

論文 生コンスラッジと回収砂を用いたセメント固化体の強度特性に関する研究

原田 貴典^{*1}・横手 晋一郎^{*2}・橋本 親典^{*3}・水口 裕之^{*4}

要旨：スラッジケーキは圧縮強度が 8N/mm^2 であれば管理型処理場から安定型処理場への廃棄が認められる。本研究は、スラッジの2次製品への有効利用を検討するにあたり、スラッジに回収砂、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を混入し、分離槽存置期間および含水率が圧縮強度に与える影響について検討を行った。その結果、分離槽存置期間の長いスラッジへの高炉スラグ微粉末の混入は有効ではないが、普通ポルトランドセメントをスラッジと回収砂の20%混入すれば分離槽存置期間が66時間で、 20N/mm^2 近くの強度を得ることができることが明らかとなった。

キーワード：生コンスラッジ，回収砂，含水率，強度特性

1. はじめに

建設汚泥の1つであるスラッジケーキは、一般に管理型処理廃棄物として扱われる。スラッジケーキは、生コン工場においてミキサやアジテーター車などの洗い水からの排水の中に含まれる粗、細骨材を分離、回収した残りの懸濁水を脱水したもので、スラッジケーキ内に存在する未反応のセメント成分による潜在的水硬能力を有すると考えられる。しかしながら、脱水装置の機種や分離槽の容量に応じて、各工場でスラッジの含水率、分離槽存置期間が大きく異なる。含水率が大きいほど、分離層存置期間が長いほど未反応なセメント成分による潜在的水硬能力は小さくなると考えられる¹⁾。また、高炉スラグ微粉末をスラッジの80%混入すれば 10N/mm^2 程度の圧縮強度を得ることができると報告されている²⁾。一方、スラッジケーキの圧縮強度が 8N/mm^2 であれば管理型処理場から安定型処理場への廃棄が認められる。

本研究では、安定型処理が可能となる強度 8N/mm^2 を満足するための処理方法を検討する

ために、含水率の異なるスラッジ単体およびスラッジ単体にスラッジ排出の際に出る細骨材(回収砂)を混合したもの2種類に物理的振動エネルギーを与え、未反応なセメント成分の活性度を圧縮強度で評価し、養生条件および含水率が活性度に与える影響について実験を行った。

また、スラッジに回収砂、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を混入し、強制2軸練りミキサによって練混ぜを行い、含水率、分離槽存置期間が強度に与える影響について検討を行い、2次製品と同等な強度を保有するために必要なセメント混入量を求めた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

図-1にスラッジ排出のフローを示す。粗骨材と細骨材を取り除き残った汚泥(水とセメント粒子)から水を搾り取ったものがスラッジである。粗骨材と細骨材はセメント成分が分離できないため廃棄される。本研究では、この細骨材(回収砂)をスラッジに混入することとした。

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 徳島県生コンクリート工業組合理事長 (正会員)

*3 徳島大学 工学部建設工学科 教授 工博 (正会員)

*4 徳島大学 工学部建設工学科 教授 工博 (正会員)

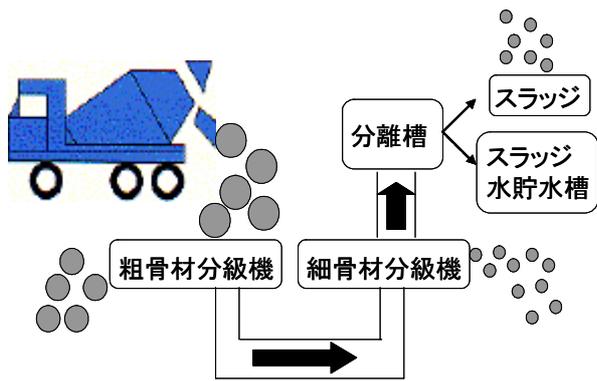


図-1 スラッジ排出フロー



写真-1 振動締固め機

実験に使用したスラッジ，回収砂は，徳島県内7社の生コン工場から排出されたものである。研究用として製造されたものではなく，実際の生コン工場で日常業務として発生したものである。そのため，各工場で配合および使用材料はすべて異なり，分離層存置期間，含水率も一定でない。スラッジ，回収砂は排出後直ちに使用するため，密度の測定は行っていない。

