

(98) 外ケーブルを有するコンクリート梁のせん断耐力実験

オリエンタル建設(株) 大阪支店 ○ 鄭 慶玉
 オリエンタル建設(株) 大阪支店 正会員 森田 嘉満
 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 松井 繁之

1. はじめに

近年、車両の大型化による道路橋示方書の設計荷重の変更により、既設鉄筋コンクリート橋に対して外ケーブル補強を行う事例が増加している。それに伴い、外ケーブル構造の力学特性を解明する研究も盛んに行われている。しかし、外ケーブル構造に関する研究の大半は曲げ補強に関するものであり、せん断耐力、偏向部そして外ケーブル定着体に関する研究は十分に行われていないのが現状である。せん断耐力に関しては、外ケーブルにより部材に軸圧縮力を導入した場合、一般的に向上することが報告されている¹⁾。これはコンクリート部材に軸力を導入することによって、ひび割れ進展を防ぎ部材内部の応力分布が変化するためと考えられている。このことはコンクリート部材に導入する軸力が大きくなるにつれて、せん断ひび割れの角度は小さくなる現象からも容易に推察できる。

本論文では、外ケーブルにより軸力が導入された鉄筋コンクリート梁の力学性状を把握するため、19体の実験供試体についてせん断実験を行い、軸力とせん断耐力向上度の関係を定性的、定量的に評価したいため、基礎的な実験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験で用いた供試体概要を図-1に示す。図中のハッチング部分がせん断スパン領域となる。供試体の

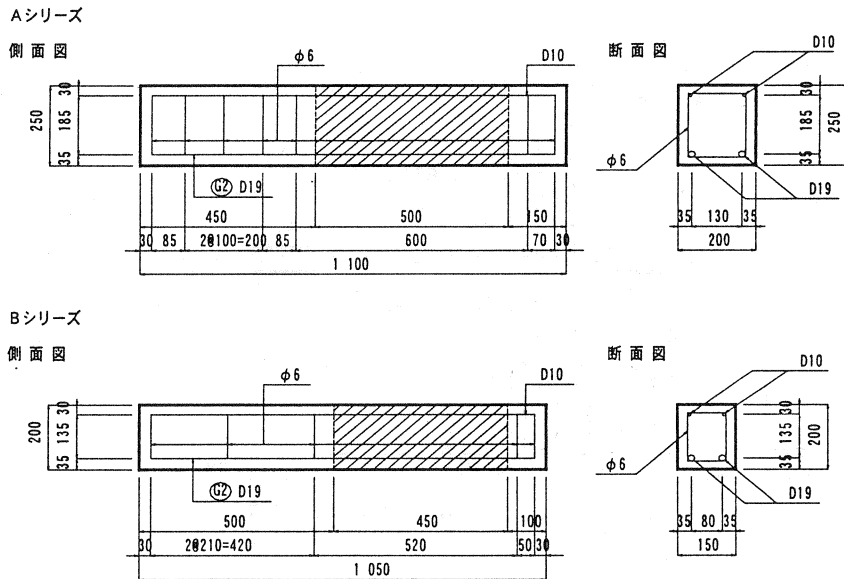


図-1 供試体概要

スターラップ量をパラメーターとするが、その鉄筋にはφ6の丸鋼を用いた。スターラップの配置形状は、Aシリーズではせん断スパン内に0、2、3、4本の本数となるように4種類を、Bシリーズでは0、4、5本の3種類を用意し、図-1のハッチング部に配置した(図-3参照)。梁の引張側には引張鉄筋としてD19鉄筋を2本、圧縮側には主鉄筋としてD10鉄筋を2本配置した。外ケーブル鋼材としてはPC鋼棒SBPR 930/1080B種1号を用い、必要に応じて導入張力を変化させた。使用材料の機械的性質を表-1に示す。コンクリートの材料定数を表-2に示す。

今回使用した実験装置を図-2に示す。実験は固定装置を用いて供試体を片持ち梁の状態にし、アクチュエータから載荷板を通じて荷重をかける方法で行った。外ケーブルによって導入する軸力は、供試体の両端にセットした定着体間にPC鋼棒を供試体の両サイドに配置し、端部のネジ部でナット回転によって与えた。

