

養生条件の違いによるコンクリートスラッジ中の残存固形分の 活性化の有無によるモルタルの圧縮強度に関する一考察

日大生産工(院)○安東 修一 日大生産工 鶴澤 正美
日本コンクリート工業(株) 青山 裕之 佐々木 猛

1. まえがき

コンクリート製造工場で排出されるコンクリートスラッジの処分が問題となっている。コンクリートスラッジは、使用されずに余ったレディーミクストコンクリート（以下、生コンと略記）から粗・細骨材を取り除き脱水した残渣や遠心成形工法で発生する余剰分のスラッジを指す。その排出量は生コン出荷量の3～5%¹⁾、年間で約300万m³とされている²⁾。コンクリートスラッジ乾燥体の固形分比は重量でセメント：細骨材比＝81：19³⁾、コンクリート乾燥体の密度³⁾2.15t/m³、コンクリートスラッジ含水率30～50%⁴⁾であり、含水率を50%で試算するとセメント量は261万tと試算されるので、セメント製造により排出される二酸化炭素排出量を770 kg・t-cement¹とすると、約200万tの二酸化炭素の排出を伴う資源であるとも言える。本研究の目的は遠心成形時のノロを一旦水中に懸濁させたのち、フィルタープレスによって固液分離して得られる残存固形分をコンクリート混和材として有効活用することを目的としている。

2. 残存固形分に関する諸性状

残存固形分は文献⁵⁾に示されている工程で製造されている粉体で、その一部をサンプルとして入手した。すなわち、コンクリートの遠心成型時のノロ分を主体としたコンクリートスラッジを水に懸濁・攪拌し、固液分離して得た固形分である。文献中でPAdeCSと示されている材料が、今回の残存固形分に該当する。そのため、残存固形分が含有するセメント成分について分析を行い性状の確認を実施した。

残存固形分は遠心成形のノロ由来であるため、骨材微粉、セメントなどで構成されている。しかしどこまでの水和反応が進んでいるのか、同時にカルシウム分の空気中の二酸化炭素による炭酸化も生じているため、その組成や構造は現時点では十分な解析ができていない。実際に使用した残存固形分の走査型電子顕微鏡（以下、SEMと略記）画像の写真を図-1に、蛍光X線分析による主要組成を表-1に示す。SEM画像から非常に微

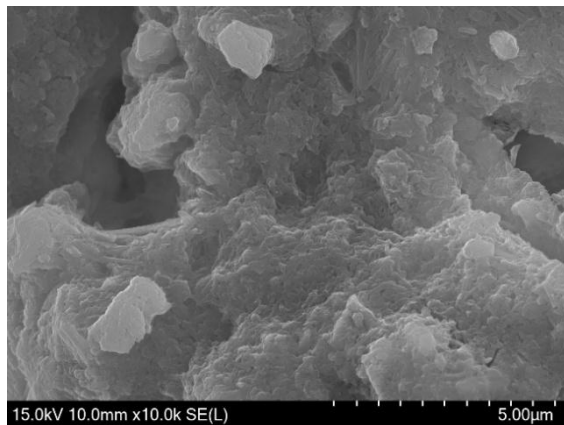


図-1 残存固形分の電子顕微鏡像

表-2 残存固形分の主な化学組成 (mass%)

Chemical Composition	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	others
Content rate	42.7	22.0	3.8	2.7	28.8

表-1 残存固形分を添加したモルタルの配合

Symbol	R/B (mass%)	Components (g)				
		W	C	R	S	Sp
N	-	225.0		-	1350.0	-
N-R10	10	225.0		45.0	1305.0	-
N-R20	20	224.0	450.0	90.0	1260.0	-
N-R30	30	223.5		135.0	1215.0	0.7
N-R40	40	223.0		180.0	1170.0	2.5

細な粒子で構成されていることがわかる。

またこの残存固形分のカルシウム分に着目すると、窒素雰囲気下での熱重量示差熱分析（TG-DTA）の脱炭酸量から炭酸カルシウム分を定量し酸化カルシウムに換算すると12.1mass%と計算された。表-1の酸化カルシウム総量から差し引くと、炭酸カルシウム以外の酸化カルシウム分すなわち30.6mass%はスラッジ中のAliteが反応したことで生成されたC-S-Hや水酸化カルシウムなどのセメント水和物や未水和のセメント鉱物に含有されている分と推定することができる。

