

論文 セメント系固化材にリサイクル材料を大量置換した地盤改良用固化材の開発

平田 大希*1・田中 美里*2・橋本 親典*3・渡辺 健*4

要旨：市販されているセメント系固化材に各種副産物を一部置換し、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行った。その結果、スラッジ灰、廃石膏微粉末、再生骨材微粉末、フライアッシュを一部置換した固化材では、セメント系固化材比率を 30%まで低減させてもセメント系固化材 100%とほぼ同等の強度を有することが確認できた。また、再生骨材微粉末の代わりにセメント汚泥を置換した固化材では、セメント系固化材比率を 40%まで低減させてもセメント系固化材 100%とほぼ同等の強度を有し、土壌汚染に係る溶出基準以下の溶出量であったことから、セメント汚泥の有用性を確認できた。

キーワード：セメント系固化材、スラッジ灰、廃石膏、再生骨材微粉末、フライアッシュ、セメント汚泥

1. はじめに

昭和 50 年代初期、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においても固化する需要がでてきたことに起因してセメント系固化材が発売されはじめた。セメント系固化材は、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、多様な性質の土質材料を固化させ強度を得て、更には有害物質を閉じ込めることができる。

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に対する保証例¹⁾があるが、実験的研究はあまり多くない。

一方、循環型社会の形成が求められており、産業副産物の有効利用が急務である。著者らはこれまでに、セメント系固化材に産業廃棄物を有効利用する方法として、既往の研究²⁾において廃石膏ボード微粉末（以降、石膏粉と称す）を使用することによる強度増加ならびに酸化カルシウムを多く含むスラッジ灰がセメント系固化材と

同様に水和反応を起こす物質であることを明らかにした。

本研究では、環境に配慮し、リサイクル材料を用いることによりセメント系固化材の使用率を低減させた新しい地盤改良用固化材の開発を目的として実験的研究を行った。実験は 2 シリーズを実施した。シリーズⅠでは、既往の研究成果²⁾を基に、セメント系固化材の使用率の限界を求めた。シリーズⅡでは、セメント系固化材に置換する新たなリサイクル材料として、再生骨材微粉末の代わりに、再生骨材微粉末の原コンクリートであるコンクリートポール製造工場から排出されるセメント汚泥の有用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 土質材料

日本では、改良の対象となる土は一般的に最適含水比より湿潤側にあることが多い。そのため、試験を行うにあたり、対象地盤から採取した試料の含水比で試験を行

表－1 使用固化材の物性

材料	種類	品質または形態
セメント系固化材	市販のセメント系固化材、主たる成分は高炉セメント	密度 3.02g/cm ³ , CaO 含有量 54.0%, SiO ₂ 含有量 23.3%
スラッジ灰	製紙スラッジ焼却灰	密度 2.05~2.10g/cm ³ , CaO 含有量 36.2%, SiO ₂ 含有量 36.2%
石膏粉	廃石膏ボード微粉末	CaO 含有量 69.7%
再生骨材微粉末	原コンクリートは、コンクリートポール	低度処理再生細骨材を分級した際に発生する 0.075 μm 以下の微粉末
フライアッシュ	フライアッシュⅡ種	密度 2.31g/cm ³ , CaO 含有量 6.3%, SiO ₂ 含有量 64.9%
セメント汚泥	コンクリートポール製造工場の生コンプラントから排出	コンクリートポール製造工程における副産物、110℃の炉乾燥室に 24 時間静置し絶乾状態の微粉末

*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 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)
*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教授 工博 (正会員)
*4 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)

う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で放置されていたため、試料に水を加え、含水比が 20%前後で一定となるよう調整を行った。調整後の土質材料の単位容積質量は約 2130 kg/m³である。

土質材料は、対象地盤から採取した砂質土を使用した。

(2) 固化材

表－1 に使用した固化材の物性を示す。セメント系固化材は市販のものを使用した。

2.2 実験シリーズ

本研究では、環境に配慮した新しい土質改良固化材の開発を目的に、固化材として期待できる各種産業副産物を使用し、シリーズⅠとシリーズⅡに分けて実験を行った。新しい固化材は、シリーズⅠではセメント系固化材を含む 5 成分系の混合物とし、シリーズⅡでは 4 成分系の混合物とした。

