

フライアッシュ・セメントの膨張収縮について

中 条 金 兵 衛*

ON THE VOLUME CHANGE OF FLY ASH MIXED CEMENT

By Kimbe Chujo

Synopsis : The author studied the drying shrinkage of specimens at constant relative humidity of 44% about several kinds of cement. As a result comparing the drying shrinkage of fly ash mixed portland cement (mixing proportion by weight P.C. : F.A. = 80 : 20) with those of normal portland cement, high early strength portland cement, moderate heat portland cement, natural pozzolana cement, slag cement, the volume change of the fly ash cement has been found always the smallest.

The author also tested the differences of cracking tendency by so-called ring test, comparing with the portland cement types I, II, III and those cements in which 20% or 30% fly ash was mixed in each of I, II, III type portland cements. It was observed that type II cement mixed with 30% fly ash showed the smallest tendency of crack corresponding to the least values of shrinkage and modulus of elasticity.

要 旨 フライアッシュを約 20%混合せしめたポルトランドセメントすなわちフライアッシュセメント(市販)と普通セメント, 早強セメント, 中庸熱セメント, シリカセメント, 高炉セメントの乾燥収縮を比較した結果, フライアッシュセメントは常に最小の値を示した。この関係は養生期間を変化せしめても成立した。

ポルトランドセメントにフライアッシュを内割で 20%, 30% 混合したモルタルについてリング試験(きれつ発生の難易を比較する)を行なった結果, フライアッシュ 30% 混入のものはきれつ発生の傾向が非常に小さく, 湿潤養生を適当日数行なったものが特に小さかった。同様の供試体について, 収縮率・弾性率を測定した結果, 上記の傾向はこれらの率が小さいことに大きな原因のあることを明らかにした。

このきれつ発生度の小さいこと, 長期材令の強度が大きいことの長所をコンクリート舗装に生かすべく, フライアッシュを各種ポルトランドセメントに対し 20%内割, 10%外割に混入したフライアッシュセメントをかなりの量試製して使用した。セメント使用量が 300 kg/m^3 のコンクリートとし, 単味ポルトランドセメントと比較して, 厚さ 20 cm, $1 \times 25 \text{ m}$ の帯状継目なしコンクリート版を 6 条だけ試験道路として舗設し, きれつ発生の有無, カールソフメーターによる伸縮を観測しているが, 2 年半を経過した今日においても, きれつは発見されていない。

1. 緒 言

一般にセメントコンクリートの volume change には, まだ固まらない間の (1) 水和作用, (2) settling, (3) 発熱冷却によるもの, 凝結後の (4) 硬化にともなうもの, (5) 乾燥によるもの, (6) 外部からの熱による伸縮, などがあげられるが, 本文においては (1), (4), (5) による膨張収縮について述べることとする。

2. まだ固まらない間の volume change

セメントの水和を凝結と硬化の 2 期に分けて, この凝結と硬化の初期における volume change を測定した。測定法としては, 40%の水量で練ったセメントペーストを伸縮自在の薄いゴムの袋に袋が緊張する程度に密封し, これを水中に沈め, 中のセメントペーストの volume change による水の浮力の変化を, 化学天秤にて精密に測定し, これから計算して volume change を求めた。セメントの水和熱によってゴム袋の周囲の水の温度が変化し, 浮力の変化が起こるが, これは水の温度を測定して補正した。フライアッシュセメントの volume change をほかのセメントと比較したものは, 図-1 のごとくである。フライアッシュの混入率は内割で 20% であった。ほかのセメントも市販のものである。

* 日本セメント KK 中央研究所

図一は縦軸に体積収縮率をとり、横軸にペーストを練ってからの経過時間をとった。フライアッシュセメントのA, B2種類とも収縮は少なく、普通セメントA, Bがこれに次ぎ、高炉セメントB, Cの volume change が最大値を示している。

3. 硬化乾燥による収縮について

凝結過程が終わって硬化に移ったモルタルまたはコンクリートを硬化・乾燥せしめた場合の収縮の状態を次に示す。

図二はフライアッシュセメントと各種セメントをランダムに市販品のうちから採取したものについて、4×4×16 cm 角柱形、セメント：標準砂（豊浦）：水=1：2：0.6

