

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870786

研究課題名(和文)石炭灰を用いた地盤材料の耐久性評価手法及び環境安全品質管理手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of durability evaluation method and environmental safety quality control method of coal ash mixed material

研究代表者

藤川 拓朗 (FUJIKAWA, TAKURO)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：20609606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：石炭灰混合材料の耐久性と環境安全性を評価する手法を確立すべく、実験的検討を行った。その結果、スレーキングを生じさせず耐久性評価が可能な乾湿繰返し試験の温度・乾燥時間を実験により見出すことに成功し、強度レベルに応じた条件設定を確立した。石炭灰混合材料は土壌環境基準を超過するような重金属類の溶出は見られず長期的に安定していることを明らかにした。しかしながら、重金属類によって溶出速度が異なるため、施工期間に応じてモニタリングする重金属類が異なる点に注意が必要である。室内試験から実地盤の長期耐久性を予測・評価する推定式を提案し、乾湿繰返し試験によって得られる挙動をある程度再現することができた。

研究成果の概要(英文)：This study carried out to establishment the method to evaluate the durability and environmental safety of coal ash mixed material in order to promote the effective utilization.

As a result, we succeeded in finding the temperature and drying time of the wetting and drying test capable of evaluating the durability without causing slaking, established the condition setting considering the strength level. The coal ash mixed material meets the environmental standards value fir soil and revealed that it is stable over the long term. Also, this study proposed an estimation formula to evaluate long-term durability of real ground from laboratory test. And it was able to reproduce the behavior obtained by the wetting and drying test.

研究分野：地盤工学・地盤環境工学

キーワード：石炭灰 石炭灰混合材料 耐久性 乾湿繰返し 一軸圧縮試験 溶出試験

1. 研究開始当初の背景

現在、電力会社や大学、建設会社を中心に石炭灰を主材とした石炭灰混合材料の開発が進められている。また、東日本大震災以降、原子力発電所の稼働が停止（現在は一部で再稼働を開始）し、その代わりとなる火力発電所の稼働が増加している。さらには、IPP（独立系発電事業者）による石炭火力発電所の運用開始も考慮すると、火力発電所から副次的に生成される石炭灰の発生量が増加することは必然であり、今後さらなる石炭灰の有効利用が求められてくる。しかしながら、石炭灰混合材料は周辺環境への影響や長期耐久性が保証されていないことが足かせとなり、公共工事等において定常的に活用されるまでには至っていないのが現状である。

2. 研究の目的

石炭灰混合材料の品質の保証をはじめ、耐久性や安全性を担保していくためには、長期的なモニタリングの実施やデータの蓄積が必要不可欠である。その一方で、有効利用を促進させるためにも、適用用途を拡大していくことが重要であり、石炭灰混合材料の耐久性と環境安全性を把握しておくことが肝要である。そのため、本研究では石炭灰混合材料の力学・溶出特性の把握のみならず、乾湿繰返し試験を用いた耐久性評価手法の検討やカラム試験による長期的な溶出特性について明らかにし、最終的には室内試験から実地盤の長期耐久性を予測・評価する手法を確立することを目的としている。

3. 研究の方法

- (1) スレーキングを生じさせず劣化を促進させ耐久性評価が可能な乾湿繰返し試験の条件設定（強度レベルに応じた乾湿繰返し試験の条件設定）の検討を行った。
- (2) カラム通水試験をはじめ種々の溶出試験による長期的な環境影響評価の検討を行った。
- (3) 室内試験（乾湿繰返し試験）から実地盤の長期耐久性を予測・評価する手法の検討を行った。

4. 研究成果

(1) 低強度石炭灰混合材料の耐久性評価手法の提案

安定処理土の耐久性を評価する手法の一つに乾湿繰返し試験がある。この試験は、表-1 に示す ASTM(American Society for Testing Materials: アメリカ材料試験協会)による乾湿履歴の与え方に準拠する例が多いが、研究代表者のこれまでの研究により、養生 28 日における一軸圧縮強度が 500KN/m^2 に満たない安定処理土は、湿潤過程においてスレーキング破壊を呈するため試験ができず、耐久性の評価ができないことが分かっている。そこで本研究では、乾燥過程における乾燥時間や乾燥温度に着目し、表-2 および表-3 に示す低強度な石炭灰混合処理土においてもスレーキング

