

論文 廃石膏ボード微粉末, 製紙スラッジ焼却灰, フライアッシュ及び再生骨材微粉末を用いたセメント系固化材の開発

田中 美里^{*1}・橋本 親典^{*2}・渡辺 健^{*3}・太田 憲史^{*4}

要旨: 本研究では, 廃石膏ボード微粉末, 製紙スラッジ焼却灰, フライアッシュ及び再生骨材微粉末などの副産物で一部置換し, 全固化材質量に対するセメント系固化材比率を低下させた新しい固化材の開発を試みた。その結果, 全固化材質量に対するセメント系固化材比率を 30%まで低下しても要求される一軸圧縮強度を満足する経済的な固化材の可能性を確認することができた。しかしながら, 酸化カルシウム含有率が高くても, 粒度がセメント系固化材よりも相当に大きいスラッジ焼却灰では, フライアッシュによるフィラー効果や再生骨材微粉末による初期ポズラン反応が期待できなく強度が低下することが明らかになった。

キーワード: 廃石膏ボード, スラッジ焼却灰, 再生骨材微粉末, フライアッシュ, 土質改良固化材

1. はじめに

昭和 50 年代初期より土質材料を対象としてセメント系固化材が発売されるようになった。セメント系固化材が開発されるようになったのは従来のセメントでは固化しにくい高含水比粘性土や高有機質土など, 従来のセメント等の使用では目的が果たしえない対象についても固化する需要がでてきたからである。セメントを母材に各種の有効成分を改良目的に応じて添加することにより, 多様な性質の粘土, 粘性土を含む多様な土質材料をそれなりに固化させ強度を得て, さらには有害物を封じ込めることができる。適切に使用すれば, ポルトランドセメント等と比較して単価が高くても, 少ない添加量で優れた改良効果を得ることができ, 経済的である可能性がある。

また, 地盤を構成する土質材料を対象にした土質・地盤改良については, 現在までセメント協会が行った 10 年間程度の関東ローム改良土柱に対する保証例¹⁾があるが, 実験的研究はあまり多く実施されていない。

一方, 資源循環型社会の形成が求められており, 各種の副産物の有効利用法の開発が求められている。スラッジは泥状の産業廃棄物や排水処理沈殿物のことを指すが, 産業排水の処理工程では, 定められた排水基準に従って排水中の有機および無機含有物を除くため生物化学的処理あるいは無機化学的処理が行われる。これらいずれの工程でもスラッジが生成してしまい, その処理や利用が問題となっておりその縮減のためスラッジを焼却することが行われている。しかし, 焼却後に残るスラッジ灰の処理も問題となっている。また廃石膏ボードは建築物の

解体等から発生する産業廃棄物で, 我が国では年間約 100 万トン(平成 22 年)が排出されており, 2025 年には約 200 万トンに達すると推測されている²⁾。しかし廃石膏ボードのリサイクル率は, 現状では数%に過ぎない。このように大量に廃棄されている廃石膏ボードもリサイクル体制不全のため処理が問題となっている。

さらに, コンクリート塊から骨材を再生し, それを用いたコンクリートとして, コンクリート用再生骨材 H (JIS A 5021), 再生骨材 M を用いたコンクリート (JIS A 5022) および再生骨材 L を用いたコンクリート (JIS A 5023) があるが, 再生骨材 H や M を製造するのに多大のエネルギーが必要となり, 副産される再生骨材微粉末の処理が問題としてその解決方法が急務である。

これらの社会的情勢に鑑み, 本研究では, 廃石膏ボード微粉末やスラッジ焼却灰として製紙スラッジ焼却灰に注目した。すなわち, 環境に優しいセメント固化体としてこれらの副産物とフライアッシュと再生骨材微粉末を組み合わせることとした。また, コスト削減を目的として, 市販のセメント系固化材の混入比率を 50%以下にする新しい固化材の開発の可能性について実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本研究では土質材料 2 種と市販のセメント系固化材, フライアッシュ及び 4 種類の副産物を組み合わせた固化材 19 種を用い, シリーズ I とシリーズ II に分けて行った。使用する廃石膏ボード微粉末の混入率は 20%で一定とし

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 博(工) (正会員)

