

プラスチックボードドレーン打設時の油圧抵抗を用いた 多次元地質分布の推定手法

前田建設工業株式会社 正会員 ○ 平田 昌史 久保 大輔
清水 英樹
錦城護謨株式会社 正会員 白神 新一郎
中日本高速道路株式会社 正会員 川井田 実 山田 耕一

1. はじめに

軟弱地盤対策工法の1つであるバーチカルドレーン工法は、軟弱地盤内の鉛直方向に排水柱を多数設置し、水平方向の排水距離を短縮することによって圧密を促進させ、地盤の強度増加や残留沈下抑制を期待する工法である。本研究で取り上げるプラスチックボードドレーン（PBD）工法は、バーチカルドレーン工法の鉛直排水柱に PBD を用いる工法である。鉛直排水柱に砂を用いるサンドドレーン工法に比べて、材質が一定で供給が安定しており、施工能率が良く経済的であるため、近年需要が伸びている工法である。

PBD 工法では、圧密対象となる軟弱層の層厚や分布位置が改良効果に大きな影響を及ぼすため、事前調査によって地質分布を把握し、適切な PBD 配置や圧密放置期間を設定することが重要である。しかしながら、堆積環境が複雑な地盤では、わずか数箇所的事前調査結果から地質分布を推定することには限界があり、期待した改良効果が得られない場合や、予期せぬ不等沈下・変形等が発生する場合もある。PBD 工法の施工管理では、設計した深度・範囲に PBD が確実に施工されているかの出来形のみを管理するのが一般的であるが、このような問題を解決するためには、PBD を施工した地盤の地質分布を詳細に把握し、設定した PBD 配置や圧密放置期間等が適切であるかを管理・判断することが必要である。

本研究では、PBD 工法とコーン貫入試験の相関性に着目し、オシログラフに記録される油圧抵抗と静的コーン貫入試験の貫入抵抗の相関性を利用して、施工時に測定した PBD 打設機の油圧抵抗（オシログラフ）を用いた地盤強度推定式を提案し、複数の実現場に対してその適用性について検討を行った¹⁾。

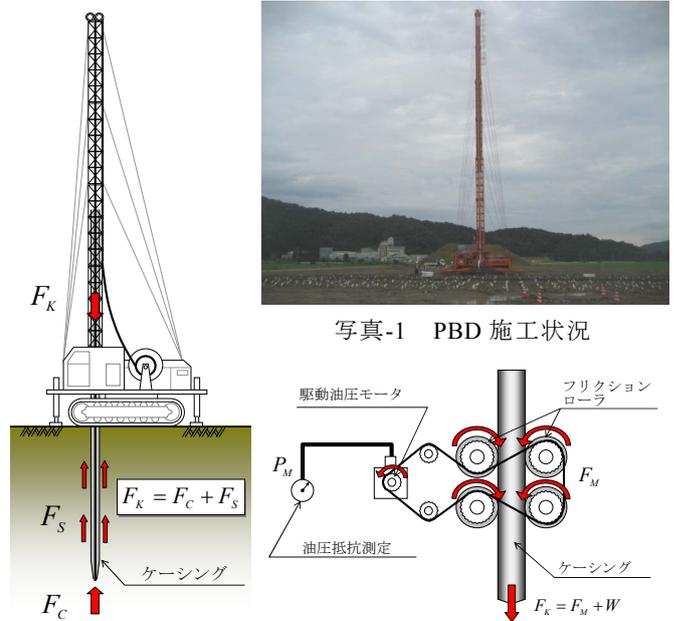


図-1 力の釣合い 図-2 ケーシングの貫入機構



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打設地盤内の地質分布図を作成し、実現場における事前調査結果や動態観測結果と比較することで、その適用性・有用性についての検討を行った²⁾。

2. 油圧抵抗を用いた地盤強度分布の推定手法

(1) 地盤強度推定式の誘導

PBD 工法の施工は、静的コーン貫入試験におけるロッドの貫入や、小口径の杭を地盤に打設することに酷似しているため、ケーシング貫入時の油圧抵抗と静的コーン貫入試験の貫入抵抗の間には良い相関性がみられる^{3),4)}。そこで、PBD 打設機の油圧抵抗からコーン貫入抵抗を求める地盤強度推定式を誘導する。ここでは、図-1 に示すようにケーシング貫入時の力の釣合いを、