表-1 ASTM に準拠した乾湿履歴の与え方

| 試験条件 | 乾燥過程 | 湿潤過程 |
|------|-----------------|----------------|
| | 炉乾燥(60±3) | 溶媒に浸水 液固比 5 |
| 試験時間 | 24h | 1h冷却+23h |
| サイクル | 乾燥 冷却 湿潤を15サイクル | |

表-2 乾燥温度に着目した乾湿履歴の与え方

| 試験条件 | 乾燥過程 | 湿潤過程 |
|------|-----------------|----------------|
| | 炉乾燥(35) | 溶媒に浸水 液固比 5 |
| 試験時間 | 24h | 1h冷却+23h |
| サイクル | 乾燥 冷却 湿潤を15サイクル | |

表-3 乾燥時間に着目した乾湿履歴の与え方

| 試験条件 | 乾燥過程 | 湿潤過程 |
|------|-----------------|----------------|
| | 炉乾燥(60±3) | 溶媒に浸水 液固比 5 |
| 試験時間 | 8h | 1h冷却+23h |
| サイクル | 乾燥 冷却 湿潤を15サイクル | |

破壊を生じさせず劣化の評価が可能な乾湿繰返し試験を実験的に明らかにした。

図-1 は乾湿繰返し試験によって得られたサイクル数と一軸圧縮強さの関係を示したものである。乾湿繰返し試験は、強制的に劣化を促進させて耐久性を評価する試験である。図中のアルファベットは、供試体の表面劣化の様子を目視によりランク分けしたものであり、詳細は表-4 に示すとおりである。乾燥温度 30 においては、健全度ランクも一定であることから、劣化の促進に至っていないと推察できる。一方、乾燥温度 35 では、サイクル初期に強度増加を示し、サイクル中期にピークを示した後、強度低下に転じており、セメント安定処理土に乾湿繰返し試験を適用した際に見られる劣化の挙動と類似し

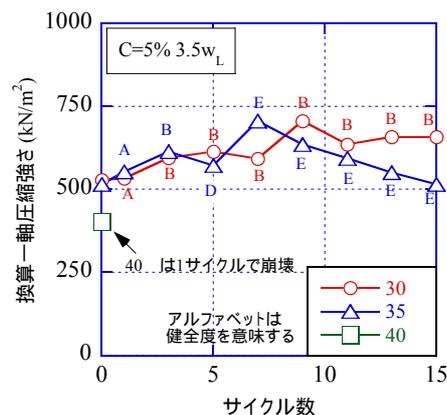


図-1 サイクル数と換算一軸圧縮強さ

表-4 目視による健全度評価基準

| | クラック状況 | 欠落状況 |
|---|-------------------------------|--------------|
| A | 外見上、ほとんど変化なし | |
| B | 微細クラック、局部クラック発生 | 表面剥離が局部的に発生 |
| C | 明瞭なクラックが一部に発生 | 供試体の一部が僅かに欠落 |
| D | 明瞭なクラックが全体に発生 | 供試体がより大きく欠落 |
| E | 供試体の一部または全体が崩落（～20%程度） | |
| F | 供試体全体的に崩壊、崩落、供試体としての形は存在 | |
| G | 供試体全体が崩壊し、片々は塊状 | |
| H | 供試体全体が崩壊し、片々は細粒化～泥状化 | |
| | ここで、細粒化とは粒径2mm程度に細分化された状況を指す。 | |

た挙動を示した。

図-2 に各乾燥温度における供試体の含水比と経過時間の関係を示す。乾燥温度 60 の場合、24 時間後の含水比は 3%以下まで低下し、浸漬過程においてスレーキングが生じ崩壊に至った。乾燥温度 40 の場合も同様に、含水比は 12%まで低下し崩壊に至っている。一方、乾燥温度 35 の場合、24 時間後の供試体は 21%の含水比を有しており、スレーキングが生じず乾湿繰返し試験が可能であったことを考慮すると、このあたりに供試体の含水比の閾値が存在すると考えられる。裏を返せば、崩壊に至った乾燥温度 60 (ASTM が定める方法) においても適切な乾燥時間を設定することで乾湿繰返し試験が可能であると考えられる。そこで、乾燥温度 60 において 3 つの乾燥時間 (6h, 7h, 8h) に着目し、

