

CFRP 板による鋼部材の補修に関する基礎的研究

東京都立大学 正会員 中村一史・山沢哲也・前田研一
システム&リサーチ 土肥千夏
東京鐵骨橋梁 正会員 入部孝夫
日石三菱 高木秀敏
明星大学 正会員 鈴木博之

1. まえがき 近年、コンクリートの分野ではCFRP(炭素繊維強化プラスチック)を利用した補修・補強工法が確立されつつあるが、鋼構造の分野では十分なデータがないのが現状である。特にCFRP板は、取り扱いが容易で、高強度、高耐食性の特徴を有し、比重が鋼材の1/5程度と軽量であるため、鋼構造の現場補修材料として期待されている¹⁾。本研究では、CFRP板を亀裂損傷を受けた鋼板の補修材料として適用することを想定し、CFRP板の寸法やその材料特性をパラメータとして、応力集中部における応力の低減効果をFEM解析により明らかにし、さらに、疲労試験を行い亀裂の進展に対する抑制効果を検討した。

2. 解析モデルと解析条件 応力集中を模擬する基本的なモデルとして、図-1(a)に示すような中央部に直径 $\phi 2\text{mm}$ の円孔を有する鋼板を取り上げた。母材の材質をSS400とし、各部材の材料特性を表-1に示す。特にCFRP板は繊維方向に卓越した材料特性を有する異方性材料であり、その繊維の方向を引張方向とした。本研究では、貼付するCFRP板の大きさが応力集中の低減に及ぼす効果を明らかにする目的で、表-2に示すようにCFRP板を貼付しないモデルを含め、CFRP板の大きさを変化させた合計11ケースで検討した。なお、境界条件については図-1に併記したように、下側を拘束し、上側に一様な引張荷重 $p=100(\text{MPa})$ を載荷するものとした。数値解析には汎用有限要素解析プログラムMARC K7.3.2を適用し、すべての構成部材をソリッド要素でモデル化し、弾性解析を行った。解析モデル中央部における有限要素分割を図-2に示す。鋼板の応力集中部の板厚方向に分布する引張方向の応力 σ_Y のうち、特に着目点として、接着剤と接する点と板厚中心点(図-2中のP点とS点)に着目し、要素の平均応力として求めた。さらに、CFRP板の異方性を無視して、数値計算上、等方性とした場合も併せて比較検討した。

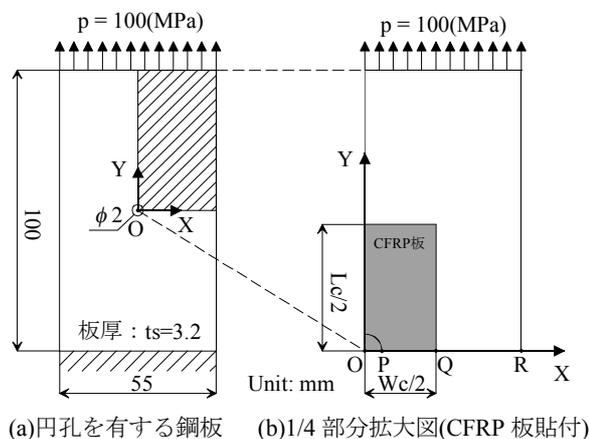


図-1 数値解析モデル

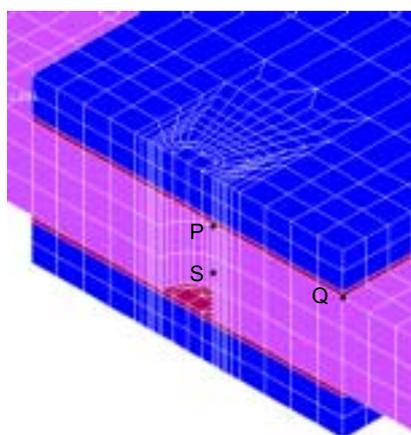


図-2 解析モデル中央部の有限要素分割

表-1 各部材の材料特性

鋼板 (SS400)		
ヤング係数(GPa)	Es	210
ポアソン比	vs	0.3
CFRP板		
ヤング係数(GPa)	Ecx	8
	Ecy	155
	Ecz	8
ポアソン比	vcxy	0.005
	vcyz	0.34
	vczx	0.005
せん断弾性係数 (GPa)	Gcxy	4
	Gcyz	5.2
	Gczx	5.2
エポキシ系接着剤		
ヤング係数(GPa)	Eb	4
ポアソン比	vb	0.3

表-2 CFRP板の寸法パラメータ
Unit: mm

モデル名	Wc	Lc	tc	
M-0-0-0	0	0	0	
M-1-2-1	8	30	1.4	
M-2-2-1	12			
M-3-2-1	16			
M-4-2-1	20			
M-5-2-1	28			
M-6-2-1	36			
M-7-2-1	55			
M-7-2-1	55			1.4
M-7-2-2				2.8
M-7-2-3				4.2

