

炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強に関する研究

岡野 素之
香川 敦
(本社 土木技術本部設計第3部)

大内 一
古賀 政二郎
(本社 土木技術本部企画部)

概要

炭素繊維シートを鉄筋コンクリート柱の周囲に貼付けることにより、部材のせん断耐力とじん性を向上する工法を開発してきた。今回、鉄道高架橋柱の実物大試験体により、せん断実験とじん性実験を実施し補強効果を検討した。また、せん断補強効果に関して非線形有限要素法解析を加え補強効果を検討した。

その結果、せん断耐力は実用的な補強量の範囲内でトラス理論による計算値の80%程度の補強効果を発揮すること、じん性は補強量に応じて向上することなどがわかり、既往の実験結果をふまえ、せん断耐力とじん性率の評価式をそれぞれ提案した。

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、せん断耐力と曲げじん性の不足により破壊に至る甚大な被害を受けた。炭素繊維シートを鉄筋コンクリートの表面に貼付けてせん断補強あるいはじん性補強する工法は、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。炭素繊維シート（以下、CFSH）とは素線を一方方向にシート状に敷き並べ樹脂などで形状を保持したもので、エポキシ樹脂を含浸させて用いる。これらの補強に関しては研究がなされている^{1)~5)}が、いずれも縮小モデルである。またラーメン橋脚は、地震時に引張力から高圧縮軸力に至るまで軸力変動が大きい。

そこで、せん断補強とじん性補強に関しこれらの条件に着目し、鉄道高架橋柱の実物大実験を実施した。せん断補強に関しては非線形有限要素法による解析により実験結果を評価した。さらに補強効果に関するパラメトリックな解析を加え、既往の実験結果を踏まえてせん断補強の評価式を提案した。じん性に関しては既往の実験結果を合わせじん性率の補強評価式を提案した。本報告はこれらの実験・解析の概要と、評価式について述べる。

2. せん断補強

2.1 せん断実験

2.1.1 実験の概要

(1) 試験体 試験体の一覧をTable 1に、形状・寸法と配筋をFig. 1にそれぞれ示す。パラメータはCFSHの強度と補強量である。試験体は断面が一辺60cmの正方形、高さ1.55mの片持ちはり形式の柱で、合計4体である。せん断スパン比は $a/d=2.5$ で、加力高さは柱基部から1.35mと

した。断面の隅角部には半径4cmの丸みを付けた。鉄筋量は、実橋脚を参考に、軸方向鉄筋比 $p_t=5.29\%$ (24-D32)、帯鉄筋比 $p_w=0.07\%$ ($\phi 9@300$ mm)とした。CFSH貼付け後1週間は養生シートで覆い内部の気温が15℃以上

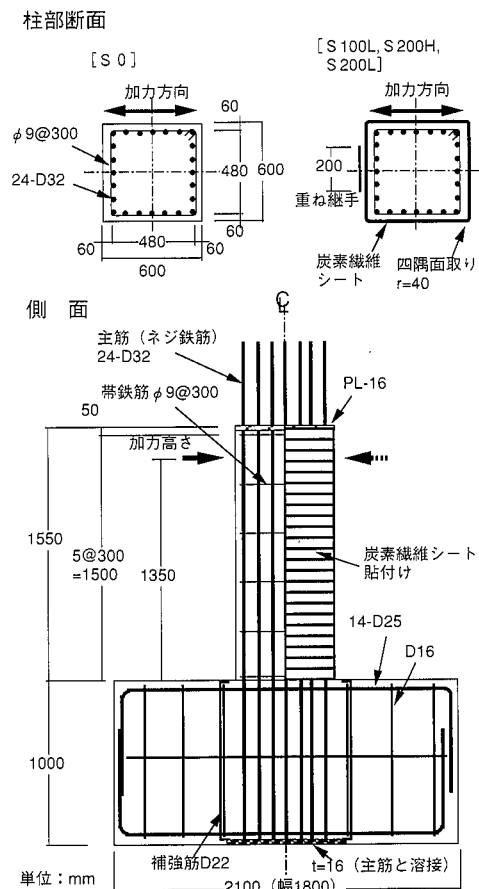


Fig. 1 試験体
Test Specimens

となるように保温した。なおCFSH貼付け時に強度試験用のテストピースを採取した。

(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のレードミクストコンクリート(早強)を使用した。コンクリートの性質をTable 2に示す。鉄筋は、柱部の主鉄筋にD32(ネジ鉄筋:SD390)を、せん断補強筋にφ9(SR235)を用いた。その性質をTable 3に示す。CFSHは、目付量200g/m²、および100g/m²の2種類とした。炭素繊維自身の換算厚さはそれぞれ0.111mm、0.0555mmである。公称強度は、

Table 1 試験体の一覧
Test Specimens

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_{cf}
S0	φ9@30cm (0.07%)	—	なし	0%
S100L		2940	100 g/m ²	0.019%
S200H		3430	200 g/m ²	0.037%
S200L		2940	200 g/m ²	0.037%

Table 2 コンクリートの性質
Properties of Concrete

圧縮強度 f_c (Mpa)	引張強度 f_t (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)
33.1	2.72	27.1

