

## 石炭灰を使用したモルタルおよびコンクリートの強度\*

## STRENGTH OF MORTAR AND CONCRETE USING CINDER ASH

戸田五郎\*\*・長谷川幸雄\*\*\*  
By Goro Toda and Sachio Hasegawa

## 1. ま え が き

最近著しい経済発展にともなう設備投資その他の建設工事が盛大に行なわれている。そのため、建設の主材ともいえるコンクリート用骨材は、日増しに枯渇する現況である。この点にかんがみ、著者らは骨材の使用量も比較的少なく、しかもポルトランドセメントの代りに、火力発電所より排出される石炭灰——シンダーアッシュ、あるいは製鉄所の鋳鉄滓等の主原料を膠結材とするところのモルタルやコンクリートの諸物性と、とくに、強度特性について報告する。

Cinder ash—Slag concrete (CS コンクリート) は、非ポルトランド系セメント質を用いたモルタルおよびコンクリートである。シンダーアッシュ、スラグ等は人工ボツランと呼ばれてシリカ質成分を主成分とし、それ自身では硬化する性質をもたないけれども、ある程度高温の下で水の存在とともに一種の刺激作用を受けて、石灰と結着し不溶性の化合物を生成する<sup>1)</sup>。すなわち、潜在水硬性に近い性質を有する。シンダーアッシュの成分中、SiO<sub>2</sub> は 73~81% 含まれているが、CaO は 5% 以下と非常に少ない。この不足する成分に対して、CaO および Ca(OH)<sub>2</sub> の微粉成分を適量追加する必要がある。一方、スラグは非常に有効なセメント質材料であり、とくに水滓スラグの化学成分は、普通ポルトランドセメントのそれに、非常によく類似している。この水滓スラグ自身は、潜在水硬性で、ある種の刺激剤によって水硬性を発揮する特性をもっている<sup>2), 3)</sup>。

普通ポルトランドセメントは、CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などの主成分が、水硬性を十分発揮するに必要な

\* 第 23 回土木学会年次学術講演会 (昭和 43 年 10 月 11 日) において一部発表

\*\* 正会員 中部電力総合技術研究所 土木研究室長

\*\*\* 正会員 中部電力総合技術研究所 副主査研究員

割合で均等に混ぜ合わされた主原料があらかじめ焼成によって活性化され、さらに凝結時間を調節する成分を添加されたものであるが、CS コンクリートの場合には、使用に際して Ash, Slag, CaO 等をべつべつに適当量を混合するものである。したがってそれだけ施工面において多くの問題点を生ずる。

水滓スラグの結晶化学反応の過程は、ポルトランドセメントの反応とは、いささか結晶生成のメカニズムを異にしているようである<sup>2)</sup>。この化学反応の速度は、材料の 1 粒子の大きさ、形、養生温度等によって非常に変化し、たとえば材料粒子が小さくて比表面積が大きいほど、接触反応効果が大きく、また材料粒子が多孔質、不安定であれば、刺激反応が行なわれやすく、比較的速やかに強度が発現する。さらに、その上養生温度がある限度内で高いほど、化学反応が促進されて強度が早く発現する傾向が見られる。したがって、強度発現のためには、これらの傾向を有効に利用して、あらゆる手法を効果的に積み重ねる必要があると考えられる。すなわち材料を適当に微粉砕し、硬練りでそれらの微粒子を均等に練りませ、高温蒸気養生を行なう必要がある。とくに、この目的のために、本研究にあたって設計試作した高速ミキサ<sup>3)</sup>を用いて、90°C、8 時間の蒸気養生を施した場合、材令 28 日において、最高 650 kg/cm<sup>2</sup> 程度までの高強度のモルタルおよびコンクリートを得ることができた。このような各種材料の特性に関する基本的な考察から、著者らは CS コンクリートの強度発現のために種々の実験的検討を加えてきた。

CS コンクリートの開発は工場残滓の有効利用を目的の一つとするものであるから、材料入手の関係や実用化の点でも経済性が問題にされなければならないが、ここでは、未利用のまま大量に廃棄処分されているシンダーアッシュを、効果的に利用した CS コンクリートの強度に関するつぎのような実験結果について報告する。すな

わち、種々のコンクリートプレキャスト製品の開発を目的とした蒸気養生と水中養生とにおける材令と、CSコンクリートの圧縮強度との関係、材料を中心にして考えた場合の、CaOあるいはCa(OH)<sub>2</sub>を用いたときの圧縮強度の差異、クリンカーを骨材代用に使用したコンクリートの特性、アッシュのブレン値の違いによる圧縮強度の比較等である。

## 2. シンダーアッシュ、水滓スラグ等CS材料の物性

非ポルトランド系セメント質材料は、数多くあげられるが、本研究では前述のごとく当地方で比較的容易に入手できる材料を選定した。しかし大部分の材料は、各地方でも類似の材料が比較的容易に入手できるものと考えられる。これらCS材料の成分や性状はでき上りコンクリートの物性を大きく左右する主要素と考えられるから、その選定や取り扱いについては十分の注意が払われなければならない。

### (1) シンダーアッシュ

中部電力KK新名古屋火力発電所の集塵装置より採取されたシンダーアッシュ（ブレン値約3000cm<sup>2</sup>/gのフライアッシュ）をそのまま、またはブレン値4000cm<sup>2</sup>/g程度にさらに粉砕したもの、およびボイラー底部に高温溶融状態で残るクリンカー（粒径不定）を、ブレン値4000cm<sup>2</sup>/g程度に粉砕したものなどをCSコンクリート用セメント質の主材料として用いた。それらの材料の化学成分を示すと表-1のようである。

### (2) 石灰質

生石灰は、小野田セメントKK藤原工場産のもので、CaOの含有成分は約89%、ブレン値は5000cm<sup>2</sup>/gのものが用いられた。

また消石灰としては、カーバイトからアセチレンガスをとったあとのいわゆるカーバイトマッド（三井化学KK名古屋工場）を乾燥、粉末にしたものが用いられた。その主成分であるCa(OH)<sub>2</sub>の含有量は約72%であり、ブレン値は4000cm<sup>2</sup>/g以上のものである。