$$F_k = F_c + F_s \quad (1)$$

と定義する． F_c はケーシングの先端抵抗力， F_s はケーシングに作用する周面摩擦抵抗力， F_k はケーシングの貫入力である．

ケーシングの先端抵抗力 F_c は，ケーシング先端の貫入抵抗 \hat{q}_c とケーシングの断面積 A_k より，

$$F_c = A_k \cdot \hat{q}_c \quad (2)$$

と表される．ここで，ケーシング先端の貫入抵抗 \hat{q}_c とコーン貫入抵抗 q_c の関係を，

$$\hat{q}_c = \alpha \cdot q_c \quad (3)$$

と定義する． α は，ケーシングの貫入速度や先端形状等の影響を考慮した補間係数である．式(3)を式(2)に代入することで，先端抵抗力 F_c は，

$$F_c = \alpha \cdot A_k \cdot q_c \quad (4)$$

と表される．

ケーシングに作用する周面摩擦抵抗力 F_s は，ケーシングに作用する局部周面摩擦 \hat{f}_s の累積であると仮定して，

$$F_s = \int_0^z \hat{f}_s \cdot D_k \cdot dz \quad (5)$$

と表す． D_k はケーシングの周長， z はケーシングの打設深度である．また，局部周面摩擦 \hat{f}_s は，三成分コーン貫入試験等で計測される局部周面摩擦 f_s を用いて，

$$\hat{f}_s = \beta \cdot f_s \quad (6)$$

と定義する． β は，ケーシングと地盤の摩擦係数や周辺地盤のリモールドの影響等を考慮した補間係数である．局部周面摩擦 f_s は，Schmertmann⁵⁾による周面摩擦係数 $FR (= f_s/q_c)$ を用いてコーン貫入抵抗 q_c に置き換えられ，さらにPBDが施工される地盤は圧密促進を必要とする軟弱地盤であることから，周面摩擦係数 FR を粘性土の代表的な値^{5),6),7)}である0.05の一定値とする．これにより，式(5)に示した周面摩擦抵抗力 F_s は，

$$F_s = 0.05 \cdot \beta \cdot A_{ks} \cdot \bar{q}_c \quad (7)$$

と表される． \bar{q}_c はコーン貫入抵抗 q_c の平均値， $A_{ks} (= D_k \cdot z)$ は貫入したケーシングの周面積である．なお，補正係数 β は深度方向に一定と仮定している．

PBD打設機では，油圧モータが発揮するトルクがギアを通してフリクションローラに伝達され，ケーシングを押込む機構となっている（図-2 参照）．このため，ケーシングの貫入力 F_k は，油圧モータによ

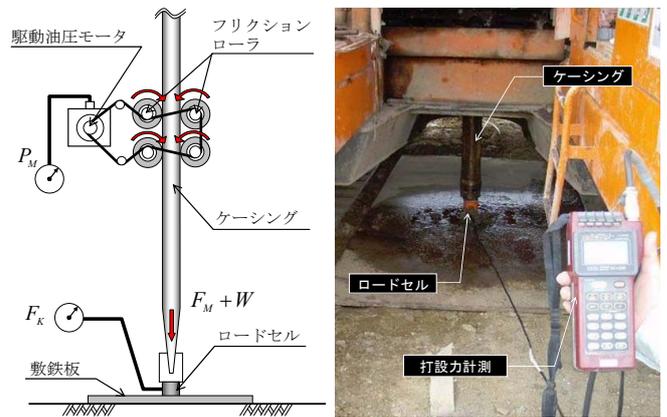


図-3 打設力検定試験

写真-2 検定試験状況

表-1 実施した打設力検定試験一覧

試験番号	PBD打設機		ケーシング重量
	型番	機体番号	W [MN]
D-01	PDC-200	202号機	0.0157
D-02	PDC-300	302号機	0.0098
D-03		314号機	0.0098
D-04		302号機	0.0176
D-05		312号機	0.0176
D-06		310号機	0.0078

る押し込み力 F_M とケーシングの自重 W から，

$$F_k = F_M + W \quad (8)$$

で表される．油圧モータによる押し込み力 F_M は，PBD打設機のギア等の影響によって決まるため，油圧抵抗 P_M とケーシング打設力 F_k の関係を校正係数 μ を用いて，

$$F_M = \mu \cdot P_M \quad (9)$$

と定義すると，ケーシング打設力 F_k と油圧抵抗 P_M の関係は，

$$F_k = \mu \cdot P_M + W \quad (10)$$

と表される．

以上の式(4)，式(7)および式(10)を，式(1)に示した力の釣合式に代入すると，ケーシング貫入時の力の釣合式は，

$$\mu \cdot P_M + W = A_k \cdot \alpha \cdot q_c + 0.05 \cdot \beta \cdot A_{ks} \cdot \bar{q}_c \quad (11)$$

となり，油圧抵抗 P_M とコーン貫入抵抗 q_c の関係式を求めることができる．なお，この式(11)はMeyerhoff⁸⁾による杭の極限支持力算定式に，補正係数 α および β を考慮し拡張した式となっている．

