

一軸拘束を受けた膨張コンクリートの力学的特性

MECHANICAL BEHAVIOR OF UNIAXIALLY RESTRAINED EXPANSIVE CONCRETE

辻 幸和*

By Yukikazu TSUJI

This paper presents the experimental results regarding compressive strength, flexural strength, Young's modulus and Poisson's ratio of expansive concrete subjected to uniaxial restraint. The uniaxial restraint with which a compressive strength test is carried out, does hardly affect the compressive strength and Young's modulus of expansive concrete, but the Poisson's ratio with the restraint is larger than that without one.

Young's moduli obtained by releasing the uniaxial restraint are almost the same as ones obtained by loading. The expansive concrete shows reduction in Young's modulus due to expansion even though the compressive strength is the same as one of ordinary concrete. When the restraining steel ratio is high, reduction of both strength and Young's modulus is alleviated. However, there is a limit of the restraining steel ratio in case of restrained only in a uniaxial direction. The change with increased age in mechanical behavior of expansive concrete is larger than that of ordinary concrete not containing expansive admixture.

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でも、膨張率が小さければ、膨張による品質低下はないと考えてよい。しかしながら、膨張率がある限度を超えて大きくなると、膨張による品質低下が生じる。この場合も、拘束を受けていると、受けていない場合よりも膨張率は減少し、品質低下も軽減される。特に、膨張力を積極的に利用する場合には、少なくとも一方向は鉄筋等による拘束を受ける。したがって、膨張コンクリートの有効利用を図るためには、まず一軸拘束を受ける場合の強度およびヤング係数などの力学的特性を明らかにしておく必要がある。

一軸拘束を受けた膨張コンクリートの圧縮強度、曲げ強度およびヤング係数などの力学的特性を実験するための試験方法には、膨張コンクリートの研究の端緒より、ナット式固定による一軸拘束方法が採用されてきた。この方法は、拘束器具が、鋼棒、ナット、端板およびシースを組み合わせたものであり、容易に拘束器具を取り除いて、拘束を受けた膨張コンクリート自体の強度や変形特性の試験を行うことができるといった、非常に便利な

試験方法である。端板と鋼棒の結合部における遊びやなじみ等が、膨張量の測定に大きな影響を及ぼすことがあるが¹⁾、拘束鋼材の鋼棒だけでなくコンクリートについても膨張量を測定することにより、コンクリートの力学的特性と膨張量との関係を求めることも可能である。

これまでの研究では、強度試験の直前に PC 鋼棒を取り除いて試験を行っているものが大半である。これは、拘束鋼材を取り除くことにより、この寄与分を考慮することなく膨張コンクリート自体の力学的特性を直接に求めることができるためである。しかしながら、拘束を解除することにより、膨張コンクリートの品質に変化が生じ、拘束を受けたまま載荷実験を行ったのとは異なる結果が得られることも懸念されるのである。この問題は、拘束解除後に強度試験を行う場合に重要であるが、これまでこの点について検討された報告はないようである。

また、普通コンクリートと比較した膨張コンクリートの力学的特性およびその特性を生じさせる原因ならびに拘束の有無、拘束の程度の影響については、ケミカルプレストレスリングを目的とする場合に特に重要であるにもかかわらずまだ未解明な点が多い。

本研究では、これらの問題点の解明に寄与するため、圧縮強度および曲げ強度の試験に供するナット式固定による一軸拘束供試体を作製し、試験直前に行う一軸拘束

* 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科
(〒376 桐生市大神町 1-5-1)

の解除時における膨張コンクリートの変形，拘束の有無およびその程度が異なる場合の力学的特性，拘束解除後の膨張特性と力学的特性，ならびに力学的特性の時間的変化などについて行った実験結果をとりまとめたものである。

2. 使用材料および配合

膨張材は，エトリンガイト系のD社製のものを，セメントは，主としてN社製の早強ポルトランドセメントをそれぞれ用いた。骨材は主として富士川産の川砂および川砂利であって，比重はそれぞれ2.62および2.66であった。また粗粒率は，それぞれ3.03および6.93(最大寸法25mm)であった。

