

炭素繊維シートとブレース材による鋼製橋脚の耐震補強法に関する基礎的研究

橋梁工学分野 谷 一成

1. はじめに

鋼製橋脚の耐震補強補強法として、現在、コンクリート充填工法、縦補剛材を補剛・増設する縦補剛材補強工法などが一般的に行われている。しかしながら、施工性・経済性の面で改善の余地が指摘されており、より簡便で施工性・経済性に富む補強法の開発が望まれている。

このような状況から、簡便かつ効果的に鋼断面の座屈変形の発生を防止する方法として、RC橋脚の耐震補強に用いられている炭素繊維シートの適用が考えられる。炭素繊維シート（以下CFRP）は軽量かつ耐久性に優れるという特色を有しているが、座屈変形のような大変形時の鋼板とCFRPの接着性が問題として挙げられる。

本研究では、炭素繊維シート貼付による補強法を基本に、さらに補強効果を高めるため、補剛板パネル全体の断面内側への座屈変形を防止する目的で断面内側に複数のブレース材を配置する方法を提案した。CFRPおよびブレース材による補強効果を、CFRPの貼付層数・方向、ブレース材の有無をパラメータとして、実験と解析を行うとともに、CFRPとブレース材による鋼製橋脚の耐震補強法について検討した。

2. CFRPとブレース材による箱形断面部材の曲げ挙動

CFRPならびにブレース材の補強効果を検討するために、縦補剛材を設けない無補剛断面モデルおよび縦補剛材を設けた補剛断面モデルを対象に、CFRPの貼付方向・層数にブレース材の有無に注目して、4点曲げ載荷試験を行った。

図-1、図-2には実験供試体の断面および実験供試体の側面図を示す。表-1には、使用した材料の機械的性質を、表-2には変形性能が不足していると想定される断面に各種補強した実験供試体内訳と各種座屈パラメータを示す。図-3には、無補剛断面モデルおよび補剛断面モデルにおける荷重-変位関係を示す。縦軸は載荷荷重 P を計算から得ら

れた降伏荷重 P_Y で、横軸は鉛直変位 δ を補強前の降伏変位 δ_Y で除している。また、図中には、CFRPを軸方向に1層貼付した場合の終局曲げモーメント M_u に対応する荷重 P_u 、ならびに鋼断面の全塑性曲げモーメント M_p に対応する P_p を示している。なお、実験供試体 t06-02 については、実験載荷中、非破壊部において、座屈変形が生じたため、その箇所を補強した後、再載荷をした。また、ブレース材を設置した t3.2-02 については、ひずみ硬化域に入って最大耐力が得られないと判断したため、 $8\delta_Y$ で実験を終了した。表-3には、最大荷重、および初期剛性、ファイバーモデルにより算出した曲げ耐力と実験値との比較を示す。

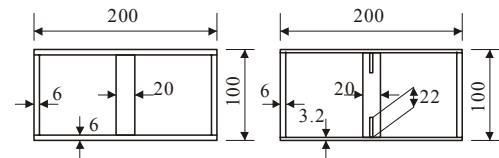


図-1 断面図 (単位: mm)

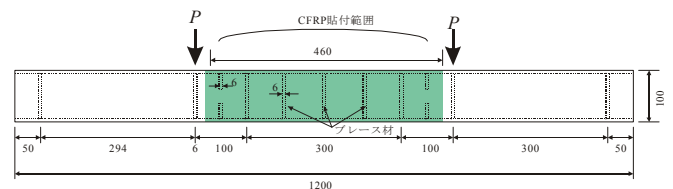


図-2 側面図 (単位: mm)

