

# 論文 RC 梁における炭素繊維シートせん断補強の定量評価

宮島 英樹<sup>\*1</sup>・幸左 賢二<sup>\*2</sup>・杉岡 弘一<sup>\*3</sup>・阿部 弘典<sup>\*1</sup>

要旨：本研究では 3 面巻きと 4 面巻きで炭素繊維シート巻き立て補強を行った大型 RC 梁の載荷試験を行い、供試体の破壊性状および、炭素繊維シートの抵抗機構の検討を行った。また、実験で得られた結果を用い、炭素繊維シートにより補強された RC 部材の斜め引張破壊に対するせん断耐力の評価方法を提案し、実験結果との比較を行った。比較した結果、本提案手法を用いて供試体のせん断耐力を算出すると 3 面巻きや 4 面巻きといった補強方法の違いによらず、実験結果と整合性の高い結果が得られた。

キーワード：せん断補強効果，炭素繊維シート，せん断耐力

## 1. はじめに

RC 梁のせん断補強工法のひとつに炭素繊維巻き立て工法がある。同工法は補強による重量の増加量が少なく、建築限界などの寸法上の制約を受ける場合でも適用し易いが、張出し橋脚の梁部に用いる場合、梁上の沓座や支承を避けるため、炭素繊維シート(以下、シート)を 3 面巻きで使用することが多い。

同工法で補強された梁のせん断耐力を評価する方法の一つとして土木学会指針<sup>1)</sup>の適用が考えられる。しかし、同指針は 4 面巻き補強のみを対象としている。また、同指針の根拠となるせん断試験は、梁供試体のせん断スパン比が 1.0~2.5 に分布しており、破壊形態は曲げ破壊先行型のせん断破壊や圧縮破壊などが混在している。

そこで本研究では、3 面巻きと 4 面巻きでシート巻き立て補強を行った大型 RC 梁の載荷試験を行い、破壊性状およびシートの抵抗機構について検討し、斜め引張破壊に対するせん断耐力の評価検討方法を提案した。

## 2. 実験概要

本実験は T 型の RC 橋脚の梁部を対象モデルとし、対象橋脚の検討断面の中で最もせん断耐力の小さい梁付け根部の断面を対象断面とした。図 - 1 に実験供試体の概要を示す。既往の研究に用いられてい

る実験供試体は小型が多く斜め引張破壊が発生する補強供試体を作成することが困難である。よって、本研究では大型供試体を用い、斜め引張破壊するときのシートのせん断補強効果を評価することを目的としてシート補強後も斜め引張破壊するように引張主鉄筋比を決定した。供試体のせん断スパン比はディープビームの影響が混在しないように 2.5 とし、引張主鉄筋比は対象橋脚と同等の 2.03% とした。また、実橋の梁部では支承があるため、連続してシートを巻き立てることが不可能である。よって、本実験ではシートをゼブラ状に巻き立てる方法で補強した。表 - 1 に供試体諸元を示す。

表 - 2 に実験ケースを示す。case1, 2 が無補強供試体、case3~case11 が補強供試体である。ここで、case1 が各補強供試体の補強対象となるケースであり、case2 は、後述する case4 と同様のせん断補強耐力比で、シートをせん断鉄筋に置き換えたケースである。

case3~case6 は 4 面巻き補強を行ったケースであり、シート幅の違いがせん断補強効果に及ぼす影響

表 - 1 実験供試体諸元

コンクリートの圧縮強度	28.4~31.4N/mm <sup>2</sup>	
コンクリートの割裂強度	3.4~4.1N/mm <sup>2</sup>	
引張主鉄筋降伏強度(D25)	381.5N/mm <sup>2</sup>	
圧縮鉄筋降伏強度(D22)	389.2N/mm <sup>2</sup>	
プライマー付着強度(エポキシ)	1.5N/mm <sup>2</sup>	
レジン引張強度(エポキシ)	29N/mm <sup>2</sup>	
炭素繊維シート	引張強度	4840N/mm <sup>2</sup>
	引張弾性率	2.53 × 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>

\*1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (正会員)

\*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科 教授 Ph.D (正会員)

\*3 阪神高速道路株式会社 大阪管理部 (正会員)

