

論文 アラミド繊維シートによる U 字形補強と部分閉合補強を併用した RC 梁のせん断耐力

篠崎 裕生^{*1}・三上 浩^{*2}・中島 規道^{*3}・田村 富雄^{*4}

要旨：ラーメン橋脚柱の横梁などに連続繊維シートを巻付けてせん断補強する場合、梁上面のうち、支承などの付帯物がある部位にはシートを貼ることができない。シートによるせん断補強は、拘束効果の点から、梁上面も含めた全周巻付けが有効であるが、このような条件では、梁の側面と下面のみにシートを貼付ける U 字形補強と、部分的に全周巻付けをする部分閉合補強が併用されることとなる。本研究では、アラミド繊維シートを用いて、このような方法による補強効果を実験的に確認した。実験の結果、せん断スパン長の 15%以上の範囲を適切に閉合補強すれば、計算曲げ耐力を確保できることが分かった。

キーワード：ラーメン橋脚柱横梁、アラミド繊維シート、せん断補強、プレキャストシート

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート構造物の耐震補強や劣化部の補修・補強が盛んに行なわれ、軽量で施工性に優れた連続繊維シート接着工法も多く採用されている。

連続繊維シートを用いたせん断補強では、シートを部材全周に巻付ける方法（閉合補強）が拘束効果が向上し、効果的であるが、鉄道高架橋に多く見られるラーメン橋脚柱横梁のせん断補強では、支承や落下防止装置などの付帯物が梁上面に設置されていることがあり、閉合補強が困難な区間が存在する。このような場合、梁の側面と下面のみにシートを貼付ける U 字形補強と、付帯物を避けて部分的に全周巻付けをする部分閉合補強を併用することが考えられる。

著者らは、これまでに、アラミド繊維シート（以下、AFRP シート）を用いた、U 字形補強のせん断耐力を実験的に検討してきた。その結果、解放面（上面）端部に折返しをつけるなどの対策を講じて、閉合補強の半分程度の補強効果しか得られないことが分かっている¹⁾²⁾。

本研究では、AFRP シートを用いて、せん断

スパンに U 字形補強と部分閉合補強を併用した RC 梁のせん断補強効果を、閉合補強の割合を変えて検討を行った。

なお、閉合補強では、梁上面部分にあたるシートについては、あらかじめ樹脂を含浸・硬化させた、部分プレキャストシートを用いた。これは、実際の施工では、梁上面付近にある付帯物等で十分な作業領域が確保できないことを考慮したものである。

2. 試験の概要

2.1 被補強 RC 梁の概要

図-1に、試験体の形状寸法および補強の概要を示す。RC 梁試験体の寸法は、高さ 300×幅 300×長さ 3500 mm で、引張主鉄筋に D32 を、圧縮主鉄筋に D22 をそれぞれ 4 本配置した。なお、梁端部を除いてせん断補強筋は配置していない。載荷方法は、2 点集中載荷で、一方向の単調載荷とした。載荷点には幅 100 mm の載荷板を使用した。

2.2 AFRP シートによるせん断補強の概要

図-2に補強概要を示す。

*1 三井住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 工博 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*4 ファイベックス(株)

