

# 論文 界面にポリウレア樹脂を塗布されたCFRPストランドシート補強RCはりの曲げ挙動に関する実験的研究

高橋 義裕<sup>\*1</sup>・荒添 正棋<sup>\*2</sup>・小林 朗<sup>\*2</sup>・佐藤 靖彦<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究では、CFRP ストランドシートを曲げ補強材として用いた RC 梁に対し、U 字補強のみを施した供試体及びシートとコンクリートの間に柔軟性のあるポリウレア樹脂を塗布しさらに U 字補強を施した供試体に対し、静的曲げ試験を行いポリウレア樹脂及び U 字補強効果について実験的に検討した。その結果 U 字補強のみの場合、U 字補強本数の増加に伴い最大荷重は増加した。また、ポリウレア樹脂を塗布し U 字補強無し供試体は、ポリウレア樹脂を塗布せず U 字補強を施した供試体とほぼ同程度の補強効果があった。ポリウレア樹脂だけでなく U 字補強を施した供試体では U 字補強本数の増加に伴いシート破断まで耐力が向上した。

**キーワード:** CFRP ストランドシート, 曲げ補強, ポリウレア樹脂

## 1. はじめに

既設コンクリート構造物の曲げ補強工法として、連続繊維シート接着工法や CFRP プレート接着工法が近年普及している。連続繊維シート接着工法は、CFRP プレート接着工法に比べ付着性状に優れているが、作業時間が長くまた浮きや膨れといった施工不良や、現場含浸作業が必要なため繊維目付量を高くすることができず、多積層が必要で工期が長くなるといった問題もある。そこで近年、施工効率の向上を目的として、連続繊維ストランド 1 本ずつに樹脂を含浸・硬化させた CFRP 素線をすだれ状にシート化した CFRP ストランドシート(以下“S シート”と呼ぶ)が開発された<sup>1)</sup>。S シートはプレートと違い付着面積が広く炭素繊維シートと同等の高い接着性が得られ、さらに現場で含浸工程が不要なため施工効率が良く、工場で事前含浸硬化させているため品質が高いといった特徴がある。S シートは、従来の現場含浸タイプの連続繊維シートと同様な曲げ補強効果が得られることは実験的に示されている<sup>2),3)</sup>。しかし、実験供試体の曲げ耐力が S シートのコンクリートからの剥離により決まっていた。その剥離抑制を目的に、繊維シートとコンクリートとの間にエポキシ樹脂系の柔軟性のある樹脂を介することにより、コンクリートと繊維シートとの付着性能を向上させる研究も数多く見られる<sup>4)</sup>。しかし、エポキシ系樹脂の柔軟性ある樹脂の場合、温度依存性の指摘もあり<sup>5)</sup>、筆者らは温度依存性の小さいポリウレア樹脂を柔軟層として用い、はりの曲げ試験により曲げ性能を実験的に確認するとともに S シートのずれ防止及びコンクリートの割裂破壊防止を目的とした U 字補強を施し曲げ性能を確認した。

