

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249064

研究課題名(和文) 接着付着界面の複合劣化特性と補修補強後部材の性能予測

研究課題名(英文) Deterioration of interfacial bond property under combined effects and prediction of performance of members after intervention

研究代表者

上田 多門 (UEDA, Tamon)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：00151796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,600,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート構造物補強法における接着界面付着特性に関し、FRP接着工法の付着特性は18か月の浸潤後において多少低下するものから向上するものまであり、増厚工法の付着特性は60度までの温度上昇とともに低下するが、温度が低下すると多少回復する。これらの結果に基づき、付着特性推定式を提案した。補強後の性能向上技術として、ポリウレア層挿入FRP接着工法の解析技術、増厚工法用アンカー筋補強効果推定モデル、ひび割れ樹脂注入による疲労耐力向上推定モデルを提示した。凍害を含む複合劣化に関し、疲労との複合作用下のコンクリート損傷推定モデル、塩害との複合作用下の凍害促進推定モデル、凍害損傷の分布測定法を提示した。

研究成果の概要(英文)：This study discloses that interfacial bond strength of FRP external bonding as strengthening of concrete structures slightly reduces or slightly increases after 18-months immersion of water, and that bond strengths of overlaying reduces with increase in temperature up to 60 degree but recovers partially after lowering temperature. Prediction formula for bond properties were proposed based on the test results. As technologies for enhancement of structural performance after strengthening, analytical methods of FRP external bonding with inserted polyurea resin layer, prediction model of strengthening effect by anchor bar for overlaying and prediction model for enhanced fatigue strength by resin injection into cracks were presented. For frost attack effects, prediction models for concrete damage under combined effect with fatigue and for accelerated frost damage under combined effect with salt attack were presented together with measuring method of frost damage distribution.

研究分野：維持管理工学

キーワード：補強設計 接着付着特性 接着工法 増厚工法 複合劣化 長期性能 接着付着特性の向上

1. 研究開始当初の背景

2012年12月の笹子トンネルの事例を始めとして、社会基盤施設の維持補修の重要性は国内外で広く認識されている。一方において、国内外において既に補修補強された事例の早期の劣化も多く報告されており、補修補強後の部材の構造性能の耐久性の確保と寿命予測はまだ技術的に確立されていないことは明らかで、最重要課題の一つである。

補修補強後の部材性能の経時変化を推定する場合、補修補強前から既設部に存在する種々の損傷・劣化の影響、補修補強後の部材中の材料特性の経時変化を明らかにする必要がある。補修補強後部材中には3つの要素；既設部（コンクリート）、補修補強材（樹脂、FRP、PCM）、それらの接着付着界面がある。これまで、コンクリート自体の耐久性に関しては多くの研究蓄積があり、樹脂、FRP（繊維強化樹脂）、PCM（ポリマーセメントモルタル）自体の耐久性に関してはある程度の研究蓄積がある。ところが、接着付着界面となると研究の蓄積が不十分である。FRPと既設部コンクリートとの接着付着界面の耐久性に関しては、温度、湿潤環境、疲労の影響下の特性に関して成果が見られるが、世界的に共通認識が持たれる水準ではなく、特に湿潤環境下の耐久性に関しては既往の成果によってかなり結果が異なっている。PCMと既設部コンクリートとの接着付着界面の耐久性に至っては、ほとんど研究成果が見られない。これらの事実から、本研究では最も一般的な劣化要因である温度、湿潤環境、疲労を考慮する。特に、過去ほとんど成果の出していないそれらの複合劣化を考慮する。補修補強材料としては、FRPとPCMを主として取り上げる（図1参照）。

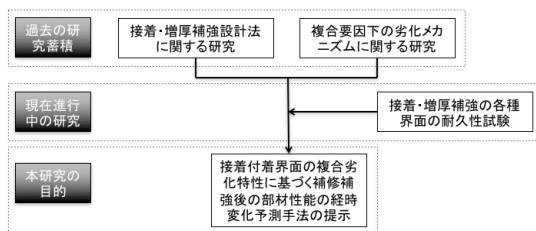


図1 本研究の位置付け

2. 研究の目的

本研究では、接着工法としてFRP接着工法を、増厚工法としてPCM増厚工法を対象とし、温度条件（低温下、高温下、温度変化の繰返し）、湿潤環境条件（浸潤下、乾湿繰返し）、荷重条件（持続荷重、疲労荷重）を与えることにより、補修補強材料（FRP、PCM）および補修補強材料と既設部コンクリートとの接着付着界面の特性の長期的変化を明らかにする。また、温度条件と荷重条件、湿潤環境条件と荷重条件、温度条件と湿潤環境条件の組合せによる複合劣化も明らかにする。これらの試験条件下の既設部コンクリ