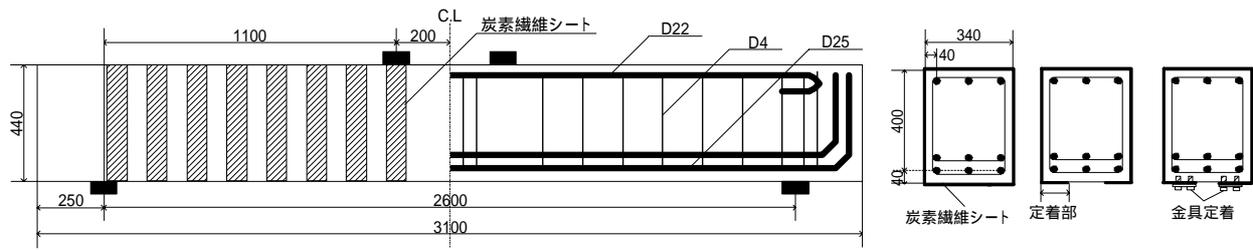


図 - 1 供試体寸法および配筋図

(断面図は左から 4 面巻き, 3 面巻き, 3 面巻き金具定着を示す)

を検討することを目的とした。まず,対象橋脚の梁側面の表面積に対するシート面積比が等しくなる様に基準シート幅(75mm)を設定し,シート幅を 50mm, 75mm, 87.5mm, 100mm と変化させた。

case7~case11 は 3 面巻き補強を行ったケースであり,シート端部の定着状態がせん断補強効果に及ぼす影響を比較することを目的とした。このうち, case7~10 について,定着方法は樹脂接着とし,既往の文献に示される付着応力度を用いて標準必要定着長(85mm)を算出し,各ケースの定着長を 0mm, 42.5mm, 85mm, 170mm と変化させた。ただし, case10 ではシート積層数が及ぼす影響についても検討する。また, case11 ではシートの定着強度の影響を検討するため,定着工法として金具定着とするケースとした。

表 - 2 実験ケース

case	補強方法	せん断補強筋	炭素繊維シート			
			補強間隔 (mm)	幅 (mm)	層数	定着長 (mm)
1	無補強	D4	-	-	-	-
2		D10	-	-	-	-
3		-	-	-	-	-
4	4面巻き	D4	150	50	1	-
5				75	1	-
6				87.5	1	-
7				100	1	-
8	3面巻き	D4	150	75	1	0
9				75	1	42.5
10				75	1	85
11				75	2	170

case11 は金具定着

表 - 3 実験結果

case	補強方法	最大耐力 (kN)	破壊形態
1	無補強	419.8	せん断破壊
2		686.7	せん断破壊
3		546.6	シート破断型せん断破壊
4	4面巻き	718.9	シート破断型せん断破壊
5		704.8	シート破断型せん断破壊
6		789.7	シート破断型せん断破壊
7		574.3	シート剥離型せん断破壊
8	3面巻き	596.9	割裂破壊型せん断破壊
9		574.2	割裂破壊型せん断破壊
10		769.9	割裂破壊型せん断破壊
11		756.4	シート破断型せん断破壊

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊形態

表 - 3 に各ケースの最大耐力および破壊形態を示す。表に示すように,いずれの供試体も斜め引張せん断破壊であったが,補強供試体については補強方法によって 3 種類の破壊進展挙動を示した。図 - 2 に各破壊形態の代表例を示す。

##### (1) シート破断型せん断破壊

4 面巻き補強(case3~6) 3 面巻き金具定着(case11)に見られた破壊形態である。例として図 - 2 a) に case4 の破壊模式図を示す。case4 では 500kN で斜めひび割れが発生し,540kN で斜めひび割れ付近のシートで剥離が発生した。その後,ひび割れは進展せず,剥離のみが進展し,650kN で載荷板下から 4 列目の剥離が上下端部に達した。720kN で同シートが破断し,直後 3, 5 列目のシートも破断し,供試体は破壊に至った。なお,3 面巻きである case11 が 4

面巻きと同じ破壊形態を示した理由は,定着金具がかぶり厚さ以上の深さまで埋設されたため,割裂破壊に対して金具が抵抗し,かぶりコンクリートの定着が強くなり,割裂破壊が抑制されたと考えられる。したがって,樹脂接着においても十分な定着が得られれば,シート破断させることができると考えられる。

