

論文 炭素繊維シートのせん断補強効果に関する解析的検討

小屋 拓郎^{*1}・幸左 賢二^{*2}・杉岡 弘一^{*3}・宮島 英樹^{*4}

要旨：本研究では炭素繊維シート巻き立て補強を行った大型 RC 梁の載荷試験および簡易的なフレーム解析を行い、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、解析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炭素繊維シートの幅の変化に対応し、実験結果と整合性の高い結果が得られた。

キーワード：炭素繊維シート、フレーム解析、せん断耐力

1. はじめに

現在までに、炭素繊維シートにより補強されたコンクリート部材のせん断補強効果および耐力評価方法の提案は多くの研究者や学会、委員会等により行われている。その中の代表的なものとして土木学会による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¹⁾が挙げられるが、指針の中では、図-1 に示すように炭素繊維シートの補強比が増加するにしたがって、補強効率が低下するということが示されている。しかし、これらのデータの中には柱の耐震補強に着目したものも含まれており、せん断スパン比も 1.0~2.5 と幅広い範囲で評価されている。また、供試体の破壊形態も、高補強比に伴う曲げ破壊先行型のせん断破壊や、コンクリートの圧縮破壊が混在しており、評価の対象としたデータの中で純粋に斜め引張せん断破壊したデータは少ない。

したがって、本研究では、炭素繊維シートによるゼブラ状の 4 面巻き立てを施したせん断破壊先行型の RC 梁のせん断補強実験を行い、炭素繊維シートのひずみやコンクリートのせん断ひび割れの進展状況を詳細に計測することにより、せん断補強効果およびコンクリートの斜

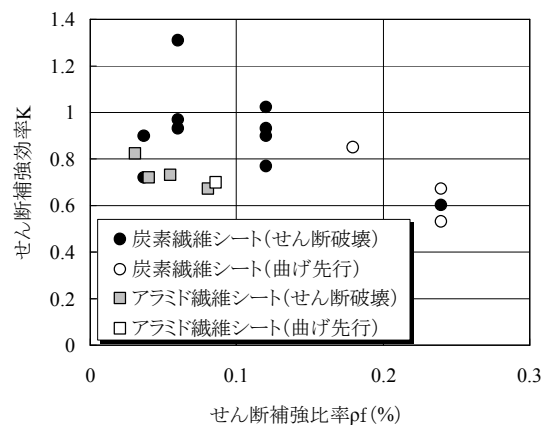


図-1 炭素繊維シートの補強比と補強効率

め引張せん断破壊の進展に伴う炭素繊維シートの抵抗機構を検討した。

また簡易的な解析モデルを作成し、シート幅や層数が変化した場合の炭素繊維シートの抵抗機構を検討し、斜め引張せん断破壊に関する耐力算出方法を提案した。

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た。各支承部断面についてせん断力を照査した結果、耐力の余裕が最も少ない梁付根部を検討断面とした。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 $a/d=2.5$ とし、引張主鉄筋比は実橋と同等の $\rho_t=2.03\%$ とした。

*1 九州工業大学 工学部 建設社会工学科(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)

*4 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)

また、供試体耐力は補強によるせん断補強効果を評価することを目的としているので、補強後もせん断破壊となるように設定している。表－1に供試体諸元を示す。Case1は無補強，Case2～5はシートの補強効果を評価するシリーズである。表－2に使用した材料の強度を示す。シートの物性値は引張強度 4840N/mm^2 ，シート厚 0.111mm ，弾性係数 $2.53 \times 10^5\text{N/mm}^2$ である。

図－3にひび割れ幅の計測方法を示す。供試体の上，中，下段の3箇所のひび割れ発生箇所にデジタルカメラ（400万画素相当）を設置し，載荷状態でのひび割れ幅の記録を行った。その後，図に示すように，撮影した画像に計測線を10線設定し，各荷重ステップ毎に計測線を横切るひび割れ幅を，画像診断支援ソフトを用いて合計30箇所測定した。ひび割れ幅はひび割れが噛み合う2点間の距離としている。評価方法としては，計測線を横切る複数のひび割れ幅の中から，最もひび割れ幅の大きい主要なせん断ひび割れを特定し，30箇所の平均値を用いている。また，打音検査により剥離の進展を計測した。

