張応力が生じない値に調整された。そのため、導入作業は、プレキャスト床版と鋼桁との合成前に合計3回に分けて行われた。

さらに、プレキャスト床版は鋼桁と合成後、鋼桁断面の正の曲げモーメントの軽減を図るため、端支点より約27m区間で余分に導入されたプレストレス力の一部分が解放された。しかし、中間支点近傍では、プレキャスト床版の引張応力の発生を極力押さえるため、解放を行わないという設計・施工が行われている。

図-3.2にはプレストレスの導入・解放の手順、および解放直後の床版応力度の分布形状を、また図-3.3には最終的な主桁の曲げモーメントの分布図を示す。



(a) 橋軸方向プレストレスの導入・解放の手順(寸法単位:mm)



(b) プレストレスによるプレキャスト床版内の応力度の分布 (単位: kgf/cm²)

1 kgf/cm² = 0.098 MPa

図-3.2 プレストレスの導入・解放の手順とプレキャスト床版内の応力度の分布

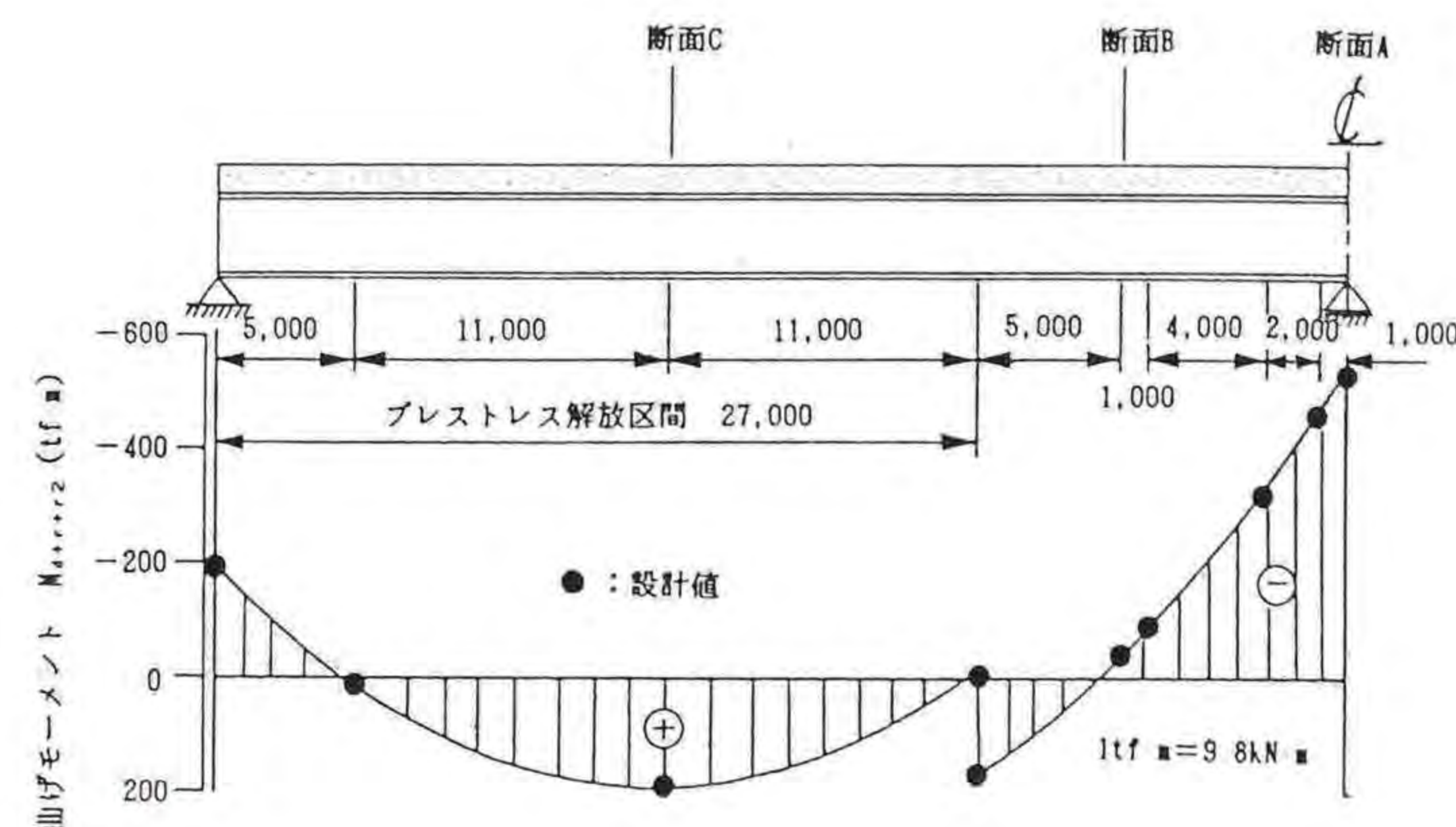


図-3.3 主桁の曲げモーメントの分布 (寸法単位: mm)

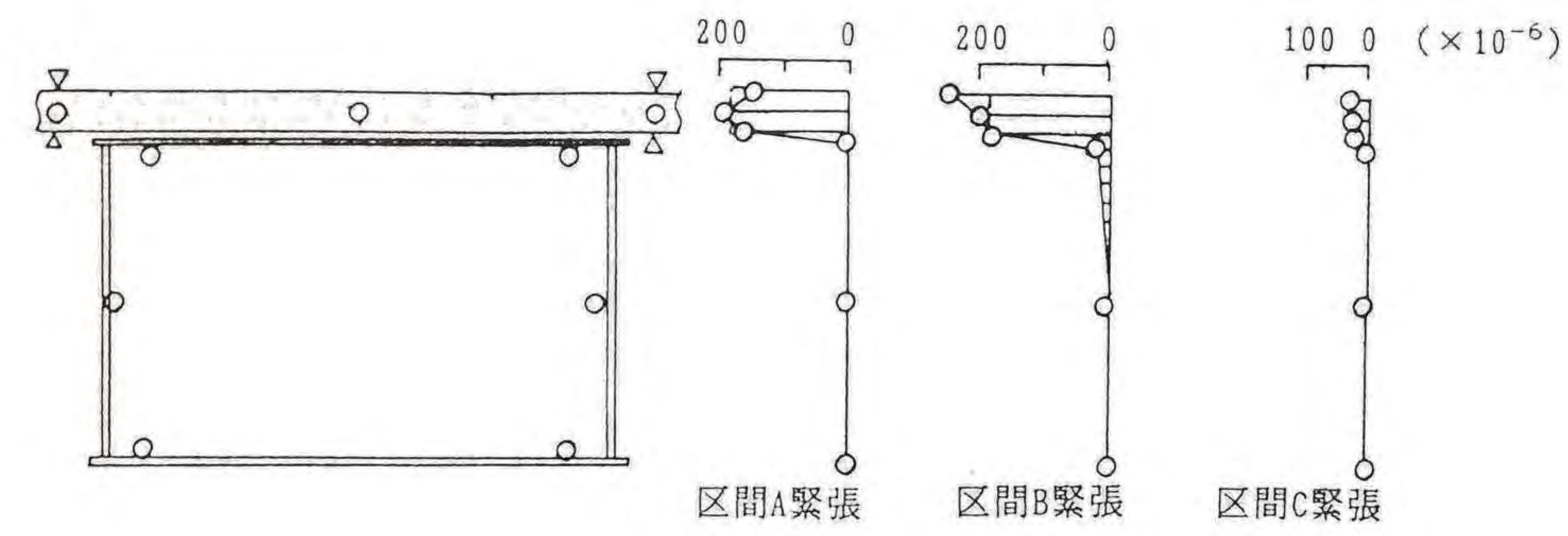
なお、本橋のクリープ・乾燥収縮に対する設計計算は、橋による解法^{3.7)}を用いて行われた。その設計計算におけるクリープ・乾燥収縮は、次の4項目に分けて検討されている。

- i) 導入プレストレス、および、それに伴う版のコンクリートのクリープ
- ii) 解放プレストレス、および、それに伴う版のコンクリートのクリープ
- iii) 合成後死荷重による版のコンクリートのクリープ
- iv) 版のコンクリートの乾燥収縮

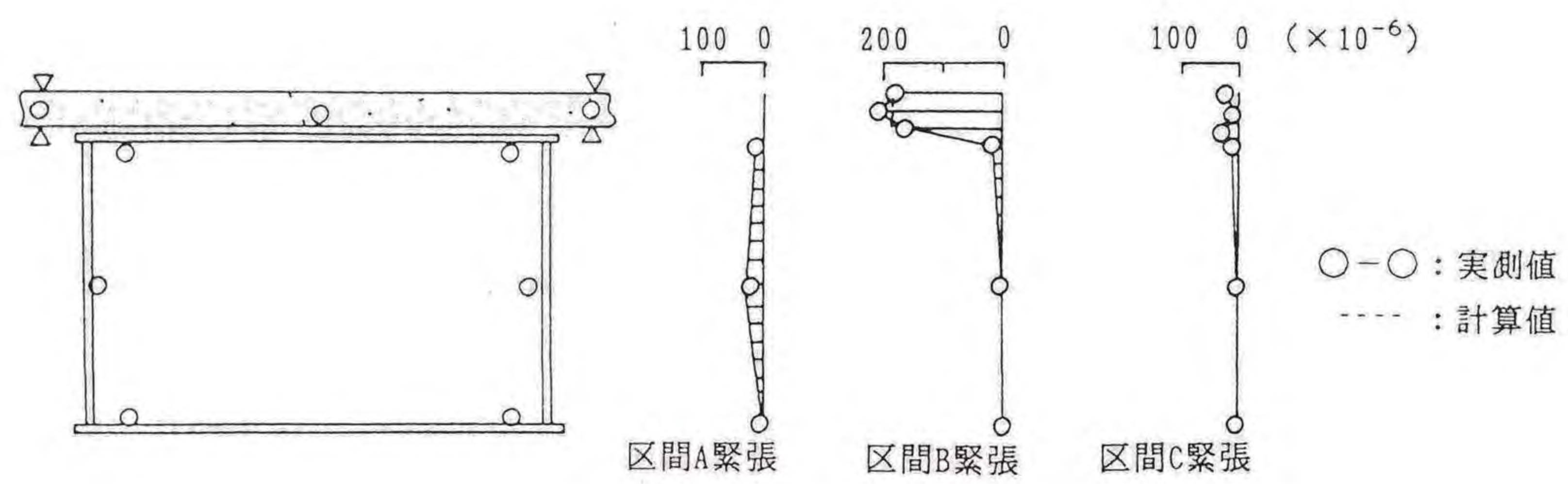
(3) プレストレスの導入、および解放に対する現場計測結果^{3.8)}

本橋の設計・施工上の重要なプレストレス力の導入、および、その一部分の解放が現場で適切に行われたか否かを確認するため、現場で応力計測が行われた。

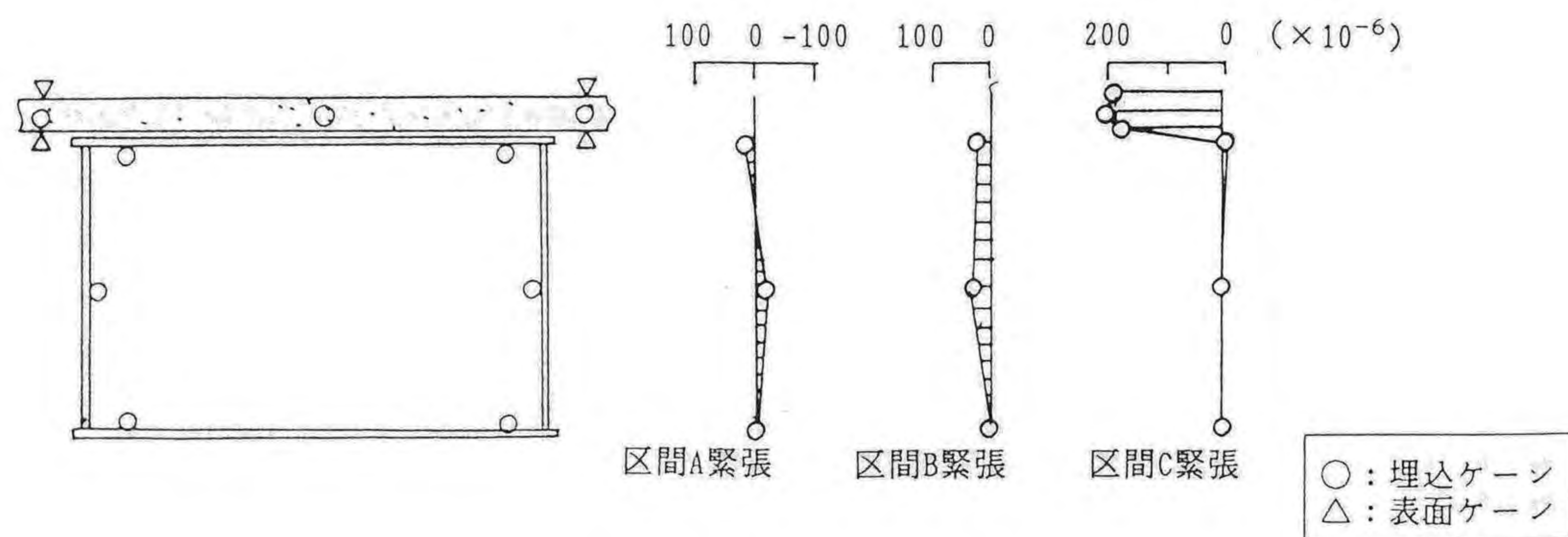
それらの結果を、図-3.4、および図-3.5に示す。なお、図中の断面A、B、およびCの位置については、後で示す図-3.15(a)中に示してある。



(a) 断面 A

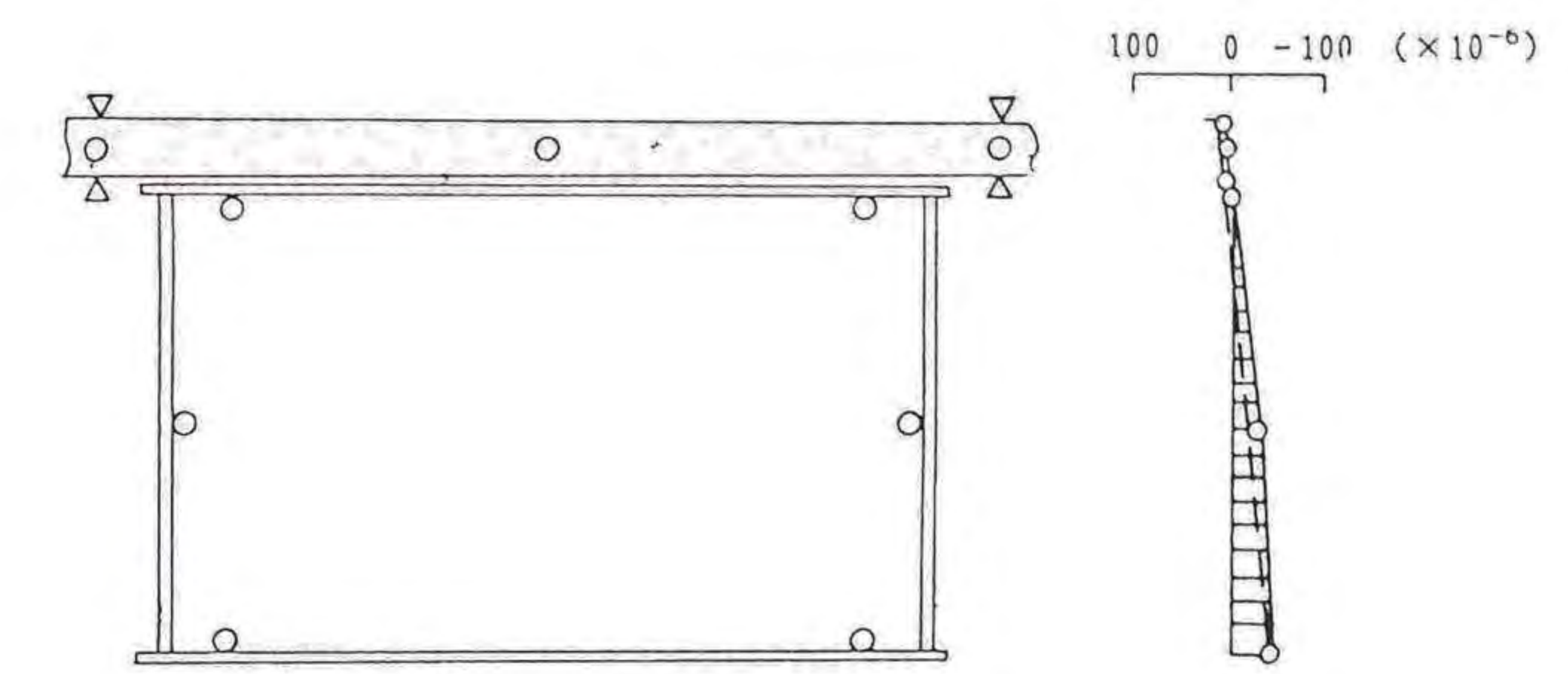


(b) 断面 B

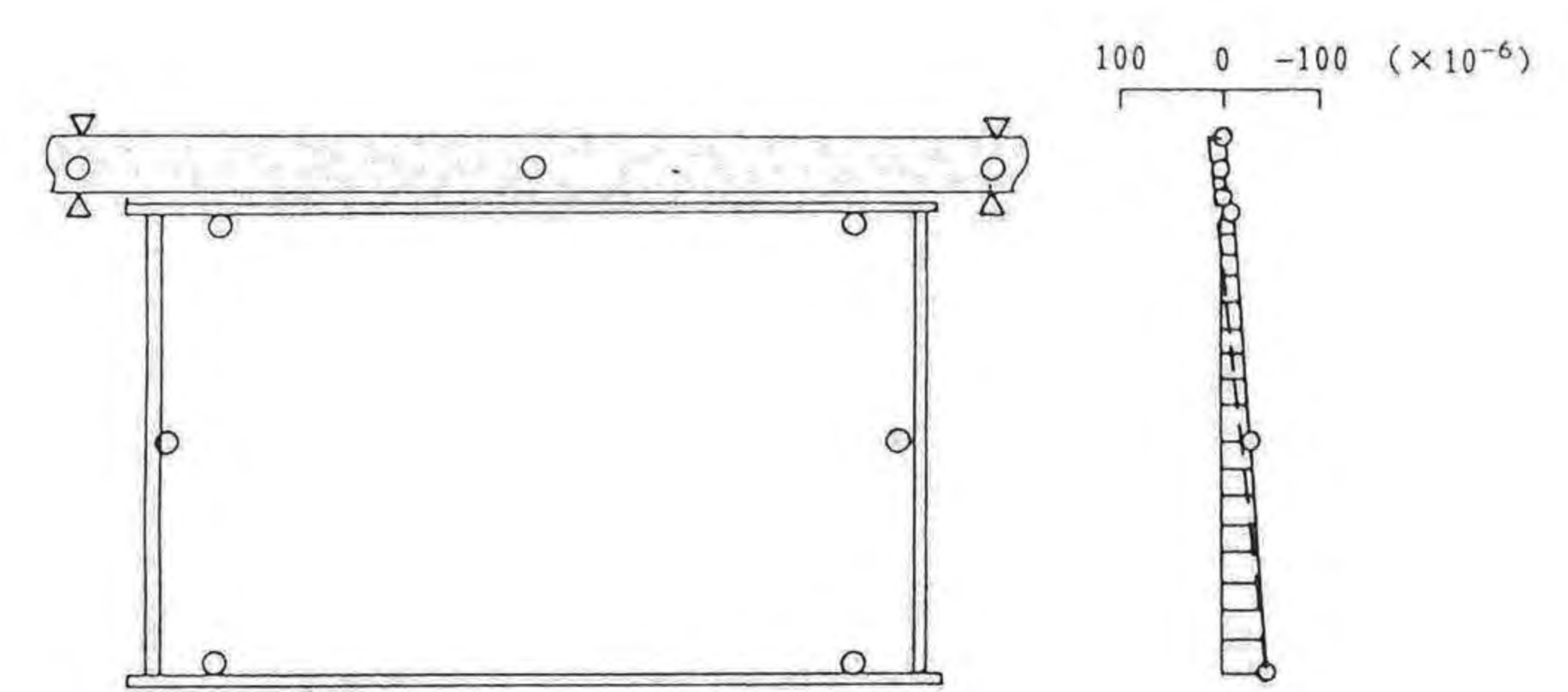


(c) 断面 C

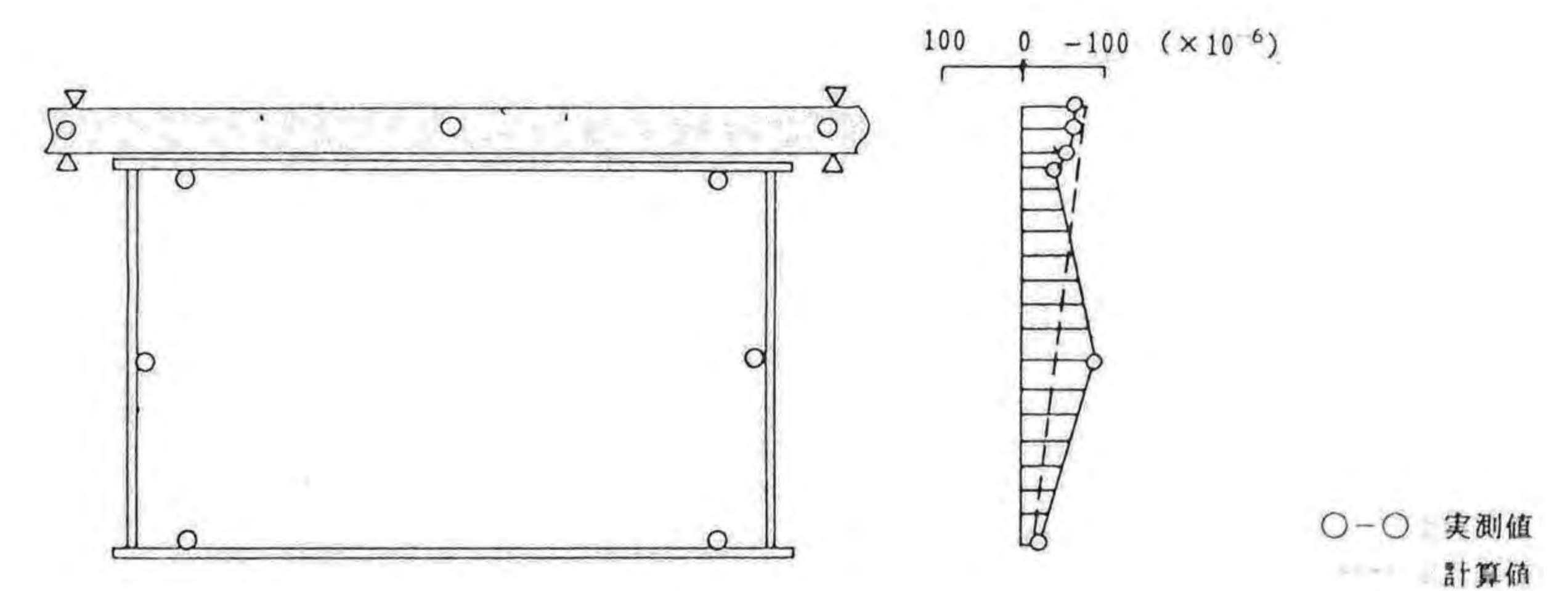
図-3.4 プレストレス力の導入による主桁各部のひずみ



(a) 断面 A



(b) 断面 B



(c) 断面 C

図-3.5 プレストレス力の一解放による主桁各部のひずみ分布

(4) 経時挙動の解析による予測

解析結果の一例として、表-3.2の条件で、時刻 $t=400$ 日に至るまでの本橋のクリープ・乾燥収縮に伴う応力、および、たわみ変化の計算結果を、それぞれ図-3.6、および図-3.7に示す。

表-3.2 計算条件

| 項目 | 数値 |
|---------------|---|
| 導入プレストレス力 | $P_t = 36 \text{ tf/ケ-ブル}$ |
| 解放プレストレス力 | $P_r = 20 \text{ tf/ケ-ブル}$ |
| 後死荷重 | $W_d = 3.033 \text{ tf/m}$ |
| コンクリートのヤング係数 | $E_b = 3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ |
| 鋼桁のヤング係数 | $E_a = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ |
| PC鋼材のヤング係数 | $E_p = 2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ |
| クリープ係数 | $\phi_{v\infty} = 0.4$, および $\phi_{f\infty} = 1.6$ |
| 乾燥収縮量 | $\epsilon_{s\infty} = 12 \times 10^{-5}$ |
| 乾燥収縮に伴うクリープ係数 | $\phi_s(\infty) = 4.0$ |

(1tf=9.8kN, 1kgf/cm²=0.098MPa)

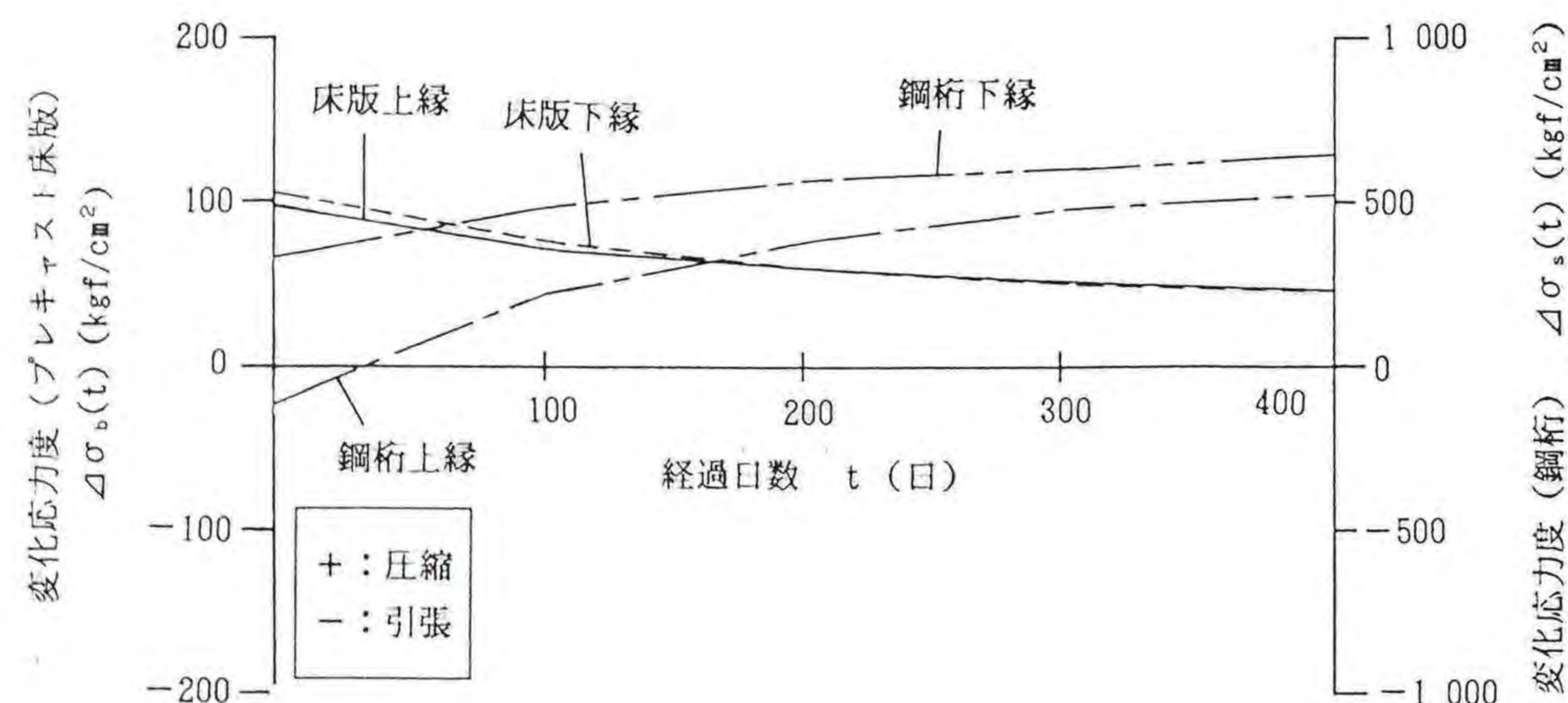


図-3.6 クリープと乾燥収縮とによる応力度の変動
(中間支点上の断面)

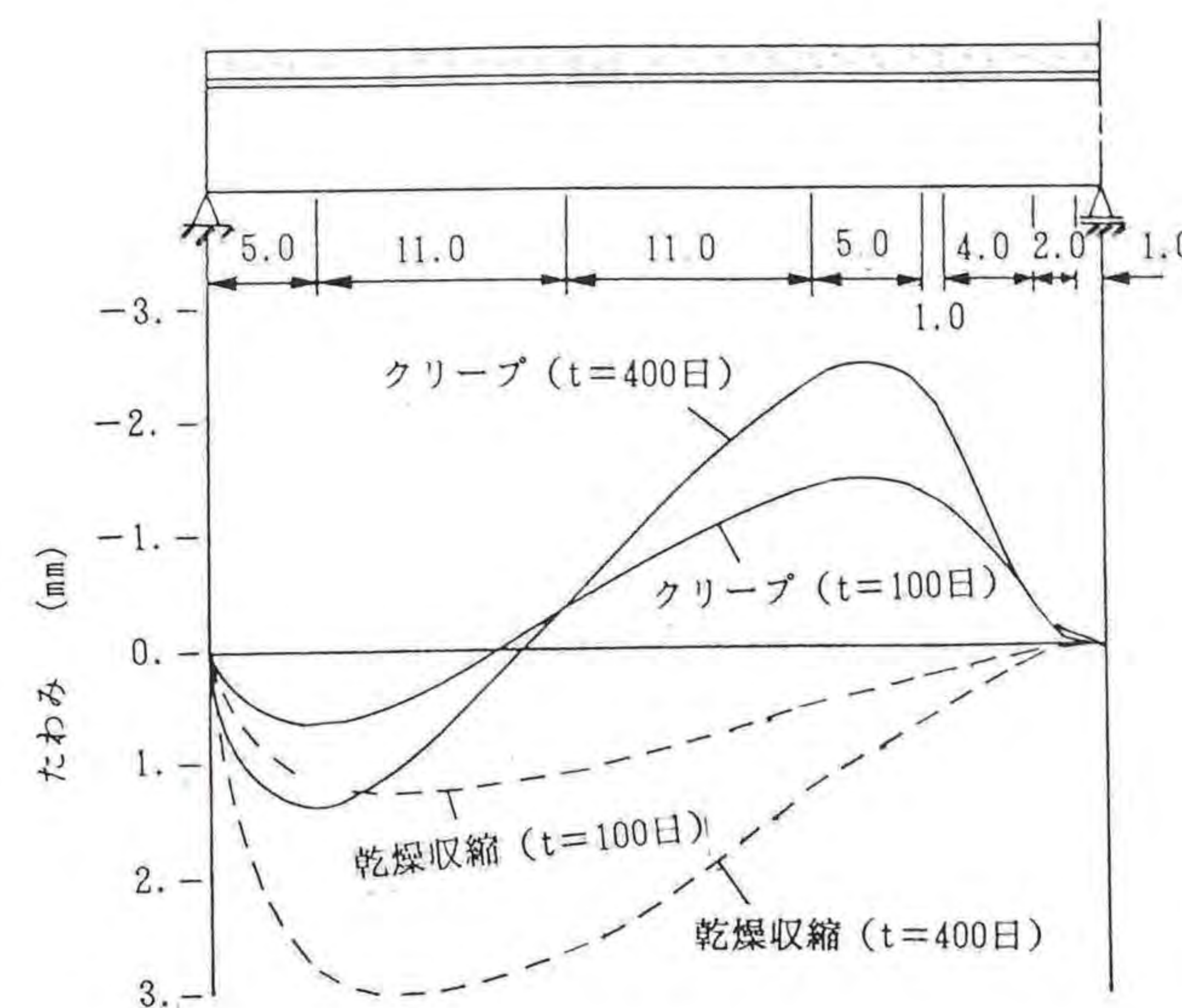


図-3.7 クリープと乾燥収縮とによるたわみの変動
(寸法単位: m)

