

## 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

○大月一真<sup>1</sup>・西口松男<sup>1</sup>・伊藤一典<sup>1</sup>・大島昭彦<sup>2</sup>・白神新一郎<sup>3</sup>・稲垣 祐輔<sup>4</sup>・譽田 孝宏<sup>4</sup>

<sup>1</sup>五洋建設・<sup>2</sup>大阪公立大学・<sup>3</sup>錦城護謨・<sup>4</sup>地域地盤環境研究所

### 1. はじめに

大阪市此花区の人工島である夢洲は 1977 年に埋立免許取得後、土地造成と浚渫土の受入れが進められた。その後、2025 年日本国際博覧会(大阪・関西万博)の開催に向けて、予定地の一部である夢洲2区のうち約 30 ha において土地造成工事を実施した。本工事は、浚渫土が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、載荷重として盛土を造成することで Bc 層の圧密を促進させた。盛土造成時には、特に、盛土法尻付近において軟弱地盤の側方流動や円弧すべりの発生が懸念されたため、地盤特性に着目した弾塑性 FEM 解析による事前検討<sup>1)</sup>をおこない、実施工時の地盤変状を計測管理<sup>2)</sup>した。また、盛土造成後に発生する沈下に伴う不陸を極力小さくなるような造成高を求めることを目的に、沈下量計測に PBD 打設機を用いて設置した計測機器を活用した ICT 施工<sup>3)</sup>を実施したので、これらの実施内容について示す。

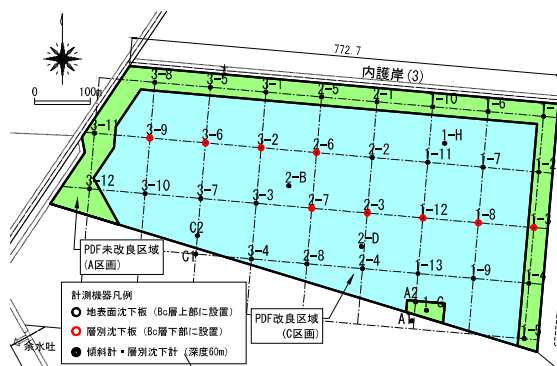


図-1 計測位置付近を含む平面図

### 2. 本工事の特徴

検断断面付近の平面図を図-1 に示す。当地盤は、自然地盤である第1洪積砂礫層(Dg1層,  $N$ 値=60)と沖積粘性土層(Ac層,  $c_u=107\sim 200$  kN/m<sup>2</sup>)の上に、人工的に敷砂層(Bs層)を1.0 m程度敷設し、浚渫土(Bc層,  $c_u=2\sim 50$  kN/m<sup>2</sup>)を投入している。このうちAc層は、過去に層上半部にサンドドレーン(SD)を設置した上でBc層を受け入れたことにより、圧密が進行している。C区画(図-1 青領域)では、浚渫土の減容化のためにBc層下半部にプラスチックボードドレーン(PBD)を設置して、地下水低下工法を併用して圧密促進させている(図-2 参照)。一方、A区画(図-1 緑領域)ではBc層の全層において未改良となっている。土地造成工事は、図-3 に示す施工工程にしたがって進めた。施工端部における側方流動等を抑制するために、C区画のBc層(一部)とA区画のBc層(全層)を高圧噴射攪拌工法により地盤改良した。また、両区画では、Bs層とBc層(全層)に盛土に伴う圧密促進のために、PBDを新たに打設した。

