

論文 連続繊維シートの弾性係数の相違が鉄筋コンクリート橋脚のじん性に及ぼす影響

堀口賢一*1・宇治公隆*2・細谷 学*3

要旨：本研究では、連続繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強（じん性補強）効果について検討した。使用した連続繊維シートは、普通弾性タイプと高弾性タイプの炭素繊維シートおよびアラミド繊維シートの3種類である。これらを橋脚供試体に巻立てて正負交番水平載荷試験を行った。その結果、連続繊維シートの弾性係数の違いにより、水平荷重—水平変位関係に違いが見られた。高弾性タイプの炭素繊維シートは伸び性能が小さいため、他に比べて早い段階で繊維が破断し、じん性向上効果が小さいことが明らかとなった。

キーワード：じん性補強，弾性係数，炭素繊維シート，アラミド繊維シート

1. はじめに

阪神大震災を契機に、コンクリート構造物の耐震補強がさかに行われている。補強方法としてはRC巻立て工法や鋼板巻立て工法が一般的に知られている。しかし、クレーン等の重機が配置できない土木構造物や、供用中のオフィスビルでは、施工性に優れている炭素繊維シート工法による補強が検討されており、適用実績も増加している。本研究では、橋脚のじん性向上を目的として連続繊維シートを巻き付けた場合に、繊維の弾性係数の違いが、じん性にどのような影響を及ぼすかについて、弾性係数の異なる炭素繊維シート、およびアラミド繊維シートを用いて検討した。

の断面は400mm×400mmの正方形断面で、隅角部は半径50mmの面取りを行った。フーチング上面から載荷点までの高さは、載荷治具を含めて1230mmである。主鉄筋はSD295AのD13、帯鉄筋はSD295AのD6を使用した。鉄筋の機械的性質を表-1に示す。帯鉄筋は70mmピッチで配置し、端部は定着長100mmの鋭角フックとした。連続繊維シートに貼付したひずみゲージ(本論文では、S3, S4)は供試体の周方向(繊維と同一方向)のひずみを測定できるようにした。また、これに対応する位置の帯鉄筋にもひずみゲージ(H3, H4)を配置した。これらのゲージは水平加力によるはらみ出しの現象を把握す

2. 供試体

本実験で用いた柱状供試体の形状寸法・配筋・ひずみゲージ貼付位置を図-1に示す。供試体

表-1 鉄筋の機械的性質

種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
D6	380	546
D13	348	491

表-2 供試体の諸元

供試体 記号	巻立て繊維 種類	補強量		連続繊維シートの性質				実験時の コンクリート強度 (N/mm ²)
		目付け量 (g/m ²)	伸び剛性 (GPa・mm ²)	比重	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	伸び率 (%)	
T1	普通弾性炭素繊維	300	41.5	1.80	249	4.17	1.67	40.0
T2	高弾性炭素繊維	300	91.0	2.12	643	2.60	0.40	38.3
T3	アラミド繊維	235×2	27.4	1.39	81	3.05	3.77	39.9

