

CFRP による鋼桁の補修・補強効果の数値的評価に関する一考察

Numerical evaluation of performance of steel girders reinforced with CFRP

笠原華子*

Hanako KASAHARA

*構造強度学研究室（指導教員：京谷孝史 教授，研究指導教員：斉木功 准教授）

Some experiments have shown that carbon fiber reinforcement polymer (CFRP) retrofitting is effective to repair steel bridges. However, since the design of CFRP retrofitting is generally based on elastic design assuming complete bonding of steel and CFRP, the limit state design method has not been established. In this study, in order to clarify the failure mechanism of CFRP-reinforced steel girders, a numerical model for nonlinear finite element analysis taking into account the elasto-plasticity of the material, debonding and fracture of CFRP is developed. The model is used to reproduce elemental tests to confirm the behavior of steel-CFRP composite members after steel material yields. As a result, although bonding of steel and CFRP is confirmed even after steel material yields, brittle fracture occurred in the case of CFRP failure or debonding. Furthermore, numerical analysis of CFRP-reinforced steel girders with concrete slab is conducted. As a result, the reinforcement effect is confirmed even after the steel girder yields. However, it is found that the load-carrying capacity is partially reduced due to the failure of CFRP, and that brittle failure occurred due to debonding. Therefore, we concluded that it is important that CFRP failure or debonding avoids becoming the ultimate limit state by selecting the modulus of elasticity and the strength of the CFRP used for retrofitting. It is also found that the anchorage of the CFRP edge is effective in avoiding brittle fracture due to debonding.

Key Words: FEM, CFRP, steel girder, energy release rate, cohesive model, fracture

1. はじめに

既設鋼構造物における性能の回復または向上させるための技術の一つに、炭素繊維強化プラスチック（以下 CFRP）接着工法がある。CFRP は、高弾性・高強度といった特徴を有しており、対象鋼部材にエポキシ樹脂等の接着剤を用いて CFRP を接着することで、腐食等による断面欠損のある部材の耐荷力向上や亀裂進展遅延などの効果が期待できる。CFRP 自体が軽量であり人力運搬も可能であるため、死荷重増加を抑制し、かつ施工において重機などを必要とせず、工期短縮やコスト削減にも効果が期待できることから、CFRP 接着工法は近年注目されている。この工法はすでに実用化されておりその効果も明らかではある¹⁾ものの、現在の補修指針²⁾では CFRP と鋼材が一体化していることが前提とされており、補強部材の限界状態が明確にされておらず、限界状態設計法の確立が遅れている。そこで本研究では、CFRP による鋼構造物の補修・補強の設計法確立に向けて、鋼材の弾塑性、CFRP の剥離と破断を考慮した非線形有限要素解析を行うことによって、CFRP 補修部材の破壊メカニズムを明らかにするとともに、補修・補強効果について数値的に評価する。

2. 解析手法

鋼材の降伏と CFRP の破断と剥離を考慮した有限要素解析を行う。解析モデルはすべて 8 節点 6 面体要素で作成した。CFRP は繊維が配向されている方向と直交す

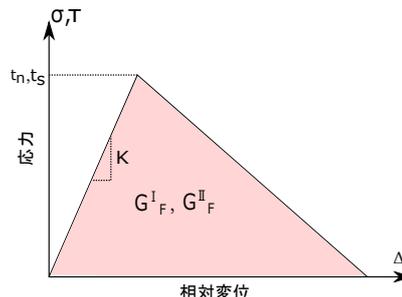


図-1 界面の応力-相対変位関係

る面で等方となる横等方性とし、引張強度に達した要素を削除することで破断を再現した。CFRP-鋼材間の界面の剥離の再現には cohesive モデル⁴⁾を用いる。図-1 に cohesive モデルの応力-相対変位関係を示す。ペナルティ剛性 K および、破壊モード I, II それぞれに対し、付着強度 t_n, t_s 、臨界エネルギー開放率 G_F^I, G_F^II を規定し、界面の剥離を再現する。界面の付着強度 t_n, t_s は、CFRP 接着に使用する接着剤の付着強度から決定し、鉛直方向・接線方向でそれぞれ $t_n = 30 \text{ N/mm}^2, t_s = 10 \text{ N/mm}^2$ とした³⁾。臨界エネルギー解放率は破壊モード I では $G_F^I = 0.2 \text{ N/mm}$ 、破壊モード II で $G_F^II = 0.1 \text{ N/mm}$ とした²⁾³⁾。ペナルティ剛性はモード I, II 共通とし、接着剤の Young 率を接着剤の厚さ 0.5 mm で割った値 $K = 4.0 \times 10^6 \text{ N/mm}^3$ とした。

