

炭素繊維シートを用いた耐震補強

（株）鴻池組 正会員 藤原祐一郎
京都大学 正会員 小野紘一
（株）鴻池組 正会員 嶋村貞夫
（株）鴻池組 正会員 松村 誠

はじめに

1995年1月17日早朝、明石海峡付近を震源とした兵庫県南部地震が発生し、多くの土木および建築構造物が従来の地震被害とは比較にならないほどの大きな被害を受けた。我が国は環太平洋地震帯に属する世界有数の地震国であり、これからも今回のような大地震の洗礼を受けることが予想され、既設構造物の耐震補強が急務となっている。

このような大規模な地震に対して、たとえば既設橋脚の補強は「鋼板接着工法」あるいは「RC 巻き立て工法」等で行われている。しかし、鋼板接着工法では鋼板を既設橋脚に仮止めするアンカーの打設、鋼板のハンドリングと溶接、樹脂注入等、施工が必ずしも容易でないという欠点がある。また RC 巻き立て工法では、新旧コンクリート打ち継ぎ面のチッピング処理など施工が煩雑で、騒音などの環境問題が発生するばかりでなく、躯体重量の増加によって基礎の増設が必要になる場合や断面の増加による建築限界の侵犯にも留意が必要となる。

これに対して、炭素繊維シート補強工法は、橋脚にシートを貼付けるだけなので重機・火気が必要なく比較的施工が容易である。しかも躯体重量や断面の増加もほとんどないので補強効果が確認できれば実用的な工法となりうる。

ここでは、炭素繊維シートによる補強効果の確認を目的として実施した、道路橋脚を対象とした大型橋脚模型実験結果を報告するとともに、実際に適用した施工事例を紹介する。

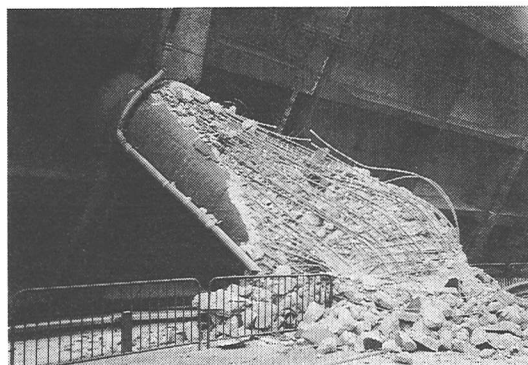


写真 1-1 倒壊したピルツ高架橋

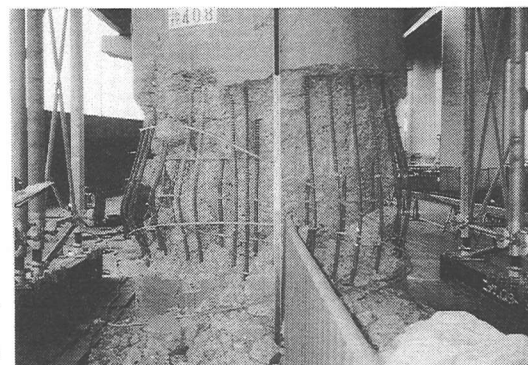


写真 1-2 RC 単柱橋脚基部の被害状況

1. 今後の耐震設計コンセプト

今回の地震では、土木および建築構造物の鉄筋コンクリート製柱部に被害が多く発生した。

一例として写真 1-1 に、630m にわたって 18 橋脚が横倒しになる壊滅的な被害を受けたピルツ形式の道路高架橋を示した。この被害はピルツ橋脚が上部構造と一体となった構造で大きな慣性力が作用したものと考えられ、一方向にせん断破壊を起こし、倒壊したものと推察される。

また、写真 1-2 は曲げ破壊した道路橋脚であり、橋脚基部のコンクリートが剥離し、鉄筋がはらみ出し、内部のコンクリートが破壊し橋脚全周に被害が発生したが倒壊はしていない。

これらの被害構造物に代表されるように、せん断破壊後に倒壊した構造物が数多く見受けられた。一方、曲げ破壊を起こした構造物のほとんどは、曲げ降伏変位を大きく越えたと思われる変位

キーワード RC 橋脚、炭素繊維シート、耐震補強、載荷試験、施工事例

連絡先 〒541 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1 TEL 06-244-3617 FAX 06-244-3676

を受けても倒壊に至っていない。このことは、大規模な地震による倒壊を防ぐには構造物のせん断耐力を十分に確保してせん断破壊を起こさせないことと曲げ破壊時に十分なじん性（変形性能）を確保させる必要がある事を示しており、今後の耐震設計の進め方を示したものと見える。

2. 炭素繊維シートを用いた橋脚の補強方法

2.1 炭素繊維シートの特性

表 2-1 に炭素繊維シート（5 種類）の特性および仕様を、写真 2-1 に炭素繊維シートを示す。炭素繊維は、高強度、軽量かつ耐久性に優れており、異形棒鋼（SD295A）と比べて強度が約 7 倍、弾性係数がほぼ同等の引張特性を持つ。また、炭素繊維は、棒鋼のような降伏域がなく、破断強度までほぼ弾性であることも大きな特徴である。この炭素繊維を一方向に並べ、特殊な横糸で織り込んだクロス状のものが炭素繊維シートであり、高強度タイプと高弾性タイプがある。