脱硫酸石灰は、三重火力発電所において、ボイラー中に微粉石灰を吹き込み、SO<sub>2</sub>を除去する試験が行なわれたときの使用済みの石灰であり、粒子の表面は石こうで中心部分は生石灰のままであり、ブレン値は5000cm<sup>2</sup>/gのものである。これらの成分は表-1に示すとおりである。

### (3) 水滓スラグ

中山製鋼所より産出される鉍滓を、冷水で急冷して、多孔質、ガラス質にしたもので、砂状、海綿状となったものを乾燥し、ロッドミルによってブレン値4000cm<sup>2</sup>/g程度に粉砕したものをを用いた。その成分は表-1に示すとおりであり、塩基度の平均値は1.9である。八幡製鉄産の水滓スラグを用いた試験を行なった結果、中山製鋼産のものとは全く変わりがなかったため、ごく一部は八幡製鉄のものも使用した。CS材料の顕微鏡写真を写真-1~4に示す。

表-1 CSコンクリート用セメント質材料の化学成分表

セメント質材料の種類	比重	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	lg <sub>100</sub>
シンダーアッシュ 新名火フライアッシュ	2.25	73.9	10.8	3.9	4.8	4.5	2.1
新名火クリンカー (不洗)	2.65	76.2	7.0	3.5	2.3	9.9	1.1
ダシ " (不洗)	2.65	81.0	6.8	4.0	4.8	1.0	2.4
リュ " (水洗)	2.65	81.6	7.2	4.9	4.8	1.0	0.5
石灰 小野田セメントKK生石灰	3.22	0.7	0.2	0.2	89.5	1.0	8.4
三重火力脱硫酸石灰 (40μ)	2.80	28.7	12.5	0.5	44.5	5.7	8.1
" (5μ)	2.80	4.4	12.7	0.6	68.4	3.0	10.9
質 三井化学カーバイトマッド	2.22	2.2	0.8	0.2	72.4	0.6	23.8
スラグ 水滓スラグ(八幡製鉄)	2.94	33.8	20.9	1.6	35.8	6.0	1.9
" (中山製鋼)	2.99	34.6	11.6	0.1	42.1	10.9	0.7
富士製鉄鉍滓バラス	2.70	34.4	20.2	0.8	37.5	6.9	0.2

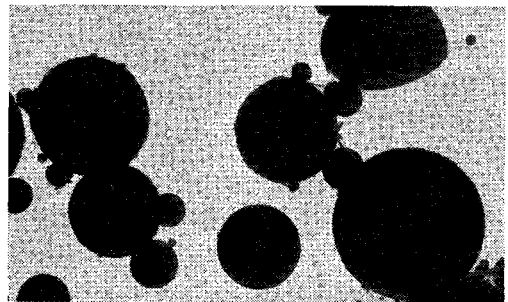


写真-1 フライアッシュ（新名火産）  
6500倍

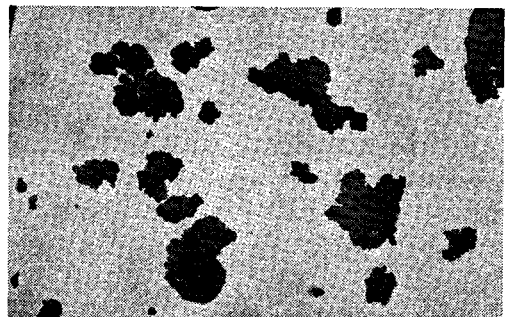


写真-2 シンダーアッシュ微粉砕粒子（新名火産）  
6500倍

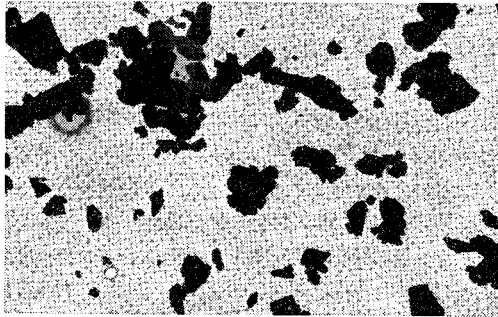


写真-3 CaO の微粉碎粒子 (小野田・藤原工場産)  
6500 倍

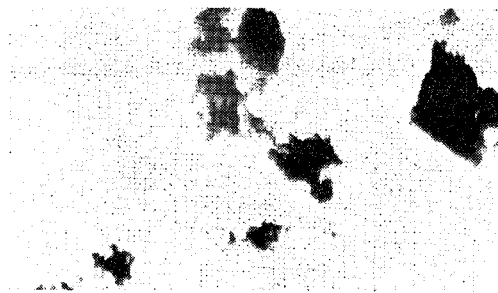


写真-4 カーバイト滓の微粉 [Ca(OH)<sub>2</sub>]  
(三井化学・名古屋工場産)  
20000 倍

#### (4) 骨材および混和剤

骨材は標準砂 (F.M.=0.95, 比重 2.65), 天竜川産砂, 矢作川産砂 (F.M.=3.77, 比重 2.56) および表-1 に示されている新名火クリンカー, 富士製鉄産鋸滓パラスを使用し, また強度促進剤として塩化カルシウム, 苛性ソーダを, リターダーとしてポゾリス物産 KK のリターールを使用した。

### 3. 実験設備の概要

CS コンクリートの強度発現のためには, 微粉碎された材料を用いる必要があり, さらに高温蒸気養生が有効であることが予備実験で明らかになった。したがってこの試験を行なうために, つぎのような設備, 機器が開発され, 用いられた。

#### (1) 材料の微粉碎用ミル

セメントのブレン値以上の粉末度を得るために, ドラム容量 10 l × 2 のパイロ ミルに, ロッドまたはボールの媒体を各ドラムに 35 kg 入れ, 粉砕能力最大 15 kg/H (連続式) で使用した。粉砕効果は各材料によって異なるがブレン値 4000 cm<sup>2</sup>/g ~ 7000 cm<sup>2</sup>/g に粉砕される間に適時サンプリングを行なって粒度の調整を行った。

#### (2) ミキサ

1 μ 以下が大半を占める極微粒の材料と水とを混合して, 硬練りでしかも均質なものを得ることは, 在来のミキサでは不可能であることがわかり, そのため, CS 材料の練りまぜに適するよう新しい高速ミキサを開発した。ミキサは円筒容器の中央軸に, 上下2段の特殊翼を有し, さらに図-1 に示すような立体運動を与える構造になっている。これにより練りまぜ時の周辺速度は小さく (壁面で  $v_1=0.1$  m/sec), 内部速度をできるだけ大きく (中心付近で  $v_{max}=10$  m/sec) して, 速度勾配を大きく

