

修正トラス理論を適用した炭素繊維シート補強 RC 梁におけるせん断耐力評価とせん断力負担分の実験的検討

学生氏名 中塚 博元

指導教員 吉川 弘道

鉄筋コンクリート梁部材におけるせん断破壊は、斜めひび割れが進展して急激な破壊を生じることから、脆性的な破壊形式とされる。このため、せん断耐力が曲げ耐力と同等もしくは上回るように設計する必要がある。

本研究では、既設構造物に対する補強工法として炭素繊維シート補強工法に着目し、載荷実験を行い、RC梁に対するせん断補強効果について修正トラス理論を適用して評価を行った。スターラップ及び炭素繊維シートのひずみを抽出し、修正トラス理論を用いて3成分のせん断耐力を評価することともに、せん断力負担分の実験的検討を行った。

Key Words: Modified Truss Theory, Reinforced Concrete Beams, Carbon Fiber Sheet, Shear force

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）部材のせん断破壊は、破壊に至るまでに変形量が少なく、急激な破壊を助長することが知られている。RC部材のせん断破壊は複雑な破壊現象を呈するが、その主な要因として、コンクリート強度、せん断補強筋量、断面形状、主鉄筋量などが挙げられる。RC部材のせん断破壊は、曲げ部材に比べ複雑な挙動を呈し、なお、研究の対象になっている^{1,2)}。

1995年に発生した阪神淡路大震災以降、既存構造物に対する曲げ・せん断補強工法に新素材が使われる事例が増加した。中でも、近年注目される補強材料として炭素繊維シート（CFRP：Carbon Fiber Reinforcement Plastic）が挙げられる。従来の補強材料と比較しても、強度が鋼材の約10倍あり、比重は約1/4と非常に軽量であること、主原料が炭素であることから耐腐食性に優れていることが特徴である。これらの特徴を活かし、既設構造物への補修補強方法として多くの利用例がある^{4,7,8)}。

炭素繊維シート補強に関する既往の研究は柱部材に対するものや、全面に巻きつける方法での議論は多くなされているが、炭素繊維シート幅を主パラメータとした研究はまだ少ないのが現状であり、また、繊維方向が1方向の炭素繊維シートをRC梁に巻きつけた場合、長手方向に対して補強効果が発揮され、スターラップと同等の効果を得られるとされている。

本研究では、あらかじめせん断破壊が生じるように設計したRC梁を計6体製作し、2点对称集中載荷試験を行った。以下の2パラメータに着目し、炭素

繊維シートの補強効果に関する実験的検討を行った。

Aシリーズ：炭素繊維シート巻きつけ幅

Bシリーズ：炭素繊維シートの繊維目付量

各試験体ごと及びシリーズごとにせん断力負担分についてひずみ測定値より抽出し、修正トラス理論を用いて評価検討した。

2. RC梁の載荷実験

(1)構成部材

試験体は矩形断面 RC 梁とし、梁の右側せん断スパン内でせん断破壊が生じるように設計を行った。また、梁表面と炭素繊維シートとの隅角部の定着を図るため、試験体断面四隅を R=20mm で面取りを行った。載荷方法は本学構造実験等所有の 300kN アクチュエータを使用し、変位制御による静的対称 2 点集中載荷を行った。載荷時には荷重、載荷点間変位、左右支点沈下変位、スターラップひずみ、炭素繊維シートひずみを測定した。試験体構成部材を表-1 に示す。

表-1 試験体構成部材

試験体名	引張鉄筋	スターラップ	炭素繊維シート		
			繊維目付量(g/m ²)	シート幅(mm)	補強方法
No.1	D19×2本	D4@100mm	-	-	ゼブラ1層巻き
No.2			200	25	
No.3A			200	40	
No.3B			300	40	
No.4			200	55	
No.5			200	70	
Aシリーズ	試験体No.1, No.2, No.3A, No.4, No.5				
Bシリーズ	試験体No.1, No.3A, No.3B				

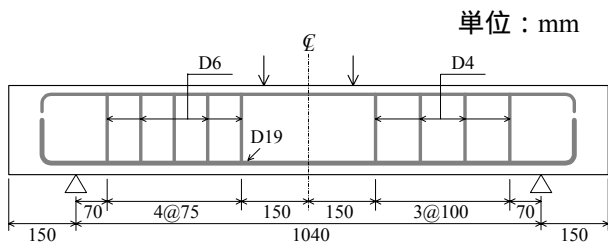


図-1 試験体配筋図

表-2 試験体諸元

断面幅	b (mm)	150
断面高さ	h (mm)	200
かぶり厚さ	c (mm)	20
有効高さ	d (mm)	170.5
全長	L (mm)	1340

(2)試験体寸法

試験体は、断面 150mm×200mm、全長 1340mmとし、順曲げスパンを 200mm、せん断スパンを 420mm とした。引張鉄筋には D19 を 2 本使用し、また、梁右側でせん断破壊させるため、左側せん断スパン内に D6 を 75mm ピッチで 5 本、右側に D4 を 100mm ピッチで 4 本配筋した。試験体数は全部で 6 体製作し、試験体名を No.1, No.2, No.3A, No.3B, No.4, No.5 とした。図-1 に試験体配筋図、表-2 に試験体諸元を示す。

試験体 No.2 ~ No.5 には、炭素繊維シートにより補強を行った。炭素繊維シートの重ね合わせ部分であるラップ長を 80mm とした。また、試験体 No.3B は試験体 No.3A と繊維目付量を変化させた。炭素繊維シート幅はそれぞれ 25mm, 40mm, 55mm, 70mm とし、15mm ピッチで増加させた。図-2 に炭素繊維シート補強した試験体の詳細を示す。

(3)計測項目

載荷時に、スターラップ及び炭素繊維シートのひずみを計測する。スターラップひずみは全ての試験体において、各スターラップ側面中央に表うら 1 枚

ずつ計 2 枚貼付けることとし、2 枚の平均値を実験値として扱う。炭素繊維シートひずみは、各炭素繊維シートにおいて表うら同様に 1 列目の炭素繊維シートでは圧縮鉄筋直上を基準とし、30mm ピッチで計 3 枚ずつ貼り付け、2 列目の炭素繊維シートは 1 列目中央のゲージ位置から 3 枚貼り付ける。3 列目、4 列目の炭素繊維シートでは引張鉄筋を基準とし前述と同様に貼り付ける。スターラップ及び炭素繊維シートのひずみゲージ貼付け位置を図-3 に示す。

また、載荷荷重はロードセル、スターラップ及び炭素繊維シートひずみは、共和電業製の 2 線式ひずみゲージ(ゲージ長 30mm)、左右支点変位及び載荷点中央変位は変位計、曲げひび割れ及びせん断ひび割れ、終局状況は目視にて計測を行った。

