

(110) PC用高性能膨張材を用いた2方向PC埋設型枠用薄板の製作に関する研究

九州工業大学 工学部 ○山崎 竹博
 同 上 正会員 出光 隆
 同 上 立石 健二
 九州共立大学 工学部 正会員 渡辺 明

1. まえがき

コンクリートの省力・迅速施工、木材型枠の節約、構造物の景観、耐久性向上などの観点から、高強度のポリマー含浸コンクリートやレジンコンクリート製薄板を防食材料兼用で埋設型枠に用いる事例が増えてきた。このような高強度の樹脂コンクリートに対して、普通コンクリート薄肉パネルでは強度不足や乾燥収縮および打設時の側圧などに起因するひび割れが懸念される。普通コンクリートのひび割れ防止には2方向プレストレスの導入が効果的であるが、プレテンション方式で2方向PC薄板を製造するには付着強度を確保できるかぶりが必要となることや、新たな緊張装置の開発などの理由で実用化が遅れている。

本研究ではケミカルプレストレスを導入した厚さ数センチの2方向PC薄板を試作し、その性能を検討した。その結果、膨張コンクリート設計施工指針の制限値 700×10^{-6} の数倍に達する膨張ひずみを導入することによって、材齢3カ月の空气中乾燥後でもプレストレスは減退しないこと、ストランドの直径の3.0倍程度 ($0.5 \times 3.0 = 1.5\text{cm}$) のかぶりでもプレストレス導入時にひび割れを生じないことなどを確認した。

2方向プレストレスの導入にケミカルプレストレスを使用することは容易ではあるが、土木学会制定の“膨張コンクリート設計施工指針”では膨張量の限界を工場製品でも 200×10^{-6} 以上 1000×10^{-6} 以下と規定している。この程度の膨張率では3~5cm厚さの埋設型枠用薄板を製造した場合、初期材齢のクリープや乾燥に起因する収縮によってプレストレスは大きく減退することになる。

本研究では緊張材として鋼より線、CFRP、AFRPを用い、数千 ($\times 10^{-6}$) の膨張ひずみを許容でき得る膨張コンクリートを打設して、場合によっては降伏値を越えるケミカルプレストレスを導入し、プレストレスの発現状況や乾燥収縮によるプレストレス低減率など測定した。このような膨張コンクリート設計施工指針の範囲を超えた膨張コンクリートを高膨張コンクリートと呼び、このような用途に用いられる膨張材を高性能膨張材と呼ぶことにする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

高膨張コンクリートには定着用膨張材として使用されている石灰系高性能膨張材、比重3.14を使用した。粗骨材には最大寸法13mm、比重2.73の碎石、細骨材には比重2.53の海砂を使用し、セメントには比重3.15の普通ポルトランドセメントを使用した。ベースコンクリートの基本配合は表-1に示すように、単位水量を 170kg/m^3 、細骨材率を48%、目標空気量を5%とし、高性能AE減水剤を用いた。膨張材は粉体量 425kg/m^3 に対して置換率で5%毎に0~25%、 106kg/m^3 までの各量を使用した。緊張材には3本よりPC鋼線 (SWPD3)、炭素繊維 $\phi 5\text{mm}$ より線、アラミド繊維 $\phi 5$

表-1 膨張コンクリートの基本配合

Gmax (mm)	W/B (%)	s/a (%)	air (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント+膨 張材 B	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
10	32.5	48	5	170	523	746	872	5.23
	35.0				485	760	888	4.85
	40.0				425	783	916	4.25

mm組紐の3種類を使用した。それぞれの機械的性質を表-2にまとめて示す。アラミド繊維組紐の引張試験結果だけは強度、弾性係数、伸び率の各保証値に対して60%程度の低い値であったが、組紐状態で使用しているため、繊維の屈曲や不揃いなどによる影響と考えられる。伸び率から見ていずれの緊張材も $10,000 \times 10^{-6}$ 程度までの膨脹に対して破断の危険性はない。