## 2. 実験概要

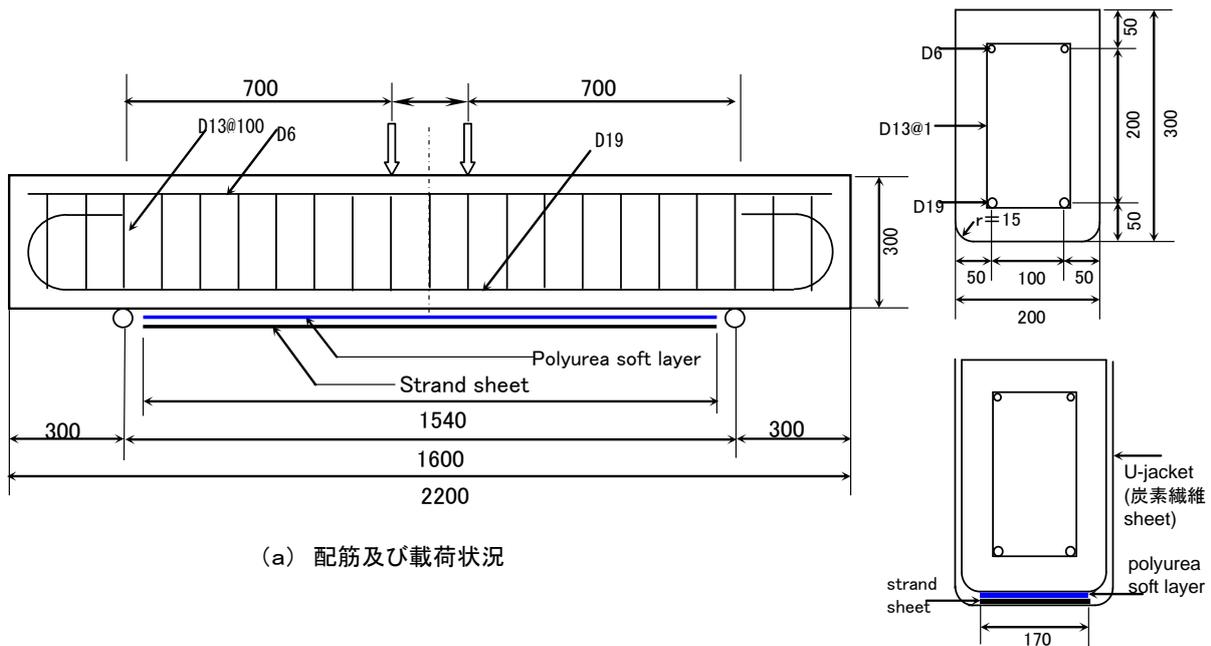
実験供試体は合計 11 体である。実験供試体の形状・寸法・配筋及び載荷状況等については図-1 に示す。主鉄筋として D19 を 2 本、せん断補強鉄筋として D13 を 100mm ピッチで配置した。下面の貼付 S シート層数は全て一層である。S シート(目付量 600g)は支点区間に渡り貼付した。ただし、支点部手前 30mm で貼り止め、支点ではコンクリート表面を直接支持している。U 字補強としては炭素繊維シート(目付量 600g)を使用し、下面 S シート貼付後、幅 50mm の 50mm 間隔で、腹部全高に貼り付けた。U 字補強量(U 字の本数)は、0, 2, 6, 12, 16 と変化させた。供試体 No.1 は、補強が施されていない供試体で「基準供試体」である。供試体 No.2 は、S シート 1 層のみ、供試体 No.3 は、S シート 1 層と 2 本の U 字補強、供試体 No.4 は、U 字補強が 6 本に、供試体 No.5 は U 字補強が 12 本に、供試体 No.6 は U 字補強が 16 本となる。供試体 No.7 から供試体 No.11 までは、それぞれ供試体 No.2 から供試体 No.6 までの供試体のコンクリートと S シートとの界面にポリウレア樹脂を塗布した供試体である。

具体的な S シート等の貼付の施行手順は以下の通りである。RC はりの打設脱型養生後、①下地処理、②ウレタンプライマー塗布、③ポリウレアパテ樹脂塗布、④研磨、⑤S シート貼付、⑥プライマー塗布し最後に U 字補強用の⑦炭素繊維シート貼付となる。ポリウレア樹脂無しの場合は②、③と④の工程が省略される。ポリウレアパテ樹脂の塗布量は  $1\text{kg}/\text{m}^2$ 、S シートの貼付のエポキシ系パテ状樹脂の塗布量は  $3.0\text{kg}/\text{m}^2$ 、U 字補強用炭素繊維

\*1 北海学園大学 工学部社会環境工学科教授 工博 (正会員)

\*2 新日鉄住金マテリアルズ株式会社 コンポジット社 (正会員)

\*3 北海道大学 大学院工学研究院准教授 博士(工学) (正会員)