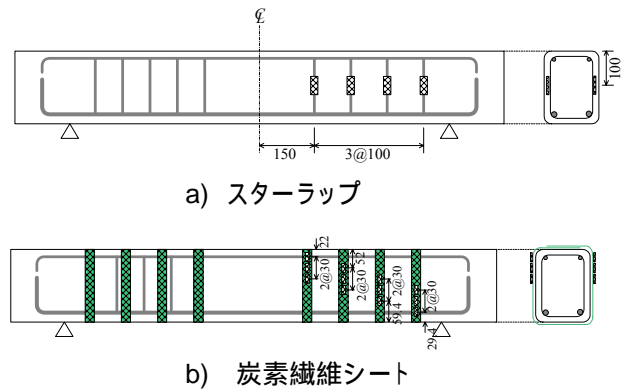


図-3 ひずみゲージ貼付け位置

(4)使用材料

a)コンクリート

試験体に使用したコンクリートは、表-3 に示す示方配合によって作製した。コンクリートの材料試験結果を表-4 に示す。

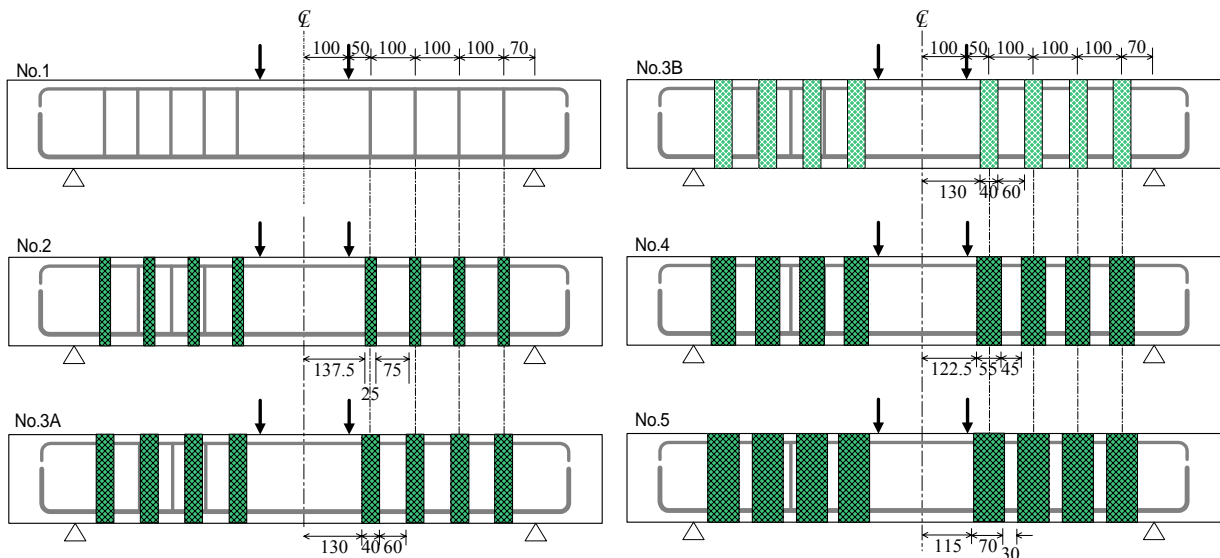


図-2 炭素繊維シート補強試験体

表-3 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)				Ad1	Ad2
		C	W	S	G		
45	47.8	410	184	784	870	4100	4100

W:混和剤分含む

C:早強ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³)

S:相模川水系産砂(密度:2.55g/cm³)

G:八王子産砕石(密度:2.66g/cm³,最大骨材寸法:15mm)

Ad1:AE減水剤25%溶液(No.70)(cc/m³)

Ad2:AE助剤1%溶液(303A)(cc/m³)

表-4 コンクリートの力学特性

圧縮強度 f _c (N/mm ²)	引張強度 f _t (N/mm ²)	曲げ強度 f _b (N/mm ²)
38.2	2.61	4.76

b)鉄筋

引張鉄筋に D19-345, スターラップには D4-295 及び D6-295 を使用した. 鉄筋の材料試験結果による力学特性及び製品規格値及び応力-ひずみ関係を表-5, 図-4 に示す.

表-5 鉄筋の力学特性

使用箇所	材質及び径	降伏強度(N/mm ²)		引張強度(N/mm ²)
		規格値	実験値	
圧縮鉄筋	SD295, D4	295	328	478
スターラップ(右側)	SD295, D4	295	344	524
スターラップ(左側)	SD295, D6	295	344	524
引張鉄筋	SD345, D19	345	405	563

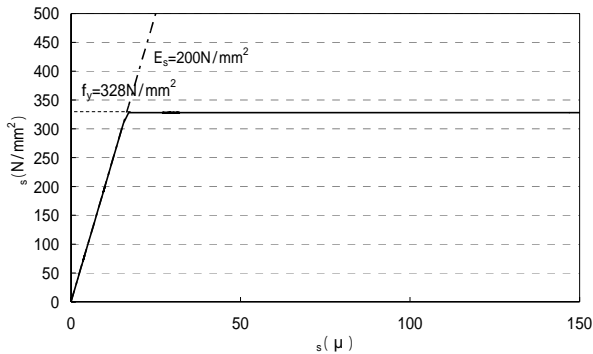


図-4 鉄筋の応力-ひずみ関係

c)炭素繊維シート

本研究で補強材料として使用する炭素繊維シートとは, 1本の太さが数μmから十数μmの連続繊維を数千~数万本の単位で束ねた連続繊維ストランドを平面上に1方向あるいは2方向に配列してシート状あるいは繊維状にしたものである. 本研究では1方向タイプの炭素繊維シートを用いてせん断補強を行い, 繊維方向における補強効果に着目し, ゼブラ状に巻きつけた.

実験では, Bシリーズとして炭素繊維シートの繊維目付量をパラメータとしている. 試験体 No.2, No.3A, No.4, No.5 においては, 高強度 200g/m², 試験体 No.3B においては高強度 300g/m²の炭素繊維シートを補強材料として使用した. 炭素繊維シートの力学特性及び応力-ひずみ関係を表-6, 図-5 に示す.

表-6 炭素繊維シート力学特性

タイプ	繊維目付量(g/m ²)		設計厚さ mm	引張強度(N/mm ²)		引張弾性率 N/mm ²
	品質管理値	試験値		品質管理値	試験値	
高強度	200	208	0.111	3400	4509	2.54 × 10 ⁵
	300	303	0.167	3400	4160	2.45 × 10 ⁵

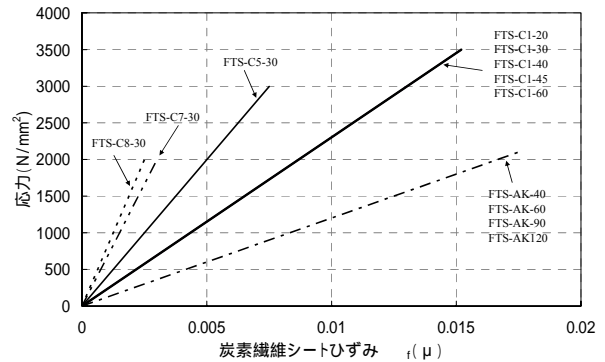


図-5 炭素繊維シートの応力-ひずみ関係

(5) 載荷方法

本実験における載荷装置は 300kN アクチュエータを使用した(写真-1). 荷重制御による載荷を行い, 載荷速度は一定とした. 荷重, 変位及びひずみをパソコン制御下にあるデータロガーにより計測した. 試験体 No.1 では, 爆裂音とともにせん断ひび割れが顕著になった時点で載荷終了とした. 試験体 No.2 以降の試験体については, 変位増加が確認されなくなったことから載荷点中央変位が 17mm 前後のところまで載荷終了とした.



