

石炭灰混入型セメント改良土の循環利用に伴う力学・溶出特性の解明

藤川拓朗¹⁾、佐藤研一¹⁾

1) 福岡大学工学部

本研究は、建設工事に伴い発生する建設発生土と他産業廃棄物である石炭灰を用いたセメント安定処理土が、短期的な供用終了時・維持修繕・ライフラインの整備等により掘削された際に、循環資源として再び有効利用していくことを目的としている。本報告では、掘削されたセメント安定処理土の循環利用に伴う力学・溶出特性を明らかにし、循環利用の可能性について検討した結果について述べる。

1. はじめに

我が国では、軟弱地盤の改良や建設発生土を有効利用するためにセメント安定処理工法が用いられることが非常に多い。しかしながら、維持修繕やライフラインの整備により安定処理土が掘削された場合、明確な利用基準や力学・溶出特性が把握されていないため、廃棄物として取り扱われているのが現状である。一方、石炭灰についても、現状では有効利用率 97%（平成 19 年度データ）と高いものの、そのうちの 66%がセメント原料、14%が土木分野に利用¹⁾されており、昨今の公共事業の削減によるセメント・コンクリート需要の低下に伴う他分野での用途拡大が急務となっている。また、大規模な灰捨場の確保が困難になってきていることや地球規模の環境を考えた資源化という面で有効利用が極めて重要となってきたことから、セメント改良土に石炭灰を混入させた事例も増えている。しかしながら、これらの石炭灰を用いたセメント改良土の再使用・再生利用を視野に入れた循環利用の研究事例やデータが極めて少ないため、結局のところ廃棄物として処分される可能性が非常に高い。循環型社会形成のためには、掘削後のセメント安定処理土を再び地盤材料として活用していくことが重要である。そこで、本研究では石炭灰を混入させたセメント安定処理土（以後、石炭灰混入型セメント改良土）の循環利用に伴う力学・溶出特性や耐久性を実験的に明らかにし、処分場延命化のための一時的回避にしか過ぎない有効利用から脱却し、恒久的なリデュース並びに持続可能な循環利用の手法を確立することを目的としている。図-1 に本研究の循環型社会形成の概念を示す。なお本研究では、石炭灰混入型セメント改良土と建設発生土の大量利

用が期待される流動化処理土²⁾の 2 つのセメント安定処理土に着目して検討を行った。前者の石炭灰混入型セメント改良土を用いた検討では、主として掘削後に再び地盤材料として利用することを目的としており、解砕した石炭灰混入型セメント改良土の強度特性に寄与する仮置き日数の影響や耐久性に着目している。後者の流動化処理土を用いた検討では、石炭灰を混入させた流動化処理土（以後、石炭灰混入型流動化処理土）を循環利用することを目的としており、所定の養生期間経過したものを掘削・解きほぐしを行った後、再び流動化処理土を作製し再生流動化処理土³⁾として循環利用する可能性に着目している。

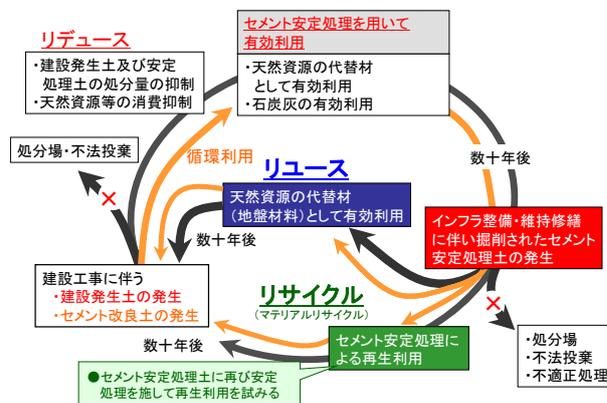


図-1 本研究の循環型社会形成の概念

2. 実験概要

石炭灰混入型セメント改良土、石炭灰混入型流動化処理土ともに、実験試料には、工事における仮設道路の供用期間終了後に掘削されたセメント安定処理土を粒径 9.5mm 以下になるまで、解きほぐしたものを使用した。なお、この掘削処理土は性状より泥土に区分⁴⁾される。石炭灰は、フライ

表-1 実験に用いた試料の物理特性

試料名	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	含水比 w (%)	塑性指数 I_p (%)	コーン指数 q_c (kN)	細粒分含有率 F_c (%)
泥土	2.609	24.6	29.3	166.7	51.2
石炭灰	2.357	0	N.P.	N.D.	99.7

