

論文 粉体状産業廃棄物を混入させたコンクリートに関する研究

加勢 貴志^{*1}・丸山 久一^{*2}・木村 仁^{*3}

要旨：現在埋め立て処分されている産業廃棄物をコンクリート材料として用い、消波ブロックとして利材化することを目的とした。廃棄物は粉体状であることから高粘性による施工性の低下や単位水量の増加に伴う強度低下などが問題となる。これらの問題を改善するため、廃棄物の混入率および高性能減水剤の適応を検討した。

キーワード：粉体状産業廃棄物, リサイクル, 圧縮強度, 施工性

1. はじめに

大量生産・大量消費を基盤とした産業は日本に大きな経済発展をもたらしてきたが、その一方で周辺環境に対する負荷も増加させてきた。その結果、大気汚染や土壌汚染などの公害問題が大きな社会問題となった。1980年代から1990年代にかけて処理技術の進歩や法改正などにより、公害問題は沈静化し始めてきたが、廃棄物を取り巻く問題、とりわけ埋め立て処分場不足の問題は、より深刻な問題として注目されるようになってきた。

産業廃棄物の最終処分場は、周辺住民から「忌避施設」という概念を逸脱することが難しいことや、増新設を敬遠した社会的風潮などがあるため、埋め立て可能な残存容量が年々減少しており、「使い捨て社会から循環型社会への転換」が謳われている近年、一刻も早い再資源化技術の確立が望まれている。

このような現状を踏まえて、本研究では新潟県中越地区において、現在も埋め立て処分されている産業廃棄物のうち還元スラグ、鋳物灰および下水汚泥焼却灰に着目し、これらをコンクリート材料として再利用することを目的とした。これまでの研究の結果、還元スラグはコンクリートの膨張および急結を引き起こすことが、

膨張は鋳物灰を混合させることで、急結は石膏を添加することで抑制できることが確認されている¹⁾。また、粉体が多量に混入されるコンクリートにおいて「コンクリートの変形性はペーストの変形性に支配される」と仮定し、ペーストおよびモルタルフロー試験から単位水量の予測を可能とした配合方法を確立した¹⁾²⁾。

今回は、既往の研究を参考とし、還元スラグ、鋳物灰に加え、下水汚泥焼却灰も含めた三種類の産業廃棄物を混入させたコンクリートの配合とその強度について検討を行った。また、廃棄物は粉体状であるため、粘性が高くなり、施工性の低下が問題となることから高性能 AE 減水剤の影響についても検討を行った。

2. 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、骨材は信濃川産の川砂、川砂利を使用した。混和剤は AE 剤にアルキルアリスルホン酸系のもの、高性能 AE 減水剤にはポリカルボン酸系のものを使用した。

また、使用した粉体状産業廃棄物の物性値、化学成分の代表値を表-2, 3に示す。使用した粉体状産業廃棄物は還元スラグ、鋳物灰、下水汚泥焼却灰(以下 焼却灰)の三種類である。還元

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学教授 工学部 環境・建設系 Ph. D. (正会員)

*3 中越環境開発(株) (正会員)

スラグは電気炉においてスクラップから鉄鋼製品を精錬する際に発生し、カルシウムやアルミニウムを多く含有している。鋳物灰は鋳物工場において鋳型を造型、解砕する際に発生し、シリカ分を多く含有する。また、焼却灰は下水処理施設から排出される下水汚泥を焼却炉において約 800℃で焼却したもので、カルシウム、シリカ、リンを多く含有している。なお、本研究ではコンクリートの性状に関与すると思われる 6 種の物質において分析を行ったため、他の化学成分は不明である。

産業廃棄物に含まれる有害物質には全 23 項目が規定されているが、本研究で対象とするような廃棄物は発生過程において高温にさらされるため、有機物はほとんど含まれていない。そこで有機物を除いた水銀、カドミウム、鉛、六価クロム、砒素およびセレンの 6 物質を対象とし、環境告示第 46 号法に準拠して溶出試験を行った。これら 6 項目の溶出試験結果の代表値および許容値(土壤環境基準)を表-4 に示す。この結果より有害物質の溶出は環境基準値以下であることがわかる。

