

論文 帯状炭素繊維シートで補強した高架橋柱の水平抵抗性能に関する実験的研究

栂山 健二^{*1}・荒木 秀夫^{*2}・中田 昌典^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨: 地震時に脆性的なせん断破壊を起こす危険性の高い既存の鉄筋コンクリート高架橋柱に関して、その水平抵抗性能を向上させ、かつ、地震後に柱の損傷状況を目視で確認できるよう、炭素繊維補強材を帯状に巻き付けた耐震補強法の有効性を実験的に検討した。炭素繊維シートまたは炭素繊維組紐によって帯状に補強した場合も、炭素繊維シート全面巻きの場合と同等の靱性能改善効果が得られることを検証した。

キーワード: 炭素繊維, 耐震補強, 高架橋柱, 帯状

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の耐震性能を向上させるためには、一般的に構造物を支える柱の性能改善が最も重要である。これまでに、RC柱の耐震補強に関して多数の研究が実施されており、特に炭素繊維やアラミド繊維等の連続繊維を用いた補強技術の進展は目覚ましく¹⁾、実施工において主流となりつつある。鉄道の高架橋柱についても、連続繊維による耐震補強の設計・施工指針が定められ^{2,3)}、既に実用に供されている。連続繊維によって柱のせん断耐力を上げ、靱性能改善を図る場合、現状では、柱全面をシートで巻き立てる工法が一般的であるが、コンクリート表面が見えないために、地震後に柱内部の損傷を目視にて評価できない難点がある。そこで本研究では、高架橋柱を対象に、炭素繊維をせん断補強材として帯状に間隔を空けて巻く方法を提案し、その補強効果を実験的に検証する。補強材には既に多用されている炭素繊維シートに加え、炭素繊維を編んだ組紐を使用する。炭素繊維の組紐は従来のシートに比較して強度と剛性では劣るものの、延伸性に優れており、補強材として活用することで靱性能の向上が期待される。

2. 実験方法

2.1 試験体概要

実験の対象とする試験体は高架橋柱を模した断面300×300mmのRC柱で、反力床に固定するためのスタブが下部に付属する。試験体の形状および配筋を図-1に示す。補強作業のために柱の角は面取りしてあり、無補強時にせん断破壊が先行するよう配慮した配筋である。同形状の試験体を4体作製して、1体は無補強で、残り3体は図-2に示す補強を施して載荷実験を実施する。4体の試験体に関する仕様を表-1にまとめる。

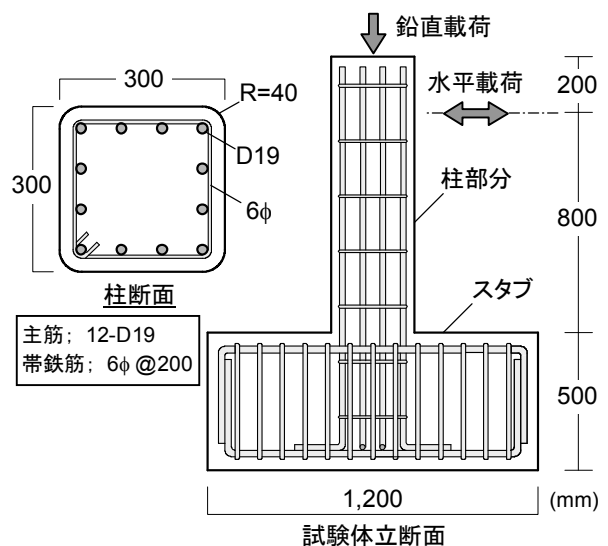


図-1 試験体の形状と配筋詳細

*1 芝浦工業大学 工学部建築工学科助教授 博(工) (正会員)

*2 広島大学 大学院工学研究科社会環境システム専攻助教授 工博 (正会員)

*3 広成建設(株) 技術部長

*4 広島大学 大学院工学研究科社会環境システム専攻教授 工博 (正会員)