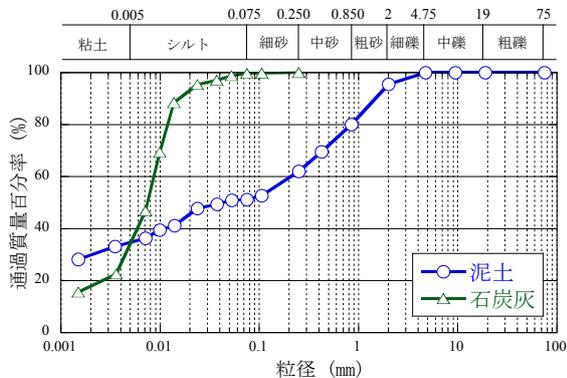


図-2 実験に用いた試料の粒径加積曲線

表-2 セメント改良土を用いた実験条件

試料名	セメント添加量 (%)	石炭灰添加量 (%)	解砕までの養生日数(日)	解砕後の仮置き日数(日)	仮置きから一軸圧縮試験までの養生日数(日)
泥土	3	0 5 10	3 28	0, 7, 28	0, 7, 28

アッシュII種 (JIS A 6201) に分類されるものを使用した。泥土及び石炭灰の物理特性値を表-1 に、粒径加積曲線を図-2 に示す。

2-1 石炭灰混入型セメント改良土を用いた検討

2-1-1 供試体作製方法 供試体の作製は泥土の含水比を $w=25\%$ に調整して、固化材の添加量を土の湿潤質量に対して外割り配合で $C=3\%$ とした。なお、固化材には高炉セメントB種を用いた。また石炭灰添加の条件に関しては、土の湿潤質量に対して外割り配合で $ash=5, 10\%$ (石炭灰: ash と表記する) を添加後に同様にセメントを添加し、これらの攪拌をホバートミキサーで8分程度行った。鋳鉄製のモールド (直径 $\phi 5 \times$ 高さ $h10\text{cm}$) を用いて、突固め層数が3層となるように試料をモールドに入れ、ランマー (質量; 1.5kg , 落下高さ; 20cm) で突固め回数を12回として供試体を作製した (JIS A 1210)。突固め回数は、突固めエネルギー E_c 約 $550 \text{ (kJ/m}^3)$ となるように調整している。供試体作製後、ラップで密封して 20°C 一定の恒温室内で所定の期間、空气中養生させた。

2-1-2 解砕した石炭灰混入型セメント改良土の仮置き期間に伴う力学特性の変化 石炭灰混入型セメント改良土のリサイクルを考慮する上で、掘削

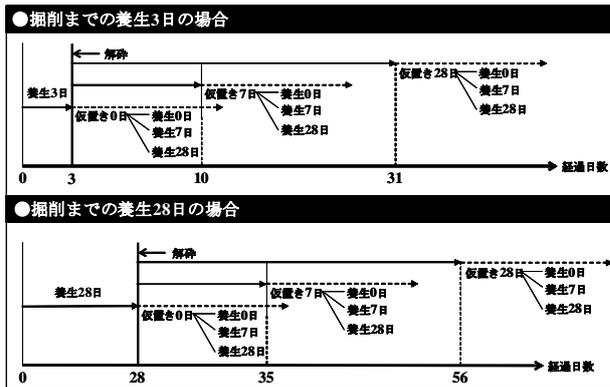


図-3 解砕から仮置きまでの考え方

・解砕後の仮置き日数及び養生日数に伴う強度発現が力学特性に及ぼす影響について検討を行った。表-2 に示した実験条件及び配合条件で、2-1-1における供試体作製時と同一のエネルギーで供試体を作製した。作製した供試体を3日間及び28日間養生後、回転式破碎混合混練機⁵⁾を用いて最大粒径が 9.5mm となるように破碎した。この解砕した石炭灰混入型セメント改良土の仮置きを想定し、ポリエチレン容器内で湿潤状態となるように密封して保存した。仮置きしたものを解砕前と同一のエネルギーで再度締め固めて供試体を作製後に所定の期間、空气中養生させて一軸圧縮試験を行った。なお、解砕からの仮置き日数と全経過日数との関係を図-3 に示す。

2-1-3 石炭灰混入型セメント改良土の耐久性評価

石炭灰混入型セメント改良土の耐久性を把握するために表-2 に示す実験条件で乾湿繰り返し試験を行った。本実験は石炭灰混入型セメント改良土を7日間水侵させた後、7日間自然乾燥させる工程を1サイクルとした。なお、水侵養生においては、供試体を $\text{pH}5.8\sim 6.3$ に調整した純水に $L/S=10$ で浸漬させた。また、所定サイクル終了後に一軸圧縮試験および各サイクルの水侵養生終了後の浸漬液を $0.45\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターを用いてろ過し、 Ca 濃度及びその他の重金属について定量した。

2-2 石炭灰混入型流動化処理土を用いた検討

2-2-1 流動化処理土作製方法 石炭灰混入型流動化処理土は埋設管の埋戻しを用途対象とし表-3 に従って作製した。その作製方法は、水、建設発生土、そして固化材である高炉セメントB種をホバートミキサーで約8分間混合攪拌し、目標フロー値が $250\pm 20\text{mm}$ になるように配合設計した。その後、作製した試料のフロー値 (JHSA 313-1992)、