ートの特性の長期的変化は、既往の知見を利用するが、必要に応じて実験を実施する。特に、複合劣化による特性の変化は明らかにする必要がある。明らかになった補修補強材料、既設部コンクリート、それらの接着付着界面の特性の長期的変化に基づいて、接着あるいは増厚補強後の部材構造性能の経時変化の推定法を提示する（図2参照）。

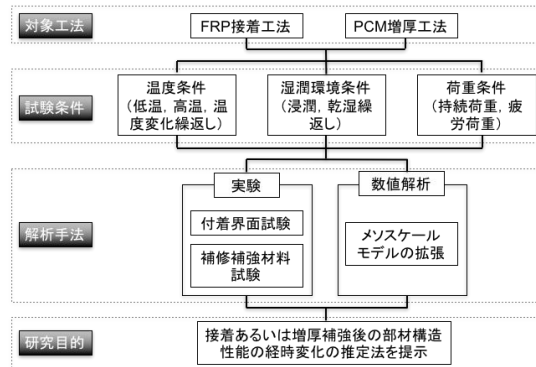


図2 研究の流れと目的

3. 研究の方法

接着補強、増厚補強後部材の構造性能予測に必要な、補修補強材料の接着付着界面のせん断付着特性、引張付着特性の、温度条件（低温、高温、温度変化繰返し）、湿潤環境条件（浸潤、乾湿繰返し）、荷重条件（持続荷重、疲労荷重）、及びそれらの複合条件下の経時変化を長期耐久性試験により明らかにする。同時に補修補強材料と既設部コンクリートの長期耐久性試験も実施し、材料特性の変化を明らかにする。また、試験後の劣化供試体の種々の物理的、化学的分析を実施し、その現象をメソ・ミクروسケールで明らかにする。複合劣化に対応可能なようにメソスケールの統一モデルを拡張し、接着付着界面領域の劣化現象のシミュレーションを可能にする。以上をまとめ、接着あるいは増厚補強後の部材構造性能の経時変化の推定法を提示する。

本研究は、研究分担者の佐藤がFRP接着工法を、古内がPCM増厚工法を担当し、研究協力者のZHANG Dawei 副教授（中国・浙江大学）も研究全体に共同研究者として参画し、特にメソスケールの統一モデルによるシミュレーションを担当する。また、やはり研究協力者（共同研究者）として小森篤也氏（新日鉄住金マテリアルズ）と高橋順博士・藤間誠司氏（デンカ）が、FRP接着工法、PCM増厚工法の担当として、特に樹脂、FRP、PCMの材料科学の専門家として参画する。実際の研究作業は主として、北海道大学の大学院学生（Justin SHRESTHA, Khuram RASHID, GONG Fuyuan, WANG Yi, WANG Zhao, 三浦舟樹, Saeid MEHRPAY）であり、FRP接着工法、PCM増厚工法に関する耐久性試験、メソスケール統一モデルの複合劣化条件下への拡張を担当する。図3に研究参画者の役割分担を示す。

