

# 論文 RC 梁の炭素繊維シート 3 面巻き補強に関する研究

宮島 英樹<sup>\*1</sup>・幸左 賢二<sup>\*2</sup>・杉岡 弘一<sup>\*3</sup>・富松 康秀<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では RC 梁に対して炭素繊維シートを用いた 3 面巻き補強の補強効率が 4 面巻き補強に比べてどれほど低下するか、また、その低下する原因を明らかにすることを目的に、3 面巻き立て補強を施した RC 梁に静的 2 点載荷実験を行い、シートに生じるひずみやコンクリートの破壊性状に着目した検討を行った。その結果、4 面巻きに比べ、3 面巻きではコンクリートの拘束効果が低下することが分かった。また、3 面巻きでは炭素繊維シートに作用する引張力によりせん断ひび割れ下端部において割裂破壊が生じた。これらが原因となり、3 面巻きは 4 面巻きに比べ、補強効率が 44% 程度低下する結果となった。

キーワード：せん断補強，炭素繊維シート，割裂破壊，3 面巻き補強

## 1. はじめに

現在、多くのコンクリート部材において連続繊維シートによるせん断補強が行われている。それに伴い、多くの機関が連続繊維シートに関する実験、検討、評価を行っており、せん断に対する補強効率の設計基準や指針が提案されている。

ただし、これらの研究はシートを柱や梁部材の全面に巻立てた場合の補強効果を評価しているものである。しかしながら、実橋の RC 橋脚の梁部に連続繊維シートを巻立ててせん断補強する場合、梁部には支承などの付属物の存在により、全面巻き立ては不可能である。したがって、梁上面以外の 3 面に巻立てた場合の補強効率を考慮できれば、より合理的な設計が可能となる。ところが、このような 3 面巻き補強に関する研究は少なく、現段階では、その補強効果は明らかになっていない。

そこで、本研究では RC 梁に対して炭素繊維シートを用いた 3 面巻き補強の補強効率が 4 面巻き補強に比べてどれほど低下するか、また、その低下する原因を明らかにすることを目的に、3 面巻き立て補強を施した RC 梁に静的 2 点載荷実験

を行い、シートのひずみやコンクリートの破壊性状に着目した検討を行った。

## 2. 供試体実験概要

本実験供試体は図 - 1 のような T 型の RC 橋脚の梁部を単純梁に置き換え、照査断面の中でせん断力に対して耐力の余裕が最も小さい梁付根部の断面 A を対象断面とした。また、対象橋

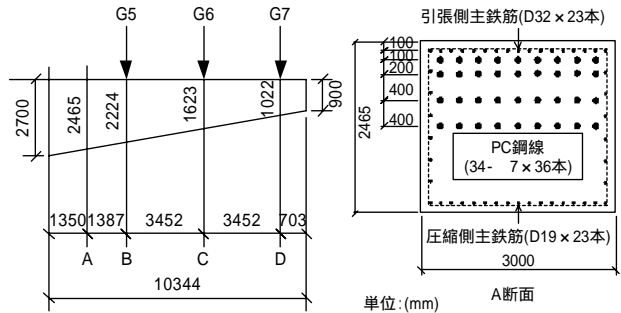


図 - 1 対象橋脚梁部

表 - 1 実験材料諸元

コンクリートの圧縮強度	28.4 ~ 31.4 N/mm <sup>2</sup>	
コンクリートの割裂強度	3.4 ~ 4.1 N/mm <sup>2</sup>	
引張主鉄筋降伏強度 (D25)	381.5 N/mm <sup>2</sup>	
圧縮鉄筋降伏強度 (D22)	389.2 N/mm <sup>2</sup>	
プライマー付着強度 (エポキシ)	1.5 N/mm <sup>2</sup>	
レジン引張強度 (エポキシ)	29 N/mm <sup>2</sup>	
炭素繊維シート	引張強度	4840 N/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 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 阪神高速道路公団 大阪管理部 (正会員)

\*4 ショーボンド建設株式会社 大阪支店 (正会員)

