

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月27日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560484

研究課題名（和文）プレストレスの導入によるCFRP板接着工法の高性能化と疲労き裂補修の設計法の構築

研究課題名（英文）Development of Advanced Prestressing System by Externally-Bonded CFRP Strips and Repair Method of Fatigue Cracks

研究代表者

中村 一史（NAKAMURA HITOSHI）

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号：70264596

研究成果の概要（和文）：既設鋼橋でしばしば発生する疲労き裂の補修対策として、軽量で材料特性にも優れた、CFRP（炭素繊維強化樹脂）板を予め緊張して接着するための装置を開発した。疲労試験を行って、開発した装置を用いることで、疲労き裂の補修効果が飛躍的に向上することが確かめられた。さらに、実験的、解析的な検討を行って、CFRP板接着によって補修された疲労き裂の余寿命予測や補修設計法を提案した。

研究成果の概要（英文）：As a repair method of fatigue cracks, which are often initiated in existing steel bridges, an advanced prestressing system by externally-bonded CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) strips. The result of fatigue tests shows that the fatigue life after repair is drastically improved by using the developed system. Moreover, the methods of fatigue life prediction and the durability enhancement in the fatigue crack repair using externally-bonded CFRP strips were proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：構造工学・地震工学，構造・機能材料，維持管理工学，維持管理工学補修・補強

1. 研究開始当初の背景

近年、都市部の幹線道路などの鋼橋では、交通量の増加や、大型車両の通行による疲労損傷が数多く報告されている。鋼部材に一旦、疲労き裂が発生すると、き裂が徐々に進行し、主要部材が破断に至る可能性もあり、その対策が重要な課題となっている。疲労き裂の補修では、き裂進展の防止あるいは遅延を図るために、一般に、ストップホールと呼ばれる拡大孔を施工して、き裂先端を除去し、応力

集中を緩和する対策が取られる。さらに、補修効果の高い、ボルト締めや、当て板を併用する工法も適用される。しかしながら、これらの補修作業は狭隘な環境下で行われることが多く、特に、当て板で補強する場合、部材同士の取り合いを考慮して、ボルトの穿孔位置や添接板を設計、製作する必要があるため、作業工程が煩雑となる。また、実橋における種々の制約の下では、所要寸法の添接板の設置が困難であるケースもある。したがっ

て、施工が容易で、効果的な補修工法が望まれている。

2. 研究の目的

疲労き裂の補修材料として用いた CFRP 板は、軽量であり、現場でのハンドリングに優れることから、最近、鋼構造物の補修、補強にも試験的に適用され始めている。本研究では、CFRP 板接着による疲労き裂の補修効果の向上、および、き裂補修の設計法の提案を目的として、以下の検討を行った。

(1) 狭隘な施工環境にも適用可能なプレストレス導入装置の開発と補修効果の検証

補修現場でのハンドリングに優れた、軽量かつコンパクトなプレストレス（以下、PS とよぶ）導入装置を開発する。プレストレスを安全かつ確実に導入できるようにするとともに、プレストレスを導入した場合、端部からはく離しやすくなるため、その対策も提案する。さらに、開発した導入装置を用いて疲労き裂の補修を行い、疲労寿命に及ぼす影響を検証する。

(2) 疲労き裂の補修後の余寿命予測と補修設計法の提案

- ① 面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂を、積層 CFRP 板接着により補修した場合、その疲労寿命の予測手法を提案する。
- ② CFRP 板接着による疲労き裂補修の設計法の構築に向けて、動的な繰返し荷重の作用下で CFRP 板を接着し、その接着特性、および、養生中、硬化後の疲労き裂の進展挙動を検討する。
- ③ 面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂に対して、既存のストップホール穿孔と積層 CFRP 板接着の併用による補修の効果を検討するとともに、その補修設計法を提案する。

3. 研究の方法

(1) PS 導入装置の開発と補修効果の検証

PS 導入装置は、種々の要素実験を行って、プロトタイプモデルを開発するとともに、引張試験を行って、はく離対策の効果について検証する。さらに、疲労き裂に対する補修効果については、疲労試験を行って検証する。

