

論文 膨張コンクリートの引張ひずみの終局値に関する一考察

栖原 健太郎^{*1}・田所 雄治^{*2}・柄澤 英明^{*3}・辻 幸和^{*4}

要旨: 異なる有効高さを持つ膨張コンクリートを用いた RC 梁の曲げ載荷実験を実施し、膨張コンクリートの引張ひずみの終局値を、曲げひび割れが発生する直前の梁供試体の引張縁のコンクリートのひずみから評価した。さらに、仕事量一定則の概念によりケミカルプレストレスを評価し、これを考慮した積層モデルによる断面解析手法を用いて、曲げひび割れが発生する直前の断面内のひずみ分布の実測値を再現できるコンクリートの引張側の応力度とひずみの関係における引張ひずみの終局値を解析的に同定した。検討の結果、膨張コンクリートの引張ひずみの終局値は、普通コンクリートの値に比べて大きいことが確認された。

キーワード: 膨張コンクリート, 引張ひずみの終局値, 伸び能力, 曲げ載荷実験

1. はじめに

膨張コンクリートの引張側の応力度とひずみの関係は、普通コンクリートと異なる非線形挙動を示すことが報告されており、引張強度に達した後も引張応力度を保持する領域の存在が示唆^{1),2),3),4)}されている。すなわち、膨張コンクリートのひび割れ抑制効果は、圧縮応力度であるケミカルプレストレスの導入効果に加えて、膨張コンクリート自身の「伸び能力」による効果も指摘¹⁾されている。

本文では、膨張コンクリートを用いた RC 梁（以下、CPC 梁と略称する）の曲げ載荷実験から、曲げひび割れが発生する直前の引張縁のコンクリートの引張ひずみを評価し、膨張コンクリートの引張ひずみの終局値を、普通コンクリートを用いた RC 梁の値と比較検討し、膨張コンクリートの「伸び能力」について検討した結果を報告する。また、CPC 部材の断面解析に用いる膨張コンクリートの引張側の応力度とひずみの関係についても提案する。

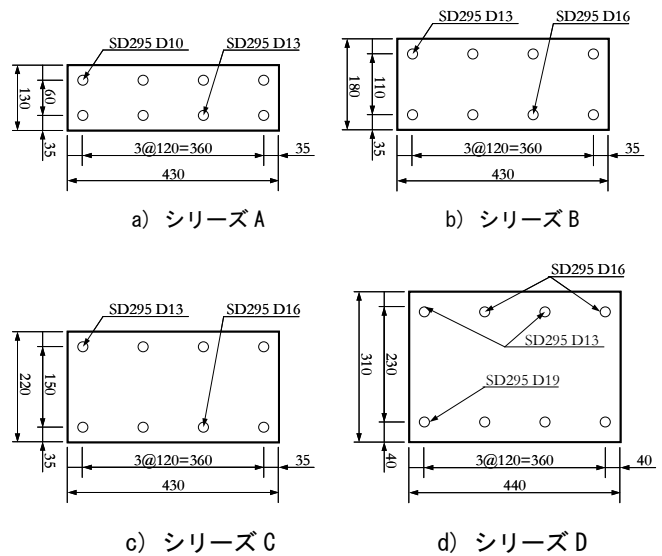


図-1 梁供試体の断面図

2. 実験概要

2.1 供試体の形状寸法および実験の要因と水準

実験の要因と水準は、梁供試体の有効高さを4水準、膨張材の使用の有無の2水準として、合計8水準とした。また、同一の水準について3体の供試体を作製し、合計24体を実験対象とした。

供試体の断面形状を図-1に、コンクリートの配合を表-1に示す。膨張コンクリートには、従来の標準混和量が 30kg/m^3 のエトリンガイト系の膨張材をセメントの内割で 60kg/m^3 混和した。JIS A 6202 附属書2における材齢7日の一軸拘束膨張率は、約 600×10^{-6} であった。

