



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



FRPシート接着により曲げ補強したH形鋼梁の耐荷性状

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学地域共同研究開発センター 公開日: 2016-06-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 三上, 浩, 栗橋, 祐介, 小室, 雅人, 岸, 徳光 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008957

FRPシート接着により曲げ補強したH形鋼梁の耐荷性状

著者	三上 浩, 栗橋 祐介, 小室 雅人, 岸 徳光
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	26
ページ	25-32
発行年	2016-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008957

FRP シート接着により曲げ補強した H 形鋼梁の耐荷性状

三上 浩*1, 栗橋 祐介*2, 小室 雅人*2, 岸 徳光*3

1 はじめに

近年の気象変動の極端化は全世界的な傾向となっており、これにより様々な災害が引き起こされている。特に、我が国では集中豪雨や台風に伴う落石、土石流および竜巻飛来物等による甚大な被害が多発している。また、その被害規模と発生件数は増加の一途を辿っている。このような環境下において、我が国では安心して安全な社会生活を維持してゆくための方策として、社会基盤の強靱化を推進している。これにより、様々な構造物の耐衝撃性評価および耐衝撃性向上に対するニーズが高まってきている。

衝撃的外力の作用を想定すべき鋼構造物としては、落石防護柵や落石防護網に用いられる支柱、鋼製ロックシェッドの各部材は勿論のこと、鋼骨組製の建築物などが挙げられる。これまで、著者らは鋼構造物の耐衝撃性や耐衝撃挙動の解明を目的に、H 形鋼梁の重錘落下衝撃実験や三次元弾塑性衝撃応答解析を行っている¹⁾。これらの研究の主な検討項目は、部材の耐衝撃挙動やエネルギー吸収特性であることから、部材の塑性変形や局所変形を含めた検討を行っている。一方、既設鋼構造物の耐衝撃性向上法に関する検討はほとんど行われていない。

既往の研究では、鋼橋の補修補強方法として連続繊維シート (以後、FRP シート) 接着工法に着目し、その実用化に向けた検討を行っている^{2),3)}。本工法の利点は、連続繊維シートに樹脂を含浸硬化させて FRP 化し鋼材と一体化する工法であるため、従来の鋼板当て板工法のように溶接や削孔などに伴う母材の損傷を回避できる点にある。また、錆による腐食減肉による補強効果の減少なども生じない。既往の

研究では鋼橋の維持管理を目的としているため、鋼部材が塑性化し大変形する場合における FRP シートの付着性能等についてはほとんど検討されていない。FRP シート接着工法を鋼構造物の耐衝撃性向上法の 1 つとして実用化するためには、大変形時におけるシートの付着性状についても検討する必要があるものと考えられる。

このような背景より、本研究では、鋼構造物の耐衝撃性向上法として FRP シート接着工法に着目し、その補強効果を検討するための基礎資料の収集を目的に、FRP シートで曲げ補強した H 形鋼梁の 4 点曲げ静載荷実験を行った。補強方法としては、鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐衝撃性向上法として検討が推進され、一部で実用化されているアラミド繊維製 FRP シート (以後、AFRP シート)^{4)~7)}を用いることを基本として、繊維目付量の異なる場合や、鋼板もしくは低弾性の FRP シートを併用する場合について検討した。

2 実験概要

2.1 試験体概要

表 1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、無補強の他、補強方法を 4 種類に変化させた全 5 体である。N 試験体は無補強であり、A830 および A1245 試験体はそれぞれ目付量 830, 1245 g/m² の AFRP シートで曲げ補強した試験体である。また、A830-P および A830-S 試験体は、目付量 830 g/m² の AFRP シートと鋼梁底面の間にそれぞれ、ポリエチレンテレフタレート (PET) 製 FRP シート (以後、PFRP シート) および厚さ 1.5 mm の薄鋼板を用いた試験体である。

表 1 に示している補強材の軸剛性は、後述の表 2 に示す各材料の力学特性を用いて弾性係数 E × 断面積 A として評価している。また、軸剛性比は、補強量の指標として(1)式により求めた。

*1: 三井住友建設 (株)

*2: 室蘭工業大学 暮らし環境系領域

*3: 釧路工業高等専門学校

$$\text{軸剛性比(\%)} = \frac{\text{補強材の軸剛性}}{\text{H形鋼梁の軸剛性}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、A830/1245 試験体は、フランジ部の腐食減肉に伴い低下した耐荷性能の回復や大変形時における耐衝撃性向上効果を想定して繊維目付量を設定した。そのため、補強材の軸剛性比は 1.5~2.0% となっている。