主として用いたコンクリートの配合は，単位水量 W を 173 kgf/m^3 ，細骨材率を36%およびセメントと膨張材の合計である結合材を，単位量 $(C+E)$ にして 450 kgf/m^3 と一定にし，膨張材を単位量 E にして0から 90 kgf/m^3 まで，置換え率 $E/(C+E)$ にして0から20%まで変化させた。コンクリートのスランプは約5cm，空気量は約1.5%であった。

膨張セメントペーストおよびモルタルも用いたが，水結合材比は40%と一定にし，膨張材の置換え率を11%と13%に，また細骨材を，結合材の容積比で0，1および2にそれぞれ変化させた。

3. 一軸拘束の解除

(1) 拘束解除時における膨張コンクリートの変形

一軸拘束供試体のPC鋼棒の取り除き作業において，コンクリート表面の拘束方向の引張ひずみとPC鋼棒のひずみより算定したケミカルプレストレスのもどりの関係を示したのが図-1である。コンクリートの断面は $15 \times 15 \text{ cm}$ ，長さは50cmである。断面図心に直径が30mmのシースを介し，その中に呼び名が17mmのPC鋼棒を設置し，両端を厚さが30mmの端板に結合していた。これらの供試体は，材令1日の脱型直後，PC鋼棒を緊張して機械的なプレストレスを $60 \sim 65 \text{ kgf/cm}^2$ 導入し，その後 20°C の水中養生を28日間行い，水槽より取り出して拘束鋼材のPC鋼棒を取り除いたものである。

材令1日における機械的なプレストレス時のプレストレスとコンクリートの圧縮ひずみとの関係を破線で示す。まだ膨張作用が十分でないため，膨張材を20%置換えても，普通コンクリートの場合とほとんど同じ変形性状を示している。

材令29日における拘束解除時の応力-ひずみ関係も，普通コンクリートと膨張材を15%置換えた場合は，機械的なプレストレス時と同様に，ほぼ直線関係を示している。

その傾きは，材令1日に比べて大きく，また普通コンクリートの方が膨張コンクリートに比べて少し大きくなっている。

しかしながら，20%の置換え率といった膨張材の使用量が多い場合には，ケミカルプレストレスの解除の開始時に比べて，完了直前の引張ひずみの増加率が大きくなり，応力-ひずみの関係が曲線を示している。そして，最終的なコンクリートの引張ひずみは， 60 kgf/cm^2 のケミカルプレストレスのもどりに対して 600×10^{-4} と大きな値を示した。

図-2は，図-1の関係を材令1日に導入した機械的なプレストレスをパラメーターにとって示したものである。膨張材の置換え率が15%の場合には，いずれも材令1日に加えたプレストレスにかかわらず，図-1と同様に，ケミカルプレストレスのもどりとコンクリートの引張ひずみはほぼ直線関係を示している。

置換え率を20%に増加した膨張コンクリートでは，材令1日にプレストレスを 20 kgf/cm^2 および 40 kgf/cm^2 導入すると，図-1の 60 kgf/cm^2 を導入した場

