

大阪市立大学工学部 学生員 ○北田 健

大阪市立大学院工学研究科 正会員 山口 隆司

京橋工業株式会社 正会員 並木 宏徳

大阪市立大学院工学研究科 正会員 松村 政秀

大阪市立大学院工学研究科 正会員 北田 俊行

1. 研究背景と研究目的 老朽化の進行や、設計自動車荷重の増加に伴う既設橋梁の耐荷力不足が問題となり、鋼板添付補強法などによる鋼桁の補強が実施されている¹⁾。近年の橋梁事情を考慮すると、施工性に優れた橋梁の補強方法の開発は急務となっており、有利な補強法の一つとして、炭素繊維シート (CFRP) を用いる方法が提案されている。

現時点において、炭素繊維シートが貼付された鋼板の有効性は実験的には検証されているが、解析により定量的に評価されるまでには至っていない。そこで、本研究では、炭素繊維シートが貼付された鋼板の弾塑性挙動を解析的に検討することを目的として、鋼I桁下フランジに炭素繊維シートを貼付した場合を対象として、その補強効果を、曲げ載荷実験および初等梁理論（以下、理論という）の両面から検討するとともに、弾塑性有限変位解析（以下、解析という）により検証している。

2. 曲げ載荷実験の概要 炭素繊維シートを貼付した鋼I桁の解析モデルの妥当性を検証するために、I型鋼（図-1(a), Type-S）と高弾性の炭素繊維シート6層を貼付したI型鋼（図-1(b), Type-CF）の2ケースについて4点曲げにより最大荷重が得られるまで曲げ載荷を実施した。各使用材料の機械的性質を表-1に示す。炭素繊維シートの破断は、曲げモーメントが卓越する両載荷点間で発生し、破断に至るまで鋼との間に剥離やズレの発生は確認できなかった。

3. 解析と実験および理論の比較

実験に用いた供試体を図-4に示すように対称性を考慮して全桁の1/2部分をモデル化した。I型鋼（補剛材含む）、および炭素繊維シートは三角形板要素を用いてモデル化した。なお、6層の炭素繊維シートは1層であるとみなした（図-2）。また、実験において、炭素繊維シートの剥離やズレが発生しなかったため、炭素繊維シートと鋼材とは完全に一体化していると仮定し、エポキシ樹脂は剛体バネ要素でモデル化した（図-3）。解析モデルの寸法や材料定数、拘束条件、載荷条件などは載荷実験のものと同様とした。

図-5は、Type-CFについて、実験、理論、および解析による支間中央位置の荷重-変位関係をプロットしたものである。表-2には初期曲げ剛性および補強率を示す。これらの結果より、理

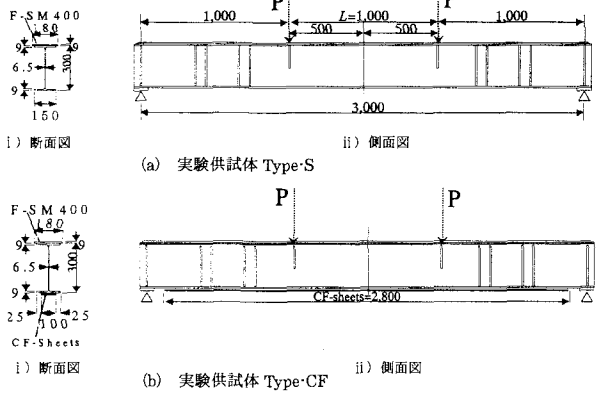


図-1 実験供試体（寸法単位：mm）

表-1 使用材料の機械的性質

記号	材料	弾性係数 (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
I-SM400	SM400	2.01×10^5	275.6	459.3
F-SM400	SM400	2.04×10^5	287.3	423.9
CF-Sheet	CFRP	6.88×10^5	-	2,180
エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	3,275	-	58.2

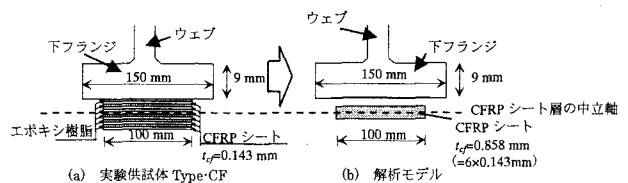


図-2 炭素繊維シート層のモデル化

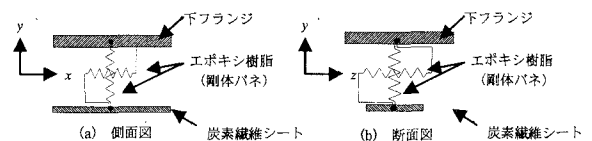


図-3 エポキシ樹脂のモデル化

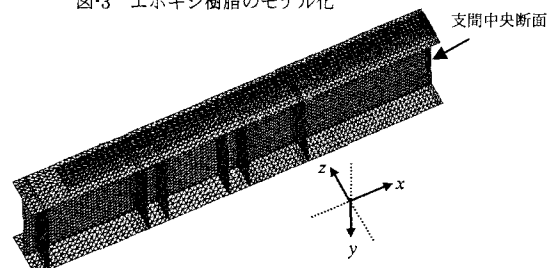


図-4 炭素繊維シートを貼付したI型鋼の

要素分割状況（下フランジ側から）

論値、実験値、および解析値は良好に一致している。ここで、初期曲げ剛性 EI および補強率 r は次式(1)および(2)により算定した。なお、補強率 r とは、炭素繊維シート貼付による鋼 I 桁の初期曲げ剛性の増加率である。

$$EI = \frac{648}{23} \cdot \frac{\delta}{Pl^3}, \quad r = \frac{EI_{CF} - EI_S}{EI_S} \quad \dots (1), (2)$$

