Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，2005

# 論文　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

中島　規道[*1]・三上　浩[*2]・篠崎　裕生[*3]・田村　富雄[*4]

**要旨**：アラミド繊維シートによりU字型と部分的な閉合を併用して補強したＲＣ梁のせん断耐荷性状試験的に検討した。試験は，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，部材を完全に閉合しないU字型補強においてもせん断補強効果を期待できること，部分閉合補強はU字型補強の解放面に発生する軸方向ひびわれを水平方向に拘束して補強効果を発揮すること，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，せん断性状

## 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の補強が困難な構造物を対象として，筆者ら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を併用したアラミド繊維シート(以下，ＡＦＲＰシート）補強工法の開発を進め[1)2)]，一部の橋脚で実用に供されるに至っている[3)]。

本試験では，U字型補強と閉合補強を併用した工法の補強方法の最適化，および設計手法の検討を目的とし，①U字型補強量，および②U字型補強と部分閉合の組合せ方法を試験因子として，せん断補強効果を試験的に検討した。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験体

試験体の形状・寸法を**図－1**に示す。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。載荷方法は，支点間距離2,800mm，載荷点間距離800mmの2点集中載荷とした。支点および載荷点には幅100mmの載荷版を使用した。載荷ルールは単調載荷として試験を行った。

### 2.2 補強方法

補強方法は，1層目のU字型補強として幅(Lu) 300mmのＡＦＲＰシートを900mmのせん断区間に隙間なく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80mmの折り返しを行った。

2層目の部分閉合補強は幅(Lo)の等しい帯状の

*1 三井住友建設（株）　技術研究所　工修　（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　　（正会員）
*4 ファイベックス(株)



NII-Electronic Library Service

シート 3 枚を等間隔で梁の全周に巻き付け，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字型補強量，および②U字型と部分閉合の組合せ方法とした。**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字型補強，閉合補強それぞれのシート耐力を略記してU**H**と表記する。①の補強量は，ＡＦＲＰシートによるせん断補強筋比(ρaf)として 0.032～0.129%の範囲で変化させた。②の併用効果は，せん断補強筋比(ρaf)の合計をほぼ同一の0.074%程度とし，U字型補強と閉合補強のシート耐力を変化させた。なお，閉合補強のシート幅(Lo)はシート耐力(Fo)と反比例の関係にあり，閉合補強とU字型補強の補強区間の比 Lo／Lu も 0.15～0.65 の範囲で変化している。

さらに，既往の研究[2)4)]から３体の試験結果も検討に使用した。これらの試験体の形状・寸法，閉合補強の方法は，本試験とほぼ同一である。試験体名は本試験体の形式に変更して表記した。

### 2.3 使用材料

ＡＦＲＰシートの機械的性質を**表－2**に示す。ＡＦＲＰシートは，高弾性タイプの一方向シートを使用した。なお、U20H5 試験体の閉合補強用シートは，メッシュ状のアラミド繊維シートを細分割して一方向の強度のみを使用した。ＡＦＲＰ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。

コンクリートは，最大骨材径 20mm の早強コンクリートを使用した。圧縮試験結果を**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[6)]の定数および基準強度を最小二乗法により回帰して算出した（**表－4参照**）。

$$f_c'(t) = t/(a + b \cdot t) \cdot f_{ck}' \quad \cdot\cdot\cdot(1)$$

$f_c'(t)$：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)