3. 廃棄物混入量の影響

3. 1 実験概要

本実験では、三種類の廃棄物の混入量とコンクリートの強度発現について検討を行った。

1) 配合設計

本研究で対象とした廃棄物を用いるコンクリートの構造物は消波ブロックである。消波ブロックの設計基準強度は 18N/mm² である。本実験では圧縮強度試験結果の変動係数から割増係数を算出し、目標強度を 22N/mm² と設定した。コンクリートの目標スランプは 5±1cm、目標空気量は 3%とし、混和剤は AE 剤のみをセメント量の 0.002%添加した。

本研究で用いた産業廃棄物は粉体状であり、

表-1 使用材料

	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (F.M)	実積率 (%)
セメント(C)	3.15	-	-	-
細骨材(S)	2.57	2.26	2.51	65.69
粗骨材(G)	2.72	1.36	7.20	66.31

表-2 使用した産業廃棄物の物性値

	還元 スラグ	鋳物灰	下水汚泥 焼却灰
密度 (g/cm ³)	3.10	2.63	2.58
含水率(%)	0.3	0.2	0.5
メディアン 径 (μm)	32.401	147.02	168.55
モード径 (μm)	28.487	147.66	177.28

表-3 化学成分

	還元 スラグ	鋳物灰	下水汚泥 焼却灰
CaO	50.4	0.11	16.0
MgO	8.3	0.63	1.9
Fe ₂ O ₃	0.6	39.2	7.9
Al ₂ O ₃	11.7	2.1	6.1
SiO ₂	23.5	59.9	29.0
P ₂ O ₅	-	-	12.0

表-4 溶出試験結果

	還元 スラグ	鋳物灰	下水汚泥 焼却灰	土壤環境 基準値
六価クロム	N.D	N.D	N.D	0.01
カドミウム	N.D	0.001	N.D	0.05
鉛	N.D	0.001	N.D	0.01
砒素	N.D	0.002	N.D	0.01
水銀	N.D	N.D	N.D	0.0005
セレン	N.D	0.001	N.D	0.01

※N.D: 測定限界値以下

コンクリートに混入させた場合、多量の水を拘束する。そのため、通常の配合設計方法では適当なスランプを得るための単位水量を把握するため膨大な試験練りが必要となる。そこで本実験では桜井らが提案した配合設計方法を適用した。この方法はペーストフロー試験およびモルタルフロー試験によって目標スランプを満足する単位水量を予測するものである。この方法で配合設計を行った結果、試験練りを数多く行う

ことなく目標スランプを達成することができた。なお、各フロー試験は JIS R 5201 に準拠して行った。

桜井らによると、この配合設計方法が適用できる範囲は限られており、以下の条件および仮定が成り立つ場合のみ適用される^{1) 2)}。

- ① モルタル中の細骨材容積比 (s/m) が 0.3 以下。
- ② コンクリート中の粗骨材容積が 300 l/m³ 程度以下。
- ③ コンクリートの変形性はペーストの変形性に支配され、骨材の噛み合いなどに影響されない。
- ④ 細骨材はある一定の拘束水比を持つ。ただし、細骨材に拘束される水はコンクリートの変形には寄与しない。

2) 供試体の作成方法および実験方法

コンクリートの練り混ぜには強制ミキサを用いた。骨材、粉体の順に投入し、30 秒間空練りを行った後、水(AE 剤)を加え、60 秒間練り混ぜを行った。練り混ぜ直後にスランプ試験、空気量試験を行い、各配合について φ100×200mm の供試体を作成し、20℃の水中養生を行った。材齢は 28 日とし、圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して行った。

3. 2 廃棄物混入量の影響

本実験では、還元スラグ・鋳物灰および焼却灰の混入量によるコンクリート強度への影響について検討を行った。

1) 配合

本実験で使用した配合を表-5に示す。配合条件はセメント量を 250kg/m³、焼却灰量を 100~300 kg/m³、還元スラグ(表中:スラグ)・鋳物灰を各 300~500 kg/m³ とした。今回の実験では還元スラグと鋳物灰の混合率は、還元スラグの膨張抑制を考慮して 1:1(重量比)とした。

2) 実験結果、考察

本実験における全ての供試体において急結、膨張は確認されなかった。このことから三種混

合コンクリートにおいても還元スラグ・鋳物灰は重量比 1:1 で混入させることで急結、膨張は抑制されることが確認された。

図-1 に還元スラグ・鋳物灰混入量と圧縮強度

表-5 廃棄物混入量の影響の検討配合

配合 No.	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	スラグ	鋳物灰	焼却灰	S G
331	311	250	300	300	100	203 645
441	374		400	400		117 136
551	410		500	500		54 172
332	377	300	300	200	135 430	
333	462			300	63 200	

