有明海沿岸低平地域における地層の3次元可視化と

軟弱粘土層の土性判別に関する研究

日野剛徳1

1 佐賀大学低平地沿岸海域研究センター

国内外の沿岸域で多用される地盤改良工法の品質管理・保証の向上に資することを到達点として, 工学・環境の両面を兼ねた地層・土性判別システムの構築を目指している.有明海沿岸低平地域を具 体的なフィールドとして,当地の上部更新統の3次元可視化を図り,上位の軟弱完新統においては3 成分コーンと土質試験結果の相関からなる土性判別法について検討し,上記の目標の礎を築いた.

1. はじめに

海成層では深層混合処理工法の適用に際して 塩分が改良強さにプラスの効果をもたらすとの 知見が導かれている^{1),2)}.北詰ら³⁾は石灰安定 処理土の長期特性調査を実施し,27年間に及ぶ 諸特性の変化を調べ,改良体全体として強度低 下は認められなかったことを報告している.

他方,橋本ら⁴は改良地盤からのカルシウム 溶脱に伴う周辺環境中のイオンの影響を調べ, 数値解析的予測手法を構築し,劣化評価の妥当 性について論じている.近隣の事例に目を向け ると,有明海湾奥部に注ぐ強混合感潮河川の六 角川では,改良土からなる堤防堤体から漏水が 生じている.改良土が高塩分環境にさらされて わずか数年のうちにカルシウムの溶脱が進み, 泥濘化するとの見解に端を発し,地表・地下全 般にわたる改良土の劣化現象の懸念が表明され ている⁵.

わが国の沿岸域は,その多くが7,000年前の 縄文海進・海退に伴う軟弱な海成層の堆積によって形成されている.海成粘土中の間隙水の原 初環境は海水であるが,現在では塩分溶脱現象 が進み塩濃度の減少が認められるとともに⁶⁰, 最近では地下深部から地表に向けて地下風化に 伴う海成層の酸性化が認められるようになって きている⁷⁰.さらに,深層混合処理工法のよう な軟弱地盤対策の多用を余儀なくされる沿岸域 では,今後は地球温暖化に伴い一層の地表水位 変動による影響下にさらされるとともに,海面 上昇に伴う地下水の塩水化も深刻な懸念となる ⁷⁰.

以上のように,深層混合処理工法ひとつをと っても,その必要性と本工法を取り巻く地盤環 境の変遷がその品質管理・保証諸量に及ぼす影 響に関する懸念の関係は極めて混沌とした状態 にある.この解決のためには,地盤工学,環境 地盤工学,地質学,地球化学による総力を結集 し,各分野の視点による検討から工学・環境の 両面を兼ね備えた地層・土性判別システムの構 築が焦眉の急と確信している.

本研究ではその端緒として,有明海沿岸低平 地域を具体的なフィールドに取り上げ,当地の 地層の上部更新統の3次元可視化を図り,これ より上位の軟弱完新統においては3成分コーン と土質試験結果の相関からなる土性判別法につ いて検討し,上記の目標の礎を築くことを目的 とする.

2. 有明海沿岸低平地域における三田川層の 3 次元可視化

2.1 有明海沿岸低平地域における既存の地 下断面図に関する動向

有明沿岸低平地では,有明沿岸道路の建設プロジェクトに伴い,有明海研究グループ ⁸以降の地域横断的な地質学的・地盤工学的情報が蓄積されつつある.当該プロジェクトでは,環境アセスメントの観点から浅層地下水のモニタリングが課題になっている.そこで,地下水観測井を用いて地下水質の分析や流向流速の検討が続けられている⁹が,これらの結果について不明な点が後を絶たない.特に有力な浅層地下水帯水層であり,上部更新統に属する三田川層中の地下水の動きについて,上位に軟弱な完新統が被覆しているために不明である.

