

夢洲2区（大阪・関西万博用地）の計画標高を満足させるための追加盛土量の推定と浚渫粘土層の沈下予測

岡田 広久¹⁾・大島 昭彦²⁾・坂口 雄人³⁾

1) 大阪公立大学 大学院工学研究科 e-mail: okada-hr@omu.ac.jp

2) 大阪公立大学 都市科学・防災研究センター e-mail: oshima@omu.ac.jp

3) (株)大林組 e-mail: sakaguchi.yuto@obayashi.co.jp

大阪・関西万博用地として利用される夢洲2区は、浚渫粘土による埋立と減容化のための地盤改良が行われ、複雑な地盤構造となっている。既報¹⁾では地盤調査結果と圧密沈下予測を報告したが、新たに万博開始時点での計画標高が見直され、既に現況標高がその計画標高を下回っていた。本論文では、実測沈下量に整合させた圧密沈下計算を行い、計画標高を満たす追加盛土量の推定とその後の沈下量の予測計算を行ったところ、不等沈下を最小限に留める予測となった。

Key words : 浚渫粘土, 圧密沈下, 沈下予測, 盛土高, 鉛直排水工法

1. はじめに

1977年に埋立が開始された人工島である夢洲（大阪市此花区、390ha）では、大阪・関西万博に向けて2023年8月現在、パビリオンを含む建築構造物の建設が始まっている。夢洲全体は浚渫粘土、建設発生土及び廃棄物の処分場として埋立てられ、減容化のため鉛直排水工法や地下水位低下工法による地盤改良も行われた。この複雑な地盤構造となっている人工島において、当面の万博を開催するためには、開催期間中にパビリオンを含む万博構造物に不等沈下が起こらないような対応が要求される。

既報¹⁾では、2021年6～8月に行われた地盤調査の結果と、夢洲2区の埋立履歴、地盤改良履歴を基に圧密沈下予測を示した。土地造成が終わった後、2023年3月までの1年間は圧密放置期間とするのが当初計画であった。しかし、2022年7月ごろに万博開始時点での計画標高が新たに設定され、既に現況標高がその計画標高を下回っていることから、2022年10月～12月に追加盛土施工が必要となった。それに伴い、万博敷地に不等沈下が起こらないような追加盛土量の提案が求められた。本論文では、夢洲2区の浚渫粘土層における実測沈下量に整合させた圧密沈下計算を行い、万博開催時において計画標高を満たす追加盛土量及び将来沈下量の予測結果を示す。

2. 夢洲2区の概要と沈下測点

図1に夢洲全体の区分けを示す。1区は一般廃棄物の処分地、2、3区は浚渫土及び建設残土の処分地、4区はコンテナターミナル用地である。3区は統合型リゾート施設（IR）の建設予定地であり、万博用地として埋立、土地造成工事を行っているのが2区の赤枠線で示す約30haである。各区の間は内護岸で仕切られている。

表1に夢洲2区の土地造成の工程表を示す。1987年に初めて一次浚渫粘土が投入された後、減容化を行うため特殊な船を使って上部を遮水処理したPBD（Plastic Board Drain）が海上から打設された（PDF工法（Plastic-board Drain by Floating system））。浚渫粘土層下部の敷砂層に設置した排水井戸によって地下水位低下工法を併用した圧密促進が行われた。二次浚渫粘土が投入された後、土地造成を行うにあたり重機の走行性を確保するため表層混合処理が行われた。圧密促進を図るため再度PBDが一次、二次浚渫粘土層を通して打設され、盛土造成が行われた。