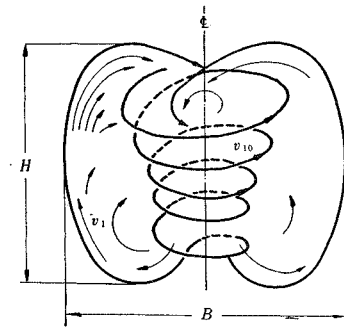
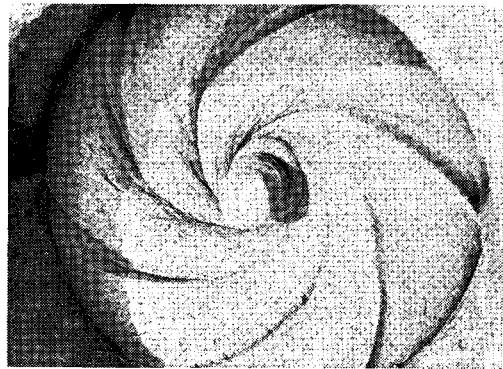
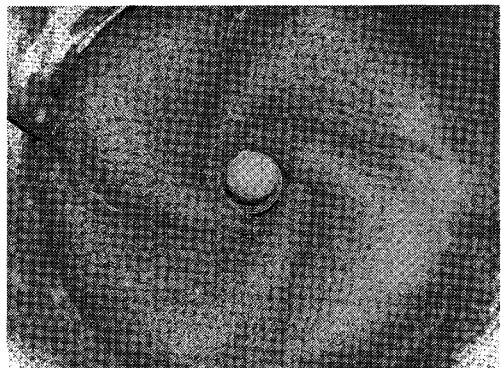


図-1 高速ミキサ内の過流運動  
 $v_1=0.1$  m/s,  $v_{10}=10.0$  m/s,  $H/B=0.8$



(a) スクレーパー6枚の渦流



(b) スクレーパー4枚の渦流

写真-5 高速ミキサによる練りまぜ状況,  
 $W/C=30\%$ , 780 rpm, 110 l 容量

し、それによって生ずる大きな流体せん断によって数種の微粉粒子を短時間に均質化することを可能にしている<sup>3),4)</sup> (写真-5 参照)。ミキサの仕様はつぎのようである。

- 18 l 容量：プロペラ式，無段変速，最高 1500 rpm
- 110 l 容量：特殊翼付，無段変速，最高 780 rpm

(3) 養生槽

蒸気養生槽は早期強度を得ることを目的とし、寸法が 700×700×高さ 400 (mm) (ヒーター 200 V 3 kW 4 段切り換え槽内温度 75°C~125°C に調整可能用サーモスタット，24 時間作動タイムスイッチ付き) の小型のもの、寸法が、1.5×5.0×高さ 1.2(m) (重油ボイラー付き) の大型のものを設備した。

一方、水中養生槽は寸法 1.2×1.0×高さ 0.5(m)、ヒーター 200 V 3 kW、温度 (-15°C~35°C) 調整可能用サーモスタット付きのもので、その水温を 20°C に保持して、恒温恒湿室 (20°C, RH 50%) 内に設置した。

4. シンダーアッシュのブレン値と圧縮強度との関係

新名古屋火力産のフライアッシュ (ブレン値 2980 cm<sup>2</sup>/g) をパイプロミルにより微粉砕した試料を用いて、圧縮強度の比較試験を行なった。パイプロミルによる粉砕試験の結果は表-2 に示すとおりである。

表-2 粉砕試験結果

	フライアッシュ	ミル1回 通し	ミル2回 通し	ミル3回 通し
ブレン値 (cm <sup>2</sup> /g)	2980	4110	6590	6840
比 重	2.21	2.47	2.58	2.59

配合条件を CaO/Ash=20%, Slag/(Ash+CaO)=30% とし、材令 1, 7, 28 日につきそれぞれ蒸気養生 (90°C×8 h) と水中養生の場合とに対して各 3 個合計 72 個の供試体を用いて比較試験をした。なお基準配合として表-3 に示す値を用いた。

表-3 基準配合 (kg/m<sup>3</sup>)

Ash	CaO	CaSO <sub>4</sub>	Slag	水	砂	CaCl <sub>2</sub>	リタール
724	109	36	261	452	565	23	2.3

試験結果は図-2~図-3 に示すとおりであり、蒸気養生、水中養生ともにブレン値の大きいほど、すなわち、粒子間の接触面積の大きいほど強度も大きいことが確認できる。ただし、あまりにも極微粉化を行なうことは経済性、実用性を欠く場合があるので、以下の諸試験では Ash のブレン値を 4000 cm<sup>2</sup>/g 程度に定めて行なうことにした。

5. 水セメント質比と圧縮強度との関係

CS コンクリートの場合にはセメントを用いないが、Ash, Slag, CaO 等の CS セメント質材料を、在来コンクリートの場合のセメントと見なして取り扱うことにする。そこで CS コンクリートの場合の水セメント質比 (W/C) と、圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) との関係をつぎのように調べた。W/C=30%, 35%, 40%, 45% とし、各配合の練り上りのフロー値を一定の範囲 (200±5 mm) にした。90°C, 8 時間の蒸気養生後における材令 24 時間の強度について W/C と  $\sigma_c$  との関係を求めた。その結果は図-4 に示すとおり、普通モルタルの場合と同様、W/C が大きくなるにつれて圧縮強度が小さくなる関係

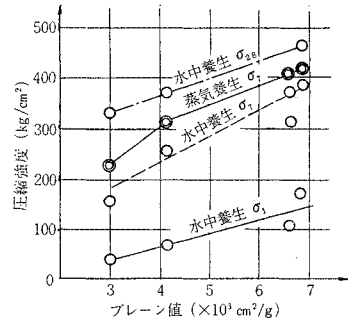
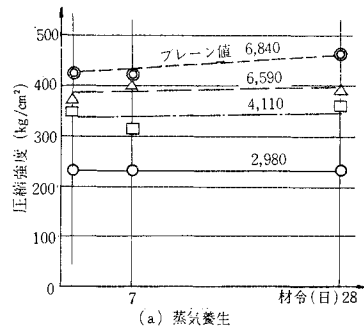
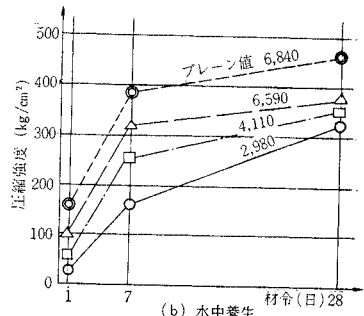


