

# 論文 ビニロン繊維メッシュとモルタル充填により補強した RC はりのせん断挙動

赤熊 宏哉\*1・梶原 勉\*2・三宅 紀\*3・二羽 淳一郎\*4

**要旨:** ビニロン繊維メッシュを巻き立てた後、モルタルを充填することにより外周を補強した RC はりのせん断挙動を検討した。ビニロン繊維メッシュの積層数を実験パラメータとして無補強試験体を含む計 5 体の供試体を作製し、4 点曲げによる載荷試験を行った。実験の結果、ビニロン繊維メッシュの積層数が多いほど、RC はりのせん断耐力が増加することを確認した。また、補強後の RC はりは最大荷重時の変位に大幅な増加が見られ、特にビニロン繊維メッシュ 8 層のケースでは無補強試験体の約 11.5 倍となり、変形性能が大きく向上することがわかった。

**キーワード:** ビニロン繊維メッシュ, モルタル充填, せん断補強, せん断抵抗力, 変形性能

## 1. はじめに

炭素繊維シート等を用いた巻立てによる既設鉄筋コンクリート(以下, RC) 構造物の補強工法は, 施工が比較的容易であり, 重機や機械が使用できない作業環境下でも人力による作業が可能なることから, 近年適用実績が増加している。従来工法では炭素繊維が高価であったり, エポキシ系樹脂は紫外線に弱いなどの問題点があったが, 本工法は, 繊維にビニロン繊維メッシュを用い, さらに, エポキシ系樹脂ではなく外周にモルタルを充填することにより, 母材との一体性を確保するものである。本工法の利点として, 一般的な炭素繊維シート等と比較してコストが低いこと, エポキシ系接着樹脂を用いないことで, 施工時の天候に左右されず, また環境への負荷を低減することができる。従来工法と比べて施工期間を短縮することができることが挙げられる。

本研究では, ビニロン繊維メッシュを RC はりに巻立て, さらに外周にモルタルを充填することにより, 補強した RC はりのせん断性状を検討することを目的として, ビニ

ロン繊維メッシュの積層数をパラメータとした補強 RC はりの載荷試験を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

本研究では, 5 体の試験体を作製した。実験ケースの一覧を表-1 に示す。使用した鉄筋, 計算より求めた曲げ破壊荷重, せん断破壊荷重および破壊モードを示した。

試験体は 150×200×1480mm(幅×高さ×長さ)の RC はりで, 有効高さは 170mm とした。ビニロン繊維メッシュの応力集中を緩和するため, 型枠の隅に 1 辺 1cm の面木を設けてコンクリートを打設し, 完成した試験体の角をベビーサンダーで面取り処理した(写真-1(a))。全ての試験体がせん断破壊をするように, 引張鉄筋と圧縮鉄筋に降伏強度が 930N/mm<sup>2</sup> 以上の異形 PC 鋼棒(D23)を 2 本配置し, せん断スパン内には, せん断補強筋を配置しなかった。異形 PC 鋼棒は緊張せず, 定着板により試験体端部に定着させた。供試体作製手順を写真-1 に示す。

表-1 実験ケース一覧

試験体 NO.	ビニロン繊維メッシュの積層数(層)	主鉄筋	圧縮鉄筋	計算値			
				曲げ破壊荷重 (kN)	せん断破壊荷重 (kN)	せん断余裕度	破壊モード
1	0	異形 PC 鋼棒 2-D23	異形 PC 鋼棒 2-D23	359.2	91.2	0.25	せん断破壊
2	2				155.4	0.43	せん断破壊
3	4				219.7	0.61	せん断破壊
4	6				283.9	0.79	せん断破壊
5	8				348.2	0.97	せん断破壊

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*2 (株) 富士ピー・エス技術開発部

\*3 ユニチカ (株) 産業繊維管理室 (正会員)

