

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420499

研究課題名(和文) 吸水性高分子摩擦低減剤の膨潤・摩擦特性と仮設鋼矢板引抜きに伴う地盤変状の抑制

研究課題名(英文) Swelling and shear properties of friction-reducing polymer and prevention of ground deformation due to pull-out of temporary sheet piles

研究代表者

梅崎 健夫 (UMEZAKI, Takeo)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：50193933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：(1)セメント改良地盤中の含有イオンのデータを収集するとともに、簡易膨潤試験により種々のイオンに対する吸水性高分子摩擦低減剤(FC剤)の最大膨潤倍率 R_{max} のデータを蓄積した。(2)一次元拘束圧 p' の条件下の純水、人工海水およびセメント水に対するFC剤の R_{max} と p' および透水係数 k の評価式を提案した。 k は非常に小さく、高い止水性を有する。(3)FC剤単体の摩擦角は $\delta' = 1^\circ$ ($c' = 0$)であり、有効応力で評価できる。また、土質材料とFC剤の接触面における摩擦角も $\delta' = 1 \sim 3^\circ$ である。(4)FC剤を塗布した鋼矢板の引抜きに伴う地盤変状は小さく、影響範囲は鋼矢板下端から約 45° の範囲となる。

研究成果の概要(英文)：(1) The ion concentration was investigated for the cement improved ground. Furthermore, simple swelling tests were carried out and the water-absorbing ratio, R_{max} , of the friction-reducing polymer (FC agent) in aqueous solution of various metal ion was evaluated. (2) Swelling and permeability test for pure water, artificial sea water, and cement water under confining pressure, p' , were conducted. The relations of R_{max} , p' and the coefficient of permeability, k , were evaluated. The value of k is very small; the FC agent is impermeable material. (3) The friction angle of FC agent obtained from box shear test is $\delta' = 1^\circ$ ($c' = 0$) which is strength parameter related to effective stress. Moreover, the friction angle on the contact surface between soil materials and FC agent is also $\delta' = 1 \sim 3^\circ$ ($c' = 0$). (4) The settlement of ground surface due to pulling out of sheet piles coated with FC agent is small, and the influence range can be evaluated about 45° from lower end of the steel sheet pile.

研究分野：地盤・環境地盤工学

キーワード：地盤工学 土留め工 鋼矢板 周面摩擦 地盤変状 吸水性高分子 拘束圧 土中水のイオン成分

1. 研究開始当初の背景

河川工事における土留め用の仮設鋼矢板は引抜き撤去することが原則である。また、都市部の近接施工においては、借地から鋼矢板を撤去することが前提である。しかし、鋼矢板の引抜きに伴って地表面沈下などの地盤変状が生じるため、仕方なく残置されている場合も多い。地盤変状の原因は、鋼矢板と地盤との付着力や周面摩擦力によって矢板表面に多量の土塊が付着して排出され、地中に空洞が生じるためである。地盤変状の影響範囲や最大地表面沈下量の予測モデル(道路土工 仮設構造物指針, 1999)が提案されているが、パラメータの決定が不明確であり、十分に活用されていない。

一方、地盤変状を抑制する対策工として、鋼矢板の表面に作用する付着力と周面摩擦力を低減する吸水性高分子摩擦低減剤(以下、FC 剤)が開発されている。吸水性高分子は地盤内において地下水と接触することにより、吸水膨潤(ゲル化)する。ゲル化した吸水性高分子は、非常に軟らかく、分離層として作用する。

申請時までの研究成果として、FC 剤を塗布した対策工により、引抜き時の土の付着や引抜き後の空隙の発生を抑制できることを実証している。対策工の設計・施工法を確立するためには、FC 剤の材料特性を明らかにすることが肝要であり、拘束圧下における膨潤特性と土との接触面における摩擦特性を解明することが必要不可欠である。また、申請時までに、純水に対する膨潤特性や豊浦砂と笠岡粘土に対する摩擦特性を明らかにしている。しかし、FC 剤の膨潤特性は金属イオンの影響を大きく受ける。したがって、FC 剤の材料特性を明らかにするためには、種々の土質や土中水中の金属イオンに対する適用性を検証することが重要である。また、対策工の信頼性を確立するためには、地盤変状の抑制効果を定量評価することが必要である。

