

# 夢洲2区（万博用地）の浚渫粘土層の沈下予測

## SETTLEMENT PREDICTION OF DREDGED CLAY LAYER IN YUMESHIMA 2<sup>ND</sup> DISTRICT (EXPO SITE)

地盤工学分野 一谷 浩史  
Geotechnical Engineering Hiroshi ICHITANI

2025年の大阪万博の開催に向けて、現在土地造成が行われている夢洲2区は、過去に浚渫粘土の埋立、鉛直排水工法と地下水位低下工法の併用などが行われ、非常に複雑な地盤構成となっている。本研究では、2021年6～8月に夢洲2区の3地点でサンプリングされた浚渫粘土を用いて圧密特性を捉え、浚渫粘土層の埋立履歴、地盤改良履歴を再現して、沈下予測計算を行った。計算値は地盤調査より得られた応力分布、含水比分布を再現でき、沈下量も実測値とほぼ一致したことを示す。

Yumeshima 2<sup>nd</sup> district, where land reclamation is currently underway for the Osaka Expo 2025, is extremely complex ground composition due to landfill of dredged clay and the combined use of vertical drainage method and groundwater level lowering method in the past. In the study, the consolidation characteristics are captured using dredged clay sampled at three points in Yumeshima 2<sup>nd</sup> district from June to August 2021. The landfill history and ground improvement history of the dredged clay layer are reproduced to settlement prediction calculation. It is shown that the stress distribution and water content ratio distribution obtained from the ground survey can be reproduced, and settlement prediction is almost the same as the measured value.

### 1. はじめに

大阪港などの臨海地域では、航路泊地の整備、環境改善、岸壁や防波堤などの港湾施設建設の際に軟弱な浚渫粘土が発生する。また、港内に河川筋を抱える大阪港では、その水深維持のための浚渫を年々行う必要がある。このように港湾を整備し維持していくためには、相当量の浚渫粘土を適正に処分することが不可欠である。浚渫粘土の処分は、一般に海上に建設された人工島に埋め立てられているが、浚渫粘土による埋立地盤は超軟弱であるため、大きな沈下が長期間にわたって生じることになる。一方、人工島造成にも限りがあるため、投入した浚渫粘土を鉛直排水工法などによる地盤改良を行って減容化させ、処分地の延命化を図る必要がある。

図-1に示す、大阪市此花区の夢洲は1977年に埋立開始された面積390haの人工島で、埋立造成中に浚渫粘土層を早期に圧密沈下させて処分地としての延命化を図るために、新たな圧密促進工法が考案された<sup>1)</sup>。それは浚渫粘土層に載荷重を用いず、地下水位低下工法を併用して、埋立造成中に浚渫粘土を圧密促進させることが特徴である。夢洲は1～4区に区分けされ、1

区は一般廃棄物処分場、2・3区は浚渫土・建設残土処分場、4区は良質土埋立による、コンテナ基地となっており、2区で2025年に大阪・関西万博が開催されることになった。現在、夢洲2区では地盤改良、盛土による土地造成が行われており、当面は2025年の万博開催期間にパビリオンに不同沈下が起こらないような対応が要求される。さらに今後、盛土による長期的な沈下検討も課題となる。



図-1 夢洲2区位置図

夢洲2区では1988年頃から投入された一次浚渫粘土があり、2002年頃にPDF打設による鉛直排水工法と地下水位低下工法が併用されて処分地としての減容化が図られた。減容後、二次浚渫粘土が投入され、浚渫粘土は2層構造となっている。さらに2020年度に新たに一次、二次浚渫粘土層を通して再度PBDが打設され、その後盛土による土地造成が行われている。このような複雑な地盤構成となっている2区において層別沈下計を設置する目的で2021年6~8月に約120mのボーリングが3ヶ所(図-1中①, ②, ③)で行われ、乱れの少ない試料がサンプリングされた。本研究ではこの3地点の浚渫粘土層の圧密特性を捉え、浚渫粘土層の埋立履歴、地盤改良履歴を再現して、圧密沈下予測を行う。

以上から、2025年4月から開催される大阪・関西万博が無事開催できるように、パビリオンを含む万博構造物に不同沈下が生じないように用地内の将来沈下情報を提供することが本研究の目的である。

## 2. 浚渫粘土層の土質特性

夢洲2区の土地造成は図-1に示すように、2区内を第1, 第2, 第3工区に分けており、各工区のボーリング調査が行われ、①地点, ②地点, ③地点で、土質試験用の乱れの少ない試料をサンプリングした。以下に代表して③地点の浚渫粘土層の土質特性を示す。

