

## 外ケーブルにより軸力を導入したRC梁のせん断耐力向上効果に関する実験と解析

オリエンタル建設株式会社 鄭 慶玉  
 オリエンタル建設株式会社 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

外ケーブル構造のせん断特性に関する研究は十分ではない。外ケーブル構造は通常の鉄筋コンクリート構造と比べて、せん断耐力は一般的に向上する。その力学的説明のひとつとして外ケーブルを曲げ上げ配置した場合の鉛直分力が内部せん断力を低減させることが挙げられる。また、外ケーブルによる軸方向力が鉄筋コンクリート梁部材内の応力性状に影響を及ぼすこともせん断耐力を向上させる大きな要因である。

本研究では、プレストレス力による圧縮応力とせん断補強鉄筋量の鉄筋コンクリート梁部材のせん断耐力に及ぼす影響に着目することとした。片持ち梁形式の模型供試体による静的実験を行い、軸力によるせん断耐力の向上効果を検証する手法として非線形材料モデルを考慮した有限要素法解析により解析を行った。さらに、解析結果と実験結果を比較することにより考察を加えた。

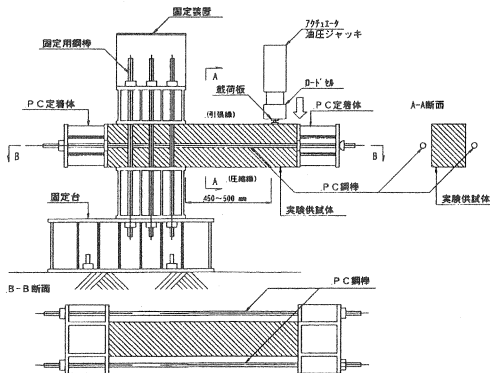
### 2. せん断破壊実験

#### 2.1 実験概要

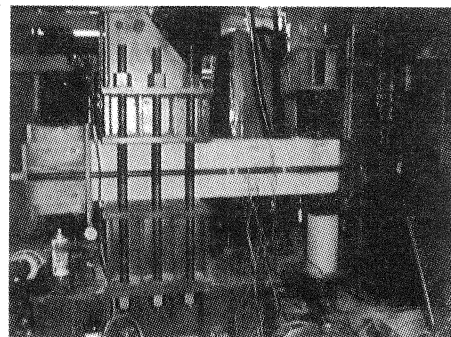
実験装置を図一および写真一に示す。実験は鋼製の固定装置の間に供試体をセットし、6本のP C鋼棒を鉛直方向に緊張することにより供試体を片持ち梁の状態にする。荷重はサーボ式アクチュエーターと手動油圧ジャッキを用い、ロードセル・載荷板を通じて供試体先端に荷重をかける方法で行った。載荷板は梁の変形に対して確実な設置を確保するため、ヒンジ構造を採用した。この実験では供試体に外ケーブルを用いて軸力を与える必要がある。外ケーブルによる軸力導入は、供試体の両端にセットしたP C鋼棒の端部ネジにナット回転を与える方法で行った。軸力導入の確認は供試体せん断スパン中央の4面の中心に取り付けたコンクリートゲージのひずみ値とP C鋼棒に取り付けたひずみゲージ値から行うことにした。

