

外ケーブルを用いたPCはり部材のせん断耐力評価法に関する一考察

ドービー建設工業(株) 技術センター	正会員	○	田村	聖
同上	正会員	工博	濱田	譲
東京工業大学大学院 理工学研究科		工修	SIVALEEPUNTH	Chunyakom
同上	正会員	工博	二羽	淳一郎

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力評価式を用いてPCはりのせん断耐力を算定した場合、PCはりのせん断耐力を過小評価するという研究成果が報告されている¹⁾。このような結果となる要因として、前述した評価式は鉄筋コンクリートはり部材の研究を基礎とした実験式であることが影響していると考えられる。また、プレストレスがせん断耐力に及ぼす影響をデコンプレッションモーメントをパラメータとして評価しているため、その影響を正確に考慮できていないことなどが関係していると考えられる。

このような背景により、著者らは算定精度の優れたPCはりのせん断耐力評価方法を確立することを試みた。その結果、PCはりを簡易的なトラス構造にモデル化(以下、簡易トラスモデル)し、その簡易トラスモデルを構成する部材の耐力を算定することによって、PCはりのせん断耐力を評価する手法を提案することができた²⁾。

この簡易トラスモデルの適用範囲は、せん断補強筋が配置されておらず、内ケーブル方式によってプレストレスが導入されたPCはり(以下、内ケーブル方式PCはり)であり、その断面形状は、矩形断面、T型断面およびI型断面を有するPCはりである。

本研究は、著者らが確立した簡易トラスモデルを外ケーブル方式によりプレストレスが導入されたPCはり(以下、外ケーブルPCはり)にも適用させるための基礎資料を得ることを目的としてせん断載荷試験を実施し、簡易トラスモデルの適用性を検討した。

2. 簡易トラスモデルの概要

本章では、先に提案した簡易トラスモデルの概要を述べる。簡易トラスモデルの確立に先立って、著者らは国内および国外で行なわれた内ケーブル方式PCはりのせん断載荷試験の実験データ76個を収集し、プレストレスがPCはりのせん断耐力に及ぼす影響などを分析した³⁾。その結果、算定精度の優れたPCはりのせん断耐力評価式を確立するためには、以下に示す事項を考慮する必要があることを明らかにした。

- (1) PCはりの破壊形式は、せん断スパン有効高さ比(a/d)および断面下縁に導入したプレストレス量に関係なく、せん断圧縮破壊が支配的となる。
- (2) 載荷点および支点の支圧板の幅の大きさが、PCはりの破壊形式およびせん断耐力に影響を及ぼす。
- (3) プレストレスによる断面の応力分布形状がせん断耐力に影響を及ぼす。

また、非線形有限要素法(以下、FEM)によるパラメータ解析を実施した結果、PCはりがせん断圧縮破壊に至るまでの過程を、以下のように推測できることを示した。

- (1) せん断スパンに発生した曲げひび割れが、荷重の増加に伴って載荷点および支点方向に徐々に発達して斜めひび割れを形成する。
- (2) この斜めひび割れが形成されても直ちに破壊には至らず、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、さらに大きな荷重に耐える。
- (3) タイドアーチ的な耐荷機構が形成されるのと同時に、載荷点付近から引張鋼材の方向へ向かって卓越した斜め圧縮応力が発生する領域が存在する(図-1参照)。その領域の傾きは、プレストレスによる断面の応力分布形状によって異なる。

(4) この卓越した斜め圧縮応力が発生している箇所
のコンクリートが圧壊して破壊に至る。
上記の研究成果に基づき、図-2 に示す簡易
トラスモデルを提案した。このモデルは、せん
断圧縮破壊に至る PC はりをトラス構造にモデル
化し、図-2 に示す 4 つの斜め圧縮部材のい
ずれかが集中荷重(せん断力)の増加によって耐
力を失った時点を PC はりのせん断耐力と評価
するものである。