**表－1　試験体一覧**

| | 試験体 | シート耐力 Fu kN/m | シート耐力 Fo kN/m | シート幅 Lo mm | シート幅 Lo/Lu | 全体補強量 Faf kN/m | 全体補強量 ρaf % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | N | - | - | - | - | - | - |
| 2 | U10 | 98 | - | - | - | 98 | 0.032 |
| 3 | U20 | 196 | - | - | - | 196 | 0.064 |
| 4 | U40 | 392 | - | - | - | 392 | 0.129 |
| 5 | U10H20 | 98 | 196 | 195 | 0.65 | 225 | 0.074 |
| 6 | U10H40 | 98 | 392 | 100 | 0.33 | 229 | 0.075 |
| 7 | U20H5 | 196 | 49 | 150 | 0.50 | 225 | 0.072 |
| 8 | U20H20 | 196 | 196 | 45 | 0.15 | 225 | 0.074 |
| 9 | U20H40 | 196 | 392 | 100 | 0.33 | 327 | 0.107 |
| a | U60 | 596 | - | - | 0.50 | 596 | 0.191 |
| b | U60H60 | 596 | 596 | 50 | 0.17 | 695 | 0.212 |
| c | U60H60 | 596 | 596 | 100 | 0.33 | 794 | 0.222 |

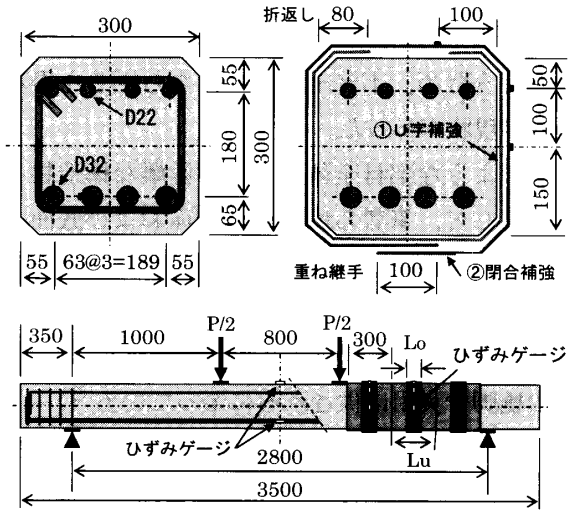
*Lu＝300mm

**表－2　ＡＦＲＰシートの機械的性質**

| 規格値 耐力 kN/m | 規格値 厚さ mm | 規格値 引張強度 N/mm² | 規格値 弾性係数 kN/mm² | 試験値 引張強度 N/mm² | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|
| 49 | 0.024 | 2060 | 118 | 2640 | メッシュ |
| 98 | 0.048 | | | 2570 | 一方向 |
| 196 | 0.097 | | | 2590 | 一方向 |
| 392 | 0.193 | | | 2470 | 一方向 |

**表－3　コンクリート強度**

| 材齢 | 日 | 7 | 14 | 28 | 35 |
|---|---|---|---|---|---|
| 圧縮強度 | N/mm² | 15.2 | 18.6 | 21.6 | 21.5 |




**図－1　試験体形状・寸法**



NII-Electronic Library Service

表－4　試験結果一覧

| | 試験体 | 強度補正 | | | 試験結果 | | | | 計算結果 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | fc' | Vc | 補正 | Vmax | Vcn | Vaf1 | 破壊状況 | Vaf2 | 補強効率 | |
| | | N/mm | kN | 係数 | kN | kN | kN | | kN | K1 | K2 |
| 1 | N | 19.0 | 81.1 | 1.000 | 75.2 | 75.2 | － | 斜めひびわれ | － | － | － |
| 2 | U10 | 21.8 | 84.9 | 1.047 | 135.9 | 78.7 | 57.2 | かぶり破壊 | 40.4 | 1.42 | 0.80 |
| 3 | U20 | 20.3 | 82.9 | 1.005 | 141.0 | 75.6 | 65.4 | かぶり破壊 | 80.8 | 0.79 | 0.80 |
| 4 | U40 | 21.1 | 83.9 | 1.016 | 165.5 | 76.4 | 89.1 | かぶり破壊 | 162.5 | 0.54 | 0.66 |
| 5 | U10H20 | 19.3 | 81.5 | 1.022 | 165.3 | 76.9 | 88.4 | 圧縮破壊 | 93.2 | 0.96 | 0.77 |
| 6 | U10H40 | 19.9 | 82.3 | 1.039 | 168.0 | 78.1 | 89.9 | 閉合部破断 | 94.5 | 0.97 | 0.77 |
| 7 | U20H5 | 21.3 | 84.2 | 1.029 | 153.5 | 77.4 | 76.1 | 閉合部破断 | 90.9 | 0.83 | 0.80 |
| 8 | U20H20 | 20.7 | 83.4 | 1.053 | 152.1 | 79.2 | 72.9 | 閉合部破断 | 93.4 | 0.80 | 0.79 |
| 9 | U20H40 | 22.2 | 85.3 | 1.036 | 177.5 | 77.9 | 99.6 | 閉合部破断 | 135.4 | 0.73 | 0.72 |
| a | U60 | 41.8 | － | － | 200 | 112 | 88 | かぶり破壊 | 251 | 0.37 | 0.79 |
| b | U60H60 | 43.8 | － | － | 251 | 109 | 142 | 閉合部破断 | 268 | 0.53 | 0.78 |
| c | U60H60 | 43.8 | － | － | 270 | 109 | 161 | 閉合部破断 | 281 | 0.57 | 0.77 |

