

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360173

研究課題名(和文) 既設コンクリート補修界面の剥落防止・一体性確保における界面処理効果と信頼性向上

研究課題名(英文) Effect of interface-treatment for the unity and reliability on the interface between existing concrete and repair materials

研究代表者

宇治 公隆 (UJI, KIMITAKA)

首都大学東京・都市環境科学研究科・教授

研究者番号：70326015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,400,000円、(間接経費) 1,620,000円

研究成果の概要(和文)：CFRP格子筋と吹付けモルタルを用いた既設コンクリート構造物のせん断補強効果およびそのメカニズムを検討した。母材コンクリート/吹付けモルタル界面のせん断付着強度、CFRP/モルタル/コンクリート相互の力の伝達特性、ならびにCFRPせん断補強梁の耐荷性能を把握した。試験の結果、界面の算術平均粗さとせん断付着強度の関係を明らかにした。また、要素試験体の引抜き試験により、CFRPからモルタル、さらにコンクリートへの力の伝達特性、せん断抵抗域の移行特性を把握した。さらに、CFRP補強小型梁試験体の載荷試験により、せん断抵抗特性を把握し本補強法の妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：The shear capacity in existing RC beams increases by attaching the carbon fiber reinforced plastic (CFRP) grids and the polymer cement mortar (PCM) to side areas of base concrete beams. In this study, the relation between shear bond strength and roughness, the shift of shear resisting area and the effect of strengthening of beam using CFRP were investigated. Shear bond strength was directly proportional to the degree of surface roughness. The pull-out tests of element specimens were conducted, to investigate shear bond behavior between existing concrete and sprayed PCM with a CFRP grid. From the experimental results and numerical analysis results, it was clarified that the bearing areas of shear bond stress shift from bottom of the specimen which is near the loading point to upper part of the specimen. Also, it was confirmed that the combination of sprayed PCM and CFRP were effective for strengthening existing reinforced concrete beams.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート

1. 研究開始当初の背景

(1) 高度経済成長期以降、膨大な数のコンクリート構造物が建設され、既に 50 年以上の年数を経て劣化が顕在化している構造物も少なくない。これら構造物は今後も補修を繰り返しながら安全に供用されることが求められ、既設コンクリート構造物と補修材料との一体性が長期間にわたって確保されなければならない。

(2) 鉄筋コンクリート梁部材のスターラップや橋脚の帯鉄筋などのせん断補強鉄筋が腐食により断面欠損した場合に、耐食性を有する CFRP 格子筋と吹付けモルタルを用いた補強工法が橋桁や橋脚側面部に適用されているが、その補強効果ならびにせん断力に対する抵抗メカニズムが明確でない。

(3) 既設コンクリートと補修材料の一体性確保には、CFRP 格子筋の定着部となる母材コンクリート / 補修モルタルの付着界面におけるせん断付着強度の把握が重要となるものの、現在、確立された評価方法がない。

2. 研究の目的

本研究では、コンクリート構造物の補強に関連する以下の 3 項目について検討を行った。

- ・コンクリート / モルタル界面のせん断付着強度
- ・CFRP / モルタル / コンクリートの力の伝達における相互作用
- ・CFRP によるせん断補強梁の耐荷性能

(1) せん断付着強度：本研究では、曲げモーメントが作用する状態でのせん断付着強度試験および圧縮応力が作用する状態でのせん断付着強度試験を行い、適切なせん断付着強度評価方法の検討を行った。また、付着界面の凹凸性状がせん断付着強度に影響することから、各試験法における母材コンクリート / 補修モルタルの付着界面における凹凸の程度を 3 水準（無処理、中目粗し、大目粗し）として試験を行った。さらに、せん断付着強度試験において破壊過程およびそのメカニズムを把握するため、実験にあたってはアコースティック・エミッション (AE) 法を適用し、AE-SiGMA 解析 (Acoustic emission simplified Green's functions for moment tensor analysis) をもとに破壊進展機構を考察した。

