

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～

福岡大学大学院 学生会員 梅田 真志

福岡大学工学部 正会員 佐藤 研一 藤川 拓朗 古賀 千佳嗣

1.はじめに 火力発電所から副次的に生成される石炭灰の有効利用の一つに石炭灰混合材料¹⁾がある。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から、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。そこで著者らは、これまでセメント改良土等の長期的な耐久性を検討する際に用いられる乾湿繰返し試験²⁾を用いて石炭灰混合材料の耐久性評価を行っている。石炭灰混合材料の実地盤中における長期的な耐久性は明らかにされていないため、乾湿繰返し試験のような短期間の室内試験から長期耐久性予測を予測する手法の確立は、極めて重要な課題である。そこで本研究では、実地盤中における長期的な耐久性を乾湿繰返し試験から予測する手法(予測式の提案)を確立することを目的としている。また、乾湿繰返し試験を行うとサイクル初期に強度が増加し、サイクル後半に強度低下することが明らかとなっている³⁾。そこで本報告では、乾湿繰返し試験によって起こる強度増加の挙動に着目し、実験式を求めた結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 石炭灰混合材料の作製方法及び実験条件 本実験には、炭種の違いによる影響を把握するため、4種類の石炭灰(JIS 灰及び原灰)と土質試料としてカオリン粘土、固化材には高炉セメントB種を混練し、これらに所定量の水を加えたものを石炭灰混合材料と定義している。表-1に実験に用いた配合条件を示す。カオリン粘土は、土質材料のばらつきによる誤差を軽減させるため、建設発生土の代替材として使用した。供試体の作製において、カオリン粘土の含水比は液性限界(w_L)=51.7%)を基準に調整を行った($2.5w_L=129.3\%$, $3.5w_L=181.0\%$)。セメントと石炭灰をカオリン粘土の湿潤質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養生28日において $q_{u28}=500\sim1,000\text{ kN/m}^2$ 程度となるように、それぞれ配合条件を設定した。

2-2 乾湿繰返し試験方法 乾湿履歴の与え方は、表-2に示す Wetting and Drying Test

(ASTM D-4843)²⁾に準拠して行った。養生28日後の供試体を用いて検討を行っている。乾燥過程では、 $60\pm3^\circ\text{C}$ に設定した炉乾燥に24時間静置し、その後 $20\pm3^\circ\text{C}$ の恒温室で1時間放置冷却した後、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(本実験では $L/S=5$)を基に溶媒を設定し、各溶媒中に23時間静置した。上記一連の過程を最長で15サイクル実施した。各サイクルの乾燥・湿潤過程終了後には供試体の高さ、直径、質量を測定している。奇数サイクルの湿潤過程終了後には、力学特性の把握を行うために灰種毎に一軸圧縮試験(JIS A 1216)と針貫入試験を行っている。また、サイクル数の増加に伴うCaの溶出量を把握するために環告46号試験及び環告19号試験を行っている。

2-3 乾湿繰返し試験における劣化挙動の考え方 図-1に全条件における石炭灰混合材料の乾湿繰返し試験結果を示す。このグラフから、全ての条件においてサイクル中盤でピークを示し、漸次、強度低下する様子が伺える。これは、乾湿繰返しに伴う強度増加と劣化速度のバランスに起因していると考えられる。強度増加に関しては、石炭灰混合材料の養生日数の経過に伴う強度増加と、乾燥過程における高温養生による安定処理効果の促進と水浸過程による水和の促進によるものであると考えられる。強度低下に関しては、サイクル経過に伴う乾燥収縮や体積膨張、質量変化に伴うポーラス化やスレーキングであり、結果的にこれらの劣化因子がCaの溶脱を助長すると捉えている。言い換えると、Caの溶脱量を定量的に評価することが出来れば、Caの溶脱量から劣化の度合を強度に換算することが可能となり、強度増加から強度低下までの一連の様子を再現できることになる。図-2は上述した石炭灰混合材料の劣化挙動の考え方を示したものである。乾湿繰返し試験によって得られる劣化挙動は、養生と乾燥・水浸による強度増加からCaの溶脱を基にした劣化強度を差し引くことで得られると考えている。この強度増加及び強度低下を予測する手法を確立することが

表-1 実験に用いた配合条件

	石炭灰の種類	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A(JIS灰)	5	$2.5w_L$	100	28
Case2	石炭灰B(原粉)	7	$3.5w_L$		
Case3	石炭灰C(原粉)	7	$2.5w_L$		
Case4		7	$3.5w_L$		
Case5	石炭灰D(原粉)	9	$2.5w_L$		
Case6		11	$2.5w_L$		
Case7			$3.5w_L$		