ここに、 δ ：支間中央変位、 P ：荷重、 l ：支間長、 EI ：初期曲げ剛性とする。

以上から、本研究で提案したモデルを用いることで炭素繊維シートと鋼板とが完全に一体化されている場合、炭素繊維シートの貼付効果を解析的に検討することが可能であると考えられる。

4. パラメトリック解析 実験供試体に用いた鋼 I 桁を対象として、貼付する炭素繊維シートの種類（弾性係数）、貼付枚数、および貼付範囲（長さ）の変化が、補強効果に及ぼす影響を検討するため、パラメトリック解析を行った。図-6 は炭素繊維シートの種類（弾性係数）および貼付枚数を変化させた場合、図-7 は炭素繊維シート（ $E_{CF}=6.88 \times 10^{13}$ で 6 層）の支間中央からの貼付長さを変化させた場合の初期曲げ剛性と補強率の変化をそれぞれプロットしたものである。図-6 によると、炭素繊維シートの弾性係数および貼付層数に対して、補強率は比例関係にあることが確認できる。一方、図-7 によると、炭素繊維シートの貼付長さを約 800mm 以上にしても、貼付長さに応じた補強効果が得られないことがわかる。両載荷点間で曲げモーメントが一定かつ最大となるため、支点付近で補強を行っても大きな補強効果は期待できない。すなわち、炭素繊維シートの貼付は曲げモーメントの大きい区間（本研究では 1,000mm まで）に行うのが良く、その区間を越えて貼付範囲を長く設定するよりも、炭素繊維シートの貼付枚数を多くするか、高弾性の炭素繊維シートを用いる方が、より効率良く補強効果が得られることがわかる。

5. まとめ 弾性内で、剥離やズレが発生しない場合には、炭素繊維シートを貼付した場合の補強効果を解析により定量的に評価することが可能であることが示された。また、剥離やズレが無視できる場合には、最も合理的な炭素繊維シートの貼付位置や貼付範囲、貼付する炭素繊維シートの種類および枚数について解析的に検討できることもパラメトリック解析により示した。実際の土木構造物に対して炭素繊維シートを貼付する際には、炭素繊維シートの繊維の貼付方向を十分に考慮する必要があるが、繊維の方向性を考慮できない三角形板要素であっても、実用上十分な解析は可能であり、炭素繊維シートを貼付した場合の構造物全体の剛性を解析的に評価することは可能であると考えられる。今後、鋼板と炭素繊維シートとの間で剥離やズレが発生する場合のモデル化について検討をすすめる必要がある。

参考文献 1) 鋼構造の幅広い設計法および既設構造物の評価に関する共同研究グループ：鋼構造の幅広い設計法および既設構造物の評価法（最終報告書）、土木学会関西支部共同研究グループ報告書、1996 年 7 月

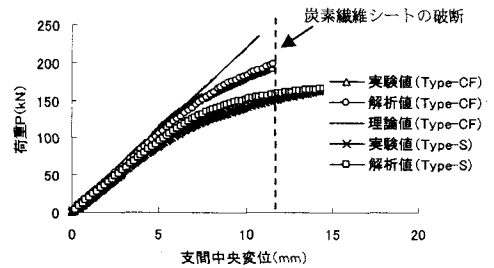


図-5 荷重-変位関係

表-2 初期曲げ剛性および補強率

	タイプ	初期曲げ剛性 EI (N/mm ²)	補強率 r (%)
実験値	Type-S	1.86×10^{13}	-
	Type-CF	2.06×10^{13}	10.9
理論値	Type-S	1.91×10^{13}	-
	Type-CF	2.11×10^{13}	10.5
解析値	Type-S	1.83×10^{13}	-
	Type-CF	2.02×10^{13}	10.1

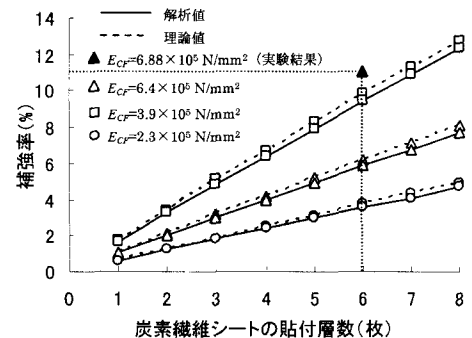


図-6 貼付総数と補強率の関係
(理論、および解析)

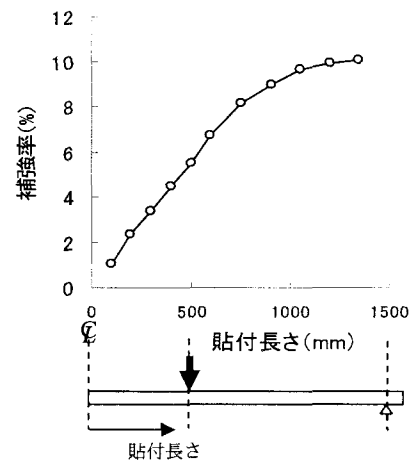


図-7 貼付長さとの補強率の関係