2区は図2に示すように、第1、第2、第3の3つの工区に分かれており、それぞれの工区の▲で示す①、②、



図1 夢洲全体の区分けと土地造成位置

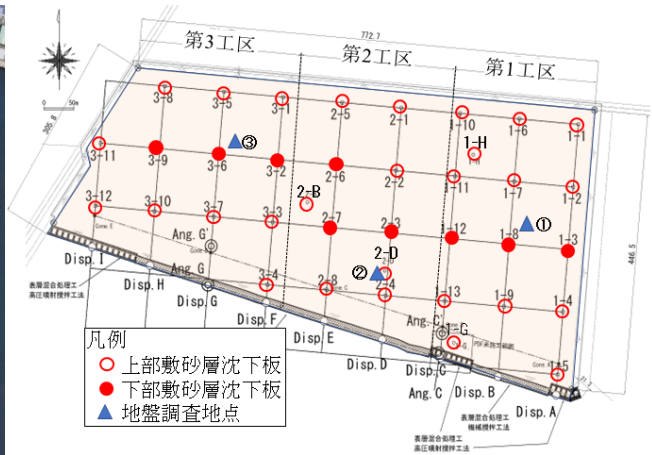


図2 夢洲2区内の地盤調査地点と沈下測点

表1 夢洲2区土地造成の工程表

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																
パビリオン建設																

③地点で地盤調査を行い、浚渫粘土層の乱れの少ない試料を水圧式サンプラーでサンプリングし、その試料を用いて詳細な土質特性を調べた¹⁾。地盤調査・サンプリング時点(2021年7月)では浚渫粘土層の表層1.5mは表層混合処理工がなされ、その上に敷砂0.5m、盛砂0.5mが盛られていた。また、図2に夢洲2区内の37ヶ所(図の○、●)の地表面沈下測点(浚渫粘土層の上部敷砂層下端に設置した沈下板)の位置を示す。その内9ヶ所(図の●)では別途土積粘土Ma13層以深の沈下量(浚渫粘土層の下部敷砂層に設置した沈下板)も計測している²⁾³⁾。この沈下量の計測値から地表面沈下量の差をとることで浚渫粘土層のみの層別沈下量を測定することができる。

3. 2022年2月末までの浚渫粘土層の沈下予測

(1) 浚渫粘土層の沈下予測手法と計算に用いた圧密特性

沈下予測を行うにあたって、各測点での埋立履歴の記録を基に再現計算を行った。一次、二次浚渫粘土層の埋立の記録は、図2で示した測点と異なるため、各測点に最も近いものを用いた。地下水位の実測値から地下水位低下による有効応力増加も再現計算している。表層混合処理工、敷砂、盛砂、PBD打設、盛土造成の測点ごとの施工年月日の記録から再現計算を行った。なお、浚渫粘土層の沈下予測方法の詳細は既報¹⁾を参照されたい。

浚渫粘土層の圧密特性は図3~5に示す第1、第2、第3工区ごとに①、②、③地点の圧密特性(圧縮曲線: $\log f - \log p$ 関係, 圧密係数 $c_v : \log f - \log c_v$ 関係)を基本的に用いた。なお、同図には参考に柱状図も示す。圧縮曲線及び c_v は対数体積比 $\log f$ による関係式を用いている⁴⁾。これは $\log f$ の方が両関係の線形性が高く、粘土の性状として本質的な関係と考えられるためである。各図とも $\log f - \log p$ 関係, $\log f - \log c_v$ 関係は深度方向で幅を持っている。これは、同一工区内であっても、一般に浚渫土を排砂管から投入する際には排砂管近傍では砂分が混入して不均質となり、圧密特性が深度方向に異なるためである(特に①、②地点で不均質性が大きい)。また、各地点の代表となる $\log f - \log p$ 関係式, $\log f - \log c_v$ 関係式を太線で書き入れた。図中の破線については4.で後述する。

