

# 論文 コンクリートスラッジの混和材としてのリサイクルに関する基礎的研究

渡会 正典<sup>\*1</sup>・寺西 浩司<sup>\*2</sup>

**要旨:** 本研究では、コンクリートスラッジおよび高炉スラグを混合粉砕して製造するコンクリート用再生混和材の開発の可能性をモルタルレベルで検討した。具体的には、まず、再生混和材におけるスラッジと高炉スラグの構成比率の影響を調べた。次に、再生混和材の構成材料、比表面積、および置換率の影響を調べた。その結果、1) 再生混和材に占めるスラッジの比率が高いほど、モルタルの流動性は低くなり、乾燥収縮ひずみはやや大きくなる。ただし、圧縮強度はほとんど変化しない、2) 再生混和材の置換率が高くなるほど、モルタルの流動性および圧縮強度は低下する。ただし、その変化は置換率が10%以下であれば顕著ではない、などの知見を得た。

**キーワード:** スラッジケーキ, モルタル, 高炉スラグ, X線回折, 圧縮強度, 乾燥収縮

## 1. はじめに

レディーミクストコンクリート工場における洗浄排水の処理により発生するコンクリートスラッジ（以下、単にスラッジという）は、産業廃棄物として処分する必要があり、そのために多くの費用が掛かる。また、JISでは、スラッジ水をレディーミクストコンクリートの練混ぜ水の一部として使用することが認められているが、現実には、そのような形でのスラッジ水の再利用はほとんど普及していない。これらのことから、近年、スラッジの再資源化技術の開発が強く望まれている。

一方で、吉兼ら<sup>1)・2)</sup>は、過去に、スラッジを主原料とした再生セメントの開発に取り組んでいる。これは、加熱処理したスラッジを高炉スラグと混合して微粉砕したものであり、この再生セメントをコンクリートに用いて、高炉セメントに近い強度が得られたと報告されている。また、これと同様の研究は依田ら<sup>3)~5)</sup>によっても実施されている。しかし、セメントとして再生セメントのみを用いたレディーミクストコンクリートを現体制下で供給することは、再生セメントが通常のセメントに代替可能な性能を有していたとしても、現実面での様々な観点から考えて、すぐに可能になるとは思えない。そこで、著者らは、上記の研究成果を参考にし、スラッジおよび高炉スラグを微粉砕して得られた粉体を、コンクリート用再生混和材として、セメントの一部に置換して使用するための検討を行った。

なお、本研究では、コンクリート実験の前段階として、再生混和材を用いたモルタルのフレッシュ性状および硬化性質を調べた。検討にあたっては、まず、再生混和材におけるスラッジと高炉スラグの構成比率の影響を

調べた（実験1）。次に、その結果を踏まえ、再生混和材の構成材料や比表面積などの影響を調べた（実験2）。本報では、これらの結果を取りまとめて報告する。

## 2. スラッジと高炉スラグの構成比率の影響を調べるための実験（実験1）

### 2.1 実験概要

#### (1) 再生混和材

表-1に、再生混和材の種類とその原料構成を示す。再生混和材の製造にあたっては、まず、高炉スラグ細骨材を150分間1次粉砕した。そして、次に、粉砕した高炉スラグ（比表面積の測定値3780cm<sup>2</sup>/g）と、200℃で加熱乾燥したスラッジ、普通ポルトランドセメントとを混合し、比表面積7000cm<sup>2</sup>/gを目標としてこれら全体をさらに粉砕するために、2次粉砕を20分間行った。粉砕には、振動ミル（内径φ220mm、振動数1200cpm、振幅10

表-1 再生混和材の原料構成および物性

記号	スラッジ混入率 (%)	原料の構成比率 (%)			密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	メジアン径 (μm)
		コンクリート	高炉スラグ	セメント			
S50	50	47.5	47.5	5	2.59	11833	6.55
S40	40	38	57		2.60	8830	7.93
S30	30	28.5	66.5		2.72	7735	8.34
S20	20	19	76		2.77	6269	9.76

