論文　膨張材を混和したコンクリートの拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響

三谷　裕二[*1]・谷村　充[*2]・佐久間　隆司[*3]・佐竹　紳也[*4]

要旨：拘束膨張特性を中心に，20℃で練り混ぜた後，温度範囲 20～70℃で養生された膨張コンクリートの諸特性を実験的に検討した。その結果，拘束鋼材比 0～1.5%の範囲において，①自由膨張ひずみは養生温度の影響を受けやすく，高温度になると大幅に増加する，②拘束膨張ひずみは自由膨張の場合より養生温度の影響を受けにくい，③導入される拘束応力は拘束鋼材比を増すと大きくなるが，拘束鋼材比間の拘束応力の差は高温度になると小さくなる，④膨張コンクリートのなす仕事量は，養生温度 30℃以下では拘束鋼材比に拘わらずほぼ一定値となるが，40℃以上では高温度になるほど差が大きくなる，ことなどを明らかにした。

キーワード：膨張コンクリート，養生温度，自由膨張，拘束膨張，拘束応力，仕事量

1.　はじめに

コンクリート構造物のひび割れは，機能上，美観上，かつ耐久性上，種々の問題を引き起こす。ひび割れに対して有効な対策となる諸方法のうち，材料面からのアプローチ，特に混和材料を用いる方法が広く普及している。この種の混和材料のうち，膨張材は広く利用されているものの一つであり，その使用実績も多い。膨張材のひび割れ低減効果についても，過去の膨大な研究，実構造体での検証実験などにより，定性的にはほぼ把握されている。しかし，昨今の性能照査型設計への移行とも相まって，そのような膨張材の効果をより定量的に把握する必要性が生じている。

膨張材を混和したコンクリートの膨張性状は，多かれ少なかれ温度の影響を受けることが知られている。この点について，過去に幾つかの研究報告[1)]はみられるが，定量的に評価することが難しい特性の一つであると考えられる。一方，構造物の大型化・大断面化が進む中，温度がある程度高い条件下での膨張性状を検討しておくことの必要性は高い。

そこで本研究では，膨張材を混和したコンクリートを 20℃で練り混ぜた後，所定の温度条件（20～70℃）で養生した際の諸特性，特に拘束膨張特性について実験的に検討した。また，膨張コンクリートの仕事量一定則の適用性について検討を加えた。

2.　実験概要

2.1　使用材料および配合

表－１，**表－２**に本実験における使用材料および配合を示す。普通ポルトランドセメントに 30kg/m^3 の石灰系膨張材を混和し，水/（セメント＋膨張材）比を 55%とした。配合条件は設計基準強度 30MPa，スランプ 15±2.5cm，空気量 4.5±1.5%とした。

2.2　養生方法

検討した養生温度は 6 水準であり 20～70℃の範囲において 10℃間隔とした。練り混ぜは 20℃，R.H.80%の試験室内で行い，打込みは養生温度 20，30℃のものは所定温度の恒温室内，養生温度 40～70℃のものは約 20℃の室内で行った。打込み完了後，ブリーディングがある程度終了するまで約 1 時間 30 分静置させた後，表面処理および湿布を施した。40～70℃は表面処理，湿布の後，各温度の恒温槽に投入した。材齢 1 日で脱型した後，供試体全表面をアルミ

*1 太平洋セメント(株)　中央研究所第１研究部　建設技術グループ　工修　（正会員）
*2 太平洋セメント(株)　中央研究所第１研究部　建設技術グループ主任研究員　工修　（正会員）
*3 太平洋マテリアル(株)　開発研究所　（正会員）
*4 太平洋マテリアル(株)　開発研究所　工修　（正会員）

表－1　使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ，密度：3.16g/cm^3，比表面積：3310cm^2/g
膨張材	EX	石灰系膨張材，密度 3.14g/cm^3
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
細骨材	S	小笠産陸砂，密度(表乾)：2.59g/cm^3，吸水率：1.63%，F.M：2.88
粗骨材	G	岩瀬産砕石 2005，密度(表乾)：2.64g/cm^3，吸水率：0.84%，F.M：6.61

表－２　配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量　(kg/m^3)					
		W	C	EX	S	G	SP
55	47	175	288	30	830	951	0.636

