

# フライアッシュを用いた固化盤の施工

林 透\*  
 田中 則\*\*  
 安藤 睦\*\*\*

**概要** 石炭灰を大量かつ新たに有効利用するための技術開発が喫緊の課題となっている中で、筆者らは、フライアッシュの特性を生かした「味噌状」の形態の固化盤造成技術を開発した。この技術は、フライアッシュに水(最適含水比の1.3倍程度)とセメントを混合し、施工条件に合わせて、バックホウのバケットで振動を加えたり、アスファルトフィニッシャーで仕上げることににより、固化盤を転圧不要で構築することができる。本文は、研究開発時の試験結果と苫東コールセンター(株)における施工結果について報告する。

**キーワード**：フライアッシュ、セメント安定処理、転圧不要、味噌状、リサイクル

## 1. はじめに

苫東コールセンター(株)は、隣接する北海道電力(株)苫東厚真発電所をはじめ一般ユーザーからの委託をうけて、海外炭の受入・揚炭から積み付け・保管・払出しまでの一連の取扱業務を行なっている。苫東コールセンターでは、苫東厚真発電所4号機(出力70万kW、平成14年6月運開)の計画に合わせた石炭取扱体制(現行：240万t/年、増設後：400万t/年)とするため、貯炭設備の増設工事を平成10年12月に着手し、平成13年10月の竣工に向けて鋭意進めている。

本報告は、増設工事に採用したフライアッシュの固化盤工法の開発と施工結果について報告する。

## 2. 工事概要

増設工事のうち土木工事は、揚炭設備のアンローダ基礎、貯炭場、石炭の積み付け払出しを行なうスタックリクレーマ・リクレーマ道床基礎(以下道床基礎と言う)、運炭コンベア基礎等の補強、改造および増設である。

図-1に苫東コールセンターの概要図を示す。

施工箇所は、浚渫土砂で埋め立てられた軟弱な造成地であることから、液状化対策の必要な地盤である。このため、道床基礎は「フライアッシュを用いた深層混合処理(FCDM)による改良体」と「フライアッシュのセメント安定処理による固化盤」の複合構造とし

