

各種セメントコンクリートにおよぼす石灰系膨張材の影響

THE INFLUENCE OF LIME SYSTEM EXPANSIVE ADDITIVE
ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF CONCRETES MADE OF
DIFFERENT TYPES OF CEMENT河野俊夫*・一家惟俊*・中野昌之**・綿貫輝彦*
By Toshio Kawano, Koretoshi Hitotsuya, Masayuki Nakano
and Teruhiko Watanuki

1. はじめに

近年セメント膨張材の開発、研究が進み、その膨張機構を応用して各種コンクリート構造物のひび割れ防止、高強度コンクリート二次製品の製造、あるいは特殊構造物への充填用グラウト等多方面にわたって利用され、しだいにその効果も確認されてきているが、それらの実施例は主として普通ポルトランドセメントを基材とし、それに膨張材を混和して使用していることが多いようである。普通ポルトランドセメントと凝結時間や強度、特に初期強度性状を異にするセメント、すなわち早強セメント、超早強セメント、中庸熱セメントおよび各種混合セメントなどに対して、膨張材を混和した場合には、普通ポルトランドセメントと比べて膨張・収縮挙動が異なり、ケミカルプレストレス効果に差を生じるものと思われる。

筆者らは上記観点にたち、各種セメントに石灰系膨張材を混和した場合の一連の実験を行い、各種セメントの諸物性、特に膨張・収縮挙動および強度性状におよぼす石灰系膨張材の影響を明らかにし得たので、以下にその詳細を報告する。

2. 試験方法

(1) 使用材料

供試セメントは、普通セメント (NPC)、早強セメント (HEC)、超早強セメント (SHEC)、中庸熱セメント (MHC)、B 種フライアッシュセメント (FAC)、B 種高炉セメント (BFC) の 6 種で、いずれも小野田セメント社製である。なお、表および図中のセメント種類名

* 小野田セメント (株) 中央研究所

** 正会員 小野田セメント (株) 中央研究所

は、すべて上記カッコ内の英字で示した。

膨張材は市販の石灰系膨張材「小野田エクспан」を使用し、骨材には富士川産の川砂、川砂利を使用した。

使用セメントの化学成分および物理試験成績を表-1 に、使用骨材の物理試験成績を表-2 に示す。

(2) コンクリートの配合

供試コンクリートはスランプ 21 cm (一般建築工事用対象) およびスランプ 6 cm (土木工事用、二次製品用対象) の二種類とした。その配合は表-3 のとおりで、膨張材混和率はセメント重量に対して内割で混和し、スランプ 21 cm の場合 9%、スランプ 6 cm の場合 10% 混和とした。

(3) 試験項目および試験方法

表-1 各種セメントの物理的性質と化学成分

セメントの種類 項目		NPC	HEC	SHEC	MHC	FAC	BFC
		比 重	3.17	3.12	3.08	3.20	2.97
比 表 面 積 (ブレン: cm ² /g)		3 080	4 700	6 060	3 100	3 230	3 810
凝 結 時 間	始 発 (h-m)	2-32	1-42	1-18	4-09	3-24	3-41
	終 結 (h-m)	3-37	2-47	2-27	5-16	4-40	4-59
曲 げ 強 度 (kg/cm ²)	1 日	—	32.5	50.4	—	—	—
	3 日	32.0	50.6	61.3	31.8	27.3	27.6
	7 日	48.4	65.2	72.0	40.0	41.0	40.8
	28 日	74.9	80.9	81.1	61.8	62.8	63.5
圧 縮 強 度 (kg/cm ²)	1 日	—	130	202	—	—	—
	3 日	132	238	308	112	105	106
	7 日	232	354	397	168	168	184
	28 日	426	470	472	318	330	379
化 学 成 分 (%)	ig. loss	0.6	1.0	1.2	0.3	0.8	1.0
	insol	0.1	0.1	0.1	0.1	14.9	0.4
	SiO ₂	22.0	20.8	20.4	24.0	18.0	26.0
	Al ₂ O ₃	5.3	5.1	5.0	4.1	5.4	9.6
	Fe ₂ O ₃	3.3	2.6	2.6	3.9	2.7	2.4
	CaO	65.1	66.2	65.6	64.5	55.0	57.0
	MgO	1.4	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3
	SO ₃	1.8	2.6	3.3	1.7	1.6	2.2
	Total	99.6	99.6	99.5	99.8	99.7	99.4

