

図8 相関係数 α の検討結果

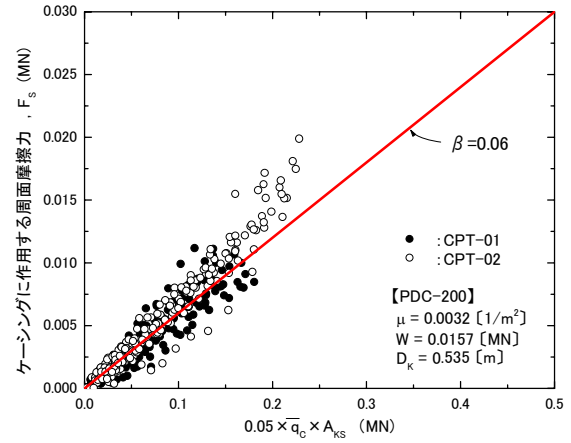


図9 相関係数 β の検討結果

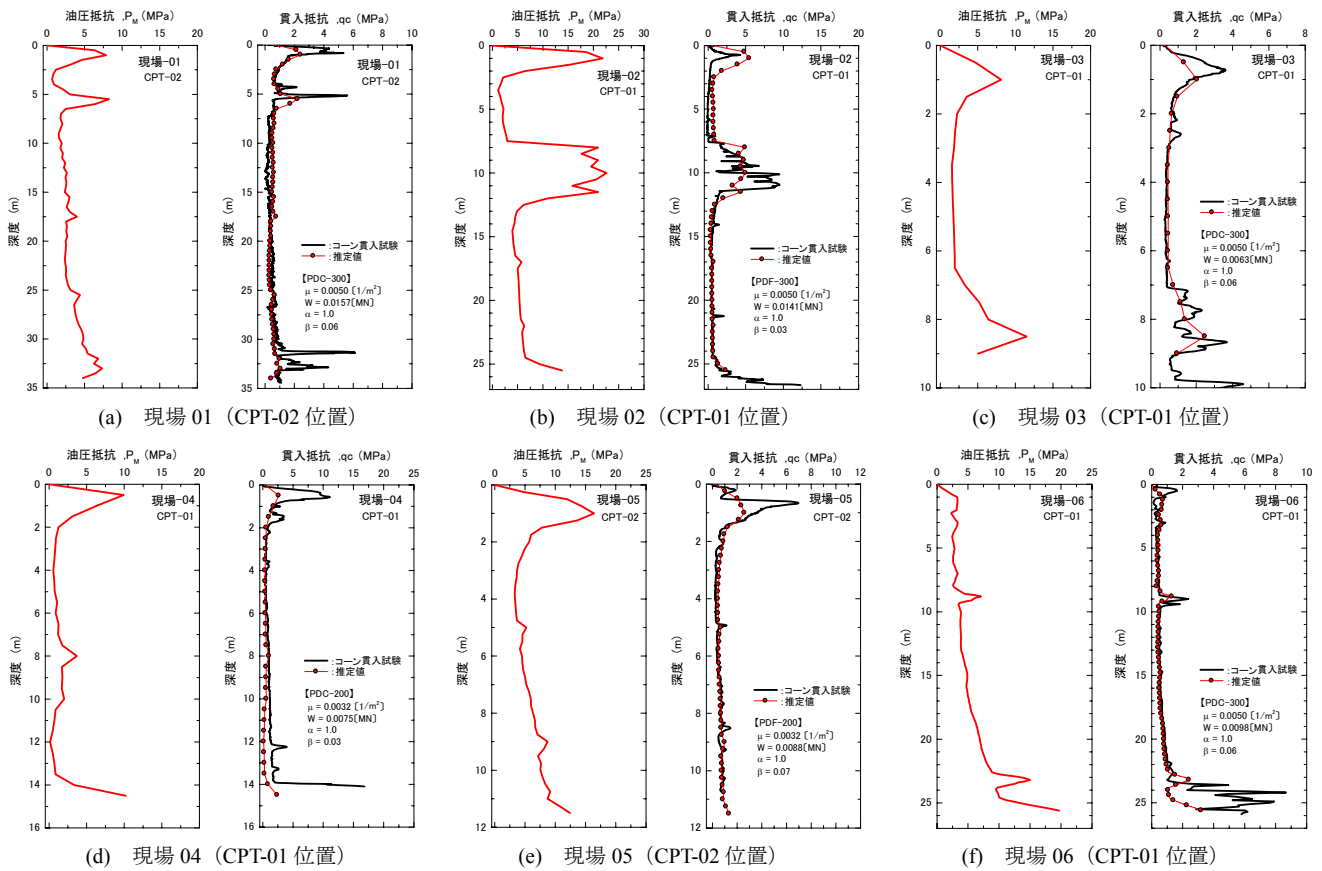


図10 ケーシングの押し込み・引抜き試験による油圧抵抗深度分布

として、試験結果を整理した図である。若干バラツキはあるものの、両者の間には比例関係が成り立つことがわかる。なお、補正係数 β はケーシングと地盤の摩擦係数の影響、周辺地盤のリモールドの影響等を考慮した値であるため、対象地盤の地質の違いによって影響を受けるものと考えられる。今回試験を実施した地盤では、補正係数 β は図9より概ね0.06と求められる。

2.4 地盤強度推定式の適用性

式(11)に示す地盤強度推定式の適用性・汎用性を検討するため、6箇所の異なるPBD施工現場に対してコーン貫入抵抗の算定を試みた。図10は、PBD打設機の油圧抵抗から算定した貫入抵抗と、コーン貫入試験結果との比較であ