(2) CFRP / モルタル / コンクリートの力の伝達：斜めひび割れ近傍 (図 1 参照) における耐荷特性を明らかにするため、母材コンクリート / 補修モルタルの界面の処理 (凹凸) 程度、プライマーの有無および補強筋として用いる CFRP 格子筋の種類を要因とし、斜めひび割れ部を模擬した要素試験体によるせん断付着抵抗試験を実施して、界面の凹凸性

状およびプライマーの有無によるせん断付着挙動・剥離進展特性を検討した。試験に際しては、AE 法を適用し、剥離部の移行特性を非破壊で把握した。なお、せん断付着抵抗域の移行特性を、せん断付着応力～変位関係をもととした FEM 解析により検証した。

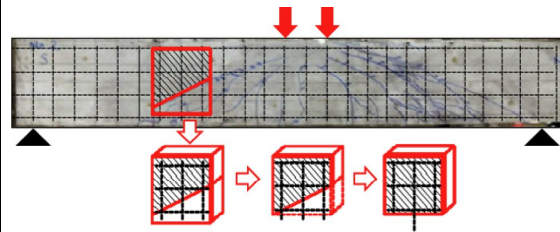


図 1 コンクリート梁側面の CFRP 補強と要素試験体

(3) CFRP によるせん断補強梁の耐荷性能：既設コンクリート梁部材のせん断補強効果を検討するため、全長 2700mm の小型梁試験体により静的載荷実験を行い、せん断ひび割れの発生状況、せん断耐荷挙動を把握するとともに、CFRP 格子筋を用いた合理的補強設計法を検討した。

3. 研究の方法

(1) せん断付着強度試験においては、2 段階で検討した。

第 1 段階は試験方法に関するもので、一面せん断、二面せん断、圧縮型せん断および円柱押抜きせん断、の 4 種類の試験方法を取り上げ、界面の処理程度 (3 段階の凹凸状態) における、せん断付着強度およびそのバラツキを比較検討した。曲げモーメントが作用する状態でのせん断付着強度試験である前 2 者のうち、一面せん断試験には、母材コンクリート / 補修モルタルの界面と同一面にせん断力が作用する構造の試験体を、二面せん断試験には、既設コンクリートに相当するコンクリートブロックに補修モルタルを打ち継ぐ形の 100 × 100 × 400mm の角柱試験体を用いた。一方、圧縮力が作用する状態でのせん断付着強度試験である後 2 者のうち、圧縮型せん断試験には、60° の傾斜となる打継ぎ部 (付着界面) を有し圧縮力による分力としてせん断力が作用する 100 × 100 × 400mm 角柱試験体を、また円柱押抜きせん断試験には、通常の円柱供試体 (100mm) の外側に補修モルタルを打設し、円柱供試体部に圧縮力を作用させて界面にせん断応力を生じさせる試験体を用いた。

第 2 段階の試験は、せん断付着強度を高い信頼性のもと求めるものである。第 1 段階で検討した 4 種類のうち、二面せん断試験が最も精度よくせん断付着強度を求めることができると考え、二面せん断試験を主体にして界面の凹凸状況を要因とした試験を行い、凹凸性状とせん断付着強度との関係を明らかにした。なお実験では、破壊位置および破壊メカニズム (引張型、せん断型、混在型) を

解明するため、AE-SiGMA 解析をもとに破壊進展挙動を把握した。

(2) 要素試験体（実構造物のせん断ひび割れ近傍をモデル化した試験体）による補強効果の検討を行った。要素試験体は、 $300 \times 300 \times 80\text{mm}$ のコンクリート版に CFRP 格子筋を配置してモルタルを 40mm の厚さで吹き付けたものを基本としている。図 2 に示すごとく、鉄筋の引張り試験を参考にして引抜きによる界面のせん断付着特性を把握した。凹凸性状のほか、プライマーの有無、補強筋となる CFRP 格子筋の種類を要因として引抜き試験を行い、せん断付着特性の合理的評価法を提案するものである。凹凸性状としては、プラスト処理とサンドペーパー処理の 2 種類である。CFRP 格子筋の種類としては、CR6(断面積 17.5mm^2)、CR8(同 26.4mm^2)、CR10(同 39.2mm^2)、CR13(同 65.0mm^2) であり、格子間隔は 50mm および 100mm の 2 種類とした。試験に際しては、AE 法を適用し、せん断付着抵抗域の移行特性を明らかにした。また、有限要素 (FEM) 解析を行い、荷重の増加に伴う要素試験体の挙動を把握した。

