

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04251

研究課題名(和文) 汚染地盤の基礎工に活用する吸水性高分子ゲルの劣化特性と耐薬品性・耐久性の評価手法

研究課題名(英文) Chemical resistance, deterioration characteristics, and evaluation for durability of water-absorbent polymer gels used in foundation construction for 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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：(1)地盤中の中性、酸性、アルカリ性の化学物質水溶液と人工海水に対する吸水性高分子摩擦低減剤(FRC)膨潤ゲルの耐久性(耐薬品性、長期耐久性)を実証した。(2)高温下(温度： $T_0=200$ 以上、時間： $t_0$ )の条件を変化させることにより、FRC粉末の劣化程度を調整できる。(3)このプレ劣化粉末の膨潤・透水試験の結果、熱劣化(時間促進)により膨潤倍率は小さくなるが、最大膨潤圧は変化しない。極端に劣化が進んでも、膨潤性は失われず、十分な止水性が保たれる。(4)地盤内の最大膨潤倍率 $R_a=30\text{g/g}$ に対する高温促進試験( $T_1, t_1$ )により、提案手法とラーソン・ミラー法を適用して耐久時間を定量評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

汚染物質を含む災害廃棄物は急激に増加しており、海面処分場などへの埋立て処分が検討されている。吸水性高分子ゲル(FRC)の劣化特性と耐久性(耐薬品性、長期耐久性)の評価手法を確立し、劣化の程度に対する耐久時間の定量評価を行った。埋立て処分における、汚染物質の安定的な遮断・漏出防止、跡地の高度利用のための基礎杭打設方法の実用化へと発展可能である。また、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も期待される。さらに、吸水膨潤ゲルに対する試験法・評価法の確立は革新的な技術であり、建設材料としての発展のみならず、他の工学・医学分野などへの利活用が推進される可能性がある。

研究成果の概要(英文)：(1) The durability (chemical resistance and long-term durability) of FRC swelling gel is verified for aqueous solutions of neutral, acidic, and alkaline chemicals in the ground and artificial seawater. (2) The degree of deterioration of FRC powder can be adjusted by changing the high temperature condition (temperature:  $T_0 = 200^\circ\text{C}$  and time:  $t_0$ ) and “pre-deteriorated FRC powder” can be prepared. (3) Based on the results of swelling and permeability tests on pre-deteriorated FRC powder, the swelling ratio decreases due to thermal deterioration, but the maximum swelling pressure does not change. Even when thermal deterioration is extremely accelerated, the swelling ability is not lost and sufficient impermeable ability is maintained. (4) The durability time of fluidity was quantitatively evaluated for the maximum swelling ratio,  $30\text{g/g}$ , in the ground by using the newly proposed method and the Larson-Miller method. For example, the durability time of 33% deterioration is about 193 years.

研究分野：地盤工学

キーワード：汚染地盤 杭基礎 吸水性高分子 流動性 摩擦低減 遮水 耐薬品性 長期耐久性

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

汚染物質を含む災害廃棄物は急激に増加しており、海面処分場などへの埋立て処分が検討されている。そのためには、汚染物質の安定的な遮断・漏出防止、跡地の高度利用のための基礎杭打設方法の開発が喫緊の課題である。吸水性高分子は、膨潤性、遮水性、摩擦低減性に優れた物質であり、鋼製遮水壁接手部の膨潤性遮水ゴムの添加剤に用いられており、基礎杭周囲の塗布剤としての応用も進んでいる(図-1)。

