

論文

[2199] せん断補強鉄筋を用いない鉄骨鉄筋コンクリート梁の耐力について

渡辺 忠朋\*1・伊藤 裕一\*2・佐藤 収\*3

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRCという）は、鉄道構造物においては施工条件に制約がある場合や桁高制限がある場合に適用される構造であり、鉄筋コンクリート部材に比べて断面を小さくできる等の長所がある。

SRC部材の耐力算定方法は、土木学会示方書<sup>1)</sup>では曲げ耐力の算定については構造を累加型構造と鉄骨鉄筋併用構造に区分し、それぞれ累加強度方式とRC方式（鉄骨を鉄筋に換算）を適用することになっている。また、せん断耐力の算定については、RC部分と鉄骨部分の和とする累加強度方式を適用している。

一方、構造物の設計方法に限界状態設計法を適用する場合、その耐力算定方法に対する安全性について検討する必要があるが、それらについて十分に明らかにされていないのが現状である。

そこで実構造物をモデル化したSRC梁供試体を用いて載荷試験を行い、既往の耐力算定手法の評価を行うことにした。以下に、載荷試験の概要および既往の耐力算定手法の検討結果を示す。

2. 実験概要

2.1 供試体形状および諸元

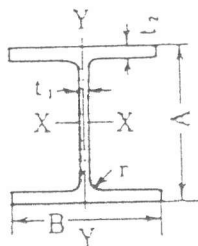
供試体諸元および形状

表-1 供試体諸元

をそれぞれ表-1および図-1に示す。供試体はコンクリート内に鉄骨および鉄筋を配置した供試体8体と鉄筋のみを配置した供試体2体の合計10体製作した。

No.	a	d <sub>e1</sub>	d <sub>e2</sub>	d <sub>w2</sub>	A <sub>s1</sub>	A <sub>s2</sub>	A×B×t <sub>1</sub> ×t <sub>2</sub>	f' <sub>c</sub>
1	105	5	10	10	D16-4	D13-2	200×100×5.5×8	278
2	70	5	10	10	D16-4	D13-2	200×100×5.5×8	267
3	105	5	10	10	D32-3, D16-2	D13-2	200×100×5.5×8	278
4	70	5	10	10	D32-3, D16-2	D13-2	200×100×5.5×8	267
5	105	5	10	10	D32-5	D13-2	200×100×5.5×8	268
6	70	5	10	10	D32-5	D13-2	200×100×5.5×8	267
7	70	5	10	5	D32-2, D19-2	D13-2	250×125×6.0×9	268
8	70	5	10	10	D16-6	D13-2	194×150×6.0×9	268
9	60	0	0	10	—	D13-2	300×150×6.5×9	268
10	52.5	0	5	5	—	D13-2	300×150×6.5×9	267

実験は、鋼材比（鋼材断面積／コンクリート断面積）、鉄骨鉄筋比（鉄筋断面積／鉄骨断面積）およびせん断スパン比（a/d: dは、圧縮縁から最下段の引張鋼材図心までの距離）をパラメータとして行った。



注) a, d<sub>e1</sub>, d<sub>e2</sub>, d<sub>w2</sub>: 単位は cm  
 A×B×t<sub>1</sub>×t<sub>2</sub>: 単位は mm  
 A<sub>s1</sub>: 引張鉄筋量(径一本)  
 A<sub>s2</sub>: 圧縮鉄筋量(径一本)  
 f'<sub>c</sub>: コンクリートの圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

\*1 (財) 鉄道総合技術研究所 橋梁担当研究室研究員 (正会員)  
 \*2 (財) 鉄道総合技術研究所 橋梁担当研究室研究員  
 \*3 (財) 鉄道総合技術研究所 橋梁担当研究室研究員