(2) 補修後の余寿命予測と設計法の提案

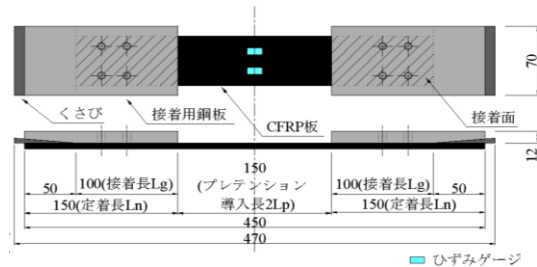
CFRP 板接着による補修効果については、疲労試験を行って検証する。さらに、FEM 解析を行って、き裂先端の応力拡大係数やストップホール縁の応力集中を算定して、余寿命予測や補修設計の妥当性を検討する。

4. 研究成果

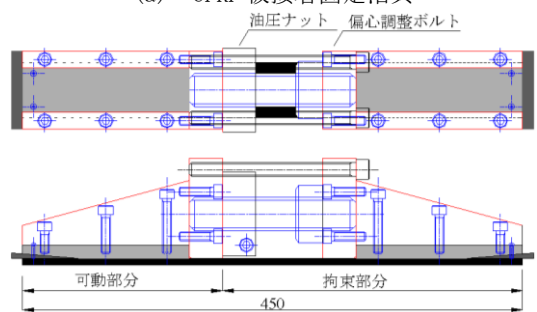
(1) PS 導入装置の開発と補修効果の検証

開発した PS 導入装置の概念図を図-1 に示

す。装置には、ボルトで脱着が可能な、図-1(a)の CFRP 板接着固定治具が小形油圧ジャッキ（油圧ナット）とともに組み込まれており、その特徴は、油圧ジャッキの伸縮によって、簡便かつ安全に、CFRP 板へプレテンションの導入と解放ができることである。さらに、プレテンションは接着用鋼板の間の CFRP 板に導入され、接着後は、接着用鋼板から CFRP



(a) CFRP 板接着固定治具



(b) プレストレス導入装置

図-1 プレストレス導入装置の概念図

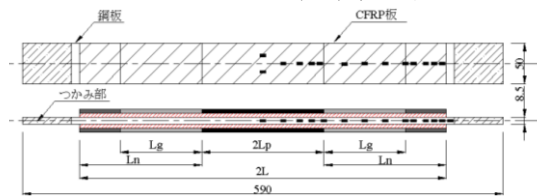


図-2 引張試験に用いた試験片

表-1 引張試験による実験シリーズと PS 導入量

試験片名	CFRP 板の接着長 2L (mm)	定着長 Ln (mm)	PS 導入量 σ_s (MPa)
NN (導入無)	150	-	-
P-Ln000	150	0	-67
P-Ln150	450	150	-62
P-Ln150S	450	150	-66

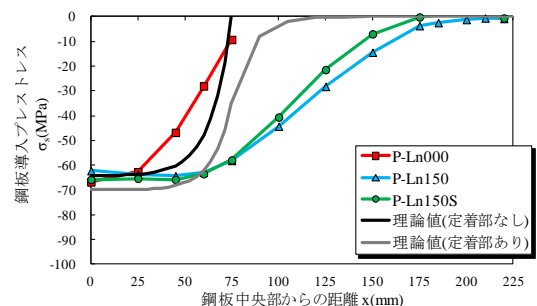


図-3 鋼板へのプレストレス導入状況

板を除去することで、プレテンションの導入がない部分によって、はく離を防止することが可能となる。

PS 導入装置による鋼板への導入プレストレス量については、図-2 に示すような、試験片を作成して検討した。表-2 に、実験シリーズの一例と PS 導入量を示す。また、PS 導入時における鋼板の圧縮応力分布を図-3 に示す。これらの図表より、-70MPa の PS 導入量に対して、鋼板に圧縮応力がほぼ導入されていることがわかる。また、定着長がない場合 (P-Ln000) に対して、定着長がある、P-Ln150 (接着用鋼板なし)、P-Ln150S (接着用鋼板あり) では、端部での応力伝達がスムーズであることがわかる。次に、引張試験結果の一部として、図-4 に、引張応力と CFRP 板中央部のひずみの関係を示す。定着長がない、P-Ln000 では、鋼材の降伏前にはく離すること、また、定着長がある P-Ln150、P-Ln150S では、降伏後にはく離することがわかり、PS 導入した場合でも、はく離に対して十分な接着強度を有していることが確かめられた。