写真-1 実験風景

3. 実験結果

(1) RC 梁の載荷実験

試験体終局状況の一例を写真-2, 3 に, 実験結果を表-7 に示す.



写真-2 試験体 No.1



写真-3 試験体 No.3A

試験体 No.1 はせん断破壊で終局となったが、試験体 No.2 以降においては、曲げひび割れ発生後、せん断ひび割れが発生し徐々に進展したものの、最終的にはせん断破壊には至らず、純曲げスパン内の圧壊による曲げ破壊で終局した。

表-7 実験結果

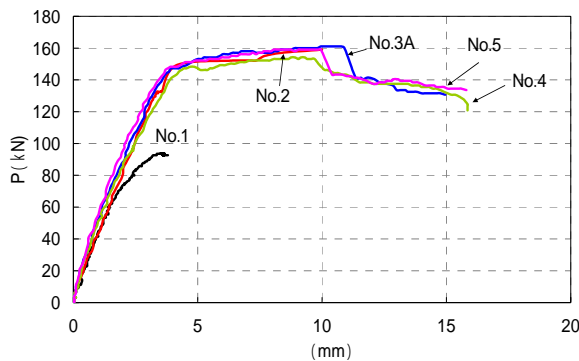
試験体名	曲げひび割れ発生荷重 P_{cr} (kN)	鉄筋降伏荷重 P_y (kN)	終局荷重 P_u, P_c (kN)	破壊モード
No.1	13.97	-	91.39	せん断破壊
No.2	27.67	149.21	159.01	曲げ破壊
No.3A	28.67	147.25	160.97	曲げ破壊
No.3B	26.71	156.07	165.87	曲げ破壊
No.4	26.71	148.23	154.11	曲げ破壊
No.5	25.73	148.23	159.01	曲げ破壊

(2) 荷重-変位関係

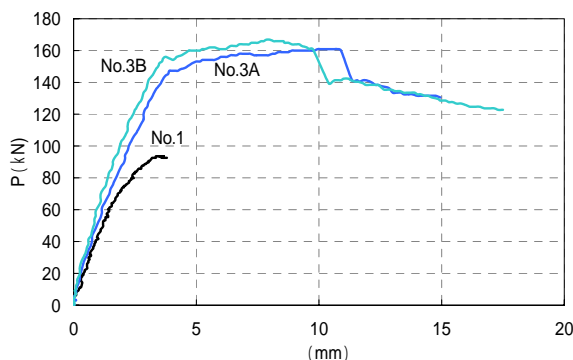
実験より得られた荷重-変位関係を、シリーズごとに図-6 に示す。ここで、載荷点中央に設置した表うらの変位計から得られた変位平均から左右支点の変位平均を引いたものを実験で得られた変位とした。

すべての試験体において、初期挙動はほぼ同様となったが、せん断破壊で終局した試験体 No.1 は、最大荷重後、すぐに脆性的な破壊に進展した。一方、試験体 No.2 以降の試験体ではほぼ同様の挙動で進展し、曲げ破壊で終局した。

A シリーズでは、試験体 No.3A, No.4, No.5 については、鉄筋降伏後、最大荷重時まではほぼ同様の挙動を示したが、荷重低下後、一定の荷重値を保持している。この要因としては、せん断スパン長に対する炭素繊維シートの総幅が増加したことにより、炭素繊維シートに



a) A シリーズ



b) B シリーズ

図-6 荷重-変位関係

より負担されるせん断力が増加したためと考えられる。

B シリーズでは、炭素繊維シート幅が同一の試験体 No.3A と試験体 No.3B を比較すると、鉄筋降伏荷重、最大荷重ともに、繊維目付量が増加すると荷重も比例して増加する結果となった。

(3) せん断ひび割れ角度の検討

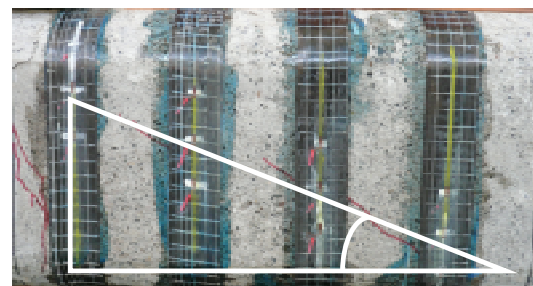
曲げ破壊で終局した試験体においても、載荷過程でせん断ひび割れが生じたことから、せん断ひび割れ角度の検討が可能と判断した。ここで計測されたせん断ひび割れ角度 θ は、スターラップ及び炭素繊維シートのせん断力負担分の算出を行う際に用いる。

終局時におけるせん断ひび割れ状況の一例を写真-4 に、目視で測定したせん断ひび割れ角度を表-8 に示す。また、試験体 No.3B では、目視で判別可能なせん断ひび割れが見受けられなかったため、除外した。

せん断破壊した試験体 No.1 については、支点部から載荷点部にかけてせん断ひび割れが顕著に現れていることがわかる。一方、曲げ破壊した他の試験体においては、載荷点直下の梁下縁に生じた曲げひび割れは顕著であったが、せん断ひび割れは著しく微細なひび割れとなり、支点部から載荷点部に至る全区間においては確認できなかった。しかし、炭素繊維シート補強量の増加により、せん断ひび割れ角度 θ が徐々に減少している。このことから、炭素繊維シートにおけるせん断ひ



a) 試験体 No.1



b) 試験体 No.3A

写真-4 せん断ひび割れ状況

表-8 せん断ひび割れ角度

試験体名	せん断ひび割れ角度 (degree)
No.1	27°
No.2	24°
No.3A	21°
No.3B	-
No.4	21°
No.5	19°

び割れの抑制効果が現れているといえる。

既往の研究成果との比較を図-7 に示す。縦軸にせん断ひび割れ角度 θ 、横軸に各試験体における貼付けた炭素繊維シート幅をとった。また、実験結果と比較するために、既往の研究より、土木学会補修補強指針²⁾、MCFT(修正圧縮場理論)²⁾、Eurocode²⁾による値を併記した。それぞれの θ は 35° 、 $26^\circ \sim 31^\circ$ 、 22° 以上である。

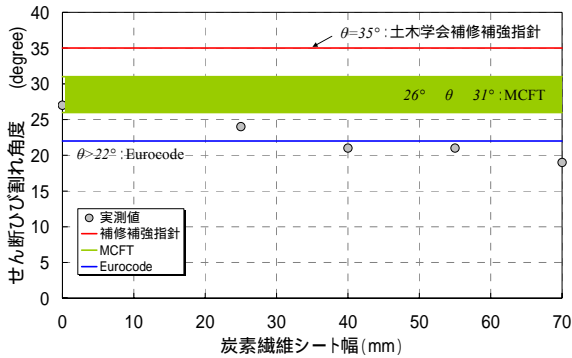


図-7 せん断ひび割れ角度の検討

これより、炭素繊維シートの補強量の増加に従い角度低下する傾向がみられた。せん断ひび割れは生じたものの、曲げひび割れの進展により曲げ破壊となったことや、炭素繊維シートのひび割れ抑制効果に起因するものと考えられる。

(4)荷重-材料ひずみ関係

スターラップ、炭素繊維シートのひずみから、載荷時の破壊過程における応力変化について検討を行った。それぞれのヤング係数はスターラップでは 200N/mm^2 、炭素繊維シートは表-6 の引張弾性率を用いた。また、各ひずみの表記は簡略化するため、 $\times 10^{-3}$ 表記としている。