この簡易トラスモデルは、7 個の節点ならび
に 11 個の部材(曲げ圧縮部材、鉛直引張部材、
斜め圧縮部材、および曲げ引張部材)から構成さ
れている。支点の拘束条件は、載荷点位置の鉛
直線上に位置する節点の X 方向および支点の Y
方向を固定する。

図-2 に示す P_1 および P_2 は、それぞれ断面上・
下縁に導入されるプレストレス力を示す。

簡易トラスモデルを構成する斜め圧縮部材
(部材番号{1}~{4})の傾き($\theta_1 \sim \theta_4$)は、FEM を
用いたパラメータ解析を実施し、以下に示す手
法により決定した。

- (1) 解析で得られた最大荷重の 90% の時点の主
圧縮応力分布に着目する。
- (2) 次に、各要素内の X 方向の全てのガウス点
(要素剛性マトリックスを求めるために、ガ
ウスの積分公式を用いて数値積分する点)
から、最大主圧縮応力が発生している箇所
を特定する(図-3(a)参照)。
- (3) 各層の最大主圧縮応力が発生している箇所
を直線で結んだものが、斜め圧縮部材の傾
きとする(図-3(b)参照)。その際、データの
バラツキを考慮し、相関係数が 0.95 以上と
なるようデータを選別する。

この斜め圧縮部材の傾きを、式(1)および式(2)
に示す m というパラメータで評価することにした。式(1)は、簡易トラスモデルを用いて PC はりのせん断耐
力を算定する場合に、重要なパラメータとなる。

$$m = 2.55(\sigma_m)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{b_f}{b_w} \right)^{-1} \left(\frac{a}{d} \right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{b_f}{b_w} \right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{f_c'}{100} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \left(1 + 0.2 \frac{\sigma_u}{\sigma_u + \sigma_l} \right) \sigma_l \quad (2)$$

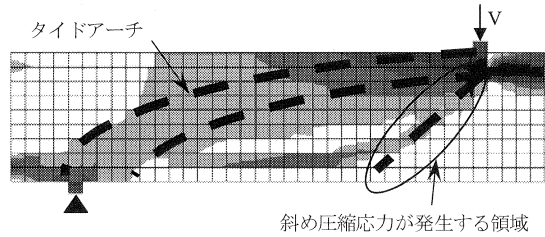


図-1 主圧縮応力の分布図

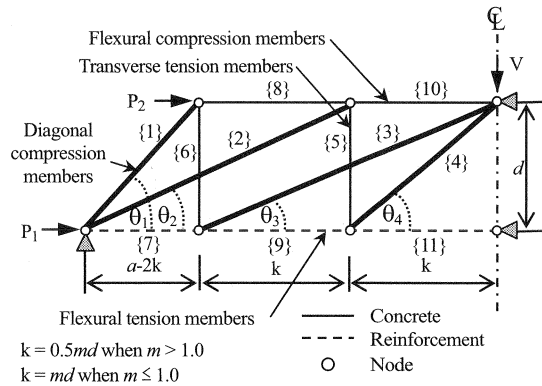


図-2 簡易トラスモデルの概要図

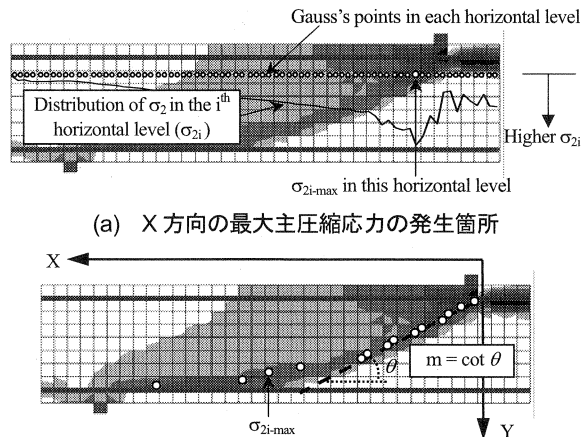


図-3 最大主圧縮応力の発生箇所

ここで、 σ_u : プレストレスによって発生する断面上縁の応力度、 σ_l : プレストレスによって発生する断面下縁の応力度、 b_f : フランジ幅、 b_w : ウェブ幅、 a : セン断スパン長、 d : 有効高さ、 f'_c : コンクリートの圧縮強度である。