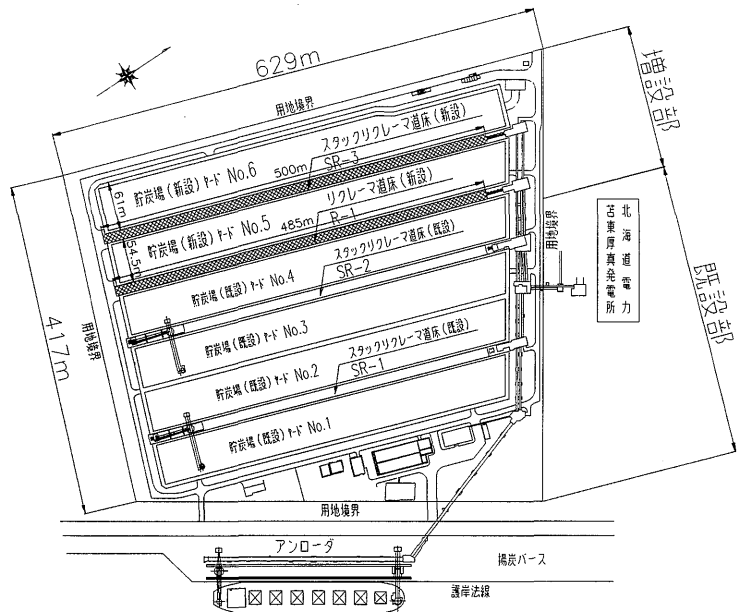


図-1 苫東コールセンターの概要図

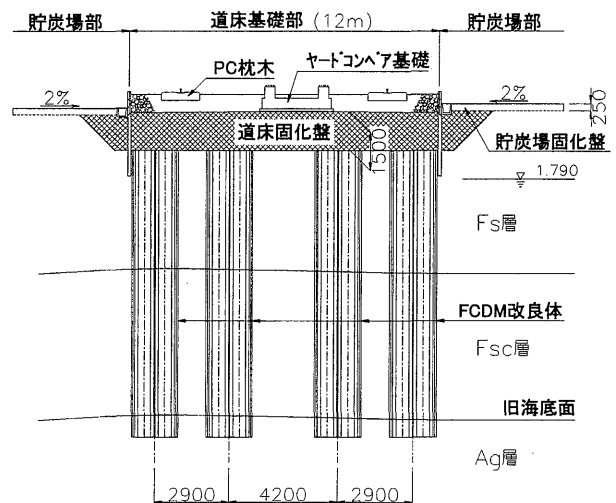
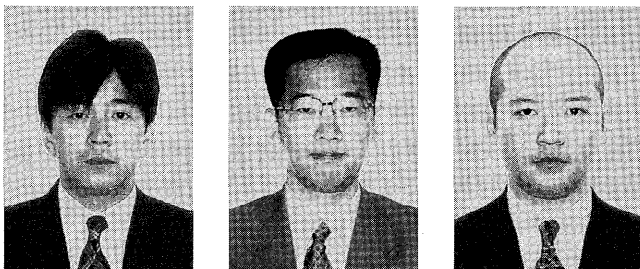


図-2 固化盤の断面図



林 透                      田中 則和                      安藤 睦

\*北海道電力(株) 土木部付 苫東コールセンター(株) 建設本部 土木G 係長 会員 tcc-kensetu@tcoal.hgn.or.jp  
 \*\*北海道電力(株) 総合研究所 土木グループ兼務石炭灰研究プロジェクトグループ 会員 nori@epmail.hepc.co.jp  
 \*\*\*北電興業(株) 土木部 主任 会員 ando-mutu@hokudenkogyo.co

た。また、貯炭場も同様にフライアッシュの固化盤工法を採用した。

図-2に固化盤の断面図を、表-1に固化盤の概要を示す。

既設貯炭場(昭和59年施工)のフライアッシュ固化盤は、「粉体状(最適含水比)」の安定処理材を敷均して転圧施工している。しかし、「粉体状」で施工した安定処理材の現場強度は、混合精度や転圧エネルギーの相違等から室内強度と比較して小さく、設計強度を満足させるためのセメント使用量が多くなる。

今回はセメントとの混合性が粉体状より優れた「味噌状」の形態を採用し、セメント使用量の軽減および品質の均一性・施工性の向上を図った。

### 3. フライアッシュの新しい練り上がり形態の開発

フライアッシュを用いたセメント安定処理の既存技術は、①転圧して締固める粉体状と②ポンプ圧送で打設するスラリー状の2種類がある。

当工事における既存形態の適応性を検討すると、スラリー状では貯炭場の勾配施工(2%)が困難であり、粉体状では前述したようにセメント使用量が多くなるためコスト削減効果が小さいと判断された。このため、安定処理材の練り上がり形態が「強度発現」や「混合性」に与える影響について試験を行った。

#### (1) 練り上がり形態と強度の関係

安定処理材の練り上がり形態(含水比)と強度の関係を把握するため、最適含水比(以下 $W_{opt}$ と言う)の0.6倍から1.6倍の範囲において安定処理材の一軸圧縮試験を実施した。試料はフライアッシュ(コンクリート用フライアッシュのJIS規格ではⅡ種)に乾燥質量比で10%のセメントを添加してモルタルミキサで5分間混合した。供試体は「安定処理土の突き固めによる供試体作製方法」とし、突き固めが不可能である試料は「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、材齢28日まで気中(20℃、湿度90%)で養生した。

図-3に含水比と圧縮強さの関係を示す。

締め固めた試料は $W_{opt}$ の0.9倍(以下 $0.9W_{opt}$ と言う)において強度がピークを示す。一方、締め固めない試料は含水比が低いほど強度が増大し、 $W_{opt}$ の1.3倍(以下 $1.3W_{opt}$ と言う)で締め固めた試料の最大強度と同程度の強度が得られた。

実際の施工を考慮すると、締め固めた「粉体状」の室内試験は1Ecで締め固めたものであり、現場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り、現場強度が室内強度よりも低くなる。一方、締め固めない試料は、転圧エネルギーの差による密度低下が無いことから、同じセメント添加量であれば現場施工時における強度が「粉体状」より高くなることが予想された。

なお、 $1.3W_{opt}$ の形態は極めて硬いスラリー状であり、イメージ的に「味噌」のような形態であることから便宜上以下「味噌状」と言う。また、「味噌状」の形態を流動性で示すとテーブルフロー値(JIS A 6201:フロー値比試験)で14.0cmである。

