

石炭灰の細骨材化ならびにその用途開発

PRODUCING THE FINE AGGREGATES FROM COAL ASH AND ITS APPLICATION

山本 忠・丹治郁夫・鈴木清司
By Tadashi YAMAMOTO, Ikuo TANGI,
Seishi SUZUKI

1. はじめに

昭和50年代始めのオイルショック以降、石炭火力発電所が石油代替電源の中心として原子力発電所と共に重点におかれ、今後も当分の間その建設と稼働率は伸びるものと予想される。電力業界の石炭灰の発生量は1985年度（昭和60年度）実績約400万t、1990年度（平成2年度）推定約500万t、1995年度（平成7年度）推定約750万t¹⁾とされている。この膨大な量の灰の有効利用について、通産省と（財）石炭技術研究所を中心として各電力会社も懸命の努力を重ねているが、セメント混和材、ケイ酸カリ肥料（電発）、焼成砂利（九電）以外はまだに大量利用の方法は確立されていない。しかし、実用化に近い有望なものもいくつか生れ始めており、路床材（北電）や新複合セメント（電中研）などがある。

一方昭和50年代後半までの石炭火力発電所から排出される石炭灰は微視的にはガラスの風船球であったが、近年脱硝装置の導入と高融点の外国灰の使用に伴って熔融不十分のまま、かつ完全燃焼しないまま電気集塵機に捕足されている。また、ここ1～2年の間に高範囲な炭種の燃焼可能性や低公害性、経済性などの優れた流動床ボイラーが一般産業ボイラーとして実稼働しており²⁾、電力業界に於いても電源開発（株）と（財）石炭技研が実証試験を行っており、数年後には大型ボイラーとして登場するものと予想される。

これは小粒石炭塊（径4～8mm）が石灰石とともに流動燃焼するもので、その灰は今までの石炭灰の概念から全く異なり不整形で未燃カーボンやCaOが多く、今までのセメント混和材的用途（発生石炭灰の約2～3割）には利用不可能と思われる。これらの灰の化学成分を表1

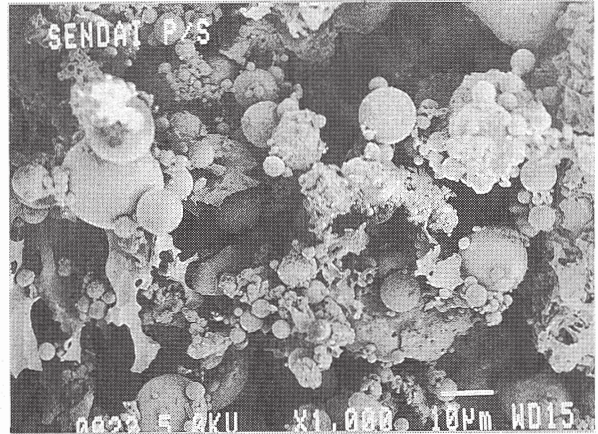


写真-2 脱硝装置導入後の微粉炭ボイラー灰



写真-3 流動床ボイラー灰

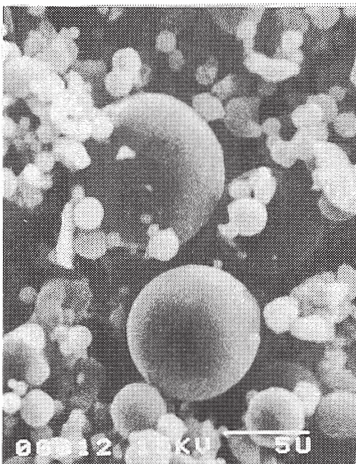


写真-1 脱硝装置導入前の微粉炭ボイラー灰

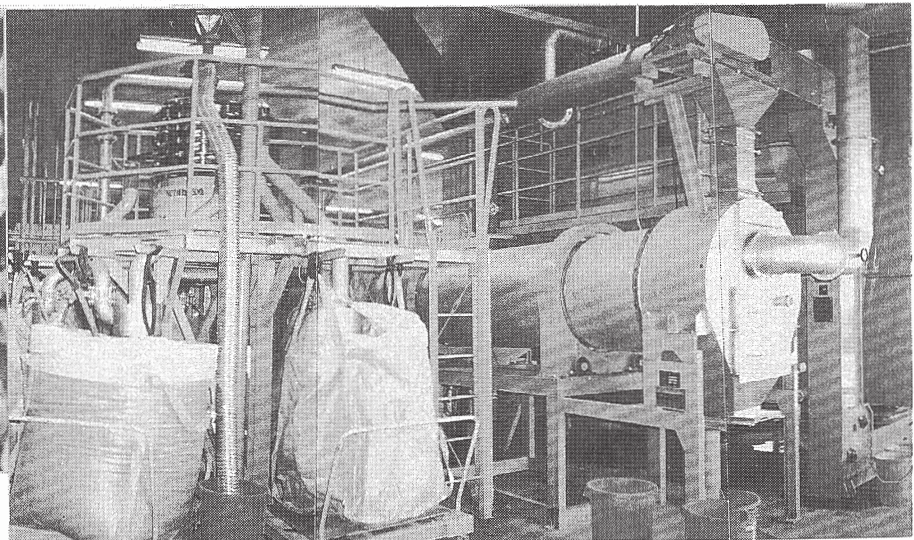


写真-4 石炭灰砂製造装置の一部（当社原町実験場）

東北電力(株)電力技術研究所
〒980 仙台市青葉区中山7-2-1

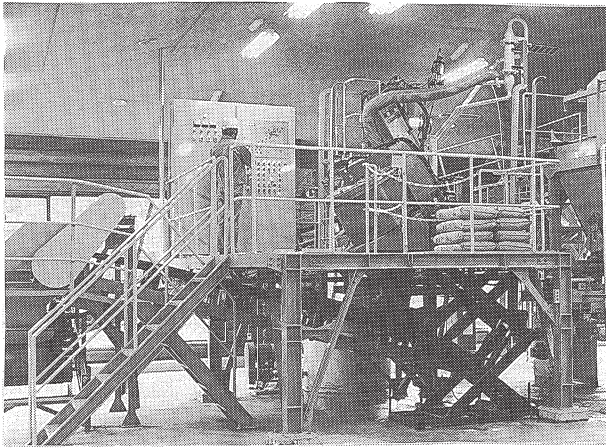


写真-5 石炭灰砂製造装置の一部(当社原町実験場)

