

論文 炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱のせん断補強

岡野素之*1・大内 一*2・森山智明*3・松本信之*4

要旨：炭素繊維シートを鉄筋コンクリートの表面に貼付けてせん断補強する工法に関し、鉄道高架橋柱の実物大実験を実施し、非線形有限要素法解析により実験結果を検討した。さらに、補強量に着目した解析を加え補強効果を検討し評価式を提案した。

試験体は合計4体で、断面が $60 \times 60 \text{ cm}$ 、 a/d を2.5とし、炭素繊維シートの補強量と強度をパラメータとした。実験と解析の結果、補強量が非常に小さいと補強効果が発揮されにくいこと、実用的な補強量の範囲では、炭素繊維シートの強度を用いてトラス理論で計算した場合の80%程度の補強効果を発揮することなどがわかった。

キーワード：ラーメン橋脚、せん断補強、炭素繊維シート

1. はじめに

兵庫県南部地震では、RC造のラーメン橋脚の柱部材がせん断耐力の不足により破壊に至る甚大な被害を受けた。炭素繊維シート（以下CFShと呼ぶ）を鉄筋コンクリートの表面に貼付けてせん断補強する工法は、狭隘な場所での施工が可能であるなどの利点があり適用が期待されている。炭素繊維による柱部材のせん断補強については報告されている[1]、[2]、[3]が、いずれも縮小模型実験であり、また鉄道高架橋のラーメン橋脚は地震時には引張軸力が生じる場合がありこれらの検討はなされていない。

そこで、鉄道高架橋柱の実物大実験により引張軸力下におけるCFShの補強効果を検討し、非線形有限要素法解析により実験結果を検討した。さらに、このモデルを基にCFShの補強量をパラメータとした解析を加え、CFShによる補強効果について検討し評価式を提案した。

2. せん断実験

2.1 実験の概要

(1) 試験体

試験体の一覧を表-1に、形状・寸法と配筋を図-1にそれぞれ示す。試験体は片持ちはり形式の合計4体で、CFShの強度と補強量をパラメータとした。鉄筋量は、実橋脚を参考に、軸方向鉄筋比 $p_l = 5.29\%$ （24-D32）、帯鉄筋比 $p_w = 0.07\%$ （ $\phi 9@300 \text{ mm}$ ）とした。

(2) 使用材料

試験体には呼び強度21MPa、スランブ8cm、粗骨材の最大寸法が20mmのレデーミクストコン

表-1 試験体の一覧

試験体	帯鉄筋 (帯鉄筋比 p_w)	炭素繊維の 公称強度 (MPa)	炭素繊維 補強量	炭素繊維の 補強筋比 p_{ef}
S0		—	なし	0 %
S100 L	$\phi 9@30 \text{ cm}$ (0.07 %)	2940	100 g/m^2	0.019 %
S200 H		3430	200 g/m^2	0.037 %
S200 L		2940	200 g/m^2	0.037 %

*1 (株) 大林組技術研究所 構造第一研究室 副主任研究員 (正会員)

*2 (株) 大林組技術研究所 構造第一研究室 主任研究員, 工博 (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 構造システム 技師, 工修 (正会員)

*4 (財) 鉄道総合技術研究所 構造システム 主任技師, 工修 (正会員)

表-2 コンクリートの材料試験結果

試験体	材齢 (日)	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)
S0	35	32.5	2.67	26.5
S100 L	42	33.1	2.72	27.1
S200 H	29	32.0	2.62	26.0
S200 L	62	34.9	2.88	28.8

表-3 鉄筋の引張試験結果

鉄筋	降伏強度 f_y (MPa)	降伏ひずみ $\times 10^{-6}$	引張強度 f_u (MPa)	ヤング係数 E_s (GPa)
D32 主筋(ネジ鉄筋)	401	2239	631	198
$\phi 9$ せん断補強筋	345	1664	489	210

