

論文 短繊維混入吹付けコンクリートとAFRPメッシュを併用したRC梁のせん断補強工法の提案

田口 史雄^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・栗橋 祐介^{*4}

要旨：本研究では，ビニロン短繊維混入吹付けコンクリートとAFRPメッシュを併用した補強工法によるRC梁のせん断耐力向上効果に関する検討を行うことを目的として，本工法によりせん断補強したRC梁の静載荷実験を実施した。その結果，本工法を適用することにより，AFRPメッシュを梁上部で閉合せずにU字型に補強する場合においても，AFRPシートにより巻付補強する場合と同程度のせん断補強効果が発揮されることなどが明らかになった。

キーワード：RC梁，せん断補強，AFRPメッシュ，短繊維混入吹付けコンクリート

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート(RC)部材のせん断補強工法の一つとして，アラミド繊維(AFRP)シート巻付工法がある¹⁾。しかしながら，橋梁上部工等の梁部材をせん断補強するために本補強工法を適用する場合には，シートを梁上部で閉合して巻付補強することが不可能であるため，U字型に貼り付けることとなる。このような場合において，過去の研究結果^{2),3)}では，1)等せん断力区間に斜めひび割れが発生した後，載荷荷重の増大に伴って，梁側面上部のシートが定着長不足となり，シート端部が捲れ上がるピーリング作用によって剥離を生じやすいこと，2)「アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領(案)⁴⁾」(以下，補強設計要領)により算定されるせん断補強効果が確保できないこと，などが明らかになっている。また，シートの接着端部を種々の方法で定着する工法⁵⁾が提案されているものの，未だ合理的な設計法の確立には至っていないのが現状である。

著者らはこれまで既設RC構造物の合理的な曲げ補強工法としてビニロン短繊維混入吹付けコンクリートとAFRPメッシュを組み合わせる工法(図-1参照)を提案し，その補強効果に関する種々の検討を行ってきた⁶⁾。本工法は，引張補強材であるAFRPメッシュが吹付けコンクリートの内部に配置されているため，吹付けコンクリートと既設RC梁のコンクリートとの付着が十分確保されている条件下においては，せん断補強のために梁側面を補強する場合においても，前述のシート接着工法の場合のように補強材が捲れ上がるピーリング作用による剥離現象を抑制できるものと考えられる。

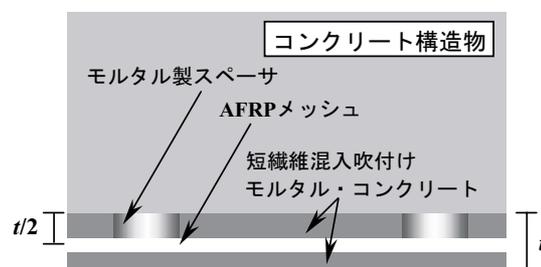


図 - 1 補強工法の概念図

*1 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室 室長 (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室 研究員 博(工) (正会員)

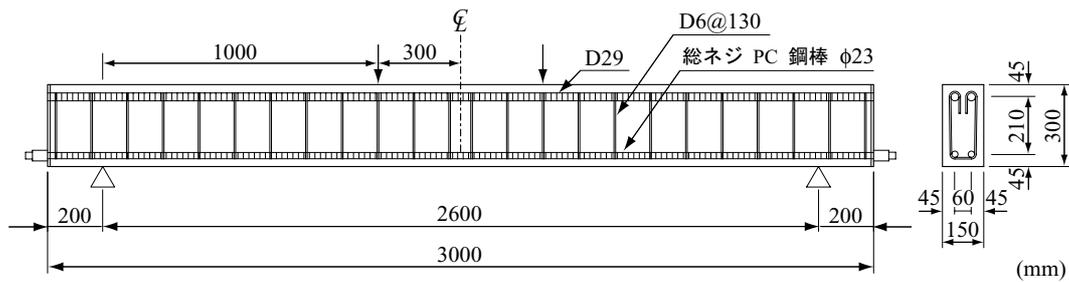


図 - 2 試験体の形状寸法および配筋状況

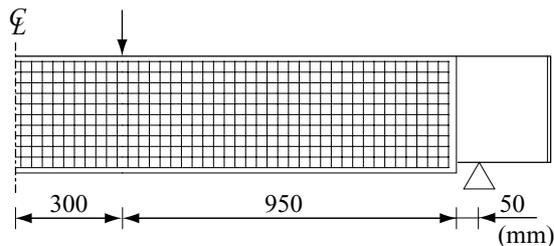


図 - 3 補強概要 (側面図)

