

論文 鋼材で拘束された膨張コンクリートの引張強度特性に関する研究

井手一雄*¹ 樋口正典*² 辻幸和*³

要旨：鋼材で拘束した膨張コンクリートの一軸引張強度試験を、単位膨張材量、水結合材比および試験材齢を変化させて行い、膨張コンクリートの一軸引張強度特性について考察した。その結果、膨張コンクリートは、膨張作用による強度およびヤング係数の低下により、非線形性が顕在化することを示した。また、非線形性により、ケミカルプレストレインに相当する量よりも大きなひび割れ幅の低減効果が得られたが、ケミカルプレストレインの少ない若材齢において過膨張により非線形性が著しく増大した場合には、付着力の低下により、ひび割れ幅の低減効果が減少することを示した。

キーワード：膨張コンクリート、一軸引張強度、ひび割れ幅

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の高機能化や高耐久化の方法の一つに、膨張コンクリートによるケミカルプレストレスやケミカルプレストレインを利用する方法がある¹⁾。

膨張コンクリートがひび割れ発生の抑制やひび割れ幅の制御、せん断耐力の向上など、鉄筋コンクリート部材の性能を改善することは、多くの文献に報告されている¹⁾。その一方で、これらの効果を定量的に評価する技術は十分でなく、膨張コンクリートが持つ潜在的な性能を十分に利用しているとはいえない。

本研究では、鋼材で拘束した膨張コンクリートの一軸引張強度試験を、単位膨張材量、水結合材比および試験材齢を変化させて行い、膨張コンクリートの一軸引張強度特性について考察した。

2. 実験概要

本研究では、水結合材比(W/B)を40%および60%の2水準、単位膨張材量(E)を0kg/m³、40kg/m³および60kg/m³の3水準とし、試験材齢を材齢2、7および28日として、一軸引張強度試験、圧縮強度試験(JIS A 1108)およ

び割れ引張強度試験(JIS A 1113)を行った。供試体は、各試験水準とも5体ずつ作製し、コンクリートの打込み後24時間まで室温20℃で湿布養生し、その後は試験の直前まで標準水中養生した。また、試験中には水を噴霧するなどして、極力乾燥の影響を防いだ。

コンクリートの配合を、表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、骨材には鬼怒川水系産川砂(表乾密度2.57g/cm³、吸水率2.25%、F.M.2.45)および秩父産碎石(最大寸法20mm、表乾密度2.71g/cm³、吸水率0.64%、F.M.6.59)を、それぞれ使用した。また、膨張材には、エトリンサイト系(構造用)を使用し、所定量をセメントに置き換えた。

表-1 コンクリートの配合表

W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
	セメント	膨張材	水	細骨材	粗骨材
40	425	0	170	655	1075
	385	40			
	365	60			
60	287	0	172	857	976
	247	40			
	227	60			

*1 三井住友建設株式会社 技術研究所 主任研究員 (正会員)

*2 三井住友建設株式会社 技術研究所 土木材料研究室室長 工博 (正会員)

*3 群馬大学 工学部 建設工学科 教授 工博 (正会員)

供試体の形状寸法を、図-1に示す。供試体は、JIS A 6202「コンクリート用膨張材」の附属書2(参考)「膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法」に規定されているB法に準じて作製した。そして、ひび割れの発生位置を特定するため、長さ方向の中央部には、深さ10mm、幅2mmの切り欠きを両側面に設けた。また、拘束棒は全長に渡ってねじ転造されているが、ひび割れ位置における拘束棒ひずみを計測するため、長さ方向中央部2cmの区間は全周に渡ってねじを切削した。そのため、拘束棒の断面積は、一般部が公称断面積の95.03mm²であるのに対し、ゲージ貼付部は61.86mm²となった。本供試体の特長としては、拘束棒の両端に設けた拘束端板で膨張を拘束するため部材端部での付着性状が改善され、長さ方向に関して小型化が可能であり、取扱いが簡便であることがまず挙げられる。また、ひび割れ位置を特定することにより、ひび割れ幅と拘束棒ひずみの関係が明確に計測可能となる。

一軸引張強度試験装置を、図-2に示す。供試体の設置は、定着部のすべりや荷重の偏心を極力なくすため、供試体の拘束端板にあらかじめ溶接してあるナット(1)に、球座がついたボルト(2)をねじ込む方法で行った。引張強度試験は変位制御で行い、載荷速度がJIS A 1113-1999「コンクリートの割裂引張強度試験方法」の載荷速度(毎秒0.06±0.04N/mm²)と同等となるように、変位速度を調整した。

