

# 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

松村政秀<sup>1</sup>・北田俊行<sup>2</sup>・徳林宗孝<sup>3</sup>・池田啓士<sup>4</sup>・岡田 崇<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 大阪市立大学大学院工学研究科 助手 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail:m\_matsu@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 大阪市立大学大学院工学研究科 教授 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

<sup>3</sup>正会員 工修 阪神高速道路公団湾岸管理部調査設計課課長補佐 (〒552-0007 大阪市港区弁天1-2-1-1900)

<sup>4</sup>正会員 ショーボンド建設株式会社 大阪支店 技術部長 (〒536-0022 大阪市城東区永田3-12-15)

<sup>5</sup>駒井鉄工株式会社 工事計画部 大阪計画課 (〒552-0003 大阪市港区磯路2-20-21)

鋼製橋脚の新しい耐震補強工法として、炭素繊維シートを利用した工法が注目されている。引張性能にすぐれた炭素繊維シートによる耐震補強では、重機や騒音を伴わず、柱部材外側のみからの施工が可能であり、コンクリート充填工法および補剛鋼材で補強する工法などの従来の耐震補強工法と比較して有利な点が多い。本研究では、円形断面鋼製橋脚を対象とした合理的・経済的な耐震補強工法として、断面周方向に炭素繊維シートを貼付する工法に着目し、その補強効果を実験的に検証している。その結果、円形断面周方向に炭素繊維シートを巻き立てると、柱部材の曲げ剛性および耐荷力を大きく上昇させずに所要の変形性能の確保が可能であり、本耐震補強工法の有効性が確認できた。

**Key Words :** carbon fiber sheet, seismic retrofit, circular steel bridge pier, loading test, ductility

## 1. はじめに

強地震動により損傷を受けた円形断面鋼製橋脚には、板厚変化部や柱部材基部に断面全周にわたる局部座屈、すなわち象の足型の座屈変形の発生が多数見られた。既往の研究成果によると、このような象の足型座屈の発生により、円形断面柱の変形性能が著しく低減し、地震後の残留変形が大きくなることが数値解析により明らかにされている<sup>1)</sup>。

既設の鋼製橋脚の耐震補強においては、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<sup>2)</sup>、あるいは発生する補剛板パネルに座屈変形モードを改善するために縦補剛材を補強・追加する縦補剛材補強・追加工法などが採用されている<sup>3)9)</sup>。また、鋼製橋脚の新しい耐震補強方法の1つとして、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を貼付する方法についても検討が始められている<sup>9)</sup>。

炭素繊維シートは、軽量かつ耐久性に有利であり、鋼材(SM400)の約10倍の引張強度と約0.5~3倍の弾性率を有し、すぐれた引張特性を示す。また、他の補修材料・工法に比較して、施工性に優れていることから、従来の工法では施工困難な場合にも施工が可能になる場合

もある。さらに、重機や騒音を伴わずに柱部材外側からのみの施工が可能であるため、施工日程の短縮が期待でき、従来の耐震補強工法と比較して、施工性・経済性に有利であると考えられる。

文献9)では、円形断面鋼製橋脚の板厚変化部へ部材軸方向に炭素繊維シートを貼付し、補強部分での鋼板の座屈強度を上昇させることにより、弱点箇所を曲げに対する変形性能の大きな柱部材下端に移行させる耐震補強方法が提案されている。しかし、円形断面鋼製橋脚を対象とした炭素繊維シートによる耐震補強法の有効性についての研究例は数少なく、縮小模型を用いた実験結果の実構造物への適用性についても明確に述べられていないのが現状である。

本研究では、単柱形式の円形断面鋼製橋脚を対象として、その断面周方向に引張性能に優れた炭素繊維シートを貼付し、断面外側へ広がる象の足型の座屈変形の発生を抑制する耐震補強方法を提案している。ここで、橋脚高さの1/5までコンクリートが充填された外径1,016 mm、板厚16 mmで橋脚高さ3.75 mの円形断面鋼製橋脚<sup>10)</sup>を対象とする。そして、その妥当性を検討するために、補強効果に著しい影響を及ぼすと考えられる炭素繊維シートの貼付層数および貼付方法とに着目して、曲げ載荷実

表-1 円形断面橋脚のための耐震補強工法の種類

従来の補強工法 <sup>2)-5)</sup>	縦補剛材補強・追加 <sup>3)</sup>	隙間空け鋼板巻立て <sup>4)</sup>	新しい補強工法
<p>コンクリート充填<sup>2)</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・耐荷力と変形性能とを共に改善できる</li> <li>・施工が比較的容易</li> <li>・経済的に有利</li> </ul> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・コンクリートの打設孔の施工、充填に伴う橋脚自重の増加</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・補強に伴う耐荷力上昇をある程度抑制することが可能</li> </ul> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・柱断面内部での作業工程が多く、経済性・施工性に不利</li> <li>・柱外側から補強する場合には補強部材スペースの確保が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・断面外側から隙間を開けて鋼板を巻き立てる</li> </ul> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・重機の使用</li> <li>・柱外側に十分な作業スペース確保が必要</li> </ul>	<p>炭素繊維シートによる補強</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・RC 橋脚への実績は多数</li> <li>・柱断面外側のみからの施工・施工性に優れている</li> <li>・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）</li> <li>・脆性的な破断を伴う</li> </ul>

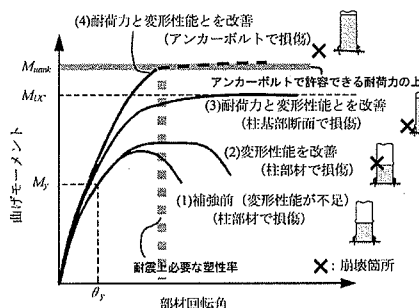


図-1 補強効果と曲げモーメント-部材回転角関係

験、純圧縮力載荷実験、および漸増繰返し水平変位載荷実験を実施している。また、断面の小さい円形鋼製橋脚にはダイアフラムが設置されていない場合があり、中埋めコンクリートの抜け出しを防止することも重要である。そこで、断面が小さくダイアフラムを追加・設置できない場合に設置するアンカー方式のジベルの設置効果についても検討している。なお、実験供試体の製作に使用する鋼板の縮小率に応じて目付量 (g/m<sup>2</sup>, 1m<sup>2</sup>あたりの炭素含有量であり、本論文では貼付する炭素繊維シートの層厚に着目する) を縮小した炭素繊維シートを用いることにより、縮小模型を用いた実験結果の実構造物への適用性についても検討している。そして、今後の円形断面鋼部材へ炭素繊維シートを貼付する際の基本的な耐荷力特性および変形性能などの基礎的データを入手する。

## 2. 円形断面の周方向に炭素繊維シートを貼付する補強方法の概要

### (1) 従来の補強工法

表-1 には、既設の円形断面橋脚柱の主な耐震補強工法とそれらの特徴とを示す。これまで、変形性能の不足している鋼製橋脚 (図-1, 曲線(1)参照) の耐震補強に際して、コンクリート充填工法、縦補剛材追加・補強工法、および隙間空け鋼板巻立て工法等が実施されてきた<sup>3)-5)</sup>。

表-2 炭素繊維シートにより耐震補強された円形断面鋼製橋脚の崩壊モード

補強前後	補強前	補強後 (文献9)の補強方法	補強後 (本補強方法)
補強範囲および崩壊箇所 (モード)	(H <sub>100</sub> , μ <sub>100</sub> ) 崩壊	(H <sub>100</sub> , μ <sub>100</sub> ) 崩壊	(H <sub>100</sub> , μ <sub>100</sub> ) 崩壊・破断
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 炭素繊維シート (部材周方向)</li> <li>● 炭素繊維シート (部材長方向)</li> <li>■ 充填コンクリート</li> </ul>			
	・中埋めコンクリート直上の鋼断面の座屈損傷 (図-1, 曲線(1))	・補強断面損傷無し ・柱基部・下端断面の座屈損傷 (図-1, 曲線(3))	・補強断面損傷無し ・アンカーボルトの損傷 (伸び・破断) (図-1, 曲線(4))
		H <sub>100</sub> > H <sub>100</sub>	H <sub>100</sub> ≧ H <sub>100</sub>
			・補強断面に損傷 ・柱基部・下端断面損傷無し (図-1, 曲線(2))

その中でも、施工性・経済性を考慮して、コンクリート充填工法の採用が優先的に検討される。コンクリート充填工法は、部材の耐荷力と変形性能とをともに改善できる方法である。しかしながら、橋脚基部に損傷が集中する場合 (図-1, 曲線(3)参照) やコンクリート充填後の柱部材の耐荷力がアンカー部の耐荷力を上回るとアンカー部が損傷する場合 (図-1, 曲線(4)参照) が想定される。路面下にある柱基部が損傷すると、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<sup>2)</sup>。したがって、柱部材の耐荷力が橋脚の最下端断面あるいはアンカー部の終局強度を上回り、損傷が柱基部に発生することが想定される場合には、コンクリート充填工法の適用が好ましくない場合が多い。この場合には、縦補剛材補強・追加工法等のように補強に伴う柱部材の耐荷力の上昇をある程度抑制することができ、かつ、所要の変形性能まで改善できる耐震補強方法<sup>1)</sup> (図-1, 曲線(2)参照) が採択される。また、縦補剛材補強・追加工法に代わるより容易な耐震補強方法として、矩形断面鋼製橋脚を対象とした中空コンクリート充填補強工法<sup>12)</sup>も提案されている。