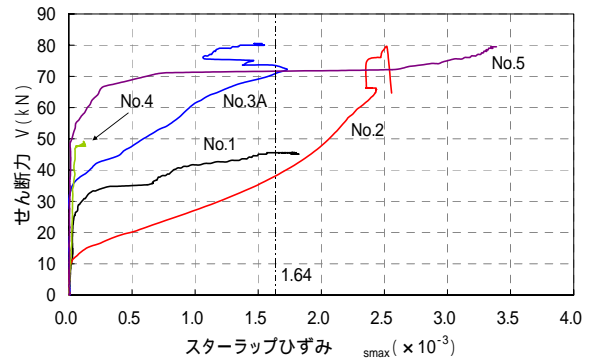
a)スターラップのひずみ挙動

各試験体のスターラップのひずみ計測結果より抽出した最大ひずみをシリーズごとに比較する。シリーズごとのせん断力-スターラップひずみ関係を図-8 に示す。

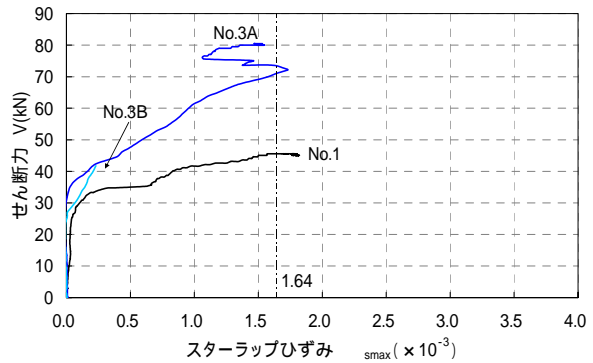
パラメータに関わらず、すべての試験体において初期挙動はほぼ同様となった。

A シリーズでは、炭素繊維シート補強量を増加させることによりひずみが急に増加するせん断力も増加することが確認できた。また、試験体 No.1、試験体 No.3A 及び試験体 No.5 を比較すると、ひずみ発生後の傾きが若干ではあるが炭素繊維シートの量に応じて大きくなる結果となった。

B シリーズでは炭素繊維シートの繊維目付量が大きいほどひずみ発生後の傾きが大きくなる傾向となった。この要因としては繊維目付量がひとつとして考えられるものの、試験体 No.3B のスターラップひずみが正確に計測することができなかったため、スターラップと同様の働きをする炭素繊維シートがより多くのせん断力を負担したことが考えられる。スターラップの降伏ひずみである $\varepsilon_y=1.64 \times 10^{-3}$ を併記したが、载荷中にスターラップが降伏したのは、試験体 No.2 及び試験体 No.5 の2体のみであった。



a) Aシリーズ



b) Bシリーズ

図-8 スターラップのひずみ挙動

b)炭素繊維シートのひずみ挙動

各試験体の炭素繊維シートのひずみの計測結果より抽出した最大ひずみの比較を行う。シリーズごとのせん断力-炭素繊維シートひずみ関係を図-9 に示す。

初期挙動及びせん断ひび割れ発生後のひずみ挙動がほぼ同様となった。また、ひずみ発生後はほぼ一定の勾配を成していることがわかる。

また、表-9 に各試験体における最大ひずみ抽出列を示す。これより、若干のずれはあるがほぼ2列もしくは3列で最大ひずみが抽出されていることがわかる。また、スターラップ及び炭素繊維シート両方で同列において最大ひずみを抽出した試験体は試験体 No.2、No.4 及び No.5 であった。スターラップはコンクリート内部、炭素繊維シートはRC梁表面上のひずみを計測していることから、これら以外の試験体においては試験体の表面と内部で载荷中に生じたせん断ひび割れの通過箇所が異なっている可能性が推察できる。

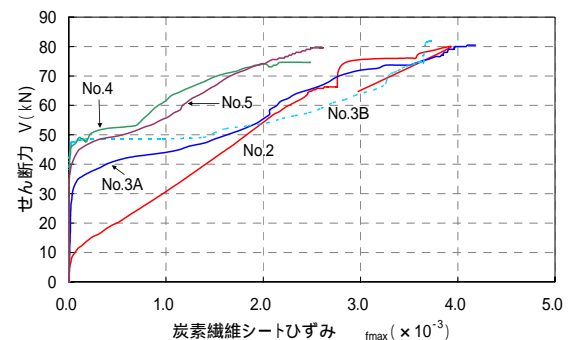


図-9 炭素繊維シートのひずみ挙動

表-9 各試験体の最大ひずみ抽出列

試験体名	最大ひずみ抽出列	
	スターラップ	炭素繊維シート
No.1	2列	-
No.2	3列	2列
No.3A	2列	2列
No.3B	1列	3列
No.4	3列	3列
No.5	2列	2列

4. 修正トラス理論に基づくせん断耐力評価

(1) 累加式におけるせん断耐力評価²⁾

スターラップを有する梁部材は、外的に作用するせん断力に対して、コンクリート、鉄筋が分担する内力によって抵抗する。

すなわち、図-10 に示したようなせん断破壊面にて切出された自由物体を考えると、作用せん断力 V に抵抗する内力として次の成分が挙げられる。

- ・コンクリート負担分 V_c ：圧縮域コンクリートによる抵抗力
- ・腹鉄筋による負担分 V_s ：鉛直スターラップによる抵抗力
- ・ひび割れ面に沿ったせん断伝達力の鉛直成分 V_{ay} ：骨材の噛合い効果(aggregate interlock)
- ・主鉄筋のダウエル力 V_d ：軸方向筋を直交方向に横切る抵抗力(dowel action)

これらの総和として、式(1)が成立する。

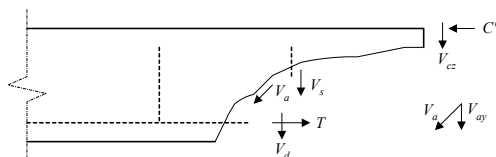


図-10 載荷せん断力に対する内力の抵抗せん断力の分担割合

$$V = V_c + V_s + V_{ay} + V_d = V_c + V_s + V_d \quad (1)$$

しかし、これら内力 4 成分の分担比率は載荷過程(曲げひび割れ、せん断ひび割れ、鉄筋降伏)に従って変化することから、終局時においては 2 成分 V_d 及び V_{ay} が消去され、式(2)のように示される。

$$V = V_c + V_s \quad (2)$$

ここで、炭素繊維シートを用いて補強した場合は、その補強分がせん断補強筋の増加分で表される。炭素繊維シート負担分を V_f とすると、式(3)のように示される。

$$V = V_c + V_s + V_f \quad (3)$$

(2) トラス近似によるせん断耐力

トラス理論(truss analogy)は、斜めひび割れを有する RC 梁のせん断耐荷機構を明瞭にできる古典理論であり、これは、コンクリートの圧縮ストラット(斜めひび割れに沿った圧縮材)、腹鉄筋による斜材(スターラップの場合は鉛直材)、上弦材(圧縮鉄筋若しくは圧縮部コンクリート)、および下弦材(引張鉄筋)を組み合わせることにより、トラスモデルとして近似するものである詳細を図-11, 12 に示す。