表-1 使用材料の機械的性質

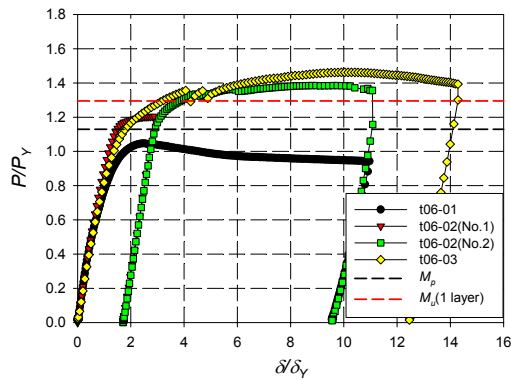
使用材料		仕様
鋼材 SM400	降伏点	305N/mm ²
	引張強度	458N/mm ²
	ヤング係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²
	ポアソン比	0.28
炭素繊維 シート	編込み方向	一方向
	繊維目付	300g/m ²
	厚さ	0.167mm
	引張強度	4,494N/mm ²
含浸樹脂	引張強度	60.4N/mm ²
	曲げ強度	83.4N/mm ²
	引張剪断強度	19.7N/mm ²

表-2 供試体内訳

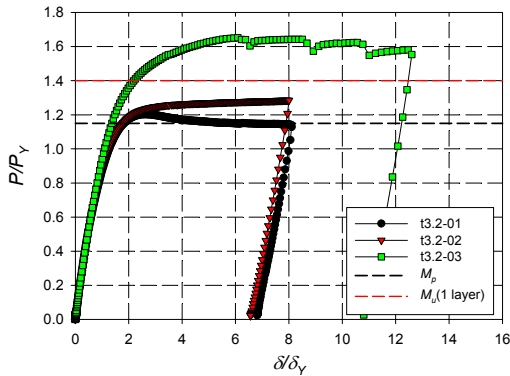
実験供試体	CFRPの貼付層数		R_R	R_F	γ/γ^*	概要
	軸方向	周方向				
無補剛 断面 モデル	t06-01	-	0.65	-	-	無補強
	t06-02	6				CFRP+ブレース材
	t06-03	1				CFRP+ブレース材
補剛 断面 モデル	t3.2-01	-	0.60	0.58	1.1	無補強
	t3.2-02	-				ブレース材
	t3.2-03	1				CFRP+ブレース材

表-3 耐荷力と曲げ剛性

実験供試体	最大荷重 P_u	計算値		最大変位 δ_u	初期曲げ剛性		
	(kN)	P_u/P_Y	樹脂考慮	樹脂無視			
t6-01	254.9	1.05	276.7		12.52	2.48	44.68
t6-02	337.2	1.38	399.3	342.0	44.97	8.93	48.43
t6-03	355.9	1.46	326.7	311.3	50.14	9.95	44.6
t3.2-01	196	1.2	188		13.19	2.62	33.71
t3.2-02	209.4	1.28			40.23	7.99	33.56
t3.2-03	269.1	1.65			220.7	222.7	30.65



(a) 無補剛断面



(b) 補剛断面

図-3 荷重-変位関係

図-3 (a)において、CFRP およびブレース材を併用して補強を行った実験供試体 t06-02 および t06-03 は、曲げ耐荷力が大きく向上している。

表-3 より、初期剛性を比較すると、実験供試体 t06-02 は、炭素繊維シート非常に薄いため、実験供試体 t06-01 と比較して 8%と小さい、軸方向 1 層、周方向 6 層貼り付けた実験供試体 t06-03 は、t06-01 とほぼ同じ剛性であることがわかる。

図-3 (b) より、補剛断面モデルでは、ブレース材のみで補強を施した実験供試体 t3.2-02、軸方向 1 層、周方向 3 層ならびにブレース材で補強した実験供試体 t3.2-03 を無補強の実験供試体 t3.2-01 と比較すると、曲げ剛性は、ほぼ同じ値であり、周方向の積層数は曲げ剛性には影響を及ぼさないことがわかる。