2. 研究の目的

本研究では、①不攪乱海成粘土や中間土および土中水中に金属イオンを含む海岸部やセメント改良地盤への適用性の検証、②対策工における地盤変状モデルの構築と効果の検証のために、以下の項目を明らかにする。

- 1) 拘束圧下における FC 剤の膨潤特性(有効拘束圧 p' と最大膨潤倍率 Ra_{max} の関係、最大膨潤圧 p'_{max})
- 2) FC 剤を塗布した鋼材と土の接触面における摩擦特性(摩擦角 δ')
- 3) 対策工における影響範囲(L) および地表面沈下量(d) と無対策工における実務データ(L, d) の比較。

3. 研究の方法

(1) 土中水中のイオン成分分析

打設後 5 年以上経過したセメント改良柱体内およびその周辺地盤内においてボーリング

試料を採取し、セメント系固化剤に由来すると考えられる金属イオンの総量および間隙水中の濃度を測定した。調査地点の詳細は業績(雑誌論文①)を参照されたい。

(2) FC 剤の膨潤・透水試験

① ティーバッグを用いた簡易膨潤試験

吸水性高分子(粉末, 平均粒径 $50\mu\text{m}$) に対する有効拘束圧 $p'=0\text{kPa}$ の無拘束条件(等方膨潤)における簡易膨潤試験を写真-1 に示すように実施した。市販のティーバッグ内に約 0.2g の吸水性高分子(粉末)を入れ(写真-1(a)), 1 価~3 価の各種金属イオンを含む水溶液(100g) に水浸した(写真-1(b))。24 時間吸水膨潤(吸水性高分子は吸水時に等方的に膨潤変形)させた後、ティーバッグを引き上げて 5 分間空气中に吊し水切りして、質量を測定した。試験方法の詳細は業績(学会発表②)を参照されたい。



(a)水浸前

(b)水浸後

写真-1 簡易膨潤試験

② 拘束圧・間隙水圧下の膨潤・透水試験

吸水性高分子、接着性高分子および有機溶剤を質量比 $10:8.4:15.6$ で十分に混合したもの(ろ紙の表面に均一な厚さで塗布し、24 時間以上乾燥(有機溶剤を気化)させ、直径 75mm の円に切り取って供試体とした。乾燥後の塗布厚さは $t_0 \approx 0.2\text{mm}$ である。試験水としては、人工海水(塩分濃度 $s=35\text{g/L}$) を希釈した濃度が異なる水溶液($s=0$ (純水)~ 35g/L (海水))と、普通ポルトランドセメントを用いて作製したセメント水比 $C/W=1 \sim 182\%$ (水セメント比 $W/C=10000 \sim 55\%$) のセメントミルクを真空吸引ろ過して得られたセメントミルク抽出水(以下、セメント水と称す)を使用した。

図-1 に示すカラム型膨潤・透水試験装置(カラム内径 $D=75\text{mm}$) を用いた。供試体(FC 剤を塗布したろ紙)を下部板に、ろ紙を載荷板に、それぞれ接着した。三軸圧縮試験と同様のドライセット法により管路を飽和した後に、供試体上下から通水して FC 剤を吸水膨潤させた。供試体には、所定の有効拘束圧 $p'=0 \sim 400\text{kPa}$ ($=p-u$, セル圧 p , 間隙水圧 $u=5 \sim 305\text{kPa}$) を載荷した。膨潤過程終了後、載荷板を固定して透水試験を実施した。下流側の二重管ビューレットを大気開放した状態で、 p' を一定を保ちながら、水頭差として上流側の二重管ビューレットの u を $55, 155, 205\text{kPa}$ と段階的に増加させ、供試体の下面から透水を行った。試験装置および試験方法の詳細は業