(2) 打設力検定試験による校正係数の検出

式(11)に示す校正係数 μ を求めるため，PBD打設機を用いて打設力検定試験を実施した．打設力検定試験では，図-3および写真-2に示すように，敷鉄板の上にロードセルを設置し，ケーシングを押込む際の油圧抵抗 P_M と，ケーシングの貫入力 F_k をロード

セルにて測定する。表-1 に、実施した打設力検定試験の一覧を示す。

図-4 は、実施した打設力検定試験結果である。この図より、油圧抵抗 P_M と油圧モータの押込み力 F_M の間には式(9)に示した比例関係が成り立ち、大型機 (PCD-300) で校正係数 $\mu=0.005$, 中型機 (PCD-200) で校正係数 $\mu=0.0032$ と求めることができる。

(3) ケーシング貫入試験による補間係数の検討

コーン貫入抵抗 q_c を求めるためには、式(11)に示す補間係数 α , β の値が必要である。これらの補間係数は、貫入速度や先端形状、摩擦係数や地盤のリモールド等のさまざまな影響を考慮しているため、理論的あるいは解析的に値を定めることは困難である。そこで、ケーシングの貫入 (押込み・引抜き) 試験結果⁵⁾を実施した。ケーシングの力の釣合いを考えた場合、ケーシングの引抜き時には先端抵抗力が作用しないため、ケーシングの周面摩擦抵抗力 F_S は、引抜き時の油圧抵抗 $P_M|_{引}$ を用いて、

$$F_S = \mu \cdot P_M|_{引} - W \quad (12)$$

と表される。また、ケーシングの先端抵抗力 F_C は、ケーシング押込み時の油圧抵抗 $P_M|_{押}$ と引抜き時の油圧抵抗 $P_M|_{引}$ を用いて、

$$F_C = \mu \cdot (P_M|_{押} - P_M|_{引}) + 2W \quad (13)$$

と表される。このように、ケーシングの貫入 (押込み・引抜き) 試験を実施することで、補間係数 α , β を個別に評価することが可能である。表-2 は、実施したケーシングの押込み・引抜き試験の一覧である。試験ヤード内の 2 箇所で行った静的コーン貫入試験 (CPT-01, CPT-02) の周囲 12 箇所で行ったケーシングの貫入速度を変えた押込み・引抜き試験を実施した。図-5 は、CPT-02 位置で行った静的コーン貫入試験結果である。試験ヤードの地盤では、比較的硬い層 (砂層) が地表から G.L.-5m 付近に分布していることがわかる。図-6 は、実施した貫入試験結果 (油圧抵抗) の深度分布である。なお、式(11)は軟弱層を対象とした式であるため、ここでは G.L.-5m 付近に分布する硬い層 (砂層) の油圧抵抗 P_M は割愛している。

図-7 は、縦軸を油圧抵抗 P_M から算定したケーシングの先端抵抗力 F_C , 横軸をコーン貫入抵抗 q_c から

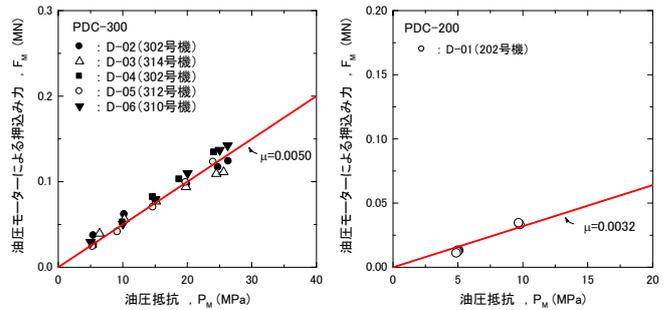


図-4 打設力検定試験結果

表-2 実施した押込み・引抜き試験の一覧

静的コーン貫入試験	打設試験 No.	貫入速度 V [m/s]		静的コーン貫入試験	打設試験 No.	貫入速度 V [m/s]	
		押込み時	引抜き時			押込み時	引抜き時
CPT-01	T1-A-01	1.0	0.8	CPT-02	T2-A-01	1.0	1.0
	T1-A-02	1.0	0.8		T2-A-02	1.0	1.0
	T1-A-03	1.0	0.8		T2-A-03	1.0	1.0
	T1-B-01	0.5	0.5		T2-B-01	0.9	0.9
	T1-B-02	0.5	0.5		T2-B-02	0.9	0.9
	T1-B-03	0.5	0.5		T2-B-03	0.9	0.9
	T1-C-01	0.3	0.4		T2-C-01	0.6	0.6
	T1-C-02	0.3	0.4		T2-C-02	0.6	0.6
	T1-C-03	0.3	0.4		T2-C-03	0.6	0.6
	T1-D-01	0.2	0.3		T2-D-01	0.8	0.8
	T1-D-02	0.2	0.3		T2-D-02	0.8	0.8
	T1-D-03	0.2	0.3		T2-D-03	0.8	0.8