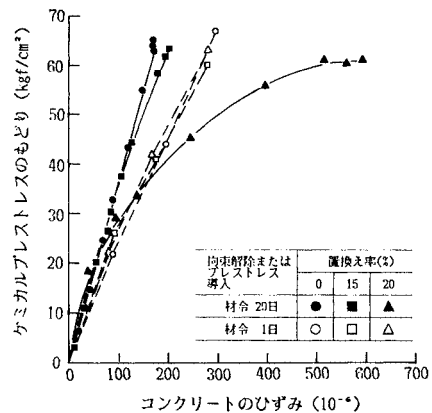


図-1 拘束の解除およびプレストレスの導入による膨張コンクリートの変形

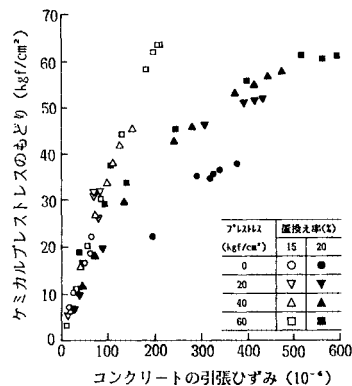


図-2 拘束解除時における膨張コンクリートの変形

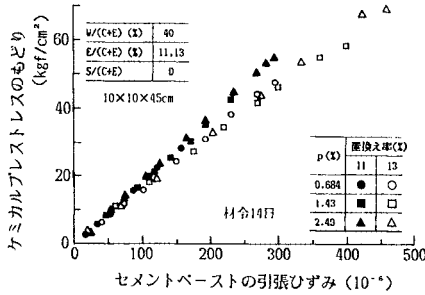


図-3 拘束解除時における膨張セメントペーストの変形

合同様な曲線上をたどって拘束は解除されている。また機械的なプレストレスを導入しなかった場合には、28日間の水中養生により、約38 kgf/cm²のケミカルプレストレスが導入され、そのもどりに対するコンクリートの引張ひずみは、さらに大きくなっている。一軸拘束の解除時におけるコンクリートの変形は、膨張コンクリートの配合だけでなく、膨張作用時に受けた応力履歴の影響をも受ける場合のあることを示す例である。

図-3は、膨張材の置換え率を2種類に変化させたセメントペーストを、一軸方向に拘束したまま材令14日まで水中養生を行い、その後PC鋼棒を取り除いた場合の結果である。それぞれ拘束鋼材比 p を3種類に変化させている。

ケミカルプレストレスが最大で70 kgf/cm²と、図-2のコンクリートの場合の38 kgf/cm²に比べて約2倍であるにもかかわらず、ケミカルプレストレスのもどりとペーストの引張ひずみは直線関係を示している。コンクリートの場合のみ曲線状となるのは、膨張材の置換え率を20%と多量に用いた膨張コンクリートでは、一軸拘束を与えても、その力学的特性が、膨張作用により劣化するためである^{21,31}。この場合、骨材とセメントペーストの境界面の劣化の影響が大きいと考えられるのである。

(2) 拘束解除の有無と力学的特性

断面が15×15 cm、長さが30 cmのコンクリートの断面図心に、直径が30 mmのシースを介し、呼び名が13 mmのPC鋼棒を配置してケミカルプレストレスを導入させ、PC鋼棒を取り除いて拘束していた方向に載荷した場合と、図-4に示す器具を用いて拘束した状態で載

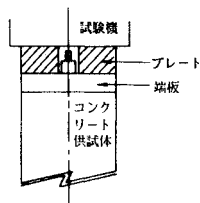


図-4 一軸拘束状態における載荷方法

荷した場合の圧縮応力-ひずみ曲線を示したのが図-5である。材令13日までの水中養生で、PC鋼棒が1570×10⁻⁶膨張しており、膨張材の置換え率が20%である膨張エネルギーの大きなコンクリートの例である。拘束した状態で載荷する場合には、端板間を圧縮するため、荷重の増加によりPC鋼棒が縮み、コンクリートに導入された19.2 kgf/cm²のケミカルプレストレスが減少するが、この影響も縦軸の圧縮応力度に考慮している。

図-5より、PC鋼棒を取り除いて拘束を解除した後載荷しても、圧縮応力度に対応する圧縮ひずみは、拘束状態のまま載荷した場合とほとんど変化がなく、ヤング係数も両者ほぼ等しいことが認められる。そして圧縮強度も等しくなっている。これらの結果を表-1に示す。

しかしながら、載荷方向に直角な方向の引張ひずみは、拘束状態のまま試験した場合の方が大きくなっている。図-6は、図-5の結果を載荷方向のひずみ ϵ_1 とそれに直角な方向のひずみ ϵ_2 から求めた体積ひずみ $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_2$ で示している。拘束状態のまま載荷した場合の方が、体積収縮ひずみが小さく、また体積ひずみが圧縮側から引張側に転じる応力度も小さくなっている。これは、圧縮応力度の増加に伴って、膨張コンクリートのポアソン比 ν が増加し、その増加の程度が拘束状態のまま載荷

表-1 拘束解除の有無と膨張コンクリートの力学的特性

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	$\sigma_c = 111 \text{ kgf/cm}^2$ において	
		E_c (10 ⁴ kgf/cm ²)	ν
拘束のまま	244	1.89	0.273
拘束解除	249	1.81	0.191

