

混和材としてのフライ アッシュに関する研究

正員 吉 越 盛 次*

INVESTIGATIONS ON FLY ASHES AS POZZOLANIC ADMIXTURE

(Trans. of JSCE, No. 31, Nov. 1955)

By Moritsugu Yoshikoshi, C. E. Member

Synopsis: This article is a report by the author on a series of studies on the practical use of coal ashes of steam power plants. The article concludes by demonstrating that the various types of ashes are each useful as pozzolanic admixture. Particularly on fly ash, the article spells out in detail its effect on the properties of concrete and suggests new testing methods for the utilization of fly ash.

要 旨: 著者は、火力発電所捨灰の資源化を旨とした一連の実用化研究を報告し、各種のアッシュがポズラン混和材として、それぞれ有用であることを明らかにする。特にフライ アッシュについては、これがコンクリートの性質におよぼす影響を細かく追求して論じ、さらにフライ アッシュ実用上の試験方法について新しい試みを示す。

目 次

- | | |
|---------------------------------|--|
| I まえがき | の性質におよぼす影響 |
| II 概 要 | [1] コンクリートおよび試験方法 |
| [1] ポズラン混和材としてのフライ アッシュ | 1 コンクリート材料 |
| [2] 火力発電所の概況および捨灰 | 2 コンクリート |
| [3] 試験研究の目的と範囲 | 3 強度試験方法 |
| III コットレル系フライ アッシュの化学的ならびに物理的性質 | 4 透水試験方法および耐透水指数 |
| [1] フライ アッシュ | 5 凍結融解試験方法 |
| [2] 試験方法 | 6 断熱温度上昇試験方法 |
| 1 比重試験方法 | 7 乾燥収縮試験方法 |
| 2 粉末度試験方法 | [2] フライ アッシュがまだ固まらないコンクリートの性質におよぼす影響 |
| 3 吸着性試験方法 | 1 コンクリートのコンシステンシーにおよぼす影響 |
| 4 所要水量比試験方法 | 2 フライ アッシュ オキカエ率およびコンクリートの配合と単位水量との関係 |
| 5 ポズラン活性試験方法 | 3 砂の粒度がフライ アッシュを用いたコンクリートの単位水量におよぼす影響 |
| [3] 試験の結果 | 4 フライ アッシュの所要水量比とフライ アッシュを用いたコンクリートの単位水量との関係 |
| 1 化学成分 | 5 AEコンクリートの単位AE剂量におよぼす影響 |
| 2 色 | 6 コンクリートのブリージングにおよぼす影響 |
| 3 比重 | [3] フライ アッシュがコンクリートの強度におよぼす影響 |
| 4 単位容積重量 | 1 フライ アッシュの品質がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響 |
| 5 粒子形状 | 2 フライ アッシュ オキカエ率およびコンクリートの配合が圧縮強度におよぼす影響 |
| 6 粉末度 | 3 フライ アッシュが普通および中庸熱ポルトランド セメントを用いたコンクリートの |
| 7 吸着性 | |
| 8 所要水量比(所要のフローをうるに必要な水量) | |
| 9 ポズラン活性 | |
| 10 ポルトランド セメントの凝結時間におよぼす影響 | |
| 11 ポルトランド セメントの安定性におよぼす影響 | |
| 12 ポルトランド セメントの水和熱におよぼす影響 | |
| IV コットレル系フライ アッシュがコンクリート | |

* 電源開発KK設計課長代理 (関西電力出向)

- 圧縮強度におよぼす影響
- 4 養生方法がフライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度におよぼす影響
- 5 フライ アッシュがコンクリートの引張強度におよぼす影響
- 〔4〕 フライ アッシュがコンクリートの透水性におよぼす影響
- 〔5〕 フライ アッシュがコンクリートの耐久性におよぼす影響
- 1 凍結融解に対する抵抗性
 - 2 硫酸ソーダ溶液に対する抵抗性
- 〔6〕 フライ アッシュがコンクリートの水和熱による温度上昇におよぼす影響
- 〔7〕 フライ アッシュがコンクリートの乾燥収縮におよぼす影響
- V ポンド アッシュならびにサイクロン系フライ アッシュの利用に関する試験
- 〔1〕 概説
- 〔2〕 ポンド アッシュの利用に関する試験
- 1 ポンド アッシュ
 - 2 ポンド アッシュの化学成分ならびに物理的性質
 - 3 ポンド アッシュを用いる混合ポルトランドセメントの製造について
- 〔3〕 サイクロン系フライ アッシュの利用に関する試験
- 1 サイクロン系フライ アッシュの化学成分ならびに物理的性質
 - 2 各種ミルによるサイクロン系フライ アッシュの粉碎試験
 - 3 粉碎したサイクロン系フライ アッシュがコンクリートのコンシステンシーおよび圧縮強度におよぼす影響
- VI 結語
- 付録 フライ アッシュ仕様書案

I. ま え が き

戦後国土再建の水力工事が始まるとともに、海外技術の進歩がつきつぎに紹介された。このうちで、ダムของコンクリートに関して、最もわれわれが目を見つめたものは、AEコンクリートと、ボゾラン混和材特にフライアッシュの使用という二項目であつた。AEコンクリートは、平岡ダム(昭和25年)を始めとして、ただちにその技術が採り入れられたが、フライアッシュはそう簡単には進まなかつた。フライアッシュを始めて水力関係者に紹介したのは、当時日本発送電KKより Hungry Horse Dam の建設工事を視察し、Bureau of Reclamation で H. S. Meissner 氏よりフライアッシュの説明をうけた野瀬正義氏で、昭和25年初めのことであつた。

昭和26年関西電力KKの発直足後より、同氏によつて管下に巨大な火力発電所をもつ同社が、コンクリート材料としてアッシュの試験研究を率先遂行すべきであることが主張された。一方当時、丸山ダムの早急な完成が望まれ、多岐にわたる技術的検討の結果、ダムコンクリートの硬化熱の処理が問題となり、わが国最初のプレクーリングが実施されたが、同時に発熱源の減少をはかるダムコンクリートのセメント使用量の低減、ないしはボゾラン混和材によるセメントのおきかえも大いに考えられた。ここにおいて、昭和26年度末に、アッシュの試験研究を行うことの基本方針がたてられ、昭和27年度より「火力発電所のフライアッシュ利用に関する試験研究」に着手し、量および質の両面より、その経済性ならびに技術的問題の調査研究を行い、試験設備の設置を含めて、昭和29年度末までに約10,000,000円の試験研究費を投じた。この間、昭和28・29年度に共同研究として建設技術研究補助金(主任研究員:大西英一氏)をうけた。

この試験研究により、火力発電所の各種アッシュのボゾラン混和材としての有用性を確認し、昭和28年度には、アッシュを用いた混合ポルトランドセメントを製造して、水力建設工事に使用し、その工費の節減に寄与し、昭和29年度初めには、尼ヶ崎第二火力発電所のフライアッシュ取り出しのためのかりの設備を設けてその生産を始め、これを角川発電所工事をはじめ佐久間ダムならびに秋葉ダムの仮設備コンクリートに供した。また昭和29年度末より尼ヶ崎第二火力発電所のフライアッシュ取り出しの本格設備の設置工事が始められ、昭和30年度より秋葉ダムならびに鳩ヶ谷ダムの本体コンクリート用としてそのフライアッシュを用いることが決定せられるにいたつた。

本報告は、これらの一貫したアッシュ実用化研究のうち、主としてコットレル系フライアッシュの諸性質、ならびにそれがコンクリートの性質におよぼす影響について述べ、フライアッシュの実用上の一、二の問題を追及し、粉碎フライアッシュならびにポンドアッシュを用いた混合ポルトランドセメントについて記述する。

本研究を行うに当つて、吉田徳次郎先生より、当初に御激励を賜わり、終始御懇篤な御指導をいただいた。また東京大学教授 国分正胤博士、京都大学教授 近藤泰夫博士、大阪大学教授 安宅勝博士の御教示をいただいた。試験の実施に当つては、関西電力KK常務取締役 一本松珠璣氏、同建設部長 目黒雄平氏より熱心な指導監督を賜つた。ここに謹んで御礼を申し上げる次第である。

本試験を担当した者は、関西電力KK建設部、西井望雄、中山謙治、野網利雄、小林正凡の4君で、「フライ

アッシュの吸着性試験」に関しては、特に野網、小林両君の努力に負うところが大きい。また一部の試験実施に当つては、大阪窯業セメントKKならびに日本セメントKKの協力を受け、おのおの植村次郎氏ならびに高橋公三氏をわずらわすところが大きかつた。

II 概 説

〔1〕 ポゾラン混和材としてのフライ アッシュ

ポゾランの使用は決して新しいものではない。ポゾランは、今から2000年以上も前に火山灰(Pozzuolana)と生石灰をセメント性材料として用いたローマ時代にさかのぼる。しかし前世紀の前半にポルトランドセメントが発明され、それが量産され普及するにおよんでポゾランの影はうすくなつてきた。ポゾランが新しい意義をもち、再び脚光をあびるようになったのは比較的最近のことであつて、ポルトランドセメントの混和材としてである。

セメント性材料としてポルトランドセメントのみを用いたモルタルまたはコンクリートは、酸またはある種の塩の作用、特に硫酸塩の土によつて侵され、さらに普通の水によつても分解される。また反応性の骨材を用いる場合には、ポルトランドセメント中のアルカリとの反応による破壊的な膨張が生ずる。ところが良質のポゾランを混和材として用いれば、コンクリートの化学的侵食に対する抵抗性をいちじるしく増し、コンクリート中に生ずる遊離石灰を減じて溶出の機会を少なくして、その耐透水性を増すとともに、特に近来いちじるしく問題となつたアルカリ骨材反応に対して有効な防止手段となることが明らかになつた。これがポゾラン登場の有力な理由の一つである。

ポルトランドセメントは、その水和反応に際してかなりの熱を発生する。これがコンクリートの温度上昇を招来し、マスコンクリートにおいてヒビワレを生ずる原因となる。マスコンクリート施工における各種の冷却工法・ブロック工法などは、すべてこのヒビワレ防止を眼目とするものであるが、その根本的な解決策の一つとしてポゾランによるポルトランドセメントのおきかえが行われるようになった。そしてこれに付随してマスコンクリートの他の品質の改善も行われることが明らかになつた。これがポゾラン登場の他の理由である。この点をいまいし詳細に検討してみる。

元来ダムマスコンクリートは、強度・水密性・耐久性などの所要の品質のみを問題とするならば、水セメント比より定まる単位セメント量は一般にいわれている量(220 kg/m³~180 kg/m³)に必ずしもしぼられる必要がない。しかし、これを下廻る単位セメント量では、所要のウォーカーピリチーを確保し、プラスチチーを維持し、ブリージングその他材料の分離を制限すること、つまり適切な施工を実施することが困難であるとされている。いいかえれば、ダムのマスコンクリートでは、その品質を確保するための必要量以上のセメントを、施工のために用いなければならない状況である。

このことは、さらに、カロリー源としてのセメントのために、ブロック工法ならびに冷却工法(自然および人工)など、一連の余分なヒビワレ防止の工法を課してきたとみることができる。マスコンクリートにおけるポゾランの混和使用は、それだけカロリー源であるセメントの使用量を減じ、しかも、所要の品質をそこなうことなく、むしろ、この品質を向上しながら、コンクリートのウォーカーピリチーを増大し、ブリージングやコンクリートのあらあらしさを制限することができることを明らかにした。この間、ポゾランの使用について、AEコンクリートの研究も逐次展開された。AEコンクリートは、そのコンクリートのウォーカーピリチー・プラスチチー・ブリージング・強度・凍結融解に対する耐久性などにおける特性が明らかになるとともに、マスコンクリートに採用されるに至つたが、マスコンクリートにおけるAE剤使用の要点は、他のコンクリートにおけるように、凍結融解に対する耐久性を眼目とするものではなく、コンクリートに適当量のエントレインドエアをもちこめば、ウォーカーピリチーを改善し、ブリージングを制限することができるからであるとされている。このことは、AE剤を用いることによつて、従来施工のためにのみ必要とされていた余分のセメントを使用する根拠をなくすることが可能となつたことを意味するものである。AE剤を用い、同時にポゾラン混和材によつてセメントをおきかえることにより、マスコンクリートの単位セメント量をさらに減少できる可能性が生じてくるに至つた。一方、ダムコンクリートの施工設備の機械化は、急速に進歩し、施工速度のいちじるしい高度化を来した。ここにおいてマスコンクリートのリフト・施工期間の短縮ならびにブロックの拡大などが企図され、これがAE剤およびポゾラン混和材の併用によつて、大幅に低減された単位セメント量を通じて、実施の根拠をうることとなつた。ダム建設は、近時工期の短縮が要求される傾向が強い。これらはポゾラン混和材の使用を大幅に要求することとなつた有力な根拠である。

ポゾラン混和材登場の第三の理由は経済性にある。各種のポゾラン混和材は、一般にポルトランドセメントよりも安い。いいかえればセメントより安いことがポゾラン混和材としての条件の一つである。従つて、ポゾランでセメントの一部をおきかえ使用することによつて、一次的にコンクリートの単価を低減し、コンクリートの施工上のブロック工法・冷却工法などの手間ははぶくことにより二次的に工費を節約し、さらにコンクリートの品質を改善することによつて最終的にコンクリートの経済性にひ益する。

ポゾラン混和材の使用がいちじるしく盛んになつたのは、第二次大戦中およびその後のことであつて、世界はあげてセメントの供給不足に悩まされた。この空気に刺戟されてマスコンクリートの単位セメント量をその品質をそこなうことなく低減しようとする広範な研究が行われた。この間の事情は Bureau of Reclamation のダムを年代順に並べた表-2・1に見るとおりである。

表-2・1 Bureau of Reclamation におけるポゾランの使用

ダムの名称	高さ (m)	堤体積 (m ³)	工事期間	セメント性材料 使用量(kg/m ³)	ポゾラン	
					種類	オキカエ率 (%)
Arrowrock	108	487 000	1911~1915	214	粉砕花崗岩	45
Elephant Butte	92	482 000	1911~1916	223	粉砕砂岩	48
Hoover	221	2 480 000	1931~1936	223	使用せず	—
Grand Coulee	168	8 100 000	1933~1942	223	使用せず	—
Shasta	184	5 000 000	1938~1945	223	使用せず	—
Bonneville	44	380 000	1935~1936	201	カ焼頁岩および プミサイト(その他)	25
Friant	97	1 630 000	1939~1942	216	プミサイト	17
Altus	34	53 700	1941~1945	196	プミサイト	26
Hungry Horse	159	2 220 000	1948~1952	164	フライアッシュ	32
Canyon Ferry	67	300 000	1949~1953	140	フライアッシュ (予定)	32
Monticello	90	200 000	1953~	140	フライアッシュ (予定)	28
Yellowtail	156	1 340 000	1953~	140	フライアッシュ	30

さて、フライアッシュは、他のポゾラン混和材に比して次の点が特に優れている。

(1) 良質のフライアッシュは、これをコンクリートに用いることによつてコンクリートの単位水量を減少することができる。これは他のポゾラン混和材には見られない特徴であつて、ポゾラン活性がほぼ同程度の材料について水セメント・ポゾラン重量比で定まるコンクリートの性質を問題にするならば、単位セメント量を減少することができる。また単位水量を一定にするならば、コンクリートまたはモルタルのウォーカービッチ・ポンプアビリティなどをいちじるしく大きくすることができる。

(2) 他のポゾラン混和材に比していちじるしく有利な生産条件をもっている。すなわち、フライアッシュは石炭の燃焼熱の利用ということから生ずる副産物で、元来は廃物である。フライアッシュはポゾランとして採掘・運搬・集積の費用を要せず、またポゾラン活性を与えるために特に焼く費用を要せず、さらに粉砕の費用もいらぬ。

以上のような背景のもとに、ポゾランとしてのフライアッシュは戦後実用の時代に入ったのである。

〔2〕 火力発電所の概況および捨灰

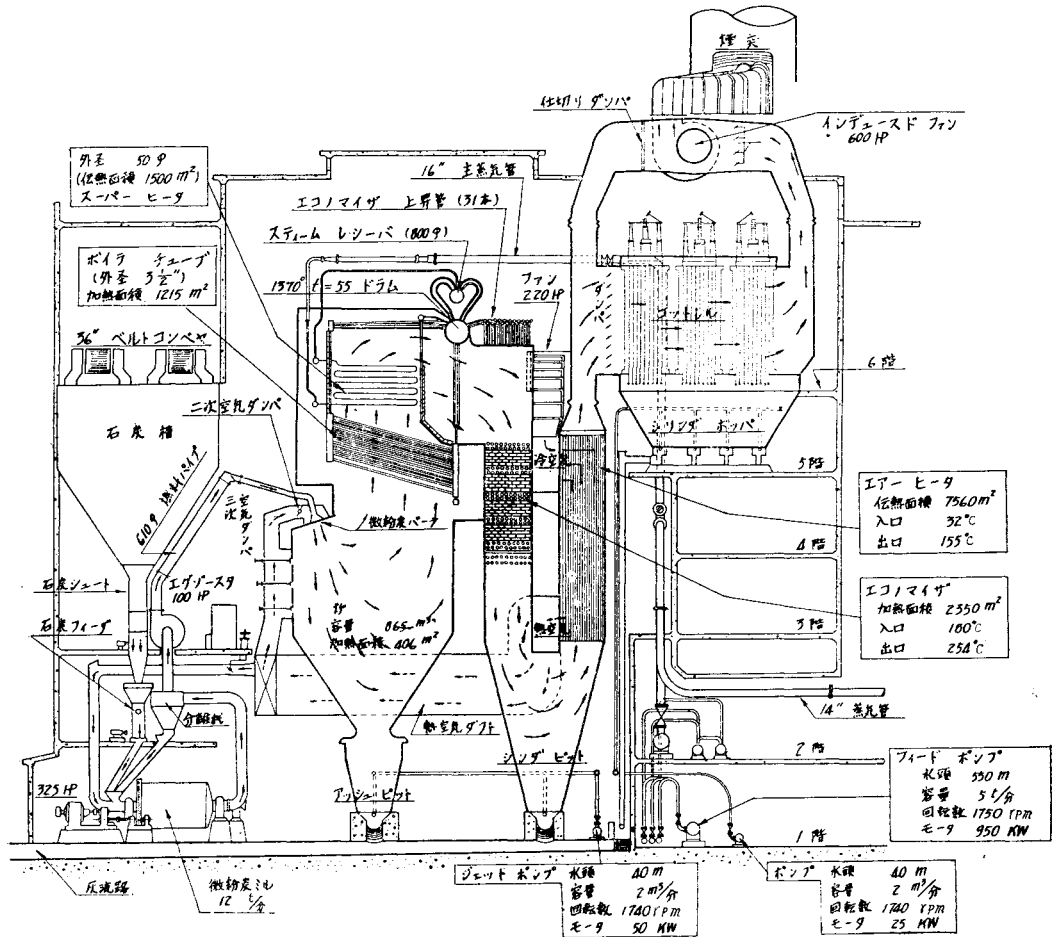
わが国火力発電設備の大半をもつ関西地区を例にとつて、火力発電所の概況および捨灰について記述する。関西地区火力発電の設備能力は表-2・2のとおりで、建設中の2発電所を含めて138万kWに達し、その年間消費石炭量は150万tにおよんでいる。これらの火力発電所のうちにはいわゆる老朽火力も含まれているが微粉炭燃焼方式をとる新鋭火力は5カ所79万kWである。

これらの火力発電所に用いる石炭は九州炭および北海道炭を主とし、その平均品位は6000kcal/kg、灰分22%で、火力発電所の年間の捨灰の生成量は30万tを越すものとみられる。これらの灰は集積して処理しなければならぬが、一部は埋立地の築造に使用し、他は船積して海に廃棄し、漁業との間に問題を生じ、あるいは、発電所近傍の田畑をつぶしてこれに捨てることもある。このように火力発電所の捨灰に要する費用は必ずしも小さいものではない。

火力発電所のボイラにおいてできる灰の種類を知るため、ストーカ方式はしばらくおき、微粉炭燃焼を行う尼ヶ崎第二火力発電所を例にとつてみる。図-2・1はそのボイラの見取図であつて、ミルで粉砕された200メッシュ通過85%の石炭は、空気とともに炉の中に送られる。この石炭は、微粉炭バーナから出るとあたかもガ

図-2・1 尼ヶ崎第二発電所ボイラ縦断面図

汽圧：43kg/cm² 汽温：445°C
 最大蒸発量：200 t/時 伝熱面積：1 215m²



ス体のように瞬時に点火し、長大な焰を形成して燃焼する。炉内の温度は1400°Cを越し、石炭中の灰分が溶けようするのに十分である。灰の受ける作用は、火山灰の受ける作用に依っていると考へられている。溶けようした灰は、その表面張力によつて小さな球状になり、熱気に乗せられて運ばれる。この間、あるものは互いに衝突してその粒径を増し、あるものは炉壁に附着する。熱気は、ボイラ チューブ・スーパー ヒータ・エコノマイザ・エアー ヒータなどを通過し、集塵器を経て煙突に至る。これらの中で所定の熱交換が行われて、スチームを作るとともに、熱気は、急速に冷却され、溶けよう状態にあつた灰の粒子は、急激に固化してガラス質となる。

この一系統の操作のうちで石炭の不燃分である灰は、(1) 炉の直下にあるアッシュ ピット、(2) エコノマイザよりエアー ヒータに移る直下にあるシンダ ピット、(3) 集塵器の下のシンダ ホップにおいて回収されるものと、さらに (4) それらに捕捉されずに抜け出す煙とに分けられる。(1)(2)(3)の灰をそれぞれアッシュ クリンカ、シンダ アッシュおよびフライ アッシュと呼ぶことにする。アッシュ クリンカは、炉壁に附着した溶けよう状態のアッシュの層がある厚さに達したとき、自重によつてピット内の水に落下したものが主体であつて、塊状のアッシュである。シンダ アッシュは、気流の方向変換の際に振り切られるアッシュの粒子であつて、5~0.5mm 程度のものが多い。フライ アッシュはシンダ アッシュより細かいもので、その粒度分布は集塵方式によつて相違する。フライ アッシュの集塵方式には、電気的方式であるコットレルと機械的方式であるサイクロン・ローテミューレなどがある。フライ アッシュは、これらの集塵方式によつて、コットレル系フライ アッシュとサイクロン系フライ アッシュに大別することができる。各種アッシュの大略の量的な割合は 表-2・3 のとおりである。

表-2.2 関西電力株式会社

発電所名	所在地	竣工年度 (増設工事を含む) 自~至	認可出力 (kW)	年間発生電力量 (k.W.H)	汽 缶			燃焼装置	集 塵 型 式	
					数	缶数—汽圧 (kg/cm ²)	汽 温 (°C)			缶数—蒸発量 (t/時)
宮 津	京都府与謝郡 津宮 津	1936	13 000	50 387 100	4	32	415	32.0	移 床	
琴 浦	和歌山 市 浦 毛	1922~40	14 000	13 657 300	8	15.46	366	4—12.56 4—17.00	鎖 床	
堺 式	堺 市 式 島	1927~35	21 000	73 643 300	5	22.5	400	52.0	移 床	
木 津 川	大阪市住吉区 北加賀屋町	1928	63 000	142 757 900	8	28.0	366	4—60 4—74	4—移 床 4—微粉炭	コットレル
福 崎	大阪市港区 北 福 崎	1920~23	36 000	2 333 200	11	7—17.6 4—18.3	333	28.6	下 込	
春日出第二	大阪市此花区 北安治川通	1922~38	65 000	29 829 700	32	15.8	316	4—17.6 28—15.0	6—下 込 26—鎖 床	
安 治 川	大阪市福島区 下 福 島	1938	16 000	44 762 400	3	33	430	48	1—鎖 床 1—移 床	コットレル
尼ヶ崎東	尼ヶ崎 市 東 浜 町	1924~28	140 000	114 677 900	16	20.4	334	4—45.5 4—52.3 4—62.5 4—75.0	4—鎖 床 8—微 粉 炭 4—重油専焼	コットレル
尼ヶ崎第一	尼ヶ崎 市 末 広 町	1933~36	318 000	763 747 000	12	42	445	145	微粉炭	コットレル マルチ サイクロン ダブル サイクロン
尼ヶ崎第二	尼ヶ崎 市 末 広 町	1937~53	300 000	1 103 845 000	11	43	445	200	微粉炭	コットレル マルチ サイクロン
湊 川	神戸市長田区 駒 栄 町	1922~25	12 500	1 661 100	8	17.5	380	14	移 床	
飾 磨 港	姫路市飾磨区 中 島	1932~53	75 000	258 395 400	7	6—46 1—47	400 410	4—56.8 2—63.5 1—16.0	微粉炭	シングル サイクロン ローテミューレ
網 干	姫路市網干区 大 江 島	1927~37	20 000	35 995 900	6	17.6	375	4—18.1 2—34.0	鎖 床	
(多 奈 川)	大阪府泉南郡 多奈川町谷川	建設中 (1956)	150 000	(788 000 000)	2	103	543	254	微粉炭	サイクロン
(姫 路)	姫路市飾磨区 中 島	建設中 (1955~57)	141 000	(741 200 000)	3	2—63 1—92	2—490 1—515	2—150 1—270	微粉炭	マルチ サイクロン (第二期分未定)
合 計	(建設中を 含む)		1 093 500 (1 384 500)	2 635 693 500 (4 164 893 500)					微粉炭方式 のみについて	コットレル サイクロン ローテミューレ

表-2.3 微粉炭燃焼を行う火力発電所のアッシュ分類表

	アッシュ名称	分 類	採 取 場 所	アッシュの大きさ	生 成 状 態	生成割合 (%)
1	クリンカ アッシュ	塊 状	アッシュ ビット	5 mm以上	5 mm以上の粒状および不規則な塊状	20~30
2	シング アッシュ	粗 粒 部	シング ビット	5~0.5mm	粒 状	15~25
3	フライ アッシュ	細 粉 部	集 塵 器	0.5mm以下	粉 状	40~50
4	煙					8~12

これら各種のアッシュは、ビットおよびホッパにおいて捕捉回収すると、ただちに水で流送する方式をとることが多い。これは、火力発電所の清潔維持のためであつて、火力発電所は、電気の生産工場であつて、アッシュ

火力発電設備一覽表

装置 設備一個/年 台数	汽機		発電機		燃料			燃料消費率 (kg/ kWH)	灰捨装置	備考
	数	台数—定格 出力 (kW)	数	容量 (k.V.A)	年間消費 石炭量 (t)	発熱量 (kcal/kg)	灰分 (%)			
4-1	2	13 000	2	12 500	35 149	5 867	25.0	0.697	アッシュ ホッパ→ドラッグ チ エン コンベヤ→ベルト コンベ ヤ→灰車運搬→灰捨場	
	2	7 000	2	8 750	12 893	6 148	21.8	0.944	ゼット アッシュ→ サンド ポンプ→ ポンド ↓ 灰車→ウインチ搬出→埋立地	No.1,2,B 昭和28.9.1 休止
	4	2—7 000 1—12 500 1—10 000	4	2—8 750 1—15 625 1—12 500	55 849	6 224	20.9	0.758	ゼット アッシュ→ ジ ポンプ→ ポンド→ クレーン ↓ →ベルト コンベヤ→ 船 貯灰場	
2-1	2	31 500	4	2—37 500 2—2 140	72 950	6 189	21.1	0.746	アッシュ ホッパ→灰車	
	4	10 000	4	12 500	2 492	5 822	25.8	1.064	アッシュ ホッパ→灰車	No.1,2,T No.4~7B 昭和28.9.1 休止
	3	2—20 000 1—25 000	3	2—25 000 1—30 000	25 705	6 351	18.9	0.861	ゼット ポンプ→アッシュ ポンド →ドレッチヤ ポンプ→ 灰溜槽 →ジブ クレーン	No.1,2,T No.17~32B 昭和28.9.1 休止
3-2/3	1	18 500	2	1—18 750 1—1 430	30 770	5 993	22.6	0.685	ドラッグ ベルト→ ベルト コンベヤ→ コンベヤ ↓ →積込 集灰場→ジブ クレーン	
4-1/2	7	4—25 000 1—40 000 1—1 000 1—1 000	7	4—25 000 1—43 750 1—1 500 1—6 250	80 408	6 126	21.5	0.891	ゼット ポンプ→クラッシュヤ→ア ッシュ ポンド→サンド ポンプ	
3-1 4-1 5-1	6	53 000	8	4—62 500 4—4 290	440 350	6 123	21.6	0.618	水洗→アッシュ ポンド→クレ ーン→灰捨場→ベルト コンベ ヤ→船	
9-1 2-1	4	75 000	4	93 750	594 565	6 151	21.7	0.572	集灰場→ボート ↑ ↓ トランス ↓ ゼット アッシュ→ ジブ ポンプ→ ポンド→ クレーン→コンベヤ ↓ ドレッチヤ ポンプ→船	
	2	12 500	2	15 625	2 397	5 917	22.0	1.440	ホッパ→スクレーパ→トロッコ ↓ →船 集灰場	
6-2 1-1	3	2—37 500 1—3 000	3	2—46 875 1—3 750	143 131	6 080	23.1	0.621	サイクロン→貯灰槽→灰車または ↓ トロッコ ↓ ボイラ→灰流ポンプ→アッシュ ポンド	
	3	1—10 000 2—12 500	3	1—12 500 2—15 625	27 895	6 068	21.3	0.774	灰車手押	
2-2	2	75 000	2	93 750	(392 000)	(5 300)		(0.497)	ボイラ→ホッパ→ コンベヤ サイクロン → ↓ →アッシュポンド→灰捨ポンプ	
2-1	2	1—66 000 1—75 000	2	1—81 176 1—88 235	(408 000)	(5 300)		(0.550)	ホッパ→灰流溝→灰流海水ポンプ →アッシュ ポンド→ポンプ→埋 立地	
18 17(21) 1					1 524 554 (2 324 554)					

の生産工場ではないという立場がとられているからである。流水で送られる各種のアッシュは、これを集めてアッシュ ポンドに運び、ここでアッシュを洗でん集積して処理するのが普通である。アッシュ ポンドで得られるアッシュは、前述したアッシュ クリカ・シンダ アッシュ・フライ アッシュの混合物であつて、これを便宜上ポンド アッシュと呼ぶ。

以上アッシュの種類を尼ヶ崎第二火力発電所について述べたが、ボイラ構造・集塵方式の異なるに従つてアッシュの種類・量も多少は異なる。しかしその内容は大きな差はないと考えてよい。いまアッシュ利用の立場より各発電所のアッシュを見ると、発電所によつてその対象となるアッシュの種類も異なるが、これを大別して、(1)コットレル系フライ アッシュ、(2)サイクロン系フライ アッシュ、(3)ポンド アッシュの3つとすることができる。そしてこの3種のアッシュについておのおのの利用の方途をうるならば、火力発電所のすべての捨灰について利用の途をつけたといふ。

〔3〕 試験研究の目的と範囲

前節の記述より知りうるように、微粉炭燃焼を行う新鋭火力におけるアッシュの大半はフライアッシュの形で回収される。本試験研究は、火力発電所のアッシュ全体のポゾラン混和材としての有効利用を目的としたものであるが、上記の理由によつてフライアッシュの研究に主力を注ぐこととなつた。

1) コットレル系フライアッシュ コットレル系フライアッシュの諸性質については、すでに米国における^{1) 2) 3)} 諸家の研究があるので実用化研究の主力は、米国およびわが国の石炭の相違・発電所設備の相違などを考慮してフライアッシュの性質の試験においた。またわが国のセメントを用いたコンクリートに及ぼす各種の性質について試験し、同時にフライアッシュをA/Eコンクリートに使用する場合に生ずる問題について新しい研究を行った。さらにフライアッシュの採取設備の改造に関する指針をうるとともに、フライアッシュの試験方法ならびに仕様の検討も行った。

2) ポンドアッシュ ポンドアッシュをポゾラン混和材として使用することを目標として、そのポゾラン活性・粉砕方式を研究するとともに、これをセメントクリンカとともにミルで粉砕して混合ポルトランドセメントとして利用することを研究し、その試験方法および仕様について検討した。

3) サイクロン系フライアッシュ サイクロン系フライアッシュは、種々試験の結果、フライアッシュとしてそのまま用いるのは適当でないことが明らかになつたが、サイクロン系のもは、コットレル系のものに比較して、その設備が多く回収量も大きいので、これを粉砕して利用することを研究した。この際フライアッシュ粒子の球形を破壊する範囲を必要最小限にとどめるため、差別粉砕のできる粉砕方式を用いて検討を行った。ポゾラン活性・所要水量比の試験とともに、粉砕フライアッシュを用いたコンクリートの強度試験その他を行った。

Ⅲ コットレル系フライアッシュの化学的ならびに物理的性質

〔1〕 フライアッシュ

コットレル系フライアッシュの試験には尼ヶ崎第二火力発電所を対象とした。実験期間の前半においては、フライアッシュはまだ水で流送されていたので、乾燥状態のままフライアッシュを採取するためには、ボイラ運転休止のときを利用しなければならなかつた。当時、フライアッシュの試料採取に当つては、それにききだつてあらかじめコットレル集塵器ホッパ下のゲートを閉め、運転中にフライアッシュホッパに十分に貯溜させておき、運転休止後にそれらを採取した。このようにして採取するフライアッシュは、本質的にはボイラ運転中に採取するフライアッシュとなんら相違するところはないが、ただホッパ下のゲートを閉めるのがやや遅く運転休止のほとんど直前に行われる場合には、ボイラ運転休止直前の燃焼不調の影響がフライアッシュに現われるのを避けることができなかつた。しかし、このことを利用して品質の異なるフライアッシュを随時採取し、フライアッシュの品質の相違がコンクリートの諸性質におよぼす影響を実験し、フライアッシュの変動の範囲を把握することもできた。実験期間の後半では、フライアッシュ採取用仮設備が整備されたのでボイラ運転中に試料を採取した。