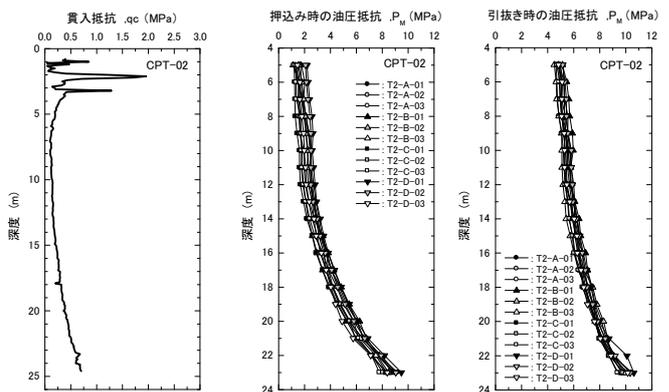


図-5 コーン貫入試験結果 (CPT-02)

図-6 押込み・引抜き試験結果 (CPT-02)

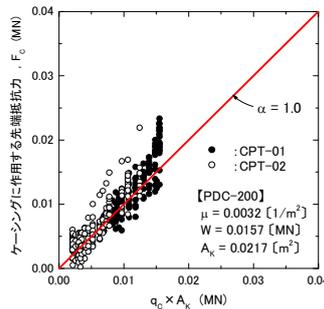


図-7 補間係数 α の検討

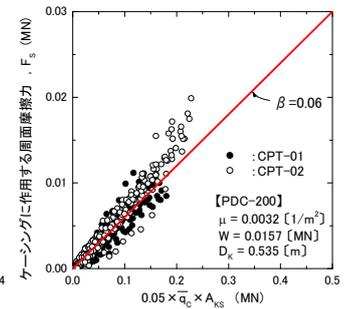


図-8 補間係数 β の検討

求めたケーシングの先端抵抗力 ($q_c \times A_k$) として、試験結果を整理した図である。バラツキはあるものの、両者の間には比例関係が成り立ち、補間係数 α は 1.0 と求められる。