### (2) 炭素繊維シートによる補強工法の現状

表-2 には、炭素繊維シートにより耐震補強された円形断面鋼製橋脚の崩壊モードの例を示す。文献9)による

と、円形断面鋼製橋脚の板厚変化部に主として部材軸方向に炭素繊維シートを貼付し、補強部分での鋼板の座屈強度を改善することにより、弱点箇所を曲げに対する変形性能の大きい柱部材下端に移行できる耐震補強方法が提案されている。しかしながら、表-2 に示すように、文献9)の補強方法を採用する場合にも、柱の曲げ剛性と耐荷力は補強前と比較して上昇し、最終的な損傷箇所は柱下端近傍となる(図-1、曲線(3)および(4)参照)。補強後の柱部材が損傷を受けた後の補修性を考慮すると、柱部材で所要の変形性能を確保できるが、柱基部で損傷させないような炭素繊維シートの貼り付け方法を採用することが有効であると考えられる。

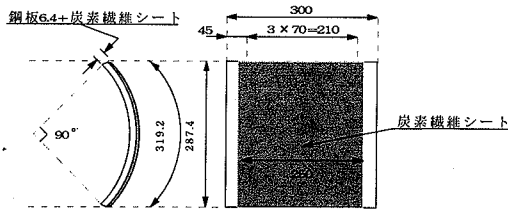
### (3) 炭素繊維シートを円形断面部材の周方向に貼付する補強工法

この補強工法は、高強度の炭素繊維シートを断面周方向に貼付し、断面外側へ広がる象の足型の座屈変形の発生を抑制し、変形性能の改善を図る工法である。また、耐震上の補修性を考慮して補強に伴う耐荷能力の上昇を防ぎ、柱下端での損傷を防止することも目的としている。断面周方向に炭素繊維シートを貼付する場合には、単純ラップ接合により継ぎ手を形成できるため、剥離・接着性に有利な構造を形成できる。また、鋼管に象の足型座

屈変形が発生した後は、鋼管周方向に貼付する炭素繊維シートの引張力が急増するため、引張特性に優れた炭素繊維シートの合理的な活用につながる。したがって、炭素繊維シートを断面周方向に貼付するメリットとして、i)柱基部付近での損傷を防ぎ、ii)象の足型座屈変形の発生を抑制し必要な変形性能まで改善し、そしてiii)補強に伴う耐荷力の上昇を許容できる耐荷力以内におさえる等が考えられる。

### 3. 実験概要および実験供試体

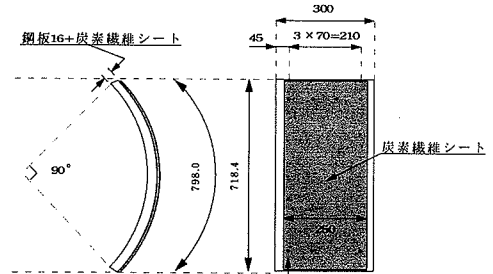
実験供試体は、公称板厚 $t=16$  mm、外径 $\phi=1,016$  mmのSTK400鋼管とそれを1/2.5に縮小した $t=6.4$  mm、 $\phi=406.4$  mmのSTK400鋼管(径厚比は63.5)とを用いて製作した。いずれも、冷間曲げ加工により形成され、象の足型の座屈変形が卓越する円形断面鋼管<sup>13)</sup>である。炭素繊維シートは、軸方向へは1層だけ貼付することとし、引張力の作用する周方向の炭素繊維シートの層数・貼付方法とに着目して、一連の実験を実施している。実構造物への施工を考慮すると目付量 $300$  g/m<sup>2</sup>の炭素繊維シートが使用されることが多いが、巻き立てる炭素繊維シートによるフープ効果の評価が重要である。実験では使用鋼板の板



(a)断面図 (b)正面図

図-2 CFRPの貼付範囲

( $t=6.4$ の実験供試体、寸法単位: mm)



(a)断面図 (b)正面図

図-3 CFRPの貼付範囲

( $t=16$ の実験供試体、寸法単位: mm)

表-3 実験供試体の内訳(曲げ載荷実験)

実験供試体の内訳 (周方向の貼付層数)	スペーサーの厚さ(mm)	
	(鋼板 $t=16$ )	(鋼板 $t=6.4$ )
0層、鋼供試体	-	-
3層*	-	-
6層*	-	-
8層*	-	-
3層*+ゴムシート(薄)	5	2
3層*+ゴムシート(厚)	10	4
8層*+ウレタンシート	-	12
炭素繊維シートの目付量	300(g/m <sup>2</sup> )	120(g/m <sup>2</sup> )

※軸方向には、必ず炭素繊維シートを1層貼付

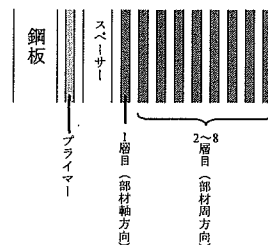


図-4 鋼部材への炭素繊維シートの貼付方法

厚の違いに応じて、それぞれ、同径の炭素繊維を、目付量が120 g/m<sup>2</sup>あるいは300 g/m<sup>2</sup>になるように一方向に束ねた炭素繊維シートを使用し、炭素繊維シートの層厚を調整することによって、実験結果を実構造物へ適用する際に、容易に相類似について評価できるように配慮した。また、補強後の耐荷力あるいは曲げ剛性の上昇をあまり許容できない場合には、鋼管の変形を拘束しすぎると座屈せず、ひずみ硬化域に入って著しい強度上昇を伴う。したがって、ある程度鋼管を変形させた状態で、巻き立てた炭素繊維シートにより拘束できることを期待して、鋼板と炭素繊維シートとの間に、剛性の低い材料をスペーサー（本研究では、ゴムシートあるいは発泡ウレタンシートを使用）として挿入する効果についても検討を加えている。

なお、RC構造物に炭素繊維シートを貼り付ける場合には、接着性を高めるためにコンクリート表面を平滑にする下地処理（プライマー塗布やパテ処理）を行い、さ

らにエポキシ系のプライマーを塗布する。そして、その上から、炭素繊維シートにエポキシ系のレジンを含浸させて貼付する方法がとられている<sup>14)15)</sup>。本研究でも、RC構造物への貼付工程を参考にして、鋼板と炭素繊維シートとの接着力に著しい影響を及ぼす鋼板表面の黒皮をグラインダー処理により除去した後、鋼板表面にプライマーを塗布し、エポキシ樹脂を塗布し、その上からエポキシ樹脂を含浸させた高強度の炭素繊維シート（以下、CFRPという）を貼付した。図-4に示すように、鋼板にプライマーを塗布し、第一層目には部材軸方向へ、その上に部材周方向へ炭素繊維シートを貼付した。スペーサーはプライマーと第一層目の炭素繊維シートとの間に挿入した。炭素繊維シートの継手のオーバーラップ長は繊維方向に20 cmとし、繊維直角方向は突き合わせとした。なお、エポキシ樹脂を含浸させたCFRPの繊維体積含有率は15%であった。

表-4 実験供試体の内訳（純圧縮力載荷実験）

実験供試体 No.	CFRP 層数		備考
	軸方向	周方向	
3-01	0	0	鋼供試体
3-02	1	3	-
3-03	1	3	ゴムシート(4 mm)を挿入
3-04	1	8	-
3-05	1	8	発泡ウレタンシート(12 mm)を挿入

表-5 実験供試体の内訳（漸増繰返し水平変位載荷実験）

供試体名	CFRP 層数			充填コンクリートの密閉方法
	軸方向	周方向	下端 10cm	
4-01*	-	-	-	鋼製ダイヤフラム
4-02*	1	8	8	
4-03*	1	3	8	
4-04*	1	5	8	ジベル

\*すべての実験供試体下端には、L/5（=300 mm；L=1,500 mm）の高さまでコンクリートを充填

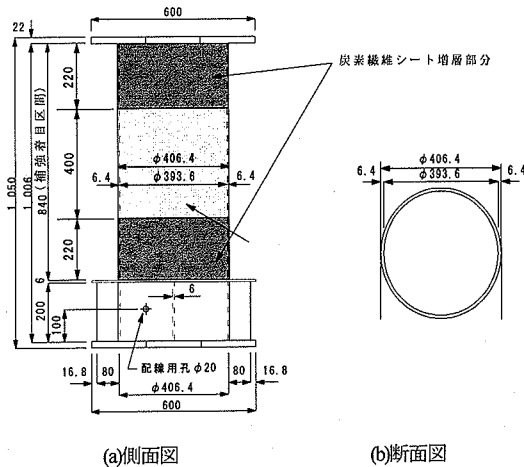


図-5 実験供試体（純圧縮力載荷実験，寸法単位：mm）

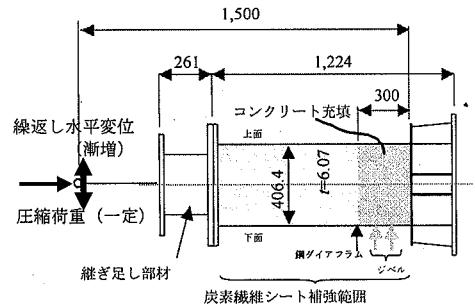


図-6 実験供試体の概略（漸増繰返し水平変位載荷実験，寸法単位：mm）

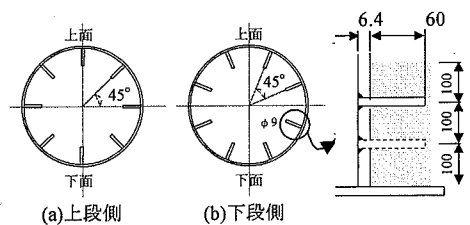


図-7 ジベルの形状（寸法単位：mm）

## (1) 実験の種類および目的

### a) 曲げ載荷実験

公称板厚16 mmの鋼板に目付量300 g/m<sup>2</sup>の炭素繊維シートを貼付する場合、および公称板厚6.4 mmの鋼板に目付量120 g/m<sup>2</sup>の炭素繊維シートを貼付する場合とで、鋼材と炭素繊維シートとからなる複合板に曲げが作用する場合のひずみ分布形状やズレや破断などの発生などの基礎的な資料を得ること、相似則を検討することを目的として、曲げ載荷実験を実施した。また、鋼板と炭素繊維シートとの間にスペーサーを挿入する効果についても着目している。各実験供試体は、図-2および図-3に示すように、公称板厚が $t=16$  mmおよび6.4 mmで径厚比が63.5のSTK400鋼管から、それぞれ1/4円弧を切り出して、各15体で計30体（計測値のばらつきを考慮して同一条件の実験供試体を2~3体製作し、それらの平均値により評価）を製作した。表-3には、曲げ載荷実験に用いた実験供試体の内訳をまとめている。なお、炭素繊維シートは、幅300 mmの各実験供試体の幅250 mmの部分に貼付した。