*4 株式会社オオタ 代表取締役社長

表-1 シリーズⅠの含水比及び単位体積質量

土質材料	含水比(%)	単位容積質量(kg/m ³)
砂質土	18.2	2134
シルト質土	24.9	2144

表-2 シリーズⅡの含水比及び単位体積質量

土質材料	含水比(%)	単位容積質量(kg/m ³)
砂質土(灰A)	20.5	1976
砂質土(灰B)	20.2	2070

表-3 使用材料の物理的性質

材料	種類
セメント系固化材 (市販品)	主たる成分は高炉セメント(密度 3.02g/cm ³) CaO 54.0%, SiO ₂ 23.3%
スラッジ灰A	製紙スラッジ焼却灰(密度 2.05~2.10g/cm ³) CaO 36.2%, SiO ₂ 36.2%
スラッジ灰B	製紙スラッジ焼却灰(密度 2.05~2.10g/cm ³) CaO 68.5%, SiO ₂ 14.6%
石膏粉	廃石膏ボード微粉末 CaO 69.71%
フライアッシュ	FAⅡ種相当, 四国電力(密度 2.31g/cm ³) CaO 6.3%, SiO ₂ 64.9%
再生骨材微粉末	香川県丸亀市産, コンクリート電柱の再生骨材

た。

シリーズⅠでは2種類の土質材料と7種類の固化材を用い、市販品であるセメント系固化材100%の強度に対し、セメント系固化材を50%または40%とし、残りの成分として廃石膏ボード微粉末(以降、石膏粉と示す)や製紙スラッジ焼却灰(以降、スラッジ灰と示す)を用いた場合の強度の比較を行い、またフライアッシュを混入した場合の強度発現について検討した。

シリーズⅡでは固化材12種と、土質材料1種を用い、セメント系固化材比率を40%以下にして更なる低セメント系固化材比率における配合での強度性状を検討した。また、コンクリートにおいて、フライアッシュを添加した場合、材齢7日において再生骨材微粉末に含まれる水酸化カルシウムによりポズラン反応による強度増加が認められたという研究結果³⁾⁴⁾に基づき、土質材料を対象とした場合においても同様にポズラン反応が起こることを期待し、再生骨材微粉末を用いることとした。さらに酸化カルシウム含有量及び粒度が異なる2種類のスラッジ灰を用い、強度に与える影響について検討した。

2.2 土質材料の含水比の調整

我が国では、改良の対象となる土は一般的に最適含水比よりも湿潤側にあることが多い。したがって、試験にあたっては対象地盤から採取した試料の含水比で試験することが原則とされている。しかし、持ち込まれた試料が採取後乾燥状態下に放置されていたため、含水比が一定になるよう水を加えて調整を行った。調整後の土質材料の含水比および単位容積質量について、シリーズⅠを表-1に、シリーズⅡを表-2に示す。

2.3 供試体の作製方法

供試体寸法はφ50×100mmとし、各配合3体作製した。

(1) 練混ぜ方法

練混ぜ方法は、両シリーズともに JIS R 5201 のセメントの物理試験方法を参考に行った。パン型ミキサーに土質材料と固化材を入れ、低速で60秒間練混ぜた。引き続き高速で30秒間練混ぜ、90秒間の休止を設け、この間に練り鉢・パドルに付着した試料を掻き落とした。その後、高速で60秒間練混ぜた。

(2) 締固め方法

練混ぜ後、型枠に3層に詰め、セメント協会 JCAS L-01 に規定されている重さ1.5kg、落下高さ20cmのランマーを用いて各層12回ずつ突いて締固め、表面をコテで平面にならした。成形後、上面にガラス板を置きその上から湿布で覆った。

(3) 養生方法

締固め後、そのままの状態です3日間静置させ、その翌日脱型を行い、材齢7日まで温度20±3℃の恒温室内に水を入れたふた付きの湿気箱に供試体が水に浸からないように入れて養生を行った。

2.4 一軸圧縮試験方法

一軸圧縮試験方法は、JIS A 1216 に規定されている土の一軸圧縮試験方法に準じて行った。一軸圧縮強さは同一供試体3本の測定値を平均とした。また、測定にあたってはアンボンドキャッピング時の試験に用いられるものと同じ材質の62×62×100mmの硬質ゴム板を上下面に置いて載荷した。