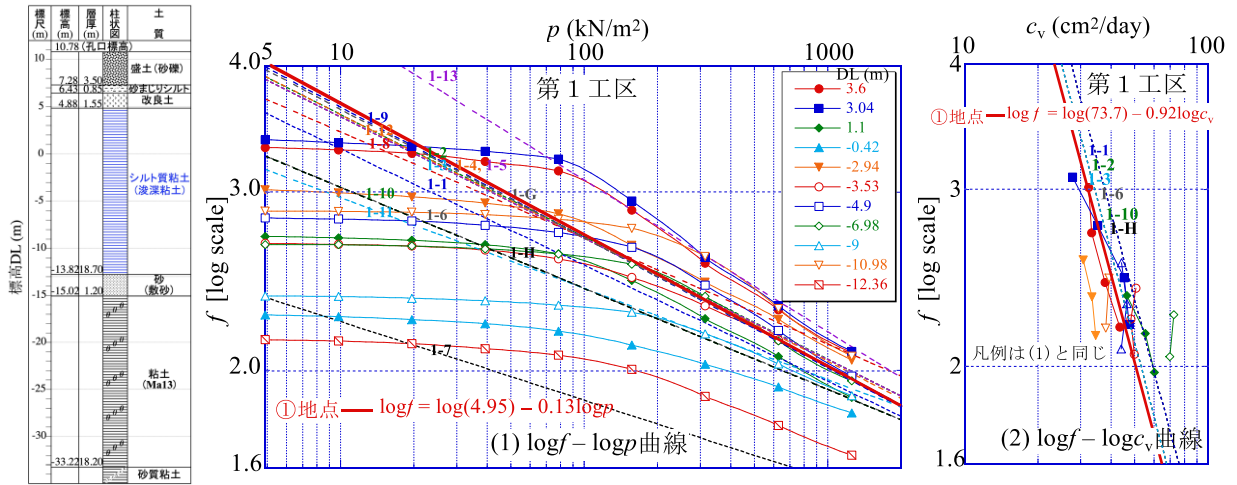


図3 第1工区①地点の浚渫粘土層の圧密特性 (logf-logp 関係, logf-logcv 関係) と代表関係式

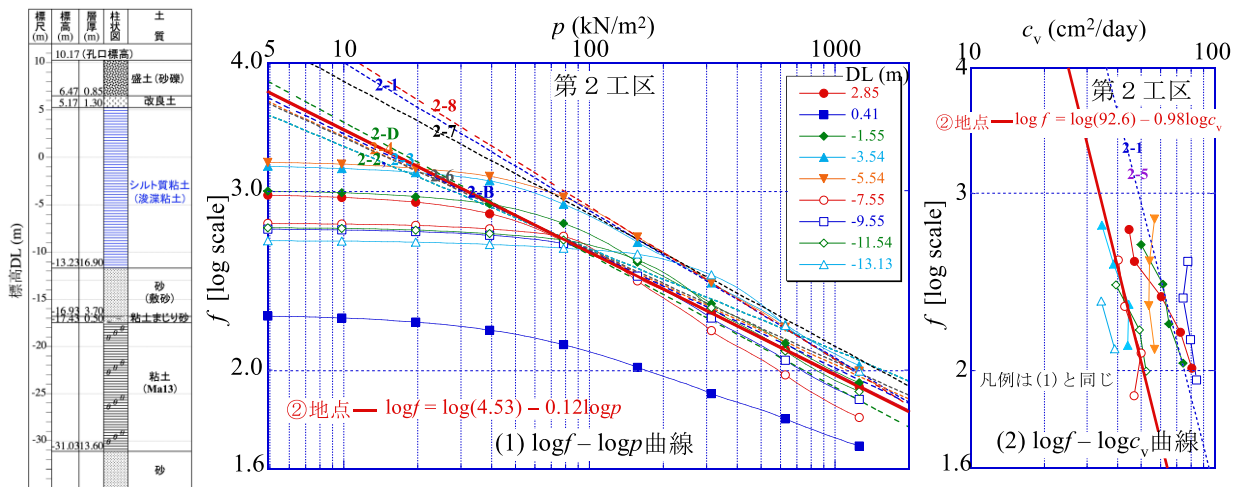


図4 第2工区②地点の浚渫粘土層の圧密特性 (logf-logp 関係, logf-logcv 関係) と代表関係式

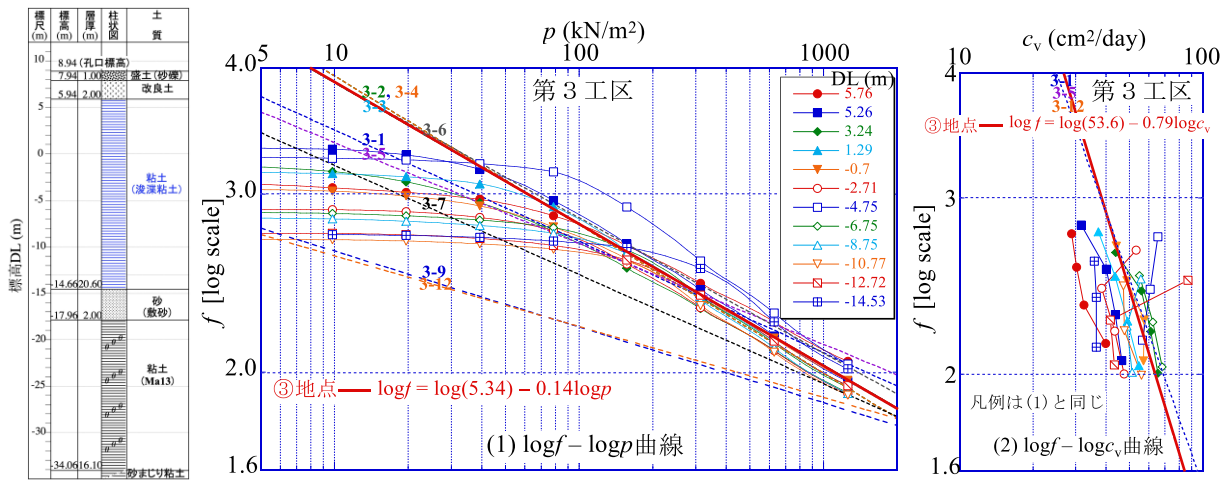


図5 第3工区③地点の浚渫粘土層の圧密特性 (logf-logp 関係, logf-logcv 関係) と代表関係式

自重圧密計算は、式(1)の三笠の有限ひずみ圧密理論 (c_v 変化と粘土自重を考慮) の自然ひずみ ε 式で行った。なお、浚渫粘土層の自重圧密時の初期含水比は $w_0=250\%$ (w_L の 2.5 倍) としている。

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

2003年に一次浚渫粘土層にPBD(幅95mm, 三角形配置, ピッチ $d=1.8\text{m}$)が海上から打設されたので, 一次浚渫粘土層にはBarron解⁵⁾を, 二次浚渫粘土層には式(1)を用いて計算した. ただし, 図2に示した観測台測点(1-H, 1-G, 2-B, 2-D)及び北, 東, 西側の外周の測点(図6参照)では2003年の時点でPBDが未打設であったため, 