

V-18

石炭灰を使用したセメント安定処理材の練り上がり形態が強度に及ぼす影響

北海道電力(株) ○正 員 田中 則和
 北海道電力(株) 正 員 小林 仁
 北電興業(株) 正 員 安藤 睦
 北電興業(株) 下田 哲司

1. はじめに

現在、火力発電所から発生する石炭灰の約7割程度が再利用されているが、そのほとんどがセメント原料(粘土代替材)としての利用である。今後、全国的な石炭火力発電所の増設に伴い発生する石炭灰に対処するためには、リサイクルの観点からも、恒常的かつ大量利用可能な有効利用の技術開発が急務とされている。

石炭灰(フライアッシュ)に少量のセメントを添加混合し、最適含水比付近の転圧施工(以下「粉体状」と呼ぶ)により盛土材、路床路盤材などの土木構造物として使用するセメント安定処理技術がこれまでに開発されている。¹⁾

しかし、「粉体状」で施工した安定処理材の現場強度は、室内試験結果と比較して、混合精度や転圧エネルギーの相違等により小さくなり、セメント添加量は、室内試験で得られる目標強度に対応する量に対して、大幅に割り増して施工しているのが一般的である。

今回、「粉体状」と最適含水比の1.3倍程度に加水した状態の「団子状」と呼んでいる安定処理材について、室内試験および実規模大の混合プラントを使用した現場試験を実施した。その結果、従来の「粉体状」と比較して「団子状」の方が良好な結果が得られた。本報告はこれらの研究結果を紹介する。

2. 室内試験

2. 1 使用材料

試験に用いた石炭灰(フライアッシュ)は、苫東厚真発電所2号機から発生した灰である。表-1にフライアッシュの基本物性値を示す。

1999年に規定されたコンクリート用フライアッシュのJIS規格ではⅡ種に分類される。

粒度分布はシルト分が8割程度で、日本統一土質分類では、ML(シルト(低液性限界))に分類される。

一軸圧縮試験は、フライアッシュを最適含水比に加水して最大乾燥密度となるように締固めて供試体を作製したものであり、表-1に示すとおり材齢7日から28日にかけて自硬性による強度の増加が見られる。

しかしながら、路盤として使用する場合は、アスファルト舗装要綱(日本道路協会)のセメント安定処理工法の基準では、材齢7日で下層路盤=0.98MPa、上層路盤=2.9MPaとなっており、セメント安定処理等の改良工法により所定強度を確保する必要がある。

表-1 石炭灰の基本物性(炭種:DR)

二酸化けい素(%)	58.6
湿分(%)	0.0
強熱減量(%)	1.5
土粒子の密度(g/cm ³)	2.364
ブレン比表面積(cm ² /g)	2760
45μmふるい残分(%)	20
フロー値比(%)	108
活性度指数(材齢91日)(%)	89
活性度指数(材齢29日)(%)	97
pH	11.4
MB吸着量(電発法)(mg/g)	0.56
礫分 2~75mm(%)	0
砂分 75μm~2mm(%)	8
シルト分 5~75μm(%)	82
粘土分 5μm未満(%)	10
最大粒径(mm)	0.85
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.486
最適含水比(%)	19.0
一軸圧縮強さ(材齢7日)(MPa)	0.18
一軸圧縮強さ(材齢28日)(MPa)	0.29

