

膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響

EFFECTS OF TEMPERATURE ON EXPANSION CHARACTERISTICS IN
EXPANSIVE CONCRETE

戸川 一 夫*・中 本 純 次**

By Kazuo TOGAWA and Junji NAKAMOTO

1. ま え が き

膨張コンクリートを場所打ちのケミカルプレストレストコンクリートとして、その使用方法を確立するためには、種々の環境条件を想定して、いろいろな温度条件のもとでの拘束膨張特性に関して、系統立った理解を与えておくことが、一つの課題として挙げられる。

これまで拘束膨張特性と養生温度との関係については Klein ら¹⁾、Kleiger ら²⁾、中原ら³⁾、長滝ら⁴⁾あるいは岡村ら⁵⁾による報告がある。Klein らあるいは Kleiger らは養生温度が高くなると拘束膨張量はわずかながら小さくすると報告している。これに対して中原らは養生温度が 20~60°C の範囲では温度が高いほど膨張量は大きくなり、最大膨張量に達する時間も早くなると述べている。長滝らは膨張率が最大になる養生温度があり、それよりも温度が高くて、また、低くても膨張率は低下する結果を得ている。岡村らは打込み時より材令 1 日まで一定温度に保ち、その後養生温度を変化させた場合および打込み時からの温度が異なる場合について温度が膨張性状に及ぼす影響を調べた結果、膨張性状は打込み時よりの養生温度のみならず、その後の温度変化、膨張材種類とその使用量およびセメント種類によって著しく異なり、これらの要因の組合せによって相反する結果が生じることを明らかにしている。

膨張機構に及ぼす温度の影響に関して、須藤ら⁶⁾および三宅ら⁷⁾は化学的な考察を行っている。須藤らは膨張セメントクリンカーの膨張機構に及ぼす温度の影響に関して、 $C_4A_3(SO_3)$ 、無水石こうおよび生石灰からなる膨張セメントクリンカーの水和膨張は 60°C 以上の場合には生石灰の水和膨張力が関与し、また 40°C 以下では主

としてエトリンガイトの生成作用によると報告しており、40°C 付近で膨張率は最も大きくなると報告している。三宅らは 20°C 付近では膨張の原動力は主として遊離の CaO と $C_4A_3(SO_3)$ であり、温度が上昇するにつれて $C_4A_3(SO_3)$ が膨張の主原動力となっており、 $Ca(OH)_2$ の結晶は 20~60°C 付近では六角板状の大きな結晶となっているが、80°C 付近になると一部炭酸化して安定な状態で存在しなくなると述べている。

以上の述べたように拘束膨張特性は温度によって著しく影響を受けることは各研究者間で一致した結論であるが、影響の受け方については結論を異にしているのである。

本研究はコンクリートの配合、膨張材種類および膨張材量を種々変化した膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響を明らかにしようとするものであり、そのうち養生温度、養生温度変化およびコンクリートの練り上がり温度の影響について検討するものである。特に、本研究は種々の温度条件のもとでの膨張性状について、膨張性水和物の生成特性といった微視的観点からも若干の考察を加えた。

2. 実験計画

(1) 使用材料とコンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂(比重=2.55, 吸水率=2.46%, FM=2.82), 粗骨材は硬質砂岩碎石(最大寸法 20 mm, 比重=2.61, 吸水率=1.68%)をそれぞれ使用した。膨張材はカルシウムサルホアルミネート系の A 膨張材と石灰系の B 膨張材を使用した。使用した膨張材ならびにセメントの化学成分をそれぞれ表-1 と表-2 に示す。コンクリートの示方配合は表-3 に示すものを計画した。

* 正会員 工修 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

表一 使用した膨張材の化学成分，粉末度および比重

種類	比重	粉末度 (cm ³ /g)	化 学 成 分 (%)							計
			強熱減量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	
A膨張材	2.87	3950	0.8	4.0	10.0	1.0	51.2	0.6	31.9	99.5
B膨張材	3.14	3920	0.4	9.6	2.5	1.3	67.3	0.4	18.0	99.5

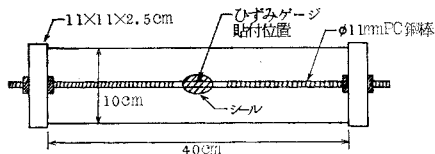
表二 使用セメントの化学成分 (%)

種類	強熱減量	不溶残分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	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

表三 コンクリートの示方配合

配合種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	目 標 スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/C+E (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント +膨張材 C+E	細骨材 S	粗骨材 G	
									5~10 mm	10~20 mm
A-1	20	7.5	2	45	43	180	340+60=400	737	501	501
A-2	20	7.5	2	45	43	180	360+40=400	737	501	501
A-3	20	7.5	2	45	43	180	320+80=400	737	501	501
A-4	20	2.0	2	36	43	164	390+60=450	737	501	501
A-5	20	15.0	2	74	43	215	230+60=290	737	501	501
B-1	20	7.5	2	45	43	180	345+55=400	737	501	501
B-2	20	7.5	2	45	43	180	365+35=400	737	501	501
B-3	20	7.5	2	45	43	180	325+75=400	737	501	501

A：A膨張材を使用している。B：B膨張材を使用している。



図一 コンクリート供試体

(2) 供試体形状と寸法

使用した供試体は 図一 に示す φ10×40 cm の円柱供試体であり、φ11 mm のねじ切り PC 鋼棒 (C 種 1 号, SBPR 110/125) で軸中心一軸拘束している。

(3) 養生温度および養生方法

養生温度は -5°~60°C の範囲を計画し、コンクリートの練り上がり温度と養生温度を同じくする場合あるいは異なる場合、さらには養生期間中の養生温度が一定の場合と急変する場合を考慮した。コンクリートの練り上がり温度は ±1°C で管理し、養生温度は ±2°C で管理した。コンクリートを所定の練り上がり温度にするために、全材料は打込み前日よりそれぞれ別個に密封して所定の温度 (たとえば練り上がり温度 35°C のときは 35°C の養生室) に置いておき、練り混ぜも所定の温度の室内で行った。コンクリート供試体は打込み直後から所定の温度にした養生室 (当研究室には養生室が 3 室あり、一室は -20°~70°C まで温度調整が可能であり、他の室は 5°~35°C まで温度調整ができ、さらに一室は 20°C の