計測項目は、ケミカルプレストレイン、引張荷重、拘束棒ひずみおよび切り欠き位置におけるひび割れ幅とした。ケミカルプレストレインおよび拘束棒ひずみの計測は、拘束棒の中央部に貼付した2本のひずみゲージ(3)により行い、荷重の計測は、引張試験機に設置されたロードセル(4)により行った。また、ひび割れ幅の計測は、切り欠きを跨いで設置した標点間距離50mmのパイ型変位計2台(5)で行った。

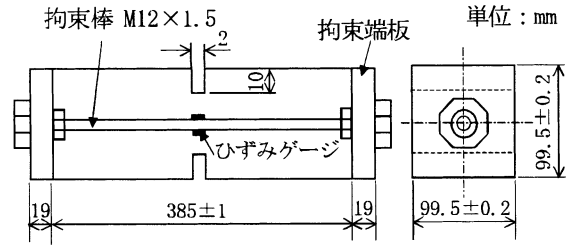


図-1 供試体の形状寸法

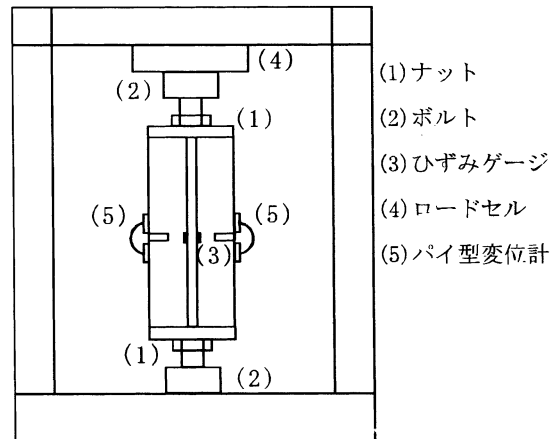


図-2 一軸引張強度試験装置

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮および割裂引張強度

圧縮および割裂引張強度試験結果を、図-3および図-4に示す。圧縮強度は、単位膨張材量が40kg/m³の場合、水結合材比や材齢に拘わらず普通コンクリートに比べて若干高い傾向にあった。また、単位膨張材量を60kg/m³に増加すると、水結合材比が40%の場合には若干低下する傾向にあり、水結合材比を60%とすると著しく低下した。割裂引張強度は、単位膨張材量が40kg/m³の場合、水結合材比が60%の材齢2日では若干高く、その他の水準では若干低くなる傾向を示した。また、単位膨張材量を60kg/m³に増加すると、著しく低下した。

3.2 ケミカルプレストレインとケミカルプレストレス

引張試験直前のケミカルプレストレインおよび式(1)で求めたケミカルプレストレスを、表-2にまとめる。

同一材齢におけるケミカルプレストレイン

は、水結合材比に拘わらずほぼ一定となった。また、本実験におけるケミカルプレストレスの範囲は、およそ0.6~2N/mm²であった。

$$\sigma_{cp} = \epsilon_{sp} \times E_s \times A_s / A_c \quad (1)$$

ここに、

σ_{cp} : ケミカルプレストレス (N/mm²)

ϵ_{sp} : ケミカルプレストレイン

E_s : 拘束棒のヤング率 (211000N/mm²)

A_s : 拘束棒の断面積 (61.86mm²)

A_c : コンクリートの断面積 (7938.14mm²)

3.3 荷重と拘束棒ひずみ

荷重と拘束棒ひずみの関係の一例を、図-5に示す。ここで、拘束棒ひずみは、コンクリートの打込み時を原点とした。すなわち、荷重0kNにおける拘束棒ひずみは、ケミカルプレストレインである。また、図中()内の数字は水結合材比(%)を示し、破線は拘束棒のみに載荷した場合を示す。

ひび割れ発生前の荷重と拘束棒ひずみの関係は、若材齢ほど、また水結合材比が大きくなる傾向にあった。特に、水結合材比が60%で単位膨張材量が60kg/m³の場合には、材齢2日で非線形性が顕著に現れた。

