

PBD 打設機による軟弱改良地盤の土層分布の推定と層別沈下板の活用例

○大月一真¹・榑原司²・白神新一郎²・大島昭彦³

¹五洋建設株式会社・²錦城護謨株式会社・³大阪公立大学

1. はじめに

大阪市此花区の夢洲 2 区において、2025 年日本国際博覧会の開催に向け予定地の一部(平面積約 $A=300,000 \text{ m}^2$)を造成する工事を実施した。本工事は、自然地盤である沖積粘性土層(Ac)上に堆積した軟弱な埋立粘土層(Bc)に、プラスチックボードドレーン(PBD)を打設し、載荷重の盛土を造成することで Bc の圧密を促進させた。ここで、同区域内において沈下量が平面的に異なる発生要因を特定するため、Bc 内の土層構成を圧密層と非圧密層に分類し、圧密層の層厚 H と沈下量 S との関係を求めた。Bc 内の土層構成の分類においては、PBD 打設時の油圧抵抗値 P_M からコーン貫入抵抗値 q_c を推定する技術を活用し、土層構成を推定した。さらに、PBD 打設機を用いて設置した層別沈下板を活用し、地表面沈下板で得られた全層沈下量 S から Bc のみと Ac 以深の沈下量を分離した。本稿では、これらの PBD 打設機を活用した実測結果に基づき、夢洲 2 区内における Bc および Ac 以深の各沈下特性について報告する。

2. 夢洲 2 区土地造成工事 (H30 年度) 区域の地盤条件概要

本検討対象である夢洲土地造成工事 (2022 年 3 月完成) の平面図を図-1 に示す。当工事の着手前には、自然地盤である第 1 洪積砂礫層(Dg1, N 値=60) と沖積粘性土層(Ac, $c_u=107\sim 200 \text{ kN/m}^2$) の上に、人工的に敷砂層(Bs)を 1.0 m 程度敷設し、浚渫土(Bc, $c_u=2\sim 50 \text{ kN/m}^2$)が投入されていた。このうち Ac は、過去に層上半部にサンドドレーン(SD)を設置した上で Bc を受け入れたことにより、圧密が進行していた。区画①(図-1 水色領域)では、浚渫土の減容化のために Bc 下半部にプラスチックボードドレーン(PBD)を設置して、地下水位低下工法を併用して圧密促進させていた(図-2 参照)。一方、区画②(図-1 緑領域)では Bc の全層において未改良となっていた。この条件の下で、本造成工事は図-3 に示す工程に従い進めた。PBD 打設状況を写真-1 に、盛土造成完了時の状況を写真-2 に示す。

造成工事に伴う沈下量は、図-1 に示す 100 m 間隔に設置した地表面沈下板および図-1 赤字で示す位置に設置した Bc 下端に設置した層別沈下板を用いて計測し、PBD 打設後から工事完了後 8 ヶ月経過までの期間の実測値を取得した。

