

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04343

研究課題名（和文）吸水性高分子のゲルブロッキング・膨潤遅延性の評価と汚染地盤への基礎杭打設法

研究課題名（英文）Evaluation of gel blocking and swelling of water-absorbing polymer and its application for piling into contaminated ground

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） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：高吸水・高耐久性の吸水性高分子（FRC）の遮水性や潤滑性とFRCのコート層として併用される高強度接着性高分子（保護膜）のFRCに対する吸水遅延性に着目し、汚染地盤や処分場跡地を高度利用するための新たな基礎杭打設法を提案した。主な成果は以下のとおりである。FRCの塗布厚さおよび膨潤・透水特性、保護膜の膨潤・透水特性およびFRCに対する吸水遅延性、基礎杭打設（無処理）に伴う汚染地盤の下層への引き込み現象、を定量評価した。その結果に基づき、FRCと保護膜を塗布した基礎杭打設法における汚染物質の漏出防止効果の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に汚染地盤や処分場跡地の利用は、汚染物質の漏出が懸念されるために、基礎杭の打設を必要としない公園や低層階の構造物の用地に限定されている。吸水性高分子（FRC）の膨潤・透水特性および高強度接着性高分子（保護膜）のFRCに対する吸水遅延性に着目して、それらを塗布する新たな基礎杭打設法を提案し、その有効性を示した。提案法がさらに一般工法として発展・確立されれば、跡地の有効利用を格段に推進することができる。その基礎研究の成果として、吸水性高分子と高強度接着性高分子の膨潤・透水特性を定量評価したことにより、高分子材料の新たな材料開発や他分野における用途拡大および高度利用にも発展することが期待される。

研究成果の概要（英文）：We focused on the impermeability and lubricity of the superabsorbent polymer (FRC), which has high water absorption and durability, and the delayed absorption effect of the high-strength adhesive polymer (protective film) used as the coat layer of FRC. A new driving method of foundation pile was proposed to effectively utilize the contaminated ground and the disposal site. Quantitative evaluation was achieved on the following points. (1) Coating thickness of FRC on the pile and properties of swelling and permeability of FRC. (2) Properties of swelling and permeability of the protective film, and effect of the delayed absorption. (3) Phenomenon of pulling contaminated ground into the lower layer by driving untreated pile. Furthermore, based on these results, (4) The effectiveness of preventing leakage of contaminated materials using the newly proposed driving method of foundation pile with the FRC and the protective film was shown.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 地盤環境 汚染地盤 漏出防止 杭基礎 周面摩擦 吸水性高分子 遮水

1. 研究開始当初の背景

汎用の吸水性高分子は、紙おむつの保水剤として世界的に広く用いられている。近年、高吸水・高耐久性の吸水性高分子 (FRC) が開発され、その遮水性や潤滑性を応用して、トンネル背面や接合部の遮水材や鋼矢板の引抜き潤滑剤などとして建設分野でも使用されている。FRC が厚く塗布された場合には、表面のみが吸水膨潤され、内部への水の浸透を妨げる、ゲルブロッキングが生じることが知られている。この現象はこれまで欠点として捉えられてきたが、申請者は、内部の未膨潤層は膨潤遅延性・自己修復層であり、長所として応用できることを着想した。また、鋼矢板引抜きのための FRC のコート層として併用されている高強度接着性高分子 (保護膜) の FRC に対する吸水遅延性 (吸水遅延効果) にも別途着目し、両者の特性を生かして汚染地盤や処分場跡地を高度利用するための新たな基礎杭打設法への応用 (図-1, 2) として発展できるものと着想した。そのためには、吸水性高分子のゲルブロッキング・膨潤遅延性および高強度接着性高分子の吸水遅延効果の定量評価を行うとともに、基礎杭打設時に汚染地盤の遮水層への引き込みを抑制し、汚染物質の漏出を防止する方法を確立することが課題である。