図-2 各材令における Ash のブレン値と圧縮強度との関係



(a) 蒸気養生



(b) 水中養生

図-3 各ブレン値の Ash による材令と圧縮強度との関係

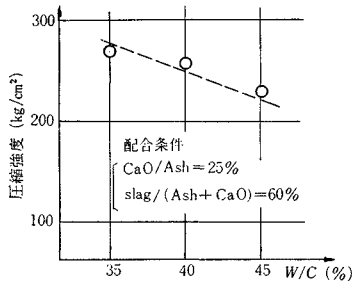


図-4 水セメント比と圧縮強度との関係 (蒸気養生, 材令1日)

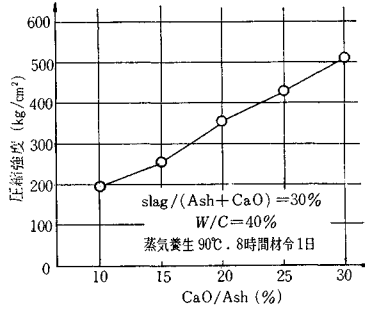


図-5 生石灰使用の場合の CaO/Ash と圧縮強度との関係 (蒸気養生, 材令1日)

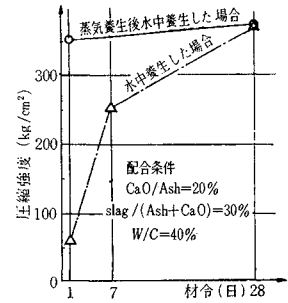


図-6 生石灰使用の場合の材令と圧縮強度との関係

がある。

### 6. 石灰の種類による圧縮強度の比較

#### (1) 生石灰 (CaO) を用いた場合

この場合は純度の高い CaO 粉末を用いるため、水と反応するときかなりの水量を吸収し、瞬間的に相当の発熱を生ずるので脱硫酸灰の場合と同じく、CaSO<sub>4</sub> を適量配合してアッシュ中に含まれるアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) と結合させてアルミナを除き、単離されたシリカ (SiO<sub>2</sub>) とこの CaO との結合を促進させた。この場合の CaSO<sub>4</sub> の量は、所要 CaO 量の 25% 相当分とした。また CaO の瞬間的の反応による凝結を抑制する意味で、少量のリターダーを添加した。この石灰を用いた試験は、つぎの配合条件により行なった。

CaO/Ash=10%, 15%, 20%, 25%, 30%

Slag/(Ash+CaO)=15%, 30%, 45%

砂/(Ash+CaO+Slag)=60%, W/C=40%

さらに、この場合の養生条件は、90°C, 8時間の蒸気養生後 20°C の水中養生をしたものと、初めから 20°C の水中養生をしたものの 2 種類であり、各ケース最少 3 個の供試体 (合計 45 個) が用いられた。その結果を図-5, 図-6 に、また配合とその試験結果を表-4 に示す。

前記 Slag 量を 30% 以上にして W/C=32% 程度にすれば、さらに高強度が発現するが、ここに配慮すべき点は CaO をそのまま使用するため、ミキシング中に発熱を生じ、水分吸収のために急激にフロー値が低下し、実用の域を逸脱することである。

したがって、CaO 量はできるだけ少量に止めるべきであって、Ash 量に対して CaO 量は 25% 程度に止めて目標強度を得ることを考えるのが好ましいと思われる。

#### (2) 消石灰 [Ca(OH)<sub>2</sub>]——カーバイトマッドを用いた場合

アセチレンガスを採った後のカーバイト滓を乾燥粉碎したものを用いると、CaO を用いた時のような高い発熱を生じない。この場合の試験は、つぎの配合条件により 90°C, 8時間蒸気養生した後、水中で標準養生したものと、最初から標準水中養生したものに対し、合計 180 個の供試体について行なった。

Ca(OH)<sub>2</sub>/Ash=15%, 25%, 35%, 45%

Slag/[Ash+Ca(OH)<sub>2</sub>]=30%

砂/[Ash+Ca(OH)<sub>2</sub>+Slag]=60%,

W/C=35%~45%

その結果を示すと図-7 のようである。水中養生 (平均  $\sigma_{28}$ =306 kg/cm<sup>2</sup>) と蒸気養生 (平均  $\sigma_{28}$ =165 kg/cm<sup>2</sup>) との圧縮強度は普通の場合、ほぼ同程度の値を示すのであるが、この場合かなりの差を生じており、しかも水中養生の場合の方の強度が大きい原因については明らかでない。これはおそらくカーバイト滓内の不純物の熱的影響によるものではないかと思われる、この点についてはさらに検討を進めている。

使用した消石灰は表-1 に示すとおり、三井化学名古屋工場産 (主成分 CaO 72.4%, Ig. loss 23.8%) のものであって、夏期外気温 30°C 時においても各配合とも練り上り温度 35°C 以下に止めることができた。また

表-4 配合と試験結果

CaO/Ash (%)	Ash (kg)	CaO (kg)	CaSO <sub>4</sub> (kg)	slag (kg)	水 (kg)	砂 (kg)	CaCl <sub>2</sub> (kg)	リターール (kg)	フロー値	練り上り温度 (°C)	蒸気養生 $\sigma_1$ (kg/cm <sup>2</sup> )
10	772	58	19	255	442	552	22	2.2	193	46	194
15	755	85	28	260	451	564	23	2.3	187	51	255
20	724	109	36	261	452	565	23	2.3	181	49	352
25	696	130	44	261	452	566	23	2.3	177	59	427
30	669	151	50	261	452	566	23	2.3	177	61	511