\*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

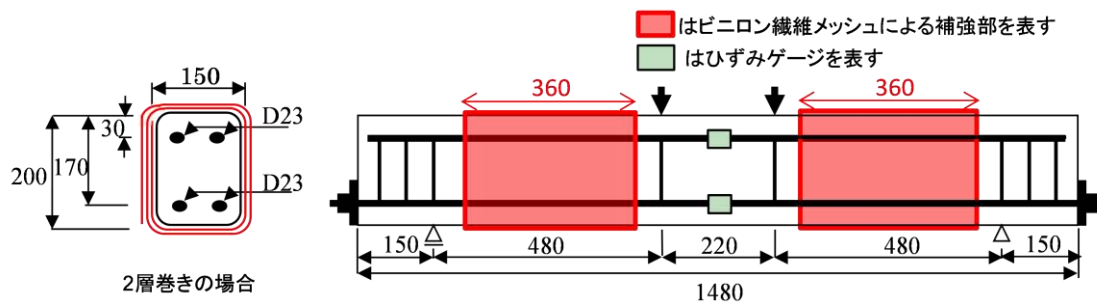


図-1 試験体寸法、配筋と補強部分の位置

単位：mm

供試体の打設後、1週間ほど散水養生を行った。その後、ビニロン繊維メッシュの巻立ておよびモルタルの打設を行った。ビニロン繊維メッシュの巻立ては、下地処理としてベビーサンダーで繊維補強部のコンクリートを研磨し、人力で供試体に密着させるように巻きつけ（写真-1(b)）、供試体断面より2cm大きい型枠を外側に設置し（写真-1(c)）、モルタルを充填することで行った（写真-1(d)）。無補強供試体の供試体寸法、配筋状況、荷重条件、およびビニロン繊維メッシュによる補強箇所を図-1に示す。荷重条件は支点間距離1180mm、せん断スパン480mm、等曲げ区間220mmの4点曲げ荷重とした。補強部はせん断スパン内であり、荷重点および支点から60mm離れた位置までの長さ360mmの区間とした。せん断スパン有効高さ比( $a/d$ )は2.8である。

終局曲げ耐力は等価応力ブロックを使用して算出した。RC部材の終局せん断耐力 $V_u$ の算定には、以下の式を使用した。

$$V_u = V_c + V_f \quad (1)$$

$$V_c = 0.2 \cdot f_c^{\frac{1}{3}} \cdot (10^3/d)^{\frac{1}{4}} \cdot p_w^{\frac{1}{3}} \cdot (0.75 + 1.4d/a) \cdot b_w d \quad (2)$$

ここで、 $V_c$ ：コンクリートの分担せん断力、 $V_f$ ：ビニロン繊維メッシュの分担せん断力、 $f_c$ ：コンクリートの圧縮強度、 $p_w$ ：鉄筋比(%),  $d$ ：有効高さ(mm),  $a$ ：せん断スパン、 $b_w$ ：部材断面幅、である。

なお、ビニロン繊維メッシュの分担せん断力 $V_f$ の算定手法はまだ確立されていないが、本研究ではせん断破壊を生じさせることを目的としているため、(1)斜めひび割れは支点と荷重点を結ぶ直線上に発生し、かつ(2)せん断破壊時、ビニロン繊維メッシュの応力が引張強度と等しくなると仮定することで、せん断耐力を大きめに見積もることとした。ビニロン繊維メッシュ形状および各ビニロン繊維メッシュに加わる力の成分分解方法を図-2に示す。部材軸から $30^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $150^\circ$ の角度を成すビニロン繊維メッシュにそれぞれに加わる力の部材軸直角成分の合計が作用せん断力と等しくなると仮定し、かつせん断破壊時に各方向の繊維に働く引張力が引張強度と等しくなると仮定した。そして、図-2に示す $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ の3方向のビニロン繊維メッシュに発生する力の垂直

