

膨張コンクリートの拘束膨張，収縮特性に及ぼす
使用材料の影響THE INFLUENCE OF COMPOSED MATERIALS ON THE EXPANSION
AND SHRINKAGE PROPERTIES OF EXPANDING CONCRETE

戸 川 一 夫*・中 本 純 次**

By Kazuo TOGAWA and Junji NAKAMOTO

1. 本研究の目的

膨張コンクリートの拘束膨張，収縮特性はコンクリートの配合条件，使用セメント種類，混和剤種類，骨材種類とその使用量，膨張材種類とその使用量，拘束条件，練り混ぜ時間，養生条件等多数の要因によって影響されることはこれまでの多数の研究報告から知ることができている。膨張，収縮特性に及ぼすこれらの要因の影響に関して，これまでの報告はほとんど巨視的な現象のみをとらえたものが多い。またこれら個々の要因が膨張，収縮特性に及ぼす影響に関して一致した結論が得られていない事例も多く見受けられる。

膨張セメントペースト硬化体の内部組織あるいは膨張力源となる水和反応生成物ならびにその物性に関する研究はしだいに進展し，それとともに膨張コンクリートの膨張機構も論議され，膨張さらには収縮特性についての巨視的な現象を理解するための糸口となりつつある。

本研究は膨張コンクリートをケミカルプレストレストコンクリートとして使用することを目的として，コンクリートの配合条件，セメント種類，混和剤種類および骨材種類の各種要因と膨張ならびに収縮特性との関係を巨視的に明らかにするとともに，これらの関係をコンクリート供試体中に埋め込んだ同配合のペーストの内部組織と水和反応生成物，あるいは供試体の重量変化特性と関連づけて微視的に考察し，それとともに膨張機構についても論じるものである。

表一 膨張材の化学成分

比重	粉末量 (cm ³ /g)	強熱 減量	化 学 成 分 (%)						
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	合計
2.87	3.950	0.8	4.0	10.0	1.0	51.2	0.6	31.9	99.5

* 正会員 工博 和歌山工業高等専門学校助教授 土木工学教室

** 正会員 和歌山工業高等専門学校助手 土木工学教室

2. 実験概要

(1) 使用材料およびコンクリートの配合条件

セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材は和歌山県日高川産川砂（比重 2.55，吸水率 2.46%，粗粒率 2.82），粗骨材は和歌山県由良産硬質砂岩碎石（最大寸法 20 mm，比重 2.61，吸水率 1.68%，粗粒率 5.23）を主として用いた。用いた膨張材はカルシウムサルホアルミネート系のものであり，その化学成分を表一に示す。

本実験では C+E=400，W=180，S=737，G=1002 kg/m³ で，普通ポルトランドセメント，川砂，碎石を使用し，混和剤無添加，単位膨張材量 E=60 kg/m³ の配合を基準膨張コンクリートと称し，E=0 のものを普通コンクリートとよぶことにする。基準膨張コンクリートは水中養生してケミカルプレストレストコンクリートとして十分な膨張力が得られ，材令 28 日の無拘束での圧縮強度が普通コンクリートのそれと比較して，低下しないではほぼ同程度得られる配合である。

セメント種類と膨張特性等との関係を調べるシリーズでは，超速硬セメント，アルミナセメント，超早強，早強，中庸熟の各種ポルトランドセメント，B種フライアッシュセメントおよびB種高炉セメントを用意した。混和剤種類と膨張特性との関係を検討するシリーズではレジン系のAE剤，リグノスルホン酸塩系のそれぞれ減水剤標準型，減水剤促進型，減水剤遅延型あるいはポリオールリグノスルホン酸塩複合体系減水剤およびナフタリンスルホン酸塩系の高性能減水剤各1種類を準備した。骨材種類と膨張特性との関係を知るシリーズでは造粒型の人工軽量細，粗骨材を1種類用い，細，粗骨材ともに2つの異なる含水状態のものを準備した。

本実験で用いたコンクリートの示方配合を表二に，使用セメントの化学成分を表三に，人工軽量骨材の含

水状態を表-4にそれぞれ示す。

(2) 供試体形状寸法と作製方法

長さ変化測定用供試体はφ10×40 cmの円柱供試体で

あり図-1に示す。供試体はその中心部にワイヤストレーンゲージを貼付する部分(60 mm)を除いて全長ねじ切りを施したPC鋼棒を配置し、両端板を内外各2個のナットで固定している。なお、軸直角方向を2本のスチールリング(外径89 mm, 肉厚3 mm, 幅10 mm)で拘束しているが、軸方向の膨張ならびに収縮ひずみには影響しないことを予備実験で確認している。

表-2 コンクリートの示方配合

	目標スランプ (cm)	水結合材比 W/C+E (%)	単 位 量 (kg/m ³)					備 考
			水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	
基配 準合	7.5±1	45	180	400	0	737	1002	普通コンクリート
	7.5±1	45	180	340	60	737	1002	基準膨張コンクリート
配合 条件 シ リ ー ズ	7.5±1	45	180	356	44	737	1002	単位膨張材量 E=44 kg/cm ³ で 単位水量変化シリーズ
	—	60	240	356	44	691	940	
	—	75	300	356	44	625	850	単位水量変化シリーズ
	—	60	240	340	60	691	940	
	—	75	300	340	60	625	850	
	—	60	180	240	60	793	1075	単位セメント量変化 シリーズ
	—	36	180	440	60	722	981	
混 和 剤 シ リ ー ズ	7.5±1	43	171	337	60	705	957	AE 剤使用 0.04%
	7.5±1	42	158	316	60	770	1045	減水剤標準型使用 0.25%
	7.5±1	42	158	316	60	770	1045	減水剤遅延型使用 0.25%
	7.5±1	40	158	340	60	762	1034	減水剤促進型使用 0.5%
	7.5±1	41	162	340	60	758	1028	高性能減水剤使用 0.6%
	7.5±1	43	160	316	60	768	1042	ポリオール系減水剤使用 940 cc/m ³
人骨工 材 量 シ リ ー ズ	—	45	180	340	60	556	537	軽量骨材組合せA
	—	45	180	340	60	556	545	軽量骨材組合せB

すべての配合で粗骨材最大寸法は 20 mm, 細骨材率は 43%, 空気量は AE 剤使用の場合を除いて 2%, AE 剤使用の場合は 6%, である。
備考欄で混和剤の添加割合は C+E に対する重量割合 (%) である。
人工軽量骨材の単位容積は川砂, 砕石の単位容積と等しくしている。

コンクリートの練り混ぜは強制練りミキサーを使用した。セメントと膨張材はミキサー投入前にあらかじめよく混ぜ合わせておき, 全材料投入後3分間練り混ぜた。

供試体はコンクリート打込み後から濡れ布とビニールシートにくるんで養生室内(20±2°C)で密封養生し, 材令1日で脱型してただちに所定の養生を開始した。

供試体は同一条件のものを3体用意し, 結果の整理には3体の供試体の平均値を用いた。

供試体はコンクリート打込み後から濡れ布とビニールシートにくるんで養生室内(20±2°C)で密封養生し, 材令1日で脱型してただちに所定の養生を開始した。

(3) 養生方法

水中養生とは 20±2°C の水中での養生, 乾燥養生とは室温 20±2°C, 相対湿度 50%

表-3 使用セメントの化学成分 (%)

