

炭素繊維シートによる円形断面鋼製橋脚の耐震補強

岡田 崇* 上田 隆博** 長谷川 敏之***

1995年の兵庫県南部地震以後、従来の設計基準で建設された橋梁や橋脚の耐震性向上工事が各地で実施されている。特に鋼製橋脚の耐震補強については種々の方法が採用されており、新たな補強方法に関しても実験・研究が進められている。本報告は、阪神高速道路公団より受注した「上部耐震改善工事（12-2-湾管）」で行った、国内では希な事例となる鋼製橋脚の炭素繊維シートによる耐震補強の設計と施工について報告するものである。

キーワード：炭素繊維シート，円形断面鋼製橋脚，模型載荷実験，動的応答解析，短期施工

まえがき

上部耐震改善工事（12-2-湾管）は、阪神高速道路湾岸線・東大阪線・大阪港線の耐震補強工事として阪神高速道路公団から発注され、駒井・ショーボンド建設工事共同企業体で受注したものである。工期は平成12年11月14日～平成14年11月3日、工事工種として、支承取替・耐震連結装置・鋼製橋脚耐震補強等を行った。

天保山入 P3 橋脚において鋼製橋脚耐震補強を行うにあたり、立地条件や橋脚構造等の問題により、通常行われているコンクリート充填工法や縦補剛材補強工法の採用が困難な状況にあった。

そのため、代替工法を検討した結果、国内では希な事例となる炭素繊維シートによる補強工法を採用することとなった。

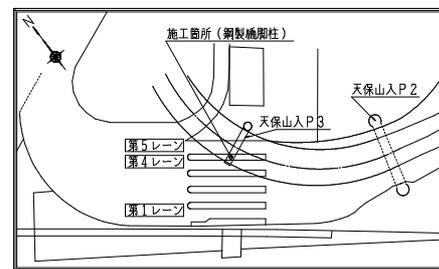


図-1 天保山入 P3 橋脚位置

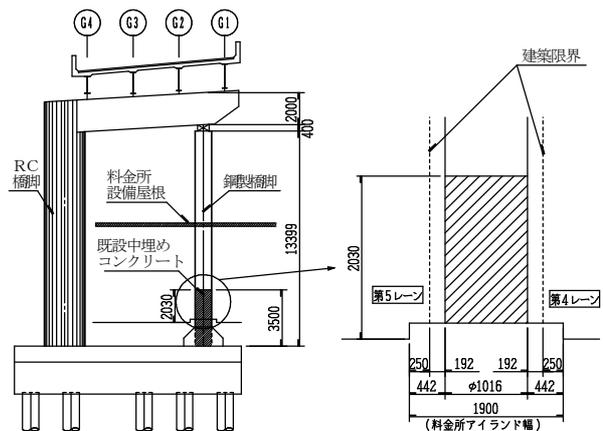


図-2 天保山入 P3 橋脚一般図

1. 設計および性能照査

(1) 補強工法の検討

対象橋脚である天保山入 P3 橋脚は図-1、図-2、および写真-1 に示すように、逆L型の RC 橋脚と鋼製橋脚柱の連結部にピン支承を有する複合門型橋脚（以下、複合門型橋脚）である。鋼製橋脚柱は、外径 1,016mm、板厚 16mm、橋脚高さ 13.369m の円形断面であり、幅 1,900mm の天保山料金所アイランド中央に位置している。



写真-1 天保山入 P3 橋脚

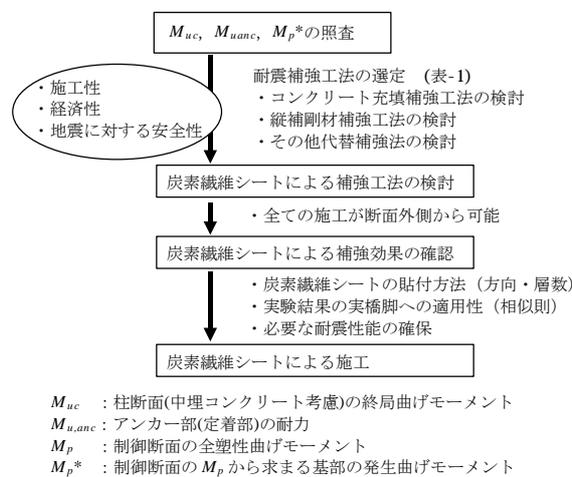
* 工事計画部大阪計画課係長 ** 設計部大阪設計一課 *** 設計部次長

一般に、鋼製橋脚の耐震補強においては、コンクリートを充填して合成柱とするコンクリート充填工法、あるいは、縦補剛材を補剛・増設する縦補剛材補強工法等が採用されている¹⁾。