A Study on the Compressive Strength of Mortar Based on the Activation of Residual Solids in Concrete Slurry Due to Differences in Curing Conditions

Shuichi ANDO, Masami UZAWA, Hiroyuki AOYAMA, and Takeshi SASAKI

3. 実験方法および測定方法

本実験では残存固形分を配合する際に未処理の状態
で添加したモルタルとボールミルによる活性化処理を
行ったものを添加したモルタルの2種類を作成した。

使用材料は、普通ポルトランドセメント(C, 密度
3.16g/cm²), JIS標準砂(S:セメント協会強さ試験用),
残存固形分(R), 上水道水(W)および高性能AE減水剤
(SP, ポリカルボン酸系)である。JISモルタルはNと
表記している。配合を表-2に示す。以降、各配合の名
称はSymbolの通りとする。水セメント比(W/C)は
50mass%の1水準, 残存固形分添加率(R/B)は0, 10,
20, 30および40mass%の5水準とした。残存固形分は
セメントの質量比で添加し, セメント質量一定でJIS
標準砂と外割置換した。

ボールミル混合の模式図を図-2に示す。本報にお
けるボールミル混合とは、円筒型の容器内に試料、
水酸化カルシウム飽和水溶液、上水道水、JIS 標準砂
およびセラミックスボールを投入し 2 段式ボールミ
ル回転架台を用いて混合を行う活性化方法である。
また、図-3 にボールミル混合による活性化機構を示
した。ボールミル混合では、セラミックスボール同
士の衝突により混和材粒子は微粒子化される。それ
と同時に、メカノケミカル反応を生じさせ微粒子化
された混和材の表面および、投入している JIS 標準
砂の表面に C-S-H (ケイ酸カルシウム水和物) を担持
させることを志向している。筆者ら研究チームはボ
ールミル混合による活性化処理を種々のコンクリー
ト混和材へ適用し高付加価値化を試みている⁶⁻⁹⁾本
研究では青木らの高活性化 FA を用いたモルタルの
圧縮強度発現に及ぼす諸条件の影響⁹⁾で報告されて
いる、流動性に優れ光沢をもったスラリーを得るた
めの混合条件に従って実験を行った。円筒容器は広
口試薬瓶(直径 73mm, 高さ 168mm, 内容量 500ml,
低密度ポリエチレン製), セラミックスボールの材質
はアルミナであり, 15mm を 10 個, 13mm を 5 個
とした。また, 回転架台の回転数 30rpm, 混合時間は
1 時間とした。さらに容器内の配合については残存
固形分の質量比で水酸化カルシウム飽和水溶液 50%,
上水道水 63%, JIS 標準砂 45%とした。使用材料は,
前述に加えて水酸化カルシウム飽和水溶液(市販の水
酸化カルシウムを溶解)を用いた。添加率 20mass%に
おけるボールミル混合における容器内の配合は表-3,
混練時の配合は表-4 に示す通りである。ここで、表
-4 における R-S とは表-3 の配合でボールミル混合
した後の残存固形分含有スラリーである。水セメン
ト比(W/C)は 50mass%の 1 水準, 添加率は 0, 10,
20, 30 および 40mass%の 5 水準とした。なお, 残存
固形分の添加率に応じて, ボールミル混合における
ボトル内の配合比率が同条件になるよう調整した。
供試体の作製は JIS R 5201 に準拠して行った。練り