セメント種類	強熱減量	不溶残分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	合計
普通ポルトランドセメント	0.6	0.1	22.0	5.2	3.2	65.5	1.3	1.7	99.6
早強セメント	0.8	0.1	21.2	4.9	2.8	64.9	1.5	3.0	99.4
超早強セメント	1.0	0.1	21.0	4.9	2.8	64.8	1.2	3.6	99.4
中庸熟セメント	0.5	0.1	23.0	4.9	4.2	63.6	1.4	1.8	99.5
B種高炉セメント	0.6	0.4	26.0	9.5	2.1	56.1	2.4	2.2	99.3
B種フライアッシュセメント	0.7	11.8	20.5	5.4	2.7	54.9	1.2	2.1	99.3
超速硬セメント	0.8	0.3	13.7	10.8	1.7	58.6	0.7	11.3	97.6
アルミナセメント	—	—	5.0	52.5	2.0	37.6	0.4	0	*—

* アルミナセメントは酸化チタンを 2.0% 含んでいる。

表-4 人工軽量骨材の比重, 含水率

組合せ	骨材区分	使用時	
		比重	含水率 (%)
A	細骨材	1.92	6.70
	粗骨材	1.40	3.08
B	細骨材	1.92	9.96
	粗骨材	1.42	17.70

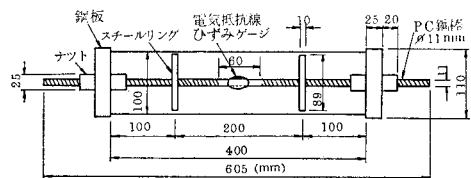


図-1 供試体

の空調室での養生，密封養生とは供試体脱型後ビニールシートで供試体を密封し，空調室（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）での養生である。

（４）長さ変化測定方法

供試体の長さ変化は PC 鋼棒に貼付した 2 枚のワイヤストレインゲージ（ゲージ長 5 mm）によって，コンクリート打込み直後を基長として測定した。

（５）空隙量測定方法

ペーストの空隙量測定には水銀圧入式ポロシメーター（最高圧力 2100 kg/cm^2 ）と窒素吸着法を用いた。

（６）X線回折方法

X線回折の測定条件は下記のとおりである。

Slit : 1-1-0.5, Range : 400 cps, Time Constant : 2 s, Scanning Speed : $1^\circ/\text{min}$, Chart Speed 10 mm/min , 35 kV, 15 mA, Target : Cu, Filter : Ni, Detector : Sd

X線回折データの整理方法は一般によく用いられるピーク強度（mm）を採用した。試料は調整条件を一定にするためにめのうばちで粒が手先に感じない程度にすりつぶした。X線回折条件は上述したように一定にし，回折結果について相対的な比較ができるようにし，内部標準による検討は行っていない。

（７）熱分析方法

熱分析には示差熱天秤を使用した。測定条件は昇温速度 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ， $\text{DTA} \pm 100 \text{ mV}$ である。エトリンサイトは 150°C 付近をピークとして 130°C あたりから脱水し始め， 165°C 付近で脱水し終わるので，その間の積算重量減少量を読み取った。

（８）電子顕微鏡写真撮影

電子顕微鏡は走査型電子顕微鏡を使用し，試料は金蒸着を施した。

なお（５）～（８）の項目について測定に供した試料は次のようにして採取したものである。長さ変化測定用供試体（同一条件のものにつき各 1 本）表面部に使用コンクリートと同一水結合材比のペースト 100 g をビニール袋に入れて，袋の口を結んでコンクリート打込み時に埋め込んでおき，ビニール袋の口は材令 1 日で破り，コンクリート部と同一の養生条件とし，所定の材令で所定量のペーストを割り取り，3 時間真空脱気した後アセトン液に浸漬して保存した。その後，空隙量測定用試料は 48 時間真空脱気し，さらに 80°C の高温箱の中に 2 時間入れた後，測定時までデシケータの中に保存した。また X 線回折，熱分析，電子顕微鏡写真撮影に用いる試料はア

セトンを吸引る過して，さらにアセトンで洗った後，デシケータ中で 5 時間真空脱気して測定まで存置した。

なお，供試体中にペーストを埋め込んでも，コンクリートの長さ変化には影響が認められなかった。

（９）供試体重量測定方法

重量測定には卓上台秤（秤量 20 kg，最小目盛 1 g）を用いた。

3. コンクリートの配合条件が膨張，収縮特性に及ぼす影響

膨張コンクリートの膨張特性とコンクリートの配合条件との関係に関しては多数の報告があるが，次の点で結論が異なっている。

辻¹⁾，門司ら²⁾あるいは楠元ら³⁾はコンクリートの配合が異なっても一定の範囲内では，自由膨張率ならびに拘束膨張率はともに単位膨張材量に一義的にほぼ比例している。これに対して，ACI の報告⁴⁾では自由膨張の場合，単位膨張材量が一定でも単位水量が変化すれば，膨張率は相違し，単位水量が多いと膨張率は大きくなり，同じような結果がプレストレストコンクリート技術協会の報告⁵⁾にもみられ，単位膨張材量が一定でも水セメント比が大きいのほど膨張率は大きくなっている。また拘束膨張の場合，長滝ら⁶⁾は単位膨張材量が一定でも水セメント比が小さいと膨張率は大きくなると報告している。

膨張コンクリートの乾燥収縮に関するこれまでの報告は普通コンクリートと比較して低減することで一致しているが⁷⁾，その理由については詳細な考察はなされていないようである。

ここでは単位膨張材量を $E=60 \text{ kg/m}^3$ と $E=44 \text{ kg/m}^3$ の一定とした場合の拘束膨張率および収縮率に及ぼす単位水量あるいは単位セメント量の影響を調べた。その結果を図-2, 3 に示す。

単位セメント量を一定にして，単位水量を 180, 240, 300 kg/m^3 と変化させると，図-2, 3 に示すように単位膨張材量 $E=60 \text{ kg/m}^3$ と $E=44 \text{ kg/m}^3$ とともに，膨張率は単位水量が多くなるに従って低減し，また単位水量を一定にして，単位セメント量を 240, 340, 440 kg/m^3 と変化させると，図-2 にみられるように単位セメント量が増加すると膨張率も増加することが示された。また水結合材比が 60% と同じでも，単位セメント量が多いと膨張率は大きくなる傾向がある（図-2 参照）。

骨材量が減少すれば膨張率は増加することが明らかにされている^{8), 9)}。しかし，本実験では単位水量が増加して骨材量が減少しても膨張率は増加しないで逆に減少す

