論文　産業副産物を混入した吹付モルタルの特性

根岸　和弘[*1]・江口　仁平[*2]・田中　泰司[*3]・丸山　久一[*4]

要旨：現在埋め立て処分されている粉体状産業副産物のうち，電気炉の還元工程から排出されるスラグ，及び鋳物工場から排出される鋳物灰を吹付モルタル材として再利用する方法について検討した。これら副産物の混入量を変化させた場合のフレッシュ性状を検討すると共に，現場にて吹付実験を行い，モルタルのポンプ圧送性や施工性の検討を行った。

キーワード：リサイクル，還元スラグ，鋳物灰，吹付，モルタル，法面

1. はじめに

近年，産業副産物の処理問題の中でも，とりわけ埋め立て処分地不足の問題は，深刻化が進み，急務の問題である。埋め立て地の増新設が敬遠されているために，埋め立て可能な残存容量が年々減少し，緊迫した状況にある。この状況下において，埋め立てに頼らない，産業副産物の再利用化は解決策の一つであり，重要な課題といえる。

これまでに，新潟県中越地区の最終処分場において埋め立て処分されている電気炉の還元工程から排出されるスラグ（以下，還元スラグと称す）と鋳物工場で鋳造過程において発生する粉塵（以下，鋳物灰と称す）の再利用を目的に，これら副産物を大量に混入したコンクリートの，消波ブロックへの適用の可能性が報告されている[1)]。本研究では，これら副産物の利用用途を拡張するために，法面吹付モルタルへの適用に着目した。吹付施工においては，消波ブロック等の既往の適用対象に比して，施工性の要求値が大きくなる。

そこで本研究では，還元スラグ・鋳物灰の混入量を変化させた場合のモルタルのフレッシュ性状を検討し，さらに現場で吹付実験を行い，ポンプ圧送性や施工性等の検討を行うこととした。また，有害物質の溶出試験を実施し，安全性の検討を行った。

表－１　使用材料の物性値

粉体種類		密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)
普通ポルトランドセメント		3.15	3300
還元スラグ		2.96	1340
鋳物灰		2.60	1660
細骨材種類		密度 (g/cm^3)	吸水率(%)
川砂（信濃川産）＊	A	2.57	2.66
	B	2.66	1.88

＊川砂Ａは**表－４**の 200-1 及び 200-2 に使用。
その他は川砂Ｂを使用。

表－２　産業副産物の構成成分[2)]

産業副産物種類	単位(%)					
	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	C
還元スラグ	53.7	7.0	0.9	6.0	26.1	0.04
鋳物灰	0.2	0.6	18.6	1.8	68.5	1.79

表－３　産業副産物の溶出試験結果

産業副産物種類	単位(mg/l)					
	Hg	Pb	Cd	Cr^{6+}	As	Se
還元スラグ	ND	0.011	ND	ND	0.016	ND
鋳物灰	ND	0.002	ND	ND	0.001	ND
環境基準	0.0005	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01

ND：検出限界値以下

*1 緑物産（株）　技術調査部　(正会員)
*2 新潟県南魚沼地域振興局　地域整備部道路課　工修
*3 長岡技術科学大学　工学部　環境・建設系　助手　工修　(正会員)
*4 長岡技術科学大学　理事・副学長　教授　Ph.D.　(正会員)

表－４ 室内予備試験配合表

No.	W/C (%)	単位量(kg/m^3)				
		水*1	セメント	細骨材	還元スラグ	鋳物灰
200-1	63.5	254	400	1168	200	200
200-2	64.8	259		1155		
200-3	66.0	264		1142		
200-4	67.3	269		1130		
300-1	73.8	295	400	908	300	300
300-2	75.0	300		895		
300-3	76.3	305		881		
300-4	77.5	310		868		

＊1：単位水量にはC×0.5%のAE減水剤を含む

2. 使用材料

使用材料の物性値を**表－１**に示す。この他に混和剤として，リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体のAE減水剤を用いた。

還元スラグ及び鋳物灰の構成成分[2)]を**表－２**に，環境庁告示第46号法準拠による有害物質の溶出試験の結果を**表－３**に示す。

3. 試験条件

還元スラグはコンクリート材料として多量に混入すると，膨張反応を引き起こすが，鋳物灰を還元スラグの40%以上混入することで膨張を抑制できる。また鋳物灰の混入割合が増えるほど強度も増加する[3)]。そのため，鋳物灰の混入割合をできるだけ大きくした方が有効性が高いが，還元スラグは鋳物灰の3倍以上の排出量である[1)]ことを考慮し，本研究では還元スラグと鋳物灰の混合比率を重量比で１：１とした。

