

## 鋼製橋脚炭素繊維耐震補強の設計施工

湾岸管理部 調査設計課 徳林宗孝  
大阪建設局 総務部 用地調査課 外園光郎

### 要 旨

湾岸線天保山入P3橋脚は、逆L型のRC橋脚の梁先端を鋼製橋脚柱で支持した複合門型橋脚で、RC橋脚部は既に鋼板巻立て工法により耐震補強が施されている。しかし、鋼製橋脚柱は料金所アイランド中央に位置する外径1,016mmの細い柱であり、鋼製橋脚の耐震補強法として一般的な縦補剛材補強あるいはコンクリート充填補強工法は採用が困難であるため、耐震補強は行われていない。そこで、このような条件下で施工可能な炭素繊維シート補強工法の適用可能性について検討した。検討は、炭素繊維による鋼製橋脚の耐震補強は世界的にも例がないため、実橋脚を縮小した供試体を用いた漸増繰返し水平変位載荷実験、およびその実験結果を反映した複合門型橋脚全体系の動的応答解析により行った。さらに、想定以上の地震力が作用した場合でも、損傷が地中部の柱基部やアンカーボルト部に発生するのではなく、補修・補強が容易な地上部に発生させるような補強方法についても検討した。これら、一連の検討の結果、合理的かつ経済的な炭素繊維による補強方法を見出した。

キーワード：炭素繊維シート、鋼製橋脚、耐震補強、耐震性能、動的応答解析

### まえがき

湾岸線天保山入P3橋脚は、逆L型のRC橋脚の梁先端を料金所アイランド中央に設置した外径1,016mmの細い鋼製橋脚柱で支持した複合門型橋脚である。RC橋脚部は既に鋼板巻立て工法により耐震補強が施されているが、鋼製橋脚柱部は、鋼製橋脚の耐震補強法として一般的な縦補剛材補強あるいはコンクリート充填補強工法<sup>1)</sup>の採用が困難であるため、耐震補強は行われていない。今回、この鋼製橋脚柱の耐震補強を実施するに当たってRC橋脚の耐震補強に広く用いられている炭素繊維シート補強工法<sup>2)</sup>の採用を検討した。炭素繊維シートは軽量かつ耐久性に優れており、重機や騒音を伴わない施工が可能である。また、天保山入P3における炭素繊維シートによる補強は、コンクリート充填補強と比較すると、レーン閉鎖

日数が一週間短縮され、都市高速道路の料金所という特殊性を考慮すると、施工性・経済性に優位と考えられる。今日まで、炭素繊維シートによる耐震補強工法の鋼製橋脚への施工実績はないが、研究レベルではその有効性について報告されている<sup>3)~4)</sup>。それらでは弱点箇所を炭素繊維シートにより補強し、弱点箇所を変形性能のある箇所に移動させる耐震補強工法が提案されている<sup>5)</sup>。しかし、損傷箇所を炭素繊維貼付箇所とする炭素繊維シートの貼付方法<sup>4)</sup>については、あまり検討されていない。

本検討では、漸増繰返し水平変位載荷実験を実施し、さらに、実験結果に基づいて動的応答解析を実施し、合理的・経済的な炭素繊維シートの貼付方法および耐震補強工法を提案・施工するとともに、その耐震性能を照査している。

# 1. 対象橋脚と耐震補強工法の選定

## 1-1 天保山入P3橋脚の概要

天保山入P3橋脚は、曲率半径51.875 mの上部構造を支持する逆L型のRC橋脚と、鋼製橋脚柱とで構成された複合門型橋脚である（図-1、図-2参照）。ここで、鋼製橋脚柱は幅1,900 mmの料金所アイランド中央に位置する外径 $\phi = 1,016$  mm、板厚16 mm、橋脚高さ13.369 mの円形断面柱である。なお、下端から3.5 mまではコンクリートが充填されているがダイヤフラムおよび縦補剛材は設置されていない。

本橋脚上の上部構造は、単純合成I桁（入P4側・可動支点）と2径間連続非合成I桁（入P2側・可動支点）の掛け違い部となっている。また、RC柱部は鋼板巻立て耐震補強が実施されており、今回工事では、鋼製橋脚柱部の耐震補強および支承等の耐震改善工事を実施した。