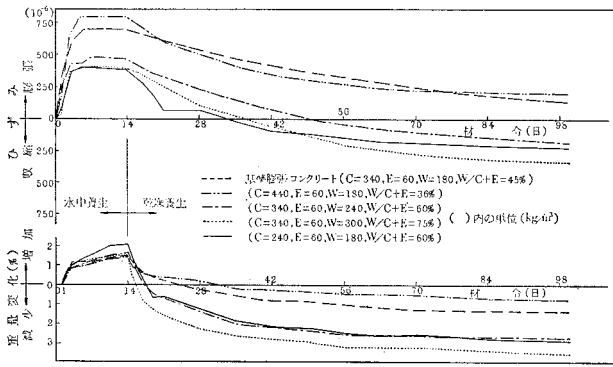


図-2 拘束膨張率に及ぼす配合条件の影響

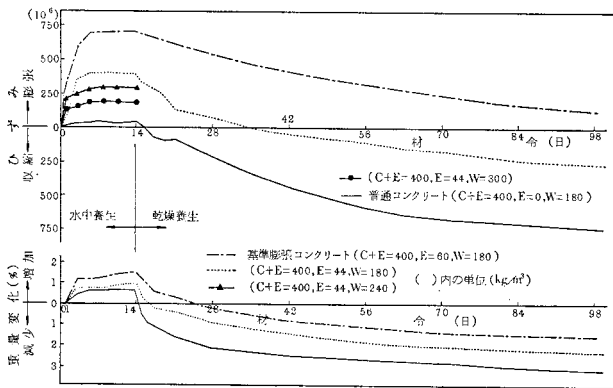


図-3 拘束膨張率に及ぼす配合条件の影響

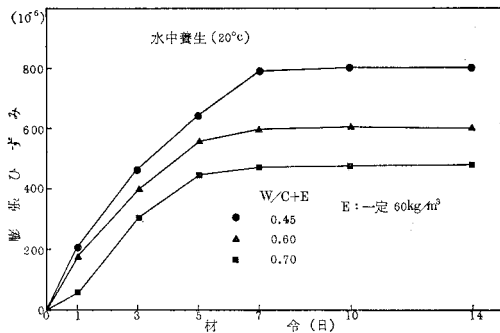


図-4 膨張セメントペーストの膨張特性に及ぼす水結合材比の影響

るのである。したがって、本実験内では、膨張率に関しては骨材量よりもセメント硬化体の強度特性の影響の方が大きく、セメントペースト硬化体の強度が高いものほど拘束膨張率は大きくなる傾向にあることがわかった。言い換えれば、拘束膨張について拘束鋼材あるいは骨材を膨張力拘束要因と考え、それに抗するセメントペースト部分を膨張反力支持要因とすると、支持要因の強度が高いほど拘束膨張率は大きくなるといえるのである。

ちなみに、膨張材の容積割合を一定にして、水セメン

ト比を変えた膨張セメントペーストの膨張特性を調べた。供試体は JIS A 6202¹⁰⁾ の膨張材のモルタルによる膨張性能試験方法に規定されている一軸拘束器具(拘束筋比0.6%)を用いている。その結果を図-4に示す。結果より膨張材量は一定でも膨張率は相違し、膨張率は一義的に膨張材量によって定まるとはいえないようである。長滝ら⁶⁾の結果と同様に膨張材量が一定でも水セメント比が小さいほど膨張率は大きくなった。

膨張コンクリートの相対収縮率(最大膨張時からの収縮量)については、単位水量が多くなると大きくなり、単位水量が等しければ、単位セメント量が異なっても相対収縮率にはほとんど差が認められないことが図-2, 3から読み取れる。さらに単位水量が多いとまた単位セメント量が少ないとコンクリートが収縮側になる材令が早くなる傾向がある。基準膨張コンクリートは普通コンクリートと比べて、相対収縮率は小さく、約80%程度であり、これまでの報告⁷⁾とよく似た傾向である。基準膨張コンクリートの配合と比較して単位膨張材量のみが少なく、他の配合条件は同じの $E=44 \text{ kg/m}^3$ の膨張コンクリートは基準膨張コンクリート ($E=60 \text{ kg/m}^3$) と比べて、膨張率は小さく、相対収縮率は若干大きく、普通コンクリートとの中間になっている(図-3参照)。

普通コンクリートの乾燥収縮は多数の要因に影響されることは衆知のことであるが、コンクリート中の水分逸散特性と乾燥収縮特性の間には密接な関係があることはこれまでの報告^{11)~15)}で明らかにされている。

単位膨張材量 $E=60 \text{ kg/m}^3$ で単位水量等の異なる膨張コンクリートの材令1日からの重量変化に関する実験結果を図-2に示す。実験結果から膨張コンクリートは単位セメント量が一定のとき、単位水量が増加すると重量減少量(最大重量からの減少量)は多くなることが認められた。したがって、膨張コンクリートの相対収縮率とここでのトータルの水分逸散量を一義的に結びつけることは無理であるとしても、膨張コンクリートの乾燥収縮特性に関しても普通コンクリートの場合にいわれているように¹³⁾、乾燥収縮特性は単位水量と強く関係しているようである。実験数が少ないので明確なことはいえないが単位セメント量が等しい場合では単位水量が多いと水分逸散量も多く乾燥収縮も大きくなる傾向がみられる。

基準膨張コンクリートと普通コンクリートの重量変化特性を比較(図-3参照)すると、膨張コンクリートの方が普通コンクリートよりも重量減少量は少なく75%程度であり、膨張材の使用が乾燥時のコンクリートの重

量減少の低減に効果を発揮することがわかる。

4. 膨張に寄与する水和反応生成物とその特性

膨張コンクリートの膨張力源については、トポケミカルな反応による微結晶性のエトリンガイトの形成とCaOがCa(OH)₂になったときの結晶成長圧との2つが主要因であると考えられており^{19)~19)}、もっかのところこの説が有力視されつつあるが、膨張コンクリートの長期間の膨張ならびに収縮特性を明確にするに際しては、膨張力源となる化合物を究明するとともに、化合物の特性を十分把握しておく必要があると考えられる。これまでの研究ではエトリンガイトの結合水はそれを取りまく雰囲気によっては脱離しやすい場合のあることや^{20), 21)}、エトリンガイトが炭酸化することも確認²²⁾されており、またCa(OH)₂の炭酸化も考えられるので、こ

れら化合物の特性が膨張、収縮挙動に与える影響を明確にしておく必要がある。

本実験では基準膨張コンクリートと普通コンクリートについて、それぞれのペースト分のX線回折と熱分析を行った。実験結果を図-5, 6に示す。供試体は材令14日まで水中養生し、その後乾燥養生している。

膨張コンクリートの水中養生期間中のエトリンガイトの生成特性について、X線回折で検出される結晶性のエトリンガイトの生成量は材令1日ではほぼピークに達してしまいその後増加の傾向はみられない。これに対して熱分析からはエトリンガイトの生成量は材令とともに増加することがわかる。熱分析で確認されるエトリンガイトはX線的に結晶性のものと、X線的に結晶性でない微結晶性のものとの両方である。膨張コンクリートの結晶性のエトリンガイトは材令1日から増加する傾向がみられないので、結晶性のエトリンガイトの生成特性は膨張曲線とは対応しないようである。したがって、膨張に寄与するエトリンガイトは磯貝ら¹⁷⁾も報告しているようにX線的に結晶性でない、いわゆる微結晶性のエトリンガイトではないかと考えられる。

また図-6には基準膨張コンクリートと配合条件の異なる膨張コンクリートのエトリンガイトの熱分析による生成特性を示しているが、単位膨張材量が44 kg/m³と少ない場合は60 kg/m³の場合と比べて、エトリンガイトの生成量は少ない。しかしながら、単位膨張材量がE=60 kg/m³と等しいものについて比較すると単位水量あるいは単位セメント量が相違してもエトリンガイトの生成量はほぼ同程度であることがわかる。したがって、配合条件が異なると膨張率が相違したことからすると膨張コンクリートの膨張特性は膨張性水和物の生成量だけではなく、前章で述べたように膨張反力支持要因としてのペーストの強度も関係してくると推測できる。

普通コンクリートでは図-5にみられるようにX線回折で結晶性エトリンガイトは材令1日で少量検出できるが、以後の材令ではまったく検出できない。また、図-6にみられるように熱分析によってもエトリンガイトは材令を通じて検出されないのである。

次に材令14日から乾燥養生し材令100日におけるエトリンガイトの生成特性は膨張コンクリートでは熱分析ならびにX線回折からエトリンガイトは前者では一定、後者では減少している(図-5, 6参照)。したがって結晶性のエトリンガイトは非晶質化しやすいようである。いずれにしてもエトリンガイトは31~32 H₂Oを結合水とするのでエトリンガイトの残存する膨張コンクリートはエトリンガイトが検出されない普通コンクリートよりも水分の逸散が少なく乾燥収縮が小さくなると考えられる。