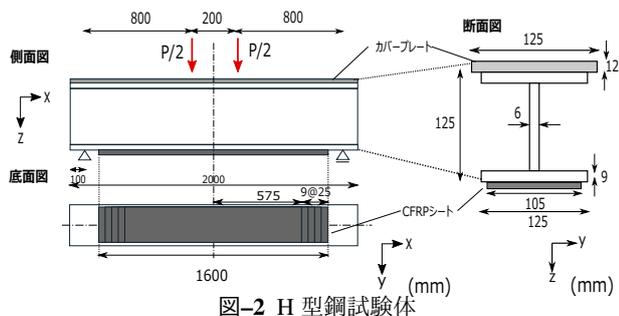


図-2 H 型鋼試験体

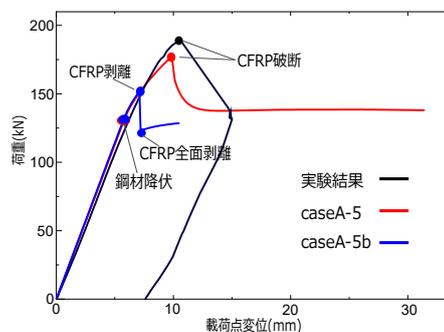


図-3 荷重変位関係

3. H 形鋼の曲げ解析

(1) 解析対象

下フランジを CFRP により補強された H 形鋼 (H125 × 125 × 6 × 9) を用いた 4 点曲げ試験の再現解析を行う。CFRP 補強された鋼部材に対して引張試験は多く行われているが、その場合鋼材降伏前に CFRP は剥離してしまうため、鋼材降伏後の CFRP 鋼材の挙動を確認できない。そこで、この実験は鋼材の曲げ降伏後の鋼材と CFRP の一体性を確認するために土木研究所で行われた。

CFRP シートは、図-2 の底面図に示すように下フランジ下面中央部に貼り付け長 1600 mm で貼付されており、CFRP シート 1 層の層厚を 0.5 mm とし、5 層貼付されている。貼り付け端部での応力集中を緩和するため各層で両端をずらして貼り付けられている⁵⁾。また、炭素繊維は鋼桁軸方向 (x 軸方向) に配向されているため、CFRP 層は桁軸に直交する面内 (yz 面内) で等方性となる横等方性である。CFRP は、高弾性 CFRP を用い、Young 率は x 方向で $6.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、y, z 方向で $3.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ とし、引張強度は 2089 N/mm^2 とした。鋼材である H 形鋼とカバープレートの Young 率は $2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、Poisson 比は 0.3 とした。H 形鋼とカバープレートの降伏応力をそれぞれ 285 N/mm^2 、 315 N/mm^2 とした。有限要素モデルは試験体の対称性を考慮した 1/4 モデルとし、荷重は強制変位として与えた。

(2) 再現解析結果

実験で計測された荷重変位関係を図-3 に示す。P = 190.3kN で CFRP がスパン中央で破断し、荷重が 28 % 減少した。また、破断部分から CFRP は剥離した。

図-3 において caseA-5 として再現解析結果を示す。各荷重における界面せん断応力分布と有限要素モデルの様子を図-4 に示す。載荷開始から鋼材降伏 P = 130.3kN まで CFRP の破断・剥離は起きず、鋼材と CFRP は一体となって弾性挙動を示す。鋼材降伏後、P = 176.7kN で CFRP が破断し、荷重が 22 % 減少した。図-4、P = 176.7kN では、スパン中央で CFRP が破断していることが分かる。また、破断付近から界面せん断応力が増加し、界面の剥離が始まり、剥離は支点方向に広がっている。この再現解析結果の載荷開始から破断に至るまでの梁の

