

フライアッシュのエアミルクへの適用性

小野寺 林 齋藤 深坂 敏樹
 齋藤 深坂 敏樹 則
 収透樹

概要 軟弱地盤の盛土や裏込などに利用されている気泡混合軽量土のうち、砂を用いないエアミルクは、砂を用いるエアモルタルと比べ軽量であるが、単位セメント量が多くなり、フライアッシュの置換利用によるコスト低減が期待できる材料である。そこで、フライアッシュ置換率や灰種がエアミルクの配合や強度に与える影響を検討し、フライアッシュがエアミルクのセメント置換材料として十分適用可能なことを確認した。本稿では、フライアッシュの適用性確認のために実施した各種室内試験の概要と、実工事への適用事例を紹介する。

キーワード：フライアッシュ、気泡混合軽量土、エアミルク、湿潤密度、フロー値

1. まえがき

北海道電力(株)における石炭灰の発生量は、ここ数年60万t/年前後で推移し、平成12年度実績では638千t/年となっている。有効利用率は徐々に増加し、平成12年度は87%に達しているが、なお81千tの石炭灰は有効利用されずに陸上埋立て処分している。また、現状有効利用の大半を占めるセメント原料(粘土代替)および炭坑充填盛土材への利用量は今後大きな拡大が望めず、リサイクル促進や灰処理費用の低減の観点からも、新たな大量利用技術の開発が急務となっている。

北海道電力(株)は、平成8年度総合研究所に石炭灰研究プロジェクトグループを設置し、以来北海道の地域特性を考慮した利用技術開発に取り組んできている。これまでに、石炭灰を利用した海上築堤工法、固化盤工法、建設汚泥再生利用などの技術を実用化した他、現在は道路・港湾等の不良土改良や道路路盤材への固化盤利用、高流動コンクリートへの利用に関する研究等に取り組んでいる。一方、北海道開発局では、建設コスト縮減や資源の有効活用の観点から、フライアッシュ等のリサイクル材を積極的に有効利用している。

本稿では、これら取組みの一環として実施した、気泡混合軽量土へのフライアッシュの適用性確認に向けて各種室内試験の結果と、試験結果をもとに採用された実工事の事例を紹介する。

2. 検討の経緯

原料土(砂質土)とセメント、水および気泡、またはセメント、水および気泡の配合割合を変化させ、強度、密度を任意に調整できる軽量の材料に、気泡混合軽量土がある。

気泡混合軽量土は、軽量性、施工時の流動性、硬化後の自立性などの特徴を有し、盛土荷重の低減、敷均し・締固めの省力化、狭小部の充填、鉛直盛土の施工などが可能となることから、軟弱地盤における盛土や裏込、急傾斜地の盛土などに利用されている。

早くから気泡混合軽量土の活用を始めた日本道路公団は、湿潤密度0.52~1.17g/cm³の範囲に対し、 $q_{u28} = 300 \sim 1,000 \text{ kN/m}^2$ の目標強度が得られる暫定配合表¹⁾を作成している。

図-1は、暫定配合表における各種配合の湿潤密度と目標強度との関係を示したものである。また図-2は、単位セメント量と目標強度との関係を示したものである。気泡混合軽量土の強度は密度と大きく関連し、よ

