

(103) 高膨張コンクリートの配合および養生条件と物理的特性

九州工業大学工学部                      〇山崎 竹博  
 同 上    正会員 出光 隆  
 オリエンタル建設                      正会員 小嶺 啓蔵

1. まえがき

収縮ひび割れの防止やケミカルプレストレスの導入に使用される膨張コンクリートは、膨張ひずみが小さい場合、数週間後には膨張ひずみは消散して拘束条件によっては引張ひずみが発生する。一般的に使用される膨張コンクリートは、土木学会コンクリート標準示方書で膨張ひずみの最大値を 700 $\mu$ (工場製品の場合は 1000 $\mu$ )以下と規定しているため、コンクリート構造物のひび割れ防止を目的とした用途に供用されることが多い。本研究では、膨張コンクリートの新しい応用として、コンクリート標準示方書で規定される膨張ひずみよりも更に大きな膨張ひずみを生じさせ、曲げひび割れ発生荷重の高い埋設型枠用ケミカルプレストレストコンクリート薄板への応用を試みている<sup>1)~5)</sup>。一連の研究での重要な検討課題には、膨張コンクリートの高強度化や安定した膨張ひずみの確保、効率的なプレストレスの導入などがある。これらに関連して、これまでに、測定方法の相違とひずみ値との関係を初めとし、膨張材の置換率、配合、鋼線の種類や拘束度、2軸拘束などの各要因と膨張ひずみ特性、強度特性などとの関係について報告してきた。これらの報告は主として 20℃定温における膨張特性に関する結果であるが、昨年度の本シンポジウムで報告したように<sup>5)</sup>、膨張コンクリートの膨張量や各種の物理的性質が初期材齢での養生温度によって大きく異なる結果を得たので、本実験では恒温養生装置を用いて更に綿密な膨張コンクリートの温度依存特性を調査した。

2. コンクリートの膨張性状

膨張コンクリートにはK型膨張材(カルシウムサルホアルミネートの結晶圧を利用した膨張材)またはO型膨張材(水酸化カルシウムの結晶圧を利用した膨張材)をセメントに置換して使用する例が一般的である。

表-1に示す市販の膨張材の分析表から、A、B欄に示すK型とC、D欄に示すO型との化学成分の相違を見ると、K型ではSO<sub>3</sub>がO型に比べて約10%程度多く、CaOが約10%程度少ないことが分かる。これらの特徴の外、鉱物組成が異なるためK型はO型に比べて比重が5%程度小さい。具体的な鉱物組成は、K型ではエトリンガイト、石膏、酸化カルシウム、O型では酸化カルシウム、酸化アルミニウム、石膏などであるが、O型ではこれらに加えてエーライトも含んでおり、比重が大きくなる原因となっている。Dは石膏量をCよりも増やすとともに酸化アルミニウムを著しく少なくし、エトリンガイトの生成を制御するとともに、生成したエトリンガイトのモノサルフェート化による収縮を防止する効果を狙っている。膨張材の粉末度は膨張と硬化の速度からそれぞれの銘柄に合わせて定められている。

ケミカルプレストレスはこれらの膨張作用とセメントの硬化反応のバランスによって導入され、膨張反応が大きくても強度の発現が遅れる場合には、導入プレストレスは増大しない。このように、硬化と膨張のバランスが導入プレストレスに影響を与えることから、本研究では、Cに示す銘柄を用いて、最大のプレスト

表-1 膨張材の化学成分

銘柄	比重	粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分 (%)							備考
			強熱減量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	
A	3.00	2,500	0.8	4.0	10.0	1.0	51.2	0.6	31.9	K型
B	3.00	3,200	1.2	3.1	6.3	0.4	58.0	0.3	29.6	
C	3.14	3,500	0.4	9.6	2.5	1.3	67.3	0.4	18.0	O型
D	3.11	4,120	0.6	3.9	1.8	2.4	63.6	1.6	25.6	

レス導入が可能な配合を使用し<sup>2)-5)</sup>、温度が異なる場合の膨張性状や強度発現性状などについて、特に打設初期の養生温度との関係について実験的検討を行った。

### 3. 実験概要

#### 3.1 使用材料

膨張材には石灰系材料、比重 3.14 を使用した。粗骨材には最大寸法 10mm、比重 2.73 の砕石、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。

薄板を対象にしたケミカルプレストレス部材の緊張材はかぶりを極めて薄くする必要があるため、錆の生じない緊張材として表-2に示すCFRP(樹脂で成型された炭素繊維)φ5mmより線および格子状製品を使用した。緊張材の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が5000μ程度まで安全に使用できると考えられる。また、緊張材は薄板の図心に入れる必要があり、打設時の締め固めによる緊張材の偏心を少なくするため、高性能AE減水剤を使用して低水粉体比でスランプ20cmを達成した。