### 2.4 計測項目

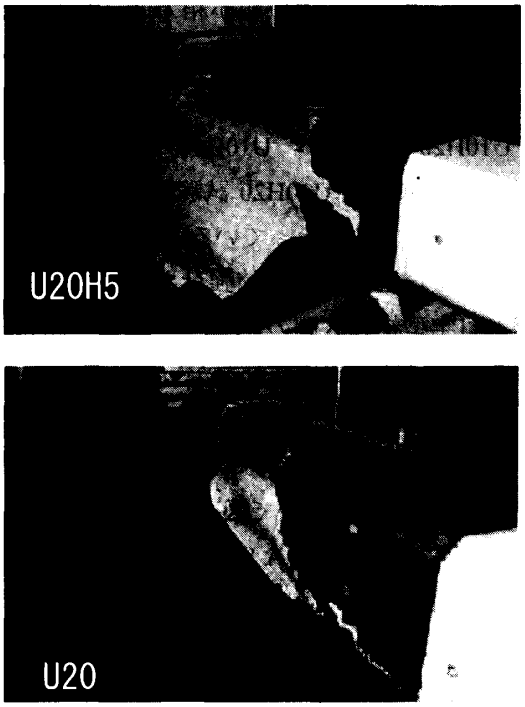
ＡＦＲＰシートのひずみは，補強区間の側面および上面にひずみゲージを貼付し，梁軸直角方向の値を計測した（**図－１**参照）。変位の測定は，試験体側面の引張鉄筋位置で行った。さらに，試験体中央の引張鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみについても計測を行った。

## 3. 試験結果

### 3.1 破壊状況

試験結果の一覧を**表－４**に示す。表中の試験体の耐力（Vmax）は，せん断力（Pmax/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字型補強のみを行った 3 試験体は，せん断区間上縁のかぶりコンクリートがＡＦＲＰシートと共に剥離する破壊形式を示した。

Ｕ字型補強と閉合補強を併用した試験体は，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－２**に示す。




**図－２　破壊状況**

### 3.2 荷重－変位関係

Ｕ字型補強のみを行った試験体の荷重－変位関係を**図－３**に示す。無補強のＮ試験体に比して，いずれの試験体も最大耐力が大きく増加していることが認められる。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，他の試験体と同様に変位 15mm 程度で急激に耐力が低下した。

Ｕ字型補強と部分閉合補強を併用した試験体の荷重－変位関係を**図－４**に示す。耐力 100kN/m のＵ字型補強に部分閉合補強を併用した 2 試験体は，U10 試験体に対する最大耐力の増加量が



NII-Electronic Library Service

比較的大きく，最大荷重以降も荷重を保持したまま変位が増加することが認められる。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。

