

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

松村 政秀*, 北田 俊行**, 林 秀侃***, 谷 一成****

*工修 大阪市立大学大学院工学研究科土木工学専攻 助手 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

**工博 大阪市立大学大学院工学研究科土木工学専攻 教授 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

***工博 阪神高速道路公団 神戸建設局 建設企画部長 (〒650-0041 神戸市中央区新港 16-1)

**** 大阪市立大学大学院工学研究科土木工学専攻前期博士課程 1 回生 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

鋼製橋脚の耐震補強においては、アンカー部の耐荷力を考慮すると、補強に伴う柱部材の耐荷力の上昇を許容できない場合も多い。そこで、本研究では、耐荷力の上昇の伴わない、より簡便で施工性に有利な耐震補強方法として、RC 橋脚の耐震補強に用いられている炭素繊維シートの貼付方法を矩形断面の鋼製橋脚柱部材に適用することを目標としている。そこで、炭素繊維シートの貼付方向・層数を変化させ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、基礎的資料ならびに問題点の整理を行った。その結果、炭素繊維シートを貼り付けると、強度上昇をほとんど伴わずに塑性率を改善できることがわかった。

Key Words: Carbon Fiber Sheet, Ductility, Cyclic Loading Test, Steel Bridge Pier, Seismic Retrofitting

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、弾塑性領域における構造物の変形性能を許容した耐震設計法が、新設の橋脚に対して適用されるようになった¹⁾⁴⁾。そして、現在その設計基準を満足しない既設の RC 橋脚はいうに及ばず、既設の鋼製橋脚についても、それらの耐震補強が実施されている。

鋼製橋脚の耐震補強工事において、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、あるいは発生する崩壊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⁵⁾⁷⁾。しかしながら、アンカー部が杭方式ではなく RC 方式で設計されている鋼製橋脚⁸⁾の中には、コンクリートを充填すると、柱部材の耐荷力がアンカー部の耐荷力を上回り、橋脚基部に損傷が集中し発生する好ましくない崩壊モードの発生が予想される例も見られる。また、縦補剛材補強工法についても、縦補剛材の補強に必要な材片の数が多く、また溶接・ボルト接合・塗装など橋脚内部の狭い空間での作業が多いため、断面の小さな鋼製橋脚への適用が困難であるなど、経済性・施工性の面で改善の余地が多い。

このような状況から、鋼断面の座屈変形の発生を防止する簡便で効果的な方法として、一部の RC 橋脚の耐震補強に用いられている炭素繊維シート補強工法の鋼製橋脚への適用が考えられる。炭素繊維シート (以下 CFS という) 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、施工後のメンテナンスも不要となる。また、重量や断面の増加を伴わないことなどから、鋼製橋脚

への炭素繊維シート補強工法が実用化されると、従来の補強工法では施工が困難であった箇所への施工も可能になると考えられる。このような CFS を利用した鋼製橋脚の耐震補強の効果あるいは、鋼板に CFS を貼付した複合構造を対象とした研究例も数少なく、一部で、その有効性について報告されているものの、炭素繊維による合理的・経済的な耐震補強法および耐震設計法を確立するまでには至っていない⁹⁾¹⁰⁾。

そこで、本研究では、CFS を鋼断面に貼付することによる補強効果を、その貼付方向と層数とを変化させた 4 体の実験供試体を用いて実験的に検討している。そして、CFS を用いた鋼製橋脚の耐震補強法についての基礎的資料を入手するとともに、その補強効果および問題点についての考察を加えたものである。