試料は、実験期間の前半ではコットレル集塵器をもつ1号～9号の全9缶のボイラより採取し、後半では採取設備の関係で5号缶および6号缶のみより採取した。

試験に用いた試料フライアッシュは総計約60種におよぶが、そのうち本報告で述べるものは36種であり、その内訳はボイラ運転休止中に採取したものが18種、運転中に採取したものが18種である。これらのうち、直接コンクリート実験に供したものは主として前者のフライアッシュである。これらのフライアッシュのおもな性質は表-3・1に示すとおりである。

〔2〕 試験方法

フライアッシュの物理的・化学的性質の試験方法のうち、特に検討したものをあげれば次のとおりである。

1. 比重試験方法 比重試験は、JIS R 5201(セメントの物理試験方法)に準じて行つた。ただし試料は70gとし、フライアッシュを比重ビンに入れ終つてから液面の目盛を読むまでの時間は、気泡を完全に追い出すため、約24時間以上とした。気泡を完全に追い出すのにこのように長時間を要するのは、後述のようにフライアッシュ粒子がある程度の空隙をそれ自体の中に有するためであると思われる。

2. 粉末度試験方法 フライアッシュの粉末度は、88 μ フルイ残分の試験・44 μ フルイ残分の試験・ブレン方法による比表面積の測定・比重計(浮ハカリ)方法による粒度分析および比表面積の測定など各種の方法によつて行つた。

表-3-1 試験に用いたフライ アッシュのおもな性質

フライ アッシュ	採取日時	採取箇所	化 学 成 分 (%)										比重	粉 末 度				
			シリカ (SiO ₂)	アルミナ (Al ₂ O ₃)	酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)	酸化カルシウム (CaO)	マグネシウム (MgO)	無水硫酸 (SO ₃)	炭素 (C)	強熱減量	合計	88μ フルイ残分 (%)		44μ フルイ残分 (%)	ブレン比表面積 (cm ² /g)	ブレン比表面積 (cm ² /g)	10μ 以下の粒子 (%)	
A	5.25.1953	尼-2コ ットレル 8号缶	57.6	27.3	7.0	3.8	2.3	0.3	0.9	1.6	99.9	2.13	1.8	12.0	3 680	2 560	28.2	
A'	"	"	57.6	27.1	3.9	3.2	2.5	0.5	0.9	1.6	96.3	2.09	2.0	—	3 440	—	—	
B	"	9号缶	57.1	27.2	6.4	3.8	2.2	0.5	1.7	2.4	99.6	2.08	2.3	18.0	3 270	2 270	23.4	
C	"	"	55.7	25.8	6.8	3.4	2.4	0.6	2.5	3.0	97.7	2.09	5.2	22.8	3 240	2 150	21.1	
D	1.—.1953	—	59.0	28.2	5.2	3.3	1.9	0.4	0.7	2.0	99.9	2.05	3.5	15.3	2 660	1 600	12.1	
E	5.22.1953	5号缶	59.2	25.7	6.6	3.7	1.6	0.4	2.2	2.6	99.7	2.12	8.3	26.2	3 110	2 080	20.4	
F	5.9.1953	6号缶	58.2	28.1	5.4	3.7	1.8	0.5	1.5	1.9	99.7	2.04	10.2	38.4	2 750	1 540	15.1	
G	"	5号缶	56.7	27.7	5.4	3.8	1.9	0.7	3.0	3.9	100.0	1.96	13.2	40.8	2 280	1 170	5.6	
H	"	6号缶	58.8	27.9	5.8	3.1	1.6	0.5	1.4	1.9	99.7	2.01	14.6	42.4	2 410	1 370	11.0	
I	"	5号缶	58.4	27.5	2.7	3.1	2.2	0.6	3.4	4.3	98.7	1.95	17.3	50.8	2 000	1 030	4.9	
J	"	4号缶	58.3	27.8	4.3	3.4	1.9	0.7	2.6	2.8	99.1	1.98	22.6	57.6	1 800	820	1.2	
K	9.9.1953	1号缶	56.9	28.9	6.1	3.4	1.8	0.5	1.1	1.5	99.0	2.07	3.0	14.9	3 180	2 150	19.3	
L	"	8号缶	53.7	28.1	5.9	5.7	2.8	0.8	0.5	1.3	98.2	2.08	4.3	18.2	2 810	1 890	15.3	
M	"	9号缶	56.6	26.7	7.2	4.4	2.0	0.7	1.0	1.4	98.9	2.08	3.3	15.3	3 290	2 100	17.9	
N	1.28.1953	5号缶	57.6	26.5	6.9	3.8	2.7	0.6	0.7	0.9	98.9	2.16	2.4	16.1	3 460	2 780	32.3	
O	5.22.1953	9号缶	57.5	24.9	5.8	3.3	1.9	0.6	1.5	2.4	97.9	2.15	3.0	18.3	2 940	1 740	13.9	
P	4.7.1954	—	—	—	—	—	—	—	—	1.1	—	2.16	2.8	15.1	2 700	—	—	
Q	3.22.1954	8号缶	54.1	30.4	6.7	5.5	1.9	0.3	0.3	0.7	99.8	2.12	2.0	13.2	3 620	2 840	30.5	
628	6.28.1954	5,6号缶混和	55.3	29.9	5.8	3.3	1.5	0.5	—	2.3	98.6	2.17	1.8	11.3	4 540	3 240	36.8	
630	6.30."	"	55.3	29.5	6.0	3.4	1.5	0.7	—	2.2	98.9	2.16	2.4	18.5	4 250	—	—	
72	7.2."	"	54.7	29.6	5.6	3.5	1.9	0.7	—	2.7	98.2	2.15	2.9	13.4	4 560	—	—	
75	7.5."	"	54.2	29.2	6.1	3.3	1.9	0.7	—	2.2	97.8	2.11	2.5	13.8	4 100	—	—	
77	7.7."	"	55.6	28.9	5.4	3.4	1.7	0.8	—	2.5	98.0	2.13	2.3	17.0	4 320	—	—	
79	7.9."	"	53.5	28.5	6.1	3.7	2.1	0.8	—	2.2	96.9	2.15	3.0	10.0	4 730	2 860	33.4	
712	7.12."	"	53.9	28.7	6.5	3.8	1.7	0.8	—	2.4	97.8	2.14	1.9	17.8	4 160	—	—	
714	7.14."	"	53.3	30.6	5.8	3.9	1.5	0.7	—	2.0	97.8	2.14	1.9	13.7	4 140	—	—	
716	7.16."	"	—	—	—	—	—	—	—	2.0	—	2.10	1.1	11.3	4 050	3 280	33.4	
721	7.21."	"	—	—	—	—	—	—	—	2.3	—	2.13	1.3	12.0	4 230	3 040	35.0	
723	7.23."	6号缶	56.3	28.6	5.4	4.5	1.5	0.2	1.2	1.9	98.4	2.09	2.5	13.6	3 800	2 910	30.4	
724	7.24."	"	—	—	—	—	—	—	—	1.3	—	2.08	2.1	—	3 430	—	—	
730	7.30."	5,6号缶混和	—	—	—	—	—	—	—	2.1	—	2.06	2.2	8.7	3 830	3 010	35.3	
82	8.2."	"	—	—	—	—	—	—	—	2.2	—	2.17	2.3	11.9	4 120	3 000	34.7	
89	8.9."	"	—	—	—	—	—	—	—	2.3	—	2.13	2.4	13.2	4 270	3 340	36.4	
96	9.6."	"	—	—	—	—	—	—	—	1.8	—	2.12	2.6	10.6	4 220	2 780	33.0	
1115	11.15."	5号缶	—	—	—	—	—	—	—	1.1	—	2.11	2.2	11.6	3 350	2 920	31.5	
1116	"	6号缶	—	—	—	—	—	—	—	1.3	—	2.12	1.9	10.4	3 520	3 000	34.0	

備考 尼-2コットレル系フライ アッシュのうちアルファベットで示したものはボイラ運転休止時に、数字で示したものはボイラ運転中にそれぞれ採取したものである。化学分析は大阪窯業セメントKK研究所で行ったものである。
表中の空白部分は未試験もしくは不明の部分である。

(1) 88μフルイ残分およびブレン比表面積の試験方法：88μフルイ残分およびブレン方法による比表面積の測定は、ともにJIS R5201（セメントの物理試験方法）に準じて行った。

ブレン方法による場合のフライ アッシュのポロシチーは、標準試料のポロシチーにできるだけ近く、しかも供試圧縮体作製に最も適したポロシチーを実験的に求め、その値を用いることを原則とした。フライ アッシュの最適ポロシチーは主として粒度分布および粒子表面の粗滑の程度などによつて相違するが、一般に0.42~0.54の範囲にあるようである。またその範囲内では、ポロシチーが最適値から±0.04程度変化しても、比表面積の値の変化は、試験誤差の範囲をわずかに上廻る程度にすぎず、実用的には、なんらさしつかえないものと思われる。表-3-2は、品質の相違する4種のフライ アッシュについてポロシチーを変化させた場合の比表面積の

試験結果の一例を示したもので、フライ アッシュの品質によつて適当なポロシチーが相違すること、適当な範囲内ではポロシチーをある程度変化させても、比表面積の試験値は、実用的には、すべて同じとみなしうることなどが認められる。

表-3・2 ブレーン方法におけるポロシチーと比表面積との関係についての実験結果

フライ アッシュ	44 μ フルイ残分 (%)	ポロシチー	ブレーン比表面積 S (cm ² /g)	最適ポロシチー	$\frac{S_{max}-S_{min}}{S_{mean}} \times 100$
No. 1116	11.6	0.50	3 540	0.42	2.3
		0.48	3 520		
		0.46	3 560		
		0.44	3 480		
		0.42	3 520		
L	18.2	0.52	2 730	0.48	2.9
		0.50	2 750		
		0.48	2 820		
		0.46	2 880		
		0.44	2 850		
No. 79	10.0	0.54	4 500	0.52	4.0
		0.52	4 570		
		0.50	4 710		
		0.48	4 490		
No. 31	31.0	0.55	2 900	0.56	4.4
		0.56	2 930		
		0.54	3 030		

(2) 44 μ フルイ残分の試験方法: 44 μ フルイは、米国標準試験フルイ No. 325 (フルイ ワク直径 8 in, 深さ 2 in, Tyler 社製) を用い、試験は主として湿式ふるい分けによつて行つた。試料は 50 g とし、フルイへの水の散布には水道の蛇口 (直径 1 cm) をそのまま用い、その水量を約 13 l/分に調節して約 10 分間続けた。その後、残存試料をフルイとともに 110°C で乾燥し、残存試料の重量を測定して 44 μ フルイ残分 (%) を算出した。散布水量を約 13 l/分に調節したのは、水の散布によつて試料が飛散せず、かつフルイ ワクから水が越流しない範囲で水量が最大となるように定めたためである。

なお一部の試験は、前記の 44 μ フルイを用い、JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に準じて行つた。

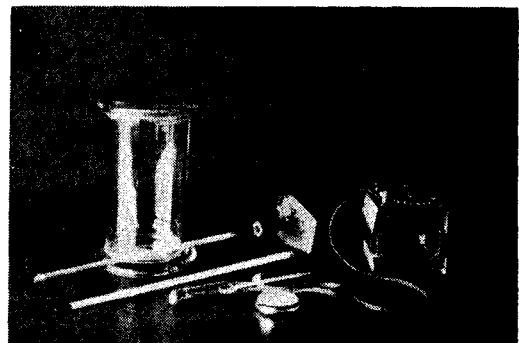
米国においてはフライ アッシュの 44 μ フルイによる試験は、一般にタービジメータによるポルトランドセメントの粉末度試験方法のうちの 44 μ フルイによる試験に準じて行うよう規定している。すなわち、44 μ フルイとしてはフルイ ワク直径 2 in, 深さ 3 in. のものを用い、試料を 1 g として 10 psi (0.7 kg/cm²) の圧力に調節したスプレイ ノズルで 1 分間湿式ふるい分けを行うものとし、かつ 44 μ フルイは試験回数 25 回ごとに 44 μ フルイ残分が既知の標準試料で検定するよう規定している。

この試験方法を採用しなかつたのは、44 μ フルイ検定用のセメント標準試料が入手できなかったためであるが、前記の試験方法によつても用いた 44 μ フルイが十分に信頼のおけるものであるので、所期の目的に対してはなんらさしつかえないと考えたからである。

(3) 比重計(浮ハカリ)方法による粒度分布および比表面積の測定方法: 通常、粉体の粒度分布の測定には沈降方法が最も多く利用されており、風フルイ方法⁽¹⁴⁾・ピペット方法⁽¹⁵⁾・タービジメータ方法⁽¹⁶⁾・比重計方法⁽¹⁷⁾および天ビン方法⁽¹⁸⁾など各種の方法がある。これらは粉体粒子が液体もしくは気体中を沈降する場合、沈降速度と粒子の大きさとの間に一定の関係があることを利用したもので、一般にストークスの法則が用いられる。フライ アッシュの粒度分析には、前記の各種の方法のうち、特に比重計方法を用いた。これは、この方法が測定装置・操作ともに簡便であり、しかも他の方法と同等の精度が期待できるからである。

比重計方法によるフライ アッシュの粒度分析は JIS A 1204 (土の粒度試験方法) に準じて行つた。ただし用いた比重計は、目盛浮バカリ 19 本組のうちの 1 本で、その測定範囲は 1.000~1.060 (最小目盛 0.001)

写真-3・1 比重計を用いたフライ アッシュの比表面積測定装置



である。また懸濁液を入れる容器には、メス シリンダの代りにガラス製円筒形容器 (内径 8.5 cm, 深さ 17 cm) を用い、粒度分布の計算に必要な供試懸濁液の容積は、その重量より算出した。試料の分散装置にはタービダメータ付属の攪拌装置を用いた。試料は 35 g とし、懸濁液の濃度が約 4% 程度になるように考慮した。分散剤としてポゾリス #90, 10% 溶液を 15 c.c. 用いた。

比重計方法によつて求めたフライ アッシュの粒度分布は、ある程度の試験誤差がさげられないので、これに対して 44μ フレイ残分の試験値を用い、次のような補正を行つた。

$$R_{(D)} = R'_{(D)} \times \frac{100-p}{R'_{(44)}} \dots\dots\dots D < 44 \mu$$

$$100 - R_{(D)} = (100 - R'_{(D)}) \times \frac{p}{100 - R'_{(44)}} \dots\dots\dots D > 44 \mu$$

ここに

$R_{(D)}$: $D \mu$ 以下の粒子の百分率 (%)

$R'_{(D)}$: 比重計方法より求めた粒子径加積曲線における $D \mu$ 以下の粒子の百分率 (%)

p : 44μ フレイ残分 (%)

フライ アッシュの比表面積は次のようにして計算した。まづ前記の補正を行つた粒子径加積曲線より、5・10・15・20・25・30・40・50・60 および 80μ の各粒子径に対応する重量百分率を求めて、5μ 以下・5~10μ・……60~80μ・80μ 以上の各粒子群ごとの百分率を算出し、(1)各粒子群における平均粒子径は最大径と最小径の平均値、(2)5μ 以下の粒子の平均径は 2.5μ、(3)最大粒子径は 100μ と仮定して各粒子群ごとにその表面積を計算し、それらの各粒子群における表面積を合計してフライ アッシュの比表面積とした。

表一3.3 比重計方法によるフライ アッシュの粒度分析の一例

試料フライ アッシュ : No.82 溶 媒 : 蒸溜水+ポゾリス #90 15g 懸濁液の平均温度 : T=22.4°C 比 重 : 溶 媒 . Sm=1.0010 フライ アッシュ : Sp=2.17 溶媒の粘性係数 : μ=0.0095 ポアズ 試料重量 : Wo=35g 懸濁液容積 : V=853.1cm ³							t : 沈降時間 (秒) R : 比重計の読み H : 沈降深さ (cm) $v = \frac{H}{t}$ = 沈降速度 (cm/秒) $k = \frac{(1.837\mu) 10^5}{Sp - Sm} = 14 920$ $D = \sqrt{\frac{10^2}{kv}}$ = 粒子径 (μ) $C = \frac{10^2}{Wo} \cdot \frac{Sp}{Sp - Sm} \cdot V = 4 520$ $W \% = C (R - Sm)$						
t	R	H	v	Kv	D	R-Sm	W%	D	W%		ΔW%	\bar{D}	$\frac{\Delta W\%}{D}$
									曲線より	補正值			
45	1.0212	9.18	2.04×10 ⁻¹	3 040	55.2	0.0202	91.3	0	0	0	10.8	2.5	4.318
90	1.0195	9.37	1.04×10 ⁻¹	1 550	39.4	0.0185	83.7	5	10.6	10.8	24.8	7.5	3.304
300	1.0160	9.76	3.25×10 ⁻²	485	22.0	0.0150	67.8	10	35.0	35.6	18.0	12.5	1.440
600	1.0130	10.10	1.68×10 ⁻²	250	15.8	0.0120	54.3	15	52.7	53.6	11.9	17.5	0.681
900	1.0111	10.32	1.15×10 ⁻²	172	13.1	0.0101	45.7	20	64.4	65.5	7.7	22.5	0.342
1 800	1.0080	10.66	5.93×10 ⁻³	88.5	9.4	0.0070	31.7	25	72.0	73.2	5.4	27.5	0.196
3 600	1.0055	10.95	3.04×10 ⁻³	45.3	6.7	0.0045	20.3	30	77.3	78.6	7.7	35	0.220
5 400	1.0040	11.12	2.06×10 ⁻³	30.7	5.5	0.0030	13.6	40	84.8	86.3	3.9	45	0.087
7 200	1.0030	11.23	1.56×10 ⁻³	23.3	4.8	0.0020	9.1	50	89.0	90.2	3.0	55	0.055
9 000	1.0020	11.34	1.26×10 ⁻³	18.8	4.3	0.0010	4.5	60	92.3	93.2	4.1	70	0.059
								80	97.0	97.3	2.7	90	0.030
								100	100.0	100.0			
比表面積 : $S = \frac{600}{Sp} \sum \frac{\Delta W\%}{D}$ = 2970 cm ² /g										$\sum \frac{\Delta W\%}{D} = 10.732$			

註) 44μ フレイ残分 : 11.9%
 粒子径加積曲線より求めた
 44μ 以下の粒子のパーセント : 13.4%

表-3.4 比重計方法の再現性に関する試験結果

フライアッシュ	比表面積(cm ² /g)		差	
	第1回	第2回	(cm ² /g)	(%)
H	1 370	1 410	40	2.9
C	2 150	2 180	30	1.4
No. 82	2 970	3 050	80	2.7
No. 1116	3 030	2 960	70	2.3

比重計方法によつて測定したフライアッシュの粒度分布およびそれにもとづいて比表面積を計算した結果の一例を示せば表-3.3 および図-3.1 のとおりである。

また表-3.4 は比重計方法によつて比表面積を求めた場合の再現性に関する試験結果の一例を示したもので、比重計方法が精度も高く、十分に信頼できる方法であることが認められる。

3. 吸着性試験方法 フライアッシュの吸着性を問題とすることになつた理由は、フライアッシュを用いたAEコンクリートの単位AE剤量は、フライアッシュの吸着性によらなければ規定できないことが明らかになつたからである。

予備的実験において、吸着される物質(吸着質)としてメチレンブルー(C₁₆H₁₈N₃S Cl·3H₂O、深青色の結晶性で水に可溶性)、醋酸およびドレシネートXなどについて比較検討した結果、メチレンブルーを用いるのが試験操作の容易さ・迅速さおよびその精度からいつてもすぐれたものであることがわかつた。すなわち、有機色素の一種であるメチレンブルーが、単に比色によつてその吸着の程度を判定、ないしは、測定できるのに対して、醋酸およびドレシネートXはアルカリもしくは酸による中和滴定を必要とするからである。

吸着質としてメチレンブルーを用いる場合、吸着の程度の測定方法として次の3つの方法が考えられる(以下単にメチレンブルーとあるのはその水溶液を意味する)。

- フライアッシュおよびメチレンブルーの量を一定にして、溶液の呈色状態を比較する方法
- フライアッシュの量を一定にして、メチレンブルーを徐々に加え、着色寸前の添加量を滴定によつて求める方法
- メチレンブルーの量を一定にして、フライアッシュを徐々に加え、脱色寸前の添加量を測定する方法

これらの3方法を検討した結果、(a)の方法が最もすぐれていることがわかつた。(b)、(c)の方法が(a)の方法にくらべて劣るのは、主として試験の操作に手数および時間を要する点であるが、もう一つ吸着現象の本質が考えられる。すなわち、吸着現象においては吸収現象などにおけるようないわゆる飽和状態は存在せず、ある物質に対する吸着量は吸着質の濃度によつて相違し、濃度が大きくなるに従つて増加すること(図-3.2)および吸着量がほぼ一定値に達しない範囲の濃度においても吸着質の一部は吸着されずに残つて平衡状態を保つことなどにより、着色もしくは脱色前後における溶液の色調の変化がきわめて鈍いため(中和滴定の際の指示薬による変色に比して)十分な精度が期待できないからである。

(a)の方式による試験方法は次のようにして行つた。まづ試験管にメチレンブルー水溶液(濃度:35 mg/l) 25 c.c.を入れ、ついで試料フライアッシュ1gを加えて約1分間手で十分に振とうしたのち、この懸濁液を濾過し、濾過後の水溶液を比色の試液とした。この試液について後述する比色方法によつてその試液中におけるメチレンブルーの残存濃度を測定した。フライアッシュ1g当りの吸着量は、原水溶液のメチレンブルー濃度および試液中のメチレンブルー残存濃度から算出した。すなわち

$$d = \frac{1}{40} (N - N')$$

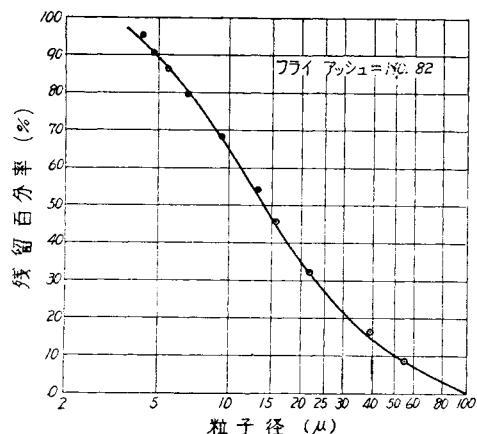
ここに d : フライアッシュ1g当りのメチレンブルー吸着量 (mg)

N : 原水溶液メチレンブルー濃度 (mg/l)

N' : 濾過試液メチレンブルー濃度 (mg/l)

比色方法によるメチレンブルー水溶液の濃度測定には、次の2つの方法を用いた。

図-3.1 比重計方法により求めたフライアッシュの粒子径加積曲線の一例



(a) 濃度既知のメチレン ブルー 水溶液を何種類かつくつておいてそれを標準液とし、試液の色調がどの標準液に等しいかを見ることによつて試液の濃度を求める。

(b) 濃度既知のメチレン ブルー水溶液を1種類つくつておいてそれを標準液とし、試液の液層の厚さを加減して標準液と色調が等しくなる点を求め、ベールの法則によつて試液の濃度を求める。

(a)に対しては、光電管比色計による方法と視察による方法の2方法を用い、(b)に対してはいわゆる比色計が入手できなかったため視察による方法のみを用いて比較した。その結果、視察による方法によつて十分な精度をうる事が明らかになった。

4. 所要水量比試験方法 フライ アッシュの品質判定の一方法として、モルタルによるいわゆる所要水量比試験が行われている。

本試験においては JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に準じてフローが 200~215mm になるような基準配合の水量を定め、フライ アッシュの所要水量比は基準配合のフローと等しくなるような水量を求めて次式により算出した。

$$\text{所要水量比(\%)} = \frac{\text{試験配合の水量}}{\text{基準配合の水量}} \times 100$$

なお、試験はモルタルの配合・砂の種類・フライ アッシュの種類などを変えて行い、さらに豊浦標準砂を用いた場合の所要水量比の検討並びに所要水量比と粉末度および強熱減量との関係などを調べた。

5. ポゾラン活性試験方法

(1) 石灰ポゾラン砂モルタル強度試験方法: フライ アッシュの石灰モルタル試験を行つたのは、フライ アッシュのポゾラン活性をできるだけ早急に判定するためであるが、本試験では Bureau of Reclamation Specification No.1904 "Calcined Reactive Silicious Material for Use in Concrete" (石灰との反応性試験方法) に準じて行つた。この試験は、重量配合比 1:2:9 の石灰ポゾラン砂モルタル供試体 (5×10 cm 円柱) を 54°C に保つた密閉容器内で一週間促進養生を行つたのち、圧縮強度試験を行い、その強度が 42 kg/cm² 以上となることを要求するものである。本試験では石灰は JIS 規格の特級品を用い、砂は主として相馬砂を用いた。なお一部の試験では Ottawa 標準砂も用いた。

(2) セメント・フライ アッシュ砂モルタル強度試験方法: セメント モルタルの圧縮強度試験は、アサノ マスコン セメントを用い、基準配合および試験配合の両者について行つた。供試体の製造および圧縮強度試験は、次の事項を除きすべて JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) によつた。

a. 配合 試験に用いた配合は次のとおりである。

	基準配合	試験配合
セメント (g)	520	364
フライ アッシュ (g)	0	156
豊浦標準砂 (g)	1 040	1 040
水	200~215 のフローを うるのに必要な水量	同 左

b. 供試体の養生 供試体は、成形後 24 時間 20 ± 3°C に保つた湿気箱に入れて保存したのち脱ワクシ、ただちに完全に気密な容器に入れ、40°C で試験時まで養生した。ただし強度試験は、供試体を 20 ± 3°C に冷やしてから行つた。

c. 試験材令 圧縮強度試験は材令 28 日で行つた。

d. 圧縮強度比 圧縮強度の試験値は供試体 6 個の平均値をとり、圧縮強度比は次式で計算した。

$$\text{圧縮強度比(\%)} = \frac{\text{試験配合の圧縮強度}}{\text{基準配合の圧縮強度}} \times 100$$

[3] 試験の結果

1. 化学成分 表-3・1 に示した尼ヶ崎フライ アッシュ 25 種について化学成分の範囲およびその平均値を示せば 表-3・5 のとおりである。なお同時に米國産フライ アッシュの化学成分についても同表に示す。

表-3・5 より次のことが認められる。

(1) 尼ヶ崎フライ アッシュの主成分はシリカ・アルミナ・酸化鉄などで、そのうちシリカが最も多く約 56 %

図-3・2 フライ アッシュの吸着等温度曲線の一例

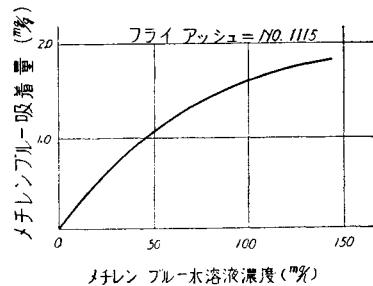


表-3.5 フライ アッシュの化学成分

フライ アッシュ		化 学 成 分 (%)							
		シリカ SiO ₂	アルミナ Al ₂ O ₃	酸化鉄 Fe ₂ O ₃	酸化カルシウム CaO	マグネシア MgO	無水硫酸 SO ₃	炭 素 C	強熱減量
尼ケ崎フライ アッシュ 26種 (本研究の対象 としたもの)	範 囲	53.3~59.2	24.9~30.6	2.7~ 7.0	3.1~ 5.7	1.5~2.8	0.2~0.8	0.3~ 3.4	0.7~ 4.3
	平均値	56.4	28.0	6.2	3.7	2.0	0.6	1.5*	2.2
米産フライ アッシュ 16種 (Davisが実験 に用いたもの)	範 囲	28.1~49.0	16.4~30.7	3.9~19.0	1.0~10.6	0.6~1.9	0.5~2.3	1.1~30.3	9.1~36.5
	平均値	39.9	24.0	9.8	4.1	1.0	1.1	12.1	13.1

* 18種のフライ アッシュの平均値である。

を占め、アルミナは約28%でこれにつき、酸化鉄は約6%となっている。米産のフライ アッシュにくらべるとシリカがやや多く、酸化鉄がやや少ない。

(2) 採取条件による尼ケ崎フライ アッシュの化学成分の変動はきわめて少なく、実用的にはすべて同一とみなしうる。これは、使用石炭の品質がボイラの性能の方から相当厳密に規定されていることによるものである。

(3) 尼ケ崎フライ アッシュの強熱減量は0.7~4.3%の範囲にあるが、これは米産のフライ アッシュにくらべてきわめて少ない値である。一般にフライ アッシュの強熱減量が少ないほどポゾラン活性もすぐれているようであるが、強熱減量が約3%以下では強熱減量とそのポゾラン活性との間には特に関係は認められない。

表-3.6 はフライ アッシュを88 μ 以上・88~44 μ ・44 μ 以下の3種にふるい分け、各粒子群ごとに化学分析を行った結果の一例である。この表より、強熱減量を除けばフライ アッシュの化学成分は、その粒子の大きさによつてほとんど相違しないことが認められる。また強熱減量は粗粒子群の方が多く、特に88 μ 以上の粒子群においては他の2群に比していちじるしく多くなっている。このことはフライ アッシュ中の炭素粒子自体がかなり大きいことを示すものである。

2. 色 フライ アッシュの色はその生成条件特に炉内の温度によつてかなり相違し、灰白色のものもあればやや黒色をおびたものもある。一般的にいつて炉内の温度が高いときは灰白色、低いときは黒色のフライ アッシュを生ずるが、その色が異なる場合にも化学成分・物理的性質などがほとんど同じであることが多い。強熱減量の多いフライ アッシュ、すなわち含有炭素の多いフライ アッシュほど色が黒いように想像されるが、実際は必ずしもそうではない。むしろ全く逆な場合もある。従つてフライ アッシュの色とそのポゾラン活性との間には関係が認められず、その意味では、フライ アッシュの色は、その品質を判定するめやすとはならない。

色の黒いフライ アッシュを用いればコンクリートの表面が黒くなり構造物の美観を損ずるが硬化後時日を経たコンクリートはその表面に炭酸石灰の白い斑点を生じ、これが色彩的に一種の保護膜の役目を果たしてくれるの

表-3.6 粒子群別のフライ アッシュの化学成分

フライ アッシュ		化 学 成 分 (%)							
名 称	粒子群	強熱減量	シリカ (SiO ₂)	アルミナ (Al ₂ O ₃)	酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)	酸化カルシウム (CaO)	マグネシア (MgO)	無水硫酸 (SO ₃)	炭 素 (C)
G	88 μ 以上	10.2	51.4 (57.3)	24.8 (27.6)	4.5 (5.0)	5.3 (5.9)	1.4 (1.8)	1.1 (1.3)	8.1
	88 μ ~44 μ	3.6	56.5 (58.6)	26.3 (27.3)	5.4 (5.6)	4.7 (4.9)	1.4 (1.5)	0.6 (0.6)	2.5
	44 μ 以下	2.0	56.4 (57.6)	27.4 (28.0)	7.4 (7.6)	3.6 (3.7)	1.7 (1.7)	0.2 (0.2)	1.3
H	88 μ 以上	4.9	58.3 (61.3)	25.9 (27.2)	4.0 (4.2)	3.9 (4.1)	1.5 (1.6)	tr	3.2
	88 μ ~44 μ	2.0	58.7 (60.0)	24.6 (25.1)	6.7 (6.8)	4.7 (4.8)	1.6 (1.6)	0.2 (0.2)	1.1
	44 μ 以下	1.5	57.1 (58.0)	27.0 (27.4)	7.6 (7.7)	3.6 (3.7)	1.9 (1.9)	tr	0.8
723	88 μ 以上	4.2	58.7 (61.4)	27.5 (28.7)	2.2 (2.3)	4.2 (4.4)	1.2 (1.3)	0.2 (0.2)	3.1
	88 μ ~44 μ	2.6	58.3 (60.0)	27.8 (28.6)	3.6 (3.7)	4.4 (4.5)	1.3 (1.3)	0.2 (0.2)	1.4
	44 μ 以下	1.2	55.6 (56.3)	29.6 (30.0)	5.8 (5.9)	4.5 (4.6)	1.7 (1.7)	0.4 (0.4)	0.5
備 考	カッコ内の数字は強熱減量を除いた部分に対する百分率を示す。 化学分析は大阪窯業セメントKK研究所で行つたものである。								

で、黒いフライ アッシュを用いたコンクリートの色も時日の経過とともに白くなり、実際上問題でなくなる。

3. 比重 表—3.1 に示したように、尼ケ崎フライ アッシュの比重は2.0~2.2の範囲にあり、平均して2.1前後である。この値は米国産フライ アッシュの比重が約2.4前後であるのにくらべてやや小さい。これは主として両者の化学成分の差、すなわち、尼ケ崎フライ アッシュが米国産のフライ アッシュに比してシリカがやや多く、酸化鉄が少ないことによるものと思われる。

表—3.7 はフライ アッシュを88 μ 以上・88~44 μ ・44 μ 以下の3種にふるい分け、各粒子群ごとに比重を測定した結果の一例であつて、粗粒子群におけるほどその比重が小さくなつてゐる。このことはフライ アッシュの化学成分がほぼ同じ場合には、フライ アッシュの粉末度が粗いものほど比重が小さいこと、逆にいえば比重の小さなものほど粉末度が粗いことを示すものと思われる。これは表—3.1 に示したフライ アッシュのうち、粉末度が特に粗い G・H・I・J などの比重が約2.0以下となつていて、他のフライ アッシュよりも一段小さな値を示していることから裏づけることができる。

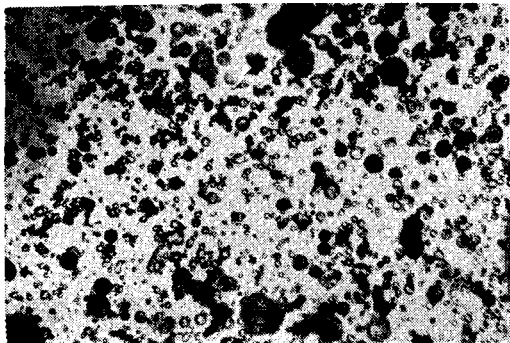
概して、比重が2.0以下であるようなフライ アッシュは粉末度も粗く、従つてそのポズラン活性もあまり期待できないことが多い。粗粒子群のフライ アッシュほど、その比重が小さいのは、粒子が粗くなるほど粒子自体の空隙率が増加することによるものと思われる。このことはフライ アッシュを粉碎した場合に比重が増加することによつても明らかである。

