

AFRPシートを用いたU字型と部分閉合補強を併用した RC梁のせん断耐荷性状

Shear Resistant Behavior of RC Beams reinforced jointly with U-shaped Jacketing and Partial Wrapping of AFRPs.

中島 規道 NORIMICHI NAKAJIMA

三上 浩 HIROSHI MIKAMI

篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI

ファイベックス（株） 田村 富雄 TOMIO TAMURA

アラミド繊維（AFRP）シートを用いたU字型と部分閉合補強を併用したRC梁のせん断耐荷性状を、9体のRC梁を用いて実験的に検討した。特に、本研究では、U字型補強および部分閉合補強のシート補強量を変化させて検討を行った。その結果、1) 閉合補強したRC梁の破壊は、部分閉合シートの破断によって生じること、2) せん断耐力を増加させるには、U字型補強の補強量を増大させるよりも、部分閉合補強量を増加させる方が有効であること、などが明らかとなった。

キーワード：アラミド繊維シート、U字型補強、部分閉合補強、RC梁、せん断耐荷性状

The shear resistant behaviors of RC beams that were reinforced jointly with U-shape jacketing and partial wrapping of AFRPs were experimentally investigated using a total of nine specimens. These experiments were undertaken with the sheet volume ratio for both reinforcing methods being taken as variable. From this study, the following results are obtained: 1) The shear failure of RC beams reinforced with both methods depends on the rupture of partially wrapped AFRPs; and 2) The shear capacity of the RC beams can be effectively improved by increasing the volume of partially wrapped sheets rather than the U-shape jacketing.

Keywords: AFRPs, U-shape jacketing method, Partially wrapping method, RC beam, Shear resistant behavior

1. はじめに

早くから整備が進められてきた都市部の主要幹線交通網では、交通量の増大や経年劣化の進展により補修工事の必要性が高まっており、現在急ピッチで補修工事が進められている。

都市部の高架化された交通網で一般的なラーメン橋脚は、交差交通、隣接構造物の存在や高架橋下の利用状況などにより、施工方法の制限を受ける事例が多いが、柱部は比較的補強が容易であり、さまざまな新工法の適用により補強が進められている。しかしながら、横梁部は上部の施工空間が制限されている、上面および側面に支承や落下橋防止装置などが設置されているなどにより、従来のRC巻立て工法、鋼板接着工法などの適用が困難

な場合が多く、汎用性の高い連続繊維シート工法を用いた場合でも支障物を避けて貼付けを行うため、不完全なものにならざるを得ないのが現状であった。

このような部材全体を補強することが困難な構造物を対象として、当社では部材の側面および底面へのU字型補強と、部分的に部材全周に巻付ける閉合補強の組合せによるシート補強工法の開発を進め¹⁾²⁾、一部のラーメン橋脚で実用に供されるに至っている³⁾。

本実験では、U字補強と閉合補強を組合せた補強工法の適用範囲の拡大および補強方法の最適化を目的とし、①U字補強量、および②U字補強と部分閉合の組合せ方法を試験因子として、せん断補強効果を実験的に検討した。

2. 実験概要

(1) 試験体

図-1に試験体の形状・寸法を示す。試験体は、幅300mm、高さ300mmの矩形断面とした。補強材は、引張側にSD345-D32を圧縮側にSD345-D22をそれぞれ4本配置した。せん断補強筋は、梁端部にのみSD245-D10を配置した。荷重方法は、支点間距離2,800mm、荷重点間距離800mmの2点集中荷重とした。支点および荷重点には幅100mmの荷重版を使用した。荷重ルールは単調荷重として試験を行った。

(2) 補強方法

図-2にアラミド繊維シートによる補強の概要を示す。

1層目のU字補強として、幅 $L_u = 300\text{mm}$ のアラミド繊維シートを900mmのせん断補強区間に隙間なく3枚貼付した。梁の上面は既往の知見¹⁾に基づいて圧縮鉄筋の水平かぶり厚さ以上となる寸法80mmの折り返しを行った。