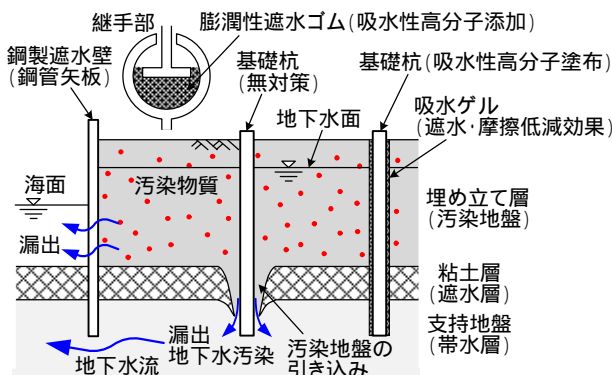


図-1 海面処分場における汚染物質の漏出問題

プラスチック等の高分子材料の耐久性評価法は既に標準化されているが<sup>1)</sup>、吸水性高分子ゲルの劣化特性と長期耐久性の評価手法は未だ確立されていない。そのため、耐久年数の定量評価ができず、用途が制限されている。

### 2. 研究の目的

本研究では、まず、過度な高温条件を付加することにより高耐久性の吸水性高分子(FRC)粉末を強制的に劣化(プレ劣化)させ、膨潤倍率 $R_a$ 、流動性、ゼリー強度の劣化特性を明らかにする。そして、上記の高温条件(温度 $T_0$ 、時間 $t_0$ )が異なるプレ劣化粉末の作製法を確立する。このプレ劣化粉末に純水、人工海水および汚染地盤の地下水を考慮した水溶液を加えて、所定の $R_a$ に調整した吸水膨潤ゲル供試体(プレ劣化供試体)を準備する。その供試体に対して、高温促進試験( $T_1, t_1$ )を実施し、流動性、ゼリー強度、透水性に対する「耐久性・耐薬品性」の評価と耐久年数(寿命)の定量評価を行う。

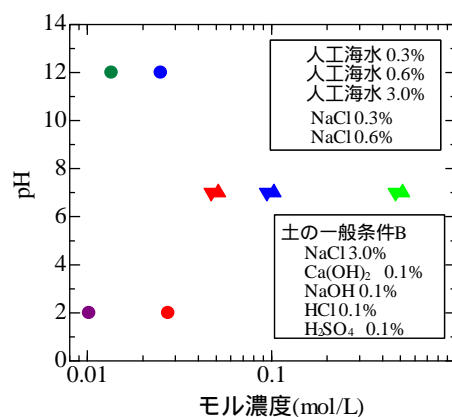


図-2 水溶液の物性

### 3. 研究の方法

(1)吸水性高分子(FRC)膨潤ゲルの化学物質に対する耐薬品性と長期耐久性試験

地盤中に存在する化学物質(図-2): ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル<sup>1)</sup>における「土の一般条件B」の5種類の水溶液(NaCl 3.0%, HCl 0.1%, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1%, Ca(OH)<sub>2</sub> 0.1%, NaOH 0.1%)と人工海水(0.3, 0.6, 3.0%), NaCl水溶液(0.3, 0.6%)を選定した。

簡易流動性試験(後述の図-3および写真-3): FRC粉末に示した水溶液を加え、所定の膨潤倍率 $R_a$ に調整した膨潤ゲルを供試体とした。小型容器(ガラス瓶: 内径 33 mm)内に静置した状態での供試体表面の長さ $l_0$ と、45°傾斜させた状態での表面の長さ $l_1$ から角度 $\theta$ (°)を算出して流動勾配 $\theta$ と定義した。

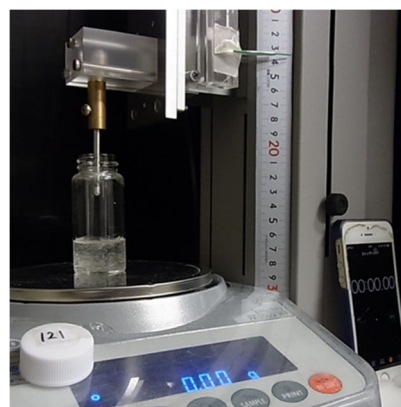


写真-1 ゼリー強度試験の概要

高温条件下におけるゼリー強度試験(写真-1): ガラス容器内に密封した所定の $R_a$ の膨潤ゲルを温度 $T=50$ °Cの高温庫内に静置した後、所定時間( $t=250 \sim 1500$  h)経過後に取り出して常温にした後、膨潤ゲルに貫入棒を貫入速度 0.5 mm/sec で貫入し、ゼリー強度を測定した。

