

論文 アラミド繊維シートにより補強した鉄道高架橋のせん断性状

中島規道*1・中井裕司*2・渡辺忠朋*3・松本信之*4

要旨：アラミド繊維シートによりせん断補強を行った柱試験体の水平交番載荷試験およびFEM解析による数値実験を実施した。その結果、FEM解析上のせん断補強性状を明らかにし、アラミド繊維シートによる補強量が大きくなる領域において、従来のトラス理論によるせん断耐力の算定方法は、実耐力との間に乖離が生じることを示した。

キーワード：アラミド繊維シート、鉄道高架橋、せん断補強効果、トラス理論

1. はじめに

現在、鉄道高架橋を初め各種の社会基盤構造物の耐震補強が急務とされており、既存工法による補強の実施と共に様々な研究開発が行われている。高強度、高耐食性さらに軽量で施工性に優れるなどの特徴を有するアラミド繊維や炭素繊維等の新素材繊維材料による耐震補強工法もその一つであり、一部は既に実用に供されている。アラミド繊維を一方向に配置してシート状にした補強材（アラミド繊維シート）のせん断補強効果は、既往の研究^{[1][2]}により明らかにされつつあるが、アラミド繊維シートによる補強量が大きな領域では、載荷実験の規模が大きくなることから十分な数の知見を得られていない。このため筆者等は、鉄道高架橋柱の実大寸法の載荷試験およびFEM解析による数値実験を併せて行い、アラミド繊維シートによるせん断補強性状の検討を行った。本研究ではアラミド繊維シートの補強量を主な解析要因とし、せん断補強性状の解明とともに設計用の知見を得ることも試みた。

2. 試験概要

載荷試験を行った実大試験体は、図-1に示す断面寸法が一辺600(mm)の正方形で高さが1550(mm)の片持ち梁形式の柱試験体とした。加力点高さは、1350(mm)で、せん断スパン比は2.25である。主鉄筋はD32を帯鉄筋はφ9をそれぞれ用い、主鉄筋比および帯鉄筋比は、それぞれ5.29および0.07とした。

アラミド繊維シートは、繊維の目付け量を200(g/m²)、シート幅を150(mm)として使用し、柱の全区間に渡り2層巻付けを行ってせん断補強した。アラミド繊維シートおよびその他の使用材料の強度試験結果を表-1に示す。試験時のコンクリート強度は、圧縮強度が195(kgf/cm²)、引張強度が23.0(kgf/cm²)であった。

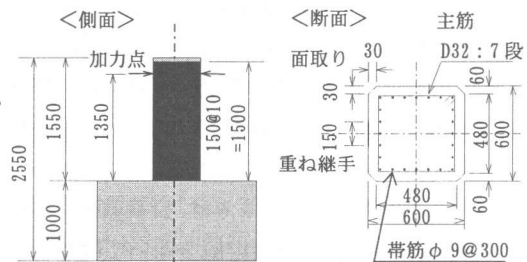


図-1 試験体形状寸法

- * 1 三井建設(株) 技術研究所 (正会員)、
- * 2 住友建設(株) 技術研究所 (正会員)
- * 3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (正会員)
- * 4 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (正会員)

表-1 材料試験結果

名称	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
アラミド	—	28600	890000
D32	4032	6004	1880000
Φ9	3315	4580	1920000

荷重方法は、軸力を作用させず、水平荷重のみを作用させるものとし、反力壁に設置した油圧ジャッキにより図-2に示す荷重手順で加力を行った。まず、曲げひびわれ発生、斜めひびわれ発生、そして帯鉄筋降伏の各荷重の計算値を上限値としてそれぞれ1回の正負交番荷重を行い、その後は一方向に単調荷重を行って試験体を破壊に至らしめた。

測定は、ロードセルにより荷重荷重を、変位計により水平変位を、ひずみゲージにより主鉄筋および帯鉄筋のひずみをそれぞれ測定した。さらに、試験体のせん断面のアラミド繊維シートのひずみ分布についても測定も行った。

3. 試験結果

実大試験体の荷重-変位曲線を図-3に示す。正負交番荷重において試験体の外観に変状は認められず、斜めひびわれの発生荷重は37(tf)と計測された。単調荷重のサイクルにおいて、荷重47.6(tf)以降剛性が徐々に低下しながらも耐力の増加を示し、荷重88.3(tf)で最大荷重を示した。その後は急激に変形が進行し、アラミド繊維シートの一部が破断して耐力を喪失した。

主鉄筋の荷重-ひずみ曲線を図-4に示す。斜めひびわれ位置において交番荷重によるひずみの累積が認められる。単調荷重の最大荷重時においても基部と同等の大きなひずみ値を示しており、この位置の損傷が著しいことが認められる。