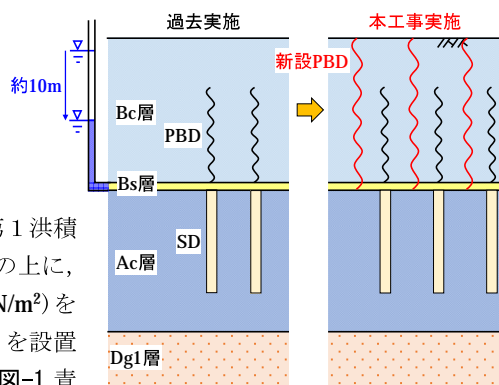


図-2 地盤改良概念図

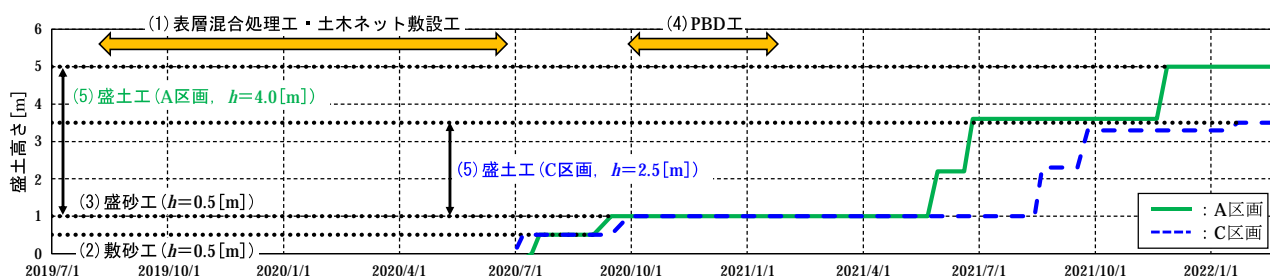


図-3 土地造成工事の施工工程

### 3. 盛土端部の計測管理

#### 3.1 現場計測の概要

盛土端部における計測機器設置位置を図-4 に示す。計測点は、過去にBc層の一部をPBD工で改良したC区画と、Bc層全層未改良のA区画の2箇所において、法尻付近と法肩から10~30 m付近で7深度に配置した。これらの計測点に、傾斜計により地盤の水平変位量を、層別沈下計により鉛直変位量(隆起量, 沈下量ともに計測可能)を手動計測することによって、地盤内の水平変位量 $\delta$ と沈下量 $S$ を同時に測定できる。

#### Identification and Management of Ground Deformation in the Yumeshima 2 Ward Land Development Project

Kazuma Otsuki<sup>1</sup>, Matsuo Nishiguchi<sup>1</sup>, Kazunori Itou<sup>1</sup>, Akihiko Oshima<sup>2</sup>, Shinichiro Shiraga<sup>3</sup>, Yusuke Inagaki<sup>4</sup>, Takahiro Konda<sup>4</sup>  
(<sup>1</sup>Penta-Ocean Construction, <sup>2</sup>Osaka City University, <sup>3</sup>Kinjo Rubber, <sup>4</sup>Geo-Research Institute)

KEY WORDS: Embankment, Soft ground, Ground deformation, Measurement Management, ICT Construction

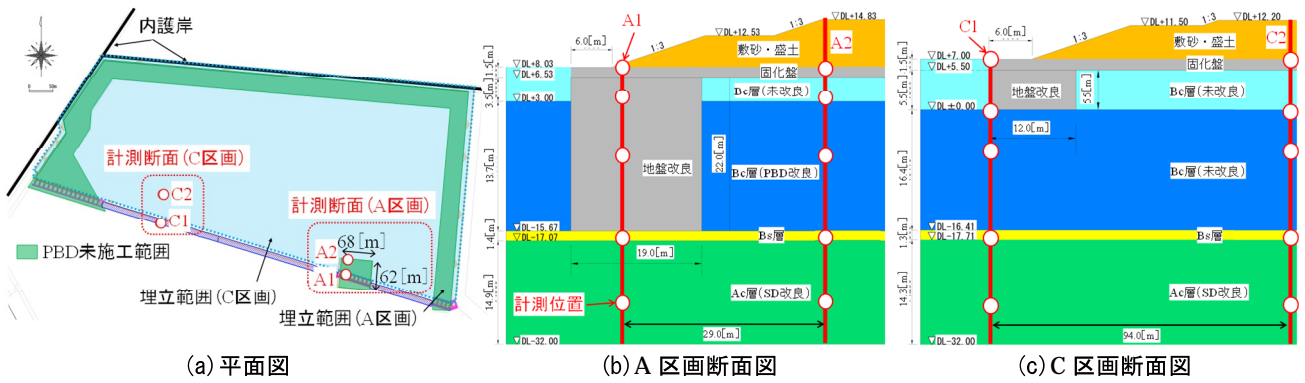


図-4 盛土端部における計器設置位置図

### 3.2 計測結果の検討

各計測断面における水平変位および沈下量の経時変化図を図-5に、各分布図を図-6に示す。いずれの測点においても、敷砂工から盛砂工まで大きな変位はなく、PBD工においてもA2で0.6mの沈下が発生する以外では変化が見られなかった(図-6参照)。一方、盛土工では施工端部のA1とC1ではそれぞれ0.20mと0.15mの水平変位が発生し、内陸部のA2とC2ではそれぞれ2.18mと1.46mの沈下が発生した(図-5参照)。つまり、施工端部では水平変位の方が大きく発生しているのに対して、内側部では逆に沈下量の方が卓越する挙動を示した。また、施工端部における水平変位は、A1もC1でもBc層上部を中心に発生した。これは、内側部の沈下に伴って、盛土直下地盤が施工端部方向に押し出されて水平変位が発生していること、過去に実施したPBDによる改良効果の違いによることが原因として考えられる。

これらの地盤内計測結果に基づいて、富永・橋本の方法( $S-\delta$ 法)<sup>4)</sup>および松尾・川村の方法( $S-\delta/S$ 法)<sup>5)</sup>を用いて計測管理を実施した。これらの計測管理手法は、当該現場のような浚渫土上部に盛土工事を実施する際に適用する方法の1つであり、2つの手法を併用することによって施工端部における側方流動等の兆候を確認することにした。なお、管理基準値は、各文献に基づいてそれぞれ $\Delta\delta/\Delta S=0.7$ 、 $p_b/p_t=0.9$ を仮定した。