ここで、圧縮ストラット角度 θ を、腹鉄筋の角度を α とする、静定トラスの釣り合い条件より、各部材力は式(4)、式(5)のように示される。

- ・腹鉄筋の分担せん断力

$$V_s = T_w \sin \alpha \quad (4)$$

- ・上/下弦材の付加軸力

$$2N = V_s \cot \theta \quad (5)$$

ここで、斜材の軸力 T_w をトラスの 1 区間を通過する腹鉄筋の集合、 C'_d をコンクリートの圧縮斜材の合力とすると、式(6)を導くことができる。

$$T_w = \frac{A_w f_{wy} z (\cot \theta + \cot \alpha)}{s}, \quad C'_d = f'_{wc} b_w z (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \theta \quad (6)$$

A_w ：区間 s における腹鉄筋の総断面積

s ：腹鉄筋の間隔

f_{wy} ：腹鉄筋の降伏強度

z ：せん断有効高さ

式(6)の第1式より、せん断耐力 V_s は式(7)のように示される。

$$V_s = \frac{A_w f_{wy} z (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s} \quad (7)$$

ここで、スターラップが部材軸となす角度を $\alpha = 90^\circ$ とすると式(8)のように整理できる。

$$V_s = \frac{A_w f_{wy} z \cot \theta}{s} \quad (8)$$

(3) 修正トラス理論

修正トラス理論とは、トラス理論を実験結果に適用した場合、実験値がトラス理論による計算値を上回るケースが多いため、トラス理論の余剰分(other contribution)として、コンクリート負担分 V_c が導入された理論である。すなわち、せん断耐力 V を式(9)のように示す。

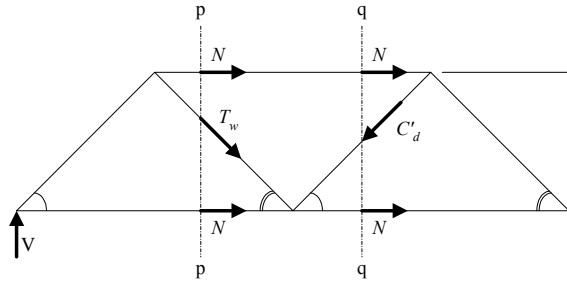


図-11 トラス近似における力の釣合い

$$V = V_c (\text{コンクリート負担分}) + V_s (\text{スターラップ負担分}) \quad (9)$$

本研究では、炭素繊維シートによる補強をした際のせん断耐力を評価するため、式(9)に炭素繊維シート負担分を付加したものをせん断耐力算出式とすることから、式(10)を適用する。

$$V = V_c (\text{コンクリート負担分}) + V_s (\text{スターラップ負担分}) + V_f (\text{炭素繊維シート負担分}) \quad (10)$$

a) スターラップ負担分

土木学会補修補強指針²⁾におけるスターラップ(腹鉄筋)でのせん断耐力は、式(11)のように表される。

$$V_s = \frac{A_w f_{wy} z (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)}{s_s} \quad (11)$$

ここで、 A_w : スターラップ総断面積(mm^2)、 f_{wy} : スターラップの設計引張降伏強度(N/mm^2)、 z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鉄筋までの図心までの距離($=d/1.15$)(mm)、 α_s : スターラップが部材軸となす角度、 s_s : スターラップの配置間隔(mm)である。

また、スターラップの応力と降伏強度の関係には、式(12)のような関係性を持たせる。

$$\sigma_s = \varepsilon_{s \max} E_s \leq f_{wy} \quad (12)$$

b) 炭素繊維シート負担分

スターラップと同様に、炭素繊維シートのせん断耐力負担分は、補修補強指針では式(13)のように表される。また、ここで低減係数の役割となるせん断補強効率Kは式(14)のように算出する。

$$V_f = K \frac{A_f f_{fwy} z (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f)}{s_f} \quad (13)$$

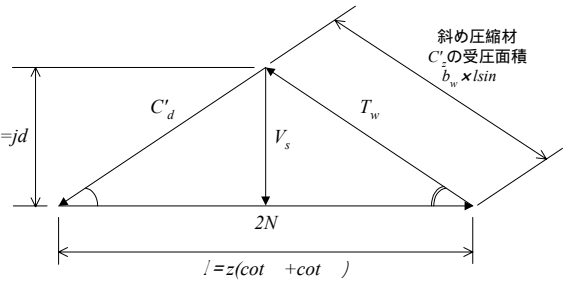


図-12 トラスモデルによるせん断耐力の算定

$$K = 1.68 - 0.67R$$

$$R = \left(\rho_f E_f \right)^{1/4} \left(\frac{f_{fwy}}{E_f} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{f'_c} \right)^{1/3} \quad (14)$$

ここで、 A_f : 炭素繊維シートの総断面積(mm^2)、 f_{fwy} : 炭素繊維シートの設計引張強度(N/mm^2)、 z : 図心からの距離(mm)、 α_f : 炭素繊維シートが部材軸と成す角度、 E_f : 炭素繊維シートの弾性係数(kN/mm^2)、 s_f : 炭素繊維シートの配置間隔(mm)である。

スターラップ及び炭素繊維シートの断面積算出式を式(15)、式(16)に示す。また、炭素繊維シートの断面積方法を図-13、各試験体における断面積を表-10に示す。

・スターラップ

$$A_s = 2 \times 12.56 = 25.12 \text{mm}^2 \quad (15)$$

・炭素繊維シート

$$A_f = \text{設計厚さ} \times \text{貼付けシート幅} \times \text{断面数} \quad (16)$$

$$= 0.111 \times 25 \times 2 (\text{繊維目付量} 200 \text{g}/\text{m}^2)$$

$$= 0.167 \times 25 \times 2 (\text{繊維目付量} 300 \text{g}/\text{m}^2)$$

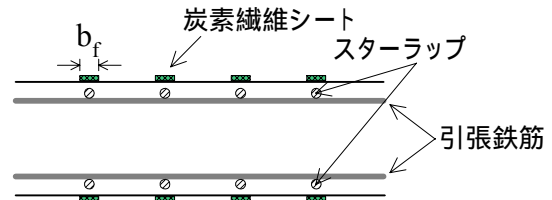


図-13 炭素繊維シートの断面積算出方法

表-10 炭素繊維シートの断面積算定

試験体名	設計厚さ (mm)	シート幅 (mm)	シート断面積 (mm^2)	繊維目付量 (g/m^2)	ピッチ (mm)
No.2	0.111	25	5.55	200	100
No.3A	0.111	40	8.88	200	100
No.3B	0.167	40	13.36	300	100
No.4	0.111	55	12.21	200	100
No.5	0.111	70	23.38	200	100

表-11 計算結果と実験値

試験体名	実験値(kN)	計算値(kN)	
		曲げ破壊荷重	せん断破壊荷重
No.1	91.39	135.37	115.66
No.2	159.01	135.37	261.28
No.3A	160.97	135.37	348.64
No.3B	165.87	135.37	330.60
No.4	154.11	135.37	436.00
No.5	159.01	135.37	523.38