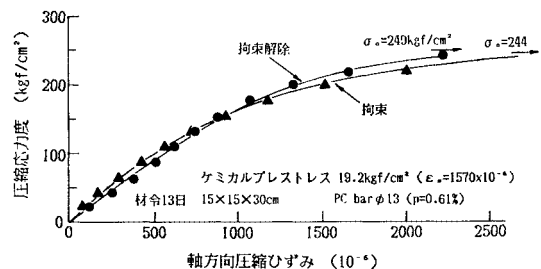


図-5 拘束解除の有無とコンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線

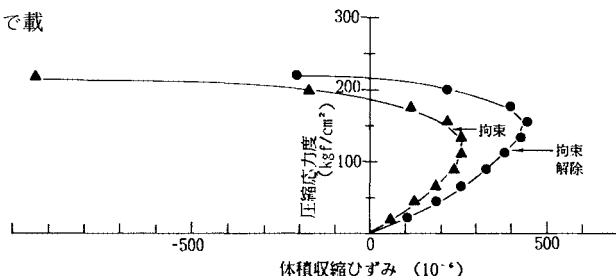


図-6 拘束解除の有無とコンクリートの圧縮応力-体積ひずみ曲線

した場合の方が大きいことを示すものである。そして、膨張材を多量に用いたコンクリートは、一軸方向に拘束しただけでは、膨張作用により発生するマイクロクラックが拘束方向に卓越し、拘束直角方向の力学的特性が拘束方向に比べて劣化して力学的特性に異質性が生じる³⁾と解釈できるのである。

以上のように、拘束を取り除いて載荷する場合と、拘束状態のまま載荷する場合とでは、拘束方向に直角な方向の力学的特性が異なる場合のあることが認められたが、拘束方向の圧縮強度およびヤング係数については、相違がないと考えてよいことが明らかになった。

一軸拘束の解除時とその後載荷した場合の応力-ひずみ曲線の例を図-7に示す。図-1および図-2で述べたように、拘束解除時におけるケミカルプレストレスのもどりと引張ひずみの関係は、膨張材の使用量が多くなると曲線を示すが、その後載荷した場合の圧縮応力度と圧縮ひずみの関係は、応力度が小さい段階のため、ほぼ直線を示している。したがって、拘束解除時における割線ヤング係数をとる場合には、ケミカルプレストレスにより異なることになる。

図-8は、一軸拘束解除時において、導入されたケミカルプレストレスとコンクリートの引張ひずみから求めた割線ヤング係数と、その後載荷して、圧縮応力度がケ

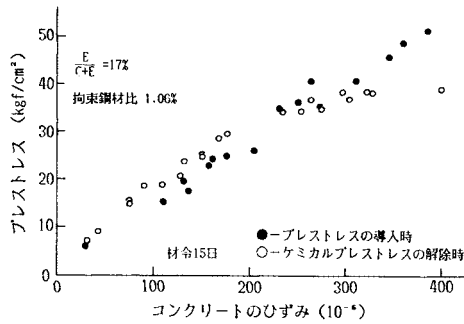


図-7 拘束解除時と載荷時における応力-ひずみ曲線

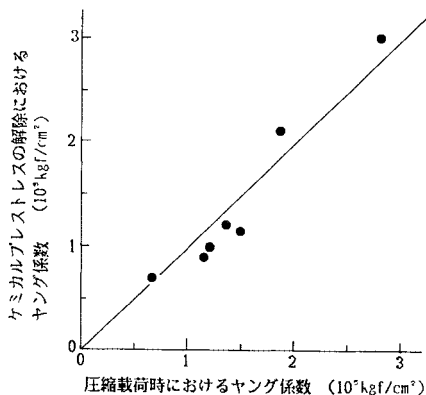


図-8 拘束解除時と載荷時におけるヤング係数

ミカルプレストレスに相当するときの割線ヤング係数との関係を示したものである。少しばらつきがあるが、両者は等しいと考えてもよいことが認められる。

4. 一般的な力学的特性

セメントに対する膨張材の置換え率を0, 13, 14 および 15 % (単位量 E にして、それぞれ0, 58.5, 63.0 および 67.5 kgf/m^3) と変化させた膨張コンクリートを、材令7日まで一軸方向に拘束鋼材比が1.06 % で拘束した後、その拘束を取り除きただちに拘束していた方向に圧縮載荷して求めた応力-ひずみ曲線を図-9に示す。この図から、膨張材を14 % まで置換えても、膨張材を用いない普通コンクリートに比べて圧縮強度は低下せず、逆に10 % 程度増加しているが、さらに1 % 膨張材を増すと、強度が約25 % 低下していることが、まず認められる。すなわち、岡田ら⁴⁾、長滝ら^{5),6)}、戸川ら⁷⁾も報告しているように、一軸方向に拘束した膨張コンクリートには、強度が急激に低下しはじめる膨張材の使用量の存在することが確認できた。