2層目の部分閉合補強は幅 L_h の等しい帯状のシート3枚を等間隔で梁の全周に巻付け、梁の下面において100mmの重ね継ぎ手により閉合した。閉合シートの間隔は梁の高さに等しい300mmとした。

試験要因は、①U字シートの補強量、および②U字補強と部分閉合補強の組合せとした。表-1に試験体の一覧を示す。無補強を含めて全試験体数を9体とした。各試験体の名称は、U字補強、閉合補強それぞれのシート耐力を重力単位 (tf) で用いて $U^{**}H^{**}$ と表記する。

①の補強量は、シート耐力 P_u を100~400kN/mの範囲で変化させた。②の組合せ効果は、補強量の合計をほぼ同一の225kN/m程度とし、U字補強と閉合補強のシート耐力を変化させた。この中で、閉合補強のシート幅 L_h はシート耐力 P_h と反比例の関係にあり、閉合補強とU字補強の補強区間の比 L_h / L_u も変化している。

なお、閉合補強量が49kN/mと小さいU20H5試験体は、メッシュ状のアラミド繊維シートを50mm幅に分割した上で所定の閉合比となる幅150mmに貼付した。さらに全体の補強量332kN/mの試験体についても試験を実施した。

(3) 使用材料

アラミド繊維シートの機械的性質を表-2に示す。アラミド繊維シートは、高弾性タイプの一方向シートを使用した。メッシュ状のシートは、直交する2方向の機械的性質が同一である。アラミド繊維シートの貼付は、一般的なエポキシ樹脂を使用して、従来の繊維補強工法と同

様の手順で実施した。

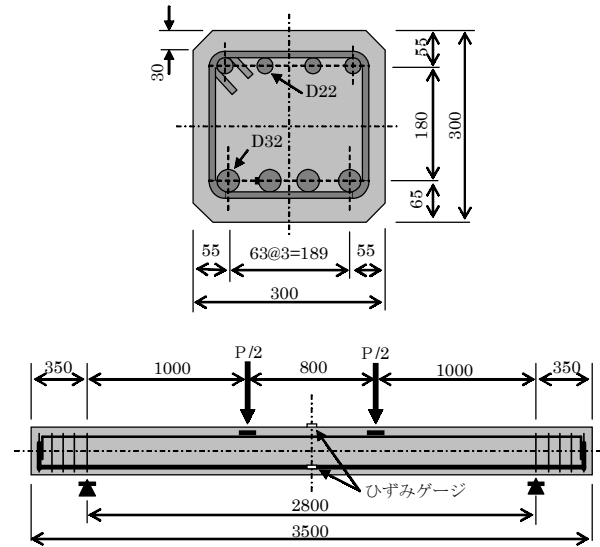
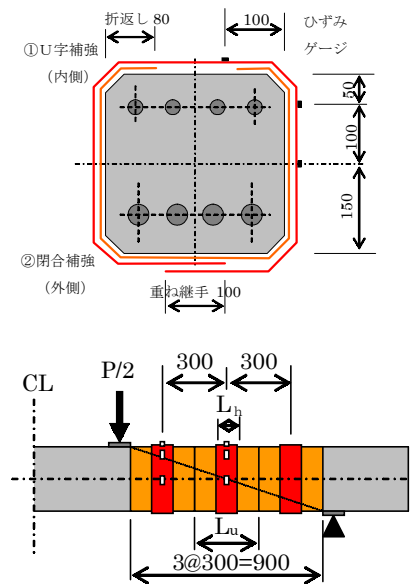