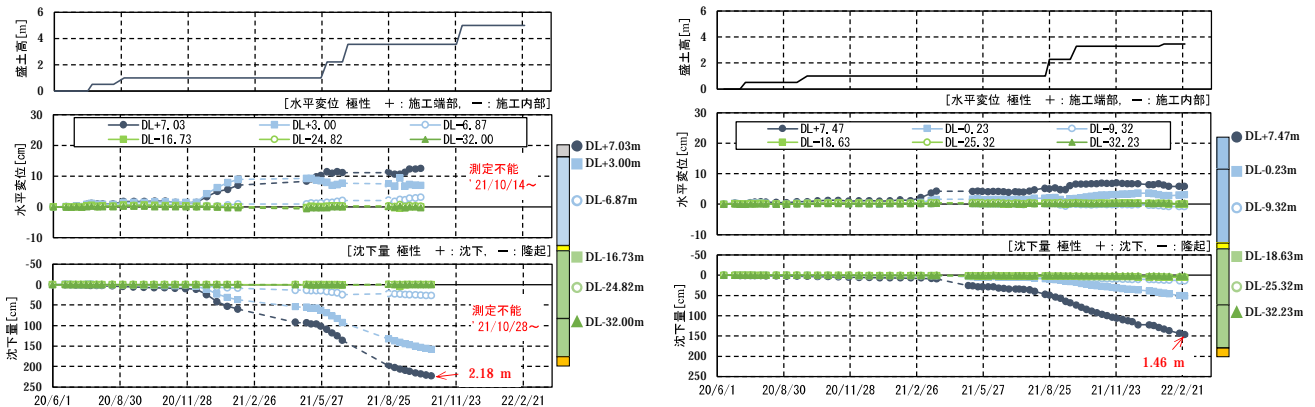


図-5 水平変位および沈下量の経時変化図(左側：A2、右側：C2)

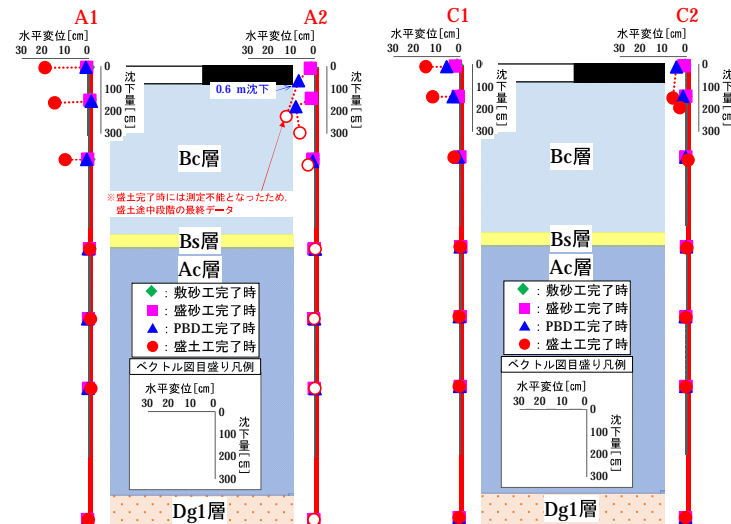


図-6 水平変位および沈下量の分布図(左側：A区画、右側：C区画)

各計測管理結果を図-7～図-8に示す。図-7からもわかるように、盛土に伴って沈下量と水平変位量の割合が急激に増加することなく、ほぼ一定の関係で沈下が卓越する結果となった。また、図-8では、敷砂工完了時～盛土完了時を通して管理基準線の内側にあり、施工進行に伴って水平変位量と沈下量の割合は徐々に低下する結果となった。以上のことから、いずれの計測管理においても安定した状態に収束し、管理基準値を超過するような側方流動等の兆候を示す挙動は確認できなかった。なお、図中の※は、盛土完了時には測定不能となったことから、盛土途中段階での最終データを表示している。

