プレテンションを導入したCFRP板接着による 疲労き裂の補修

伊藤 寛弥1・中村 一史2・林 帆3

1学生会員 首都大学東京大学院博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 首都大学東京大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

3正会員 雲南大学 講師都市建設・管理学院(中華人民共和国 雲南省昆明市翠湖北路2号)

疲労き裂の補修を目的として、鋼板に圧縮プレストレスを導入する方法を採用し、軽量、コンパクトな プレストレス導入装置を開発した.本研究では、開発したプレストレス導入装置を用いて、補修効果を疲 労試験により検証した.まず、プレストレスの導入方法については、接着剤の養生時に、温度変化が小さ くなるように管理すれば、プレストレスの損失が小さくなることがわかった.さらに、疲労試験の結果か らは、鋼板にプレストレスを導入することで、疲労寿命が飛躍的に向上することが確かめられた.また、 鋼板の最大応力からプレストレス導入量を差し引いた値を有効応力範囲と定義し、S-N関係を整理すれば、 プレストレスを導入しない場合の回帰直線にほぼ重なることから、プレストレス導入による補修効果は、 応力範囲の低下によるものといえた.

Key Words : CFRP strip, prestress, fatigue crack repair, fatigue life, life extension

1. はじめに

都市部における鋼橋では、交通量の増加、過積載車両 の通行等によって疲労損傷が発生している.き裂発生後 の対策として種々の工法¹⁾が検討されている中で、軽量 で高剛性の炭素繊維強化樹脂板(以下,CFRP板)とエ ポキシ樹脂接着剤を用いた補修方法^{2,3}がある.CFRP板 接着によるき裂の補修は、CFRP板の当て板による応力 低減が主たる効果である.したがって、き裂先端の応力 拡大係数を低減するためには、CFRP板の剛性を高める ことが必要であり、積層数が増大することになる^{4,5,0}.

例えば、予め引張力(プレテンション)を CFRP 板に 与え、それを鋼板に接着して、硬化後に解放すれば、鋼 板に圧縮のプレストレスを導入することができる.この プレストレスの導入を適用して、き裂の補修法が提案さ れ、検討されている^{7~10}.さらに、コンクリートあるい は鋼桁の曲げ補強に対しても、種々の導入方法^{11,12}が提 案され、鋼橋の拡幅工事で、活荷重だけでなく死荷重時 の曲げモーメントの増加に対する補強対策³として適用 されている. しかしながら,提案されている CFRP 板へのプレテン ションを導入するための装置は,大型の油圧ジャッキと 反力を確保するための固定治具を必要としている. 図-1 に,鋼橋の疲労き裂の補修方法の概念図を示す.補修対 象は,鋼桁の面外ガセット継手の溶接止端部から発生す る疲労き裂であり,補修作業は,部材の取り合いが複雑 で,狭隘な環境となる.したがって,疲労き裂の補修に, 本工法を適用するにあたっては,プレストレス導入装置 の小型化が大きな課題となっていた.

さらに、プレテンションを導入した CFRP 板を接着し



図-1 鋼橋の疲労き裂に対する補修方法の概念図

た場合, CFRP 板には, 常時, 引張力が作用するため, 端部からはく離しやすくなる. 既往の検討では, 端部に 鋼板の定着体を設け, ボルトなどで被着体に固定するこ とで, CFRP 板端部からのはく離を防止している. き裂 補修の場合, 定着体を設置するスペースが確保できない 場合もあるため, はく離に対する抵抗強度を改善する必 要もある.

そこで、本研究では、現場での疲労き裂の補修に適用 可能なプレテンション導入装置を開発するとともに、プ レストレスの導入で問題となっている CFRP 板端部から のはく離に対して、その抵抗強度を改善する方法を提案 する.また、鋼板へのプレストレスの導入効果とはく離 に対する抵抗強度を検証するために、引張試験を行う. さらに、プレストレス導入による疲労き裂の補修効果を 検討するために、疲労試験を行う.

