

FRP シートを用いて曲げ補強した H 形鋼梁の曲げ耐荷性状

Flexural load-carrying capacity of H-shaped steel beams strengthened with FRP sheet

三上浩[†], 栗橋祐介^{*}, 小室雅人^{**}, 岸徳光^{***}

Hiroshi Mikami, Yusuke Kurihashi, Masato Komuro and Norimitsu Kishi

[†]博 (工), 三井住友建設 (株), 技術研究所, 上席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)^{*}博 (工), 室蘭工業大学大学院, 講師, 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット
(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)^{**}博 (工), 室蘭工業大学大学院, 准教授, 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット
(〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)^{***}工博, (独) 国立高専機構 釧路工業高等専門学校, 校長 (〒084-0916 釧路市大楽毛西 2-32-1)

In this study, in order to investigate flexural load-carrying behavior of H-shaped steel beams strengthened with FRP sheet, four-point static loading tests of flexural strengthened H-shaped steel beams were conducted. Here, Aramid FRP (AFRP) sheet, Polyethylene terephthalate FRP (PFRP) sheet, and thin steel plate were tried to be used as strengthening material. From this experiment, following results were obtained: 1) bonding performance of AFRP sheet can be kept even if the beam is severely deflected, and then the maximum bonding shear stress obtained from this experiment reached at 13 MPa; 2) the larger the unit mass of FRP sheet is, the greater the yield and maximum loads are; 3) in the case of applying AFRP sheet with PFRP sheet, bonding shear stress may be able to be decreased.

Key Words : H-shaped steel beam, flexural strengthening, FRP sheet, bonding capacity

キーワード : H 形鋼梁, 曲げ補強, FRP シート, 付着強度

1. はじめに

近年における気象変動の極端化は全世界的な傾向であり, これに伴い様々な災害が発生している. 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, その発生件数と被害規模は増加の一途を辿っている. このような環境下において, 我が国では安心で安全な社会生活を維持するための方策として, 社会基盤の強靱化に向けた諸施策が実施されつつある. 特に, 落石や竜巻飛来物等の衝撃的外力に対する構造物の性能照査型設計法に基づく耐衝撃性評価法や耐衝撃性向上に資する補修補強法の確立が喫緊の課題となっている.

衝撃的外力の作用を想定すべき鋼構造部材には, 鋼製覆工 (鋼製ロックシェッド) の主梁である H 形鋼梁および落石防護柵や落石防護網, 竜巻飛来物防護ネット等に用いられる鋼製支柱, 鋼骨組製の建築物等が挙げられる.

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: hiroshimikami@smcon.co.jp

これまで, 著者らは鋼構造部材の耐衝撃性や耐衝撃挙動の把握を目的に, H 形鋼梁を用いた重錘落下衝撃実験や¹⁾三次元弾塑性衝撃応答解析²⁾を行ってきた. これらの研究の主な検討項目は, 部材の耐衝撃挙動および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. しかしながら, 衝撃作用が想定される既設鋼構造部材の耐衝撃性を向上させるための補修補強法に関する検討はほとんど行われていないのが現状である.

一方, 鋼橋の補修補強を想定した検討の場合, 鋼部材の腐食減肉による耐荷性能の低下を補うために高い弾性係数を有する炭素繊維製 FRP シート (以後, CFRP シート) を下フランジ底面に多層貼付ける方法が既に多く検討され, 鋼梁端部における CFRP シート剥離抑制方法を含めた実用化に資する知見が多数得られている^{3)~7)}. なお, 上記の検討を行う上では, H 形鋼梁の載荷点近傍を十分に補剛し, CFRP シートを多層貼付けても鋼梁の座屈破壊が先行しないように工夫されている. また, 上記検討では鋼橋の維持管理が主目的であることから, 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

部材が塑性化して大変形する場合に関してはほとんど検討されていない。しかしながら、衝撃作用を受ける鋼構造部材では大きなエネルギーが瞬間的かつ局所的に作用するため、塑性変形や局所変形も想定されることから、鋼橋の維持管理を目的とした補修補強法の検討とは異なるアプローチが必要と考えられる。

CFRP シートを含む連続繊維シート (以後、FRP シート) 接着工法の利点は、連続繊維シートに樹脂を含浸硬化させて FRP 化して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等に伴う母材の損傷を回避できる点にある。また、錆びによる補強材の腐食減肉による補強効果の低下がなく、軽量かつ施工が簡便で品質を確保しやすい。以上のような利点を有する FRP シート接着工法を耐衝撃用途の鋼構造部材に適用するためには、大変形時および局所変形時における FRP シートと鋼部材との付着性状の把握が極めて重要と考えられる。

このような背景より、本研究では鋼構造部材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として、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。基本となる FRP シートには、鉄筋コンクリート (RC) 製やプレストレストコンクリート (PC) 製の落石覆工 (各々 RC, PC ロックシェッド) 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)^{8)~11)}を用いることとした。

AFRP シートの特徴は、1) CFRP シートに比べて弾性係数が小さいものの耐衝撃性や耐切削性に優れていること、2) しなやかな繊維であるため母材の変形への追従性が良く、母材表面に多少の不陸があっても接着が可能であること、3) 電気を通さないで鋼材に接触しても電位差腐食の懸念がないこと、等が挙げられる。