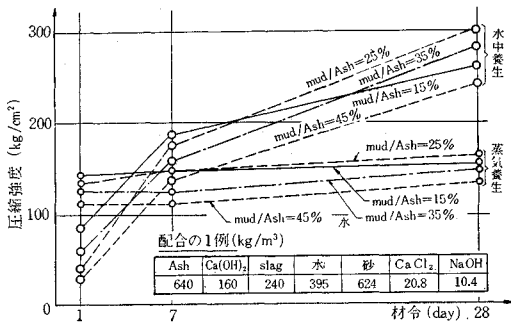


図-7 カーバイト滓を用いたコンクリートの圧縮強度の比較 (Slag/Ash=30%)

カーバイトマッド量が、Ash 量の 25% の場合には、 $\sigma_{28}=306 \text{ kg/cm}^2$  の圧縮強度が得られたが、45% では強度低下を見た。これはすでに加水分解を完了した  $\text{Ca(OH)}_2$  成分が非常に安定した材料であり、CaO に比して純度が低いことなどとあわせて、材料の化学的素因によるものと考えられる。事実、このマッド使用の場合は X線回折等によっても、普通セメントおよび CS 材に対して初期硬化が非常に遅れることが認められた。

(3) 生石灰と消石灰とを併用した場合

材料がいずれも極微粉体である上、高速ミキサで練るため、できあがったモルタルは粘性が大きく、しかも練り上り温度が普通コンクリートにくらべて高い。しかし練り上り温度が高いということは製品化した場合、収縮クラックを発生させる恐れがあり好ましくない。前述の試験結果からわかるように、この発熱は生石灰を用いた場合はとくに顕著である。そのため生石灰と消石灰とを併用して、合計 51 個の供試体について、つぎのような配合条件による比較試験を行なった。

- [CaO+Ca(OH)<sub>2</sub>]/Ash=20%, 25%, 30%
- CaO : Ca(OH)<sub>2</sub>=10 : 0, 7 : 3, 6 : 4, 5 : 5, 0 : 10
- Slag/[Ash+CaO+Ca(OH)<sub>2</sub>]=30%, 40%, 50%, 60%

その結果を図-8 に示す。このほか、比較検討のため CS セメント質材料の一部を普通セメントで代替した場

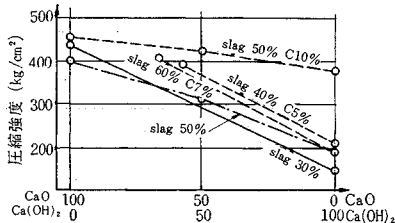


図-8 CaO と Ca(OH)<sub>2</sub> の配合比と圧縮強度との関係 (蒸気養生、材令 1 日)

合、すなわちセメント代替率=0%, 5%, 7%, 10% のそれぞれについて行なった試験結果の一例を図-8 に示す。これを見ると、CaO の配合比が大きいほど強度が出るが、セメントを代替したことによる効果は  $\text{Ca(OH)}_2$  の配合比が大きい場合ほど顕著であることがわかる。

(4) 脱硫試験に使用済みの石灰を用いた場合

この場合の石灰は、脱硫のために火力発電所の炉中に吹き込まれた CaO で、SO<sub>2</sub> と反応し、その表面だけが CaSO<sub>4</sub> で被覆された状態となり、内部は生石灰 (CaO) のままになっているので、水と混合された場合 CaSO<sub>4</sub> の被膜が水と石灰との瞬間的化学反应を抑制するとともに、モルタルの同一流動性を得るのに必要な水量を少なくする利点を有している。

試験は、つぎの配合条件により合計 380 個の供試体について行なった。

- CaO/Ash=15%, 25%, 35%
- Slag/(Ash+CaO)=0%, 30%, 60%, 90%
- 砂/(Ash+CaO+Slag)=60%, W/C=35%

その結果を図-9、図-10 に示す。残滓利用を配慮して脱硫石灰を用いて試験を行なったが、W/C=35

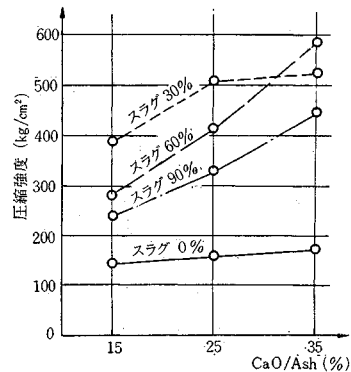


図-9 CaO/Ash と圧縮強度との関係 (三重火力脱硫石灰使用) (蒸気養生、材令 1 日)

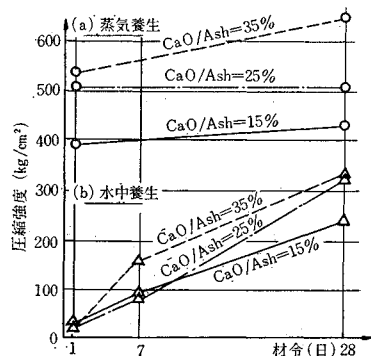


図-10 材令と圧縮強度との関係 (三重火力脱硫石灰使用) スラグ 30%

% で十分なミキシング効果が得られ、材令 24 時間において  $\sigma_1=600 \text{ kg/cm}^2$ 、材令 28 日において  $\sigma_{28}=650 \text{ kg/cm}^2$  程度の高強度が得られた。

### 7. スラグ量と圧縮強度との関係

水滓スラグの使用量を定めるために、Slag/(Ash+CaO) の値を変えて比較試験を行なった。この場合の配合条件はつぎのようである。

#### (1) 生石灰を用いた場合

CaO/Ash=20%  
Slag/(Ash+CaO)=15%, 30%, 45%  
W/C=35%

#### (2) 脱硫試験に使用ずみの石灰を用いた場合

CaO/Ash=25%  
Slag/(Ash+CaO)=0%, 30%, 60%, 90%  
W/C=35%

この試験には合計 56 個の供試体を用いた。その試験結果を示すと 図-11 のようである。図-11 より、スラグの混合比は (Ash+CaO) に対して約 30% 付近が最も強度の出ることがわかる。

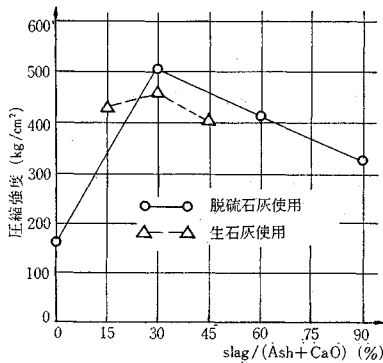


図-11 スラグ量と圧縮強度との関係 (蒸気養生, 材令 1 日)