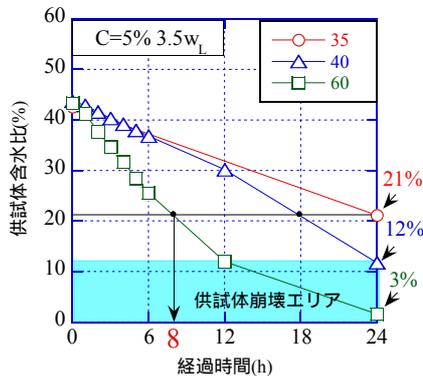


図-2 経過日数と含水比

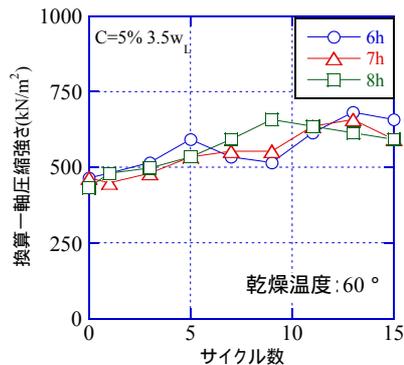


図-3 経過日数と含水比

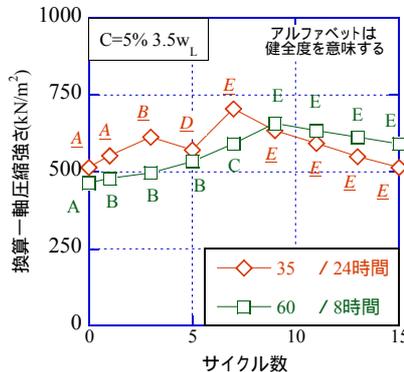


図-4 乾燥時間と乾燥温度の違いに着目した乾湿繰返し試験結果

乾湿繰返し試験を実施した。図-3 に乾燥時間の違いに着目したサイクル数と一軸圧縮強さの関係を示す。6h においてはサイクル数の増加に伴い一軸圧縮強さも緩やかに増加し、劣化の進行は見られなかった。このことは健全度ランクからも裏付けることができる。しかしながら、7h においてはサイクル終盤で、8h においてはサイクル中盤で、それぞれピークを示す劣化の挙動が確認された。ここで、図-4 に示す乾燥時間と乾燥温度の違いに着目した乾湿繰返し試験結果に着目すると、8h の条件と 35 で 24 時間乾燥させた条件は、サイクル数の増加に伴い健全度ランクが低下していることから、劣化の進行が起こっていると考えられる。また、いずれもサイクル中盤にピークを示すような類似した挙動を呈していることが分かる。以上のことから、乾燥温度を ASTM に準拠した 60 で実施する場合、乾燥時間を 8 時間に設定すれば、35 で 24 時間乾燥させた条件と同一の含水状態となり、乾湿繰返し試験の実施が可能であることが明らかとなった。

(2)石炭灰混合材料の長期溶出特性の解明と安全性評価手法の提案

実験に用いた試料の配合条件を表-5 に示す。石炭灰混合材料は、道路路盤材や裏込材等の覆土される環境下での利用において摩耗や粉塵の飛散はないと考えられることから、利用有姿による試験 (JIS K 0058-1) が定められている。そこで、利用有姿による溶出試験結果を表-6 に示す。カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、六価クロム(Cr(VI))、セレン(Se)は定量下限値以下であった。フッ素(F)、ホウ素(B)に関しては、いずれの条件において若干の溶出が見られたが、全て土壤環境基準値以下であった。しかしながら利用有姿による試験だけでは、長期的な環境安全性が担保されたわけではない。そのため、図-5 に示すカラム試験装置を用いて溶出挙動の詳細な評価を行った。