斜め圧縮部材の断面剛性を算出する際の部材の幅(t)は、式(3)および式(4)を用いて算定する。なお、 t_i は部材番号{1}および{2}の部材の幅となり、 t_j は部材番号{3}および{4}の部材の幅となる。

$$t_1 = 2(r_l + 0.1d) \left(\frac{b_f}{b_w} \right)^{\frac{1}{5}} \tag{3}$$

$$t_s = 2(r_s + 0.1d) \left(\frac{b_f}{b_w} \right)^{\frac{1}{5}} \tag{4}$$

ここで、 r_l : 載荷点の支圧板の幅、 r_s : 支点の支圧板の幅である。

図-2 に示す集中荷重(せん断力(V)およびプレストレス力 P_1 および P_2)を作用させた場合に発生する各斜め圧縮部材の部材力(F_i)は、各節点での力の釣り合いによって算出する。その際、この簡易トラスモデルは不静定トラスモデルであるため、式(5)および式(6)に示す最小ひずみエネルギーの法則を適用することにした。

$$\frac{\partial U}{\partial X_i} = 0 \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{11} \left[F_i \frac{\partial F_i}{\partial X_i} \frac{L_i}{E_i A_i} \right] = 0 \tag{6}$$

ここで、 $\frac{\partial F_i}{\partial X_i}$: 単位部材力、 U : ひずみエネルギー、 L_i : 各部材長、 E_i : 各部材の弾性係数である。

また、各斜め圧縮部材の耐力は式(7)より算定する。

$$R_i = \eta f'_c A_i \sin \theta_i \tag{7}$$

ここで、 η : 圧縮強度の軟化係数、 A_i : 斜め圧縮部材の断面積($A_i = t b_w \sin \theta_i$)である。

上記の式(1)～式(7)を用いて各斜め圧縮部材の部材力(F_i)と耐力(R_i)の比率を算定する。そして、部材番号{1}～{4}までのいずれかの部材の比率が 1.0 となった時点の外力が PC はりのせん断耐力とする。

なお、この簡易トラスモデルの精度を確認するため、既往の 40 個の実験データを収集してせん断耐力の実験値と簡易トラスモデルより算出した計算値を比較した。その結果、実験値と計算値の比率の平均が 1.00 となり、その際の変動係数は 0.13%であった。これにより、せん断補強筋を配置していない内ケーブル方式 PC はりのせん断耐力は、この簡易トラスモデルを適用することで十分に高い精度で算定することが可能であることを確認した。

3. 実験概要

3.1 供試体の概要

実験要因と外ケーブル方式 PC はり供試体の概要をそれぞれ表-1 および図-4 に示す。本研究では、実験要因を断面下縁に導入するプレストレス量とし、2 体の供試体を製作した。断面形状は T 型断面とし、両供試体の寸法はスパン長(L)3200mm、上フランジ幅

表-1 実験要因

供試体名	スパン長 [mm]	せん断 スパン長 [mm]	有効高さ [mm]	下縁導入 プレストレス [N/mm ²]
ns7	3200	1400	400	7.0
ns14				14.0