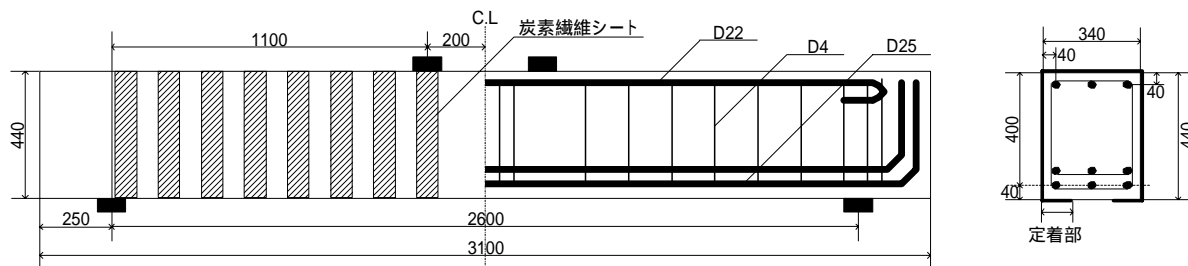


図 - 2 供試体寸法および配筋図

表 - 2 実験ケース

ケース	補強方法	シート幅 (mm)	間隔 (mm)	定着長 (mm)	巻き立て層数	曲げ耐力 Pyo (kN)	せん断耐力 Sc (kN)	Sc/Pyo	破壊形態
case1	無補強	-	-	-	-	302	262	0.868	せん断破壊
case2	3面巻き	75	150	0	1	302	262	0.868	せん断破壊
case3	3面巻き	75	150	42.5	1	302	262	0.868	せん断破壊
case4	3面巻き	75	150	85	1	302	262	0.868	せん断破壊
case5	3面巻き	75	150	170	1	302	262	0.868	せん断破壊
case6	3面巻き	75	150	170	2	302	384	1.272	曲げ破壊
case7	4面巻き	75	150	-	1	302	262	0.868	せん断破壊

脚の梁部はPC鋼線を有するPC部材であるため、まず、実橋をPCの軸力を考慮して初降伏時の曲げ耐力が等価になるRC単純梁に置き換え、次に、実験供試体の主鉄筋比  $t$  を置き換えたRC梁の主鉄筋比 ( $t=1.90\%$ ) と同等となるように  $2.03\%$  とした。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  $a/d=2.5$  とした。供試体断面は対象断面Aの  $1/7$  スケールとし、炭素繊維シートによるせん断補強後も供試体がせん断破壊し、かつ主鉄筋比は釣り合い鉄筋比を超えない範囲としている。以上により、決定した供試体寸法および供試体配筋図を図 - 2 に示す。次に、今回用いた実験材料の諸元を表 - 1 に示す。使用した炭素繊維シートは目付量  $200\text{g/m}^2$  (設計厚さ  $0.11\text{mm}$ 、破断強度  $4840\text{N/mm}^2$ 、弾性係数  $2.53 \times 10^5\text{N/mm}^2$ ) であり、主鉄筋 (D25: 降伏強度  $381.5\text{N/mm}^2$ 、D22: 降伏強度  $389.2\text{N/mm}^2$ ) にはSD345の異形鉄筋を使用した。また、使用したコンクリートの試験時材齢における圧縮強度は  $28.4 \sim 31.4\text{N/mm}^2$  である。

実験ケースを表 - 2 に示す。曲げ耐力は供試体の断面より算出し、せん断耐力は供試体の断面より算出した値と炭素繊維シートによる補強せん断耐力を足して算出した。炭素繊維シート巻き補強と同等の補強効果が得られると仮定し、土木学会指針に従い、補強効率  $0.8$  を用いてによる補強せん断耐力は、3面巻き補強でも4面算出