#### (2) 練り上がり形態と混合性の関係

微粉末であるフライアッシュは、攪拌混合度の劣る現場混合において精度良く混合することが難しい。このため、「粉体状( $0.9W_{opt}$ )」と「味噌状(テーブルフロー値14cm)」の混合性を比較するため、予め加水したフライアッシュとセメントとの混合時間を10, 30, 60, 180秒と変化させ、材齢7日における一軸圧縮試験を行った。セメント量は乾燥質量比で5, 10, 20%とした。

表-1 固化盤の概要

項目	道床固化盤	貯炭場固化盤
設計基準強度(材齢91日)	1.47N/mm <sup>2</sup>	0.59N/mm <sup>2</sup>
施工断面(幅×延長×厚)	12m×500m×1.5m×2条	60m×520m×0.25m×2面
固化盤の施工量	19,215m <sup>3</sup>	56,631m <sup>3</sup>
フライアッシュ利用量	26,200 t	20,300 t

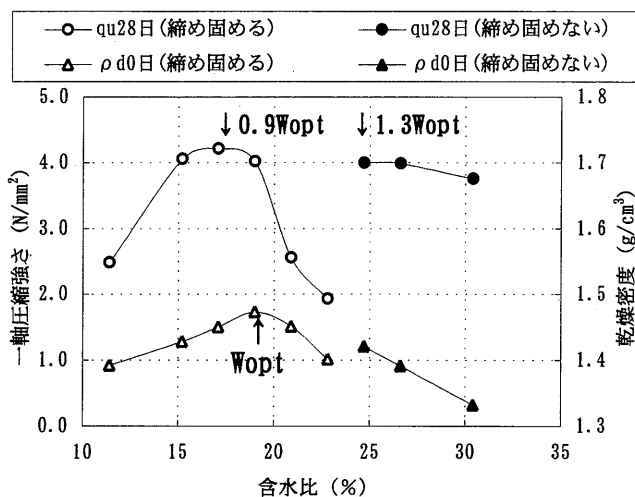


図-3 含水比と圧縮強さの関係

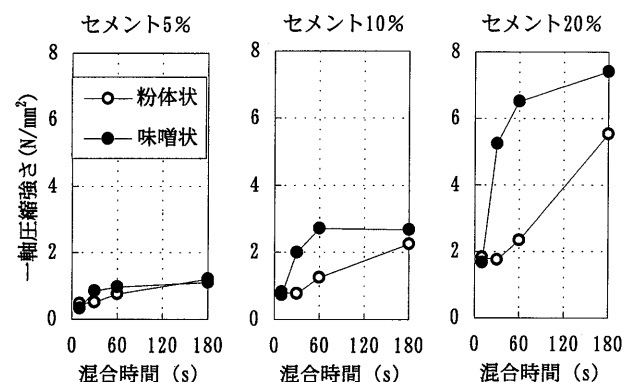


図-4 混合時間と圧縮強さの関係

図-4に混合時間と圧縮強さの関係を示す。

「粉体状」は混合時間の増加にあわせて強度が徐々に増加するのに対して、「味噌状」は30~60秒の短い混合時間で180秒の強度に大きく近づいていることから、「味噌状」の形態は混合効率が良いと言える。また、その傾向は混合時間が短いほど、セメント添加量が多いほど、顕著である。

#### (3) 現場確認試験

提案した「味噌状」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100m<sup>3</sup>/h)を使用して現場試験を実施した。試験ケースは、2灰種×2セメント添加量×2形態(「味噌状」と「粉体状」)の合計8ケースとし、高さ1m×幅10m×長さ10mの試験ベットを造成した。また、比較のため現場と同じ配合による室内試験を実施した。

使用したフライアッシュは苫東厚真発電所1号機および2号機から発生したフライアッシュであり、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。セメントは高炉セメントB種を使用し、添加

量は安定処理材の仕上がり 1 m<sup>3</sup>に対し、75kg(フライアッシュの乾燥質量に対して約7%)と175kg(フライアッシュの乾燥質量に対して約18%)となるように配合した。「味噌状」は各配合で安定処理材のテーブルフロー値が14±1.0cmとなる含水比を目標含水比とし、「粉体状」は各配合で突き固めによる締め固め試験の最適含水比×0.9倍となる含水比を目標含水比とした。