使用した普通ポルトランドセメントの密度は 3.15g/cm^3 ，比表面積は $3390\text{cm}^2/\text{g}$ である。また，高炉スラグ微粉末の密度は 2.91g/cm^3 ，比表面積は $3970\text{cm}^2/\text{g}$ である。なお，練混ぜ水は，スラッジおよび回収砂に含まれる水のみとし，水道水等は一切使用していない。

2.2 実験方法

実験は5つのシリーズから構成される。表-1に各シリーズで使用した材料の重量比を示す。

スラッジ，回収砂は密度が一定でないため，容積比でなく重量比によって計量した。表-1に示す各材料の数値はスラッジの重量を1.0としたときの重量比を意味する。

スラッジと回収砂を混入する場合は，同一の工場から排出されたものを使用する。

シリーズ1

写真-1に示すような振動締固め機を用いて，スラッジに物理的振動エネルギーを与えた。

シリーズ2

排出されるスラッジと回収砂の排出される割合は，ほぼ同量であるため，スラッジと回収砂を重量比で1:1の割合で混合し，振動締固め機を用いて物理的振動エネルギーを与えた。

シリーズ3

スラッジに回収砂，普通ポルトランドセメントを混入した。

表-1 各材料の重量比，工場数，練混ぜ方法および養生方法

	スラッジ	回収砂	普通ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末	使用したスラッジの工場数	練混ぜ方法	養生方法
シリーズ1	1.0	—	—	—	4社	振動締固め	水中・気中
シリーズ2	1.0	1.0	—	—	4社		
シリーズ3	1.0	1.0	—	—	3社	強制2軸練ミキサ	水中
	1.0	1.0	0.2	—	2社		
	1.0	1.0	0.4	—	1社		
シリーズ4	1.0	1.0	—	—	3社		
	1.0	1.0	—	0.2	3社		
	1.0	1.0	—	0.4	3社		
シリーズ5	1.0	1.0	0.1	—	2社		
	1.0	1.0	0.2	—	2社		
	1.0	1.0	0.3	—	2社		
	1.0	1.0	0.4	—	1社		

シリーズ 4

スラッジに回収砂，高炉スラグ微粉末を混入した。

シリーズ 5

スラッジは粗骨材と細骨材を取り除いた後，1～3 日程度分離槽に貯められ，ある程度分離層に汚泥が溜まった後にスラッジとして排出される。この汚泥が分離層に貯められた時間を分離槽存置期間と定義する。スラッジの分離槽存置期間を記し，シリーズ 3 と同様にスラッジに回収砂，普通ポルトランドセメントを混入した。

2.3 供試体作成方法

2.3.1 物理的振動エネルギーを与えた場合

- (1) 使用するスラッジはスラッジ分離槽から排出されて間もないものを使用する。排出されて間もないスラッジの含水率は，脱水装置の機種にもよるが 30～50%である。排出されたばかりのスラッジを写真-2 に示す。これは大きな塊であるために，写真-3 に示すように砕いてから使用する。
- (2) スラッジ単体および回収砂を振動締固め



写真-2 排出後のスラッジ



写真-3 砕いた後のスラッジ

機を用いてφ100×200mm 円柱供試体に成形する。振動条件は，振幅 1mm，周波数 50Hz で一定とし，振動時間は締固まりの状況を見ながら，2.5～3 分とした。

2.3.2 強制 2 軸練りミキサによって練混ぜた場合

- (1) 使用するスラッジはスラッジ分離槽から排出されて間もないものを使用する。
- (2) 計量を行ったのちにスラッジ，回収砂および普通ポルトランドセメント，高炉スラグ微粉末をミキサに同時に投入する。ミキサは，強制 2 軸練りミキサを用いて練混ぜ，φ100×200mm 円柱供試体に成形する。
- (3) 練混ぜは最低 3 分以上行い，バイブレーターによって締固めが可能であると判断される程度に流動性が改善された時点で練混ぜを終了する。
- (4) 本試料は粗骨材がないため型枠に詰めるとき大きな空気泡を巻き込みやすいので 2 層に詰め，各層 10 秒程度バイブレーターをかける。試料の含水状態によってはブリーディング水が多い場合もあるので，キャッピング面は少し盛った状態に詰めておき，脱型後水平面に切削するようにする。