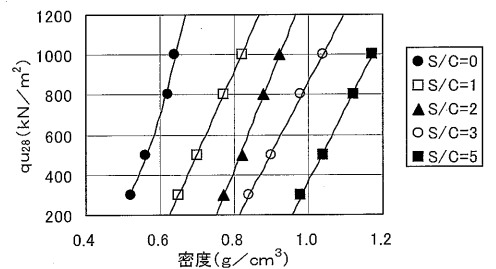


図-1 各種配合の密度と目標強度

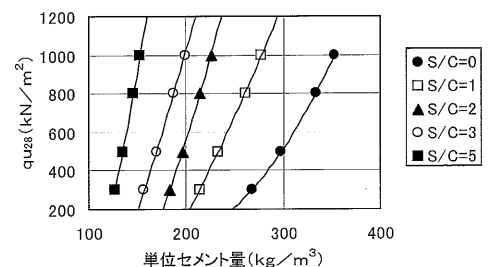
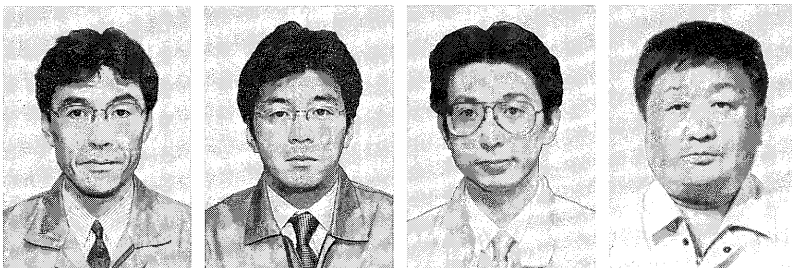


図-2 単位セメント量と目標強度



小野寺 収 林 透 齋藤 敏樹 深坂 敏則

*北海道電力(株) 総合研究所 主幹研究員 土木グループリーダー兼務石炭灰研究プロジェクトグループ 会員 chirai@epmail.hepco.co.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 h-toru@epmail.hepco.co.jp
 ***北電興業(株) 土木部 副長 会員 toshiki-sait@hokudenkogyo.co.jp
 ****北海道開発局 函館開発建設部 瀬瀬道路総合事業所 副長 fukasaka-t22aa@hkd.milt.go.jp

り軽量で強度を確保するためには、砂セメント質量比S/Cを小さくすれば良いが、この場合単位セメント量が多くなる。

フライアッシュのポズラン効果を活かし、セメントの置換利用ができれば、材料費の低減が可能となり、フライアッシュの新たな利用方法拡大が期待できることから、S/C=0のエアミルクについて、フライアッシュの適用性を検討することとした。

3. フライアッシュの適用性検討試験

(1) フライアッシュ置換率の検討

フライアッシュ置換率が強度に与える影響を調べるため、室内試験を2シリーズ実施した。シリーズ1は同一灰種でエアミルクの湿潤密度を3水準(0.6, 0.8, 1.0g/cm³)に設定し、それぞれの水準でフライアッシュ置換率を変化させたもの、またシリーズ2は暫定配合表におけるK0-5配合の条件($q_{u28}=500\text{kN/m}^2$, 湿潤密度=0.56g/cm³)を満足するフライアッシュ置換率を、3灰種で確認したものである。

使用材料を表-1に示す。エアミルクは、セメント、フライアッシュおよび水をモルタルミキサーで混合したミルクに、発泡ガンに起泡剤希釈液と圧縮空気を送って排出された気泡を混合して製造した。発泡ガンは写真-1に示すように筒型の形状で、内寸φ25mm、L320mmの内部にφ3mmのガラスビーズを充填したものである。各ケースとも所定の密度およびフロー値(180±10mm)が得られるよう、空気量と単位水量を調整した。

表-1 使用材料

材 料	種 類	品 質		
		比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	密 度 (g/cm ³)
セメント	高炉B種	3,870	1.7	3.04
フライアッシュ	A(国内炭FA)	3,480	0.8	2.21
	B(海外炭FA)	2,850	1.6	2.15
	C(海外炭FA)	2,710	1.6	2.12
	D(海外炭FA)	2,770	2.1	2.14
起泡剤	硫酸エステル塩系アニオン界面活性剤			1.00