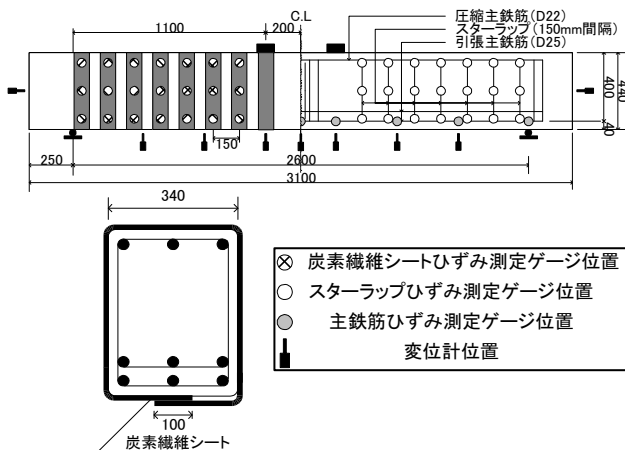
3. 簡易的フレーム解析

3.1 解析モデル

解析モデルは図－4に示すような3次元フレームモデルとし，実験供試体の対称性を考えて，供試体の片側半分を解析対象とした。解析モデルにおいて，コンクリート供試体は剛な梁要素を用いてその形状を表しており，実験でせん断ひび割れが生じた箇所にせん断損傷仮定断面を設けた。また，せん断損傷仮定断面を横切る5本の炭素繊維シートは引張力のみを負担する弾性トラス要素，せん断損傷仮定断面のコンクリートの抵抗は非線形バネ要素，コンクリートと炭素繊維シート間の界面の接着樹脂はすべり方向に非線形バネ要素を用いた。

3.2 各部材のモデル化

接着樹脂の付着構成則として，より忠実にシートの剥離挙動を再現するため，実現象に最も近い傾向を示す弾性－軟化－剥離型の構成則を



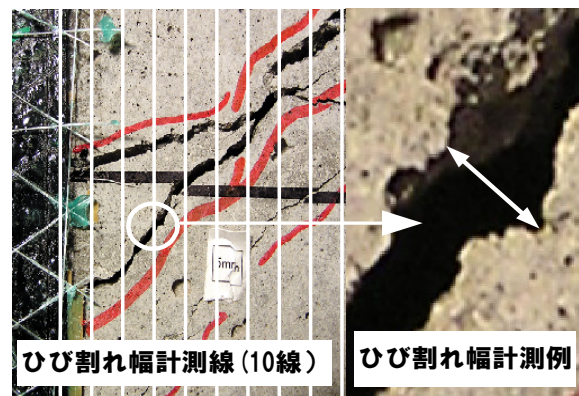
図－2 実験供試体

表－1 供試体諸元

供試体	シート幅 (mm)	間隔 (mm)	曲げ耐力 Pyo (kN)	せん断耐力 V (kN)	補強比率 (%)
Case1	無補強	-	302.0	131	0
Case2	50	150	302.0	212.3	0.022
Case3	75	150	302.0	253	0.032
Case4	87.5	150	302.0	273.3	0.038
Case5	100	150	302.0	293.6	0.043

表－2 材料特性

部材	強度の種類	強度値
コンクリート	コンクリートの平均圧縮強度	29.9N/mm^2
	コンクリートの平均割裂強度	3.7N/mm^2
鉄筋	引張主鉄筋降伏強度(D25)	381.5N/mm^2
	圧縮鉄筋降伏強度(D22)	389.2N/mm^2
接着樹脂	プライマー付着強度(エポキシ)	1.5N/mm^2
	レジン引張強度(エポキシ)	29N/mm^2
炭素繊維シート	引張強度	4840N/mm^2
	引張弾性率	$2.53 \times 10^5\text{N/mm}^2$



図－3 クラック幅計測状況

用いている。付着構成則の数値は既往の付着試験¹⁾を参考に， $\tau_y=3.75\text{N/mm}^2$ ， $\delta_y=0.1\text{mm}$ ， $\delta_u=0.5\text{mm}$ としている。