3. 数値解析結果と考察 解析の一部として、CFRP板を貼付しないモデル M-0-0-0 と、CFRP板を貼付したモデル M-2-2-1 の引張方向の応力分布を図-3に示す。CFRP板を貼付した場合、接着剤に接する鋼板表面の応力は十分に低減されているが、鋼板の板厚中心部の応力の低減効果は小さいことがわかる。

次に、CFRP板の寸法をパラメータとして、応力集中の低減効果を把握するために、表-2に示したようにCFRP板の幅 Wc と板厚 tc を変化させた時の鋼板の応力集中部に生じる引張応力 σ_Y を求めた。図-4, 5に、 Wc を孔径 ϕ で、 tc を鋼板の板厚 ts で無次元化して、CFRP板の異方性の考慮の有無別にそれぞれ示す。図より、CFRP板の幅あるいは板厚を大きくするほど応力は低下する傾向にあるが、幅は孔径に対して15倍程度、板厚は鋼板の板厚と同程度でその低減効果は小さくなる傾向がある。また、板厚比が大きい場合、CFRP板の異方性を考慮しないと応力の低減効果を過大に評価する傾向にあるといえる。

Key Words : CFRP板, 補修, 応力集中, 疲労亀裂

連絡先*: 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL. 0426-77-1111 FAX. 0426-77-2772

また、CFRP板(寸法: $Wc12 \times Lc30 \times tc1.4mm$)の繊維方向のヤング係数 E_{cy} を変化させた時の鋼板の応力集中部に生じる引張応力 σ_y を求めた。図-6に、 E_{cy} を鋼板のヤング係数 E_s で無次元化して同様に示す。図より、CFRP板の繊維方向のヤング係数が大きくなるほど応力は低減されることがわかる。しかし、炭素繊維そのもののヤング係数にほぼ匹敵するが、CFRP板のヤング係数を鋼板のものに対して約2倍まで高めても、応力集中部の板厚中心点における応力の低減効果は約40%程度であることがわかる。