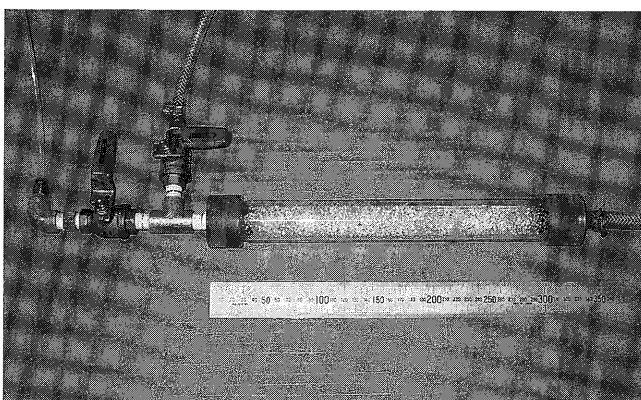


写真-1 発泡ガン

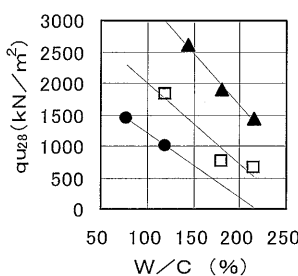
a. シリーズ1

配合試験結果を表-2に示す。なお、フライアッシュは、表-1に示したAを使用した。

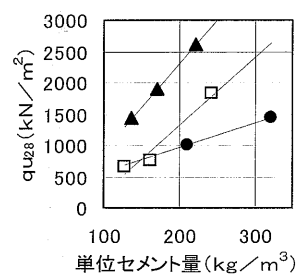
強度試験結果を図-3および図-4に示す。フライアッシュ混合エアミルクの強度は、水セメント比および単位セメント量と良い相関を示し、目標強度を得るのに必要なセメント量が目標密度毎に求められることが分かった。

表-2 シリーズ1の配合試験結果

湿潤密度 (g/cm ³)	F/ (C+F) (%)	単位量(kg/m ³)				空気量 (%)
		C (BB)	F	W	起泡剤	
0.6	0	323	0	274	1.0	64.5
	33	211	106	278	1.0	63.0
0.8	50	243	243	312	0.8	52.0
	67	162	325	312	0.8	51.0
	75	127	381	294	0.8	51.5
1.0	67	222	444	336	1.0	41.0
	75	170	511	323	1.0	41.0
	80	137	550	311	1.0	41.5



● ρ=0.6 □ ρ=0.8 ▲ ρ=1.0



● ρ=0.6 □ ρ=0.8 ▲ ρ=1.0

図-3 水セメント比と強度 図-4 単位セメント量と強度

表-3 シリーズ2の配合試験結果

ケース	単位量(kg/m ³)				空気量 (%)	F/ (C+F) (%)
	C (BB)	F	W	起泡剤		
BB	295	0	263	0.54	65.0	0
C160	160	133	256	0.56	64.0	45
C200	200	95	261	0.56		32
C240	240	60	264	0.57		20

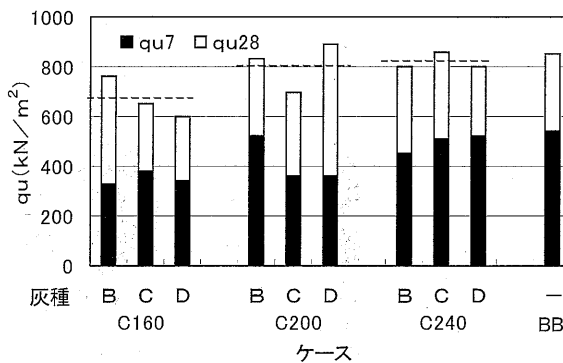


図-5 シリーズ2の強度試験結果

b. シリーズ2

シリーズ1の結果により、K0-5配合の条件($q_{u28}=500\text{kN/m}^2$, 湿潤密度=0.56g/cm³)を満足する単位セメント量は、200kg/m³前後と想定されたことから、単位セメント量を3水準(160, 200, 240kg/m³)に変化させ、表-1に示したB, C, Dの3灰種を用いて配合および強度試験を実施した。

配合試験結果を表-3に示す。灰種の違いによる配合への影響はほとんどなく、3灰種ともほぼ同一の配合で、所定のフレッシュ性が得られたことから、表-3のフライアッシュ使用ケースの配合は、灰種Dのものを代表として記載している。

