

CFRP 板のせん断変形を考慮した軸力を受ける CFRP 接着補修鋼板の理論解析

名古屋大学[院] ○白井瑛人 北根安雄 伊藤義人 京都大学[院] 石川敏之

Analysis of CFRP bonded steel plate subjected to axial force including the effect of shear deformation of CFRP plate

Akito SHIRAI, Yasuo KITANE, Yoshito ITOH, and Toshiyuki ISHIKAWA

1 緒 言

鋼構造物に対する CFRP 接着補修は施工性や耐食性における利点を持ち合わせることから、補修費用や維持管理費用を抑える合理的な補修方法として期待され¹⁾、国内の CFRP 接着による鋼構造物の補修・補強事例も近年その数を増やしている。しかし一方で、CFRP 板の接着端部における剥離に対する設計方法や、補修後の耐荷性能回復効果を定量的評価した補修設計方法が十分に確立されていないのが現状である。

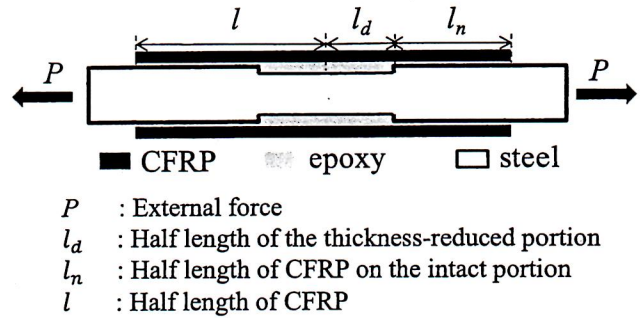
断面欠損を有する鋼板に対する CFRP 接着補修に関して、補修鋼板が軸力を受ける際の力学的挙動は、石川らが古典的なせん断遅れ理論によって理論解析的検討を行っている¹⁾。この理論解析では、CFRP および鋼板は軸力を伝達する要素、接着剤はせん断力を伝達する要素としてモデル化されており、CFRP と鋼板を軸力部材とした有限要素解析 (FEM 解析) 結果とも良好な一致を得ている。しかし、CFRP 板をソリッド要素でモデル化し、CFRP 板のせん断変形を考慮した FEM 解析結果と比べると、理論解析結果は鋼板から CFRP 板への応力伝達がより短い区間で生じる。実際の CFRP 接着補修鋼板では CFRP 板がせん断変形するため、鋼板から CFRP 板への応力伝達が、CFRP 板がせん断変形しない場合に比べて、遅れることになる。

これにより、補修の際の CFRP 板の必要長さ、すなわち必要定着長も影響を受けるため、CFRP 板のせん断変形が CFRP 接着補修鋼板の力学的挙動に与える影響を明らかにする必要がある。

本研究では、断面欠損を有する鋼板への CFRP 接着補修を対象とし、CFRP 接着補修鋼板の一軸引張荷重下における応力分布を求める理論解析において、CFRP のせん断変形の影響を考慮するため、接着剤の厚さを実際の厚さより増してより正確かつ簡便に理論解析を行う方法を提案する。

2 既存の理論解析とせん断変形を考慮した FEM 解析

本研究では文献 2) と同様、Fig.1 に示すような上下面に対称に、また鋼板の幅方向に一様に断面欠損を有する鋼板に、対称に CFRP 板を接着補修したモデルを考え、鋼板は引張軸力下にあると仮定する。Fig.2 に鋼板厚 9mm、断面欠損厚 3mm、欠損部片側長さ 40mm の欠損鋼板 (ヤング率 $E_s=200\text{GPa}$ 、せん断剛性 $G_s=769\text{MPa}$) を板厚 2mm の CFRP 板 1 層 (ヤング率 $E_1=150\text{GPa}$ 、 $E_2=E_3=4.7\text{GPa}$ 、せん断弾性係数 $G_{12}=G_{13}=1468\text{MPa}$ 、片側接着長さ 140mm) で補修したケースについて、鋼板の応力を既存の理論解析²⁾と FEM 解析とで評価した結果を比較する。部材軸方向に x 軸をとり欠損部中央からの距離を横軸に表している。縦軸は得られた鋼板の応力 σ_s を健全部鋼板応力 σ_{sn} で除した応力比を表している。このとき、 σ_s と σ_{sn} は断面の平均値とした。



- P : External force
- l_d : Half length of the thickness-reduced portion
- l_n : Half length of CFRP on the intact portion
- l : Half length of CFRP