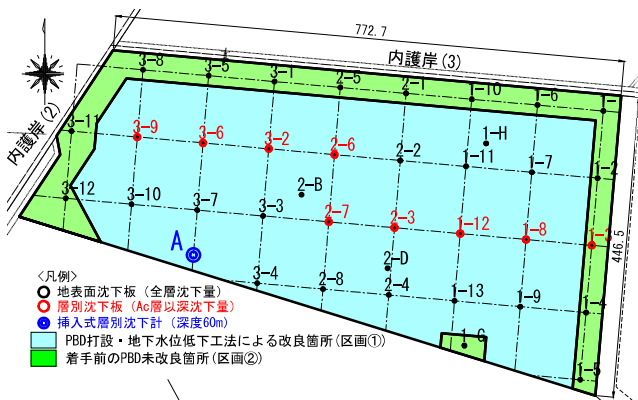


図-1 計測位置付近を含む平面図

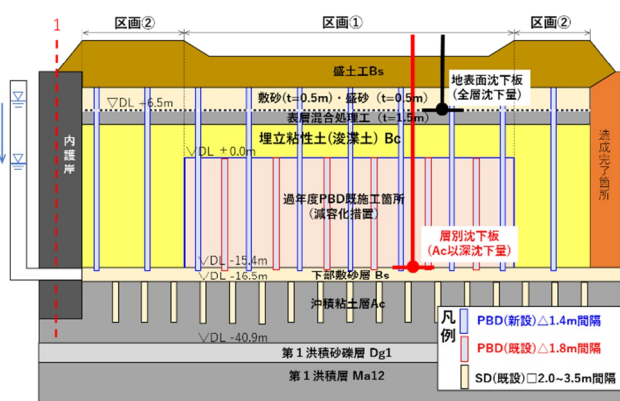


図-2 工事断面図

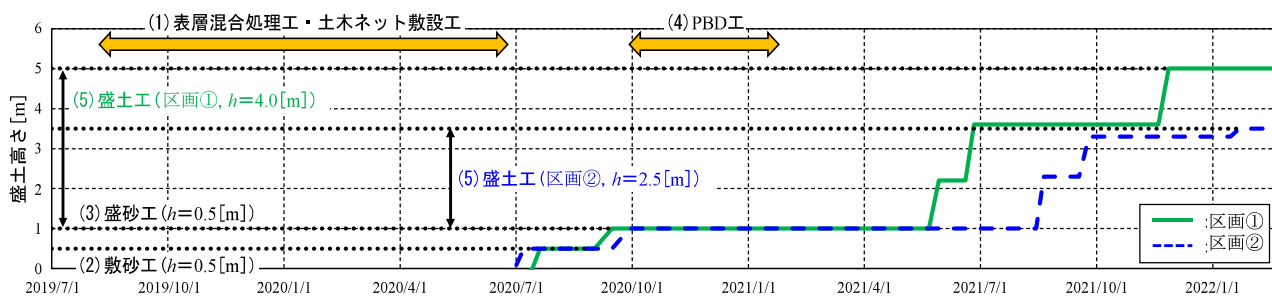


図-3 土地造成工事の施工工程

Estimation of Soil Layer Distribution of Soft Improved Ground by PBD Driving Machine and Usage of Stratified Settlement Plate

Kazuma Otsuki¹, Tsukasa Sakakibara², Shinichiro Shiraga², Akihiko Oshima³

(¹Penta-Ocean, ²Kinjo Rubber, ³Osaka Metropolitan University)

KEY WORDS: Soft ground, Consolidation settlement, Measurement management, Different settlement gage



写真-1 PBD 打設状況



写真-2 盛土造成完了

3. PBD 打設記録から推定した Bc 内土層構成と沈下量の関係 3.1 PBD 打設時の油圧貫入抵抗値に基づく土層の分類

夢洲 2 区の造成完了後から 7 ヶ月経過した 2022 年 11 月 2 日時点での全層沈下量を図-4 に示す。この結果、同じ区画①内で隣り合う沈下板 3-6 と 3-9 の全層沈下量 S は、それぞれ $S_{3-6}=2.13\text{ m}$ 、 $S_{3-9}=0.92\text{ m}$ と 1.21 m の差異が生じた。このような沈下量 S の違いには、区画別に Bc 内の圧密進行度が異なる他、Bc 内の砂質土の混入量や盛土層厚の違いによる影響が考えられる。なお、これまでの沈下量の計測結果より、PBD 打設後から 2022 年 11 月までの期間では、全層沈下量の 90% 以上が Bc の沈下量である。このため、本項においては、Bc の圧密沈下量に対する要因を分析することを目的とする。

この課題に対し、PBD 打設記録 (打設箇所の Bc 層厚および油圧抵抗値 P_M) を用いて Bc 内の圧密層と非圧密層の分類を試み、地表面沈下板付近の圧密層の層厚 H と沈下量 S との関係を求めた。具体的には、PBD 打設時のケーシング圧入に対する油圧抵抗値 P_M から静的コーン貫入試験の貫入抵抗 q_c を推定し、PBD 打設位置情報と連動させることで地盤の強度分布や土層分布を多次元的に図象処理するシステム¹⁾を活用している。 P_M から q_c への換算は打設機械ごとの公差を低減した萩原ら²⁾による手法を用いて定めた。得られた沈下板地点における q_c の鉛直分布を図-5 に示す。

図-5 において、Bc 内の軟弱粘性土層は $q_c=1.5\text{ MPa}$ 以下にあり、 $q_c=1.5\text{ MPa}$ を超える箇所にまとまった硬質土が存在している。そこで、 $q_c=1.5\text{ MPa}$ を閾値として非圧密層である硬質土 (砂質土層および表層混合処理工における改良土) と圧密層である軟弱粘性土に分類した。

3.2 PBD 打設記録から求めた夢洲 2 区の Bc 層厚と土層構成

夢洲 2 区内の Bc に 1.4 m 間隔、全 175,144 本の PBD を打設した記録を用いて、打設深度および油圧抵抗値 P_M を整理した。この結果、打設深度の平面図を図-6 に、Bc 内において圧密層 ($q_c=1.5\text{ MPa}$ 未満) と非圧密層 ($q_c=1.5\text{ MPa}$ 以上) に分類した断面図を図-7 (東西方向) および図-8 (南北方向) に示す。図-7 および図-8 には地表面沈下板地点における盛土層厚および 2022 年 11 月時点の全層沈下量 S を併記している。

Bc 内の非圧密層は、深度 0~2.5 m の範囲に敷砂と盛砂による砂層 (層厚 1.0 m) および表層混合処理工によるセメント固化改良土層 (層厚 1.5 m) があり、層内の中間および下部に砂質土が混在している。深度 2.5 m 以浅に圧密層として図象化された箇所が存在するが、これは表層混合処理工の改良土の強度が高く PBD 打設時にケーシングを貫入できない箇所を別途油圧アースオーガにより削孔したものである (削孔径 $\phi 300\text{ mm}$)。このため、深度 2.5 m 以浅は一律全域において非圧密層とみなしている。また、Bc の圧密を促進させる载荷盛土は PBD 打設後に敷均しをしたため、図-7 および図-8 には図象化していない。