※配合名「331」はスラグ300kg/m³、鋳物灰300kg/m³、焼却灰100kg/m³を示す

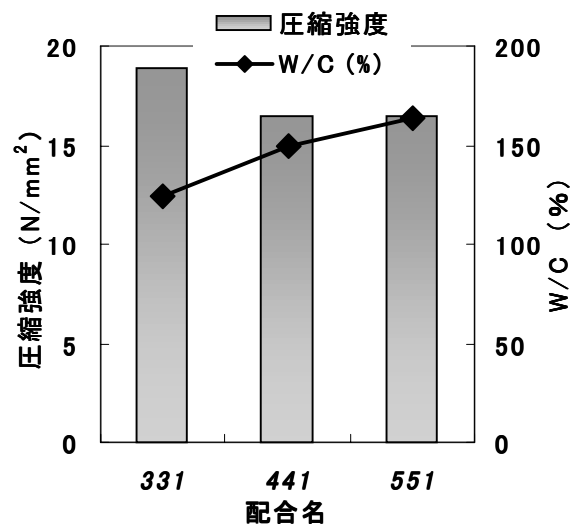


図-1 還元スラグ鋳物灰混入量の影響

の関係を示す。図-1 から還元スラグ・鋳物灰の混入量が増加するとともに強度が低下していることがわかる。これは表-5からもわかるように、コンクリート中の粉体量が増加するに従って単位水量が増加していることが主な原因と考えられる。混入している廃棄物はいずれも微細な粉体状であるため、同一のスランプを得るために多量の水が必要となる。本実験ではセメント量を 250 kg/m³ と一定としているため、結果的に水セメント比(W/C)が増加し、強度低下を招いているものと考えられる。

なお、このシリーズでは目標強度である

22N/mm²を達成することはできなかった。

図-2に焼却灰混入量と圧縮強度の関係を示す。本実験においても目標強度を達成することは出来なかった。図-2から、焼却灰の混入量が増加すると水セメント比が大きくなり、それに伴って強度が低下していることがわかる。還元スラグ・鋳物灰量を変化させた場合と比較すると、全体的な廃棄物混入量が多少少なめでも、その強度低下量は顕著である。これは焼却灰の混入量が増加すると必要なスランプを得るために単位水量が大幅に増加するためであると考えられる。

4. 粉体の拘束水比

4. 1 実験概要, 実験方法

粉体をコンクリートに混入させるにあたって、適当な施工性を得るためには単位水量が大幅に増加することが確認された。

本実験では各粉体が拘束する水量を確認するために、還元スラグ・鋳物灰および焼却灰単体の拘束水比をペーストフロー試験によって求めた。拘束水比はペーストが変形し始めるときの粉体容積比で、粉体のペースト流動に対する特性値である³⁾。なお、ペーストフロー試験はJIS R 5201に準拠して行った。

4. 2 実験結果, 考察

表-6に各産業廃棄物の拘束水比をペーストフロー試験によって算出した値を示す。拘束水比はある体積の粉体が拘束する水量を比で表したものである。表-6からもわかるように焼却灰は他の廃棄物に比べて水を多く拘束し、その量は焼却灰自体の2倍程度である。本研究で使用

している焼却灰は800℃程度で焼却されたものであり、1000℃以上の高温で熔融処理されたものではない。そのため、その粒子形状は複雑で多孔質であると考えられる。この形状から焼却灰は多くの水を拘束し、単位水量の増加につながるものと考えられる。