実測沈下量と整合するようにPBDのピッチを拡げて($d=2.5\sim 4.0\text{m}$)計算した. 2019年以降の表層混合処理工で浚渫粘土層の表層1.5mを固化されているので, 圧密沈下層から対象外とした. ただし, 荷重として考慮した. 敷砂, 盛砂はそれぞれ0.5m層厚で, 载荷に要する時間が短いことから一括荷重とした. その後2021年4月以降に, 一次, 二次浚渫粘土層を通してPBD(幅150mmの広幅タイプ, 三角形配置, $d=1.4\text{m}$)が再打設された. これ以降は一次, 二次浚渫粘土はBarron解で計算した. 最後に, 盛土造成は各測点で実測されている施工年月日と盛土層厚を基に段階荷重として与えた. なお, 敷砂, 盛砂, 盛土の単位体積重量は $\gamma_t=19.6\text{kN/m}^3(2.0\text{tf/m}^3)$ とした.

(2) 2022年2月末までの沈下予測

図6に既報¹⁾で示した2020年3月(沈下量の実測開始)から2022年2月28日(最終盛土終了)時点の沈下量の計算値(上段)と実測値(下段)を示す. 枠線の外周の北, 東, 西側の測点は計算対象外としたので, 実測値のみを示している. 沈下量の計算値は実測値とほぼ整合しているが, 南西方向に大きく, 北東方向に小さい傾向にある. これは, 浚渫粘土投入時の排砂管に近い位置では低塑性の, 遠い位置では高塑性の粘土が堆積し, 粘土層の不均質性によって沈下量の小, 大が現れたと考えられる.