CFRP 格子筋に生じる引張力はモルタルを介し、さらに母材コンクリート/補修モルタル界面を通して既設コンクリート構造物に伝達される。そこで、解析においては、Marc-Mentat による 3 次元解析を基本とし、載荷初期から終局段階の剝離に至るまでの挙動を解析的に表現できるよう、界面バネ要素の設定方法、界面の付着特性、などを工夫した。

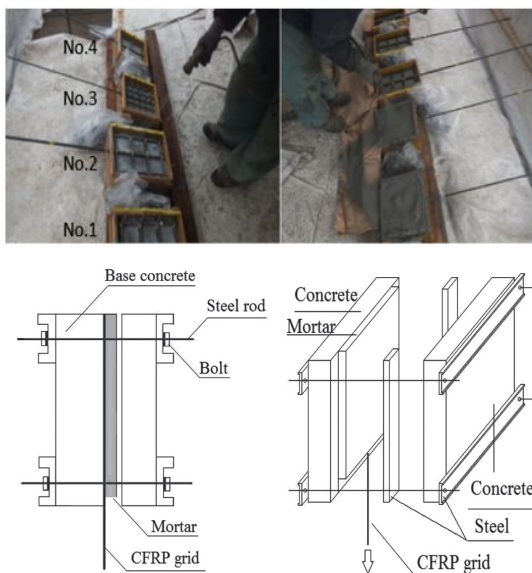


図 2 要素試験体および載荷方法

(3) 梁試験体による 2 点集中載荷試験では、幅 200mm × 高さ 500mm で長さ 2700mm の試験体を作製し、側面に CFRP 格子筋を配置して補修モルタルを吹き付けた補強模擬梁試験体の静的載荷を行った。なお、基準となるスターラップのみの健全試験体等も合わ

せて試験し、相対的な最大荷重の比較を行っている。CFRP 補強試験体では、せん断ひび割れ近傍における CFRP 格子筋ならびに母材コンクリート/補修モルタル界面の挙動を把握した。CFRP 格子筋ならびにコンクリート表面のひずみ特性を把握し、AE 法により界面の剝離抵抗挙動を明らかにした。

4. 研究成果

(1) せん断付着強度試験の結果、付着界面処理を大きくした場合には、試験法により付着界面で破壊する供試体本数に差が生じ、試験結果の安定性が試験方法により異なることが示された。圧縮応力下でのせん断付着強度試験では、付着界面に拘束力が生じるため、せん断付着強度が大きく評価され、さらに、付着界面外で破壊に至る過程が AE 法により明らかとなった。一方、曲げモーメント下でのせん断付着強度試験では、試験結果の安定性が比較的高く、概ね、付着界面での破壊が確認された。また、AE-SiGMA 解析により、せん断型 AE イベントが卓越して破壊に至る過程を明らかにした。以上のことから、本研究の範囲内では、曲げモーメント下でのせん断付着強度試験が適当な評価方法であると言える。

(2) 上記のように、本研究の検討において信頼性が高いと判断された二面せん断試験を主体に、界面の処理程度とせん断付着強度の関係について検討した。なお、実験では、破壊位置および破壊機構（引張型、せん断型、混在型）を解明するため、AE 法を適用し SiGMA 解析をもとに破壊進展挙動を把握した。その結果、界面の凹凸性状を表す指標である算術平均粗さとせん断付着強度の関係を図 3 のごとく、一次関数で表現できることを示した。