一定温度室である) に材令 1 日まで置いて、その間密封養生し、材令 1 日で所定の温度の水中に浸漬した。ただし、-5°C 養生の場合には供試体をビニールシートで包みその上をガムテープで巻き密封養生を行っている。養生温度を変化させた場合の影響を調べる試験に用いた供試体はできるだけ同一バッチのコンクリートから造るよう計画した。しかし養生室数と計画温度との関係から同一バッチから供試体を造れない場合があったので、同一シリーズについてはコンクリート打込み日をできるだけ接近させるよう配慮した。

(4) コンクリートの長さ変化測定方法

供試体の長さ変化の測定は PC 鋼棒に貼付した 3 線式の 2 枚の電気抵抗線ひずみゲージによる。基長はコンクリート打込み直後とし、ひずみゲージの温度変化に伴う測定誤差は補正して、実験値を整理した。

(5) エトリンガイトおよび Ca(OH)₂ の定量方法

エトリンガイト、水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) とともにセメントの水和によって生成されるものとは温度依存性等があるため明確に区別することは不可能であるので熱分析によって求めた脱水率をエトリンガイト、Ca(OH)₂ 量の指標とした。

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°C/min である。

エトリンガイトはその DTA 曲線から 150°C 付近をピークとして約 130°C あたりから脱水し始め約 165°C あたりで脱水し終わる。したがって、それぞれの試料について脱水開始と脱水終了時の温度を DTA 曲線の変曲点から求めた。そして脱水開始時と終了時の温度間の脱水量を TGA 曲線から求め、エトリンガイトの脱水率を算定した。また、Ca(OH)₂ はその DTA 曲線は 510°C 付近にピークをもち、約 490°C あたりから脱水し、約 530°C あたりで脱水し終わる。そして、エトリンガイトと同様に脱水開始時と終了時の温度を DTA 曲線から求め、その間の脱水量を TGA 曲線から求めて、Ca(OH)₂ の脱水率を算定した。

測定に供した試料は次のようにして採取した。コンクリート供試体表面端部にコンクリートに使用されたのと

同一配合のセメントペーストをビニール袋に入れてコンクリート打込み時に埋め込んでおき、ビニール袋は材令1日で破っておき、所定の材令で試料を採取し、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、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に供した。

(6) 圧縮強度試験方法

コンクリートの圧縮強度試験にはφ10×20cmの円柱供試体を用いており、それぞれの長さ変化測定用供試体と同一養生条件とした。なお、供試体は材令1日に脱型し、無拘束状態で養生している。

本実験では膨張率および圧縮強度は3本の供試体の平均値を用いて整理している。

3. 拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響

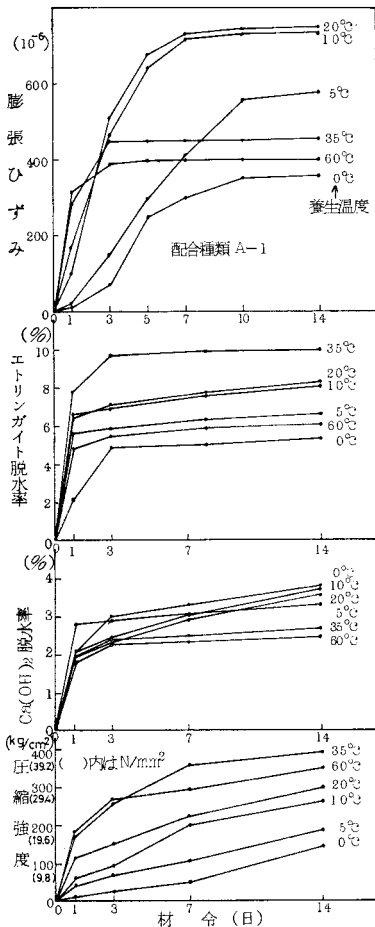


図-2 養生温度が膨張特性、エトリンガイトおよび Ca(OH)₂ の生成特性ならびに圧縮強度特性に及ぼす影響

図-2 と 図-3 にカルシウムサルホアルミネート系の A 膨張材と石灰系の B 膨張材とを使用した膨張コンクリートについて、養生温度と膨張率との関係を示している。この場合、コンクリートの練り上がり温度もそれぞれの養生温度に等しくしている。

同図から、A 膨張材および B 膨張材ともに、材令 14 日の時点では養生温度が 10°C あるいは 20°C で膨張率は最大になり、養生温度が 5°C 以下あるいは 35°C 以上では、その膨張率は 10°C~20°C の場合と比べて小さくなるのがわかる。

膨張コンクリートの膨張力源となる水和生成物としてはエトリンガイトと Ca(OH)₂ であることがほぼ明らかにされている⁸⁾。

同図には熱分析によって求めた脱水率をエトリンガイトおよび Ca(OH)₂ の生成量の指標として示している。

エトリンガイトの脱水率は両膨張材ともに、養生温度が 10°C~35°C では 5°C 以下あるいは 60°C の場合よりも多くなることが認められる。Ca(OH)₂ の脱水率は

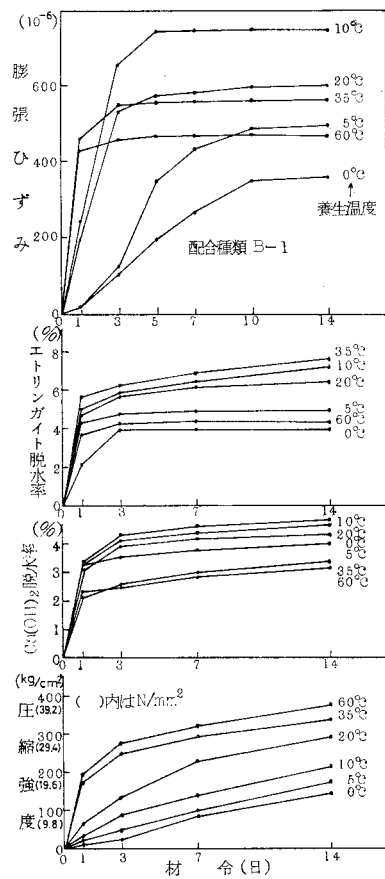


図-3 養生温度が膨張特性、エトリンガイトおよび Ca(OH)₂ の生成特性ならびに圧縮強度特性に及ぼす影響

20℃以下では30℃以上の場合より多いことが示されている。これらの膨張性水和物の生成特性と膨張コンクリートの膨張特性との関係については、養生温度が10～20℃での膨張率が他の養生温度の場合と比べて大きくなるのはエトリンガイトおよびCa(OH)₂の生成量が他の養生温度の場合よりも多く生成されることによるようであり、養生温度が5℃以下になると膨張率が小さくなるのはエトリンガイトの生成量が少なくなる傾向にあること、35℃以上の場合に膨張率が小さくなるのはCa(OH)₂の生成量が少なくなる傾向にあることによると推測する。

