

# 論文 高強度プレテンション PC はり部材のせん断ひび割れ強度に関する研究

渡辺博志\*・河野広隆\*\*・府内洋一\*\*\*・田中政章\*\*\*\*

要旨：設計基準強度が400～800kgf/cm<sup>2</sup>の高強度コンクリートを用いたプレテンション PC はり部材のせん断ひび割れ強度について、載荷実験を交えた検討を行った。調査の対象とした影響要因は、コンクリート強度、プレストレス量、部材の有効高さ等である。この結果、プレストレスが0の場合、コンクリートを高強度化しても曲げせん断ひび割れ強度は増加しないこと、プレストレス量を大きくするとせん断ひび割れ荷重は著しく大きくなること、部材の寸法効果は高強度コンクリート部材では500kgf/cm<sup>2</sup>以下の通常強度のコンクリートの場合に比べやや顕著であることなどが明らかとなった。

キーワード：高強度コンクリート、せん断、プレストレスコンクリート、寸法効果

## 1. はじめに

高強度コンクリートの製造技術は年々進歩し、実験室レベルでは圧縮強度が1000kgf/cm<sup>2</sup>を超える高強度コンクリートも容易に作られるようになってきている。ところが、土木構造物にこれまで用いられてきたコンクリートは、一部の工場製品を除き、強度の上限が設計基準強度で500kgf/cm<sup>2</sup>に限定されており、高強度コンクリートが積極的に用いられているとは言えない状況にある。圧縮強度が500kgf/cm<sup>2</sup>を超える高強度コンクリートは、500kgf/cm<sup>2</sup>以下の強度のコンクリートと比較して、圧縮強度に対する引張強度の増加が小さいなどの力学的特性を持っている。このため、高強度コンクリートをPC部材に用いた場合、斜め引張応力によるせん断ひび割れ発生荷重が、あまり大きくならない可能性がある。また、はり部材のせん断ひび割れ強度は、コンクリート強度だけではなく、部材寸法やせん断スパン比など多くの要因に依存することが知られている。これらの要因を考慮したせん断耐力式 [ 1、2 ] が提案されているが、主として500kgf/cm<sup>2</sup>以下のコンクリートを用いた部材に対して適用される式が、高強度コンクリートに対してもそのまま適用可能であるかどうか明確ではない。ここでは、高強度コンクリートを用いたせん断補強鉄筋のないプレテンションPCはり部材のせん断載荷試験を実施し、せん断ひび割れ強度に及ぼすコンクリート強度の影響を調査するとともに、部材の寸法効果・導入プレストレス量との相互効果についても検討を行った。

## 2. 実験概要

実験供試体の数は全部で23体であり実験要因としては、コンクリート強度、プレストレス量、部材の有効高さを選んだ。実験供試体の一覧表を表-1に示す。断面上縁で、コンクリートに導入されるプレストレスが0になるようにPC鋼材の緊張力を調節した。用いたPC鋼材はい

\*建設省土木研究所コンクリート研究室主任研究員、工修

\*\*建設省土木研究所コンクリート研究室室長、工修

\*\*\* (株) 富士ピーエス福岡支店、課長代理

\*\*\*\* (株) 富士ピーエス福岡支店

表-1 実験供試体の条件設定一覧表

供試体 番号	供試体記号	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			せん断スパン比 a/d			有効高さ (cm)				プレストレスによる下縁応力 度 (kgf/cm <sup>2</sup> )				
		400	600	800	2	3	4	35	55	75	95	0	30	60	90	120
1	L2-35-00	○			○			○				○				
2	L3-35-00	○				○		○				○				
3	L4-35-00	○					○	○				○				
4	M2-35-00		○		○			○				○				
5	M3-35-00		○			○		○				○				
6	M4-35-00		○				○	○				○				
7	H2-35-00			○	○			○				○				
8	H3-35-00			○		○		○				○				
9	H4-35-00			○			○	○				○				
10	H3-35-30			○		○		○					○			
11	H3-35-60			○		○		○						○		
12	H3-35-90			○		○		○							○	
13	H3-55-00			○		○			○				○			
14	H3-55-30			○		○			○					○		
15	H3-55-60			○		○			○						○	
16	H3-75-00			○		○				○			○			
17	H3-75-30			○		○				○				○		
18	H3-75-60			○		○				○					○	
19	H3-95-00			○		○					○		○			
20	H3-95-60			○		○					○				○	
21	H3-95-120			○		○					○					○
22	L3-35-30	○				○			○				○			
23	L3-35-60	○				○			○					○		

