

論文 高膨張コンクリート PC 薄板のプレストレス導入に関する 実験的研究

山崎 竹博*1・出光 隆*2・渡辺 明*3

要旨：膨張コンクリートでプレストレスを導入する場合、コンクリートの乾燥収縮や硬化初期のクリープによる大きなプレストレス損失が生じるため、これらを補償してなお有効に残存する膨張ひずみの確保が必要となる。本研究では、数千 μ を越えるひずみを発現する膨張コンクリートとFRP緊張材を用いて、実用的な曲げ耐力をもつPC薄板を作製する方法について検討してきた。CPC部材は、数ミリの極めて薄いかぶりでも緊張材に沿うひび割れが発生し難いため、極薄のPCパネルが製造可能となり、ポリマーコンクリートや鋼板などに代わる埋設型枠や補修用材料としての開発が期待される。
キーワード：ケミカルプレストレス、高膨張コンクリート、PCパネル、埋設型枠

1. まえがき

プレテンション方式によるPC部材の作製法は、定形部材の大量生産に優れた方法である。同方式では、コンクリート硬化後に緊張材のひずみを解放してプレストレスを導入するため、ポアソン効果によって緊張材には直径方向の膨張が生じ、極めて薄い部材の作製時には緊張材に沿ったひび割れが発生する。これに対し、膨張コンクリートでケミカルプレストレスを導入する方法では、プレストレス導入時に緊張材は断面減少するため、比較的ひび割れが発生しにくい。しかしながら、ケミカルプレストレスは硬化反応の過程で導入されることから、膨張ひずみの管理が重要である。特に、乾燥収縮に加えて硬化反応の初期からクリープによるプレストレス損失が生じるため、これらを補償してなお有効に残存する膨張ひずみの発生が必要となる。本研究では、CFRPの使用によって大きなかぶりを必要とせず、低弾性係数のためクリープや乾燥収縮などの時間依存ひずみによるプレストレス損失への影響が小さいことなどの性質を利用して、かぶり10mm程度のCPC薄板の製造を試みた。

薄板のクリープや乾燥収縮ひずみを差し引いて、十分な緊張材ひずみを維持するには数千 μ の膨張ひずみが必要となる。しかし、膨張ひずみが大きくてもコンクリート強度の発現が遅い場合には、緊張材とコンクリートの間に滑りが発生し、十分なプレストレスは導入されない。用途に応じたプレストレス導入には、千 μ 以上の安定した長期膨張ひずみやケミカルプレストレス導入に必要な圧縮強度および付着強度の確保も必要である。土木学会“膨張コンクリート設計施工指針”に定める膨張ひずみの範囲を超えたこのような膨張コンクリートを“高膨張コンクリート”と呼び一般の膨張コンクリートと区別した。[1]

本論文では、ポリマー材料や鋼板などに代わる埋設型枠やコンクリート補修材料として、極薄のPCパネルの作製を目的に、水粉体比や単位膨張材量などの配合要因や打設初期の養生温度条件がケミカルプレストレス導入特性に与える影響について実験的に検討したので報告する。

*1 九州工業大学助教授 工学部設計生産工学科, 工博(正会員)

*2 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科, 博士(正会員)

*3 九州共立大学教授 工学部開発学科, 工博(正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料

膨張材には水酸化カルシウムの結晶力で膨張する石灰系材料、比重3.14を使用した。粗骨材には最大寸法10mm、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。

高膨張コンクリートの実験配合を表-1に示す。各配合は、一定の流動性を確保する観点から、ペースト(水+セメント+膨張材)の容積が336ℓ一定となるように定めた。既報の実験結果から、高膨張コンクリートの膨張ひずみは主として高性能膨張材の単位膨張材量に、強度は単位膨張材量と水粉体比に依存すると判断されたので[1]、本実験では単位膨張材量(E)と水粉体比(W/B)を表-1のように変化させ、高膨張コンクリートの強度と膨張ひずみ、緊張材の拘束ひずみなどを測定した。高膨張コンクリートのスランプはほぼ20cmとなるように高性能減水剤の使用量で調整した。