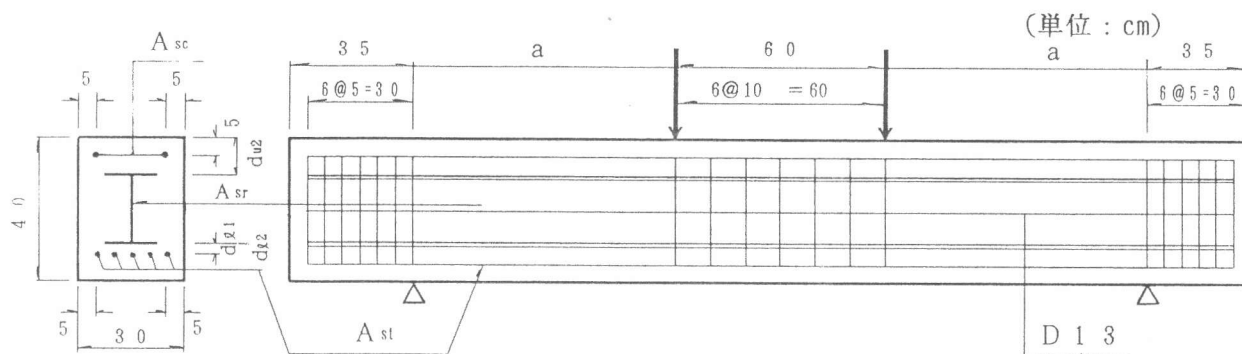


図-1 供試体形状および載荷方法

## 2.2 載荷方法

載荷方法を図-1に示す。

載荷は2点対称載荷で単調載荷とした。

## 2.3 測定項目

測定は、ひずみ（鉄筋、鉄骨およびコンクリート）ひびわれおよび破壊性状について行った。

## 2.4 使用材料

セメントは早強ポルトランドセメント、鉄筋および鉄骨は、それぞれSD345およびSS400を用いた。コンクリートの配合を表-2に示す。鉄筋、鉄骨の引張降伏強度をそれぞれ表-3および表-4に示す。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ひびわれおよび破壊性状

最大荷重時のひびわれ状況の例を図-2に示す。

鉄骨と鉄筋の両方を配置した供試体（No.1～8）のうちNo.3, 5および6の供試体は、まず、スパン中央付近に曲げひびわれが発生し、載荷荷重の増加とともに曲げひびわれが多数発生した。その後せん断スパン内にせん断ひびわれが発生し梁の圧縮領域に向かって伸展するが、供試体上側へ伸展するひびわれの発生は認められなかった。

しかし、荷重の増加とともに荷重載荷点と支点内の支点側の供試体の上側に上フランジに沿ってせん断ひびわれが発生し、せん断破壊した。その他の供試体は、せん断ひびわれが拡大する前に鉄筋および鉄骨のひずみが降伏ひずみに達して梁上側のコンクリートが圧壊し、曲げ破壊した。

SRC部材の場合、せん断スパン比が比較的大きいRC部材では斜め引張破壊する領域でも、斜めひびわれ発生後も顕著な耐力の増加が認められ、斜めひびわれが梁の上側へ貫通しないことなど、一般のRC部材のせん断破壊性状に比べると、破壊形態が異なる傾向にあるものと考えられる。また、曲げひびわれの発生状況から考えるとSRC部材でも引張側に鉄筋を配置することにより、RC部材とほぼ同等のひびわれ性状が得られるものと考えられる。

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度	240 kgf/cm <sup>2</sup>
セメント	早強ポルトランドセメント
スランブの範囲	8 ± 2.5 cm
空気量	4.0 ± 1 %
水セメント比	55 %

表-3 鉄筋の引張降伏強度( $f_{sy}$ )

呼び名	引張降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
D13	3950
D16	3480
D19	4180
D25	4090
D32	3910

表-4 鉄骨の引張降伏強度( $f_{sy}$ )

寸法(mm)	引張降伏強度(kgf/cm <sup>2</sup> )
200×100×5.5×8	2890
194×150×6.0/9.0	4090
300×150×6.5/9.0	3390
250×125×6.0/9.0	3110

なお、鉄骨のみを配置した供試体No.9およびNo.10は、曲げひびわれは2~3本程度しか発生せず、鉄筋を配置したSRC供試体に比べてひびわれ分散性が劣る結果となり、曲げひびわれ幅が拡大し

