

乾湿繰返し条件下における石炭灰混合材料の力学特性に及ぼす初期養生日数の影響

福岡大学工学部
福岡大学工学部
(独)国立環境研究所

学生会員
正会員
正会員

渡邊裕継
佐藤研一
肴倉宏史

行徳大輝
藤川拓朗
古賀千佳嗣

1.はじめに 東日本大震災により原子力発電の安全性が問題視されている中、電力の安定供給のため火力発電の増設や再稼働などは避けられない状況となっている。それに伴い石炭灰発生量も増加しており、有効利用法を模索していくことが重要である。石炭灰をはじめ各種リサイクル材料の有効利用を進めていくには、品質の保証や周辺環境への安全性だけでなく材料としての耐久性を担保させることが重要である。そのような背景の中、本研究は石炭灰混合材料の利用用途を拡大させるため乾湿繰返し試験を用いて耐久性の検討を行っている。しかし、乾湿繰返し試験は試験法自体に明確な規定がないため、結果の解釈が困難な試験であり、種々の条件設定が力学特性に及ぼす要因を明らかにしておくことが肝要である。そこで本報告では、石炭灰混合材料の初期養生日数の違いが乾湿繰返し条件下の力学特性に及ぼす影響について報告する。

2. 実験概要

2-1 供試体の作製方法 実験試料にはカオリン粘土及び石炭灰を用い、固化材には高炉セメント B 種を使用した。**表-1, 2**にカオリン粘土及び石炭灰の物理特性、化学組成を示す。供試体の作製はカオリン粘土の含水比を液性限界の 2.5 倍に調整し、セメント添加率と石炭灰添加率をカオリン粘土の湿潤重量に対し外割り配合で添加している。また、供試体の目標強度を実施工において用いられているスラリー状石炭灰混合材料¹⁾を参考に養生 28 日において $q_u=1000\text{kN/m}^2$ となるように配合を行った。含水比を調整したカオリン粘土に、石炭灰を加えて 5 分間、さらに高炉セメント B 種を加え 5 分間攪拌を行った後、直径 5cm、高さ 10cm のモールドに安定処理土の締固めを行わない供試体作製方法²⁾に準じて打設を行った。本報告では、**表-3**に示す条件にて配合した供試体の初期養生日数に着目して実験を行った。

2-2 乾湿繰返し試験方法 乾湿繰返し試験における履歴の与え方については、Wetting and Drying of Solid Wastes(ASTM D-4843)³⁾を採用した。その試験条件を**表-4**に示す。乾燥過程では、 $60\pm 3^\circ\text{C}$ に保った乾燥炉内に 24 時間静置し、その後 $20\pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室で 1 時間放置冷却し、湿潤過程に供した。湿潤過程においては、供試体が完全に浸水する体積(本サンプルにおいては $L/S=5$)を基に溶媒を設定し、各溶媒中に 23 時間静置した。乾燥及び湿潤過程の前後に供試体の高さ、直径、質量を測定し、上記の一連の過程を最長で 15 サイクル実施した。奇数サイクルの湿潤過程終了後には一軸圧縮試験を行い、試験後の供試体をサンプリングし、環告 19 号法試験を行った。全サイクルの湿潤過程終了後には、浸漬液を対象としてタンクリーチング試験を行い、劣化に影響を及ぼす Ca 溶出量についても把握を行っている。なお Ca をはじめ重金属等の分析には ICP プラズマ発行分析装置 (ICPS-7000 Ver.2) を用いて定量している。

3. 実験結果及び考察

3-1 健全度評価による石炭灰混合材料の劣化状態の把握 石炭灰混合材料の劣化状態を把握するため、**表-5**に供試体の健全度評価基準⁴⁾を示し**表-6**に健全度評価を示す。健全度評価とは、目視にて乾湿履歴に伴う劣化を評価しており Case 1(28 日養生)はサイクルを重ねるごとに表面より徐々に劣化が進行していることが確認された。一方の Case2(91 日養生)については表面劣化があまり見られなかった。これは 91 日養生させたことでセメントの水和反応が十分に行われ構造が緻密化され、劣化の進行を受

表-1 試料の物理特性

試料	カオリン粘土	石炭灰
土粒子密度 (g/cm^3)	2.731	2.375
含水比 (%)	0	0
液性限界 (%)	5.17	NP
塑性限界 (%)	3.43	NP
砂分 (2mm-75 μm)	0	0.3
シルト分 (75 μm -5 μm)	35.4	65.3
粘土分 (5 μm)	64.6	34.4
lg-loss (%)	3.11	5.83