る。油圧抵抗から算定した貫入抵抗は、事前調査として実施したコーン貫入試験結果とほぼ一致しており、地盤強度推定式の実現場に対する適用性・有用性が確認できる。

2.5 地盤強度分布図の作成手法

PBD工法では、通常0.5~1.5m程度の間隔で多数のPBDが打設される。このため、地盤強度推定式を用いて算定した貫入抵抗を、PBDの打設位置情報を基に繋ぎ合わせることで、地盤内の強度分布(貫入抵抗分布)を連続的かつ多次元的に描くことが可能である。

PBD打設機の油圧抵抗は、施工中すべてのPBDに対して記録される。このため、地盤の強度分布を作成するには、膨大なデータ量の油圧抵抗をプログラム等により一括処

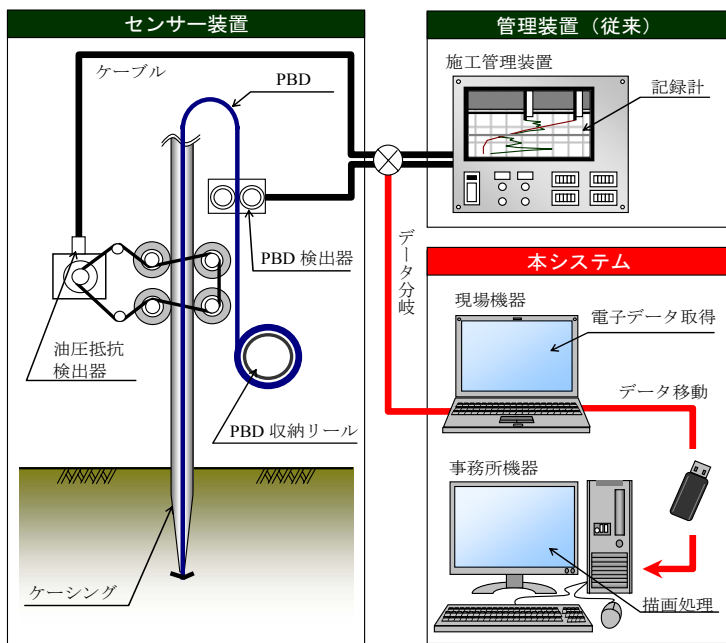


図 11 地盤強度分布図作成の流れ (文献 9 に加筆)



