

第 I 部門

部分的に破断した GFRP に対する補修板接着補修に関する研究

京都大学工学部 学生員 ○佐藤 顕彦 京都大学大学院 正会員 鈴木 康夫
 京都大学大学院 正会員 松村 政秀 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征
 京都大学大学院 学生員 林 巖

1. はじめに

ガラス繊維強化ポリマー(GFRP)は比強度が高い、腐食しないといった特徴を有し、橋梁の構造部材や補修材料として活用されている¹⁾。FRP 部材には、紫外線劣化、マトリックス内き裂、層間剥離、強化繊維の破断等の損傷が生じることから、FRP 製の橋梁や部材の持続的な維持管理の実施に向けて、損傷影響評価や補修方法に関する技術開発が求められる。

そこで、本研究では、GFRP 製クーパーン試験片を用いる 1 軸引張実験を実施し、部分的な繊維破断が部材強度に及ぼす影響を明らかにするとともに、補修板(Patch)を繊維破断箇所に着着する補修効果を、引張強度の向上と補修板への応力伝達に着目して検討する。

2. 1 軸引張実験

本研究では、強化繊維に部分的破断を有する GFRP に対して、破断深さ以上の板厚を有する補修板を両面に接着する補修法に着目し、実験には、Health, DMG, CE, DD の 4 種類の供試体を使用する。母材 (350×25×5.9mm)、補修板 (200×25×2.0mm) とともにロービングクロス材と不飽和ポリエステル材で構成した GFRP 積層板から切り出し作製する。Health は健全な母材、DGM は FRP の材料定数 1.15~1.3²⁾を参考に母材中央に 1.8mm (板厚の 30%) の切込みを入れ強化繊維の部分的破断を模擬した損傷供試体、CE, DD は表-1 に示すエポキシ樹脂系接着剤により GFRP 製補修板を両面に接着した、DGM に対する補修供試体である。補修板および母材の接着面は、FRP の強化繊維が露出し、かつ表面が粗くなるようディスクグラインダーにて調整し、接着面に一定の荷重を与え、20℃で 1 週間以上養生した。

載荷試験には精密万能試験機(島津製作所: AG-Xplus, 最大荷重 50kN)を用い、JIS K7164 に従い載荷速度 2mm/min の条件で最大荷重が得られるまで引張荷重を漸増させる。引張強度は、最大荷重を母材健全部の断面積で除して算出する。また、図-1 に示すようにひず

みゲージを貼付し、補修板に作用する直応力分布を計測し、計算値と比較する。計算値は、文献 2)を参考に健全な母材に対する部分積層部材の理論から式(1)~(3)を誘導し、算出する。

$$\sigma_p = \frac{E_p}{E_B} \xi \left\{ 1 - \frac{\cosh(cx)}{\cosh(cL)} \right\} \sigma_{Bn} \quad (1)$$

$$c = \sqrt{\frac{G}{E_B}} \sqrt{\frac{2}{1-\xi}} \frac{1}{\sqrt{ht_B}} \quad (2)$$

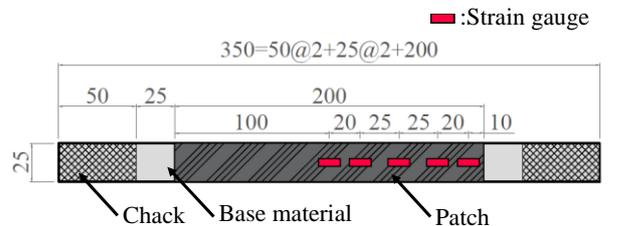
$$\xi = \frac{E_B t_B}{E_B t_B + 2E_p t_p} \quad (3)$$

式中の記号と材料特性は表-2 に示すとおりである。

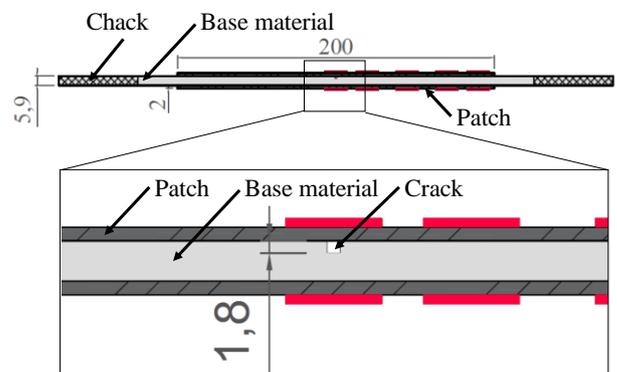
3. 実験結果

各供試体の引張強度を表-3 に示す。強度比は Health の引張強度に対する、各供試体の引張強度の比である。

表-3 から、DMG は Health と比べて強度比が 3 割程度低下し、強度回復のための補修を要することが確



(a) 供試体平面図



(b) 供試体側面図

図-1 供試体概要

認できる。補修供試体は補修板が端部から中央に向かって剥離し、その直後に母材の繊維破断が生じ終局に至った。補修供試体 CE は母材の引張強度を迎える前に補修板が剥離したため補修効果が認められなかったが、小さな弾性係数の接着剤を用いた DD では強度比が 92%まで回復した。したがって、接着層に生じるせん断応力は端部で最大となり、補修板の接着力が補修効果の発現に支配的であったことがわかる。