\*1 名城大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 名城大学 理工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

mm) を使用し、破砕媒体には鉄球 (φ25~50mm) を用いた。

**(2) 試験項目および試験方法**

再生混和材とそれを用いたモルタルを対象として、表-2 に示す項目の試験を行った。なお、再生混和材の試験は、普通ポルトランドセメント (記号 N) に対しても行い、モルタルの試験は、再生混和材を置換しないケース (記号 N) に対しても行った。

**(a) 再生混和材に対する試験**

再生混和材に対して、密度試験、比表面積試験を行うとともに、粒度分布を測定した。また、粉末 X 線回折により、再生混和材とそれを用いたペースト (水粉体比 50%) 中に含まれる物質を同定した。その際、ペーストは気中養生し、材齢 7 日の時点で試験に供した。

**(b) モルタルに対する試験**

再生混和材を用いたモルタルに対して、フロー試験、強さ試験および乾燥収縮試験を行った。表-3 および表-4 に、モルタルの使用材料および調合を示す。本実験では、再生混和材をセメントに対して質量比で 20% 置換した。また、調合の設定にあたっては、砂粉体比 (質量比) を一定 (=3.0) とし、JIS R 5201 における強さ試験の調合を基にして、すべてのケースで、化学混和剤を用いないで健全なワーカビリティが得られるように水粉体比 (=53%) を調整した。なお、モルタルに用いた粉体 (セメントの 20% を再生混和材に置換した粉体) に対して凝結試験も行った。

**2.2 実験結果とその考察**

**(1) 再生混和材に対する試験の結果**

**(a) 密度、比表面積および粒度**

表-1 中に、再生混和材の密度、比表面積、および粒度分布から求めたメジアン径を示す。再生混和材を同一工程で製造したにもかかわらず、比表面積はスラッジ混入率が高いほど高くなった。これは、スラッジの方が容易に細かく粉砕されるためであると考えられる。

表-2 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法
再生混和材	密度	JIS R 5201
	比表面積	JIS R 5201 (ポロシチーによらない方法)
	粒度分布	レーザー回折式粒度分布測定装置による
	含有物質	粉末 X 線回折
粉体	凝結時間	JIS R 5201
モルタル	フロー値	JIS R 5201
	圧縮強度	JIS R 5201
	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3

\*粉体 (セメント+再生混和材)

表-3 モルタルの使用材料 (再生混和材以外)

項目	種類	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	長良川産川砂	表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.40%, 粗粒率 2.70

表-5 粉体の凝結時間

記号	始発時間(h:m)	終結時間(h:m)
S50	2:00	4:00
S40	2:15	4:00
S30	2:15	4:15
S20	3:00	5:00
N	2:30	3:40

表-4 モルタルの調合

記号	再生混和材の置換率 (%)	水粉体比 (%)	空気量 (%)	*砂粉体比	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積(ℓ/m <sup>3</sup> )			質量(kg/m <sup>3</sup> )		
						セメント	細骨材	再生混和材	セメント	細骨材	再生混和材
S50	20	53	0	3.0	264	126	571	39	399	1496	99
S40					264	126	571	39	399	1496	99
S30					265	126	572	37	400	1499	100
S20					265	126	573	36	400	1500	100
N	0				266	159	575	0	502	1506	0