2.2 補強工法

図 2-1 に炭素繊維シートによる補強工法概要を示す。

施工は既設橋脚コンクリート面の下地処理・面取りを行った後、プライマーを塗布し、炭素繊維シートをエポキシ接着剤を含浸させながら貼り付ける。このため、鉄筋組立や溶接を行う専門作業員が不要であり、重機などは必要なく作業が容易である。

曲げ耐力不足に対しては、主鉄筋方向に貼り付ける。せん断耐力不足には帯鉄筋方向に貼付け、せん断耐力の向上と同時にコンクリートの拘束効果によって十分なじん性（変形性能）を持たせる。炭素繊維シートは自由に切断でき、構造物の複雑な形状にも柔軟に対応できる。また、補強量は炭素繊維シートの層数によって調整することができる。

3. 補強効果の確認試験

炭素繊維シートによるせん断耐力の向上を確認するせん断試験およびじん性能の改善効果を確認するじん性試験を実施した。

3.1 せん断試験

(1) 供試体および試験

供試体は梁型供試体と柱供試体の 2

表 2-1 炭素繊維シートの特性

項目	高強度タイプ(HS)			高弾性タイプ(HM)	
	HS-A	HS-B	HS-C	HM-A	HM-B
記号	HS-A	HS-B	HS-C	HM-A	HM-B
繊維目付 (gf/m ²)	200	300	400	300	300
設計厚さ (mm)	0.111	0.167	0.222	0.165	0.144
繊維引張弾性率 (GPa)	230			372	490
繊維引張強度 (MPa)	3,430			2,940	2,450
シート幅 (cm)	25 / 50				
シート長さ (m)	50				

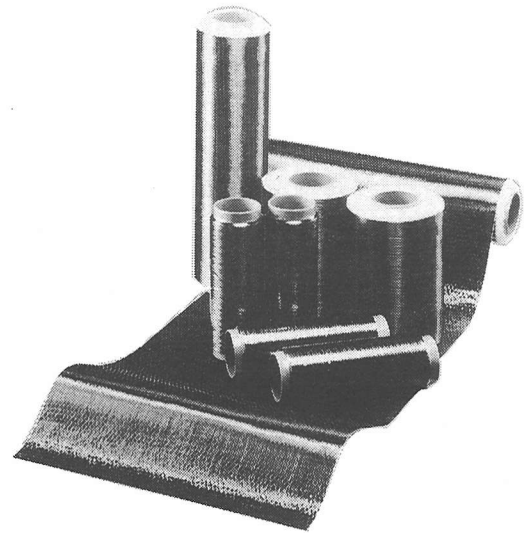


写真 2-1 炭素繊維シート

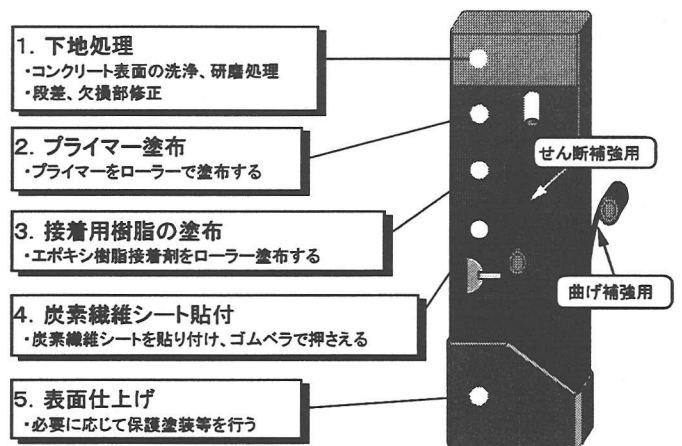


図 2-1 炭素繊維シートによる補強工法概要

表 3-1 試験ケース（せん断試験：梁モデル）

試験種別	供試体	補強種別	炭素繊維補強量	巻方
せん断試験 (SBシリーズ)	SB1	無補強	—	—
	SB2	炭素繊維シート補強	0.5層	100gf/m ²
	SB3		1層	200gf/m ²
	SB4		2層	400gf/m ²
	SB5		2.5層	500gf/m ²

種類を用いた。

(a)梁モデル

供試体は柱をイメージした1辺30cm正方形断面の梁型供試体の合計5体とした。供試体の鉄筋量は5体とも同一とし、軸方向鉄筋比 $p_f=1.91\%$ (6-D19)、軸方向引張鉄筋比 $p_t=1.47\%$ (4-D19)、およびスターラップ筋比 $p_w=0.08\%$ ($\phi 6@250$) とした。

表 3-1 に試験ケースを、図 3-1 に供試体諸元を示す。PC 鋼棒によって橋脚の上部工重量を想定した 135kN の軸力を与え、静的に2点载荷を行った。せん断スパン比は 1.5 とした。炭素繊維シートはスターラップ方向に供試体全体にらせん状に貼り付けた。表 3-1 の 0.5 層とは図 3-2 に示すように、らせん状に巻くピッチを調整して供試体の半分の面積について補強を行ったものである。