アラミド繊維シートのひずみは、交番荷重中はひびわれ発生位置の近傍の測定値を除いて明確な変化は認められず付着性状は良好であった。単調荷重におけるアラミド繊維シートのひずみ分布を図-5に示す。せん断力の増加と共に斜めひびわれ周辺のアラミド繊維シートのひずみが大きくなり、その範囲も徐々に拡大した。最大荷重時、加力点高さの

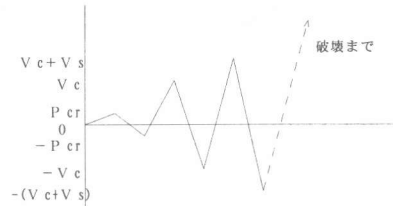


図-2 荷重サイクル

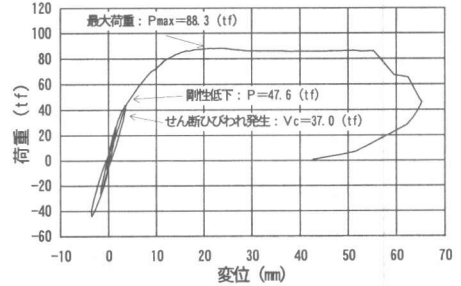


図-3 荷重-変位曲線

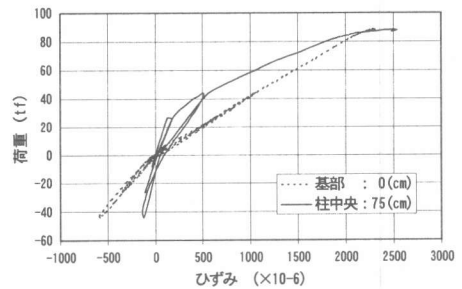


図-4 荷重-主鉄筋変ひずみ曲線

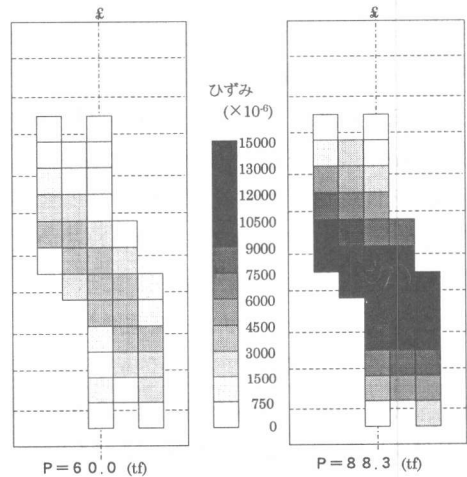


図-5 アラミド繊維シートのひずみ分布

中段付近のアラミド繊維シートのひずみは、水平方向にほぼ同一の値となり、付着破壊の状態を示していたものの、せん断変形を確実に拘束していることが認められた。この時のひずみは 14000×10^{-6} 程度であり、破断ひずみの 46(%)であった。

破壊後の試験体の観察では、基部からの高さ 30(cm)付近の圧縮側コンクリートの損傷が著しいことも認められた。これらの性状により、実大試験体の終局状態は、せん断変形による圧縮部コンクリートの破壊により生じたと判断される。

4. 解析方法

実大試験結果との整合性を予備解析を行い検証した後に、順次パラメトリック解析を実施した。解析手法は、アラミド繊維シートの拘束効果をせん断方向のみに仮定して2次元平面応力解析とした。解析対象は、実大試験体の柱体部のみとして、柱下部を完全拘束とした。荷重試験では正負交番荷重を行っているが解析では単調荷重として加力点位置に強制変位荷重を与えた。解析対象は、実大試験体の柱体部のみとして、柱下部を完全拘束とした。荷重試験では正負交番荷重を行っているが解析では単調荷重として加力点位置に強制変位荷重を与えた。

材料の非線形性を考慮するため図-6 に示す応力-ひずみ関係を使用した。コンクリート部は、4接点アイソパラメトリック要素とし、ひびわれおよび圧縮破壊を考慮した。鉄筋はトラス要素とし、弾塑性モデルと弾性モデルの2種を使用した。アラミド繊維シートは、破断を考慮した直交異方性材料とし、繊維方向のみ剛性を有する4接点要素とした。さらに、鉄筋とコンクリート間およびアラミド繊維シートとコンクリート間には付着要素を設け滑り破壊を考慮した。また、ひびわれ部のせん断方向の剛性は、ひびわれひずみ依存型とした。