緊張材には、表-2に示す炭素繊維φ5mmより線を使用した。破断時の伸び率から見て、コンクリートの自由膨張ひずみは5000μ程度まで安全に使用できると考えられる。

2.2 供試体の形状・寸法

供試体は打設後24時間で脱型し、材齢7日までは湿布養生、それ以後は温度20℃、湿度70%の気中養生とした。強度測定にはφ10×20cm円柱供試体を、コンクリートの膨張ひずみおよびPC薄板の緊張材ひずみの測定には図-1に示す3.5×10×50cmの1方向プレストレス供試体を用いた。緊張材の使用量に伴う膨張ひずみの発現状況を調べるため、CFRP緊張材1, 2, 3本を、それぞれ合成断面図心が膨張コンクリートの断面図心と一致するよう配置した。

2.3 膨張ひずみおよび有効プレストレスの測定方法

供試体表面の膨張ひずみは、図-1に示すように供試体中央部に20cm間隔で設置した標点距離をコンパレータで打設後6時間から測定するとともに、材齢1日からホイットマーゲージでも測定した。また、緊張材の引張力からプレストレスを測定するため、打設前に緊張材中央位置の両側面に防水加工したワイヤーストレインゲージを貼付してひずみを測定した。供試体の各膨張ひずみを材齢28日まで測定した後、曲げ試験から再びひび割れ荷重を測定して有効プレストレスを算出した。再びひび割れ試験は、一度生じた微細なひび割れ上にワイヤーストレインゲージを貼付して再載荷し、荷重～ひずみ直線が直線関係から外れる荷重を検出するものである。曲げ試験では、供試体スパン30cm、3等分点に2点集中載荷し、緊張材配置時の偏心による影響を除去するため板の裏表で再びひび割れ荷重を測定した。

表-1 高膨張コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/B (%)	s/a (%)	air (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤 × B %
				水 W	セメント B	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	
10	25.0	48	3	148	496	96	785	871	1.13
	27.5			156	471				0.97
	30.0			163	448				86
				458	96				
				427	106				
	32.5			170	417	106			0.8
396		127	0.9						
372		151							

表-2 CFRP緊張材の性質

	破断荷重 KN	破断強度 MPa	弾性係数 GPa	伸び率 (%)	断面積 (mm ²)
CFRP	26.4	2610	154	1.5	10.1

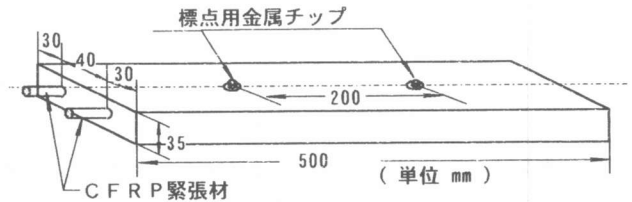


図-1 1方向プレストレス供試体

3. 実験結果および考察

3.1 計測方法の相違と実測膨張ひずみ

膨張コンクリートの膨張ひずみは強度の低い早期から発現する。そのため、型枠には剛性の低い木材を使用し、脱型は24時間から開始した。

膨張コンクリートの自由膨張ひずみの測定には光学的方法としてコンパレータを、機械的方法としてホイットマーひずみ計を使用した。それぞれの方法による測定結果の一例を図-2, 3に示している。コンパレータ法は非接触測定であるため打設直後からの測定が可能であるが、ホイットマーひずみ計は計測に押圧を必要とするため、脱型後材齢26時間から計測を開始した。図-2および図-3のひずみが2000 μ 程度相違するのは、図-2から分かるように、材齢6時間程度から26時間の間に発現した膨張ひずみを意味する。

一方、ワイヤーストレインゲージによって測定したPC部材の緊張材ひずみはホイットマーひずみ計で測定した値に近いが、コンクリートの強度発現が不十分な初期の膨張ひずみが緊張材に伝達されなかったためであり、両者の値に何ら相関性はない。上記の理由で、本実験ではコンパレータで測定した値を自由膨張ひずみとした。