強度試験結果を図-5に示す。シリーズ1の結果と同様強度は単位セメント量と関連し、C ≥ 200kg/m³以上であれば、K0-5配合の室内配合強度($q_{u28}=700\text{kN/m}^2$ ~現場での材料や施工のばらつきを考慮して、200kN/m²割増し)を満足することが確認できた。ま

たC=200kg/m³の場合F=95kg/m³となり、結果として所定の目標強度に対しフライアッシュを30%程度までは置換可能なことが分かった。灰種による強度のばらつきについては、さらに多品質の灰種により確認することとした。

(2) 灰種が配合および強度に与える影響

フライアッシュの品質変動がエアミルクの配合および強度に与える影響を把握するため、C=200kg/m³に固定して表-4に示す11灰種を使用して確認試験を実施した。なお、セメント、起泡剤および表中の灰種A、B、Dについては、表-1に示したものと同一である。

表-4 使用フライアッシュ(灰種による影響確認試験)

灰種	比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	活性度指数 (%)	フロー値比 (%)
A 国内炭	3,480	0.8	2.21	85	116
B	2,850	1.6	2.15	82	102
D	2,770	2.1	2.14	82	102
E	3,460	3.8	2.23	91	104
F	2,570	1.3	2.15	81	107
G 海外炭	2,580	0.9	2.41	83	112
H	3,110	2.7	2.11	81	104
I	2,440	1.1	2.30	90	100
J	3,300	2.6	2.21	84	100
K	4,220	7.0	2.37	86	108
L	3,210	4.8	2.22	77	106

a. フレッシュ性状への影響

配合試験の結果を表-5に示す。シリーズ2と比べ単位水量が減少したのは、起泡剤量を増加して標準的な気泡性状(希釈倍率24倍、発泡倍率25倍)を確保したことにより、フレッシュ性状が改善されたためと考えられる。単位水量が減少した分、フライアッシュを増加して同一密度を確保することが可能となり、単位フライアッシュ量をF=110kg/m³とした。

表-5 配合試験結果(灰種による影響試験)

灰種	単位量 (kg/m ³)				空気量 (%)
	C (BB)	F	W	起泡剤	
ADEFHJ	200	110	236	1.12~1.15	64.5~65.1
BIKL			226	1.14~1.15	65.6~66.0
G			222	1.16	66.6

11灰種のうち6灰種(ADEFHJ)は、同一単位水量で所定のフロー値(180±10mm)に収まり、フライアッシュの品質の相違がフレッシュ性状に与える影響は、総じて小さい結果となった。単位水量が小さくなった5灰種(BGIKL)のうちG、IおよびKは、表-4に示したとおり、密度、あるいは密度とフロー値比が大きな灰種であり、気泡混合軽量土のフロー値の一般的な管理値である180±20mmの範囲では、このような灰種を除いて大半の灰種で同一配合の製造が可能と考えられる。

灰種によるフレッシュ性状への影響が小さい原因としては、エアミルクの粘性がフライアッシュの品質より主として空気量によって支配されているためと考えられる。

表-5中の同一配合における空気量の幅は、フライアッシュの密度の相違により1m³あたりの必要空気量が若干変化するためであり、これにより起泡剤量も変化するが、その幅はわずかである。