2.2 供試体の形状・寸法

供試体は打設後24時間で脱型し20℃恒温室内で湿布散水養生した。強度測定には $\phi 10 \times 20$ cm円柱供試体を、基本膨脹量の測定には $10 \times 10 \times 30$ cm角柱供試体を用いた。薄板供試体の寸法は一方方向プレストレスでは図-1に示す $3.5 \times 10 \times 50$ cm、2方向プレストレスでは図-2に示す $5 \times 50 \times 50$ cmとした。緊張材の配置は一方方向には図心に、その直角方向には緊張材の合成断面が図心が供試体断面の図心と一致するよう千鳥に配置した。

2.3 膨脹ひずみの測定方法

膨脹ひずみは、図-3のように供試体中央部に20cm間隔で設置した標点をホイットマーゲージで測定するとともに、鉄筋に打設前に貼付したワイヤーストレインゲージと脱型直後(材齢1日)に供試体表面へ貼付したワイヤーストレインゲージとから測定した。

また、供試体の一部にはこれらの方法に加えて、埋込ゲージを中央より10cm離れた位置に設置してひずみを測定した。

2.4 有効プレストレスの測定

供試体の膨脹ひずみを材齢90日まで測定した後曲げ試験を実施し、ひび割れ発生直後に除荷してひび割れ直交方向にワイヤーストレインゲージを貼付し、再びひび割れ試験を実施した。有効プレストレスは鉄筋に貼付したワイヤーストレインゲージのひずみと再びひび割れ荷重から算定した。

載荷供試体のスパンは30cm、3等分点に2点集中荷重を載荷した。

3. 実験結果および考察

3.1 膨脹材量と強度との関係

一般に、ケミカルプレストレスの導入には 60 kg/m^3 程度以下の膨脹材を、水結合材比45~60%で打設した例が多い^{1) 2) 3) 4)}。

表-2 緊張材の機械的性質

	破断荷重 (tf)	破断強度 kgf/mm^2	弾性係数 kgf/mm^2	伸び率 (%)	断面積 mm^2
CFRP	2.63	261	15,402	1.5	10.1
AFRP	1.67	158	4,540	2.4	10.6
鋼より線	3.90	196	20,000	3.5	19.8

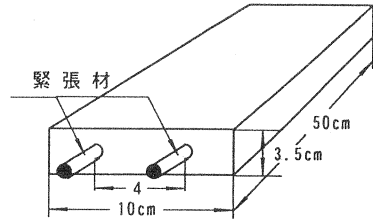


図-1 1方向プレストレス供試体

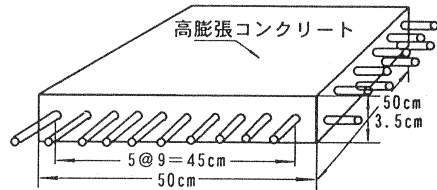


図-2 2方向プレストレス供試体

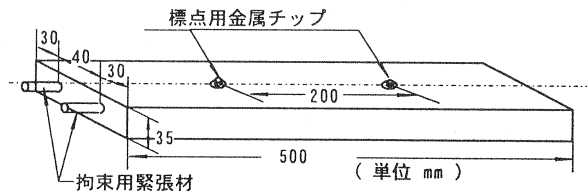


図-3 1方向PC薄板供試体の標点

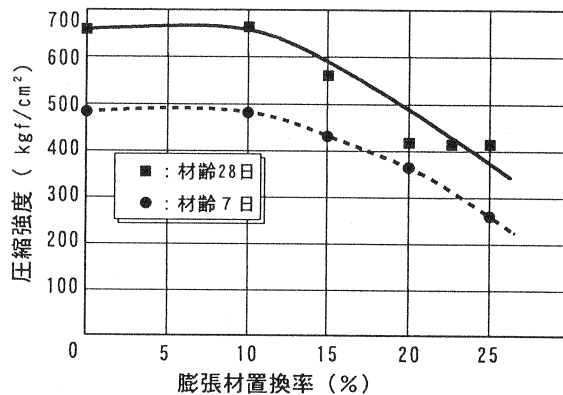


図-4 膨脹材置換率と圧縮強度

このような膨張コンクリートは、打設時の温度にもよるが、材齢2週間以内で最大ひずみに達し、その後1~2カ月程度で膨張ひずみは消失してさらに引張状態に移行することが一般的であり、実用化への障害となっている。