### 8. 骨材の種類による圧縮強度の比較

コンクリート用骨材として用いるところの石炭クリンカーおよび鉍滓等は碎石よりもさらに表面形状が不規則で、しかも空冷時に多くの空げきを生じ、材質がきわめて弱い。しかし、高速ミキサの練りませ状況や供試体の破断面観察によると、写真-6 に見られるようにクリンカー粒子内、および鉍滓スラグ表面の細部にわたって CS セメント材が相当量浸入し、CS コンクリート内ではこの空げきのみたされて、強度が発現するものと予想さ

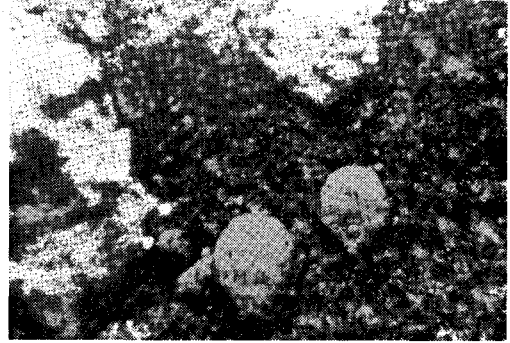


写真-6 クリンカー粒子の内部空洞にセメントミルクが浸入硬化状比 (高速ミキサ使用 300 倍)

れたので、骨材の状態によってその力学性状がどのように変わるかを調べるため、以下に述べるような区分のもとで比較試験を行なった。

#### (1) 骨材の粒度を変えた場合

使用骨材の種類は、① 天竜川産の天然骨材、② 新名火産のクリンカー、③ 富士鉄一名古屋工場産の鉍滓、とし、使用骨材の粒度範囲は、① 1.2 mm~2.5 mm、② 2.5 mm~5.0 mm、③ 5 mm~10 mm、④ 10 mm~20 mm のそれぞれについてつぎの配合条件により合計 45 個の供試体について試験を行なった。

CaO/Ash=20%  
Slag/(Ash+CaO)=30%  
骨材/セメント質=60%, W/C=35%

試験結果は 図-12 に示すとおりであり、細粒骨材の場合には、天然骨材よりクリンカー、鉍滓骨材のほうが大きい強度を得た。この強度の差異はモルタルと骨材との付着強度の強弱によるものと考えられる。

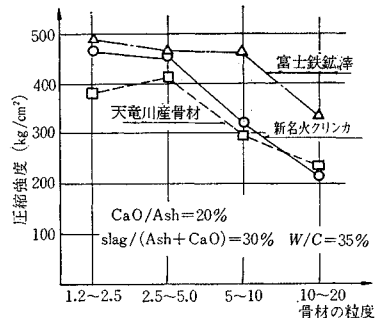


図-12 骨材粒度と圧縮強度との関係 (蒸気養生, 材令 1 日)

#### (2) 細骨材として砂の代りにクリンカー アッシュを用いた場合

新名火産の石炭クリンカーアッシュを 5 mm 以下にフルイ分け、砂の代りとしてセメント質に対して 60%

表-5 配合ならびに圧縮強度

砂の種類	Ash (kg)	CaO (kg)	Ca(OH) <sub>2</sub> (kg)	CaSO <sub>4</sub> (kg)	slag (kg)	セメント (kg)	水 (kg)	砂 (kg)	CaCl <sub>2</sub> (kg)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )					
										材令 1 日		7 日		28 日	
										蒸気養生	水中養生	蒸気養生	水中養生	蒸気養生	水中養生
標準砂	589	90	60	27	230	77	333	644	22	555	58	570	261	632	511
クリンカー (5 mm 以下)	542	84	55	24	211	70	306	592	20	483	47	483	199	536	427

入れて、蒸気養生の場合と、水中養生の場合との比較を行なった。試験はつぎの配合条件により合計 70 個の供試体について行ない、その結果を表-5 および 図-13 に示す。

$$\frac{\text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2}{\text{Ash}} = 30\%, \text{CaO} : \text{Ca(OH)}_2 = 6 : 4$$

$$\frac{\text{Slag}}{\text{Ash} + \text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2} = 30\%, W/C = 31\%$$

砂(クリンカー)/セメント質=60%

なお、この場合は、セメント質材料の 7% 相当を普通セメントで代替した。

さらに比較のために、細骨材として砂を用いた場合の試験結果も同時に図示している。

蒸気養生の場合において、標準砂使用の CS モルタルの圧縮強度  $\sigma_{28} = 632 \text{ kg/cm}^2$  に対して、石炭クリンカーアッシュを使用したモルタルは  $\sigma_{28} = 536 \text{ kg/cm}^2$  で、約 15% 程度圧縮強度が低下した。また、水中養生の場合にも、前者が  $\sigma_{28} = 511 \text{ kg/cm}^2$  に対して、後者は  $\sigma_{28} = 427 \text{ kg/cm}^2$  の値で圧縮強度は前同様に約 15% 小さい値を示した。

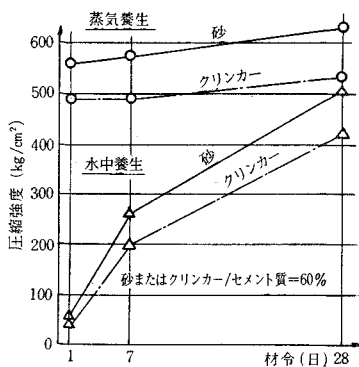


図-13 細骨材として砂ならびにクリンカーを用いた場合の比較

(3) 砂とクリンカー アッシュを併用した場合

下記のような配合条件のもとで、セメント質に対し、砂(標準砂)とクリンカーアッシュの混合割合を変えて、合計 12 個の供試体につき圧縮試験が行なわれた。

$$\text{CaO/Ash} = 20\%$$

$$\text{Slag}/(\text{Ash} + \text{CaO}) = 30\%$$

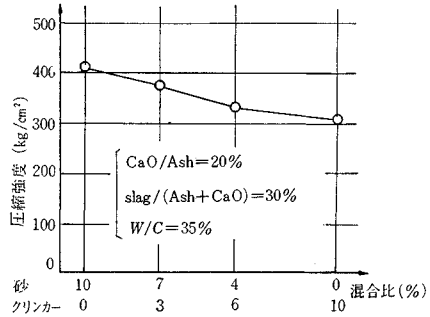


図-14 砂とクリンカーとの混合比と圧縮強度との関係(蒸気養生, 材令 1 日)