に表す(写真1~3参照)。

これらのフライアッシュとしての活用が全く期待できない石炭灰から作った石炭灰砂の性質と、これを主原料とした数種類の建材試作品の性質について実験結果を報告する。

2. 石炭灰砂

風船玉状の微粉炭ボイラー灰(以下微粉炭灰と称す)も不整形の流動床ボイラー灰(以下流動床灰と称す)も微小なミクロン単位の粒であるので、これらにセメントを加えて造粒して砂粒とする。造粒は転動造粒でも可能であるが、粒自体の硬さの点から流動造粒や混合造粒の方が適している様である³⁾。当社で使用しているものはこの両者の中間位のものではなかろうかと推察している。アジテータの回転数とパンの回転数ならびに水分量と回転時間によって粒度、粒度分布、粒の硬さなどが変化する。5mm以下0.075mm以上の粒を作ることができる。また、セメントの混入量によって大きく性質が変わるので使用目的に応じて配合を決める。微粉炭ボイラー灰で作った砂の性質の一例を表2に示す。表2の破砕率はBS-812(骨材の破砕試験)に準じて行い、破砕率は次式によった。なおこの時の荷重は100kgf/cm²を7分間保持した。

$$\text{破砕率} = \frac{\text{破砕後の0.6 mmふるいを通過する砂の質量}}{\text{破砕前の0.6 mm以上2.5 mm以下の砂の質量}} \times 100$$

(1) 石炭灰砂の製造および養生

以下の実験に使用した石炭灰の化学的性質は、表1の通り、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。

灰とセメントとの配合を8:2とし適量の水にて造粒し20℃6時間の前養生、70℃の蒸気養生24時間、養生室養生(20℃90%R.H)12日間のち気乾養生24時間行い試験に供した。モルタル用は、前記養生の石炭灰砂をJIS A 5002(構造用軽量コンクリート骨材)の人工軽量骨材の粒度分布に調整し、表乾とし、砂:セメント=1:1(比較用は標準砂:セメント=3:2)水セメント比47%にてモルタル試験体を打設した。その後、前養生24時間、水中養生13日の後試験に供した。

表1 石炭灰組成分析結果

(単位:重量%)

試料 分析項目	微粉炭灰			流動床灰		
	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃
強熱減量	6.59	11.51	3.85	23.43	31.52	15.50
SiO ₂	53.77	46.29	56.38	35.15	21.38	17.00
Al ₂ O ₃	23.66	35.87	27.05	24.26	17.86	12.40
Fe ₂ O ₃	6.76	3.11	3.05	2.60	3.21	3.90
CaO	4.08	1.49	4.90	9.16	14.07	34.30
MgO	1.43	0.69	1.25	0.50	0.68	0.40
Na ₂ O	0.72	0.16	1.30	0.21	0.76	0.60
K ₂ O	1.64	0.46	1.11	0.45	0.76	0.40
SO ₃	0.51	0.36	1.05	2.78	9.64	4.00

注-1 分析方法:JIS R 5202[ポルトランドセメントの化学分析方法]による。

注-2 強熱減量以下の成分含有率はドライベース規準である。

表2 石炭灰砂の性質

セメント:石炭灰 wt	吸水率 %	絶対比重	破砕率 %
1 : 9	29.0	1.33	34.8
1.5 : 8.5	28.9	1.33	26.1
2 : 8	25.9	1.42	17.8
2.5 : 7.5	26.9	1.41	17.7
3.3 : 6.7	25.9	1.47	9.1
市販軽骨 B	15.4	1.44	23.2
" M	15.9	1.52	16.6

(2) 石炭灰砂の試験

・硬度試験

前記養生直後の砂を40℃にて約6時間乾燥し、JIS Z 8801(標準ふるい)付属書表2の目開き2380μmを通過し、付表1の目開き2.36mmに留まる粒を10粒とり出し、木屋式硬度計にて圧壊強度を測定し平均値を出した。

・比重、吸水率、強度、組成分析、溶出試験

前記養生直後の砂をJIS A 1134(構造用軽量細骨材の比重及び吸水率試験方法)、JIS A 5201(セメントの物理試験方法)JIS R 5202(ポルトランドセメントの化学分析方法)、ま溶出試験は昭和48年環告13号(a,陸上埋立処分,b.海面埋立処分)によって行った。

(3) 石炭灰砂の試験結果と考察

石炭灰組成分析結果より微粉炭ボイラーの灰は比較的安定しているが、流動床ボイラーの灰は品質が一定していない。運転開始後の期間が短いと思われる。さらに石灰石(CaCO₃)を流動媒体として770℃~850℃位で燃焼させるため、未燃カーボンとCaOが異状に多い。

これらの灰を用いて作った石炭灰砂粒の物理的性質を表3に示す。流動床灰は、未燃物が多いにもかかわらず粒の硬度が向上しているのはCaO含有量の影響と思われる、この灰は石炭灰砂の原料とし向いている。いづれも軽く、断熱性も悪くないと考えられるので内装用建材原料として開発して行きたい。参考のため標準砂とも比較しているが、硬さ、重さ共丁度その約1/2である。また、これらの砂粒を用いて作ったモルタルの物理的性質を表4に示す。

灰の特性の差が粒にするとかなり小さくなった様に、モルタルにすると更に差がなくなり、微粉炭灰も流動床灰も同様に使用できると思われる。

(4) 石炭灰砂からの溶出成分⁴⁾

石炭灰を水侵すると各種成分が溶出する。これらの成分は一般の土壌にも含まれているが溶出して高濃度になる場合は人に害をおよぼす恐れもあり、この面から石炭灰は、管理型廃棄物とされている。表5に石炭灰砂の化学成分、表6に石炭灰砂からの溶出試験結果を示す。判定規準を大きく下廻り、使用上の不安はない。