しかし、本橋脚においては柱基部定着部の耐力に十分な余裕がないこと、およびコンクリート打設用孔による断面欠損の割合が大きいことからコンクリート充填工法の採用が困難であった。また、縦補剛材補強工法については、橋脚内部での作業が困難であることや、柱外面への補剛材の設置についても建築限界に余裕が無いことから適用が困難であった。

そこで、種々の方法を検討した結果、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⁾に着目することとした。

図-3 に検討を行った補強工法の選定フロー、および表-1 に耐震補強工法の比較を示す。



M_{uc} : 柱断面(中埋コンクリート考慮)の終局曲げモーメント
 M_{unc} : アンカー部(定着部)の耐力
 M_p : 制御断面の全塑性曲げモーメント
 M_p^* : 制御断面の M_p から求め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 耐震補強工法の比較

補強工法項目	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)。 脆性的な破断を伴う
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	×	×	○

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。今日まで鋼製橋脚に炭素繊維シートによる耐震補強の施工実績はなく、一部でその有効性について報

告されており^{3)~6)}、炭素繊維シートによる補強により、弱点箇所を変形性能のある箇所に改善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方法については検討事例がない。

そこで、施工に先立ち、天保山入 P3 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のための模型載荷実験⁸⁾を行い、合理的・経済的な補強方法(補強範囲・炭素繊維シートの貼付方向の組合せ等)の検討を行うこととした。

(2) 模型載荷実験

模型載荷実験は、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柱の補強方法の有効性を検討することを目的として実施した。実験には、天保山入 P3 橋脚の鋼管柱断面を 1/2.5 に縮小した供試体(外径 $\phi 406\text{mm}$ 、板厚 6.4mm、実験装置の制限から高さ方向の縮尺は実橋脚の 1/10)を用いて、一定軸方向圧縮力(実橋脚と軸方向圧縮力を合わせる)を導入した状態で水平変位を漸増させる、漸増繰返し水平載荷実験を行った。図-4 および図-5 に実験供試体と載荷装置の概要を示す。

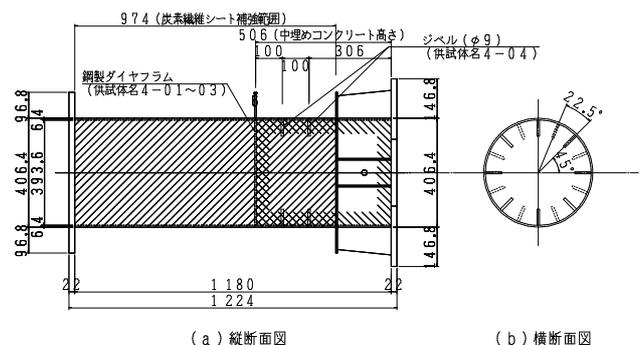


図-4 実験供試体

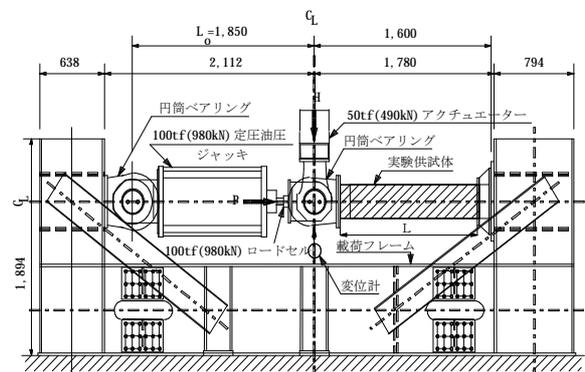


図-5 載荷装置

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, 5層と変化させた3体の実験供試体4-02~4-04である。また、実橋脚はダイヤフラムが設置されていない構造となっているため、実験供試体4-04は、断面外側からジベルを設置して既設中埋めコンクリートを固定する工法の妥当性を確認することも合わせて行うこととしている。

表-2 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		
4-04	1	5		

漸増繰返し水平載荷実験から得られた主な結果は、表-3、図-6、の通りである。なお、実験結果の詳細については、文献8)を御参照頂きたい。

表-3 漸増繰返し水平載荷実験から得られた主な結果

供試体名	炭素繊維シートの貼付層数		強度上昇率 β ($=H_u/H_{u4-01}$)	塑性率 μ_u ($=\delta_u/\delta_y$)	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時の終局変位
 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_{u4-01} : 実験供試体4-01の終局水平荷重