\*質量比

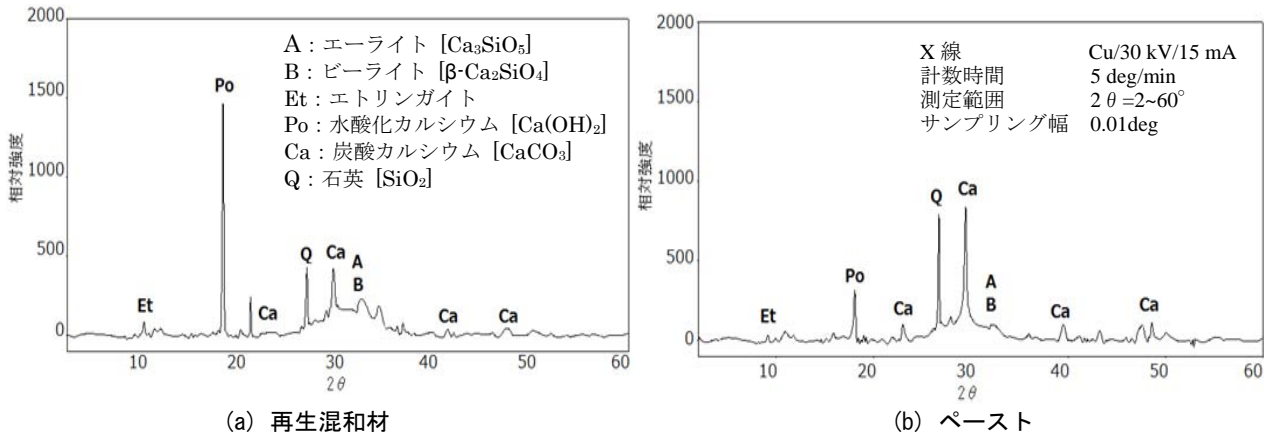


図-1 XRD パターン (S40)

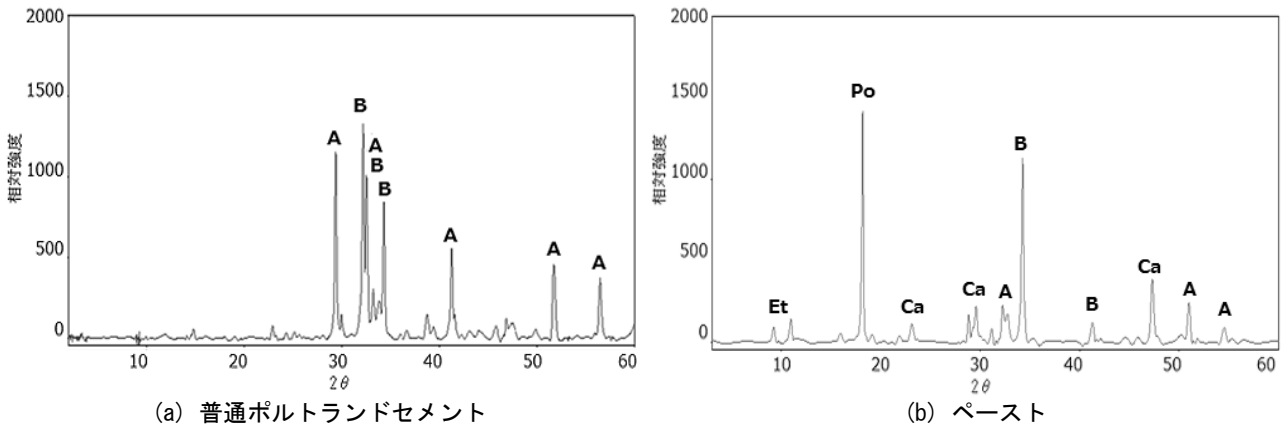


図-2 XRD パターン (N)

(b) X線回折分析の結果

図-1および図-2に、再生混和材の一例 (S40) および普通ポルトランドセメントに対するX線回折分析の結果を示す。図-1 (a) と図-2 (a) の比較からわかるように、再生混和材には、未水和セメントに含まれるエーライトやビーライトなどのクリンカー鉱物がほとんど見られなかった。また、再生混和材では、水酸化カルシウムやエトリンガイトが同定され、図-2 (b) との比較からわかるように、セメント硬化体とほぼ同様の XRD パターンとなった。なお、このことは、ペーストの場合も基本的に同様であった。

(2) 粉体の凝結時間

粉体の凝結時間を表-5 に示す。始発および終結時間は、再生混和材におけるスラッジ混入率が低いほど長くなった。ただし、普通ポルトランドセメント (N) との比較からもわかるように、いずれのケースの場合も、通常のセメントと大差ない値であった。

