

石炭灰を利用した再生路盤材（造粒物）の研究

橋本 徹*¹ 長山 明*¹

1. はじめに

石炭火力発電所（七尾大田，敦賀，富山新港）から副産物として排出される石炭灰を有効利用する取組みとして，JIS 灰については，産学官連携で「北陸地区におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」を平成 23 年 1 月に設置し，コンクリート分野への有効利用拡大を図っている。一方，非 JIS 灰については，現在，再生路盤材として年間 3～4 万トンの有効利用を行っているものの，更なる利用拡大を図るため，商品価値を高めることが必要であった。そこで，平成 21，22 年度に「石炭灰を利用した再生路盤材（造粒物）の研究」^{(1),(2)}を富山県立大学との共同研究により実施し，競合品の RC-40 と同等の強度を有する造粒物を現状のコストで製造する方法を確立した。

2. 研究内容

(1) 研究目標

研究の目標は，第 1 表に示す市販の RC-40 と同等の品質（すりへり減量目標 35%以下）を満足する再生路盤材(造粒物)の製造方法の確立である。

第 1 表 再生路盤材（造粒物）の要求品質

項目	要求品質	現 状	下層路盤材品質基準*
※1すりへり減量	35%以下	35～45%	50%以下
※2残留粉体	発生の防止	発生する	規定なし
※3団粒塊	発生の防止	発生する	規定なし
粒度分布	0～40mm	0～40mm	0～40mm

* 下層路盤材の品質基準は，プラント再生舗装技術指針による
※1ロサンゼルス試験機で道路用碎石の規格(JISA5001)に準じて行う
※2造粒時に，造粒機底面に粉体が附着して残る量
※3造粒物同士が接着して塊となること

(2) 研究の方向性

造粒物は，フライアッシュに，セメント，水，結合材を練混ぜて水分調整しながら造粒・固化することから，現状より硬い造粒物を造る対策としては，下記①～③が考えられた。今回はコスト増加に直結しない対策②を指向した。

対策① セメントを増やす⇒ コスト高

対策② 水分を減らす ⇒ コスト増なし

対策③ 結合材を使用する⇒ コスト高

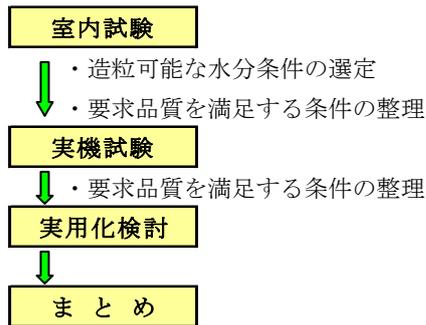
<造粒物の構成>



(3) 試験計画

造粒に最適な水分条件を設定するために，室内試験，実機試験，実用化検討の順で研究を進めた。今回用いた石炭灰は，富山新港火力発電所での代表炭種 A 炭の燃焼灰である。なお，A 炭の至近年の未燃分は約 2%，調達比率は 70% (H21～H22) である。

<研究の流れ>



3. 室内試験

(1) 造粒可能な水分条件の選定

a. 検討ケース

造粒可能な水分条件を選定するための検討ケースを第 2 表に示す。造粒に用いる水は，粉体（セメント C，フライアッシュ F）の練混ぜに用いる混練水と，その混練物を造粒する際に用いる調湿水の 2 つに分けられる。現在，実機で製造している造粒物の水分量は水粉体比 $W/(C+F)$ で 34%，その内訳は混練水 $W1$ が 20%，調湿水 $W2$ が 14% であることから，現状より水分を少なくする方向で表に示す 9 通りの検討ケースを実施した。検討ケースにおける水粉体比 $W/(C+F)$ としては 25～33%の範囲となる。基本配合を第 3 表に示す。

*1 土木部 土木技術チーム

第2表 検討ケース

		※2調湿水W2/(C+F) (%)		
		10	12	14
※1混練水 W1/(C+F) (%)	15	25	27	29
	17	27	29	31
	19	29	31	33