また、A830-P 試験体は、AFRP シートと梁の間層に弾性係数の低い PFRP シートをを用いること

による付着せん断応力の低減効果や、それに伴う付着性能の改善効果を検討するための試験体である。また、A830-S 試験体は、鋼板接着により H 形鋼梁の曲げ剛性の向上を図るとともに、AFRP シート接着により鋼板の腐食を抑制することを想定した試験体である。そのため、鋼板の接着範囲は、シートの接着範囲よりも全周において 15 mm ずつ内側の範囲としている。また、補強材の軸剛性比は最も大きく 7% 程度となっている。

図 1 には、H 形鋼梁の形状寸法、補強概要およびひずみゲージの貼り付け位置を示している。H 形鋼

表 1 試験体の一覧

試験体名	補強材	補強材の軸剛性(MN)	軸剛性比(%)
N	-	-	-
A830	AFRP シート (830g/m ²)	101.2	1.40
A1245	AFRP シート (415g/m ²) + AFRP シート (830g/m ²)	151.8	2.10
A830-P	PFRP シート (1250g/m ²) + AFRP シート (830g/m ²)	114.8	1.58
A830-S	薄鋼板 (1.5mm) + AFRP シート (830g/m ²)	502.9	6.94

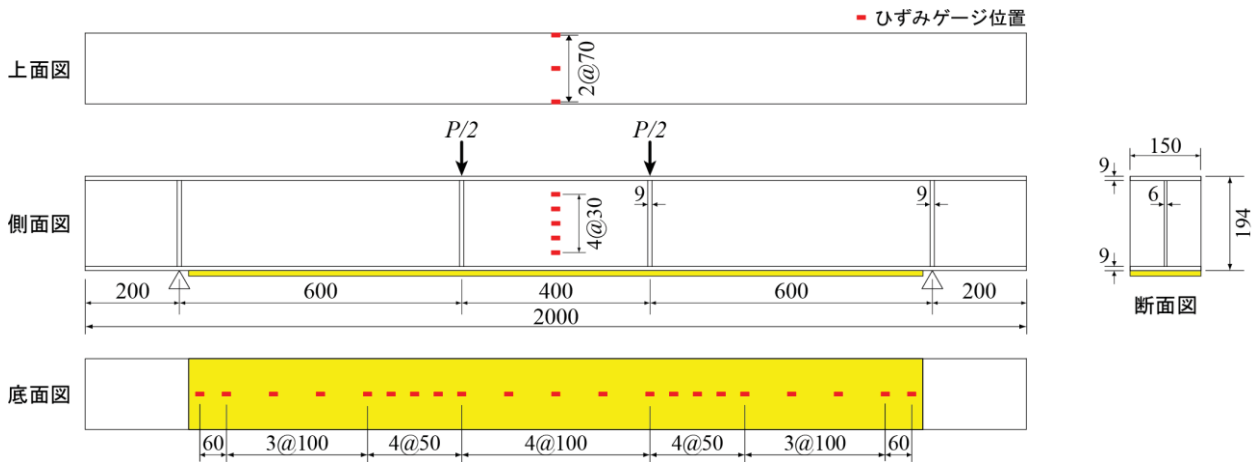


図 1 試験体の形状寸法

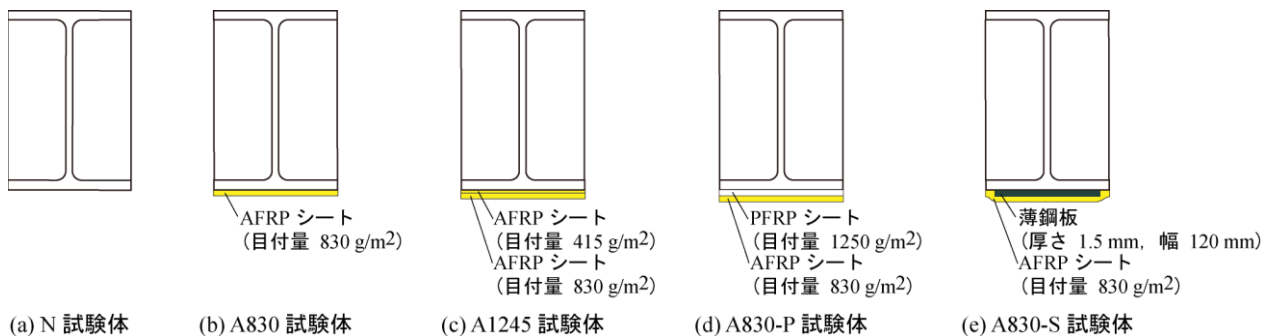


図 2 各試験体の断面図

表 2 H 形鋼梁の実寸法および力学的特性値

部位	厚さ(mm)	弾性係数(GPa)	降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)
フランジ	8.5	206	310	436
ウェブ	5.5		380	469