#### 2.2 実験供試体

本実験で用いた供試体の概要を図二に示す。A、Bシリーズは、それぞれのせん断スパン比が2.33と2.73であ



図一 実験装置概要図



写真一 実験装置

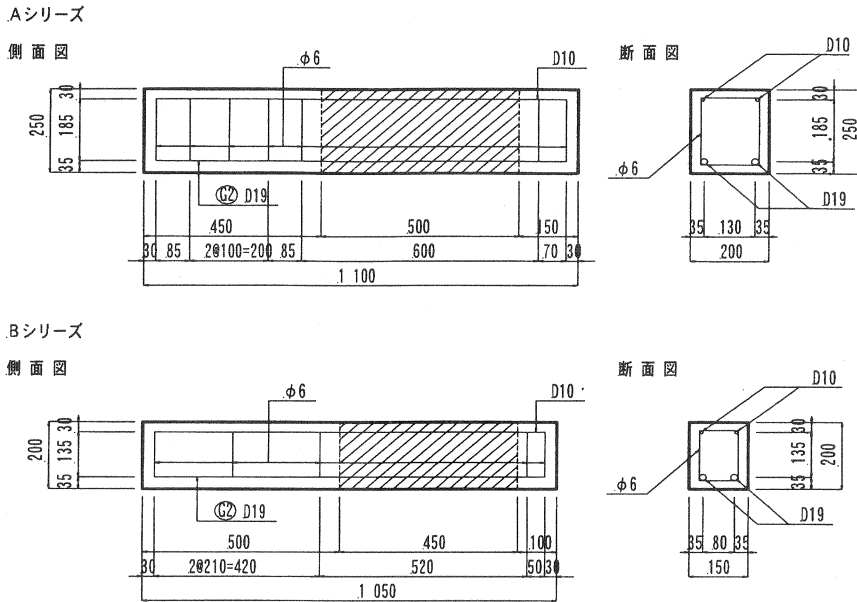


図-2 実験供試体概要図 (側面図)

る。図中のハッチング部にφ6の丸鋼のせん断補強筋を用い、供試体毎にその本数を変化させた。圧縮鉄筋にはD10そして引張鉄筋にはD19を使用し、外ケーブル鋼材としてはPC鋼棒SBPR 930/1080B種1号を用いた。使用材料の機械的性質は表-2に、コンクリートの材料定数は表-3の通りである。表-4に実験パラメーターを整理して供試体の種類をまとめた。

表-2 鋼材の機械的性質

種類	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
φ6	28.27	230	270	1.793E+05
D10	71.33	380	510	2.059E+05
D19	286.5	380	510	2.059E+05

表-3 コンクリートの材料定数

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
Aシリーズ	49.3	3.59
Bシリーズ	49.5	3.31

表-4 実験パラメーター

供試体名	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	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 (%)	導入応力 (N/mm <sup>2</sup> )
A-0-0	49.3	∞	0	0.000	0.0
A-0-1.5					1.5
A-0-3					3.0
A-2-0					0.0
A-2-1.5		1.5			
A-2-3		3.0			
A-3-0		0.0			
A-3-3		3.0			
A-4-0		0.0			
A-4-3		3.0			
B-0-0	49.7	∞	0	0.000	0.0
B-0-1					1.0
B-0-2					2.0
B-0-3					3.0
B-0-4	4.0				
B-4-0	49.7	10.0	4	0.377	0.0
B-4-1(2)					1.0
B-4-2(2)					2.0
B-4-3(2)					3.0
B-4-4(2)					4.0
B-5-0					0.0
B-5-1(2)	49.7	7.5	5	0.503	1.0
B-5-2(2)					2.0
B-5-3(2)					3.0
B-5-4(2)					4.0

