

正会員 岡 村 浩（東京大学）

正会員 ○辻 幸和（足利工業大学）

後 藤 克己（日産建設）

1. まえがき

膨張コンクリートは、その膨張が拘束されていない場合、膨張がある限度を越えて大きくなると、膨張による強度低下が起るが、この場合にも膨張を拘束すると、強度低下は軽減される。したがって、膨張コンクリートの膨張力を積極的に利用して、部材の力学的特性を改善するためには、まず、一軸方向の拘束を受ける場合の強度を明らかにしておく必要がある。それは、単に、一方を拘束しただけでは、拘束方向以外の方向への膨張は減少するとしても、その程度は大きくならないので、それらの方向への膨張による強度低下のおそれがあるからである。

これまで、一軸拘束を受ける膨張コンクリートの強度について数多くの実験結果が報告されているが、拘束方向およびそれに直角方向に生じる膨張率と強度との関係を定量的に取扱ったものはほとんどない。本研究は、一軸拘束を行った膨張コンクリートを、拘束解除後直ちに圧縮強度試験を行い、各方向に生じた膨張率と強度との関係について実験的に検討したものである。

2. 実験の概要

実験は3シリーズに分けて行った（表1参照）。シリーズIは、拘束鋼材比pと単位膨張材量Eを、シリーズIIは、拘束鋼材比pを0.67%と一定にして強度試験を行う材令を、また、シリーズIIIは、一軸拘束をいったん解放する材令を、それぞれ主な要因とし、一軸拘束を受けた方向の圧縮強度と各方向に生じた膨張率を求めたものである。

一軸拘束方法としては、1本のPC鋼棒の両端にそれぞれ端板を内ナットと外ナットのダブルナットで固定する方法を採用した。用いた供試体の形状寸法は、シリーズIでは、断面が15×15cm、長さが55cmの、シリーズIIおよびIIIでは、断面が10×10cm、長さが36cmの角柱の膨張コンクリートを、長さ方向に拘束したものである。なお、PC鋼棒との付着を切るために、断面中央にはシースを設けた（図1参照）。そして、シリーズIでは、呼び名が9.2mm、17mm、および32mmのPC鋼棒を用いて、拘束鋼材比pを0.3%から4.0%まで変化させた。拘束鋼材比が0%の無拘束供試体にも、断面中心に直径27mmのシースを配置した。これらの供試体は、それぞれ2本を1組として作製しそれらの平均値を求めた。

長さ方向の拘束膨張率は、PC鋼棒の中央部に貼った2枚の防水ゲージを用いて、コンクリート打込み前を基準に固定抵抗法により求めた。また、長さ方向に直角な無拘束方向の膨張率および無拘束供試体の膨張率は、あらかじめ打込み前に供試体側面にガラス小片(10×10×1mm)を埋込

表1 実験の概要

シリーズI 要因：拘束鋼材比P、単位膨張材量E

P(%)	0	0.3	1.0	4.0
E(kg/m ³)				
90			○	○
80		○	○	○
65		○	○	○
60	○	○	○	○
55	○	○	○	○
0	○			

シリーズII 要因：材令、単位膨張材量E;P=0.67%

材令(D)	7	28	94
E(kg/m ³)			
80	○	○	○
60	○	○	○
0	○	○	○

シリーズIII 要因：拘束をいったん解放する材令;P=0.67%

材令(D)	7	28	94
E(kg/m ³)			
80			○
60	○	○	○

注：○印について実験を行った。

んでおき、材令 1 日で脱枠後直ちに鋼球を埋込んだ鋼小片を接着剤でガラスの上に貼りつけ、鋼球間の伸びをマイクロメーターにより $5 / 1000 \text{ mm}$ まで測定することにより求めた。この膨張率は、コンクリート打込み方向に直角な方向のものであって、材令 1 日を基長にとっている。

所定の材令まで養生後、拘束供試体では、P C 鋼棒のみを取り除き、両端板をつけたまま、拘束していた方向に容量 200 t のアムスラー型試験機により圧縮強度試験を行った。