*1大成建設（株）技術研究所材料研究部研究員 工修（正会員）

*2大成建設（株）技術研究所材料研究部主任研究員 工博（正会員）

*3大成建設（株）技術研究所材料研究部研究員 工修（正会員）

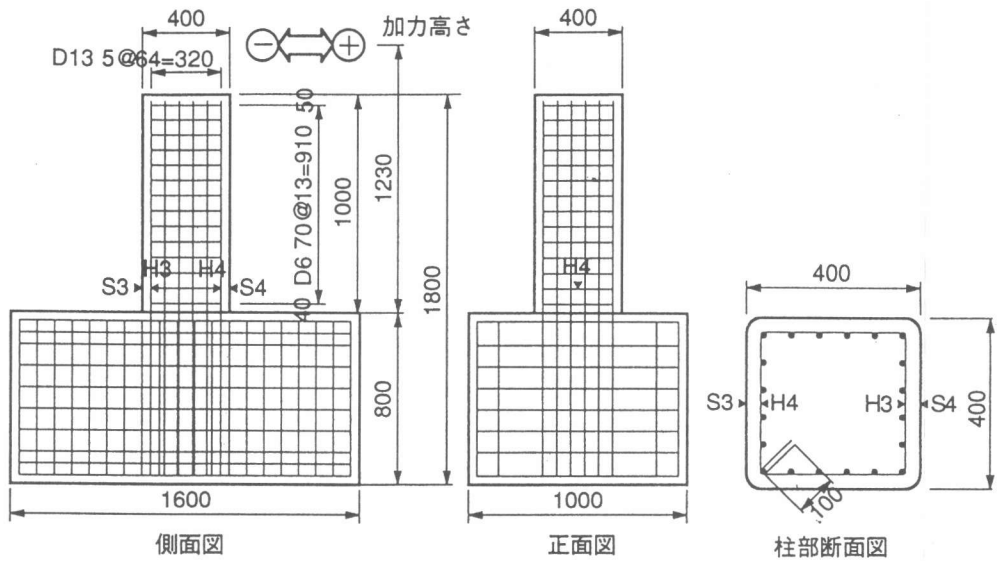


図-1 供試体寸法・配筋・ひずみゲージ貼付位置

るためのものである。

各供試体の諸元を表-2に示す。本研究では、炭素繊維シートは1層、アラミド繊維シートは2層を供試体の柱部全高を対象に帯鉄筋方向に巻き付けた。炭素繊維シート(300g/m²)とアラミド繊維シート(235g/m²)は1層あたりの繊維量が異なるため、アラミド繊維シートの目付け量は炭素繊維シートの目付け量の約1.5倍となっている。また、弾性係数と、繊維の目付け量を比重で除した換算厚さの積である伸び剛性の値は、表-2中に示す通りである。帯鉄筋方向のシートどうしの重ね合わせは加力方向平行面で行い、重ね合わせの長さは20cmとした。載荷実験時のコンクリート強度は38.3~40.0N/mm²であった。

3. 実験方法

実験は、上部工の重量を想定して1.0N/mm²の鉛直力を作用させた状態での正負交番水平載荷とした。水平加力は、最外縁主鉄筋が降伏する時の水平変位を降伏変位(1 δ y)とし、順次その整数倍の変位をそれぞれ3回づつ作用させた。降伏変位の決定は、最初に載荷試験を行ったT1供試体の最外縁主鉄筋のひずみが、主鉄筋(D13)の材料試験より得られた降伏ひずみ(1980 μ)に達した時点での水平変位(6.85mm)と

した。

実験の終了の目安は、荷重が最大時の8割に低下した時点、あるいは水平変位が10 δ yに達した時点とした。

4. 実験結果

4.1 破壊性状

図-2は、普通弾性タイプの炭素繊維シートで補強したT1供試体の水平荷重-水平変位関係の履歴曲線である。2 δ yで橋脚基部に曲げひび割れが確認され、7 δ yの2回目の載荷で隅角部の炭素繊維シートの一部が破断し耐力が低下し始めた。それ以降において、炭素繊維シートの破断範囲が次第に広がり、9 δ yではらみ出しに抵抗できなくなり、急激に耐力が低下したため実験を終了した。

図-3は、高弾性タイプの炭素繊維シートで補強したT2供試体の水平荷重-水平変位関係の履歴曲線である。2 δ yで橋脚基部に曲げひび割れが確認され、5 δ yで加力方向に平行な面の炭素繊維シートに斜めに亀裂が入り、6 δ yの2回目の載荷で破断した。それ以降、はらみ出しに抵抗できなくなり、7 δ yで急激に耐力が低下したため実験を終了した。

T1供試体が加力直角方向面のコンクリートのはらみ出しによって炭素繊維シートが破断し

たのに対して、T2供試体は加力方向平行面のコンクリートのせん断ひびわれにより、炭素繊維シートが局部的に破断した。これは、高弾性タイプの炭素繊維シートの伸び率が0.4%と非常に小さいため、せん断変形に追従できなかったことによると考えられる。

図-4は、アラミド繊維シートで補強したT3供試体の水平荷重—水平変位関係の履歴曲線である。48yに達した時点で橋脚基部に曲げひび割れが確認され、98yではらみ出しが顕著になった。108yの負側の載荷で主鉄筋が破断して耐力が低下したが、アラミド繊維シートは破断しなかった。T3供試体の実験は108yで終了した。

4.2 水平荷重—水平変位関係

各変位1回目の載荷における最大水平荷重を表-3に、その最大水平荷重と水平変位との関係の包絡線を図-5に示す。表-3、図-5には、本実験と同一の寸法・配筋の供試体で行われた武村らの実験結果⁹⁾を無補強供試体として併記してある。

