Japan Concrete Institute

論文　若材齢コンクリートの熱膨張係数に関する実験的研究

国森　亮平*1・島崎　磐*2・六郷　恵哲*3・森本　博昭*3

要旨：コンクリートの熱膨張係数は温度応力の発現性状に大きな影響をおよぼす。コンクリートの若材齢期においては，熱膨張係数が特に大きく変化するため，これを的確に評価し解析に反映させなければならない。本研究では，若材齢コンクリートの熱膨張係数を高精度変位計（ギャップセンサー）および埋込型ひずみ計を用いた二つの方法で計測し，それぞれの測定法の適用性を比較，検討した。その結果，ギャップセンサーを用いた熱膨張係数測定法により若材齢コンクリートの熱膨張係数におよぼす材齢およびセメントの種類の影響を明らかにすることができた。

キーワード：熱膨張係数，若材齢，温度応力

1.　はじめに

コンクリートの温度ひびわれの制御には温度応力をいかに精度よく評価，推定するかが重要な要件となる。温度応力の発現性状にはコンクリートの熱膨張係数が大きく影響する。コンクリートの若材齢期では熱膨張係数が特に大きく変化するため，これを的確に評価し解析に反映させなければならない。コンクリートの熱膨張係数は熱膨張ひずみを測定して算出されるが，ひずみの計測はコンクリート中に埋設したひずみ計（埋込型ひずみ計）を用いるのが一般的である。埋込型ひずみ計は計器のフランジの付着・アンカー効果や周面摩擦によって計器に伝達される変形を計測するため，強度が十分に発現していない若材齢期に信頼性の高いひずみ計測ができるかどうかに疑問が残る。本研究では著者らが提案している変位計測法[1]と従来の埋込型ひずみ計を用いたひずみ計測法により熱膨張係数測定の実験を行い，若材齢コンクリートの熱膨張係数の性状を明らかにするとともに，各々の測定法の適用性を検討した。

2.　実験方法

2.1　実験概要

コンクリートの熱膨張係数の測定にはまだ規準化された方法はない。本研究では，変位計測法と埋込型ひずみ計測法の二つの計測法により若材齢コンクリートの熱膨張係数の性状を明らかにするとともに，各計測法の適用性を検討した。

表－1　コンクリートの配合

セメントの種類	水・セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
普通	50	40	197	350	719	1100
早強	50	40	197	350	718	1099

*1 岐阜大学大学院　工学研究科土木工学専攻　（正会員）
*2 岐阜工業高等専門学校教授　環境都市工学科　（正会員）
*3 岐阜大学教授　工学部土木工学科　工博　（正会員）

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

2.2 コンクリートの配合と供試体

セメントには普通および早強ポルトランドセメントの二種類を使用した。

骨材は揖斐川水系根尾川産の洗浄砂を用いた。骨材の岩質割合は，玄武岩30%，安山岩15%，石灰岩15%，花崗岩15%，その他25%である。骨材表乾比重は，粗骨材2.63，細骨材2.61で，最大骨材寸法は25mmである。コンクリートの配合を表－1に示す。

熱膨張係数計測用供試体はコンクリート打設後10時間で脱型し試験開始材齢まで20℃の水中養生を行った。表－2に供試体の種類と試験開始材齢を示す。各供試体には図－1に示すように中央部と内側部に温度測定用熱電対を埋め込んだ。また，埋込型ひずみ計(T社製KM－100B)は表－2の供試体記号N_1，N_2，H_1，H_2に埋設した。供試体は全て10×20cmの円柱供試体を用いた。