耐荷力について、実験供試体 t06-02 は、t06-01 と比較して 32%、t06-03 は t06-01 と比較して 40%耐力が上昇する結果となった。また補剛断面モデルでは、t3.2-02 は、6%、t3.2-03 は、37%と t3.2-01 と比較して耐荷力が向上している。しかしながら、表-3 より算出した曲げ耐力と比較すると、ファイバーモデルでは、軸方向に貼付した CFRP のみ考慮していることや剥離が生じない仮定で計算を行っており、CFRP を貼付した場合の実験値と大きな差が見られる。t06-02 においては、樹脂の影響を考慮した場合の終局曲げモーメントは、考慮しない場合のそれより低い値となっており、軸方向に貼った

CFRP の剥離の影響が大きいと考えられる。周方向に多く貼付した実験供試体 t6-03、t3.2-03 では、CFRP を軸方向に 1 層貼付した最大耐力よりもそれぞれ 10%、20%と大きい値となり、ブレース材を配置することによる圧縮領域でのひずみ硬化も考えられるが、周方向に巻き付けた CFRP による拘束により、鋼が多軸応力状態になっていることなど様々な影響が考えられる。今後、CFRP の直交異方性ならびに座屈等の幾何学的非線形を考慮できる詳細な解析モデルで CFRP を周方向に貼付した影響を検討する必要がある。

3. 材部材へブレース材を用いた補強効果に関する解析的検討

建築分野で、ラーメン構造の斜材として、使用されているブレース材を座屈拘束ブレースとして、設置することにより、補剛板パネル全体の座屈の発生を抑制し、変形性能を改善できる効果が期待できる。そこで、FEM 解析を行い、柱部材へブレース材の適用性、ならびに補強効果について検討した。

柱モデルの解析には、兵庫県南部地震の際に、損壊が多く見られた一例である阪神高速道路・3 号神戸線の橋脚 P353 を対象とした図-4 に示す実験供試体を対象に縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ R_R および補剛板全体の幅厚比パラメータ R_F に着目して、板パネルならびに補剛板で座屈変形が生じにくいケース ($R_R = 0.4$, $R_F = 0.4$) から、板パネル、補剛板ともに座屈変形が生じやすいケース ($R_R = 0.8$, $R_F = 0.8$) までの場合を変化させて解析を行った。 R_R の変化には、柱部材の板厚を変化させ、 R_F の変化には、フランジの縦補剛材の高さを変更させた。載荷方法については、鉛直方向に上部構造の死荷重を想定して、全塑性軸方向力の 11%を導入した状態で、水平変位を漸増させた。初期不整には、初期たわみと残留応力を考慮している。なお、解析コードには、USSP を用いた。

ブレース材の配置方法については、表-4 に示すように基部付近のダイアフラム間を 2~4 分割して配置し、ブレース材が塑性化しないような断面とした。ここで、解析ケースの名称であるが解析ケース 2h1b を一例にとると、2h は、基部付近のダイアフラムを 2 分割していることを示し、1b はブレース材を 1 本設置していることを示す。

図-6 には、補強効果を検討するため、耐荷力ならびに変形能に着目して、最大水平荷重 H_{max}/H_Y と R_F の関係、図-7 には、板パネル幅厚比パラメータ R_R ごとに最大水平荷重時 H_{max} における水平変位 (以下 δ_{max}) と R_F の関係、図-8 には、終局荷重以降の変形能を比較するため、最大作用水平荷重 H_{max} から 5%耐力が低下したときにおける水平変位 (以下 δ_{95}) と R_F の関係をそれぞれ示す。

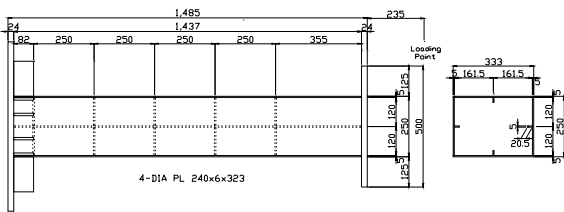


図-4 P353 実験供試体 (単位 : mm)

表-4 解析ケース

解析ケース	ブレース材 配置本数	配置位置
2h1b	1本	基部から12.5cm
3h2b	2本	基部から8.06,16.07cm
4h2b	2本	基部から6.25,12.5cm
4h3b	3本	基部から6.25,12.5,18.75cm