還元スラグには六価クロムの収着能力があり，セメント重量の約50%以上の還元スラグを混入した場合，六価クロムの検出量は検出限界値以下となることが報告されている[2)]。以上の観点から，本研究ではセメント重量の50%以上の還元スラグを混入することとした。

法面保護工でのモルタル吹付のセメント使用量は一般的に400kg/m^{3}以上[4)]とされており，本研究ではこれら副産物をできるだけ多量に混入する目的から，セメント量は最低使用量の400 kg/m^{3}とした。

これらの条件から，本研究では還元スラグ及び鋳物灰の混入量はそれぞれ200kg/m^3(200シリーズ)及び300kg/m^3(300シリーズ)とし，室内予備試験を行った。

4. 室内予備試験

表－４に室内予備試験の配合表を示す。吹付工に必要とされるフロー値を満たす配合を決定するために，単位水量を変化させた各シリーズ4配合ずつで予備試験を行った。

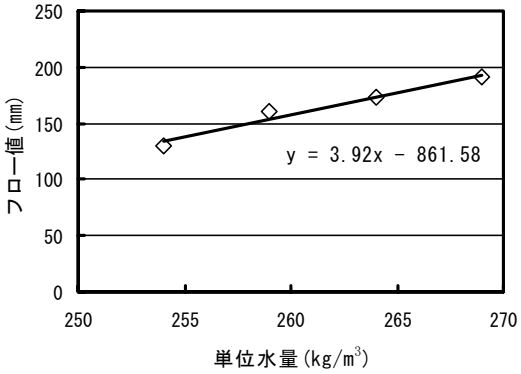
モルタルの練り混ぜは，JIS A 1138に基づいて行い，またJIS R 5201に基づきフロー試験を行った。

単位水量とフロー値の関係について，**図－１**に200シリーズ，**図－２**に300シリーズの結果を示す。200シリーズ，300シリーズ共に高い相関関係が確認された。200シリーズ，300シリーズの最小二乗法による近似式を式(1)，(2)にそれぞれ示す。なお，それぞれ式中のｙはフロー値（mm）を，ｘは単位水量（kg/m^3）を示す。

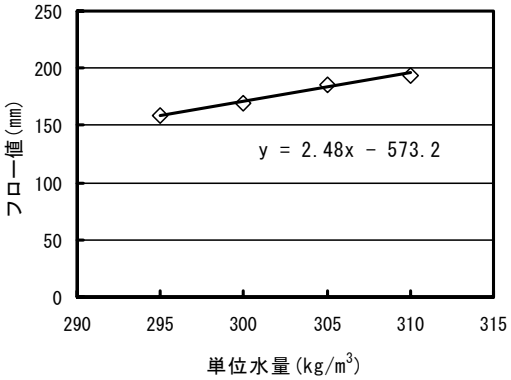
$$y=3.92x-861.58 \quad (1)$$

$$y=2.48x-573.20 \quad (2)$$

目標フロー値の120mm[4)]となるような単位水量は，式(1)及び式(2)を用いて計算すると，200シリーズでは250kg/m^{3}となり，300シリーズで



図－１　200 シリーズの単位水量とフロー値の関係



図－２　300 シリーズの単位水量とフロー値の関係

は 280kg/m^3 となる。この結果を基にそれぞれのシリーズの配合を決定した。**表－５**に配合表を示す。この配合により練り混ぜを行い, JIS A 1132 に基づき，φ100mm×200mm の鋼製型枠にて各シリーズ 6 本ずつ供試体を作成した。翌日脱型し，キャッピングを行った。養生方法は水中養生(20±2℃)および，気中養生(20℃，RH50%)とし，材齢 28 日まで養生を行った。養生後，JIS A 1108 に基づき圧縮試験を行った。圧縮強度試験の結果を**表－６**に示す。法面保護工での吹付モルタルの圧縮強度は 15N/mm^2 以上必要 [4)]とされるため，本研究においてはこれら副産物の物性のばらつきや，実際の現場での養生方法の制約を考慮し，4 割増しの 21N/mm^2 を目標強度とした。200 シリーズ，300 シリーズ共に目標強度を大きく満足していることが確認され，実施工においても十分な強度が確保できるものと考えられる。