図-1 試験体形状・寸法



U10H40 : $L_r/L_u = 0.33$

図-2 補強方法

表-1 試験水準

試験体	シート耐力		シート幅		せん断補強量 ρ_f %	補強区 間の比 L_h / L_u %
	U字 P_u kN/m	閉合 P_h kN/m	U字 L_u mm	閉合 L_h mm		
1	N	0	-	-	-	-
2	U10	98	-	300	0.032	-
3	U20	196	-	300	0.064	-
4	U40	392	-	300	0.192	-
5	U10H20	98	196	300	0.074	65.0
6	U10H40	98	392	300	0.075	33.3
7	U20H5	196	49	300	0.072	50.0
8	U20H20	196	196	300	0.074	15.0
9	U20H40	196	392	300	0.107	33.3

コンクリートの強度試験結果を表-3に示す。各試験体の試験時強度は、式(1)に示す材齢-強度関係の定数および基準強度を実験値から最小二乗法により回帰して算出した。求められた材齢-強度関係⁸⁾を式(1)に、各試験体の試験時強度を表-4に示す。

$$f'_c(t) = t/(a + b \cdot t) \cdot f'_{ck} \quad (1)$$

$f'_c(t)$: 材齢 t 日のコンクリート強度

a, b : 定数 ($a = 3.784, b = 0.901$)

f'_{ck} : 基準強度 ($f'_{ck} = 21.92$)

(4) 計測項目

計測はアラミドシートのひずみを中心として行った。シート補強区間の4断面の側面および上面にひずみゲージを貼付し、梁軸直角方向のひずみを計測した(図-2参照)。変位の測定は、試験体側面の引張鉄筋位置で行った。また、試験体中央の引張鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみについても計測を行った。

3. 試験結果

(1) 破壊状況

各試験の試験結果の一覧を表-4に示す。表中の試験体の耐力は、作用するせん断力 ($P/2$) として示した。

無補強のN試験体は、荷重75.2kNで斜めひびわれが発生して耐力を喪失した。U字補強のみを行った3試験体は、せん断区間上縁のかぶりコンクリートがアラミドシートとともに剥離する破壊形式を示した。U字補強と閉合補強を行った試験体は、最大耐力近傍で梁上面に軸方向のひびわれが観察された後に、閉合シートの破断および上面のかぶりコンクリートの剥離が発生する破壊形式を示した。破壊状況の一例を図-3に示す。

(2) 荷重-変位関係

U字補強のみを行った試験体の荷重-変位関係を図-4に示す。無補強のN試験体に比して、いずれの試験体も大幅な耐力の増加が認められる。補強量が大きいU40試験体は、他の試験体に比して斜めひびわれ発生後の剛性も高くなっているが、変位15mm程度でかぶり部の破壊により急激に耐力が低下した。

U字補強と閉合補強を行った試験体の荷重-変位関係を図-5に示す。耐力200kN/mのU字補強シートに閉合補強を行ったU20H5試験体およびU20H20試験体は、U字補強のみのU20試験体よりも最大耐力および最大耐力時の変形は増加するが、増加量は比較的小きな値であった

表-2 アラミド繊維シートの機械的性質

耐力 kN/m	設計厚さ mm	引張強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	備考
98	0.048	2060	2060	一方向
196	0.097	2060	2060	一方向
392	0.193	2060	2060	一方向
49	0.024	2060	2060	メッシュ

表-3 コンクリート強度

材令 日	圧縮強度 f_c N/mm ²	引張強度 f_t N/mm ²	弾性係数 $E_c \times 10^5$ N/mm ²	ポアソン 比 -
7	15.2	1.48	0.199	0.163
14	18.6	-	0.200	0.163
28	21.6	2.21	0.220	0.181
37	21.5	-	0.226	0.162