図-2(1)~(4)に2区③地点の浚渫粘土層の土質特性を示す。図(1)の自然含水比 $w_n$ , 液性限界 $w_L$ , 塑性限界 $w_p$ から、2区③地点は均質な粘土であることがわかる。全体に $w_L=100\%$ 前後、 $w_n$ は90~60%で深度方向に減少している。ただし、DL-13m付近の塑性が低いのは、砂の混入による。図(2)の圧密降伏応力 $p_c$ は、調査時点の有効土被り圧 $p_0$ と対比しているが、全体に未圧密の状態にある。 $p_c$ と $p_0$ の差が深度方向に一定(約3 tf/m<sup>2</sup>)となっていることから、PBDの鉛直排水工が効いた未圧密の分布となっている。図

(3)に圧密試験による圧縮曲線(logf-logp曲線)を示す。ほぼ均質な粘土層であったことから、圧縮曲線は比較的狭い範囲に集まっている。外挿した黒線を2区③地点の代表圧縮曲線とした。図(4)に同様に圧密試験より得られた、logf-logc<sub>v</sub>関係を示す。logf-logc<sub>v</sub>関係も均質な地盤として外挿した黒線を2区③地点の代表とした。

## 3. 浚渫粘土による夢洲2区土地造成の沈下予測

### 3.1 夢洲2区土地造成の概要

表-1に土地造成の工程表を示す。1987~2002年に一次浚渫粘土が投入され、2003年に処分地の減容化のため、水面上からPBDが打設された(PDF工法)。2004~2018年に二次浚渫粘土が投入された。2020~2021年に浚渫粘土層上部1.5mに表層混合処理工、その上に0.5mの敷砂、0.5mの盛砂が行われ、浚渫粘土層圧密促進のために一次、二次浚渫粘土層を通してPBD打設が行われた。2021年6~8月にボーリング調査が行われ、2022年4月までに盛土が造成される予定である。その後2022年4月から2023年3月までの1年間の圧密放置期間を経て、2025年4月から万博パビリオンなどの建設が始まる予定である。

また、浚渫粘土層下部敷砂層に設置された排水井戸により、一次浚渫粘土投入期間の1992~2002年まで地下水位低下工法を併用して更なる圧密促進が行われている。図-3に2区内堤内水位と敷砂層水位の測定値を示す。この堤内水位と敷砂層水位の水位差による有効応力増分で浚渫粘土層が圧密されている(図-4)。

表-1 工程表

年(西暦)	1987	1988	1989	2001	2002	2003	2004	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
年(和暦)	S62	S63	H1	H13	H14	H15	H16	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
一次浚渫粘土	■	■	■	■	■	■	■									
PDF打設				■	■	■	■									
二次浚渫粘土							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
表層混合処理											■	■				
敷砂・盛砂											■	■				
PBD打設													■	■	■	■
盛土造成																■
圧密放置期間																