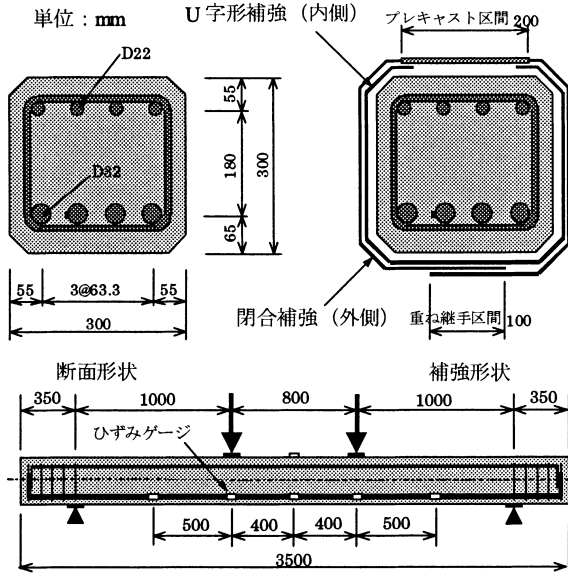


図-1 試験体形状と補強断面図

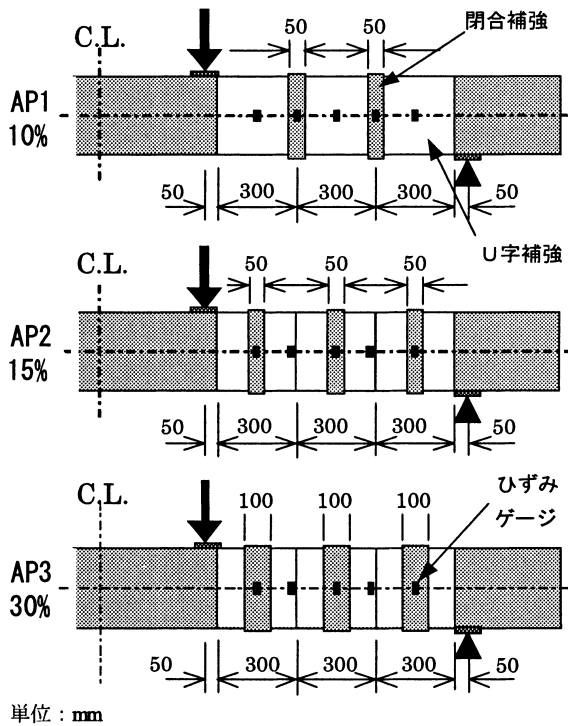


図-2 せん断補強概要

まず、幅 300mm の AFRP シート (以下、シートと呼ぶ) を 3 枚用いて、せん断スパンの全長に渡って U 字形補強を行った。梁上面においては、端部から 80mm 内側までシートを折返した。これは、文献 1),2)において、梁上面の折返しを圧縮主鉄筋のかぶり(本試験体の場合 55mm)以上の長さで行うことで補強効率が增加する知見に基づいている。

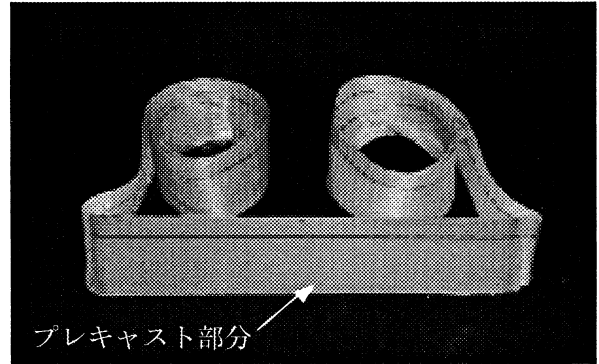


写真-1 部分プレキャストシート

閉合補強は、幅 50 mm または 100 mm の帯状のシートを U 字形補強の上から梁の全周に巻き付けて行った。閉合補強シート同士の間隔は、梁高さ(300mm)を超えないよう配慮した。梁上面のうち長さ 200 mm の区間は、予め樹脂を含浸・硬化させたプレキャストシートとし、残りの部分は梁下面で長さ 100mm の重ね継手により閉じた (図-1 断面図参照)。

プレキャスト部は、コンクリート面に樹脂を塗布したあと、圧着するのみで施工が完了するため、通常のシート施工が必要となる、シートへの樹脂の含浸と上塗りの作業が不要である。このため、当該施工条件に適した手法と言える。

施工前の部分プレキャストシートを写真-1 に示す。

2.3 試験の概要

試験体は、せん断スパン長に対する閉合補強部長さの割合を 10~30%で変化させた AP1~AP3 試験体と、無補強の N 試験体を合わせた計 4 体である。U 字形補強のみの A2 試験体および

表-1 AFRP シートの力学特性値

耐力 (kN/m)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
588	0.286	2060	118

表-2 使用材料の力学特性値

試験体	鉄筋降伏強度 (N/mm ²)		コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)
	D22	D32	
N, AP1~3	420	454	43.9
A2, A4	391	388	41.8

スパン全長を閉合補強した A4 試験体は、既往の実験結果²⁾から参照し、補強効果の比較検討用とした。

使用材料の力学特性値を表—1 および表—2 に示す。シートは、幅 1m あたりの保証耐力が 588 kN の一方向シートで、一般的なエポキシ樹脂を使用して貼付けた。