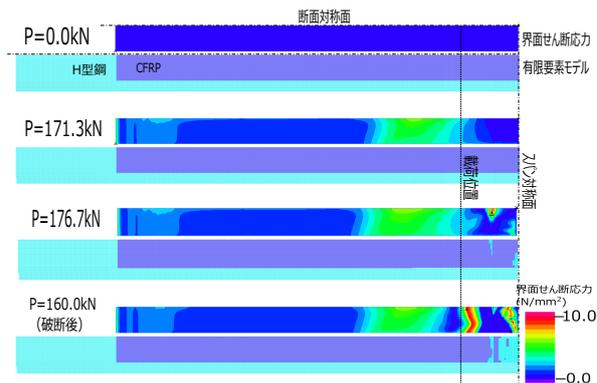


図-4 再現解析せん断応力分布と破断の様子

挙動、破断による破壊やそれによる剥離の進展は実験結果と一致しており、有限要素モデルの再現性が確認できた。

(3) 剥離先行破壊のパラメータスタディ

前節の再現解析で梁は CFRP の破断により破壊に至った。そこで、剥離が先行する場合の挙動の確認のために、CFRP-鋼材界面の付着強度を 30 %、臨界エネルギー開放率を 30 % とした caseA-5b の解析を行った。図-3 に caseA-5b として荷重変位関係を示す。図-5 に各荷重と界面せん断応力分布を示す。界面の付着強度と臨界エネルギー開放率が小さくなると、CFRP 破断に先行して界面の剥離が起こる。剥離は図-5、P = 151.6kN のように、載荷点付近から始まり、急速に進展し CFRP は全面剥離した。その結果、図-3、caseA-5b に示すように梁は脆性的に耐力を失う。

(4) 考察

H 形鋼の解析結果から、H 形鋼下フランジ降伏後も鋼材と CFRP は一体性が確保されていることが確認できた。鋼材の降伏後も載荷を続け、CFRP の破断が生じることで、破断点からの剥離が進展し脆性的な耐力低下となった。また、CFRP の剥離が先行して起きる場合、剥離は急速に進展し CFRP 貼付面全面に進展し、耐力を失った。以上から、CFRP の破断・剥離ともに脆性的な破壊となるといえる。

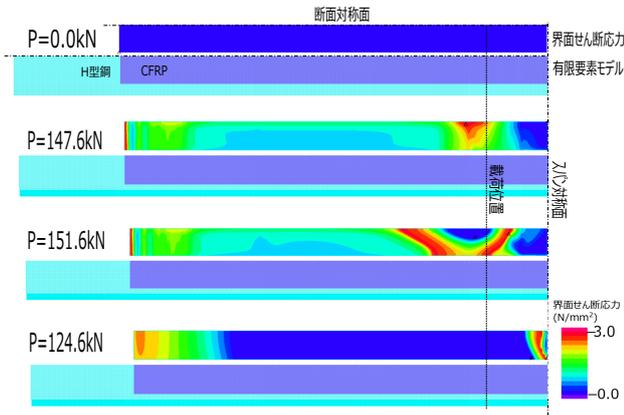


図-5 界面のパラメーターを30%とした場合のせん断応力分布と破断の様子

4. RC床版を有する鋼桁の解析

(1) 解析対象と梁の解析結果

図-6に示すようなRC床版を有する鋼桁の4点曲げ試験の数値解析を行う。この解析によってコンクリート系床版を含めた鋼桁のCFRP補修・補強における鋼材降伏後、破壊に至る挙動を明らかにする。

前章のH形梁と同様に、図-6の底面図に示すように下フランジ下面をCFRPにより補強している。鋼桁のYoung率は $2.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 、Poisson比は0.3、降伏応力を 355 N/mm^2 とした。床版コンクリートは、Young率を $3.0 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 、Poisson比を0.17、終局圧縮ひずみを0.3%とした。鉄筋はD13を用いることとし、Young率を $2.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 、降伏応力を 345 N/mm^2 とした。試験体の対称性を考慮した1/4モデルとし、荷重は強制変位として与えた。

CFRPシートの貼付がない、健全な梁のみの解析結果をcaseB0と呼ぶ。また、I形鋼の腐食損傷を仮定し、スパン中央1480mmの範囲の下フランジ上面を図-6の切削断面図に示すように切削し板厚を20mmから15.5mmに減少させた。

CFRPシートの貼付がなく、損傷を有する梁の解析結果をcaseB1と呼ぶ。

図-7にcaseB0とcaseB1の荷重-載荷点変位関係を示す。caseB0では初期剛性が 61 kN/mm 、caseB1では 58 kN/mm となり、損傷により剛性が4.4%低下している。また、caseB0ではスパン中央の下フランジが $P = 1177 \text{ kN}$ で、caseB1では下フランジ損傷部が $P = 852 \text{ kN}$ で降伏する。

(2) CFRPの種類による耐荷特性の違い

前章のH形梁と同様に、図-6の底面図に示すように損傷を有する梁の下フランジ下面7420mmの範囲をCFRPにより補強した。CFRPは1層の層厚を0.5mmとし6層貼付し、桁軸方向(x軸方向)に繊維を配向した。軸方向のYoung率が $2.5 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、破断強度が $3.4 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ である高強度CFRPを貼付したモデ