表-2 骨材の物理的性質

骨材の種類	項目	比重	吸水量 (%)	単位容積重量 (kg/m ³)	粗粒率 (F.M)	ふるい通過分 (%)									
						25 mm	20 mm	15 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15mm
細骨材		2.65	1.60	1685	2.70	—	—	—	—	100	91	74	45	14	6
粗骨材		2.66	0.84	1710	6.89	100	91	56	20	0	0	0	0	0	0

表-3 コンクリートの配合 (PLAIN)

セメントの種類	項目	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
				セメント	水	細骨材	粗骨材
スランプ 21 cm	NPC	60	48.3	335	201	874	939
	HEC	63	〃	〃	211	855	918
	SHEC	61	〃	〃	204	869	934
	MHC	60	〃	〃	201	876	941
	FAC	57	〃	〃	191	877	943
	BFC	63	〃	〃	211	855	913
スランプ 6 cm	NPC	40	40.0	409	164	723	1088
	HEC	42	〃	〃	172	728	1097
	SHEC	42	〃	〃	172	728	1097
	MHC	40	〃	〃	164	740	1114
	FAC	38	〃	〃	156	737	1110
	BFC	42	〃	〃	172	723	1089

注：膨張材混和率 ① スランプ 21 cm の時セメント量×0.09
 ② スランプ 6 cm の時 〃 ×0.10

a) 膨張試験 (自由膨張試験および拘束膨張試験)

i) 自由膨張試験

JIS A 1125-1957 “モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法 (コンパレータ法)” に従い、供試コンクリートを 10×10×40 cm 型枠中に成形し、成形後 24 時間で脱型した後基長を刻線し、ただちに 20°C の水中に浸漬して材令 2 日, 4 日, 6 日および 8 日で長さ変化を測定し、その後試験体を 20°C, 50% R.H 雰囲気中に移して材令 15 日および 22 日で長さ変化を測定した。

ii) 拘束膨張試験

養生方法として ① 水中養生 (一般土木, 建築用対象) と ② 蒸気養生 (コンクリート二次製品対象) の 2 種を採用した。

図-1 に示すような拘束装置をあらかじめ 20°C 室内に放置後 PC 鋼棒の両端をダイヤルゲージで測長した後、10×10×40 cm 型枠中に設置してコンクリートを打設し試験体を作成した。水中養生を行う試験体は自由膨張試験と同じ条件でダイヤルゲージを用いて長さ変化を測定した。他方、蒸気養生を行う試験体はコンクリート

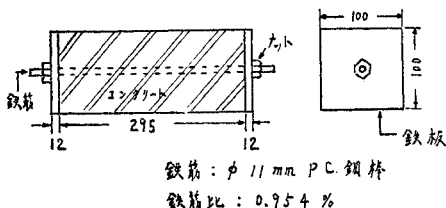


図-1 膨張試験用拘束装置

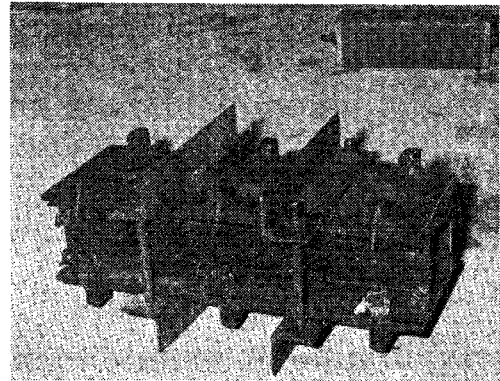


写真-1 拘束試験体の蒸気養生時の状態

打設後 3 時間で写真-1 に示すようにキャッピング面を鉄板で覆い、鉄板をボルトとナットで締めつけ蒸気養生に供した。蒸気養生条件は、昇温速度 20°C/h で 65°C に昇温し、65°C で 3 時間保持した後常温 (20°C) まで徐冷した。

その後脱型し、ダイヤルゲージで長さ変化を測定した後 20°C の水中に浸漬し、以後自由膨張試験と同じ条件で長さ変化を測定した。

b) 圧縮強度試験

供試コンクリートを 20°C, 80% R.H 雰囲気中で φ 10 × 20 cm 型枠中に成形し、成形後 5 時間でキャッピングを行い、次の 2 種類の条件における圧縮強度を求めた。

