

外ケーブル方式 PRC はりにおけるせん断耐力算定式の適用性

日本大学理工学部社会交通工学科 正会員 工博 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 はりについてのせん断に関する研究は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。

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 (タイプ DW) とせん断補強鉄筋のないはり (タイプ DN) の 2 種類である (表-1 参照)。せん断補強鉄筋にはスターラップを用い、垂直に配置した。タイプ DW の代表的な形状と寸法を図-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 D25 をそれぞれ 2 本ずつ使用し、PC 鋼材は SBPR1080/1230 の $\phi 17\text{mm}$ を 2 本使用した。スターラップは、D6 を 20cm と 30cm 間隔に配置した。導入したプレストレス力は 200, 300kN の 2 種類である。外ケーブルは直線に配置し、図-1 のように定着間の途中で支持した。

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。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。

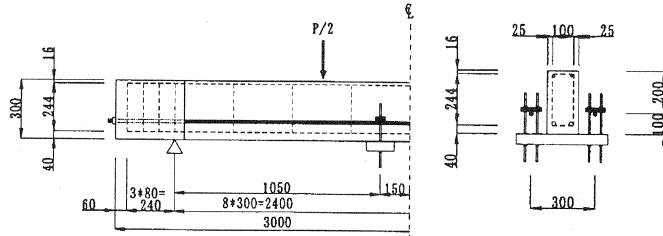


図-1 供試体と外ケーブルの支持状況

表-1 実験結果一覧

タイプ	供試体名	f_c' N/mm ²	a/h	せん断補強鉄筋比 %	下縁導入プレストレス N/mm ²	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
DW	DW-1	35.6	2.5	0.140	3.50	15	56.9	121.1	245.8	せん断圧縮
	DW-2			0.140	6.36	15	100.9	170.5	279.0	せん断圧縮
	DW-3			0.209	6.68	15	110.9	180.8	294.7	せん断圧縮
DN	DN-1	35.6	2.5	0	6.55	15	124.9	175.9	259.4	せん断圧縮

備考) 表中、支持点の位置はスパン中央からの距離である。 f_c' はコンクリートの圧縮強度, a はせん断スパン, h ははりの高さである。

3. 実験結果

外ケーブル方式 PRC はりの実験結果を表-1 に示す。すべての供試体は、斜めひび割れが発生した後にせん断圧縮破壊した。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。

4. 実験結果と計算結果との比較

4. 1 セン断耐力算定式

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力 V_s との和として求める。

$$V_y = V_c + V_s \tag{1}$$

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¹⁾の基礎となった二羽ら²⁾の式 (2)、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³⁾式 (3) によるものとし、計算値と実験値とを比較検討する。ここでは、二羽らの式 (2) による方法を β_n の方法、曲げひび割れモーメントを考慮する式 (3) による方法を M_{cr} の方法と呼ぶことにする。ここに、 β_n は $(1+2M_0/M_u)$ で求める。

$$V_c = 0.2(fc')^{1/3} \cdot \beta_p \cdot \beta_d \cdot [0.75+1.4/(a/d)] \cdot b \cdot d \cdot \beta_n \tag{2}$$

$$V_c = 0.2(fc')^{1/3} \cdot \beta_p \cdot \beta_d \cdot [0.75+1.4/(a/d)] \cdot b \cdot d + M_{cr}/a \tag{3}$$

ここに、 M_0 はデコンプレッションモーメント、 M_u は断面の曲げ破壊モーメント、 M_{cr} はひび割れ発生モーメント、 a はせん断スパン、 b ははり幅、 d は有効高さ、 p は軸方向鉄筋比、 fc' はコンクリートの圧縮強度である。 $\beta_p=(100p)^{1/3}$ 、 $\beta_d=(1/d)^{1/4}$ で d の単位は m である。

せん断補強鉄筋の受け持つせん断力 V_s は、式 (4) で求める。

$$V_s = A_w \cdot f_{wy} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \cdot z \tag{4}$$

ここに、 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。 α はせん断補強鉄筋が部材軸となす角度、 s はせん断補強鉄筋の配置間隔である。なお、本研究では、せん断耐力の計算において安全係数はすべて 1.0 とした。