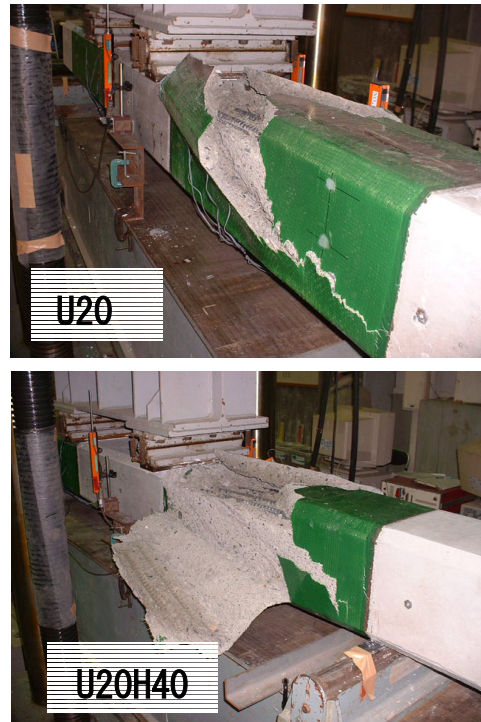


図-3 破壊状況

。破壊状況は、試験体上面に割裂ひびわれが確認された後に、閉合シートが破断して比較的急激に耐荷力が低下する結果を示した。

同様に耐力100kN/mのU字補強シートを有するふたつの試験体は、最大耐力がさらに増進し、最大荷重以降も変位の増加傾向が認められる。変形の進行後、U10H40試験体は閉合シートの破断より、U10H20試験体は斜めひびわれ貫通位置のコンクリート破壊によりそれぞれ終局に至った。本実験においては全体の補強量を等しく設定しているため、U字シートの補強量が小さいと閉合シ

表-4 試験結果一覧

試験体	コンクリート強度の補正				試験結果				計算結果		
	試験材令日	圧縮強度 f_c N/mm ²	Vcの計算値 kN	補正係数 α	最大耐力 P/2 kN	コンクリートの分担力 kN	シートの分担力① kN	破壊状況	シートの分担力② kN	補強効率 ①/②	
1	N	15	19.0	81.1	1.000	75.2	75.2		斜めひびわれ	—	—
2	U10	37	21.8	84.9	1.047	135.9	78.7	57.2	かぶり破壊	40.4	1.416
3	U20	21	20.3	82.9	1.005	141.0	75.6	65.4	かぶり破壊	80.8	0.794
4	U40	28	21.1	83.9	1.016	165.5	76.4	89.1	かぶり破壊	162.5	0.539
5	U10H20	16	19.3	81.5	1.022	165.3	76.9	88.4	載荷点圧壊	93.2	0.963
6	U10H40	19	19.9	82.3	1.039	168.0	78.1	89.9	閉合シート破断	94.5	0.97
7	U20H5	30	21.3	84.2	1.029	153.5	77.4	76.1	閉合シート破断	90.9	0.829
8	U20H20	24	20.7	83.4	1.053	152.1	79.2	72.9	閉合シート破断	93.4	0.8
9	U20H40	40	22.2	85.3	1.036	177.5	77.9	99.6	閉合シート破断	135.4	0.727

一トの耐力および幅が相対的に大きくなる。この点から閉合補強は、U字補強に比して補強効果が高いものと推測される。

U10H20 試験体と U10H40 試験体、および U20H5 試験体と U20H20 試験体との差は小さく、ほぼ同一の挙動となっている。同一のU字シート補強量および同一の閉合補強量において、閉合区間とU字補強区間の比 (L_h/L_u) が耐力に与える影響は特に認められなかった。

(3) 荷重-アラミドひずみ関係

荷重-アラミド繊維シートひずみ関係の一例をU10H40試験体について図-6に示す。

試験体側面中央のアラミド繊維シートひずみは、斜めひびわれの発生以降、荷重の増加とともにほぼ線形に増加していることが認められる。一方、試験体上面の閉合シートのひずみは、最大荷重近傍で急激に増加が認められる。最終的に1%を超える計測ひずみを得た後に破断に至っている。これは、前述の試験体上面において軸方向に割裂ひびわれが発生したことに対応しており、U字補強の上面に発生する水平方向の体積膨張を部分閉合シートで拘束することが部材の耐力増加に重要であることが示唆されている。