無補強供試体、連続繊維シートで補強した供試体とも、58yまで荷重と変位の関係はほぼ同じであった。しかし、無補強供試体は水平変位が68yに達すると耐力が急激に低下したのに対し、炭素繊維シートあるいはアラミド繊維シートで補強した供試体は68y以降でも耐力を保持した。このことから、連続繊維シートで補強すると横拘束効果によりじん性が向上することが明らかとなった。

高弾性タイプの炭素繊維シートで補強したT2供試体の耐力は、68yまでは普通弾性タイプの炭素繊維シートで補強したT1供試体やアラミド繊維シートで補強したT3供試体とほとんど変わらないが、前述したように、せん断による繊維の破断のため78yで耐力が急激に低下した。

一般に、弾性係数が大きい連続繊維シートほど伸び率は小さいと言われている。本実験で用いた連続繊維シートの伸び率は、高弾性タイプの炭素繊維シート(弾性係数643GPa)では0.40%、

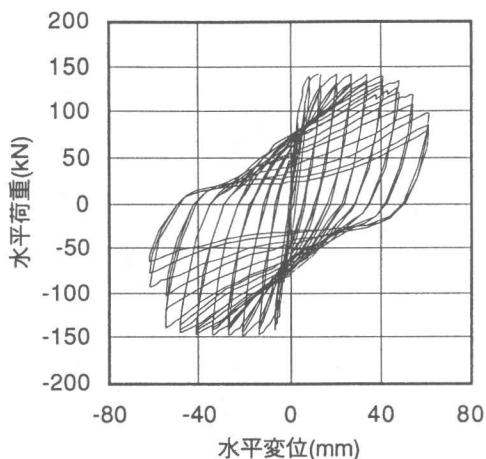


図-2 普通弾性炭素繊維シートで補強した供試体の水平荷重—水平変位関係

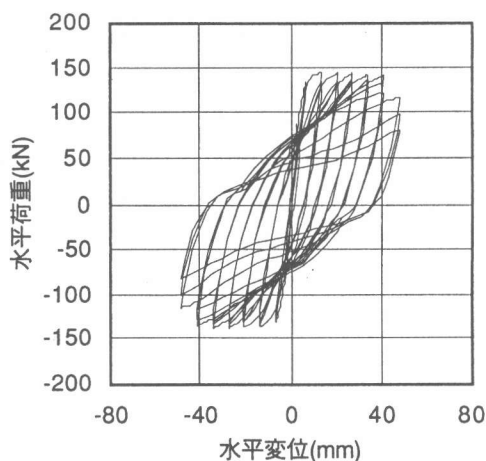


図-3 高弾性炭素繊維シートで補強した供試体の水平荷重—水平変位関係

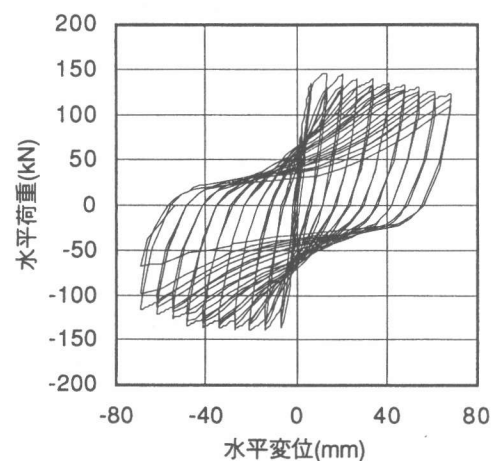


図-4 アラミド繊維シートで補強した供試体の水平荷重—水平変位関係

表-3 各サイクル1回目の最大水平荷重

(荷重：kN)