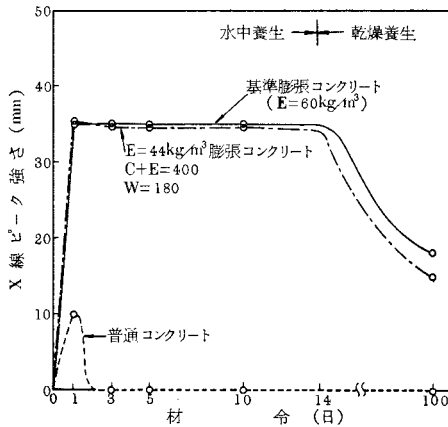


図-5 各種ペーストのエトリンガイト (2θ=9.1°) のX線回折結果

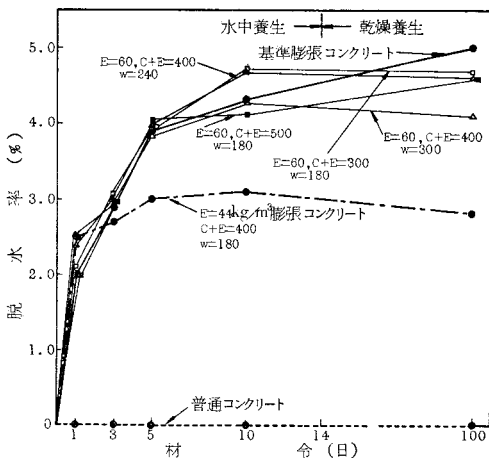


図-6 各種ペーストのエトリンガイトの脱水率(%) (熱分析結果)

表一5 各種膨張セメントペーストの X 線回折，熱分析結果

供試体種類	測定日の養生条件	測定日の材令(日)	X 線 強 さ (mm)			熱分析脱水率 (%)	
			エトリン ガイト 2θ=9.1°	Ca(OH) ₂ 2θ=18.1°	Ca(OH) ₂ 2θ=34.2°		
基準シリーズ	普通コンクリート C=400, E=0 W=180	一水乾 1 10 100	10 0 0	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	120 144 132	0 0 0	
	基準膨張コンクリート C+E=400, E=60 W=180	一水乾 1 10 100	35 10 25	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	105 155 148	2.0 4.3 5.0	
配合条件シリーズ	C+E=400, E=44 W=180	一水乾 1 10 100	36 35 15	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	150 165 160	95 144 144	2.5 3.1 2.8
	C+E=400, E=60 W=240	一水乾 1 10 100	35 30 10	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	110 160 165	110 141 141	2.4 4.7 4.6
	C+E=400, E=60 W=300	一水乾 1 10 100	38 38 17	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	90 125 157	90 82 82	2.5 4.3 4.1
	C+E=300, E=60 W=180	一水乾 1 10 100	37 35 10	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	102 128 155	102 110 110	2.1 4.7 4.7
	C+E=500, E=60 W=180	一水乾 1 10 100	35 37 16	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	185 178 178	110 160 142	2.0 4.1 4.6
セメント種類シリーズ	B種高炉	一水乾 1 10 100	60 58 54	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	100 115 100	100 100 100	2.6 4.6 4.6
	B種フライアッシュ	一水乾 1 10 100	58 55 40	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	95 130 125	95 130 125	3.9 4.1 4.9
	中庸熱	一水乾 1 10 100	58 52 34	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	100 175 176	100 175 176	2.4 5.1 4.6
	早強	一水乾 1 10 100	50 50 45	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	111 188 180	111 188 180	2.8 4.7 4.1
	超早強	一水乾 1 10 100	57 54 45	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	120 125 95	120 125 111	2.7 5.0 4.6
	超速硬	一水乾 1 10 100	133 122 72	25 37 38	22 55 56	11.9 10.0 7.5	
	アルミナ	CaSO ₄ ・2H ₂ O 添加率 (%) 0 10 25	水水水 14 14 14	0 0 10	0 0 0	0 0 0	0 0 0
B種高炉	CaSO ₄ ・2H ₂ O 添加率 (%) 0 10 25	水水水 14 14 14	50 55 40	スケールオーバー 50 40	120 40 26	5.5 5.6 3.9	
混和剤シリーズ	AE 剤	一水乾 1 10 100	54 51 40	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	105 158 160	105 170 170	1.5 4.6 3.6
	減水剤標準型	一水乾 1 10 100	67 61 45	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	105 165 160	105 165 160	1.6 5.1 4.9
	減水剤遅延型	一水乾 1 10 100	56 56 33	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	100 167 167	100 167 167	1.1 5.2 4.6
	減水剤促進型	一水乾 1 10 100	62 67 40	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	125 172 155	125 165 165	2.2 5.1 4.7
	減水剤 (ポリオール系)	一水乾 1 10 100	54 54 45	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	106 155 157	106 160 160	1.2 4.7 4.3
	高性能減水剤	一水乾 1 10 100	62 67 40	スケールオーバー スケールオーバー スケールオーバー	125 172 155	125 172 150	2.2 5.1 4.8

測定日の養生条件 水：水中養生
乾：乾燥養生

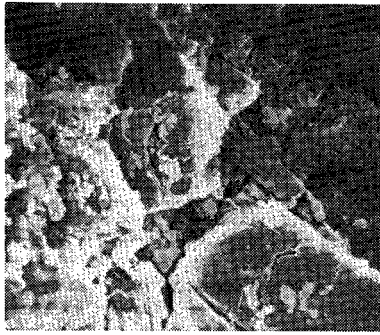
すべての供試体は材令 14 日まで水中養生し，以後乾燥養生している。

Ca(OH)₂ の生成特性について，表一5 に示す。基準膨張コンクリートと普通コンクリートの Ca(OH)₂ の生成量はほぼ同量であり，材令 14 日までの水中養生期間中は材令とともに増加するが，乾燥養生した材令 100 日の時点では若干減少している。また，膨張コンクリートは配合条件が変わっても Ca(OH)₂ の生成量にはほとんど差異が認められない。したがって X 線回折では Ca(OH)₂ が膨張に寄与しているかどうかは判断できない。しかしながら普通コンクリートではセメント中の C₃S が水和反応して溶け出した Ca イオンが Ca(OH)₂ になるので，このときは結晶圧は生じないのである。

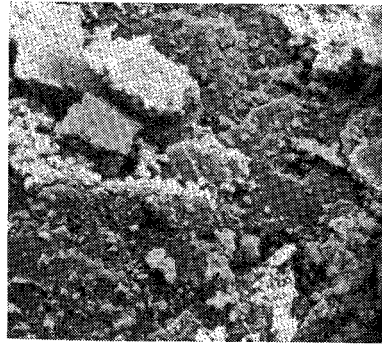
Ca(OH)₂ の結晶形態に関して写真一1 をみると，普通コンクリートでは薄片状にべったりと広がっているのに対して，膨張コンクリートでは大きな塊となって他の水和生成物を押しつけるようにして存在し，塊のところどころに結晶がはじけたような亀裂の発生がみられ，結晶成長の勢いが読み取れ，Ca(OH)₂ が膨張に寄与しているように推測できる。

5. 膨張セメントペーストの空隙分布特性

エトリンガイトあるいは Ca(OH)₂ はいずれもそれらの水和系全体の容積率はマイナスとなり，収縮することになるが，これらの反応によって膨張現象が起こされたとすると，膨張材粒子表面にできる水和物は水和に消費された成分のあった場所を単純に充填していくのではなくて，これらの一部は空隙として残り，さらに既成の水和物を



(基準膨張セメントペースト (×3500))



(普通セメントペースト (×3500))