本研究では定着用膨張材として開発された膨張材の圧縮応力が数年後にもほぼ変化なく作用していることを利用し⁵⁾、①膨張材量を増やして乾燥収縮を保証するための膨張ひずみを確保すること、②高性能減水剤を使用して緻密で乾燥収縮の小さいコンクリートにすること、③若材齢で生じるケミカルプレストレスは非常に大きいクリープを生じることが予測されるため3~4日以後にこれを保証できる膨張を継続させること、などを目標に、水セメント比40%以下で膨張材置換率20%以上のPC用高性能膨張コンクリートを作製した。

一般に、膨張材の単位使用量を多くして膨張率を高くすればペーストの緻密性が悪くなり、コンクリート強度の低下を生じる。ここでは膨張材置換率を0, 10, 15, 20, 22.5, 25%として無拘束状態の強度試験を実施した。その結果を図-4に示す。普通ポルトランドセメントを用いた場合、膨張材25%の置換による圧縮強度の低下は材齢28日で38%程度であった。ちなみに、弾性係数は膨張材置換率0で $4.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、膨張材置換率25%で $2.8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であり31%の低下を示した。

膨張材置換率と膨張ひずみとの関係については実験初期の材料温度管理が悪く1日以内に膨張ひずみの大半が発生し、十分な資料が得られなかった。しかし、その後の膨張量に低下のないことは確認された。

3. 2 膨張量の長期性状

実用範囲程度の自由膨張ひずみは膨張材置換率とほぼ比例関係にあることが知られており¹⁾、それらの関係から $10,000 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみを得るために膨張材置換率を25%として3カ月間のひずみ測定を行った。緊張材の力学的性質の相違による膨張ひずみの違いはあるが、ほぼ類似した形状の材齢と膨張ひずみの関係を示すため、ここではPC鋼線による拘束を受けた状態での膨張ひずみを測定するため、PC鋼線を0, 1,

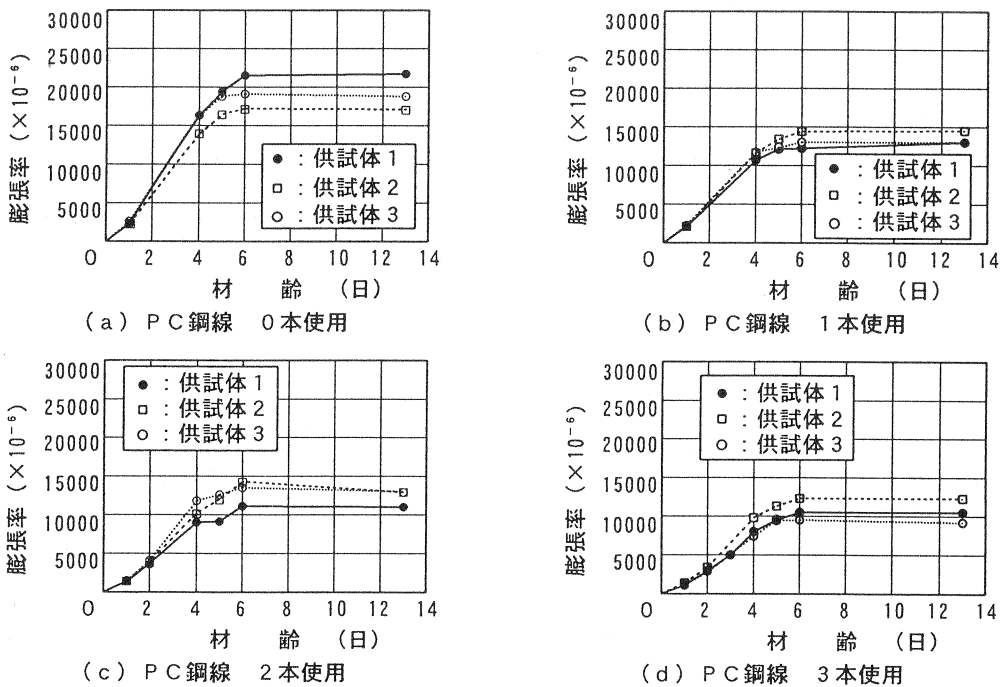


図-5 膨張材25%置換時のPC鋼線量と拘束膨張ひずみの関係

2, 3本用いた供試体の膨張ひずみをホイットマーゲージによって測定した。測定例をそれぞれ図-5 (a), (b), (c), (d) に示した。膨張ひずみは材齢14日以後ほとんど変化せず, 材齢1カ月と3カ月のひずみ値は表-3に示すように3カ月後でもほぼ一定の膨張ひずみを維持していることが分かる。