耐力 200kN/m のU字型補強に閉合補強を併用した U20H5 試験体，および U20H20 試験体は，U字型補強のみの 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，増加量は比較的小さな値であった。さらに，最大耐力以降，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。

本試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 字型補強量が小さいと閉合補強シートの耐力および幅が相対的に大きくなり，この点も変形性能の改善に寄与していたものと推測される。

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 字型補強量および同一の閉合補強量において，閉合区間とU字型補強区間の比（Lo／Lu）が耐力に与える影響は特に認められなかった。

### 3.3 荷重－ＡＦＲＰシートひずみ関係

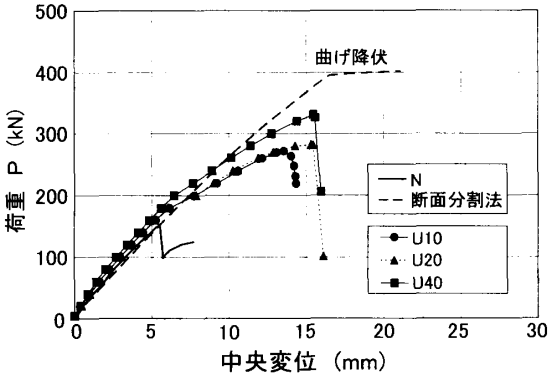
荷重－ＡＦＲＰシートひずみ関係の一例を U10H40 試験体について**図－５**に示す。

試験体側面中央のＡＦＲＰシートひずみは，斜めひびわれの発生以降，荷重の増加と共にほぼ線形に増加していることが認められる。

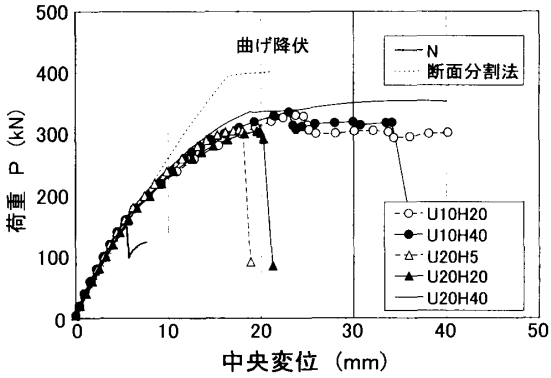
一方，試験体上面の閉合シートのひずみは，最大荷重近傍で急激に増加が認められ，最終的に１％を超える計測ひずみを得た後に破断にいたった。これは，前述の試験体上面において軸方向に割裂ひびわれが発生したことに対応しており，部分閉合補強の効果は U 字型補強の解放面の軸方向ひびわれを水平方向に拘束することで発揮されることを示していると考えられる。

## 4. 部分閉合補強の効果

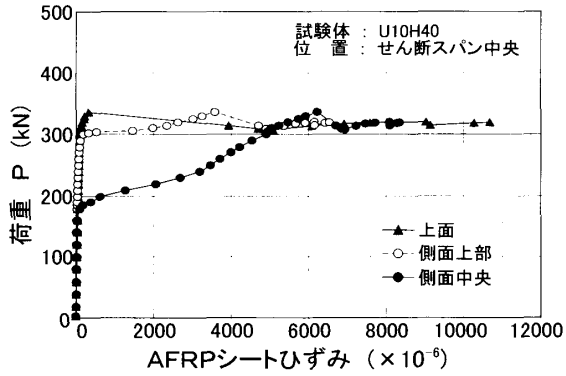
### 4.1 補強効率の算定




**図－３　荷重－変位関係（Ｕ字型補強）**




**図－４　荷重－変位関係（部分閉合併用）**




**図－５　荷重－ＡＦＲＰシートひずみ関係**

ＡＦＲＰシートの分担するせん断力の試験値と計算値および補強効率を**表－４**に示す。

シート分担力の試験値（Vaf1）は，各補強試験体の最大せん断力（Vmax）から無補強試験体の最大せん断力（Vcn）を一律に減じて算出した。この際，コンクリート強度（Fc）がせん断力に与える影響は，式(2)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。