2.2 実験要因

実験パラメーターを表-3に示す。本実験は導入プレストレス及びスターラップ量がせん断耐力に及ぼす影響を調べることを目的としている。A-0からA-4までの供試体に関しては、それぞれプレストレスしないものと3.0N/mm²のプレストレス応力を導入したものを用意し、A-0・A-2に関してはさらに1.5N/mm²プレストレス応力を導入したものを用意した。B-0からB-5シリーズに関しては、プレストレスしないものと1.0N/mm²のプレストレス応力を導入したものを用意した。せん断スパン比(a/d)はせん断耐力に影響を及ぼす要因の一つであるが、今回の実験では、Aシリーズでは2.33、Bシリーズ2.73とした。

表-1 鋼材の機械的性質

種類	断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
φ6	28.27	294	400	2.06×10 ⁵
D10	71.33	380	510	2.06×10 ⁵
D19	286.5	380	510	2.06×10 ⁵
PC鋼棒	415.5	1046	1140	1.96×10 ⁵

表-2 コンクリートの材料定数 (N/mm²)

	Aシリーズ*	Bシリーズ*
圧縮強度	49.3	49.7
ヤング係数	3.59×10 ⁴	3.31×10 ⁴

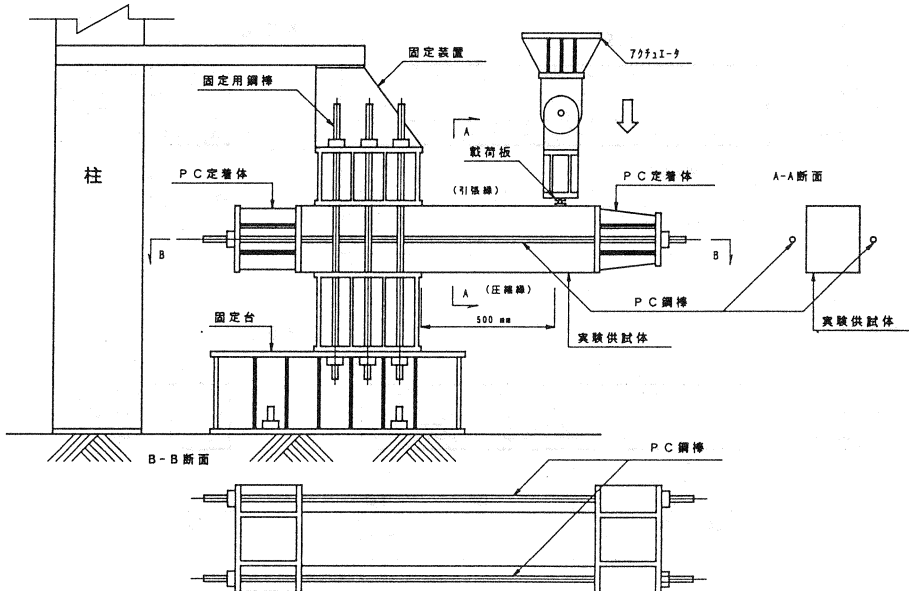


図-2 実験装置

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

図-3にA、Bシリーズ供試体のせん断領域(図-1のハッチング部分)における破壊時の全ひび割れ性状を示す。各供試体ともせん断破壊した。また、表-4には各供試体の実験結果を示す。図-3において太い線のひび割れは破壊時に支配的となったひび割れを示し、ハッチングされた領域はせん断圧縮型破壊により圧壊または剥離した部分を示す。また、図中にはせん断補強筋と軸方向筋を併せて作図した。図-3からはプレストレス導入するとせん断ひび割れ角度が相対的に小さくなる事が確認できた。プレストレスを与えない供試体はすべて中立軸付近でほぼ45°のひび割れが発生した。プレストレスのレベルが高い供試体ではせん断圧縮型の破壊を呈した。せん断補強筋を有しない供試体に関しては、斜めひび割れ進展後に引張鉄筋に沿った付着