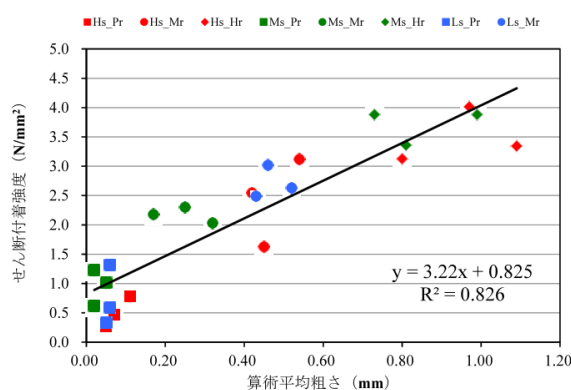


図 3 算術平均粗さとせん断付着強度

(3) CFRP 格子筋はスターラップの腐食が生じた既設コンクリート梁のせん断耐力向上を目的に既設コンクリート構造物（母材コンクリート）の側面に配置される。そこで、CFRP 格子筋に生じる引張応力、母材コンクリートと吹付けモルタルの界面特性を把握するため、表面の凹凸性状、プライマーの有

無、CFRP 格子筋の種類を要因として、既設コンクリート構造物の側面の一部を模擬したモデル供試体（要素試験体）の引抜き試験を行った。その結果、CFRP 格子筋からモルタル、モルタルから母材コンクリートへの力の伝達挙動を AE-SiGMA 解析により把握し、界面のせん断付着特性が CFRP 格子筋の剛性や格子間隔によって異なる事を明らかにした。せん断付着抵抗域の移行の概念として一例を図 4 の上段に示す。初期段階では、引張力を作用させている下部近傍が抵抗域となるが、引張力の増加に伴い抵抗域は上方へ移動して行くことが分かる。CFRP 格子筋に作用する鉛直方向の引張力に対し、梁側面上下端付近の水平方向 CFRP 格子筋が定着部として抵抗するため、水平方向 CFRP 格子筋の剛性が高く（CR6 程度の細径よりも CR13 程度の太径のほうが）、また、CFRP 格子筋の間隔が小さい場合（格子筋の間隔 50mm と 100mm を比較すると 50mm のほうが）、最大荷重が高くなることが明らかとなった。すなわち、鉛直方向 CFRP 格子筋の拔出しへの抵抗性を確保するためには、径が太くて格子間隔が狭い CFRP 格子筋を用い、せん断付着抵抗域を効果的に機能させることが必要であると言える。

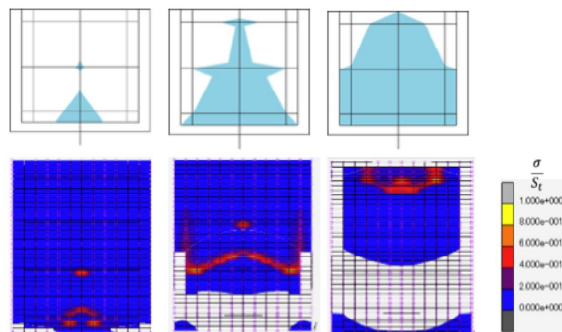
(4) 要素試験体を対象に、FEM 解析により、既設コンクリートと吹付けモルタルのせん断付着応力状態、吹付けモルタルと CFRP 格子筋との力の伝達、せん断抵抗域の移行特性を明らかにした。

FEM 解析では、既設コンクリートと吹付けモルタルのせん断付着特性として、

- (a) 最大付着応力で終局となるモデル
- (b) 最大付着応力後も抵抗する破壊エネルギーモデル
- (c) ひび割れを考慮した破壊エネルギーモデル

の 3 種類をもとに検討した。

解析の結果、界面の凹凸性状を要因としたせん断付着応力～変位関係、すなわち破壊エネルギーモデルを適切に考慮することで、終局荷重を推定でき、せん断抵抗域が順次移行



(初期) (中間時) (終局時)
図 4 要素試験体のせん断付着抵抗域 (FEM 解析結果)