表-5 配合条件

| Case | 灰種 | 目標強度 (kN/m ²) | セメント添加率 C(%) | 設定含水比 w(%) | 石炭灰添加率 ash(%) | 養生日数(日) |
|-------|------|---------------------------|--------------|-------------------|---------------|---------|
| Case1 | 石炭灰D | 300~1000 | 7 | 2.5w _L | 100 | 28 |
| Case2 | | | | 3.5w _L | | |
| Case3 | | | 9 | 2.5w _L | | |
| Case4 | | | | 3.5w _L | | |
| Case5 | | | 11 | 2.5w _L | | |
| Case6 | | | | 3.5w _L | | |

表-6 利用有姿による溶出試験結果

| 分析項目 | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 | Case5 | Case6 | 基準値 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Cd | mg/L | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d | 0.01 |
| Pb | mg/L | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d | 0.01 |
| Cr() | mg/L | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d | 0.05 |
| Se | mg/L | n.d | n.d | n.d | n.d | n.d | 0.01 |
| F | mg/L | 0.04 | 0.14 | 0.02 | 0.05 | 0.03 | 0.02 |
| B | mg/L | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.04 | 0.05 | 1 |
| pH | - | 10.00 | 10.04 | 9.60 | 9.23 | 9.21 | 8.55 |

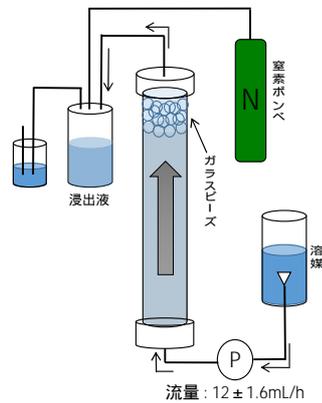
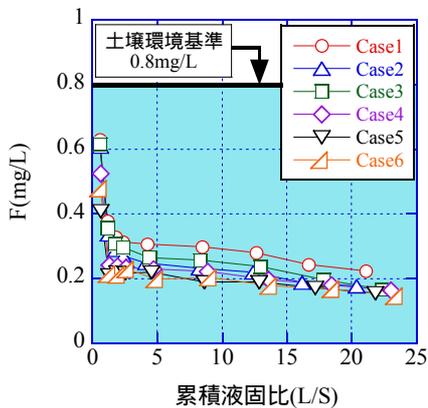
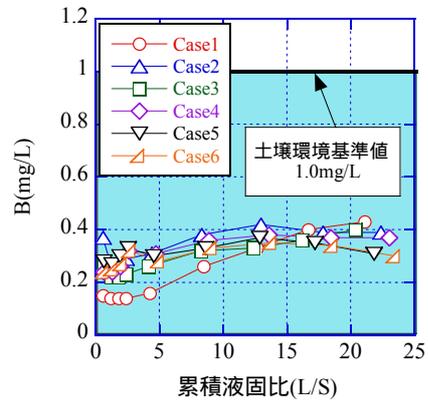


図-5 カラム試験の回路図

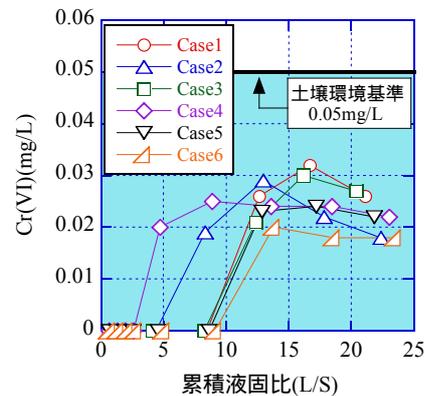
図-6(a)～(c)にフッ素(F)、ホウ素(B)、六価クロム(Cr(VI))のカラム試験結果を示す。フッ素については、通水初期にピークを示し、その後、減少する傾向が見られた。これは、フッ素が水溶性であるため、通水初期に溶出したと考えられる。フッ素はpH7以上では、土質試料として用いたカオリナイト鉱物から成るカオリン粘土には吸着されないため、初期段階で溶出したと考えられる。また、初期段階にピークを示し、その後は安定的な挙動を示していることから、フッ素に関しては溶出初期の濃度に注意が必要であり、漸次、低下していくと考えられる。一方、ホウ素は初期段階において減少傾向にあるが、その後、溶出量は増加傾向にあることが分かる。六価クロムについては、利用有姿による試験では定量下限値以下であったにも関わらず、カラム試験については、L/Sの増加に伴い溶出する結果が得られた。よって、ホウ素、六価クロムに関しては長期的なモニタリングの必要性があることが今回の結果から示唆された。このようにカラム試験は、利用有姿による溶出試験だけでは把握できない溶出のメカニズムを把握できることから、実際の環境条件に即した詳細な溶出挙動を捉えるツールとして有効である。その為、有姿による試験のみで環境安全性の評価を行うのではなく、カラム試験を併用し横断的に環境安全性の評価を行うことが重要である。



