

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

岡田 広久¹⁾・大島 昭彦²⁾・一谷 浩史³⁾

1) 神戸市建設局 e-mail: hirohisa_okada@office.city.kobe.lg.jp

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

3) (株)建設技術研究所 e-mail: hrs-ichitani@ctie.co.jp

大阪・関西万博の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するための地盤改良により複雑な地盤構造となっている。本論文では、地盤調査で調べた浚渫粘土層の圧密特性を基に、埋立履歴や地盤改良履歴を再現計算して今後の圧密沈下の予測計算を行い、実測値との比較を行った。その結果、計算値は実測値とほぼ一致し、圧密進行状態をよく再現できた。また、2023年3月時点で浚渫粘土層の圧密度は設計通り90%を超えていることが確認できた。

Key words : 浚渫粘土, 圧密沈下, 沈下予測, 地盤改良

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)は、大阪・関西万博や統合型リゾート(IR)の用地として利用される予定にある。しかし、夢洲全体は浚渫粘土、建設発生土および廃棄物の処分場として埋め立てられたため、場所によって埋立材料や埋立履歴、地盤改良の履歴が異なり、複雑な地盤構造となっている。そのため、構造物の設計・施工にあたっては、浚渫粘土層の短期的な沈下や沖積粘土層や洪積粘土層の長期的な沈下を把握することが重要となる。特に、夢洲2区は元々浚渫粘土の処分地で2025年4月から開催される大阪・関西万博に向けて、2022年3月末まで土地造成工事が行われたが、これまで2度に渡る浚渫粘土の埋立に対して、プラスチックボードドレーン(PBD)による鉛直排水工法と地下水位低下工法の併用による地盤改良が行われた。当面の万博を開催するためには、開催期間にパビリオンを含む万博構造物に不同沈下が起こらないような対応が要求されている。この夢洲2区地盤の沈下性状を把握するために、大阪港湾局の発注で層別沈下計を3地点に設置する工事と地盤調査が2021年6~8月に行われた。その際に3地点で浚渫粘土層の乱れの少ない試料のサンプリングが行われた。文献1)では地盤調査を行った3地点での浚渫粘土層の土質特性(物理・圧密特性など)の詳細および埋立履歴、地盤改良履歴を再現した圧密沈下予測を示した。本論文では、夢洲2区(万博用地)の地表面沈下測点の1地点を代表例として、浚渫粘土層の今後の圧密沈下を予測した結果と実測値との比較を示す。なお、その他の地表面沈下測点の比較については文献2)を参照されたい。

2. 夢洲2区浚渫粘土層の圧密特性

(1) 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区は浚渫土およ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IRの予定地であり、万博用地として埋立、土地造成工事を行っているのが2区の赤破線で示す約30haである。各区の間は内護岸で仕切られている。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①,②,③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サンプリングし、その試料を用いて土質試験を行って詳細な土質特性を調べた。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●)では別途沖積粘土Ma13層以深の沈下(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³⁾⁴⁾。なお、外周の測点は内護岸に近く、2003年の1度目のPBDが未打設で、他の測点と地盤条件が異なるので、図2の青線内の20の測点を計算対象とした。本論文では、計算対象の代表地点として測点3-6について報告する。その他の地点の計算結果は文献2)を参照されたい。また、沈下量の実測は2020年3月頃から始められている。

(2) 夢洲2区③地点の圧密特性

図3に測点3-6付近に位置する③地点の深度ごとの(1)圧縮曲線(logf-logp 関係)、(2)圧密係数 c_v (logf-log c_v 関係)を示す。いずれも対数体積比logfによる関係式を用いている⁵⁾。これは従来の算術体積比(f -logp, f -log c_v 関係)よりもlogfの方が両関係の線形性が高く、本質的な関係と考えられるためである。図3(1)圧縮曲線より③地点の粘土層はほぼ均質である。また、得られた圧縮曲線の正規圧密の範囲で平均的に位置するlogf-logp 関係式を実直線(赤線)で書き入れた。なお、この関係式は後述する沈下予測計算で用いており、均質粘土層として計算を行った。図3(2)圧密係数 c_v においても、平均的に位置するlogf-log c_v 関係式を実直線(赤線)で書き入れた。沈下予測計算ではこの関係式を用いており、圧密中の c_v の変化を考慮した。なお、各地点の物理特性を含む土質特性の詳細は文献1)を参照されたい。



