

プレストレスを導入した CFRP による 鋼桁のポストテンション補強法と補強効果に関する研究

Study on Post-tension strengthening method of existing steel girder using Pre-stressed CFRP and its effect

松村政秀*, 北田俊行**, 北田 健***, 並木宏徳****

Masahide Matsumura, Toshiyuki Kitada, Takeshi Kitada, Hironori Namiki

*博(工), 大阪市立大学大学院助手, 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

**工博, 大阪市立大学大学院教授, 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

***大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻前期博士課程 2 年生 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

****工博, 京橋工業株式会社 (〒536-0014 大阪市城東区鳴野西 2-2-21)

As one of strengthening techniques for superannuated steel bridge girders with insufficient load carrying capacity, Post-tension strengthening method through pre-stressed carbon fiber reinforced plastic (CFRP) is proposed by the authors. In this study, the effects of the post-tension strengthening method by CFRP are investigated experimentally and analytically. Also dealt with is the problem of debonding at the tips of CFRP. The effect of a holding plate newly employed to prevent the debonding of CFRP strips is examined experimentally. Finally applicability of the post-tension strengthening method by CFRP to making the plate thickness of the web plates thinner in a steel girder bridge to be constructed is analytically investigated.

Key Words: strengthening, steel girder, CFRP, post-tension strengthening, debonding

キーワード: 補強, 鋼桁, 炭素繊維強化樹脂, Pre-Stress 工法, 剥離

1. はじめに

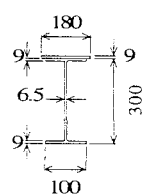
高度経済成長期に建設された橋梁の多くが 40~50 年程度の供用年数を迎つつあり, 老朽化した橋梁の補強が問題となっている。また, 1993 年に設計自動車荷重が 200 kN から 250 kN に引き上げられた¹⁾ことに伴って, 既設橋梁の構造部材の一部で耐荷力が計算上不足するケースも見られる。このような耐荷力が不足する既設の鋼桁の補強に際しては, 鋼板の添接補強や, より補強効果を高めるためにプレストレス (PS) を導入して鋼板を添接する補強法²⁾, ケーブルや鋼棒を用いる補強法も採用されている。引張特性に優れた炭素繊維板あるいは炭素繊維シートを直接鋼板に接着して補強する方法³⁾も注目されている。

炭素繊維強化樹脂板 (以下, CFRP 板という)⁴⁾あるいは炭素繊維シートを用いる鋼部材の補強では, 施工に重機を必要とせず, 接着剤としてエポキシ樹脂を用いる接着接合が採られる。したがって, CFRP 板あるいは炭素繊維シートを用いる鋼部材の補強は, 鋼部材を用いる従来の補強方法に比べて, 大幅な工期の短縮と騒音・振動等の発生を伴わない施工が可能⁴⁾であり, 量的な増加が

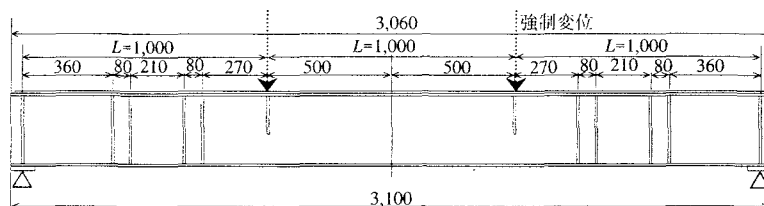
予想される老朽化鋼橋に対する容易に施工可能で, かつ効果的な補強方法の 1 つであると考えられる。さらに, プレストレスを与えた炭素繊維を貼付し補強すると, 単純に接着する補強に比べて炭素繊維シートの引張強度の活用につながり, より効率的な補強が可能であると考えられる。

本研究では, 炭素繊維シートを鋼 I 桁下フランジにエポキシ樹脂を含浸して接着する補強効果, および, 貼付する炭素繊維シートにプレストレスを導入する補強 (以下, PS 補強) 効果を明らかにし, PS 補強の実橋梁への適用性について検討することを目的とする。そこで, 載荷実験⁵⁾を実施するとともに, 簡易なモデル化により FEM 解析を行い PS の導入効果を検証する。載荷実験の供試体への PS の導入には, 実際の施工現場において使用されることを念頭に置いて開発した PS 導入治具を用いる。

ここで, 炭素繊維シートにプレストレスを導入して貼付する場合には, エポキシ樹脂含浸後に硬化した炭素繊維シート (以下, CFRP という) と鋼材との異材界面剥離の発生が懸念される。本研究では, CFRP 端部の剥離発生の有無に着目し, 導入する PS 量と剥離限界との関

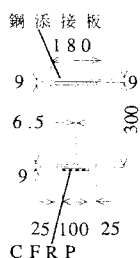


i) 断面図

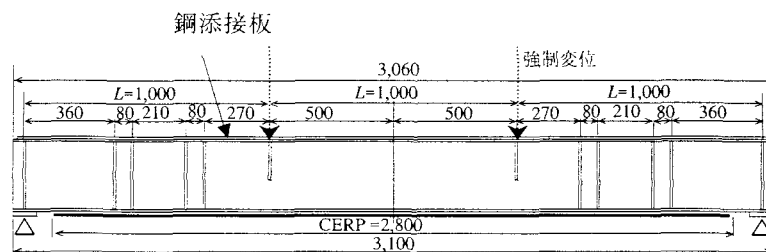


ii) 側面図

(a) 鋼のみ



i) 断面図



ii) 側面図

(b) 鋼+CFRP および 鋼+PS 導入 CFRP

図-1 実験供試体 (単位: mm)