表－５　フロー値が 120 ㎜程度となる配合表

No.	W/C (%)	単位量(kg/m^3)				
		水*1	セメント	細骨材	還元スラグ	鋳物灰
200-5	62.5	250	400	1220	200	200
300-5	70.0	280		945	300	300

＊1：単位水量には C×0.5%の AE 減水剤を含む

表－６　圧縮強度試験結果

NO.	圧縮強度(N/mm^2)	
	気中養生	水中養生
200－5	33.6	35.0
300－5	31.8	32.7

表－７　使用材料の物性値(現場試験)

粉体種類	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)
普通ポルトランドセメント	3.14	3300
還元スラグ	2.96	1340
鋳物灰	2.60	1660

細骨材種類	密度(g/cm^3)	吸水率(%)
川砂（信濃川産）	2.53	3.00

5.　現場吹付試験の試験方法

室内予備試験の結果を踏まえ，現場吹付試験を行った。試験は平成 16 年 6 月に新潟県寺泊町の試験ヤードで行った。200 シリーズ，300 シリーズ及び比較用の普通モルタルについて試験を行い，施工性，ポンプ圧送性，フレッシュ性状について検討を行った。また，200 シリーズ及び 300 シリーズにおいて圧送可能となった配合については，圧縮強度試験用のための吹付を行い，供試体を作成の上，圧縮強度試験を行った。

現場吹付試験で使用した材料の物性を**表－７**に，現場吹付試験の配合表を**表－８**に示す。還元スラグ・鋳物灰混入モルタルでの配合はフロー値がそれぞれ 120mm 程度となる配合の NO.をそれぞれ 200-6 及び 300-6 として吹付実験を行い，ホース内に閉塞が生じた場合，この結果を考慮して配合修正し, 再度試験を行った(200-7, 300-7)。なお，表中の W/P は還元スラグと鋳物灰を粉体

表－８ 現場試験配合表

No.	W/C (%)	単位量(kg/m^3)					W/P (%)
		水*1	セメント	細骨材	還元スラグ	鋳物灰	
普通	60.0	240	400	1500	0	0	60
200-6	62.5	250		1108	200	200	31
200-7	67.5	270		1058			34
300-6	70.0	280		850	300	300	28
300-7	72.0	288		830			29

＊1：単位水量にはC×0.5%の室内試験と同様のAE減水剤を含む

と見なした場合の水粉体比である。

試験装置概略図を**図－３**に示す。試験装置は細骨材を計量器で計量し，ベルトコンベアでミキサーに搬送した。練り混ぜは一括練りとして，約 120 秒練り混ぜを行った。練り混ぜ後，ベルトコンベアで湿式の吹付機械へ搬送し，吹付試験を行った。吹付の圧送圧力は 0.3～0.5MPa の範囲とした。

フレッシュ性状はミキサーから吹付機に搬送途中の試料を採取し，フロー値(JIS R 5201)及び空気量(JIS A 1128)を測定した。圧縮強度は，圧縮試験用の箱に吹付を行い，硬化後φ100mm×200mm となるように各配合 3 本ずつコアを抜き，材齢 28 日まで気中養生を行い，予備試験の場合と同様の方法で圧縮強度試験を行った。また，圧縮強度試験で用いた試料を粉砕し，環境庁告示第 46 号法に基づき有害物質の溶出試験を行った。

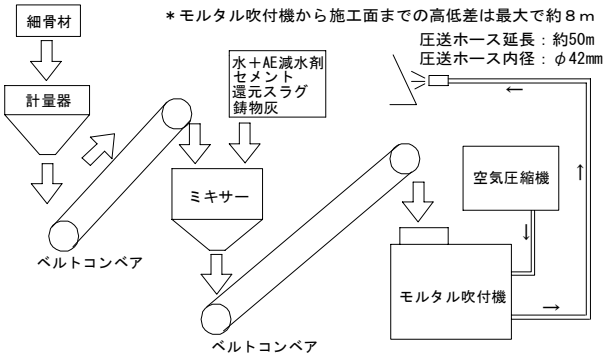
6. 現場吹付試験の結果及び考察

1) フロー値と圧送性及び施工性の関係

表－９にフロー値とポンプ圧送性の関係を示す。一般的に施工されている普通モルタルでは，フロー値が 120mm 程度の配合で圧送が可能である。還元スラグ・鋳物灰を混入した場合，120mm 程度のフロー値では管内で閉塞が生じたが，フロー値 150mm 程度では，圧送が可能となった。これら副産物を混入したモルタルは，還元スラグ・鋳物灰をセメントに対して外割り置換しているので，粉体量が大きくなる。そのため，同