##### (2) シート剥離型せん断破壊

3 面巻きで定着長がない場合(case7)でのみ見られた。図 - 2 b) に破壊模式図を示す。case7 では 420kN で供試体に斜めひび割れとシートの剥離が同時に発生した。その後,各シートの剥離が進展し,570kN で載荷板下から 4 列目および 5 列目の剥離がシート端部に達した。直後に供試体のせん断ズレが大きくなり,供試体が破壊に至った。case7 は定着部がないため,シートの剥離が端部に達するとシートがせん断力に抵抗することができなくなり,破壊に至っ

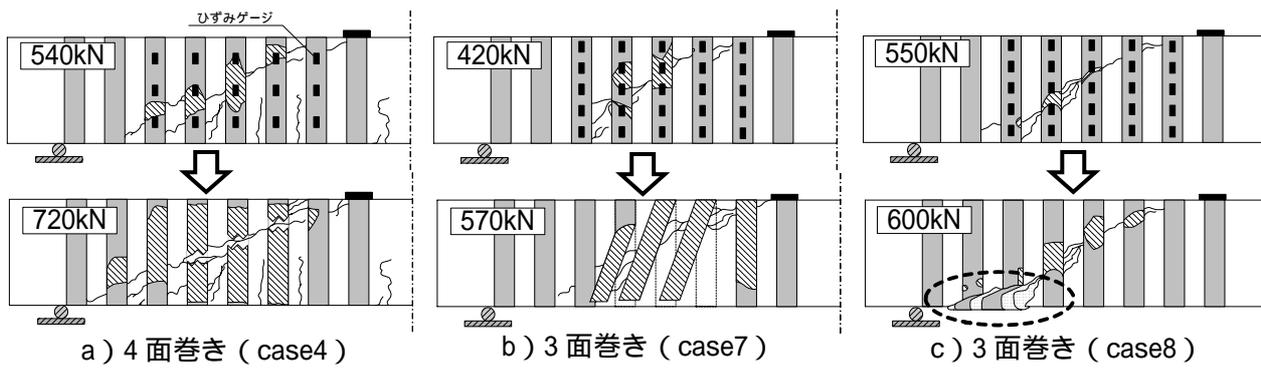


図 - 2 破壊形態模式図 ( は剥離部 )

たとえられる。

(3) 割裂破壊型せん断破壊

3面巻きで定着部を樹脂接着した場合(case8~10)に見られた。例として図-2c)に case8 の破壊模式図を示す。case8 も case7 と同様に、420kN で斜めひび割れが発生した。ついで、ひび割れが進展し、550kN で斜めひび割れ付近のシートが剥離した。その後、シートの剥離が進展したが、600kN で斜めひび割れ下端部で被りコンクリートの割裂破壊が生じた。その直後に、供試体のせん断ズレが大きくなり、供試体が破壊に至った。以下に割裂破壊について、詳細に述べる。

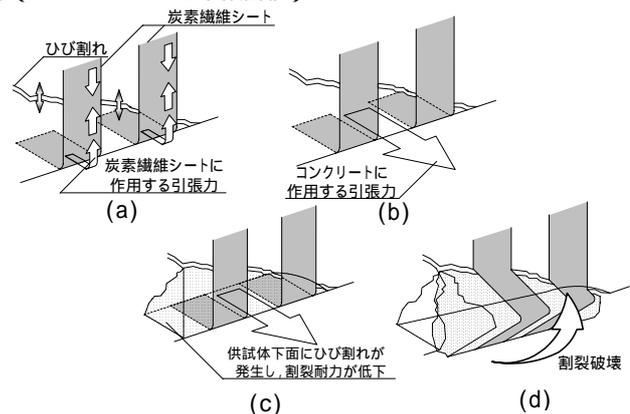


図 - 3 割裂破壊メカニズム

割裂破壊メカニズムの模式図を図-3に示す。図-3(a)に示すように、供試体に荷重を載荷すると、斜めひび割れが発生し、ひび割れ幅を広げようとする。シートはそのひび割れの開口に対して抵抗するが、そのとき、シートには引張力が作用する。ひび割れ開口に対して抵抗するのは側面に補強されたシートであるが、ひび割れが供試体の下端に位置する場合、側面のみならず、供試体下面に補強されたシートにも引張力が作用すると考えられる。(b)下面のシートに引張力が作用すると供試体下面が左右に引っ張られ、(c)下面にひび割れが発生する。(d)斜めひび割れおよび供試体下面のひび割れにより、かぶりコンクリートの割裂耐力が低下し、割裂破壊が生じたと考えられる。割裂破壊はシート剥離が進展し始めた荷重で生じたため、シートひずみはあまり増加していない。したがって、シートに破断するほどの引張力が作用せず、先に供試体下面に作用する引張力がコンクリート引張応力に達し、後述するようにひずみ 5500 μ, 剥離面