4. 単位容積重量 表—3.8 はフライ アッシュの単位容積重量の一例を示したものである。フライ アッシュの単位容積重量は、セメントと同じく比重・粉末度・粒子表面の粗滑の程度・測定方法などによつて相違するが、一般に良質の尼ケ崎フライ アッシュについていえば、軽く詰めた場合には約900 kg/m³、十分揺りこんで詰めた場合には約1000 kg/m³である。

5. 粒子形状 フライ アッシュは、一般に球状をなした粒子が多数含まれている。これは前述のようにその成生の過程からも容易に考えられることであつて、写真—3.2~3.8 は、フライ アッシュの顕微鏡写真を7種のフライ アッシュについて示したものである。これによつて明らかなようにフライ アッシュの粉末度のいかにかわららずその大部分が球状をなしていることが認められる。

写真—3.2 フライ アッシュの顕微鏡写真

種類：コットレル系フライ アッシュA
プレーン比表面積：3 680 cm²/g



表—3.7 各粒子群別のフライ アッシュの比重

フライ アッシュ	比 重			
	全 粒 子	88 μ 以上	88~44 μ	44 μ 以下
P	2.16	1.87	1.96	2.21
723	2.09	1.82	1.98	2.14
1116	2.12	1.78	1.96	2.13
S ₁	1.96	—*	1.91	2.08
備 考	*印のものは、比重試験において浮遊粒子成分多く液面の読取困難であつたのでこれを除外した。			

表—3.8 フライ アッシュの単位容積重量

フライ アッシュ	88 μ フルイ 残分 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)		空 隙 率 (%)	
		ゆるくつ めた場合	十分にゆり こんだ場合	ゆるくつ めた場合	十分にゆり こんだ場合
C	5.2	820	960	61	54
L	4.3	840	980	60	53
M	3.3	810	940	61	55
N	2.4	980	1 040	55	50
O	3.0	810	920	62	57
P	2.8	880	990	59	54
723	2.5	900	950	57	55
1116	1.9	940	1 050	56	50
S ₁	30.0	570	690	71	65
S ₂	9.2	780	900	63	57
S ₃	3.0	790	860	65	61
330	8.8	860	1 020	57	49

備 考 用いた容器は内径25cm、高さ28cmの鉄製円筒容器である。

写真—3.3 フライ アッシュの顕微鏡写真

種類：コットレル系フライ アッシュB
プレーン比表面積：3 270 cm²/g

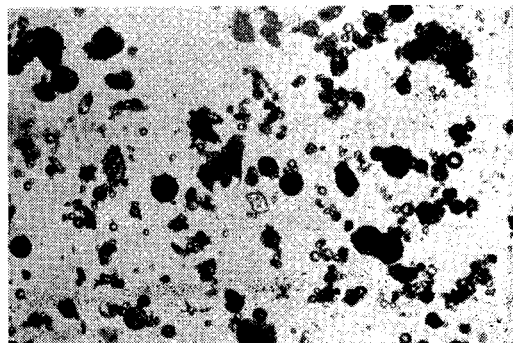


写真-3.4 フライ アッシュの顕微鏡写真
種類:コットレル系フライ アッシュ D
ブレン比表面積: 2 660 cm²/g

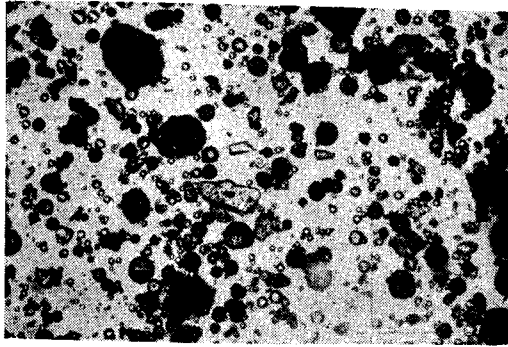


写真-3.7 フライ アッシュの顕微鏡写真
種類:コットレル系フライ アッシュ G
ブレン比表面積: 2 280 cm²/g

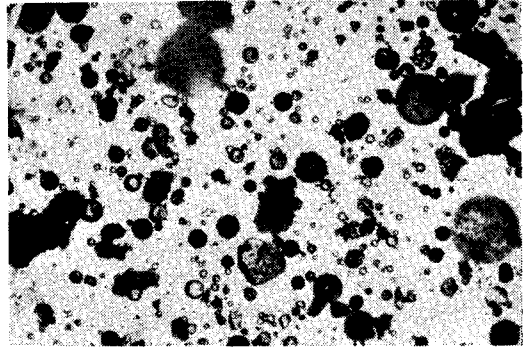


写真-3.5 フライ アッシュの顕微鏡写真
種類:コットレル系フライ アッシュ E
ブレン比表面積: 3 110 cm²/g

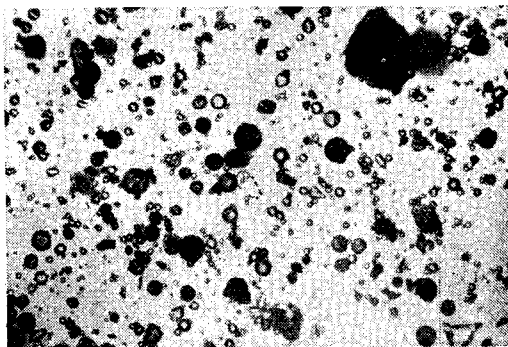


写真-3.8 フライ アッシュの顕微鏡写真
種類:コットレル系フライ アッシュ J
ブレン比表面積: 1 800 cm²/g

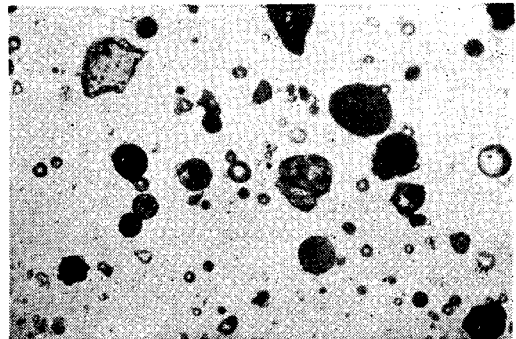


写真-3.6 フライ アッシュの顕微鏡写真
種類:コットレル系フライ アッシュ F
ブレン比表面積: 2 750 cm²/g

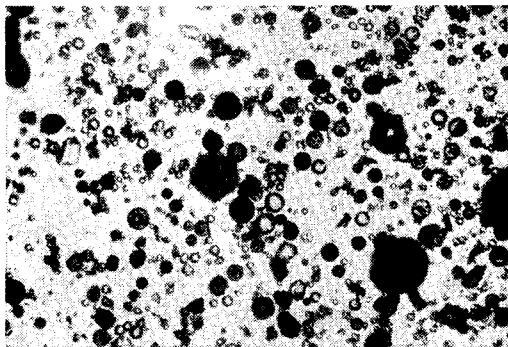


表-3.9 フライ アッシュの風フルイ
試験結果と粒子形状

フライ アッシュ	実粒 子径 (μ)	残分 (%)	限界粒子形状 (100コ中)	
			円形(コ)	多角形(コ)
B	14.6	65.6	70	30
	20.0	53.0	79	21
	30.3	36.2	50	50
	43.2	21.2	52	48
M	14.6	67.6	78	22
	19.7	59.6	72	28
	31.8	39.6	65	35
	45.4	22.4	60	40
No.1115	14.1	58.4	89	11
	18.1	47.6	80	20
	31.6	29.5	61	39
	43.0	16.6	65	35

またフライ アッシュ B・M・No. 1115 について、風ふるい方法により限界粒子径 40・30・20・15μで、風ふるいし、各粒子群ごとに粒子100個の形状を観察し、これを円形部分と多角形部分とに分類して表わした結果は表-3.9 のとおりであり、大体の傾向として細粗いづれの

粒子群においても球状粒子が支配的であること、およびこの傾向は細粒子群におけるほど大きくなることわかる。これは前述したように粗粒子群におけるほど炭素含有量が増加することによるものと考えられる。

このようにフライ アッシュは、その粒子の大部分が球状をなしていることによつて、同じ粉体の中でも粉砕工程を経たセメントや他のポゾランにはみられない特性をもっている。

6. 粉末度 表—3・1 に示した数値にもとづいて、粉末度の範囲および平均値を、ボイラ運転休止時に採取したものと、ボイラ運転中に採取したものとの2群に分けて示せば 表—3・10 のとおりである。

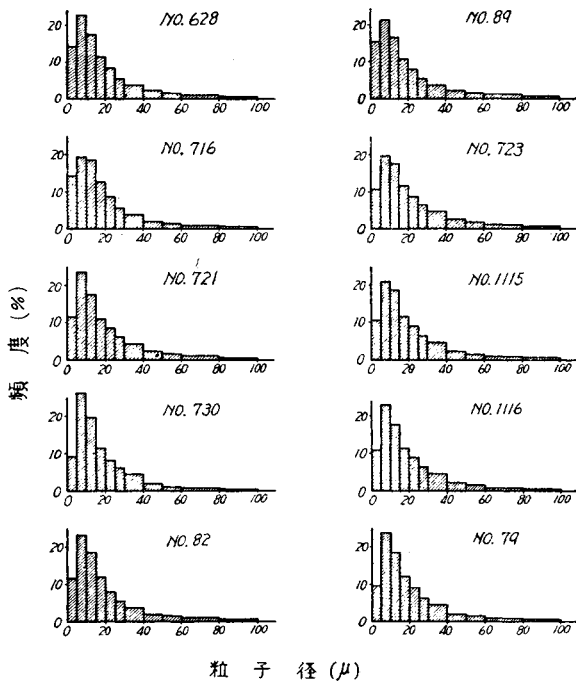
表—3・10 試験研究の対象とした尼ヶ崎フライ アッシュの粉末度

フライ アッシュ		88 μ フルイ残分 (%)	44 μ フルイ残分 (%)	ブレン比表面積 (cm ² /g)	比重計方法比表面積 (cm ² /g)
ボイラ運転休止時に採取したもの18種	範囲	1.8~22.6	12.0~57.6	1 800~3 680	820~2 840
	平均値	6.8	25.6	2 920	1 680
ボイラ運転中に採取したもの18種	範囲	1.1~3.0	8.7~18.5	3 350~4 730	2 780~3 340
	平均値	2.2	12.9	4 090	3 030

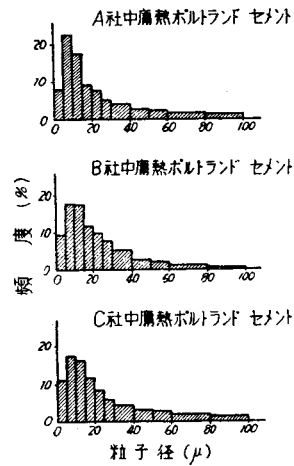
表—3・1 および 表—3・10 から次のことが認められる。

(1) 試料とした尼ヶ崎フライ アッシュのうち、ボイラ運転休止時に採取したフライ アッシュの粉末度は88 μ フルイ残分で 1.8~17.3%，ブレン比表面積で 2 000~3 620 cm²/g の範囲にあつてかなり大幅に変化している。またボイラ運転中に採取したフライ アッシュの粉末度は、88 μ フルイ残分で1.1~3.0%，44 μ フルイ残分で 8.7~18.5%，ブレン比表面積で 3 350~4 730 cm²/g となつていて、国産フライ アッシュとしては、良質の部類に属することが認められる。

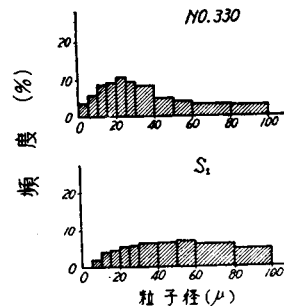
図—3・3 フライ アッシュの粒度分布をヒストグラムで示した例



図—3・4 セメントの粒度分布をヒストグラムで示した一例



図—3・5 サイクロン系フライ アッシュの粒度分布をヒストグラムで示した一例



(2) 図—3・3 はボイラ運転中に採取したフライ アッシュ10種について、比重計方法により求めた粒度分布をヒストグラムで示した一例であつて、これらのフライ アッシュにあつては、20 μ 以下の粒子が全体の約 65% を占めており、特に 5~10 μ の範囲の粒子が最も多く、また 5 μ 以下の粒子も相当量含まれていることが認められる。

図—3・4 は参考のために、市販セメント3種について比重計方法により求めた粒度分布をヒストグラムで示した一例であるが、これらのセメントと前記のフライ アッシュの粒度分布を比較す

ればほぼ似かよつた傾向を示しており、その粒度分布面からみた場合、市販セメントと良質の尼ヶ崎フライアッシュの粉末度がほぼ同程度であることが認められる。

なお、**図-3-5**はサイクロン系フライアッシュ2種について比重計方法により求めた粒度分布をヒストグラムで示した一例である。

図-3-6 フライアッシュのブレン比表面積と比重計方法による比表面積との関係

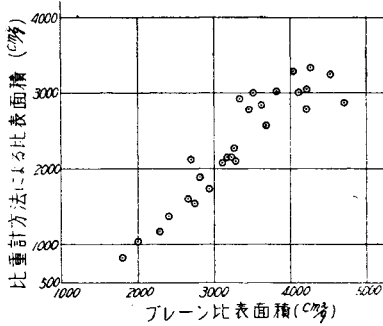
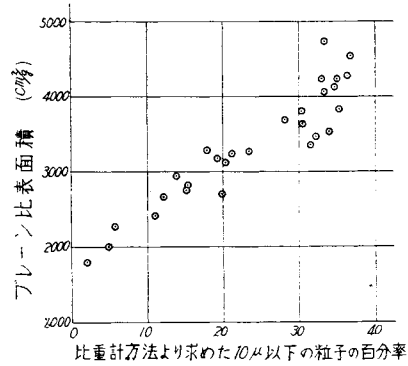


図-3-7 フライアッシュの10μ以下の粒子の百分率とブレン比表面積との関係



(3) **図-3-6**は表-3-1の数値にもとづいて、フライアッシュのブレン比表面積と比重計方法による比表面積との関係を示したものであつて、両者の間にはその絶対値にある程度の差があるが(ブレン比表面積が比重計方法にくらべて1000 cm²/g程度大きい)、ほぼ直線の関係にあることが認められる。また、**図-3-7**は比重計方法により求めたフライアッシュの10μ以下の粒子の百分率とブレン比表面積との関係を示したもので、**図-3-6**と同様に両者の間にはほぼ直線関係が認められる。これらの相関性はブレン比表面積がフライアッシュの粉末度を表わす尺度として、その測定方法の簡便さと相まつて、有効な方法であることを示すものと思われる。

(4) **図-3-8**は、表-3-1の数値にもとづいてフライアッシュの44μフルイ残分と比重計方法による比表面積との関係を示したものである。両者の間には、ほぼ直線関係が認められるが、この直線関係のうちに包含されないフライアッシュも少なくない。このことは、コットレル系フライアッシュの粒度分布状態にはある規則性が認められるが、厳密な意味では、ボイラ特性・集塵器特性および負荷状態などによつて、その規則性にある程度の幅があること、および、フライアッシュの粒子径加積曲線からも認められるように、粒子径44μ程度では同曲線のごくソソの方を押えているに過ぎないことなどによるものと思われる。しかし、これらのことを加味しても、なお、44μフルイ残分がフライアッシュの粉末度を表わす有効な方法であることはいうまでもない。

(5) **図-3-9**は、表-3-1の数値にもとづいて、フライアッシュの88μフルイ残分と44μフルイ残分との関係を示したもので

図-3-8 フライアッシュの44μフルイ残分と比重計方法による比表面積との関係

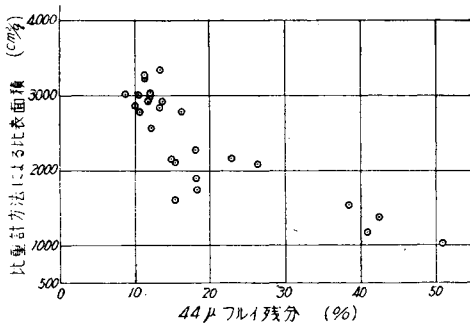
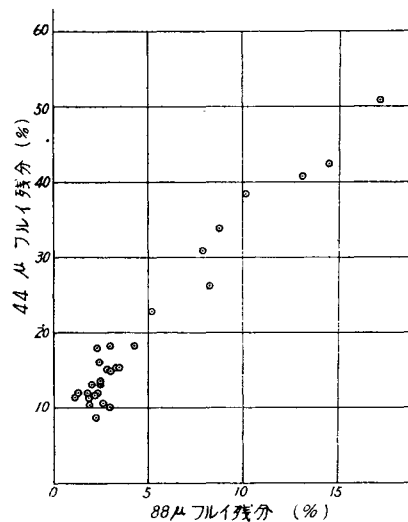


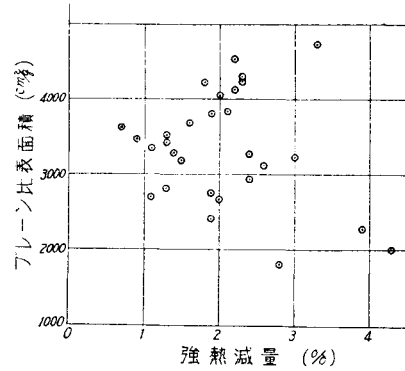
図-3-9 フライアッシュの88μフルイ残分と44μフルイ残分との関係



であつて、両者の間にはほぼ直線的関係が認められる。このことはフライ アッシュの粉末度を測定する場合、フルイによる試験として必ずしも44 μ フルイによる必要がなく、88 μ フルイで十分にめやすをうることを示すものと思われる。なお 図-3.9 から判断すると、フライ アッシュの88 μ フルイ残分が5%のものは44 μ フルイ残分では約20%程度に相当するようである。

(6) 図-3.10 は、表-3.1 の数値にもとづいてフライ アッシュのブレン比表面積と強熱減量との関係を示したものであるが両者の間には別に関係が認められない。このことは、あるフライアッシュの強熱減量を粒子径別にみた場合、強熱減量はその粒子径に比例して増加する傾向にあること、すなわち粗粒子のものは強熱減量が多いということと一見矛盾しているように考えられるが、後者の傾向はあくまでもあるフライ アッシュ内における相対的な性質であつて、個々のフライ アッシュについてその粉末度と強熱減量との関係を論ずる場合には、問題は、おのづから別である。

図-3.10 フライ アッシュの強熱減量と粉末度との関係



7. 吸着性 9種の尼ヶ崎フライ アッシュについて、1g 当りのメチレン ブルー吸着量を試験した結果は表-3.11 のとおりである。また光電管比色計による方法のみを用い、前記9種以外の6種の尼ヶ崎フライ アッシュについても吸着量を試験したが、その試験結果および 表-3.1 の試験結果にもとづきフライ アッシュの炭素含有量とメチレン ブルー 吸着量との関係を示せば 図-3.11 のとおりである。

表-3.11 フライ アッシュの吸着性試験結果の一例

フライ アッシュ	メチレン ブルー 吸着量					
	光電管比色計 による方法		各種標準液との 比色による方法		ペールの法則を 適用する方法	
	(mg/g)	比	(mg/g)	比	(mg/g)	比
B	0.73	1.30	0.55	1.22	0.48	1.26
C	0.84	1.50	0.65	1.44	0.56	1.47
D	0.56	1.00	0.45	1.00	0.38	1.00
E	0.85	1.52	0.80	1.78	0.68	1.79
F	0.76	1.36	0.65	1.44	0.58	1.53
K	0.69	1.23	0.55	1.22	0.50	1.32
L	0.24*	0.43	0.40	0.89	0.33	0.89
N	0.77	1.38	0.60	1.33	0.58	1.53
O	0.48	0.88	0.45	1.00	0.41	1.08

表-3.11 および 図-3.11 から次のことが認められる。

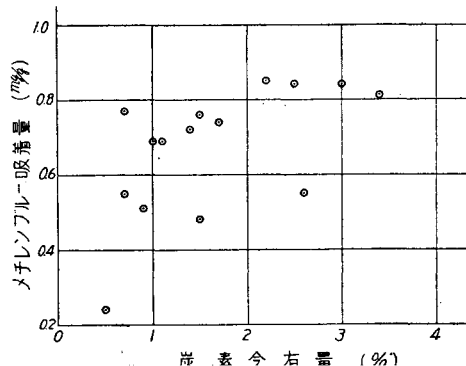
(1) 3種の方法で試験した場合、フライアッシュのメチレンブルー吸着量は試験方法によつてある程度相違している。

これは主として各種試験方法による吸着性試験が同時に行われたものでなく、ある程度の期間をおいて行われたものであること、および各試験方法自体の固有誤差、さらにはこれらの試験方法にまだ十分習熟しなかつたことなどによるものと思われる。しかし、フライアッシュのメチレンブルー吸着量をフライアッシュDに対する比で示した場合には、試験方法が相違してもこの吸着量比はほぼ同じ値を示している。このことはフライアッシュの吸着性を試験したおまな目的が、その絶対値を求めることにあつたのではなく、その相対値を求めるにあつたこと、すなわち後述するようにそれによつてフライアッシュを用いるAEコンクリートの単位AE剤量を決定する場合の一つの“ものさし”をうることにあつたことを考えると、これら3種のうちそのいずれを用いても十分に所期の目的を達しうることを示すものである。

(2) フライアッシュの吸着性は、その含有炭素によるものであるが、吸着性の大小は必ずしも含有炭素量には比例しない。これは、

備考 吸着量比はフライ アッシュDに対する比で示す。
* 印の試験値は他の2方法による値に比べてかなり小さいがこれは測定の誤差によるものと思われる。

図-3.11 フライ アッシュの炭素含有量と吸着性との関係



が相違する場合があること並びにフライアッシュの吸着性が含有炭素量およびその活性度の関数であると同時に比表面積の関数でもあることなどによるものと思われる。

8. 所要水量比(所要のフローをうるに必要な水量)砂の種類およびモルタルの配合が相違する5種の基準配合を用い、フライアッシュB・C・Nの3種について所要水量比を試験した結果は表-3-12に示すとおりである。

表-3-12 から次のことが認められる。

(1) セメントの一部をフライアッシュでおきかえた場合のモルタルの所要水量比は、セメント砂重量比および砂の種類(豊浦砂と相馬砂)によつてほとんど相違しない。しかし、フライアッシュをおきかえる方法によつて相違し、重量でおきかえる方が容積でおきかえるよりも所要水量比は大きくなる。これは重量でおきかえる場合には、セメントとフライアッシュの比重の差によつて基準配合の絶対容積よりも、おきかえたのちのモルタルの絶対容積の方が大きくなるからであると考えられる。

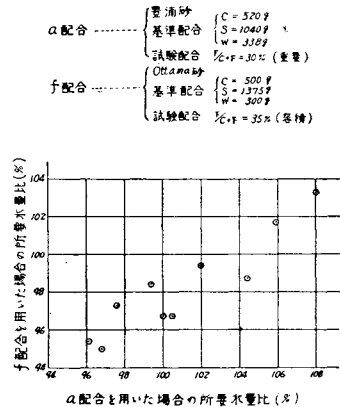
表-3-12 モルタルの配合がフライアッシュの所要水量比におよぼす影響

区分	砂	基準配合のモルタル				フライアッシュ含有率(%)	フライアッシュ	所要水量比(%)
		セメント(g)	標準砂(g)	水(g)	フロー(mm)			
a	豊浦砂	520	1 040	338	211	重量比で30	N	96
							B	102
							C	104
b	"	390	1 170	350	211	"	N	96
							B	102
							C	103
c	"	312	1 248	376	211	"	N	97
							B	102
							C	104
d	"	520	1 040	338	211	容積比で35	N	92
							B	98
							C	101
e	相馬砂	520	1 040	225	213	重量比で30	N	95
							B	100
							C	104
f	Ottawa砂	500	1 375	300	206	容積比で35	N	95
							B	97
							C	99
備考	1. セメントは磐城普通ポルトランドセメント(七尾工場製)を用いた。 2. モルタルの練り混ぜは JIS R 5201 によつた。 3. 所要水量はモルタルのフローが 200~215 になるように定めた。							

表-3-13 フライアッシュの所要水量比

名称	フライアッシュ		所要水量比(%)	
	強熱減量(%)	44μmフルイ残分(%)	a配合を用いる場合	f配合を用いる場合
A	1.6	12.0	96.8	95.0
B	2.4	18.0	102.0	96.7
C	3.0	22.8	104.4	98.7
D	2.0	15.3	97.6	97.4
F	1.9	38.4	102.0	99.4
G	3.9	40.8	108.0	103.3
H	1.9	42.4	105.9	101.7
L	1.3	18.2	100.5	96.7
M	1.4	15.3	99.4	98.4
N	0.9	16.1	96.1	95.4
O	2.4	18.3	102.0	—
P	1.1	15.1	97.6	—
Q	0.7	13.2	96.0	—

図-3-12 フライアッシュの所要水量比



(2) 表-3-12 における a および f の配合を用い、13種の尼ヶ崎フライアッシュについて所要水量比を試験した結果は表-3-13 および 図-3-12 に示すとおりである。すなわち、a 配合を用いた場合の所要水量比と f 配合を用いた場合それとの間にはほぼ直線の関係があることがわかる。また Bureau of Reclamation で要求する 103% (配合: f) は、a 配合を用いればほぼ 105~108%に相当するものと考えられる。

(3) また 図-3-13 は表-3-1 の数値にもとづいて、フライアッシュの粉末度および強熱減量と所要水量比(a配合を用いた場合)との関係を示したものであつて、傾向としてはフライアッシュの所要水量比はその粉末度が細くなるほど、また強熱減量が少なくなるほど小さくなることが認められる。

図-3-13 フライ アッシュの粉末度および強熱減量と所要水量比との関係

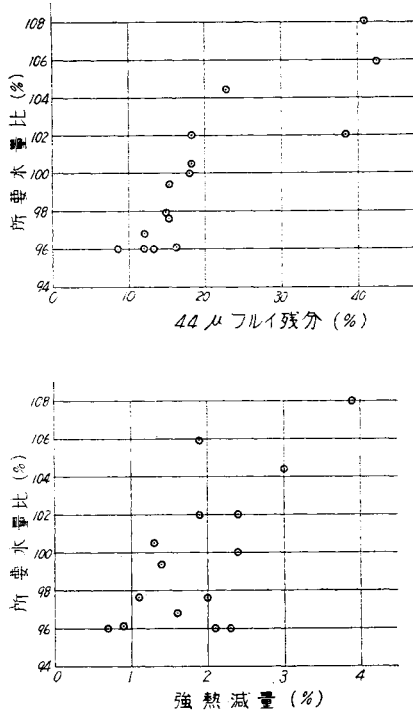


表-3-14 石灰・フライ アッシュ砂モルタル強度試験の結果

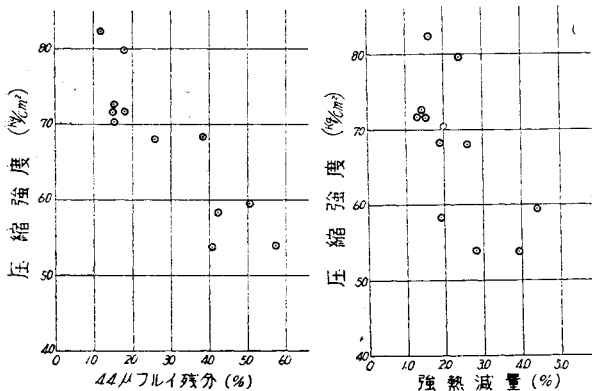
名称	フライ アッシュ		石灰・フライアッシュ砂モルタル		
	強熱減量 (%)	44μ フライ 残分 (%)	砂の種類	モルタル中の水量 (%)	材令7日圧縮強度 (kg/cm ²)
A	1.6	12.3	相馬砂	12.8	82.4
B	2.4	18.0	〃	〃	79.7
D	2.0	15.3	〃	〃	70.4
E	2.6	26.2	〃	〃	68.1
F	1.9	38.4	〃	〃	68.3
G	3.9	40.8	〃	〃	53.8
H	1.9	42.4	〃	〃	58.3
I	4.3	50.8	〃	〃	59.5
J	2.8	57.6	〃	〃	54.1
K	1.5	14.9	〃	〃	71.7
L	1.3	18.2	〃	13.2	71.7
M	1.4	15.3	〃	13.0	72.6
A'	1.6	—	Ottawa砂	13.2	55.8
N	0.9	16.1	〃	12.8	58.6
O	2.4	18.3	〃	13.7	52.5

備考 フライ アッシュ A~J についての石灰モルタル試験においては、試験の都合でモルタル中の水量を、フライ アッシュの品質いかんにかかわらずすべて 12.8% とした。

9. ポゾラン活性

(1) 石灰フライ アッシュ砂モルタル強度試験の結果：15種の尼ヶ崎フライ アッシュについて、石灰ポゾラン強度試験によつてポゾラン活性を試験した結果は 表-3-14 および 図-3-14 のとおりである。

図-3-14 フライ アッシュの粉末度および強熱減量とポゾラン活性との関係



すなわち尼ヶ崎フライ アッシュはいずれも Bureau of Reclamation の規格に合格するポゾラン活性を有し、十分に満足すべきものである。フライ アッシュのポゾラン活性は粉末度が細かく、強熱減量が少ないものほどすぐれていることがわかる。なおこの場合、砂の種類の影響はかなり大きく、予備試験の結果によれば Ottawa 砂と相馬砂を用いた場合の強度の比は約 1:1.4 であつた。

表-3-15 セメント・フライ アッシュ砂モルタル強度試験の結果

No.	フライ アッシュ		所要水量 (%)	圧縮強度比 (%)
	強熱減量 (%)	44μ フライ 残分 (%)		
716	2.0	11.3	96	102
719	2.7	13.6	〃	103
721	2.3	12.0	〃	106
722	2.1	17.9	〃	101
726	3.0	17.8	〃	103
728	1.8	12.5	〃	98
730	2.1	8.7	〃	105
82	2.2	11.9	〃	105
84	1.8	12.5	〃	102
86	2.4	12.2	〃	105
69	2.3	13.2	〃	103
811	2.4	17.5	〃	100
826	2.1	13.3	〃	101
831	2.3	15.7	〃	103
93	2.0	12.9	〃	106
96	1.8	10.6	〃	98

備考 フライ アッシュ オキカエ率 30%, 40°C 密封養生, 材令 28 日

(2) セメント・フライ アッシュ砂モルタル強度試験の結果

: 16種の尼ヶ崎フライ アッシュについて、セメント・フライ アッシュ砂モルタル強度試験方法によつてポゾラン活性を試験した結果は表-3-15のとおりである。

すなわち、その圧縮強度比はほとんど100%以上であつて、これらの尼ヶ崎フライ アッシュは、すぐれたポゾラン活性を有していることがわかる。また、強熱減量が約3%以下、粉末度が44 μ フレイ 残分で約20%以下のフライ アッシュは、ポゾラン活性の点よりみれば、実用的に同程度とみなすことができる。

10. ポルトランド セメントの凝結時間におよぼす影響 フライ アッシュ No.723 とアサノ マスコン セメントとを用い、JIS R 52J1 (セメントの物理試験方法)によつて試験した結果は表-3-16に示すとおりである。

表-3-16 フライ アッシュ オキカエ率と凝結時間

ペーストの配合				ペーストの単位容積当りの使用水量 (g/c.c.)	凝 結 時 間		
フライ アッシュ オキカエ率 (%)	セメント (g)	フライ アッシュ (g)	水 (g)		始 発 (時一分)	終 結 (時一分)	始発より終結まで (時一分)
0	400	0	102	0.449	3-10	4-40	2-20
10	360	40	104	0.440	3-25	5-15	1-50
20	320	80	107	0.433	3-45	5-55	2-10
30	280	120	110	0.427	4-00	6-25	2-25
40	240	160	114	0.424	5-00	7-30	2-30
50	200	200	119	0.421	6-30	9-10	2-40

試験の結果によれば、フライ アッシュ オキカエ率が増大するにつれて始発終結ともに延びているが、始発から終結までの時間は大して変つていない。

なお、水量がフライ アッシュ オキカエ率に比例して増加しているが、これは重量比でセメントの一部をおきかえたためにセメント+フライ アッシュの絶対容積がフライ アッシュ オキカエ率に比例して増加することによるものと考えられる。

11. ポルトランド セメントの安定性におよぼす影響 表-3-17は尼ヶ崎フライ アッシュがポルトランド セメントの安定性におよぼす影響を ASTM : C151-52 (ポルトランド セメントのオートクレーブ膨脹試験方法) に準じて試験した結果である。

すなわち、中庸熱ポルトランド セメント (アサノ マスコン セメント) および普通ポルトランド セメント (磐城セメント) の一部をフライ アッシュでおきかえた場合、オートクレーブ膨脹試験による安定性は、オキカエ率に関せず、ほぼ同程度である。

12. ポルトランド セメントの水和熱におよぼす影響 セメント(アサノ マスコン セメント) 重量の20% および40%をおきかえた試料について、JIS R5203 (セメントの水和熱測定方法) に準じて試験を行った。

表-3-17 フライ アッシュ オキカエ率と安定性

フライ アッシュ オキカエ率 (%)	水 量 (%)	オートクレーブによる膨脹 (%)
中庸熱ポルトランド セメント使用		
0	23.0	-0.01
10	23.6	-0.03
20	24.2	-0.02
30	25.0	-0.01
40	26.0	-0.01
50	27.0	+0.01
普通ポルトランド セメント使用		
0	24.0	0.23
10	24.3	0.15
20	24.8	0.11
30	25.3	0.09
40	26.0	0.04
50	27.0	0.04

表-3-18 フライ アッシュがポルトランド セメントの水和熱におよぼす影響

フライ アッシュ オキカエ率 (%)	未水とセメント・フライ アッシュの溶解熱 (cal/g)	水 和 熱 (cal/g)		溶解熱測定時の不溶残分 (%)				フライ アッシュの水和熱	
		材 令	材 令	未水とのセメント・フライ アッシュ (%)	材 令		材 令		
		7 日	28 日		7 日	28 日	7 日	28 日	
0	600.9	61.3 (100%)	79.1 (100%)	0	0	0	—	—	
20	561.0	51.5 (84%)	68.4 (86%)	6.12	5.96	5.91	13	26	
40	521.4	42.8 (70%)	57.8 (73%)	11.84	12.00	11.92	15	26	