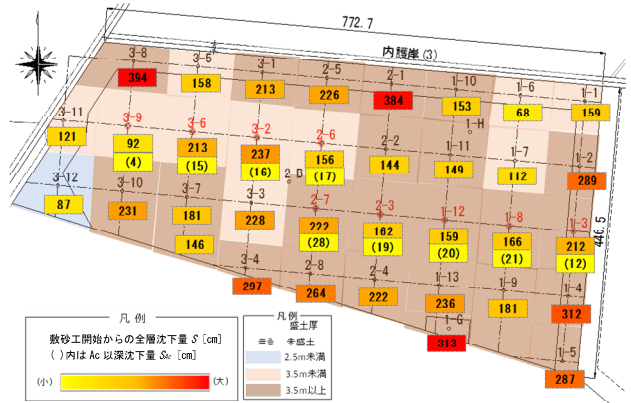


図-4 盛土層厚と沈下量平面図
(沈下量は 2022 年 11 月時点)

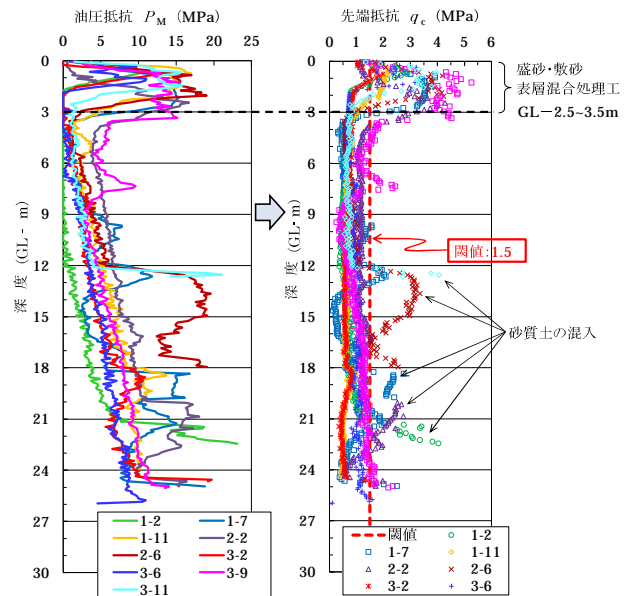


図-5 PBD 打設機による油圧抵抗値 P_M から換算した先端抵抗 q_c および土層区分の閾値の設定

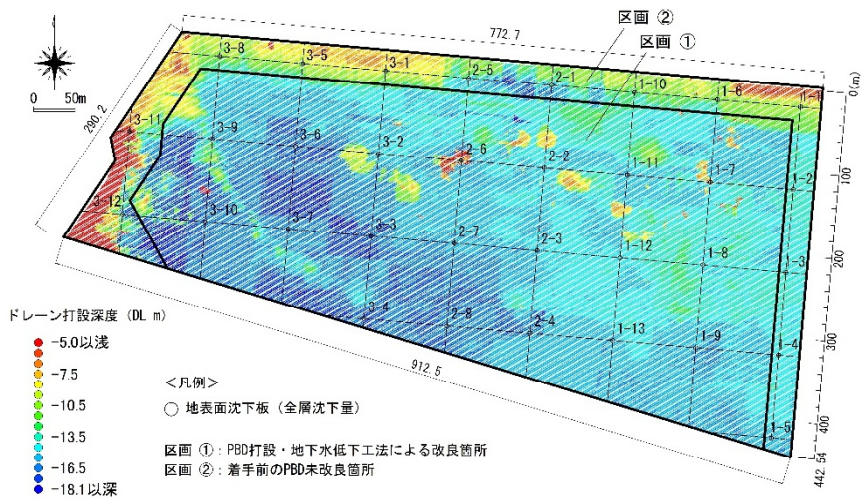


図-6 PBD 打設深度の平面分布図

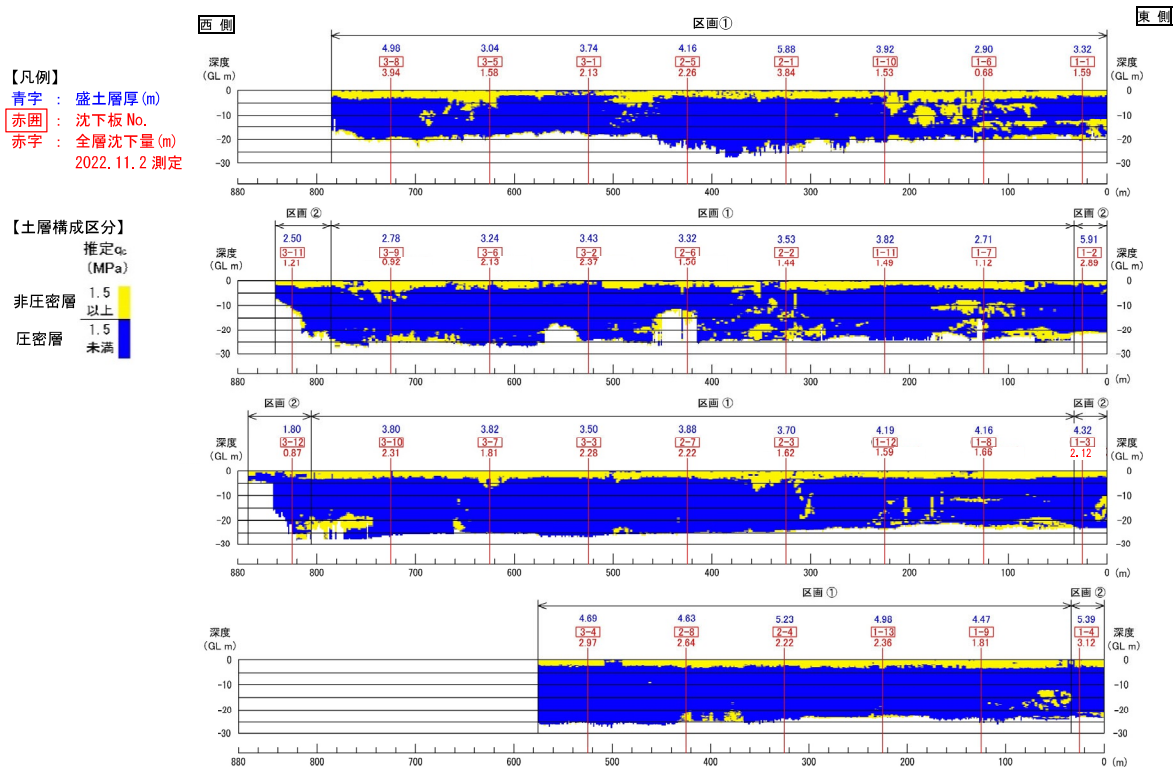


図-7 PBD 打設記録から求めた圧密層・非圧密層の土層構成図 (東西方向)

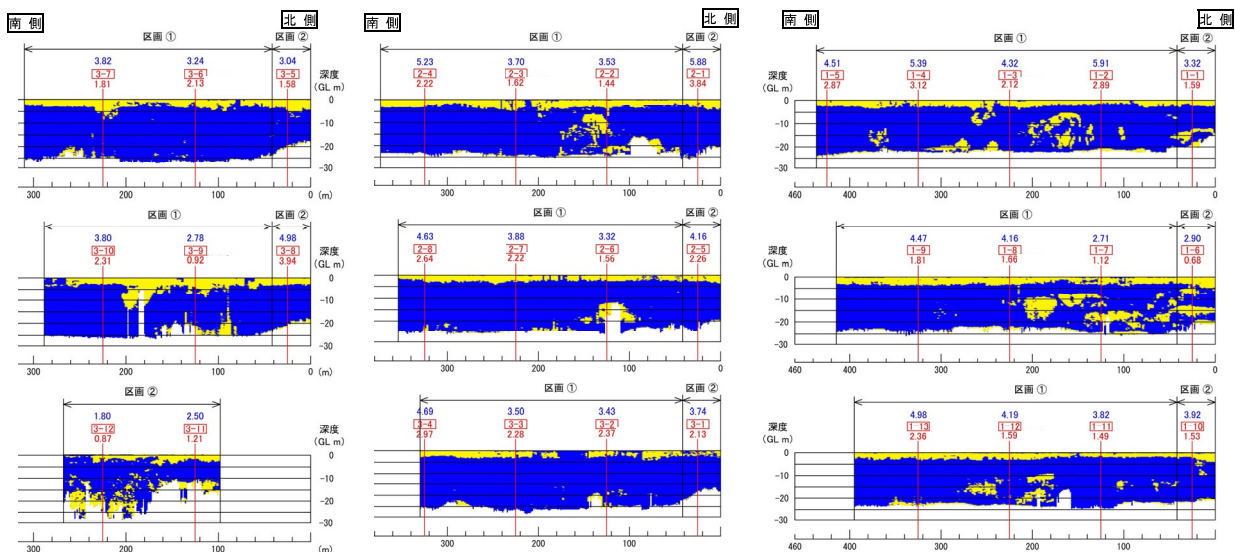


図-8 PBD 打設記録から求めた圧密層・非圧密層の土層構成図 (南北方向)

3.3 Bc 内の圧密層厚 H 、圧密圧力 p' と全層沈下量 S の関係

各沈下板地点での全層沈下量の実測値 S に不陸が生じた要因を明らかにするため、Bc 内の圧密層の厚さ H との関係性を求めた。図-9 に示すように、沈下板を中心とした 10 m 四方の柱状のブロックから $q_c=1.5$ MPa 未満の圧密層の体積を抽出し、Bc 内の圧密層の平均層厚 H を求めた。