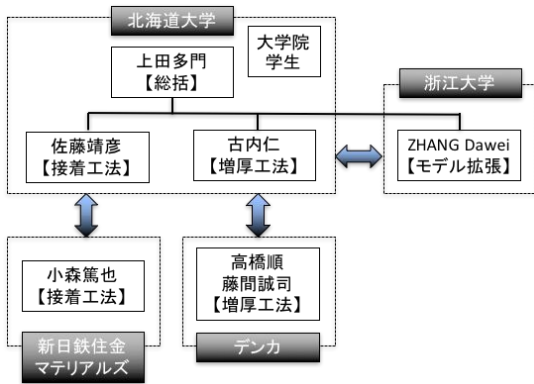


図3 研究参加者と役割分担

4. 研究成果

得られた成果を項目別にまとめると以下のようなになる。

(1) FRP 接着工法の耐久性試験に関しては、次のような成果が得られた。

国内外の企業による実務に適用されている6つのシステムの浸潤環境の影響を18ヶ月間の期間にわたり比較試験をした。接着・含浸樹脂は引張強度が少し低下するものがあるが、樹脂に吸収された水分量と明確な関係はない。接着界面のせん断付着強度は、接着時に繊維を樹脂で固めるFRPの場合(Dry layup)、システムによって多少低下するものの、FRP成形材を樹脂で接着するシステムの場合(Wet layup)、多少増加する傾向がある(図4)。せん断付着強度は、樹脂の引張強度とは密接な相関はない。せん断剥離破壊モードは、コンクリートの凝集破壊から、付着界面剥離破壊へと変わる。ただし、接着・含浸樹脂の引張強度、FRPとコンクリートとの界面でのせん断付着強度とせん断剥離モードは湿潤環境6ヶ月後の性状から大きく変化しない。以上の実験結果に基づいて、湿潤環境の影響を考慮した、接着界面での付着応力-すべりモデルを提案した。

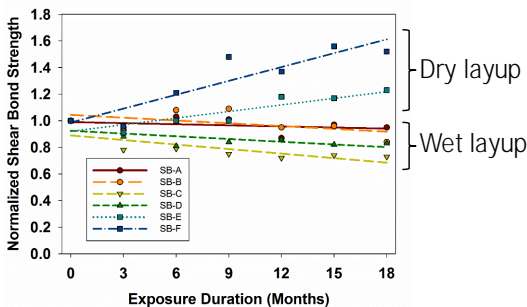


図4 湿潤環境下の接着工法の付着強度

浸潤環境によるせん断付着強度の劣化程度に影響を与える、既設部コンクリートの表面粗度が静的強度に与える影響の定量化のために3水準の粗度の試験体による実験を一つのFRP接着システムに対して実施した。その結果、粗度が大きいほどせん断付着強度

(平均付着強度と局部付着強度)が大きくなる事が明らかになった。

湿潤環境下も考慮した持続荷重、疲労荷重下の付着特性の解明が残された課題となった。

(2) セメント系増厚工法の耐久性試験に関しては、次のような成果が得られた。

国内企業(2社)により実務に適用されている複数のシステムの温度の影響を1ヶ月間にわたり試験を行った結果、高温(60度)の影響は、1日で見られ、セメント系材料(PCM)の強度及び付着強度は顕著に低下する。試験時の温度を常温に下げると強度は回復する。破壊モードは付着界面剥離破壊からPCMの凝集破壊へと変わる。

次に海外で使用されている国内企業の1システムへの温度の影響(1ヶ月間60,40度に暴露)を要素試験とはり試験を通して確認し(図5),2014年度までに実施した他の2システムの結果にも適用できる付着界面剥離強度推定式、この式に基づいた増厚補強したはりの剥離耐力推定法を提案した。合わせてひび割れ幅推定法も提示した。

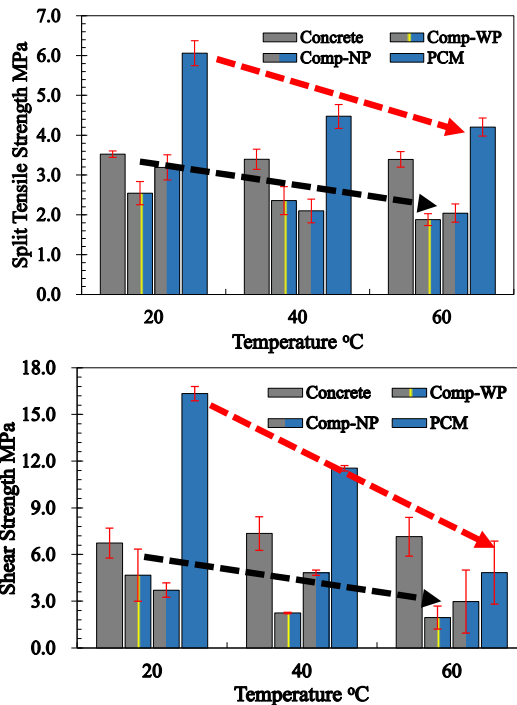


図5 高温環境下の増厚工法の付着強度

さらに、国内企業の1つのPCM増厚システムに対して、せん断付着強度を明らかにする実験を実施した。せん断付着強度は、温度を40,60度と上げると低下し、既設部コンクリートの表面粗度を大きくすると増加する。ただし、表面粗度が最も小さい場合は、温度の影響は小さい。コンクリート表面の水分量の影響も明確には見られない。表面粗度が最も小さい場合は、温度が上昇すると荷重-すべり関係がより延性的になる。コンクリートとPCMの強度と表面粗度の関数として、せん断