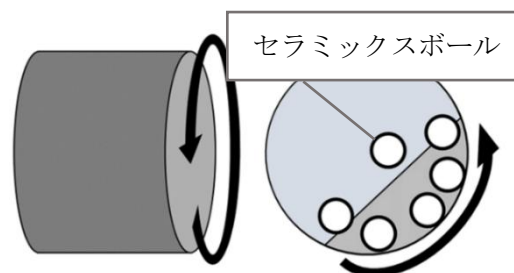


図-2 ボールミル混合の模式図

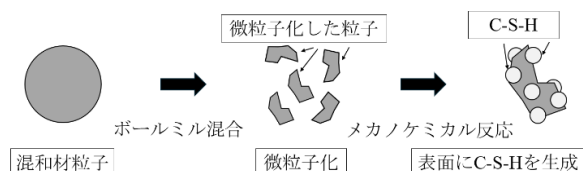


図-3 ボールミル混合による活性化機構

表-3 ボールミル混合における容器内の配合

R/C (mass%)	Components (g)			
	W	sat. Ca(OH) ₂ aq.	R	S
20	56.7	45.0	90.0	40.5

表-4 活性化した残存固形分を添加したモルタルの配合

Symbol	R/B (mass%)	Components (g)				
		W	C	R-S	S	Sp
N	-	225.0		-	1350.0	-
N-R10	10	174.2		116.1	1233.9	-
N-R20	20	123.3	450.0	232.2	1260.0	-
N-R30	30	72.1		348.3	1001.7	0.4
N-R40	40	19.8		464.4	885.6	1.8

混ぜは JIS モルタルミキサー, 型枠は 40×40×
160mm の角柱型とした。供試体の成型後, 型枠上に
ガラス板を載せ水分の蒸発を抑制し, 20℃, 60%R.H.
の室内で前置き養生を行い翌日に脱型を行った。そ
の後脱型を行い, 水中養生および蒸気養生を行った。
水中養生は試験材齢を 7, 14 および 28 日として 20℃
-65%R.H の恒湿恒湿室内の水中に投じた。蒸気養生
は十分に水分を含ませた濡れウェスで供試体全体を
覆い, 密閉可能なプラスチック製耐熱容器に入れて
密閉した後に定温乾燥機で高温を付加させることで
蒸気を供給し, 湿潤高温環境を再現し, 行った。昇
温温度 20℃・h⁻¹ で, 3 時間 15 分かけて 65℃まで昇
温し, 65℃を 3 時間維持した後 20℃まで徐冷し供試

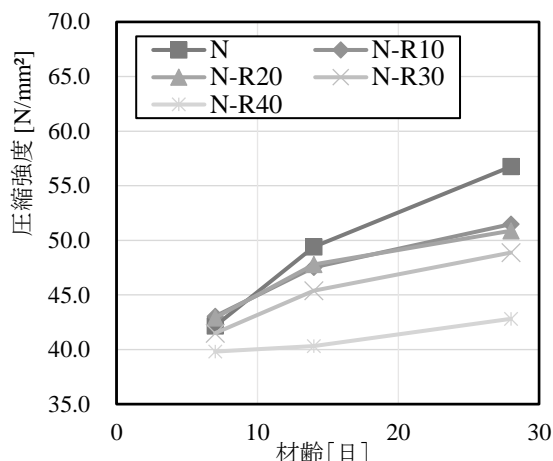
体を取り出した。蒸気養生後の材齢期間は 7, 14, および 28 日とし、20℃・65%R.H.の恒温恒湿室で気中養生した。残存固形分は吸水性が高いため、JIS R 5201 に倣って最初にセメントと水を添加する時点で投入すると JIS モルタルミキサーのパドルが回らなくなる。そこでセメントと水、高性能 AE 減水剤を練り混ぜ、その後に残存固形分、砂の順で投入し練り混ぜた。また、減水剤による粒子の分散に時間がかかるため、長時間の練り混ぜを行った。減水剤添加量によって異なるが、練り混ぜ時間は 4～7 分間の範囲で行った。

圧縮強度試験はJIS R 5201 付属書Cに準拠して測定し、荷重速度は2.4kN・sec⁻¹で行った。なお、供試体は6本ずつ測定を行い、その平均を測定値とした。