表-4 炭素繊維の引張試験結果

種類	換算厚さ (mm)	公称強度 (MPa)	引張強度 f_{cf} (MPa)	ヤング係数 E_{cf} (GPa)	試験体
30000 級100 g/m ²	0.0555	2940	3832	244	S100 L
35000 級200 g/m ²	0.111	3430	4312	252	S200 H
30000 級200 g/m ²	0.111	2940	3391	252	S200 L

クリート（早強）を使用した。実験時のコンクリートの材料試験結果を表-2に示す。

鉄筋は、柱部の主鉄筋にD32を、せん断補強筋に $\phi 9$ をそれぞれ用いた。CFShは、目付量200 g/m²、および100 g/m²の2種類とした。JIS K7073に準拠しCFShの引張試験を実施した。補強材の引張試験結果を表-3、4にそれぞれ示す。

(3) 載荷方法

加力装置を図-2に示す。試験体を反力床に鋼棒で固定し、引張り軸力（合計706 kN、1.96MPa）を載荷・保持した状態で、試験体頭部に正負交番で水平力を加えた。

2.2 実験結果

(1) 破壊性状

試験体の破壊状況の代表例を写真-1に示す。各試験体ともせん断引張型の破壊であった。無補強のS0試験体は、せん断ひび割れ発生後帯鉄筋が降伏し荷重が低下し破壊した。またCFShで補強した試験体は、帯鉄筋が降伏した後、最大荷重時にCFShが破断し荷重が大きく低下し破壊した。補強量の小さい試験体S100 LはCFShの破断が瞬時に発生し、CFShとコンクリート表面が密着していたのに対し、補強量の大きい試験体S200 H、S200 LはCFShの破断は段階的に発生し、CFShはせん断破壊面付近でコンクリート表面からの剥離が認められた。

(2) 変位性状

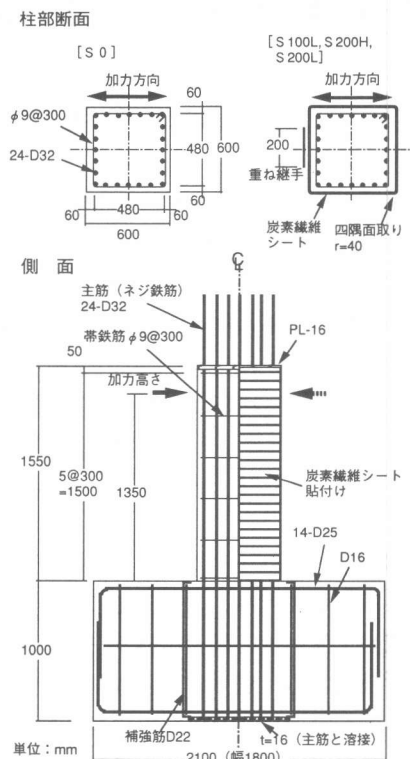


図-1 試験体の形状・寸法と配筋

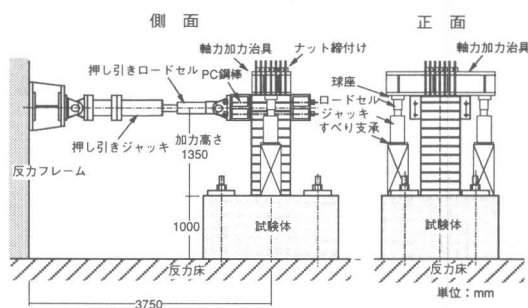


図-2 加力装置

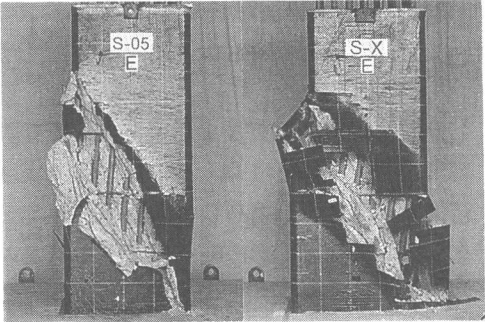
各試験体のせん断力（水平荷重）と加力高さでの水平変位との関係を図-3に示す。補強量の小さいS100L試験体は補強しないS0試験体と荷重と変位の関係はほぼ同様であり補強効果が少ないことがわかる。また補強量の大きい試験体（S200H、S200L）の補強効果は明らかに確認できる。