鉄筋に貼付したワイヤーストレインゲージの値はひずみが数千 $\times 10^{-6}$ を越えるころから追従できず, 測定値から除外した。図-5の結果から, 鋼線の拘束力が大きくなるほど膨張ひずみは小さくなることが分かるが, 設計施工指針の解説に示されている式(1)から材齢28日でのエネルギーUを求めたところ表-4のようになり一定のエネルギー値を得ることはできなかった。

$$\epsilon_{sp} = \sqrt{2U / (E_s \cdot p_r)}$$

$$\therefore U = \epsilon_{sp}^2 E_s p_r / 2 \quad \text{式(1)}$$

3.3 水結合材比が及ぼす膨張ひずみへの影響

水セメント比が膨張率に及ぼす影響を調べるため, $10 \times 10 \times 30$ cm角柱の無拘束状態での膨張ひずみを測定した。その結果, 膨張材の置換率が20%程度と多く膨張ひずみが多い場合には, 表-5に示すように水結合材比の相違によって特に顕著な膨張ひずみの変化は見られなかった。表中, 同一の膨張材量でありながら $W/B=32.5\%$, No. 2の場合のみ材齢4日以後の伸びが非常に小さくなる結果が得られた。その原因として, 硬化初期の膨張ひずみの発現が極めて大きいため, ホイットマーゲージの標点取り付けと初期値の計測時刻に問題があったものと考えられる。これらの点については導入されたプレストレスをひび割れ試験から実測することによって再度検討するとともに, 今後, コンパレータなど強固な標点を必要としない計測方法を用いて, 打設後数時間から計測を行う必要がある。

3.4 二方向ケミカルプレストレス薄版の膨張ひずみ

表-3に示したように, 膨張材置換率25%では導入ひずみが $10,000 \sim 20,000 \times 10^{-6}$ にも達し, 膨張量の増加に伴う強度低下なども考慮すれば, PC板に導入する膨張ひずみは $10,000 \times 10^{-6}$ 以下であることが望ましく, 置換率を22.5%, W/B を40%として一方向薄版を打設した。打設後測定した膨張ひずみを表-6示す。

ケミカルプレストレスの導入ひずみは表-2に示す緊張材の弾性係数と補強材量から定まる拘束剛性が低

表-3 材齢1, 3カ月での長期膨張ひずみ

供試体の種類		膨張率 ($\times 10^{-6}$)			
		14日目	28日目	91日目	
膨張材置換率 25%	PC鋼線 0本使用	No. 1	21650	20650	20025
		No. 2	17015	16890	16014
		No. 3	18760	18510	17760
	PC鋼線 1本使用	No. 1	12965	12215	11465
		No. 2	14510	14260	13760
		No. 3	13100	12725	12224
	PC鋼線 2本使用	No. 1	11010	10135	9760
		No. 2	12915	13040	12540
		No. 3	12595	12345	12094
PC鋼線 3本使用	No. 1	10505	9755	9630	
	No. 2	12330	12205	11954	
	No. 3	9405	9405	9154	

表-4 膨張ひずみとエネルギーU

PC鋼棒	ϵ_{sp}	P_r	U
0本	0.0187	2.1 $\times 10^6$	0
1本	0.0131		1.004
2本	0.0118		1.652
3本	0.0104		1.930

表-5 水結合材比が変化した場合の膨張ひずみ (無補強)