係を実験的に明らかにするとともに、CFRP 端部での剥離を防止するための剥離制御板を考案し、その効果を検証している。

さらに、CFRP を用いる PS 補強を新設橋梁に適用し、架設時の座屈耐力を向上させることによって腹板の板厚を低減し経済的に有利な構造を提案可能かどうかについても検討している。

2. 曲げ载荷実験

2.1 実験供試体⁵⁾

実験には、無補強の鋼 I 桁、無補強の鋼 I 桁に CFRP を単純に貼付した鋼 I 桁、および PS を導入した CFRP を貼付した鋼 I 桁に対応する 3 体の実験供試体を用いた。図-1 に示すように、各実験供試体は、H 型鋼 (SM400) を用いて製作し、横ねじれ座屈に対する耐荷性の向上、および上フランジが先行して降伏に至ることを防止する目的で、上フランジには添接鋼板を溶接している。

炭素繊維シートにより補強した実験供試体には、6 層の高弾性炭素繊維シートを、鋼 I 桁下フランジ下面に繊維軸方向が H 型鋼長手方向に一致するようにエポキシ樹脂を用いて貼付した。炭素繊維シートは、CFRP 端部で剥離が発生しないように、桁のほぼ全長である 2,800 mm に渡って貼付した。図-2 には、貼付した炭素繊維シートの断面構成を示す。なお、手作業によりエポキシ樹脂の含浸を行ったため、CFRP の繊維体積含有率は 14.8 % であった。表-1 には実験に用いた各材料の主な諸元を示す。H-SM400 は H 型鋼、F-SM400 は添接板の材料である。

図-3 には、PS 導入による補強効果を模式的に示す。 σ_f は被補強材の導入応力を示し、 σ_s は補強材の導入応力を

示している。(1)が PS 導入の無い場合であり、(2)が PS を導入する場合である。すなわち、PS を導入することによって b_1 の分だけ被補強材の弾性域を広げることができるため、補強材が被補強材に比べて高強度である場合に、より PS の導入効果が顕著に顕れる。

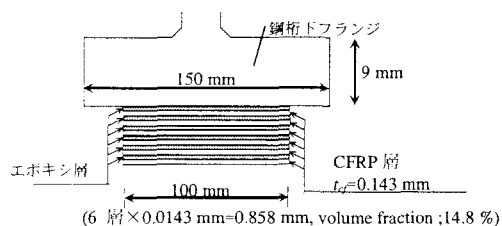


図-2 CFRP の断面構成

表-1 使用材料の機械的性質

材料	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
H-SM400	2.01×10^5	275.6	459.3
F-SM400	2.04×10^5	287.3	423.9
CF sheets	6.88×10^5	-	2,180

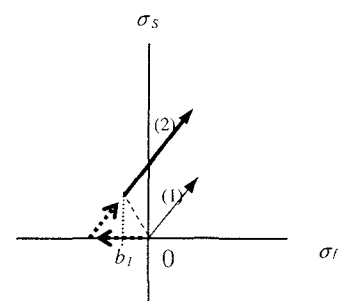


図-3 PS 導入による補強効果

PS は次のような手順で導入した。まず、鋼桁の両端から約 400 mm の位置に PS 導入治具を設置し、両治具間を鋼棒で締め付けることにより下フランジに所定の圧縮応力を導入する（図-4 (a)）。つぎに、炭素繊維シートを 2 層ずつ 3 回に分けてエポキシ樹脂を含浸させて、PS が導入された下フランジ下面に貼付する（図-4 (b)）。エポキシ樹脂の硬化後、PS 導入治具を撤去する（図-4 (c)）。これにより鋼 I 桁下フランジには圧縮応力が、CFRP には引張応力が導入される。

表-2 には、PS 導入治具を撤去する前・後における下フランジ下面、および CFRP 上のひずみの変化を示す。同表によると、下フランジには鋼材の降伏ひずみ ε_{ys} の約 8 % に相当する圧縮ひずみが、CFRP には炭素繊維の破断ひずみ ε_f の約 25 % の引張ひずみが導入されていることが確認できる。

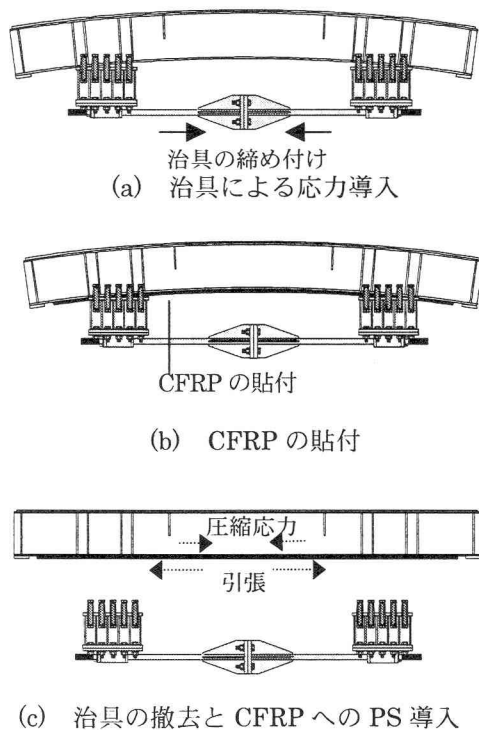


図-4 PS 導入手順

表-2 ひずみ量の変化

	下フランジ	CFRP
治具撤去前	-613×10^{-6} ($=0.45 \varepsilon_{ys}$)	0
治具撤去後	-92×10^{-6} ($=0.08 \varepsilon_{ys}$) (Pre-stress)	552×10^{-6} ($=0.25 \varepsilon_f$) (Pre-tension)