2. 開発したプレストレス導入装置の概要

(1) プレストレス導入の原理と手順

図-2に、開発したプレストレス導入装置の概略図を、 図-3に、プレストレス導入装置の外観をそれぞれ示す. CFRP板への引張力(プレテンション)の導入は、小型 油圧ジャッキが仕組まれた市販のナット(油圧ナット) の反力を利用している.用いた油圧ナットのストローク は最大2mmであり、最大60kNまでの軸力を導入するこ とができる.油圧ナットのストロークは、側面に取り付 けられた六角穴付きボルトを回して押し込むことにより、 伸びる仕組みとなっている.図-2に示したように、プレ テンションは、接着用鋼板間のCFRP板に導入される. CFRP板にプレテンションが導入されない部分を定着部

(定着長L_n)とよぶ.鋼板へのプレストレス導入の手順 を以下に示す.

Step1: CFRP 板接着固定治具の製作

はじめに、CFRP 板の両端に、反力を受けるための 2 枚の接着用鋼板を、エポキシ樹脂接着剤を用いて接着す る.養生の温度と時間は約 40°C,24 時間である.図-2 (a)に示したように、CFRP 板接着固定治具を製作する. 接着用鋼板の長さは、事前検討により 150mm とした. プレストレス導入量の限界値は、この接着用鋼板の長さ と定着部のはく離強度に依存する.さらに、プレストレ スの導入後、接着用鋼板を除去するために、その端部に は、鋼製のくさびがボルトで取り付けられている.接着 用鋼板を除去する際、CFRP 板の表面に損傷を与えない ように、CFRP 板と接着用鋼板の間の接着層には、ガラ ス繊維シート(0/90°クロス)を挿入している.

Step2: プレストレス導入装置の組み立て

図-4 (a)に, CFRP 板接着固定治具をボルトで接合して, 組み立てた状態のプレストレス導入装置を示す.鋼板の



(b)ボルトで組み立てたプレストレス導入装置 図-2 プレストレス導入装置の概略図



図-3 プレストレス導入装置の外観

両面からプレストレスを導入するために、この装置を 2 組製作する.

Step3:プレテンション導入

図4 (b)に示すように、CFRP 板へのプレテンションは、 油圧ナットを押し出すことで導入される. プレストレス 導入装置には、偏心が生じるため、その調整は、2 本の 長いボルトを用いて行う. プレテンションは、接着用鋼 板間の CFRP 板に均一に導入されるが、定着長 L_nの定着 部においては、接着剤にせん断応力が生じるため、 CFRP 板の引張力は、端部に向かって徐々に減少する. なお、プレテンション量は、後述するように、CFRP 板 の中央に設置された 2 枚のひずみゲージで制御する.

Step4:接着と養生

図-4 (c)に示すように、プレテンションを導入した CFRP 板を鋼板の両面に接着する. 養生の温度と時間は、 それぞれ約 40℃と 24 時間である. また、接着の際には、 接着層内にガラスビーズ(直径 0.4mm)を入れることで、 接着層厚を約 0.4mm に管理する. なお、養生中には、

CFRP 板の位置がずれないようにクランプしている. Step5:プレテンションの解放によるプレストレス導入

接着剤の硬化後,図-4(d)に示すように,両面の油圧 ナットを同時に緩めることで,CFRP板のプレテンショ ンを解放する.これにより鋼板には圧縮のプレストレス が鋼板の中央付近に導入される.

Step6: プレストレス導入装置の除去と仕上げ

図-4 (e)の①に示すように、プレストレス導入装置を除去する.次に、接着用鋼板に設けられたボルト孔にボルトをセットし、②に示すように、ボルトの締め付けにより、接着用鋼板に引き上げ力を作用させる.さらに、③に示すように、CFRP板と接着用鋼板を分離するために、接着層とガラス繊維シートの間に組み込まれたくさびを、端部から打ち込む.接着用鋼板を除去した後、CFRP板の表面をサンドペーパーで仕上げる.④に示すように、表面はCFRP板のみになるため、外観を損なわない補修となる.

