

論文 高性能軽量コンクリートを用いた大型 PC はりのせん断耐荷特性

田村 聖*1・濱田 譲*2・前堀 伸平*3・二羽 淳一郎*4

要旨: 軽量コンクリートを用いたはりのせん断耐力は、同じ圧縮強度を有する普通コンクリートはりのせん断耐力より低下することが知られている。そこで、高性能軽量コンクリートを用いた有効高さが 1m の大型プレストレストコンクリートはりのせん断耐荷試験を実施し、PC 部材のせん断耐力について各種の耐力式を用いて検討を行った。

その結果、PC はりに軽量コンクリートを使用した場合、せん断耐力を一律 70%に低減するという現行の土木学会コンクリート標準示方書の規定は、高性能軽量コンクリートを用いた大型 PC はりのせん断耐力を過小評価することが明らかとなった。

キーワード: 高性能軽量コンクリート, PC はり, せん断耐力,

1. はじめに

最近、従来の人工軽量骨材とは異なり、高強度で低吸水性を示す高性能軽量骨材が開発され¹⁾、幅広い分野での利用が期待されている。この高性能軽量コンクリートをプレストレストコンクリート(以下、PC と称す)上部工に適用することにより、桁重量の軽量化・スレンダー化が可能となる。また、PC 上部工の軽量化により、基礎および下部構造に対する負担も低減し、下部工の建設コストを削減することが可能となる。

しかし、軽量鉄筋コンクリートはりのせん断耐力は、同じ圧縮強度を有する普通コンクリートはりより低下することが知られている。現行の土木学会コンクリート標準示方書²⁾(以下、標準示方書と称す)では、せん断補強筋のない軽量鉄筋コンクリートはりのせん断耐力を、一律 70%に低減することが規定されている。また、その際のプレストレスの取り扱いについては明確にされていないので、せん断補強筋のな

い軽量 PC 部材のせん断耐力へのコンクリート分担分についても 70%を乗じることになる。

しかしながら、これらの規定を PC はりに適用することの妥当性は、必ずしも明らかにされていないのが現状である。

そこで、本研究では 45N/mm²および 60N/mm²の圧縮強度を有する高性能軽量コンクリートを用いた大型 PC はりのせん断耐荷試験を実施し、PC 部材のせん断耐力について各種の耐力式を用いて検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料とコンクリートの配合

使用した材料の物理特性を表-1 に示す。粗骨材には、密度の異なる 2 種類の低吸水性高性能人工軽量骨材を用いた。また、細骨材の一部にも高性能人工軽量骨材を用いた。これらの高性能人工軽量骨材は、絶乾状態で使用した。

コンクリートの示方配合を表-2 に示す。45N/mm² 以上の高強度を得るため、水セメン

*1 ドーピー建設工業(株) 技術センター 研究員 (正会員)

*2 ドーピー建設工業(株) 技術センター 主任研究員 工修 (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究員 工修 (正会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料の物理特性

使用材料	種類	密度 (g/cm ³)	主な物性
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.13
細骨材	S1	低吸水性高性能軽量骨材	0.97 ^{*1}
	S2	大井川産川砂	2.62 ^{*2}
粗骨材	G1	低吸水性高性能軽量骨材	0.87 ^{*1}
	G2	低吸水性高性能軽量骨材	1.23 ^{*1}
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
	AE	AE 剤	変性アルキルカルボン酸化合物

*1: 絶乾状態 *2: 表乾状態

表-2 コンクリートの示方配合

呼名	f_c^{*1} (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	air (%)	単位量(kg/m ³)						SP (C×%)	AE (C×%)
					W	C	S1	S2	G1	G2		
45LC	45	30.0	45	5.0	150	500	113	456	305	—	0.70	0.20
60LC	60		44		160	533	—	706	—	431	0.75	—