### 2.3 測定項目

本実験では、基本的な鉄筋コンクリートの曲げせん断特性を調べることを目的とし、次の項目について測定および観察を行った。

- ①せん断補強筋の分担せん断力
- ②梁のたわみ
- ③目視によるひび割れ観察
- ④P C鋼棒の張力変化

測定項目の概要図を図-3に示した。点線で囲まれた部分がせん断スパンを、ハッチング部は固定点を示す。

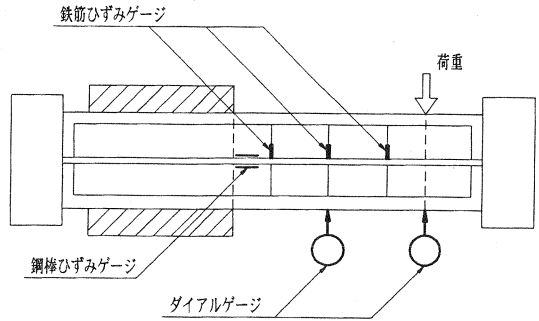


図-3 測定概要図

### 2.4 実験結果

#### 1) 破壊性状

本実験による最終破壊性状を図-4に示す。ひび割れ性状の図中に引張鉄筋、圧縮鉄筋およびせん断補強筋を併記した。図中のハッチング部分は最終段階でのコンクリートの圧壊もしくは剥離破壊した部分を示す。軸力を導入しなかった供試体は全て斜め引張破壊を起こした。破壊時に支配的となったせん断ひび割れの角度は梁高さの半分のところではほぼ45°の角度となった。せん断補強筋の配置本数によりひび割れの性状は変化し、配置本数が多いほどこの45°になる位置が固定端より遠ざかる傾向を示した。また、ひび割れの分散性は良い傾向を示した。軸力を導入した供試体は導入軸力が大きくなるにつれてせん断圧縮破壊の傾向を強く示すことが明確に認められる。また、曲げせん断ひび割れの角度は導入軸力の増加に比例して小さくなった。せん断補強筋を配置した供試体と配置しなかった供試体を比較すると、配置しなかった供試体は引張鉄筋でのダウエル作用によって引張鉄筋に沿った剥離破壊が顕著であった。

#### 2) 既存せん断耐力式と実験値の比較

実験結果と土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>のせん断耐力算定式による計算結果を比較した結果を表-5に示す。