これらの図から、つぎのことがいえる。

- i) 応力度に関しては、クリープ・乾燥収縮により、床版部分が次第に引張応力を受け、また鋼桁部分が次第に圧縮応力を受けている。
- ii) 変位に関しては、次第にたわみが増加する傾向にある。しかし、プレストレスの解放を行っていない区間、すなわち中間支点近傍においては、クリープによって主桁がそり上がる傾向を呈する。

3.3 室内実験

(1) 実験概要

供試体としては、表-3.3に示すように、クリープ計測用5体、および乾燥収縮計測用3体の計8体を製作した。プレストレス導入量は、実橋の図-3.2の各施工区間に対応するように、3ケースを設定した。

供試体の寸法、配筋量、およびゲージ位置などの詳細を、図-3.8に示す。また、クリープ計測用2体(C120L-2, およびC120L-3)は、実橋で用いた目地充填材(無収縮、および樹脂モルタル)の影響を調べるため、図-3.9に示す目地を含んでいる。ひずみは、埋め込み型ひずみ計と表面ゲージとを併用して測定した。また、PC鋼棒の張力管理は、各供試体の2箇所に配置したセンターホール型のロードセルによって行った。供試体の設置場所は、実験センターの地下室で、そこでの年間の温度変化は、15°C~25°Cであり、また湿度変化は年間を通じて60~90%の範囲であった。

なお、材齢28日目のコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、およびポアソン比は、それぞれ475.6kgf/cm²、3.61x10⁵kgf/cm²、および0.21であった。

橋軸、および幅員2方向にプレストレス力が導入された本橋のプレキャスト床版は、2方向におけるクリープ現象を生ずる。そこで、計測は、実物大のPC版単体を製作して約2年間にわたるクリープ、および乾燥収縮に伴うひずみを長期間にわたり測定し、実橋の経時挙動の解析に必要なクリープ係数、および乾燥収縮量を調べることを目的として計測を実施した。

表-3.3 供試体の種類

| 供試体 | 記号 | 幅員方向 プレスト力量 (kgf/cm ²) | 橋軸方向 プレスト力量 (kgf/cm ²) | 供試体の寸法(mm) (幅×長さ×厚さ) | 計測目的 |
|-----|---------|--|--|--|------------------------|
| 1-1 | C120L-1 | 100 | 120 | 2,200×2,000×180 | クリープ |
| 1-2 | C120L-2 | 100 | 120 | 2,200× $\begin{bmatrix} 998 \\ 998 \end{bmatrix}$ ×180 | クリープ 目地(無収縮モルタル)の影響 |
| 1-3 | C120L-3 | 100 | 120 | 2,200× $\begin{bmatrix} 998 \\ 998 \end{bmatrix}$ ×180 | クリープ 目地(樹脂モルタル)の影響 |
| 2 | C65L | 100 | 65 | 2,200×2,000×180 | クリープ |
| 3 | C35L | 100 | 65→35(*1) | 2,200×2,000×180 | クリープ |
| 4 | S100L | 100 | 0(*2) | 2,200×2,000×180 | 乾燥収縮 |
| 5 | SOL | 0(*3) | 0(*2) | 2,200×2,000×180 | 乾燥収縮 |
| 6 | SPL | 0(*4) | 0(*4) | 1,100×1,000×180 | 乾燥収縮 |

(*1): 65kgf/cm²導入し、5日後に35kgf/cm²までリリースを行う。 (*3): 鋼線を配置する。
(*2): 鋼棒を配置し、グラウトを施す。 (*4): フレッシュコンクリート

1kgf/cm²=0.098MPa

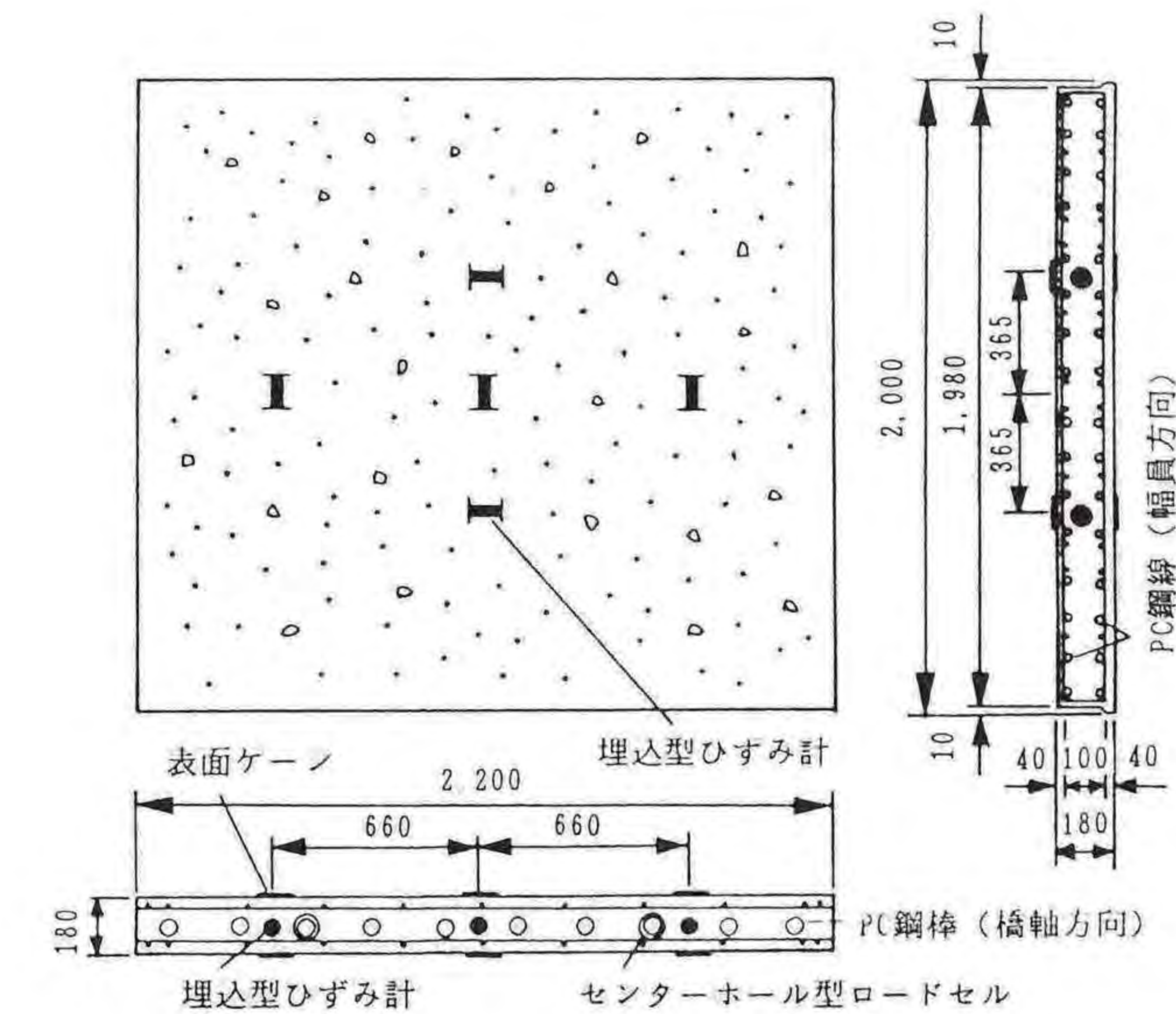


図-3.8 供試体の詳細図(寸法: mm)
(C120L-1, S100L, および SOL)

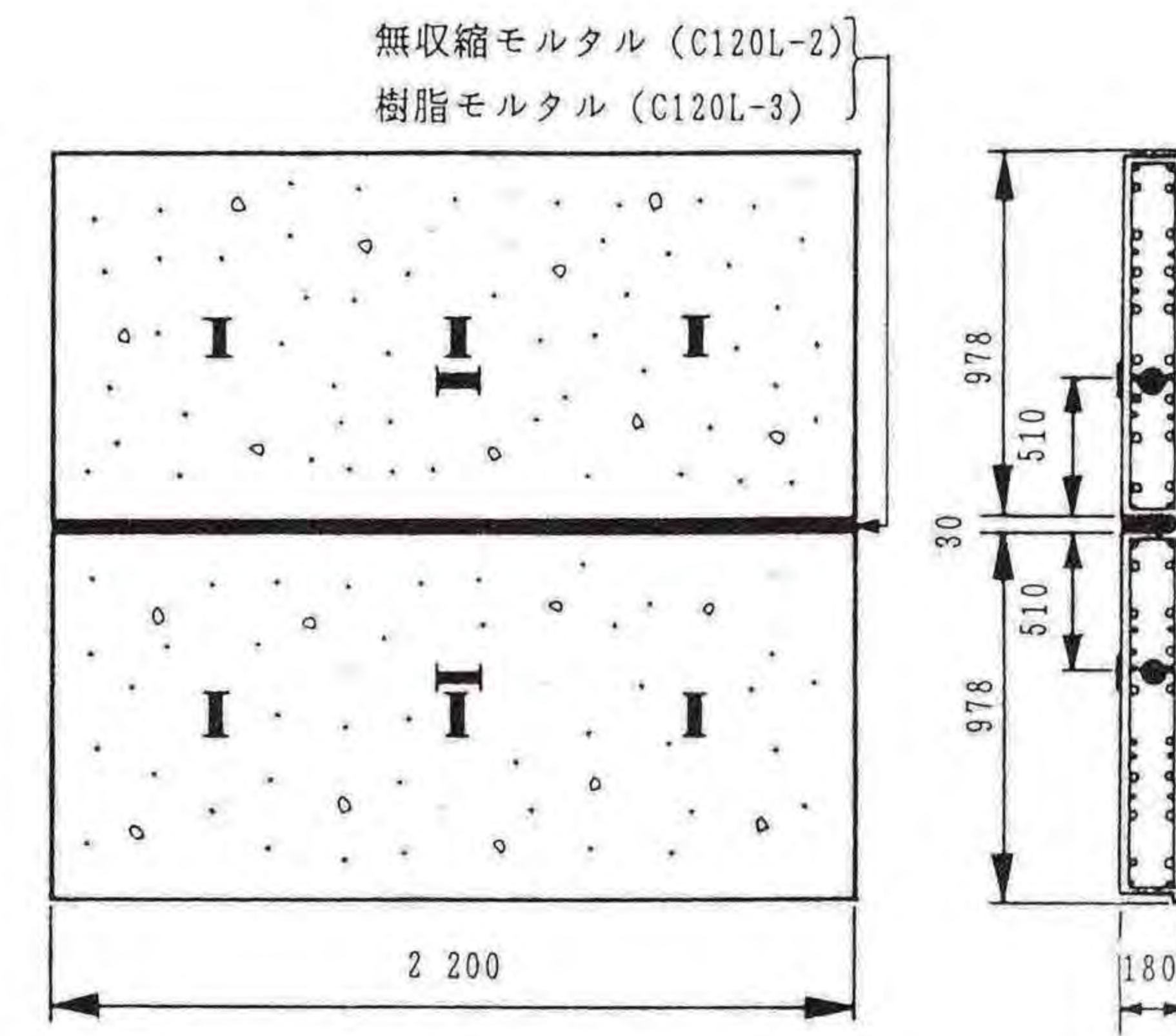


図-3.9 供試体の詳細図(寸法: mm)
(C120L-2, および C120L-3)

(2) 実験結果とその考察

代表的な計測結果として図-3.10、および図-3.11には、供試体C120L-1、およびS100Lの約2年間にわたるひずみの経時変化を示す。

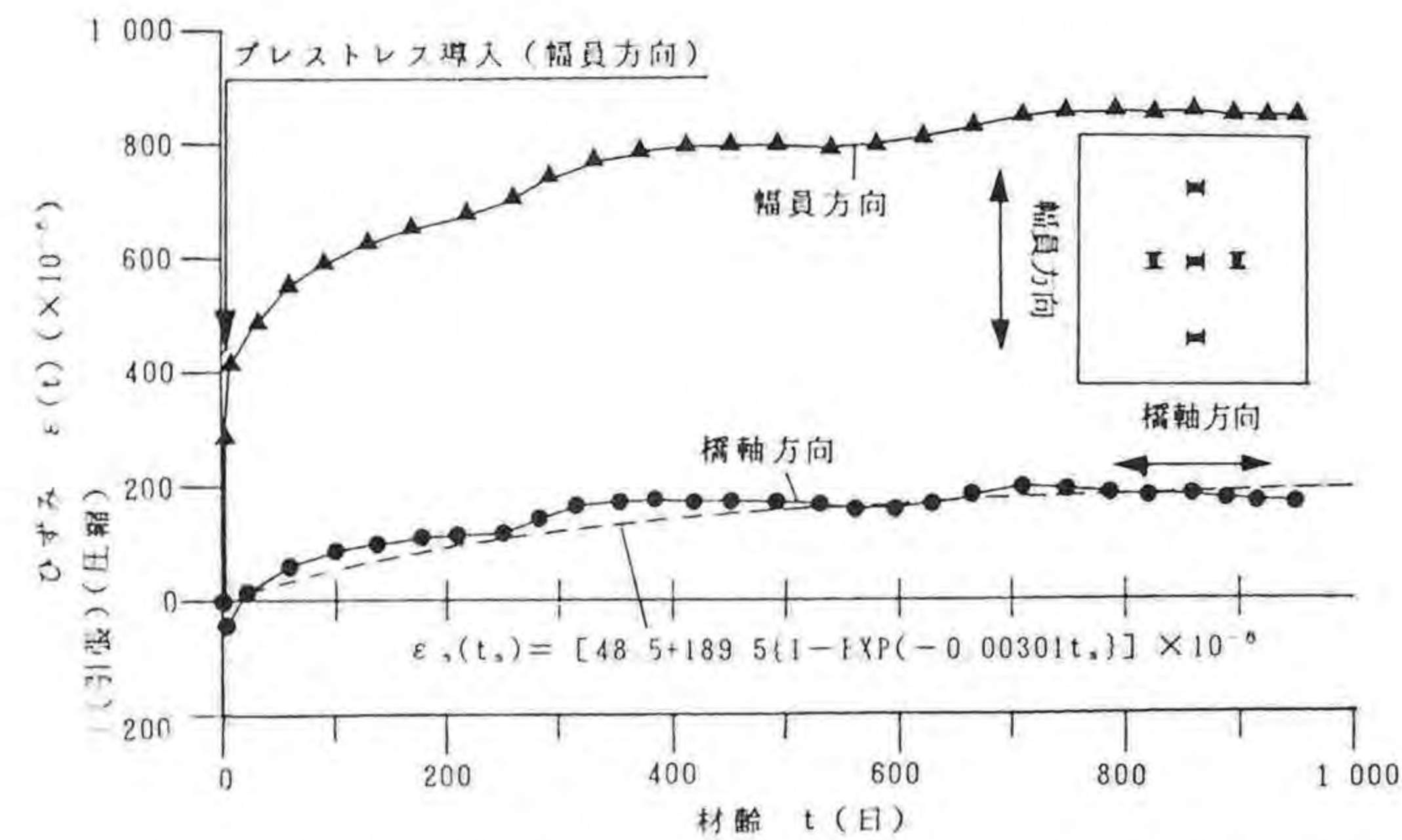


図-3.10 供試体C120L-1の材齢-ひずみ図

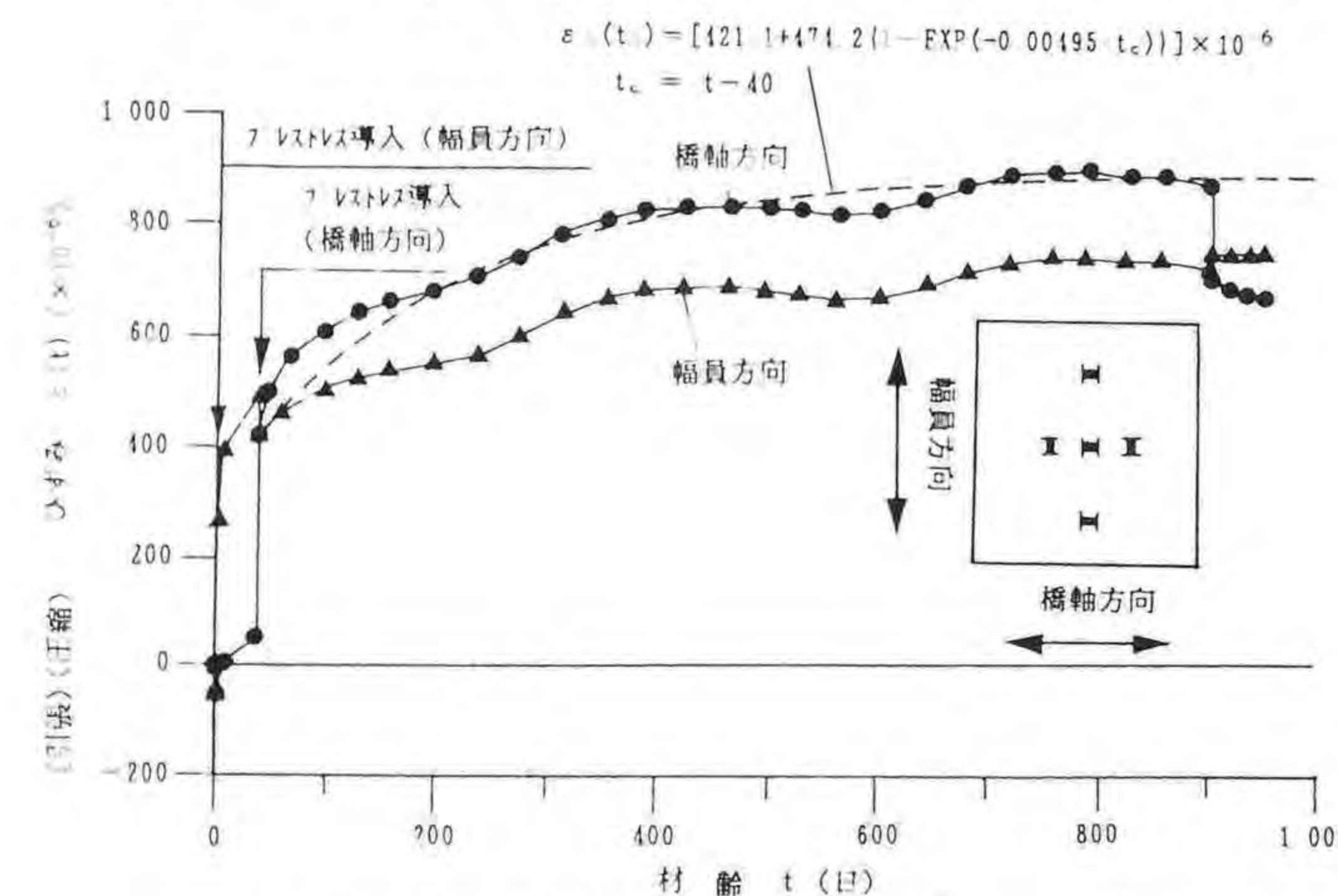


図-3.11 供試体S100Lの材齢-ひずみ図

これらの図から明らかなように、橋軸、および幅員2方向にクリープ現象が生じているのがわかる。そして、橋軸方向ひずみに関しては、その最終値を予測するため、指数関数とみなした回帰曲線も図中に示した。

そして、図-3.12には、供試体C120L-1、およびC65Lのプレストレス解放後のひずみの経時変化を示す。

また、表-3.4には、各供試体のクリープ係数、および乾燥収縮量の値がまとめられている。もちろん、クリープ係数の算定の際、乾燥収縮ひずみを差し引いている。

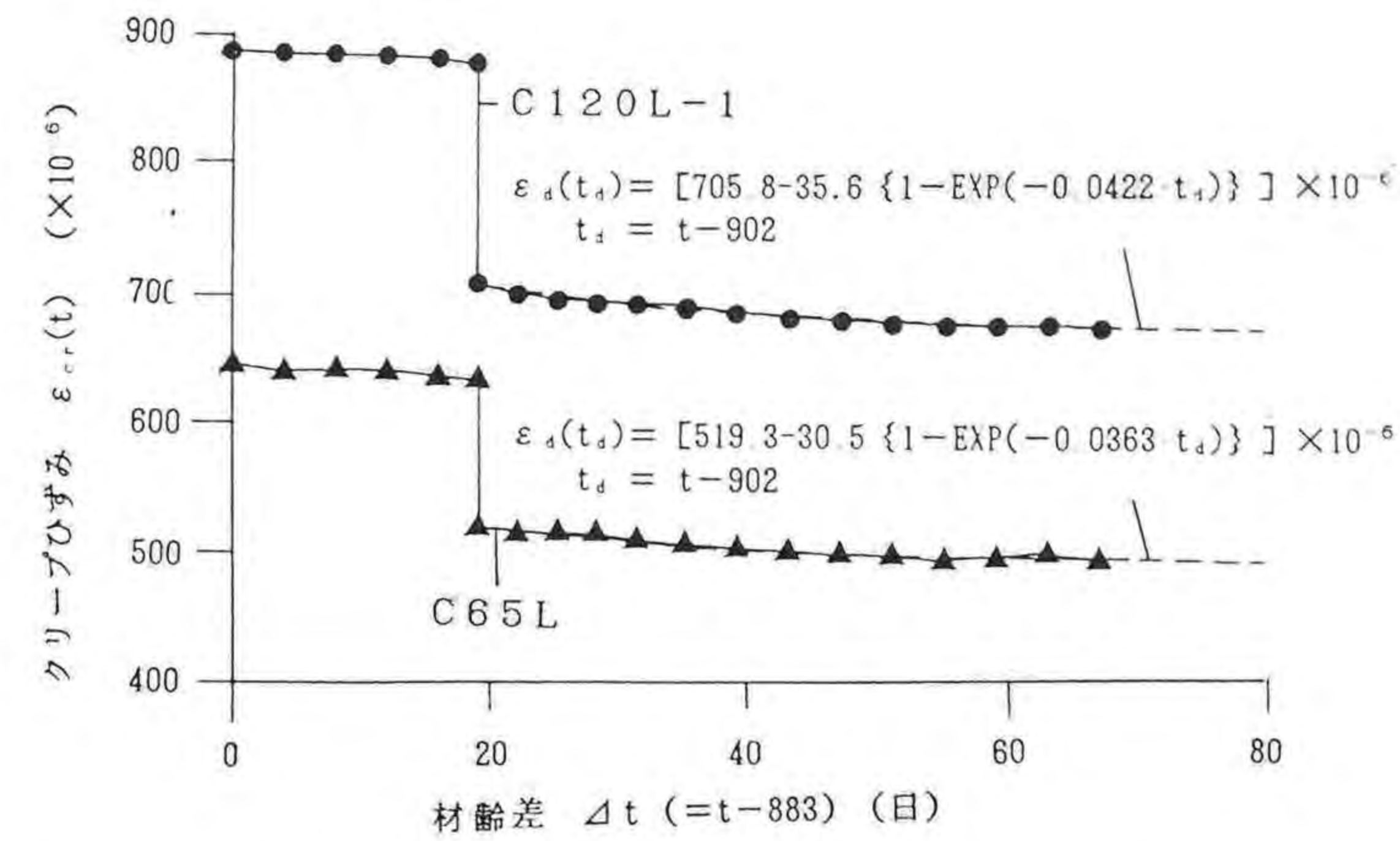


図-3.12 供試体C120-1、およびC65Lの材齢-ひずみ図

表-3.4 各供試体のクリープ係数、および乾燥収縮量

| 供試体 No. (プレストレス(kgf/cm ²)) | クリープ係数 φ | 回復クリープ係数 φ _s | 供試体 No. | 乾燥収縮量 ε _{s,t} (×10 ⁻⁶) |
|---|--------------|----------------------------|---------|--|
| C120L-1(120) | 0.84 | 0.21 | S100L | 238.0 |
| C120L-2(120) (無収縮モル目地を含む) | 0.70 | — | S0L | 227.4 |
| C120L-3(120) (樹脂モル目地を含む) | 0.70 | — | SPL | 242.0 |
| C65L(65) | 0.88 | 0.27 | | |
| C35L (65→35) | 0.24 0.65 | — | | |

これらの結果から、次のことがいえる。

- i) クリープ係数・乾燥収縮量の最終値は、平均すると、それぞれ0.80、および236×10⁻⁶である。また、回復クリープ係数の値は、次の第4章で示す方法で同定した結果によると、0.24程度の値と推定される。
- ii) 2種類の目地充填材をもつ供試体C120L-2、およびC120-3のクリープ係数は、ほぼ同じ値である。そのため、目地充填材の相違によるクリープ係数には、差異が認められない。さらに、これらの供試体とC120L-1とを比較すれば、目地による悪影響は、少ないものと考えられる。
- iii) 2本の供試体S100L、およびS0Lの比較より、乾燥収縮ひずみに関しては、幅員方向のプレストレスの導入の差異が現れない。当然のことながら、無筋コンクリートの供試体SPLの乾燥収縮量は、S100L、およびS0Lよりも僅かながら大きな値となった。