図1 夢洲全体の区分け

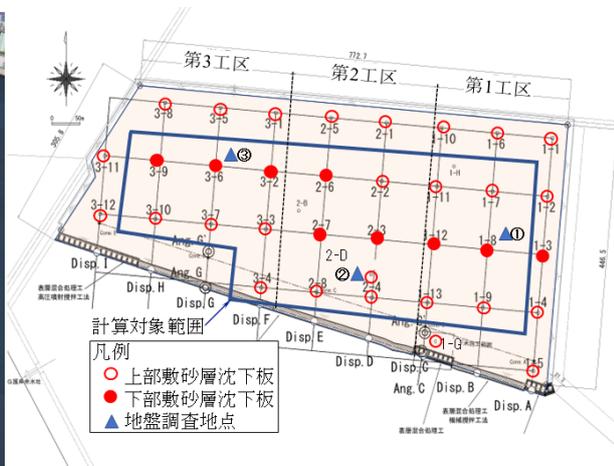


図2 夢洲2区土地造成地内のサンプリング位置

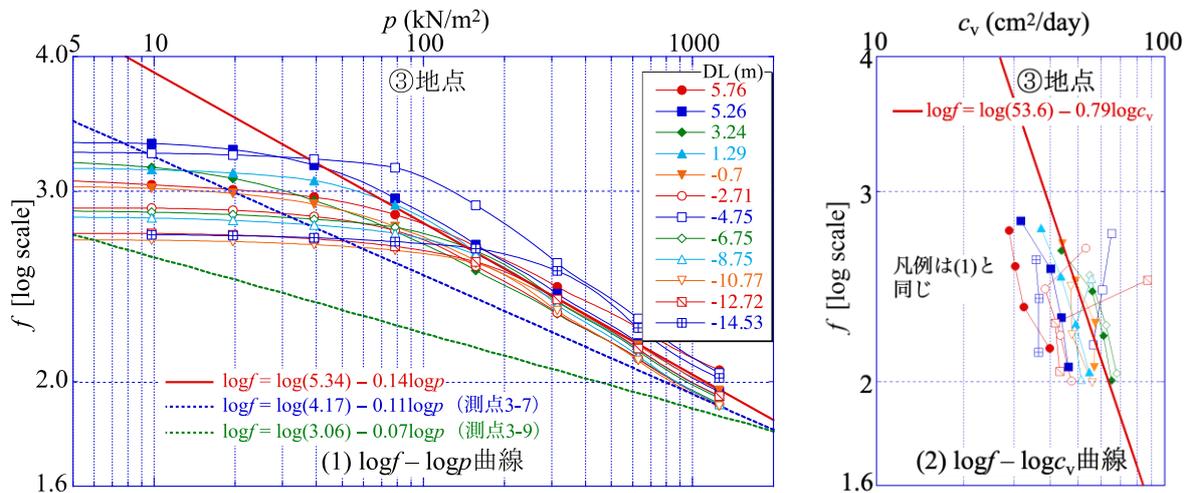


図3 夢洲2区③地点の浚渫粘土層の圧縮曲線(logf-logp 曲線)と圧密係数 c_v (logf-log c_v 曲線)

3. 夢洲2区沈下測点での浚渫粘土層の沈下予測

(1) 夢洲2区の土地造成の概要

夢洲の埋立は1977年から始められ、旧海底面の沖積粘土Ma13層の上に敷砂層を設置し、Ma13層にサンドドレーン施工後、後述の一次浚渫粘土の投入に応じて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（この段階ではMa13層の圧密促進が主である）。図4に2区内堤内水位（浚渫粘土層の上面水位）と敷砂層水位の測定結果を示す。1992年頃から2007年頃まで敷砂層の地下水位低下が行われているが、その後は敷砂層の水位はほぼDL+2mに平衡している。次節の圧密沈下予測ではこの堤内水位と敷砂層水位の差による有効応力増分を圧密応力として考慮した。なお、2017年以降も水位差は約5mで続いているので、それを考慮した。表1に夢洲2区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PDF工法によって海面上からPBDが打設され、圧密促進によって2区処分地が減容化され、2004～2018年に二次浚渫粘土が投入された。この際のPBDの打設状態と有効応力増分を図5に示す。PDF工法ではPBDの上部1.5mを熱溶着でシールして不透水としているので、それ以深のPBDの水位は敷砂層と同じとなり、図に示す有効応力増分による圧密促進が期待できる。その後、2019年から浚渫粘土層の上部1.5mが表層混合処理され、敷砂0.5mと盛砂0.5m施工後、2020年10月から2021年4月まで一次、二次浚渫粘土層を通して再度PBDが打設され、2022年3月まで盛土（最終標高が揃うように層厚2～4mに設定）による土地造成がなされた。今後、2023年3月まで1年間の圧密放置期間を経て（浚渫粘土層の圧密度が90%以上となるようにPBDを設計）、2023年4月から2025年3月まで万博パビリオンなどの建設工事が始まる予定にある（2025年4月から万博開催）。