b. 強度への影響

圧縮強度試験の結果を図-6および図-7に示す。11灰種中DおよびHの2灰種が、わずかにK0-5配合の室内配合強度(qu₂₈=

700kN/m²)を下回ったが、残る9灰種は室内配合強度を十分に満足している。

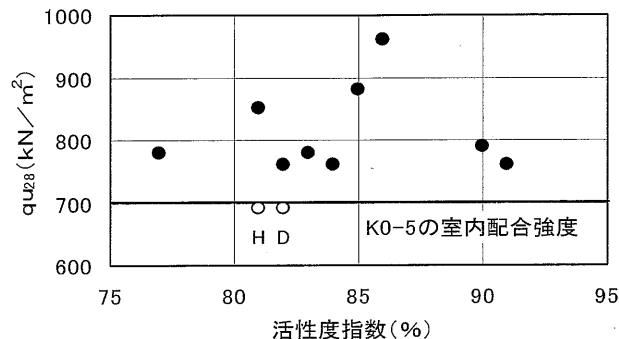


図-6 活性度指数と圧縮強度

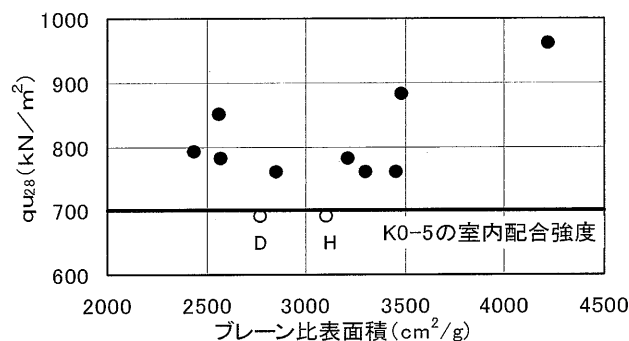


図-7 ブレーン比表面積と圧縮強度

活性度指数、ブレーン比表面積と圧縮強度との間には、有意な相関が認められない。これは、エアミルクの強度発現に与えるフライアッシュのポズラン活性によるマトリックス自体の強度の影響が、エアミルクの密度(空気量)や単位セメント量による影響と比べて、相対的に小さいためと考えられる。このことは、一般のフライアッシュコンクリートと比べて、エアミルクの強度はフライアッシュの品質による影響を受けにくいことを示唆していると考えられる。

(3) その他の特性

a. 凍結融解抵抗性

フライアッシュの使用がエアミルクの凍結融解抵抗性に与える影響を確認するため、シリーズ2の配合ケースにおいて水中凍結水中融解(JSCE-G501)による凍結融解試験を実施した。使用した灰種は表-1に示したBであり、試験開始材齢は14日である。

試験結果を図-8に示す。いずれの配合も凍結融解サイクル60~90回で相対動弾性係数が60%を下回り、一般のコンクリートより凍結融解抵抗性が劣る結果となったが、配合による明確な相違は認められず、フライアッシュを混合したエアミルクの凍結融解抵抗性は、未混合の場合と同等となった。

気泡混合軽量土の軽量性を期待して用いる場合には、雨水・地下水などの吸水による密度増加を防ぐため、外部からの吸水を遮断し、排水工を設ける必要がある¹⁾。このため、エアミルクは水中凍結水中融解という過酷な環境下に施工されるものではなく、通常エアミルクが施工される環境にあっては、十分フライアッシュの適用が可能と判断される。

また、既往の研究²⁾では、密度1.06±0.05g/cm³、qu₂₈≥1,000kN/m²の石炭灰エアミルクの相対動弾性係数は、試験開始材齢91日の場合、約200回の凍結融解サイクルにおいても60%を維持しており、フライアッシュを使用したエアミルクの凍結融解抵抗性は強度発現とともに向上すると考えられる。

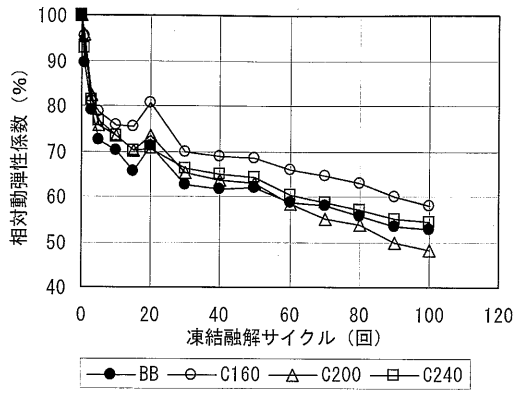


図-8 凍結融解試験結果

b. 水和熱

フライアッシュの使用がエアミルクの水和熱に与える影響を確認するため、凍結融解試験と同一配合ケース、同一灰種において断熱温度上昇試験を実施した。

試験結果を図-9に示す。断熱温度上昇量は、当然ながら単位セメント量が多い順に大きく(BB>C240>C200>C160)なり、BBのセメント量を約30%置換したC200の上昇量は、BBより約18℃低下した。