供試体	変位 荷重	1 δ y	2 δ y	3 δ y	4 δ y	5 δ y	6 δ y	7 δ y	8 δ y	9 δ y	10 δ y
		T1 (普通弾性)	+側荷重	137.7	141.6	140.1	140.1	140.1	139.2	132.8	118.6
	-側荷重	-141.6	-146.5	-149.0	-147.5	-146.5	-146.0	-145.0	-138.7	-93.1	—
T2 (高弾性)	+側荷重	133.8	145.0	144.1	143.1	141.1	140.1	116.1	—	—	—
	-側荷重	-131.3	-137.2	-135.7	-138.7	-138.2	-135.7	-115.2	—	—	—
T2 (アラミド)	+側荷重	135.2	145.0	143.1	138.2	138.2	134.3	131.8	128.4	124.5	121.5
	-側荷重	-136.2	-139.7	-139.2	-138.2	-137.7	-137.2	-134.8	-126.4	-122.0	-117.1
無補強	+側荷重	145.5	151.7	150.0	147.2	144.4	124.3	89.3	70.3	61.6	—
	-側荷重	-142.1	-142.1	-141.8	-138.7	-137.3	-113.3	-91.8	-79.4	-73.4	—

普通弾性タイプの炭素繊維シート(弾性係数249 GPa)では1.67%であり, アラミド繊維シート(弾性係数81GPa)では3.77%である。このように高弾性タイプの炭素繊維シートは破断時の伸び率が小さいため, はらみ出しに伴って変形が大きくなってくるとその変形に追従できず, 普通弾性タイプの炭素繊維シートやアラミド繊維シートに比べると, 変形が小さい段階で破断すると考えられる。したがって, 大変形まで許容しなくてはならない場合には, 伸び率の大きい連続繊維シートで補強することが有効であると考えられる。

無補強供試体が5 δ yまでじん性のある挙動を示していたため, 水平変位が6 δ yまでの比較的変位が小さい範囲では, 3種類の連続繊維シートの弾性係数の違いによる耐力の差はほとんど見られなかった。一方, 7 δ y以降の比較的変位が大きい範囲では, 弾性係数の違いにより耐力の相違が見られた。高弾性タイプの炭素繊維シートを用いた場合, せん断により繊維が破断したこともあり, じん性の向上効果は見られなかった。これに対して, 普通弾性タイプの炭素繊維シートの場合には8 δ yまで, アラミド繊維シートの場合には10 δ yまでじん性の向上が期待できる。ただし, 本実験では, アラミド繊維シートが炭素繊維シートの約1.5倍の補強量であることを考慮しておかなければならない。

4.3 水平変位一ひずみ関係

図-6~図-11は, 連続繊維シートで補強した3体の供試体の帯鉄筋と連続繊維シートの周方

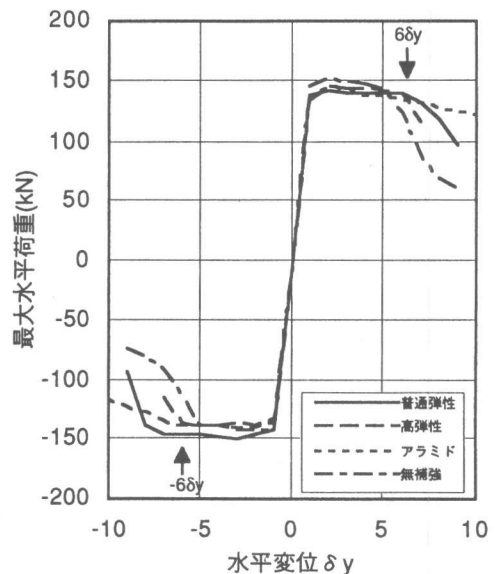


図-5 荷重・変位関係の包絡線

向ひずみ(H3, H4, S3, S4)である。なお, ひずみとしては, 各変位における1回目の測定値を用いている。

図-6, 図-7は, 普通弾性タイプの炭素繊維シートで補強したT1供試体のひずみである。

帯鉄筋, 炭素繊維シートとも5 δ y程度までは大きなひずみは生じていない。6 δ yになるとひずみの増加が顕著になり, 帯鉄筋のひずみの増加割合に比べ, 炭素繊維シートのひずみの増加割合が高くなる。これは, はらみ出しに抵抗する際に, 炭素繊維シートが受け持つ力の分担が大きくなっていることを意味している。

