

# [79] コンクリートの熱膨張係数に関する一考察

正会員 ○ 山川 秀次 (電力中央研究所)  
 正会員 中内 博司 (間組技術研究所)  
 正会員 喜多 達夫 (間組技術研究所)  
 正会員 大沼 博志 (電力中央研究所)

## 1. まえがき

マスコンクリート構造物の温度応力発生メカニズムなどの基本的な現象については、ここ数年間の研究成果によりかなりの部分が明らかにされている。しかしながら、既往の大部分の研究例ではコンクリートの初期硬化過程における熱特性の時間依存性については、断熱温度上昇曲線を除けば、考慮していないのが現状といえる。

マスコンクリート構造物の温度応力を解析的に推定する場合、コンクリートの初期硬化過程における熱膨張係数の時間依存性を考慮するか否かにより、コンクリート構造物に残留する温度応力の数値が変動し、1986年度よりコンクリート標準示方書に新しく導入されるマスコンクリート構造物の温度ひび割れ指数による評価をも変更させることになる。

本報告は、コンクリートの初期硬化過程における熱膨張係数の時間依存性を明らかにするための前段として実施した熱膨張係数試験結果と熱膨張係数に関する既往の研究成果について考察を加えたものである。

## 2. 熱膨張係数の時間依存性に関する既往の研究成果

表-1 コンクリートの熱膨張係数の時間依存性<sup>2)</sup>

コンクリートの熱膨張係数の測定方法に関しては、統一された規格、基準類はないが、既往の研究成果を要約すると以下ようになる。

コンクリートの調合			熱膨張係数 (μ/°C)			
水セメント比 (%)	セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	骨材容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	凝結直後	材令 3日	材令 7日	材令 28日
50	322	0.697	7.0	8.1	8.7	9.1

## 1) 一般にマスコンクリートで問題となるごく若い

令の硬化過程におけるコンクリートの熱膨張係数は、表-1に示すように材令の古いものに比較してやや小さいという傾向が認められるという報告例と、

表-2 コンクリートの熱膨張係数の時間依存性<sup>3)</sup>

コンクリートの調合					熱膨張係数 (μ/°C)		
セメントの種類	細骨材の種類	水セメント比 (%)	セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	骨材容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	硬化過程	材令 91日	材令 182日
中庸熟	海砂	45	364	0.682	8.64	7.93	7.80
	混合砂	45	371	0.676	8.38	7.66	7.49
	砕砂	45	402	0.653	8.12	7.41	7.32

これとは正反対に表-2ならびに図-1に示すように初期硬化過程における熱膨張係数は、材令の古いものに比較して大きいという報告例とがある。

2) 一定以上の材令(2~3週間程度)が経過したものについては、その熱膨張係数の変化はごく微小であり、事実上時間依存性に関しては無視できる。

3) コンクリートの熱膨張係数は、昇温過程と降温過程ではその値が異なり、表-3に示すように昇温過程の方が降温過程に比較して熱膨張係数が大きいという傾向が認められる。

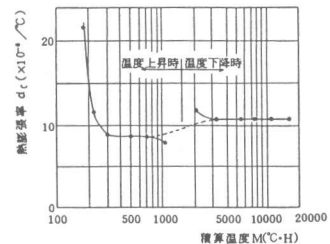


図-1 コンクリートの熱膨張率の経時変化<sup>4)</sup>

前述したようにこれまでの研究成果が必ずしも一致していないため、コンクリートの熱膨張係数の時間依存性については、熱膨張試験により再確認する必要が生じた。そこで、以下に述べる円柱供試体を用いた熱膨張試験と初期硬化過程の熱膨張係数の測定を目的とする柱状供試体を用いた熱膨張試験とを実施した。