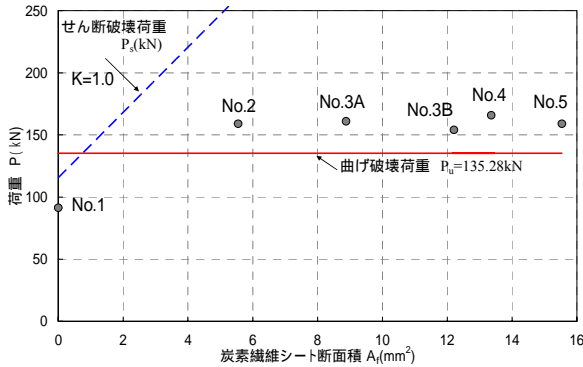


図-14 炭素繊維シート断面積による比較

(4) 計算結果

材料試験結果スターラップの降伏強度、炭素繊維シートの引張強度を適用した各試験体の計算結果と実験値を表-11に示す。

また、材料試験結果を適用した曲げ破壊荷重値及びせん断破壊荷重値を実験結果と比較した。実験結果との比較を図-14に示す。試験体No.1以外は曲げ破壊になったが、計算結果とほぼ同値となった。また、両者の比である実験値/計算値を算出してみると、試験体No.1では0.79, その他の試験体についてはばらつきもほとんど小さくなり、その平均は1.12であった。

5. せん断力負担分の実験的抽出

(1) 各部材の最大ひずみ

本実験において、載荷時にスターラップ及び炭素繊維シートについてひずみの計測を行った。スターラップは梁側面、載荷方向中央に表裏1枚ずつ貼付けた。炭素繊維シートにおいてもスターラップと同様に各シートでの検討を行う。その際、炭素繊維シートのひずみは表裏3枚ずつ貼付けたことから、まず、同高さにおけるひ

ずみを平均し、さらに高さ方向3段分のひずみを平均することにより算出した。

最大ひずみの抽出については、スターラップでは各列での表裏の平均値を算出し、炭素繊維シートにおいては各シートに貼り付けた同高さのひずみ計測値を平均し、さらに同一シートの平均値を平均することにより決定することとした。算出方法を表-12に示す。

(2) 検討方法

まず、スターラップ及び炭素繊維シートで計測されたひずみを式(17)、式(18)に代入し、応力に換算する。

- ・スターラップ

$$\sigma_s = \varepsilon_{s \max} E_s \leq f_{wy} \quad (17)$$

- ・炭素繊維シート

$$\sigma_f = \varepsilon_{f \max} E_f \leq f_{fwy} \quad (18)$$

さらに、 V_s と V_f については式(7)、式(13)の材料強度を応力に置き換え、以下とする。

- ・スターラップ

$$V_s = \frac{A_w \sigma_s z}{s_s} \cot \theta$$

- ・炭素繊維シート

$$V_f = K \frac{A_f \sigma_f z}{s_f} \cot \theta$$

次に、コンクリート負担分を式(12)の右辺を式(19)のように変形し、算出する。

$$V_c = V - V_s - V_f \quad (19)$$

従って、上記3成分は載荷履歴により変動するものであり、これが本章での検討事項である。

表-12 部材別のひずみ算定法

側面図	断面図	算定式
		$\bar{\varepsilon}_{s1} = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_5)$ $\varepsilon_{s \max} = \text{1列} \sim \text{4列の最大ひずみ}$
		$\bar{\varepsilon}_{f1} = \frac{1}{3} \left\{ \frac{1}{2}(\varepsilon_9 + \varepsilon_{21}) + \frac{1}{2}(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{22}) + \frac{1}{2}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{23}) \right\}$ $\varepsilon_{f \max} = \text{1列} \sim \text{4列の最大ひずみ}$

(3)検討結果(その1)

a)主要荷重時の分担せん断力評価

各試験体における主要荷重時での各部材のせん断力評価を表-14に示す。全せん断力Vに対する各部材のせん断耐力負担比率を併記した。ほとんどの荷重時において、スターラップ及び炭素繊維シートは降伏を迎えずに終局した。また、各せん断力時の負担比率を比較してみると、コンクリート負担分はそれぞれ0.48, 0.38, 0.35となりスターラップ及び炭素繊維シート寄与分の増加が認められる。

b)抽出結果

各試験体におけるせん断力負担分抽出結果を3成分のせん断力負担履歴で図-15に示す。

炭素繊維シート補強を行った全ての試験体で、せん断補強部材であるスターラップ及び炭素繊維シート負担が初期ひび割れ発生後に始まったことを確認できた。

試験体 No.1 では終局時のせん断耐力負担が若干スターラップが上回っている。試験体 No.3A では 70kN 付近でスターラップ負担分が負の値となったため、以後のスターラップ負担分を 0 とした。試験体 No.4 では、せん断力 60kN 付近でスターラップと炭素繊維シートの分担が逆転し、その後、スターラップは降伏した。このときせん断スパン全体に占める炭素繊維シートの割合は 47% となっており、スターラップが降伏を達した後も炭素繊維シートが保持したため、炭素繊維シートの負担比率が上昇したと推測することができる。試験体 No.5 では、耐力分担の挙動が試験体 No.4 と同様となった。また、この試験体のみスターラップ及び炭素繊維シートの両方が降伏に至った。

終局時においてスターラップの降伏強度を上回ったのは、試験体 No.2 及び No.5 のみであった。このことから、炭素繊維シートで補強した場合、載荷荷重が各部材に

分担されるため、スターラップは降伏まで達していなかったことが考えられる。

(4)検討結果(その2)

全せん断力を100%とした場合の各部材のせん断力負担の検証を行う。コンクリート、スターラップ及び炭素繊維シートにおけるせん断力負担割合を図-16～18に示す。コンクリートの負担においては、試験体別、シリーズ別にみても相関関係は見られなかった。しかし、試験体 No.4 及び試験体 No.5 における負担割合をみると、40kN から 50kN 付近にかけては同じ挙動を保持してせん断力の負担割合が減少した。これは、炭素繊維シート幅が 40mm 以下の試験体ではみられない現象である。

スターラップにおいては、試験体 No.2 では載荷直後に大きく分担されているが、試験体 No.1, 試験体 No.4 及び試験体 No.5 においては、分担された後に分担が始まったせん断力の近傍において負担割合が一気に増加に転じていることがわかる。炭素繊維シートの負担割合は 30kN 付近からせん断力が分担され始め、40kN から 50kN 付近においては、シート幅の増大とともに負担割合の増加傾向が確認できた。

6. まとめ

a)RC梁の載荷実験

本研究では、近年、補強材料として炭素繊維シートに着目し、150×200×1340mm の RC 梁を計 6 体製作し、せん断スパン内でゼブラ巻きによりせん断補強を施したうえで、載荷試験を行った。

得られた知見を以下にまとめた。

・終局時の破壊形式は、無補強の試験体 No.1 のみせん断破壊となったが、試験体 No.2 以降においては載荷中にせん断ひび割れが生じて進展したものの、曲げ破壊で終局した。