ひび割れ発生後の荷重と拘束棒ひずみの関係では、拘束棒ひずみの原点をケミカルプレストレインとしているにも拘わらず、いずれの場合も拘束棒のみに載荷した場合とほぼ同一となった。これは、ひび割れ発生前には内部応力の釣り合いを保つ役割を果たしたケミカルプレストレインが、ひび割れ発生後には消失することなく外力を負担したことを意味するものである。さらに、単位膨張材量が40kg/m³の場合には、拘束棒のみに載荷した場合よりも同一荷重に対するひずみが若干小さく、普通コンクリートとほぼ同等であった。一方、単位膨張材量を60kg/m³とした場合には、同一荷重に対するひずみは普通コンクリ

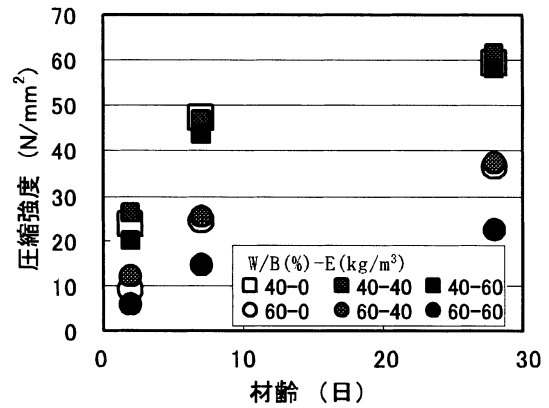


図-3 圧縮強度試験結果

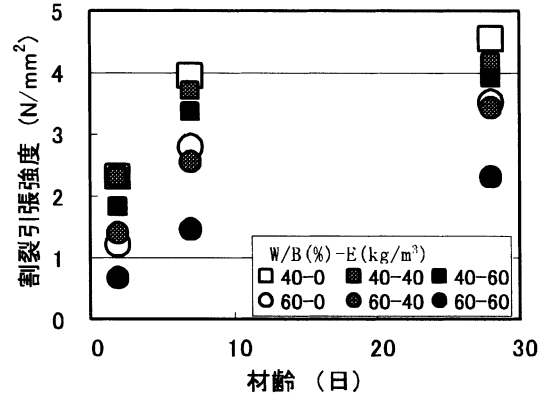


図-4 割裂引張強度試験結果

表-2 ケミカルプレストレインとケミカルプレストレス

W/B (%)	E (kg/m ³)	材齢 (日)	ϵ_{sp} ($\times 10^{-6}$)	σ_{cp} (N/mm ²)
40	40	2	399	0.65
60			389	0.64
40		7	510	0.83
60			528	0.87
40		28	576	0.94
60			578	0.94
40	60	2	588	0.96
60			620	1.02
40		7	1075	1.76
60			1172	1.93
40		28	1254	2.06
60			1165	1.92

ートよりも若干大きく、その傾向は荷重が増すほど顕在化した。すなわち、単位膨張材量が40kg/m³の場合には、拘束棒とコンクリート間の付着により得られる引張剛性効果が普通コンクリートとほぼ同等であり、単位膨張材量が60kg/m³の場合には、普通コンクリートよりも低下したものと考えられる。この原因と

しては、本実験では膨張を一軸方向にしか拘束していないため、軸直角方向の過膨張による拘束棒とコンクリート間の付着力の低下が考えられる。この現象は、圧縮強度や割裂引張強度がそれほど低下していない水結合材比が40%の場合にも生じていることから、過膨張が付着力に及ぼす影響は、圧縮強度や割裂引張強度に及ぼす影響よりも大きいものと考えられる。

3.4 一軸引張応力度と拘束棒ひずみ

ひび割れ発生までの拘束棒ひずみと一軸引張応力度の関係の一例を、図-6に示す。これらの図は、縦軸および横軸とも載荷時を原点に採っているため、膨張コンクリートの拘束棒ひずみは、横軸の値に表-2のケミカルプレストレインが生じていることになる。また、図中()内の数字は、水結合材比(%)を示す。

単位膨張材量が 40kg/m^3 の場合は、載荷初期には普通コンクリートと同程度の弾性挙動を示し、初期引張ヤング係数も普通コンクリートとほぼ同等であるが、引張応力度が増加して一軸引張強度の2分の1程度を超えると、非線形性が大きくなった。ただし、水結合材比が60%の材齢2日に限っては、普通コンクリートも比較的大きな非線形性を示しており、膨張コンクリートと普通コンクリートの挙動は、ほぼ同一となった。一方、単位膨張材量を 60kg/m^3 とした場合には、載荷直後から拘束棒ひずみは大きくなり、初期引張ヤング係数も小さくなった。

