

大阪市立大学工学部 学生員○玉田和法
 大阪市立大学大学院工学研究科 正員 山口隆司
 阪神高速道路公団・湾岸管理所 正員 徳林宗孝

大阪市立大学大学院工学研究科 正員 北田俊行
 大阪市立大学大学院工学研究科 正員 松村政秀

1. まえがき これまで、エポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維シート（以下 CFRP という）を貼付した鋼構造物の耐荷力性状についての研究は少なく、CFRP による鋼製橋脚の耐震補強とその妥当性については、一部で報告されているものの、その合理的・経済的な耐震補強法・設計法の確立には至っていない。そこで本研究では、円形鋼製橋脚柱の変形性能向上を対象として、CFRP を用いた耐震補強法を提案することを目的として、曲げ載荷実験および純圧縮力載荷実験を実施している。CFRP を利用した補強の特徴として、補強には重機を必要とせず、それに伴う自重増加がほとんどない。また、CFRP の引張応力は鋼材のおよそ 10 倍の強さがあり、ヤング率はほぼ同じ値を示すこと等が挙げられる¹⁾。

2. 実験目的 供試体の製作には、断面（ $\phi=1,016\text{mm}$ 、板厚 16 mm）および、それを 1/2.5 に縮小した断面（ $\phi=406.4\text{mm}$ 、板厚 6.4 mm）を有する鋼管（STK400）を用いる。鋼板に CFRP を貼付した場合に、補強効果に著しい影響を及ぼすと考えられる CFRP の貼付方法（層数・層厚および、プライマーの塗布厚あるいはスパーサーの厚さ）とをパラメータとした。さらに、板厚 16 mm の実験供試体には目付量 300 g/m² の CFRP を、また板厚 6.4 mm の実験供試体には目付量 120 g/m² のものを使用し、実験結果を実橋脚へ適用する際に、その相似則の評価を容易にできるようにした。表-1 には供試体に使用した鋼材および CFRP の機械的性質を、図-1 には鋼材と CFRP との応力-ひずみ曲線を、表-2 および表-3 には供試体の内訳をそれぞれ示す。

3. 曲げ載荷実験 円形断面の周方向への CFRP の貼付効果を検討し、鋼板からプライマーを介して CFRP への応力の伝達を確認することを目的として曲げ載荷実験を実施した。

図-2 には、実験供試体（ $t=6.4\text{mm}$ ）の曲げモーメント-曲率曲線の一例を示す。同図によると、ゴムシートあるいは発泡ウレタンシートの層を挿入すると、

表-1 実験供試体に使用した材料の機械的性質

材料内訳	引張応力 (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 $\times 10^5$ (N/mm ²)
鋼材 ($\phi=406.4\text{mm}$, $t=6.4\text{mm}$)	453.7	349.1	2.10
鋼材 ($\phi=1,016\text{mm}$, $t=16\text{mm}$)	468.7	296.6	2.13
CFRP (目付量 120g/m ²)	4,790	-	2.47
CFRP (目付量 300g/m ²)	4,180	-	2.38

表-2 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)	スパーサーの厚さ(mm)	
	実験供試体 ($t=16\text{mm}$)	実験供試体 ($t=6.4\text{mm}$)
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
CFRP の目付量 g/m ²	300	120

※軸方向には、必ず炭素繊維シートを 1 層貼付する。

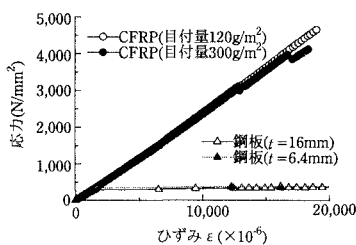


図-1 応力-ひずみ曲線

表-3 実験供試体の内訳 (純圧縮力載荷実験)

実験供試体名	CFRP の貼付層数		上下端 CFRP 層増数	備考
	軸方向	周方向		
3-01	0	0	2	鋼供試体
3-02	1	3	2	-
3-03	1	3	2	ゴムシート(4mm)を挿入
3-04	1	8	3	-
3-05	1	8	3	ウレタンシート(12mm)を挿入

※ $t=6.4\text{mm}$ 、目付量 120g/m² 使用

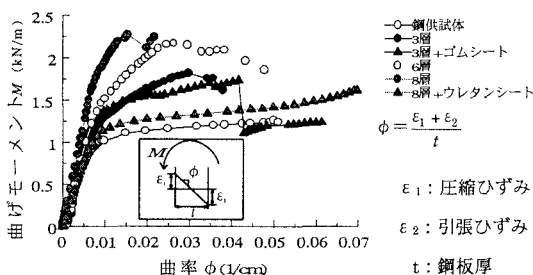


図-2 曲げモーメント-曲率曲線(実験供試体($t=6.4\text{mm}$))

終局荷重の低減につながる事が確認できる。表-4 には、弾性域における CFRP の曲げ剛性を貼付層数ごとに算定し、比較している。同表によると、鋼板の板厚の違いを問わず、CFRP の貼付層数の増加に伴い、曲げ剛性は、CFRP を周方向に 3 層貼付すると鋼供試体の約 1.1 倍、6 層貼付すると約 1.3 倍、および 8 層貼付すると約 1.5 倍、それぞれ増加することが確認できた。また、弾性域では、理論値との相関が認められた。