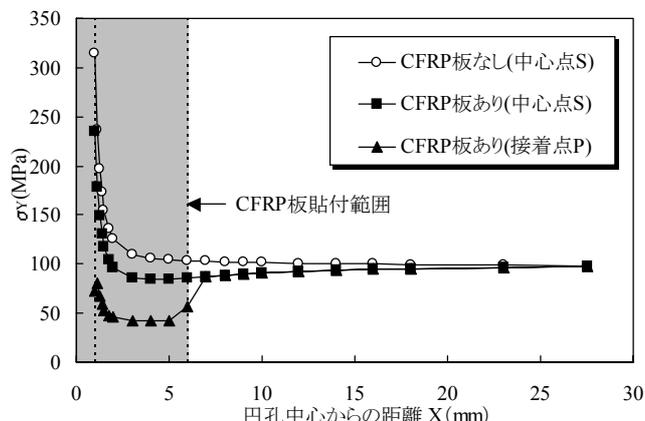


図-3 CFRP板の有無による鋼板の引張応力分布

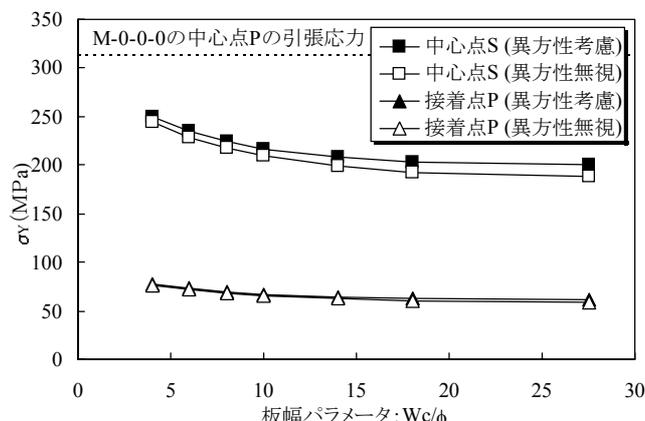


図-4 CFRP板の板幅と鋼板の引張応力の関係

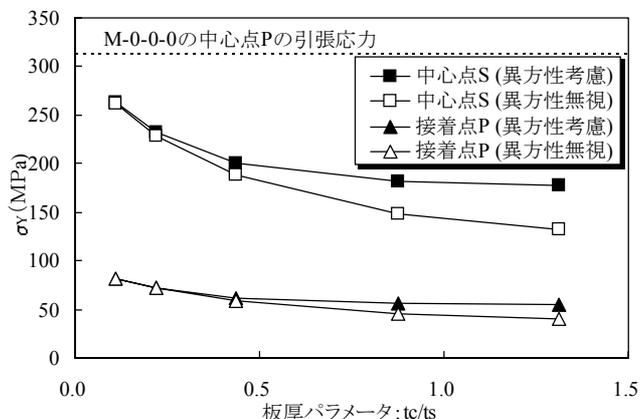


図-5 CFRP板の板厚と鋼板の引張応力の関係

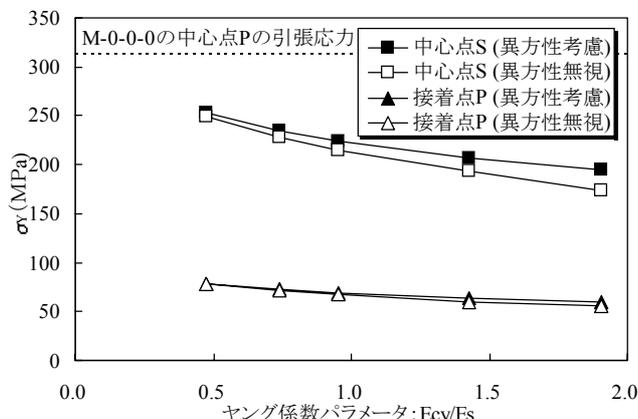


図-6 CFRP板のヤング係数と鋼板の引張応力の関係

4. 疲労亀裂の進展の抑制効果 最後に、亀裂を生じた鋼板にCFRP板を貼付して亀裂進展に対する抑制効果を検討するために疲労試験を行った。試験片の寸法および各部材の材料特性は上述の解析モデルと同一であり、応力範囲を $\Delta\sigma_n=205(MPa)$ 、 $R=0.02$ として繰り返し引張荷重を与えた。まず、CFRP板を貼付しない試験片を用いて疲労亀裂を最大で3mm生じさせた後、CFRP板(寸法: $Wc12 \times Lc30 \times tc1.2mm$)をエポキシ系接着剤で接着して補修を行った。さらに同様の荷重載荷条件の下で疲労試験を行い、その抑制効果を実験的に検討した。その実験結果の一部として、疲労亀裂の長さとし繰り返し回数との関係を図-7に示す。図中には、CFRP板を貼付しない試験片を用いて亀裂の伝播特性を別途検討した結果も併記している。図より、CFRP板の貼付によって若干の効果が認められるが、有意な疲労寿命の改善ではなかった。これは前述の解析結果で示したように、鋼板の応力集中部の応力をCFRP板の貼付によって十分に低減されていないためであると考えられる。なお、本実験での応力範囲は設計で想定する応力を大きく上回るものであり、設計レベルの応力範囲を対象とすれば、その抑制効果が認められると予想される。

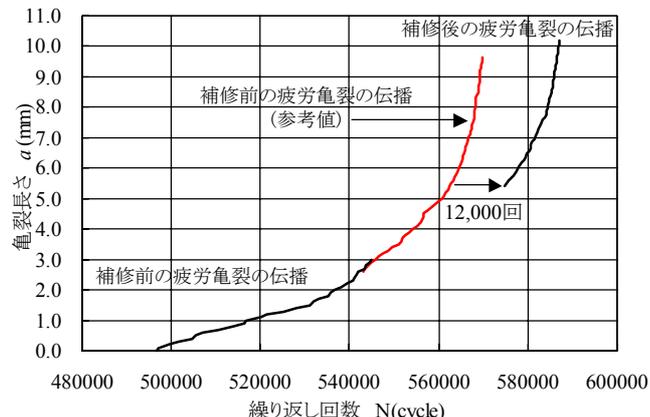


図-7 疲労亀裂の長さとし繰り返し回数の関係

図より、CFRP板の貼付によって若干の効果が認められるが、有意な疲労寿命の改善ではなかった。これは前述の解析結果で示したように、鋼板の応力集中部の応力をCFRP板の貼付によって十分に低減されていないためであると考えられる。なお、本実験での応力範囲は設計で想定する応力を大きく上回るものであり、設計レベルの応力範囲を対象とすれば、その抑制効果が認められると予想される。

5. あとがき このような円孔を有する鋼板で模擬した応力集中部の一様引張問題では、CFRP板の寸法が十分な大きさであっても、応力的に最も厳しくなる鋼板の板厚中心部の引張応力の十分な低減効果は見られなかった。しかしながら、接着剤を介してCFRP板に接する鋼板の表面の引張応力に対しては十分な低減効果が認められたことから、今後は曲げによる縁応力などが支配的となる部位への適用を検討したい。

参考文献

1) 鈴木・永崎・遠藤・池田: き裂を有する材の炭素繊維強化樹脂板による補強, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, 2000.11.