Table 3 鉄筋の性質
Properties of Rebar

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
φ9 せん断補強筋	345	1664	489	210

Table 4 炭素繊維シートの性質
Properties of Carbon Fiber Sheet

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	S100L
35000 級200 g/m ²	0.111	3430	4312	252	S200H
30000 級200 g/m ²	0.111	2940	3391	252	S200L

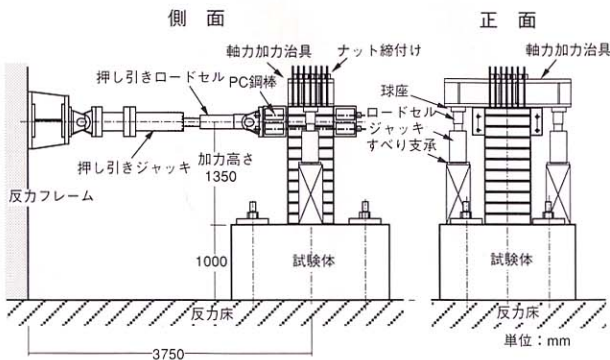


Fig. 2 加力装置
Loading Apparatus

3,430MPaと2,940MPaである。JIS K7073に準拠しCFSHの引張試験を実施した。試験結果をTable 4に示す。

(3) 荷重と測定 加力装置をFig. 2に示す。試験体を反力床に鋼棒で固定し、引張軸力(706kN、柱単位断面面積当たり1.96MPa)を荷重・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。各荷重段階で、荷重、変位および炭素繊維・鉄筋のひずみを測定した。

2.1.2 実験結果

(1) 破壊性状 試験体の破壊状況をPhoto 1に示す。各試験体ともせん断引張型の破壊であった。補強していない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。補強量の少ない試験体S100L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るのに対し、補強量の多い試験体S200H、S200L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剥がれているのが認められた。また、CFSHの強度の高い試験体S200Hは、CFSHの剥離が広く発生している。

(2) 変位性状 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Fig.3に示す。補強量の少ないS100L試験体は補強していない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

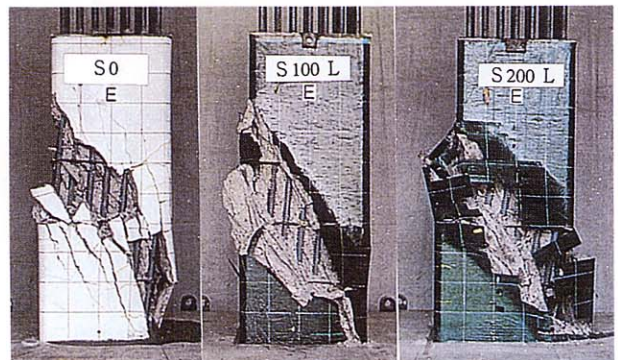


Photo 1 破壊状況の例
Typical Failure Circumstances

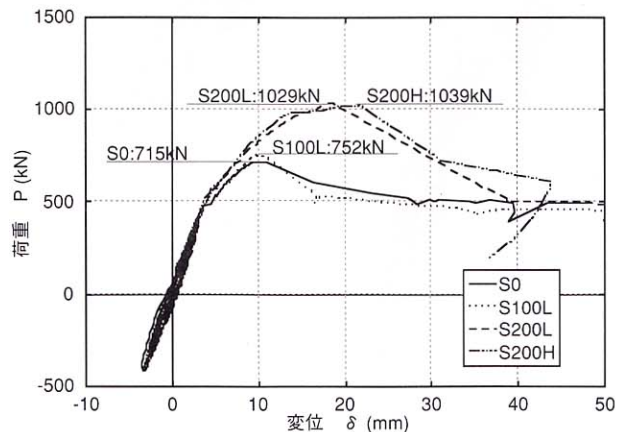


Fig. 3 荷重-変位関係
Load-Displacement Relationship

わかる。また補強量の多い試験体 (S200H, S200L) の補強効果は明らかに確認できる。

(3) ひずみ性状 CFSHの高さ方向のひずみ分布を Fig.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。補強量の多い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少ないS100L試験体はCFSHのひずみが局部的に卓越する傾向がある。

(4) 補強効果 Table 5に補強効果の一覧を示す。表中に、最大荷重のCFSHによる補強増分の計算値 (V_{cf} : トラス理論, CFSHの強度を用い土木学会コンクリート標準示方書⁹⁾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CFSH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。また有効率はせん断抵抗区間での炭素繊維シートの平均的な補強効果を示す指標とし、補強増分を前述した計算値 (V_{cf}) で除して求めた。200g/m²のCFSHを使用したS200H, S200Lは有効率70%以上を確保しており、CFSH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下では補強効果は低下しないと考えられる。補強量の少ないS100L試験体はS200H, S200Lに比べ有効率が小さくCFSHの補強効果が低い。一般に製造されているCFSH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。