ひび割れ発生までの拘束棒ひずみは、普通コンクリートの場合、材齢に拘わらずほぼ一定となった。一方、膨張コンクリートの場合、いずれも普通コンクリートより大きく、水結合材比が60%の場合は、材齢が経るにつれ減少する傾向を示し、水結合材比が40%の場合は、材齢に拘わらずほぼ一定となった。また、材齢2日では、水結合材比が60%の方が40%よりも大きなひずみが生じたが、材齢7日以降では同程度となった。

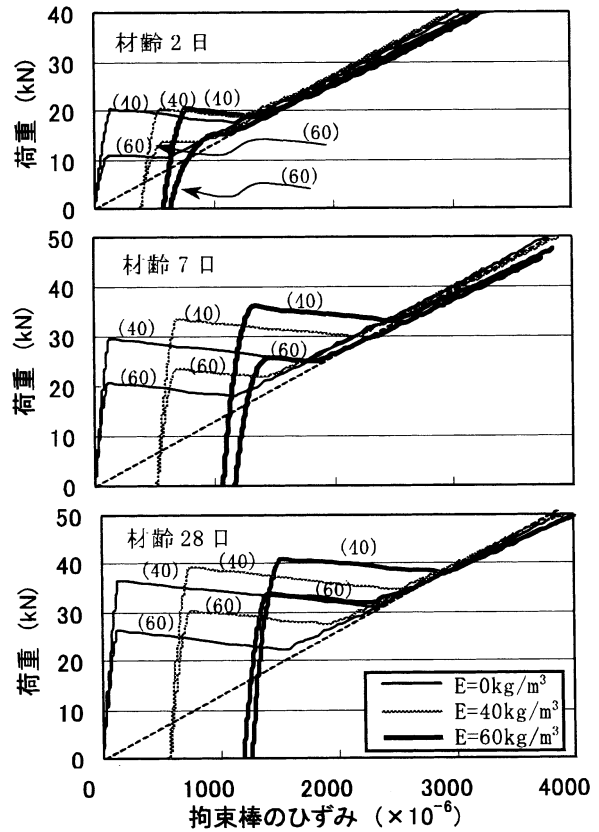


図-5 荷重と拘束棒ひずみ

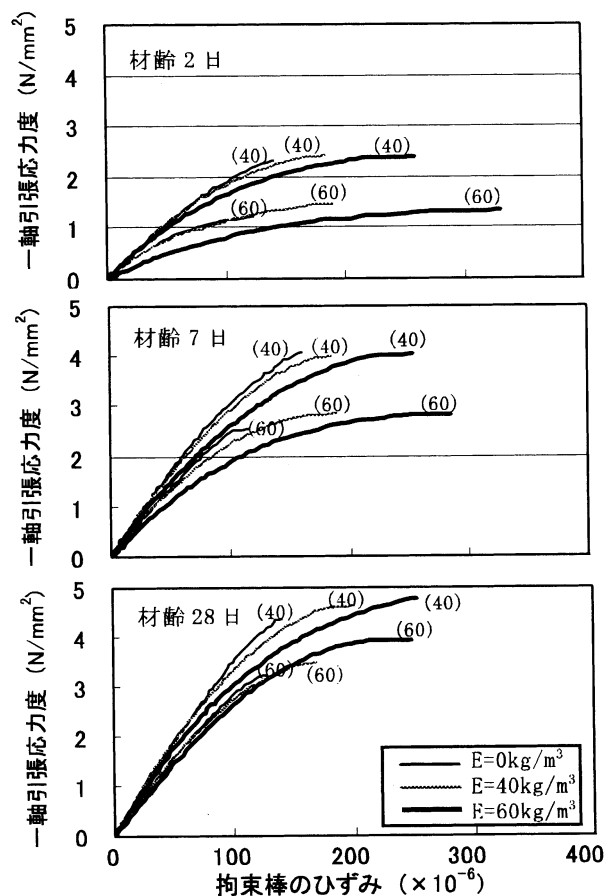


図-6 一軸引張応力度と拘束棒ひずみ

これらの結果から、膨張コンクリートの非線形性は、若材齢ほど、また水結合材比が大きく、単位膨張材量が多いほど顕在化する傾向にあることが分かる。これは、割裂引張強度が低下する傾向と一致しており、膨張コンクリートの非線形性には、膨張作用によるコンクリートの強度およびヤング係数の低下が密接に関係しているものと思われる。

