

論文 下水汚泥焼却灰の再資源化に関する研究

宮澤 聡^{*1}・丸山久一^{*2}・木村 仁^{*3}

要旨：現在大部分が埋め立て処分されている下水汚泥焼却灰を，熔融処理を行わずコンクリート材料として再資源化し，多量にコンクリートに用いた場合のコンクリートの圧縮強度特性について検討した。その結果，汚泥焼却灰の混入は単位水量の著しい増加を招き，コンクリートの圧縮強度を著しく低下させるが，塩化ナトリウムを添加することにより大幅な強度増加が図れることを確認した。

キーワード：下水汚泥焼却灰，再資源化，圧縮強度特性，塩化ナトリウム

1. はじめに

下水汚泥焼却灰（以下，焼却灰）は早くからコンクリート材料として注目されてきており，これまでも様々な研究が行われてきた^{1), 2)}。しかし，そのほとんどが熔融ガラス化処理を経た焼却灰を対象としたものであった。熔融処理は1000℃以上の高温で焼却灰を再焼却し，熔融させることで減容・無害化・安定化を図る方法である。しかし，熔融処理は，特別な熔融炉が必要となることや処理コストが高くなることがネックとなっているため普及しづらいのが現状である。また，熔融処理されていない焼却灰は，大部分が埋め立て処分されている。しかし，下水処理施設の高度化，下水道普及率の向上に伴い，下水汚泥の排出量は年々増加の一途をたどっている。そのため，産業廃棄物を処理する処分場の残存容量の減少や新規処分場の確保難，それによって生じる産業廃棄物の不法投棄などの問題が発生し，年々深刻な状況になっている。これらのことから，産業廃棄物の有効利用，再資源化は早急に解決しなければならない問題である。

そこで本研究では，熔融処理を行わず，現在大部分が埋立処分されている下水汚泥焼却灰を

対象とし，コンクリートの混和材料として，コンクリート2次製品に利用することを目的とした。コンクリート2次製品としては，高い強度や耐久性をそれほど必要としない消波ブロックへの適用を考えることとした。消波ブロックに要求される圧縮強度は21N/mm²，必要なスランプは4～8cmである。本論文ではこの要求性能を満足する配合を検討した。

2. 下水汚泥焼却灰

本研究で使用した焼却灰は，下水処理施設から運ばれてくる下水汚泥を流動床焼却炉にて800℃で焼却処理をしたときに発生する産業廃棄物である。なお，本大学の位置する新潟県中越地区からは，年間約3000tが排出されており，全量埋立処分されている。

表-1, 2に焼却灰の物性値と化学成分を示す。焼却灰の密度は2.50～2.60g/cm³である。これは，焼却灰は同一プラントから採取しているが採取日によって値が変化するために，その変化の範囲を示している。焼却灰は粉体状であり，またpHが非常に高い。化学成分は，カルシウム，シリカ，リン，鉄，アルミニウムが多く含まれている。

*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㈱ (正会員)

表 - 3 に焼却灰に含まれている有害物質の溶出試験の結果を示す。溶出試験方法は環境告示第 46 号法に準拠した方法で行った。有害物質の溶出量はすべて環境基準を満足する値となっている。これらのことより、有害物質という観点からは、焼却灰をコンクリート材料とすることは、問題はない。

3. 下水汚泥焼却灰の混入の影響

3.1 実験概要

焼却灰をできるだけ多量にコンクリートに混入させ、目標とするコンクリート 2 次製品の要求性能を満足する配合を検討した。表 - 4 に、実験に用いた使用材料を示す。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。表-5 に、本実験で使用したコンクリートの配合を示す。配合条件は、できるだけ焼却灰の使用量を多くしたいために、焼却灰を 400 kg/m³、500 kg/m³、600 kg/m³ 混入した 3 配合とし、単位セメント量はそれぞれの配合で 250kg/m³ 一定とした³⁾。コンクリートのフレッシュ性状は、2 次製品の要求性能を満たすようにスランプを 5 ± 1 cm、空気量を 3 % となるように単位水量を調節した。なお、AE 剤をセメント質量に対して 0.002% 添加した。コンクリートの練混ぜは強制ミキサを用い、細骨材、粗骨材、セメント、焼却灰の順に投入し、30 秒間空練りを行った後、水 (AE 剤) を加えて 60 秒間練り混ぜを行った。各配合について材齢 28 日まで 20℃ の水中養生を行った。