また、盛土の造成層厚に伴い発生する圧密圧力 p' が沈下板地点ごとに異なる点も S の違いに関係していると考えた。港湾施設における圧密沈下量を求める下式³⁾より、 C_c と U は場所や深度ごとに違いはあるものの、ここでは同一値と仮定し、 $S-H$ 、 $S-\log_{10}p'$ 、 $S-H \cdot \log_{10}p'$ の関係を整理した。

$$S_f = \frac{C_c}{1 + e_0} H \left(\log_{10} \frac{p'_0 + p'}{p'_0} \right) (1 - U)$$

ここに、 S_f : 複合地盤の沈下量(m)、 C_c : 圧縮指数、 e_0 : 原地盤の初期間隙比、 p'_0 : 初期圧力(kN/m²)、 p' : 圧密圧力(kN/m²)、 U : 圧密度である。図-10 に区画①、図-11 に区画②における全層沈下量の実測値 S と Bc 内の圧密層厚 H 、圧密圧力 p' との関係を示す。この結果、 S と H 、 S と $\log_{10}p'$ には一定の相関が認められた。図-10 の沈下板 2-6 や図-11 の沈下板 3-8 での S は、 H との関係では近似直線から逸脱して大きい値であるが、 $\log_{10}p'$ との関係では近似直線との乖離が小さいことが示された。