施工方法は、「粉体状」が普通ブルドーザー(15t)6回+タイヤローラー(8~15t)2回の転圧回数とし、締め固度を90%以上で管理して一層25cmの4層で施工した。「味噌状」はバックホウによる投入を行い、バケットによる振動を加え、一層1mで仕上げた。

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「安定処理土の突き固めによる供試体作製方法」で作製し、「味噌状」は「安定処理土の締め固めをしない供試体作製方法」で作製した。供試体は所定材齢まで気中養生(20℃, 湿度90%)した。

図-5に同灰種、同セメント量における各形態の平均現場強度を示す。

「味噌状」は「粉体状」の約2.1倍の強度発現を示した。また、施工状況から「味噌状」は、必要重機数の軽減やサイクルタイムの短縮が見込め、施工コストの低減が可能と判断された。

図-6に同形態、同セメント量における室内および現場の各灰種の平均強度を示す。

1号灰と2号灰ではほぼ同程度の強度を示しており、JIS規格外であっても安定処理材として十分に使用できると判断された。

図-7に2号灰の室内試験結果を示す。

特徴として材齢28日から91日における強度の伸び率が大きいことが判る。一般的に普通コンクリートの伸び率が約1.2倍<sup>5)</sup>程度であるのに対して、フライアッシュの安定処理材は「粉体状」が1.4倍と大きく「味噌状」では1.8倍とさらに大きい結果が得られた。これより、フライアッシュの安定処理材を使用する場合は、設計材齢を長期に設定することがセメント材料費の低減に有効であると言える。

また、材齢28日から91日において強度発現の顕著な「味噌状」のセメント175kg/m<sup>3</sup>のケースは、湿潤密度が変化しないにもかかわらず、含水比の低下や乾燥密度の増加がみられる。このことは、水和やポズラン反応により水が結晶水として取りこまれて、強度が大きく伸びたことを裏付けるものである。

#### 4. 固化盤の施工

##### (1) 配合

苫東厚真発電所から発生するフライアッシュは、燃焼する石炭の種類やボイラの違いで、灰種が35種類(1年間)を超え、施工に使用するフライアッシュも15種類を越えると予想された。また、フライアッシュは、種類によって強度発現や物性値が異なることから、「味噌状」の配合は次の考え方で決定した。

表-2に配合の一例を示す。

- ① 施工におけるハンドリングを確保するため、全ての灰種において流動性を一定とし、含水比は灰種によって適時変更する。
- ② 強度発現の小さい灰種で配合試験を実施し、セメント配合量を安全側に決定する。
- ③ 若材齢における現場強度を確認し、適時設計定数の見直しを行い、セメント量を見直す。

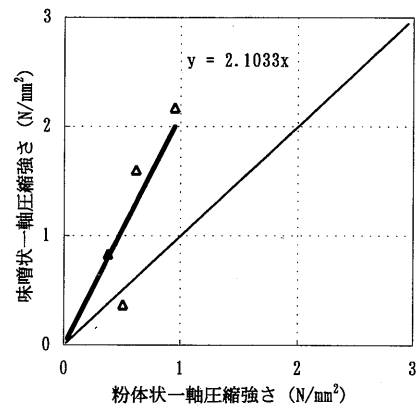


図-5 各形態の平均現場強度(材齢28日)

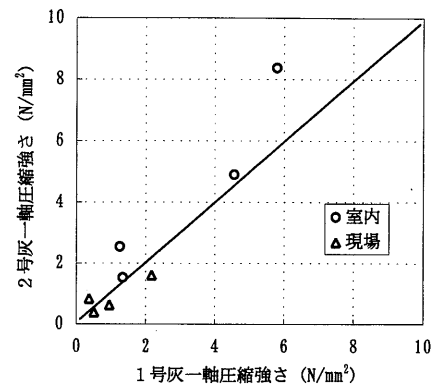


図-6 各形態の平均現場強度(材齢28日)