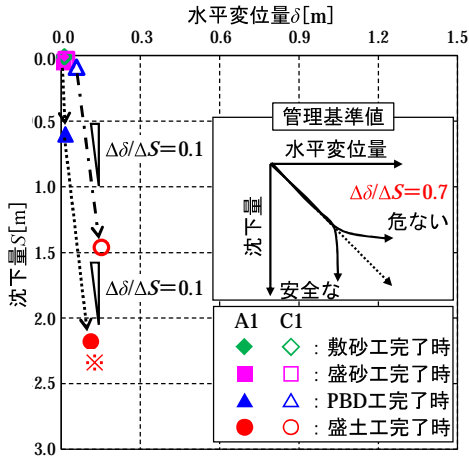


図-7 富永・橋本の方法( $S-\delta$ 法)による計測管理結果

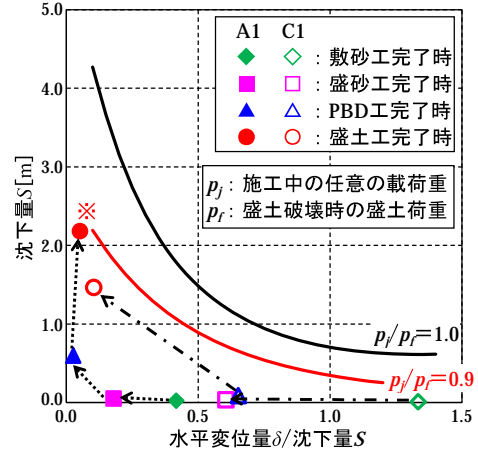


図-8 松尾・川村の方法( $S-\delta/S$ 法)による計測管理結果

#### 4. 軟弱な浚渫粘土上に造成した盛土地盤の変形挙動解析

##### 4.1 解析条件

有限要素メッシュ図を図-9～図-10に示す。解析は、平面ひずみ条件下のもと、側方境界および下方境界にそれぞれ静水圧条件および排水条件の水理境界を設定し、地盤の構成則として関口・太田モデル<sup>6)</sup>を用いた2次元弾塑性FEM解析(土～水連成解析)を実施した。弾塑性地盤材料パラメータは、Bc層およびAc層から採取した乱れの少ない試料を用いた段階荷重圧密試験および定ひずみ速度圧密試験と三軸圧縮試験(CU条件)の結果から決定した(図-11, 表-1参照)。なお、盛土層、盛砂・敷砂層、Dg1層(第1洪積砂礫層)および地盤改良部については、弾性材料を仮定した。

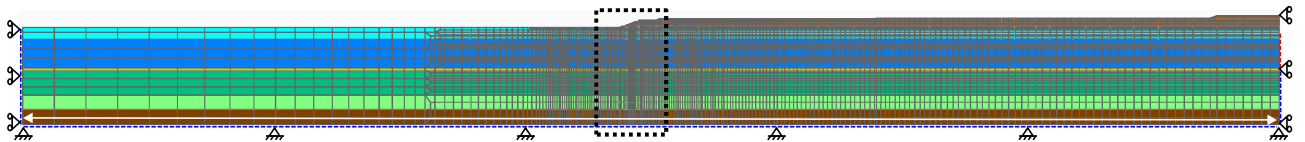
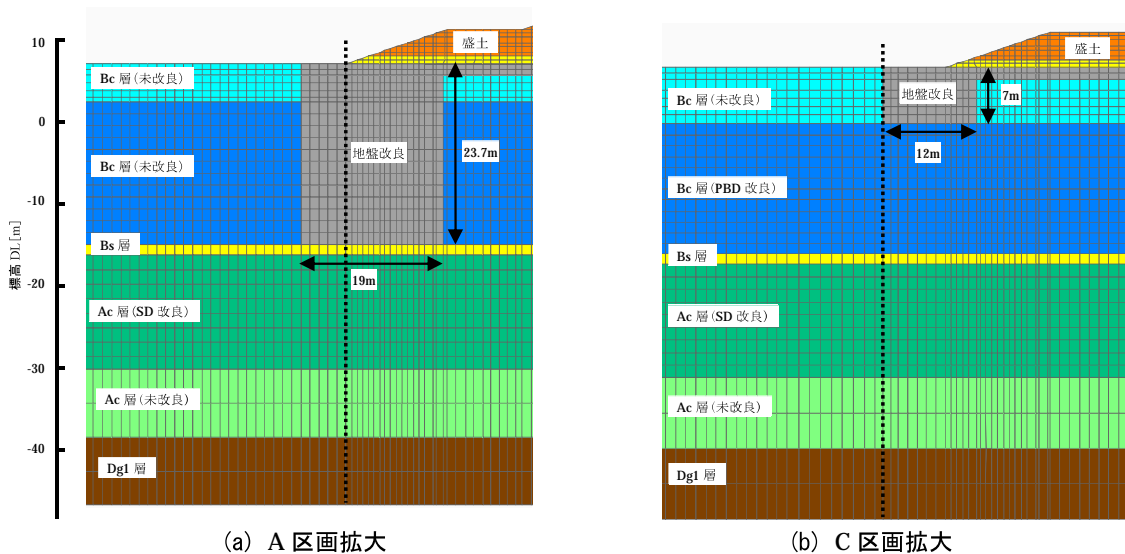


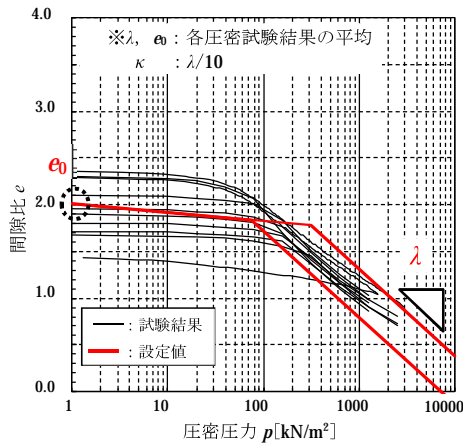
図-9 有限要素メッシュ図(全体図)



