

炭素繊維シート巻立工法による 円形断面鋼製橋脚柱の耐震補強事例

吉原 聡¹・北田俊行²・松村政秀³・中本 覚⁴・木田秀人⁵

¹正会員 阪神高速道路公団 保全施設部 保全技術課 保全技術係長 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

²正会員 工博 大阪市立大学大学院工学研究科 都市系専攻 教授 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

³正会員 工修 大阪市立大学大学院工学研究科 都市系専攻 助手 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

⁴正会員 阪神高速道路公団 湾岸管理部 調査設計課 調査設計課長 (〒552-0007 大阪市港区弁天 1-2-1-1900)

⁵正会員 工修 ショーボンド建設株式会社 大阪支店技術部 (〒536-0022 大阪市城東区永田 3-12-15)

料金所アイランド上の円形断面鋼製橋脚柱(外径 1,016mm)の耐震補強を対象とし、重機や騒音を伴わず外側からの施工が可能であり、コンクリート充填補強と比較するとレーン閉鎖日数も一週間短縮できる炭素繊維シート補強工法を採用した。炭素繊維シートの鋼製橋脚柱への耐震補強は国内でもまれな事例であるため、鋼製橋脚柱を縮小した実験供試体を用いた漸増繰返し水平変位載荷実験等を行い、さらに、RC 橋脚を含めた橋脚全体系の動的応答解析を実施し、合理的・経済的な補強方法を検討するとともに炭素繊維シート補強後の耐震性能を照査した。以上の結果から、地表部の既設中埋めコンクリート直上部に主たる塑性化を考慮し、当該部を中心に軸方向1層、周方向に3層巻き立て、当該部に損傷を発生させることにより、補強に伴う強度上昇をほとんど伴わずに所要の塑性率の確保を可能とした。

Key Words : carbon fiber sheet , steel bridge pier , seismic retrofit , seismic performance , dynamic response analysis

1. はじめに

本研究では、逆L型のRC橋脚と鋼製橋脚柱の連結部にピン支承を設けた複合門型橋脚(以下、複合門型橋脚)の鋼製橋脚柱を対象として、所要の耐震性能の確保を目的として実施した耐震補強について取り扱っている。

鋼製橋脚の耐震補強において、変形性能を高めるためにコンクリートを充填し合成柱とするコンクリート充填工法、あるいは発生する補剛板の座屈変形モードを改善するために縦補剛材を補剛・増設する縦補剛材補強工法などが採用されている¹⁾。しかし、コンクリート充填工法によると、最終的な損傷が柱部材下端に発生するため、震災後の緊急点検や応急復旧を行う際、専用機械等により路面を掘削し柱基部を露出させる必要が生じる。そのため、耐震設計上の修復性の観点から好ましいとは言えない。対象橋脚は、幅1,900mmの料金所アイランド中央に位置する外形φ=1,016mmの円形断面柱であり、柱基部定着部の耐荷力にも十分な余裕がなく、また、コンクリート打設用孔による断面欠損が断面に占める割合が大きいためコンクリート充

填工法は採用しがたい。一方、縦補剛材補強工法についても橋脚内部での施工作业が多いため断面の小さな鋼製橋脚への適用が困難であり、柱外面からの縦補剛材等の設置も建築限界に余裕がなく適用が困難である。そこで、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²⁾を参考に、柱部材周方向に炭素繊維シートを貼付することにより、強度は上昇させずに所要の変形性能を確保し、補強箇所損傷を発生させるような工法の採用を検討している。

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り、また、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の鋼製橋脚への施工実績はなく、一部でその有効性について報告されており^{3)~6)}、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確立されている⁷⁾。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についてはあまり検討されてい

い^{5)~6)}.

そこで、本検討では、対象橋脚に対して柱部材外側から貼付することで、柱部材の強度を上昇させずに変形性能を改善できるような炭素繊維シートの貼付方法による耐震補強工法の提案を目的として、漸増繰返し水平変位載荷実験を実施し¹²⁾、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⁸⁾。

2. 対象橋脚と耐震補強法の選定

(1) 天保山入 P3 橋脚の概要

天保山入 P3 橋脚は、図-1、図-2、および写真-1 に示すように、曲率半径 51.875m 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。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 $\phi=1,016\text{mm}$ 、板厚 16mm、橋脚高さ 13.369m の円形断面柱である。対象橋脚の高さ方向の曲げモーメントの分布は図-4 のとおりであり、中埋めコンクリートを無視すると、強地震による水平力が作用すると柱基部での損傷の発生が予想される。なお下端から 3.5m まではコンクリートが充填されているがダイヤフラムは設置されていない。