5. 純圧縮耐荷力実験 CFRP の貼付方法の違いによる耐荷力特性への影響を、検討するために純圧縮力荷重実験を行った。なお、補強後の耐荷力上昇をあまり許容できない場合を考慮して、硬度の低いスペーサー（ゴムシートあるいは発泡ウレタンシート）を鋼板と CFRP との間に挿入することにより、鋼断面を先に座屈変形させ、耐荷力の上昇を抑制し、変型性能を向上させる方法の有効性についても検討した。図-3 には供試体の軸方向圧縮荷重-軸方向縮み関係を示す。ここで、軸方向縮みは、供試体の上下四隅に設置した変位計により計測した値の平均値を示す。

表-5 には、実験結果のまとめを示す。これらによると、弾性内では、補強の有無にかかわらず、各供試体でほぼ同じ圧縮剛性が得られた。すなわち、鋼管の周方向に CFRP を貼付しても、圧縮剛性に与える影響は小さいと言える。しかしながら、終局荷重は上昇し、実験供試体 3-04 では鋼材の引張強度に相当する軸方向力を上回る終局荷重を示した。これは、鋼管外側への座屈および周方向の変形を CFRP が拘束することにより鋼材が 2 軸圧縮応力状態になったためと考えられる。またいずれの供試体も CFRP の周方向のひずみが約 9,000 μ で破断し、耐荷力の著しい低下を起こしている。CFRP を周方向に貼付した各供試体（スペーサーを挿入していないもの）の終局荷重時の縮み量から判断すると、CFRP の貼付層数を増加させることにより変型性能を著しく改善できることがわかる。一方、スペーサーを挿入した供試体は終局荷重が低下しており、スペーサーを挿入することにより変型性能を改善することは可能であるが、それを実現するための材料を見出すことが困難であると考えられる。

6. まとめ (i) 曲げ荷重実験結果より、CFRP を貼付した鋼板の曲げ剛性は、実験と理論値とでほぼ等しいことがわかった。また、CFRP の層厚を変化させれば、鋼材の板厚を変化させるのと同様に、相似則が成立することが確認できた。(ii) CFRP は鋼管の周方向（外側）に対する座屈変形を拘束することができ、その拘束力が大きいほど鋼管の耐荷力の上昇と変型性能の改善につながる事が確認できた。また、スペーサーを挿入して変型性能を改善することは難しいものの、耐荷力は低減できる可能性が確認できた。

7. 参考文献 1) 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。

表-4 曲げ剛性の比較（曲げ荷重実験）

(a) 実験供試体 ($t=16\text{mm}$ 、目付量 300g/m^2 の CFRP を使用)

実験供試体の内訳	EI 平均 ($\times 10^{10}\text{N}\cdot\text{mm}^2$)	鋼供試体に対する倍率
鋼供試体 (鋼理論値)	2.031 (2.238)	1.00 (1.00)
3 層 (3 層理論値)	2.295 (2.503)	1.13(=2.295/2.031) (1.12)
6 層 (6 層理論値)	2.682 (2.860)	1.32(=2.682/2.031) (1.28)
8 層 (8 層理論値)	3.003 (3.155)	1.48(=3.003/2.031) (1.41)

(b) 実験供試体 ($t=6.4\text{mm}$ 、目付量 120g/m^2 の CFRP を使用)

実験供試体の内訳	EI 平均 ($\times 10^9\text{N}\cdot\text{mm}^2$)	鋼供試体に対する倍率
鋼供試体 (鋼理論値)	1.452 (1.214)	1.00 (1.00)
3 層 (3 層理論値)	1.625 (1.375)	1.13(=1.625/1.452) (1.13)
6 層 (6 層理論値)	1.935 (1.594)	1.33(=1.935/1.452) (1.31)
8 層 (8 層理論値)	2.446 (1.776)	1.68(=2.446/1.452) (1.46)

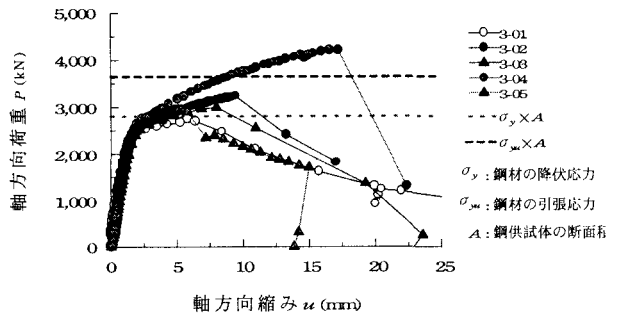


図-3 荷重-軸方向縮み

表-5 純圧縮力荷重実験の結果

供試体名	圧縮剛性 (kN/mm)	鋼との剛比	終局荷重 (kN)	終局時縮み (mm)
3-01	1,712	-	2,694.0	6.42
3-02	1,720	1.00	3,238.0	9.45
3-03	1,566	0.91	2,997.8	8.01
3-04	1,752	1.02	4,212.0	17.23
3-05	1,723	1.01	2,942.0	5.32