(a) 配筋及び荷重状況

(b) 断面寸法, U字補強及びポリウレア樹脂層

図-1 実験供試体

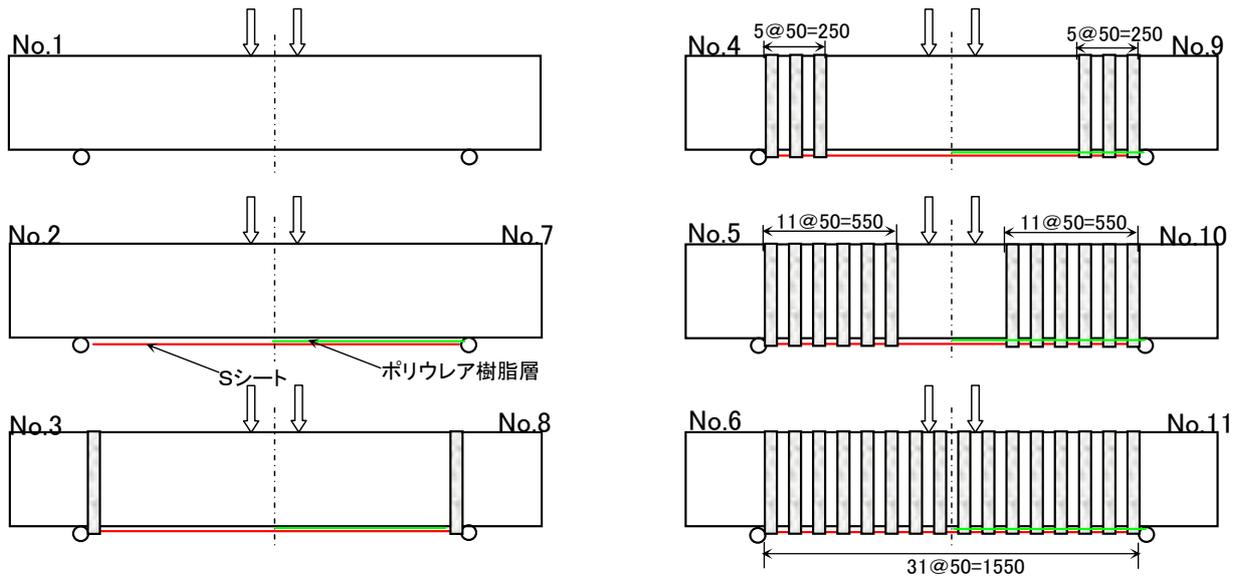


図-2 各供試体のU字補強配置状況

シート貼付のエポキシ樹脂の塗布量は  $1.2\text{kg}/\text{m}^2$  である。それぞれの工程において十分な脱泡作業を行った。供試体のU字補強状況を図-2に示す。全ての供試体支点間長は1600mmであり、せん断スパン比は2.8である。荷重点間隔は200mmである。図-2の左半分はポリウレア樹脂層無し供試体 No.2 から No.6 を、右半分はポリウレア樹脂層有り供試体 No.7 から No.11 をそれぞれ示す。

コンクリートは、水セメント比45%、細骨材率38%、早強ポルトランドセメント、川砂及び川砂利を使用した。

測定は、荷重載荷点での変位、主鉄筋及びSシートのひずみである。下面のSシートには、スパン中央より100mmピッチで両支点までゲージ長5mmの一軸歪ゲ-

ジを貼り付けた。供試体一覧を表-1に、使用材料の力学特性を表-2に示す。表-1中の降伏荷重は等曲げ区間の主鉄筋ひずみの測定値が最初に降伏ひずみに達した荷重である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊状況および最大荷重

無補強供試体 No.1 は、主鉄筋降伏後に曲げ圧縮破壊した。写真-1に主な供試体の破壊状況を示す。Sシートのみで補強した供試体 No.2 はコンクリート表層のモルタルがシートに薄く付着しせん断区間で剥離した時点で荷重が無補強供試体 No.1 の降伏荷重程度まで急落し、そ