第2に認められる点は、圧縮強度が少し増加している13 % および14 % の置換え率の場合でも、同じ圧縮応力度に対応するひずみが、普通コンクリートに比べて大きくなり、ヤング係数が低下することである³⁾。そして、この現象は、膨張材の置換え率が増加するに従って、著しくなっているのである。

表-2 膨張セメントペーストおよびモルタルの圧縮特性

	E C+E (%)	ペースト			モルタル		
		S/(C+E)					
		0	1.0	2.0	0	1.0	2.0
圧縮 強度 (kgf/cm ²)	13	668 (96.4)	586 (101.7)	604 (90.7)			
	11	751 (108.4)	624 (108.3)	668 (100.3)			
	0	693 (100)	576 (100)	666 (100)			
ヤング 係数 (10 ⁴ kgf/cm ²)	13	16.8 (84.4)	21.6 (82.4)	24.9 (87.1)			
	11	18.5 (93.0)	24.2 (92.4)	27.4 (95.8)			
	0	19.9 (100)	26.2 (100)	28.6 (100)			
拘束方向 の膨張率 (10 ⁻⁴)	13	3280	2730	2220			
	11	2270	1860	1210			

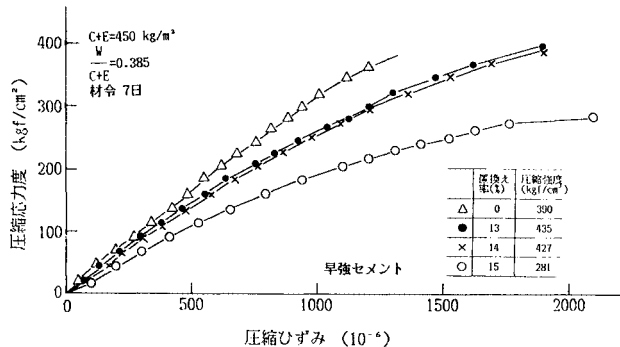


図-9 圧縮応力-ひずみ曲線

特にヤング係数が普通コンクリートに比べて小さくなることは、膨張コンクリートの特徴と考えられる。表-2は、水結合材比を40%、砂と結合材の容積比を0.1および2としたセメントペーストおよびモルタルを、材令15日まで拘束鋼材比が1.02%で一軸方向に拘束を行った後、図-9と同様にその拘束を取り除いて、拘束していた方向に圧縮载荷して求めた圧縮強度およびヤング係数をまとめたものである。この表から、膨張材を13%置換えて、約 3000×10^{-6} の拘束膨張率を生じさせた場合でも、圧縮強度はほとんど低下しないのに対し、ヤング係数は、セメントペーストおよびモルタルとも、置換え率が增加するのに従って小さくなっていることが認められるのである。

5. 拘束程度の影響

拘束鋼材比を0から2.71%まで6種類に変化させた膨張コンクリートの圧縮強度とヤング係数を、それぞれ図-10および図-11に示す。拘束解除後、ただちにその方向に载荷した場合の結果である。

図-10から、置換え率が13%および14%の場合のように強度の低下が生じず、逆に少し増加している場合には、拘束の程度は、圧縮強度にはほとんど影響を与えないが、強度の低下が生じている15%の置換え率の場合になると、拘束の程度が大きくなるほど圧縮強度は増加