4. 組合せ補強の効果

(1) アラミド繊維シートの補強効率

アラミド繊維シートの負担するせん断力の実験値と計算値および補強効率を表-4に示す。せん断耐力の実験値は、式(2)により各補強試験体の最大せん断力から無補強試験体の最大せん断力を一律に減じて算出した。この際、コンクリート強度 (F_c) がせん断力 (V_c) に与える影響は、式(3)および前述の試験時強度により無補強試験体との比を算出して補正した。

せん断力の計算値は、標準的なトラス理論の算定式(4)を用いて算出した⁶⁷⁾。補強効率は実験値と計算値

の比として求めた。

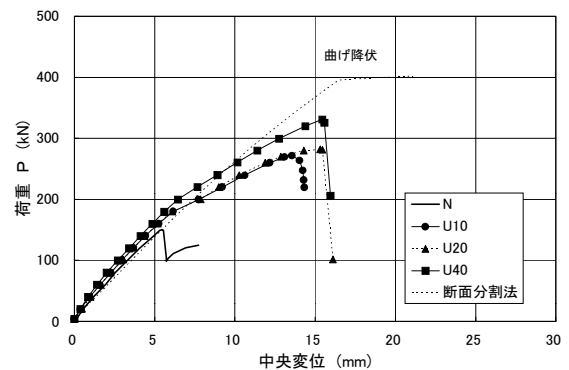


図-4 荷重-変位関係 (U字補強)

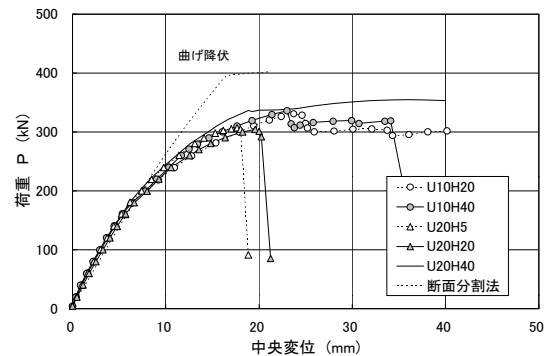


図-5 荷重-変位関係 (U字+閉合補強)

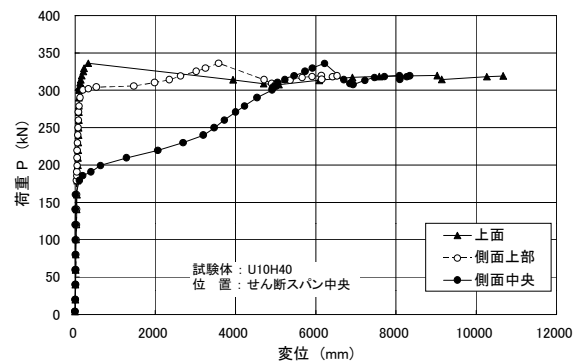


図-6 荷重-アラミドひずみ関係

さらに、比較検討のため、既往の研究²⁴⁾から破断耐力 596kN/m のシートで U 字補強と閉合補強を行った 3 体の試験結果についても併記した。これらの試験体の断面形状・寸法、閉合補強の方法は、本実験とほぼ同一である。なお、試験体名は本試験体の表現に統一し U60 試験体および U60H60 試験体と標記する。

$$V_{af1} = V_{a-sp} - V_{c-sp} \quad (2)$$

V_{a-sp} : アラミド補強試験体の最大せん断耐力

V_{c-sp} : 無補強試験体の最大せん断耐力

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (3)$$

$\beta_d = (1/d)^{1/4}$ 、ただし、 $\beta_d \leq 1.0$

$\beta_p = (100p_w)$ 、ただし $\beta_p \leq 1.5$

$f_{vc} = 0.2(f_c)^{1/3}$ 、ただし $f_c \leq 75(\text{N/mm}^2)$

b_w = 腹部の幅、 d = 有効高さ

$$V_{af2} = K \cdot A_{af} \cdot f_{af} (\sin \theta + \cos \theta) Z / \gamma_b \quad (4)$$