備 考

フライ アッシュの水和熱は、フライ アッシュ オキカエ率0%における水和熱を基準として、計算によつて求めた。

試験を行うに当つて、シリカ セメントは材令によつて不溶残分が異なり、溶け終るまでに規定以上の時間がかかるので、正確にはこの方法を適用することができない点を考慮して、セメント・フライ アッシュを溶解するときに、フツ化水素酸の量を1.5倍用いて試験を行つた結果、セメント・フライ アッシュの未水和のときの不溶残分と、7日および28日の水和作用を行つたときの不溶残分とがほぼ等しい値になつた。従つて、不溶残分の水和熱におよぼす影響は互いに消去するものと考えられる。表—3・18はこの方法によつて試験した場合の結果である。

表—3・18 から、フライ アッシュでセメント重量の20%および40%をおきかえたセメント・フライ アッシュの材令7日における水和熱は、基準配合の場合の84%および70%であり、材令28日においては86%および73%であることがわかる。これより、セメントとともに用いた、フライ アッシュは、それ自身で材令7日では14 cal/g、材令28日では26 cal/gの水和熱を発生することになる。すなわち、フライ アッシュがセメントの遊離石灰などと反応するときの水和熱はセメントの水和熱よりいぢるしく小さく、セメント・フライ アッシュの水和熱は、フライ アッシュ オキカエ率に比例して減少する。

IV. コットレル系フライ アッシュがコンクリートの性質におよぼす影響

〔1〕 コンクリートおよび試験方法

1. コンクリート材料

(1) セメント：セメントは、主として小野田セメントKK津久見第二工場の普通ポルトランド セメントを用いたが、一部の試験では小野田セメントKK津久見第二工場の中庸熱ポルトランド セメント・日本セメントKK西多摩工場のアサノ マスコン セメント・磐城セメントKK七尾工場の普通ポルトランド セメントならびに中庸熱ポルトランド セメントおよび同社浜松工場の中庸熱ポルトランド セメントなども用いた。これらの試験成績は表—4・1に示すとおりである。

表—4・1 用いたセメントの試験成績

セメント	化 学 成 分 (%)									粉 末 度		
	強熱減量	不溶残分	シリカ (SiO ₂)	アルミナ (Al ₂ O ₃)	酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)	酸化カルシウム (CaO)	マグネシウム (MgO)	無硫酸 (SO ₃)	比重	88μ フライ残分 (%)	ブレン比表面積 (cm ² /g)	
小野田 普通ポルトランド セメント (津久見第二工場製)	0.6	0.4	22.2	5.1	3.3	65.6	1.1	1.2	3.16	1.4	3 100	
小野田中庸熱ポルトランド セメント (同上)	0.8	0.3	24.1	4.3	3.8	64.1	1.2	1.0	3.20	1.8	3 310	
アサノ マスコン セメント (西多摩工場製)	0.6	0.6	24.0	4.6	3.9	62.8	1.5	1.2	3.22	2.0	3 130	
磐城中庸熱ポルトランド セメント (七尾工場製)	0.8	0.5	23.4	4.9	4.1	63.5	1.3	1.3	3.19	1.0	3 110	
同 (浜松工場製) 上	0.8	0.8	22.7	5.5	4.2	62.9	1.6	1.3	3.20	1.8	3 000	

セメント	凝 結		安 定 度		軟 練 モ ル タ ル						
	始 発 (時-分)	終 結 (時-分)	煮沸法	オートクレープ方法 (%)	フロー (mm)	曲げ強度(kg/cm ²)			圧縮強度(kg/cm ²)		
						3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
小野田 普通ポルトランド セメント (津久見第二工場製)	2-11	3-28	完	—	218	34.5	50.1	63.1	135	238	396
小野田中庸熱ポルトランド セメント (同上)	2-12	3-31	完	0.01	—	19.1	34.3	58.4	69	119	270
アサノ マスコン セメント (西多摩工場製)	3-10	4-40	完	-0.01	258	26.9	40.6	74.9	95	161	412
磐城中庸熱ポルトランド セメント (七尾工場製)	2-42	3-38	完	—	223	18.3	32.7	57.0	56	115	245
同 (浜松工場製) 上	2-55	4-10	完	—	215	21.4	35.4	56.8	79	156	293

(2) 砂：砂は淀川産・大和川産・楯保川産・天龍川産および相模川産などで、それらのおもな試験成績は表—4・2に示すとおりである。砂の使用に当つては、天日で乾燥したものを粒の大きさによつて2種もしくは3種にふるい分け、それらを一定の割合に混ぜて用いた。砂は乾燥状態のままで使用し、有効吸水量に相当する水は、練り混ぜ水の方に加えた。なお、砂の粒度がフライ アッシュを用いたコンクリートのコンシステンシーおよび強度におよぼす影響をたしかめるために行つた試験では、表—4・2に示した粒度以外のものを用いたが、それらについてはそのところで述べる。

(3) 砂利：砂利は日高川産・那賀川産・日置川産・天龍川産および相模川産であるが最大寸法は実験の目的に応じて変え、最大寸法を 15・25・30・40 mm とした場合には日高川産・那賀川産・相模川産のものを、80 mm とした場合には日置川産のものを、150 mm とした場合には天龍川産のものをを用いた。それらのおもな試験成績は表-4.3 に示すとおりである。砂利の使用に当つては、あらかじめふるい分けておいたものを表-4.3 に示す粒度に配合し、かつ十分に吸水させた粒の表面を布でふき表面乾燥飽和状態として用いた。ただし、最大寸法が 80 mm および 150 mm の場合には気乾状態のまま用い、有効吸水量に相当する水は練り混ぜ水の方に加えた。

(4) AE 剤：AE 剤は Hercules Powder Co. 製のビンソル レジンおよびドレシネート X を用いた。その使用に当つては、ともに 1% 溶液にして用いた。

2. コンクリート

(1) 配合：試験に用いたコンクリートの品質は、主として中庸の気候の土地に造られる普通の構造物とダムとの内部コンクリートをめやすとした。試験がかなり長期間にわたつたために、その間コンクリート材料も種々変り、コンクリートの配合も多種多様に变化したが、試験の結果を論ずるに当つては常にフライ アッシュを用いた場合と用いない場合のコンクリートの品質の比較を目的としたので、その点に関してはなんら支障ないものとする。

試験に用いたコンクリートの粗骨材の最大寸法は 15・25・30・40・80・150 mm の 6 種で、15・25・30・40 mm のコンクリートは単位セメント・フライ アッシュ量を 239 ~ 356 kg/m³ とし、スランプを約 6 cm (ただし一部の試験では 2 cm および 4 cm とした)、AE コンクリートの場合の空気量は約 5% とした。また 80 mm および 150 mm のコンクリートは単位セメント・フライ アッシュ量を 160 kg/m³ および 180 kg/m³ とし、スランプを約 4cm, 空気量は約 4% とした。

全シリーズの実験を通じて、フライ アッシュを用いる場合には、基準配合のセメントの一部をフライ アッシュでおきかえて用いた。フライ アッシュ オキカエ率は重量百分率で表わし、おもに 20% および 30% おきかえたものについて試験を行つたが、一部では 10・40・50% のものもある。フライ アッシュを用いた場合のコンクリートの単位水量は、粗骨材の使用量を基準配合と等しく保ちながら所定のスランプが得られるように試的方法によつて求めた。また AE コンクリートにフライ アッシュを用いた場合の単位 AE 剤量は、基準配合と等しい空気量が得られるように試的方法によつて求めた。

実験に用いたコンクリートの配合は、相当種類が多いのでそのたびごとに表示する。

(2) 練り混ぜおよびまだ固まらないコンクリートの試験：AE 剤を用いないコンクリートは、バッチの大きさを 20 l もしくは 24 l とし、すべて手練りで練り混ぜた。粗骨材の最大寸法が 25 mm および 30 mm の AE コンクリートは、1 バッチの大きさを 20 l, 80 mm のコンクリートは 36 l とし、ともにコーン型 2 切可傾式ミキサーを用いて全材料を投入後 4 分間練り混ぜた。ただし最大寸法 80 mm のコンクリートを練る場合には前記 2 切ミキサーのブレードの形状を変え (一組 3 枚のブレードをすべてボルト締めにしておき必要に応じて適宜この枚

表-4.2 用いた砂の試験結果

区 分	澁川産	大和川産	桃保川産	天龍川産	相模川産
比 重	2.58	2.56	2.57	2.66	2.60
吸水量 (%)	1.3	1.6	2.5	1.3	2.9
フルイに止る量の百分率	5	0	0	0	0
	2.5	7	7	12	5
	1.2	28	26	29	29
	0.6	59	58	54	55
	0.3	89	88	85	74
	0.15	98	97	96	91
粗 粒 率	2.81	2.76	2.76	2.54	2.77

表-4.3 用いた砂利の試験結果

区 分	日 高 川 産			那賀川産	日置川産	天龍川産	相模川産
比 重	2.61			2.62	2.60	2.70	2.68
吸水量 (%)	1.3			1.0	1.2	0.7	1.4
最大寸法(mm)	15	25	30	30	80	150	40
フルイを通る量の百分率	150					100	
	80				100	68	
	40				60	42	100
	30			100	100	—	—
	25		100	—	—	—	71
	20		80	75	72	30	22
	15	100	—	—	—	—	—
10	50	30	25	22	10	9	
5	0	0	0	0	0	0	

数を加減するようにした)一応支障のないようにした。また最大寸法 150 mm のコンクリートは、1 バッチの大きさを 100 l とし、ゼガー型 8 切可傾式ミキサを用いて全材料を投入後 3 分間練り混ぜた。なお最大寸法 80 mm および 150 mm のコンクリートは、ミキサより排出後ただちに 40 mm 板ファイルによつて 40 mm 以上の骨材を取り除き、さらに手練りで練り直した。

これらのコンクリートについて、スランプおよび空気量を試験するとともに、目的に応じて圧縮強度試験・凍結融解試験・透水試験・断熱温度上昇試験などの供試体を造つた。一部の試験においては、リモールジング試験およびブリージング試験を行つた。リモールジング試験は Powers の方法に、ブリージング試験は ASTM の標準試験方法試案に準じて行つた。リモールジング試験を行つたのは、ある種の混和材を用いたコンクリートとそれを用いないコンクリートのウォーカーを比較する目的に対しては、スランプ試験が必ずしも適当なものではないといわれているからであつた。またコンクリートの空気量はすべて容積方法で試験した。

練り混ぜたときのコンクリートの温度は、試験の期間が相当長期間にまたがつたので 7~27°C の範囲に変化した。1 シリーズの試験は約 7~14 日の間に行つてその間における試験の諸条件を一定に保つようにし、フライアッシュを用いたコンクリートと用いないコンクリートの品質を比較する目的に対して支障のないようにした。

3. 強度試験方法

(1) 圧縮強度試験方法：圧縮強度試験に用いた供試体は 15×30cm 円柱供試体および 10×20 cm 円柱供試体の 2 種類である。供試体の寸法は、粗骨材の最大寸法・実験の目的および 1 シリーズの実験量などを考慮して定めたが、主として 15×30 cm 円柱供試体は、最大寸法 30 mm 以上のコンクリートを、10×20 cm 円柱供試体は最大寸法 25 mm のコンクリートをそれぞれ対象とした。供試体は成形後 2 日間空気中においたのち脱ワクし、試験時まで 20±3°C の水中で養生した。なお養生条件がフライアッシュを用いたコンクリートの圧縮強度におよぼす影響を比較する試験では、20°C 水中養生のほか 38°C 水中養生および冬期寒冷な気候時を利用した低温水中養生を行つた。

試験の材令は主として 28 日・91 日・6 月・1 年としたが、一部の試験では 7 日および 2 年をもその対象とした。試験値は供試体 3 個の平均値をとつた。

(2) 引張強度試験方法：引張強さ係数試験に用いた供試体は 15×20 cm 円柱供試体で 15×30 cm 円柱供試体用型ワクを用いて製造した。供試体は製造後 2 日間空気中においたのち脱ワクし、試験時まで 20±3°C の水中で養生した。試験は材令 7 日・28 日・91 日・6 月・1 年で、試験値は供試体 4 個の平均値をとつた。

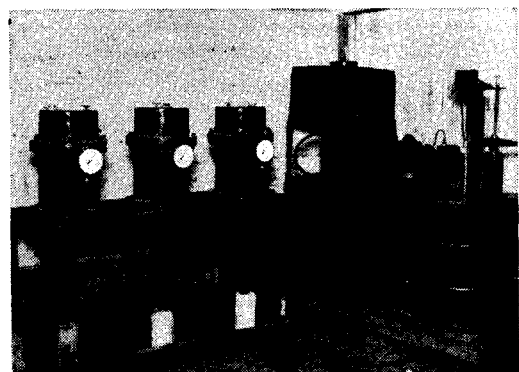
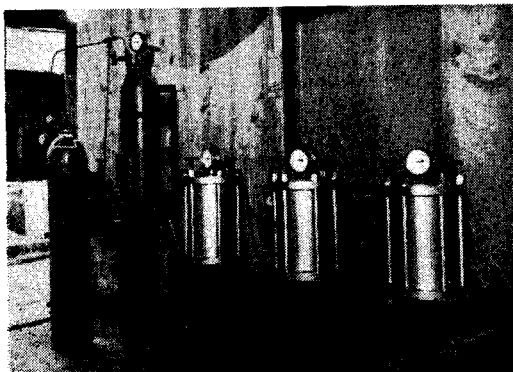
4. 透水試験方法および耐透水指数 透水試験は著者の構想によつて円井製作所および丸東製作所に製作させた、中空厚肉円筒方式透水試験装置¹³⁾を用いて行つた。試験装置は写真-4-1~4-5 に示すとおりである。写真-4-1 の円井製作所製の透水試験機は、圧力源として窒素ガスポンペを用い、窒素ガス圧力を水圧に切り換える二次タンクおよび試験槽をその主要部分とする。試験水圧の自動調節装置は使用してないが、あらかじめ透水試験時における供試体からの流出量を想定し、1~3 日程度放置しておいても水圧の低下が試験誤差の範囲にとどまるように二次タンクの窒素ガスの容量を設計したので、実用上なら支障はない。

写真-4-2 の丸東製作所製の透水試験機は、この種透水試験装置のうち加圧方式として荷重式蓄圧装置による定水圧機構を備えたものである。これらの透水試験機はともに供試体 3 個を同時に試験しうるものである。

供試体は 15×30 cm 円柱の中心に直径 2.0 cm の孔をもつ中空円筒供試体である。型ワクは 15×30 cm 円柱

写真-4-1 窒素ガスポンペを用いた透水試験装置

写真-4-2 荷重蓄圧方式による透水試験装置



供試体製造用型ワクの中心軸に直径 2.0 cm の丸棒を写真—4.3 に示すように固定したものを、供試体の製造は圧縮強度試験用供試体に準じて行つた。供試体の中心孔の直径を 2.0 cm としたのは、主として供試体製造の容易さおよび用いるコンクリートの粗骨材の最大寸法などを考慮したものである。

製造した供試体は、写真—4.4 に示す脱棒装置を用いて中心の丸棒を抜き取り、その翌日キャッピングを行つた。キャッピングに際しては、コンクリートとペーストとの間に空隙が生ずるのを防ぐため、まず十分にレイタンスを取り除いたコンクリート表面に、水セメント重量比約 34% 程度のペーストを入念にうすくしきつめ、そのの水セメント重量比が約 28% のペーストでいわゆるガラス キャッピングを行つた。

透水試験は材令 28 日・60 日・91 日・4 月でそれぞれ開始した。特に長期材令のコンクリートについて行わなかつたのは、この試験に用いたコンクリートの水セメント重量比程度では、試験水圧を 30 kg/cm² としても試験開始時より最初の透水をみるまでに 1 カ月以上を要し、他の試験に支障を来すからである。所定の材令に達した供試体は、試験にさきだちその側面および中心孔の内面をワイヤ ブラシでこすり、表面のペースト部分を取り除いた。供試体を試験槽に掘付けるに際しては、供試体の上下端面と試験装置との境界面をゴム パッキングおよびアスファルトなどを介して十分にボルトで締めつけ、上下端面を水密に保つた(写真—4.5 参照)。試験水圧は早期材令においては主として 15 kg/cm²、長期材令においては 30 kg/cm² とした。

一般に 1 時間ごとに供試体よりの流出量を測定し、流出量がほぼ一定値を示すまで継続した。供試体 1 個の試験に要した日数は 2~30 日であるが、試験水圧をかけてから最初の透水をみるまでにある程度のアソビ時間 (dead time) があり、これはコンクリートの透水性によつていちじるしく相違する。特に流出量が少ない場合には、集水メス シリンダよりの水分の蒸発が試験値に影響するようになるので、あらかじめメス シリンダに軽油を数滴入れておき、水面に軽油の被膜をつくることによつて水分の蒸発を防いだ。試験は早期材令においては供試体 2 個を用い長期材令においては供試体 1 個を用いた。

透水試験の結果は、平均流出量およびそれにもとづいて算出した透水係数ならびに耐透水指数で整理した。透水係数および耐透水指数は 20°C における cm・秒を基準とした値で表わすものとし、次式で計算した。

$$\text{透水係数: } K = \frac{\mu}{\mu_{20}} \frac{\rho \log_e r_0/r_i}{2\pi h} \frac{Q}{P_0 - P_i}$$

$$\text{耐透水指数: } pK = -\log_{10} K$$

- ここに
- K : 供試体の透水係数 (cm/秒)
 - P_0 : 供試体の外側における水圧 (kg/cm²)
 - P_i : 供試体の内側における水圧 (kg/cm²)
 - Q : 流出量 (cc/秒)
 - ρ : 水の単位容積重量 (kg/cm³)
 - h : 供試体の高さ (cm)
 - r_0 : 供試体の半径 (cm)
 - r_i : 供試体の中心孔の半径 (cm)
 - μ : 試験時温度における水の粘性係数 (g/cm・秒)
 - μ_{20} : 20°C における水の粘性係数 (g/cm・秒)
 - pK : 供試体の耐透水指数

表—4.4 コンクリートの透水試験結果の一例

水セメント比	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	試験開始材令 (日)	試験水圧 (kg/cm ²)	試験水温 (°C)	アソビ時間 (時)	平均流出量 (cc/時)	平均流出量算出時の材令 (日)	供試体重量 (kg)		圧入水量 (%)	透水係数 × 10 ¹² cm ² /秒		耐透水指数	材令 28 日 圧縮強度 (kg/cm ²)	
											試験前	試験後		試験時温 20°C の場合	20°C の場合			
0.51	180	91.0	4.1	3.3	28	15	20	620	0.02	69	12.218	12.432	4.1	3.8	3.8	11.4	237	
"	"	91.5	5.8	4.1	29	"	17	透水試験機故障のため中止										
0.58	160	93.5	6.0	4.1	28	"	10	80	0.45	34	11.820	12.058	4.6	89	120	9.9	147	
"	"	93.5	5.2	3.9	28	"	10	55	0.46	34	11.997	12.232	4.5	91	120	9.9	156	
0.65	140	91.0	4.0	4.4	29	"	13	20	1.25	35	11.822	12.095	5.2	250	300	9.5	116	
"	"	91.5	4.2	4.2	29	"	13	23	1.46	35	11.723	12.000	5.3	290	350	9.5	113	
備考	1. 用いた粗骨材の最大寸法は 150 mm、セメントはイワキ中庸熟ボルトランド セメント (浜松工場製) である。 2. 透水試験は 20 mm 以上の骨材をふるい去つたコンクリートについて試験した。																	

コンクリートの透水試験の結果を数量的に表わす場合、 K の値は、例えば $10^{-6} \sim 10^{-13}$ というようなオーダーの差として現われてくる。従つて、これの前につけられる有効数字例えば 3.8, 9.6 などのみをとつて透水係数を論ずることは当を得たものでない。流出量または透水係数をもつて試験結果を整理するときには、その本質を見のがすことがある。本論文においてはそれゆゑ耐透水指数を用いることとした。この値は透水係数の負のオーダーの高さ、すなわち耐透水性を示す値である。

水セメント重量比 0.51・0.58・0.65, スランプ約 5 cm, 空気量約 4% の AE コンクリートについて前記の方法に従つて透水試験を行つた結果は 表—4.4 に示すとおりであつて、透水の程度と他の諸量例えば水セメント重量比および単位セメント量との関係は耐透水指数を通じて、きわめて明確に把握することができるとともに、この試験方法が十分信頼できるものであることを知るものである。

5. 凍結融解試験方法 凍結融解試験装置(写真—4.6)は三菱電機KKに製作させたもので、ASTM : C 290-52 T の標準試験方法試案に準じて凍結融解試験を行う場合、16 個の供試体 ($10 \times 10 \times 42$ cm 角柱) に対し、1 日に 10~12 サイクルの凍結融解を全自動的に行いうる能力を有するものである。試験装置は大別して試験槽・高温ブラインタンク・低温ブラインタンク・機械室・制御装置からなつている。

写真—4.3 透水試験用供試体成形型ワケ



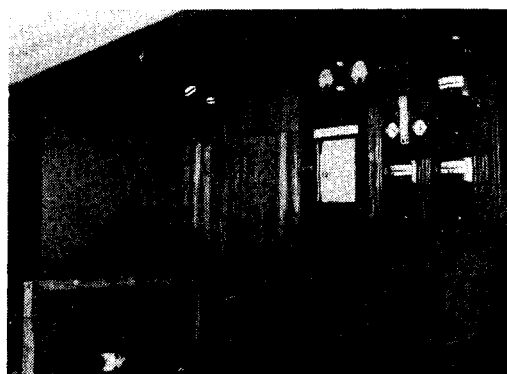
写真—4.4 透水試験用供試体中心孔脱棒装置



写真—4.5 透水試験用供試体の取付け状況



写真—4.6 凍結融解試験装置



供試体は製造後2日間空気中で養生したのち脱ワクし、試験開始時まで $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。ただし脱ワクするまでの2日間は供試体を湿布でおおい、室温のまま養生した。凍結融解試験を開始した材令はフライアッシュを用いたコンクリートの特性を考慮して、早期材令(28日)と長期材令(3月~11月)とに区別した。

凍結融解試験は ASTM : C 290-52 T²⁵⁾ の標準試験方法試案に準じて行った。供試体中心部の温度は、凍結時で $-17.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 、融解時で $4.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$ とし、供試体の凍結には約 -18°C の塩化カルシウム ブラインを、融解には約 10°C の塩化カルシウム ブラインをそれぞれ用いた。凍結融解1サイクルの所要時間は2時間15分 \pm 5分で、1日平均10サイクル強で実施した。凍結融解サイクルの自動制御は、制御用供試体の中心部に挿入した抵抗温度計およびこれに接続した電子管式自動温度調節計によつて行い、測温供試体中心部の温度が所定の温度を示すように調節した。各サイクルにおける供試体中心部の温度は、測温供試体中心部に埋込んでおいた鉄コンスタンタン熱電対によつて自動的に記録した。図-4.1は凍結融解1サイクルにおける供試体中心部の温度履歴を示したものであり、また表-4.5は、凍結融解の任意の28サイクルについて各サイクルごとに供試体中心部の最高最低温度および所要時間を示したものであつて、本試験装置がきわめて信頼度の高いものであることがわかる。

なお、供試体を入れる容器には、ゴム製容器を用いた。前記試験方法試案によれば、試験の全期間を通じて供試体の周囲には、厚さ約3mmの水または氷があることが必要とされているが、このためには供試体を網目の寸法3.5mm、網ヒモの太さ3.5mmの網に包んでゴム容器に入れ、供試体と容器壁との間に水を注入したのち、試験槽の塩化カルシウム ブライン中に縦にして入れた。

供試体の凍結融解に対する抵抗性は、凍結融解約30サイクルごとにその動弾性係数および重量を測定し、試験開始時のそれと比較することにより判定した。なお、同時に供試体の容積も測定したが、供試体の比重が凍結融解試験中を通じてほぼ一定であるため、その減少の傾向は重量の場合と同様な傾向を示すので特に凍結融解に対する抵抗性の尺度とはしなかつた。試験値は、供試体2個の平均値をとつた。

図-4.1 凍結融解試験における供試体中心部の温度

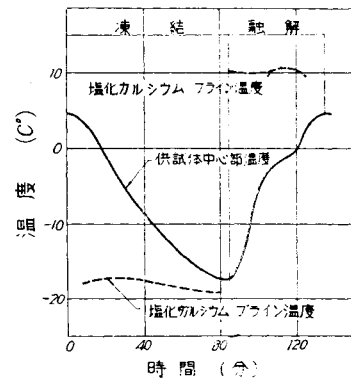


表-4.5 凍結融解試験における供試体中心部温度および1サイクル所要時間

サイクル数	凍		結		サイクル数	融		解	
	最低温度(°C)	所要時間(分)	最高温度(°C)	所要時間(分)		最低温度(°C)	所要時間(分)	最高温度(°C)	所要時間(分)
1	-17.2	85	4.5	50	17	-18.0	90	4.0	50
2	-17.3	85	4.5	50	18	-18.4	85	3.6	50
3	-17.4	85	4.3	50	19	-18.1	85	4.0	50
4	-17.7	85	4.3	50	20	-18.0	80	4.5	50
5	-17.7	80	4.5	50	21	-18.0	85	4.4	55
6	-17.6	80	4.5	50	22	-18.0	85	4.4	50
7	-17.8	85	4.6	50	23	-18.2	85	4.0	50
8	-17.2	85	6.0	40	24	-18.1	85	4.0	50
9	-17.5	80	5.0	50	25	-18.4	85	4.7	50
10	-17.2	85	4.8	55	26	-18.4	90	4.0	50
11	-17.5	80	5.0	50	27	-18.0	85	5.8	50
12	-17.3	85	5.0	55	28	-18.0	85	4.6	50
13	-17.7	85	4.8	50					
14	-18.0	85	4.5	50	平均値	-17.8		4.7	
15	-17.8	90	4.5	50	標準偏差	0.4		0.5	
16	-18.0	85	4.6	50					

備考 所要時間は5分単位で示し、その端数は2捨3入した。

6. 断熱温度上昇試験方法 コンクリートの硬化熱による温度上昇は、断熱熱量計を用いて測定した。試験に用いた断熱熱量計は、従来から用いられていたものと同じ種類のものである¹²⁾。

すなわち、試験槽内はコルク隔壁によつて、コンクリート供試体を入れる内槽とこれを取りまく外槽(空気槽)の2つに分けられており、いかなる温度においても内槽温度と外槽温度をたえず等しく保つことによつて供試体を原則的に断熱状態におくことができるようになっていいる。この作用は、コルク隔壁内に埋込まれている熱電対およびこれに接続された自動温度調節計の働きによつて行われる。元来試験装置は完全に断熱的なものでないで、試験槽内より槽外にある程度の熱量が漏洩することはさげられず、従つて内槽温度と外槽温度を等しく保つためには、外槽に対して漏洩熱量に相当する熱量だけ補わなければならない。この漏洩熱量はある温度の範囲内では試験槽内温度と槽外温度との差にはほぼ比例すると考えられるので、試験槽外温度を一定に保つ場合には、漏洩熱量すなわち補正熱量は試験槽内温度(またはコンクリート温度)のみの関数で与えられる。この種の断熱熱量計を用いる場合には、その試験槽は恒温室におき、試験にさきだちあらかじめ試験槽内温度と補正熱量との関係を求めておき、実際の試験に当るのが通常である。

試験に用いた恒温室は縦 1.9 m、横 2.6 m、高さ 2.2 m の木製キャビネットで、周囲の4面および上下面の壁厚は 10 cm とし、その中には保温材としておがくずを十分に填充したものである。室内の温度調節は加熱用として 100 W 電球 3 個、60 W 電球 1 個を用い、それらを必要に応じて人為的に随時点滅することにより恒温に調節した。

厳冬時においても、100 W 電球 3 個程度で容易に $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ に室温を保つことができた。なお断熱試験中における恒温室の温度は、 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ を原則としたが、コンクリートの打込み温度が相違する場合には、適宜恒温室の温度を変え、試験の実施に支障のないようにした。

試験の実施に当つては、供試コンクリートを直径 28 cm、高さ 25 cm のブリキ製容器に入れ、ふたをハンダづけによつて密封したのちただちに断熱熱量計に入れ、材令 7 日までその上昇温度を測定した。コンクリートの温度測定は供試体中心部に挿入した抵抗温度計により、自動的にその温度を記録していつた。前述のハンダづけ操作による加熱のために、コンクリート温度は打込み時にくらべて多少上昇したが、フライ アッシュを用いたコンクリートと用いないコンクリートとを比較する目的に対しては別に支障はないと考えられる。断熱試験は材令 7 日までしか行わなかつたが、これは断熱熱量計が一式しかなかつたために、材令 28 日まで継続すると 1 シリーズの試験を終えるのには少なくとも 4 カ月を要することおよび、そのような長期間にわたつてコンクリート材料、その他試験の諸条件を一定に保つことがまづ不可能に近いことなどを考慮したためである。

7. 乾燥収縮試験方法 試験に当つてはコンクリートの材料を全部計量し、温度 20°C 、相対湿度 80% の恒温室に入れておき、コンクリートの練り上り温度が 20°C になるようにした。コンクリートの練り混ぜは、KK 式 1 切のミキサを用いて用い、スランプが 5 cm のコンクリートを 25 mm の板フルイで 25 mm 以上の骨材を取除いた。また供試体は、標識とするオパール ガラスを測定の有効長さが 34 cm になるようにセットした $10 \times 10 \times 40$ cm 角柱型ワクで成形し、これにふたをして 2 日間恒温室にそのままおいたのち、型ワクから取り外し、 20°C の水中養生を 5 日間行つた。次に供試体は温度 20°C 、炭酸カリの飽和溶液で相対湿度 45% に調節される $54 \times 44 \times 37$ cm の乾燥箱の中に 3 本づつ入れて乾燥貯蔵した。供試体の乾燥による収縮は、7・14・28・50 日の終りにおいて、ライツ社製コンパレーター(最小目盛: $1/2\mu$)によつて長さで測定した。しかし、乾燥貯蔵日数 7 日・14 日においては、乾燥箱の炭酸カリ飽和溶液が、相対湿度を 45% に調節する能力よりも、供試体から蒸発する水分の影響が大きく、安定した結果が得られなかつた。

さらに、JIS R5201(セメントの物理試験方法)に準じてモルタル供試体(測定の有効長さ: 14 cm)を成形し、コンクリートの場合と同様に $23 \times 19 \times 12$ cm の乾燥箱の中に 3 本づつ入れて貯蔵し、3・7・14・28・50 日の終りにおいて、高千穂光学 KK 製オリンパス コンパレーター(最小目盛: $5/3.3\mu$)によつて供試体の長さを測つた。この場合も、乾燥貯蔵日数 3 日・7 日においては、乾燥箱の相対湿度が 45% に調節されていなかつたことが測定の結果に現われたように認められる。

また、水セメント・フライ アッシュ重量比 0.40 のペーストを、 $1 \times 1 \times 7$ cm 角柱型ワク(測定の有効長さ: 5 cm)で成形した。この場合には、コンクリートの場合と同様に、 $88 \times 46 \times 50$ cm の乾燥箱の中に 15 本一緒に入れて乾燥貯蔵し、3・7・14・28・50 日の終りにおいて、供試体の長さをライツ社製コンパレーター(最小目盛: $5/3\mu$)によつて測定した。この場合は、供試体から蒸発する水分に対して、乾燥箱の容積が大きく、炭酸カリの飽和溶液が相対湿度を 45% に調節する能力が十分であつたため、安定した測定結果が得られた。

〔2〕 フライ アッシュがまだ固まらないコンクリートの性質におよぼす影響

良質の尼ヶ崎フライ アッシュでセメントの一部をおきかえてコンクリートを造る場合、所定のコンシステンシーをうるために必要な単位水量は、フライ アッシュを用いない場合よりも減少する。この単位水量の減少程度は、フライ アッシュの品質・フライ アッシュのオキカエ率・コンクリートの配合・砂の粒度・セメントの種類などによつて相違する。以下にこれらの試験結果を列記する。

1. コンクリートのコンシステンシーにおよぼす影響 13種のフライ アッシュおよび小野田普通ポルトランドセメントを用い、フライ アッシュ オキカエ率を20%として

(i) 粗骨材の最大寸法 25 mm, 単位セメント・フライ アッシュ量 306 kg/m³, スランプ約 6 cm のコンクリート (実験: 001)

(ii) 粗骨材の最大寸法 30 mm, 単位セメント・フライ アッシュ量 285 kg/m³, スランプ約 6 cm, 空気量約 5% のコンクリート (実験: 002)

(iii) 粗骨材の最大寸法 30 mm, 単位セメント・フライ アッシュ量 280 kg/m³, スランプ約 7 cm, 空気量約 5% のコンクリート (実験: 003)