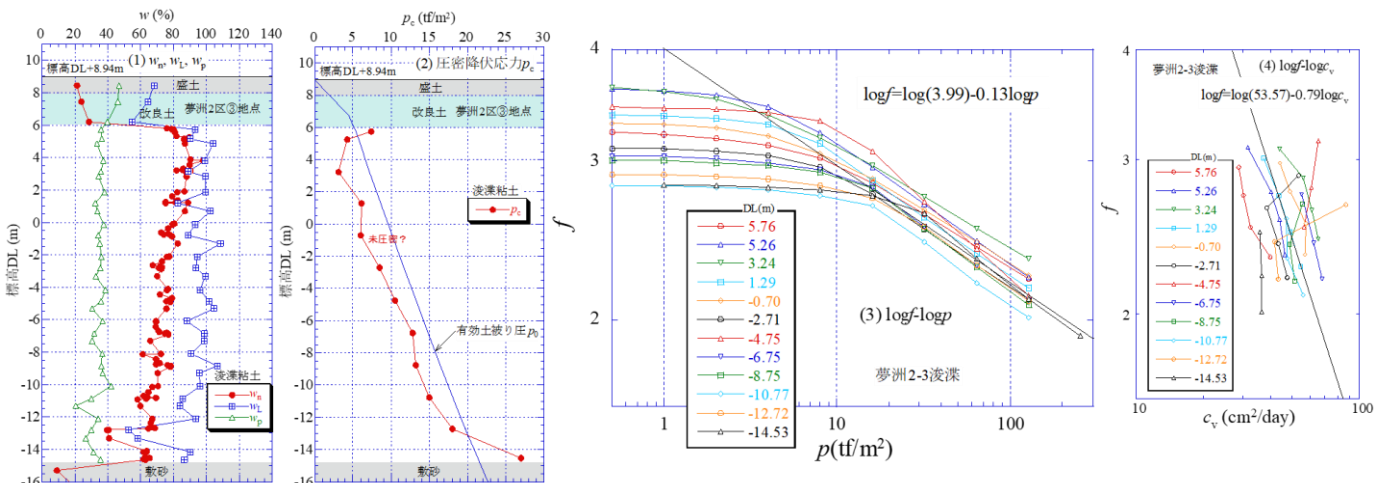


図-2 ③地点の土質特性

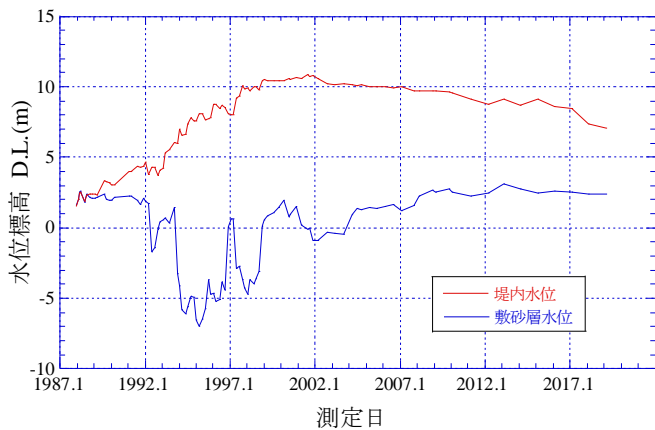


図-3 浚渫粘土層上面と下面の水位測定結果

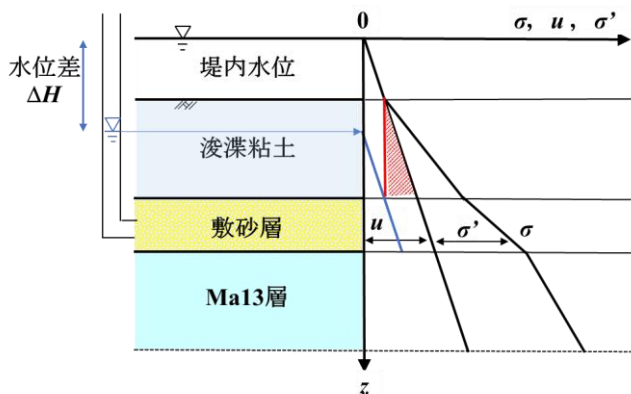


図-4 水位差による有効応力増加

### 3.2 ③地点浚渫粘土の埋立履歴シミュレーション計算

今後の沈下予測を行うにあたって、過去に埋立てられた浚渫粘土の時期・投入量を把握する必要があるが、具体的な時期・投入量は不明であった。そこで、埋立履歴（浚渫粘土の泥面標高の経時変化）を基にして、浚渫粘土の圧密特性から、浚渫粘土埋立のシミュレーション計算を行い、投入状況を計算によって再現した。計算条件として、初期含水比  $w_0$  は、一般に浚渫粘土が投入後に自重圧密を始める際の含水比は液性限界  $w_L$  の 2~3 倍といわれている。③地点での  $w_L$  は約 100% であったので  $w_0=250\%$  と仮定した。図-2(3), (4) に示した  $\log f$ - $\log p$ ,  $\log f$ - $\log c_v$  関係式を用いた。

圧密の沈下計算には式(1)の三笠の有限ひずみ圧密理論における自然ひずみ  $\epsilon$  式（圧密中の  $c_v$  変化と粘土自重考慮）を用い、差分式により計算を行った。

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = c_v \exp(2\epsilon) \left\{ \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z_0^2} + \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial z_0} \right)^2 \right\} + \exp(2\epsilon) \frac{dc_v}{d\epsilon} \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right)^2 - \exp(\epsilon) \frac{d(c_v m_v \gamma')}{d\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z_0} \quad \dots (1)$$

③地点のシミュレーション計算で用いる浚渫粘土の泥面標高の経時変化を図-5 に示す。図中の●で示すように泥面標高を簡略化し（設定値）、標高が増加している期間は浚渫粘土投入期間、標高が減少している期間は放置期間として、一次浚渫粘土を 6 段階、二次浚渫粘

