

(18) 高膨張コンクリートの膨張量とケミカルプレストレスの導入性状に関する研究

九州工業大学 工学部 ○山崎 竹博  
 同上 正会員 出光 隆  
 九州共立大学 工学部 正会員 渡辺 明  
 小沢コンクリート工業 鶴田 健

1. まえがき

セメントコンクリート製薄板を製造するには、RC構造ではひび割れ発生荷重が小さいため、PC構造とすることが好ましい。また、定形のPC部材の大量生産にはプレテンション方式が適しているが、薄板のように小径のCFRP(炭素系連続繊維強化プラスチック)緊張材を多数2方向に緊張するには特殊な定着装置が必要となる。これらの事情から、本研究ではCFRP緊張材の定着装置が不要なケミカルプレストレスコンクリート(CPC)を用いることとした。<sup>2) 3) 4)</sup>土木学会コンクリート標準示方書で規定される膨張コンクリートのひずみは700 $\mu$ 以下で、主としてひび割れ防止を目的として導入されるが、ここではこれを越えるひずみでCFRP緊張材を緊張する方法を検討した。この他、薄板にCPCを採用した理由として、プレストレス導入時に緊張材のポアソン効果によって、薄いかぶりでも緊張材に沿うひび割れ発生が少ないことが上げられる。

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り大きなプレストレス損失が生じるため、これらの収縮ひずみを越える数千 $\mu$ 以上の膨張ひずみを確保しなければならない。一方、膨張材の置換率を増やして膨張ひずみを大きくすれば、セメント硬化体の空隙率も大きくなり、強度の低下やクリープ係数の増加などを生じる。

本論文では、膨張ひずみが1000 $\mu$ を越えるコンクリートを高膨張コンクリートと呼び、以下にその膨張性状と、膨張ひずみによるケミカルプレストレスの導入性状について実験的に考察したので報告する。

2. ケミカルプレストレス導入の概念

CPC用膨張材にはK型(CSA系)とO型(石灰系)が一般的であるが、長期に膨張圧の低下が少ないとされるO型膨張材を使用した。O型膨張材は水酸化カルシウムの結晶化に伴う膨張作用を利用したもので、結晶空隙を考えなければ理論化学的には収縮反応が生じると考えられる。反応は初期にコロイド状の水酸化カルシウム結晶を生成し、結晶の成長に伴い膨張が継続するものと考えられている。プレストレス導入に利用するためには、緊張材を拘束して引張ひずみを導入できる付着強度ならびに圧縮強度が必要となる。図-1中の①~⑤に緊張材に導入される引張ひずみの発生状況の概念図を示している。図中の曲線①は最大数百 $\mu$ のひずみを導入した場合で、十分な強度が確保できてもクリープや乾燥収縮により、プレストレスが消滅する場合を示している。②は適切な膨張ひずみは発生するが水セメント比が大きく十分な強度が得られない場合で、クリープや乾燥収縮によるプレストレス減退が大きい例を示している。③は適切な膨張と所要の強度が得られた場合であるが、自然養生では長期にわずかな膨張が継続し、クリープや乾燥収縮の補償が可能

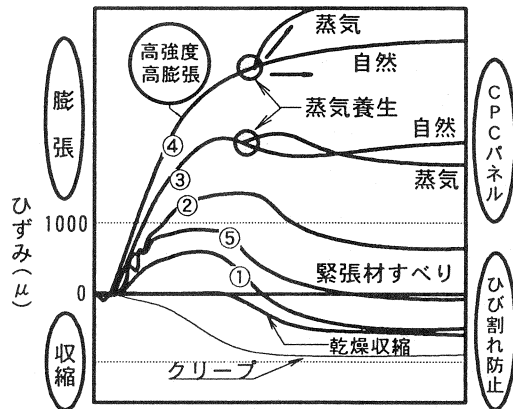


図-1 ケミカルプレストレス導入の概念図

であるが残存膨張の管理が重要である。また、残存膨張を防ぐために図中の○印部分で蒸気養生を行えば、一時的に膨張が生じるが、以後安定した緊張材ひずみが得られる。④は高強度かつ高膨張が得られた場合であるが、膨張材が多いため、蒸気養生の際に異常な膨張を生じないように管理する必要がある。⑤の曲線は硬化反応に対して膨張が早いめに緊張材とコンクリートとが滑りを起こし緊張材のひずみが増大しない場合である。本研究では曲線③の状況が安定して得られることを目標にしている。