績（雑誌論文②）を参照されたい。

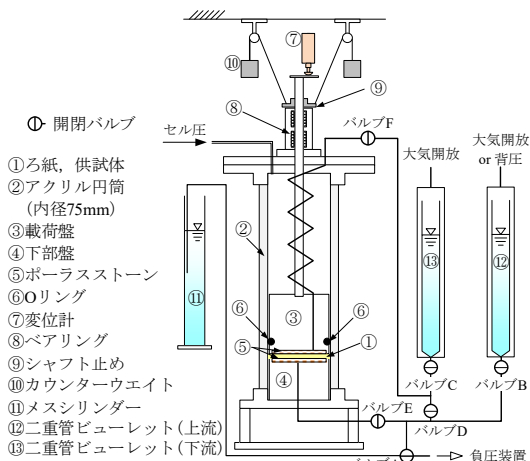


図-1 カラム型膨潤・透水試験装置

(3)FC 剤のせん断試験および土との接触面における摩擦試験

土質試験法 (JIS 0560-2000, JIS 0561-2000) に準拠した一面せん断試験を実施した。図-2 に試験の概要を示す。FC 剤のみに対する試験 (図-2 (a)) および FC 剤と土との接触面に対する試験 (図-2 (b) ~ (e)) を実施した。試験装置および試験方法の詳細は業績 (雑誌論文③, 学会発表①) を参照されたい。

①FC 剤の一面せん断試験

段階的に垂直応力を減少させる試験 (DPT) および定体積条件の試験 (CVT) を実施した (図-2 (a))。DPT は、鋼材の上面が下せん断箱の上面よりも 0.2mm 低くなるように鋼材を設置し、FC 剤の塗布厚さを $t_0 \approx 0.5\text{mm}$ とした。初期垂直応力 $\sigma_{n0} = 147, 196, 245 \text{ kN/m}^2$ を負荷し、水浸箱に純水を十分に注水して 1 時間程度水浸した。せん断変位速度 0.2mm/min でせん断を行った。せん断応力 τ の最大値 τ_{max} が發揮された後に、 $D=0.5\text{mm}$ 毎に $\sigma_n = 10\text{kN/m}^2$ ずつ減少させた。一方、CVT は、比較的硬く流動性の低い状態である膨潤倍率 $Ra=5.0\text{g/g}$ に吸水膨潤させた FC 剤 ($t_0 \approx 20\text{mm}$) に対して、土質試験法 (JIS 0560-2009) に準拠して実施した。

②FC 剤と土との接触面の摩擦試験

土との接触面に対する試験は、図-2 (b) ~ (e) に示した位置関係となるように、下せん断箱内に、FC 剤を塗布した鋼材およびサンドペーパーを貼付した鋼材を設置し、上せん断箱内に土試料 (笠岡粘土の再構成試料, 豊浦砂) を充填した (図-2 (d), (e))。圧密圧力 $\sigma_c = 147, 196, 245\text{kN/m}^2$ で 3t 時間圧密した後、水浸箱に純水を十分に注水して 1 時間程度水浸した。そして、笠岡粘土では定体積条件、豊浦砂では定載荷圧条件を、それぞれ手動で制御しながらせん断変位速度 0.2 mm/min でせん断を行った。比較のため、FC 剤を塗布しない試験も実施した (図-2 (b), (c))。