表-1 供試体一覧

供試体No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11
Sシート層数	無し	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U字補強数	無し	無し	2	6	12	16	無し	2	6	12	16
ポリウレア層	無し						有り				
$f_c$ (Mpa)	43.4	42.7	43.5	41.7	42.0	47.9	45.9	47.6	41.9	43.8	46.8
$P_y$ (kN)	155	195	202	200	201	222	196	201	210	205	201
$P_{max}$ (kN)	161.5	236.3	218.7	229.5	267.7	265.8	255.0	277.5	274.6	302.0	304.9
破壊形態	曲げ	剥離	剥離	剥離	剥離と部分破断	剥離と部分破断	割裂	割裂	割裂	破断	破断

$f_c$ :コンクリート圧縮強度  $P_y$ :降伏荷重  $P_{max}$ :最大荷重

表-2 使用材料の特性値

ストランドシート (HT-600)	目付量	600g/m <sup>2</sup>	
	設計厚さ	0.333mm	
	弾性率	256GPa	
	引張強度	4093MPa	
	破断歪	16,000μ	
炭素繊維シート (C1-60)	目付量	600g/m <sup>2</sup>	
	設計厚さ	0.333mm	
	弾性率	251GPa	
	引張強度	4190MPa	
	破断歪	16,700μ	
鉄筋	D19 (SD345)	降伏強度	380MPa
		引張強度	538MPa
	D13 (SD345)	降伏強度	393MPa
		引張強度	595MPa
ポリウレア樹脂	圧縮弾性率	66MPa	
	伸び率	452%	