表-3 実験パラメーター

供試体名	スターラップ間隔 (cm)	スターラップ本数 (本)	せん断補強筋比 γ (%)	導入プレストレス量 (kN)	コンクリート導入応力 (N/mm ²)
A-0-0	∞	0	0.000	0.0	0.0
A-0-1.5				73.5	1.5
A-0-3				147.0	3.0
A-2-0	20.0	2	0.141	0.0	0.0
A-2-1.5				73.5	1.5
A-2-3				147.0	3.0
A-3-0	15.0	3	0.188	0.0	0.0
A-3-3				147.0	3.0
A-4-0	12.5	4	0.226	0.0	0.0
A-4-3				147.0	3.0
B-0-0	∞	0	0.000	0.0	0.0
B-0-1				30.0	1.0
B-4-0	10.0	4	0.377	0.0	0.0
B-4-1				30.0	1.0
B-4-1'					
B-5-0	7.5	5	0.503	0.0	0.0
B-5-1				30.0	1.0
B-5-1'					

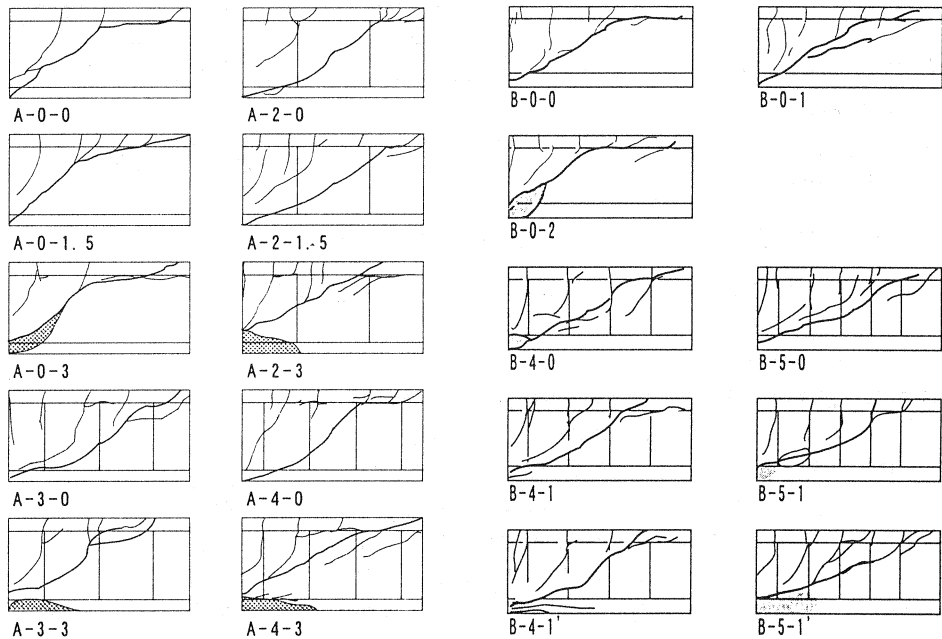


図-3 せん断領域のひび割れ性状

破壊後の剥離破壊が導入プレストレス量に関わらず顕著であった。

3. 2 既存のせん断耐力式との比較

本実験による結果と既存のせん断耐力式から得られる計算値との比較考察を行う。せん断ひび割れ発生荷重、せん断耐力の算定に関しては土木学会コンクリート標準示方書²⁾による式を用いた。

(1) せん断ひび割れ発生荷重算定式

$$V_{cd_1} = \beta_u \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (1)$$

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

$$\beta_n = 1 + M_o / M_d (N_d \geq 0), \quad 1 + 2M_o / M_d (N_d \leq 0)$$

M_o : テンションモーメント

M_d : 曲げ破壊モーメント

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \quad p_w = A_s / (b_w \cdot d)$$