試験時には、図—1、図—2 に示す位置でシートおよび主鉄筋のひずみを測定した。

3. 試験結果

3.1 破壊状況

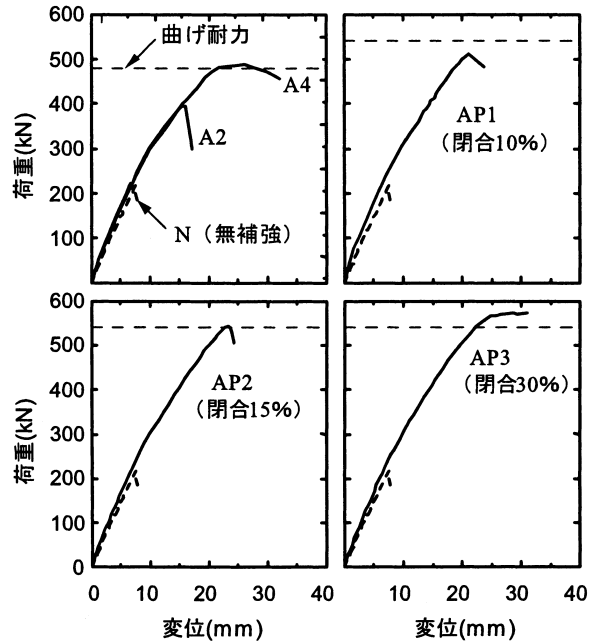
試験結果の一覧を表—3 に、荷重と変位の関係を図—3 に示す。図—3 の曲げ耐力は、材料試験結果を用いてファイバーモデルで計算した。

無補強試験体は、218 kN で斜め引張破壊した。

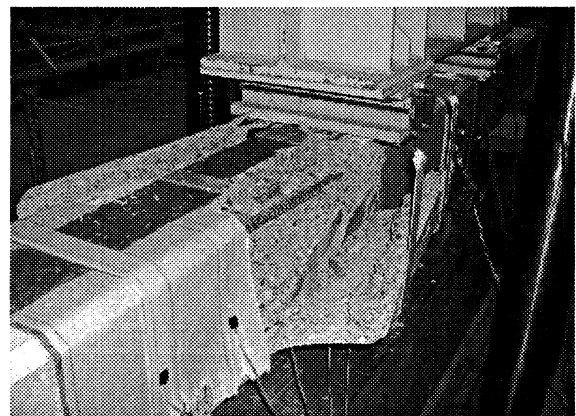
U 字型補強のみの A2 試験体は、無補強試験体とほぼ同じ荷重で斜めひび割れが発生したが、ひび割れ後も荷重が増加した。そして、400kN において梁上面のシート折返し部から生じた U 字形シートの剥離により耐力を失った。

せん断スパンの 10% の範囲を閉合補強した AP1 試験体においても斜めひび割れ発生後の荷重増加が顕著であり、U 字形補強のみの A2 試験体よりもさらに大きな耐力(502kN)を示した。破壊は、U 字形シートの剥離と閉合シートの破断が同時に生じて耐力を失った。

せん断スパンの 15% と 30% の範囲を閉合補強した AP2、AP3 試験体は、さらに耐力が向上した。斜めひび割れ発生荷重と最大耐力は両試験体で同程度であるが、破壊性状は異なっている。



図—3 荷重—変位関係



写真—2 破壊状況 (AP2)

AP2 試験体は U 字形シートの剥離と閉合シートの破断で破壊したが、AP3 試験体は載荷点近傍のコンクリートの圧壊で曲げ破壊した。

AP1、AP2 試験体の閉合補強シートの破断は、

表—3 試験結果一覧

試験体	閉合補強割合 (%)	斜めひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	シート最大ひずみ ($\times 10^{-6}$)	破壊状況
N	0	218	218	---	斜め引張 (せん断) 破壊
A2	0	216	384	7000	斜めひび割れ後シートの剥離
AP1	10	230	502	5115	斜めひび割れ後 U 字シート剥離と閉合シート破断
AP2	15	272	540	11146	斜めひび割れ後 U 字シート剥離と閉合シート破断
AP3	30	266	564	6386	コンクリート圧壊
A4	100	-	488	8300	コンクリート圧壊

注 1 : A2、A4 試験体は文献 2) から引用

注 2 : A2 試験体は U 字形補強のみ、A4 試験体はせん断スパンをすべて閉合補強したもの

いずれも隅角部で発生している(写真-2)。

以上の結果から、U字形補強に部分閉合補強を併用することで、せん断耐力が大きく向上することが分かった。本試験の場合、せん断スパンの15%以上を閉合補強することで、梁の耐力をほぼ計算曲げ耐力まで向上させることが出来ることが分かった。