表-2 石炭灰の化学組成

成分	石炭灰
SiO ₂ (%)	58.8
CaO(%)	5
Al ₂ O ₃ (%)	25.9
Fe ₂ O ₃ (%)	2.3
MgO(%)	0.9
Na ₂ O(%)	0.2
K ₂ O(%)	2.3

表-3 実験条件

	目標強度 $Q_{u28}(\text{kN/m}^2)$	セメント 添加率(%)	石炭灰 添加率(%)	養生日数 (日)
Case1	1000	5	100	28
Case2				91

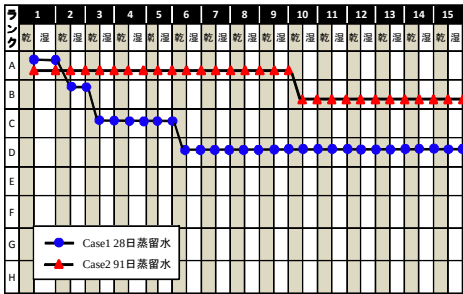
表-4 乾湿履歴の与え方

試験条件	乾燥過程	湿潤過程
	炉乾燥 ($60\pm 3^\circ\text{C}$)	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1サイクル 最長15サイクル	

表-5 健全度評価基準⁴⁾

	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。		

表-6 健全度評価



けにくかったためと考えられる。しかしながら、10 サイクルを超える辺りから徐々に表面劣化が確認された。

3-2 初期養生日数の違いが乾湿繰返し試験の力学特性に与える影響

図-1 にサイクル数と一軸圧縮強さの関係を示す。図-2 にサイクル数と変形係数の関係を示す。図中に、併せて各サイクルにおける健全度評価も示している。また、図-3, 4 に各条件の一軸圧縮試験結果を示す。

Case1(28 日養生)はサイクル数の増加に伴いピークを示した後、強度の低下が見られる。一方、Case2(91 日養生)では、Case1(28 日養生)で見られるサイクル数の増加に伴う著しい強度増加・低下は見られておらず、その様子は応力ひずみ曲線からも伺える。これらの図より、初期の養生日数が異なることで、乾湿繰返しを受けた石炭灰混合材料の力学特性は全く異なる挙動を示すことが判明した。ここで、両者の乾湿繰返しを受けた際の力学特性の差異について以下のように捉えている。Case1(28 日養生)は水和反応における強度増加の途中にあり、劣化が進行していない若サイクルにおいては、図-5 に示す Ca 含有率より内部拡散による Ca の溶脱は見られるものの、乾燥過程における高温養生による安定処理効果の促進⁵⁾と水浸過程による水和の促進が相まって強度発現が進行する。しかしながら健全度評価からも推察されるように、6 サイクル以降はクラックの進行が全体的に発生し Ca の溶脱、供試体の表面劣化や乾湿繰返しによる供試体内部の歪の蓄積が高温養生・水和促進と比べ卓越し、強度低下を生じさせている。これに対し、Case2(91 日養生)は、水和反応が十分落ち着いた定常状態にあり、内部拡散による Ca の溶脱が Case1(28 日養生)と比べて低い率で生じており、水和反応による強度発現やポゾラン反応により構造が緻密化されている。このことから健全度評価からも推察できるように乾湿サイクルによる劣化の影響を 9 サイクルまで受けていない点や図-6 に示す伸縮率のように Case1(28 日養生)と比べ、乾湿履歴による膨張・収縮を受けておらず乾燥に対する抵抗力を有している様子が伺える。しかしながら、図-7 に示す質量変化率から分かるようにサイクル数の増加に伴い供試体中への水の出入りが増加し着実に劣化が進行しており、20 日以降(10 サイクル以降)は Case1(28 日養生)と質量変化が同程度となり局部的な表面剥離が見られはじめ徐々に強度低下が生じている。更にサイクル数を重ねていくと供試体の崩壊に至るまでの強度低下が発生すると考えられる。以上の結果より、初期養生日数が 28 日の石炭灰混合材料は乾湿繰返しに伴う表面劣化が支配的であり、初期に強度増加が見られるものの劣化の進行とともに強度低下が生じる。これに対し、材齢を重ねた石炭灰混合材料は新たに強度発現は生じないものの構造は緻密化されている。そのため、乾湿繰返しに伴う質量変化による劣化が支配的となるが、若材齢の劣化の進行に比べ遅いことが分かる。