次に，バネモデルの最大付着力 P_y は式(1)を用いて算出し，図－5(a)に示す接着樹脂の荷重－ひび割れ幅関係とした。なお，1層の炭素繊維シートの有効付着長は既往の研究²⁾を参考に50mmとし，本解析においても50mm毎に接着

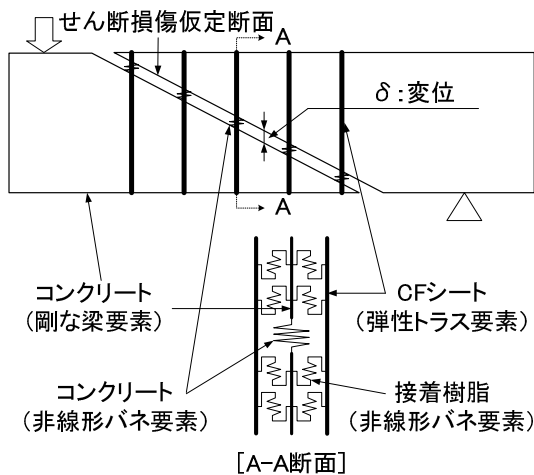


図-4 解析モデル

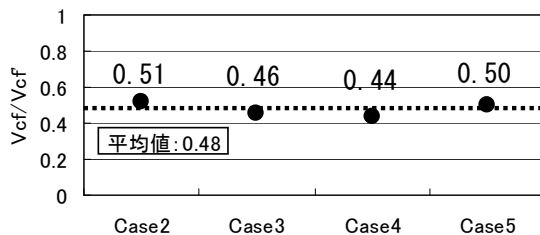


図-6 炭素繊維シートの有効率

樹脂のバネモデルを配置している。

$$P_y = \tau_y \times b \times l \quad (1)$$

一方、炭素繊維シートの初期剛性 K_1 および破断荷重 P_u は、シートの物性値を用いて式(2)、(3)により算出し、図-5(b)に示す荷重-変位関係とした。また、せん断損傷仮定断面間におけるコンクリートの非線形バネモデルは、図-7に示すように実験より得られた V_c とひび割れ幅の関係を用い、図-5(c)に示す荷重-変位(コンクリートではひび割れ幅と同一)関係とし、 $\delta_c=0.01\text{mm}$ 、 $\delta_u=8.0\text{mm}$ とした。なお、解析におけるひび割れ幅は鉛直方向の距離である。

$$P_u = f_{wyd} \times A \quad (2)$$

$$K_1 = E \times A / L \quad (3)$$

解析における外力としては強制変位を与えている。また、実験の結果、図-6に示すように、シートのひずみより算出した破断時の V_{cf} は破断荷重の48%程度であったため、解析における終局状態の判定としてシートが負担するせん断力 V_{cf} が破断荷重の48%に達した時点とした。

4. 実験結果および解析結果

図-7に、Case3を例に炭素繊維シートが負

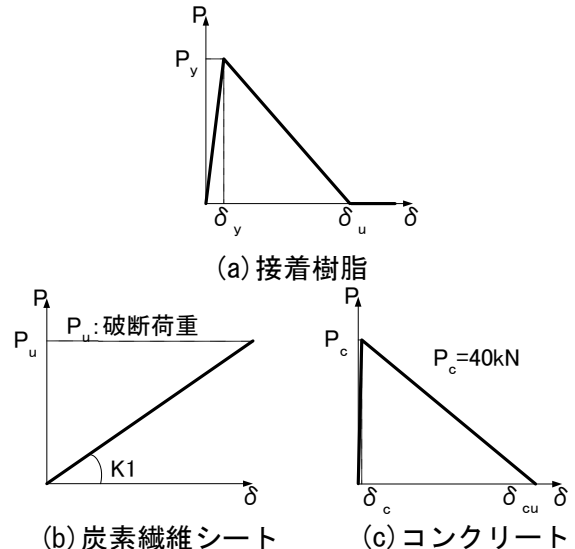


図-5 各要素の荷重-変位関係

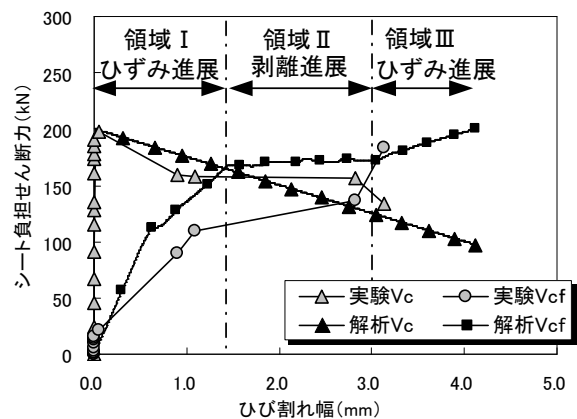


図-7 せん断力-ひび割れ幅関係 (Case3)