2.2 載荷方法

写真-1 に示すように、1,000 kN 万能試験機を用い、実

験供試体の中央部に 4 点曲げ載荷により曲げモーメントを載荷した。載荷点間距離は 1,000 mm とし、鋼供試体は鋼材が十分に降伏したことが確認できるまで、CFRP を貼付した補強供試体は、CFRP が破断に至るまで載荷した。

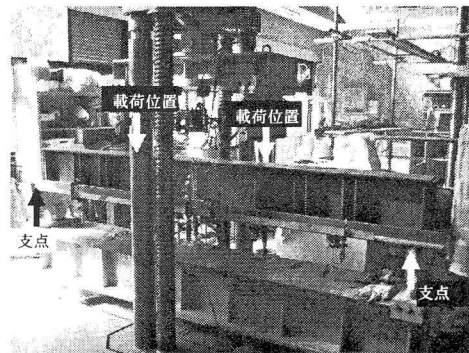


写真-1 実験風景

2.3 実験結果

図-5 には、鉛直荷重と桁中央の鉛直方向の変位との関係を示す。CFRP を貼付補強すると、降伏荷重は約 12 %、PS を導入すると、CFRP を単純貼付する場合に比べ 10 % の改善がみられる。したがって、今回の実験では PS 導入した CFRP 補強により、無補強鋼に比べて約 22 % 高い荷重まで鋼材を弾性挙動させることができた。

なお、降伏荷重は下フランジ下面の中央に貼付したひずみゲージの値が、表-1 から求まる鋼材の降伏ひずみに達したときの荷重であり、実験的に算定した値である。また、CFRP を貼付した単純補強および PS 補強ともに、載荷開始から CFRP が破断に至るまで、CFRP と鋼との間に剥離やズレの発生は認められず、CFRP が破断に至り載荷を終了した。降伏後、CFRP を単純貼付した場合の荷重変位曲線が、PS を導入して補強した場合の上方に位置している。この主な原因には、桁の面外方向の変形や圧縮フランジの変形による影響と考えられる。

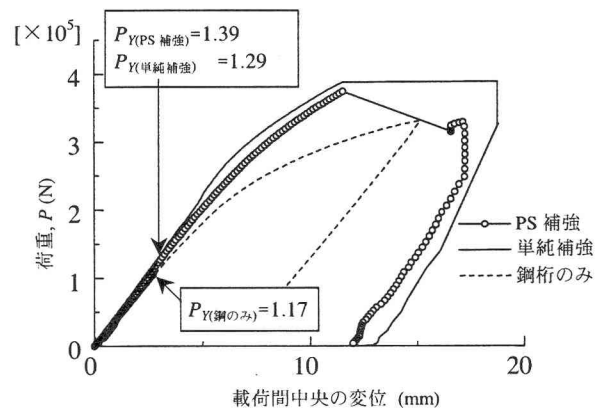


図-5 載荷実験結果

また、表-2 に示したとおり、PS を導入しない場合に比較して、PS を導入すると、10 % 程度弾性域を拡げることが可能である。すなわち、鋼板の場合と同様に炭素繊維

シートへの PS 導入が可能であり、PS の導入量に応じた鋼材の弾性域の拡大が可能であることが確認できる。

図-6 には、載荷荷重と CFRP 上に貼付したひずみゲージによる計測ひずみとの関係を示す。同図によると、下フランジに貼付した CFRP の破断ひずみは、PS 導入の有無に係わらず約 $3,000\mu$ であり、表-1 に示した CFRP の 1 軸引張試験で得られた破断ひずみの値とほぼ等しいことが確認できる。

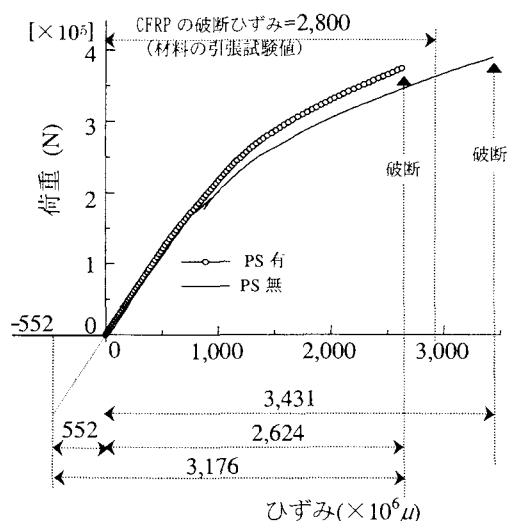


図-6 実験中の CFRP ひずみ

3. 解析モデルおよび、その検証

3.1 実験供試体および PS のモデル化

前述の曲げ載荷実験では、載荷開始から CFRP が破断に至るまで、CFRP と鋼板との間に剥離やズレが発生しなかった。そこで、鋼板と CFRP との界面で剥離が発生しない条件で、CFRP と鋼板とは完全に一体化されていると仮定し、図-7 に示すようにエポキシ樹脂は剛なバネ（バネ定数が無限大）要素でモデル化した。前述の曲げ載荷実験では 6 層の炭素繊維シートを貼付したが、図-8 に示すように 1 層の等価断面に置き換えて CFRP をモデル化した。上フランジに溶接された添接板は、上フランジと併せて等価断面としてモデル化した。H 型鋼および CFRP は、ともに三角形板要素を用いてモデル化した。このとき、鋼板と CFRP とで別々の節点を設けることに