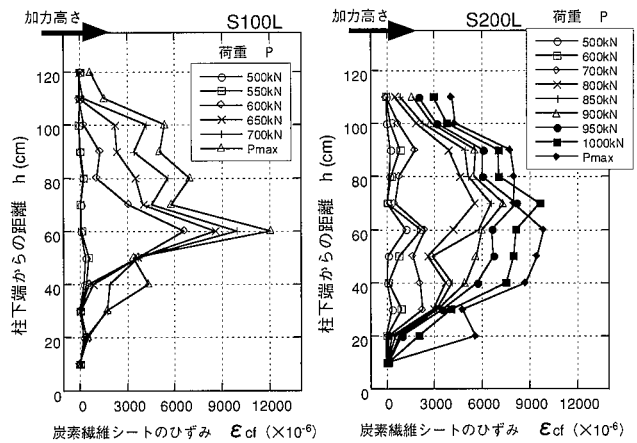


Fig. 4 炭素繊維シートのひずみ分布
Typical Strain Distributions of Carbon Fiber Sheet

Table 5 実験結果の一覧
Test Results

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 %

2.2 有限要素法解析による実験結果の検討

2.2.1 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」⁷⁾を使用した。解析モデル (2次元) と材料試験結果に基づく材料特性をFig. 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⁸⁾を用いた。なお、帯鉄筋は丸鋼であるため両端の主筋のみ固定し、主筋の抜け出しは実験時の測定結果から決めた。

2.2.2 解析結果 荷重と変位の関係を実験結果とともに Fig. 6に示す。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の試験体では、最大荷重は実験値が解析値より小さい値となっている。これらから、CFSHの補強量が少ない場合に注意を要するが、付着を考慮した本解析方法とモデルにより構造性能の評価が可能と判断できる。

2.3 有限要素法解析による補強効果の検討

2.3.1 解析方法とパラメータ 2.2で用いた解析モデルと材料特性を基本とし、CFSHの補強量をパラメータとし解析を行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

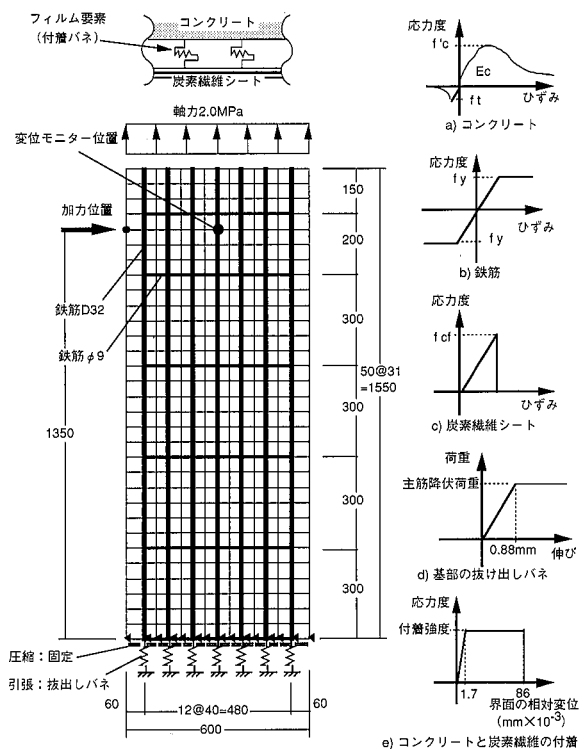


Fig. 5 解析モデル
Models of Non-linear FEM Analysis

性を変更した。

- 1) 帯鉄筋を除く
- 2) 主筋を弾性体とする
- 3) 軸力なし
- 4) 基部の主筋を固定

2.3.2 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定した。補強量が少ない(600g/m²以下, $p_{cf} \leq 0.111\%$) 領域ではCFShが破断し,せん断引張破壊した。一方補強量が多い(600g/m²より大, $p_{cf} > 0.111\%$) 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ており,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くCFShの補強効果計算値: τ_{Truss} 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Fig.7に示す。ばらつきはあるもののCFShが破断する $p_{cf} = 0.111\%$ 程度まで補強量の増加に従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効果はほとんど上昇しなくなる。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にはコンクリートの強度で決まるためである。

せん断引張破壊型における有効率と補強量の関係をFig.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 値は低い傾向があるが,実橋脚で想定される補強量である $0.037\% < p_{cf} < 0.111\%$ (補強量200~600g/m²)の範囲では $K = 0.70 \sim 0.85$ (平均0.81)まで上昇している。本実験と既往の報告(1),(2)および(3)での K 値と補強量の関係をFig.9に示す。Fig.8とFig.9から,今回の実験結果(▲で表示)が解析値と整合しているのが分かる。Sheet, Strandの実験結果は解析値を上回る傾向があるが,現在一般に用いられるCFShと強度が違うことなどが考えられる。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。補強量が非常に少ない領域 ($p_{cf} < 0.037\%$)では炭素繊維の剛性が低いため付着切れ範囲は極めて小さく,ひび割れを横切るCFShのひずみが局所的に大きくなり補強効果を十分発揮せずに破断する。補強量が多くなると ($0.037\% \leq p_{cf}$),炭素繊維の剛性が上がるため付着切れ範囲は広くなり,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われず,せん断抵抗区間全体では,CFShの強度を發揮しない。

