

夢洲2区（万博用地）における

浚渫粘土層の実測沈下量と整合させた圧密沈下と盛土量の予測

PREDICTION OF CONSOLIDATION SETTLEMENT AND FILL HEIGHT CONSISTENT WITH ACTUAL SETTLEMENT OF DREDGED CLAY LAYER IN YUMESHIMA 2ND DISTRICT (EXPO SITE)

地盤工学分野 坂口 雄人

Geotechnical Engineering Yuto SAKAGUCHI

2025年の大阪万博の開催に向けて、夢洲2区は新規の計画標高が設定され、ほとんどの地点で計画標高を満たしておらず、現在土地造成が行われている。新たに追加する盛土による不同沈下が生じる恐れがあり、正確な盛土量の予測が急務となっている。本研究では、浚渫粘土層の埋立履歴、地盤改良履歴を再現し、実測の沈下量に整合する圧密沈下量を算出した。その後、夢洲2区の全沈下計測点で行った計画標高を満たす盛土量の予測結果を示す。

In preparation for the Osaka Expo 2025, a new planned elevation has been set for Yumeshima 2nd district, and most of the points do not meet the planned elevation. The newly added embankment may cause unequal settlement, and accurate prediction of the amount of embankment is urgently needed. In this study, the consolidation settlement consistent with the measured settlement was calculated by reproducing the reclamation history and ground improvement history of the dredged clay layer. Then, the prediction of the amount of fill to meet the planned elevation was made at all settlement measurement points in Yumeshima 2nd district.

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。

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¹⁾。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4月から大阪・関西万博が開催されることになった。現在、夢洲2区では新規の計画標高を満たすため、盛土による土地造成が追加で行われており、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。



図-1 夢洲2区位置図

夢洲2区では本来、2023年3月まで盛土による約1年間の圧密放置を経て、パビリオンなどの万博構造物の建設が開始される予定であった。しかし、2022年10月に万博開催時における地表面標高値(DL+10.30m)が新たに設定され、現在の標高値が2区の大部分で計画標高値を満たしていないことから、急遽追加の盛土を行うこととなった。さらに、建設工事は予定通り2023年4月から開始され、追加盛土による圧密進行中にパビリオンの建設が始まる恐れがあるため、正確な盛土量を設定し施工しなければならない。

そのため、昨年度行った夢洲2区浚渫粘土層の圧密沈下予測で、夢洲2区内の全測点において、測点ごとに圧密特性を修正することで2022年9月時点の実測沈下量に計算値を合わせ、その後、追加盛土を行った際の沈下量を計算し、万博開催時の計画標高を満たす最適な盛土量を提案する。また、2023年4月のパビリオン建設開始時～2025年4月の万博開催時までの残留沈下量および万博開催時の標高値を推定する。

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追加の盛土量の提案、並びに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)に代表例として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

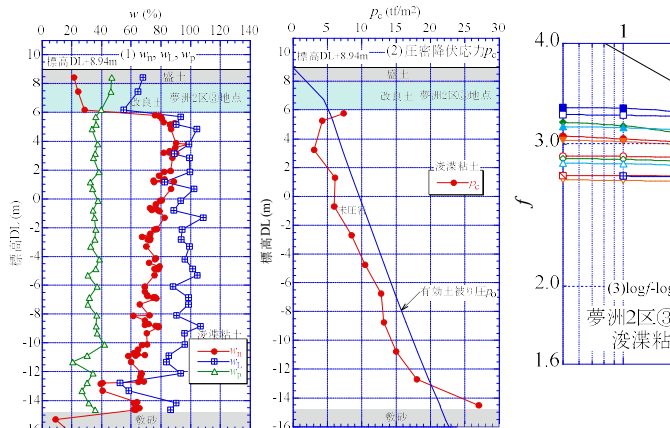


図-2 夢洲2区③地点の圧密特性

一定(約3 tf/m²)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_v関係を示す。logf-logc_v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. 夢洲2区浚渫粘土層の沈下予測と実測値との整合