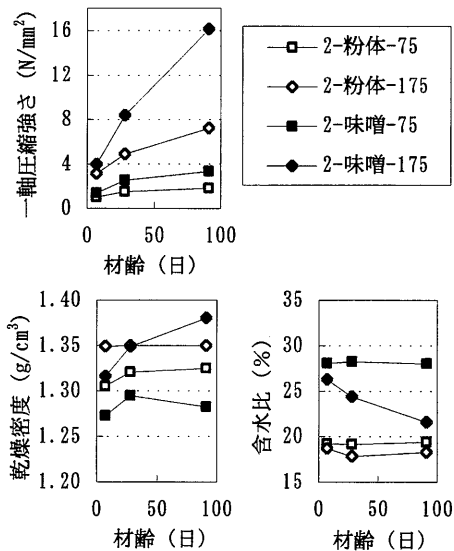


図-7 室内試験結果

表-2 配合の一例

施工箇所	灰種	配合割合(1 m <sup>3</sup> 当たり)			安定処理材		
		フライアッシュ	セメント	水	W	$\rho_t$	$\rho_d$
		kg	kg	kg	%	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>
道床基礎	1号	972	130	465	42.2	1.567	1.102
	2号	1040	130	425	36.3	1.595	1.170
貯炭場	1号	994	85	470	43.6	1.549	1.079
	2号	1070	85	425	36.8	1.580	1.155

##### (2) 混合プラント

フライアッシュの混合にあたっては、既存の土質改良等に使用されている連続式2軸パドルミキサの混合プラントに次の改良を加えて、安定処理材の品質の均一化を図った。

図-8に混合プラントの模式図を示す。

- ① フライアッシュを一定量で切出すための「インバータ制御式ホッパー」の設置
- ② フライアッシュの水分量をリアルタイムで測定するための「赤外線水分計」の設置
- ③ 均一に加水するための「シャワー状の加水設備 (40t/h)」の設置
- ④ 攪拌効率を向上させるための「2次ミキサ (連続2軸パドルミキサ)」の設置

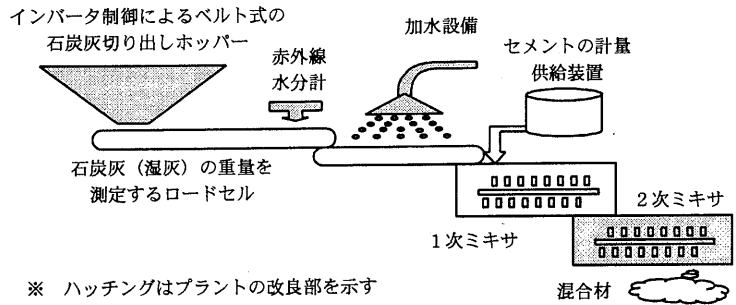


図-8 混合プラントの模式図

(3) 品質管理

品質管理試験は、配合決定に必要なフライアッシュの性状と、練上りの品質管理に必要な安定処理材のフレッシュ性状の試験を実施した。

表-3に試験項目と試験頻度を示す。

表-3 品質管理試験項目と頻度

	試験項目	試験頻度
フライアッシュ	密度 (JIS A 6201)	1回/1日
	密かさ比重	〃
	pH (JSF T 211)	〃
安定処理材	含水比	2回/1日以上
	テーブルフロー (JIS A 6201)	〃
	湿潤密度 (JIS A 1104)	〃

密かさ比重の測定は、長瀧らの方法<sup>4)</sup>に準じて落下回数を1000回とした。

含水比の測定は、電子レンジを用いて5分程度の乾燥を3回から5回実施し、質量が変化しなくなるまで乾燥させた。

(4) 固化盤の施工方法

道床基礎の施工は、安定処理材を混合プラントからダンプトラックで運搬し、幅16mの両側からバックホウ4台で打設した。打設高は75cmの2層、日施工量は平均で420m<sup>3</sup>とした。表面の仕上げは、バックホウのバケットで味噌状の表面を上下に揺らして波立たせることで締固めと平坦性を確保した。流動性はテーブルフロー値で14±1cmとした。

写真-1に道床基礎の施工状況を示す。

貯炭場の施工は、味噌状の形態が振動で流動することから、横断勾配(2%)を確保するために、施工性や平坦性の優れているアスファルトフィニッシュ(幅3~6m)を選定した。施工は、高さ0.25mを1層とし、流動性はダンプアップ等の施工性を向上するためにテーブルフロー値で15cm~16cmと道床固化盤より柔らかめとした。

