

## 外ケーブル方式 PRC はりのせん断耐力

日本大学理工学部社会交通工学科 正会員 柳沼 善明

### 1. はじめに

外ケーブル方式プレストレストコンクリート (PC) 橋梁が注目されている。外ケーブル方式 PC 橋梁を設計するためには、曲げのみならずせん断に対しても十分な検討が必要である。鉄筋コンクリート (RC) はりならびに内ケーブル方式 PC はりのせん断に関する研究がさかんに行われているが、外ケーブル方式 PC はりのせん断に関する研究は数少なく、この分野の資料の蓄積が望まれている。

本研究では、せん断補強鉄筋を持つ外ケーブル方式 PRC はりを対象としたせん断破壊実験を行い、RC はりで提案されているせん断耐力算定式の適用性を検討することが主な目的である。さらに、ストラット・タイモデルに基づく破壊耐力式を提案し、実験結果と比較するものである。

### 2. 実験概要

実験に使用した供試体は、せん断補強鉄筋を持つはりで、形状と寸法を図-1に示す。供試体の断面寸法は幅 15cm、高さ 30cm、有効高さ 26cm である。鉄筋は SD345 で、上縁側に D10、下縁側に D19 をそれぞれ 2 本づつ使用し、PC 鋼材は SBPR1080/1230 の  $\phi 17\text{mm}$  を 2 本使用した。せん断補強鉄筋は、タイプ AW では D10 を 15cm 間隔に、タイプ BW と CW では D6 をそれぞれ 15cm、30cm 間隔に配置した (表-1 参照)。

プレストレス力は 100、200、300kN の 3 種類に変化させた。外ケーブルは直線に配置し、外ケーブルの支持状態は外ケーブルを定着間の途中で支持したはりと支持しないはりの 2 種類である。外ケーブルの支持状況は図-1、支持位置は表-1 のようである。

載荷方法は左右対称 2 点載荷で、静的にせん断破壊させた。大部分の供試体は、スパン 240cm、せん断スパン 75cm で、せん断スパン/高さ比 ( $a/h$ ) は 2.5 であった。コンクリートのクリープや乾燥収縮、PC 鋼材のリラクゼーションなどによる PC 鋼材の応力減少をできるだけ少なくするため、荷重の載荷はプレストレス力を導入した後ただちに行った。

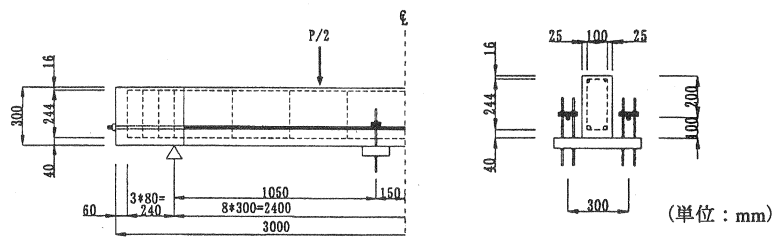


図-1 供試体と外ケーブルの支持状況

### 3. せん断試験の実験結果

#### 3.1 実験結果

外ケーブル方式 PRC はりの載荷試験結果を表-1に示す。供試体の外ケーブルは、最大荷重に至るまですべて降伏しなかった。すべての供試体は、斜めひび割れが発生した後に破壊した。破壊モードはせん断圧縮破壊と曲げ破壊であった。