砂/クリンカー=10:0, 7:3, 4:6, 0:10

$$\frac{\text{砂} + \text{クリンカー}}{\text{セメント質}} = 60\%, W/C = 35\%$$

蒸気養生(90°C×8h)した時の材令 24 時間における圧縮強度の結果を図-14 に示す。前記試験結果と同様砂の混合割合が高いほど強度が大きくなる傾向が認められた。

(4) 砂またはクリンカーの配合比を変えた場合

同一セメント質量に対して細骨材の配合比を変えた場合、および細骨材を使用しないで石炭クリンカーの粒径を 5~10 mm と 10~20 mm との 2 種類に選定しそれぞれの配合比を変えた場合についての強度の比較を試みた。つぎの配合条件によって、合計 27 個の供試体に対して圧縮強度試験を行なった。

$$\text{CaO/Ash} = 20\%$$

$$\text{Slag}/(\text{Ash} + \text{CaO}) = 30\%, W/C = 35\%$$

砂またはクリンカーの配合比=20, 40, 60%

クリンカーの粒度 5~10 mm, 10~20 mm

その試験結果を示すと 図-15 のようである。図より明らかなようにクリンカーを使用した場合にはその粒度によって異なるが、50 kg/cm<sup>2</sup>~200 kg/cm<sup>2</sup> 程度の 1 日圧縮強度が得られた。この強度は標準砂を用いた場合に比べてかなり低い値ではあるが、砂利骨材を使用しない経済的コンクリートとして十分に利用される可能性があるように思われる。また、10~20 mm クリンカーを用いた場合の供試体の断面観察によれば、高速ミキサを使用しても前記のようなセメントミルクの微粒子がクリンカー粒子の内部にまで浸入していないことが認められ



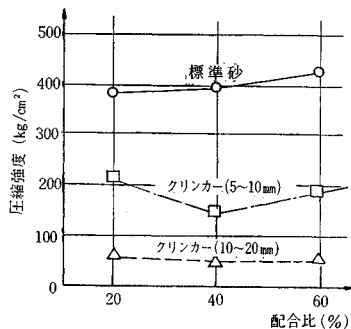


図-15 砂の配合比を変えた場合の比較砂およびクリンカーの配合比と圧縮強度との関係 (蒸気養生, 材令 1 日)

た。したがって内部には多くの空げきを持つ特徴があることがわかり、軽量コンクリート (比重 1.8 以下) としての利用も考えられる。

従来、火力発電所ボイラー内で高温度燃焼した微粉炭の残滓は微粉と粗粉とに分けられ、その微粉はすでに JIS 化されているが、粗粉のクリンカーについては、その規定がない。骨材としても強度の低いものしか得られないので、従来あまり使用されていなかった。しかし以上の骨材の種類による圧縮強度の比較試験の結果からつぎのことがいえる。高速度ミキサにより練りませる時は、5mm 以下であれば粗粒粉でも強度低下が少なく、十分使用できる。さらに、その配合比を変えることにより種々の強度のものが得られるが、練りませる時間、W/C、材質等によって強度の変動率が比較的大きい欠点があるので、この点については配合設計、施工上注意しなければならない。

### 9. その他二、三の特性

いままでは、圧縮強度の比較によって CS コンクリートの強度特性におよぼす CS 材料の種類や配合条件の影響を検討してきたが、圧縮試験と併用して、いくつかのケースについて引張強度試験、曲げ強度試験、すりへり試験ならびに弾性係数の測定などを行なったので、それらの結果について述べる。

#### (1) 引張強度試験

引張強度は JIS A 1113 の方法によって求めた。この

試験はつぎの配合条件

$$[CaO + Ca(OH)_2] / Ash = 20\%, 25\%, 30\%$$

$$Slag / [Ash + CaO + Ca(OH)_2] = 30\%, 60\%$$

$$W/C = 32\%, 35\%$$

を用い、骨材は図-16 に示すものを用いて合計 91 個の供試体について行なわれた。使用骨材とその試験結果を図-16 に示す。ここで行なった試験範囲では、引張強度は圧縮強度の 1/14~1/21 であるが、富士製鉄鉱滓を用いた場合は 1/23~1/27 とかなり小さい値を示した。

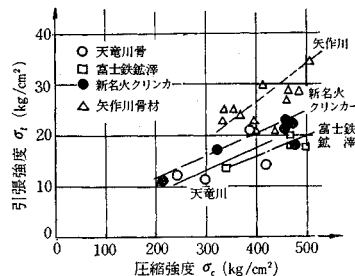


図-16  $\sigma_c$  と  $\sigma_t$  との関係

#### (2) 曲げ強度

曲げ強度試験は、水中養生を施した材令 28 日の 15×15×53 (cm) 供試体 (合計 6 個) を用い、ASTM C 293 による中点荷重を受けるたわみ試験により求めた。この場合の配合と試験結果を表-6 に示す。

#### (3) すりへり試験

CS コンクリートの耐摩耗性に関する試験としてすりへり試験を行ない、普通コンクリートの場合と比較した。

試験は、供試体を取りつけたドラム状の回転部内に鉄製ロッドを挿入し、ドラムの回転によりロッドが供試体面に摩耗作用を与える構造のロッド方法 (電研式すりへり試験機) によって行なった。

比較の対象とした供試体の種類、配合条件、すりへり係数は表-7 および図-17 に示す。試験は材令 14 日において湿式により合計 24 個の供試体について行ない 1 時間、3 時間、6 時間でのすりへり量を測定した。

この結果、CaO 配合のものは、Ca(OH)<sub>2</sub> 配合のものより圧縮強度と同様すりへりに対する抵抗性も大きいことがわかった。

表-6 配合ならびに試験結果

配 合 (kg/m <sup>3</sup> )									試 験 結 果		
Ash	CaO	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaSO <sub>4</sub>	slag	セメント	水	砂	CaCl <sub>2</sub>	圧縮強度 $\sigma_c$	曲げ強度 $\sigma_b$	$\sigma_b/\sigma_c$
514	62	26	15	370	72	318	635	21	332 kg/cm <sup>2</sup>	76 kg/cm <sup>2</sup>	1/4.4