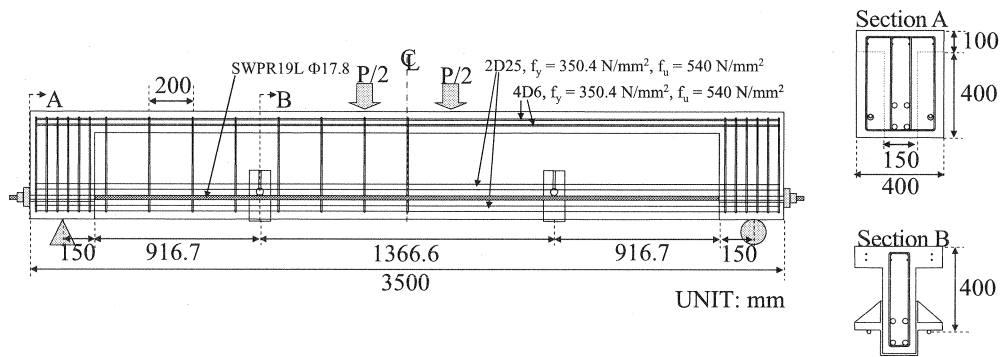


図-4 供試体の概要図

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				SP*4 (C×%)	AE*5 (C×%)
		W	C*1	S*2	G*3		
35.5	38.5	143	403	690	1114	0.75	0.30

- *1: 早強ポルトランドセメント, 密度 3.14g/cm³
- *2: 静岡県大井川産川砂, 表乾密度 2.60g/cm³, 粗粒率 2.73
- *3: 静岡県大井川産川砂利, 表乾密度 2.63g/cm³, 粗粒率 6.68, 最大寸法 20mm
- *4: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤, 標準型
- *5: 変形アルキルカルボン酸化合物

(b)400mm, ウェブ幅(b_w)150mm, はり高さ(h)500mm, 有効高さ(d)400mmである。また, 断面下縁に導入するプレストレス量は, 7.0N/mm² および 14.0N/mm² とした。

せん断破壊に先行して曲げ破壊が生じないように, 両供試体において引張鋼材には呼び名 D25 の異形鉄筋を 4 本配置した。外ケーブル PC 鋼材には SWPR19L ϕ 17.8mm を使用した。なお, デビエータは鋼製のプレートで製作し, 供試体を製作後に接着剤にて後付けした。

荷重方法は, せん断スパン(a)1400mm, せん断スパン有効高さ比(a/d)3.5 の対称 2 点荷重とした。荷重パターンは, 曲げひび割れが発生するまで荷重を行い一度除荷した。その後, 破壊に至るまで荷重を行なった。

計測項目は, スパン中央断面での PC 鋼材のひずみと変位とした。また, ひび割れ発生状況についての観察も同時に行なった。

3.2 コンクリートの配合

実験に用いたコンクリートの示方配合を表-2 に示す。実験時の材齢におけるコンクリートの圧縮強度の目標値を 50N/mm² と設定した。また, 水セメント比は 35.5% とし, セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。細骨材および粗骨材には大井川産の川砂と川砂利を用いた。なお, 混和剤には高性能 AE 減水剤ならびに AE 減水剤を用いた。

4. 実験結果

4.1 コンクリートの物性

実験時における両供試体のコンクリートの試験結果を表-3 に示す。両供試体の圧縮強度は, 目標とした圧縮強度(50N/mm²)に達しているのが確認できた。

表-3 コンクリートの物性値

供試体名	圧縮強度 [N/mm²]	引張強度 [N/mm²]	弾性係数 [kN/mm²]
ns7	53.6	4.1	32.5
ns14	55.8	4.2	31.1

4.2 ひび割れ発生荷重および終局荷重

実験結果を表-4に示す。表-4に示すとおり、断面下縁に導入したプレストレス量を大きくした ns14 供試体の初期曲げひび割れ発生荷重は、ns7 供試体のそれと比較して約 1.5 倍大きくなった。また、斜めひび割れ発生荷重および終局荷重についても ns14 供試体は ns7 供試体と比較して約 1.2 倍大きくなった。