供試体の養生は、実際のコンクリート工場製品の製造

表-1 コンクリートの配合

	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	
	RC 梁	20	8	2.0	47	49
CPC 梁	20	8	2.0	45	48	
単位量 (kg/m ³)						
	W	C	Ex	S	G	Ad.
RC 梁	168	357	0	904	955	1.97
CPC 梁	168	313	60	879	967	2.05

*1 電気化学工業株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 博士 (工学) (正会員)

*2 全国ボックスカルバート協会 技術委員長 (興建産業株式会社) (正会員)

*3 全国ボックスカルバート協会 技術委員長 (鶴見コンクリート株式会社) (正会員)

*4 前橋工科大学 学長 工学博士 (正会員)

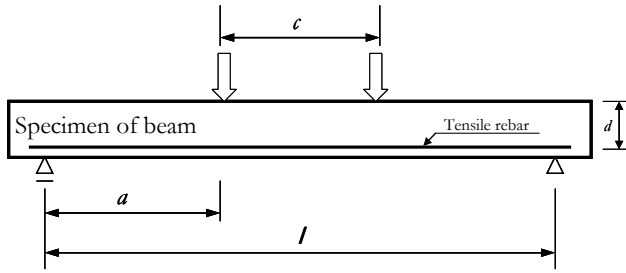


図-2 曲げ載荷実験

表-2 曲げ載荷実験の条件

シリーズ	A	B	C	D	
供試体数	3	3	3	3	
支点間距離 c (mm)	600	700	800	1000	
せん断スパン a (mm)	600	700	800	1000	
せん断スパン比 a/d	6.32	4.83	4.32	3.70	
圧縮強度 (N/mm^2)	RC	46.4	38.7	43.3	41.9
	CPC	40.9	40.9	47.0	46.2
長さ変化率 ^{*1} ($\times 10^{-6}$)	600	600	670	650	
仕事量 ($\times 10^{-5}\text{N}/\text{mm}^2$) ^{*2}	7.6	9.1	11.2	12.3	

*1 JIS A6202 附属書2 材齢7日の一軸拘束膨張率

*2 CPC梁の曲げ載荷試験時の仕事量 U の平均値

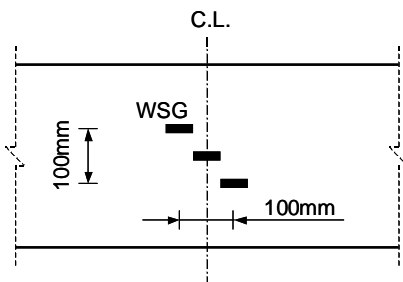


図-3 引張縁のWSGの設置位置

条件を模擬して、一次養生に蒸気養生を施した後、材齢28日における載荷実験まで気乾養生を実施した。蒸気養生は、コンクリートを打ち込んでから4~5時間後に開始し、昇温速度は1時間あたり20°Cとした。また、65°Cで4時間保持した後自然冷却して、材齢1日で型枠を取り外し、気中養生とした。

2.2 載荷方法および測定項目

曲げ載荷方法は、曲げモーメントの一定区間を有する三等分点載荷とした。載荷条件を図-2および表-2に示す。

測定項目は、ワイヤストレインゲージ(以下、WSGと略称する)による曲げモーメントの一定区間内での引張鉄筋および圧縮鉄筋のひずみ、圧縮縁および引張縁のコンクリートのひずみとした。なお、引張縁のコンクリート貼付したWSGは、図-3のように配置した。

2.3 曲げひび割れ発生荷重

表-3に、各梁供試体の曲げひび割れ発生荷重と、その

表-3 曲げひび割れ発生荷重

シリーズ	RC梁		CPC梁	
	荷重	平均	荷重	平均
A	9.8	8.7	17.9	16.9
	7.3		15.3	
	9.1		17.5	
B	13.9	13.7	36.5	31.9
	9.5		28.2	
	17.6		31.0	
C	22.0	24.8	34.5	37.6
	24.7		42.6	
	27.8			
D	41.0	44.0	64.5	67.0
	48.3		81.3	
	42.8			

