

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：34315

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23541

研究課題名（和文）熱的挙動を考慮した断面修復コンクリートの一体性評価モデルの提案

研究課題名（英文）Proposal of Integrity Evaluation Model for Patched Concrete Considering Thermal Behavior

研究代表者

金 侖美 (Kim, Yunmi)

立命館大学・総合科学技術研究機構・専門研究員

研究者番号：20846662

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、コンクリート部材の補修時に適切な補修材の選定を可能とする基準の提案を目的とし、特にコンクリートと補修材の界面に生じる熱応力に着目している。異なる熱膨張係数を有するコンクリートと補修材を様々な形状で複合した試験体を対象に温度履歴を与えひずみ測定実験および解析を行った。その結果、両材の熱膨張係数の差と補修材の静弾性係数を小さくすることで熱挙動の違いによる応力発生が緩和され、また変形性能の大きい材料（静弾性係数小）を界面のプライマーとして使用することは応力低減に有効であることが分かった。また、補修材がコンクリートを覆う形態になる場合は界面の端部に発生するひび割れ対策の必要性が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートと補修材の体積変化の不一致により生じる補修したコンクリート部材の早期劣化が問題となっている。本研究で検討するコンクリートと補修材の一体性と応力発生との関係究明は構造物の安全性確保を可能とし、補修後の早期劣化を防止することで構造物のライフサイクルコストが低減できると考えられる。また、断面修復コンクリートのような異種接合材料の健全性評価への適用が期待される。

研究成果の概要（英文）：For the proposal of the integrity evaluation model for patched concrete considering thermal behavior, the thermal behavior experiment and finite element analysis were conducted on patched concrete with different coefficients of thermal expansion of concrete and repair material. The results are as follows: 1) by reducing the difference in the coefficient of thermal expansion between concrete and repair material and reducing the coefficient of static elasticity of the repair material, thermal stress due to the difference in thermal behavior is alleviated; 2) using a repair material with high deformation performance at the repair interface is effective in reducing stress; 3) when the repair material covers concrete, it is necessary to supplement the strength against cracks generated at the edges of the interface.

研究分野：建築材料

キーワード：断面修復コンクリート 一体性 熱挙動 界面

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート構造物のコンクリートに鉄筋腐食もしくは凍結融解作用、磨耗などによってひび割れや欠損などの劣化が発生した場合、劣化したコンクリート部分をはつり取って欠損した部分を補修材で埋め戻す断面修復工法が補修手法として採用されている。しかし、断面修復工法で補修したコンクリート部材（以下、断面修復コンクリート）において、目標とした耐用年数に達する前に既設コンクリートと補修材の付着界面（以下、界面）や補修材の外気露出面（以下、補修表面）にひび割れが生じる早期劣化が問題となっている（図1）。

このような断面修復コンクリートの早期劣化は、補修材の熱膨張係数がコンクリートと大きく異なる場合に両材の体積変化の違いによって界面に剥離が生じる現象であり、使用環境（ここでは、外気温度変化と日射）および既設コンクリートの熱挙動を理解せずに補修を行ったことが原因だと言える¹⁾。また、付着不良や界面劣化による補修材の剥離または剥落を防ぐために既設コンクリートが凹形になるよう劣化部分を除去して補修材を埋める形状を勧告されているが、劣化状況によっては補修部が突出形（補修材が既設コンクリートを覆う形態）になり応力負担の箇所（補修表面、界面）が変わることで想定外の場所でひび割れが発生することも考えられる。

既往の研究²⁾によると外気温度が40℃を上回る場合に日射を受けるコンクリート表面は60℃以上の高温となり（図2）、地球温暖化の影響によって日本各地の最高気温が今後さらに高くなる見通しがあることから、既設コンクリートと補修材の熱挙動の違いによる早期劣化の危険性はさらに高くなると考える。なお、日本国内の断面修復工法に関する規定では各種劣化に対する補修材の耐久性および材料自体の力学的特性を提示しており、体積変化に関しては補修材の熱膨張係数や乾燥収縮率を制限している³⁾⁴⁾。しかし、使用環境を考慮した補修材と既設コンクリートの一体性および熱的挙動に関する内容は不十分である。