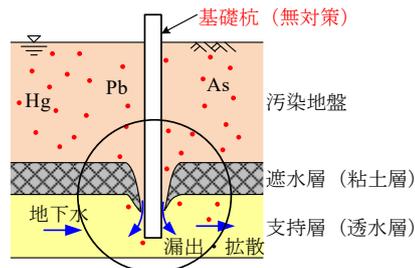


図-1 汚染地盤における基礎杭打設の問題点

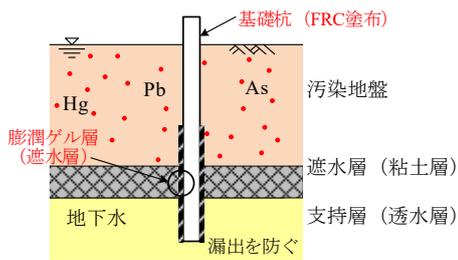


図-2 漏出防止ための提案法

2. 研究の目的

高吸水・高耐久性の吸水性高分子 (FRC) の遮水性や潤滑性と FRC のコート層として併用される高強度接着性高分子 (保護膜) の吸水遅延効果の両者の特性を活かすことにより、汚染地盤や処分場跡地を高度利用するための基礎杭打設法への応用として発展させる。そのための基礎研究として、①ゲルブロッキングが生じる塗布厚さおよび膨潤・透水特性に及ぼすゲルブロッキングの影響、②保護膜の膨潤・透水特性および FRC に対する吸水遅延性、③基礎杭打設 (無処理) に伴う汚染地盤の下層の遮水層への引き込み現象、を定量評価する。その結果に基づいて、④上記①、②を応用した新たな基礎杭打設法 (FRC・保護膜塗布) における汚染物質の漏出防止効果の有効性を模型実験に基づいて明らかにする。

3. 研究の方法

(1) カラム型膨潤・透水試験：①ゲルブロッキングが生じる塗布厚さおよび膨潤・透水特性に及ぼすゲルブロッキングの影響、②保護膜の膨潤・透水特性および FRC に対する吸水遅延性

カラム型膨潤・透水試験装置 (図-3) を用いた。供試体および試験方法は以下の通りである。
①に関して：FRC をろ紙に塗布し、24 時間以上乾燥させたものを供試体とした。初期吸水距離 h_i (≤ 0.5 mm) は試験毎に変化させた。片面膨潤試験の場合は $h_i=h_0$ (塗布厚) であり、両面膨潤試験の場合は $h_i=h_0/2$ である。供試体をカラム型膨潤・透水試験装置の下部盤に、無処理のろ紙を上部載荷盤に、それぞれ接着し、有効拘束圧 $p'=0\sim 400$ kPa、間隙水圧 $u=5$ kPa を載荷させた状態で 24 時間の吸水膨潤を実施した。その後、引き続き透水試験も実施した。

②に関して：有機溶剤に分散した液状の高強度接着性高分子をテフロン板に所定厚さ塗布し、24 時間以上乾燥 (溶剤を気化) させることで作製したフィルム状の保護膜を用いた。保護膜の初期厚さを $h_0=0.1$ mm (実務での厚さ) ~ 0.3 mm とし、下部盤に接着した。供試体の鉛直方向に所定の有効拘束圧 p' と水圧 u を組み合わせて載荷し、膨潤/圧縮試験を行った。所定時間経過後、シャフトを固定して変水位透水試験を行った。その後、シャフトの固定を解除して、膨潤/圧縮試験と透水試験を繰り返した。有効拘束圧を $p'=p-u=20, 50, 70, 100$ kPa (p : 全応力), 水圧を $u=5, 55, 85$ kPa とした。

(2) 杭先端モデル実験：③基礎杭打設 (無処理) に伴う汚染地盤の下層への引き込み現象、④上記①、②を応用した新たな基礎杭打設法 (FRC・保護膜塗布) における汚染物質の漏出防止効果

