

論文 シート状連続繊維によりせん断補強された RC 梁の構造性能に関する実験的研究

荒木伸宏*¹・松崎育弘*²・中野克彦*³・片岡隆広*⁴

要旨：本論文は、シート状連続繊維による補強で RC 部材のせん断耐力が向上することを確認するとともに、そのせん断耐力を定量的に評価することを目的としたものである。シート補強量およびシート種類をパラメーターとした RC 梁の載荷試験を行った結果、シート補強量を増やすことで部材のせん断耐力が大きく向上すること、また、シート補強された RC 部材のせん断耐力は、シート引張強度に低減係数を乗じることで、従来の RC 部材と同様に評価できることが確認できた。

キーワード：炭素繊維シート、アラミド繊維シート、耐震補強、せん断耐力

1. はじめに

1995年1月の阪神・淡路大震災において、1981年以前に建てられた、現行の耐震設計基準に適合しない「既存不適格」建築物に多くの被害が生じた。このことから、1995年12月に建築物の耐震改修の促進に関する法律が施行され、既存建物の耐震診断・改修が本格的に動き始めた。

このような情勢の中、新技術を用いた既存建築物の耐震補強工法の開発が進められており、RC 建築物に関しては、シート状連続繊維(以下、シート)による補強工法が注目を集めている。材料が軽量でフレキシブルであり、施工性が良いことなどが従来の補強工法に比べた利点であり、すでに実用化も始められている。しかし、その補強効果については不明な点も多く、評価方法の統一化もされていないのが現状である。

本研究では、昨年度の研究[1]に引き続き、シートによる補強で RC 部材のせん断耐力が向上することを確認するとともに、シートのせん断補強効果を定量的に評価することを目的として、シート種類およびシート補強量をパラメーターとした RC 梁の載荷試験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

試験体一覧を表-1に示す。試験体総数は13体である。No.1~9の既存 RC 部分は全て共通で、せん断補強筋比は0.19%である。No.1はシートによる補強を行わない基本試験体である。No.2~6は炭素繊維シートによって、No.7~9はアラミド繊維シートによってせん断補強をした試験体であり、シート補強量を変化させてある。No.10~13はせん断補強鉄筋(以下、スターラップ)のみでせん断補強をした比較用の試験体(以下、純 RC 試験体)である。いずれの試験体もシートのせん断補強効果を明確にさせるため、確実にせん断破壊を起こすように設計した。なお、No.2~9のシート補強量を決定する際、式(1)によるせん断補強量 $\Sigma(pw \cdot \sigma_w)$ が比較用の試験体 No.10~13に概

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

*3 東京理科大学助手 工学部建築学科 (正会員)

*4 榊池組 (正会員)

は100mmとした。

2.3 実験方法

加力は大野式逆対称正負交番繰返し载荷とし、部材変形角 $R=1/800, 1/400, 1/200$ radで折り返した後に、最大耐力を確認した。また、シートの歪みは図-1に示すように、せん断面中央およびコーナー部において、歪みゲージにより測定した。

3. 実験結果および検討

3.1 破壊性状

最終破壊状況の一例を図-2に示す。No.1~12は、スターラップ降伏後、载荷点付近から伸びたせん断ひび割れが大きく口開いて最大耐力に達する、いわゆるせん断引張破壊の性状を示した。No.13は、スターラップ降伏前にコンクリートが圧壊することで最大耐力に達した。シート補強をした試験体は、いずれも最大耐力時にはシートが破断することはなく、最大耐力以降、No.6およびNo.9以外は、シートが破断することで急激に耐力が低下した。炭素繊維シートによって補強した試験体においては、せん断ひび割れに沿う形でシートが破断した。一方、アラミド繊維シートによって補強した試験体においては、せん断ひび割れが口開くことにより、せん断面でのシートとコンクリートとの付着が徐々に切れて、最終的には試験体コーナー部でシートが破断した。また、実験終了後に、シートをはがしてコンクリートのひび割れ状況を調べた結果、いずれの試験体も、基本試験体であるNo.1と同様の性状を示していた。

3.2 変形状

せん断力(Q)－支点間相対変位(δ)関係の包絡線を図-3~5に示す。図3は炭素繊維シートの補強量をパラメーターとした試験体を比較したものである。基本試験体であるNo.1は $Q=20.5$ tf、 $\delta=9.98$ mmでせん断引張破壊を起こして耐力が低下した。シート補強をした試験体においては、シート補強量が増加するにつれて、せん断ひび割れ発生後の剛性低下が小さくなり、最大耐力も大きく向