以上の背景から、断面修復コンクリートの補修部で発生する応力は、両材の熱膨張係数に依存した温度上昇による体積変化、コンクリートと補修材の相互拘束による体積変化の抑制、両材の静弾性係数により大きさが決まることから、既設コンクリートと補修材の力学性能の違いおよび幾何学的形態を十分理解した上で補修すると断面修復コンクリートの早期劣化が予防できると考える。



図1 断面修復部の劣化

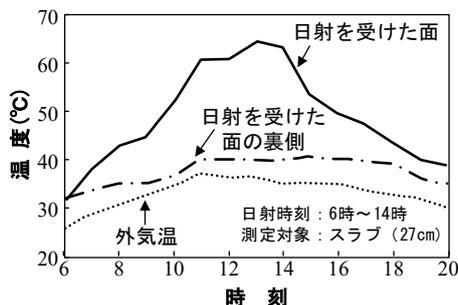


図2 外気温度とコンクリートの表面温度²⁾

2. 研究の目的

本研究は、断面修復工法で補修したコンクリート部材において熱荷重による早期劣化を防止するために補修計画段階で使用環境やその環境による既設コンクリートの熱挙動を考慮した補修材の選定基準を提案することを目的とする。このために、①既設コンクリートと補修材の熱挙動の違いによる断面修復コンクリートの熱ひずみ分布および、②両材の熱膨張係数および静弾性係数の差とひずみおよび応力との関係について実験的に検討を行う。また、③有限要素解析を行うことで断面修復コンクリートの応力分布に及ぼす補修部の幾何学形態の影響を検討する。

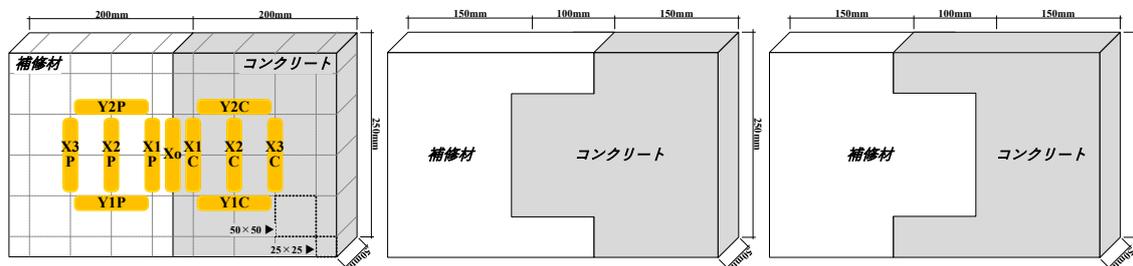
3. 研究の方法

(1) 実験概要

断面修復コンクリートは補修材とコンクリートの温度がほぼ同様であっても両者の熱挙動の違いおよび相互拘束によって温度変化による体積変化が抑制されるが、それぞれの熱膨張係数および静弾性係数の違いによって熱膨張の抑制程度が変わる。断面修復コンクリートの熱膨張率の抑制程度に違いを与えるため、1種の補修材（静弾性係数：10.8kN/mm²、熱膨張係数：14.1×10⁻⁶/°C）に対してコンクリートの静弾性係数（E）と熱膨張係数が33.0kN/mm²・9.4×10⁻⁶/°C、38.4kN/mm²・9.3×10⁻⁶/°C、39.8kN/mm²・9.1×10⁻⁶/°Cとなる3つの試験体を図3(a)のように作製し、内部温度上昇によるひずみ（図中の黄色）を測定した。また、付着界面の処理方法（界面の体積変化の有無）による断面修復コンクリートの体積変化の抑制低減および、付着界面の体積変化のない試験体の温度ひずみと応力に及ぼす補修材とコンクリートの熱膨張係数および静弾性係数の影響についても検討した。