図7にその後の2022年9月1日時点の全測点の実測標高と計画標高を示す. 計画標高は万博開催時の2025年4月1日時点として新たに設定された標高値であり, 東側の測点以外では $DL=+10.30\text{m}$ と設定されている. 既に現況の標高が計画標高を下回っている地点が多くあり, 特に第3工区はその傾向が顕著である. なお, 東側の測点(測点1-1~1-5)では周辺道路への擦り付けのため, 計画標高が他の測点より低く設定されている.

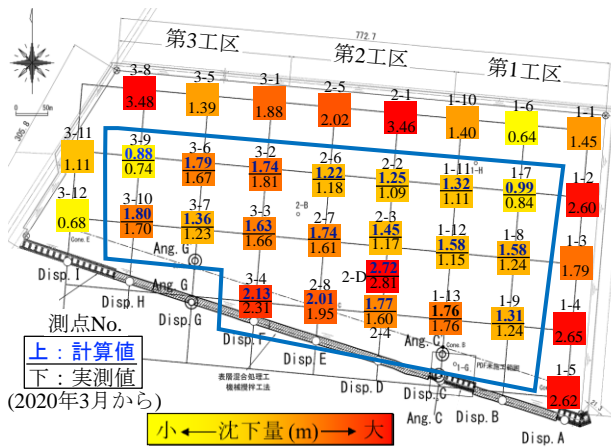


図6 既報¹⁾による2022年2月28日時点の沈下量

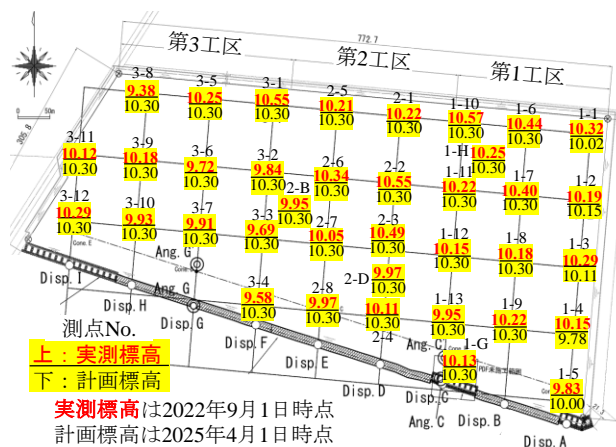


図7 2022年9月の実測標高と計画標高

4. 2022年9月からの追加盛土量と沈下予測の再計算

(1) 計画標高を満足する追加盛土量と沈下量の予測

2022年9月1日時点の標高が新たな計画標高を下回っている地点があるので, 計画標高を満足する最適な盛土量(2022年10月~12月に施工)を求めた. 各測点で圧縮曲線($\log f-\log p$ 関係)を低塑性側又は高塑性側に補正した(図3~5(1)の破線). c_v は各工区ともに赤実線で示した平均的な $\log f-\log c_v$ 関係式を与えた. 測点によっては少し関係式を補正して(図3~5(2)の破線)計算した. 圧密沈下予測では圧密中の c_v 変化を考慮した. この補正により, 繰返し計算で2022年9月7日の実測沈下量に整合させた. これらは今後の沈下予測をより正確にするための処置と考えて行った. また, 計算での追加盛土は盛土造成期間の中間の2022年11月15日に一括荷重とした.

図8に夢洲2区内の37ヶ所での計画標高を満足する追加盛土量の予測値を示す. 当然, 図7で実測標高が低かった第3工区及び南側の地点で追加盛土量が多くなっている. ただし, 東側や北側の測点では現況標高が計画標高を満たしており, その後の沈下が加わっても計画標高を下回らないので, 追加盛土は不要と判断している.