(2) プレストレス量の制御方法

鋼板に導入されるプレストレスは、CFRP 板のプレテ ンションを解法することにより導入される. 鋼板に導入 される圧縮応力 (プレストレス量) は、後述する試験に おいては、鋼板の側面に設置されるひずみゲージにより 計測することができる. また、本研究では、CFRP 板に 導入するプレテンションは、CFRP 板の中央部に設置さ れたひずみゲージを用いて制御する. CFRP 板に導入す る引張ひずみ*Epre*と鋼板に導入されるプレストレス量*G*_x*pre* の関係は、以下の式によって示される¹³.



$$\sigma_{s,pre} = -(1 - \xi_0) E_s \varepsilon_{pre} \tag{1a}$$

$$\xi_{0} = \frac{1}{1 + 2E_{c}t_{c}b_{c}/(E_{s}t_{s}b_{s})}$$
(1b)

ここに、*E_s*, *E_c*, *t_s*, *t_c*, *b_s*および*b_c*は, それぞれ、鋼板、 CFRP板の弾性係数、厚さ、幅である.本研究では、安 全かつ確実にプレストレスを導入するために、事前検討 により、本装置の引張力の上限を31.5kNとした.これは、 弾性係数150GPaのCFRP板の場合、プレテンションによ る引張ひずみ ϵ_{pre} は2100×10⁶であり、315MPaに相当する 引張応力となる.式(1)より、このプレテンションの ひずみ量を導入することで、例えば、幅50mm、厚さ 9mmの鋼板には、理論上、プレストレスによる圧縮応力 $\sigma_{s,pre}$ =70MPaが導入される.また、Step4の加温養生中に、 CFRP板のひずみが低減する現象がみられた.これは、 室温から加温養生(約40°C)にともなう温度差による損 失と考えられ、第3章の引張試験による検証では、CFRP 板に導入するプレテンションのひずみ量を20%割増して、 与えることとした.

3. プレストレス導入量の検証と引張試験による はく離強度の検討

(1) 試験片と実験方法

試験片は、鋼板 (SM490Y, 590×9×50 mm)の両面に CFRP 板 (450×1.2×50 mm)をエポキシ樹脂接着剤で接 着したものである. 表−1 に、引張試験に用いた材料の 機械的性質を示す. 接着層厚は 0.4mm に管理した.プ

CFRP板(高強度 鋼板 エポキシ樹脂接 (SM490Y) 着剤(E250) タイプ) 降伏強度 (MPa) 415 引張強度 (MPa) 547 2808 30 破断のび (%) 26 1.9 弾性係数 (GPa) 150 1.5 206

表-1 引張試験に用いた材料の機械的性質



図-5 引張試験に用いた試験片の概略図

レテンションの解放による鋼板への圧縮応力の目標導入 量は σ_{s pe}=0, -70MPa の 2 通りである.前章で述べた手 順にしたがって,接着剤の硬化後,プレテンションを解 放して,鋼板にプレストレスを導入した.本実験では, CFRP 板端部の接着剤に生じるせん断応力を低減するた めに,150mmの定着長を確保する.

図-5に、引張試験に用いた試験片の概略図を示す.比 較のために、4種類の試験片を用意して引張試験を行っ た.NNは、150mmのCFRP板を接着し、プレストレスを 導入しない試験片、P-Ln000は、CFRP板の中央部分 150mmのみ接着し、プレストレス導入後にCFRP板を切 断除去した試験片である.P-Ln150、P-Ln150Sは、前述し た通り、定着長L,=150mmを確保した試験片であり、P-Ln150Sは接着用鋼板を除去しない試験片である.

これらの試験片を対象に、導入されるプレストレス量 を計測した.プレストレス量は、鋼板の側面に設置した ひずみゲージから得られたひずみに鋼板の弾性係数を乗



じて算定した. さらに,万能試験機を用いて,引張試験 を行い,プレストレスの導入がCFRP板の接着強度に与 える影響を検討した.

(3) 導入されたプレストレス量の評価

図-6に、鋼板に導入されたプレストレス(圧縮応力) の分布図を、また、表-2に、引張試験のパラメータと実 験結果を示す.これらの図表より、全ての試験片におい て、その中心(X=0mm)では、目標値の70MPaに相当する 圧縮のプレストレスが概ね導入されていることがわかる.