表-2 乾湿繰返し試験条件²⁾

試験条件	乾燥過程	湿潤過程
	炉乾燥($60\pm3^\circ\text{C}$)	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15サイクル	

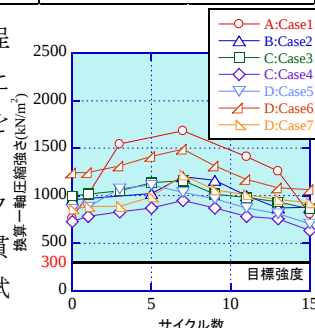


図-1 乾湿繰返し試験結果

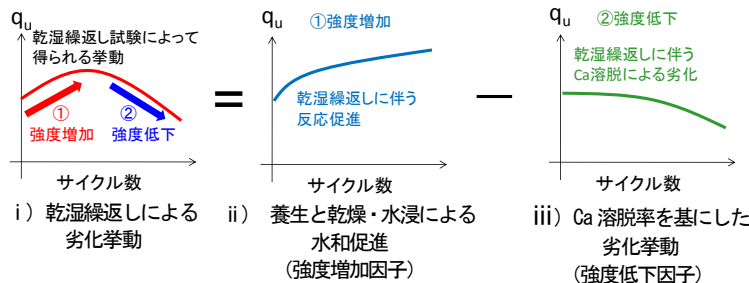


図-2 乾湿繰返し試験における挙動の考え方

理効果の促進と水浸過程による水和の促進によるものであると考えられる。強度低下に関しては、サイクル経過に伴う乾燥収縮や体積膨張、質量変化に伴うポーラス化やスレーキングであり、結果的にこれらの劣化因子がCaの溶脱を助長すると捉えている。言い換えると、Caの溶脱量を定量的に評価することが出来れば、Caの溶脱量から劣化の度合を強度に換算することが可能となり、強度増加から強度低下までの一連の様子を再現できることになる。図-2は上述した石炭灰混合材料の劣化挙動の考え方を示したものである。乾湿繰返し試験によって得られる劣化挙動は、養生と乾燥・水浸による強度増加からCaの溶脱を基にした劣化強度を差し引くことで得られると考えている。この強度増加及び強度低下を予測する手法を確立することが

出来れば、乾湿繰返し試験を行わずして石炭灰混合材料の耐久性を評価できることになる。そして最終的に実地盤中の挙動と乾湿繰返し挙動それぞれの予測式を導いて両者の関係を明らかにし、そこから実地盤中における長期強度の把握に繋がりたいと考えている。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、実験式検討を行った。

3. 実験結果及び考察 図-3に石炭灰A～Dにおける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伺える。石炭灰混合材料をはじめ、セメント改良土は養生28日までに著しく強度発現が起り、その後は緩やかな増加挙動を呈する。今回、実験から得られた結果を用いて数式化したところ、式-1が得られた。この式の妥当性については、今後さらに養生日数を増やすか、新たな条件やデータを加えて吟味する必要がある。

$$q_{t0} = a + b \log(t) \quad (1)$$

ここで、 t : 養生日数、 q_{t0} : 養生 t 日における一軸圧縮強さ(kN/m²)、 a 、 b : 係数とする。また、この係数 a 、 b については、図-4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出来る。この関係は、図-3における全ての条件によって得られた結果を数式化し、そこから得られた a 、 b の実験値を水セメント比で整理したものである。供試体の水セメント比を計算し、その時の a 、 b の値をグラフから読み取り、式-1に代入することによって長期的な強度を予測することが出来る。また、このグラフから相関が取れている(相関係数: 0.65~0.67)ことが分かるが、今後も更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。この式に、供試体を打設してからの日数を代入することで、その時の強度をある程度予測することができると考えている。また、この式によって予測した強度から Ca の溶脱を考慮した強度低下を差し引き、実地盤での強度と比較することで、乾湿繰返し試験の強度増加及び年数を予測できると捉えている。次に、図-5及び図-6に石炭灰C及びDにおける経過日数と一軸圧縮強さの実測値と予測値を比較したグラフを示す。

図-5 実験値と予測値の比較(石炭灰C) 図-6 実験値と予測値の比較(石炭灰D)