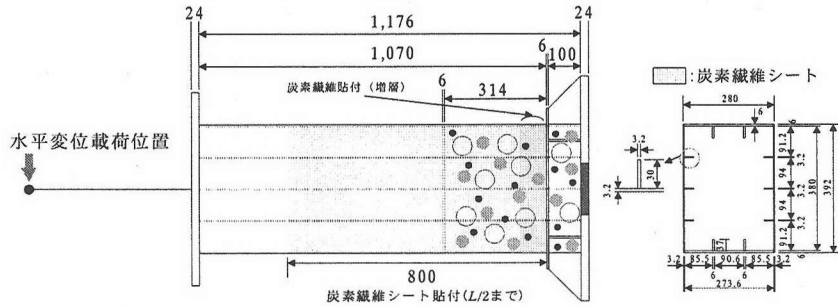
2. 実験の概要

2.1 実験供試体

表-1 および図-1 に示す 5 体の実験供試体を製作した。これらの実験供試体は、実際の鋼製橋脚柱の補剛板構造をできるだけ再現した梁・柱供試体、すなわち以下の式(1)~(3)に示す縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ R_R ¹¹⁾、補剛板全体の幅厚比パラメータ R_F ¹¹⁾、および縦補剛材のみの幅厚比パラメータ R_S ¹¹⁾を文献 6)に規定されている制限値の 0.4, 0.4, および 0.5 を満足せず、耐震補強が必要となる補剛板構造を有する箱形断面柱を想定した。

表-1 実験供試体の内訳

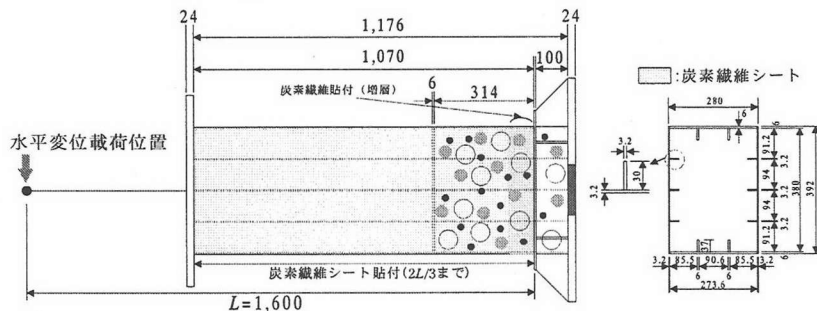
実験供試体	水平変位载荷位置 L (mm)	外形寸法 (mm)	板厚 (mm)	CFS 貼付層数		貼付高さ
				鉛直方向	水平方向	
CEO-L/5	1,600	392×280	フランジ: 3.2 ウェブ: 6	-	-	-
CCF13				1	3	L/2
CCF31				3	1	L/2
CCF01				0	1	2L/3
CCF11f				1	1	2L/3



i) 側面図

ii) 断面図

(a) 実験供試体 CCF13 および CCF31



i) 側面図

ii) 断面図

(b) 実験供試体 CCF01 および CCF11

図-1 実験供試体の寸法(単位: mm)

$$R_R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{4\pi^2}} \quad (1)$$

$$R_F = \frac{B}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{k_F \pi^2}} \quad (2)$$

$$R_S = \frac{h_s}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{0.425\pi^2}} \quad (3)$$

$$\gamma_s^* = 4\alpha_i^2 n(1+n\delta_s) - \frac{(\alpha_i^2 + 1)^2}{6} \quad (4)$$

$$\gamma_s = \frac{EI_s}{DB} \quad (5)$$

$I_s(I_s = b_s^3 t_s/3)$: 縦補剛材の付け根回りの断面 2 次モーメント
 また、実験供試体の製作には、実橋脚に用いられる鋼板と同様の降伏棚を有する鋼板を用いた。表-3 にロール方向の鋼板の機械的性質を示す。表-2 には、式(1)~(5)を用いて算出される実験供試体の幅厚比パラメータおよび縦補剛材剛比パラメータ γ_s/γ_s^* をまとめて示す。

表-2 実験供試体の各種パラメータ

縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ R_R	0.618
補剛板パネル全体の幅厚比パラメータ R_F	0.494
縦補剛材の幅厚比パラメータ R_S	0.579
縦補剛材剛比パラメータ γ_s/γ_s^*	1.704