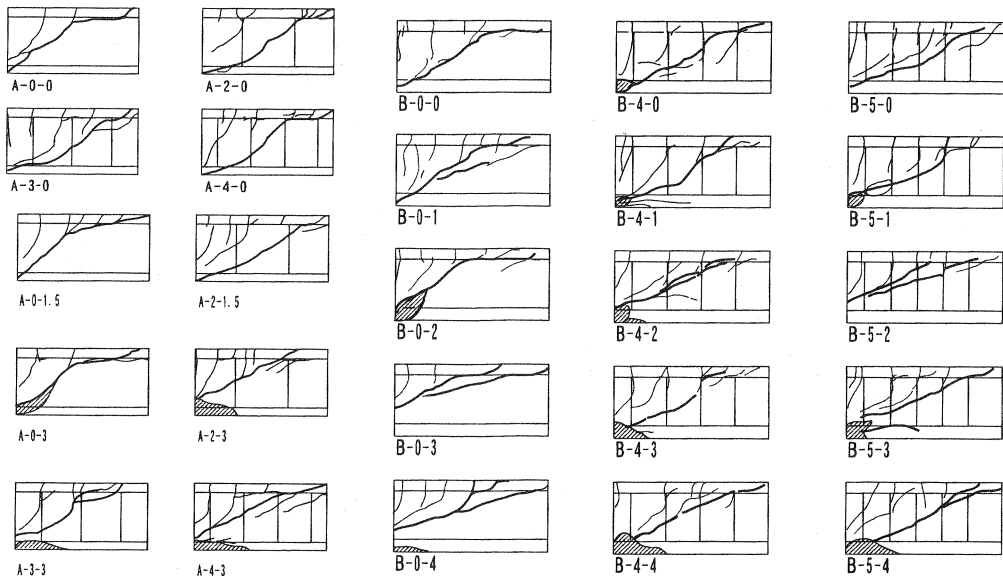


図-4 最終破壊性状

表一5 実験結果と計算結果の比較

供試体名	各分担荷重(kN)								終局荷重(kN)		
	実験値		計算値 $V_{cd}$	計算値と実験値の比較		実験値 $V_s$	計算値 $V_{sd}$	④/⑤	実験値 ⑥	計算値 ③+⑤	⑥/⑦
	$V_{c1}$ ①	$V_{c2}$ ②		①/③	②/③						
A-0-0	53	—	51	1.039	—	—	—	—	73	51	1.431
A-0-15	64	—	59	1.085	—	—	—	—	97	59	1.644
A-0-3	78	—	65	1.200	—	—	—	—	115	65	1.769
A-2-0	54	56	51	1.059	1.098	23	12	1.901	75	63	1.189
A-2-15	64	66	59	1.085	1.119	26	12	2.149	77	71	1.083
A-2-3	78	80	66	1.182	1.212	14	12	1.157	129	78	1.652
A-3-0	54	59	51	1.059	1.157	31	16	1.914	79	67	1.176
A-3-3	83	87	66	1.258	1.318	33	16	2.037	126	82	1.533
A-4-0	54	58	51	1.059	1.137	38	20	1.949	86	71	1.220
A-4-3	88	86	66	1.333	1.303	31	20	1.590	129	86	1.509
B-0-1	39	—	41	0.951	—	—	—	—	68	41	1.659
B-0-2	44	—	44	1.000	—	—	—	—	75	44	1.705
B-0-3	45	—	46	0.978	—	—	—	—	72	46	1.565
B-0-4	49	—	49	1.000	—	—	—	—	69	49	1.408
B-4-1	44	43	41	1.073	1.049	34	19	1.789	83	60	1.383
B-4-2	45	45	44	1.023	1.023	39	19	2.053	83	44	1.886
B-4-3	50	50	47	1.064	1.064	43	19	2.263	95	66	1.439
B-4-4	48	48	49	0.980	0.980	40	19	2.105	79	68	1.162
B-5-1	42	41	41	1.024	1.000	47	25	1.880	85	66	1.288
B-5-2	44	48	44	1.000	1.091	61	25	2.440	91	69	1.319
B-5-3	45	45	46	0.978	0.978	47	25	1.880	76	71	1.070
B-5-4	47	51	49	0.959	1.041	52	25	2.080	87	74	1.176

$V_{c1}$  : 目視観察によるひび割れ発生荷重  
 $V_{c2}$  :  $V_c$  &  $V_s$  関係のグラフよりもとまる  $V_c$  ピーク荷重  
 $V_s$  :  $V_c$  &  $V_s$  関係のグラフよりもとまる  $V_s$  ピーク荷重

使用したせん断耐力算定式は次に示すとおりである。

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

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

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

$$V_{ped} = P_{ed} \cdot \sin \alpha_p \quad (4)$$

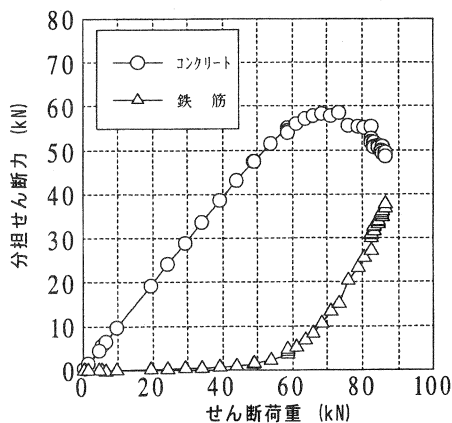
$V_{yd}$  : せん断耐力

$V_{cd}$  : コンクリートが分担するせん断力

$V_{sd}$  : せん断補強筋が分担するせん断力

$V_{ped}$  : プレストレスの鉛直方向力による抵抗せん断力

測定項目でせん断補強筋に添付したひずみゲージ値から計算できるせん断分担力を挙げた。このせん断分担力を  $V_s$  とし、実測値の作用せん断力から  $V_s$  を差し引いたもの  $V_c$  とした。そして、この  $V_c$  と  $V_s$  との関係をグラ



