

論文 外ケーブルのせん断補強効果に関する解析的研究

鄭 慶玉*1・松井繁之*2

要旨: 外ケーブルを配置した鉄筋コンクリート梁のせん断耐力は、外ケーブルの鉛直分力とは別に、通常、向上することが報告されている。しかし、その評価計算法はいまだに確立されていない。本研究では、外ケーブルを配置された鉄筋コンクリート梁のせん断耐力向上効果を評価する計算方法として、土木学会せん断耐力式、修正圧縮場理論の2種類で解析し、それぞれの解析結果について考察を加えるとともに簡易評価法の提案を行った。

キーワード: 外ケーブル、せん断耐力、ひび割れ角度、修正圧縮場理論

1. はじめに

近年、コンクリート橋に対して外ケーブルが用いられることが多くなっている。その目的は既設橋の補強、また、自重低減等の合理化を目的とした新設橋への適用等が挙げられる。一方、外ケーブルを使用する場合、曲げ耐力・せん断耐力と言った力学的特性は従来の内ケーブル方式の力学的特性とは異なってくる。現在、外ケーブル構造の耐荷力に関する研究は、主に曲げ耐力に重点が置かれている。せん断耐力に関しても、外ケーブルによるプレストレス力によって増加することが報告されているが、まだ十分に研究はされていないようである^{1) 2)}。将来の適用されるであろう性能照査型設計を考えると、外ケーブルを適用したコンクリート橋の正確なせん断耐力の把握は不可欠である。

本研究は、せん断耐力の算定法として、土木学会コンクリート標準示方書によるせん断耐力評価法、修正圧縮場理論によるせん断耐力算定法の2種類を用意し、数値解析を行った。そして、その結果よりせん断破壊時のひび割れ角度を考慮した新しい評価式の提案を行った。

2. 各せん断耐力算定法の概要

2.1 土木学会式

土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾によるせん断耐力の算定式を以下に示す。

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

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

$$V_{sd} = A_w f_{wyd} / s_s \cdot d / 1.15 \quad (3)$$

$$V_{ped} = P_p \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

ここに、

$$\beta d = \sqrt[4]{1/d}, \beta_p = \sqrt[3]{100 pw}$$

$$\beta_n = 1 + Mo / Md \quad (Nd \geq 0)$$

$$1 + 2Mo / Md \quad (Nd \leq 0)$$

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'cd} \quad (N/mm^2)$$

$$pw = A_s / (b_w \cdot d)$$

A_w : せん断補強筋断面積(cm²)

A_s : 引張鋼材断面積(cm²)

b_w : ウェブ厚(cm) d : 有効高(cm)

$f'cd$: コンクリートの設計圧縮強度(kgf/cm²)

f_{wyd} : せん断補強鉄筋の設計圧縮強度(kgf/cm²)

s_s : せん断補強鉄筋の配置間隔(cm)

P_p : 軸方向緊張材の有効引張力(kgf)

α : 軸方向緊張材と部材軸のなす角度

*1 オリエントル建設株式会社 工務部 設計チーム (正会員)

*2 大阪大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

この式において、軸方向緊張力のせん断耐力への影響はパラメーター βn により表現されている。 βn 中のデコンプレッションモーメント M_o を用いる評価は、軸方向力による梁部材断面下縁の応力度の大きさのみを考慮している。梁部材断面内の応力分布の影響は考慮されていない。これに対し外ケーブルによる軸力効果を考慮したせん断耐力を、伊藤ら²⁾は次式により提案している。

$$Vcd' = \beta d \cdot \beta p \cdot f_{vcd} \cdot bw \cdot d / \gamma b + Mc/a \quad (5)$$

ここに、

Mc : ひび割れ発生モーメント ($kgf \cdot cm$)

a : せん断スパン長 (cm)

式(5)はプレストレスによる梁への効果を βn の代わりに、 Mc/a を直接加算している。この Mc/a は梁に曲げひび割れが発生するまでの増加せん断力を意味し、軸力によるせん断耐力向上の効果を算定する上で、デコンプレッションモーメントを用いる土木学会式よりも良い近似を示したと報告されている。