表-1 実験結果一覧

タイプ	供試体名	fc' N/mm <sup>2</sup>	a/h	せん断補強鉄筋比 %	下縁導入 プレストレス N/mm <sup>2</sup>	支持点 の位置 cm	曲げひび割れ 発生荷重 kN	斜めひび割れ 発生荷重 kN	最大荷重 kN	破壊モード
AW	AW-1	40.5	2.0	0.634	11.27	15	180.9	266.1	340.8	曲げ
	AW-2		2.5		7.46	—	105.9	181.0	265.8	曲げ
	AW-3		2.5		11.38	—	145.7	216.8	291.1	曲げ
	AW-4		2.5		11.26	15	138.9	219.6	309.4	曲げ
BW	BW-1	40.5	2.5	0.282	11.25	15	150.6	222.8	302.7	せん断圧縮
	BW-2		2.5		7.37	—	115.8	183.8	265.5	曲げ
	BW-3		2.5		7.47	82.5	120.9	185.9	284.8	曲げ
	BW-4		2.5		7.47	15	131.2	195.9	284.7	せん断圧縮
CW	CW-1	38.0	2.5	0.141	12.07	15	140.3	200.9	288.6	せん断圧縮
	CW-2		2.5		7.82	15	120.5	169.0	271.2	せん断圧縮
	CW-3		2.5		4.09	15	74.6	121.0	241.4	せん断圧縮
	CW-4		3.0		7.84	15	93.0	141.1	221.0	曲げ

備考) 表中支持点の位置は、スパン中央からの距離である

### 3. 2 破壊性状

せん断破壊した各供試体の破壊後のひび割れ状況を図-2に示す。載荷荷重を増加させると、はじめに曲げひび割れが発生した。その後、曲げひび割れの先端から斜めひび割れが徐々に載荷点方向へ伸展していった。斜めひび割れが形成されても直ちに破壊に至らず、さらに大きな荷重に耐えることができた。これは、斜めひび割れ上部のコンクリートと引張鉄筋でストラットの耐荷機構を形成したためである。最終的に、上部コンクリートの圧壊によって破壊した。導入プレストレスが大きいと、斜めひび割れとより軸方向のなす角度が鋭角になる傾向が見られた。

導入時のプレストレスと最大せん断応力度との関係を図-3に示す。図-3によれば、導入時のプレストレスが増加すれば、最大せん断応力度も増加している。また、せん断補強鉄筋量の増加にともない、最大せん断応力度も増加している。

### 4. 実験結果と計算結果との比較

#### 4. 1 せん断耐力算定式の評価

各供試体のせん断耐力について、実験値と計算値とを比較する。せん断補強鉄筋を持つはりのせん断耐力  $V_y$  は、式(1)のようにせん断補強鉄筋を持たないはりのせん断耐力  $V_c$  と、せん断補強鉄筋の受け持つせん断耐力  $V_s$  との和として求めるものとする。

$$V_y = V_c + V_s \quad (1)$$

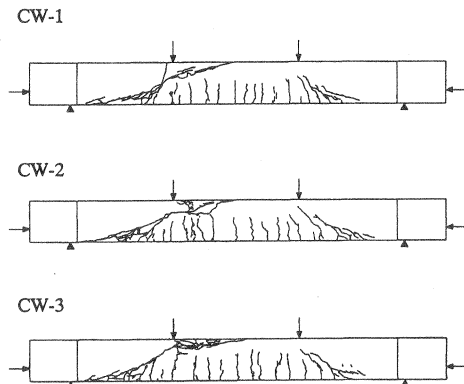


図-2 破壊後のひび割れ状況

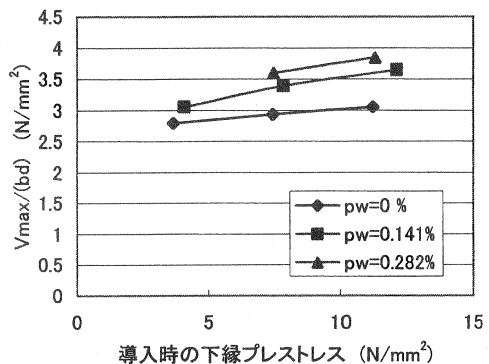


図-3 導入時の下縁プレストレスと最大せん断応力度との関係

せん断補強鉄筋を持たないはりのせん断耐力  $V_c$  の算定式は、土木学会の標準示方書<sup>1)</sup> の式 (2)、その示方書の基礎となった二羽ら<sup>2)</sup> の式 (3)、岡村・楢貝<sup>3)</sup> の式 (4)、さらに曲げひび割れが発生するまでのせん断力の増加量 ( $M_{cr}/a$ ) をせん断力に加算する<sup>4)</sup> 式 (5) とし、これらの式による計算値と実験値とを比較する。