杭先端付近のモデル実験装置 (図-4) を用いた。周面摩擦の影響を詳細に検討するために、モデル杭はステンレスの平板を用い、杭周面を拡大して模擬し、地盤の変形は二次元平面ひずみ状態として評価する。汚染地盤と支持層には豊浦砂、遮水層には NSF(C)粘土を一次元圧密した塊状試料を用いた。モデル杭にはサンドペーパー (#100) を表面に貼付したステンレス板 (厚さ 2 mm, 幅 290 mm) を用いた。③、④の検討項目に対して、以下の条件のモデル杭を用いた。

③に関して：サンドペーパー (#100) を表面に貼付したステンレス板をそのまま用いた。

④に関して：③のステンレス板上に、実施工と同様に、FRC を約 0.2 mm 塗布した後に吸水遅延効果を有する高強度接着性高分子を保護膜として約 0.1 mm 上塗りした。モデル杭は FRC と保

護膜の塗布位置により以下の2種類とした。FRCと保護膜を全面塗布したもの、FRCと保護膜を下方6cm(粘土層上面以下の貫入部分)に塗布したものである。

いずれも、所定の鉛直応力 $\sigma_v=2.7, 40 \text{ kPa}$ を载荷した状態で、モデル杭の貫入(貫入速度 1 mm/min)を行った。FRC・保護膜を塗布した場合は、モデル杭の貫入を粘土層表面で一時停止してFRCを24時間吸水膨潤させた後、粘土層の3倍の深さまで貫入を行った場合と停止を行わず連続貫入した場合の実験を行った。貫入前後の粘土層(遮水層)における透水係数と漏水量を定量的に評価するために、定水位透水試験(図-5)を所定の時間間隔で実施した。実験終了後、モデル杭を固定して貫入力を除荷し、水位を低下させた後、モデル地盤を慎重に掘削して、上部砂層と粘土層の引き込み現象を観察・計測した。