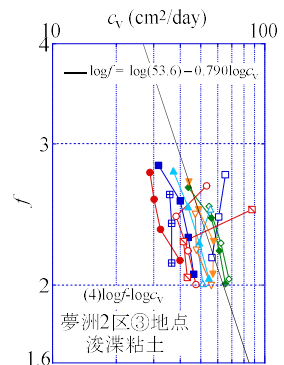
3.1 夢洲2区土地造成の概要

表-1に夢洲2区の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月まで盛土が造成された。その後2022年9月まで6か月間の圧密放置期間を経て、2022年10月から追加の盛土造成が行われている。2023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																



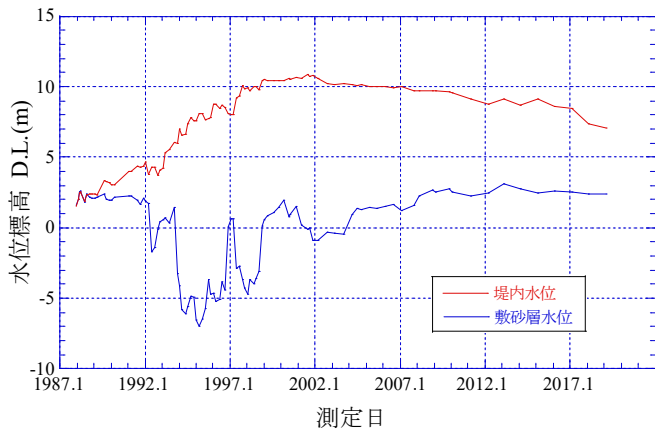


図-3 浚渫粘土層上面と下面の水位測定結果

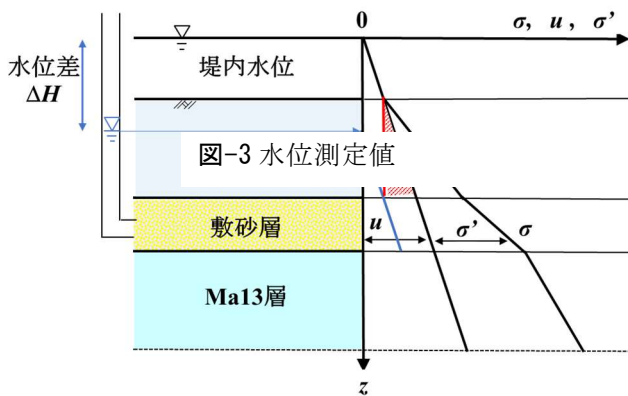


図-4 水位差による有効応力増加

3.2 ③地点浚渫粘土の埋立履歴シミュレーション計算

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 $\log f\text{-}\log p$, $\log f\text{-}\log c_v$ 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 ϵ 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。

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

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り返し計算で求めた。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43.3mで二次が14.5mの合計57.8m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。

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	0	-7.46	14.9	-7.46
		1990/4/20	873	1.96		2.20
	2	1991/8/26	1366	0.77	2.3	0.73
		1992/3/2	1555	1.85		1.89
	3	1992/9/24	1761	1.26	10.1	1.26
		1995/5/23	2732	5.81		5.35
4	1995/11/15	2908	4.66	5.4	4.62	
	1996/9/11	3209	7.96		7.82	
5	1997/9/13	3576	6.60	4	6.60	
	1998/5/21	3826	8.85		9.07	
6	2000/11/10	4730	7.12	6.6	7.05	
	2001/11/14	5099	11.24		11.81	
PDF施工	2003/7/1	5693	10.47		10.43	
二次浚渫	7	2003/11/14	5829	9.69	5.6	8.95
		2007/1/17	6989	6.54		6.60
	8	2007/1/17	6989	6.54	6.2	6.60
		2009/7/23	7907	9.11		9.17
	9	2012/12/6	9139	7.78	2.7	7.80
	2014/9/2	9774	8.64	8.97		
	2019/2/18	11404	8.00		8.03	

一次 Σ 43.3m
二次 Σ 14.5m 合計 57.8m

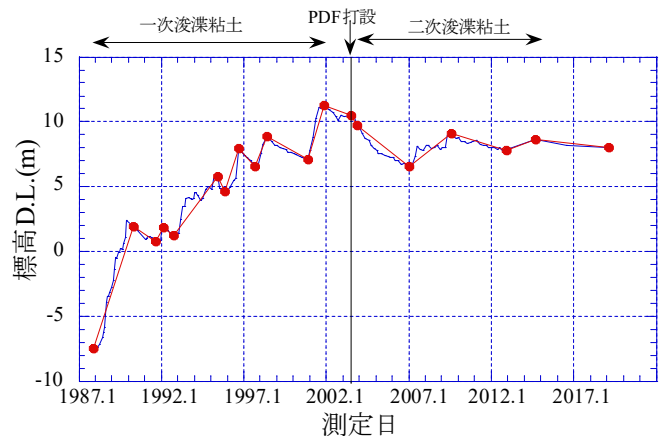


図-5 ③地点の泥面標高と簡略化した標高

図-6に浚渫粘土泥面標高の設定値■（図-6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

しているため、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。

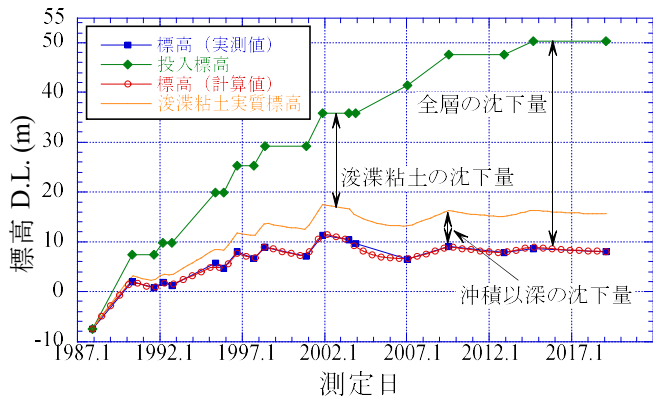


図-6 ③地点シミュレーション結果と浚渫土投入量

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-7 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も沈下板を設置して 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-8 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、□は測点 3-6 の地表面沈下量の実測値、△は同じく測点 3-6 の Ma13 層以深の実測値、○は□から△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（○）の沈下傾向を捉えているが、最終的な沈下量が 0.2m 程度大きい計算結果となった。