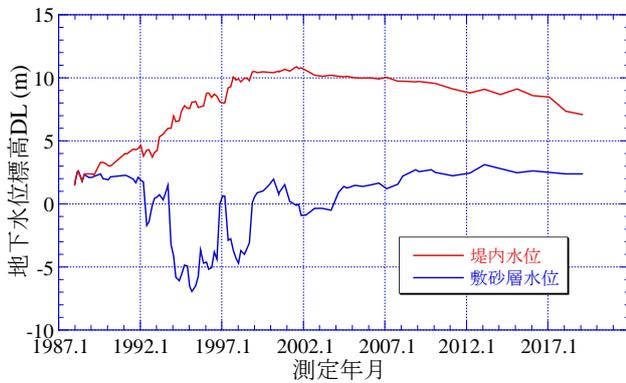


図4 夢洲2区内の堤内水位と敷砂層水位の測定結果

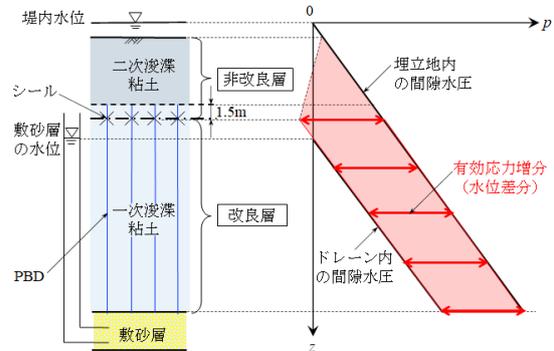


図5 PBD 打設状態と有効応力増分の模式図

表1 夢洲2区の土地造成の工程表

年(西暦)	1987	1988	1989	1990	1991	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025			
年(和暦)	S62	S63	H1	H2	H3	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	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																																	

(2) 浚渫粘土層の埋立状況の再現計算

地盤調査時点（2021年7月）以降の圧密沈下予測を行うに当たって、過去の浚渫粘土層の埋立履歴を再現する必要がある。図6に浚渫粘土埋立当初からの計測点を示す。計算対象地点である測点3-6において具体的な浚渫粘土の投入量の記録はないが、計算対象地点に最も近い測点22で浚渫粘土層の埋立履歴（泥面標高）が測定されて

いるため、計算ではその測定値から再現計算を行った。図7に他の計測地点を含めた泥面標高の経時変化を示す。測点ごとによる差はそれほどなく、ほぼ均等の標高で浚渫粘土が投入されていることがわかる。

図8に測点3-6における一次、二次浚渫粘土の泥面標高の経時変化を■線に示す。これを圧密計算で再現したり。経過日数は浚渫粘土投入開始の1987年11月29日を0としている。図8の■線で標高が増加しているのは投入期間(一次浚渫粘土は6段階、二次浚渫粘土は3段階)、標高が減少しているのは放置期間として、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。ただし、浚渫粘土投入と同時に、浚渫粘土自体の自重圧密と沖積粘土Ma13層以深(洪積粘土層を含む)の圧密沈下が始まるので、浚渫粘土層の投入層厚は■線の実測泥面標高にそれらの沈下量を加える必要がある。Ma13層以深の沈下は図6に赤字で示した観測台2-B, 2-D, 1-G, 1-Hで実測されている。その圧密曲線を図9に示す。約30年間で7mを超える沈下が起きていることがわかる。測点3-6に最も近い観測台Bの沈下量を加えたのが図8の橙線、さらに浚渫粘土層の沈下量を加えたのが図8の◆線となる。一次、二次浚渫粘土層の投入層厚はそれぞれ41.8m, 15.3mとなった。これは後述の初期含水比 $w_0=250\%$ によるが、 w_0 によって投入層厚は変わるが、実質層厚は同じとなるので、自重圧密後の層厚は w_0 によらず同じとなる。圧密計算条件は以下である。一般に浚渫粘土層が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。①~③地点の浚渫粘土層は $w_L \approx 100\%$ であったので、初期含水比 $w_0=250\%$ と仮定した。浚渫粘土層の圧縮曲線と c_v は、図3内に示した関係式を用いた。自重圧密計算は、次式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。