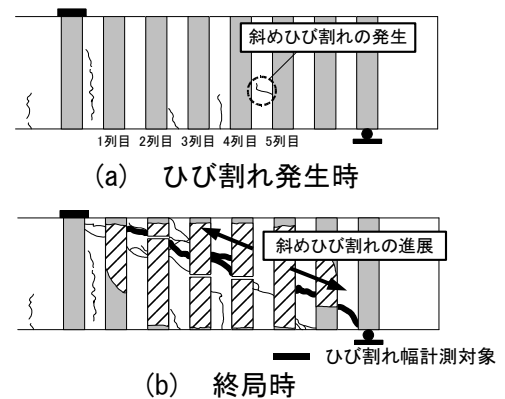


図-8 ひび割れ性状 (Case3)

担するせん断力 V_{cf} およびコンクリートが負担するせん断力 V_c とせん断ひび割れ幅の関係を示す。ここで、実験結果と解析結果で終局時のひび割れ幅が異なっているが、図-8に示すように実験におけるひび割れ幅の計測は主要な斜めひび割れ複数本を対象に行っており、分散したひび割れ全てを計測できていない。よって、

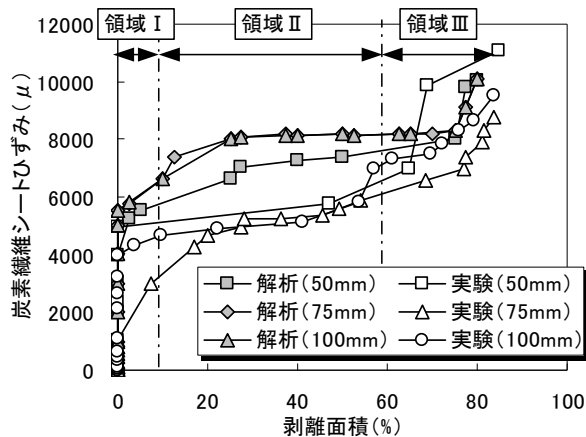


図-9 シートひずみ-剥離面積関係

実験におけるひび割れ幅を小さく評価し、解析結果と差が生じたと考えられる。

図より、 V_c とひび割れ幅の関係は実験と解析で比較的一致していることが分かる。また、 V_{cf} を見ると実験値、解析値ともにひび割れ幅が小さい段階で V_{cf} が増加し（領域Ⅰ）、ひび割れ幅 1.5mm 程度から V_{cf} が停滞し（領域Ⅱ）、その後再び V_{cf} が増加する（領域Ⅲ）傾向となっている。しかし、実験値の方が領域Ⅱにおける V_{cf} の値がやや小さくなっている。

次に、図-9 に炭素繊維シートひずみ-剥離面積関係を示す。図中に示す炭素繊維シートひずみや剥離面積は 5 列の平均値である。図より、実験、解析ともにひずみの進展性状や剥離進展性状が等しく、以下の領域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲが存在している。炭素繊維シートの抵抗メカニズムとして、(1)まず炭素繊維シートが抵抗し、シートのひずみが増加する（領域Ⅰ）。(2)シートのひずみがある値に達すると付着が切れ、剥離が発生する。(3)その後、ひずみは増加せず、剥離面積のみ増加する（領域Ⅱ）。剥離が端部に達すると再びシート自体が抵抗し、ひずみが増加する（領域Ⅲ）。したがって、解析は実験における炭素繊維シートの抵抗機構を妥当に評価できていると考えられる。ただし、解析では剥離進展時にひずみが停滞しているのに対し、実験では緩やかにひずみが増加している。

