

## 外ケーブル方式 T 形 PRC はりのせん断挙動

日本大学大学院 正会員 ○井口 淳  
 日本大学 正会員 工博 柳沼 善明

### 1. はじめに

外ケーブル方式は、新設橋梁にさかんに採用されている。さらに、補修・補強といった点でも注目され、その使用が増えている。しかし、外ケーブル方式構造物のせん断破壊については十分にその挙動を把握できず、未だ確立された評価方法はなく、設計基準等の改定でも議論の多いところである。そこで本研究では、外ケーブル方式 T 形 PRC はりのせん断挙動を明確にすることを主な目的とした。本研究では、プレストレス力およびスターラップの配置間隔を変化させた外ケーブル方式 T 形 PRC はりの載荷実験を行い、非線形有限要素解析を行い、実験結果と解析結果を比較した。さらに、土木学会せん断耐力式の計算結果と実験結果を比較した。

### 2. 実験概要と解析概要

本実験に用いた供試体の寸法および形状を図-1に示し、供試体の種類を表-1に示した。供試体の鉄筋は、上部鉄筋にφ6を2本使用し、下部鉄筋にD29を1本使用した。PC鋼材(SBPR1080/1230)にはφ9.2mmを2本使用した。スターラップにはφ6を用い、間隔を150mmと200mmとした。コンクリートの材料特性を表-2に、鋼材の材料特性を表-3に示した。

本研究では、材料の非線形を考慮した2次元非線形有限要素法プログラム「ATENA」を用いて解析を行った。コンクリートの引張と圧縮に関する構成則<sup>1)</sup>を次に示す。引張の構成則は、引張強度( $f_t^{ef}$ )に達するまでを線形弾性材料とし、引張強度以降(図-2)はHordijkの指数関数モデルにより軟化を考慮し、破壊エネルギー $G_f$ の値は土木学会標準示方書<sup>2)</sup>を用いた。ここに、 $w$ はひび割れ開口変位、 $w_c$ は応力が完全に開放された時のひび割れ開口変位である。圧縮の構成則は、仮想圧縮平面モデル(図-3)を用い、応力が完全に解放された時点のひずみ $\epsilon_d$ を $\epsilon_d = \epsilon_c + w_d/L_d'$ で定義した。ここに $\epsilon_c$ は応力ピーク( $f_c^{ef}$ )時のひずみ、 $w_d$ は塑性変位で0.0005mとし、 $L_d'$ は損傷幅である。また、コンクリートのひび割れモデルには分散ひび割れモデルで固定ひび割れモデルを用いた。鉄筋は弾塑性モデルとした。

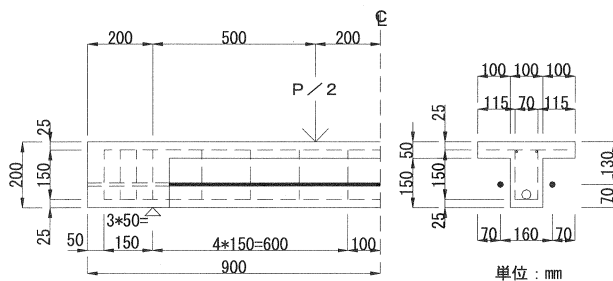


図-1 供試体の形状(スターラップ間隔 150mm の場合)

表-2 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
41.12	30.50	0.20

表-1 供試体の種類

供試体	プレストレス力 (kN)	スターラップ間隔 (mm)
TN15-0	0	150
TN15-50	50	150
TN15-100	100	150
TN20-100	100	200

表-3 鋼材の材料特性

鋼材の種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
鉄筋	φ6	331.9	210.9
	D29	390.3	176.5
PC鋼材	φ9.2	1271	201.0

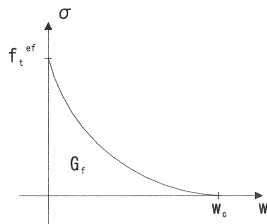


図-2 引張の構成則

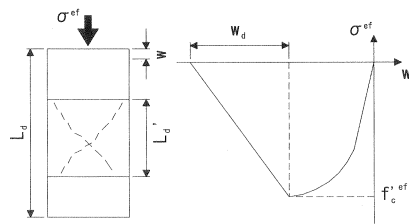


図-3 仮想圧縮平面モデル

3. 実験結果

供試体の各種荷重と破壊形式を表-4に示した。破壊形式はすべての供試体においてせん断圧縮破壊であった。スターラップ間隔が150mmで一定の場合について、プレストレス力が増加するにしたがい、初期ひび割れ発生荷重、斜めひび割れ発生荷重、最大荷重が増加する傾向にあった。プレストレス力が増加するにつれて、スターラップ間隔が各種荷重に及ぼす影響は、スターラップの間隔を大きくすると、初期ひび割れ発生荷重と斜めひび割れ発生荷重にはあまり変化が見られなかったが、最大荷重は減少した。