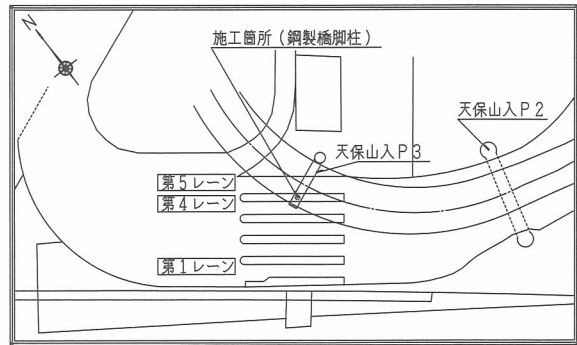


図-1 補強対象鋼製橋脚柱の位置

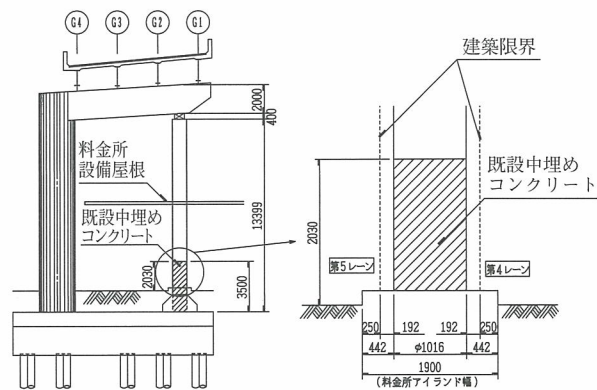


図-2 対象橋脚の一般図（寸法：mm）

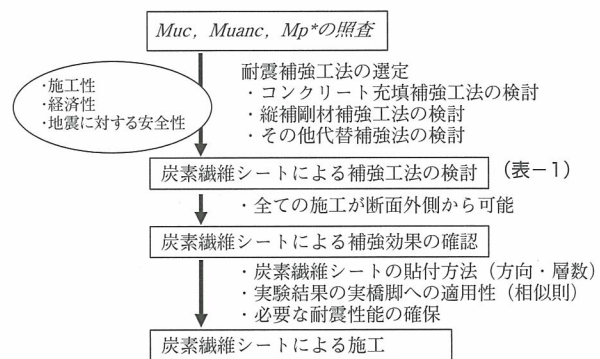
## 1-2 炭素繊維シート補強の採用に至った経緯

耐震補強工法選定フローを図-3に示す。

コンクリート充填補強工法を適用するには打設用孔明けが必要であり、本橋脚においては、鋼製橋脚柱断面が小さいためコンクリート打設用孔（ $\phi = 400$  mm）が断面に占める割合が大きく、常時荷重作用下での施工が困難であること、基部アンカーボルトの耐力に余裕がないことなど問題が多い。

一方、縦補剛材補強工法は、本橋脚の断面寸法が小さいことからマンホールを設置して橋脚内部での施工作业（部材搬入・取付・溶接作業等）は不可能である。また、柱外面に補剛材等を設置する方法についても、施工箇所が料金所内に位置し建築限界等を考慮すると採用しがたい。

そこで、代替工法としてRC橋脚の耐震補強で実績も多く、柱部材の外面からの施工が可能な炭素繊維シートによる補強工法を検討した。基部アンカーボルトの強度にあまり余裕がないことを考えると、表-1に示すように、強度上昇をとまわずに所要の変形性能を確保できるような炭素繊維



$Muc$  : 柱断面（中埋コンクリート考慮）の終局曲げモーメント  
 $Mu.anc$  : アンカー部（定着部）の耐力  
 $Mp^*$  : 制御断面の  $Mp$  から求まる基部の発生曲げモーメント

図-3 耐震補強工法選定フロー

表-1 炭素繊維シートによる耐震補強概念

$H_{uo}$  : 補強前の終局荷重,  $H_u$  : 補強後の終局荷重  
 $\mu_{Lu}$  : 補強前の塑性率,  $\mu_u$  : 補強後の塑性率