3. セメント系固化材半減による強度発現についての実験(シリーズⅠ)

3.1 使用材料および配合

表-3に実験で使用した固化材の物理的性質を示す。セメント系固化材、スラッジ灰A、スラッジ灰B、及びフライアッシュの粒子の光学顕微鏡写真の画像を図-1~4に

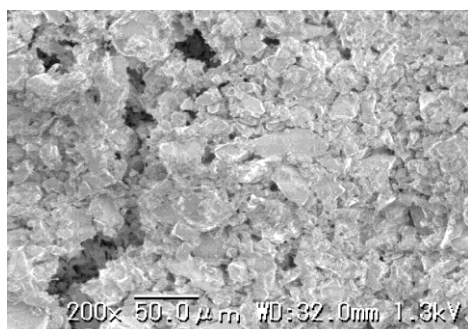


図-1 セメント系固化材の粒子の状況

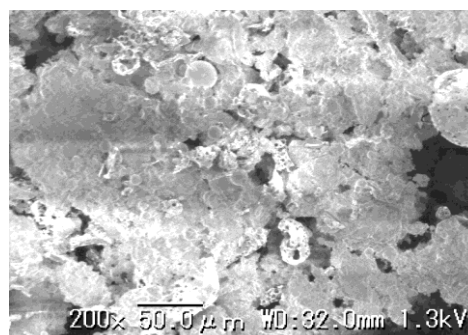


図-2 スラッジ灰 A の粒子の状況

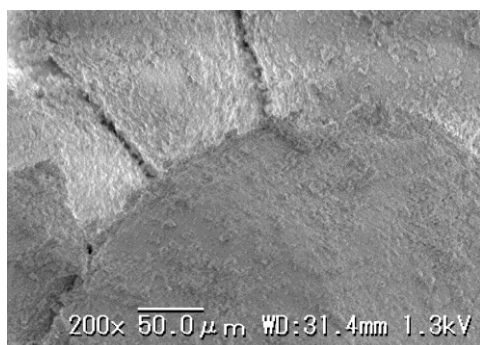


図-3 スラッジ灰 B の粒度の状況

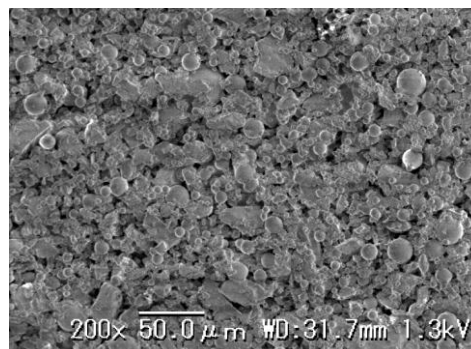


図-4 フライアッシュの粒度の状況

示す。なお倍率はすべて同率 200 倍である。セメント系固化材の主たる成分は高炉セメントである。セメント系固化材とフライアッシュの粒子径はほぼ同程度であることが目視観察できる。一方、スラッジ灰 A とスラッジ灰 B の粒子径はばらつきが大きく、セメント系固化材の粒子径に対し小さいものでは数倍、大きいものでは約 50 倍にもなる。特に、スラッジ灰 B は、粒子径が大きく、焼却灰として微粉碎工程がなされていない。スラッジ灰 A は、スラッジ灰 B と比較すると、細粒分が多い。

表-4 シリーズ I の固化材の成分比

配合名	成分比(%)				
	セメント系固化材	スラッジ灰A	スラッジ灰B	石膏粉	フライアッシュ
A	50	30		20	
B		20			10
C		15			15
D					30
E	40	30			10
F	50		30	20	
G	100				

シリーズ I では、土質材料として湿潤状態の砂質土およびシルト質土を用いた。また固化材の成分比については、表-4 に示す。なお、固化材の名称を簡潔にするため、シリーズ I では A, B, C, D, E, F, G とした。