有明海沿岸低平地域はかつて,堆積環境が地 盤特性に及ぼす影響に関する研究委員会九州地 区部会により,所定のグリッド線に基づく地下 断面が描かれている¹⁰.以後の検討では,この 地下断面図を更新して三田川層の三次元可視化



図-1(a) 地下断面の修正の一例 (D-D'断面・ 修正前)



図-1(b) 地下断面の修正の一例 (D-D' 断面・ 修正後)



図-2 地質断面の位置(参考文献 10)の図に加筆)

を図り,同地層における地下水の流向まで検討 する.同研究委員会九州地区部会によって描か れた地下断面図群¹⁰は,その後(独)産業技術 総合研究所・地質調査総合センターによる「佐 賀地域の地質」⁷⁰の執筆の際に,最近のボーリン グ調査の成果に基づいて更新・修正された.図 -1(a),(b)に,地下断面図の修正の例を示す.この ような修正地下断面を用いて以後の検討に供し た.

2.2 三田川層基底の3次元可視化と地下水流 動方向の推測

3 次元可視化に際しては,データ分析・グラ フ作成ソフトウェアの ORIGIN を使用した.図 -2 に示す緑のポイントは地下断面図が描かれて いないため、同ソフトの機能である Statistics and Date Analysis in Geology を参照に補完計 算を行った.低平地表層を占める蓮池層上部と 有明粘土層、およびこれらに覆い隠されている 下位の蓮池層下部、三田川層、および Aso-4 に おいて 3 次元可視化を図った.図-3(a),(b)は三田 川層基底深度の 3 次元可視図である.図-3(b)の 中の D-D'・C-C'(垂直線)とI-I'・J-J'(平 行線)で囲まれた範囲(図-2中ではピンクの範 囲、以後当該範囲と呼ぶ)では三田川層中の地 下水の流向流速が実測されている 9.3 次元可 視化による検討の結果から、当該範囲において は図-3(b)に示す地下水の流れが推測された.



図-3(a) 三田川層基底の三次元可視化 (三次元図)

2.3 勾配計算による流向方向の検討

当該範囲における流向をさらに推測するため に、プレートの勾配計算を行った.流向の計算 において対象点を3点取り上げ、それぞれの座 標 (x, y, z)を式ax + by + cz + d = 0に代入し、 a, bおよびdの値を計算する.両辺をcで除す ことでz = -ax - by - dの平面方程式となり、この 式を偏微分し $ix = \partial z / \partial x$, $iy = \partial z / \partial y$ をそ れぞれ得る.これより傾き θ は $\theta = tan^{-1}ix / iy$ により求められる.求めた θ を θ 'とおくと勾配 iは $i\theta = ixsin\theta' + iycos\theta'$ によって得られる. さらに透水係数kがわかればv = kiより流速を 求めることができる.

四角形 0bdf (図-2 中の当該範囲を含む黄色の 全域)において流向流速の実測点 $9 \delta \alpha$ (地図 上では久保田地区における北緯 33° 13'48.6670",東経 130° 13'37.9034")とし, *c-g* と *a-e* の交点を β とする. 三角形 $0a\alpha$ の勾配方 向は北を 0° とし 94° (矢印 1),三角形 $\alpha a\beta$: 180° (矢印 2),三角形 $\alpha g\beta$: 162°, (矢印 3) 三角形 $0\alpha g$: 97° (矢印 4)の値がそれぞれ得 られた.また,三角形 0cfの広範囲なグリッド で検討したところ,220°の値が得られた.以 上に計算された 5 つの流向から,四角形 0bdfに おける流向は弓なりに南西方向に流れることが 推測された.

3. 軟弱完新統の土性判別

3.1 調査箇所と湿潤密度の推定

 3 成分コーンを用いた土性判法に Robertson¹¹⁾によるものがある.この判別法は, 地盤の鉛直全応力および鉛直有効応力とともに,







図-4 勾配計算プレート

正規化先端抵抗比 Q_t,正規化間隙水圧比 B_qおよび正規化周面摩擦比 F_rの3つのパラメータから土性が判別される考え方によるものである.