単位: kN

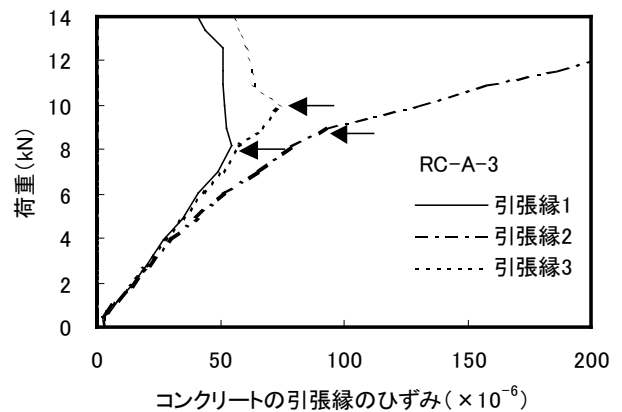


図-4 コンクリートの引張縁のひずみの代表例
(RC梁 シリーズA 3体目)

平均値を示す。なお、曲げひび割れ発生荷重は、図-4の一例を示すように、梁供試体の引張縁のコンクリートに貼付した3枚のWSGの急変点により判定し、これらWSGの急変点の荷重の平均値をその梁の「曲げひび割れ発生荷重」と定義した。

表-3より、CPC梁の曲げひび割れ発生荷重は、ケミカルプレストレスの導入効果により、いずれのシリーズもRC梁に比べて高い。

3. コンクリートの引張ひずみ

曲げひび割れが発生する直前における梁供試体の引張縁のコンクリートのひずみは、引張縁のコンクリートに貼付したWSGの測定値を直接用いる方法と、圧縮縁のコンクリート、圧縮鉄筋および引張鉄筋に貼付したWSGの測定値から、平面保持の仮定に基づく断面内のひずみの適合条件から外挿して算出した引張縁のコンクリート

表-4 曲げひび割れが発生する直前の梁供試体の引張縁のコンクリートのひずみ

n 数		RC 梁							
		シリーズ A		シリーズ B		シリーズ C		シリーズ D	
		荷重 (kN)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	荷重 (kN)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	荷重 (kN)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	荷重 (kN)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)
1	WSG-1	7.0	106	16.2	47	22.4	88	36.7	73
	WSG-2	12.2	205	10.3	45	21.2	81	40.3	94
	WSG-3	10.1	160	15.3	72	22.4	118	45.9	92
	平均	9.8	157	13.9	55	22.0	96	41.0	86
2	WSG-1	7.0	82	10.6	42	22.4	81	47.8	140
	WSG-2	7.0	34	12.4	69	27.3	112		
	WSG-3	8.0	65	5.4	24	24.3	116	48.8	81
	平均	7.3	60	9.5	45	24.7	103	48.3	111
3	WSG-1	8.2	55	24.3	110	24.0	94	48.0	98
	WSG-2	9.0	93	17.5	78	29.7	112	44.9	81
	WSG-3	10.0	75	10.9	56	29.7	102	35.4	40
	平均	9.1	74	17.6	81	27.8	103	42.8	73
平均		8.7	97	13.6	60	24.8	101	44.0	90
変動係数(%)		19.3	52.2	37.4	39.4	12.4	14.0	11.4	30.0
n 数		CPC 梁							
		シリーズ A		シリーズ B		シリーズ C		シリーズ D	
		荷重 (kN)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	荷重 (kN)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	荷重 (kN)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	荷重 (kN)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)
1	WSG-1	15.7	122	38.2	210	32.2	87	65.3	128
	WSG-2	19.3	168	33.5	162	33.8	88	55.8	84
	WSG-3	18.6	140	37.7	174	37.4	127	72.3	114
	平均	17.9	143	36.5	182	34.5	101	64.5	109
2	WSG-1	15.5	115	25.5	102	40.2	108	51.1	77
	WSG-2	18.0	216	26.8	115	30.9	91	59.3	86
	WSG-3	12.4	86	32.3	170	35.8	76		
	平均	15.3	139	28.2	129	35.6	92	55.2	82
3	WSG-1	18.6	135					89.0	139
	WSG-2	17.6	135	26.6	131	37.7	98	87.7	142
	WSG-3	16.3	109	35.3	153	47.5	160	67.3	120
	平均	17.5	126	31.0	142	42.6	129	81.3	134
平均		16.9	136	31.9	151	37.6	107	67.0	108
変動係数(%)		12.0	26.0	14.9	21.5	13.3	24.5	19.1	21.6