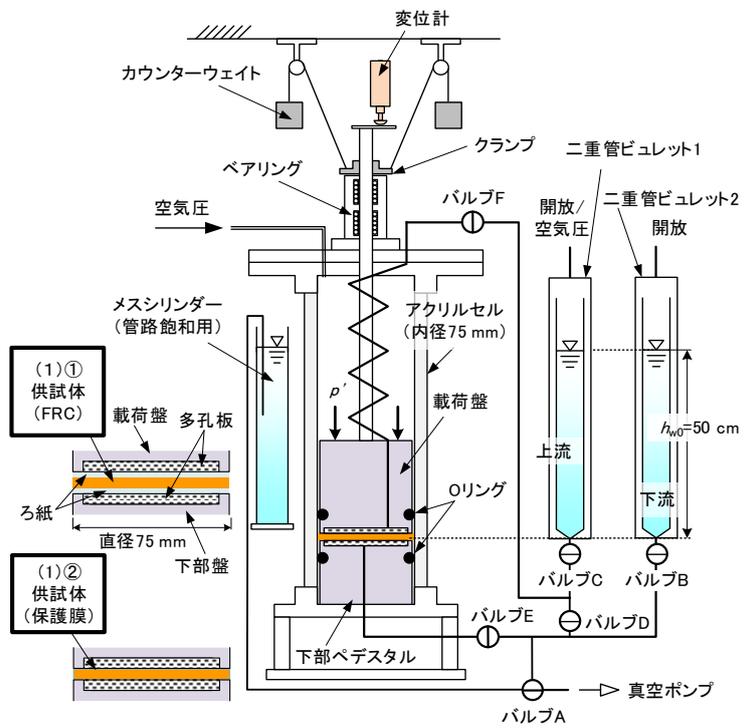


図-3 カラム型圧縮・透水試験装置

汚染地盤におけるFRCの基礎的な特性として、以下の項目について追加検討した。

(3)簡易流動試験および耐久性試験(高温促進試験とゼリー強度試験): ⑤地中に存在する化学物質に対する流動性および耐久性の評価: 簡易流動試験では、汚染地盤の間隙水中の化学物質に着目して、小型ガラス容器(内径 33 mm)内で、中性、酸性、アルカリ性の5種類の溶液(NaCl 3.0%溶液, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0.01%溶液, NaOH 0.01%溶液, HCl 0.01%溶液, H_2SO_4 0.01%溶液)を吸水させたFRCの膨潤ゲルを作製した。ガラス容器を静置した状態と 45° 傾斜させた場合のFRC膨潤ゲルの傾斜角度により、状態変化を定量評価した。耐久性試験では、同様のFRC膨潤ゲルに対して、ガラス容器の蓋を密閉して温度 $T=50^\circ\text{C}$ の恒温庫内に静置した後、所定時間($t=250, 750, 1000, 1500 \text{ h}$)経過したガラス容器を恒温庫から取り出し、常温にした後、ゼリー強度試験を実施した。ゼリー強度試験(JIS K 6503)は、ゼラチンなどの強さを測定する試験方法であり、これに準じた方法を適用した。

(4)一面せん断試験および摩擦試験: ⑥複数のイオンを含む間隙水を吸水した膨潤ゲルのせん断特性, ⑦処分場に存在するコンクリート片や礫層のような間隙の大きい層に対する摩擦低減効果: ⑥土質試験法(JIS 0560-2000, JIS 0561-2000)に準拠した一面せん断試験装置を用いた。FRCを滑らかな鋼材に塗布して乾燥させたものを供試体とした。複数のイオンを含む間隙水として、セメントミルクを濾過した溶液(セメント水)と人工海水を吸水させた膨潤ゲルを作製し、所定の有効垂直応力の下でせん断試験を実施した。⑦同様の装置により、コンクリート片や礫の局所的な接触と大きな間隙を、アクリル製の载荷リングの角度、接触幅、接触面積によりモデル化した。所定の有効垂直応力を負荷して、吸水膨潤させた後に、摩擦試験を実施した。