2.4 評価式の提案

以上の検討から得られた有効係数をもとに,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。

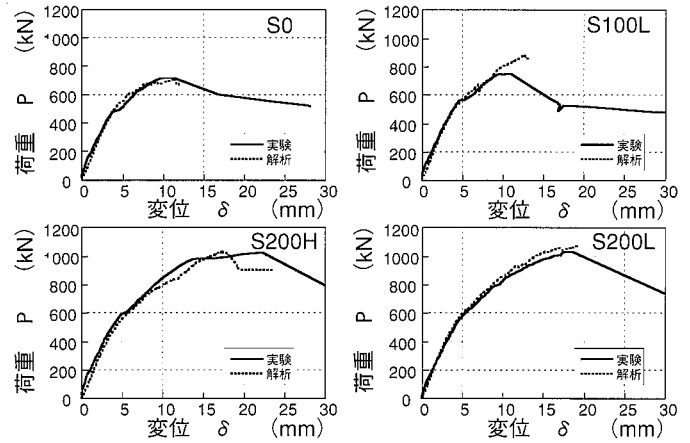


Fig.6 実験と解析の比較
A Comparison of Experiment with Analysis

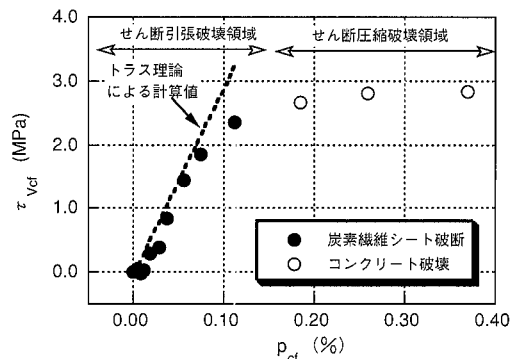


Fig.7 補強効果と補強量の関係
Retrofitting Effect - Reinforcing Ratio Relationship

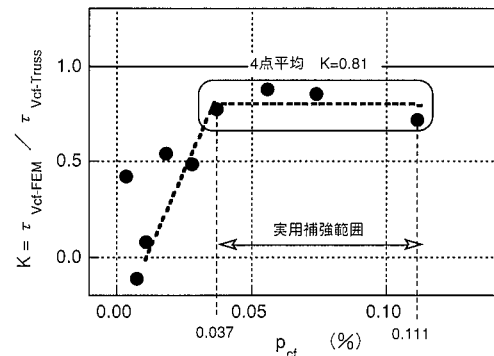


Fig.8 有効率と補強量の関係(解析)
Effect Rate-Reinforcing Ratio Relationship of Analysis

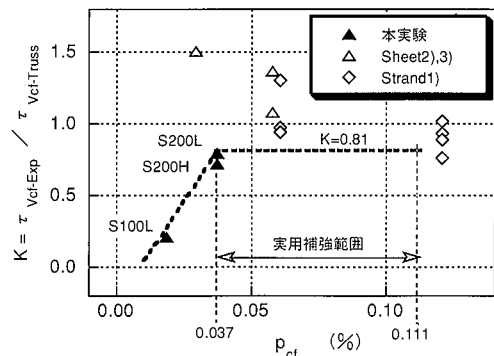


Fig.9 有効率と補強量の関係(実験)
Effect Rate-Reinforcing Ratio Relationship of Experiment

補正係数 $K=0.8$

ただし $p_{cf} > 0.035\%$ p_{cf} : せん断補強筋比

炭素繊維シートが受け持つせん断耐力は、上記補正係数を修正トラス理論による計算値に乗じて計算する。

2.5 せん断補強のまとめ

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) 炭素繊維シートの補強量が非常に小さい場合 ($p_{cf} < 0.037\%$)、炭素繊維シートはその剛性が低いため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) 実橋脚で想定される炭素繊維シートの補強量の範囲 ($0.037 < p_{cf} \leq 0.111\%$) ではせん断引張破壊し、炭素繊維シートはその強度の80%程度を発揮する。全強度を発揮しない理由は、ひび割れ発生により局所的に集中した応力が、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がなされないことによる。
- 5) 補強量が非常に大きい場合 ($0.111 < p_{cf}$)、破壊形態は炭素繊維シートの破断ではなく、コンクリートの破壊となる。
- 6) 本実験程度の引張軸力 (1.96MPa) では、補強効果への影響はみられない。
- 7) せん断引張破壊領域での評価式として補正係数: $K=0.8$ を提案した。