のひずみを用いる方法の2通りの方法を検討した。

3.1 ワイヤストレインゲージによる測定値

代表例として、シリーズ A の RC 梁について説明する。

図-4 は、シリーズ A の 3 体目の梁供試体の荷重と引張縁のコンクリートに貼付した 3 枚の WSG のひずみの測定値の関係をまとめたものである。曲げひび割れは、これら 3 枚の WSG のひずみの急変点から確認することができるが、図中の矢印で示したように、いずれも急変点異なる。また、それぞれの急変点のひずみの平均値を、その梁供試体の「引張ひずみの終局値」とした。

このように定義して、すべての RC 梁および CPC 梁供試体について整理したものが表-4 である。また、同一の 3 体の梁供試体の「曲げひび割れ発生荷重」および「引張ひずみの終局値」の平均値を、それぞれの梁の代表値とする。なお、表-4 における空欄は、急変点が明確でなく判定が困難であったため、不採用としたものである。

表より、コンクリートの引張ひずみの終局値の平均値は、RC 梁で $60 \sim 101 \times 10^{-6}$ 、CPC 梁で $107 \sim 151 \times 10^{-6}$ であることが確認できる。梁供試体の個々のばらつきはあるものの、シリーズごとの平均値で整理した場合、CPC

表-5 平面保持の仮定に基づくひずみの適合条件から外挿したコンクリートの引張ひずみの終局値

n 数	位置	RC 梁				CPC 梁			
		シリーズA	シリーズB	シリーズC	シリーズD	シリーズA	シリーズB	シリーズC	シリーズD
		ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)
1	圧縮縁	-92	-66	-83	-93	-147	-170	-106	-125
	圧縮鉄筋	-30	-38	-50	-62	-55	-99	-71	-88
	引張鉄筋	74	63	75	81	92	166	88	110
	引張縁	136	94	105	106	181	247	125	145
2	圧縮縁	-74	-47	-86	-101	-137	-126	-118	-102
	圧縮鉄筋	-27	-25	-60	-63	-49	-71	-75	-75
	引張鉄筋	52	35	76	90	96	102	84	98
	引張縁	99	55	107	118	183	157	122	128
3	圧縮縁	-77	-92	-101	-92	-162	-141	-146	-156
	圧縮鉄筋	-23	-47	-64	-62	-55	-78	-92	-106
	引張鉄筋	48	76	76	101	104	104	124	144
	引張縁	95	117	109	129	203	164	176	189
引張縁の平均		110	89	107	118	189	189	141	154
変動係数(%)		16.8	28.9	1.5	8.0	5.3	21.6	17.6	16.7

梁の引張ひずみの終局値は、RC 梁に比べて $6\sim 91 \times 10^{-6}$ 程度大きいといえる。

3.2 ひずみの適合条件を用いる方法

引張縁のコンクリートのひずみの実測値は、図-4 で示したように曲げひび割れが発生した位置によるばらつきが大きい。そこで、図-5 に示すように、梁供試体のコンクリートの圧縮縁、圧縮鉄筋および引張鉄筋に貼付した WSG のひずみを用いて、平面保持の仮定に基づく梁供試体の断面内のひずみの適合条件から外挿されるコンクリートの引張縁のひずみを算出した。なお、荷重条件は、表-4 で示した個々の梁供試体の曲げひび割れ発生荷重とした。