(a)フッ素(F)の溶出特性



(b)ホウ素(B)の溶出特性



(c)六価クロム(Cr(VI))の溶出特性

図-6 カラム試験結果

(3) 石炭灰混合材料の長期耐久性評価手法(予測式)の提案

図-7 に乾湿繰返し試験によって得られたサイクル数と一軸圧縮強さの関係を示す。配合条件によって強度発現やピークが異なるものの、いずれもサイクル初期に強度増加を示し、ピーク値を示した後、強度低下に転じていることが分かる。これを踏まえ図-8 に、乾湿繰返しによる劣化予測のイメージを示す。乾湿繰返しによる劣化挙動は、養生と乾燥・水浸による水和の促進(強度増加因子)から Ca 溶脱を基にした劣化挙動(強度低下因子)を差し引いたものであると捉えている。そこでまずは、乾湿繰返し試験におけるサイクル初期の強度増加に着目し、実験式の検討を行った。図-9 に養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。全ての条件において、養生日数の増加に伴い一軸圧縮強さは増加していることが分かる。ここで実験から得られた結果を用いて数式化すると、式-1 が得られる。

$$q_{u(t)} = a + b \log(t) \quad (1)$$

ここで、 t : 養生日数、 $q_{u(t)}$: 養生 t 日における一軸圧縮強さ(kN/m^2)、 a 、 b : 係数とする。また、この係数 a 、 b については、図-10 に示す供試体の水セメント比(W/C)と係数の関係により決定することが可能である。