(2)FRC粉末のプレ劣化(熱劣化)試験

プレ劣化FRC粉末の作製と色度の測定: 高温条件下(温度 $T_0=110 \sim 240$  °C, 時間 $t_0=12 \sim 1272$  h)において、熱劣化の程度が異なるFRC粉末を作製した。熱劣化によるFRC粉末の色彩の変化を色度として数値化し、最大膨潤倍率と色度の関係について検討した。

簡易膨潤試験・簡易流動性試験・ゼリー強度試験: FRCのプレ劣化粉末の特性変化を定量評価した。簡易膨潤試験では、純水に浸漬した市販のティーバッグにプレ劣化粉末を投入した。24時間吸水させた後、ティーバッグを引き上げ、質量を測定してプレ劣化粉末の最大膨潤倍率 $R_{a,max}$ (g/g)を算出し、温度 $T_0$ ごとの $R_{a,max}$ 、流動性、ゼリー強度の経時変化について検討した。

(3)プレ劣化粉末を用いた膨潤・透水試験: 地盤内において極端に劣化が進行した場合のFRCの

膨潤・透水特性を求めた。カラム型膨潤・透水試験装置(図-2)を用いた。高温条件(温度  $T_0=200^\circ\text{C}$ , 時間  $t_0=10, 30, 72, 100\text{h}$ )のプレ劣化粉末と接着性高分子および有機溶剤を混合し、ろ紙に塗布した後、乾燥させたものを供試体とした。有効拘束圧下において、膨潤試験を実施した。試験終了後、透水試験を行った。

(4)プレ劣化 FRC 粉末を用いた膨潤ゲルの熱劣化試験と耐久時間の予測: 後述の試験結果に基づいて説明する。高温条件 ( $T_0=200^\circ\text{C}$ ,  $t_0=30, 50, 70\text{h}$ )のプレ劣化粉末を膨潤倍率  $Ra=20, 25, 30\text{g/g}$  に調整し、流動特性を検討した(図-10)。  $Ra$  が大きくなるほど、流動性の変化(流動勾配  $\theta$ が増加)が速く、耐久時間が短くなる。地盤内の最大膨潤倍率  $Ra_{\text{max}}$   $33\text{g/g}$ に近い<sup>2)</sup>,  $Ra=30\text{g/g}$ の膨潤ゲルを供試体とした。異なる高温条件 ( $T_1=50, 60, 70^\circ\text{C}$ ,  $t_1=0\sim 1506\text{h}$ )において