表-2 CFRPの規格値

緊張材種類	断面積(mm <sup>2</sup> )	破断荷重(kN)	破断強度(MPa)	弾性係数(GPa)	伸び率(%)
より線 CFRP	10.1	21.4	2117	144	1.6
格子状 CFRP	17.5	20.6	1176	98	1.3

表-3 高膨張コンクリートの実験配合

水粉体比 W/P(wt.%)	細骨材率 s/a(%)	空気量 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 ×P(wt.%)
			水 W	粉体P		細骨材 S	粗骨材 G	
				セメント C	膨張材 E			
32.5	48	3	170	427	96	785	871	0.80

#### 3.2 実験配合

高強度を目的として低水粉体比とした高膨張コンクリートの配合は、水粉体比

が32.5%以下では値が大きいくほど膨張ひずみは大きくなる。これは、結晶の膨張に必要な水分が十分に供給される条件で膨張ひずみが最大になるためと理解される。本実験では表-3のように水粉体比を32.5%とし、圧縮強度40N/mm<sup>2</sup>以上が確保できるように、単位膨張材量を96kg/m<sup>3</sup>と定めた。

配合決定の方針としては、一定の流動性を確保する観点から、1m<sup>3</sup>当たりのペースト(水+セメント+膨張材)の容積を336l一定となるように定めた。既報の実験結果から、膨張コンクリートの膨張ひずみは使用する単位膨張材量に比例して大きくなる傾向にあり、強度は単位膨張材量の増加に対して、逆に低下する傾向にある。このような、水粉体比と単位膨張材量との関係から、単位膨張材量を96kg/m<sup>3</sup>と定めた<sup>5)</sup>。

#### 3.3 供試体の形状・寸法

使用する材料は打設前24時間からそれぞれ10、20、30℃の定温養生室で温度調整し、打設後再び同養生室内で湿布に散水して湿潤養生した。供試体は打設後24時間で脱型し、供試体に貼付したストレインゲージおよびチップ間の距離をコンパレータで測定することによって材齢7日まで各温度下で膨張ひずみを測定した。

圧縮強度試験にはφ10×20cm円柱供試体を使用し、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(又は緊張材比調整で2.5cm)×15×51cmの1方向プレストレス

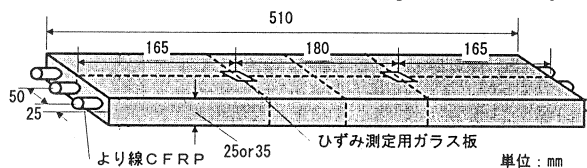


図-1 1方向供試体(より線CFRP)

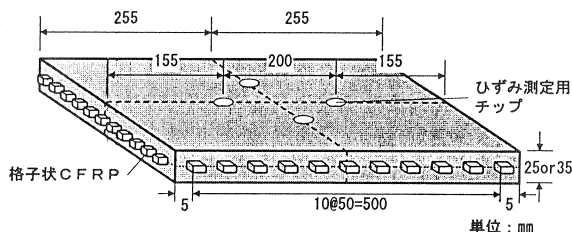


図-2 2方向供試体(格子状CFRP)

供試体を用いた。また、実際の薄板を製造する場合には2方向にプレストレスを導入することが必要となるので、格子状のCFRPを用いて、図-2に示す2方向供試体の膨張ひずみを測定した。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と一致するように配置した。

ケミカルプレストレスはコンクリートの膨張ひずみが緊張材に拘束されることによって導入される。すなわち、CFRPとコンクリートとの付着強度が大きい程、高いプレストレスの導入が可能となる。そこで、 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱にCFRPより線を埋め込み、図-4の状態で測定した自由端0.1mm引き抜き荷重から付着強度を求めた。

### 3. 4 膨張ひずみおよび有効プレストレスの測定方法

コンクリート供試体表面の膨張ひずみは、図-1, 2に示すように供試体中央部に20cm間隔で貼付したガラス板の目盛り間隔をコンパレータで打設後6時間から測定した。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。

## 4. 実験結果および考察

### 4. 1 膨張コンクリートの強度と初期養生温度

初期養生温度の異なる無拘束円柱供試体の圧縮強度試験結果を図-5に示す。引抜き試験でのCFRPの引抜き荷重(付着応力に換算)と自由端すべり量の関係は図-6のように測定され、0.1mmすべり点を付着破壊点とした。引抜き試験から求めた付着強度を初期養生温度別に図-7にそれぞれ示す。それらの結果から、膨張コンクリートの圧縮強度は材料温度10℃で発現が著しく遅れ、材齢7日以後20℃の常温に戻しても強度の増加が極めて小さくなる結果を得た。これらと同様の傾向は付着強度にも見られ、30℃程度での初期養生温度では、恒温であるほど強度発現は早く、かつ、大きくなるのが分かる。ケミカルプレストレス部材として40N/mm<sup>2</sup>以上