### b) 純圧縮力載荷実験

補強に伴う耐荷力の著しい上昇を抑制し、かつ十分な変形性能を確保できるような炭素繊維シートの貼付方法を検討するため、純圧縮力載荷実験を実施した。STK鋼管（ $\phi=406.4$  mm,  $t=6.4$  mm）を使用し、図-5および表-4に示す5体の実験供試体を製作した。また、導入する圧縮応力が乱れる実験供試体上下端部が先行する崩壊を防ぐため、実験供試体の端部200 mmの部分には炭素繊維シートを2層ずつ増厚し貼付した。なお、炭素繊維シートは目付量120 g/m<sup>2</sup>を使用し、第1層目の炭素繊維シートは部材軸方向に貼付した。

### c) 漸増繰返し水平変位載荷実験

繰返し水平荷重が作用する荷重状態を対象に、円形断面周方向に炭素繊維シートを貼付した鋼製柱の補強効果を検討するため、一定の軸方向力 $N$ （ $=0.211 N_p$ ）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変位載荷実験を実施した。

実験供試体は、 $\phi=406$  mm,  $t=6.4$  mmのSTK400鋼管（径厚比63.5, 径厚比パラメータ0.099）を用いて、図-6および表-5に示す4体を製作した。なお、すべての実験供試体の下端には、既設の中埋めコンクリートを想定して、コンクリートを橋脚高さの1/5まで充填した。3体の実験供試体4-01~4-03には、鋼製のダイヤフラムを設置し充填コンクリートを密閉している。実験供試体4-04は、1断面8本のジベルを下端から高さ10 cmおよび20 cmの位置に設置している（図-6および図-7参照）。これは、コンクリートが充填されているがダイヤフラム等設置されていない場合に、ダイヤフラムを設置せず、既設の中埋めコンクリートの抜け出しを簡単に防止できる工法を開発することを目的として、断面外側から施工可能なアン

カー式のジベルを設置する工法の有効性について検討を加えるための供試体である。また、図-7に示すように、孔明け加工による鋼管の断面欠損が生じないように、ジベルは鋼管外側で溶接している。なお、炭素繊維シートには目付量120 g/m<sup>2</sup>を使用し、第1層目の炭素繊維シートは部材軸方向に貼付した。

## (2) 使用鋼材、炭素繊維シート、スペーサーおよびコンクリートの機械的性質

表-6、表-7、図-8、および図-9には、実験供試体の製作に使用した鋼材、貼付した炭素繊維シート、およびエポキシ樹脂の機械的性質を示す。鋼管から切り出した鋼板には、冷間曲げ加工の影響で明確な降伏点が現れなかったため、応力とひずみとの関係図において、ひずみ軸上で、ひずみ値を0.2 %とするオフセット法により降伏点を算出した。ここで、表-6に示すとおり、使用した鋼材は、板厚の違いに関係なく、ほぼ同じ値の引張強度およびポアソン比が計測されたが、板厚が小さいと高い降伏点を、および小さな破断伸びを示していることがわかる。

目付量の異なる高強度炭素繊維シートにエポキシ樹脂を含浸し硬化させた複合板の繊維方向に載荷する引張試験の結果、いずれも使用鋼板の降伏点の10倍程度の応力まで線形挙動を示し、目付量の違いによって弾性係数および破断ひずみとともに若干の差異がみられた。これはエポキシ樹脂の含浸・貼付作業等に起因すると考えられる。

さらに、漸増繰返し水平変位載荷実験に使用した実験供試体の下端には、既設の中埋めコンクリートを想定してコンクリートを充填した。コンクリートは、目標とする圧縮強度20 N/mm<sup>2</sup>およびスランプ15 cmの早強コンクリートを使用した。表-8および表-9には、充填したコンクリートの機械的性質を示す。

ここで、使用した2種類の鋼管は、ともにSTK400の規格を満たすものであったが、曲率半径の大・小により残留応力分布の形状が異なることが予想されたため、2種類の鋼管の残留応力を計測した。図-10および図-11には、板厚の異なる2種類の鋼管（STK400）の残留応力分布の計測結果を示す。各図(a)には溶接線の位置から左右周方向の残留応力を、各図(b)には、溶接線位置からの角度を横軸にとり、溶接線位置から等しい角度の左右方向の残留応力を同じ座標位置にプロットしている。これらの図の縦軸は計測された残留応力 $\sigma_r$ をそれぞれの鋼板の降伏点 $\sigma_{ys}$ で除して無次元化した残留応力を示し、横軸は溶接線位置からの角度を示す。

図-10によると、 $\phi=1,016$  mm,  $t=16$  mmの鋼管は、引張・圧縮の残留応力ともに最大で $\sigma_r/\sigma_{ys}$ 約0.3をとり、約100°付近で再び極大値をとる。また、図-11によると、 $\phi=406.4$  mm,  $t=6.4$  mmの鋼管は、溶接線位置で最

大値  $\sigma_r/\sigma_{YS}=1.0$  をとり、溶接線位置から離れるにつれて残留応力は小さい値となるが、曲げ加工による影響が顕著に現れている。

表-10 には、スペーサーとして挿入したゴムシートおよびウレタンシートの物性値を示す。

表-6 使用鋼板およびCFRPの機械的性質

材料内訳	降伏点 $\sigma_{YS}$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	破断時伸び (%)	実験方法
鋼板 (t=6.4 mm)	349.1	2.10	453.7	0.283	34.6	曲げ載荷実験/純圧縮力載荷実験
鋼板 (t=6.4 mm)	376.1	2.10	450.6	0.284	36.3	漸増繰返し水平変位実験
鋼板 (t=16 mm)	296.6	2.13	468.7	0.283	45.8	曲げ載荷実験
炭素繊維シート (目付量 120 g/m <sup>2</sup> , 層厚 0.067 mm)	-	2.47	4,790	-	約 1%	-
炭素繊維シート (目付量 300 g/m <sup>2</sup> , 層厚 0.167 mm)	-	2.38	4,180	-	約 1%	-

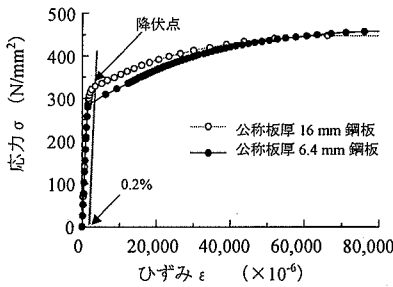


図-8 鋼板の引張試験結果

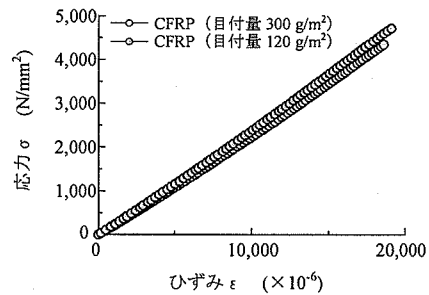


図-9 CFRPの引張試験結果

表-7 エポキシ樹脂の機械的性質

曲げ強度(N/mm <sup>2</sup> )	65.3
引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	38.7
引張せん断接着強度(N/mm <sup>2</sup> )	21.7

表-9 コンクリートの材料試験結果

材令日	圧縮強度 $\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $\sigma_{ct}$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_c$ ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\mu_c$
7	18.4	2.75	2.03	0.207
28	23.3	3.10	2.31	0.190
37	25.3	3.40	2.34	0.198

表-8 使用したコンクリートの種類

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	空気量(%)	目標強度(N/mm <sup>2</sup> )
早強	15	9.1	3.6	20

表-10 ゴムシートおよびウレタンシートの物性値

(a)ゴムシート

引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	80.6
破断時伸び(N/mm)	21
硬さ	65

(b)ウレタンシート

引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	1.0
硬さ	15

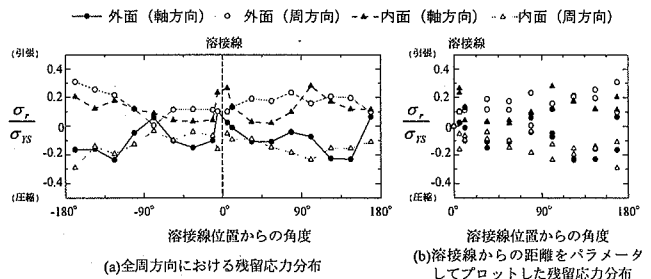


図-10 残留応力分布 ( $\phi=1,016$  mm,  $t=16$  mm)