Effect of Fresh Forms on The Strength of Cement Stabilized Coal Ash Material

by Norikazu Tanaka, Hitoshi Kobayashi, Mutsumi Ando, Tetsuji Shimoda

2. 2練り上がり形態（含水比）を変化させた強度試験

2. 2. 1試験方法

石炭灰のセメント安定処理を行う上で練り上がり形態（含水比）が強度へ及ぼす影響を調べるため、セメント添加量を一定として、含水比を変化させて供試体を作製し、一軸圧縮試験を行った。配合含水比の設定は試料の「突き固めによる土の締め固め試験」による最適含水比を1として、0.6～1.6まで変化させた。供試体の作製方法は、「粉体状」の試料は「安定処理土の突き固めによる供試体作製方法」により、突き固めできない試料は「安定処理土の締め固めをしない供試体作製方法」により行った。混合はJIS R 5201に規定されている「機械練り用練混ぜ機」（他の試験も同様）を使用し、練り混ぜ時間は5分間とした。セメント添加量は乾燥重量比で石炭灰の10%として普通ポルトランドセメントを使用し、供試体は気中養生（20℃、湿度90%）とした。

2. 2. 2試験結果および考察

配合含水比別の供試体作製時の乾燥密度と材齢28日の一軸圧縮強さを図-1に示す。

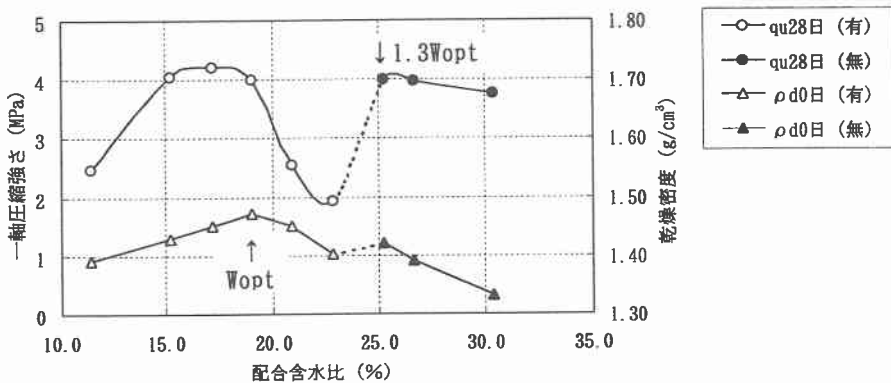


図-1 配合含水比と強度試験、乾燥密度試験結果

図-1の凡例の（有）と（無）は供試体作製時の締め固めの有無を表している。

締め固めをした試料は、最適含水比の0.9倍の含水比付近において圧縮強さがピークを示す。

締め固めをしない試料では、含水比が低いほど圧縮強さが大きくなる傾向が見られ、最適含水比の1.3倍の含水比付近においてピークを示し、「粉体状」の最大強度と同程度の圧縮強さが得られた。

実際の施工を考慮すると、「粉体状」は1E cで締め固めたものであり、現場での重機による転圧では乾燥密度が室内試験よりも低くなることにより、現場強度が室内強度よりも低くなるのがこれまでの研究で明らかになっている。一方、締め固め不要の形態は、転圧エネルギーの差による強度低下が無いことから、締め固め不要の形態の方が、同じセメント添加量で現場施工時における強度が高くなることが予想される。

2. 3団子状の設定試験

2. 3. 1試験方法

石炭灰（海外炭フライアッシュ）の有効利用拡大の課題の一つに、燃焼する石炭の種類やボイラーの特性等により品質が変動する石炭灰に対応できる配合設計手法の確立がある。例えば、苫東厚真発電所（1～2号機）産の石炭灰の最適含水比は15～45%の広範囲の幅を持っており、図-1の結果より全ての石炭灰の配合含水比を決定することはできない。そこで、より簡便な、2. 2で述べた締め固め不要の形態の含水比を設定するために、スランプ（h=15cm）試験（JIS A 1173：ポリマーセメントモルタルのスランプ試験）、ベーンせん断試験（D=15mm、H=30mmの簡易的なもの）とテーブルフロー試験（JIS A 6201のフロー値比試験による）を実施し、適切な試験方法の検証を行った。

2. 3. 2試験結果および考察

図-1 の試験結果より、締め固めをしない試料のうち、①強度が高いこと、②施工時にダンブトラックによる運搬が容易であること等を考慮して最適含水比（W opt）の1.3 倍の含水比を目標含水比とした。