無補強供試体の場合には, 水平変位が6 δ yに達すると加力方向直角面がはらみ始めており,

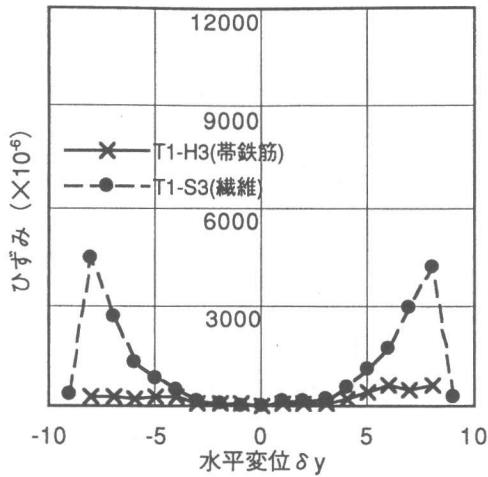


図-6 普通弾性炭素繊維シートで補強した供試体のひずみ(H3, S3)

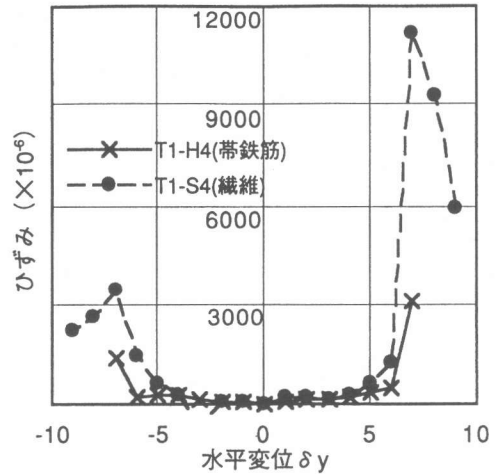


図-7 普通弾性炭素繊維シートで補強した供試体のひずみ(H4, S4)

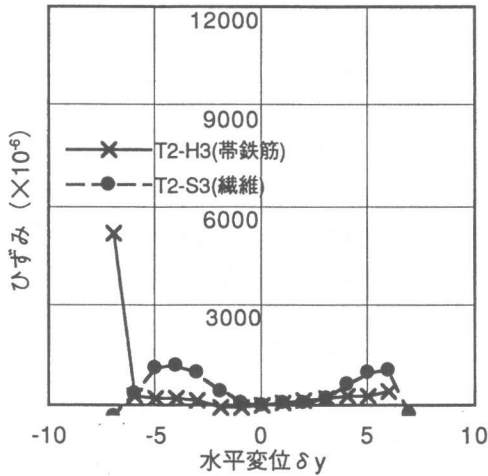


図-8 高弾性炭素繊維シートで補強した供試体のひずみ(H3, S3)

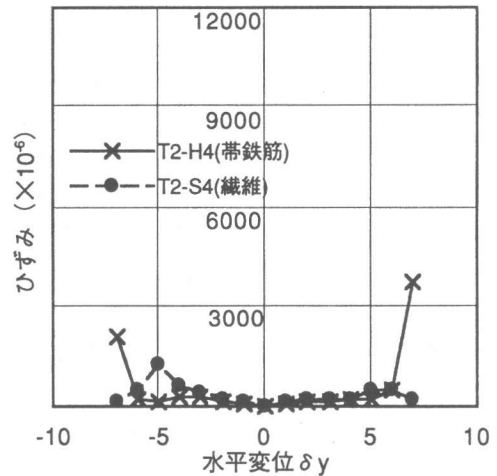


図-9 高弾性炭素繊維シートで補強した供試体のひずみ(H4, S4)

このことは、普通弾性タイプの炭素繊維シートで補強した供試体T1のひずみが6δyから増えることに対応している。また、S4の炭素繊維シートのひずみが、7δyで急激に増加しているが、これは主鉄筋の座屈に伴うコンクリートのはらみ出しによって帯鉄筋が降伏し、それ以上には帯鉄筋がはらみ出しに抵抗する力を負担できなくなり、炭素繊維シートに大きな力がかかったこと、およびかぶりコンクリート部の剥落にも炭素繊維シートは抵抗していることによると考えられる。

図-8、図-9は、高弾性タイプの炭素繊維シ

トで補強したT2供試体のひずみである。

S3, S4の炭素繊維シートのひずみはあまり大きくならず、ほとんど変化していない。これは、炭素繊維シートが6δyにおいて加力方向平行面でせん断により破断したため、炭素繊維シートにほとんど拘束力が生じなかったためと言える。また、帯鉄筋のひずみも6δyまで約200μ程度でほとんど変わらないが、7δyで急激に増加した。これは6δyの段階で炭素繊維シートはすでに破断しており、帯鉄筋だけではらみ出しに抵抗したためと考えられる。