さらに、疲労試験によって、疲労き裂の補修効果を検証した。試験片は、有限幅板中の中央貫通き裂 (初期き裂長さ $2a=12\text{mm}$) を有

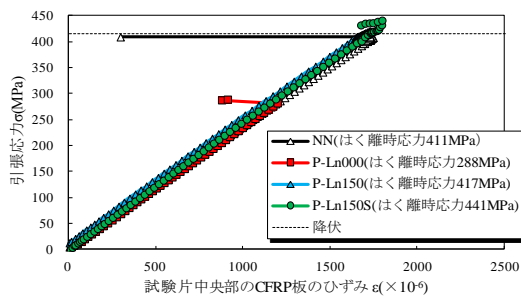


図-4 引張応力と CFRP 板中央部のひずみの関係

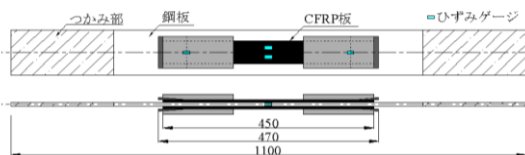


図-5 疲労試験に用いた PS 導入した試験片

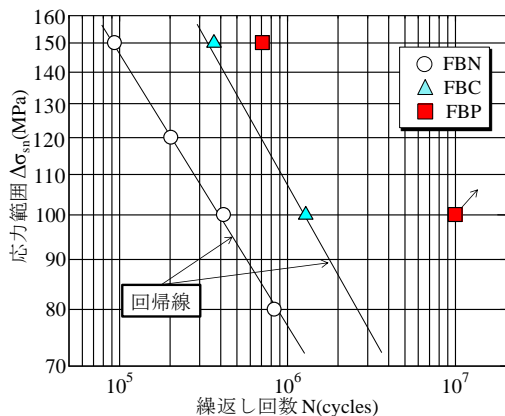


図-6 応力範囲と繰返し回数の関係

する鋼板 (SM400) に CFRP 板を接着しないもの (FBN)、CFRP 板を接着したもの (FBC)、CFRP 板を接着し、60MPa 相当のプレストレスを導入したもの (FBP) の 3 種類とした。応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}$ は、80、100、120、150MPa の 4 通りである。載荷速度は 10Hz で、応力比 R を 0.1 として、疲労試験を行った。

FBP の試験片を図-5 に、試験結果の一部として、図-6 に、応力範囲と繰返し回数の関係を示す。CFRP 板接着補修を行うことで、き裂進展速度が小さくなり、余寿命が長くなることがわかる。また、FBP は応力範囲 100MPa 下では、補修後、 10^7 回の繰返し回数に到達してもき裂の進展は見られず、疲労限に達したと判断された。そのため、応力範囲 $\Delta\sigma_{sn}=150\text{MPa}$ で疲労試験を行ったところ、71 万回で試験片が破断した。FBC と FBP の比較から、PS 導入により疲労き裂の補修効果が飛躍的に向上することがわかった。

以上のことから、開発したプレストレス導入装置を用いて、鋼板に簡便かつ安全にプレストレスの導入が可能であること、また、それにより、より効果的なき裂補修が可能であることが確かめられた。

(2) 補修後の余寿命予測と設計法の提案

① 面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂の補修後の余寿命予測

面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂に対して、CFRP 板接着による補修効果を、過去の疲労試験結果と対比させて、定量的に余寿命を推定した。

図-7 に、面外ガセット試験片と疲労き裂のモデル化を、また、図-8 に、検討した 2 つの補修シリーズにおいて、き裂長さ 15mm における数値解析モデルの一例を示す。CFRP 板の接着方法の相違や、まわし溶接の先端部の接着形態が補修効果に及ぼす影響について解析的に検討した。線形弾性有限要素解析により、き裂先端の応力拡大係数を算定した。