図-2 に試験結果を示す。

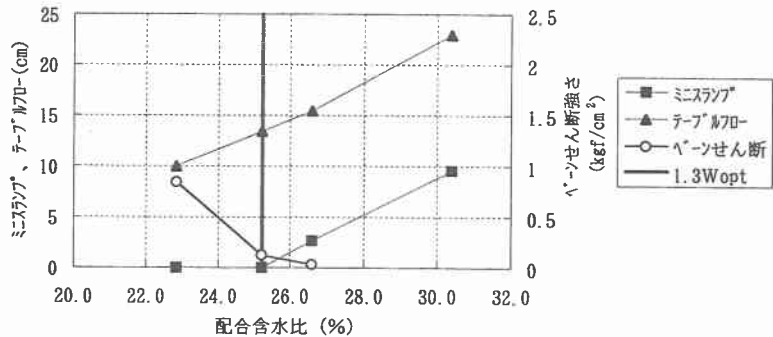


図-2 配合含水比適正試験結果

図-2 より、1.3 W opt 付近で配合含水比と試験値が直線関係にあるテーブルフロー試験が妥当と判断し、配合設定試験とした。

図-1 より 1.3 W opt より含水比が低下すると、粉体状態になり急激に強度が低下することから、現場施工によるバラツキも考慮して、テーブルフロー14 cmとなる含水比を配合含水比とし、形態から便宜上「団子状」と呼ぶこととした。

2. 4混合時間が強度に及ぼす試験

2. 4. 1 試験方法

「粉体状（最適含水比の0.9 倍の含水比）」と「団子状（テーブルフロー14 cmとなる含水比）」の2形態について、セメント添加量を乾燥重量比で石炭灰の5, 10, 20%とし、混合時間を加水した灰にセメントを加えてから10, 30, 60, 180 秒にそれぞれ変化させ、材齢7日における一軸圧縮試験を行った。

2. 4. 2 試験結果および考察

図-3 に試験結果を示す。「粉体状」をβ1、「団子状」をβ2としてグラフに示した。

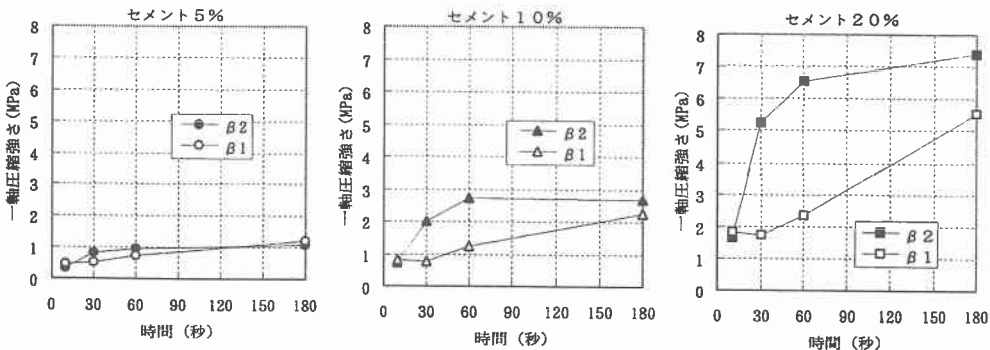


図-3 混合時間が強度に及ぼす試験結果

3つのグラフを比較するとセメント添加量が多いほど強度が増加している。また、「粉体状」、「団子状」とともに混合時間が長いほど強度が発現し、10秒のケースは180秒のケースと比較して、20～40%程度の強度しか発現していない。

「粉体状」と「団子状」について混合時間による強度差を比較するため、各試験ケースの β_2/β_1 （強度比）を図-4に示した。

この図より、混合時間10秒の全セメント添加量ケースとセメント添加量5%で混合時間180秒のケースを除き、 (β_2/β_1) 強度比は1以上であり、「団子状」の方が強度が高いことが分かる。