土を 3 段階に分けて投入したとして計算を行った。

表-2 の左半分に、浚渫粘土の投入年月日、経過日数と泥面標高の実測値を示す。経過日数は浚渫粘土を投入開始した 1987 年 11 月 29 日を 0 日目としている。表の太字で示している浚渫粘土投入直前の実測値に合うように、粘土の投入段階ごとの投入層厚を繰返し計算で求めた。その結果を表-2 の右半分に示す。与えた粘土の投入層厚の合計は一次が 37.9m で二次が 13.2m の合計 51.1m となった。ただし、この層厚はあくまで投入含水比が  $w=250\%$  とした場合の値である。

図-6 に浚渫粘土泥面標高の設定値■（図-5 と同じ）と計算値○を示す。シミュレーションによる計算値が実際の標高の設定値と概ね一致していることがわかる。ただし、実際には浚渫粘土層下の Ma13 層以深も沈下しているのので、浚渫粘土の投入層厚はそれを加えないと標高が合わなくなる。そこで Ma13 層以深の沈下量は実測値があるので、それを浚渫粘土の標高に上乗せしたのが図-6 の浚渫粘土実質標高（橙線）である。さらに投入した浚渫粘土の標高は緑線であり、緑線と橙線の間が投入期間中に生じている浚渫粘土層自重圧密沈下量、それに Ma13 層以深の沈下量を加えたものが全沈下量となる。

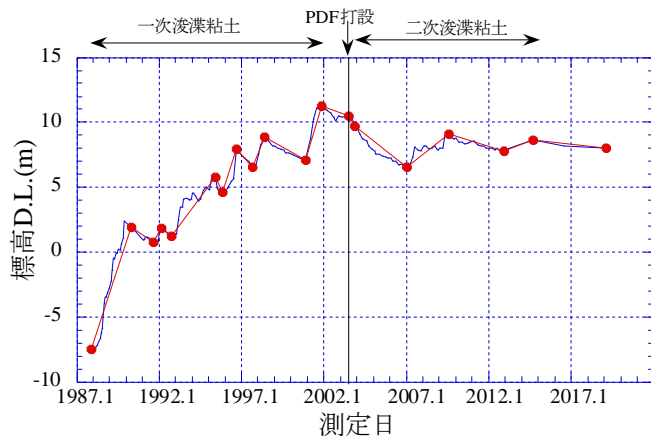


図-5 ③地点の泥面標高と簡略化した標高

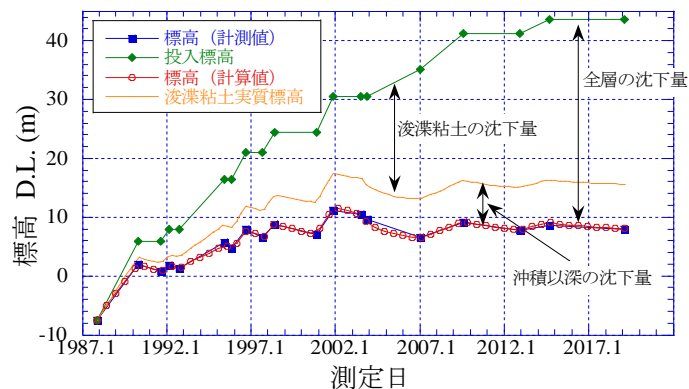


図-6 ③地点シミュレーション結果と浚渫土投入量

表-2 埋立履歴シミュレーション結果

浚渫粘土投入回数	年月日	経過日数 (day)	計測値 D.L.(m)	投入層厚 (m)	計算結果 D.L.(m)	
一次浚渫	1	1987/11/29	-7.46	13.4	-7.46	
		1990/4/20	873		1.96	2.10
	2	1991/8/26	1366	<b>0.77</b>	2.0	<b>0.71</b>
		1992/3/2	1555	1.85		1.86
	3	1992/9/24	1761	<b>1.26</b>	8.5	<b>1.27</b>
		1995/5/23	2732	5.81		5.37
	4	1995/11/15	2908	<b>4.66</b>	4.5	<b>4.69</b>
		1996/9/11	3209	7.96		7.75
	5	1997/9/13	3576	<b>6.60</b>	3.5	<b>6.63</b>
		1998/5/21	3826	8.85		8.99
6	2000/11/10	4730	<b>7.12</b>	6.0	<b>7.08</b>	
	2001/11/14	5099	11.24		11.79	
PDF施工	2003/7/1	5693	<b>10.47</b>		<b>10.44</b>	
二次浚渫	7	2003/11/14	9.69	4.6	9.14	
		2007/1/17	6989		6.54	6.54
	8	2007/1/17	6989	<b>6.54</b>	6.1	<b>6.54</b>
		2009/7/23	7907	9.11		9.39
	9	2012/12/6	9139	<b>7.78</b>	2.5	<b>7.82</b>
		2014/9/2	9774	8.64		9.10
	2019/2/18	11404	<b>8.00</b>		<b>8.05</b>	
			一次 $\Sigma$ 37.9m			
			二次 $\Sigma$ 13.2m			
			合計 51.1m			