*1: 目標圧縮強度

表-3 実験要因

供試体 No.	f_c^{*1} (N/mm ²)	σ_{pe} (N/mm ²)	P_w (%)
45LC-3	45	3.0	1.379
45LC-5		5.0	
60LC-3	60	3.0	
60LC-5		5.0	

f_c^{*1} : コンクリートの圧縮強度目標値

σ_{pe} : 断面下縁の有効プレストレス

P_w : 引張鋼材比

ト比(W/C)は30%とした。

2.2 供試体の概要

実験要因と供試体の概要をそれぞれ表-3 および図-1 に示す。実験要因としては、コンクリートの圧縮強度と導入プレストレス量とし、合計4体の供試体を作製した。すべての供試体の形状寸法は、幅(b_w)350mm、はり高さ(h)1100mm、有効高さ1000mmとした。

高性能軽量コンクリートの圧縮強度の目標値は、45N/mm²および60N/mm²の2水準とした。また、断面下縁に導入するプレストレス量は、3.0N/mm²および5.0N/mm²とした。

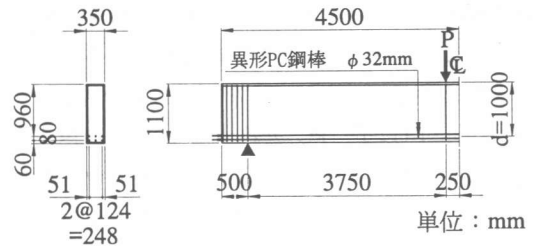


図-1 供試体の概要図

せん断破壊に先行して曲げ破壊が生じないように、すべての供試体において引張鋼材には直径32mmの異形PC鋼棒($A_p=804.2\text{mm}^2$, $f_{py}=930\text{N/mm}^2$)を用いた。引張鋼材比は1.379%である。プレストレスは、この異形PC鋼棒を用い、プレテンション方式により導入した。また、プレストレス導入に伴うPC鋼棒の滑り込みを制御するため、PC鋼棒はアンカープレートとナットを用いてプレストレス導入前にはり端部に定着した。載荷点直下およびはり端部には、スターラップを配置した。また、プレストレス導入に伴うはり上縁のひび割れを制御するため、異形鉄筋D16($A_p=198.6\text{mm}^2$, $f_{py}=507\text{N/mm}^2$)を3本配置した。

表-4 コンクリートの強度試験結果

供試体 No,	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	単位重量 (kN/m ³)
45LC-3	55.1	2.50	5.72	18.9	15.8
45LC-5	53.3	2.29	4.60	17.7	15.5
60LC-3	71.6	3.39	7.58	23.4	18.9
60LC-5	68.7	3.41	5.84	24.9	18.4

表-5 実験結果

供試体 No,	下縁導入プレストレス (N/mm ²)	曲げひび割れ荷重 (kN)	斜めひび割れ荷重 (kN)	終局荷重 (kN)	破壊形式
45LC-3	2.60	423.0	786.0	1010.0	せん断圧縮
45LC-5	5.44	450.0	970.0	1137.0	せん断圧縮
60LC-3	4.57	380.0	830.0	940.0	斜め引張
60LC-5	5.78	319.0	925.0	1200.0	せん断圧縮

載荷方法は、せん断スパン(a)3750mm、せん断スパン有効高さ比(a/d)3.75の対称2点載荷とした。載荷パターンは、曲げひび割れが発生するまで載荷を行い一度除荷した。その後、破壊に至るまで載荷を行った。

計測項目は、スパン中央断面でのPC鋼棒のひずみおよび変位である。

3. 実験結果および考察

3.1 載荷時のコンクリート強度

載荷試験時に実施したコンクリートの強度試験結果を表-4に示す。圧縮強度は、目標とした強度に達している。45LCの単位重量は約15.7 kN/m³となり、軽量化が図られていることが分かる。しかし、圧縮強度に対する引張強度の比率(f_t / f_c)は、1/20~1/23の範囲となり、従来の軽量コンクリートと同様に普通コンクリートより低下した。