3.2 シートのひずみ

荷重とシートの補強軸(鉛直)方向ひずみの関係を図-4に示す。計測点は、せん断スパン中央(図-5凡例の8番)とした。

シートのひずみは、斜めひび割れが発生するまではほぼゼロであり、ひび割れ発生後に急増する傾向が見られた。

図-5に、シートひずみの梁軸方向の分布を

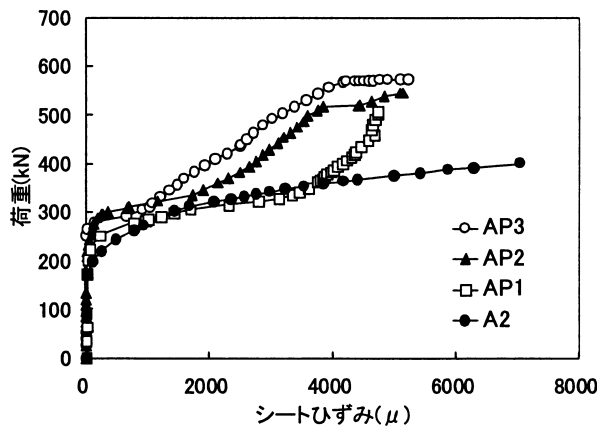


図-4 荷重とシートひずみ関係

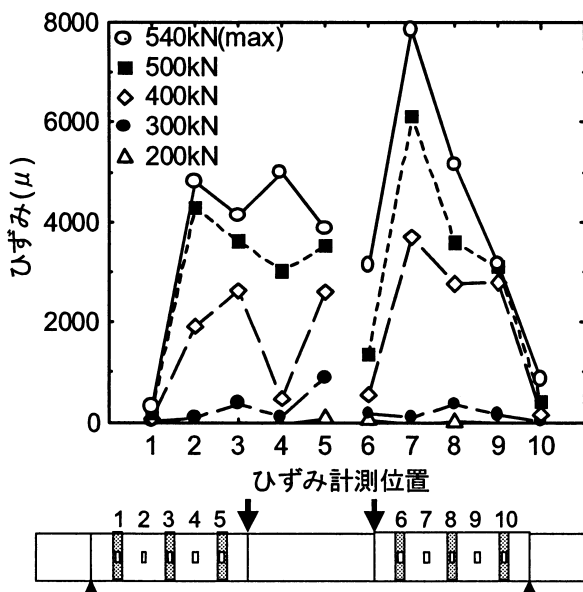


図-5 シートのひずみ分布(AP2)

示した。図はAP2試験体のものであるが、他の試験体も同様の傾向を示している。

図より、シートひずみは、斜めひび割れ発生直後から、左右スパン中央付近でひずみ値が大きく増加しているのが分かる。また、各荷重レベルにおいて、U字形補強位置のシートひずみと、閉合補強位置のシートひずみ値にばらつきはあまり見られなかった。すなわち、どちらか一方のシートのみでせん断に抵抗しているのではなく、同等にひずみながら両者が共同してせん断力負担していると考えられる。

図-5凡例中の2,3,4番と7,8,9番位置のシートの最大ひずみ値を表-4にまとめた。

表から、当該位置のシート平均最大ひずみは4000~5000μになることが分かった。

表-4 シート最大ひずみ 単位(μ)

試験体	2 9	3 8	4 7	平均
AP1	4366 3022	3907 3130	4727 4109	4048
AP2	4818 3155	4135 5148	4996 7851	5017
AP3	5022 -	5224 4551	6332 4357	5097

3. シートのせん断補強効果

シートのせん断補強効果を検討した。無補強のN試験体およびU字形補強のみのA2試験体の最大荷重を基準として、それぞれの試験体の最大荷重との差をU字形補強あるいは閉合補強のせん断補強効果として、それぞれ数値化した。

計算値は、以下の3つの方法で算出した。

(1)土木学会指針³⁾

$$V_f = K \cdot [A_f \cdot f_{fd}(\sin\beta + \cos\beta) / S_f] \cdot z / \gamma_b \quad (1)$$

ここに、 V_f =シートが受け持つせん断力、 K =シートのせん断補強効率で、 $K=1.68-0.67R$ ($0.4 \leq K \leq 0.8$)、 $R=(\rho_f \cdot E_f)^{1/4} (f_{fd}/E_f)^{2/3} (1/f_{fd})^{1/3}$ ($0.5 \leq R \leq 2.0$)、 $\rho_f=A_f/(b_w \cdot S_f)$ 、 b_w =梁幅、 E_f =シートの弾性係数、 A_f =区間 S_f におけるシートの総断面積、 f_{fd} =シートの設計引張強度、