表-3 材料試験結果

降伏点 σ_{YS} (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 E_S (N/mm ²)	ポアソン比 μ_S	伸び率 (%)
288.5	436.2	1.90×10^5	0.283	40.7

ここで、

μ : 鋼材のポアソン比

B : 補剛板パネルの全幅

b : 縦補剛材によって区切られる板パネルの幅

n : 縦補剛材によって区切られる板パネル数

k_F : 補剛板全体の座屈係数

α : 縦横比

δ_s : 縦補剛材断面積比

$D(D = Et^3/12(1-\mu^2))$: 板曲げ剛度

鋼板への CFS の貼付方法は、RC 構造物に貼付する一般工程を参考にして、はじめに接着性を高め、鋼板の表面

を平滑化する下地処理を行い、さらにエポキシ系のプライマーを塗布する。その上から、CFSにエポキシ系のレジンを含浸させて貼付する方法を採用した。表4には、実験供試体への施工時となるべく同条件下で別途実施した材料試験結果を示す。

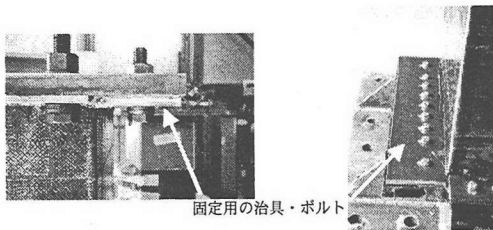
表4 CFSの機械的性質

引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (N/mm ²)	目付量 (g/m ²)
5,230 (3,400)	2.32×10 ⁵ (2.30×10 ⁵)	306 (300)

ただし、表中()内数値は、規格値を示す¹²⁾。

そして、実験供試体基部には、車両衝突による橋脚基部の大損傷を防止するために充填されている中詰めコンクリートを想定して、橋脚高さ L (L : 橋脚下端から水平荷重の作用位置までの距離、以下では、橋脚高さという) の $1/5$ までコンクリートを充填した。

ここで、実験供試体 CCF13 の名称は、CFS を鉛直方向に1層、水平方向に3層貼付したことを示す。また、CFS による補強効果の比較・検討には、補強を施さずにコンクリートを $L/5$ まで充填した鋼断面供試体 CEO- $L/5$ を用いた。なお、実験供試体 CCF11f は、下端からの高さ $2L/3$ の位置および下端で、鉛直方向に貼付した CFS と補剛板を治具によって固定し、CFS と鋼板とのズレを防止した実験供試体である (図2参照)。そして、すべての実験供試体において、柱最下端(8cm)は CFS を1層増しとしている。



固定用の治具・ボルト

(a) 下端から高さ $2L/3$ の位置 (b) 下端

図2 CFSの固定 (実験供試体 CCF11f)

2.2 漸増繰返し水平変位載荷実験

漸増繰返し水平変位載荷実験においては、図3 および図4に示すように、最大荷重 1,000 kN 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設置されている実験装置を用いた。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。

載荷方法は、はじめに上部構造物の死荷重に相当する鋼断面の全塑性軸方向圧縮力 N_{ps} の 11% を作用軸力として載荷する。そして、水平変位の載荷方法は、図5に示すように、降伏水平変位 δ_{ym} を基準として、作用水平変位が降伏変位の ±2 倍、±3 倍・・・と漸増するように載荷し、供試体の耐荷力の低下が確認できるまで繰返し水平変位を漸増載荷した。ここで、降伏水平変位 δ_{ym} は、軸方向圧縮力の影響を考慮した水平荷重による降伏水平変位であ

り、実験供試体基部の弾性支持による剛体変位を含む変位である。

そこで、本実験を行う前に、弾性範囲における実験結果を用いて、実験供試体を支持する載荷フレームの弾性剛性に対応するバネ定数を求め、供試体基部に起因する剛体水平変位を含む降伏水平変位 δ_{ym} を実験的に算出し、本番の実験での制御水平変位とした。また、この載荷装置では、水平荷重 H による変位 δ が増大していくと、軸方向荷重 N の鉛直成分 $N \sin(\delta/L_0)$ (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。