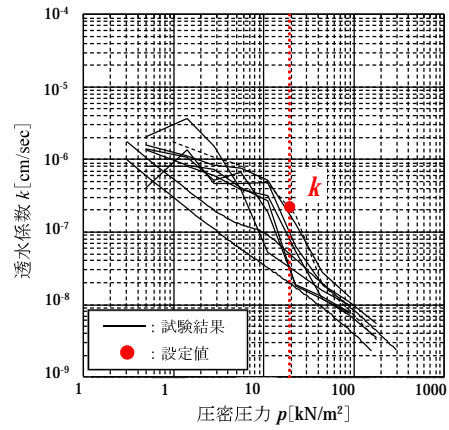
(a) A区画拡大

(b) C区画拡大

図-10 有限要素メッシュ図(図-9破線部拡大)



(a) 間隙比～圧密圧力関係



(b) 透水係数～圧密圧力関係

図-11 圧密試験結果(C区画, Bc層(PBD改良))

表-1 FEM解析に用いた地盤材料パラメータ

土層	弾塑性材料パラメータ																				
	平均 N値	単位体積 重量 $\gamma_t$ [kN/m³]		変形係数 $E$ [kN/m²]		ポアソン 比 $\nu$		透水係数 ( $\times 10^{-9}$ ) $k$ [m/sec]		静止 土圧係数 $K_0$		圧縮指数 $\lambda$		膨潤指数 $\kappa$		限界状態 係数 $M$		過圧密比 OCR		初期 間隙比 $e_0$	
		A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C
区画																					
盛土	—																				
盛砂・敷砂	—	18.0		11900		0.33		120000		—		—		—		—		—		—	
固化盤	—	4.1		20400		0.30		13.0		—		—		—		—		—		—	
Bc層(未改良)	—	3.2	4.1	—	—	0.43	0.42	13.1	—	0.75	0.72	0.48	0.43	0.05	0.04	0.55	0.61	1.0	2.61	2.62	
Bc層(PBD改良)※	—	4.5	5.5	—	—	0.41	0.38	6.3	2.2	0.69	0.61	0.44	0.40	0.04	0.04	0.69	0.89	1.0	2.6	2.06	2.01
Bs層	17	10.0		11900		0.33		1.2		—		—		—		—		—		—	
Ac層(SD改良)	—	6.6		—		0.36	0.38	0.3	0.7	0.56	0.62	0.31	0.34	0.03	0.03	1.03	0.88	1.1	2.7	1.86	1.54
Ac層(未改良)	—	6.6		—		0.36	0.36	0.4	2.2	0.56	0.56	0.17	0.13	0.02	0.01	1.03	1.02	1.4	2.7	1.15	0.92
Dg1層	60	10.0		168000		0.33		1.2		—		—		—		—		—		—	

※: Bc層は, C区画では下半分を改良し, A区画では全層未改良である。

#### 4.2 FEM解析結果と計測結果の比較・検討

各区画断面の法尻付近における水平変位分布の比較図(盛土完了時)を図-13に示す。C区画断面での計測値は, Ac層以深でほとんど発生せず, Bc層で最大水平変位量0.15mが発生した。一方解析値は, 計測値よりも過大となっているものの, Bc層にて水平変位量が大きくなる挙動については, 定性的に類似傾向にあった。解析値が計測値よりも大きい理由は, 地盤改良をBc層に実施していることから, 盛土に伴ってBc層に発生したせん断ひずみが地盤改良領域の下側に回り込むように発達したためと考えられる(図-14参照)。

A区画断面では, 解析断面と計測断面で盛土中央付近におけるBc層の性状が異なるものの, 法面付近の条件は同じであることから, 参考までに比較した。その結果, 計測値はAc層以深でほとんど発生せず, Bc層ではAc層から連続してほぼ直線的な変形挙動を示し, 最大水平変位量は0.20mであった。一方, 解析値はAc層から大きく変位しているものの, Bc層だけの水平変位量に着目すれば, 定性的, 定量的に同程度であった。Ac層の解析値が大きくなった理由としては, 計測断面付近の実地盤よりも軟質に評価している可能性が考えられる。つまり, 実地盤では地下水低下工法を併用して圧密を促進させた結果, Ac層は上載荷重以上の有効応力が载荷したため, 地下水低下工法終了後には過圧密状態に移行したものと考えられる。これは, Ac層の過圧密比がA区画とC区画で同程度に過圧密であると仮定した場合, 計測値と良い対応関係にあることから推察できる(図-13 橙色破線参照)。