表3 石炭灰砂の物理的性質

石炭灰名	砂			
	硬 度	比 重	吸水率	単 溶 量
A ₁	4.13kg	1.27	34.6%	775.0 g/l
A ₂	4.23kg	1.29	34.0%	791.8 g/l
A ₃	4.10kg	1.34	30.5%	763.9 g/l
B ₁	4.51kg	1.23	39.9%	857.4 g/l
B ₂	4.74kg	1.19	42.5%	834.5 g/l
B ₃	4.26kg	1.15	45.8%	739.6 g/l
標準砂	9.01kg	2.57	0.8%	1586.7g/l

表4 石炭灰砂モルタルの物理的性質

石炭灰名	曲げ強度	圧縮強度	比重	吸水率
A ₁	55.5kgf/cm ²	332.3kgf/cm ²	1.68	26.5%
A ₂	53.8kgf/cm ²	374.2kgf/cm ²	1.70	25.3%
A ₃	62.3kgf/cm ²	427.2kgf/cm ²	1.70	23.5%
B ₁	59.5kgf/cm ²	401.4kgf/cm ²	1.71	27.0%
B ₂	57.2kgf/cm ²	383.4kgf/cm ²	1.68	30.1%
B ₃	59.8kgf/cm ²	346.0kgf/cm ²	1.72	32.4%
標準砂	83.7kgf/cm ²	489.1kgf/cm ²	2.12	12.1%

表5 石炭灰砂の化学成分 (単位: 重量%)

試料	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	B ₃
強熱減量	8.18	9.18	30.97	33.33	37.02
SiO ₂	48.47	42.01	28.14	20.10	18.57
Al ₂ O ₃	20.57	23.91	17.96	14.19	13.25
Fe ₂ O ₃	3.49	4.81	2.02	3.10	1.13
CaO	13.64	14.99	17.11	21.17	25.50
MgO	1.60	0.85	0.64	0.77	0.59
Na ₂ O	0.74	0.44	0.22	0.97	0.57
K ₂ O	2.40	0.87	0.40	0.69	0.25
SO ₃	0.70	0.83	2.31	5.08	2.72

注-1 分析方法: JIS R 5202[ポルトランドセメントの科学分析方法]による。

注-2 強熱減量以下の成分含有率はドライベース規準である。

表6 石炭灰砂からの溶出試験結果

海面埋立		(単位: mg/l)		
元 素 名	A ₁	B ₁	B ₃	
亜鉛 (定量下限値: 0.0009)	NO	NO	NO	
カドミウム (定量下限値: 0.0060)	NO	NO	NO	
クロム (定量下限値: 0.0005)	0.0160	0.0030	0.0150	
水銀 (定量下限値: 0.0004)	NO	NO	NO	
銅 (定量下限値: 0.0080)	NO	NO	NO	
鉛 (定量下限値: 0.1270)	NO	NO	NO	
ヒ素 (定量下限値: 0.0009)	NO	NO	NO	

陸上埋立

元 素 名	A ₁	B ₁	B ₃
カドミウム (定量下限値: 0.0060)	NO	NO	NO
クロム (定量下限値: 0.0005)	0.0140	0.0040	0.0150
水銀 (定量下限値: 0.0004)	NO	0.0007	NO
鉛 (定量下限値: 0.1270)	NO	NO	NO
ヒ素 (定量下限値: 0.0003)	NO	NO	NO

(NO定量下限以下)

参考: 産業廃棄物判定基準一覧表

(単位: mg/l)

元 素 名	海面埋立に関する基準値	陸上埋立に関する基準値
亜鉛	5.0	-
カドミウム	0.1	0.3
クロム	0.5	1.5
水銀	0.005	0.005
銅	3.0	-
鉛	1.0	3.0
ヒ素	0.5	1.5

3. 用途開発

昭和61年10月の原町実験場開設に伴い、石炭灰砂の大量生産技術の確立と、用途開発を進展させるため各企業へのサンプル提供を目的として石炭灰砂製造パイロットプラント(月産20トン)を同実験場内に建設し、製造技術と共に用途開発の進展にも力を注いできた。昭和63年3月に改造が加えられ、二交代生産体制により、月産50トンの石炭灰砂の製造が可能になっている。本報告では建築分野における利用方法について、試作品や試験施工の状況、その性能などについて紹介する。

(1) OAフロアパネルの開発

オフィスオートメーション(OA)の進展に伴い、二重床の需要が高まっているが、二重床自体も積載荷重となるため、軽量かつ高強度で安価なフロアパネルが望まれている。

原町実験場に設置した加圧成形機を用いて各種の基礎製造実験を実施すると同時に、従来のOAフロアパネル製造工場における製造ラインにのせた試作を行いながら研究を進めた(写真6~8参照)。

このパネルは、寸法が500×500×20mmで、片面には付着強度を高めるために山形の突起が出るように加工された鋼板(0.6mm)が石炭灰モルタルと一体になるように、加圧・脱水成型され、その後蒸気養生を施して製造される。石炭灰砂の混入率を25%きざみで変化させた場合のフロアパネルの4点支持中央点荷重に