表-7 配合条件と試験結果

供試体の種類	配合条件	養生条件	すりへり係数 (mm <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup> )			圧縮強度 $\sigma_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
			1時間	3時間	6時間	
I CS(CaO 配合)	CaO/Ash=20%, スラグ配合比 30%, W/C=40%	蒸気養生	85	384	1016	379
II CS[Ca(OH) <sub>2</sub> 配合]	Ca(OH) <sub>2</sub> /Ash=25%, スラグ配合比, 30%, W/C=38%	水中養生	246	685	1503	247
III 普通コンクリート	CS コンクリートと同程度の強度を有する配合	〃	130	362	616	356
IV 普通モルタル		〃	323	882	1378	328

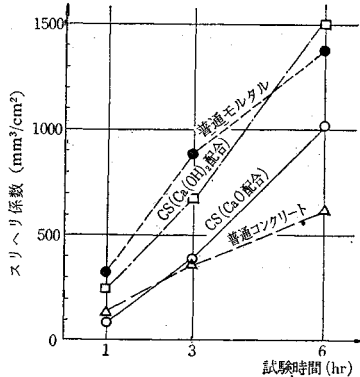


図-17 試験時間とすりへり係数との関係 (蒸気養生, 材令1日)

(4) 弾性係数

供試体としては表-8に示す配合で、蒸気養生後材令7日のもの(供試体数9個)を用い、静弾性係数は鏡式(湯浅式)ひずみ測定器を用いて応力ひずみ曲線を求め、破壊荷重のほぼ1/3点においてヤング率を算出した。一方動弾性係数は、静弾性係数測定に先きだてて共振振動法によって測定した。それらの結果、圧縮強度と弾性係数との関係は表-8のとおりである。

表-8 配合と試験結果

配合 (kg/m <sup>3</sup> )						試験結果			
Ash	CaO	Slag	水	砂	CaCl <sub>2</sub>	圧縮強度 $\sigma_c$	静弾性係数 $E_s$	動弾性係数 $E_D$	$E_D/E_s$
626	157	352	397	568	23	kg/cm <sup>2</sup> 424	kg/cm <sup>2</sup> 170 000	kg/cm <sup>2</sup> 215 000	1.26

10. あとがき

本研究は大量に排出される各種工場残滓を適宜配合し、それらの経済的な有効利用をはかり、建設資材としても新分野の開発を意図したものである。実験により極微粒子のゲル化合物を比較的均等に作ることに成功したと思われるモルタル、コンクリートの力学的性状を明らかにした。これらの残滓はこれまで通常都市周辺部にあって排出、堆積されて飛散、流下などにより公害の因をなすことが多かったが、開発されれば一変して建設資材となり、美化工事にも使用することができて、社会益も

少なくないものと信ずる。

非ポルトランド系セメント質材料の成分や性状に基づいて、適当な材料をそれぞれ適量配合し、完全な練りませにより均質なモルタル、コンクリートとし、さらに加熱蒸気養生の前後における熱管理条件を配慮すること等、強度発現のために考えることのできるあらゆる手法を積み重ねれば、均質で高強度を有する非常に優れた力学的性状を示すモルタル、コンクリートを製造することのできる事が認められた。

CS コンクリートの品質性状を左右する要因は多いが本研究の結果によれば、とくに材料の成因、組成、鉱物組織等が重要な役割をもつことがあげられる。主材料としたシンダーアッシュフライアッシュは球形粒子であり、微粉炭の高温燃焼によって、煤煙とともに排出される時に空冷されたものであり、基本的にはガラス質であるが、性状によりポゾラン活性の差異があり、ことに8万倍拡大写真の観察によれば、完全結晶形をなすものは水和作用がきわめて長期にわたって粒子の内部におよぶことが予想される。また粒子中には微量(1%以下)の“空洞アッシュ”があってガラス質球状シェル構造となっている点も、練りませや成形後の力学的性状に影響のある一因子であると思われる。これらの点からいえば、フライアッシュよりもクリンカーの微粉碎粒子を使用するほうが好ましいと判断される。

つぎに圧縮強度については、普通コンクリートに比較して、同一配合でも各材料の配合比を変化させることによって、圧縮強度は自由に調節できるであろう。ブレン値 3000 cm<sup>2</sup>/g, 4000 cm<sup>2</sup>/g 等の定値, W/C, 骨材量, Ash 量を定値とした場合でも, CaO, または Ca(OH)<sub>2</sub>, および Slag の配合比をわずか 5% 程度変えただけでも強度差は大きく、最高は約 650 kg/cm<sup>2</sup> である。適量範囲としていえることは, CaO 系材料は Ash に対して 30% まで, Slag 材料は 40% までが実用限界であろう<sup>9)</sup>。

以上述べた本報告の研究に引き続いて、多方面にわたり広範囲の実験を行なっているが、施工面についても多くの問題点が考えられる。

終りに、本研究は、電力中央研究所技術研究所と当所との共同研究のうち、実用具体化のための開発研究の分担を行なった事項であり、とくに開発の立役者である同所の関研究室長と研究室の各位に終始指導を賜わり、実

験に対し貴重なご指導と、ご助言をいただいた岐阜大学大浜教授、名古屋大学 川本助教授、および分析等でご援助いただいた小野田セメント中央研究所 竹本次長はじめ当所の渡辺化学研究室長ならびに関係各位に対し心から感謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) Giovanni Malquori: Chemistry of Cement, Proc. of the Fourth International Symposium, Washington (1960), Paper VIII-3.
  - 2) 丸安・小林・阪本: 高炉セメントコンクリートの研究, 東大生産技術研究所報告, 第 15 卷, 第 4 号, 2 (1966) p. 215~281.
  - 3) 戸田: 極微粉体用モルタルコンクリートの高速混練機の開発について, 中電総合技術研究所, 研究報告書, No. 0067, 6 (1968), p. 31
  - 4) 粉体工学編集委員会: 粉体工学ハンドブック, KK 産業経済技術研究所, 9 (1959).
  - 5) 戸田・長谷川・朝倉: CS コンクリートの開発について, 中電総合技術研究所, 研究報告書, No. 0047, 1 (1968). (1969. 1. 4. 受付)
-