表-4 から、実際の試験で使用した固化材、土質材料また含水比を一定にする際に加えた水の質量を表-5 に示す。

3.2 実験結果および考察

図-5 に砂質土、図-6 にシルト質土についての圧縮強度の結果を示す。改良地盤では、材齢 7 日での一軸圧縮試験強度は原則として 0.3N/mm² 以上でなければならない⁵⁾。セメント系固化材を半減させても、砂質土およびシルト質土において一軸圧縮試験強度の性能を満たすことができた。

砂質土において、セメント系固化材量 100% の配合 G に対し、セメント系固化材量 50%、さらには 40% に減らした配合においてもほぼ同程度の強度が得られた。これは、

表-5 シリーズ I の固化材配合

供試体3本分の質量(g)								
固化材(105g)						土質材料		
配合名	セメント系固化材	スラッジ灰A	スラッジ灰B	石膏粉	フライアッシュ		砂質土	シルト質土
A	52.5	31.5	—	21	—	全体	1493.8	1500.8
B	52.5	21	—	21	10.5			
C	52.5	15.75	—	21	15.75			
D	52.5	—	—	21	31.5			
E	42	31.5	—	21	10.5	試料	1221.93	1127.10
F	52.5	—	31.5	21	—			
G	105	—	—	—	—			
						水	271.87	373.70

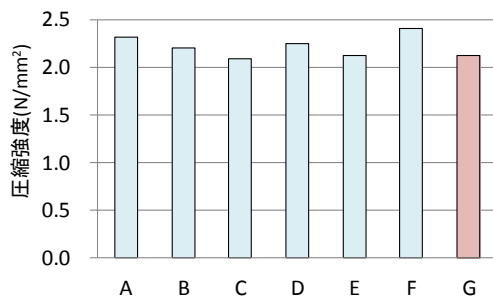


図-5 砂質土圧縮強度結果

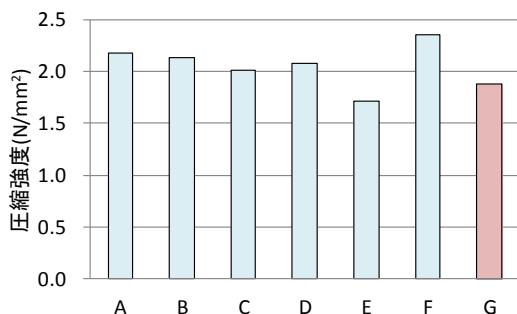


図-6 シルト質土圧縮強度結果

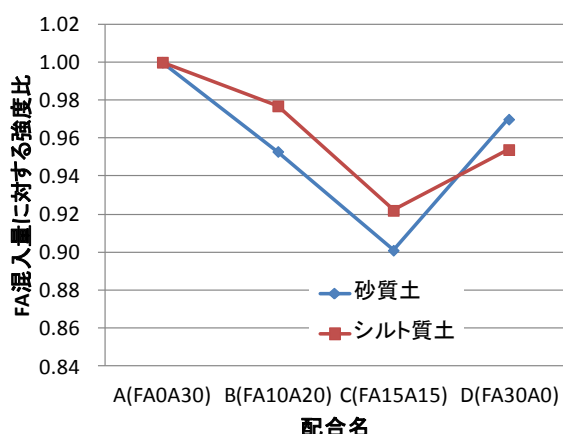


図-7 FA 混入率に対する強度比

スラッジ灰に含まれる酸化カルシウムが豊富であるため、セメントと同じように水和反応を起こし、セメントと同様のはたらきをしたためと考えられる。このことから、スラッジ灰はセメント系固化材の代わりに強度発現に影響を与えることができる物質であるということが考えられる。また、配合 A よりも配合 F の強度が大きくなったことに関しては、これはスラッジ灰 B に含まれる酸化カルシウムの量が、スラッジ灰 A の約 2 倍も含まれていることが原因であると考えられる。なお、通常コンクリートの水和反応では、必ずしも酸化カルシウムの量のみで強度が決定することはないが、セメント固化体のような低強度の場合、酸化カルシウムの量が多い方が強度の発現が大きくなると考えた。