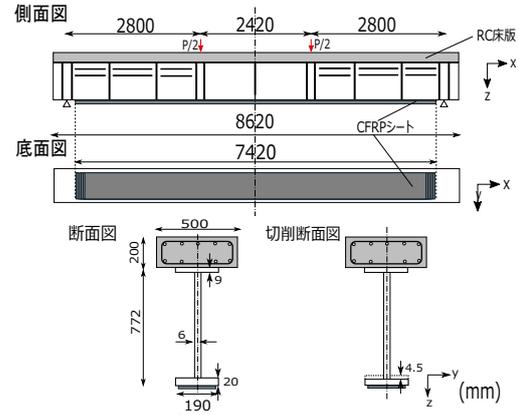


図-6 RC床版を有する鋼桁

ルをcaseB1-C1と呼ぶ。Young率が $6.4 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、破断強度が $1.9 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ である高弾性CFRPを貼付したモデルをcaseB1-C8と呼ぶ。

図-7に解析結果の荷重変位関係を示す。caseB1-C1、caseB1-C8では初期剛性がそれぞれ 60 kN/mm 、 62 kN/mm となった。それぞれ健全系caseB0と比較すると、99%、102%まで剛性が回復している。鋼材はいずれも下フランジの損傷部分から降伏する。caseB1-C1では変位15mm($P = 902 \text{ kN}$)で鋼材が降伏する。鋼材降伏後、変位28.6mm($P = 1313 \text{ kN}$)で鋼材降伏部分付近でCFRP界面剥離が始まる。変位39.8mmで床版の圧壊が始まる。変位40.4mmでCFRPが全面剥離し、図-7に示すように、未補修のcaseB1と同等の荷重まで低下する。

caseB1-C8では変位15mm($P = 945 \text{ kN}$)で鋼材が降伏する。その後変位23.6mm($P = 1285 \text{ kN}$)で鋼材降伏部分付近のCFRPが破断した。高い弾性率を有し剛性回復効果が大きい高弾性CFRPを貼付した場合(caseB1-C8)、健全時と同程度までの耐荷力回復効果が見られたが、破断時のたわみは降伏時の1.5倍程度と比較的早期に破断する。よって、CFRPの弾性率やシートの積層数を適切に選定するなどして、破断に対し十分な安全余裕をとるか、他の破壊モードへと誘導することが望ましいと考える。一方、大きい破断強度を有する高強度CFRPを貼付した場合(caseB1-C1)、高弾性CFRPほど大きい剛性回復効果は得られず、耐荷力回復効果は高弾性CFRPと比較すると低い。CFRPの破断は起こりにくいだが、CFRP-鋼材界面の剥離が起こる。この場合CFRPの性能を十分に生かすことができず、破壊も脆性的なものとなった。以上からコンクリート系床版を有する鋼桁の補修・補強設計においては、床版の圧壊を終局状態とみなし、床版の圧壊までCFRPの破断・剥離は避けるように設計することが望ましいと考える。床版の圧壊を終局状態とし床版のコンクリートの破壊を靱性的にすることで、粘り強い変形へと誘導することが可能であると考えられる。

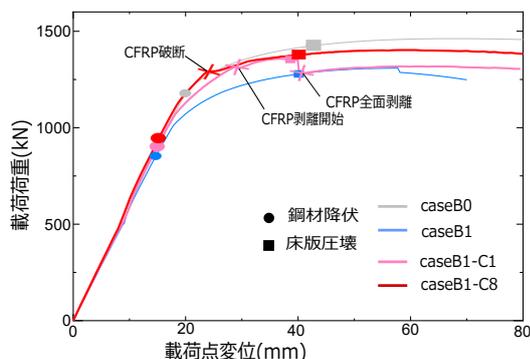


図-7 RC床版を有する鋼桁解析 荷重変位関係

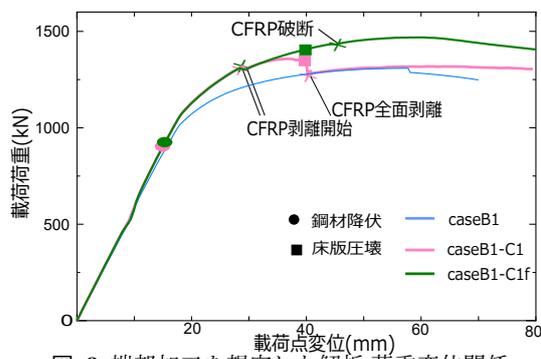


図-8 端部加工を想定した解析 荷重変位関係

(3) 端部定着を想定した解析

前章より、CFRPの破断に先行して剥離が起きるとき全面剥離は避けられず、特に脆性的な破壊となることが分かった。また鋼材損傷部分は鋼材の変形が大きく、CFRPの剥離が起りやすく特に対策が必要であるといえる。そこで剥離に対する対策として、CFRPの貼り付け両端部を定着板とボルトを用いて加工し、剥離を抑制する補修工法について検討する。図-9の caseB1-C1f 底面図に示すように、CFRP 貼り付け両端部の 200mm を定着板で加工することを仮定し、この範囲には鋼桁と CFRP で節点を共有し、剥離が起らないものとした解析を行った。CFRP シートは高強度 CFRP を用いることとし、解析結果を caseB1-C1f と呼ぶ。