$$V_c = (1/d)^{1/4} \cdot (100p_w)^{1/3} \cdot (1+M_o/M_d) \cdot 0.20(fc')^{1/3} \cdot b \cdot d \quad (2)$$

ここに、 $V_c$  はコンクリートの負担するせん断力、 $d$  は有効高さ、 $b$  ははり幅、 $p_w$  は軸方向鉄筋比、 $fc'$  はコンクリートの圧縮強度である。 $M_o$  はデコンプレッションモーメント、 $M_d$  は設計曲げモーメントで  $M_u = 2M_d$  と仮定<sup>3)</sup> して  $(1+M_o/M_d) = (1+2M_o/M_u)$  となる。 $M_u$  は曲げ破壊モーメントである。

$$V_c = 0.20(fc')^{1/3} \cdot p_w^{1/3} \cdot (1/d)^{1/4} \cdot (1+2M_o/M_u) \cdot [0.75+1.4/(a/d)] \cdot b \cdot d \quad (3)$$

ただし、  $M_o$  : デコプレッションモーメント  
 $M_u$  : 断面の曲げ破壊モーメント

$$V_c = 0.94(fc')^{1/3} \cdot (1+\beta_p+\beta_d) \cdot [0.75+1.4/(a/d)] \cdot b \cdot d \quad (4)$$

ただし、  $fc'$  :  $\text{kgf/cm}^2$   
 $\beta_p = (p)^{1/2} - 1 \leq 0.732$ ,  $p = 100A_s/(bd)$   
 $\beta_d = (1/d)^{1/4} - 1$ , ( $d$  : m)

$$V_c = 0.20(fc')^{1/3} \cdot p_w^{1/3} \cdot (1/d)^{1/4} \cdot [0.75+1.4/(a/d)] \cdot b \cdot d + M_{cr}/a \quad (5)$$

ただし、  $M_{cr}$  : ひび割れ発生モーメント

せん断補強鉄筋の受け持つせん断力は、式 (6) で求める。

$$V_s = A_w \cdot f_{wy} \cdot (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s \cdot z \quad (6)$$

ただし、 $A_w$  と  $f_{wy}$  とはせん断補強鉄筋のそれぞれ断面積と降伏強度、 $z = d/1.15$  である。 $\alpha_s$  はせん断補強鉄筋が部材軸となす角度、 $s_s$  はせん断補強鉄筋の配置間隔である。

本研究で実施するせん断耐力の計算において安全係数はすべて1.0である。

せん断破壊した供試体について、せん断耐力の実験値と計算値との比較を表-2、3に示す。表-2、3によれば、せん断補強鉄筋の有無にかかわらず、 $M_{cr}$  に基づく式 (5) による計算値が実験値とよく一致している。なお、表-2のせん断補強鉄筋を持たない外ケーブル方式 PRC はりの実験結果は、過去に実施したもの<sup>5, 6)</sup> である。

表-2 せん断補強鉄筋のない場合

供試体名	test Vmax (kN)	test/calc			
		JSCE	二羽ら	岡村・楢貝	Mcrを考慮
A98-1	110.45	1.999	1.498	1.574	1.352
A98-2	115.55	1.820	1.366	1.436	1.219
A98-3	120.45	1.722	1.292	1.359	1.113
SH91-2	44.71	1.199	0.985	1.074	0.854
SH91-3	64.50	1.307	1.074	1.172	1.051
SH91-4	75.73	1.312	1.078	1.176	1.076
SH91-5	80.04	1.235	1.015	1.107	1.008
test/calcの平均値		1.513	1.187	1.271	1.096