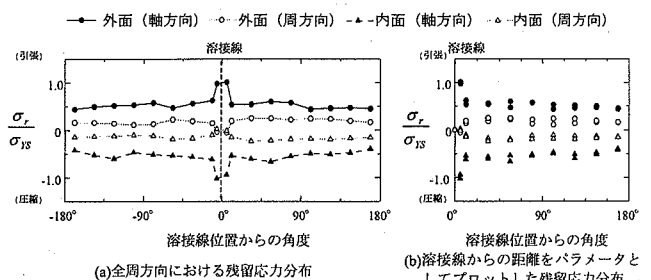


図-11 残留応力分布 ( $\phi=406.4$  mm,  $t=6.4$  mm)

#### 4. 曲げ载荷実験

##### (1) 载荷方法

曲げ载荷実験には、1,000 kNのアムスラーを使用して、図-12に示すように、実験供試体の上下に载荷治具を固定し、軸方向荷重を漸増させることにより曲げモーメントを载荷した。载荷点はピン支持とし、円弧の中心軸位置を着目点とし、ひずみの計測は、着目点に、鋼板の表・裏および炭素繊維シートの層間・表面に1軸ゲージを密に貼付した。また、以下の実験では、曲げモーメントの値には、供試体の変形に伴うたわみを考慮した付加曲げモーメントを用いて評価し、ひずみゲージの配線が

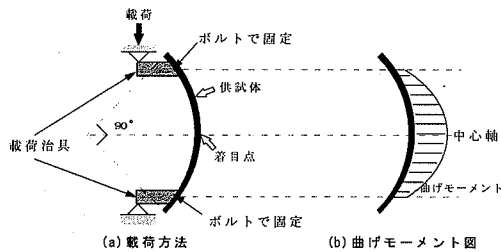


図-12 曲げモーメントの载荷方法

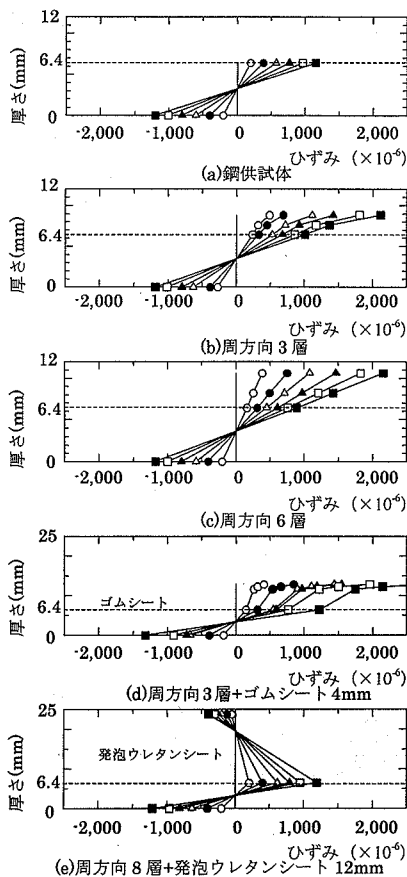


図-13 板厚方向のひずみ分布

接着性に影響を及ぼさないよう、ポリイミド線長が 30 cmのひずみゲージを使用した。

##### (2) 曲げ载荷実験の結果

###### a) 板厚方向のひずみ分布

図-13には、公称板厚  $t=6.4$  mmの実験供試体の中から代表的なものの着目点における断面板厚方向のひずみ分布を示す。厚さ 0 mmの位置が曲げ圧縮側であり、図中の点線は、引張側の鋼板表面を示す。

同図より、最外縁に位置する炭素繊維シートの層間・表面には、鋼断面内のひずみ勾配を考慮したひずみよりも若干大きいひずみが計測されたものも見られたが、ほぼ平面保持の仮定が成立していると考えられる結果が得られた。一方、ゴムシートあるいは発泡ウレタンシートをスペーサーとして挿入すると、炭素繊維シートに作用するひずみは、鋼板に直接炭素繊維シートを貼付する場合と比べて、相当に小さくなるのがわかる。これは、作用する荷重が小さい場合には炭素繊維シートには曲げひずみがほとんど伝達されないためであり、ウレタンシート (12 mm) を挿入した場合には、炭素繊維シート上では圧縮ひずみが計測されたが、これは試験体端部の固定が十分でなかったためである。

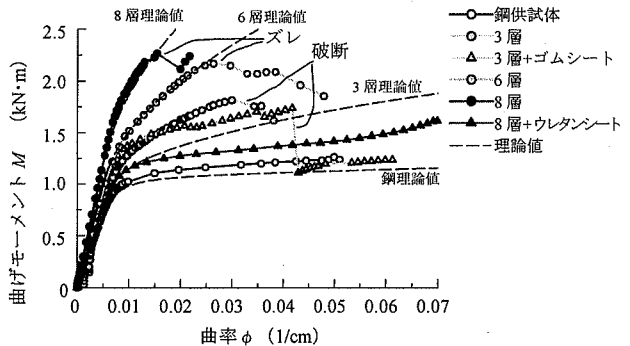


図-14 曲げモーメント-曲率曲線

表-11 曲げ剛性の比較 (曲げ载荷実験)

(a) 実験供試体 ( $t=16$ mm)		
実験供試体の内訳	$EI$ の平均値 ( $\times 10^{10} \text{ N}\cdot\text{mm}^2$ )	鋼供試体に対する倍率
鋼供試体	2.095 [2.238]	1.00
3層	2.433 [2.476]	1.16 [1.11]
6層	2.816 [2.803]	1.34 [1.25]
8層	3.118 [3.076]	1.49 [1.37]
(b) 実験供試体 ( $t=6.4$ mm)		
実験供試体の内訳	$EI$ の平均値 ( $\times 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$ )	鋼供試体に対する倍率
鋼供試体	1.090 [1.214]	1.00
3層	1.247 [1.364]	1.14 [1.13]
6層	1.556 [1.570]	1.43 [1.29]
8層	1.828 [1.742]	1.68 [1.44]

[ ]内数値は理論曲げ剛性を示す

b) 曲げ剛性に及ぼす影響

図-14には、実験、および鋼板と炭素繊維シートとが完全付着状態であると仮定して、断面分割法により得られた主な曲げモーメント-曲率関係を示す。ここで、図中の曲げモーメントの値の小さな低下は端部での鋼板と炭素繊維シートとのズレを、また、極端な低下は炭素繊維シートの破断を示す。表-11には、比較的曲率の小さい弾性域において、鋼板の周方向に炭素繊維シートを3, 6, および8層貼付した場合の曲げ剛性の平均値と理論曲げ剛性とを比較しまとめている。ここで、各実験供試体の弾性域における曲率は、引張側のひずみが900 $\mu$ 以下において平面保持が成り立つものとし、断面中央の鋼断面の表・裏に貼付したひずみゲージの計測値を用いて算出した。また、理論曲げ剛性は、炭素繊維シートと鋼板とが一体となり挙動すると仮定し、ヤング係数比を考慮して炭素繊維シートを鋼板(エポキシ樹脂は、強度を考慮せず層厚のみを考慮)へ換算して算出した。断面には、軸方向の圧縮力と曲げモーメントとが作用するが、曲げモーメントが卓越するため、軸力成分は考慮していない。さらに、表-11中の鋼断面の理論曲げ剛性は、公称板厚 $t=6.4\text{ mm}$ と $t=16\text{ mm}$ の鋼板とで2.3倍となっていない。これは、公称板厚 $t=6.4\text{ mm}$ と $t=16\text{ mm}$ の鋼板の実測板厚はそれぞれ6.07 mmおよび16.01 mmであり、ヤング係数が異なるためである。

表-11によると、鋼板の公称板厚の違いによらず曲げ剛性は、炭素繊維シートを周方向に3層貼付すると鋼供試体の約1.1倍、6層貼付すると1.3倍、および8層貼付すると約1.4倍に、それぞれ改善できることがわかる。また、図-12によると、剛性の低いスペーサーとしてゴムシートを挿入すると曲げ剛性が若干改善されるものの、発泡ウレタンシートの場合にはほとんど効果が認められない。

5. 純圧縮力載荷実験

(1) 載荷方法

鉛直載荷には、6,000 kN 圧縮試験機を用いた。実験供試体の上面には軸方向圧縮力が断面に均一に作用するように、厚さ83 mmの載荷鋼板を挿入し、実験供試体、載荷板、および載荷台の上下面を切削加工し水平度を確保した。実験供試体の上・下板の4隅に変位計を設置し、それらの平均値により軸方向縮みを算定した。実験供試体の中央部(8方向)に着目し、鋼管の内側と最外縁の炭素繊維シート上には2軸のひずみゲージを、炭素繊維シートに被われた鋼管の外面上には1軸のひずみゲージを貼付した。

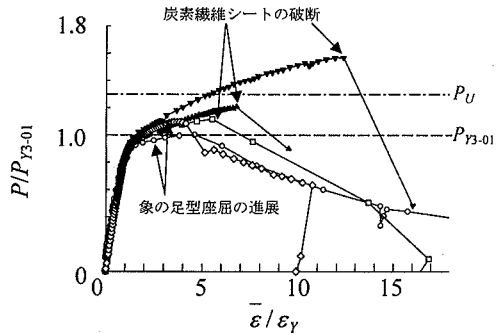
(2) 実験結果

a) 荷重-軸方向縮み関係

図-15には、実験から得られた軸方向圧縮荷重-軸方向縮み関係を示す。縦軸は荷重 $P$ を補強前の鋼管に相当する実験供試体3-01の全塑性軸方向圧縮力 $P_{Y3-01}$ ( $=\sigma_Y A$ ,  $A$ : 実験供試体3-01の断面積)で、横軸は軸方向の平均圧縮ひずみ $\bar{\epsilon}$ ( $=u/L_c$ ;  $u$ : 平均縮み量,  $L_c$ : 着目区間長)を鋼板の降伏ひずみ $\epsilon_Y$ で無次元化したものである。図中の点線および一点鎖線は、それぞれ $P_{Y3-01}$ および $P_u$ ( $=\sigma_u A$ ,  $\sigma_u$ : 引張試験で求めた引張強度)を示す。また、表-12には、各実験から得られた圧縮剛性、終局荷重、および終局縮みをまとめて示す。また、軸方向圧縮荷重の急激な減少は、実験供試体3-01と3-05とでは鋼管の象の足型座屈の発生・進展に、実験供試体3-02, 3-03, および3-04では象の足型座屈に伴う周方向の炭素繊維シートの破断によるものである。