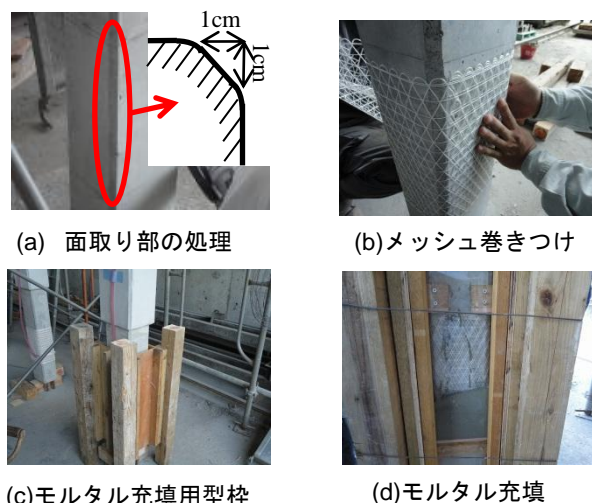


写真-1 試験体作製手順

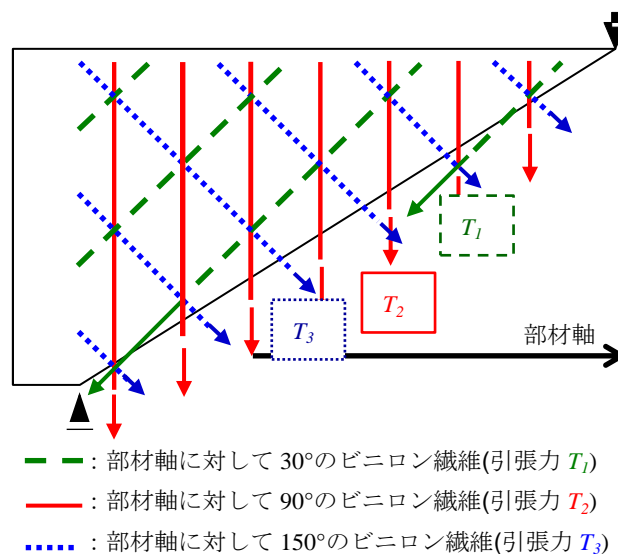


図-2 ビニロン繊維メッシュの形状および力の分解方法

成分の和を足しあわせ、式の整理を行い、得られたものが式(3)である。

$$V_f = \frac{21 \cdot n_l \cdot F_t \cdot a \cdot d}{8h} \quad (3)$$

ここで、 $n_l$ ：ビニロン繊維メッシュの積層数、 $F_t$ ：繊維の配向方向に力が作用した時、単位幅あたりのメッシュに生じる最大の引張力（以下、引張強度）、 $h$ ：はりの高さ、である。ここで引張強度 $F_t$ は、ビニロン繊維メッシュの単位幅あたりに平均に加えられた張力で破断するま

でにどれだけ耐えられるかを表したものである。なお、式(3)は土木学会「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」<sup>2)</sup>を参考にして、引張合力と圧縮合力の作用点間(モーメントアーム長  $z=1.15d$ )で繊維が引張力を負担するという仮定に基づくものである。載荷試験中、引張鉄筋のスパン中央部分のひずみ、圧縮鉄筋のスパン中央部分のひずみ、およびコンクリートスパン中央の上縁ひずみを測定した。また、試験終了後に補強部のモルタルとコンクリートの分離を行い、ビニロン繊維メッシュおよびコンクリート内部の状態を観察した。

## 2.2 使用材料

試験体に使用したコンクリートの示方配合および力学特性をそれぞれ表-2、表-3に示す。また、モルタルおよび鉄筋の材料特性を表-4、表-5にそれぞれ示す。コンクリートの強度は各試験の実施日に実測したものである。また、補強材として使用したビニロン繊維メッシュの材料特性および形状を表-6、写真-2に示す。

## 3. 実験結果

### 3.1 最大荷重およびせん断補強分の検討

各ケースの実験で得られた最大荷重  $P_{exp}$ 、式(1)から導いた計算で得られた最大荷重  $P_{cal}(=2V_u)$ 、実験で得られたビニロン繊維メッシュとモルタルが受け持つ分の荷重  $P_{fexp}$  (各試験体の実験時の最大荷重  $P_{exp}$  - 無補強試験体の実験時の最大荷重)、計算で得られたビニロン繊維メッシュとモルタルが受け持つ分の荷重  $P_{fcal}$  (各試験体の計算時の最大荷重  $P_{cal}$  - 無補強試験体の計算時の最大荷重)、式(3)を変形した式(4)より求めた実験時に発揮された繊維の引張強力  $F_{texp}$  を表-7に示す。ここで  $V_f$  には実験で得られた  $P_{fexp}/2$  を代入する。

$$F_{texp} = \frac{8 \cdot h \cdot V_f}{2l \cdot n_f \cdot a \cdot d} \quad (4)$$