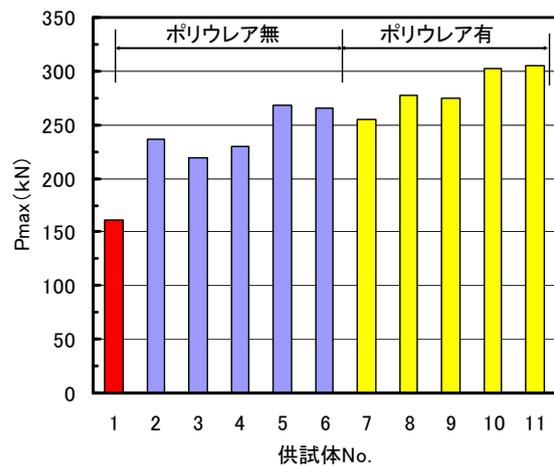


図-3 最大荷重と各供試体



(a) 供試体No.2



(b) 供試体No.4



(c) 供試体No.5



(d) 供試体No.7



(e) 供試体No.9

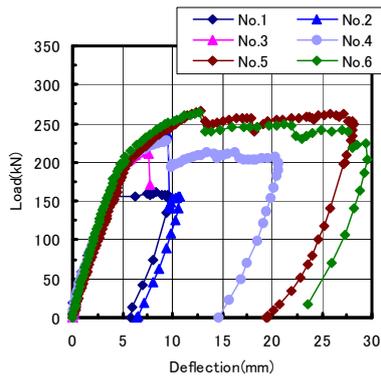


(f) 供試体No.10

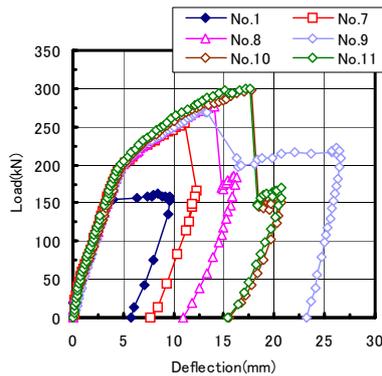
写真-1 破壊状況

の後、変形が大きくなり圧縮縁コンクリートが破壊した。一方、ポリウレア樹脂を有する供試体 No.7 はせん断スパン内でかぶりコンクリートがSシート端部から主鉄筋に

沿って破壊（以下“割裂破壊”と呼ぶ）した。U字補強2本の場合、ポリウレア無し供試体 No.3 ではU字補強内側のせん断区間内でSシートが剥離し、供試体



(a)ポリウレタ樹脂層無し



(b)ポリウレタ樹脂層有り

図-4 荷重と載荷点のたわみ関係

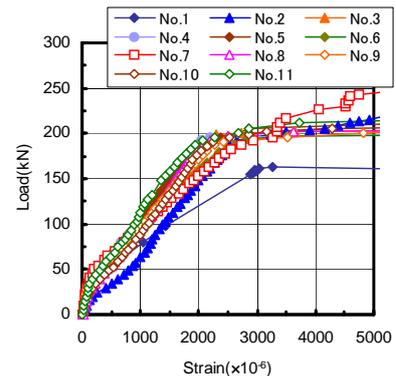


図-5 荷重とスパン中央の鉄筋ひずみ関係

No.2と同様に荷重が無補強供試体 No.1 の降伏荷重程度まで急落し、変形がおおくなり圧縮縁のコンクリートが破壊した。しかし、ポリウレタ有り供試体 No.8 では、U字補強拘束端部から若干のSシートの剥離を伴い載荷点近傍で割裂破壊した。U字補強6本の場合、ポリウレタ無し供試体 No.4 ではU字補強内側のせん断区間内でのSシートの剥離、ポリウレタ有り供試体 No.9 では、U字補強拘束端部から若干のSシートの剥離を伴い載荷点近傍で割裂破壊している。U字補強12本の場合、ポリウレタ無し供試体 No.5 ではU字補強内側区間内でのSシートの一部破断、ポリウレタ有り供試体 No.10 では、U字補強拘束端部でのSシートの破断および曲げ区間での割裂であった。U字補強16本の場合、ポリウレタ無し供試体 No.6 ではSシートの横ずれ剥離と載荷点直下付近でのSシートの一部破断、ポリウレタ有り供試体 No.11 では、載荷点直下のSシートの破断であった。U字補強及びポリウレタ樹脂塗布によりSシートの剥離又はかぶりコンクリートの割裂は制御できた。

各供試体の最大荷重を図-3に示す。同図は又U字補強の増分関係をも示している。ポリウレタ樹脂層を有しない場合、最大荷重はU字補強本数が増加すると増加傾向を示す。しかし、U字補強本数が12本以上になると破壊形態が剥離と部分破断が同時に起こるためU字補強による違いは殆ど見られない。ポリウレタ樹脂層を有する場合は、破壊形態が主鉄筋に沿うかぶりコンクリートの割裂破壊又はSシートの破断となるためそれほど大きな最大荷重の増加は見られない。これは、ポリウレタ樹脂層を塗布した時点で最大荷重がかなり増加し、U字補強による増加余裕がかなり少なくなっているためと思われる。同図よりポリウレタ樹脂層を有する供試体の最大荷重は、ポリウレタ樹脂層無し供試体の最大荷重をいずれも上回っていた。

### 3.2 たわみ性状

荷重と載荷点直下のたわみ関係を図-4に示す。図-4(a)は、ポリウレタ樹脂層のない供試体、図-4(b)はポリウレタ樹脂層を有する供試体である。両図中には、無補強の基準供試体の荷重-たわみ関係も示す。図-4(a)のポリウレタ樹脂層を有しない供試体の場合、U字補強本数がある程度あると最大荷重到達後かなり粘りのある挙動を示している。一方、図-4(b)のポリウレタ樹脂層を有する供試体の場合、降伏荷重後の荷重増分は大きい。最大荷重到達後その荷重は、一挙に無補強供試体 No.1 の降伏荷重近傍まで急落している。これは、ポリウレタ樹脂層を有する場合その破壊形態がかぶりコンクリートの割裂又はSシートの破断となっているためである。

### 3.3 鉄筋及びSシートのひずみ性状

荷重と支点間中央での鉄筋ひずみの関係を図-5に示す。ただし、ここでは鉄筋のひずみは5000 $\mu$ で打ち切っている。図中に基準供試体 No.1 の荷重-鉄筋ひずみ関係も示す。同図より、ひび割れ発生後、鉄筋ひずみはほぼ線形に増加し、200kN近傍で鉄筋は降伏しており、ポリウレタ樹脂の有無による鉄筋ひずみ挙動に大きな違いは見られなかった。