2.2 修正圧縮場理論⁵⁾

土木学会のせん断耐力式はトラス理論から導かれる理論式を基礎としたものであり、せん断力による圧縮斜材角度を 45° としている。しかし、軸力を受ける梁ではせん断ひび割れ角度は、軸力による影響で部材内の主応力の方向が変化するため、必ずしも圧縮斜材角度は 45° とならないことが指摘されている。

修正圧縮場理論は、コンクリート部材のひび割れの発生した部分をマクロ的にとらえ、その要素内の平均応力・平均ひずみに対して力の釣り合い条件および変形の適合条件を用いて解く理論である。本理論においては、ひび割れ角度や軸力の影響が合理的に考慮されている。ひび割れの発生したコンクリートの引張抵抗を考慮した場合、コンクリートに発生している平均的な応力およびひずみ関係は図-1に示されたモールの応力円およびモールのひずみ円よりそれぞれ次の式のように表される。

$$f_2 = (\tan \theta + \cot \theta)v - f_1 \quad (6)$$

ここに、

f_1, f_2 : 主引張・主圧縮応力

θ : ひび割れ角度

v : せん断応力

$$\varepsilon_x = (\varepsilon_1 \cdot \tan^2 \theta + \varepsilon_2) / (1 + \tan^2 \theta) \quad (7)$$

$$\varepsilon_y = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot \tan^2 \theta) / (1 + \tan^2 \theta) \quad (8)$$

ここに、

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$: 部材軸方向・部材直角方向ひずみ

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 主引張ひずみ・主圧縮ひずみ

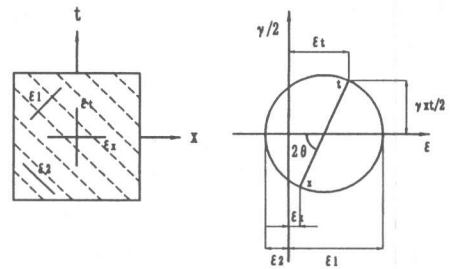
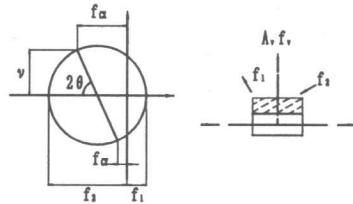
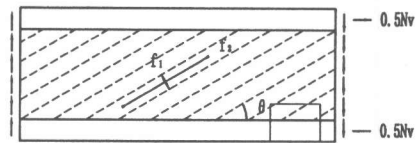


図-1 モールの応力円・ひずみ円

せん断ひび割れが生じたコンクリート部材の力の釣り合い条件により、せん断補強筋による鉛直方向力は次式で表される。

$$A_v \cdot f_v = (f_2 \sin^2 \theta - f_1 \cos^2 \theta) bw \cdot s \quad (9)$$

A_v, f_v : せん断補強筋の面積、応力

bw, s : ウェブ厚、せん断補強筋間隔

この(9)式に(6)式を代入すると、せん断耐力 V が求められる。

$$V = f_1 b w j d \cot \theta + \frac{f_v A_v}{s} j d \cot \theta \quad (10)$$

$j d$: 有効高さ

(10)式の第1項はコンクリートによる耐力を表し、第2項はせん断補強筋による耐力を表している。

さらに、部材軸方向の釣り合い式を考慮するとき、

$$A_{sx} f_t + A_{px} f_p = V \cot \theta - f_1 b w j d \quad (11)$$

A_{sx} : 軸方向鉄筋の断面積

A_{px} : 軸方向緊張材の断面積

f_t, f_p : 各々の鋼材軸力

と表すことができる。図-2に本理論を用いたせん断耐力算定の計算のフローチャートを示す。

修正圧縮場理論は、せん断力のみが作用する仮定の下で、理論式が導かれている。しかし、実際のコンクリート部材は曲げ、せん断、軸力が同時に作用する。よって、軸力と曲げによる力の釣り合い条件を満足させながら、収束計算を行うこととする。