また、図-3 に示すように、本橋脚上の上部構造は、単純合成 I 桁（可動支点）と連続非合成 I 桁（可動支点）の掛け違い部となっており、RC 橋脚および鋼製橋脚の建設年は 1973 年であり、設計震度 0.27 で設計されている。また、RC 柱部は鋼板巻立てによる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。

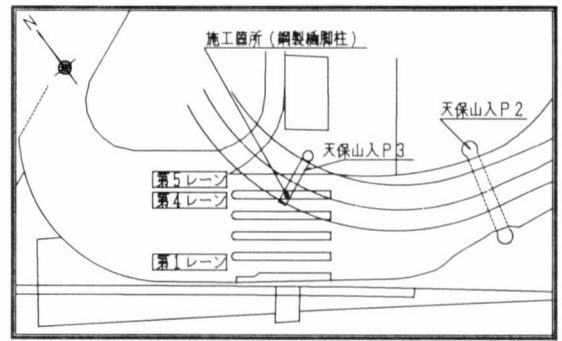


図-1 補強対象鋼製橋脚柱の位置

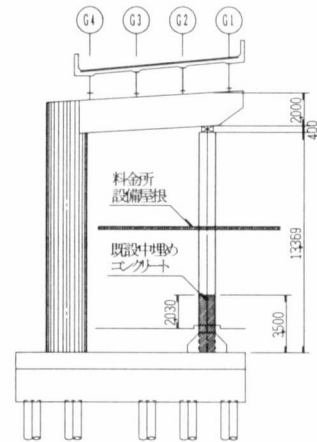


図-2 対象橋脚の一般図(寸法:mm)

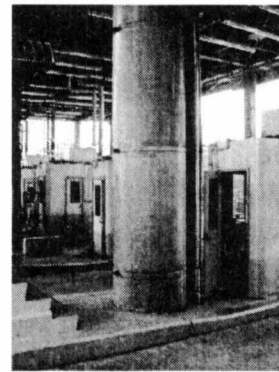


写真-1 補強対象鋼製橋脚柱

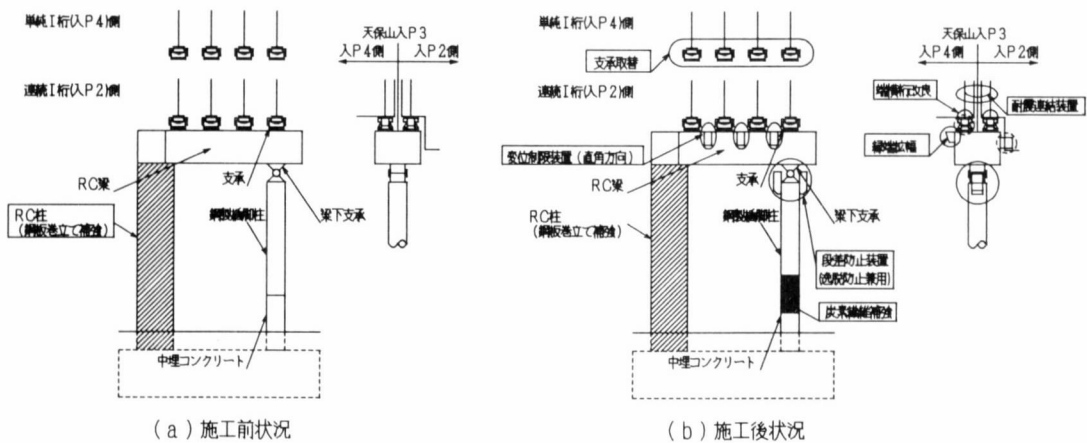
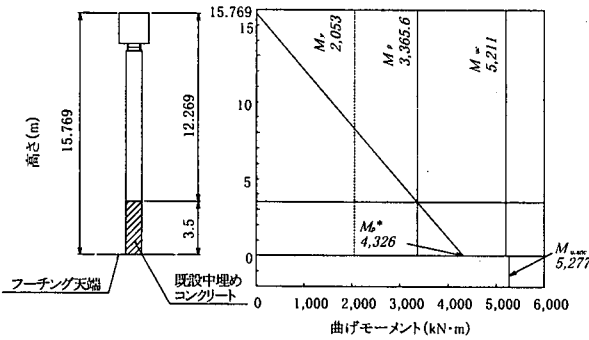