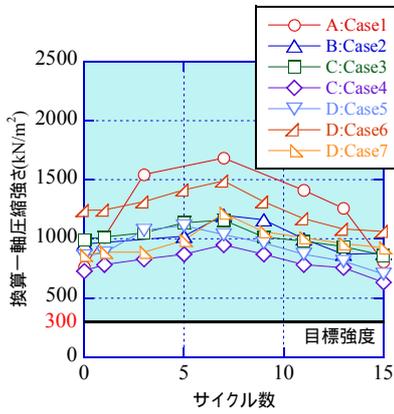


図-7 乾湿繰返し試験結果

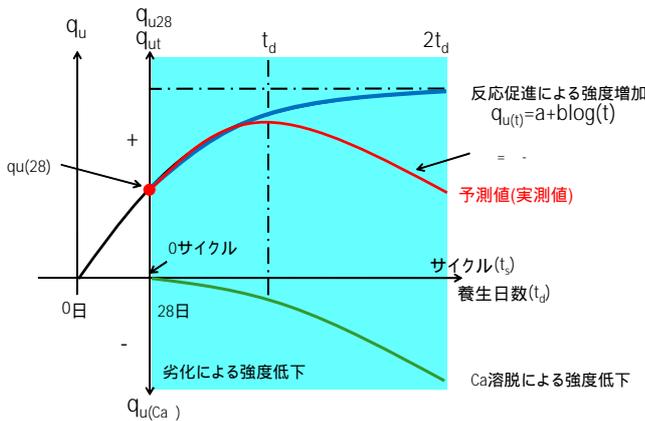


図-8 乾湿繰返しにおける劣化のイメージ

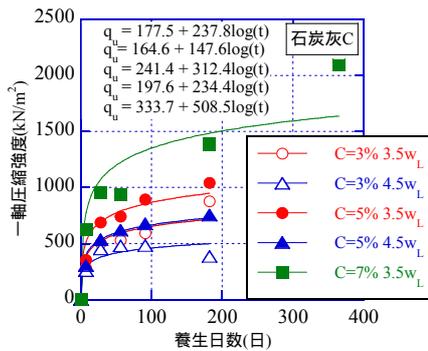


図-9 養生日数と一軸圧縮強さの関係

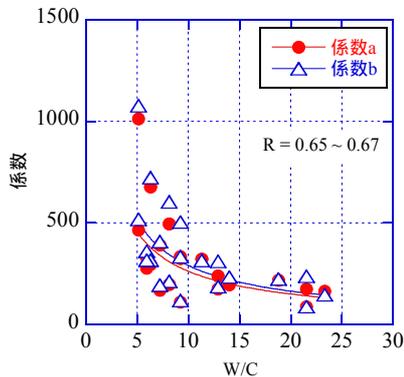


図-10 養生日数と一軸圧縮強さの関係

次に、Caの溶脱に着目し乾湿繰返し試験における強度低下に着目する。図-11に石炭灰混合材料における乾湿繰返しに伴うサイクル数とCa溶脱率の関係の一例を示す。ここでCa溶脱率とは、作製した石炭灰混合材料のCa含有量を各サイクルのCa含有量で除し、百分率で表したものを意味している。このことから、乾湿履歴を受けた石炭灰混合材料の強度低下(劣化)はCaの溶脱が支配的であり、両者には一義的な関係があることが明らかとなった。なお、 $Ca_{(out)}$ の取り方については、()直線の初期勾配を採用する方法、()の非線形性を直接解く方法、()近似式を用いる方法等が考えられるが、セメント量の増加に伴う線形性を考慮し一次式による近似で表す手法を採用し式-2が得られた。

$$Ca_{(out)} = C \cdot t_s \quad (2)$$

ここで、 t_s : サイクル数、 $Ca_{(out)}$: Ca溶脱率、 C : Ca溶脱係数とする。乾湿繰返し試験による強度低下が著しいものほど、Ca溶脱係数が大きくなるのが分かる。

また、このCa溶脱係数を基に劣化強度に換算したグラフが図-12であり、得られた結果を用いて数式化したところ、式-3が得られた。

$$q_u(Ca) = D \cdot t_s^2 \quad (3)$$

ここで、 $q_u(Ca)$: Ca溶脱率を基にした劣化強度、 D : 強度劣化係数、 t_s : サイクル数とする。劣化強度は、サイクル数 t_s の2次関数で表すことができ、強度劣化係数 D とCa溶脱係数には、図-13に示すような相関がみられた。

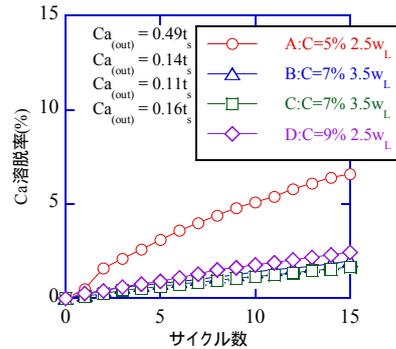


図-11 サイクル数とCa溶脱率

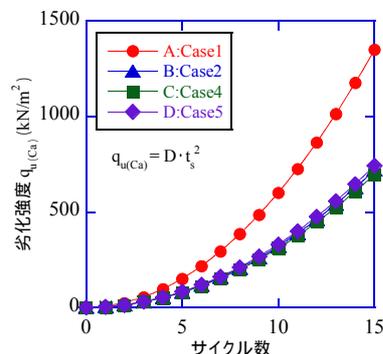


図-12 乾湿繰返しに伴うサイクル数と劣化強度

よって、溶脱係数を室内試験によって直接的に得るか、間接的に求めることができれば、乾湿繰返し試験によって起こる強度低下(劣化)を予測できると考えている。強度劣化係数と Ca 溶脱係数の関係については、今後さらにデータを蓄積してより信憑性の高いものにしていく必要がある。