写真-1 ペーストの電子顕微鏡写真

ことは膨張機構を解明するうえで、またコンクリートのマクロな強度特性，弾塑性的性質さらには乾燥収縮特性を解明していくうえにも有用である。

図-7 には一例として基準膨張コンクリートと普通コンクリートの水銀圧入式ポロシメーターによる空隙分布測定結果を示している。供試体は材令 14 日まで水中養生し以

後乾燥養生している。押し広げながら生成すると考えるのが妥当であり，膨張機構に関するこの説は山崎ら²³⁾によって提唱されたものである。

膨張セメントペーストの空隙分布特性に関して，これまで山崎ら²³⁾，磯貝ら²⁴⁾，村田ら²⁵⁾，小林ら²⁶⁾あるいは Benter ら²⁷⁾の報告がある。山崎らおよび Benter らは自由膨張の場合に膨張コンクリートの全空隙量は普通コンクリートのそれと比べて多くなり，膨張量は空隙量に比例するとしている。磯貝らは自由膨張の場合，水中養生では膨張材量が多くなるほど全空隙量は多く，膨張すると細孔直径 75~1400 Å の細かい毛細管空隙の増加を伴い，乾燥養生では水中養生の場合より空隙量は多くなるが，普通コンクリートと比べて膨張コンクリートの空隙量は少なくなり，そのとき毛細管空隙は減少するが，逆にゲル空隙は増加する傾向があると報告している。

拘束膨張の場合，村田らは細孔直径 750 Å 以下の空隙は普通コンクリートよりも少なくなると述べている。小林らは拘束膨張量と空隙量との関係について膨張量が大きくなるほど空隙量は少なくなり，膨張量の少ないものの粗い空隙が多くなると報告している。

このように膨張コンクリートの空隙特性については研究者間で異なった結果が得られているようであり，今後より詳細な検討を必要とする。特に空隙分布特性を知る

こと膨張機構を解明するうえで、またコンクリートのマクロな強度特性，弾塑性的性質さらには乾燥収縮特性を解明していくうえにも有用である。

基準膨張コンクリートと普通コンクリートを比べてみると，膨張コンクリートは材令 10 日，100 日の全空隙量は普通コンクリートよりも多く，そのうち細孔直径 300 Å 以下の空隙量は少ないが 300~20000 Å までの空隙量が常に多いことが注目される。したがって，膨張コンクリートは 300 Å 以上の粗い空隙を多量につくりながら膨張することが明らかにされたわけである。なおこのような傾向は，以下に述べる減少特性も含めて著者らの多数の実験結果で認められているのである。

材令の経過に伴う空隙分布特性の推移については膨張コンクリート，普通コンクリートともに材令の経過とともに全空隙量は減少し，減少の量的程度は膨張コンクリートの方が著しく，膨張コンクリートでは直径 300 Å 以下の空隙量は一定かごくわずか増加するが，300 Å 以上の空隙は大幅に減少する。普通コンクリートでは 300 Å 以下の空隙量は若干増加し，300 Å 以上の空隙量は減少するが，減少の量的程度は膨張コンクリートほど著しくない。

膨張コンクリートが普通コンクリートよりも材令の経過に伴う空隙の減少の程度が著しいことについては膨張コンクリートではセメント水和物のほかに液相反応によるエトリングが材令の経過とともに空隙を埋めていくことと²⁴⁾，拘束圧のもとで機械的に粗い空隙がつぶされていくことによると推測している。

室素吸着法によって求めたペーストの細孔直径 60 Å 以下の空隙分布特性についてその一例を図-8 に示す。実験結果より基準膨張コンクリートは普通コンクリートよりもそれらペーストの細孔直径 20 Å ~ 55 Å の空隙量は少ないことが明らかである。しかも材令が経過するとその傾向はより顕著になることがわかる。

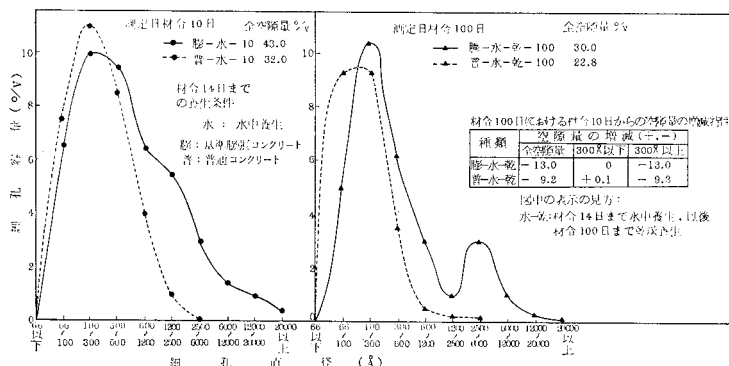
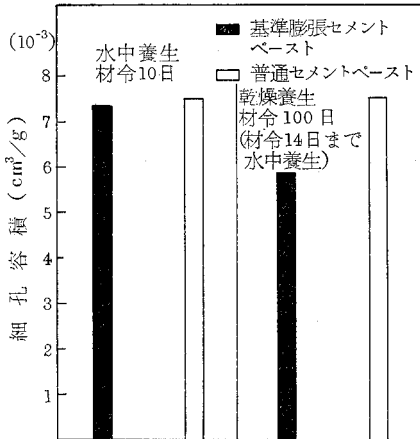


図-7 ペーストの細孔径分布特性の一例 (水銀圧入法)



図一八 窒素吸着法によるセメントペーストの細孔容積 (細孔直径 20~55 Å)

コンクリートの乾燥収縮は先にも述べたように水分の逸散特性と細孔分布特性に強く関係し、より小さい細孔から水分が逸散すると収縮力はより強くなるといわれている¹²⁾。本実験の場合、乾燥養生中の相対湿度は50%なので細孔直径約32 Å以上の細孔から水分が蒸散することになる¹²⁾。膨張コンクリートは普通コンクリートと比べて66~300 Åさらには20~55 Åの細孔径の空隙が少ないことが明らかになったので、すべての空隙に水が満たされているとすれば、膨張コンクリートは普通コンクリートよりも水分逸散に伴う収縮力は小さくなることが定性的にいえる。

6. セメント種類が膨張、収縮特性に及ぼす影響

膨張特性はそのセメントの化学成分、粉末度、さらにはコンクリートの強度発現速度と膨張力源となる水和生成物の生成速度と生成量との相互関係、あるいはセメントが同一でも膨張材量と拘束条件との関係によって複雑に変化すると報告されている。

セメントの化学成分が膨張特性に及ぼす影響について、Lerch²⁸⁾はC₃Aの量を一定にすればSO₃量が多いほど膨張が大きくなり、膨張に必要な最小限以上のSO₃が存在すると膨張が起こり、その膨張期間はアルミネートに対するSO₃分の比によって定まるとしている。またGustaf²⁹⁾およびPolivkaら³⁰⁾はC₃Aが多くなると膨張率は小さくなると報告している。

セメント種類を変えて膨張材量あるいは拘束条件が膨張特性に及ぼす影響に関して、自由膨張で

膨張材量が30 kg/m³程度と少ないとき、門司³¹⁾あるいは著者ら³²⁾は早強型のセメントを用いると強度遅延型のセメントを用いるときよりも膨張率は小さくなることで一致しているが、膨張材量が50 kg/m³程度と多くなると、早強型のセメントを用いた場合の方が強度遅延型のセメントを用いた場合よりも膨張率が大きくなるという報告³¹⁾と逆に小さくなるという報告³⁾があり一致をみていない。

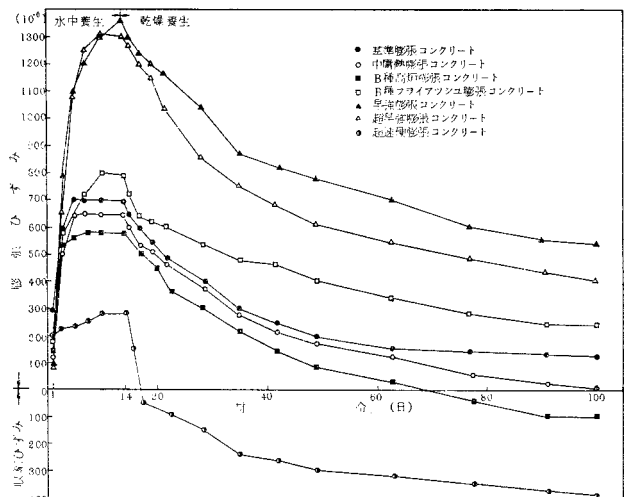
拘束膨張の場合には膨張材量が少ないときは早強型のセメントを用いると強度遅延型のセメントを用いるときよりも膨張率は小さくなり⁶⁾、³¹⁾、膨張材量が多くなると早強型のセメントを用いた方が膨張率は大きくなることでほぼ一致した結論を得ている。