(3) ひずみ性状

CFS_hの高さ方向のひずみ分布を、図-4（S100L）、（S200L）に示す。同図は試験体側面中央の水平ひずみを示している。補強量の大きいS200L試験体では基部から40～90cmの区間ではほぼ均等なひずみの値を示しているのに対し、補強量の小さいS100L試験体はCFS_hのひずみが局所的に卓越する傾向がある。

(4) 補強効果

表-5に補強効果の一覧を示す。表中に、最大荷重のCFS_hによる補強増分の計算値（ V_{cf} ：トラス理論、CFS_hの強度を用い、土木学会コンクリート標準示方書[4]の V_{sd} の計算に準ずる）との比較を示した。ここで補強増分はCFS_hの受け持つせん断耐力で、補強した試験体と補強しないS0試験体の最大荷重の差として求めた。また有効率は補強増分を前述した計算値（ V_{cf} ）で除して求めた。200g/m²のCFS_hを使用したS200H、S200Lは有効率70%以上を確保しており、CFS_hの補強効果が認められる、また軸力のない実験結果[1]において、炭素繊維ストランドは強度の2／3程度を発揮するとの報告があり今回と同程度の補強効果である。したがって本実験程度の引張軸力では補強効果は低下しないと考えられる。補強量の小さいS100L試験体はS200H、S200Lに比べ有効率が小さくCFS_hの補強効果が低い。一般に製造されているCFS_hは200g/m²以上の製品であり、これらを使用する上では補強効果は期待できるといえる。



S100L S200L
写真-1 最終破壊状況の例

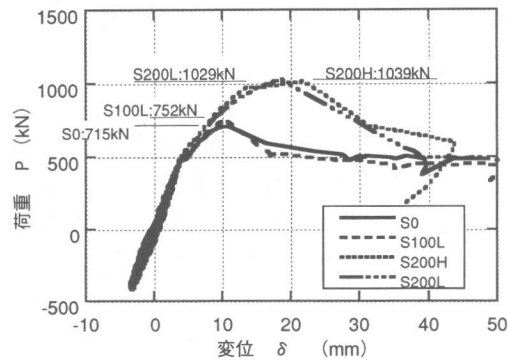


図-3 荷重－変位関係

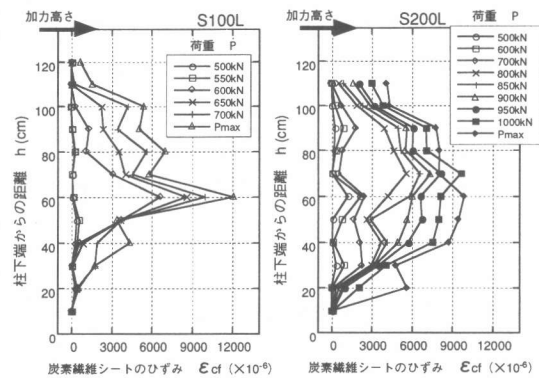


図-4 ひずみ分布

表-5 補強効果の一覧

試験体	Vcfの 計算値 (kN)	実験結果			
		帯筋降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	補強増分 (kN)	有効率
S0	0	533	715	—	—
S100L	176	607	752	37	21 %
S200H	450	665	1039	324	72 %
S200L	400	791	1029	314	78 %