写真-2に貯炭場固化盤の施工状況を示す。

5. 施工結果

(1) フライアッシュ性状と安定処理材のフレッシュ性状

これまでの知見から、密かさ比重は「粉体状の最適含水比」や「スラリー状の一定の流動性における含水比」などと良い相関関係が示されている。

図-9にテーブルフロー値15±1cmにおける、フライアッシュの密かさ比重と安定処理材の含水比の関係を示す。

当施工においても高い相関関係が得られたことから、新灰種など事前に室内配合試験を実施できないフライアッシュの利用は、この関係を利用して含水比を推定し、施工に利用した。



写真-1 道床基礎の施工状況

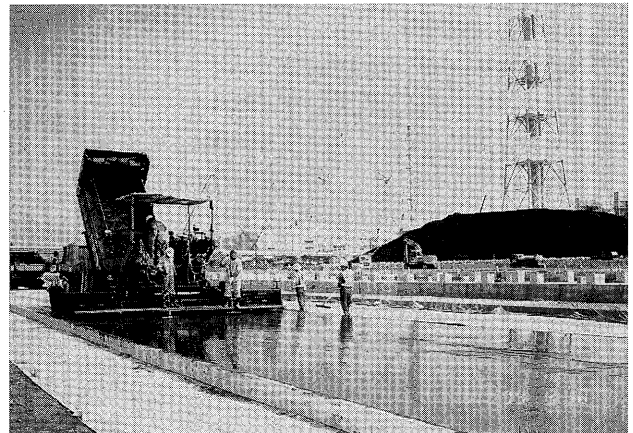


写真-2 貯炭場固化盤の施工状況

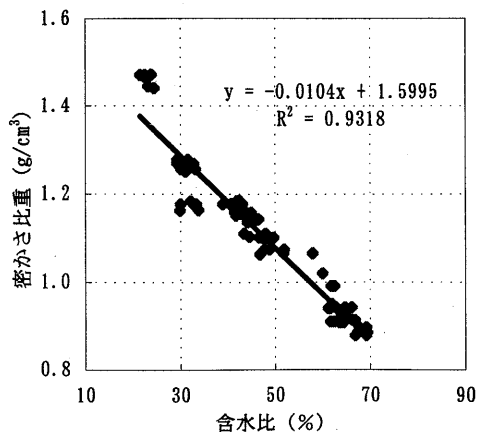


図-9 密かさ比重と含水比の関係

(2) 道床固化盤の強度

セメント150kg/m<sup>3</sup>で施工を開始し、材齢28日における現場強度を確認したところ、最低値が6.3N/mm<sup>2</sup>と、材齢91日の現場配合強度

の4.3N/mm<sup>2</sup>を上回っていた。このため、セメント量を130kg/m<sup>3</sup>に見直し、残りの施工を実施した。

図-10にセメント量を130kg/m<sup>3</sup>で施工した材齢91日の現場強度を示す。

道床基礎の現場平均強度は5.55N/mm<sup>2</sup>であり、最低値でも1.9N/mm<sup>2</sup>と設計基準強度の1.47N/mm<sup>2</sup>を満足している。

図-11に施工に最も多く使用した灰種の、現場、プラント、室内の各条件における一軸圧縮強さと材齢の関係を示す。

現場強度が室内強度やプラント強度を上回っていることが判る。この原因として、固化盤の打設後の養生温度が高かったものと推測されたことから、セメント量150kg/m<sup>3</sup>の施工中に、道床固化盤の高さ1.5mの断面で、上面から10cm、中心部、下面から10cmの3深度の温度と外気温度を測定した。

図-12に温度測定結果を示す。

固化盤の打設から3～4日目に固化盤の中心部が最大63℃まで上昇し、固化盤の上面でも打設から4週間は30℃を越えていた。これらのことから、水和熱で養生効果が促進されていたものと言える。

(3) 2次ミキサの効果

セメント量130kg/m<sup>3</sup>の施工中に、1次ミキサと2次ミキサの出

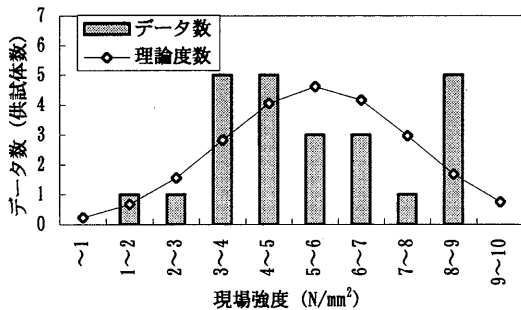


図-10 現場強度(材齢91日)