図-3 今回の耐震補強施工前・施工後の状況

- ・単純合成 I 桁：支承取替（タイプ B・鋼製支承）
- ・連続非合成 I 桁：変位制限装置新設（支承取替無）
- ・耐震連結装置（桁間ゴム被覆チェーン）の新設

また、合わせてRC梁部と鋼製橋脚柱上部との間の支承部に段差防止装置を設置し、梁・柱部の支承が損傷した場合に梁の損傷を防止するものとした。図-3には、今回の耐震補強工事の施工前と施工後との状況を比較して示す。



M_u : 局部座屈および軸方向力を考慮した曲げモーメント
 $M_{u,ce}$: 柱断面(中埋めコンクリート考慮)の終局曲げモーメント
 $M_{u,urc}$: アンカー部(定着部)の耐力
 $M_{u,pr}$: 制御断面の全塑性曲げモーメントから求まる基部の発生曲げモーメント

図-4 曲げモーメントの分布

(2) 炭素繊維シート補強の採用に至った経緯

検討した補強工法の選定フローを図-5に示す。表-1に示すように、鋼製橋脚柱の縦補剛材補強工法は、その断面寸法が小さいことから一般に行われる橋脚内部での施工作业(部材搬入・取付・溶接作業等)が非常に困難である。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。

一方、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、鋼製橋脚柱断面が小さいため、コンクリート打設用孔($\phi=400\text{mm}$)が断面に占める割合が大きくなり、常時荷重作用下での施工が困難であること、追加中埋めコンクリートの天端処理が不可能であること、およびコンクリートを充填すると最終的な損傷断面が柱基部となることから、採用できない。

そこで、代替工法を模索したところ、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が検討された。基部アンカーボルトの強度を考えると、表-2に示すように、

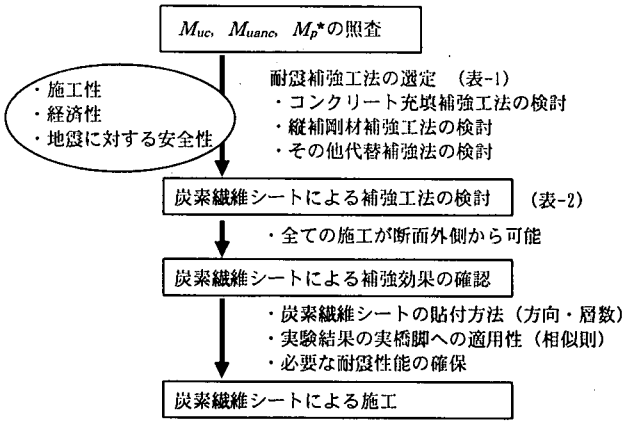


図-5 耐震補強工法選定フロー

対象橋脚への炭素繊維シートを適用する場合でも、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貼付方法で、かつ補強後の損傷箇所を柱基部としないような貼付方法を採用することが重要である。

しかしながら、炭素繊維シートによる鋼板補強については、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。なお、高い引張

表-1 耐震補強工法の比較

補強工法項目	(従来の補強工法)		(新しい補強工法)
	コンクリート充填補強工法	縦補剛材補強工法	炭素繊維シートによる補強工法
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 耐荷力・変形性能を共に著しく改善 施工が比較的容易 十分な耐荷力を有する脚基部(アンカーボルト、フーチング)が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 補強に伴う耐荷力上昇をある程度抑制することが可能 柱内部での作業が多く、経済性・施工性に不利 	<ul style="list-style-type: none"> RC橋脚への実績は多数ある 柱断面外側のみからの施工 施工性に優れている 補強に伴う耐荷力の上昇を抑制できる(一部で有効性は検討されている) 脆的な破断を伴う
対象橋脚へ適用する場合の問題点	<ul style="list-style-type: none"> 柱基部の耐荷力に十分な余裕がない コンクリートの打設孔の施工、充填に伴う自重増加 	<ul style="list-style-type: none"> 断面が小さく柱内部での作業が困難 建築限界が厳しく補強部材スペース確保が困難(柱外側) 	<p><検討項目></p> <ul style="list-style-type: none"> 炭素繊維シートの貼付方法(方向・層数) 実験結果の実橋脚への適用性(相似則) 必要な耐震性能の確保
対象橋脚への適用	×	×	○