箔粘着テープでシールし，材齢 7 日まで封緘養生を行った。尚，40～70℃の供試体は，恒温槽から出して速やかに脱型およびシールを行い，恒温槽内に再投入した。

2.3　作製供試体および測定方法

2.3.1　凝結および強度特性

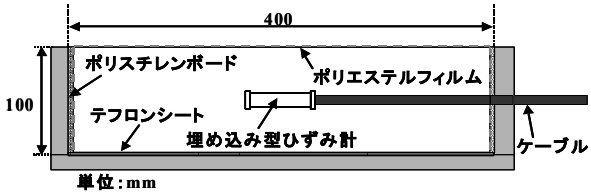
JIS A 1147 に準拠して凝結試験を行った。また，JIS A 1108，JIS A 1149，JIS A 1113 に従って圧縮強度，静弾性係数および引張強度を測定した。測定材齢は 1，3，7，28 日であり，所定材齢までは各温度下において封緘養生を行った。

2.3.2　自由膨張特性

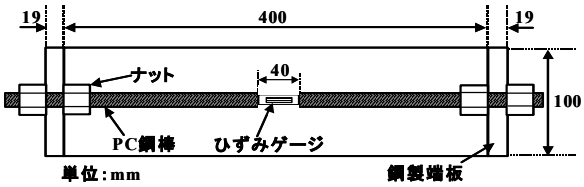
図－１に自由膨張ひずみ測定用供試体を示す。コンクリートの自由な変形を，型枠が拘束することを防止する方法は，日本コンクリート工学協会・自己収縮委員会の「セメントペースト，モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」にほぼ準拠させた[2)]。また，打設面にはポリエステルフィルムを被せ，乾燥を防止した。

供試体中央部に設置された低弾性型(弾性係数：約 40MPa)の測温機能付き埋込みゲージによってひずみを測定し，ゲージの測定値から温度ひずみを差し引いて自由膨張ひずみとした。ここでの温度ひずみは，コンクリートの線膨張係数を 10×10^{-6}/℃として算出した。硬化過程の線膨張係数はこの値よりも大きく，また，材齢によっても変化することが考えられるが，測定を行っていないため，この値を用いた。

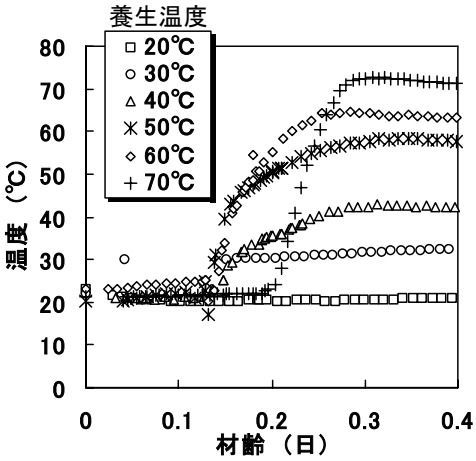
2.3.3　拘束膨張



図－１　自由膨張ひずみ測定用供試体



図－２　拘束膨張ひずみ測定用供試体



図－３　温度履歴

図－２に拘束膨張ひずみ測定用供試体を示す。用いた PC 鋼棒は呼び名 D9.2，D13，D17 の 3 種類である。拘束鋼材比を 0.5，1.0，1.5% の 3 水準とし，各 PC 鋼棒の中央部 40mm 区間を切削して，この中央部分が所定の拘束鋼材比となるよう，円断面に加工した。

鉄筋ひずみは，PC 鋼棒中央切削部の対称面に貼付した自己温度補償型のひずみゲージによって測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 供試体の温度履歴

図－３に実際の供試体内部の温度履歴を示す。材齢の起点は打設完了時としている。70℃は若干遅れたものの，40～60℃はほぼ同材齢時に所定温度の恒温槽内へ投入した。また，恒温槽へ投入後，約 3 時間で供試体の内部温度が所定の養生温度に達した。

3.2 凝結特性

図－４に凝結試験結果を示す。70℃は恒温槽への投入が若干の遅れたため，ここでは 20～60℃で議論する。温度が高くなると始発時間が早くなり，また，40℃以上になると始発から終結までの時間も急激に短くなることが分かる。始発から終結までの時間は 20～60℃でそれぞれ 2.5，1.5，1.0，0.7，0.5 時間であった。

