

PBD 打設機の油圧抵抗を用いた地質分布推定システム「GEO-DIVER」の開発

平田 昌史・清水 英樹^{*1}・福田 淳^{*1}・久保 大輔^{*2}・白神 新一郎^{*3}・川鍋 修^{*3}

Development of Geological Distribution Presumption System Using Oil Pressure Resistance of the Plastic Board Drain Machine

Masafumi HIRATA, Hideki SHIMIZU, Jun FUKUDA, Daisuke KUBO, Shinichirou SHIRAGA, Syuu KAWANABE



写真-1 PBD の施工状況

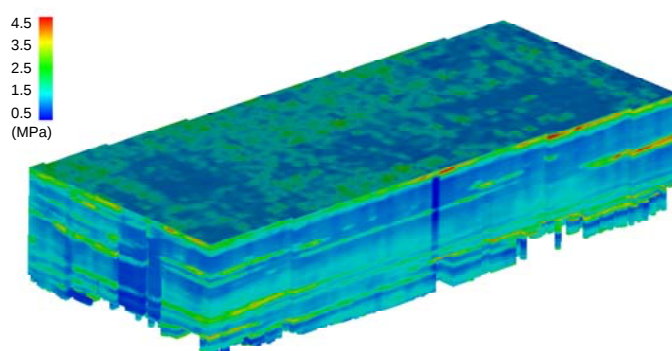


図-1 GEO-DIVER による地盤強度の三次元分布

研究の目的

プラスチックボードドレーン（PBD）工法は、軟弱地盤内に PBD を打設することで水平方向の排水距離を短縮し、圧密を促進させる工法である。このため PBD 工法では、対象となる地盤の地質分布を把握し、適切なドレーン配置や圧密放置期間を設定することが重要となる。しかしながら、堆積環境が複雑な地盤では、わずか数箇所の地盤調査結果から地質分布を推定することには限界がある。本研究では、施工中に取得する PBD 打設機の油圧抵抗（オシログラフ）と静的コーン貫入試験の貫入抵抗の相関性に着目し、リアルタイムで PBD 施工範囲の地盤強度分布・地質分布を推定するシステム「GEO-DIVER（ジオダイバー）：Geological Map Drawing System by Intrusive of Vertical Drains」を開発した。

技術の説明

「GEO-DIVER」では、PBD の施工中に計測する油圧抵抗を、推定式を用いて地盤強度（コーン貫入抵抗）に変換する。PBD は通常 0.5～1.5m 程度の間隔で施工されるため、得られた地盤強度データを繋ぎ合わせることで、PBD 施工範囲の地盤強度分布・地質分布を連続的かつ多次元的に推定するシステムである。なお本システムは、従来から施工管理の一環として取得する油圧抵抗を有効利用するため、特殊な計測機器等の追加設置は必要なく、簡易かつ安価に導入が可能である。

主な結論

- ・ PBD 打設中に取得する油圧抵抗から、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。この推定式を実際の現場に適用した結果、精度良く地盤強度を推定可能であることを確認した。
- ・ 実現場に対して、施工管理で記録する油圧抵抗からコーン貫入抵抗を求め、これを基に改良地盤の強度分布・地質分布を多次元的に評価した。得られた地質推定図は、実際の地盤強度分布や地質分布を精度良く表現できており、本手法の有効性を確認した。
- ・ 得られた地質推定図を沈下・安定計算や FEM 変形解析等へ利用することで、不等沈下や残留沈下の予測、対策工の検討が可能であるとともに、PBD 工法の工期短縮や工程管理、性能評価等にも活用できると考えられる。

* 1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部

* 2 北陸支店 三方インターチェンジ作業所

* 3 錦城護謄(株) 土木事業本部

PBD打設機の油圧抵抗を利用した地質分布推定システム 「GEO-DIVER」の開発

平田 昌史 清水 英樹^{*1}福田 淳^{*1} 久保 大輔^{*2}白神 新一郎^{*3} 川鍋 修^{*3}

要 旨

プラスチックボードドレーン（PBD）工法は、軟弱地盤内にPBDを多数打設することで水平方向の排水距離を短縮し、圧密を促進させる工法である。このため、圧密対象となる軟弱層（粘性土）の層厚や分布位置が、改良効果に大きな影響を及ぼす。しかしながら、事前調査から対象地盤の地質分布を推定することには限界があるため、期待した改良効果が得られない場合も多い。本研究では、オシログラフに記録される油圧抵抗から静的コーン貫入試験における貫入抵抗を算定し、PBD打設地盤の強度分布や地質分布を連続的かつ多次元的に評価するシステム「GEO-DIVER（ジオダイバー）」を開発し、その適用性・有用性に関する検討を行った。本システムから推定した強度分布や地質分布は、実際の地盤を精度良く表現できており、沈下・安定計算やFEM変形解析等へ利用することで、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考えられる。

キーワード 軟弱地盤／プラスチックボードドレーン／油圧抵抗／コーン貫入試験／地質分布

目 次

- | | |
|----------------------|-------------------|
| 1. はじめに | 5. 実現場における貫入抵抗の推定 |
| 2. PBD打設時の貫入力推定式の誘導 | 6. 地質分布推定システムの概要 |
| 3. ケーシング貫入力と油圧抵抗の関係 | 7. 実現場における適用事例 |
| 4. 貫入力推定式における補正係数の決定 | 8. おわりに |

DEVELOPMENT OF GEOLOGICAL DISTRIBUTION PRESUMPTION SYSTEM USING OIL PRESSURE RESISTANCE OF THE PLASTIC BOARD DRAIN MACHINE

Masafumi HIRATA Hideki SHIMIZU
Jun FUKUDA Daisuke KUBO
Shinichirou SHIRAGA Syuu KAWANABE

Synopsis:

Plastic board drain (PBD) method is a consolidation method which can accelerate consolidation by placing a lot of PBD into the soft ground. It is important for PBD method to get information about the layer thickness of soft ground and geological distribution, before designing the optimal arrangement of PBD. However, it is difficult to get the accurate information by subsurface exploration with an only few samples.

In this paper, the simplified estimating equation is proposed that evaluates cone bearing capacity by using oil pressure resistance of placing PBD machine during operating. Furthermore, the system is proposed that can evaluate the distribution in three dimensions of ground strength by using estimated cone bearing capacity. Finally, it was confirmed that this proposed system could evaluate the layer thickness of soft ground and geological distribution accurately.

* 1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部
* 2 北陸支店 三方インターチェンジ作業所

* 3 錦城護謨(株) 土木事業本部

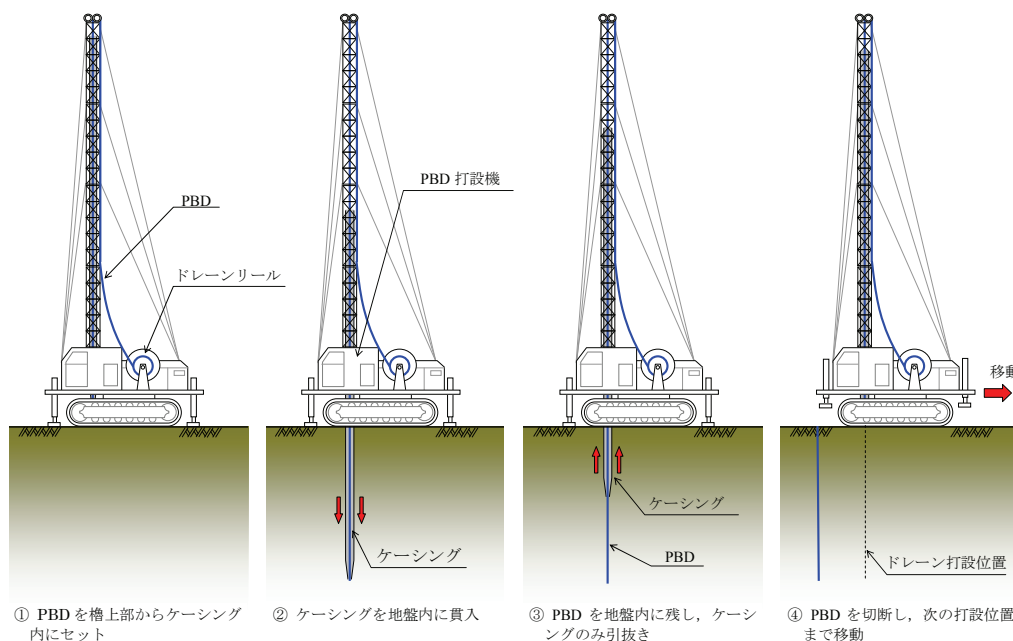


図-1 プラスチックボードドレーン（PBD）工法の施工手順³⁾

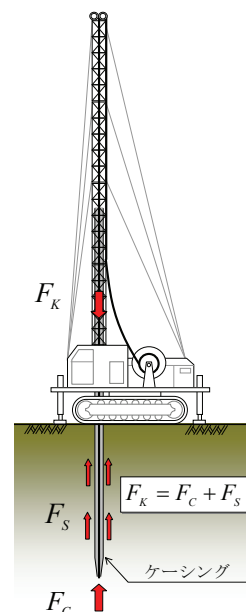


図-2 力の釣合い

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。バーチカルドレーン工法では、圧密対象となる軟弱層（粘性土）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、適切なドレーン配置や圧密放置期間を設定することが重要となる。しかしながら、堆積環境が複雑な地盤では、わずかに数箇所の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るため、期待した改良効果が得られない場合があり、ドレーンによる圧密促進効果自体に疑問を抱く声もある。このような問題を解決するためには、バーチカルドレーンが施工された地盤の地質分布を詳細に把握するとともに、実際の地質分布に沿った圧密沈下予測を適宜実施し、設定したドレーン配置や圧密放置期間が適切であるかを管理・判断することが求められる。