P-Ln000のStep4(プレテンションの解放時)では、プレストレスの分布は、併記した理論式による値⁵⁰とよく一致することがわかる.引張試験時にはプレストレスが 全体として低下する傾向がみられ、端部から25mm付近では、その低下の度合いが最も大きいことがわかる.

定着長L_nを確保した, P-Ln150およびP-Ln150Sでは, 導入されたプレストレスは, CFRP板の端部に向かって緩

封殿上々	CFRP板長さ	定着長	位美田留佐	CFRP板ひずみ	試験片中央部に導入されるプレストレス量α _{pe} (MPa)				最大引張応力
武贵 石	$2L_c$ (mm)	L_n (mm)	1女有/市到机汉	Step6 (×10 ⁶)	目標値	Step5	Step6	引張試験時	o₅n (MPa)
Ν	150	-	-	-	_	_	-	_	411
P-Ln000	150	0		1988	-70	-71	-71	67	288
P-Ln150	450	150	除去	1771	-70	-85	-63	62	417
P-Ln150S	450	150	除去せず	1969	-70	-84	-67	-66	441

表-2 引張試験のパラメータと実験結果

やかに零になることがわかる.また,定着長がある場合, 鋼板に導入されたプレストレスは,Step6のプレストレ ス導入装置の除去後に大幅に低下している.これは,偏 心調整用ボルトが負担していた反力が,導入装置を除去 することによって解放されるためである.なお,Step6 と引張試験時の応力分布では,両者にほとんど差はみら れず,安定していることがわかる.

(4) 引張試験結果と考察

引張試験結果の一部として、図-7に、引張応力と鋼板 中心部のひずみの関係を示す.まず、定着長のないP-Ln000では、表-2に示したように、最大引張応力 σ_{sr} = 288MPaで、端部よりCFRP板がはく離した.プレストレ ス導入を行わないNN、定着長を確保したP-Ln150、接着 用鋼板を除去しないP-Ln150Sでは、CFRP板は、一般部 の鋼板が降伏するまではく離しなかった.したがって、 開発したプレストレス導入装置を用いることで、確実な プレストレスの導入が可能であり、定着長150mmを確保 することで、鋼板の降伏点まではく離せず、十分な接着 強度を有することが確かめられた.

4. 疲労き裂補修への適用検討

(1) 試験片と実験方法

試験片には、有限幅板中の中央貫通き裂(2a=12mm) を有する鋼板(SM400,1100×9×100mm,降伏応力: 305MPa)を用いる. 表-3 に、疲労試験に用いた材料の 機械的性質を示す.まず、予き裂として、2a=6mmのソ ーカットを導入した鋼板を用いて疲労試験を行い、試験 片に初期き裂を与える.

図-7に、疲労試験に用いた試験片の概略図を示す. 試 験片は、CFRP板を接着しない、無補修の試験片 (FBN), CFRP板 (450×1.2×50mm) をエポキシ樹脂 接着剤で接着した試験片(FBC),両面で45kN相当のプ レテンションを導入したCFRP板を接着し、接着用鋼板 を除去しない試験片(FBPS),FBPSの状態から接着用 鋼板を除去した試験片 (FBPN) の4種類である. CFRP 板の寸法は450×1.2×50mmであり、プレストレスの導入 方法は第2章で述べた通りである.また、プレテンショ ンひずみ& の目標値は2100×10⁶であり、加温養生におい てプレストレスが20%損失することを考慮し、導入時の プレテンションひずみは2600×10⁶とした. したがって, 導入されるプレストレス量は、このプレテンションひず みの範囲であり、厚さ9mm、幅100mmの鋼板に導入され るプレストレス量は、式(1)より、 $\sigma_{s,pre}$ = -47~-38MPa となる. 導入するプレストレス量を検証するために、 試 験片の中央部に、ひずみゲージを設置した、図-8に、ひ ずみゲージの設置位置を示す.

疲労試験では、応力比Rは全ての試験片において一定 (R=0.1)とし、繰返し速度は10Hzとした.応力範囲 $\Delta \sigma_{sn}$ は、 $\Delta \sigma_{sn}$ =80、100、120、130、140および150 MPaの6通り とした.