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度

b_w : ウェブ厚 d : 有効高

γ_b : 部材係数

(2) せん断耐力算定式

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{ped} \quad (2)$$

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

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

A_w : せん断補強筋断面積

f_{wyd} : せん断補強鉄筋の降伏強度 s_s : せん断補強鉄筋の配置間隔

P_p : 軸方向緊張材の有効引張力 α : 軸方向緊張材と部材軸のなす角度

(3) 実験値と計算値の比較

実験で得られた結果と上述の式で計算された値の比較一覧を表-5に示す。せん断ひび割れ発生荷重に着目すると、スターラップ量が少ないものに関してはよい近似を示したが、スターラップ本数が多くなるにつれて実験値が計算値を上まわることが確認できる。土木学会式はせん断補強筋がないコンクリートのひび割れ発生荷重を算定する式であることからこのような結果に至ったものと思われる。また、この傾向はプレストレスが導入されるとともに顕著になることが確認できる。次にせん断耐力に着目する。せん断補強筋のない供試体に関しては、せん断ひび割れ発生後に軸方向引張鉄筋にそった付着破壊が顕著であった。そのため、軸方向鉄筋の付着強度がせん断耐力に大きく寄与し、他の供試体に比して実験値と計算値との差が大きくなったものと思われる。せん断補強筋を配置した供試体は、プレストレスしないものは大凡の一致を示したが、プレストレス量の増加とともに一致度が小さくなるのが容易に確認できた。

表-4 実験結果

供試体名	せん断ひび割れ荷重(kN)	最大耐力(kN)	破壊形式
A-0-0	53	73	S-T-F
A-0-1.5	64	97	S-T-F
A-0-3	78	115	S-C-F
A-2-0	54	75	S-T-F
A-2-1.5	64	77	S-T-F
A-2-3	78	129	S-C-F
A-3-0	54	79	S-T-F
A-3-3	83	126	S-C-F
A-4-0	54	86	S-T-F
A-4-3	88	129	S-C-F
B-0-0	39	60	S-T-F
B-0-1	39	68	S-T-F
B-0-2	44	75	S-C-F
B-4-0	42	73	S-T-F
B-4-1	49	83	S-C-F
B-4-1'	47	84	S-C-F
B-5-0	44	75	S-T-F
B-5-1	47	78	S-T-F
B-5-1'	49	85	S-C-F

S-T-F: せん断引張型破壊

S-C-F: せん断圧縮型破壊

表一五 実験値と計算値の比較

供試体名	せん断ひび割れ荷重 (kN)			せん断耐力 (kN)			
	V_{cd1}	実験値	①/②	V_{sd}	$V_{cd1} + V_{sd}$	実験値	④/⑤
	①	②		③	④	⑤	
A-0-0	52	53	0.983	0	52	73	0.716
A-0-1.5	61	64	0.965	0	61	97	0.632
A-0-3	71	74	0.964	0	71	115	0.618
A-2-0	52	54	0.965	16	68	75	0.907
A-2-1.5	61	64	0.965	16	77	77	0.994
A-2-3	71	78	0.904	16	86	129	0.668
A-3-0	52	54	0.965	21	73	79	0.924
A-3-3	71	83	0.851	21	92	126	0.726
A-4-0	52	54	0.965	25	77	86	0.891
A-4-3	71	88	0.803	25	96	129	0.741
B-0-0	38	39	0.969	0	38	60	0.632
B-0-1	40	39	1.029	0	40	68	0.590
B-0-2	43	44	0.973	0	43	75	0.574
B-4-0	38	42	0.912	24	62	73	0.848
B-4-1	40	49	0.823	24	64	83	0.774
B-4-1'	40	47	0.866	24	64	84	0.761
B-5-0	38	44	0.861	32	70	75	0.927
B-5-1	40	47	0.866	32	72	78	0.927
B-5-1'	40	49	0.823	32	72	85	0.850

3. 3 考察

実験値と計算値の比較より曲げせん断ひび割れ発生荷重は大凡の近似を示した。せん断耐力に関しても、プレストレスしない供試体で補強筋を配置しない供試体以外は90%程度の近似を示している。しかし、プレストレスを導入した供試体に関しては、実験値と計算値の差が大きくなった。このことからせん断補強筋を有しないコンクリート梁に関しては、従来の土木学会コンクリート標準示方書の式で十分にせん断耐力の推定を行うことができるということが出来る。しかし、トラス理論より導かれるせん断補強筋を有するコンクリート梁のせん断耐力式は式中の第2項 V_{sd} について考察する必要がある。 V_{sd} 項の元式は図-4の幾何学的条件により(5)式で表すことができる。