3.2 載荷試験結果

載荷試験結果を表-5に示す。表中の曲げひび割れ発生荷重および斜めひび割れ発生荷重は、目視による荷重である。

すべての供試体において、斜めひび割れ発生より最大荷重に至るまでPC鋼棒は降伏に至らなかった。

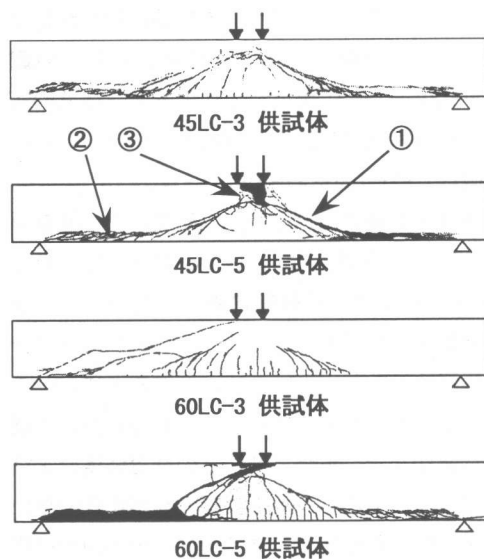


図-2 ひび割れ状況図

載荷試験終了後のひび割れ状況を図-2に示す。破壊形式は、斜め引張破壊に至った60LC-3供試体以外のすべての供試体において、せん断圧縮破壊であった。60LC-3供試体の最大荷重は、他の供試体と比較して幾分低い値となった。これは、せん断スパン中央部付近の断面中央位置に、コンクリート打設時において耐荷性能に影響を及ぼす弱点が発生したためではないかと思われる。したがって、この弱点が発生しなければ、他の供試体と同様にせん断圧縮破壊

表-6 斜めひび割れの傾斜角およびせん断耐力の比較

供試体 No,	V _{c,exp} (kN)	θ _{.exp} (度)	θ _{.cal} (度)	θ _{.exp} θ _{.cal}	M ₀ 法		M _{cr} 法		θ法	
					V _{c1,cal}	V _{c,exp} V _{c1,cal}	V _{c2,cal}	V _{c,exp} V _{c2,cal}	V _{c3,cal}	V _{c,exp} V _{c3,cal}
45LC-3	505.0	33	37	0.89	375.5	1.35	570.5	0.89	438.8	1.15
45LC-5	568.5	30	31	0.97	419.8	1.35	582.0	0.98	540.2	1.05
60LC-3	470.0	35	36	0.97	436.5	1.01	573.5	0.82	508.6	0.88
60LC-5	600.0	28	34	0.82	450.1	1.33	537.7	1.12	532.3	1.13

形式になったと予想される。

ひび割れ発生より破壊に至るまでの過程は次のようである。まず、ウェブ部分を中心に明瞭な斜めひび割れが発生する(図-2-①)。その後、斜めひび割れ上部のコンクリートと引張鋼材でタイドアーチ的な耐荷機構を形成し荷重は上昇する。その後、支点側の斜めひび割れ延長線上で、引張鋼材との付着が徐々に劣化する(図-2-②)。さらに荷重が上昇すると、最終的には載荷点付近での曲げ圧縮域コンクリートが圧縮破壊し破壊(図-2-③)に至った。

著者らが過去に行った、本研究と同じ軽量コンクリートを用いた小型 PC はり(有効高さ d=300mm)のせん断載荷試験³⁾においても同様な破壊過程が観察されている。軽量コンクリートは弾性係数が小さいため、部材断面における曲げ圧縮領域が大きくなり、斜めひび割れの進行が遅れる⁴⁾。また、鉄筋との付着強度および引張強度が小さく、斜めひび割れが比較的早い段階で発生するため、タイドアーチ的な耐荷機構に移行しやすくなったものと考えられる。

3.3 せん断耐力の検討

(1) プレストレスによる影響

供試体のせん断耐力を表-6 に示す。せん断耐力の計算値は、標準示方書のせん断補強筋のない RC はりのせん断耐力評価式の基礎となった式(1)⁹⁾を基本として算定した。

せん断耐力に及ぼすプレストレスの効果は、標準示方書と同様に、軸方向力の影響をデコンプレッションモーメント M₀ で評価する方法(以下、M₀ 法と称す)、曲げひび割れが発生するま