4.3 ひび割れ状況

実験終了時に観察したひび割れ状況を、図-5に示す。両者の供試体の破壊形式は、せん断圧縮破壊であった。ひび割れ伸展の状況は、以下のとおりであった。

- (1) せん断スパン内のデビエータ付近において、曲げひび割れが発生する。
- (2) その曲げひび割れが荷重の増加に伴い、載荷点と支点方向に徐々に発達し、斜めひび割れを形成する。
- (3) タイドアーチ的な耐荷機構が形成され、さらに荷重が増加する。その際、斜めひび割れの幅が拡大し、載荷点方向に伸展していく。
- (4) 最大荷重に達する直前に、タイドアーチが形成されている領域に新たな斜めひび割れが発生し、急激に耐力が低下する。

以上のひび割れ伸展状況は、内ケーブル方式 PC はりがせん断圧縮破壊する状況とほぼ同様な傾向であると思われる。

耐力の低下を誘発した斜めひび割れの角度(β)を比較すると、断面下縁に導入したプレストレス量が多い ns14 供試体のほうが ns7 供試体よりも小さくなった。この結果より、断面下縁に導入したプレストレス量が大きくなると、供試体の耐力の低下を誘発する斜めひび割れの角度が小さくなること確認できた。

表-4 実験結果

供試体名	初期曲げひび割れ発生荷重 [kN]	斜めひび割れ発生荷重 [kN]	終局荷重 [kN]
ns7	193.5	303.4	491.2
ns14	295.5	373.1	574.8

5. 簡易トラスモデルの適用性の検討

5.1 斜めひび割れ発生位置の比較

2章で述べたとおり、簡易トラスモデルでは、集中荷重(せん断力)の増加に伴い、いずれかの斜め圧縮部材が破壊した時(部材力(F_i)と部材耐力(R_i)の比(F_i/R_i)が1.0となった時点でPCはりは最大耐力に達すると定義している。各斜め圧縮部材のなかで、破壊した部材を示したものを図-6に示す。また、各斜め圧縮部材の部材力(F_i)と部材耐力(R_i)を算定した結果を表-5に示す。

ns7 供試体の実験では、耐力の低下を誘発した斜めひび割れは、図-6に示す部材番号{2}の位置付近で発生したが、簡易トラスモデルでは部材番号{3}であった。これは、表-5に示す部材番号{2}および部材番号{3}の部材力と部材耐力の比(F_i/R_i)を比較すると、それぞれ0.95と1.00となっており、両者の部材がほぼ同時に破壊する傾向を示していることが影響していると思われる。一方、ns14 供試体では、実験と簡易トラスモデルから得られる耐力の低下を誘発する斜めひび割れ発生位置が

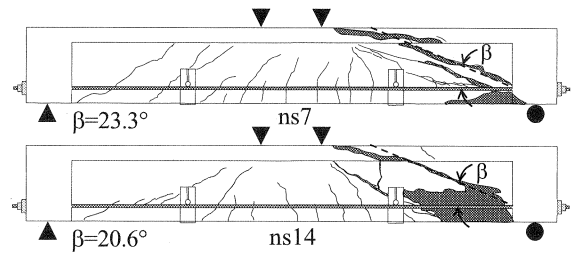


図-5 ひび割れ図

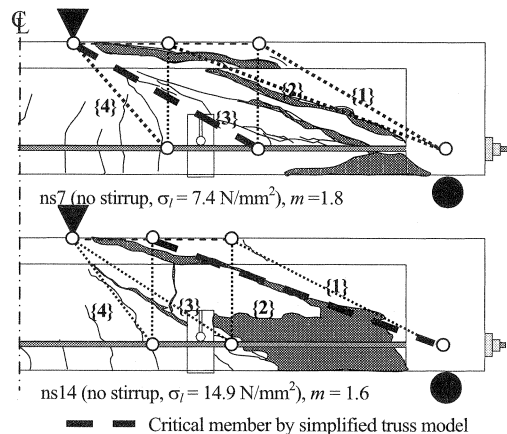


図-6 耐力が低下する部材とひび割れ状況

一致した。

本研究により、内ケーブル方式 PC はりと外ケーブル方式 PC はりの破壊形式ならびにひび割れ伸展状況は、同様な傾向を示すことが明らかとなった。しかし、斜めひび割れ発生位置の比較結果より、主圧縮応力の分布形状が若干異なっていることが推測される。そのため、FEM を用いた外ケーブル方式 PC はりのパラメータ解析を実施し、内ケーブル方式 PC はりと主圧縮応力の分布形状の相違を確認する必要があると思われる。