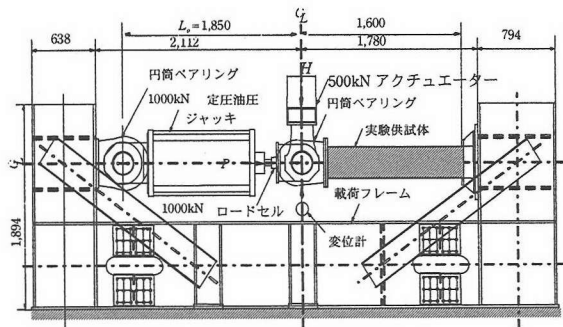


図3 実験載荷装置の概要 (単位: mm)

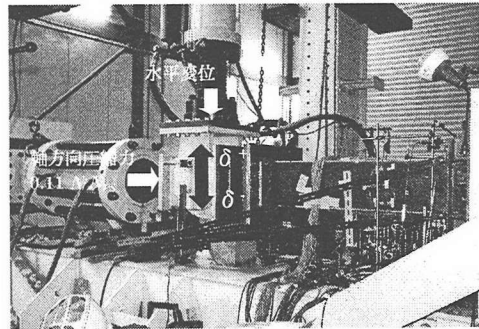


図4 載荷装置の全景

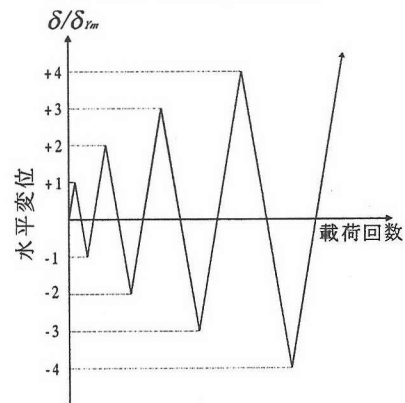


図5 繰返し載荷方法

3. 実験結果とその考察

3.1 水平荷重-水平変位関係

図6には、各実験供試体の水平荷重-水平変位曲線を示す。縦軸は、各実験供試体に作用する水平荷重 H を各実験供試体の降伏水平荷重 H_{y0} で無次元化したものであり、横軸は供試体頂部の水平変位 δ_0 を各実験供試体の降伏水

平変位 δ_{y0} で無次元化している。ここで、 δ_0 および δ_{y0} は、それぞれ供試体基部の弾性ばね変形による剛体変形を取り除いた水平変位および降伏水平変位を示している。

また、図-7には、各実験供試体の塑性率および作用最大水平荷重の値を比較するため、各載荷サイクルの正側および負側の水平荷重-水平変位のピーク時点における座標値の絶対値の平均をプロットした包絡線を示す。さらに、表-5には、包絡線から得られた各実験供試体の、実験供試体 CEO-L/5 に対する強度上昇率 $\beta (=H_u/H_{u,CEO-L/5})$ 、および塑性率 $\mu_w (\delta_w/\delta_{y0})$ とを比較して、まとめている。