膨張材は電気化学工業(株)製の #20 を、また、セメントはアサノ早強ポルトランドセメントを用いた。骨材は富士川産の良質な川砂、川砂利であって、比重はそれぞれ 2.60 および 2.66、粗粒率はそれぞれ 2.88 および 6.88(最大寸法 25 mm) であった。これらの材料は前日から 20°C 恒温室に保存し、打込み温度が 20°C になるように留意した。

コンクリートの配合は、単位水量を 175 kg/m^3 セメントと膨張材を合計した単位結合材量を 350 kg/m^3 、細骨材率を 40% と一定にし、単位膨張材量 E のみを $0, 55, 60, 65, 80, 90 \text{ kg/m}^3$ に変化させた(表 1 参照)。

供試体は材令 1 日に脱枠し、鋼小片を貼りつけて膨張率の基長を測定後、 20°C の水槽に入れて養生を行った。

3. 実験の結果および考察

膨張材を用いない普通コンクリートに対する膨張コンクリートの圧縮強度の比率と一軸拘束方向に直角な無拘束方向の膨張率との関係を示したのが図 2 である。この図には、共通試験による自由膨張させた供試体(6ヶ所)の研究機関、エトリンガイト系膨張材 2 種類、セメント 2 種類、配合 2 種類、単位膨張材量 5 種類)の結果¹⁾も斜線で示している。

本実験では、自由膨張させた供試体($p = 0$)は、単位膨張材量を 60 kg/m^3 までに限定している(表 1 参照)。これは、共通試験の結果から明らかなように、それ以上多量の膨張材を用いると強度低下が著しく、特に 90 kg/m^3 を使用すると膨張作用のため自己崩壊するおそれがあったためである。このような場合でも、一軸方向に拘束すると、自由膨張の場合のような強度低下とはならない。たとえば、無拘束方向の膨張率が約 1000×10^{-5} になても、強度低下が約 50% までに改善されており、特に膨張エネルギーの大きなコンクリートを使用する場合には、強度の点からも鉄筋等の拘束鋼材の配置が不可欠となる。

一軸方向に拘束すると、その方向の膨張率は拘束鋼材比 p が大きくなるに従って小さくなるが、無拘束方向の膨張率は、拘束鋼材比が 0.3% から 4.0% の間ではほぼ等しい値となった(図 3 参照)。そして、これらの値は自由