表-3 流動化処理土の品質規定²⁾

用途	適用対象	試験項目	基準値
埋設管の埋戻し	ガス管 上下水道管 など	一軸圧縮強さ	130kN/m ² 以上600kN/m ² 以下
		フロー値	140mm以上
		ブリージング率	3%未満
		湿潤密度	1.40g/cm ³ 以上

表-4 実験に用いた流動化処理土の配合と品質

土質材料	セメント量 (kg/m ³)	石炭灰 混入率 (%)	発生土 (kg/m ³)	石炭灰 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	フロー値 (mm)	ブリー ジ ン グ 率 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)
粘土	75	10	810	90	627	260×260	1.09	1.602
	75	20	740	185	613	260×260	1.63	1.613
	75	30	650	279	608	250×255	1.27	1.612
	75	50	450	450	612	250×250	1.59	1.587
	100	10	780	87	631	255×255	0.99	1.598
	100	20	720	180	615	250×250	0.91	1.615
	100	30	630	270	611	260×260	1.32	1.611
	100	50	440	440	611	250×250	1.34	1.591

湿潤密度、ブリージング率 (JSCE-1986) を測定し、混合攪拌した試料を、直径 φ5×高さ h10 (cm) の塩ビ製モールドに打設した。そして、固まり次第整形、脱型を行い、ラップに包み 20℃ 一定の恒温室で養生させた。養生日数は 7, 28 日とし、各養生経過後に一軸圧縮試験を行った。実験に用いた流動化処理土の配合と品質を表-4 に示す。表中の石炭灰混入率とは、主材+石炭灰に対する石炭灰の割合 (重量比) を表したものであり、グラフ中では FA と表記する。

2-2-2 石炭灰混入型流動化処理土の耐久性評価

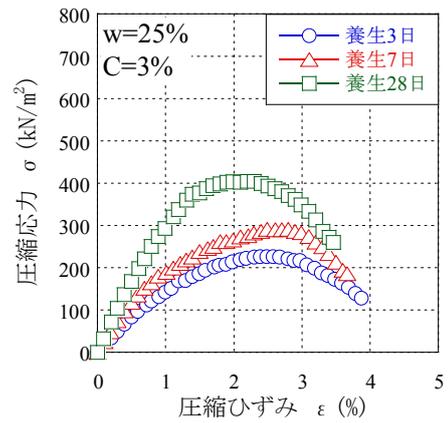
表-4 に示す条件で、各サイクル数経過後に一軸圧縮試験と溶出試験を行い、石炭灰混入型流動化処理土の乾湿繰返し作用における耐久性と溶出特性について検討した。なお水浸過程 7 日間、乾燥過程 7 日間を 1 サイクルとした。水浸過程では pH5.8 ~ 6.3 に調整した純水を L/S (液固比) = 10 で浸漬させた。また、サイクル経過後の浸漬液をろ過したものを検液とし、ICP プラズマ発光分析装置を用いて Ca, T-Cr, Pb, B を定量した。

3. 実験結果および考察

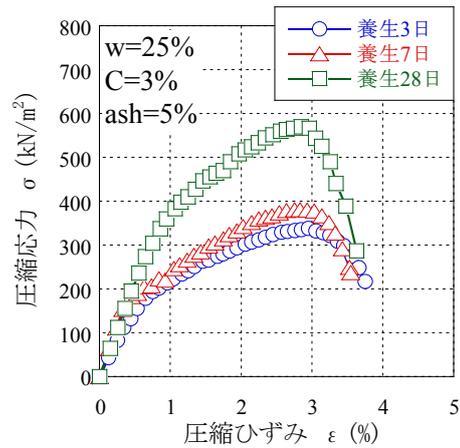
3-1 石炭灰混入型セメント改良土を用いた検討

3-1-1 石炭灰混入型セメント改良土の力学特性

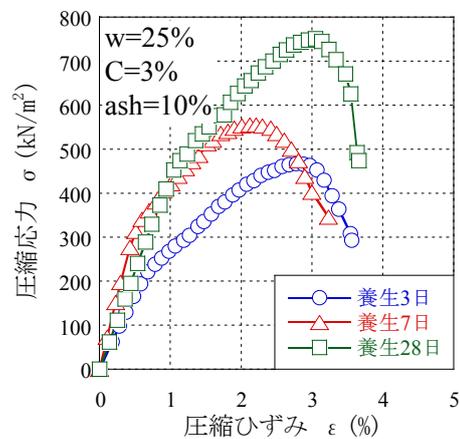
図-4(a) にセメントのみで改良を行ったもの、図-4 (b), (c) に石炭灰混入型セメント改良土の一軸圧縮試験結果を示す。いずれの条件においても養生経過と共に強度が増加していることがわかる。また、石炭灰添加量を増やすことで強度の増加がみられる。これらは、含水比 0% の石炭灰を添加したことで、石炭灰の表面積による吸水効果³⁾が発揮されて石炭灰混入型セメント改良土の含水比が低下し