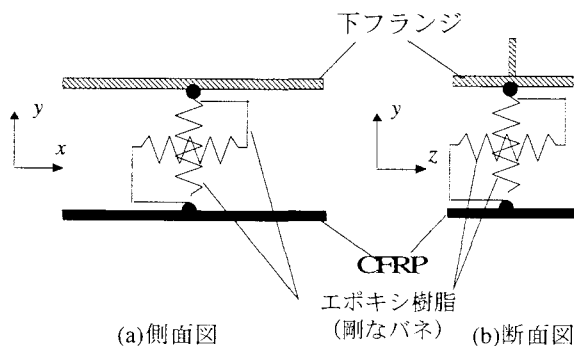


図-7 エポキシ樹脂モデル

よって、前章の CFRP の貼付状態を参考にして、鋼板と CFRP のそれぞれ板厚中心間距離を再現している。ここで、CFRP は直交異方性が顕著に顕れ、CFRP の破断も考慮できないことから、上記のモデル化は簡易なモデル化である。なお、解析には弾塑性有限変位解析プログラム USSP (*Ultimate Strength of Steel Plated Structure*)⁶⁾を用いた。

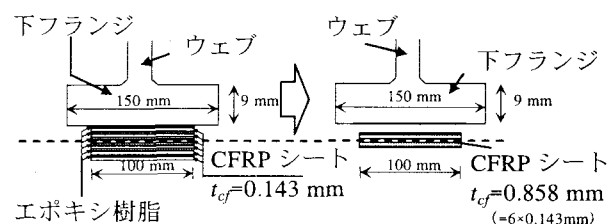


図-8 炭素繊維シート層のモデル化

解析モデルは、図-9 に示すように曲げモーメントが一定となる載荷点間の半分をモデル化したハーフモデルとし、端断面のせん断中心の位置に強制的に曲げ変位を与えることで曲げモーメントを載荷した。解析モデルの端部断面においては中央断面、および載荷断面を共に剛体要素で固定した。すなわち、載荷面では z 軸方向変位、 y 軸方向変位および、 x 軸周りの回転を拘束し、中央面では x 軸方向変位、 y 軸周りの回転および、 z 軸周りの回転を拘束し、せん断中心の位置で回転を許容した。また、すべての三角形板要素について面内の回転を拘束している。

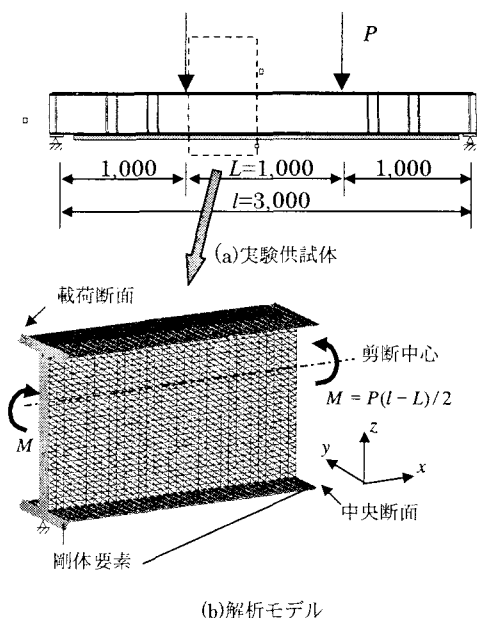


図-9 FEM 解析モデルの全体図（寸法単位：mm）

PS を導入した CFRP を貼付する場合の解析は、導入する PS に相当する荷重を CFRP に与えて CFRP に引張応力、

下フランジに圧縮応力が導入された状態を再現し、引き続き曲げモーメントを漸増させた。なお、各材料の材料定数には、表-1 に示した値を用いている。

3.2 解析結果および考察

図-10 および図-11 には、それぞれ CFRP を貼付した鋼桁と、PS 導入した CFRP を貼付した鋼桁とに荷重を行った場合の解析結果と実験結果とを比較をして示す。ここに、降伏曲げモーメント M_y は次式で定義し、その時の曲率を ϕ_y とした。

$$M_y = \sigma_y \times \frac{I}{z} \quad (1)$$

表-3 初期曲げ剛性

	タイプ	初期曲げ剛性 EI (N/mm ²)
実験値	PS 無し	2.06×10^{13}
	PS 有り	2.11×10^{13}
理論値	PS 無し	2.11×10^{13}
	PS 有り	2.11×10^{13}
解析値	PS 無し	2.02×10^{13}
	PS 有り	2.02×10^{13}

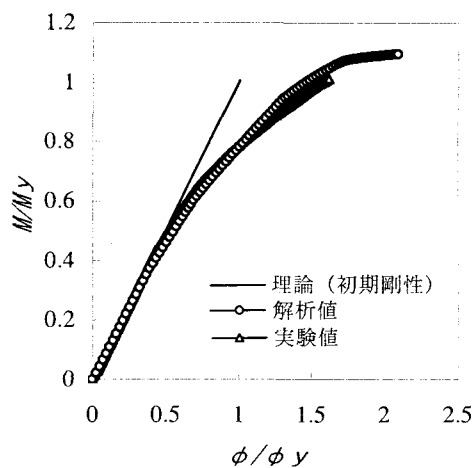


図-10 実験結果と解析結果（単純補強）

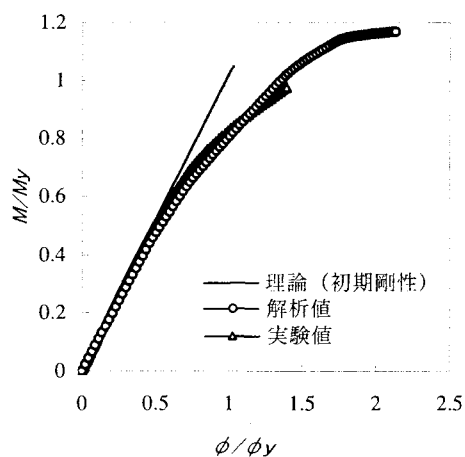


図-11 実験結果と解析結果（PS 補強）

ここに、 M_y ：降伏曲げモーメント、 σ_y ：鋼材の降伏応力、 I ：断面二次モーメント、 z ：荷重位置から下フランジ下面までの距離。

表-3 には初期曲げ剛性に関する比較をまとめた。図-10、図-11、および表-3 より、理論値と実験値および解析値は良好に一致していることが確認できる。したがって、CFRP と鋼材との間に剥離やズレが発生しない場合には、本研究で採用したモデル化により、PS を導入する場合、しない場合のいずれの場合も、荷重開始から CFRP が破断に至るまでの挙動を再現できる。