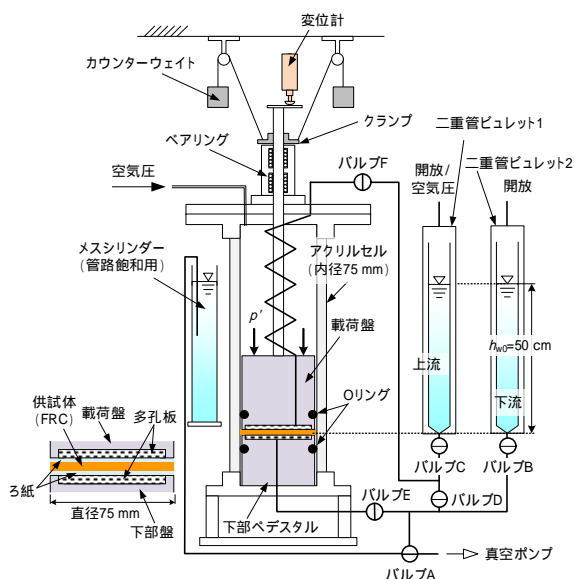


図-2 カラム型膨潤・透水試験装置

静置した後、簡易流動性試験を実施した。高温条件毎の試験結果にラーソン・ミラー法を適用し(図-11), 地中温度  $T_1=15^\circ\text{C}$ における流動性の経時変化に対して、プレ劣化時間の異なる予測曲線を求めた(図-12)。さらに、以下に示す新たな提案手法により耐久時間を算定した。すなわち、各予測曲線の  $\theta=15, 25, 35^\circ$  になる耐久時間  $t_d$  を求めた(図-12)。プレ劣化時間  $t_0$  と耐久時間  $t_d$  の関係を求めて、プレ劣化時間  $t_0=0$  に相当する初期状態(プレ劣化の操作なし)の吸水膨潤ゲルの耐久時間  $t_d$  を決定した(図-13)。そして、劣化の程度を表す流動勾配  $\theta$  と耐久時間  $t_d$  の関係を求めて、任意の耐久時間を算定した(図-14, 表-1)。

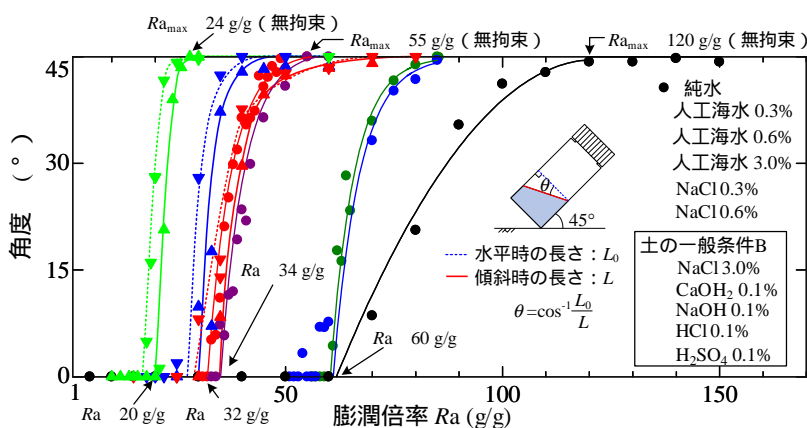


図-3 膨潤倍率と流動勾配の関係 ( $T_0=23\pm 1^\circ\text{C}$ ,  $t_0=0$ )

#### 4. 研究成果

(1)吸水性高分子(FRC)膨潤ゲルの化学物質に対する耐薬品性と長期耐久性

- 1) 溶液の種類によってそれぞれ流動性は異なるが、「土の一般条件 B」および人工海水の全ての溶液において、地盤中における膨潤ゲル<sup>2)</sup>はいずれも固体状で存在する(図-3)。
- 2) 膨潤倍率が大きいほど、ゼリー強度  $J$  は小さくなるが、いずれの場合においても  $Ra$  毎にそれぞれのゼリー強度は一定であり、純水や人工海水の値とほぼ等しい。すなわち、これらの濃度の溶液に対しては、高い耐薬品性と長期耐久性を有することが実証された(図-4)。

(2)FRC 粉末のプレ劣化(熱劣化)試験  
プレ劣化 FRC 粉末の作製と色度の測定

- 1)  $T_0=200$  程度以上の高温環境下では、24 時間経過時点で粉末に変色が生じ、高温時間が長くなるほど褐色度合いは大きくなる(写真-2)。劣化の程度は黄方向を示す色度  $b^*$  によって概略評価できる。