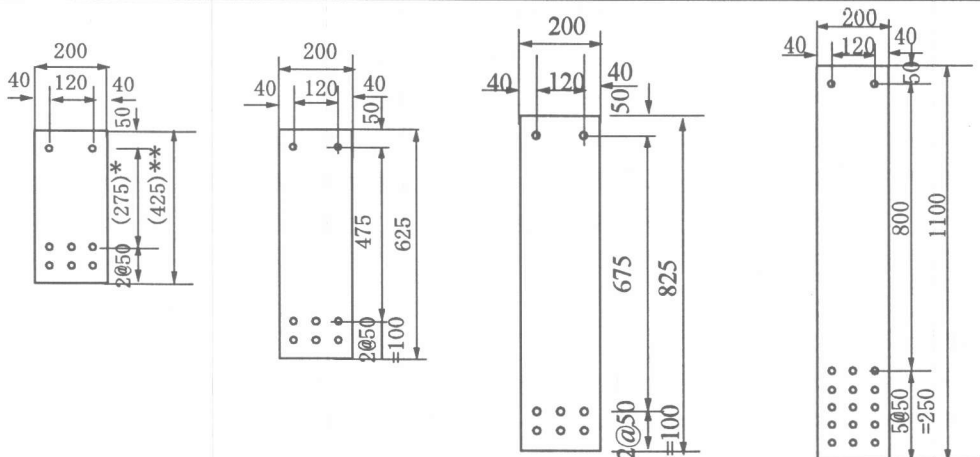


図-1 供試体の断面諸元 (左からそれぞれ有効高さ35cm,55cm,75cm,95cm)

ずれの供試体もSWPR7B 15.2mmである。はり供試体の断面図を図-1に示す。供試体の端部は、PC鋼材の滑りによるプレストレスの変化が起こらないよう1000mmの長さを確保し、この端部のみスターラップを配置した。なお、高強度コンクリートの配合条件は、目標スランプ8cm、

空気量4%、使用セメントは早強ポルトランドセメントとし、高性能AE減水剤を用いて水セメント比を低く押さえることにより強度を高めた。

載荷方法は図-2に示すように2点に集中荷重をかけた。ここで、等曲げモーメント区間は部材の有効

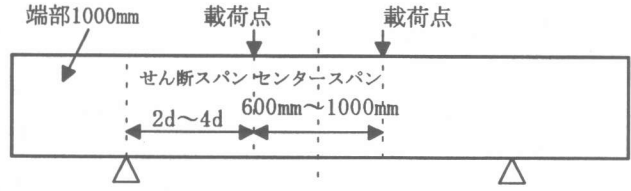


図-2 載荷方法

高さに応じて600mm~1000mmに変化させた。部材に導入されているプレストレスは、コンクリートのヤング係数やクリープ係数が設計時の予測値と必ずしも等しくないので、当初予定している値が導入されていない可能性がある。ここでは、はり部材の載荷試験を実施して得られた荷重たわみ曲線からひび割れ発生モーメントを求め、ひび割れ発生モーメントと材料試験で得られたコンクリートの割裂強度をもとに、有効プレストレスの推定を行った。すなわち、載荷試験で得られた荷重たわみ曲線において、その立ち上がりの勾配が変化する点を見つけ、この点での等モーメント区間での曲げモーメントを曲げひび割れ発生モーメント(Mcr)とし、断面下縁のコンクリートに導入されていた圧縮応力度

$$\sigma_{eff} = \frac{M_{cr}}{I}(h-x) - f_t \quad (1)$$

を計算した。

ここに

$\sigma_{eff}$ : 断面下縁のプレストレスによる圧縮  
応力度の推定値

h: 部材断面の高さ

x: 中立軸位置

$f_t$ : コンクリートの引張強度

図-3は計画したプレストレスによる圧縮応力度と、実験結果から推定した応力度の比較を示すものであり、おおむね当初計画したプレストレスが導入されていたものと考えられる。