(2) 解析概要

補修部の幾何学形態ごとの応力集中部を把握するために、図 3 のように補修材とコンクリートを 1 面付着した形状および補修材がコンクリートを凹形で覆う形状と凸形で補修材の一部をコンクリートに埋める形状の 3 タイプの補修形態に対して有限要素解析を行った。補修材とコンクリートの熱挙動および応力発生に差異を与えるためにそれぞれの熱膨張係数と静弾性係数を $10.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \cdot 10.4 \text{ kN}/\text{mm}^2$ と $7.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \cdot 35.6 \text{ kN}/\text{mm}^2$ とし、 20°C のひずみを基準とした 60°C の応力分布を検討した。



(a) 1面付着補修 (b) 凹形補修 (c) 凸形補修部

図 3 試験体および解析モデルの様子

4. 研究成果

①コンクリートと補修材の異なる熱挙動による断面修復コンクリートの熱ひずみ分布

図 4 は付着界面の体積変化を考慮しない 20°C の試験体 (ひずみ = 0) を 40°C まで温度を上げた場合のひずみ分布を示したものである。一般に拘束されていない材料の温度変化によるひずみは一樣に変化すると考えられる。構成材料の熱膨張係数がそれぞれ異なる断面修復コンクリートは、両材の相互拘束により相対的に熱膨張係数が大きい補修材のひずみは界面 (X_0) に近づくほど低下する傾向を、より小さい熱膨張係数のコンクリートは増加する傾向を示した。また、界面付近 ($X1P$, X_0 , $X1C$) のひずみはコンクリートの熱膨張係数が大きいほど大きくなっていることが確認できた。

図 5 は断面修復コンクリートの界面に変形性能の大きいエポキシ (静弾性係数小) を塗布した場合に断面修復コンクリートの温度—ひずみ関係に及ぼす影響を示したものである。界面付近の補修材 ($X1P$) とコンクリート ($X1C$) のひずみが界面で非連続的に変化し、同材料の他の測定箇所とのひずみ勾配が発生しておらずに温度上昇に伴い一律に増加する傾向を示した。このことから、界面が緩衝層として作用すると界面付近の補修材とコンクリートに応力負担が減少することが分かった。しかし、界面が大きな応力を負担するため十分な付着強度や引張強度を要する。

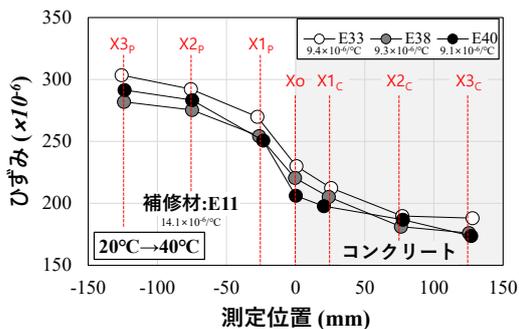


図 4 断面修復コンクリートの温度変化によるひずみ分布

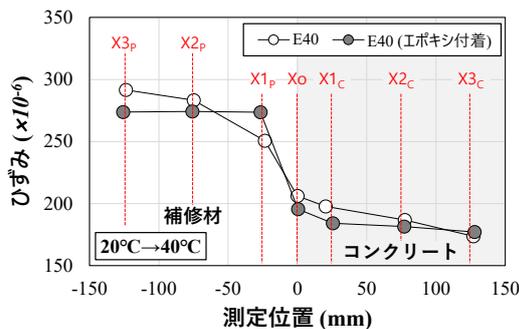


図 5 付着界面の体積変化有無による温度—ひずみ

②熱膨張係数および静弾性係数の違いによる断面修復コンクリートのひずみと発生応力

図 6 と図 7 は界面の体積変化を考慮しない 40°C の界面付近におけるひずみとコンクリートの静弾性係数および熱膨張係数との関係を示したものである。各測定箇所のひずみはコンクリートの熱膨張係数が大きいほど大きくなる傾向であるが、静弾性係数が大きいほど小さくなる傾向を示している。また、界面 (X_0) と界面付近のコンクリート ($X1C$) のひずみ差は静弾性係数が大きいほど小さくなる傾向であった。