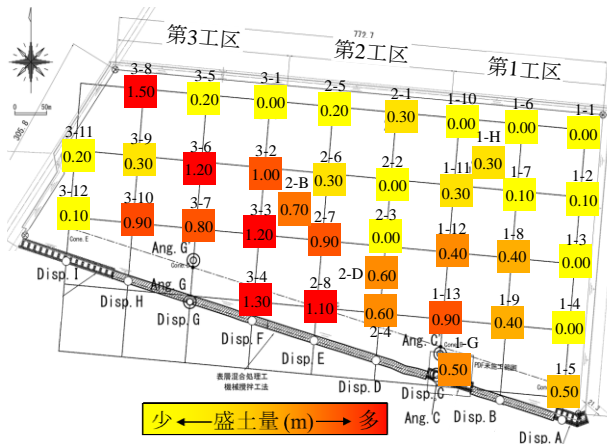


図8 計画標高を満足するための追加盛土量の予測値

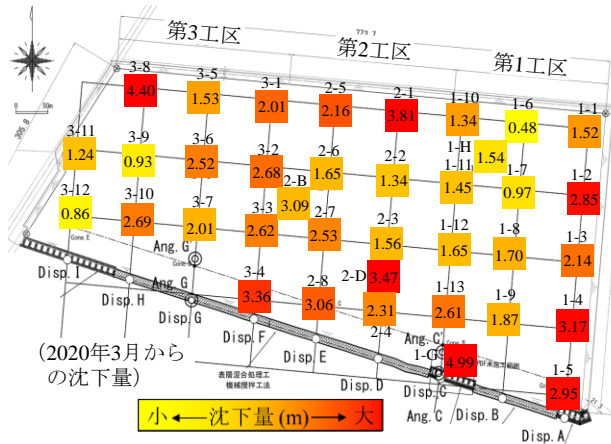


図9 追加盛土量の予測値による最終沈下量

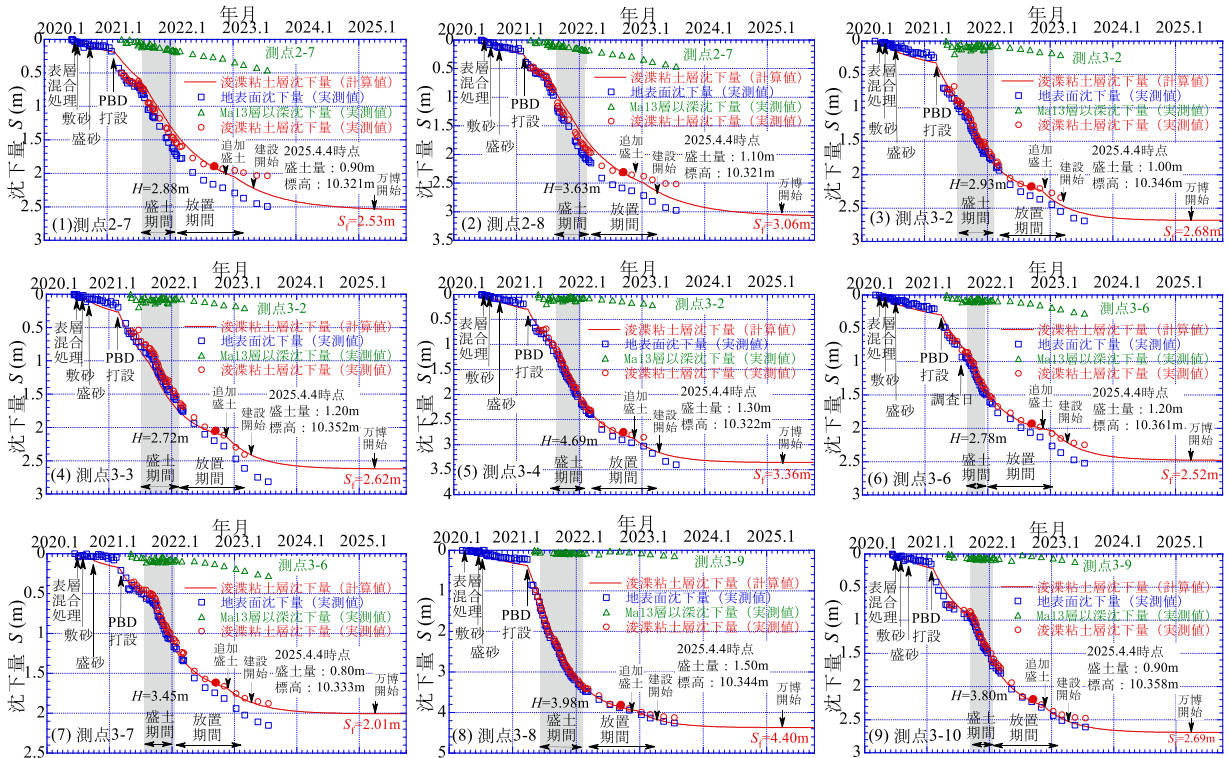


図10 各地点の圧密曲線の計算値と実測値の比較

図9に図8の追加盛土量の予測値による2020年3月からの最終沈下量の分布を示す。当然ながら追加盛土量が多い地点ほど沈下量の増加が大きい。沈下量の大きさの傾向は図6と同様で南西方向に大きく、北東方向に小さい傾向にある。また、2003年の時点でPBDが未打設であった外側の箇所についても沈下量が大きい。

図10に代表例として、現況標高が低く図8の追加盛土量が多くなった第2工区の2-7、2-8測点と第3工区の3-2、3-3、3-4、3-6、3-7、3-8、3-10測点の圧密曲線の計算値と実測値の比較を示す。実線が浚渫粘土層の沈下量の計算値、□は地表面沈下量の実測値、△はMa13層以深沈下量の実測値、○は□から△を差し引いて求めた浚渫粘土層のみの沈下量の実測値である。圧密特性の見直しによって2022年9月7日時点(図の●)で計算値と実測値を整合している。その後、計画標高+10.30mを満足させるための追加の盛土量を繰返し計算により求めた。万博開始時点の2025年4月時点では浚渫粘土層の沈下はほぼ収まっていることが分かる。