した。今回行った実験ではシート幅を統一し、3面巻きの定着長の違いによる影響を検討するため、定着長をパラメータとした。ここで、定着長については、式(1)を用いて算出した。式(1)にはコンクリートと炭素繊維シートの付着応力度が必要となるが、付着応力度について、基準などに明確な値が表示されたものがないことから、既往の文献<sup>1)</sup>を参考に式(2)を用いて算出した。ただし、この文献はシート付着面方向の一軸引張試験により、炭素繊維シートの付着応力度を算出している。本実験で使用したコンクリートの場合、圧縮強度が平均で  $30.3\text{N/mm}^2$  であったため、式(2)より  $=4.2\text{N/mm}^2$  を用いている。これは、一般的な連続繊維シート一軸引張試験から得られる付着応力度  $=1.5\text{N/mm}^2$  に比べて3倍程度大きい。したがって、式(1)より算出される1層巻き立ての場合の定着長  $85\text{mm}$  を標準ケース (case4) とした。また、この算出結果より、case6の2層の場合は定着長を標準ケースの2倍の  $170\text{mm}$  と設定した。

$$A \times \tau \geq P$$

$$L \geq \sigma_t \times t / \tau \tag{1}$$

$$\tau = 0.93 \sigma_{ck}^{0.44} \tag{2}$$

ここに、

$A$  : 付着面積 ( $\text{mm}^2$ )

(シート幅 × シート定着長)

$\tau$  : コンクリートと炭素繊維シートの

表 - 3 最大荷重および補強効率

供試体	CFシート	最大荷重 (kN)	補強耐力 (kN)	補強せん断耐力Vcf		せん断補強効率
				実験値 (kN)	設計値(kN)	
-	無補強	419.8	-	-	-	-
-	75mm(4面巻き)	718.9	299.1	149.6	121.9	1.227
case1	75mm(定着長0mm)	574.3	154.5	77.3	121.9	0.634
case2	75mm(定着長42.5mm)	596.9	177.1	88.5	121.9	0.726
case3	75mm(定着長85mm)	574.2	154.4	77.2	121.9	0.633
case4	75mm(定着長170mm)	598.0	178.24	89.12	121.9	0.731
case5	75mm(定着長170mm2層巻き)	769.9	350.1	175.1	243.8	0.718

付着応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$P$  : 設計荷重(N)

(シート設計荷重 × シート断面積)

$L$  : シート定着長 (mm)

$\sigma_t$  : シート設計引張荷重 (3400N/mm<sup>2</sup>)

$t$  : シート厚さ (mm)

$\sigma_{ck}$  : コンクリート強度 (N/mm<sup>2</sup>)

一方、炭素繊維シートの補強方法として、実橋では引張側に定着部が存在するため、本実験供試体についても図 - 2 の断面図に示すように梁下面に定着部を設けた。また、実橋の橋脚梁部は支承の存在により、連続してシートを巻き立てることが不可能である。そのため、本実験では炭素繊維シートを 150mm 間隔でゼブラ状に巻き立てる方法で補強した。補強間隔は対象橋脚における炭素繊維シートの補強比率が本実験供試体でのシートの補強比率と等しい値となるように設定した。また、供試体内部のひずみを炭素繊維シートのひずみの測定位置と同位置で計測するため、コンクリート内部にダミー鉄筋を 150mm 間隔で設置した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 最大荷重およびせん断補強効率

表 - 3 に各ケースの最大荷重および補強効率を示す。補強耐力はシートを補強することにより得られる耐力の増分であり、補強せん断耐力は補強耐力を 1/2 倍し破壊した側の梁のみを評価している。そしてせん断補強効率は炭素繊維シートの設計破断荷重に対して実際に破断した荷重がどれだけの割合であるかを算出したものである。ここで、補強せん断耐力の設計値はトラス理論を用いて式(3)により算出した。なお、