### 3. 載荷実験結果

#### 3.1 部材の破壊形態

せん断スパン比が2およびプレストレスが導入されている供試体は斜め引張ひび割れの後、タ

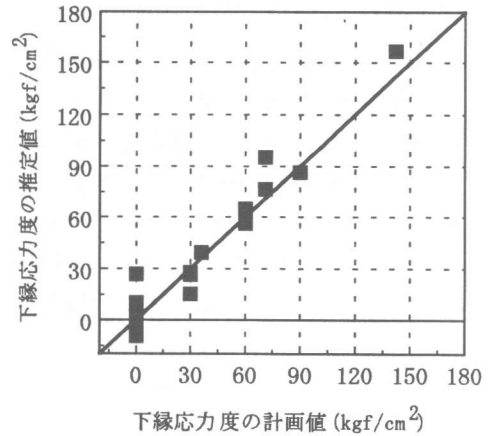


図-3 プレストレスの検証結果

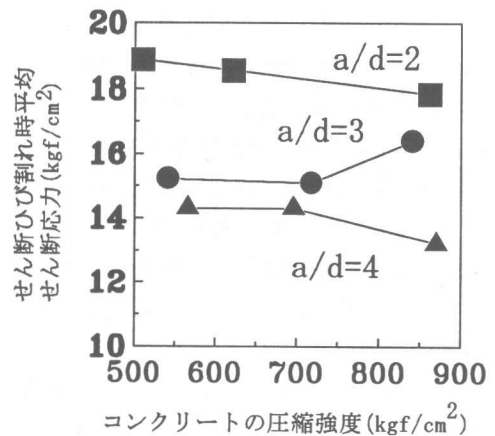


図-4 コンクリート強度と平均せん断応力の関係

イドアーチ機構に移行し、更に大きな荷重に耐え、最終的には等曲げモーメント区間の圧縮側コンクリートの圧壊により破壊した。一方、せん断スパン比が3、4でプレストレスがない供試体では、わずかな荷重増加ののち、斜め引張ひび割れ発生後、急激にひび割れが進展し破壊した。

### 3. 2 コンクリート強度とせん断ひび割れ発生荷重の関係

図-4に、コンクリート強度と、曲げせん断ひび割れ発生時の平均せん断応力の関係を示す。図中に示した結果はプレストレスのない供試体のものである。コンクリート強度の増加に伴う曲げせん断ひび割れ発生荷重の増加は、せん断スパン比が2,3,4のいずれの場合もほとんど認められない。図-5は、今回の実験データに加え、文献[3]に報告されているせん断載荷試験結果のうち、部材の有効高さが35cm、せん断スパン比が3で、今回の実験供試体の鋼材比(1.2%)とほぼ同等の鉄筋比(1.23%)をもった鉄筋コンクリート部材でのデータをあわせて示したものである。図中に示した今回の実験データのうち、せん断スパン比が2と4のものについては、文献[4]に示されているせん断強度算定式を参考にして、せん断スパン比に対する補正係数kを乗じてせん断スパン比が3の場合に基準化している。ここで、補正係数kは次式で与えられる。

$$k = \frac{0.75 + 1.4 \cdot 1/3}{0.75 + 1.4 \cdot d/a}$$

コンクリートの圧縮強度の増加に対して、圧縮強度が600kgf/cm<sup>2</sup>あたりでせん断ひび割れ発生時の平均せん断応力の増加が止まっている。図-6には、今回実験で用いたコンクリートの圧縮強度と割裂強度の関係を示す。コンクリートの圧縮強度が増加するに伴い、割裂強度も増加する傾向にあるが、割裂強度はばらつきが大きく、その下限値は必ずしも増加の傾向を示していない。図中には圧縮強度が600kgf/cm<sup>2</sup>以上の領域について回帰直線を示しているが、この回帰直線の傾きが小さく、平均的に見ても割裂強度はほとんど増加していない。曲げせん断ひび割れ強度はコンクリートの圧縮強度よりはむしろ引張強度に左右されると考えられる。高強度コンクリートの割裂強度は、圧縮強度が増加してもほとんど増加しないため、せん断ひび割れ発生時のせん断力の増加が頭打ちになったと考えられる。

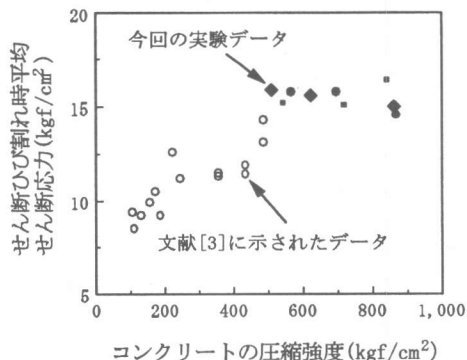


図-5 コンクリート強度と平均せん断応力の関係 (過去の実験データ含む)