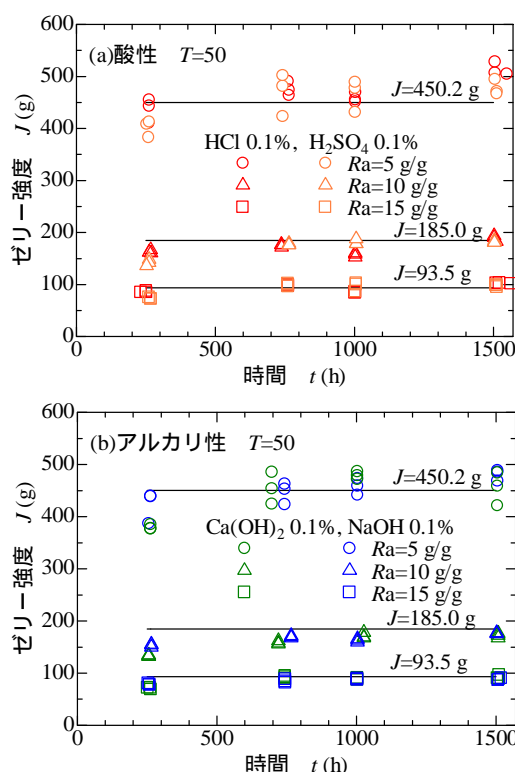
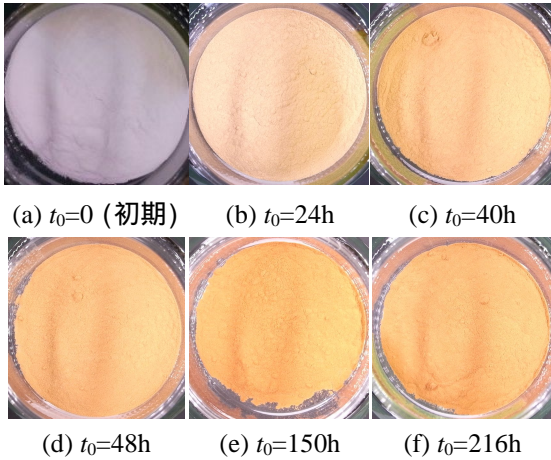


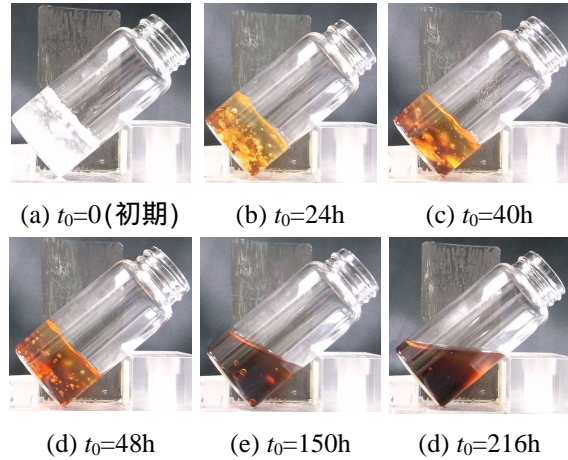
図-4 高温促進試験の結果(土の一般条件 B)の一例





(a)  $t_0=0$  (初期) (b)  $t_0=24$ h (c)  $t_0=40$ h  
(d)  $t_0=48$ h (e)  $t_0=150$ h (f)  $t_0=216$ h

写真-2 熱劣化したFRC粉末(プレ劣化粉末)の状態の一例 ( $T_0=200^\circ\text{C}$ )



(a)  $t_0=0$ (初期) (b)  $t_0=24$ h (c)  $t_0=40$ h  
(d)  $t_0=48$ h (e)  $t_0=150$ h (d)  $t_0=216$ h

写真-3 プレ劣化粉末を用いた膨潤ゲルの状態の一例 (純水,  $T_0=200^\circ\text{C}$ ,  $Ra=30\text{g/g}$ )