図 12 対象現場位置図



写真 3 向笠地区における PBD 施工状況

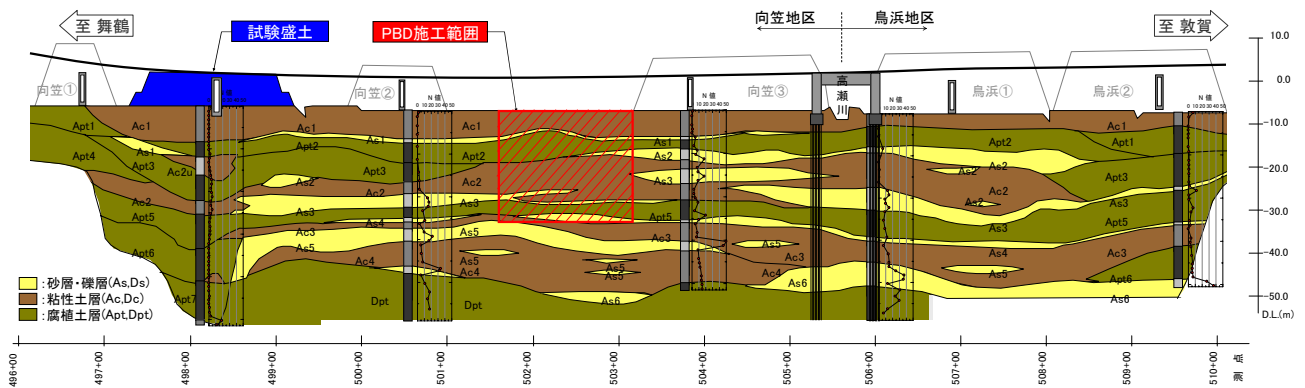


図 13 向笠地区の地質想定縦断面図

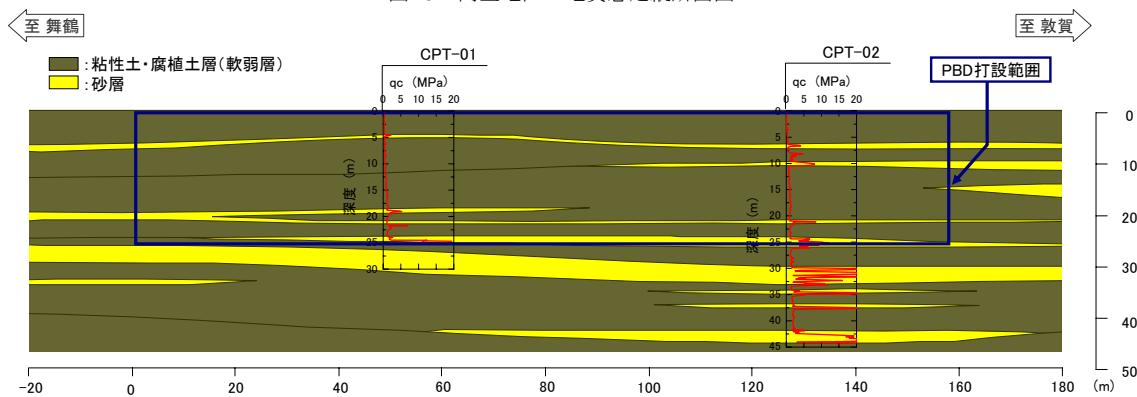


図 14 PBD 施工範囲の地質想定縦断面図と事前調査位置

理する必要がある。しかし、既存の PBD 打設機に搭載されている管理装置の多くはアナログ式(記録紙への出力のみ)であるため、施工時の油圧抵抗をプログラム処理することが困難である。そこで、図 11 のように管理装置に繋がるケーブルを分岐させ、油圧抵抗を電子データとして別途パソコンにて取得し、地盤強度推定式を用いてリアルタイムで貫入抵抗を算定した。また、この貫入抵抗データと PBD 打設位置データを事務所パソコンにて集計し、対象地盤の地質分布等を図化処理するシステムを作成³⁾し、実際