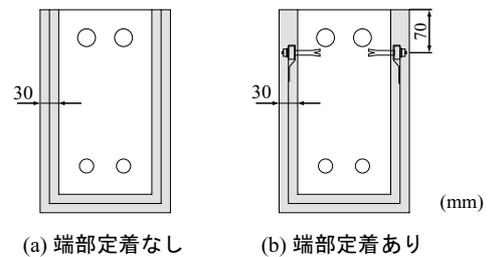


図 - 4 補強概要 (断面図)

このような観点より、本研究では、ビニロン短繊維混入吹付けコンクリートとAFRPメッシュを組み合わせた補強工法におけるRC梁のせん断耐力向上効果を検討することを目的として、RC梁を用いた静載荷実験を実施した。また、本工法によるせん断補強設計法の確立に向けて、実験により得られたせん断耐力向上効果を補強設計要領による計算せん断耐力と比較する形で評価検討を行った。

2. 実験概要

表 - 1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、無補強試験体を含め、AFRPメッシュの保証耐力およびメッシュ端部の定着処理の有無をパラメータとした全5体である。試験体名のNは、無補強試験体であることを意味している。また、補強試験体の場合には、英文字のMとメッシュの保証耐力(kN/m)を100で除した数字の組み合わせにより示している。なお、試験体名の末尾にAを付した試験体は、メッシュ端部に定着処理を施していることを示している。試験体は無補強時においてせん断破壊によって終局に至るように、せん断余裕度(せん断耐力/曲げ耐力)が1.0以下になるように設計している。

表 - 1 試験体の一覧

試験体名	コンクリート吹付け厚さ (mm)	メッシュ保証耐力 (kN/m)	端部定着処理
N	-	-	-
M0	30	-	-
M1		100	なし
M1-A		100	あり
M2		200	なし

図 - 2 には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している。用いた試験体は、断面形状(縦×横)が30×15 cm、純スパン長が2.6 mの複鉄筋RC梁である。上下端鉄筋には、それぞれD29(SD345)およびφ=23 mmの総ネジPC鋼棒を2本ずつ用いている。せん断補強筋にはD6(SD295A)を用い、130 mm間隔で配置している。実験時におけるコンクリートの圧縮強度および弾性係数は、それぞれ34.8 MPa、26.0 GPaであった。また、上下端鉄筋の降伏強度は、それぞれ380、1020 MPaであった。

図 - 3, 4 には、それぞれ補強概要に関する側面図および断面図を示している。図に示するように、せん断補強のために梁の両側面および底面を覆うようにU字型に補強を施してい

表 - 2 吹付けコンクリートの配合

V_f (vol. %)	W/B (%)	単体量 (kg/m ³)					SP (C × %)	スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	SF	S	G			
1.5	43	185	387	43	1365	340	0.8	5.8	5.2

$B = C + SF$, SF: シリカフューム, V_f : 短繊維混入率, SP 高性能減水剤

表 - 3 吹付けコンクリートの力学特性値

圧縮 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	曲げ 強度 (MPa)	曲げ靱 性係数 (MPa)
73.9	33.8	2.0	1.0

表 - 4 ビニロン短繊維の材料特性値

直径 (mm)	長さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
0.66	30	29.4	0.88	7.0

表 - 5 AFRP メッシュの材料特性値

保証耐力 (kN/m)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
100, 200	118	2.06	1.75

る。また、部材軸方向の補強範囲は梁中央部から両支点の 50 mm 手前までとしている。コンクリートの吹付け厚は 30 mm とし、AFRP メッシュは吹付け厚の 1/2 の位置に配置している。試験体の補強は、1) 吹付け補強する RC 梁の表面にブラスト処理を施した後、2) モルタル製スペーサを介して AFRP メッシュを配置し、3) ビニロン短繊維混入コンクリートを吹付けることにより実施している。

AFRP メッシュの端部に定着処理を施す場合には、図 - 4 のように上端鉄筋の下縁近傍に配置した鋼製のフラットバー ($t = 9$ mm, $B = 25$ mm) に AFRP メッシュを巻き付ける形で定着させている。なお、フラットバーは、固定用のコンクリートアンカーが上端鉄筋に接触しないように、梁上縁から 70 mm 下方の位置に配置している。表 - 2, 3 には、短繊維混入吹付けコンクリートの配合および力学性能試験結