A膨張材およびB膨張材を用いた膨張コンクリートの膨張特性に及ぼす養生温度の影響についてさらにいえることは、ともに養生温度が高くなるほど膨張速度が早くなり、しかも膨張はより若い材令で終了してしまうことである。A膨張材およびB膨張材ともに、膨張がほぼ終了する材令は養生温度35℃以上のとき材令3日程度、養生温度10～20℃のとき材令7日程度、5℃以下では材令14日程度となっている。

なお、エトリンガイトおよびCa(OH)₂の生成量の増加は養生温度が異なっても材令3日程度までは著しく、それ以後の材令では生成量の増加は緩慢になる。しかしながら膨張終了材令は上述のように異なるのである。すなわち、膨張性水和物が増産されていても、膨張は終了するときと継続するときがあるわけである。

同図にはA膨張コンクリートおよびB膨張コンクリートの圧縮強度の発現性状を示している。種々の養生温度のもとで、膨張が終了するときの材令での圧縮強度を読み取ると、両膨張コンクリートともに、養生温度が0℃および5℃で160 kg/cm²(15.7 N/mm²)、10～20℃で220 kg/cm²(21.6 N/mm²)程度、また35℃以上の場合では大略260 kg/cm²(25.5 N/mm²)程度となり、膨張終了時の圧縮強度に差異がみられるのである。

磯貝ら⁹⁾および山崎⁹⁾らは膨張コンクリートの膨張機構に関して膨張が可能な「場」の条件があることを論じている。本実験では膨張が可能な「場」の条件はあるとしても養生条件が異なれば「場」の条件も異なることが示されたといえる。

4. 拘束膨張特性に及ぼす配合条件と養生温度の影響

A膨張材およびB膨張材を用いて、配合条件が異なる膨張コンクリートについて、養生温度が膨張特性に及ぼす影響を検討した結果を図4～9に示している。

図4～6はA膨張材を用いた場合である。養生温度が5℃、20℃および35℃について、いずれの養生温度

の場合にも、膨張材量が多くなると膨張率は大きくなる。カルシウムサルホアルミネート系のA膨張材の場合、膨張材量が多くなると熱分析によればエトリンガイトの生成量が多くなり、Ca(OH)₂の生成量にはほとんど