2.4 脱型

脱型は硬化の状況からすべて材齢 2 日後とし，脱型後直ちに 20℃ 気中，水中養生を行った。

2.5 測定項目

2.5.1 含水率

練混ぜた試料を 1000g 程度採取し，100℃ の炉乾燥に 24 時間入れ絶乾状態にする。この重量を測り含水率を測定する。

$$[\text{含水率}] = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100(\%)$$

W_1 : 採取した試料の質量 (g)

W_2 : 絶乾状態の試料の質量 (g)

2.5.2 圧縮強度

JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方

法」に基づいて行った。材齢は1週、2週および4週とした。

2.5.3 単位体積質量

各材齢の養生終了後、供試体を表乾状態にし、供試体の重量、寸法を測定し、単位体積質量を算出する。

$$[\text{単位体積質量}] = \frac{M}{V} (\text{g/cm}^3)$$

M : 供試体の表乾質量(g)

V : 供試体の体積(cm^3)

3. 実験結果および考察

3.1 シリーズ1

振動締固め前のスラッジは写真-3に示すように水分の少ない状態に見える。物理的振動エネルギーを与えることによって写真-4に示すように液状化し、ブリーディング水が発生する状態に至る。

スラッジ単体に物理的振動エネルギーを与え



写真-4 ブリーディング水発生状況

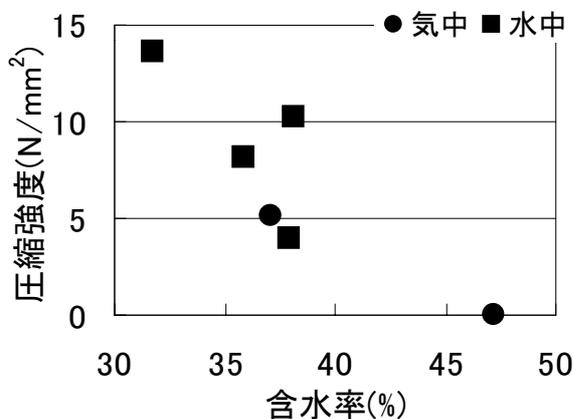


図-2 養生条件による含水率と圧縮強度の関係

た場合の含水率と材齢4週圧縮強度の関係を図-2に示す。含水率の小さいものほど強度は増加する傾向にある。含水率が35%以下であれば、安定型処理場への廃棄が認められる 8N/mm^2 以上を得ることができた。しかしながら、同等の含水率において、強度増進が見られない場合もあり、出荷する生コンの種類や脱水装置の機種、分離層存置期間などの影響が大きいと考えられる。分離層存置期間による評価は後に記す。

養生条件では、水中養生の場合は、十分な硬化が見られたが、気中養生の場合は、強度試験に耐えうるまで強度が発現しなかったものもあった。このため、スラッジの未水和セメント粒子の水和反応には十分な水が必要であることが明らかとなった。このことから、以降の実験では水中養生のみによって行うこととした。

3.2 シリーズ2

スラッジに回収砂を混入した場合の含水率と材齢4週圧縮強度の関係を図-3に、単位体積重量と材齢4週圧縮強度の関係を図-4に示す。含水率が小さいほど強度は増加した。また、回収砂の混入によって含水率は減少、単位体積重量は増加し、強度は増加した。これは、回収砂に含まれる10%程度の表面水によって、流動性が向上し、密実となったためである。しかしながら、スラッジに回収砂を混入し、物理的振動エネルギーを与えた場合、振動時間を長くすると、ブリーディング水が大量に発生し、材料分離を起こす恐れがあった。そこで、スラッジに回収砂を混入し、強制2軸練りミキサで練混ぜ



