

アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱のじん性能に関する実験的研究

勝木 太^{*1}・中井裕司^{*2}・渡辺忠朋^{*3}・森山智明^{*3}

要旨：アラミド繊維シートで補強した鉄道高架橋柱のじん性能を評価するために、鉄道高架橋柱をモデルとした実物大試験体の正負水平交番載荷試験を実施した。その結果、柱軸に対して垂直にシートを貼付けた柱のじん性能は大きく改善されること、アラミド繊維シートで補強した柱のじん性率をせん断余裕度で評価できること等を確認した。また、アラミド繊維シートによりじん性補強された柱の設計じん性率を求める設計式も提案した。

キーワード：アラミド繊維，じん性，耐震補強，交番載荷，鉄道高架橋

1. はじめに

既存 RC 柱の代表的な耐震補強工法として、鋼板巻立て工法や RC 巻立て工法が挙げられる。これらの工法は実績もあり、経済性も良いことから鉄道高架橋柱の耐震補強工法として多く採用されている。しかしこれらの工法は、環境および施工性の面において、建築限界や作業ヤード等の制約を受けること、また力学的な面においては、柱の自重を増大させ大きな地震力が生じたときフーチングや杭に過剰な外力を生じさせること等の問題がある。そこで、連続繊維補強材として利用されているアラミド繊維が、高強度で比較的耐久性に優れ、軽量であること、また伸びが大きくじん性に富むことから、鉄道高架橋柱の耐震補強材としての可能性について検討した。

本論文では、せん断耐力およびじん性が不足する実物大の鉄道高架橋柱にアラミド繊維を一方方向に並べてシート状にしたアラミド繊維シートを貼り付け、補強後の柱の変形性能を正負水平交番載荷試験で確認するとともに、アラミド繊維シートによりじん性補強された鉄道高架橋柱の設計じん性率を求める設計式を提案した。

2. 実験概要

2.1 試験体の種類

試験体は断面が一辺 60cm, 70cm および 80cm の正方形の柱で、1 層ラーメン高架橋の標準的な柱断面を実物大で模擬したもので、柱下端から水平載荷点までの高さは、ラーメン構造物の柱長さの 1/2 程度を想定した。アラミド繊維シートの補強は補強前の柱の破壊形式、すなわち曲げ破壊が先行する柱とせん断破壊が先行する柱の 2 種類に対して行い、それぞれ補強量をパラメータとして試験を行った。試験体一覧を図 1 に示すが、補強前の破壊形式が曲げ破壊する試験体については柱基部から 2D (D: 柱の断面高さ) 区間に補強し、せん断破壊する試験体については柱全体に補強することを原則とした。

アラミド繊維シートの貼り付け施工は、コンクリート表面をディスクサンダーでケレン仕上げをした後にプライマーを塗布し、シートを巻き付けた後にエポキシ樹脂を含浸させて硬化させた。

* 1 東急建設(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)

なお，試験体のコーナ部は長辺が 40mm の二等辺三角形の面木を設置した後にコンクリートを打設することで面取りを行っている。

2.2 使用材料

表 1 および表 2 に使用した材料の種類と特性を示すが，表中の値はすべて試験結果の平均値である。なお，試験体のせん断耐力および設計曲げモーメントの算定に使用する材料の特性値は，試験結果の平均値を用い，材料係数と部材係数を 1.0 として計算した。

図 1 試験体概要

2.3 荷重方法

荷重方法は試験体 1, 2 に 1177kN の，試験体 3, 4 に 2354kN の，また試験体 5 には 1922kN の軸力を荷重し，正負水平交番荷重とした。なお，柱上部は軸力荷重用ジャッキと荷重フレームの間にスライド支承を挿入させ，柱の変位を拘束しないようにした。軸力荷重用ジャッキは定荷重制御装置により制御し，常に一定軸力を荷重した。加力サイクルは， $\pm 1 y$ ， $\pm 2 y$ ， $\pm 4 y$ ・・・とし，各 y 毎に 3 サイクル行うことを基本とした。ここで，降伏変位 y は，正負方向でそれぞれ

れ柱下端部の最外縁の主鉄筋ひずみが降伏ひずみに達するときの変形量とした。

3. 実験結果

3.1 変形性状

表3に各試験体の主な試験結果を示すが，表中の計算値は材料試験結果を用い，材料係数と部材係数はすべて1.0として計算した結果である[1]。また，図2には各試験体の荷重

と載荷点での水平変位の履歴曲線と破壊状況を示す。なお，荷重はジャッキの水平力に鉛直力の曲げモーメント成分を加えて補正したものである。

表1 材料特性 (単位: MPa)

項目	試験体 No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
コンクリート	圧縮強度	22	27	23	24	20
主筋	弾性係数($\times 10^5$)	2.01	1.91	2.01	2.01	1.82
	降伏強度	345	349	345	345	316
帯筋	弾性係数($\times 10^5$)	2.01	1.95	2.03	2.03	1.88
	降伏強度	325	317	319	319	325