表-3 疲労試験に用いた材料の機械的性質

		網店 (SM400)	CFRP板(高強度	エポキシ樹脂接
		业四月汉 (3101400)	タイプ)	着剤(E250)
降伏強度	(MPa)	305	-	-
引張強度	(MPa)	447	2808	30
破断のび	(%)	32	1.9	-
弹性係数	(GPa)	209	150	1.5



図-8 試験片の中央部におけるひずみゲージの位置

さらに、CFRP 板を接着した範囲において、き裂進展 の長さを測定するために、ビーチマーク法を用いた. ビ ーチマーク導入時における応力の制御方法は、最大応力 を固定して、応力範囲ムの。を元の応力範囲の値の 50%と した. ビーチマークの間隔は、応力範囲に応じて変化さ せた. 表-4 に, 疲労試験のパラーメータと試験片に導 入されたプレストレス量を示す. 繰返し回数の間隔は、 表-4 に、示す通りとした. なお、FBPS150 は、FBPS100 を用いて再試験を行った試験片である.また,FBPS150 では、再試験前にプレストレス量を計測していないため、 FBPS100 のプレストレス量を用いて評価している. 初期 き裂長さとビーチマークの間隔は、試験片が破断した後 に、マイクロスコープ(キーエンス VHX-2000)を用い て測定した.

(2) 導入されたプレストレス量の検証

図-9に、接着剤の養生中に計測した CFRP 板と鋼板の ひずみの経時変化の一例を示す. 試験片は FBPN140 で ある. プレテンション導入時では, CFRP 板の 4 つのひ ずみゲージのひずみの平均値は 2601×10⁶ であり,目標 値(2600×10⁶)が導入されていることがわかる.図よ り、時間の経過とともに徐々に低下し、プレストレスの 導入の直前で 2503×10⁶となった. ひずみの変化量はプ レテンション導入時から-98×10⁶ で 3.5%の低下であっ た. ひずみの低下が小さい理由は、図中に温度を併記し たように、プレテンション導入時の室温と養生時の温度 の差が約 10℃と小さかったためである. さらに、プレ テンションの解放による平均ひずみの変化量は鋼板では -205×10⁶で, CFRP 板では-223×10⁶であり, 鋼板と CFRP 板のひずみ変化量がほぼ一致する. これは、試験片中央 部では、鋼板と CFRP 板が一体となって挙動するためで

ある³⁾. したがって、試験片中央部のプレストレス導入 量は、CFRP 板のプレテンションの変化量で評価するこ ととした.

図-10に、鋼板中央部におけるプレストレスの分布図 を示す. 試験片は前述したFBPN140である. プレストレ スの分布はほぼ均一であり、その平均値は-44.6 MPaで あった.







表-4 疲労試験のパラーメータと試験片に導入されたプレストレス量

シナモシトレク	初期	き裂長さ(r	nm)	CFRP板の	の平均ひずみ	× (×10 ⁶)	プレストレス	量 $\sigma_{\! spre}$ (MPa)	ビーチマークの場下し回数	応力範囲
武 映 月	左側 a _l	右側a _R	$2a = a_{iL} + a_{iR}$	解放前a	解放後 &	$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$	中心	平均	の繰返し回数 間隔 <i>N_i</i> (cycles)	⊿o _{sn} (MPa)
FBN080	5.00	4.80	9.80	-	_	-	-	-	50,000	80
FBN100	5.56	5.54	11.10	-	-	-	-	-	43,000	100
FBN120	6.27	6.10	12.37	-	-	-	-	-	20,000	120
FBN150	5.94	6.02	11.96	-	-	-	-	-	5,000	150
FBC080	6.72	6.74	13.46	-	-	-	-	-	100,000	80
FBC100	6.70	6.50	13.20	-	-	-	-	-	52,000	100
FBC120	5.45	5.32	10.77	-	-	-	-	-	20,000	120
FBC150	6.13	6.18	12.31	-	-	-	-	-	11,000	150
FBPS100	-	-	10.20†	1984	1814	170	-33.2	-38.3	52,000	100
FBPS120	-	-	11.20†	2313	2172	141	-33.5	-40.3	100,000	120
FBPS130**	-	-	11.20†	2313	2072	241	-50.6	-42.9****	100,000	130
FBPS140**	6.33	6.39	12.72	2313	2037	276	-57.8	-39.3****	50,000	140
FBPS150*	5.42	5.46	10.88	1984	1814	170	-33.2	-38.3	52,000	150
FBPN120	-	-	11.55†	2535	2293	242	-51.4	-47.2	100,000	120
FBPN130***	6.26	6.27	12.53	2535	2282	253	-53.2	-42.5****	150,000	130
FBPN130	6.14	6.42	12.56	2501	2279	222	-46.7	-43.0	50,000	130
FBPN140	5.82	5.87	11.69	2503	2280	223	-46.8	-45.1	50,000	140
FBPN150	6.08	6.15	12.22	2519	2270	249	-52.4	-45.4	35,000	150