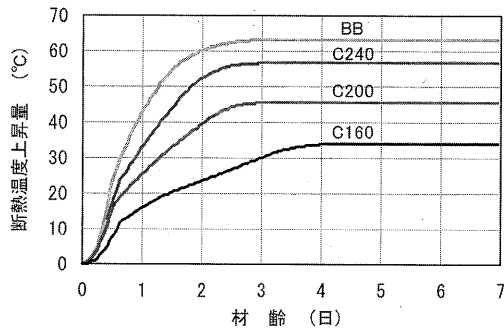


図-9 断熱温度上昇試験結果

軽量盛土材としてEPSと併用してエアミルクを使用する場合、EPSの熱変形や強度低下対策の観点からは、エアミルクの水和熱を低減することが望ましく、このような場合にはフライアッシュの使用は有効な手段と考えられる。

(4) 適用性検討のまとめ

エアミルクへのフライアッシュの適用性を検討した結果をまとめると、以下のとおりである。

- ①フライアッシュ混合エアミルクの強度は、水セメント比および単位セメント量と良い相関を示し、目標強度を得るのに必要なセメント量が目標密度毎に求められる。
- ②目標密度0.56g/cm³、目標強度 $q_{u28}=500\text{kN/m}^2$ を満足する単位セメント量は、 $C=200\text{kg/m}^3$ であり、 $F/(C+F)=30\%$ 程度までフライアッシュの置換利用が可能である。
- ③フライアッシュの品質がエアミルクのフレッシュ性状に与える影響は総じて小さく、大半の灰種で同一配合でのエアミルク製造が可能と考えられる。
- ④フライアッシュの活性度指数、ブレン比表面積とエアミルクの強度との間に有意な相関は認められず、一般のフライアッシュコンクリートと比べ、エアミルクの強度はフライアッシュの品質による影響を受けにくいものと考えられる。
- ⑤フライアッシュを混合したエアミルクの凍結融解抵抗性は、未混合の場合と同等である。また、フライアッシュの混合により

単位セメント量を低減することで、水和熱の低減が図れる。

4. 実施工への適用事例

以上の適用性検討結果をもとに、国道トンネル坑口部の保護盛土工事に使用するエアミルクに、フライアッシュが使用されたので、概要を紹介する。

(1) 工事概要

本工事は、一般国道229号狩場トンネル南側坑口付近における急崖斜面の落石・岩石崩壊対策として、北海道開発局函館開発建設部が平成13年8月から施工しており、一部オーバーハングした斜面に近接する坑口部分(覆道を含む延長約100m区間)に盛土して、崩落防止と坑口保護を行なうものである。現地の施工前の状況を写真-2に示す。

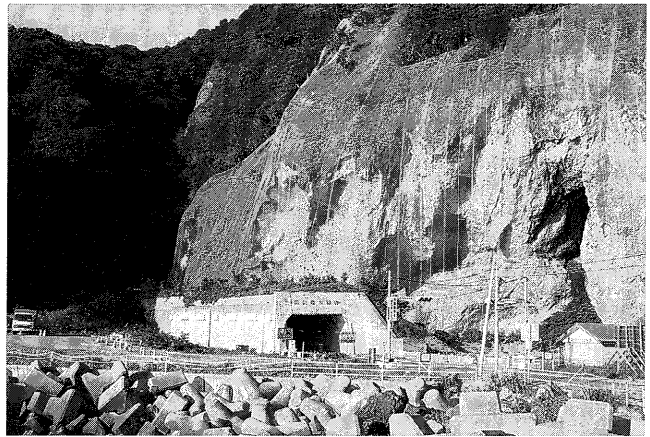


写真-2 狩場トンネル坑口付近状況(施工前)