(b)柱モデル

供試体は高速道路橋脚の約 1/6 スケールとし、断面が一辺 60cm の正方形柱で片持ち梁形式の合計 5 体とした。供試体の鉄筋量は 5 体とも同一とし、軸方向鉄筋比 $p_f=5.29\%$ (24-D32)、軸方向引張鉄筋比 $p_t=1.72\%$ (7-D32)、帯鉄筋比 $p_w=0.07\%$ ($\phi 9@300$ mm) とした。

橋脚の上部工重量を想定した 539kN の軸力のもと、柱頭部を水平方向に静的に载荷した。せん断スパン比は 2.5 とした。

表 3-2 に試験ケースを、図 3-3 に供試体諸元を示す。

(2)結果

図 3-4、図 3-5 に各供試体の荷重と変位の関係を示す。

荷重-変位関係をみると、SB シリーズ (梁モデル) では炭素繊維シートの補強量が増加するに従って、せん断耐力および破壊たわみも増加している。ただし、SB2 (0.5 層) と SB5 (2.5 層) では、シートの巻厚

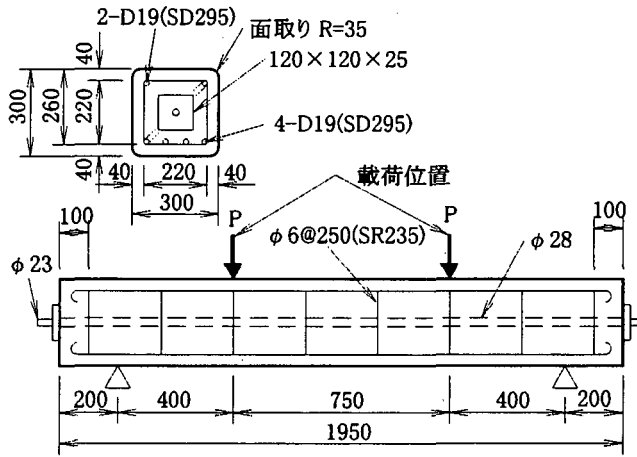


図 3-1 供試体諸元 (a/d=1.5)

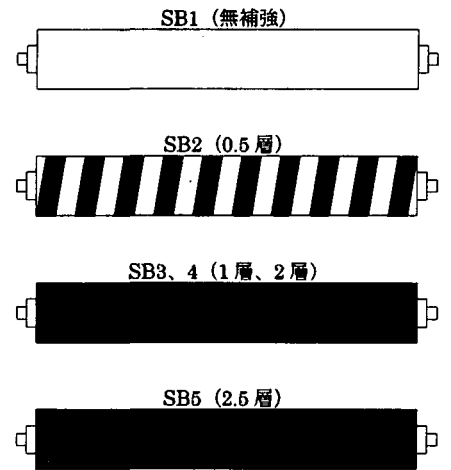


図 3-2 炭素繊維シート貼り付けイメージ

表 3-2 試験ケース (せん断試験: 柱モデル)

試験種別	供試体	補強種別		補強範囲	炭素繊維補強量	巻方
せん断試験 (SCシリーズ)	SC1	無補強	—	—	—	—
	SC2	炭素繊維	1層	柱全部	200gf/m ²	横巻き
	SC3	シート補強	2層	柱全部	400gf/m ²	横巻き
	SC4	シート補強	5層	柱全部	1000gf/m ²	横巻き
	SC5	鋼板接着補強	3.2mm厚鋼板	柱全部	—	—

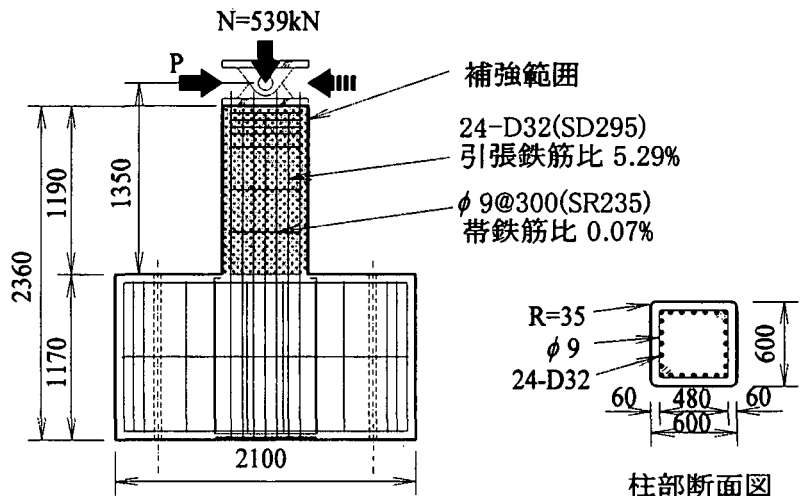


図 3-3 供試体諸元 (a/d=2.5)

の変化部で応力が集中したためか、期待通りの増加は認められなかった。また、SCシリーズ（柱モデル）では、せん断耐力は増加するものの、最大荷重時の変位の増加は認められなかった。なお、SC4（5層）とSC5（鋼板）は、SC4（5層）では供試体上部の縦割れが先行した破壊により、また、SC5（鋼板）では上部溶接部の破断により、荷重が低下したもので、載荷部の補強をすればせん断耐力および変位とも実験値以上あるものと推定される。