シルト質土では、砂質土よりも含水比が大きいため砂質土よりも全体的に強度が低いという結果が得られた。しかし、砂質土ではセメント系固化材半減による差がほぼ見られなかったが、シルト質土ではセメント系固化材量 50% のものがセメント系固化材量 100% のものよりも強度を大きく上回った。これは、砂質土よりも粒度の小さなシルト質土ではセメント系固化材による水和反応により、それぞれの粒子同士がより密実に結びつき強度発現が顕著に現れたためと考えられる。またスラッジ灰や石膏粉などによる吸水のため見かけの含水比が小さくなったことも原因として考えられる。配合 E の強度が大きく下がってしまった点については、セメント系固化材が少ないという原因のためである。また、シルト質土でも砂質土同様、配合 G の強度が最も大きくなった。これは、スラッジ灰 B 中の酸化カルシウムがシルト質土でも砂質土のときと同様のはたらきをしたためであると考えられる。

図-7 に、フライアッシュ混入率 0% を 1 とした場合のフライアッシュ混入量に対する強度比について、セメント系固化材量と同じある配合 A～D を用いて比較を行った結果を示す。FA はフライアッシュ混入率、A はスラッジ灰混入率を示す。配合 B 及び配合 C ではスラッジ灰が減少したことにより固化材全体に占める酸化カルシウムの量が減ったことによる強度への影響が、フライアッシュによるフィラー効果^⑥の影響よりも大きくなったと考えられる。配合 D では、酸化カルシウムは最も少なくなっているものの、フライアッシュによるフィラー効果^⑥により配合 B とほぼ同等の強度が現れた。

両結果から、セメント系固化材量を半減、または半減以下とした場合に、ここにスラッジ灰や石膏粉、及びフライアッシュを混入した固化材は市販品であるセメント系固化材とほぼ同等の強度が得られ、十分実用に供することができると考えられる。また、特にスラッジ灰 B には酸化カルシウムがセメント系固化材よりも多く含まれているため強度発現の影響が大きくなることが明らかになった。

表-6 シリーズⅡの固化材の成分比

名称	成分比(%)			
	セメント系固化材	スラッジ灰	石膏粉	再生骨材微粉末
C40S5a	40	35	20	5
C40S5b		30		
C35S10a	35	35		10
C35S10b		30		
C30S15a	30	35		15
C30S15b		30		

4. セメント系固化材半減以下での強度発現についての実験(シリーズⅡ)

表-7 シリーズⅡの固化材配合

供試体3本分の質量(g)								
固化材(105g)						土質材料		
配合名	セメント系固化材	スラッジ灰	石膏粉	フライアッシュ	再生骨材微粉末		砂質土(灰A)	砂質土(灰B)
C40S5a	42	36.75	21	-	5	全体	1383.2	1499.0
C40S5b	42	31.5	21	5.25	5	試料	1099.64	1196.20
C35S10a	36.75	36.75	21	-	10			
C35S10b	36.75	31.5	21	5.25	10			
C30S15a	31.5	36.75	21	-	15			
C30S15b	31.5	31.5	21	5.25	15	水	283.56	302.80

4.1 使用材料および配合

シリーズⅡでは、セメント系固化材量をさらに減らすことによりコスト削減にもつながることから、セメント系固化材量の限界を知るためにも今回は比較的低セメント系固化材比率での配合を検討した。さらに、この条件下においてスラッジ灰A及びスラッジ灰Bがそれぞれどのような強度の挙動を示すか比較を行った。セメント系固化材量減少により強度の低下が考えられ、これを防ぐため再生骨材微粉末を用い、水酸化カルシウムによるポズラン反応の強度への影響が現れるかについても検討を行った。

固化材はシリーズⅠと同様のものを使用した。また固化材の成分比については、表-6に示す。Cはセメント系固化材混入率、Sは再生骨材微粉末混入率とし、フライアッシュを添加していないものをaとする。これにスラッジ灰の5%をフライアッシュに置換し添加したものをbと表記する。なお、今回使用するスラッジ灰は、スラッジ灰Aとスラッジ灰B(以後、図や表において灰A、灰Bと略す)の2種でそれぞれ配合を行うものとし、シリーズⅡではそれぞれ固化材6種のものがスラッジ灰2種の2パターンあり、計12種とした。