3.3 圧縮強度特性

図－５に各温度下における圧縮強度の経時変化を示す。材齢 1 日において，20℃に対する圧縮強度の比率は 30℃で約 2 倍，40～60℃で約 3 倍であった。しかし，材齢 7 日以降では温度に関係なくほぼ同等であった。

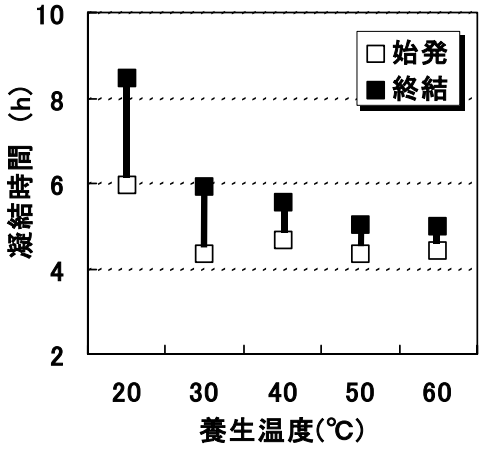
図－６に式（1）より求めた圧縮強度と積算温度の関係を示す。同図には，著者らが別に行った，同一配合で膨張材を混和しない普通コンクリートの試験結果を併記した。これより，圧縮強度と積算温度の関係は，膨張材の有無にかかわらず，ほぼ同一の 2 直線で表すことができる。すなわち，膨張材を混和した場合も，圧縮強度は積算温度によって評価可能である。

$$f_c' = \alpha \log_{10} M - \beta \quad \cdots\cdots \quad (1)$$

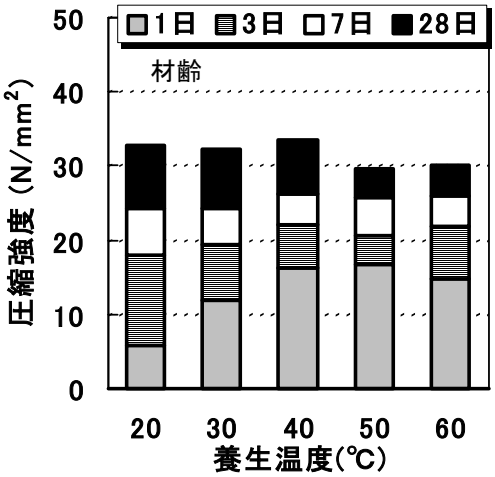
$$M \ (\text{積算温度}) = \sum_{z=1}^{n} (\theta_z + 10)$$