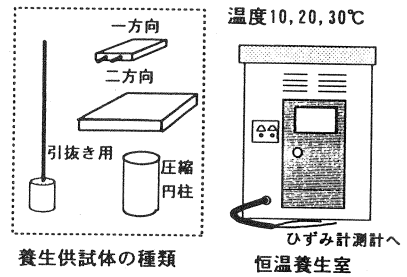


図-3 供試体の温度管理の状況

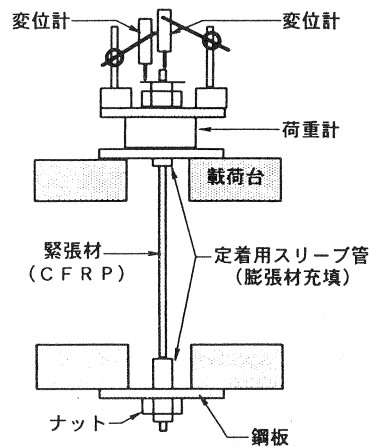


図-4 付着試験の概略図

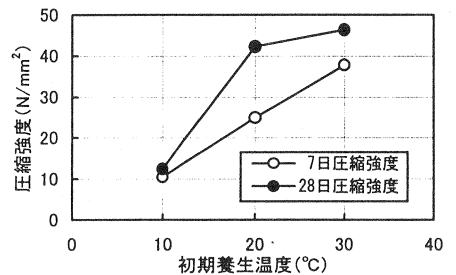


図-5 初期養生温度と圧縮強度の関係

の圧縮強度を得るには、初期養生温度を 20℃以上にすることが重要である。このような膨張コンクリートの圧縮強度と付着強度との関係を示すと図-8のように、圧縮強度に対する付着強度の割合は強度が小さいときに比べて、高強度になる程大きくなるのが分かる。

#### 4.2 初期養生温度と膨張ひずみ発現性状

一軸方向に緊張材を配置した供試体の材齢に伴うコンクリート表面膨張ひずみの発生状況を初期養生温度別に図-9に示す。図-10には2方向に緊張材を配置した供試体の膨張ひずみを同様に示した。それらの結果から、養生温度が 10℃では打設後数日間膨張ひずみの発生が観察されず、その後膨張したがひずみ量は小さい。温度 30℃程度であれば初期の養生温度が高いほど大きな膨張ひずみを生じることが分かる。また、材齢 7日から 28日までに生じる膨張ひずみの低下は膨張ひずみの量(プレストレスに比例)の大きさにかわらずほぼ一定量であり、低下の原因として若材齢でのクリープよりもむしろ乾燥収縮に起因する割合が大きいと考えられる。

#### 4.3 初期養生温度が膨張ひずみ量に与える影響

初期養生温度が異なる供試体の、材齢 7日における圧縮強度と養生温度との関係を図-11に示す。コンクリートの膨張ひずみに及ぼす初期養生温度の影響は、図から一方向供試体の 20℃での表面膨張ひずみが際立って大きくなっているが、同図に見られるように膨張材ひずみは大きくなっていない。すなわち、3500 $\mu$ を越えるような大きな膨張ひずみの状態では、緊張材とのわずかな滑りの発生でもコンクリートのひずみは解放されコンクリート表面の膨張ひずみは大きく測定されるものの、緊張材に貼付したストレインゲージや曲げ試験による再亀裂発生応力の算定値などを総合的に判断したプレストレスは図-12に示されるように 30℃での値が大きくなっている。すなわち、3500 $\mu$ を越えるような膨張ひずみによる導入プレストレスへの温度の影響は、20℃と 30℃とでは大きな差異はなく、むしろ 20℃を下回る養生温度で膨張ひずみの低下に注意が必要と考えられる。

また、養生温度が高い場合、膨張ひずみは大きくなるが同時に、圧縮や付着の各強度がそのひずみを拘束できる程度に大きくなるのが、導入プレストレスの増大に繋がり、一般的にはこれらの強度に見合ったプレストレスが導入されるものと考えられる。