選定した基本となる AFRP シートには、汎用品の中で最も目付量が多いシートとし、その 1.5 倍の目付量を有するシートを製作して目付量の影響を検討した。また、基本となる AFRP シートと薄鋼板あるいは AFRP シートよりも弾性係数の低い FRP シートを併用し、補強材の引張剛性 (軸剛性) や伸び性能が鋼構造部材の大変形時における補修補強効果に及ぼす影響を検討することとした。

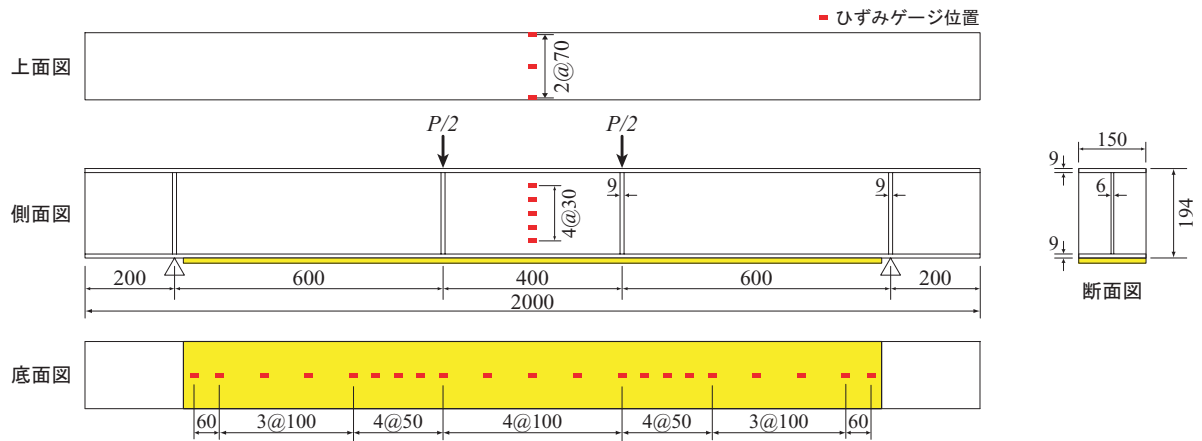
2. 実験概要

2.1 試験体概要

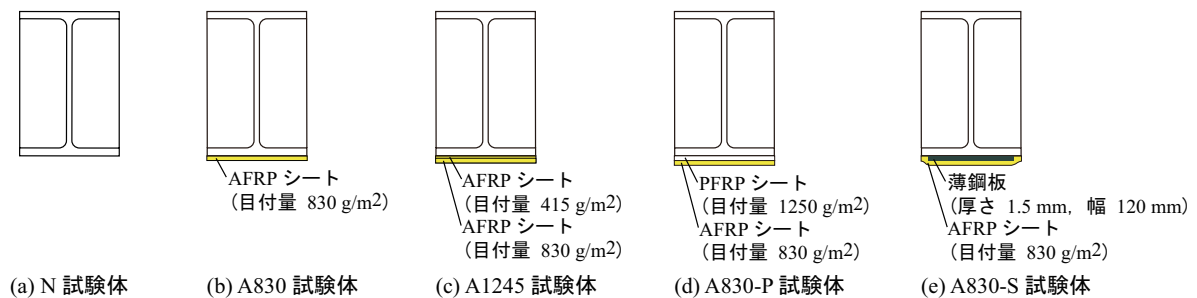
表－１には本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は無補強の他、補強方法を 4 種類に変化させた全 5 体である。N 試験体は無補強であり、A830 および A1245 試験体は目付量がそれぞれ 830, 1245 g/m² の AFRP シートで曲げ補強した試験体である。ここで、A830 試験体は、鋼製ロックシェッドの鋼梁補強を模擬した実験とするため、下フランジを簡易かつ大きな目付量で補強することを狙いとして、汎用品 1 層の最大目付量である 830 g/m² を接着することとした。一方、A1245 試験体は、本研究の最終目的が鋼製ロックシェッド等の耐衝撃補強であり、既往の RC 梁を補強した衝撃載荷実験では、FRP シートの破断で終局に至りやすいことから、A830 試験体の目付量の 1.5 倍である 1245 g/m² とした。なお、目付量 1245 g/m² の AFRP シートは 415 g/m² のシートと 830 g/m² のシートを積層して製作した。

A830-P および A830-S 試験体は、鋼梁の底面にポリエチレンテレフタレート (PET) 繊維製 FRP シート (以後、PFRP シート) または厚さ 1.5 mm の薄鋼板を接着し、その上に基本となる AFRP シートを接着した試験体である。PFRP シートの弾性係数は AFRP シートの 1/10 程度以下と小さく、鋼梁の変形への追従性が良好かつ鋼梁との界面における付着せん断応力が小さいことからシート剥離にくく、大変形下においても補修補強効果が維持できることを期待した補強法である。なお、繊維材料の弾性係数の大きさに応じて接着界面における付着せん断応力が大きくなることは、RC 床版下面を FRP シートで接着補強した際の 3 次元弾性論に立脚した著者らの理論計算結果¹²⁾より明らかである。また、AFRP シートに比べて PFRP シートは安価であることから、より経済的な補強法としても期待できる。