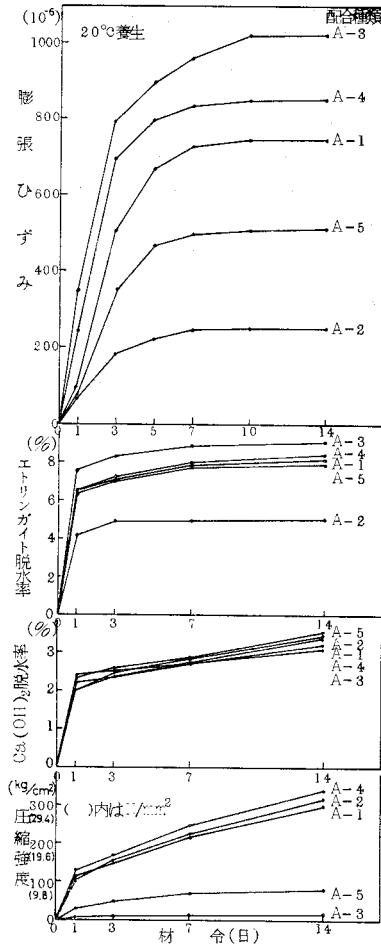


図4 膨張特性、エトリンガイトおよびCa(OH)₂の生成特性ならびに圧縮強度特性に及ぼす配合条件の影響

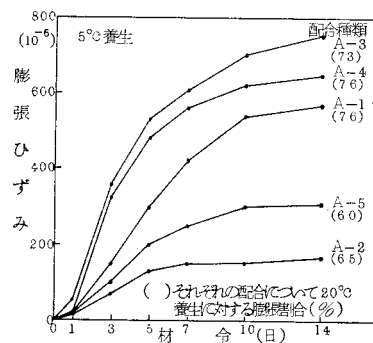


図5 膨張特性に及ぼす膨張材量および配合条件の影響

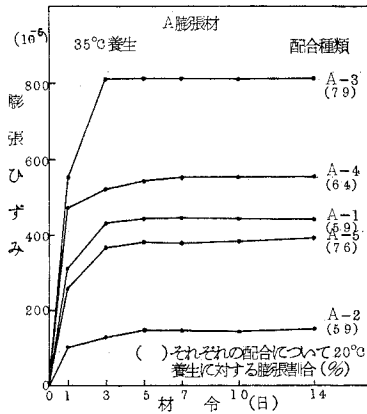


図-6 膨張特性に及ぼす膨張材量および配合条件の影響

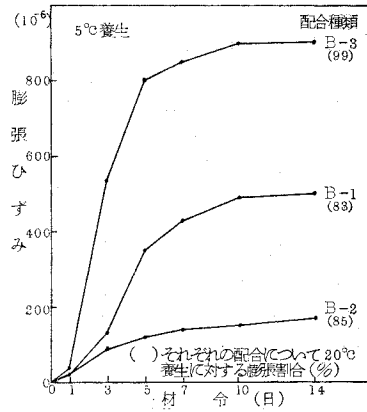


図-8 膨張特性に及ぼす配合条件の影響

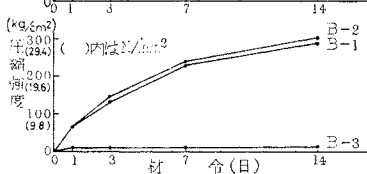
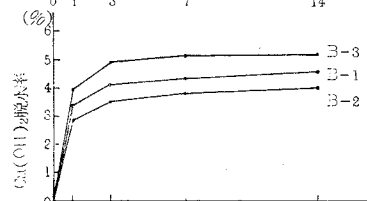
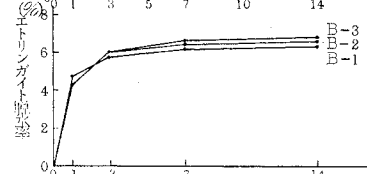
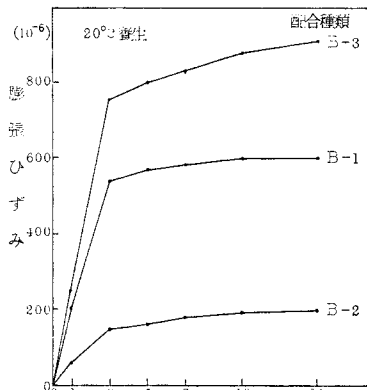


図-7 膨張特性、エトリンガイトおよび Ca(OH)_2 の生成特性ならびに圧縮強度特性に及ぼす配合条件の影響

ど差がみられないのである。また、膨張材量が同じでも、コンクリートの配合条件が異なると膨張率は相違す

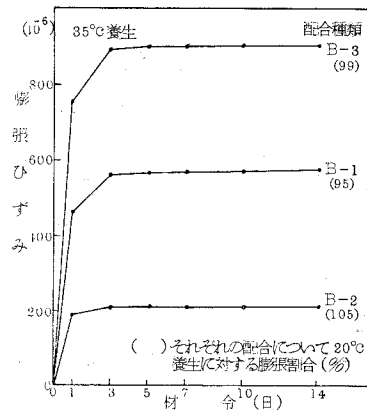


図-9 膨張特性に及ぼす配合条件の影響

ることがわかる。すなわち、単位セメント量が多くなると、あるいは単位水量が少なくなると膨張率は大きくなることが示された。なお、単位膨張材量が一定であれば、単位セメント量あるいは単位水量が変化しても、両膨張性水和物の生成量にはほとんど差が認められないことがわかる。

図-7~9 は石灰系の B 膨張材の場合について示している。ここでも、いずれの養生温度の場合も、膨張材量が多くなると膨張率は大きくなることが示された。この場合、図-7 から膨張材量が多くなると、エトリンガイトの生成量にはほとんど差がないが、 Ca(OH)_2 の生成量は多くなっており、この膨張材の特徴を示しているようである。

ここで、20°C 養生における A 膨張材 (図-4 参照) あるいは B 膨張材 (図-7 参照) コンクリートの膨張がほぼ終了する材令について考察する。A 膨張材の場合、単位膨張材量 80 kg/m^3 のとき材令 10 日、 60 kg/m^3 のときは配合条件にかかわらず材令 7 日、 40 kg/m^3 で材令 7 日程度で膨張は終了する。B 膨張材の場合、単位膨張材

量 75 kg/m^3 のとき材令 14 日、 55 kg/m^3 あるいは 35 kg/m^3 のときは材令 7 日程度である。したがって、膨張材量が異なれば膨張終了材令も異なることがわかる。次に膨張終了材令時のコンクリートの無拘束圧縮強度に関して考察する。ここでのコンクリートの圧縮強度は無拘束供試体から得たものであり、拘束下でのコンクリートの圧縮強度とは異なるものであるが、膨張特性と強度特性との大略的な関係を説明できると考えている。

A, B 膨張材コンクリートの膨張終了材令時のコンクリートの圧縮強度について、単位結合材量 (C+E) = 400 kg/m^3 の場合、単位膨張材量が A 膨張材で 60 および 40 kg/m^3 、そして B 膨張材で 55 および 35 kg/m^3 のとき、大略 220 kg/cm^2 (21.6 N/mm^2) 程度であり、A 膨張材量 80 kg/m^3 および B 膨張材量 75 kg/m^3 のときはほとんど零に近い値である。したがって単位膨張材量が異なれば、膨張終了材令時の圧縮強度は異なることがわかる。また、A 膨張材で、単位膨張材量は 60 kg/m^3 と一定であるが、A-1 配合と比べて、単位セメント量が多く、単位水量の少ない A-4 配合およびその逆の配合の A-5 の場合、膨張終了材令時の圧縮強度はそれぞれ 250 kg/cm^2 (24.5 N/mm^2) および 50 kg/cm^2 (4.9 N/mm^2) 程度となっており、単位膨張材量が同じでも、配合条件が異なれば膨張終了材令時の圧縮強度は異なる傾向が示されたといえる。

また、同一膨張材量の場合でも、コンクリートの圧縮強度が高い場合の方が拘束膨張率は高くなる傾向を有するといえるようである。

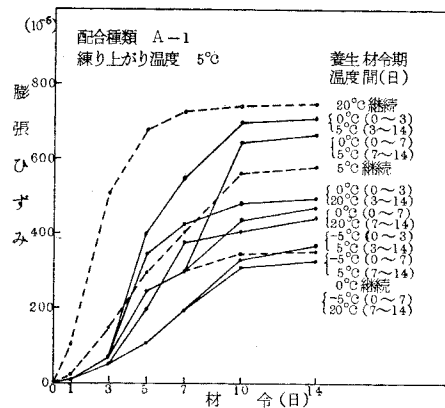
以上 3. および 4. の結果から、膨張コンクリートの膨張が可能な「場」の条件はたとえあるとしても、その条件はコンクリートの配合条件、膨張材量あるいは養生温度等によって変化するようである。

