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

并手一雄^{*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 び割裂引張強度試験(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)および秩父産砕石 (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,エトリンガイト系(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)

* 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 * 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。

ー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JISA 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 - 2 一軸引張強度試験装置

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。

_{cp} = _{sp} × Es × As / Ac (1) ここに, _{cp}:ケミカルプレストレス(N/mm²) _{sp}:ケミカルプレストレイン Es:拘束棒のヤング率(211000N/mm²) As:拘束棒の断面積(61.86mm²) Ac: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,単位膨張材量が多いほど非線形性が強く 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



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	材齡	SD	CD
(%)	(kg/m³)	(日)	(×10 ⁻⁶)	(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/m³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/m³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。



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。

ー軸引張強度は,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 0.6~2N/mm² 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 60kg/m³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 40kg/m³と 60kg/m³のひび割れ幅は,同等か 60kg/m³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イ ン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 40kg/m³のケミカルプレスト レインと 60kg/m³との差が 200×10⁻⁶程度と小 さいことや,単位膨張材量を 60kg/m³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 40kg/m³ と 60kg/m³のひび割れ 発生後の拘束棒ひずみには,ケミカルプレス トレイン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⁾



とおいて,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 は,各材齢において単位膨 張材量が0kg/m³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。

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/m³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/m³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	荷重	差(mm)	
(%)	(日)	(kN)	E40	E60
	2	20	+0.02	0.00
		25	+0.02	-0.01
		30	+0.01	-0.03
	7	32	+0.00	-
40		35	+0.02	+0.02
		40	0.00	+0.01
	28	35	+0.02	-
		40	+0.04	+0.05
		45	+0.05	+0.08
	2	15	0.01	0.00
		20	0.00	-0.01
		25	-0.01	-0.01
	7	25	+0.02	0.00
60		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

- 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