同表中の設計塑性率を目標値として、全面補強と帯状補強では文献²⁾を、組紐補強では素材の剛性を考慮して文献³⁾を準用し補強量を算定した。

2.2 使用材料

使用材料の特性を表-2に示す。コンクリートは目標強度 27N/mm^2 、スランプ値 8cm 、空気量 4.5% で配合した。

表-1 試験体の仕様一覧

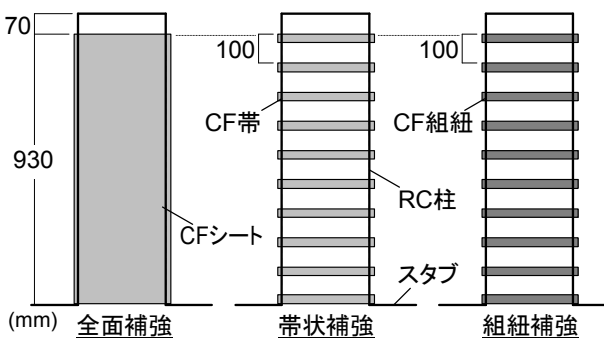
名称	補強材料・巻き層数	破壊モード	設計塑性率
無補強	なし	せん断	1以下
全面補強	CFシート(W=900)× [2層($\rho=400$)+2層($\rho=300$)]	曲げ	10
帯状補強	CF帯(W=30, t=1.5)×5層 巻き間隔:100mm	曲げ	10
組紐補強	CF組紐(W=30, t=3)×5層 巻き間隔:100mm	曲げ	8

CF:炭素繊維, W:幅(mm), t:厚さ(mm), ρ :目付量(g/m^2)

※ CFは含浸樹脂にて接着, 定着部は重ね継手

表-2 材料特性の一覧

コンクリート[実験実施時] (N/mm ²)				
試験体	無補強	全面補強	帯状補強	組紐補強
圧縮強度	28.4	28.8	29.5	28.5
引張強度	2.8	2.7	2.8	2.4
鉄筋 (N/mm ²)				
種類	降伏強度	最大強度	弾性係数	
D19	339	528	1.87×10^5	
6 ϕ	617	713	2.06×10^5	
CF[炭素繊維(含浸樹脂を含む)] (N/mm ²)				
種類	引張強度	引張弾性率	限界ひずみ(%)	
CFシート	3,804	2.39×10^5	1.46	
CF帯				
CF組紐	2,248	1.06×10^5	2.31	



CFシート : 炭素繊維シート
CF帯 : 炭素繊維シートを帯状に加工
CF組紐 : 炭素繊維を編んだ組紐

図-2 試験体の補強状況

炭素繊維の特性において、組紐はシートおよび帯に比べ引張強度・引張弾性率は下回るが、破断時の限界ひずみは約1.6倍の能力を持つ。

2.3 载荷・計測方法

試験体はスタブをPC鋼棒にて反力床に固定し、頂部に圧縮応力度 1N/mm^2 に相当する一定軸力を加え、柱高さ 800mm の位置で水平方向に正負交番繰返し载荷を行った。図-3に载荷装置の概要を示す。水平载荷では、同図中の制御用変位計の計測値をモニターしつつ、同位置における変形角 $R=1/800$ のサイクルから始めて、柱脚部の最外縁主筋が引張降伏するまではサイクルの目標変形角を倍増させた。主筋が引張降伏すると、その降伏変位 δ_V を基準として、その整数倍を目標変位として载荷し、 $10\delta_V$ までは同一の水平変位で3回ずつ、それ以降は1回ずつの繰返しとしている。主筋の引張降伏は、载荷中に柱脚部最外縁の主筋に貼付したひずみゲージの計測値をモニターすることで見極めた。

载荷中の計測方法として、荷重はジャッキに取付けたロードセルにより検出し、制御用に加えて設置した変位計により柱各所の水平変位と鉛直変位を測定した。また、柱の主筋、帯鉄筋および炭素繊維補強材の表面にひずみゲージを貼付し、ひずみデータを計測している。