本研究で取り上げるプラスチックボードドレーン（以下、PBD）工法は、鉛直排水柱に PBD を用いる工法であり、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 工法の一般的な施工管理では、オシログラフに記録されたケーシングの貫入深度や貫入速度、油圧抵抗を用いて、設計した深度・範囲にドレーンが確実に施工されているかが管理される。しかしながら、PBD を打設した地盤の地質や層序については管理・把握されないため、設定したドレーン配置や圧密放置期間の妥当性を照査することは出来ない。

本研究では、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、油圧抵抗から貫入抵抗を算定する簡便な推定式の誘導を試みており、複数の実現場に対して推定式を適用することで、その妥当性を検討している¹⁾。さらに、この推定式から算出した貫入抵抗と打設位置情報を用いて、PBD 打設地盤内の地盤強度分布や地質分布を連続的かつ多次元的に評価するシステム「GEO-DIVER : Geological Map Drawing System by Intrusive of Vertical Drains」を開発し、その有用性に関する検討²⁾も行った。

2. PBD 打設時の貫入力推定式の誘導

2.1 PBD の施工と力の釣合い式

PBD 工法は、図-1 に示すようにケーシング内にドレーン材（プラスチックボード）をセットし、このケーシングを地盤に貫入することで、軟弱地盤内にドレーン材を押込む工法である。このような 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。このため、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、油圧抵抗を用いて地盤強度を評価する検討^{4), 5)}も実施されており、オシログラフに記録された油圧抵抗が、軟弱地盤内に介在する硬い層（砂層）の判別に有効であることが示されている。しかしながら、これらの検討事例では、油圧抵抗に対して相対的な評価を行うため、得られる結果は対象地盤の土質性状に依存し、力学的意味も曖昧である。

そこで、静的コーン貫入試験や杭の極限支持力のメカニズムを参考に、オシログラフに記録された油圧抵抗から、静的コーン貫入試験の貫入抵抗を推定する簡便式の

導出を試みる．図-2 に示すように，ケーシング貫入時の力の釣り合い式を，

$$F_k = F_c + F_s \quad [1]$$

と定義する． F_k はケーシングの貫入力， 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である．この力の釣り合い式を，静的コーン貫入試験の貫入抵抗で表すことができれば，地盤強度の定量的な評価が可能となる．

2.2 ケーシングに作用する先端抵抗力

ケーシングに作用する先端抵抗力 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，次のように表される．

$$F_c = A_k \cdot \hat{q}_c \quad [2]$$

ここで，PBD 打設時におけるケーシングの貫入が，大型の静的コーン貫入試験を実施することと等価であると捉えるならば，ケーシング先端の貫入抵抗 $\hat{q}_c$ は，静的コーン貫入試験における貫入抵抗 q_c と等価であると考えることができる．但し，静的コーン貫入試験におけるロッド貫入速度が通常 0.01～0.02m/s 程度であるのに対して，PBD 打設時のケーシング貫入速度は約 0.3～0.5m/s と非常に速いため，貫入速度の影響を考慮する必要がある．また，図-3 に示すように，今回使用したケーシングの先端形状と静的コーン貫入試験のコーン先端形状が異なることから，このような先端形状の影響も考慮しなければならない．ここでは，貫入速度やコーン先端形状の影響^{6), 7)}を，補正係数 α を用いて考慮し，

$$\hat{q}_c = \alpha \cdot q_c \quad [3]$$

と定義する．式 [3] を式 [2] に代入すると，ケーシングに作用する先端抵抗力 F_c は，静的コーン貫入試験における貫入抵抗 q_c を用いて，

$$F_c = \alpha \cdot A_k \cdot q_c \quad [4]$$

と表される．

2.3 ケーシングに作用する周面摩擦抵抗力

次に，ケーシングに作用する周面摩擦抵抗力 F_s について考えてみる．静的コーン貫入試験の場合，ロッドに作用する周面摩擦抵抗力には，ある一定の深度以降は増加しない臨界深さがあるとされ，例えば均質な軟弱粘土では，ロッドを 5～6m 程度貫入すると周面摩擦抵抗力はほぼ一定になってしまうとの報告⁹⁾もある．これは，ロッドが一般的に曲がりやすいため，ロッドの貫入が進むにつれて貫入孔が拡大し，ロッドと孔壁に隙間が生じて摩擦が発揮されないことが要因の 1 つとして挙げられる．これに対して，PBD 打設機のケーシングは，静的コーン貫入試験のロッドに比べて曲がり難く，断面積も 20 倍程

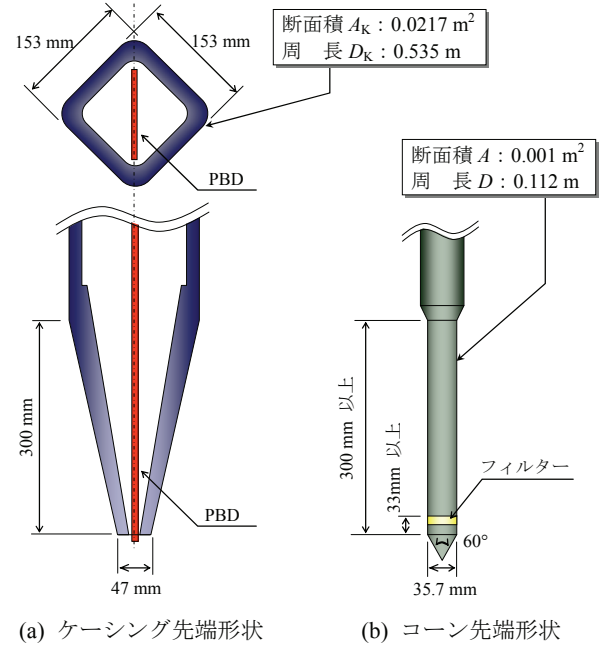


図-3 ケーシングの先端形状と電気式コーン先端形状（地盤工学会基準⁸⁾）の比較

度（図-3 参照）あることから，孔壁との隙間の影響はほとんど生じないものと考えられる．ここでは，杭の極限支持力の考え方と同様に，ケーシングに作用する周面摩擦抵抗力 F_s が，地表から先端位置までの局部周面摩擦 $\hat{f}_s$ の累積であるとして，

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

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．ケーシングに作用する局部周面摩擦 $\hat{f}_s$ については，前述した貫入抵抗と同様に，静的コーン貫入試験（電気式コーン試験等）で計測される局部周面摩擦 f_s と相関があるものとする．但し，静的コーン貫入試験で使用するフリクションスリーブと PBD 打設機のケーシングの材質の違い，動摩擦の影響，ケーシング周辺地盤のリモールドの影響等を，補正係数 β を用いて考慮し，

$$\hat{f}_s = \beta \cdot f_s \quad [6]$$

と定義する．この式 [6] を式 [5] に代入することで，周面摩擦抵抗力 F_s は，

$$F_s = \beta \cdot D_k \int_0^z f_s \cdot dz \quad [7]$$

と表される．なお，補正係数 β については，深度方向に一樣に作用するものと仮定している．

静的コーン貫入試験による局部周面摩擦 f_s については，貫入抵抗 q_c と相関性があることが知られている．この相関性を利用することで，静的コーン貫入試験結果から土質を判定することが可能である．Begemann¹⁰⁾ は局部周面摩擦 f_s と貫入抵抗 q_c を用いた土質判別チャートを，Schmertmann¹¹⁾ は周面摩擦係数 $FR (= f_s/q_c)$ を用いた土

質判別チャートを提案している．また，Robertson¹²⁾ は電気式コーン貫入試験から得られる間隙水圧も考慮した土質判別チャートを提案している．PBD を施工する場合，電気式コーン貫入試験のように間隙水圧は計測できないため，ここでは周面摩擦係数 FR を用いて局部周面摩擦 f_s を評価する．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り，対象となる土質は透水性が低い軟弱な粘性土・腐植土である．Begemann や Schmertmann の土質判別チャートによると，軟弱な粘性土の周面摩擦係数 FR は概ね 0.03～0.07 の値であるが，ここでは式を簡略化するために，周面摩擦係数 FR を 0.05 の一定値と仮定して，

$$\begin{aligned} F_s &= \beta \cdot D_K \int_0^z FR \cdot q_c dz \\ &= 0.05 \cdot \beta \cdot D_K \int_0^z q_c dz \end{aligned} \quad [8]$$

とする．また，ケーシング周面の貫入抵抗 q_c の平均値を $\bar{q}_c$ と置くと，

$$\int_0^z q_c dz = \frac{\int_0^z q_c dz}{z} \cdot z = \bar{q}_c \cdot z \quad [9]$$

であり，式 [8] に示した周面摩擦抵抗力 F_s は，この平均貫入抵抗 $\bar{q}_c$ を用いて，

$$F_s = 0.05 \cdot \beta \cdot \bar{q}_c \cdot A_{KS} \quad [10]$$

と表される．なお， A_{KS} ($= D_K \cdot z$) は地盤内に貫入したケーシングの周面積である．

2.4 ケーシングの貫入力推定式

ケーシングの貫入力算定式は，式 [1] に示したケーシングに作用する力の釣合式に，式 [4] および式 [10] を代入することにより，

$$F_K = \alpha \cdot A_K \cdot q_c + 0.05 \cdot \beta \cdot \bar{q}_c \cdot A_{KS} \quad [11]$$