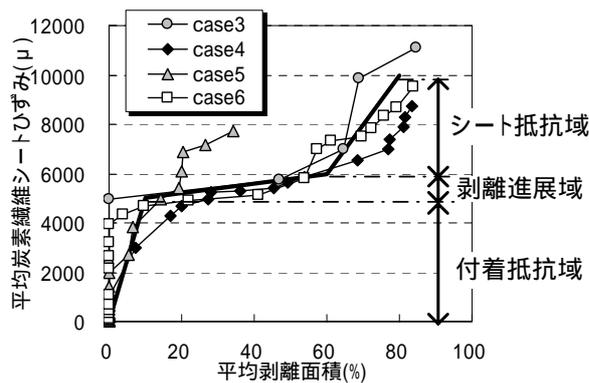
積 30% で割裂破壊が生じたと考えられる。

3.2 シートひずみ - 剥離面積関係

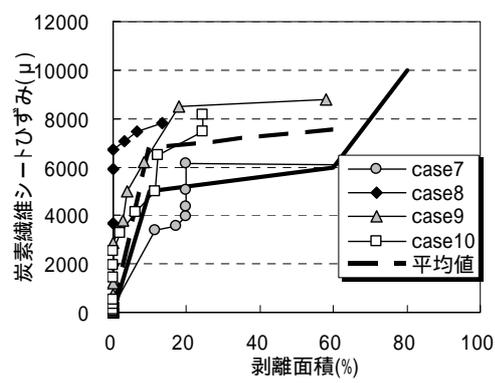
実験の結果、いずれの破壊形態についても、シートのひずみと剥離面積が破壊進展に影響を及ぼしていると考えられる。そこで、図-4に両者の関係を整理した。図に用いたシートのひずみは、図-2の測定位置で測定したひずみのうち、各列の最大ひずみを平均したものである。剥離面積についても、各列の平均値を示している。

4面巻き補強供試体では図-4a)より、シートの幅によらず、はじめにシートひずみが顕著に増加し、次にシート剥離の進展が顕著になり、最後に両者が進展するといった傾向であった。このため、シートの抵抗機構は付着抵抗域、剥離進展域、シート抵抗域と3つに区分でき、シートひずみと剥離面積の関係がトリリニアで示すことができると考えられる。シートの抵抗機構を図-5に示す。シートにより補強された供試体では作用するせん断力に対し、まずシートとコンクリートの付着が抵抗する。このとき、シートのひずみが顕著に増加する。ここで、シートの引張応力と付着抵抗の釣合いを式(1)に示す。

$$E \times x \times b \times t = x \times b \times L \quad (1)$$



a) 4面巻き補強



b) 3面巻き補強

図 - 4 炭素繊維シートひずみ - 剥離面積関係

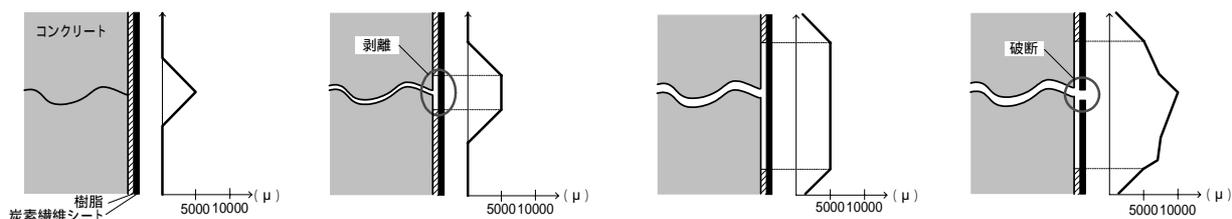


図 - 5 炭素繊維シート抵抗メカニズム

式(1)に値を代入し、 $\sigma = 1.5\text{N/mm}^2$ として計算した結果、シートのひずみ( )が $5000\mu$ 程度に達すると、シートの剥離が発生する。剥離が発生した後は、シートに引張力が作用しても、付着抵抗領域がシート端部に移動するのみであるため、シートのひずみは増加せず、剥離面積が増加する。剥離がシート端部に達すると、シートとコンクリートの付着ではなく、シート本体が引張力に抵抗する。したがって、再びシートのひずみが増加する。その後、シートひずみが破断ひずみに達するとシートが破断する。