3.2 水粉体比の相違による膨張ひずみおよび圧縮強度への影響

単位膨張材量を 96kg/m^3 として水粉体比を変化させ、養生温度20 $^{\circ}\text{C}$ で打設した供試体の緊張材ひずみおよび円柱供試体の圧縮強度を測定した。図-4に示す緊張材ひずみの測定結果から、水粉体比32.5%以下の範囲では大きい程、膨張ひずみも大きくなることが分かった。また、材齢7日以後28日までの室内乾燥状態での膨張ひずみの減少量は材齢7日での緊張材ひずみ2657, 2482, 2232, 2105, 1880 μ に対してそれぞれ617, 557, 496, 473, 432 μ となり、乾燥収縮ひずみとクリープを含めた、弾性ひずみの減少率はすべて22~23%であった。

一方、無筋供試体の圧縮強度は図-5に示すように、水粉体比の増加と共に低下する結果が得られ、1週で40MPa以上を確保し、大きい緊張材ひずみを得るには水粉体比は30~32.5%程度が最適と判断した。この時、材齢4週での緊張材ひずみは1400 μ 以上が確保される。

3.3 単位膨張材量と膨張ひずみ・緊張材ひずみ

700 μ 程度の膨張ひずみを用いる従来の膨張コンクリ

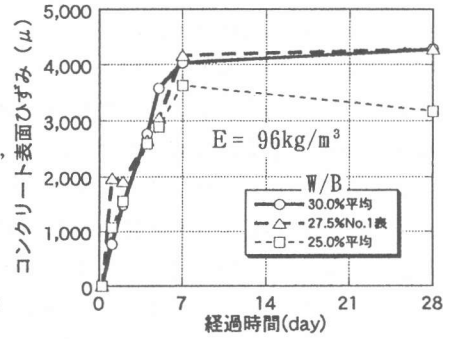


図-2 コンパレータによる無筋供試体の実測膨張ひずみ

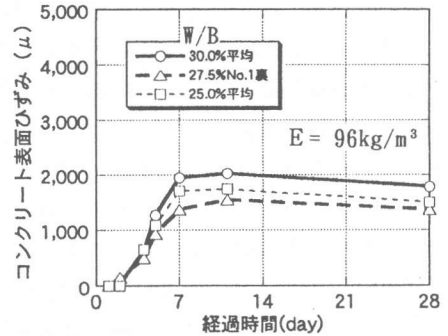


図-3 ホイットマーゲージによる無筋供試体の実測膨張ひずみ

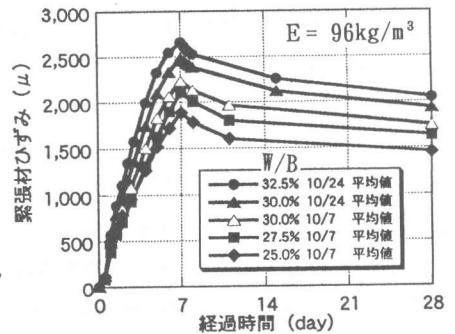


図-4 緊張材ひずみの経時変化

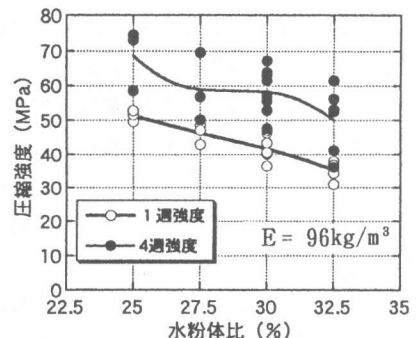


図-5 水粉体比と圧縮強度の関係

ートでは、一般に 60kg/m^3 程度以下の単位膨張材量を使用する。本研究では 2000μ 程度の安定した膨張ひずみを薄板に導入するために必要な単位膨張材量を検討した。

膨張材量を多くすれば膨張ひずみは大きくなるが硬化体の結晶が粗くなり強度低下を生じる。実験ではペーストの容積を一定として、単位膨張材量を $86, 96, 106\text{kg/m}^3$ の範囲で変化させ、無拘束状態、緊張材1, 2, 3本使用時の薄板の膨張ひずみおよび圧縮強度を測定した。それらの結果を図-6~8に示す。