z ：材齢，　α，β ：定数，　f_c' ：圧縮強度

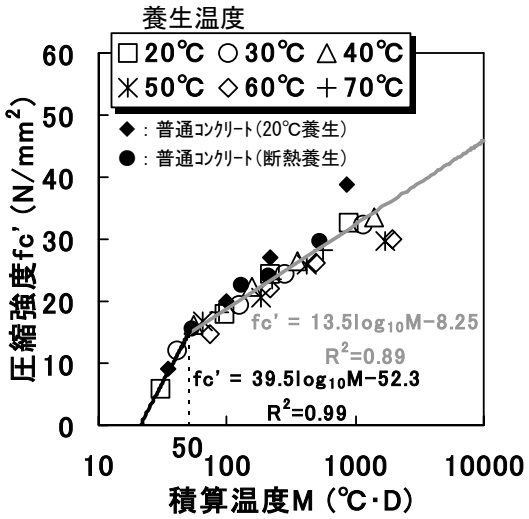
θ_z ：材齢 z 日でのコンクリートの平均温度



図－４　凝結特性

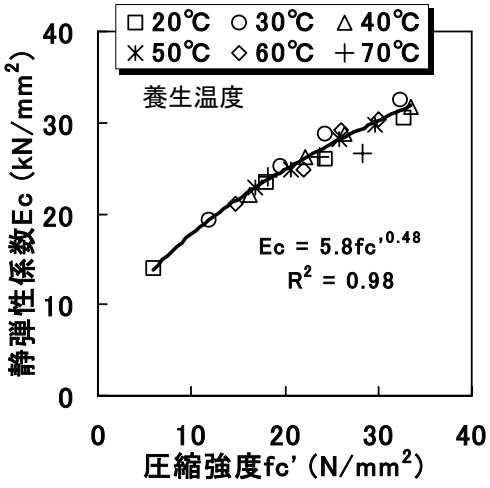


図－５　圧縮強度

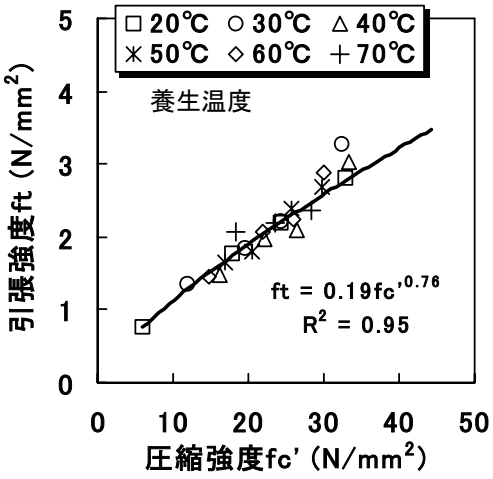


図－６　圧縮強度と積算温度の関係

図－７に静弾性係数と圧縮強度の関係，**図－８**に引張強度と圧縮強度の関係を示す。静弾性係数と引張強度は養生温度に拘わらず，圧



図－７　静弾性係数と圧縮強度の関係



図－８　引張強度と圧縮強度の関係

縮強度によって一義的に表すことができる。参考のため，関係式を図中に示す。

3.4　自由・拘束膨張特性

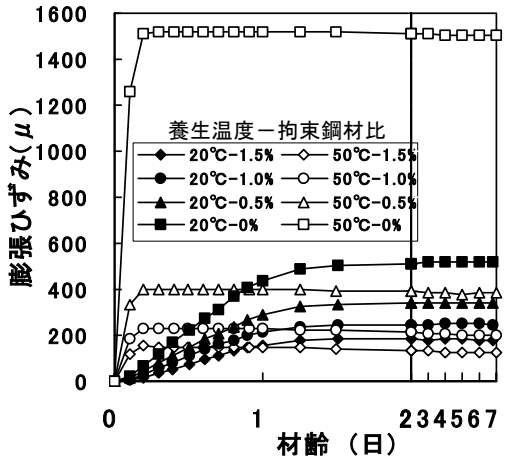
図－９に，20℃と 50℃における自由膨張ひずみと拘束膨張ひずみの経時変化を例示する。養生温度が高いほど早い段階で大きな膨張が生じ，また，膨張が収束する時期も早まる。膨張ひずみが最大となる材齢は，始発からみて温度の低い方から順に，1.5，0.8，0.5，0.4，0.3，0.2 日であった。**図－４**に対比してみると，養生温度 60℃の場合，終結から約 6 時間後に最大値に達する。以上の傾向は拘束膨張ひずみの場合も同様である。

図－１０に自由膨張ひずみおよび拘束膨張ひずみの最大値，**図－１１**に 20℃の膨張ひずみに対する，各養生温度での膨張ひずみの比率を示す。自由膨張ひずみをみると，30℃を境界に，温度の上昇に伴って大幅に増加する傾向を示し，20，30℃の場合と比較して，40℃では約 1.5 倍，50～70℃では約 2 倍となった。50～70℃間での明確な傾向はみられないが，自由膨張ひずみは温度の上昇によって増加し続けることはなく，50℃で最大となった。

一方，拘束膨張ひずみは 40℃以上になると徐々にひずみの減少がみられる。しかしながら，ひずみの絶対値をみると，養生温度の影響は自由膨張の場合より相対的に小さくなっており，60，70℃の拘束鋼材比 1.5%の場合でも，20℃の 70～80%であった。

図－１２に拘束膨張ひずみによってコンクリートに導入される拘束応力の最大値を示す。拘束鋼材比が高いほど導入される拘束応力は大きくなるが，40℃以上になると徐々に減少し，高い温度では拘束鋼材比間の拘束応力の差が小さくなった。

図中の点線は，「コンクリート標準示方書」[3)]における収縮補償用コンクリートの目安となる範囲を示す。この範囲は JIS A 6202 参考-1 の A 法に準じた拘束膨張ひずみ 150～250 μ とされているが，ここでは比較のため，拘束応力により示した。A 法における拘束鋼材比は約