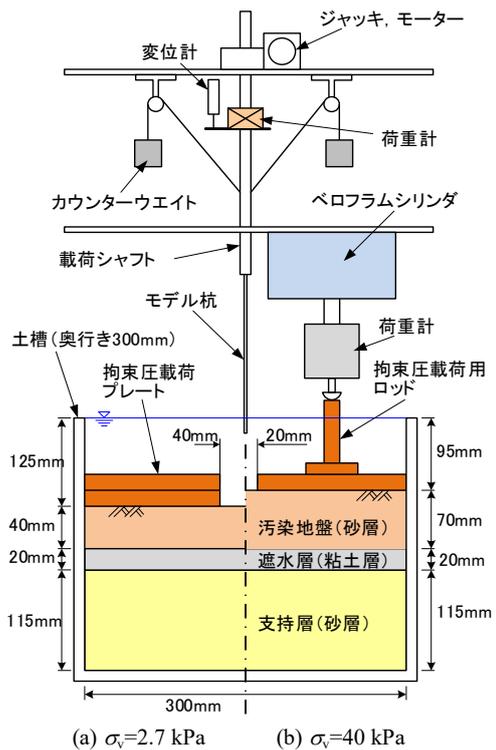


図-4 杭先端付近のモデル実験装置

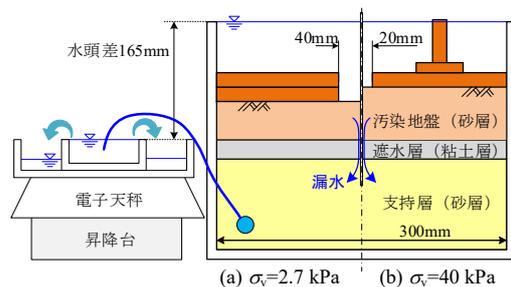


図-5 定水位透水試験の概要

4. 研究成果

(1) カラム型膨潤・透水試験

①ゲルブロッキングが生じる塗布厚さおよび膨潤・透水特性に及ぼすゲルブロッキングの影響

- 1) 塗布厚さ（初期吸水距離 h_i ）が大きい場合の膨潤倍率は、ゲルブロッキングにより、 h_i が小さい場合の最大膨潤倍率よりも小さくなる。
- 2) ゲルブロッキングの有無によらず、摩擦低減層の厚さを予測するための膨潤倍率と有効応力の関係を定式化した（図-6）。
- 3) FRC の透水係数は極めて小さく（汚染水の遮水効果）、ゲルブロッキングの有無によらず、膨潤倍率のみで評価できる（図-7）。

②保護膜の膨潤・透水特性および FRC に対する吸水遅延性

- 1) 保護膜は吸水膨潤しない。初期状態の保護膜は乾燥状態であり、有効応力 p' の原理が成り立たず、特に载荷初期においては、全応力 p に依存して圧縮する（図-8）。
- 2) 圧縮量は $p=55$ kPa 以上の場合、約 6 日経過後には初期厚さの約 1/20~1/30 と非常に薄くなる（図-8）。
- 3) 6 日経過後における保護膜の透水係数は $k=1.0 \times 10^{-11} \sim 10^{-9}$ m/s 程度と非常に小さいが、FRC の透水係数よりも格段に大きい（図-9）。
- 4) 保護膜の透水係数は非常に小さく、施工時における短時間での雨水など浸透を阻害する効果が認められる（図-9）。
- 5) 圧縮後の膜厚は極めて薄く、地盤内の間隙水は徐々に FRC 中に浸透する。保護膜による FRC に対する吸水遅延性（吸水遅延効果）が実証された（図-8, 9）。

(2) 杭先端モデル実験

③基礎杭打設（無処理）に伴う汚染地盤の下層への引き込み現象

- 1) 基礎杭打設による汚染地盤の引き込み現象を再現し、独自のパラメータにより定量評価した（写真-1）。
- 2) 無処理のモデル杭を粘土層厚の 3 倍まで貫入した場合、 $\sigma_v=2.7$, 40 kN/m² に対して、貫入直後の換算透水係数 k^* はそれぞれ貫入前の 35, 7.2 倍程度に増加する。貫入後約 96 時間後においても k^* は貫入前の 27, 4.3 倍程度、漏水量は 338, 31 mL/(min・m²) 程度である。基礎杭打設による漏水現象が再現された（図-10, 11）。

④上記①, ②を応用した基礎杭打設法（FRC・保護膜塗布）における汚染物質の漏出防止効果

- 1) FRC をモデル杭の全面もしくは下方部分（粘土層貫入部分）に塗布した場合、 $\sigma_v=2.7$ kN/m² において、貫入直後には若干の漏水が認められるが、24 時間以上経過すると漏水はほとんど生じない（図-11）。
- 2) FRC を下方部分に塗布した $\sigma_v=40$ kN/m² において、貫入直後から約 96 時間後まで、 k^* は貫入前の 1.7~1.9 倍程度に、漏水量は $V^*=7 \sim 8$ mL/(min・m²) 程度に抑制される（図-10, 11）。
- 3) 提案する FRC・保護膜を用いた新たな基礎杭打設法の有効性が認められた（図-10, 11）。