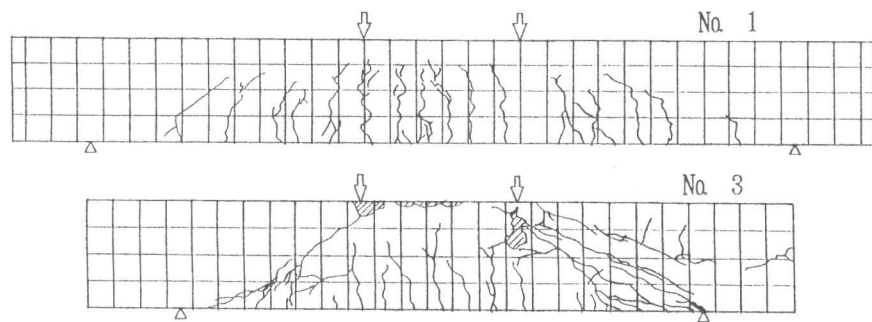


図-2 ひびわれ性状

て鉄骨が降伏し、載荷荷重が増加しなくなった。

### 3.2 曲げ耐力

実験から得られた最大荷重( $P_{max}$ )を表-5に示す。

なお、実測された鉄筋および鉄骨ひずみおよび破壊性状から供試体No.3, 5および6以外を曲げ破壊と判断した。供試体の曲げ耐力を算定し、実験結果との比較を行う。曲げ耐力の算定は、RC方式<sup>1)</sup>と累加強度方式<sup>1)</sup>により行った。計算値( $P_{Muca1}$ )および実験値( $P_{max}$ )と計算値の比を表-5に示す。各パラメータと実験値と計算値の比の関係を、図-3に示す。曲げ耐力算定手法にいずれの方法を用いても概ね精度良く算定される結果となっているが、累加強度方式の方がRC方式に比べ実験値を過少に評価する傾向にある。なお、曲げ破壊した供試体の実験値/計算値の平均値は、RC方式で1.07、累加強度方式で1.08となった。

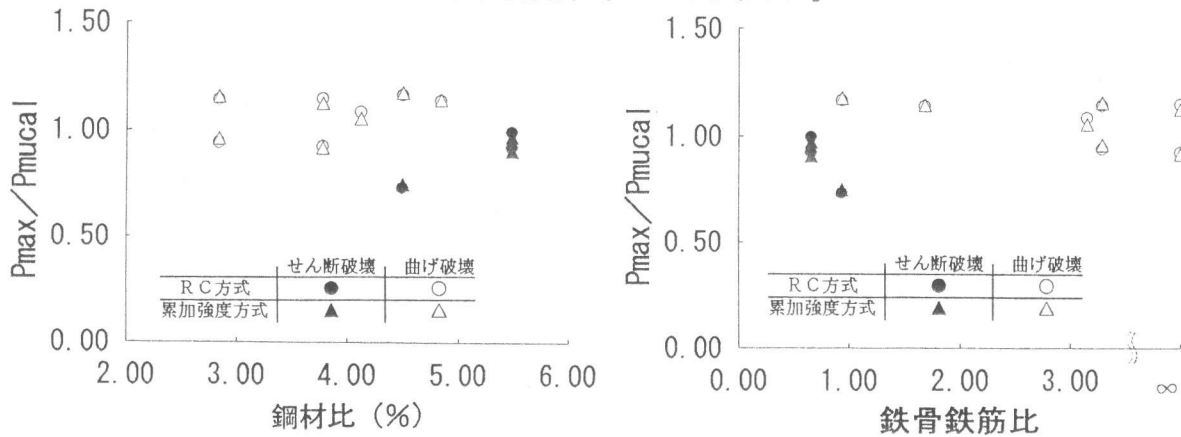


図-3 各パラメータと $P_{max}/P_{Muca1}$ の関係

### 3.3 せん断耐力

(1) 既往のせん断耐力算定式による評価

既往のせん断耐力算定式として土木学会示方書<sup>1)</sup>に示されている次式を用いて、せん断耐力の評価を行った。なお、安全係数は全て1.0とした。

$$V_{sry} = V_{sy} + V_{cd} \quad (1)$$

ここに、 $V_{sy}$ : 鉄骨部分のせん断耐力

$V_{cd}$ : RC部分のせん断耐力

$$V_{sy} = f_{vyd} \cdot Z_w \cdot t_w / \gamma_b \quad (2)$$

ここに、 $f_{vyd}$ : 鋼材の設計せん断降伏強度

$Z_w$ : 鉄骨の腹部高さ

$t_w$ : 鉄骨の腹部厚さ

$\gamma_b$ : 部材係数(=1.0)

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (3)$$

ここに、 $f_{vcd} = 0.9 \sqrt[3]{f'_{cd}}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

$$\beta_d = \sqrt[4]{100/d} \quad (d : \text{cm}) \quad \beta_p = \sqrt[3]{100 p_w}$$

$b_w$  : 腹部の幅  $d$  : 有効高さ

$$p_w = A_s / (b_w \cdot d) \quad A_s : \text{引張側鋼材の断面積} \quad \gamma_b : \text{部材係数}(=1.0)$$