Fig.1 CFRP bonded steel plate with a partical loss of cross-sectional area

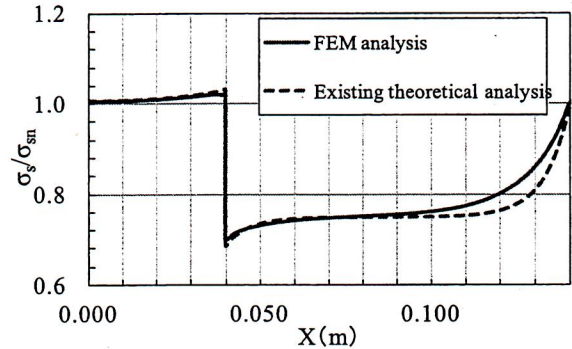


Fig.2 Comparison of steel stress between analytical solution and FEM analysis

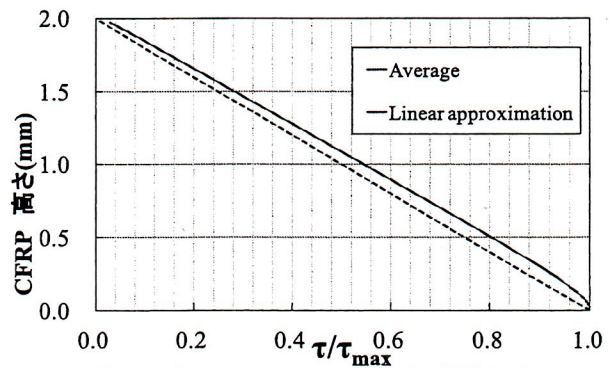


Fig.3 Shear stress variation in CFRP plate from FEM analysis

どちらの結果においても、接着端部から断面欠損部に至るまでの区間で、接着剤のせん断変形を介して鋼板から徐々に CFRP へ力が伝わり、鋼板応力がある一定の値に収束したのちに、断面欠損部で最小となっている。しかし、接着端部近くで鋼板から CFRP に力の伝達が生じている区間では、FEM 解析の鋼板応力が既存理論解析の鋼板応力より大きく評価されている。FEM 解析では、

CFRP のせん断変形の影響により、既存理論解析で想定しているほど鋼板から CFRP への応力の伝達が進んでいないことを示している。

Fig.3 に、Fig.2 と同じモデルに対して、FEM 解析で得られた CFRP 板断面高さ方向におけるせん断応力分布を示す。縦軸は CFRP の板厚方向の座標であり、横軸は中心からの距離 $x(\text{mm})$ の断面におけるせん断応力 τ をその断面での CFRP 下端に生じるせん断応力 τ_{max} で除した値である。せん断応力が大きい接着端部近くの $x=120\sim 137.5\text{mm}$ の断面で平均をとると、Fig.3 に示すようにほぼ線形の分布を示すことから、本研究では CFRP に生じるせん断応力は板厚方向に線形分布すると仮定する。

3 CFRP のせん断変形を考慮した修正理論解析

FRP 接着鋼板のせん断ひずみエネルギー U を、接着剤のせん断ひずみエネルギー U_e と CFRP 板のせん断ひずみエネルギー U_c の和とする。既存理論解析では、接着剤はせん断応力のみを、鋼板と CFRP は軸力のみを伝える部材として仮定しているため、接着剤のみせん断変形しせん断ひずみエネルギーが生じるが、接着剤の厚さを実際より厚くすることで、理論解析のせん断ひずみエネルギーを CFRP 接着鋼板がもつせん断ひずみエネルギー U に等しくすることを試みる。

ある微小区間 dx における CFRP 接着鋼板のせん断ひずみエネルギーは、CFRP に生じるせん断応力が板厚方向に線形分布すると仮定することで、材料定数と CFRP 下面に生じる最大せん断応力の関数で表現できる。同じ最大せん断応力のもとで、このせん断ひずみエネルギーと、理論解析における接着剤のせん断ひずみエネルギーが一致するように理論解析の接着剤の厚さを計算すると、式(1)の h' が得られる。

$$h' = h + \frac{t_c G_e}{3 G_{13}} \quad (1)$$

ここで、 h は接着剤の実際の層厚、 t_c は CFRP 板の板厚、 G_e は接着剤のせん断弾性係数、 G_{13} は CFRP 板の面外せん断弾性係数である。式(1)で計算される h' を文献 2) の既存理論解析における接着層厚に代入することにより、理論解析で CFRP のせん断ひずみエネルギーを接着剤のせん断ひずみエネルギーとして考慮することが可能となる。この h' を本研究では、換算接着層厚と呼ぶ。