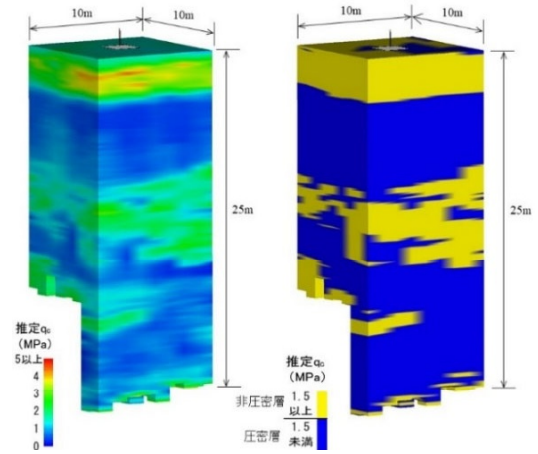


図-9 沈下板付近の圧密層の抽出例(沈下板 1-7)

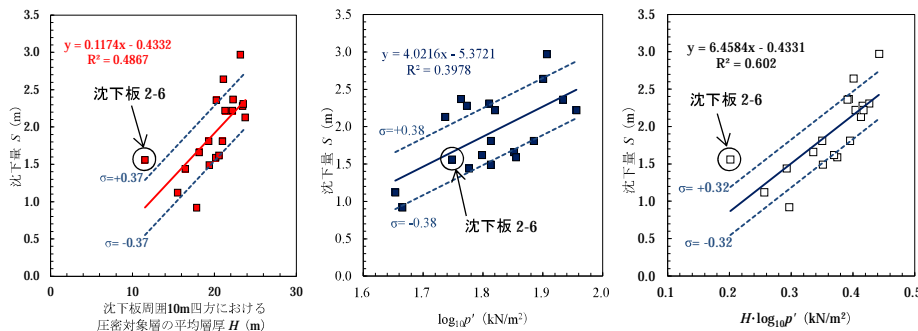


図-10 Bc 内の圧密層の平均層厚 H 、圧密圧力 p' と全層沈下量 S の関係 (区画①)

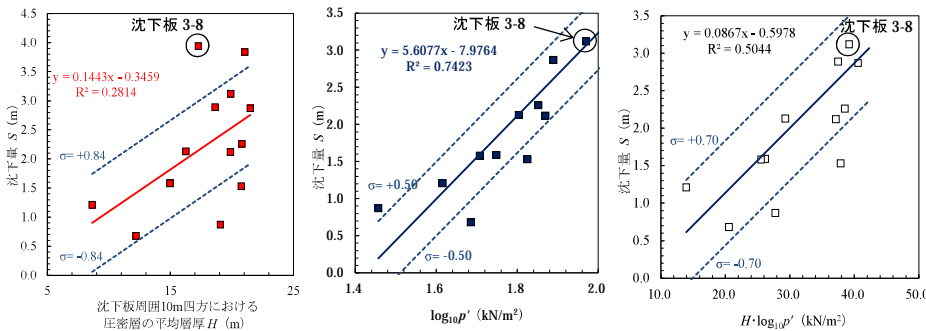


図-11 Bc 層内の圧密層の平均層厚 H 、圧密圧力 p' と沈下量 S の関係 (区画②)

図-10 および図-11 において、近似直線からの乖離幅の標準偏差 σ は、 $S-H$ のみの関係よりも $S-\log_{10}p'$ あるいは $S-H \cdot \log_{10}p'$ の方が小さい結果となった。図-12 は区画①において盛土層厚を 3.0 m から 4.0 m の間だけの $S-H$ の関係を抽出したものである。圧密圧力 p が大きく変わらない範囲に限定すると、 $S-H$ の相関性は高くなり、近似直線からの乖離幅の標準偏差 σ も小さい。

上記より、PBD 打設記録である油圧抵抗値 P_M から Bc 内の圧密層厚 H を抽出し、圧密圧力 p' を考慮することで、沈下量 S と相関性があることが示された。したがって、沈下量 S の平面的な違いには、Bc 内に混在する砂溜まり等の非圧密層の堆積層厚が影響していると考えられる。

この関係を用いることで、沈下計測地点間の実測沈下量および沈下量の将来予測値を PBD の打設記録により平面補間することを可能としている。沈下量を高い精度で補間するには、圧密圧力 p' 等のパラメーターを一定の範囲内に限定するか、各種パラメーターを考慮した相関を取る必要がある。

表-1 沈下板地点での沈下量 S および影響因子 (区画①)