図-15 および表-12によると、炭素繊維シートを軸方向1層貼付し、周方向の貼付層数を3層あるいは8層と変化させたとしても、圧縮剛性にはほとんど影響を及ぼさないことが確認できる。

炭素繊維シートを貼付しない実験供試体3-01は、 $P/P_{Y3-01}=0.8$ 以降、断面外側へ広がる座屈変形が卓越し、



- : 実験供試体 3-01
- ▲: 実験供試体 3-02
- : 実験供試体 3-03
- ▼: 実験供試体 3-04
- ◇: 実験供試体 3-05
- :  $P_u (= \sigma_u A)$
- - -:  $P_{Y3-01} (= \sigma_{YS} A)$
- $\sigma_{YS}$ : 鋼板の降伏点
- $\sigma_u$ : 鋼板の引張強度
- $A$ : 実験供試体 3-01の断面積

図-15 軸方向圧縮荷重-軸方向縮み関係

表-12 主な実験結果 (純圧縮力載荷実験)

供試体名	圧縮剛性 (kN/mm)	鋼との剛比	終局荷重 $P_u$ (kN)	$P_u/P_{Y3-01}$	終局縮み $u_u$ (mm)	$u_u/u_{u,3-01}$
3-01	1,790	-	2694.0	1.00	6.42	1.00
3-02	1,791	1.00	3238.0	1.20	9.45	1.47
3-03	1,860	1.04	2997.8	1.11	8.01	1.25
3-04	1,782	1.00	4212.0	1.56	17.23	2.68
3-05	1,770	0.99	2942.0	1.09	5.32	0.83



○:実験供試体 3-01    ▲:実験供試体 3-02    □:実験供試体 3-03    ▼:実験供試体 3-04    ◇:実験供試体 3-05

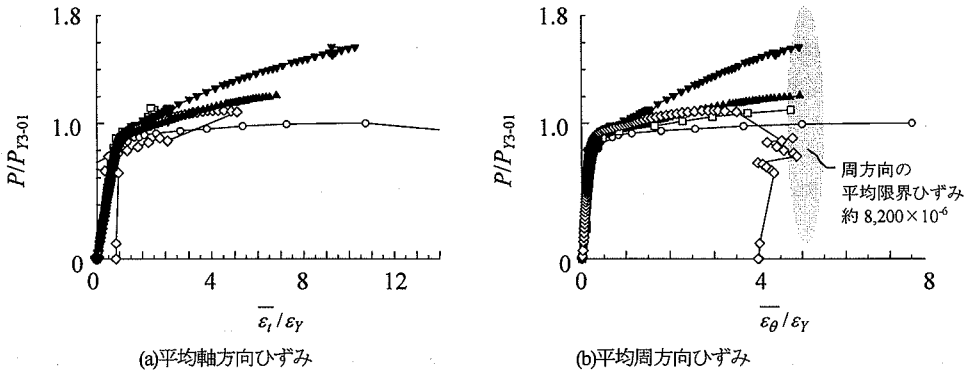


図-16 軸方向荷重-軸方向ひずみ曲線

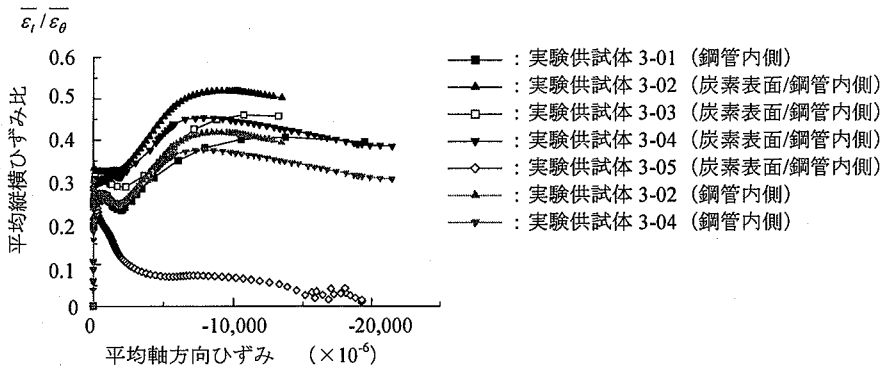


図-17 平均縦横ひずみ比-平均軸方向ひずみ曲線

終局縮みが  $\varepsilon/\varepsilon_y=4$  以降で急激に耐荷力を失う。炭素繊維シートを鋼管の軸方向1層・周方向3層貼付した実験供試体 3-02 では、実験供試体 3-01 に比べ、それぞれ 1.20 倍の終局荷重の上昇と 1.47 倍の終局縮みを計測した。また、炭素繊維シートを鋼管の軸方向1層・周方向8層貼付した実験供試体 3-04 では、それぞれ 1.56 倍および 2.68 倍となり、使用鋼板の引張強度を上回る終局荷重を計測した。

一方、終局荷重の著しい上昇の抑制を目的として、炭素繊維シートと鋼管との間にスペーサーとして 4 mm のゴムシート (=約 0.63 t) および 12 mm の発泡ウレタンシート (=約 1.9 t) をそれぞれ挿入した実験供試体 3-03 および 3-05 と、直接貼付した実験供試体 3-02 あるいは 3-04 とを比較すると、硬度の高いゴムシートを挿入した場合には、終局荷重の低下と変形性能の改善が確認できるものの、硬度が小さい発泡ウレタンシートの場合にはほとんど改善できず、挿入する効果が小さいことがわかった。

b) 荷重-平均ひずみの関係

図-16 には、軸方向圧縮荷重と平均軸方向ひずみ、あるいは平均周方向ひずみとの関係を示す。平均軸方向ひずみ、および平均周方向ひずみは、実験供試体 3-01 で

は鋼管内側と鋼管外側、それ以外の実験供試体では、鋼管内側と炭素繊維表面とで計測されたひずみの平均値であり、鋼板と炭素繊維シートとからなる複合板としての平均ひずみに相当する。同図によると、炭素繊維シートを鋼管に直接貼付した実験供試体 3-02 と 3-04 とでは、軸方向圧縮力と軸方向平均ひずみとの関係は、軸方向荷重と軸方向縮みとの関係(図-15 参照)に類似した傾向を示すことがわかる。一方、周方向に貼付した炭素繊維シートの破断は、炭素繊維シートの層数、およびスペーサーの有無の違いに関係なく、 $\varepsilon_\theta/\varepsilon_y \cong 5$  ( $\varepsilon_\theta =$  約  $8,200 \times 10^6 \mu$ ) を限界平均ひずみとして発生し、終局状態の決定に支配的であることがわかった。

c) 軸方向圧縮荷重と平均縦横ひずみ比との関係

図-17 には、平均縦横ひずみ比 (=炭素繊維シート表面の平均周方向ひずみ、あるいは鋼管内側の平均周方向ひずみ / 鋼管の平均軸方向ひずみ) と鋼管の平均軸方向ひずみとの関係を示す。

同図によると、炭素繊維シートを貼付した実験供試体では、平均軸方向ひずみ  $= 1,200 \mu$  ( $P/P_{13-01} = 0.7$ ) 以下で鋼管の平均縦横ひずみ比は 0.23~0.26 のほぼ一定値をとるが、平均軸方向ひずみ  $= 1,800 \mu$  ( $P/P_{13-01} = 0.9$ ) 付近で極小となり、その後急増し平均軸方向ひずみ  $= 6,000 \sim 8,000 \mu$

( $P/P_{30}=1.1\sim 1.2$ ) 付近で極大値をとる。すなわち、鋼管が降伏に至る  $P/P_{30}=0.9$  以降から、炭素繊維シートによる拘束力が有効に機能し始める。同様の傾向が、炭素繊維シート表面での平均縦横ひずみ比の値からも確認できる。実験供試体 3-02 および 3-04 において、炭素繊維シート表面の計測値から算出した平均縦横ひずみ比は、鋼管内面に貼付した 2 軸のひずみゲージによる計測値よりも大きな値をとるが、ほぼ相似な傾向を示し、鋼管の軸・周方向の作用ひずみが、実験終了時まで、確実に炭素繊維シートへ伝達されているのがわかる。一方、発泡ウレタンシートを鋼管と炭素繊維シートとの間に挿入した実験供試体 3-05 は、平均縦横ひずみ比が、軸方向圧縮荷重が漸増するにつれてゼロに近づき、発泡ウレタンシートを介して炭素繊維シートに、ほとんどひずみが伝達されなかったことが確認できる。

#### d) 終局荷重の上昇について

以上の通り、炭素繊維シートを周方向に貼付した鋼管の終局荷重の上昇（降伏以降の荷重上昇）は、炭素繊維シートによる拘束力に比例するものと考えられる。これには、鋼材が 2 軸圧縮応力状態になるため等方硬化の影響、鋼材と炭素繊維シートとに挟まれたエポキシ樹脂の強度上昇の影響等が含まれると考えられるが、今後、追加実験を実施し明らかにする必要がある。