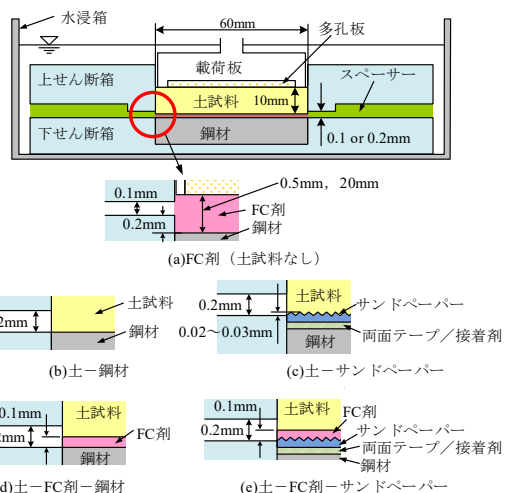


図-2 一面せん断試験条件

(4)FC 剤を塗布した鋼矢板の引抜きに関する遠心模型実験

土槽 (高さ $H=45.0\text{cm}$, 幅 $W=55.0\text{cm}$, 奥行き $D=15.0\text{cm}$) 内に鋼矢板打設後の模型地盤を作製し (写真-2), 50G 遠心場において引抜き実験を実施した。試料には 5 号硅砂と 6 号硅砂を混合したものをを用いた。模型鋼矢板には、 $H=16.0\text{cm}$ (根入れ長 $L=12.5\text{cm}$, 50G 換算: 6.25m), 厚さ $t=0.3, 0.8\text{cm}$ (50G 換算: $15, 40\text{cm}$) の 2 種類の鋼板に、FC 剤を塗布 (200g/m^2) したものをを用いた。土層中央に模型鋼矢板を鉛直に設置し、相対密度 $Dr=80\%$ となるように、土槽内で試料を締め固めた。試料の層厚は 12.5cm (50G 換算: 6.25m) とし、画像解析用の測点を設置した。通水して飽和させた後、12 時間以上放置することにより、FC 剤を吸水膨潤 (ゲル化) させた。そして、50G 遠心場にて模型鋼矢板を引き抜いた。試験方法の詳細については、業績 (学会発表③) を参照されたい。

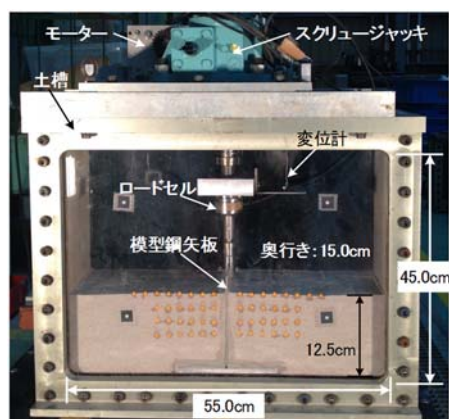


写真-2 模型地盤 (遠心模型実験)

4. 研究成果

(1)土中水中のイオン成分分析

打設後 5 年以上経過したセメント改良柱体内およびその近傍におけるセメント系固化材に由来すると考えられる Ca^{2+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$ および

Si⁴⁺の総量ならびに間隙水中の溶存濃度の深さ分布を図-3に示す。得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 打設後5年以上経過した改良体近傍における間隙水中の溶存濃度は、改良体内の総量に比べて3~5オーダーの低い値である。本検討において対象とした研究フィールドにおいては、改良柱体からのセメント成分の溶出の懸念はない。

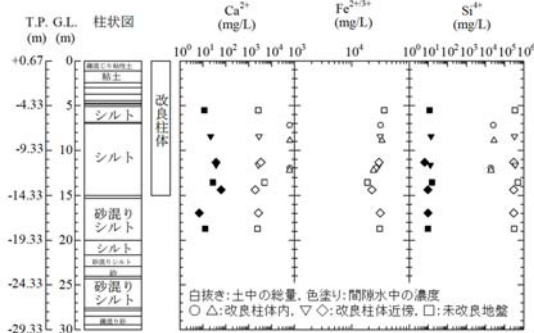


図-3 各種金属イオンの総量および間隙水中の濃度の深度分布

(2) FC 剤の膨潤・透水試験

①膨潤特性に及ぼす間隙水中の金属イオンの影響

FC 剤単体に対する簡易膨潤試験の結果を図-4に示す。得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 最大膨潤倍率 $R_{a,max}$ と濃度 c の関係は、金属イオンの価数ごとに評価することができる。
- 2) いずれの価数においてもイオン濃度が高くなると $R_{a,max}$ は急激に低下し、1価では0.6Nの付近、2価では0.1N付近、3価では0.03N付近で一定となる。
- 3) 価数が大きいほど、 $R_{a,max}$ は小さくなり、純水に比べて1価では約1/5、2価では約1/8、3価では約1/14程度まで低下する。