図 8 と図 9 は界面の体積変化を考慮しない 40°C のひずみから算定した応力を示したものである。界面 (X_0) における応力は補修材の熱膨張がコンクリートより大きいことにも関わらず、補修材の静弾性係数がコンクリートより小さい (1/3 程度) ことで、補修材の応力 ($X1P$, X_0C) がコンクリート ($X1C$, X_0C) より小さかった。また、補修材とコンクリートの静弾性係数および断面積の比で求められる等価縦弾性係数で計算した X_0 の応力はコンクリートの静弾性係数が大きいほど大きくなっている。

以上のことから、断面修復コンクリートの界面付近における応力は補修材とコンクリートの熱膨張係数の差を小さくすることで相互拘束によるひずみの発生を低減し、補修材の静弾性係数を小さくすることで応力発生が軽減されることが確認できた。

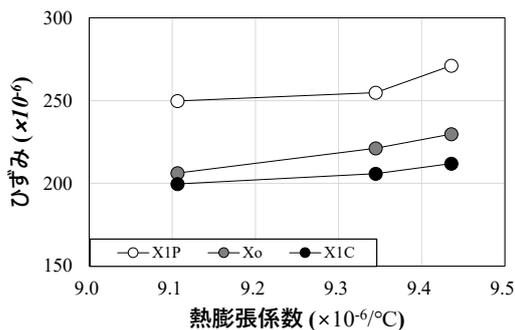


図6 界面付近のひずみとコンクリートの熱膨張係数との関係 (40°C)

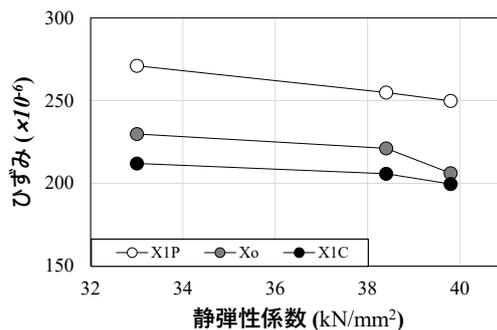


図7 界面付近のひずみとコンクリートの静弾性係数との関係 (40°C)

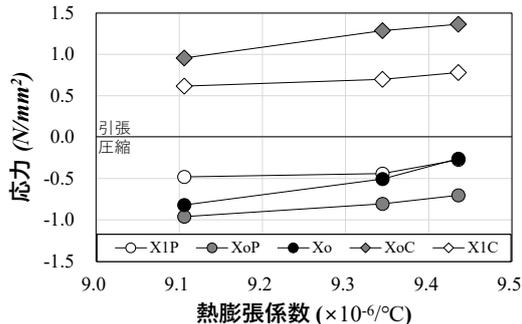


図8 界面付近の応力とコンクリートの熱膨張係数との関係 (40°C)

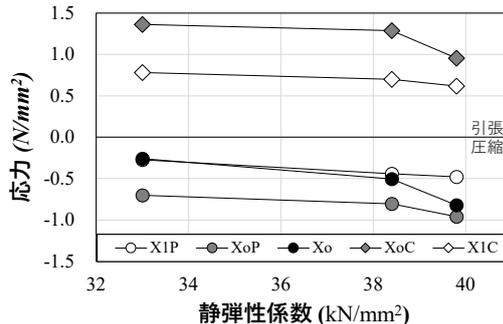
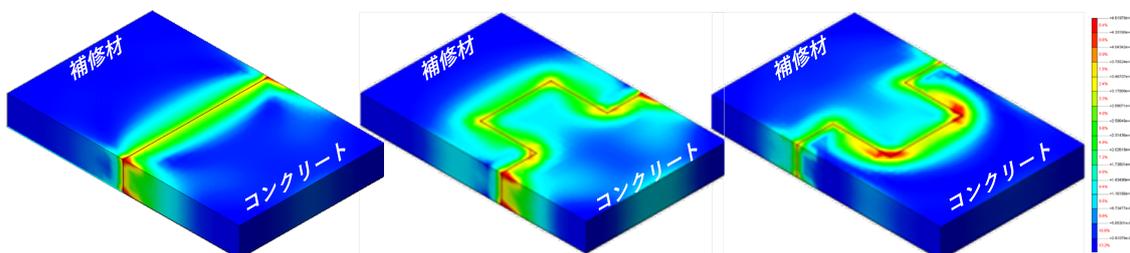