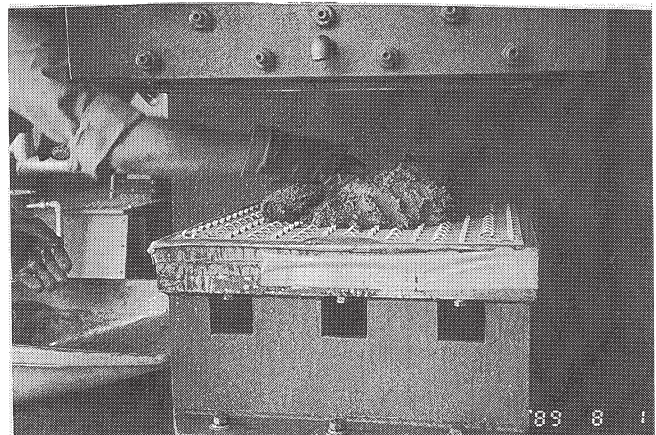


写真-6 OAフロアの試作

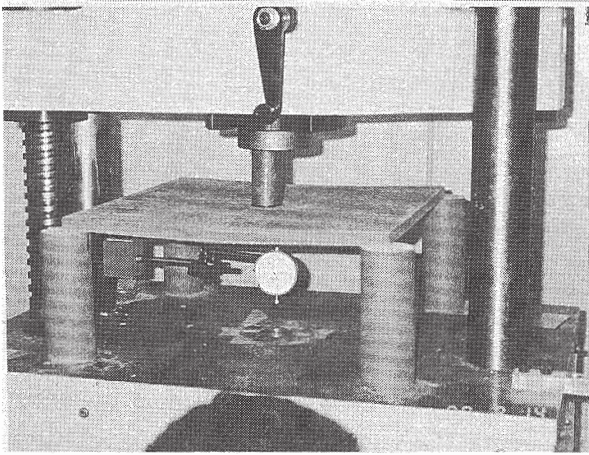


写真-7 試作OAフロアの強度試験



写真-8 石炭灰砂OAフロアの現場施工

よる強度試験結果を図1に示す。一般に、床加重 300 kgf/m^2 に対応するフロアパネルの力学的性能は、最大点荷重で 900 kgf 程度、点荷重 300 kgf 時の中央たわみ量は 2.0 mm 程度以下とされている。強度試験結果を図1に示す。石炭灰砂混入率50%のものを現在当研究所土木研究室にクリープ試験を兼ねて試用している。なお、混入率50%の時の重量減少は約1割となっている。

(2) 間仕切壁パネルの開発 (写真9～16参照)

(2-1) 打設成形間仕切壁パネル

打設成形法では、図2に示すような2種類の形状および補強を施したものを試作した。このパネルは、骨材として石炭灰砂を用い、ガラス繊維を混入したモルタルを練り混ぜ、型枠に打設した後、蒸気養生を施して製造した。養生後の製品の密度は 1.7 t/m^3 程度である。

図3には試作した2種類のパネルの曲げ試験結果を示す。

(2-2) 押し成形間仕切壁パネル

押し成形法では、図4に示す形状のものを試作した。このパネルは、骨材として石炭灰砂を用い、 $15 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ の高圧力で押し出して成形した後、蒸気養生を施して製造した。

(2-3) 耐火試験 (予備) 結果について

耐火試験申請に先立ち、前述の2種類のパネルにつ

いて JIS A 1304 (建築構造部分の耐火試験方法) に従って耐火試験を実施した。

試験体の構造と代表的な耐火試験結果を図5から図8に示す。試験の結果、打設成形パネルの場合は2時間耐火に、押し成型パネルは1時間耐火の規定をクリアする見込みを得た。また、これらは原町市に建設中の当社研修センターの地下1階ドライエリアに試験施工された。

(3) GRC製フラワーポットおよびベランダ手摺

ガラス繊維混入セメント製品のフラワーポットやベランダ手摺の軽量化を目的として、石炭灰砂を骨材として用いた。フラワーポットの場合、従来品に比べて軽量化と着色性が改善された他、樹木の根の断熱効果