図－９　自由・拘束膨張ひずみの経時変化

1.0%であるので，本実験の拘束鋼材比 1.0%の結果を対比すると，高温度になるほど拘束応力は小さくなるが，70℃の場合でも，規定範囲内の拘束応力は確保されていることが分かる。

4. 仕事量の適用性

4.1 膨張コンクリートの仕事量一定則

コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量 U は式（2）で表される。また，拘束応力は式（2）を変形した式（3）より，仕事量の平方根を介して求められる。既往の研究より，拘束鋼材比 0.67～4.0%の範囲において，仕事量 U はほぼ一定値となることが確認されている [4)]。ただし，この仕事量一定則は 20℃程度の標準養生温度下においてのみ確認されており，高い温度下における検証例はほとんどない。そこで，本実験結果を基に，養生温度が高い場合の仕事量一定則の適用性について検討した。

$$U = \frac{1}{2}\sigma_{cp}\varepsilon = \frac{1}{2}pE_s\varepsilon^2 \quad \cdots\cdots \quad (2)$$

$$\sigma_{cp} = \sqrt{2E_s p}\cdot\sqrt{U} \quad \cdots\cdots \quad (3)$$

σ_{cp} ：拘束応力

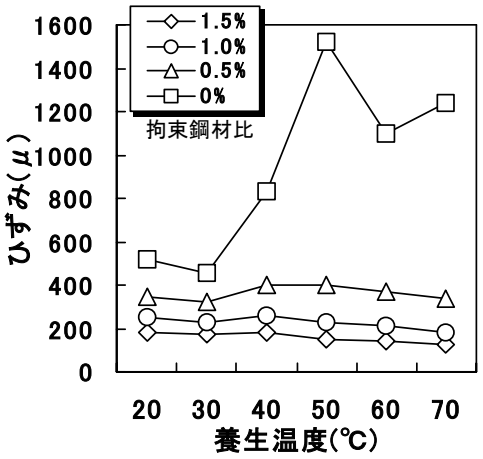
ε ：拘束膨張ひずみ

E_s ：拘束鋼材の弾性係数

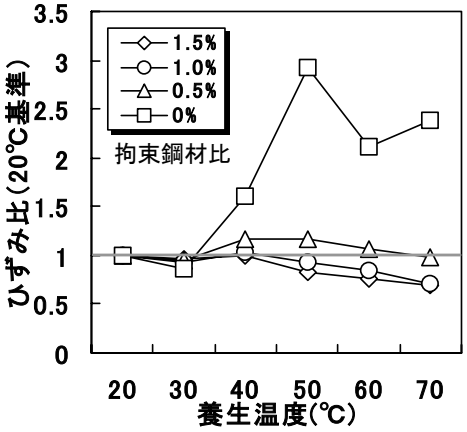
p ：拘束鋼材比

4.2 仕事量に与える養生温度の影響

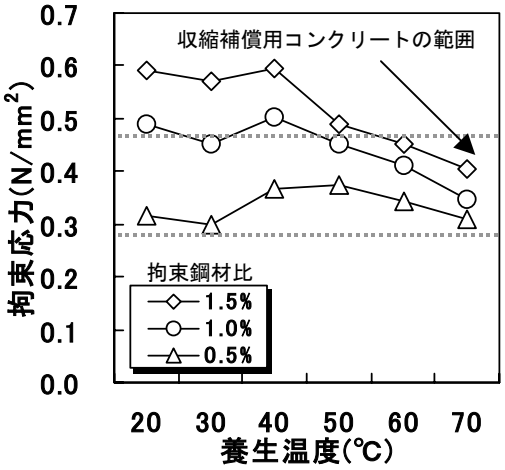
図－１３に，実験結果を基に計算された 20℃と 50℃における仕事量の平方根の経時変化を示す。20℃の場合には，拘束鋼材比による仕事量の差がほとんどない。一方，50℃の場合には，拘束鋼材比が大きいほど仕事量が小さくなり，拘束鋼材比間の差が顕著であった。**図－１４**に全養生温度における，拘束鋼材比 1.0%における仕事量の平方根に対する 0.5%および 1.5%における仕事量の平方根の比率を示す。20，30℃の場合，過去の研究結果 [4)]と同様，仕事量はほぼ一定であることが認められる。一方，高い温度になると，拘束鋼材比 0.5%では