4. CFRP 端部における剥離問題

今回の荷重実験では見られなかったが、とくに炭素繊維シートにプレストレスを導入して貼付する場合には、CFRP と鋼材との異材界面剥離の発生が懸念される。CFRP と鋼材の異種材料間の界面で剥離⁷⁾が発生すると、期待する補強効果が得られない。ここで、界面の剥離には 3 種類のモードが存在する（図-12 参照）。すなわち、モード I：面外方向の剥離、モード II：面内のずれによる剥離、モード III：面内の回転による剥離であり、剥離に必要な破壊エネルギーをエネルギー解放率と呼びそれぞれ G_I 、 G_{II} 、 G_{III} としている。

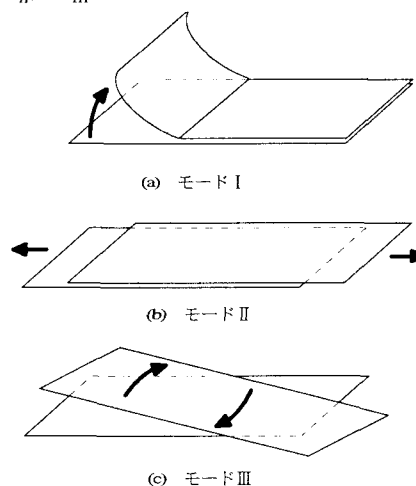


図-12 剥離モード図

このうちモード III は本研究のようなケースにおいては影響が少ないため、モード I および II について $G_{total} = G_I + G_{II}$ として剥離問題を考察する。CFRP を鋼材に貼付した場合、エネルギー解放率 G_{total} は貼付端部において最大となり、端部から剥離が進展する可能性が最も高い。CFRP の面外方向の剥離をなんらかの形で押さえることで、モード I に対応するエネルギー解放率 G_I の値を改善することを目的とする。そこで、CFRP の面外方向の剥離を押さえるために剥離制御板を採用し、この設置効果を実験的に検証する。

4.1 実験の概要

実験は、図-13に示す小型実験装置を製作し実施した。図-14には、炭素繊維シートにより補強されることを想定した供試体（以下、貼付部という）を示す。炭素繊維シートは両端共に固定治具に接着・巻き付け固定され、引張棒のナットを締め付けることにより、炭素繊維シートに引張力を導入することが可能である。PS量は、実験に先立ち実施したキャリブレーション結果に基づいて、引張棒に貼付したひずみゲージにより管理する。炭素繊維シートの幅は30 mmとし、弾性係数が $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 程度の高強度炭素繊維シート一枚を用いた。これは、高弾性炭素繊維シートの破断ひずみは $3,000 \mu$ 程度であるが、それ以上の引張りひずみを炭素繊維シートに導入する場合を検討するためである。表-4には引張棒および炭素繊維シートの主な機械的性質をまとめた。なお、押さえ板は、板厚0.5 mmの隙間ゲージと共に設置するため、CFRPの繊維体積含有率は一定値（33 %）をとる。

実験の実施手順は以下のとおりである。

- ① 炭素繊維シートを治具に固定する。
- ② ナットを締め付け炭素繊維シートに所定のPSを導入する。
- ③ 貼付部上でエポキシ樹脂を炭素繊維シートに含浸させる。
- ④ 剥離制御板および押さえ板を設置する。
- ⑤ エポキシ樹脂の硬化後に引張力を除荷する。このときに剥離が発生したかどうかを確認する。
- ⑥ 剥離制御板を取り除き、剥離発生の有無を確認する。

ここで、引張力は4～10 kNの範囲で変化させ、貼付部表面はグラインダーで仕上げた粗い表面（粗面）と、グラインダー仕上げしない滑らかな表面（平滑面）の2種類の接着面を用意した。

表-4 使用材料の機械的性質

材料	性質	弾性係数 (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	厚さ (mm)
鋼棒	SS400	2.1×10^5	235	—
CF-sheet	CFRP	2.3×10^5	—	0.167

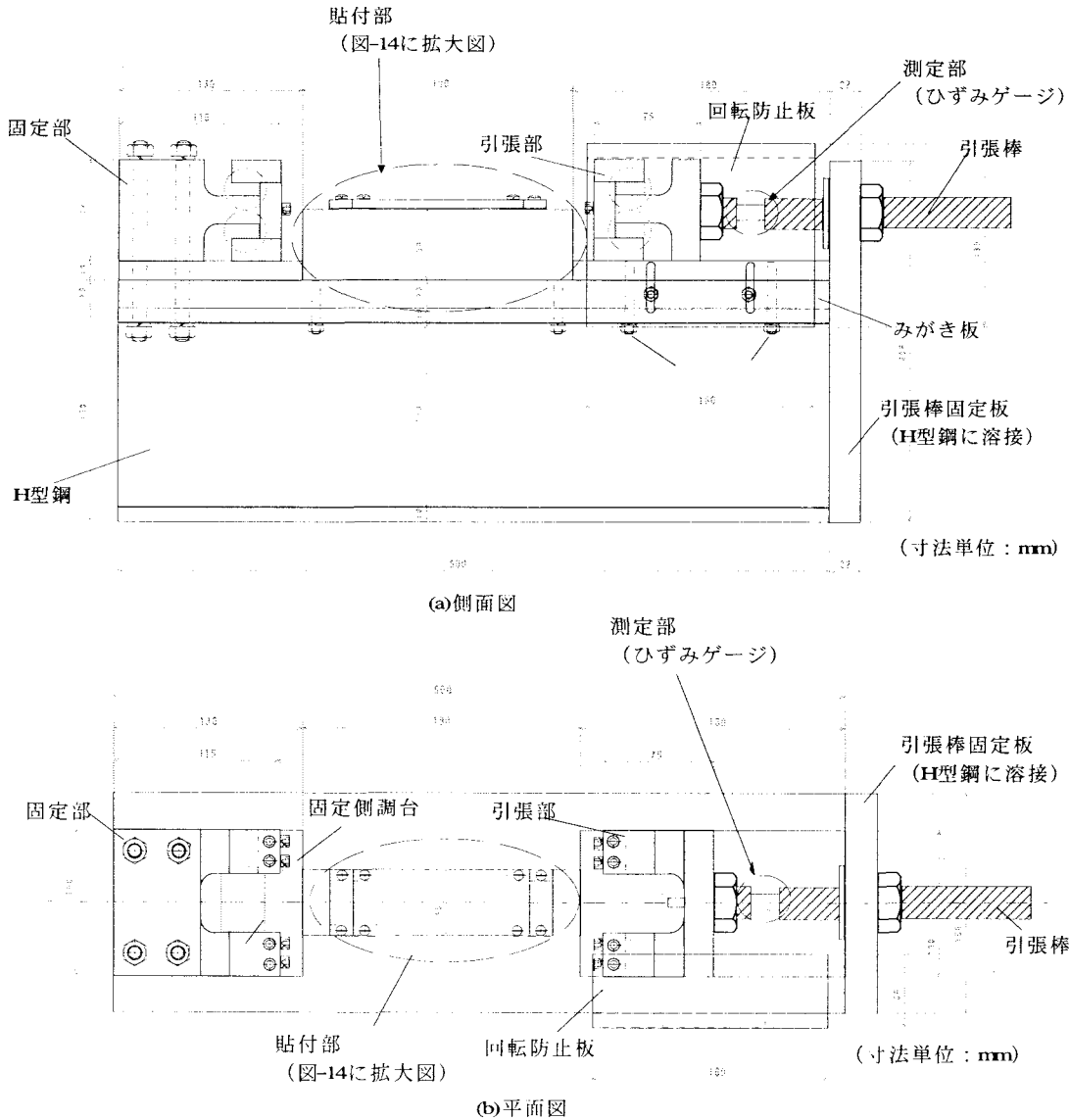


図-13 小型実験装置

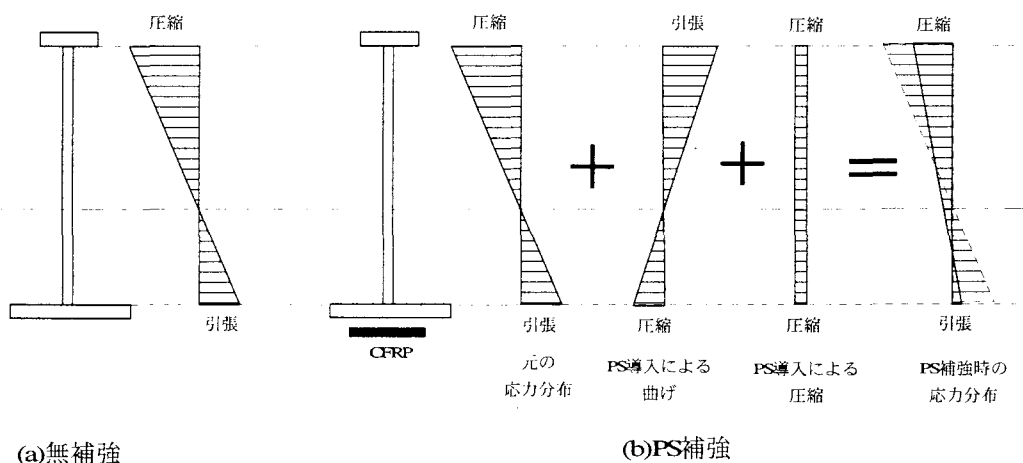


図-16 PS 補強による応力分布変化

このとき、架設時の荷重を腹板の板厚を増すことによって受け持つのではなく、図-16 に示すように、PS を導入し鋼断面応力分布を変化させ、座屈に対して有利となるようにする。架設時に限り耐荷力、および座屈耐力を向上させることができれば、現状よりも腹板の板厚を減らした経済的なプレートガーダーの設計が可能であると考えられる。

そこで、以下では、鋼断面に対して PS 導入による CFRP 補強を行う場合の腹板の板厚低減の可能性について、3 章で述べたモデル化と同様に、鋼板と CFRP との界面で剥離が発生しない条件で、解析的に検討している。

5.1 解析条件

解析には、図-17 に示す単純なプレートガーダー（SS400、降伏点 $\sigma_y = 235 \text{ N/mm}^2$ 、ヤング係数 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ）を用いた。アスペクト比は $\alpha = a/b = 1.5$ に設定し、フランジの板厚は上下ともに 10mm に設定している。