Case1(28 日養生)は水和反応における強度増加の途中にあり、劣化が進行していない若サイクルにおいては、図-5 に示す Ca 含有率より内部拡散による Ca の溶脱は見られるものの、乾燥過程における高温養生による安定処理効果の促進⁵⁾と水浸過程による水和の促進が相まって強度発現が進行する。しかしながら健全度評価からも推察されるように、6 サイクル以降はクラックの進行が全体的に発生し Ca の溶脱、供試体の表面劣化や乾湿繰返しによる供試体内部の歪の蓄積が高温養生・水和促進と比べ卓越し、強度低下を生じさせている。これに対し、Case2(91 日養生)は、水和反応が十分落ち着いた定常状態にあり、内部拡散による Ca の溶脱が Case1(28 日養生)と比べて低い率で生じており、水和反応による強度発現やポゾラン反応により構造が緻密化されている。このことから健全度評価からも推察できるように乾湿サイクルによる劣化の影響を 9 サイクルまで受けていない点や図-6 に示す伸縮率のように Case1(28 日養生)と比べ、乾湿履歴による膨張・収縮を受けておらず乾燥に対する抵抗力を有している様子が伺える。しかしながら、図-7 に示す質量変化率から分かるようにサイクル数の増加に伴い供試体中への水の出入りが増加し着実に劣化が進行しており、20 日以降(10 サイクル以降)は Case1(28 日養生)と質量変化が同程度となり局部的な表面剥離が見られはじめ徐々に強度低下が生じている。更にサイクル数を重ねていくと供試体の崩壊に至るまでの強度低下が発生すると考えられる。以上の結果より、初期養生日数が 28 日の石炭灰混合材料は乾湿繰返しに伴う表面劣化が支配的であり、初期に強度増加が見られるものの劣化の進行とともに強度低下が生じる。これに対し、材齢を重ねた石炭灰混合材料は新たに強度発現は生じないものの構造は緻密化されている。そのため、乾湿繰返しに伴う質量変化による劣化が支配的となるが、若材齢の劣化の進行に比べ遅いことが分かる。

Case1(28 日養生)は水和反応における強度増加の途中にあり、劣化が進行していない若サイクルにおいては、図-5 に示す Ca 含有率より内部拡散による Ca の溶脱は見られるものの、乾燥過程における高温養生による安定処理効果の促進⁵⁾と水浸過程による水和の促進が相まって強度発現が進行する。しかしながら健全度評価からも推察されるように、6 サイクル以降はクラックの進行が全体的に発生し Ca の溶脱、供試体の表面劣化や乾湿繰返しによる供試体内部の歪の蓄積が高温養生・水和促進と比べ卓越し、強度低下を生じさせている。これに対し、Case2(91 日養生)は、水和反応が十分落ち着いた定常状態にあり、内部拡散による Ca の溶脱が Case1(28 日養生)と比べて低い率で生じており、水和反応による強度発現やポゾラン反応により構造が緻密化されている。このことから健全度評価からも推察できるように乾湿サイクルによる劣化の影響を 9 サイクルまで受けていない点や図-6 に示す伸縮率のように Case1(28 日養生)と比べ、乾湿履歴による膨張・収縮を受けておらず乾燥に対する抵抗力を有している様子が伺える。しかしながら、図-7 に示す質量変化率から分かるようにサイクル数の増加に伴い供試体中への水の出入りが増加し着実に劣化が進行しており、20 日以降(10 サイクル以降)は Case1(28 日養生)と質量変化が同程度となり局部的な表面剥離が見られはじめ徐々に強度低下が生じている。更にサイクル数を重ねていくと供試体の崩壊に至るまでの強度低下が発生すると考えられる。以上の結果より、初期養生日数が 28 日の石炭灰混合材料は乾湿繰返しに伴う表面劣化が支配的であり、初期に強度増加が見られるものの劣化の進行とともに強度低下が生じる。これに対し、材齢を重ねた石炭灰混合材料は新たに強度発現は生じないものの構造は緻密化されている。そのため、乾湿繰返しに伴う質量変化による劣化が支配的となるが、若材齢の劣化の進行に比べ遅いことが分かる。

