

論文 連続繊維シートで補強した柱のせん断耐荷機構

中井 裕司*1・樋口 昇*2・下村 匠*3・丸山 久一*4

要旨：せん断スパン比 2.7 で補強前のせん断余裕度が 0.7 程度の 500mm 角柱に，せん断補強する連続繊維シートの種類と引張耐力をパラメーターにした正負交番載荷試験を行った。結果，同一の引張耐力であれば各シートの引張剛性に依存せず終局ひずみの大きいほうが，同一のシートならば引張耐力の大きいほうが大きな変形性能を得た。終局時における塑性ヒンジ区間のシートの最大ひずみはそれぞれの終局ひずみにほぼ相当し，負担するせん断力はその終局ひずみの 1/2 に相当する平均ひずみで評価できることがわかった。

キーワード：連続繊維シート，正負交番載荷，せん断余裕度，破壊形式，終局ひずみ

1. はじめに

地震時に正負交番載荷される柱のせん断耐荷機構は，コンクリートの負担するせん断耐力の劣化により変化する。筆者らは，各種の連続繊維シートで補強された柱のせん断耐荷機構の変化を定量化し，柱の終局の変形性能との関係を調べることを目的とした。

運上らは，せん断スパン比 2.5，補強前のせん断余裕度が 0.6 程度の供試体を炭素繊維シートにより補強し，せん断余裕度を 1.2 (0.5Vc) から 1.5 (1.0Vc) 程度に補強した場合，繰返し載荷実験において安定した曲げ破壊に移行しなかったとしている¹⁾。一方，長田らは，塑性ヒンジ部を鉄筋で，その他のせん断区間を炭素繊維シートで補強した 1 回の繰返し載荷試験を行い，塑性ヒンジ部外における炭素繊維シートのせん断補強効果を証明している²⁾。

つまり，せん断余裕度の小さい部材において，繰返し載荷により損傷を受けるコンクリートおよび繊維シートのせん断負担の効率が明らかにされていない。その結果，塑性ヒンジ部のじん性とせん断補強にシートを適用した場合，安定した破壊へ移行する条件が明らかにさ

れていない。

一方，アラミド繊維シートを用いた柱の正負交番載荷試験は，補強前のせん断余裕度が 1.0 以下の供試体が少なく，損傷を受ける塑性ヒンジ内のせん断耐荷機構が明確でない。そこで，補強前のせん断余裕度の低い供試体を各種繊維シートでせん断補強した場合の，せん断耐荷機構と変形性能を明らかにする一連の実験を行った。

2. 試験方法の概要

2.1 供試体

供試体は，図-1 に示すように，柱の断面を 500 mm × 500 mm の矩形断面，載荷点の高さを 1250mm とし，せん断スパン比は 2.72 とした。軸方向鉄筋は，D19 を載荷面に 8 本配置し，せん断ひび割れの進展を妨げないように側方鉄筋を用いていない。軸方向鉄筋比は 1.83% である。せん断補強筋は，せん断スパンに D6 を 250 mm ピッチに配置し，せん断補強筋比は 0.05% である。補強前のせん断余裕度は，「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（以下：指針）」³⁾で 0.7 程度，「道路橋

*1 アラミド補強研究会技術委員 住友建設(株)技術部 (正会員)

*2 アラミド補強研究会技術委員 三井建設(株)土木事業本部 工博

*3 長岡技術科学大学助教授 工学部 環境・建設系 工博 (正会員)

*4 長岡技術科学大学教授 工学部 環境・建設系 Ph.D (正会員)

示方書「耐震編（以下：道示）」で 0.6 弱に設定した。

2.2 使用材料

用いたコンクリートの圧縮強度とヤング率を表-1 に、鉄筋の降伏強度と引張強度を表-2 に示す。補強に用いた繊維シートの特長値を表-3 に示す。繊維シートは、炭素、アラミド 1、アラミド 2 の 3 種類を用いた。各シートの 1 枚あたりの引張耐力は、ほぼ等しく約 400kN/m である。引張剛性は炭素：アラミド 1：アラミド 2 が 2.1：1.8：1.0 で、終局ひずみはそれぞれ、1.61%、2.06%、3.44%である。

2.3 載荷方法

載荷方法は、供試体を鉛直に設置し、反力壁に設置したアクチュエーターにより水平方向に交番載荷した。載荷ステップは、降伏変位の整数倍とし、ステップごとに正負 3 回行った。載荷点は、柱基部から 1250mm を基準とした。なお、軸力は与えていない。