沈下板 No.	圧密層体積比	Bc内圧密層層厚 H(m)	全層沈下量(実測値) S(m)	盛土層厚(m)	圧密圧力 P'(kN/m ²)
1-7	72%	15.52	1.12	2.71	45.03
1-8	78%	18.15	1.66	4.16	71.13
1-9	85%	20.98	1.81	4.47	76.71
1-11	84%	19.38	1.49	3.82	65.01
1-12	87%	20.19	1.59	4.19	71.67
1-13	86%	20.24	2.36	4.98	85.89
2-2	67%	16.47	1.44	3.53	59.79
2-3	84%	20.56	1.62	3.70	62.85
2-4	88%	21.31	2.22	5.23	90.39
2-6	65%	11.53	1.56	3.32	56.01
2-7	88%	22.20	2.22	3.88	66.09
2-8	83%	21.10	2.64	4.63	79.59
3-2	90%	22.29	2.37	3.43	57.99
3-3	89%	23.44	2.28	3.50	59.25
3-4	90%	23.19	2.97	4.69	80.67
3-6	88%	23.78	2.13	3.24	54.57
3-7	77%	19.32	1.81	3.82	65.01
3-9	73%	17.84	0.92	2.78	46.29
3-10	90%	23.54	2.31	3.80	64.65

表-2 沈下板地点での沈下量 S および影響因子 (区画②)

沈下板 No.	圧密層体積比	Bc内圧密層層厚 H(m)	全層沈下量(実測値) S(m)	盛土層厚(m)	圧密圧力 P'(kN/m ²)
1-1	73%	14.98	1.59	3.32	56.01
1-2	83%	18.64	2.89	5.91	102.63
1-3	86%	19.88	2.12	4.32	74.01
1-4	86%	19.90	3.12	5.39	93.27
1-5	87%	21.49	2.87	4.51	77.43
1-6	59%	12.20	0.68	2.90	48.45
1-10	86%	20.76	1.53	3.92	66.81
2-1	87%	21.05	3.84	5.88	102.09
2-5	88%	20.81	2.26	4.16	71.13
3-1	85%	16.26	2.13	3.74	63.57
3-5	74%	14.97	1.58	3.04	50.97
3-8	83%	17.26	3.94	4.98	85.89
3-11	70%	8.64	1.21	2.50	41.25
3-12	79%	19.06	0.87	1.80	28.65

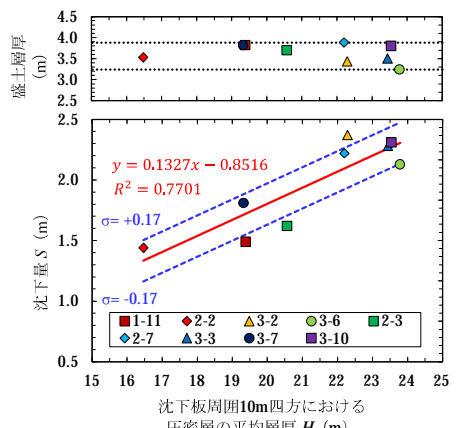


図-12 盛土層厚 3~4 m の $S-H$ の関係 (区画①)

4. PBD 打設機による層別沈下板の設置と計測値の活用

4.1 PBD 打設機による層別沈下板の設置

沈下性状が場所ごとに異なる Bc および Ac 以深の沈下量を分離して測定するため、図-1 の位置において地表面沈下板 (Bc 上端) および層別沈下板 (Bc 下端) の沈下量を計測した。層別沈下板の構造および設置方法は図-13 および既往文献⁴⁾を参照されたい。

沈下量の測定頻度は沈下初期である造成工事期間中は週 1 回、造成工事完了後は 2 ヶ月に 1 回とした。沈下量の初期値は敷砂層の敷均し開始時点を示す沈下量ゼロとし、工事期間中の測定は計測頻度を高めるため簡易に測定できるポータブル GPS 位置決め装置を使用し、造成工事完了後の計測はオートレベルを用いた 3 級水準測量と同等の精度の計測を行った。また、造成工事期間中には工事区域南側の端部変位計測を目的として設置した観測孔 (φ116 mm) を使用した挿入式層別沈下計を使用した計測を同じ頻度で実施した (図-1 測点 A)。

4.2 層別沈下板の沈下計測値に関する考察

地表面沈下板および層別沈下板による計測値と造成工事による盛土層厚の変化を図-14 に示す。図-14 では、層別沈下板により得られた Ac 以深沈下量 S_{Ac} の大小のグループに分類した。また、地表面沈下板による全層沈下量 S の実測値および各沈下量の差異から求めた Bc 沈下量 S_{Bc} を併記した。この結果、全層沈下量 S は場所ごとに大きく異なっており、計測期間内で 90~240 cm の沈下を計測し、造成工事終了後の 2022 年 5 月以降に沈下速度が低減した。沈下速度の低減は 2023 年 4 月時点で圧密度 90% に達するように設計された Bc 沈下量 S_{Bc} が卓越していることが要因にある。一方で、Ac 以深沈下量 S_{Ac} は、造成工事期間中の 12~15 ヶ月間で 5~20 cm、工事完了後の 8 ヶ月間で 5~15 cm であった。 S_{Ac} は、計測期間内で沈下速度の低下が認められず、全層沈下量 S とは異なる性状を検知している。