と求められる．この貫入力算定式は，貫入抵抗 q_c のみからケーシングの貫入力 F_K を算定できる簡便な式となっている．一方，Meyerhoff¹³⁾ は砂地盤 ($FR = 0.005$) を対象として，杭の極限支持力の算定式を次のように定義している．

$$Q = A \cdot q_c + 0.005 \cdot \bar{q}_c \cdot A_s \quad [12]$$

Q は杭の極限支持力， A は杭の底面積， A_s は地盤内に打設した杭の周面積である．式 [11] と式 [12] を比較すると，両者は同じ形式であることがわかる．つまり，式 [11] で誘導したケーシングの貫入力算定式は，Meyerhoff による杭の極限支持力算定式に対して，貫入速度や先端形状，摩擦係数の違いや地盤のリモールド等のさまざまな影響を補正係数 α ， β を用いて考慮し，拡張した式であるといえる．

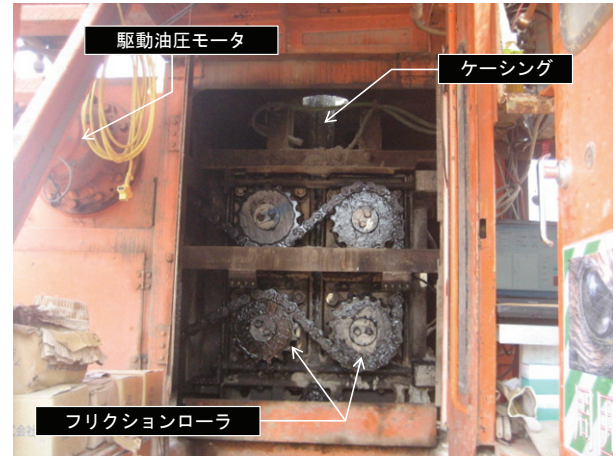


写真-1 ケーシングとフリクションローラ

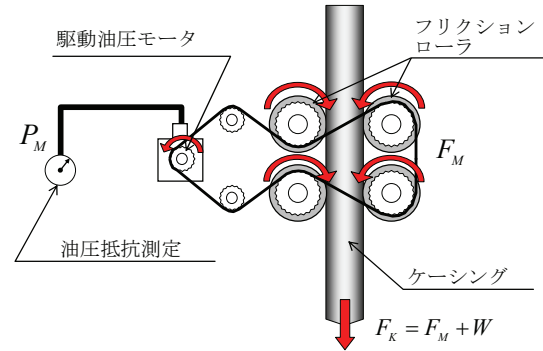


図-4 ケーシング貫入機構の模式図

3. ケーシング貫入力と油圧抵抗の関係

3.1 ケーシング貫入力と油圧抵抗の関係式の誘導

写真-1 は，フリクションローラ式 PBD 打設機のケーシング付近の写真である．図-4 に示す模式図のように，油圧モータに油圧が作用することで，油圧モータが回転しトルク力を発揮し，ギアを通してフリクションローラに力が伝達され，ケーシングを押込む機構となっている．オシログラフに記録される油圧抵抗 P_M は，PBD 打設機の油圧モータに作用する油圧を測定したものであり，ケーシングの貫入力 F_K を測定したものではない．このため，式 [11] に示した貫入力推定式を使用するためには，オシログラフに記録される油圧抵抗 P_M と，ケーシングの貫入力 F_K の関係を明らかにすることが必要である．

ケーシングの貫入力 F_K は，図-4 に示すようにその機構上，油圧モータによる押込み力 F_M と，ケーシングの重量 W との足し合わせとなる．

$$F_K = F_M + W \quad [13]$$

なお，ケーシングに作用する浮力は，式 [11] 右辺に抵抗力として既に含まれているため，式 [13] に示すケーシングの貫入力 F_K に考慮する必要はない．油圧モータによる押込み力 F_M は，油圧モータが発揮するトルクや PBD 打設機の伝達効率等の影響によって決まるものであるため，油圧抵抗 P_M との間に比例関係が成り立つものと

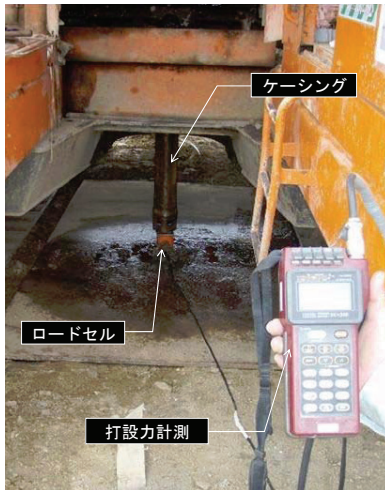


写真-2 検定試験状況

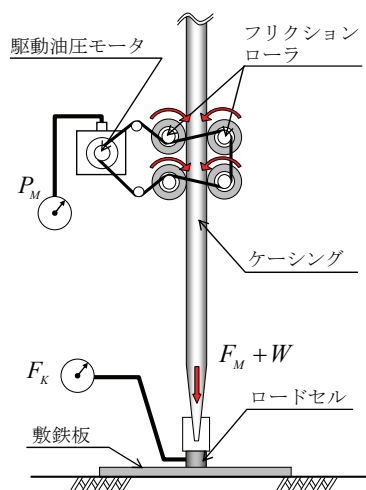


図-5 打設力検定試験の模式図



写真-3 PBD 打設機

仮定し、変換係数 μ を用いて、

$$F_M = \mu \cdot P_M \quad [14]$$

と置く。ケーシングの貫入力 F_K と油圧抵抗 P_M の関係式は、式 [13] に式 [14] を代入することで、

$$F_K = \mu \cdot P_M + W \quad [15]$$

と求められる。

3.2 PBD 打設機を用いた打設力検定試験

油圧抵抗 P_M からケーシングの貫入力 F_K を求めるためには、式 [15] に示した変換係数 μ が必要である。ここでは、実際の PBD 打設機を用いたケーシングの打設力検定試験を実施し、変換係数 μ の推定を試みた。写真-2 は、打設力検定試験の実施状況である。打設力検定試験では、図-5 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 を計測すると同時に、ケーシング先端に設置したロードセルを用いて貫入力 F_K を直接測定する。なお、ケーシング先端とロードセルの間には、鉛直に荷重が伝達されるように治具を配置している。表-1 は、実施した打設力検定試験の一覧である。なお、表-1 に示したケーシング重量は、PBD 打設機にセットしたケーシング長から算定している。検定試験では、写真-3 に示した中型機 (PDC-200 型) と大型機 (PDC-300 型) の2種類のPBD 打設機を使用した。

図-6 は、中型機 (PDC-200 型) を使用した場合の試験結果である。横軸は油圧抵抗 P_M 、縦軸はケーシングの貫入力 F_K から重量 W を引いて算定した油圧モータによる押込み力 $F_M (=F_K - W)$ である。この結果、油圧抵抗 P_M と油圧モータによる押込み力 F_M の間には比例関係が成り立つことがわかる。また、この結果より式 [15] に示した変換係数は $\mu=0.0032$ と求めることができる。

図-7 は、大型機 (PDC-300 型) を使用した場合の試験結果である。図中には、同型の PBD 打設機の試験結果をすべてプロットしている。油圧抵抗 P_M と油圧モータの押

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	
	機体番号	型番	W (MN)	
D-01	202号機	PDC-200	中型機	0.0157
D-02	302号機	PDC-300	大型機	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

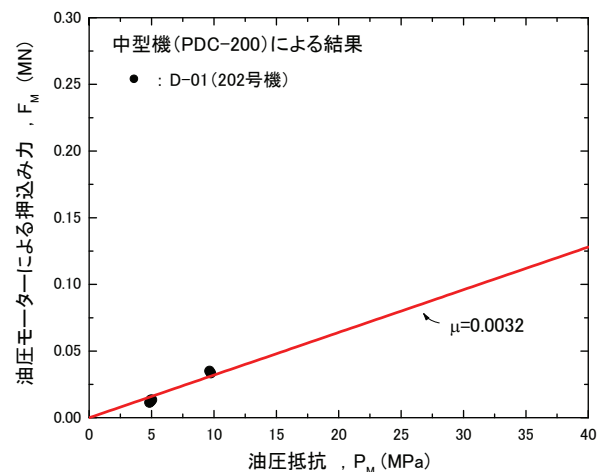


図-6 中型機による打設力検定試験結果

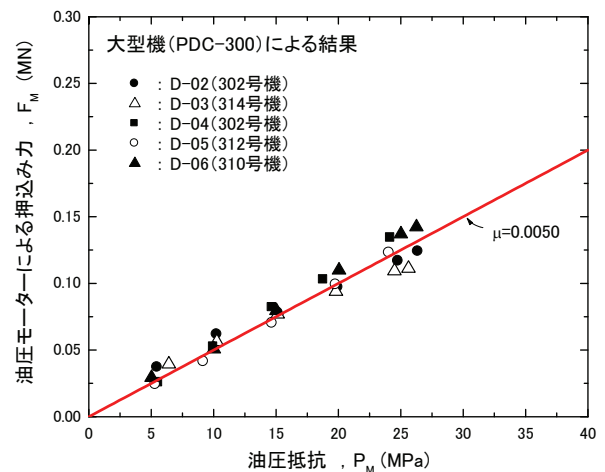


図-7 大型機による打設力検定試験結果

込み力 F_M の間には、中型機と同様に比例関係が成り立ち、式〔15〕に示した変換係数を $\mu = 0.0050$ と求めることができる。なお、若干の誤差はあるが、同型の PBD 打設機であれば各機体による差はほとんどないこともわかる。

以上のことから、現場で使用した PBD 打設機の仕様（型番、ケーシング長）がわかれば、変換係数 μ とケーシングの重量 W を定めることができ、油圧抵抗 P_M から式〔15〕を用いてケーシングの貫入力 F_K を算定することが可能である。