2.4 パラメーターと諸荷重

試験のパラメーターは、繊維シートの種類および引張耐力であり、表-4 に示す。引張耐力はアラミド 1 で 2 水準、アラミド 2 で 3 水準設け、計 7 体の試験を行った。補強後のせん断余裕度

表-1 コンクリートの物性

供試体 No.	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
No.0	34.6	29.3
No.1	33.5	32.9
No.2	28.2	29.3
No.3	34.5	29.7
No.4	41.1	34.0
No.5	42.4	33.8
No.6	28.6	33.6

表-2 鉄筋の物性

	軸方向鉄筋 D19	帯鉄筋 D6
降伏強度 (MPa)	350.3	287.7
引張強度 (MPa)	531.2	435.7

表-3 連続繊維シートの物性

	Aramid 1	Aramid 2	Carbon
保証強度 (MPa)	2060	2350	3430
引張強度 (MPa)	2723	2858	4291
ヤング率 (GPa)	132	83	261
終局ひずみ (%)	2.06	3.44	1.61
シートの厚さ (mm)	0.193	0.169	0.111

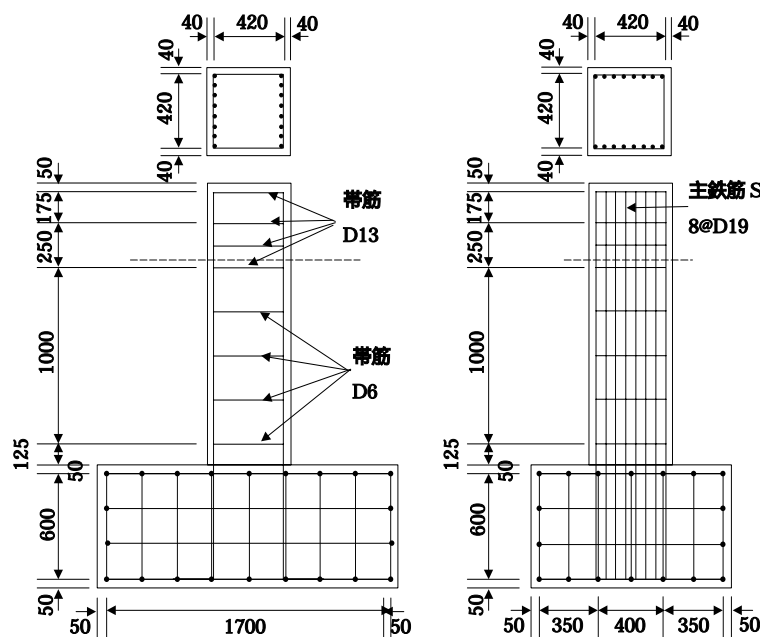


図-1 供試体の諸元

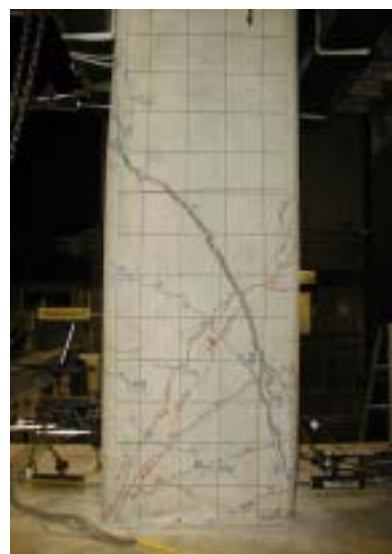


写真-1 No.0 供試体の破壊性状

は、指針で1.1~1.9、道示で0.9~1.5に設定されている。なお、表-4には各供試体の曲げ耐力、せん断耐力およびせん断余裕度の計算値と実験結果も併せて記述している。

No.1-No.2-No.3とNo.4-No.5は、同一のせん断余裕度でシートの種類をパラメーターにしている。No.2-No.4とNo.3-No.5-No.6は、同一のシートで引張耐力をパラメーターにしている。

3. 試験結果

3.1 破壊性状

基準供試体は、写真-1に示すように、載荷点と基部を結ぶせん断ひび割れが卓越して破壊した。補強水準が上がるに従い、斜めひび割れの角度も緩やかとなり、基部の損傷が目立つようになってきた。繰返し載荷の影響でせん断破壊が生じる可能性もあるNo.4およびNo.5供試体（指針で安全係数を1.0としてせん断余裕度1.15程度、道示で0.87程度）も基部の1D区間以上の広範囲にせん断ひび割れが認められるが、シートが破断するまで耐力を維持し、基準供試体のような脆性的なせん断破壊は生じな