3.2 実験結果および考察

図 - 1 に、焼却灰の混入量とコンクリートの圧縮強度の関係を示す。焼却灰は表 - 1 に示すように細かい粉体である。また、表 - 5 より、コンクリートに混入すると同一スランプを得るためには非常に多量の単位水量が必要となる。これは、焼却灰の粒子形状が複雑で多孔質であることが原因であると考えられる。そのため、焼却灰の混入量が増加すると水セメント比が大

表 - 1 下水汚泥焼却灰の物性値

密度 (g/cm ³)	2.50~2.60
含水率 (%)	1.92
pH	13.35
メディアン径 (μm)	28.47

表 - 2 下水汚泥焼却灰の化学成分

	化学成分 (%)
CaO	22.00
MgO	2.80
Fe ₂ O ₃	12.00
Al ₂ O ₃	5.20
SiO ₂	23.00
K ₂ O	1.00
Na ₂ O	0.65
P ₂ O ₅	15.00
SO ₃	0.82
TiO ₂	0.49
MnO	0.29

表 - 3 下水汚泥焼却灰の溶出試験結果

有害物質	試験結果
カドミウム	N.D
鉛	N.D
六価クロム	N.D
セレン	N.D
水銀	N.D
砒素	N.D

N.D: 測定限界値以下

表 - 4 使用した材料の物性値

	セメント	細骨材	粗骨材
密度 (g/cm ³)	3.15	2.52	2.71
吸水率 (%)	-	2.54	1.36
粗粒率 (F.M)	-	2.51	7.20
実積率 (%)	-	66.55	66.13

表 - 5 混入量の影響の検討配合

W/C (%)	s/a (%)	sl (cm)	air (%)	単位量 (kg/m ³)					AE 剤 (C × %)
				W	C	焼却灰	S	G	
141	25	5.5	2.1	352	250	400	245	784	0.002
162	25	5.0	2.6	406		500	186	597	0.002
200	25	4.5	3.0	499		600	98	312	0.002

きくなりコンクリートの強度が低下する。

図 - 2 に焼却灰 500 kg/m³ 混入コンクリートと材齢の関係を示す。焼却灰混入コンクリートは材齢 7 日目までに 28 日強度の約 60%の強度発現が見られることから、強度発現性は普通コンクリートとほぼ同様である。

ただし、この実験結果では、消波ブロックに要求される圧縮強度を満足することはできない。

4. 強度の改善方法

4.1 実験概要

焼却灰を多量に混入すると目標とする圧縮強度が得られない。そこで、目標とする圧縮強度が得られるよう、セメント量の増加、高性能減水剤の添加、塩化ナトリウムの添加について検討した。焼却灰混入量は、目標強度を満足する範囲で、できるだけ多量に焼却灰を混入させるという観点から 500 kg/m³ とした。

4.2 セメント量の増加

4.2.1 実験概要

本実験ではセメント量の増加が焼却灰混入コンクリートの強度の増加に及ぼす影響について検討した。表 - 6 に、実験で使用したコンクリートの配合を示す。使用材料は表 - 4 と同様のものをを用いた。焼却灰の混入量は 500 kg/m³ とし、セメント量を 250kg/m³, 350 kg/m³, 450 kg/m³ とした。スランプを 5 ± 1 cm, 空気量を 3% となるように配合を調整した。なお、AE 剤をセメント質量に対して 0.002% 添加し、材齢 28 日まで 20℃ の水中で養生を行った。

4.2.2 実験結果および考察

図 - 2 に、セメント量を増加した焼却灰混入コンクリートのセメント水比 (C/W) と圧縮強度の関係を示す。セメント量を増加させることによって目標とする圧縮強度が得られた。また、この図より、焼却灰混入コンクリートにおいてもセメント水比と圧縮強度の間にはほぼ線形関係が成り立つことが認められる。つまり、焼却