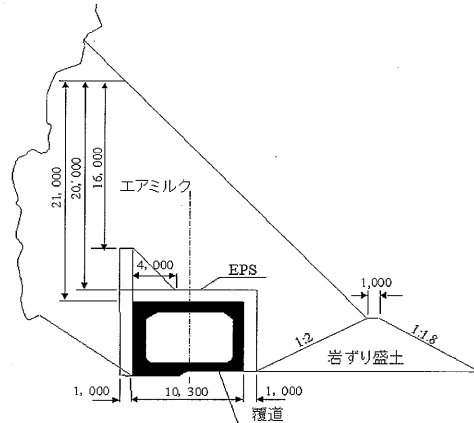


図-10 標準施工断面

既存の構造物への盛土荷重低減のため、盛土材料にはエアミルクを使用することとした。標準施工断面を図-10に示す。エアミルク打設時の側圧解消と上載荷重軽減のため既設覆道の周囲にEPSを合理的に配置するとともに、盛土法尻部分に現地発生した岩ずりを利用して、コスト低減を図る設計としている。また、エアミルクの品質条件を表-6に示す。

表-6 エアミルクの品質条件

湿潤密度 (g/cm ³)	フロー値 (mm)	空気量 (%)	一軸圧縮強さ q_{u28} (kN/m ²)
0.56以下	180±20	64±5	500以上

フライアッシュは、適用性検討の結果所定の強度発現が確認された灰種のうち、施工期間中の発電所燃焼計画を勘案してA, B, E, Fの4灰種(JIS II種相当灰)を使用した。灰種毎の配合は、表

ー5に示したとおりである。

(2) 施工

日打設量(最大約830m³/日)に対応するため、エアミルク製造プラントを現場に2基(Aプラント、Bプラント)設置した。各プラントの施工能力は、Aプラントが80m³/h、Bプラントが30m³/hである。いずれのプラントも、一般の気泡混合軽量土製造用のものをフライアッシュ使用のために一部改造している。Bプラントのエアミルク製造・打設フローチャートを図-11に示す。

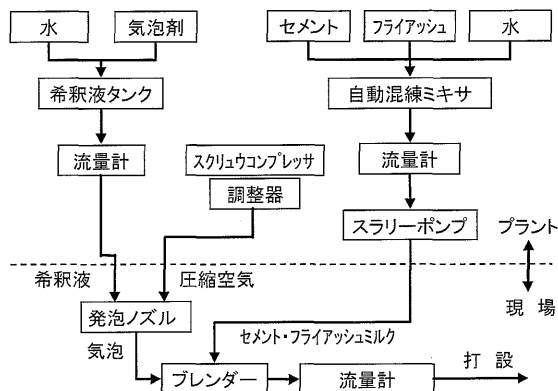


図-11 エアミルクの製造・打設フローチャート(Bプラント)