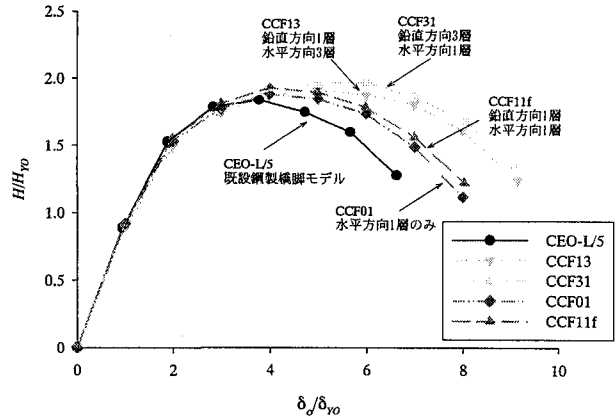
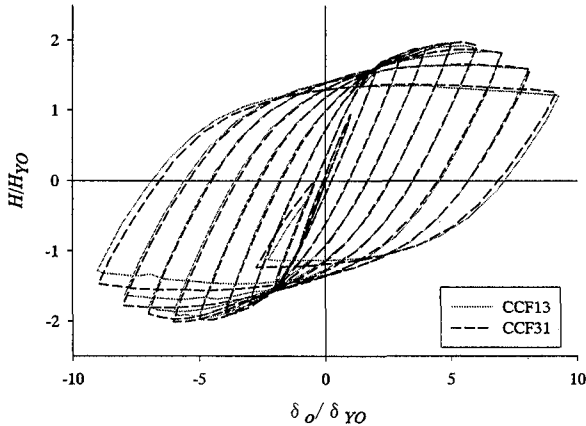


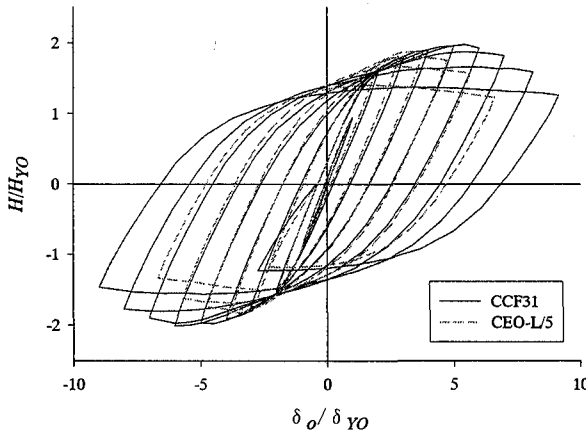
図-7 各実験供試体から得られた包絡線

表-5 各実験供試体の塑性率および強度上昇率

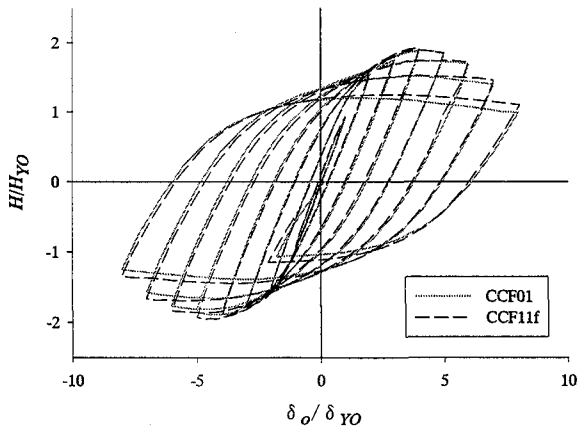
実験供試体	CFS 貼付層数		塑性率 μ_w (δ_w/δ_{y0})	強度上昇率 β ($H_u/H_{u,CEO-L/5}$)
	鉛直	水平		
CEO-L/5	-	-	3.78	1.00
CCF13	1	3	4.99	1.04
CCF31	3	1	6.10	1.07
CCF01	0	1	3.99	1.02
CCF11f	1	1	4.01	1.05