図一5  $V_c$  &  $V_s$  曲線

化したものを  $V_c$  &  $V_s$  曲線として図-5に示す。このときの  $V_c$  のピーク値を  $V_{c2}$  として、また、 $V_c$  &  $V_s$  曲線から得られる  $V_s$  の最大値を  $V_s$  の実験値として表-5に示した。せん断ひび割れ発生荷重に着目すると、Aシリーズの供試体に関しては  $V_{cd}$  と  $V_{cl}$  はよい近似を示すが、導入軸力レベルが大きくなると  $V_{cd}$  と  $V_{cl}$  の値の差は大きくなる傾向を示した。一方、Bシリーズでは導入軸力レベルに関わらずよい近似を示し、 $V_{cl}$  と  $V_{c2}$  の値はほぼ等しくなった。次にせん断耐力に着目すると、実験値が計算値を全て上回る結果となった。せん断補強筋を配置しなかった供試体に関しては、斜めひび割れ発生後に引張鉄筋に沿ったダウエル破壊が顕著となったため実験値が計算値を大きく上回ったものと推察できる。せん断補強筋を有する供試体に関しては、せん断補強筋が分担するせん断力の実験値が計算値を大きく上回っており、このことが実験で得られた終局荷重が算定式の値を超えた主な要因と推察される。

### 3. 解析によるせん断耐力算定

せん断耐力の算定を非線形有限要素法解析を用いて行い、実験結果との比較および考察を加えた。

#### 3. 1 解析モデル

ひび割れモデルは固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルを比較検討し、ひび割れ形成の再現性より固定ひび割れモデルを用いることにした。せん断補強筋のモデル化に関してもスミアードモデルとディスクリ

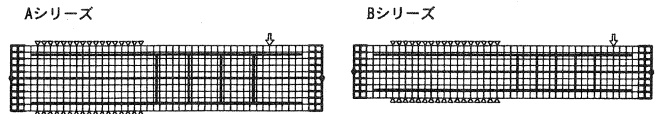


図-6 要素分割図

ートモデルの2種類を比較検討し、ディスクリットモデルを採用することにした。解析には鉄筋コンクリートの2次元平面応力解析問題用に開発された CERVENKA CONSULTING の「SBETA」を用いた。両モデルの要素分割図を図-6に示す。

#### 3. 2 解析結果と実験結果の比較

##### 1) 荷重-変位関係

A、BシリーズのFEM解析と実験データから得られる荷重-変位曲線を比較したものを図-7に示す。

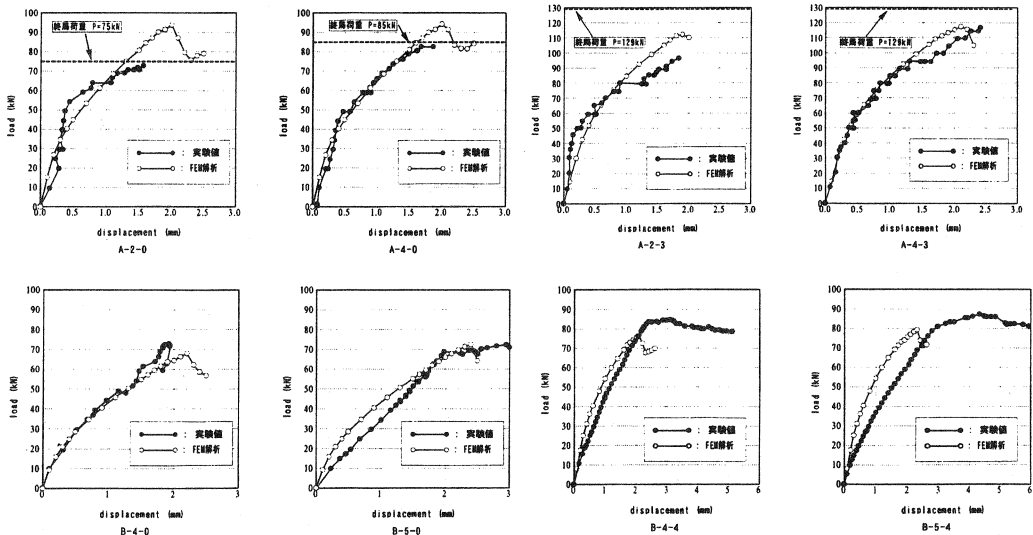


図-7 荷重-変位曲線

FEM 解析の結果、終局荷重は A シリーズでは実験と解析結果の差が大きかったが、B シリーズではほぼ実験値と解析結果は一致した。荷重-変位曲線に着目すると、A シリーズが機械特性により大きな差を生じたが、回転補正を行うことにより解析とはほぼ同じ荷重-変位関係となった。一方、B シリーズは補正を行うこともなく、実験結果と解析結果から得られる荷重-変位関係はほぼ等しくなった。