$f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>) とする。  $\gamma_b = 1.0$

計算値( $V_{call}$ )および実験値と計算値の比を表-5に示す。

また、各パラメータと実験値と計算値の比の関係を図-4に示す。なお、図中にはせん断破壊と判定された供試体の値については○印、曲げ破壊耐力と判定された供試体の値については×印として示した。土木学会示方書を適用した場合、計算値はせん断スパン比の大きい領域では実験値をほぼ評価できる結果となった。しかし、せん断スパン比の小さい領域では、供試体は曲げ破壊しているので実際のせん断耐力は実験値よりも大きいことを考慮すると実験値を過少に評価する結果となることが分かる。

せん断スパン比の影響に着目すると、鉄骨および鉄筋を配置した供試体については、RC部材と同様にせん断スパン比が小さくなるとせん断耐力は増加する傾向にあることが分かる。

なお、鋼材比および鉄骨鉄筋比についてはとくに顕著な傾向は認められないと考えられる。

表-5 実験結果

No.	$P_{cr}$	$P_{max}$	$P_{Mucal1}$	$P_{max}/P_{Mucal1}$	$P_{Mucal2}$	$P_{max}/P_{Mucal2}$	$V_{call}$	$P_{max}/V_{call}$
1	3.80	16.3	17.33	0.94	16.97	0.96	24.19	0.67
2	3.00	29.5	25.79	1.14	25.46	1.16	24.09	1.22
3	3.50	25.0	34.13	0.73	33.41	0.75	27.92	0.90
4	6.25	59.0	50.65	1.16	50.11	1.18	27.77	2.12
5	5.50	36.7	39.74	0.92	40.47	0.91	28.76	1.27
6	3.75	59.0	59.47	0.99	60.70	0.97	28.57	2.05
7	6.50	58.5	51.40	1.14	51.09	1.15	35.13	1.67
8	3.75	42.3	39.03	1.08	40.10	1.05	33.20	1.27
9	7.25	40.0	43.23	0.93	43.60	0.92	35.88	1.11
10	4.00	49.4	43.05	1.15	43.89	1.13	35.88	1.38

注)  $P_{cr}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_{Mucal1}$ ,  $P_{Mucal2}$ ,  $V_{call}$  : tf  $P_{cr}$  : 曲げひびわれ発生荷重  
 $P_{Mucal1}$ ,  $P_{Mucal2}$  : それぞれRC方式、累加強度方式による計算値

## (2) 耐力算定手法に対する一考察

SRC部材の各抵抗機構を考慮した種々のせん断耐力算定手法<sup>2)</sup>が提案されている。ここでは本実験でせん断破壊した供試体No 3, 5および6の実験結果を用いてSRC部材のせん断耐力を鋼とコンクリートによるサンドイッチ構造部分とそれを除いたRC部分のそれぞれのせん断耐力の和であると仮定して、せん断耐力の推定を試みた。RC部分のせん断耐力は、腹部幅( $B - b_f$ )を有する矩形断面梁として、せん断スパン比の影響を考慮して次式で求めた。

$$V_{ccal} = f(a/d) \cdot f'_{cd} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

ここに、 $f(a/d) = 0.94(0.75 + 1.4 d/a)$  ただし、 $a/d \geq 2.5$ <sup>3)</sup>

$$= 3.58(a/d)^{-1.166} \quad \text{ただし、} 2.5 \geq a/d \geq 0.5 \quad 4)$$

$b_w = B - bf$  (B: 供試体幅  $bf$ : 鉄骨フランジ幅)

実験から得られた最大荷重からRC部分のせん断耐力  $V_{ccal}$  を差引いた値をサンドイッチ構造部分が負担するせん断力 ( $V_{sctest}$ ) とした。サンドイッチ構造部分のせん断耐力は、トラス機構の耐力で算定できると仮定し、せん断破壊した供試体のひずみ測定結果によると鉄骨ウェブ部分は鉄骨ウェブ部分は降伏していないことから、コンクリートの圧縮斜材の破壊として次式で求めることとする。

$$V_{sccal} = f_{vu} \cdot b_w \cdot d + V_w \quad (5)^{5)}$$

ここに、 $f_{vu} : 0.6f'_c{}^{1/2} \beta_d \beta_p \beta_s$  もしくは  $4f'_c{}^{1/2}$  のうち大きい値