(3) モルタルに対する試験結果

(a) フロー値

図-3 にモルタルのフロー値を示す。同図から、再生混和材を置換すると、普通ポルトランドセメントのみを使用したモルタルよりも、フロー値が小さくなること

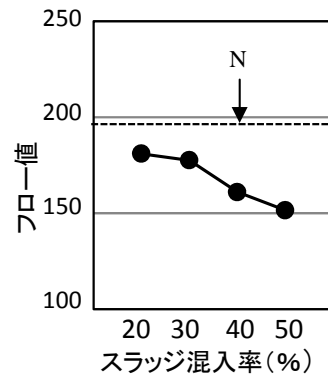


図-3 フロー値

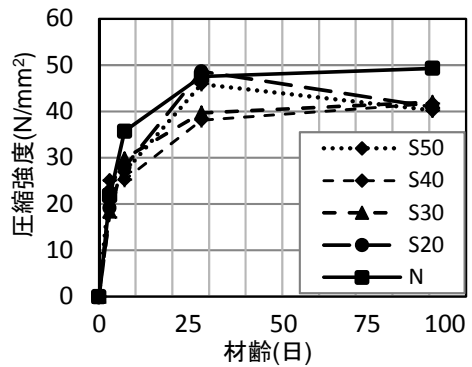


図-4 圧縮強度

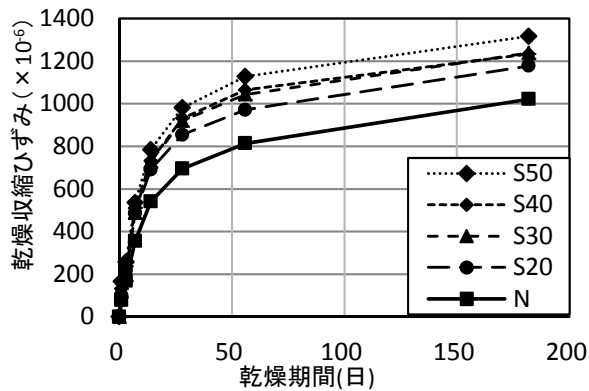


図-5 乾燥収縮ひずみ

わかる。また、フロー値は、スラッジ混入率が高いほど低くなった。

(b) 圧縮強度

図-4 にモルタルの圧縮強度を示す。S50 および S20 では、材齢 28 日から 91 日にかけて圧縮強度がやや低下しているが、これは試験誤差によるものであると考えられる。また、同図から、再生混和材を置換すると、普通ポルトランドセメントのみを使用した場合に比べて、圧縮強度がやや低くなるのがわかる。ただし、材齢 91 日の圧縮強度には、スラッジ混入率による違いはほとんど見られなかった。

(c) 乾燥収縮ひずみ

図-5 に、モルタルの乾燥収縮ひずみを示す。再生混和材を置換したモルタルの乾燥収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントのみを使用した場合よりも大きくなった。また、スラッジ混入率が高いほど乾燥収縮ひずみがやや大きくなった。

3. 再生混和材の構成材料、比表面積および置換率の影響を調べるための実験 (実験 2)

3.1 実験概要

(1) 再生混和材

表-6 に実験要因とその水準を示す。実験 2 では、再生混和材の種類とモルタルにおける再生混和材の置換率を実験要因とした。

表-7 に、再生混和材の種類とその原料構成および物性を示す。実験 1 の結果から、再生混和材におけるスラッジ混入率が高いほど、モルタルの流動性が低下し、乾燥収縮ひずみがやや大きくなるものの、圧縮強度 (材齢 91 日) にはほとんど違いが見られないことが明らかになった。これらのことを総合的に勘案し、実験 2 では、実験 1 のスラッジ混入率 40% のケース (S40) を基本ケース (C) とした。このほかに、Ch は比表面積を 10000cm<sup>2</sup>/g 程度まで高めたケース、CS および P は補助的な原料を変化させたケースである。また、W および B は比較用の