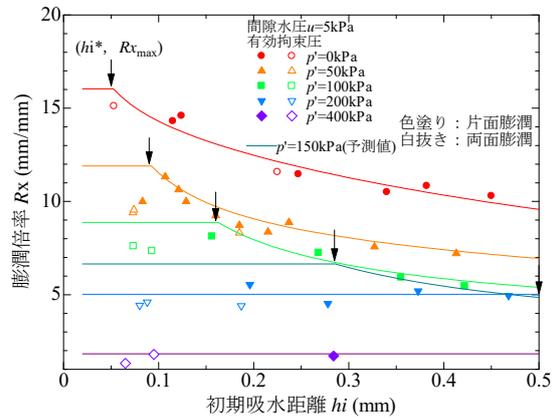


図-6 初期吸水距離と膨潤倍率の関係

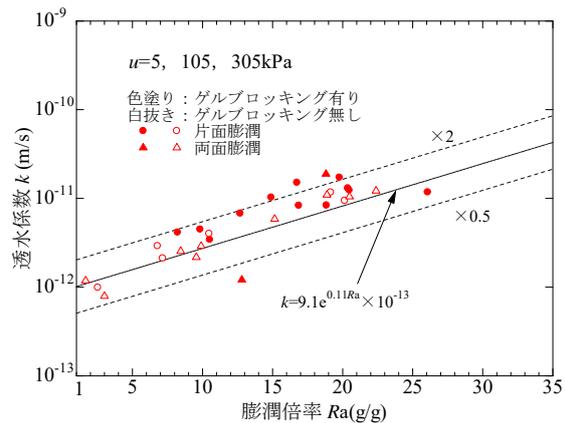


図-7 透水係数と最大膨潤倍率の関係

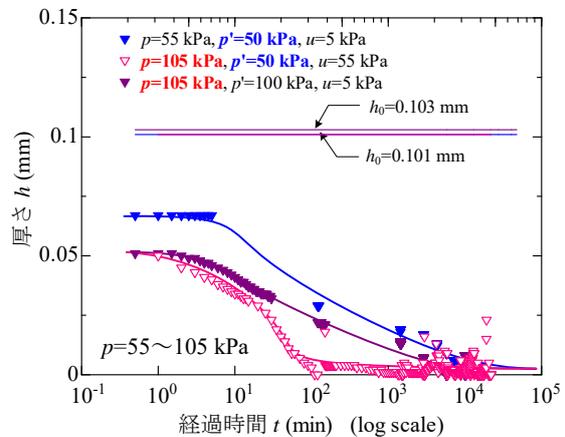


図-8 保護膜の厚さの経時変化の一例

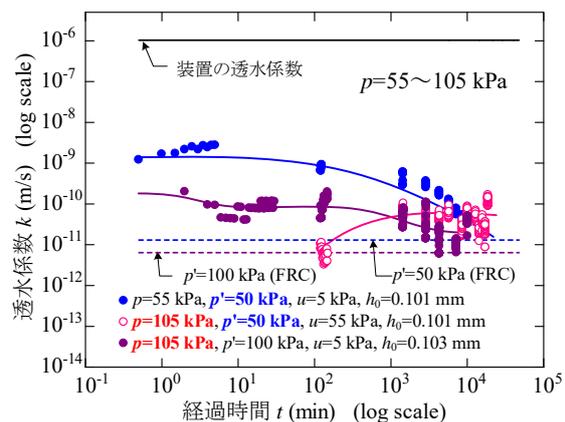
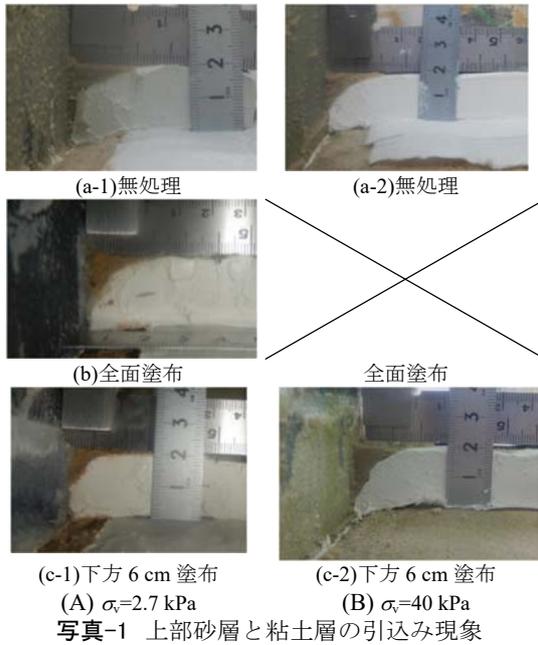