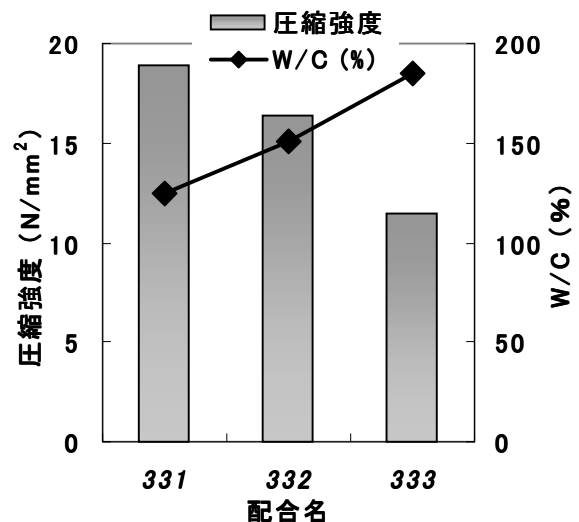


図-2 焼却灰混入量の影響

表-6 各産業廃棄物の拘束水比

廃棄物名	還元スラグ	鋳物灰	焼却灰
拘束水比	0.8291	0.5890	1.9512

5. 高性能 AE 減水剤添加率の影響

5. 1 実験概要

本研究では廃棄物を混入させたコンクリートの使用対象を消波ブロックに絞り、廃棄物を出るだけ多量に混入することを目的としてきた。しかし、廃棄物を多量に混入することにより同

表-7 SP添加率の影響

配合NO.	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						SP (P*wt%)	
		W	C	スラグ	鋳物灰	焼却灰	S		G
100-0	61	184	300	100	100	0	604	993	-
100-25						25	594	977	1.00
100-50						50	585	961	1.25
100-75						75	575	945	2.00
100-100						100	565	929	5.00

※配合名「100-25」はスラグ・鋳物灰各100kg/m³、焼却灰25kg/m³を示す

一スランプであっても普通コンクリートと比べて粘性が高く⁴⁾、施工の妨げになることが予想される。

そこで本実験では AE 剤を添加せずに高性能 AE 減水剤のみを添加した配合における施工性と強度を確認するため、三種類の廃棄物を混合させたコンクリートにおける廃棄物混入量に対する高性能 AE 減水剤の添加率およびその強度特性について検討を行った。

1) 配合

本実験では、基準となる普通コンクリートの配合設計を行い、普通コンクリートに骨材と置換させる形で廃棄物を混入した。その際に細骨材率(s/a)は一定に保って骨材の調整を行った。

表-7 に本実験で使用した配合を示す。セメント量を 300 kg/m³、還元スラグ・鋳物灰混入量をそれぞれ 100 kg/m³ 一定とし、焼却灰混入量は 0 ~ 100 kg/m³ とした。W/C は 61% 一定とし、目標スランプは 10 ± 2.5 cm としてポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤 (SP) で調整した。なお、SP の添加率は粉体 (表中 P : セメント + 廃棄物) の重量に対する割合である。SP は練り混ぜ温度や練り混ぜ温度条件等の変化に非常に敏感な添加剤であることが知られており、過剰な添加は安定した施工性の妨げとなるため、本実験における SP 添加率は 5.0% を上限とした。

2) 供試体の作成方法および実験方法

コンクリートの練り混ぜは強制ミキサーを用いた。骨材、粉体の順に投入し、30 秒間空練りを行った後、水 (SP) を加え、60 秒間練り混ぜを行い、5 分間静置した後、排出した。排出直後にスランプ試験、空気量試験を行い、各配合について φ100 × 200 mm の円柱供試体を作成した。養生条件は 20°C の水中養生および恒温室で 20°C の気中養生とした。材齢は 28 日とし、圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して行った。

5. 2 実験結果、考察

1) フレッシュ性状

SP を添加した配合における焼却灰量に対す

るスランプと SP 添加量の関係を図-3 に示す。この図から焼却灰を増加させていくに従って SP 添加率が上がっていることがわかる。このことから焼却灰には SP の分散能力を低減させる要因があると考えられる。SP の粉体分散能力は、SP が練り混ぜ水中に存在することでその効果