(iv) 粗骨材の最大寸法 30 mm, 単位セメント・フライ アッシュ量 280kg/m³, スランプ約 5.5 cm, 空気量

表一4・6 品質の相違するフライ アッシュを用いたコンクリートの配合

実験整理番号	フライ アッシュ			粗骨材の最大寸法 (mm)	単位セメント・フライ アッシュ量 (kg/m ³)	フライ アッシュ オキカエ率 (%)	単位水量		粗細骨材重量比	単位A E剤量 (g/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	練り練りたときのコンクリート温度 (°C)
	名称	強熱減量 (%)	ブレン比表面積 (cm ² /g)				kg/m ³	比					
001	—	—	—	25	306	0	190	1.00	1.12	0	6	—	26
	A	1.6	3 680			20	181	0.95			6		
	B	2.4	3 270			〃	183	0.96			6		
	D	2.0	2 660			〃	183	0.96			6		
	E	2.6	3 110			〃	188	0.99			6.5		
	H	1.9	2 410			〃	186	0.98			6		
002	—	—	—	30	285	0	150	1.00	1.6	23	6.5	5.1	11
	B	2.4	3 270			20	143	0.95		50	6.5	5.4	
	C	3.0	3 240			〃	143	0.95		78	6.5	5.6	
	D	2.0	2 660			〃	143	0.95		40	5	4.9	
	E	2.6	3 110			〃	144	0.96		120	7	5.5	
	K	1.5	3 180			〃	141	0.94		48	6	5.2	
	L	1.3	2 810			〃	141	0.94		26	6	5.0	
M	1.4	3 290	〃	141	0.94	42	6	5.1					
003	—	—	—	30	280	0	152	1.00	1.68	21	8	5.0	8
	B	2.4	3 270			20	143	0.94		49	7	5.0	
	C	3.0	3 240			〃	143	0.94		78	5.5	5.1	
	F	1.9	2 760			〃	146	0.96		68	7.5	5.0	
	K	1.5	3 180			〃	143	0.94		48	7	4.9	
	L	1.3	2 810			〃	143	0.94		28	7	5.2	
	M	1.4	3 290			〃	143	0.94		37	7	5.1	
	N	0.9	3 460			〃	140	0.93		65	7	4.7	
O	2.4	2 940	〃	146	0.96	36	7	5.5					
004	—	—	—	30	280	0	150	1.00	1.6	6.5	5.5	5.1	20
	B	2.4	3 270			20	142	0.95		23	5	4.9	
	C	3.0	3 240			〃	144	0.96		38	5	4.8	
	L	1.3	2 810			〃	143	0.95		8.8	6	5.1	
	M	1.4	3 290			〃	143	0.95		15	5.5	5.1	
	Q	0.7	3 620			〃	140	0.93		8.5	5	4.9	

備考 AE剤は実験:002, 003 においてはビンソル レヂンを用い、実験:004 においてはドレシネートXを用いた。

約 5% のコンクリート (実験 : 004)

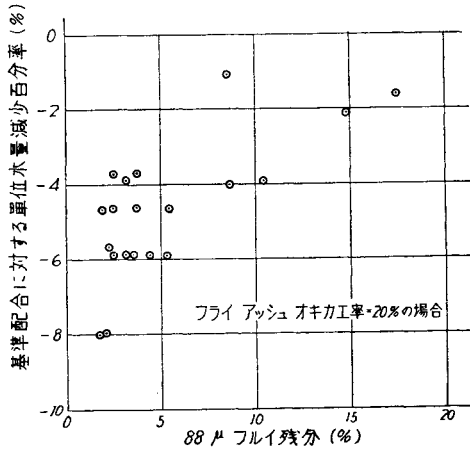
を造るため配合を定めた結果は 表—4.6 のとおりである。

すなわちこの試験結果より次のことが認められる。

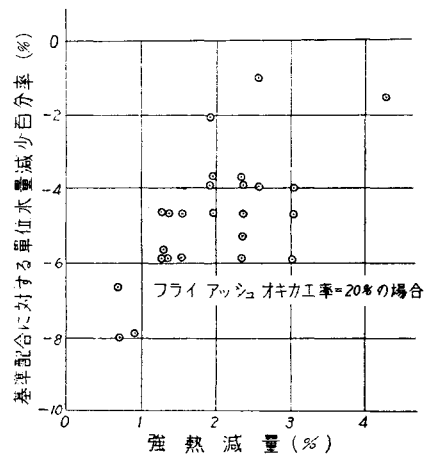
(1) これらの試験に用いた程度の品質のフライ アッシュ (強熱減量 : 0.7~3.0% , プレーン比表面積 : 2 400~3 700 cm²/g) でセメントの 20% をおきかえてコンクリートを造る場合, 所定のスランブをうるために必要な単位水量は, 用いるフライ アッシュの品質によつて多少の差はあつても, すべて, フライ アッシュを用いない場合よりも減少しており, その減少範囲は 1~7% となつている。また, 同一フライ アッシュでも実験によつて, その単位水量の比は相違しているが, これは, それらの実験をそれぞれある程度の期間をおいて行つたからである。

(2) フライ アッシュを用いた場合のコンクリートの単位水量の減少程度は, 一般にフライ アッシュの粉末度が高く, 強熱減量が少ないほど大きい。また粉末度が 88μ フレイ残分で 5% 以下, 強熱減量が 3% 以下の範囲, すなわち良質のフライ アッシュでは, 実用的にはすべてほぼ同等とみなすことができる。図—4.2 および 図—4.3 は 表—4.6 にもとづいてフライ アッシュを用いたコンクリートの基準配合に対する単位水量減少百分率とフライ アッシュの粉末度および強熱減量との関係の一例を示したものである。

図—4.2 フライ アッシュの 88μ フレイ残分とコンクリートの単位水量との関係



図—4.3 フライ アッシュの強熱減量とコンクリートの単位水量との関係



(3) フライ アッシュをコンクリートに用いた場合の単位水量の減少程度は, AE 剤を用いても用いなくてもほぼ同じである。また用いる AE 剤が相違しても変らない。

2. フライ アッシュ オキカエ率およびコンクリートの配合と単位水量との関係

(i) 小野田普通ポルトランド セメントおよびフライ アッシュ A を用い, 粗骨材の最大寸法 30 mm, フライ アッシュ オキカエ率を 0・10・20・30・50% としたコンクリート (実験 : 011)

	単位セメント・フライ アッシュ量	スランブ
a.	239kg/m ³	2 cm
b.	285 "	4 "
c.	354 "	6.5 "

(ii) アサノ マスコン セメントおよびフライ アッシュ Q を用い, 粗骨材の最大寸法 80 mm, 単位セメント・フライ アッシュ量 180 kg/m³, フライ アッシュ オキカエ率 0・20・30・40%, スランブ 4 cm, 空気量 4% としたダム用コンクリート (実験 : 101)

(iii) 磐城中庸熱ポルトランド セメント (七尾工場) およびフライ アッシュ Q を用い, 粗骨材の最大寸法 80 mm, 単位セメント・フライ アッシュ量 180 kg/m³, フライ アッシュ オキカエ率 0・20・30・40%, スランブ 3 cm, 空気量 4% としたダム用コンクリート (実験 : 102)

(iv) 磐城中庸熱ポルトランド セメント (浜松工場) およびフライ アッシュ No. 723 を用い, 粗骨材の最大寸法 150 mm, 単位セメント・フライ アッシュ量 140 kg/m³, フライ アッシュ オキカエ率 0・20・30・40%,

スランプ 4.5 cm, 空気量 4% としたダム用コンクリート (実験: 104)

を造るために定めた配合は 表-4.7 に示すとおりである。

表-4.7 フライ アッシュ オキカエ率を変えたフライ アッシュを用いたコンクリートの配合

実験整理番号	フライアッシュ	セメント	粗骨材の最大寸法 (mm)	単位セメント・フライアッシュ量 (kg/m ³)	フライアッシュオキカエ率 (%)	単位水量		粗細骨材重量比	単位AE剤量 (g/m ³)	スランプ (cm)	リモルジング (回)	空気量 (%)	練り混ぜたコンクリート温度 (°C)							
						kg/m ³	比													
011	A	小野田普通ポルトランドセメント (津久見工場製)	30	239	0	177	1.00	1.20	0		2	—	—	25						
					10	172	0.97				2									
					20	169	0.95				2.5									
					30	165	0.93				2.5									
					50	155	0.87				2									
					285	0	177				1.00				1.30	0	4	—	—	25
						10	172				0.97						4			
						20	169				0.95						4.5			
						30	165				0.93						4.5			
					354	0	177				1.00				1.40	0	6.5	—	—	27
						10	172				0.97						6.5			
						20	169				0.95						7			
30	165	0.93	7																	
50	155	0.87	5																	
101	Q	アサノコセト多摩 (西工場製)	80	180	0	117	1.00	2.50	3.5	4	—	4.1	21							
					20	111	0.95		4.4	4		4.1								
					30	109	0.93		4.8	4		4.1								
					40	106	0.91		5.4	4		4.0								
102	Q	イワキ中ホラセト (七尾工場製)	80	180	0	118	1.00	2.45	5	3.2	—	4.0	17							
					20	112	0.95		6	2.8		4.1								
					30	110	0.93		6.5	3		4.0								
					40	108	0.91		7	3.5		4.0								
104	No.723	イワキ中ホラセト (浜松工場製)	150	140	0	92	1.00	3.40	4	4.1	36	4.0	9							
					20	87	0.95		17	4.3	44	3.9								
					30	86	0.94		26	4.5	43	4.1								
					40	85	0.92		32	4.9	44	4.1								

備考 AE剤はドレシネートXを用いた。

この表から次のことが認められる。

(1) 良質のフライ アッシュを用いたコンクリートの単位水量の減少程度は、フライ アッシュ オキカエ率が増加するほど大きい。表-4.7 における実験: 102 を例にとると、その単位水量は基準配合のものが 118 kg/m³ であるのに対し、フライ アッシュ オキカエ率 20% では 112 kg/m³、オキカエ率 40% では 108 kg/m³ となっていて、それぞれ 5% および 9% だけ減少している。

(2) 実験: 011 は、フライ アッシュを用いたコンクリートの単位水量の減少程度を、特に単位セメント・フライ アッシュ量の相違したコンクリートについて比較した一例であつて、単位セメント・フライ アッシュ量が、239 kg/m³ および 354 kg/m³ のいずれの場合もほぼ同程度であつた。ただ単位セメント・フライ アッシュ量が 354 kg/m³ の場合に、フライ アッシュオキカエ率が 50% にもなると“セメント+フライ アッシュ”の絶対容積がいちじるしく増加するため(この絶対容積に相当するセメント量に換算すると約 440 kg となる)練り上がりコンクリートは非常に粘つく、ひつつきやすい状態となる。これらのことを要約すると通常のコンクリート工事に用いられる程度の単位セメント量の範囲では、フライ アッシュを用いた場合における単位水量の減少程

度は、配合の貧富に関せずほぼ同程度とみられる。

(3) 表一4・7 の各実験は用いたコンクリートの材料も全く相違するものであり、またそれぞれ相当期間をおいて行つたものであるが、これらの実験結果からセメントの種類による単位水量の減少程度は、ほぼ同じであるといふことができる。

3. 砂の粒度がフライ アッシュを用いたコンクリートの単位水量におよぼす影響 小野田普通ポルトランドセメントおよびフライ アッシュ Q を用い、粗粒率が 2.44・2.76・3.33 の 3 種の砂について、それぞれ粗骨材の最大寸法を 30 mm、単位セメント・フライ アッシュ量を 280 kg/m³、フライ アッシュ オキカエ率を 0・20・30%，スランブを 6 cm としたコンクリートを造るための配合を定めた結果は 表一4・8 のとおりである。

表一4・8 砂の粒度が相違する場合のフライ アッシュを用いたコンクリートの配合の一例

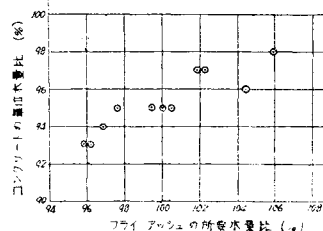
砂の粒度 粗粒率	フルイに止る 百分率 (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	単位セメント・フ ライアッシュ量 (kg/m ³)	フライ アッシュ オキカエ 率 (%)	単位水量		粗細骨材 重量比	スランブ (cm)	備 考			
					kg/m ³	比						
3.33	2.5……21	30	280	0	161	1.00	1.30	6.5	1. セメントは小野田普通ポ ルトランド セメント、フライ アッシュはQを用いた。 2. 練り混ぜは手練りで行つた。 3. 練り終つたときのコンクリ ート温度は約 20°C であつ た。			
	1.2……53			20	150	0.93		6				
	0.6……70							30		145	0.90	6.5
	0.3……90											6.5
2.76	0.15 …99	30	280	0	161	1.00	1.60	6.5				
	2.5……12			20	152	0.94		6.5				
	1.2……29							30		148	0.92	6
	0.6……53											6.5
2.44	0.3……85	30	280	0	161	1.00	1.70	6				
	0.15 …97			20	154	0.96		6.5				
	2.5……11							30	150	0.93	6.5	
	1.2……21										6	
3.33	0.6……45	30	280	20	154	0.96	1.70	6.5				
	0.3……74			30	150	0.93		6.5				
	0.15 …93							6.5				
	2.5……11							6				

表から次のことが認められる。すなわち、フライ アッシュを用いたコンクリートの単位水量の減少程度は、以上に述べた諸因子のほか、用いる砂の粒度によつても相違し、一般に粗い砂を用いる場合ほど大きい。表一4・8 によれば、フライ アッシュ オキカエ率 30% の場合の基準配合に対する単位水量比は、粗粒率が 2.44・2.76・3.33 の砂に対しそれぞれ 0.93・0.92・0.90 となつていて、単位水量の減少程度は粗粒率が大きいほど大きい。

4. フライ アッシュの所要水量比とフライ アッシュを用いたコンクリートの単位水量との関係 III [7] で述べたように、フライ アッシュの品質判定の一方法としての所要水量と試験によるフライ アッシュの所要水量比は試験に用いるモルタルの配合によつて相違する。いま一定のコンシステンシーをうるのに必要な水量を、モルタルの場合とコンクリートの場合とについて相関関係があることが考えられるので、その相対値を用いて調べてみよう。

表一3・13 における a 配合を用いた場合のフライ アッシュの所要水量比と、表一4・6 におけるフライ アッシュを用いたコンクリートの基準配合に対する単位水量比との試験値にもとづいて、両者の関係を図示すれば、図一4・4 のとおりであつて、両者の間にはほぼ直線関係が認められる。しかしその絶対値は、フライ アッシュの所要水量比が 96~106% であるのに対し、フライ アッシュを用いたコンクリートの単位水量比は、93~99% であつて、両者の間には相当開きがあり、またフライ アッシュの所要水量比が 100% 以上のものでも、コンクリートの単位水量比は、すべて 100% 以下になつてゐる。このことはフライ アッシュの所要水量比試験方法として、表一3・13 における a 配合を用いる方法による場合、所要水量比の規格値を 100% 以下にする

図一4.4 フライ アッシュの所要水量比とフライ アッシュコンクリート(オキカエ率 20%)の単位水量比との関係



必要がないことを示すものである。

5. AE コンクリートの単位 AE 剤量におよぼす影響

(1) フライ アッシュの強熱減量および吸着性と単位 AE 剤量との関係：フライ アッシュでセメントの一部をおきかえて AE コンクリートを造る場合、所定の空気量をうるために必要な単位 AE 剤量は 表—4.9 のようにフライ アッシュの品質によつて相違し、一般にフライ アッシュを用いない場合よりも増加する。

表—4.9 フライ アッシュの強熱減量および吸着性と単位 AE 剤量

実験整理番号	フライ アッシュ	強熱減量 (%)	吸着量 (mg/g)	単位 AE 剤量 (g/m ³)
002	なし	—	—	23
	B	2.4	0.55	50
	C	3.0	0.65	78
	D	2.0	0.45	40
	E	2.6	0.80	120
	K	1.5	0.55	48
	L	1.3	0.40	26
	M	1.4	—	42
003	なし	—	—	21
	B	2.4	0.55	49
	C	3.0	0.65	78
	F	1.9	0.65	68
	K	1.5	0.55	48
	L	1.3	0.40	28
	M	1.4	—	37
	N	0.9	0.60	65
	O	2.4	0.45	36

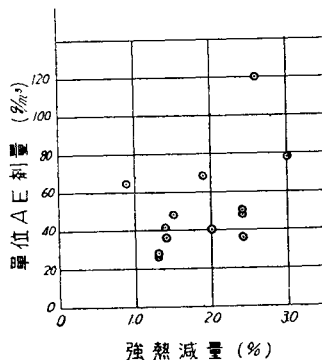
備考 表 3.1; 3.11; 4.6 参照

表—3.9 よりフライ アッシュの強熱減量と単位 AE 剤量との関係を図示すれば 図—4.5 のとおりである。すなわち、品質の異なるフライ アッシュを用いた場合の単位 AE 剤量（ビンソル レジン）とフライ アッシュの強熱減量との間には一定の関係を見出すことができない。

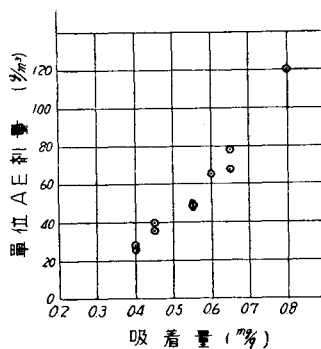
しかし、図—4.5 におけるフライ アッシュの強熱減量の代りに、吸着性をとり、これと単位 AE 剤量（ビンソル レジン）との関係を求めれば、図—4.6 のようになり、両者の間にはほぼ一定の関係が認められる。また AE 剤として、ドレシネート X を用いた場合にも、これと全く同一の傾向が認められる。このことはフライ アッシュを AE コンクリートに用いた場合における単位 AE 剤量の増加およびその変動が、フライ アッシュの吸着性によつて支配されていることを示すものと考えられる。

(2) フライ アッシュのオキカエ率と単位 AE 剤量との関係：ドレシネート X を用い、表—4.7 の配合によつて行つた試験の結果は 図—4.7 のとおりである。すなわちフライ アッシュでポルトランドセメントの一部をおきかえて AE コンクリートを造る場合、所定の空気量をうるために必要な単位 AE 剤量は、フライ アッシュ オキカエ率に応じて直線的に増加する。またオキカエ率の増加にともなう単位 AE 剤量の増加割合は、

図—4.5 フライ アッシュの強熱減量と単位 AE 剤量との関係



図—4.6 フライ アッシュの吸着性と単位 AE 剤量との関係



一般にフライアッシュの吸着性の大小に左右される。

(3) 単位 AE 剤量の増加にともなつて生ずる問題:表-4-6の実験例では、セメントの20%をフライ アッシュでおきかえて造つた AE コンクリートの単位 AE 剤量が、フライ アッシュを用いない場合の1.1~5.2倍になつている。またフライアッシュを用いたコンクリートの単位 AE 剤量は、フライアッシュ オキカエ率が増加するほど増加することを考えると、場合によつてはフライ アッシュを用いない場合の約10倍となりうることもありうる。この場合 AE 剤それ自体が、コンクリートの性質におよぼす悪影響の有無が問題となる。ASTM : C350 -54T²²⁾のフライ アッシュ規格試案では、フライアッシュでセメントの20%をおきかえて所定の AE コンクリートを造つた場合の単位 AE 剤量が、フライアッシュを用いない場合の2倍をこえないことを要求している。

しかしこれは、ある種の市販 AE 剤のうちに含まれている分散材、硬化促進材もしくは緩結材がコンクリートの品質におよぼす悪影響を考慮して定めたものであつて、フライアッシュを用いた場合の単位 AE 剤量が、2倍をこえる場合であつても、そのコンクリートについて所定の試験を行つて満足な結果が得られた場合、または用いる AE 剤がすでに試験されたものであり、かついま用いようとするフライアッシュよりも多量の AE 剤を必要とするフライアッシュについて経験上満足な結果が確認されている場合には、2倍ということにこだわらなくてもよいことを同試案ではうたつている。現在までに行つた実験の範囲内では、ピンソル レジンおよびドレシネート X については、これを相当量用いてもならぬ悪影響は認められない。

6. フライアッシュがコンクリートのブリージングにおよぼす影響 フライアッシュがコンクリートのブリージングにおよぼす影響を確かめるため、富配合コンクリート(骨材最大寸法 30 mm, 単位セメント・フライアッシュ量 280 kg/m³) および貧配合コンクリート(粗骨材最大寸法 120 mm, 単位セメント・フライアッシュ量 180 kg/m³)²⁴⁾について、ASTM C232-52T²⁴⁾に準じて試験を行つた。試験に用いたコンクリートの配合および試験の結果は表-4-10、4-11および図-4-8に示すとおりである。また、モルタルについても ASTM C243-53T

図-4-7 フライアッシュ オキカエ率と単位 AE 剤量

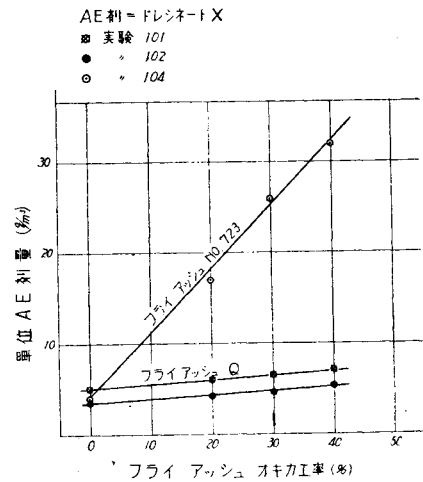


表-4-10 コンクリートのブリージング試験に用いた配合

粗骨材最大寸法 (mm)	単位セメント・フライアッシュ量 (kg/m ³)	フライアッシュ オキカエ率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	砂百分率 (%)	単位 AE 剤量 (g/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	練り上りコンクリートの温度 (°C)	備考
30	280	0	137	37.0	2.1	6.2	5.2	27.0	セメント; 大阪産業中熟ポルトランドセメント フライアッシュ; N AE 剤; ドレシネート X 細骨材; 天龍川産 (F. M. = 2.62)
"	"	"	"	"	"	7.1	5.5	—	
"	"	"	"	"	1.9	6.3	5.5	27.0	
"	"	20	127	37.5	23	6.8	5.2	—	粗骨材; 那賀川産
"	"	"	"	"	20	6.2	5.4	26.8	
"	"	"	"	"	"	5.7	5.0	26.8	
120	180	0	98	24.0	5.0	3.3	3.6	21.1	セメント; 磐城普通ポルトランドセメント フライアッシュ; No. 1116 AE 剤; ドレシネート X 細骨材; 鳩ヶ谷ダム用 (F. M. = 2.89)
"	"	"	"	"	5.1	3.4	3.4	19.7	
"	"	"	"	"	5.5	4.5	3.7	18.6	
"	"	"	"	"	5.5	4.0	3.5	19.6	
"	"	30	91	23.9	65	4.0	3.5	21.7	粗骨材; 鳩ヶ谷ダム用
"	"	"	"	"	68	5.5	4.6	19.3	
"	"	"	"	"	56	4.4	3.6	19.2	
"	"	"	"	"	59	4.3	4.1	20.0	

表-4-11 コンクリートのブリージング試験結果

測定時間 (分)	単位セメント・フライ アッシュ量=280 kg/m ³								単位セメント・フライ アッシュ量=180 kg/m ³									
	フライ アッシュ オキカエ率 0%				フライ アッシュ オキカエ率 20%				フライ アッシュ オキカエ率 0%				フライ アッシュ オキカエ率 30%					
	1	2	3	平均	1	2	3	平均	1	2	3	平均	1	2	3	平均		
20	0.27	0.23	0.29	0.26	0.28	0.19	0.33	0.27	0.08	0.19	0.19	0.18	0.16	0.00	0.11	0.10	0.28	0.12
40	0.72	0.75	0.71	0.73	0.61	0.44	1.05	0.70	0.35	0.43	0.55	0.63	0.49	0.30	0.38	0.49	0.49	0.42
60	1.61	1.27	1.25	1.38	0.96	0.94	1.37	1.09	0.64	0.85	0.99	1.06	0.89	0.58	0.72	0.85	0.91	0.77
80	2.12	1.85	1.82	1.93	1.39	1.33	2.04	1.59	1.01	1.14	1.39	1.38	1.23	0.81	1.13	1.05	1.41	1.10
100	2.75	2.36	2.22	2.44	2.01	1.75	2.52	2.09	1.32	1.46	1.70	1.72	1.55	1.15	1.67	1.60	1.79	1.55
120	3.36	2.92	2.63	2.97	2.44	2.08	2.96	2.49	1.66	1.85	2.05	2.11	1.92	1.44	2.15	2.06	2.25	1.98
140	3.73	3.25	2.90	3.29	3.03	2.38	3.49	2.97	1.94	2.33	2.47	2.50	2.31	1.73	2.59	2.34	2.53	2.30
160	4.07	3.46	2.94	3.49	3.34	2.72	3.53	3.20	2.12	2.50	2.85	2.97	2.61	1.99	2.98	2.83	2.95	2.69
180	4.13	3.47	2.94	3.51	3.52	2.98	3.53	3.34	2.24	2.70	3.16	3.38	2.87	2.38	3.28	3.35	3.30	3.08
200	4.13	3.47	2.94	3.51	3.52	3.07	3.53	3.37	2.31	2.75	3.54	3.69	3.07	2.61	3.64	3.63	3.92	3.45
220	—	—	—	—	—	—	—	—	2.34	2.76	3.85	4.07	3.26	2.73	3.95	3.86	4.11	3.66
240	—	—	—	—	—	—	—	—	2.34	2.76	3.90	4.13	3.28	2.90	4.25	4.22	4.28	3.91
260	—	—	—	—	—	—	—	—	2.34	2.76	3.92	4.16	3.30	2.93	4.52	4.48	4.28	4.05
280	—	—	—	—	—	—	—	—	2.34	2.76	3.92	4.19	3.30	2.93	4.66	4.51	4.28	4.10
300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.93	4.67	4.53	4.28	4.10

に従って試験したが、その結果は表-4-12に示すとおりである。これらから次のことが認められる。

(1) ポルトランドセメントの一部をフライアッシュでおきかえて造つたコンクリートのブリージングは、フライアッシュを用いないものにくらべて、本試験の範囲の平均値によれば、富配合の場合にはわずかに減少し、貧配合の場合にはわずかに増加するようにみられる。しかし、このような試験方法による場合、同一系列の3~4回の試験結果の間には相当の変動が生じ、このことを一般的傾向とすることは困難であると思われる。

(2) 一方、モルタルのブリージングについては、ポルトランドセメントの一部をフライアッシュでおきかえた場合には、フライアッシュを用いないものよりわずかに多くなることが認められる。

(3) ポルトランドセメントの一部をフライアッシュでおきかえて造つたコンクリートは、フライアッシュを用いないものに比して、コンシステンシーおよびプラスチシティーがいちじるしくよくなることが認められ、実際の施工に当つてはコンクリート材料の分離が少なく、従つて全体としてのブリージングもまた少なくなるように考えられる。

〔3〕 フライアッシュがコンクリートの強度におよぼす影響

約20°Cの水中養生を行う場合、良質のフライアッシュでセメントの一部をおきかえて造つたコンクリートの強度は、早期材令においては、フライアッシュを用いないものよりも強度が弱くなるが、長期材令においてはいちじるしい強度増進を示し、オキカエ率20~40%のものはフライアッシュを用いないものよりも強くなる。またオキカエ率50%のものでも材令6月ないし1年でフライアッシュを用いないものより強くなつた実験結果もある。このフライアッシュオキカエ率と圧縮強度の関係および材令の増加にもなる強度増進率は、フライアッシュの品質・コンクリートの配合・セメン

図-4-8 フライアッシュを用いたコンクリートのブリージング

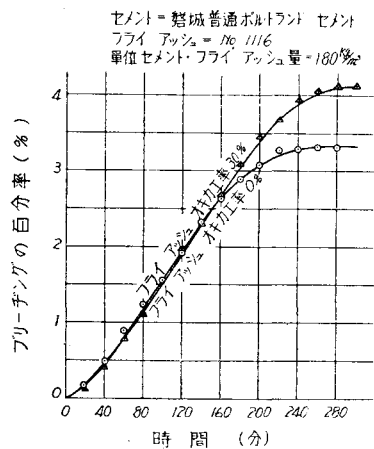
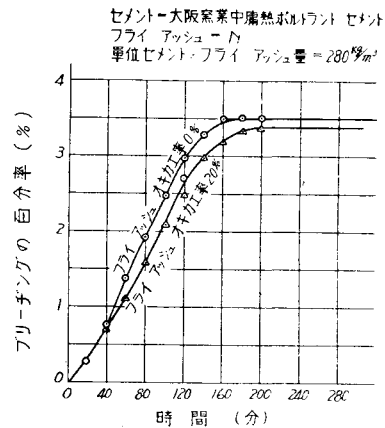


表-4-12 モルタルのブリージング試験に用いた配合およびその結果

試験回数	セメント・フライ アッシュ量 (g)	フライ アッシュ オキカエ 率 (%)	水 量 (c.c.)	フ ロ ー 率 (%)	ブリージング の初期の速度 ($\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{秒}$)	ブリージング量 (cm^3/cm^3)
第 1 回	750	0	375	107	60.7×10^{-6}	21.4×10^{-3}
第 2 回					60.3 "	21.3 "
第 3 回					48.5 "	16.8 "
平 均					56.5 "	19.8 "
第 1 回	750	20	375	107	73.7×10^{-6}	27.8×10^{-3}
第 2 回					66.4 "	22.7 "
第 3 回					66.4 "	24.6 "
平 均					68.8 "	25.3 "
第 1 回	750	40	360	107	62.8×10^{-6}	26.3×10^{-3}
第 2 回					67.6 "	24.2 "
第 3 回					63.4 "	24.7 "
平 均					64.6 "	25.1 "

トの種類・養生方法・などに左右される。次にこれらの諸因子がフライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度におよぼす影響について述べよう。

1. フライ アッシュの品質がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響 13種のフライ アッシュを用いた場合、表-4-6 に示した配合のコンクリートについて約 20°C の水中養生を行い、その圧縮強度を試験した結果は表-4-13 に示すとおりである。

表-4-13 品質の相違するフライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度

実 験 整理番号	フ ラ イ ア ャ ッ シ ュ			単位セメ ント・フ ライ ア ッシュ量 (kg/m^3)	フ ラ イ ア ャ ッ シ ュ オ キ カ エ 率 (%)	圧 縮 強 度 (kg/cm^2)				備 考
	名 称	強熱減量 (%)	ブレン 比表面積 (cm^2/g)			28 日	91 日	6 月	1 年	
001	—	—	—	306	0	215	268	296	313	1. 供試体は 10×20 cm 円柱である。 2. 各試験値は供試体 3 個の平 均値である。 3. AE 剤は用いない。
	A	1.6	3 680		20	190	276	329	332	
	B	2.4	3 270		"	183	263	313	339	
	D	2.0	2 660		"	185	247	316	327	
	E	2.6	3 110		"	161	220	282	301	
	H	1.9	2 410		"	163	215	280	287	
003	—	—	—	280	0	283	355	359	363	1. 供試体は 10×20 cm 円柱 である。 2. 各試験値は供試体 3 個の平 均値である。 3. AE 剤はピソソル レチン を使用。
	B	2.4	3 270		20	238	344	400	400	
	C	3.0	3 240		"	235	343	396	400	
	F	1.9	2 760		"	228	336	378	397	
	K	1.5	3 180		"	238	340	392	410	
	L	1.3	2 810		"	243	342	395	401	
	M	1.4	3 290		"	249	345	381	400	
	N	0.9	3 460		"	259	352	398	427	
	O	2.4	2 940		"	228	329	353	373	
004	—	—	—	280	0	294	342	366	348	1. 供試体は 10×20 cm 円柱 である。 2. 各試験値は供試体 3 個の平 均値である。 3. AE 剤はドレシネート X を 使用。
	B	2.4	3 270		20	243	358	397	396	
	C	3.0	3 240		"	251	339	402	405	
	L	1.3	2 810		"	231	327	347	381	
	M	1.4	3 290		"	251	331	374	364	
	Q	0.7	3 620		"	260	369	405	415	

表-4-13 より次のことが認められる。

(1) フライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度は、フライ アッシュの粉末度が細かいほど、大きくでる傾向にある。また、粉末度が細かいものほど早期に強度が増進する傾向にある。

しかし実験：003 において、8種のフライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度は、材令 28 日では、228~259 kg/cm² の範囲にあつてその変動係数は 4.1%、材令 1年では、373~427 kg/cm² の範囲にあつてその変動係数は 3.5% である。従つてこの範囲のフライ アッシュは、実用上はほぼ同程度とみなしてさしつかえないように思われる。

2. フライ アッシュ オキカエ率およびコンクリートの配合が圧縮強度におよぼす影響 表—4・7 に示した配合のうち、実験：011・101・102 のコンクリートについて、約 20°C の水中養生を行い、その圧縮強度を試験した結果は、表—4・14 および 図—4・9 に示すとおりである。

表—4・14 フライ アッシュ オキカエ率と圧縮強度との関係

実験整理番号	単位セメント・フライアッシュ量 (kg/m ³)	フライアッシュオキカエ率 (%)	圧 縮 強 度 (kg/cm ²)					28 日強度に対する比			備 考
			7 日	28 日	91 日	6 月	1 年	91 日	6 月	1 年	
011	239	0	72(1.00)	132(1.00)	157(1.00)	174(1.00)	187(1.00)	1.15	1.27	1.36	1. 供試体は 15×30 cm 円柱である。 2. 各試験値は供試体 3 個の平均値である。
		10	69(0.96)	125(0.95)	170(1.08)	190(1.13)	224(1.20)	1.36	1.52	1.79	
		20	65(0.90)	120(0.91)	168(1.07)	213(1.22)	231(1.24)	1.40	1.77	1.93	
		30	59(0.82)	107(0.81)	161(1.02)	209(1.20)	239(1.28)	1.51	1.95	2.23	
		50	40(0.56)	73(0.55)	122(0.78)	180(1.03)	233(1.29)	1.67	2.46	3.19	
	285	0	125(1.00)	219(1.00)	256(1.00)	287(1.00)	281(1.00)	1.17	1.31	1.28	
		10	117(0.94)	211(0.96)	284(1.11)	325(1.13)	331(1.18)	1.35	1.54	1.57	
		20	111(0.89)	199(0.91)	278(1.09)	321(1.12)	340(1.21)	1.40	1.61	1.71	
		30	94(0.75)	169(0.77)	261(1.02)	321(1.12)	337(1.20)	1.54	1.90	1.99	
		50	66(0.53)	121(0.55)	201(0.79)	269(0.94)	305(1.09)	1.66	2.22	2.52	
	354	1	223(1.00)	350(1.00)	399(1.00)	419(1.00)	433(1.00)	1.14	1.20	1.24	
		10	219(0.98)	345(0.99)	430(1.08)	460(1.10)	—	1.25	1.33	—	
20		196(0.88)	313(0.89)	428(1.07)	480(1.15)	492(1.14)	1.37	1.53	1.57		
30		175(0.79)	279(0.80)	406(1.02)	461(1.10)	486(1.12)	1.45	1.65	1.74		
50		126(0.57)	214(0.61)	321(0.81)	380(0.91)	418(0.97)	1.50	1.78	1.95		
101	180	0	—	174(1.00)	254(1.00)	254(1.00)	254(1.00)	1.46	1.46	1.46	1. 供試体は 15×30 cm 円柱で、40 mm 以上の骨材をふるい去つたコンクリートで製造した。 2. 各試験値は供試体 3 個の平均値である。
		20	—	123(0.71)	236(0.93)	270(1.06)	282(1.11)	1.92	2.20	2.29	
		30	—	93(0.53)	212(0.83)	249(0.98)	296(1.17)	2.28	2.68	3.18	
		40	—	75(0.43)	202(0.80)	251(0.99)	301(1.19)	2.69	3.35	4.02	
102	180	0	—	119(1.00)	226(1.00)	253(1.00)	265(1.00)	1.90	2.13	2.23	2. 各試験値は供試体 3 個の平均値である。
		20	—	80(0.67)	226(1.00)	256(1.01)	305(1.15)	2.82	3.20	3.81	
		30	—	73(0.61)	192(0.85)	239(0.95)	303(1.14)	2.63	3.27	4.15	
		40	—	59(0.50)	135(0.60)	204(0.81)	230(0.87)	2.29	3.46	3.90	