① 成形 24 時間後に脱型した後 20°C の水中に浸漬し、材令 7 日および 28 日で圧縮強度を実施したもの。

② 成形 24 時間後試験体表面をぬれむしろで覆い、材令 7 日まで型枠のまま養生 (湿空養生) した後脱型して圧縮強度試験を実施したもの。

また、ヤング率は各試験体の圧縮強度試験時に試験体側面加圧方向 (縦方向) にペーパーストレインゲージを貼り付け、圧縮強度の 1/3 応力段階における (応力-ひずみ) 曲線を求め、割線ヤング率として算出した。

c) 拘束試験体の曲げ強度試験

各種セメントに石灰系膨張材を混和したコンクリートのケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレス効果を明確化することを目的として実施したものであり、供試コンクリートはスランプ 6 cm で、各種セメントに石灰系膨張材を混和したコンクリートおよび混和しないコンクリートについて実施した。

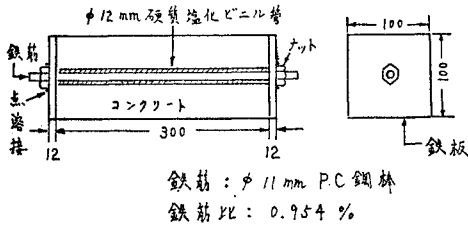


図-2 曲げ強度試験用拘束装置

試験体は図-2に示すように、 $\phi 12$ mm の硬質塩化ビニル管で被覆した $\phi 11$ mm の PC 鋼棒の両端を、 $10 \times 10 \times 1.2$ cm 鉄板の中心でナット締めした装置で拘束されており、試験体の寸法は $10 \times 10 \times 30$ cm である。

試験体の成形方法および蒸気養生条件は、前記(3) ii) 拘束膨張試験法と同様に行った。

供試コンクリートを蒸気養生した後ダイヤルゲージで PC 鋼棒のひずみを測定し、膨張材無混和コンクリートは全部、膨張材混和コンクリートについては半数の試験体について拘束装置のナットをゆるめて拘束を解除し、全試験体について曲げ強度試験を行った。

また、拘束解除後の試験体については曲げ強度試験終了後、その試験片を用いて圧縮強度試験を行った。

拘束試験体と拘束解除試験体の曲げ強度の差をケミカルプレストレスと仮定し、一方、参考値として蒸気養生終了時における拘束鉄筋のひずみ量から導入プレストレスを算出し比較検討した。

3. 試験結果および考察

(1) 膨張試験

図-3 (A~E) および図-4 から明らかなように、高スランプの場合自由膨張量はフライアッシュセメントお

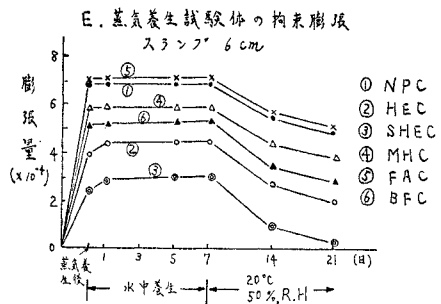
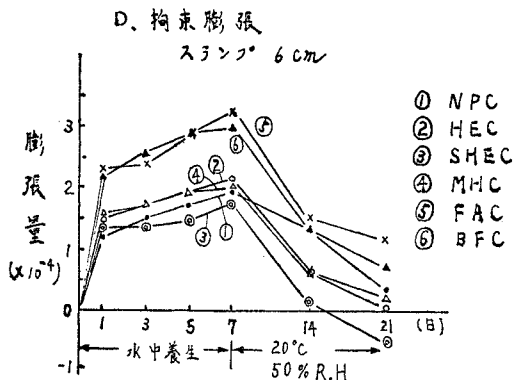
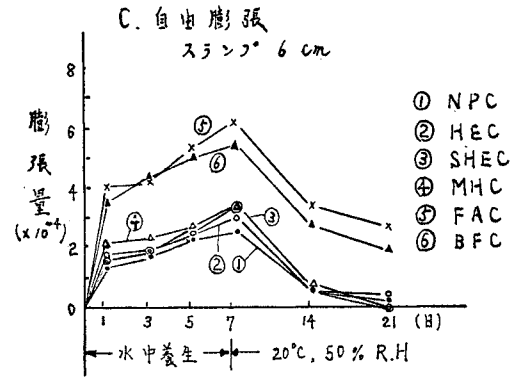
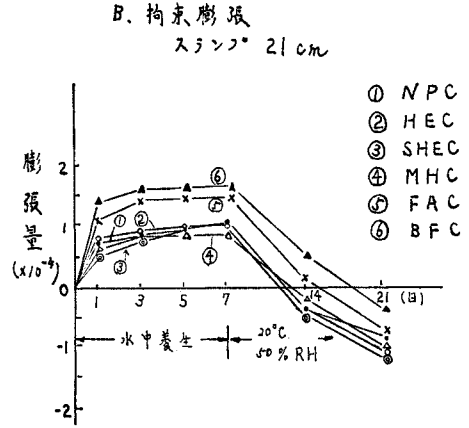
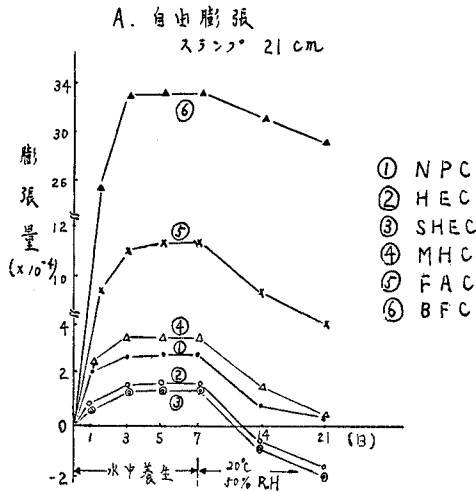