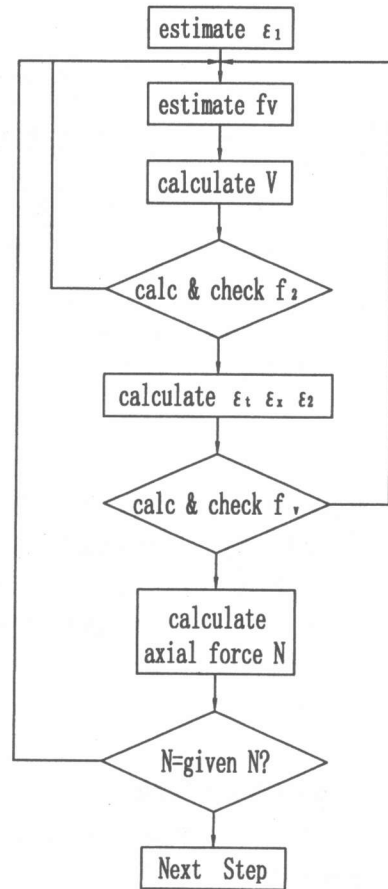


図-2 計算フローチャート

3. 検証解析

3.1 解析対象

既にコンクリート梁部材に外ケーブルを配置し、せん断耐力の向上効果を検証する実験が数例行われている^{1) 2)}。本解析では、基礎的なせん断耐力向上性状を究明する目的により、RC部材に外ケーブルを配置した補強実験例の供試体¹⁾を解析対象として選定した。解析対

象の概要を図-3に、材料諸元を表-1に示す。せん断スパン有効高さ比を3とし、3等分載荷を行っている。せん断補強筋としては異形鉄筋D6が18cmピッチで配置され、引張応力が卓越する下縁側には異形鉄筋D19が4本配置されている。外ケーブルは載荷点において7°の角度で偏向配置され、桁端部にて定着されて

表-1 使用材料諸元

コンクリート強度	
σ_{ck}	380kgf/cm ²
せん断スパン比	
a/d	3
引張鉄筋比	
pw	1.490

種類	断面積 (mm ²)	降伏強度 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
D6	31.67	40	57	1.83E+06
D10	71.33	45	60	1.99E+06
D19	286.50	44	59	1.93E+06
1S12.7 ^{mm}	98.70	161	189	2.00E+06

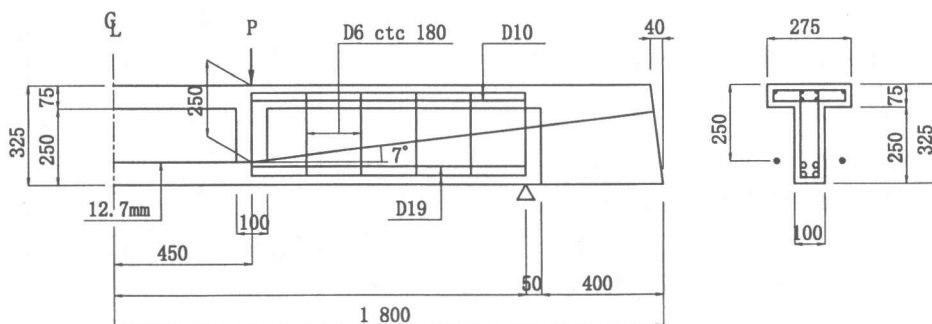


図-3 解析供試体概要図

いる。本解析においては、外ケーブル配置の有無によるせん断耐力向上の効果を確認するため、外ケーブルを配置しないケースについても解析することにする。外ケーブルを配置しない解析対象を（T-1）、配置する解析対象を（T-2）と呼ぶことにする。

3.2 解析結果および考察

各解析値と実験値の比較を表-2に示す。

(1) 土木学会式について

コンクリートにせん断ひび割れが発生するまでの耐力はコンクリートのみによるせん断耐力で表せる。（T-1）に着目すると、せん断ひび割れ発生荷重は概ね実験値と類似したが、耐力は実験値が計算値を上回った。（T-2）の場合、プレストレスの軸力によるコンクリートの

せん断耐力増加率は13%の増加を示し、池田等の提案式では77%の増加率を示した。実験結果から得られるコンクリートのみの耐力増加率は69%であった。せん断耐力に関しては、実験値が計算値を土木学会式で55%、池田式で23%上まわった。池田式においても実験値が上まわる結果となった要因としては、軸力の効果を曲げひび割れ発生までの耐力増分として捉えているため、軸力によるせん断領域における主応力方向の変化の影響が適切に考慮されていないためと推察できる。

(2) 修正圧縮場理論について

修正圧縮場理論の特徴は、軸力による主応力の変化として表れる圧縮斜材角度の評価である。図-4に主引張ひずみと圧縮斜材角度の関係を図-5に主引張ひずみと作用せん断力の関係を