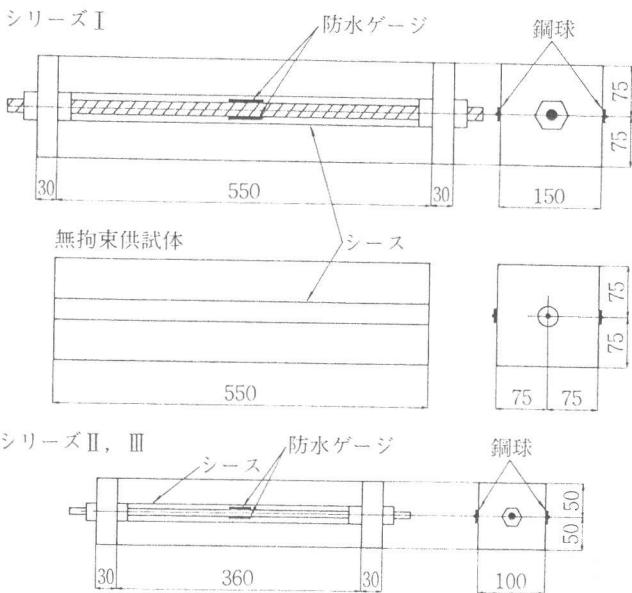


図 1 供試体の形状寸法

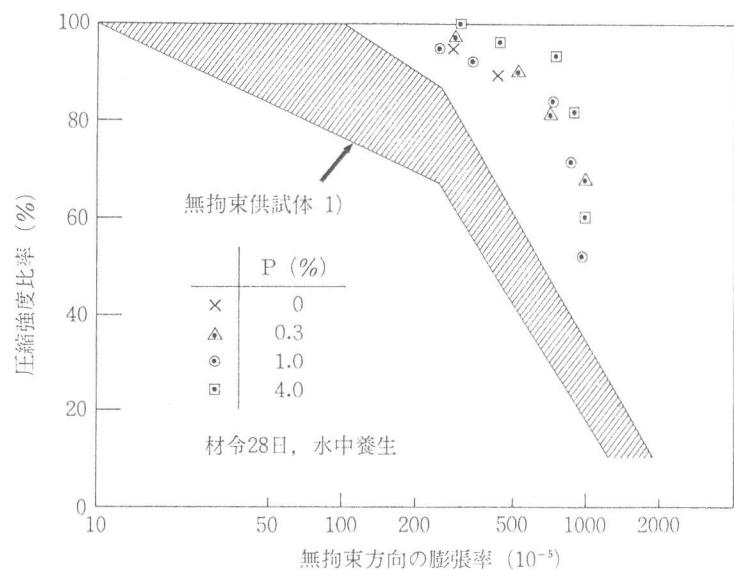


図 2 拘束直角方向の膨張率と圧縮強度との関係

膨張させた場合の膨張率とも同程度となった。一軸拘束方向に直角な無拘束方向の膨張率が、拘束によりどのように変化するかについては、いくつかの実験結果が報告されているが、明らかにされていない。たとえば、Klein, Karby, Polivka²⁾, Bertero, Polivka³⁾, 飯田, 門司⁴⁾らは、一軸拘束により無拘束方向の膨張率が小さくなることを報告し、楠元, 杉田⁵⁾らは、反対の結果を示している。また、本実験のように変化がないと報告しているものもある。これらは、供試体の形状寸法、拘束の方法、膨張率の測定方法およびコンクリートの膨張力の大きさ等により異った結果が出されたものと思われる。

図4は、横軸に図2の無拘束方向の膨張率の代わりに、拘束方向の膨張率で圧縮強度比率との関係を示したものである。この図より、拘束方向の膨張率が異なると強度も異なり、既に報告されているように、膨張率が小さいほど、一般に強度も大きいことが認められる。たとえば、単位膨張材量が55kg/m³から65kg/m³の範囲で、拘束方向の膨張率が 20×10^{-5} 程度までだと、普通コンクリートと同じ強度を持ち、膨張材の置換による強度低下は生じない。また、膨張率が 50×10^{-5} 以下だと、強度低下は10%以下であって、実用的には、強度の点からは特に問題はないようと思われる。しかしながら、 200×10^{-5} 程度に拘束方向の膨張率が増加すると、強度が約20%低下している。これらの場合における無拘束方向の膨張率 ϵ_0 は約 700×10^{-5} 以下であって、この範囲では、単位膨張材量によらず、拘束方向の膨張率と圧縮強度比率との間に良い相関が認められる。

単位膨張材量が80kg/m³および90kg/m³と増加して、無拘束方向の膨張率が約 700×10^{-5} 以上になると、拘束方向の膨張率が同じでも強度低下が大きくなることも、図4より明らかである。たとえば、単位膨張材量を90kg/m³まで増加すると、 200×10^{-5} の拘束方向の膨張率で50%程度にまで低下している。

以上のことより、一軸方向に拘束した場合、拘束方向に直角な無拘束方向の膨張率は拘束鋼材比が異なっても大差ないので、その値が 700×10^{-5} 程度以下の範囲では、無拘束方向よりも拘束方向の膨張率が強度に及ぼす影響が大きくなる。すなわち、既往の研究で報告されているように、拘束鋼材比が大きくなると、その方向の膨張率が小さくなるため、強度が高くなるのである。しかしながら、単位膨張材量が著しく多くなって無拘束方向の膨張率もたとえば 700×10^{-5} を越える場合には、無拘束方向の膨張率の強度に及ぼす影響が支配的になり、この範囲では拘束鋼材比が強度に及ぼす効果は小さくなる。したがって、実用的には、一軸方向だけの拘束の場合、その方向の拘束の程度がいかに大きくとも、膨張材の使用量にはおのずと制限がある。