## 6. 漸増繰返し水平変位載荷実験

### (1) 載荷方法

漸増繰返し水平変位載荷実験には、図-18 に示すように、最大荷重 1,000 kN、ストローク ±15 cm の定荷重油圧ジャッキを水平方向に、最大荷重 500 kN、ストローク ±15 cm のアクチュエーターを鉛直方向にそれぞれ独立に、または同時に載荷できる実験装置を用いた。実験供試体を水平に設置しているため、水平荷重により実験供試体に軸方向圧縮力を導入し、アクチュエーターによる鉛直変位を橋脚の漸増繰返し水平変位とした。なお、実験供試体は、基部が固定支持され（実際には、載荷フレームが弾性変形する。そのため、厳密には弾性支持となる）、頂部を円筒ベアリングによるピン結合としている。

載荷は、はじめに、一定の軸方向力  $N$  ( $=609.9$  kN、軸力比  $NN_p=0.211$ 、 $N_p$ : 鋼断面の全塑性軸方向力) を導入した。そして、柱部材に理論水平荷重  $H_Y$  (式(1)) が作用するときの供試体基部の弾性変形に起因する剛体水平変位を含む降伏水平変位  $\delta_Y$  を実験的に算定し、この  $\delta_Y$  を載荷変位の制御変位として、変位マイナス側から載荷を開始し、以降、制御変位の整数倍となるよう漸増させた。また、この載荷装置では、水平荷重  $H$  による変位  $\delta$  が増大していくと、軸方向荷重  $N$  の鉛直成分

$N \cdot \sin(\delta/L_0)$  ( $L_0$ : 1,000 kN 定圧ジャッキの固定間距離) が、水平荷重  $H$  に加算され、この影響が無視できなくなる。以下では、この影響を計算により補正している。

$$H_Y = \left( \sigma_Y - \frac{N}{A} \right) \frac{W}{L} \quad (1)$$

ここに、 $N$ : 導入した軸方向圧縮力、 $A$ : 鋼断面の断面積、 $W$ : 鋼断面の断面係数、および  $L$ : 供試体高さ ( $=1,500$  mm)

## (2) 実験結果

### a) 水平荷重—水平変位関係

図-19 には、実験供試体頂部における水平荷重—水平変位関係を示す。また、図-20 には、載荷を開始した変位マイナス方向における各ピークでの水平荷重および水平変位をプロットした包絡線を示し、表-13 には、得られた代表的な結果をまとめて示す。柱部材の変形性能は、終局水平変位  $\delta_u$  を降伏水平変位  $\delta_Y$  で無次元化した値（塑性率  $\mu_u = \delta_u / \delta_Y$ ）で評価した。また、終局水平荷重の上昇の程度は、ダイヤフラムを設置しコンクリートを  $L/5$  まで充填した実験供試体 4-01 に対する終局水平荷重からの上昇率（強度上昇率  $\beta = H_u / H_{u,401}$ ）で評価し、考察を加えている。ここで、水平荷重が最大となる時の水平荷重を終局水平荷重、そのときの水平変位を終局水平変位と本文で定義する。

図-19(a)、図-20、および表-13 によると、既設（補強前）の橋脚鋼管柱を想定し、鋼管基部にコンクリートを高さの  $1/5$  まで充填した鋼供試体である実験供試体 4-01 は、繰返し 3 回目まで安定した紡錘形の履歴を呈し、繰返し 4 回目にコンクリート充填直上の鋼断面が座屈し、以降、急激に耐荷能力を失う。

図-19(b)、図-20、および表-13 によると、炭素繊維シートを鋼管の軸方向 1 層・周方向 8 層貼付した実験供試体 4-02 は、繰返し 4 回目から S 字形の履歴ループを描き、繰返し +6 回目に引張側の炭素繊維シートで鋼管の周方向に沿って割れが発生し、繰返し 7 回目には実験供試体下端のコンクリート充填部分の炭素繊維シートが破断し耐荷能力を失う。補強後の強度は 16% 程度上昇するものの、塑性率  $\mu_u$  を 6~7 程度にまで改善できる。

一方、図-19(c)、図-20、および表-13 によると、炭素繊維シートを鋼管の軸方向 1 層・周方向 3 層貼付した実験供試体 4-03 は、繰返し 5 回目に引張側の炭素繊維シートで周方向に割れが発生し、繰返し +5 回目にはコンクリート充填区間直上の鋼断面で炭素繊維シートが破断したため急激に耐荷能力を失っていく。しかしながら、補強に伴う強度の上昇は実験供試体 4-02 と同様な 16% 程度であり、塑性率  $\mu_u=4$  を確保することができた。

図-19(d)、図-20、および表-13 によると、中埋めコンクリートの抜け出し防止を目的としたジベルを設置し、

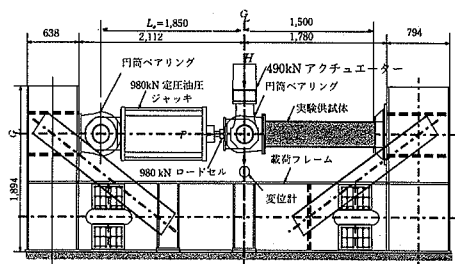


図-18 荷重装置の概略 (寸法単位: mm)

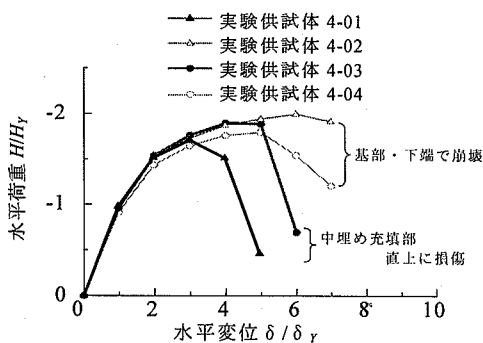


図-20 各実験供試体から得られた最大水平荷重とその時の水平変位との包絡線

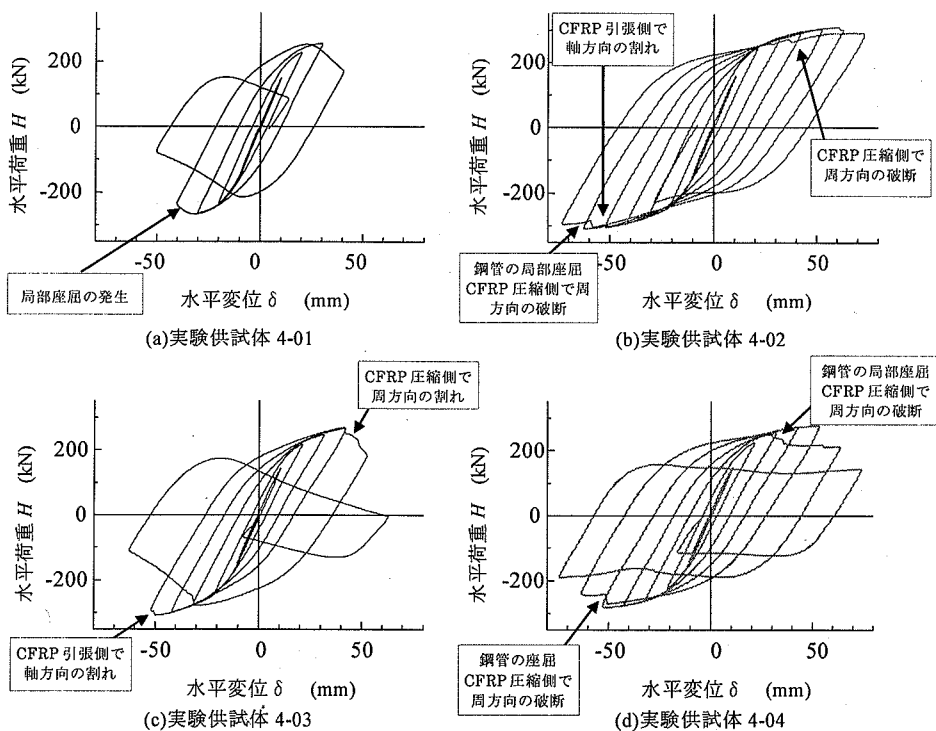


図-19 水平荷重-水平変位関係 (各実験供試体別)

表-13 各実験供試体の強度上昇率および塑性率 (漸増繰返し水平変位荷重実験)

供試体名	炭素繊維シート の貼付層数		終局変位および終局荷重				強度上昇 率 $\beta$ ( $=H_u$ $/H_{u4-01}$ )	塑性率 $\mu_u$ ( $=\delta_u$ $/\delta_y$ )	崩壊 箇所
	軸方向	周方向	変位プラス側		変位マイナス側				
			水平 変位 (mm)	終局 荷重 (kN)	水平 変位 (mm)	終局 荷重 (kN)			
4-01*	-	-	28.51	252.3	-30.62	-260.7	1.00	3.1	中埋め直上
4-02*	1	8	59.37	303.7	-60.76	-302.9	1.16	6.4	基部
4-03*	1	3	39.03	264.6	-48.63	-301.5	1.16	4.2	中埋め直上
4-04*	1	5	51.36	270.6	-50.86	-277.3	1.06	5.4	基部