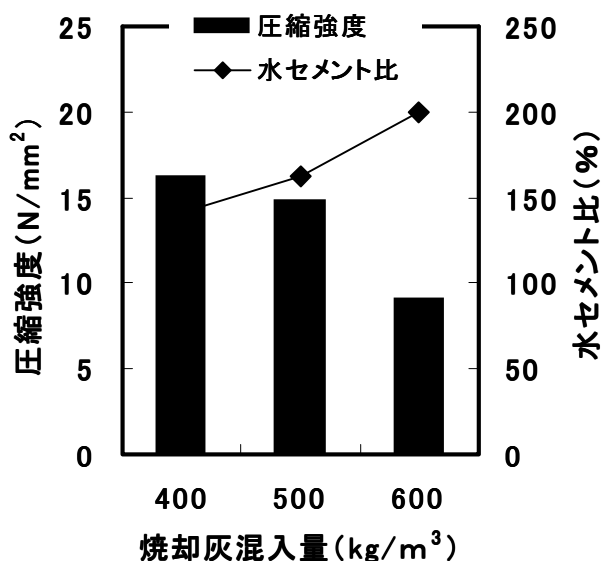


図 - 1 焼却灰混入の影響

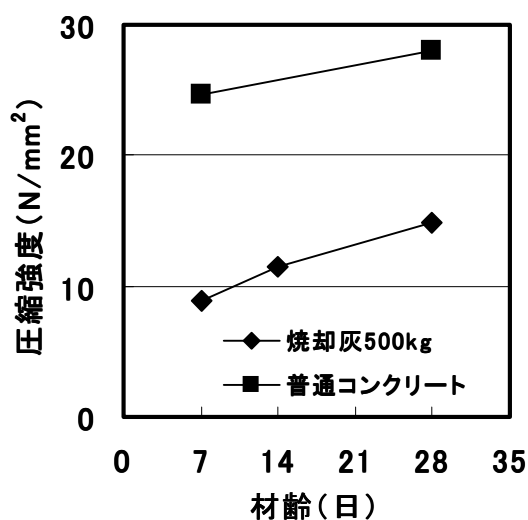


図 - 2 材齢と圧縮強度の関係

表 - 6 セメント量増加の検討配合

C/W	s/a (%)	sl (cm)	air (%)	単位量 (kg/m ³)				AE剤 (C×%)	
				W	C	焼却灰	S		G
0.58	25	5.0	2.5	433	250	500	166	530	0.002
0.79	25	4.0	2.6	444	350		138	443	0.002
0.97	25	4.5	2.5	463	450		106	339	0.002

灰混入コンクリートにおいても、従来の普通コンクリートと同様に圧縮強度はセメント水比によってほぼ決定されると考えられる。そのため、水セメント比を低減させることによって目標強度を達成することは可能である。

4.3 高性能減水剤の添加

4.3.1 実験概要

本実験では高性能減水剤の添加が焼却灰混入コンクリートの強度の増加に及ぼす影響について検討した。表 - 7 に実験で使用したコンクリートの配合を示す。使用材料は表 - 4 と同様のものをを用いた。焼却灰の混入量は 500 kg/m^3 とし、セメント量を 250 kg/m^3 で一定とした。高性能減水剤はナフタリン系を使用し、添加率は粉体質量に対するものとして、1, 3, 5%とした。スランプを $5 \pm 1 \text{ cm}$ 、空気量を 3%となるように配合調整を行った。なお、AE剤をセメント質量に対して 0.002%添加し、材齢 28 日まで 20°C の水中で養生を行った。

4.3.2 実験結果および考察

図 - 3 に、高性能減水剤を添加した焼却灰混入コンクリートの高性能減水剤添加率と圧縮強度の関係を、図 - 4 に C/W と強度の関係を示す。高性能減水剤の添加率を 1% とすると無添加のコンクリートと比較して C/W が 24% 低下し、それによって大きな強度増加が見られた。しかし、さらに添加率を大きくした場合、W/C が大きく低下しているにもかかわらず、図 - 2 に見られるような強度の増加はなく、逆に強度が低下する傾向が見られた。これは焼却灰混入コンクリートにおいて、多量に減水剤が添加されたため硬化不良をおこしたものであると考えられる。本配合で高性能減水剤の添加率を変えるだけでは、目標強度を達成することはできない。

4.4 塩化ナトリウムの添加

4.4.1 実験概要

本実験では、塩化ナトリウムの添加が焼却灰混

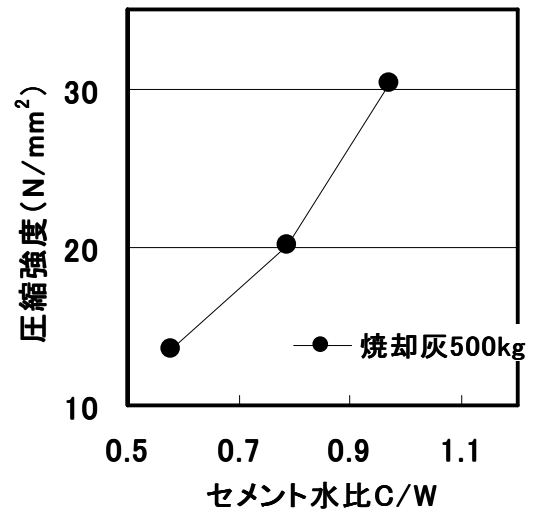


図 - 3 セメント量増加の影響

表 - 7 高性能減水剤の添加検討用配合

C/W	s/a (%)	sl (cm)	air (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能減水剤 (P×%)	AE剤 (C×%)
				W	C	焼却灰	S	G		
0.62	25	5.0	2.5	406	250	500	186	597	-	0.002
0.70	25	4.0	2.0	358			215	688	1.0	0.002
0.76	25	4.0	2.5	328			234	749	3.0	0.002
0.81	25	4.0	3.0	308			245	790	5.0	0.002