佐賀市嘉瀬地区から得られたボーリングおよび3成分コーン結果(以後嘉瀬コアと呼ぶ),ならびに佐賀県杵島郡有明町における同結果(以後竜王コアと呼ぶ)を用いて以後の検討に供した. 嘉瀬コアおよび竜王コアはともに佐賀県政下の有明沿岸道路プロジェクトにおいて基準コアに位置づけられるものであり¹²⁾,3成分コー

表-1 俯瞰法に補完法および 0.5z 法を対比させた際の各パラメータの変化の比率

<hr/>										
	鉛直到	全応力	<u>5カ</u> 鉛直有効応力 変化の比率		正規化先端抵抗比Q _t		正規化間隙水圧比B。		正規化周面摩擦比F,	
	嘉瀬	変11C0 竜王	ッ に 平 嘉瀬	竜王	嘉瀬	竜王	<u>変化の</u> 嘉瀬	レビー 一 竜王	嘉瀬	竜王
空白データ域補完法	0.98~1.01	0.99~1.01	0.96~1.03	0.97~1.04	0.95~1.05	0.80~1.03	0.99~1.01	0.99~1.03	0.99~1.00	0.99~1.04
0.5z法	0.92~1.05	0.98~1.05	0.96~1.13	0.94~1.14	0.83~1.15	0.82~1.19	0.99~1.03	0.99~1.04	1.00~1.03	0.99~1.03
$ \begin{array}{c} 1000 \\ 500 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 10 \\ 5 \\ 1 \\ -0.4 \\ \end{array} $		2 0.4 B	 ○ 俯瞰法 ×空白データ △0.5z法 3 3 0.8 	- 「」	10 5 1 Qt	$ \begin{array}{c} 00 \\ 00 \\ 7 \stackrel{\circ}{\xrightarrow{22}} \\ 7 \stackrel{\circ}{\xrightarrow{22}} \\ 7 \stackrel{\circ}{\xrightarrow{22}} \\ 7 \stackrel{\circ}{\xrightarrow{22}} \\ 6 \\ 10 \\ 5 \\ 10 \\ 1 \\ 0.1 \\ \end{array} $	職法 ゴデータ域補 Z法 菜 Q	完法 @ @ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0		9 9 3 2 5 10
-q 図-5 B _q -Q _t の関係に基づく土性判別 (嘉瀬コア)					図-6 Fr-Qtの関係に基づく土性判別 (嘉瀬コア)					
$\begin{array}{c}1000\\500\\$		2 0.4 Bq	 ○ 俯瞰法 ※空白データ △ 0.5z法 3 3 0.5z法 	域補完法 1 1.2	10 5 1 Qt	$ \begin{array}{c} 000 \\ 000 \\ 7 \land 0.5 \\ 000 \\ 50 \\ 6 \\ 00 \\ 6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0$		完法 合 の 合 の の の の の の の の の の の の の		9 9 0 2 5 10
図-7 Bq	-Q _t の関係 竜王コア	系に基づ ')	く土性判	別		図-8 F1	- Q tの関 (竜王コフ	係に基づ P)	じく 土性半	可另门

ン適用可能層においては 1m ピッチで土質試験 が行われており、データ的に恵まれている. 鉛 直全応力および鉛直有効応力を求めるに際し、 湿潤密度の鉛直分布について次の検討を行っ た:1)実測湿潤密度のデータ空白域を最小二乗 法により緻密かつ連続的にデータ補完するデー タ空白域補完法(以後補完法と呼ぶ);2)実測湿 潤密度を俯瞰的に最小二乗し直線関係を求める 俯瞰法;3)経験則に基づいて地下水位面より上 位の鉛直全応力は1.5z(z=深さ(m))で求め,



図-9 竜王コアにおける Robertson 判別法による土性判別

地下水位以下は 0.5z として求める方法(以後 0.5z 法と呼ぶ). これらの方法で鉛直全応力お よび鉛直有効応力を算出し,土性判別に関する 比較検討を行った.