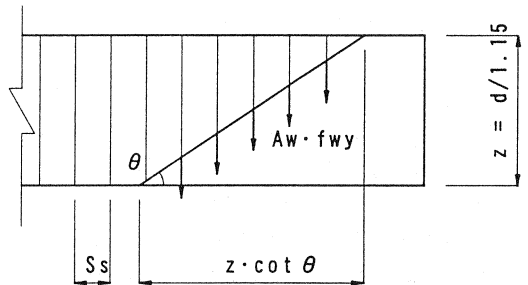


図-4 せん断補強筋作用概念図

$$V_{sd} = A_w \cdot f_{wyd} \cdot \frac{z \cot \theta}{S_s} \quad (5)$$

この式はトラス理論から導かれたものであり、ここでの $z \cdot \cot \theta / S_s$ はひび割れに交差するせん断補強筋の組数を表している。土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力式では斜めひび割れ角度を 45° と仮定しているため、 $\cot 45^\circ = 1$ となっている。ところが実験ではプレストレスの導入によりせん断ひび割れ角度が

小さくなる傾向が確認できている。このことは、せん断破壊時に有効なせん断補強筋の組数に影響を与えるものである。供試体A-4-3に着目すると、破壊性状は図-5に示す通りで、せん断ひび割れが鉄筋①~③に掛かっているのが確認できる。供試体内のせん断補強筋に添付したひずみゲージの値から得られたせん断補強筋の分担せん断力は図-6の様な結果となった。図中の破線は降伏値を示す。図からも分かるように、せん断補強筋②は降伏荷重に達しており、鉄筋③についても降伏荷重に近い値を示している。残りの各2本の鉄筋にもある程度のせん断力が分担されていることが図より確認できる。スターラップ①~③の分担力の合計の最大値は49.9kNとなり、表-5の V_{cd} に足し込むとせん断耐力は120.9kNとなりほぼ実験値に近くなる。しかし、同様な考えをA-2-3に当てはめると、計算値は111.3kNとなるが、実験値129.4kNとの差は大きくなった。よって、この考えも定量的でなく、他の要因を考える必要がある。

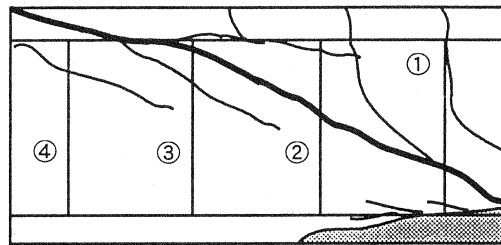


図-5 鉄筋配置状況

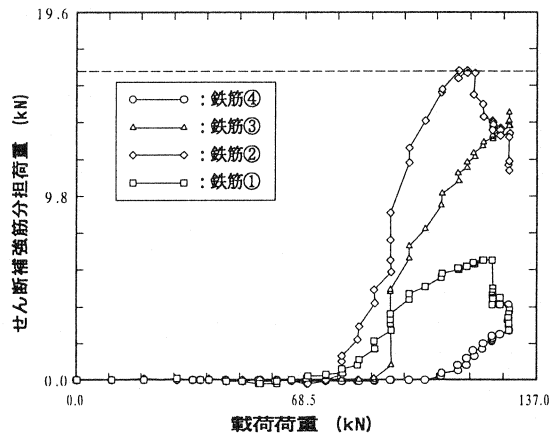


図-6 各せん断補強筋分担量

4. まとめ

今回の外ケーブルにより補強された鉄筋コンクリート桁を想定し実験を行い、以下の3つのことが確認できた。

- ①せん断ひび割れ発生荷重に関して、既存の算定式と実験値は大凡の一致を得た。
- ②部材にプレストレスを導入することによりせん断破壊時のひび割れの角度が、プレストレスを導入しない場合に比べて小さくなることが確認できた。
- ③導入プレストレスレベルの高い供試体はアーチ機構によりせん断圧縮破壊を起こした。

今後は、さらに8体の供試体に関して追加実験を行い、せん断ひび割れの発生角度に着目したせん断耐力式の提案および検証を修正圧縮場理論の展開により行う予定である。

参考文献)

- 1) 例えば、田辺忠顕、檜垣勇、梅原秀哲、二羽淳一郎：コンクリート構造、朝倉書店、1985
- 2) コンクリート標準示方書(平成8年版)設計編、土木学会、1996