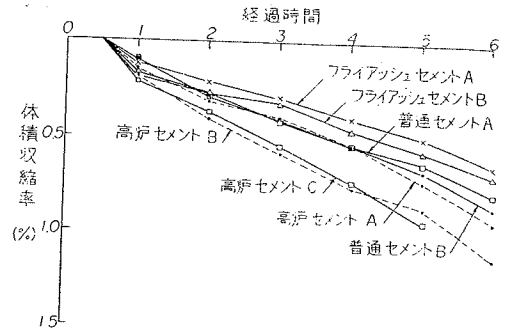
の配合のモルタル供試体による硬化・乾燥収縮の経過の比較である。測定法はコンプレーター法（コンクリート標準示方書、土木学会規準）によった。すべて 20°C 恒温室において養生・貯蔵・測定を行なった。供試体を成形後、2日間型わく中に存置後に脱型、5日間水中において養生後、20°C、相対湿度 44% の貯蔵箱中に静置して、各材令における収縮率を測定した結果を図二に示した。

図二においてみられるように、フライアッシュを普通ポルトランドセメントに20%程度混入した、いわゆるフライアッシュセメントは中庸熱セメントと同様の経過をたどり最も少ない収縮率を示している。そして高炉セメントが9~14週の材令においても収縮の傾向が進む様子のあるのに反して、フライアッシュセメントはその材令以後の収縮はきわめてわずかであることがわかる。

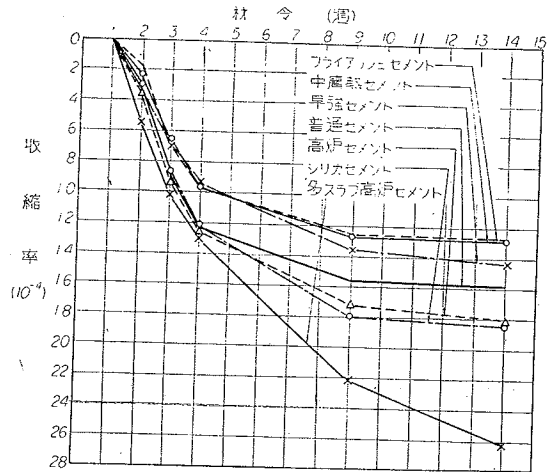
図二の結果は、供試体の湿潤養生期間を7日とした場合であるが、さらにその期間を長くして14日間、28日間とし、その後の収縮経過を測定した。それらの結果を図三(a), (b) に示す。これらの図中に示した各種セメントは市販のものであるが、図二にかかげたセメントとは異なるものであることを付記したい。

これらの場合のフライアッシュセメントもフライアッシュ混入 20% 程度のものであるが、図二の場合と同様中庸熱セメントとともに収縮率の少ない傾向を示している。ほかのセメントの収縮の順位、傾向とも図二の場合と同様であって、湿潤養生期間を14日、28日と長くしても乾燥収縮の傾向は大きくは変更できないものであることがわかる。