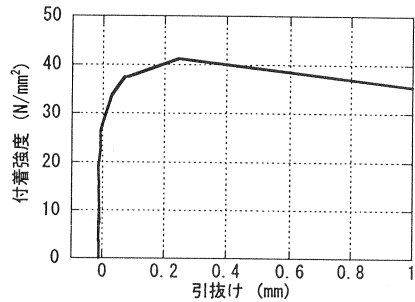


図-6 引抜き試験結果

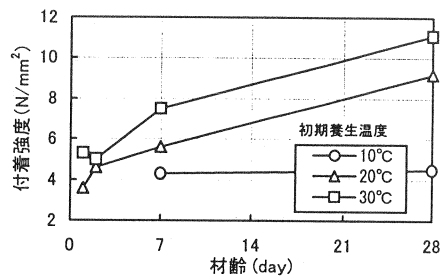


図-7 付着強度の材齢による変化

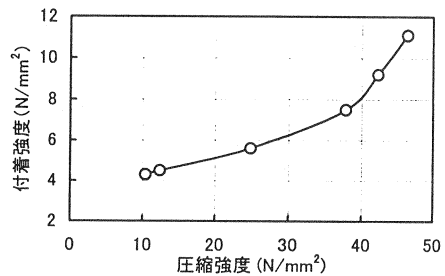


図-8 圧縮強度と付着強度の関係

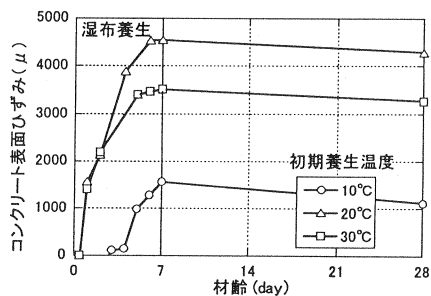


図-9 1方向供試体のコンクリートひずみ

#### 4.4 導入プレストレスへの影響

膨張コンクリートの材齢 28 日での導入プレストレスを確認するために、実測ひずみおよび供試体の曲げによる再亀裂試験から導入プレストレスを求めた。このとき、供試体を面状に打設した場合(平打ちと呼ぶ)、上面にレイタンスの多い層ができるため、再度、縦方向に型枠を立ててコンクリートを打設することを試みた。このようにして異なる打設方向で作製した膨張コンクリートのプレストレスも同時に図-12に示している。その結果、初期養生温度の増加とともに平打ちの供試体のプレストレスは増大するが、縦打ちの供試体では温度の増加とともに徐々にプレストレスが低下する傾向が見られた。その原因には、縦打ちの場合には型枠が供試体両面にあるため、材齢初期に膨張ひずみが拘束されること、ブリーディング水の発生によって、膨張に最適な水が不足することなどが考えられるが、今後さらに検討して行きたい。

打設方向が異なる供試体のプレストレスへの初期養生温度との関係は、型枠拘束度の小さい平打ちの供試体は初期養生温度に比例してプレストレスも増加した。一方、縦打ちの場合では初期養生温度の増加に伴いプレストレスが小さくなっているが、これは木材よりも剛性の大きい鋼製型枠に材齢初期のひずみが拘束された状態で養生したため、コンクリートの膨張ひずみそのものが小さくなったものと考えられる。

#### 4.5 緊張材比と膨張ひずみおよび導入プレストレス

異なる2種類のCFRP緊張材による膨張ひずみの拘束効果を比較するため、より線の弾性係数を基準にして格子状のCFRPの断面積を換算し、コンクリート断面に対する緊張材比を算出した。緊張材比と膨張ひずみとの関係を図-13に、プレストレスとの関係を図-14に示す。このとき、縦打ちと平打ちの2種類の打設方法を用いた供試体の膨張ひずみとプレストレスとの関係も同時に求めた。

供試体の緊張材比が大きくなると、拘束力が増すことによって膨張ひずみは減少する。一方、図-14に示すようにプレストレスは緊張材比の増加とともに増大している。つまり、緊張材比を上げることで膨張ひずみは多少減少するが、それ以上にプレストレスの増加に対する効果の方が大きいことになる。

#### 5. まとめ

- (1) 膨張コンクリートの初期養生温度は 30℃程度では、温度が高いほど圧縮強度および付着強度は大きくなる。ちなみに、膨張材量 96kg/m<sup>3</sup>、水粉体比 32.5%では、