解析要因の一覧を表-2示す。主な解析要因をせん断補強量とし、補強量($\rho_{af} \cdot f_{af}$)をアラミド繊維シートの補強比(ρ_{af})と破断強度(f_{af})の積として設定した。補

表-2 解析要因一覧

シリーズ	目的	アラミド繊維シート		鉄筋降伏強度	コンクリート強度
		補強量	弾性係数		
		kg/cm^2	$\times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	kg/cm^2	kg/cm^2
MA	モデルの検証	27.5	0.89	4032	195
MC	補強量の影響	0~60	0.89	4032	330
MD	主筋の降伏を排除	0~60	0.89	弾性体	330
MF	シートの弾性率の影響	30,60	1.2, 2.35	弾性体	330
MG	コンクリート強度の影響	30	0.89	弾性体	195

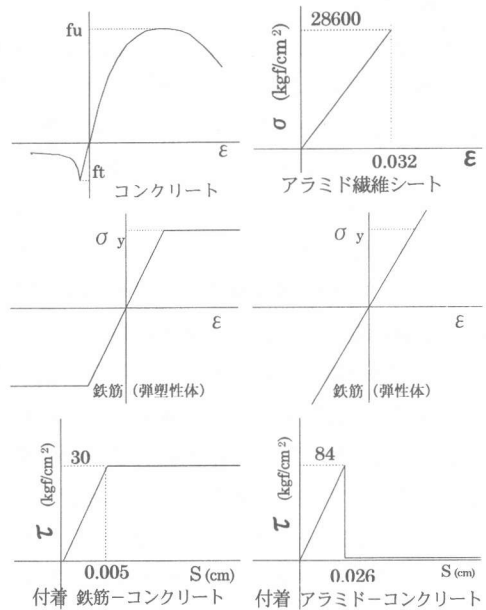


図-6 材料モデル

表-3 弾性係数の設定

名称	弾性係数 $\times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	破断強度 kg/cm^2	備考
Lタイプ	0.89	28600	アラミド
Mタイプ	1.20	27200	アラミド
Hタイプ	2.35	38900	炭素

*: 解析は主に Lタイプを使用(凡例省略)

表-4 主要荷重の比較

	実験値 (tf)	計算値 (tf)	解析値 (tf)
斜めひびわれ	37.0	37.6	36
帯鉄筋降伏	(47.6)	44.4	45
シート破断	---	75.5	---
せん断圧縮破壊	88.3	---	86
曲げ降伏	---	85.4	---
曲げ圧縮破壊	---	120.7	---

計算値: 鉄道構造物設計標準(a/d考慮)
解析値: 段階的に計算(Ma1, Ma2, Ma4)

強量の多い領域でのせん断性状を検討するために、鉄筋を弾性体として主鉄筋の曲げ降伏を抑制した解析も行った。さらに、繊維シートの弾性係数およびコンクリート強度の影響についても検討を行った。弾性係数の違いは、表-3に示す繊維材料の違いを反映させるためである。

5. 解析結果

実験値、トラス理論による計算値、FEM解析値の比較を表-4に示す。斜めひびわれ発生荷重および帯鉄筋の降伏荷重は両手法でほぼ一致した値を得られた。破壊形式は、トラス理論を用いた計算値はアラミド繊維シートの破断による破壊となったが、FEM解析は、せん断変形の進行により圧縮部コンクリートの塑性領域が拡大して計算の発散に至っており実験結果と一致した結果を得られた。

FEM解析値は、図-7に示す荷重-変位曲線、および図-8に示すアラミド繊維シートの荷重ひずみ曲線の何れについても最大耐力までの実験過程を良好に表現している。したがって、仮定した解析モデルは、十分な整合性を持つものと検証された。

鉄筋の降伏を考慮した場合の荷重-変位曲線を図-9に示す。なお、凡例中の数値が補強量を示している。また、ファイバー法により求めた鉄筋の曲げ降伏荷重および曲げ破壊荷重も併記した。せん断補強量が $30(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ を超えた場合は、主鉄筋の降伏が発生し、アラミド繊維シートの補強量が増加してもせん断補強の増分が少なくなった。

鉄筋を弾性体とした場合の荷重-変位曲線を図-10に示す。終局状態がせん断変形によるコンクリートの圧縮部の破壊となり、補強効率が鉄筋の降伏を有する場合に比べ10(%)程度高くなる傾向が認められた。また、補強量を $100(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ と極めて多く設定した場合、破壊形式はコンクリートの曲げ圧縮破壊に移行した。

上記2種の解析ケースに共通の傾向として変位15(mm)前後で曲線勾配が低下する特徴が認められ、柱試験体の絶対変形量が耐力性状に影響を与えている可能性が示唆されている。