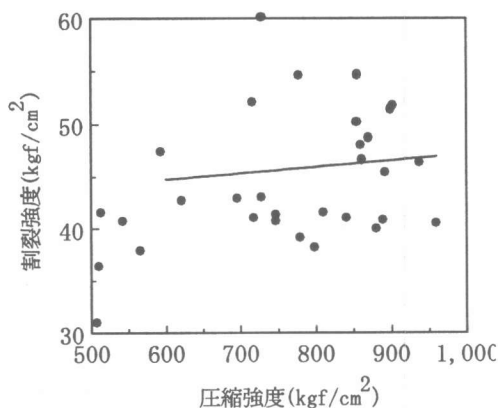


図-6 実験に用いたコンクリートの圧縮強度と割裂強度の関係

### 3. 3 導入されたプレストレスとせん断ひび割れ発生荷重の関係

ここでは、せん断ひび割れ発生時のせん断力が、デコンプレッションモーメント( $M_0$ )の増加により、どの程度増加するかについて検討を行った。プレストレスの無い供試体( $M_0=0$ )におけるせん断ひび割れ時のせん断力( $V_{cr0}$ )からの、 $M_0$ の増加に伴うせん断ひび割れ時のせん断力の増加( $V_{cr}-V_{cr0}$ )と、 $M_0/a$  ( $a$ はせん断スパン長) の関係を示したものが図-7である。この結果から、高強度コンクリートにおいても、プレストレスによるせん断ひび割れ発生時のせん断力の増加は、 $M_0/a$ とほぼ線形関係にあることがわかる。 $V_{cr}$ の増加は $M_0$ の増加に対しておおよそ1.0~2.0倍の間に広がっているが、この倍率についてはコンクリート強度あるいは部材寸法との因果関係は認められなかった。

### 3. 4 はりの有効高さとせん断ひび割れ発生荷重の関係 (寸法効果)

せん断ひび割れ時の断面の平均せん断応力は、部材の有効高さが大きくなるにつれて小さくなることが知られている。ここでは、部材の有効高さが35cmの場合を基準として、この時のせん断ひび割れ時の平均せん断応力 ( $\tau_{cr35}$ ) を分母とし、部材の有効高さがそれ以上の場合のせん断ひび割れ時の平均せん断応力度 ( $\tau_{cr}$ ) の比を求めた。この結果を図-8に示す。図中に示した数字はそれぞれ、プレストレスにより導入される部材下縁の圧縮応力度を示す。なお、供試体の有効高さの変化に応じPC鋼材量比が異なっている。PC鋼材量が異なると、せん断ひび割れ時のせん断力がダウエル作用により大きくなることが予想され、純粋な寸法効果を検討することができない。PC鋼材量の違いによる影響を排除するため、文献[1]を参考に、有効高さが35cmの場合の鋼材量比に基準化できるようにせん断力の補正を行った。図中には寸法効果が $-(1/2)$ 、 $-(1/3)$ 、および $-(1/4)$ 乗の割合で表れると仮定した場合の曲線を示す。この結果から、寸法効果は $-(1/3)$ 乗~ $-(1/2)$ 乗と顕著に現れていることが分かる。逆に、プレストレスが大きくなるにつれて、寸法効果は顕著でなくなることがわかる。この理由を明らかにするため、次のような検討を行った。図-9にはプレストレスの導入による、せん断ひび割れ時の平均せん断応力の増加分 ( $\tau_{cr}-\tau_{cro}$ ) と部材の有効高さとの関係を示す。せん断ひび割れ発生時の平均せん断応力のプレストレスによる増加量は有効高さの増加に対し減少していない。このことからプレストレスの効果による平均せん断応力の増