(a) C=3%のみ



(b) C=3%+ash=5%



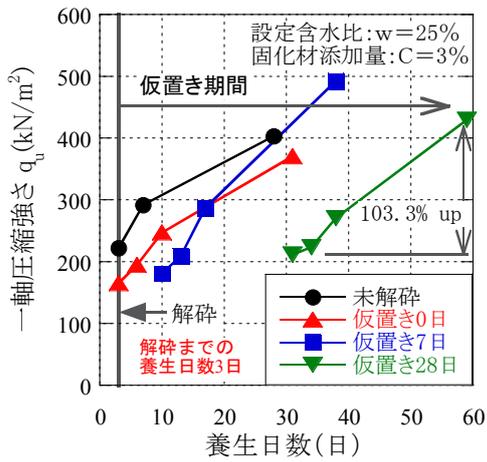
(c) C=3%+ash=10%

図-4 石炭灰改良土の一軸圧縮試験結果

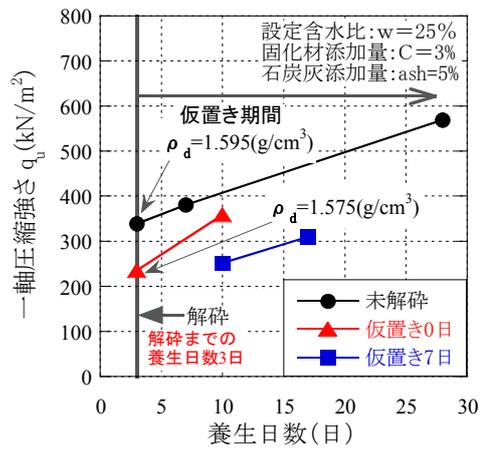
たためだと考えられる。また、石炭灰には数%の CaO を含んでいるため、水和反応による固結効果も一つの要因だと考えられる。

3-1-2 仮置き期間が締固めの強度に及ぼす影響

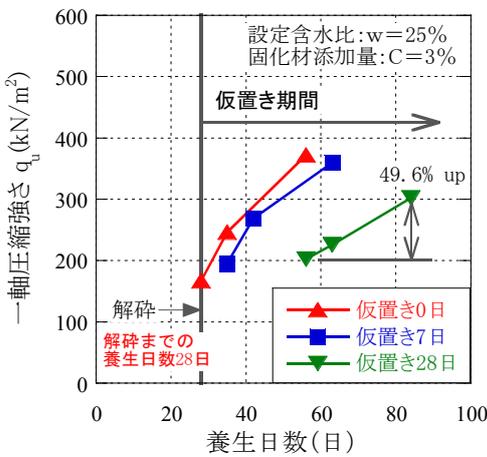
図-5 および図-6 は解砕した石炭灰混入型セメント改良土の仮置き日数の違いが締固め後の一軸圧縮強さに与える影響について示したものである。



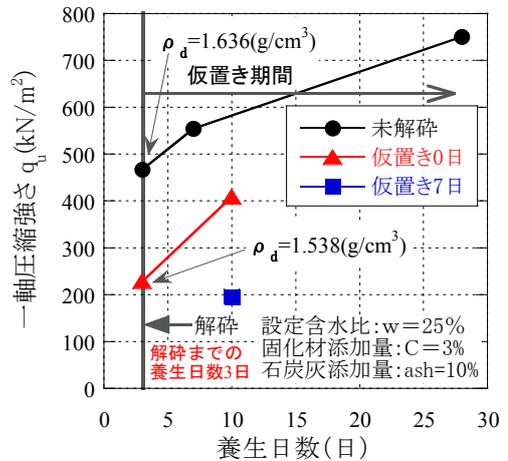
(a) C=3% 解砕日数 3 日



(a) C=3%+ash=5% 解砕日数 3 日



(b) C=3% 解砕日数 28 日



(b) C=3% 解砕日数 28 日

図-5 仮置き養生に伴う一軸圧縮強さの変化
(石炭灰混入なし)

図-6 仮置き養生に伴う一軸圧縮強さの変化
(石炭灰混入あり)