混合時間10秒では、材料を混合するにはあまりにも時間が短く、締め固めを行った「粉体状」のほうが強度が発現したと考えられる。しかし、30秒から180秒をみると、混合時間が短いほど、またセメント添加量が多いほど「団子状」の方が「粉体状」よりも強度が発現しており、「団子状」の方が混合効率が良い結果が得られた。

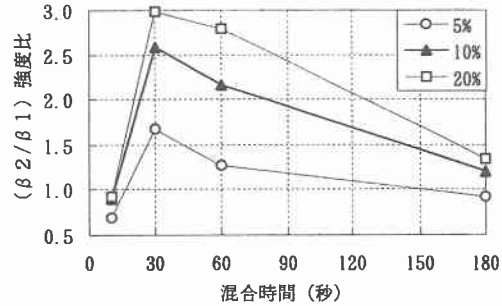


図-4 混合時間と (β_2/β_1) の関係

3. 現場試験

3. 1 試験概要

提案した「団子状」の実用性を検証するために、実規模大の連続式混合プラント（混合処理能力100 m³/h）を使用して、2つの灰種、セメント添加量2種類（75kg/m³と175kg/m³）、そして形態を「団子状」および「粉体状」の2種類の合計8ケースをそれぞれ、高さ1 m×幅10 m×長さ10 mの試験ベツを造成し、所定の材齢においてコアボーリングによるサンプリングを実施して強度試験をした。また、比較として、同じ配合による室内で混合し、養生した供試体の室内試験を行った。

3. 2 使用材料と試験方法

使用した石炭灰は苫東厚真発電所1号機および2号機から発生した石炭灰2種類である。石炭灰の基本物性を表-2に示す。1号灰は強熱減量が10%を超える「コンクリート用フライアッシュJIS」の規格外品である。2号灰はⅡ種に該当する。セメントは高炉B種セメントを使用した。

「団子状」は室内試験同様、各灰種・セメント添加量時のテーブルフロー試験を実施し、14±1.0cmとなる含水比を現場目標含水比とし、「粉体状」は各配合で突き固めによる締め固め試験を実施し、最適含水比×0.9倍となる含水比を現場目標含水比として、試験を実施した。

セメント添加量は各ケースで安定処理材料の仕上がり1 m³に対し、75kg（石炭灰の乾燥重量に対して約7%）と175kg（石炭灰の乾燥重量に対して約18%）となるように配合した。

施工方法は、「粉体状」は締め固め度90%以上が得られるように、普通ブルドーザー（15t）6回＋タイヤローラー（8～15t）2回を転圧回数とし、一層25cmで施工した。「団子状」はバックホウによる投入後、特殊バケツにて振動を与えて、一層1 mで仕上っている。

室内試験は「機械練り用練混ぜ機」を用いて5分間混合し、「粉体状」は1Ecで締め固め、「団子状」は「安定処理土の締め固めをしない供試体作製方法」で作製し、気中養生（20℃、湿度90%）した。

表-2 石炭灰の基本物性

	1号灰 (MO/OB)	2号灰 (WA)
二酸化けい素 (%)	49.7	66.8
湿分 (%)	0.04	0.00
強熱減量 (%)	14.1	1.6
比重 (g/cm ³)	2.16	2.15
ブレイク比表面積 (cm ² /g)	—	2850
45 μmふるい残分 (%)	30	17
フロー値比 (%)	—	102
活性度指数(材齢91日) (%)	—	82
活性度指数(材齢29日) (%)	—	98
pH	13.2	11.4