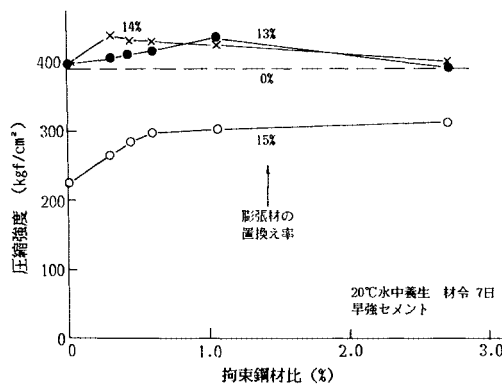


図-10 圧縮強度に及ぼす拘束程度の影響

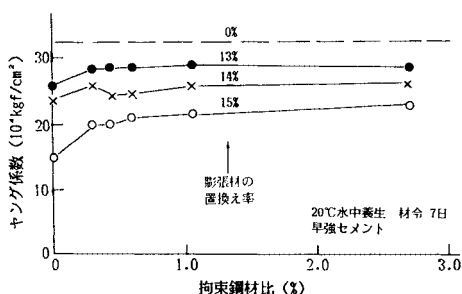


図-11 ヤング係数に及ぼす拘束程度の影響

することが認められる。しかしながら、この傾向も拘束鋼材比の小さい範囲で著しくて、拘束程度がある値を超えると、ほとんどその影響は無視できるようである。

図-11はヤング係数について示している。4.に述べたように、膨張材を用いることによりヤング係数は小さくなっている。また、その低下の程度は、拘束鋼材比により異なるが、圧縮強度の場合と同様に、拘束鋼材比がある値以上になると低下の程度はほとんど一定になっていることが認められるのである。

拘束鋼材比を変えずに、材令1日において、それまでに導入されたケミカルプレストレスに加えて、0, 20, 40および60 kgf/cm²程度の機械的プレストレスを加えて拘束の程度を変化させた後、水中養生を行って、材令35日において拘束を取り除き、圧縮試験を行った結果を、図-12および図-13に示す。長滝ら^{51,8)}も報告しているように、材令初期にプレストレスを与えた膨張コンクリートは、圧縮強度およびヤング係数とも改善されることが認められる。

しかしながら、機械的プレストレスを20 kgf/cm²から60 kgf/cm²に増加して、拘束方向のコンクリートの膨張率を、たとえば膨張材の置換え率が20%の場合、

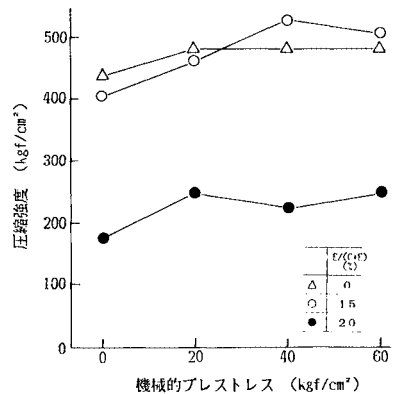


図-12 圧縮強度に及ぼす機械的プレストレスの影響

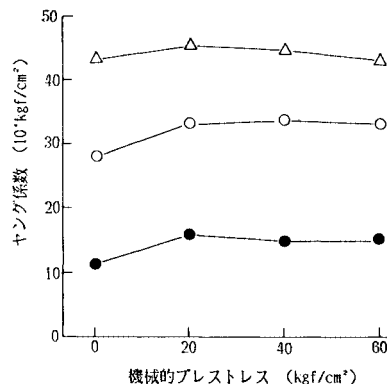


図-13 ヤング係数に及ぼす機械的プレストレスの影響

2200×10^{-6} から 670×10^{-6} に減少させても、圧縮強度およびヤング係数はほぼ一定の値を示しているのである。

Bertero, Polivka⁹⁾も拘束鋼材比を0.22%から6.47%まで変化させた実験から、拘束鋼材比が0.22%から0.90%までは、圧縮強度およびヤング係数とも、拘束鋼材比が増すに従って増加するが、拘束鋼材比が0.90%を超えるとほぼ一定であるか逆に低下することを報告しており、本実験の結果とほぼ一致している。すなわち、一軸拘束の程度を増加させることにより、膨張コンクリートの力学的特性を改善するには限度のあることが、本実験により確かめられたのである。

6. 拘束解除後の力学的特性の変化

断面が15×15cm、長さが50cm、拘束鋼材比が1.06%の一軸拘束供試体の曲げ強度を、材令7日で拘束を取り除いてただちに求めた場合、その後材令14日と36日まで水中で自由膨張させて求めた場合、および材令36日まで一軸拘束したまま水中養生を行い、拘束を取り除いてただちに試験した場合について示したのが図-14である。この図から、膨張材の置換え率が15%および20%のいずれの場合においても、一軸拘束を取り除いて自由膨張させても、材令7日に比べて材令14日では曲げ強度が一時低下するものの、材令36日においては強度が回復して、ほぼ等しい値かあるいはそれ以上の強度になっていることが認められる。