の現場に適用した。

3. 実現場における強度分布・地質分布の推定

3.1 現場概要

実現場の PBD 施工に対して、PBD 打設機の油圧抵抗から地盤内の強度分布・地質分布を推定し、その有効性を検討した。検討対象とした現場は、図 12 に示す舞鶴若狭自動車道三方インターチェンジ工事(福井県三方上中郡若狭町)の向笠地区で実施した PBD 施工¹⁰⁾である。図 12 に示

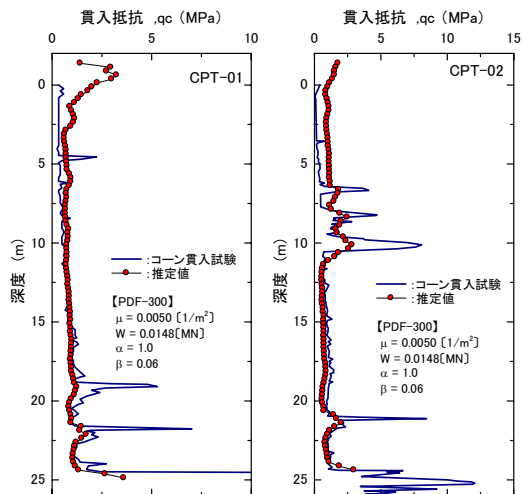


図 15 推定した貫入抵抗とコーン貫入試験の比較

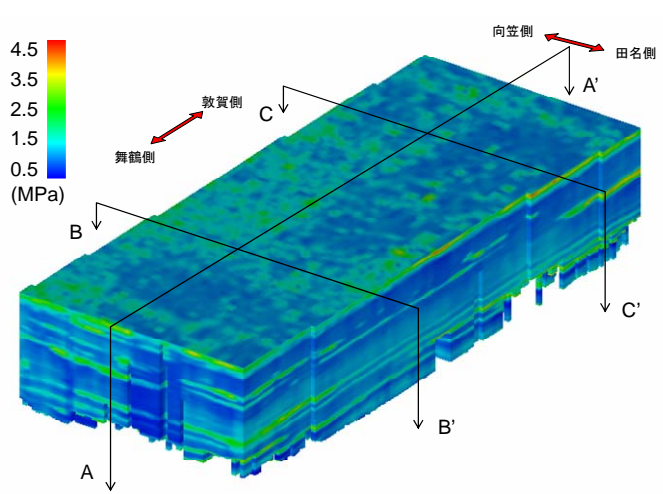


図 16 推定した貫入抵抗の分布 (3次元)