そこで、筆者らは膨張機構に関して次のように推論している。すなわち、膨張が終了する材令は生成される膨張性水和物の膨張発現能力に支配されるとし、さらに膨張性水和物が膨張を拘束することになるコンクリートマトリックスを押し広げる力には生成量に応じて上限値があっても、膨張はその力の上限値に達するまで継続するとは限らないと説明づけた方がより適切であると思われる。たとえば、養生温度が高いときのように、コンクリートマトリックスの強度が膨張性水和物の生成量に応じた膨張能力の上限値に早く達してしまえば膨張はとにかく終了してしまうが、コンクリート強度が膨張能力の上限値に達していない場面では拘束膨張率は膨張性水和物の生成量と膨張を拘束したときに生じる反力を受けとめるコンクリートマトリックスの強度特性に支配され、膨張性水和物のエトリングaitと $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量とともに多いほど、さらには生成量が等しいときには膨張反

力支持要因としてのコンクリートマトリックス (セメントペーストマトリックスといった方がよいかもしいない) の強度が大きいほど、拘束膨張率は大きくなると著者らはいたいのである。

5. 養生期間中の温度変化が拘束膨張特性に及ぼす影響

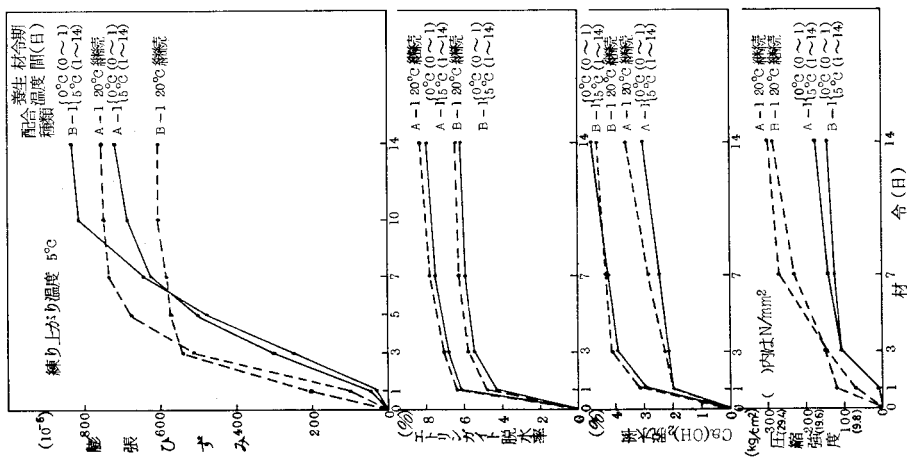
ここでは養生温度をある材令で急変させる場合の膨張性状について述べる。実験は打込み直後からの養生温度を 0°C および -5°C にし、その後ある材令で養生温度変化を与えた場合、また、打込み直後からの養生温度を 20°C 、あるいは 35°C にして、その後養生温度を変化させた場合について行った。



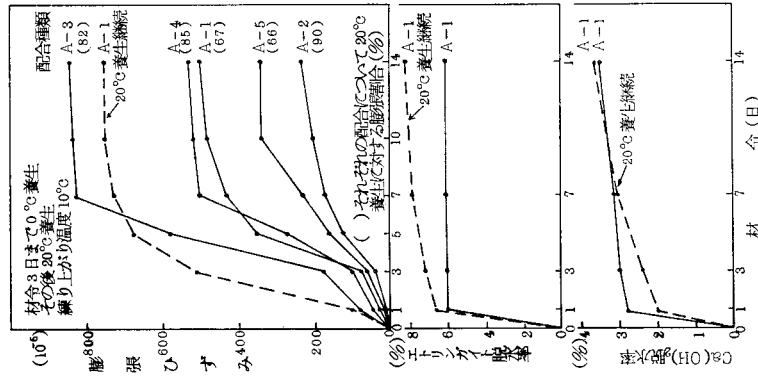
図—10 養生中の温度変化が膨張特性に与える影響

図—10 はコンクリートの練り上がり温度を 5°C にして、A 膨張材を用いた膨張コンクリートを打込み直後から 0°C あるいは -5°C で低温養生し、その後養生温度を変化させたとき、養生温度の変化が膨張性状に及ぼす影響を示している。打込み直後から 0°C あるいは -5°C で養生した場合、材令 3 日あるいは材令 7 日までの膨張率は 0°C 養生の方が -5°C 養生の場合より大きくなるのである。そして、材令 3 日あるいは 7 日において 5°C あるいは 20°C の温度変化を与えると、膨張は急増し、 5°C の低い温度変化を与える場合の方が 20°C の高い温度変化を与える場合よりも材令 14 日の膨張率は大きくなり、しかもより若い材令で温度変化を与えると膨張率はより大きくなるという特異な現象がみられるのである。

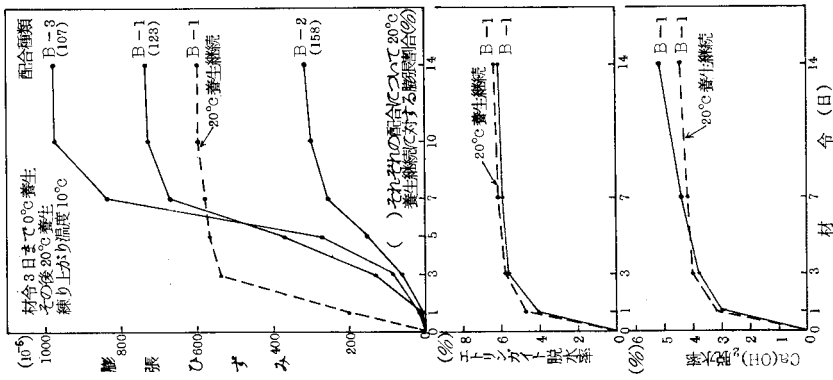
さらに、A 膨張材および B 膨張材を用いたコンクリートについて、材令 1 日まで 0°C 養生し、その後 5°C 養生に移すと、材令 14 日の膨張率は 20°C 養生を継続した場合とほとんど同程度か B 膨張材の場合にはそれ以上になることが示されたのである (図—11 参照)。



