# CFRP補強された鋼桁の曲げ終局メカニズムに関する数値的考察

東北大学工学部 学生会員 〇笠原 華子 東北大学大学院工学研究科 正会員 斉木 功

#### **1.** はじめに

近年、鋼橋の経年劣化が問題となっている。その補修・補強工法の一つとして炭素繊維補強(CFRP)シー 側面図ト等の貼付がなされている<sup>1)</sup>.この工法は、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、腐食断面欠損のある部材の耐荷力向上や亀裂進展の遅延などが期待できる。実験などによりフラ 底面図ンジへの CFRP 貼付によって曲げ耐力の向上が確認されているが、その曲げ終局メカニズムは十分に明らかにされているとはいえず、そのため、設計における限界状態が規定できなていない。

そこで、本研究では CFRP 補強された鋼桁の曲げ終 局メカニズムを解明することを目的する. そのために、 曲げ降伏が先行するするような小型試験体を設計し、 鋼材の弾塑性および接着の剥離を考慮した非線形有限 要素解析を実施した.

## 2. CFRP を貼付した鋼桁とそのモデル化

図-1,図-2に示すような下フランジ下面に CFRP シートが貼付された H 形鋼 (H 125 × 125 × 6.5 × 9) を用いた 4 点曲げ試験体を解析対象とする。上フランジには座屈を防ぐことを目的としてカバープレートが溶接されている。

この試験体の有限要素モデルを図-3 に示す. 試験体の対称性を考慮した 1/4 モデルとした.

鋼材である H 形鋼とカバープレートの Young 率は  $2.0 \times 10^{11}$  N/m², Poisson 比は 0.3 とした.また,鋼材は完全弾塑性材料とし,H 形鋼とカバープレートの降伏応力をそれぞれ 235 N/mm², 315 N/mm² とした.CFRPシートは,図-1 の底面図に示すように下フランジ下面中央部にに貼り付け長 1200 mm で 5 層貼付されている.1 層を 0.5 mm とし,各層をモデル化した.貼り付け端部での応力集中を緩和するため各層が 50 mmずつ両端をずらして貼り付けられている20. また,鋼桁軸方向(x 軸方向)に炭素繊維が配置されており,鋼桁に直交する面内(yz 面内)で等方性となる横等方性とした.Young 率は x 方向で  $1.8 \times 10^5$  N/mm², y, z 方向で  $1.2 \times 10^4$  N/mm² とした30.

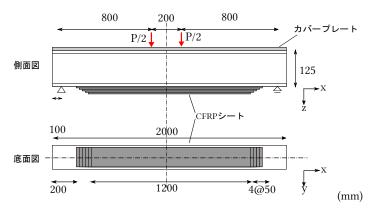
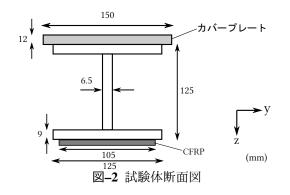


図-1 試験体全体図



荷重は強制変位として与えた。モデルはすべて 8 節点 6 面体要素で作成し、要素寸法は y, z 方向に対しては  $2 \text{mm} \sim 5 \text{mm}$  とし、x 方向に対しては載荷点付近で 2 mm, CFRP 貼り付け端部で 2.5 mm, その他の区間では  $5 \text{mm} \sim 10 \text{mm}$  とした。要素数は 68,712, 節点数は 127,239 となった。

CFRP-鋼材間の界面には cohesive モデルを用いる.図 -4 に cohesive モデルの応力-相対変位関係を示す.破壊モード I, II それぞれに対し,付着強度  $t_n$ ,  $t_s$ , ペナルティ剛性 K, エネルギー解放率  $G_F{}^I$ ,  $G_F{}^{II}$  を規定し,界面の剥離を評価する.界面の付着強度は  $t_n=25\ N/mm^2$ ,  $t_s=8.5\ N/mm^2$  とし,エネルギー解放率は破壊モード I では  $G_F{}^{II}=0.1\ N/mm^{1/3}$ . 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  $K=4.0\times10^6\ N/mm^3$  とした.

### 3. 解析結果

図-5 に下フランジ塑性ひずみの進展を示す. 荷重 P = 106 kN 程度で下フランジは等曲げ区間から降伏し

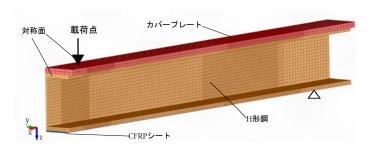


図-3 有限要素モデル

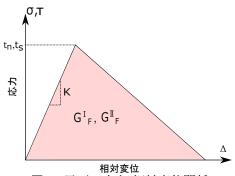


図-4 界面の応力-相対変位関係

始め、支点方向に降伏域が進展していった

また、CFRPシートは弾性として解析しているが、荷 重 150 kN 程度で CFRP シートは引張強度に達してい るため、鋼材降伏後に破断すると考えられる.

図-6(a) に鋼材と CFRP 界面の接線方向応力分布を示 す. 降伏前の P = 102.5 kN では, 貼り付け端部を除い たせん断区間で界面せん断応力は一定である. 鋼材降 伏後,スパン中央から 200 mm~ 400 mm 付近で接線 方向応力が卓越していることが分かる. P = 198.7 kN ではウェブ直下,スパン中央から350 mm付近で界面 接線方向応力が接線方向の付着強度に達し、さらに荷 重が増加するとウェブ直下,スパン中央から200 mm ~ 400 mm の範囲で接線方向応力が付着強度に達した. P = 203.6 kN の図から付着強度に達した後、応力は減 少していることが分かる. また, 図-**6**(b) にウェブ直下 の CFRP 界面せん断ひずみの軸方向分布を示す. 界面 の接線方向応力が付着強度に達した場所でせん断ひず みが荷重の増加に対して減少していることから、剥離 が進展していることが確認できる.

#### 斜辞

本研究の一部は, 土木研究所との共同研究として行 われた. 情報を提供していただいた関係者各位に感謝 する.

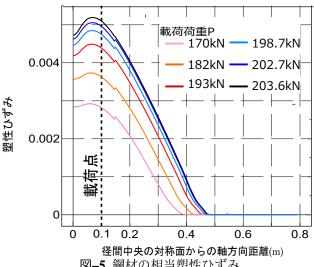
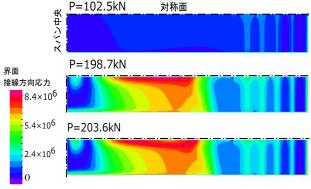
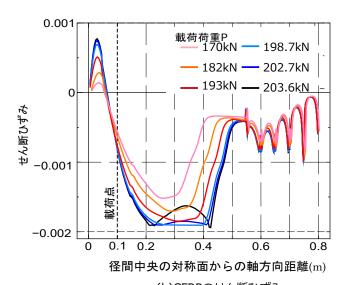


図-5 鋼材の相当塑性ひずみ



(a)鋼材とCFRP界面の接線方向応力



(b)CFRPのせん断ひずみ 図-6 鋼材と CFRP 界面の応力・ひずみ分布

### 参考文献

- 1) 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.
- 浦杉江·小林朗·大垣賀津雄·稲葉尚文·冨田芳男·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.
- 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荷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.