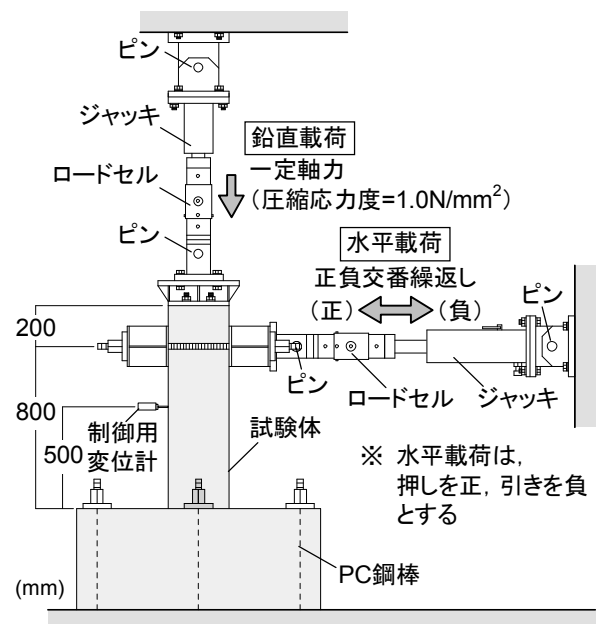
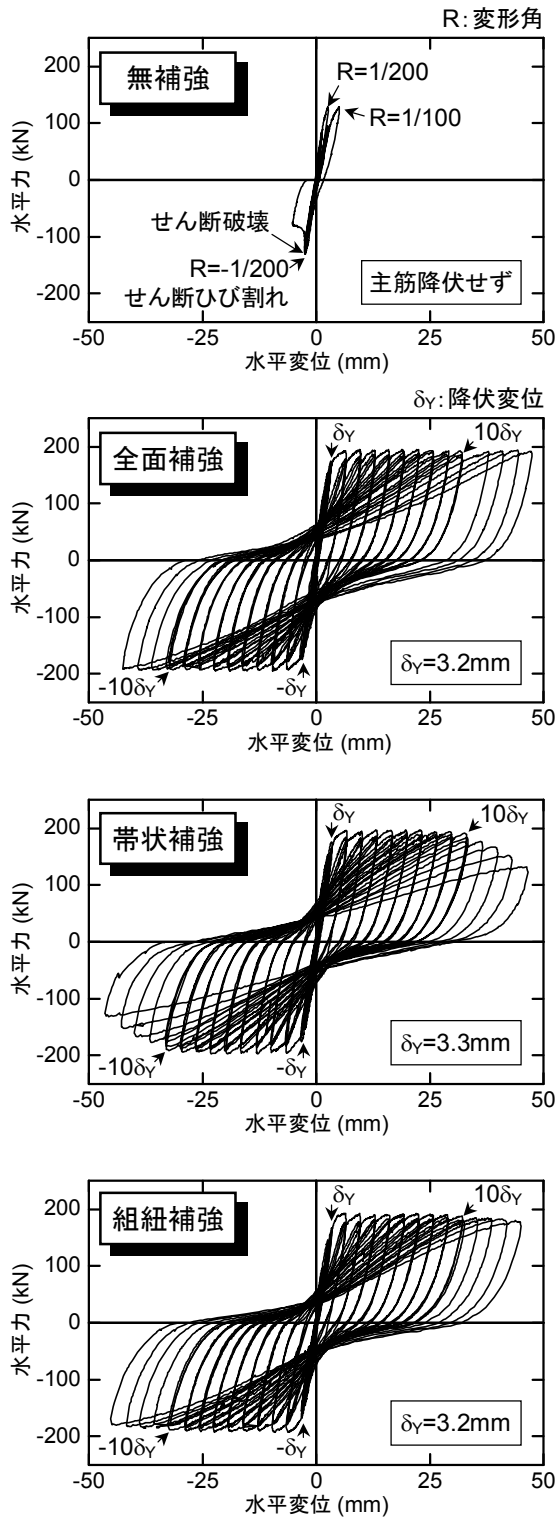