かった。

これは、実質のせん断余裕度が1程度であれば、破断しにくい繊維シートを用いた場合、正負繰返し載荷によるせん断ひび割れの発生に対する補強効果は十分あり、その後、コンクリートの損傷が進み負担するせん断力が低下してもシートの負担するせん断力が増加し、シート強度もしくはひずみの限界点まで耐力を維持することを示している。

3.2 変形性能

図-2に示すように、供試体の変形性能は、同一のシートを用いて引張耐力が大きくなれば、じん性が大きくなる。また、同一の引張耐力を有するシートの場合、シートの終局ひずみが大きくなるに従い、じん性が大きくなる。このことより、せん断破壊を生じさせない量のシート補強を行えば、変形性能はシートの強度ではなく、シートの終局ひずみ量に依存することになる。No.3供試体は、終局ひずみの大きなシートを用いているので、11 yまでの繰返し載荷後、単調に変位を増分させ20 yの変形でシートが破断した。変形性状は柱全体においてせん断変

表-4 供試体の諸荷重

供試体	供試体 No.	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
	シートの種類		Carbon	Aramid1	Aramid2	Aramid1	Aramid2	Aramid2
	用いたシートの枚数 ^{*1}		1	1	1	1/3	1/3	2/3
計算値	降伏曲げモーメント(kNm)	316	316	314	316	318	319	314
	同上時のせん断力(kN)	253	253	251	253	261	261	256
	終局曲げモーメント(kNm)	334	334	329	334	339	340	330
	同上時のせん断力(kN)	267	267	263	267	278	279	269
	補強前のせん断耐力(kN) ^{*2}	198	196	186	198	208	210	187
	補強前のせん断余裕度	0.74	0.73	0.71	0.74	0.75	0.75	0.69
	シートせん断補強効率K ^{*3}		0.80	0.74	0.62	0.80	0.80	0.66
	シートのせん断負担分(kN)		305	313	239	112	102	170
	補強後のせん断耐力(kN) ^{*1}	198	501	499	437	320	312	357
	補強後のせん断余裕度 ^{*3} JSCE	0.74	1.87	1.90	1.64	1.15	1.12	1.33
補強後のせん断余裕度 ^{*4} 道示	0.58	1.42	1.51	1.44	0.88	0.85	1.11	
実験値	最大耐力(kN)	303	306	310	315	293	297	303
	平均降伏変位(mm)	4.3	5.4	4.6	3.5	4.6	4.4	4.9
	平均終局変位(mm)	5.8	45.3	48.1	72.3	14.2	19.1	37.6
	じん性率	1.3	8.5	10.5	>11	3.1	4.3	7.7
	シートの最大ひずみ(%)		1.80	1.82	>2.6	1.54	3.34	3.37

*1 例えば、シート枚数が1/3の場合は繊維束を3本中1本残すように加工した。*2 コンクリート標準示方書に従う。*3 参考文献(3)による。*4 道示「耐震編」シートのせん断補強効率K=0.6と仮定した。

形が生じるような形状を示し、シートが部材全域でひび割れを生じたコンクリートを拘束し、力を伝達している状況となっていた。

3.3 繊維シートのひずみ分布とひび割れ

図-3 にシートのひずみ分布の推移とシートの終局時に目視により調査した剥離状況およびシート除去後のひび割れを示す。なお、シートのひずみ分布図は、せん断面にせん断方向に100mm、高さ方向に約225mmピッチに設けたひずみゲージの値であり、各载荷ステップのひずみを図中に示す最大ひずみで正規化し、円の大きさで表している。以下の定性的特徴がわかる。

a. シートの引張耐力が小さいとせん断ひび割れに沿った部分にひずみが集中し、シートが破断する。

b. シートの引張耐力が大きくなるに従い、ひずみの分布が均一になる。これは、繰返し载荷によりシートの付着の劣化が進行するためである。

c. 繊維シートの引張剛性が小さく、破断伸びひずみ大きい場合には、载荷に伴ってシートに生じるひずみは、下部だけでなく、上部でも大きくなる。これは、シートが破断しないため、柱下部における斜めひび割れ部のコンクリートの拘束が確保されていて、力の伝達が可能であり、その結果、ひび割れが上部にも発生し始めているためである。

d. シートのひずみは、シートの引張剛性にかかわらず、ほぼ終局ひずみに近い値となっている。したがって、シートの役割としては、ひび割れたコンクリートを拘束し、力の伝達を確保するものと考えられ、シートの引張耐力が同一であれば、図-2 で示したように終局ひずみの大きいことが重要であると言える。