図-8 は、縦軸を油圧抵抗 P_M から式(13)を用いて算定したケーシングの周面摩擦抵抗力 F_S , 横軸をコー

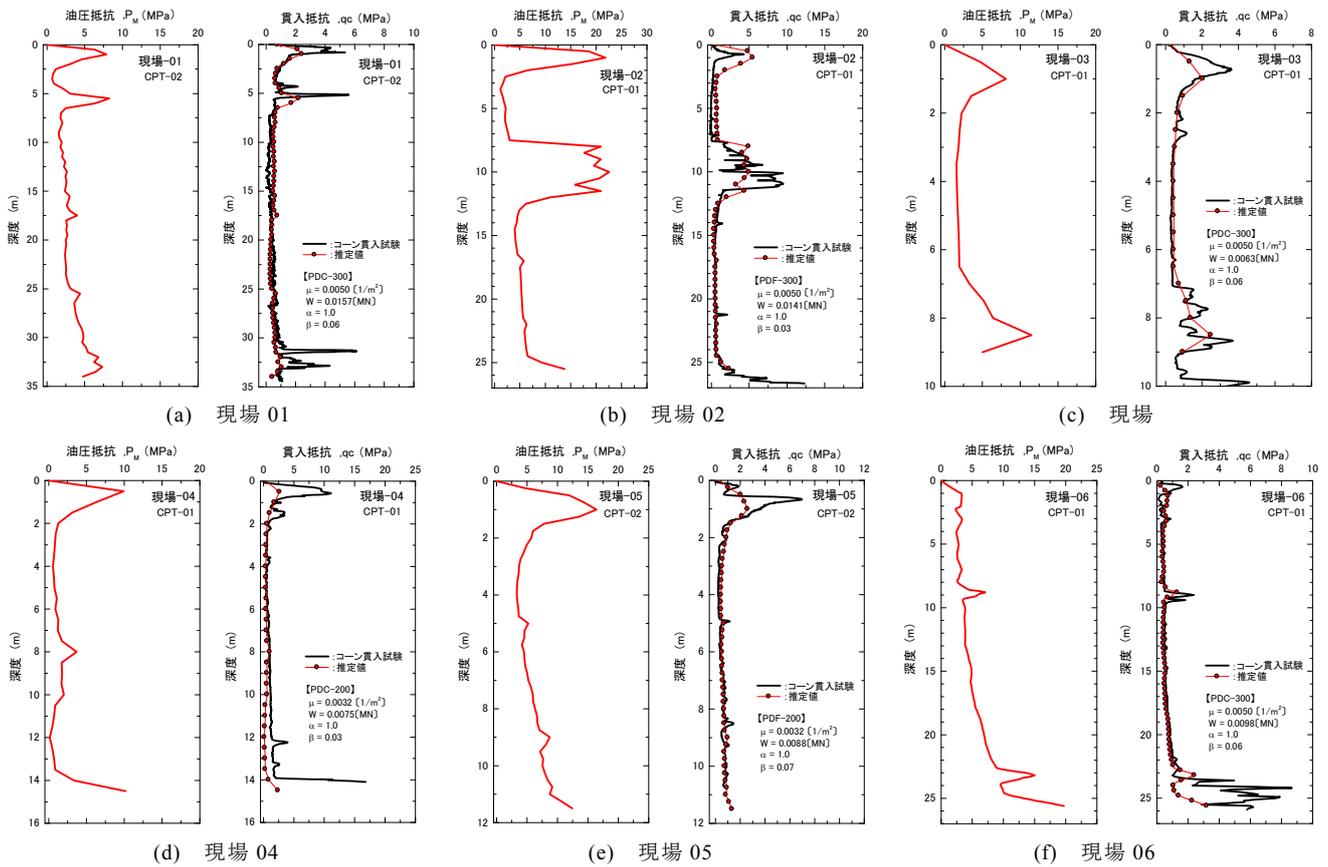


図-9 油圧抵抗から推定した貫入抵抗とコーン貫入試験結果の比較

ン貫入抵抗 q_c の平均値から式(7)を用いて算定した周面摩擦抵抗力 ($0.05 \times \bar{q}_c \times A_{KS}$) 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る影響を受けるものと考えられるが、今回試験を実施した地盤では、補正係数 β は概ね 0.06 と求められる。

(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、実際の PBD 施工現場 (6 現場) の油圧抵抗データを用いて、コーン貫入抵抗の算定を試みた。図-9 は、PBD 打設機の油圧抵抗から算定した貫入抵抗と、PBD 打設位置近傍で実施されているコーン貫入試験結果との比較である。周面摩擦係数 FR に 0.05 を用いているため硬い層 (砂層) では若干小さめに評価される傾向にあるが、油圧抵抗から算定した貫入抵抗は、コーン貫入試験結果とほぼ一致しており、提案する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。



図-10 対象現場位置図

3. 実現場における地盤強度・地質分布の推定

(1) 対象現場の概要

実現場の PBD 施工に対して、PBD 打設機の油圧抵抗から地盤強度および地質分布を推定し、その有効性を検討した。ここで対象とした現場は、舞鶴若狭自動車道三方インターチェンジ工事²⁾ (福井県三方上中郡若狭町) である。図-10 に現場位置図を示す。なお、PBD 施工位置 (向笠地区) は三方五湖に近接しており、非常に軟弱な地盤が広く分布している地域である。図-11 は、事前調査結果から作成さ