図-7 に浚渫粘土埋立過程における計算で求めた浚渫粘土層の体積比 $f$ と有効応力分布 $p$ の等時線を示す。 $t=6000\text{day}$ 以降の等時線には改良層（一次浚渫粘土へPDFを打設した層）と非改良層（改良層上のPDFを打設していない層）の境界を矢印で示す。改良層ではPDF打設の影響を受けて $f$ が大きく減少している。非改良層の下部も改良層の $f$ の減少の影響を受けて大きく減少している。有効応力分布からも経過日数とともに有効応力が増加し、圧密の進行がわかる。特に、改良層はPDFの打設によって沈下が急速に進むため有効応力も増加する。一方、非改良層では自重のみの圧密となり、有効応力の増加は遅い。

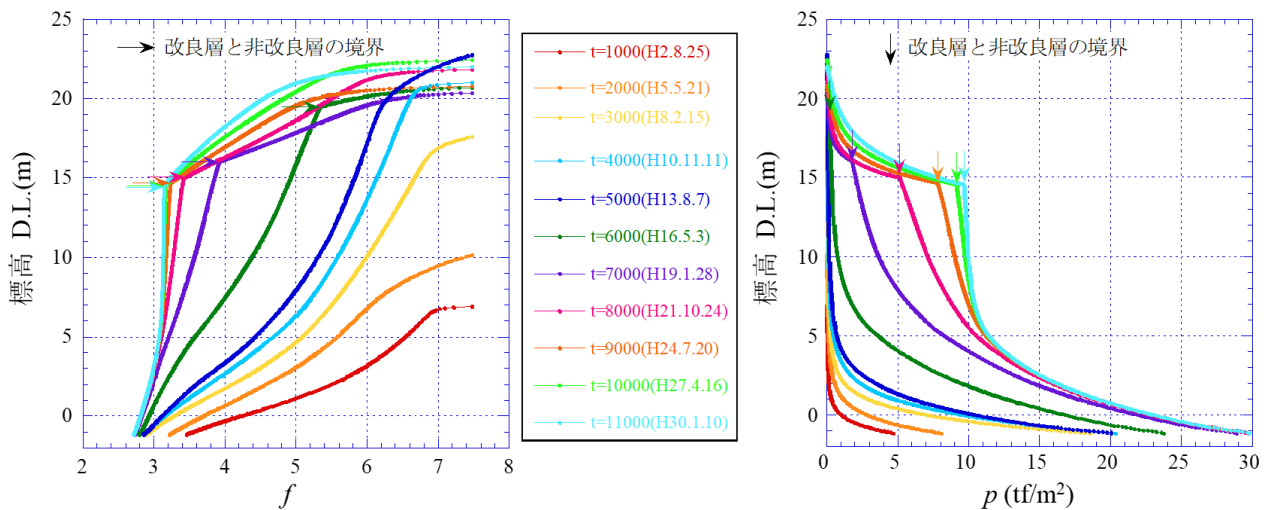


図-7 体積比 $f$ , 有効応力 $p$ の等時線

### 3.3 地盤改良・盛土造成後の沈下予測

二次浚渫粘土投入終了までの埋立履歴に基づくシミュレーション計算は行えたので、それ以降の表層混合処理工、敷砂、盛砂、PBD打設、盛土造成における沈下量計算を行う。表層混合処理工は浚渫粘土層を固化させているので、浚渫粘土上部1.5mはこれ以降、圧密沈下計算対象外とする。ただし、荷重としては考慮している。次に、敷砂・盛砂は0.5mずつ投入されており、それぞれ荷重に要する時間が短いことから一括荷重として荷重を増加させる。その後、浚渫粘土全層に対してPBDが打設される。PBDは三角形配置の1.4mピッチとして、Barronの解で計算する。最後に、盛土は段階荷重として荷重を増加させる。なお、敷砂・盛砂、盛土は $\gamma=2.00\text{tf/m}^3$ として計算を行った。また、以上の工程は同じ2区内であっても地点によって工程の施工時期や盛土層厚に違いがある。そのため計算では各地点の施工年月日と盛土層厚を詳細に設定して計算を行った。