4 解析結果と考察

Fig.2 と同じモデルに対して、式(1)による換算接着層厚を用いた修正理論解析と FEM 解析による鋼板応力を Fig.4 に比較する。Fig.4 からわかるように、既存理論解析では、FEM 解析と比べ一般部において鋼板から CFRP への力の伝わりが早い結果が見られたが、換算接着層厚を用いた修正理論解析では、一般部の鋼板応力が概ね FEM 解析結果と一致しており、換算接着層厚を用いることで鋼板から CFRP 板への力の伝達が理論解析で正確に表現できていることがわかる。

ここで、完全合成断面を仮定した場合の鋼板応力に収束するまでの接着端からの長さに着目すると、修正理論解析は既存理論解析より大きく、FEM 解析に近い。本研究では、この鋼板応力が完全合成断面を仮定した場合の値に至るまでの長さを収束長さと呼ぶ。FEM 解析を基準とした場合、理論解析における収束長さの誤差は、Fig.4 に示すモデルでは、既存解析で 13% であるのに対し、修正解析では 3.2% となる改善がみられた。同様の改善が、欠損長さや鋼板厚の異なる他のモデルにおいても確認できた。

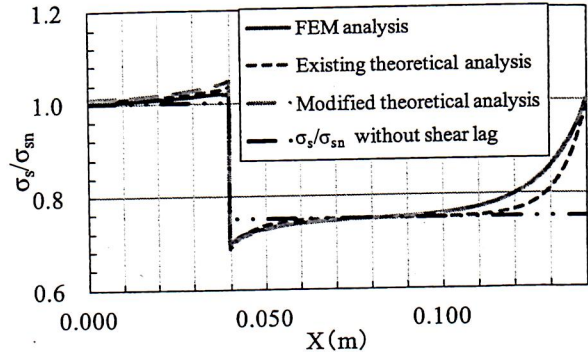


Fig.4 Comparison of steel stress among different analyses

今回検討したどの解析ケースも、文献 2) で示された CFRP 板の必要定着長は 45.5mm であるが、同じ計算方法で換算接着層厚 h' を用いると、必要定着長は 79.9mm となり、大きな差が生じる。本研究では、これより十分長い 100mm を定着長としたため、CFRP のせん断変形が補修効果に与える影響は小さい。実際の補修事例¹⁾でも十分に定着長を確保している場合が多いが、そのような場合においては CFRP のせん断変形が必要定着長に与える影響は少ないと考えられる。

一方で、断面欠損部での鋼板最大応力に着目すると、修正理論解析による断面欠損部の鋼板応力は FEM 解析の値より大きな値を示す結果となった。FEM 解析に対する誤差は、Fig.4 のモデルでは、既存解析で 1.2% であるのに対し、修正解析では 2.7% であった。ただし、今回検討した解析ケースの中ではその誤差が一番大きいものでも 3.0% であり、3% 程度応力を安全側に見積もる結果であるから、設計上は大きな問題ではないと判断できる。

5 結論

本研究では、断面欠損を有する鋼板に対する CFRP 接着補修を対象とし、CFRP 板接着補修鋼板の一軸引張荷重下における応力分布を求める理論解析において、接着剤の厚さを実際の厚さより増すことにより、簡便に CFRP 板のせん断変形の影響を考慮できる理論解析方法を提案した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 引張荷重下にある CFRP 板補修鋼板において、CFRP 板にせん断変形が生じると、鋼板から CFRP への荷重伝達が遅くなる。
- 2) 1 層の CFRP 接着補修鋼板の引張荷重下における鋼板に対する既存の理論解析において、接着層厚を式(1)で計算される換算接着層厚に置き換えることにより、CFRP のせん断変形の影響が反映され、鋼板から CFRP への応力伝達を精度よく予測できる。
- 3) 換算接着層厚を用いた修正理論解析を行うことにより、一般部における鋼板応力分布、および完全合成断面を仮定した場合の応力に達する長さは、既存理論解析より大幅に改善され、FEM 解析結果に近くなる。ただし、修正理論解析では、断面欠損部の鋼板最大応力が FEM 解析結果より約 3% 大きくなった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 石川敏之、北根安雄：断面欠損を有する接着補修に必要な CFRP 板の長さおよび板厚の決定方法、応用力学論文集, Vol.13, pp.911-920, 2010.