表-2 シート特性

| | 引張強度* (kgf/cm ²) | ヤング係数* ($\times 10^6$ kgf/cm ²) | 破断伸び* (%) |
|--------|---------------------------------|---|--------------|
| 炭素繊維 | 35500 | 2.35 | 1.5 |
| | 42800 | 2.44 | 1.67 |
| アラミド繊維 | 25000 | 0.89 | 2.8 |
| | 30400 | 0.84 | 3.41 |

*上段：カタログ値(本研究で検討の際に用いた値)
下段：材料試験結果平均値

表-3 コンクリート材料試験結果

| | 圧縮強度 (kgf/cm ²) | 引張強度 (kgf/cm ²) | ヤング係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| No. 1~9 | 251~266 | 19.4~24.4 | 2.56~2.73 |
| No. 10~13 | 214 | 22.3 | 2.53 |

表-4 鉄筋材料試験結果

| | | 降伏強度 (kgf/cm ²) | 引張強度 (kgf/cm ²) | ヤング係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²) |
|-----------|-----|--------------------------------|--------------------------------|--|
| No. 1~9 | D 6 | 3510 | 5270 | 1.92 |
| | D22 | 5700 | 9050 | 2.00 |
| No. 10~13 | D 6 | 4330 | 5720 | 1.91 |
| | D10 | 3850 | 5930 | 1.93 |
| | D22 | 3730 | 5840 | 1.84 |

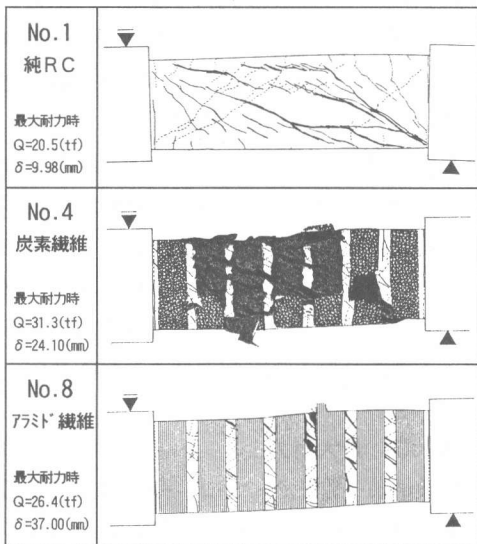


図-2 最終破壊状況

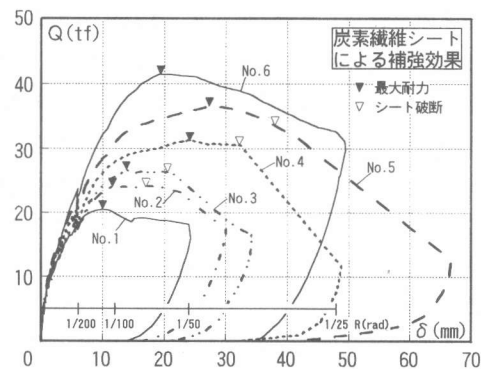


図-3 Q- δ 関係包絡線(炭素繊維シート)

上した。なお、補強量が最も多いNo.6においては最大耐力が41.5tfとなり、No.1に対して2倍以上の値を示した。また、最大耐力時およびシート破断時の変位も、シート補強量の増加にともなって大きくなる傾向がみられた。図-4はアラミド繊維シートの補強量をパラメーターとした試験体を比較したものである。炭素繊維シートの場合と同様に、シート補強量が増加するにつれて最大耐力が向上した。図-5はシート補強した試験体と純RC試験体を、式(1)によるせん断補強量 $\Sigma(pw \cdot \sigma w)$ がほぼ等しいもの同士で比較したものである。各試験体は $\delta=6\text{mm}$ (部材変形角 $=1/200\text{rad}$)付近まではほぼ同様の性状を示したが、それ以降、シート補強をした試験体は、純RC試験体(No.11)に比べて、剛性低下が大きく、最大耐力も炭素繊維シート補強(No.3)で10%、アラミド繊維シート補強(No.7)で20%程度低い値となった。最大耐力以降の性状は、純RCの試験体(No.11)では徐々に耐力が低下していったのに対し、炭素繊維シートによって補強した試験体(No.3)では、 $\delta=20.46\text{mm}$ まではほぼ最大耐力を維持し、シートが破断するとともに急激に耐力が低下した。一方、アラミド繊維シートによって補強した試験体(No.7)は、シートが $\delta=59.00\text{mm}$ で破断するまで、ほぼ最大耐力を維持し、シート破断時も大きな耐力低下を示さなかった。