ここでは膨張コンクリートをケミカルプレストレストコンクリートとして利用することを対象にして膨張材量が比較的多い場合について、種々のセメントが拘束膨張特性に及ぼす影響をセメントの化学成分あるいは水和反応生成物と関連づけて考察する。

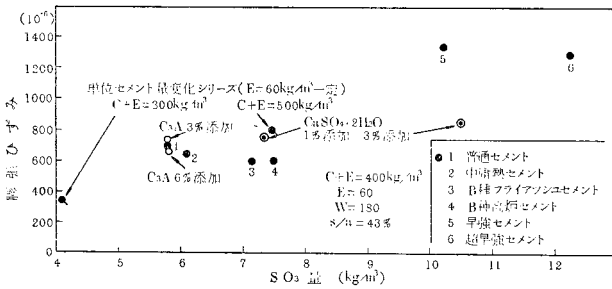
本実験結果を図一9に示す。コンクリートの配合はセメント種類が異なる点を除けば配合割合を基準膨張コンクリートと同一にしている。

実験結果から、拘束膨張率はこれまでの報告でいわれているように超速硬セメントを除くと、早強型のセメントを用いた方が強度遅延型のセメントを用いた場合よりも大きくなることが示された。超速硬セメントの場合には早強型にもかかわらず膨張率はきわめて小さくなることがわかった。

図一10は各種セメントを用いたコンクリート中に含まれるSO₃量と材令14日の膨張率との関係を示す。同図から超速硬セメントを除くと、大略SO₃量が多いセメントほど膨張率は大きくなる傾向がある。また普通セ



図一九 各種セメントを用いた膨張コンクリートの膨張、収縮特性



図一10 種々のセメントを用いた場合のコンクリート 1m³中のSO₃量と膨張量との関係ならびにCaAの添加と膨張率との関係

メントに CaSO₄·2H₂O を単位セメント量に対して 1% および 3% (SO₃ 量に換算すると 0.46% および 1.39%) 添加した場合、SO₃ 量が多くなるほど膨張率は大きくなる (図一10 参照)。これは CaSO₄ の残存のもとで CaO の水和が著しく遅延し、生成された Ca(OH)₂ の結晶が粗大化するためと考えられる¹⁶⁾。

しかしながら、図一10 にみられるように 1m³ 当たりのコンクリート中のセメント分の SO₃ 量が 10 kg/m³ 程度とほぼ同じでも普通ポルトランドセメントと早強セメントでは基幹セメント種類が異なれば膨張率は相違することが認められる。また表一5 にみられるように超速硬セメントを除いて他のセメントについては X線回折ならびに熱分析から、エトリンガイトおよび Ca(OH)₂ の生成量には差がみられない。普通セメントに CaSO₄·2H₂O を 3% 添加して SO₃ 量を早強型のセメントとほぼ同程度にしても、普通セメントよりも早強型のセメントの方が膨張率が大きくなるので、セメント硬化体の強度発現速度も拘束膨張特性に密接に関係していると推測する。

超速硬セメントの場合、SO₃ 量は普通セメントと比べて 6.6 倍程度含まれているが、膨張率は小さく特異な現象を示した。他のセメントの化学成分と特に異なる点は SO₃ 量が多いことと、Al₂O₃ 量が多いことである。表一5 に示す X線回折結果をみると、他のセメントの場合と比較してエトリンガイトの生成量が若干多いことと、Ca(OH)₂ の生成量が極端に少ないことが注目される。したがって、Al₂O₃ 量が多くてしかも SO₃ 量が多い場合には Ca(OH)₂ の生成量が少なくなり、結果的に膨張率が小さくなったと考えられる。なお、このほかペーストの凝結速度の問題も考えられる。

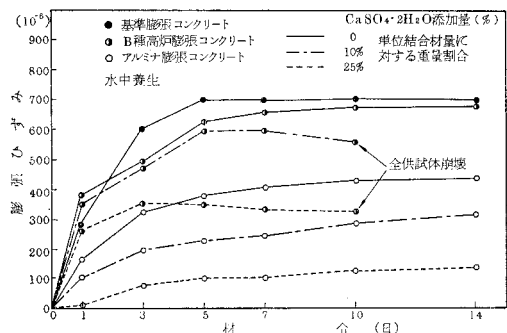
ここでアルミナセメントに CaSO₄·2H₂O を単位結合材量の 10% および 25% 添加した膨張コンクリートの膨張特性を調べた。配合条件はセメント種類が異なる点を除くと基準膨張コンクリートと同一である。その結果を 図一11 に示す。アルミナセメントには Al₂O₃ が 52.5% 含まれている。CaSO₄·2H₂O を添加しないとき、その膨張率は基準膨張コンクリートの膨張率の 60% 程度

得られるが、CaSO₄·2H₂O を添加すると、添加量が増加するにつれて、膨張率は減少することが示された。また CaSO₄·2H₂O の添加量が多くなるに従って、コンクリートはよりパサパサになった。表一5 に水和生成物の X線回折ならびに熱分析結果を示す。アルミナセメントに膨張材を添加した場合、エトリンガイトおよび Ca(OH)₂ の生成量は零になり、他のセメントと水和生成物の様相が著しく異なることがわかる。

高炉セメントの場合、Al₂O₃ 量が多く、SO₃ 量が少ないが、他のセメントと同程度のエトリンガイトおよび Ca(OH)₂ が得られており、膨張率も普通セメントとほぼ同程度得られる。しかしながら、高炉セメントに対して CaSO₄·2H₂O を添加すると、その添加量が多くなると膨張率は減少していくことが 図一11 からわかる。表一5 に高炉セメントに CaSO₄·2H₂O を添加した場合に生成される水和物、特にエトリンガイトと Ca(OH)₂ についての結果を示している。高炉セメントに CaSO₄·2H₂O を添加すると、その添加量が増加すると、Ca(OH)₂ の生成量が少なくなっていくことがわかる。なお高炉セメントに CaSO₄·2H₂O を加えると凝結が遅延するので、そのため膨張力の発現が遅れて、膨張率が小さくなったとも考えられる。

なお、高炉セメントに CaSO₄·2H₂O を添加すると材令 10 日頃にコンクリートは膨張破壊した。

以上述べたことから、拘束膨張特性にはただ単にセメント分の SO₃ 量あるいは Al₂O₃ 量が関係するのではなく、それらの量的な比率と、当然その結果として生成される膨張性水和物の生成量あるいはセメント硬化体の強度発現速度等が複雑にからみあって影響しているといえる。詳細な検討は今後におくが、ポルトランドセメント系あるいは B種フライアッシュセメントについては大略 SO₃ 量が多いこと、さらには膨張性水和物の生成速度とセメント硬化体の強度発現速度とがうまくからみあ



図一11 アルミナセメントならびに B種高炉セメント膨張コンクリートに CaSO₄·2H₂O を添加した場合の膨張特性

うセメントであることが拘束膨張率を増大させることになると考えられる。また超速硬セメントのように Al_2O_3 量が多いセメントでは SO_3 量が多くなるにつれて、拘束膨張率は小さくなる。ちなみに、 C_3A を普通セメントに 3% および 6% 添加しても、拘束膨張率はほとんど変化しないことがわかった (図-10 参照)。