β = シートが部材軸となす角度, $z = d / 1.15$,
 d = 有効高さ, γ_b = 部材係数(1.0)

(2)FIB⁴⁾

$$V_f = 0.9 \cdot \varepsilon_{fk,c} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot d \cdot b_w (\sin\beta + \cos\beta) \quad (2)$$

ここに, V_f = シートの負担するせん断力,
 ε_{fe} = シートのひずみ率, $\varepsilon_{fk,c}$ = シートの有効ひずみで U 字形補強と閉合補強の場合でそれぞれ以下の式で示される。

(a)U 字形補強(U-shaped CFRP)

$$\varepsilon_{fe} = \min[0.65(f_c^{2/3} / \rho_f \cdot E_f)^{0.56} \cdot 10^{-3}, 0.048(f_c^{2/3} / \rho_f \cdot E_f)^{0.47} \cdot \varepsilon_{fu}] \quad (3)$$

(b)閉合補強(Fully wrapped AFRP)

$$\varepsilon_{fe} = 0.048(f_c^{2/3} / \rho_f \cdot E_f)^{0.47} \varepsilon_{fu} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{fk,c} = 0.8 \cdot \varepsilon_{fe} \leq 0.005 \quad (5)$$

(3)Triantafillow and Antonopoulos⁵⁾

$$V_f = \varepsilon_{feA} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot d \cdot b_w (\sin\beta + \cos\beta) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{feA} = 0.9 \cdot \varepsilon_{fe} \leq 0.006 \quad (5)$$

表-5 に計算結果を示す。

無補強の N 試験体と A2 試験体の耐力差から, U 字形補強のせん断耐力寄与分 91kN が計算される。AP1~AP3 試験体における, 閉合補強のせん断耐力寄与分は, それぞれの最大荷重から, 無補強試験体耐力(109kN=218/2)と U 字形補強の寄与分(91kN)を差し引いて求められる。

FIB や Triantafillow らの式で, A2 試験体の U

字形補強効果と A4 試験体の閉合補強効果が同じ値となるのは, U 字形補強におけるシートの有効ひずみ ε_{fe} の算定式 (式(3)の 1 項目, 付着切れ)が AFRP シートでは未整備であり, 計算上, 2 項目のシートの破断で決まってしまうためである。しかし, A2, A4 試験体に対して, 両計算式ともかなり安全側の評価となっている。

図-6 は, シートによる全せん断耐力寄与分を各計算値と比較したものである。土木学会指針式は, 閉合補強を前提とした計算方法であるため, 実験値よりも大きな値を示した。一方, FIB や Triantafillow らの式は, U 字形補強と閉合補強補強を併用した場合についても, かなり安全側に評価する傾向にあることが分かった。

図-7 は, せん断耐力寄与分のうち, 閉合補強によるもののみを計算値と比較したものである。左図の Case1 は, 表-5 の値をそのまま図化したもの, Case2 は, 閉合補強の AFRP シート量をその位置における U 字形補強シートの分

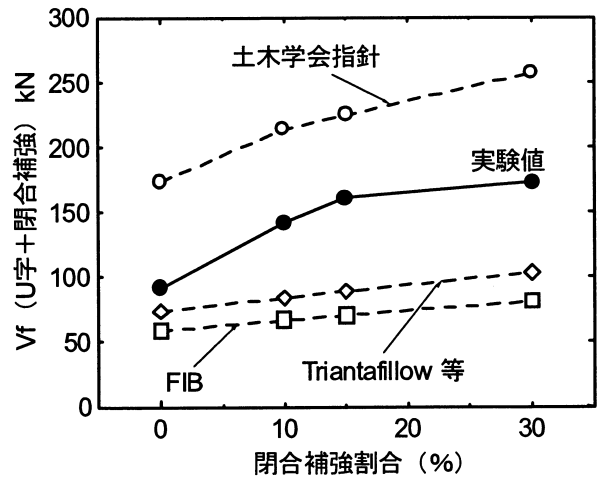


図-6 計算値との比較

表-5 試験結果一覧

単位: kN

試験体	閉合補強割合 (%)	V_{fe}	V_{fe}		土木学会指針	FIB		Triantafillow and Antonopoulos	
			U字	閉合		U字	閉合	U字	閉合
A2	0	91	91	-	173.4	58.8	-	73.5	-
AP1	10	142	91	51	214.0(21.4)	59.7	7.1	74.6	9.5
AP2	15	161	91	70	224.7(32.1)	59.7	10.7	74.6	14.3
AP3	30	173	91	82	256.8(64.2)	59.7	21.4	74.6	28.6
A4	100	135	-	135	173.4	-	58.8	-	73.5