図-9 保護膜の透水係数の経時変化の一例



追加検討項目について以下の成果を得た。
 (3)簡易流動試験および耐久性試験（高温促進試験とゼリー強度試験）：⑤地中に存在する化学物質に対する流動性および耐久性の評価

- 1) 簡易流動試験の結果から、FRCは吸水する溶液によって、膨潤倍率が同じでも異なる流動性を示すこと、中性、酸性、アルカリ性の5種類の溶液における膨潤ゲルは、いずれも地盤中ではゲル化点以下の固体状であると推測されること、を明らかにした。
- 2) 耐久性試験（高温促進試験）の結果から、FRCの膨潤ゲルは50°Cで1500h後までの耐久性を有し、これは簡便法によると少なくとも2年以上の耐久性に相当すること、を明らかにした（図-12）。

(4)一面せん断試験および摩擦試験

⑥複数のイオンを含む間隙水を吸水した膨潤ゲルのせん断特性

- 1) セメント水、人工海水を吸水した場合でもFRCの膨潤ゲルは、粘着性材料ではなく、 $c'=0$ の摩擦性材料として評価できる。
- 2) 純水を吸水させた場合と同様にセメント水、人工海水を吸水したFRCの膨潤ゲルの内部摩擦角 ϕ' は、膨潤倍率 Ra のみで定量評価できる（図-13）。
- 3) 海岸地域やセメント改良地盤においても十分な深さまで摩擦低減層（遮水層）として機能することを示した（図-13）。

⑦処分場に存在するコンクリート片や礫層のような隙の大きい層に対する摩擦低減効果

- 1) 鋼材に塗布されたFRCと礫などの粗粒材の接触面においても、摩擦低減層（遮水層）が形成される。
- 2) 鋼材に塗布されたFRCと礫との接触面における摩擦角 ϕ' は、せん断直前の膨潤ゲルの厚さに依存する。その厚さが0.1mm以上であれば、 $\phi' \approx 5^\circ$ 以下である。
- 3) 摩擦角 ϕ' は、礫の内部摩擦角 ϕ'_i の1/20~1/3程度であり、FRCは、コンクリート片や礫層などの存在する処分場などにおいても摩擦低減層（遮水層）として期待される。