配合の種類	材齢	膨張率 ($\times 10^{-6}$)								
		2日	3日	4日	5日	6日	7日	14日	28日	56日
$W/B=35\%$ 置換率=20%	No. 1	364	1545	3640	5305	6804	7429	7304	7054	7054
	No. 2	475	1840	3574	5069	5694	5820	5695	5570	5445
	No. 3	260	970	2095	2954	5204	6204	6079	6079	6079
$W/B=32.5\%$ 置換率=20%	No. 1	290	1105	2870	4329	5330	5705	5330	5205	5080
	No. 2	414	1265	2310	2490	3114	3240	2990	3115	2990
	No. 3	410	1565	3605	5839	6340	6590	6340	6340	6340

いほど大きくなると考えられる。置換率22.5%では膨張ひずみの最も大きいAFRPでも $6,000 \times 10^{-6}$ 程度の安定した膨張ひずみを得られたので、膨張材置換率を22.5%として図-2に示すように5cm間隔に緊張材を並べ、その直行方向に上下千鳥に緊張材を組立てて

表-6 水結合材比40%の場合の一方方向PC板供試体の膨張ひずみ

供試体の種類		膨張率 ($\times 10^{-6}$)								
		材齢	2日	3日	4日	5日	6日	7日	14日	28日
膨張材置換率 22.5%	PC鋼棒	No. 1	575	930	1259	1539	1647	1757	1544	1221
		No. 2	489	895	1219	1485	1642	1805	1704	1367
		No. 3	487	866	1149	1396	1557	1689	1422	1209
	CFRP	No. 1	1025	1802	2297	2614	2745	2809	2637	2324
		No. 2	942	1774	2167	2329	2424	2632	2392	1814
		No. 3	1032	1822	2322	2654	2907	3047	2860	2454
	AFRP	No. 1	2077	4147	5529	6405	6967	7467	7279	6904
		No. 2	1935	3827	4596	5596	6222	6660	6722	6222
		No. 3	1909	3797	5379	6379	7129	7630	7504	7128

二方向ケミカルプレストレス薄版を3体ずつ3種類計9体作製した。また、膨張材置換率35%程度では水粉体比の変化は膨張ひずみに顕著な変化を与えないことから、パネルの高強度化を期待してW/Bを32.5%とした。打設後のひずみの測定値を図-6に示す。その結果、2方向共にほぼ同一の値を示していること、表-6に比較して2方向に配筋した場合、一方方向配筋の場合よりも膨張ひずみが少し小さくなる傾向が得られた。

3.5 再びひび割れ試験によるケミカルプレストレスの算定

PC薄版を支間30cmとし、2点集中荷重を与えて曲げ試験を実施した。曲げひび割れ発生後直ちに除荷とし、ひび割れ部分にストレインゲージを貼付して再び載荷した。これを再亀裂試験と呼び、荷重と供試体表面ひずみとの関係が最初に直線から外れる点を再びひび割れ荷重とし、その値からプレストレスを算出した。荷重～ひずみの関係の一例を図-7に、プレストレス算定結果を表-7にまとめて示している。その結果、膨張ひずみから算定したプレストレスよりも大きい値となったが、緊張材量を増やせば $40\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上のプレストレス導入も可能であり、PICやRECパネルに相当するコンクリート薄板の製作も可能と考えられる。このとき、プレテンション方式で薄板にプレストレスを導入するには、ポアソン効果によるコンクリートのひび割れ防止にCFRPでは緊張材の $2.5\phi \sim 3.2\phi$ のかぶりが必要であり、AFRPでは $3.4\phi \sim 5.2\phi$ ものかぶりが必要である⁶⁾。しかし、ケミカルプレストレスでは緊張材は導入応力によるポアソン効果によって収縮の傾向にあり、今後更に薄い部材の製造が可能と考えられる。