カッコ内の数値は基準配合の強度に対する比を示したものである。

表—4・14 および 図—4・9 より次のことが認められる。

(1) フライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度は、早期材令ではフライ アッシュ オキカエ率が増すほど弱くなるが、長期材令ではいちじるしい強度増進を示し、材令約 1 年程度では、フライ アッシュ オキカエ率 50% 程度まで、フライ アッシュを用いない場合よりも強くなるか、あるいはほぼ同程度になる。またフライ アッシュを用いたコンクリートの材令の増加にともなう強度増進率は、フライ アッシュ オキカエ率が増すほど大きくなる。

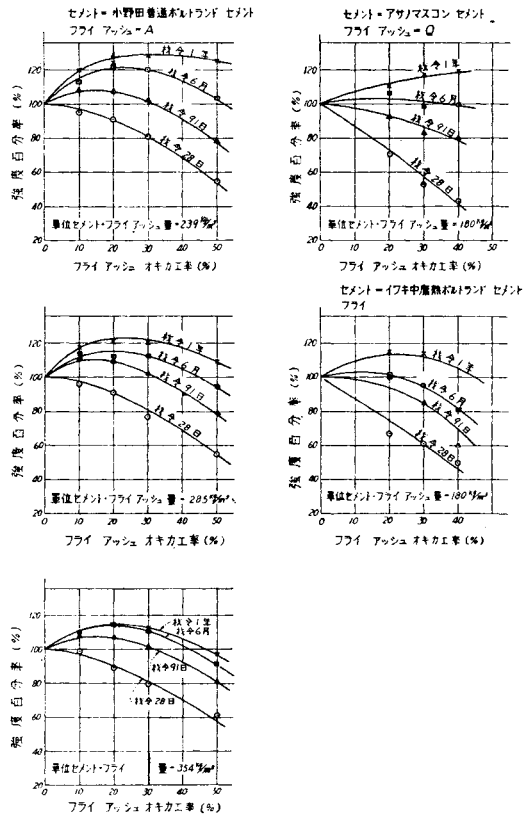
(2) フライ アッシュ オキカエ率と圧縮強度との関係は、比較的早期材令においては、配合の貧富に関せずほぼ一定であるが、長期材令においては、貧配合のコンクリートほどフライ アッシュの効果により顕著にあらわれてくる。

これは、フライ アッシュとセメント中の遊離石灰の結合に必要な水分が、セメントの水和後におけるコンクリート中の残存水分によつてまかなわれるとすれば、この残存水分は一般に貧配合におけるほど多いことによるものではないかと考えられる。

3. フライ アッシュが普通および中庸熱ポルトランド セメントを用いたコンクリートの圧縮強度におよぼす影響 小野田普通ポルトランド セメントおよび小野田中庸熱ポルトランド セメントの2種のセメントとフライ アッシュ N を用い、粗骨材の最大寸法 30 mm, 単位セメント・フライ アッシュ量 280 kg/m³, フライ アッシュ オキカエ率 0・20%, スランブ 4・6 cm, のコンクリートについて、約 20°C 水中養生を行い、その圧縮強度を試験した結果は表—4・15 のとおりである。この数値にもとづいて、それぞれの圧縮強度および基準配合に対する圧縮強度百分率と材令との関係を示せば、**図—4・10** に示すとおりである。

すなわち、フライ アッシュで普通ポルトランド セメントおよび中庸熱ポルトランド セメントの一部をおきかえたコンクリートの、材令の増加にともなう圧縮強度の増進状態は、フライ アッシュを用いない基準配合のコンクリートのそれに支配され、一般には、石灰分の多い早強性のセメントの方が、フライ アッシュを用いる場合には条件がよいように考えられる。

図—4・9 フライ アッシュ オキカエ率と圧縮強度との関係

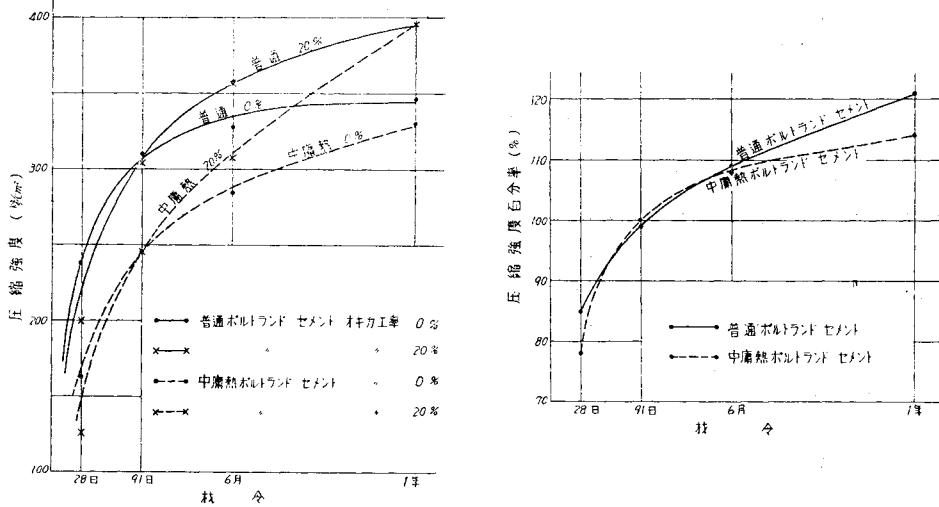


表—4・15 セメントの相違する場合におけるフライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度

セメント	フライ アッシュオキカエ率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	スランブ (cm)	圧縮強度 (kg/cm ²)			
				28 日	91 日	6 月	1 年
小野田普通ポルトランド セメント (津久見工場製)	0	168	4	238	310	328	330
	20	156	4	201 (0.85)	305 (0.99)	358 (1.09)	398 (1.21)
小野田中庸熱ポルトランド セメント (津久見工場製)	0	168	6	162	246	284	347
	20	156	6	127 (0.78)	246 (1.00)	308 (1.08)	397 (1.14)

- 備 考
1. フライ アッシュは N を用いた。
 2. 粗骨材の最大寸法は 30 mm. 単位セメント・フライ アッシュ量は 280 kg/m³ である。
 3. 練り混ぜたときのコンクリート温度は約 10°C であった。
 4. 供試体は 15×30 cm 円柱、試験値は供試体 3 個の平均値である。
 5. 20°C 水中養生を行った場合のものである。

図-4.10 セメントの相違するフライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度



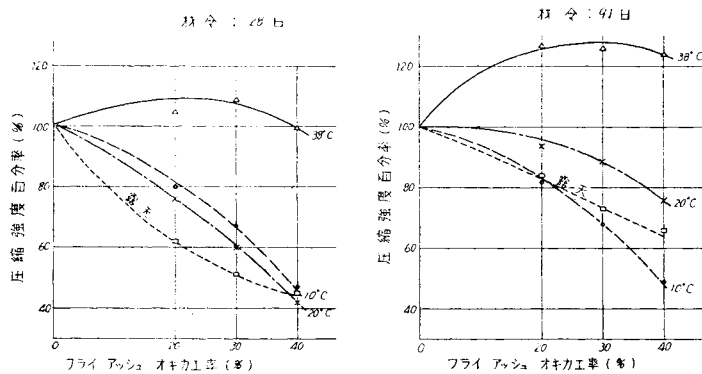
4. 養生方法がフライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度におよぼす影響 表-4.7の実験: 104に示した配合のコンクリートを、それぞれ 10・20・38°C の水中および露天放置で養生した場合の圧縮強度試験結果は、表-4.16 および 図-4.11 に示すとおりである。

表-4.16 養生方法がフライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度におよぼす影響

単位セメント・フライアッシュ量 (kg/m³)	フライアッシュ オキカエ率 (%)	単 位 水 量 (kg/m³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧 縮 強 度 (kg/cm²)							
					約 10°C 水中養生		20°C 水中養生		38°C 水中養生		露 天 放 置	
					28 日	91 日	28 日	91 日	28 日	91 日	28 日	91 日
140	0	92	4.1	4.0	79	163	135	239	212	248	99	147
					(1.00)	(1.00)	(1.00)	(1.00)	(1.00)	(1.00)	(1.00)	(1.00)
	20	87	4.3	3.9	63	134	102	224	222	315	61	123
					(0.80)	(0.82)	(0.76)	(0.94)	(1.05)	(1.27)	(0.62)	(0.84)
	30	86	4.5	4.1	53	110	81	212	231	313	50	108
					(0.67)	(0.68)	(0.60)	(0.89)	(1.09)	(1.26)	(0.51)	(0.73)
	40	85	4.9	4.1	37	79	57	181	213	307	45	97
					(0.47)	(0.49)	(0.42)	(0.76)	(1.00)	(1.24)	(0.45)	(0.66)

1. 粗骨材の最大寸法は 150 mm、セメントは警城中庸熱ポルトランドセメント(浜松工場製)、フライアッシュは No. 723 である。
2. 練り混ぜたときのコンクリート温度は約 9°C であつた。
3. 圧縮強度試験に用いた供試体は 10×20 cm 円柱で、20 mm 以上の骨材をふるい去つたコンクリートについて試験した。
4. 露天放置期間中(1~4月)の平均温度は約 10°C であつた。

図-4.11 養生方法が相違するフライ アッシュ コンクリートの圧縮強度



これらのことから次のようなことが認められる。

(1) フライ アッシュを用いたコンクリートの早期材令における圧縮強度は、10°C および 20°C 水中養生を行なった場合にはフライ アッシュを用いないものよりも小さいが、30°C 水中養生を行なった場合には、フライ アッシュを用いないものよりも強くなる。

(2) フライ アッシュを用いたコンクリートは、10・20・38°C のいずれの養生温度においても、材令の増加にともなう強度の増進がみられる。28 日より 91 日への強度増進の割合は、10°C の養生温度では、オキカエ率のいかんにかかわらずほぼ同じであるが、20°C および 38°C においてはオキカエ率が増加するに従って大きくなる (表—4・17 参照)。

(3) 露天放置のまま養生した場合においても、フライ アッシュを用いたコンクリートの 材令増加にともなう強度の増進は、フライ アッシュを用いないものよりも大きく、表—4・17 に示すように、材令 91 日強度の 28 日強度に対する比は、フライ アッシュを用いないものが、約 1.5 であるのに対し、フライ アッシュを用いたものは約 2.0~2.2 となっている。この実験においては、露天放置期間中(1~4月)の平均気温が約 10°C であつて、圧縮強度およびその増進率は、約 10°C の水中養生を行なったものにくらべて大差がない。従つて、フライ アッシュを用いないコンクリートで 露天放置の許されるような場合には、フライ アッシュを用いたものでも、露天放置を行つてもさしつかえないものと考えられる。

表—4・17 養生条件をかえたフライ アッシュを用いたコンクリートの 91 日強度と 28 日強度との比

フライ アッシュ オキカエ率 (%)	養生温度			露天放置
	10°C	20°C	30°C	
0	2.1	1.8	1.2	1.5
20	2.1	2.2	2.0	2.0
30	2.1	2.6	2.2	2.2
40	2.1	3.2	2.2	2.2

5. フライ アッシュがコンクリートの引張強度におよぼす影響 表—4・7の実験：011 (単位セメント・フライ アッシュ量 285 kg/m³) に示した配合のコンクリートを、約 20°C の水中養生を行い、材令 7・28・91 日・6 月・1 年において引張強さ係数を試験した結果は 表—4・18 のとおりである。

表—4・18 フライ アッシュを用いたコンクリートの引張強さ係数

フライ アッシュ オキカエ率 (%)	引張強さ係数 (kg/cm ²)					圧縮強度 / 引張強さ係数				
	7 日	28 日	91 日	6 月	1 年	7 日	28 日	91 日	6 月	1 年
0	12.2 (1.00)	18.4 (1.00)	22.1 (1.00)	24.1 (1.00)	23.1 (1.00)	10.2	11.9	11.6	11.9	12.2
10	12.1 (0.99)	18.1 (0.98)	23.5 (1.06)	27.2 (1.13)	26.9 (1.16)	9.7	11.7	12.1	11.9	12.3
20	11.2 (0.92)	16.5 (0.90)	22.2 (1.00)	28.0 (1.16)	27.2 (1.18)	9.9	12.1	12.5	11.5	12.5
30	9.2 (0.75)	14.3 (0.78)	20.6 (0.93)	27.2 (1.13)	26.5 (1.15)	10.2	11.8	12.7	11.8	12.7
50	6.6 (0.54)	11.1 (0.60)	17.7 (0.80)	26.7 (1.11)	26.9 (1.17)	10.0	10.9	11.4	10.1	11.3

備考

1. セメントは小野田普通ポルトランド セメント、フライ アッシュは A を用いた。
2. 粗骨材の最大寸法は 30 mm、単位セメント・フライ アッシュ量は 285 kg/m³、スランプは 4cm である。
3. 練り混ぜたときのコンクリート温度は約 25°C であつた。
4. 供試体は 15×20 cm 円柱である。
5. 各試験値は供試体 4 個の平均値である。

すなわち、フライ アッシュを用いたコンクリートの引張強さ係数とフライ アッシュ オキカエ率との関係および材令の増加にともなう引張強さ係数の増進割合は、圧縮強度の場合とほぼ同じであつて、特にフライ アッシュの効果は圧縮強度の場合よりも引張強さ係数においていちじるしいという傾向は認められない。この表の実験例および 1~4 で述べたことから、フライ アッシュの品質・コンクリートの配合・セメントの種類・養生方法などがフライ アッシュを用いたコンクリートの引張強度におよぼす影響は、圧縮強度の場合とほぼ同じであろうと考えられる。

〔4〕 フライ アッシュがコンクリートの透水性におよぼす影響

実験に用いた配合を示せば、表—4・19 のとおりであり、これを〔1〕4 に述べた方法で試験を行つた結果は、表—4・20 および 表—4・21 に示すとおりで、これを図示すれば、図—4・12 および 図—4・13 のとおりである。

表-4-19 透水試験に用いたコンクリートの配合

実験整理番号	セメント	フライアッシュ	粗骨材の最大寸法(mm)	単位セメント・フライアッシュ量(kg/m ³)	アッシュ・オキカエ率(%)	単位水量(kg/m ³)	粗細骨材重量比	スランブ(cm)	備考
015	小野田普通ポルトランドセメント(津久見工場製)	B	25	300	0	180	1.30	6.5	手練りで練り混ぜた。練り混ぜたときのコンクリート温度は約12°Cであった。
					20	172		6.5	
					30	168		6.5	
016	"	N	15	300	0	201	0.86	6	手練りで練り混ぜた。練り混ぜたときのコンクリート温度は約9°Cであった。
					20	189		6	

表-4-20 フライアッシュを用いたコンクリートの透水試験結果

実験整理番号	フライアッシュ・オキカエ率(%)	試験水圧(kg/cm ²)				アソビ時間(時)				平均流出量(c.c./時)				圧入水量(%)				平均流出量を算出したときの材令(日)			
		28日	60日	91日	4月	28日	60日	91日	4月	28日	60日	91日	4月	28日	60日	91日	4月	28日	60日	91日	4月
015	0					—	220	60*	110*	0.10	0.03	0.07	0.07	3.2	2.4	2.3	1.7	33	73	98	140
	20	15	15	30	30	—	—	100	290*	0.37	—	0.03	0.01	4.1	—	2.5	1.3	31	—	98	144
	30					—	20*	90	190*	1.10	0.40	0.06	0.03	1.5	1.7	1.7	1.7	30	67	90	140
016	0					—	50	60	110	0.31	0.21	0.25	0.21	3.0	1.2	2.4	2.2	36	68	98	147
	20	15	30	30	30	—	30	100	240	1.14	0.47	0.15	0.06	2.0	3.0	1.8	1.9	33	66	108	143

備 考

1. 実験:015 における試験時の温度は 材令 28日 60日 91日 4月
温度 約9°C 約10°C 約11°C 約14°C
実験:016 " " "11°C "16°C "17°C "24°C
2. アソビ時間とは透水試験開始時より最初の透水を見るまでに要した時間をいう。
3. 圧入水量は次式で算出した。 $\text{圧入水量(\%)} = \frac{\text{試験後供試体重量} - \text{試験前供試体重量}}{\text{供試体容積}} \times 100$
4. 各試験値のうち *印は供試体1個、その他のものは供試体2個の平均値である。

図-4-12 フライアッシュを用いたコンクリートの材令と耐透水指数および圧縮強度との関係

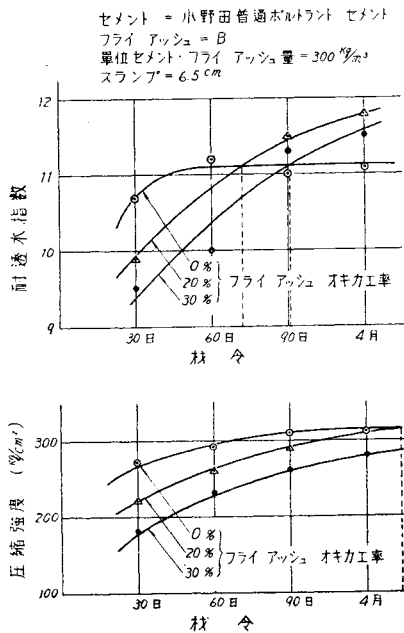
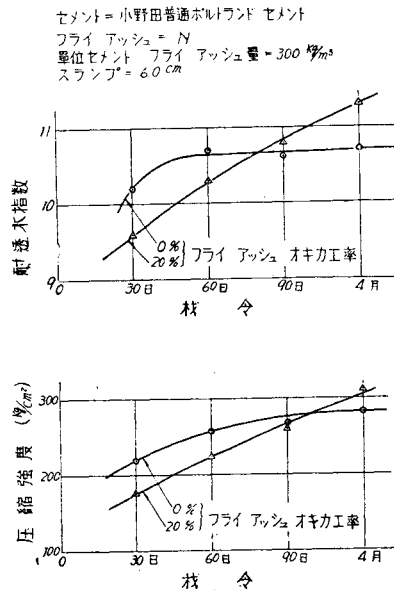


図-4-13 フライアッシュを用いたコンクリートの材令と耐透水指数および圧縮強度との関係



表—4.21 フライ アッシュを用いたコンクリートの耐透水指数と圧縮強度

実験番号	フライアッシュオキカエ率 (%)	透水係数×10 ¹² (cm/秒)				耐 透 水 指 数				圧 縮 強 度 (kg/cm ²)			
		28 日	60 日	91 日	4 月	28 日	60 日	91 日	4 月	28 日	60 日	91 日	4 月
015	0	28	6.5	9.0	8.1	10.7	11.2	11.0	11.1	271	291	310	310
	20	98	—	4.0	1.5	9.9	—	11.5	11.8	220	258	291	307
	30	324	93	7.1	3.5	9.5	10.0	11.3	11.5	181	231	261	279
016	0	76	22	27	19	10.2	10.7	10.6	10.7	217	256	267	282
	20	290	53	16	5.4	9.6	10.3	10.8	11.3	175	222	260	311

これらの表および図から次のことが認められる。

(1) 約 20°C で水中養生を行った場合、普通ポルトランド セメントを用いたコンクリートの耐透水性は、材令 60 日くらいまで増進するが、それ以後はほとんどその増進が認められない。これに対し、セメント重量の 20～30% をフライ アッシュでおきかえたコンクリートの耐透水性は、早期材令においてはフライ アッシュを用いないものよりも劣るが、材令の増加とともに逐次増大し、長期材令においてはフライ アッシュを用いないものよりもはるかにすぐれるようになる。

(2) 普通ポルトランド セメントの一部をフライ アッシュでおきかえたコンクリートの耐透水性が、フライ アッシュを用いないコンクリートの耐透水性をこす材令は、オキカエ率 30% のものは 20% のものよりも長い。

(3) また、普通ポルトランド セメントの一部をフライ アッシュでおきかえたコンクリートと、フライ アッシュを用いないコンクリートの両者において、耐透水性の方が圧縮強度よりも早期の材令において一致する。これは、フライ アッシュがコンクリートの圧縮強度に対するよりも、耐透水性に対して有効に働らくことを意味するとみることができる。

(4) 以上のことより、耐透水性の要求される構造物にフライ アッシュを用いれば、きわめて有利な場合があるものと考えられる。

〔5〕 フライ アッシュがコンクリートの耐久性におよぼす影響

1. 凍結融解に対する抵抗性 表—4.22 に試験を行ったコンクリートの配合とその結果を示す。

(1) フライ アッシュでセメントの一部をおきかえた (0・20・30%) 実験 : 022 の配合のコンクリートを約 20°C の水中養生を行い、材令 28 日および 4 月において凍結融解試験を開始した結果、供試体の重量変化および動弾性係数の変化は図—4.14 に示すようになった。材令 28 日より開始した場合には、フライ アッシュを用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性はフライ アッシュを用いないものよりもわずかに劣るように思われる。すなわち凍結融解に対する抵抗性の尺度として、動弾性係数の減少率をとれば、フライ アッシュを用いたものも用いないものもほぼ同程度の抵抗性を有することが認められるが、重量の減少率をとる場合には、フライ アッシュを用いないものに比べて、フライ アッシュを用いたものは、オキカエ率が増すほど、重量の減少率は大きくなっている。しかし、材令 4 月におけるフライ アッシュ

図—4.14 フライ アッシュを用いたコンクリートの凍結融解試験結果

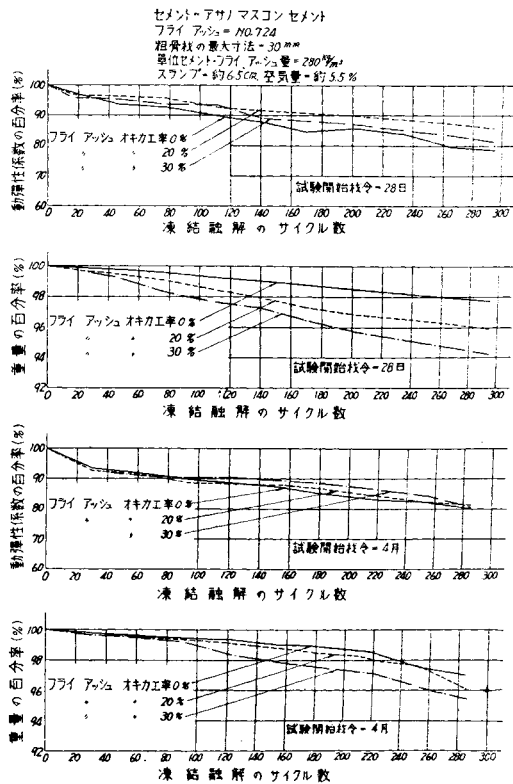


表-4.22 フライ アッシュ を用いた コン

実験 整理番号	水セメント・ フライ アッ シュ重量比	スランブ (cm)	空気量 (%)	粗細骨材 重量比 (G/S)	セメント	フライ アッシュ	細骨材	粗骨材	フライ ア ッシュオ キカエ率 (%)	単位水量 (kg/m ³)
022	0.50	6.5	5.6	1.70	アサノ マスコン セメント	ナ シ	楯保川	那賀川	0	141
	0.48	"	5.2	"		No. 724	"	"	20	133
	0.47	"	5.5	"		"	"	"	30	130
	0.50	"	5.6	"	(中庸熟ポ ルトラン ドセメ ント)	ナ シ	"	"	0	141
	0.48	"	5.2	"		No. 724	"	"	20	133
	0.47	"	5.5	"		"	"	"	30	130
003	0.54	8.0	5.0	1.68	小野田普 通ポルト ランド セメント	ナ シ	大和川	日高川	0	152
	0.51	7.0	5.2	"	"	L	"	"	20	143
	0.51	"	5.1	"	"	N	"	"	"	143
	0.50	"	4.7	"	"	M	"	"	"	140
004	0.54	5.5	5.1	1.60	"	ナ シ	"	"	0	150
	0.51	5.0	4.9	"	"	B	"	"	20	142
	0.52	"	4.8	"	"	C	"	"	"	144
	0.51	"	4.9	"	"	Q	"	"	"	140
備 考	(1) 単位セメント・フライ アッシュ量=280 kg/m ³ , 粗骨材の最大寸法=30 mm (2) 試験開始時における圧縮強度は 20°C 水中養生を行った15×30 cm 円柱供試体 2 個の平均値で、試験終了時には正確 には 10×10×21 cm ではない。 (3) 実験:003 における AE 剤はピンソル レチンを用いた。									

を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、フライアッシュを用いないものとはほぼ同程度である。すなわち材令4月においては、動弾性係の減少率も重量の減少率もほぼ同程度となつている。

なお材令4月で凍結融解試験を開始し、394 サイクルまで凍結融解をくり返したのちの角柱供試体を中央部で切断し、相切半した供試体の切断面を加圧面として圧縮強度試験を行った結果は、表-4.23 に示すとおりである。これによると、フライアッシュを用いないものも用いたものもほぼ同じである。

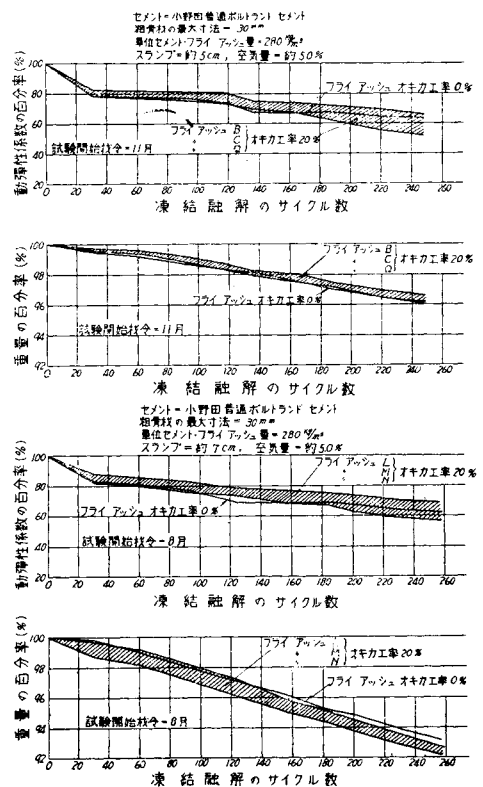
(2) 6種のフライアッシュを用いて、表-4.6の実験:003 および実験:004の配合のコンクリートを約20°Cの水中で養生し、それぞれ11月および8月で凍結融解試験を開始し、約250 サイクルまで行った試験の結果は 図-4.15 のとおりである。

表-4.23 凍結融解試験を行なったコンクリートの強度

フライ アッシュ オキカエ 率 (%)	圧 縮 強 度 (kg/cm ²)		強度の比 (B/A)
	4 月間20°C水中養生 供試体 15×30cm 円柱 (A)	4 月間 20°C 水中養生後 凍結融解 394 サイクル 供試体 10×10×21cm角柱(B)	
0	394	239	0.61
20	400	289	0.72
30	374	228	0.61

備 考
1. (A) は供試体 2 個の平均値, (B) は供試体 4 個の平均値である。
2. (B) の供試体は凍結融解試験により供試体表面が損耗したためその寸法は正確には 10×10×21 cm ではない。

図-4.15 フライ アッシュを用いたコンクリートの凍結融解試験結果



クリートの凍結融解試験の結果

単位ドレンシートX量 (g/m ³)	試験開始時の供試体				凍結融解の サイクル数	試験終了時の供試体		試験による変化	
	材令	圧縮強度 (kg/cm ²)	重量 (kg)	動弾性係数 ($\times 10^{-3}$ kg/cm ²)		重量 (kg)	動弾性係数 ($\times 10^{-3}$ kg/cm ²)	重量の百分率 (%)	動弾性係数の百分率 (%)
7.0	28日	293	9.860	337	294	9.564	265	97.7	78.5
31.0	"	222	9.832	328	"	9.429	281	95.9	85.8
46.0	"	183	9.826	321	"	9.246	260	94.1	81.1
7.0	4月	394	9.948	378	252	9.699	311	97.5	82.2
31.0	"	400	9.861	377	"	9.624	310	97.6	82.3
46.0	"	374	9.882	370	"	9.506	313	96.2	84.5
21.0	8月	—	9.700	375	257	9.040	231	93.2	61.9
28.0	"	—	9.565	378	"	8.809	241	92.1	63.8
37.0	"	—	9.575	375	"	8.828	213	92.2	56.8
65.0	"	—	9.675	380	"	8.969	262	92.7	68.9
6.5	11月	—	9.689	372	248	9.301	237	96.0	63.7
23.0	"	—	9.800	386	"	9.428	226	96.2	58.6
38.0	"	—	9.800	382	"	9.467	197	96.6	51.5
8.5	"	—	9.890	402	"	9.554	263	96.6	65.5

ける圧縮強度は 10×10×21 cm 角柱供試体 4 個の平均値である。なお角柱供試体は凍結融解試験により表面が侵されたため、その寸法は

この図から次のことが認められる。

(i) 粉末度が 88μ フレイ残分で 5% 以下、ブレン比表面積で 3000 cm²/g 程度以上、強熱減量が約 4% 以下の良質のフライ アッシュを用いる場合には、その品質に関係なく、それらのフライ アッシュが凍結融解に対する抵抗性におよぶ影響は、ほぼ同程度であると考えられる。

(ii) 図—4・15 に示した実験においては、凍結融解約 250 サイクル後の動弾性係数の減少率は、約 31~49% であり、図—4・14 に示した実験におけるそれは約 14~22% であつて、前者はかなり大きい値を示しているが、これは主として用いたセメントおよび骨材の種類が相違することによるものと思われる。

2. 硫酸ソーダ溶液に対する抵抗性

(1) フライ アッシュを用いたモルタルに関する耐硫酸塩試験：耐硫酸塩試験に用いたモルタル供試体は 5×10 cm 円柱で、製造後約 200 日間 20°C 水中養生を行つたものである。試液としては、硫酸ソーダの 21°C における飽和溶液を用いた。試験は、2 週間ごとに容器から供試体を取り出し、ゆるんだ粒子および侵食された部分のごとくなくなるまでワイヤ ブラシでこすり取つたのち、湿布で供試体の表面の水滴をふき、その重量を g まで測定し、供試体の重量の変化をもつて硫酸塩の作用に対する抵抗性の尺度とした。

表—4・24 フライ アッシュを用いたモルタルの耐硫酸塩試験結果

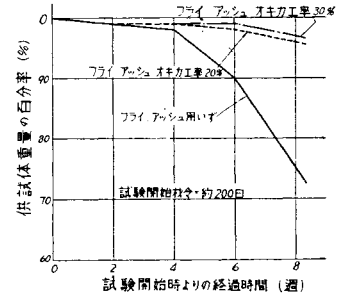
単位セメント・フライ アッシュ量 (kg/m ³)	フライ アッシュ オキカエ率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	フロー (mm)	耐硫酸塩試験の進行にともなう供試体の重量			
				2 週	4 週	6 週	8 週
401	0	249	139	99	98	90	75
	20	235	134	99	99	98	96
	30	231	136	99	99	99	97

- 備 考
- セメントは小野田普通ポルトランド セメント、フライ アッシュは A を用いた。
 - 基準配合のモルタルの水セメント比は 0.62、セメント砂比は 1/4 である。
 - 用いた試液は硫酸ソーダ飽和溶液 (21°C) である。
 - 供試体は 5×10 cm 円柱で約 200 日間水中養生を行つたものである。
 - 表の値は供試体 4 本の平均値である。

すなわちフライ アッシュを用いたモルタルは、フライ アッシュを用いないものに比べて、硫酸塩の作用に対していちじるしく抵抗性を増す。このことは、供試体の外観を見ただけでもいちじらしい相違がただちに認められた。

(2) フライ アッシュを用いたコンクリートに関する耐硫酸塩試験：実験に用いたコンクリートは 表—4.25 に示すとおりである。試液は、硫酸ソーダ 10% 溶液を用い、供試体は 10 × 20 cm 円柱を用いて、6 週間 20°C 水中養生を行つたのち 6 週間試液に浸した。試験はそれらの供試体を試液から取り出して圧縮強度試験を行い、その結果と 20°C 水中養生を 1 年間行つた供試体の圧縮強度とを比較することにより判定した。これらの試験の結果を示せば 表—4.25 のとおりである。

図—4.16 フライ アッシュを用いたモルタルの硫酸塩に対する抵抗性



表—4.25 フライ アッシュを用いたコンクリートの耐硫酸塩試験結果

粗骨材の最大寸法 (mm)	単位セメント・フライアッシュ量 (kg/m³)	フライアッシュオキカエ率 (%)	単位水量 (kg/m³)	粗骨材重量比	スランブ (cm)	圧縮強度 (kg/cm²)		強度の比 (B/A)
						1年間 20°C 水中養生 (A)	6 月間 20°C 水中養生後 6 月間試液に浸す (B)	
25	300	0	180	1.30	6.5	337	82	0.24
		20	172		6.5	366	363	0.99
		30	168		6.5	358	382*	1.07