図-3 载荷装置の概要

3. 実験結果

3.1 履歴関係と損傷性状

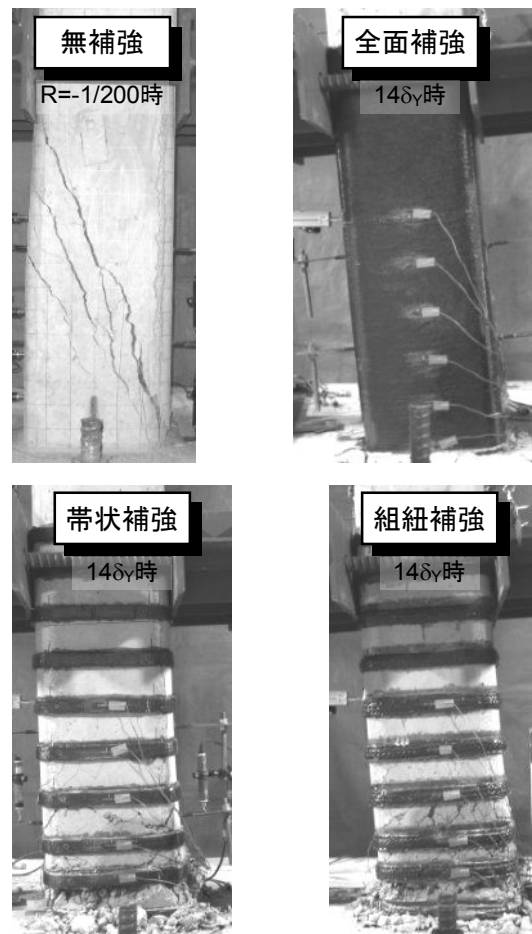
各試験体の水平力－水平変位履歴曲線を図－4に示す。同図の水平力には水平ジャッキの荷重に加え、鉛直ジャッキの傾斜による水平成分とP-△効果による付加曲げの影響も考慮している。



図－4 水平力－水平変位履歴曲線

水平変位は制御用変位計の計測値である。無補強試験体では $R=-1/200$ の1サイクル目にせん断ひび割れが現れ、 $R=-1/100$ を目指す途中で大きく開いて耐力低下を起し、せん断破壊した。補強試験体はいずれも $10\delta_y$ まで顕著な耐力低下を起すことなく安定した履歴を描いた。

各試験体の損傷性状を図－5に示す。無補強では、せん断ひび割れを起こした $R=-1/200$ 時、他は $14\delta_y$ 時の状況である。全面補強は最下部のひび割れ幅が大きくなり、帯状補強と組紐補強では脚部から3～4段目の補強材までの区間が激しく損傷を受けていることが同図から判る。なお、図からは判別しにくい、それらの試験体では柱中間部にも斜めひび割れ等の損傷が発生していることを把握した。補強繊維の破断や定着部の剥がれは起きていない。帯状に補強することで、脆性的なせん断破壊を防止し、かつ、柱の損傷状況を目視で評価できることを確認した。



図－5 終局時の損傷性状

3.2 主筋ひずみの性状

柱脚部最外縁における主筋の引張ひずみの進展状況を水平変位との関係として図-6に示す。以降、ひずみの値は伸びを正とする。図中の ϵ_Y は材料試験から得た主筋の降伏ひずみである。補強試験体では、降伏点と見なした前後の履歴を描かせており、いずれも降伏変位 $\delta_Y = 3.2 \sim 3.3\text{mm}$ 近傍でひずみが顕著に伸びていることが判る。一方、無補強ではひずみ履歴の包絡線を表しているが、実験終了時まで降伏していない。