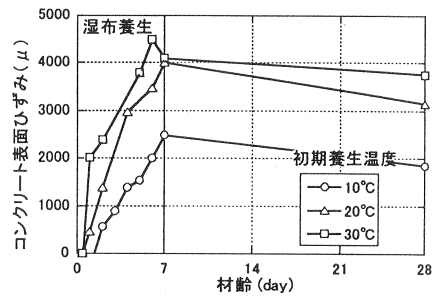


図-10 2方向供試体のコンクリートひずみ

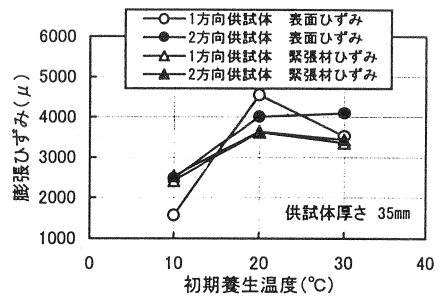


図-11 初期養生温度と膨張ひずみの関係

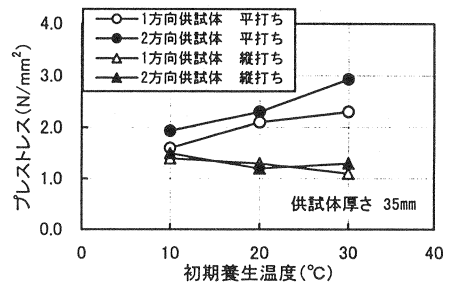


図-12 初期養生温度とプレストレスの関係

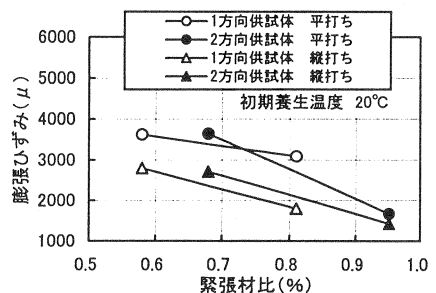


図-13 緊張材比と膨張ひずみの関係

40N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を得るには初期養生温度を20~30℃とすることが望ましい。

- (2) 膨張コンクリートの付着強度は、圧縮強度が大きくなるにつれて2次関数的に増加し、大きいケミカルプレストレスを導入するには、高強度のコンクリートを用いることが重要である。
- (3) 膨張ひずみは20~30℃で最大となるが、3500μを越える膨張ひずみは、緊張材との間に滑りを生じ、コンクリートの膨張ひずみは大きくなるが、プレストレスは付着強度に応じた値が導入される。
- (4) 緊張材比を大きくするとコンクリートの膨張ひずみは減少するが、導入されるプレストレスは大きくなる。このとき、初期養生温度が高いものほど大きい導入プレストレスが得られる。
- (5) 膨張コンクリートを用いたプレストレス薄板は、平面上に打設した方が、壁状に縦打ちするよりも大きいプレストレスが導入される。
- (6) 1000μを越える高膨張コンクリートでは、7日間の湿潤養生後の乾燥による膨張ひずみの低下は700μ程度であり、3000μ程度を目標に膨張ひずみを発生させれば、曲げ強度10N/mm<sup>2</sup>程度が得られる有効プレストレスを導入することが可能となる。

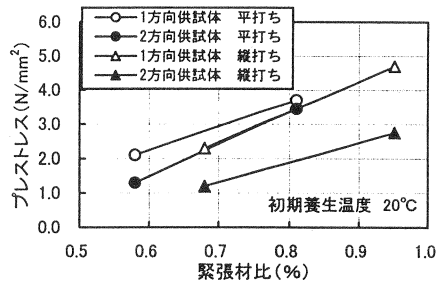


図-14 緊張材比とプレストレスの関係

#### おわりに

以上、板厚 30mm 程度のコンクリート板を埋設型枠工法などに使用する目的で、土木学会標準施工書に規定される膨張ひずみを越えてケミカルプレストレスを導入する方法を提案してきた。それら一連の研究の中で、膨張コンクリートの力学的性質も化学用混和剤の使用によって強度や膨張性状などに大きな改善効果が見られ、従来言われてきた“膨張コンクリートによるプレストレスは収縮ひび割れ防止程度に効く”との概念を打ち破ることができた。しかし、これらの成果を部材厚の大きい一般の部材に直接応用することは、膨張反応の性質上、今後の研究に待たねばならないが、少なくとも積極的にプレストレストコンクリートに応用できることが明らかになった。

#### 参考文献

- [1] 佐野史佳・出光隆・山崎竹博・ミヨーキン：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.
- [2] 山崎竹博，出光隆，立石健二，渡辺明：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，プレストレスト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
- [3] 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PC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，pp. 974-975, 1996. 9
- [4] 山崎竹博，出光隆，渡辺明：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16, No. 2, pp. 847-852, 1994.
- [5] 山崎竹博，出光隆，渡辺明，鶴田健：高膨張コンクリートの配合および養生条件と物理的特性，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，Vol. 7, pp. 91-96, 1997. 10