

断面欠損を有する補剛材溶接部の CFRP 接着による曲げ耐力の回復とはく離強度の向上の検討

東京都立大学大学院 学生員 ○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、鋼構造物の補修材料として注目され、近年、研究が進められている。CFRP 接着による補修効果が明らかにされているが、CFRP 接着工法を種々の実構造物の条件に適用するためには、課題が残されている。本研究では、補剛材の接合部近傍に断面欠損を有する鋼部材への曲げ耐力の回復を目的として、CFRP 接着工法の適用性とはく離荷重の向上を検討した。CFRP 接着方法として、図-1 に概念図を示すように、大型 FRP 構造物の製造方法の一つである VaRTM 成形 (Vacuum Assisted Resin Molding) ¹⁾ を応用している。

2. 試験体と試験方法

図-2 に、試験体寸法と試験の概要を示す。図-2 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 を用いた。荷重条件として、単純支持として、断面欠損側 (CFRP 補修側) が曲げ引張状態となるように、補剛材の先端に鉛直上向きの荷重をすることとした (図-2)。補修の方針として、鋼部材の欠損厚さから CFRP の弾性係数を考慮した等価な剛性を付与すること ²⁾ として、CF シートの必要厚さ (積層数) を算出した。その結果、5 層の CF シートを積層することとした。健全体の性能までの回復を補修の目標とし、健全体の全塑性時の荷重である、5.617kN を耐荷力の目標値としている。表-1 に、試験体と補修に使用した材料の物性値を示す。図-3 に、補修ケースを示す。Case1 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。また、補修 Case1 を施したうえで、隅角部のはく離防止のために接合部に円弧状の不陸修正 (以下、R 加工と呼ぶ) を施したケースも用意した。R 加工半径は事前の解析結果を踏まえ、30mm とした。

さらに、汎用有限要素解析ソフト MSC Marc 2018 を用いて、実験での荷重条件に基づいてモデル化し、弾塑性有限変位解析により、力学的挙動、接着層のはく離強度を検討した。解析モデルは 4 節点ソリッド要素でモデル化し、厚さは試験体の幅方向と同じ寸法の 60mm を設定した。図-4 に、補修試験体の解析モデル (C1 のみ) の補剛材の接合部の拡大図を示す。R 加工無し補修 (C1, C2, C3) についても、実際の試験体は CFRP が緩やかに折れ曲がるため、計測に基づいた R 半径を与え、モデルを作成している。

3. 実験結果とはく離強度の評価

表-2 に、検討ケースと結果のまとめを示す。はく離荷重は、CFRP 上面に設置したひずみゲージの変化よりのはく離を評価し、その時の荷重とした。はく離強度は、解析結果よりのはく離荷重時の接着剤の一層目 (鋼材と CF シートの間) における最大主応力のピーク値で評価した。

曲げ引張状態では、接合部での CFRP を引きはがす作用が厳しく、全てのケースで、曲げ耐力の目標値に達する前にはく離

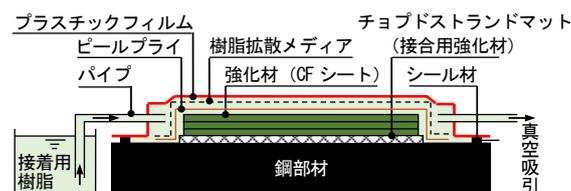


図-1 VaRTM 成形の概念図

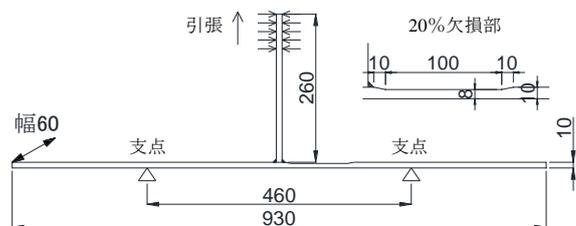


図-2 試験体寸法と試験概要図

表-1 材料物性値

材料	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	降伏強度 (N/mm ²)
鋼材	195000	0.286	411.9
含浸接着樹脂	3430	0.39	-
不陸修正材	3600	0.3	-
CSM	18750	0.3	-
CF シート	440000	0.005	-

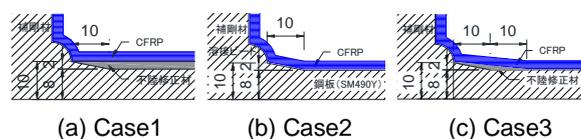


図-3 補修ケース

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 東京都立大学 TEL.042-677-1111 内線(4564)