一方、図-4b)より、3面巻き供試体ではひずみが顕著に増加する区域と剥離が顕著に進展する区域で表された。せん断力に抵抗する側面のシートは4面巻きも3面巻きも違いがないため、図-5の、では4面巻きと同様の現象となる。しかし、3面巻きではシート剥離破壊や割裂破壊が生じたため、小さい剥離面積で終局に至ったと考えられる。定着部を有する3面巻き供試体では、剥離面積進展時に割裂破壊が生じ、破壊に至るため、終局時の平均剥離面積が小さくなる。また、case7は定着長が0mmであるため、ある列のシートの剥離がシート端部に達すると、シートがせん断力に抵抗できなくなり、破壊に至る。したがって、平均剥離面積が60%で終局となる。

また、既往の研究<sup>2)</sup>より、炭素繊維シートの幅、積層数、弾性係数が変化してもシートとコンクリートの - 関係(付着応力 - 相対変位関係)が変化しないことがわかっている。以上より、シートと剥離面積の関係はシート幅、シート積層数、補強方法の違いによらず、統一したトリリニアモデルで表すことができることが分かった。また、実験で得られた各破壊形態は終局時の剥離面積の値により区別することができる。

#### 4. 耐力算出方法の提案

##### 4.1 各部材のモデルの作成

実験結果から、補強方法により破壊形態が異なり、シートの補強効果が異なることが分かった。しかし、シートひずみと剥離面積関係は統一したモデルで表すことが可能であり、剥離面積で各破壊形態を区別することができるため、本研究ではシートにより補強された部材のせん断耐力をシートひずみと剥離面積関係を用いて評価する。

##### (1) 炭素繊維シートモデル

シートひずみ - 剥離面積関係モデルを図-6に示す。ここで各破壊形態を以下のように定義した。各破壊形態時におけるシートひずみの推定値を図-7に示す。

(1)シート破断：斜めひび割れが各列のシートを

横切る荷重が異なるため、ひずみおよび剥離の進展に各列で差が生じる。ひび割れが初期に横切る梁中央部のシートでは 14000  $\mu$  程度の高いひずみが生じるが、両端部のひずみは低いひずみとなる。したがって、シート破断時の平均ひずみは図 - 7 (d) に示すように約 10000  $\mu$  となる。また、剥離面積についても梁中央部のシートではほぼ全域が剥離するが、両端部のシートは剥離面積が小さい。よって、平均剥離面積は 80% 程度であると考えられる。

(2)シート剥離: 全列にシート剥離が発生した後、ある列の剥離が全域に達し、剥離破壊が生じるため、全列のひずみは 6000  $\mu$  程度で停滞する。したがって、剥離破壊時の平均ひずみは図 - 7 (c) に示すように、6000  $\mu$  となる。また、各列で剥離の進展に差が生じるため、平均剥離面積は 60% となった。

(3)割裂破壊: 割裂破壊が生じるのは梁中央部のシート剥離が進展し始める荷重であり、両端部のシートは剥離していない。したがって、平均剥離面積は 30% 程度であり、平均ひずみも 5500  $\mu$  程度と低くなった。

なお、図 - 4b) より、割裂破壊が生じたケースのシートひずみが実験結果とモデルで異なっていることが分かる。しかし、実験値を用いて算出したせん断耐力とモデル値を用いて算出したせん断耐力には 13.6kN の差しか生じなかったため、耐力の評価には 4 面巻きモデル値を用いて算出する。