3. じん性補強

3.1 じん性実験

3.1.1 実験の概要

(1) 試験体 試験体は、断面が一辺70cmの正方形の鉄筋コンクリート柱で、柱高さ3.4mである。加力高さは柱基部から3.2mとし、せん断スパン比は $a/d=5.0$ である。試験体の形状・寸法と配筋をFig. 10に、一覧をTable 6にそれぞれ示す。パラメータは炭素繊維の補強量と形態(シートとストランド)である。炭素繊維ストランド(以下CFS_t)とは繊維の素線を数千本から数万本束ねたもので、エポキシ樹脂を含浸させて用いる。補強区間は柱の基部から2D(D:断面の高さ)の範囲とした。試験体の鉄筋量は、実橋脚を参考に、軸方向鉄筋比 $p_l=2.59\%$ (16-D32)、帯鉄筋比 $p_w=0.12\%$ ($\phi 9@150\text{mm}$)とした。CFS_h貼付後、1週間は養生シートで覆い約15℃以上となるよう保温し、その後実験開始まで現場養生とした。D-S試験体におけるCFS_tの巻付け作業は専用のCF巻付け装置を使用した。なおCFS_h貼付けおよびCFS_t巻付け作業時に強度試験

Table 6 試験体の一覧
Test Specimens

No.	帯鉄筋 (帯鉄筋比 p_w)	炭素繊維 補強量	炭素繊維の 補強筋比 p_{cf}	備考
D-0	$\phi 9@150\text{cm}$ (0.12%)	なし	0%	基準試験体
D-3		600 g/m ²	0.095%	炭素繊維シート
D-5		1000 g/m ²	0.158%	
D-8		1600 g/m ²	0.254%	
D-S		1000 g/m ²	0.158%	炭素繊維ストランド

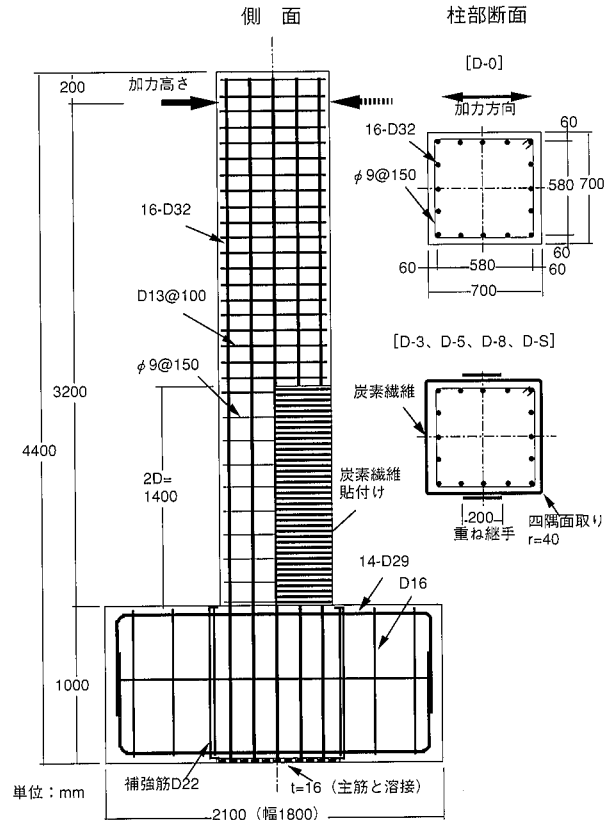


Fig. 10 試験体
Test Specimens

Table 7 コンクリートの性質
Properties of Concrete

圧縮強度 f_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)
38.1	3.17	28.5

Table 8 鉄筋の性質
Properties of Rebar

鉄筋	降伏強度 f_y (MPa)	降伏ひずみ $\times 10^{-4}$	引張強度 f_u (MPa)	ヤング係数 E_s (GPa)
D32 主筋	349	1757	544	202
$\phi 9$ せん断補強筋	345	1664	489	210
D13 せん断補強筋	355	1857	533	200

Table 9 炭素繊維シートの性質
Properties of Carbon Fiber Sheet

試験片	公称強度 (MPa)	引張強度 f_{cf} (MPa)	ヤング係数 E_{cf} (GPa)	試験体
炭素繊維シート (200 g/m ²)	3430	4312	252	D-3、D-5
	3430	4322	246	D-8
炭素繊維ストランド	3430	3814	234	D-S

用のテストピースをそれぞれ採取した。

(2) 使用材料 試験体には呼び強度21MPa, スランプ8cm, 粗骨材の最大寸法が20mmのレードミクストコンクリート(早強)を使用した。コンクリートの性質をTable 7に示す。鉄筋は柱部の主鉄筋にD32(SD295A)を, せん断補強筋は靱性補強区間(基部より2D区間)にφ9(SR235)を, それより上部にD13(SD295A)を用いた。その性質をTable 8に示す。補強材に使用したCFSHは, 1層当たりの炭素繊維量(目付量)が200g/m²の製品で, 換算厚さは1層当たり0.111mmである。炭素繊維の公称強度はともに3430MPaである。JIS K 7073に準拠しCFSHとCFSHの引張試験を実施した。試験結果をTable 9に示す。

(3) 载荷と測定 加力装置をFig. 11に示す。試験体を反力床に鋼棒で固定し, 反力壁に取付けた油圧ジャッキにより試験体頭部に水平力を加えた。圧縮軸力は1921kN(柱単位断面積当たり3.92MPa)を試験体頭部に加え保持した。加力サイクルは最外縁主筋の降伏変位(+δy, -δy)を基準とし, 順にその整数倍の変位をピークとして, 各3回繰返した。各荷重段階で, 荷重, 軸力, 変位および炭素繊維・鉄筋のひずみを測定した。