表-14 主要荷重時の分担せん断力評価

試験体No.	V(kN)	スターラップ			炭素繊維シート			コンクリート V _c (kN)
		ε _{smax} (×10 ⁻³)	σ _s (N/mm ²)	V _s (kN)	ε _{fmax} (×10 ⁻³)	σ _f (N/mm ²)	V _f (kN)	
試験体No.1	20.09 (1.00)	0.029	5.8	0.42 (0.02)	-	-	-	19.67 (0.98)
	35.77 (1.00)	0.667	133.4	9.75 (0.27)	-	-	-	26.02 (0.72)
	44.10 (1.00)	1.276	255.1	18.64 (0.42)	-	-	-	25.46 (0.58)
試験体No.2	20.22 (1.00)	0.612	122.4	8.95 (0.44)	0.576	146.4	2.30 (0.12)	8.91 (0.44)
	36.39 (1.00)	1.626	325.1	23.76 (0.65)	1.316	334.3	5.40 (0.15)	7.23 (0.20)
	78.53 (1.00)	2.520	328.0	23.97 (0.31)	3.914	994.0	16.05 (0.20)	38.50 (0.49)
試験体No.3A	50.01 (1.00)	0.040	8.0	0.58 (0.01)	1.638	416.1	10.75 (0.21)	38.68 (0.78)
	59.91 (1.00)	0.148	29.6	2.16 (0.04)	2.137	542.8	14.03 (0.23)	43.72 (0.73)
	79.51 (1.00)	-0.811	-162.1	0.00	3.963	1006.7	26.01 (0.33)	65.34 (0.82)
試験体No.3B	40.31 (1.00)	0.252	50.4	3.68 (0.09)	0.006	1.4	0.05 (0.00)	36.57 (0.91)
	60.40 (1.00)	0.452	90.4	6.61 (0.11)	0.346	84.8	3.30 (0.05)	50.49 (0.84)
	78.53 (1.00)	0.595	119.0	8.70 (0.11)	3.383	829.0	32.23 (0.41)	37.60 (0.48)
試験体No.4	49.13 (1.00)	0.116	23.2	5.35 (0.11)	0.593	150.7	1.70 (0.03)	42.08 (0.86)
	54.03 (1.00)	0.758	151.5	11.07 (0.20)	2.364	600.4	21.33 (0.40)	21.62 (0.40)
	71.18 (1.00)	1.510	301.9	22.06 (0.31)	2.429	617.0	43.98 (0.62)	27.19 (0.38)
試験体No.5	48.64 (1.00)	0.011	2.1	0.15 (0.003)	0.333	84.6	3.82 (0.08)	44.67 (0.92)
	66.77 (1.00)	0.228	55.5	4.06 (0.06)	1.509	383.2	17.33 (0.26)	45.28 (0.68)
	78.04 (1.00)	3.289	328.0	23.97 (0.31)	2.337	593.6	26.84 (0.47)	27.21 (0.35)
備考	θ = 27°, E _s = 200kN/mm ² , E _f = 254kN/mm ² , K = 1.0							

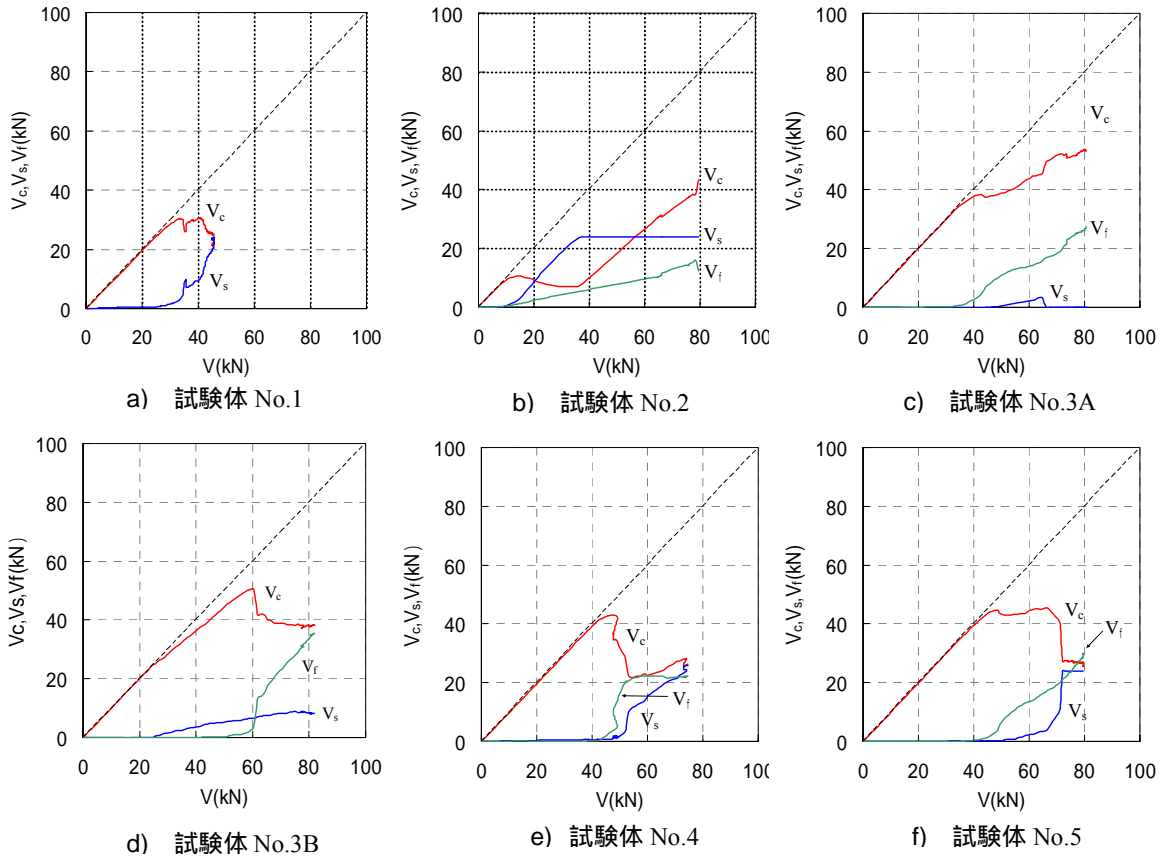
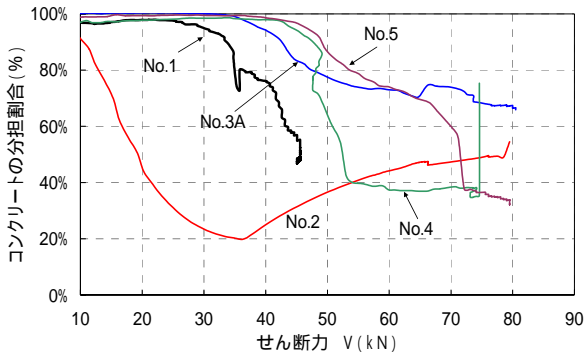
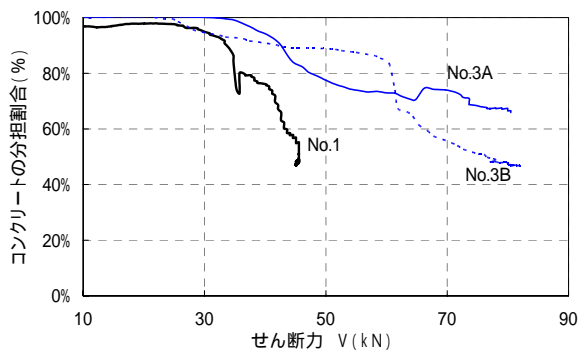