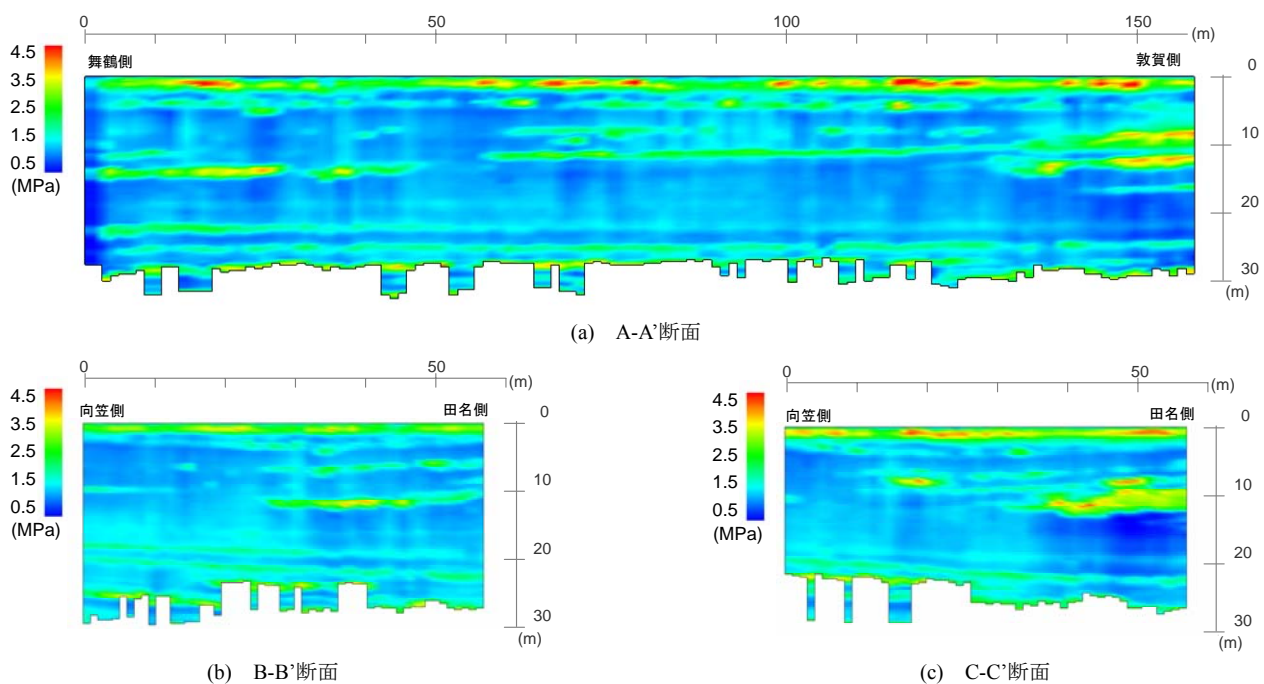


図 17 推定した貫入抵抗の分布 (2次元)

すように、施工位置は三方五湖に近接しているため、非常に軟弱な地盤が広く分布している地域である。図 13 は、向笠地区の地質想定縦断面図である。PBD 工法は、向笠地区のほぼ中間位置（延長約 160m、幅約 60m）で施工している（写真 3 参照）。この図に示すように、向笠地区では軟弱な粘性土・腐植土が深度 30m~40m 付近まで厚く堆積した超軟弱地盤帯である。同じ向笠地区で実施した試験盛土施工（図 13 参照）では、複雑な地質分布の影響により、大規模な沈下や周辺地盤の変形が盛土片側に集中する特殊な傾向が見られた^{11), 12)}。このため、今回の PBD 施工においても、想定以上の大規模な不等沈下や変形の集中が発生することが懸念された。図 14 は、図 13 に示した地質想定縦断面図から PBD 施工範囲を抜粋したものである。PBD の配置は、この地質想定縦断面図を基に、深度 25m 付近までの軟弱層を対象として 1.2m×1.2m の正方配置で設計・施工されている。しかしながら、図 14 中に示したよ

うに PBD 打設範囲では静的コーン貫入試験がわずか 2 箇所しか実施されておらず、この地質想定図が実際の地盤を忠実に再現したものであるとは言い難く、設計した PBD の配置や圧密放置期間が適切であるかの判断は、事前の調査結果のみでは困難である。

3.2 油圧抵抗を用いた地盤強度分布の推定

図 15 は、油圧抵抗から推定した貫入抵抗と、事前調査で実施された 2 箇所の静的コーン貫入試験結果（図 14 参照）を比較したグラフである。PBD を打設する際には、表層に敷砂が施工されているため、敷砂の層厚分だけ深度を補正し比較している。油圧抵抗から推定した貫入抵抗は、砂層部分で実際より小さめに推定されているものの、静的コーン貫入試験結果とほぼ一致しており、推定した地盤強度の精度は十分あると考えられる。