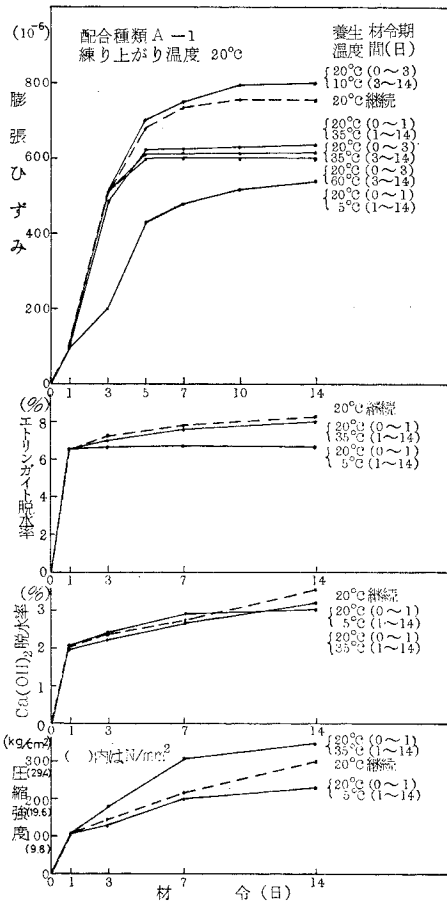
図一11 養生中の温度変化が膨張特性、エトリンガイトおよび $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成特性ならびに圧縮強度特性に及ぼす影響



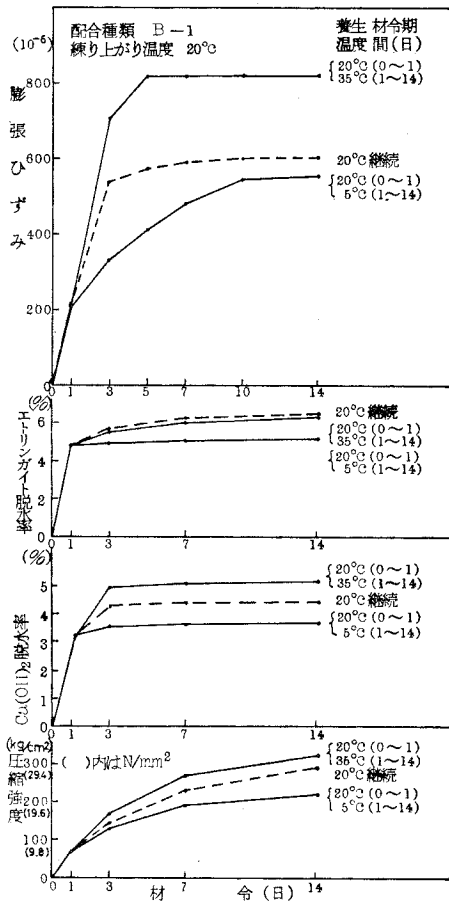
図一12 養生中の温度変化が膨張特性、エトリンガイトおよび $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成特性に及ぼす影響



図一13 養生中の温度変化が膨張特性、エトリンガイトおよび $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成特性に及ぼす影響



図一四 養生中の温度変化が膨張特性，エトリンガイトおよび Ca(OH)_2 の生成特性ならびに圧縮強度特性に及ぼす影響



図一五 養生中の温度変化が膨張特性，エトリンガイトおよび Ca(OH)_2 の生成特性ならびに圧縮強度特性に及ぼす影響

図一十二と図一十三はそれぞれA膨張材あるいはB膨張材を用いて、練り上がり温度を 10°C とし、材令 3 日まで 0°C 養生し、その後 20°C 養生を行った場合の膨張性状を示している。図一十二はA膨張材の場合であるが、いずれの配合条件の場合も温度変化を与えると膨張は急増し、材令 14 日ではそれぞれの配合条件の 20°C 養生を継続した場合の膨張率と比較して 70~90% 近くまで膨張することがわかる。図一十三のB膨張材の場合は、温度変化を与えると、20°C 養生を継続した場合よりも材令 14 日の膨張率はより大きくなることが示されたのである。

図一十四と図一十五はA膨張材およびB膨張材を用いた膨張コンクリートについて練り上がり温度を 20°C とし、打込み直後から材令 1 日あるいは材令 3 日まで 20°C 養生し、その後養生温度を 5°C、10°C、35°C あるいは 60°C に変化させた場合の膨張性状を示している。A膨張コンクリートの場合打込み直後から 20°C 養生し、そ

の後材令 1 日あるいは材令 3 日で温度変化を与えても 20°C 養生を継続した場合よりも材令 14 日の膨張率は同程度か小さくなるのである。図一十五はB膨張材の場合であるが、A膨張材の場合と異なる現象がみられるのである。すなわち、B膨張材の場合には材令 1 日から養生温度が 35°C に変化すると、膨張は急増し始め、20°C 養生を継続する場合よりも大きな膨張率を示すことになる。このような現象は岡村ら⁵⁾の報告にもみられる。

図一十六と図一十七はA膨張材およびB膨張材を用いた膨張コンクリートについて、練り上がり温度を 35°C とし、打込み直後から材令 1 日あるいは材令 3 日まで 35°C あるいは 60°C 養生し、その後養生温度を 20°C にした場合の膨張性状を示している。A膨張材の場合、材令 1 日まで 35°C あるいは 60°C で養生すると、膨張はほぼ終了しているため、その後の養生温度の変化は膨張性状にほとんど影響しないことがわかる。しかしながら、図一十七のB膨張材の場合には材令 1 日まで 35°C 養