解析結果の一部として、まわし溶接の先端部のはく離を考慮しない場合について、図-9 に裂長さと応力拡大係数の関係を示す。図より、スリットを入れた CFRP 板を面外ガセットに密着させて補修する M シリーズでは、単層 CFRP 板を接着して補修する S シリーズと比べて、応力拡大係数の低減効果が大きいことがわかる。また、図を略したが、M シリーズでは、まわし溶接の先端部のはく離を考慮した場合、考慮しない場合と比べて、応力拡大係数は若干大きくなるものの、その差異は小さいこともわかった。

さらに、線形破壊力学に基づいたき裂進展解析を行って、補修後の疲労寿命を推定した。図-10 に、疲労寿命の推定結果をそれぞれ示す。S および M1 シリーズでは、き裂進展解析によって補修後の疲労寿命を精度良く予測

できることがわかる。また、M5 シリーズでは、積層 CFRP 板の負担する応力が実験値に比べて低くなり、その算定に課題が残されたものの、疲労寿命の推定結果からは、実験結果を安全側に評価できることが確かめられた。

②CFRP 板接着によるき裂の補修時における養生中の繰返し荷重と架橋効果の検討

動的な繰返し荷重の作用下で CFRP 板を接着し、その接着特性、および、養生中、硬化後の疲労き裂の進展挙動を検討した。検討結果の一部として、図-11 に、繰返し回数と鋼板、CFRP 板のひずみの関係を示す。図より、

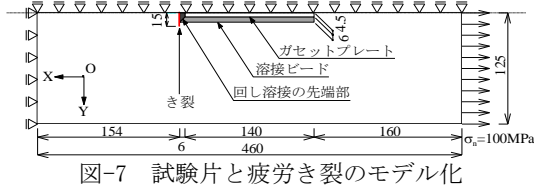
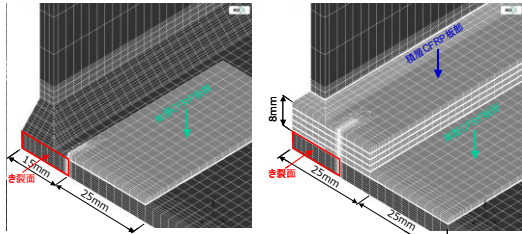


図-7 試験片と疲労き裂のモデル化



(a) S シリーズ (b) M シリーズ (M5)

図-8 解析モデルの一例 (き裂長さ 15mm)

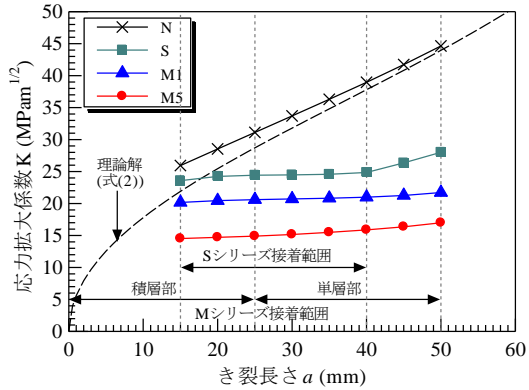


図-9 き裂長さと応力拡大係数の関係 (はく離なし)

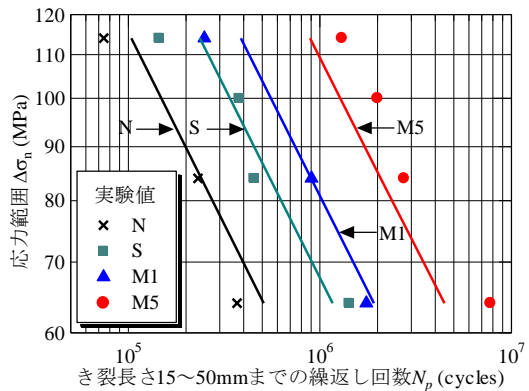


図-10 疲労寿命の推定結果 (はく離なし)

CFRP 板は正負交番するひずみ変化を受けることがわかる。また、図-12 に、疲労試験結果の一例として、ビーチマーク試験による破断面を示す。接着の直後から硬化が完了するまで、わずかに進展するものの、硬化時間は数時間であり、実用上は問題ないことが確かめられた。

