

[69] 多軸拘束された膨張コンクリートの圧縮強度

正会員 ○竹井利公 (熊谷道路・横浜支店)
 正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学工学部)
 正会員 辻 幸和 (群馬大学工学部)

1. はじめに

硬化収縮や乾燥収縮を補償してコンクリート部材のひびわれ性状を改善する目的、あるいは鋼材等を用いて膨張を拘束し、得られるケミカルプレストレスで部材の力学的性状を改善する目的などに膨張コンクリートが使用されてきている。膨張性状や部材としての力学的性状に関しては、これまで種々の実験的研究が行なわれてきているが、膨張のメカニズムについてはまだ十分に解明されてはおらず、特に、膨張コンクリート自体の膨張性状^{1)~3)}と力学的諸特性との関係についてはわずかな研究があるにすぎない。

本研究では、膨張コンクリートの膨張性状と力学的性状との関係を把握する1段階として、立方体供試体を用いて多軸方向に拘束し、拘束の程度を極度に高くし、ほぼ膨張が認められない状態で、セメントとの結合材中に占める膨張材量の比率を0~100%とした場合の膨張コンクリートの圧縮強度特性を検討したものである。

2. 実験概要

用いた供試体は10×10×10cmの立方体で、3軸拘束装置は図1に示すようである。2つの方向の拘束はPC鋼棒(φ26mm)を用い、第3の方向は、端板にガイド用の鋼材を予め溶接し、それに端板を沿わせるように設置した。供試体の作成は、-先ず、横方向の端板をPC鋼棒とナットで固定し、もう一方の端板をガイドに沿ってはめ込み、それを底板上にセットする。そして、コンクリートを上から打設し、上下の端板をPC鋼棒とナットで締め付けた。2軸拘束では、上端板を用いない。1軸拘束は、更に、ガイドに沿った端板を取りはずした。ちなみに、PC鋼棒に生じた最大引張ひずみは 100×10^{-6} 程度であった。

表1に配合を示す。シリーズAは3軸拘束のもので、結合材量(C+E)のレベルを3段階に変えた。配合の考え方としては、(C+E)を一定にし、かつ、スランブがほぼ一定値(16cm程度)になるように単位水量(W)を定め、結合材中の単位膨張混和材量(E)の内割りを0~100%と、通常用いられる以上に極端に変化させた。シリーズBは2軸拘束用の配合で、シリーズCは1軸拘束用である。粗骨材の最大寸法は25mmで、s/aは40%とした。外見上は、単位膨張材量を増してゆくと、コンクリートの色が白っぽくなり、練り混ぜ易くなるが、こわばり方が早くなりスランブルロスも急激になっている。尚、用いた膨張材はカルシウムサルフォアルミニート系であり、セメントは普通ポルトランドセメントである。

養生は20℃空気中養生とし、材令7日で拘束を解除し圧縮試験を行なった。

2軸拘束および1軸拘束での無拘束方向の膨張ひずみは、標点を埋設し、標点間の変形をマイクロメータで読み取ることにより求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 3軸拘束供試体

3軸拘束を受けた供試体の圧縮試験結果を、膨張材の結合材に対する割合($E/(C+E)$)を横軸にとって示すと図2のようになる。PC鋼棒の伸びひずみが最大でも 100×10^{-6} 程度であったので、材令7日まではほぼ完全に膨張は拘束されていたと考えられ

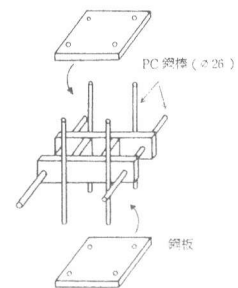


図1 3軸拘束装置

表1 配合

	C+E (kg/m ³)	W/(C+E) (%)	E (kg/m ³)
A	250	70	0,20,40,50,125,100,250
	450	40	0,40,60,70,140,330,450
	700	30	0,60,70,100,160,525,700
B	500	37	0,60,80,125,250,375,500
C	500	36	0,50,75,100,125