一方、薄鋼板を併用した A830-S 試験体は、鋼橋の補修補強検討事例に見られるように、弾性係数の高い CFRP シートを多層に貼付け、軸剛性や引張耐力を大きくすることで補強効果が向上することから、より安価に軸剛性を増加させ、それが補強効果に及ぼす影響を検討するための試験体として計画した。なお、試験体の断面寸法等によっては、鋼板をさらに厚くする必要性も考



図－１ 試験体の形状寸法



図－２ 各試験体の断面図

られるが、施工性を考慮して薄鋼板を接着剤にて積層する施工法を想定している。薄鋼板の上には基本となるAFRPシートを接着したが、後述するように薄鋼板の幅は下フランジ幅よりも狭く、薄鋼板と鋼梁母材との段差は、AFRPシートがしなやかで段差処理がなくとも接着可能であることから、フランジ全幅にAFRPシートを段差処理なしで接着している（図－2 (e) 参照）。このように薄鋼板の上にAFRPシートを接着することで、薄鋼板の腐食を抑制できると考えられる。

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的特性値を用いて、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 H 形鋼梁の軸剛性に対する補強材の軸剛性の比とし、補強量の指標として下式により求めた。

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

FRP シートのみを用いた補強試験体の軸剛性比は 1 ～ 2 % 程度であるが、薄鋼板を併用した A830-S 試験体では 7 % 程度と大きくなり、容易に軸剛性の増大が図れることが分かる。

図－1 に H 形鋼梁の形状寸法、補強概要およびひずみゲージの貼付け位置を示している。本研究では、鋼製ロックシェッドの主梁である H 形鋼梁を模擬して試験

体を作製した。H 形鋼梁の断面寸法は、幅 × 高さが 150 × 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。鋼製ロックシェッドは H 形鋼主梁を道路軸直角方向に配置し、その上にデッキプレート敷設し、場所打ちでコンクリートスラブを施工する鋼・コンクリート合成構造であり、逆 L 型や 2 柱式の構造形式が多い。鋼製ロックシェッドの内空断面内を車輛が走行することから、H 形鋼梁を重い鋼材を用いて補剛することは現実的に困難であり、そのため補強材である FRP シート層数も制限されることとなる。本研究では H 形鋼梁に直交して道路軸方向に配置される横繫ぎ H 形鋼を模擬して、載荷点部および支点部のみに厚さ 9 mm の補剛板を溶接し、ウェブおよびフランジの早期座屈を抑制することとした。

また、補強材の接着範囲は鋼製ロックシェッドにおける落石位置（衝撃荷重作用位置）が特定できないことから、H 形鋼梁下フランジ底面全体を補強することとした。ただし、既設鋼構造部材の補修補強を目的としているため、施工上の制約を考慮して接着範囲は梁中央部から両支点の 5 cm 手前までとしている。

図－2 には各種補強試験体の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 層接着している。A1245 試験体では、目付量 415 g/m² の AFRP シートの上に 830 g/m² の AFRP シートを積層

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	309	464
ウェブ	5.5		339	473

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	-

表－4 含浸樹脂の力学的特性値

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



写真－1 実験状況

して接着している。また、A830-P 試験体および A830-S 試験体では、それぞれ PFRP シートまたは薄鋼板を鋼梁にエポキシ系含浸接着樹脂を用いて接着した上に目付量 830 g/m² の AFRP シートを積層する形で接着した。なお、補強試験体の底面にはあらかじめ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、各種補強材および含浸接着樹脂の力学的特性値の一覧を示している。本実験に用いた FRP シートは全て 1 方向繊維強化型シート (1 方向シート) とした。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 シートならびに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 に実験状況を示している。実験は大変形時における各種補強材による補強効果を大略把握する目的で

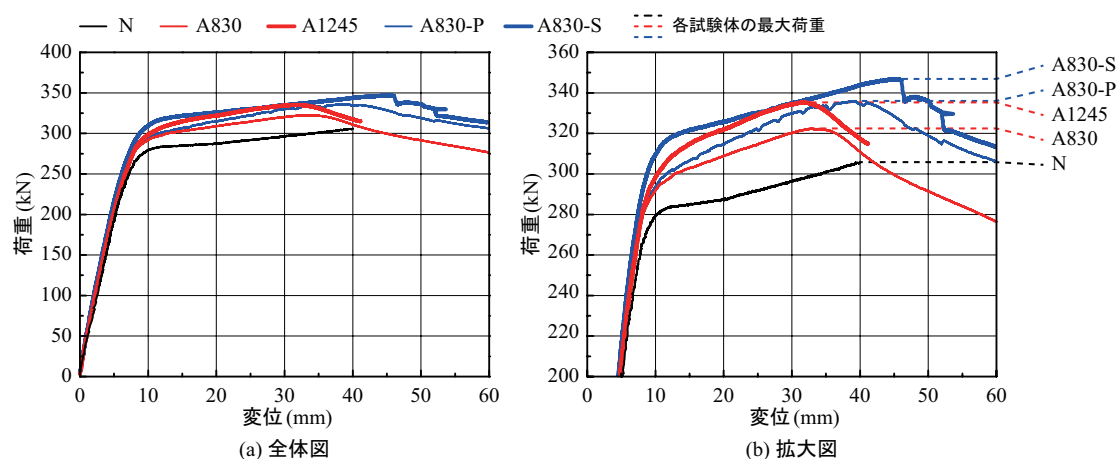
4 点静的曲げ载荷により行った。なお、载荷点直下や等曲げモーメント区間および等せん断力区間における補強材のひずみ性状を明確にするため、载荷点間隔 (等曲げ区間長) はスパンの 1/4 である 400 mm に設定した。荷重は容量 500 kN の油圧ジャッキを用いて作用させた。測定項目は载荷荷重、各点の変位およびひずみである。ひずみはゲージ長 10 mm の箔ひずみゲージを用いて測定した。ひずみの測定位置は 図－1 に示す通りである。実験終了後には試験体の変形状況やシートの剥離状況を観察するとともに写真撮影を行った。また、実験終了後に土木学会の「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」¹³⁾における「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、鋼梁と補強材の接着強度試験を実施している。