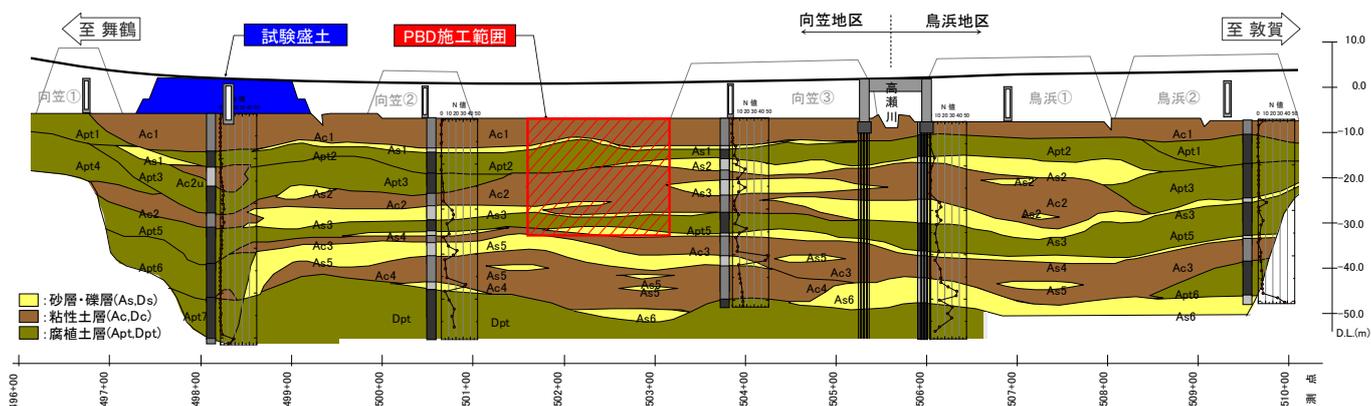


図-11 向笠地区の地質想定縦断面図

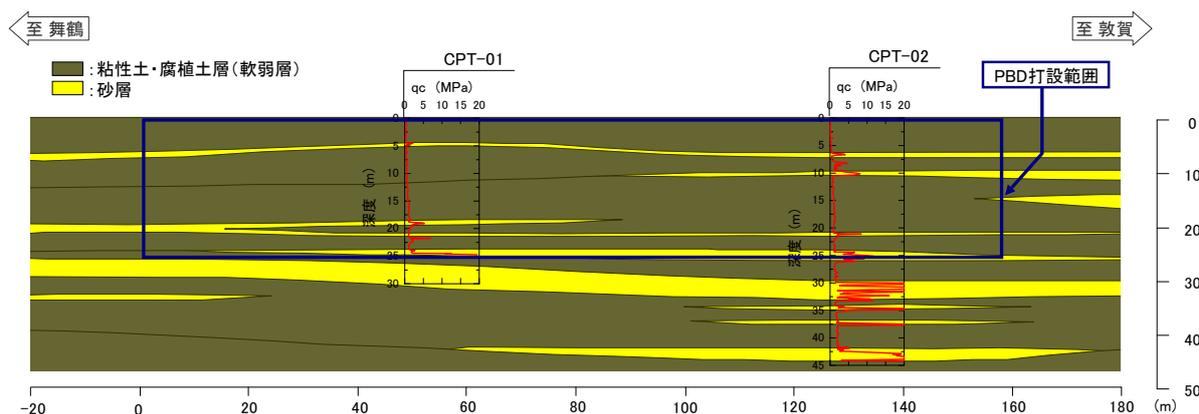


図-12 PBD 施工範囲の地質想定縦断面図と事前調査位置

れた地質想定縦断面図である。PBD 工法は、この地質想定縦断面図のほぼ中間位置（延長約 160m、幅約 60m）で施工している。この図に示すように、施工位置は軟弱な粘性土・腐植土が深度 30m～40m 付近まで複雑に堆積している超軟弱地盤帯である。なお、同じ向笠地区で施工された試験盛土では、この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観測されている^{9), 10)}。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-12 は、図-11 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-13 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。

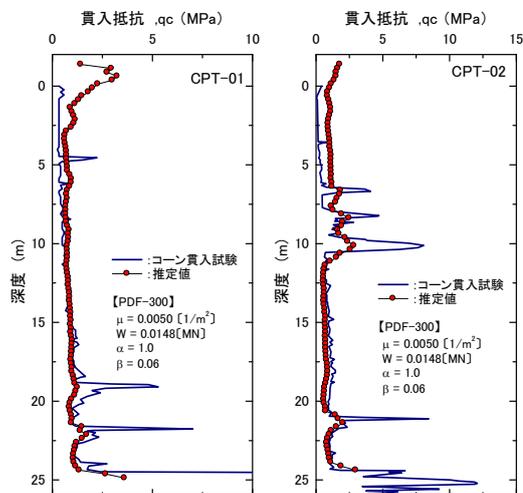


図-13 推定した貫入抵抗とコーン貫入試験の比較

(2) 油圧抵抗を用いた地盤強度の推定

図-13 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-12 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