図-3 各種セメントの膨張量

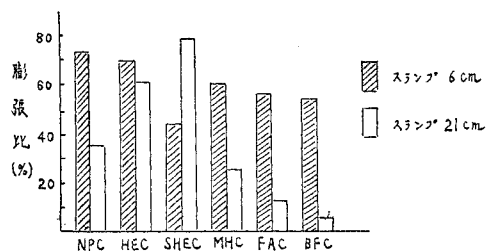


図-4 自由膨張量に対する拘束膨張量の割合

よび高炉セメントが他のセメントに比し著しく大きく、他の4種のセメント(普通セメント、早強セメント、超早強セメント、中庸熟セメント)間には自由膨張量に大きな差はみられない。すなわち、普通セメントの膨張量を基準とした場合フライアッシュセメントは 9×10^{-4} 、高炉セメントは 31×10^{-4} 程度大きな膨張量を示しているが、早強セメント、超早強セメント、中庸熟セメントの自由膨張量は $\pm(0.5 \sim 1.5) \times 10^{-4}$ 程度の差である。

一方、拘束膨張量についてはフライアッシュセメントおよび高炉セメントは他のセメントに比して自由膨張量ほど大きな膨張を示さず、普通セメントを基準にした場合フライアッシュセメントで 0.4×10^{-4} 、高炉セメントで 0.6×10^{-4} 程度膨張量が大きく、その他のセメントの拘束膨張量はほぼ同程度で約 1×10^{-4} である。

低スランブコンクリートの場合、高スランブコンクリートの場合と同様、フライアッシュセメントおよび高炉セメントの自由膨張量は他のセメントに比べて大きい。すなわち、普通セメントの自由膨張量を基準とした場合フライアッシュセメントで 4×10^{-4} 、高炉セメントで 3×10^{-4} 程度大きな自由膨張量を示している。他方、フライアッシュセメントおよび高炉セメント以外のセメント間には自由膨張量に大きな差は認められず、普通セメントの自由膨張量を基準とした場合、 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 程度の膨張量差にとどまっている。拘束膨張量においても低スランブの場合、フライアッシュセメントおよび高炉セメントの膨張量は他のセメントに比していくぶん大きく、普通セメントの拘束膨張量を基準とした場合、フライアッシュセメントおよび高炉セメントとも 2×10^{-4} 程度大きな膨張量を示しているが、他の4種のセメントは $\pm(0.5 \times 10^{-4})$ 程度の膨張量の差にとどまりほぼ同じとみなされる。

高スランブコンクリートの場合、フライアッシュセメントおよび高炉セメントの自由膨張量と拘束膨張量の差は 31×10^{-4} 、 19×10^{-4} と非常に大きい。他の4種のセメントは $0.5 \sim 2.5$ 程度でありその差は小さい。