図－１０　自由・拘束膨張ひずみ(最大値)

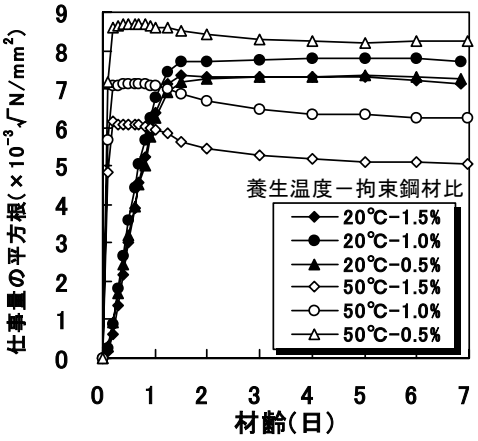


図－１１　膨張ひずみ比(基準 20℃)

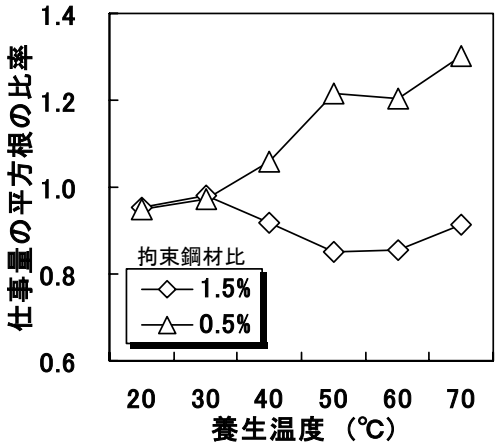


図－１２　拘束応力（最大値）

1.0%に対して仕事量が大きくなり，1.5%では小さくなる傾向を示しており，仕事量は一定とならなかった。特に 50～70℃において，拘束鋼材比 0.5%と 1.5%での仕事量の平方根の差は約 40%であった。



図－１３　仕事量の平方根の経時変化



図－１４　仕事量の平方根の比率

上記の結果の一要因として，高温度下における若材齢クリープの増大が考えられる。既往の研究によると，普通コンクリートの場合，養生温度 20℃～40℃の範囲においては，温度が高いほど若材齢コンクリートのクリープは大きくなることが明らかにされており [5)]，膨張材を混和したコンクリートについても同様の現象が考えられる。しかしながら，若材齢かつ高温度下におけるクリープの実験データは少なく，また，水和物の構造や生成速度などが普通コンクリートと異なることもあり，膨張コンクリートの若材齢クリープに及ぼす養生温度の影響は未だ明確ではない。従って，高温度下における膨張コンクリートの若材齢クリープ性状を把握することは，今後の検討課題である。

5.　まとめ

種々の温度下における膨張材を混和したコンクリートの諸物性に関して，本研究で得られた知見を以下に記す。

(1) 圧縮強度は積算温度の 2 直線式で定式化できる。

(2) 自由膨張ひずみは，養生温度 30℃を境界に，温度が高くなるに従って大幅に増加する傾向にあり，養生温度 50℃付近で最大となった。

(3) 拘束膨張ひずみは，自由膨張の場合と比較して，相対的に温度の影響が小さい。

(4) 導入される拘束応力は拘束鋼材比が高いほど大きいが，温度が高くなるに従って拘束鋼材比間の差は小さくなる。

(5) 拘束鋼材比 0.5～1.5%において，膨張コンクリートのなす仕事量は，20，30℃の場合にはほぼ一定であるが，40～70℃の場合には拘束鋼材比間の差が大きくなる。

参考文献

1）戸川一夫，中本純次，中野錦一：膨張コンクリートの拘束膨張特性におよぼす温度の影響，セメント技術年報 35，pp.277-281，1981

2）日本コンクリート工学協会，自己収縮研究報告書，pp.195-198，1996

3）土木学会，コンクリート標準示方書，施工編，pp.289-290，2002

4）辻幸和：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，土木学会論文報告集，第 235 号，pp.111-124，1975.3

5）入矢桂史郎，平本昌生，服部達也，梅原秀哲：若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究，土木学会論文集，No.599，V－40，pp.1-14，1988.8