4. 貫入力推定式における補正係数の決定

4.1 ケーシングの押込み・引抜き試験

静的コーン試験の貫入抵抗 q_c をオシログラフの油圧抵抗 P_M から推定する場合、式〔11〕に示した補正係数 α 、 β の値が必要となる。この補正係数 α 、 β には、貫入速度や先端形状、摩擦係数の違いや地盤のリモールド等、さまざまな影響が考慮されているため、理論的あるいは解析的に値を定めることは困難である。また、実際の PBD 打設時の油圧抵抗から補正係数を求めようとしても、式〔11〕に未知数が 2 つ含まれるため、補正係数を一意に定めることができない。そこで、ケーシングの押込み・引抜き試験結果を基に、補正係数 α 、 β の値の検討を試みた。図-8 は、ケーシング押込み時・引抜き時における力の釣合いを示した模式図である。ケーシングを押込む際の力 $F_K|_{\text{押}}$ は式〔1〕より、

$$F_K|_{\text{押}} = F_C + F_S \quad [16]$$

である。これに対して、ケーシングを引抜く際の力 $F_K|_{\text{引}}$ には先端抵抗力 F_C が作用しないため、

$$F_K|_{\text{引}} = F_S \quad [17]$$

となる。式〔16〕および式〔17〕に示したケーシングの押込み力と引抜き力の差を取ると、

$$F_K|_{\text{押}} - F_K|_{\text{引}} = F_C \quad [18]$$

と表される。このように、ケーシングの押込み・引抜き試験を実施することで、ケーシングに作用する先端抵抗力 F_C と周面摩擦抵抗力 F_S を個別に求めることができ、補正係数 α 、 β の値を検討することが可能になる。

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の周囲 12 箇所、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ている。なお、使用した PBD 打設機は中型機（PDC-200）であり、ケーシングの重量 W は 0.0157MN である。

図-9 は、静的コーン貫入試験による貫入抵抗 q_c の深度分布である。試験ヤードの地盤は、比較的硬い層（砂層）が地表から G.L.-5m 付近にかけて分布しており、その下に軟弱層（粘性土）が厚く堆積している。図-10 は、押込み・引抜き試験において測定した油圧抵抗 P_M の深度

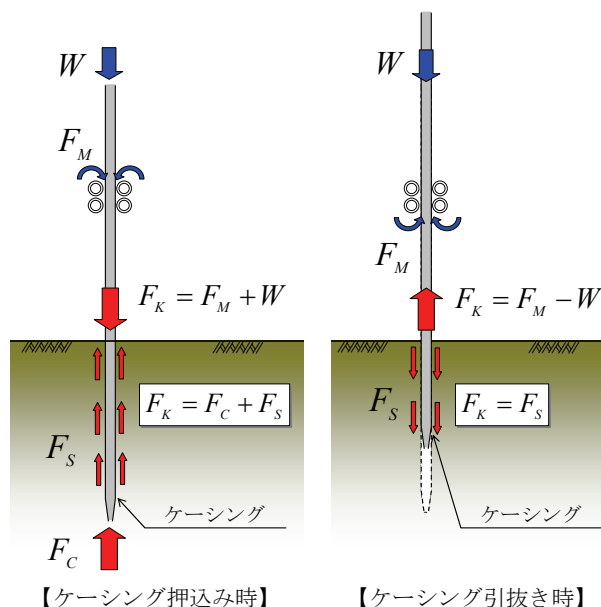


図-8 ケーシング押込み・引抜き時の力の釣合い

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 No.	打設試験 No.	貫入速度 V [m/s]	静的コーン 貫入試験 No.	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

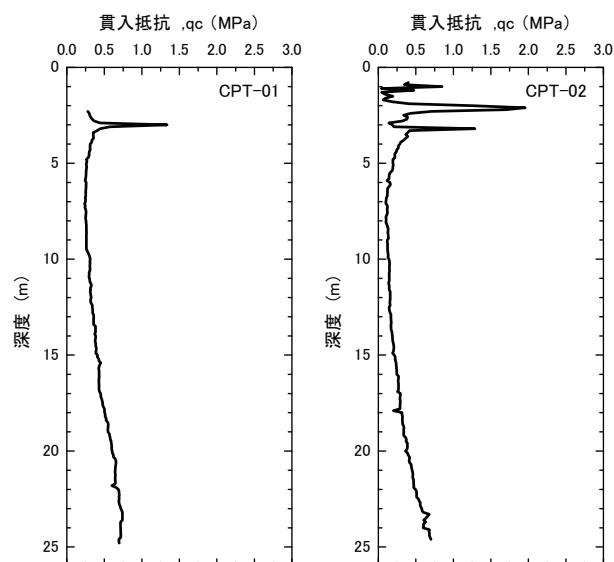


図-9 静的コーン貫入試験結果

分布である。式〔11〕に示した推定式は、圧密促進を必要とする軟弱層（粘性土）を対象としているため、ここでは G.L.-5m 付近にかけて分布する硬い層（砂層）の油圧抵抗データは割愛している。なお、図-10 に示す油圧抵抗 P_M は 1.0～1.5MPa 程度の範囲でズレが見られる。これは、G.L.-5m 付近に分布する硬い層（砂層）の層厚が異な

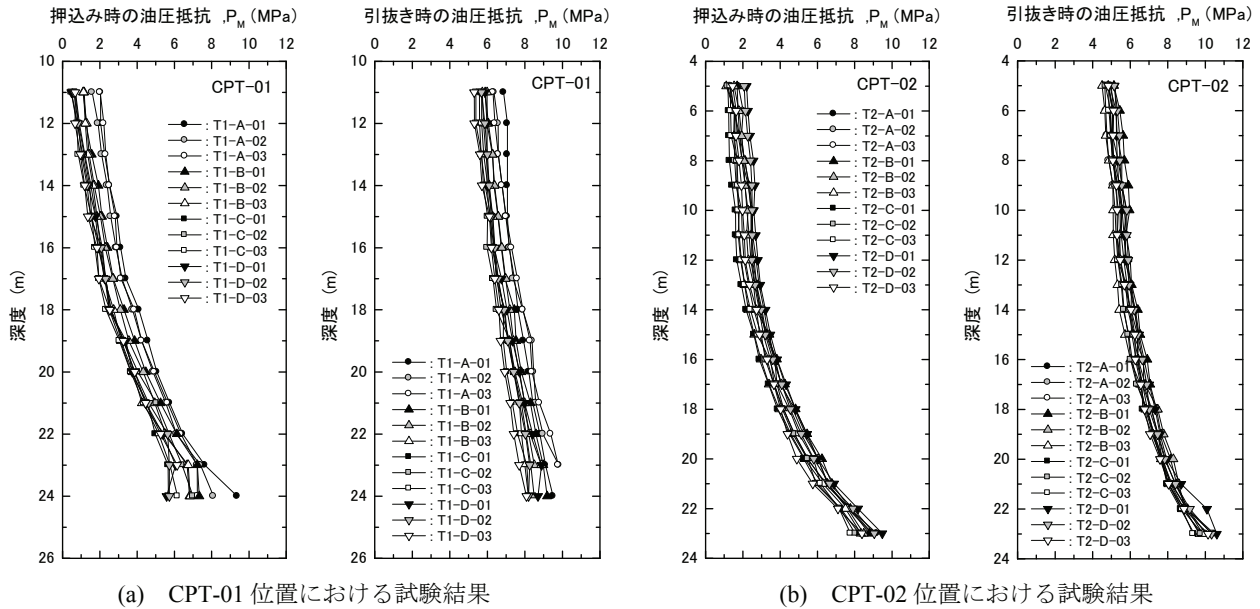


図-10 ケーシングの押込み・引抜き試験による油圧抵抗深度分布

る影響であり、深度方向に対する油圧抵抗の増分量には、ほとんど差が見られない。

4.2 先端抵抗力に作用する補正係数 α の検討

ケーシング押込み時の力 $F_K|_{\text{押}}$ を、押込み時の油圧抵抗 $P_M|_{\text{押}}$ を用いて表すと、式〔15〕より、

$$F_K|_{\text{押}} = \mu \cdot P_M|_{\text{押}} + W \quad [19]$$

である。一方、ケーシング引抜き時の力 $F_K|_{\text{引}}$ には、ケーシングの自重 W が押込み時とは逆に作用するため、引抜き時の油圧抵抗 $P_M|_{\text{引}}$ を用いて、

$$F_K|_{\text{引}} = \mu \cdot P_M|_{\text{引}} - W \quad [20]$$

と表される。式〔19〕および式〔20〕を式〔18〕に代入すると、

$$F_C = \mu \cdot (P_M|_{\text{押}} - P_M|_{\text{引}}) + 2W \quad [21]$$

となり、ケーシングの先端抵抗力 F_C を油圧抵抗 P_M から求めることができる。また、ケーシングの先端抵抗力 F_C と静的コーン貫入試験の貫入抵抗 q_c の間には、式〔4〕のように比例関係が成り立つと仮定しており、

$$F_C = \alpha \cdot A_K \cdot q_c \quad [4] : \text{再掲}$$

である。この式〔4〕と式〔21〕を比較することで、補正係数 α の検討を行った。

図-11 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 、横軸を貫入抵抗 q_c から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。図中には、実施した試験ケースのすべてをプロットしている。若干バラツキは見られるが、両者の間にはほぼ比例関係が成り立つと考えられ、補正係数 α は1.0と求められる。なお、補正係数 α にはケーシング