シート分担力の計算値（Vaf2）は，式(3)に示



NII-Electronic Library Service

す土木学会指針 [5]を用いて算出した。この際,シート耐力は，設計値との比較を行うため規格値を使用し，式中のシートのせん断補強効率 K2 および部材係数 $\gamma_b$ は，1.0 として計算を行った。

補強効率は，上記の試験値を計算値で除した試験上の補強効率（K1），および式(3)の補強効率(K2)の 2 種を算出して比較検討を行った。既往の文献 [2)4)]のデータも同様の手順で補正および計算を行い，条件の統一を図った。

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d/\gamma_b \qquad \cdot\cdot\cdot(2)$$

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

$\beta_p = (100p_w)$，　ただし$\beta_p \le 1.5$

$f_{vc} = 0.2(f_c')^{1/3}$,ただし$f_c \le 75(\mathrm{N/mm^2})$

$b_w$＝腹部の幅,$d$＝有効高さ,$p_w$＝引張鉄筋比

$$V_{af2} = K_2 \cdot A_{af} \cdot f_{af}(\sin\theta + \cos\theta)z/\gamma_b \qquad \cdot\cdot\cdot(3)$$

$K_2 = 1.68 - 0.67R$　　ただし,$0.4 \le K_2 \le 0.8$

$R = (\rho_{af} \cdot E_{af})^{1/4}\left(\frac{f_{af}}{E_{af}}\right)^{2/3}\left(\frac{1}{f_{af}}\right)^{1/3}$ ただし,$0.4 \le R \le 0.8$

$K_2$: シートのせん断補強効率,

$A_{af}$: シートの断面積,　　$\rho_{af} = A_{af}/(b_w \cdot s_{af})$

$s_{af}$: シートの配置間隔,　　$\theta$: 補強角(90°)

$f_{af}$: シートの引張強度,　　$z = d/1.15$

$E_{af}$: シートの弾性係数,　　$\gamma_b$ :部材係数(1.0)

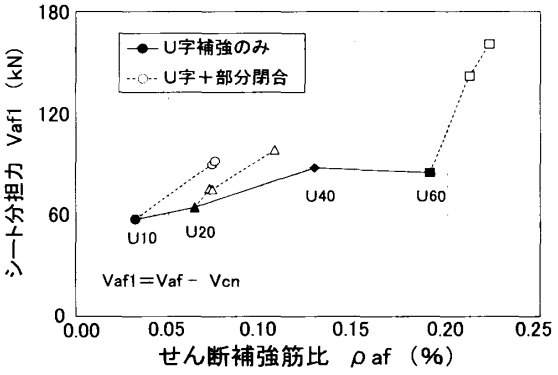
### 4.2ＡＦＲＰシートの分担力

ＡＦＲＰシートによるせん断補強筋比とシートの分担するせん断力の関係を**図－６**に示す。

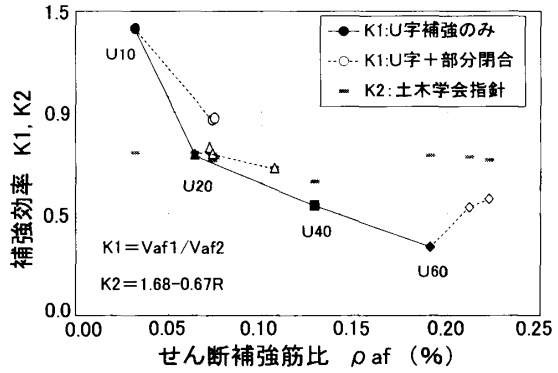
Ｕ字型補強のみの試験体に着目すると,本試験の範囲内では補強量の増加とともにシートが分担するせん断力の増加が認められる。しかしながら，既往の試験結果を含めると耐力 596kN/m のＡＦＲＰシートを使用した U60 試験体のせん断力は U40 試験体と大差なく，Ｕ字型補強のみでは補強効果に上限があることが示されている。