まず、セメントのみの改良である図-5 (a), (b)における解砕までの養生日数(以後、解砕日数)と仮置き日数の違いに着目すると、いずれの条件においても一度解砕し再び締固めた供試体は、その後も養生日数の経過に伴い、強度が増加していることがわかる。しかし、仮置き 28 日経過後に作製した供試体の養生 0 日から養生 28 日までの一軸圧縮強さの増加率は、解砕日数を 3 日とした条件では、103.3%であるのに対して、解砕日数を 28 日とした条件では 49.6%と養生の経過に伴う強度の増加がみられていない。これは、解砕日数を 28 日とした条件では、解砕までの養生期間が長かったことから、再び締固めてからの水和反応がゆるやかな状態にあったと考えられる。次に、石炭灰を添加させて改良を行った図-6 (a), (b)に着目すると、石炭灰を添加させた条件についても同様に、解砕後の一軸圧縮強さが未解砕と比べて低下しているこ

とが分かる。また、石炭灰添加量の違いでみると、石炭灰を多く添加した ash=10%の条件の方が解砕の有無による強度差が著しいことが分かる。これは、石炭灰添加に伴い、強度の増加が大きくみられた ash=10%の条件の方が、解砕した石炭灰混入型セメント改良土自身もある程度の強度を有することから、締固める際に空隙が生まれ、乾燥密度が低下したことに起因すると考えられる。

3-1-3 石炭灰混入型セメント改良土の耐久性の検討 図-7 にサイクル数に伴う一軸圧縮強さと Ca 濃度の関係を示す。サイクル数に伴う Ca の溶脱がみられ、3 サイクル目の自然乾燥養生終了後には、供試体表面が剥離する劣化が生じて、強度の低下がみられた。既往の研究⁶⁾から水和反応により生成される可溶性の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ から Ca が溶脱して強度が低下することが知られている。本研究で作製したセメント改良土においても、供試体と溶媒の

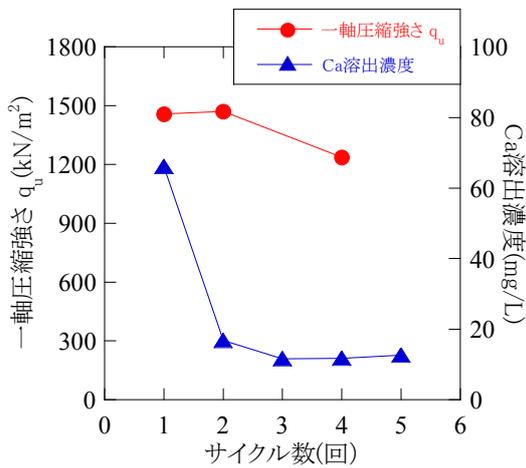


図-7 セメント改良土の乾湿繰返し試験結果

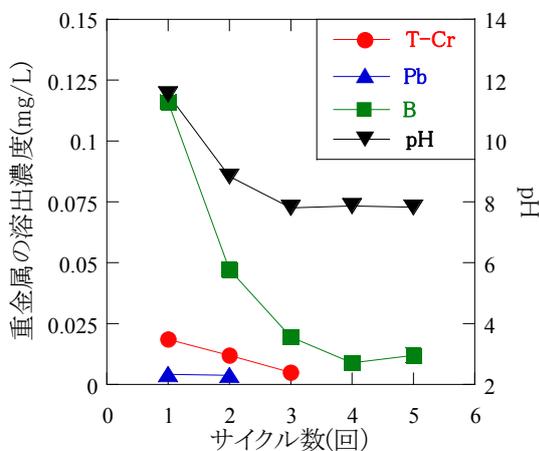


図-8 溶出試験結果

濃度差から、Ca が溶脱し、供試体内部の構造がポーラス化することによって、間隙が増大し耐久性が低下したと考えられる。図-8 にサイクル数に伴う重金属の溶出濃度と pH の関係を示す。全サイクルにおいて土壌環境基準値を超える溶出濃度は見られないことが分かる。今後、石炭灰の添加に伴う影響についても同様に検討を行っていく予定である。

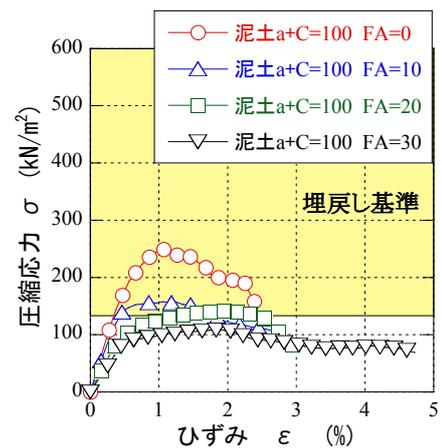
3-2 石炭灰混入型流動化処理土を用いた検討

3-2-1 石炭灰混入型流動化処理土の品質 表-4 に示すようにフロー値、ブリージング率、湿潤密度はいずれも品質規定を満たす結果となった。その中のブリージング率に着目すると、石炭灰は非塑性な材料であるため、石炭灰混入率の増加に伴いブリージング率は増加する傾向にあるものの、いずれの条件においても埋戻し基準の 3%未満を満足する結果となった。また、湿潤密度は石炭灰混入率の増加に伴い増加する傾向を示した。これは、石炭灰は球形の微細粒子であるため混入率を増加