P:セメント+焼却灰

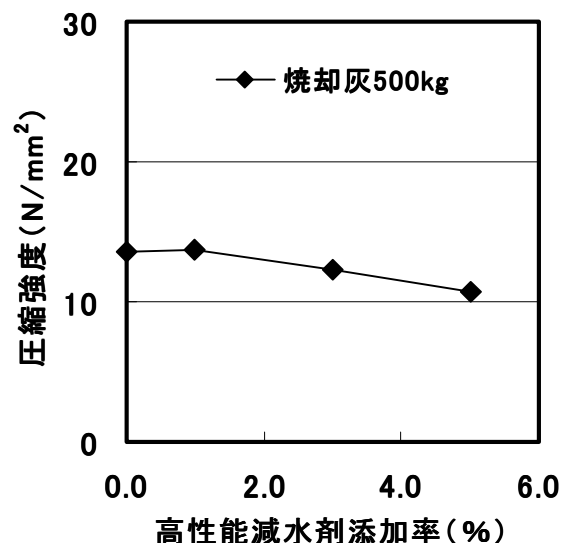


図 - 4 高性能減水剤添加率と強度の関係

入コンクリートの強度の増加に及ぼす影響について検討した。塩化ナトリウムは減水効果があると報告されている^{4), 5)}。また、シリカを多く含んだ産業廃棄物をコンクリートに混入させている既往の研究では塩化ナトリウムの添加によって強度の増加が確認されている^{4), 5), 6)}。これらのことから、本研究においても焼却灰混入コンクリートに対し塩化ナトリウムの添加を検討した。表 - 8 に、実験で使用したコンクリートの配合を示す。使用材料は表 - 4 と同様のものを用いた。焼却灰の混入量は 500 kg/m^3 とし、セメント量を 250 kg/m^3 、一定とした。塩化ナトリウムは市販のものを使用し、添加率は粉体質量に対するものとして、1, 3, 5%とした。スランプを $5 \pm 1 \text{ cm}$ 、空気量を3%となるように配合を調整した。なお、AE剤をセメント質量に対して0.002%添加し、材齢28日まで 20°C の水中で養生を行った。塩化ナトリウムの種類、添加方法は既往の研究⁴⁾と同様とした。また、目標とするコンクリートのフレッシュ性状も同様とした。

4.4.2 実験結果および考察

図 - 5 に塩化ナトリウム添加率と圧縮強度の関係を、図 - 6 に塩化ナトリウムの添加によるC/Wと強度の関係を示す。これらの図から、焼却灰混入コンクリートでは塩化ナトリウムを添加することで大幅な強度増加が図れることが確認できる。添加率3%で強度は最大の増加を示しており、目標とする圧縮強度を満足することができた。

表 - 8、および図 - 6 から焼却灰混入コンクリートにおいても塩化ナトリウムを添加することによって減水効果が認められ、添加量を増加させることでW/Cを低下させることができた。しかし、添加率が5%になると強度は添加率が3%の時よりも低下し強度の増加は見られなかった。また、塩化ナトリウムの添加によってC/Wは大きくなっているが、セメント量の増加、高性能減水剤の添加によるC/Wの増加に比べ

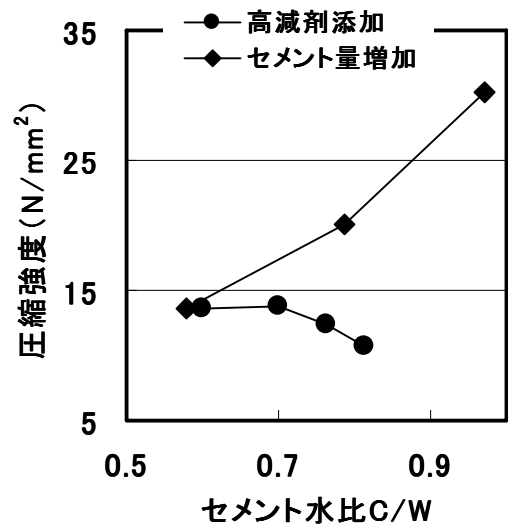


図 - 7 高性能減水剤添加によるC/Wの関係

表 - 8 塩化ナトリウムの添加検討用配合

C/W	s/a (%)	sl (cm)	air (%)	単位量 (kg/m^3)					NaCl (P×%)	AE剤 (C×%)
				W	C	焼却灰	S	G		
0.62	25	5.0	2.5	406	250	500	186	597	-	0.002
0.60	25	5.0	3.0	415			177	566	1.0	0.002
0.63	25	4.5	2.5	400			184	587	3.0	0.002
0.63	25	4.0	2.5	395			184	588	5.0	0.002