(a) 実験供試体 CCF13 および CCF31



(b) 実験供試体 CCF31 および CEO-L/5



(c) 実験供試体 CCF01 および CCF11f

図-6 各実験供試体の水平荷重-水平変位関係

図-6、図-7、および表-5より、CFSを鋼製橋脚に貼付すると終局水平荷重に至るまで安定した紡錘形のヒステリシスを描いているのが確認できる。また、コンクリートをL/5まで充填するがCFSによる補強を施さない実験供試体CEO-L/5、CFSを鉛直方向に1層、水平方向に3層貼付した実験供試体CCF13、および鉛直方向に3層、水平方向に1層貼付した実験供試体CCF31とを比べると、終局水平荷重はほぼ同様の値をとり、CFSの貼付が終局荷重に与える影響は明確には現れなかった。その原因として、補剛板パネルが箱断面内側へ座屈変形するため、補剛板パネルとCFSとが剥離し、補剛板パネルにおけるCFSの拘束効果が十分に得られないためと考えられる。しかしながら、終局水平変位を各実験供試体の降伏水平変位で除して算出される塑性率は、実験供試体CEO-L/5で3.78であったが、CFSにより補強を行った実験供試体CCF13では4.99、実験供試体CCF31では6.10とそれぞれ向上し、CFSによる補強により、強度上昇をほとんど伴うことなく、塑性率 μ_w を約5から6程度にまで向上できることがわかる。なお、CFSを鉛直方向に層数多く貼り付ける方が、若干ではあるが、良好な補強効果が確認された。

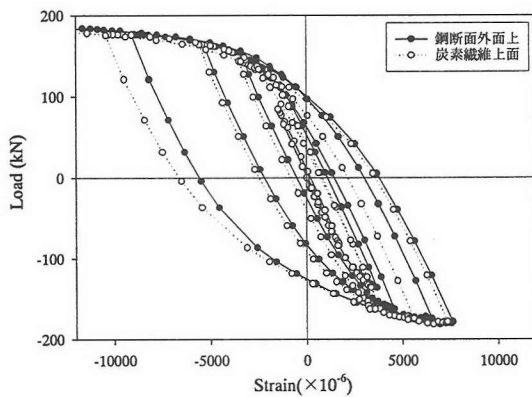
また、水平方向に1層だけCFSを貼付した実験供試体CCF01では、塑性率・強度上昇率ともに実験供試体CEO-L/5とほとんど有意な差異は確認できなかったものの、終局水平荷重後の包絡線の落込みは緩やかとなっている。つぎに、CFSを鉛直方向に1層、水平方向に1層貼付し、さらに、CFSの上・下端でCFSと補剛板パネルとを固定し一体化した実験供試体CCF11fは、実験供試体

CCF01 とほぼ同様な繰返し挙動が得られた。これは、箱断面内側へ補剛板が座屈し変形したために、CFS と鋼板とが剥離し、それらを両端で固定した効果が得られなかったためである。

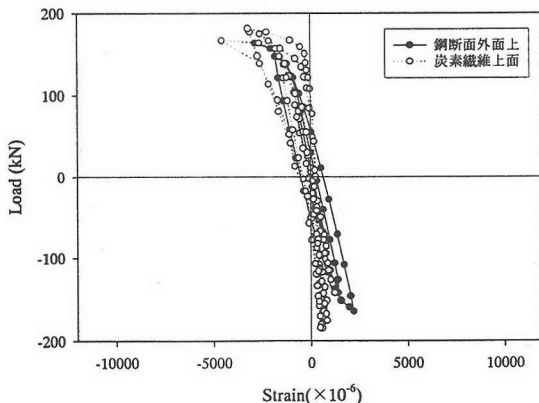
いずれの実験においても、終局荷重付近において、コンクリートを充填した断面の直上に位置する鋼断面区間の補剛板パネル全体が箱断面内側へ座屈変形し、以後、繰返し回数の増大に伴って、耐荷力を失っていくことが確認された。したがって今後は、補剛板の箱断面内側への座屈変形するような鋼製橋脚への炭素繊維シートとの適用性を検討する必要がある。また、エポキシ樹脂を含ませた炭素繊維シートと補剛鋼板とからなる複合補剛板の耐荷力特性、それらの接着力・付着力の評価方法、およびプライマーとレジンを含浸させた炭素繊維シートの厚さ方向のせん断剛性についての検討も必要であると考えられる。