一軸引張強度は、膨張コンクリートの方が大きくなる傾向を示したが、引張強度試験は結果のばらつきが大きく、また、本実験のケミカルプレストレスが $0.6 \sim 2 \text{ N/mm}^2$ 程度と比較的小さいレベルであったこと、単位膨張材量を 60 kg/m^3 としてケミカルプレストレスを大きくした水準ではコンクリートの強度低下が大きかったこと、膨張コンクリートの割裂引張強度が普通コンクリートに比べて低下する傾向にあったことなどから、本実験ではケミカルプレストレスの一軸引張強度に対する明瞭な効果は顕れなかった。

3.5 ひび割れ幅

ひび割れ幅の計測結果を、図-7に示す。結果には、各水準の平均値を示した。

同一荷重におけるひび割れ幅は、材齢7日と28日では、単位膨張材量が多いほど小さくなった。一方、材齢2日では、単位膨張材量が 40 kg/m^3 と 60 kg/m^3 のひび割れ幅は、同等か 60 kg/m^3 の方が大きくなった。これは、図-8に示すように、材齢7日以降ではひび割れ発生後の拘束棒ひずみにケミカルプレストレス程度の差が生じたのに対し、材齢2日では、単位膨張材量が 40 kg/m^3 のケミカルプレストレスと 60 kg/m^3 との差が 200×10^{-6} 程度と小さいことや、単位膨張材量を 60 kg/m^3 とすると引張剛性効果が低下することなどから、単位膨張材量が 40 kg/m^3 と 60 kg/m^3 のひび割れ発生後の拘束棒ひずみには、ケミカルプレストレスほどの差が生じなかったためである。