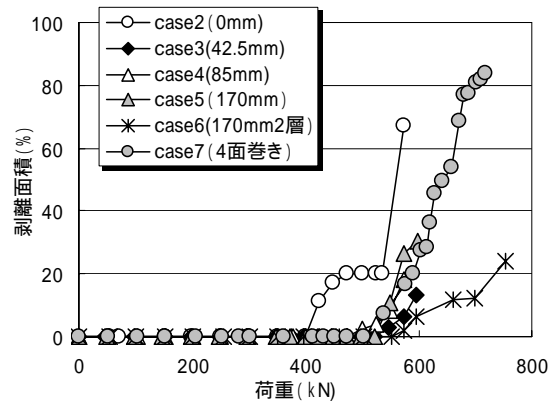


図 - 3 剥離面積 - 荷重関係

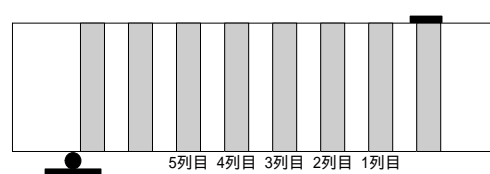


図 - 4 せん断力を負担する主要の5列

case5 の場合、2 層巻きであるため補強材料断面積  $A_{cf}$  が 2 倍になる。

$$V_{cf} = \frac{A_{cf} \times f_{wyd} \times (\sin \theta + \cos \theta) \times d}{1.15 \times s} \quad (3)$$

ここに、

$V_{cf}$  : シート補強せん断耐力 (kN)

$A_{cf}$  : シート断面積 (2 本分考慮) (mm<sup>2</sup>)

$f_{wyd}$  : 補強材料の破断強度 (4840N/mm<sup>2</sup>)

$d$  : 有効高さ (mm)

$s$  : シート配置間隔 (mm)

$\theta$  : 炭素繊維シートと部材のなす角

実験の結果、最大荷重は無補強供試体 (case1) において 419.8kN、3 面巻き補強を行った case2 ~ case6 において、それぞれ 574.3kN、596.9kN、574.2kN、598.0kN、769.9kN となった。また、4 面巻き補強を行った case7 では最大荷重は 718.9kN となった。したがって、補強により最大荷重が case2 ~ case7 で、それぞれ 154.4kN ~

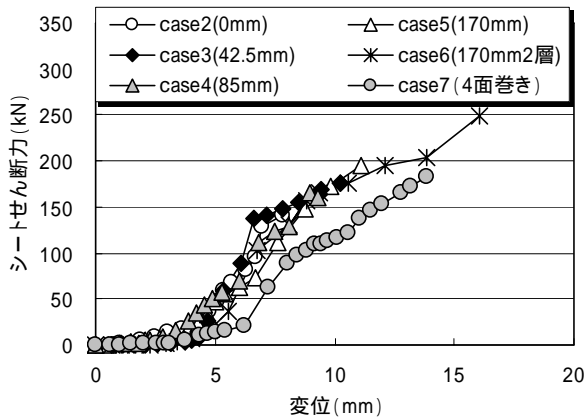


図 - 5 シートの負担せん断力 - 変位関係

350.1kN 増加する結果が得られた。ただし、定着長が長くなるほど最大荷重が高くなると予想されたが、case4（定着長 85mm）と case5（定着長 170mm）はコンクリートとシートの付着応力度が低く、想定された荷重に比べ最大荷重が小さくなる結果となった。

次に、各ケースのせん断補強効率を算出した結果、3面巻き供試体ではシートの定着長や巻き立て層数にかかわらず、0.7 程度となった。4面巻き供試体はせん断補強効率が 1.227 となり、3面巻きの平均は 4面巻きに比べ、補強効率が 44% 低下する結果となった。

### 3.2 剥離面積 - 荷重関係

図 - 3 に炭素繊維シート剥離面積 - 荷重関係を示す。炭素繊維シートの剥離は図 - 4 に示すせん断力を負担する主要の 5 列を対象に、打音検査により測定を行った。図より、case7（4面巻き）では載荷荷重が 500kN を越えた頃から急激に剥離が発生し、最大荷重時にはシート剥離面積が 80% を超える結果となった。しかし、定着長を有する 3面巻きのケース（case3 ~ case6）では最大荷重時においても 30% 程度しか剥離しなかった。これは 3面巻きのケースでは剥離が十分に進展する前に供試体がせん断破壊に至ったためと考えられる。