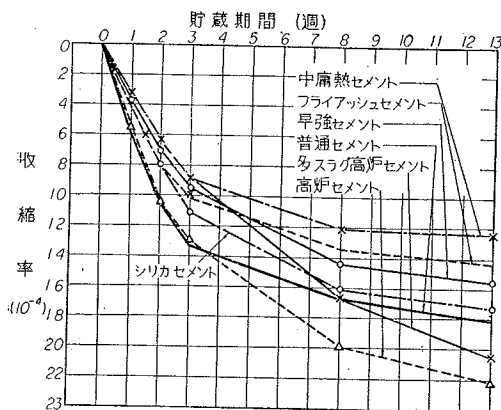
図一 ニートペースト (W/C=40%) の早期 volume change



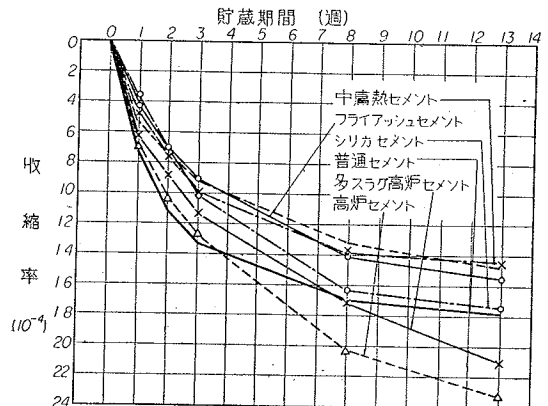
図二 フライアッシュセメントなどのモルタルによる乾燥収縮



図三 (a) 湿潤養生 14 日後の収縮傾向



図三 (b) 湿潤養生 28 日後の収縮傾向



3. きれつに関する試験

フライアッシュ混入の効果がきれつ試験ではどのように現われるかを試験した結果は次のようである。きれつ試験の一つとして採用したのが、**図-4** きれつ試験用型わくのうち左方のAを用いた方法である。これは中心部に外径 13.5 cm φ のリジットな鉄のコアを有し底がその外側につき、さらに内径 20.0 cm φ の円形型わくが圍繞している。このコアと外わくとの間にモルタルを型詰めし、硬化後、外わくと底とを取りはずすと、鉄製コアを中心にこれに密着したリング状のモルタルのハチ巻きができあがる。この脱型は成形後2日に行ない、なおα日間水中養生して後に平衡相対湿度 44% の静止空気中におき、特別の装置によって、モルタルリングの外側に発生したきれつの有無、発生の日時を自動記録するようにした。

上記の水中養生α日のαを 2, 5, 12 とした場合のリング状モルタル(セメント:豊浦標準砂:水=1:2:0.6)の外側に発生したきれつの時期(日),モルタル供試体(4×4×16 cm)の収縮率と貯蔵材令との関係などをプロットしたものが**図-5**である。2日間水中養生ののちに R.H. 44% で乾燥した場合、フライアッシュを 20% 混合したのも、および混入しないセメントモルタルはきれつを発生しているのに反し、30%混合のものはきれつの発生をみなかった。

図-5において7日間水中養生ののちに R.H. 44% で乾燥の場合、フライアッシュを 20% 混入したのも、および混入しないセメントモルタルはきれつの発生をみている。しかも後者の場合5日くらいの短い乾燥できれつを生じている。フライアッシュ 30% 混合のセメントモルタルのリングはきれつを生じなかった。この点は2日水中養生の場合と同様である。

14日水中養生後に乾燥の場合は、30%, 20%, 0%混合の場合ともきれつが発生している。しかも発生がかなり早い。

以上のように水中養生が2日または7日の場合はフライアッシュ混入 30% のセメントモルタルのリングにはきれつの発生をみないが、14日間水中養生を行なった場合には、0%, 20%混合のもののみならず、30%混合のものにもきれつの発生したことは注目し値する。0%, 20%, 30%となるに従ってきれつ発生までの期間の長くなっていることは、フライアッシュ混合によってきれつ発生の危険性を軽減し得ることを示唆するものであって、この可能性が2日水中、7日水中養生の場合 30% 混合が無きれつとなって現われてきているのである。もっともこのリング試験はかなり苛酷なものといえるのであって、フランスではきれつ発生までの経過時間の長短をもって安全性の一つの物指しとしている。

以上のようにフライアッシュ混合率の増加に従ってきれつ発生の危険性は軽減されるが、その原因として種々の要因があげられる。その一つは**図-5**にみられるようにフライアッシュ混合率に比例して、乾燥収縮率が小さくなることである。

さらにはほかの原因としては弾性係数、クリープ量が考えられる。**図-6**はフライアッシュ混合比と水中養生期間(2日, 7日, 14日)乾燥状態(R.H. 44%)における日数とともにモルタル供試体(4×4×16 cm)の動弾性率がどのように変化するかを示したものである。

この図によって分るように、セメント:豊浦標準砂:水=1:2:0.6なるモルタル中のセメントに内割で 20%, 30%のフライアッシュを混合するときは、無混合のものに比して動弾性率をかなり低下せしめることができ