表-6 実験要因とその水準

実験要因	水準
再生混和材の種類	C, Ch, CS, P, W, B
再生混和材の置換率*(%)	0, 内割 10,30,60,100, 外割 30

\*セメントに対する質量比

表-7 再生混和材の原料構成および物性

記号	原料の構成比率(%)					密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	メジアン径 (μm)
	コンクリートスラッジ	コンクリート塊	高炉スラグ	セメント	廃珪砂			
C	38	0	57	5	0	2.54	7422	9.13
Ch	38	0	57	5	0	2.64	9822	7.01
CS	34	0	51	5	10	2.58	6793	8.96
P	40	0	60	0	0	2.53	7510	8.60
W	0	38	57	5	0	2.92	5873	7.15
B	0	0	95	5	0	2.77	7112	6.35

表-8 モルタルの調査 (基本ケース C)

再生混和材の置換率 (%)	水粉体比 (%)	空気量 (%)	*砂粉体比	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	質量(kg/m <sup>3</sup> )		
					セメント	細骨材	再生混和材
0				266	502	1506	0
内割	10	53	3.0	265	450	1500	50
	30			263	347	1490	149
	60			260	196	1471	294
	100			256	0	1449	483
外割	30		2.1	266	501	1354	151

\*質量比

ケースであり、W ではコンクリート塊を、B では高炉スラグのみを主原料とした。

再生混和材の基本的な製造手順は実験 1 の場合と同様とした。ただし、Ch のケースでは 1 次粉砕は 360 分間とした。また、W のケースでは、高炉スラグとは別に、コンクリート塊に対して 60 分間の 1 次粉砕を行った。

(2) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法は実験 1 と同様とした。表-8 にモルタルの調査を示す (基本ケース C の場合)。調査設計の基本的な方針は実験 1 と同様とし、内割の場合

表-9 粉体の凝結時間

記号	内割 30%		内割 100%	
	始発時間 (h:m)	終結時間 (h:m)	始発時間 (h:m)	終結時間 (h:m)
C	1:55	3:00	5:35	6:45
Ch	1:50	3:00	3:30	5:45
CS	1:50	3:05	4:30	6:10
P	2:00	3:10	5:50	6:45
W	1:55	3:15	2:40	4:55
B	2:10	3:20	1:55	5:00
N	—	—	2:20	3:30

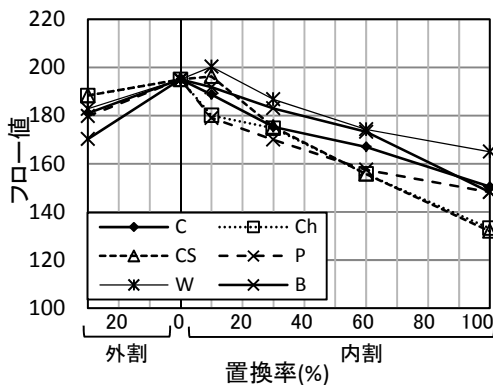


図-6 フロー値

は再生混和材をセメントと置換し、外割の場合は再生混和材を細骨材と置換した。なお、再生混和材以外のモルタルの材料は実験 1 と同じとした。

### 3.2 実験結果とその考察

#### (1) 密度、比表面積および粒度

再生混和材の密度、比表面積およびメジアン径を表-7 中に示す。同表から、ばらつきはあるものの、再生混和材の比表面積を概ね目標通りに調整できていることがわかる。

#### (2) 凝結時間

表-9 に、内割 30 および 100% のケースにおける粉体（セメント+再生混和材）の凝結時間を示す。内割 30% では、始発時間および終結時間は、N との比較からもわかるように、いずれのケースの場合も、普通ポルトランドセメントの場合と大差ない値であった。

#### (3) フロー値

図-6 にモルタルのフロー値を示す。同図から、内割、外割のいずれの場合も、再生混和材の置換率が高くなるほど、フロー値が低下することがわかる。

また、図-7 に、フロー値と粉体全体（セメント+再生混和材）の密度の関係を示す（外割以外のケース）。同図によると、両者の関係は、再生混和材の種類や置換率にかかわらず概ね一つの直線で表されており、密度が小さいほどフロー値が小さくなっている。このことか