(3) 道路橋示方書の規定値との比較

以上の計測結果を道路橋示方書^{3.1)}の進行曲線と比較した結果を、図-3.13~3.15に示す。

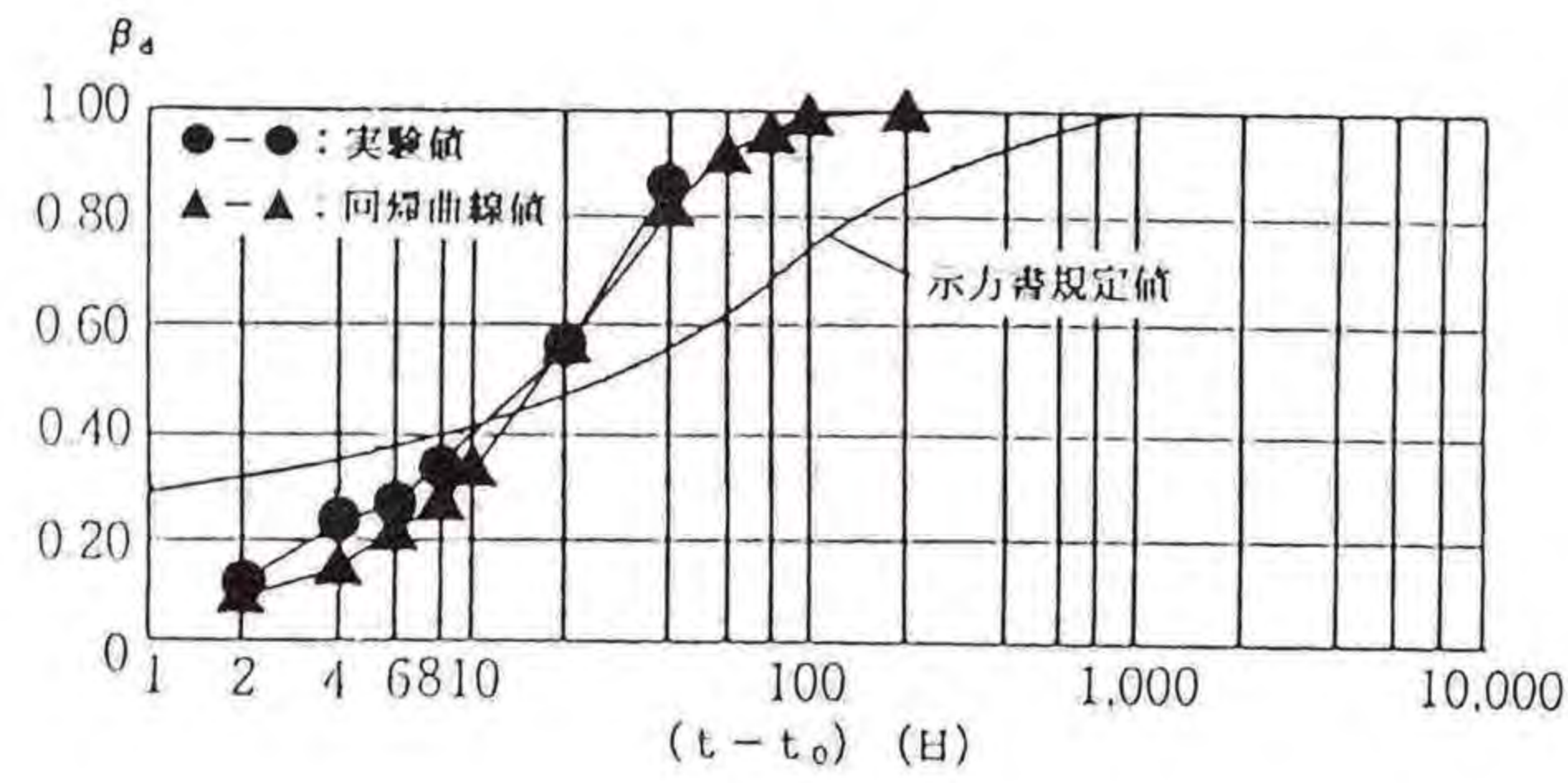


図-3.13 係数 β_a 計測値と道路橋示方書の規定値との比較

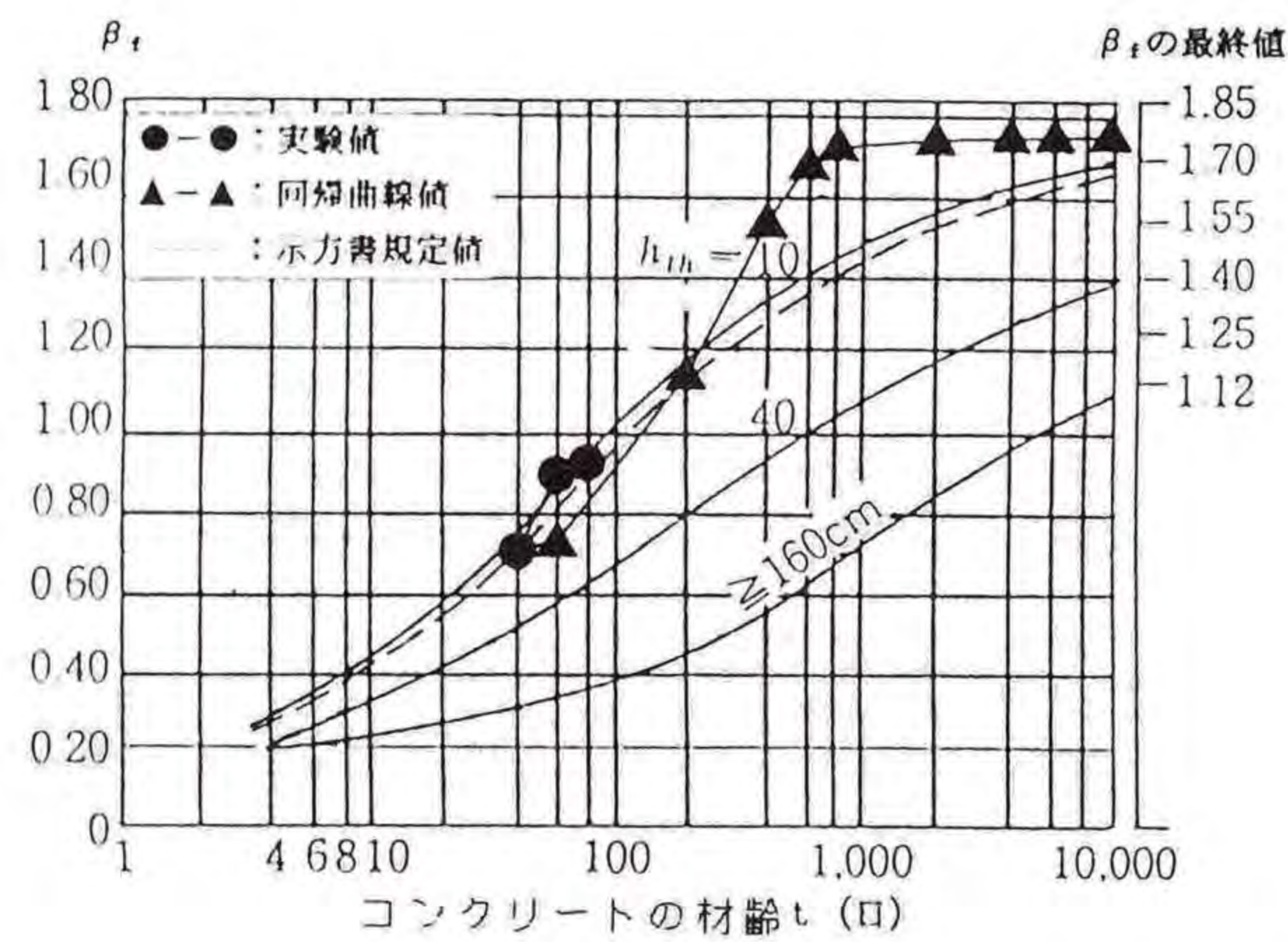


図-3.14 係数 β_f 計測値と道路橋示方書の規定値との比較

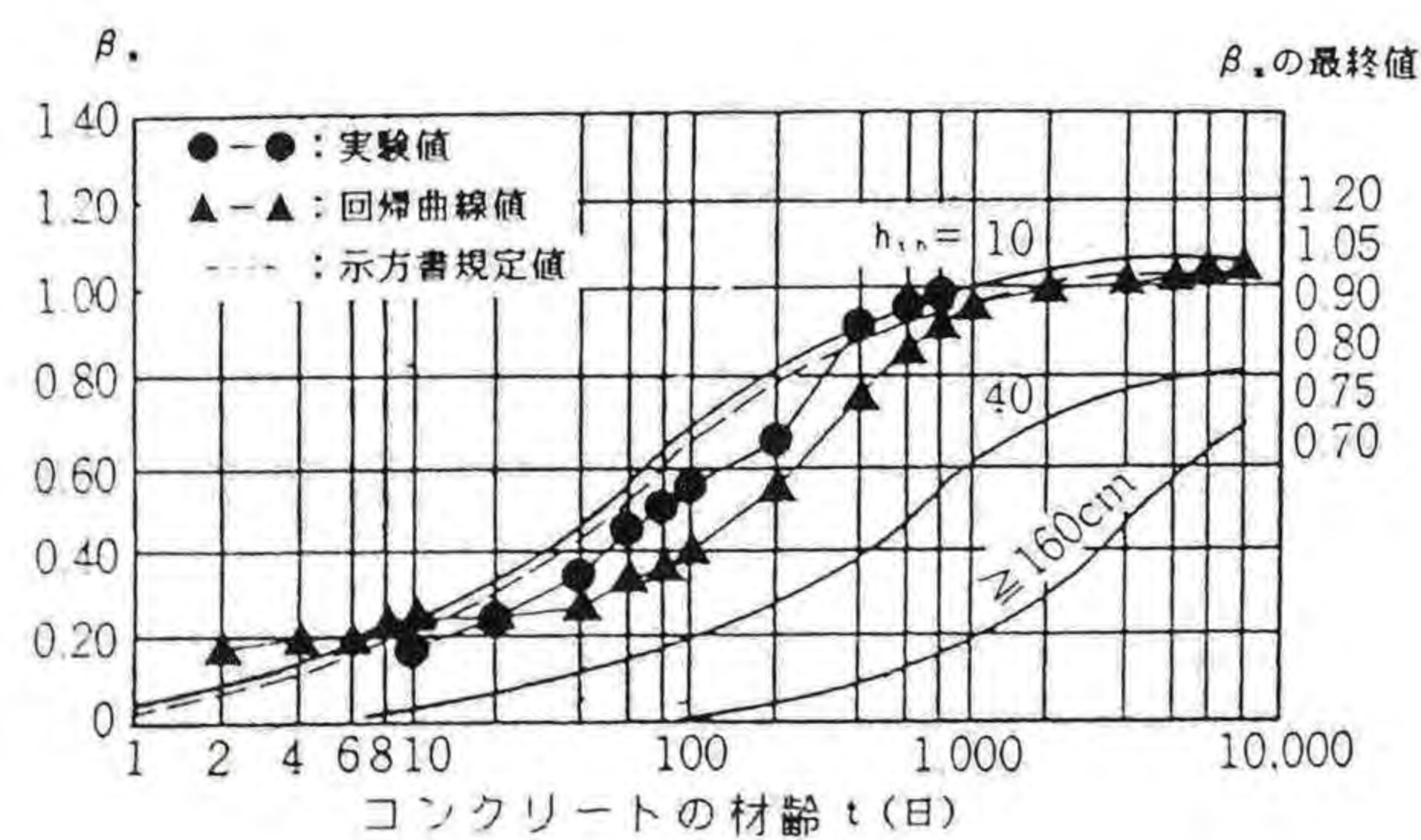


図-3.15 係数 β_s 計測値と道路橋示方書の規定値との比較

これらの図から、次のことがいえる。

- i) 図-3.14から、クリープ成分中のフロー成分 $\beta_f(t)$ の最終値に関しては、ほぼ道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート編^{3.1)}の規定に近い値になっている。しかし、その進行に関しては、上記示方書の進行曲線に比べて、若干、早く最終値に達していることがわかる。また、図-3.13から、遅れ弾性成分 $\beta_a(t-t_0)$ に関しても、同様のことがいえる。
- ii) 図-3.15から、乾燥収縮の進行は、計測床版に対応する道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート編^{3.1)}の規定値とほぼ類似の性状を呈している。

3.4 現場実験

(1) 経時挙動の測定方法

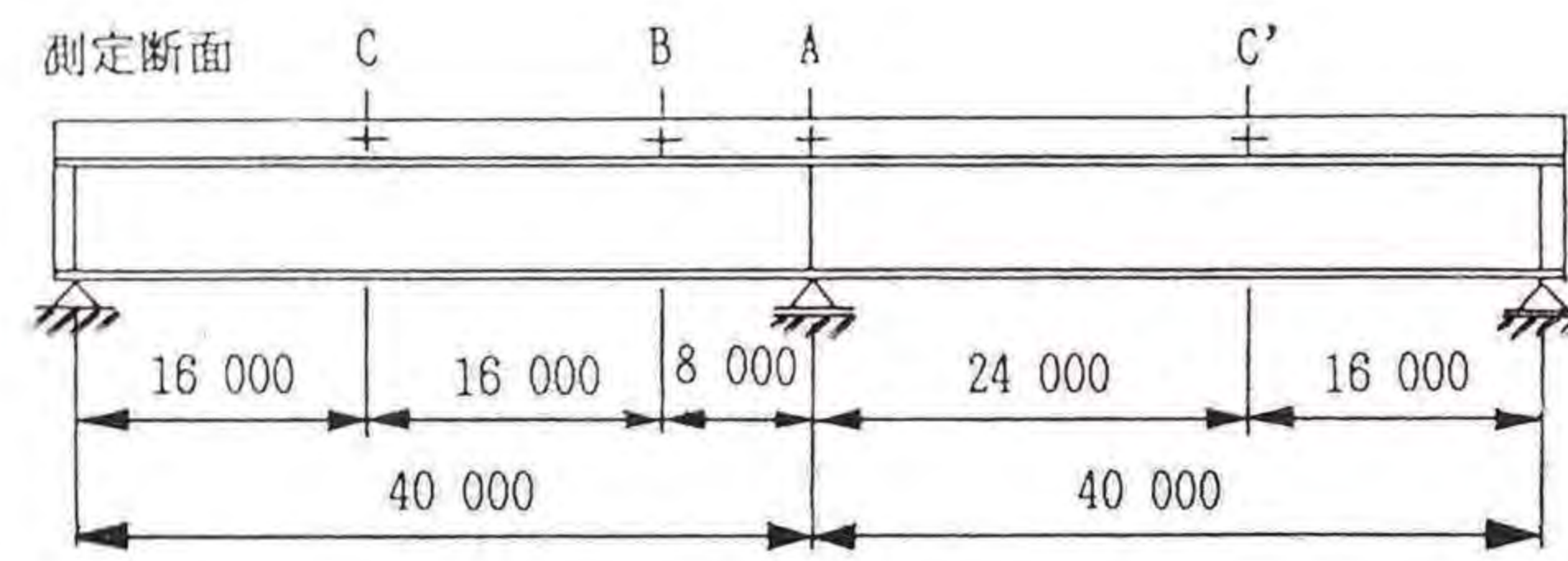
a. 計測目的

本計測は、前述のPPCS工法により施工された実橋において、2方向にプレストレス力が導入されたプレキャスト床版のクリープ・乾燥収縮に伴う合成桁各部の経時挙動を調べることを目的とし、約2年間にわたる長期測定を実施した。

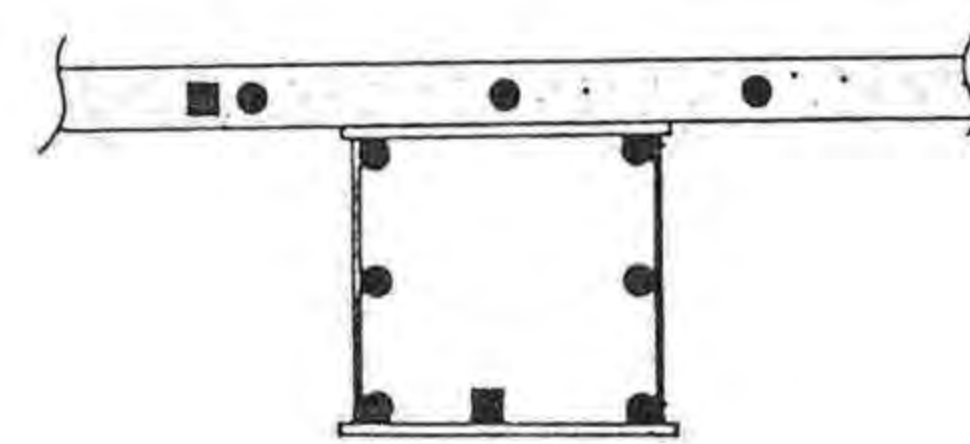
b. 計測方法

実橋の長期ひずみの測定位置は、図-3.16(a)に示す4断面、すなわちA、B、C、およびC'とし、埋込型ひずみ計を用いて測定を行った。

断面内におけるひずみ計は、プレキャスト床版内に4個(ダミーゲージ1個を含む)、鋼桁上フランジに2個、鋼桁ウェブに2個、および鋼桁下フランジに3個(ダミーゲージ1個を含む)を、図-3.16(b)に示すように、それぞれ取り付けた。



(a) 側面図



(b) 断面図

図-3.16 ゲージの取付け位置 (寸法単位: mm)

(2) 測定結果とその考察

本橋は、1989年6月に完成し、すでに約3年間にわたって供用されてきている。建設後、約2年間にわたるひずみの測定を行ったので、それらの結果を以下に示す。

その際、ひずみ変化に関しては、温度変化の影響を考慮して補正を行っている。すなわち、図-3.17には温度補正前の中間支点上断面の各部のひずみ変化を、図-3.18には温度変化を、また図-3.19には温度補正後の断面各部のひずみ変化をそれぞれ示した。

さらに、図-3.20に示すように、断面内部のひずみ分布についても、計測値と解析値との比較を行った。なお、解析で使用したクリープ係数は0.75であり、また乾燥収縮量はプレキャスト床版の仮置期間7ヶ月を考慮して 70×10^{-6} とした。

本橋の場合、クリープ・乾燥収縮により、合成桁の全断面にわたって圧縮ひずみが生ずるという特性が解析によって判明している。そして、計測結果についても、その傾向がよく現れており、解析値と計測値とは、比較的よく一致している。

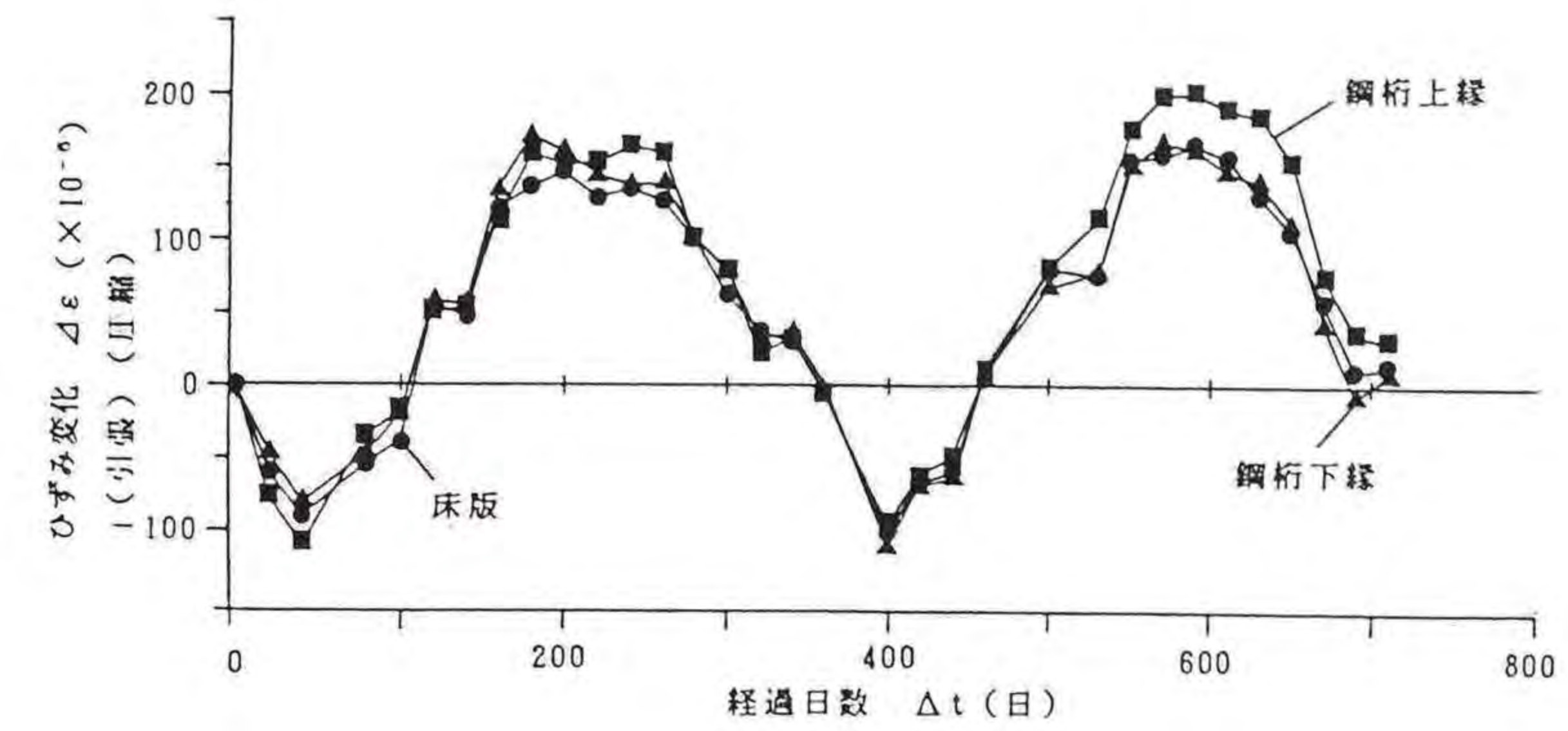


図-3.17 測定断面A (中間支点上の断面) におけるひずみの経時変化 (温度補正前)

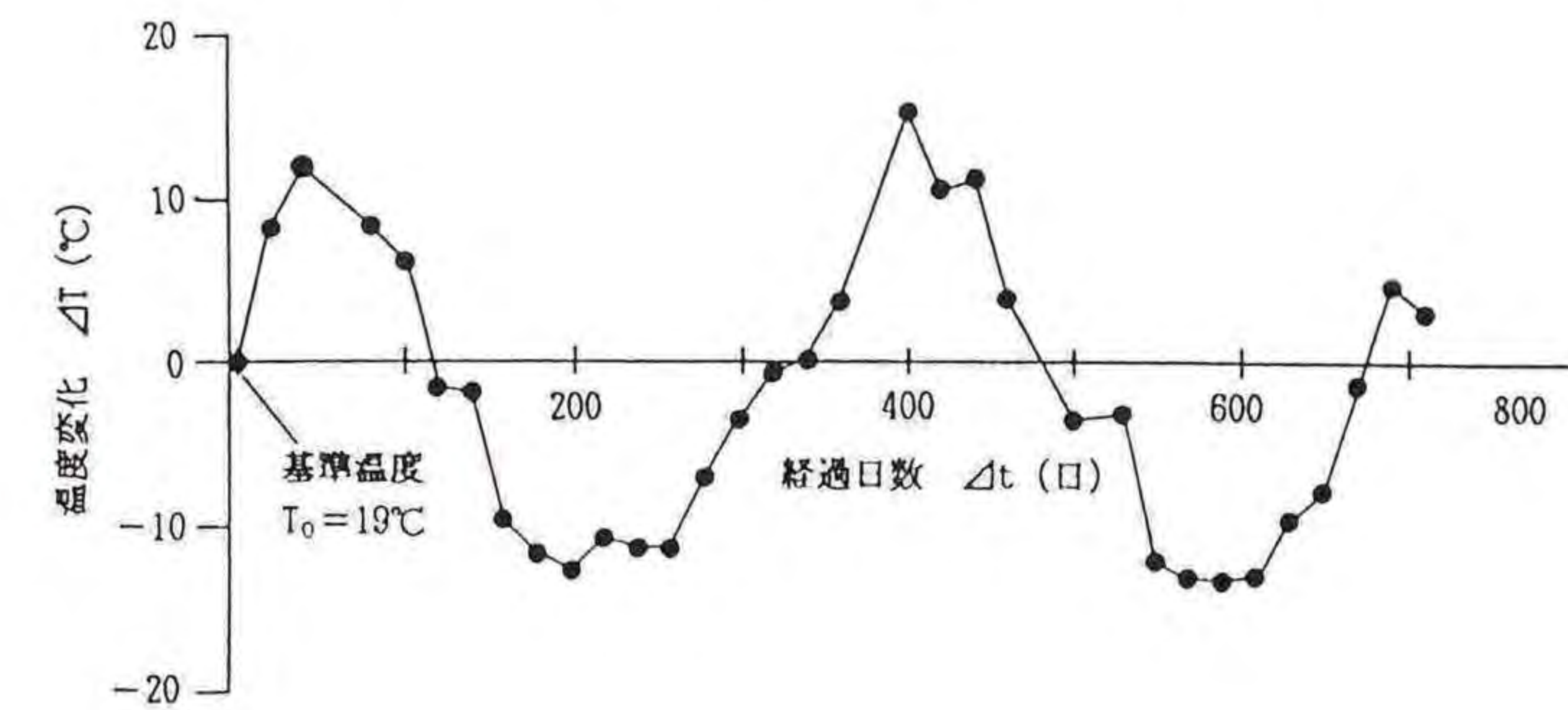


図-3.18 温度変化

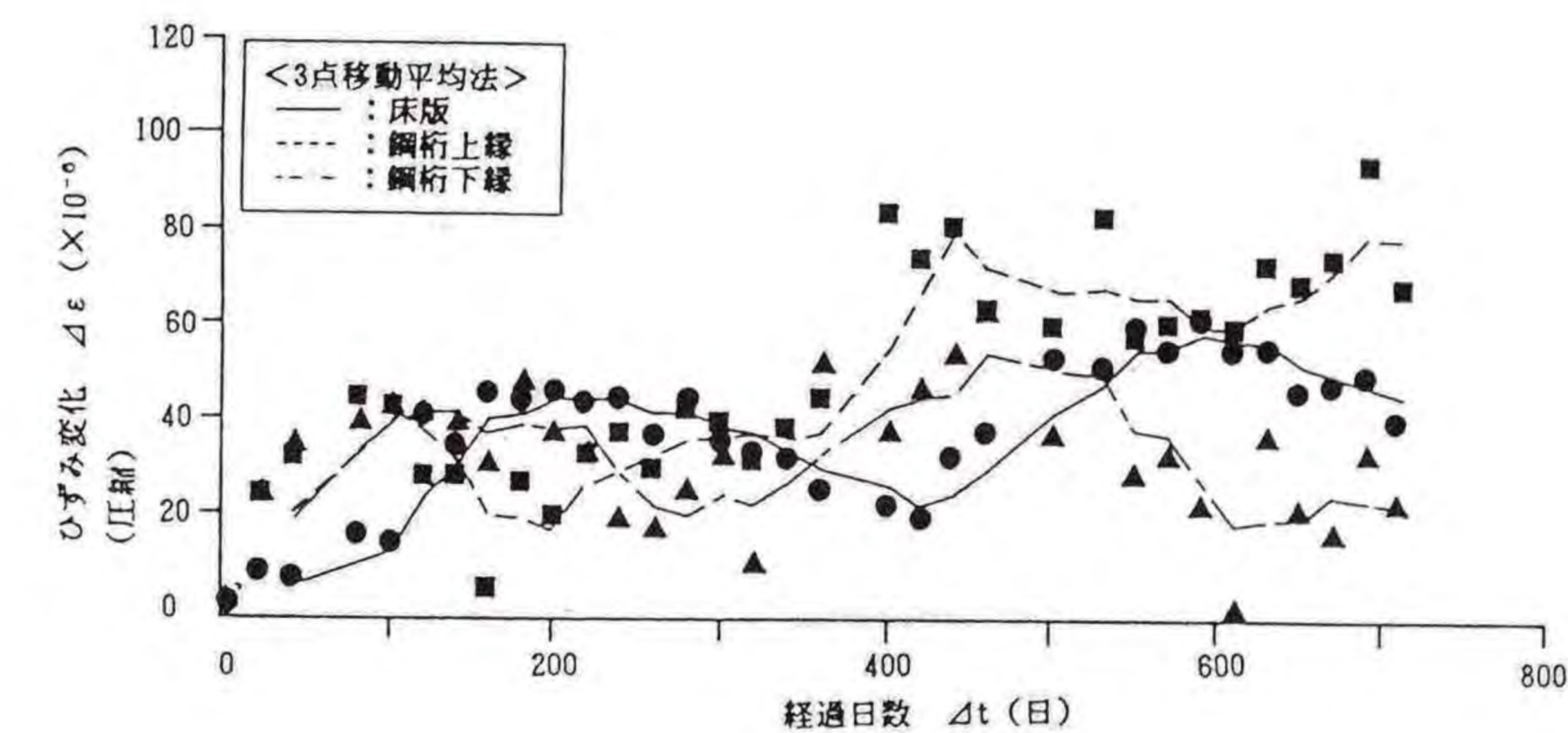
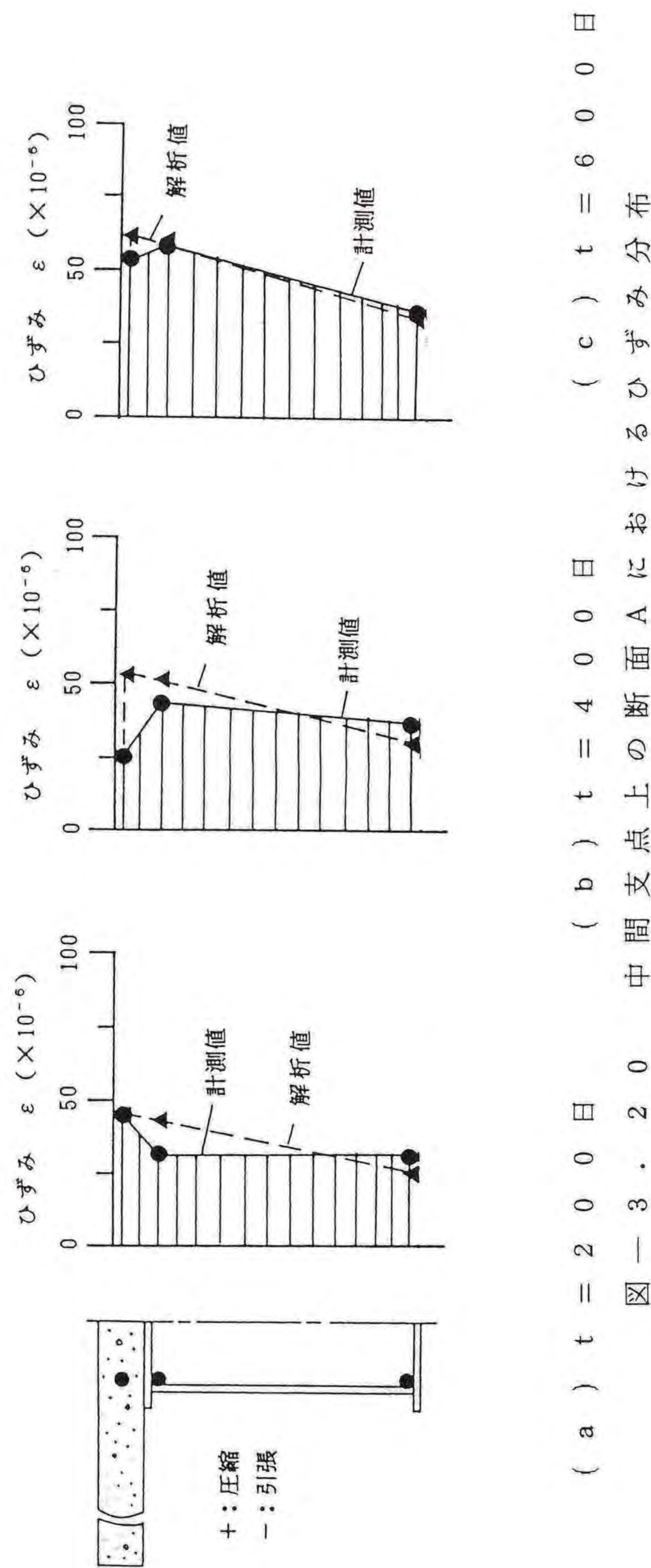


図-3.19 測定断面A (中間支点上の断面) におけるひずみの経時変化 (温度補正後)



さらに、図-3.17の温度補正前のひずみ変化と図-3.18の温度変化とを比較すれば明らかなように、本橋の場合のひずみ変化は、クリープ・乾燥収縮に伴うひずみよりも温度の影響を著しく受けていることがわかる。

したがって、本実験で行ったように、必ず温度を測定しておき、その補正を行うことが、この種の合成桁のクリープ・乾燥収縮の経時挙動を評価するうえで不可欠である。

3.5 まとめ

プレキャスト床版を用いた連続合成桁橋の例として、わが国で初めて本格的に採用が試みられた菅原城北大橋アプローチ橋の概要を、まず紹介した。つぎに、本橋を対象に、クリープ、および乾燥収縮に対する現場、および室内における計測を行った結果、今後、この種の橋梁の建設に役立つ次のような有用な知見が得られた。

- i) プレキャスト床版の目地部に使用された無収縮、および樹脂モルタルがプレキャスト床版全体のクリープ現象に与える悪影響は、少なかった。
- ii) 幅員、および橋軸両方向ともプレストレス力を導入していない供試体SOL、およびSPLの計測結果から、乾燥収縮ひずみは、幅員方向、および橋軸方向とも、ほぼ同程度の値である。
- iii) 室内における実物体試体についての計測結果から、プレキャスト床版の橋軸方向のクリープ係数は、0.80程度であり、道路橋示方書の規定値の半分以下の値である。この理由としては、本プレキャスト床版には2方向のプレストレスが導入され、かつ良質のコンクリートを使用していることなどが挙げられる。また、回復クリープ係数は、0.24程度と推定される。一方、乾燥収縮量は、 240×10^{-6} 程度と推定される。なお、プレキャスト床版製作後のヤードなどでの仮置期間が2~3ヶ月あることを考慮すれば、設計計算に用いるべき乾燥収縮量は、 240×10^{-6} より大幅に低減した値を用いてもよいことがわかった。
- iv) 室内計測結果と道路橋示方書の規定値とを比較(図-3.13~3.15)すれば、クリープ係数の進行に関する計測値は、同示方書の進行曲線よりも早く最終

値に到達する。

- v) 実橋に対するのひずみ測定値と解析値とを比較すると、両者は、比較的よく一致している。したがって、本論文の第2章で示した解析法により、プレキャスト床版を用いた連続合成桁橋のクリープ・乾燥収縮性状を、精度よく評価ができることがわかった。

参 考 文 献

- 3.1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編、Ⅱ鋼橋編、およびⅢコンクリート橋編、丸善、1980年、1990年、および1978年。
- 3.2) 土木学会関西支部プレキャスト床版合成桁橋研究委員会：プレキャスト床版合成桁橋の設計と施工、昭和62年度講習会テキスト、1987年。
- 3.3) 中井 博編・栗田章光分担執筆：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工、森北出版、1988年。
- 3.4) 阪神高速道路公団・大阪第一建設部：プレキャスト床版を用いた連続桁橋の設計・施工要領（案）、1988年。
- 3.5) 中井 博・亀井正博・瀬野靖久・栗田章光：プレキャスト床版連続合成桁橋のクリープ・乾燥収縮に関する研究、土木学会第46回年次学術講演会、pp.334~335、1991年。
- 3.6) Nakai, H., Kurita, A., Kamei, M. and Seno, Y.: Creep and Shrinkage of Continuous Composite Girder Bridge by Using Prestressed Precast Concrete Slabs, Proc. of ICCS-3, Conference, Fukuoka, Japan, pp.407~412, 1991.
- 3.7) 橋 善雄：連続合成桁橋、理工図書、1966年。
- 3.8) 大阪市建設局：菅原城北大橋工事誌、1991年。
- 3.9) 栗田章光・中井 博：回復クリープを考慮した鋼・コンクリート合成桁のクリープ解析、構造工学論文集Vol.37A、土木学会、pp.1407~14、1991年。

第 4 章

鋼・コンクリート合成構造の クリープ、および乾燥収縮に 関するデータベースの構築

第4章 鋼・コンクリート合成構造のクリープ、および乾燥収縮に関するデータベースの構築

4.1 まえがき

無筋コンクリートのクリープひずみと乾燥収縮ひずみとを対象とし、阪田^{4.1)}、^{4.2)}らは、多量のデータを収集し、それらを整理した予測式を提案している。しかし、これまでのところ、データベースの作成には、まだ至っていないようである。さらに、鉄筋や鋼材などによる内部拘束、あるいは鋼管などによる外部拘束を受けるコンクリートのクリープ係数、および乾燥収縮量に関するデータベースは、国の内外を通じて全く見当たらないのが現状である。

コンクリートのクリープ係数と乾燥収縮量とを把握するための試験は、相当な日数を要する疲労試験と比較しても、それ以上の長期にわたる月日が必要となる。もちろん、たとえば、道路橋示方書・同解説I共通編^{4.3)}では、コンクリート橋や合成桁橋の設計のためのクリープ係数と乾燥収縮の量とが、ある程度の内部拘束を考慮したうえ、提示されている。これによって、その示方書で規定されている適用範囲内の橋梁を設計する場合には、何ら支障が生じることがない。

しかしながら、プレキャスト床版を用いた合成桁^{4.4)}などに見られるように、新形式の鋼・コンクリート合成桁橋の長期にわたる経時挙動を解析する場合や、コンクリート充填、あるいは被覆鋼管構造をトラス系、およびアーチ系の橋梁や、その他の構造形式のものに応用する場合、それぞれの拘束条件に対応したクリープ係数や乾燥収縮量の予測や評価が不可欠となる。そのような際に、種々な条件のもとにおけるコンクリートのクリープ係数と乾燥収縮量とに関するデータベースが構築されていれば、先に述べたよう、コンクリートのクリープ試験には、長期にわたる月日を要するだけに、その利用価値が大きい。