表-2 実験結果と数値解析

	外ケーブルの有無	算定方法	解 析 値				実 験 結 果		
			コンクリート	鉄筋	PC鋼材	せん断	ひび割れ	スターアップ	せん断
			V _{cd}	V _{sd}	V _{pe}	最大耐力	発生荷重	降伏荷重	最大耐力
T-1	無	土木学会	8.03	6.85	—	14.88	8.0	15.5	26.5
		修正圧縮	8.76	12.56	—	21.32			
T-2	有	土木学会	9.04	6.85	3.41	19.31	13.5	15.0	30.0
		池田式	14.18	6.85	3.41	24.45			
		修正圧縮	10.59	13.37	3.41	27.37			
		提案式	18.06	10.16	3.41	31.63			

※ ひび割れはせん断ひび割れ発生荷重を示す。

示す。

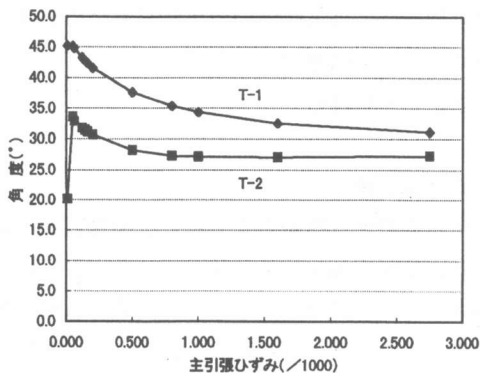


図-4 主引張ひずみと圧縮斜材角度の関係

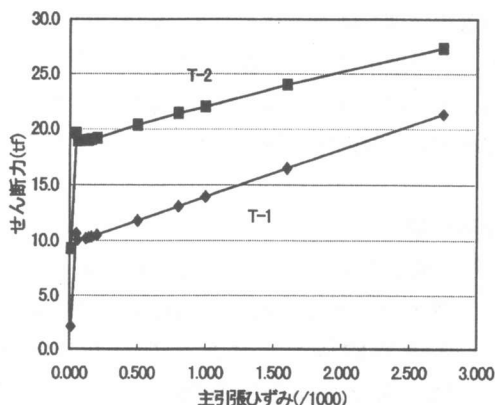


図-5 主引張ひずみとせん断力の関係

図-4に着目した場合、せん断力の増加とともに圧縮斜材の角度が変化していく様子がうかがえる。一般に、せん断ひび割れ角度はせん断力の増加とともに小さくなるが、その現象と一致する結果となっている。ひび割れの発生は主引張ひずみが $0.05E-3$ (クラック発生ひずみ) に達すると同時に確認された。また、(T-2) はプレストレスによる軸力が導入されるため、圧縮斜材の角度が (T-1) と比較して、小さくなっている。図-5からは外ケーブルから導入される軸力によりせん断耐力が向上することが確認できる。せん断耐力の最大値は主引張ひずみが、 $2.5E-3$ の値に達した時点でむかえて

いる。せん断ひび割れ発生荷重はコンクリートが負担するせん断力で表されるが、実験値と比較すると (T-1) においては10%、(T-2) では外ケーブルの鉛直分力を考慮すると4%の差となった。また、せん断耐力は (T-1) は実験値を下まわったが、(T-2) に関しては池田式よりも良い近似を見せた。このような結果に至った理由としては、理論構成の過程段階において、部材断面内の応力勾配を平均化したことが挙げられる。解析対象の断面は、T型の断面であるため、断面を薄い層に分割し、再び修正圧縮場理論を適用する必要があるものと思われる³⁾。

4. 簡易せん断耐力式の新提案

4.1 簡易せん断耐力式

土木学会式において、 V_{cd} は実験から導かれた経験式であり、 V_{sd} はひび割れ発生角度を 45° と仮定した場合のトラス理論から導かれている。しかし、コンクリートはり部材に軸力を導入する場合、必ずしもせん断によるひび割れ角度は、 45° にならないと既往の研究からは報告されており、今回適用した修正圧縮場理論の解析結果からもひび割れ発生角度は、軸力の導入力の増加とともに 45° よりも小さい角度になることが、(T-2) に対して求めた図-6の導入軸力とひび割れ発生