5.2 せん断耐力の比較

簡易トラスモデルを適用し、ns7 および ns14 供試体のせん断耐力を算定した。その結果を表-6 に示す。簡易トラスモデルより算定したせん断耐力の実験値に対する計算値の比は、ns7 供試体が 0.83 であり、ns14 供試体が 0.73 となった。本研究の範囲では、簡易トラスモデルを適用して外ケーブル方式 PC はりのせん断耐力を算定した場合、内ケーブル方式 PC はりの場合と比較して算定精度が若干劣る傾向を示した。また、内ケーブル方式 PC はりのせん断耐力よりも外ケーブル方式 PC はりのせん断耐力のほうが大きくなる傾向を示した。これは、一般的な PC はりのせん断耐荷試験では引張鋼材比が 1.0%~2.0% の範囲で配置されているが、本研究では供試体を確実にせん断破壊させるため、引張鋼材比($p_w=4.07%$)を比較的大きくしていることが影響していると思われる。

以上の比較結果より、簡易トラスモデルは外ケーブル方式 PC はりのせん断耐力を過小評価する傾向を示したため、斜め圧縮部材の断面剛性の決定法などについても再度検討する必要があると考えられる。また、簡易トラスモデルは外ケーブル方式 PC はりのせん断耐力を概ね算定することが可能であると考えられるが、さらに算定精度を向上させるための検討が必要であると思われる。

6. まとめ

- (1) 本研究の範囲においては、内ケーブル方式 PC はりの破壊形式と同様に、外ケーブル方式 PC はりについても両供試体においてせん断圧縮破壊となった。
- (2) 内ケーブル方式 PC はりと外ケーブル方式 PC はりでは、主圧縮応力の分布形状が若干異なっていることが推測され、パラメータ解析により外ケーブル方式 PC はりの主圧縮応力の分布形状を確認する必要がある。
- (3) 簡易トラスモデルは、外ケーブル方式 PC はりのせん断耐力を概ね算定することができる。しかし、さらに算定精度を向上させるための検討が必要である。

[参考文献]

- 1) 田村 聖, 濱田 譲, 前堀伸平, 二羽淳一郎: 高性能軽量骨材を用いた大型 PC はりのせん断耐荷特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.709-714, 2001
- 2) Manakan LERTSAMATTIYAKUL, Junichiro NIWA, Satoshi TAMURA and Yuzuru HAMADA: SIMPLIFIED TRUSS MODEL FOR PRESTRESSED CONCRETE SLENDER BEAMS, Proceedings of the JSCE, No.767/V-64, pp.313-325, 2004 August
- 3) 田村 聖, 濱田 譲, Manakan LERTSAMATTIYAKUL, 二羽淳一郎: 矩形断面を有する PC はり部材のせん断耐力評価法に関する一考察, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.6, pp.101-110, Nov.2003

表-5 部材力と部材耐力の算定結果

部材 番号	ns7			ns14		
	F_i (kN)	R_i (kN)	F_i/R_i	F_i (kN)	R_i (kN)	F_i/R_i
1	-232.2	-508.5	0.46	-270.4	-432.9	0.62
2	-244.8	-257.0	0.95	-245.5	-245.5	1.00
3	-239.4	-239.4	1.00	-229.7	-300.0	0.77
4	-117.5	-557.8	0.21	-107.4	-640.5	0.17

表-6 せん断耐力の算定結果

供試体名	実験値	計算値	計算値 / 実験値
	(kN)	(kN)	
ns7	245.6	204.6	0.83
ns14	287.4	208.6	0.73