:プレテンション解放前のひずみ, E B

:FBPS100による再試験,

:FBPS120,FBPS130による再試験,

:プレテンション解放後のひずみ, t :ノギスによる計測値, :FBPN120による再試験,

: S1~S6のひずみゲージの値から算出

すべての試験片における鋼板中央部のプレストレスの 平均値を表-4に示す.再試験を行った,FBPS130, FBPS140,FBPN130では,CFRP板のひずみが,再試験前 の解放後のひずみに対して減少していることがわかる. 式(1a)は、CFRP板からプレストレス量を算出する方 法であり,これによれば,表-4より中心のプレストレス 量が見かけ上,増加することになる.これは、解放前の CFRP板のひずみを一定と仮定した場合であり、実際に は、経時変化とともにプレストレス量は、クリープ変形 によって減少すると考えられる.したがって、これらの 試験片では、鋼板のS1~S6のひずみを用いて、プレスト レス量の平均値を算出している.この評価によれば、再 試験によって、プレストレス量が若干低下していること が確かめられる.

以上のことから,鋼板の中央部におけるプレストレス 量として,目標の下限値(-38MPa)が,確実に導入さ れているといえた.

(3) 疲労試験結果と考察

表-5 に、疲労試験のパラーメータと実験結果を示す. また、破断までの繰返し回数は、ビーチマーク法におけ る半振幅時の繰返し回数を除いて評価している.また, 試験片中央部におけるひずみの変化は、疲労試験中に、 動ひずみ測定器(キーエンス製 NR-600)を用いて測定 した.本研究では、10,000,000 万回の繰返し回数に達し た時点で、ひずみの変化がない場合、疲労限と判定した. 表-5 に示したように、FBPS100、FBPS120、FBPS130、 FBPN120の試験片では、疲労限であると評価された.こ れらの試験片では、応力範囲をさらに上げて、再試験を 実施した.

図-11 に、応力範囲 150MPa におけるひずみと繰返し 回数の関係を示す.まず、FBC150では、CFRP 板の平均 ひずみがほかの試験片よりも高くなっている. これは, 図-8 に示したように, ひずみゲージが予き裂上に設置 されているためである. 全ての試験片で, き裂に進展に 伴って CFRP 板のひずみが増加することがわかる. CFRP 板のひずみは破断時まで増加していることから, CFRP 板は破断時にはく離したと判断された. さらに, 鋼板の平均ひずみも同様の傾向を示している. FBPS150 と FBPN150 の疲労寿命の差は, 表-5 に示すようにプレ ストレス量の差や, 後述するように, き裂進展のばらつ きが原因であると考えられた.

図-12 にき裂前縁に導入されたビーチマークの一例を, また,図-13 にき裂長さと繰返し回数の関係をそれぞれ 示す. き裂は FBPN150 を除いて左右でほぼ同時に進行 していることがわかる. FBPN150 においては,疲労試験 の途中から左側のき裂が先に進展していることがわかる.