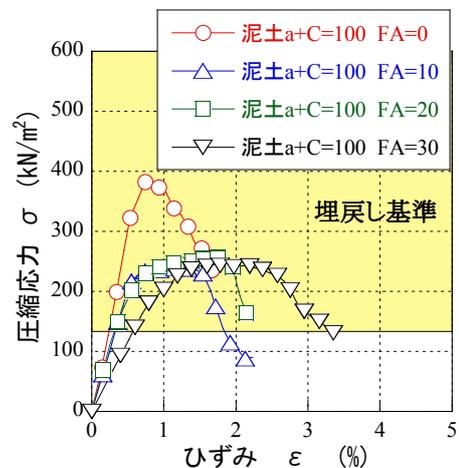
することで流動性が増し⁷⁾、フロー値を得るために必要な単位水量を減らすことができることに起因していると考えられる。

3-2-2 石炭灰混入型流動化処理土の力学特性

図-9 に各種流動化処理土の一軸圧縮試験結果を示す。養生日数の増加に伴いいずれの条件においても一軸圧縮強さは増加し、破壊ひずみは減少することがわかる。この傾向は、石炭灰を添加しない場合に特に顕著にみられる。図-10 にセメント量と一軸圧縮強さの関係、図-11 に石炭灰混入率と一軸圧縮強さの関係を示す。土質区分に関わらずセメント量の増加に伴い強度が増加し、養生日数の増加に伴い強度が増加している。また、石炭灰混入率に着目すると、石炭灰を混入させることで強度低下が見られるものの、その後の混入率の増加に伴う過度な強度低下は見られないことが分かる。しかしながら、石炭灰を 30%以上混入させると埋戻し基準を満足しなくなることから、石炭灰の添



a) 養生 7 日



b) 養生 28 日

図-9 一軸圧縮試験結果

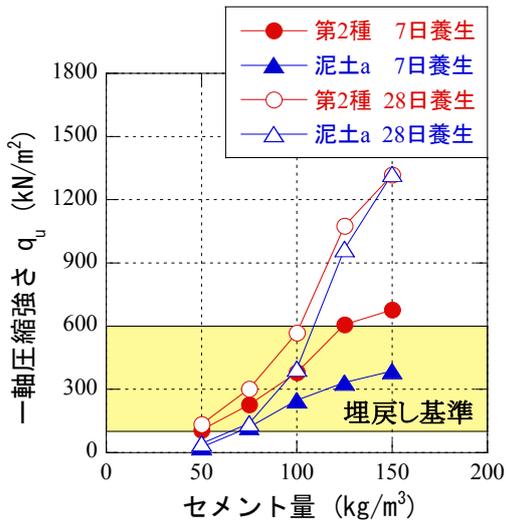


図-10 セメント量と一軸圧縮強さの関係

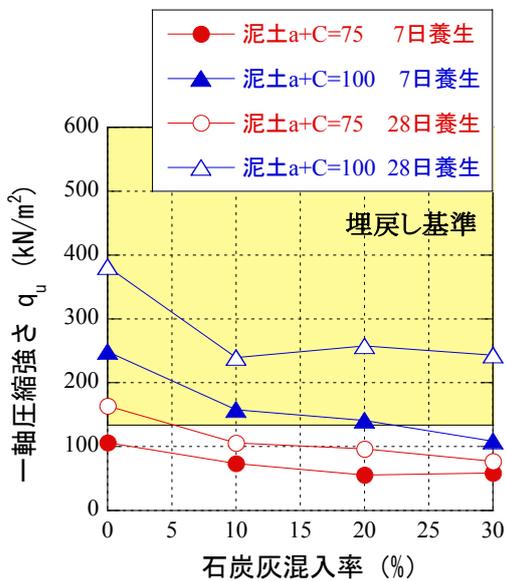


図-11 石炭灰混入率一軸圧縮強さの関係

加には適切な添加量が存在するため注意が必要である。

3-2-3 乾湿繰返しによる力学・溶出特性 図-12に泥土 a を用いて作製した流動化処理土のサイクル数に対する一軸圧縮強さと Ca 濃度の関係を示す。いずれのサイクルにおいても Ca の溶出が見られ、サイクル数の増加に伴い一軸圧縮強さは減少していることが分かる。強度が低下した要因として、供試体の間隙を埋めていた $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や珪酸カルシウム水和物 (C-S-H) 等のセメント水和物が供試体から溶出し、供試体をポーラス化させることで強度が低下したと考えられる⁸⁾。また、表-5に各サイクルにおける重金属の溶出濃度を示す。いずれの重金属も基準値を超える溶出は見られない