このような背景のもとで、筆者は、自ら実施したクリープ試験^{4.5)~4.8)}をはじめ、国内外で公表された種々な拘束を受けるコンクリートのクリープ係数と乾燥収縮量とに関する実験結果^{4.9)~4.14)}を収集し、それを統一した手法で数値処理するデータベースを構築した。このデータベースは、上で述べた新形式の鋼・コンクリート合成構造物の長期にわたる経時挙動の評価にも使用できる。こ

のほか、PC構造物を含む既存の鋼・コンクリート合成構造物のたわみなどの経時挙動に異常が生じた場合、その原因の究明や補修対策を立てる際にも、このデータベースが有効に利用できよう。

ちなみに、ここで構築したデータベースには、クリープ、および乾燥収縮に関するデータが110例登録されている。

4. 2 データベースの構成

(1) 対象とする構造物の分類

本章で構築したデータベースでは、表-4.1に示すように、対象とする構造物を大きく3つの形式に分類している。このうち、分類コードAの構造物は、一般的なRC、およびPC構造物に対応するものである。そして、合成柱などに用いられるコンクリートを充填した鋼管構造は、分類コードBに入れた。もちろん、この構造物は、角形鋼管と円形鋼管との2つの使用法が考えられる。また、コンクリート中に鋼部材(鋼管、形鋼、あるいは溶接集成材など)が埋め込まれる構造物は、コンクリート被覆鋼構造とみなし、Cの分類コードに入れている。分類コードB、およびCの形式のものが、最近、基礎構造や地下構造(抗土圧構造物)に積極的に応用されようとしているので、ここでも対応しておく必要がる。

表-4.1 対象とした構造形式

| 分類コード | 構造形式 | 具体的な適用構造物例 |
|----------------|------------------------------|--------------------------------|
| A - 1 A - 2 | 鉄筋コンクリート構造 PSコンクリート構造 | RC橋、PC橋、および合成桁橋 |
| B | コンクリート充填鋼管構造 | 合成柱の橋脚、および合成トラス橋 |
| C - 1 C - 2 | コンクリート被覆鋼管構造 コンクリート被覆形鋼構造 | コンクリート巻き立てアーチ橋、 基礎杭、および、その他 |

(2) データベースの入力項目

本章で構築したデータベースの入力項目は、構造形式によって若干異なる。しかし、本質的なものは同じであるので、ここでは、分類コードAの場合のみの入力項目を、表-4.2に例示する。

表-4.2 データベースの入力項目(Aの場合のみ示す)

| 項目の分類 | | 具体的項目 | | | |
|-------|------------------|-------------|-------------------|---------------|-----------|
| 出典 | | 1 文献番号 | 2 研究者名 | 3 研究機関名 | 4 発表年 |
| | | 5 言語 | 6 特記事項 | | |
| 試験 | 外形寸法 | 7 試験体寸法 | 8 鋼材比 | | |
| | コンクリート | 9 設計強度 | 10 セメントの種類 | 11 セメント量 | 12 水セメント比 |
| | | 13 骨材の種類 | 14 混和剤の種類 | 15 実測圧縮強度 | 16 ヤング係数 |
| | | 17 ポアソン比 | 18 特記事項 | | |
| 試験体 | 鉄筋、およびPC鋼材 | 19 鋼種 | 20 呼び径 | 21 実測径 | 22 使用本数 |
| | | 23 降伏点 | 24 特記事項 | | |
| 試験方法 | 試験体の本数 | 25 クリープ | 26 乾燥収縮 | 27 回復クリープ | |
| | 試験装置 | 28 荷重方法 | 29 特記事項 | | |
| | 荷重応力と材齢 | 30 荷重応力 | 31 初期荷重材齢 | 32 荷重応力の調整の有無 | |
| | 測定期間 | 33 クリープ | 34 回復クリープ | 35 乾燥収縮 | |
| 試験条件 | 測定方法 | 36 荷重 | 37 応力 | 38 変位(ずれ) | 39 ひずみ |
| | | 40 温度 | 41 湿度 | | |
| | 試験環境 | 42 設置場所 | 43 乾燥条件 | 44 特記事項 | |
| 試験結果 | ひずみなどの測定データ | 45 ひずみ | 46 温度 | 47 湿度 | |
| | クリープ係数 | 48 最終クリープ係数 | 49 回復クリープ係数 | | |
| | | 50 回帰式 | 51 クリープ係数と鋼材比との関係 | | |
| | 乾燥収縮量 | 52 最終乾燥収縮量 | 53 回帰式 | | |
| | 54 乾燥収縮量と鋼材比との関係 | | | | |
| 粘弾性定数 | 55 ハネ定数 | 56 粘性係数 | | | |

この表から明らかなように、分類コードAでは、合計56項目の入力値が設定してある。これらの項目について説明を加えると、下記のとおりである。

まず、データの出典に関しては6項目にわたって入力し、表-4.2に示したように、その他は文献番号で参考文献(あるいは報告書)に戻れる方法をとっている。そして、クリープ・乾燥収縮の試験では、とくにコンクリートの物性と試験体の大きさ、および拘束度が試験結果に与える影響が大きい。そこで、試験体に関する入力データは、21項目となっている。なお、分類コードB,およびCでは、試験体に関する入力項目として重要なものに、ずれ止めの配置の有無とその形式とが挙げられる。そのため、分類コードAの入力項目のほか、ずれ止めに関する項目を加えている。また、クリープに関する比較的最近の知見である回復クリープの試験の実施の有無と試験体数とが、第27項目に入れてある。

つぎに、クリープ試験では、種々の载荷方法が考えられる。最も簡易なものとしては、試験体の内部、あるいは外部にPC鋼棒を配置して、それを緊張・固定することによって持続力を载荷する方法がある。この方法では、試験体の大きさと導入応力に応じて固定治具、およびPC鋼棒の本数とを自由に選択することができる。小型の試験体であれば、数種のクリープ試験装置^{4.12)}がある。もちろん、試験装置の良否が結果に与える影響は極めて大きいので、特記事項を設け、装置に関する詳細なコメントを入力できるように配慮している。なお、分類コードB,およびCでは、コンクリート部材への载荷、鋼部材への载荷、および合成部材へ3つの载荷方法が考えられるので、これらを入力項目として追加している。測定期間については、長いもので、4年間にわたるものもある。そして、荷重、ひずみ、および温度等の測定方法については、6項目とした。大型の試験体を用いる場合、一般に最も条件がよいとされる恒温・恒湿の試験室を用意することが不可能であり、普通の実験室の適当な場所に試験体が設置されることが多い。そのため、試験結果に対しては、温度と湿度との補正が必要になってくる。したがって、この場合、温度と湿度との測定方法も重要な因子となる。また、乾燥収縮試験では、試験体表面の乾燥条件が最も重要である。そこで、乾燥面が何面あるかに関する情報を、43番目の項目で入力することにした。

さらに、試験結果に関する入力データの項では、载荷材齢とひずみ、温度、および湿度についてのデータをとりあえず入力する。ついで、最終的に利用者が求

めているクリープ係数、および乾燥収縮量などを入力する。鋼材比を種々変化させた試験では、クリープ係数、および乾燥収縮量と鋼材比との関係が代数式によってまとめられているので、このデータも入力することとした。また、クリープ現象を次節の4.3で述べる3要素のモデルを用いて粘弾性解析が行われるケース^{4.8), 4.16), 4.17)}もまれにあるので、粘弾性定数の項目も入力できるように配慮してある。この入力値が記載されていない文献では、次節の4.3で述べる方法をもとにしたアプリケーションプログラムが用意してあるので、その計算を実施したうえで、粘弾性定数が出力できるようにしている。

(3) データベースとアプリケーションプログラムとの構成

本論文で作成したデータベースとそのアプリケーションプログラムとの構成を、図-4.1に示す。データベース、およびそのアプリケーションプログラムは、文献4.15)を参照にしてパーソナルコンピューターを使用し、市販のデータベース言語とBASIC言語とを用いて作成してある。

この図より明らかなように、本システムは、クリープ・乾燥収縮データのデータベースと、これにアクセスするいくつかのプログラムとで構成されている。これらの機能としては、データ入力機能、データ処理機能、検索機能、および出力機能などを備えている。

(4) データベースの出力項目

本論文で作成したデータベースの出力項目は、表-4.2で示した56の入力項目のほか、必要に応じて、材齢-クリープ係数曲線図、材齢-乾燥収縮量曲線図、およびクリープ係数-鋼材比関係図などが、CRT上、あるいはハードコピー、もしくはプロッターで出力できる。

また、クリープ係数と乾燥収縮量とに関する各国の設計規準、たとえば、ACI、およびDINなどの値と比較した形で試験値を出力することもできる。

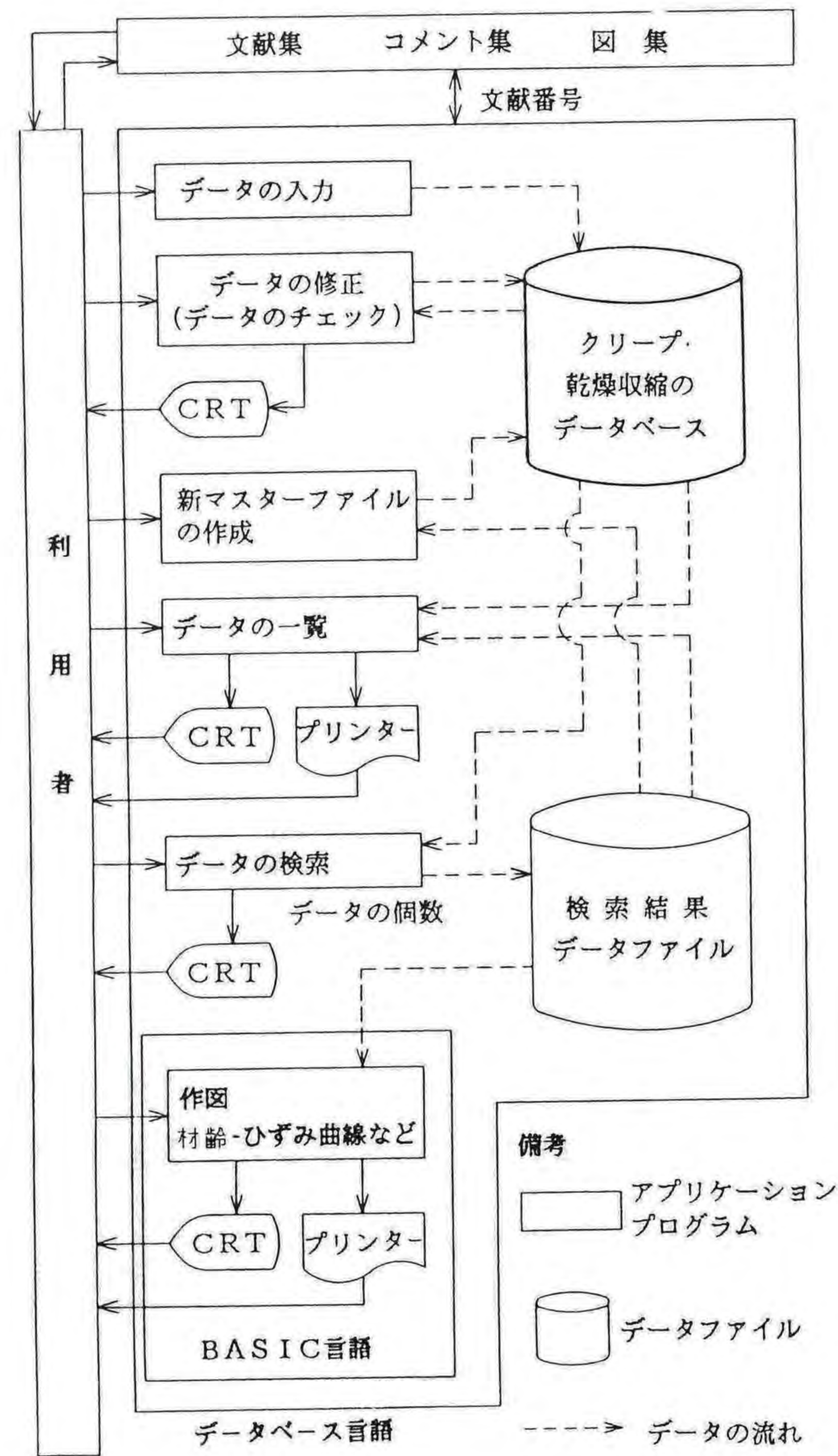


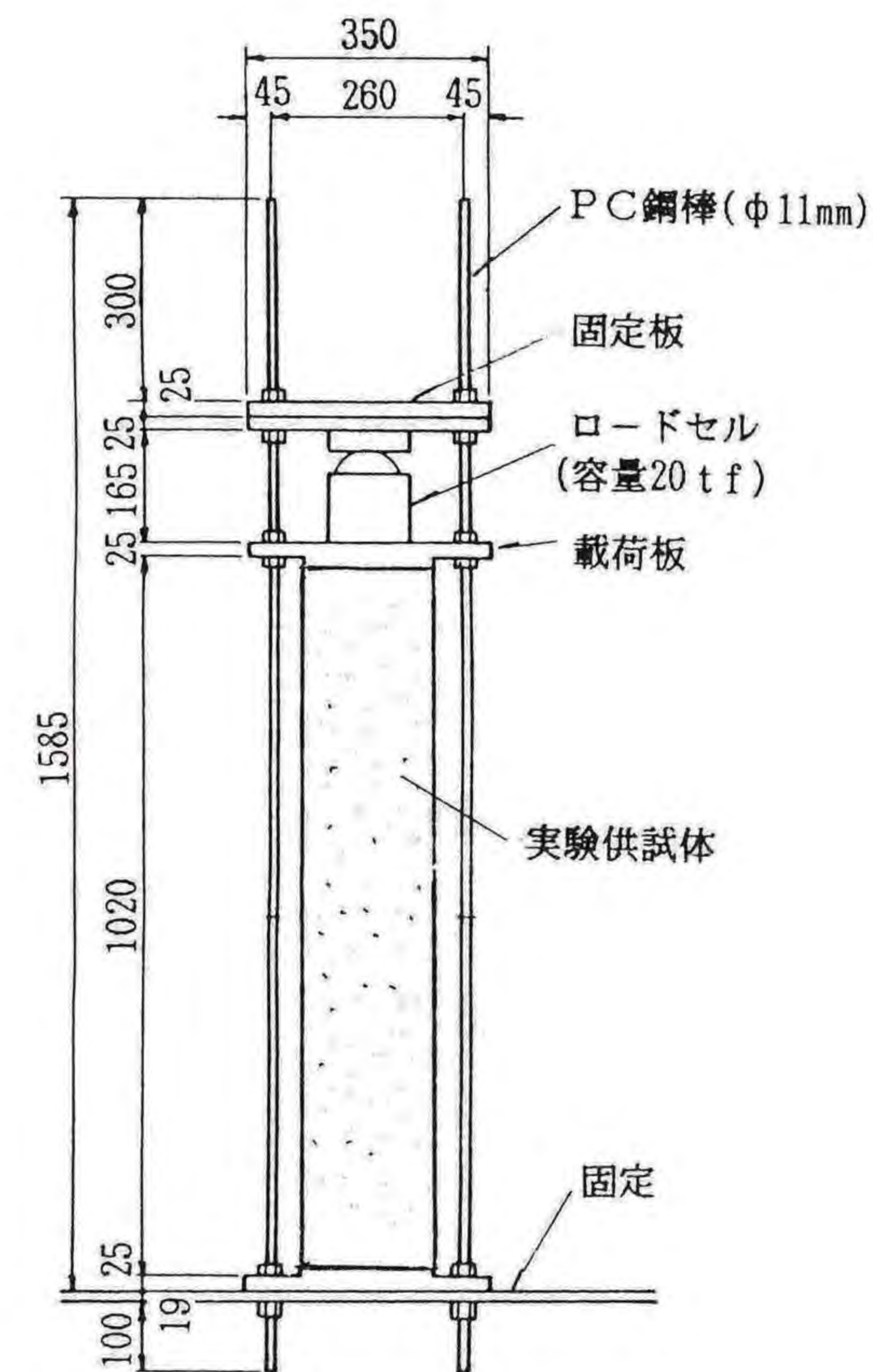
図-4.1 データベースとアプリケーションプログラムとの構成

4.3 データの処理方法

このデータベースを作成するに当たって、共通して用いたデータの処理方法(係数の同定法)を、以下に述べる。もちろん、参考文献の中で行われている本解析法とは別のデータ処理結果も、データベースに入力され、記録されている。

(1) 解析モデル

応力が一定なとき、ひずみが増加する現象がクリープである。しかし、これを実際に試験しようとするとき、大がかりな試験装置が必要となる。したがって、たとえば図-4.2に示す一般的な試験装置では、ひずみのみならず、応力も同時に変動する。そのため、実際には、クリープと同時にリラクゼーションの試験を行っていることにもなる。それゆえ、バネ要素とKelvinモデルとを直列させた3要素モデルによって、クリープ現象を解析することができる^{4,5)}。通常、図-4.2に示すように、ロードセルを用いて供試体に作用する荷重が測定されていることが多いので、3要素モデルにおけるバネ要素の項は、既知である。そこで、ここでは、図-4.3に示すバネ要素とダッシュポットの2要素で構成されたKelvinモデルを用いて解析を行う。



(1tf = 9.8 kN)

図-4.2 RC柱のクリープ試験の一例(寸法単位: mm)

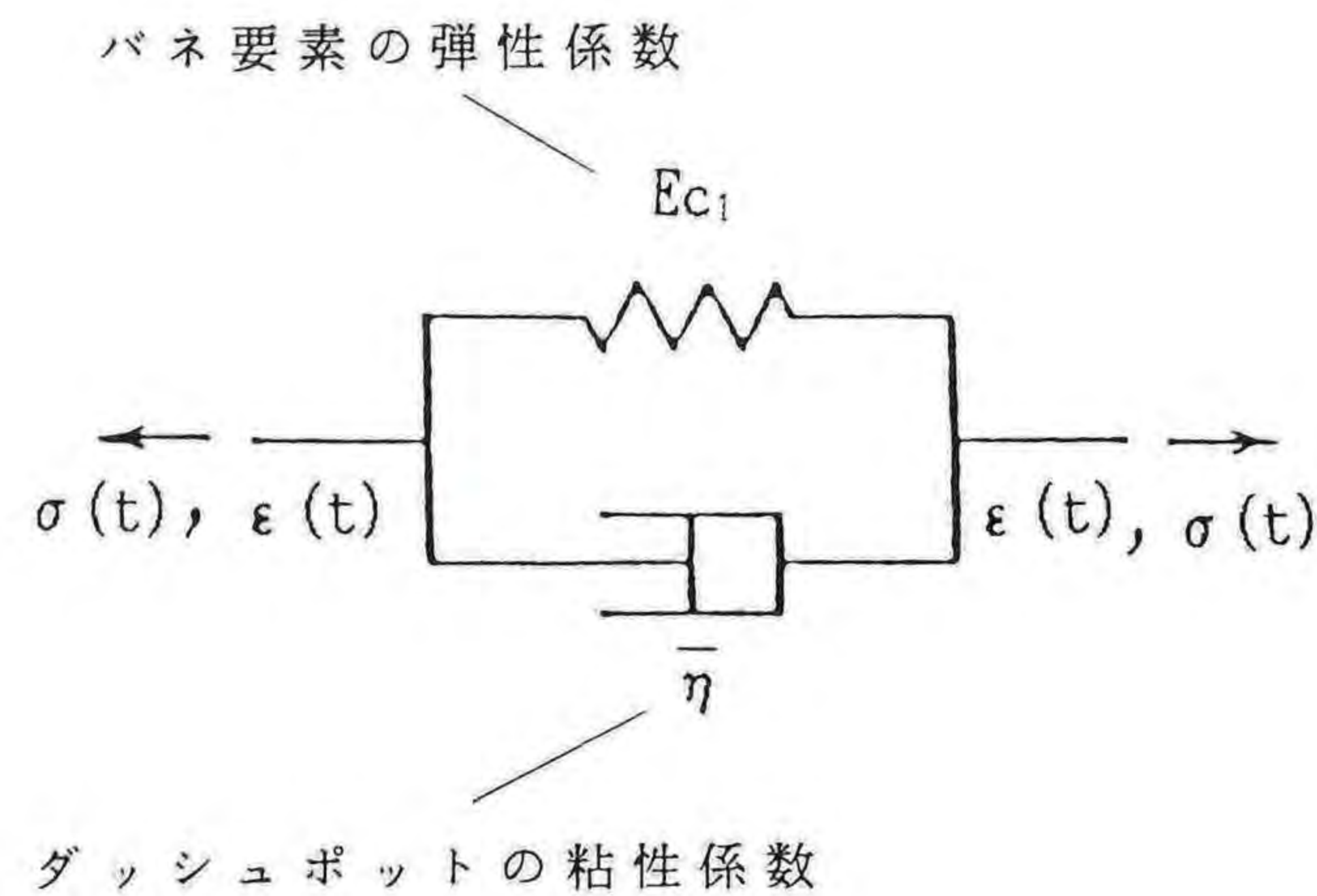


図-4.3 Kelvinモデル

(2) 応力が与えられたときのひずみの解

図-4.3 に示した Kelvinモデルに応力 $\sigma(t)$ を与えたときのひずみ $\epsilon(t)$ は、次のように表される。

$$\bar{\eta} \frac{d\epsilon(t)}{dt} + E_{c1} \epsilon(t) = \sigma(t) \quad (4.1)$$

ここに、

- $\epsilon(t)$: Kelvinモデルに生じるひずみ
- $\bar{\eta}$: ダッシュポットの粘性係数
- $\sigma(t)$: Kelvinモデルに作用する応力
- E_{c1} : バネ要素の弾性係数

いま、供試体への時刻 t における作用荷重 $P(t)$ を、次のように仮定する。

$$P(t) = P_0 \{ \bar{\alpha} + (1 - \bar{\alpha}) e^{-\kappa t} \} \quad (4.2)$$

この式は、途中の応力下降が指数関数的であり、また時刻 $t=0$ 、および $t=\infty$ のとき、次の値をとる。

$$P(0) = P_0, \quad P(\infty) = \bar{\alpha} P_0 \quad (4.3)_{1-2}$$

すなわち、式(4.2)中の係数 $(1 - \bar{\alpha})$ は、リラクセーション係数を意味する。すると、式(4.1)の応力 $\sigma(t)$ は、荷重 $P(t)$ を供試体の有効断面積 A_{eff} で割ったものである。

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{A_{eff}}, \quad \sigma(t) = \frac{P(t)}{A_{eff}} \quad (4.4)_{1-2}$$

さて、初期ひずみ ϵ を、

$$\epsilon(0) = 0 \quad (4.5)$$

とおき、式(4.1)、(4.2)、および(4.4)をラプラス変換を用いて解くと、ひずみ $\epsilon(t)$ は、次のように与えられる。ただし、 $\beta = E_{c1} / \bar{\eta}$ である。

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_{c1}} \{ \bar{\alpha} (1 - e^{-\beta t}) + \frac{1 - \bar{\alpha}}{1 - \kappa / \beta} (e^{-\kappa t} - e^{-\beta t}) \} \quad (4.6)$$

以上の式より、 $P(t)$ 、および $\epsilon(t)$ として実測値を用い、パラメータ $\bar{\alpha}$ 、 κ 、および $\bar{\eta}$ を最小自乗法を用いて同定し、実験結果を整理することができる。

しかし、この式は、荷重がリラクセーション的に変動し、最終的に $\bar{\alpha} P_0$ になるとの仮定のもとに導かれた式である。そのため、一定の荷重 P_0 が作用するときの純粋なクリープひずみとは、みなし得ない。

そこで、この式から純粋なクリープひずみを求めるために、式(4.6)において、時刻 $t=\infty$ とおく。すると、

$$\epsilon(\infty) = \bar{\alpha} \frac{\sigma_0}{E_{c1}} = \bar{\alpha} \epsilon_\infty \quad (4.7)$$

が得られる。この式から逆算して、応力が変動するときの最終クリープひずみ $\epsilon(\infty)$ を $1/\bar{\alpha}$ 倍して、応力が一定なときの最終クリープひずみ ϵ_∞ に換算する必要がある。これらの操作を図示したものが、図-4.4である。

(3) 応力に関するパラメータの同定法

上述の(2)で明らかにしたように、応力、および、ひずみの経時挙動を数理的に処理したとき、同定式は、いずれも指数関数を含んだものとなる。そのため、原式のままの形で最小自乗法を適用して各種パラメータを同定したとき、解式は、

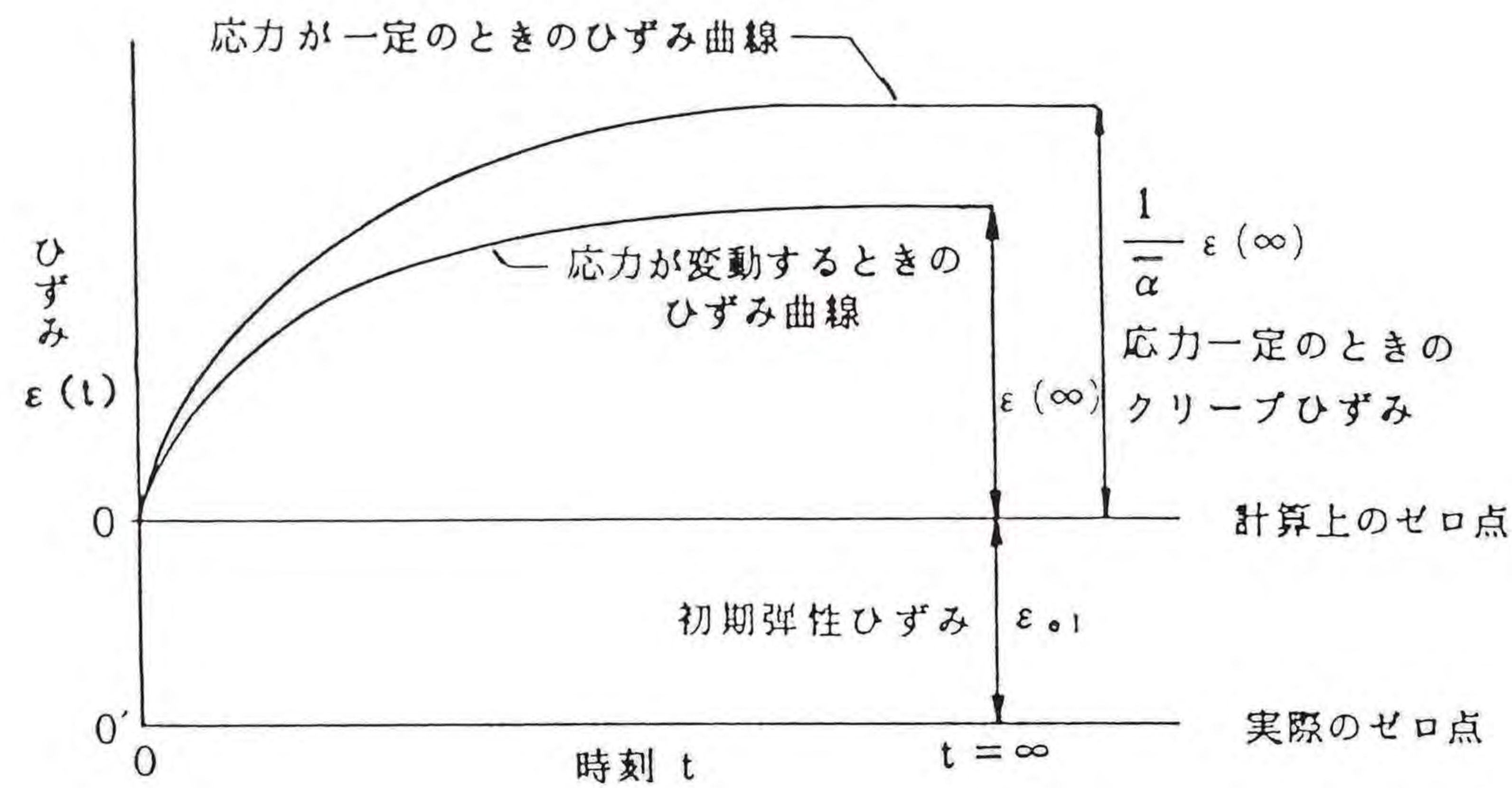


図-4.4 応力が一定、あるいは変動するときのクリープひずみ

著しく煩雑な陰関数を含んだ連立方程式となる。ここでは、それを避けるため、以下に示すように、パラメータを逐次近似法を用い、同定する方法について述べる。

a. パラメータ κ の同定法

まず、以下のように、式(4.2)よりパラメータ κ を同定するため、荷重 $P(t)$ を

$$p_i = P(t_i)/P_0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4.8)$$

とする。すると、式(4.2)は、次のように表せる。

$$p_i = \bar{\alpha} + (1 - \bar{\alpha})e^{-\kappa t_i} \quad (4.9)$$

つぎに、上式を $e^{-\kappa t_i}$ について解き、両辺の自然対数をとった後に、最小自乗法を適用すると、パラメータ κ は、

$$\kappa = \frac{-\sum_{i=1}^n t_i \ln\left(\frac{p_i - \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}\right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (4.10)$$

によって与えられる。ただし、ここでパラメータ $\bar{\alpha}$ は、あくまで既知でなければならない。

b. パラメータ $\bar{\alpha}$ の同定法

式(4.9)から、パラメータ $\bar{\alpha}$ を同定するため、同様に最小自乗法を適用すると、

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - e^{-\kappa t_i}) \cdot (1 - e^{-\kappa t_i})}{\sum_{i=1}^n (1 - e^{-\kappa t_i})^2} \quad (4.11)$$

が得られる。ここに、前記 a. より、パラメータ κ が求まっていれば、パラメータ $\bar{\alpha}$ の同定は、可能である。

実際の計算処理は、当初、パラメータ $\bar{\alpha}$ は未知であったものを、 $\bar{\alpha}_0 = \bar{\alpha}_n$ と仮定し、あとは逐次近似法によって2つのパラメータ κ , および $\bar{\alpha}$ の収束値を得ることができる。図-4.5は、そのフローチャートを示したものである。