夢洲2区では、図-8に示すように100mピッチで地表面沈下を実測する測点（表層混合処理層上面、上部敷砂層下面に設置した沈下板）が37ヶ所設けており、その内9ヶ所では下部敷砂層に沈下板を設置してMa13層以深の沈下量も計測している。先の③地点は、測点3-6の近傍となっている。図-9に夢洲2区③地点表層混合処理工以降の圧密曲線を示す。図中の赤線が浚渫粘土層の沈下量の計算値、青丸(○)は測点3-6の地表面沈下量の実測値、緑丸(○)は同じく測点3-6のMa13層以深の実測値、赤丸(○)は青丸から緑丸を差し引いた浚渫粘土層の沈下量の実測値である。計算値(赤線)は実測値(赤丸)を良く再現している。

また、ボーリング調査結果で浚渫粘土層の層厚が20.6mであり、計算値では21.1mとなったため、粘土層厚も再現性が高いといえる。最終沈下量 $S_f=2.11\text{m}$ となった。圧密放置期間が終わる2023年4月時点で $S=2.04\text{m}$ と圧密度90%を超えている。なお、この計算

は2022年1月19日時点までの盛土量から計算したものである。

図-10(1), (2)にボーリング調査時点(2021年7月)での浚渫粘土層の含水比  $w_n$ , 圧密降伏応力  $p_c$  の実測値と計算値の標高分布を示す。図(1)の  $w_n$  の実測値と計算値はほぼ一致している。図(2)の  $p_c$  も実測値と計算値はほぼ一致している。以上から計算値が実際の浚渫粘土層の圧密進行状態を再現できているといえる。

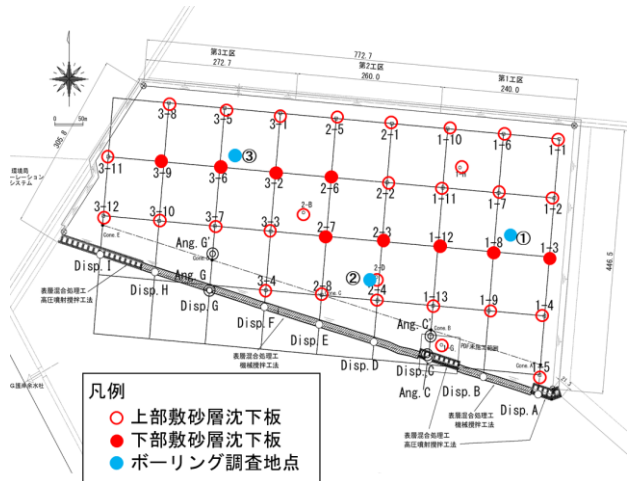


図-8 夢洲2区沈下板設置位置

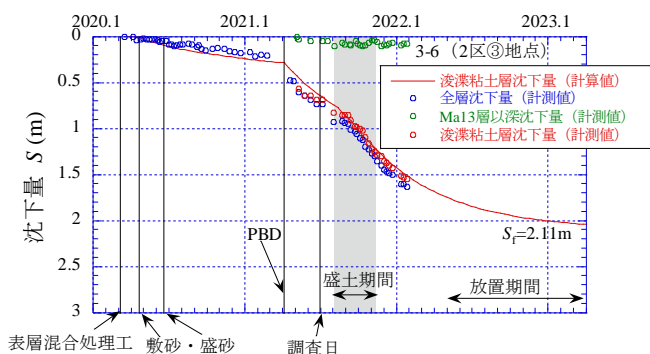


図-9 ③地点の圧密曲線の実測値と計算値の比較

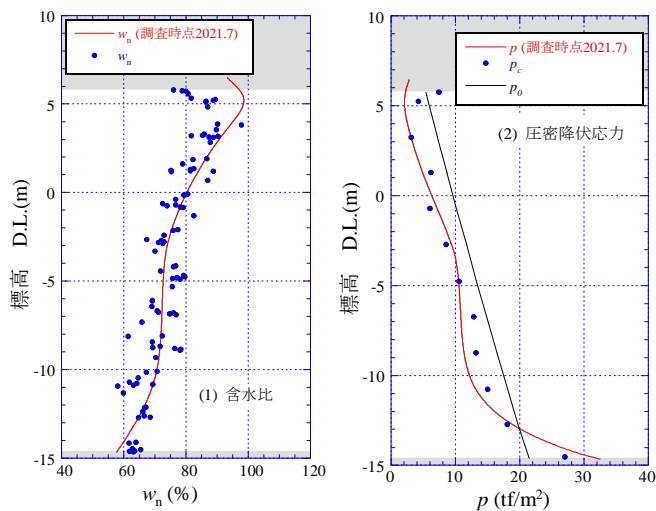


図-10 調査時点での  $w_n$ ,  $p$  の標高分布比較

### 3.4 ①, ②地点の沈下予測

①, ②地点も③地点と同様に泥面標高の経時変化から埋立履歴をシミュレーションし, その後の地盤改良, 盛土による土地造成での沈下予測を行った。計算に用いる圧密特性は①, ②地点のものをそれぞれ用いた。なお, ②地点は2003年頃のPDFが打設されていない観測台D近傍であり, ドレーンの効果が限定的であると考え, PDFの打設間隔を3.4mと仮定して計算を行った。図-11, 12に①, ②地点の表層混合処理工からの圧密計算を行った結果を示す。