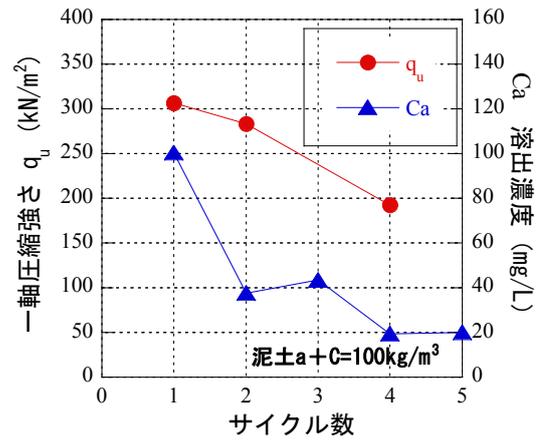


図-12 サイクル数に対する q_u と Ca 溶出濃度の関係

表-5 各サイクルにおける溶出濃度

条件	サイクル数	pH	ORP [mV]	Ca [mg/L]	T-Cr [mg/L]	Pb [mg/L]	B [mg/L]
流動化処理土 (泥土a+C=100kg/m³)	1	11.83	-282	100.5	0.004	0.005	0.121
	2	9.99	-181	37.6	0.015	0.004	0.075
	3	8.63	-106	43.4	0.007	0.008	0.031
	4	7.53	-47	19.5	0.005	N.D.	0.026
	5	7.90	-70	20.0	0.002	N.D.	0.031

ことから、土壤環境に与える影響はないといえる。今後は石炭灰を混入させた流動化処理土についても乾湿繰返し試験を行い、ポズラン反応による耐久性改善効果について比較検討を行っていく必要がある。

3-3 再生流動化処理土による循環利用の検討

3-3-1 再生流動化処理土の作製条件と品質

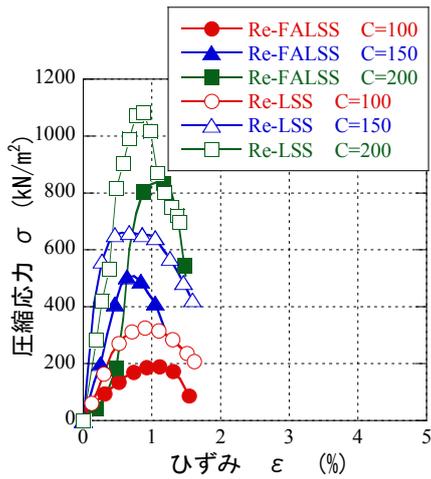
3-2-2において、流動化処理土の埋戻し基準を満たした条件 (泥土+C=100kg/m³+ash=10%) を用いて再生流動化処理土を作製し、循環利用の検討を行った。28日間養生させた石炭灰混入型流動化処理土を、回転式破碎混合混練機を用いて最大粒径が9.5mmとなるように破碎させたものを掘削処理土と定義する。この掘削処理土に再びセメントと水を混ぜ合わせ流動化処理土を作製した。なお、作製手順および品質基準については、2-2-1と同様である。なお目標フロー値については、これまでの研究³⁾により、再生流動化処理土が流動化処理土と同一フロー値を得るためには、解泥作業に加水が必要となることや掘削処理土自体の含水比が高いことから単位水量が増加する傾向にあり、所定の強度を得るためにセメント量が増加することが分かっている。その点を考慮し、今回、再動化処理土の目標フロー値は、 $200 \pm 20 \text{mm}$ になるように配合を行った。得られた配合および品質管理値を表-6に示す。いずれの条件においても、表-3

表-6 再生流動化処理土の配合および品質

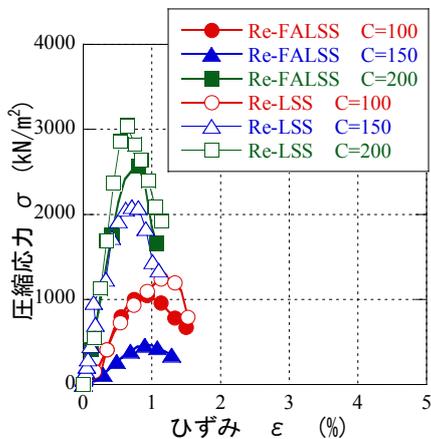
土質材料	セメント量 (kg/m ³)	石炭灰混入率 (%)	発生土 (kg/m ³)	石炭灰 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	フロー値 (mm)	ブリージング率 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)
掘削処理土 < 凝土 +C=100kg/m ³ +ash=10%>	100	0	735	-	685	210×210	0.29	1.52
	150	0	725	-	673	190×190	0.11	1.548
	200	0	710	-	662	190×190	0.07	1.572
	100	10	700	78	665	200×200	0.07	1.543
	150	10	680	76	658	190×190	0.02	1.564
	200	10	660	73	650	185×185	0	1.584