圧縮強度と材令との関係を示したのが図5である。この図より、一軸拘束を受けた膨張コンクリートの場合も圧縮強度は材令の経過とともに増加し、強度の増加は普通コンクリートと同程度である。したがって、圧縮強度比率は材令の経過とともに増加し、材令初期の膨張による強度低下が改善されるのである。

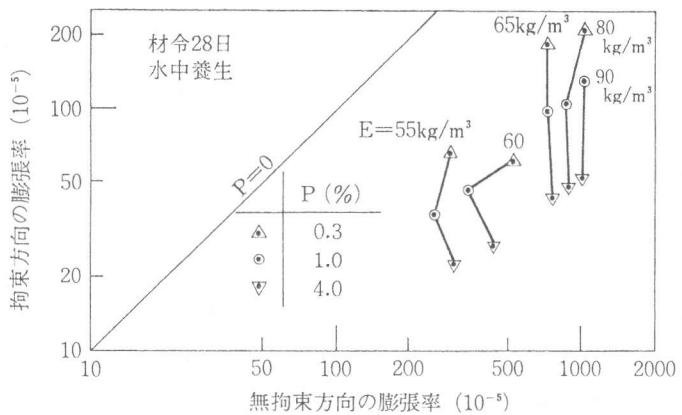


図3 拘束方向と無拘束方向の膨張率

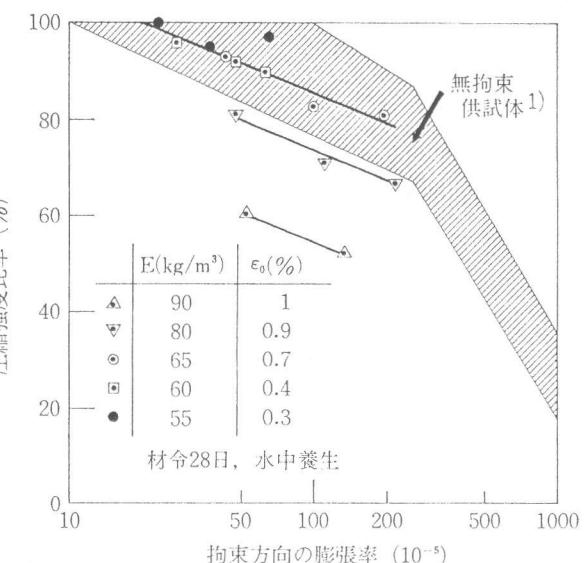


図4 拘束方向の膨張率と圧縮強度との関係

Bertero⁶⁾は、膨張エネルギーの大きな膨張コンクリートを一軸方向に拘束すると、材令14日頃から圧縮強度が低下したことを報告し、この原因として、この材令頃より増加する無拘束方向の膨張率を指摘しているが、本実験では、単位膨張材量を 80kg/m^3 （膨張材の置換率にして約23%）、拘束鋼材比を0.67%として材令28日の拘束方向の膨張率が 200×10^{-6} 程度になってもそのような材令の経過にともなう強度低下は認められなかった。

材令の経過にともなう圧縮強度比率の増加の現象は自由膨張させた供試体でも確かめられているのであって⁷⁾、膨張コンクリートの強度は所要の材令で検討するのがよく、材令7日などの初期材令のデータから結論を容易に引き出すべきではない。

図5には、材令7日以降にPC鋼棒の外ナットをいったんゆるめて拘束を解放し、その後直ちに再セットして一軸拘束を行った供試体の結果も破線で示している。拘束をいったん解放すると、その後拘束方向の膨張率は若干増すが、それによる強度の低下は生じていない。