※1混練水:セメントとフライアッシュの練混ぜに使う水
 ※2調湿水:造粒機に投入した混練物に散水して水分調整する水

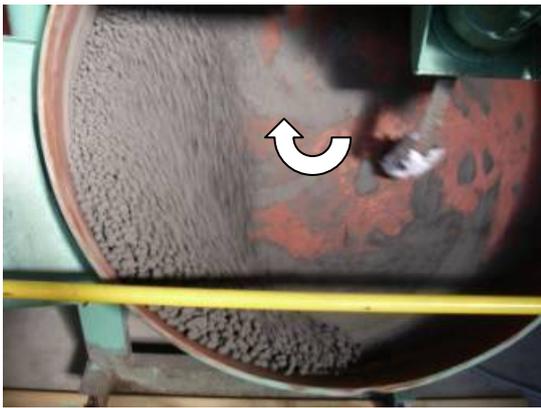
第3表 基本配合

セメント C (kg)	フライアッシュ F (kg)	水 W (kg)	混練水 W1 (kg)	調湿水 W2 (kg)
220	1,000	305~403	183~232	122~171

b. 試験条件

室内試験で用いた造粒機は、新日本海重工業(株)製パン型造粒機(パン直径1m)で、下記の条件で実施した。(第1図)

- ・パン傾斜角度: 55°
- ・パン回転速度: 12.8rpm
- ・造粒時間 : 10分



第1図 室内試験での造粒状況

c. 試験結果

検討ケース毎の造粒物の性状を第4表に、造粒物の性状毎の写真を第5表に示す。表より、造粒物が接着せず、残留粉体や団粒塊の発生が防止できる表乾状態の水粉体比は25~27%であり、混練水と調湿水の割合が異なっても、造粒物の状態に明瞭な差異は生じないことが確認できた。

第4表 試験結果その1

		調湿水W2/(C+F) (%)		
		10	12	14
混練水 W1/(C+F) (%)	15	25	27	29
	17	27	29	31
	19	29	31	33

凡例 造粒物の性状
 表乾状態
 表面に水の浮きが散見される
 表面に水が浮き出す

第5表 試験結果その2

	造粒物の写真			造粒物の性状
	25% ○(15,10)	27% ○(15,12)	27% ○(17,10)	
				表乾状態
	29% △(15,14)	29% △(17,12)	29% △(19,10)	表面に水の浮きが散見される
	31% ×(17,14)	31% ×(19,12)	33% ×(19,14)	表面に水が浮く

(2) 要求品質を満足する条件の整理

a. 検討ケース

要求品質を満足する条件を検討するため、水粉体比を25%の一定とし、セメント量(現状:220kg)、結合材(現状:なし)、養生条件(現状:自然養生)を変化させた第6表に示す検討ケースを実施した。養生方法は自然養生を基本とするが、C=220, 250, 280kgのケースについては、恒温恒湿養生(20℃, 60%)も実施した。結合材としてベントナイト3%を添加したC=220, 250, 280kgのケースについては、自然養生、恒温恒湿養生(20℃, 60%)、蒸気養生(65℃1時間保持後自然養生)、温風養生(65℃1時間保持後自然養生)の各養生方法を試行した。造粒物は28日材齢で、すりへり減量試験(JISA 1121に準拠)と圧かい強度試験を実施した。

すりへり減量試験は、ロサンゼルス試験機を用いて、JIS A1121のコンクリート用砕石及び砕砂の規格JISA5005に準じて実施した。

圧かい強度試験は、土木学会規準 JSCE-C505-2001「高強度フライアッシュ人工骨材の圧かい荷重試験方法」⁽³⁾を参考に実施した。試験では、造粒物の粒径と質量を計測し、圧縮試験機で造粒物に軸方向の荷重を作用させ、造粒物が圧かいるまでの最大荷重を割裂面の断面積で除して圧かい強度を算出した。但し、バラツキを考慮して1ケースにつき試料10個の平均値を用いた。

第6表 配合ケース

結合材	セメント C (kg)	フライアッシュ F (kg)	混練水 W1 (kg)	調湿水 W2 (kg)	養生条件			
					自然養生	恒温恒湿	温風養生	蒸気養生
無し	100	1,000	165	110	○			
	120		168	112	○			
	140		171	114	○			
	160		174	116	○			
	180		177	118	○			
	200		180	120	○			
	220		183	122	○	○		
	250		187.5	125	○	○		
	280		192	128	○	○		
V 3%*	220	1,000	183	122	○	○	○	○
	250		187.5	125	○	○	○	○
	280		192	128	○	○	○	○