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。また、図－3 右には荷重 $P = 200$ 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。なお、表－5 には、各試験体の最大荷重および最大荷重時変位の一覧を示している。図より、いずれの試験体においても荷重 $P = 240$ kN 程度までは変形量の増加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－変位関係の初期勾配は補強試験体で多少大きくなるものの補強方法による差異は顕著ではない。

無補強の N 試験体では $P = 260$ kN 程度において荷重の増加勾配が大きく低下し、変位 $\delta = 20$ mm 程度までは $P = 285$ kN 程度を示している。変位 $\delta = 20$ 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が認められる。これは、後述するように変位 $\delta = 30$ mm 以上において N 試験体の等曲げ区間におけるひずみが 20,000 μ (2 %) を超過していることから、鋼材のひずみ硬化によるものと考えられる。



図－3 荷重－変位関係

表－5 各試験体の最大荷重および最大荷重時変位

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)
N	305.9	40.0
A830	322.5	32.9
A1245	335.3	32.0
A830-P	336.0	39.0
A830-S	346.9	44.9

A830 試験体では N 試験体よりも 20 kN 程度大きな荷重で増加勾配が低下していることから、AFRP シート補強によって下フランジの降伏が抑制されていることが分かる。また、下フランジ降伏後の増加勾配は N 試験体に比べて大きく、AFRP シートによる補強効果が下フランジ降伏後も持続していることが分かる。なお、変位 $\delta = 35$ mm 程度から荷重が徐々に低下し始めるが、これは後述の 写真－2 に示すように、上フランジが座屈して鋼梁の見かけ上の剛性が低下したことによるものと考えられる。

A1245 試験体では A830 試験体よりも降伏荷重や最大荷重が大きくなる傾向にあるものの、最大荷重時変位は多少小さくなっている。これは、曲げ補強量の増加に伴って梁の曲げ耐力は増加する傾向にある一方で、上フランジの負担が大きくなって早期に座屈が生じたためと考えられる。すなわち、AFRP シートの目付量を増加させて補強材の軸剛性を 1.5 倍に増加させても、上フランジを補剛しない限り大変形時における耐荷性能の保持は難しいことを示している。

A830-P 試験体は $P = 290$ kN 程度までは A830 試験体とほぼ同様の耐荷性状を示しているものの、下フランジ降伏後の増加勾配は A830 試験体よりも大きい。これは、下フランジの降伏後において変形量の増加に伴って PFRP シートの補強効果が大きく出現するためであり、RC 梁下面を FRP シートで曲げ補強した場合に、主鉄筋降伏後に FRP シートの補強効果が顕著に出現するこ

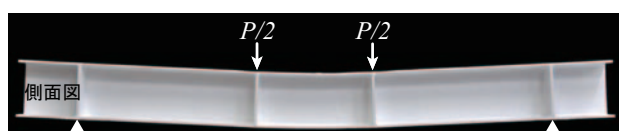
とと同義であると考えられる。

なお、A830-P 試験体の最大荷重および最大荷重時変位は A1245 試験体よりも大きい。これは、本試験体における最大荷重や最大荷重時変位には、上述したように上フランジの座屈が影響を及ぼすため、必ずしも補強材の軸剛性や引張耐力の大きさに対応して上記の耐荷性能が向上するわけではないことを示している。すなわち、大変形時における H 形鋼梁の耐荷性能を保持するための補強法として、低弾性係数の FRP シートを併用することにより効果的となる可能性があることを示唆するものと考えられる。これは同時に、より経済的な鋼構造部材の耐衝撃補強を可能とすることに繋がるものと考えられる。

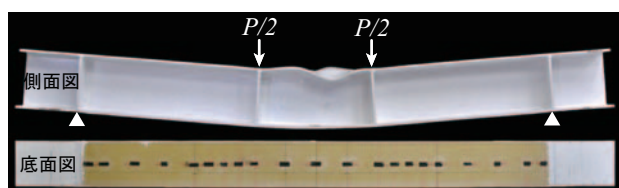
A830-S 試験体は $P = 310$ kN 程度で荷重の増加勾配が急激に低下している。後述する AFRP シートのひずみ性状から、この時点で載荷点直下および等曲げ区間におけるひずみが降伏ひずみ $1,500 \mu$ を超過していることから、下フランジおよび薄鋼板が降伏したものと考えられる。降伏荷重は N 試験体に比べて 50 kN 程度増加し、全ての試験体で最も高い。これは、軸剛性の増加によって降伏荷重が大きく増加することを示すものであり、薄鋼板を併用することにより経済的に降伏荷重を増大できるものと考えられる。