図 16 は、油圧抵抗から推定した貫入抵抗 (PBD 施工 7107

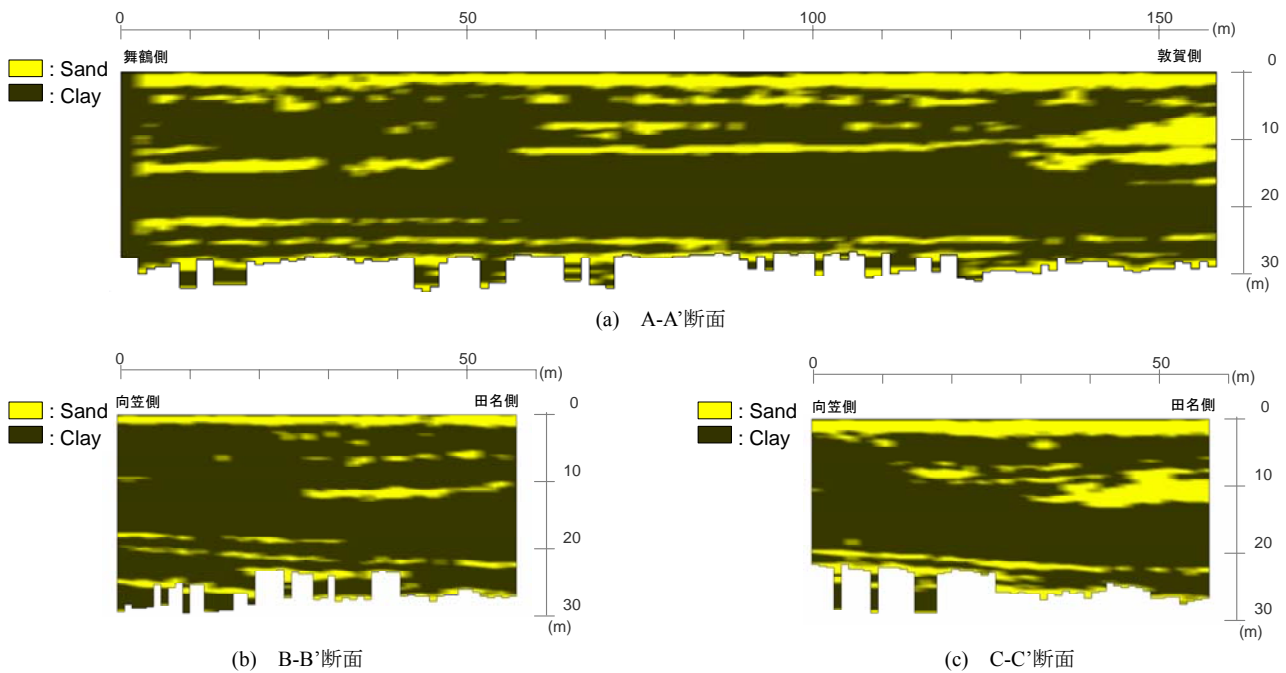


図 18 貫入抵抗分布から推定した地質断面図

本分) と PBD の打設位置情報から、改良範囲の地盤強度 (貫入抵抗) 分布を図化处理したものである。PBD の打設間隔が非常に密 (1.2m×1.2m の正方配置) であるため、地盤の強度分布を連続的かつ多次元的に把握できることがわかる。図 17 は、図 16 に示した任意の断面に対して、地盤強度分布を切り出した図である。これらの断面図から、地盤強度の高い層が軟弱地盤内に傾斜して堆積している様子がわかる。なお、これらの分布図において貫入抵抗が大きい表層部分は、敷砂施工による影響である。

3.3 地質分布の推定と動態観測結果

今回対象とした現場では、圧密対象層 (粘性土・腐植土層) と排水層 (砂層) の貫入抵抗には大きな差があるため、地盤強度から圧密対象層と排水層の区別が可能であると考えられる。そこで、図 17 に示した各断面の貫入抵抗分布を、 $q_c=1.5\text{MPa}$ を境界として軟らかい層と硬い層の 2 色に塗り分け、硬い層を砂層として捉えることで地質分布を推定した。