表-2 コンクリートの示方配合

$G_{max}$ (mm)	W/C (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	混和剤
20	63	48	175	278	879	952	1.39

表-7 実験値、計算値の最大荷重、繊維強度および実験の破壊形式

NO.	$P_{exp}$ (kN)	$P_{exp}/P$	$P_{cal}$ (kN)	$P_{exp}/P_{cal}$	$P_{fexp}$ (kN)	$P_{fcal}$ (kN)	$F_{texp}$ (N/mm)	$F_{texp}/F_t$	実験における破壊形式
1	104.1	1	91.2	1.14	-	-	-	-	せん断破壊
2	165.6	1.6	155.4	1.07	61.5	64.2	14.4	0.96	せん断破壊
3	193.8	1.9	219.7	0.882	89.7	128.5	10.5	0.70	せん断破壊
4	218.2	2.1	283.9	0.769	114.1	192.7	8.9	0.59	せん断破壊
5	239.8	2.3	348.2	0.689	135.7	257	7.9	0.53	せん断破壊

$P_{exp}$ : 実験における最大荷重,  $P_{cal}$ : 計算における最大荷重,  $P_{fexp}$ : 実験におけるビニロン繊維メッシュとモルタルが受け持つ荷重,  $P_{fcal}$ : 計算におけるビニロン繊維メッシュとモルタルが受け持つ荷重,  $F_{texp}$ : 実験時に発揮されたビニロン繊維メッシュの引張強力,  $F_t$ : ビニロン繊維メッシュの引張強力(15N/mm)

表-3 コンクリートの力学特性

NO.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
1	33.6	2.83	28.9
2	33.6	2.57	23.8
3	37.4	2.61	28.7
4	36.5	2.93	31.1
5	33.3	2.70	28.1

表-4 モルタルの材料特性

NO.	圧縮強度(左側 <sup>*1</sup> ) (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度(右側 <sup>*2</sup> ) (N/mm <sup>2</sup> )
1	-	-
2	58.4	56.7
3	56.0	55.8
4	53.2	55.1
5	51.3	53.9

\*1, \*2: それぞれ図-1 に示した供試体の左側, 右側の補強部分

表-5 鉄筋の力学特性

使用箇所	径	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
圧縮鉄筋	D23	930	1080	200
主鉄筋	D23	930	1080	200

表-6 ビニロン繊維メッシュの材料特性

	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ (mm)	引張強力 <sup>*3</sup> (N/mm)	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
ビニロン繊維メッシュ	81.7	0.72	15	42

\*3: メッシュの単位幅の平均に加えられた張力で破断するまでにどれだけ耐えられるかを表したのもの

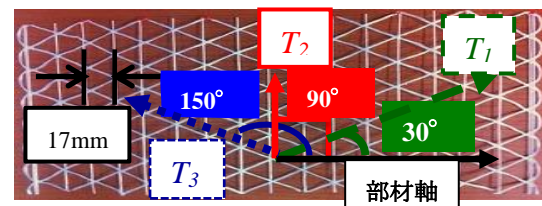


写真-2 ビニロン繊維メッシュの形状

すべての試験体で主鉄筋は降伏しておらず、コンクリート上縁のひずみも終局ひずみ(0.0035)に達しなかったことから、破壊形式はせん断破壊と判定した。また、補強を施した全ての試験体で無補強の最大荷重を上回った。無補強では最大荷重が 104kN であったのに対して、ビニロン繊維メッシュ 2 層巻きの試験体の最大荷重は 165.6kN であり、無補強供試体の約 1.6 倍となった。同様に、4 層巻きでは 1.9 倍、6 層巻きでは 2.1 倍、8 層巻きでは 2.3 倍の最大荷重が得られた。以上より、ビニロン繊維メッシュの積層数が増加するほど、最大荷重は増大することがわかる。また、ビニロン繊維メッシュおよびモルタルが受け持つ荷重  $P_{f_{exp}}$  と積層数を比較したものを図-3 に示す。図-3 に示したように、ビニロン繊維メッシュによる最大荷重の増加分は、積層数に対して線形の関係ではなく、積層数が増加するに従って減少していることがわかる。2 層巻きでは実験値と計算値がほぼ同等の値であるのに対して、積層数が大きくなるほど実験値が式(3)による計算値よりも小さくなる傾向がある。これは、積層数が大きいほどビニロン繊維メッシュの応力が引張強度に達しておらず、繊維の力学性能が発揮されなくなる傾向があるためである。