表-4 供試体の各種強度と破壊形式

供試体	初期ひび割れ発生荷重 P <sub>cr</sub> (kN)	斜めひび割れ発生荷重 P <sub>dia</sub> (kN)	最大荷重 P <sub>max</sub> (kN)	破壊形式
TN15-0	35.62	61.42	130.4	せん断圧縮
TN15-50	42.27	69.70	146.3	せん断圧縮
TN15-100	60.21	84.80	208.4	せん断圧縮
TN20-100	64.44	86.61	200.0	せん断圧縮

4. 実験結果と FEM 解析結果の比較

(1) ひび割れ状況

破壊時のひび割れ状況を図-4, 5に示した。図-4より TN15-0 は、実験結果と FEM 解析結果ともに荷重を増加していくと、スパン中央付近の下縁部に曲げひび割れが発生し、その後斜めひび割れが載荷点付近に進展していった。図-5より TN15-100 の FEM 解析結果については、軸鉄筋に沿ったひび割れが進展した。なお、TN15-50 と TN20-100 のひび割れ状況は TN15-100 と同様なひび割れ状況であり、FEM 解析結果はおおむね実験結果と一致した。FEM 解析結果はすべての供試体でせん断破壊であった。

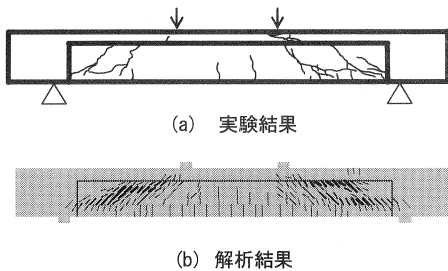


図-4 破壊時のひび割れ状況 (TN15-0)

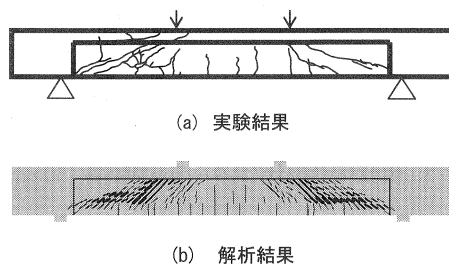


図-5 破壊時のひび割れ状況 (TN15-100)

(2) せん断力とたわみの関係

せん断力とスパン中央のたわみの関係を図-6に示した。図-6によれば、プレストレス力がない TN15-0 の場合、実験結果と FEM 解析結果は破壊に至るまでおおむね一致した。プレストレス力のある

TN15-100 の場合、実験結果と解析結果はほぼ一致したが、最大荷重の解析結果は実験結果よりも約 30% 小さかった。これは、FEM 解析に用いた材料のモデル化が一因と考えられる。したがって、材料のモデル化を適切にした解析が必要であると思われる。なお、プレストレスの小さな TN15-50 の場合には、解析結果とおおむね一致した。プレストレス力の大きい TN20-100 の場合には、解析結果と実験結果の傾向は TN15-100 と同様な傾向であった。

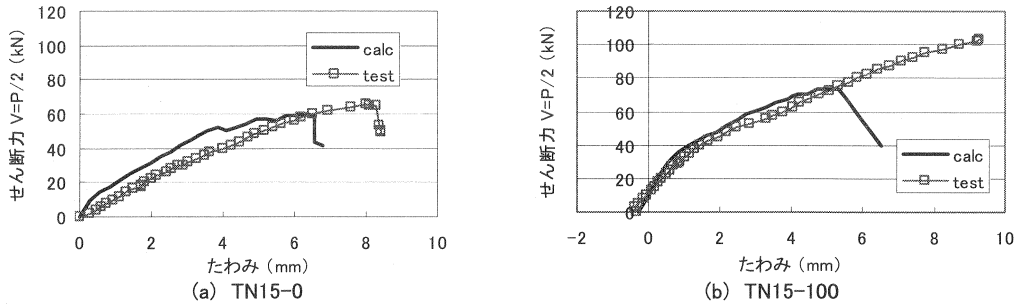


図-6 セン断力とスパン中央のたわみの関係

次に、せん断耐力とプレストレス力の関係を図-7に示した。実験結果では、プレストレス力の増加にともない、せん断耐力は増加した。FEM 解析結果は、プレストレス力が 0kN、50kN の場合は実験結果とよく一致したが、プレストレス力が 100kN の場合は解析結果が実験結果より小さい値となった。

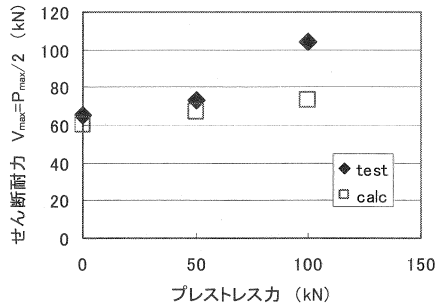


図-7 セン断耐力とプレストレス力の関係

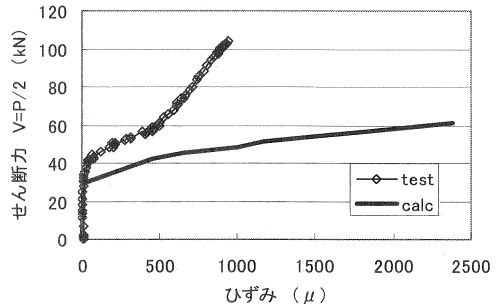


図-8 セン断力とスターラップひずみの関係 (TN15-100)