表 3 各補強材の力学的特性値

材料	目付量(g/m ²)	厚さ(mm)	弾性係数(GPa)	降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)	破断ひずみ(μ)
AFRP	415	0.286	118	-	2060	17,500
	830	0.572				
PFRP	1250	0.906	10	-	740	70,000
薄鋼板	-	1.5	206	310	436	-

梁の断面寸法は、幅 × 高さが 150 mm × 194 mm で、フランジ厚およびウェブ厚はそれぞれ 9 および 6 mm である。また、全長は 2 m、支点間の長さは 1.6 m とした。

支点部および載荷点部にはウェブおよびフランジの座屈防止のために厚さ 9 mm の補剛板を溶接した。H 形鋼梁の底面には、FRP シートを接着している。なお、本実験では、既設構造物の補修補強を対象としているため、接着範囲は梁中央部から両支点の 5 cm 程度内側までの範囲としている。

図 2 には、各補強試験体の補強概要に関する断面図を示している。A830 試験体には、目付量 830 g/m² の AFRP シートを 1 層用いている。A1245 試験体の場合には、目付量 415 g/m² の AFRP シートの上から事前含浸した目付量 800 g/m² の AFRP シートを積層して接着している。また、A830-P および

A830-S 試験体は、それぞれ PFRP シートおよび薄鋼板上に事前含浸した目付量 830 g/m² の AFRP シートを積層する形で接着した。なお、FRP シートによる補強を施す試験体には、あらかじめ補強底面の表面処理としてブラスト処理およびプライマー塗布を行っている。

表 2、表 3 および表 4 には、それぞれ、H 形鋼梁、各補強材および含浸樹脂の力学的特性値の一覧を示している。なお、鋼材については、5 号試験片による引張試験結果、AFRP および PFRP シート、含浸接着樹脂については公称値を示している。

2.2 実験方法と測定項目

写真 1 には、実験状況を示している。実験は 4 点静的曲げ載荷により行った。中央部の載荷点間隔は 400 mm とした。荷重は容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて作用させた。

測定項目は、載荷荷重、各点の変位およびひずみである。ひずみはゲージ長 10 mm の箔ひずみゲージを用いて測定した。ひずみの測定位置は、図 1 に示している通りである。実験終了後には、試験体の変形状況やシートの剥離状況などを観察するとともに写真撮影を行った。また、「連続繊維シートとコンクリートの接着試験方法(案)」に準拠して補強材と鋼梁の接着強度試験を実施した。

表 4 含浸樹脂の力学的特性値

圧縮強度(MPa)	曲げ強度(MPa)	引張せん断強さ(MPa)
35	40	10



写真 1 実験写真

3 実験結果

3.1 荷重－変位関係

図 3 には、各試験体の荷重－変位関係に関する実験結果を示している。ここでは、荷重 $P=200$ から 360 kN における耐荷性状に着目した拡大図も併せて示している。図より、いずれの試験体の場合においても、荷重 $P=240$ kN 程度までは変形量の増加

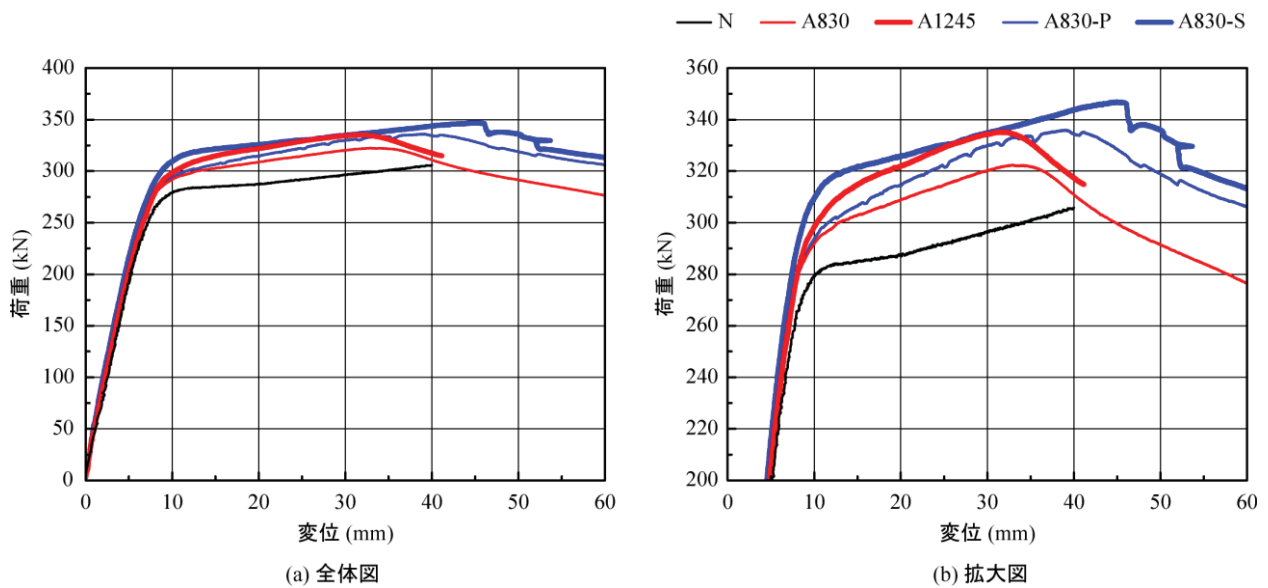


図 3 荷重-変位関係

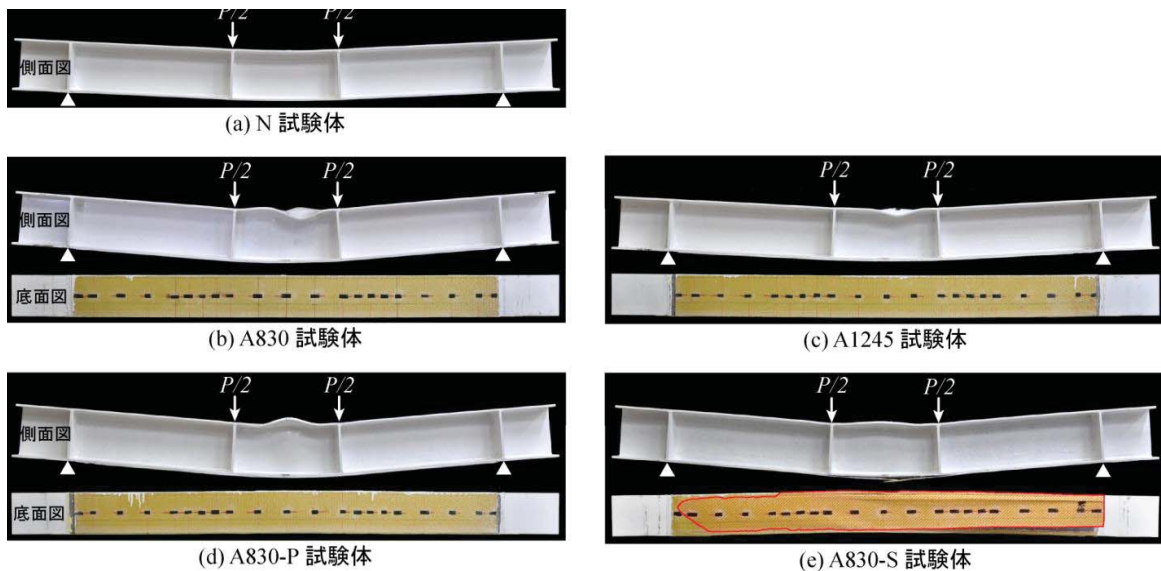


写真 2 各試験体の変形状況

に伴って、荷重がほぼ線形に増加していることが分かる。荷重の増加勾配は、補強することにより僅かに大きくなるものの、補強方法による違いはほとんどないことが分かる。

無補強の N 試験体の場合には、 $P = 260 \text{ kN}$ 程度において荷重の増加勾配が大きく低下し、変位 $\delta = 20 \text{ mm}$ 程度までは $P = 285 \text{ kN}$ 程度となっている。また、変位 $\delta = 20 \text{ mm}$ 程度以降においては、荷重の増加勾配がわずかに上昇する傾向にある。これは、鋼材のひずみ硬化によるものと考えられる。

A830 試験体の場合には、N 試験体よりも 20 kN 程度大きな荷重で増加勾配が低下するものの、その後の増加勾配は N 試験体の場合よりも大きい。こ

れは、鋼梁の下フランジ降伏後、AFRP シートの補強効果がより明確に現れたことによるものである。また、変位 $\delta = 35 \text{ mm}$ 程度で荷重が低下している。これは、後述の 写真 2 に示すように上フランジが座屈したことによるものと考えられる。