表−5 疲労試験のパラーメータと実験結果								
試験片名	平均プレストレス量 <i>o</i> _{spre} (MPa)	最大応力 o _{max} (MPa)	最小応力 o _{min} (MPa)	応力範囲 ⊿o _{sn} (MPa)	有効応力範囲 ⊿o _e f (MPa)	破断までの 繰返し回数N _f		
FBN080	-	89	9	80	80	836,712		
FBN100	-	111	11	100	100	417,593		
FBN120	-	133	13	120	120	202,730		
FBN150	-	167	17	150	150	93,646		
FBC080	-	89	9	80	80	2,360,161		
FBC100	-	111	11	100	100	1,283,376		
FBC120	-	133	13	120	120	731,831		
FBC150	-	167	17	150	150	364,681		
FBPS100	-38.3	111	11	100	72.7	>10,000,000		
FBPS120	-40.3	133	13	120	92.7	>10,000,000		
FBPS130**	-42.9	144	14	130	101.1	>10,000,000		
FBPS140**	-39.3	156	16	140	116.7	1,130,369		
FBPS150*	-38.3	167	17	150	128.7	758,374		
FBPN120	-47.2	133	13	120	85.8	>10,000,000		
FBPN130***	-42.5	144	14	130	101.5	2,567,022		
FBPN130	-43.0	144	14	130	101.0	3,100,000		
FBPN140	-45.1	156	16	140	110.9	1,116,198		
FBPN150	-45.4	167	17	150	121.6	945,550		

* : FBPS100を用いて FBPS150として再試験,
*** : FBPN120を用いて FBPN130として再試験

: FBPS120を用いて FBPS130, FBPS140として再試験,



図-13 応力範囲 150MPa におけるき裂長さ繰返し回数の関係

これらの結果から、プレストレスの導入により、き裂の 進展は大幅に低下することがわかった.

図-14 に、応力範囲と繰返し回数の関係を示す.まず, CFRP 板接着による補修で、き裂進展速度が遅くなり、 疲労寿命が長くなることがわかる.また、FBPS では応 力範囲が 130MPa,また、FBPN では応力範囲が 120MPa において、補修後、10⁷回の繰返し回数に達してもき裂 の進展は確認されず、疲労限と判断された.FBPS と FBC の比較から、CFRP 板にプレテンションを導入する ことで疲労寿命が大幅に延び、補修効果が飛躍的に向上 していることがわかる.一方、応力範囲 130MPa では FBPS と FBPN に補修効果の差が生じたが、これは疲労 限付近のばらつきによるものと考えられる.FBPS と FBPN は、応力範囲 140MPa, 150MPa では、ほぼ同等の 補修効果が得られることから、接着用鋼板の有無が補修 効果に及ぼす影響はほとんどないといえる.

最後に、プレストレス導入による効果を明確にするために、鋼板の最大応力からプレストレス導入量を差し引いた値を有効応力範囲と定義し、FBPN、FBPSの応力範囲を再評価して、整理することを試みた.式(2)に、 有効応力範囲 $\Delta \sigma_{d}$ を示す.

$$\Delta \sigma_{eff} = \sigma_{max} + \sigma_{spre} \quad (\sigma_{min} + \sigma_{spre} \le 0) \tag{2a}$$

$$\Delta \sigma_{eff} = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (\sigma_{min} + \sigma_{spre} > 0) \tag{2b}$$

ここに、 σ_{max} 、 σ_{min} 、 σ_{syne} は、それぞれ最大応力、最小応力、導入プレストレスである.式 (2a)は、 $\sigma_{min} + \sigma_{syne} \le 0$ のき裂閉口の条件に基づいたものであり、式 (2b)は、通常の応力範囲を示す.



図-15 に、有効応力範囲と繰返し回数の関係を示す. 図より、有効応力範囲 110MPa 以上では、FBPS、FBPN のプロット点は、FBC の回帰直線にほぼ重なることが わかる.これより、プレストレス導入による補修効果は、 き裂近傍の応力範囲の低下によるものと考えられる.さ らに、本研究の範囲では、疲労限となる有効応力範囲は およそ 100MPa であると推定された.