シリーズⅠでは、既往の研究成果²⁾を基に、産業副産物を大量に使用することを目的とした。すなわち、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、セメント系固化材比率の限界値を求めた。また、再生コンクリートにフライアッシュを添加した際、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早期ポズラン反応による強度増加が認められた研究結果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の反応が起こることを期待し、再生骨材微粉末を使用した。

シリーズⅡでは、再生骨材微粉末の代替リサイクル材料としてセメント汚泥を用いた配合での強度性状を検討し、土質改良固化材におけるセメント汚泥の有用性を確認することを目的にした。これは、再生骨材微粉末よりもセメント汚泥の方が大量に排出されるコンクリートボール製品工場の事情から、新規のリサイクル材料候補として利用可能であるかを検討するためである。なお、シリーズⅡを検討する予備実験において、フライアッシュを含む 5 成分系で実験したが、再生骨材微粉末を用いた場合ほどの強度発現性状が確認できなかった。そのため、シリーズⅡでは、フライアッシュは採用しなかった。

また、地盤へ適用することを踏まえ、pH 測定および溶出試験も合わせて行った。

2.3 配合条件

表－2 にシリーズⅠ、表－3 にシリーズⅡの固化材成分比（質量比）を示す。シリーズⅠ、シリーズⅡともに、固化材使用量は土質材料かさ容積 1m³に対して 150kg とした。セメント系固化材に対し、スラッジ灰、石膏粉、再生骨材微粉末、フライアッシュおよびセメント汚泥をそれぞれ質量置換で一部置換した。石膏粉は、強度増加が期待できる混入可能限界点の質量比 20%一定で置換した。また、通常のセメントコンクリートと異なり水は

混合させず、土質材料に含まれる水量とセメントで反応させ固化させた。シリーズⅠは、セメント系固化材比率を 35%、30%、25%の 3 段階に、シリーズⅡは、セメント系固化材比率を 50%、45%、40%の 3 段階にそれぞれ変化させ実験を行った。配合名の記号は、C がセメント系固化材、A がスラッジ灰、s がセメント汚泥を意味し、その後の数字はそれぞれの固化材の置換率を意味する。

表－2 シリーズⅠ 固化材質量成分比

配合名	成分質量比(%)				
	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
C35A45	35	45	20	—	—
C35A40		40		—	5
C35A35		35		—	10
C35A30		30		5	10
C35A25		25		5	15
C35A20		20		10	15
C30A45	30	45		—	5
C30A40		40		5	5
C30A35		35		5	10
C30A30		30		10	10
C30A25		25		10	15
C30A20		20		15	15
C25A45	25	45		5	5
C25A40		40		10	5
C25A35		35		10	10
C25A30		30		15	10
C25A25		25		15	15
C25A20		20		20	15
C100	100	—	—	—	—

表－3 シリーズⅡ 固化材質量成分比

配合名	成分質量比(%)			
	セメント系固化材	スラッジ灰	石膏粉	セメント汚泥
C50s0	50	30	20	—
C50s5		25		5
C50s10		20		10
C50s15		15		15
C45s0	45	35		—
C45s5		30		5
C45s10		25		10
C45s15		20		15
C40s0	40	40		—
C40s5		35		5
C40s10		30		10
C40s15		25		15
C100	100	—	—	—

2.4 供試体の作製方法

(1) 練混ぜ方法

両シリーズともに JIS R 5201 のセメントの物理試験方法で使用される機械練り用練混ぜ機を使用し、同一の練混ぜ方法で行った。まず、機械練り用練混ぜ機に土質材料と固化材を投入した。低速で 60 秒間練り混ぜた後、高速で 30 秒間練り混ぜ、90 秒間の休止を設けた。その間に練鉢・パドルに付着した試料を掻き落とした。その後、高速で 60 秒間練り混ぜた。

(2) 締固め方法

練り混ぜ後、型枠に 3 層に詰め、写真-1 に示すセメント協会 JCAS L-01 に規定されている重さ 1.5kg のランマーを用いて落下高さ 20cm から各層 12 回ずつ突いて締固め、表面をコテで平滑にならした。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べて 3 日間静置させた後脱型を行い、規定の材齢まで温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 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。