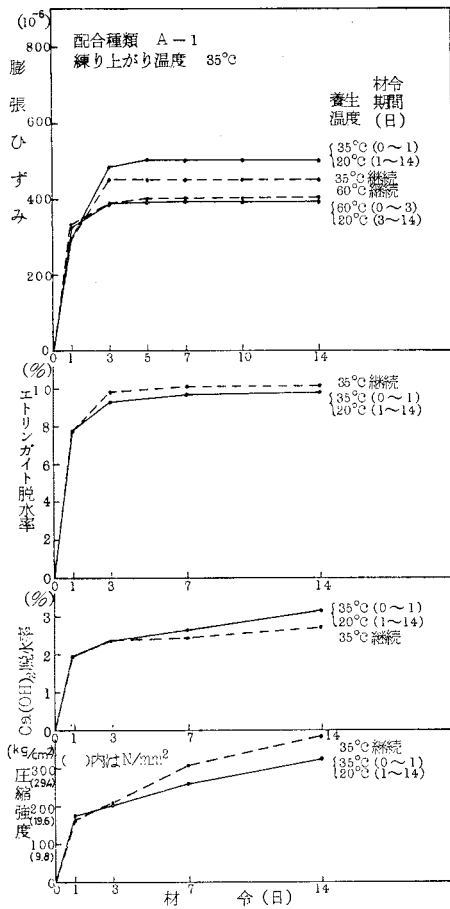


図-16 養生中の温度変化が膨張特性、エトリンガイトおよび Ca(OH)₂ の生成特性ならびに圧縮強度特性に及ぼす影響

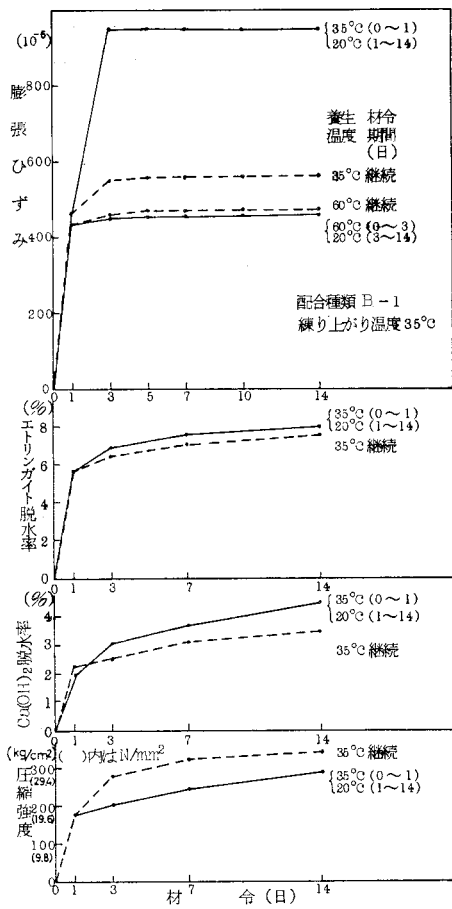


図-17 養生中の温度変化が膨張特性、エトリンガイトおよび Ca(OH)₂ の生成特性ならびに圧縮強度特性に及ぼす影響

生し、その後 20°C 養生に移すと、膨張は急増し、材令 14 日では 20°C 養生を継続する場合よりも大きな膨張率を生じることになるのである。

この章での結果を要約すると、A 膨張材および B 膨張材を用いた膨張コンクリートの膨張特性について、まだ膨張途中にあるときに養生温度が変化すると、膨張性状は急変する傾向があることがわかった。

これらの現象を説明するために、膨張性水和物の生成特性およびコンクリートの圧縮強度発現特性を調べた。それらの結果は 図-11~17 に示している。

図-11 で、材令 1 日まで 0°C 養生し、その後 5°C 養生した場合と、20°C 養生を継続した場合の膨張性水和物の生成特性を比較すると、A、B 膨張材ともにエトリンガイトの生成量は低温養生 (0°C→5°C) の方が若干少なくなり、Ca(OH)₂ の生成量は A 膨張材では低温養生 (0°C→5°C) の方が少なく、B 膨張材では低温養生の場合が多くなっており、この場合膨張特性と Ca(OH)₂ の生成特性とはよく対応しているようである。また膨張が

ほぼ終了する材令 14 日での圧縮強度は 150 kg/cm² (14.7 N/mm²) 程度である。

図-12 および 図-13 は 0°C 養生後材令 3 日で 20°C 養生に移した場合であるが、A 膨張材の場合にはエトリンガイトの生成量が 20°C 養生継続の場合より少なく、また B 膨張材の場合には Ca(OH)₂ の生成量が 20°C 養生を継続した場合よりも多くなり、これらの生成特性はそれぞれコンクリートの膨張特性に影響していることがわかる。

図-14 と 図-15 は A 膨張材と B 膨張材の場合について材令 1 日まで 20°C 養生し、その後 5°C 養生した場合であるが、このときは両膨張材の場合ともに、エトリンガイトの生成量が 20°C 養生を継続した場合よりも少なく、したがって膨張率も 20°C 養生を継続した場合よりも小さくなったといえるのである。膨張終了材令 14 日での圧縮強度は 230 kg/cm² (22.5 N/mm²) 程度である。

また、A 膨張材の場合に 図-14 に示すように材令 1 日まで 20°C 養生し、その後 35°C 養生に移したとき、

あるいは 図—16 に示すように材令 1 日まで 35°C 養生し、その後 20°C 養生した場合には、20°C 養生を継続した場合と比べて、膨張性水和物の生成量は同程度か若干少なくなり、この場合も膨張性水和物の生成量は膨張特性と密接な関係を有していることがわかる。両場合ともに膨張終了材令は 5 日程度であり、そのときの圧縮強度は $230 \text{ kg/cm}^2 (22.5 \text{ N/mm}^2)$ 程度である。

B 膨張材の場合には 図—15 と 図—17 に示すように、材令 1 日まで 20°C 養生あるいは 35°C 養生し、その後養生温度をそれぞれ 35°C あるいは 20°C に変化させると、 Ca(OH)_2 の生成量に変化が生じるのである。すなわち、20°C → 35°C の場合は 20°C 養生継続の場合よりも、また、35°C → 20°C の場合には 35°C 養生継続の場合よりも、 Ca(OH)_2 の生成量が多くなっており、この現象が膨張率の急増につながったと考えられる。

したがって、この実験範囲で知る限りでは、膨張が可能な「場」の上限値は養生温度が 35°C 以上のときにみられるように、圧縮強度で $250 \text{ kg/cm}^2 (24.5 \text{ N/mm}^2)$ 程度であり、コンクリートの圧縮強度が 250 kg/cm^2 程度以下であれば、拘束膨張率は膨張性水和物の生成量の多少とコンクリートの強度発現性状に支配されると考えられる。