3. 有限要素法解析による 実験結果の検討

(1) 解析方法

分散ひび割れモデルを用いた非線形有限要素法解析（以下FEMと呼ぶ）により実験結果を検討した。解析には自社開発のコンクリート構造非線形FEM解析プログラム「FINAL」[5]を使用した。解析モデル（二次元）と材料試験結果に基づく材料特性を図-5に示す。コンクリートとCFSHの付着性状は佐藤らの提案するモデル[6]を用いた。なお、主筋の抜け出しは実験時の測定結果から決めた。

(2) 解析結果

荷重と変位の関係を実験結果とともに図-6に、実験値と解析値の比較を表-6にそれぞれ示す。解析での破壊形態は実験結果と整合した。S0、S200HおよびS200Lの試験体は最大荷重、最大荷重時の変位および全体の荷重と変位の関係において実験値（実線）と解析値（点線）はよく整合している。一方S100Lの試験体は、途中までは両者は整合しているが最大荷重は実験値が解析値より小さい。無補強・補強の試験体がともに精度よく評価できていることから、補強量が少ない場合に注意を要するが、本解析方法とモデルで構造性能の評価が可能と判断できる。

4. 有限要素法解析による 補強効果の検討

(1) 解析方法とパラメータ

3章で用いた解析モデルと材料特性を基本とし、CFSHの補強量（ p_{cf} ）をパラメータとした解析を行ない補強効果を検討した。なお補強効果をより明確に把握するため以下のように解析条件と材料特性を変更した。

- 帯鉄筋を除く。
- 主筋を弾性体とする。
- 軸力をゼロとする。

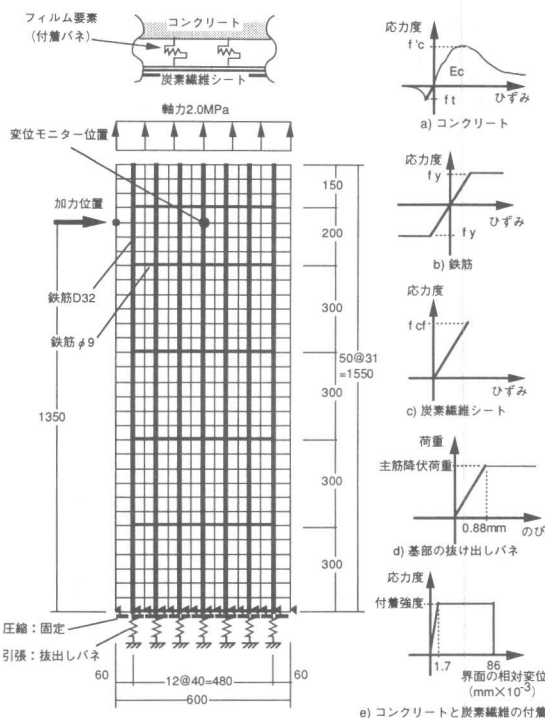


図-5 解析モデルと材料特性

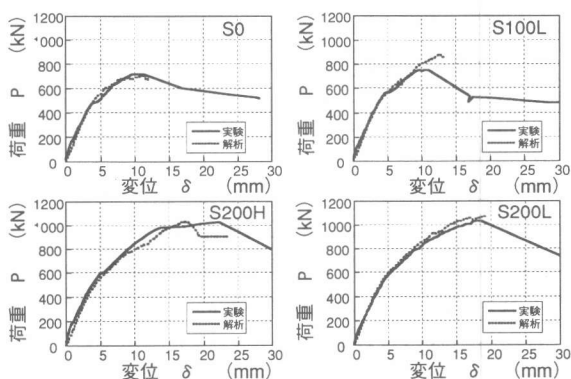


図-6 荷重－変位関係

表-6 実験値と解析値の比較

試験体	最大荷重 (kN)			変位 (mm)		
	実験値	解析値	実／解	実験値	解析値	実／解
S 0	715	708	0.99	9.89	11.59	0.85
S 100 L	752	883	0.85	9.72	12.71	0.76
S 200 H	1039	1028	1.01	21.72	17.52	1.24
S 200 L	1029	1064	0.97	18.57	18.83	0.99

d)主筋の拔出しをゼロとする。

(2) 破壊形式と補強効果

各解析ケースで最大荷重後、荷重が急激に低下する時点を破壊と判断した。破壊形式は、補強筋比が0.111%以下の領域ではCFShが破断するせん断引張破壊であった。それ以上の補強領域ではCFShが破断せずコンクリートの破壊により荷重が低下し、せん断圧縮破壊とみられる。