	補強前 ( $H_{uo}, \mu_{Lu}$ )	補強後	
		文献 <sup>6)</sup> の補強方法	本補強方法
補強範囲および崩壊箇所			
		$H_u > H_{uo}$ $\mu_u > \mu_{Lu}$	$H_u > H_{uo}$ $\mu_u > \mu_{Lu}$
・中埋めコンクリート直上の鋼断面の座屈損傷	・補強断面に損傷無し ・柱基部・下端断面の座屈損傷	・補強断面に損傷無し ・アンカーボルトの損傷（伸び・破断）	・補強断面に損傷 ・柱基部・下端断面に損傷無し



維シートの貼付方法が望ましい。

しかしながら、炭素繊維シートによる鋼材補強については、これまでにそのような貼付方法についての検討例がない。そこで、施工に先立ち、本橋脚を対象として炭素繊維シートによる耐震補強の確認実験を行い、合理的・経済的な補強方法（補強範囲・炭素繊維シート貼付方向の組合せ等）を検討した。

## 2. 模型載荷実験

レベル2地震動のように、橋脚に繰返し水平荷重が作用する場合の炭素繊維シートによる鋼製橋脚柱の補強方法の有効性を検討することを目的として、漸増繰返し水平変位載荷実験を実施した。実験には、対象橋脚の断面を1/2.5に縮小した供試体（ $\phi = 406\text{mm}$ ,  $t = 6.4\text{mm}$ , 実験装置の制限から高さ方向の縮小は対象橋脚の約1/10とする）を用いて、一定の軸方向圧縮力（対象橋脚と軸方向圧縮力比を合わせる）を導入した状態で、水平変位を漸増させるものとした。なお、炭素繊維シートは、実験供試体と対象橋脚との相似則を考慮し、使用鋼板の板厚に応じて、目付け量が $120\text{g/m}^2$ （ $= 300\text{g/m}^2 \times 6.4\text{mm}/16\text{mm}$ ）のものを使用した。実験供試体を図-4、載荷装置を図-5に示す。

実験供試体は表-2に示す4体とした。すなわち、既設の鋼製橋脚を想定した実験供試体No.1とそれに断面周方向に貼付する炭素繊維シートの層数を8, 3, および5層と変化させた3体の実験供試体No.2~No.4である。全ての供試体下端には、橋脚高さLの5分の1（ $= 30\text{cm}$ ）までコンクリートを充填し、供試体No.2~No.4は鋼製のダイヤフラムを設置することによりコンクリートを確実に密閉化した。なお、実験供試体No.4は、ダイヤフラムの代替として断面外側からジベルを設置し、既設の中埋めコンクリートの抜け上りを防止する工法の妥当性を調べる実験供試体である。漸増繰返し水平変位載荷実験から得られた主な結果をまとめると、以下のとおりである。