閉合補強を併用した場合，U10 試験体のシリーズでは基準となる U10 試験体のシートの分担するせん断力は 60kN 程度であるが，補強筋比で 0.0425%程度の部分閉合の付与により分担するせん断力は 90kN と 1.5 倍程度の値を示した。

一方，U20 試験体のシリーズに関しても閉合補強の効果によりシートの分担するせん断力の




**図－６　部分閉合補強の補強効果**




**図－７　部分閉合補強の補強効率**

増加が認められるが，補強筋比を 0.073%とした試験体の増加量は小さく，部分閉合補強により補強筋比を 0.107%に増加させた U20H40 試験体において U10H20 試験体および U10H40 試験体と同等のせん断力が得られる結果となった。

なお，Ｕ字型補強のみで同等の補強効果を示したものは U40 試験体であるが補強筋比は 0.129%であり，併用補強の U10H20 試験体の補強量 0.074%と比較すると 1.7 倍程度を必要とする結果となった。

U60 試験体に部分閉合補強を併用した場合は，特に大きなせん断力の増加を示しているが，これはむしろ補強量の増加により，U 字型補強の端部で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。

### 4.3ＡＦＲＰシートの補強効率

ＡＦＲＰシートによるせん断補強筋比とシートの補強効率の関係を**図－７**に示す。U 字型補



NII-Electronic Library Service

Japan Concrete Institute

強の試験体では，補強量の増加と共に補強効率は低下し，U60 試験体においては 0.34 程度にまで低下していることが認められる。

閉合補強を併用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字型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。不完全なU字型補強においては，かぶりコンクリートの破壊を抑制しＡＦＲＰシートの耐力を有効に利用するために部分閉合補強の併用が重要であることが示唆されている。

土木学会指針を用いた本試験の K2 は，0.66～0.80 の変動範囲となっている。シートのせん断補強筋比が大きな領域では，K1 との差異が危険側に大きくなっていが、これは式(3)が閉合補強を前提とした式であることによると判断される。同様に補強量の小さい U10 試験体についても差異が著しいが，これはシートの耐力として規格値を使用していることが一因であると推測される。さらに，式(3)が低補強量のシートの分担力を過小評価している可能性も示唆されている。

本試験の破壊形式は，部分閉合シートの破断，およびかぶりコンクリートの破壊であり特殊な破壊形式となっているが，せん断補強比 0.1%程度以下の範囲内では概ね一致，または安全側の差異となり，従来の設計手法の準用可能性が示唆されている。

しかしながら，実際の RC 構造物における補強鉄筋比やせん断剛性は様々に変動しており，包括的な算定を可能とするには至っていない。これらの点を含め，U字型と部分閉合併用補強工法の定式化および適用範囲の明確化を今後の課題としたい。

## 5. まとめ

アラミド繊維シートにより，部材の側面と底面への U 字型補強，および部分的に部材全周への閉合補強を併用した RC 梁の載荷試験行った。本試験により得られた知見を以下に示す。

(1) U字型補強を行った RC 梁は，せん断補強区間圧縮縁のかぶりコンクリートの破壊により終局に至る。

(2) U字型補強に部分閉合補強を併用した RC 梁は，主にせん断補強区間圧縮縁の閉合シートの破断により終局に至る。

(3) 部材を完全に閉合しないU字型補強においてもせん断補強効果を期待できる。

(4) 部分閉合補強は，U字型補強の解放面で発生する軸方向ひびわれを水平方向に拘束することで補強効果を発揮する。

**謝辞**

本研究の実施にあたり貴重なご助言を頂いた埼玉大学工学部睦好宏史教授ほか，関係諸氏に深く感謝いたします。

**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 rein- forced 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) 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

6) 土木学会編：コンクリート標準示方書-施工編，2002



NII-Electronic Library Service