3.3 水平耐力

実験から得られた試験体の水平耐力を算定値と比較して表-3に示す。算定値の曲げ終局時水平力(cV_U)はファイバーモデルによる断面解析から求め、せん断耐力(cV_{yd})は文献²⁾に従い計算した。無補強では cV_{yd} 近傍でせん断破壊したことが確認できる。補強試験体では、いずれも最大耐力は cV_U の1.1倍程度で同様の値となり、また、 $10\delta_Y$ 時の耐力は降伏点(δ_Y 時)耐力以上を維持している。最大耐力を無補強の値で除して求めた補強による耐力上昇率は約1.5で等しい。

3.4 補強試験体の変形状

補強試験体について、柱高さ方向に関する水平変位の分布を図-7に示す。いずれも同様の傾向を示しており、 $2\delta_Y$ までは上部ほど傾く曲げ形の変形分布であるが、 $4\delta_Y$ 以降で脚部の変位が大きくなり、 $6\delta_Y$ では上部ほど傾斜が緩慢となった。曲げ降伏後に下部に損傷が集中し、脚部で水平方向のずれを起こしたことが確認できる。

4. 考察

4.1 履歴性状とエネルギー吸収能力の比較

水平力-水平変位の履歴包絡線を比較して図-8に示す。せん断破壊した無補強に対し、その他は補強方法に関わらず、いずれも $10\delta_Y$ まで類似した曲線を示しており、带状補強、組紐補強ともに全面補強と同レベルの靱性能を有していることが判る。ただし、 $10\delta_Y$ 以降は带状補強で顕著な耐力低下が起こっており、脚部に集中した損傷が原因と考えられる(図-5参照)。

表-3 水平耐力および算定値との比較

名称	水平耐力実験値(kN)			実験値/算定値	
	$E V_Y$	$E V_U$	$E V_{10Y}$	$E V_U / c V_U$	$E V_U / c V_{yd}$
無補強	—	131	—	0.75	1.09
全面補強	174	195	192	1.12	1.63
带状補強	176	198	182	1.13	1.65
組紐補強	166	193	189	1.11	1.61

水平耐力実験値; $E V_Y$: δ_Y 時, $E V_U$:最大値, $E V_{10Y}$: $10\delta_Y$ 時
 曲げ終局時水平力算定値; $c V_U = 174\text{kN}$
 せん断耐力算定値; $c V_{yd} = 120\text{kN}$