### 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、ベスト(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[2]、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。

#### 3.2 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。

#### 3.3 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

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/m³)					
				水 W	セメント B	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 ×B%
10	25.0	48	3	148	496	96	785	871	1.13
	27.5			156	471				0.97
	30.0			163	448	86			0.8
				458	427				
	32.5			170	417	106			0.8
					396	127			
				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 (mm²)
CFRP	26.4	2610	154	1.5	10.1

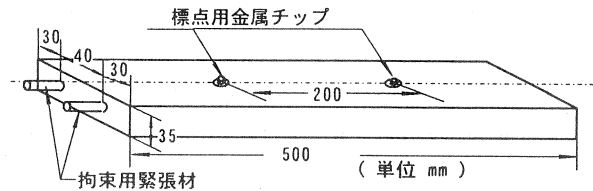


図-1 1方向PC薄板供試体の標点

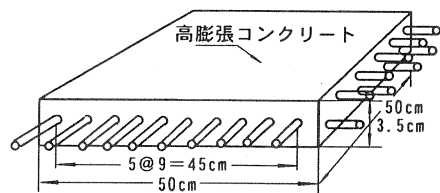


図-2 2方向プレストレス供試体

から再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割れ荷重を測定した。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 水粉体比と緊張材ひずみの関係

膨張コンクリートの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。膨張コンクリートの膨張ひずみは打設後6時間程度から発生するが、材齢6時間程度では強度が低くホイットマーゲージなどの押圧を伴う測定法は困難である。そのため、ホイットマーゲージは材齢26時間から測定を開始した。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り、測定結果を図-3に示した。図-3は単位膨張材量を $96\text{kg/m}^3$ 一定とし、水粉体比を変化させた供試体の膨張ひずみをコンパレータで測定したものである。同じ供試体をホイットマーゲージで測定した結果は図-3の結果より $2000\mu$ ほど小さい値となった。 $2000\mu$ の相違は前述のように、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している。

一方、図-4に供試体の緊張材に貼付したワイヤーストレインゲージによって測定した緊張材ひずみの経時変化を水粉体比ごとに示している。図-3、4の比較から、緊張材ひずみはコンクリートの表面ひずみに対して材齢28日で約半分の値であることが分かる。特に、材齢2日程度以内ではコンクリートと緊張材のひずみ差が大きく、コンクリートの強度が十分に発現するまでは膨張ひずみが緊張材に確実に伝達されなかったと推察される。

図-4から、水粉体比の変化が緊張材ひずみ(ケミカルプレストレス)に及ぼす影響は、養生温度 $20^\circ\text{C}$ 、単位膨張材量 $96\text{kg/m}^3$ 一定の場合、水粉体比が32.5%以下の範囲ではその比が大きい程、膨張ひずみも大きくなることが分かった。このことから、十分な膨張結晶を生じるには多くの水を必要とすることが分かるが、過剰な水による膨張は一方で組織の強度を低下させる。

材齢7日まで湿潤養生を行った後、28日まで室内乾燥状態で膨張ひずみの変化を測定した。その結果は図-4から分かるように、材齢7日の緊張材ひずみ2657、2482、2232、2105、1880 $\mu$ に対して材齢28日までの減少ひずみはそれぞれ617、557、496、473、432 $\mu$ 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水粉体比にかかわらず22~23%であった。

##### 4.2 単位膨張材量と緊張材ひずみの関係

前節で、単位膨張材量が一定の場合について、水粉体比と緊張材の膨張ひずみとの関係を述べた。700 $\mu$ 程度の膨張ひずみを用いる従来の膨張コンクリートでは、一般に $60\text{kg/m}^3$ 程度以下の単位膨張材量を使用する。本研究では2000 $\mu$ 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。