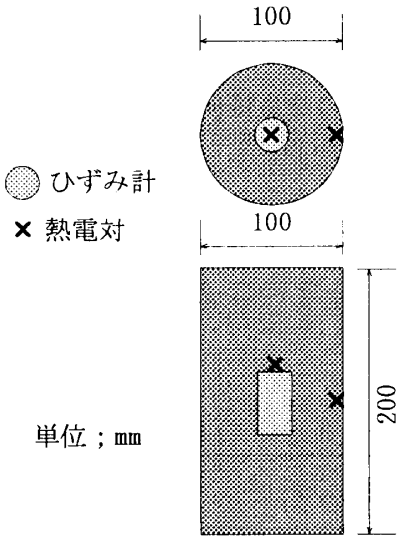
2.3 実験方法および測定装置

熱膨張係数測定試験には，水温制御用の液圧式自動温度調節器および水循環ポンプ式を備えた図－2に示す内径30×40cmの試験用水槽を用いた。恒温養生水槽より取り出した供試体は直ちに図－2の測定台に移設し，その後，供試体の温度を安定させるために30分間程度静置してから試験を開始した。供試体の熱膨張ひずみ計測のための試験水槽の温度上昇量は5℃／hr.とし，上昇開始後1時間で所定の温度となるように水温の制御を行った。各供試体は第一回目の試験終了後は再び養生水槽に戻し，繰り返し試験体として使用した。変位計測法では，図－2に示した分解能1/10000mmのギャップセンサー(S.G.社製)により供試体上端の熱変位量を計測した。測定台は，インバール鋼(熱膨張係数0.8×10^{-6}／℃)で作製されている。

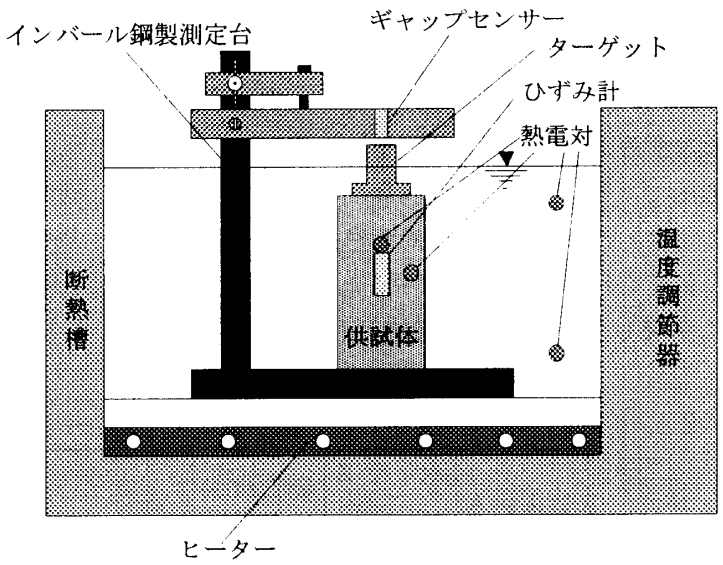
3. 結果および考察

3.1 供試体温度と熱膨張ひずみ

試験中の試験槽温度と供試体温度の測定例を図－3に示す。図から，供試体中心部と内側部の温度は，ほぼ一致して試験槽の温度上昇に追随して上昇していくことがわかる。また，試験



図－1 計器埋め込み位置



図－2 試験装置

表－2 供試体の種類と試験開始材齢

供試体番号									
	普通	N_1，N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9
	早強	H_1，H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9
第一回目の試験開始材齢 (hr.)		12	24	36	48	60	72	96	168

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

槽温度は供試体の上端部と下端部で差異はなかったので，供試体には一様の熱膨張が生じており，変位計測法で供試体の長さ変化から熱膨張係数を算定しても問題がないと判断することができる。

表－3は，N_1，H_1供試体の各試験材齢における試験槽の昇温速度である。表から，いずれの試験材齢においてもN_1供試体の昇温速度は4.7℃／hr.前後，H_1供試体で5.0℃／hr.程度であった。他の供試体についてもほぼ同程度の値であった。