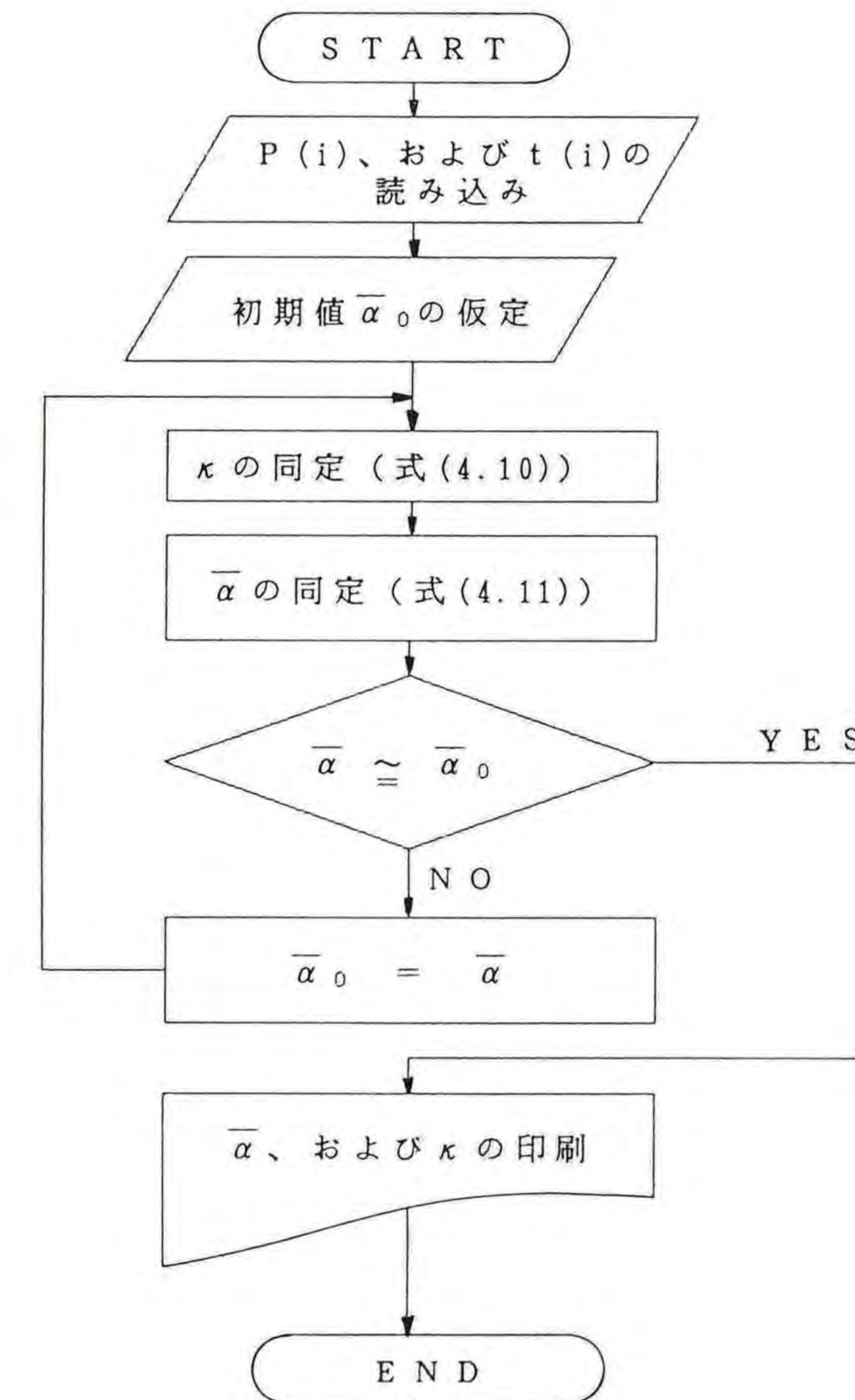


図-4.5 パラメータ $\bar{\alpha}$ 、および κ を同定するためのフローチャート

(4) ひずみに関するパラメータの同定法

すでに、(2)で示したように、時刻 $t = \infty$ の時のひずみは、 $\varepsilon(\infty) = \bar{\alpha} \varepsilon_{\infty}$ で与えられ、その結果、一定の荷重 $P(t) = P_0$ を受ける場合のひずみ $\varepsilon(t)$ の経時挙動、すなわち

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(\infty) (1 - e^{-\beta t}) \quad (4.12)$$

を最終的に $1/\bar{\alpha}$ 倍すればよいことを示した。

ここでは、式(4.6)より、パラメータ β , および最終クリープひずみ ε_{∞} を同定する代わりに、より簡単な指数関数で表された式(4.12)から、それらを同定するようにした。前述の(3)と同様の方法を用いると、次のように、パラメータ β , および $\varepsilon(\infty)$ が求められる。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \ln \{1 - \varepsilon(t_i)\}}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon(\infty) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon(t_i)}{1 - e^{-\beta t_i}} \quad (4.14)$$

この場合の計算も(3)と同じで、まず $\varepsilon(\infty)$ を仮定している。そのため、逐次近似法により、両パラメータ β , および $\varepsilon(\infty)$ を求めることができる。これに対するフローチャートを、図-4.6に示す。

以上に述べたデータ解析法がアプリケーションプログラムとして、本データベースの数値処理に用いられている。

4.4 使用例

(1) PC版のクリープとその同定結果

以上に述べたデータベースとアプリケーションプログラムとを用いて、実物大PC版の430日間にわたるクリープひずみのデータ^{4, 6)}をプロッタにより出力させた例を、図-4.7に示す。

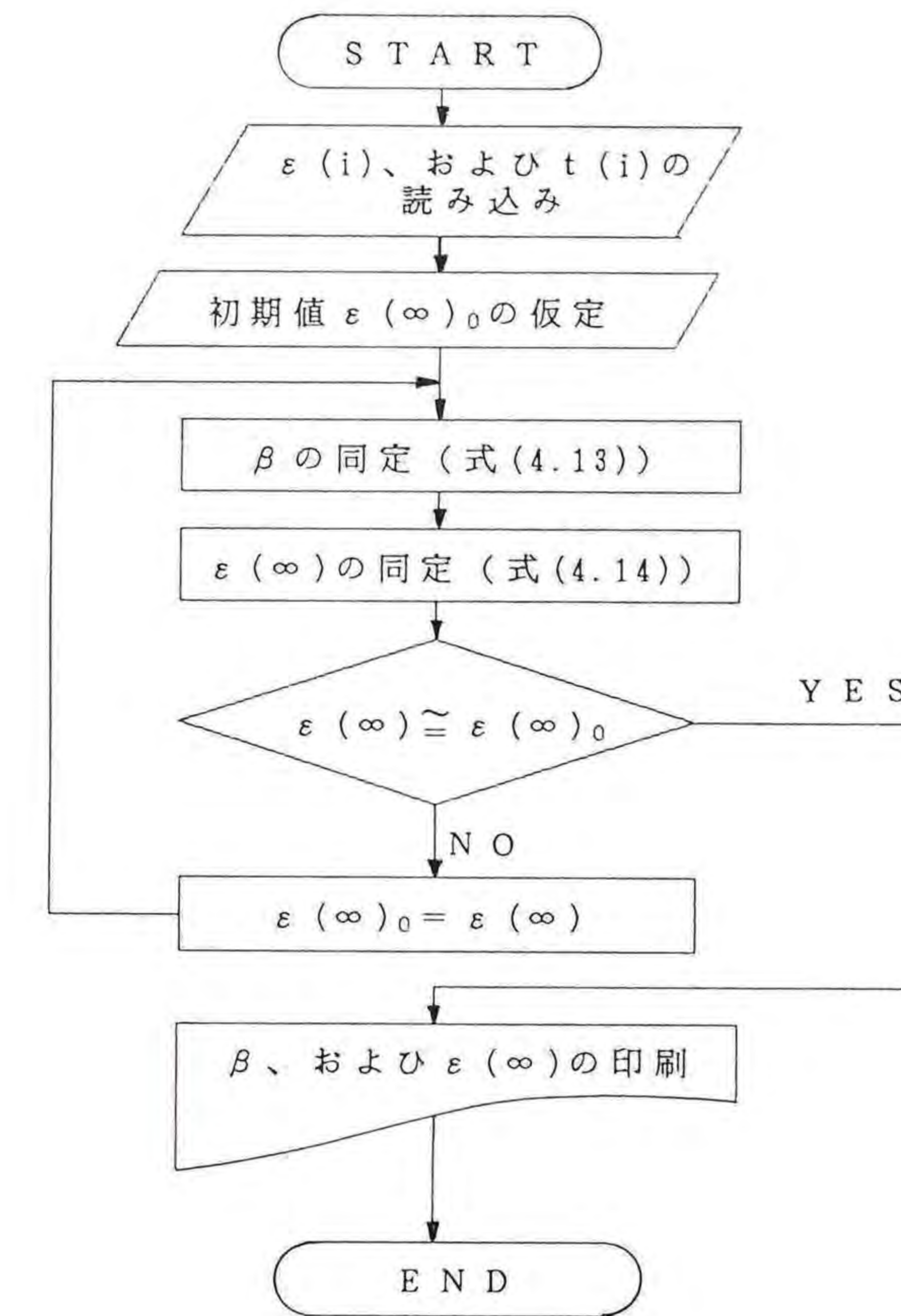


図-4.6 パラメータ β , および最終ひずみ $\varepsilon(\infty)$ を同定するためのフローチャート

この図より明らかなよう、生データのプロットとともに、前節の4.3で述べたデータ解析法により処理された回帰式も出力されている。

(2) コンクリート柱と合成柱との乾燥収縮ひずみの比較

図-4.8に示す出力例は、コンクリート柱(鋼管なし)と合成柱(ずれ止めなしのコンクリートを充填した鋼管柱)^{4, 8)}の乾燥収縮量(収縮ひずみ)とを比較して画面上に出力し、それをハードコピーしたものである。

この図から、合成柱の乾燥収縮量は、計算上、無視しうるほど小さいことがわかる。

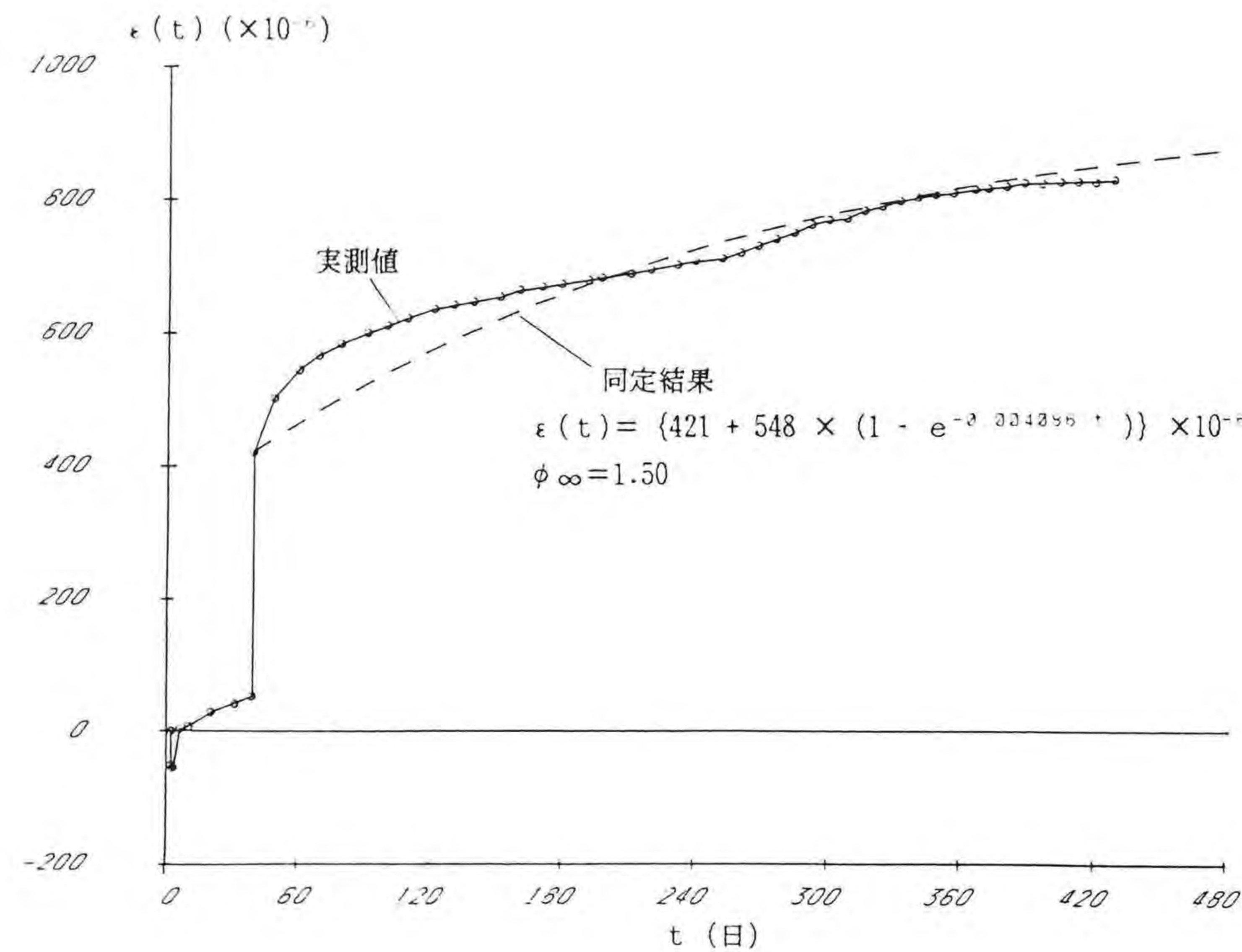


図-4.7 PC版のクリープの実測値とその同定結果の一例

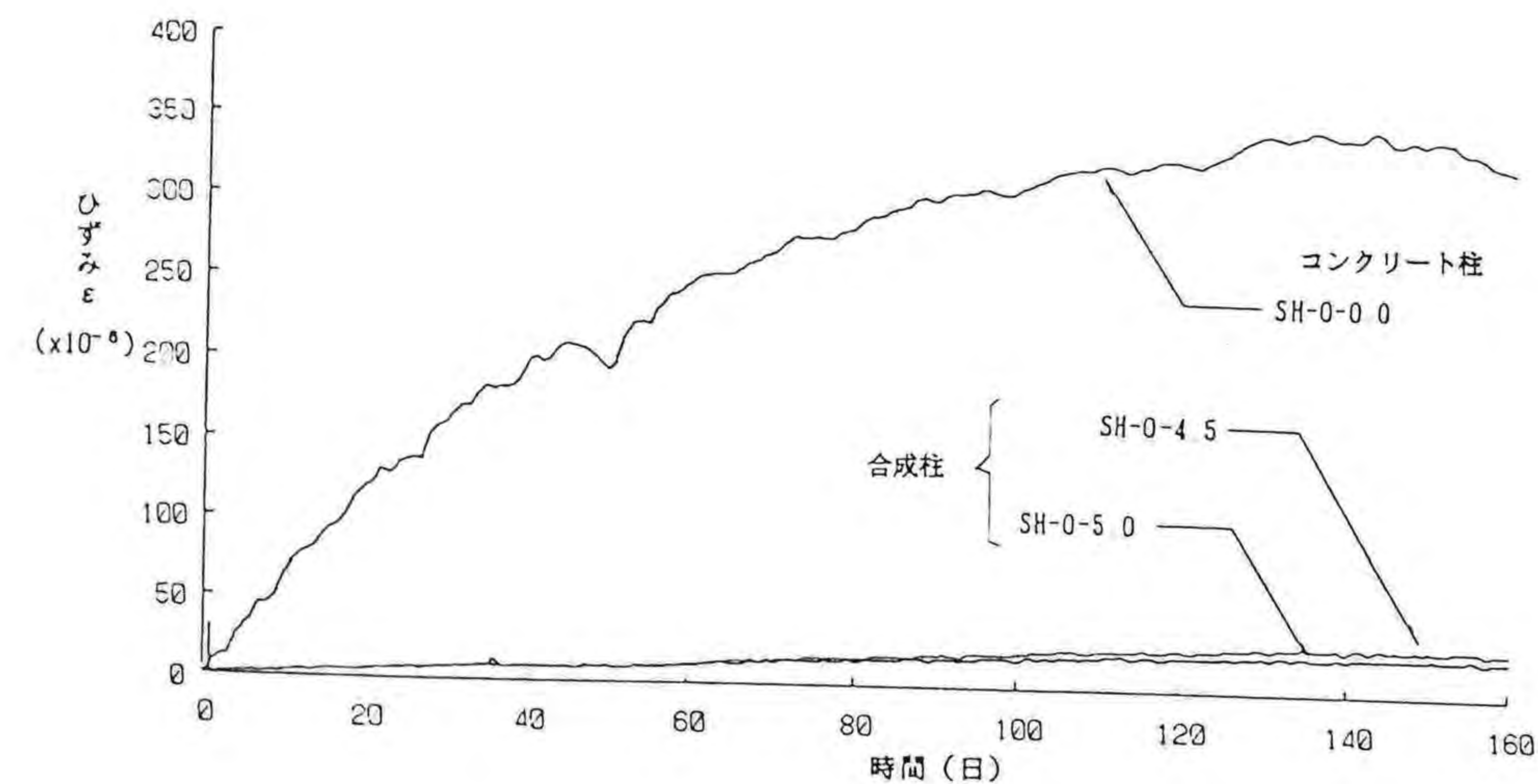


図-4.8 コンクリート柱と合成柱との乾燥収縮ひずみの実測値

4.5 まとめ

本章では、3つの鋼・コンクリート合成構造形式を対象に作成されたクリープ・乾燥収縮に関するデータベースとそのアプリケーションプログラムとの構成、データの統一した数理処理法、ならびに使用例を述べた。

鉄筋や形鋼の拘束を受けるコンクリートのクリープ・乾燥収縮に関する試験データは、無筋コンクリートのそれに比べはるかに少ない。そこで、今後、データを収集・蓄積することにより、本章で示したデータベースの規模の拡大を図っていく必要がある。

参考文献

- 4.1) 阪田憲次・綾野克紀・廣村治：コンクリートのクリープひずみの予測式の提案、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、日本コンクリート工学協会、pp. 271~276、1988年。
- 4.2) 阪田憲次・綾野克紀：コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案、第43回セメント技術大会講演集、セメント協会、pp. 338~343、1989年。
- 4.3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編、丸善、1990年。
- 4.4) 中井博編・栗田章光分担執筆：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工、森北出版、1988年。
- 4.5) 中井博・藤井学・渡辺英一・竹中裕文：プレキャスト床版を用いた合成桁のクリープ現象に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.33A、土木学会、pp. 275~284、1987年。
- 4.6) 中井博・栗田章光・亀井正博・瀬野靖久：連続合成箱桁橋に用いられた実物大プレキャスト床版のクリープ・乾燥収縮に関する室内実験について、土木学会第45回年次学術講演会、I-268、pp. 566~567、1990年。
- 4.7) 栗田章光・瀬野靖久・末吉良敏：鉄筋比を変化させたクリープ・乾燥収縮に関する一実験について、土木学会第45回年次学術講演会、V-381、pp. 788~789、1990年。

- 4.8) Ichinose, L. H., Kurita, A. and Nakai, H. : An Experimental Study on Creep of Concrete Filled Steel Columns , 45th Annual Conference of JSCE , I -267 , pp. 564~565, 1990.
- 4.9) 日本道路公団大阪管理局・新構造技術(株) : 大阪管理局内積迎池橋及び美陵高架橋追跡調査(その3) 報告書、1982年.
- 4.10) Bridge, R. Q. : The Behaviour of Composite Columns under Long Term Loading, Research Report No. R321, The University of Sydney, 1978.
- 4.11) Roik, K., Bergmann, R. und Bode, H. : Einfluß von Kriechen und Schwinden des Betons auf die Tragfähigkeit von ausbetonierten Horlprofilstützen, Projekt 27, Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V. , 1979.
- 4.12) Neville, A. M., Dilger, W. H. and Brooks, J. J. : Creep of Plain & Structural Concrete. Construction Press, 1983.
- 4.13) Smerda, Z. and Kristek, V. : Creep and Shrinkage of Concrete Elements and Structures, Elsevier, 1988.
- 4.14) Roik, K., Bergmann, R. und Managerig, I. : Zur Traglast von einbetonierten Stahlprofilstützen unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens von Beton, Der Stahbau, Jarhg. 59, Heft 1, S. 15~19 1990.
- 4.15) 三ツ木幸子・近藤明雅・山田健太郎・寺尾圭史 : ボルトおよびリベット継手の疲れ試験データベースの作成とその利用、土木学会論文集、第404号/I-11 (報告)、pp. 435~441、1989年.
- 4.16) 中井博・渡辺英一・竹中裕文・林圭一 : プレキャスト床版合成桁のクリープ、リラクゼーションに関する基礎的考察、構造工学論文集、Vol. 33A、土木学会、pp. 327~340、1987年.
- 4.17) Watanabe, E., Hayashi, K., Takenaka, T. and Nakai, H. : Behavior of Precast Concrete Composite Girders, Proc. of JSCE, No. 392/I-4, pp. 71~79, 1988.

第5章

クリープ、および乾燥収縮の 数値解析法と連続合成桁橋への適用

第5章 クリープ、および乾燥収縮の数値解析法と連続合成桁橋への適用

5.1 まえがき

本章では、第2章で詳述の回復クリープの影響をも考慮したクリープの解、および乾燥収縮の解にもとづいて、連続合成桁橋の経時挙動の解析法について示す。

まず、第1の方法として、最も基本的な弾性荷重法による解析法を示す。そして、2径間連続合成桁についての数値計算を通じて、クリープの解析における回復クリープの影響が、単純桁橋よりも、連続桁橋のほうが大きく現れることを示す。

つぎに、これらの解析法に汎用性をもたせるため、クリープ、および乾燥収縮の解を用い、剛性マトリックス法による連続合成桁の経時挙動の解析法を示す。そして、多径間連続合成桁橋について数値解析を行い、その経時挙動の特性を調べる。このような8~10径間以上の多径間連続合成桁橋をとりあげたのは、今後、わが国でも自動車の走行性や耐震性の面から採用される気運にある橋梁形式であるからである。

また、連続合成桁についてのパラメトリック解析を行い、合成桁橋の経時挙動に及ぼす各種パラメータの影響を評価するため、本論文では、次の5つのパラメータを抽出した。

- i) フロークリープ係数 $\phi_{f\infty}$
- ii) 合成桁の断面構成比 α
- iii) 初期載荷材齢 t_1
- iv) 最終乾燥収縮量 $\varepsilon_{s\infty}$
- v) 乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_s(\infty)$

最後に、これらのパラメトリック解析結果について、種々な考察を加え、今後、連続合成桁の合理的な設計を行うための論点を示した。

5.2 弾性荷重法

等断面を有する2径間連続合成桁において、代表的な持続外力による作用断面

力を示すと、表-5.1のようにまとめられる。

各載荷ケースに対する作用断面力は、同表中に示す式(5.1)~(5.4)で求められるので、それらの断面力を第2章の式(2.1)₁₋₄に代入すれば、時刻 t_1 において任意の断面に作用する分担断面力 N_{b,t_1} 、 N_{s,t_1} 、 M_{b,t_1} および M_{s,t_1} が得られる。

(1) 分担断面力の変化量

a. 静定基本系における分担断面力の変化量の計算

静定基本系における分担断面力の変化量の計算は、第2章の式(2.30)~(2.32)と式(2.38)₁₋₃とによって算定される。これらの分担断面力の変化量の桁軸方向における分布形状は、上式からわかるように、持続荷重による曲げモーメントと軸方向力との分布形状と相似である。たとえば、Case-3の場合のコンクリート床版の任意点の分担モーメントの変化量は、式(2.30)から、次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta M_{b,t-t_1} &= -\delta M_{\delta,t_1} \phi(t-t_1) \\ &= -\delta \phi(t-t_1) Q x \end{aligned} \quad (5.5)$$

ここに、係数 δ は、

$$\delta = - \frac{D_v(1+\eta + D_N + D_1 a) - D_2 D_m a}{(1+\eta + D_N + D_1 a)(1+\eta + D_N) - D_1 D_m a} \quad (5.6)$$

である。

b. 不静定系における分担断面力の変化量の計算

不静定系における分担断面力の変化量は、次の2つのもの、すなわち

i) 静定基本系における分担断面力の変化量

ii) 不静定力の変化 ΔX_i に伴う分担断面力の変化量

に分けて取り扱うことができる。したがって、鋼桁に着目した場合、不静定系における分担断面力の全変化量は、上記のi)、およびii)を重ね合わせて、次式で求められる。

表-5.1 代表的な持続外力による連続合成桁の断面力

| 載荷状態 | 載荷状態 | 曲げモーメント | 軸方向力 |
|-------------------------------|------|--|--|
| 後死荷重 (Case-1) | | $M_{q,t_1} = \frac{qx}{8} (3l - 4x) \quad (5.1)$ | 0 |
| PC鋼材による プレストレス (Case-2) | | $\begin{aligned} &0 \leq x \leq l-a \\ &M_{P,t_1} = -P_e \alpha' x \\ &l-a \leq x \leq l \\ &M_{P,t_1} = P_e (1 - \alpha' x) \end{aligned}$ ここに、 $\alpha' = \frac{3a(2l-a)}{2l^3} \quad (5.2)_{1-3}$ | $\begin{aligned} &0 \leq x \leq l-a \\ &P_{P,t_1} = 0 \\ &l-a \leq x \leq l \\ &P_{P,t_1} = P \quad (\text{一定}) \end{aligned}$ (5.3) ₁₋₂ |
| 支点沈下による プレストレス (Case-3) | | $M_{\delta,t_1} = \frac{3EI}{l^3} \delta x \quad (5.4)$ | 0 |

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{s,t-t_1}^{\tau} &= \Delta M_{s,t-t_1}^{\circ} + \Delta M_{s,t-t_1}^i \\ \Delta N_{s,t-t_1}^{\tau} &= \Delta N_{s,t-t_1}^{\circ} + \Delta N_{s,t-t_1}^i \end{aligned} \right\} (5.7)_{1-2}$$

同様に、コンクリート床版では、

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{b,t-t_1}^{\tau} &= \Delta M_{b,t-t_1}^{\circ} + \Delta M_{b,t-t_1}^i \\ \Delta N_{b,t-t_1}^{\tau} &= \Delta N_{b,t-t_1}^{\circ} + \Delta N_{b,t-t_1}^i \end{aligned} \right\} (5.8)_{1-2}$$

と表される。

ここに、上添字は、以下のように定めている。

T : 変化量の合計値

0 : 静定基本系における分担断面力の変化量

1 : 不静定力の変化に伴う分担断面力の変化量

静定基本系における分担断面力の変化量は、すでに第2章で示したように、2種類の基本載荷ケースや乾燥収縮に対して求まっているので、既知量として取り扱える。

(2) 弾性方程式とその解

鋼桁に着目して、不静定力の変化に伴う分担断面力の変化量 $\Delta M_{s,t-t_1}^i$ 、および $\Delta N_{s,t-t_1}^i$ を求める。一般に、n次の不静定構造物に対し、それらを求めるための弾性方程式は、次のように書ける。

$$[\delta_{ij}]_{n \times n} \{ \Delta X_i \}_{n \times 1} = \{ K_i \}_{n \times 1} \quad (5.9)$$

ここに、 $[\delta_{ij}]_{n \times n}$ は、n行、およびn列のたわみ性マトリックスである。いま、

\bar{N}_i, \bar{N}_j : それぞれ単位の不静定力 $X_i = 1$ 、および $X_j = 1$ を作用させたときの軸方向力

\bar{M}_i, \bar{M}_j : それぞれ単位の不静定力 $X_i = 1$ 、および $X_j = 1$ を作用させたときの曲げモーメント

とするとき、その要素 δ_{ij} は、次式で求められる。ただし、 \int_0^L は、不静定構造物の全長にわたって積分することを意味する。

$$\delta_{ij} = \int_0^L \frac{\bar{N}_i \bar{N}_j}{E_s A_s} dx + \int_0^L \frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{E_s I_s} dx \quad (5.10)$$

そして、 $\{ \Delta X_i \}_{n \times 1}$ は、n行、および1列の不静定力の変化量を表すベクトルである。また、 $\{ K_i \}_{n \times 1}$ は、n行、および1列の外荷重による静定基本系のたわみを表すベクトルで、次式で算出される。

$$K_i = - \int_0^L \frac{\bar{N}_i \Delta N_{s,t-t_1}^{\circ}}{E_s A_s} dx - \int_0^L \frac{\bar{M}_i \Delta M_{s,t-t_1}^{\circ}}{E_s I_s} dx \quad (5.11)$$

したがって、式(5.9)を、

$$\{ \Delta X_i \} = [\delta_{ij}]^{-1} \{ K_i \} \quad (5.12)$$

として解けば、不静定力の変化量 ΔX_i が求められる。それゆえ、不静定力の変化に伴う鋼桁の分担断面力の変化量は、次式で算定される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{s,t-t_1}^i &= \sum_{i=1}^n \Delta X_i \bar{M}_i \\ \Delta N_{s,t-t_1}^i &= \sum_{i=1}^n \Delta X_i \bar{N}_i \end{aligned} \right\} (5.13)_{1-2}$$

一方、不静定力の変化量に伴うコンクリート床版の分担断面力の変化量は、鋼桁とコンクリート床版との間に、ひずみの適合条件式と曲率が一致する条件式とが常に成り立つことから、第2章の式(2.29)を適用することによって、 $\Delta M_{b,t-t_1}^i$ 、および $\Delta N_{b,t-t_1}^i$ の関数として算定することができる。もちろん、式(2.29)の右辺の荷重項は、0にする必要がある。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} -\Delta N_{b,t-t_1}^i + \eta_N \Delta N_{b,t-t_1}^{\circ} + D_N \Delta N_{s,t-t_1}^i + D_1 \Delta M_{s,t-t_1}^i &= 0 \\ -\Delta M_{b,t-t_1}^i + \eta_M \Delta M_{b,t-t_1}^{\circ} + D_M \Delta M_{s,t-t_1}^i &= 0 \end{aligned} \right\} (5.14)_{1-2}$$

ここで、 $\eta = -\eta_N = -\eta_M$ であるから、上式より、 $\Delta N_{b,t-t_1}^i$ 、および $\Delta M_{b,t-t_1}^i$ は、次式によって求められる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{b,t-t_1}^i &= \frac{1}{1+\eta} (D_N \Delta N_{s,t-t_1}^i + D_1 \Delta M_{s,t-t_1}^i) \\ \Delta M_{b,t-t_1}^i &= \frac{D_M}{1+\eta} \Delta M_{s,t-t_1}^i \end{aligned} \right\} (5.15)_{1-2}$$

さて、連続合成桁橋に限定すると、当然、不静定力 X_i 、または $X_j = 1$ による軸方向力 \bar{N}_i 、または $\bar{N}_j = 0$ である。したがって、式(5.10)、(5.13)、および(5.15)は、次のように簡単化される。

$$\left. \begin{aligned} \delta_{ij} &= \int_0^L \frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{E_B I_B} dx \\ K_i &= - \int_0^L \frac{\bar{M}_i \Delta M_{B,t-t_1}^{\circ}}{E_B I_B} dx \end{aligned} \right\} (5.16)_{1-2}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{B,t-t_1}^i &= \sum_{i=1}^n \Delta X_i \bar{M}_i \\ \Delta N_{B,t-t_1}^i &= -\Delta N_{b,t-t_1}^i \end{aligned} \right\} (5.17)_{1-2}$$

および

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_{b,t-t_1}^i &= \frac{D_M}{1+\eta} \Delta M_{B,t-t_1}^i \\ \Delta N_{b,t-t_1}^i &= \frac{D_N}{1+\eta+D_N} \Delta M_{B,t-t_1}^i \end{aligned} \right\} (5.18)_{1-2}$$

(3) 合成断面に作用する断面力

合成断面に作用する軸方向力と曲げモーメントとの変化量は、軸方向力と曲げモーメントのつり合い式から、

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{v,t-t_1}^i &= \Delta N_{b,t-t_1}^i + \Delta N_{B,t-t_1}^i = 0 \\ \Delta M_{v,t-t_1}^i &= \Delta M_{B,t-t_1}^i - \Delta N_{B,t-t_1}^i a + \Delta M_{b,t-t_1}^i \end{aligned} \right\} (5.19)_{1-2}$$

で算定される。

ここに、

$$\begin{aligned} \Delta N_{v,t-t_1}^i &: \text{合成断面に作用する軸方向力の変化量} \\ \Delta M_{v,t-t_1}^i &: \text{合成断面に作用する曲げモーメントの変化量} \end{aligned}$$

したがって、任意の時刻 t において合成断面に作用する軸方向力と曲げモーメントとは、次式で算定される。

$$\left. \begin{aligned} N_{v,t} &= N_{v,t_1} + \Delta N_{v,t-t_1}^{\circ} + \Delta N_{v,t-t_1}^i \\ M_{v,t} &= M_{v,t_1} + \Delta M_{v,t-t_1}^{\circ} - \Delta M_{v,t-t_1}^i \end{aligned} \right\} (5.20)_{1-2}$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{v,t-t_1}^{\circ} &= \Delta N_{b,t-t_1}^{\circ} + \Delta N_{B,t-t_1}^{\circ} = 0 \\ \Delta M_{v,t-t_1}^{\circ} &= \Delta M_{B,t-t_1}^{\circ} - \Delta N_{B,t-t_1}^{\circ} a + \Delta M_{b,t-t_1}^{\circ} \end{aligned} \right\} (5.21)_{1-2}$$