写真-5 強制2軸練りミキサ内での練混ぜの状態

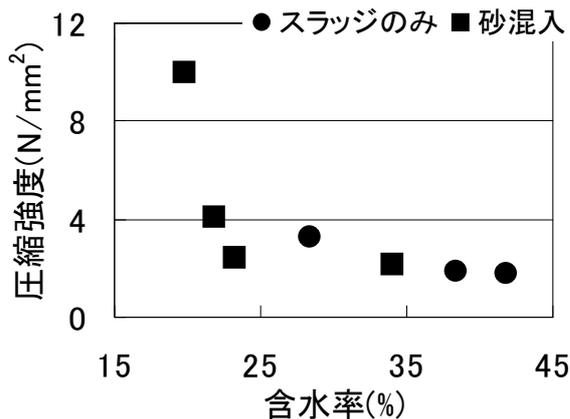


図-3 回収砂混入による含水率と圧縮強度の関係

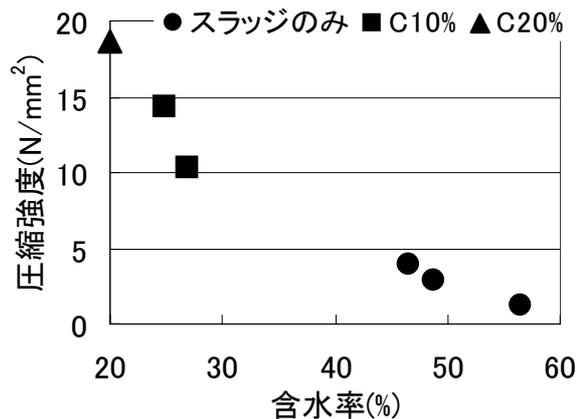


図-5 セメント混入による含水率と圧縮強度の関係

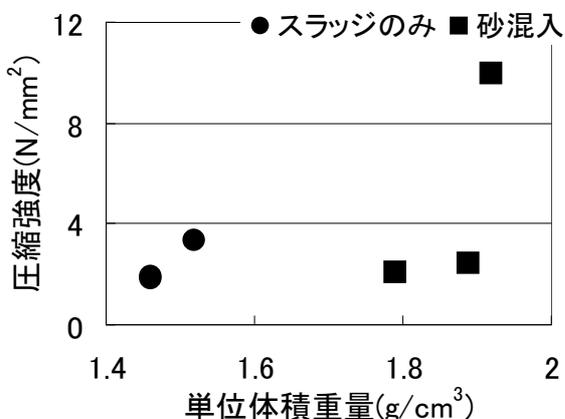


図-4 回収砂混入による単位体積重量と圧縮強度の関係

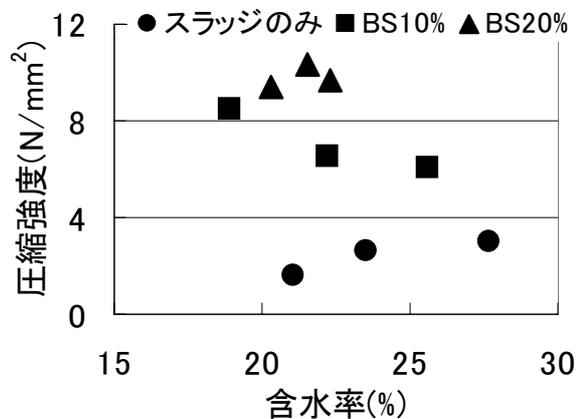


図-6 高炉スラグ微粉末混入による含水率と圧縮強度の関係

を行った。写真-5は強制2軸練りミキサ内での練混ぜの状態を示す。

スラッジ単体はゼロランプの超硬練りコンクリートのようであり、振動締固めを行う必要があった。しかし、回収砂を混入すれば、強制2軸練りミキサでも練混ぜが可能である有ランプコンクリートと同様のコンシステンシーが得られる。回収砂に含まれる表面水が練混ぜ水として十分機能することが明らかとなった。

3.3 シリーズ3およびシリーズ4

スラッジに回収砂、普通ポルトランドセメントを混入した場合の含水率と材齢4週圧縮強度の関係を図-5に示す。セメント混入率の増加に伴って含水率は低下し、圧縮強度は増加した。また、セメント混入率20%で、20N/mm²近くの強度を得ることができた。

スラッジに回収砂、高炉スラグ微粉末を混入した場合の含水率と材齢4週圧縮強度の関係を図-6に示す。高炉スラグ微粉末混入率の増加に伴って含水率は低下し、圧縮強度は増加した。しかし、セメントの混入率時と比較すると強度の増加は少なかった。これは、スラッジが分離層に1~3日程度貯められている間にpHが低くなり、さらに、セメントの活性が低下し、水酸化カルシウムの供給が減少したため高炉スラグ微粉末が潜在水硬性を発揮しなかったためであると考えられる。また、同じ混入率で圧縮強度にばらつきが見られるのは、分離層存置期間の違いによるものと考えられる。分離層存置期間の長い場合、高炉スラグ微粉末の混入はスラッジ混入モルタルの強度増加には有効ではないと考えられる。