さらに、FEM 解析プログラムを用いて応力拡大係数を求め、線形破壊力学に基づいたき裂進展解析を実施して、補修後の疲労き裂の進展を実験結果と比較するとともに、公称応力の低減を考慮した評価式 (式(8)) から算出される応力拡大係数および疲労寿命との対比から、公称応力の低減効果と架橋効果の定量的な評価を試みた。図-13 に、き裂長さと繰返し回数の関係を、実験結果に推定結果を併記して示す。架橋効果は、公称応力の低減効果と比べると小さく、今回の検討の範囲では、応力拡大係数の低減率では 5~10%程度であることなどがわかった。また、疲労試験結果との比較から、公称応力の低減効果のみを考慮した評価では、疲労寿命が安全側に予測されること、また、FEM 解析により架橋効

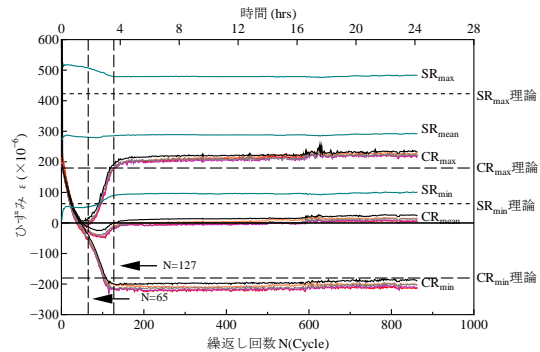


図-11 繰返し回数とひずみの関係

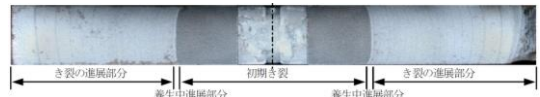


図-12 疲労試験による破断面の一例

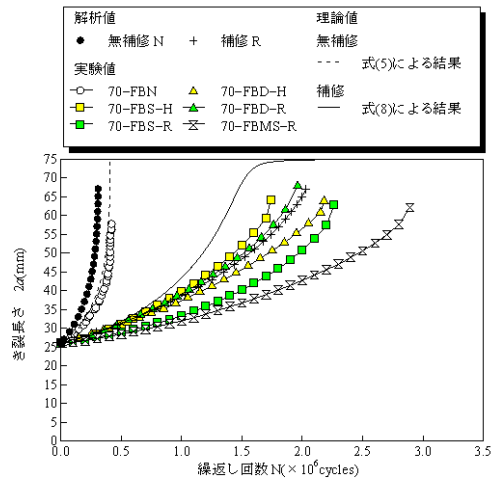


図-13 き裂長さと繰返し回数の関係

果も考慮した場合、今回の実験の範囲では、疲労寿命を精度よく予測できることが確かめられた。

③ストップホール穿孔と積層 CFRP 板接着の併用による補修設計法の提案

鋼桁面外ガセット溶接継手部を模した試験体に基づく補修効果を FEM 解析により検討した。さらに、実構造への適用を想定して、鋼合成鉄桁橋の全橋 3 次元 FEM 解析モデルを作成し、提案する補修法と設計式による評価