5. まとめ

本研究では、疲労き裂補修を目的としたプレストレス 導入装置を提案し、引張試験と疲労試験を行って、開発 した装置の妥当性を検証した.その結果、以下の結論が 得られた.

- (1) 開発したプレストレス導入装置は、軽量でコンパク トであり、安全かつ確実にプレストレスを導入する ことができることが確かめられた.
- (2) プレストレスが導入されない定着長を設置する方法 を提案した.この方法によれば、プレストレスを導 入した場合でも鋼板の降伏強度まで十分な接着強度

を有することがわかった.

(3) プレテンションを導入したCFRP板を鋼板に接着す ることで疲労強度が飛躍的に向上することがわかっ た.また、プレストレス導入による補修効果は、最 大応力からプレストレス導入量を差し引いた有効応 力範囲で整理できることが確かめられた.

参考文献

- 鋼構造委員会編:鋼橋の疲労対策技術,鋼構造シリ ーズ22,土木学会,2013.
- 複合構造委員会編: 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,土木 学会,2012.
- 中村一史,諸井敬嘉,鈴木博之,前田研一,入部孝 夫:溶接継手部に発生した疲労き裂の積層 CFRP 板 による補修効果,鋼構造年次論文報告集,第 13 巻, 日本鋼構造協会, pp.89-96, 2005.
- Nakamura, H., Jiang, W., Suzuki, H., Maeda, K., and Irube, T.: Experimental study on repair of fatigue cracks at welded web gusset joint using CFRP strips, *Thin-Walled Structure*, 47(10), pp.1059–1068, 2009.
- 6) Lin, F., Sun, J. G., Nakamura, H., and Maeda, K.: Fatigue crack repair using drilled holes and externally bonded CFRP strips, *Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2012*, pp.1308–1315, 2012.

- Stöcklin, I., and Meier, U.: Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips, *Proceedings of the Seventh International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-5)*, pp.291–296, 2001.
- Colombi, P., Bassetti, A., and Nussbaumer A.: Analysis of cracked steel members reinforced by pre-stressed composite patch, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26(1), pp.59–66, 2003.
- Täljsten, B., Hansen, C.S., and Schmidt, J.W.: Strengthening of old metallic structures in fatigue with prestressed and non-prestressed CFRP laminates, *Construction and Building Materials*, 23(4), pp.1665–1677, 2009.
- 10) Huawen, Y., König, C., Ummenhofer, T., Shizhong, Q., and Plum, R.: Fatigue performance of tension steel plates strengthened with prestressed CFRP laminates, *Journal of Composites for Construction*, 14(5), pp.609–615, 2010.
- 11) Tateishi, A., Kobayashi, A., Hamada, Y., Takahashi T., and Yasumori, H.: Application of tensioned CFRP strip method to an existing bridge, *Proceedings of the Seventh International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-7)*, pp.1177–1190, 2005.
- 12) 松村政秀,北田俊行,北田健,並木宏徳:プレストレスを導入した CFRP による鋼桁のポストテンション補強法と補強効果に関する研究,構造工学論文集, Vol.51A, pp.183-192, 2005.
- 13) 野阪克義,石川敏之,小林朗:部分的にプレテンションされた CFRP 板接着鋼板におけるはく離せん断応力,構造工学論文集, Vol.57A, pp.1026-1033, 2011.

REPAIR METHOD OF CRACKED STEEL MEMBERS USING ADHESIVELY BONDED PRE-TENSIONED CFRP STRIPS

Hiroya ITOU, Hitoshi NAKAMURA and Fan LIN

A method of repairing cracked steel members with pre-tensioned CFRP strips was investigated experimentally. Since a compressive force is introduced into the steel members by releasing the pre-tension in the CFRP strips after bonding, this technique is an effective fatigue crack repair method. With the aim of applying the method to a real structure, a simple, compact pre-tensioning device prototype was developed, and the effectiveness of the repair method was verified experimentally. The preliminary experiments were conducted using flat steel plates and varying the pre-tension of the CFRP strips. Results of tensile and creep tests revealed that it was possible to introduce a compressive force into the steel plate rationally. Fatigue test results confirm that the application of this method to fatigue crack repair is feasible.