(3) スターラップの挙動

せん断力とスターラップひずみの関係を図-8に示した。スターラップひずみは、載荷点に一番近い位置のスターラップのひずみである。図-8より、スターラップひずみの実験結果は、斜めひび割れ発生以前ではひずみの増加はほとんどなく、斜めひび割れの発生にともない(せん断力  $V$  が約 40kN) ひずみが増加した。FEM 解析結果においても、斜めひび割れの発生にともないスターラップのひずみが増加した。他の供試体も同様なせん断力とスターラップひずみの関係となった。

5. 実験結果と土木学会耐力式による計算結果の比較

土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>で示されている設計せん断耐力式を式(1)に示した。これは、せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力  $V_{cd}$  と、せん断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力  $V_{sd}$  と、軸方向緊張材の有効引張力のせん断耐力に平行な成分  $V_{ped}$  からなる。本解析では、外ケーブルに偏向角を設けてないため、 $V_{ped}$  をゼロとした。また、安全係数は全て 1.0 として計算した。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{ped} \quad (1)$$

$$V_{cd} = \frac{\beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d}{\gamma_b} \quad (2)$$

$$V_{sd} = \frac{\{A_w \cdot f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s\} \cdot z}{\gamma_b} \quad (3)$$

ここに、 $\beta_n = 1 + 2 \cdot M_o / M_u$ 、 $f_{vcd} = 0.23 \sqrt{f_{cd}}$ 、 $M_u$  は終局曲げモーメント、 $M_o$  はデコンプレッションモーメント、 $\gamma_b$  は部材係数、 $d$  は有効高さ、 $b_w$  は部材腹部の幅、 $p_w$  は  $A_s / b_w \cdot d$ 、 $f'_{cd}$  はコンクリートの設計圧縮強度である。 $\beta_d = \sqrt[3]{1/d}$ 、 $\beta_p = \sqrt[3]{100 \cdot p_w}$  で  $d$  の単位は  $m$  である。 $A_w$  は区間  $s_s$  におけるせん断補強鉄筋の総断面積、 $f_{wyd}$  はせん断補強鉄筋の設計降伏強度、 $\alpha_s$  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。 $z$  は圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で  $d/1.15$  とした。

土木学会によるせん断耐力を式 (1) より求め、実験値との比較を行った。その結果を表-5 に示した。表-5 より、せん断耐力の  $calc/test$  は  $0.544 \sim 0.719$  となり、外ケーブルを用いた T 形 PRC はりに土木学会式を適用した場合、安全側に計算されることがわかった。次に、式 (1) の計算値を斜めひび割れ発生耐力に適用して、実験値と計算値との比較を表-6 に示した。表-6 より、式 (1) の計算値はプレストレス力、スターラップ間隔に関わらず危険側に計算された。

表-5 実験値と計算値の比較(せん断耐力)

表-6 実験値と計算値の比較(斜めひび割れ発生耐力)

供試体	せん断耐力		calc/test
	test (kN)	calc (kN)	
TN15-0	65.20	45.21	0.693
TN15-50	73.15	52.60	0.719
TN15-100	104.20	58.78	0.564
TN20-100	100.00	54.43	0.544

供試体	斜めひび割れ発生耐力		calc/test
	test (kN)	calc (kN)	
TN15-0	30.71	45.21	1.472
TN15-50	34.85	52.60	1.509
TN15-100	42.40	58.78	1.386
TN20-100	43.31	54.43	1.257

## 6. まとめ

- 1) スターラップ間隔が一定のとき、プレストレス力を増加させると、曲げひび割れ発生荷重、斜めひび割れ発生荷重、最大荷重は大きくなった。
- 2) プレストレス力が一定のとき、スターラップ間隔を大きくすると、最大荷重は低下した。
- 3) ひび割れ状況について、FEM 解析結果はおおむね実験結果と一致した。
- 4) スターラップのひずみについて、FEM 解析結果はせん断力が小さい場合には実験結果に一致したが、せん断力が大きくなると実験結果よりもせん断力は小さく計算される傾向にあった。
- 5) 土木学会せん断耐力式によるせん断耐力の計算結果は、プレストレス力にかかわらず安全側に計算された。

## 参考文献

- 1) Cervenka Consulting : ATENA Program Documentation Part-1 Theory, 2004
- 2) 土木学会 : コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp. 27~28, 2002
- 3) 土木学会 : コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp. 67~72, 2002