図-15 3成分のせん断力負担履歴

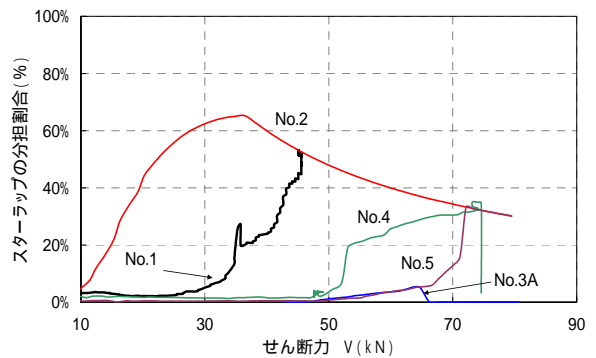


a) Aシリーズ

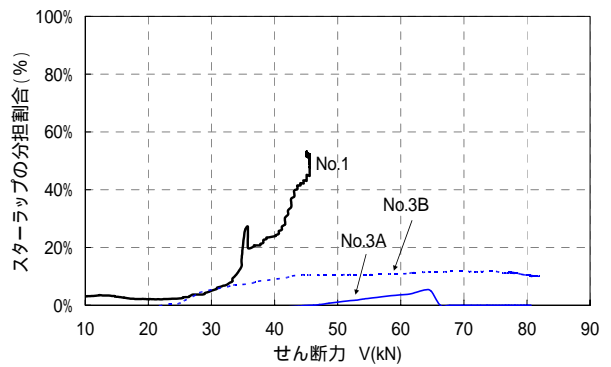


b) Bシリーズ

図-16 コンクリートのせん断力負担分

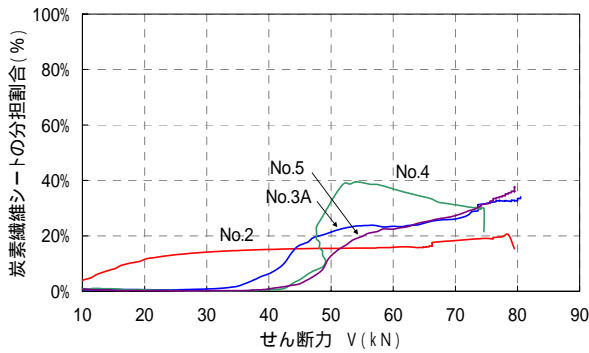


a) Aシリーズ

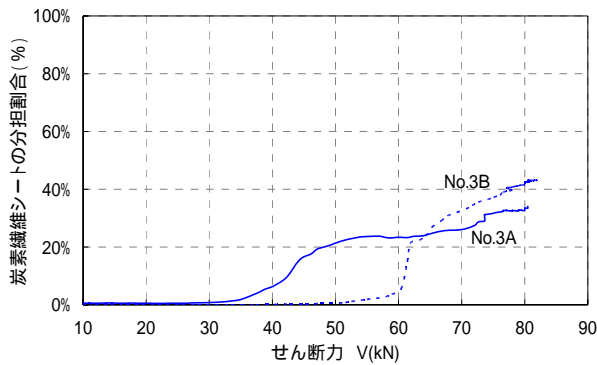


b) Bシリーズ

図-17 スターアップのせん断力負担分



a) Aシリーズ



b) Bシリーズ

図-18 炭素繊維シートのせん断力負担分

・破壊時のせん断ひび割れ角度 θ は、 $19^\circ \sim 27^\circ$ となり、炭素繊維シートの補強量に反比例して減少傾向となった。既往の研究と比較すると、Eurocode ($\theta > 22^\circ$) をほぼ満足し、また土木学会補修補強指針 ($\theta = 35^\circ$) より小さな値となった。

b) せん断耐力評価

・修正トラス理論を拡張し、累加式 $V = V_c + V_s + V_f$ を適用し、せん断耐力評価を行った。

・計算値と実験結果を比較検討した。計算値/実験値との比は、試験体 No.1 (せん断破壊) では、0.79 となり、計算値過小評価となり、そのほかの試験体 (曲げ破壊) では、各試験体のばらつきは小さく、平均は 1.12 となった。

c) せん断耐力負担分の抽出

累加式 $V = V_c + V_s + V_f$ を適用し、載荷時に測定したスターラップ及び炭素繊維シートにおけるひずみ値を適用して、実験結果より各部材でのせん断力負担分の抽出ならびに検討を行った。以下に結果を整理した。

- 1) 試験体 No.1：終局時、コンクリート負担分及びスターラップ負担分がほぼ同比率となった。
- 2) 試験体 No.2：せん断力 10kN 付近よりせん断補強部材におけるせん断耐力負担分がはじまり、コンクリート負担分が減少したが、40kN 手前でスター

ラップが降伏したと考えられ、残り 2 成分のせん断力負担分が増加に転じた。

- 3) 試験体 No.3A：70kN 近傍で、スターラップ負担分が負の値となったため、以後のスターラップ負担分は 0 と置換した、そのため、炭素繊維シート負担分は緩やかに上昇を継続した。
- 4) 試験体 No.3B：スターラップ負担分は緩やかに増加したが、60kN 付近で炭素繊維シート負担分の急激な上昇がみられた。
- 5) 試験体 No.4：50kN 付近において、せん断補強部材の 2 成分に急激な負担分上昇がみられた。また、終局直前にスターラップと炭素繊維シートの負担割合が逆転した。
- 6) 試験体 No.5：載荷過程において、スターラップ及び炭素繊維シート両方で降伏に達した。また、炭素繊維シートはスターラップと比較して、負担分が生じる荷重は一定であるが、その後の傾きに変化が生じ、スターラップには、より急激な負担分増加がみられた。

謝辞

本研究を行うにあたり、吉川弘道教授、栗原哲彦准教授、佐藤安雄技士には、終始御指導、貴重な御助言を頂きましたことを心から感謝いたします。

また、本研究に使用した補強材料である炭素繊維シート並びに周辺器具を提供していただきました日鉄コンポジット株式会社小林朗氏、設計時に多くの助言をしてくださった奈良建設株式会社佐藤貫一氏にもご鞭撻を受け賜りました。ここに、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計、丸善、1995
- 2) MacGregor, J.G.: Reinforced Concrete, A Fundamental Approach (2nd edition), Prentice Hall, 1990
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー101、連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、丸善、2000
- 4) 日鉄コンポジット株式会社：連続繊維シートによるコンクリート構造物の補修・補強 FORCAトウシート工法技術資料
- 5) 炭素繊維協会HP：http://www.carbonfiber.gr.jp/
- 6) 佐藤靖彦：炭素繊維シートにより補強したRCはりのせん断性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.18、No.2、1996
- 7) 加藤博文：炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートはりのせん断補強に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.18、No.2、1996
- 8) 吉川弘道：鉄筋コンクリート構造物の耐震設計と地震リスク解析、丸善、2007
- 9) ACI-ASCE Committee 426：The Shear Strength of Reinforced Concrete Members, ASCE, St.Div., No.ST6, 1973

EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR CAPACITY EVALUATION AND SHEAR FORCE CONTRIBUTIONS OF CARBON FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS

Hiromoto NAKATSUKA

A shear failure is frequently sudden and brittle. The design for shear capacity of reinforced concrete beams must ensure that the shear strength equals or exceeds the flexural strength. This paper aims the shear strength of the carbon fiber sheet reinforced concrete beams by means of experimental works with modified truss theory.

The shear capacity and shear force of stirrups and carbon fiber sheets contributions are examined using results based on the modified truss theory.