3.3 最大耐力

実験結果一覧を表-5に、式(1)によるせん断補強量 $\Sigma(pw \cdot \sigma w)$ と最大耐力の関係を図-6に示す。図-6より、純RC試験体においては、せん断圧縮破壊を起こしたNo.13以外、 $\Sigma(pw \cdot \sigma w)$ の増加とともに、最大耐力が直線的に向上している。また、シート補強した試験体においても、シート補強量の多いNo.6にやや頭打ち傾向がみられるものの、 $\Sigma(pw \cdot \sigma w)$ の増加とともに、ほぼ直線的に最大耐力が向上している。よって、シートのせん断補強効果は、スタラップと同様に $\Sigma(pw \cdot \sigma w)$ を用いて概ね評価できると考えられる。ただし、アラミド繊維シートにより補強した試験体は、純RC試験体に比べて $\Sigma(pw \cdot \sigma w)$ の増加に対する最大耐力

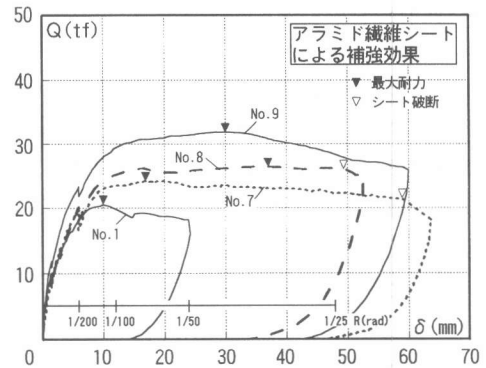


図-4 Q- δ 関係包絡線(アラミド繊維シート)

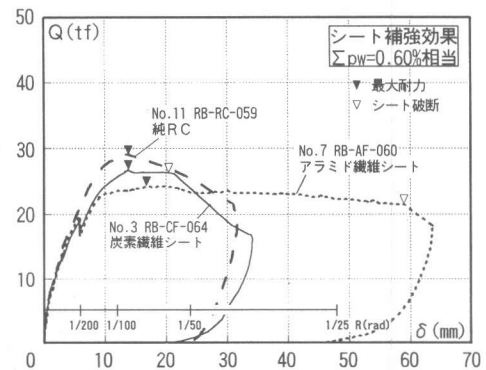


図-5 Q- δ 関係包絡線(同一補強量)

表-5 実験結果一覧

| No. | 試験体名 | コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²) | 最大耐力時 | | シート破断時 | | 破壊モード |
|-----|-----------|--|--------|---------------|--------|---------------|---|
| | | | Q (tf) | δ (mm) | Q (tf) | δ (mm) | |
| 1 | RB-RC-019 | 251 | 20.5 | 9.98 | — | — | せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 せん断引張破壊 |
| 2 | RB-CF-045 | 253 | 24.1 | 11.62 | 24.1 | 16.98 | |
| 3 | RB-CF-064 | 254 | 26.7 | 13.84 | 26.3 | 20.46 | |
| 4 | RB-CF-097 | 257 | 31.3 | 24.10 | 30.4 | 32.49 | |
| 5 | RB-CF-131 | 259 | 36.5 | 27.24 | 33.6 | 37.91 | |
| 6 | RB-CF-243 | 261 | 41.5 | 19.34 | — | — | |
| 7 | RB-AF-060 | 263 | 24.2 | 16.90 | 21.4 | 59.00 | |
| 8 | RB-AF-090 | 264 | 26.4 | 37.00 | 26.1 | 49.39 | |
| 9 | RB-AF-120 | 266 | 31.8 | 30.02 | — | — | |
| 10 | RB-RC-040 | — | 24.9 | 11.54 | — | — | |
| 11 | RB-RC-059 | 214 | 29.0 | 13.82 | — | — | |
| 12 | RB-RC-089 | — | 32.4 | 19.86 | — | — | |
| 13 | RB-RC-118 | — | 32.5 | 15.65 | — | — | |