図3-6、3-7は実測のせん断耐力とせん断補強量との関係を示したものである。また、この図には土木学会「コンクリート標準示方書 設計編」（以下JSCE）のせん断耐力式に準拠したせん断耐力計算値と道路橋示方書・同解説Ⅲに示されている破壊抵抗モーメントから求めた曲げ耐力も示した。ここでせん断補強量 q は以下のように定義した。

$$q = p_w \cdot f_{wy} + p_{cf} \cdot f_{cfd}$$

ここに p_w : 鉄筋比

p_{cf} : 炭素繊維シート比

f_{wy} : 帯鉄筋の降伏強度 [MPa]

f_{cfd} : 炭素繊維シートの引張強度 [MPa]

また、JSCEのせん断耐力式とは、補強した部材のせん断耐力は、コンクリート、帯鉄筋、炭素繊維シートそれぞれのせん断耐力を累加できるものとし、炭素繊維シートを帯鉄筋と同じ評価式としたものである。実測せん断耐力は、せん断破壊の範囲でSBシリーズでは無補強のせん断耐力 245kN に対して1層補強では358kNに、また、SCシリーズでは無補強の641kNに対して2層補強では899kNにそれぞれ増加しており、せん断耐力はせん断補強量が増加するに従って、ほぼ直線的に増加し、炭素繊維シートによる補強効果が認められる。

このことは、炭素繊維シートが帯鉄筋と同様の働きをし、せん断補強効果を発揮していることを示している。

また、せん断耐力の実験値をJSCEによる計算値と比較すると計算値は十分安全側の評価をしており、せん断耐力設計上、各部材のせん断耐力を累加する方式は有効であるといえる。

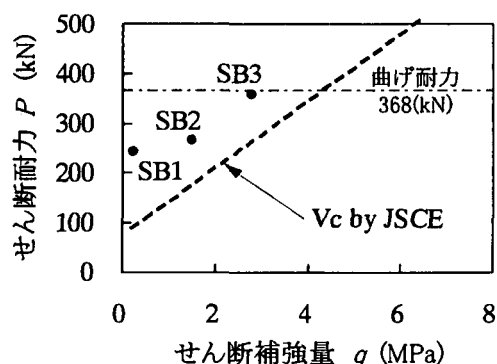


図3-6 せん断補強量—せん断耐力関係 (SBシリーズ)

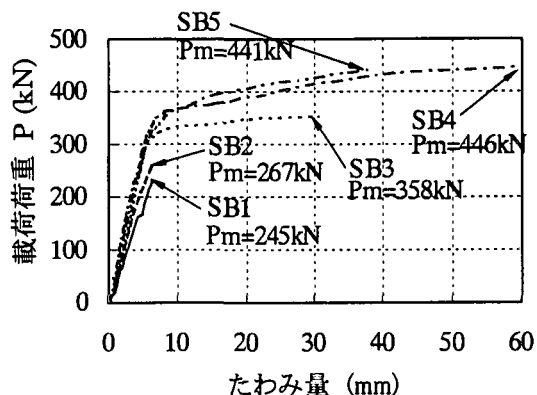


図3-4 荷重—変位関係 (SBシリーズ)

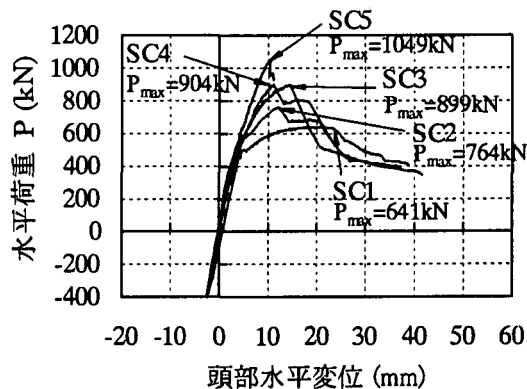


図3-5 荷重—変位関係 (SCシリーズ)

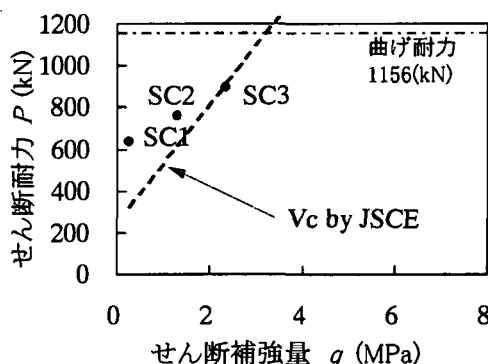


図3-7 せん断補強量—せん断耐力関係 (SCシリーズ)

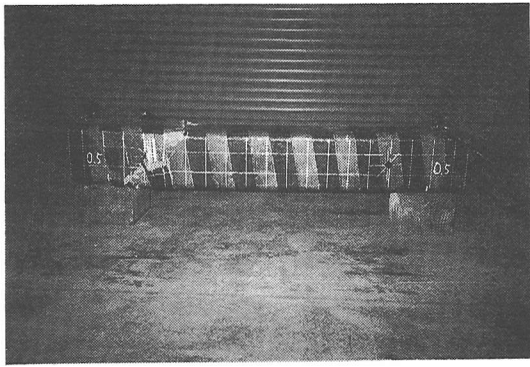


写真 3-1 SB2 の破壊状況

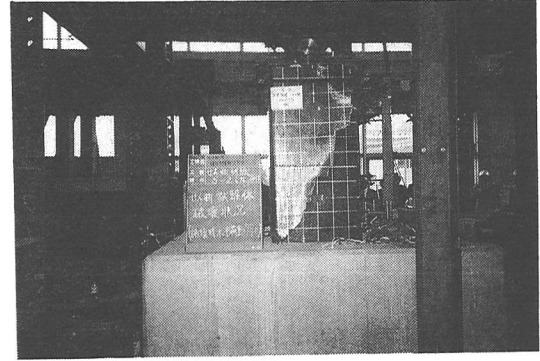


写真 3-2 SC2 の破壊状況

写真 3-1 に SB シリーズ、写真 3-2 に SC シリーズでの代表的なせん断破壊状況を示す。

3.2 じん性試験

(1) 供試体および試験

供試体は梁型供試体と柱供試体の 2 種類を用いた。

(a) 梁モデル

供試体は、柱をイメージした 1 辺 20cm 正方形断面の梁型供試体の合計 5 体とした。供試体の鉄筋量は 5 体とも同一とし、軸方向鉄筋比 $p_o=1.90\%$ (6-D13)、軸方向引張鉄筋比 $p_t=1.49\%$ (4-D13)、およびスターラップ筋比 $p_w=0.27\%$ ($\phi 6@100$) とした。表 3-3 に試験ケースを、図 3-8 に供試体諸元を示す。せん断試験と同様に 135kN の軸力を加え静的に 2 点荷重を行った (せん断スパン比 3.5)。炭素繊維はスターラップ方向に供試体全体にらせん状に貼り付けた。2/3 層とは炭素繊維シートの、らせん状に巻くピッチを調整して、補強するコンクリートの面積の 2/3 だけ補強したものである。

(b) 柱モデル

表 3-3 試験ケース (じん性試験：梁モデル)

試験種別	供試体	補強種別	炭素繊維補強量	巻方
じん性試験 (BBシリーズ)	BB1	無補強	—	—
	BB2	炭素繊維シート補強	2/3 層	133gf/m ²
	BB3		2×2/3 層	266gf/m ²
	BB4		3×2/3 層	400gf/m ²
	BB5		4×2/3 層	533gf/m ²

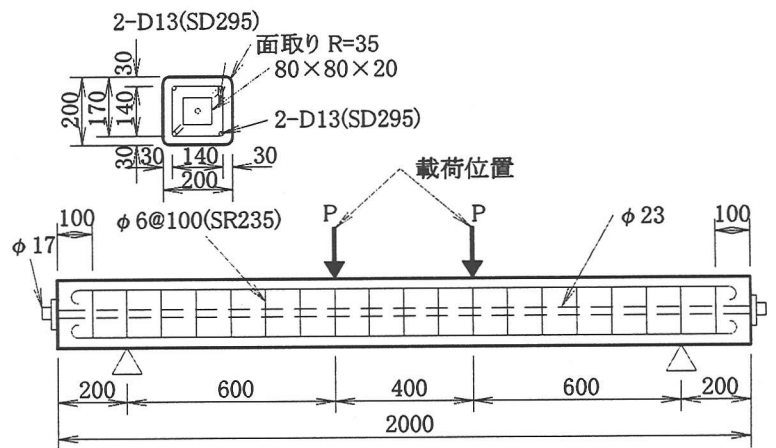


図 3-8 供試体諸元 (a/d=3.5)

表 3-4 試験ケース (じん性試験：柱モデル)

試験種別	供試体	補強種別	補強範囲	炭素繊維補強量	巻方	
じん性試験 (BCシリーズ)	BC1	無補強	—	—	—	
	BC2	炭素繊維シート補強	2 層	基部より 1250mm ^{※※}	400gf/m ²	
	BC3		4 層	基部より 1250mm ^{※※}	800gf/m ²	
	BC4		4 層+ 1 層+ テープ	基部より 1250mm ^{※※} + 柱全部 + フーチング内 300mm 埋込み	800gf/m ² + 200gf/m ² + 200gf/m ²	4 層(横巻き) + 1 層(縦巻き) + テープ (1 層分)
			BC5	4 層 [※]	基部より 1250mm ^{※※}	1600gf/m ²

※ : 炭素繊維目付量 400gf/m²(1 層当たり)のシート、その他は 200gf/m²(1 層当たり)

※※ : 1250mm = 柱幅 (600mm) × 2 + 50mm

高速道路橋脚の約 1/6 スケールの断面が一辺 60cm の正方形柱で片持ち梁形式の合計 5 体とした。供試体の鉄筋量は 5 体とも同一とし、軸方向鉄筋比 $p_f=1.29\%$ (12-D22)、軸方向引張鉄筋比 $p_t=0.48\%$ (4-D22)、帯鉄筋比 $p_w=0.14\%$ ($\phi 9@150\text{mm}$) とした。表 3-4 に試験ケースを、図 3-9 に供試体諸元を示す。せん断試験と同様に 539kN の軸力のもと、柱頭部を計算で求めた柱頭部の降伏変位 δ_y (鉄筋降伏強度 294MPa で計算) を基本として変位制御で降伏変位の整数倍で正負交番荷重し、ピーク荷重が 50% に低下するまで各 3 回繰り返した。なお、せん断スパン比は 5.0 とした。