拘束下における乾燥収縮特性に関してはセメント種類が異なる場合、セメントの化学成分、蒸散可能水量、細孔径分布さらにはクリープ特性等多数の要因に関係してくることになるので、定量的な解析は現状では困難であるが、本実験内では相対収縮率についてはフライアッシュセメントを除けば、概して膨張率が大きくなるセメントを用いると相対収縮率は大きくなる傾向が示された。またフライアッシュセメントを用いると膨張コンクリートの場合にも乾燥収縮量は他のセメントを用いた膨張コンクリートよりも小さくなっている。

7. 各種混和剤が膨張、収縮特性に及ぼす影響

各種の混和剤が膨張特性に及ぼす影響については、Polivka ら³⁰⁾、Gustafarro ら²⁹⁾、Kesler³²⁾、小林ら³⁴⁾、辻³⁾などによって研究されているが、AE 剤あるいは減水剤単独の効果を試験することが困難なために研究結果は異なっている。

Polivka らは AE 剤は膨張率にほとんど影響を及ぼさないかあるいはまったく及ぼさないとしている。これに対して Gustafarro らは AE 剤は膨張率を減少させると結言している。Kesler は混和剤の種類により最大膨張量は大きな影響を受け、特に AE 剤を用いた場合には膨張率は大きく低下するが、減水剤あるいは減水遅延剤を併用し、単位水量をさらに減じた場合には改良されることを明らかにしている。さらに小林らは良質な AE 剤あるいは減水剤を用いると膨張率は大きくなるとしており、辻は単位水量、単位セメント量を一定にして、AE 剤を用いた場合、空気量が多くなると膨張率が大きくなる場合と逆に小さくなる場合があることを報告している。

著者ら³²⁾が以前に各種の混和剤が自由膨張特性に及ぼす影響について実験した結果では混和剤を入れて、単位水量を減じてコンクリートのスランブを一定にした場合、混和剤を用いると自由膨張率は若干増大することを明らかにしている。

ここでは AE 剤および減水剤が拘束膨張特性に及ぼす影響を実験的に明らかにした。コンクリートの配合は減水剤促進型ならびに高性能減水剤を用いる場合を除いて、目標スランブを 7.5 cm にして、材令 28 日の圧縮強度をほぼ同一 (約 390

kg/cm²) になるよう単位水量と単位セメント量を調整した。減水剤促進型および高性能減水剤を用いる場合は目標スランブを 7.5 cm として単位水量を減じており、単位セメント量は基準膨張コンクリートと同一である。なお AE 剤を用いたときのコンクリートの空気量は 6% である。

本実験結果を図-12 に示す。この結果、高性能減水剤あるいは減水剤促進型を用いた場合を除いて、各種混和剤を用いても拘束膨張率は混和剤無添加の基準膨張コンクリートのそれと比べてほぼ等しいか若干大きくなることわかる。高性能減水剤あるいは減水剤促進型を用いた場合には、混和剤無添加の基準膨張コンクリートよりも拘束膨張率は 1.5 倍程度大きくなること示された。したがって、混和剤を混入してもコンクリートの圧縮強度をほぼ等しくした場合には拘束膨張率は混和剤無添加の場合とほとんど差はないが、高性能減水剤を用いた場合のように単位水量だけを減じてコンクリートの圧縮強度が高くなる場合には単位膨張材量が同じでも拘束膨張率は大きくなるといえる。

表-5 に示されているように、各種混和剤を添加してもエトリンサイトおよび $Ca(OH)_2$ の生成特性にはほとんど差がみられない。拘束膨張率には混和剤そのものよりコンクリートひいてはセメント硬化体の強度特性が関係しているように考えられる。

相対収縮量は混和剤を用いると無添加の基準膨張コンクリートと比べて、総じて大きくなる傾向がみられた。なお、これらの結果は使用する混和剤の化学成分あるいは性能によって異なるかもしれないので、今後ともさらに研究を進めなければならないと考えている。

8. 骨材種類が膨張、収縮特性に及ぼす影響

骨材種類が膨張コンクリートの膨張収縮特性に及ぼす影響については、天然骨材と人工軽量骨材とを比較した

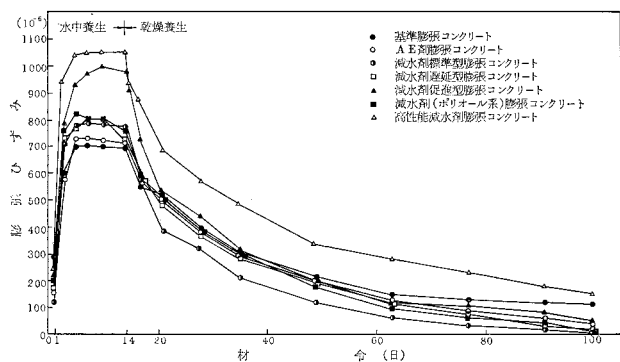
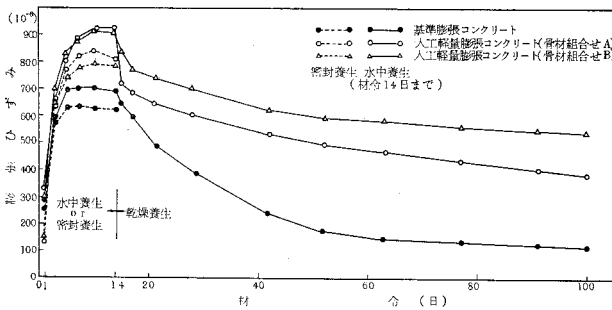


図-12 各種混和剤を添加した膨張コンクリートの膨張、収縮特性



図一三 骨材種類が膨張特性に及ぼす影響

場合、一般に人工軽量骨材を用いた方が天然骨材を用いるときよりも膨張率は大きくなると報告されている^{35)~37)}。

その理由として、骨材中に含まれる水による自己養生効果を挙げているが、詳細な検討はなされていないようである。

ここでは含水量の異なる人工軽量細粗骨材と碎石と川砂の組合せ骨材をそれぞれ用いた膨張コンクリートについて、水中養生した場合と密封養生した場合について、膨張，収縮特性を検討した。軽量骨材の使用時の含水量は表一3に示している。各配合中の骨材容積は同一にしている。本実験結果を 図一13 に示す。

水中養生した場合、人工軽量骨材膨張コンクリートは碎石，川砂を用いたいわゆる基準膨張コンクリートよりも膨張率は1.5倍程度になっている。また密封養生した場合は水中養生したときよりもいずれの骨材を用いた膨張コンクリートともに膨張率は小さくなり、この場合も人工軽量骨材を用いた場合の方が膨張率は大きくなる。しかしながら、人工軽量骨材の含水量が異なっても膨張率にはほとんど差がないことが示された。したがって、拘束膨張率に及ぼす骨材種類の影響は骨材の含水特性というよりもむしろ骨材自身の膨張拘束力の相違によるところと考えた方が合理的であるように考えられる。

相対収縮率について、人工軽量骨材を用いた場合と碎石，川砂を用いた場合を比較すると前者の方が小さく、しかも含水量が多い軽量骨材（組合せB）を用いたときの方がより小さくなった。阪田¹³⁾は含水量の多い骨材を用いるとコンクリート中の湿度勾配が小さくなり、乾燥収縮は小さくなると報告している。このため含水量の多い人工軽量骨材を用いると乾燥収縮が小さくなったと考えられる。

9. 結 論

本研究は比較的膨張材量の多い膨張コンクリートの拘束膨張ならびに拘束収縮特性に関して、種々のコンクリ

ート構成材料の影響を巨視的に考察するとともに、膨張収縮特性をペーストの水和反応生成物とその物性および空隙分布特性さらにはコンクリートの水分逸散特性と関係づけて微視的に考察した。