4. 実験結果

普通ポルトランドセメントに対し質量比で 0, 10, 20, 30, および 40 mass%の残存固形分を JIS 標準砂に外割り置換したモルタルの圧縮強度を測定した結果を図-4 に示す。この結果より、残存固形分の添加率が増加するほど圧縮強度は低下することが確認された。具体的には、添加率 10 および 20mass%の場合は N に対して 7 日から 14 日の圧縮強度増進は、N よりやや低いものの強度増進が認められているが、14 日から 28 日にかけての長期強度の伸びは、N よりも大幅に低下している。さらに添加率を高めると、7 日から 14 日への強度増進が緩やかになる傾向があった。最終的には N と添加率 40mass%を比較すると材齢 28 日において約 25%の圧縮強度低下が確認された。次に、普通ポルトランドセメントに対し質量比で 0, 10, 20, 30, および 40 mass%のボールミル混合による活性化処理を行った残存固形分を JIS 標準砂に外割り置換したモルタルの圧縮強度を測定した結果を図-5 に示す。この結果より活性化処理を行った場合に残存固形分の添加率を増加させることで圧縮強度が大きく低下することはなかった。具体的には、活性化処理を行うことでほぼすべての添加率で 7 日から 14 日の強度増進が認められ、N とほぼ同等かやや低い圧縮強度となっており、14 日から 28 日にかけての強度増進も 10 および 20mass%の低添加率では、N とほぼ同等の傾きで増進している。30mass%以上では 14 日から 28 日の強度増進は抑えられているものの、未処理に対して強度増進の効果が向上している。すなわち N と添加率 40mass%を比較すると材齢 28 日において約 10%の圧縮強度低下で抑えることができた。以上の検討から残存固形分を普通ポルトランドセメントモルタルに配合する場合にはボールミル混合による活性化処理が有効であることが判明した。

普通ポルトランドセメントに対し質量比で 0, 10, 20, 30, および 40 mass%の残存固形分を JIS 標準砂



に外割り置換したモルタルを蒸気養生した場合の圧

図-4 普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに未処理の残存固形分を添加し、水中養生した場合の圧縮強度

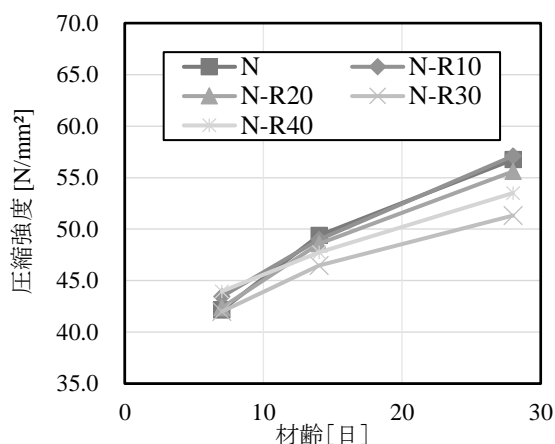


図-5 普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに活性化処理をした残存固形分を添加し、水中養生した場合の圧縮強度

縮強度を測定した結果を図-6 に示す。具体的には、水中養生に比べて全体の圧縮強度の増進傾向が、活性化処理をしていなくても活性化処理した場合に近くなるが、14 日から 28 日にかけての強度増進が伸びにくいのは水中養生同様であるが、圧縮強度の値は大幅に改善されている。N と添加率 40mass%を比較すると材齢 28 日において約 12%の圧縮強度低下程度である。次に、普通ポルトランドセメントに対し質量比で 0, 10, 20, 30, および 40 mass%のボールミル活性化処理を行った残存固形分を JIS 標準砂に外割り置換したモルタルを蒸気養生した場合の圧縮強度を測定した結果を図-7 に示す。この結果より活性化処理をすることで約 5%の圧縮強度の低下に抑えることができた。この強度増進メカニズムも水中養生と同様で明確な説明はできないが、活性化処理に

より蒸気養生でも同様の効果が表れていると考えている。

以上の結果から、蒸気養生の場合にも水中養生で確認されたようにボールミル混合による活性化処理が有効であり、コンクリート混和材としての活用の可能性があることが判明した。また、今回の実験結果より活性化処理の有無により材齢7日から材齢14日にかけての初期の圧縮強度増進性に影響があることが確認されたが、この要因としては炭酸カルシウムが含まれていることが影響していると考えている。既往の研究によりモルタル中に石灰石微粉末を添加することにより微粉末効果による初期の水和反応の促進が起こっていると推察している報告がある。^{10)・11)}よって微細な炭酸カルシウムによる微粉末効果で初期の水和反応の促進による圧縮強度改善がされていると推察している。残存固形分を添加することによる初期強度の改善については Alite ピークを確認することで判断することができるのではないかと推察しており、より詳細な解析を加えていくことを計画している。

5. まとめ

本研究では、残存固形分の物性を検討したうえで、モルタルに添加し圧縮強度試験を実施した。また、ボールミル混合により活性化処理を行った残存固形分を添加したモルタルの圧縮強度試験を実施し、その反応メカニズムについて考察した。以下に得られた知見を纏める。

