

# 圧縮応力分布に着目したPCはりのせん断耐力に関する解析的研究

(公財) 鉄道総合技術研究所 修(工) ○本田 翔平  
 (公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 博(学) 渡辺 健  
 (公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 博(工) 岡本 大

Abstract : The development of failure mechanism of the prestressed concrete (PC) member is important for evaluating the shear carrying capacity. Even for one of the element of concrete structure such as PC slender beams, the failure propagation has not been explained reasonably. This research has carried out the parametric study using the finite element method (FEM) in order to investigate the failure mechanism of PC slender beams, of which loading capacity is affected by material and structural parameters. Based on the FEM, the simplified truss model that can express the stress-flow was developed to calculate the load carrying capacity of PC beam.

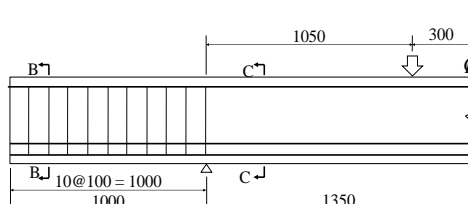
Key words : PC slender beams , Shear carrying capacity , Stress flow

## 1. はじめに

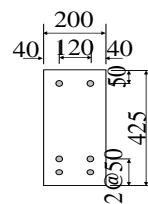
プレストレストコンクリート（以下、PC と称す）はりにおいて、比較的大きなせん断スパン比を有するはりにおいてもせん断圧縮破壊が生じることが指摘されており<sup>1)</sup>、このような耐荷機構を考慮に入れた評価法の確立が必要である。より合理的に、PC はりのせん断耐力を評価するためには、PC はりの破壊形態を適切に考慮することが必要である。そこで著者らは、鉄筋コンクリート（以下、RC と称す）はりおよび PC はりのせん断耐荷力を連続的に取り扱うことができる簡便なモデルを開発するために、簡易トラスモデル<sup>2)</sup>を用いた算定手法に着目した。具体的には、特にせん断補強鉄筋や軸力の効果が PC はりの破壊形式に及ぼす影響を明らかにするために、非線形有限要素法を用いて PC はりの载荷中に発生する応力分布を把握した。そして、圧縮応力が卓越して発生する領域の幅（以下、圧縮応力幅）を明らかにしたうえで、これを組込んだ簡易トラスモデルの、RC・PC はりの耐荷力算定法

表-1 検討に用いた実験データの概要と結果

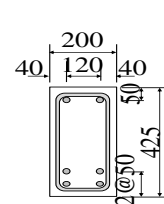
供試体記号	せん断スパン比 $a/d$	幅 (mm)	PC鋼材	下縁導入 プレストレス $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	コンクリート		耐力		
			公称径		圧縮強度 $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f'_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	実験 $P_{exp}$ (kN)	解析 $P_{FEM}$ (kN)	$P_{exp}/P_{FEM}$
L3-35-00	3.0	150	15	0.0	55.1	4.0	213.8	224.0	0.95
M3-35-00				0.0	70.4	4.0	225.7	258.2	0.87
H3-35-00				0.0	82.5	4.0	226.7	259.0	0.88
H3-35-30				3.0	92.0	4.5	490.2	439.9	1.11
H3-35-60				6.0	86.3	3.9	566.7	530.1	1.07
H3-35-90				9.0	70.3	5.1	589.9	612.3	0.96



(a) 供試体側面



(b) B-B 断面



(c) C-C 断面

図-1 実験供試体概要 (単位:mm)

としての適用性について検討した。

## 2. FEM解析概要

### 2.1 解析対象

表-1に解析の対象とした既往の実験データ<sup>3)</sup>を、図-1に既往実験の供試体形状を示す。また、圧縮応力幅を把握するため、供試体の諸元を変数とした解析を行った。表-2に解析において変数とした諸元、図-2に供試体形状を示す。変数はせん断補強鉄筋比 $p_w$ 、コンクリートの圧縮強度 $f'_c$ 、せん断スパン有効高さ比 $a/d$ 、断面下縁のプレストレス量である。

### 2.2 解析モデル

既往の文献<sup>2)</sup>を参考に、汎用有限要素解析プログラムDIANA（Ver.9.4.4）を用いて2次元の非線形有限要素解析を行った。なお対称性を考慮し、供試体の1/2を解析することとした。図-3に要素分割図を示す。コンクリートは8節点アイソパラメトリック要素を用い、PC鋼棒および鉄筋には埋め込み鉄筋要素を用いた。また、解析において、載荷は変位制御で行い、支点の水平方向の拘束はないものとした。