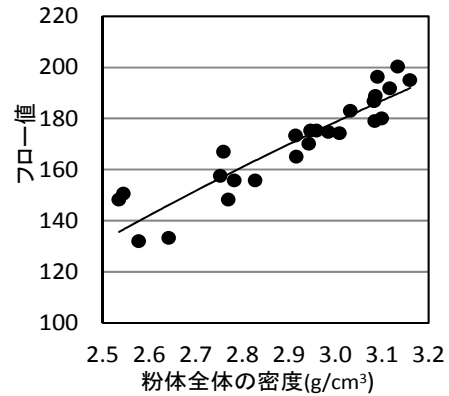


図-7 フロー値と粉体の密度の関係

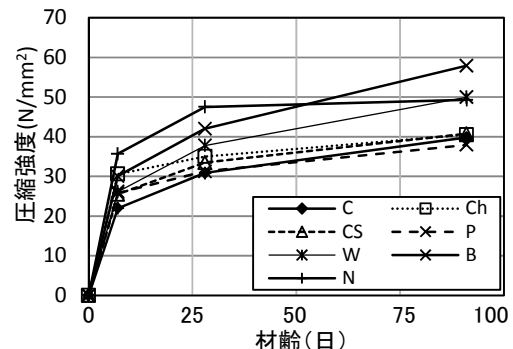


図-8 圧縮強度の経時変化（内割 30%）

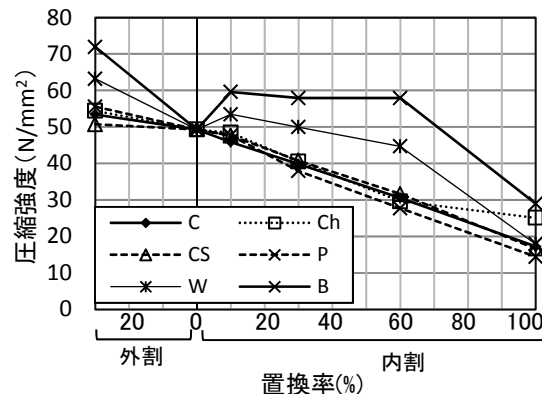


図-9 圧縮強度（材齢 91 日）

ら、モルタルのフロー値に対する再生混和材の置換率の影響は、粉体全体の密度によりある程度評価できるものと考えられる。

#### (4) 圧縮強度

##### (a) 構成材料および置換率の影響

図-8 に、内割 30% のケースにおけるモルタルの圧縮強度の経時変化を示す。また、図-9 に、材齢 91 日におけるモルタルの圧縮強度を示す。図-9 によると、主原料を高炉スラグのみやコンクリート塊とした、比較用のケース（B および W）の圧縮強度は、それ以外のスラッジを主原料としたケースよりも全体として高くなっている。スラッジを主原料としたケース（W, B 以外）に着目すると、本実験の範囲では、圧縮強度に構成材料や比表面積による違いは見られない。また、圧縮強度は、外

割 30% の場合は、セメントのみ（置換率 0%）の場合と同等かそれ以上となっているが、内割の場合は、置換率が高いほど低くなっている。ただし、置換率 10% 程度以下であれば、圧縮強度の低下はそれほど顕著とはいえない。

(b) 水酸化カルシウムの含有量との関係

図-10 に、ペースト（材齢 7 日）に対する X 線回折分析で得られた水酸化カルシウム（Po）のピーク強度と、内割 100% のケースにおけるモルタルの圧縮強度（材齢 7 日）の関係を示す（W, B 以外のケース）。ここで、ピーク強度には  $2\theta = 18.08^\circ$  の値を用いた。同図からわかるように、初期材齢では、比表面積が大きいほど、水酸化カルシウムの含有量が多くなり、圧縮強度も高くなる傾向となっている。