3. 3試験結果および考察

室内試験、現場試験およびそれらの強度比の結果を図-5～7に示す。

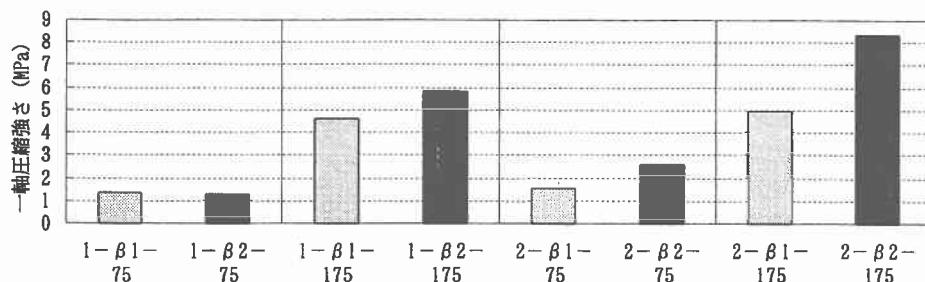


図-5 材齢28日の室内試験結果

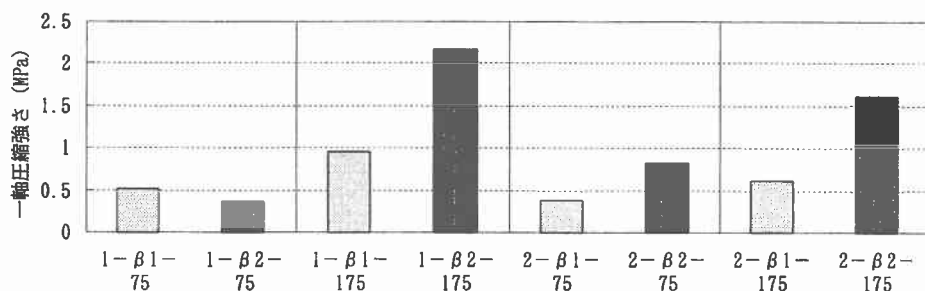


図-6 材齢28日の現場試験結果

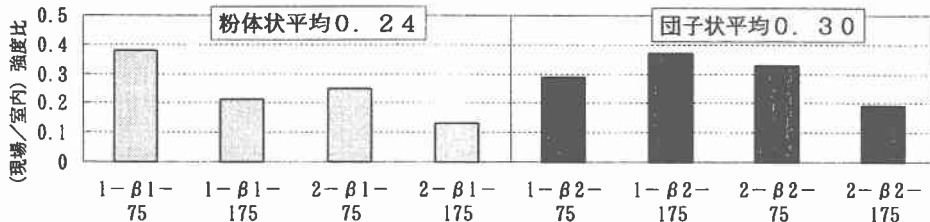


図-7 (現場/室内) 強度比結果

ケース名は(灰種)-(形態)-(セメント添加量)を表しており、1号灰の「団子状」のセメント添加量 75kg/m^3 は1-β2-75と表示している。

現場試験、室内試験共に、1号灰のセメント添加量 75kg/m^3 のケースは「粉体状」と「団子状」が同程度の強度が得られたが、他のケースは全て「粉体状」より「団子状」の方が強度が高い結果が得られた。

1m^3 当りの施工を考慮した場合に同じ強度を得るためには、「団子状」の方がセメント添加量が少なくて良く、さらに、「粉体状」は、ブルドーザーやタイヤローラー等による締め固めが必要となるのに対し、「団子状」はバックホウにより投入して振動を加えて仕上げる事ができ、必要重機数を減らし、サイクルタイムを短縮させることができるので、「団子状」の方が施工コストを低減できると考えられる。

1号灰と2号灰を比較すると、バラツキはあるが、ほぼ同程度の強度を示しており、「コンクリート用フライアッシュJIS」の規格外である1号灰でも十分に使用できる結果が得られた。

(現場/室内)強度比は、配合設計に必要な指標であり、改良対象土や固化材の種類や量および施工機械、養生条件等によって左右される係数で、一般に0.2～0.8を示す。²⁾ 今回の試験結果は「粉体状」が平均で0.24、「団子状」が0.30と、やや「団子状」の方が高いが、共に小さな値となった。これは、図-3に示したように混