このようにして得られた引張縁のコンクリートの引張ひずみを整理して表-5 に示す。表より、曲げひび割れが発生する直前の引張ひずみの終局値の平均値は、RC 梁で $89\sim 118 \times 10^{-6}$ 、CPC 梁で $141\sim 189 \times 10^{-6}$ であった。シリーズごとの平均値と比較した場合、CPC 梁の引張ひずみの終局値は、RC 梁に比べて $34\sim 100 \times 10^{-6}$ 程度大きく、前節の傾向と同様である。

以上の実験結果ならびに検討結果から、既報⁴⁾ に示されるように、ケミカルプレストレスによる圧縮ひずみが含まれる膨張コンクリートの引張ひずみの終局値は、普通コンクリートの値よりも大きくなることが確認できた。

4. 解析的検討

4.1 概要

解析的検討では、外力が作用する前の膨張コンクリー

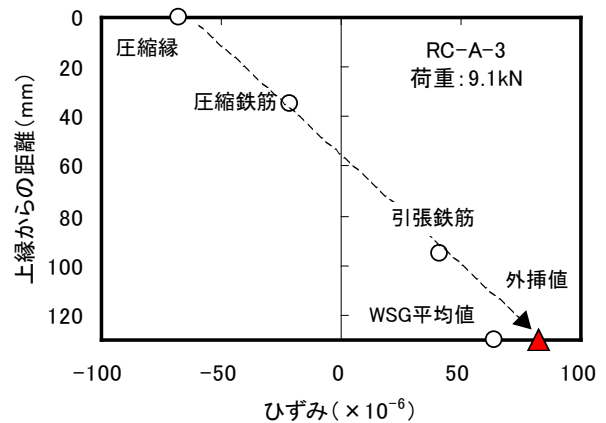


図-5 ひずみの適合条件からの外挿

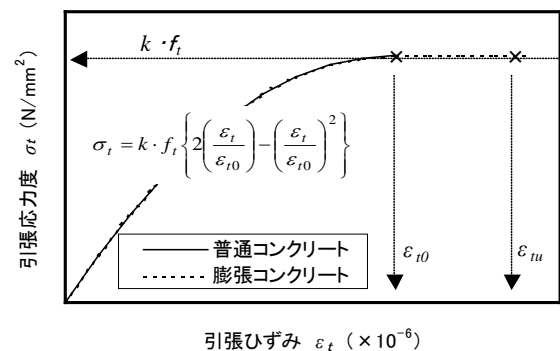


図-6 引張側のコンクリートの応力度とひずみの曲線

トのケミカルプレストレスを仕事量一定則の概念⁵⁾ で評価し、これに積層モデルを適用した断面解析手法⁶⁾

を用いて、曲げひび割れが発生する直前の断面内のひずみ分布の実測値を再現できるコンクリートの引張側の応力度とひずみの関係を試行錯誤的に同定した。なお、CPC梁の載荷試験時の仕事量 U^5 は、表-2 に示すとおりである。

コンクリートの引張側の応力度とひずみの関係は、土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾の圧縮側のコンクリートの応力度とひずみの関係式と相似形をとる式(1)を適用した。

$$\sigma_t = k \cdot f_t \left\{ 2 \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここに、 σ_t : 引張応力度 (N/mm²)、 ε_t : 引張ひずみ、 k : 係数で今回は 0.85 を採用、 f_t : 引張強度 (N/mm²) で、表-2 で示した圧縮強度の実験値を用いて、式(2)に示す土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾の圧縮強度の関係式から算定した。なお、 f'_c は圧縮強度 (N/mm²) である。

$$f_t = 0.23 f'_c{}^{2/3} \quad (2)$$

式(1)を図化したものが図-6 である。図中の ε_{t0} と ε_{tu} は、それぞれコンクリートの引張ひずみの終局値の定数を表し、今回のケーススタディの要因となる。なお、曲げひび割れが発生する直前の断面計算は、引張縁のコンクリートのひずみが図-6 に示す ε_{tu} になるときとした。