式(1)~(3)と同様の理論により、接着層に生じるせん断応力(τ)を表す次式を誘導する。

$$\tau = ct_B \frac{1 - \xi \sinh(cx)}{2 \cosh(cL)} \sigma_{Bn} \quad (4)$$

式(4)より、母材健全部の直応力が 50MPa の時、接着層に生じる最大せん断応力は、CE が 33.7MPa、DD が 3.0MPa と算定でき、接着層のせん断破壊が生じにくい DD が高い接着力を発揮したと考えられる。ただし、本実験では DD の接着層厚が CE の約 6 倍であったことも、接着層のせん断応力の差に影響を及ぼしている。

図-2 に、母材健全部の直応力が 50MPa の時の補修板の直応力分布を示す。グラフの横軸は補修板中央部からの距離を、縦軸は補修板が負担する直応力を表す。白抜きの印と塗りつぶしの印は、それぞれ切込みを有する面、切込みがない面で測定された実験値を表す(丸印: CE, 四角印: DD)。点線と実線はそれぞれ CE, DD の計算値を表す。

同図より、切込み部では計算値と実験値は異なるが、切込みから 20mm 以上離れると直応力の計算値と実験値が良好に一致している。このことから、板厚の 30% の切込みを入れた後に切込み深さの 111%の厚さの補修板を両面に接着した場合、補修板端部の直応力や接着層に生じるせん断応力を、健全な母材を対象とした部分積層部材の理論により算定できることがわかる。なお、切込み部の応力は、DD よりも弾性係数の大きな CE が実験値と計算値の差異が小さく、切込み部での曲げによる影響を緩和できたためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、1 軸引張実験を実施し、切込み(繊維破断)を有する GFRP 板の引張強度とそれに対する補修板接着効果を検討した。その結果、補修板接着補修を施すことにより、引張強度を向上させることが可能であることを示した。また、切込みを有する GFRP に対す

表-1 接着剤物性値

接着剤		CE	DD
引張せん断接着強さ	MPa	24.5	7.8
弾性係数	MPa	2889.5	121.8
ポアソン比		0.39	0.38
せん断弾性係数	MPa	1039.3	44.1
用途	CFRPの含浸樹脂		コンクリートのひび割れ注入剤

表-2 材料特性

補修供試体		CE	DD
E_B	弾性係数(母材)	MPa	26920.0
E_P	弾性係数(補修板)	MPa	20940.0
G	せん断弾性係数(接着剤)	MPa	1039.3 44.1
t_B	厚さ(母材)	mm	5.90
t_P	厚さ(補修板)	mm	2.00
h	厚さ(接着層)	mm	0.09 0.48
L	補修板の半接着長さ	mm	100
σ_{Bn}	母材健全部応力	MPa	50.0

表-3 引張強度の比較

供試体	切込深さ(%)	補修板長(mm)	引張強度(MPa)	強度比(%)
Health	-		295.0	100.0
DMG	31.45		212.4	72.0
DMG	31.20		192.2	65.2
CE	29.93	200	177.9	60.3
DD	31.45	200	271.7	92.1

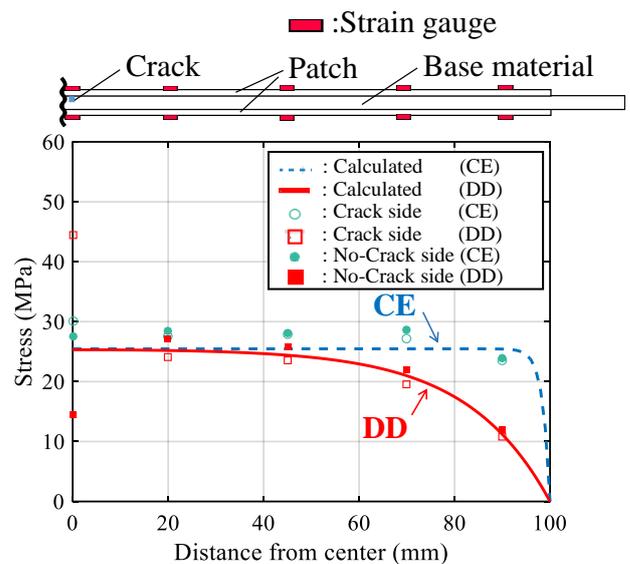


図-2 補修板の直応力分布

る補修板接着補修においても部分積層部材の理論が適用可能であることを示した。

参考文献

- 1) 土木学会, FRP 歩道橋設計・施工指針(案), 2011.
- 2) 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三, ”炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力”, 土木学会論文集 No.689, 2001