一方、最大荷重および最大荷重時変位も全試験体の中で最も大きい。補強材の軸剛性や引張耐力が大きくなることで、曲げ耐力が向上する傾向にあることは前述した通りであるが、A1245 試験体では上フランジの座屈が早期に生じ、最大荷重時変位は A830 試験体よりも小さくなったことから、FRP シートを積層して軸剛性や引張耐力を大きくした場合とは変形特性が異なることが分かる。

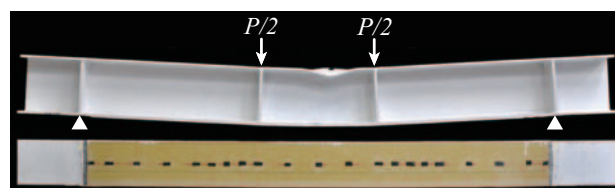
これは、A830-S 試験体では薄鋼板が下フランジとともに降伏し、薄鋼板の引張力負担が一定になること、および後述するように薄鋼板端部の段差部近傍においてシートが断裂するとともに薄鋼板と AFRP シートの界面で剥離が生じたことに関連するものと考えられる。なお、シートの剥離状況については後述することとする。



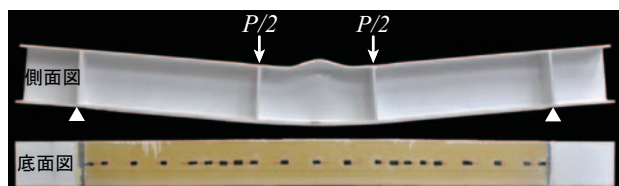
(a) N 試験体



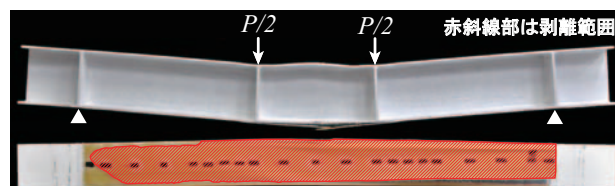
(b) A830 試験体



(c) A1245 試験体

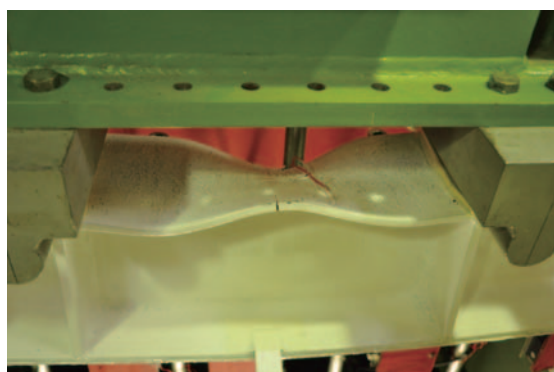


(d) A830-P 試験体

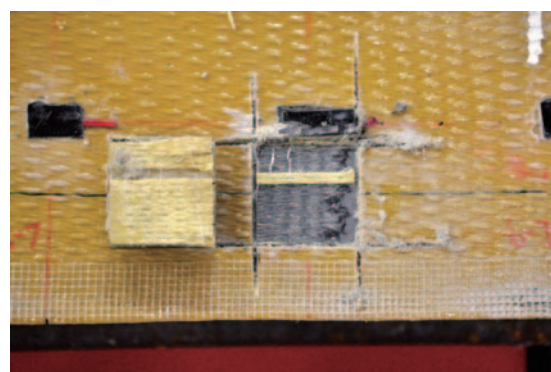


(e) A830-S 試験体

写真－２ 実験終了後における各試験体の変形状況およびシートの外観



写真－３ A830-P 試験体の
実験終了後における座屈状況



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

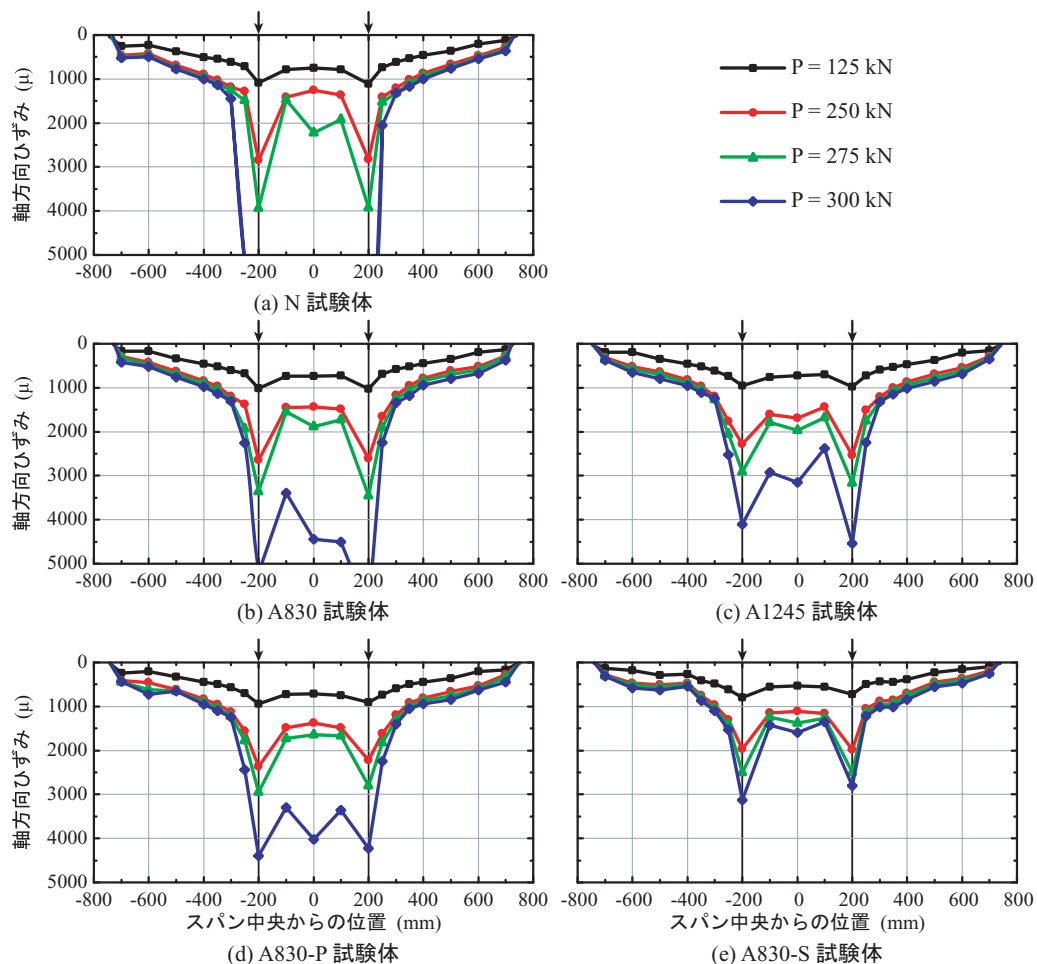
3.2 破壊性状および接着試験結果

写真－２に実験終了後における各試験体の変形状況およびシートの外観を示す。なお、無補強の N 試験体は補強試験体よりも小さな変位で荷重を終了したため、スパン中央部近傍は座屈しているものの変状は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激しく座屈している。衝撃荷重実験の場合、衝撃力の荷重によって塑性変形や局所変形が想定されることから、静荷重実験では H 形鋼梁の大変

形時における補強材と鋼梁界面での付着せん断応力の増大およびそれに伴うシートの剥離破壊を想定して、変位 $\delta = 60 \text{ mm}$ 程度 (スパンに対する変位量の比が 4 % 弱) まで荷重を続けたものの、等曲げ区間内の上フランジおよびウェブが座屈して、横倒れ座屈状態となったため安全上の配慮から荷重を終了した。写真－３には A830-P 試験体の実験終了後における座屈状況を示している。

なお、梁底面の外観を確認した所、A830-S 試験体を除いて AFRP シートには剥離が認められなかった。また、梁底面を点検棒によって打音検査した結果、浮き等の局所的な変状も一切認められなかった。