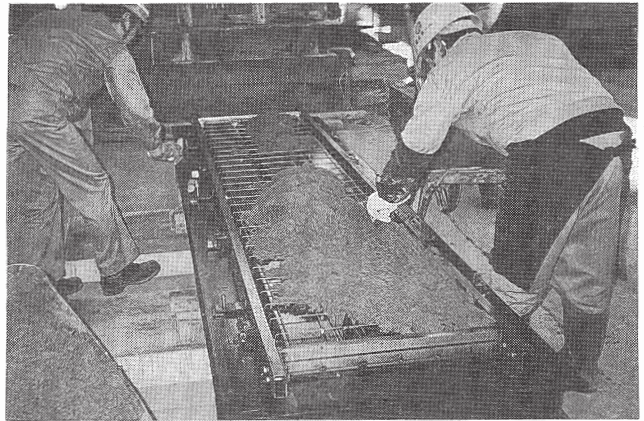


写真-9 打設成形間仕切パネルの製造

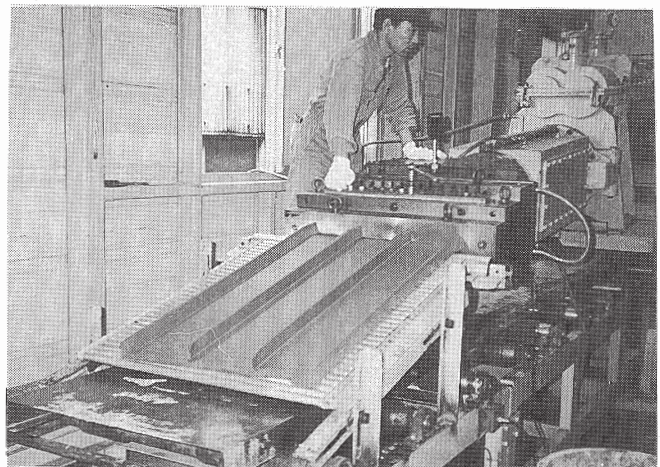


写真-10 押し成形間仕切パネルの製造

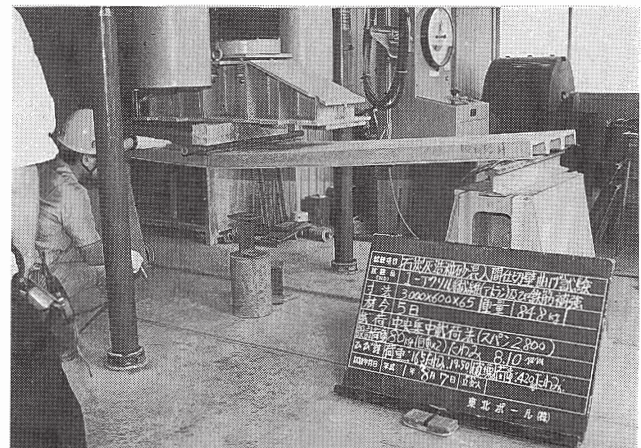


写真-11 間仕切パネルの強度試験

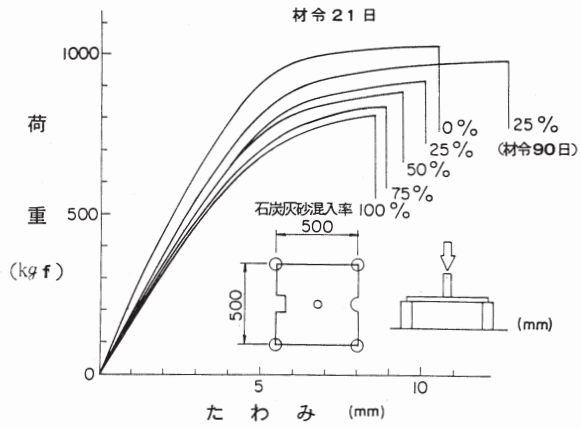


図1 石炭灰砂混入O.A.フロアパネルの強度試験結果

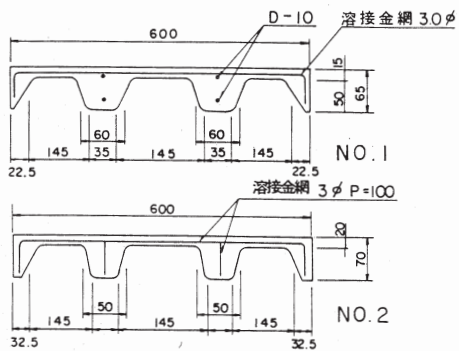


図2 打設成形パネルの構造

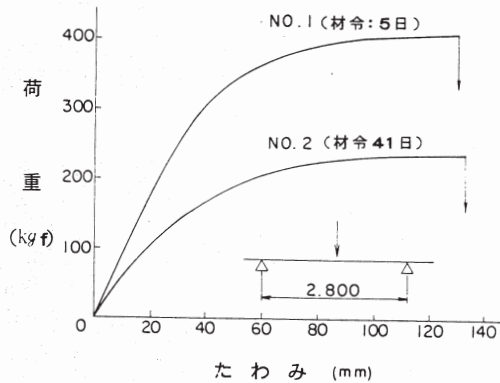


図3 打設成形パネルの曲げ試験結果

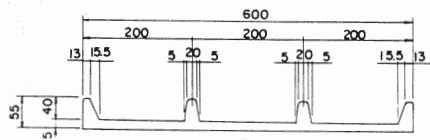


図4 押し出し成形パネルの形状

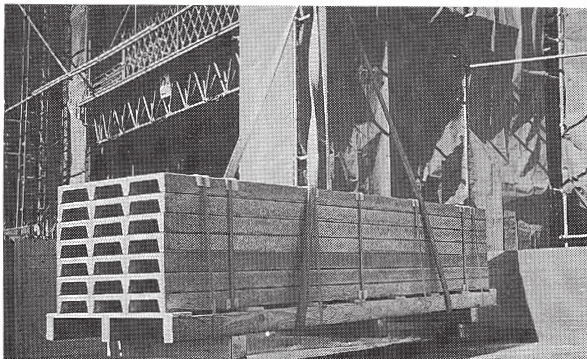


写真-12 石炭灰砂間仕切パネルの現場施工

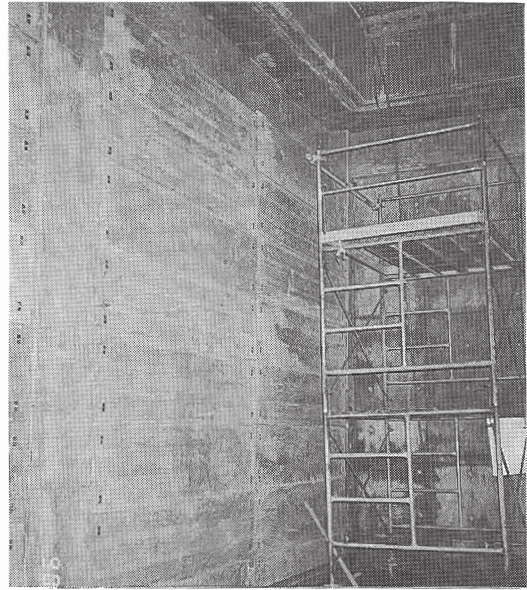


写真-13 石炭灰砂間仕切パネルの現場施工

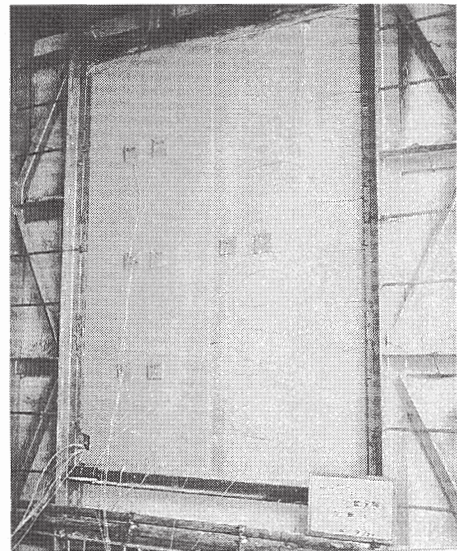


写真-14 石炭灰砂間仕切パネルの耐火試験 (裏面)

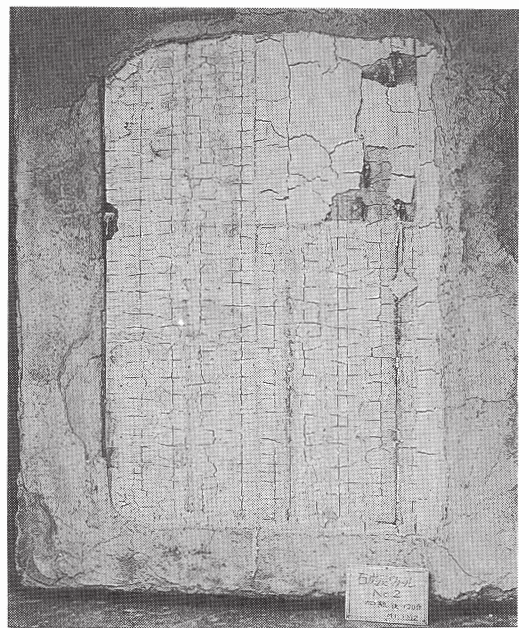


写真-15 同上試験後のパネル (炉内面)

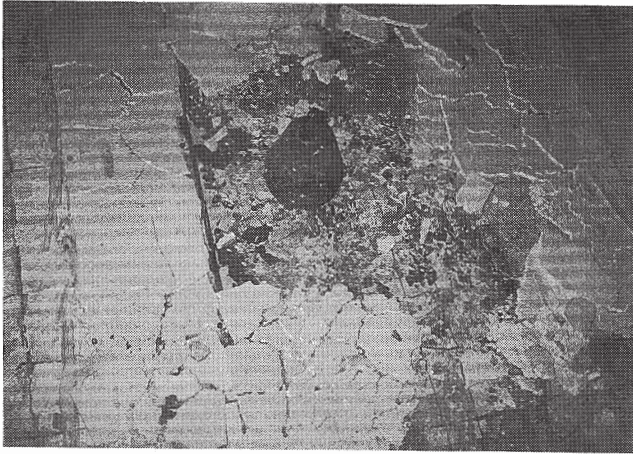


写真-16 耐火試験後の落錘試験

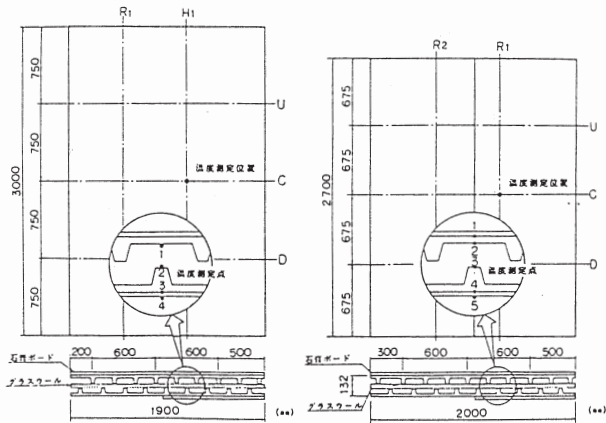


図5 打設成形パネルを用いた試験体の構造
図6 押し出成形パネルを用いた試験体の構造

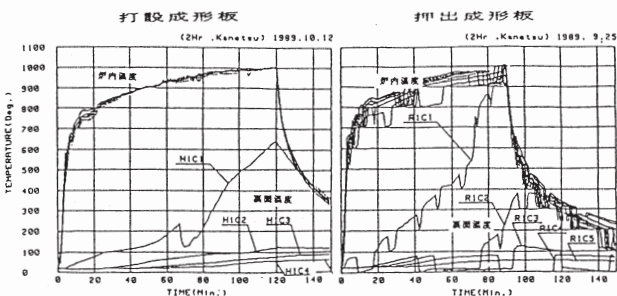


図7 耐火試験結果
図8 耐火試験結果

も期待できると言われている(写真17参照)。

(4) 左官用プレミックスモルタル(写真18~20参照)

近年、左官工事に用いられるモルタルは、骨材、セメント、混和材などが予め混合、袋詰めされた「プレミックスモルタル」が一般的になっている。石炭灰砂が軽量で球形であることが施工性を向上させるので石炭灰砂を骨材としたプレミックスモルタルの開発を行い、当社研究所新実験棟の一部に施工された。

(5) 耐流動アスファルト舗装材(写真21~27参照)

建材ではないが、近年車輛増加と大型化とが相俟って舗装路面のわだち掘れ現象が多発する傾向にあり大きな問題となっている。耐摩耗性を損なうことなく耐流動性に優れたアスファルト舗装材の開発を目的として、昭和62年度から建設省東北技術事務所、東北電力