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

2003年に一次浚渫粘土層にPBD(幅95mm, 三角形配置, ピッチ $d=1.8m$)が打設されたので、それ以降は一次浚渫粘土層(図5の改良層)にはBorron解を、二次浚渫粘土層(図5の非改良層)には式(1)を用いて計算した。

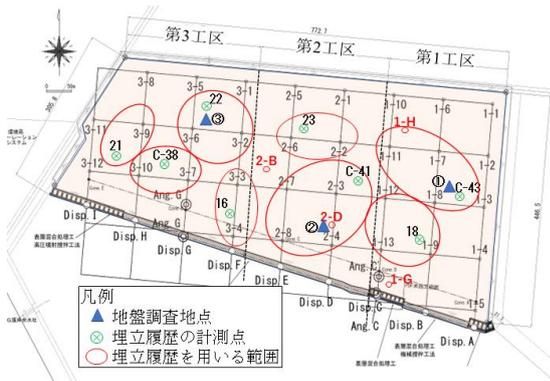


図6 浚渫粘土層の泥面標高測点

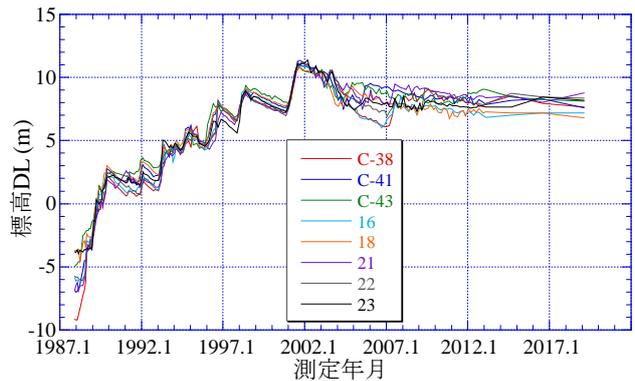


図7 2区内の浚渫粘土層の泥面標高の経時変化

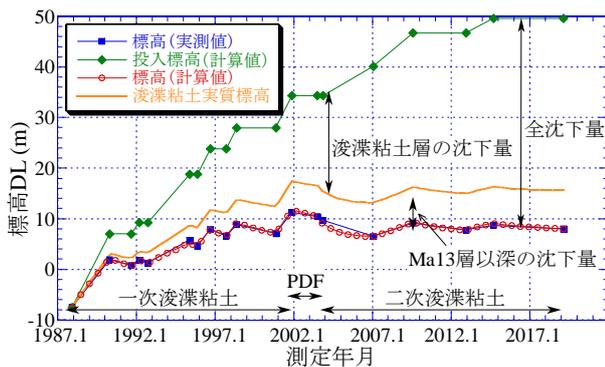


図8 測点3-6での泥面標高の経時変化

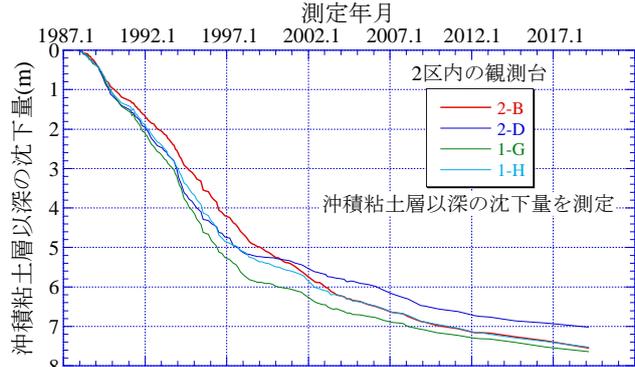


図9 2区内の沖積粘土層以深の圧密曲線

図8の○線で浚渫粘土層の泥面標高の計算値を示す。計算値が■線の実測値をほぼ再現できていることがわかる。他の測点でも同様な手法で泥面標高の経時変化を再現した²⁾。

(3) 測点 3-6 (③地点) での沈下予測結果

次に、各測点での 2019 年以降の表層混合処理工、敷砂、盛砂、PBD 打設、盛土造成における圧密沈下予測を行った。表層混合処理工は浚渫粘土層の表層 1.5m を固化させているので、圧密沈下層から対象外とした(荷重としては考慮)。敷砂、盛砂はそれぞれ 0.5m 層厚で、荷重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、 $d=1.4$ m) が再打設された。これ以降は一次、二次浚渫粘土層を通して Barron 解で計算した。最後に、盛土造成は実測値に応じて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 $\gamma_t=19.6\text{kN/m}^3$ (2.0tf/m^3)とした。図 10 に測点 3-6 の表層混合処理工以降の圧密曲線を盛土の経時変化とともに示す。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、△は測点 3-6 の Ma13 層以深の沈下量の実測値、○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)は若干実測値(○)よりも大きいのが、比較的良く再現している。また、最終沈下量 $S_f=2.28\text{m}$ となった。