4. 繊維シートのせん断耐荷機構について

各変位レベル(降伏変位の整数倍)において、基部から600mmの区間におけるシートに貼り付けたゲージ(15測点)の平均ひずみと最大ひずみを図-4 に示す。繊維シートの平均ひずみは、

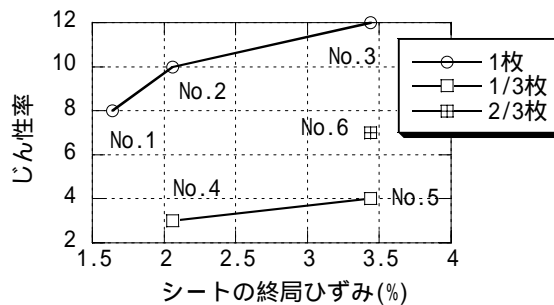
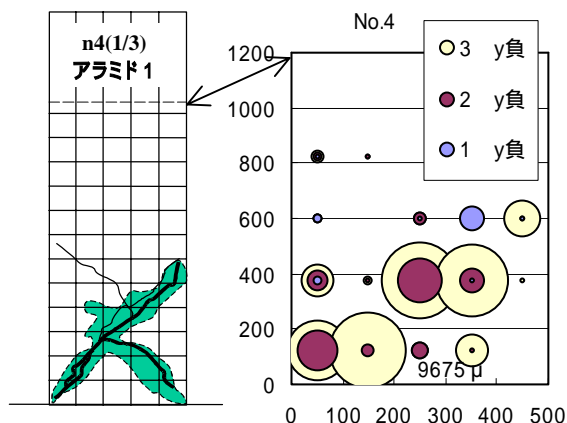
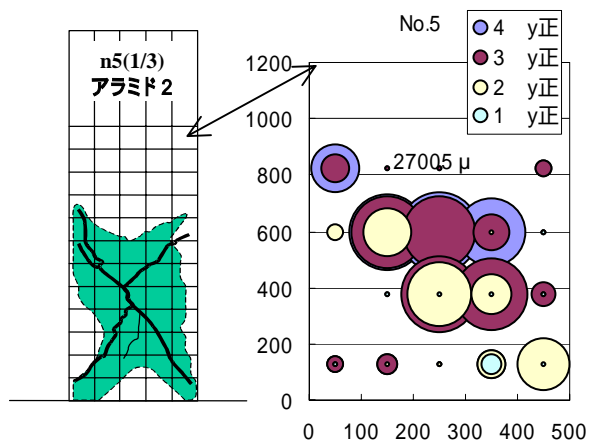


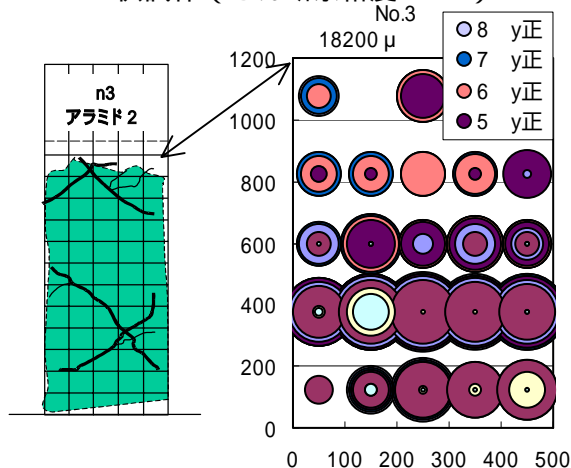
図-2 シートの終局ひずみとじん性の関係



No. 4 供試体 (せん断余裕度=1.15)



No. 5 供試体 (せん断余裕度=1.12)



No. 3 供試体 (せん断余裕度=1.64)

図-3 シートのひずみと剥離状況

基部のせん断面に生じたコンクリートの損傷による平均伸びを示していると思われる。つまりコンクリートの負担できるせん断力の減少にしたがい、平均ひずみは増大している。最大ひずみは、損傷の進展とシートの付着性状および耐力に左右される局部的なひずみである。図-5に、シートに生じている最大ひずみと平均ひずみの比の変化を、各変位レベルに対して示す。変位レベルが4以上になると、この比はほぼ2になっている。シートによるせん断耐力への寄与を修正トラス理論で評価するとすれば、変位レベルにしたがい負担するせん断力の評価対象は、最大ひずみから平均ひずみに代わると考える。以下に、計算の仮定を示す。

a. シートで補強された柱部材は、修正トラス理論にしたがい45°のひび割れが生じ、コンクリートと鉄筋とシートがそれぞれせん断力を分担して負担するものとする。b. シートの負担するせん断力はシートの有効高さ500mmで負担