また、低スランブコンクリートの場合、フライアッシュセメントおよび高炉セメントの自由膨張量と拘束膨張量との差は $(2.5 \sim 3.5) \times 10^{-4}$ 程度であり、高スランブ

の場合に比しその差は著しく小さい。他の4種のセメントの場合その差は $(0.5 \sim 1.0) \times 10^{-4}$ 程度で、高スランブコンクリートと同様その差は小さい。

蒸気養生を行った場合の拘束膨張量は、蒸気養生直後ではほぼ最大膨張量に達しており、その後水中に浸漬してもほとんど膨張しておらず、各種セメントに石灰系膨張材を混和したコンクリートを蒸気養生した場合膨張反応は蒸気養生終了時点でほぼ完了したと思われる。

各種セメント間で蒸気養生直後の拘束膨張量に大きな差がみられ、フライアッシュセメントの膨張量が最も大きく 7×10^{-4} 、ついで普通セメントで 6×10^{-4} 、中庸熟セメント 5.8×10^{-4} 、高炉セメント 5.2×10^{-4} 、早強セメント 3.8×10^{-4} 、超早強セメント 2.3×10^{-4} であった。

また、石灰系膨張材を混和した場合、同種セメントで同配合のコンクリートにおいて、蒸気養生時の拘束膨張量は水中養生時の拘束膨張量に比しきわめて大きな傾向にある。

以上の結果から各スランブのコンクリートとも、高炉セメント及びフライアッシュセメントの膨張量、特に自由膨張量が他種セメントに比し大きい傾向がみられた。

この原因としては、① 高炉およびフライアッシュセメント中における膨張材の水和反応速度および水和反応量の増大(化学的要因)、② 高炉およびフライアッシュセメントの初期強度発現が普通セメントなど他種セメントよりも小さいことによる膨張効果の増大(物理的要因)などが考えられる。①の原因に関してはさらに詳細な実験を行わねば結論を下し得ないが、②の原因に関しては次の事柄が想定される。すなわち、高炉セメントおよびフライアッシュセメントは普通ポルトランドセメントに高炉水滓およびフライアッシュを所定量混和し製造されたものであり、混和された高炉水滓およびフライアッシュは、普通ポルトランドセメントの水和により生ずる水酸化アルカリにより強度を発現(潜在水硬性)するものである。初期の強度が普通セメントなど他種セメントに比して小さいのは当然である。しかるに膨張材は高炉セメントおよびフライアッシュセメント使用量に対して規定百分率で内割混和されるため、上記セメント中の普通ポルトランドセメント量に対する膨張材混和百分率は規定値よりも大きくなるうに、さらに上述したように初期強度発現性が普通ポルトランドセメントなど他種セメントに比べて小さいため、かりに膨張材の水和反応速度および水和反応量が普通ポルトランドセメントと同一であったとしても膨張発現効果は大きくなるのは当然であり、この現象が高炉およびフライアッシュセメントの膨張が他種セメントよりも大きくなる原因の一因をなしているものと思われる。また、蒸気養生時の拘束膨張試験結果からみられるように、早強セメントお

よび超早強セメントが他種セメントに比較して膨張量がきわめて小さな値となっているが、この原因としては膨張材の水和速度とコンクリートの硬化速度が大きく起因しているものと思われ、早強および超早強セメントのように水和の初期段階で強度が著しく大きくなるものでは、膨張力がコンクリートの強度に抑制（自己拘束）されるため膨張量が小さくなるものと推察される。

(2) 圧縮強度試験

図-5 (A), (B) および図-6 より明らかなように、膨張材無混和コンクリートの場合、拘束状態（型枠のまま所定材令までぬれむしろ養生したもの）で養生した試験体の圧縮強度は、無拘束状態（成形 24 時間後脱型したもの）で水中に浸漬した試験体の圧縮強度に比べ、セメントの種類により若干異なるが、 $10\sim 40\text{ kg/cm}^2$ 程度低下しており、これは水分の補給の違いにより生じたものと考えられる。一方、膨張材を混和したコンクリートにおける拘束試験体と無拘束試験体の圧縮強度値は、同種セメント間ではほぼ同程度か拘束試験体のほうがいくぶん大きな値を示している。これは無拘束状態で水中養生