3.2 水平荷重-軸方向ひずみ関係

実験供試体 CCF13 および CCF31 は、炭素繊維シートを貼付前に、鋼断面にもひずみゲージを貼付した。図-8には、実験供試体下端から、高さ 334mm の断面に貼付したひずみゲージから得られた実測ひずみを用いた水平荷重-軸方向ひずみ関係、図-9には、ひずみの計測位置を示す。実験供試体 CCF13 では繰返し回数 4 回目まで、CCF31 では繰返し回数 2 回目までは、鋼板に貼付したひずみゲージの測定結果と炭素繊維シートに貼付したものと、作用ひずみの大きさに関係なく、ほぼ同様の値を得た。



(a) 実験供試体 CCF13



(b) 実験供試体 CCF31

図-8 水平荷重-軸方向ひずみ関係

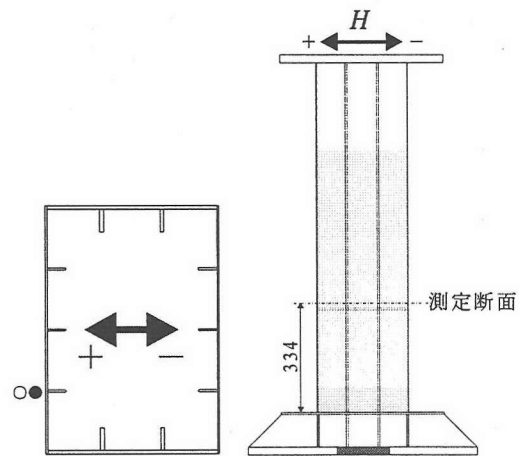
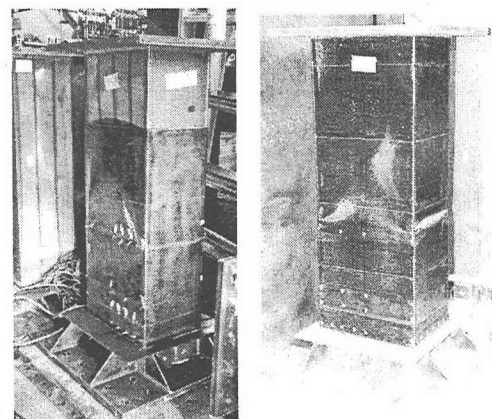


図-9 ひずみゲージ貼り付け位置

また、硬化したエポキシ樹脂および CFS と鋼板との剥離により、少ない繰返し回数において、ひずみゲージが切断され、十分な測定結果を得ることが出来なかった。したがって、鋼部材が座屈する以前では、鋼と CFS とが一体となって挙動すると考えられる。

3.3 実験終了後の実験供試体の崩壊状況

図-10には、載荷を終了後、作用水平荷重をゼロまで戻した状況における崩壊状況を示している。CFS による補強を施さない実験供試体 CEO-L/5 を含む、いずれの実験供試体も、橋脚高さの $L/5$ までコンクリートを充填した断面の直上に位置する鋼断面に、繰返し回数 3~4 回目において、縦補剛材間の板パネルの局部座屈が発生し、その後、繰返し回数の増大に伴って補剛板パネル全体の座屈変形が進展し、崩壊に至っている。また、補剛板パネルの全体座屈変形が進展すると同時に、供試体の軸方向縮みも増大するため、CFS と鋼板とが剥離し、その後の炭素繊維シート補強効果は、あまり期待できないことがわかった。



(a) 実験供試体 CCF31 (b) 実験供試体 CCF01

図-10 実験終了後の変形状況

4. まとめ

本研究では、炭素繊維シート (CFS) 補強工法の長方形断面鋼製橋脚の耐震補強法への適用性に関する補強効果を調べるとともに問題点を検討・整理するため、上部構造の死荷重を想定した一定の軸方向圧縮力を導入した状態