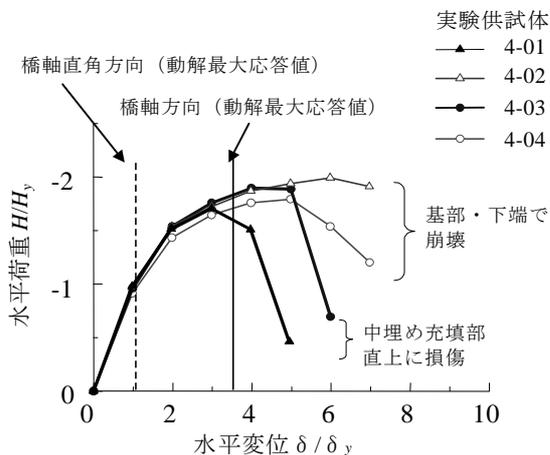


図-6 H-δ曲線の包絡線

(3) 動的応答解析による耐震性能の照査

1) 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の確認を行った。

表-4に動的応答解析の結果を示す。さらに、図-6には漸増繰返し水平載荷実験に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)と共に、動的応答解析によって得られた最大応答変位を示す。表-4および図-6から、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(基部鋼断面が降伏するときの変位 δ_y の3.5倍(379mm/108.4mm))と算定された。以上のことから、橋軸方向の塑性率3.5は、無補強供試体の実験結果(表-3および図-6参照)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を再確認することができたと共に、補強後に必要な塑性率が3.5であることも明らかとなった。

表-4 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	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

天保山入P3橋脚の立地条件を考慮すると、中埋めコンクリートの充填部直上に損傷部が発生した場合、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という利点がある。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。従って、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、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充填高さの決定法を参考にし、補強前の曲げモーメント分布（図-7参照）に基づいて決定する。さらに、その上・下端には、炭素繊維シートが確実に定着するように定着長 l_c （=230mm）を考慮することとし、併せて補強範囲とした。

3) 橋脚全体系の耐震性能の照査

橋軸直角方向については、RC 梁付根部の塑性回転角および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。しかし、検討の結果、以下の理由により道路橋示方書⁹⁾に示されている耐震性能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、RC 梁部等の補強は必要ないと判断した。

- ①動的応答解析から、RC 梁付根部での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 地震動時 $\alpha=1.5$ ，タイプ II 地震動時 $\alpha=3.0$ ）が見込まれているため、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て行った弾性微小変位解析から、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。

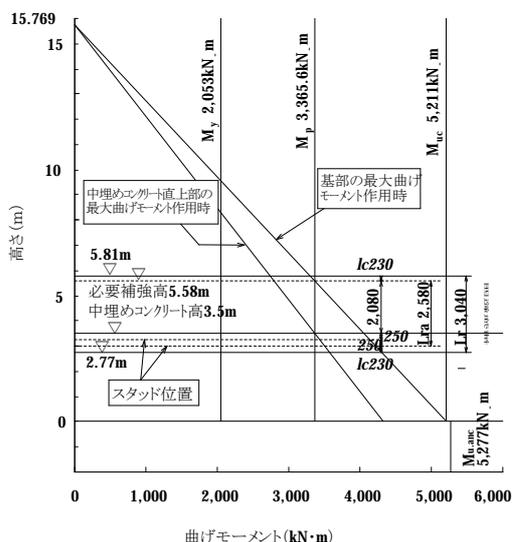


図-7 炭素繊維シートの貼付範囲および曲げモーメント分布

2. 施工

(1) 工程表および施工フロー

図-8 および図-9 に施工工程表および施工フローを示す。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料金所レーンの閉鎖を行った。

工 程	8 月											9 月				
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3
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-8 施工工程表

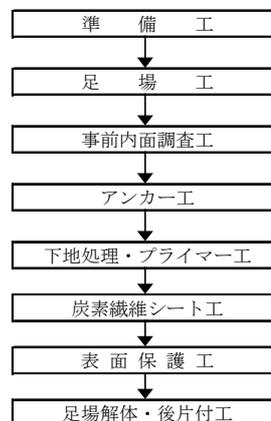


図-9 施工フロー

(2) アンカー工

既設の中埋めコンクリートの抜け出し防止を目的として、柱部材外側からの施工が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方向として上下2段に配置する。アンカーは柱部材外側からφ32mmの削孔を行い、定着材（膨張モルタル）を充填後、D22のボルトを差し込んで既設中埋めコンクリートに固定し、柱部材とは溶接を行うことによって一体化を図った。写真-2にアンカーの施工状況を示す。

(3) 炭素繊維シート接着工

炭素繊維シートの貼付に先立ち、鋼製橋脚柱の下地処理およびプライマーの塗布を行った。下地処理は、ディスクサンダーを用いて既設塗装を除

去し、錆が発生しないように直ちにプライマーの塗布を行った。その際、炭素繊維シートと鋼製橋脚柱が接触して水が侵入すると電食が生じる可能性があるため、プライマーを均一に塗布して炭素繊維シートと鋼製橋脚柱が直接接触しないよう、十分に注意して行うよう配慮した。プライマーの塗布状況を写真-3に示す。