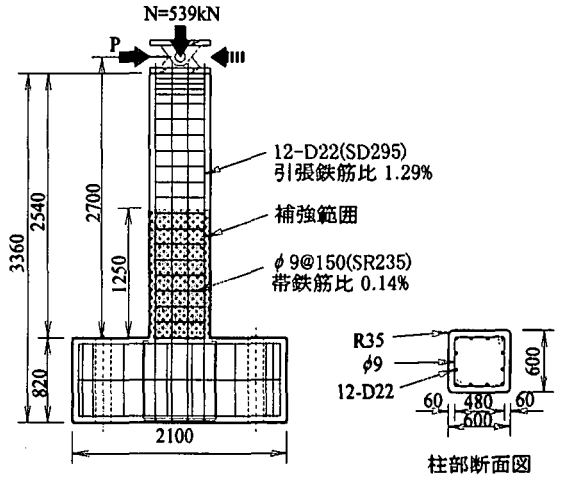


図 3-9 供試体諸元 (a/d=5.0)

(2)結果

図 3-10 に BB シリーズ (梁モデル) での各供試体の荷重と梁中央変位の関係を、図 3-11、3-12 に BC シリーズ (柱モデル) での BC1 と BC5 の水平荷重と柱頭部変位の関係を示す。なお、すべての供試体は曲げ破壊を示した。

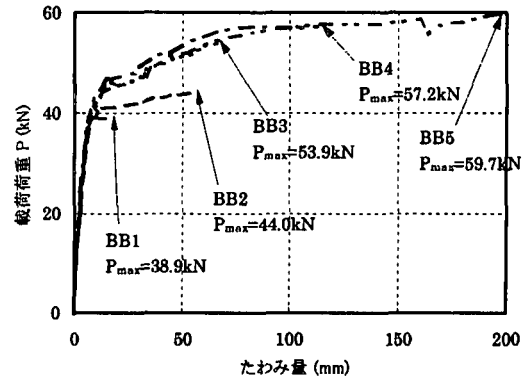


図 3-10 水平荷重－頭部水平変位関係(BBシリーズ)

図 3-13 にじん性率とせん断補強量との関係を示す。じん性率 μ は、 $\mu = \delta_u / \delta_y$ と定義した。ここで降伏変位 δ_y は実測ひずみから引張側の主鉄筋が降伏点 (降伏強度 ; 350MPa) に達したときの変位、終局変位 δ_u は、終局時に荷重が降伏荷重と等しくなったときの変位とした。

荷重と変位の関係をみると、炭素繊維シートで補強した供試体と無補強供試体とを比較すると、BB シリーズで無補強供試体 (BB1) の終局変位が 14.3mm に対して 4 × 2/3 層補強供試体 (BB5) は 197.3mm、また、BC シリーズで無補強供試体 (BC1) の 87.9mm に対して 4 層補強供試体 (BC5) では 144.8mm であり、降伏変位がいずれの供試体もほぼ同様であるにもかかわらず、補強量の増加につれて終局変位が増加しており、炭素繊維シートによる変形性能の改善効果が認められた。

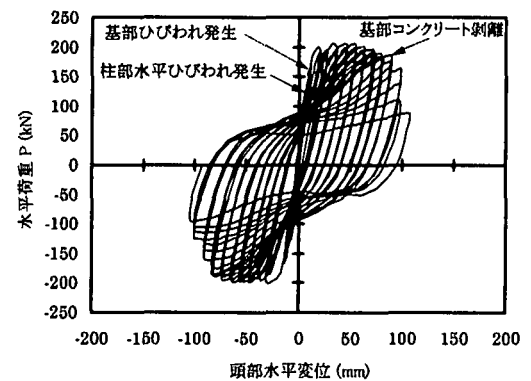


図 3-11 水平荷重－頭部水平変位関係 (BC1)

図 3-13 からじん性率は、せん断補強量の増加に伴いほぼ直線的に増加している。ただし BC シリーズ (柱モデル) に比べて BB シリーズの方がじん性率の増加がかなり大きい。

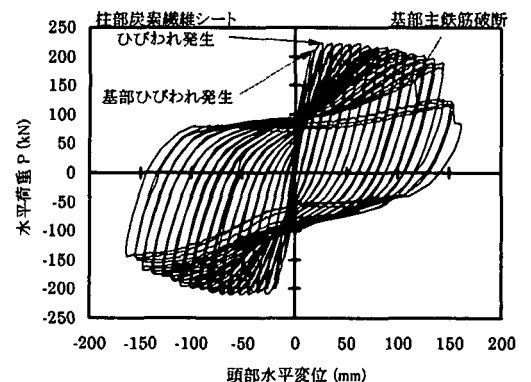


図 3-12 水平荷重－頭部水平変位関係 (BC5)

これは、BC シリーズでは無補強の時点で BC1 供試体に十分なじん性があったためと考えられる。曲げ耐力向上を目的とした BC4 はフーチングに埋め込んだ炭素繊維テープが荷重履歴の初期段階で柱根元部で破断したため曲げ耐力の向上はあまり認められなかった。炭素繊維シートの目付量は一般に 200~300gf/m² であり、この量を