図-6に材齢4週の供試体コンクリート表面のひずみを示している。図中の各曲線は緊張材の配筋本数が0, 1, 2, 3本の各供試体であり、無筋の自由膨張供試体では単位膨張材量が 106kg/m^3 で過大な膨張が生じた。しかし、緊張材が配置された供試体では単位膨張材量の増加に伴い緊張材ひずみは直線的に増大した。

図-7および図-8にはそれぞれ材齢1週および4週でのCFRP緊張材の弾性ひずみを示した。材齢1週では緊張材ひずみは単位膨張材量の増加に連れて大きくなっているが、材齢4週では単位膨張材量の増加に対する緊張材ひずみの増加量が小さくなる結果を得た。この傾向は使用する緊張材の本数が多くなるにつれ顕著となる。

上述の結果から、図-6, 8に示す材齢4週での供試体コンクリートの表面ひずみと緊張材の弾性ひずみとを比較すると、表面ひずみの方が大きく、若材齢のコンクリートでは膨張ひずみの発生過程で緊張材との間に滑りが生じていると考えることができる。この滑り量は膨張材量が多いほど大きいことが分かる。

これらの結果を総合すれば、 20°C 常温養生で使用する単位膨張材量は 96kg/m^3 程度が適切と考えられる。

3.4 単位膨張材量と圧縮強度・導入プレストレス

前節で、単位膨張材量が多いほど自由膨張ひずみは大きい結論を得た。ここでは、図-9に薄板供試体の自由膨張ひずみとコンクリート強度との関係を示した。その結果、養生温度 20°C で圧縮強度 40MPa 以上を確保するためには、コンクリートの自由膨張ひずみは 5000μ 以下でなければならないことが分かる。この結果を図-6の自由膨張ひずみ曲線に当てはめると、適切な単位膨張材量は 96kg/m^3 程度であることが分かる。

図-7および図-8に示した緊張材ひずみから、薄板のコンクリートに導入されたプレストレスを算出し、そ

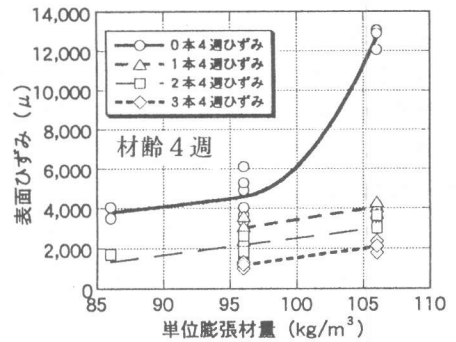


図-6 単位膨張材量とコンパレータによる供試体表面ひずみ

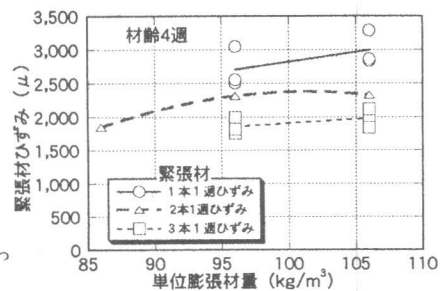


図-7 単位膨張材量と緊張材ひずみ

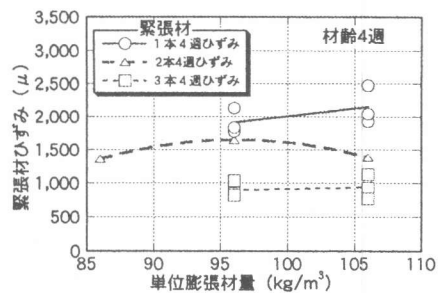


図-8 単位膨張材量と緊張材ひずみ

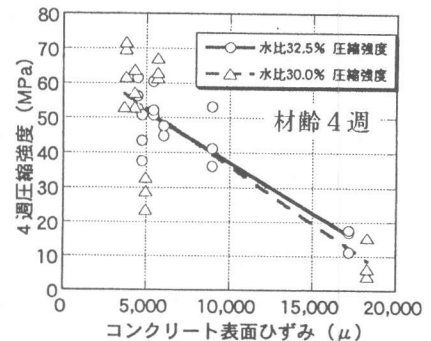


図-9 圧縮強度とコンパレータによる供試体表面ひずみ

れぞれ図-10および11に示した。図-10から、材令1週でのプレストレスは単位膨張材量を 96kg/m^3 以上に増やしても大きくならないことが分かる。また、使用する緊張材量に伴う導入プレストレスは材令1週では、緊張材量の増加に伴って大きくなるが、初期材齢でのプレストレスが大きい場合、4週後のプレストレス損失が大きく、結局材齢4週では緊張材量に拘わらずほぼ一定のプレストレスとなることが分かった。