さらに炭素繊維シートを鋼管の軸方向1層・周方向5層貼付した実験供試体 4-04 は、強度の上昇を 10%以下に

とどめ、塑性率を 5~6 にまで改善できることが確認できた。

繰返し6回目には、実験供試体下端の中埋めコンクリート充填部分で、圧縮側の鋼管が局部座屈し、炭素繊維シートが破断したため耐荷能力を失う。繰返し回数が少ない段階から他の実験供試体と比較して若干小さい曲げ剛性を示すことから、ジベルによる充填コンクリートの拘束効果は、鋼製ダイヤフラムと比べると十分でなく、その後の耐荷力の低下量も実験供試体 402 より大きくなったと考えられる。曲げ剛性の若干の低下には、ジベル設置のための孔明け加工に伴う断面欠損による影響も含まれるが、孔のサイズはφ9 mm と小さく、図-7 に示すような溶接としているため、この影響は小さいと考えられる。

b) 崩壊状況および高さ方向の曲げモーメントの分布

炭素繊維シートにより補強を施したいずれの実験供試体も、最終的には、鋼管の象の足型の座屈変形に伴い、その箇所で炭素繊維シートが破断して崩壊した。実験供試体 401 および 403 は中埋めコンクリートの充填部直上の鋼断面が、一方、実験供試体 402 および 404 は実験供試体下端のコンクリートの充填部分が損傷箇所となり崩壊に至る。実験終了後、実験供試体 404 のコンクリート充填部分の鋼板をガス切断により取り除き、内部のコンクリートの損傷状況を観察した。その結果、コンクリートにはジベルを起点としたひび割れの発生が認められた。

図-21 には、各実験結果における最大の作用曲げモーメント（軸方向力による付加曲げモーメントを考慮）と、

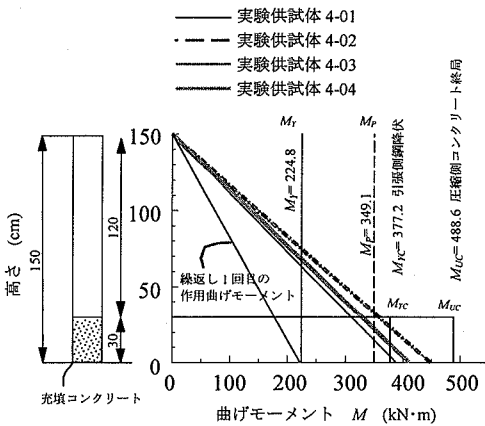


図-21 高さ方向の曲げモーメントの分布

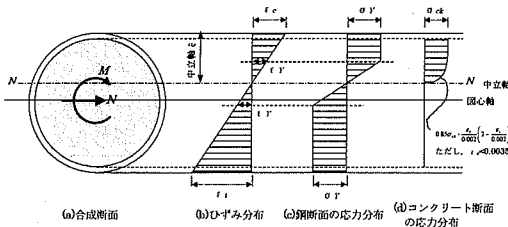


図-22 仮定した合成断面の応力-ひずみ分布

実験供試体の各断面の抵抗曲げモーメントとの分布を示す。

ここで、各種限界曲げモーメントの算出方法は、以下のとおりである。すなわち、軸方向圧縮力  $N$  と曲げモーメント  $M$  とが作用する断面の弾塑性応力分布を図-22 に示すように仮定した。そして、中立軸および各種限界曲げモーメントは、表-14 に示すように定義し、式(2) および式(3)を満足するように算定し決定する。なお、鋼材のひずみ硬化は考慮していない。

$$N = \int \sigma dA \quad (2)$$

$$M = \int \sigma \cdot y dA \quad (3)$$

図-21 によると、鋼管のみの実験供試体 401 において、繰返し1回目の作用曲げモーメントは、理論値から算定される降伏曲げモーメントの値とほぼ等しいことが確認できる。

実験供試体 401 の最大作用曲げモーメントは、実験供試体下端の合成断面の降伏曲げモーメント  $M_{fc}$  を上回り、中埋めコンクリート充填部の直上の鋼断面には、 $0.9 M_p$  ( $M_p$ : 鋼断面の全塑性曲げモーメント) が作用している。一方、炭素繊維シートを周方向に8層および3層貼付した実験供試体 402 および 403 とでは、象の足型の座屈変形の発生が抑制され、最大荷重時において、中埋めコンクリート充填部の直上の鋼断面の座屈強度を、鋼断面の全塑性曲げモーメント  $M_p$  まで改善できる。そして、実験供試体 402 は下端の合成断面で、実験供試体 403 は中埋めコンクリート充填部の直上の鋼断面で、それぞれ炭素繊維シートが破断した。

以上から、今回の実験供試体と同様な条件の橋脚については、補強断面の座屈強度を  $M_p$  まで改善でき、周方向に5層以上の炭素繊維シートを貼付すると損傷箇所は柱基部へ移行し、3層貼付する場合には、補強前と同様に中埋めコンクリート直上位置で損傷が発生すると考えられる。

表-14 合成断面の各種限界曲げモーメントの設定

各限界曲げモーメント	判定基準
鋼断面降伏 $M_{fs}$	圧縮側鋼材が降伏
鋼断面全塑性 $M_p$	全鋼断面が降伏
合成断面降伏 $M_{fc}$	min {引張側鋼材が降伏; 圧縮側コンクリートが降伏}
合成断面終局 $M_{cc}$	min {引張側鋼材が終局; 圧縮側コンクリートが終局}

ここで、鋼材の降伏ひずみは  $\epsilon_{fs} = \sigma_{fs}/E$ 、鋼材の終局ひずみは  $\epsilon_{cc} = 0.05$ 、コンクリートの降伏ひずみは  $\epsilon_{fc} = 0.002$ 、およびコンクリートの終局ひずみは  $\epsilon_{cc} = 0.0035$  とする。

c) アンカー式のジベルの設置効果

図-23には、同様な崩壊モードを示した実験供試体 4-02 および 4-04 の高さ方向のたわみ分布および軸方向・周方向ひずみ分布を示す。これらの図は、1 回目の繰返しの際、はじめに圧縮力を受ける計測面 (図-6 中の下面に沿った計測面) において、実験供試体下端から高さ 45cm までに設置した変位計あるいはひずみゲージの計測値をプロットしたものである。

図-23によると、下端からの高さ 30 cm に鋼製のダイアフラムを設置した実験供試体 4-02 では、高さ 26 cm 付近で周方向ひずみは、水平変位が漸増してもほとんどの変化していない。アンカー式のジベルを高さ 10 cm および 20 cm に設置した実験供試体 4-04 は、設置したジベルの中間に位置する高さ 16 cm 付近で周方向ひずみは最小値をとり、2 段目のジベル付近では、実験供試体 4-02 よりも相対的に小さいひずみを計測した。なお、いずれの実験供試体も象の足型の座屈変形は、ほぼ同じ位置 (高さ 7 cm 付近) に発生し、その箇所計測ひずみには局部座屈の影響が含まれている。繰返し回数 3 以降で、この周方向ひずみは水平変位が漸増してもあまり変化しない。また、実験終了後に、ダイアフラム近傍の鋼板をガス切断により除去し、断面内側を観察したところ、充填したコンクリートの抜け出しは認められず、ジベルの設置箇所鋼板の割れは確認されなかった。したがって、

繰返し 3 回目以降で、1 段目と 2 段目とのジベル間で、鋼製のダイアフラムを設置すると同様な効果が期待できる。実験では、実験供試体の寸法の関係で、コンクリートの充填長に比較してジベルピッチを比較的大きく設定したが、対象橋脚には、図-24 に示すように、充填コンクリートの上部に、2 断面のジベルを設置すれば、鋼製のダイアフラムを設置する場合ほど十分ではないが、鋼製のダイアフラムを設置すると同様な効果が期待できると考えられる。

d) 本補強方法の対象橋脚への適用

実験では、補強前に充填コンクリートの直上で損傷を受ける橋脚を対象として実験供試体の高さの 2/3 まで、鋼管の周方向に 3 層の炭素繊維シートを貼付し補強した。補強後も補強前と同じ位置に象の足型の座屈変形が発生するが、変形性能を改善することが出来る。

また、補強後に補強断面に作用する最大の曲げモーメントは鋼断面の全塑性曲げモーメント  $M_p$  であった。したがって、外径 1,016 mm の鋼管に目付量 300 g/m<sup>2</sup> の炭素繊維シートを柱部材に巻き立てるが、補修性を考慮して柱基部での損傷発生を防止し、柱部材で所要の変形性能を確保するためには、今回の実験実施と同様な施工方法を採用する場合、周方向に 3 層の炭素繊維シートを貼付するのが有効である。

炭素繊維シートの貼付範囲 (補強範囲)  $L_r$  は、図-25

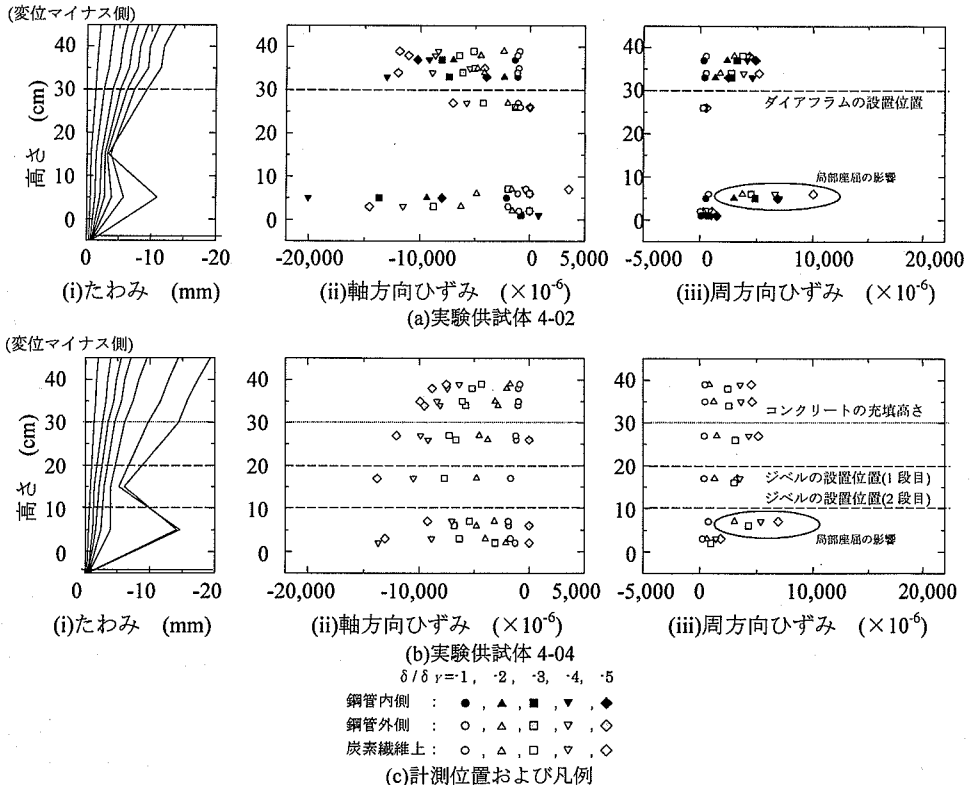
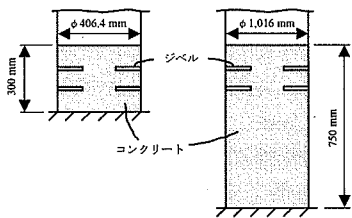