付着強度推定式を提示した。

FRP 接着工法と同様に、持続荷重、疲労荷重下の付着特性の解明が残された課題となった。

(3) FRP 接着工法の剥離耐力向上技術開発に関しては、以下の成果が得られている。

ポリウレア層を設けた炭素繊維シートとコンクリート間の付着特性に関する検討を行った。試験温度が 60 度以下であれば付着強度の低下が起こらないことを実験的に明らかにするとともに、実用的な有限要素解析用の付着モデルを構築した。

ポリウレア層を挿入し炭素繊維シートを巻き付けまたは貼り付けた場合はりのせん断破壊試験において、ポリウレア層がない試験体に比べせん断補強効率が向上すること、ポリウレア樹脂を挿入し繊維シートにより曲げ補強したはりの曲げ破壊試験において、コンクリート強度が小さいと付着割裂破壊が発生するため付着耐力の向上を期待できないことを実験的に明らかにした。

ポリウレア層を挿入し、炭素繊維シートを下面に貼り付けた RC はりの破壊挙動を再現できる解析法を開発した。この解析法を用いれば、実験的に明らかにされている低温環境と常温環境において破壊形式が異なるメカニズムを合理的に説明できる。すなわち、低温下でのポリウレア樹脂のヤング係数およびせん断弾性係数の増加および樹脂の大変形領域での大きな非線形特性がシートとコンクリート界面の付着特性に影響を及ぼし、その結果、破壊形式が変化することを明らかにした。しかし、当初目標とした設計法の開発までには至らず、今後の課題として残された。

(4) セメント系増厚工法の剥離耐力向上技術開発に関しての成果は以下のようであった。

下面増厚端部に設置するアンカー筋の長さおよび位置を変数として実験を行い、アンカーによる補強効果を確認した。実験によって、増厚端部補強筋の引張力によって生じる割裂破壊面の局部曲げ応力の一部をアンカー筋が受け持つことが示された。実験結果に基づき、アンカー筋配置の補強効果による耐力の推定モデルを構築した。

(5) 接着工法およびセメント系増厚工法と併用されることが多いひび割れ補修に関しては、次の成果が得られた。

ひび割れ補修による、ひび割れを跨ぐ鉄筋の疲労寿命の増大に対する推定モデルを構築した。また、補修後のひび割れ面の伝達機構を実験的に調べ、せん断方向と直交方向の剛性に対するひび割れ幅及び拘束力の影響を示した。

(6) 凍害と荷重や塩害による複合劣化に関

しては、以下の成果が得られている。

凍結融解繰り返し作用下のコンクリートの変形挙動のモデルを構築し、実験結果を推測できることを示した。このモデルに基づき、凍結温度下のコンクリートの強度推定モデルと、凍害と疲労荷重の複合作用下のコンクリートの変形挙動のモデルを構築し、実験結果を推測できることを示した(図6)。

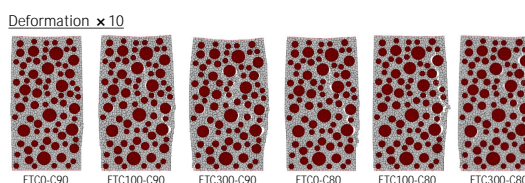


図6 凍害と疲労を受けるコンクリート

凍害と塩害の複合劣化下のコンクリートの特性モデルを構築するために、コンクリート中の NaCl が与える影響を明示するための実験を実施し、NaCl が水分の移動に与える影響、コンクリートの剛性や強度に与える影響、凍害機構に与える影響を示すと同時に、影響が出る理由を明らかにした。

一般の構造物のように凍害が不均一に生じる場合のコンクリート特性モデルを構築するために、まず、凍害の損傷度合いの内部分布を実験的に推定する方法を提示した。その上で、前述の凍結融解繰り返し作用下のコンクリートの変形挙動のモデルと水分・熱移動解析とを組合せ、損傷度合いの内部分布をシミュレートし、実験結果と合致することを示した。

(7) 本研究成果を国内外で作成中の指針(土木学会指針と fib Model Code)に取り込む作業を、それぞれの指針作成委員会で実施中である。

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)

Fuyuan Gong¹, Tamon Ueda, Yi Wang, Dawei Zhang and Zhao Wang, "Mesoscale Simulation of Fatigue Behavior of Concrete Materials Damaged by Freeze-thaw Cycles", Construction and Building Materials, 査読有, Volume 126, 2017 (掲載決定)