①円形断面の周方向に炭素繊維シートを3~8層

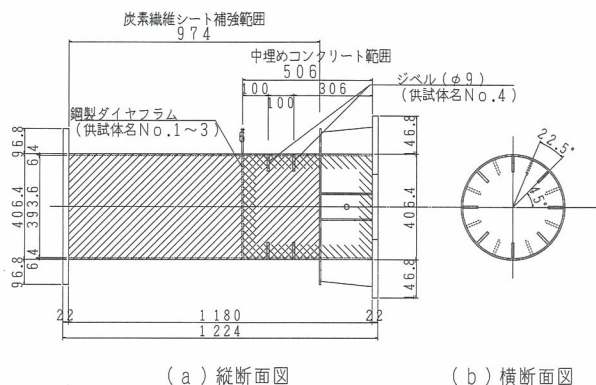


図-4 実験供試体

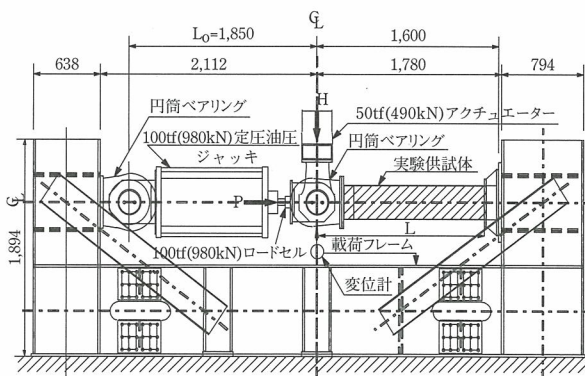


図-5 載荷装置

表-2 漸増繰返し水平変位載荷実験より得られた主な結果

供試体名	炭素繊維シートの貼付層数		強度上昇率 $\beta$ ( $=H_{u4}/H_{u4-01}$ )	塑性率 $\mu_u$ ( $=\delta_u/\delta_y$ )	崩壊箇所 (最弱点断面)
	軸方向	周方向			
1	—	—	1.00	3.1	中埋め直上
2	1	8	1.16	6.4	基部・下端
3	1	3	1.16	4.2	中埋め直上
4	1	5	1.06	5.4	基部・下端

$\delta_u$  : 水平荷重が最大となるときの終局変位  
 $\delta_y$  : 基部鋼断面下端が降伏するときの変位  
 $H_u$  : 各供試体の終局水平荷重  
 $H_{u4-01}$  : 実験供試体No.1の終局水平荷重

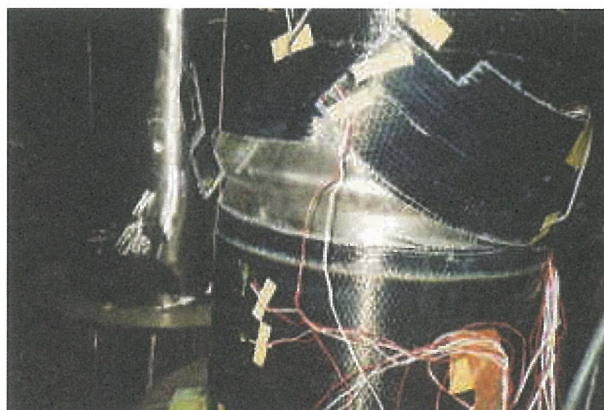


写真-1 実験後の状況（実験供試体No.3）

貼付することにより、曲げ剛性を変化させずに、補強後の強度上昇を6~16%にとどめ、塑性率を4~6程度にまで改善できる（表-2、図-6、図-7参照）。

- ②炭素繊維シートの貼付層数の違いによって、崩壊箇所が、中埋めコンクリート直上のものと、基部断面のものとの2つの崩壊パターンがみられる（表-2参照）。中埋めコンクリート直上に塑性ヒンジが発生した実験供試体No.3を写真-1に示す。
- ③鋼製ダイヤフラムの代替としてアンカー方式のジベルを設置すると、鋼製のダイヤフラムを設置した場合に比べて、若干小さな曲げ剛性となるものの、ほぼ同様の履歴特性が得られた（図-7）ので、ジベルによるアンカー方式でも鋼製のダイヤフラムと同じ効果が期待できると考えられる。