備考

1. セメントは小野田普通ポルトランド セメント，フライ アッシュは B を用いた。
2. 試液の温度は試験期間を通じて平均約 25°C であつた。
3. 供試体は 10×20 cm 円柱である。
4. 試験値は * 印以外のものは供試体 2 個の平均値，* 印のものは供試体 1 個の試験値である。

すなわち、フライ アッシュを用いたコンクリートに関する実験においても、モルタルの場合と全く同様に、フライ アッシュは、硫酸塩に対して卓越した抵抗を有することが認められる。ただし、この場合には、供試体の外観上はあまり差異を認められなかつた。

なお、これらの試験は、耐硫酸塩試験方法自体としては多少適当でない点もあるが、少なくとも硫酸塩の作用に対するフライ アッシュの効果を確かめる目的に対しては、なんら支障ないものと考えてる。

〔6〕 フライ アッシュがコンクリートの水和熱による温度上昇におよぼす影響

(i) アサノ マスコン セメントとフライ アッシュ B を用い、粗骨材の最大寸法を 80mm、単位セメントフライ アッシュ量を 180 kg/m³、スランブを約 2cm、空気量を約 4% としたダム用コンクリートについて、フライ アッシュ オキカエ率を 0.30・50% とした場合 (実験: 103)

(ii) 磐城中庸熱ポルトランド セメント (七尾工場製) とフライ アッシュ Q を用い、粗骨材の最大寸法

表—4.26 フライ アッシュを用いたコンクリートの断熱温度上昇に関する試験結果

実験整理番号	粗骨材の最大寸法 (mm)	単位セメント・フライアッシュ量 (kg/m³)	フライアッシュオキカエ率 (%)	単位水量 (kg/m³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	試験開始時のコンクリート温度 (°C)	試験開始時よりの温度上昇 (°C)		
								1 日	3 日	7 日
103	80	180	0	113	2	3.9	16.5	7.8 (100)	13.5 (100)	17.6 (100)
			30	103	1	3.7	20.0	5.7 (73)	9.5 (71)	11.8 (67)
			50	100	2	4.4	16.0	4.5 (74)	7.0 (52)	9.3 (53)
102	80	180	0	118	3	4.0	21.3	5.7 (100)	12.0 (100)	14.8 (100)
			20	112	3	4.1	18.6	5.1 (89)	9.4 (78)	12.3 (83)
			30	110	3	3.9	18.7	4.2 (74)	8.0 (67)	10.8 (73)

備考

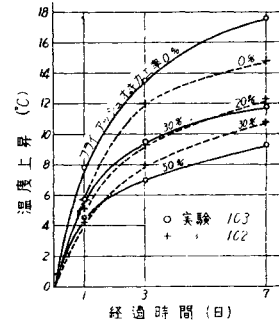
1. 実験: 103 で用いたセメントはアサノ マスコン セメント，フライ アッシュは B，実験: 102 で用いたセメントはイワキ中庸熱ポルトランド セメント，フライ アッシュは Q である。
2. 練り混ぜたときのコンクリート温度は実験: 103 では約 13°C，実験: 102 では約 16°C であつた。

80 mm, 単位セメント・フライ アッシュ量を 180 kg/m³, スランブを約 3 cm, 空気量を約 4%としたダム用コンクリートについて, フライ アッシュ オキカエ率を 0・20・30%とした場合(実験:102)

について, 材令 7日までその断熱温度上昇を測定した結果は, 表—4・26 および 図—4・17 に示すとおりである。

すなわち, 中庸熱ポルトランド セメントの一部をフライ アッシュでおきかえたコンクリートの温度上昇は, フライ アッシュを用いない基準配合のものに比して減少する。図—4・18 において, 材令 7日における温度上昇を, 基準配合のそれに対する百分率で表わし, これとフライ アッシュ オキカエ率との関係を求めれば, 実線のようになり, フライ アッシュのおきかえによる温度上昇の減少率は, そのオキカエ率に比例し, オキカエ率の約 90% とみることがができる。また, セメントの一部をフライ アッシュでおきかえたセメントの材令 7日における水和熱の, おきかえないも

図—4・17 フライ アッシュを用いたコンクリートの断熱温度上昇

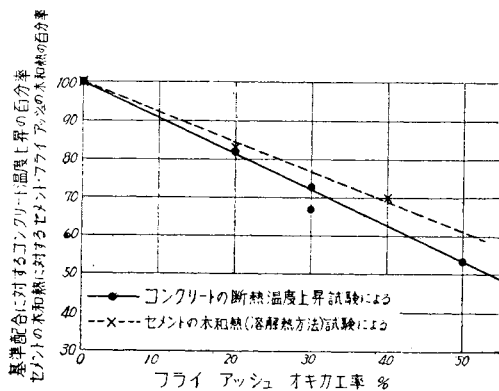


表—4・27 乾燥収縮試験のフライ アッシュを用いたコンクリートの配合

実験整理番号	フライ アッシュ オキカエ率 (%)	水・セメント・フライ アッシュ重量比	スランブ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	粗骨材の比重 (G/S)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位フライ アッシュ量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)
202	0	0.55	5	40	1.66	245	0	135
	10	0.55	〃	〃	1.66	220	25	134
	20	0.54	〃	〃	1.67	196	49	133
	30	0.53	〃	〃	1.68	171	74	129
	40	0.51	〃	〃	1.69	147	98	123
備考	1. 使用セメントはアサノ マスコン セメントである。(表-4・1 参照) 2. 使用骨材は相模川産である。(表-4・2, 4・3 参照) 3. 使用フライ アッシュは No. 723 である。(表-3・1 参照)							

のに対する百分率と, フライ アッシュ オキカエ率との関係を求めれば, 図—4・18 の点線のようになる(Ⅲ〔3〕12 参照)。この場合の水和熱の減少率は, フライ アッシュ オキカエ率の約 80% とみることがができる。このことから, セメントの一部をフライアッシュでおきかえたコンクリートの温度上昇の減少率は, 材令 7日においてはフライアッシュ オキカエ率の 80~90% と考えられる。材令 28 日における断熱温度上昇試験は行わなかつたが, 材令 28 日におけるセメントの水和熱の測定結果と合わせて判断すれば, 材令 28 日におけるコンクリートの温度上昇の減少率はフライアッシュ オキカエ率の 70~80% ではないかと推定される。

図—4・18 フライ アッシュ オキカエ率とコンクリートの温度上昇およびセメント水和熱との関係(材令 7日)



〔7〕 フライ アッシュがコンクリートの乾燥収縮におよぼす影響

フライ アッシュでポルトランド セメントの, 0・10・20・30・40% をおきかえて造つた表—4・27 の配合のコ

表-4.28 フライ アッシュ オキカエ率とそれを用いたコンクリート・モルタル・ペーストの乾燥収縮

フライ アッシュ オキカエ率 (%)	供試体の乾燥貯蔵後における長さの収縮 (×1 000 000)											
	3 日		7 日		14 日		28 日		50 日			
	ペースト	モルタル	ペースト	モルタル	ペースト	モルタル	ペースト	モルタル	コンクリート	ペースト	モルタル	コンクリート
0	1 710 (100%)	90 (100%)	2 380 (100%)	200 (100%)	2 600 (100%)	790 (100%)	2 840 (100%)	1 270 (100%)	380 (100%)	3 150 (100%)	1 400 (100%)	570 (100%)
10	1 610 (94%)	70 (78%)	2 050 (86%)	190 (95%)	2 290 (88%)	760 (96%)	2 420 (85%)	1 160 (91%)	330 (87%)	2 640 (84%)	1 230 (88%)	530 (93%)
20	1 540 (90%)	70 (70%)	1 930 (81%)	180 (90%)	2 070 (80%)	730 (92%)	2 250 (80%)	1 110 (88%)	310 (82%)	2 400 (76%)	1 190 (85%)	500 (88%)
30	1 440 (84%)	50 (56%)	1 760 (74%)	170 (85%)	1 880 (72%)	710 (90%)	2 090 (74%)	990 (78%)	310 (82%)	2 290 (73%)	1 020 (73%)	480 (84%)
40	1 360 (80%)	50 (56%)	1 630 (69%)	150 (75%)	1 810 (70%)	660 (84%)	2 040 (72%)	960 (76%)	310 (82%)	2 260 (72%)	1 010 (72%)	460 (81%)

備考 各測定値は供試体 3 個の平均値である。

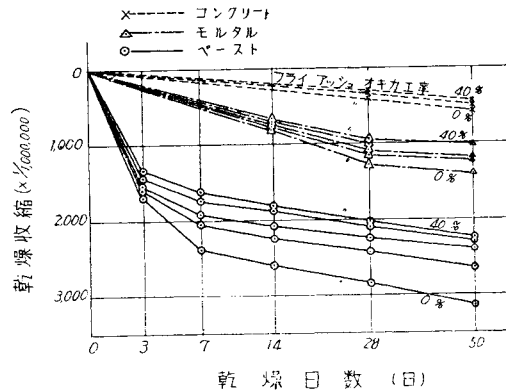
ンクリートについて試験を行つた結果は、表-4.28 および 図-4.19 に示すとおりである。表-4.28 および 図-4.19 から次のことが認められる。

(i) フライ アッシュでポルトランド セメントの一部をおきかえた場合、コンクリートの乾燥収縮は、フライ アッシュを用いないものにくらべて減少する。

(ii) この減少の程度は、材合によつて多少の相違はあるが、フライ アッシュ オキカエ率が増加するのに応じて大きくなる傾向が認められる。フライ アッシュ オキカエ率40%の場合、約20%弱減少した。

(iii) フライ アッシュでポルトランド セメントの一部をおきかえたモルタルおよびペーストについても同様の傾向が認められる。

図-4.19 フライ アッシュがコンクリート、モルタルおよびペーストの乾燥収縮におよぼす影響



V. ボンド アッシュおよびサイクロン系フライ アッシュの粉砕利用に関する試験

[1] 概説

わが国現有の火力発電所には、設備費および維持費のかかるコットレル集塵器を設備するものが少ない。電源開発5カ年計画ならびに上水・治水・かんがいなどの多目的開発計画などにみるわが国のダムの建設計画を考えるとき、もしこれらにフライ アッシュを使うとしてコットレル系のもののみを対象とするならば、中程度のダムが2~3程度しかまかない得ないことになる。

またコットレル系の良質のフライ アッシュは、その特長が高く評価されるようになったプレキャスト コンクリート用ならびに防水コンクリート用、さらにコンクリート ブロック用として、その使用分野を急速に開拓しつつある。

これらの点より、本試験研究の当初から、コットレル系フライ アッシュの需給のバランスは近々に破れることを想定し、かつ一方廃棄物である各種アッシュの資源化ないし有効利用の立場より、ボンドアッシュ、サイクロン系アッシュを粉砕し、これをポゾラン混和材として利用する問題について重点的に試験を進めてきた。もちろん、サイクロン系フライ アッシュに対しては、その粉砕利用とは別に、粗粒子群を撰別によつて除き、微粒子群のみとして利用することも考えられるが、その歩止りの問題を別としても、サイクロン系フライ アッシュの本質的欠陥である極微粒子群の不足のために、多くを期待できない見通しを得たので、この試験は行わなかつた。

ボンドアッシュ、サイクロン系フライ アッシュの粉砕利用を問題にする場合、それらの粉砕アッシュといわゆるフライ アッシュの粒子形状を比較し、コンクリートのウォーカービッチ改善の点で前者が後者に劣ること

を実験的手段によらないで論じ、粉碎利用の不可を結論するのは当を得たものでない。もしこれを不可とするならば、それは粉碎アッシュとコットレル系フライ アッシュのコンクリートの性質におよぼす影響を実験的に比較し、さらにはフライ アッシュ以外の他のポゾラン混和材と比較してみなければならぬ。

以下、ポンド アッシュおよびサイクロン系フライ アッシュの粉碎利用に関する試験について述べ、それらの粉碎アッシュがポゾラン混和材としてきわめて有用であることを明らかにする。

〔2〕 ポンド アッシュの粉碎利用に関する試験

1. ポンド アッシュの化学成分ならびに物理的性質

(1) ポンド アッシュ：試験に用いたポンド アッシュは、尼ケ崎第二火力発電所のアッシュ ポンドより採取したものである。試料ポンド アッシュは、その粒の大きさによつて A (0.5 mm 以下)、B (0.5~10 mm) および C (10 mm 以上) の3種類に分け、乾燥後試験ミルで粉碎して用いた。これらのポンド アッシュのおもな性質は表-5.1 に示すとおりである。

表-5.1 試験に用いた粉碎ポンド アッシュのおもな性質

区 分	化 学 成 分 (%)									比重	粉 末 度	
	シリカ (SiO ₂)	アルミナ (Al ₂ O ₃)	酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)	酸化カルシウム (CaO)	マグネシウム (MgO)	無水硫酸 (SO ₃)	炭素 (C)	強熱減量	合 計		88μ フルイ 残分(%)	ブレン 比表面積 (cm ² /g)
ポンド アッシュ A	57.1	27.0	5.0	4.3	2.1	0.8	1.4	3.1	99.4	2.40	1.5	2 870
〃 B	56.3	25.8	6.0	6.5	2.2	0.7	1.0	1.9	99.4	2.51	1.5	3 240
〃 C	57.4	28.2	4.8	4.9	1.9	0.4	1.1	1.1	98.7	2.53	1.1	3 410
尼ケ崎フライ アッシュ 8種の平均*	54.5	29.4	5.9	3.5	1.7	0.7	1.2	2.3	99.2	2.14	1.4	4 350

* 表-3.1 参照

(2) 粉碎ポンド アッシュの化学成分・比重・粉末度：表-5.1 より次のことが認められる。

(i) ポンド アッシュの化学成分は、フライ アッシュとほぼ同じである。このことは、クリンカ アッシュ・ピット アッシュおよびフライ アッシュの捕集される場所が相異しても、その根源が同一であることを考えれば当然である。従つてその化学成分からみた場合、ポンド アッシュはコットレル系フライ アッシュと同様に、ポゾラン混和材として十分に利用しうる成分を有するものといえる。

(ii) 粉碎ポンド アッシュの比重は、3種とも2.5前後であつて、コットレル系フライ アッシュの比重が、2.1前後であるのにくらべて相当に大きい。これは前にも述べたようにアッシュ粉碎の影響も加わるものと考えられる。

(iii) 試験に用いた粉碎ポンド アッシュの粉末度は、大体においてポルトランド セメントと同程度とした。この場合、粉碎ポンド アッシュのうちには、粉碎という過程にもかかわらず、なお球状粒子が相当に存在することが認められた(写真-5.1)。これは、ポンド アッシュのうちには、いわゆる微細な球状のフライ アッシュも相当含まれていて、これのあるものは、直接の粉碎をうけずにそのまま残るためであると考えられる。

(3) 粉碎ポンド アッシュのポゾラン活性：Ⅲ〔2〕5 で述べた石灰ポゾラン砂モルタル強度試験方法に従い、

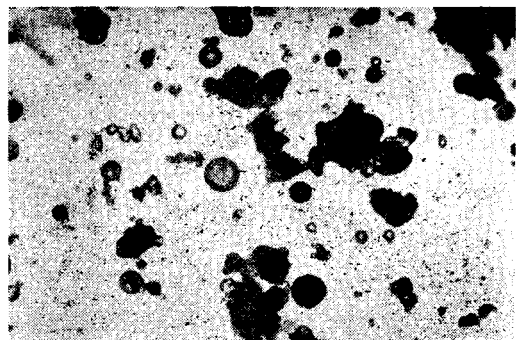
表-5.2 ポンド アッシュの石灰・ポゾラン砂モルタル試験結果

試 料	モルタル中の 水量(%)	材令7日にお ける圧縮強度 (kg/cm ²)	強度の比
ポンド アッシュ A	12.5	60.6	1.03
〃 B	12.3	61.2	1.04
〃 C	12.6	66.8	1.14
フライ アッシュ N	12.8	58.6	1.00
市販混和材 A	14.3	47.9	0.82
〃 B	20.7	46.2	0.79

備 考

1. 砂は Ottawa 標準砂を用いた。
2. U.S.B.R 規格： $\sigma_7 > 42.2 \text{ kg/cm}^2$

写真-5.1 粉碎したポンド アッシュの顕微鏡写真



前記3種のポンド アッシュおよびそれと比較する目的で、コトレル系フライ アッシュN、市販混和材A、B について、そのポゾラン活性を試験した結果は、表-5.2 に示すとおりであつた。

表-5.3 セメント・ポンド アッシュ・砂モルタル強度試験結果

区 分	ポンド アッシュ オキカエ率 (%)	フロー (mm)	曲 げ 強 度					圧 縮 強 度														
			kg/cm ²					比(%)														
			7日	28日	91日	6月	1年	7日	28日	91日	6月	1年	7日	28日	91日	6月	1年					
アッシュ 用いず	0	221	48.6	74.2	82.3	84.9	86.2	100	100	100	100	100	232	372	427	456	493	100	100	100	100	100
ポンド アッシュ A	10	220	45.3	68.6	75.3	81.7	85.4	93	92	92	96	94	218	328	406	437	489	94	88	95	96	99
	20	219	46.2	66.3	69.3	80.4	85.0	95	89	84	95	94	195	301	403	432	494	84	81	94	95	100
	30	220	40.2	60.0	67.6	74.5	80.1	83	81	82	88	89	167	253	350	404	442	72	68	82	86	90
	40	219	35.6	53.2	62.4	74.7	77.7	73	72	76	88	86	139	216	306	374	447	60	58	72	82	91
	50	217	29.2	44.2	58.1	68.5	74.5	60	60	71	81	82	102	172	279	349	425	44	46	65	77	86
ポンド アッシュ B	10	223	45.6	72.1	78.8	84.3	87.0	94	97	96	99	101	210	340	441	459	511	91	91	103	101	104
	20	224	43.7	66.4	74.4	81.0	84.8	90	89	90	95	98	192	298	422	476	517	83	80	99	104	105
	30	224	42.4	59.7	71.7	76.7	81.5	87	80	87	90	95	168	269	391	450	489	72	72	92	99	99
	40	226	36.7	51.5	70.0	76.4	82.3	76	69	85	90	95	135	227	375	439	495	58	61	88	96	100
	50	226	36.4	48.2	66.0	72.5	76.5	75	65	80	85	89	105	191	317	404	472	45	51	74	86	96
ポンド アッシュ C	10	221	44.1	72.4	73.2	78.8	83.4	91	98	89	93	97	207	336	392	428	464	89	90	92	94	94
	20	225	43.3	67.6	74.0	76.6	79.2	89	91	90	90	92	191	312	374	418	463	82	84	88	92	94
	30	227	40.3	58.8	70.0	75.4	77.0	83	79	85	89	89	161	262	346	406	458	69	70	81	89	93
	40	226	34.8	52.0	67.5	72.0	74.8	72	70	82	85	87	127	220	329	387	442	55	59	77	85	90
	50	227	26.3	44.0	61.0	66.5	72.0	54	59	74	78	84	84	167	289	367	433	36	45	68	80	88

図-5.1 ポンド アッシュ オキカエ率とモルタル強度との関係 セメント：大阪窯業普通ポルトランド セメント

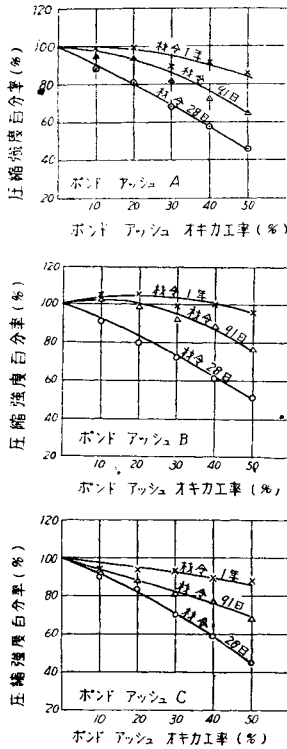


表-5.4 市販混和材を用いた標準モルタルのフロー

混和材 オキカエ率 (%)	モルタルのフロー (mm)	
	混和材 A	混和材 B
0	189	189
10	164	178
20	129	163
30	120	148
40	113	127
50	108	116

表-5.5 ポンド アッシュ セメント砂モルタルの1年強度と28日強度との比

ポンド アッシュ オキカエ率 (%)	ポンド アッシュ		
	A	B	C
0	1.3	1.3	1.3
10	1.5	1.5	1.4
20	1.6	1.7	1.5
30	1.8	1.8	1.8
40	2.1	2.2	2.0
50	2.5	2.5	2.6

表—5.2 より次のことが認められる。

3種の粉砕ポンド アッシュで造つた石灰モルタルの材令7日強度はそれぞれ 60.6・61.2・66.8 kg/cm² となつていて U. S. B. R. 規格の 42.2 kg/cm² をはるかに上廻つており、粉砕ポンド アッシュのポゾラン活性は十分満足しうるものである。これらのポンド アッシュを用いた石灰モルタルの強度を、コトレル系フライ アッシュのうちでも良質の部類に属するフライ アッシュ N に対する比で示すとそれぞれ 1.03・1.04・1.14 となつて、粉砕ポンド アッシュがコトレル系フライ アッシュにまさるとも劣らぬポゾラン活性を有することが認められる。なお粉砕ポンド アッシュが市販混和材 A・B にくらべて数段すぐれたポゾラン活性を有することは注目すべき事実である。

2. ポンド アッシュがモルタルのコンシステンシーおよび強度におよぼす影響 表—5.1 に示す粉砕ポンド アッシュと、大阪築業 K K 普通ポルトランド セメントを用いて、粉砕ポンド アッシュでセメントの重量の 10・20・30・40・50% をおきかえた混和物を一種のセメントとみなし、JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に従い、フロー試験および強度試験を行つた結果は 表—5.3 および 図—5.1 に示すとおりであつた。

表—5.3 および 図—5.1 より次のことが認められる。

(i) 使用水量を一定とした場合、ポンド アッシュを用いたモルタルのフローはポンド アッシュ オキカエ率が増加してもほとんど変化しない。このことから、粉砕ポンド アッシュでセメントの一部をおきかえてコンクリートを造る場合、その使用水量を増加する必要のないことが期待できる。ついでながら、表—5.4 に示すよ

表—5.6 混合ポルトランド セメントの試験結果の一例

区	分	混合ポルトランド セメント(40%混合)	普通ポルトラン ド セメント	JIS 中麻熟規格	JIS 普通規格
化学成分 (%)	強 熱 減 量	1.4	0.64	<4.0	<4.0
	不 溶 残 分	29.3	0.90		
	シ リ カ (SiO ₂)	16.0	21.48		
	アル ミ ナ (Al ₂ O ₃)	4.2	5.56		
	酸化第二鉄 (Fe ₂ O ₃)	3.4	3.16		
	酸化カルシウム (CaO)	42.2	64.64		
	マグネシア (MgO)	0.9	1.18	<4.0	<5.0
	無 水 硫 酸 (SO ₃)	2.0	1.85	<2.5	<2.5
	合 計	99.4	99.41		
比	重	2.95	3.15	>3.05	>3.05
粉 末 度 (0.088)		2.1	2.0	<10.0	<10.0
凝 結	水 量 (%)	27.5	26.2		
	始 発(時一分)	2-11	1-35	>1	>1
	終 結 (〃)	4-44	3-10	<10	<10
	温 度 (°C)	21.0	21.0	20±3	20±3
	湿 度 (%)	85	85		
フ ロ ー (mm)		216	213		
曲げ強度 (kg/cm ²)	3 日	23.7	28.5	>10	>12
	7 日	34.8	49.7	>20	>25
	28 日	53.5	70.5	>30	>36
比縮強度 (kg/cm ²)	3 日	64	102	>35	>45
	7 日	113	188	>70	>90
	28 日	203	340	>150	>200
養生水温 (°C)	3 日	21.3	21.5	20±3	20±3
	7 日	20.8	20.9	〃	〃
	28 日	21.6	20.8	〃	〃

うに市販混和材 A・B では、フローがそのオキカエ率に比例して減少している(表—5・4)。

(ii) 粉砕ポンド アッシュを用いたモルタルの強度は、ポンド アッシュ A・B・C によつて多少の差はあるが、早期材令においては、ポンド アッシュを用いないものより、ポンド アッシュ オキカエ率にほぼ比例して小さく、材令の増加とともに急速に回復し、コトレル系フライ アッシュと同じ傾向にあることが認められる。

また、材令の増加にともなう強度の増進は、表—5・5 に示すとおりで、ポンド アッシュ A・B・C いずれにおいてもほぼ同様の値であり、ポンド アッシュ オキカエ率が大きいものほど大きい。以上のことから、ポンド アッシュとして A・B・C を分けないものを粉砕して用いても、上記の性質を期待してよいと考えられる。

3. ポンド アッシュを用いた混合ポルトランド セメントの製造とその試験結果の一例 以上の試験結果から粉砕ポンド アッシュのボゾラン混和材としての有用性を確かめたので、さらにポンド アッシュが粉末のものより塊状のものまでの混和物であることを考慮して、これの粉砕はセメント クリンカとともに行つて、粉砕過程を集結するとともに、均一な混合物をうることが有利であるという結論をえた。すなわちポンド アッシュを乾燥処理し、これとポルトランド セメント クリンカと混合同時粉砕して混合ポルトランド セメントを製造した。ポンド アッシュ混合率を 40% とした混合ポルトランド セメントに関する二、三の試験結果を示せば次のとおりである。

(1) 混合ポルトランド セメントの JIS 規格による試験結果：ポンド アッシュ混合率 40% の混合ポルトランド セメントを JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) および同 5202 (セメントの化学分析方法) に従つて試験した結果は 表—5・6 に示すとおりである。

この試験結果によれば、混合ポルトランド セメントの化学成分は、不溶残分を除けば中熱または低熱ポルトランド セメントに近いものである。この不溶残分が多いのは、ポンド アッシュの塩酸では溶けない部分によるものであつて、ポンド アッシュのアルカリ溶ゆう方法による表—5・1の結果より判断すれば、これは支障のないものと考えられる。また、比重は 2.95 であつて普通ポルトランド セメントよりも多少小さいが、粉末度は、0.088 mm フルイ残分で 2.1% であるから、普通ポルトランド セメントと大体同じ程度に粉砕されうるものと考えられる。また、混合ポルトランド セメントの強度は、粉砕ポンド アッシュを用いた表—5・3の試験結果と同じ傾向にあることが認められる。

(2) 混合ポルトランド セメントを用いたコンクリートに関する試験結果：ポンド アッシュ混合率 40% の混合ポルトランドセメントを用い、

(i) 粗骨材最大寸法 25 mm, 水セメント重量比をそれぞれ 0.52・0.57・0.62, スランプを約 7cm としたコンクリート、

(ii) 粗骨材最大寸法 30 mm, 水セメント重量比をそれぞれ 0.52・0.74, スランプをそれぞれ 6 cm・2 cm としたコンクリート、

を 20°C 水中養生を行い、圧縮強度を試験した結果を 表—5・7 に示す。表—5・7 および 表—4・14 の実験：011(単位セメント量 285 kg/m³) から、コンクリートの材令と圧縮強度との関係を図示したものを 図—5・2 に示す。また、表—5・7 および実験：011 から、コンクリートのセメント水重量比と材令 28 日強度との関係を図示したものを 図—5・3 に示す。

すなわち、混合ポルトランド セメントを用いたコンクリートの材令の増加にともなう強度の増進状態は、フ

表—5・7 混合ポルトランド セメントを用いたコンクリートの強度

セメント	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント重量比	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	粗細骨材重量比	スランプ (cm)	圧縮強度 (kg/cm ²)			
							7日	28日	91日	20月
混合ポルトランドセメント (P.A.=40%)	25	0.52	346	180	1.22	5	98	171	262	315
		0.57	322	184	1.21	7	85	147	219	290
		0.62	299	185	1.18	7	70	125	184	275
普通ポルトランドセメント	30	0.52	354	177	1.4	6	—	210	—	—
		0.74	239		1.2	2	—	85	—	—
備考	1. 供試体は 15×30cm 円柱である。 2. 試験値は供試体 3~4 個の試験値の平均値である。									

ライ アッシュを用いたコンクリートのそれとはほぼ同じである。水セメント重量比が同じ場合には、混合ポルトランド セメントを用いたコンクリートの強度は、早期材令においては普通ポルトランド セメントを用いたコンクリートよりも弱いが、長期材令においては後者とはほぼ同じ程度である。なお、コンクリートの練り混ぜに当つて、混合ポルトランド セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランド セメントを用いたコンクリートにくらべてプラスチチーならびにウォーカビリチーがいちじるしくよくなることが認められた。

〔3〕 サイクロン系フライ アッシュの粉砕利用に関する試験

1. サイクロン系フライ アッシュの化学成分ならびに物理的性質

(1) サイクロン系フライ アッシュ：試験に用いたサイクロン系フライ アッシュは、尼ヶ崎第二火力発電所10号缶および11号缶マルチ サイクロン集塵器より採取したもの4種、飾磨港火力発電所シングル サイクロン集塵器より採取したものの2種である。これらの試験に用いたフライ アッシュは、その前後に採取したフライ アッシュの品質の範囲から考へて、それぞれの代表的試料とみなすことができるものである。これらのサイクロン系フライ アッシュのおもな性質は、表—5.8 に示すとおりである。

表—5.8 試験に用いたサイクロン系フライ アッシュのおもな性質

区 分	採取箇所	化 学 成 分 (%)										比重	粉 末 度			
		シリカ (SiO ₂)	アルミナ (Al ₂ O ₃)	酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)	酸化カルシウム (CaO)	マグネシア (MgO)	無水硫酸 (SO ₃)	炭素 (C)	強熱減量	合計	88μフルイ 残分(%)		44μフルイ 残分(%)	ブレン法による 比表面積 (cm ² /g)	比重計法による 比表面積 (cm ² /g)	
No. 311	尼-2 マルチ サイクロン	55.4	27.0	5.0	4.2	1.4	0.5	4.5	5.0	98.5	2.03	7.9	31.0	2 930	1 380	
No. 312	〃	57.8	28.4	4.6	4.3	0.7	tr	3.0	3.2	99.0	1.97	15.8	53.0	2 000	970	
No. 330	〃	58.8	24.0	6.5	4.8	2.3	0.3	1.7	1.9	98.6	2.01	8.8	33.9	1 800	1 520	
No. 45	〃	55.0	26.7	6.7	5.5	2.0	0.5	2.4	2.6	99.0	2.05	7.2	29.2	2 160	1 810	
S	飾磨 シングル サイクロン	46.9	20.2	10.5	6.6	1.9	3.7	4.7	8.1	97.9	2.08	22.9	67.0	2 160	640	
S ₁	〃	54.5	26.2	7.9	3.0	1.4	0.6	4.5	6.1	99.7	1.96	30.0	72.4	1 330	800	
尼ヶ崎フライ アッシュ 18種の平均	尼-2 コットレル	56.4	28.0	6.2	3.7	2.0	0.6	1.5	2.2	100.6	2.13	2.2	12.9	4 090	3 030	

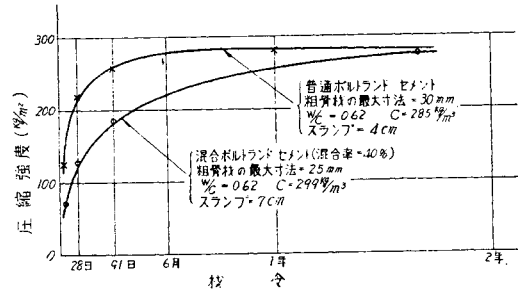
(2) サイクロン系フライ アッシュの化学成分、比重および粉末度：表—5.8 より次のことが認められる。

(i) 同一火力発電所のフライ アッシュについていえば、サイクロン系フライ アッシュの化学成分は、コットレル系フライ アッシュおよびポンド アッシュとはほぼ同様である。従つて化学成分からみた場合には、サイクロン系フライ アッシュもボゾラン混和材として十分利用しうる成分を有するものといえる。

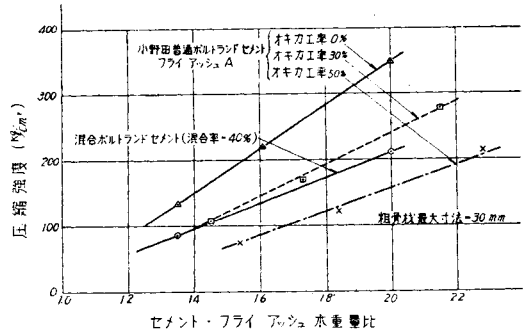
(ii) サイクロン系フライ アッシュの比重は、全般的にいつて、コットレル系フライ アッシュにくらべてやや小さい。このことは同一条件で生成されたフライ アッシュでは、粗粒子群におけるほどその比重が小さくなる傾向を有することによるものと思われる。

(iii) 一般にサイクロン系フライ アッシュの粉末度は、コットレル系フライ アッシュにくらべて相当粗い。尼ヶ崎第二火力発電所産のアッシュを例にとると、サイクロン系フライ アッシュの粉末度は、88 μフルイ残分で約8%、44 μフルイ残分で約30%であるのに対し、コットレル系フライ アッシュは、88 μフルイ残分で約2%

図—5.2 混合ポルトランド セメントを用いたコンクリートの圧縮強度



図—5.3 セメント・フライ アッシュ水重量比と材令28日圧縮強度との関係



44 μ フレイ残分で 13% であつて、両者の間には相当の差異が認められる。また同じサイクロン系フライ アッシュでも、その集塵器の型によつてフライ アッシュの粉末度が相違することは当然であつて、表-5.8 においてマルチ サイクロン集塵器で採取した尼ヶ崎フライ アッシュと、シングル サイクロン集塵器で採取した飾磨フライ アッシュとの粉末度のいちじるしい相違は、その一例である。

なお、粉末度としてのブレン比表面積は、サイクロン系フライ アッシュに関するかぎり、直接のめやすとなり得ない。試験に用いた6種のサイクロン系フライ アッシュについて、ブレン方法および比重計方法による比表面積を、フライ アッシュ No. 312 に対する比で示すと次のとおりである。