$V_w$  : せん断補強鋼材が引張鋼材としてトラス機構で考慮される以外に負担できるせん断力

$\beta_s : 5 / (1 + \cot^2 \theta)$

$\theta$  : コンクリートの圧縮斜材の部材軸のなす角度  $30^\circ$  とする。

せん断耐力の計算値 ( $V_{sccal}$ ) および  $V_{sccal}$  と  $V_{sctest}$  との比を表-6に示す。

なお、計算は  $V_w$  を0として求めた。供試体No.3とNo.5は、引張鉄筋量のみが異なる供試体である。

鋼材比と  $V_{sccal}$  と  $V_{sctest}$  の比の関係を図-5に示す。引張鉄筋量が増加すると、サンドイッチ構造部分で負担するせん断力が増加していることになる。また、コンクリートの圧縮斜材の圧縮破壊耐力の計算値との比では、No.3は1.09であるのに対してNo.5は1.93となり約2倍のせん断力を負担する結果となっている。

圧縮破壊耐力自体のばらつきが予想されるものの、実際には  $V_w$  が負担するせん断力が存在していると考えられる。一般に、引張・圧縮鋼材量が多くなると  $V_w$  が大きくなる<sup>5)</sup>とされていることから、引張鉄筋量の増加が一因となり、 $V_w$  が増加したことを示していると考えられる。

供試体No.5とNo.6は、せん断スパン比のみが異なる供試体である。せん断スパン比と  $V_{sccal}$  と  $V_{sctest}$  の比の関係を図-6に示す。せん断スパン比が小さくなると、サンドイッチ構造部分で負担するせん断力が増加していることになる。

これは、サンドイッチ構造においても

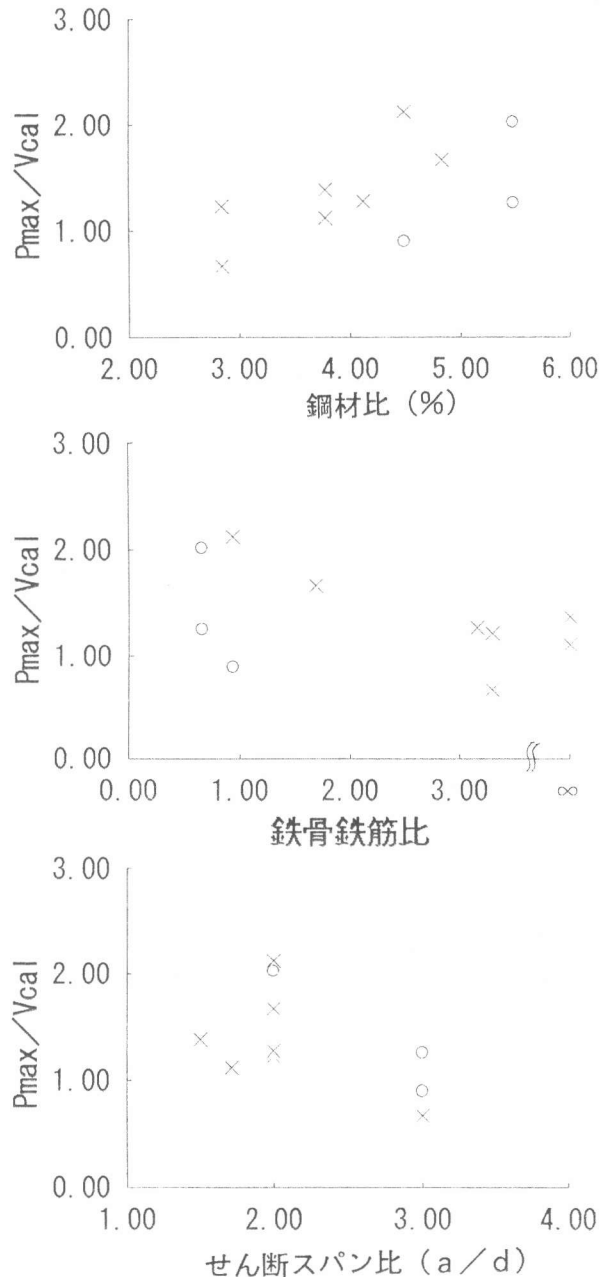


図-4 各パラメータと  $P_{max}/V_{cal}$  の関係

表-6 せん断耐力の計算結果

供試体 No.	$V_{ccal}$ (tf)	$V_{test}$ (tf)	$V_{sctest}$ (tf)	$V_{sccal}$ (tf)	$\frac{V_{sctest}}{V_{sccal}}$
3	10.76	25.0	14.24	13.07	1.09
5	11.97	36.7	24.73	12.83	1.93
6	16.68	59.0	42.32	12.81	3.30