6. コンクリートの練り上がり温度が拘束膨張特性に及ぼす影響

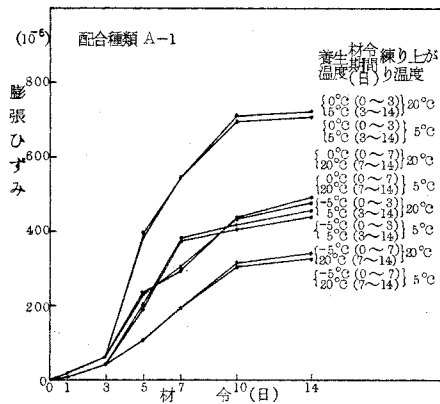
図—18 と 図—19 はコンクリートを所定の練り上がり温度にして、コンクリート打込み直後から所定の養生を開始し、コンクリートの練り上がり温度の相違が膨張特性に及ぼす影響を示している。コンクリート温度は練り上がり温度と養生温度との差が 40°C ある場合でも、打込み直後から 4 時間程度経過すると、養生温度にほぼ等しくなっている。

同図の結果から判断すると、コンクリートの練り上がり温度はまったくといってよいほど膨張特性に影響しないことが明らかにされたといえるのである。

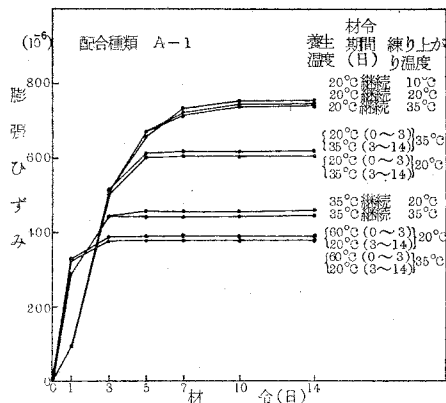
7. あとがき

本研究は膨張材種類、膨張材量およびコンクリートの配合条件を異にした種々の膨張コンクリートの拘束膨張特性に及ぼす温度の影響について明らかにした。

膨張コンクリートの膨張特性は養生温度あるいは養生期間中の温度変化に著しく影響され、また膨張材種類が異なれば温度が膨張特性に与える影響の程度は異なり、膨張特性と養生温度との関係について法則性を見つけることは現状では難問であることがわかった。以下に本実



図—18 コンクリートの練り上がり温度が膨張特性に及ぼす影響



図—19 コンクリートの練り上がり温度が膨張特性に及ぼす影響

験で得られた結果を要約する。

(1) カルシウムサルホアルミネート系の A 膨張材および石灰系の B 膨張材を使用した膨張コンクリートは、養生温度が一定の場合、ともに養生温度が高いほど膨張速度は早い、膨張はより若い材令で終了する。材令 14 日の膨張率は養生温度が 10°~20°C のとき、養生温度が 5°C 以下あるいは 35°C 以上の場合よりも大きくなり、養生温度が 5°C 以下では低ければ低いほど、また 35°C 以上では高ければ高いほど、小さくなることが明らかにされた。

(2) A 膨張材および B 膨張材を用いた膨張コンクリートは熱分析によって求めた脱水率を指標とするとエトリングイトおよび Ca(OH)_2 の生成量は養生温度が 10°~20°C のときに他の養生温度のときよりも相対的に多くなる傾向がある。養生温度が 5°C 以下の場合にはエトリングイトの生成量が少なくなること、また、養生温度が 35°C 以上のときには Ca(OH)_2 の生成量が少なくなる傾向があること、さらにはこの場合はコンクリート強

度があまりにも早く発現してしまうことが、それぞれ膨張率の低下につながったのではないかと考えられる。

(3) 20°C 養生の場合、A 膨張材あるいは B 膨張材の混入量を増加すると、膨張コンクリートの膨張率は増大し、前者ではエトリンガイト、後者では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量が増加することが特徴である。

(4) A 膨張材および B 膨張材を用いた膨張コンクリートは養生期間中に養生温度が変化すると膨張性状は急変することが明らかになった。

養生温度の変化に伴う膨張性状の急変の程度は打込み直後から養生温度あるいは養生温度が変化する材令によって異なる傾向がある。また、膨張材種類が異なると養生温度変化に伴う膨張性状の急変の様子も異なることが示された。養生温度の変化はエトリンガイトおよび $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成特性に影響することが認められた。

(5) 練り上がったコンクリートをすぐある一定温度で養生開始するときはコンクリートの練り上がり温度は膨張特性にはほとんど影響しないと考えられる。

(6) 拘束膨張機構に関しては、本実験範囲内ではコンクリート強度が膨張性水和物の生成量に応じた膨張能力の上限値に達してしまえば、膨張は終了してしまう傾向がみられ、コンクリート強度が膨張能力の上限値に達していない場面では、拘束膨張率はエトリンガイトあるいは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の両膨張性水和物の生成量の多少と、膨張反力支持要因としてのコンクリートの強度特性に支配されるようであり、両膨張性水和物の生成量がともに多いほど、さらにはコンクリート強度（セメントペースト

マトリックスの強度と考えた方がよい）が大きいほど拘束膨張率は大きくなる傾向がみられた。

本研究を行うにあたり、実験にご協力下されました大阪セメント株式会社、中野主任研究員ならびに和歌山工業高等専門学校、真田技官およびコンクリート研究室卒業研究生の諸氏に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Kleiger, P. and N.R. Greening: Utility of Expansive Cement, Proceedings, Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement (Tokyo, 1968), Paper IV-132, Cement Association of Japan, 1969.
- 2) Klein, A. and V.V. Bertero: Effects of Curing Temperature and Creep Characteristics of Expansive Concrete, Proceedings, ASTM, Vol. 63, 1963.
- 3) 中原・万木・中矢: 膨張性混和材のマッシュなコンクリート構造物への利用に関する基礎研究, 土木学会第 28 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部門, 1973.
- 4) 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.
- 5) 岡村・古沢・辻: 膨張コンクリートの膨張性状に及ぼす温度の影響, 第 1 回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1979.
- 6) 須藤・中村: $\text{C}_4\text{A}_3(\text{SO}_3)$ の水和膨張におよぼす温度の影響, セメント技術年報 XXIII, 1969.
- 7) 三宅・中川・磯貝: カルシウムサルホアルミネート系セメント混和材の基礎性状, セメント技術年報 XXIX, 1975.
- 8) たとえば磯貝・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 31, 1977.
- 9) 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.

(1981.4.13・受付)