①, ②地点ともに圧密曲線をおおよそ再現できている。①地点の計算値はやや過大な結果となっているのは, 浚渫粘土層内に砂層が混入しており, 沈下量の実測値が小さくなっていると考えられる。②地点は先述の通り, PDFによる圧密促進の効果が小さいため他地点と比べて計測沈下量は大きく, 計算値もほぼ一致している。また, ①, ②地点ともにボーリング調査時の浚渫粘土層厚, 応力分布, 含水比分布を再現できていることが確認できた。また, 2023年4月時点で①, ②地点ともに圧密度90%を超えている。

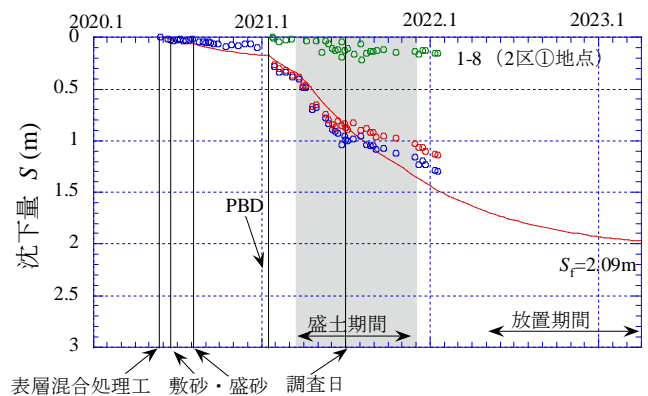


図-11 ①地点の圧密曲線の実測値と計算値の比較

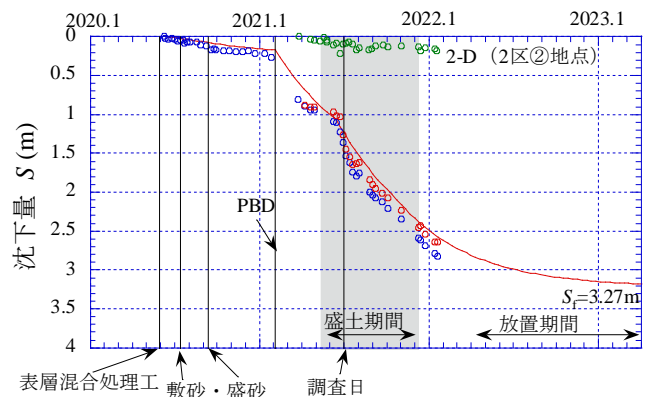


図-12 ②地点の圧密曲線の実測値と計算値の比較

## 4. 夢洲2区沈下計測点での浚渫粘土層の沈下予測

### 4.1 沈下計測点での沈下予測

次に、図-8に示した夢洲2区内に設置されている各沈下計測点での沈下予測を行い、実測値との比較を行う。沈下予測にあたって、まず各地点の圧密特性の把握が必要であるが、ボーリング調査・土質試験を行っているのは①、②、③地点のみであるため、第1工区内を①地点、第2工区内を②地点、第3工区内を③地点の圧密特性をそれぞれ代表して用いた。次に浚渫粘土の埋立履歴は、浚渫粘土の投入履歴を表す泥面標高の経時変化の記録も限られるため、各沈下計測点の埋立履歴は各工区内のうち最も近い位置にあるものを用いた。