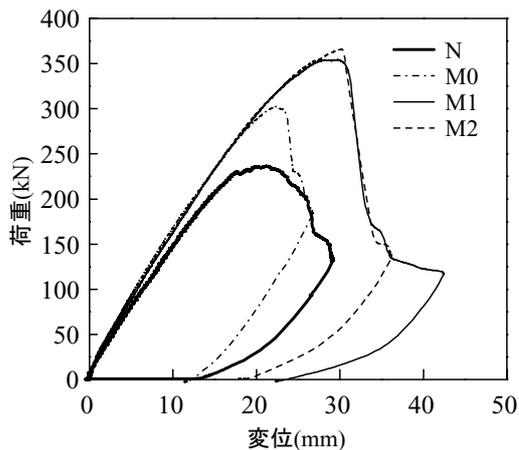
果の一覧を示している。また、表 - 4, 5 には、ビニロン短繊維および AFRP メッシュの材料特性値の一覧を示している。

3. 実験結果

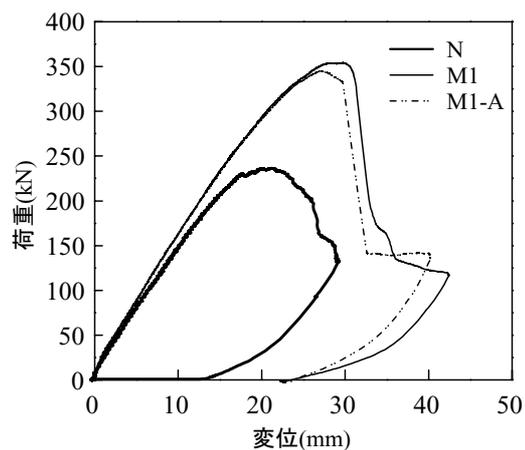
3.1 荷重 - 変位関係

図 - 5 には、各試験体の荷重 - 変位関係に関する実験結果を (a) メッシュ補強量の影響、および (b) 端部定着の影響、に着目して示している。図 - 5(a) には、無補強試験体およびメッシュ補強量の異なる 3 試験体の結果を示している。図より、いずれの試験体も最大荷重到達後荷重が急激に低下して終局に至っていることが分かる。M0 試験体の結果を見ると、短繊維混入コンクリートの吹付けによって初期剛性および耐力が無補強の場合よりも増大していることが分かる。これは、コンクリートの吹付けによって梁の断面積が増大するとともに、吹付けコンクリートに混入されているビニロン短繊維の架橋効果が発揮されたことによるものと推察される。また、メッシュを配置した M1/2 試験体の場合には、初期剛性は M0 試験体の場合とほぼ同様であるものの、最大荷重は M0 試験体の場合よりも大きく示されていることが分かる。ただし、メッシュの保証耐力を 100 kN/m から 200 kN/m としたことによる耐力向上効果は小さい。これは、後述の破壊性状においても示しているように、M1/2 試験体ともに AFRP メッシュが破断する前に等せん断力区間における RC 梁側面のかぶりコンクリートが吹付けコンクリートと一体となって剥落し、終局に至ったためと考えられる。

図 - 5(b) には、メッシュ端部に定着処理を施した M1-A 試験体の実験結果を N および M1



(a) メッシュ補強量の影響



(b) 端部定着の影響

図 - 5 各試験体の荷重 - 変位関係の比較

試験体の結果と比較して示している。図より、M1-A 試験体の場合には、M1 試験体よりも最大荷重が多少小さく示されているものの、両試験体ともに最大荷重時までほぼ同様の耐荷性状を示していることが分かる。なお、M1-A 試験体の最大荷重が M1 試験体の場合よりも小さいのは、M1-A 試験体の場合にはメッシュの端部を上端鉄筋の下部近傍で定着させているため、梁高方向のせん断補強範囲が M1 試験体の場合よりも小さいためと推察される。

実験時には、両試験体ともに等せん断力区間の吹付けコンクリートが、かぶりコンクリートとともに剥落して終局に至っている。また、上述のように、端部定着の有無にかかわらず、耐荷性能および破壊性状がほぼ同様であることより、吹付けコンクリートと RC 梁コンクリート間の付着は極めて良好であるものと判断される。このことより、本実験に用いた吹付けコンクリートは、メッシュ端部に定着処理を施す場合と同等の定着性能を有していることが明らかになった。

3.2 破壊性状

図 - 6 には、実験終了後における各試験体のひび割れ分布性状を示している。無補強の N 試験体の場合には、右側等せん断力区間において、載荷点位置から支点側に向かって斜めひび割れが進展し、かつ下端鉄筋に沿う割裂