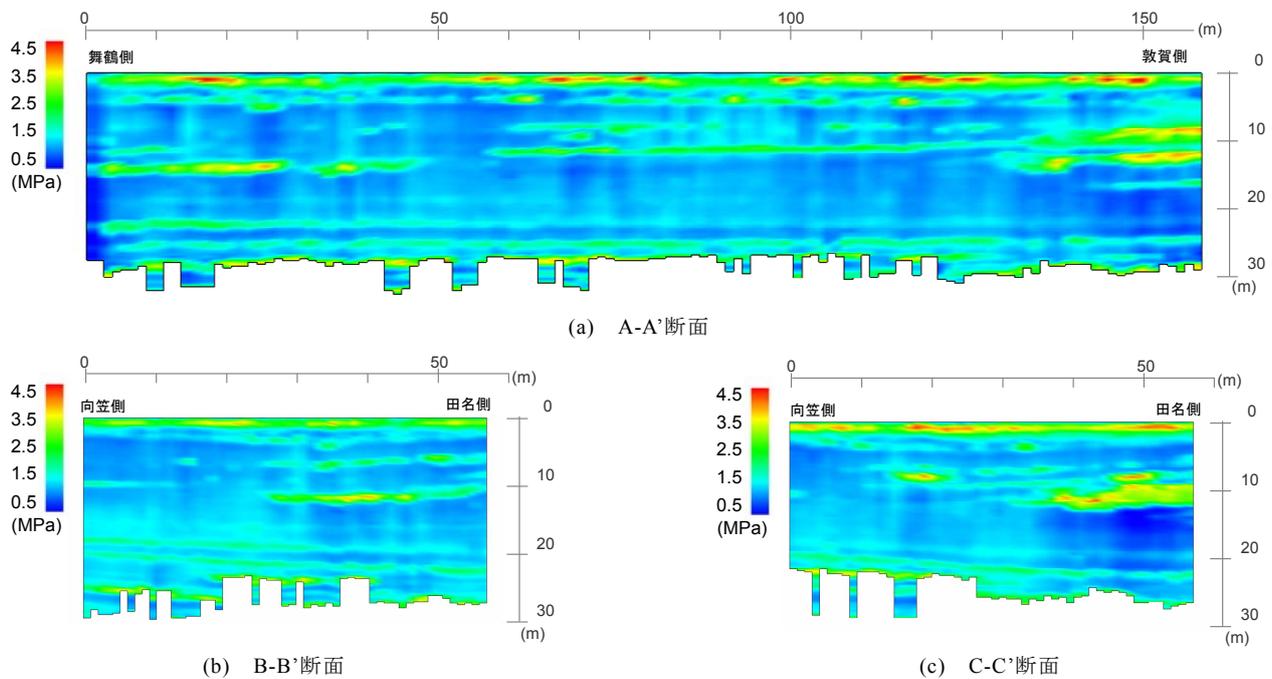


図-15 推定した貫入抵抗の分布（2次元）

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であると考えられる。

（3）地盤強度分布・地質分布の推定

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地盤強度（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、地盤内の強度分布図を連続的かつ多次元的に描くことが可能である。図-14 は、油圧抵抗から推定した貫入抵抗（PBD 施工 7107 本分）と PBD の打設位置情報（1.2m×1.2m の正方配置）を用いて、PBD 改良範囲の地盤強度分布を図化処理したものである。PBD の打設間隔が非常に密であるため、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-15 は、図-14 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、貫入抵抗が大きい表層部分は、PBD 打設前の敷砂施工による影響である。

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、軟らかい層（粘性土・腐植土層）と硬い層（砂層）の境界を、図-13 から $q_c=1.5\text{MPa}$ と設定し、図-15 に示した各断

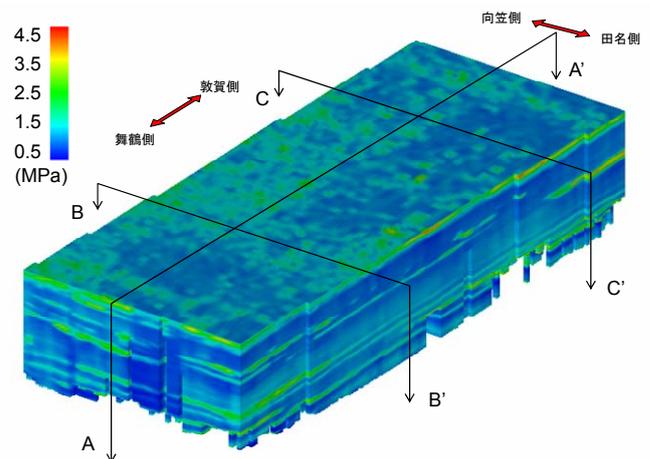


図-14 推定した貫入抵抗の分布（3次元）

面の貫入抵抗分布を塗り分けることで、地質分布図を作成した。

図-16(a)に示す A-A'断面は、図-12 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-12 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-16(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。