	ブレン方法	比重計方法
No. 311	1.46	1.42
No. 312	1.00	1.00
No. 330	0.90	1.57
No. 45	1.08	1.87
S	1.08	0.66
S ₁	0.67	0.83

すなわち、粉末度の細粗の序列は、ブレン方法による場合と、比重計方法による場合とでいちじるしく相違し、サイクロン系フライ アッシュに対しては、ブレン方法が必ずしも粉末度のめやすとなり得ないことがわかる。これは、サイクロン系フライ アッシュの粉末度が比較的粗いために、ブレン方法を適用するのが妥当でないことによるものと思われる。

表-5.9 サイクロン系フライ アッシュの石灰ボゾラン砂モルタル試験および所要水量比

試料	所要水量比 (%)	モルタル中の水量 (%)	材令7日における圧縮強度 (kg/cm ²)	強度の比
No. 311	111	13.8	52.5	0.69
No. 312	115	14.0	40.4	0.53
No. 330	109	13.3	46.9	0.62
No. 45	115	13.8	46.4	0.61
No. 1115*	96	13.2	75.8	1.00

備考 *はコットレル系フライ アッシュである。
材令7日における圧縮強度試験の砂は相馬砂を使用した。

写真-5.2 ポールミル

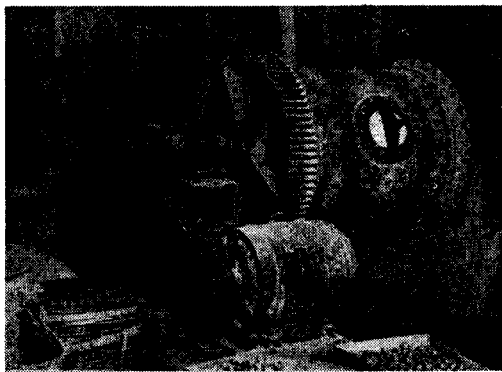
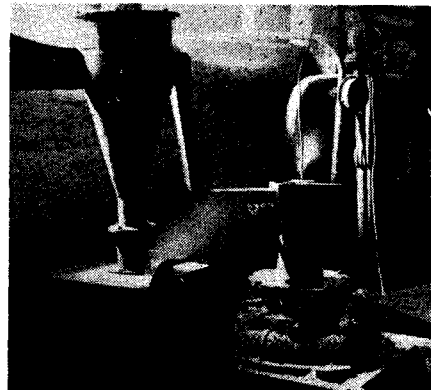


写真-5.3 エアーミル



写真-5.4 ジェットバルベライザ



(3) サイクロン系フライ アッシュの所要水量比：Ⅲ〔2〕4.の方法に従つてサイクロン系フライ アッシュとコットレル系フライ アッシュの所要水量比を試験した結果は、表—5・9 に示すとおりである。すなわち、サイクロン系フライ アッシュはコットレル系フライ アッシュにくらべていちじるしく所要水量比が大きく、いずれも、100%をはるかに上まわつている。

(4) サイクロン系フライ アッシュのポゾラン活性：石灰ポゾラン砂モルタル強度試験方法に従い、前記4種のサイクロン系フライ アッシュのポゾラン活性を試験した結果は、表—5・9 に示すとおりであつて、コットレル系フライ アッシュにくらべると相当に劣る。

以上、サイクロン系フライ アッシュは、主として所要水量比、およびポゾラン活性の上から、そのままポゾラン混和材として利用することは好ましくないと考えられる。

2. 各種ミルによるサイクロン系フライ アッシュの粉砕試験

(1) 試験に用いたミル：試験に用いたミルは、ボール ミル・エアー ミル*・ジェット パルベライザ** の3種で、各ミルの外観は写真—5・2~5・4 に示すとおりである。なお3種のミルのうち、よく知られているボールミルは別として、エアー ミルおよびジェット パルベライザのあらまはは次のとおりである。

エアー ミル：一つのケーシング内で相対する一対のプロペラを、互いに反対方向に3000~4000 r. p. m.の速度で回転させ、これに被粉砕物を送入する。被粉砕物はプロペラにはねられ、それら相互の衝突、プロペラおよびケーシング内壁との衝突によつて粉砕される。図—5・4 はその説明図である。すなわち、被粉砕物は、ホップよりスクリー フィーダを通して、ケーシングに送入される。空気はファンの作用によつて、ダンパのついている口より内部に吸い込まれ、ケーシングに入つて細かくなつた粉末をともなつて撰粉器に入る。ここで微粒子群と粗粒子群とに分けられ、前者はサイクロン集塵器で捕えられ、後者は再びホップに戻される。

ジェット パルベライザ：円筒形の低いケーシングの周囲に設けられた流体室より、ノズルを通して圧縮空気をケーシング内に噴射させる。この渦噴流中に送入された被粉砕物は、渦噴流によつてケーシング内を駆けめぐり、粒子相互の衝突およびケーシング内壁との衝突によつて粉砕される。図—5・5 はその説明図である。すなわち、被粉砕物はホップより送入管を通じてケーシング内に送入される。ケーシング内で粉砕された粗粒子群は気流によつて上昇し、蓋体とサイクロンとの間を通つて、サイクロンの内部に渦流しながら導かれる。ここで微粒子群と粗粒子群とに分けられ、前者は出口を経てサイクロン集塵器で捕えられ、後者は中心部を経て再びケーシング内に戻される。

(2) 試験結果：表—5・8 に示したサイクロン系フライ アッシュのうち、フライ アッシュ No. 45 を前記3種のミルを用いて粉砕し、各ミルの大体の粉砕能力(kg/時/馬力)を推定するとともに、粉砕したフライ アッシュの比重・粉末度・所要水量比・ポゾラン活性などを試験した結果は、表—5・10 および図—5・6 に示すとおりである。

表—5・10 サイクロン系フライ アッシュの粉砕試験結果の一例

粉 砕 試 験				粉 砕 し た フ ラ イ ア ッ シ ュ の 性 質					
ミルの種類	馬力数	粉砕能力 (kg/時/馬力)	摘 要	比 重	粉 末 度			所要水量比 (%)	石灰モルタル試験材令 7日強度 (kg/cm ²)
					88μ フライ 残分 (%)	44μ フライ 残分 (%)	比重計方法 比表面積 (cm ² /g)		
ボール ミル	10	18	1" ボール 85kg 使用	2.14	2.7	24.5	1 960	—	—
		10	"	2.22	1.5	17.9	2 560	107	74.5
エアー ミル	5	20*		2.10**	1.3	18.9	2 130	—	—
		10*		2.11**	1.1	17.9	2 650	109	73.7
ジェット パルベライザ	17.5	5	圧 力 (5kg/cm ²)	2.32	1.2	11.5	3 100	101	78.8
粉 砕 前 の フ ラ イ ア ッ シ ュ				2.05	7.2	29.2	1 810	115	46.4

* 実験の都合で、循環再粉砕が完全に行われなかつたため、この値は推定した。

** 同上の理由により、粉砕が完全でないので、多少小さくでている。

石灰モルタル試験の砂は相馬砂を用いた。

図-5.4 エアー ミル

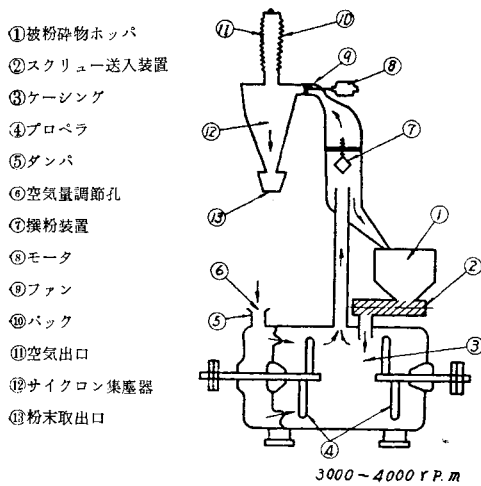


図-5.5 ジェット パルペライザ

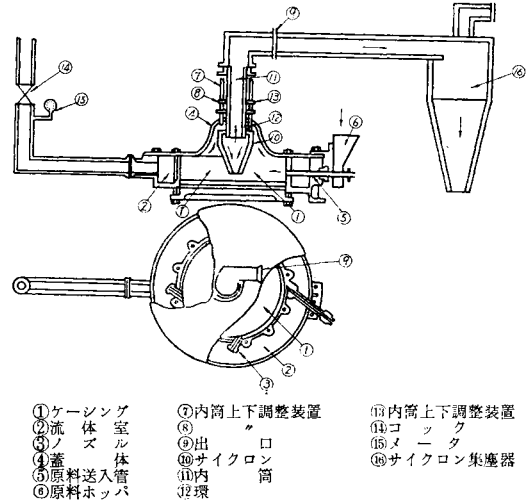


表-5.9 および図-5.5 から次のことが認められる。

(i) 粉砕後のフライ アッシュの比重は、総じて粉砕前のものより増加し、その程度は粉砕の程度に応じて大きくなっている。このことは、逆にサイクロン系フライ アッシュを粉砕する場合には、比重試験によつてその粉砕程度の大体のめやすをつけることを示すものである。ただこれらの粉砕したフライ アッシュのうちで、エアーミルで粉砕したフライ アッシュは、その比重が約 2.1 であつて、粉砕処理を経たものであるにかかわらず、他の粉砕したフライ アッシュに比して小さいのは、試験の都合で完全な循環再粉砕を行えず、一部に風フィルの効果が入つたためと思われる。

(ii) フルイ残分がほぼ同程度の粉砕したフライ アッシュの粒度分布状態は、粉砕に用いたミルの型式に関せずほぼ同様で、サイクロン集塵器で捕捉したままの粒度分布をいぢりしく改善し、コットレル系フライ アッシュに近い分布にすることができる。

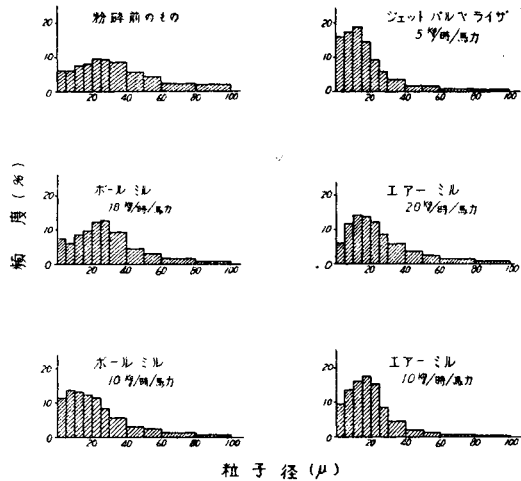
(iii) 粉砕したフライ アッシュの所要水量比は、粉砕前のものに比べると相当小さくなり、粉砕前のものとコットレル系フライ アッシュの間ぐらいになつた。

(iv) 粉砕したフライ アッシュを用いた石灰モルタルの材令 7 日強度は、73.7~78.8 kg/cm² となつていて、サイクロン系フライ アッシュもポンド アッシュと同じく、適当な粉末度になるまで粉砕すれば、ポゾラン混和材として十分満足すべきものであることが認められる。また石灰モルタル強度試験の結果より判定すれば、粉砕したサイクロン系フライ アッシュは、良質のコットレル系フライ アッシュとほぼ同等のポゾラン活性を有することが認められる。

(v) 本試験の範囲内でいえば、粉砕方法それ自体は、製品の品質に特に影響をおよぼさないものと思われる。

3. 粉砕したサイクロン系フライ アッシュがコンクリートのコンシステンシーおよび圧縮強度におよぼす影響

図-5.6 粉砕したフライ アッシュの粒度分布をヒストグラムで示した一例
フライ アッシュ：サイクロン系 フライ アッシュ No.45



表—5.11 粉碎した飾磨フライ アッシュの比重および粉末度

フライ アッシュ	比重	粉末度				
		88 μ フライ 残分 (%)	44 μ フライ 残分 (%)	ブレン比 表面積 (cm^2/g)	比重計方法 比表面積 (cm^2/g)	10 μ 以下の 百分率
S	2.08	22.9	67.0	2 160	640	0
S' (粉碎)	2.28	2.8	16.4	5 050	3 500	37.1
S ₁	1.99	30.0	72.4	1 330	800	1.8
S ₂ (粉碎)	2.10	9.2	44.2	3 550	1 320	9.8
S ₃ ()	2.23	3.0	17.4	4 910	3 250	32.5

(1) フライ アッシュ：試験に用いたフライ アッシュは、飾磨フライ アッシュ S および S₁ を試験用ボール ミルで図—5.7 に示すような粉末度に粉碎したもので、そのおもな性質は 表—5.11 に示すとおりである。

(2) 試験

(i) 飾磨フライ アッシュ S および同粉碎フライ アッシュ S' を用い、粗骨材の最大寸法を 25 mm、単位セメント・フライ アッシュ量を 306 kg/m^3 、フライ アッシュ オキカエ率を 20%、スランブを 6 cm としたコンクリート、

(ii) 飾磨フライ アッシュ S₁、同粉碎フライ アッシュ S₂ および S₃ を用い、粗骨材の最大寸法を 30 mm、単位セメント・フライ アッシュ量を 285 kg/m^3 、フライ アッシュ オキカエ率を 20%、スランブを 5 cm としたコンクリート、

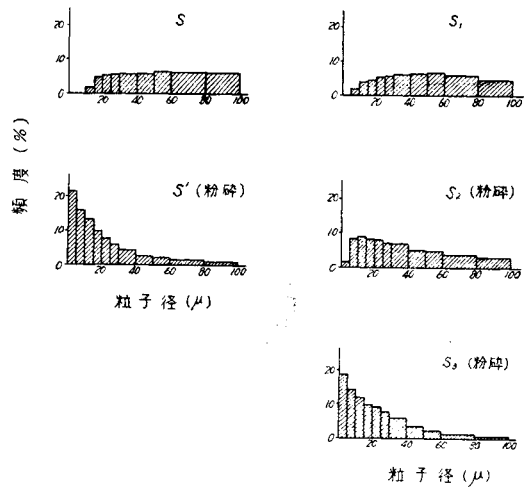
以上を造るための配合および同コンクリート を 20°C の水中で養生した場合の圧縮強度は 表—5.12 および 図—5.8 に示すとおりであつた。

(3) 試験結果

(i) コットレル系フライ アッシュでセメントの 20% をおきかえてコンクリートをつつた場合、所定のコンシステンシーをうるために必要な水量は、フライ アッシュを用いない場合よりも減少したが、本実験において、粉碎しない飾磨フライ アッシュを用いた場合、使用水量はフライ アッシュを用いない場合よりも増加している。このことは、他のサイクロン系フライ アッシュにおいても見られることである。これに反し、粉碎したフ

図—5.7 粉碎した フライ アッシュの粒度分布をヒストグラムで示した一例

フライ アッシュ：サイクロン系フライ アッシュ S・S₁



表—5.12 粉碎したサイクロン系フライ アッシュがコンクリートのコンシステンシー および圧縮強度におよぼす影響

実験整理番号	フライ アッシュ		粗骨材の最大寸法 (mm)	単位セメント フライ アッシュ量 (kg/m^3)	フライ アッシュ オキカエ (%)	単位水量 (kg/m^3)	粗細骨材 重量比	スランブ (cm)	圧縮強度 (kg/cm^2)			
	名称	44 μ フライ 残分 (%)							28日	91日	6月	1年
203	—	—	25	306	0	190	1.1	6	244	293	319	—
	S	67.0			20	198			158	225	267	—
	S'	16.4			〃	188			196	294	343	—
204	—	—	30	285	0	172	1.5	5	263	310	322	327
	S ₁	72.4			20	186			145	205	246	253
	S ₂	44.2			〃	175			185	261	309	320
	S ₃	17.4			〃	173			212	296	328	324

備考 セメントは小野田普通ポルトランド セメントを用いた。

ライ アッシュを用いたコンクリートの使用水量は、フライ アッシュを用いない場合とほぼ同程度であり、サイクロン系フライ アッシュを適当な粉末度に粉砕した場合には、サイクロン系フライ アッシュ以外の混和材にしばしば見られるようなコンクリートの単位水量の増加は、認められない。

(ii) 約 20°C の水中養生を行う場合、粉砕したフライ アッシュで、セメントの 20% をおきかえて造つたコンクリートの強度は、早期材令においては、フライ アッシュを用いないものよりも弱い、長期材令においては、いちじるしい強度増進を示し、フライ アッシュを用いないものと同程度となり、材令の増加にともなう強度の増進状態は、良質のコットレル系フライ アッシュとほぼ同程度であるとみなすことができる。

(iii) 粉砕したフライ アッシュは、その粒子形状の点を除けば、化学成分・粉末度・

ボゾラン活性などは良質のコットレル系フライ アッシュとならば相違するところがない。従つて粉砕したフライ アッシュがコンクリートの性質におよぼす影響は、コンシステンシーを除けば、良質のコットレル系フライ アッシュにおける場合とほぼ同程度とみなしてなら差支えないものと思われる。

VI. 結 語

以上、各種の試験の結果、火力発電所の捨灰は、次に示すようにボゾラン混和材としてすべて有用であることが明らかになった。

(a) コットレル系フライ アッシュは、乾燥の状態ではこれを採取すれば、そのままこれをボゾラン混和材として利用できる。ボイラの負荷が一定のときに得られるアッシュは、特にその品質が良好であつて、本研究のために使用した悪いフライ アッシュは、ボイラ運転休止直前の負荷変動時を利用してえた特殊の生産物で、これは廃棄しなければならないものである。なお、本試験研究の結果、コットレル系フライ アッシュの実用化に当つて定めた仕様を参考のために示せば、附録フライ アッシュ仕様書案のとおりである。

(b) サイクロン系フライ アッシュは、乾燥状態でこれを採取する場合、そのままこれをボゾランとして利用するのは好ましくない。しかしこれを粉砕して、所定の粉末度とする場合には、市販の混和材よりボゾラン活性に富み、コットレル系フライ アッシュに匹敵するものが得られる。粉砕の目的はボゾラン活性の増進にあるが、粉砕をうける粒子の数を必要最小限にとどめる差別粉砕方式が好ましい。

(c) ポンド アッシュは、これを乾燥して粉砕すればボゾラン 混和材として利用できる。ポンド アッシュは細かいものから粗いものまで種々の割合で含まれた状態で得られるから、これの粉砕はポルトランド セメントクリンカと同時に、混合ポルトランド セメントの形にして用いるのが有利と思われる。

また、コットレル系フライ アッシュについて行つた本試験の結果より、大体次のことが結論できるようである。

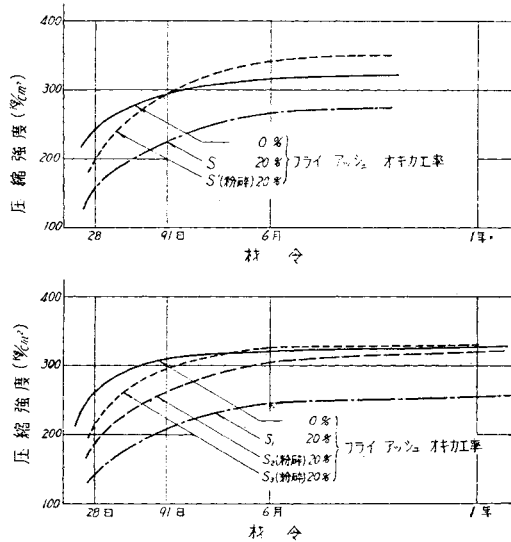
(1) フライ アッシュの主成分は、シリカ・アルミナ・酸化鉄などで、シリカは約半分を占め、ボゾランとして十分に用いるものと考えられる。

(2) フライ アッシュは灰白色より黒色を呈するものまで種々あるが、この色は含有炭素量およびボゾラン活性判定のめやすとはならない。

(3) フライ アッシュの比重は、九州炭および北海道炭を使う場合大体 2.0~2.2 の範囲にある。また単位容積重量は、約 800~1000 kg/m³ の範囲にある。フライ アッシュ粒子の大部分は球状をなしている。

(4) ボイラ運転時に採取するコットレル系フライ アッシュの粉末度は、ブレン比表面積で 3000~5000cm²/g、88 μ フルイ残分で 1~3%、44 μ フルイ残分で 8~20% の程度である。また 20 μ 以下の粒子が約 60% 強を

図—5.8 粉砕したフライ アッシュを用いたコンクリートの圧縮強度



占めており、顕微鏡写真によれば 2μ 以下の粒子もかなり含まれている。

フライ アッシュの品質判定に当つて粉末度を試験する場合、コットレル系フライ アッシュに対しては、ブレン方法による比表面積は1つの尺度となると考えられる。

(5) フライ アッシュは、その含有炭素のために吸着性を有するが、その吸着量は必ずしも炭素含有量とは一定の関係がない。

(6) 石灰ポゾラン砂モルタル強度試験方法によれば、コットレル系フライ アッシュは、十分なポゾラン活性を有することが認められる。

(7) フライ アッシュでポルトランド セメントの一部をおきかえる場合、凝結・始発ともにそのオキカエ率に従つて延びる。

(8) フライ アッシュでポルトランド セメントの一部をおきかえた場合、オートクレーブ膨張試験による安定性は、フライ アッシュを用いないものとはほぼ同程度と考えられる。

(9) 良質のフライ アッシュでポルトランド セメントの一部をおきかえた場合、コンクリートの単位水量を減少することができる。この単位水量減少の程度は、フライ アッシュの粉末度、フライ アッシュ オキカエ率および砂の粗粒率が大きいかほど大きくなる傾向にある。またこの場合、まだ固まらないコンクリートのプラスチックは増加し、ウォーカーピッチャーはよくなり、実際の施工に当つて見られる材料の分離並びにブリージングは、軽減されるものと考えられる。

(10) フライ アッシュを AE コンクリートに用いる場合、所定の空気量をうるために必要な単位 AE 剤量は、フライ アッシュの吸着量が大きく、オキカエ率が大きいかほど、大きくなることが認められる。

(11) フライ アッシュでポルトランド セメントの一部をおきかえたコンクリートの強度は、フライ アッシュを用いないものよりも、早期材合においては小さいが、材合が増加するにつれて大きくなる。

たとえば、普通ポルトランド セメントを用いて、 21°C 水中養生を行つた場合、オキカエ率 30% のものは材合 91 日でフライ アッシュを用いないものとはほぼ同じ強度になり、50% のものは材合 6 月～1 年でほぼ同じ強度になつた。このフライ アッシュによる強度の発生は、養生温度が高いほどはやく、早期に強度のでるセメントほどはやい。また、強度増進の程度は、コンクリートの配合が貧配合であるほど大きい。

(12) 21°C の水中養生を行う場合、良質のフライ アッシュでポルトランド セメントの一部をおきかえて造つたコンクリートの耐透水性は、早期材合においてはフライ アッシュを用いないものよりもおとるが、長期材合においてはいちじるしく増進し、フライ アッシュを用いないものよりもはるかに優れるようになる。フライ アッシュの効果は強度におけるよりも耐透水性における方がいちじるしいといえる。

(13) ポルトランド セメントの一部をフライ アッシュでおきかえたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、早期材合ではフライ アッシュを用いないものにくらべて多少おとるが、長期材合ではほぼ同程度になる。またフライ アッシュを用いたモルタルおよびコンクリートの硫酸塩に対する抵抗性は、これを用いないものにくらべ、いちじるしく大きい。

(14) フライ アッシュで、ポルトランド セメントの一部をおきかえたコンクリートの発熱量は、これを用いないものにくらべると、フライ アッシュ オキカエ率に比例して減少する。

(15) フライ アッシュで、ポルトランド セメントの一部をおきかえたコンクリートの乾燥による収縮は、フライ アッシュを用いないものにくらべると減少する。

附録 フライ アッシュ仕様書案 (昭和 30 年 3 月)

1 節 適用の範囲

この仕様書は○○○新設工事に用いるフライ アッシュに適用する。

2 節 定 義

この仕様書でいうフライ アッシュは、微粉炭燃焼ボイラの煙道ガスからコットレル集塵器でとつたごく微細なものをいう。

3 節 品 質

フライ アッシュは、5 節に規定する方法に従つて試験した場合、化学分析および物理的性質に関する次の諸条件を満足するものでなければならない。

化学成分

シリカ (SiO_2)45% 以上

アルミナ (Al_2O_3)	20% 以上
マグネシア (MgO)	3.0% 以下
無水硫酸 (SO_3)	2.0% 以下
強熱減量	5.0% 以下
含水量	1.5% 以下

物理的性質

比重	2.0 以上
粉末度	
0.088 mm フルイ残分	5.0% 以下
ブレン方法による比表面積	3 000 cm^2/g 以上
圧縮強度比	
(基準配合に対する百分率)	
材令 7 日	60% 以上
材令 28 日	90% 以上
所要水量比	105% 以下
乾燥収縮	() % 以下
反応性	() % 以上
(材令 14 日おける膨張反応減少率)	

4条 品質の均一性

フライ アッシュの粉末度・所要水量比および圧縮強度比は、3節に合格し、その均一性は次に示すものでなければならない。ただし、試料採取および試験方法は、5節および6節に従うものとする。

(1) 粉末度

0.088 mm フルイ残分 (%) およびブレン方法による比表面積 (cm^2/g) は、その平均値およびネハバの変動が $\bar{X} \cdot R$ 管理図の 3σ 管理限界をこえてはならない。

(2) 所要水量比

所要水量比 (%) の平均値およびネハバの変動は $\bar{X} \cdot R$ 管理図の 3σ 管理限界をこえてはならない。

(3) 圧縮強度比

圧縮強度比 (%) の平均値およびネハバの変動は $\bar{X} \cdot R$ 管理図の 3σ 管理限界をこえてはならない。

5節 試験方法

フライ アッシュの試験は、次に示す方法で行わなければならない。

(1) 化学分析

化学分析は、アルカリ溶ゆう方法によりフライ アッシュを溶ゆうした後、JIS R 5202 (セメントの化学分析方法) に準じて行うものとする。ただし、溶ゆうする必要のないものはこの限りでない。

(2) 比重

比重試験は、JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に準じて行うものとする。ただし試料は 70 g とし、フライ アッシュを比重ビンに入れ終つてから、液面の目盛を読むまでの時間は、気泡を完全に追出すため 24 時間以上とする。

(3) 粉末度

0.088 mm フルイの残分およびブレン方法による比表面積の測定は、ともに JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に準じて行うものとする。ただし、ブレン方法による場合のフライ アッシュのポロシチーは、標準試料のポロシチーにできるだけ近く、しかも供試圧縮体作製に最も適したポロシチーを実験的に求め、 $\bigcirc\bigcirc$ の承認を得たものでなければならない。

(4) 圧縮強度比

圧縮強度比の試験は、 $\bigcirc\bigcirc$ 用セメントまたは $\bigcirc\bigcirc$ の承認したセメントを用い、基準配合および試験配合の両者について圧縮強度試験を行うものとする。これらの試験に用いる供試体の製造および圧縮強度試験は、次の事項を除きすべて JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) によるものとする。

i) 配合

試験に用いる配合は次のとおりとする。

項 目	基 準 配 合	試 験 配 合
セメント (g)	520	364
フライ アッシュ (g)	0	156
豊浦標準砂 (g)	1 040	1 040
水 (g)	200~215のフローを得るのに必要な量 同左	

ii) 供試体の養生

供試体は、成形後 24 時間 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ に保った湿気箱に入れて保存したのち脱ワクし、ただちに完全に気密な容器に入れ、 40°C で試験時まで養生するものとする。ただし強度試験は供試体を $20 \pm 3^\circ\text{C}$ に冷やして行うものとする。

iii) 試験材令

圧縮強度試験は、材令 7 日および 28 日で行うものとする。

iv) 圧縮強度比

圧縮強度の試験値は、供試体 6 個の平均値をとるものとし、圧縮強度比は次式で計算する。

$$\text{圧縮強度比(\%)} = \frac{\text{試験配合の圧縮強度}}{\text{基準配合の圧縮強度}} \times 100$$

(5) 所要水量比

所要水量比は次式によつて計算する。

$$\text{所要水量比(\%)} = \frac{(4)\text{における試験配合の水量}}{(4)\text{における基準配合の水量}} \times 100$$

(6) 乾燥収縮 (検討中)

乾燥収縮試験用試体の配合は (4) で述べた試験配合と同一とし、供試体の製造および試験は ASTM C 157-52 T に準じ〇〇の承認した方法で行うものとする。

(7) 反応性 (検討中)

材令 14 日における膨張反応減少率の試験は、ASTM : C 311-53 T に準じ、〇〇の承認した方法で行うものとする。

6 節 試料・試験および報告

フライ アッシュは、出荷にさきだち、400 t またはその端数ごとに平均品質を表わすように 1 口 5 kg 以上の試料を採取し、ただちに品質試験を行い、その結果を報告しなければならない。ただし、材令 28 日の圧縮強度・乾燥収縮および反応性については試験終了後ただちに報告しなければならない。

4 節の品質の均一性を調べるための試験は、出荷フライ アッシュ 100 t ごとに平均品質を表わすように 1 口 5 kg 以上の試料を採取して行うものとする。ただし、総計 10 000 t 以上試験したのち品質が均一であることが確認された場合は、試験の回数を変更することができる。

また納入者は〇〇が要求する場合はただちに試料を送附しなければならない。

なお、報告書の様式・提出先および部数は別途指示するものとする。

7 節 出荷の承認および納入方法

納入者は、出荷の都度〇〇の承認を得なければならない。また、承認を得たフライ アッシュの受渡し場所は〇〇とし、その単位は重量 (t) とする。

8 節 包装および標示

フライ アッシュを包装する場合は、紙袋 (JIS Z 1505 大型紙袋に準ずる) 入りとし、その正味重量は 40 kg とする。また、袋の外面にはフライ アッシュであることを明らかにし、他の標示は〇〇の承認を得たものでなければならない。



参 考 文 献

- 1) R.E. Davis, J.W. Kelly, G.E. Troxell, and H. E. Davis : "Properties of Mortars and Concretes Containing Portland-Pozzolan Cements" Jour. A.C.I. Sep.~Oct. 1935. Proc. Vol. 32.
- 2) R.E. Davis, R.W. Carlson, J.W. Kelly, and H.E. Davis : "Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash" Jour. A.C.I. 1937, Proc. Vol. 33.
- 3) R.E. Davis, H.E. Davis, and J.W. Kelly : "Weathering Resistance of Concretes Containing Fly-Ash Cements" Jour. A.C.I. Jan. 1941. Proc. Vol. 37.
- 4) A.F. Blanks : "The Use of Portland-Pozzolan Cement by the Bureau of Reclamation" Jour. A.C.I. Oct. 1949.
- 5) "Symposium on Use of Pozzolan Materials in Mortars and Concretes." ASTM Special Technical Publication No. 99. October 1949.
- 6) R.F. Blanks : "Fly Ash as a Pozzolan" Jour. A.C.I. May 1950.
- 7) "Portland Cement and Pozzolan for Palisades Dam and Power Plant. Palisades Project, Idaho" U.S. Bureau of Reclamation.
- 8) W. T. McClevahan : "Experience with Fly-Ash Blends in a Test Pavement built in 1938" Engineering News Record. March 12, 1953.
- 9) G.W. Washa, and N.H. Withey : "Strength and Durability of Concrete Containing Chicago Fly Ash" Jour. A.C.I. Apr. 1953.
- 10) "Laboratory and Field Investigations of Concrete, Hungry Horse Dam" Hungry Horse Project Concrete Laboratory Report No. C-699. 1953.
- 11) L. John Minnick : "Investigations relating to the Use of Fly Ash as a Pozzolan Material and as an Admixture in Portland Cement Concrete". ASTM 1954.
- 12) 浅岡勝彦, 大岡輝雄 : "断熱々量計によるセメント水和熱試験方法とその実例" 日本セメント株式会社, アサノ マスコン セメントに関する文献資料 M-(17) 昭和18年12月.
- 13) 吉越盛次 : "コンクリートの透水試験方法に関する一提案" 電力技術研究所報 土木, 第2巻, 第4号, 昭和25年1月.
- 14) セメント風ふるい試験方法, 日本セメント技術協会.
- 15) 水渡英二, 荒川正文 : "沈降式自動粒度測定器によるセメント粒度分布測定" セメント技術年報, 昭和28年.
- 16) S.B. Biddle Jr, and Alexander Klein : "A Hydrometer Method for Determining the Fineness of Portland-Pozzolan Cements" Proc. ASTM 1936.
- 17) "Admixtures for Concrete" Jour. A.C.I. Nov. 1944.
- 18) C.H. Scholer, and G.M. Smith : "Use of Chicago Fly Ash in Reducing Cement Aggregate Reaction" Jour. A.C.I. Feb. 1952.
- 19) Standard Method of Test for Fineness of Portland Cement by the Turbidimeter. ASTM : C 115-42.
- 20) Standard Method of Test for Autoclave Expansion of Portland Cement. ASTM : C 151 ?.
- 21) Tentative Method of testing for Fly Ash as an Admixture for Portland Cement Concrete. ASTM : C 311-53 T.
- 22) Tentative Specification for Fly Ash for Use as an Admixture in Portland Cement Concrete. ASTM : C 350-54 T.
- 23) Tentative Method of Sampling and Testing Fly Ash for Use as an Admixture in Portland Cement Concrete. ASTM : C 311-54 T.
- 24) Tentative Method of test for Bleeding of Concrete. ASTM : C 232-49 T.
- 25) Tentative Method of test for Resistance of Concrete Specimens to Rapid Freezing and Thawing in Water. ASTM : C 290-52 T.
- 26) Tentative Method of test for Volume Change of Cement Mortar and Concrete. ASTM : C 157-52 T.
- 27) セメント技術年報 昭和28年.

昭和30年11月25日印刷
昭和30年11月30日発行

土木学会論文集
第 31 号

定価 100 円 (〒 20 円)

著 者	東京都千代田区丸ノ内1ノ1 電源開発株式会社土木部	吉 越 盛 次
編集兼発行者	東京都千代田区大手町2丁目4番地	中 川 一 美
印 刷 者	東京都港区赤坂溜池5番地	大 沼 正 吉
印 刷 所	東京都港区赤坂溜池5番地	株式会社技報堂

東京中央郵便局区内 千代田区大手町2丁目4番地

発行所 社 団 法 人 土 木 学 会 電話(20) 3945・4078
振替東京 16828