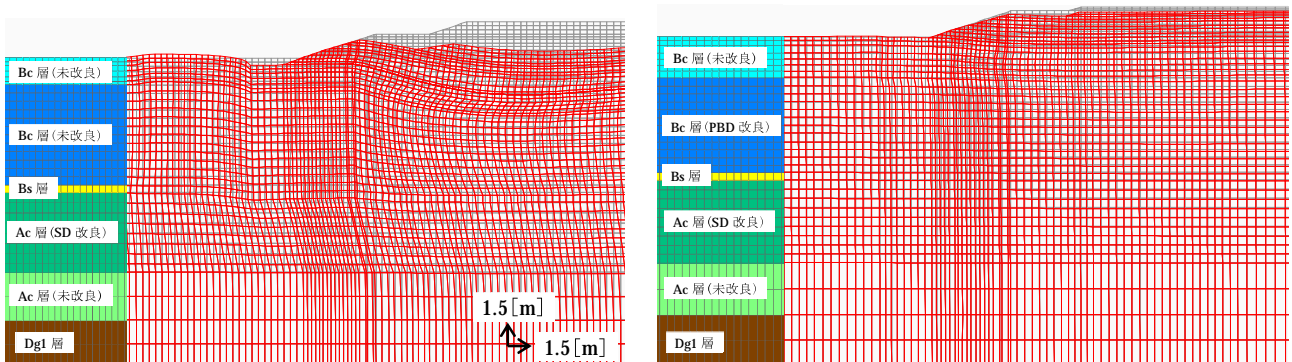


図-12 全体変形図(左側: A区画拡大版, 右側: C区画拡大図)



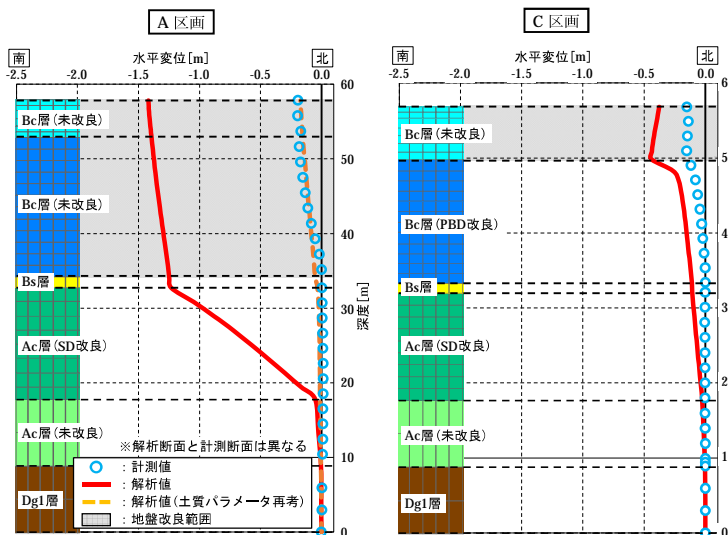


図-13 盛土尻付近における水平変位分布図(盛土完了時)

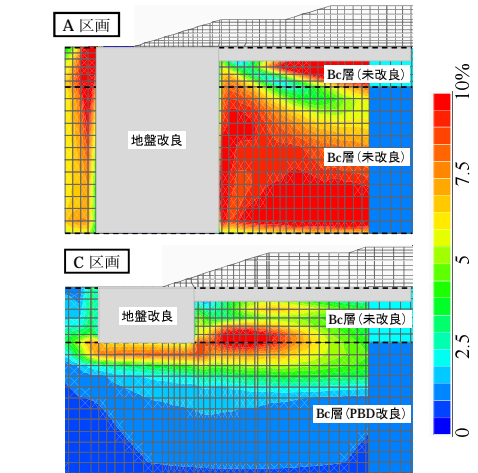


図-14 Bc層せん断ひずみ分布図(盛土完了時)

## 5. Bc層下部に設置した沈下計測機器の設置とその活用法

### 5.1 PBD打設機を活用した沈下計測機器の設置

場所ごとに異なる Bc 層の沈下量を正確に把握するため、図-1 に示す位置の地表面沈下板と層別沈下板を 2 週間に 1 回の頻度で継続的に計測した。層別沈下板の設置構成図を図-15 に示す。層別沈下板は 200 mm 四方、厚さ 16 mm の鉄板とし、PBD 打設機のケーシングパイプ下端より Bc 層内に圧入して下部敷砂層上端に設置した。沈下板の中央から鉛直方向のロッド(φ12 mm)とフリクションカット管(VP-φ25A)を接続し、盛土地表面上に突出させた。ロッドとフリクションカット管は PBD 打設機のリーダー上端よりケーシングパイプ内にワイヤーを通して電動ホイストで引き上げることで沈下板圧入と並行して継足すことで 20 m を超える Bc 層厚分を設置した。この方法により、Bc 層のみとそれ以上の層別の沈下値を分離して計測することを可能とした。