図-10、図-11は、アラミド繊維シートで補強

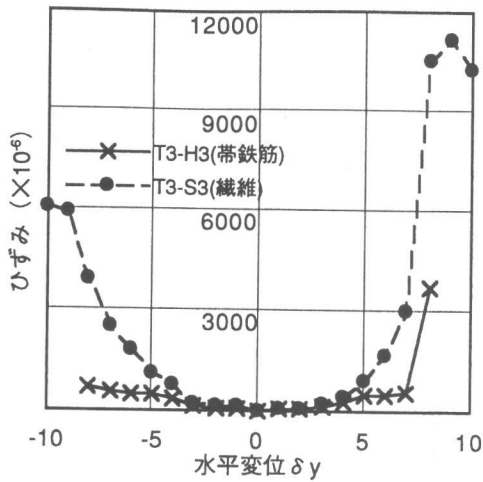


図-10 アラムド繊維シートで補強した供試体のひずみ(H3, S3)

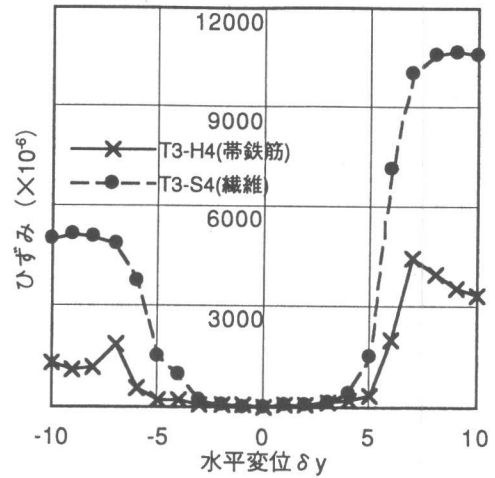


図-11 アラムド繊維シートで補強した供試体のひずみ(H4, S4)

したT3供試体のひずみである。帯鉄筋，アラミド繊維シートとも $3\delta y$ 程度までは大きなひずみは生じていないが， $4\delta y$ 以降になると徐々にひずみが増加している。 $6\delta y$ になると帯鉄筋のひずみに比べ，アラミド繊維シートのひずみの増加割合が大きくなる。これは，普通弾性タイプの炭素繊維シートで補強したT1供試体の実験結果と同様に，主鉄筋の座屈に伴うコンクリートのはらみ出しによって帯鉄筋が降伏し，それ以上には帯鉄筋がはらみ出しに抵抗する力を負担できなくなり，アラミド繊維シートに大きな力がかかったこと，およびかぶりコンクリート部の剥落にもアラミド繊維シートは抵抗していることによると考えられる。

なお，アラミド繊維シートは， $7\delta y$ で帯鉄筋が降伏した後も破断せず， 10000μ 以上のひずみを保持していたことが分かる。

5. まとめ

連続繊維シートの弾性係数の違いが橋脚の耐震（じん性）補強効果に及ぼす影響について検討した。以下に本実験より得られた事柄を記述する。

- 1) 無補強供試体が $5\delta y$ まで十分じん性のある挙動を示していたため，水平変位が $6\delta y$ までの

比較的変位が小さい範囲では，連続繊維シートの弾性係数の違いによる耐力の差はほとんど見られなかった。

- 2) $7\delta y$ 以降の比較的変位が大きい範囲では，弾性係数の違いによる耐荷性能に差が見られた。高弾性タイプの炭素繊維シートは，伸び率が小さいことから，早い段階（ $6\delta y$ ）で繊維が破断し， $7\delta y$ で破壊した。じん性補強においては，横拘束力によりはらみ出しを抑えることと，はらみ出しが生じた場合に十分な変形（伸び）能力があることを考え合わせて，材料を選定する必要がある。
- 3) 橋脚の変形が大きくなると，帯鉄筋のひずみに比べ連続繊維シートのひずみの増加する割合が高くなる。これは，帯鉄筋が降伏して受け持つ力が頭打ちになるのに対し，連続繊維シートは弾性材料であるためひずみに応じて受け持つ力が大きくなることと，かぶりコンクリート部の剥落に抵抗するためと考えられる。

参考文献

- 1) 武村浩志・川島一彦：載荷履歴特性が鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす影響，土木学会構造工学論文集，Vol.43A，pp.849-pp.858，1997.3