3.5 緊張材比と導入プレストレス

ケミカルプレストレスを導入する際、緊張材比を大きくすればコンクリートの膨張を拘束する力が大きくなり、高いプレストレスが導入される反面、硬化反応初期の強度発現が伴わずに緊張材とコンクリート間に滑りが生じたり、大きなクリープ変形を生じることが考えられる。

図-12および13に緊張材比とプレストレスとの関係を整理した。図中の3本の曲線はそれぞれ単位膨張材量86, 96, 106kg/m^3 の供試体である。それらの結果から特筆すべきは現象は、単位膨張材量に変化しても導入プレストレスに影響が見られないことである。この傾向は材令1週および4週共に見られ、大きい膨張ひずみを用いたケミカルプレストレス導入時には、緊張材の膨張力は使用するセメントの強度発現特性に依存し、膨張材量には大きな影響を受けないことが考えられる。すなわち、強度の低い材齢で大きな膨張ひずみが発現しても、強度に見合うだけのプレストレスが導入され、過大なプレストレスはクリープや塑性ひずみとして消失することになる。

3.6 養生温度と圧縮強度

図-6で述べたように、CPC薄板用膨張コンクリートの自由膨張ひずみは 4000μ 以上にも達し、単位膨張材量が多い場合にはひび割れを生じて強度低下を生じる。そこで、単位膨張材量 96kg/m^3 と 106kg/m^3 の場合について、養生温度を $10\sim 30^\circ\text{C}$ の間で変化させて圧縮強度を測定した。図-14に示すそれらの結果から、単位膨張材量が 106kg/m^3 では 20°C で圧縮強度が十分に発現しないが、養生温度を 30°C とすることによって、単位膨張材量 96kg/m^3 と同程度の圧縮強度となる結果を得た。しかしながら、膨張コンクリートの養生条件はコンクリートの硬化反応と膨張材の膨張反応の両者に影響すると考えられ、今後引き続きケミカルプレストレスの導入性状との関係を検討して行きたい。