表－９ フロー値と圧送性の関係

NO.	フロー値 (mm)	圧送性
普通	113	良好
200-6	124	閉塞
200-7	149	良好
300-6	128	閉塞
300-7	154	良好



図－３　試験装置概略図

一フロー値では，普通モルタルに比して粘性が大きくなる。この理由で，普通モルタルに対して規定されているフロー値 120mm 程度では施工が不可能となり，それよりも大きなフロー値が必要となると考えられる。なお，作業員の聞き取り調査では，200-7 では柔らかく，300-7 ではやや柔らかく，共に普通モルタルと比較して圧送性がよいと判定された。

表－８には還元スラグと鋳物灰を粉体として見なした場合の水粉体比(W/P)が示してある。この水粉体比とフロー値が圧送の可否に与える影響を**図－４**に示す。**図－４**では，圧送可能であ

った水粉体比とフロー値の関係と，管内閉塞により不可能となった場合の関係がそれぞれ示されている。圧送不可である試験値が少ないものの，これより，水粉体比とフロー値により圧送の可否が推定可能であると考えられる。今回の試験条件における，圧送性が保証されるフロー値を式(3)に示す。なお、式中のｙはフロー値（mm）を、ｘは水粉体比（%）を示す。

$$y=-1.343x+193.73 \quad (3)$$

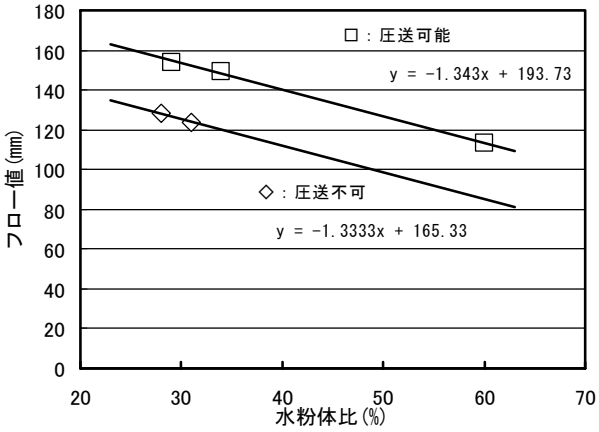
法面でのモルタル吹付の場合，湿式吹付方式が主流[5)]である。湿式の場合，水セメント比(W/C)が 55～60%でなければ施工できない[6)]。普通モルタルの場合，水セメント比と水粉体比は同じ値となるので，施工可能な水セメント比の最低値である 55%(水粉体比)を式(3)に代入すると，フロー値が 119.9mm と算出され，普通モルタルでの施工に適しているとされるフロー値の 120mm とほぼ同じ値となった。これらのことから，**図－４**で示した保証値は，セメントと同等の粉体で構成されるモルタルにも拡張性を有する可能性が示唆される。

2) 産業副産物混入量と空気量の関係

普通モルタルの空気量が 5%なのに対して，還元スラグ・鋳物灰混入モルタルの 200-6，200-7 及び 300-6 では 2.7%，300-7 では 2.3%と小さくなっている。これは細かい粉体による影響や鋳物灰に含まれる炭素が AE 剤の働きを阻害したことなどが考えられ，今後の研究の課題としたい。

3) 産業副産物混入量とリバウンド率の関係

リバウンド率は，いずれの配合も約 30%であった。還元スラグ・鋳物灰混入量に関係なく，普通モルタルと同様のリバウンド率であり，これら副産物の混入量はリバウンド率には影響しないと考えられる。リバウンドは施工条件によって大きく変化する可能性があり，「ノズルマンの熟練度」は重要な要因の一つである[7)]ともいわれている。本研究では圧送圧力をほぼ一定にし，ベテランのノズルマンにより試験を行っていることもあり，使用材料による影響は少なかったものと考えられる。



図－４　圧送の可否に関する水粉体比とフロー値の関係

表－１０ 圧縮強度試験結果（現場試験）

NO.	圧縮強度(N/mm^2)
200-7	35.9
300-7	32.2

表－１１　溶出試験結果（現場試験モルタル）

No.	単位(mg/l)					
	Hg	Pb	Cd	Cr^{6+}	As	Se
200-7	ND	0.012	ND	ND	0.002	0.001
300-7	ND	0.004	ND	0.01	ND	0.003
環境基準	0.0005	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01