表-3 せん断補強鉄筋のある場合

供試体名	test Vmax (kN)	test/calc			
		JSCE	二羽ら	岡村・楢貝	Mcrを考慮
BW-1	151.35	1.430	1.171	1.213	1.046
BW-4	142.35	1.428	1.177	1.218	1.082
CW-1	144.30	1.605	1.271	1.324	1.120
CW-2	135.60	1.642	1.306	1.358	1.186
CW-3	120.70	1.641	1.315	1.367	1.205
test/calcの平均値		1.549	1.296	1.248	1.128



表一4 提案式による計算値と実験値との比較  
(せん断破壊した供試体の場合)

供試体名	test Vmax (kN)	提案式 test/calc	計算された 破壊モード	参考値 (kN)	
				式(8)の値	式(9)の値
BW-1	151.35	1.072	曲げ	156.41	141.19
BW-4	142.35	1.157	曲げ	143.26	123.02
CW-1	144.30	1.069	せん断圧縮	135.04	138.39
CW-2	135.60	1.126	曲げ	120.41	120.39
CW-3	120.70	1.173	曲げ	106.32	102.91
test/calcの平均値		1.119	—	—	—

表一5 提案式による計算値と実験値との比較  
(曲げ破壊した供試体の場合)

供試体名	test Vmax (kN)	提案式 test/calc	計算された 破壊モード
AW-2	132.90	1.087	曲げ
AW-3	145.55	1.027	曲げ
AW-4	154.70	1.093	曲げ
BW-2	132.75	1.082	曲げ
BW-3	142.40	1.158	曲げ
CW-4	110.50	1.098	曲げ
test/calcの平均値		1.073	—

によるものとする。

修正したストラット・タイモデルによる破壊耐力の算定式による計算値と実験値との比較を表一4、5に示す。表一4、5中の提案式のcalc値は式(8)、(9)のいずれか小さいほうの値であり、式(8)の場合ではせん断破壊モード、式(9)の場合では曲げ破壊モードとなる。式(7)の値はすべて式(8)、(9)よりも大きい値のため、ここでは省略した。なお、表一5では参考値の欄を省略した。せん断補強鉄筋を持つ供試体について、表一4、5からtest/calcの平均値は、せん断破壊の場合では1.119、曲げ破壊の場合では1.073となり、計算値は実験値と概ね一致している。表一4において、せん断破壊した供試体CW-1の破壊モードはせん断補強鉄筋の降伏によるせん断破壊モードとして計算され、他の供試体は曲げ破壊モードとして計算されている。この曲げ破壊モードとして計算されたCW-2、CW-3は、せん断破壊モードである式(8)による値がそれぞれ120.41kNと106.32kN、曲げ破壊モードである式(9)による値がそれぞれ120.39kNと102.91kNであり、ごくわずかに式(9)による値が大きい曲げ破壊モードとなっている。また、曲げ破壊した供試体ではすべて引張鉄筋の降伏による曲げ破壊として計算されている(表一5)。したがって、本提案式は、せん断破壊と曲げ破壊との両者について破壊耐力をよく計算できるものと思われる。

本提案式は、デビエータを設け外ケーブルに偏向角度があるはりについても拡張して破壊耐力を計算することができる。過去に実施した偏向角度が約6.4°でせん断補強鉄筋を持たないPRCはりのタイプB<sup>5)</sup>を計算した結果、せん断耐力のtest/calcは、B98-1で1.084、B98-2で0.900となり、計算値と実験値とは概ね一致している。また、破壊モードはせん断破壊として計算され、実験で得られた破壊モードと一致している。