N_{v,t_1} : 時刻 t_1 において合成断面に作用する当初の軸方向力

M_{v,t_1} : 時刻 t_1 において合成断面に作用する当初の曲げモーメント

(4) 2径間連続合成桁に対する数値解析結果とその考察

2径間連続合成桁に、最も単純な持続荷重の載荷例であるCase-3の荷重を載荷させた場合に対して解析する。この連続合成桁の断面には、第2章(8)の計算例と同じものを用いる。また、図-5.1に示すように、1径間のスパン長は $l=40\text{m}$ とし、支点の下降量は $\delta=22.6\text{cm}$ とする。計算に用いた断面諸定数を表-5.2に示す。さらに、計算のフローチャートを、図-5.2に示す。

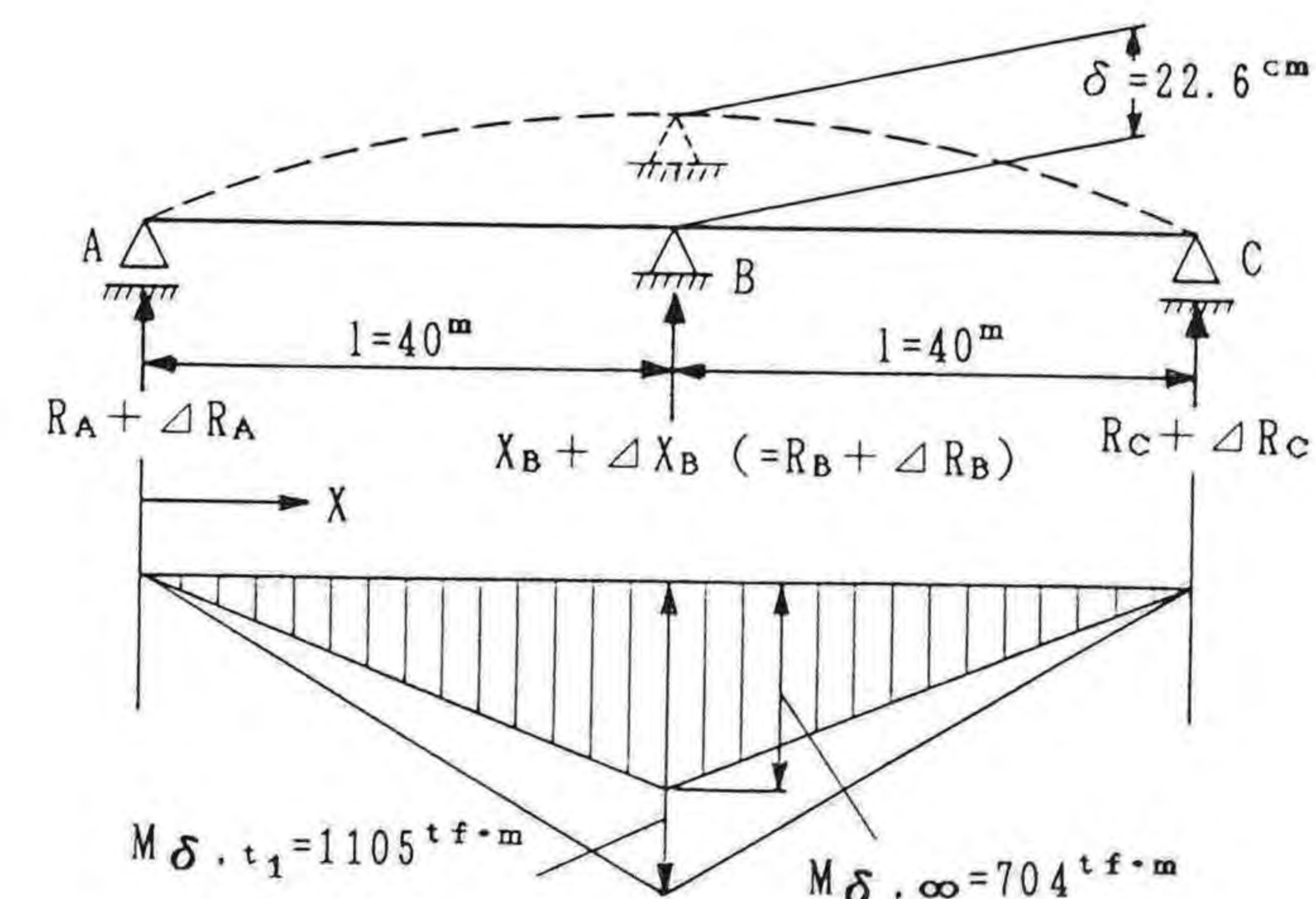


図-5.1 等断面の2径間連続合成桁 (1tf·m = 9.8 kN·m)

表-5.2 計算条件

| | |
|---|--|
| $\phi_{v\infty} = 0.4$ | $\phi_{f\infty} = 1.6$ |
| $k_1 = 0.0200$ | $k_2 = 0.00670$ |
| $E_b = 3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ | $E_a = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ |
| $I_b = 2.0 \times 10^5 \text{ cm}^4$ | $A_b = 6.0 \times 10^3 \text{ cm}^2$ |
| $I_a = 3.5673 \times 10^6 \text{ cm}^4$ | $A_a = 6.0 \times 10^2 \text{ cm}^2$ |
| $I_v = 1.2425 \times 10^7 \text{ cm}^4$ | $A_v = 1.6 \times 10^3 \text{ cm}^2$ |
| $D_1 = 0.04300 (1/\text{cm})$, $D_2 = 0.00463 (1/\text{cm})$, $D_v = 0.00268$ | |
| $\eta = 1.27133$ | $\eta' = 1.00000$ |

注: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$

それらの計算結果を、表-5.3に示す。同表には、Troostの方法による結果^{5.1)}も示してある。

表-5.3 計算結果

| 分担断面力 の変化量 | 回復クリープを考慮 | | | 回復クリープを無視 | |
|---|------------|---------|-------|-----------|-------|
| | ①Troostの方法 | ②本論文の方法 | ①/② | ③本論文の方法 | ③/② |
| $\Delta N_{b,\infty}^T \text{ (tf)}$ | -240.37 | -259.72 | 0.925 | -278.83 | 1.074 |
| $\Delta M_{b,\infty}^T \text{ (tf}\cdot\text{m)}$ | -2.17 | -2.60 | 0.835 | -2.96 | 1.138 |
| $\Delta M_{a,\infty}^T \text{ (tf}\cdot\text{m)}$ | 0 | 0 | — | 0 | — |

注: $1 \text{ tf} = 9.8 \text{ kN}$, $1 \text{ tf}\cdot\text{m} = 9.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$

この計算結果と第2章で示した静定系における計算結果との比較から明らかのように、不静定系における回復クリープの影響は、静定系よりも相当に大きくなることがわかる。すなわち、静定系における影響は約3%であるが、不静定系になると約2倍の7%の影響が出ている。この理由は、不静定系では、不静定力の変化に伴う分担軸方向力の変化量が、静定系の約2倍近くとなり、その変化量が著しい影響を及ぼすためである。この傾向は、合成桁の断面構成比を表すパラメータ α が大きくなるのに伴って、さらに顕著になっている。

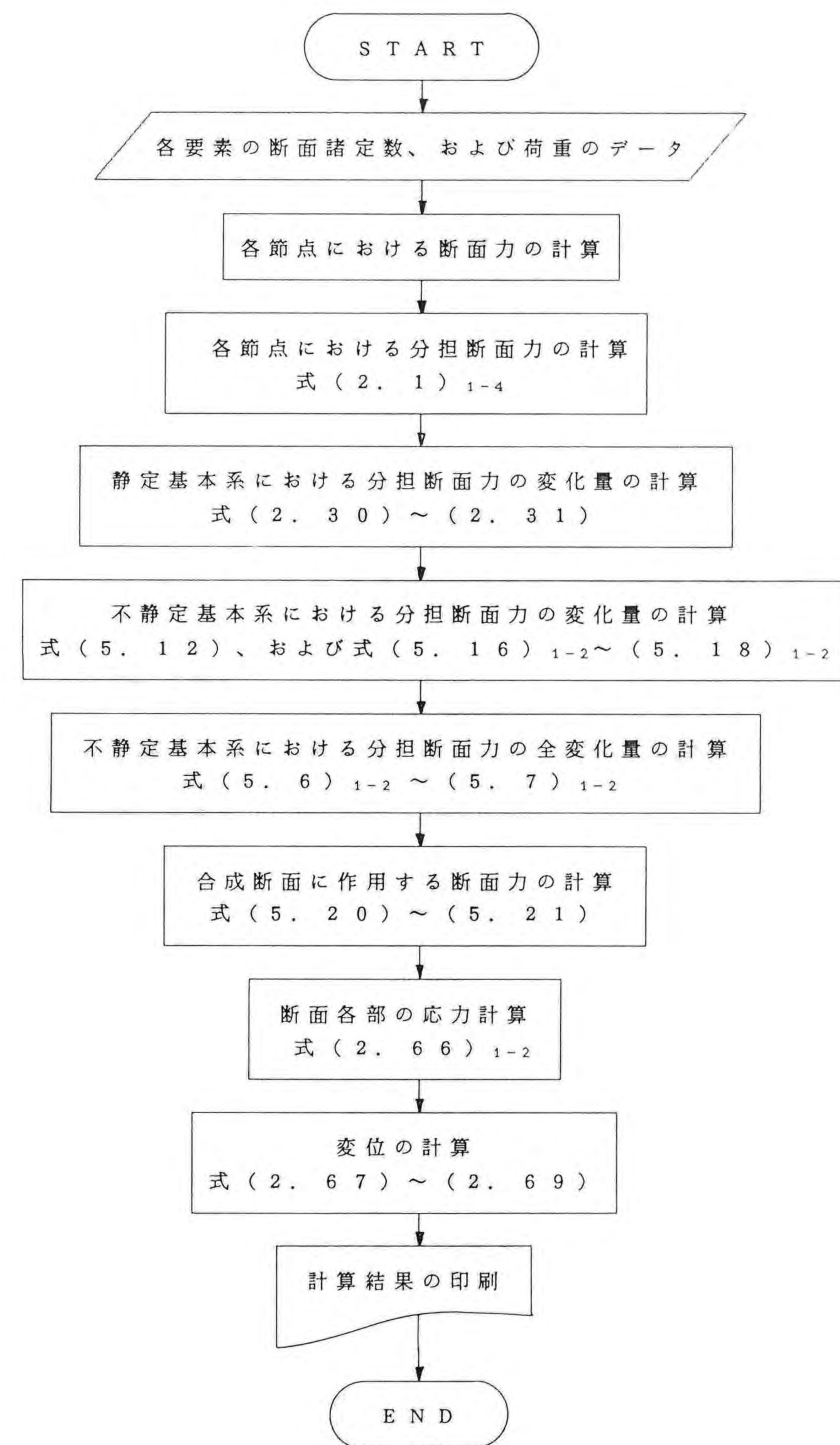


図-5.2 弾性方程式法による計算のフローチャート

5.3 剛性マトリックス法^{5.2)~5.7)}

本節では、合成桁橋の経時挙動の解析方法に汎用性をもたせるため、まず第2章で論述のクリープ、および乾燥収縮の解を用いた剛性マトリックス法による解析法を導く。つぎに、それにもとづいて構築したプログラムの概要を、説明する。さらに、20径間までの多径間連続合成桁橋を対象とした数値解析を行い、その経時挙動特性について考察する。

(1) 剛性方程式

a. 節点力、および変位の符号のとり方

節点 i 、および j における節点力 $\{X_i, Y_i, M_i, X_j, Y_j, M_j\}^T$ 、および変位 $\{u_i, v_i, \theta_i, u_j, v_j, \theta_j\}^T$ の符号は、図-5.3に示す方向を正とする。

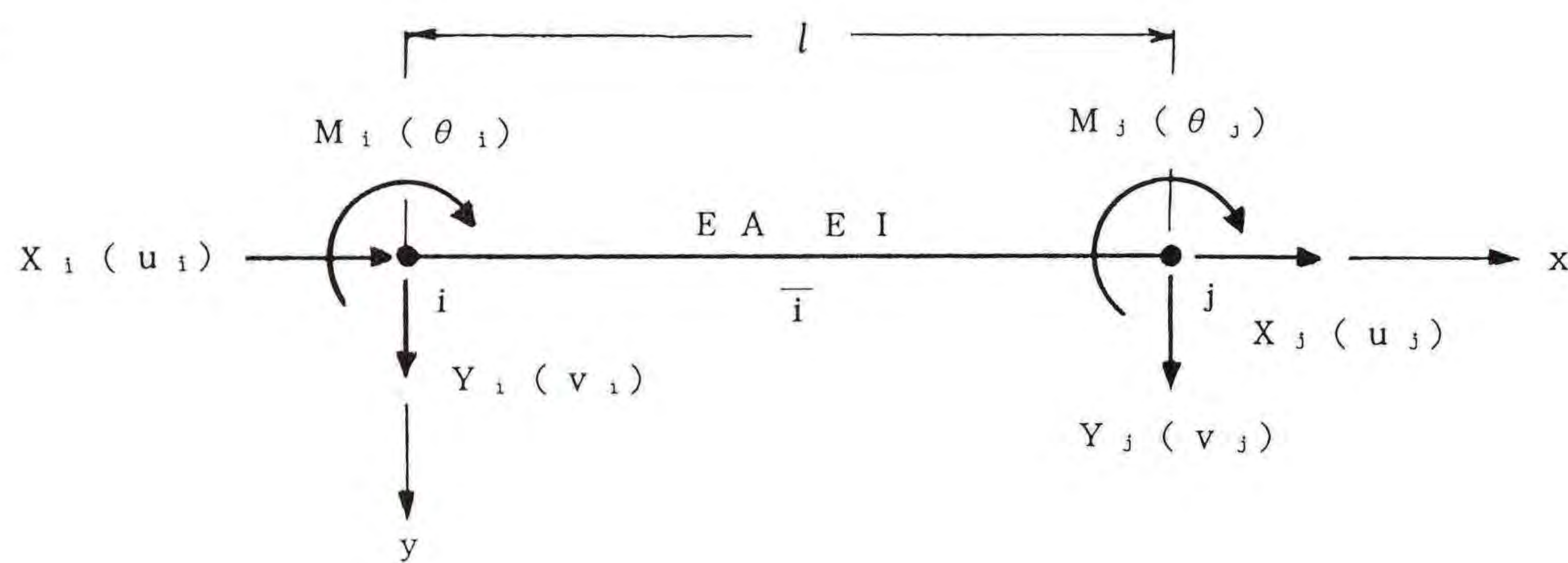


図-5.3 節点力、および変位の符号の決め方

ここに、

EA : 部材 \bar{i} の伸び剛性

EI : 部材 \bar{i} の曲げ剛性

l : 節点 i と j との間の長さ

b. 軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の剛性方程式

軸方向力と曲げモーメントとを同時に受ける部材の剛性方程式は、周知のように、次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ M_i \\ X_j \\ Y_j \\ M_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA/l & 0 & 0 & -EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/l^3 & 6EI/l^2 & 0 & -12EI/l^3 & 6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 4EI/l & 0 & -6EI/l^2 & 2EI/l \\ \hline -EA/l & 0 & 0 & EA/l & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/l^3 & -6EI/l^2 & 0 & 12EI/l^3 & -6EI/l^2 \\ 0 & 6EI/l^2 & 2EI/l & 0 & -6EI/l^2 & 4EI/l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \\ u_j \\ v_j \\ \theta_j \end{Bmatrix} \quad (5.22)$$

上式を破線で示すように分割し、部分マトリックス K_{ii} 、 K_{ij} 、 K_{ji} 、および K_{jj} に分けて表すと、次式のようにまとめられる。

$$\begin{Bmatrix} f_i \\ \dots \\ f_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ \dots & \dots \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \dots \\ \delta_j \end{Bmatrix} \quad (5.23)$$

さらに、簡素に表現すると、

$$f = K \delta \quad (5.24)$$

と書ける。

c. 中間荷重を含む場合の剛性方程式

図-5.3に示した節点 i 、および j の中間に任意の外力が作用する場合の剛性方程式は、式(5.23)と類似の形で表すと、次式のように書ける。

$$\begin{Bmatrix} f_i \\ \dots \\ f_j \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} f_i^0 \\ \dots \\ f_j^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ \dots & \dots \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \dots \\ \delta_j \end{Bmatrix} \quad (5.25)$$

あるいは、上式の左辺の荷重項を右辺へ移行すると、次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} f_i \\ \dots \\ f_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ \dots & \dots \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \dots \\ \delta_j \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} f_i^0 \\ \dots \\ f_j^0 \end{Bmatrix} \quad (5.26)$$

ここに、 f_i^0 、および f_j^0 は、荷重ベクトルで、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} f_i^0 &= \{ X_i^0 \quad Y_i^0 \quad M_i^0 \}^T \\ f_j^0 &= \{ X_j^0 \quad Y_j^0 \quad M_j^0 \}^T \end{aligned} \right\} (5.27)_{1-2}$$

すなわち、これらは、節点 i 、および j が固定されているとみなした場合の中間荷重による反力と同じ値で、その符号を逆にした集中節点力として与えられる。そこで、代表的な持続荷重の載荷状態における荷重項を、表-5.4に示す。

表-5.4 代表的な持続荷重の載荷状態に対する荷重項

| 載荷状態 | X_i^0 | X_j^0 | Y_i^0 | Y_j^0 | M_i^0 | M_j^0 |
|------|--------------------------|--------------------------|---|---|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | $\frac{Pb}{l}$ | $\frac{Pa}{l}$ | — | — | — | — |
| | $\frac{pl}{2}$ | $\frac{pl}{2}$ | — | — | — | — |
| | $\frac{2p_i + p_j}{6} l$ | $\frac{p_i + 2p_j}{6} l$ | — | — | — | — |
| | — | — | $P \left(\frac{b}{l} \right)^2 \cdot \left(1 + 2 \frac{a}{l} \right)$ | $P \left(\frac{a}{l} \right)^2 \cdot \left(1 + 2 \frac{b}{l} \right)$ | $\frac{Pab^2}{l^2}$ | $\frac{Pa^2b}{l^2}$ |
| | — | — | $-\frac{6abm}{l^3}$ | $\frac{6abm}{l^3}$ | $-\frac{mb(2l-3b)}{l^3}$ | $\frac{mb(2l-3a)}{l^3}$ |
| | — | — | $\frac{ql}{2}$ | $\frac{ql}{2}$ | $\frac{ql^2}{12}$ | $-\frac{ql^2}{12}$ |
| | — | — | $\frac{l}{20} \cdot (7q_i + 3q_j)$ | $\frac{l}{20} \cdot (3q_i + 7q_j)$ | $\frac{l^2}{60} \cdot (3q_i + 2q_j)$ | $-\frac{l^2}{60} \cdot (2q_i + 3q_j)$ |

(2) 持続外力による任意断面の時刻 t_1 における分担断面力の計算

式(5.25)のように表された単一部材の剛性方程式を重ね合わせると、構造物全体の剛性方程式を作成することができる。ついで、荷重条件、および支持条件を与えることにより、剛性方程式を未知変位について解くことができる。さらに、各節点の変位量を用いて未知反力や節点 i 、および j の間の任意の位置における断面力が算定できる。

このようにして、種々の持続荷重の載荷状態における任意の断面における作用断面力が求められたならば、第2章の式(2.1)₁₋₄を用いて、コンクリート床版、および鋼桁の時刻 t_1 における分担断面力 N_{b,t_1} 、 N_{s,t_1} 、 M_{b,t_1} 、および M_{s,t_1} を算出することができる。ただし、剛性方程式を作成する際に使用する桁の伸び剛性、および曲げ剛性は、合成桁としての剛性を用いる必要がある。また、剛性マトリックス法で算定された節点力、および任意の断面における断面力の符号は、次のような変換を行っておく必要がある。

いま、図-5.4で示すように、中間荷重がない場合について考えると、力のつり合い条件式より任意点における断面力は、

$$\left. \begin{aligned} X_{ix} &= -X_i \\ Y_{ix} &= -Y_i \\ M_{ix} &= Y_{ix} l - M_i \end{aligned} \right\} (5.28)_{1-3}$$

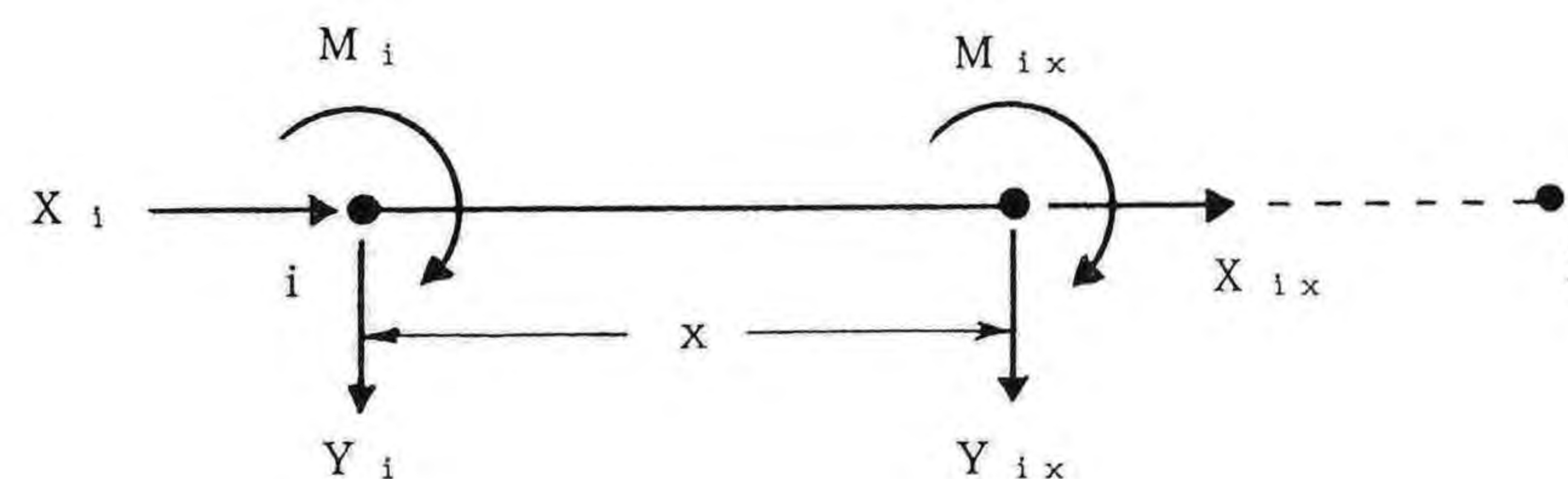


図-5.4 節点 i 、および j の間の断面力 (中間荷重がない場合)

と表される。ところが、第2章で使用した断面力の符号は、図-5.5に示すようにとっているので、次式を用いて、剛性マトリックス法による演算結果の符号を変換しなければならない。

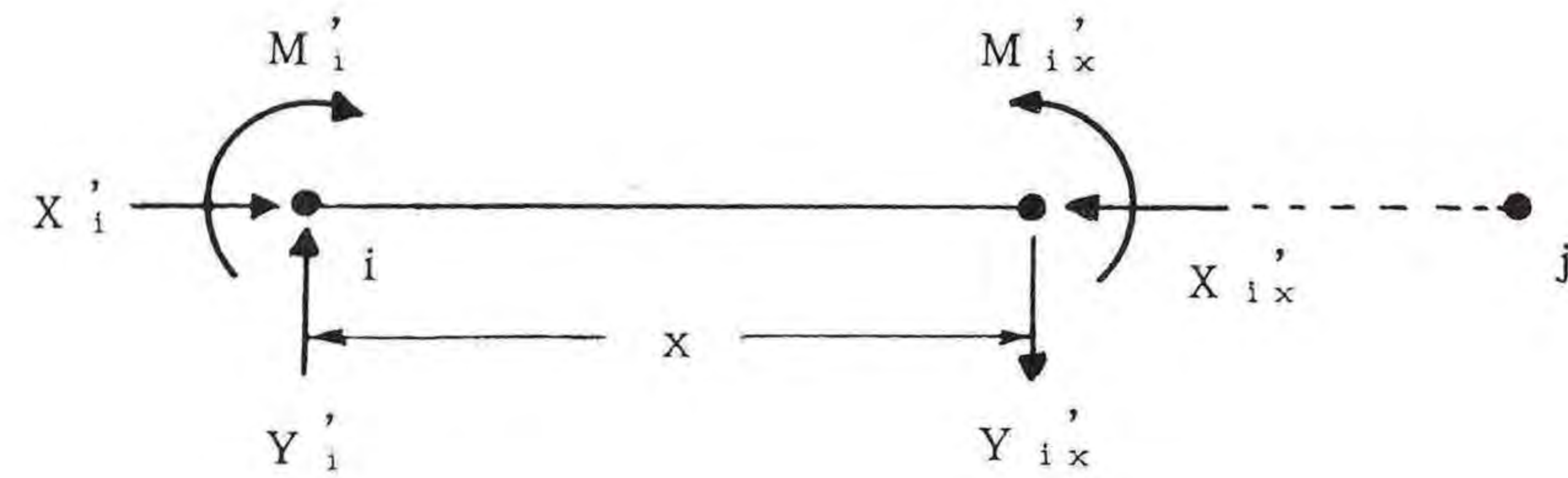


図-5.5 本論文における断面力の正符号の定義

$$\left. \begin{aligned} X_{i'} &= X_i \\ Y_{i'} &= -Y_i \\ M_{i'} &= M_i \\ X_{ix'} &= X_{i'} = X_i \\ Y_{ix'} &= Y_{i'} = -Y_i \\ M_{ix'} &= M_{i'} + Y_{i'} x = M_i - Y_i x \end{aligned} \right\} (5.29)_{1-6}$$

ここに、

- X_i, Y_i, M_i : それぞれ剛性マトリックス法による節点 i における節点力
- X_{ix}, Y_{ix}, M_{ix} : それぞれ剛性マトリックス法による節点 i 、および j の間の任意点における断面力
- $X_{i'}, Y_{i'}, M_{i'}$: それぞれ符号変換後の節点 i における節点力
- $X_{ix'}, Y_{ix'}, M_{ix'}$: それぞれ符号変換後の節点 i 、および j の間の任意点における断面力

もちろん、節点 j における断面力も、節点 i と同様に、次式を用いて変換しなければならない（前の図-5.3、および図-5.5を参照）。

$$\left. \begin{aligned} X_{j'} &= -X_j \\ Y_{j'} &= Y_j \\ M_{j'} &= -M_j \end{aligned} \right\} (5.30)_{1-3}$$

ここに、

- X_j, Y_j, M_j : それぞれ剛性マトリックス法における節点 j における節点力
- $X_{j'}, Y_{j'}, M_{j'}$: それぞれ符号変換後の節点 j における節点力

(3) 各節点における分担断面力の変化量の計算

a. クリープによる分担断面力の変化量

持続荷重の載荷により生じたクリープに伴う各節点におけるコンクリート床版、および鋼桁の分担断面力の変化量は、第2章の式(2.30)~(2.32)、式(2.38)₁₋₃、あるいは式(2.43)₁₋₅によって、それぞれの持続荷重状態、もしくは施工法に対応させて求められる。

b. 乾燥収縮による分担断面力の変化量

乾燥収縮による分担断面力の変化量は、第2章の式(2.63)₁₋₅によって算定することができる。

(4) クリープ、および乾燥収縮に対する荷重項

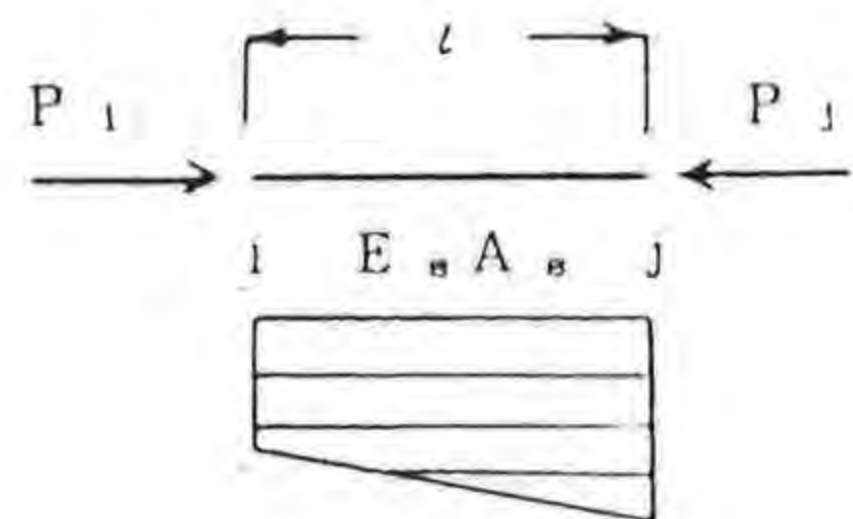
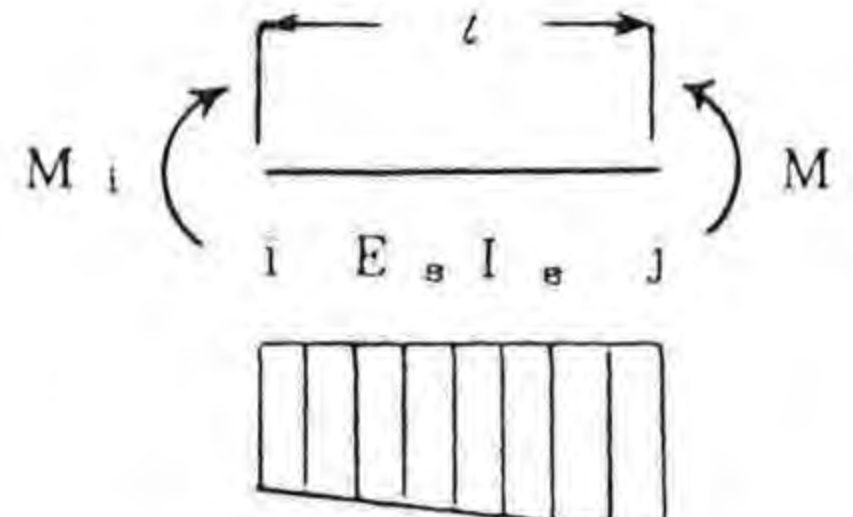
まず、先節までに述べた方法により、構造全体系の持続荷重による断面力、および静定系のクリープ、および乾燥収縮による分担断面力の変化量を算定する。

つぎに、クリープ、および乾燥収縮による構造全体系の変化量を算定するためには、5.2節で述べた弾性荷重法による方法と同様に、鋼桁に着目して、鋼桁のクリープ、および乾燥収縮による分担断面力の変化量を荷重項とみなして再び構造全体系の解析を行うことにより得られる。その際のクリープ、および乾燥収縮に対する荷重項を、表-5.5に示す。

この表の荷重項は、表-5.4の場合と同じ考え方で求められたものである。すなわ

ち、各節点における鋼桁の分担軸力、および分担モーメントの変化量は、両端固定ばりの支点反力の符号を逆にした集中節点力として与えられる。たとえば、持続曲げモーメント $M_{a, t-t_1}$ が作用する場合の節点 i におけるクリープに対する荷重項は、式(2.30)~(2.31)を用いて、具体的に次のように表せる。