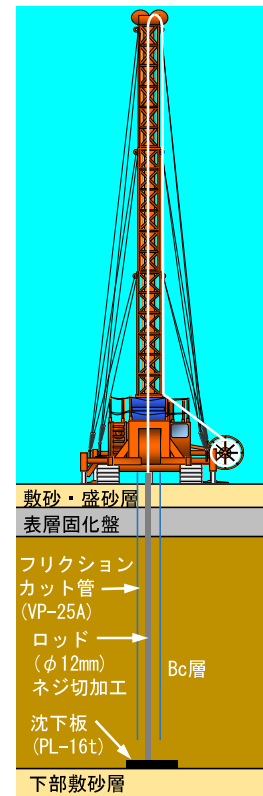
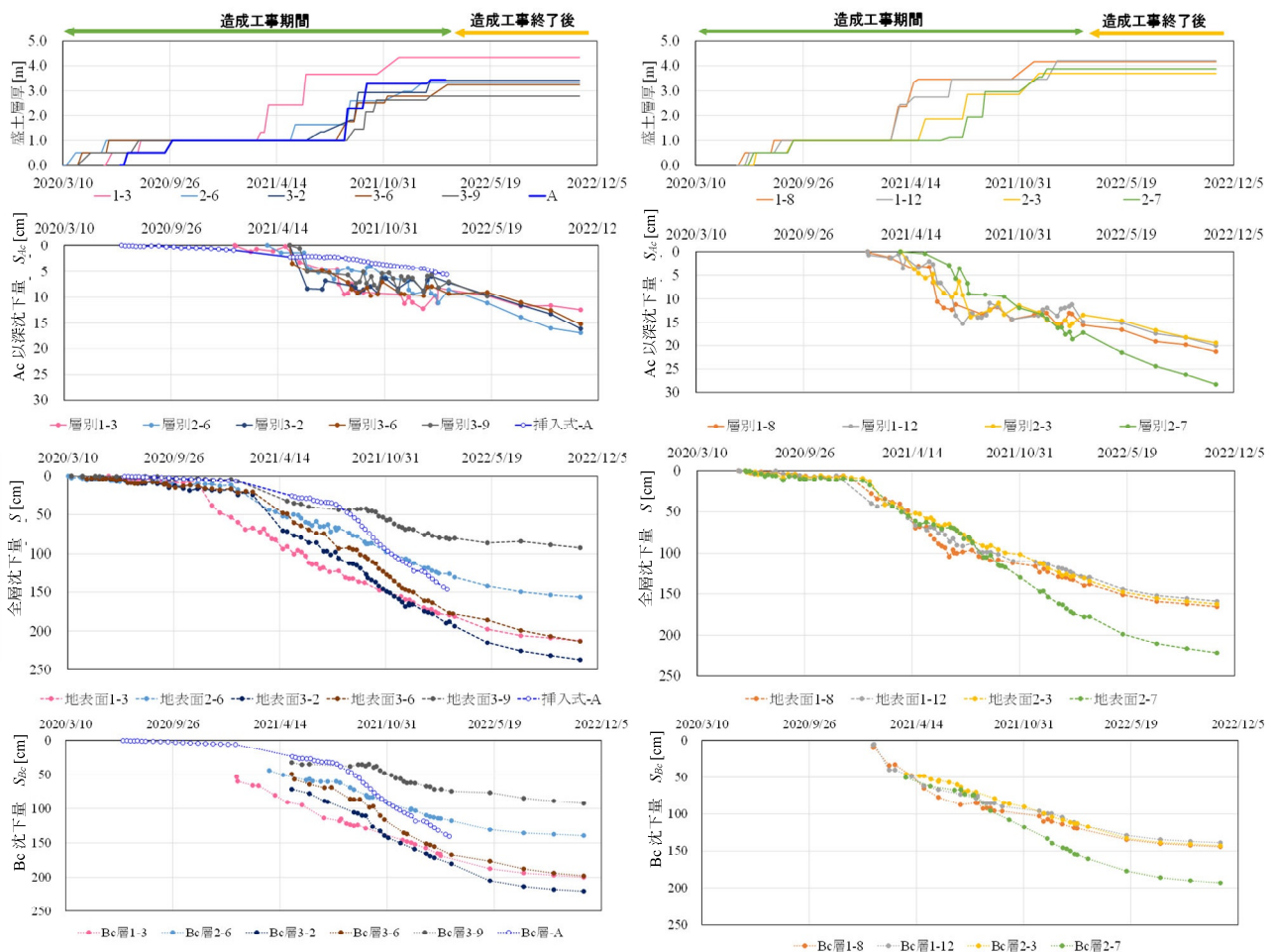


図-13 Bc 層下端の層別沈下板設置図



(a) Ac 以深沈下量 S_{Ac} が小さいグループ

(b) Ac 以深沈下量 S_{Ac} が大きいグループ

図-14 地表面沈下板および層別沈下板による沈下量実測値および盛土層厚の変化

4.3 層別沈下計 A 地点との比較

層別沈下板と挿入式層別沈下計(A 地点) の計測値を比較すると、A の S_{Ac} 以深沈下量 S_{Ac} は他の層別沈下板に比べ小さい。A 地点が盛土南端部であるため、 Ac 以深に作用する盛土荷重は他地点に比べ小さいことが起因していると考えられる。また、各層別沈下板の沈下量は第 1 洪積層 Ma_{12} 以深の沈下量も含んでいるが、挿入式傾斜計 A の沈下計測値は Ac のみの値であり洪積層以深の沈下量を含んでいないことも沈下量が小さい要因にある。しかしながら、近隣の舞洲の沈下計測実績⁵⁾ では、洪積層の沈下量が Ac の沈下量に対して約 13% であり、今回は沈下初期であることから、洪積層の沈下量の影響は小さいと考えられる。