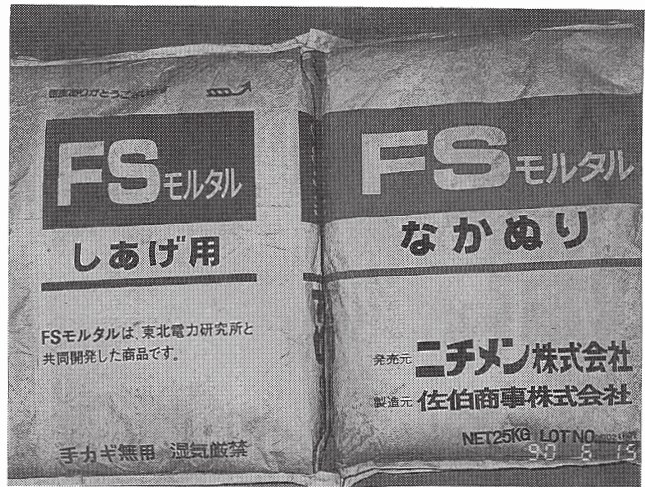


写真-18 石炭灰砂製プレミックスモルタル

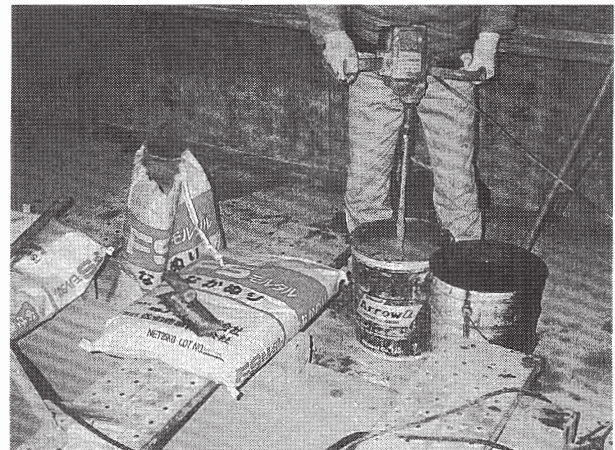


写真-19 同上プレミックスモルタルの混練

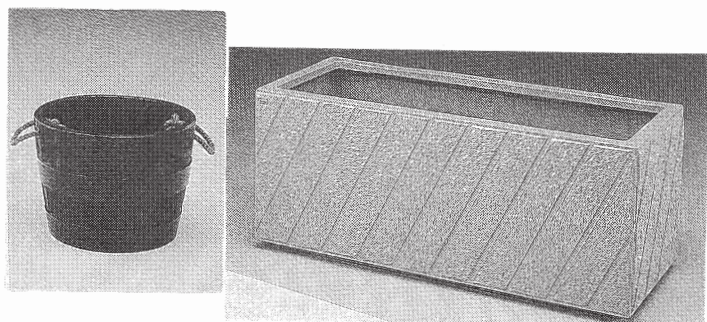
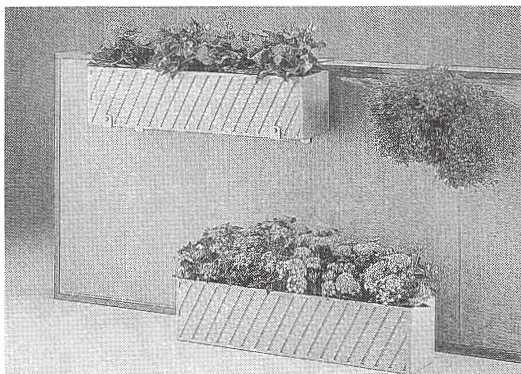


写真-17 石炭灰砂製フラワーポット

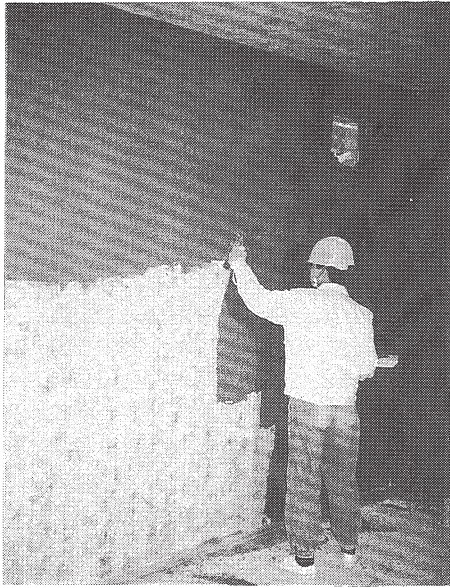


写真-20 石炭灰砂製プレミックスモルタルの施工現場

(株)、大成道路(株)の3者による共同開発を行っている。

開発試験は、素材の物性試験及び混合物の配合試験、耐久性試験等を室内試験^{6)~8)}によって確認し、東北地方建設局「技術活用パイロット事業」によって現場検証試験⁷⁾を実施し、その有効性について確認することとしている。

室内試験に用いた混合物は、東北地方建設局管内で主に使用されている密粒度ギャップ(20F)を基本混合物として試験を行った。これらの中間結果を図9~10、表6に示す(FB石炭灰砂と仮称している)。

なお、日本道路公団、福島管理事務所管内にも試験施工された。

4. おわりに

この研究は灰捨場の延命から出発したものであるが、有効利用による灰捨費用の減少分と販売による収入との合計が従来の灰捨経費をいくらかでも下廻る場合は積極的に事業として取組むべきと考えている。灰捨費用は電気料金に見込まれてはいるが額の多少にかかわらず考えられる限りの手段を尽くして発電経費を抑える様努力しなければならない。

建設省では、昭和63年から5ヶ年計画で新規総合プロジェクト「建設事業への新素材、新材料の開発と利用技術の開発」をスタートさせた。これはとくに建築分野では建築物の居住性や耐久性の向上、軽量化、高層化、大スパン化、地中化を基礎とする新居住空間の