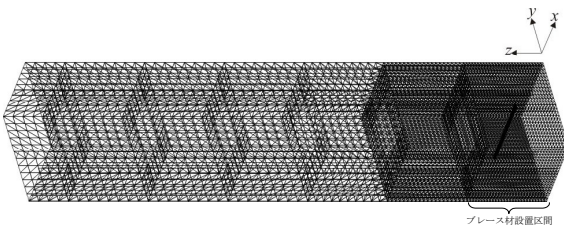


図-5 解析モデル (2h1b) の要素分割状況

図-6 よりブレース材による補強効果を、強度上昇率から検討すると、すべての解析ケースにおいて、耐荷力が向上しているのが確認できる。また、初期剛性については、ブレース材が初期剛性に及ぼす影響は見られない。

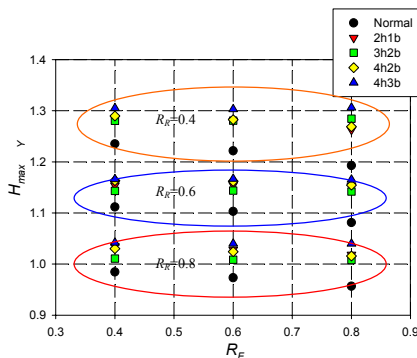
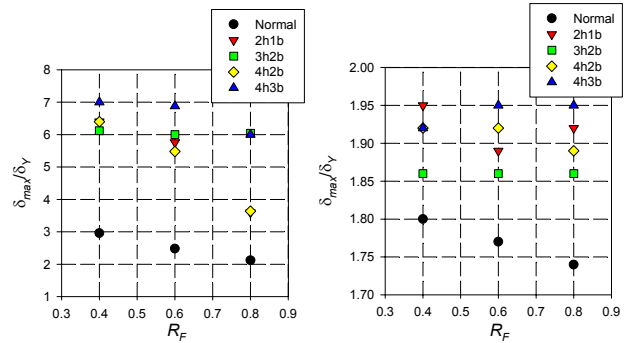


図-6 耐荷力と R_f の関係

R_f が 0.8 と大きく補剛板全体の座屈変形が生じるケースで、強度上昇は、5.4%~9.5%となり、 R_R の大きさ、ブレース材の配置箇所に関わらず $R_f=0.4$ の場合以上の耐荷力が期待できる。すなわち、補剛板パネル全体の座屈が生じやすい場合ほど、ブレース材は耐荷力の上昇に効果的である。また、 R_R が強度上昇に及ぼす影響について比較すると、 R_R の大きさに関わらず、ブレース材は、板パネル間の局部座屈の抑制にはほとんど寄与しないことがわかる。ブレース材の設置が耐荷力に及ぼす補強効果は、補剛板パネル全体の幅厚比パラメータ R_f が大きく、板パネルの幅厚比 R_R が小さいほど高い。

ブレース材の配置箇所について比較すると、高さ方向に3本設置したケース (4h3b) が最も効果が高く、基部付近に2本設置したケース (4h2b) が、その次に補強効果がある傾向となった。しかし、 $R_R=0.4$ 、 $R_f=0.8$ のケースで、高さ方向に2本設置したケース (3h2b) の方が効果は高く、基部付近に多数のブレース材を設置すると、