2.5 試験項目および方法

(1) 一軸圧縮試験

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。圧縮強度は、同一供試体 3 本の測定値の平均とした。また、測定にあたり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 $62 \times 62 \times 100\text{mm}$ の硬質ゴム板を上下面に置いて載荷した。シリーズ I の試験材齢は、3, 7, 28 日の 3 材齢とし、シリーズ II の試験材齢は、7 日とした。

(2) pH 測定試験

供試体を粉砕し、粉末と精製水を 3:7 の割合で混ぜ合わせ、試料が沈殿し、水溶液がある透明度になるまで放置した。その後、pH 測定器を用いて、数値が安定したときの値を pH 値として記録した。

(3) 溶出試験

公害対策基本法第 9 条の規定に基づく土壌の汚染に係る環境基準全 26 項目について、JIS および環境庁告示に規定されている計量方法に準じて行った。

本実験において最もセメント成分を多く含む、シリーズ II セメント系固化材比率 50% の、C50s0 および C50s15 の配合に対して試験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 シリーズ I の実験結果

(1) 一軸圧縮試験結果

図-1、図-2、図-3 に、セメント系固化材比率 35%、30%、25% それぞれの一軸圧縮試験結果を示す。全ての



写真-1 供試体作製に使用したランマー

配合において、地盤改良において原則とされている材齢 7 日における必要最低限の圧縮強度である 0.3N/mm^2 以上⁵⁾を満足した。

また、それぞれのセメント系固化材比率の比較対象として作製したセメント系固化材比率 100%（以降、従来品と称す）の圧縮強度は、作製日が異なると多少のばらつきが生じた。これは、採取した砂質土がその時々に応じて土の成分や含水率に違いをもたらすためであると推察される。本研究では水を混合させず、土質材料に含まれる水量とセメントで反応させ固化させた。そのため、砂質土のわずかな差においても圧縮強度に及ぼす影響は通常のセメントコンクリートより大きい。しかし、実際にセメント系固化材を使用する現場においても土質材料の状態は異なる。そのため、従来品と同等の強度が得られる範囲を見出す上では多少のばらつきは問題ない。

図-1 より、セメント系固化材比率 35% は、材齢 7 日において、従来品と同等以上の圧縮強度を有した。また、再生骨材微粉末とフライアッシュを同時に混入した A30、A25、A20 は、再生骨材微粉末とフライアッシュの割合を大きくすることで強度を増進させることが確認できた。これは、微粒分により密実度が高まったことや、再生骨材微粉末に含まれる水酸化カルシウムの早期ポズラン反応によるもの^{3,4)}と推察される。

図-2 より、セメント系固化材比率 30% は、再生骨材微粉末やフライアッシュによる圧縮強度増進が見られない。特に 3 日強度から 7 日強度にかけての圧縮強度増進は、従来品やセメント系固化材比率 35% の 3 日強度から 7 日強度にかけての圧縮強度増進と比較して殆ど見られなかった。これは、セメント系固化材 (CaO 含有量 54.0%) やスラッジ灰 (CaO 含有量 36.2%) の混入比率が低下し、出来上がった供試体の CaO 含有量も低下したためであると考えられる。しかし、スラッジ灰を多く用いたものに関しては、7 日強度までは従来品と同等以上の圧縮強度を有した。

図-3 より、セメント系固化材比率 25% は、全ての配合、材齢において従来品以下の強度となった。必要最低限の強度は確保できたものの、材齢 28 日において従来品