図11に図8の追加盛土量を載荷した時の各測点において、万博開始時の2025年4月1日時点の予測標高値の分布を示す。各地点の予測標高値は追加盛土していない地点を除き、計画標高DL=+10.30mの+0.2m以内で収まっており不等沈下を最小限に留める盛土量の予測ができたと考えている。

なお、実際の現場ではこの結果を参考にしながらも実測沈下量に基づく双曲線法によって沈下予測を行い、それ

に基づいて追加盛土量が決定された。この盛土量は図8の推定盛土量に近いものとなった。別途、実際の盛土量に基づいた沈下計算も行っており、概ね計画標高を満たす結果となった⁶⁾。

ただし、以上の沈下予測は浚渫粘土層のみであり、実際の地表面沈下量には浚渫粘土層の下の沖積粘土Ma13層及び洪積粘土層の沈下も加わる。図12に9地点で実測されたMa13層以深の圧密曲線（横軸は対数時間）を示す。各測点でばらつきは大きいですが、今回想定した2022年9月7日時点から万博開催時2025年4月1日までの沈下量は、平均0.15m程度と予測される。この程度の沈下量であれば、計画標高を大きく下回ることはないと考えられるが、今後2年間の実測沈下量に応じて地表面の不陸を調整することも想定される。

5. まとめ

本論文では、夢洲2区の浚渫粘土層における実測沈下量に整合させた圧密沈下計算を行い、万博開催時の計画標高を満たす追加盛土量の推定とそれによる沈下量予測を行った。以下に結論を示す。