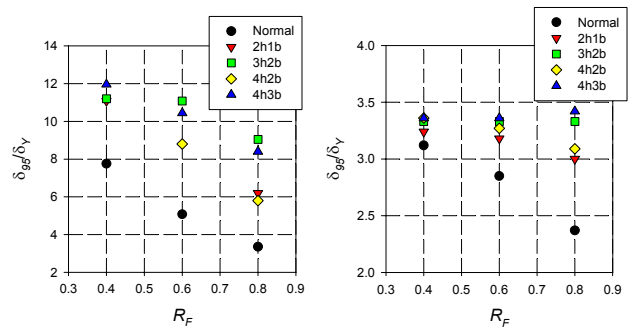
設置した上部で補剛板パネル全体の座屈変形が生じる可能性がある。



(a) $R_R=0.4$

(b) $R_R=0.8$

図-7 δ_{max} と R_f の関係



(a) $R_R=0.4$

(b) $R_R=0.8$

図-8 δ_{95} と R_f の関係

次に、図-7、図-8 より、変形能を比較すると、局部座屈が生じにくい $R_R=0.4$ のケースにおいては、 δ_{max} および δ_{95} とともに $R_f=0.8$ の場合では、 δ_{max} では、70%~180%、 δ_{95} では、72%~173%の変形能の向上と、耐力とともに変形能の改善についても向上が見られた。また、ブレース材による耐力の上昇が小さかった $R_f=0.4$ のケースでも δ_{max} では100%以上、 δ_{95} では、40%以上の向上が見られた。次に $R_R=0.8$ のケースでは、 δ_{max} では、6.8%~12%の変形能の向上が見られるが、 δ_{95} では、26%~40%と $R_R=0.4$ の場合に比べて変形能の改善が乏しい結果である。これは、 R_R が 0.8 と大きく、ブレース材で補剛板の座屈変形の発生を抑制しても、局部座屈が生じ、耐力が急激に低下するためと考えられる。しかし、 R_f の大小について比較すると、 R_f が大きいケースの方が変形能の改善に及ぼす影響が大きい。

また、ブレース材の配置箇所は、同様に R_f 、 R_R により若干バラツキがあるものの高さ方向に3本設置したケース (4h3b) が最も効果的であるという結果となった。

4. CFRP とブレース材による鋼製橋脚の補強効果に関する実験的検討

地震時における柱部材の挙動について検討するため、CFRP の貼付方向・層数、ブレース材の有無に着目し、表-4 および図-9 に示す7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・柱供試体であり、縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ R_R 、補剛板全体の幅厚比パラメータ R_F 、および縦補剛材の幅厚比パラメータ R_S が文献1) の規定値である 0.4, 0.4, 0.5 を満足せず、耐震補強が必要となる箱断面柱を想定している。また、すべての実験供試体には、車両衝突による橋脚基部の大きな損傷を防止するために充填されている中埋めコンクリートも考慮し、1/5 の高さまでコンクリートを充填した。

荷重方法は、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 11% を作用軸力として荷重する。そして、水平変位の荷重方法は、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、供試体の耐力力の低下が確認できるまで荷重した。

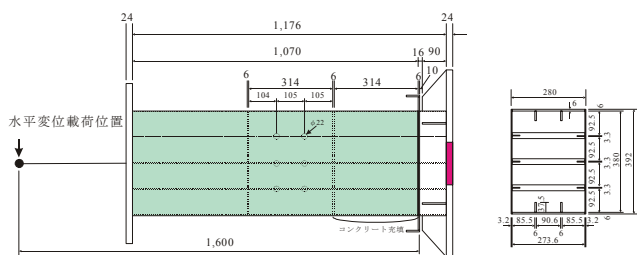


図-9 実験供試体の例 (CCF-31-B) (単位: mm)

表-5 供試体の内訳、塑性率および終局強度

実験供試体	R_R	R_F	γ_s/γ_s^*	CFRP貼付層数		CFRP貼付高さ	ブレース材	塑性率 δ_u/δ_{YO}	H_u/H_y
				軸方向	周方向				
CEO-L/5	0.619	0.484	1.76	-	-	-	-	3.78	1.84
CCF13	0.602	0.471		1	3	L/2	-	4.99	1.91
CCF31				3	1	L/2	-	6.1	1.97
CCF01				0	1	2L/3	-	3.99	1.88
CCF11f				1	1	2L/3	-	4.01	1.93
CEO-L/5-B	0.631	0.494		-	-	-	設置	5	1.62
CCF31-B			3	1	2L/3	設置	-	1.92	