荷重とスパン中央でのSシートひずみの関係を図-6に示す。各図には平面保持を仮定した計算Sシートの荷重-ひずみ関係をも“Cal”として示した。図は各U字補強の本数ごとにポリウレタ樹脂層の有無で示した。図-6(a)はSシートのみでU字補強なし、図-6(b)はU字補強2本、図-6(c)はU字補強6本、図-6(d)はU字補強12本、図-6(e)はU字補強16本である。U字補強無しの場合、図-6(a)よりポリウレタ樹脂層の有無によるSシートひずみへの影響は殆ど見られず、Sシートの破断ひずみに達していない。これは、終局時にはせん断スパン内でのSシートの剥離又はかぶりコンクリートの割

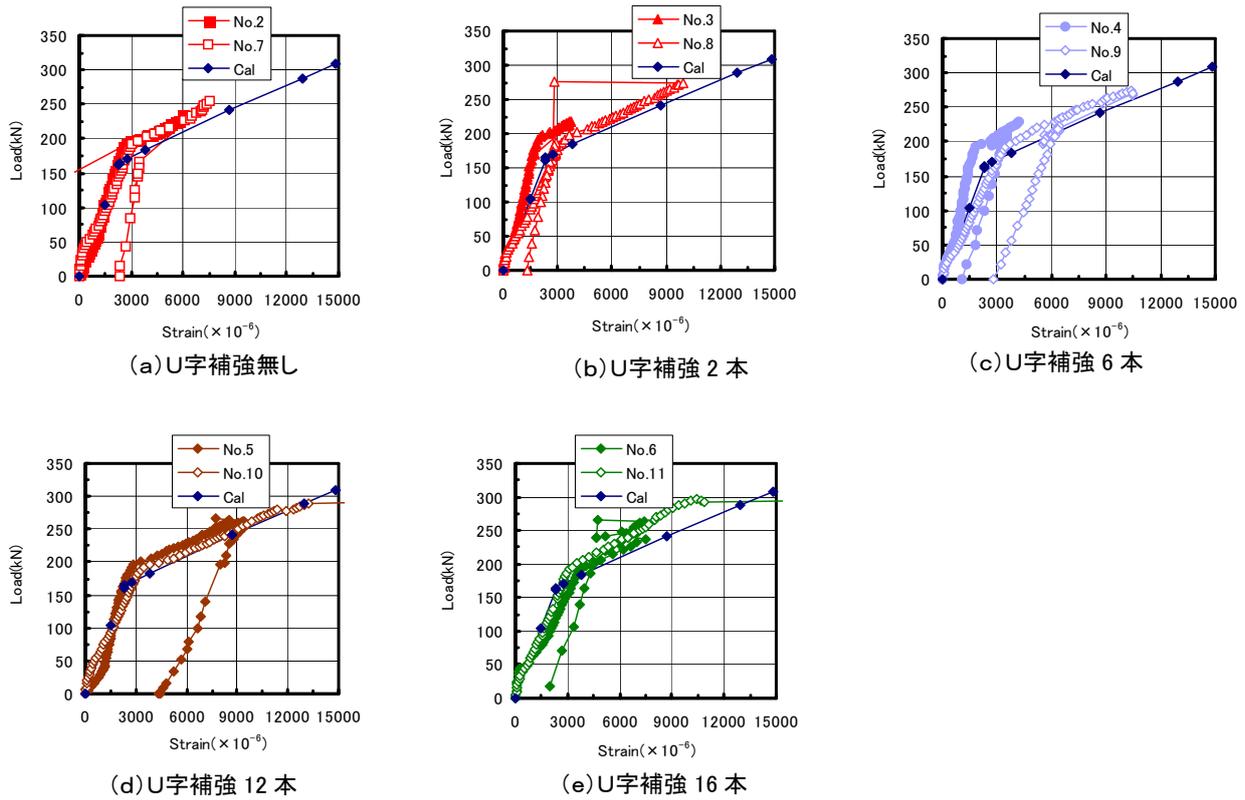


図-6 荷重とスパン中央でのSシートひずみ関係

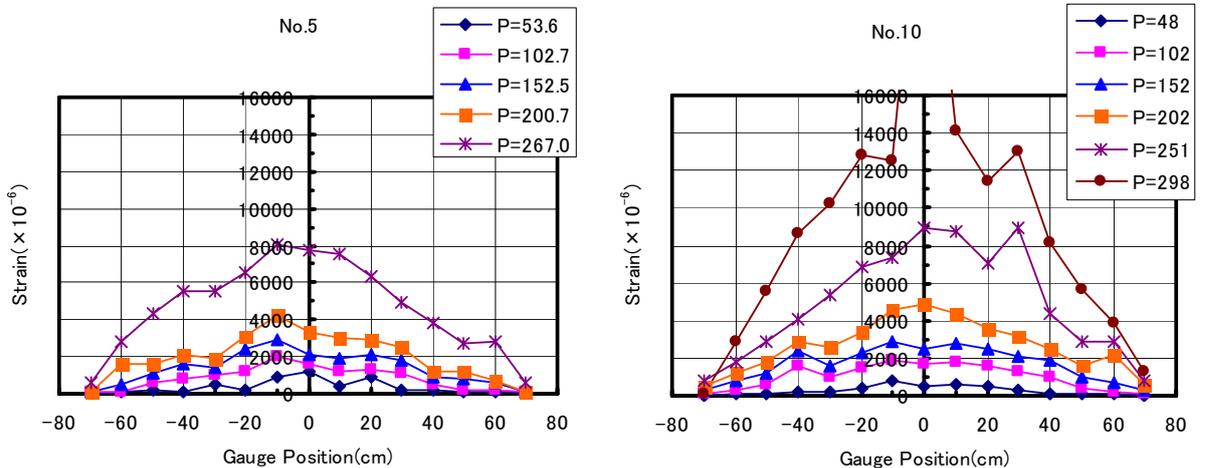


図-7 Sシート軸方向ひずみ分布

裂のためである。ポリウレア樹脂層無し供試体 No.2, No.3, No.4 は降伏荷重近傍まではほぼ同じ値を示している。また、ポリウレア樹脂層あり供試体 No.8, No.9, No.10, No.11 も降伏荷重近傍まではほぼ同じ値を示している。図-6(b)と(c)で供試体 No.3 と No.4 のひずみ曲線が計算値のひずみ曲線と比べ 60kN 近傍から若干左にシフトして計測されている。これはひずみゲージの検長が 5mm