図 18(a) に示す A-A' 断面は、図 14 に示した地質想定縦断面図と同じ位置における地質縦断面図である。図 14 と比較すると、事前調査が実施された付近では、砂層 (硬い層) の分布位置に大きな違いは見られない。しかしながら、図 18(a) に示す A-A' 断面からは、断面左側 (舞鶴側) では深度 10m 付近にも砂層が分布していること、断面右側 (敦賀側) では深度 5~15m 付近の砂層が想定図よりも厚く堆積していることがわかる。このため、圧密速度や沈下量が事前の設計値と異なることが予想され、不等沈下の発生も懸念される。

図 18(b), (c) に示す B-B' 断面および C-C' 断面は、横断方向の地質分布である。事前調査では、縦断方向 2 箇所の調査しか実施されていないため、横断方向の地質分布はわかっていない。図 18(b), (c) を見ると、砂層の分布状況が左

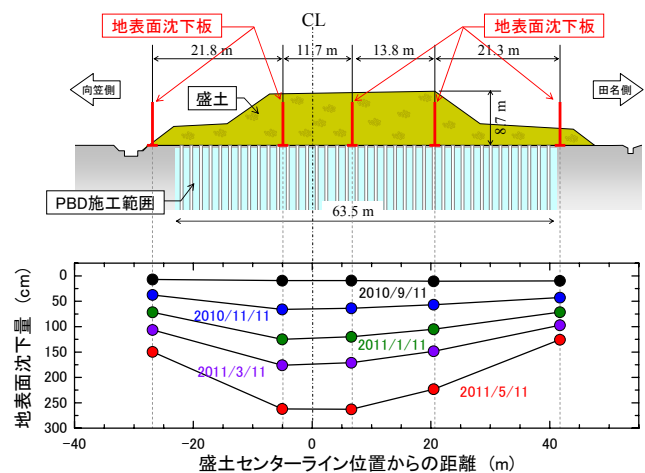


図 19 C-C' 断面における動態観測結果 (地表面沈下量)

右で明らかに異なっている。特に C-C' 断面では、断面左側 (田名側) に砂層が厚く堆積していると推定されることから、断面右側 (向笠側) に沈下や変形が集中すると考えられる。図 19 は、現場で計測した C-C' 断面位置における地表面沈下の動態観測結果である。図 18(c) に示した地質断面図から予想されたように、断面右側 (向笠側) に沈下が集中している様子がわかる。

以上のように、PBD 打設機の油圧抵抗と打設位置情報から推定した強度分布や地質分布結果は、実際の地盤を精度良く表現できているものと考えられる。なお、舞鶴若狭自動車道三方インターチェンジ工事では、今回推定した地質分布を用いた安定解析や地質分布を考慮した施工管理等を実施することで、得られたデータを活用している。

4. おわりに

本研究では、舞鶴若狭自動車道三方インターチェンジ工事で施工した PBD 工法について、施工時に測定した PBD

打設機の油圧抵抗(オシログラフ)から、地盤の強度分布・地質分布を推定した。地盤強度(コーン貫入抵抗)を定量的に評価するために使用した推定式は、実際のコーン貫入試験結果を精度良く再現できることが確認できた。なお、PBD 打設機の油圧抵抗は、従来から施工管理としてオシログラフに記録されるものであるため、PBD 打設機の改良等(新たな計測装置の追加、仕様変更)は必要ない。このため、従来の PBD 施工を阻害することもなく、非常に簡易かつ安価に地盤強度を得ることが可能である。また、この推定式から算出した地盤強度と打設位置情報を用いて、PBD 打設地盤の連続的かつ多次元的な強度分布・地質分布を推定し、事前調査結果や動態観測結果と比較した。推定した強度分布・地質分布結果は、実際の地盤を精度良く表現できていることが確認できた。この地質分布結果を沈下計算や安定計算、FEM 変形解析^{13), 14)}等へ利用することで、不等沈下や残留沈下の予測、载荷盛土の施工管理等の検討が精度良く実施可能となり、工期短縮や工程管理、PBD 工法の性能評価等に有用であると思われる。