また図中には、材令13日で一軸拘束を解除して7日間の水中養生を行った場合も示しているが、この場合には一時的な強度低下もない。

図-15に示すように、拘束を取り除いて、たとえば材令7日から36日まで拘束していた方向に 2000×10^{-6} から 8500×10^{-6} 、それに直角な方向に 5000×10^{-6} から 13800×10^{-6} といった多量に自由膨張させても、強度の低下が生じない場合があるのである。そして、材令36

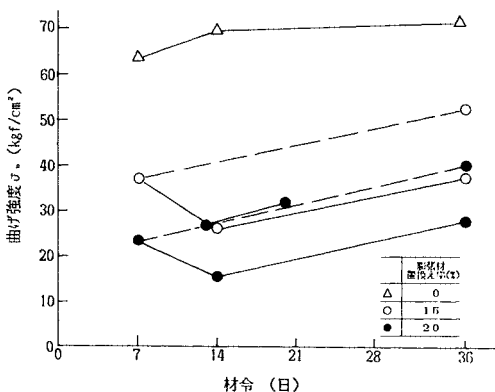


図-14 曲げ強度の時間的変化

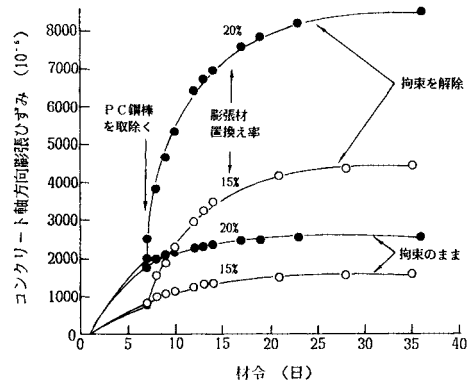


図-15 一軸拘束状態および拘束解除後の膨張特性

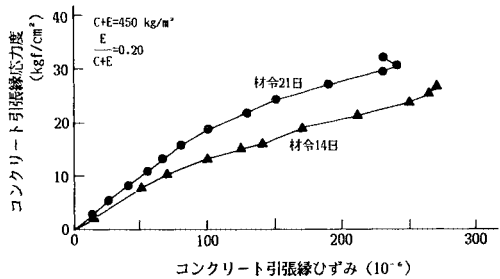


図-16 曲げ応力-ひずみ曲線

表-3 力学的特性の時間的変化

	材令 (日)	置換え率 (%)	
		15	20
ヤング係数 (10 ⁴ kgf/cm ²)	7	12.5	5.50
	36	24.2	22.0
曲げ強度 (kgf/cm ²)	7	37.3	23.4
	36	52.9	40.4

日まで拘束して、拘束方向に 2000×10^{-6} から 2500×10^{-6} 、それに直角な方向に 5000×10^{-6} から 6800×10^{-6} まで膨張させても、曲げ強度が大きくなっていることも明瞭である。

また、表-3に示すように、拘束を取り除く際におけるコンクリートのケミカルプレストレスのもどりと引張ひずみから求めたヤング係数も、材令7日から36日まで水中養生を行うことにより、著しく増加しているのである。

図-16は、図-14の場合と同様な一軸拘束供試体を、ケミカルプレストレスがほとんど終わった材令14日において拘束を取り除いた直後と、その後取り除いたまま7日間の水中養生を行った後に実施した曲げ応力度と引張線のひずみとの関係を示したものである。膨張作用により曲げ強度はそれぞれ低下しているが、7日間の水中養生により、拘束していた方向に 1000×10^{-6} 、それに直角方向に 650×10^{-6} の膨張率が生じたにもかかわらず

ならず、曲げ強度および剛性とも劣化せず、逆に改善されていることは明らかである。なお、この間における普通コンクリートの曲げ強度および剛性の増加はほとんど認められなかった。

以上の実験結果から、膨張コンクリートの力学的特性は、普通コンクリートに比較して、ヤング係数が小さくなるとともに、材令に伴う変化が著しく、材令初期の膨張作用の著しい時期には、力学的特性の向上程度が小さいが、材令が経過するに従って、その間の膨張作用が継続しているにもかかわらず、力学的特性の改善は大きくなることが認められた。