### 3.2 各試験体の破壊状態

載荷終了時の供試体の破壊側スパンに生じたひび割れ状況を図-4 に示す。

#### (a)無補強試験体

図-4(a)に示した無補強の試験体では、初めは等曲げ区間に 44.1kN で曲げひび割れが発生し、その後、コンクリート引張縁から発生した斜めひび割れが荷重点の方向へ進展していき、104.1kN でせん断破壊に至った、なお、コンクリートの圧壊は生じなかった。

#### (b)2 層巻き試験体

図-4(b)に示したビニロン繊維メッシュ 2 層巻きの試験体では、無補強と同様に等曲げ区間内のコンクリートに曲げひび割れが 58kN で発生した後、補強部モルタル中央に 83kN で曲げひび割れが発生した。荷重増加に伴い、115kN で曲げひび割れが荷重点へ向かう斜めひび割れに移行すると同時に、150kN で支点方向にもひび割れが進展し、このひび割れ付近に多数の斜めひび割れが発生した。160kN で荷重点および支点に進展したひび割れが補強部分のモルタルを貫通した。最終的に、初めに発生した斜めひび割れの上側に多数のひび割れが発生し、開口幅が増大しながら荷重点へと到達し、165.6kN で無補強試験体と同様、コンクリートの圧壊が生じることなくせん断破壊に至った。