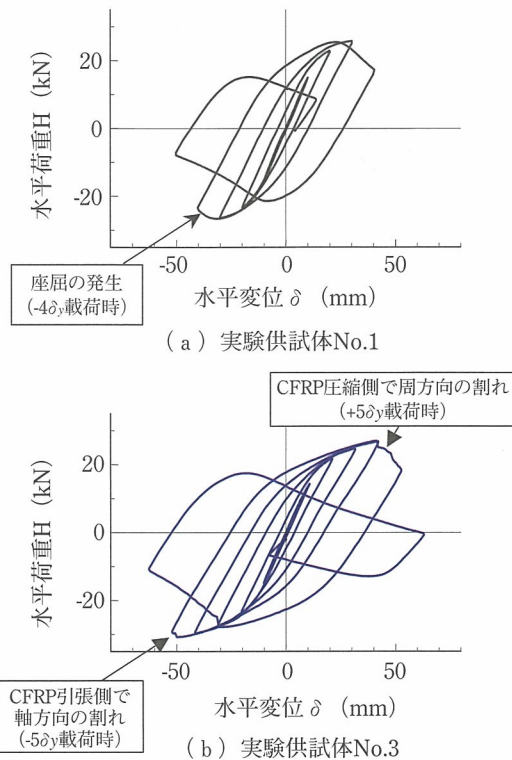


図-6 水平荷重-水平変位曲線

### 3. 動的応答解析による耐震性能の照査

#### 3-1 解析モデルの設定および安全性の照査

複合門型橋脚を対象とした動的応答解析を実施し、レベル2地震動に対する耐震性能を照査した。例として、図-8に橋軸直角方向解析モデルを示す。炭素繊維シートにより補強を施した鋼断面の構成則は、漸増繰返し水平変位載荷実験の結果より非線形バネ定数 $k_p$ を算定し用いた。すなわち、曲げモーメント $M$ と回転角 $\theta$ との関係が、橋脚の復元力モデルと等価となるよう、非線形バネ定数 $k_p$ を設定した。また、道路橋示方書<sup>6)</sup>を参考に上部構造を支持する支承条件を考慮して、可動支承には上部構造反力の1/2、固定支承には上部構造反力を重力加速度 $g$ で除した質量が存在するものとした。入力地震波には、道路橋示方書<sup>6)</sup>に規定されるⅢ種地盤における、タイプⅠ（3波）とタイプⅡ（3波）の加速度波形を用いた。

表-3に動的応答解析の結果を示す。さらに、図-7には、漸増繰返し水平変位載荷実験より得られた各実験供試体の包絡線（各載荷サイクルの最大荷重点を結んだ曲線）とともに、動的応答解

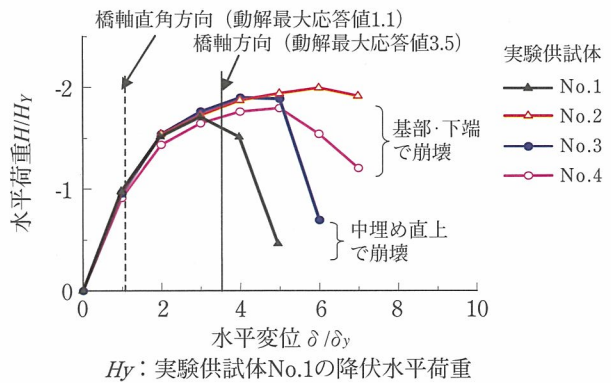


図-7 水平荷重-水平変位曲線の包絡線

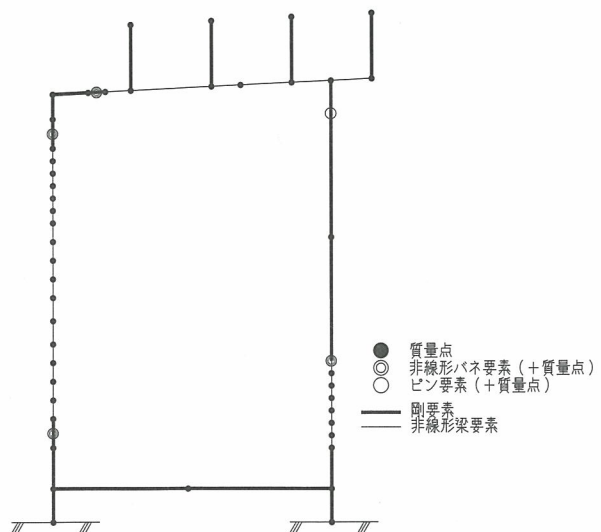


図-8 動的応答解析モデル（橋軸直角方向）

析より得られた最大応答変位を示す。表-3および図-7によると、鋼製橋脚柱天端位置における最大応答水平変位は、橋軸直角方向で119mm（塑性率1.1）、橋軸方向で379mm（塑性率3.5）と算定された。すなわち、橋軸方向の塑性率3.5は供試体No.1の塑性率3.1を上回り、鋼製橋脚柱の耐震補強の必要性が再確認できた。

### 3-2 炭素繊維シートの貼付層数および補強範囲

動的応答解析の結果、タイプIIの地震動に対して、橋軸方向（橋脚面外方向）に最大応答変位（塑性率3.5）が発生するものの、その値は周方向の貼付層数を3層とした実験結果（塑性率4.2）以下であった。したがって、経済的な貼付層数および最終的な損傷発生箇所を考慮して、炭素繊維シートは目付け量300g/m<sup>2</sup>の高強度タイプ<sup>2)</sup>を使用し、貼付層数は軸方向1層・周方向3層と決定した。このとき、最弱点断面は中埋めコンクリート直上である。