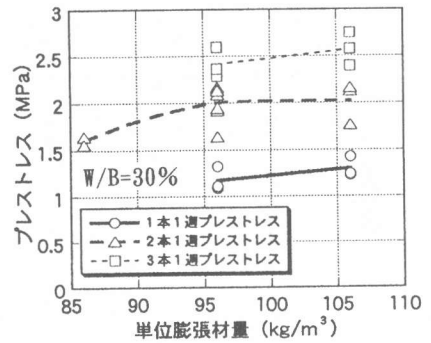


図-10 単位膨張材量と材令1週でのプレストレス

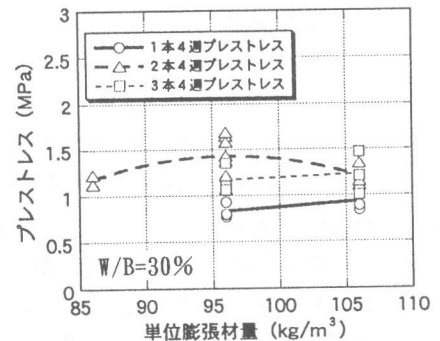


図-11 単位膨張材量と材令4週でのプレストレス

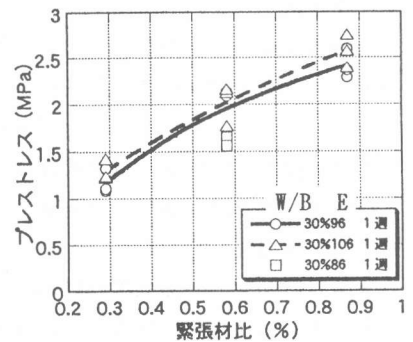


図-12 緊張材比と材令1週でのプレストレス

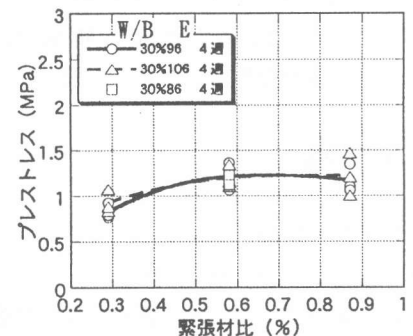


図-13 緊張材比と材令4週でのプレストレス

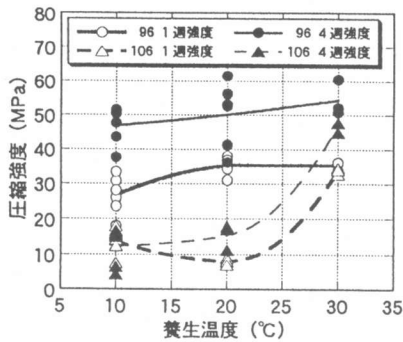


図-14 自由膨張供試体の養生温度と圧縮強度 (W/B=32.5)

表-3 C P C 薄板の曲げ強度

単位膨張材量 kg/m ³	水粉体比 (%)	緊張材 本数 (本)	供試体 No.		曲げ強度 (MPa)
			表	裏	
96	30	2	4	表	11.9
				裏	10.6
			5	表	12.4
				裏	9.0
			6	表	10.2
				裏	10.2
			7	表	11.4
裏	11.1				

3.7 C P C 薄板の曲げ強度

以上の実験結果から得られたC P C薄板のプレストレス導入性状に関する検討から、部材厚さ3.5cm、水粉体比30%、単位膨張材量96kg/m³、緊張材本数2本、材料温度20℃として打設した薄板の曲げ強度試験を実施した。それらの結果を表-3に示す。表中に示す“裏”、“表”は供試体の裏と表の2方向について実施した曲げ試験を表す。それらの曲げ強度(プレストレスを含む)の平均値は10.7MPaとなり、目標曲げ強度12MPaにはわずかに到達しなかった。今後は、さらに安定した強度を確保し、目標曲げ強度を得る方法として蒸気養生を検討したい。

4. まとめ

高膨張コンクリートを用いたC P C薄板のプレストレス導入性状について、部材厚さ3.5cm、常温養生の条件下で実験的検討を行ってきた。実験から得られた知見をいかにまとめる。

- (1) 膨張コンクリートは常温では材齢6時間程度から膨張ひずみの測定を開始するのがよい。
- (2) 水粉体比32.5%以下では水粉体比が大きいほど膨張ひずみは大きくなる。
- (3) 材齢1週まで湿布養生した膨張コンクリートのプレストレスは、材齢4週までに22~23%のプレストレス損失を生じた。
- (4) 養生温度20℃で圧縮強度40MPa以上を発現するには、コンクリートの自由膨張ひずみは5000μ以下とすること、単位膨張材量は96kg/m³程度が望ましい。
- (5) ケミカルプレストレスは単位膨張材量を96kg/m³程度以上に増やしても、また、緊張材比を0.6%以上に増やしても顕著な増加を示さない。
- (6) 部材厚さ3.5cm、水粉体比30%、単位膨張材量96kg/m³、緊張材本数2本、材料温度20℃としてC P C薄板を作製した結果、最大11.2MPa、平均値は10.7MPaの曲げ強度を得た。

参考文献

- [1]山崎竹博, 出光隆, 立石健二, 渡辺明: P C用高性能膨張材を用いた2方向P C埋設型枠用薄板の製作に関する研究, プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol. 6, pp.575-580, 1996.10
- [2]山崎竹博, 出光隆, 渡辺明: 高性能膨張材を用いたケミカル2方向P C埋設型枠用薄板の製作に関する研究, 土木学会第51回年次学術講演会 V, pp.974-975, 1996.9