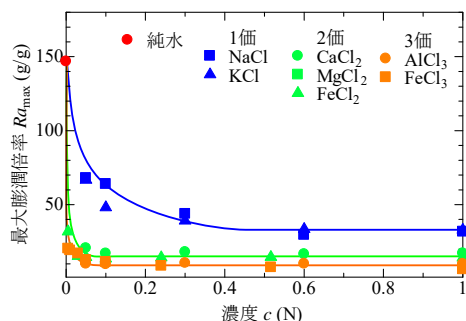


図-4 簡易膨潤試験の結果

②拘束圧下における膨潤・透水特性

純水、人工海水およびセメント水に対して、拘束圧および間隙水圧を負荷した条件における膨潤・透水試験の結果を図-5~図-9に示す。主な知見は以下の通りである。

- 1) FC 剤の最大膨潤倍率 $R_{a,max}$ は、有効拘束

圧 p' 、塩分濃度 s 、セメント水比 C/W の影響を受けるが、間隙水圧 u の影響は受けない (図-5, 6)。

- 2) 最大膨潤圧 p'_{max} は s および C/W によって異なり、純水において $p'_{max} \approx 590\text{kPa}$ 、海岸近くの地盤 ($s=10\text{g/L}$) において $p'_{max} \approx 247\text{kPa}$ 、セメント改良地盤 ($C/W=100\%$ 、水セメント比 $W/C=100\%$) において $p'_{max} \approx 510\text{kPa}$ である (図-5, 6)。
- 3) $R_{a,max}$ の予測式は、 p' 、 s 、 C/W を変数とした式(1)~(3)で評価できる (図-5, 6)。

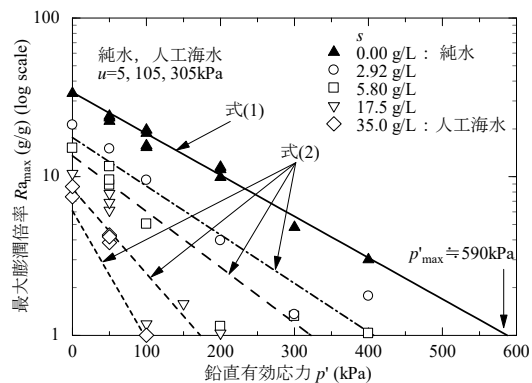


図-5 鉛直有効応力と最大膨潤倍率の関係 (純水、人工海水)

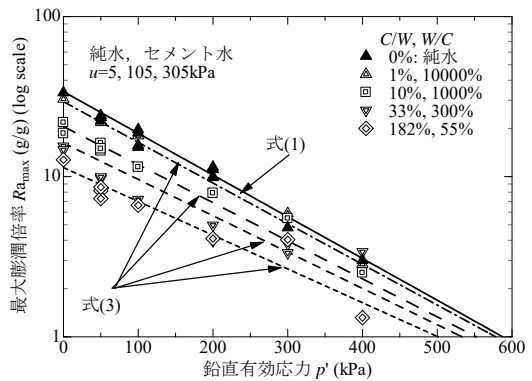


図-6 鉛直有効応力と最大膨潤倍率の関係 (純水、セメント水)