注1: V_{fe} はシートが受け持つせん断力の実験値で荷重値の半分
 注2: 土木学会指針の括弧内の値は閉合補強部のみの値で内数

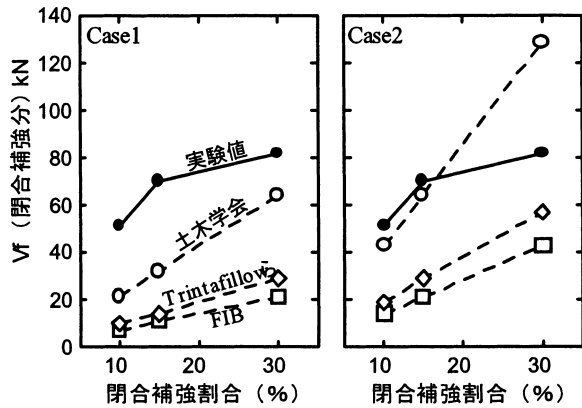


図-7 計算値との比較（閉合補強）

も含め、2倍として計算したものである。

これは、閉合補強シートと、その内側にあるU字形補強シートとは樹脂で一体化しており、共同でせん断力に抵抗すること。また、破壊時において、閉合補強シートの破断とU字形シートの剥離が同時に発生しており、破断は閉合補強シートのみ存在する梁上面ではなく、梁の隅角部で発生していることなどによる。

なお、閉合補強割合30%の試験体は曲げ破壊しているため、せん断負担は頭打ちとなっている。

図-7より、Case1では各計算方法とも実験値をかなり安全側に評価していることが分かる。AFRPシート量2倍として計算したCase2においては、土木学会指針が比較的良く一致したが、その他の方法では、依然安全側となった。これは、FIBやTriantafillowらの式では、繊維シートのひずみ上限値を0.005~0.006と比較的安全側に設定していることも一つの要因である。

表-4に示した通り、ひずみゲージで測定できるシートの最大ひずみは、0.004~0.005であるが、実際には、シートが破断した隅角部では、かなり大きなひずみが発生していることが予想される。また、U字形補強シートの梁上面へ折り返し、あるいはU字形補強と閉合補強を併用することによる相乗的な補強効果などの影響も結果に大きく影響していると考えられる。今後の検討課題としたい。

5. まとめ

AFRPシートを用いて、せん断スパンにU字形補強と部分閉合補強を併用したRC梁のせん断補強効果を、閉合補強の割合を変えて検討を行った結果、以下の点が明らかとなった。

- (1) 本試験の場合、U字形補強に加えて、せん断スパンの15%以上の長さを閉合補強することで、計算曲げ耐力を確保できることが分かった。
- (2) AFRPシートのせん断耐力への寄与は、FIBあるいはTriantafillowらの式で安全側に評価できた。土木学会指針はU字形補強の算定式がないため、危険側の評価となった。
- (3) U字形補強シートの梁上面へ折り返し、あるいはU字形補強と閉合補強の相乗効果などの影響が比較的大きいと考えられる。これらの影響を数式にある程度反映させることが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 中島, 三上, 田村, 平井: RC梁のせん断耐力に与えるアラミド繊維シートの貼付形状の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 24, No.2, pp. 1411-1417, 2002
- 2) Ashraf, M. Mutsuyoshi, H. Adhikary, B. B. Watanabe, K.: Shear upgrading of reinforced concrete beams with externally bonded composite sheets, JCI, Annual Convention Vol. 24, No.2, pp.1537-1542, 2002
- 3) 土木学会編: 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, コンクリートライブラリー101, 2000
- 4) International Federation for Structural Concrete (FIB): "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures" Technical Report, Bulletin 14, 2001, pp59-66
- 5) Triantafillow, T. C. and Antonopoulos, C. P., "Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP," ASCE Journal of Composites for Construction, Vol.4, No.4, pp.198-205, 2000