補剛材の溶接継手近傍に断面欠損を有する鋼部材の CFRP 接着による曲げ耐力の回復

首都大学東京大学院 学生員 〇西岡裕次郎 正会員 中村一史 三井海洋開発 坪川毅彦 東レ 正会員 松井孝洋

1. はじめに

炭素繊維を強化材とする CFRP は,高弾性・高強度であるこ と,軽量でハンドリングに優れることから,鋼構造物の補修補 強に適用されている.実構造物に適用される中で,より具体的 な検討も必要である.本研究では,補剛材の溶接継手近傍に断 面欠損を有する鋼部材における曲げ耐力の回復を明らかにす ることを目的として,断面欠損を擬似的にモデル化して検討を 行った.

2. 補剛材の溶接接合部に断面欠損を有する鋼板のモデル化 と実験方法

図-1 に、試験体寸法と試験の概要を示す. 図-1 のように補 剛材を有する鋼板の溶接接合部に断面欠損を与え,かつ断面欠 損部と健全部との間には、1:5 の直線勾配ですりつけを設けた 形状とする. 鋼種は SM490A, 降伏強度 411.9 N/mm², 引張強 度 568.0 N/mm², ヤング係数 195.0 kN/mm² である. 荷重条件は, 3 点曲げ載荷とした. CFRP に圧縮力が作用する,曲げ圧縮試 験では、荷重を補剛材の先端に鉛直下向きに、また、曲げ引張 試験では、荷重を鉛直上向きの載荷をする. 図-2に、セットア ップ図を示す.載荷試験には、島津サーボパルサ(静的容量: ±240kN)を使用した.補修の方針として,鋼部材の欠損厚さか ら炭素繊維(以下, CF)シートの弾性係数を考慮した等価な剛 性を付与すること¹⁾として, CF シートの必要厚さ(積層数)を 算出した. CF シートは, 中弾性タイプ(シートの厚さ 0.217mm, 引張強度 2.4kN/mm², 弾性係数 440kN/mm²) を用いた. 表-1 に 示すように、20%欠損では5層のCFシートを積層する.図-3 に、CFシートの配置と補修方法を示す. Casel では、欠損部に エポキシ樹脂接着剤で不陸修正を施した上で CF シートを接着 すること, Case2 では不陸修正なしで, また, Case3 では応力緩 和のため、1:5の勾配の欠損すりつけ部を1:10の勾配に不陸修 正して、CFシートを接着することとした.CFシートの積層接 着は,真空含浸法(VaRTM)²⁾によった. 表-2に,実験パラメ ータと最大荷重を示す.補修モデルの最大荷重は,試験体3体 の平均値である.なお、載荷は、健全モデル、無補修モデルで は、鉛直変位 50mm、補修モデルでは変位鉛直 25mm に達した 時点で終了とした.



図-1 試験体寸法と曲げ試験の概要図

表-1 鋼換算補修における炭素繊維シートの数量

項目	単位	20%欠損
鋼材の健全体の厚さ	mm	10.0
鋼材の必要厚さ	mm	2.0
CF シートの体積含有率	%	50
CFRP 必要厚さ	mm	1.82
必要積層数	層	5



図-2 セットアップ



表-2 検討パラメータと最大荷重

荷重条件	モデル名	検討ケース	最大荷重 kN	健全体に対す る割合
曲げ圧縮	R00C0-A	健全	6.37	1.00
	R20C0-A	無補修	5.24	0.82
	R20C1-A	補修 Case1	7.43	1.17
	R20C2-A	補修 Case2	6.56	1.03
	R20C3-A	補修 Case3	6.38	1.00
曲げ引張	R00C0-B	健全	6.33	1.00
	R20C0-B	無補修	5.16	0.82
	R20C1-B	補修 Case1	5.51	0.87
	R20C2-B	補修 Case2	5.33	0.84
	R20C3-B	補修 Case3	5.39	0.85

また,2次元弾塑性有限要素解析(Msc Marc2018)によりモデル化して,力学挙動,接着層のはく離を検討した. 鋼材の降伏後の硬化係数は鋼材のヤング率の1/100とした.また,別途実施した,接着接合部の試験結果より,接着 層の主応力が40N/mm²となった時点ではく離と判断した.