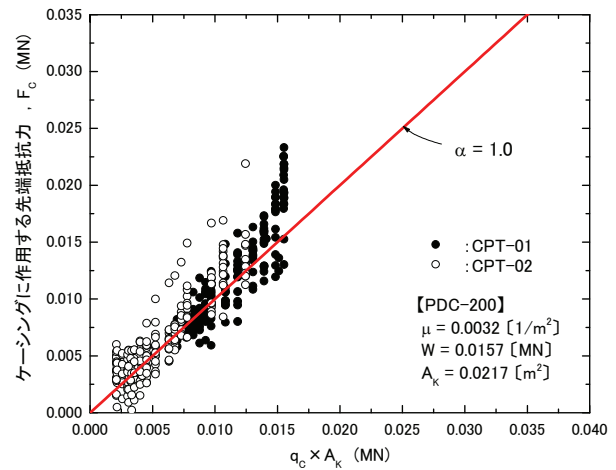


図-11 補正係数 α の検討結果

貫入速度の影響も考慮されているが、今回試験を実施した貫入速度0.2~1.0m/sの間では、補正係数 α の値に明確な差は生じておらず、通常のPBD施工範囲内では、貫入速度の影響を考慮する必要はないと考えられる。

4.3 周面摩擦抵抗力に作用する補正係数 β の検討

ケーシングの周面摩擦抵抗力 F_s は、式〔17〕に式〔20〕を代入することで、引抜き時の油圧抵抗 $P_M|_{\text{引}}$ を用いて次のよう表される。

$$F_s = \mu \cdot P_M|_{\text{引}} - W \quad [22]$$

また、ケーシングの周面摩擦抵抗力 F_s と静的コーン貫入試験の貫入抵抗 q_c の間には、式〔10〕に示す関係が成り立つと仮定しており、

$$F_s = 0.05 \cdot \beta \cdot \bar{q}_c \cdot A_{KS} \quad [10] : \text{再掲}$$

である。この式〔10〕と式〔22〕を比較することで、補正係数 β の検討を行った。

図-12 は、縦軸を油圧抵抗 P_M から算定したケーシングの周面摩擦抵抗力 F_s 、横軸を静的コーン貫入試験の貫入抵抗 q_c の平均値から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、両者の間にはほぼ比例関係が成り立つといえる。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を考慮した値であり、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、今回のケースでは補正係数 β は 0.06 程度と求めることができる。なお、補正係数 β は理論上ケーシング貫入速度の影響は受けない。図中には、実施した試験ケースのすべてをプロットしているが、貫入速度の違いによる差はほとんど生じていないことも確認できる。

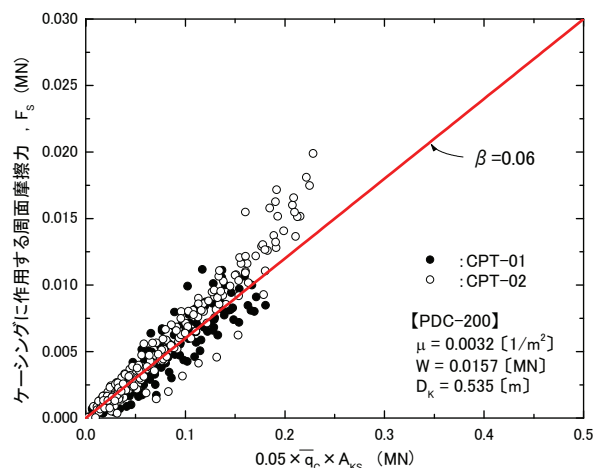


図-12 補正係数 β の検討結果

4.4 貫入力推定式を用いた貫入抵抗の算定

式〔11〕に示す貫入力推定式を用いて、図-10 に示した押込み時の油圧抵抗 $P_M|_{押}$ から、静的コーン貫入試験による貫入抵抗 q_c の算定を試みた。補正係数には、 $\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 0.06$ を用いている。

図-13 は、油圧抵抗から算定した貫入抵抗と、静的コーン貫入試験による貫入抵抗を比較した図である。油圧抵抗から算定した貫入抵抗（図中プロット）は、静的コーン貫入試験結果（図中ライン）とほぼ一致しており、式〔11〕に示した貫入力推定式の有効性が伺える。

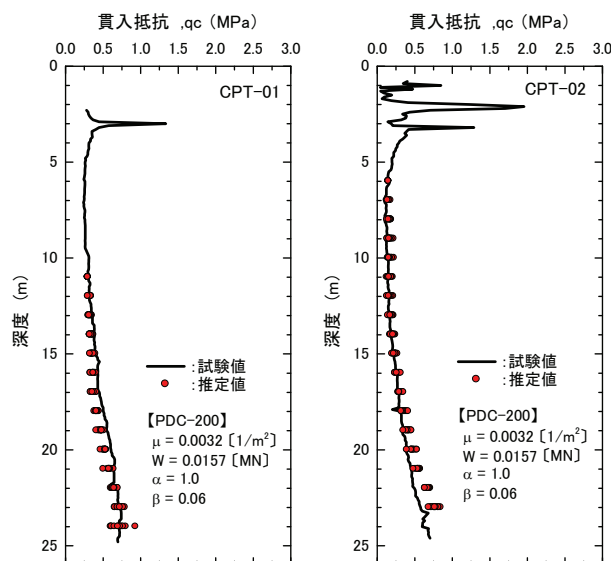


図-13 油圧抵抗から推定した貫入抵抗

5. 実現場における貫入抵抗の推定

貫入力推定式の実現場での適用性・汎用性を検討するため、PBD 工法を採用している複数の現場に対して、式〔11〕を用いたコーン貫入抵抗の算定を試みた。表-3 は、検討対象とした現場の一覧である。変換係数およびケーシング重量は、使用した PBD 打設機の仕様（型番、ケーシング長）から求めた値であり、補正係数 α はすべての現場で固定値 1.0 を用いた。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を考慮した値であり、周面摩擦係数 FR を 0.05 と仮定しているため対象現場の地盤物性に大きく依存する。ここでは、補正係数 β の値を 0.01～0.1 の範囲で変化させて貫入抵抗を計算し、事前調査結果（コーン貫入試験結果）と最も良く一致する値を採用している。

図-14 は、事前調査として実施した静的コーン貫入試験位置近傍の油圧抵抗（オシログラフ）と、推定した貫入抵抗の深度分布である。油圧抵抗から推定した貫入抵抗は、硬い層（砂層）では若干小さめに評価されるものの、静的コーン貫入試験結果とほぼ一致しており、貫入力推定式の実現場に対する適用性・妥当性が確認できる。なお、図-14 に示した貫入抵抗から、補正係数 β は硬い層（砂層）が多く軟弱層が比較的薄い地盤では 0.03～0.05 程度、硬い層（砂層）が少なく軟弱層が厚い地盤では 0.05～0.07 程度の値となる傾向にある。これは、砂層が多

表-3 検討対象現場の一覧

	PBD打設機		ケーシング重量 W [MN]	補正係数	
	型番	変換係数 μ		α	β
現場-01	PCD-300	0.0050	0.0168	1.0	0.06
現場-02	PDF-300	0.0050	0.0141		0.03
現場-03	PDF-300	0.0050	0.0063		0.06
現場-04	PDF-200	0.0032	0.0075		0.03
現場-05	PDF-200	0.0032	0.0088		0.07
現場-06	PDC-300	0.0050	0.0098		0.06
現場-07	PCD-300	0.0050	0.0098		0.05

く含まれる地盤では、軟弱層との層境に砂分やシルト分が多く含まれるため、ケーシングの周面摩擦に影響を与えることが要因と考えられる。このような補正係数 β と地盤物性との関係については、今後さらにデータ収集・分析を行うことで傾向を把握し、値を設定することが必要であるが、PBD 工法を採用する現場では、PBD の打設長や打設間隔を設定するために事前調査がほぼ確実に実施されるため、実用上は各現場の事前調査結果とのフィッティングにより補正係数 β を求めればよい。