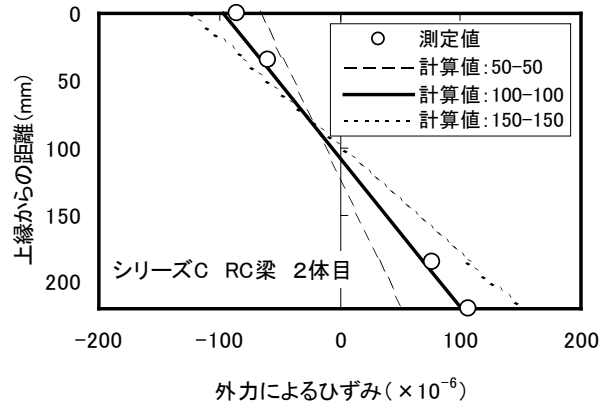
ε_{t0} と ε_{tu} の同定には、 ε_{t0} と ε_{tu} とを 10×10^{-6} 刻みで変化させ、実測値との最小二乗誤差が最小となるときの値を採用した。

4.2 検討結果

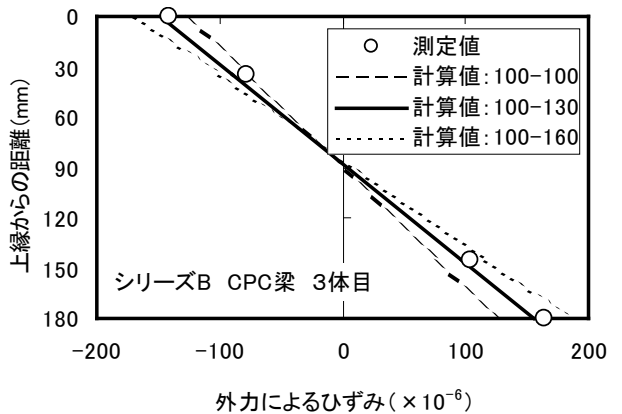
図-7 に、曲げひび割れが発生する直前の断面内のひずみ分布の代表例を計算値とともに示す。a) が RC 梁、b) が CPC 梁の一例である。なお、図中の凡例の計算値の数値は、コンクリートの引張ひずみの終局値 ε_{t0} と ε_{tu} を表したもので、例えば「100-130」の表記は ε_{t0} が 100×10^{-6} 、 ε_{tu} が 130×10^{-6} として算定した場合を意味する。

図-7 a) に示す RC 梁において、曲げひび割れが発生する直前のひずみ分布を再現できる ε_{t0} と ε_{tu} は同一の値で 100×10^{-6} となった。

また、図-7 b) に示す CPC 梁では、RC 梁と同様に ε_{t0} と ε_{tu} を 100×10^{-6} と同一の値とした場合、ひずみ分布の実測値との差異が認められる。試行錯誤の結果、 ε_{t0} を 100×10^{-6} 、 ε_{tu} を ε_{t0} よりも少し増加させて 130×10^{-6} とすることで、ひずみ分布の実測値を再現できることが確認された。CPC 梁の場合、コンクリートの引張側の応力度とひずみの関係に、膨張コンクリートの伸び能力を考慮することで、断面内のひずみ分布の実験値を評価できること



a) RC 梁 シリーズ C 2体目



b) CPC 梁 シリーズ B 3体目

図-7 曲げひび割れが発生する直前の断面内のひずみ分布

が示唆された。なお、ケミカルプレストレスの導入により、引張側に生じていた圧縮ひずみであるケミカルプレストレインは、積層モデルを適用した本断面解析手法では考慮している。

このようにして、すべての梁供試体について ε_{t0} と ε_{tu} を同定した結果を表-6 にまとめた。また、 ε_{tu} と ε_{t0} のひずみの差を併記する。

表より、RC 梁では ε_{t0} と ε_{tu} が同一の値で断面内のひずみ分布を再現でき、その値は 3 体の平均値で $73 \sim 108 \times 10^{-6}$ の範囲となった。一方、CPC 梁では、 ε_{t0} が $87 \sim 100 \times 10^{-6}$ 、 ε_{tu} が $117 \sim 152 \times 10^{-6}$ の範囲となった。RC 梁と CPC 梁とで、 ε_{t0} の値がほぼ同程度の範囲を示すことから、CPC 梁における ε_{tu} は、膨張コンクリートの「伸び能力」に相当するものと考えられることができる。