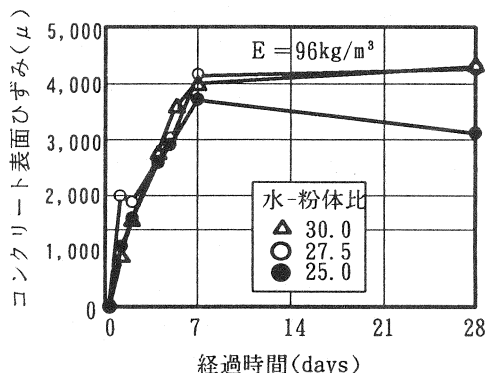


図-3 コンパレータによるコンクリートひずみの測定値

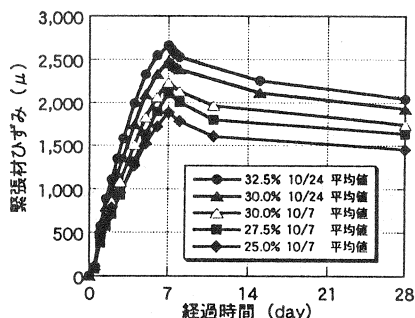


図-4 水粉体比の相違と緊張材ひずみ

その方法として、水粉体比を30%一定にし、単位膨張材量を86から106kg/m<sup>3</sup>まで変化させて緊張材のひずみを測定した。それらの結果を図-5に示す。

図-5から、単位膨張材量が106kg/cm<sup>3</sup>以下であれば単位膨張材量が多いほど緊張材ひずみが大きくなる傾向が見られる。また、図中の破線は、最も大きな緊張材ひずみを示した単位膨張106kg/cm<sup>3</sup>の配合を、水粉体比を32%に増やした結果を示したものである。前節の傾向と同様に、膨張ひずみも増大している。

以上の結果は、すべて緊張材の拘束の基で膨張反応が生じた場合であり、緊張材のない無拘束状態ではコンクリートひずみは著しく増大することになり、図-

5に示すW/B=30%, E=96kg/cm<sup>3</sup>で4600 $\mu$ , E=106kg/cm<sup>3</sup>の配合では13000 $\mu$ を越えるひずみとなった。さらに、膨張材量を増やした例を図-6に示す。このとき、コンクリートひずみが1万 $\mu$ を越える場合でも、緊張材ひずみは図-7に示すようにある緊張力で止まり、緊張材の破断には至らない。しかし、膨張初期からコンクリートと緊張材のひずみには関連性がなく、付着破壊しているものと考えられる。