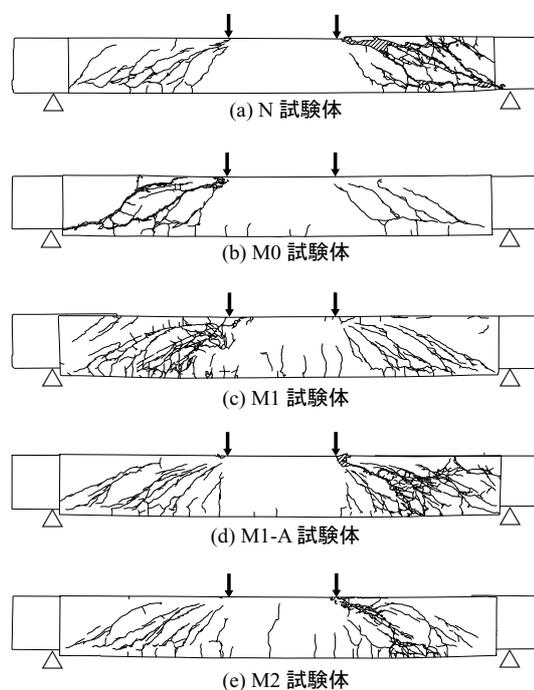


図 - 6 実験終了後におけるひび割れ性状

ひび割れも発生している。また、上端鉄筋に沿った割裂ひび割れも発生しており、載荷点近傍ではかぶりコンクリートの剥落が見られる。一方、短繊維混入コンクリートを吹付けた M0 試験体の場合には、左側等せん断力区間において 2 本の斜めひび割れが大きく開口している。ただし、N 試験体に見られるようなかぶりコンクリートの著しい剥落は見られない。これは、短繊維の架橋効果によりコンクリートの剥落が抑制されたことによるものと考えられる。

M1 および M1-A 試験体の場合には、それぞ

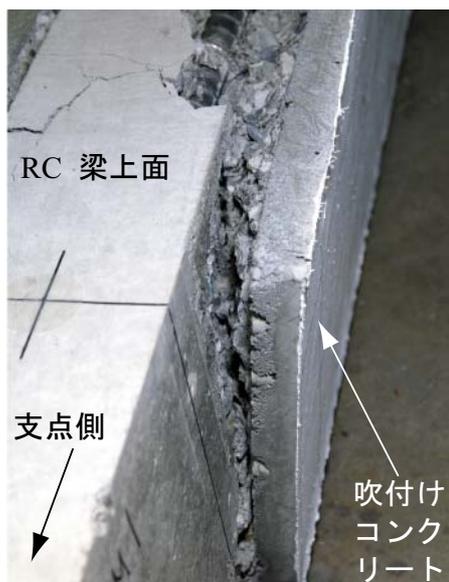


写真 - 1 M1 試験体の支点部近傍の破壊状況

れ左側および右側等せん断力区間において多数の微細なひび割れが発生していることが分かる。また、M1-A 試験体の場合には、梁高方向のメッシュ補強範囲が上端鉄筋の下縁近傍までとしているため、梁上部のひび割れの発生は顕著ではない。しかしながら、その他のひび割れ分布性状は両試験体とも大略同様である。実験時には、メッシュが破断する前に梁側面かぶりコンクリートが剥離・剥落し、吹付けコンクリートとともに梁から分離する形で終局に至っていることを確認している。写真 - 1 には、M1 試験体の支点近傍部の破壊状況を示している。写真より、梁上縁部では上端鉄筋が露出し、側面では吹付けコンクリートがかぶりコンクリートを伴って引き剥がされていることが分かる。

M2 試験体の場合には、M1 や M1-A 試験体の場合とほぼ同様のひび割れ分布性状を示している。また、前述のように他の補強試験体よりもメッシュ補強量が多いにもかかわらず、それらと同程度の耐力増加となっているのは、写真 - 1 と同様、梁部コンクリートの剥離・剥落により終局に至ったためと考えられる。

4. AFRP メッシュによるせん断耐力増分の評価

表 - 6 には、各補強試験体の最大荷重および

AFRP メッシュによる耐力増分の実験結果および計算結果の一覧を示している。なお、メッシュによる耐力増分の計算値は、せん断補強筋が分担する設計せん断耐力の算定法⁷⁾を準用して下式により算出した。すなわち、

$$V_{fd} = \alpha \cdot [A_f \cdot f_{fu} (\sin\theta_f + \cos\theta_f)/s_f] \cdot z \quad (1)$$