と短く、計測されるひずみが局所的なため供試体 No.3, 供試体 No.4 の計測ひずみが骨材等の位置により若干低めに計測された可能性がある。また、ポリウレア樹脂層有り供試体 No.8 および No.9 では最大荷重時には、10,000  $\mu$  前後の値に到達しているが、ポリウレア樹脂層無し供試体 No.3 および No.4 では、そのひずみは 4,500  $\mu$  前後の値であった。また、U字補強が 12 本の図-6(d)と 16 本

の図-6(e)より、ある程度 U 字補強本数があると降伏荷重近傍まではポリウレア樹脂層の有無による S シートひずみ挙動への影響は殆ど見られず、両者はほぼ同様の挙動を示した。ポリウレア樹脂層有り供試体では降伏荷重到達後は、その S シートひずみは、ほぼ線形に増加しシートの破断ひずみに達した。一方、ポリウレア樹脂層無し供試体では、そのひずみは 9,000  $\mu$  前後の値であり、また S シートの破断ひずみに達していなかった。また、計算値はほぼ実験値の挙動を示した。

図-7 に U 字補強 12 本のはり軸方向の S シートのひずみ分布を示す。図-7(a) は供試体 No.5 のポリウレア樹脂層無し、図-7(b) は供試体 No.10 のポリウレア樹脂層有り供試体である。両図とも主鉄筋降伏前（ほぼ 200kN 近傍まで）は、ひずみ分布はほぼ左右対称に S シート端部から線形に増加している。図-7(b)の中央で突き抜けているのは、最大荷重で S シートが破断したためである。