3.2 鉛直全応力および鉛直有効応力が各パ ラメータに及ぼす影響

表-1 に, 俯瞰法に補完法および 0.5z 法を対比 させた際の各パラメータの変化の比率を示す. まず, 鉛直全応力と鉛直有効応力の変化の比率 は小さく、3 つの湿潤密度算出値に大差は認め られなかった. 正規化先端抵抗比 Qt に関しては, 竜王コアにおいて俯瞰法との比較による変化の 比率が 0.8 倍にまで達しており, 各応力の変化 の比率を凌ぐ.しかし、図-5~8の判別図上では 一部を除き空間分布上の最大変化は平均して約 3%程度にとどまり、大きな影響は認められない ことがわかった.正規化間隙水圧比 Bg と正規化 周面摩擦比 Fr に関しては,変化の比率は鉛直全 応力に類似しており,図-5~8に示す空間分布に おいて、大きな影響は認められなかった.これ らのことから、湿潤密度の実測値からなる鉛直 全応力および鉛直有効応力の算定に関しては, 一般的に用いられる俯瞰法で十分な可能性があ る. あるいは, 0.5z 法でも判別が可能なことも 示唆される.

3.3 土性判別

図-9に、竜王コアにおける Robertson 判別法 からなる柱状図を示す.この結果から、砂層を 挟む層の非均一性が読み取れており、この点に おいて判別法は有効であるといえる.

他方, 竜王コアにおける有明粘土層は極めて 高い鋭敏性を示しており,特に深さ 17m 付近の 鋭敏比 S_t は 100 以上の高い数値を示している. B_q - Q_t 法および F_r - Q_t 法を比較すると,後者でわ ずかにその特徴が捉えられているに過ぎない. Robertson は判別法の作成に際し, S_t =10~20 程度の粘土を用いていること,各国における鋭 敏比の測定の違いが認められること,などが原 因として考えられ,今後,改良の余地を残して

いるといえる.

4. 軟弱地盤における着底型深層混合処理工法 適用上の注意点

佐賀県では DMM 検討会が結成され,ボック スカルバートの深層混合処理工法基礎~着底方 式 設計の手引き(案)~¹³⁾が発行された.同 マニュアルの作成の過程で関係者から度々相談 されたのは:1)軟弱粘土層の土性判別(均質層・ 不均質層の判別、有機物混入の有無など);2) 沖積層(軟弱粘土層あるいは完新統)・洪積層(正 しくは更新統)の境界:3)軟弱粘土層下の洪積 粘土層(正しくは更新世粘土層)の土質特性, などであった.

前述までの各検討に基づく知見を活かし,図 -10,11 に示す注意点をまとめ,地域における技 術力の向上に関する貢献を果たした.

5. まとめ

国内外の沿岸域で多用される地盤改良工法の 品質管理・保証の向上に資することを最終的な 到達点として,工学・環境の両面を兼ねた地層・ 土性判別システムの構築を目指している.有明 海沿岸低平地域を具体的なフィールドに選び, 当地の上部更新統の3次元可視化を図った.ま た,この上位の軟弱完新統においては3成分コ ーンと土質試験結果の相関からなる土性判別法 について検討した.本研究から得られた知見を 要約すると,次のとおりである.

1)本検討に示した 3 次元可視化は大きくグリ ッド区分された地下断面に基づくものであった. 今後新たにボーリングデータが追加されていく ことで,曲面的な三次元可視化が期待できる.

2)3 次元可視化の結果,三田川層における地下水の流向・流速が検討されている地域(当該範囲)における基底深度の地下水は南西方向または南東方向として得られた.