炭素繊維シートの貼付範囲（補強範囲） $L_r$ は、対象橋脚の補強前の曲げモーメント分布（図-9）に基づき決定する。すなわち、基部の最大曲げモーメント（ $M_{uc}$ ）作用時に、鋼断面部の全塑性曲げモーメント（ $M_p$ ）を上回る高さからジベル位置までを、炭素繊維シートの貼付高さとする。さらに、その上・下端には、炭素繊維シートの確実な定着を考慮して、定着長 $l_c$ （ $=230\text{mm}$ ）<sup>7)</sup>を考慮し、併せて補強範囲とした。

## 4. 施工

### 4-1 工程

図-10に施工工程を示す。施工は平成14年8月19日から9月2日にかけて行い、その間の15日間については、図-1に示す第4・第5レーンの閉鎖を行った。

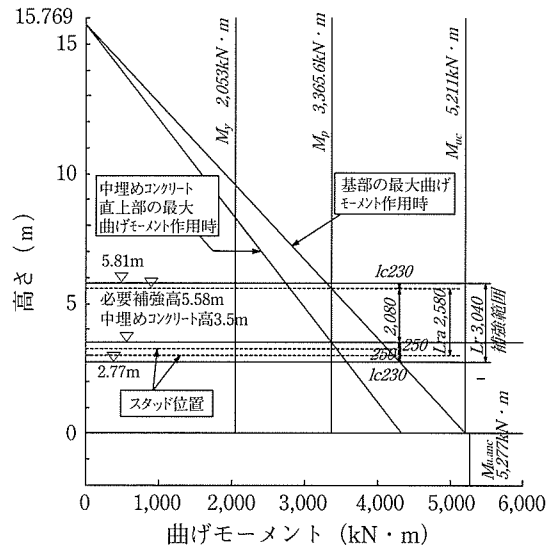
### 4-2 事前内面調査

本橋脚は建設から29年経過している。特に鋼

表-3 動的応答解析の結果

照査方向	橋軸直角	橋軸
最大応答水平変位	119mm	379mm
降伏水平変位	108.4mm	
必要塑性率 (=最大応答変位/降伏変位)	1.1	3.5
残留変位	8.2mm (=L/1630)	24.8mm (=L/539)

L：鋼製橋脚柱高さ



$M_y$ ：局部座屈および軸力を考慮した曲げモーメント  
 $M_p$ ：制御断面の全塑性曲げモーメント

図-9 炭素繊維シートの貼付範囲および曲げモーメントの分布

工程	日程												
	8月												
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
準備工	■	■											
足場設置工			■	■									
事前内面調査工				■	■								
アンカー工				■	■								
下地処理・プライマー工					■	■							
炭素繊維シート工								■	■	■	■		
表面保護工												■	■
足場解体・後片付工													■

図-10 施工工程

製橋脚柱は密閉構造であり、橋脚内面は無塗装となっていることから、橋脚内面の腐食状況、および既設中埋めコンクリート天端の滞水状況・ひび割れの有無について調査を行った。しかし、鋼製橋脚柱の内部に入っている作業ができないため、橋脚に観測孔を設けてファイバースコープを使用し確認を行った。その結果、コンクリート打設孔の一部に錆が見られたが、他の箇所に異常は見られず、黒皮が残っている良好な状態であることが確認できた。写真-2に既設中埋めコンクリート天端付近の状況を示す。



### 4-3 アンカー工

鋼製橋脚柱周方向の炭素繊維シートの貼付と中埋めコンクリートが鋼製橋脚柱と一体に挙動するように、柱部材の外側から施工できるアンカー方式によるジベルを、実験に用いた供試体と同じく1断面につき8本、上下2断面に千鳥型（図-11）に設置した。ジベルは鋼管外面からφ32（削孔長276mm）の削孔を行い、定着材を充填後D22（アンカー長266mm）のボルトを差込んで中埋めコンクリートに固定し、鋼製橋脚柱とは溶接を施すことにより一体化を図った。定着材には膨張モルタルを使用した。