る。ただし、圧縮試験をする為に拘束を解除したので、その影響がどのように表われているかは必ずしも明らかでない。単位結合材量(C+E)が多い場合、膨張材の置換率($E/(C+E)$)が20%程度になると強度が急激に低下している。一方、単位結合材量が 250 kg/m^3 と小さい場合には、圧縮強度の絶対値は小さいものの膨張材(E)が少し加わると強度が上昇する傾向を示し、いわゆるケミカルプレスの効果が認められた。しかし、この時でも置換率が20%を超えるとやはり強度低下を示すようになる。

単位結合材量の多い場合と少ない場合の圧縮強度性状の違いの原因の1つに、水・結合材比の違いが考えられる。(C+E)の多い場合は、セメントの水和に必要な水の余裕が少ない。それで、膨張材が先に水和反応して水を消費すると、セメントの水和に必要な水が充分でなくなる。また膨張材の結晶がセメントペースト内に発達し、セメントの結合力を損なうものとも考えられる。これに対し、(C+E)が少ない場合は、スランブを同程度にしている為、水結合材比($W/(C+E)$)が大きく、セメントの水和に必要な水の余裕があり、かつ、膨張材の結晶が進展する空間も存在すると考えられる。それで、膨張材を 40 kg/m^3 程度まで混入すると、コンクリートの内部が密実になり、いわゆるケミカルプレスの効果により強度が増加するものと考えられる。

3.2 2軸拘束供試体

2方向の膨張をほぼ完全に拘束した場合の圧縮強度と無拘束方向膨張ひずみの関係を図3に示す。圧縮試験は、やはり、拘束装置を取りはずしてから行なったのであるが、その際、無拘束面にゲージを貼布し拘束解放による伸びひずみを測定したところ、約 300×10^{-6} 程度認められた。圧縮試験は拘束方向と載荷方向との関係を調べる為、図に示すように2通り行なった。

この結果より、膨張をほぼ完全に拘束した方向の圧縮強度は、膨張を許した方向の圧縮強度より2~3割程度高い。

配合と無拘束方向の膨張ひずみに関しては、2軸拘束の場合、端板面での摩擦の影響が大きく、相当量の膨張材を使用しないと無拘束方向の膨張ひずみは大きくならない。ここでは、単位結合材量(C+E)が 500 kg/m^3 であるが、膨張材量(E)を 80 kg/m^3 以上にしてようやく、無拘束方向膨張ひずみが $2,000 \times 10^{-6}$ を超えている。しかし、膨張材量を 250 kg/m^3 以上にすると膨張ひずみも $10,000 \times 10^{-6}$ を越え、無拘束面に平行な微小ひびわれが発生し始めた。

3.3 1軸拘束供試体

図4によると、1軸拘束供試体では、2軸拘束の場合と異なり拘束方向と載荷方向の違いが圧縮強度にあまり影響を及ぼしていないように見える。無拘束方向の膨張ひずみと強度の関係では、1軸拘束あるいは2軸拘束にかかわらず、同一膨張ひずみに対してほぼ同じ程度の強度低下を生じている。ただし、1軸拘束供試体の方が少ない単位膨張材量(E)で2軸拘束状態における膨張ひずみを示す。