V3%*: ベントナイト3%添加

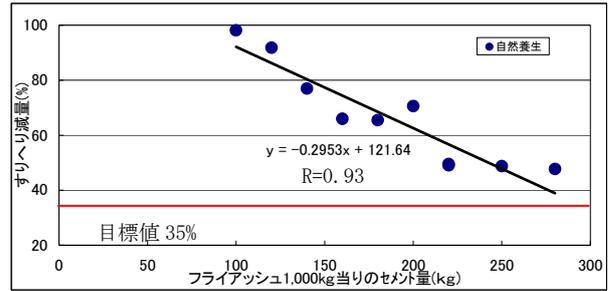
b. 試験条件

試験条件としては、(1)と同様の条件とした。

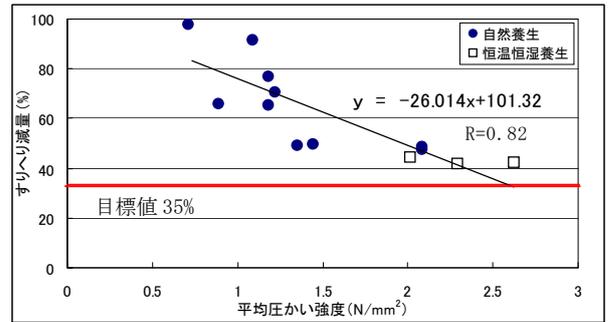
c. 試験結果

試験結果の例として、結合材を用いないケースにおけるすりへり減量とセメント量の関係を第2図に、すりへり減量と平均圧かい強度の関係を第3図に、平均圧かい強度とセメント量の関係を第4図に示す。室内試験における試験結果は次の通りである。

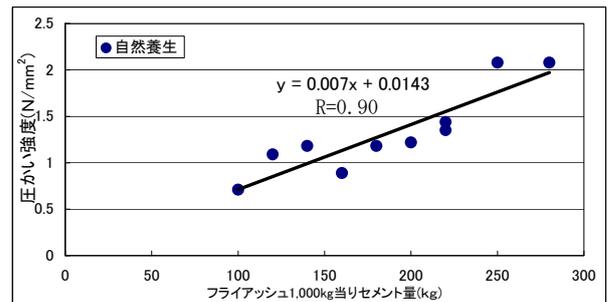
- すりへり減量とセメント量およびすりへり減量と平均圧かい強度 (28日材齢) に負の相関がある。また、平均圧かい強度 (28日材齢) とセメント量に正の相関がある。
- すりへり減量はセメント量を280kgまで増やしても、目標の35%以下を満足することはできなかった。(但し、実機試験では、パン径が大きいため、遠心力増加による転動圧密効果が期待できる。)
- ベントナイトを3%添加すれば、すりへり減量が2~3%低減することが確認できた。
- 自然養生 (積算温度 462°C・日)、温風養生 (積算温度 464°C・日)、蒸気養生 (積算温度 464°C・日) には、養生方法の違いによる差異は認められなかったが、恒温恒湿養生 (積算温度 840°C・日) の場合にはすりへり減量が自然養生より4~6%減少した。これは、恒温恒湿養生の場合は積算温度が他の養生に比べ倍近く大きいためであり、積算温度による養生管理が必要と考えられる。



第2図 すりへり減量 (28日材齢) とセメント量



第3図 すりへり減量と平均圧かい強度(28日材齢, n=10)



第4図 平均圧かい強度 (28日材齢, n=10) とセメント量

4. 実機試験

(1) 要求品質を満足する条件の整理

a. 検討ケース

現状の実機のセメント量220kgで水粉体比を現状の34%から25%に変更した第7表に示す基本配合で、自然養生と恒温恒湿養生の2ケースを実施した。造粒物は28日材齢で、すりへり減量試験 (道路用碎石の規格 JISA5001 に準拠) と圧かい強度試験を実施して、要求品質を満足する条件を整理した。

第7表 基本配合

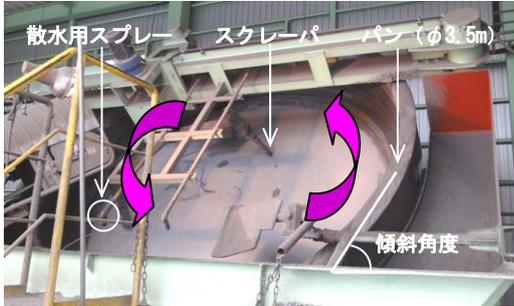
セメント C (kg)	フライアッシュ F (kg)	混練水 W1 (kg)	調湿水 W2 (kg)
220	1,000	183	122