## 4. 考察

### 4.1 負担せん断力の割合

図 - 5 に炭素繊維シートが負担するせん断力 - 変位関係を、図 - 6 にコンクリートが負担す

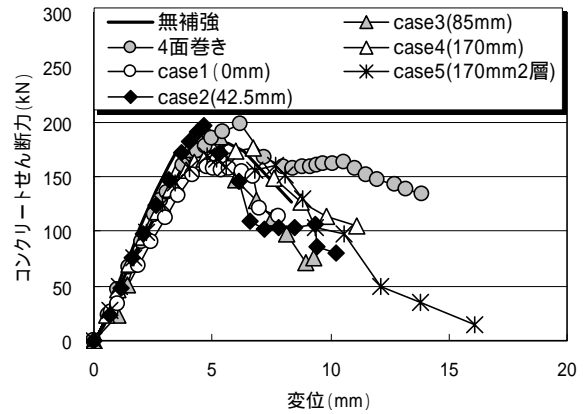


図 - 6 コンクリートの負担せん断力 - 変位関係

るせん断力 - 変位関係を示す。炭素繊維シートが負担するせん断力  $V_{cf}$  は、せん断ひび割れに抵抗する 5 列を対象に、トラスモデルを仮定し、式(4)により算出した。なお、シートのひずみには各荷重ステップごとの最大値を用いて算出している。コンクリート負担せん断力は式(5)より、部材が受け持つせん断力  $V$  から、炭素繊維シート負担せん断力  $V_{cf}$  および、ダミー鉄筋負担せん断力  $V_s$  を差し引くことにより算出した。

$$(4)$$

$$V_c = V - V_{cf} - V_s \quad (5)$$

ここに、

$V_{cf}$  : 炭素繊維シート負担せん断力 (kN)

$\varepsilon_{cf}$  : 炭素繊維シート最大ひずみ

$E_{cf}$  : 炭素繊維シート弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$A_{cf}$  : 炭素繊維シート断面積 (mm<sup>2</sup>)

$V_c$  : コンクリート負担せん断力 (kN)

$V$  : 部材が受け持つせん断力 (kN)

$V_s$  : ダミー鉄筋負担せん断力 (kN)

図 - 5 より、全ケースにおいて鉛直変位 5mm 以降にシート負担せん断力が増加していることが分かる。供試体の破壊性状より、鉛直変位 5mm 程度にせん断ひび割れが発生していることから、炭素繊維シートはひび割れ発生後にせん断力に対して抵抗し始めると考えられる。同変位での比較を行うと、3面巻きは 4面巻きに比べ、シート負担せん断力大きいことが分かる。

### 4.2 破壊メカニズム

本節では各供試体の破壊性状について述べる。まず、無補強供試体 (case1) では 350kN 程度

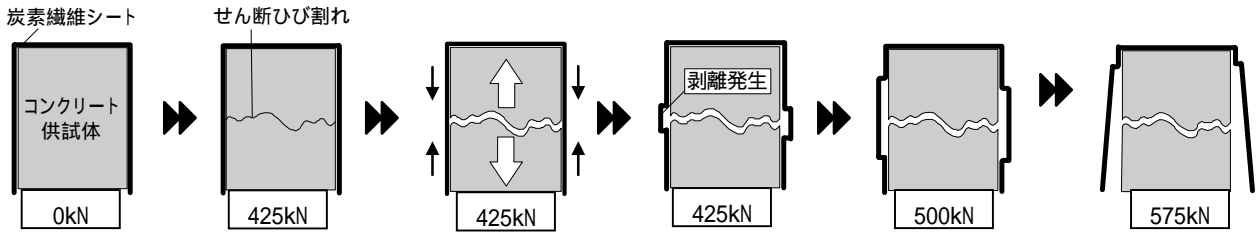


図 - 7 3面巻きの定着部が無い場合の破壊メカニズム (case2)

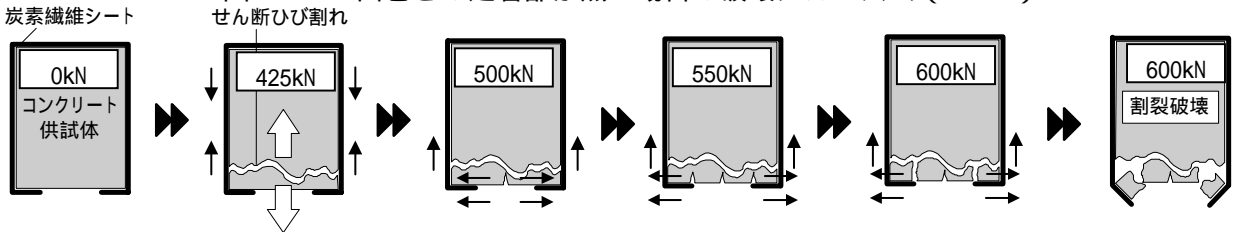


図 - 8 3面巻きの定着部がある場合の破壊メカニズム (case3 ~ case6)