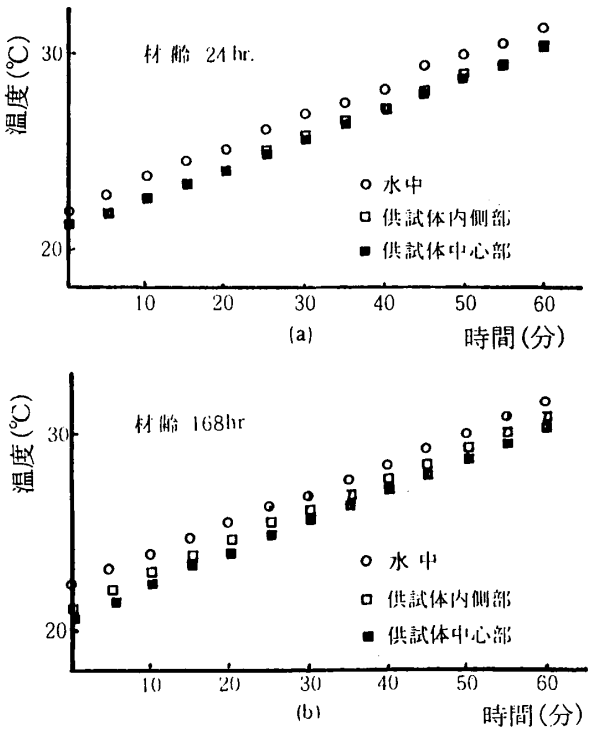
図－4に変位計測法による材齢24hr.での熱膨張ひずみの測定例を示す。図から，N_3，H_3供試体いずれについても，温度と熱膨張ひずみとの間には良好な直線関係が認められ，精度よく熱膨張係数を算出できることがわかる。

3.2 熱膨張係数に及ぼす材齢の影響

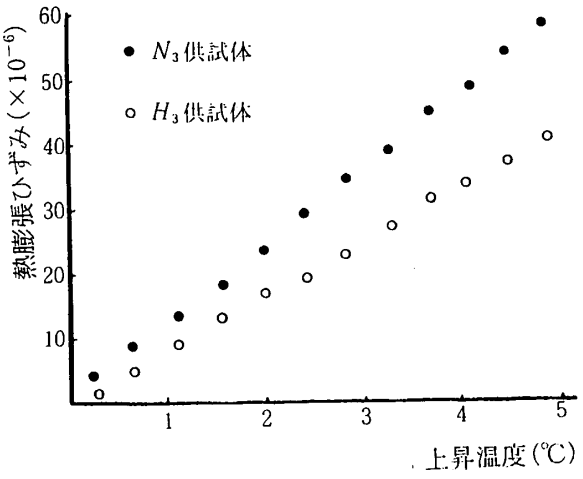
表－4，および図－5，6に変位計測法によって得られた各供試体の熱膨張係数を示す。図－5，6において，実線は各供試体の第1回目の測定から得られた熱膨張係数，すなわち処女測定値を表わす。一方，破線は繰り返し使用した供試体の測定値を含めた各材齢における平均測定値を表わす。各図から，処女測定値と平均測定値とはよく合致しており，また材齢の進行に伴う熱膨張係数の定性的傾向も両者は類似し

表－3 各試験の昇温速度(℃／hr.)

供試体	センサー位置	材齢 (hr.) 12	24	36	48	60	72	96	168	平均
N_1	中心部		4.6	4.8	4.5	4.9	4.8	4.6	4.8	4.7
	内側部		4.6	4.8	4.5	4.9	4.8	4.6	4.8	4.7
	水中		4.6	4.8	4.6	4.9	4.9	4.5	4.8	4.7
H_1	中心部	5.1	4.9	5.0	4.8	5.0	5.0	4.8	5.2	5.0
	内側部	5.1	5.0	5.0	4.8	5.0	5.0	4.8	5.2	5.0
	水中	5.0	5.0	5.0	4.8	5.0	4.9	4.8	5.0	5.0