これは、解析では予めせん断損傷断面を設けているため、5 列のシートが同時に抵抗し、いずれの列においても顕著にひずみが進展する。一方、実験では図-8 に示すように、供試体中

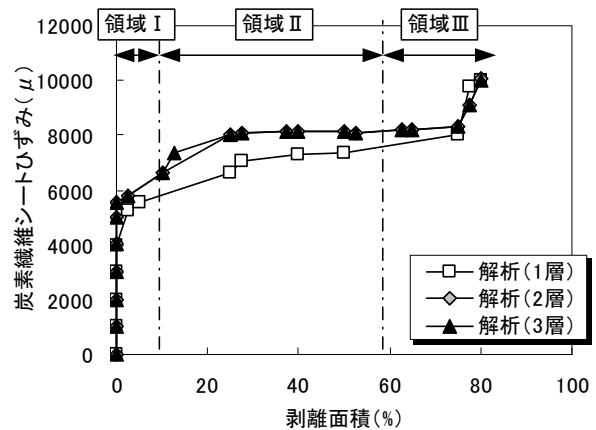


図-10 シート積層数による抵抗機構の変化

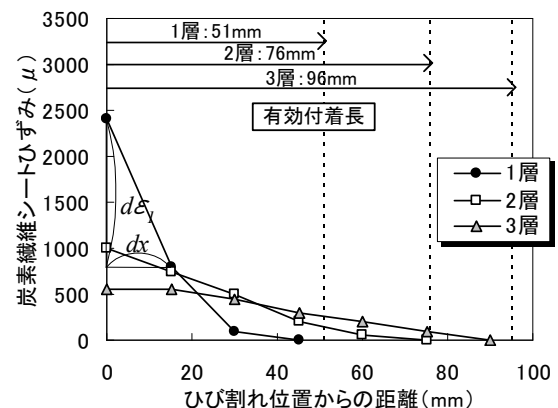


図-11 炭素繊維シートのひずみ分布例²⁾

央部からせん断ひび割れが発生し、その後、支承版、載荷板方向に進展するといった段階を踏むため、載荷板および支承版付近の 1、5 列はひずみの進展が遅くなる。よって、解析における V_{cf} や炭素繊維シートひずみが実験値よりも大きくなったと考えられる。

また、図-10 に炭素繊維シートの積層数をパラメータとしたときのシートひずみ-剥離面積関係を示す。図より、シート積層数が変化しても、炭素繊維シートの抵抗機構に変化はなく、ひずみや剥離の進展が等しくなっている。

ここで、炭素繊維シートの付着応力を式(3)で、炭素繊維シートに作用する引張力を式(4)で表す。この式(3)、(4)が釣り合う場合に炭素繊維シートの剥離が発生する。また、既往の研究より、炭素繊維シートとコンクリートの付着応力度 τ は式(5)で表すことができ、これらの式を展開すると、以下の式(6)を得ることができる。

$$P_f = \tau \times b \times Le \quad (3)$$

$$P_2 = \sigma \times A_{cf} = E \times \varepsilon_{cf} \times b \times t \quad (4)$$

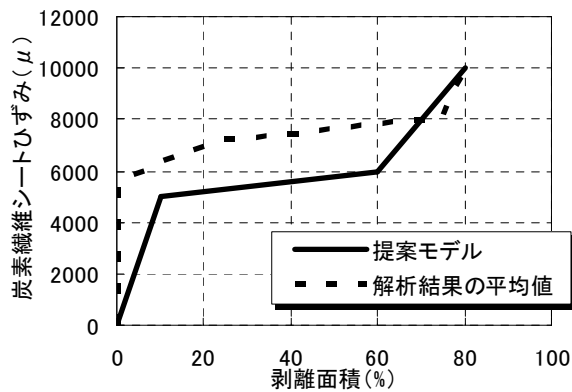


図-12 炭素繊維シートモデル

$$\tau = E \times t \times \frac{d\varepsilon_1}{dx} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{cf} = L_e \times \frac{d\varepsilon_1}{dx} \quad (6)$$