注)  $V_{sctest} = V_{test} - V_{ccal}$

せん断スパン比が小さくなると、圧縮破壊耐力はトラス機構からアーチ機構へ変化し増加していくとされていることと同様の傾向があると考えられる。

なお、圧縮破壊耐力の計算値との比ではNo.5が1.93であるのに対してNo.6は3.30となりNo.5の1.7倍となっているが、両供試体の差異中には、前述同様トラス機構以外で受持つ鋼材のせん断力がせん断スパン比が小さくなるほど増加する<sup>5)</sup>とされていることから、これらの影響も含まれているものと考えられる。

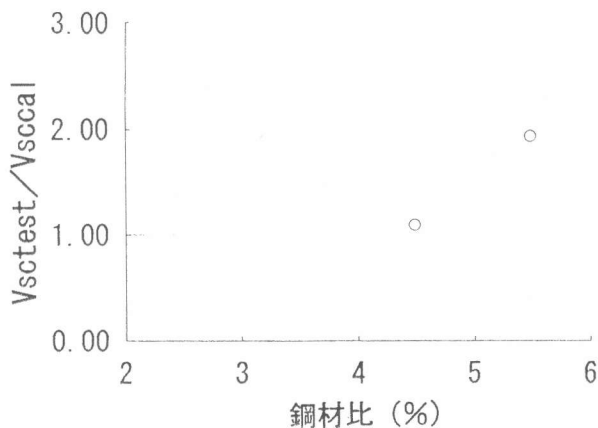


図-5 鋼材比と  $V_{sctest}/V_{sccal}$  の関係

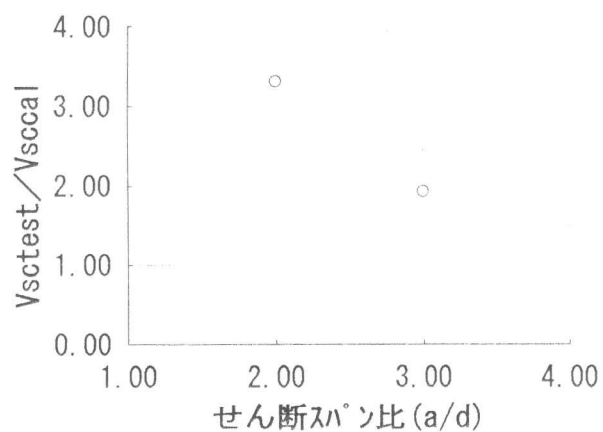


図-6 せん断スパン比と  $V_{sctest}/V_{sccal}$  の関係

#### 4. 結論

本実験の範囲で明らかになったことを以下に示す。

- (1) 曲げ耐力の算定手法については、累加強度方式、RC方式のいずれも概ね実験結果を安全側に推定できる。
- (2) SRC部材は、RC部材と異なりせん断スパン比が大きい領域でも斜めひびわれ発生後も顕著な耐力の増加が認められる。
- (3) 既応のせん断耐力算定式<sup>1)</sup>は、安全側に実験結果を評価できる結果となった。
- (4) SRC部材のせん断耐力をRC構造とサンドイッチ構造の累加とした場合、サンドイッチ構造部分のせん断スパン比の影響やせん断補強鋼板の抵抗機構について検討する必要があると考えられる結果が得られた。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成3年版）設計編，平成3年  
鉄道総研報告，Vol.2, No.7, p.17~p.25, 1988.7.
- 2) たとえば 若林 實，南 宏一：コンクリート系構造部材のせん断強度について，  
京大防災研究所年報第24号 B-1, p.245~277, 1981.4.
- 3) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村 甫：せん断補強鉄筋を用いないRC梁のせん断  
強度式の再評価，土木学会論文集，第372号/V-5, p.167~176, 1986.8.
- 4) 石橋忠良，松田好史，斉藤啓一：少数本の杭を用いたフーチングのせん断設計について，  
土木学会論文報告集，第337号, p.197~204, 1983.9.
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー73 鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案），  
p.11~14, p.51~59, 1992.7.