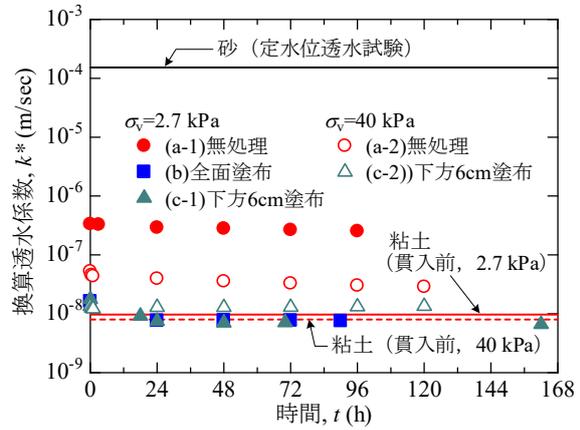


図-10 換算透水係数 k^* の経時変化

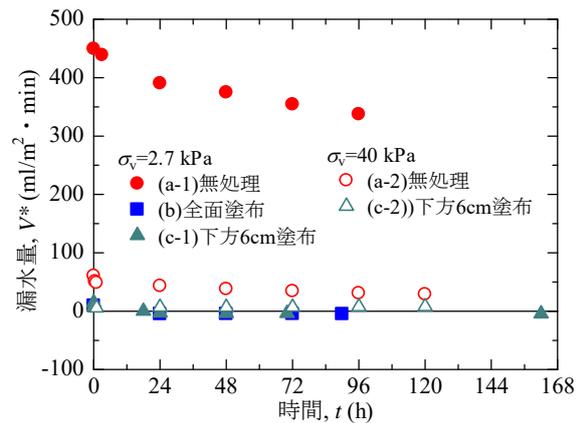


図-11 漏水量 V^* の経時変化

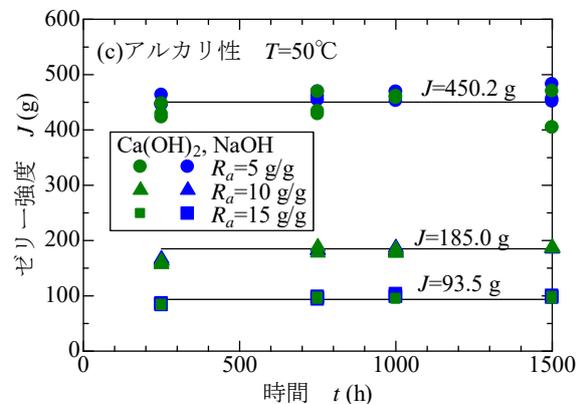


図-12 高温促進試験の結果の一例

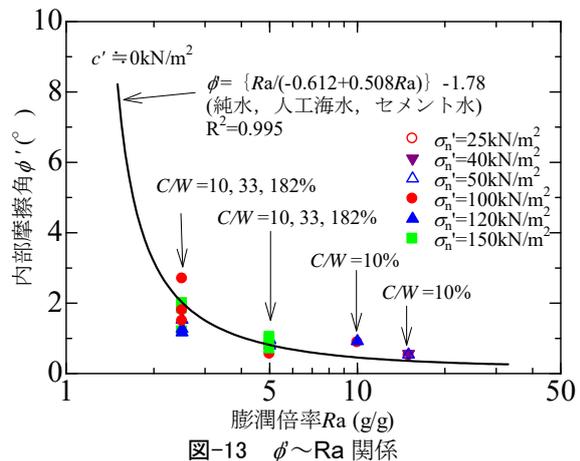


図-13 $\phi' \sim Ra$ 関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 周 敏琦, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤を用いた汚染地盤を貫通する基礎杭の打設法（その1）
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 三好雄斗, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤に塗布する保護膜の圧縮・透水特性（その3）
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 周 敏琦, 服部 晃, 岡本功一, 西田健吾
2. 発表標題 汚染地盤を貫通する基礎杭の打設法（その2）
3. 学会等名 R3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 三好雄斗, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤に塗布する保護膜の圧縮・透水特性（その2）
3. 学会等名 R3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 三好雄斗, 周 敏琦, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤に塗布する保護膜の圧縮・透水特性(その1)
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 周 敏琦, 服部 晃, 岡本功一, 西田健吾
2. 発表標題 汚染地盤を貫通する基礎杭の打設法(その1)
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 関口太地, 成政翔太, 服部 晃, 岡本功一, 関下啓誠
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤の化学物質に対する耐久性(その1)
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 佐々木洸介, 服部 晃, 岡本 功一, 中村哲世士
2. 発表標題 礫などの粗粒材と埋設体に塗布した吸水性高分子摩擦低減剤の接触面における摩擦特性(その1)
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 古橋 佳, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤の膨潤・透水特性に及ぼす吸水距離の影響(その4)
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 松林達也, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤の内部摩擦角に及ぼす間隙水の影響(その1)
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 関口太地, 服部 晃, 岡本功一, 関下啓誠
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤の状態変化に及ぼす間隙水中のイオン濃度の影響(その1)
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 関口太地, 服部 晃, 岡本功一, 関下啓誠
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤の状態変化とゼリー強度(その1)
3. 学会等名 H30年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 古橋 佳, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤の膨潤・透水特性に及ぼす吸水距離の影響(その3)
3. 学会等名 H30年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	河村 隆 (Kawamura Takashi) (50324231)	信州大学・学術研究院工学系・准教授 (13601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------