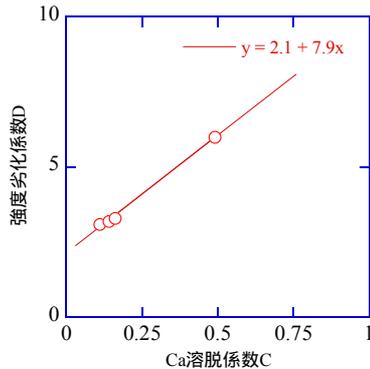


図-13 劣化係数の与え方

これらの結果より、今回、ASTM に準拠した乾湿繰返し試験手法における劣化の予測式をまとめると、式-4 となる。ここで、1 サイクルは乾燥 1 日、湿潤 1 日の合計 2 日を要することを考慮し、 $t_s=2t$ としている。

$$Q_u(t_s) = Q_u(t) - Q_u(Ca) \quad (4)$$

上式を用いて劣化予測を再現した結果を図-14 に示す。本研究で提案した予測式を用いることで、乾湿繰返し試験より得られる挙動をある程度、再現できていると考えられる。しかしながら、石炭灰によって化学組成や pH が異なるため、それらを考慮した補正係数については今後も更なる検討を行い、データの蓄積が必要である。また、地盤内曝露試験についてもこれらと同様の検討を行い、乾湿繰返し試験との相互関係を明らかにした上で、石炭灰混合材料の実地盤中における長期耐久性評価手法を確立していくことが重要である。

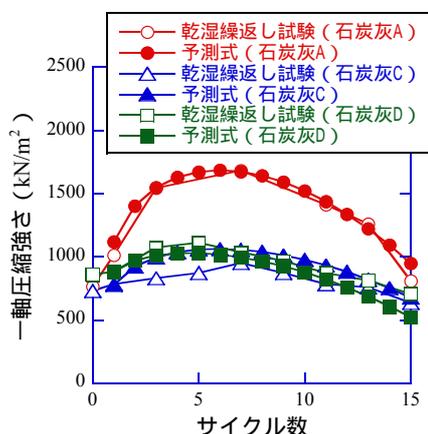


図-14 実測値と推定値の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- 1) 梅田真志・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣, 乾湿繰返し試験を用いた低強度石炭灰混合材料の耐久性評価手法の検討, 日本材料学会 第 12 回地盤改良シンポジウム論文集, 査読有, pp.369-372, 2016.
- 2) Takuro Fujikawa, Durability evaluation of coal ash mixed material on wetting and drying test considering the various environmental degradation factors, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 査読有, JPN-019, 2015.
- 3) Takuro Fujikawa, Durability evaluation of coal ash mixed material on wetting and drying test, The 9th International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials “WASCON2015”, 査読有, CD-ROM, 2015.

〔学会発表〕(計 10 件)

- 1) 池田哲朗・梅田真志・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣、上向流カラム通水試験を用いた石炭灰混合材料の環境影響評価、平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会、2017 年 3 月、佐賀大学(佐賀)
- 2) 梅田真志・佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣, 乾湿繰返し試験を用いた石炭灰混合材料の耐久性予測手法に関する研究 ~ W/C を考慮した実験式の検討 ~ , 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会、2017 年 3 月、佐賀大学(佐賀)
- 3) M.Umeda, K.Sato, T.Fujikawa, C. Koga, Durability Evaluation Method of Low Strength Coal Ash Mixed Material by Wetting and Drying Test, The 8th Asian Joint Symposium on Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2016 年 11 月、台南(台湾)
- 4) 梅田真志、佐藤研一、藤川拓朗、古賀千佳嗣、低強度石炭灰混合材料の耐久性評価手法の検討(その 1: 乾湿繰返し温度の影響), 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.2016 年 9 月, 岡山大学(岡山県)
- 5) 藤川拓朗、佐藤研一、古賀千佳嗣、梅田真志、低強度石炭灰混合材料の耐久性評価手法の検討(その 2: 乾湿繰返し時間の影響), 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.2016 年 9 月, 岡山大学(岡山県)

6. 研究組織

研究代表者

藤川 拓朗 (Fujikawa Takuro)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号: 20609606