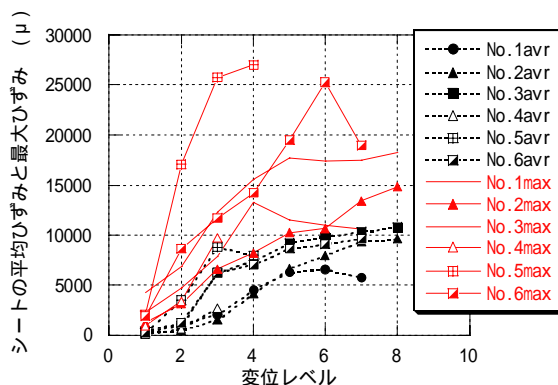


図-4 シートに生じたひずみ

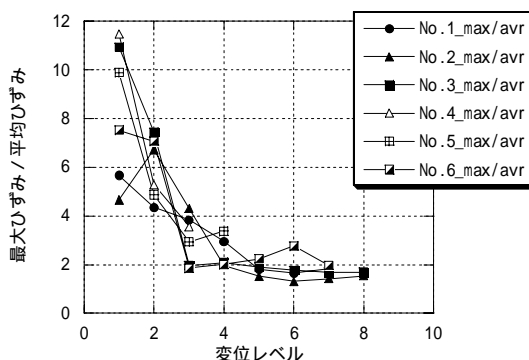


図-5 最大ひずみと平均ひずみの比率

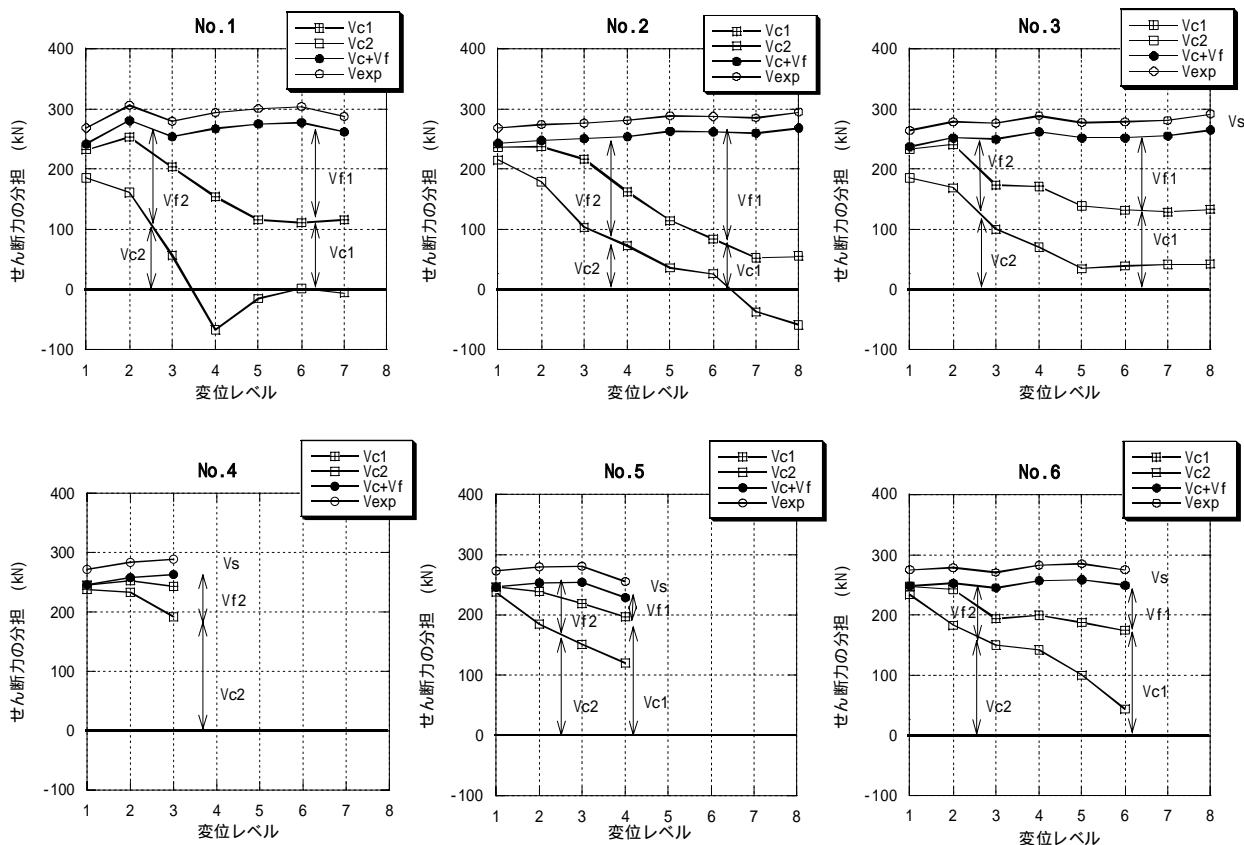


図-6 各構成材の負担するせん断力の推移

(Vc1, Vc2: それぞれ平均ひずみと最大ひずみから算出)

し、その力は平均ひずみもしくは最大ひずみに比例するものとする。c.せん断補強鉄筋は、降伏耐力を常に保持しているものとする。d.コンクリートの負担するせん断力は変位レベルの変数とする。

平均ひずみと最大ひずみから導いた作用せん断力の分担状況(それぞれ V_{f1} と V_{f2})を図-6に示す。コンクリートの負担しているせん断力 V_c は、載荷荷重からせん断補強筋の負担分(V_s)とシートの負担分(V_{f^*})を引いたものとなる。荷重の増加とともに、シートのひずみが大きくなることから、 V_c は低下する。No.3供試体以外は、シートの破断で終局を迎えており、局所的な最大ひずみがシートの終局ひずみに到達したことが破壊の原因と推測できる。特に、No.4およびNo.5供試体は、 V_c の減少量より補強したシートの耐力が少ない事と、最大ひずみが局所化していることにより早期に破壊したと思われる。No.1とNo.2供試体は局所化した最大ひずみを主因として破壊し、No.3供試体はシートの終局ひずみが大きいためじん性率11以上を得られたと考えられる。

正負交番載荷による塑性ヒンジ区間におけるコンクリートの負担する V_c は、 V_{c1} と V_{c2} の中間値と思われるが、この実験の範囲内では同定できない。拘束された場合で8yの繰返しにおいてコンクリート標準示方書耐震編が想定している0.5 V_c 程度まで、この実験では80kN程度まで低下するようである。