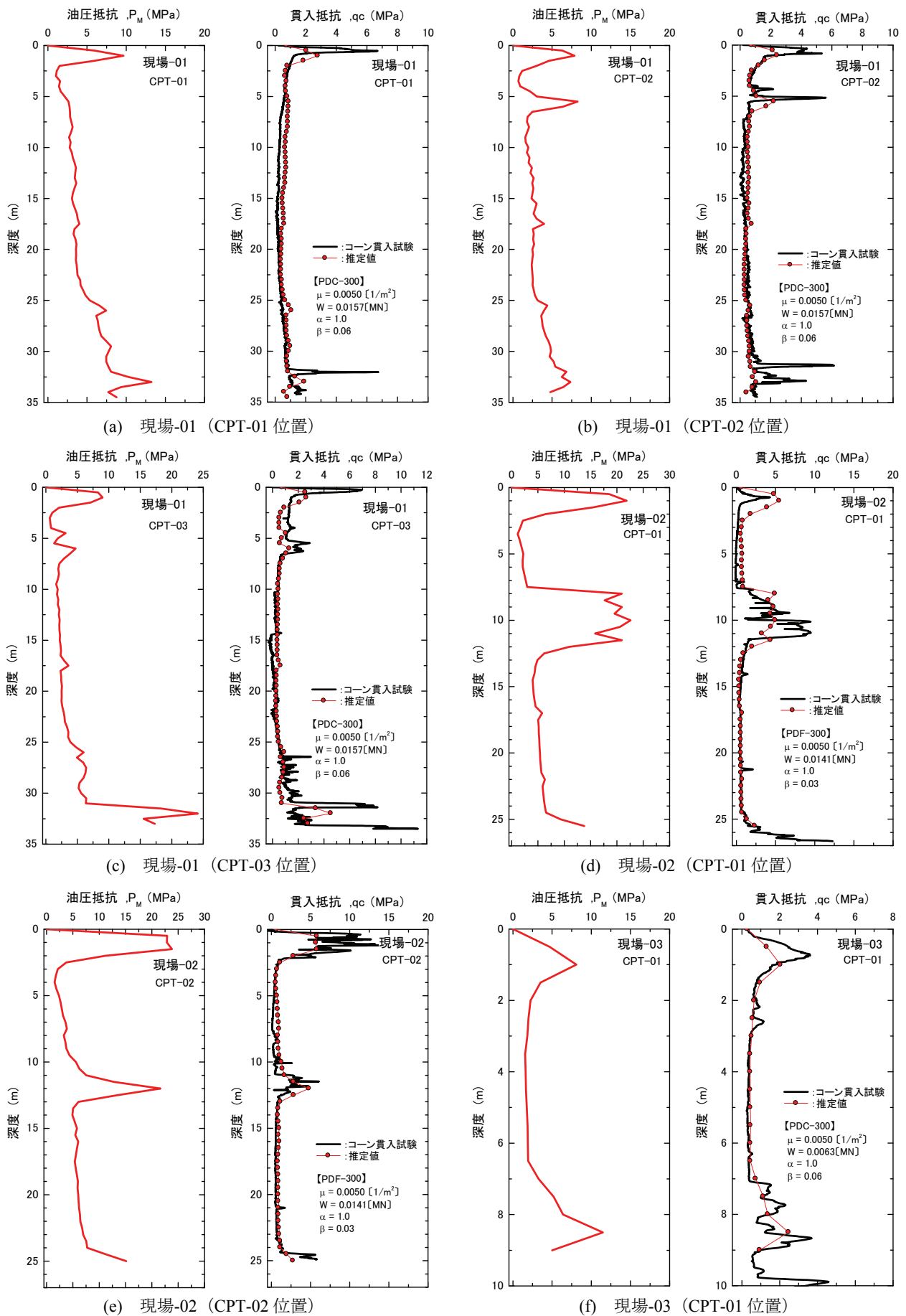
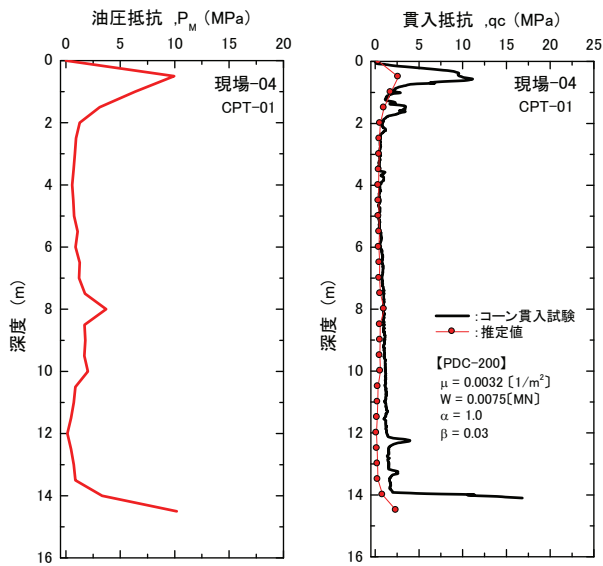
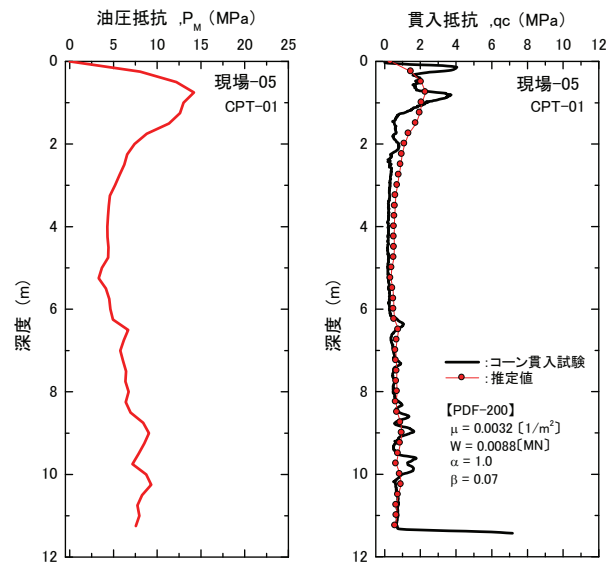


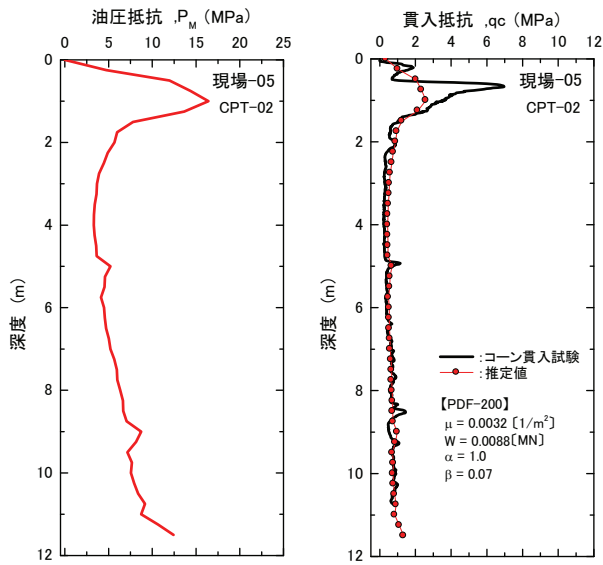
図-14 静的コーン貫入試験と油圧抵抗から推定した貫入抵抗の比較



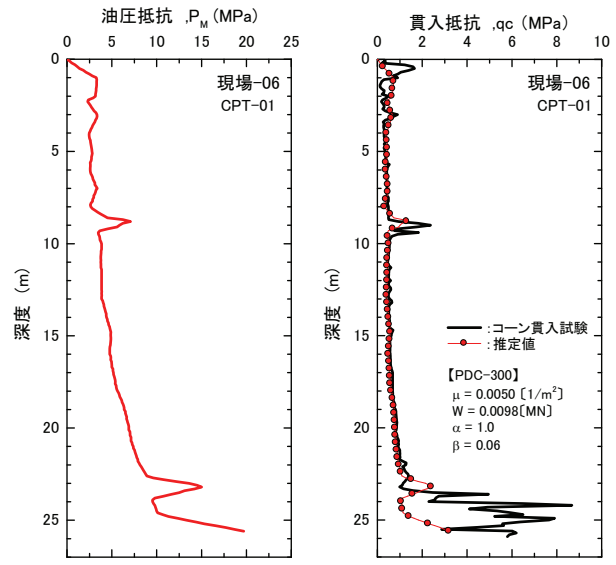
(g) 現場-04 (CPT-01 位置)



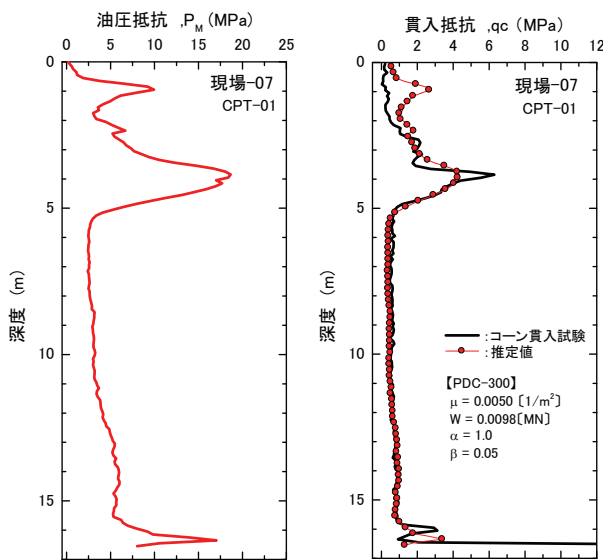
(h) 現場-05 (CPT-01 位置)



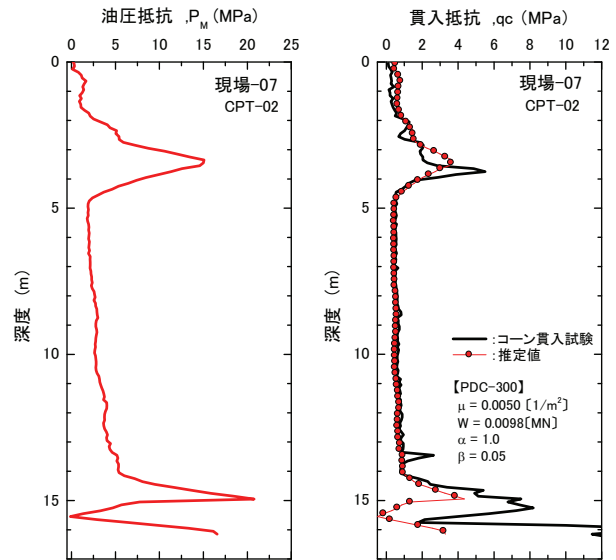
(i) 現場-05 (CPT-02 位置)



(j) 現場-06 (CPT-01 位置)



(k) 現場-07 (CPT-01 位置)



(l) 現場-07 (CPT-02 位置)