写真－４には A1245 試験体の接着試験状況および試験後における接着界面の状況を示している。接着試験は A830-S 試験体を除いた各補強試験体において、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 程度支点側の各位置にて行った。写真－４に示す界面の状況から、剥離はシー



図－４ 降伏時近傍までの AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状

トと鋼梁母材の界面で生じていることが分かる。なお、その他の試験体および試験位置においても同様の性状が認められ、試験体および試験位置の違いによる接着性状の差異は認められなかった。また、接着強度は 7～8 MPa 程度であり、比較的安定した値を示した。同じ含浸接着樹脂を用いてコンクリートに AFRP シートを接着した際の接着強度は大略 2～3 MPa 程度であるので、シートと鋼梁との接着強度はコンクリートの場合に比べて 3 倍程度大きいことが分かる。

A830-S 試験体では、写真－5 に示すように AFRP シートが薄鋼板端部における段差部周辺で軸方向に断裂し、薄鋼板上の AFRP シートが広域的に剥離している。後述するように、AFRP シートは変位量 $\delta = 30$ mm 程度で剥離し始めたものと思われる。薄鋼板端部における段差部周辺において、繊維シートの強化方向と直交する方向に大きな応力が作用して軸方向に断裂が生じ、それが引き金となってシート剥離が進行したものと推察される。なお、薄鋼板と鋼梁母材の接着状況を点検棒で検査した結果、実験終了後も浮きや剥離は一切認められないことが分かった。このように、鋼梁母材と薄鋼板および鋼梁母材と AFRP シートの接着は良好であったことから、

薄鋼板と AFRP シートの接着も良好であるものと考えられる。そのため、段差部周辺でシートが軸方向に断裂したことが A830-S 試験体のシート剥離の要因と考えられる。今後は段差部をパテ材等で平滑にすることや、薄鋼板の幅を下フランジ幅と同等にして段差を解消すること、および 2 方向繊維強化型シート (2 方向シート) を用いること等で、この課題を解決できるものとする。

3.3 AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状

図－4 には各試験体の荷重初期から下フランジ降伏時近傍までにおけるシートのひずみ分布性状を検討するため、荷重 $P = 125, 250, 275, 300$ kN 時の実験結果を示している。図－4 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、特に荷重点部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、荷重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下フランジに伝達されるためと考えられる。 $P = 250$ kN 時における荷重点直下のひずみは、全ての試験体で 1,500 μ を超過していることから、 $P = 250$ kN 時に荷重点部は降伏しているものと考えられる。なお、等曲げモーメント区間内の 3 点のひずみに着目すると、これら