(5) 乾燥収縮ひずみ

図-11 に、モルタルの乾燥収縮ひずみを示す（乾燥期間 182 日）。乾燥収縮ひずみは、内割の場合、再生混和材の置換率が高いほど大きくなる傾向となっている。また、置換率 100% の場合は、スラッジを主原料としたケースの乾燥収縮ひずみがそれ以外のケース（B および W）よりも大きくなっている。ただし、いずれのケースの場合も、置換率が 30% 以下であれば、乾燥収縮ひずみの極端な増加は見られない。

4. まとめ

本研究では、コンクリートスラッジを主原料とした再生混和材の開発を目的として、スラッジの混入率、構成材料、比表面積、置換率などが再生混和材を用いたモルタルの各種性質に及ぼす影響を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 再生混和材に占めるコンクリートスラッジの比率が高く、高炉スラグの比率が低いほど、モルタルの流動性は低くなり、乾燥収縮ひずみは大きくなる。ただし、圧縮強度はほとんど変化しない。
- (2) コンクリートスラッジを主原料とした再生混和材をモルタルに内割で使用すると、置換率が高くなるほど、流動性および圧縮強度は低下する。ただし、その変化は置換率が 10% 以下であれば顕著ではない。
- (3) コンクリートスラッジを主原料とした再生混和材をモルタルに内割で使用すると、置換率の高い領域では乾燥収縮ひずみが大きくなる。ただし、置換率が 30% 以下であればその低下は顕著ではない。
- (4) 再生混和材の比表面積や補助的な原料（セメントまたは廃珪砂）の混入の有無は、上記 (2) および (3) に示した傾向に対して大きな影響を及ぼさない。

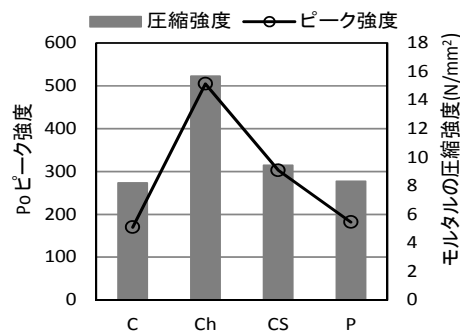


図-10 水酸化カルシウムのピーク強度と圧縮強度

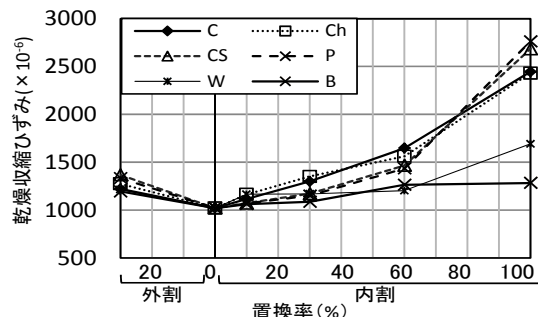


図-11 乾燥収縮ひずみ

本研究は、コンクリート技術支援機構（ASCoT）「生コンスラッジを利用したコンクリート混和材に関する研究委員会」への協力を前提として実施したものである。

謝辞

本研究の実施に際し、ASCoT 副理事長 吉兼亨氏から貴重なご意見を頂いた。また、森野奎二愛知工業大学名誉教授に X 線回折についてご教授頂いた。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉兼亨, 竹島宏侑, 中島佳郎: コンクリート廃棄物を用いた再生セメント及び再生コンクリート, コンクリート工学年次講演会論文集, Vo1.8, pp.861-864, 1986.
- 2) 吉兼亨, 鯉江利夫, 中島佳郎: 生コンスラッジを用いた再生セメントを混和材として用いたコンクリートの性状, コンクリートスラッジの有効利用に関するシンポジウム論文報告集, pp.II-39-46, 1996.5
- 3) 依田和久, 十代田知三: 再生セメントを用いた再生コンクリートの性状 (I), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.11-12, 1985.10
- 4) 依田和久, 十代田知三: 再生セメントを用いた再生コンクリートの性状 (II), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.5-6, 1986.8
- 5) 依田和久, 十代田知三: 再生セメントを用いた再生コンクリートの性状 (III), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.27-28, 1987.10