表-2 炭素繊維シートによる耐震補強例

	補強前	補強後 文献7)の補強方法		補強後 本補強方法
補強範囲および崩壊箇所	(H_{uo}, μ_{uo}) 	(H_u, μ_u) 	(H_u, μ_u) 	(H_u, μ_u)
			$H_u > H_{uo}$	$H_u > H_{uo}$
	中埋めコンクリート直上の鋼断面の座屈損傷	補強断面損傷無し 柱基部・下端断面の座屈損傷	補強断面損傷無し アンカーボルトの損傷(伸び・破断)	補強断面に損傷 柱基部・下端断面損傷無し

度を有する炭素繊維シートの合理的な貼付方法を考慮して、部材軸方向へは炭素繊維シートを1層だけ貼付することとし、引張力の作用する周方向の炭素繊維シートの貼付層数に着目して、対象橋脚の断面を2.5分の1に縮小した実験供試体を用いて漸増繰返し水平変位載荷実験を実施した^{6),12)}。なお、実験供試体と対象橋脚との相似則を考慮し、貼付する炭素繊維シートは、使用鋼板の板厚の違い ($t=16\text{ mm}$ あるいは 6.4 mm) に応じて、それぞれ、目付量が 300 g/m^2 あるいは 120 g/m^2 のものを使用している。以上の検討実験の詳細については、文献12)を参照されたい。

3. 動的応答解析による耐震性能の照査

(1) 解析モデルの設定および地震に対する安全性の照査

対象橋脚と逆L型のRC橋脚とで構成される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確認した。例として、図-6には橋軸直角方向解析モデルを示す。ここで、節点103は炭素繊維シートの貼付層数を決定するための解析においては非線形バネ要素 (Case1, 橋軸方向)、および耐震性能の照査にはピン要素 (Case2, 橋軸直角方向) としている⁹⁾。さらに、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 を算定し用いている。すなわち、曲げモーメント M と回転角 θ 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¹⁰⁾にしたがい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・同解説、V耐震設計編¹¹⁾に規定される地盤種別Ⅲ種用の加速度波形を用いた。そして、動的応答解析結果に基づく照査では、地震動の各タイプに応じた3波の入力地震動を用いて得られた応答値の平均値を用いた。部材の減衰定数 h はコンクリート部材では0.02、鋼部材では0.01とした。また、今回用いた解析モデルにおいて中埋めコンクリート高さを3.5mと設定したが、より精緻な検討には後述の実験結果に従って3.125mとするのが適当と考えられる。

ここで、対象橋脚の縮小モデルを用いた漸増繰返し水平変位載荷実験には、表-3に示す4体の実験供試体を使用した。すなわち、既設の鋼製橋脚を想定した実験供試体4-01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4-02~4-04である。なお、実験供試体4-04

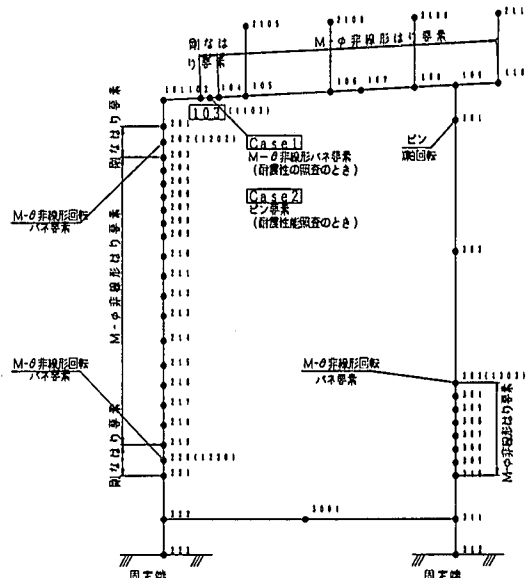


図-6 動的応答解析モデル (橋軸直角方向)