図-4 きれつ試験用型わく

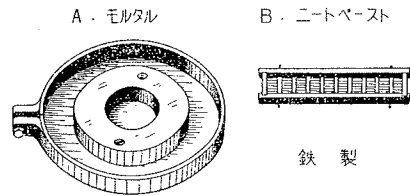


図-5 (普通セメント+FA)のモルタル収縮ときれつ試験結果

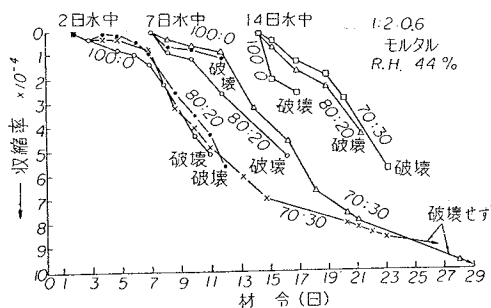
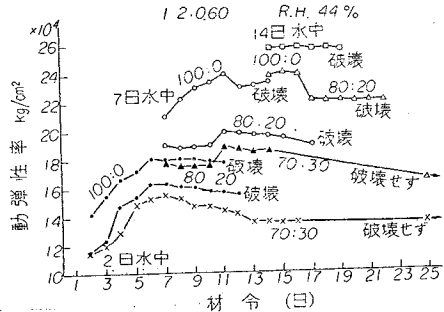


図-6 (普通セメント+FA)のモルタルの動弾性率ときれつ試験結果



る。その上、水中養生期間を 14 日から 7 日、2 日と短くすることにより弾性率を大巾に低下せしめ得ることもわかった。また乾燥によって初期には一時弾性率は上昇するが、後期には下降することも明らかとなった。

以上の 図-1, 2, 3 (a), (b), 5, 6 についての考察からすれば、きれつを防止するには、フライアッシュを 20~30% 混合し、凝結中ならびに硬化乾燥中の収縮率を小さくすると同時に、湿潤養生を適当な早い材令において打切って弾性率を小ならしめ、かつクリープの十分効く間に収縮を大部分終らせることが一つの対策と考えられる。

4. 試験道路に試用の フライアッシュ

フライアッシュ使用のコンクリートが乾燥収縮の少ないこと、緻密なコンクリートが打てること、長期強度の伸びがよいこと、などの点から、コンクリート道路版として好適ではないかと考えられた。この試験においては、日本セメント KK 研究所の構内に厚さ 20 cm, 巾 1m, 長さ 25 m の目地なしの帯状コンクリート版を 6 条打設した。路盤は十分の bearing power を有するようにした。使用セメントとしては、表-1 に示す化学成分および物理的性質を有する普通セメント, 中庸熱セメント, 早強セメントとこれらのおのおのにフライアッシュ (表-1, 2 に化学的, 物理的性質を示す) を内割に 20%, 外割に 10%, すなわちセメント: フライアッシュ=80:30 の比で混合したもの、これら合計 6 種のセメントを用いた。それらのセメントのおのおのに対し表-3 にかかげた示方配合によるコンクリートを隣接の ready mixed concrete のプラントで秤量・練り混ぜを行ない、トランシットミキサーによって運搬、discharge して、portable vibrator によって上記の巾 1m, 長さ 25 m, 間 no joint の版を 3 枚ずつ平行して計 6 枚打設した。各版の中央、厚さ 20 cm の中間に Carlson strain meters を版の長さの方向とそれに直角の方向におのおの 1 本埋め込んだ。これらによって版の長ての方向の伸縮 (これには 25 m にわたる路盤との friction による影響が加わ

表-1 セメントおよびフライアッシュの化学成分

品名	Loss	Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
普通セメント	0.72	0.39	22.89	5.30	2.96	64.24	1.33	1.61
中庸熱セメント	0.90	0.25	23.55	4.41	4.11	64.18	0.81	1.33
早強セメント	1.47	0.40	20.90	4.63	2.67	65.60	1.30	2.33
フライアッシュ	2.26		57.40	26.08	4.08	5.98	1.76	0.64

セメントの物理的性質

セメント名	比重	粉末度			凝結					安定性	フロー mm
		ブレン cm ² /g	88 μ 残分 %	風ふるい 40 μ 残分 %	温度 °C	湿度 %	水量 %	始発 時分	終結 時分		
普通	3.16	3100	2.5	33.2	20.6	90	26.3	2-58	4-18	良	229
中庸熱	3.20	3100	1.0	29.0	20.6	90	26.0	3-39	5-49	良	248
早強	3.13	4190	0.8	23.8	20.6	90	28.5	3-27	4-57	良	213
F.A.	2.20	4060	0.7								