4.4 Ac 層以深沈下量 S_{Ac} に関わる要因の考察

Ac 以深沈下量 S_{Ac} が比較的大きいグループの位置は、図-15 より夢洲 2 区内の中央から東側に偏っていることが示された。本工事では盛土造成高は沈下後の標高を確保するため、 Bc 沈下量 S_{Bc} が大きい箇所には盛土層厚を大きく造成し、区域東側の盛土層厚は西側比べて総じて大きくなった。したがって、 Ac 以深沈下量 S_{Ac} が大きい箇所は、盛土層厚に伴う圧密圧力 p' が増大したことが影響していると考えられる。

また、区画①の Bc は、過去に PBD 打設および地下水位低下工法により圧密促進することで浚渫粘土が減容化され、密度が高まって圧密圧力 p' が増加したことが考えられる。これにより、区画②(沈下板 1-3) よりも Ac 以深沈下量 S_{Ac} が大きくなったことが考えられる。

図-16 は、盛土造成に伴う圧密圧力 p' と S_{Ac}/H_{Ac} の関係を示している。ここで、 S_{Ac} は Ac 以深沈下量、 H_{Ac} は Ac 層厚を示す。盛土南端部の A 地点の p' は受圧面積を考慮し他地点の 60% に低減している。この結果、 S_{Ac} と $\log_{10} p'$ には一定の相関関係が認められた。したがって、層別沈下板による計測値が適切に場所ごとの特性に応じた Ac 以深沈下量 S_{Ac} を捉えたと考えられる。

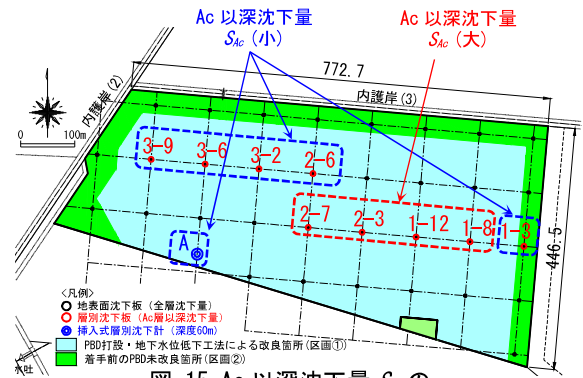


図-15 Ac 以深沈下量 S_{Ac} の大小グループの位置関係

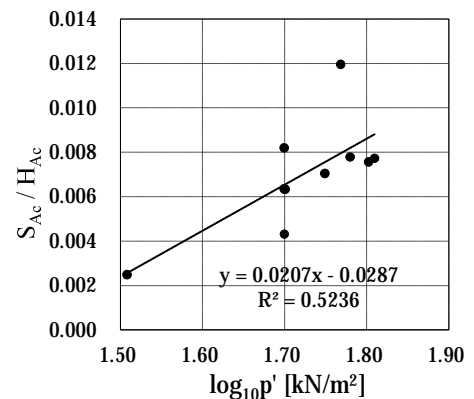


図-16 層別沈下板により計測した S_{Ac}/H_{Ac} と $\log_{10} p'$ の関係

5. おわりに

夢洲 2 区における PBD 工において、PBD 打設機を活用した下記の試みを行った結果を整理する。

- (1) 埋立粘性土層 Bc の土層構成を PBD 打設時の油圧抵抗値 P_M から圧密層と非圧密層に区分した土層構成を推定した。この結果、沈下板を中心に 10m 四方の圧密層の平均層厚 H と沈下量 S には相関性があり、 S の平面的な違いには砂溜まりなどの非圧密層の存在が影響していることが示された。また、圧密圧力 p' を考慮することで、 H と S との相関性を高められることが示された。この活用により、PBD 打設記録を用いて沈下計測地点間の沈下量を一定の精度で平面補間することが可能と考えられる。
- (2) PBD 打設機により Bc 下端に設置した層別沈下板による沈下計測結果より、地表面沈下板で得られた全層沈下量 S から Bc と Ac 以深の各沈下量に分離した。 Bc が圧密度 90% に達するのに従い全層での沈下速度が低下しているのに対し、 Ac 以深の沈下速度は低下せず、 Bc と分離した沈下性状を検知した。また、夢洲 2 区内の Ac 以深沈下量 S_{Ac} は、区画別の Bc 内の圧密進行状態や載荷盛土の層厚に伴う圧密圧力 p' と関係があることが示された。

謝辞：本稿の執筆および調査にあたり、大阪港湾局にご協力を頂いた。ここに付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 平田昌史・白神新一郎・清水英樹・福田淳・川鍋修・野村忠明：プラスチックボードドレーン打設機の油圧抵抗を利用した地質推定手法の開発，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol.67, No.3, 358-371, 2011
- 2) 萩原侑大・林口美木・大島昭彦・大月一真・白神新一郎：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量予測，第 16 回地盤改良シンポジウム論文集，pp.217-224, 2022
- 3) 公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.826-827, 平成 30 年 5 月
- 4) 大月一真・榊原 司・大川浩司・明石実可子・大島昭彦：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, 2022
- 5) 社団法人土質工学会：海底地盤 大阪湾を例として，p.341, 1995