は、対象橋脚への施工を考慮して、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を密閉する工法の妥当性を調べる実験供試体である。紙面の関係上、載荷実験の詳細は文献7), 12)を参照されたいが、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、図-7、表-4、および以下のとおりである。すなわち、1) 円形断面の周方向に炭素繊維シートを3~8層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、2) 炭素繊維シートの貼付層数の違いによって、損傷箇所が、中埋めコンクリートの充填部直上のもとの、基部断面のものとの2つの崩壊パターンがみられる、3) 周方向の炭素繊維シートを併用してアンカー方式のジベルを設置すると、図-7からわかるように、鋼のダイヤフラムを設置する場合に比べて、若干小さな曲げ剛性となるものの、ほぼ同様の履歴特性を示す。これは、1列目と2列目のジベル間以下でコンクリートの閉じ込め効果が機能していたが、この位置は、実験供試体ではコンクリート充填区間長の1/2のところとなっているためである。実橋脚では、この点はほとんど問題でなくなるため、ジベルによるアンカー方式でも鋼のダイヤフラムと同じ効果が期待できると考えられる。

表-3 実験供試体の内訳

供試体名	炭素繊維シートの貼付層数		充填コンクリートの密閉方法	備考
	軸方向	周方向		
4-01'	-	-	鋼製ダイヤフラム	鋼供試体 下端断面 (10cm)は周 方向に8層
4-02'	1	8		
4-03'	1	3	ジベル	
4-04'	1	5		

* : $L/5(=30\text{cm})$ までコンクリートを充填する

表-4 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 β ($=H_u/H_{u01}$)	塑性率 μ_u ($=\delta_u / \delta_{y0}$)	崩壊箇所 (最弱点断面)
	軸方向	周方向			
4-01*	-	-	1.00	3.1	中埋め直上
4-02*	1	8	1.16	6.4	基部・下端
4-03*	1	3	1.16	4.2	中埋め直上
4-04*	1	5	1.06	5.4	基部・下端

δ_u : 水平荷重が最大となるときの終局変位
 δ_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_{u01} : 実験供試体 4-01 の終局水平荷重

また、表-5 には動的応答解析の結果 (Case 1) 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高荷重点を結んだ曲線) とともに、動的応答解析より得られた最大応答変位を示す。表-5 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 (基部鋼断面下端が降伏するときの変位 δ_y の 1.1 倍 (119mm/108.4mm))、橋軸方向で 379mm (δ_y の 3.5 倍 (379mm/108.4mm)) と算定された。すなわち、橋軸方向の塑性率 3.5 は、無補強供試体の実験結果 (表-4 および図-7 参照) の塑性率 ($\delta_u / \delta_y = 3.1$) 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とともに、補強後に必要な塑性率が 3.5 であることも明らかになった。

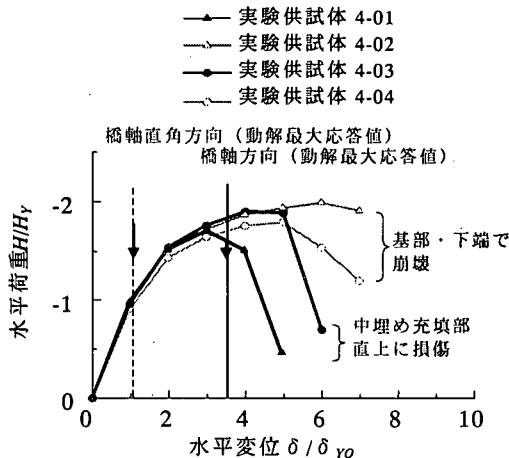


図-7 H- δ 曲線の包絡線

表-5 動的応答解析の結果 (Case1)

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

δ_y : 基部鋼断面下端 (フーチング天端) が降伏するときの変位
 L : 鋼製橋脚柱高さ

(2) 炭素繊維シートの貼付層数および補強範囲

高架形式の都市高速での管理上、中埋めコンクリートの充填部直上に崩壊部が発生した場合、基部断面に発生した場合と比べて、損傷復旧を容易に行うことができる。動的応答解析の結果、レベル2タイプII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、炭素繊維シートには、弾性率が鋼とほぼ同様に目付量が 300 g/m² のものを使用し、中埋めコンクリートの充填部直上を最弱点断面とする炭素繊維シートを軸方向 1 層・周方向 3 層と決定した。

炭素繊維シートの貼付範囲 (補強範囲) L_r は、コンクリート充填補強工法によるコンクリートの充填高さの決定法を参考にして、対象橋脚の補強前の曲げモーメント分布 (図-8 参照) に基づき決定する。すなわち、作用曲げモーメントが M_{uc} を超えないような高さ L_{ra} から設置するジベル位置までを、曲げモーメント図より算定される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 (=230mm) を考慮し、併せて補強範囲とした。