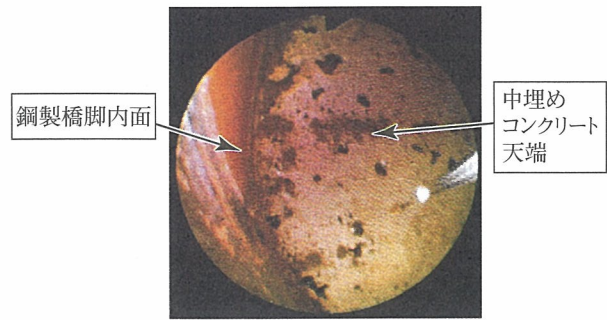


写真-2 内面調査状況

### 4-4 下地処理・プライマー工

炭素繊維シートの貼付に先立ち、下地処理およびプライマー塗布を行った。下地処理はディスクサンダーにより塗装を除去し、錆が発生しないよう直ちにプライマー塗布を行った。炭素繊維シートと鋼製橋脚柱が接触し水が浸入すると電食の可能性<sup>8)</sup>が生じるため、プライマーを均一に塗布し炭素繊維シートと鋼管とが直接接触しないように配慮した。

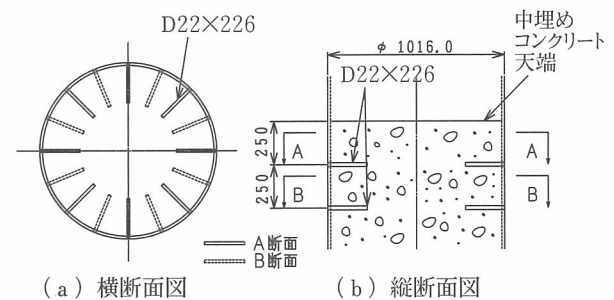


図-11 中埋めコンクリート拔出し防止アンカー

### 4-5 炭素繊維シート工

炭素繊維シートの継手長は繊維方向に20cmとし、ラップによる接着面の凹凸が、その上の接着層の平坦性を損なわないように突き合わせとした<sup>2)</sup>。炭素繊維シートは幅250mmのロールを現場に搬入し、現地で所定の寸法に切断して施工した。写真-3にエポキシ樹脂の炭素繊維シートへの含浸状況（周方向）を示す。なお、現場の品質管理として、炭素繊維シートに接着樹脂を含浸させた引張試験供試体を別途作成し、所要の強度規格値<sup>2)</sup>を満足していることを確認した。



写真-3 炭素繊維シートへのエポキシ樹脂含浸（周方向）

### 4-6 表面防護工

本橋脚は料金所アイランド上に位置しており、車両の衝突による炭素繊維シートの損傷が懸念される。通常、根巻コンクリートや防護柵を設置して対処するが、建築限界等の問題があるため図-12

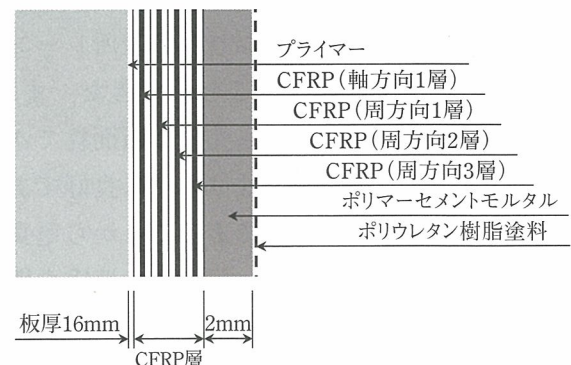


図-12 表面防護（対衝突仕様）

に示すような対衝突仕様<sup>2)</sup>の表面防護工を採用した。

## 5. まとめ

本橋脚柱を対象とした炭素繊維シートによる補強工法の確認実験、逆L型のRC橋脚柱を含めた複合門型橋脚全体系の動的応答解析を実施し、補強後の耐震性能を照査のうえ補強方法を決定し、実橋脚に適用した。