純水：

$$R_{a,max} = 34 \exp(-0.0060p') \quad (\text{g/g}) \quad (1)$$

人工海水：

$$R_{a,max} = \{34(s+1)^{-0.48}\} \times A \quad (\text{g/g}) \quad (2)$$

$$A = \exp\{- (0.00036s + 0.0060)p'\}$$

セメント水：

$$R_{a,max} = \{34(C/W+1)^{-0.21}\} \times B \quad (\text{g/g}) \quad (3)$$

$$B = \exp\left[\{0.00022 \ln(C/W+1) - 0.0060\}p'\right]$$

- 4) FC 剤の透水係数 k は、 s や C/W によらず、 $R_{a,max}$ を変数とする式(4)で評価できる。 $k \approx 10^{-13} \sim 10^{-11} \text{m/s}$ と非常に小さく、いずれの場合も高い止水性を有する (図-7)。

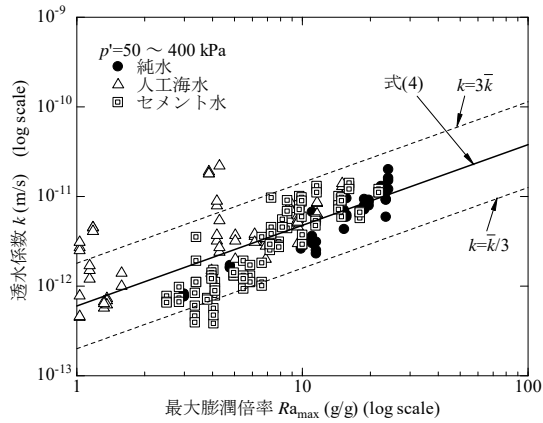


図-7 最大膨潤倍率と透水係数の関係

$$\bar{k} = 6.0(Ra_{\max})^{0.90} \times 10^{-13} \quad (\text{m/s}) \quad (4)$$

- 5) 実用的なチャートとして、式(1)に基づいて、膨潤ゲル層の厚さおよび透水係数の深度分布を示した(図-8, 9)。

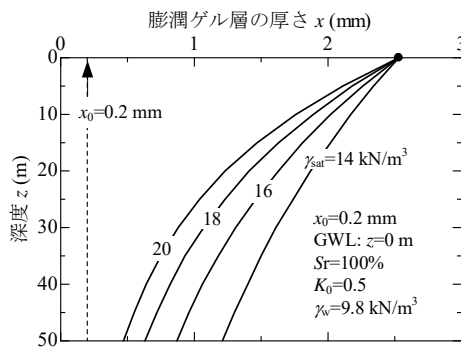


図-8 膨潤ゲル層厚の深さ分布

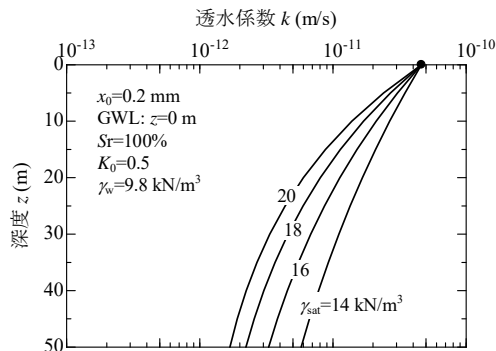


図-9 FC 剤の透水係数の深さ分布

(3)FC 剤の摩擦特性

①FC 剤の一面せん断試験

FC 剤単体に対して実施した DPT および CVT の結果を図-10, 11 に示す。得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 吸水膨潤した FC 剤の強度定数は土質材料と同様に有効応力で評価でき、 $\delta' = 1^\circ$ ($c' = 0$) である(図-10)。
- 2) 吸水膨潤した FC 剤のせん断においては、

ダイレイタンシーおよび過剰間隙水圧はほとんど発生しない(図-11)。

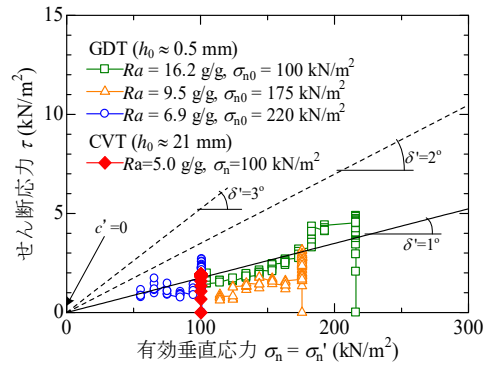


図-10 有効垂直応力とせん断応力の関係 (DPT, CVT)