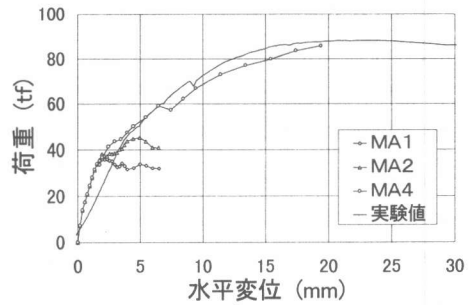


図-7 荷重-変位関係の検証

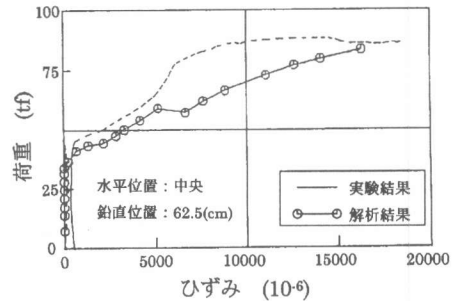


図-8 アラミド繊維シートひずみの検証

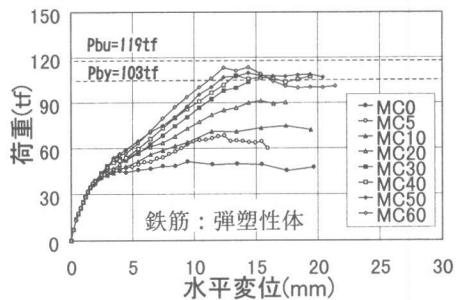


図-9 アラミド繊維シート補強量の関係

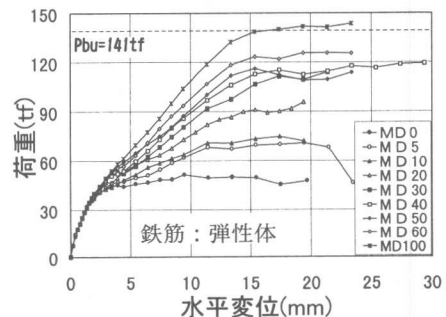


図-10 アラミド繊維シート補強量の影響

繊維シートの弾性率がせん断補強性状に与える影響を図-11に示す。繊維シートの弾性率を大きくすると、同一の補強量においてもせん断耐力の補強効率が増加する傾向が認められる。これは、等しい変形量においても繊維シートの負担するせん断力が増加すること、およびコンクリートの負担するせん断力がひずみ依存型になっていることに起因すると考えられる。また、MタイプとHタイプの補強効果の差が僅かなものとなっているが、これは補強量($\rho_{af} \cdot f_{af}$)を一致させると両者の引張剛性($A_{af} \cdot E_{af}$)がほぼ等しくなるためである。

コンクリート強度がせん断補強性状に与える影響について図-12に示す。データ数が少ないものの、コンクリートの圧縮強度が低下するとせん断補強効果も低下する傾向が示唆されている。これは、低強度のコンクリートの軟化現象が早期に開始されるためと考えられる。

6. アラミド繊維の補強効果

FEM解析におけるアラミド繊維シートの補強量と補強効率の関係を図-13に示す。補強効率は、FEM解析上のせん断耐力の増分値を、トラス理論による計算上のせん断耐力の増分値で除して算定した。トラス理論による計算式を式(1)に示す。補強量が増加するに従い、トラス理論に対する補強効率は双曲線的に低下し、0.4前後の値に収束することが認められる。また、せん断補強量が小さい領域において、アラミド繊維シートのせん断補強効果は、見かけ上トラス理論値を超えていることを示している。

この原因は、最大耐力時の変形量が小さくなるためにコンクリートのせん断剛性が寄与しているためと考えられる。

$$V_{af} = K \cdot A_{af} \cdot f_{afu} \cdot (\sin \theta + \cos \theta) \cdot Z \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 V_{af} : シートの負担するせん断力、 K : 補正係数 ($K = 1.0$)

A_{af} : アラミド繊維シートの断面積、 f_{af} : アラミド繊維シートの破断強度

Z : 応力中心間距離、 θ : シートの補強角 ($\theta = 90^\circ$)

解析結果と同様に、実験値におけるアラミド繊維シートの補強量と補強効率の関係を図-14に示す。図中のデータは、既往の研究結果^{[1][2]}より集計した。実験値においても補強量が大きくなると、トラス理論値に対する効率が双曲線的に低下する傾向が認められる。