でのせん断力の増加量(M_{cr}/a)を V_c に加算する方法⁹⁾(以下、M_{cr} 法と称す)および導入プレストレス量とコンクリートの引張強度の関数 [√1+(σ_{cp}/f_t)] を V_c に乗ずる方法⁷⁾(以下、θ 法と称す)でそれぞれ算定した。ここで、M₀ は引張鋼材ひずみの実測値を用いて計算した有効プレストレスに基づいて算定した。また、M_{cr} は目視による曲げひび割れ発生荷重より算定した。

$$V_c = 0.20f_c^{1/3}p_w^{1/3}d^{1/4} (0.75+1.4/(a/d)) b_w d \quad (1)$$

$$V_{c1} = V_c \cdot [1+2M_0/M_u] \quad (2)$$

$$V_{c2} = V_c + M_{cr}/a \quad (3)$$

$$V_{c3} = V_c \cdot \cot \theta \quad (4)$$

$$\cot \theta = \sqrt{1+(\sigma_{cp}/f_t)} \quad (5)$$

ここで、

f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

p_w : 引張鋼材比(=100A_p/(b_w・d))

M₀ : デコンプレッションモーメント

M_u : 曲げ耐力モーメント

M_{cr} : 曲げひび割れ発生モーメント

θ : 斜めひび割れの傾斜角

σ_{cp} : 断面中央の平均プレストレス
応力度(N/mm²)

f_t : コンクリートの引張強度(N/mm²)

斜めひび割れ傾斜角の実験値と計算値を表-6 に示す。実験値は、各供試体に発生した斜めひび割れ傾斜角度の平均値である。計算値は、式(5)を用いて算定した。その際、コンクリートの引張強度は表-4 に示す強度試験結果を用

いた。実験値と計算値の比率は0.82~0.97の範囲となり、高性能軽量コンクリート PC はりの斜めひび割れ傾斜角を概ね評価できている。なお、 θ 法によりせん断耐力を算定する際には、表一六に示す斜めひび割れ傾斜角の計算値を用いて算定した。

せん断耐力の実験値と計算値の比率と有効プレストレス量の関係を図一三に示す。プレストレス量に関係なく、 M_{cr} 法より得られた実験値と計算値の比率はすべて1.0を上回っており、60LC-3 供試体以外の供試体においては、1.2以上の安全性を示している。

M_{cr} 法および θ 法より得られる比率は、1.0に近い値となった。また、 M_{cr} 法と θ 法の比率を比較すると、 θ 法の方が平均値は1.0に近い。

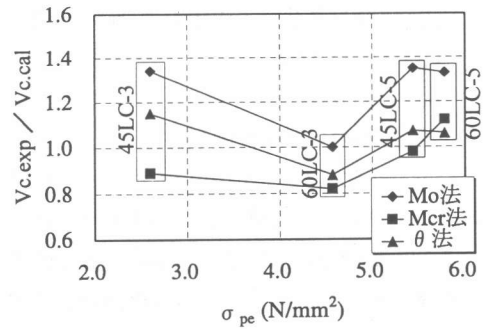
標準示方書のせん断耐力評価式は、本来斜めひび割れ発生荷重を評価するものである。しかし、現行の基準ではせん断圧縮破壊となる部材のせん断耐力評価式が規定されていないので、本検討では現行の標準示方書のせん断耐力評価式に基づいて検討を行った。その場合、 V_c の評価において標準示方書に規定されている70%の低減を行わなくても、実験値と計算値の比率は0.7を大きく上回る結果となった。

しかしながら、今回の結果では実験値と計算値の比率が1.0を下回る供試体もある。安全性の観点から、供試体寸法がさらに大きくなった場合等に対し、これらの方法の適用性を今後も検討していく必要がある。

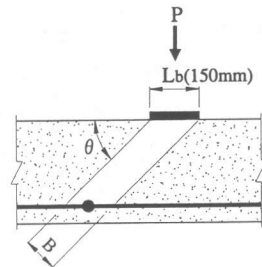
せん断耐力に及ぼす寸法効果による影響は、有効高さ $d=1.0m$ までなら軽量コンクリートについても式(1)を用いることにより概ね評価することが可能であると言える。

(2) ストラットータイモデルの適用

PC はりのせん断載荷試験を行った場合、せん断スパン有効高さ比(a/d)が3.0以上であってもせん断圧縮破壊が生じることが指摘されている⁷⁾。本研究においても、60LC-3 供試体以外の供試体でせん断圧縮破壊が生じた。