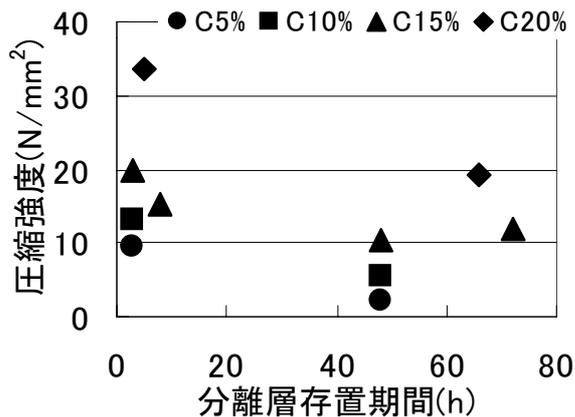


図-7 セメント混入による
分離層存置期間と圧縮強度の関係

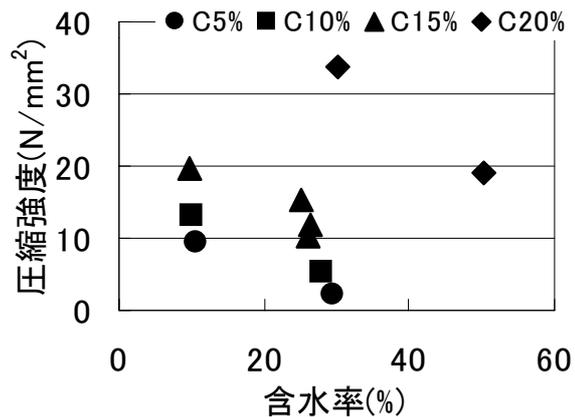


図-8 セメント混入による
含水率と圧縮強度の関係

3.4 シリーズ5

セメント混入率を変化させた場合の分離層存置期間と材齢4週圧縮強度の関係を図-7に示す。分離槽存置期間が長くなるほど圧縮強度は減少する傾向にあったが、3.3の結果と同様に分離槽存置期間が66時間、セメント混入率20%で20N/mm²近くの強度を得ることができた。混入したセメント量を20%、含水率を30%とすれば、W/C=180%となるため、スラッジが強度発現に寄与していると考えられる。つまり、分離層存置期間が70時間程度でも、スラッジ内に未反応のセメント成分が存在していることが明らかとなった。

セメント混入率を変化させた場合の含水率と材齢4週圧縮強度の関係を図-8に示す。含水率が低いほど圧縮強度は大きくなる傾向にあったが、含水率が非常に大きい場合でも強度は発現していることから、圧縮強度は含水率より分離層存置期間に大きく左右されると考えられる。

4. 結論

本研究で得られた成果を以下に記す。

- (1) スラッジ単体でも十分な振動締固めと水中養生を行うことによって安定型処理を行うために必要な8N/mm²以上の強度を発現させることが可能であった。
- (2) スラッジに回収砂を混入することによって、回収砂の表面水によって流動性が向

上し、密実となるため、圧縮強度が増加する。また、流動性が向上することから、振動締固めを行わなくても、強制2軸練りミキサによって練混ぜが可能であった。

- (3) 分離槽存置期間の長いスラッジはpHが低いと考えられるため、高炉スラグ微粉末の混入は、強度増加に有効ではなかった。
- (4) 分離層存置期間の長いスラッジに普通ポルトランドセメントをスラッジと回収砂の重量の20%程度混入し、水中養生することによって20N/mm²近く得ることができた。

謝辞：本実験を行うに当りスラッジ等の材料を提供して頂いた生コン工場の方々および徳島県生コンクリート工業組合技術委員会の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木一雄, 伊藤康司, 辻本一志: スラッジケーキの強度管理方法に関する基礎実験, 第53回セメント技術大会講演要旨, pp.414-415, 1999
- 2) 佐々貴敬, 三井宜之, 村上聖, 川野哲史: 生コンスラッジの有効利用に関する実験的研究, 第53回セメント・コンクリート論文集, pp.893-897, 1999