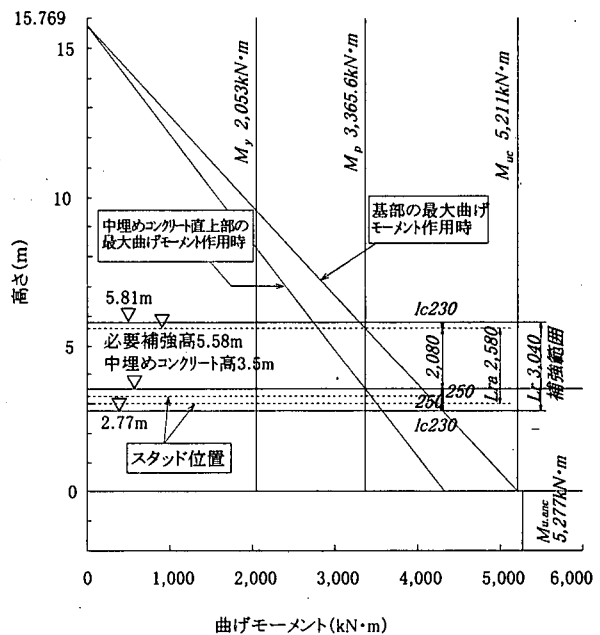


図-8 炭素繊維シートの貼付範囲および曲げモーメントの分布

(3) 橋脚全体系の耐震性能照査 (橋軸方向)

塑性回転角 (崩壊部)、せん断力、部材曲率、および残留変位に着目して動的応答解析結果による安全性の評価を行った。その結果、橋軸方向については、塑性

回転角および一般部材曲率（鋼製橋脚柱・RC柱部）、せん断耐力（RC梁・柱部）のいずれの許容値も満足しており、耐震性能2を満足していると考えられる。

(4) 橋脚全体系の耐震性能の照査（橋軸直角方向）

a) 耐震性能2の安全性の観点からの照査（Case 1）

橋軸直角方向については、RC梁付根部の塑性回転角（崩壊部）、一般部材曲率の照査において、許容値を満足しないことがわかった（表-6 および表-7 を参照）。このときのRC梁付根部の状態は、引張側鉄筋は降伏しており、引張側コンクリートについてはひび割れが発生しているものの、圧縮側コンクリートは圧壊に至っていない。

表-6 塑性回転角(rad)の照査(梁付根部θ, 節点103, Case 1)

	平均値(3波)	許容値	判定
タイプI	5.299×10^{-3}	3.768×10^{-3}	OUT
タイプII	8.667×10^{-3}	8.820×10^{-3}	OK

表-7 部材曲率(1/m)の照査(梁付根部φ, 節点103, Case 1)

	平均値(3波)	許容値	判定
タイプI	1.27×10^{-3}	1.31×10^{-3}	OK
タイプII	1.75×10^{-3}	1.31×10^{-3}	OUT

b) 耐震性能2の供用性・修復性の観点からの照査（Case 2, 橋軸直角方向）

レベル2地震後の常時荷重（死荷重・活荷重）に対する耐震性能2の照査を弾性微小変位解析により行った。ここで、RC梁付根部はピン結合としてモデル化し、さらに引張側の鉄筋は全て無効とし、圧縮側の鉄筋断面のみ有効とした。これは、地震後のRC梁付根部の圧縮側コンクリートは圧壊には至っていないが、崩壊部の塑性回転角が許容回転角以上であること、および鉄筋断面が降伏状態にあるため曲げ剛性は期待できないと考えられるためである。

そして、ピン結合部の鉄筋断面に生じるせん断力 S に着目して照査を行った。その結果、表-8に示すように、死荷重+B活荷重を載荷した場合でも許容応力度を満足し、地震直後でも緊急車両が通行できると考えられる。また、地震後の短期的修復性は、対象橋脚は料金所アイランドに位置し、近傍レーンを通行止めとし梁受けベントを設置することが可能であり、橋としての機能が応急修復程度で速やかに回復できると考える。一方、長期的修復性についても、引張側鉄筋が降伏していることから梁受けベントを残置したまま桁受けベントを設置し、梁付根部のコンクリートを切断・撤去後、配筋後速硬コンクリート打設を行うことで比較的容易に行うことができると考えられる。

表-8 RC梁部の断面照査結果(Case 2)

荷重	せん断力 S (kN)	発生応力度 τ (N/mm ²)	許容応力度 τ_s (N/mm ²)	判定
死荷重	750.5	31.4	80	OK
B活荷重	944.1	39.5	80	OK
合計	1,694.6	70.9	80	OK