図一三 せん断耐力の実験値と計算値の比率と有効プレストレス量の関係



図一四 載荷点付近のストラットータイモデルの概要図

前述したとおり、現行の基準ではせん断圧縮破壊した PC はりのせん断耐力評価式は規定されていない。そこで、せん断圧縮破壊した供試体のせん断耐力をストラットータイモデルを用いて算定することを試みた。

ストラットータイモデルは本来、耐力を求める手法ではないが、今回の手法によれば比較的簡易に PC はりのせん断圧縮破壊耐力を求めることができる。

せん断圧縮破壊が生じる載荷点付近のストラットータイモデルの概要を図一四に示す。せん断耐力の算定にあたっては、fib Recommendation におけるストラットータイモデルを参考⁸⁾にして式(6)を用いて算定した。

$$V_c = \eta \cdot f'_c \cdot B \cdot b_w \cdot \sin \theta \quad (6)$$

$$B = L_b \cdot \sin \theta \quad (7)$$

ここで、

η : 軟化係数(=0.60)

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

b_w : ウェブ幅

L_b : 載荷板の幅

θ : 斜めひび割れの傾斜角

ひび割れが生じたコンクリートは、引張ひずみの増加に伴い、その直交方向の圧縮強度が低下することが知られている。本検討ではこの考え方に基づき、コンクリートの軟化係数を0.60として算定した。また、斜めひび割れの傾斜角は表-6に示す計算値を用いた。

ストラットタイモデルを用いて算定したせん断耐力を表-7に示す。実験値と計算値の比率は0.80~1.28の範囲となり概ねせん断耐力を評価できている。今後は、今回の結果を踏まえ、PCはりのせん断圧縮耐力評価法の精度をさらに向上させていきたいと考える。

4. まとめ

- (1) 高性能軽量コンクリートの圧縮強度に対する引張強度の比率(f_t / f'_c)は、1/20~1/23の範囲となり、従来の軽量コンクリートと同様に普通コンクリートより低下した。
- (2) 高性能軽量コンクリートを用いたせん断補強筋のない大型PC部材のせん断耐力 V_c は、標準示方書の軽量コンクリートの使用に伴う V_c の低減は必要ない。すなわち、軽量コンクリートを使用した場合に、 V_c を70%に低減するという標準示方書の規定は、今回のようなせん断圧縮型の破壊形式をとるPC部材においては、せん断耐力を過小評価する傾向にあった。
- (3) 今回導入したプレストレス量の範囲においては、導入プレストレス量の違いが与えるせん断耐力への影響は、本実験で考慮したいずれの方法でも、概ね評価することができた。
- (4) せん断耐力に及ぼす寸法効果による影響は、有効高さ $d=1.0m$ までなら軽量コンクリートについても式(1)を用いることにより概ね評価することが可能であると言える。

表-7 せん断耐力

供試体 No,	$V_{c.exp}$ (kN)	$V_{c.cal}$ (kN)	$\frac{V_{c.exp}}{V_{c.cal}}$
45LC-3	505.0	628.6	0.80
45LC-5	568.5	445.4	1.28
60LC-5	600.0	705.3	0.85

- (5) ストラットタイモデルを用いたせん断耐力の実験値と計算値の比率は、0.80~1.28の範囲となり概ねせん断耐力を評価することができた。この結果を踏まえ、PCはりのせん断圧縮耐力評価法をさらに検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 岡本享久ほか：超軽量コンクリート、コンクリート工学, vol.36, No.1, pp.48-52, 1998.1
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書・〔設計編〕, 1996
- 3) 濱田譲ほか：高性能軽量コンクリートを用いたPCはり部材のせん断耐力, 第10回プレ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, pp.739-744, 1999
- 4) 村山八洲雄ほか：高強度軽量コンクリートコンクリート及びこれを用いたRCはりの挙動について, 鹿島技術研究所年報, 第34号, pp.33-40, 1986
- 5) 二羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 6) 伊藤忠彦ほか：人工軽量骨材を用いたPCはりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18-2, pp.1133-1138, 1996
- 7) Mikata, Y., et al. : Effect of Prestress on Shear Capacity of Prestressed Concrete Members, Proceedings of fib Symposium, Prague, pp.331-336, Oct.1999
- 8) fib Recommendation : Practical design of structural concrete, pp.33-49, Sep.1999