補強効果は最大荷重の増加分を平均せん断応力度： τ_{Vcf} で表し、補強量は補強筋比 p_{cf} (%)で評価する。またトラス理論に基づきCFShの補強効果計算値に対する τ_{Vcf} の比を有効率： K と定義する。

補強効果と補強量の関係を図-7に示す。全体にCFShが破断する $p_{cf}=0.111\%$ 程度まで補強量の増加にしたがって補強効果は上昇し、その後コンクリートで破壊する領域では補強量が増えても補強効果はほとんど上昇しない。これはCFSh破断の場合は補強量が強度に直接寄与するのに対し、コンクリート破壊の場合はコンクリート強度で決まるためと考えられる。

せん断引張破壊型の有効率と補強量の関係を図-8に示す。補強量の少ない $p_{cf}<0.037\%$ (200g/m²のシート1層に該当)の領域では K 値は低いが、実用レベルとみられる $0.037\%<p_{cf}<0.111\%$ (200~600g/m²)の範囲では $K=0.70\sim0.85$ (平均0.81)まで上昇する。

本実験と既往の報告[1]、[2]、[3]での K 値と補強量の関係を図-9に示す。図-8と図-9から、今回の実験結果(記号：▲)が解析値と整合しているのが分かる。Sheet[2]、Strand[3]およびStrand[1]の実験結果は解析値を上回る傾向があり、解析値が安全側の計算を与えている。

補強効果がトラス理論で求めた値より低い原因として以下のことが考えられる。コンクリートにせん断ひび割れが生ずると、その位置からコンクリートとCFSh間での付着切れが発生する。補強量が少ない領域($p_{cf}<0.037\%$)では付着切れ範囲は非常に小さいため、ひび割れを横切るCFShのひずみが局所的に大きくなり十分な効果を発揮せずに破断する。補強量が多い領域($0.037\%\leq p_{cf}$)では、付着切れ範囲は大きくなり、CFShが断面高さ方向に平均的に応力を分担する。しかしCFShは弾性材料で鉄筋のように降伏しないため、応力の部材軸方向の再配分が十分行なわれず、せん断抵抗区間でCFShの強度を発揮しない。