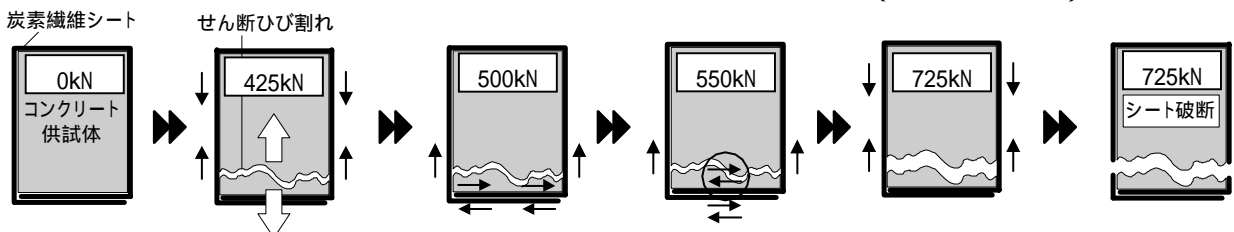


図 - 9 4面巻きの破壊メカニズム (case7)

でせん断ひび割れが供試体中央部に発生する。その後、荷重を続けると、せん断ひび割れが進展し、420kN でせん断破壊に至った。

次に 3面巻きでシート定着がない場合 (case2) について述べる。case2 の破壊メカニズムは図 - 図 - 6 より、4面巻きに比べ、3面巻きのコンクリート負担せん断力の低下が急勾配であることが分かる。これは、3面巻きの方が4面巻きに比べてせん断ずれに対する抵抗が小さく、コンクリートに対する拘束効果が低くなるためであると推察される。そのため、図 - 5 に示すように、炭素繊維シートに負担が移行することが早くなったと考えられる。7 に示すように、425kN 時にせん断ひび割れが発生した。その後、ひび割れ付近で局所的にシートの剥離が発生し、剥離が上下方向に進展していく。剥離がシート下端部に達すると、その炭素繊維シートがせん断に対して抵抗することができなくなり、575kN でコンクリートとともにせん断破壊に至った。

また、3面巻きの定着長を有する場合 (case3 ~ case6) の破壊メカニズムを図 - 8 に示す。case3 ~ case6 ではせん断ひび割れ下端部において、写真 - 1 に示すような割裂破壊が発生した。

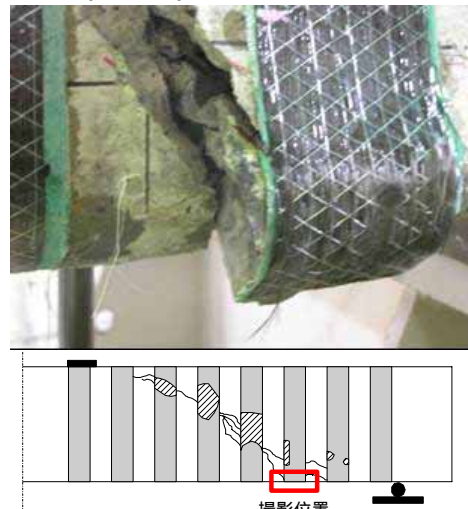


写真 - 1 割裂破壊図 (case3)

これより、割裂破壊のメカニズムを説明する。まず、420kN 程度でせん断ひび割れが発生し、ひび割れ付近でシートの剥離が生じた。その後、せん断ひび割れが進展していき、ひび割れ幅が増加する。ここで、ひび割れ幅の増加に対して側面のシートが抵抗し、炭素繊維シートに引張力が作用する。この引張力は定着部のシートにまで伝達されるが、シートとコンクリートの付着により、定着部のシートだけでなくコンクリートの内部にまで作用すると考えられる。このように、シート両端部に引張力が作用すること