4. まとめ 初期の養生日数が異なることで、乾湿繰返しを受けた石炭灰混合材料の力学特性は劣化のメカニズムが異なることを明らかにした。今回の検討結果から得られた劣化のメカニズムの相違をどう解釈し、どう設計法に反映させていくかは、今後、実地盤中における挙動と比較しながら考察していく予定である。

謝辞：本研究は、「東アジア標準化に向けた廃棄物・副産物の環境安全品質管理手法の確立」環境省環境研究総合推進費補助金(K113004)の一部として実施された研究である。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献：1)財団法人石炭エネルギーセンター、港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン、pp37, 2011.3. 2) 地盤工学会、土質試験の方法と解説—第一回改正版—、「安定処理土の締固めをしない供試体作製」、PP.308-316, 2005. 3) Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes, Designation: D4843-88, ASTM International, 2009. 4) 日隈厚志・久富優二・佐藤研一・藤川拓朗：乾湿繰返し履歴を受けた石炭灰混合材料の耐久性、土木学会西部支部研究会講演概要集、Ⅲ-019, pp385-386, 2012.3. 5) 嘉門雅史・勝見 武・今西秀公：セメント系安定処理土の乾湿繰返し耐久性、セメント・コンクリート論文集、No.45, pp.744-749, 1991.

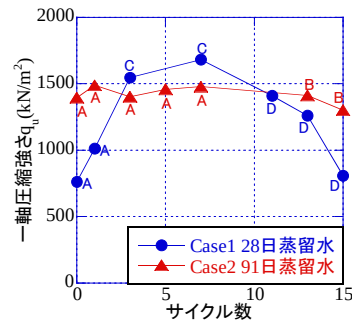


図-1 サイクル数と一軸圧縮強さ

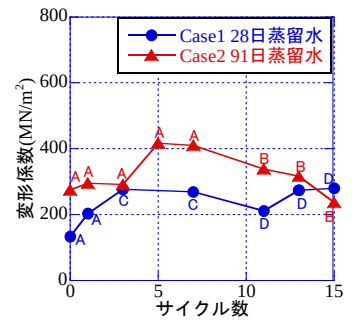


図-2 サイクル数と変形係数

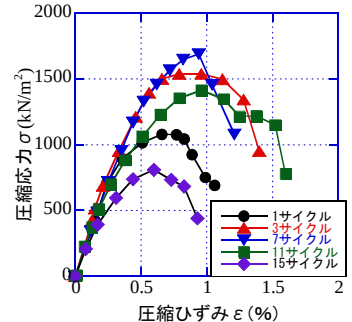


図-3 一軸圧縮試験結果 (Case1 28 日蒸留水)

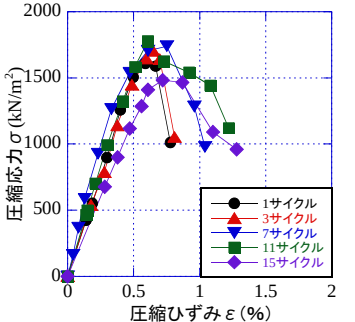


図-4 一軸圧縮試験結果 (Case2 91 日蒸留水)

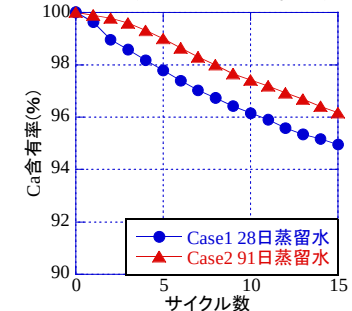


図-5 サイクル数と Ca 含有率

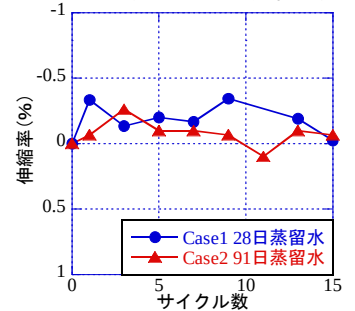


図-6 サイクル数と伸縮率

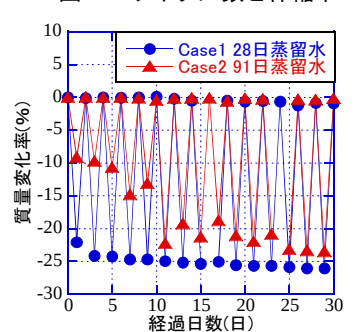


図-7 経過日数と質量変化率