これらの結果から、常温養生の場合、コンクリート薄板製造に用いられる単位膨張材量としては96kg/cm<sup>3</sup>程度が適切であると考えられる。

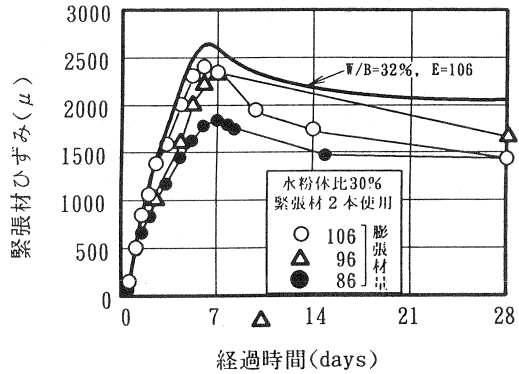


図-5 単位膨張材量の相違と緊張材ひずみ

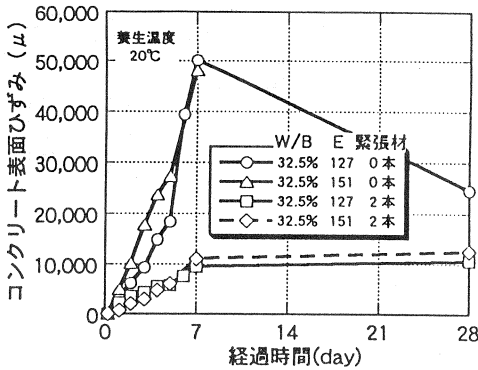


図-6 膨張材量多量使用のコンクリートひずみ

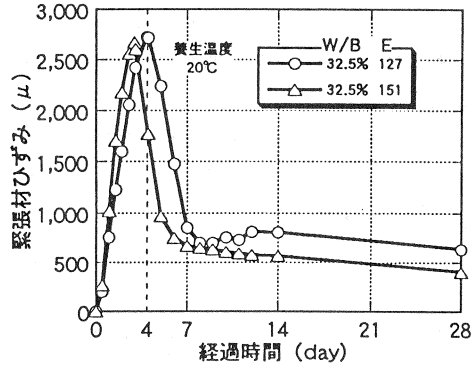


図-7 膨張材量多量使用の緊張材ひずみ

#### 4.3 養生温度と緊張材の膨張ひずみ

ケミカルプレストレスを導入するための実用的なコンクリートの膨張作用は、セメントの硬化反応速度と膨張材の膨張反応速度の均衡の上で成立する。ここでは、養生温度の変化と緊張材ひずみとの関係を調べるため、水粉体比を32.5%、単位膨張材量96および106kg/cm<sup>3</sup>とし、CFRP緊張材0本と2本を用いた供試体を7日間10, 20, 30℃で湿布養生後20℃室内乾燥して、ひずみ変化を測定した。緊張材2本を用い単位膨張材量を96および106kg/cm<sup>3</sup>とした供試体の結果をそれぞれ図-8, 9に示す。

図-8に示す単位膨張材量96kg/cm<sup>3</sup>の場合では緊張材ひずみ曲線は、打設後4日間10℃で養生した後25℃で3日間養生した場合および20℃養生の場合がほぼ等しく膨張率が高いことが分かった。しかし、図-9に示す単位膨張材量106kg/cm<sup>3</sup>では初期に低温養生した供試体の緊張材ひずみが最も大きくなった。また、10℃養生の場合、膨張の発現は緩やかではあるが、図-9のように膨張材量が106kg/cm<sup>3</sup>の場合には実用的な

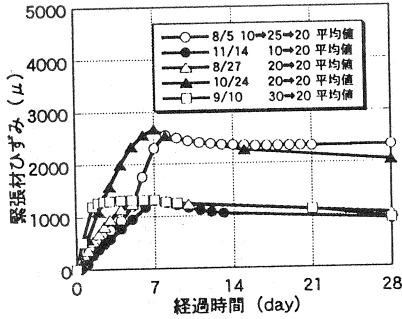


図-8 養生温度が異なる供試体の緊張材ひずみ (単位膨張材量=96kg/cm<sup>3</sup>)

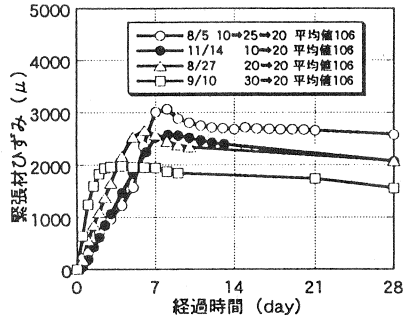


図-9 養生温度が異なる供試体の緊張材ひずみ (単位膨張材量=106kg/cm<sup>3</sup>)

ひずみに達している。しかし、30℃養生の場合、初期の膨脹反応が急である反面、ひずみ量そのものは小さい。

#### 4.4 膨脹ひずみとコンクリート強度の関係

これまでに単位膨脹材量が多いほど、水粉体比が32.5%程度で大きな緊張材ひずみと自由膨脹ひずみが得られることを述べてきた。一般に、膨脹作用が大きくなれば硬化体の結晶も粗くなりコンクリートそのものの強度低下を生じる。もちろん、緊張材で拘束されたコンクリートでは膨脹も拘束され、自由膨脹供試体よりも高い強度を発現すると考えられる。そこで、無拘束の供試体の自由膨脹ひずみと圧縮強度の関係を水粉体比を30, 32.5%について測定し図-10に示した。

図-10から、圧縮強度40MPa以上を確保しようとするならばコンクリートの自由膨脹ひずみを5000μ以下としなければならないことが分かる。

#### 4.5 緊張材の拘束とコンクリート強度の関係

自由膨脹ひずみが大きければコンクリート強度は低下することが分かったが、実際の薄板は緊張材で拘束されており、膨脹ひずみも部材の位置によって異なっていると考えることができる。ここでは、実際にCFRP 1, 2, 3本を緊張材に用いた供試体を切断して軸方向及び軸と直角方向の圧縮強度試験を行った。それらの結果を載荷方向別に図-11, 12にまとめて示した。

それらの結果から、ばらつきはあるものの十分な拘束が期待できない供試体端部にわずかながら強度の低下傾向が認められる。しかし、緊張材が多い場合では強度低下の割合は小さい。