#### (c)4 層巻き試験体

図-4(c)に示したビニロン繊維メッシュ 4 層巻きの試験体では、2 層巻きの試験体と同様、等曲げ区間内のコ

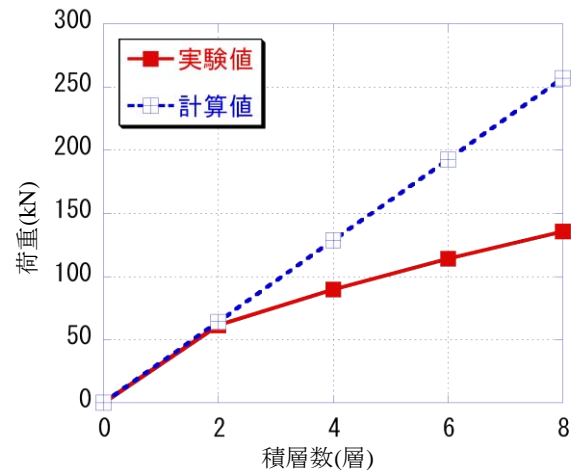


図-3 ビニロン繊維メッシュとモルタルが受け持つ荷重-積層数の関係

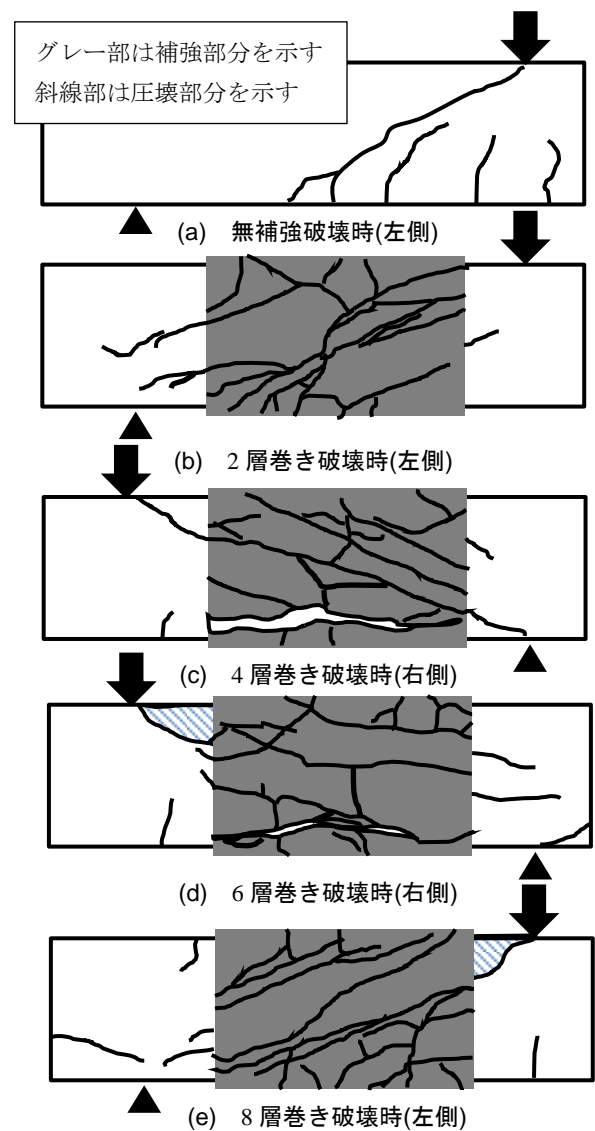


図-4 載荷試験終了時のひび割れ状況

ンクリートに 40.8kN で曲げひび割れが発生した後、モルタルに 60kN で曲げひび割れが発生した。約 90kN でモルタル中の曲げひび割れが斜めひび割れに移行し、160kN



で載荷点および支点へと貫通した後、170kNで斜めひび割れの上側および下側に多数のひび割れが発生した。180kNでモルタル部に発生していた斜めひび割れが非補強部のコンクリートまで進展し、載荷点へ到達した。この時、モルタル下部の隅角部付近でひび割れが開口し、外側に巻かれたビニロン繊維が2層ほど破断しているのを確認した。193.8kNで2層巻き試験体と同様、コンクリートの圧壊が生じることなくせん断破壊に至った。

#### (d)6層巻き試験体

図-4(d)に示したビニロン繊維メッシュ6層巻きの試験体では、40kNの時点でモルタルの高さ方向中腹付近に水平ひび割れが発生した。これは、母材コンクリートに発生した斜めひび割れが開口した際、ビニロン繊維メッシュおよびモルタルが抵抗しようとしたが、母材コンクリートとの付着が十分でなく、剥離が生じたためと考えられる。50kNで等曲げ区間内のコンクリートに曲げひび割れが発生し、140kNで水平ひび割れの上部および下部に多数のひび割れが発生し、180kNでモルタル部に発生していた斜めひび割れが非補強部のコンクリートにも進展した。その後、斜めひび割れは載荷点へと向かい、210kNの時点で載荷板付近のコンクリートに圧壊が生じた。218kNの時点でモルタルの下部の隅角部付近のひび割れが開口し、外側に巻かれたビニロン繊維が2層ほど破断しているのを確認した後、せん断破壊に至った。

#### (e)8層巻き試験体

図-4(e)に示したビニロン繊維メッシュ8層巻きの試験体では、60kNでせん断スパン中央付近のモルタルに曲げひび割れが発生し、その後、70kNでコンクリートの等曲げ区間内に曲げひび割れが発生した。モルタル中の曲げひび割れは荷重の増大に伴い、80kNで斜めひび割れに移行後、190kNで載荷点へと向かう斜めひび割れが多数発生した。そして、220kNでモルタル部に発生していた斜めひび割れが非補強部のコンクリートへと進展し、239.8kNで載荷板付近のコンクリートの圧壊が生じ、せん断破壊に至った。モルタル部のひび割れ開口幅が小さく、繊維の破断を試験中に目視で確認することはできなかったが、最大荷重付近において繊維の破断音を確認している。また、試験体解体後に繊維の破断を確認した。

### 3.3 荷重-変位関係

各試験体の荷重-変位関係を図-5に示す。無補強の試験体では最大荷重に達した後、すぐに荷重が下がり、終局に至った。これに対して、補強された試験体では、モルタル部にひび割れが発生後、荷重が減少と増加を繰り返す挙動が観察された。この挙動は、モルタルに多数のひび割れが発生したことと密接な関係がある。すなわち、モルタルにひび割れが発生すると、それまでモルタルによって負担されていた引張抵抗力が失われ、荷重が