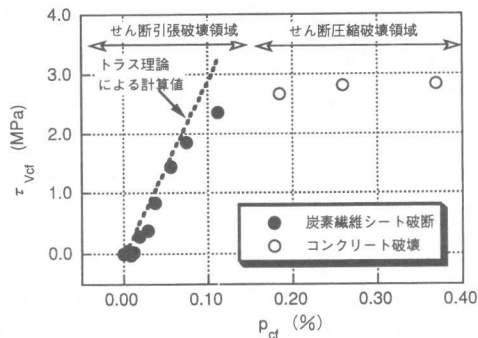


図-7 補強効果と補強量の関係

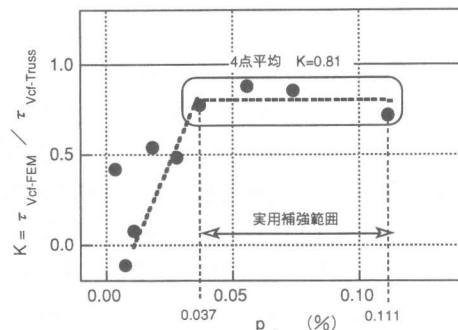


図-8 解析における
有効率と補強量の関係

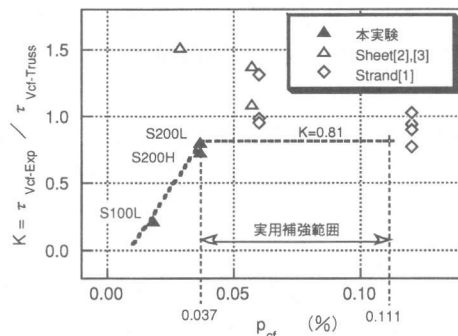


図-9 実験における
有効率と補強量の関係

5. 評価式の提案

以上の検討から得られた有効率をもとに、実用上の補強範囲を考え、炭素繊維シートによる補強効果の補正係数（K値）を提案する。

補正係数 $K=0.8$ 、ただし $p_{cf} > 0.035\%$ p_{cf} : セン断補強筋比
炭素繊維が受け持つせん断耐力は、トラス理論を用いた計算値に上記補正係数を乗じて求める。

6. まとめ

炭素繊維シートによるせん断補強に関して、鉄道高架橋柱をモデルとした実大実験を実施し、非線形有限要素法解析により補強効果を検討した。その結果を以下に示す。

- (1) 実大規模において炭素繊維シートはせん断補強材として利用できる。
- (2) 炭素繊維シートとコンクリート間の付着モデルを用いた非線形有限要素法解析により、破壊形態、荷重変位関係を評価できる。
- (3) 補強量が非常に小さい場合 ($p_{cf} < 0.037\%$)、炭素繊維シートは付着力の影響でひずみが局所化し破断しやすくなり、補強効果が大きく低下する。
- (4) 実用の補強量の範囲 ($0.037 < p_{cf} \leq 0.111\%$) ではせん断引張破壊し、炭素繊維シートの強度を用いてトラス理論で計算した場合の80%程度の補強効果を発揮する。全強度を発揮しない理由は、ひび割れ発生による応力の集中が、炭素繊維シートが弾性体であるため、せん断抵抗区間全体に再配分されないことによる。
- (5) 補強量が非常に大きい場合 ($0.111\% < p_{cf}$)、破壊形態はコンクリートの破壊となる。
- (6) 補強効果は引張軸力により低下しない。

提案した評価式は「炭素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、平成8年7月（鉄道総合技術研究所）」に採り入れられている。

謝辞：せん断実験とその検討[7]は、鉄道高架橋炭素繊維シート利用耐震補強工法研究会からの委託により実施しました。関係各位に深謝致します。

参考文献

- [1] 小畠克朗、勝俣英雄、田中常雄：炭素繊維の巻付けによる既存鉄筋コンクリート部材の耐震補強、コンクリート工学年次論文報告集、論文1147、11-1、pp.861～866、1989年6月
- [2] 安藤博文、前田良文、緒方紀夫、岡野素之、小畠克朗：炭素繊維によるせん断補強効果に関する研究、土木学会第49回年次学術講演概要集、V-467、pp.934～935、1994年9月
- [3] 岡野素之、勝俣英雄：炭素繊維による鉄筋コンクリートはりのせん断補強効果、土木学会第49回年次学術講演概要集、V-466、pp.932～933、1994年9月
- [4] 土木学会：コンクリート標準示方書[平成8年度制定]
- [5] 長沼一洋：鉄筋コンクリート耐震壁の非線形解析手法とせん断強度に関する研究、学位論文（千葉大学工学部）、平成5年9月
- [6] 佐藤裕一、木村耕三、小畠克朗：CFRP接着補強コンクリート部材におけるCFRPシート接着面の挙動について、第5回複合材料界面シンポジウム要旨集、pp.209～213、1996年5月
- [7] 岡野素之、大内一、森山智明、松本信之：炭素繊維シートによる鉄道高架橋のせん断補強に関する実験、第2回阪神・淡路大震災学術講演会、pp.329～332、1997年1月