創成、拡大等の社会的要請に応える形で、建築物に従来にない高性能化、高機能化を期待するものである⁵⁾。

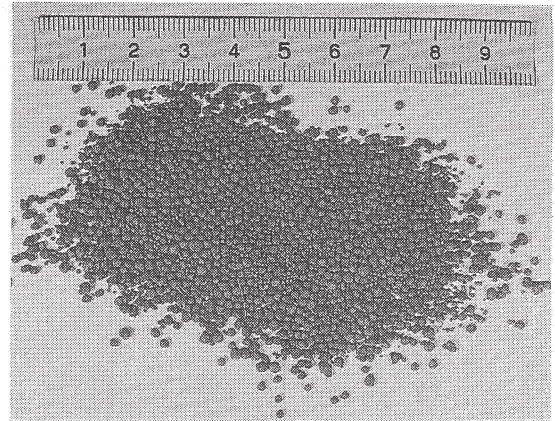


写真-21 FB石炭灰砂の形状

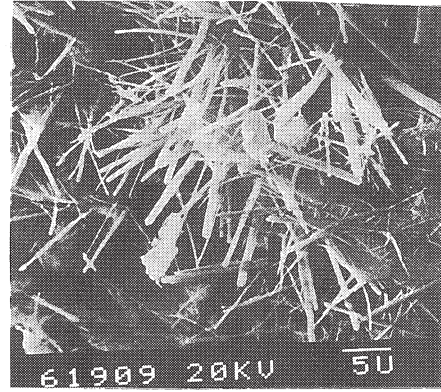


写真-22 FB石炭灰砂表面の電顕写真

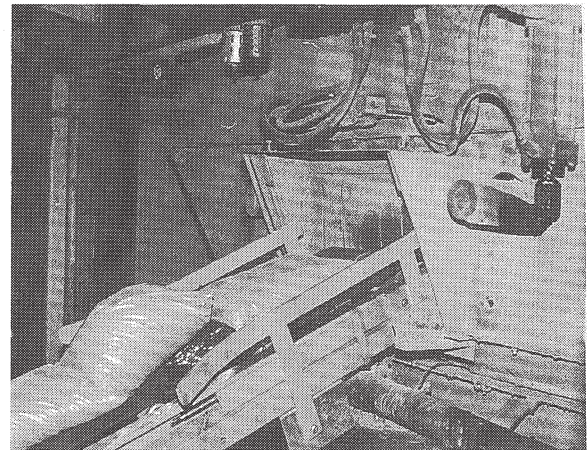


写真-23 アスファルト合材プラントへのFB石炭灰砂の投入

表-2 施工箇所の概要

路線名	国道6号線	国道4号線	同左	同左	同左	国道13号線	国道4号線	同左	同左	同左	同左	道路公団
工事名	坂元修繕工事	卸町修繕工事	槻木改良工事	富谷拡幅工事	白河修繕工事(大清水)	福島修繕工事(大町)	中野修繕工事(青森県)	十和田修繕工事(十和田市)	岩沼修繕工事	福島修繕工事(伏拝)		東北自動車道修繕工事(二本松)
施工延長(m)	200	200	200	200	400	50	370	500	200	50		200
施工面積(m ²)	1800	700	3300	3300	2800	175	2600	3500	1400	175		700
舗装構成	密粒G20 F t50	同左	密粒20F t50	同左	密粒G20 F t50	同左	同左	密粒13F t80	同左	同左		表層タイプE t80
FB添加量	外添加4%	内添加4%	外添加4%	内添加4%	各4%	外添加4%	同左	同左	各4%	外添加4%		外添加2%
施工時期	S.63.8.25	S.63.10.7	H1.8.10	H1.9.22	H1.9.29	H1.10.17	H2.8.9	H2.9.6	H2.9.21	H2.11.10		H2.7.6
FB使用量	7トン	3.5トン	16トン	16トン	14トン	1トン	13トン	11トン	7トン	1トン		2トン

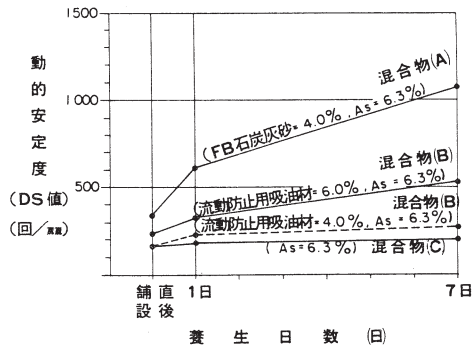


図9 養生日数とDS値⁶⁾

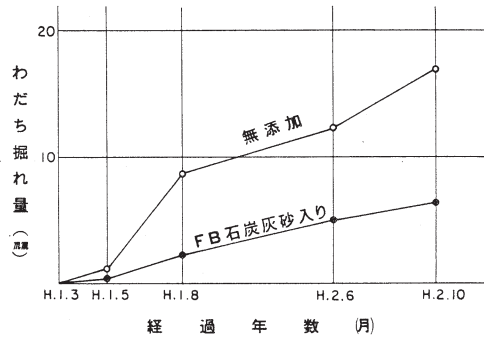


図10 槻木地区の交通量とわだち掘れ量⁷⁾

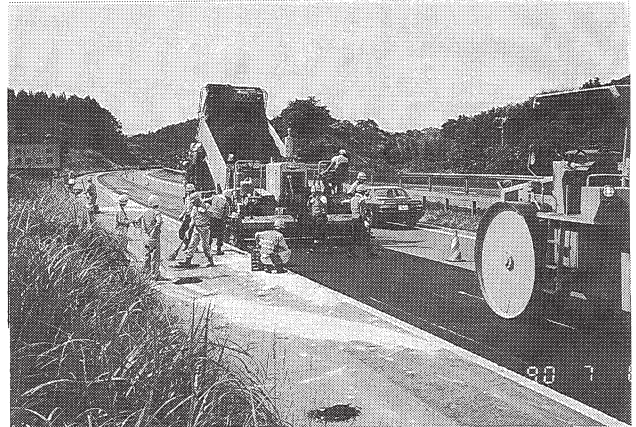


写真-26 東北自動車道二本松付近に施工



写真-27 わだち掘れ測定中の富谷バイパス



写真-24 国道4号線仙台バイパスに施工

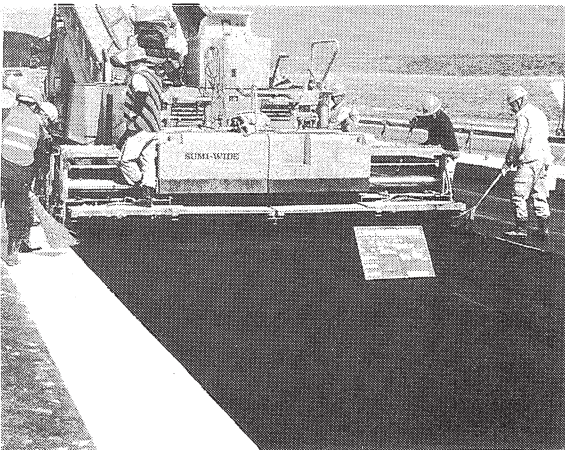


写真-25 国道4号線槻木バイパスに施工

この石炭灰砂を断熱面から居住性の向上、軽量面から軽量化、高層化、大スパン化に役立てたいと願っている。

なお、原町実験場における石炭灰砂の製造・実験では東北ポール(株)、東北発電工業(株)、用途開発では、東北大学、建設省東北地方建設局東北技術事務所、ニチメン(株)、清水建設(株)鹿島建設(株)、(株)昭電、(株)東神他各社の共同研究や協力を得ながら進めており、関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) アッシュ情報センター, 昭和61年度調査報告書 (昭和62年4月)
- 2) 矢巻時蔵, 流動床ボイラーの開発状況と課題 ENERGY 1987年9月.
- 3) 東畑平一郎, 最近造粒技術とプロセス(株)工学情報センター
- 4) 山本忠, セメントカプセル軽量細骨材, 石膏石灰学会誌No.222(1989)
- 5) 福島敏夫, 新材料の開発の現状と将来, 建築雑誌 Vol.103.1988年8月
- 6) 小原務, 佐々木爽春, 耐流動性に優れたアスファルト舗装材の開発について第18回日本道路会議論文集 平成元年10月
- 7) 佐々木爽春, 石炭灰の耐流動性混合物への応用。「舗装」11月号Vol.24 1989
- 8) 太田宏, 石炭灰を利用した耐流動アスファルト混合物添加剤「積算技術」1990年8月号