本実験で得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 膨張コンクリートの拘束膨張特性はコンクリートの配合条件による影響を受け、膨張率は単位膨張材量によって一義的に定まることはなく、膨張材量が一定でも単位水量が少ないほどあるいは単位セメント量が多いほど拘束膨張率は大きくなる傾向があり、膨張反力支持要因としてのペーストの強度特性に関係していると考えられる。

(2) 膨張コンクリートの拘束膨張特性は使用セメント種類によって影響を受け、ポルトランドセメント系の Al_2O_3 量の少ないセメントでは SO_3 含有量の多いセメントであることが膨張率の増大につながるように考えられる。このとき、 SO_3 量が同じでも強度発現速度の大きいセメントの方が膨張率は大きくなる傾向がある。また特殊セメントである超速硬セメントのように Al_2O_3 量が多くしかも SO_3 量が多いセメントは膨張率を低下させるようである。

(3) 膨張コンクリートの拘束膨張率に及ぼす各種混和剤の影響については、コンクリートのスランプを一定にし、圧縮強度を一定にした場合、各種混和剤は膨張率にほとんど影響しないようである。高性能減水剤あるいは減水剤促進型を用いてスランプを一定にして単位水量だけを減じるとこれら混和剤を用いた膨張コンクリートの膨張率は混和剤を用いない場合より大きくなる傾向がある。

(4) 人工軽量骨材を用いると碎石，川砂骨材を用いる場合よりも膨張コンクリートの拘束膨張率は大きくなる。また含水量の多い人工軽量骨材を用いた膨張コンクリートの相対収縮率は碎石，川砂骨材を用いた場合よりも小さくなる。

(5) 膨張コンクリートの乾燥収縮率は普通コンクリートよりも小さい。さらに膨張コンクリートの乾燥収縮率は単位水量が少ないほど小さくなる。

謝 辞：本研究を行うにあたり、終始ご指導を賜りました京都大学 岡田清教授，実験にご協力下されました大阪セメント株式会社主任研究員 中野錦一氏に深謝いたします。

参 考 文 献

1) 辻：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究，東京大学学位論文。

- 2) 門司・井上・吉川：膨張材を使用するコンクリートの配合設計に関する研究，セメント技術年報 XXV, 1971.
- 3) 楠元・杉田：石灰系膨張材がコンクリートの膨張および強度性状におよぼす影響，セメント技術年報 31, 1977.
- 4) ACI 223 委員会：Expansive Cement Concrete-*Present State of Knowledge*, *Jour. of ACI*, 8, 1970.
- 5) プレストレストコンクリート技術協会：コンクリート橋の長大化に関する調査研究報告書資料，1971.
- 6) 長滝・米山・飯田：化学的プレストレスの導入に関する基礎研究，セメント技術年報 XXII, 1968.
- 7) たとえば，一家：膨張材使用によるひび割れ防止，施工，No. 109, 1975.
- 8) 長滝・高田：膨張コンクリートの品質管理に関する実験的研究，東工大土木工学科研究報告，No. 23, 6, 1978.
- 9) 大浜・李：膨張モルタルの長さ変化率におよぼす骨材量の影響，セメント技術年報 XXX, 1976.
- 10) 土木学会編：コンクリート標準示方書（昭和49年制定）昭和55年度版，1980.
- 11) Czernin, W.: 建設技術者のためのセメントコンクリートの化学，技報堂，1975.
- 12) 山田・有泉：わかりやすいセメントとコンクリートの知識，鹿島出版会，1976.
- 13) 阪田：持続および繰返し荷重下におけるコンクリートの塑性的挙動に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1976.
- 14) 岩崎：コンクリートの特性，コンクリートセミナ 1，共立出版，1975.
- 15) Neville, A.M.: *Properties of Concrete*, 技報堂，1979.
- 16) 山崎・上赤・小林・廣瀬：膨張セメントの水和および膨張機構，セメント技術年報 34, 1980.
- 17) 磯貝・斉藤・高橋：カルシウムサルホアルミネート系膨張セメントの水和膨張過程に関する考察，セメント技術年報 XXXI, 1977.
- 18) 世良・土屋：カルシウムサルホアルミネートの水和反応，セメント技術年報 XXII, 1968.
- 19) 赤岩・須藤・中村： $C_4A_3(SO_3)$ の水和膨張に関する研究，セメント技術年報 XXI, 1967.
- 20) 坂内・中川：エトリンジャイトの加熱変化，*Gypsum & Lime*, No. 97, 1968.
- 21) Skoblinskaya, N.N. ほか：Changes in Crystal Structure of Ettringite on Dehydration. 2, *Cement and Concrete Research*, Vol. 5, 1975.
- 22) 吉良・間木野・山本：エトリンジャイトの炭酸化，*Gypsum & Lime*, No. 159, 1979.
- 23) 山崎：膨張性混和材を用いたコンクリートの膨張機構，セメントコンクリート，No. 352, 1976.
- 24) 磯貝： $3CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot CaSO_4 - CaSO_4 - CaO$ 系膨張セメント硬化体の長期材令での諸性状，セメント技術年報 XXIX, 1975.
- 25) 村田・大塚・国府：膨張セメントコンクリートの細孔径分布と水密性および付着強度，コンクリートライブラリー，第39，土木学会，1974.
- 26) 小林・伊藤：膨張セメントの膨張圧に影響をおよぼす諸要因，コンクリートライブラリー，第39，土木学会，1974.
- 27) Benter, A. and M.I. Shalom: Properties of Type K Expansive Cement of Pure Components, (II Proposed Mechanism of Ettringite Formation and Expansion in Unrestrained Paste of Pure Expansive Component), *Cement and Concrete Research*, Vol. 4, 1974.
- 28) Lerch, W.: The Influence of Gypsum on the Hydration and Properties of Portland Cement Pastes, *Proc. ASTM*, Vol. 46, 1946.
- 29) Gustaferro, A.H. ほか：Expansive Concrete-Laboratory Tests of Freeze-Thaw and Surface Scaling Resistance, *Jour. of PCA Research and Development Laboratories*, Vol. 3, No. 1, 1, 1966.
- 30) Palivka, M. and V.V. Bertero: Factors Affecting the Properties of Expanding Concrete, *Proc. International Conference on the Structure of Concrete (London 1965)*, Cement and Concrete Association, London, 1968.
- 31) 門司・井上・沢野：各種セメントコンクリートに混和した膨張材の効果，セメントコンクリート，No. 307, 9, 1972.
- 32) 戸川・荒木：膨張材使用の舗装コンクリートの性状におよぼす各種セメント・混和剤の影響，セメントコンクリート，No. 298, 12, 1971.
- 33) Kesler, C.E.: Control of Expansive Concrete during Construction, *Jour. of the Construction, Div., Proc. of ASCE*, Vol. 102, No. Co 1, 3, 1976.
- 34) 小林・高橋：膨張混和材を用いたコンクリートの凍結融解にたいする抵抗性について，膨張性セメント混和材を用いたコンクリートに関するシンポジウム講演概要，土木学会，8, 1972.
- 35) Aroni, A. and M. Polivka: Effect of Expanded Shale Aggregate on Properties of Expansive-Cement Concrete, *Proc. RILEM Symposium on Light weight Aggregate Concretes*, Budapest, 3, 1967.
- 36) 河野・一家・綿貫・松本：軽量コンクリートの諸物性に及ぼす石灰系膨張材の影響，セメント技術年報 XXVIII, 1974.
- 37) 大浜・縄田：膨張材を混入した富配合軽量コンクリートの膨張および強度特性，セメント技術年報 XXVII, 1973.

(1981.9.28・受付)