#### 4.3 設計への提言

外ケーブルの緊張量の増加量が、破壊耐力の計算結果に及ぼす影響を表一4、5の供試体について求め、そのtest/calcの平均値を表一6に示す。外ケーブルの緊張量の増加量は、Naamanら<sup>8)</sup>による場合、曲げ破壊耐力の算定に200N/mm<sup>2</sup>まで認めた場合<sup>9)</sup>、さらに増加量を100N/mm<sup>2</sup>までと無視した場合について、それぞれ破壊耐力の計算値と実験値を比較する。表一6によれば、緊張力の増加を100N/mm<sup>2</sup>まで認めた場合

表一6 破壊耐力の計算値と実験値との比較

破壊モード	破壊耐力のtest/calcの平均値			
	Naamanら	0N/mm <sup>2</sup>	100N/mm <sup>2</sup>	200N/mm <sup>2</sup>
せん断破壊したPRCはり	1.119	1.240	1.142	1.081
曲げ破壊したPRCはり	1.073	1.165	1.074	0.996

の破壊耐力は、Naamanらにより緊張量の増加量を求めて計算した破壊耐力の test/calc と、せん断破壊ならびに曲げ破壊についてあまり差がないことがわかる。さらに、外ケーブルの緊張量の増加量を  $200\text{N/mm}^2$  とした場合は、せん断破壊と曲げ破壊ともに計算値は実験値とよく一致しているが、曲げ破壊したはりについては、わずかに危険側に計算されている。したがって、安全側に計算される外ケーブルの緊張量を  $100\text{N/mm}^2$  として簡易的に破壊耐力を計算してもよいものと思われる。

ここで行った検討は、限られた実験結果と計算結果との比較検討である。せん断耐力を算定するために、設計で用いる外ケーブルの緊張量の増加量については、さらに多くの実験結果との比較検討が必要であるものと思われる。

#### 4. 結 論

本研究の実験条件の範囲内で得られた結論は次の通りである。

- ① せん断補強鉄筋を持たない外ケーブル方式 PRC はりのせん断耐力は、曲げひび割れが発生するまでのせん断力の増加量 ( $M_{cr}/a$ ) をせん断力に加算する方法により、精度よく計算される。
- ② せん断補強鉄筋を持つ外ケーブル方式 PRC はりのせん断耐力は、修正したストラット・タイモデルで精度よく計算される。
- ③ 修正したストラット・タイモデルによる破壊耐力の計算値は、せん断破壊ならびに曲げ破壊について精度よく計算される。
- ④ 外ケーブルの緊張量の増加量を  $100\text{N/mm}^2$  とした破壊耐力の簡易計算値は安全側に計算され、概ね実験値と一致している。

最後に、本研究を実施するに当たり、資料の整理に協力してくれた坂本豊君に感謝する。この研究は、日本大学研究助成金により実施されたものである。

#### 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8年版，pp.60～65，1996
- 2) 二羽淳一郎・山田一字・横沢和夫・岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はり部材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
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書(昭和61年制定)改訂資料，コンクリート・ライブラリー第61号，pp.163-170，1986
- 4) 伊藤忠彦・鈴木宣政・山口隆裕・池田尚治：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
- 5) 柳沼善明・高島修：外ケーブルを用いた PRC はりのせん断耐力，PC の発展に関するシンポジウム論文集，Vol.19，pp.559-562，
- 6) 柳沼善明・与儀友一郎：外ケーブルを用いた PRC はりのせん断破壊実験，PC の発展に関するシンポジウム論文集，Vol.3，pp.29-32，1992
- 7) K.H.Tan and A.E.Naaman：Strut-and-Tie Model for Externally Prestressed Concrete Beams，ACI Structural Journal，pp.683-691，Nov./Dec.1993
- 8) A.E.Naaman and F.M.Alkhairi：Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons:Part 2 -Proposed Methodology，ACI Structural Journal，pp.683-692，Nov.-Dec.，1991
- 9) プレストレストコンクリート技術協会：外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工規準(案)，1996