### 5.2 沈下計測値に基づく将来予測と盛土造成高の管理

盛土造成後 3 年間の短期的な沈下量の将来予測をおこなうため、層別沈下板 9 地点による Ac 層以深の実測沈下量と PBD 打設日から起算した経過日数との関係を線形近似で求めた(図-16)。測定値にばらつきがみられるが、Ac 層に設けられたサンドドレーン(φ400 mm、設置間隔 3.5 m)と測定地点との位置関係が影響したと考えられる。このため、Ac 層以深の沈下量は全 9 地点による近似直線(図-16 赤色破線)により求めた。全層沈下量から Ac 層以深の沈下量を差引くことで、Bc 層のみの実測沈下量とした。Bc 層の実測沈下量より造成工事の進捗に伴う盛土層厚の変化に合わせて段階的に双曲線法による将来予測をおこなった。この結果に基づき、盛土層厚と予測沈下量との関係を求めた(図-17)。

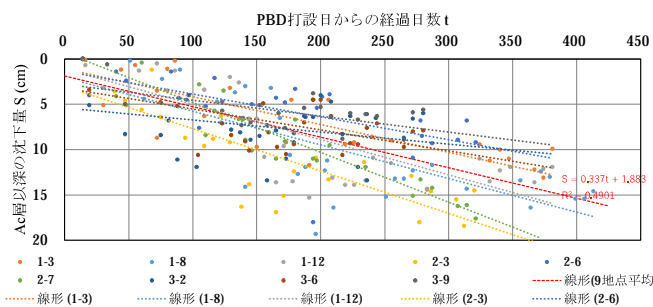


図-16 層別沈下板による Ac 層以深の沈下量

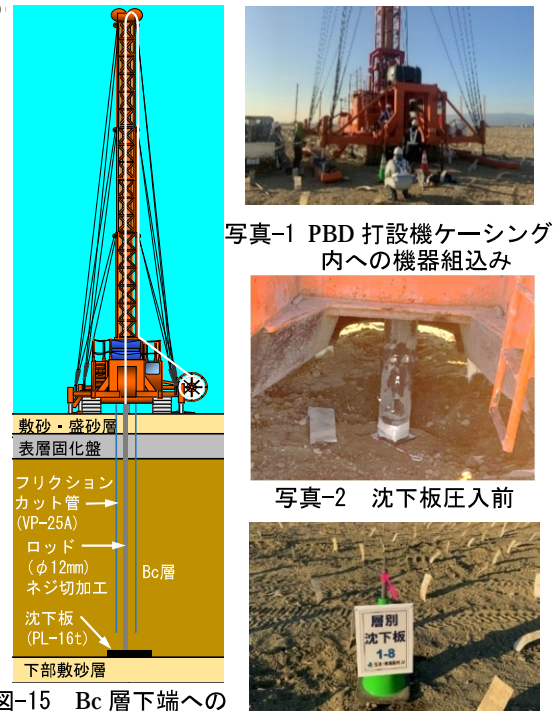


図-15 Bc層下端への沈下板設置図

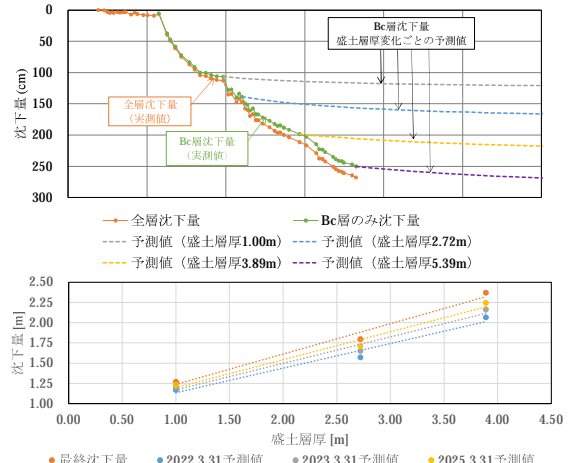
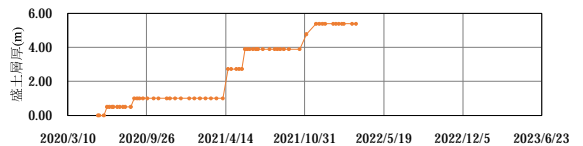


図-17 Bc層の実測沈下量と盛土施工段階毎の将来予測(沈下板1-4地点)

写真-1 PBD打設機ケーシング内への機器組込み

写真-2 沈下板圧入前

写真-3 沈下板圧入完了

設置した沈下板 37 地点において盛土層厚と沈下量の予測値の関係を求めた結果、盛土の造成天端高を図-18 のように定めた。盛土工事を先行する第 1, 2 工区の天端高を DL+10.8 m とし、後工程で Bc 層厚が小さい第 3 工区を DL+10.4 m とすることで、工事完了時の 2022 年 3 月時点で標高が同等となることを想定した。また、沈下板 1-G 地点では沈下量が大きいため、盛土造成高を周囲より 70 cm 高い DL+11.5 m とした。敷均し作業にはブルドーザに施工段階ごとの盛土形状の 3D 設計データに合わせてブレードが自動制御するマシンコントロール機能を使用した(写真-4)。モニタ上に示される設計データの造成高になるまで敷均し、沈下速度が低下するまで沈下量を計測する方法を繰り返した。設定仕上げ高まで盛土の造成が完了した後も沈下量の計測を継続し、その後の将来予測をおこなった。この結果、2023 年 3 月末時点の Bc 層の圧密度は沈下板の全地点で要求された 90% 以上に達することを確認した。また、造成天端の高低差は仕上げ時点で最大 110 cm の設定としたが、2023 年 3 月末で 74 cm になるなど不陸が低減する傾向にある(図-19)。