図－3 供試体の温度上昇



図－4 熱膨張ひずみと温度との関係

NII-Electronic Library Service

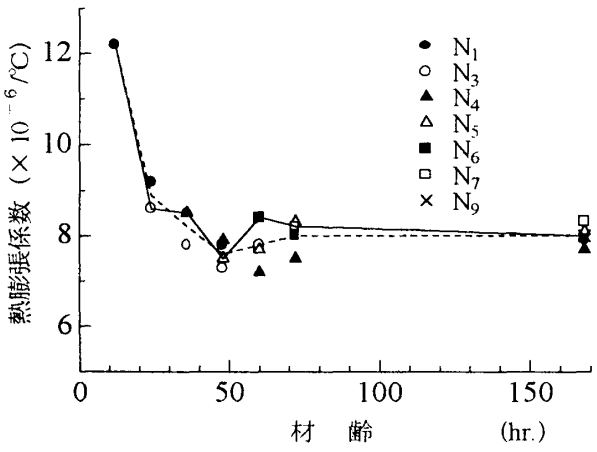
Japan Concrete Institute

ている。このことから，試験時に供試体に与える温度履歴が，少なくとも20℃～25℃の範囲内であれば一つの供試体を繰り返し使用しても大きな問題はないと考える。

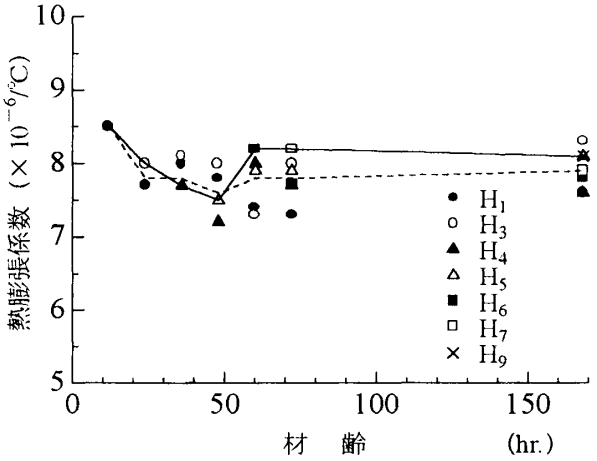
図－5から，普通セメントコンクリートの熱膨張係数は，材齢の進行に伴い7.6～12.2×10^{-6}／℃の範囲内で大きく変化することがわかる。すなわち，強度発現のごく初期の段階である材齢12hr.で最も大きな値となる。そしてその後は急激に減少し，材齢48hr.前後で極小値を示す。その後は漸増傾向を示し材齢72hr.以降はほぼ一定値に収束する。一方，図－6から，早強セメントコンクリートについても普通セメントコンクリートとほぼ同様の傾向を示すが，材齢による熱膨張係数の変化は緩やかである。特に，材齢12hr.における熱膨張係数は，他の材齢に比べて普通セメントコンクリートほど大きくはならない。これは，早強セメントコンクリートの硬化の進行が早いためであると考えられる。このように，普通セメントコンクリートと早強セメントコンクリートのいずれにおいても，硬化のごく初期の段階で大きな熱膨張係数を示すが，これはコンクリートの硬化過程初期では未水和状態の水分が多量に存在しており，コンクリートの熱膨張係数がセメントや骨材などと比較して大きな熱膨張係数をもつ水に強く

表－4　熱膨張係数測定結果(×10^{-6}／℃)

材齢 (hr.)		12	24	36	48	60	72	168	材齢 (hr.)		12	24	36	48	60	72	168
普通セメント	N_1	12.2	9.2	8.5	7.8	7.7	8.0	7.9	早強セメント	H_1	8.5	7.7	8.0	7.8	7.4	7.3	7.6
	N_3		8.6	7.8	7.3	7.8	8.2	8.0		H_3		8.0	8.1	8.0	7.3	8.0	8.3
	N_4			8.5	7.9	7.2	7.5	7.7		H_4			7.7	7.2	8.0	7.7	7.6
	N_5				7.5	7.7	8.3	8.1		H_5				7.5	7.9	7.9	8.1
	N_6					8.4	8.0	8.3		H_6					8.2	7.7	7.8
	N_7						8.2	8.3		H_7						8.2	7.9
	N_9							8.0		H_9							8.1
	平均	12.2	8.9	8.2	7.6	7.8	8.0	8.0		平均	8.5	7.8	7.8	7.6	7.8	7.8	7.9