4. 2 曲げ耐力

二羽らの β_n の方法において、 β_n の評価は重要である。 β_n を求めるには、曲げ耐力 M_u を計算する必要がある。外ケーブル方式 PRC はりの M_u を求めるには、外ケーブルの偏心距離の変化を考慮した計算をしなければならない。その計算は煩雑である。本研究での大部分のはりは外ケーブルをスパンの中央付近で支持してある (図-1 参照) ため、 M_u の計算には外ケーブルの偏心距離が変化しないものとした簡略な方法とする。外ケーブルの緊張量の増加応力度を $0N/mm^2$ と $200N/mm^2$ とした場合^{4, 5)}、付着ありとした曲げ耐力の 70% とした場合、さらに比較のため Naaman による場合⁶⁾ とし、文献 7) の曲げ破壊したはり 7 体について M_u を検討する。 M_u の test/calc の平均値と変動係数 CV は、表-2 のようになる。表-2 から、外ケーブルの増分応力度を $200N/mm^2$ とした場合、計算値が実験値とよく一致している。したがって、せん断力の計算に用いる β_n は、外ケーブルの増分応力度を $200N/mm^2$ として求めるものとする。

表-2 曲げ耐力 M_u の test/calc の平均値

方法	外ケーブル緊張量の増加応力度		付着ありの 70%	Naaman
	0 N/mm^2	200 N/mm^2		
test/calcの平均値	1.184	1.066	1.428	1.058
変動係数CV (%)	5.6	4.8	4.7	4.6

4. 3 斜めひび割れ発生時のせん断力 V_{dia}

せん断補強鉄筋のある外ケーブル方式 PRC はりにおいて、斜めひび割れ発生時のせん断力 V_{dia} について実験値と計算値とを比較する。ここでの V_{dia} は、斜めひび割れ発生時においてせん断補強鉄筋の受け持つせん断力を差し引き、コンクリートのみが受け持つせん断力とした。なお、計算には文献7) のほりを加えて、供試体の数は15体である。表-3に V_{dia} の test/calc の平均値と変動係数 CV を示す。表-3から、 β_n の方法による test/calc の平均値は1.093 (CV: 12.6%) となり、計算値は実験値とよく一致し、わずかであるが安全側に計算されている。一方、Mcr の方法では、test/calc の平均値は0.904 (CV: 9.9%) となり、計算値が実験値よりも大きくなり、危険側に計算されている。また、Mcr の方法による計算値は、 β_n の方法による計算値の約1.21倍大きく計算されている。

次に、 V_{dia} の test/calc に及ぼす下縁導入プレストレス σ_c の影響を図-2に示す。 β_n の方法と Mcr の方法はともに、 σ_c が増加するにつれて、test/calc が増加する傾向にある。

表-3 斜めひび割れ発生時のせん断力 V_{dia} の test/calc の平均値

方法	β_n の方法	Mcrの方法
test/calcの平均値	1.093	0.904
変動係数CV (%)	12.6	9.9

表-4 最大せん断力 V_{max} の test/calc の平均値

方法	β_n の方法	Mcrの方法
test/calcの平均値	1.34	1.164
変動係数CV (%)	4.5	4.9

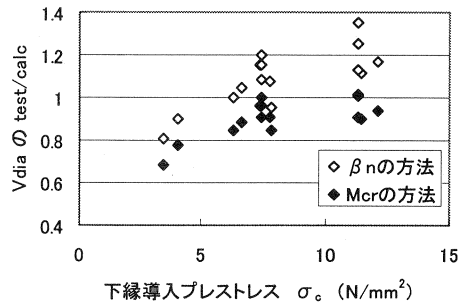


図-2 斜めひび割れ発生時のせん断力 V_{dia} の実験値と計算値との比較

4. 4 最大せん断力 V_{max}

最大せん断力 V_{max} は、式(1)のように V_c にせん断補強鉄筋の受け持つせん断力 V_s を加えて求める。 V_s について、式(4)による計算値と実験値とを比較する。 V_s の実験値は、載荷点から斜め45度の線上で交差するスターラップのひずみから求めた。 V_s の test/calc の平均値は0.847 (CV: 24.1%) となり、 V_s の計算値の多くは実験値よりも大きく計算されている(図-3)。