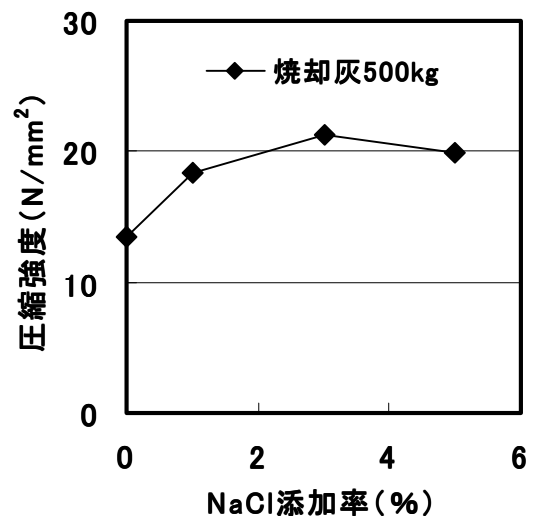


図 - 6 NaCl 添加率と強度の関係

て、C/Wの増加量は小さいにもかかわらず大きな強度増加が見られた。これは、焼却灰もしくは焼却灰とセメントの混合粉体に対して最適な割合で添加することで、何らかの化学反応が起こり強度を増加させていると考えることができる⁵⁾。また、コンクリートを打設した鋼製型枠には腐食が見られた。このことから、実構造物に適用するさいには防錆効果のある型枠を使用する必要がある。

5. まとめ

焼却灰をできるだけ多量にコンクリートに混入させ、目標とするコンクリート2次製品の要求性能を満足する配合を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

1) 焼却灰はカルシウム、シリカを多く含み、有害物質の溶出も認められず、コンクリート材料として再資源化可能な材料である。

2) 焼却灰は粉体状であるため多量にコンクリートに混入すると所要のワーカビリティを確保するためには多量の単位水量が必要となる。

3) 焼却灰混入コンクリートの強度発現性は普通コンクリートとあまり変わらない。

4) 圧縮強度は普通コンクリートと同様にセメント水比によってほぼ決定される。

5) 高性能減水剤を添加すると、低い添加率ではW/Cの低下に伴い強度は増加するが、添加量が増加すると、W/Cは低下するものの強度は低下する。

6) 塩化ナトリウムを添加すると強度は大きく増加する。

7) 以上の結果より、下水汚泥焼却灰を多量に用いたコンクリートは、高い強度や耐久性をそれほど必要としない消波ブロックへの適用は十分可能であると考えられる。

参考文献

1) 中村博之：廃棄物熔融スラグの高流動コンクリートへの適応に関する研究，長岡技術科学大学大学院修士論文，1997.3

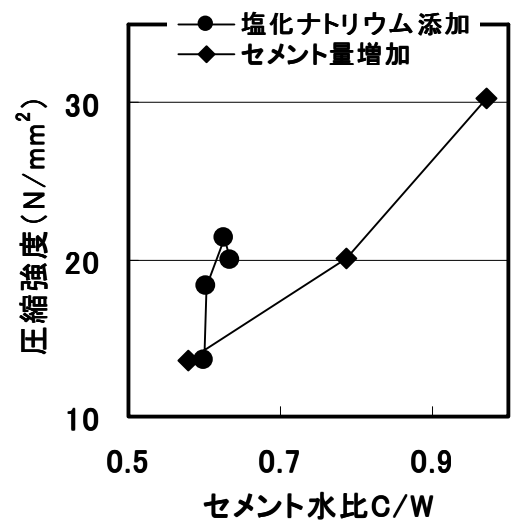


図 - 7 NaCl 添加による C/W の関係

2) 野尻拓男ほか：下水汚泥焼却灰のコンクリートへの有効利用について，コンクリート工学年次論文報告書，Vol. 22, No. 2, pp. 43 - 48, 2000. 7

3) 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, pp. 1153 - 1158, 2000. 7

4) 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，2000.3

5) 桜井邦昭ほか：鋳物灰を多量に混入したコンクリートの圧縮強度特性，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp. 24 - 25, 1999.9

6) 長滝重義ほか：フライアッシュを用いた新硬化体の海洋構造物への適用性，コンクリート工学年次論文報告書，Vol. 9, No. 1, pp. 211 - 216, 1987