図-23 高さ方向のたわみ、および軸・周方向ひずみの分布 (変位マイナス側)



(a)実験供試体 (b)対象橋脚  
図-24 コンクリートの充填長

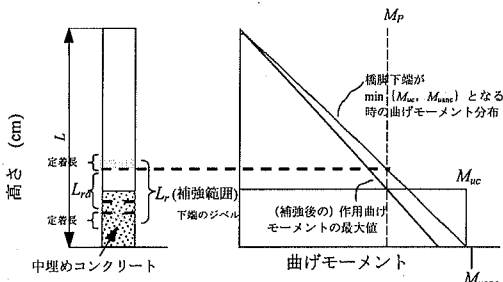


図-25 高さ方向の曲げモーメント分布および補強範囲

に示すように、対象とする橋脚の補強前の曲げモーメント分布に基づいて決定すると合理的である。すなわち、補強範囲  $L_r$  は、橋脚下端の曲げモーメントがアンカーボルトの終局曲げモーメント  $M_{max}$  とコンクリート充填部の終局曲げモーメント  $M_{bc}$  のいずれか小さい方となる曲げモーメント分布図から決まる  $M_p$  を示す高さから、設置する下段のジベル位置までの区間を  $L_m$  とし、その上・下端に、炭素繊維シートを確実に定着に必要な長さを考慮して決定できる。また、コンクリートの充填長には、最下端のジベル以下をとるのが適切と考えられる。

## 7. まとめ

本研究では、炭素繊維シートを円形鋼製橋脚周方向に貼付し、象の足型の座屈変形の発生を抑制する耐震補強方法を提案している。補強後の柱部材が損傷を受けた後の補修性を考慮すると、柱部材で所要の変形性能を確保できるが、柱基部で損傷させないような炭素繊維シートの貼り付け方法を採用することが有効であると考えられる。その妥当性および基本的な耐荷力特性を検討するために、曲げ載荷実験、純圧縮力載荷実験、および漸増繰返し水平変位載荷実験を実施した。得られた主な結果は以下のとおりであり、炭素繊維シートを円形断面周方向に貼付する耐震補強方法の有効性を検証できた。

i) 鋼板に炭素繊維シートを貼付した複合板の弾性域における曲げ剛性は、鋼と炭素繊維シートとが一体となり挙動するとして算定した理論曲げ剛性により算定す

ることができる。これは、目付量の小さい炭素繊維シートを使用する場合にも適用可能である。

ii) スペーサーとして硬度の高いゴムシートを挿入した場合には、終局荷重の低下と変形性能の改善が確認できるものの、硬度が小さい発泡ウレタンシートの場合にはほとんど改善できず、挿入する効果が小さいことがわかった。適切なスペーサーの材質(硬度)や層厚の決定には至らなかった。

iii) 炭素繊維シートを圧縮力を受ける鋼管の周方向に貼付すると、降伏後の鋼管周方向への変形を拘束できるため、終局荷重と変形性能とをともに改善できる。炭素繊維シートを周方向に貼付した鋼管の終局荷重の上昇(降伏以降の荷重上昇)は、炭素繊維シートによる拘束力に比例するものと考えられるが、今後、追加実験を実施する等して、終局強度の上昇の原因を明らかにする必要がある。

iv) 径厚比 63.5 の鋼管にコンクリートを高さ 1/5 まで充填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、繰返し荷重が作用する場合の有効性を検討した。その結果、主に円形断面の周方向に炭素繊維シートを 3~8 層貼付すると、曲げ剛性を変化させずに象の足型の座屈変形の発生を抑制でき、補強後の強度上昇を 6~16% ほどと認め、塑性率を 4~6 程度にまで改善できる。また、最大荷重時において、鋼断面の座屈強度を鋼断面の全塑性曲げモーメント  $M_p$  まで改善できる。

v) 炭素繊維シートの貼付層数の違いによって、中埋めコンクリートの充填区間直上の鋼断面に損傷(座屈・破断)箇所が形成されるものと、基部断面に損傷箇所が形成されるものと 2 つの崩壊パターンがみられた。いずれの実験供試体も、最終的には鋼管が外側への座屈変形し、周方向の炭素繊維シートが破断して崩壊に至った。

vi) 橋脚高さの 1/5 までコンクリートが充填された外径 1,016 mm、板厚 16 mm で橋脚高さ 3.75 m の円形断面鋼製橋脚を対象とし、その周方向に目付量 300 g/m<sup>2</sup> の炭素繊維シートを貼付する場合、周方向に 3 層の炭素繊維シートを貼付すると中埋めコンクリートの充填区間直上の鋼断面で、5 層以上貼付すると柱基部で損傷が発生する。

vii) 周方向の炭素繊維シートを併用してコンクリートの抜け出し防止を目的としたアンカー方式のジベルを設置すると、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を示した。

炭素繊維シートは、極めてぜい性的に破断するが、鋼板・炭素繊維シートとも安定した機械的性質を示すことから、円形断面鋼製柱に貼付する炭素繊維シートの貼付

層数を変化させ、設計・立地条件に応じて強地震時に必要となる塑性率に応じた貼付層数が決定できると考えられる。

鋼管の周方向に炭素繊維シートを貼付する補強工法は、建築構造物や水圧鋼管等へも適用可能である<sup>19)10)</sup>。しかし、炭素繊維シートを用いた円形鋼製橋脚の耐震補強をはじめ、その他の耐荷力に関する実験の実施件数も少なく、炭素繊維シートを適切にモデル化できる数値解析ツールが完備されていないのが現状である。今後、実験データの充実ならびに解析手法の開発が必要である。

#### 参考文献

- 1) 池内智行, 小野 潔, 西村宣男: 座屈被害を受けた鋼管橋脚の地震応答解析, 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.119-126, 2002年1月。
- 2) (社)日本道路協会: 既設道路橋の耐震補強に関する参考資料, 1997年8月。
- 3) 阪神高速道路公団: 既設鋼製橋脚の耐震補強設計要領(案)・同施工マニュアル(案), 1998年3月。
- 4) 首都高速道路公団: 既設鋼橋脚の耐震性向上設計要領(暫定案), 1998年8月。
- 5) 名古屋高速道路公社保全部: 既設鋼製橋脚の耐震補強要領(案), 1997年9月。
- 6) 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年10月。
- 7) 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年1月。
- 8) 渡辺貴之, 石田圭吾, 林 和彦, 山口隆裕, 池田尚治: (2003.1.10 受付)
- 9) (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年7月。
- 10) 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, 地震工学委員会, pp. 63-70, 2002年11月。
- 11) 北田俊行, 中井 博, 加賀山泰一, 松村政秀: 既設鋼製橋脚における補剛板の耐震補強に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, 土木学会, pp.215-226, 1999年3月。
- 12) 松村政秀, 北田俊行, 乙黒幸年, 中原嘉郎: 復旧可能な箇所にエネルギー吸収断面を有する既設鋼製橋脚の耐震補強法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.48A, 土木学会, pp.129-140, 2002年3月。
- 13) 後藤芳頭, 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年10月。
- 14) 土木学会コンクリート委員会・連続繊維シート補修補強研究小委員会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針: コンクリートライブラリー101, 土木学会, 2000年7月。
- 15) 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年3月。
- 16) 小野絃一, 杉浦邦征, 三木亮二, 小牧秀之, 若原直樹: 炭素繊維シート巻き立てによる損傷鋼管の補修効果に関する検討, 鋼構造年次論文報告集, 第10巻, pp.225-230, 2002年11月。
- 17) 西野孝仁, 古川哲也: 円形鋼管柱材の局部座屈形成に対する炭素繊維シートの補剛効果, 構造工学論文集, Vol.49B, 日本建築学会, pp.489-496, 2003年3月。

## EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC RETROFITTING OF CIRCULAR STEEL BRIDGE PIERS STIFFENED IN CIRCUMFERENCE DIRECTION BY CFRP SHEETS

Masahide MATSUMURA, Toshiyuki KITADA, Munetaka TOKUBAYASHI,  
Keishi IKEDA and Takashi OKADA

Proposed in this paper is a seismic retrofitting method utilizing carbon fiber reinforced plastic sheets for circular columns in existing steel bridge piers. The method can be considered to be practical and convenient in retrofitting works compared with other current retrofitting methods. In the method, a circular column is wrapped with CFRP sheets of extremely high tensile performance. The validity of the proposed method is investigated through a bending test, compression test and cyclic loading test. It is concluded that the proposed method can control and improve the ductility capacity of the column without increasing its flexural stiffness and ultimate strength. Applications of the method are also discussed.