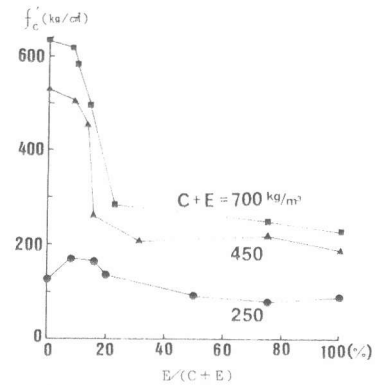


図2 3軸拘束供試体の圧縮強度と膨張材置換率

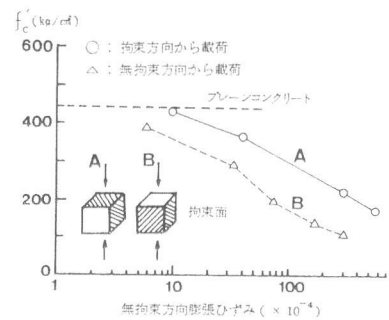


図3 2軸拘束供試体の圧縮強度と無拘束方向膨張ひずみ

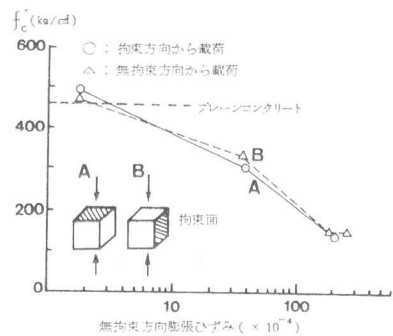


図4 1軸拘束供試体の圧縮強度と無拘束方向膨張ひずみ

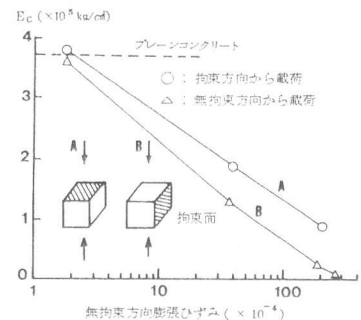


図5 1軸拘束供試体の弾性係数と無拘束方向膨張ひずみ

拘束方向と載荷方向との違いが、弾性係数（圧縮強度の30%における割線弾性係数）に及ぼす影響を図5に示す。また、ポアソン比に及ぼす影響を図6に示す。1方向の膨張がほぼ完全に拘束されている為、膨張材の水和反応による結晶形成および膨張作用による微小ひびわれに何らかの異方性が生じ、従って、コンクリート自体も異方性を呈しているものと考えられる³⁾。図6に示した配合では、無拘束方向膨張ひずみは 200×10^{-6} 程度と小さく、圧縮強度はブレンコンクリートと同じであるが、拘束方向に載荷しても（ケースA）ポアソン比は大きく、更に、拘束直角方向に載荷するとより大きなポアソン比が生じている。

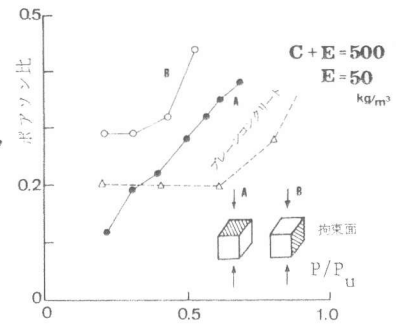


図6 1軸拘束供試体のポアソン比

図7は、全て拘束方向に載荷した場合のポアソン比を示している。単位膨張材量（E）が 75 kg/m^3 の場合の無拘束方向膨張ひずみは約 3.000×10^{-6} である。10cm立方体の供試体を1軸方向に拘束した場合においても、i)膨張コンクリートは低応力レベルで既に大きなポアソン比を生じる、ii)膨張ひずみが大きければ大きい程、同一応力レベルでのポアソン比も大きくなる、およびiii)ポアソン比が0.5、すなわち、体積膨張ひずみが収縮から膨張に変わる応力レベルがブレンコンクリートに比べて低いことがそれぞれ認められる。このことは、内部にかなりひびわれが発達しても耐力低下を生じないという予測を可能にするようで、実際、圧縮試験を行なっている時に、供試体にひびわれが発生するのが肉眼で観察されても、耐力は直ちには低下しない。