A1245 試験体の場合には、A830 試験体の場合よりもさらに降伏荷重および最大荷重が大きくなる傾向にあるものの、最大荷重時変位は小さくなっている。これは、曲げ補強量の増加により、梁の曲げ耐力が向上する一方で上フランジの負担が大きくなったことによるものである。

A830-P 試験体の場合には、 $P = 290 \text{ kN}$ までは A830 試験体とほぼ同様の性状を示しているものの、

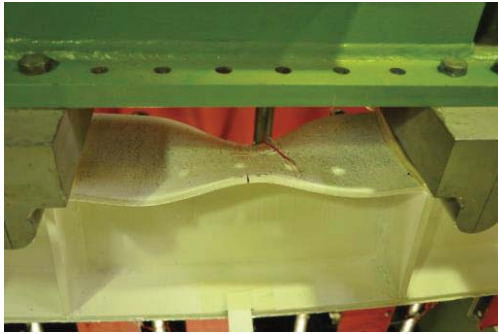


写真 3 荷重実験時における等曲げ区間の座屈状況

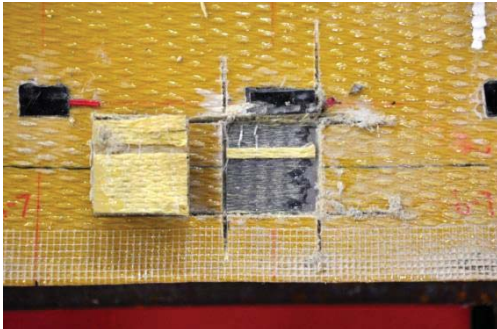


写真 4 接着強度試験状況と界面の状況の一例



写真 5 A830-S 試験体のシートの断裂・剥離状況

その後の増加勾配は A830 試験体の場合よりも大きくなっている。これは、変形量の増加に伴って PFRP シートの補強効果が発揮されていることによるものと考えられる。また、最大荷重および最大荷重時変位はともに A830 および A1245 試験体の場合よりも大きい。

A830-S 試験体は、 $P = 300 \text{ kN}$ 程度において荷重の増加勾配が急激に低下している。しかしながら、その後の増加勾配は、A830 試験体よりも小さい。これは、補強材に薄鋼板を用いているため降伏荷重が大きいものの、降伏後に AFRP シートが薄鋼板との界面で剥離し、シートの補強効果が発揮されてい

いことによるものと考えられる。なお、シートの剥離状況については後述することとする。

3.2 破壊性状および接着試験結果

写真 2 には、実験終了後における各試験体の変形状況を示している。なお、無補強の N 試験体は、他の試験体よりも小さな変位で荷重を終了しているため、スパン中央部近傍は座屈しているものの明瞭には認められない。補強試験体は、いずれの場合もスパン中央部の上フランジおよびウェブが著しく座屈していることが分かる。

実験時には、H 形鋼梁の大変形に伴う補強材の付着せん断応力の増大や剥離破壊を想定して、変位 60 mm 程度まで荷重を続けたものの、等曲げ区間の上フランジおよびウェブが座屈して、上フランジの著しい変形を伴う横倒れ座屈が発生した。そのため、実験の安全性を考慮して荷重を終了した。写真 3 には、実験時の状況を示している。

梁底面においては、A830/1245 および A830-P 試験体の場合にはシートの剥離は見られなかった。点検棒による打音検査によっても浮きなどの変状は確認されなかった。写真 4 には、A1245 試験体の接着強度試験状況および試験後における界面の状況の一例を示している。接着試験は、各試験体においてスパン中央部、端部および後述する最大付着せん断応力が発生するスパン中央部から 300 mm 程度支点側の位置で行った。

写真に示しているように、剥離はシートと母材の間で生じており、このような状況は A830-S 試験体を除いた他の試験体においても同様であった。また、接着強度は 7~8 MPa 程度であった。

A830-S 試験体の場合には、写真 5 に示すように AFRP シートが薄鋼板の縁で軸方向に断裂し、薄鋼板上の AFRP シートが剥離している。後述するように、AFRP シートは早期に剥離していることから、薄鋼板の縁の段差部近傍においてシート剥離に影響を与える応力が作用し、AFRP シートの断裂・剥離が生じたものと推察される。この点については、今後も検討してゆく必要があるものと考えている。なお、薄鋼板と鋼梁の接着は確保されており、実験終了後においても浮きや剥離は全く認められなかった。

3.3 AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状

図 4 には、荷重初期から部材降伏時近傍におけるシートのひずみ分布性状を検討するため、荷重 $P = 125, 250, 275, 300 \text{ kN}$ 時の実験結果を各試験体について示している。図より、いずれの試験体も荷重増加に伴ってひずみが増大しており、特に荷重点部に

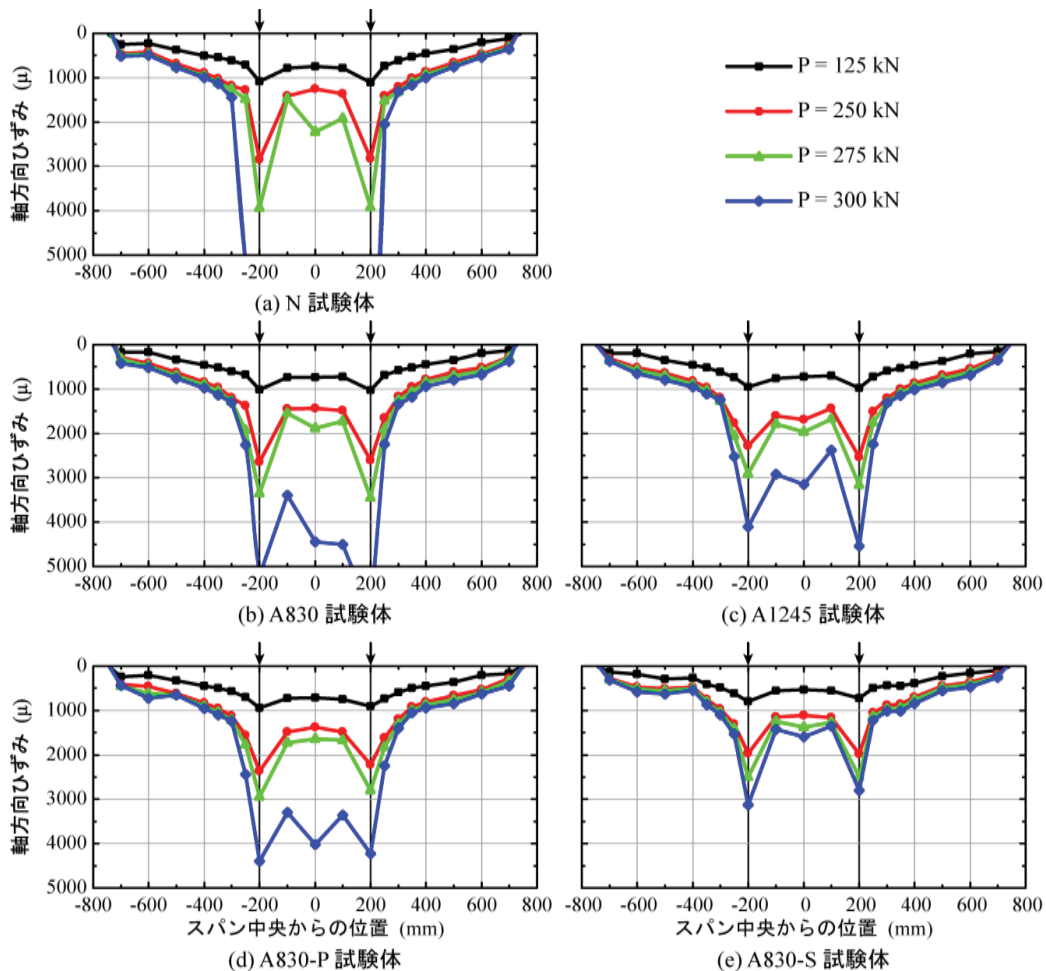


図 5 主鉄筋降伏までの AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状

において大きなひずみが発生していることが分かる。これは、載荷点部には補剛板が溶接されているため、鉛直荷重が直接的に梁下縁に伝達されることによるものと考えられる。従って、荷重が作用する補剛板周辺のシートと梁下面の接着界面には、周囲よりも大きな付着せん断応力が作用しているものと考えられる。

同一荷重時における各試験体のひずみ分布を比較すると、補強試験体は無補強の場合よりも全般的にひずみが小さいことが分かる。また、その傾向は、補強材の軸剛性 EA が大きい場合ほど顕著であることが分かる。このことから、載荷初期から部材降伏時近傍において、各シートの補強効果が発揮されており、その効果は補強材の軸剛性が大きい場合ほど大きいことが明らかになった。

図 5 には、降伏後におけるひずみ分布の推移を検討するため、変位 $\delta = 10, 20, 30, 40, 50$ および 60 mm 時の実験結果を各試験体について示している。図より、A830/1245 および A830-P 試験体の場合に