以上をまとめると、つぎのようである。

①動的応答解析（Case1）から、塑性回転角および応答曲率の照査において許容値を満足しない結果が得られたが、安全係数（タイプI地震動に対する場合 $\alpha=3.0$ 、タイプII地震動に対する場合 $\alpha=1.5$ ）を見込んでいるため、終局状態（圧縮側コンクリートの圧壊）まで余裕がある。

②地震後のRC梁付根部の損傷状況を想定した弾性微小変位解析（Case 2）から、主荷重（死荷重+B活荷重）が作用した場合においても、許容応力度を満足する結果が得られた。

したがって、耐震性能2を満足していると考えられる。また、損傷後の短期・長期修復性についても可能であることが確認できた。なお、RC梁部の補強は必要ないことがわかった。

4. 施工工事の概要

本橋脚の耐震補強工事の施工工程を図-9に示す。鋼製橋脚柱は密閉構造で建設から29年経っており、また鋼管内面は無塗装であることから、施工前に内部の腐食・滞水状況をファイバースコープを用いて確認したところ、腐食・滞水は見られなかった。

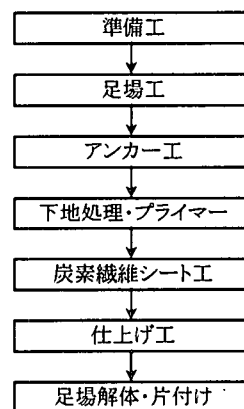


図-9 施工工程フロー

(1) 中埋めコンクリートの抜け出し防止策

鋼製橋脚柱周方向の炭素繊維シートの貼付と併用して、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、実験結果に基づき図-10に示すように1断面につき8方向とし上下2断面に設置する。アンカーは鋼管外面からφ32の削孔を行い、定着材を充填後D22のボルトを差込み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。定着材は膨張モルタルを使用した。アンカーの施工状況を写真-2、写真-3に示す。

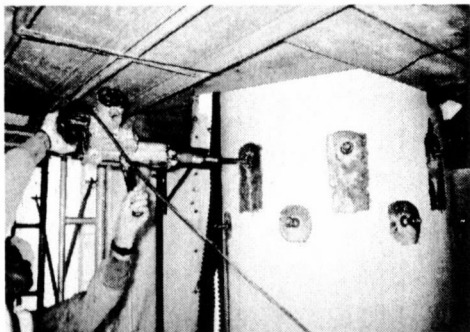


写真-2 アンカー工

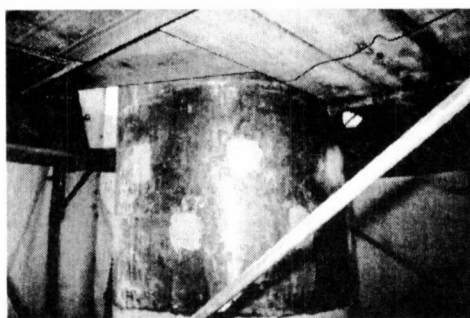


写真-3 アンカー工完了

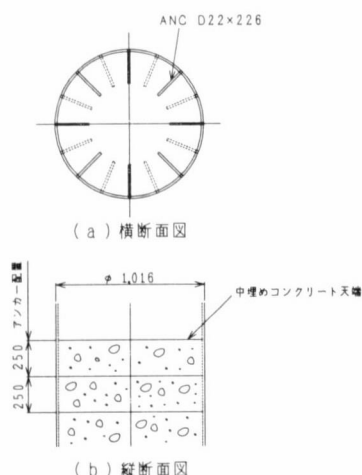


図-10 中埋めコンクリート抜け出し防止アンカー

(2) 炭素繊維シート接着工

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。プライマー塗布の施工状況を写真-4に示す。

炭素繊維シートの継手長は繊維方向に20cmとし、繊維直角方向は強度を期待しないことに加え、ラップによる接着面の凹凸が、さらに上の接着層の平坦性を損なう恐れがあるため突き合わせとした。写真-5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。

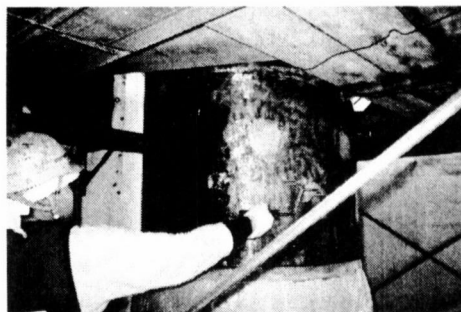


写真-4 プライマー塗布



写真-5 炭素繊維シートへの含浸(周方向)