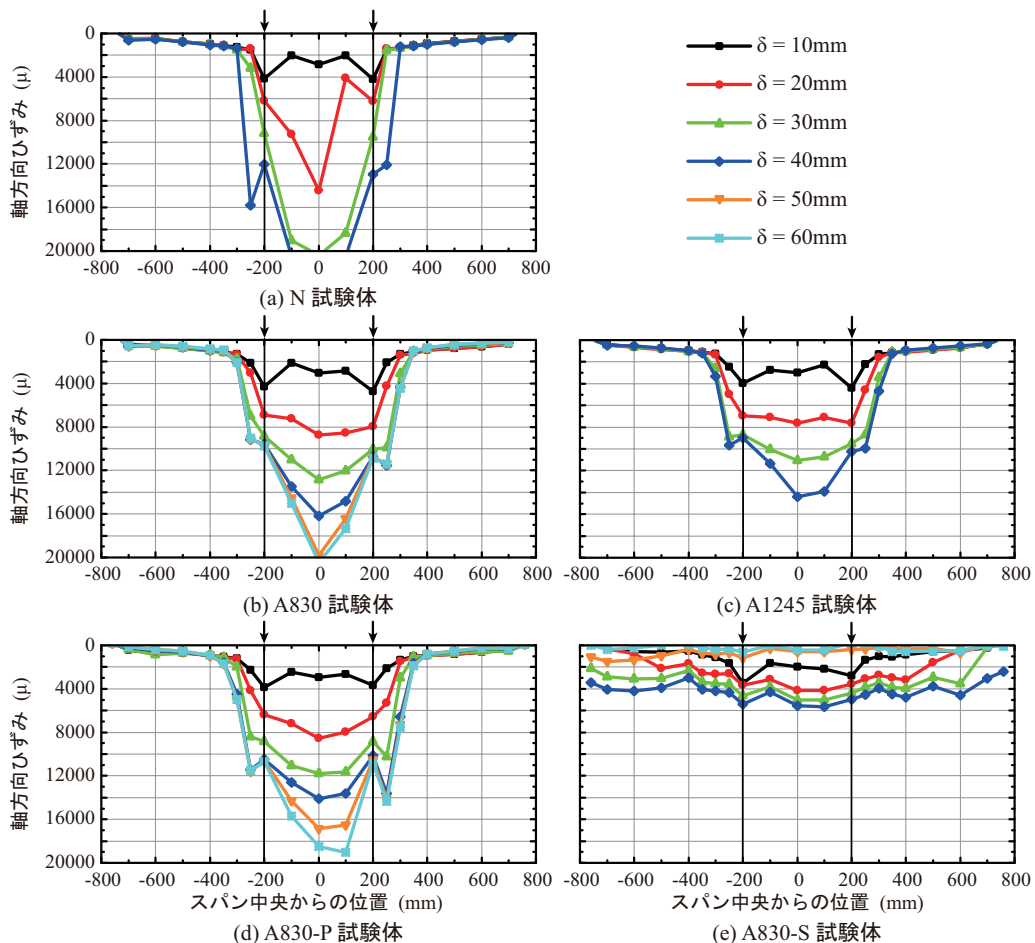


図-5 降伏以降の AFRP シートの軸方向ひずみ分布性状

が $1,500 \mu$ を超過するのは、A830-S 試験体を除いて $P = 275 \text{ kN}$ 時であり、図-3 に示す荷重-変位関係の勾配変化点の荷重とほぼ合致する。すなわち、荷重-変位関係の勾配変化は、等曲げ区間内のひずみ性状と対応することが分かる。

同一荷重時における各試験体のひずみ値を比較すると、補強試験体は無補強試験体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。以上から、载荷初期から下フランジ降伏時近傍までは、各補強材の軸剛性に応じた補強効果が出現し、そのため A830-S 試験体の降伏荷重が無補強 N 試験体の降伏荷重を最も大きく上回ったものと考えられる。

図-5 には、各試験体の下フランジ降伏後におけるひずみ分布の推移状況を検討するため、変位 $\delta = 10 \text{ mm}$ から 60 mm までの実験結果を 10 mm 間隔で示している。図-5 より、A830-S 試験体を除いて、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。また、下フランジ降伏前のひずみ分布と異なり、変位の増大とともに等曲げ区間内のひずみが载荷点部のひずみを大きく上回る傾向を示している。これは、等曲げ区間内の上フランジが座屈し、見かけ上の断面二次モーメント

が減少して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、载荷点直下から 100 mm 程度支点側の位置からひずみ勾配が急増する傾向を示し、かつ、ひずみ値は $2,000 \mu$ 程度を超えていることから、この領域のせん断スパン内においても下フランジは降伏域に達しているものと考えられる。

なお、A830-P 試験体における大ひずみの発生領域は、A830 試験体よりも幾分広い。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、付着に抵抗できる領域が幾分拡大したことによるものと推察されるが、この点に関しては、衝撃荷重が作用する場合を含めて今後の課題としたい。

A830-S 試験体では他の試験体と異なり、等曲げ区間および等せん断力区間において、ひずみが均等化する傾向が顕著に伺われる。特に、変位 $\delta = 20 \text{ mm}$ 程度から AFRP シートのひずみが均等化する傾向が強まり、変位 $\delta = 30 \text{ mm}$ ではひずみの均等化範囲が支点側まで到達している。これは、薄鋼板と AFRP シートの接着界面での剥離が変位の増加に伴って支点側まで進展していることを示すものと考えられる。ただし、シートのひずみは変位 $\delta = 40 \text{ mm}$ 程度までは増大していることから、この時点まではシートと薄鋼板は部分的に接着しており、全面