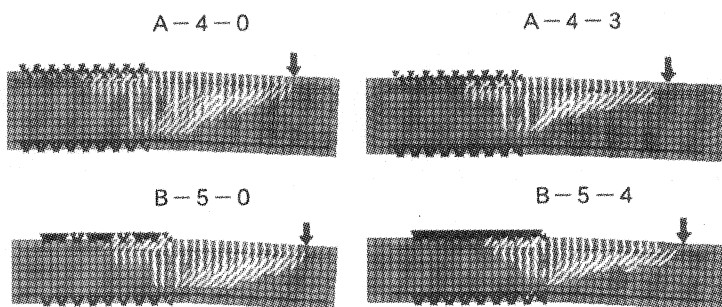


図-8 ひび割れ性状

### 2) ひび割れ性状

FEM 解析から得られるひび割れ性状図の代表的なものを図-8 に示す。A、B シリーズとも解析では導入軸力によりひび割れ角度が小さくなっており、このことは実験で得られた供試体のひび割れ性状と一致する。また、せん断補強筋を配置しなかった供試体の解析結果と比べて、せん断補強筋を配置することにより生じるひび割れの分散性もよく再現されていた。

### 3) せん断耐力

FEM 解析から得られるせん断耐力の値と、実験値に対してせん断破壊時に支配的になった斜めひび割れに交差するせん断補強筋をのみを考慮して再評価した値を比較した表を表-6 に示す。せん断補強筋を配置してないものおよびせん断補強筋比が小さい供試体は解析値と実験値では大きな差が生じた。せん断補強筋比を密に配置し、せん断補強筋比が大きい供試体は解析値と実験値はほぼ等しい値となった。せん断補強筋を配置しない供試体は、実験ではひび割れの発生位置や角度によりダウエル効果が顕著に現れるケースもあった。しかし、FEM 解析ではダウエル効果が再現されておらず、このような大きな差が生じた。また、せん断補強筋比が小さい供試体は、実験ではディスクリートの破壊するが、FEM 解析はコンクリート要素に対してスミアードモデルを採用しており、このため、解析値と実験値に大きな差をもたらす結果となった。

表-6 再評価による実験値と FEM 結果の比較

供試体名	再評価値	FEM結果	供試体名	再評価値	FEM結果
A-0-0	73	87	B-0-1	68	62
A-2-0	72	93	B-0-2	75	63
A-3-0	70	94	B-0-3	72	65
A-4-0	75	98	B-0-4	69	68
B-0-0	60	48	B-4-1	76	72
B-4-0	60	68	B-4-2	76	74
B-4-0'	66	68	B-4-3	89	75
B-5-0	66	72	B-4-4	77	76
B-5-0'	65	72	B-5-1	77	76
A-0-15	97	104	B-5-2	83	78
A-0-3	115	112	B-5-3	78	79
A-2-15	77	108	B-5-4	79	80
A-2-3	93	113			
A-3-3	119	114			
A-4-3	129	119			

### 4. まとめ

外ケーブルにより軸力を導入した RC 梁のせん断耐力に着目し、基礎的な実験と解析を行った。実験値と既存耐力式による値は大きな差を生じたが、実験結果の再評価を行い、非線形 FEM を適用することにより、せん断補強筋比が大きい供試体のせん断耐力の推定およびひび割れ進展性状の解明には有効である考えることができる。

参考文献)

- 1) コンクリート標準示方書 (平成 8 年版) 設計編, 土木学会, 1996