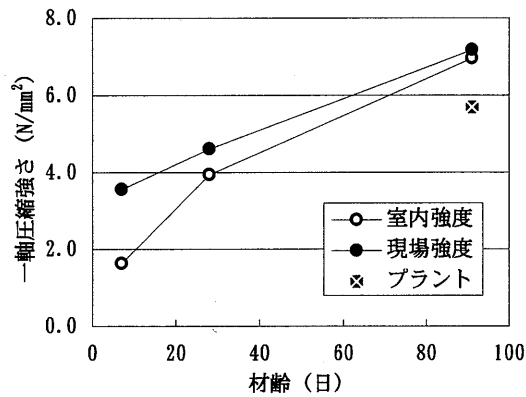


図-11 一軸圧縮強度と材齢の関係

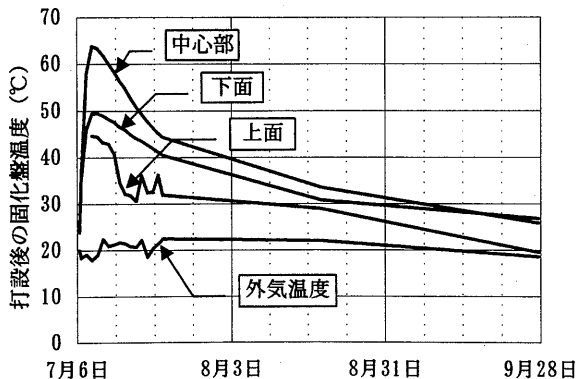


図-12 温度測定結果

口でそれぞれ10試料(5分間隔)を採取して供試体を作製し、室内で28日間養生したものの一軸圧縮試験を実施した。

表-4に一軸圧縮試験結果を示す。

2次ミキシングの平均強度は1次ミキシングの2.7倍であり、最小値でも1次ミキシングの最大値を上回っていた。また、変動係数も0.16と1次ミキシングの0.27に対して小さい。これらのことから、2次ミキサの増設は、強度の増加やバラツキの抑制に極めて効果的であったと言える。

表-4 プラント強度

	単位	1次ミキサ	2次ミキサ	2次/1次
平均値	N/mm <sup>2</sup>	1.98	5.46	2.76
最大値	N/mm <sup>2</sup>	2.81	6.64	2.36
最小値	N/mm <sup>2</sup>	1.26	3.64	2.89
標準偏差		0.54	0.86	1.59
変動係数		0.27	0.16	0.59

6. まとめ

味噌状の形態を用いたフライアッシュの固化盤工法をまとめると次の通りである。

- ① 混合効率に優れており、長期強度の伸びが大きいことからセメント材料費の削減に有効であった。
- ② 一般土工機械で施工できる流動性であることから、打設費の削減に有効であった。
- ③ 「コンクリート用フライアッシュJIS」の規格外品でも十分に使用可能であった。
- ④ 2次ミキサの増設は、強度の増加やバラツキの抑制に極めて効果的であった。

7. おわりに

廃棄物として処理されている石炭灰を有効利用することは、発電コストの低減はもとより、「循環型社会」の構築を目指す観点からも重要なことである。

今回開発した技術は、石炭灰の球形で微細粒子という性質が生かされたものであると考えられ、今後は、フライアッシュ固化盤が軽量かつ低い透水性である特性も生かした新たな用途の開拓を進めて行きたい。

最後に、ご協力頂いた試験関係者、工事関係者の方々に深く感謝の意を示す次第である。

参考文献

- 1) 安藤 陸;小林 仁;田中則和. 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(室内試験). 土木学会第55回年次学術講演会概要集. 2000(投稿中)
- 2) 下田哲司;田中則和;安藤 陸. 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(現場試験). 土木学会第55回年次学術講演会概要集. 2000(投稿中)
- 3) 林 透;朝倉弘行;安藤 陸. 石炭灰を用いた固化盤工法の施工. 土木学会第55回年次学術講演会概要集. 2000(投稿中)
- 4) 長瀧重義他. フライアッシュコンクリートの品質管理手法に関する研究. コンクリート工学年次論文報告集. 1987. p.223-228.
- 5) 財団法人コンクリート協会. コンクリート便覧. 第2版. 1996.