図9 界面付近の応力とコンクリートの静弾性係数との関係 (40°C)

③補修部の幾何学形態が断面修復コンクリートの応力分布に及ぼす影響

図10は有限要素解析による補修部の幾何学形態ごとの熱応力分布を示したものである。補修材とコンクリートの熱膨張係数および静弾性係数の違いによる応力発生はいずれも界面付近で大きくなっている。1面拘束(図10(a))の場合は、応力が界面中心部の両側に均等に分布していたが、両端部はコンクリートの静弾性係数が補修材より大きいことによってコンクリート側の応力がより大きく広い範囲を示した。凹形の補修部(図10(b))は、1面拘束より界面の面積が広いために界面中心部の応力分布がより広がったが、両端部は1面拘束と同様にコンクリート側の応力が最も大きかった。このことから熱膨張係数の大きい補修材がコンクリートを覆う形態になる場合は界面端部にひび割れが発生しやすくなることがわかる。

一方、凸形の補修部(図10(c))は熱膨張係数の大きい補修材をコンクリートが覆う形になることで、補修材の熱膨張によりコンクリートが圧縮され界面中心部の角に応力が大きくなった。しかし、発生応力がコンクリートの圧縮強度より小さいためひび割れの発生可能性は少ない。



(a) 1面拘束の補修部 (b) 凹形の補修部 (c) 凸形の補修部
図10 20°Cを基準とした60°Cの応力分布(上部:PCM 下部:コンクリート)

参考文献

- 1) 金侖美: 断面修復コンクリートの早期劣化に関する研究, 北海道大学博士論文, 2018
- 2) 地濃茂雄: 日射に代えて赤外線を照射した場合のコンクリート表面の温度上昇, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.331-336, 2008
- 3) 東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社: 構造物施工管理要領, 高速道路総合技術研究所, 2015
- 4) 国土交通省, 建築保全センター: 建築改修工事監理指針上巻, 建築保全センター, 2016

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 神代 康輔, 吉富 信太, 金 侖美, 福山 智子	4. 巻 14
2. 論文標題 断面修復コンクリートの修復界面の形態と熱的挙動の関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 歴史都市防災論文集	6. 最初と最後の頁 83-90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 金 侖美, 福山 智子, 神代 康輔, 吉富 信太	4. 巻 27
2. 論文標題 ひずみゲージによるコンクリートの熱変形の測定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 622-625
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金 侖美, 福山 智子, 神代 康輔, 吉富 信太
2. 発表標題 断面修復部の界面付近における応力発生に及ぼす静弾性係数および熱膨張係数の影響
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金侖美, 福山智子, 神代康輔, 吉富信太
2. 発表標題 熱膨張係数を考慮した断面修復コンクリートの修復界面のひずみ変化に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神代康輔, 吉富信太, 金侖美, 福山智子
2. 発表標題 断面修復コンクリートの修復界面の形態と熱挙動の関係
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yunmi Kim, Tomoko Fukuyama, Koske Jindai, Shinta Yoshitomi
2. 発表標題 Experimental Study on the Thermal Behavior of Patched Concrete considering Coefficient of Thermal Expansion
3. 学会等名 Architectural Institute of Korea
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神代康輔, 吉富信太, 金侖美, 福山智子
2. 発表標題 断面修復コンクリートの修復界面の形態と熱応力の関係
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------