圧密放置期間が終わる 2023 年 3 月時点では $S=2.21\text{m}$ となり、PBD の設計通りに圧密度 90%を超えていることが確認できる。また、地盤調査時点での浚渫粘土層の層厚は 20.6m、計算値は 21.3m であり、粘土層厚も再現できている。図 11(1), (2)に地盤調査時点(2021 年 7 月)でのそれぞれ含水比 w_n 、圧密降伏応力 p_c の③地点の実測値と測点 3-6 の計算値の比較を示す。両者の実測値と計算値はほぼ一致しており、計算値が浚渫粘土層の圧密進行状態を再現できているといえる。なお、測点 1-8 (①地点)、測点 2-D (②地点)でも計算値が実測値を再現していることを確認している¹⁾。また、他の測点においても同様の手法を用いて計算を行い計測値と実測値が一致した箇所もあったが、計算値が過小・過大となる測点もあった。これらは、浚渫粘土層の不均質性の影響によるものと考えられ、圧縮曲線(logf-logp 式)を低塑性側側か高塑性側側に試行計算により補正し実測値と合うように投入標高を再計算した(例えば、図 3(1)に示す測点 3-7, 3-9 では低塑性側へ補正した)²⁾。

図 12 に 2 区全体の沈下測点での 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。外周の測点は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おり、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⁶⁾。ただし、沈下量の小さいところは盛土層厚が小さく、沈下量の大きいところは盛土層厚が大きく現地において施工調整されているので、圧密放置期間が終了する 2023 年 3 月末時点での 2 区全体の盛土の地表面標高の計算値による不陸は 1m 以内に収まることを確認している。これは文献 4)による実測沈下量から双曲線法によって推定した標高値とも対応した。

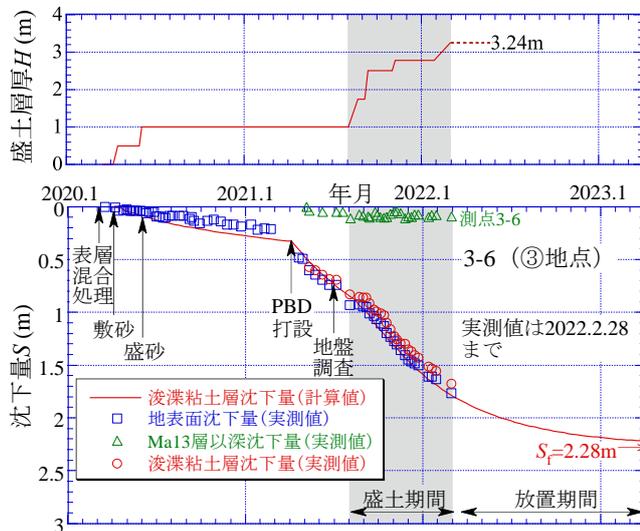


図 10 測点 3-6 での圧密曲線と盛土の経時変化

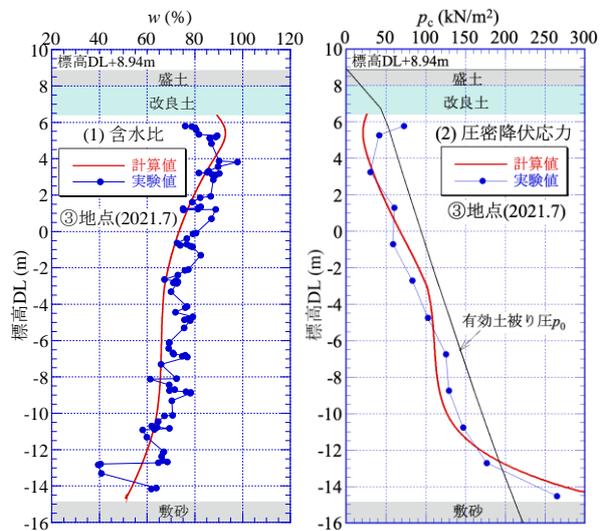


図 11 2021 年 7 月時点の w_0 , p の実測値と計算値の比較

4. まとめ

本論文では、夢洲2区(万博用地)の3地点の地盤調査で調べた浚渫粘土層の圧密特性を基に、2区の地表面沈下測点3-6を代表例として、浚渫粘土層の埋立履歴、地盤改良履歴を再現し、今後の圧密沈下を予測した結果と実測値との比較を示した。その結果から以下の結論が得られた。