する現象を表現できた。また、要素分割数を適切に設定することの重要性が明らかとなった。せん断抵抗域の移行を解析的に再現した一例を図 4 の下段に示す。解析的検討の結果、CFRP 格子筋の剛性、格子間隔、界面処理程度、プライマーの有無を考慮した FEM 解析により、CFRP 格子筋の挙動、母材コンクリート/補修モルタル界面の挙動が再現でき、今後、様々な条件での構造物としての耐荷特性が評価できるようになった。

(5) 幅 200mm×高さ 500mm、長さ 2700mm の梁試験体を検討モデルとし、CFRP 格子筋を試験体の側面に配置した場合のせん断抵抗挙動を把握した。図 5 に、一例として、CFRP 補強試験体における載荷試験終了後の状況を示す。試験の結果、CFRP 格子筋は既設コンクリート構造物中のスララップと協同してせん断力に抵抗すること、母材コンクリート/補修モルタル界面の一体性は終局段階まで十分に確保できることを明らかにした。斜めひび割れ近傍における CFRP 格子筋の定着が確保され、スターラップの腐食分だけ CFRP 格子筋を配置した補強試験体の終局荷重は基準試験体の荷重をも上回る結果を示し、CFRP 格子筋の有効性が示された。



図 5 CFRP 補強梁の破壊状況

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

Vu Dung TRAN, Kimitaka UJI, Atsushi UENO, Kentaro OHNO and Junlei ZHANG, Testing and Modeling of Existing Concrete Substrate Repaired by CFRP Grids and Sprayed Mortar, The 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering - International Institute for FRP in Construction, 査読有, (Aug. 2014)

菊池亮、大野健太郎、張軍雷、宇治公隆、上野敦、CFRP 格子筋と吹付けモルタルで補強した梁部材のせん断破壊性状、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.13、pp.585-592 (2013年 11月)

Junlei Zhang, Kentaro Ohno, Ryo Kikuchi, Tran Vu Dung, Kimitaka Uji and Atsushi Ueno,

Mechanisms of Bond Failure between Existing Concrete and Sprayed Polymer Cement Mortar with Grid by Acoustic Emission, The 26th Concrete Institute of Australia 's Biennial National Conference (Concrete 2013), 査読有, CD-ROM SESSION 8A-3, Australia (Oct. 2013)

黒原創、大野健太郎、宇治公隆、上野敦、母材コンクリートと無機系補修材界面のせん断付着強度試験に関する考察、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.35、No.1、pp.607-612 (2013年6月)

〔学会発表〕(計 10 件)

菊池亮、宇治公隆、上野敦、大野健太郎、張軍雷、CFRP 格子筋と吹付けモルタルによる梁部材のせん断補強、土木学会第 68 回年次学術講演会、V-173、pp.345-346 (2013年9月4日～6日)

大野健太郎、宇治公隆、上野敦、AE 法によるコンクリートの破壊エネルギー試験におけるクラック形成に関する一考察、第56 回日本学術会議材料工学連合講演会、pp.45-46 (2012年10月29日～30日)

黒原創、宇治公隆、大野健太郎、上野敦、コンクリートと補修材料のせん断付着強度評価法に関する実験的考察、土木学会第 66 回年次学術講演会、第5 部、pp.613-614 (2011年9月7日～9日)

〔その他〕

宇治公隆、コンクリート構造物の長寿命化における課題、日刊工業新聞、11月29日号、pp.14-15、2012

6. 研究組織

(1)研究代表者

宇治 公隆 (UJI, Kimitaka)
首都大学東京・都市環境科学研究科・教授
研究者番号：70326015

(2)連携研究者

上野 敦 (UENO, Atsushi)
首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授
研究者番号：50232765

大野健太郎 (OHNO, Kentaro)
首都大学東京・都市環境科学研究科・助教
研究者番号：80571918