土質材料についてはシリーズⅠで砂質土とシルト質土の結果にそれほど大差はなかったため、シリーズⅡでは湿潤状態の砂質土のみを用いた。

これらを踏まえ、シリーズⅡでの土質材料と固化材の配合を表-7に示す。

4.2 実験結果および考察

図-8にスラッジ灰Aとスラッジ灰Bによる圧縮強度の比較結果を示す。両結果とも改良地盤において原則とされている強度である 0.3N/mm^2 以上を満たすことができた。シリーズⅡでは全体的に40%以下の低セメント系固化材比率であるため、シリーズⅠで得られた圧縮強度 2.0N/mm^2 を超えるものはなかった。スラッジ灰Aならびにスラッジ灰Bを用いたフライアッシュと再生骨材微粉末を用いた3配合の平均圧縮強度は、それぞれ 1.6N/mm^2 、 1.4N/mm^2 であり、スラッジ灰Aの方が強度が大きかった。

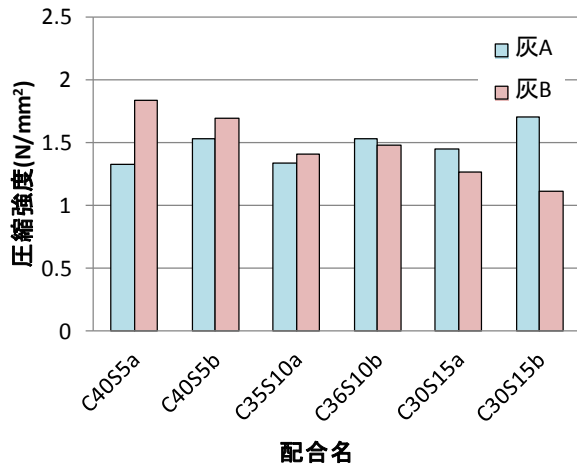


図-8 スラッジ灰による圧縮強度比較結果

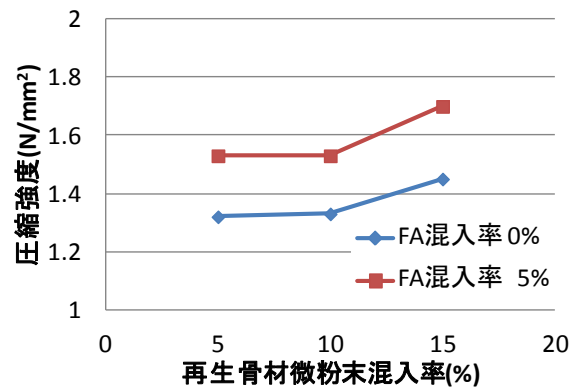


図-9 スラッジ灰AでのFA有無による強度比較

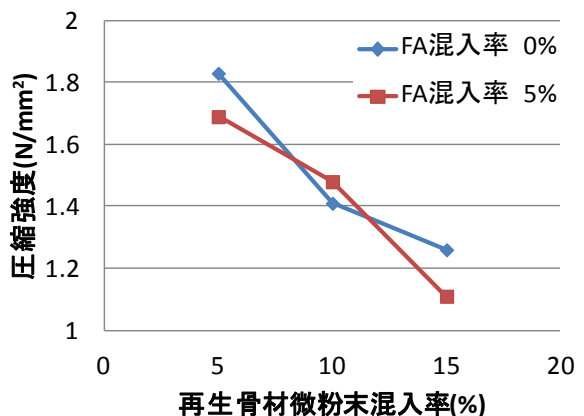


図-10 スラッジ灰BでのFA有無による強度比較

図-8の結果に基づき、スラッジ灰 A 及びスラッジ灰 B について再生骨材微粉末混入率に対する圧縮強度について表したグラフをそれぞれ図-9、図-10 に示す。

スラッジ灰 A では、それぞれの配合において、フライアッシュ無混入の a よりもフライアッシュを混入した b の強度が大きくなった。これは混入したフライアッシュに対して再生骨材微粉末中の水酸化カルシウムが反応し、ポズラン効果⁷⁾が現れているためよと考えられる。一方、図-8においてセメント系固化材量で比較した場合には、フライアッシュを混入したもの、また無混入のものそれぞれにおいてセメント系固化材量に関係なくほぼ強度に大きな変化はなかった。これは、図-9 に示す通り、セメント系固化材量が少なくなっても再生骨材微粉末によるポズラン反応により、強度が維持できたためと考えられる。また粒度においてスラッジ灰 A は比較的セメント系固化材の粒子径に近い程度までに粉砕化され粒度も小さいことから、セメントとスラッジ灰 A と水の接触回数や混合度が増加し、水和反応における反応性が良好であったと考えられる。