Khuram Rashid, Dawei Zhang, Tamon Ueda, Weiliang Jin, "Investigation on concrete-PCM interface under elevated temperature: At material level and member level", Construction and Building Materials, 査読有, Volume 125, 2016, pp.465-478

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuild>

mat.2016.08.067
Shrestha, J., Zhang, D., and Ueda, T.,
“Durability Performances of Carbon
Fiber-Reinforced Polymer and
Concrete-Bonded Systems under
Moisture Conditions”, Journal of
Composites for Construction, 査読有,
Vol.20, Issue 5, 2016, 04016023-1 to 12
(12 pages)
DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.00006
74
Yi Wang, Fuyuan Gong, Dawei Zhang,
Tamon Ueda, “Estimation of Ice
Content in Mortar Based on Electrical
Measurements under Freeze-Thaw
Cycle”, Journal of Advanced Concrete
Technology, JCI, 査読有, Vol.14, No.2,
February 2016, pp.35-46
DOI:10.3151/jact.14.35
古内仁, 渡邊忠朋, 繰返し荷重下におけ
るひび割れ注入補修後の鉄筋の挙動と疲
労寿命の増大に関する研究, 土木学会論
文集 E2, 査読有, 72 巻, 2016, pp.19-31

[学会発表](計7件)

UEDA Tamon, GONG Fuyuan, WANG Yi, WANG
Zhao and ZHANG Dawei, “Performance
Assessment of Concrete Structures -
General Approach for Damages under
Combined Effects”, Conference
Proceedings - Keynote and Lead papers,
ACF 2016 “Sustainable Concrete for
Now and the Future”, 招待講演, 30th
October - 2nd November 2016, Hanoi,
pp.57-62 (on 31st October 2016 at JW
Marriot Hotel).

Ueda Tamon, Justin Shrestha, Khuram
Rashid and Zhang Dawei, “Moisture and
Temperature Effects on Interface
Mechanical Properties for External
Bonding”, Proceedings of the 5th
International Conference on the
Durability of Concrete Structures, 基
調講演, 30 June - 1 July 2016, Shenzhen
University, Shenzhen, China, pp.3-12
(on 1 July 2016 at Shenzhen
University).

T. Ueda, “Structural retrofitting and
renovation for sustainable
infrastructures”, Proceedings of
IABSE-JSCE Joint Conference on
Advances in Bridge Engineering - III,
基調講演, 21-22 August 2015, Dhaka,
Bangladesh, pp.49-56 (on 22nd August
2015 at Pan Pacific Sonargaon Dhaka).

古内仁, 渡邊忠朋, ひび割れを注入補修
した鉄筋コンクリート梁の疲労耐力, コ
ンクリート工学年次論文集, 第37回コ
ンクリート工学年次大会, 2015年7月14-
16日, 千葉幕張メッセ, pp.1243-1248.

Yasuhiko Sato and Khalid Farah,
“Modeling Flexural Behavior of RC
Beams Strengthened with FRP by Using
RBSM”, Proceedings of 4th
International Symposium on Life-Cycle
Civil Engineering, 2014, 16-19
November 2015, RIHGA Royal Hotel and
Waseda University, Tokyo, 8 pages.

T. Ueda, “Material Conditions
Necessary for Strengthening Concrete
Structures”, Proceedings of 2nd
International Conference on
Sustainable Civil Engineering
Structures and Construction Materials,
Gadjah Mada University, Yogyakarta,
基調講演, 23-25 September 2014 (24
September), KEY-3, Procedia
Engineering 95 (2014) 321 - 334 (also
in USB memory).

Tamon Ueda, “DEBONDING IN
STRENGTHENED CONCRETE MEMBERS”,
Proceedings of the 6th International
Conference of Asian Concrete
Federation, 基調講演, The-K Seoul
Hotel, Seoul, Korea, 21-24 September
2014, pp.1-5 (USB memory).

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 多門 (UEDA, Tamon)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 00151796

(2)研究分担者

佐藤 靖彦 (SATO, Yasuhiko)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：6 0 2 6 1 3 2 7

古内 仁 (FURUUCHI, Hitoshi)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：6 0 1 6 5 4 6 2

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

ZHANG Dawei (ZHANG, Dawei)
小森 篤也 (KOMORI, Atsuya)
高橋 順 (TAKAHASHI, Jun)
藤間 誠司 (FUJIMA, Seiji)