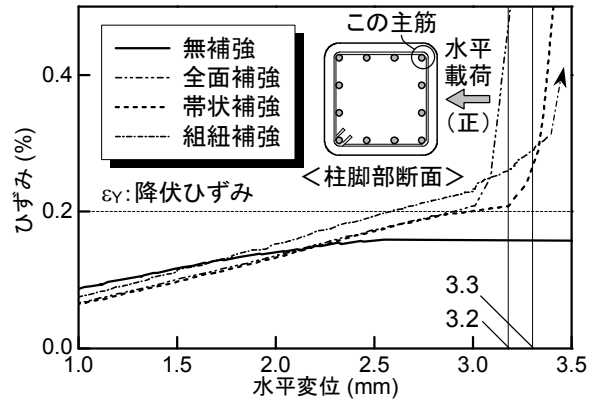


図-6 主筋の降伏状況

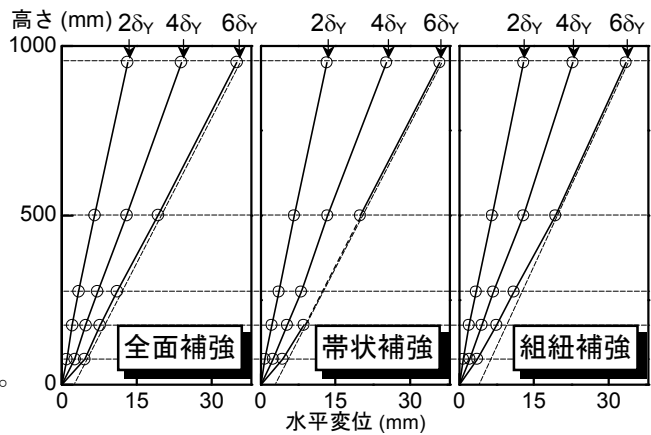


図-7 水平変位分布性状の推移

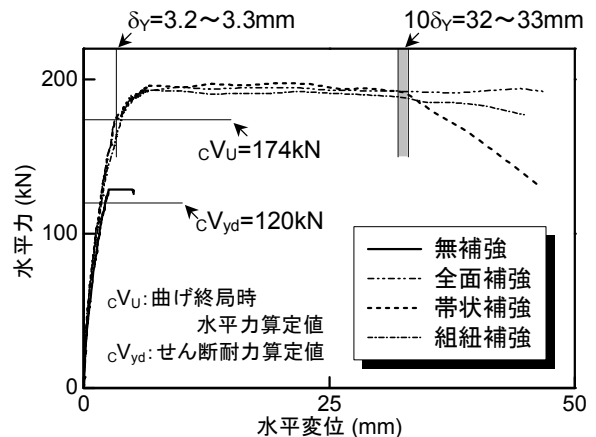


図-8 履歴包絡線の比較

履歴によるエネルギー吸収能力を比較するために、各サイクルの履歴曲線毎に等価粘性減衰定数を算出した。その値を水平変位との関係として図-9に示す。降伏点前は無補強を含め10%以下で同様の性状を示し、エネルギー吸収能力が乏しいことが判る。降伏点以降について、補強試験体ではいずれも水平変位に関わらず20%程度の値で安定して推移している。このことから、3体は補強方法に関わらず同様のエネルギー吸収能力を持つと判断できる。

4.2 鉛直変位の進展状況

履歴曲線の各頂点に達した際の試験体の鉛直変位をその時の水平変位との関係として図-10に示す。この鉛直変位は柱の高さ430mm位置に設置した変位計の計測値であり、脚部からその位置までの縮み量を表している。脚部の損傷が激しい帯状補強で値がやや大きいですが、補強試験体は同様の増加傾向を示しており、5~6 δ_y 時、いずれも柱が約5mm縮んでいることが判る。