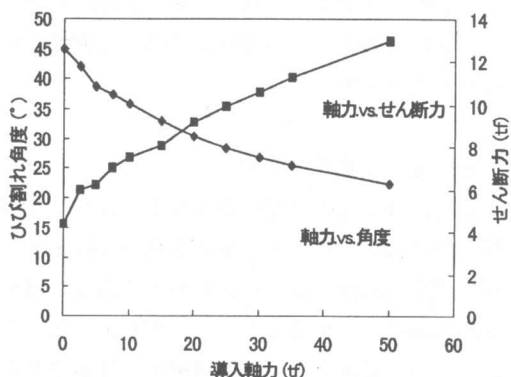


図-6 導入軸力と初期ひび割れの関係

時の角度の関係からも読みとれる。

また、(10)式においては、第1項のコンクリートが負担するせん断力の部分と第2項の鉄筋が負担するせん断力の両方にひび割れ角度の効果が現れている。このことから以下の簡易式を提案することにした。

$$V_{yd} = V_{cd}' + V_{sd}' + V_{ped} \quad (12)$$

$$V_{cd}' = \beta d \cdot \beta_p \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d \cdot \cot \alpha / \gamma_b + M_c / a \quad (13)$$

$$V_{sd}' = V_{sd} \cdot \cot \alpha \quad (14)$$

ここに、

α : 修正圧縮場理論から求まる
せん断ひび割れ角度

基本的には、土木学会のせん断耐力式を修正する。鉄筋の負担するせん断力とコンクリートが負担するせん断力のそれぞれに、修正圧縮場理論から導き出される初期ひび割れ発生時のひび割れ角度の効果を加える。修正圧縮場理論で計算されるひび割れ角は、平均ひずみの変動とともに変化するが、実際の破壊現象では初期ひび割れが進行し、せん断破壊に至るためである。この場合、デコンプレッションモーメントによる軸力の効果 β_n は考慮しない。また、実験報告²⁾で曲げひび割れ発生後にせん断ひび割れが発生していることから、(5)式同様、曲げひび割れ発生までのせん断耐力の増分を考慮し、ひび割れ角度 α を求めるときには、コンクリートはりに働く曲げモーメントの影響は考慮しない。このことにより、はりに働くせん断と曲げモーメントの2つの力成分を分離して簡潔に取り扱うことができる。

4. 2 簡易式の考察

先に、提案した簡易式を本論文で使用した解析対象に適用した。その結果を表-2に示す。解析値は実験値と良い近似を示しており、修正圧縮場理論により算定したせん断耐力に対しては15%の差違となったが実験値と比較すると5%であった。修正圧縮場理論と提案式の V_{cd} の値は著しい相違を見せた。その要因として、

修正圧縮場理論による解には、理論構築過程で、はり部材における軸方向引張鉄筋部分の剥離破壊によるせん断耐力向上分が考慮されていないことが考えられる。

5. まとめ

土木学会せん断耐力式と修正圧縮場理論によるせん断耐力算定法を、外ケーブルにより軸力が導入されたコンクリートはりのせん断耐力算定に使用し、それぞれ考察を加えた。さらに、その考察をふまえ、せん断ひび割れ角度を考慮した新しいせん断耐力式の提案を行った。その結果、ひび割れ角度を考慮することにより、数値解の精度を向上させることが確認できた。今回、検証解析モデルの数が極端に少なかったため、今後は実験、FEM解析を適用し、さらに本提案式の信頼性を検証していく予定である。

参考文献

- 1) 近藤悦郎・睦好宏史・高橋博威・佐野 正：
外ケーブルによるせん断補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学，Vol.16, No.2, pp1015-1020, 1994
- 2) 伊藤忠彦・山口隆裕・池田尚治：プレキャストセグメントはりの曲げせん断特性に関する実験的研究，プレストレスコンクリート，Vol.39, No.1, pp83-96, Jan, 1997
- 3) 中村 光・檜貝 勇：拡張した修正圧縮場理論によるRCはり断面のせん断耐力評価，土木学会論文集，No490, V-23, pp157-166, 1994.5
- 4) コンクリート標準示方書（平成8年版）設計編，土木学会，1996
- 5) Collins, M.P. and Mitchell, D: Prestressed Concrete Structures, PRENTICE HALL, Inc, 1991