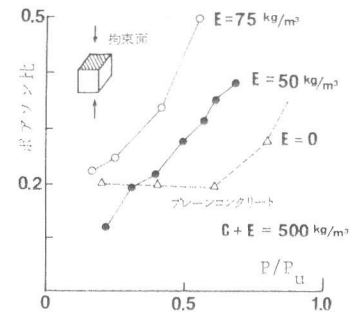


図7 1軸拘束供試体のポアソン比

4. 多軸拘束状態における膨張ひずみと圧縮強度

本実験では拘束鋼材比を10%以上と極端に大きくして、拘束方向にはほとんど膨張させない状態で3軸拘束、2軸拘束および1軸拘束状態を実現させた後、圧縮試験を行なった。なお、圧縮試験を実施する際、拘束装置を取りはずし、拘束を解放している為、 $300 \sim 500 \times 10^{-6}$ 程度の膨張が認められるものもあった。この影響を検討する為、1軸拘束供試体については、別に、拘束を解放せずに圧縮試験を行なった。拘束解放で 500×10^{-6} 程度の膨張が生じた供試体と、拘束を解放しない供試体でほぼ同じ強度が得られた。この結果が、膨張ひずみの全ての場合、および、2軸拘束あるいは3軸拘束状態での拘束解放について適用できるかはまだ十分に明らかにされていないが、本節では、解放の影響が無視出来るものと仮定し、圧縮試験までに生じている膨張ひずみが圧縮強度に及ぼす影響を検討することとした。

まず、載荷方向の膨張ひずみが圧縮強度に及ぼす影響を取り出す為、図8に示す2軸拘束供試体での無拘束方向から載荷した場合を対象とする。

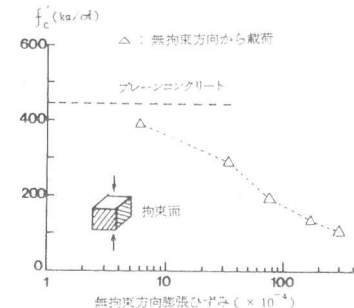
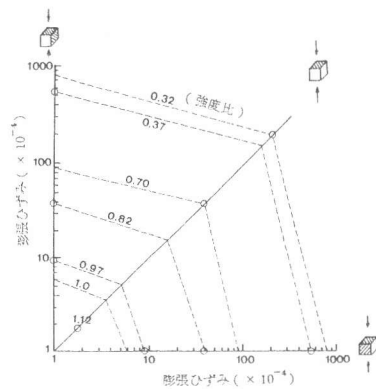


図9 載荷直角方向の膨張ひずみが圧縮強度に及ぼす影響

次に、載荷直角方向の膨

図8 載荷方向の膨張ひずみが圧縮強度に及ぼす影響

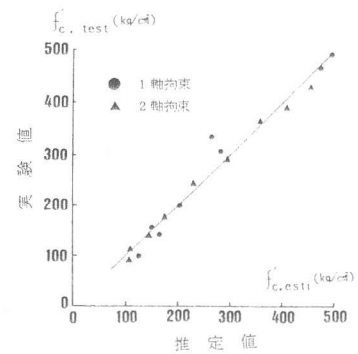


図10 強度評価式による比較

張ひずみの影響を検討する為に、2軸拘束および1軸拘束状態での実験結果を用い、図9のように、2次元で膨張ひずみと圧縮強度比（プレーンコンクリートとの比）の関係を示す。図9では、荷重方向と直角な2方向の膨張ひずみは、無拘束かあるいは完全拘束というデータしかないので、その中間は直線的であるとした。

これらのデータを包含するように圧縮強度と各方向膨張ひずみを定式化すると式(1)のようになる。

$$f'_c = \left\{ \alpha_0 + \alpha_1 \times \log(1 + k_1 \times \epsilon_1 + k_2 \times |\epsilon_2 + \epsilon_3| + k_3 \times |\epsilon_2 - \epsilon_3|) \right\} \times f'_{c,0} \dots (1)$$

ここで ϵ_1 ; 荷重方向膨張ひずみ ($\times 10^{-6}$)
 ϵ_2, ϵ_3 ; 荷重直角方向膨張ひずみ ($\times 10^{-6}$)
 $f'_{c,0}$; プレーンコンクリートの圧縮強度