表-2 フライアッシュの物理的性質

品名	比重	粉末度			凝結				
		ブレン cm ² /g	88 μ %	44 μ %	温度 °C	湿度 %	水量 %	始発 時分	終結 時分
規準セメント(A)	3.20	3210	0.9	4.1	20.2	92	27.5	3-29	5-12
フライアッシュ(B)	2.20	4060	0.7	4.2					

水量比	フロー (mm)	強さ												養生温度				
		曲げ			圧縮			曲げ比率			圧縮比率			水中				
		7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日		
A	100	207	64.7	74.0	81.1	381	480	521	100	100	100	100	100	100	100	40	40	40
B	93	206	51.1	93.0		300	581		79	126		79	121		40	40		

っている)と直角方向の伸縮 (版は巾 1 m であるから路盤との friction の影響は少ない) ならびに内部温度の経過を測定するようにした。

Carlson strain meters による測定結果は測定進行中であり未整理なので報告はあとにゆずるが、これら帯状の 6 枚のコンクリート版には、2 年半を経た今日でも 1 本のきれつも発生していない。

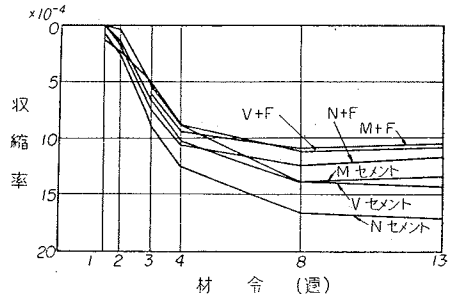
表-3 コンクリート示方配合

セメント種別	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	$\frac{p}{c+f}$ (%)	$\frac{S}{G}$ %	単位量 (kg/m ³)					
					C	F	W	S	G	
単味系	普通	40	2.5	46.0	35.0	300	0	138	692	1318
	中庸熱	40	2.5	45.3	35.0	300	0	136	694	1324
	早強	40	2.5	46.7	34.5	300	0	140	680	1325
フッシュ系	普通	40	2.5	40.3	34.0	240	90	133	656	1307
	中庸熱	40	2.5	40.0	34.0	240	90	132	657	1309
	早強	40	2.5	40.9	33.5	240	90	135	644	1313

前記の6種類のセメントをもって、20°Cの研究室にて試験を行なった結果は図-7のごとくであった。

この図の上部、モルタルの収縮試験におけるモルタルは、セメント：豊浦標準砂：水=1：2：0.65のJISモルタルの供試体4×4×16cmとしたもので、成形後2日で脱型、水中5日養生後R.H.44%（平衡湿度）の箱中にて乾燥貯蔵した場合の収縮率を示せば図のようになる。フライアッシュを混入しないNセメント（普通セメント）、Vセメント（早強セメント、ベロセメント）、Mセメント（中庸熱セメント、マスコンセメント）のモルタル収縮率の経過はMセメントが最も小さく、Vセメント、Nセメントの順に大きくなっている。これらのセメントに内外割として30%だけフライアッシュを加えたものN+F、V+F、M+Fの収縮率は総体にかなり小さくなり、

図-7 試験コンクリート道路に用いたセメントのモルタル収縮試験



しかもポルトランドセメント単味の場合の収縮の大きさの順序と同様であってM+Fが最も小さくV+F、N+Fと大きくなっている。そして材令8週から13週までの間に多少膨張の傾向さえみられる。

これら6種類のセメントを用いてきれつ試験を行なったので次に報告する。器具としては図-4右方B：ニートペースト用のものによった。これは図に示すように一定の間隔をおいて突起のあるかなり厚い鉄製底板の内側面に型わくを有し、これにW/C=40%のセメントペーストを一樣の厚さに詰め、2日後に脱型する。このさい、底面はセメント硬化体に密着しており、これを水中にて5日間養生したのち、R.H.44%（平衡湿度）の箱中に貯蔵して乾燥せしめ、セメント硬化体の収縮が底板の突起にはばまれて、弾性的変形、クリープ量、引張り強度、弾性率など総合的結果としてきれつ発生の有無となって現われてくる。セメントの種類に関せずほとんどすべての場合、きれつを生ずるが、きれつの数、発生までの経過日数をもって比較することができる。図-8は上記6種類のセメントについて行なった試験結果を図示したものである。