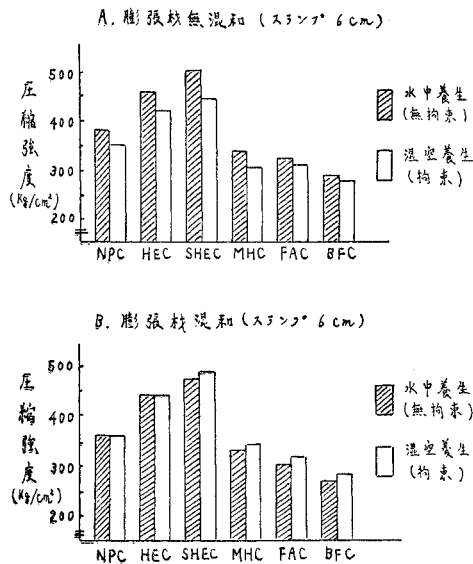


図-5 各種セメントの圧縮強度 (材令 7日)

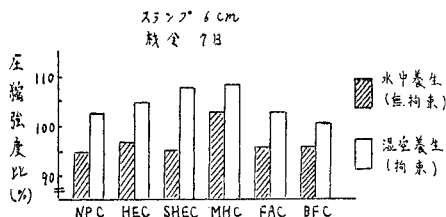


図-6 膨張材無混和コンクリートに対する膨張材混和コンクリートの圧縮強度比

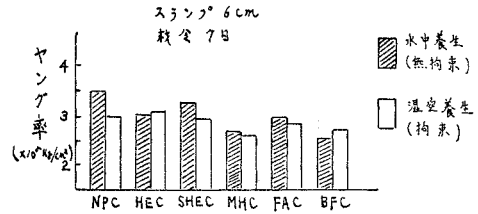


図-7 膨張材混和コンクリートのヤング率

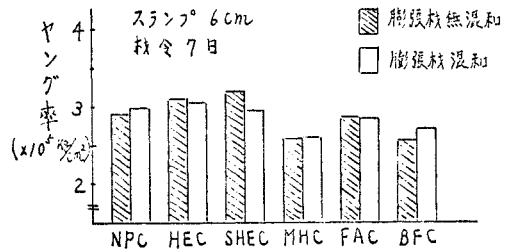


図-8 各種コンクリートのヤング率

を行った試験体のセメント水和強度は型枠養生の場合に比べ十分発現されるが、膨張によりコンクリート内部の組織がルーズとなるのに対して、拘束試験体のセメント水和強度は不十分であるが、膨張力が型枠により拘束される結果、コンクリート内部の組織が圧密されるため強度が増加し、結果として両者の強度間に差が生じなかったものと考えられる。

(3) ヤング率試験

試験結果は図-7, 8 に示すとおりで、セメントの種類によるヤング率の相違がみられるが、同一種類のセメントについては膨張材混和および無混和、並びに養生条件の違いによる影響は小さくほぼ同程度とみなされる。

(4) ケミカルプレスとケミカルプレストレス効果

各種類のセメントに膨張材を混和した場合と混和しなかった場合の拘束試験体の曲げ強度および拘束解除試験体の曲げ強度を表-4 の結果から比較検討してみると、

① 膨張材混和コンクリートの拘束試験体曲げ強度は、いずれのセメントとも膨張材無混和コンクリートの曲げ強度より大きく、その曲げ強度比増は $102\sim 131\%$ であり、フライアッシュセメントがその増大効果は最大で、超早強セメントが最小である。

② 膨張材混和コンクリートの拘束解除試験体の曲げ強度は、高炉セメントを除き膨張材無混和コンクリートより劣り、その曲げ強度比は $79\sim 88\%$ であったが、高炉セメントでは同程度であった。

膨張材混和による強度低下は、膨張によるコンクリート組織の脆弱化および水和強度の相違に起因するものと思われる。また、高炉セメントに曲げ強度の低下が生じ

表-4 各種セメントの拘束試験体曲げ強度

項目 セメントの種類	A 拘束膨張量 ($\times 10^{-4}$)	B 導入プレ ストレス (kg/cm^2)	D-E (kg/cm^2)	曲げ強度 (kg/cm^2)			$\frac{D}{C} \times 100$ (%)	$\frac{E}{C} \times 100$ (%)
				C プレーン 拘束解除	D 膨張材混和 拘束状態	E 膨張材混和 拘束解除		
NPC	6.23	11.9	15.5	66.8	72.2	56.7	108	85
HEC	4.53	8.6	16.3	62.4	65.9	49.6	106	79
SHEC	2.20	4.2	9.5	66.8	68.0	58.5	102	88
MHC	5.03	9.6	15.9	54.6	59.6	43.7	109	80
FAC	6.76	12.9	23.5	58.8	70.6	47.5	120	81
BFC	4.93	9.4	13.0	44.5	58.4	45.4	131	102