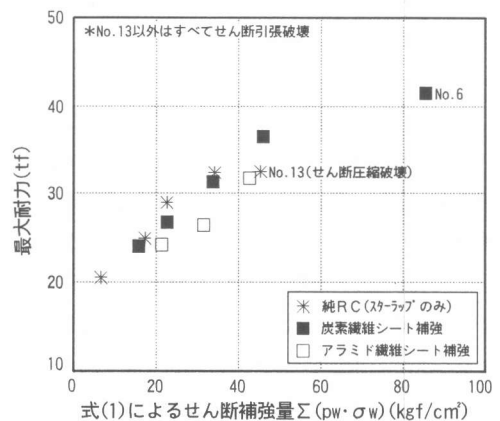


図-6 せん断補強量-最大耐力関係

の向上の割合が小さく、炭素繊維シートにより補強した試験体も、No.13以外の純RC試験体に比べると、最大耐力の向上の割合が若干小さい。なお、純RC試験体のコンクリート強度が、シート補強をした試験体より40～50kgf/cm²程度低かったことを考慮すると、その傾向はさらに強まるといえる。以上より、シートのせん断補強効果は $\Sigma(pw \cdot \sigma w)$ によって概ね評価できるが、スターラップのせん断補強効果に比べると、いくらか低減させる必要があると考えられる。

3.4 せん断耐力評価に関する検討

(1) シートの低減係数

3.3で述べたように、シートのせん断補強効果を評価するには、式(1)による $\Sigma(pw \cdot \sigma w)$ をいくらか低減させる必要があると考えられる。式(1)においてはシート引張強度をそのまま用いたが、いずれの試験体も最大耐力時にはシートが破断していないことから、シート引張強度に何らかの低減係数を掛けて評価することが適当であると思われる。ここでは、最大耐力時にシートに働く平均応力度のシート引張強度に対する比率から低減係数を提案することとした。

シートおよびスターラップの歪み分布の一例(No.4)を図-7に示す。シートの歪み分布はスターラップとほぼ同様であり、せん断ひび割れ近傍で大きくなる傾向がみられた。最大耐力時には、スターラップが完全に降伏しているのに対し、シートの歪みは、最大耐力を決定したと思われるひび割れ近傍の平均で約10000 μ と破断歪みの2/3程度にしか達していない。シートは弾性体であるので、No.4に関しては、最大耐力時にシートに働く平均応力度は、シート引張強度の2/3程度であるといえる。同様に求めた各試験体の最大耐力時のシートの平均応力度を図-8に示す。最大耐力時のシート平均応力度は、炭素繊維シートでは、補強効果に頭打ち傾向のあったNo.6を除くと、シート引張強度の57～67%、アラミド繊維シートでは43～48%と、シート種類によりほぼ一定の値を示した。以上の結果から、本実験における使用材料の範囲内においては、シート低減係数を炭素繊維シートの場合は0.6、アラミド繊維シートの場合は0.45と提案する。以下、シート補強した試験体のせん断補強量を式(3)による $\Sigma(pw \cdot \sigma w)'$ で表す。

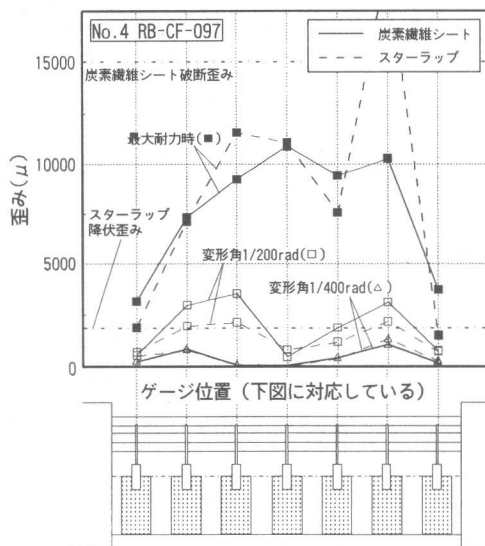


図-7 シートおよびスターラップの歪み分布

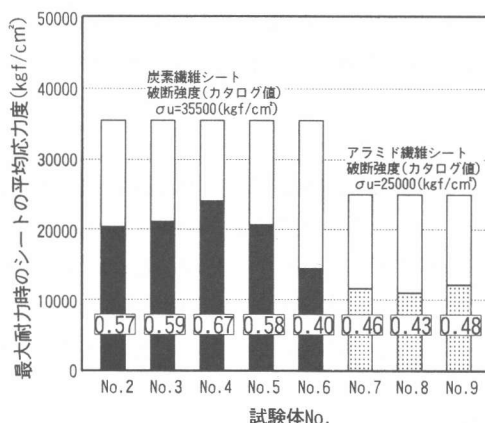


図-8 最大耐力時のシートの平均応力度

$$\Sigma(pw \cdot \sigma w)' = p_w \cdot s \cdot \sigma_y + p_w \cdot \alpha \cdot \sigma_u \quad (3)$$