表-5.5 クリープ、および乾燥収縮に対する荷重項

| 載荷状態 | X_i^0 | X_j^0 | Y_i^0 | Y_j^0 | M_i^0 | M_j^0 |
|---|---------|---------|---------------------------------|----------------------------------|---------|---------|
|  | P_i | $-P_j$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
|  | 0 | 0 | $\frac{1}{l} \cdot (M_j - M_i)$ | $-\frac{1}{l} \cdot (M_j - M_i)$ | M_i | $-M_j$ |

$$\begin{aligned}
 P_i^c &= \Delta N_{B, t-t_1} \\
 &= \frac{D_2(1-\eta + D_M) - D_1 D_v}{(1-\eta + D_N + D_1 a)(1-\eta + D_M) - D_1 D_M a} M_{a, t_1} \phi(t-t_1) \\
 M_i^c &= \Delta M_{B, t-t_1} \\
 &= \Delta N_{B, t-t_1} a - \Delta M_{b, t-t_1} \\
 \Delta M_{b, t-t_1} &= - \frac{D_v(1-\eta + D_N + D_1 a) - D_2 D_M a}{(1-\eta + D_N + D_1 a)(1-\eta + D_M) - D_1 D_M a} M_{a, t_1} \phi(t-t_1)
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} P_i^c \\ M_i^c \\ \Delta M_{b, t-t_1} \end{aligned}} \right\} (5.31)_{1-3}$$

同様に、乾燥収縮の場合の荷重項は、式(2.63)₁₋₅を用いると、次のように表せる。

$$\begin{aligned}
 P_i^d &= \Delta N_{B, t} = \Delta P_{P, t} - \Delta N_{b, t} \\
 M_i^d &= \Delta N_{B, t} a - \Delta M_{b, t}
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} P_i^d \\ M_i^d \end{aligned}} \right\} (5.32)_{1-2}$$

(5) クリープ、および乾燥収縮による構造全体系における断面力の変化量の計算

式(5.31)、あるいは式(5.32)で示された荷重項を用いて、再度、構造全体系の解析を行うことにより、不静定系に対する断面力の変化量が得られる。ただし、この場合の計算に用いる剛性は、鋼桁に関する伸び剛性、および曲げ剛性を用いねばならない。

最終的に鋼桁のクリープ、および乾燥収縮による分担断面力の総変化量は、静定系に対する変化量と不静定系に対する変化量との和として与えられる。さらに、コンクリート床版の分担断面力の総変化量は、弾性荷重法の場合と同様に、内力のつり合い条件式、ならびに変位の適合条件式から得られた式(5.15)における値を、静定系に対する変化量に加算することによって得られる。

(6) 数値計算の手順^{5.7)}

プレキャスト床版を用いて架設される合成桁を含めた一般の合成桁橋の剛性マトリックス法によるクリープ、および乾燥収縮を解析するためのプログラムを、フローチャートとしてまとめたものを図-5.6に示す。

同図中に示す①から④までの各ブロックにおける演算内容の概要は、次のとおりである。

- ①：部材の節点割り（節点番号 i 、および j ）、ならびに支点条件を入力する。
- ②：各要素 \bar{i} の断面諸定数 $A_b, I_b, A_s, I_s, E_b, E_s, A_p, E_p, a_b$ 、および a_s を入力する。
- ③：それらの値とサブルーチン〈DANMEN〉を用いて、合成桁断面に対する断面諸定数を計算する。
- ④：持続荷重に対する荷重項（等価節点荷重）を入力する。プレキャスト床版を用いた合成桁の場合、プレストレスの導入、および解放量を入力する。
- ⑤：持続荷重による各節点における断面力をサブルーチン〈STIFNS〉を用いて計算する。つぎに、持続曲げモーメントのみが作用する場合には、⑧のブロックへ移り、クリープによる分担断面力の変化量を計算する。その際に使

用しているサブルーチンが<BUNMOM>である。

持続軸方向力と持続曲げモーメントとが同時に作用する場合には、⑨、および⑩の演算処理を行う。持続軸方向力が作用する場合には、上記のサブルーチン<BUNMON>が用いられる。

⑥：一方、プレキャスト床版を用いた合成桁に対するクリープ計算では、サブルーチン<BUNMOP>を用いる。

⑦：また、乾燥収縮に対する静定系の断面力演算には、サブルーチン<BUNSHR>を用いる。

以上のステップによって、クリープ、および乾燥収縮に対する静定基本系におけるコンクリート床版、および鋼桁の分担断面力の変化量が得られる。それ以降の演算は、以下の演算手順によって行っている。

⑪：鋼桁のみを対象にクリープ、および乾燥収縮による不静定力の変化に伴う分担断面力の変化量を、サブルーチン<STIFNS>によって計算する。

⑫：上の⑪における結果を用いて、コンクリート床版の不静定力の変化に伴う分担断面力の変化量の計算を、サブルーチン<BUNB2>によって計算する。

⑬：そして、分担断面力の変化量を集計し、応力計算をサブルーチン<STRESS>によって行う。

⑭：最後に、必要な計算結果を印刷する。

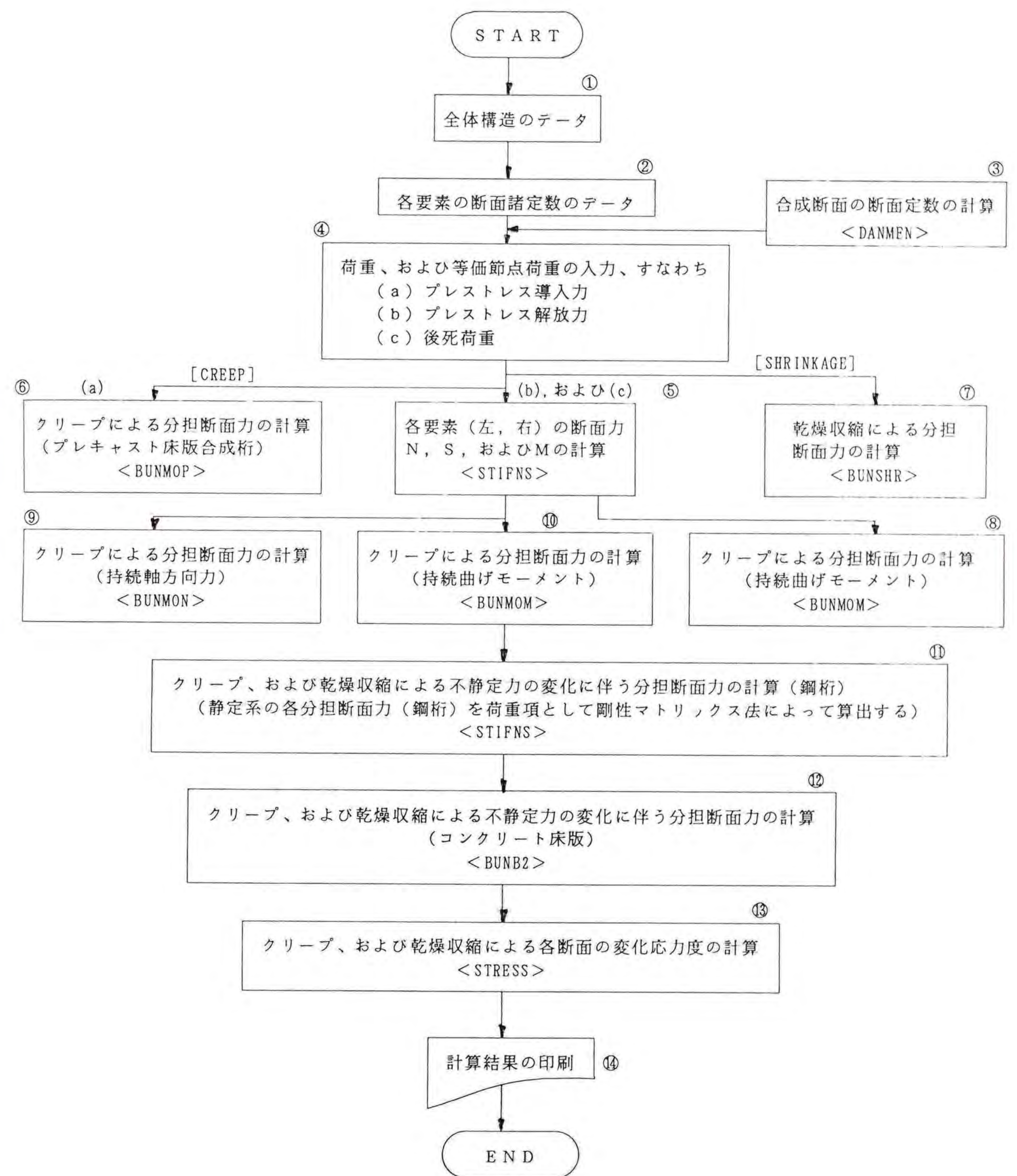


図-5.6 剛性マトリックス法による合成桁のクリープ、および乾燥収縮に伴う応力を計算するためのフローチャート

(7) 多径間連続合成桁に対する数値解析結果とその考察

剛性マトリックス法による計算プログラムを用いて、図-2.9に示した合成桁断面^{5, 8)}を対象にN=2~20径間までの連続合成桁におけるクリープ、および乾燥収縮の特性を調べ、検討を加える。ただし、対象とする連続合成桁の断面は全径間を通じて一定とし、また持続曲げモーメントは、図-5.7に示すように、両端の支間を除いて、全ての間中支点上に持続曲げモーメント $M_g = 1,105 \text{ tf}\cdot\text{m}$ を載荷した^{5, 4)}。なお、クリープ係数、および乾燥収縮量などは、表-5.6に示す値を用いた。

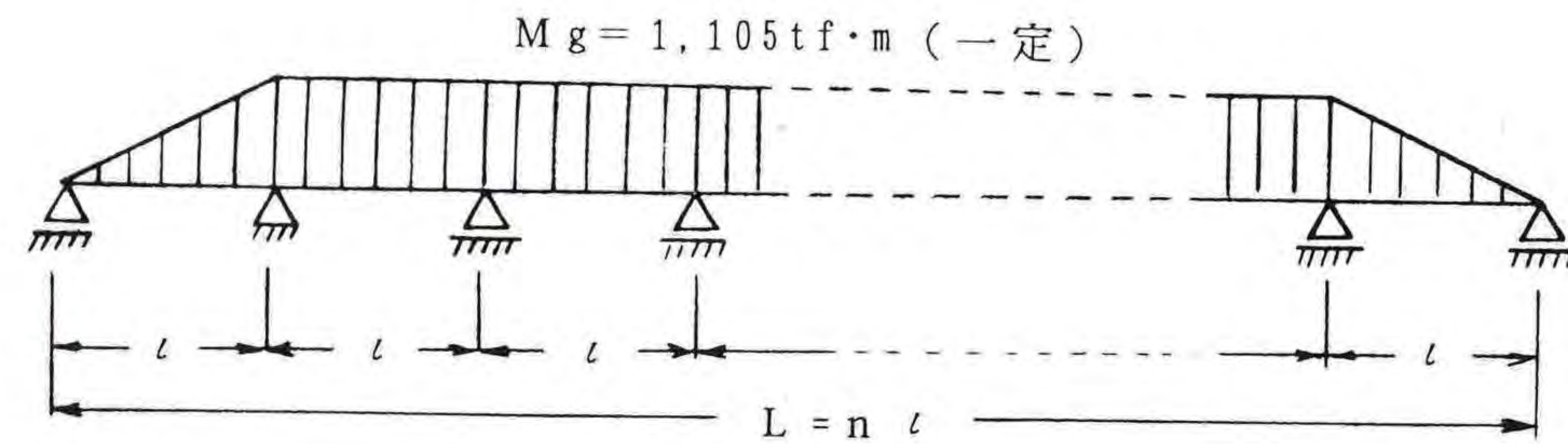


図-5.7 持続曲げモーメントの載荷状態

表-5.6 計算条件

| 項目 | 数値 |
|--------------|--|
| スパン長 | $l = 40 \text{ m}$ |
| クリープ係数 | $\phi_{v\infty} = 0.4$ |
| クリープ係数 | $\phi_{f\infty} = 1.6$ |
| 乾燥収縮量 | $\epsilon_{s\infty} = 25 \times 10^{-5}$ |
| 収縮に伴うクリープ係数 | $\phi_{s(\infty)} = 2.0$ |
| 鋼桁のヤング係数 | $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ |
| コンクリートのヤング係数 | $E_b = 3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ |

注: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$

それらについての計算結果を、図-5.8~5.10に示す。

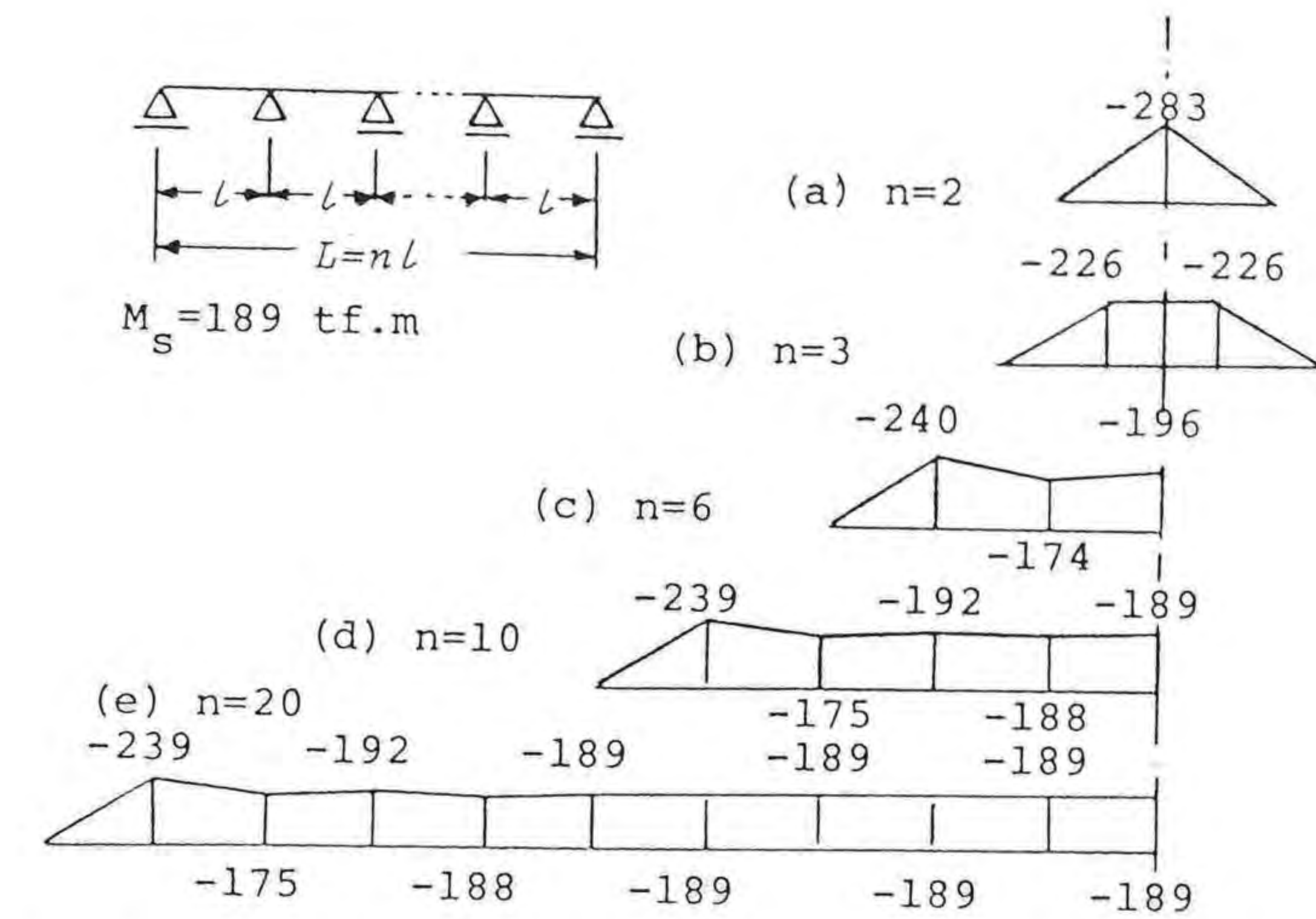


図-5.8 乾燥収縮による不静定曲げモーメント(単位: $\text{tf}\cdot\text{m}$)

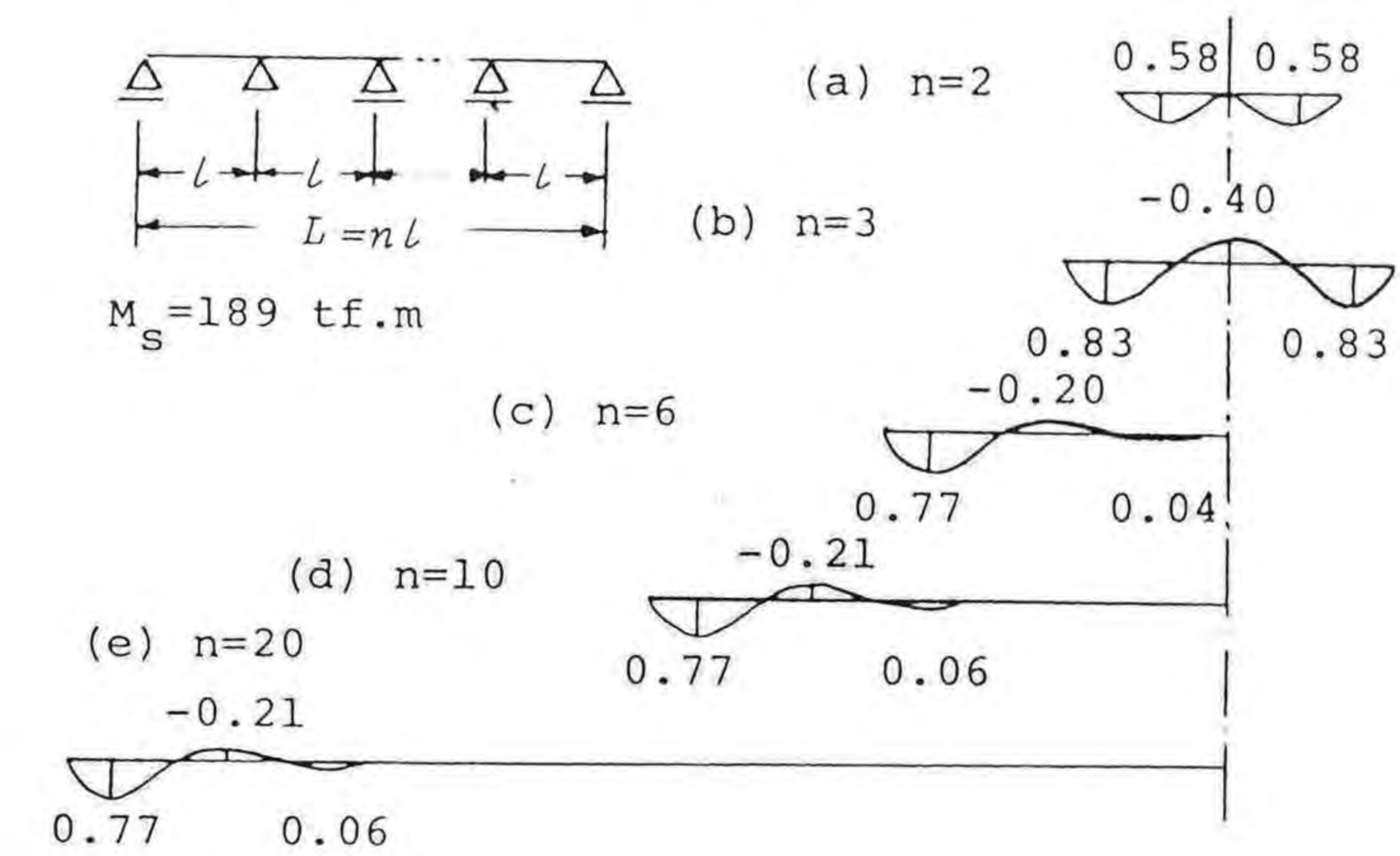


図-5.9 乾燥収縮によるたわみ(単位: cm)

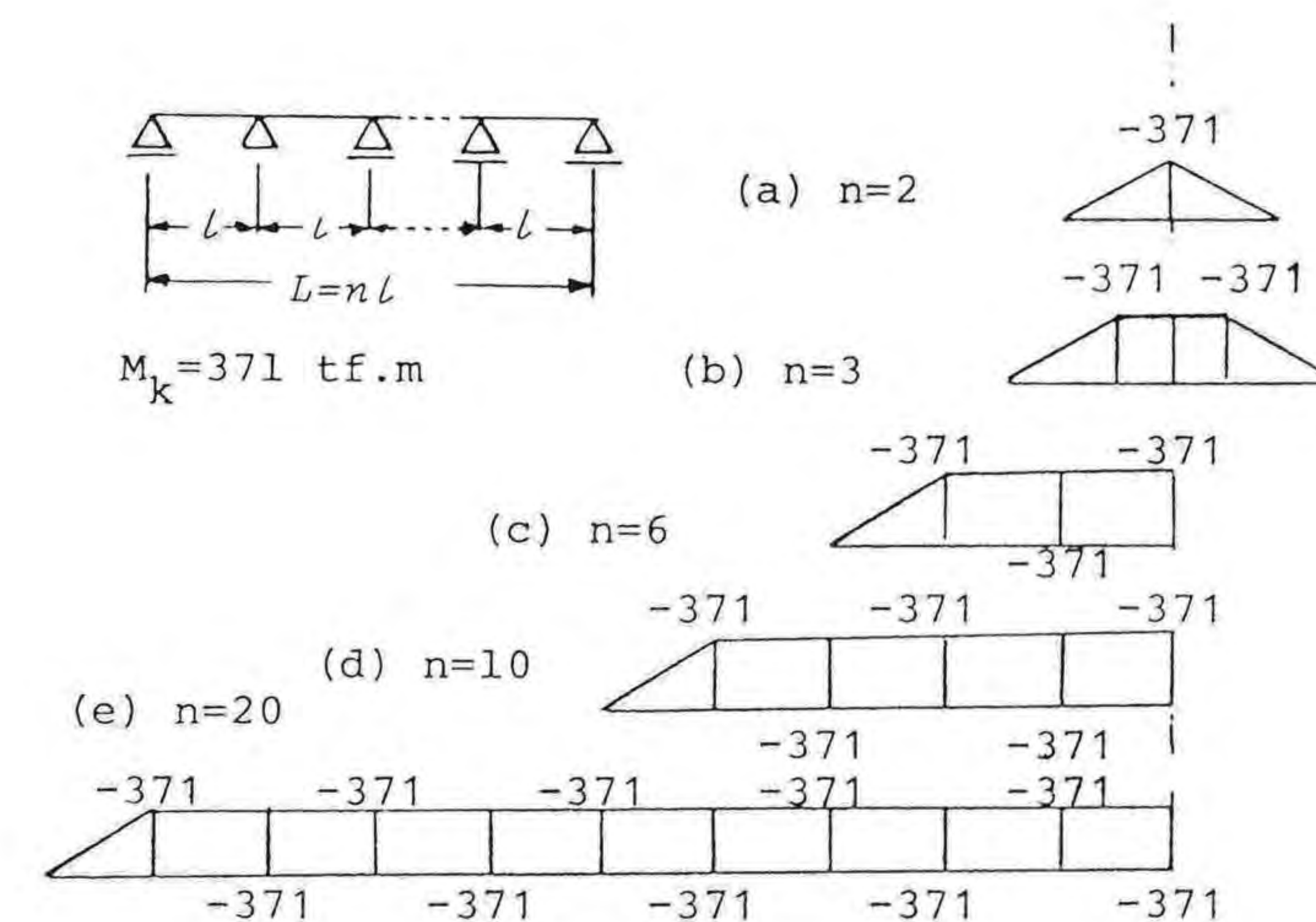


図-5.10 クリープによる不静定曲げモーメント(単位: $\text{tf}\cdot\text{m}$)

まず、図-5.8は、乾燥収縮により合成桁断面に作用する不静定曲げモーメントの分布を示したものである。スパン数Nが6以上になると、端支間を除く中間部の不静定曲げモーメントの値は、一定値 $-189tf\cdot m$ になることがわかる。この場合の乾燥収縮による静定曲げモーメントの値が $189tf\cdot m$ であることから、 $N \geq 6$ の場合の中間支点領域における総計の曲げモーメントは、ゼロとなる。その結果、乾燥収縮によるたわみの形状は図-5.9に示すとおり、 $N \geq 6$ の場合の中間支点領域でゼロとなり、両端支点で最大値をとることがわかる。

つぎに、図-5.10は、図-5.7に示した持続曲げモーメントを載荷した場合のクリープによる合成桁断面の不静定曲げモーメントの分布を示したものである。この場合、全ての中間支点の曲げモーメントが $-371tf\cdot m$ の一定値をもち、また静定曲げモーメントが $371tf\cdot m$ となることから、クリープによる総計の曲げモーメントは、全径間を通じてゼロとなる。それに伴って、クリープによるたわみも、全径間を通じてゼロとなる。

以上のことから、多径間連続合成桁における乾燥収縮の影響は、端部支間近傍の2~3径間においてのみ現れることがわかった。また、全径間にわたり一定な持続曲げモーメントを載荷した場合、多径間連続合成桁橋のクリープによる曲げモーメントは、ゼロになることがわかる。

5.4 パラメトリック解析

(1) パラメータの抽出

合成桁のクリープ解析における回復クリープの影響を評価するため、3つのパラメータ、すなわち合成桁の断面構成比 α 、フロークリープ係数 $\phi_{f\infty}$ 、および初期載荷材齢 t_1 を抽出した。

ここで、最も影響が大きいと考えられる合成桁の断面構成比 α は、次式で定義されるものである^{5.8)}。

$$\alpha = \frac{A_s I_e}{A_v I_v} \quad (5.33)$$

そして、パラメーター α の計算に用いた3種類の合成桁断面の形状寸法を、図-5.11に示す。

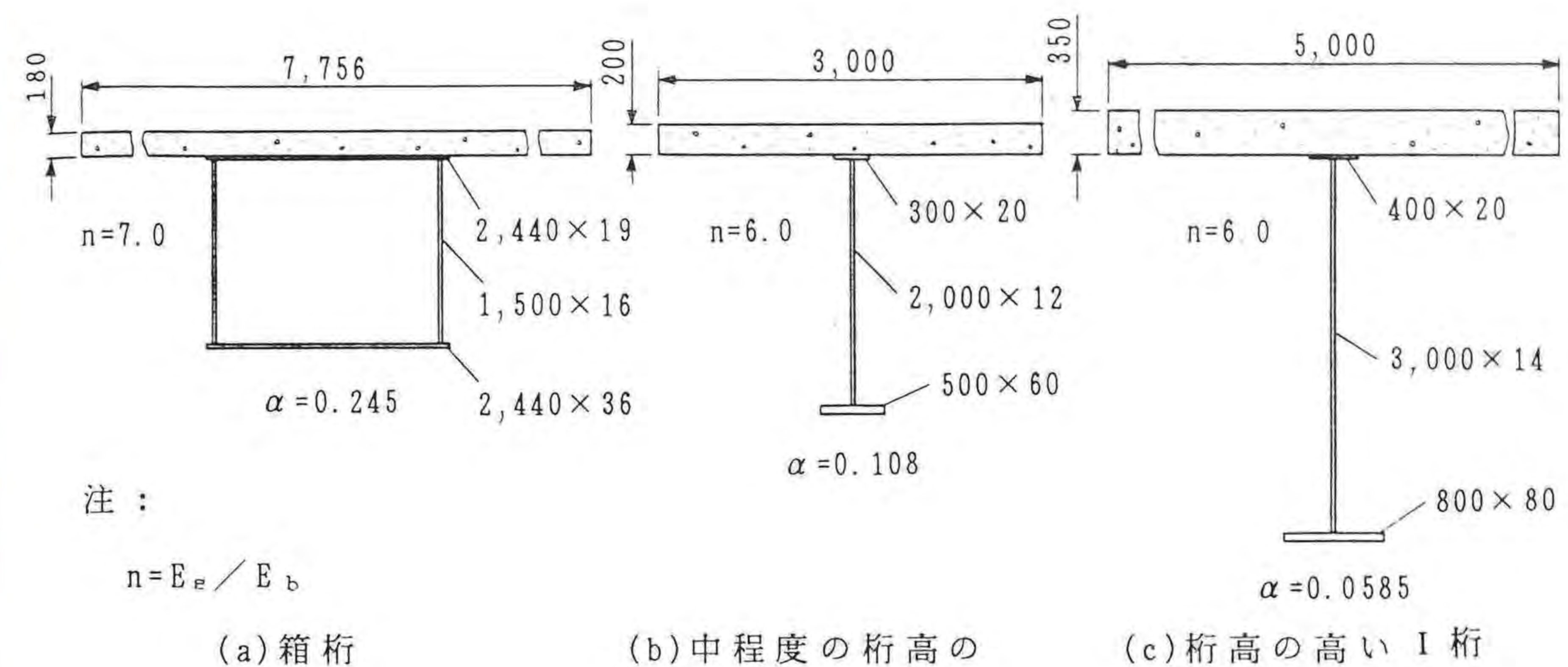


図-5.11 パラメトリック解析に供した3種類の合成桁の横断面形状 (寸法単位: mm)

これらの3つのパラメータの具体的な数値を、表-5.7に示す。この表-5.7中に見られるように、遅れ弾性ひずみに対するクリープ係数 $\phi_{v\infty}$ の値は、0.4の一定値に固定した。

また、合成桁の乾燥収縮解析においては、乾燥収縮量 $\epsilon_{s\infty}$ 、合成桁の断面構成比 α 、および乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_{s(\infty)}$ の3つのパラメータとに選んだ。

表-5.7 3つのパラメータの値

| 合成桁の断面構成比 α | 初期載荷材齢 t_1 (日) | クリープ係数 | |
|-----------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | フロークリープ $\phi_{f\infty}$ | 遅れ弾性クリープ $\phi_{v\infty}$ |
| 0.0585 | 28 | 0.8 | 0.4 |
| 0.108 | 90 | 1.6 | |
| 0.245 | 365 | 3.0 | |

(2) 合成桁の断面構成比 α の影響^{5.1)}

図-5.11に示した3種類の合成桁に持続曲げモーメント $M_{d, t_1} = 1.0 \text{ tf}\cdot\text{m}$ を作用させ、回復クリープを考慮した場合と考慮しない場合とに分けて分担断面力の変化量を時間 $t = \infty$ について計算した。ただし、 $t_1 = 0$ 、 $\phi_{v\infty} = 0.4$ 、および $\phi_{f\infty} = 1.6$ の値に固定した。それらの計算結果を、表-5.8に示す。

この表から、コンクリート床版の分担曲げモーメントを除けば、パラメータ α の値が大きくなるのに伴って、回復クリープの考慮の有無が分担断面力の変化量に著しい影響を及ぼすことがわかる。

この理由としては、コンクリート床版と鋼桁との分担断面力の大きさが、パラメータ α の大きさに応じて決まるからである。すなわち、パラメータ α が大きくなるということは、合成桁断面に占める鋼桁断面の割合が高くなるということを示し、鋼桁の剛度が増すのに伴ってコンクリート床版のクリープ変形に対する拘束力が大きくなり、回復クリープの影響がより顕著になるということを示している。

(3) フロークリープ係数 $\phi_{f\infty}$ の影響^{5.1)}

フロークリープ係数の影響を評価するため、初期荷材齢を $t_1 = 28$ 日の一定値に固定し、断面構成比 α とフロークリープ係数 $\phi_{f\infty}$ とを3種類に変えた場合の分担断面力の変化量を計算した。

その一例として、コンクリート床版の分担軸力の変化量に着目し、回復クリープを無視した場合の軸方向力の変化量 $\Delta N'_{b, \infty}$ と回復クリープを考慮した場合の軸方向力の変化量 $\Delta N_{b, \infty}$ との比を縦軸にとり、さらにパラメータ α を横軸にとって $\phi_{f\infty}$ の影響を示したのが、図-5.12である。