- (1) 実験結果から、炭素繊維シートの貼付層数の違いによって、周方向5層の場合には基部断面に（塑性率5.4）、周方向3層の場合には中埋めコンクリート直上の鋼断面（塑性率4.2）に崩壊部が形成されることがわかった。複合門型橋脚をモデル化した動的応答解析の結果、タイプⅡの地震動に対しては、橋軸方向（橋脚面外方向）に最大応答変位（塑性率3.5）が発生するが、周方向の貼付層数を3層とした実験結果（塑性率4.2）を十分満足していることが確認できた。
- (2) 本検討で対象とした鋼製橋脚柱は径厚比  $R/t=63.5$  であり、文献<sup>9)</sup>によるとダイヤモンド座屈が生じにくい柱であり、今回の実験でも提灯座屈のみが生じた。ダイヤモンド座屈が生じる可能性のある鋼製橋脚柱へ炭素繊維シートによる耐震補強を適用する際は、別途検討が必要である。
- (3) 対象橋脚は料金所アイランド上に位置しており、炭素繊維シートによる補強工法を採用することによって、他の工法（コンクリート充填工法・縦補剛材補強工法）に比べて短期施工が可能となり、料金所レーンの閉鎖期間を短縮することができた。また、今回の橋脚は径が小さく円形断面柱であったこともあり、施工性は非常に良好であった。なお、鋼製橋脚であることから電食対策としてのプライマー施工には慎重を期して施工を行った。

## あとがき

炭素繊維シート補強工法は軽量かつ耐久性に優れており、また、現場成形のため作業空間が限定される場所での施工性に優れる工法であることから、本橋脚のように断面が小さく、柱部材内部での作業が困難と考えられる場合において非常に有利な工法であると考えられる。また、基礎の耐荷力の関係から、コンクリート充填工法が採用できない場合にも有効である。今後、同様の鋼製橋脚において、各種の実験や検討が行われ、施工実績が増えていくことにより、合理的な補強方法（補強範囲、および貼付層数）が確立されることが期待される。

謝辞：本実験の企画・管理と解析において多大な御指導と御助言を賜りました大阪市立大学大学院北田俊行教授および松村政秀助手に感謝致します。また、当代替工法の可能性を示唆していただいた(財)阪神高速道路管理技術センター林秀侃部長（当時）、電食対策の必要性を注意喚起していただいた大阪大学大学院大倉一郎助教授、および駒井・ショーボンド建設工事共同企業体の関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：既設鋼製橋脚の耐震補強設計要領（素案）・同施工マニュアル（案），1997. 3.
- 2) 阪神高速道路公団：炭素繊維シートによるRC橋脚耐震補強に関する設計・施工要領（案），1998. 3.
- 3) 渡辺貴之，石田圭吾，林 和彦，山口隆裕，池田尚治：炭素繊維シートを用いた鋼製橋脚の耐震補強，構造工学論文集，Vol.48A，土木学会，pp. 725-734，2002. 3.
- 4) 松村政秀，北田俊行，林 秀侃，谷 一成：炭素繊維シートを用いた長方形断面鋼製橋脚柱の耐震補強方法に関する基礎的実験，第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計

- への応用に関する論文集，土木学会，pp. 19-24, 2002. 1.
- 5) 財土木研究センター：炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン（案），2002. 7.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2002. 3.
- 7) 阪神高速道路公団：道路構造物の補修要領，第2部コンクリート構造物，1990. 6.
- 8) 大倉一郎，福井唯夫，中村圭吾，松上泰三：炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力，土木学会論文集，No.689/I-57, pp. 239-249, 2001. 10.
- 9) 後藤芳顕，張 崇厚：比較的厚肉の円筒殻における提灯座屈からダイヤモンド座屈への塑性分岐過程の解析，土木学会論文集，No.605/I-45, pp. 105-115, 1998. 10.

## DESIGN AND CONSTRUCTION FOR SEISMIC RETROFIT OF STEEL BRIDGE PIERS USING CARBON FIBER SHEETS

Munetaka Tokubayashi and Mitsuro Hokazono

Pier 3 at the entrance ramp at Tempoan is a hybrid gate-type bridge pier composed of an L-shaped RC column and a steel pier column. In this project, the steel bridge pier column was retrofitted. Conventional retrofitting methods could not be adopted because they were inapplicable to structures of small cross-section. Then, the possibility of retrofitting with carbon fiber sheets(CFS) was considered. As a result of cyclic loading test and dynamic response analysis, we found that the required ductility and seismic performance could be obtained with little increase in strength by retrofitting, by coating the steel column with a layer of longitudinal CFS and three layers of circumferential CFS.