表2 アラミド繊維シート (樹脂含浸のもの) の特性

シート種類	目付量	層数	総目付量	引張強度	弾性係数	計算に使用
テクノーラ	200	1	200	2587	0.97×10^5	No.1
		3	600	2665	0.87×10^5	No.2~4
ケブラー	425	3	1275	2500	1.32×10^5	No.5

表3 試験結果一覧

試験体	主筋降伏時				最大荷重時				終局時	全体 じん性率 μ		
	降伏荷重 P_y (kN)			変位 y (mm)	最大荷重 P_{max} (kN)			変位 p (mm)	変位 u (mm)			
	計算値	実験値	実/計		計算値	実験値	実/計					
No.1	292	正	355	1.21	27.5	350	正	422	1.20	157.0	208.3	7.6
		負	365	1.25			25.8	負	432	1.24	174.6	174.6
No.2	301	正	338	1.12	21.8	336	正	448	1.33	155.3	213.2	9.8
		負	340	1.13			21.2	負	428	1.27	192.6	192.6
No.3	647	正	712	1.10	23.3	765	正	914	1.19	137.4	181.4	7.8
		負	701	1.08			19.5	負	862	1.13	132.2	132.2
No.4	651	正	705	1.08	19.8	775	正	885	1.14	79.6	151.4	7.6
		負	723	1.11			21.4	負	849	1.10	139.7	139.7
No.5	420	正	442	1.05	18.6	483	正	609	1.26	115.5	201.0	10.6
		負	406	0.97			16.5	負	575	1.19	95.0	165.0

無補強時の破壊形式が曲げ破壊する試験体1,2および5を比較すると，最も補強量の少ない試験体1は，主筋が座屈すると同時にはらみ出すコンクリートを拘束できなくなった時点で，柱隅角部近傍のアラミド繊維シートが破断し荷重が急激に低下した。これに対し，試験体2および5は比較的補強量が多いため，主筋が座屈しコンクリートがはらんでもアラミド繊維シートは十分コンクリートを拘束し，変形性能を増大させた。

無補強時の破壊形式がせん断破壊する試験体3および4を比較すると，両者ともせん断破壊することなく変形性能を増大させたが，補強量の少ない試験体3は試験体1の場合と同様，主筋の

座屈によりはらみ出すコンクリートを拘束できなくなり脆性的に破壊した。また、試験体 4 は試験体 3 より多く補強したため、アラミド繊維シートの破断は免れたが、コンクリートのはらみ出しがかなり進むため、試験体 3 よりも変形性能を増大させる結果とはならなかった。これは、柱基部のせん断変形が卓越し、シートで拘束されたかぶりコンクリート部の圧縮特性が著しく低下したためと考えられる。

図2 各試験体の変位履歴曲線と破壊状況

3.2 補強効果の比較

アラミド繊維シートによる補強効果を評価するために、各試験体のじん性率およびエネルギー吸収能力を無補強のもの[2],[3]と比較した。エネルギー吸収能力は式(1)より求めた各試験体の荷重 - 変位包絡線の面積 A (図3参照)の無補強試験体に対する比率で評価した(表4)。ただし、各試験体の降伏変位、終局変位は正負の平均値を使用し、降伏荷重は表3の計算値を使用した。曲げ破壊が先行する試験体1, 2, 5においては無補強試験体に比べ約1.5~2.0倍程度の、またせん断破壊が先行する試験体3, 4については約4倍程度の面積が確保されており、アラミド繊維シートで補強することによってエネルギー吸収能力が大きく向上する結果となった。

$$A = 1/2 \cdot \delta_y \cdot P_y + 1/2 \cdot (\delta_u - \delta_y) \cdot (P_y + P_u) \quad (1)$$

ここで、 P_u : 終局変位時の荷重(= P_y) , $\mu = \delta_y / \delta_u$

表4 補強効果の比較

断面(mm)	種類	実験値(mm)		計算値	μ	A/A ₀
		y	u	P _{yca1} (kN)		
600×600	無補強	25.6	123.3	300	4.82	1.00
	No.1	26.7	191.5	292	7.17	1.57
	No.2	21.5	202.9	301	9.44	1.74
800×800	無補強	21.0	43.6	671	2.08	1.00
	No.3	21.4	156.8	647	7.33	4.26
	No.4	20.6	145.6	651	7.08	3.96
700×700	無補強	21.2	89.9	448	4.24	1.00
	No.5	17.6	183.0	420	10.40	2.06