式(6)より、炭素繊維シートの剥離発生ひずみは有効付着長および、シートひずみ分布の傾きに依存することが分かる。また、シートの有効付着長もひずみの分布範囲より求めるため、剥離発生ひずみは炭素繊維シートのひずみ性状によって、求めることとなる。図-11に既往の文献²⁾に示される炭素繊維シートのひずみ分布例を示す。既往の研究より、シート幅が変化してもシートのひずみ性状は変化しないことが明らかとなっている。一方、積層数が増加すると、図に示すようにシートのひずみ性状が変化し、分布範囲が広がる。しかし、ひずみ分布の傾き $d\varepsilon_f/dx$ が小さくなるため、式(6)より求められる剥離時の炭素繊維シートのひずみは変化しない結果となる。

以上より、炭素繊維シートひずみ-剥離面積関係はシート幅や積層数によらず、一定の傾向を示すことが分かった。

5. せん断補強耐力評価モデル

5.1 せん断補強耐力評価モデルの提案

実験および解析結果より、炭素繊維シートひずみ-剥離面積関係はシート幅や積層数によらず、変化しないことが分かった。よって、この関係を用いることにより、炭素繊維シートが負担するせん断力を定量的に評価することが可能であると考えられる。したがって、本検討では炭素繊維シートひずみ-剥離面積関係を用いた評価方法を提案す

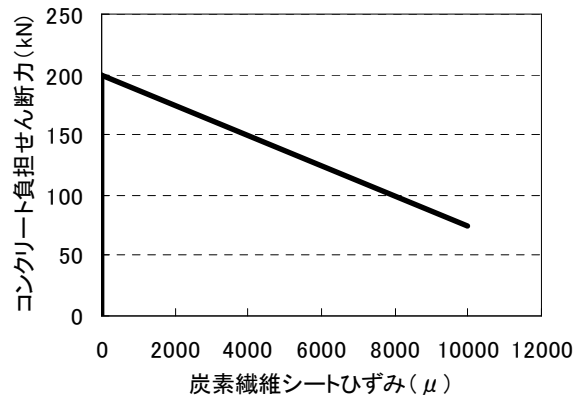


図-13 コンクリートモデル

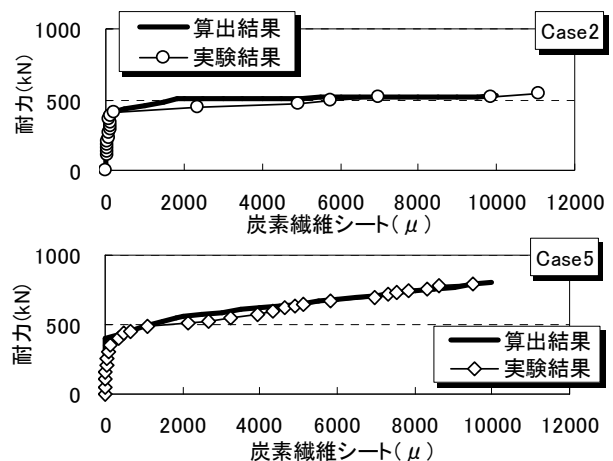


図-14 実験値と計算値の比較

る。図-12に提案モデルを示す。上述したように解析は斜めひび割れを予め設定したモデルであり、5列の炭素繊維シートが同時に抵抗するため、実現象と異なる。よって、提案モデルは実験結果を参考とし、実験では1, 5列目のシートのひずみ性状が他の列に比べて遅れるため、炭素繊維シートひずみ-剥離面積関係の各直線が勾配を持ち、再び炭素繊維シートひずみが増加し始めるときの剥離面積の値が解析値に比べ小さくなっている。せん断耐力の評価方法として、5列に作用する平均炭素繊維シートひずみに弾性係数を掛けることにより、炭素繊維シートの抵抗せん断力を求め、その後、同一ひずみ値を用いてコンクリートせん断力、スターラップせん断力を求める。以上を累加することにより、せん断耐力を求める。

図-13にコンクリートモデルを示す。シートの幅や層数により炭素繊維シートひずみ性状が変化しないことが明らかとなったため、耐力算出モデルではシートひずみを基準として評価を行なう。モデルにおける最大値および、直線の下