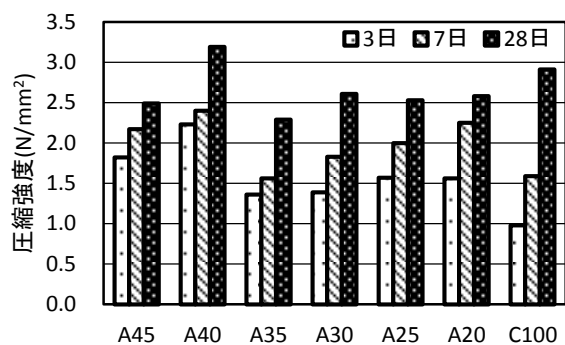


図-1 C35%一軸圧縮試験結果

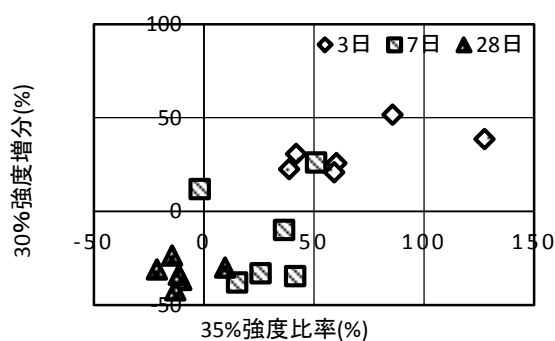


図-4 C35%-C30%のC100%に対する強度増分

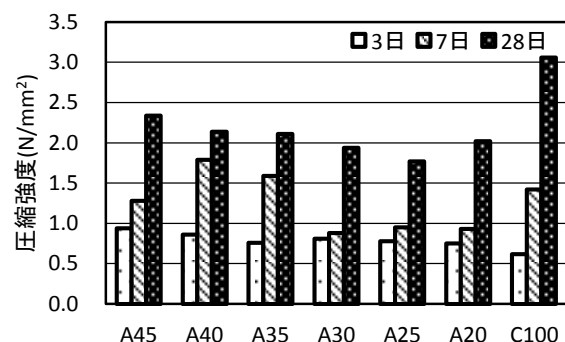


図-2 C30%一軸圧縮試験結果

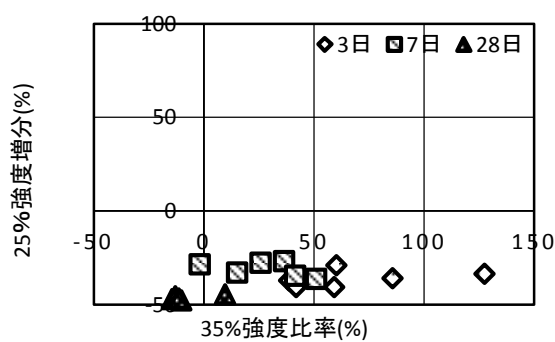


図-5 C35%-C25%のC100%に対する強度増分

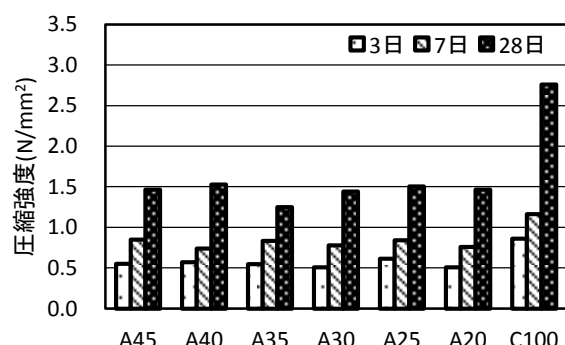


図-3 C25%一軸圧縮試験結果

の約 50%しか圧縮強度を発現することが出来ず、十分に安全側である結果は得られなかった。

図-4 に、セメント系固化材比率 35%および 30%それぞれの、セメント系固化材比率 100%（従来品）の配合に対する各材齢の強度増分の相関図を示す。なお、従来品に対する強度増分は以下の式(1)により算出した。

$$\text{強度増分}(\%) = \{(f_x - f_{C100}) / f_{C100}\} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 f_x : 各材齢の各配合の強度

f_{C100} : 各材齢の C100%の強度

スラッジ灰の質量比が同じ配合同士で比較すると、各材齢において、この 2 配合間に相関が見られる。初期材齢におけるほど、従来品に対する強度増分が高い。これは、従来品が水和反応により一般的なコンクリートと同じように強度を発現させているのに対し、リサイクル材

料を置換した配合が水和反応による強度発現以前に強度発現があることを意味する。これは、先に考察した微粒子により密度が高まったことや、再生骨材微粉末に含まれる水酸化カルシウムの早期ポズラン反応によるもの^{3,4)}と考えられる。セメント系固化材は材齢 7 日の比較的早期の強度が求められるため、リサイクル材料の使用による初期強度の増進と相性が良いことが伺える。