増やすと接着剤の含浸に支障を来すと言われているが、BC5 は目付量が 400gf/m² であったにもかかわらず、施工性・じん性能とも良好であり、施工時間の改善には有効のようである。

写真 3-3 に BB シリーズ、写真 3-4 に BC シリーズでの代表的な曲げ破壊状況を示す。

3.3 まとめ

炭素繊維シートによるせん断補強効果およびじん性補強効果を把握するため、実大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)せん断補強効果

- ・せん断破壊の範囲では、炭素繊維シートを帯筋方向に貼付けることによりせん断耐力は無補強時にくらべ 1.4 倍程度増加しており、補強効果が認められた。
- ・累加方式のせん断耐力式は、 q が 2.0MPa 程度まででは炭素繊維シートを帯鉄筋と同様と考えても安全側の評価を与える。

(2)じん性補強効果

- ・炭素繊維シートを柱基部から 2D (D ; 柱幅) 区間の帯鉄筋方向に貼付けることにより、じん性補強効果が認められた。
- ・じん性率は炭素繊維シートの補強量が増加するに従って増加し、その程度は梁モデルでは無補強時の 11 倍、柱モデルでは 2 倍程度であった。
- ・部材の初期じん性能の違いが、炭素繊維シートによる補強効果に影響する可能性がある。

4. 鉄道高架橋への施工例

4.1 工事概要

京阪本線の枚方市駅京都方のラーメン高架橋橋脚に鋼板及び炭素繊維シートを用いて耐震補強を行った。炭素繊維シート補強については「炭素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(以下炭素繊維指針と呼ぶ)」(鉄道総合技術研究所) および今回の実験結果を参考にした。

補強対象橋脚38基のうち3基については柱が橋軸直角方向から約4度の角度が付いた平行四辺形をしており、さらに柱面から0.3mの場所に、建造物があったことなどから(写真4-1)、柱の形状にとらわれず、狭いスペースで作業ができる炭素繊維シート補強を選定、施工することとなった。

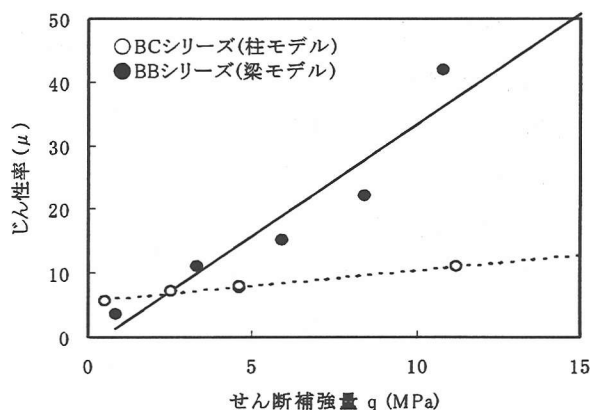


図 3-13 じん性率—せん断補強量関係

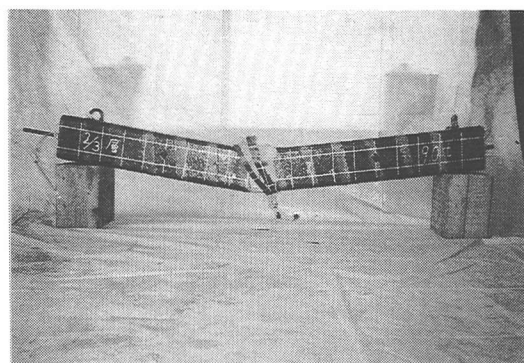


写真 3-3 BB2(2/3 層補強)の破壊状況

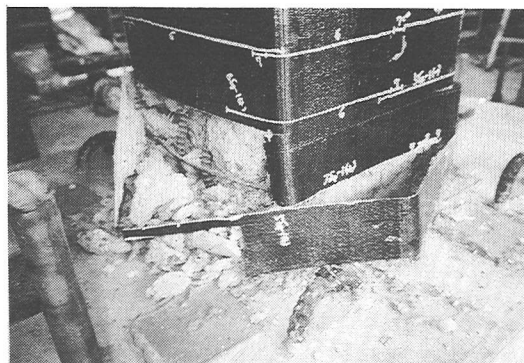


写真 3-4 BC3(4 層補強)の破壊状況

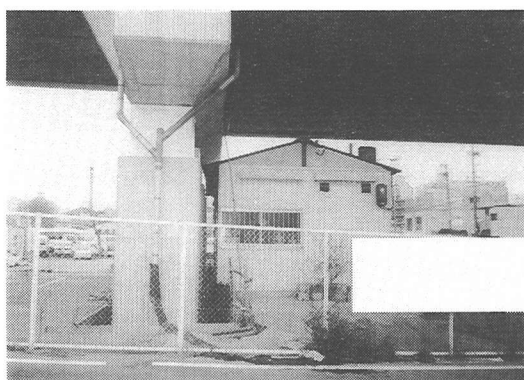


写真 4-1 近接構造物状況

図4-1に炭素繊維シートによる補強概要を示す。

4.2 炭素繊維シート補強量

炭素繊維シート補強量は、鋼板 ($t=6\text{mm}$) 補強後に地震時保有水平耐力が確保されることから、炭素繊維シートは、鋼板厚 6mm で補強した場合と同等の耐震性が確保される補強量とした。計算の結果、繊維目付量 300gf/m^2 の炭素繊維シート (高強度タイプ HS-B: 厚さ $t=0.0167\text{mm}$) を 5 層巻くものとした。