により、図 - 10 に示すように、供試体下面の中央部にひび割れが発生する。その後、供試体下面のかぶり部付近でひび割れが発生し、最終的に、かぶりコンクリートにおいて割裂破壊が生じた。ここで、割裂破壊はせん断ひび割れ下端部のみで生じたが、これは図 - 11 に示すように、せん断ひび割れによって供試体かぶり部の割裂耐力が低下したためであると考えられる。

表 - 4 に定着部の炭素繊維シートに作用する引張応力とコンクリートの割裂耐力の比較を示す。炭素繊維シートに作用する引張力は、側面に作用する引張力が定着部まで等価で伝達されると仮定し、シート側面のひずみを用いて式(4)により算出した。また、割裂耐力は図 - 12 に示すような割裂破壊面積に道路橋示方書・同解説 コンクリート橋編に示されるコンクリート許容引張応力度を乗じて算出した。図 - 12 は例として case4 の割裂破壊を示した図である。表より、全ケースともコンクリートの割裂耐力と炭素繊維シートに作用する引張力がほぼ同等となる結果が得られた。したがって、炭素繊維シートに作用する引張力により、割裂破壊が生じることが確認できた。

一方、4面巻き補強の破壊メカニズムを図 - 9 に示す。3面巻きと同様に、せん断ひび割れが発生するとひび割れ幅の増加に対して、側面の炭素繊維シートが抵抗する。その際に、シートに引張力が作用し、定着部まで伝達されるが、4面巻き補強では炭素繊維シートの両端部を重ねて定着しているため、定着部の引張力が互いに抵抗し合う。したがって、梁下面にはひび割れが発生せず、斜めひび割れ幅の増加により側面の炭素繊維シートが破断し、せん断破壊に至った。

3面巻き補強ではこのように炭素繊維シートが破断する前に割裂破壊が生じたため、最大耐力が低下したと考えられる。

## 5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) コンクリート負担せん断力 - 荷重関係より、

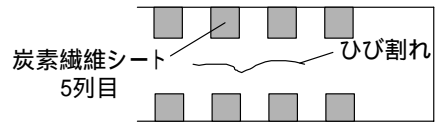


図 - 10 供試体下面のひび割れ

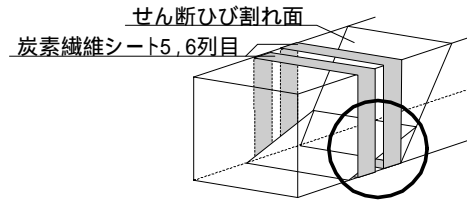


図 - 11 ひび割れの割裂耐力に対する影響

表 - 4 シート引張応力と割裂耐力の比較

case	シートに作用する引張力 (kN)	コンクリート割裂耐力 (kN)
3	25.6	21.6
4	50.7	45.1
5	52.3	78.3
6	72.4	62.7

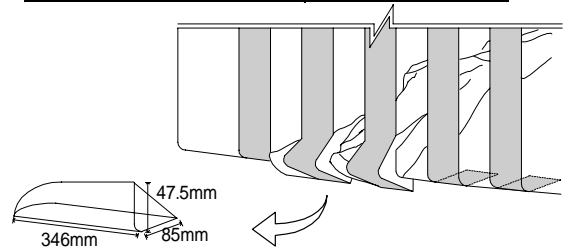


図 - 12 割裂破壊面積 (case4)

3面巻き補強が4面巻き補強に比べ、拘束効果が低下することが分かった。

- (2) 3面巻き補強では炭素繊維シートに作用する引張力により割裂破壊が生じることが分かった。
- (3) 3面巻きでは割裂破壊および拘束効果の低下が原因で4面巻きに比べ、補強効率が44%程度低下する結果となった。
- (4) 供試体実験ではせん断ひび割れ下端部において割裂破壊が発生したため、3面巻き補強における定着部の抵抗特性に関する検討が困難となっている。したがって、定着部に着目した研究を行う必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 磯雅人, 松崎育弘, 園部泰寿, 中村洋行: 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.22, No.3, pp.295-300, 2000