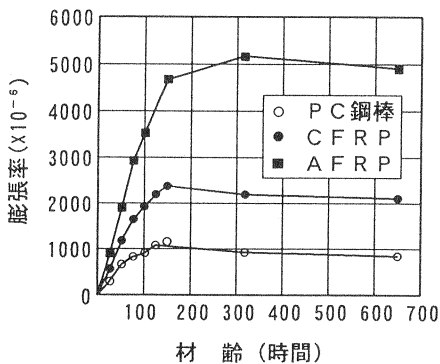


図-6 二方向板の膨張率

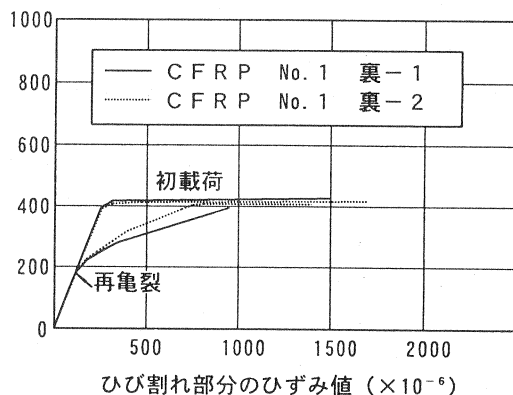


図-7 曲げひび割れ試験の一例

4. まとめ

高性能膨張材を用いた埋設型枠用2方向プレストレス薄板版作製の可能性を検討するため、実際にPC鋼線、CFRP、AFRPを用いてプレストレス薄板を作製した結果、プレテンション方式のプレストレス導入と異なり、更に薄板化できる可能性を見いだした。これらの実験に付随して得られた膨張コンクリートに関する知見を以下に示す。

(1) 高性能膨張材を粉体量の20%程度置換した膨張コンクリートは3カ月以後も安定した膨張ひずみを維持しており、PCいた薄版として実用可能と考えられる。

(2) 膨張ひずみの増大に伴って、コンクリートの強度は低下する傾向を示すが、膨張材置換率25%、膨張ひずみ 2×10^{-6} 発生時でも38%程度の圧縮強度低下率であった。

(3) 同一単位膨張材量を使用したとき、水結合材比が多少変動しても膨張ひずみに与える影響は小さい。

(4) 薄板のかぶりは二方向PC版では12.5mm(2.5φ)であったが、ひび割れは全く見られず互いに直角方向の膨張ひずみによるプレストレスは等しい値であった。

(5) コンクリートの膨張ひずみは使用補強材量の剛性による拘束度が高い場合小さくなる。

(6) 曲げ試験による再亀裂荷重から求めたプレストレスは3カ月後でも目標値を保持しており、PC薄板の製造は可能である。

参考文献

[1]門司唱・井上一郎・吉川功：膨張材を使用するコンクリートの配合設計に関する研究，セメント技術年報，No. 25, pp. 200-203, 1971.

[2]楠元孝夫・杉田英明：石灰系膨張混和材がコンクリートの膨張および強度性状に及ぼす影響，セメント技術年報，No. 31, pp. 237-241, 1977.

[3]河野俊夫・一家惟俊・中野昌之・綿貫輝彦：各種セメントコンクリートに及ぼす石灰系膨張材の影響，土木学会論文報告集，No. 229, pp. 99-104, 1974.

[4]戸川一夫・中本純次：膨張コンクリートの拘束膨張，収縮特性に及ぼす使用材料の影響，土木学会論文報告集，No. 326, pp. 129-140, 1982.

[5]原田哲雄・小坂英樹・出光隆：静的破砕剤によるCFRP[®]緊張材の定着法とそのプレテンションはりへの適用について，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 636-637, 1990.

[6]佐野史佳・出光隆・山崎竹博・ミヨーケン：連続繊維緊張材を用いたプレテンションPC薄板の端部定着に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16, No. 2, pp. 847-852, 1994.

表-7 材齢3カ月におけるケミカルプレストレスの算定結果

供試体名		再亀裂荷重 kgf	プレストレス kgf/cm ²
PC鋼線	No. 1	表-1	222
		表-2	204
		裏-1	---
		裏-2	147
	No. 2	表-1	150
		表-2	192
		裏-1	---
		裏-2	230
	No. 3	表-1	226
		表-2	220
		裏-1	193
		裏-2	176
CFRP	No. 1	表-1	121
		表-2	125
		裏-1	172
		裏-2	158
	No. 2	表-1	151
		表-2	152
		裏-1	149
		裏-2	137
	No. 3	表-1	159
		表-2	158
		裏-1	126
		裏-2	135
AFRP	No. 1	表-1	---
		表-2	19
		裏-1	0
		裏-2	0
	No. 2	表-1	---
		表-2	22
		裏-1	0
		裏-2	0
	No. 3	表-1	---
		表-2	25
		裏-1	23
		裏-2	25