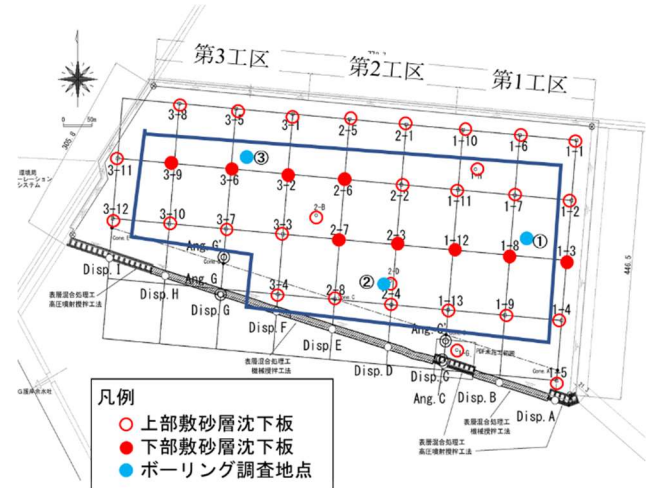


図-7 夢洲 2 区沈下板設置位置

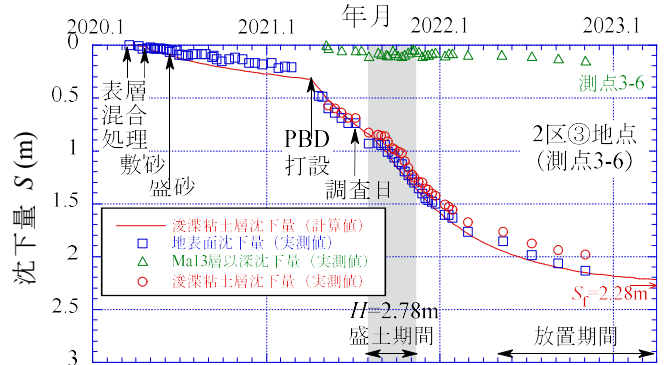


図-8 ③地点の圧密曲線の実測値と計算値の比較

3.4 実測値との整合および盛土量予測

③地点で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うことができた。以上の方法を用いて、2022 年 10 月以降に計画されている追加盛土量を推定するために、2022 年 9 月時点の実測沈下量に計算値を合わせることにした。沈下量を整合するにあたって圧密特性の式を見直し、繰返し計算を行うことで、実測値と計算値が整合する圧密特性を求めた。図-9 に③地点で使用した圧密特性を示す。黒線が代表値で赤線が今回の計算で見直した式を表している。なお、 $\log f - \log c_v$ 関係は変更せず、代表値を使用した。

以上の圧密特性を用いて、③地点における 2025 年 4 月の計画標高を満たす追加盛土量を予測した。追加盛土は 2022 年 10 月～12 月に荷重される予定であることから、中間である 11 月 16 日に一括荷重する設定し、計画標高（測点 3-6 : DL=+10.300m）を最低限満たす盛土量を繰返し計算によって求めた。図-10 に表層混合処理工以降の追加盛土を荷重した時の圧密沈下計算結果を示す。図-10 より追加盛土荷重以降、大きな沈下

が生じていることが確認でき、最終沈下量は $S_f=2.53\text{m}$ となった。図-11 に 2022 年 9 月以降の標高推移の予測結果を示す。黒横線は③地点における計画標高を示しており、2022 年 9 月時点では計画標高を満たしていないことが分かる。繰返し計算の結果、計画標高を満たす追加の盛土量は $H=1.20\text{m}$ となり、万博開催時の標高は $DL=+10.361\text{m}$ と計画標高 $DL=+10.300\text{m}$ を十分に満たすことが確認できた。ただし、計算の標高値は浚渫粘土の沈下量のみ考慮しており、沖積粘土以深の沈下量を考慮できていないことに留意する。パビリオン建設開始時点では、圧密が進行しているが、約 1 年かけて圧密の進行が落ち着き、2025 年 4 月（万博開催時）には圧密度が 95% を超え、圧密が収束していくことが確認できた。また、万博開催以降の残留沈下量も 0.05m 以内に収まる結果が得られた。

各測点で③地点と同様に圧密特性を見直し、実測沈下量に整合する圧密沈下量を求め、追加盛土量の予測を行った。例として図-12、13 に測点 1-7（第 1 工区）と測点 2-1（第 2 工区）の表層混合処理工からの圧密計算結果を示す。測点 1-7 は実測沈下量が 1.0m 未満と小さいので、浚渫粘土層に砂層が混入していると考えられ、第 1 工区の代表値より塑性の低い圧密特性に見直した。反対に、測点 2-1 は実測沈下量が大きかったため、第 2 工区の代表値より塑性の高い圧密特性に見直したことで実測値と整合する結果が得られた。そして、計画標高を満たす盛土量は $H=0.30\text{m}$ となり、万博開催時の標高は $DL=+10.372\text{m}$ となることが分かった。