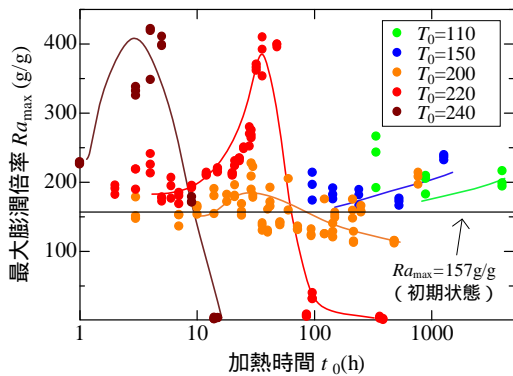


図-5 熱劣化における最大膨潤倍率  $Ra_{\max}$  の経時変化

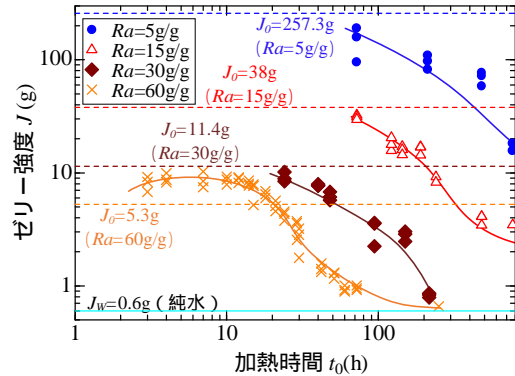


図-6 熱劣化による流動配分  $\theta$  の経時変化の一例 ( $T_0=200^\circ\text{C}$ )

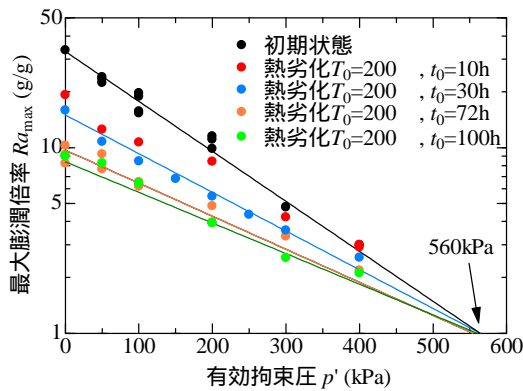


図-7 有効拘束圧  $p'$  と最大膨潤倍率  $Ra_{\max}$  の関係

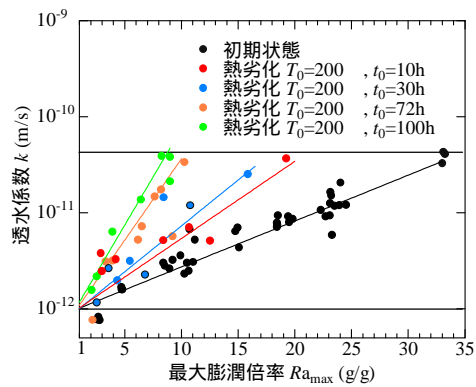


図-8 最大膨潤倍率  $Ra_{\max}$  と透水係数  $k$  の関係

2) 高温時間 ( $T_0, t_0$ ) を変化させることにより、熱劣化の程度の異なるプレ劣化 FRC 粉末を準備可能である。

簡易膨潤試験・簡易流動性試験・ゼリー強度試験

1) 高温時間  $T_0$  が長くなるほど、熱劣化 FRC の膨潤ゲルの褐色度合いも大きくなり、流動性が大きくなる (写真-3)。

2) 最大膨潤倍率  $Ra_{\max}$  は一度増加した後、初期状態以下まで低下する。 $T_0=200$  以上の条件において、劣化の程度は著しい (図-5)。