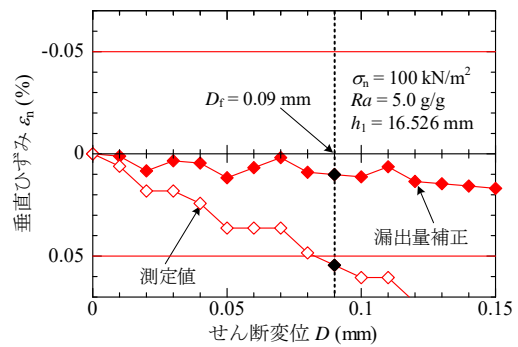


図-11 垂直ひずみとせん断変位の関係 (CVT)

②FC 剤と土との接触面における摩擦試験

吸水膨潤した FC 剤と土質材料との接触面における摩擦試験の結果を図-12 に示す。得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 砂や粘土などの土質材料が異なる場合や鋼材の表面粗度が異なる場合においても、土と FC 剤の摩擦角は、 $\delta' = 1 \sim 3^\circ$ 程度 ($c' = 0$) であり、非常に小さい(図-12)。

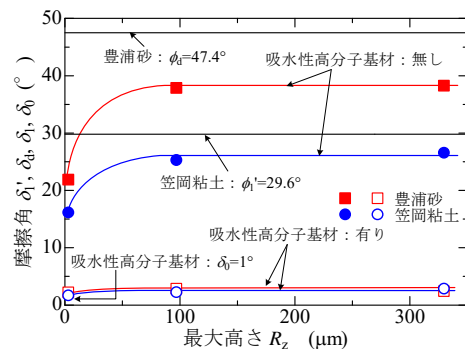


図-12 鋼材の表面粗さと摩擦角の関係

(4)FC 剤を塗布した鋼矢板の引抜きに関する遠心模型実験

本田の式を修正した予測モデルを用いることにより、鋼矢板引抜き時の地盤変状を概略評価できることを示した。得られた主な知見を示す。

- 1) FC 剤を塗布した鋼矢板の引抜きに伴う影響範囲は、鋼矢板の下端から約 45° の範囲と推定される (図-13)。
- 2) FC 剤を塗布した場合の地表面における引き抜き跡は、矢板の厚さと同程度 (III 型鋼矢板の場合約 13mm) と小さく、地表面の変状は非常に小さい (図-14, 15)。

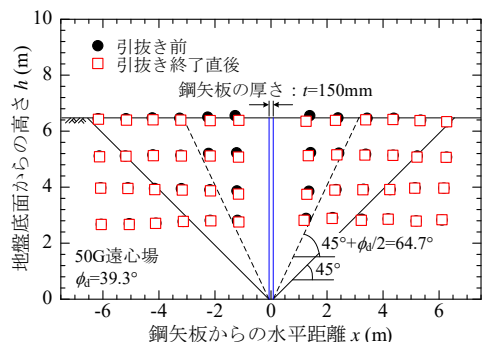


図-13 引抜き前後の地盤変位 (50G 換算)

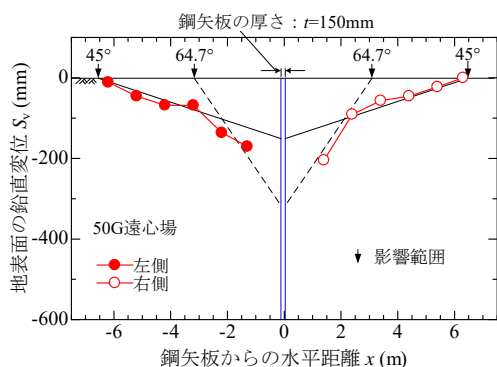


図-14 地表面の鉛直変位 (50G 換算)