に示す流動化処理土の品質基準であるフロー値、ブリージング率、湿潤密度を満足していることが分かる。特に再生流動化処理土のブリージング率においては、石炭灰の添加に関係なく流動化処理土のブリージング率よりも低くなる傾向にあることが分かる。これは、2 度のセメント添加に伴う粘性の増加によるものと考えられる。

3-3-2 再生流動化処理土の力学特性 図-13 に再生流動化処理土の一軸圧縮試験結果を示す。こ



a) 7日養生



b) 28日養生

図-13 再生流動化処理土の一軸圧縮試験結果

こで、凡例の Re-LSS は再生流動化処理土を、Re-FALSS は、石炭灰を 10%混入させて作製した再生流動化処理土を意味している。いずれの条件においても、セメント量および養生日数の増加に伴い一軸圧縮強さが増加していることが分かる。また、石炭灰を混入させた再生流動化処理土は、いずれのセメント添加量においても混入させない場合に比べて一軸圧縮強さは低い傾向を示した。この点については、今後の養生日数の増加に伴うポズラン反応の影響により長期的に強度増加が見込めると考えられる。セメント量 C=100kg/m³ で作製した再生流動化処理土については、流動化処理土の埋戻し基準強度を概ね満足していることから、強度面において循環利用は可能であると考えられる。しかしながら、再生流動化処理土の耐久性や溶出特性については今後の検討が必要であり、それらの結果を踏まえ、循環利用の評価を行う必要がある。

4. まとめ

- 1) 石炭灰混入型セメント改良土は、石炭灰の添加による吸水効果及び水和反応により強度が増加する。
- 2) 解砕前の強度が大きい程、解砕した石炭灰混入型セメント改良土自身も強度が大きく、再び締固めた際の強度低下率への影響が大きいと考えられる。
- 3) 仮置き後の強度発現は、仮置きにおける単粒子の強度増加と締固め後の水和反応による粒子同士の結びつきといった両者のバランスに影響を受けると考えられる。
- 4) Ca の溶脱や、乾燥時における間隙水の蒸発により、供試体の内部構造がポーラス化することにより耐久性が低下すると考えられる。
- 5) 掘削までの養生日数及び掘削後の仮置き期間が短期なものについては、その後の養生により強度が増加すると考えられる。しかし、掘削までの養生日数及び掘削後の仮置き期間が長期なものについては、水和反応速度が緩やか状態にあるため、養生に伴う強度の増加はあまり見込めないと考えられる。
- 6) 石炭灰混入率の増加に伴い石炭灰混入型流動化処理土のブリージング率は増加する。
- 7) 石炭灰入率の増加に伴い石炭灰混入型流動化処理土の一軸圧縮強さは低下するため、埋戻し基準

強度を満足する適切な添加量が存在する。

8) 繰返し作用を受けた流動化処理土は、Ca の溶脱に伴い一軸圧縮強度はサイクル数とともに低下する。

9) いずれの石炭灰混入型流動化処理土からも土壌環境基準を超える重金属の溶出は見られないことから、周辺環境に対する影響は少ないと考えられる。

10) 再生流動化処理土は、流動化処理土と同等の強度を得ることが可能であり、循環利用が可能と考えられる。

本報告書内容の一部は、以下の学会で発表済みあるいは発表予定です。

- ・平成 22 年度土木学会西部支部研究発表会
- ・第 46 回地盤工学研究発表会（予定）
- ・第 66 回土木学会年次学術講演会（予定）

参考文献

- 1) 財団法人 石炭エネルギーセンターホームページ
<http://www.jcoal.or.jp/coalash/ash02.html>
- 2) 久野悟郎：土の流動化処理工法，技報堂出版，pp.204-205, 1997.
- 3) 藤川拓朗，佐藤研一：掘削処理土および再生流動化処理土の力学・溶出特性，土木学会論文集 C, Vol.65, No.4, pp.963-976, 2009.
- 4) 土木研究センター：「建設発生土利用技術マニュアル」丸善出版，1997.
- 5) 日本国土開発株式会社 ホームページ
http://www.n-kokudo.co.jp/tec_civil/twister_atypical.html
- 6) 福留和人，喜多達夫：「フライアッシュを混和したセメント硬化体の溶脱特性に関する研究」ハザマ研究年報，2007.
- 7) 日本フライアッシュ協会ホームページ：「フライアッシュの化学・物理的性質」
<http://www.japan-flyash.com/fchemiphsy.html>
- 8) 林宏親：「セメント安定処理土の長期強度特性 その 2 一室内実験による検討」，北海道開発土木研究所月報，No.612 号，2004 年 5 月