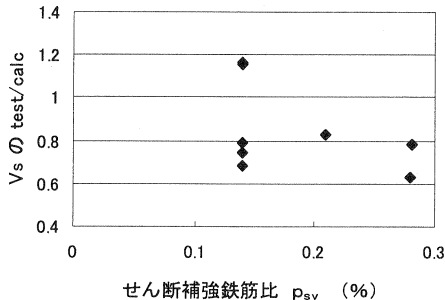


図-3 せん断補強鉄筋の受け持つ V_s の実験値と計算値の比較

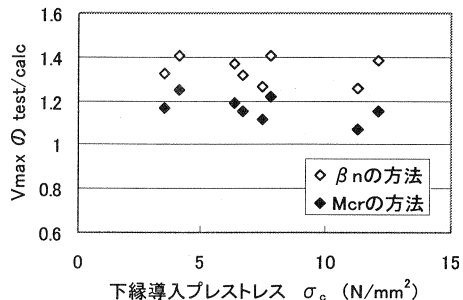


図-4 最大せん断力 V_{max} の実験値と計算値との比較

次に、せん断圧縮破壊した外ケーブル方式PRCはりの最大せん断力 V_{max} について、実験値と計算値とを比較する。なお、計算には文献7)のせん断圧縮破壊したはりを加えて、供試体の数は8体である。表-4に V_{max} の test/calc の平均値と変動係数 CV を示す。表-4によれば、 β_n の方法と M_{cr} の方法について、 V_{max} の計算値は安全側に計算され、 M_{cr} の方法よりも β_n の方法がより安全側に計算されている。また、 M_{cr} の方法による計算値は、 β_n の方法による計算値の約 1.15 倍大きく計算されている。次に、 V_{max} の test/calc に及ぼす下縁導入プレストレス σ_c の影響について、図-4に示す。 β_n の方法と M_{cr} の方法はともに、 σ_c が増加するにつれて、test/calc が減少する傾向にある。

4. 5 土木学会の算定式による評価

土木学会の算定式¹⁾による計算値と実験値とを比較し図-5に、表-5に V_{dia} と V_{max} の test/calc の平均値と変動係数 CV を示す。 V_{dia} の test/calc の平均値は 1.377 (CV : 14.9%) であり、 V_{max} の test/calc の平均値は 1.586 (CV : 5.6%) である。 V_{dia} と V_{max} の計算値はともに安全側に計算されている。 σ_c が増加するにつれて、 V_{dia} の test/calc は増加する傾向にあるが、 V_{max} の test/calc はわずかであるが減少する傾向にある (図-5)。

5. 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) 斜めひび割れ発生時のせん断力 V_{dia} の計算値において、 β_n の方法はよく実験値と一致し、わずかであるが安全側に計算される。一方、 M_{cr} の方法は、計算値が実験値よりも大きく計算され、危険側に計算される。
- 2) 最大せん断力 V_{max} の計算値において、 β_n の方法ならびに M_{cr} の方法はともに安全側に計算される。
- 3) 土木学会の算定式による計算値は、 V_{dia} と V_{max} とともに安全側に計算される。

最後に、本実験を実施するに当たり協力してくれた坂本豊君ならびに構造工学第2研究室の関係者に感謝する。なお、この実験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]，2002年制定，pp.67-72，2002
- 2) 二羽淳一郎・山田一宇・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) 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
- 4) (財) 高速道路技術センター：外ケーブルを用いた PC 橋梁の設計マニュアル，1996.8
- 5) 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基準(案)，1996.3
- 6) Naaman A.E. and Alkhairi F.M. : Stress at Ultimate in Unbonded Post-Tensioning Tendons:Part 2 -Proposed Methodology, ACI Structural Journal, pp.683-692, Nov.-Dec., 1991
- 7) 柳沼善明：外ケーブル方式 PRC はりのせん断耐力，プレストレストコンクリート技術協会，第11回シンポジウム論文集，pp.815-820，2001.11

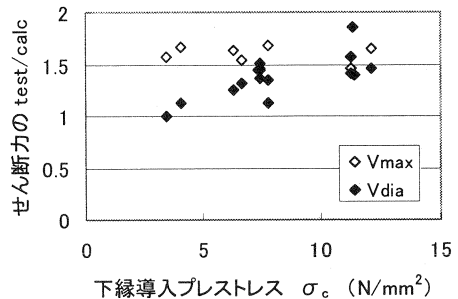


図-5 土木学会算定式による実験値と計算値との比較

表-5 土木学会算定式による V_{dia} と V_{max} の test/calc の平均値

せん断力	V_{dia}	V_{max}
test/calcの平均値	1.377	1.586
変動係数CV (%)	14.9	5.6