合時間が少ないと、十分に混合したものと比較して強度が低くなることから、混合プラントの練り混ぜ時間が不十分であり、混合時間を長くする等の改善を図ることにより（現場／室内）強度比が高くなるものと考えられる。

また、現場施工および養生期間中は、平均気温 -3°C 、最高気温 $+8^{\circ}\text{C}$ 、最低気温 -16°C という厳しい寒さの中で実施したものであり、施工1日後に1mの覆土を実施したが、養生温度が室内（ $+20^{\circ}\text{C}$ ）と比較して極めて低く、強度発現も低くなったと推定でき、気温の高い時期に施工すれば、さらに（現場／室内）強度比が高くなるものと推察される。

表-3と図-8に室内で混合した試験結果を示す。

ケース名	一軸圧縮強度 (MPa)				
	σ_7	σ_{28}	σ_{91}	σ_{91}/σ_7	
2- β 1-75	1.04	1.52	1.83	1.76	β 1 平均 2.24
2- β 1-175	3.13	4.89	7.23	2.31	
2- β 2-75	1.40	2.54	3.34	2.39	β 2 平均 3.50
2- β 2-175	3.97	8.36	16.13	4.06	

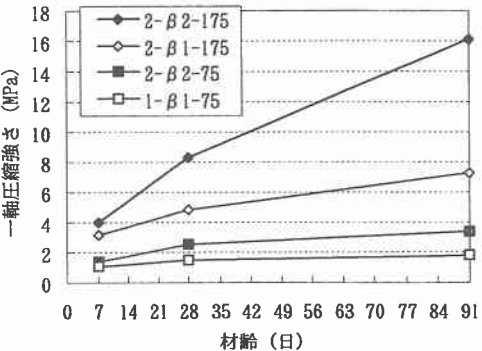


図-8 室内配合試験結果

各ケースとも、材齢の経過に伴い強度が増加しており、7日材齢と91日材齢を比較すると、約2～4倍強度が増加している。セメント添加量が多いほど、また、「粉体状」より「団子状」の方がその増加傾向が大きい。

石炭灰を利用したセメント安定処理材を利用する場合、構造物の供用開始日等を勘案した上で、設計材齢を長くすることにより、セメント添加量を低減することができ、より経済的な配合設計が可能となる。

4. まとめ

以上のように、今回新たな形態である、石炭灰を使用したセメント安定処理材の「団子状」の提案をし、室内試験および実規模大の混合プラントを用いた現場試験を実施した。本研究で得られた結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) 最適含水比の1.3倍程度の含水比である「団子状」は、0.9倍の含水比「粉体状」と比較して、室内試験および現場試験において同等以上の強度が得られた。施工方法等も勘案すると「団子状」の方がより経済的な形態となる。
- (2) 「団子状」の現場含水比はテーブルフロー試験で 14 ± 1.0 cmと設定することを提案した。
- (3) 混合時間により得られる強度に大きな差が見られ、「団子状」の方が混合効率が良い。
- (4) 石炭灰を使用したセメント安定処理材は「コンクリート用フライアッシュJIS」の規格外品でも、フライアッシュⅡ種と同程度の強度が得られ、十分に使用可能である。
- (5) 石炭灰を利用したセメント安定処理材を利用する場合、設計材齢を長くすることにより、セメント添加量を低減することができ、より経済的な配合設計が可能となる。

参考文献

- (1) 鈴木和男・松下啓郎：石炭灰の土木材料への利用－セメント安定処理した石炭灰（海外炭灰）の力学的性状と変動および強度推定について（完）一、北海道電力総合研究所研究報告第426号、1989
- (2) 社団法人セメント協会：セメント系固化工材による地盤改良マニュアル（第2版）、1994