3.1.2 実験結果

(1) 破壊性状 最終破壊状況の例をPhoto2に示す。各試験体とも, 曲げひび割れの発生, 主筋の降伏, 主筋の座屈によるコンクリートのはらみ出しの順で破壊が進み, 補強試験体は終局時に以下の二つの性状を示した。

- 1) 炭素繊維が破断して破壊: D-3, D-5
- 2) 柱基部の断面形状が矩形から円形に変化し破壊: D-8, D-S

D-8では補強量が多いため, コンクリートがはらんでもCFSHは破断せず, 柱基部のコンクリートが内部で破損し, 柱の断面形状が矩形から円形に近づく変化が生じた。

また, D-5はCFSHが破断したのに対し, 同じ補強量のD-SのCFSHは破断しなかった。

(2) 変位性状 各試験体の荷重と変位の関係とスケルトンの比較をFig.12に示す。図中には柱頭部の変形にともなう軸力による2次曲げを考慮した降伏荷重Pyを記した。終局変位δuは変位の包絡線とPyの交点としたこれらの図から炭素繊維でじん性補強した試験体は無補強試験体に比べ, 終局変位が増加しており, また補強量が増加するにつれて終局変位も増加するのがわかる。

(3) ひずみ性状 Fig. 13に代表的な補強試験体の炭素繊維のひずみの変化を示す。測定位置は柱側面の基部より45cmの高さである。炭素繊維が破断したD-3に比べ破断しなかったD-8はCFSHの最大ひずみが小さく破壊形態を裏付けている。Fig. 14に主筋の高さ方向のひずみ分布の代表例を示す。柱の引張側中央部の主筋における, 各正加力サイクルピーク時のひずみ測定値である。これから, 各試験体とも破壊に至るまで1.5Dから上方では鉄筋は降伏しないこと, また炭素繊維の補強量は, 主筋の降伏する範囲に顕著に影響しないことがわかり,

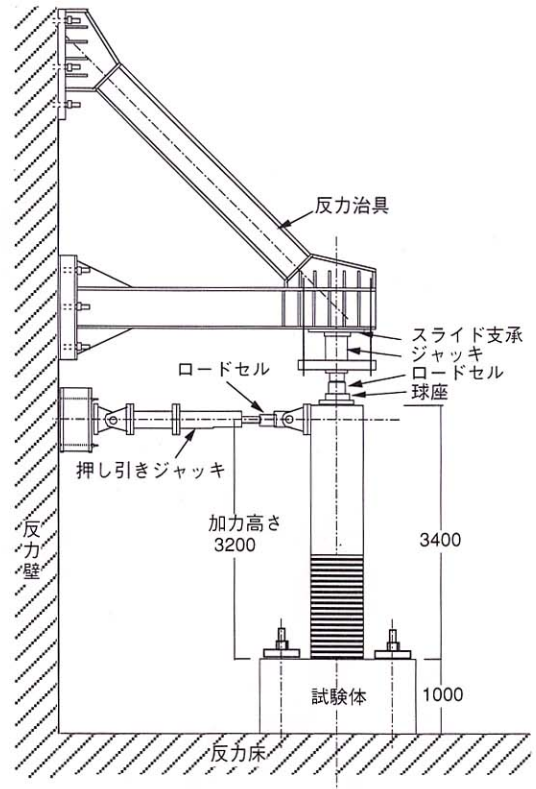


Fig. 11 加力装置
Loading Apparatus

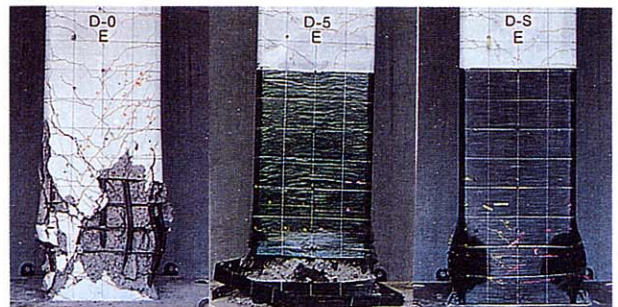


Photo 2 破壊状況の例
Typical Failure Circumstances

本実験では塑性ヒンジ領域は基部から1.5D以下の範囲であったと言える。

(4) じん性率 Table 10にじん性率の一覧を示す。じん性率は, 無補強のD-0に比較し, 補強型ではその量に応じて増大しており補強効果があることがわかる。また, CFSHによる補強効果(D-S)はCFSH(D-5)よりやや大きい。

3.2 評価式の提案

じん性率とせん断余裕度との関係を, 今回の実験と既往の実験^{4) 5)}についてまとめ, Fig.15に示す。図中の(正)は正負交番载荷の正加力载荷, (負)は負加力载荷の結果である。各試験体のせん断余裕度 $V_u \cdot a / M_u$ の計算は,