## (2) スターラップモデル

スターラップのモデルは鉄筋の応力 - ひずみ関係を用い、全てのスターラップで一律にひずみが増加すると仮定した。Vs は以下の式(2)により算出する。

$$V_s = \sum_{i=1}^n (2 \times s \times E_s \times A_s) \quad (2)$$

## (3) コンクリートモデル

図 - 8 に実験結果より得られたコンクリート負担せん断力(Vc)とシートひずみの関係を示す。実験より、せん断ひび割れ発生以降、Vc は低下することが分かったため、せん断耐力の評価では、Vc の低下を考慮したモデルとし、実験値を

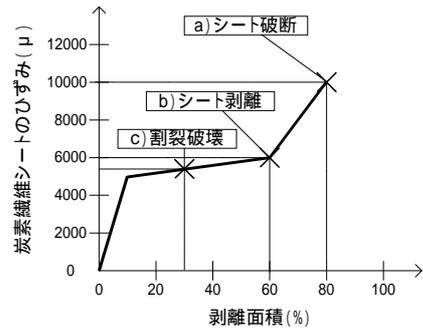


図 - 6 炭素繊維シートモデル

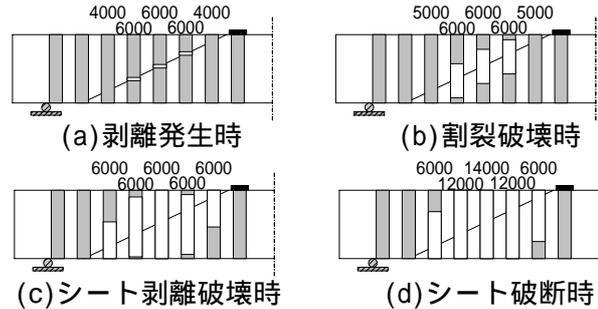


図 - 7 各破壊形態におけるシートひずみ推定分布

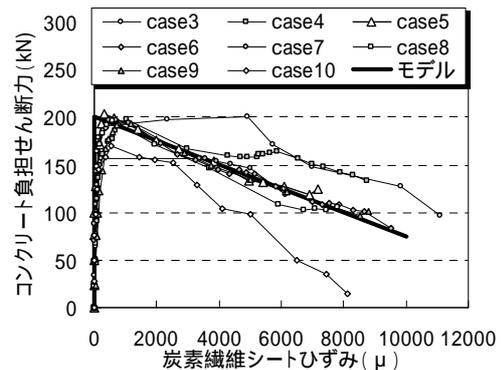


図 - 8 Vcf - 炭素繊維シートひずみ関係

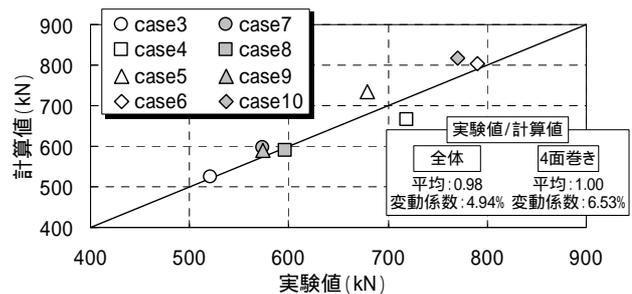


図 - 9 実験値と計算値との比較(提案手法)

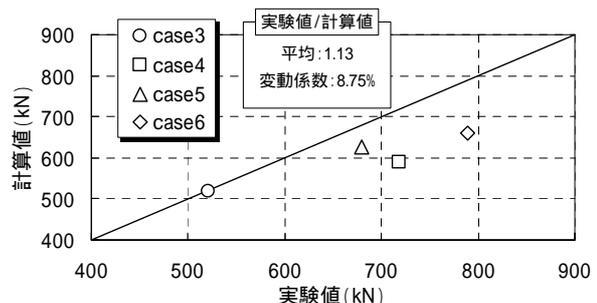


図 - 10 実験値と計算値との比較(指針手法)

参考で作成した。なお、シートひずみはコンクリ

ートにひび割れが生じた後から発生するため、 $V_c$  はシートひずみ  $0\mu$  で最大値となる。

#### 4.2. 提案手法の妥当性の評価

4.1 で提案したモデルを用い、各補強実験供試体のせん断耐力を計算した。図 - 9 に本提案手法による計算結果と実験結果の比較を示す。図より、補強方法の違いによらず、提案手法による計算値は実験値を精度良く再現でき、実験値/計算値の平均値は 0.98 (変動係数は 4.94%) となった。