3) 熱劣化によりゼリー強度  $J$  は小さくなる。 $Ra$  が大きいほど熱劣化の影響を受ける (図-6)。

4) ゼリー強度が小さいほど流動性は大きい。すなわち、膨潤ゲル層が地盤内で保持されるこ

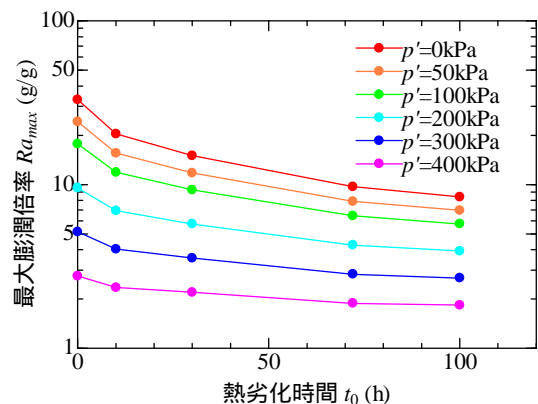


図-9 熱劣化時間  $t$  と最大膨潤倍率  $Ra_{\max}$  の関係

とが重要であり、流動勾配 $\theta$ を用いて劣化の程度を評価することができる。

(3) プレ劣化 FRC 粉末の膨潤・透水特性

- 1) 熱劣化に伴い  $Ra_{max}$  は小さくなるが、いずれの場合も最大膨潤圧  $p'_{max}=560\text{kPa}$  の値は一定である。 $Ra_{max}$  と有効拘束圧  $p'$  の関係は、初期状態と同様の式型で定式化できる (図-7)。
- 2) 熱劣化後の膨潤ゲルの透水係数  $k$  は、初期状態よりも大きくなるが、 $k$   $10^{-13} \sim 10^{-11}$  m/s の範囲内であり、十分な止水性を有する。このときの  $Ra_{max}$  と  $k$  の関係は、初期状態と同様の式型で定式化できる (図-8)。
- 3) いずれの有効拘束圧においても  $T_0=200$  ,  $t_0=100\text{h}$  程度で熱劣化はほぼ一定に収束する (図-9)。したがって、図-7、図-8 における  $T_0=200$  ,  $t_0=100\text{h}$  の結果は、極端に劣化が進んだときの膨潤・透水特性として評価できる。

(4) プレ劣化 FRC 粉末を用いた膨潤ゲルの熱劣化試験と耐久時間の予測

3. 研究の方法において示した新たな提案手法とラーソン・ミラー法を適用した結果 (図-10 ~ 14), 劣化の程度に対する耐久時間を表-1 のように定量評価した。例えば、地盤内 ( $T_0=15^\circ\text{C}$ ) における最大の膨潤倍率  $Ra_{max}=30$  g/g の膨潤ゲルが 33%劣化 (流動勾配  $\theta=15^\circ$ ) するまでの時間は 193 年と算定される。

< 引用文献 >

- 1) 一般財団法人土木研究センターほか：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル, pp.436-437, 2013。
- 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, 第 50 回地盤工学研究発表会, pp.1483-1484, 2015。