α : シート低減係数(炭素繊維シート0.6、アラミド繊維シート0.45)

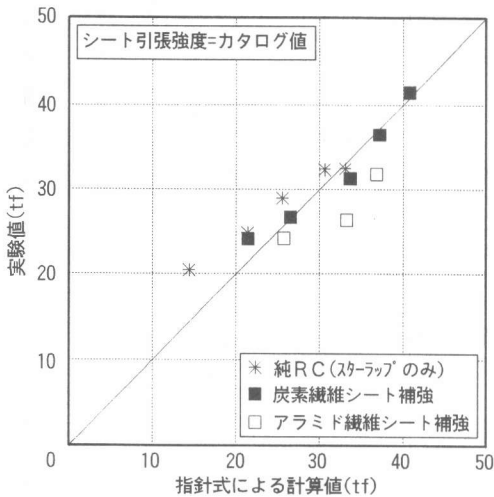


図-9 計算値-実験値比較(式(1)を使用)

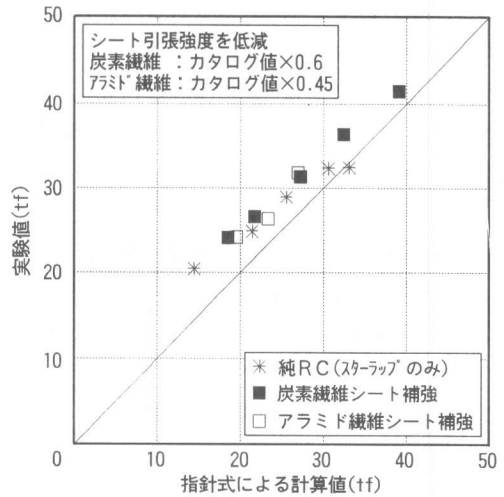


図-10 計算値-実験値比較(式(3)を使用)

(2) 計算値と実験値との比較

終局強度型耐震設計指針式(指針式)[2]によるせん断耐力の計算値と実験値との比較を図-9、10に示す。純RC試験体においては、計算値は実験値によく対応しており、せん断圧縮破壊をしたNo.13を除くと、10%程度安全側に評価している。

また、シート補強した試験体においては、式(1)によるせん断補強量(シート強度の低減なし)を用いて計算すると(図-9)、炭素繊維シート補強の場合、計算値は実験値によく対応しているが、若干危険側であり、純RC試験体に比べるとその傾向が強い。アラミド繊維シート補強の場合、計算値は実験値を明らかに危険側に評価している。一方、式(3)によるせん断補強量(シート強度の低減あり)を用いて計算すると(図-10)、炭素繊維シート補強およびアラミド繊維シート補強の場合とも、計算値は実験値によく対応している。よって、ここで提案したシート低減係数を用いることで、シート補強した試験体のせん断耐力を純RC試験体とほぼ同様に評価できたと考えられる。

終局強度型耐震設計指針式

$$V_u = b \cdot j_t \cdot p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot \nu \cdot \sigma_B / 2$$

b: 梁幅, j_t : 主筋中心間距離, $p_w \cdot \sigma_{wy}$: せん断補強量

ϕ : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度

θ : アーチ機構の材軸に対する角度

β : コンクリート圧縮力のトラス機構の負担比率

D: 梁せい, ν : コンクリート圧縮強度の有効係数, σ_B : コンクリート圧縮強度

*本研究では、シート強度に対して25 $\cdot\sigma_B$ の制限は与えなかった

4. まとめ

- (1) シート状連続繊維によるせん断補強でRC部材のせん断耐力は大きく向上する。
- (2) シート状連続繊維により補強されたRC部材のせん断耐力は、指針式を用いることで従来のRC部材のせん断耐力と同様に評価することができる。ただし、シートの引張強度を低減する必要があり、本実験の使用材料の範囲内においては、炭素繊維シートの場合で0.6、アラミド繊維シートの場合で0.45という低減係数(カタログ値に対する値)を提案する。

【謝辞】

本研究を行うにあたり、東燃㈱の明星徹氏、帝人㈱の河崎俊史氏、建設省建築研究所の福山洋氏に多大な助力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1] 松崎育弘他: シート状連続繊維によりせん断補強されたRC柱の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第18巻, 第2号, pp.1463-1468, 1996
- [2] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990