は、変位の増加に伴って、ひずみが徐々に増大する傾向にあることが分かる。特に、スパン中央部のひずみが大きくなっている。これは、等曲げ区間の上フランジが座屈したため、見かけ上の断面二次モーメントが減少し、この部分の曲率が増大したことによるものと考えられる。一方、せん断スパンにおいては、載荷点近傍においてひずみ勾配が急増していることから、シート接着界面の付着せん断応力が増大しているものと考えられる。

なお、A830-P 試験体の大ひずみの発生範囲は、A830 試験体の場合よりも幾分大きい。これは、AFRP シートと鋼梁の間に弾性係数の低い PFRP シートを配置しているため、付着に抵抗する領域が多少増加したことによるものと推察される。この点については、衝撃荷重が作用する場合を含めて、今後の検討課題としたい。

A830-S 試験体の場合には、変位 $\delta = 20$ mm 時以降から AFRP シートのひずみが均等化する傾向を示しており、 $\delta = 30$ mm 時にはひずみの均等化範囲

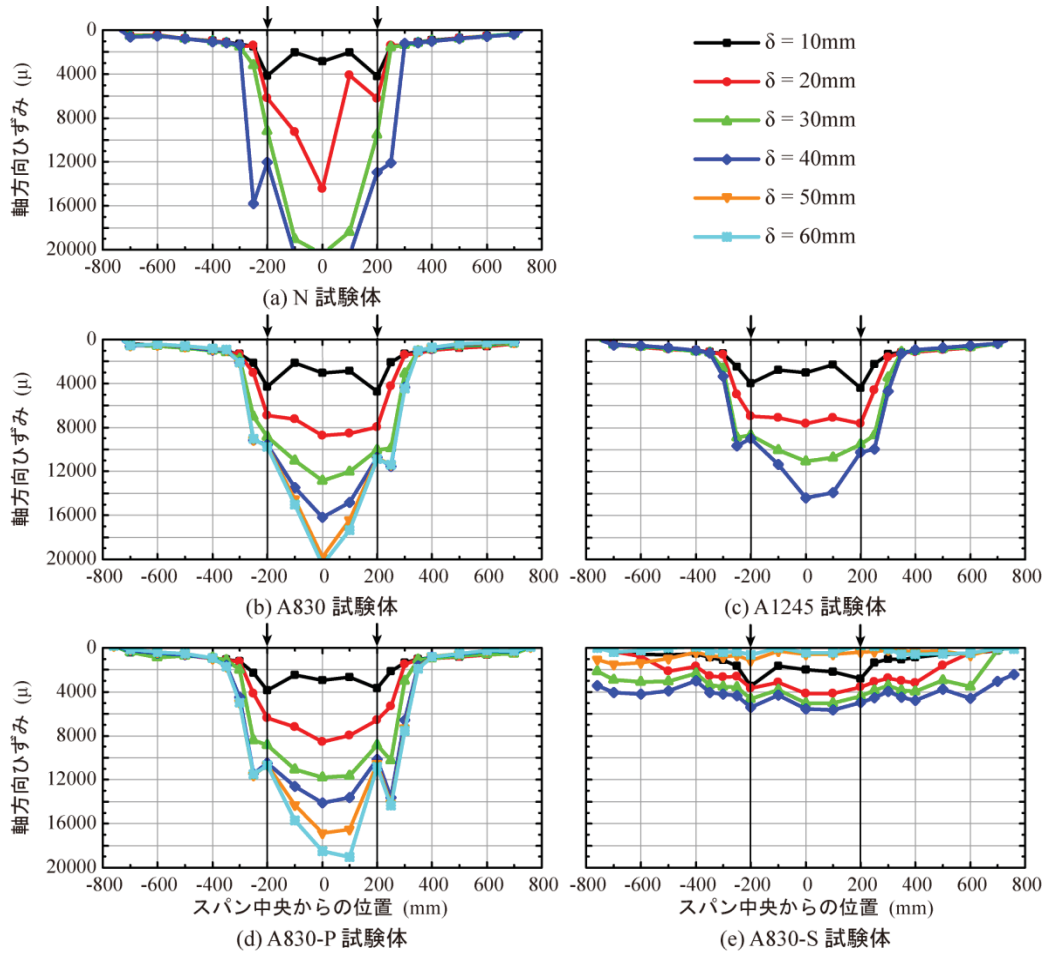


図 5 降伏以降の AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状

表 5 最大付着せん断応力

試験体名	軸剛性 (MN)	軸剛性比 (%)	最大荷重 P_{max} (kN)	最大付着せん断応力 τ_{max} (MPa)
A830	101.2	1.40	322.5	9.6
A1245	151.8	2.10	335.3	13.2
A830-P	114.8	1.58	336.0	11.3