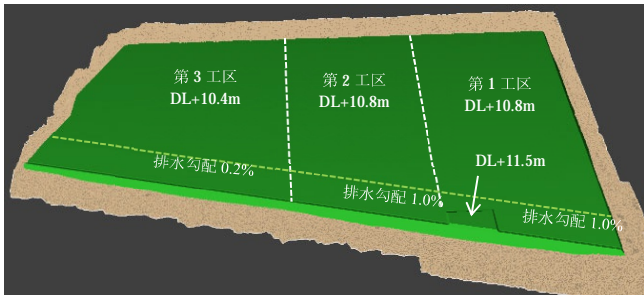


図-18 盛土造成天端高の設定

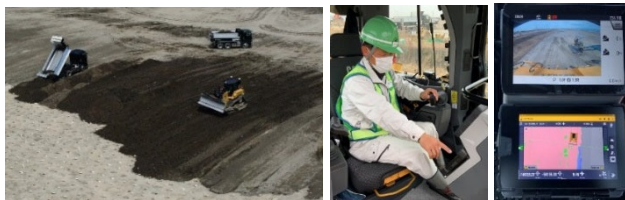


写真-4 盛土敷均し状況(マシンコントロール機能使用)

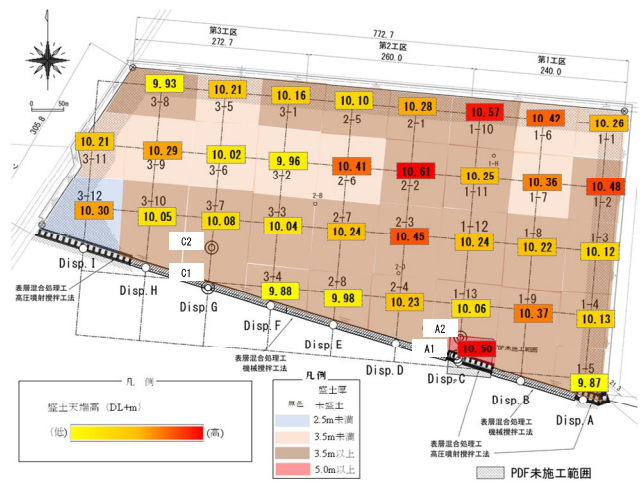


図-19 盛土造成天端高の予測値(2022年2月時点計測値に基づく2023年3月末時点予測値)

## 6. おわりに

軟弱な埋立粘土地盤上において、盛土時の地盤挙動の予測および計測管理を実施した結果より、以下の結論を得た。

- 1) 盛土時における軟弱地盤の変位計測をおこなった結果、盛土端部では水平変位の方が、内陸部では沈下の方が卓越する挙動を示した。端部の挙動は、内側部の沈下に伴って盛土直下地盤が施工端部方向に押し出されたことが原因として考えられる。ただし、2つの計測管理手法を併用して施工管理を実施した結果すべて基準値内に収束していることから、懸念していた側方流動等の兆候を示すことなく安全に施工を終えることができた。
- 2) 盛土時の Bc 層の挙動について FEM 弾塑性解析を実施した結果、解析値は計測値よりも過大に評価するものの、埋立粘土層の水平変位分布は定性的に再現できることを示した。また、全層未改良区画(A 区画)における沖積粘土層の地盤材料パラメータを再考することにより、計測値を再現できることも示した。
- 3) PBD 打設機を用いて Bc 層下端への層別沈下板設置をおこない Ac 層以深の沈下量を計測することで、軟弱な Bc 層のみの沈下量を把握した。その結果、精度の高い沈下量の将来予測が可能となり、沈下後に不陸を低減する盛土造成の計画立案に活用した。

謝辞：本論文の執筆において大阪港湾局に多大なご協力を頂いた。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 稲垣祐輔・譽田孝宏・大月一真：臨海地区における盛土地盤の変形挙動に関する検討，土木学会第 77 回年次学術講演会(投稿中)
- 2) 大月一真・伊藤一典・中野梢・譽田孝宏・稲垣祐輔・辻貴博：臨海地区の土地造成工事における盛土端部の計測管理，土木学会第 77 回年次学術講演会(投稿中)
- 3) 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(投稿中)
- 4) 富永真生・橋本正治：側方変位の現地計測による盛土の施工管理について，(社)土質工学会「土と基礎」，Vol.22, No.11, pp.43-51, 1974
- 5) 松尾稔・川村国夫：軟弱地盤上の盛土施工に関する施工管理図，(社)土質工学会「土と基礎」，Vol.26, No.7, pp.5-10, 1978
- 6) Iizuka and Ohta: A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987