図-14 静的コーン貫入試験と油圧抵抗から推定した貫入抵抗の比較

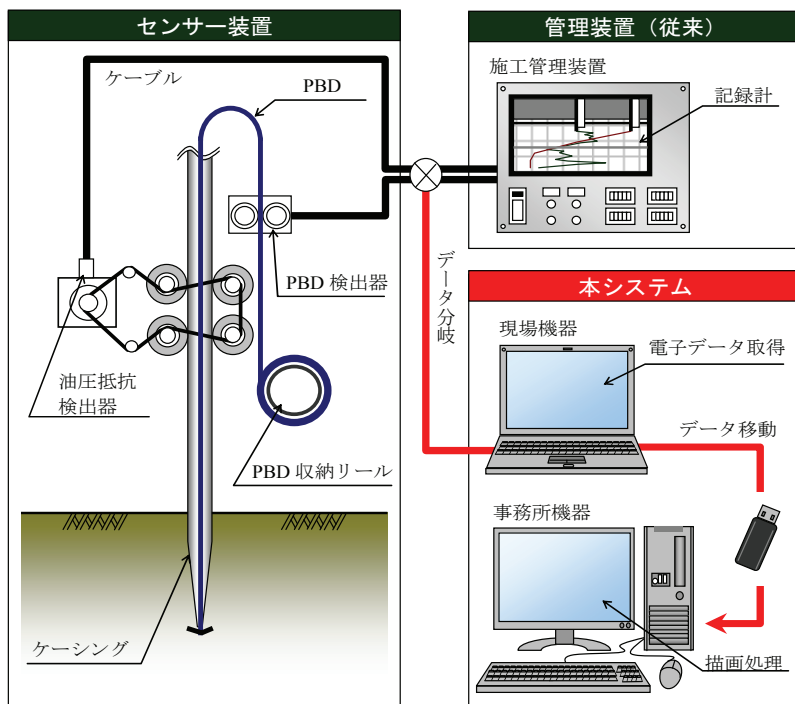
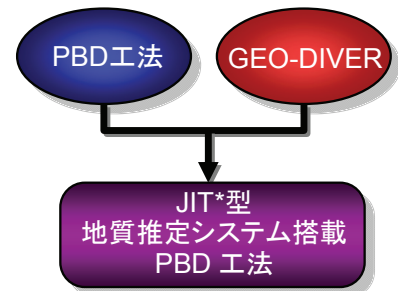


図-15 「GEO-DIVER」の概略図（文献 14）に加筆



写真-4 PBD 打設事例 (1.0m×1.0m)



*Just In Time

図-16 「GEO-DIVER」と PBD 工法

6. 地質分布推定システムの概要

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（写真-4 参照）。このため、打設位置情報と油圧抵抗から算定した貫入抵抗を用いて、地盤内の強度分布を連続的かつ多次元的に評価することが可能である。そこで、オシログラフに記録される油圧抵抗から静的コーン貫入試験における貫入抵抗を算定し、PBD 打設位置情報から地盤の強度分布や地質分布を連続的かつ多次元的に評価するシステム「GEO-DIVER（ジオダイバー）：Geological Map Drawing System by Intrusive of Vertical Drains」を作成した。図-15 は、本システムの概略図である。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、施工時の油圧抵抗データをプログラム処理することが困難である。「GEO-DIVER」では、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パソコンにて取得し、推定式を用いてリアルタイムで貫入抵抗を算定する。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画処理するシステムとなっている。このため、従来の PBD 工法に「GEO-DIVER」を適用することで、図-16 に示すように「JIT（Just In Time）型地質推定システム搭載 PBD 工法」となり、本システムから推定される強度分布や地質分布は、PBD がどのような地盤に施工され、その効果はどの程度になるかを管理する品質管理や性能規定に用いられることになる。なお、本システムで利用する 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、図-15 に示すようにシステム導入のための、PBD 打設機の改良等（新たな



図-17 対象現場位置図

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なく、非常に簡易かつ安価に導入可能であることも、本システムの大きな特徴の 1 つである。

7. 実現場における適用事例

実現場の施工に対して今回開発した「GEO-DIVER」を導入し、その適用性・有用性を検討した。検討対象とした現場は、舞鶴若狭自動車道三方インターチェンジ工事（福井県三方上中郡若狭町）の向笠地区で実施した PBD 施工である。図-17 に示すように、対象現場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-18 は、PBD 施工位置である向笠地区の地質想定縦断面図である。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 付近まで複雑に堆積していることが予想されており、同じ向笠地区で実施した試験盛土施工（図-18 参照）では、複雑な地質分布

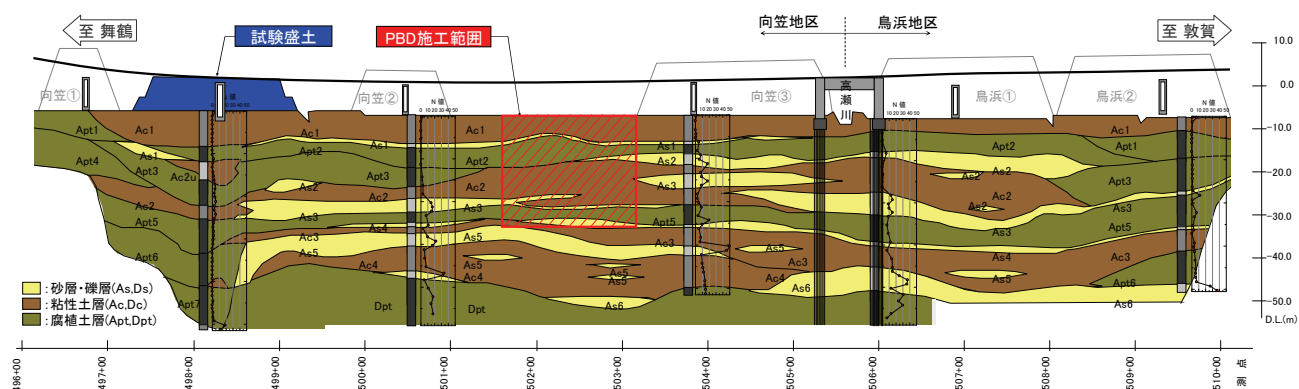


図-18 向笠地区の地質想定縦断面図

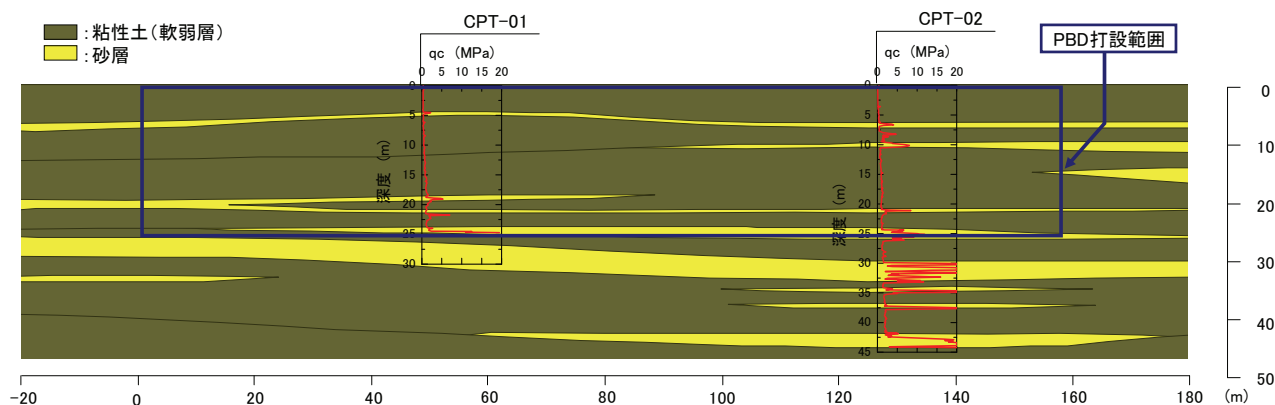


図-19 PBD 施工範囲の地質想定縦断面図と事前調査位置

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^{15), 16)}。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る。図-19 は、図-18 に示した地質想定縦断面図から PBD 施工範囲を抜粋した図である。PBD 工法は、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（写真-5）。しかしながら図-19 中に示したように、この 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、事前に設計した PBD の配置や圧密放置期間が適切であるかの判断は困難である。このため今回開発した「GEO-DIVER」の適用は、不等沈下や残留沈下、PBD の効果確認等に非常に有効であると考えられる。

図-20 は、油圧抵抗から推定した貫入抵抗と静的コーン貫入試験結果（図-19 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、粘性土層では静的コーン貫入試験結果とほぼ一致しており、提案した推定式の精度は十分であると考えられる。図-21 は、油圧抵抗から推定した貫入抵抗（7107 本分）と打設位置情報から、改良範



写真-5 向笠地区における PBD 施工状況

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-22 は、図-21 に示した任意断面に対して、地盤強度（貫入抵抗）分布を切り出した図である。これらの分布図から、地盤強度の高い排水層（砂層）と思われる層が、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、トラフィカビリティ確保のための敷砂施工による影響である。

また、今回対象とした現場では、圧密対象層（粘性

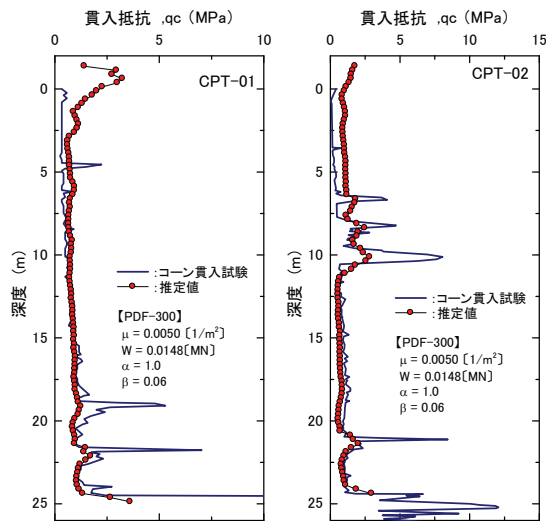


図-20 推定した貫入抵抗とコーン貫入試験の比較

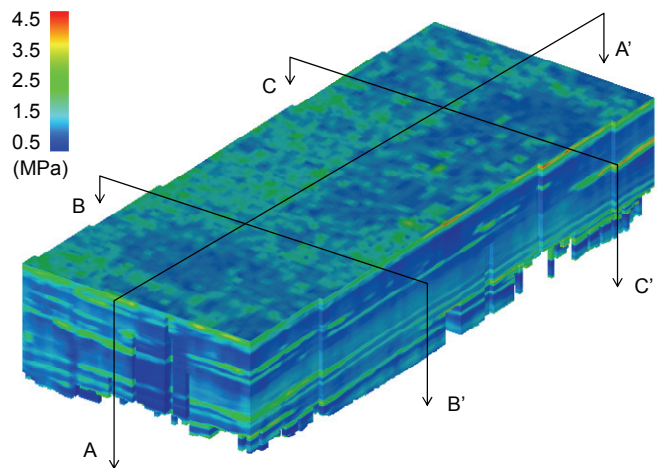


図-21 推定した貫入抵抗の分布 (3次元)