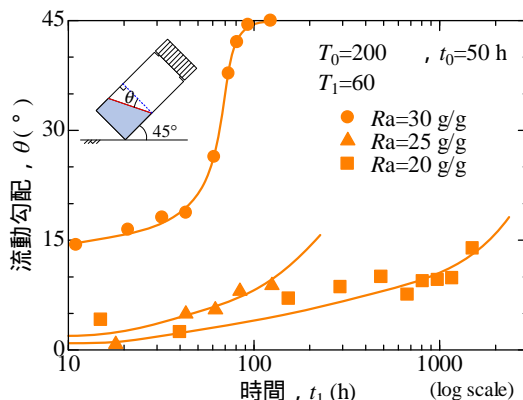


図-10 耐久性に及ぼす膨潤倍率の影響の一例

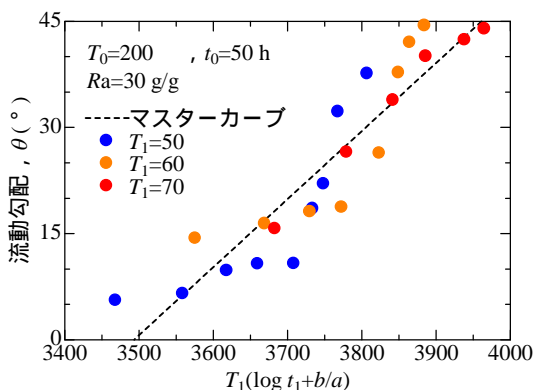


図-11 ラーソン・ミラー法のマスターカーブの一例

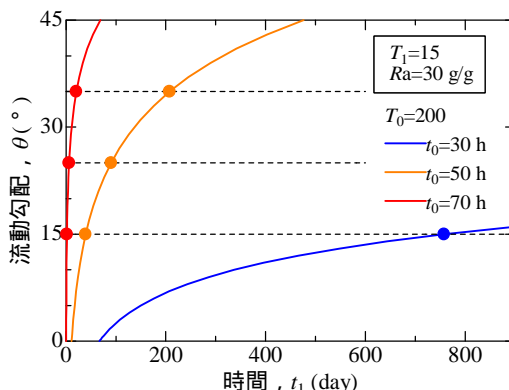


図-12 プレ劣化膨潤ゲルの流動特性の経時変化

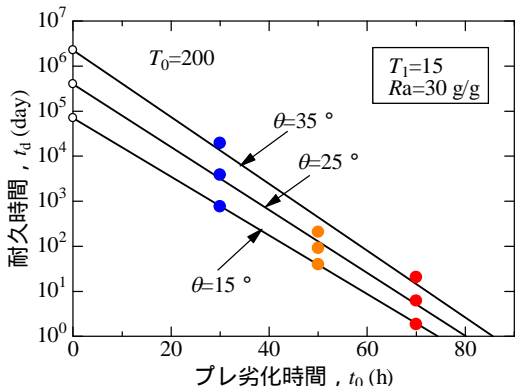


図-13 耐久時間に及ぼすプレ劣化時間の影響の一例

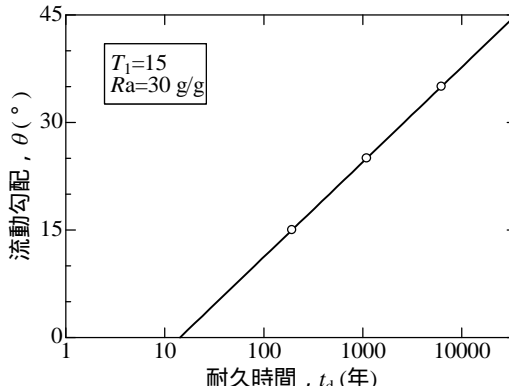


図-14 初期状態における流動勾配と耐久時間の関係

表-1 耐久時間の予測結果 ( $T_1=15$  ,  $Ra=30$  g/g)

$\theta$ (°)		4.5	9	15	22.5
劣化度合い	劣化開始	10%	20%	33%	50%
$t_d$ (年)	15	32	68	193	710

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10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, 川上将生, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 摩擦低減剤に用いる吸水性高分子の熱劣化における膨潤・透水特性（その3）
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 内村幸太郎, 成政翔太, 関口太地, 服部 晃, 岡本功一
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2）
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 川上将生, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 摩擦低減剤に用いる吸水性高分子の熱劣化における膨潤・透水特性（その4）
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 宮川晃太郎, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 吸水性高分子膨潤ゲルの高温下における流動特性と耐久時間の予測手法（その1）
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 川上将生, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 摩擦低減剤に用いる吸水性高分子の熱劣化における膨潤・透水特性(その1)
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 野崎裕也, 田口穂乃佳, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 摩擦低減剤に用いる吸水性高分子の熱劣化における膨潤特性(その2)
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 野崎裕也, 田口穂乃佳, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 摩擦低減剤に用いる吸水性高分子の熱劣化における膨潤・流動・強度特性(その2)
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 川上将生, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 摩擦低減剤に用いる吸水性高分子の熱劣化における膨潤・透水特性(その2)
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅崎健夫, 河村 隆, 野崎裕也, 成政翔太, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 吸水性高分子摩擦低減剤に用いる吸水性高分子の熱劣化における膨潤特性(その1)
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, 野崎裕也, 成政翔太, 服部 晃, 岡本功一
2. 発表標題 摩擦低減剤に用いる吸水性高分子の熱劣化における膨潤・流動・強度特性(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

〔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
---------	---------