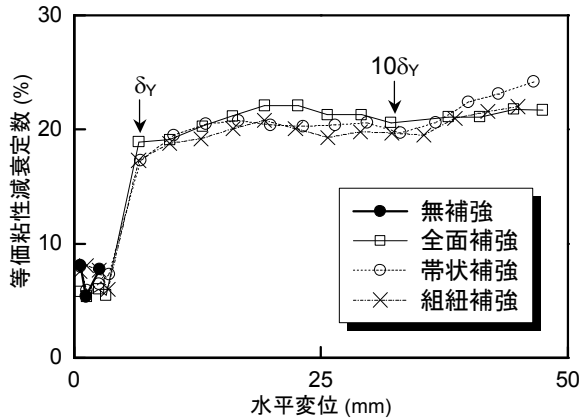


図-9 等価粘性減衰定数の推移

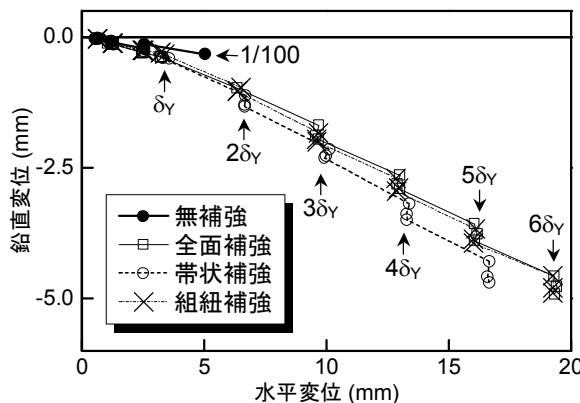


図-10 鉛直変位の増加傾向

4.3 帯鉄筋のひずみ性状

帯鉄筋の横方向ひずみ性状を図-11に示す。上から3~5段目の帯鉄筋に関して、ひずみと水平変位による履歴曲線の頂点を包絡している。

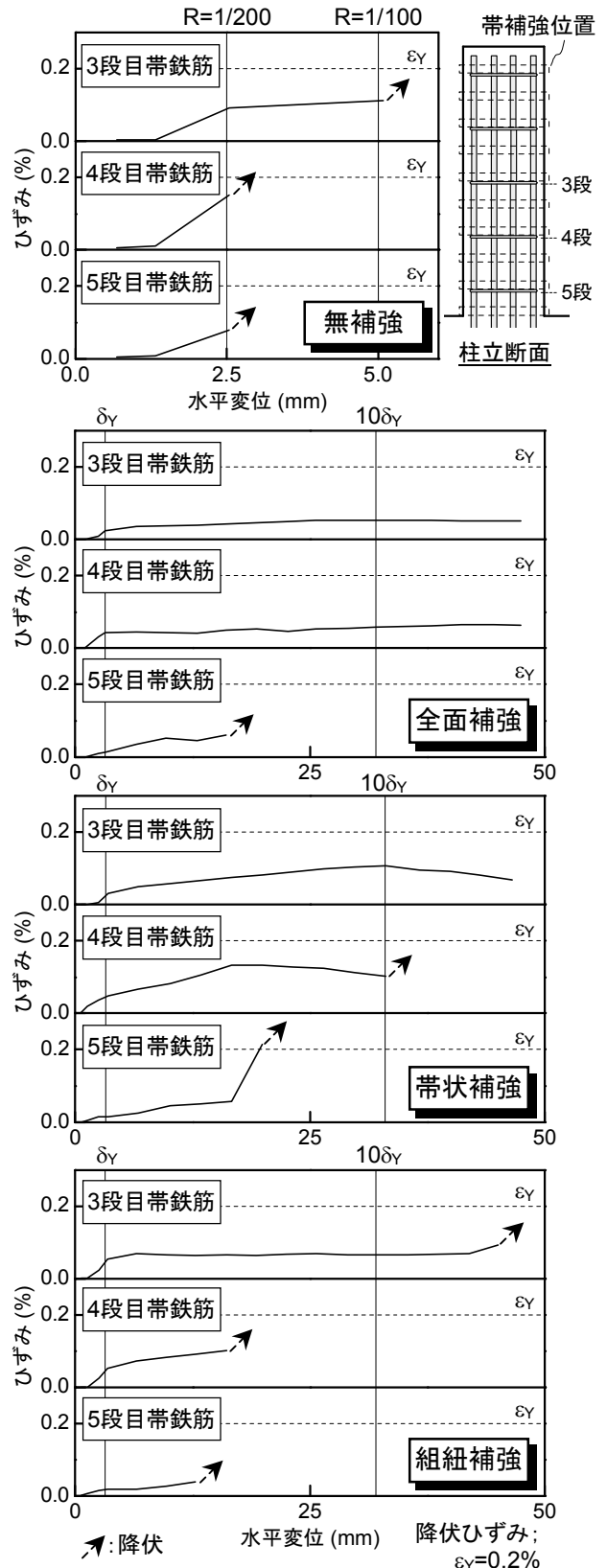


図-11 帯鉄筋ひずみの進展

無補強では、 $R=1/200$ で下の2本が降伏し、 $R=1/100$ で残る上の帯鉄筋も降伏に至り、せん断ひび割れが広がったことが確認できる。一方、補強試験体ではいずれも主筋降伏点(δ_Y 時)まではひずみの値は小さいが、それ以降、全面補強では最下部、帯状補強では下2本、組紐補強では3本ともが実験終了時まで降伏しており、補強法による差異が表れた。帯状に補強した場合、柱中間部で帯鉄筋が降伏する、特に剛性の小さい組紐を帯状とした場合、試験体本体の損傷が進み、帯鉄筋が全面的に降伏する可能性がある。