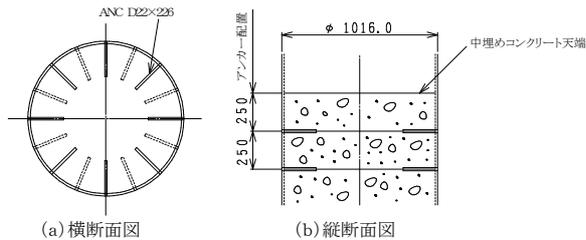


図-10 既設中埋めコンクリート抜け出し防止アンカー



写真-2 アンカー施工状況



写真-3 プライマー塗布状況



写真-4 炭素繊維シートへの含浸

炭素繊維シートの継手長（ラップ長）は繊維方向に20cmとし、繊維直角方向については、強度を期待していないこと、およびラップを行った場合に生じ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ことから、ラップさせず

に突き合わせとすることとした。写真-4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。

(4) 表面保護工

天保山入 P3 橋脚の鋼製橋脚柱は天保山料金所アイランド上に位置しており、車両の衝突による損傷が生じる場合が考えられる。本鋼製橋脚柱においては建築限界等の問題があり、通常、車両の衝突等が想定される場合に用いられる根巻きコンクリートや防護柵等を設置することが困難であった。そのため、文献 2) に準拠し、図-11 に示すように対衝突仕様を採用することとした。

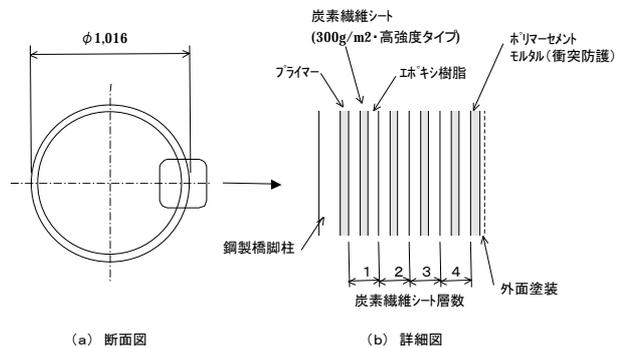


図-11 表面防護（対衝突仕様）

3. まとめ

本鋼製橋脚における炭素繊維シートによる耐震補強に関する検討結果を以下に示す。

- 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層の場合には柱基部断面に、周方向3層の場合には既設中埋めコンクリートの充填部直上の鋼断面に崩壊部が形成されることがわかった。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、橋軸方向（橋脚面外方向）に最大応答変位が発生する結果が得られたが、周方向の貼付層数を3層とした実験結果を十分満足していることが確認できた。
- ②動的応答解析の結果に基づき検討した結果、安全性・供用性・修復性の観点から耐震性能2を満足していることが確認できた。
- ③以上の結果から、既設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層で補強することとした。
- ④天保山入 P3 橋脚は天保山料金所アイランド中央に位置しており、炭素繊維シートによる補強

工法を採用したことによって、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、橋脚径が小さい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。

- ⑤本鋼製橋脚柱は、径厚比 $R/t=63.5$ のダイヤモンド座屈が生じにくい柱¹⁰⁾であり、今回行った実験結果でも提灯座屈のみが生じた。しかし、ダイヤモンド座屈が生じる可能性のある鋼製橋脚柱に炭素繊維シートによる耐震補強を適用する場合には別途検討が必要と考えられる。

あとがき

天保山入 P3 橋脚鋼製柱の炭素繊維シートによる耐震補強の施工は、平成 14 年 8 月 19 日から 9 月 2 日にかけて行い、国内では希な事例であることから、併せて公開施工を実施して、無事に完了した（写真-5 参照）。



写真-5 施工完了

炭素繊維シートによる補強工法は、軽量かつ耐久性に優れており、短期施工が可能であること、および施工性においても有利な工法であることから、本鋼製橋脚柱のように断面が小さく、柱内部での作業が困難な場合に適用するのに非常に有利な工法であると考えられる。また、現段階での施工実績は本鋼製橋脚のみであるが、今後、各種の実験や検討等が行われ、より合理的な方法が確立されて施工実績が増えていくことが考えられる。

最後に、本鋼製橋脚の実験を含めた設計・施工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、ならびに阪神高速道路公団湾岸管理部調査設計課・湾岸維持事務所および阪神高速道路管理技術

センターの方々をはじめ、多くの関係各位に深く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) 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) 吉原 聡・北田俊行・松村政秀・中本 寛・木田秀人：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，既設構造物の耐震補強に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.63-70，2002.11.
- 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) 松村政秀・北田俊行・徳林宗孝・池田哲士・岡田 崇：炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強法に関する実験的研究，土木学会論文集，（投稿中）
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2002.3.
- 10) 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.