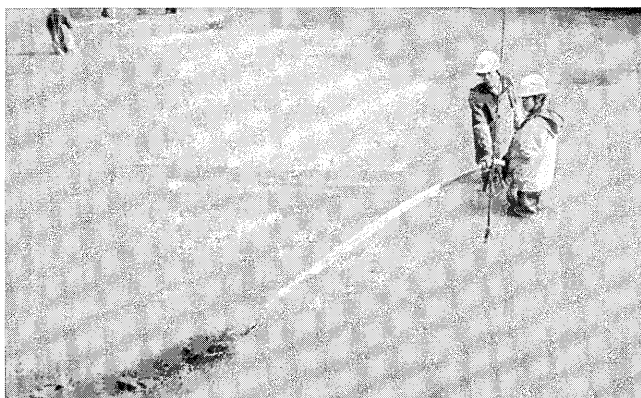


写真-3 打設状況

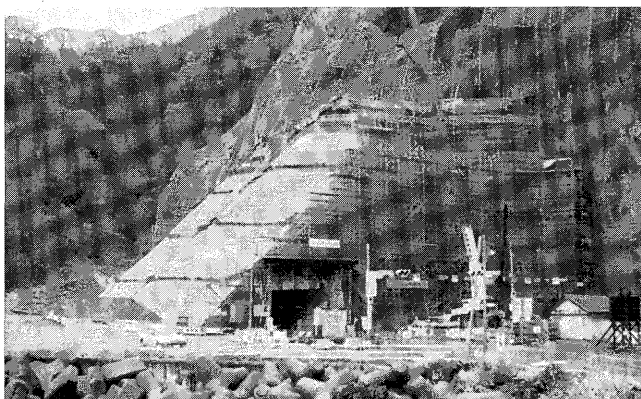


写真-4 保護盛土全景

Aプラントは、セメントミルクとフライアッシュミルクを別々のミキサで製造後混合する点、および気泡とミルクをプラント内で混合後現場に圧送する点が、Bプラントと異なっている。

エアミルクの打設にあたっては、地山からの水の浸入を防止するため、事前に排水管設置による水替を行なった。また、エアミルクの打設高さは、材料分離防止の観点から1m/回以下とした。

施工状況を写真-3および写真-4に示す。

施工時の品質管理試験項目を表-7に示す。なお、品質管理の規定値は、表-6に示したとおりである。

表-7 品質管理試験項目

項目	方法	頻度	備考
フロー値	JHS A 313	2回/日 (午前・午後)	シリンダー法
湿潤密度	JHS A 313		
空気量	JHS A 313A		
圧縮強度	JIS A 1216	1回/日	φ5×h10cm

11月末時点における、圧縮強度の品質試験結果を表-8に示す。海外炭フライアッシュE、Fを使用した場合、国内炭フライアッシュAよりも若干変動係数が大きい結果となったが、いずれの灰種およびプラントにおいてもqu₂₈は500kN/m²以上の規定値を満足している。このことは、多品種のフライアッシュがエアミルクに適用できることを、実施工において実証したものとと言える。

表-8 圧縮強度(qu₂₈)の品質試験結果

プラント	項目	灰種			計
		A	E	F	
A プラント	データ数	24	9	15	48
	最大値(kN/m ²)	690	830	710	830
	最小値(kN/m ²)	570	570	530	530
	平均値(kN/m ²)	632	648	581	619
	標準偏差(kN/m ²)	31	84	43	56
	変動係数(%)	5.0	13.0	7.5	9.0
B プラント	データ数	26	11	16	53
	最大値(kN/m ²)	740	750	760	760
	最小値(kN/m ²)	560	550	540	540
	平均値(kN/m ²)	610	600	604	606
	標準偏差(kN/m ²)	38	54	56	48
	変動係数(%)	6.3	8.9	9.2	7.9
計	データ数	50	20	31	101
	最大値(kN/m ²)	740	830	760	830
	最小値(kN/m ²)	560	550	530	530
	平均値(kN/m ²)	621	622	593	612
	標準偏差(kN/m ²)	37	73	51	52
	変動係数(%)	5.9	11.7	8.7	8.5

5. おわりに

フライアッシュは、エアミルクのセメント置換材としての利用が十分可能なことが確認でき、また、品質変動による配合や強度への影響が小さいなどの新たな知見が得られた。フライアッシュの優れた特性を活かし、今後もエアミルクへの利用拡大を図る所存である。

最後に、今回の試験実施にあたり種々ご協力をいただいた、東興建設㈱ならびに松本・原田・三菱JVの関係各位に厚く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日本道路公団試験研究所。気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工に関する指針原案。試験研究所技術資料。第225号、1996。
- 2) 内田裕二；樋野和俊；斉藤直。石炭灰を使ったエアモルタルの特性。電力土木。no.291。2001、P65-69。