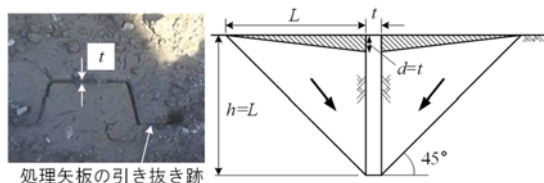


図-15 FC 剤を塗布した III 型鋼矢板の引き抜き跡と地盤変位の修正モデル

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 日野剛徳, 根上武仁, 柴錦春, 姫野季之, 陣内隆文: 土の活性度と物理化学的性質に関する一考察, 低平地研究, 査読無, 25, pp.28-33, 2016.
- ② 梅崎健夫, 河村隆, 小林優太, 宮木克真, 岡本功一, 服部 晃: 吸水性高分子摩擦低減剤の地盤条件を考慮した膨潤・透水特性 (その 1), 信州大学環境科学年報, 査読無, 第 37 号, pp.75-82, 2015. <http://www.shinshu-u.ac.jp/group/env->

[sci/Vol37/paper2015/37_12_Umezaki.pdf](http://www.shinshu-u.ac.jp/group/env-sci/Vol37/paper2015/37_12_Umezaki.pdf)

- ③ 梅崎健夫, 河村隆, 古久根晋太郎, 小林優太, 岡本功一, 服部 晃: 鋼材に塗布した吸水性高分子摩擦低減剤の摩擦特性 (その 1), 信州大学環境科学年報, 査読無, 第 37 号, pp.83-89, 2015. http://www.shinshu-u.ac.jp/group/env-sci/Vol37/paper2015/37_13_Umezaki.pdf

[学会発表] (計 12 件)

- ① 梅崎健夫, 河村隆, 古久根晋太郎, 岡本功一, 国際会員 服部 晃: 吸水性高分子摩擦低減剤の有効応力に基づく摩擦角 (その 2), 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016 年 9 月 13 日~15 日, 岡山大学 (岡山県・岡山市) (発表確定).
- ② 岸川公紀, 山崎晴香, 梅崎健夫, 河村隆, 岡本功一, 服部 晃: 吸水性高分子摩擦低減剤の膨潤特性に及ぼす pH の影響 (その 1), 平成 27 年度土木学会中部支部研究発表会, 2016 年 3 月 4 日, 豊田工業高等専門学校 (愛知県・豊田市).
- ③ 梅崎健夫, 河村隆, 鶴ヶ崎和博, 宮本順司, 関下啓誠, 岡本功一, 服部 晃: 鋼矢板の引抜きに伴う地盤変状に関する遠心模型実験 (その 1), 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015 年 9 月 16 日~18 日, 岡山大学 (岡山県・岡山市).
- ④ 梅崎健夫, 河村隆, 小林優太, 宮木克真, 岡本功一, 服部 晃: 吸水性高分子摩擦低減剤の地盤条件を考慮した膨潤・透水特性, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015 年 9 月 1 日~3 日, 北海道科学大学 (北海道・札幌市).
- ⑤ 園英, 姫野季之, 日野剛徳: 改良柱体と周辺地盤の地盤環境学的性質に関する原位調査と室内試験, 平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会, 2015 年 3 月 7 日, 琉球大学 (沖縄県西原町).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅崎 健夫 (UMEZAKI, Takeo)
信州大学・学術研究院工学系・教授
研究者番号: 50193933

(2) 研究分担者

日野 剛徳 (HINO, Takenori)
佐賀大学・低平地沿岸海域研究センター・教授
研究者番号: 20295033

河村 隆 (KAWAMURA, Takashi)
信州大学・学術研究院工学系・准教授
研究者番号: 50324231