最後に浚渫粘土投入終了後の表層混合処理、敷砂・盛砂、PBD、盛土の施工年月日と盛土層厚は各地点で詳細に計測されているため、それを用いた。

### 4.2 沈下予測結果

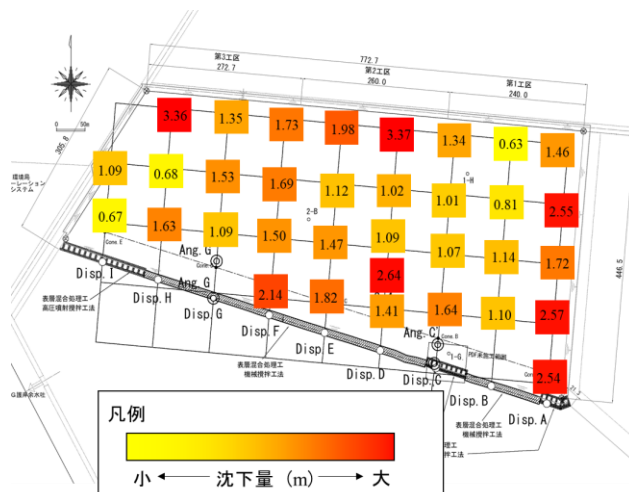
20地点の沈下計測点ごとに沈下予測を行った。工区ごとに同一の圧密特性を用いたため、埋立履歴と敷砂・盛砂、PBD、盛土などの土地造成の施工時期や盛土層厚による違いは反映するが、場所による圧密特性の違いは反映できない。そのため、排砂管があったとされる位置に近く、砂溜まりが想定される地点では沈下量の実測値が小さく、計算値が過大となる。一方、排砂管から遠いとされる地点では、より細粒分が溜まりやすいと考えられ、沈下量の実測値が大きく、計算値が過小となる。このような実測値と計算値の差が大きい地点で圧縮曲線を変更（砂溜まりと考えられる地点は低塑性の圧縮曲線、細粒分が溜まりやすいと考えられる地点は高塑性の圧縮曲線を使用）して再度計算を行うとほぼ一致する結果が得られた。そのため場所による圧密特性の違いが結果に大きく影響すると考えられる。

図-13に2022年1月時点の沈下量の実測値と計算値の比較したものを示す。沈下量は実測値と計算値ともに南西方向に大きく、北東方向に小さいという傾向は同じで、おおよその傾向は把握できている。

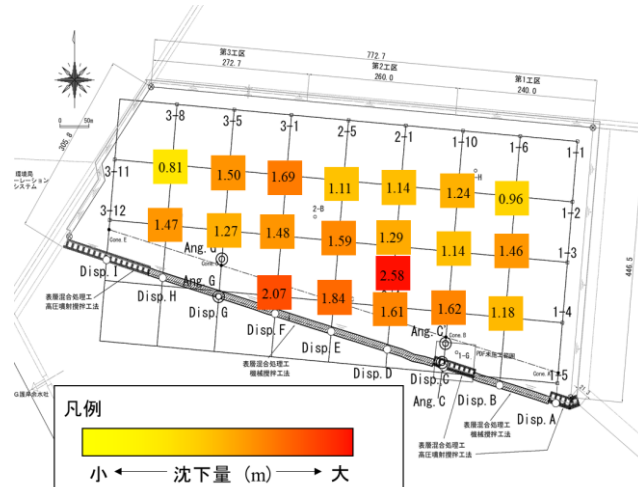
## 5. 結論

本研究では、夢洲2区の浚渫粘土層を対象に沈下予測を行った。さらに、実測の沈下計測との検証も行った。以下に本研究で得られた結論を述べる。

- 1) 夢洲2区の①、②、③地点の浚渫粘土の投入状況を各地点の圧密特性を用いて、泥面標高経時変化を基にシミュレーション計算を行い、浚渫粘土投入状況を再現できた。
- 2) 浚渫粘土の埋立履歴を再現できたので、その後の土



(1) 沈下量の実測値



(2) 沈下量の計算値

図-13 2022年1月の沈下量

地造成工事（表層混合処理、敷砂・盛砂、PBD、盛土）による沈下計算を行い、浚渫粘土層の沈下量は①、②、③地点で実測値とほぼ一致した。また、2021年6～8月に行われた地盤調査結果より得られた応力分布  $p$ 、含水比分布  $w$  と計算で得られた同時期の応力分布、含水比分布もほぼ一致しており、正しくシミュレーションできていることが確認できた。

- 3) 沈下量の計算結果によると、2023年4月の圧密放置期間終了時に圧密度90%に達することが確認され、鉛直排水工法による圧密促進効果が正しく現われており、それ以降の浚渫粘土層の残留沈下量は小さいことが確認できた。
- 4) ①、②、③地点の圧密特性を用いて、2区内の沈下計測点での沈下予測計算を行い、実測値と比較した。実測値との整合性の良い地点も存在するが、整合しない地点も存在する。これは排砂管からの位置などによる浚渫粘土の場所による圧密特性の違いが原因に挙げられる。

（参考文献）

- 1) 木山正明, 大島昭彦, 東洋二, 田中克実: 地下水位低下工法とPDF工法を併用した新しい圧密促進工法, 地盤改良シンポジウム発表論文集, pp.15-22, 2000