シートの負担するせん断力は、実構造物のシートの貼付け枚数や付着性状および側方鉄筋により初降伏耐力よりも終局耐力が大きいことなどを考慮すると、平均ひずみで算定するのが安全側と考えられる。すると、塑性ヒンジ部を繊維シートで補強する場合、繰返しにより劣化した V_c と V_s およびシートの引張耐力の50%で設計すれば、安定した破壊性状を示すと考えられる。安定した破壊への要件は、上記の設計でシートの引張強度が部材レベルで発揮されることであり、シートが局所的なひずみの集中

などにより破断しない特性を有することが重要となる。

5. まとめ

せん断スパン比2.7で、補強前のせん断余裕度が0.7程度の500mm角柱にせん断補強する繊維シートの種類と引張耐力をパラメーターにした正負交番載荷試験を行った。本研究から得られた結論は下記である。

- (1) せん断余裕度が小さい場合、繊維シートで補強した供試体は、塑性ヒンジ区間にほぼ45°のせん断ひび割れが生じ、終局はシートの破断となる。
- (2) シートに生じた最大ひずみは、シートの終局ひずみに近い値となっていた。
- (3) 引張耐力が同程度の繊維シートは、終局ひずみの大きいものの方が大きな変形能力を付与する。
- (4) 塑性ヒンジ部分のシートに生じた平均ひずみは、変位レベル4以降、そこに生じている最大ひずみのほぼ1/2であった。
- (5) 正負交番載荷の繰返しにしたがい、繊維シートの負担するせん断力は増大する。その値は、シートの平均ひずみと最大ひずみから算出される値の間に存在すると考える。
- (6) 塑性ヒンジ区間のせん断補強は、シートの引張強度の50%で算定するのが妥当である。

参考文献

- 1) 運上茂樹ほか：炭素繊維シートを用いた繰返し荷重を受けるRC柱のせん断補強設計法，第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，1998
- 2) 長田光司ほか：炭素繊維シートでせん断補強されたRC柱部材の寸法効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3，1999
- 3) 土木学会：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101，1999