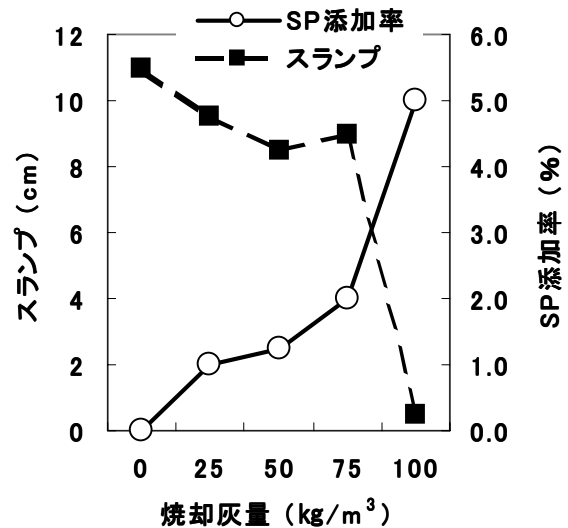


図-3 焼却灰量とスランプ、SP 添加量の関係

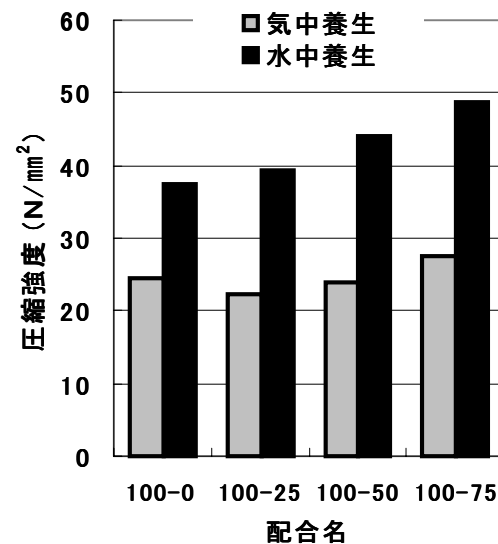


図-4 廃棄物混入量と圧縮強度の関係

を發揮するものと考えられる。これに対し、焼却灰には水を多量に拘束する性質がある。そのため、SP が作用する場となる練り混ぜ水、または SP 自体を焼却灰が拘束してしまい、より高

い分散能力を発揮するためには SP の添加率を上げる必要があるものと考えられる。

焼却灰混入量 $100\text{kg}/\text{m}^3$ では SP を 5.0% 添加したが、スランプ値は 0.5cm と目標スランプに達しなかった。このことから W/C61% における廃棄物混入量の限界値は還元スラグ・鋳物灰が各 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 、焼却灰が $75\text{kg}/\text{m}^3$ であると考えられる。

2) 強度特性

還元スラグ・鋳物灰混入量を一定とし、焼却灰混入量を変化させた配合において圧縮強度試験を行った。図-4 に SP を添加した場合の廃棄物混入量と圧縮強度の関係を示す。本実験における配合では目標強度を達成することができた。

本実験では W/C、単位水量、s/a および還元スラグ・鋳物灰混入量を一定としているにも関わらず、焼却灰混入量が増加するに従って水中養生における圧縮強度の増加が確認された。

また、養生条件によって強度が大きく異なり、水中養生における強度が非常に大きいことがわかる。これは廃棄物に含まれるシリカ分が影響しているものと考えられる。

フライアッシュコンクリートなど、特にシリカ分を多く含んだ混和材を混入したコンクリートでは湿潤養生が重要とも言われている⁵⁾。これは混和材が水和するために多量の水が必要とされるためであり、本実験の結果においても同様のことが考えられる。いずれにしても、今回の実験では単一の W/C についての結果であるため、今後さらなる検証が必要である。

6. まとめ

還元スラグ、鋳物灰および焼却灰の三種類の産業廃棄物を混入させたコンクリートの強度、高性能 AE 減水剤の適応性について検討した。本研究の結果から以上の知見が得られた。

- 1) 三種類の産業廃棄物を混入させたコンクリートにおいて還元スラグ・鋳物灰を重量比 1:1 で混入させることで膨張、急結

反応の抑制が可能である。

- 2) 焼却灰は還元スラグ・鋳物灰と比較するとその拘束水比は非常に大きく、多くの水を拘束する。
- 3) 三種混合コンクリートに SP を添加することによって、小さい単位水量であっても適当な施工性を得ることができた。
- 4) 焼却灰は SP 添加率を上げてても適当な施工性が得られる混入量には限界が存在する。
- 5) 還元スラグ・鋳物灰を各 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 混入させた三種混合コンクリートにおいて、焼却灰混入量の増加とともに圧縮強度が増加し、水中養生ではその挙動は顕著であった。

参考文献

- 1) 桜井邦昭：粉体状産業廃棄物を用いたコンクリートの配合設計に関する研究，長岡技術科学大学大学院修士論文，2000.
- 2) 桜井邦昭ほか：粉体状産業廃棄物を多量に混入したコンクリートの配合設計方法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 22, No. 2, pp1153 - 1158, 2000.
- 3) 枝松良展ほか：粉体特性とペーストフロー値との関係，土木学会論文集，No. 538/V-31, pp. 37-46, 1996.
- 4) 町勉ほか：コンクリート材料としてのフライアッシュの適用限界に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 1, pp199 - 204, 1997.
- 5) コンクリート便覧，第6章，6.4 養生，pp383.