キーワード 断面欠損,曲げ耐力,真空含浸工法,炭素繊維シート,接着接合,はく離 連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 TEL.042-677-1111 内線(4564)

8000

実験結果と考察

図-4に、曲げ圧縮試験の荷重と鉛直変位の関係を示す、補修 モデルは、実験した3体のうち、最大荷重が2番目に高かった 1体を代表値として記載している.無補修モデルの最大荷重は, 健全モデルの最大荷重に比べて18%低下した.これは、20%の 断面欠損の部分が早期に降伏に達するためである.

一方, すべて補修モデルで, 最大荷重は健全を上回ることが わかる. Casel の最大荷重は, Case2, Case3 と比べて大きくな ること, Case2 と Case3 では差異が小さいことから、すりつけ の影響は小さいことがわかった. Casel では、不陸修正を施す ことで、CFRP の断面中心距離が大きくなり、欠損部の曲げ剛 性が高くなるためと考えられる. さらに, Casel を除いて, 解 析結果は実験とよい一致を示すことがわかる. Casel では,不 陸修正材が設計よりも厚くなり、剛性が増加したためと考えら れる. 図-5に、補修モデルの破壊の状態を示す. すべてのケー スにおいて,破壊形式は、断面変化点での CFRP の圧縮破壊で あった. Casel では鋼材と不陸修正材の間ではく離が生じたが, CFRP の圧縮破壊が曲げ耐力に支配的であることがわかった.

図-6に、曲げ引張試験の荷重と鉛直変位の関係を示す. すべ ての補修モデルで,早い段階ではく離が生じ,健全体の最大荷 重まで回復しないことがわかる. 図-7 に、補修モデルの破壊の 状態を示す. すべてのケースで、溶接接合部近傍の欠損部から はく離が生じ、進展した.曲げ引張状態では、隅角部のはく離 が曲げ耐力に支配的であることがわかった.これは、補剛材に 引張力を載荷すると、鋼板に対して CFRP には引きはがす方向 の力が働き,はく離に対しては厳しいためである. Case1, Case3 では、不陸修正材で凝集破壊が生じ、また、Case2、Case3 では CFRP の層間破壊が生じている.

表-3に、曲げ引張試験におけるはく離荷重を示す. ケースご とに比較すると、Case2 が最も高く、Case1 が最も低くなった. 不陸修正材の量に応じて強度が低下する傾向があり, その強度 に依存することが考えられる.実験と解析を比較すると、はく 離が生じる箇所は溶接接合部の隅角部である点は一致するが, すべてのケースにおいて,解析よりも実験の方が,はく離荷重 が高くなった.これは,溶接接合部の近傍では,実際には,CFRP が緩やかに折れ曲がることに対して,解析では直線的に折れ曲 がるようにモデル化しており、その応力集中の影響で、はく離 荷重が過小に評価されることによるものと考えられる.

7000 6000 5000 € 4000 R00C0-A(実験 R20C0-A(実験) R20C0-A(実験) R20C1-A(実験) R20C2-A(実験) 痯 3000 픹 R20C3-A(実験 2000 - 0- -R00C0-A(解析 - 17- -R20C0-A(解析 R20C0-A(解析 R20C1-A(解析 R20C2-A(解析 R20C3-A(解析 1000 0 -15 -45 -35 -25 変位 (mm) 曲げ圧縮試験における荷重-鉛直変位の関係 図-4



図-5 曲げ圧縮試験における破壊の状態





曲げ引張試験における破壊の状態 図-7

表-3 曲げ引張試験におけるはく離荷重

補修ケース・	はく離荷	宝融/細北	
	実験	解析	天歌/胜州
Case1	1.47	1.14	1.29
Case2	2.71	1.81	1.50
Case3	2.27	1.36	1.67

3. まとめ

以上のことから、曲げ圧縮試験では曲げ耐力が回復すること、また、曲げ引張試験では溶接接合部で、低い荷重 ではく離が生じ、今回の補修方法においては、健全体の性能までは回復しないことが確かめられた.

参考文献

1) 高速道路総合技術研究所:炭素繊維シートによる鋼構造物の補修補強工法設計・施工マニュアル, p.32, 2013.10

2) 小林洸貴,近藤諒翼,中村一史,松本幸大,松井孝洋,越智寛:真空含浸工法を応用した CFRP 接着による鋼桁 端腐食部の補修に関する実験的検討,土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.5, pp.II_20-II_31, 2017.5