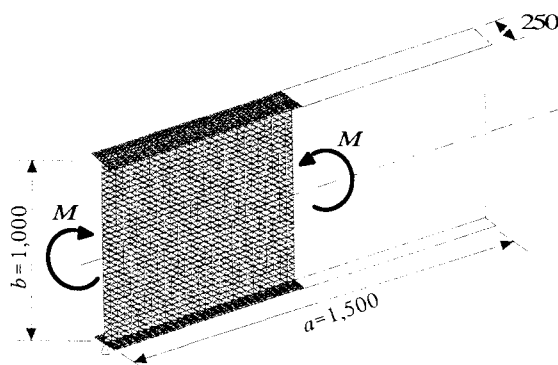


図-17 解析モデル（寸法単位 mm）

ここで、幅厚比に関する規定¹⁾に従うと水平補剛材のない場合の腹板の最小板厚は 6.58 mm であり、通常の設計では、腹板の板厚は 9 mm とされる。そこで、補強を行わないケースと PS 補強したケースについて、それぞれ、腹板の板厚を 6～10 mm の間で 1 mm ごとに変化さ

せて解析を行った。なお、PS を導入する補強材には CFRP を採用し、炭素繊維層 1 mm を下フランジ全面に貼付する。いずれのモデルにおいても、炭素繊維シートには高強度の炭素繊維シートを使用し、引張強度の 50 % 程度に相当する PS を導入した。

5.2 解析結果および考察

図-18 には、道路橋示方書に基づいて設計を行った腹板の板厚が 9 mm の場合の作用曲げモーメントー曲率関係を示す。同図において、作用曲げモーメントおよび曲率は、それぞれ降伏曲げモーメントおよび降伏曲率で無次元化している。なお、降伏点を安全率 1.7 で割った $M/M_y = 0.588$ 、および、施工時荷重を考慮した許容応力度の割り増しを考慮して、それを 1.25 倍した $M/M_y = 0.735$ が、十分な耐荷力が確保されていることの一つの目安となる。

図-18 によると、腹板の板厚が 9 mm の場合には十分な耐荷力を有していることがわかる。したがって、十分な安全率 ($M/M_y = 0.735$) を確保できるのであれば、PS を導入した CFRP を貼付することにより、腹板の板厚を薄くすることができる。

図-19 には、腹板の板厚が 6～8 mm の場合に、PS 補強した鋼桁と無補強の鋼桁との挙動を解析的に求め、曲げモーメントー曲率関係を示す。また、図-20、および表-5 には M/M_y の最大値をまとめた。いずれの場合も PS を導入することで、補強前の鋼桁に比べて桁の弾性域が実用的に評価できる程度に拡大できることがわかる。とりわけ、図-19(a)および表-5 に示すように、通常的设计により決定される腹板の板厚よりも 1 mm 薄い板厚を採用した 8 mm のケースに PS を導入すると、腹板の板厚が 9 mm のケースよりも高い耐荷力を示している。また、腹板の板厚が 7 mm のケースに PS を導入した場合でも、無補強で腹板の板厚が 9 mm のケースと同等の耐荷力を示している。

図-20 によると、腹板の板厚が、座屈防止の観点から

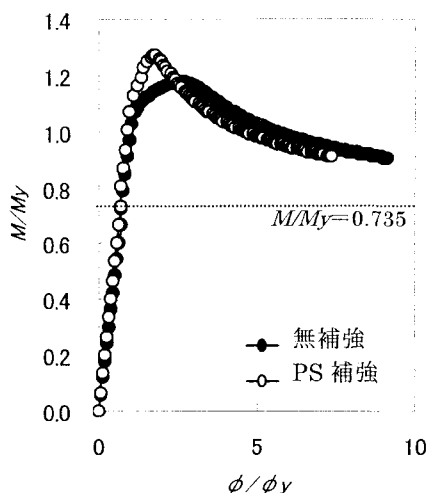


図-18 曲げモーメント-曲率関係
(腹板の板厚 9 mm)