### 2.3 構成則と材料特性

コンクリートの圧縮モデルは、Thorenfeldtモデル（図-4）を使用し、引張軟化曲線は、Hordijkモデル（図-5）を用いた。また、コンクリートの2軸応力状態を考慮するために、破壊基準として、圧縮側はDrucker-Pragerモデル、引張側にはRankineモデル（図-6）を用いた。なお、コンクリートのひび割れモデルは、多方向固定ひび割れモデルで表現し、ひび割れ後のせん断剛性低減係数 $\beta$ は既往の文献<sup>2)</sup>を参考に0.005とした。PC鋼棒および鉄筋は、降伏強度に達するまで初期剛性 $E_s$ の弾性挙動をとり、それ以降は $E_s$ の1/100の剛性で直線的に増加するバイリニアモデルを用いた。

### 2.4 実験結果との比較

表-1に、本研究で行った解析と既往の実験結果<sup>3)</sup>の耐力の比を示す。解析結果と既往の実験結果を比較すると、10%程度の誤差はあるものの、いずれのケースも解析結果が実験結果を概ね再現していることが確認できる。一方、PC部材の耐荷力の評価手法として簡易トラスモデルの適用の検討が行われている<sup>2)</sup>。図-7に本研究で用いた簡易トラスモデルを示す。本研究で用いた簡易トラスモデルは7節点11部材のストラット、タイ、および節点で離散化したモデルである<sup>2)</sup>。モデルの高さは、有効高さに一致し、支間中央の対称面において水平方向を、支点において垂直方向を固定している。簡易トラスモデルは、載荷点および支点付近の応力の分布が不均一となっている領域に対して、2つの異なる角度

表-2 パラメータスタディの各諸元

せん断 スパン比 $a/d$	幅 (mm)	PC鋼材		軸方向鉄筋		せん断 補強 鉄筋比 (%)	プレストレス (N/mm <sup>2</sup> )		コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		公称 断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	公称 断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏 強度 (N/mm <sup>2</sup> )		上縁	下縁	
2.5	200	1018	930	-	-	0.0	0	0	40.0
3.5						0.48	0	5	
4.5						0.84	0	10	

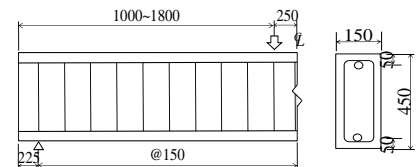


図-2 パラメータスタディ供試体  
(単位:mm)

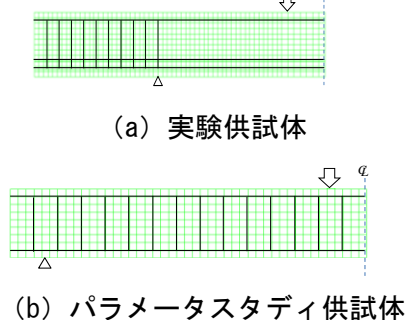


図-3 要素分割図

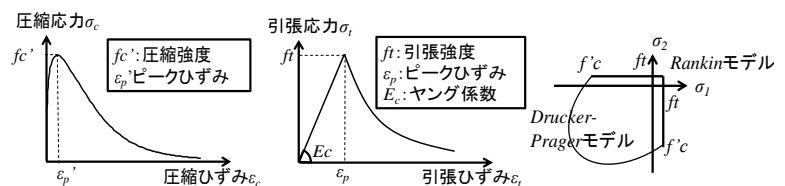


図-4 圧縮モデル 図-5 引張モデル 図-6 破壊基準

を有するストラット（斜め圧縮材）[1][2][3][4]で表現される。[1]と[3]、[2]と[4]が横方向補強材で連結され、荷重が伝達される。斜め圧縮材の配置は、圧縮ストラット角度 $m$ および有効高さ $d$ の関数として表わされる。なお、部材の破壊の判定は以下の式で表される。

$$F_i \geq R_i \quad (1)$$

ただし、 $F_i$  :  $i$  番目の斜め圧縮材に作用する荷重、 $R_i$  :  $i$  番目の斜め圧縮材の限界値( $=\eta \times f_c' \times A$ ,  $\eta = -0.003f_c' + 0.7$ ),  $\eta$  : 一軸圧縮強度低減係数、 $A$  : 断面積<sup>2)</sup>である。

図-8に解析により求められた載荷時の最小主応力分布と簡易トラスモデルの斜め圧縮材の配置を示す。解析により求められた載荷時の主応力分布と簡易トラスモデルの斜め圧縮材の配置は、概ね一致していることが確認できた。ところで、簡易トラスモデルを用いてPCはりの耐力算定する際には、圧縮応力分布幅から決定される斜め圧縮材の断面幅が重要となる。そこで、2.3節に示した構成則、材料特性を用いてパラメータスタディを行うことにより、圧縮応力幅を推定した。