で、漸増繰返し水平変位を与える載荷実験を行った。

本研究より得られた主な結論は、以下のとおりである。

- 1) CFSにより補強を施した各実験供試体の塑性率 μ_{wo} と強度上昇率 β に着目するとCFSを用いた補強により、ほとんど強度上昇を伴うことなしに、塑性率 μ_{wo} を4程度から5~6程度(補強前の鋼供試体は3.78)にまで改善できることがわかった。
- 2) 水平方向1層のみのCFSで補強した実験供試体CCF01,鉛直方向に1層,水平方向にも1層のみのCFSで補強した実験供試体CCF11fでは,CFSによる補強効果は、ほとんど確認できなかった。
- 3) 繰返し回数が増大に伴い箱断面の内側に補剛板全体の座屈変形が進展し、崩壊に至った。そして、CFSにより補強を施した実験供試体においては、補剛板の箱断面内側への全体座屈変形が進展すると、CFSと鋼板とが剥離するため、終局荷重以降のCFSと鋼板との補強効果は、あまり期待できないと考えられる。
- 4) 補剛板パネルが箱断面内側への座屈変形するような鋼製橋脚へのCFSによる耐震補強工法の適用性、すなわち鋼板パネルが箱断面内側へ座屈変形する場合にもCFSが有効に機能する補強方法についての検討が今後必要であると考えられる。
- 5) 今後、CFSと補剛鋼板とからなる複合補剛板の耐荷力特性、それらの付着力・剥離性状の評価方法、およびプライマーとレジンを含浸させた炭素繊維シートの厚さ方向のせん断剛性についての検討も必要であると考えられる。
- 6) 補剛板パネルの内側への座屈変形を防止するために、箱断面内側に支保工を設けたり、CFSと鋼板の剥離を防止するために、リベット等により一体化した構造で補強する方法についても検討する必要があると考えられる。

- 2)土木学会・耐震基準等基本問題検討会議：土木構造物の耐震基準等に関する提言(第二次提言)、1996年1月。
- 3)兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様(案)、1995年2月。
- 4)日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様・解説」に基づく設計計算例、1995年6月。
- 5)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)、平成8年8月。
- 6)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。
- 7)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。
- 8)北田俊行, 迫田治行, 尾立圭巳, 堀江佳平, 新名 勉：鉄筋コンクリート方式で設計された鋼製橋脚定着部の終局強度について、鋼構造年次論文報告集, 第6巻, 日本鋼構造協会, pp.221-228, 1998年11月。
- 9)松沼政明, 山口隆裕, 池田尚治：橋脚の複合化による補強とその耐震性能, コンクリート工学年次論文報告会, Vol.21, No.1, 日本コンクリート工学協会, pp.409-414, 1999年6月。
- 10)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, 第56回年次学術講演会, I-A281, pp.562-563, 2001年10月。
- 11)日本道路協会：道路橋示方書・同解説, I.共通編, II.鋼橋編, 1996年12月。
- 12)CFルネサンス協会：リペラーク技術データ集, 2000年4月。

(2001年12月7日受付)

参考文献

- 1)土木学会・耐震基準等基本問題検討会議：土木構造物の耐震基準等に関する提言(第一次提言)、1995年5月。

Experimental Study on Seismic Retrofitting Method for Existing Steel Bridge Piers by Using Carbon Fiber Sheets

Masahide MATSUMURA, Toshiyuki KITADA, Hidenao HAYASHI, and Kazuaki TANI

A loading test is carried out for steel bridge pier models with rectangular cross section largely scaled down subjected to bending moment increasing in cyclic and constant axial compressive force in order to investigate the effect of retrofitting by carbon fiber sheets pasted on component steel stiffened plate panels of an existing steel bridge pier by epoxy resin upon its seismic performance. It is concluded that the retrofitting method can improve the ductility factor from about 4 to 5~6 with little load carrying capacity increment an existing the bridge pier retrofitted by the method. In the future, the bond characteristics between steel plate panels and carbon fiber sheets should be investigated both analytically and experimentally in detail in order to evaluate the effectiveness of this retrofitting method in precise.