降勾配は実験結果の平均値を用いて算出した。

5.2 セン断補強耐力評価モデルの算出結果

図-14 に Case2, 5 におけるせん断耐力-炭素繊維シートひずみ関係の実験結果と算出結果の比較を示す。図より，提案手法による計算値は実験値を精度良く再現でき，炭素繊維シートの幅によらずせん断耐力の増加傾向および最大耐力を精度良く評価できていると考えられる。

また，図-15 に各部材のせん断耐力分担状況の代表例を示す。まず，炭素繊維シートひずみが 5000μ 程度のときの比較を見ると，炭素繊維シート負担せん断力やコンクリート負担せん断力はほぼ等しくなっているが，いずれのケースもスターラップ負担せん断力は計算値が実験値を上回っている。これは，計算では全てのスターラップが同時に抵抗すると仮定しているためである。しかし，合計せん断耐力は計算値と実験値で整合性の高い結果となっている。

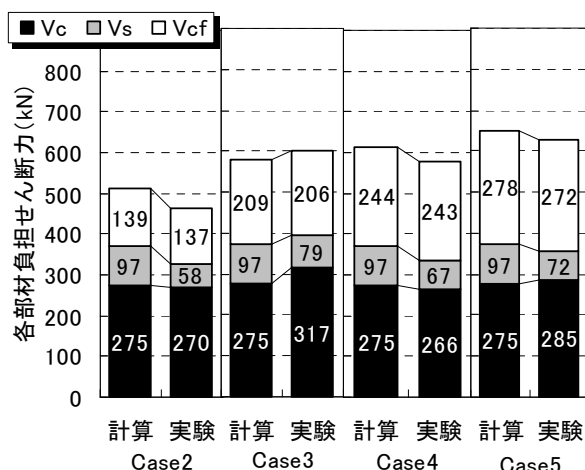
次に，終局時に着目すると本提案手法を用いた場合，せん断耐力のみならず，各部材の分担割合も実験結果と合っていることが分かる。ただし，Case3 では実験での V_c が計算値とは 100kN 程度の差が生じている。これは，本検討では抵抗するシートを 5 本と仮定しているが，Case3 はひび割れ角度が他ケースに比べ緩やかであり，抵抗するシートが実際は 1 本多かったため， V_{cf} がさらに大きくなったと考えられる。

以上より，提案した炭素繊維シート補強せん断耐力モデルは炭素繊維シートの幅や層数によらず，補強後のせん断耐力の推移を妥当に評価することが可能であると考えられる。

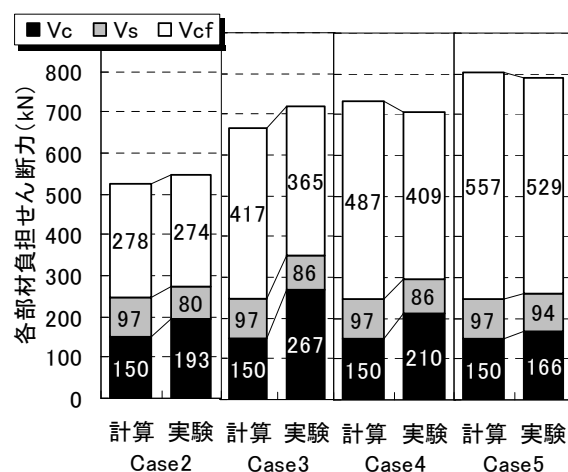
6. まとめ

以下に，本研究で得られた結論を示す。

- (1) 炭素繊維シートで補強されたコンクリート部材のせん断補強耐力について，本解析モデルを用いることで，炭素繊維シートの補強方法によらず，シートの抵抗挙動を概ね評価できることが分かった。
- (2) 炭素繊維シートの幅や積層数が増加しても，



(a) 炭素繊維シートひずみ 5000μ 時



(b) 終局時

図-15 セン断耐力の分担割合

炭素繊維シートひずみ-剥離面積関係は変化しないことが分かった。

- (3) 実験結果および解析結果を用い，梁部材の斜め引張せん断破壊に対するせん断耐力算出式を提案した。この式を用いることにより，シートで補強された供試体のせん断耐力を妥当に評価することができると考えられる。

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) 磯雅人ら：連続繊維シートとコンクリート界面の付着性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19, No.2，pp.295-300，2000.6