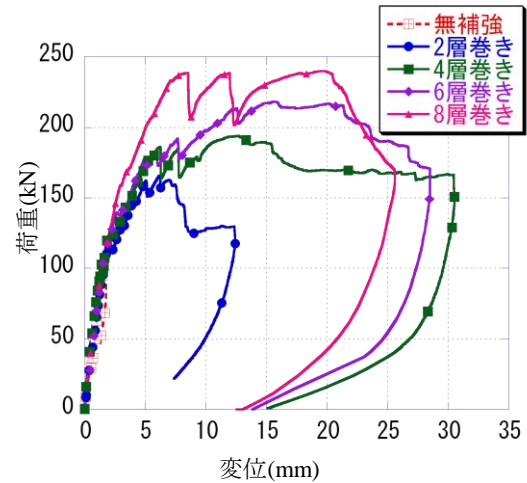


図-5 荷重-変位関係

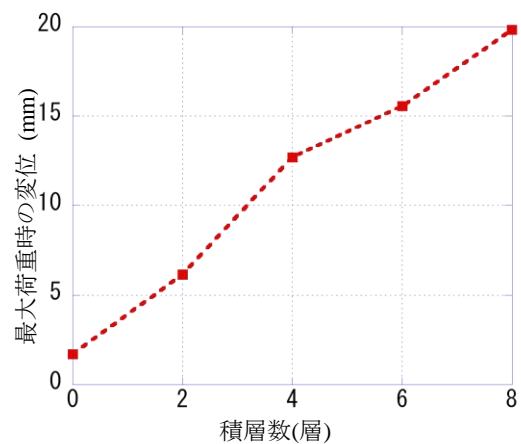


図-6 最大荷重時の変位-積層数関係

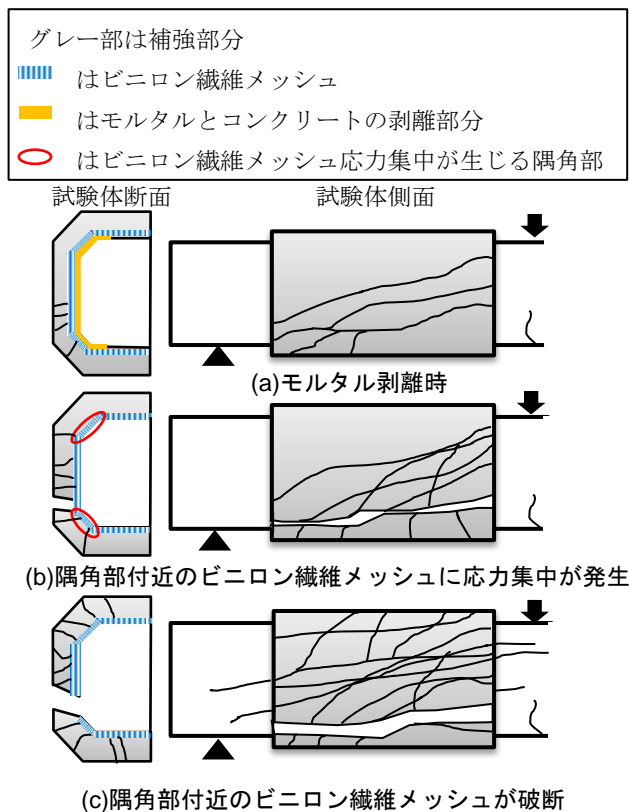


図-7 ビニロン繊維メッシュのせん断抵抗メカニズム

一時低下するが、引張抵抗力がビニロン繊維メッシュに再分配されることで、荷重が再度増加する。この挙動を繰り返すことで、図-4 に示したような多数のひび割れがモルタルに発生したものと考えられる。

最大荷重時の変位と積層数の関係を図-6 に示す。この図より、最大荷重時の変位は積層数の増大に伴って大きくなり、その関係は線形であることがわかる。無補強の試験体の最大荷重時の変位が 1.72mm であるのに対して、8 層巻きでは 19.8mm となり、無補強の試験体よりも 11.5 倍と変形性能が著しく向上した。

### 3.4 ビニロン繊維メッシュのせん断抵抗メカニズムに関する考察

ビニロン繊維メッシュとモルタル充填により外周を補強した RC はりがせん断破壊に至るまでの模式図を図-7 に示す。

まず、3.3 節で述べたように、ビニロン繊維メッシュはモルタルにひび割れが発生した時点から抵抗力を発揮し始める(図-7(a))。ビニロン繊維メッシュの積層数が大きくなるにしたがい、RC はりのせん断耐力が増加したことから、ビニロン繊維メッシュが負担できるせん断抵抗力も増加したものと考えられる。2 層巻きの試験体に関して、斜め方向の繊維の貢献分も考慮したビニロン繊維メッシュの分担せん断力の計算結果が実験値と一致したことから、メッシュを構成するすべての方向の繊維が効果的に機能したものと予想される。