このような膨張コンクリートの力学的特性における特異な現象は、ケミカルプレストレスの導入機構に関連する重要な問題と考えられるが、これまでほとんど解明されていない。著者は以下のように推論したのである。すなわち、材令初期には、膨張素材の水和反応による膨張作用のため、膨張コンクリートの内部にマイクロクラックが発生して、コンクリートの強度および弾性係数の増加は小さい。しかしながら、材令が経過すると膨張作用が弱くなり、セメント本来の水和作用による強度等の発現に加えて、膨張作用により発生したマイクロクラックの内部にエトリングait等の生成物が析出して、強度等が回復することにより、力学的特性の改善が図られることになるのである。現在のところ、この推論を検証するまでには至っていないが、顕微鏡での観察¹⁰⁾および細孔径分布の測定^{11), 12)}などの報告は、この推論を裏付けるものと思われる。

7. 結 論

一軸拘束を受けた膨張コンクリートの圧縮強度、曲げ強度、ヤング係数およびポアソン比に関する実験結果より、次のことがいえると思われる。

(1) 多量の膨張材を用いたコンクリートの一軸拘束供試体の拘束解除時において、ケミカルプレストレスのもどりとコンクリートの引張ひずみの間には直線関係でなく、曲線関係を示す。このような変形性状は、膨張コンクリートの配合だけでなく、膨張作用時に受けた応力履歴の影響をも受ける。

(2) 拘束鋼棒を解除した後と拘束状態のまままで載荷した場合に、ヤング係数と圧縮強度に相違はほとんど認められなかったが、ポアソン比は拘束状態のまままで載荷した方が大きくなった。

(3) 一軸拘束解除時において、導入されたケミカルプレストレスとコンクリートの引張ひずみから求めた割線ヤング係数と、その後載荷して、圧縮応力度がケミカルプレストレスに相当するときの割線ヤング係数は、少しばらつきがあるが、両者は等しいと考えてよい。

(4) 一軸拘束を受けた膨張コンクリートは、圧縮強度が膨張作用により低下しない場合でも、ヤング係数が普通コンクリートに比べて小さくなる。

(5) 膨張作用により圧縮強度およびヤング係数が低下する場合には、一軸拘束の程度の増加とともに品質低下が軽減されるが、その効果には限度がある。

(6) 膨張コンクリートの力学的特性は、普通コンクリートに比較して、材令に伴う変化が著しい。すなわち、材令初期の膨張作用の著しい時期では、力学的特性の向上の程度が小さいが、材令が経過するに従って、その間に膨張作用が継続しているにもかかわらず、力学的特性の改善は大きくなることがある。

謝 辞：本研究のうち、大部分の実験は、著者が東京大学大学院在学中に、國分正胤先生、岡村 甫先生のご指導のもとに実施したものである。両先生の懇切なるご指導に対して、深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 國分・鈴木・辻：一軸拘束によるコンクリートのケミカルプレストレスングに関する基礎研究，土木学会第26回年次学術講演会講演概要集，V-101，1971。
- 2) 岡村・辻・後藤：一軸拘束を受ける膨張コンクリートの強度，コンクリート工学年次講演会講演論文集，第1回，1979。
- 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，コンクリート工学年次講演会論文集，第6回，1984。
- 4) 岡田・平沢・陳：膨張セメントコンクリートのセルフプレストレスおよびクリープに関する一実験，土木学会論文報告集，第223号，1974年3月。
- 5) 長滝・米山・飯田：化学的プレストレスの導入に関する基礎研究，セメント技術年報，Vol. 22，1968。
- 6) 長滝・米山・後藤・八巻：拘束を受けた膨張セメントコンクリートの基礎的性状，セメント技術年報，Vol. 24，1970。
- 7) 戸川一夫・荒木謙一：膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレスに関する研究，プレストレスコンクリート，1972年4月。
- 8) 長滝重義・米山絃一：膨張セメントコンクリート舗装に関する研究，土木学会論文報告集，第206号，1972年10月。
- 9) Bertero, V. and Polivka, M.: Effect of Degree of Restraint on Mechanical Behavior of Expansive Concrete, Proc. of ASTM, Vol. 64, 1964.
- 10) 中村孝則・深谷泰文：膨張材によるセメント硬化体の膨張変形，セメント技術年報，Vol. 26，1972。
- 11) 戸川一夫：ケミカルプレストレスコンクリートの利用に関する基礎的研究，京都大学提出学位論文，1982年1月。
- 12) 國府勝郎：膨張コンクリートと鋼材との複合効果に関する研究，東京都立大学提出学位論文，1984年3月。

(1986.1.16・受付)