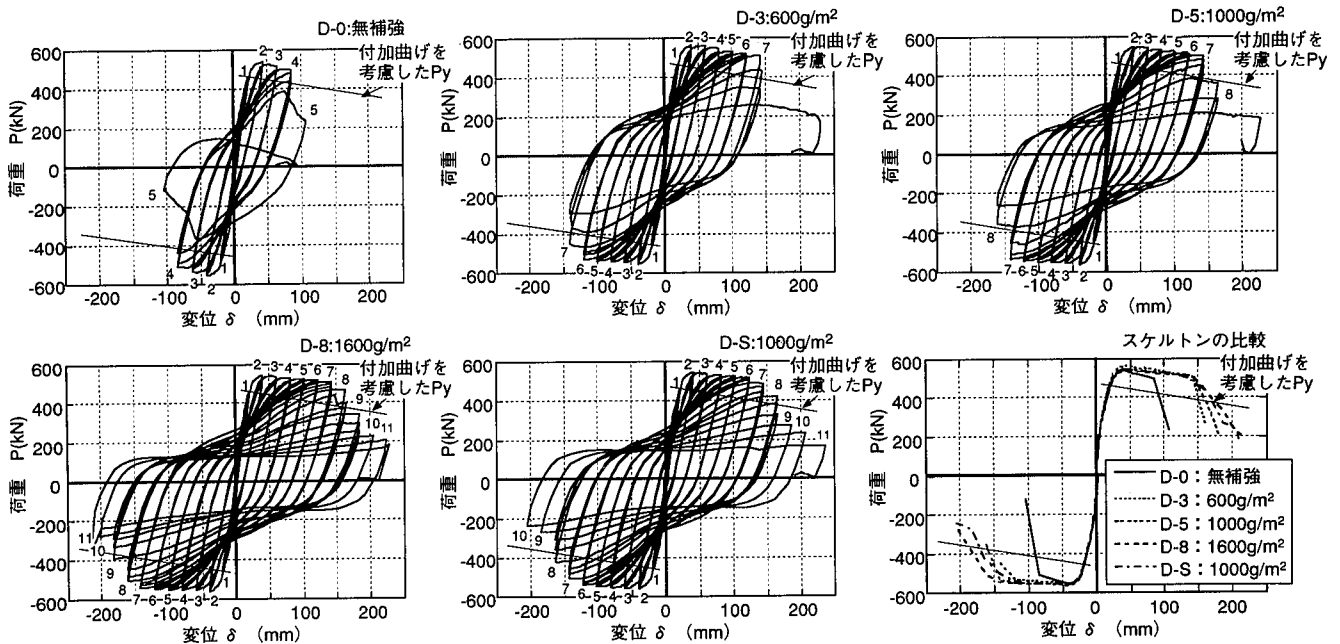


Fig. 12 荷重-変位関係
Load-Displacement Relationship

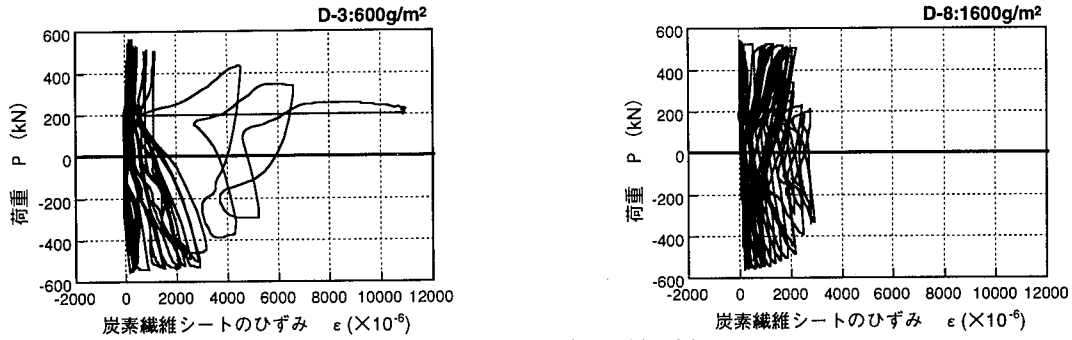


Fig. 13 荷重-ひずみ関係の例
Typical Load - Strain Relationship of Carbon Fiber

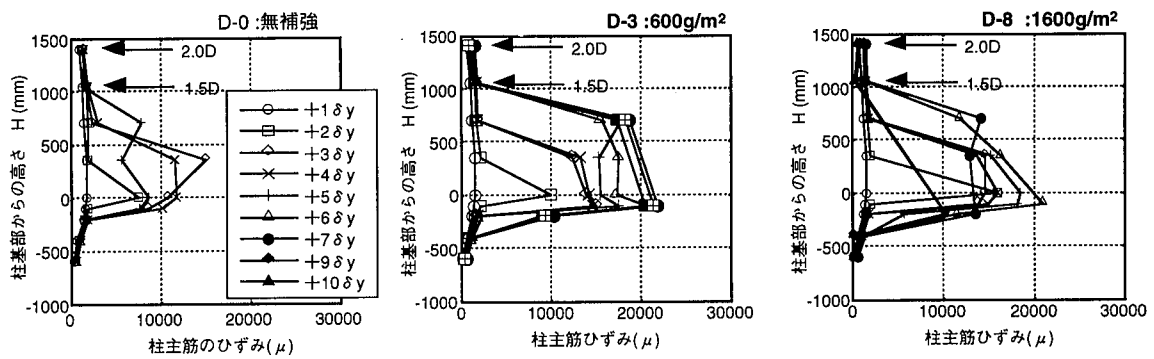


Fig. 14 主筋のひずみ分布
Typical Strain Distributions of Longitudinal Rebar

炭素繊維シート、コンクリートおよび鋼材の材料強度に材料試験結果を用い、材料係数と部材係数を1.0として求めた。せん断耐力は2.4に従い求めた。

じん性率の中央値は、今回の実験について最小2乗法で直線で近似し実線で示す次式となる。

$$\text{中央値} : \mu_m = 3.35 + 1.06 \times (V_u \cdot a / M_u) \quad \dots (1)$$

また、下限値は(1)式を安全率で除した型で与えて点線で示す次式となる。

$$\text{下限値} : \mu_l = 2.80 + 0.88 \times (V_u \cdot a / M_u) \quad \dots (2)$$

ここに μ : じん性率, V_u : せん断耐力
 a : せん断スパン, M_u : 曲げ耐力

Table 10 じん性率と部材角の一覧

Ductility and Drift Angle					
試験体	方向	降伏変位 δ_y (mm)	終局変位 δ_u (mm)	じん性率 $\mu = \delta_u / \delta_y$	部材角 $\delta_u / \text{加力高さ}$
D-0	+	21.20	91.23	4.30	1/35
	-	21.20	88.65	4.18	1/36
D-3	+	20.10	150.07	7.47	1/21
	-	20.10	141.70	7.05	1/23
D-5	+	20.30	160.32	7.90	1/20
	-	20.30	158.10	7.79	1/20
D-8	+	20.30	180.75	8.90	1/18
	-	20.30	187.63	9.24	1/17
D-S	+	20.50	171.64	8.37	1/19
	-	20.50	174.17	8.50	1/18

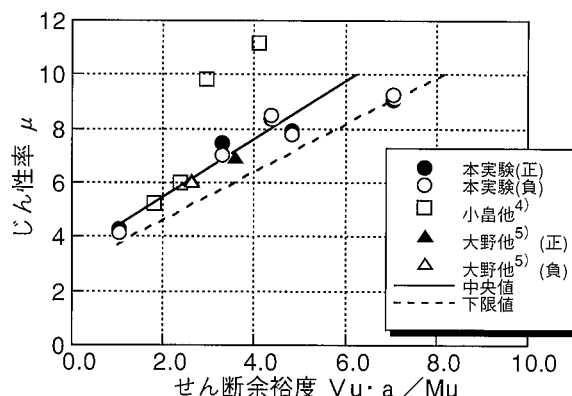


Fig. 15 じん性とせん断余裕度の関係
Ductility - Shear Safety Margin Relationship

3.3 じん性補強のまとめ

柱部材の炭素繊維シートによるじん性断補強効果を把握し、構造物への適用をはかるため、実物寸法での構造実験を実施した。その結果以下のことがわかった。