4.4 炭素繊維補強材のひずみ性状

補強試験体における炭素繊維補強材のひずみ性状を比較して図-12に示す。水平変位が $\delta_Y \sim$

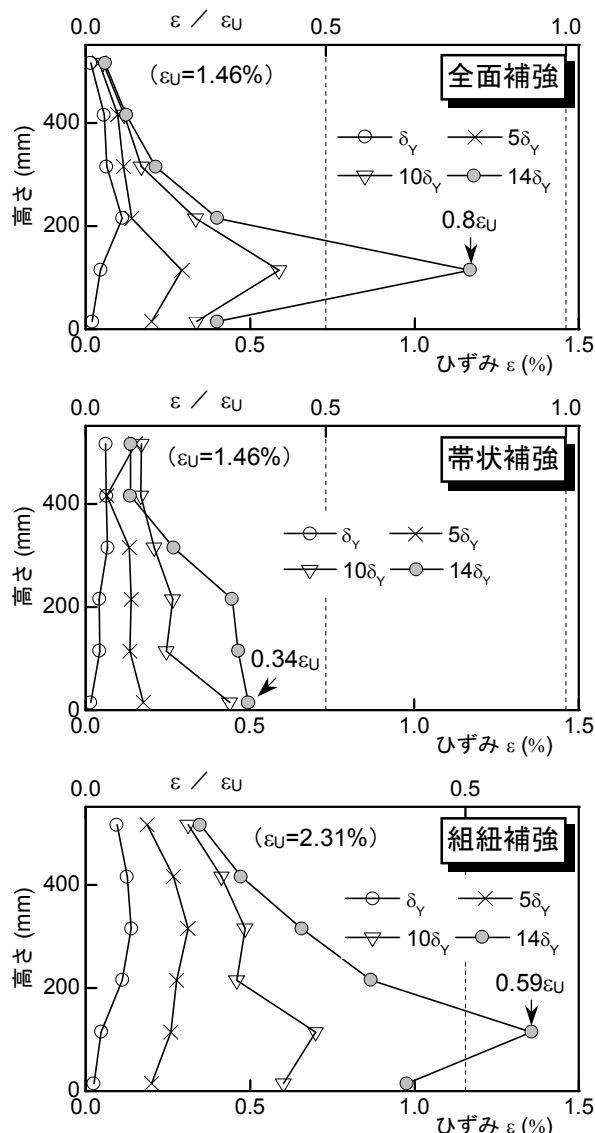


図-12 炭素繊維補強材のひずみ分布性状

$14\delta_Y$ 時点における横方向ひずみを柱高さ方向の分布として表しており、高さ0mmが柱脚部を意味する。全面補強では、上部のひずみが小さく、下部の特定位置で顕著に大きくなり、 $14\delta_Y$ 時点では最大値が材料の限界ひずみ(ϵ_U)の80%に達している。帯状補強では、全面補強に比べ上部でのひずみが大きい、特定位置に集中することなく、 $14\delta_Y$ 時でも最大で ϵ_U の34%に留まっている。帯状に補強することで、損傷が補強部以外に分散し、全面巻きに対して補強材のひずみ分布バランスを改善できることが判る。一方、組紐補強は他に比べ全体的にひずみが大きいものの、補強材の剛性が低いために拘束力は同程度と考えられる。材料の ϵ_U 自体が大きいため、 $14\delta_Y$ 時で最大値がその59%であり、全面補強よりひずみ分布のバランスは優れていると評価できる。

5. まとめ

RC高架橋柱に対して炭素繊維をせん断補強材として帯状に巻く工法の効果を確認するために、補強方法を変数とした試験体の載荷実験を実施し、結果の比較検討から以下の知見を得た。

- ・水平変位 $10\delta_Y$ までの範囲において、炭素繊維のシートまたは組紐を本実験の通り帯状に巻いた場合も、せん断破壊を防止し、従来の全面巻き補強と同レベルの水平耐力、靱性能、エネルギー吸収能力を得ることができる。
- ・炭素繊維シートまたは組紐による帯状の補強で、構造体の損傷を分散させ、補強材のひずみ分布性状を改善することが可能である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会:連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集, 1998.5
- 2) 鉄道総合技術研究所:炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 研友社, 1996.7
- 3) 鉄道総合技術研究所:アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, 研友社, 1996.11