(3) 表面防護工(対衝突仕様)

本鋼製橋脚柱の立地位置は天保山料金所アイランド上にあり車両の衝突が想定されるが建築限界等の問題があるため根巻コンクリートや防護柵の設置が困難である。

そのため、図-11の対衝突仕様を採用した。炭素繊維シートの車両衝突防護についての考え方は、「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)」(平成9年5月制定)(阪神高速道路公団²⁾)に準拠した。施工完了状況を写真-6に示す。

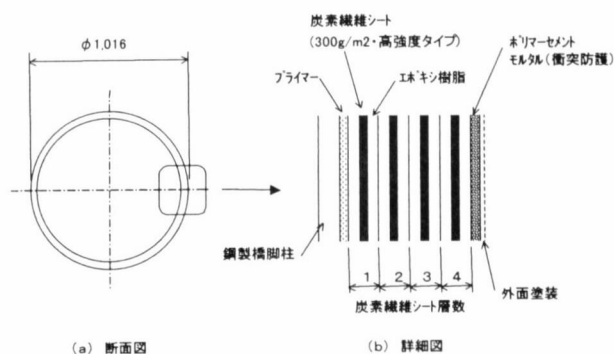


図-11 表面防護(対衝突仕様)

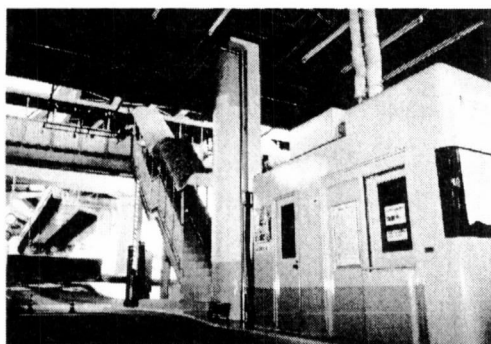


写真-6 施工完了

5. まとめ

本論文では、複合門型橋脚の鋼製橋脚柱を対象として実施した耐震補強法について検討して結果をとりまとめている。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の動的応答解析を実施し、補強方法の決定および炭素繊維シート補強後の耐震性能を照査した。以下に本検討によって得られた主な結果を示す。

- (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 $\delta_u / \delta_y = 5.4$ ）、周方向3層の場合には中埋めコンクリートの充填部直上の鋼断面（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、レベル2のタイプII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) 動的応答解析から、RC梁付根部の照査において許容値を満足しない結果が得られたが、安全性の観点からは耐震性能2を満足していると考えられる。また、地震後のRC梁付根部の損傷状況を想定した弾性微小変位解析から、供用性・修復性の観点から見ても、耐震性能2を満足していると考えられる。よって、RC梁付根部の補強は不要と考える。
- (3) 以上のことから、中埋めコンクリートの充填部直上を最弱点断面とし、炭素繊維シートを軸方向1層、周方向3層で補強する工法が選択できることを明らかにした。
- (4) 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13)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。

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) 永崎央輔，鈴木博之，西村宣男，袴田文雄：炭素繊維強化樹脂板により補強された既設鋼製橋脚の繰返し載荷実験，土木学会第56回年次学術講演会，pp. 562-563，2001.10.
- 5) 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.
- 6) 松村政秀，北田俊行，池田啓士，岡田崇，徳林宗孝：炭素繊維シートを橋脚鋼管柱周方向に貼付した耐震補強法に関する実験的研究，土木学会第57回年次学術講演会，I-015，pp.29-30，2002.9.
- 7) 炭素繊維シートによる鋼製橋脚の耐震補強工法研究会：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），同研究会報告書，（財）土木研究センター，2002.7.
- 8) 橋梁新聞：炭素繊維シート工法公開，第786号，pp.5，2002.9.1.
- 9) 富士通エフ・アイ・ピー（株）：耐震設計支援システム EARMEST レファレンスマニュアル，Ver.4
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2002.3.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996.12.
- 12) 松村政秀，北田俊行，徳林宗孝，池田啓士，岡田崇：炭素繊維シートを橋脚鋼管柱周方向に貼付した耐震補強法に関する実験的研究，土木学会論文集（投稿中）
- 13) 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.

(2002.10.4 受付)