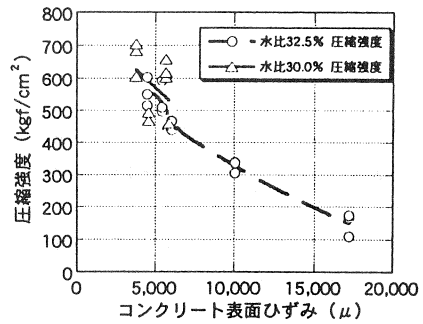


図-10 自由膨脹ひずみと圧縮強度の関係

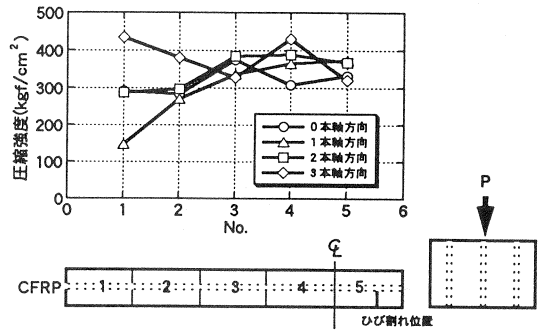


図-11 1方向供試体の軸方向圧縮強度分布

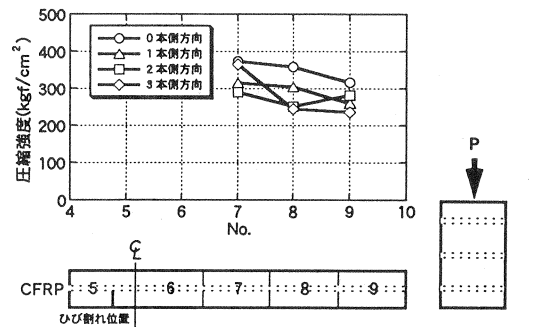


図-12 1方向供試体の軸直角方向圧縮強度分布

#### 4.6 2方向プレストレスを導入薄板のプレストレス分布

薄板にケミカルプレストレスを導入する際の問題点を、一方向供試体を用いた実験で調べてきた。ここでは、実際に2方向にプレストレスを導入した場合の、緊張材ひずみの分布を調べてみた。図-13に示す2方向供試体の中央部および端部の緊張材のそれぞれ直交する方向にストレインゲージを貼り、緊張材ひずみを測定した結果、供試体端面に直交する緊張材の端部から5cm位置でのひずみが著しく小さいことが分かった。これは緊張材の定着不足に起因するものと考えられる。

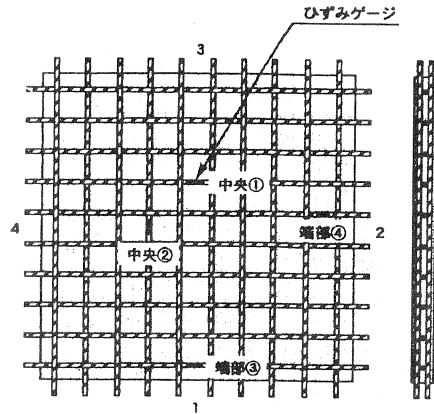


図-13 2方向供試体のひずみ測定位置

#### 5. まとめ

高膨張コンクリートを用いたCPC薄板のプレストレス導入性状について、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週から4週までにケミカルプレストレスは、22~23%の損失を生じた。

(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5000 $\mu$ 以下とすること、単位膨張材量は96kg/m<sup>3</sup>程度が望ましい。

(5) 単位膨張材量を106kg/m<sup>3</sup>程度以上使用するとき、緊張材による拘束が十分でない場合、過大な膨張ひずみの発生に注意が必要である。

(6) 養生温度は20℃程度が望ましいが、高温には特に注意が必要である。

(7) 供試体端部の定着域でコンクリート強度の低下傾向が見られるが、その割合は小さい。

(8) 2方向CPCのプレストレス分布は部材端面に直角方向の緊張材で低下傾向が見られるので定着長さを考慮することが重要である。

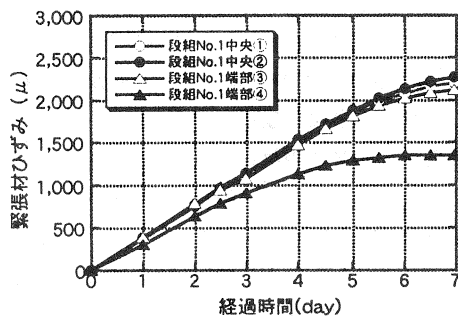


図-14 2方向供試体の緊張材ひずみ

#### 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 V, 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.