表－6 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

剥離には至っていないものと考えられる。しかし、変位 $\delta = 50$ mm 以上においては全ての計測点でひずみがほぼ零まで低下し、全面剥離に至っていることが分かる。

3.4 最大付着せん断応力

表－6 に各補強試験体の最大付着せん断応力を示す。最大付着せん断応力 τ_{max} は AFRP シートの各ひずみ計測位置において隣接するひずみゲージ間に生じる平均付着せん断応力の最大値として評価した。これは、RC 梁に接着した FRP シートの最大付着せん断応力を算定する方法と同様である。各試験体の最大付着せん断応力 τ_{max} は下式により算定した。なお、A830-S 試験体はシート剥離が認められたことから検討より除外している。

A830/1245 試験体

$$\tau_{max} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) E_a t_a / l \quad (2)$$

A830-P 試験体

$$\tau_{max} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) (E_a t_a + E_p t_p) / l \quad (3)$$

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－6 より、最大付着せん断応力 τ_{max} は A1245 試験体で最も大きく、次が A830-P 試験体、A830 試験体の順に大きいことが分かる。すなわち、FRP シートで補強した際の最大付着せん断応力は、補強材の軸剛性の大きさに応じて増大することが分かる。一方、最大荷重は A830-P 試験体で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るためと推察されるが、今後、さらに検討を進める必要がある。

以上から、FRP シートを用いて軸剛性比が 2 % 程度で補強する場合、H 形鋼梁の下フランジが降伏して大きく塑性変形する場合においても FRP シートは剥離に至らず、最大付着せん断応力は本実験の範囲内では 13 MPa 程度以上であることが明らかとなった。なお、鋼梁母材とシートの接着強度は試験結果から 7 ～ 8 MPa

程度であったことから、最大付着せん断強度は接着強度の 2 倍程度以上であるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では耐衝撃用途鋼構造部材の耐衝撃性向上法として、RC、PC 構造物で実績のある 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。検討の対象は鋼製ロックシェッドの主梁である H 形鋼梁とし、鋼梁の補剛は最小限かつ、落石位置が特定できないことから FRP シートを鋼梁下フランジ底面全体に貼付けて補強した。補強方法には耐衝撃性に優れるアラミド繊維シート (AFRP シート) を用いることを基本とし、繊維シート目付量の影響を検討するとともに、補強材の軸剛性と弾性係数が大変形時における耐荷挙動に及ぼす影響に着目し、薄鋼板および低弾性の PET 繊維製 FRP シートを併用する場合についても検討した。本実験により得られた知見を要約すると以下の通りである。

- 1) 下フランジが降伏する前は載荷荷重が補剛板直下に伝達され、補剛板直下の下フランジ下縁に応力が集中してひずみが大きくなる。下フランジ降伏後は変位量が増大し、上フランジおよびウェブの座屈に伴う曲率増加によって等曲げ区間内のひずみが載荷点直下を上回る傾向にある。
- 2) AFRP シートの鋼梁との付着性能は、等曲げ区間内において上フランジやウェブが座屈して断面曲率が急増する場合でも確保される。本実験の範囲内では、付着せん断応力が接着強度の 2 倍程度である 13 MPa 程度を示す場合においてもシート剥離には至らなかった。
- 3) シートの目付量を大きくすることで H 形鋼梁の降伏荷重や最大荷重は増大するものの、上フランジの座屈を伴うために最大荷重時変位は小さくなる傾向となった。
- 4) 弾性係数の低い PET 繊維製 FRP シートを併用することで、最大荷重や最大荷重時変位を効率的に増加させることができた。これは、シートの接着界面における付着せん断応力が抑制されることに関連するものと考えられる。

- 5) 薄鋼板を併用した場合に降伏荷重や最大荷重および最大荷重時変位が最も増加した。薄鋼板の併用は効果的な補強に繋がる可能性があるが、AFRP シートの断裂や剥離が生じたことから、さらなる検討が必要である。なお、シートが剥離しても薄鋼板と鋼梁の付着は終局まで確保されていた。

今後は H 形鋼梁の断面寸法や補剛程度の影響および薄鋼板と AFRP シートの最適な併用方法等を検討するとともに、衝撃荷重載荷時における補強効果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, pp. 664-670, 2015.11
- 2) 小室雅人, 岸徳光: 重錘落下衝撃を受ける H 形鋼梁の衝撃応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 365-366, 2015.9.
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 杉浦江, 大垣賀津雄, 稲葉尚文, 富田芳男, 長井正嗣, 小林朗: 炭素繊維シートを用いた腐食による鋼部材断面欠損部の補修効果に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp. 548-554, 2008.3
- 6) 松村政秀, 北田俊行, 久部修弘: 高弾性 CFRP 板を I 形断面鋼桁に貼付する補強効果に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp. 834-841, 2008.3
- 7) 奥山雄介, 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 541-553, 2014.3
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 三上浩, 高島輝雄, 廣瀬清泰, 堀川都志雄: 二方向アラミド繊維シート補強床版の界面剥離に関する数値解析, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1065-1074, 2013.3
- 13) 土木学会: 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, 2000.

(2015 年 9 月 25 日受付)

(2016 年 2 月 1 日受理)