今回用いた地盤強度推定式は、軟弱な粘性土を対象としているため、砂層における貫入抵抗を小さく評価する傾向にある。油圧抵抗から推定した地盤強度の値を沈下・安定解析、FEM 解析等に直接使用するためには、砂層の貫入抵抗に対する補正方法を検討し、推定値の精度を向上させることが今後の課題として挙げられる。今後はこの手法を広く実現場に適用し、さらなるデータの収集・分析を行う予定である。

参考文献

- 1) 渡部要一, 鈴木和実, 新舎博, 宮本健児: PBD 打設時のマンドレル貫入抵抗による土質判定, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, III-181, pp.361-362, 2009.
- 2) 久保大輔, 平田昌史, 中山泰起, 福田淳, 山田耕一, 川井田実: オシログラフを利用した軟弱地盤における砂層位置の推定, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, III-393, pp.785-786, 2010.
- 3) 平田昌史, 清水英樹, 福田淳, 白神新一郎, 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 (投稿中)
- 4) 平田昌史, 清水英樹, 福田淳, 白神新一郎, 川鍋修, 野村忠明: PBD 打設機の油圧抵抗を用いた地盤強度推定法の検討(その 1)~強度推定式の誘導, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集 (投稿中)
- 5) 白神新一郎, 川鍋修, 野村忠明, 平田昌史, 清水英樹, 福田淳: PBD 打設機の油圧抵抗を用いた地盤強度推定法の検討(その 2)~強度推定式の適用性, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集 (投稿中)
- 6) Schmertmann, J.H.: Dutch friction-cone penetrometer exploration of research area at field 5, Eglin Air Force Base, Florida, U.S. Army Eng. Waterways Exp. Stat., Vicksburg, Miss., Contact Rep., S-69-4, 1969.
- 7) Begemann, H.K.S.Ph.: The Friction Cone as an Aid in Determining the Soil Profile, Proc. of the 6th ICSMFE, Vol. I, p.17-20, 1965.
- 8) Robertson, P.K.: Soil classification using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal, Vol.27, No.1, pp.151-158, 1990.
- 9) NCB ドレーン協会: 設計施工マニュアル, p.61, 2001.
- 10) 久保大輔, 平田昌史, 並川武, 松永厚彦, 矢野一郎, 山田耕一, 川井田実, 白神新一郎: PBD 打設機の油圧抵抗を用いた多次元地質分布の推定事例, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集 (投稿中)
- 11) 川井田実, 信田潤一, 平田昌史, 山田耕一: 深い腐植土地盤における高速道路建設-舞鶴若狭自動車道(小浜~敦賀)の軟弱地盤対策-, 地盤工学会, 第 54 回地盤工学シンポジウム論文集, pp.563-570, 2009.
- 12) 平田昌史, 木藤政則, 山田耕一, 飯塚敦, 荒井克彦: 超軟弱地盤における道路盛土の変形挙動要因とその抑制対策, 土木学会論文集 C, Vol. 66, No.2, pp.356-369, 2010.
- 13) 鈴木哲太郎, 平田昌史, 福田淳, 水野智幸, 山田耕一, 川井田実: 超軟弱地盤における载荷盛土の FEM 解析, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, III-389, pp.777-778, 2010.
- 14) 西川浩二, 平田昌史, 福田淳, 信田潤一, 山田耕一, 川井田実: 軟弱地盤における载荷盛土を伴う真空圧密工法の FEM 解析~その 1, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, III-234, pp.467-468, 2010.