表-2 検討ケースと接着用樹脂材のはく離強度のまとめ

モデル名	補修ケース	R 加工半径 (mm)	はく離荷重 (kN)	はく離強度 (N/mm ²)	補修ケースのはく離強度の平均値 (N/mm ²)	補修ケースの変動係数
C1	Case1	-	1.52	20.4	19.7	0.028
			1.47	19.7		
			1.42	19.0		
C2	Case2	-	2.53	21.7	23.2	0.068
			2.96	25.3		
			2.64	22.6		
C3	Case3	-	2.29	23.5	23.3	0.011
			2.28	23.4		
			2.23	22.9		
C1r30	Case1	30	5.00	25.0	25.0	-
平均 (全体)	-	-	-	22.3	-	-
変動係数 (全体)	-	-	-	0.091	-	-

が生じた。図-4 に示す、最大主応力コンタ図からも、接着剤に対し、引きはがす方向へ主応力が作用していること、隅角部付近 (×印) でピーク値となることがわかる。R 加工を施したケース (C1r30) においても、はく離荷重の向上がみられたものの、目標値以下ではく離が生じた。

実験結果より、解析から接着剤のはく離強度を評価した。評価の結果を表-2 に合わせて示す。図-5 に、はく離荷重とはく離強度の関係を示す。これらの図表より、はく離荷重に対して、はく離強度は 19~26N/mm² に収まること、また、その平均値は 22.3N/mm² であり、変動係数は 9.1% であることがわかる。したがって、はく離強度は、はく離荷重によらず、ほぼ一定となることから、この指標を用いれば、解析的にはく離を評価できるといえた。

4. はく離防止を目的とした解析的検討

以上の結果を踏まえ、さらにはく離に対する強度を向上させるために、積層数と R 加工半径をパラメータとした解析的な検討を行った。

R 加工半径 30, 35, 40mm に対して、それぞれ積層数を 5 層から一層ずつ増やし、目標値まではく離が生じない積層数を検討した。はく離は、前述の検討から求めたはく離強度の平均値を用いて評価し、接着層一層目の最大主応力ピーク値がはく離強度に達したときをはく離と判断し、その時の荷重をはく離荷重として求めた。

図-6 に、CF シート積層数とはく離荷重の関係を R 加工半径ごとに示す。R 加工半径 30mm では 18 層で、35mm では 12 層で、40mm では 7 層で目標値の曲げ耐力の荷重まではく離しないことがわかった。はく離荷重の向上効果は、CF シートの積層数よりも R 加工半径による影響が大きいことが確かめられた。

5. まとめ

以上のことから、曲げ引張状態では、隅角部ではく離が耐力に支配的であること、補剛材接合部に不陸修正を施すことではく離荷重が向上すること、有限要素解析からはく離強度の評価が可能であることがわかった。今後、解析から得られたはく離対策について、実験を行ってその効果を検証する予定である。

参考文献

- 1) 小林洗貴, 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
- 2) 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

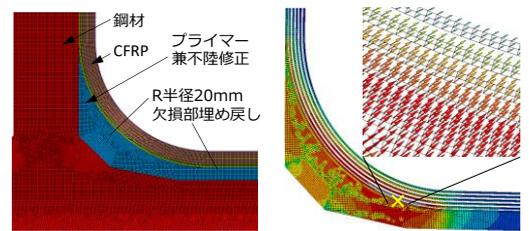


図-4 解析モデル (C1) と接着層の応力コンタ図

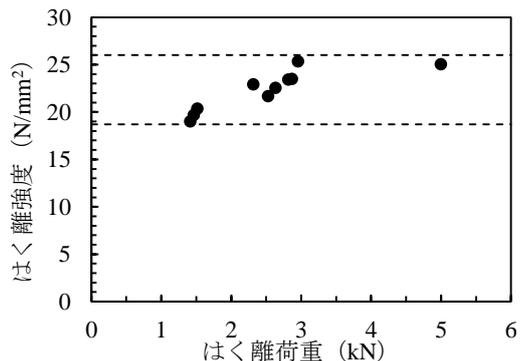


図-5 はく離荷重とはく離強度の関係

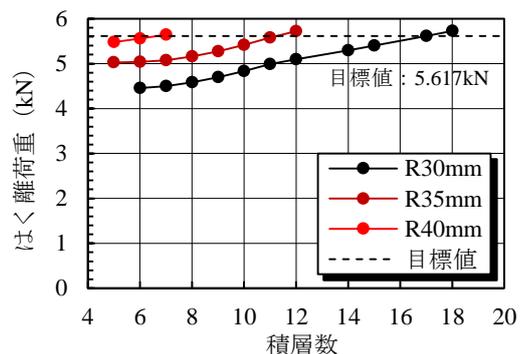


図-6 積層数とはく離荷重の関係