図 4-2 に炭素繊維補強仕様図を示す。

4.3 仕上げ

写真 4-2 に補強後全景を示す。橋脚は保護コンクリートおよび仕上げ塗装で保護した。

5. おわりに

炭素繊維シートによる補強効果の確認を目的として大型橋脚模型実験を実施した。その結果、実構造物への適用可能なせん断耐力およびじん性に対する補強効果が確認された。

また、炭素繊維を適用した補強事例を紹介したが、適用部材も、橋脚だけでなく、トンネル、覆工、床版、梁、壁等があり、当工法を用いた補強工事は、性能がある程度確認されたことで今後とも盛んに行われるものと考えられる。

謝辞

大型橋脚模型実験で共同研究を行った日本石油(株)の宮田氏、コニシ(株)の松尾氏、(株)サンキットの坂西氏に心より感謝の意を表します。

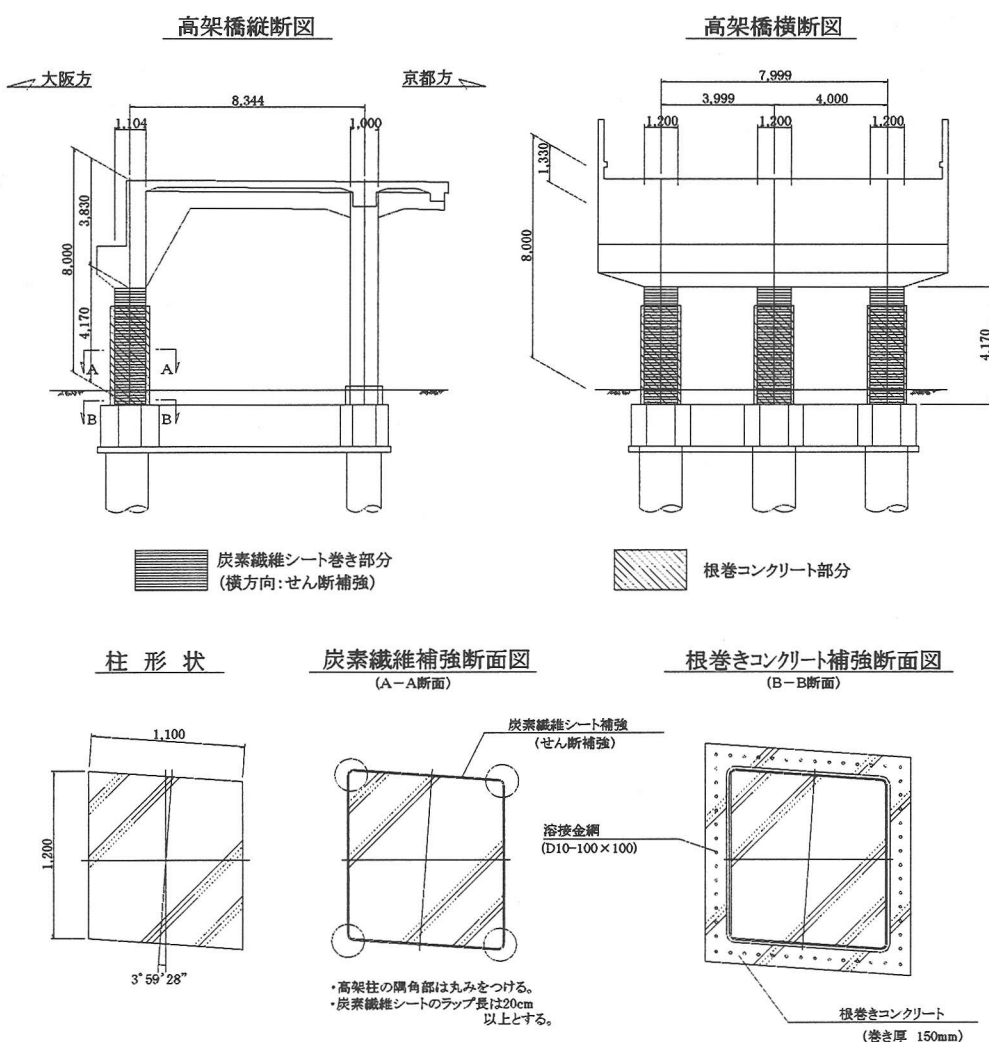


図4-1 炭素繊維シート補強概要

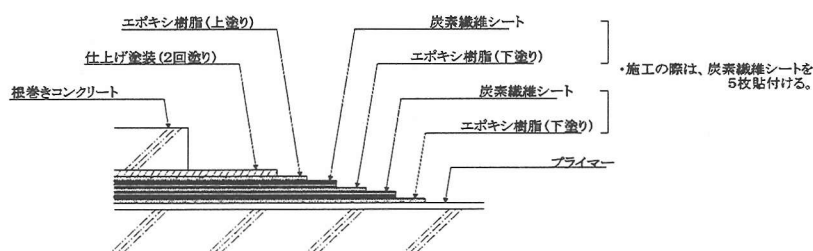


図 4-2 炭素繊維補強仕様図



写真 4-2 補強後全景