ないのは膨張試験結果の考察の項でも述べたとおり、自由膨張量に対して拘束膨張量が小さいことから考えて、高炉セメントでは膨張材の圧密効果が大きく作用したため、ならびに膨張材中の膨張性酸化カルシウムが高炉セメントの潜在水硬性をより刺激して、強度発現性を増大させたためと考えられる。

③ 膨張材混和コンクリートでは、いずれのセメントの場合も拘束試験体の曲げ強度が拘束解除試験体の曲げ強度より大きく、その差をプレストレスとみれば $9.5 \sim 23.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ となり、フライアッシュセメントが最大で超早強セメントが最小であった。

以上の試験結果から考えて、膨張材混和コンクリートの拘束試験体の曲げ強度が大きいものは普通セメント、超早強セメントおよびフライアッシュセメントであり、特にフライアッシュセメントの場合は、実質的なコンクリート強度は大きく低下するが、大きなケミカルプレストレスの導入により拘束試験体の曲げ強度が増加して、膨張材の混和効果が最も大きくなるといえよう。

また、膨張材混和コンクリートの拘束解除試験体の圧縮強度試験結果を表-5 に示すが、曲げ強度の場合と同様に高炉セメントを除いては、膨張材を混和しないコンクリートに比べ $86 \sim 90\%$ の強度低下を生じているが、曲げ強度に比較するとその低下率は小さい。

4. ま と め

本実験は製造銘柄および製造工場が単一のセメントを使用して実施したものであり、本実験結果をもって全般的な結論に及ぶことはできないが、本実験範囲内で得た結論をまとめるとおおむね次のとおりとなる。

(1) 水中養生時の自由膨張および蒸気養生時の拘束膨張性状には各種セメントの間で大きな差が認められるが、水中養生時の拘束膨張性状には大きな違いは認められない。

(2) 各種セメントに石灰系膨張材を混和したコンクリートの圧縮強度は、通常の養生方法 (JIS A 1132) においては中庸熱セメントを除きいくぶん低下の傾向にあるが、型枠で拘束した状態で養生した場合にはほぼ同程

表-5 各種セメントの拘束試験体圧縮強度

項目 セメントの種類	圧縮強度 (kg/cm^2)		$\frac{B}{A} \times 100$ (%)
	A プレーン 拘束解除	B 膨張材混和 拘束解除	
NPC	316	283	90
HEC	403	373	93
SHEC	437	429	98
MHC	257	239	93
FAC	287	246	86
BFC	214	247	115

度であった。膨張コンクリートの圧縮強度試験に際してはその特殊性（無拘束状態では膨張によりコンクリート組織がルーズとなり強度が低下する性質）を考慮して、型枠などによる拘束状態で試験体を養生することが望まれる。

(3) 各種セメントコンクリートの拘束試験体のヤング率は圧縮強度と同様、膨張材混和による影響は認められない。

(4) フライアッシュセメントは普通セメントに比較して膨張材混和によるケミカルプレストレス効果がきわめて大きく、今後この特徴を生かした利用法が注目されよう。なお、膨張材混和によるケミカルプレストレス効果の大きなセメントは、フライアッシュセメント>早強セメント>中庸熱セメント>普通セメント>高炉セメント>超早強セメントの順であった。

5. おわりに

本試験結果からは膨張材を混和して鉄筋にケミカルプレストレスを導入することにより、コンクリートの曲げ強度を改善し得ることが確認された。しかし、反面、拘束状態においても膨張量が過大になるとコンクリートの組織が著しくルーズとなり、コンクリート自体の強度が低下するので、ケミカルプレストレス導入による曲げ強度の改善にも自ずと限度があることもうかがいしれた。この件に関しては、今後膨張材混和率を種々変化させた場合のケミカルプレストレス量、曲げ強度およびコンクリート自体の強度を測定し明確化させていきたい。

最後に、本研究が膨張材の用途開拓に関する関係諸氏の一助になればと願う次第である。(1973.9.17・受付)