この図から、フロークリープ係数の大きさが回復クリープの考慮の有無に与える影響は、無視してもよいほど小さいことがわかる。もちろん、フロークリープ係数の値が大きくなればなるほど、分担断面力の変化量の絶対値は、大きくなることわかる。

表-5.8 パラメータ α の影響 ($\times M_{d, 0}$)

| 断面力 | パラメーター | ① 回復クリープを考慮 | ② 回復クリープを無視 | ② / ① |
|----------------------------|----------|---|--|-------|
| コンクリート床版の軸方向力 (tf) | α | $\Delta N_{b, \infty} (\times 10^{-1})$ | $\Delta N'_{b, \infty} (\times 10^{-1})$ | |
| | 0.245 | -2.10812 | -2.19922 | 1.043 |
| | 0.108 | -0.87133 | -0.89300 | 1.025 |
| コンクリート床版の曲げモーメント (tf·m) | α | $\Delta M_{b, \infty} (\times 10^{-3})$ | $\Delta M'_{b, \infty} (\times 10^{-3})$ | |
| | 0.245 | -1.91536 | -2.13970 | 1.117 |
| | 0.108 | -1.80275 | -2.03016 | 1.126 |
| 鋼桁の曲げモーメント (tf·m) | α | $\Delta M_{s, \infty}$ | $\Delta M'_{s, \infty}$ | |
| | 0.245 | 0.236970 | 0.247350 | 1.044 |
| | 0.108 | 0.135457 | 0.139023 | 1.026 |
| | 0.0585 | 0.086913 | 0.088307 | 1.016 |

注: 1 tf = 9.8 kN, 1 tf·m = 9.8 kN·m

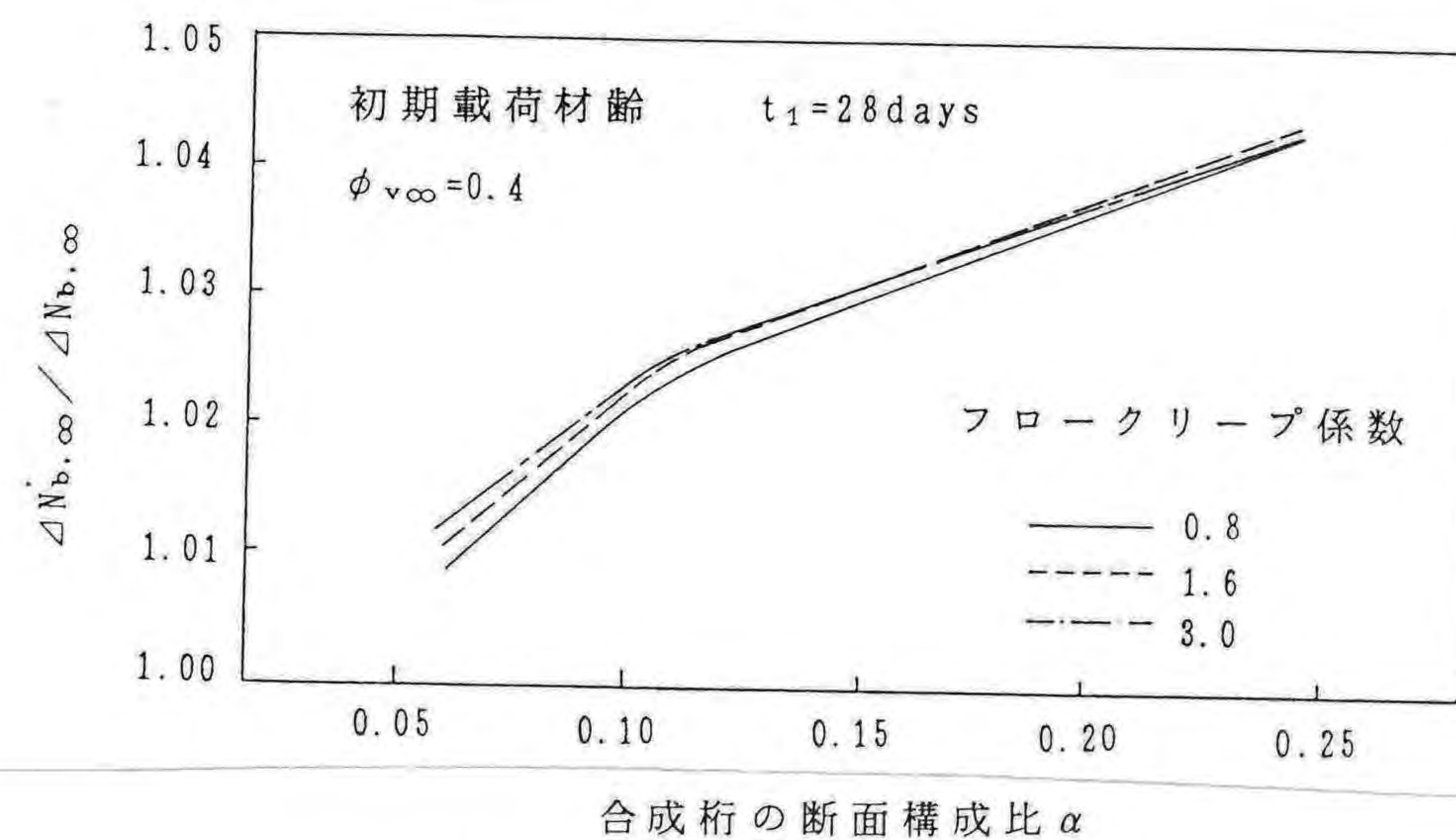


図-5.12 パラメータ $\phi_{f\infty}$ の影響

(4) 初期荷材齢 t_1 の影響^{5.1)}

初期荷材齢の影響を調べるため、フロークリープ係数を $\phi_{f\infty}=1.6$ の一定値に固定し、断面構成比 α と初期荷材齢 t_1 とを3種類に変えた場合の分担断面力の変化量を計算した。

その一例として、コンクリート床版の分担軸力の変化量に着目し、回復クリープを無視した場合の軸方向力の変化量 $\Delta N'_{b,\infty}$ と回復クリープを考慮した場合の軸方向力の変化量 $\Delta N_{b,\infty}$ との比を縦軸にとり、さらにパラメータ α を横軸にとって初期荷材齢 t_1 の影響を示したのが、図-5.13である。

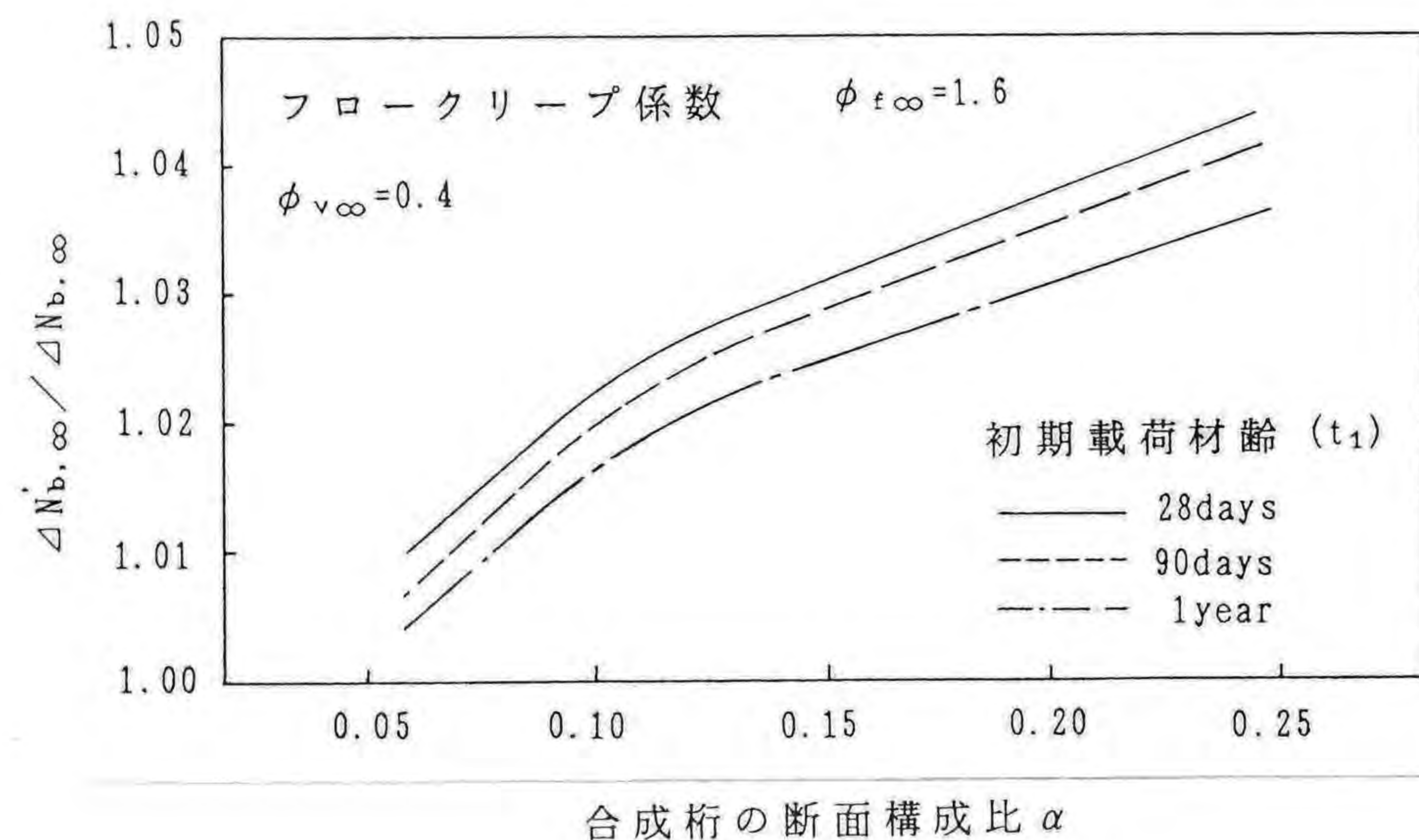


図-5.13 パラメータ t_1 の影響

この図から、初期荷材齢 t_1 の値が、回復クリープの考慮の有無に与える影響は、先に示したフロークリープ係数 $\phi_{f\infty}$ よりも大きいことがわかる。また、この場合、初期荷材齢が遅くなるのに伴って、回復クリープの影響は、小さくなることがわかる。もちろん、初期荷材齢が遅くなるのに伴って、分担断面力の変化量の絶対値は、小さくなる。

(5) 乾燥収縮量 $\epsilon_{s\infty}$ の影響

第2章の式(2.63)～(2.65)で示したように、乾燥収縮による各分担断面力の変化量は、乾燥収縮量 $\epsilon_{s\infty}$ に比例して大きくなる。したがって、プレキャスト床版を用いた合成桁では、現場打ちのコンクリート床版を用いる合成桁よりも、格段に乾燥収縮による影響が小さくなり、この種の合成桁を設計する際には、使用限界状態に対して有利となる。

ちなみに、道路橋示方書・同解説Ⅱの鋼橋編^{5.9)}によると、現場打ちのコンクリート床版に適用される乾燥収縮量の値は、

$$\epsilon_{s\infty} = 20 \times 10^{-5}$$

である。ところが、プレキャストコンクリート床版を用いた合成桁では、床版の製作ヤード、または現場における仮置期間にも関係するが、通常^{5.10)}

$$\epsilon_{s\infty} = 12 \times 10^{-5}$$

が使用される。この値の妥当性については、筆者らの実物大のプレキャスト床版を用いた実験^{5.11)}によって確かめられている。

一方、乾燥収縮量と合成桁の断面構成比 α との関係は、すでに第2章の2.4節(5)に示した数値計算による検討とその考察のところで述べたように、乾燥収縮量が同じであっても、パラメータ α が大きくなるのに伴って、分担断面力の変化量が大きくなる。これは、パラメータ α が大きくなるほど、乾燥収縮に対する鋼桁の拘束力が増大するからである。

(6) 乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_{s(\infty)}$ の影響^{5.12)}

合成桁の乾燥収縮解析に与えるクリープ係数の影響を調べるため、乾燥収縮量を $\epsilon_{s\infty} = 12 \times 10^{-5}$ の一定値に固定し、 $\phi_{s(\infty)}$ の値を2.0～6.0の範囲で5種類に変え、さらに合成桁の断面構成比 α も3種類に変えた場合の分担断面力の変化量を計算した。

それらの計算結果を、表-5.9に示す。この表の中には、 $\phi_{s(\infty)} = 4.0$ を基準にしたときの各分担断面力の変化量の比も()内に示してある。

表-5.9 パラメータ ϕ_{∞} の影響

| パラメーター α | クリープ 係数 ϕ_{∞} | 変化断面力 | | |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | $\Delta N_{b, \infty}$ (tf) | $\Delta M_{b, \infty}$ (tf·m) | $\Delta M_{c, \infty}$ (tf·m) |
| 0.245 | 2.0 | -104.30 (1.210) | 0.2621 (1.814) | 85.51 (1.209) |
| | 3.0 | -94.38 (1.095) | 0.1899 (1.314) | 77.42 (1.095) |
| | 4.0 | -86.19 (1.000) | 0.1445 (1.000) | 70.73 (1.000) |
| | 5.0 | -79.31 (0.920) | 0.1140 (0.789) | 65.10 (0.920) |
| | 6.0 | -73.45 (0.852) | 0.0924 (0.639) | 60.30 (0.853) |
| 0.108 | 2.0 | -24.63 (1.099) | 0.1757 (1.645) | 37.60 (1.097) |
| | 3.0 | -23.47 (1.047) | 0.1340 (1.255) | 35.86 (1.046) |
| | 4.0 | -22.41 (1.000) | 0.1068 (1.000) | 34.28 (1.000) |
| | 5.0 | -21.45 (0.957) | 0.0876 (0.820) | 32.82 (0.957) |
| | 6.0 | -20.58 (0.918) | 0.0736 (0.689) | 31.49 (0.919) |
| 0.059 | 2.0 | -41.15 (1.059) | 1.1160 (1.582) | 101.92 (1.055) |
| | 3.0 | -39.97 (1.028) | 0.8690 (1.232) | 99.20 (1.027) |
| | 4.0 | -38.87 (1.000) | 0.7053 (1.000) | 96.62 (1.000) |
| | 5.0 | -37.84 (0.974) | 0.5892 (0.835) | 94.16 (0.975) |
| | 6.0 | -36.87 (0.949) | 0.5027 (0.713) | 91.82 (0.950) |

注: 1 tf = 9.8 kN, 1 tf·m = 9.8 kN·m

上表から、次のことがいえる。

- i) ϕ_{∞} が大きくなると、分担断面力の変化量が小さくなる。これは、 ϕ_{∞} が大きくなるのに伴って乾燥収縮のクリープによる緩和作用が強くなるからである。
- ii) また、上の傾向は、パラメータ α が大きくなれば、より顕著になる。
- iii) したがって、パラメータ α の大きい断面ほど、 ϕ_{∞} の値を正確に設定して設計する必要がある。しかし、現時点では、データ不足のため、乾燥収縮

縮量に対応したクリープ係数の正確な値を定めるのがまだむずかしく、今後の研究課題の1つとして指摘される。

5.5 まとめ

本章では、まず弾性荷重法による連続合成桁橋のクリープの解析法を示した。そして、クリープ解析における回復クリープの影響は、単純合成桁橋よりも、連続合成桁橋のほうが顕著に現れることを数値計算例を行うことによって示した。

つぎに、剛性マトリックス法による連続合成桁橋のクリープ、および乾燥収縮の解析方法を示した。そして、多径間連続合成桁橋について数値計算を行い、それらのクリープ、および乾燥収縮の特性を調べた。

その結果、多径間連続合成桁橋における乾燥収縮の特性に関しては、その影響が両端支間近傍の2~3径間にだけに顕著に現れることを示した。また、クリープの特性に関しては、両端の支間を除く中間部の全スパンに一定の持続曲げモーメントが作用する場合、クリープによる曲げモーメントの変化は中間の支間部で全く現れず、軸方向力の変化のみ生じることがわかった。

さらに、本解析方法を用いてパラメトリック解析を実施し、合成桁のクリープ解析における回復クリープの影響を評価した。それらの結果、以下のような知見が得られた。

- i) 合成桁の断面構成比 α が解析結果に与える影響は、コンクリート床版の分担曲げモーメントを除き、パラメータ α の値が大きくなるのに伴って顕著に現れる。
 - ii) フロークリープ係数 $\phi_{f\infty}$ 、および初期載荷材齢 t_1 が解析結果に与える影響は小さく、実用上は無視しても差し支えないものと考えられる。もちろん、フロークリープ $\phi_{f\infty}$ が大きいほど、また初期載荷材齢 t_1 が早いほど、分担断面力の変化量の絶対値は、大きくなる。
- 最後に、乾燥収縮に関するパラメトリック解析も行った。それらの結果、次のような知見が得られた。
- iii) 乾燥収縮による合成桁の各分担断面力の変化は、乾燥収縮量に比例して大

きくなる。したがって、プレキャスト床版を用いた合成桁では、現場打ちのコンクリート床版合成桁よりも、かなり小さな乾燥収縮量を設定し設計することができるので、実際には有利となる。

- iv) 乾燥収縮に伴うクリープ係数 ϕ_{∞} が大きくなるのに伴って、合成桁の各分担断面力の変化量は小さくなる。
- v) この傾向は、合成桁の断面構成比 α が大きくなれば、より顕著になる。

参 考 文 献

- 5.1) Kurita, A. and Nakai, H. : An Analysis for Long-Term Behavior of Steel-Concrete Composite Girders by Taking Account of Creep Recovery, Proc. of JSCE, Structural Eng. / Earthquake Eng., Vol.9, No.2, pp.117s~128s, 1992.
- 5.2) 倉田宗章・岡村宏一・谷平勉 : 構造力学Ⅱ、明元社、1978年.
- 5.3) Kurita, A. : Vereinfachte Berechnungsmethode für Kriechen und Schwinden in Verbundkonstruktionen, Ruhr-Universität Bochum, Institut für KIB, 1983.
- 5.4) 栗田章光・赤尾親助 : マトリックス法による鋼コンクリート合成構造の乾燥収縮・クリープ解析、合成構造の活用に関する講演論文集、土木学会、pp.49~56、1986年.
- 5.5) 岡村宏一 : 構造力学(Ⅰ)、鹿島出版会、1988年.
- 5.6) 岡村宏一 : 構造力学(Ⅱ)、鹿島出版会、1991年.
- 5.7) 中井博・栗田章光・瀬野靖久 : PPCS工法による鋼・コンクリート合成桁橋の経時挙動解析、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、第16巻、日本鋼構造協会、pp.249~254、1992年.
- 5.8) Fritz, B. : Verbundträger, Berechnungsverfahren für die Brückenbaupraxis, Springer-Verlag, 1961.
- 5.9) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編、Ⅱ鋼橋編、丸善、1990年.
- 5.10) 大阪市土木局 : 淀川新橋架設工事(その19)設計計算書、1987年.

- 5.11) 中井博・栗田章光・亀井正博・瀬野靖久 : プレキャスト床版を用いた連続合成桁橋におけるクリープ・乾燥収縮性状の計測と解析、土木学会論文集(印刷中).

- 5.12) Kurita, A. and Nakai, H. : Effect of Creep Coefficient on Analysis of Shrinkage in Steel-concrete Composite Girder Bridges, Abstract of the Second Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges, pp.59~60, Tokyo, Japan, 1992.

第 6 章

結 論

第 6 章 結 論

本論文は鋼・コンクリート合成桁橋（以下、合成桁と略する）の経時挙動に関する研究結果を、主としてコンクリートの回復クリープ現象の影響を評価するという観点からとりまとめられたものである。論文は、6章から構成されており、各章で得られた結論を要約すると、次のとおりである。

第1章では、合成桁の経時挙動解析法に関する既往の研究結果を、クリープの解析、乾燥収縮の解析、およびリラクセーションの解析の3つの解析法に分類してとりまとめを行うとともに、本研究の位置づけを示した。とくに、クリープの解析に関しては、その基本となるコンクリートの応力-ひずみ関係式を代数式としてとりまとめることにより、各種の解析法の特徴を分類・整理した。ついで、本研究の目的、および概要について述べた。

第2章では、クリープ、および乾燥収縮の解析式を導き、それらについて検討を加えた。まず、クリープ解析理論においては、回復クリープ現象の考え方と解析上の取扱い方を詳述した。ついで、コンクリートの応力緩和を考慮したクリープ係数 η を含む応力-ひずみ関係式を誘導し、合成桁のクリープ解析のための基礎式を導いた。この係数 η は、Troost法におけるリラクセーション係数 ρ と容易に関係づけられるので、本解析法でもリラクセーション係数 ρ_{NK} を導入し、種々な条件のもとで、その性質を調べた。その結果、回復クリープを無視した場合のリラクセーション係数は、 $\rho_{NK}' = 0.5$ となり、これはDischingerの方法によるリラクセーション係数 $\rho_D = 0.5$ と一致することが示された。また、一般的な条件のもとにおける ρ_{NK} の値は0.65程度となり、この値は、Troostの方法によるリラクセーション係数 $\rho = 0.80$ とDischingerの方法によるリラクセーション係数 $\rho_D = 0.5$ とのほぼ中間の値になることも示された。このほか、クリープの解析に関しては、場所打ちの一般的なRC床版を用いた合成桁をはじめ、プレキャスト床版を用いた合成桁に対するクリープの解も導いた。さらに、数値解析を通じて、合成桁のクリープ解析において回復クリープの影響を考慮すれば、無視した場合よりも断面力(応力)のクリープによる変化量が小さくなり、設計上有利な結果が得られることを示した。さらに、乾燥収縮の解析に関しては、既往の解析方法における問題点を指摘するとともに、乾燥収縮に伴うクリープ現象を精度よく予測できる解析

方法を示した。

第3章では、クリープ、および乾燥収縮に関する実験結果を示した。実験は、わが国で初めて連続鋼箱桁にプレキャスト床版が本格的に採用された菅原城北大橋アプローチ橋を対象にして行われた。約2ヵ年にわたる室内、および現場実験を通じて、プレストレスの導入されたプレキャスト床版のクリープ係数、および乾燥収縮の実測値を得るとともに、解析値と実橋のひずみ測定値との比較から、第2章で示した解析法で、実橋の経時挙動を比較的に精度よく評価できることを示した。さらに、実物大のPC版を用いたクリープ・乾燥収縮に関する室内実験結果と道路橋示方書規定値との比較から、遅れ弾性ひずみ、フローひずみ、ならびに乾燥収縮ひずみの実測値の進行は、示方書規定値よりもかなり早くそれぞれの最終値に達することを示した。

第4章では、各種の鋼・コンクリート合成構造物の経時挙動を解析するための基本となるクリープ係数、および乾燥収縮に関するデータベースの作成とその適用例について述べた。このデータベースでは、鋼部材により内部、あるいは外部よりの拘束を受けるコンクリート部材を対象としている。対象構造物としては、鉄筋(あるいはプレストレス)コンクリート構造、コンクリートを充填した鋼管構造、およびコンクリート被覆形鋼(鋼管)構造の3つに分類されている。そして、このデータベースを多種・多様な鋼・コンクリート合成構造の経時挙動解析に容易に利用できるように、クリープ、およびリラクセーション現象を簡単な粘弾性モデルで表したときのバネ定数と粘性係数として出力が可能にようにした。

第5章では、クリープ、および乾燥収縮の数値解析法と連続合成桁橋への適用について述べた。まず、ここでは、本解析法の連続合成桁解析への最も基本的なものである弾性方程式を用いた解析方法を示した。本解析方法では、静定系における鋼桁の分担断面力の変化量を荷重項とみなして鋼桁に載荷し、その結果、不静定力の変化量と不静定力の変化に伴う断面力の変化量を算出する手法を用いている。最終的には、両者を重ね合わせて、鋼桁の不静定系における断面力の全変化量が得られる。一方、コンクリート床版の断面力の変化量は、すでに鋼桁の変化量が既知となっているから、断面力のつり合い条件式、ならびに変位の適合条件式を用いて算出する手法をとった。さらに、合成断面に作用する断面力の全変化量も断面力のつり合い条件から導いた。数値計算例として、Fritzが用いた2径間連続合成桁と同じものを用い、回復クリープの考慮の有無が、断面力の変化

量に与える影響を検討した。その結果、連続合成桁のクリープ解析において回復クリープを考慮すれば、それを無視した場合よりも、断面力のクリープによる変化量が、7~14%少なくなることを示した。つぎに、本解析法に汎用性をもたせるため、剛性マトリックス法によるクリープ、および乾燥収縮の解析方法を導いた。上述の弾性方程式法と同様に、ここでも鋼桁のみを最初に解いて、ついでコンクリート床版の断面力変化量を求める手法をとった。剛性マトリックス法を用いてクリープ、および乾燥収縮解析を行う際、クリープ、および乾燥収縮による荷重項の作成のみが重要である。この荷重項は、静定系におけるクリープ、および乾燥収縮に伴う分担断面力の変化量の分布を両端固定ばりに載荷することによって両端における反力として求められることを示した。このようにして求められたクリープ、および乾燥収縮による荷重項を、表で整理した。また、将来、わが国でも自動車の走行性などの理由から採用される機会が多いと思われる20径間までの連続合成桁橋を数値計算例として示し、多径間連続合成桁橋のクリープ、および乾燥収縮による断面力、および変形性状について考察を加えた。最後に、パラメトリック解析の結果を述べた。その際のパラメータとしては、フロークリープ係数 $\phi_{f\infty}$ 、合成桁の断面構成比 α 、および初期載荷材齢 t_1 を選んだ。数値計算の結果、合成桁の断面構成比が回復クリープに与える影響として最も大きいことがわかった。もちろん、フロークリープ係数が大きいほど、また初期載荷材齢が小さいほど、分担断面力の変化量そのものは大きくなる。さらに、乾燥収縮解析におけるパラメータとして、乾燥収縮量 $\epsilon_{s\infty}$ 、乾燥収縮に伴うクリープ係数 $\phi_{s(\infty)}$ 、および合成桁の断面構成比 α を選んだ。当然、乾燥収縮量を大きくすれば、分担断面力の変化量が大きくなるので、数値計算によってプレキャスト床版を用いた合成桁橋が有用であることを示した。また、今日までの示方書で不明瞭であった乾燥収縮に伴うクリープ係数のとり方も、ここで検討した。その結果、乾燥収縮の解析における合成桁の断面構成比 α の影響に関しては、 α が大きくなるほど、すなわちコンクリート床版の変形拘束度が大きくなるほど、分担断面力の変化量が大きくなることを示した。

第6章では、本文で得られた結論を要約した。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、終始暖かい、時には厳しい御指導を賜りました大阪市立大学工学部・中井 博教授に深謝の意を表します。

さらに、本論文をまとめるに際し、大阪市立大学工学部・園田恵一郎教授、ならびに福田武人教授には、種々貴重な御助言を賜りましたことをここに記し、厚く御礼申し上げます。

また、筆者に研究者としての手ほどきをして下さり、かつ長年にわたり、鋼・コンクリート合成構造の分野で幅広く研究指導をして下さった大阪工業大学工学部・赤尾親助 教授に厚く御礼申し上げます。大阪工業大学工学部・岡村宏一教授からは、研究者としての心構えなどを懇切・丁寧に教わりました。さらに、岡村宏一教授には、学校法人大阪工大摂南大学・八幡工学実験場・構造実験センター長として長期にわたり、筆者の実験に種々な御配慮と御協力を戴きました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

他方、筆者が1982年から1983年にかけてドイツのボーフム大学・構造工学研究所において、K.Roik教授のもとで合成桁のクリープ・乾燥収縮解析法の研究に従事できる機会をつくって下さった大阪大学名誉教授・前田幸雄先生に厚く御礼を申し上げます。留学中、故・H.J.Holtkamp博士、R.Bergmann博士、G.Albrecht博士、J.Haensel博士、ならびにH.Bode教授からは、ドイツにおける合成桁の設計法や合成構造全般にわたって教えて戴きましたこと、ここに御礼申し上げます。

さらに、菅原城北大橋アプローチ橋の2年間にわたる現場測定に関しましては、大阪市建設局・亀井正博主査をはじめ、橋梁メーカー、ならびにPC版メーカーの方々の絶大なる支援と協力を得ましたこと、深く御礼を申し上げます。

そして、筆者が本論文を作成中、数々の貴重なアドバイスと励ましの言葉とを与えて下さいました大阪工業大学工学部・福田 護教授、および小林和夫教授、また大阪大学工学部・松井繁之教授、川崎製鉄(株)設計研究室・佐藤政勝博士、ならびに川田建設(株)開発室・梶川靖治博士に、厚く御礼申し上げます。

文末になりましたが、筆者が昭和46年に大阪工業大学で勤務をはじめて以来、数値計算や実験の実施に際して並々ならぬ御協力を戴いた当時の橋梁研究室に所属された各位、とくに富田耕司氏(現JIPエンジニアリング(株))、堤下隆司氏(現修成建設専門学校)、瀬野靖久氏(現修成建設専門学校)、および中谷武弘氏(現中央復建コンサルタンツ(株))らの諸氏に感謝の意を捧げます。

本論文に関する筆者の発表論文

- 1) 栗田章光・赤尾親助 : マトリックス法による鋼コンクリート合成構造の乾燥収縮・クリープ解析、合成構造の活用に関するシンポジウム講演会論文集、土木学会、pp.49~56、1986年9月。
- 2) 中井博・栗田章光 : 鋼・コンクリート合成構造のクリープ・乾燥収縮の解析法に関する一考察、第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演会論文集、土木学会、pp.47~54、1989年9月。
- 3) 中井博・栗田章光・亀井正博・瀬野靖久 : プレキャスト床版連続合成桁橋のクリープ・乾燥収縮の実験と解析、第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演会論文集、土木学会、pp.55~60、1989年9月。
- 4) 中井博・栗田章光 : 鋼・コンクリート合成構造のクリープ・乾燥収縮解析における種々の基礎式に関する一考察、構造工学論文集、Vol.36A、土木学会、pp.1275~1284、1990年3月。
- 5) 中井博・栗田章光・L.一ノ瀬伯子 : 鋼・コンクリート合成構造物の応力・変形解析のためのクリープ係数と乾燥収縮量に関するデータベースの作成、構造工学論文集、Vol.37A、土木学会、pp.1397~1406、1991年3月。
- 6) 栗田章光・中井博 : 回復クリープを考慮した鋼・コンクリート合成桁のクリープ解析、構造工学論文集、Vol.37A、土木学会、pp.1407~1418、1991年3月。
- 7) H. Nakai, A. Kurita, M. Kamei and Y. Seno : Creep and Shrinkage of Continuous Composite Girder Bridge by Using Prestressed Precast Concrete Slabs, Proc. of ICCS-3 Conference, Fukuoka, JAPAN, pp.407~412, Sept. 26-29 1991.
- 8) 中井博・栗田章光・瀬野靖久 : 鋼材の拘束を受けるコンクリート部材の回復クリープ現象に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.38A、土木学会、pp.1321~1328、1992年3月。
- 9) A. Kurita, and H. Nakai : An Analysis for Long - Term Behavior of Steel-Concrete Composite Girders by Taking Account of Creep Recovery, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.9, No.2, pp.117s~128s, July 1992.

- 10) 中井博・栗田章光・亀井正博・瀬野靖久 : プレキャスト床版を用いた連続合成桁橋におけるクリープ・乾燥収縮性状の計測と解析、土木学会論文集(印刷中)。
- 11) 中井博・栗田章光・瀬野靖久 : PPCS工法による鋼・コンクリート合成桁橋の経時挙動解析、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、第16巻、日本鋼構造協会、pp249~254、1992年7月。
- 12) A. Kurita and H. Nakai : Effect of Creep Coefficient on Analysis of Shrinkage in Steel-Concrete Composite Girder Bridges, Abstract of the Second Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges, pp.59~60, Tokyo, Japan, July 20-21 1992 .