図-8 ニートセメントのきれつ試験成績

普通セメント N	中庸熱セメント M	早強セメント V
29時間	168時間	29時間
29時間	23時間	24時間
ミル通過	ミル通過	ミル通過
普通セメント N+F	中庸熱セメント M+F	早強セメント V+F
29時間	23時間	23時間
フライアッシュ混合セメント	フライアッシュ混合セメント	フライアッシュ混合セメント

この試験はセメントにとって苛酷なもので、きれつはほとんどの場合発生するが、ただその発生の時期と本数が問題となることはすでに述べた。図-8の上列の3つの矩形は底面に鉄製突起板（図-4B参照）を付したセメント硬化版の上面を示したもので、湿潤養生7日後、44% R.H. 空中での乾燥15日以上経過したもので、各版に2本ずつ表われている曲線は、傍記した時間直後（R.H.44%に保ち始めから）そのきれつが発生したことを示している。これらフライアッシュを混合しない普通セメントN、中庸熱セメントM、早強セメントVの場合はそれぞれ23~29時間以内に（セメントMの場合1本は168時間）2本ずつのきれつの発生をみ、それ以後は発生していない。中庸熱セメントMの場合1本がずっと後期に発生したことは、図-2, 3, 4にも掲げたように、この種セメントはもともと収縮率が小さいことにより原因しているものと考えられる。

図-8下側に掲げた、フライアッシュ混合（内割にて27%）のセメントN+F、M+F、V+Fの場合、きれつ発生は上述と同様23~29時間後であるが1本ずつしか生じていない。これはフライアッシュ混合によって収縮、弾性的・非弾性的性質が改善されたことによるものと考察される。

次に、試験道路工事の現場からとったコンクリート供試体の20°C研究室養生による強度の値は表-4に示したとおりである。15×15×53cm beamsによる曲げ強度、その折片による圧縮強度および標準シリンダーによる圧縮強度は、材令28日においてフライアッシュコンクリートは（いずれの母体セメントの場合も）フライアッシュ混入なきコンクリートに比して同等の値に達し、材令91日では上まわった数値を示している

表-4 試験道路用のコンクリート強度試験成績 (20°C)

セメント種別	C:F (%)	強度 (kg/cm ²)									
		曲 げ			圧 縮			はり折片圧縮			
		7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	
単味系	普通	100:0	32.1	41.5	47.7	268	425	483	309	459	547
	中庸熱	100:0	28.5	44.4	49.4	218	400	455	250	435	546
	早強	100:0	42.7	46.5	53.0	382	462	521	454	512	561
フライアッシュ系	普通	73:27	31.2	42.8	51.7	253	423	501	290	462	560
	中庸熱	73:27	25.5	41.8	50.4	165	351	475	250	435	546
	早強	73:27	37.6	43.2	53.4	363	473	574	390	527	607

供試体養生法はいずれも20°C標準法

ことがわかる。

5. 総 括

本報においては、フライアッシュを 20~30% 混合したフライアッシュセメントと他種のセメントとの volume change と、きれつ問題に関連して比較検討を行なった。要約すれば次のようである。

(1) まだ固まらない状態から凝結終了までの間の volume change はフライアッシュセメントが他種のセメントに比して少ない値を示した。

(2) 湿潤養生の後、乾燥せしめた条件においては、フライアッシュ混合のセメントモルタルは中庸熱セメントとともに他種セメントに比して少ない硬化乾燥収縮を示した。この傾向は湿潤養生期間をさらに延長しても同様であった。

(3) 上記の volume change のみならず、弾性的ならびに非弾性的性質、強度などの関係が総合的結果として現われるきれつ試験の結果を報告した。2つの異なった方法を述べたが、そのうちリング試験では、フライアッシュ混合がきれつ防止に役立つこと、そしてその原因が低収縮性、低弾性係数（さらに恐らくクリープ量の増大）にあることを説明した。

(4) 以上のフライアッシュ混合によってきれつ発生をおさえ、長期強度の延びのある特長を舗装道路に生かすべく行なった試験コンクリート版についての試験結果とそのさい使用の fly ash concrete, no fly ash concrete を母体セメントを変えて実験室的の研究を行なった結果を述べたが、この試験においてもフライアッシュの低収縮、長期材令における高強度を証明することができた。また(3)に述べたきれつ試験のさらに一つの方法について説明し、この方法によってもフライアッシュ混合セメントを使用すればきれつの傾向を小さくし得ることを述べた。