図－5　熱膨張係数と材齢の関係
(普通セメント)



図－6　熱膨張係数と材齢の関係
(早強セメント)

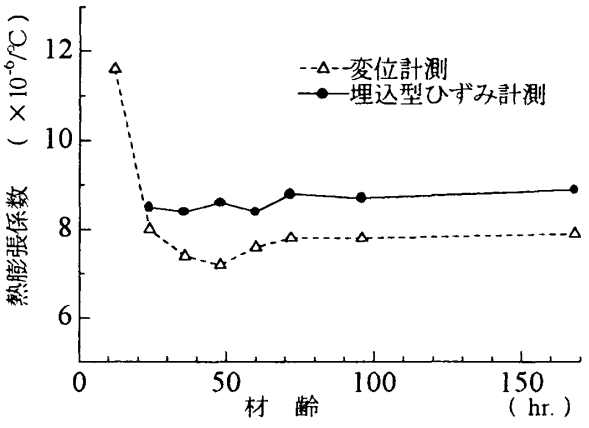
NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

依存するためと考えられる。硬化のごく初期において熱膨張係数が大きくなる現象については，竹下らも同様の報告をしている[2]。

また，材齢48hr.前後で極小となった熱膨張係数はそののち漸増して，材齢72hr.以降はほぼ一定値に収束する傾向を示すが，これは硬化が進行するに伴いコンクリート内部の水分の熱膨張の影響が次第に小さくなるためと考えられる。これに関して，井上らや山川らは，材齢1～2日のコンクリートの熱膨張係数は大きく，その後は漸減して一定値に収束することを報告している[3),4)]。一方，川口は若材齢硬化過程のコンクリートの熱膨張係数は，材齢の古いものに比べやや小さいことを報告している[5)]。

図－5，6で，普通セメントコンクリートと早強セメントコンクリートの熱膨張係数を比較すると，ごく初期の材齢を除いて全般的に両者はほぼ同様の値を示すことがわかる。



図－7　熱膨張係数と材齢の関係

3.3　熱膨張ひずみ計測法の影響

埋込型ひずみ計の計測値から実ひずみを計算するには次式を用いる。

$$\varepsilon_r = C \cdot \varepsilon_i + 11.7 \times 10^{-6} \times \Delta t - C \times \chi \quad (1)$$

ここで　ε_r：実ひずみ

C　：校正係数

ε_i：ひずみ計の指示値

Δt：温度差

χ：ひずみ計の零点移動量

表－5および図－7に，普通セメントコンクリートの変位計測法と埋込型ひずみ計測法による熱膨張係数測定値を示す。各測定法による熱膨張係数を比較すると，埋込型ひずみ計測法から得られた値は，材齢24hr.以降は材齢にかかわらず8.4～8.9×10⁻⁶／℃の一定値を示している。しかし，材齢12hr.においてはコンクリートの硬化がごく初期の段階にあるためコンクリートと計器との一体化が不十分で，コンクリートの熱伸縮に計器が正確に追随しないため意味のある計測値を得ることはできなかった。一方，変位計測法によって得られた値は，前節で述べたように，硬化初期の段階で大きく変化した後，埋込型ひずみ計測法で得られた値とほぼ同様の8.0×10⁻⁶／℃前後の値に収束していくことがわかる。以上のように，埋込型ひずみ計測法では，コンクリート硬化のごく初期における熱膨張係数の性状を十分に把握することが困難であった。この原因として，①コンクリートと埋込型ひずみ計との一体性，および②埋込型ひずみ計のひずみ補正計算の二つが考えられる。

まず①のコンクリートと埋込型ひずみ計と

表－5　熱膨張係数測定結果(×10⁻⁶／℃)