- (1) 2022年9月時点の標高が万博開始時の2025年4月時点の計画標高を下回っている地点があったので、既に求めていた浚渫粘土層の圧密特性を測点ごとに無理のない範囲で補正し、追加盛土が載荷される前の2022年9月7日の実測沈下量に計算沈下量を整合させ、計画標高を満足する盛土量及びそれによる沈下量を推定した。
- (2) 追加盛土量を算定し、それによる沈下予測を行った結果、万博開催時の2025年4月時点の予測標高は計画標高DL=+10.30mに対して+0.2m以内で収まっており、不等沈下を最小限に留める盛土量の予測ができた。また、万博開始時点では圧密がほぼ終了していることが分かった。
- (3) ただし、実際の地表面ではMa13層以深の沈下も加わる。9地点の実測値から万博開催時までの沈下量は15cm程度と予測され、この程度の沈下量であれば、計画標高を大きく下回ることには無いと考えられる。

上記のように、今回は浚渫粘土層を対象とした短期的な圧密沈下予測を示したが、浚渫粘土層の下に堆積している沖積粘土層及び洪積粘土層は長期的に沈下していくので、今後はその圧密沈下予測を行う予定である。

6. 参考文献

- 1) 岡田広久・大島昭彦・一谷浩史(2022): 夢洲2区(大阪・関西万博用地)の浚渫粘土層の地盤改良を考慮した圧密沈下予測, 都市防災研究論文集, 第9巻, pp.31-36.
- 2) 大月一真・榊原司・大川浩司・明石実可子・大島昭彦(2022): PBD 打設機により軟弱粘土層下部に設置した沈下計測機器の活用法, 土木学会第77回年次学術講演会, III-409.
- 3) 大月一真・西口松男・伊藤典一・大島昭彦・白神新一郎・稲垣祐輔・髻田孝宏(2022): 夢洲2区土地造成工事における地盤変状の把握と管理について, Kansai Geo-Symposium 2022, pp.103-108.
- 4) 岡田広久・大島昭彦(2015): 対数体積比 $\log f$ で表した圧密特性の再検討—浚渫粘土を例にして—, 地盤工学ジャーナル, Vol. 10, No. 2, pp.187-199.
- 5) Barron, R. A. (1948) : Consolidation of fine-grained soils by drain wells, Trans. ASCE, Vol.113, pp.718-742.
- 6) 坂口雄人・大島昭彦・岡田広久・塩崎一樹・佐々木徹・島一郎・平原毅(2023): 夢洲2区(万博用地)の計画標高を満足させる盛土量と浚渫粘土層の沈下予測, Kansai Geo-Symposium 2023, (投稿中).

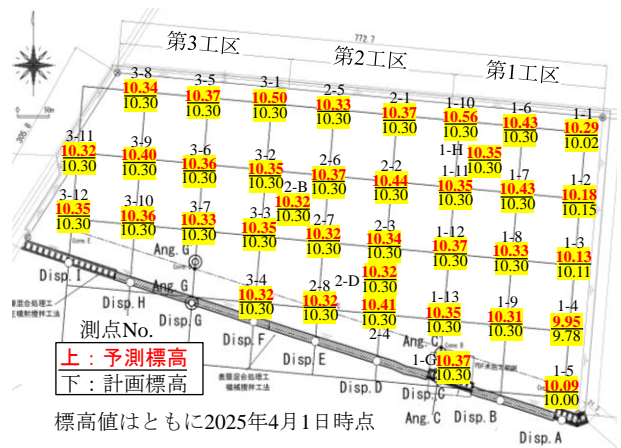


図11 2025年4月1日時点の予測標高と計画標高

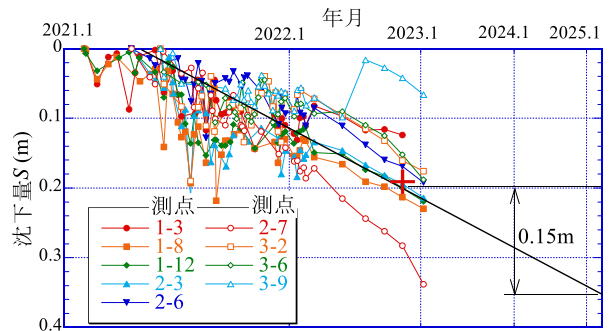


図12 Ma13層以深の実測圧密曲線