- 1)ボールミル混合による活性化により、減水剤添加量の減量ができることが判明した。この結果は凝集している混和材を分散させる効果があることを示唆している。
- 2)普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに残存固形分を添加した場合において、水中養生した場合に添加率を上げるにつれて圧縮強度の低下が確認された。
- 3)普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに残存固形分を添加する場合、ボールミルによる活性化処理を行った場合には未処理の場合と比較して圧縮強度の増進が確認された。
- 4)水中養生と同様の条件で蒸気養生の実験を行ったところ、ボールミルによる活性化処理が残存固形分の添加率を上げていったときに起こる圧縮強度の低下を抑えることに対して有効であることが判明した。よってコンクリート製品向けの材料としての活用の可能性を見出すことができた。

参考文献

- 1)佐々木猛，（公社）日本コンクリート工業工学会，化学工学85巻3号，p192-196，2021
- 2)全国生コンクリート工業組合連合会，<https://www.zennama.or.jp/>，（閲覧日：2025. 10. 1）
- 3)畑中 重光，谷川 恭雄：「生コンクリートスラッジに関する研究の現状」，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，pp.14-24，1995
- 4)原田 貴典，横手 晋一郎，橋本 親典，水口 裕之：生コンスラッジと回収砂を用いたセメント固化体の強

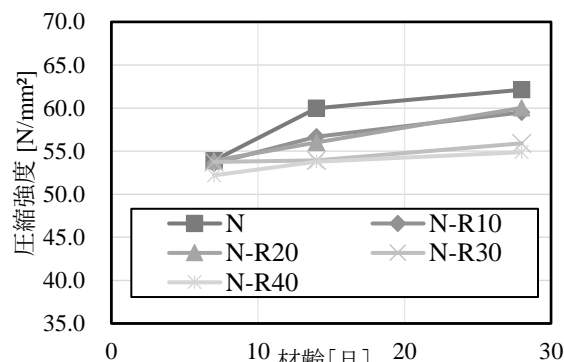


図-6 普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに未処理の残存固形分を添加し、蒸気養生した場合の圧縮強度

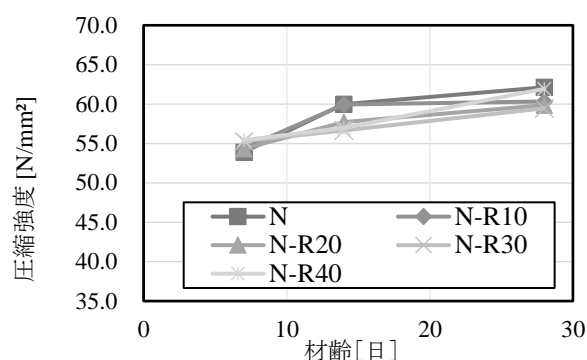


図-7 普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに活性化処理をした残存固形分を添加し、蒸気養生した場合の圧縮強度

度特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，2004

5)佐々木 猛，八木 利之，吉田 浩之，早川 康之：コンクリートスラッジを利用したCO₂リサイクリングと副生成物の完全利活用について，コンクリートテクノ，Vol.39，pp54-58，2020

6)青木康平，鶴澤正美：高活性化FA含有モルタルの圧縮強度特性とその増進メカニズムの解明，無機マテリアル学会誌，Vol.29，pp.132-139，2022.5

7)福永晃久，鶴澤正美，青木康平，畑実：高活性化下水汚泥焼却灰を用いたモルタルの圧縮強度発現に及ぼす諸条件の影響，無機マテリアル学会誌，Vol.29，pp.210-216，2022.7

8)藤原颯，福永晃久，鶴澤正美，井川秀樹：活性化した下水汚泥焼却灰のコンクリートへの適用に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol. 45，No. 1，pp.106-111，2023.7

9)青木康平，鶴澤正美：高活性化FAを用いたモルタルの圧縮強度発現に及ぼす諸条件の影響，無機マテリアル学会誌，Vol.28，pp.259-264，2021.9

10)コンクリート委員会・規準関連小委員会，土木学会論文集，767，11-16，(2003)．

11)炭酸化研究委員会，“コンクリートの炭酸化に関する研究の現状”，日本コンクリート工学協会，(1993)．