これらのことより、強度低下の原因と考えられるマイクロクラックの発生は、膨張の著しい材令初期に生じると思われるが、その後はある程度膨張しても新しいマイクロクラックが生じることは少く、むしろ、場合によっては、新しい結合物が間隙に発生すると考えられる。

4. あとがき

一軸拘束を受ける膨張コンクリートの圧縮強度と、拘束方向およびそれに直角な無拘束方向の膨張率との関係を、拘束鋼材比、単位膨張材量および強度試験の材令等を要因として実験により求めた結果から、本実験の範囲内でつぎのことがらがいえると思われる。

(1)一軸方向だけを拘束しても、それに直角な無拘束方向の膨張率は自由膨張の場合とほとんど変わらないが、その値が 700×10^{-6} のように大きくなても、同じ膨張率を示す拘束のないものに比して、その強度低下は少く、たかだか20%程度であった。このように、無拘束方向の膨張率が 700×10^{-6} 程度以下の場合には、拘束鋼材比によっても強度は大きな影響を受け、拘束鋼材比が大きくなると、その方向の膨張率が小さくなるため、強度が高くなる。したがって、一軸拘束だけでも強度の点からは特に問題がないようにすることができる。

(2)無拘束方向の膨張率が 700×10^{-6} 程度を越える場合には、拘束鋼材比を大きくしても強度低下が大きくなる。したがって、一軸方向だけの拘束の場合には、膨張材の使用量に限度がある。

(3)自由膨張させた場合と同様に、一軸拘束を受けた膨張コンクリートの圧縮強度の増加量は、普通コンクリートと同程度であり、そのため、圧縮強度比率は材令の経過とともに増加する。したがって、所要の材令において膨張コンクリートの強度を評価すべきである。

- 文献 1) 国分、小林、長瀧、岡村、町田；膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの標準試験方法に関する研究、土木学会論文報告集 第225号、1974年5月
 2) Klein, A, Karby, T and Polivka, M; Properties of an Expansive Cement for Chemical Prestressing, Jour. of ACI, July, 1961
 3) Bertero, V and Polivka, M; Effect of Degree of Restraint on Mechanical Behavior of Expansive Concrete, Pro. of ASTM. Vol. 64, 1964
 4) 飯田秀雄、門司唱；ケミカルプレストレスを導入する鉄筋コンクリート管の拘束条件に関する研究、土木学会論文報告集 第225号、1974年5月
 5) 楠元孝夫、杉田英明；石灰系膨張混和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、1977年
 6) Bertero, V; Curing Effects on Expansion and Mechanical Behavior of Expansive Cement Concrete, Jour. of ACI, Feb., 1967
 7) 例えば、三宅信雄、中谷清一；膨張材を用いたモルタルおよびコンクリートの長期材令における性状、セメントコンクリート No. 369, 1977年11月

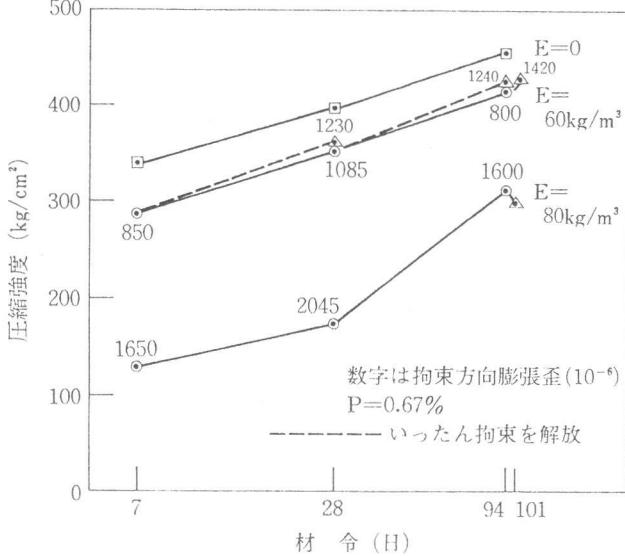


図5 圧縮強度と材令との関係