3) プレートの勾配計算による検討を重ねた結 果, 流向の実測値を伴う当該範囲とこの一帯(四 角形 0bdf) における地下水は弓なりに南西方向 に流れると推測された.

4)上位の軟弱完新統における Robertson 土性 判別法の適用に際し,実測湿潤密度に俯瞰法お よび補完法を適用する方法,ならびに 0.5z 法に より鉛直全応力および鉛直有効応力を求めた結 果,いずれも Robertson 土性判別法に影響を及 ぼすほどの各パラメータの変化は認められなか った.

5)上記の結果から,鉛直全応力および鉛直有 効応力の算定に関しては,湿潤密度における俯 瞰法あるいは0.5z法で求めてよい可能性がある.

6) 有明粘土層は高鋭敏粘土であるが, Robertson 土性判別法では鋭敏粘土と判別され なかった.

7)以上の知見に基づいて,有明海沿岸低平地 域の軟弱地盤における着底型深層混合処理工法 適用上の注意点を総合的にまとめ,地域におけ



(佐賀県・福所江左岸側の詳細地下断面図 SV:SH=1:1/10)

る技術力の向上に関する貢献を果たした.

参考文献

- 三浦哲彦,古賀良治,西田耕一:有明粘土 地盤における生石灰を用いた深層混合処理 工法の適用,土と基礎, Vol.34, No.4, pp.5-11, 1986.
- 2) 中村六史,三浦哲彦,松田応作:有明粘土 に対する地盤改良材の適用上の問題と改良 地盤についての現地調査,土と基礎, Vol.35, No.5, pp.9-14, 1987.
- 北詰昌樹,高橋英紀:現地石灰安定処理土 の長期特性調査,土木学会論文集,C, Vol.64, No.1, pp.144-156, 2008.
- 4) 橋本勝文,大即信明,西田孝弘:セメント 系改良地盤の Ca 溶脱に伴う強度低下に関 する Cl[·]の影響を考慮した長期予測,土木学 会論文集,C, Vo.64, No.2, pp.226-237, 2008.
- 5) 原弘行,林重徳,末次大輔,水城正博:海 水環境下における石灰処理土の性状変化に 関する基礎的検討,土木学会論文集,C, Vol.66, No.1, pp.21-30, 2010.
- 三浦哲彦,赤峰剛徳,下山正一:有明粘土 層の堆積環境とその鋭敏性について,土木 学会論文集,No.541/Ⅲ-35, pp.119-131, 1996.
- 下山正一,松浦浩久,日野剛徳:佐賀地域 の地質,地域地質研究報告,5万分の1地質 図幅,福岡(14)第71号,NI-52-11-9,(独) 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 97p,2010.
- 8) 有明海研究グループ:有明・不知火海域の 第四系,地団研専報,地学団体研究会, No.11, 86 p, 1965.
- 松本拓也,日野剛徳,伊賀屋豊,島内明, 中川和樹:佐賀低平地の地下水観測井にお ける洗浄・揚水時の水質変化と流向・流速 の測定,平成21年度土木学会西部支部研究 発表会講演概要集,CD-ROM,pp.515-516, 2010.
- 10) 三浦哲彦,岩尾雄四郎,小林孝洋,赤峰剛 徳:堆積環境が佐賀平野の地盤特性に及ぼ す影響,堆積環境が地盤特性に及ぼす影響 に関するシンポジウム発表論文集,土質工 学会,pp.6-25,1995.
- 11) Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M. : Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Span Press, 312p, 1997.

- 12) 日野剛徳,伊賀屋豊,下山正一,柴錦春: 九州・沖縄の特殊土の紹介①~有明粘土~, 地盤工学会誌, vol.58, No.6, pp.6-10, 2010.
- 13) 佐賀県県土づくり本部・NPO 技術交流フォ ーラム:ボックスカルバートの深層混合処 理工法基礎~着底方式 設計の手引き(案) ~, 80p, 2010.