がほぼ支点側まで到達している。これは、シートと薄鋼板との剥離が変位の増加に伴って発生・進展していることを示している。また、変位 $\delta = 60 \text{ mm}$ においては、シートが完全に剥離し、ひずみが零まで低下している。

3.4 最大付着せん断応力

表 5 には、各補強試験体の最大付着せん断応力を示している。最大付着せん断応力 τ_{max} は、FRP シートの各位置において隣接するひずみゲージ間に生ずる平均付着せん断応力の最大値として評価した。

各試験体の最大付着せん断応力 τ_{max} は下式により算出した。なお、A830-S 試験体は、AFRP シートが剥離したことより検討から除外している。

A830/1245 試験体

$$\tau_{max} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) E_{at} / l$$

A830P 試験体

$$\tau_{max} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) (E_{at} + E_{pt}) / l$$

ここに、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: その差分が最大になる隣接する実測ひずみ、 E_a : AFRP シートの弾性係数、 t_a : AFRP シートの設計厚さ、 E_p : PFRP シートの弾性係数、 t_p : PFRP シートの設計厚さ、 l : 隣接するひずみゲージ間の距離、である。

表より、最大付着せん断応力 τ_{max} は、A1245 試験体の場合が最も大きく、次いで A830-P、A830 試験体の順に大きいことが分かる。また、最大荷重は A830-P 試験体が最も大きいにもかかわらず、最大付着せん断応力は A1245 試験体よりも小さい。

これは、弾性係数の低い PFRP シートを中間層に用いることで、付着せん断応力が緩和されたことによるものと推察される。この点については、今後さらに検討を進めてゆく必要がある。

このことから、軸剛性比が 2 % 程度の補強量の場合には、H 形鋼梁が降伏し大きく変形する場合においても、シートの剥離は生じず、最大付着せん断応力は 13 MPa 程度以上であることが明らかになった。

4 まとめ

本研究では、鋼構造物の耐衝撃性向上法として FRP シート接着工法に着目し、その補強効果を検討するための基礎資料の収集を目的に、FRP シートで曲げ補強した H 形鋼梁の 4 点曲げ静載荷実験を行った。補強方法としては、AFRP シートをを用いることを基本として、繊維目付量の異なる場合や、鋼板もしくは低弾性の FRP シートを併用する場合について検討した。本実験により得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 補剛板配置位置に荷重が作用する場合には、下縁ひずみが大きくなる傾向にある。シート補強する場合には、付着せん断応力の増加要因となる可能性があることに留意する必要がある。
- 2) AFRP シートの鋼梁との付着性能は、スパン中央部の上フランジやウェブが座屈して断面の曲率が急増する場合においても確保される。本実験においては、付着せん断応力が 13 MPa 程度発生する場合においてもシート剥離には至らなかった。
- 3) シート補強量を大きくすることにより、H 形鋼梁の降伏および最大荷重が増加するものの、最大荷重時変位は小さくなる。
- 4) 弾性係数の低い PFRP シートを併用する場合に

は、シートの接着界面に生じる付着せん断応力を低減できる可能性がある。

- 5) 薄鋼板を併用する場合には、降伏荷重到達後シートが鋼板から剥離するものの、薄鋼板と鋼梁の付着は終局まで確保されている。

今後は、スパンが長い場合、シート補強量が大きい場合の検討を行うとともに、衝撃荷重載荷時における補強効果やシートの剥離挙動について検討する予定である。

参考文献

- 1) 葛西勇輝, 小室雅人, 栗橋祐介, 岸 徳光: 重錘落下衝撃を受ける H 形鋼梁の耐衝撃挙動, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 23, 2015.11
- 2) 土木学会: FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端, 複合構造レポート 05, 2012.6
- 3) 土木学会: FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術, 複合構造レポート 09, 2013.11
- 4) 栗橋祐介, 西 弘明, 三上 浩, 小室雅人, 岸 徳光: AFRP シートで曲げ補強した T 型 PC 梁の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 980-989, 2015.3
- 5) 三上 浩, 栗橋祐介, 今野久志, 岸 徳光: 衝撃載荷によって損傷を受けた RC 梁の AFRP シート曲げ補強による耐衝撃性向上効果, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 990-1001, 2015.3
- 6) 栗橋祐介, 今野久志, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP シート補強 T 形 PC 梁の耐衝撃挙動に及ぼす補強方法の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 1147-1152, 2015.7
- 7) 佐藤元彦, 栗橋祐介, 三上 浩, 岸 徳光: AFRP および PFRP シートで曲げ補強した RC 梁の重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 1153-1158, 2015.7