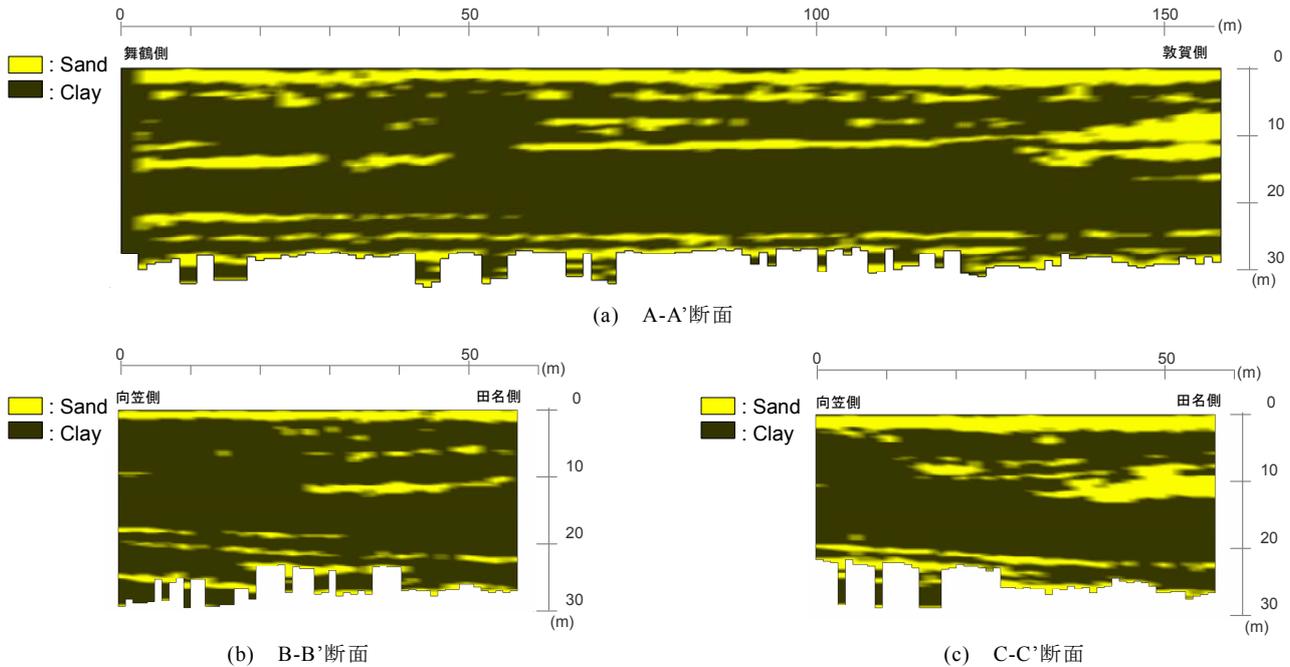


図-16 貫入抵抗分布から推定した地質断面図

図-16(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-16(b), (c)を見ると、砂層の分布状況が左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-17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-16(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。

4. おわりに

本研究では、PBD 打設時に計測した油圧抵抗（オシログラフ）から、静的コーン貫入試験における貫入抵抗を算定する簡易な推定式を提案した。この地盤強度推定式を用いて求めた貫入抵抗と、実際の現場で実施したコーン貫入試験を比較した結果、精度良く地盤強度を推定可能であることが確認できた。PBD 打設機の油圧抵抗は、従来から施工管理として測定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、PBD 施工を阻害することもなく、非常に

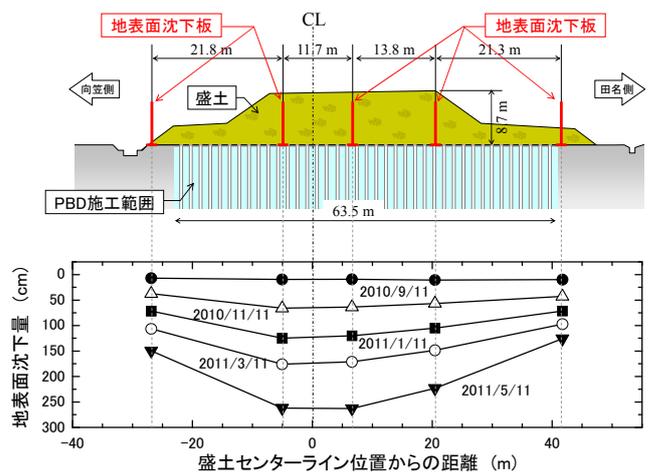


図-17 C-C'断面における動態観測結果（地表面沈下量）

簡易かつ安価に地盤強度を得ることが可能である。また、舞鶴若狭自動車道三方インターチェンジ工事の PBD 施工に対して、推定式から算出した地盤強度と PBD 打設位置情報を用いて、多次元的な強度分布・地質分布図を作成し、事前調査結果や動態観測結果と比較を行った。この結果、油圧抵抗から推定した強度分布・地質分布は、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¹¹⁾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。

参考文献

- 1) 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, Vol.67, No.3, pp.358-371, 2011.
- 2) 久保大輔, 平田昌史, 並川武, 長澤正明, 矢野一郎, 白神新一郎, 山田耕一, 川井田実 : PBD 打設機の油圧抵抗を用いた軟弱地盤の多次元地質分布の推定, 第 23 回中部地盤工学シンポジウム論文集, pp.91-98, 2011.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Schmertmann, J.H. : Dutch friction-cone penetrometer exploration of research area atfield 5, Eglin Air Force Base, Florida, *U.S. Army Eng. Waterways Exp. Stat., Vicksburg, Miss., Contact Rep.*, S-69-4, 1969.
- 6) Begemann, H.K.S.Ph. : The Friction Jacet Cone as an Aid in Determining the Soil Profile, *Proc. of the 6th ICSMFE*, Vol.I, p.17-20, 1965.
- 7) Robertson, P.K. : Soil classification using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, No.1, pp.151-158, 1990.
- 8) Meyerhof G.G. : Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, *Proc. of the ASCE, Journal of the Soil Mech. and Found. Div.*, Vol.82, No. SM1, p.866, 1956.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 平田昌史, 福田淳, 信田潤一, 西川浩二, 山田耕一, 川井田実 : 載荷盛土を併用した真空圧密工法の改良効果と FEM 解析, 土木学会論文集 C, Vol.68, No.1, pp.97-116, 2012.