図-10には、実験から得られた包絡線を示す。表-5には、包絡線から得られた塑性率および終局強度を示す。図-10より、CFRPを鋼製橋脚に貼付すると耐力力と変形能が改善されているのが確認できる。CFRPにより補強を施した各実験供試体の塑性率 μ_{uo} に着目するとCFRPを用いた補強によ

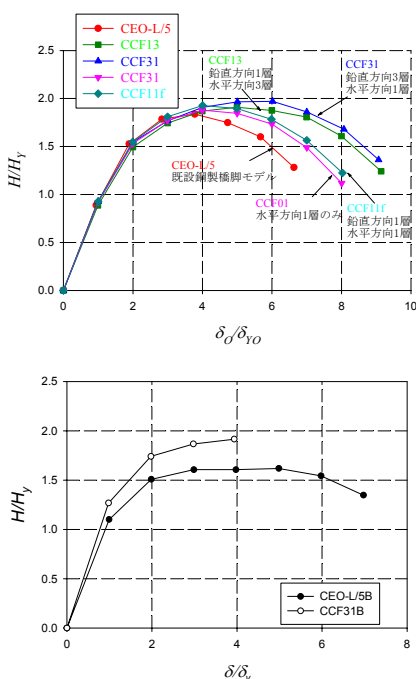


図-10 実験から得られた包絡線

り、塑性率 μ_{uo} を 4 程度から 5~6 程度 (補強前は 3.78) にまで改善できることが確認できる。しかし、CFRPのみで補強を施した実験供試体においては、繰返し回数の増大に伴い箱断面内側へ補剛板の座屈変形が進展し、CFRPの剥離が生じた。そのため、終局荷重以降の補強効果は、あまり期待できないと考えられる。

ブレース材のみ配置した実験供試体CEO-L/5-Bでは、中埋めコンクリート上部のダイアフラムと1段目のブレース材との間で板パネルの局部座屈が発生し、損傷が進行していった。変形能について実験供試体CEO-L/5と比較すると、耐力力の低下を防止し、変形能の改善につながる結果となった。

一方、CFRPとブレース材で補強を施した実験供試体CCF31-Bでは、 $+4\delta_y$ で、合成断面特有のS字型の曲線に移行し、基部でCFRPの剥離が生じた。ブレース材とCFRPを併用した断面には損傷が発生せず柱基部先行の破壊形態になる恐れから、 $4\delta_y$ で荷重を中断した。しかし、他の供試体で見られた座屈変形は確認されなかった。

5. まとめ

- i) ブレース材を適切な位置に設置すると、補剛板パネル全体の座屈変形の防止に有効的である。柱部材に適用する場合の効果は、補剛板パネル全体の座屈変形が生じやすい場合において、耐力の向上には効果があり、板パネルの局部座屈が生じにくいほど、変形能は改善される。
- ii) 周方向にCFRPを多層貼付すると、実験値と計算値に大きな差異が見られた。周方向に巻き付けたCFRPによる拘束効果も影響し、多軸応力状態になっていることなど、様々な要因が考えられる。この原因について、CFRPの直交異方性ならびに幾何学的非線形を考慮した詳細な解析モデルで検討を行い、定量的な評価方法について、検討する余地がある。
- iii) ブレース材とCFRPを併用すると、鋼断面の補剛板パネル全体の座屈変形だけでなく、板パネルの局部座屈も抑制でき、耐力および変形性能ともに改善が見込める。
- iv) 板パネルの幅厚比パラメータ R_R が小さく、補剛板の幅厚比パラメータ R_F が大きいケースに対しては、ブレース材のみの補強で効果的であり、 R_R が大きく、 R_F が小さい、局部座屈しか生じないようなケースにおいては、炭素繊維シートのみで補強が可能であると考えられる。また、 R_R 、 R_F とも大きいケースに対しては、ブレース材で補剛板の座屈変形を防止し、CFRPで局部座屈を防止すれば、耐力、変形能ともに大きく改善できると考えられる。

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 (案)・同施工マニュアル (案), 1997年3月.