## 2.5 パラメータスタディ

図-9に圧縮応力分布幅の評価に用いたガウス点の位置を示す。圧縮鉄筋から下方へ有効高さ $d \times 0.2$ 区間を対象とした。図-10に荷重が最大値 $V_{max}$ の90%に達した際に得られた、鉛直方向の圧縮応力 $\sigma_y$ の分布例を示す。なお、それぞれの高さにおける最大値 $\sigma_{yi-max}$ に対する割合 $\Delta_{yi}$  ( $=\sigma_{yi} / \sigma_{yi-max}$ ) で示している。圧縮応力が卓越して発生した領域の幅は $\Delta_{yi} \geq 0.3$  領域として算出し<sup>2)</sup>、検討に用いた圧縮応力幅はこれらの平均値を用いた。図-11にせん断補強鉄筋比と耐力の関係、図-12にせん断補強鉄筋比と圧縮応力幅の関係を示す。せん断補強鉄筋比の増加により耐力が増加したとともに、圧縮応力幅も増加する傾向が見られた。この圧縮応力幅の増加は、 $p_w$ の増加に伴いひび割れ進展を抑制したことで荷重を負担できる領域が拡大したためと考えられる。この傾向は、簡易トラスモデルを用いて実験結果をもとに算出した圧縮応力分布幅が増加した<sup>4)</sup> ことと同様の結果である。一方で、プレストレス量が増加するに伴い、圧縮応力幅の増分は低下する傾向が見られた。プレストレスの導入に伴い相対的に供試体の耐力が向上したことにより、せん断補強鉄筋による補強効果が小さくなったことを示すものである。

## 3. 簡易トラスモデル

図-13に簡易トラスモデルを用いて、パラメータスタディの耐力に一致する圧縮応力幅を求めた結果を示す。図-14に実験<sup>3),5)</sup>を再現した結果を示す。なお、図中に示す2つの指標は、パラメータスタ

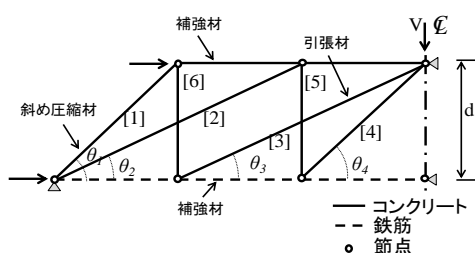


図-7 簡易トラスモデル<sup>2)</sup>

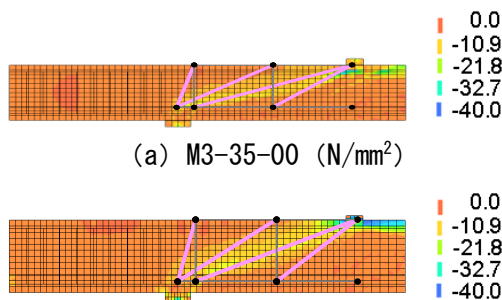


図-8 主応力ひずみと簡易トラスモデル

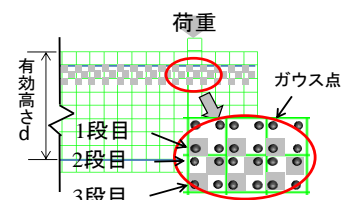


図-9 評価位置

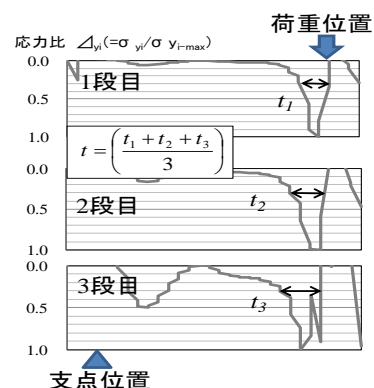


図-10 圧縮応力分布の例

ディから得られた圧縮応力幅を定式化し、実験での圧縮応力幅を算出し耐荷力を求めた結果（図-14 中●印）（以下、パラメータスタディから得られた結果と称す）およびパラメータスタディから得られた耐荷力に一致するように簡易トラスモデルの圧縮応力幅を変更し、その幅を定式化し耐荷力を求めた結果（図-14 中■印）（以下、簡易トラスモデルによる結果と称す）である。実験値と算定値の比をみると、簡易トラスモデルによる結果は、概ね 1.0 を中心に分布した。一方、パラメータスタディから得られた結果は、ばらつきが大きい。この主な要因として、式(1)における簡易トラスモデルの破壊基準として、せん断補強鉄筋がない場合、一軸圧縮強度低減係数  $\eta$  をコンクリートの圧縮強度のみの関数<sup>2)</sup>として用いたことが挙げられる。本研究で対象としたせん断補強鉄筋を用いた RC・PC 部材では、せん断補強鉄筋比に依存してさらにこの低減係数が変化する可能性が考えられる。このことは、有限要素解析を用いて得られた最小主応力の絶対値を考慮しても予想されることから、今後、斜め圧縮斜材の限界値について軸力やせん断補強鉄筋比の影響を考慮に入れて検討を進める必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