K : 補正係数 ($K = 1.0$)

A_{af} : アラミド繊維シートの断面積

f_{af} : アラミド繊維シートの破断強度

Z : 応力中心間距離、 $\gamma_b = 1.0$

θ : シートの補強角 ($\theta = 90^\circ$)

(2) U 字補強の補強効果

U 字補強のみを行った試験体のシート補強量とせん断耐力の増分および補強効率の関係を図-8 に示す。シート補強量は、梁の単位長さ当たりのせん断補強材比として表示した。

本実験の範囲内では、U 字補強の増加とともにせん断耐力の増加が認められる。しかしながら、既往の試験結果を含めると耐力 596kN/m のアラミドシートを使用した U60 試験体の増分は U40 試験体と大差なく、U 字シートのみでは補強効果に上限があることが示唆されている。これは、終局状態がシートの破断耐力ではなく、梁上面のかぶりコンクリートの破壊により決定されているため、補強量が大きいほどシート端部のコンクリートの負担が増大し、かぶり部の破壊を誘発するためと推測される。この結果、シート補強量の増加とともに補強効率は低下し、U60 試験体においては 0.34 程度にまで低下した。

なお、補強量の少ない U10 試験体は、補強効率が 1.4 と 1.0 以上の大きな値を示しているが、シートの効率が良いことに加えて試験体の個体差等が作用したためと推測される。

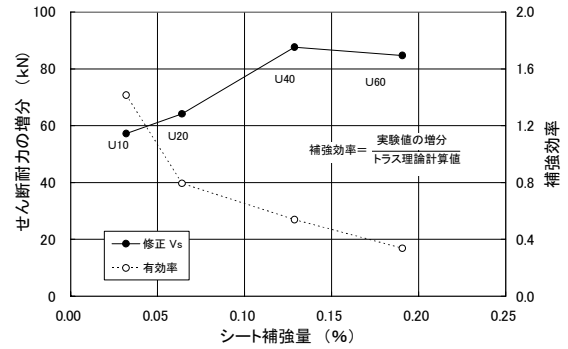


図-8 U 字シートの補強効果

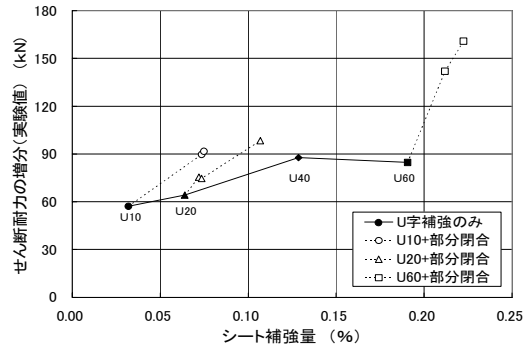


図-9 部分閉合シートの補強効果 (増分)

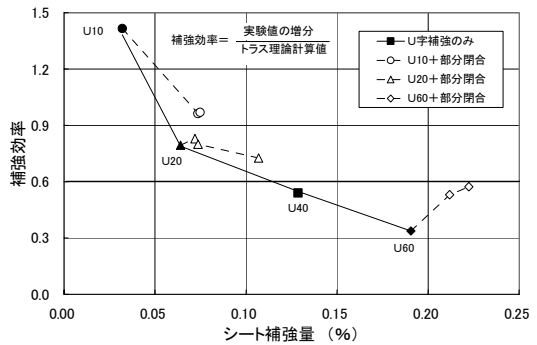


図-10 部分閉合シートの補強効果 (効率)

(3) 部分閉合補強の効果

閉合補強を組合せた試験体のシート補強量とせん断耐力の増分の関係を図-9 に示す。

U10 試験体はせん断補強量 0.032 % においてせん断耐力の増分が 60kN 程度であるが、閉合補強によりせん断補強量を 0.075 % まで増加させると、せん断耐力の増分は 90kN と 1.5 倍程度の増加を示した。