さらに、荷重が増加すると、3.2 節で述べたように、4 層巻き、6 層巻きに関して、最大荷重時に隅角部のビニロン繊維メッシュが破断していることを確認した。これは、ビニロン繊維メッシュとモルタルが母材コンクリートから剥離したことに起因している。すなわち、剥離によって引張力が隅角部付近のビニロン繊維メッシュに伝達され(図-7(b))、このとき隅角部において応力集中が生じたために破断した(図-7(c))と考えられる。8 層巻きでは、隅角部付近での繊維の破断を確認することはできなかったが、破断音で繊維の破断を確認した。また、試験終了後に母材コンクリートから分離したモルタル部を写真-2 に示す。写真からわかるように、モルタルの端部(写真-2 の点線部)では十分にモルタルが行き届いておらず、積層数が増すに連れて、この傾向は顕著になり、母材コンクリート表面まで行き届かず十分な付着が取れていなかったと推察される。図-3 に示した、積層数が増加するにしたがってビニロン繊維メッシュとモルタルが受け持つ分担せん断力の実験値が計算値より低下した理由は、積層数が増加するほど、モルタルの充填性が低下したためと考えられる。

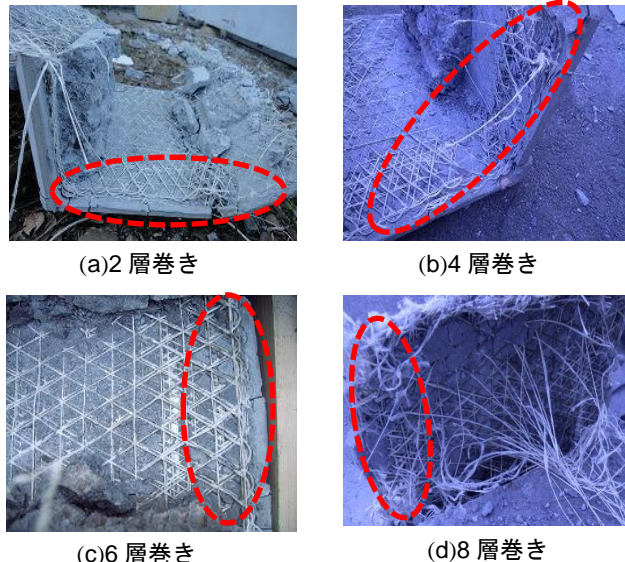


写真-2 分離後のビニロン繊維メッシュとモルタルの様子

### 4. まとめ

RC はりにビニロン繊維メッシュを巻き付け、その外周にエポキシ系樹脂を用いずにモルタルを充填することによってせん断補強した RC はりの載荷試験を行い、補強効果を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)せん断補強した RC はりは、無補強の試験体に比べて、せん断耐力が増加した。また、ビニロン繊維メッシュの積層数の増加に伴って、最大荷重が増加することを確認した。
- (2)せん断補強した RC はりは、無補強試験体と比べて、最大荷重時の変位が増加した。その増加率は積層数が大きいほど顕著であり、ビニロン繊維メッシュを 8 層巻きした試験体の最大荷重時変位は、無補強試験体の約 11.5 倍となり、明確な補強効果が確認された。
- (3)モルタルとビニロン繊維メッシュが一体となって引張応力を負担することで、せん断耐力および変形性能が向上したが、ビニロン繊維メッシュの積層数が大きいほど、モルタルの充填性が低下し、母材コンクリートとモルタルの剥離が顕著になった。

今後の検討課題として、補強効果をより向上させるため、ビニロン繊維メッシュの積層数が増しても、モルタルが十分に充填されるように、ビニロン繊維メッシュ、モルタルおよび母材コンクリートの一体性を確保する方法を検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) 二羽淳一郎：コンクリート構造の基礎，数理工学社，2006.2
- 2) 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，2000.7