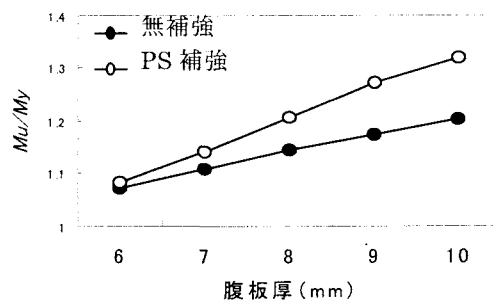


図-20 最大荷重の比較

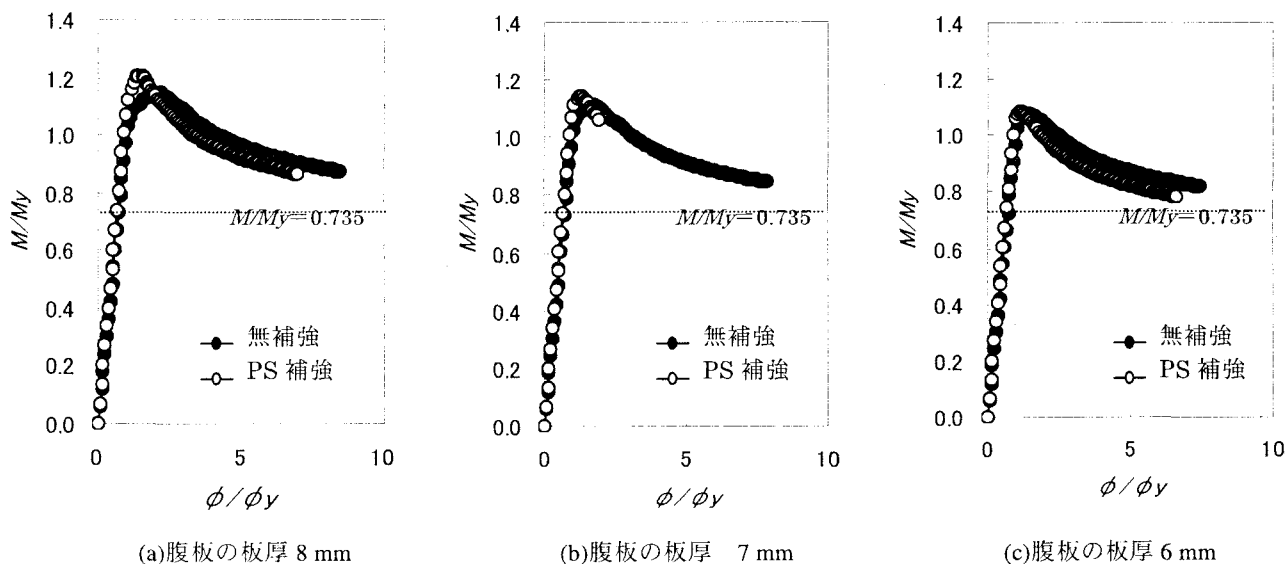


図-19 曲げモーメント-曲率関係

決定される腹板の最小板厚 9 mm よりも薄い場合には、PS を導入した CFRP を貼付する補強効果はほとんど得られないことがわかる。これは、鋼桁の耐力が板パネルの座屈によって決定づけられているのではなく、全塑性に至ることにより耐力が決定されているためであると考えられる。

以上より、限られた解析結果ではあるが、架設時に PS を導入した CFRP を貼付することで、腹板の板厚を、これまでの設計よりも 1~2 mm 程度、薄くすることが期待でき、より合理的なプレートガーダーの設計を行える可能性を確認した。ただし、桁の変形状態と剥離の発生の有無については別途実験を実施する等して確認することが必要である。

表-5 M_u/M_y の比較

腹板の板厚 (mm)	無補強	PS 補強
6	1.07	1.08
7	1.11	1.14
8	1.14	1.21
9	1.18	1.27
10	1.20	1.32

6. まとめ

本研究では、CFRP および PS を導入した CFRP による補強の補強効果、実験・解析の両面から検討した。PS を導入した場合に問題となる鋼材と CFRP との界面剥離の発生を防止できる剥離制御板を提案し、その設置効果を

実験的に検討した。また、PSを導入してCFRPを貼付する方法を新設するプレートガーダーへ適用し、腹板の板厚低減の可能性について検討した。

本研究から得られた主な結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 載荷実験では、使用した鋼 I 桁供試体に CFRP を貼付すると、降伏荷重を 10 %, PS を導入すると 19 % 向上することが可能であった。CFRP を接着し鋼 I 桁を補強することで、鋼断面の弾性域を有効に拡大できることがわかった。
- 2) 鋼板と CFRP との間でズレや剥離が発生しない条件で、簡易的な解析モデルを提案し、CFRP により単純補強された鋼桁、および PS を導入した CFRP によって補強した鋼桁の挙動を解析的に再現することができた。
- 3) CFRP に導入する PS 量が 8,000 μ 程度であれば、剥離制御板を CFRP 端部に設置することにより、CFRP 端部における剥離の発生を防止することが可能であることを示した。
- 4) PS を導入して CFRP を貼付する方法を、架設時のプレートガーダーへ適用すると、従来の設計で決定される板厚を 1~2 mm 低減できる可能性を見いだした。

高弾性の炭素繊維板や炭素繊維ケーブルを用いることにより、今回得られた結果よりも経済的なプレートガーダーの設計に繋がると考えられるので、今後引き続き検討したいと考えている。

謝辞

CFRP 端部での剥離に関して、京都大学大学院工学研究科機械工学専攻の北條正樹教授、同田中基嗣助手には適切なアドバイスを頂戴するとともに数値計算にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋編，2002.
- 2) 玉置正徳，坂野昌弘，並木宏徳，田中道七：鋼板を用いたポストテンション補強工法の補強効果，土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部 (A)，55 巻，pp.610-611，2000.
- 3) 杉原尚史，並木宏徳，松村政秀，北田俊行：炭素繊維シートを貼付する既設鋼橋桁の補強法に関する基礎的な実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部(A)，58 巻，pp.1071-1072，2003.
- 4) 板垣一也，渡邊憲市，鈴木博之：炭素繊維強化樹脂板（カーボン板）による鋼橋補強の事例，第 8 回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集，2002.
- 5) Hisashi Sugihara, Hironori Namiki, Masahide Matsumura, and Toshiyuki Kitada: Strengthening technique for superannuated steel bridge girders installing pre-stressed CFRP sheets by externally attached device, 3 International Conference on Current and Future Trends in Bridge Design, Construction and Maintenance, Shanghai, China, ICE, pp.455-463, 29 September-1 October, 2003.
- 6) USSP 研究会：USSP ユーザーズ・マニュアル，入出力編，Ver6.0，日本構研情報（株），2002.
- 7) 吉城良治：界面の力学，培風館，1993.
- 8) 小笹弘晃，北條正樹，田中基嗣，松村政秀，北田俊行，並木宏徳：鋼橋の CFRP Pre-Stress 補強における接着剥離破壊の有限要素法による検討，第 33 回 FRP シンポジウム講演論文集，日本材料学会，pp.348-350，2004.

(2004 年 9 月 17 日受付)