U20 試験体に関しても閉合補強の付加による改善効果が認められるが、U10 試験体のシリーズに比して同一のせん断補強量における閉合補強の効果が小さいことが認められる。この結果、全体の補強量が 0.11 % である U20 H40 試験体において、U10 試験体に部分閉合を組合せた試験体と同等の耐力増加が得られる結果となった。

U字補強のみのU40試験体についても、せん断耐力の増分は90kN程度となっているが、補強量は0.129%である。U字補強と閉合補強を組合せたU10H20試験体の補強量0.074%であり、1.7倍程度の補強量を必要とする結果となった。

U60試験体に組合せた閉合補強の効果は特に大きな増加量を示しているが、これは補強量の増加によりU字シート端部でのかぶりコンクリートへの負担が大きくなるため、基準となるU60試験体の耐力が抑制されていたためと判断される。

閉合補強を組合せた試験体のシート補強量と補強効率の関係を図-10に示す。

閉合補強を加算した各試験体においても補強量の増加に伴って補強効率は低下しているものの、その勾配はU字補強のみの勾配に比して緩やかになっており、U60H60試験体に関しても0.53程度の補強効率を保持した。U字補強と部分閉合補強の組合せ補強においては、主に閉合補強の補強量を増加させることがシート耐力を有効に利用できることが示唆されている。

RC橋脚の既往の耐震補強設計において、式(4)における補正係数 K は0.6として規定されている⁶⁾。これは圧縮側コンクリートの破壊がアラミド繊維シートの破断に先行する破壊形式を考慮して、実用的なせん断補強範囲の補正係数として設定された値である。本試験の破壊形式は、部分閉合シートの破断、かぶりコンクリートの破壊となっているが、シート補強量0.1%程度以下の範囲内では従来の設計手法が準用可能であると思われる。

しかしながら、シート補強量が0.1%を超えた領域では補強効率は0.6を下回っていること、実際のラーメン橋脚横梁における補強鉄筋比やせん断剛性の変動範囲が考慮されていないことなどから、包括的な算定を可能とするには至っていない。さらに、付帯構造物の配置に応じてシートの組合せも様々な形式を取らざるを得ないことなども予想される。

これらの点を含め、U字補強と閉合補強それぞれの補強効果の定式化および適用範囲の明確化を今後の課題として検討を進めていきたい。

5. まとめ

アラミド繊維シートによる部材の側面および底面へのU字型補強、および部分的に部材全周に巻付ける閉合補強を組合せて行ったRC梁の載荷試験を行った。

本試験により得られた知見を以下に示す。

- ・ U字補強を行ったRC梁は、せん断区間圧縮面のかぶりコンクリートの破壊により終局に至る。
- ・ U字補強に部分閉合補強を組合せたRC梁は、主にせん断区間圧縮縁の閉合シートの破断により終局に至る。
- ・ 部材を完全に閉合しないU字補強においてもせん断補強効果を期待できる。
- ・ 部分閉合補強は、U字補強に比して効率的なせん断補強効果を有する。

参考文献

- 1) 中島ほか：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) 篠崎ほか：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 25, No.2, pp. 1891-1896, 2003
- 3) 三上ほか：支承を有するラーメン橋脚横梁のアラミド繊維シートによる補修・補強，コンクリート工学，2004.6
- 4) ASHRAFほか：Shear upgrading of reinforced concrete beams with externally bonded composite sheets，日本コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 24, No.2, pp. 1537-1542, 2002
- 5) 山田ほか：繊維シートで梁を補強したRC1層ラーメン橋の耐震性状に関する研究，日本コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24, No.2, pp.1291-1296, 2002
- 6) アラミド研究会編：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補修工法，設計・施工要領(案)，1998
- 7) 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
- 8) 土木学会編：コンクリート標準示方書 - 施工編，2002