ND：検出限界値以下

4) 産業副産物混入量と圧縮強度の関係

表－１０に現場試験のモルタルの圧縮強度試験の結果を示す。還元スラグ・鋳物灰を混入した 200-7 及び 300-7 のいずれも，目標とした強度の 21N/mm^2 を大きく上回っている。圧送性を確保するために単位水量を適正な範囲内で多くしても，強度上問題のないことがわかる。これら副産物の硬化反応は割合小さいために，副産物混入による水粉体比の低下に対して，強度増加率は小さい。この理由で，今回使用した副産物は基本的にセメントに対して外割り置換するのが妥当であると考えられる。ただし，本試験のように大量の副産物を使用した場合には，副産物自体の硬化反応と，セメント粒子の分散効果などの影響は割合大きく，強度増加に寄与した

ものと考えられる。これらを適切に加味すれば，水セメント比を大きくしても，所要の強度が確保できると考えられる。水セメント比が増加する結果，単位水量を減少させることが可能となり，前述の問題は緩和されると思われる。

5)有害物質溶出試験

現場で吹付けたモルタルの有害物質の溶出試験結果を**表－１１**に示す。一部の項目でわずかに環境基準を上回る有害物質の溶出が確認された。これらは本研究で用いた還元スラグ単体からも溶出が確認されており，その影響が考えられる。今回採用した試験方法では，試料粉砕により，溶出が促進されるため，供用状態とはかけ離れた状態にある[8)]。この点については，塊状の試料を溶媒水中に静置して，供用状態に近い状態で溶出量を測定するタンクリーチング試験を実施し，今後，さらに検討を行う予定である。なお，既往の研究[1)2)3)]において，これら副産物を混入したコンクリートからは，環境基準を上回る有害物質の溶出は確認されていない。通常は環境基準値以下になると考えられるが，これら産業副産物を用いる場合には搬出場所や時期により含有量が異なるため，注意が必要である。

7. まとめ

還元スラグと鋳物灰を混入したモルタルが，法面保護工の吹付モルタルとして利用できるかを現場吹付試験にて確認した。本研究から以下の知見が得られた。

(1) 還元スラグ・鋳物灰混入吹付モルタルは，フロー値と単位水量の関係が相関関係の高い直線で表すことができる。所定のフロー値を決定することにより，必要とされる単位水量を把握することができる。

(2) 還元スラグと鋳物灰を粉体とみなした場合，圧送の可否に関する水粉体比とフロー値の関係を検討した結果，圧送の可否の目安となる水粉体比とフロー値の存在が明らかとなった。

(3) 還元スラグ・鋳物灰混入吹付モルタルは現場吹付試験においても，圧縮強度は30N/mm^{2}以上であり，単位水量を適正な範囲内で多くした配合においても目標強度とした21N/mm^{2}を大きく上回る。

(4) 還元スラグ・鋳物灰混入モルタルの有害物質の溶出は概ね環境基準値以下であるが，産業副産物の排出場所や排出時期により含有量が変動するため，使用には十分留意する必要がある。

参考文献

1) 木村　仁，丸山久一，森末晴男：粉体状産業副産物を用いたコンクリートの消波ブロックへの適用，土木学会論文集，No.732，V-59，pp.193-209，2003.5

2) 木村　仁，丸山久一，森末晴男：産業副産物を用いたコンクリートの応用と有害金属の溶出抑制に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.1361-1366，2003

3) 木村　仁，丸山久一，森末晴男：粉体状産業廃棄物を用いたコンクリートの特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.1371-1376，2002

4) (社)全国特定法面保護協会：のり枠工の設計・施工指針　国土交通省大臣官房技術調査課・監修，2003.3

5) 吹付けコンクリート指針(案)[のり面編]，コンクリートライブラリー122，土木学会，2005

6) (社)全国特定法面保護協会：のり面保護工に関する質疑応答集，2000.5

7) 魚本健人：吹付けコンクリートの特性と技術の現状，コンクリート工学，Vol.37，No.8，pp.3-13，1999.8

8) コンクリートからの微量成分溶出に関する現状と課題，コンクリートライブラリー111，土木学会，2003