図-8 に荷重-荷重点変位関係を、図-9 に caseB1-C1 と caseB1-C1f の剥離の進展と有限要素モデルを示す。端部加工がない caseB1-C1 と同様に、caseB1-C1f でも鋼材損傷部分から剥離が始まり進展する。caseB1-C1 では変位 40.4mm で CFRP が全面剥離した。しかし、caseB1-C1f では CFRP 端部加工の効果により剥離の進展が抑制され、剥離範囲はスパン中央から 1700mm 程度までに限られており、全面剥離には至らなかった。図-8 に示すように caseB1-C1 と比較すると、caseB1-C1f では剥離による大きな耐力の低下は見られない。変位 38.7mm で床版の圧壊、変位 45.2mm で CFRP の破断が始まり徐々に耐力が低下し始める。caseB1-C1 と比較すると caseB1-C1f は、図-9 の変位 50.1mm の図に示すように剥離範囲が限定的であるため大きな耐力の低下は見られず靱性的な破壊であるといえる。特に、破断しにくく剥離が先行する高強度 CFRP に対してはこの工法は有効であるといえる。

5. まとめ

H 形梁の解析から、CFRP の破断、CFRP-鋼材界面の剥離はともに脆性的な耐力低下となることが分かった。解析結果を踏まえ、鋼曲げ部材の補修設計においては以下のことが推奨される。

- 破断に対して十分な安全余裕を確保するように設計する、もしくは他の破壊モードへと誘導する。
- CFRP の破断に先行して界面の剥離が起きる場合、十分な貼り付け長を確保したとしても全面剥離が

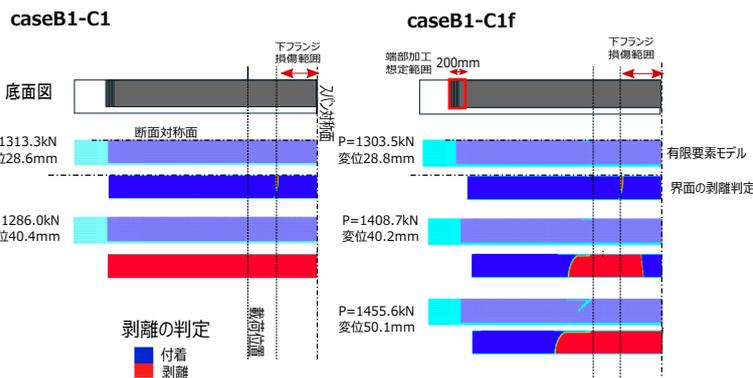


図-9 caseB1-C1 と caseB1-C1f の剥離の進展と有限要素モデル

避けられない。したがって剥離により終局状態となることは避けるか、十分な余裕を確保する。また、RC床版を有する鋼桁の解析結果を踏まえ、その補修設計に関して以下の知見を得た。

- コンクリートの圧壊を終局状態とすることで、CFRP の破断・剥離を終局状態とみなすよりも靱性的な破壊へと誘導することが可能である。
- CFRP の弾性率、強度によって CFRP の終局状態は異なり。CFRP を適切に選定することで、破壊モードの誘導が可能であるといえる。
- 端部を定着板などにより加工し、CFRP の全面剥離を避けることで、剥離が進展したのちも補強効果を発揮させることができる。

参考文献

- 1) 越智内士・村松政秀・久部修弘：鋼 I 桁下フランジに貼付する高弾性 CFRP 板の剥離防止方法に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.57A，2011，3。
- 2) 公益社団法人土木学会複合構造委員会：複合構造シリーズ 09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)，2018。
- 3) 高橋一生・斉木功・山本剛大：FRP 接着により補強された鋼部材の接着部耐力の数値的評価に関する基礎的検討，平成 30 年度土木学会東北支部技術研究発表会，2019。
- 4) A.Needleman：Some issues in cohesive surface modeling，Procedia IUTAM 10，pp.221-246，2014。
- 5) 浦杉江・小林朗・大垣賀津雄・稲葉尚文・富田芳男・長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究，土木学会論文集 A，Vol.64，No.4，pp.806-813，2008,11。

(2022 年 2 月 1 日 提出)