CPC 梁における ε_{tu} と ε_{t0} のひずみの差は、シリーズごとの平均値で $24 \sim 52 \times 10^{-6}$ となった。これらの結果から CPC 梁の引張側のコンクリートの終局ひずみは、RC 梁の値に比べて大きな値をとることが確認できた。CPC 梁では、ケミカルプレストレスが導入されているため、外力が作用する前にコンクリートにはケミカルプレストレ

表-6 積層モデルから同定したひずみの終局値

n 数	ひずみの 終局値	RC 梁				CPC 梁			
		シリーズ A	シリーズ B	シリーズ C	シリーズ D	シリーズ A	シリーズ B	シリーズ C	シリーズ D
		ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ひずみ ($\times 10^{-6}$)
1	ϵ_{t0}	130	80	90	100	100	100	60	100
	ϵ_{tu}	130	80	90	100	145	190	90	110
	$\epsilon_{tu}-\epsilon_{t0}$	0	0	0	0	45	90	30	10
2	ϵ_{t0}	90	40	100	110	100	100	60	80
	ϵ_{tu}	90	40	100	110	145	120	100	90
	$\epsilon_{tu}-\epsilon_{t0}$	0	0	0	0	45	20	40	10
3	ϵ_{t0}	90	100	100	115	100	100	100	100
	ϵ_{tu}	90	100	100	115	165	130	145	150
	$\epsilon_{tu}-\epsilon_{t0}$	0	0	0	0	65	30	45	50
平均	ϵ_{t0}	103	73	97	108	100	100	87	93
	ϵ_{tu}	103	73	97	108	152	147	118	117
	$\epsilon_{tu}-\epsilon_{t0}$	0	0	0	0	52	47	31	24

スに相当する圧縮ひずみが導入されている。この分が曲げひび割れの発生耐力を増加させることに寄与することは既往の研究から明らかであるが、膨張コンクリート自身の引張側の「伸び能力」を、膨張コンクリートの応力度とひずみの関係における引張ひずみの終局値として考慮することで、さらに精度良く評価できるものとする。

5. まとめ

膨張コンクリートを用いた RC 梁の CPC 梁における曲げ載荷実験から、曲げひび割れが発生する直前の引張縁のコンクリートの引張ひずみを評価した。また、積層モデルを用いた断面解析手法と適用して、コンクリートの終局ひずみについて検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 膨張コンクリートの引張ひずみの終局値は、普通コンクリートの値よりも大きくなることが確認された。
- (2) 膨張コンクリートの引張側の応力度とひずみの関係を、コンクリート標準示方書のコンクリートの圧縮側の応力度とひずみの関係を表す二次式と相似形でモデル化した場合、膨張コンクリートの引張ひずみの終局値を ϵ_{t0} より大きい ϵ_{tu} を用いることで、提案した積層モデルによる断面解析手法により精度良く適用することができる。

参考文献

- 1) 岡村甫, 辻幸和: ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性, 土木学会論文報告集, 第 225 号, pp.101-108, 1974.5
- 2) 細田暁, 岸利治: 膨張モルタルの非線形挙動とひび割れ抵抗性の機構について, 土木学会論文集, No.683, V-52, pp.13-29, 2001.8
- 3) 細田暁, 岸利治: ケミカルプレストレス部材の曲げ性状と多軸拘束の効果, 土木学会論文集, 第 739 号, V-60, pp.15-29, 2003.8
- 4) 土木学会: 膨張コンクリートの設計施工指針, 試験報告 2, コンクリートライブラリー, No.75, pp.147-163, 1993
- 5) 辻幸和: ケミカルプレストレスの推定方法について, セメント技術年報 XXV II, pp.340-344, 1973
- 6) 栖原健太郎, 李春鶴, 芦田公伸, 辻幸和: 膨張コンクリートを用いた CPC はりの曲げひび割れ幅の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.229-234 (2009)
- 7) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2008