また、図 - 10 に土木学会式による計算結果と実験結果の比較を示す。なお、土木学会式では 4 面巻きのみを対象とした評価方法であるため、3 面巻きのせん断耐力を算出することができない。図より、土木学会式を用いて算出すると、4 面巻きでは全てのケースで計算値が実験値を下回る結果となった。

図 - 11 に各部材のせん断耐力分担状況の代表例を示す。図より、本提案手法を用いた場合、せん断耐力のみならず、各部材の分担割合も実験結果と合っていることが分かる。ただし、case4 では実験での  $V_c$  が計算値と 100kN 程度の差が生じている。本検討では、抵抗するシートを 5 本と仮定しているが、case4 はひび割れ角度が他ケースに比べ緩やかであり、抵抗するシートが実際は 1 本多かったため、 $V_{cf}$  がさらに大きくなったと考えられる。

これに対し、土木学会式を用いた場合では、 $V_c$  と  $V_{cf}$  の分担量に差が生じている。土木学会式では、ひび割れ発生以降の  $V_c$  の低下を考慮していないこと、実験で得られたひび割れ角度は約 30 度であったが、土木学会式ではひび割れ角度を 45 度として計算するため、せん断力に抵抗するシートの面積が実際に比べ小さくなるのが原因となり、土木学会式の算出結果では  $V_c$  を過大評価し、 $V_{cf}$  を過小評価すると考えられる。

また、図より、3 面巻き供試体の分担割合についても本提案手法は精度良く再現できている。これは、本手法では実験で得られた各破壊形態を区別して評価しているためであり、各破壊形態の定義が妥当であったと判断できる。

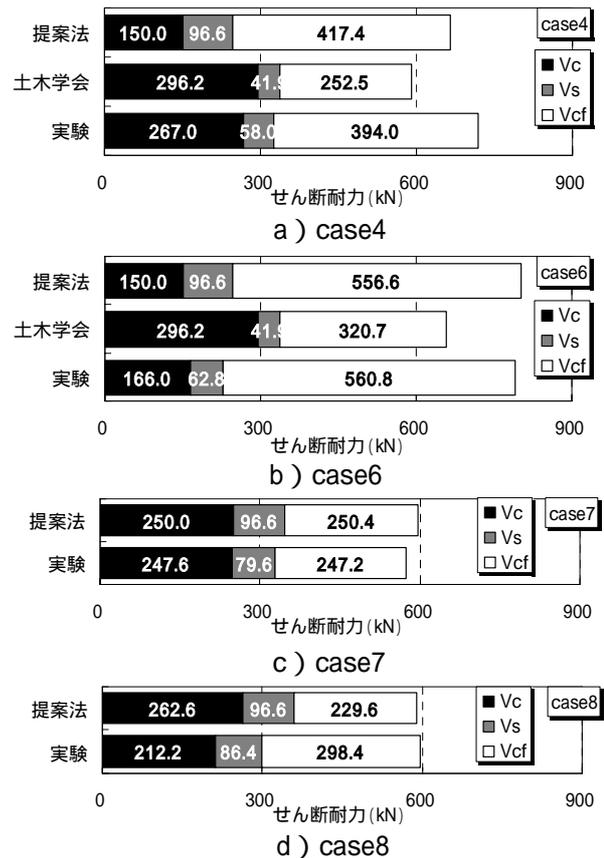


図 - 11 各部材が負担するせん断力

#### 5. まとめ

- (1)シートと剥離面積の関係はシート幅、シート積層数、補強方法の違いによらず、統一したトリリニアモデルで表すことができる。また、各破壊形態は終局時の剥離面積の値により区別ができる。
- (2)実験結果を用い、シートひずみ - 剥離面積関係、 $V_s$  - シートひずみ関係、 $V_c$  - シートひずみ関係をそれぞれモデル化し、せん断補強力の評価方法を提案した。
- (3)本提案手法により供試体のせん断耐力を算出した結果、実験値/計算値の平均値が 0.98 (変動係数は 4.94%) となり、精度良く再現できた。

#### 参考文献

- 1)土木学会：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，pp.23-29，pp.301-308，2000.3
- 2)上原子・下村・丸山・西田：連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析，土木学会論文集，No.634/V-45,197-208,1999.11