なお、今回試験条件が多いため、代表した4条件のみを示す。これらを見てわかる通り、実測値及び予測値は類似した傾向を示している。しかしながら若干の誤差が見られた。石炭灰によって化学組成やpHが異なるため、今後はそれらを考慮した項を検討していく必要がある。

4. まとめ 本検討では、水セメント比を変数とした対数の一次式の検討を行い、石炭灰混合材料の長期的な強度をある程度予測できることが明らかとなった。しかしながら実測値と予測値には若干の誤差が見られたため、今後は炭種の違い(化学組成やpH等)を考慮した項や補正係数の検討が必要である。

謝辞: 本研究は、文科省 科研費 26870786 の助成を受けたものです。関係者各位に心より感謝申し上げます。

【参考文献】1) (公) 土木学会: 石炭灰有効利用技術について—循環型社会を目指して—, 第58回土木学会全国大会・研究討論会, 報告書, p.29, 2003. 2) Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes, Designation: D4843-88, ASTM International, 2009. 3) 藤川ら: 種々の乾湿繰返し履歴を受けた石炭灰混合材料の耐久性及び環境影響評価, 第11回地盤改良シンポジウム論文集, pp.277-280, 2014.

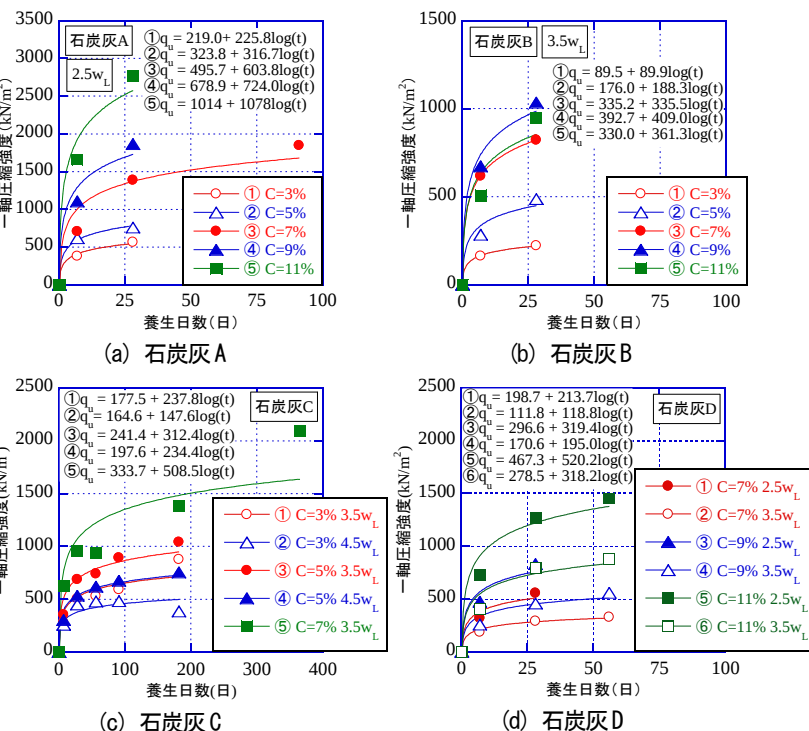


図-3 養生日数と一軸圧縮強さと

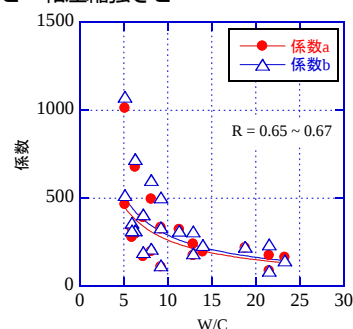


図-4 W/Cと係数の関係

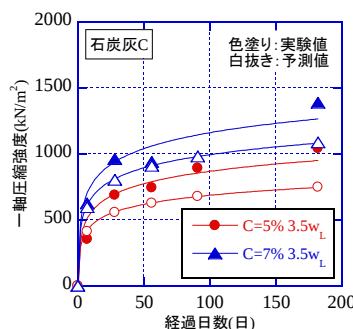


図-5 実験値と予測値の比較(石炭灰C)

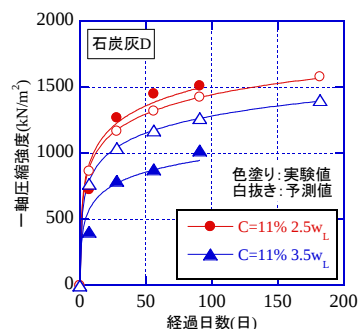


図-6 実験値と予測値の比較(石炭灰D)