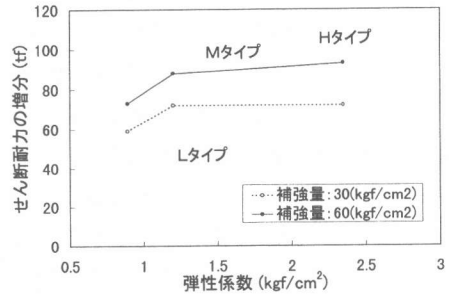


図-11 シートの弾性係数の影響

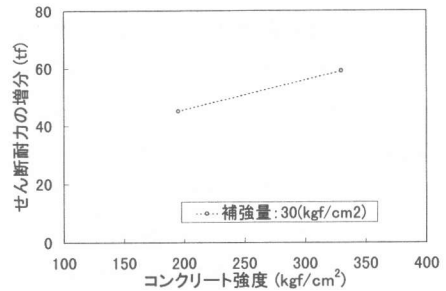


図-12 コンクリート強度の影響

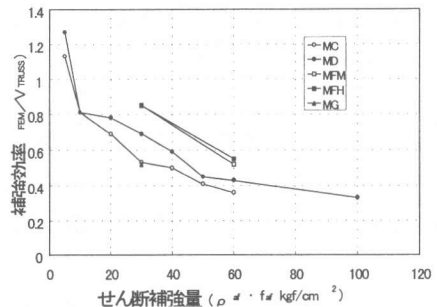


図-13 解析上のせん断補強効果

破壊形式に着目すると、解析上せん断破壊となった場合は、全てせん断変形が卓越して崩壊に至ったもので、アラミド繊維シートの破断は発生していない。これに対して、既往の実験結果では、アラミド繊維シートのせん断引張破壊とコンクリートのせん断圧縮破壊が混在している。補強量が大きな領域では両者に曲げ破壊形式が存在することも踏まえると、アラミド繊維シートによるせん断補強を効果的に行うためには破壊形式の違いを包括する手法の確立が望ましいと考えられる。しかしながら、破壊形式およびせん断耐力には、軸力、引張鉄筋比、そしてせん断剛性などの諸要因が錯綜して影響していると推測され、設定した解析要因の中では十分な解明を行うには至らなかった。

解析結果および既往の実験結果より、アラミド繊維シートの補強効率を勘案すると鉄道高架橋の実用的なせん断補強範囲内において0.7程度、全ての破壊形式を包括すると0.4程度の値が下限値となる。現状では、この補強効率を式(1)の補正係数 K として定義することによりトラス理論を使用した設計式を安全側で使用する手法が適切だと考えられる。

7. まとめ

アラミド繊維シートのせん断補強効果に対する実験および解析で、以下の知見を得られた。

- (1)材料非線形を考慮した2次元平面応力FEM解析により、アラミド繊維シートのせん断補強効果を精度良く再現する事が可能である。
 - (2)解析上のせん断破壊は、アラミド繊維シートの破断で生ずることはなく、せん断変形が卓越し崩壊する性状を示す。
 - (3)アラミド繊維シートの補強量の増加にしたがい、せん断補強の増分値のトラス理論値に対する効率は低下する。
2. トラス理論によるせん断耐力算定式に補正係数を定義することで、アラミド繊維シートのせん断耐力を算定することが可能である。

謝辞: 本研究を行うにあたり、埼玉大学町田篤彦教授にご指導を得ました。また、アラミド補強研究会の各位にご協力を得ました。ここに深甚に感謝致します。

参考文献

- [1] 朝倉他：高強度繊維巻付けによる既存RC柱のせん断補強、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.16, No.1, pp.1061-1066, 1994.6
- [2] 梅津：アラミドシートにより補強したRCはりのせん断性状、新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集、(社)日本コンクリート工学協会北海道支部、Vol.13, No.2, , 1996.11
- [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柱の耐震補強工法・設計施工指針、1996.11
- [4] 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柱の耐震効果確認実験報告書、1996.11
- [5] 佐藤他：CFRPシートとコンクリートとの付着性状と付着耐力に関する一考察、日本建築学会大会学術講義集、1995.8

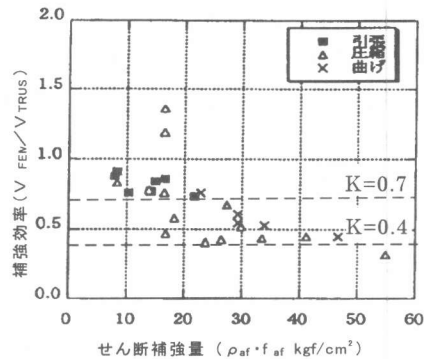


図-14 既往実験のせん断補強効果