スラッジ灰 B では、酸化カルシウムを多く含んでいるにも関わらずスラッジ灰 A と全く逆の傾向を示す結果となった。この原因として、スラッジ灰の粒度が大きく関係していると考えられる。スラッジ灰 B は、酸化カルシウム含有量においてセメント系固化材よりも多く含まれているという長所があるが、粒度においてセメント系固化材と比べて非常に大きいという短所がある。このため、セメントとスラッジ灰 B と水との接触回数や混合度が低減し、水和反応における反応性が低下し、低セメント系固化材率ほど、固化材全体の酸化カルシウムが少なくなり、図-10 に示すように、再生骨材微粉末を多く含んでいるにも関わらず強度が低下する原因となった。また、同一セメント系固化材比率において、フライアッシュ無混入の場合に対しフライアッシュ混入の場合の強度が低下した原因としては、フライアッシュ混入によるフィラー効果⁶⁾や再生骨材微粉末による初期ポズラン反応⁷⁾が強度に与える影響よりも、置換した 5% のスラッジ灰 B に含まれる酸化カルシウムの減少が強度に大きく影響を与えたためと考えられる。スラッジ灰 B の粒径が大きいため、酸化カルシウムの活性度の低下が著しいものと思われる。

5. 結論

副産物として廃石膏ボード微粉末、製紙スラッジ焼却灰、及び再生骨材微粉末、またフライアッシュを用いて、市販のセメント系固化材の混入比率を 50% 以下にする新しい固化材の開発の可能性について実験的検討を行っ

た。本研究の範囲で明らかになったことを以下に記す。

- (1) 市販品であるセメント系固化材の混入率を半減し、スラッジ灰や石膏粉およびフライアッシュを混入することにより、セメント系固化材 100% と比較してほぼ同等の強度を得ることができた。スラッジ灰は酸化カルシウムを多く含み、セメント系固化材と同様に水和反応を起こすことができる物質であることが明らかになった。
- (2) 粒径の小さいスラッジ灰 A は、水和反応性が良好で、30% 程度のセメント系固化材混入率においても、スラッジ灰、石膏粉、フライアッシュおよび再生骨材微粉末を混入することによって、強度を増進することができた。一方、粒径の大きいスラッジ灰 B は酸化カルシウム含有量が非常に多いが、粒度がセメント系固化材よりもはるかに大きいため、水和反応の反応性が低下し、フライアッシュのフィラー効果や再生骨材微粉末の初期ポズラン反応が現れず、低セメント系固化材混入率では強度が下がってしまうことが明らかになった。

参考文献

- 1) 社団法人 セメント協会「セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第 3 版)」2003. 3 版 1 刷
- 2) 一般社団法人 石膏ボード工業会: 廃石膏ボードの年間総排出量の推測結果, 2010. 5
- 3) 山口 輝幸, 牛尾 仁, 橋本 親典, 石井 光裕: 実機ミキサおよび室内試験練りミキサで製造した全量再生骨材コンクリートのフレッシュ性状と強度特性の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1451-1456, 2010
- 4) 青井 洋視, 橋本 親典, 渡邊 健, 山口 輝幸: 再生骨材 L 級コンクリートの簡易長さ変化量特性と急速凍結融解特性に影響を及ぼすフライアッシュの効果, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部門, Vol. 66, pp. 1229-1230, 2011. 9
- 5) 日本建築センター 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法 [単行本] 第 7 章, pp37-42, 2002
- 6) 遠藤崇司, 山本泰彦: モルタルの強度発現に及ぼす鉱物質微粉末の影響に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 V 部門, Vol. 58, pp. 325-326, 2003. 9
- 7) 青井洋視, 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔: モルタル供試体による再生細骨材とフライアッシュの早期ポズラン反応機構に関する一考察, 日本材料学会四国支部学術講演会講演論文集, Vol. 10, pp. 43-44, 2012. 6