- 1) 浚渫粘土層の埋立履歴(一次、二次投入)、地盤改良履歴(地下水位低下、2回のPBD打設)を再現した計算値はほぼ実測値を再現することができた。また、地盤調査時点(2021年7月)での浚渫粘土層の層厚も再現できた。
- 2) 地盤調査時点での含水比 w_n 、圧密降伏応力 p_c の計算値は実験値とほぼ一致しており、計算値が浚渫粘土層の圧密進行状態をよく再現できた。
- 3) 表層混合処理を行った2020年3月以降の圧密曲線の計算値は実測値を良く再現できた。また、圧密放置期間が終わる2023年3月時点で浚渫粘土層の圧密度はPBDの設計通り90%を超えていることが確認できた。ただし、浚渫粘土層の不均質性のために合わない測点もあったので、圧縮曲線を見直して再計算することによって実測値を再現することができた。
- 4) 最終盛土終了の2022年2月末時点での沈下測点での沈下量の計算値は実測値とほぼ整合しており、南西方向に大きく、北東方向に小さい傾向にあった。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た。

なお、2023年3月時点での2区全体の盛土の地表面標高の計算値による不陸は1m以内に収まることを確認できており、文献4)による実測沈下量から双曲線法によって推定した標高値と対応した。

今回はPBD打設の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、最終的な盛土荷重によって、その下に堆積している沖積粘土層および洪積粘土層が長期的に沈下を考慮した圧密沈下予測を行う予定である。

最後に、本研究は地盤工学会関西支部「夢洲の地盤性状と沈下性状に関する研究委員会」での活動の一環として行ったことを付記する。また、夢洲2区での工事と地盤調査を実施いただいた大阪港湾局に謝意を表す。

5. 参考文献

- 1) 一谷浩史・大島昭彦・坂口雄人・岡田広久・大月一真(2022): 夢洲2区(万博用地)の浚渫粘土層の土質特性と埋立・地盤改良を再現した圧密沈下予測, Kansai Geo-Symposium 2022, No.3-2.
- 2) 一谷浩史・大島昭彦・坂口雄人・岡田広久・大月一真(2022): 夢洲2区(万博用地)の浚渫粘土層の沈下予測と実測値との比較, 日本材料学会第15回地盤改良シンポジウム(投稿中).
- 3) 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.
- 4) 大月一真・西口松男・伊藤一典・大島昭彦・白神新一郎・稲垣祐輔・譽田孝宏(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, No.3-1.
- 5) 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.
- 6) 萩原侑大・林口美木・大島昭彦・大月一真・白神新一郎(2022): 夢洲2区(万博用地)の浚渫粘土層のPBD打設時の先端貫入抵抗に基づく沈下予測, 第15回地盤改良シンポジウム論文集(投稿中).

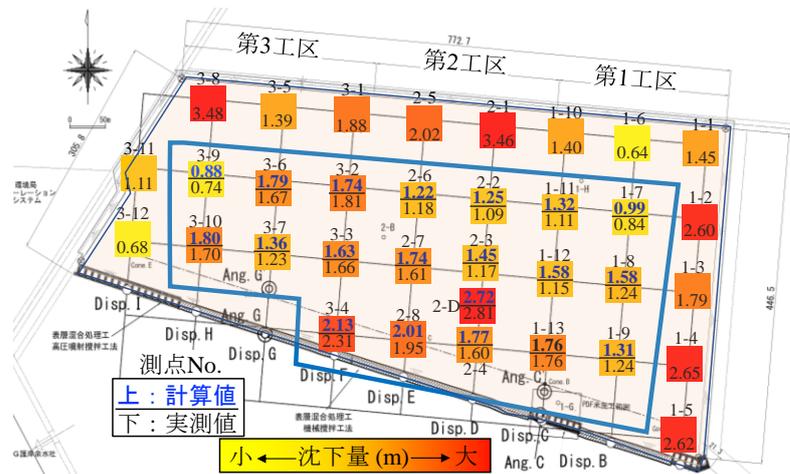


図1.2 2022年2月28日時点の沈下量