FEM解析により、PCはりに生じる圧縮応力幅を捉えるとともに、得られた圧縮応力幅による簡易トラスモデルへの適用法について検討を行った結果、せん断補強鉄筋比の増加に伴い圧縮応力卓越領域の幅は増加するが、この増加分はプレストレス量にも依存することを確認した。

#### 参考文献

- 1) 田村聖, ARAVINTHAN, T, 濱田譲, 二羽淳一郎: せん断補強筋の無い大型PCはりのせん断耐力に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.637-642, 2002.
- 2) M, LERTSAMATTIYAKUL, Niwa, J., TAMURA, S., HAMADA, Y.: Simplified Truss Model for Prestress Concrete Slender Beams, Journal of materials, Concrete structures and Pavements, No.767, pp.313-325, 2004.
- 3) 建設省土木研究所, プレストレスト・コンクリート建設業協会: 高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書, 1995.3.
- 4) 中田裕喜, 渡辺健, 谷村幸裕, 渡邊忠朋, 阿部淳一: 実験に基づく格子モデルの離散化手法に関する検討, 土木学会年次学術講演会, V-256, pp.511-512, 2013
- 5) 佐藤勉, 石橋忠良, 山下裕章, 高田三郎: プレストレスコンクリートはりのせん断耐力と破壊性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.2, pp.323-328, 1987.

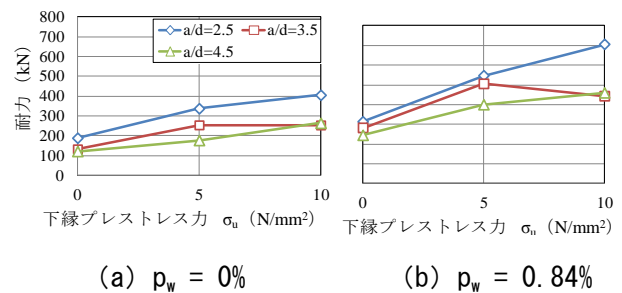


図-11 せん断補強鉄筋比とせん断力の関係

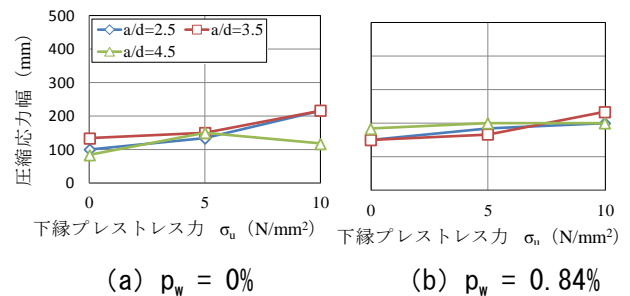


図-12 せん断補強鉄筋比と圧縮応力幅の関係  
(パラメータスタディの結果)

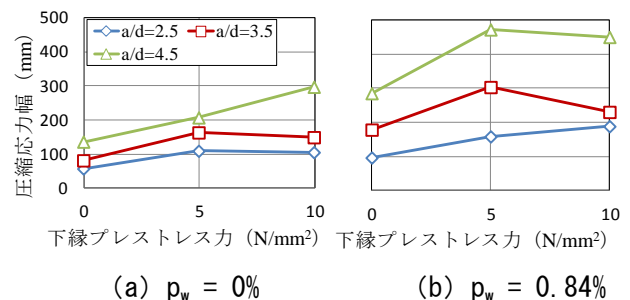


図-13 せん断補強鉄筋比と圧縮応力幅の関係  
(簡易トラスモデルにおいて耐力が評価可能な場合)

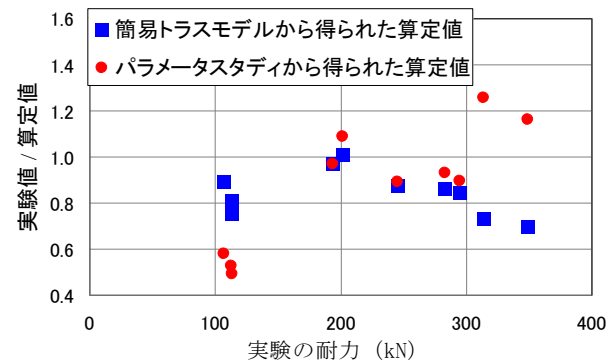


図-14 実験結果と算定値の比較