ここで、 α ：せん断補強に対する AFRP メッシュの補強効率(以後、補強効率)、 s_f ：メッシュの格子間隔、 A_f ：メッシュ 1 本当り断面積、 f_{fu} ：AFRP メッシュの設計引張強度、 θ_f ：メッシュの上下方向成分が部材軸となす角度、 $z = d/1.15$ 、である。なお、M1-A 試験体の場合には、他の補強試験体よりもメッシュの梁高方向の補強範囲が小さい。そのため、せん断補強効果が低減されるものと考えられることより、補強範囲の減少分を換算して V_{fd} を算出することとした。また、補強効率 α は、補強設計要領を参考にして 0.6 と設定した。

表より、M1 および M1-A 試験体の場合には、メッシュによる耐力増分の実測値は計算値と同程度となっていることが分かる。ただし、これらの試験体は、いずれも RC 梁のかぶりコンクリートの損傷が起因となって終局に至っているため、AFRP メッシュの有するせん断耐力向上効果は、本実験により得られた結果よりも大きいものと推察される。一方、M2 試験体の場合には、耐力増分の実測値は計算値を大きく下回っている。これは、M2 試験体は、他の補強試験体よりもメッシュ補強量が多いにもかかわらず M1 や M1-A 試験体と同様に梁側面のかぶりコンクリートが剥落して、M1, M1-A 試験体と同程度の荷重レベルで終局に至っているためである。

以上より、本実験において保証耐力 100 kN/m 程度の AFRP メッシュを用いる場合には、梁上部を閉合せずに U 字型に補強する場合においても、FRP シートにより巻付補強する場合の設計値と同等以上のせん断耐力向上効果が期待できることが明らかになった。

表 - 6 AFRP メッシュによるせん断耐力増分の評価

試験体名	実測耐力 (kN)	M0 に対する 耐力増分 (kN) (1)	メッシュによる 耐力増分の計算値 V_{fd} (kN) (2)	(1) / (2)	破壊形式
M0	302	-	-	-	せん断破壊
M1	355	53	51	1.04	かぶり部剥落
M1-A	345	43	42	1.02	かぶり部剥落
M2	366	64	102	0.63	かぶり部剥落

なお、本実験では、RC 梁の断面積に対する吹付けコンクリート部の断面積の比が比較的大きく、コンクリートの吹付けのみによってもせん断耐力が大きく向上した。そのため、AFRP メッシュを併用する場合には、吹付けコンクリートと RC 梁部コンクリート間の付着は十分に確保されているにもかかわらず、吹付けコンクリート中のメッシュのせん断補強効果が十分に発揮される前に、梁本体のかぶり部コンクリートの剥離・剥落によって終局に至る傾向が強く現れた。今後は、実構造物を想定した大型 RC 梁の載荷実験を実施し、AFRP メッシュのせん断補強効果を適切に評価する必要があるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、AFRP メッシュと短繊維混入吹付けコンクリートを併用した補強工法による RC 梁のせん断耐力向上効果を検討することを目的として、本工法によりせん断補強した RC 梁の静載荷実験を実施した。本実験で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 本実験に用いた吹付けコンクリートと RC 梁部コンクリート間の付着は極めて良好であり、メッシュ端部に定着処理を施す場合と同程度の定着性能を有する。
- 2) 本実験の範囲内において、メッシュ保証耐力が 100 kN/m の場合には、本工法を用いることにより梁上部を閉合せずに U 字型に補強する場合においても、シートを用

いて巻付補強する場合の設計値と同等以上のせん断耐力向上効果が期待できる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針（案），コンクリートライブラリ - 95，1999.
- 2) 出雲健司，浅水俊博，佐伯 昇，志村和紀：アラミドおよび炭素連続繊維シートの付着特性，コンクリート工学論文集，第 9 巻，第 2 号，pp.1-7，1998. 7
- 3) 池田憲二，今野久志，岸 徳光，三上浩，巽 治：AFRP シートで不完全閉合補強した RC 梁のせん断耐力，土木学会北海道支部論文報告集，第 58 号，pp.752-755，2002. 1
- 4) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領（案）
- 5) 有留義朗，金久保利之，松井雅明，藤田直人：繊維シートによる RC 構造物の耐震補強におけるシート端部定着に関する研究，コンクリート工学論文集，第 10 巻，第 2 号，pp.119-130，1999. 5
- 6) 栗橋祐介，田口史雄，三上 浩，岸 徳光：高靱性吹付けモルタルと AFRP メッシュの組み合わせにより曲げ補強した RC 柱の水平交番載荷実験，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 3 巻，pp.105-112，2003. 10
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編），2002