b. 試験条件

実機試験に用いた造粒機は、新日本海重工業(株)製パン型造粒機 (パン直径 3.5m) で、下記の条件

で実施した。実機、製造した造粒物の写真を第 5 図、第 6 図に示す。

- ・パン傾斜角度：53°
- ・パン回転速度：8rpm
- ・造粒時間：5分（0.3m³当り）



第 5 図 実機

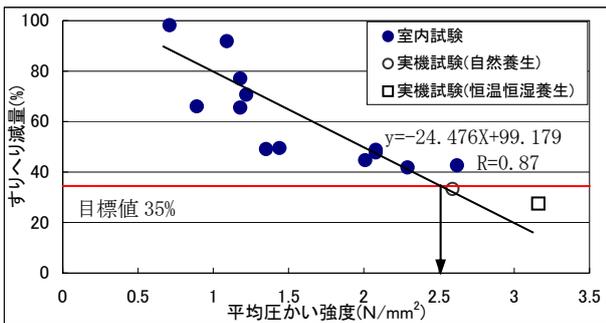


第 6 図 造粒物

c. 試験結果

すりへり減量と平均圧かい強度の関係を第 7 図に示す。実機試験における試験結果は次の通りである。

- ・実機試験では、自然養生、恒温恒湿養生共にすりへり減量 35%以下を満足する。
- ・すりへり減量 35%以下を満足する平均圧かい強度は約 2.5N/mm²である。
- ・同一セメント量の場合、実機試験は室内試験に対し、すりへり減量は 16~17%低下、平均圧かい強度は約 1.2N/mm²増加する。



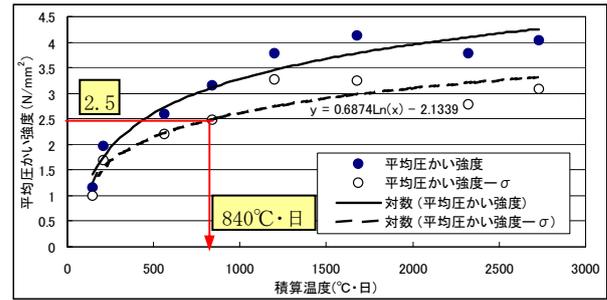
第 7 図 すりへり減量と平均圧かい強度の関係

5. 実用化検討

実用化にあたり、第 8 図に示す平均圧かい強度と積算温度の関係から、目標強度を満足する積算温度を定めて、その積算温度に必要な養生期間を求めた。

図より、目標圧かい強度を満足する積算温度は、圧かい強度のバラツキを考慮すれば 840°C・日となる。また、積算温度 840°C・日に到達する養生期間は、季節毎の月平均気温の最低値から算出すると、夏季(6~9月)は 30日、春秋(4, 5, 10, 11月)は 45日、冬季(1~3月, 12月)は 70日になる。なお、造粒物の積算温度 M は寒中コンクリートの積算温度⁽⁴⁾に準じて、 $M = \sum (\theta + 10) \cdot \Delta t$ で与える。ここで、 θ は造粒物の日平均気温を、 Δt は養生日数を表す。

なお、造粒物を用いた再生路盤材の現場施工状況を第 9 図に示す。



第 8 図 平均圧かい強度と積算温度の関係



第 9 図 再生路盤材現場施工状況

6. まとめ

石炭灰を利用して製造する再生路盤材は、水分を適正に減らし、適切な養生管理を行えば、通常コストで要求品質（すりへり減量目標 35%以下）を満足できることが確認できた。以下に今回得ら

れた知見を示す。

- ①室内試験において、適正な水粉体比（25～27%）と運転条件により、表乾状態の造粒物が製造でき、かつ、団粒塊と残留粉体の発生を防止できることが確認できた。また、造粒物のすりへり減量は積算温度による養生管理が必要である。
- ②実機試験において、現状のセメント量 220kg、自然養生の条件で、水分を減らすことにより、すりへり減量目標値 35%以下を達成できた。
- ③実用化において、造粒物の平均圧かい強度と積算温度の関係から、目標圧かい強度を満足する積算温度を定めれば、要求品質を満足する必要養生期間が求められる。

今後の課題として、実運用では造粒物の更なる水分管理のノウハウが必要であり、データを蓄積することにより、効率的な運用方法を検討していきたい。

最後に、共同研究実施にあたり、指導・助言をいただきました富山県立大学工学部環境工学科伊藤始准教授、北電技術コンサルタント(株)土木部水上隆司様に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 高島依里, 伊藤始, 橋本徹, 長山明: セメント混入量石炭灰造粒物のすりへり特性と強度特性に与える影響, 土木学会中部支部研究発表会, Vol-024, pp.515-516(2010)
- (2) 伊藤始, 高島依里, 橋本徹, 長山明: 石炭灰造粒物の強度特性に与える養生方法と混和材料の影響, 土木学会中部支部研究発表会, Vol-021, pp.493-494(2011)
- (3) 土木学会: コンクリート標準示方書, 規準編, pp.17(2007)
- (4) 土木学会: コンクリート標準示方書, 施工編, pp.210(2007)

(本論文は, No.356, 2011, 電力土木「石炭灰を利用した再生路盤材(造粒物)の研究」(社団法人 電力土木技術協会発行)より, 許諾の上転載しております。)