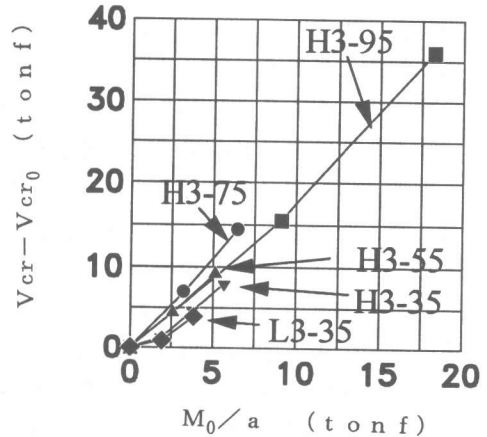


図-7 デコンプレッションモーメントとせん断力の増加の関係

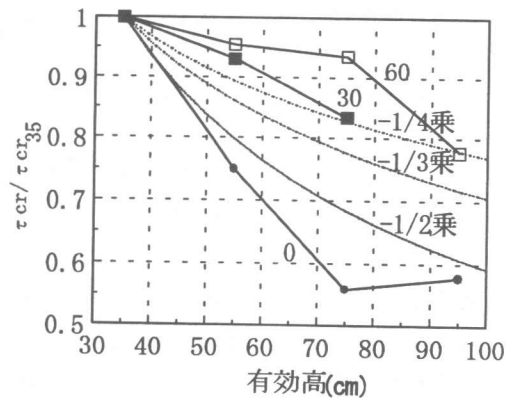


図-8 寸法効果の影響

加には、寸法効果が含まれていないことがわかる。このような理由から、プレストレスのある部材では見かけ寸法効果が顕著にならなかったものと考えられる。一方、文献[3]に示されたせん断載荷のうち、今回行った載荷試験とほぼ同じ鉄筋比の実験データをあわせて示したものが図-10である。図中の数字はコンクリートの圧縮強度を示していて、普通強度のコンクリートのみコンクリート強度の違いによる補正を施している。この図から、高強度コンクリートの方がやや寸法効果は顕著にあらわれる傾向があるといえる。

#### 4. まとめ

1) 高強度コンクリートPCはりのせん断ひび割れ強度は、導入されているプレストレス量が0であればコンクリートの圧縮強度約 $600\text{kgf/cm}^2$ を境とし、これ以上圧縮強度を増加させても増加しない。

2) 高強度コンクリートPCはりのせん断ひび割れ強度は、導入されているプレストレス量の増加により著しく増加する。コンクリートの高強度化により、導入されるプレストレス量は増やすことができるので、1)に示した性質は実際問題にはならない。プレストレスによるせん断ひび割れ荷重の増加量はデコンプレッションモーメントによって表現される。この増加量にはコンクリート強度あるいは部材の寸法効果は表れない。

3) 高強度コンクリートPCはりのせん断ひび割れ強度におよぼす寸法効果は、圧縮強度が $200\text{kgf/cm}^2$ 台のコンクリートと比べやや顕著に表れ、せん断ひび割れ強度は部材の有効高さの $(1/3)$ 乗 $\sim(1/2)$ 乗に比例する。

なお、本研究は(社)プレストレスコンクリート建設業協会と共同で行ったものであり、供試体の製作などで協力をいただいた。紙面を借りて謝意を表します。

#### [参考文献]

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）、平成3年
- 2) 佐藤勉、山住克己、渡邊忠朋：プレストレスコンクリートはりのせん断強度、鉄道総合研究所報告第2巻8号、pp.19-24、1988.8
- 3) 小林茂敏、森濱和正、高橋正志：鉄筋コンクリート部材のせん断実験データ集、土木研究所資料第2045号、1984年3月
- 4) Okamura, H., Higai, T., "Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement", Proc. of JSCE No.300, August, 1980.

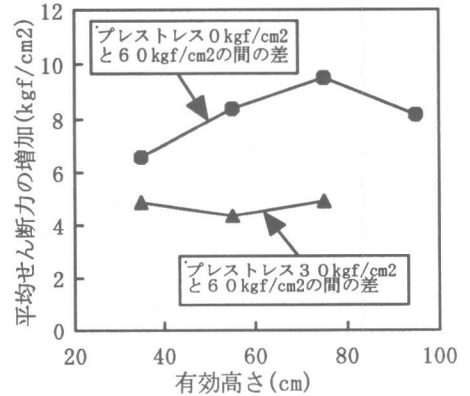


図-9 プレストレスによる平均せん断応力度の増加に及ぼす寸法効果の影響

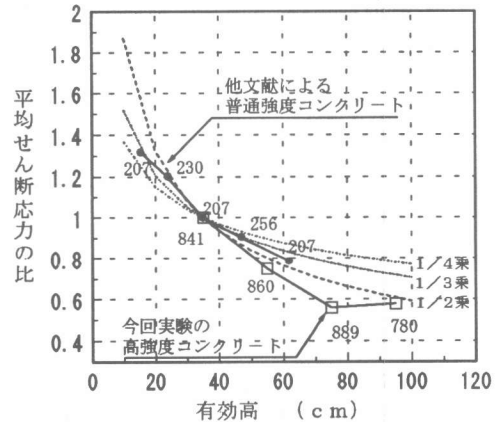


図-10 寸法効果に及ぼすコンクリート強度の影響