#### 4. まとめ

本研究は、S シート 1 層をコンクリート下面に貼付した供試体に対し、S シートの剥離防止を目的とした U 字補強効果及び S シートとコンクリートとの界面に S シートの剥離防止としてポリウレア樹脂層を塗布し、さらにかぶりコンクリートの割裂破壊防止を目的とした U 字補強を施した供試体を作製し、静的曲げ試験を行った。パラメータはポリウレア樹脂層の有無と U 字補強本数である。以上の供試体に対し静的二点対称荷重を作用させ、破壊性状、最大荷重、載荷点のたわみ、鉄筋及び S シートのひずみについて実験的に検討したものである。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

(1) 終局状態は、ポリウレア樹脂層無しで U 字補強本数が 6 本までは、U 字補強無し区間での S シートの剥離、12 本と 16 本の場合は U 字補強なし区間での S シートの部分剥離と一部破断の共存であった。しかし、ポリウレア樹脂層有りでの終局状態は、U 字補強本数が 6 本までは、せん断スパン内でのコンクリートの割裂破壊、12 本と 16 本の場合は S シート載荷点近傍での破断であった。U 字補強およびポリウレア樹脂層塗布による剥離防止及び割裂防止効果は確認できた。

(2) ポリウレア樹脂層無し供試体において U 字補強本数の増加に伴い S シートのずれ防止による剥離抑制効果により最大荷重は増加傾向が見られた。ポリウレア樹脂を塗布し U 字補強無し供試体は、剥離が防止されポリウレア樹脂を塗布せず U 字補強を施した供試体とほぼ同程度の補強効果があった。また、ポリウレア樹脂層だけの場合、コンクリートの割裂破壊となったが、ポリウレア樹脂層だけでなく U 字補強を施した供試体では U 字補強本数の増加に伴い割裂破壊が防止され破壊形式が S シ

ートの破断に移行し最大耐力が増加した。

(3) 荷重-たわみ関係より、ポリウレア樹脂層無しで U 字補強本数が 6 本、12 本、16 本の場合、かなり粘りのあるたわみ挙動が見られたが、ポリウレア樹脂層を有する供試体の場合、最大荷重に到達後急激に無補強供試体の荷重近くまで低下し、殆ど粘りのある挙動は見られなかった。

(4) 全ての供試体において鉄筋ひずみはひび割れ後ほぼ線形に降伏荷重近傍まで増加した。また、ポリウレア樹脂層の有無及び U 字補強本数の違いによる鉄筋ひずみ挙動の差異は殆ど観測されなかった。

(5) S シートの荷重-ひずみ関係より、U 字補強無しの場合、ポリウレア樹脂層の有無の違いによる S シートのひずみ分布の違いは殆ど見られなかった。しかし、U 字補強量が多くポリウレア樹脂層を有する場合 S シートは破断ひずみに達した。ポリウレア樹脂層なし供試体の S シートひずみは 9,000  $\mu$  前後で破断ひずみに達していない。計算値はほぼ実験値と一致した。

#### 謝 辞

本実験を進めるに当たっては、北海学園大学工学部社会環境工学科の学生の協力を得た。ここに付記し謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 小林 朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕, 立石晶洋 : FRP スtrand シートの材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1561-1566, 2008.7
- 2) Kobayashi, A., Tateishi, A., Sato, Y. and Takahashi, Y. : Study on Basic Characteristic of FRP Strand Sheets and Its Flexural Strengthening Effect for RC Beams, CD-ROM Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on FRPRCS Sydney, Australia, July, 2009
- 3) Takahashi, Y., Sato, Y. and Kobayashi, A. : Study on Flexural Capacity of RC Beams Reinforced with CFRP Sheet, CFRP Plate and CFRP Strand Sheet, CD-ROM Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on FRPRCS Sydney, Australia, July, 2009
- 4) 前田敏也, 小牧秀之, 坪内賢太郎, 村上かおり : 緩衝材を用いた炭素繊維シート接着工法の補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.817-822, 2001.6
- 5) 三井雅一, 福澤公夫, 斉藤誠, 船川勲 : 緩衝材を用いた FRP シート・コンクリート間のせん断付着特性の温度依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.351-356, 2004.7