ちなみに、 $\alpha_0 = 1.20$, $\alpha_1 = 0.155$, $k_1 = 9299$, $k_2 = 4791$, $k_3 = -1555$ を用いて、実験値と比較すると図10のようになる。

ところで、図2に示した3軸拘束供試体の圧縮強度結果をプレーンコンクリートの圧縮強度との比で示すと図11のようになる。3軸いずれの方向にもほとんど膨張しなくても ($E/C+E$) が大きくなると圧縮強度が低下してくる。この現象は式(1)では十分に表現することが出来ない。そこで、筆者らが先に提案した等価セメント水比の概念を拡張し、膨張コンクリートが膨張するというは、強度の面から見れば見掛け上セメント量が減少していると考えられるなら、式(2)のように表現できる。

$$C_{eq} = (C + E \times f(W/C + E)) (1 - g(E/C + E)) (1 - (k_1 \times \epsilon_1 + k_2 \times |\epsilon_2 + \epsilon_3| + k_3 \times |\epsilon_2 - \epsilon_3|)) \dots (2)$$

ここで C ; 単位セメント量 (Kg/m^3) g ; ($E/C + E$) の3次多項式
 E ; 単位膨張材量 (Kg/m^3) f ; ($W/C + E$) の1次多項式
 ϵ_1 ; 荷重方向膨張ひずみ ($\times 10^{-6}$)
 ϵ_2, ϵ_3 ; 荷重直角方向膨張ひずみ ($\times 10^{-6}$)

ちなみに、 $k_1 = 420$, $k_2 = 435$, $k_3 = -385$ を用いると図12のようになる。

5. 結論

本研究で得られた知見を要約すると以下のようになる。

- 1) 3軸方向にほとんど膨張させないように拘束した膨張コンクリートの圧縮強度は膨張材量の比率が増すと強度低下を生ずる可能性がある。
- 2) 2軸拘束あるいは1軸拘束状態を受けた膨張コンクリートでは、力学的性質に異方性が認められる。特にポアソン比が著しい。
- 3) 多軸拘束を受けた膨張コンクリートの圧縮強度は、荷重方向の膨張ひずみおよび荷重直角方向の膨張ひずみの影響を受ける。この影響は、見掛け上空隙が増すことゆえ、相対的にセメント量が小さくなるとして取扱い、強度を推定することも可能である。

(参考文献)

- 1) 丸山久一、吉田茂；膨張コンクリートの膨張性状と圧縮強度，第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp 217 ~ 220，1982
- 2) 丸山久一、大谷悟司、竹井利公；3軸拘束された膨張コンクリートの圧縮強度，第38回土木学会年次講演会講演概要集，第5部，pp 117 ~ 118，1983
- 3) 辻幸和、丸山久一；膨張コンクリートの力学的特性に及ぼす拘束方法の影響に関する基礎研究，第6回コンクリート工学年次講演会講演論文集，1984

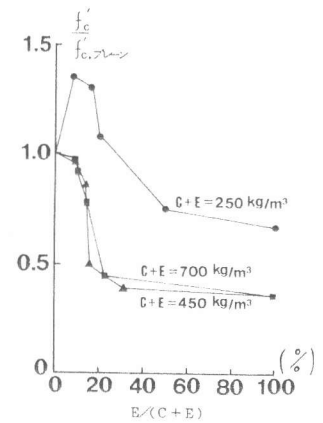


図11 3軸拘束供試体のプレーンコンクリートに対する強度比

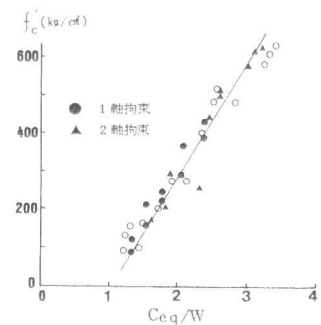


図12 等価セメント・水比と圧縮強度