つぎに、ひび割れ幅の算定式を式(2)²⁾

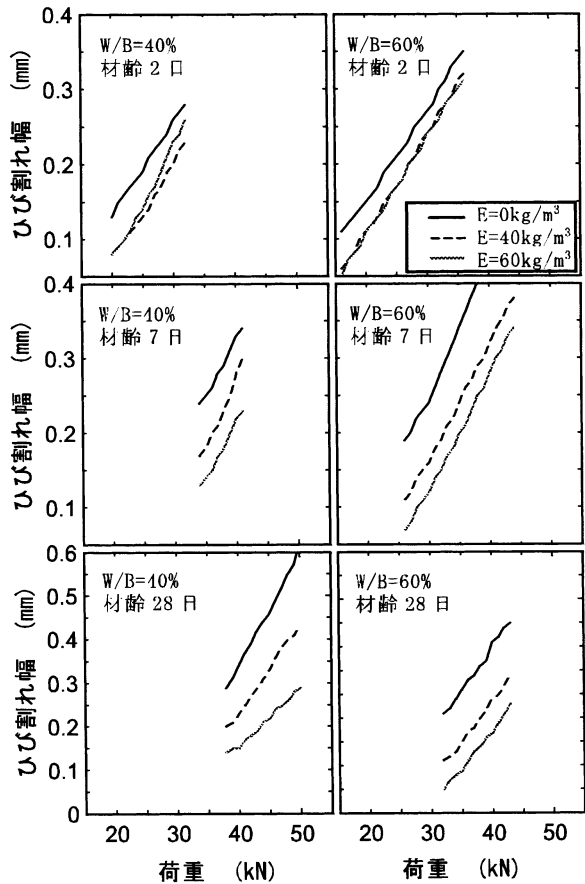


図-7 ひび割れ幅の計測結果

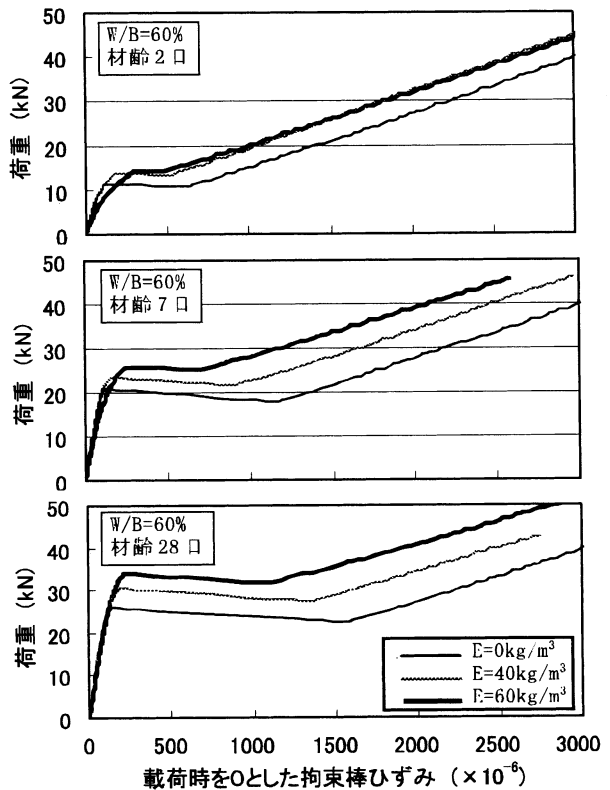


図-8 載荷時を0とした拘束棒ひずみと荷重

とにおいて、ひび割れ前の塑性変形や付着性状などの影響を普通コンクリートと同じと仮定し、ケミカルプレストレインのみを考慮した場合の膨張コンクリートのひび割れ幅を算定して、ひび割れ幅の低減効果を考察した。ここで、補正係数 α は、各材齢において単位膨張材量が 0kg/m^3 における拘束棒ひずみとひび割れ幅の計測結果から、各荷重ごとに式(2)を逆算して求めた。

$$w = \alpha (\epsilon_s - \epsilon_{sp}) \quad (2)$$

ここに、

w : ひび割れ幅 (mm)

α : 付着性状や供試体の形状などに関する補正係数

ϵ_s : 拘束棒ひずみの絶対量

ϵ_{sp} : ケミカルプレストレイン

ひび割れ幅の算定値と計測値との差を、表-3にまとめる。表で+は計測値より算定値の方が大きく、-は算定値の方が小さいことを示す。すなわち、+の場合はケミカルプレストレインよりもひび割れ幅の低減効果が多く、-の場合は少ないことを意味する。

ひび割れ幅の算定値は、水結合材比や単位膨張量に拘わらず、材齢が経るに従って計測値より大きくなる傾向を示した。さらに、単位膨張材量が 60kg/m^3 の材齢2日では、計測値より算定値の方が小さくなった。単位膨張材量が 60kg/m^3 の材齢2日では、ひび割れ発生までの拘束棒ひずみが大きく、ひび割れ幅の低減には有利であるものの、ケミカルプレストレインが比較的小さく、引張剛性効果が低下する影響の方が顕在化したため、ケミカルプレストレインよりもひび割れ幅の低減効果が少なくなったものと思われる。一方、材齢7日以降では、引張剛性効果の低下に対して十分なケミカルプレストレインが導入されたことと、ひび割れ発生までの伸びひずみが有効に作用したため、ケミカルプレストレインよりもひび割れ幅の低減効果が多くなったものと思われる。

表-3 ひび割れ幅の算定値と計測値の差

W/B (%)	材齢 (日)	荷重 (kN)	差 (mm)	
			E40	E60
40	2	20	+0.02	0.00
		25	+0.02	-0.01
		30	+0.01	-0.03
	7	32	+0.00	-
		35	+0.02	+0.02
		40	0.00	+0.01
	28	35	+0.02	-
		40	+0.04	+0.05
		45	+0.05	+0.08
60	2	15	0.01	0.00
		20	0.00	-0.01
		25	-0.01	-0.01
	7	25	+0.02	0.00
		30	+0.02	+0.01
		35	+0.03	+0.02
	28	30	+0.02	-
		35	+0.04	+0.03
		40	+0.05	+0.03

4. まとめ

鋼材で拘束した膨張コンクリートの一軸引張強度試験を、単位膨張材量、水結合材比および試験材齢を変化させて行った。その結果、膨張コンクリートは、膨張作用による強度およびヤング係数の低下により、若材齢ほど、また水結合材比が大きく、単位膨張材量が多いほど、非線形性が顕在化する傾向にあった。また、非線形性により、ケミカルプレストレインに相当する量よりも大きなひび割れ幅の低減効果が認められたが、ケミカルプレストレインの少ない若材齢において過膨張により非線形性が著しく増大した場合には、拘束棒とコンクリートとの付着力が低下するため、ひび割れ幅の低減効果が減少した。

参考文献

- 1) コンクリートライブラリー75 膨張コンクリートの設計施工指針, 土木学会, 1993年7月
- 2) 井手一雄, 樋口正典, 辻 幸和: 膨張コンクリートによるひび割れ制御に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.195-200, 2002