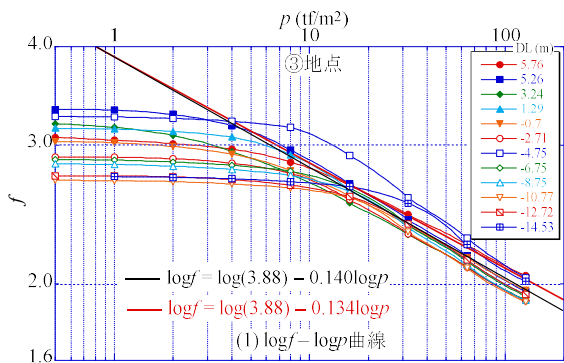


図-9 ③地点の圧密特性

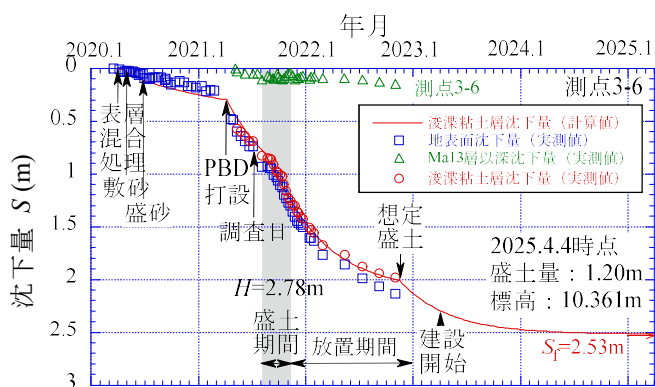


図-10 ③地点の沈下量（追加盛土載荷後）

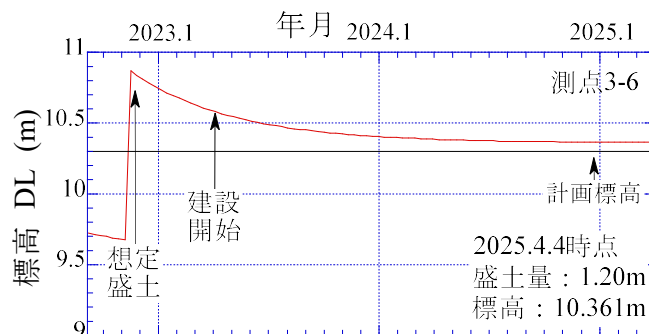


図-11 ③地点の標高推移

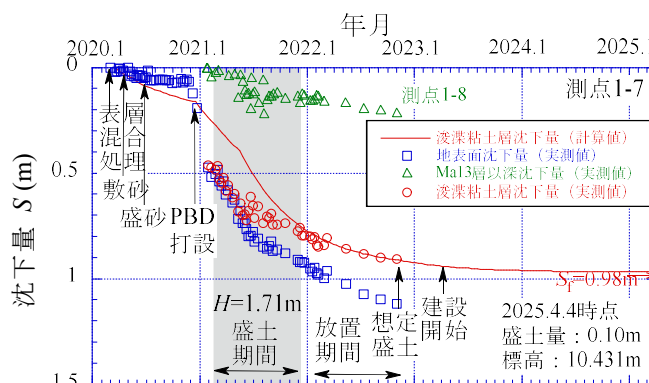


図-12 測点 1-7 の沈下量（第 1 工区）

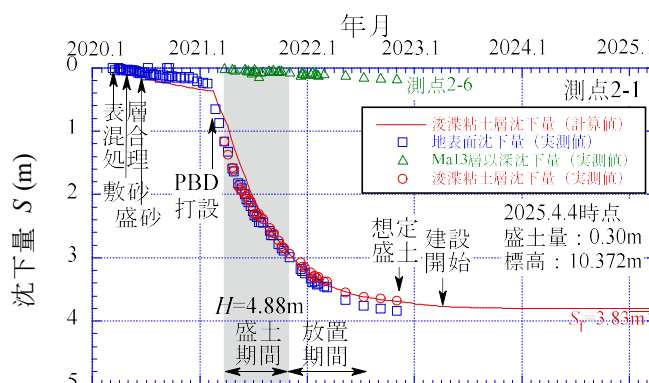


図-13 測点 2-1 の沈下量（第 2 工区）

4. 夢洲 2 区沈下計測点での浚渫粘土層の圧密沈下と盛土量の予測

4.1 沈下計測点での現況標高と沈下予測

次に、図-8 に示した夢洲 2 区内に設置されている 37 の沈下計測点での沈下予測を行い、実測値との整合および追加の盛土量の予測を行う。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。ただし、実測の沈下量と整合させるため、③地点と同様に使用する圧密特性を各測点ごとに見直した。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