1) 鉄筋コンクリート柱の基部から高さ方向2D区間の全周にCFShを帯筋方向に貼付けることにより、じん性に関して補強効果が認められ、補強量の増加に従ってじん性率が補強前の4程度から7~9程度まで向上する。

2) 破壊性状は、曲げひび割れの発生、主筋の降伏、主筋の座屈によるコンクリートのはらみ出しの順で破壊が進み、終局時には補強量により炭素繊維シートが破断する場合と破断せずに柱基部の断面形状が矩形から円形に変化する場合がある。

3) 炭素繊維ストランドは同じ量 (1,000g/m²) の炭素繊維シートに比較し、ややじん性補強効果が高い。

4) 本実験では塑性ヒンジ領域は基部から1.5D以下の範囲であった。

5) せん断余裕度を指標とした評価式を提案した。

4. まとめ

炭素繊維シートによるせん断およびじん性補強に関し、実験結果をもとに解析を加え、評価式を提案した。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

本研究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、(財)鉄道総合技術研究所と共同で実施しました。関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) 小島克朗, 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, p.861~866, (1989.6)
- 2) 安藤博文, 前田良文, 緒方紀夫, 岡野素之, 小島克朗: 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, p.934~935, (1994.9)
- 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, p.932~933, (1994.9)
- 4) 小島克朗, 勝俣英雄, 大野 了: CFRP 巻付け工法で耐震補強された既存RC橋脚のじん性能, 土木学会第49回年次学術講演概要集, V-459, p.918~919, (1994.9)
- 5) 大野 了, 大内 一: 炭素繊維によるRC橋脚の耐震補強に関する実験的検討, 土木学会第51回年次学術講演概要集, V-476, p.950~951, (1995.9)
- 6) 土木学会コンクリート標準示方書 [平成8年制定] 設計編
- 7) 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), (1993.9)
- 8) 佐藤裕一, 木村耕三, 小島克朗: 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, p.209~213, (1996.5)