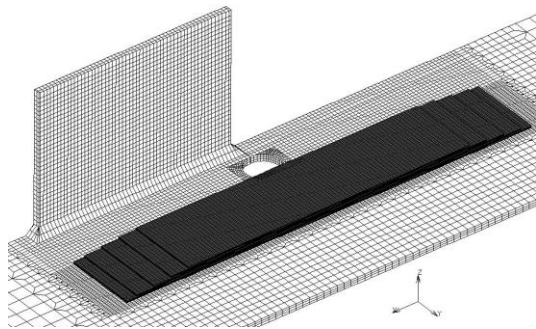


図-14 ストップホール穿孔と CFRP 板接着を併用した補修の解析モデル

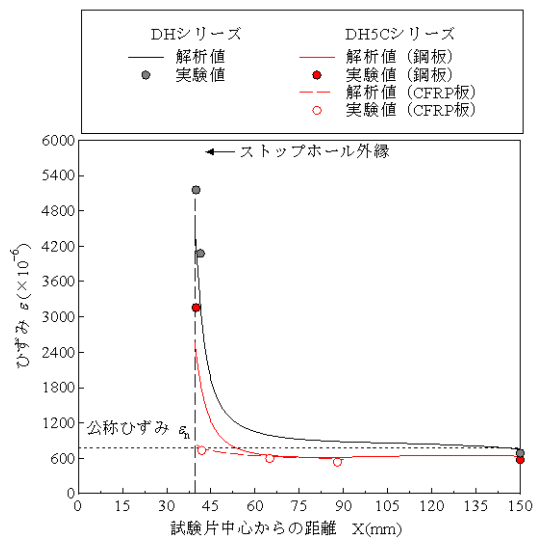


図-15 鋼板と CFRP 板のひずみ分布 ($\sigma_{sn}=160\text{MPa}$)

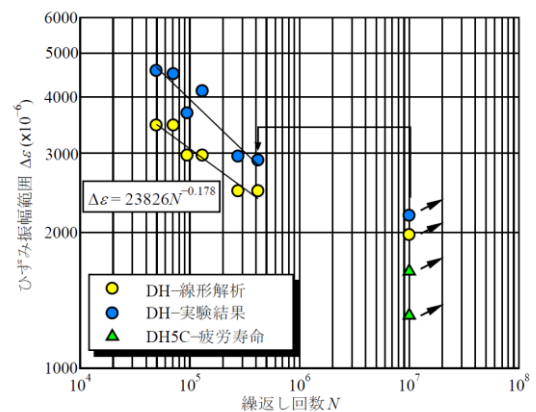
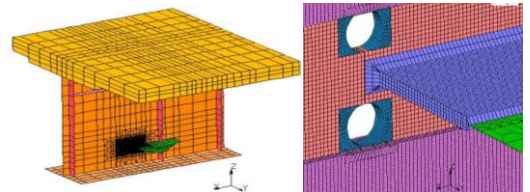


図-16 線形解析と実測のひずみ振幅で評価した S-N 線図

の妥当性と有用性を検証した。

まず、実験的に確かめられた補修効果を、弾塑性有限変位理論に基づく FEM 解析によって検証した。図-14 に、ストップホール穿孔と CFRP 板接着を併用した補修の解析モデルを示す。その結果の一部として、図-15 に鋼板と CFRP 板のひずみ分布を示す。図より、解析結果は、実験結果より若干小さく評価されるものの、両者は概ね一致することがわかる。また、線形解析と実測のひずみ振幅（ストップホール内壁）で評価した疲労試験結果を図-16 に示す。図より、本研究の範囲では、ストップホール縁からの再発生を防止するためのひずみの限界値を 2000×10^{-6} と設定した。パラメトリックな検討結果より、応力集中係数と剛性比をパラメータとする簡便な設計評価式を提案することができた。

さらに、全橋 3 次元 FEM 解析モデルを用いた計算結果に基づいて、面外ガセット溶接部の疲労き裂発生想定箇所におけるストップホール穿孔および CFRP 板接着による応力低減効果を検討した。図-17 に、き裂発生予想部位の解析モデルを示す。解析結果の一部として、図-18 に、接着前後におけるストップホール内壁のひずみ分布を比較して示す。図より、横構斜材軸力による面外曲げ応力に対しても有意な効果があることが解るとともに、提案した設計評価式は、実構造の補修効果予測式としての妥当性が明らかになった。また、横構の部材力によって、面外ガセット溶接部には、面外方向の板曲げが生じることから、ストップホール内壁のひずみ振幅が大きくなることも明らかとなった。