図-5 に、セメント系固化材比率 35%および 25%それぞれの、従来品の配合に対する各材齢の強度増分の相関図を示す。スラッジ灰の質量比が同じ配合同士と比較すると、どの材齢においても相関は見られない。これは、C25%の強度発現が小さかったことによる。セメント系固化材の一部をスラッジ灰などで置換した場合に、従来品と同等の強度発現が期待できるセメント系固化材比率の下限値は、30%から 25%の間にあることが予測される。

3.2 シリーズⅡの試験結果

(1) 一軸圧縮試験結果

図-6 に、セメント系固化材比率 50%、45%、40%それぞれの材齢 7 日における一軸圧縮試験結果を示す。シリーズⅡでは、全ての配合を同一日に供試体を作製した。そのため、砂質土の状態の違いによる圧縮強度の差は見られない。全ての配合において、地盤改良において原則とされている材齢 7 日における必要最低限の圧縮強度である 0.3N/mm²以上⁵⁾を満足し、かつ従来品と同等の圧縮強度を有した。また、各セメント系固化材混入率に

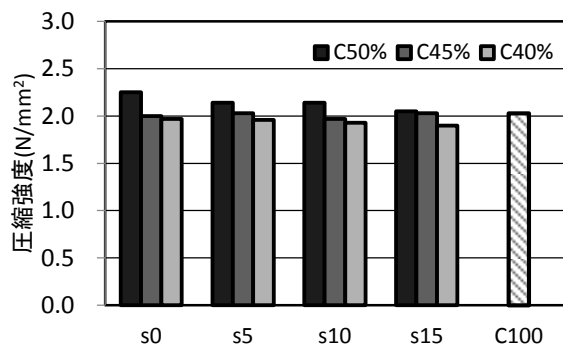


図-6 一軸圧縮試験結果

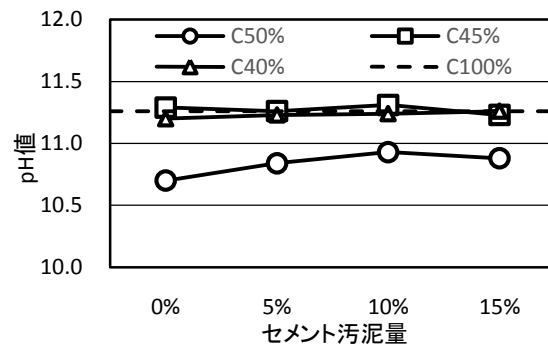


図-7 pH測定結果

において、セメント汚泥の置換率が増加しても、圧縮強度は同等であった。もし、セメント汚泥の微粉末の粉末度が低ければ、セメント汚泥を混合することによって、セメント系固化材のセメント硬化体の圧縮強度低下を招く可能性がある。しかしながら、圧縮強度低下はほとんど見られなかった。これは、本実験で使用されたセメント汚泥はコンクリートパールの製造工程において生成されたものであり、セメント成分の含有量が多い。そのため、粉末度の計測はしていないが、ある程度の粉末度を有する微粉末になっていると想像される。そのため緻密度が高まり、フライアッシュや再生骨材微粉末のリサイクル材料による強度増進とあまり遜色のない結果につながったと考えられる。

本研究において、セメント成分の含有量が多いセメント汚泥 1 種類でのみの検討となっているが、強度増進の面においては、スラッジ灰と同様にセメント系固化材に利用することの有用性が確認された。

(2) pH 測定試験結果

図-7 に、pH 測定試験結果を示す。セメント系固化材比率 45%および 40%の配合は、セメント系固化材比率 50%の配合と比較して pH 値が増加した。しかしながら、全ての配合において、pH 値は従来品と比較して同等もしくは低下した。スラッジ灰やセメント汚泥を置換することにより、アルカリ性による影響が増加する可能性もあるが、本実験の範囲内において、石膏粉を 20%置換することにより、従来品を超える pH 値は検出されなかった。このことから、地盤に適用できる範囲内の pH 値であることが確認された。

(3) 溶出試験結果

表-4 に、C50s0 および C50s15 の溶出試験結果を示す。両配合とも、全 26 項目中 23 項目で、溶出量は検出を確認できる定量下限値以下となった。両配合においてふっ素およびほう素、C50s15 の配合において六価クロムの検出が確認されたが、3 項目とも計量値は、公害対策基本法第 9 条の規定に基づく土壤の汚染に係る環境基準の基準値（以降、基準値と称す）を大きく下回る結果となっ

た。最もセメント成分を多く含むセメント系固化材比率 50%の配合において土壤の汚染に係る検出がなかったことから、本実験の他の配合においても土壤の汚染に係る検出はないと考えられる。

また、六価クロムはセメント系固化材およびセメント汚泥に、ほう素はスラッジ灰にそれぞれ多く含まれる成分である。そのため、それらのリサイクル材料を使用することにより土壤の汚染に係る溶出が心配されているが、結果として基準値の 4 分の 1 以下の検出であった。それぞれのリサイクル材料の置換率を増加させ、仮に 100%の使用に近い混入率においても、土壤の汚染に係る溶出の基準値には満たないと考えられる。本研究では、それぞれのリサイクル材料に対して一種類のみの使用であるが、スラッジ灰、石膏粉、セメント汚泥を使用することによる土壤の汚染に係る溶出はないと考えられる。

4. 結論

セメント系固化材の代替として一部リサイクル材料を置換した、環境に配慮した地盤改良用固化材の開発を目的に、セメント系固化材比率の最低限値を求める研究と、セメント系固化材の一部代替としてセメント汚泥を利用する有用性の確認について実験的検討を行った。本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) 市販されているセメント系固化材の代替として、スラッジ灰、石膏粉、再生骨材微粉末およびフライアッシュを一部質量置換することにより、組合せ次第でセメント系固化材比率 30%まではセメント系固化材比率 100%と同等の強度を有することができた。
- (2) リサイクル材料を使用することにより、水和反応による強度発現の前から強度発現する傾向が見られた。材齢 7 日の早期の強度が求められるセメント系固化材とリサイクル材料の相性の良さを示唆した。
- (3) セメント系固化材の一部代替によるセメント汚泥の使用は、スラッジ灰および石膏粉を同時に混入することで、セメント系固化材比率 40%でもセメント系固化材比率 100%と同等の強度を有した。また、

表-4 溶出試験結果

項目	単位	定量下限値	C50s0 結果	C50s15 結果	基準値
カドミウム	mg/l	0.001	定量下限値 以下	定量下限値 以下	0.01
全シアン		0.1			検出されないこと
有機リン		0.1			検出されないこと
鉛		0.002			0.01
六価クロム		0.005		0.006	0.05
ヒ素		0.005		定量下限値 以下	0.01
総水銀		0.0005			0.0005
アルキル水銀		0.0005			検出されないこと
PCB		0.0005			検出されないこと
ジクロロメタン		0.002			0.02
四塩化炭素		0.0002			0.002
1,2-ジクロロエタン		0.0004			0.004
1,1-ジクロロエチレン		0.1			0.1
シス-1,2-ジクロロエチ		0.004			0.04
1,1,1-トリクロロエタン		0.01			1
1,1,2-トリクロロエタン		0.0006			0.006
トリクロロエチレン		0.003			0.03
テトラクロロエチレン		0.001			0.01
1,3-ジクロロプロペン		0.0002			0.002
ベンゼン		0.001			0.01
チウラム		0.0006			0.006
シマジン		0.0003			0.003
チオベンカルブ		0.002			0.02
セレン		0.001			0.01
ふっ素		0.1	0.2	0.2	0.8
ほう素		0.01	0.05	0.04	1
含水率	%	0.1	14.1	15.2	—

pH 値や土壌の汚染に係る溶出に関しても、地盤に適用できる範囲内に抑えることができ、セメント汚泥を使用することの有用性を確認できた。

- (4) 本研究で使用したリサイクル材料は、土壌の汚染にかかる検出は基準値の4分の1以下であった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、共同研究先の（株）オオタから各種の試料提供を受けました。また、溶出試験の実施ならびに試験結果の報告を受けました。ここに付記し感謝の意を表します。

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) 田中美里，橋本親典，渡辺健，太田憲史：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1549-1554，2013

- 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) 松坂裕介，宮崎健治，横井克則，上田隆雄：低度処理骨材を用いた再生コンクリートの性能向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1565-1569，2011
- 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，pp.37-42，2002