図3 荷重 - 変位の包絡線

4. じん性補強設計式の提案

全体じん性率とせん断余裕度の関係を、60×60cmの無補強試験体および試験体1~5についてまとめたものを図4に示す。全体じん性率とは終局変位を降伏変位で除した値としたが、ここで使用する終局変位および降伏変位は交番載荷実験から得られる部材端の変位であり、それぞれ軸方向鉄筋の抜け出しを含んだ変位である。なお、降伏変位は柱基部の最外縁の主鉄筋ひずみが降伏ひずみに達したときの載荷点変位と定義し、また終局変位は荷重変位曲線の包絡線において、復元力が主鉄筋降伏時の復元力を越えて最大値に達した後に低下を始め、降伏点復元力以下に低下する直前の変位とした。各試験体のせん断余裕度の計算は、各材料強度に材料試験結果を用い、材料係数および部材係数をすべて1.0として鉄道構造物等設計標準・同解説に準拠し求めた。なお、アラミド繊維シートで補強した柱のせん断耐力(V_{AFy})は、コンクリート(V_c)、帯鉄筋(V_s)およびアラミド繊維シート(V_{AF})の受け持つせん断耐力の和とし、特にアラミド繊維シートが受け持つ

せん断力は, 式(2)に示すようにトラスモデル式に 0.4 を乗じて評価した[4]。

$$V_{AF} = 0.4 \cdot (A_{AF} \cdot f_{AFu} / S_{AF}) \cdot z \quad (2)$$

ここで, A_{AF} : アラミド繊維シート単位幅あたりの断面積

f_{AFu} : アラミド繊維シートの平均引張強度

S_{AF} : アラミド繊維シートの単位幅

z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材の図心までの距離で, 一般に $d/1.15$ としてよい。(d は有効高さ)

今回行った実物大の実験結果によれば, アラミド繊維シートで補強した柱部材のじん性率は, せん断余裕度が増加すれば, ほぼ直線的に増加する傾向があることがわかる。そこで, せん断余裕度と全体じん性率の関係を定式化するため, 実験結果に対して直線近似したものを中央値とし, さらに, すべての実験結果を包括できるように中央値を $=1.2$ の係数で除したものを下限値とし

て設定した。ここで, この下限式をじん性率を求める設計式とした場合, 材料係数・部材係数を考慮せずに求めたせん断余裕度から設計補強じん性率が与えられる。しかし本論文では, 設計上の利便性を考え, 材料係数および部材係数を考慮したせん断補強設計時の設計曲げ耐力, 設計せん断力を用いて求まる設計せん断余裕度より設計補強じん性率を求めることのできる設計式を提案した。そこで, 今回行った試験体すべてに対して設計せ

図 4 全体じん性率とせん断余裕度の関係

ん断余裕度を求め, その時の全体じん性率が部材係数, 材料係数を考慮せずに求めたせん断余裕度と下限式によって求まる全体じん性率と同等となるように係数を定めた。式(3)には, アラミド繊維シートによるじん性補強量を求める設計式を提案した。また, 表 5 には設計する場合の材料係数および部材係数を示した。

$$\mu = 2.2 + 3.2 \times (V_{AFyd} \cdot a / M_{AFud}) \quad (3)$$

ここで, V_{AFyd} : 設計補強せん断耐力

M_{AFud} : 設計補強曲げ耐力

a : 柱のせん断スパン長

5. まとめ

今回, 鉄道高架橋柱へのじん性補強材としてアラミド繊維シートの適用をはかるため, 実大寸法で構造実験を実施した。その結果以下のことが分かった。

(1) 曲げ破壊する RC 柱に対して, 柱基部

から高さ方向 2D 区間にアラミド繊維シートを柱軸直角方向に貼り付けることにより, じん性能お

表 5 材料係数および部材係数

		V_{AFyd}	M_{AFud}
材料係数	コンクリート	1.3	1.3
	鉄筋	1.0	1.0*
	アラミドシート	1.2	1.2
部材係数	コンクリート	1.3	1.0
	鉄筋	1.15	1.0
	アラミドシート	1.15	1.0

* 材料修正係数 1.2 を乗じる

よびエネルギー吸収能力の向上が認められた。

(2) せん断破壊する RC 柱に対して，柱全体にアラミド繊維シートを柱軸直角方向に貼り付けることにより，柱の破壊モードが曲げ破壊に移行し，じん性能及びエネルギー吸収能力の向上が認められた。

(3) 今回，全体じん性率をせん断余裕度の一次式で評価し，材料係数および部材係数を考慮した設計式を提案した。

参考文献

- [1] 鉄道総研：鉄道構造物等設計標準・同解説，コンクリート構造物，，1992.10
- [2] 鉄道総研：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強効果確認実験報告書，1996.7
- [3] 佐藤，安原，渡辺：RC 柱の鋼板巻きによる耐震補強効果，橋梁と基礎 8，pp96-99，1996.8
- [4] 鉄道総研：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（設計編），1996.7

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各位にご協力を得ました。ここに深甚に感謝いたします。