材齢(hr.)		12	24	36	48	60	72	96	168
変位計測	N_1	11.6	7.9	7.5	7.1	7.5	7.6	7.6	7.6
	N_2	-	8.4	7.3	7.3	7.6	7.9	7.9	8.2
	平均	11.6	8.0	7.4	7.2	7.6	7.8	7.8	7.9
埋込型ひずみ計測	N_1	-	8.6	8.2	8.5	8.3	8.8	8.8	8.7
	N_2	-	8.4	8.5	8.7	8.4	8.8	8.6	9.1
	平均	-	8.5	8.4	8.6	8.4	8.8	8.7	8.9

NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

の一体性については，前述のように，強度の発現が十分でないごく初期の材齢においてはコンクリートと計器との一体性が十分でないため変形の伝達が完全になされていないことが考えられる。従って，例えば計器のフランジ径を大きくして変形追随性を改善するなどの検討が必要であると考える。

次に②の補正計算について，図－8に補正係数測定治具を示す。図に示すように，埋込型ひずみ計に鋼製の拘束枠を取り付け，この状態で単位変位および単位温度変化を与える。この時のひずみ計の出力から式(1)の補正計算式が求められる。式(1)の右辺の第2項および第3項は，コンクリートと計器との熱膨張の差を補正するための項で，第2項の係数が11.7×10^{-6}となっているのは計器を鋼製枠に取り付けたためである。従って，測定対象となるコンクリートの熱膨張係数が鋼の熱膨張係数と大きく相違する場合は，補正項の値が変化することになる。一方，前述のように若材齢期にはコンクリートの熱膨張係数が大きく変化するため，式(1)を用いると補正誤差が大きくなる可能性がある。以上の理由から，この種類の埋込型ひずみ計を用いて若材齢コンクリートの熱膨張ひずみを計測する場合は，上で述べた二つの点に留意する必要があると考える。

4. まとめ

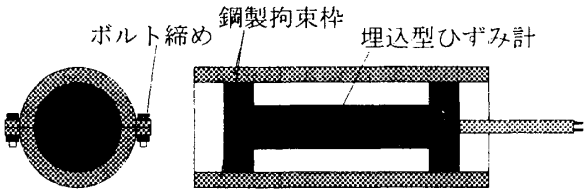
本研究では，若材齢コンクリートの熱膨張係数を高精度変位計（ギャップセンサー）および埋込型ひずみ計を用いた二つの方法で測定をした。熱膨張係数におよぼす材齢およびセメントの種類の影響を明らかにするとともに，二つの測定法の適用性を比較，検討した。本研究で得られた知見をまとめると次のようになる。

(1)コンクリートの硬化のごく初期の段階で熱膨張係数は大きな値を示すが，硬化の進行に伴い急激に減少する。そして，材齢48hr.前後で極小の値を示したのち漸増し，材齢72hr.付近でほぼ一定の値に収束する。

(2)早強セメントコンクリートの熱膨張係数は，普通セメントコンクリートほど材齢の影響を受けず，材齢の進行に伴い普通セメントコンクリートとほぼ同じの値に収束していく。

(3)ギャップセンサーを用いた変位計測法により，若材齢期におけるコンクリートの熱膨張係数の性状を明らかにすることができた。

一方，埋込型ひずみ計を用いた方法では，硬化のごく初期の熱膨張係数の変化を把握することが困難であった。



図－8　埋込型ひずみ計の補正係数測定方法

参考文献

1)島崎　磐：コンクリートの熱膨張係数に関する一実験について，岐阜工業高等専門学校紀要，25，pp.11－14，1990

2)竹下　治之，浅沼　潔，横田　秀彦：マスコンクリートの基礎的特性について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，pp.27－34，1982

3)井上　元，内藤　英晴，小堀　光憲：マスコンクリートにおける熱膨張係数の時間依存性について，土木学会第43回年次学術講演会概要集，Vol.V，pp.438－439，1988

4)山川　秀次，中内　博司，喜多　達夫，大沼　博志：コンクリートの熱膨張係数に関する一考察，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.313－316，1986

5)川口　徹：コンクリートの熱膨張係数に関する既往の研究成果について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，pp.15－18，1982

NII-Electronic Library Service