## 3. 円柱供試体を用いた熱膨張試験

表-3 コンクリートの昇・降温が熱膨張係数に与える影響

コンクリートの調合				熱膨張係数 (μ/°C)	
フライアッシュ混合率 (%)	水セメント比 (%)	セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	骨材容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	昇温時	降温時
0	61.2	170 (266)	0.800 (0.712)	9.0	7.7
20	58.2	170 (266)	0.800 (0.710)	9.0	7.3
40	55.8	170 (266)	0.796 (0.706)	8.6	7.3

セメント：中庸熟 骨材：火成岩砕石・砕砂 ( )内は修正調合  
 原調合の最大骨材粒径は150mm、ただし、試験は40mm以下で実施

### 3.1 試験概要

コンクリートの熱膨張試験方法は未だ確立されておらず、研究者の自主的な判断に負う面も多いため、硬化コンクリートを対象とした熱膨張係数試験(試験開始材令56日で密封供試体と非密封供試体を3本

づつ作成)と比較的材令の若いコンクリート(試験開始材令10日で非密封供試体を3本作成)を対象とした熱膨張試験とを実施した。

### 3.2 使用材料、コンクリートの配合および供試体の作成

本試験では、結合材として中庸熱ポルトランドセメントとフライアッシュ(30%)を用いた。骨材は碎石で、岩質は珪質砂岩と角礫岩の混合したものである。コンクリートの配合を表-4に示す。供試体の成形は40mmの網ふるいでユニットスクリーニングして、40mm以上の粗骨材を取り除いたコンクリートによって行い、成形後20℃の恒温室に静置した。密封供試体はコンクリート打設後約5時間経過した時点で成形用型枠として使用した銅缶の上面に蓋をした後、直ちにハンダ仕上げを行って水分の逸散を防止し、試験開始材令まで20℃の恒温室で養生した。また、非密封供試体はコンクリート打設後24時間経過した時点で脱型して、試験開始材令まで恒温水槽中で養生した。供試体の形状は密封供試体ならびに非密封供試体とも直径20cmで高さ40cmの円柱形であり、図-2に示すようにその中心部にカールソン型歪計(CS-25F;ゲージ長さ25cm)を埋め込んだ。

### 3.3 試験方法

熱膨張試験には、水温制御用の温度調節計、10kwのヒーターおよび攪拌器より構成される図-3に示す外形85×85×86cmの断熱槽を用いた。また、試験は水中で行い、水の温度範囲は常温(約20℃)から75℃弱迄とした。さらに温度変化は5℃毎に段階的に上昇させ、所定の最高温度に到達後、昇温時と同様に5℃毎に段階的に常温まで降温させた。温度ならびに歪は供試体中心部に埋設したカールソン型歪計を用いて、設定温度毎に供試体の中心温度と周辺温度とが一致した時点より少なくとも1時間経過後に測定し、この結果に基づいてコンクリートの熱膨張係数を算出した。

### 3.4 試験結果ならびに考察

硬化コンクリートの熱膨張試験結果を図-4、図-5に示し、比較的材令の若いコンクリートの試験結果を図-6に示す。また、これらの結果を最小2乗法により整理したものを表-5に示す。これらの試験結果より以下の考察と結論が得られた。

- 1) 硬化コンクリート(密封供試体と非密封供試体)には、温度依存性ならびに昇・降温の影響による熱膨張係数の差異は認められない(図-4、5参照)。
- 2) 密封供試体と非密封供試体の熱膨張係数はほぼ同じ値であり、水分の移動(コンクリート中からの逸散)がなければ両者の値は同じと考えてよい。
- 3) 比較的材令の若いコンクリートでは、昇温過程における熱膨張係数は、コンクリートを弾性体と仮定し、しかも実測データが正しいものとなれば、降温過程における値よりも大きくなる傾向が認められる。しかしながら、図-6に示した結果を詳細に検討した結果、以下の結論を得た。図-6に示した温度変化量

表-4 コンクリートの配合

粗骨材の最大 寸法 (mm)	単位水量 (kg)	単位セメント量(C+F)		水セメント比 (%)	骨材容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
		セメント:C (kg)	フライアッシュ:F (kg)		
150	100	98	42	71	0.82

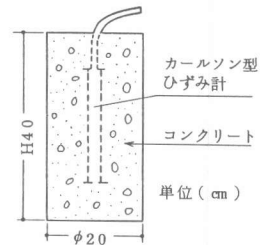


図-2 熱膨張試験用供試体

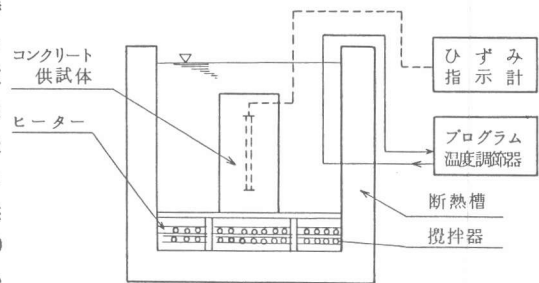


図-3 熱膨張試験装置

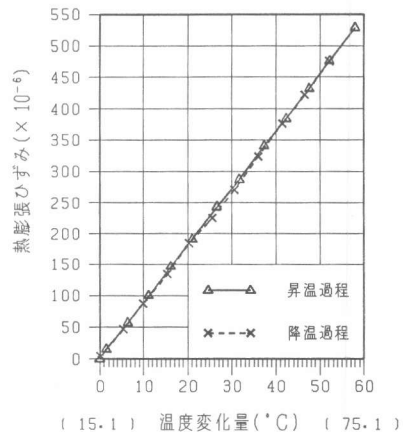


図-4 熱膨張試験結果 (密封供試体:試験開始材令56日)

の範囲をA, BおよびC段階に3分割し、それぞれの温度変化量の段階に対応する熱膨張係数を最小2乗法を用いて求めると表-6に示すようになる。すなわち、コンクリートの昇温過程における熱膨張係数が降温過程におけるものよりも大きくなった理由は、主として昇温過程におけるC段階での値が他の温度変化量範囲(AとB)の値に比較して約1~2割程度大きくなったためである。さらに、供試体中心温度が一定温度に到達したあとの温度保持期間中には歪計の実測歪に変動傾向が認められないことから、昇温過程における特に高温領域でのコンクリートの熱膨張係数の値が他の温度領域におけるものよりも大きくなった原因は、コンクリート供試体の昇温途中に生じているとの結論に至った。そこで、この現象を説明するために以下の仮説を立てることとした。

4) コンクリートの温度が上昇すると、コンクリートと計測器との熱膨張係数の差異に起因する拘束応力が発生する。このため、歪計本体(但し、歪計の熱膨張係数はコンクリートより大と仮定)に圧縮応力が、またその反作用として歪計本体近傍(特に端部)のコンクリートに引っ張り応力が発生することになるが、コンクリートの応力がある応力レベルを超えると塑性変形成分が加わるため、歪計の拘束歪が一部解放され、見かけ上のコンクリートの熱膨張係数が増加することになる。すなわち、コンクリートとカールソン型歪計の熱膨張係数をそれぞれKとb(但し、 $b > K$ )とし、また、温度変化量と歪計の抵抗比の変化量をそれぞれ  $\Delta t$ と $\Delta z$ とすると、コンクリートの熱膨張係数は式： $K = \Delta z / \Delta t + b$ で与えられるが、コンクリートが塑性領域に入ると、これまで温度上昇過程で負の値をとっていた $\Delta z$ の絶対値が小さくなり、見かけ上コンクリートの熱膨張係数が大きくなる。この現象は、砂質土の繰返し圧縮を行った場合に得られる砂の圧縮曲線と荷重強度との関係に類似していると考えても良い。また、このような現象は特にコンクリートの初期硬化過程(材令1日前後迄)において顕著に生じやすいと考えられるため、図-7に示す幅40cm×高さ40cm×長さ300cmの柱状供試体を用いて、初期硬化過程における熱膨張係数を計測することにした。

4. 柱状供試体による初期硬化過程における熱膨張試験

4.1 試験概要

本試験は、前述した推論の妥当性を間接的に裏づけることを一つの目的としたものであり、コンクリートの初期硬化過程における熱膨張試験としては不十分なものであることを付け加えておく。また、コンクリートの配合、成形および使用材料は、円柱供試体を用いた熱膨張試験の場合と同じものであり、コンクリート供試体の中心には図-7に示すように埋込み型歪

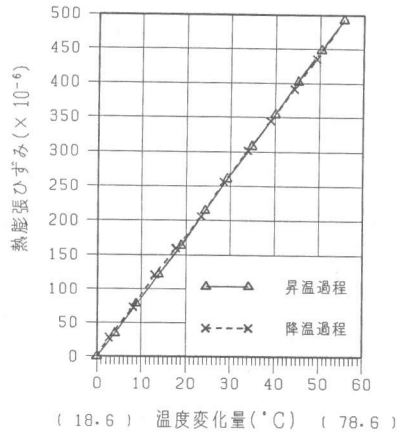


図-5 熱膨張試験結果(非密封供試体:試験開始材令56日)

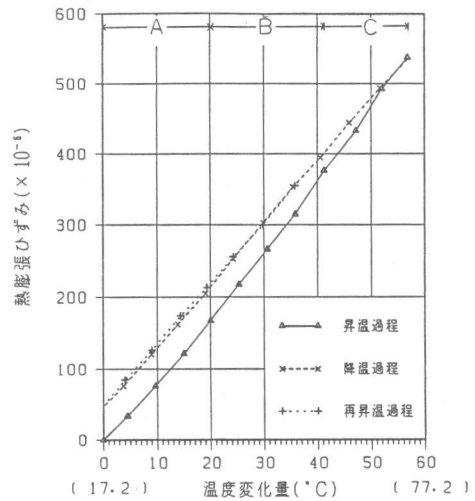


図-6 熱膨張試験結果(非密封供試体:試験開始材令10日)

表-5 コンクリートの昇・降温が熱膨張係数に与える影響

項目 供試体 体番号	密封供試体 熱膨張率 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	アンシール供試体 熱膨張率 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	アンシール供試体熱膨張率( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )		
			昇温時	降温時	最昇温時
1	9.02	9.22	9.32	8.82	8.83
2	9.04	8.78	9.24	8.60	8.54
3	8.85	8.85	9.60	8.91	8.93
平均	8.96	8.95	9.36	8.78	8.77
試験開始時 の材令(日)	56	56	10		

表-6 熱膨張係数の温度と昇・降温による影響

温度変化量 範囲	熱膨張係数( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )		
	昇温過程	降温過程	再昇温過程
A	8.18	8.55	8.59
B	9.22	8.50	8.38
C	10.32	8.46	—

計(BS-50 DS)とコンクリート有効応力計(GK-60-12020)とを直列に埋設した。コンクリートの応力と歪(熱膨張係数)の計測は、コンクリート打設直後より行い、また、コンクリート上面からの水分の逸散を防止するため、相対湿度約90%の恒温槽内に静置した。

#### 4.2 試験結果ならびに考察

コンクリートの初期硬化過程における実測応力ならびに歪と供試体中心温度との関係を図-8に示す。この図よりコンクリート有効応力計の実測応力が零すなわち柱状供試体全体に型枠等による拘束応力が発生していないにもかかわらず、実測歪の応力関与歪(但し、硬化後のコンクリートの熱膨張係数を用いて算出)が材令1日程度迄漸増傾向にあることが判る。そこで、この実測歪の変動をコンクリートの初期熱膨張係数が時間依存するとの大前提に基づき、逆にコンクリートの熱膨張係数を算出したものが図-9である。この図の結果が全面的に正しいものとする、コンクリートの初期硬化過程における熱膨張係数は、硬化後のものよりも大きく、しかも材令の経過に伴ってある一定値に収束するとの結論に至ることになる。しかしながら、初期硬化過程におけるコンクリートと歪計周辺における相互作用(相対変形等)ならびにコンクリートの塑性変形等を考慮するならば、コンクリートを弾性体として取り扱うには無理がありすぎることから、コンクリートの熱膨張係数に時間依存性が存在するとの結論には必ずしも至らない。そこで、硬化過程におけるコンクリートの熱膨張係数時間依存性については他の計測方法により再確認する必要があるものと考えられる。

#### 5. 終わりに

コンクリートの熱膨張係数の時間依存性を含めた熱的性質について、既往の研究結果ならびに試験

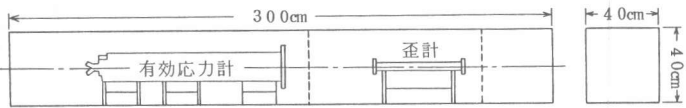


図-7 初期熱膨張係数試験用供試体の概要

結果を含めた考察結果より以下に示す結論を得た。

1) 比較的若材令におけるコンクリートの熱膨張係数の昇・降温過程における差異ならびに硬化過程(材令7日程度迄)における時間依存性の原因は、メカニズムとして同種のもので、コンクリートと歪計との熱膨張係数の差に起因して生じた応力により、コンクリートに塑性変形が生じ、この塑性歪成分を歪計が計測している可能性が強いものと考えられる。しかしながら、この種の現象については、データ数も少ないため他の計測方法を用いた実験により再確認する必要があるものと考えられる。

2) 3.4の試験結果と円柱供試体による熱膨張試験結果の考察に基づき、材令7日程度経過したコンクリートを対象とした場合には、少なくとも現状で以下のことは言えるものと考えられる。最初の昇温過程に引き続く降温過程ならびに再昇温過程における熱膨張係数は一定値となる。但し、再昇温過程の最高温度は最初の昇温過程における最高温度未満とする。

最後に、本研究の範囲では特に初期硬化過程における熱膨張係数の時間依存性に対して、定量的な評価が不十分であるため、他の計測方法による初期硬化過程を含めた熱膨張試験を実施しており、その結果が纏まり次第報告する予定である。

#### 6. 参考文献

- 1) 川口：コンクリートの熱膨張係数に関する既往の研究結果について、コンクリート工学協会、第1回マスコンコロキウム論文集、1982年9月
- 2) 大林組社内資料、文献 1) 参照
- 3) 九州電力社内資料、昭和56年8月、文献 1) 参照
- 4) 竹下他：マスコンクリート中の計器特性について、第2回マスコンコロキウム論文集、1984年3月
- 5) 榊原：電力中央研究所報告、NO.64046、1964年10月

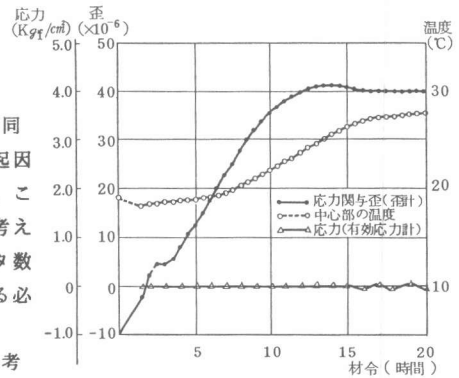


図-8 初期硬化過程における応力・歪履歴

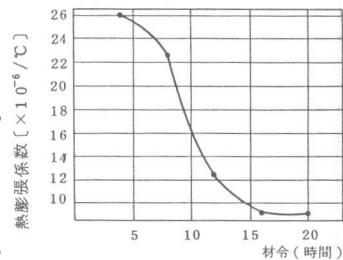


図-9 初期硬化過程における見かけ上の熱膨張係数の経時変化