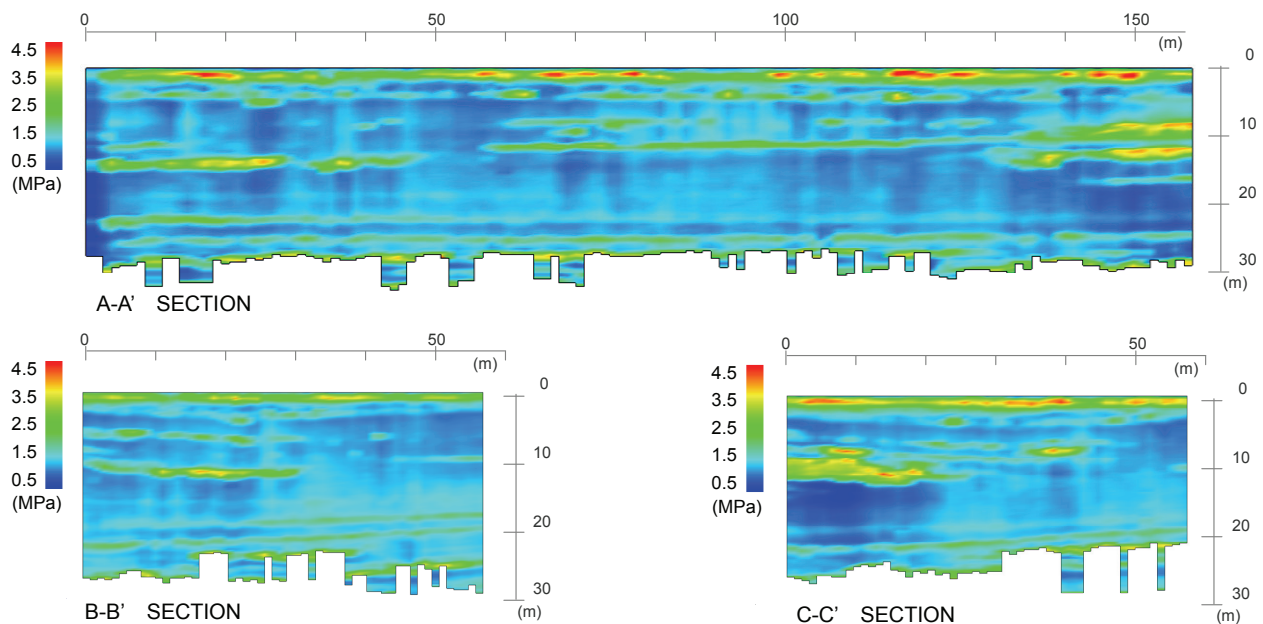


図-22 推定した貫入抵抗の分布 (2次元)

土)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。図-23は、図-22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(粘性土)と硬い層(砂層)の2色に塗り分けた図である。図-22のA-A'断面は、図-19に示した地質断面図位置における地質推定断面図であるが、図-19と比較すると砂層分布位置にあまり大きな違いは見られないことがわかる。しかしながら、A-A'断面では深度10m付近の砂層が断面左側にも分布していること、断面右側の深度5~15m付近の砂層が想定よりも厚く堆積していることから、圧密速度や沈下量が設計値とは異なることが予想されるとともに、PBD打設範囲内での不等沈下の発生も懸念される。

以上のように、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。「GEO-DIVER」から得られる強度分布や地質分布は、沈下計算や安定計算、FEM変形

解析^{17), 18)}等へ利用することで、PBD打設後の盛土施工速度や施工手順の検討、不等沈下や残留沈下の予測が精度良く実施可能であり、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。

8. おわりに

本研究では、PBD打設時に計測した油圧抵抗から、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。この推定式に対して、PBD打設機を用いた試験結果や、実際の現場に対して適用した結果から、精度良く地盤強度(コーン貫入抵抗)を推定可能であることを示した。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打設地盤の強度分布や地質分布を、連続的かつ多次元的に評価するシステム「GEO-DIVER」を作成し、実際の現場に導入することでその適用性・有用性について検討を行った。推定した強度分布や地質分布は、実際の地盤を精度良く表現できて

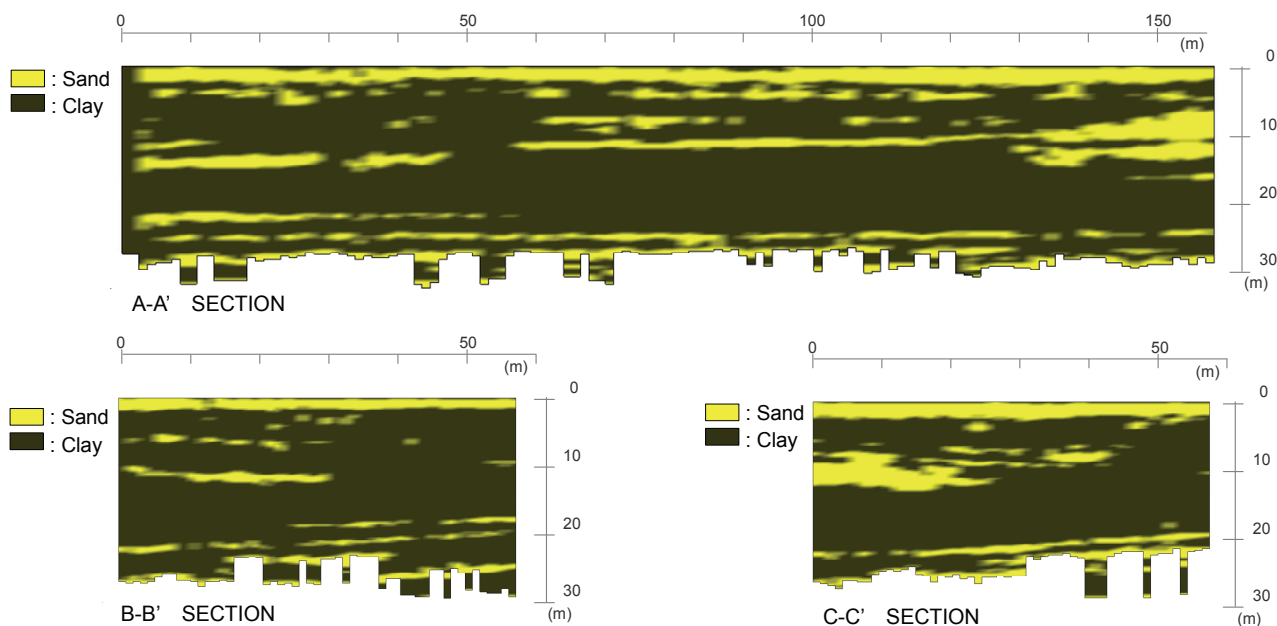


図-23 貫入抵抗分布から推定した地質断面図

いると考えられ、沈下・安定計算や FEM 変形解析等へ利用することで、工期短縮や工程管理、PBD 工法の性能評価等へ有効に活用できる。

なお、本研究で提案した貫入力推定式は、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貫入抵抗を安定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。また、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) 平田昌史, 白神新一郎, 福田淳, 清水英樹, 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)
- 2) 久保大輔, 長澤正明, 矢野一郎, 平田昌史, 並川武, 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 (投稿中)
- 3) プラスチックボードドレーン協会: プラスチックボードドレーン工法 その理論と実際, 鹿島出版会, pp.99-130, 2009.
- 4) 渡部要一, 鈴木和実, 新舎博, 宮本健児: PBD 打設時のマンデル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.
- 5) 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.
- 6) 室町忠彦: 静的コーンペネトロメータの軟弱地盤調査への適用に関する実験的研究, 鉄道技術報告, No.757(施工編第 333 号), 1971.
- 7) Muromachi, T.: Cone penetration testing in Japan, *Proc. of Cone Penetration testing and experience*, ASCE National Conv., St. Louis, pp.49-75, 1981.
- 8) 土質調査法改定委員会編: 地盤調査法, 地盤工学会, pp.233-235, 1995.
- 9) 室町忠彦, 赤木俊允 共訳: 貫入試験と地盤調査, 鹿島出版社, pp.183-210, 1976.
- 10) Begemann, H.K.S.Ph.: The Friction Jacet Cone as an Aid in Determining the Soil Profile, *Proc. of the 6th ICSMFE*, Vol.I, pp.17-20, 1965.
- 11) 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.
- 12) Robertson, P.K.: Soil classification using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, No.1, pp.151-158, 1990.
- 13) 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.
- 14) NCB ドレーン協会: 設計施工マニュアル, p.61, 2001.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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載荷盛土の 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.
- 18) 西川浩二, 平田昌史, 福田淳, 信田潤一, 山田耕一, 川井田実: 軟弱地盤における載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.