(a) 部分モデル (b) き裂近傍の拡大図

図-17 き裂発生予想部位の解析モデル

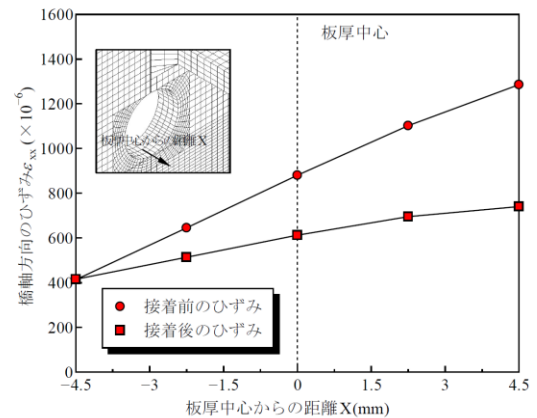


図-18 接着前後におけるストップホール内壁のひずみ分布の比較

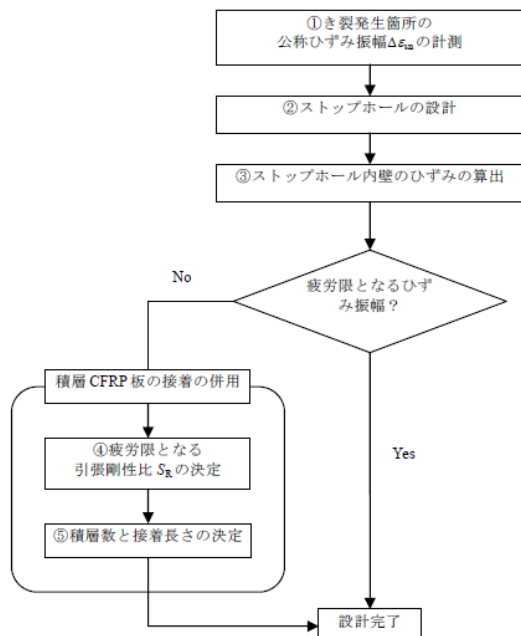


図-19 ストップホール穿孔と積層CFRP板接着による補修法の設計フロー

以上のことから、ストップホール穿孔と積層CFRP板接着による補修法の設計フローを図-19に示す。これより、疲労き裂の再発生を防止するための補修設計法を提案することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ①Fan Lin, J. G. Sun, Hitoshi Nakamura, Ken-ichi Maeda: 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. 7 (査読有)
- ②Hitoshi Nakamura, Fan Lin, Ken-ichi Maeda, Hiroyuki Suzuki, Takao Irube, Yoshihiro Fukuda: Fatigue Life Prediction for Cracked Web Gusset Joints Repaired by Externally Bonded CFRP Strips, The 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2012, 8 pages 2012. 6 (査読有)
- ③林帆, 中村一史, 前田研一, 福田欣弘: CFRP板接着による疲労き裂の補修工法における養生中の繰返し荷重と架橋効果の検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 58A, pp. 635-646. 2012. 3 (査読有)
- ④Hitoshi Nakamura, Fan Lin, Ken-ichi Maeda, Hiroyuki Suzuki, Takao Irube and Yoshihiro Fukuda: Fatigue Life Prediction

for Fatigue Crack Initiated at Welded Gusset Joints Repaired by Externally Bonded CFRP Strips, The 6th International Symposium on Steel Structures, ISSS2011, pp. 671-677, 2011. 11 (査読有)

⑤中村一史, 姜威, 前田研一, 鈴木博之, 入部孝夫, 福田欣弘: CFRP板接着により補修された面外ガセット溶接継手部き裂の疲労寿命予測, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 57A, pp. 842-851, 2011. 3 (査読有)

[学会発表] (計3件)

- ①手塚涉太, 林帆, 孫継光, 中村一史, 前田研一, 福田欣弘: 鋼構造の補修・補強に用いる積層CFRP板の端部処理による接着強度の向上, 土木学年次学術講演会, 第67回全国大会, CS3-017, 名古屋大学, 2012. 9. 5~7
- ②林帆, 孫継光, 中村一史, 前田研一, 福田欣弘: ストップホール施工に積層CFRP板接着を併用した疲労き裂の補修に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第66回全国大会, I-153, 愛媛大学, 2011. 9. 7~9
- ③山村勇斗, 林帆, 孫継光, 中村一史, 前田研一, 福田欣弘: CFRP板接着補修におけるプレストレス導入方法に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第66回全国大会, I-678, 愛媛大学, 2011. 9. 7~9

[図書] (計1件)

- ①中村一史 (共著): 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, FRPと鋼の接合方法に関する調査研究小委員会, 複合構造委員会, 土木学会, pp. 94-110, 2012. 6

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 一史 (NAKAMURA HITOSHI)
 首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授
 研究者番号: 70264596

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし