

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01506

研究課題名(和文) NDTと構造解析とのデータ同化による道路床版の余寿命評価システムの研究開発

研究課題名(英文) Evaluation system on the remaining life of road deck by data assimilation with NDTs and structural analysis

研究代表者

田中 泰司 (TANAKA, Yasushi)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：40377221

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：道路橋コンクリート床版の点検診断の合理化を目的として、近年、開発された非破壊試験(NDT)技術と構造解析技術を組み合わせた床版の余寿命を推定するシステムの検討を行った。その結果、3次元レーダー波形を信号処理することによって、床版内部の滞水箇所が目視よりもかなりはやい段階で検出できることを詳細解体調査結果との比較から明らかにした。また、磁気計測と解析を組み合わせることで構造物内部の鋼材腐食を検出する手法を開発した。さらに、定期的に撮影した床版下面の高精細画像からひび割れ検出を行い、余寿命推定を行ったところ、季節変動の考慮が必要であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究は、現在、道路システムの維持管理で最も問題となっているコンクリート床版に対して、その点検診断に有用である技術の抽出と開発を行い、それらが実働するための検討と各種提案を行った点に大きな社会的意義がある。道路橋コンクリート床版の診断では、劣化を加速させる滞水現象の把握と、疲労損傷の進展具合を表す内部ひび割れの把握、コンクリートおよび鋼材の材料劣化の把握が重要である。現状ではそれらは目視調査と微破壊試験で実施されている。本研究で着目・開発した技術によれば、非破壊で情報を取得し、定量的に評価が可能となる。

研究成果の概要(英文)：Estimation system on the remaining fatigue life of concrete bridge deck was studied to develop the rational inspection and diagnosis in this research. Coupling system between structural analysis and non-destructive tests (NDTs) which had been recently developed, was proposed.

Demolition survey of existing road bridge deck verified that signal processing of 3D radar enables to detect stagnant water inside bridge deck even in the early stage where visual inspection is impossible to detect. Detection method for steel corrosion inside concrete structure was developed by the combination of magnetic measurement and numerical analysis. Moreover, remaining fatigue life of concrete bridge deck was estimated from high-resolution images which were periodically taken on the lower face. Crack width detected from image had significant change with climate.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：道路橋 床版 レーダー信号処理 磁気計測 高精細画像 ひび割れ 滞水 余寿命

1. 研究開始当初の背景

橋梁やトンネルなどの道路インフラの老朽化は喫緊の課題である。特に道路橋床版の維持・更新には、道路全体の半分以上の予算が必要とされており、維持管理の合理化が求められている。しかし、現状の道路床版の点検は、目視で行われており、点検者のばらつきが大きく診断精度が低い。それによって、重大事故の発生リスクと、不要な対策を講じることによる損失リスクの両方を抱えている。この問題に対し、これまでに、床版の重交通による疲労破壊メカニズムの研究が実験・解析の両面から進められてきた(松井ら 1984, 前川ら 2013)。また、近年、非破壊試験(Non Destructive Test, NDT)による床版の調査・モニタリングに関する研究も実施されている(依田ら 2016, 門ら 2016)。しかし、これらの学術研究の成果が実際の床版の維持管理には未だに活かされていないのが現状である。これは、前者のメカニズムの研究成果を診断や補修設計などにどのように使えば良いのかが明らかでないこと、後者の非破壊試験においては、計測結果の維持管理上での活用方法とメリットが明確でないことなどによる。すなわち、新しい知見、新しい技術を活用するための統合化研究とシステム研究が不足しているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、道路床版の点検・診断において、これまでに個別に研究開発されていた非破壊試験・解析技術を統合化し、実用的なシステムを研究開発することにある。システムの中核は、研究代表者ら(2017)が開発した、マルチスケール解析によるデータ同化技術である。この技術を発展させて、ひび割れ画像や、レーダー計測などの非破壊検査データを損傷入力情報または環境作用に変換して、床版の疲労余寿命を推定する技術を確立する。さらに、非破壊検査の観測精度、余寿命解析・劣化予測の予測精度の個々の限界を踏まえ、オブザベーションメソッドによる定期更新を行えば信頼性が向上する可能性もある。点検・診断システムに疲労解析を組み込むことによって、モニタリングのタイミングや状態判定が合理的に実施可能となるというメリットもある。道路床版の維持管理において、工学的合理性を導入することによって、社会的リスクと社会的負担の両者を低減し、社会に貢献することが本研究の最終目標である。

3. 研究の方法

道路橋コンクリート床版は交通による疲労を受ける。このとき、水が存在すると疲労寿命は1/50~1/200程度に低下することが松井ら(1986)の研究によって知られている。さらに寒冷地では凍結防止剤散布によって凍害と塩害の複合環境作用を受けて床版が劣化する。そのため、道路橋コンクリート床版の点検・診断では、①劣化を加速させる滞水現象の把握と、②疲労損傷の進展具合を表す内部ひび割れの把握、③コンクリートおよび鋼材の材料劣化の把握が重要である。

このうち①②については、従来、目視によって定性的な評価が行われてきた。本研究では、①について、3Dレーダーを用いて床版内の滞水箇所を検出する方法に着目し、実際の道路橋床版での適用性を実橋計測および解体調査により実証することとした。②については、高解像度カメラで撮影した画像を画像解析することでひび割れ幅を評価する手法に着目し、実橋梁床版の下面での画像撮影およびひび割れ計測と疲労解析にもとづく余寿命評価を実施した。

一方、③については、これまでコンクリートコア採取やかぶりコンクリートのハツリを伴う破壊試験によって調査が行われてきた。本研究では、材料劣化のうち、内部鋼材の腐食について、非破壊で計測する手法の開発を実施した。

3.1 レーダー信号処理による床版滞水箇所の評価

3Dレーダーで得られた波形に水谷らが開発した信号処理を適用することによって、床版の異常箇所を特定する手法により、道路橋床版の滞水箇所を推定する方法について検討した。実際に床版劣化が進行して取換えが予定されていた道路橋床版を研究対象として、レーダー計測を行い、図-1に示すような信号処理結果を得た。このうち、顕著な異常が得られた部分を4.5×3.0mの範囲で切り出し、詳細な解体調査を行った。信号処理結果との比較を行うことで、異常の種類区分と劣化メカニズムを考察した。

3.2 床版下面のひび割れ画像解析

AIを用いた画像のひび割れ判定技術を開発することで、床版に生じているひび割れを定量化し、疲労余寿命を評価した。機

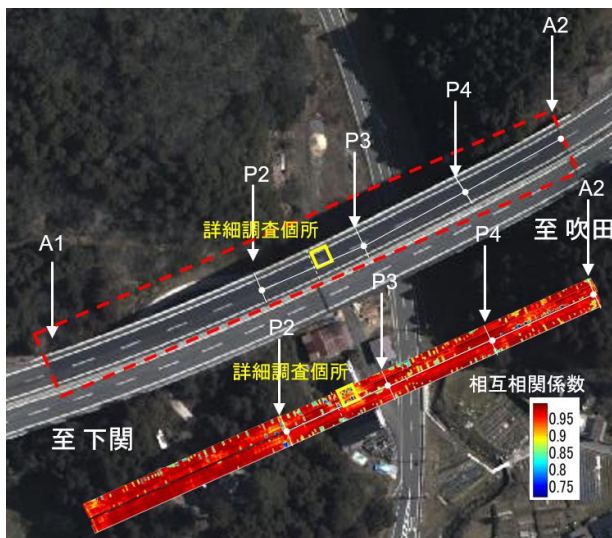


図-1 道路橋床版のレーダー信号処理結果

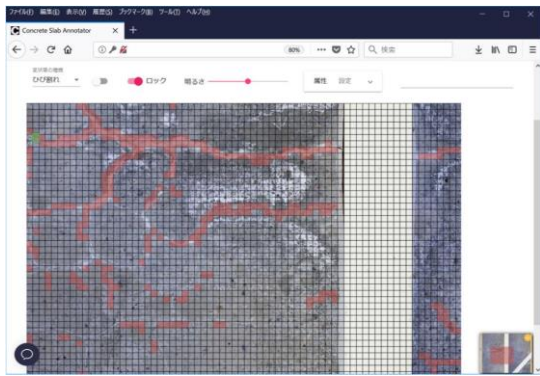


図-2 アノテーション支援ツール

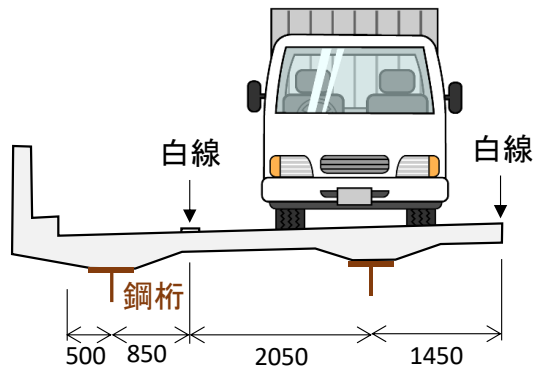


図-5 RC床版の断面図

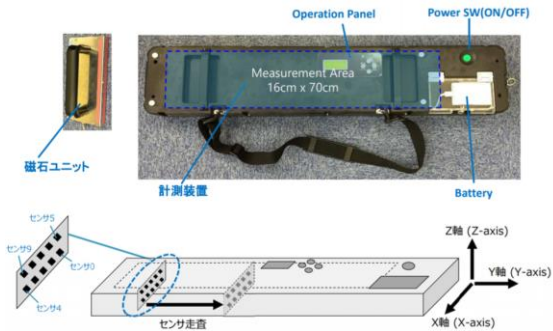


図-3 使用した3軸磁気計測装置

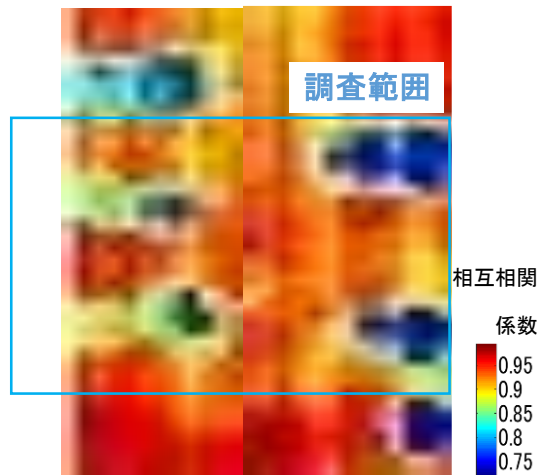


図-6 レーダー信号処理結果

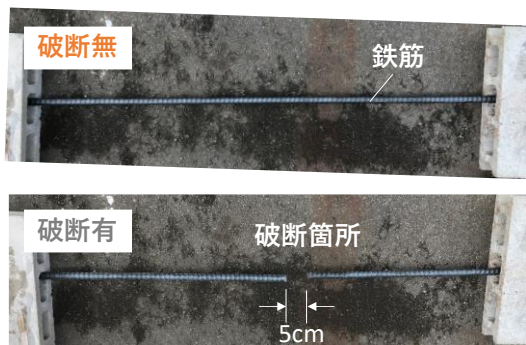


図-4 鋼材の配筋例

機械学習のための教師データには、全国の道路橋床版の下面で撮影された高解像度画像を用いた。SIPにて作成されたアノテーション支援ツール(図-2)により、約2cm格子内のひび割れの有無をアノテートし、VGG-16をベースとした転移学習モデルを櫻井と共同で作成した。このAIモデルの精度検証のため、ひび割れを直接トレースし、さらにウェブレット変換によるひび割れ幅分析(堀口ら)を行ったデータを用意し、AIモデルの判定との比較を行った。

3.3 磁気計測による鋼材腐食破断の検出

永久磁石の近傍の磁束密度分布を図-3に示す装置を用いて計測し、計測箇所周辺のコンクリート内部の鋼材の配筋と腐食による破断を検出する手法の開発を試みた。図-4に示すように、鉄筋を配筋し、破断箇所の有無が計測結果に及ぼす影響を確認した。

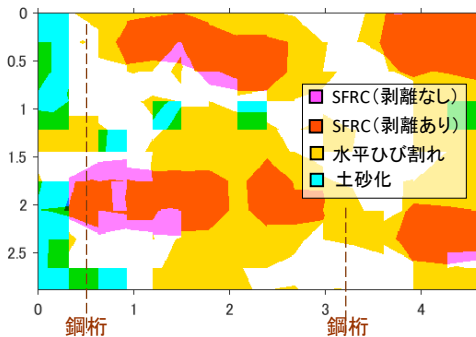


図-7 コンクリートの変状分布

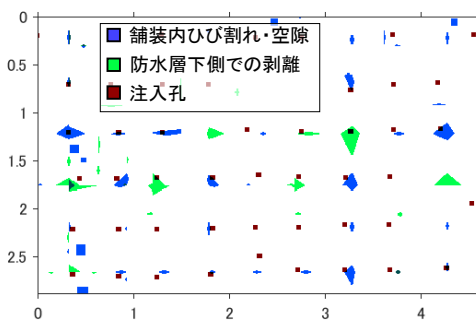


図-8 アスファルト舗装および防水層での変状分布

4. 研究成果

4. 1 レーダー信号処理による床版滞水箇所の評価

床版の撤去工事の前に、蛍光塗料を含有したエポキシ樹脂を 50cm 間隔で注入した。撤去床版を 30cm 格子に切断し、切断面を観察したところ、供用中から舗装に多くのひび割れや空洞が生じていたことがわかった。図-5 の RC 床版断面図に鋼桁と車両走行位置を示す。図-6 はレーダー信号処理の解析結果である。図-7 に RC 床版で観察された変状の分布、図-8 にアスファルト舗装および防水層で観察された変状の分布を示す。

図-7 に赤、ピンクで示す SFRC 補修位置はレーダー信号処理における青色で示される相互相関の低い位置とおおむね一致している。これは、SFRC に含まれる鋼繊維によって電磁波が強く反射するためである。図-7 で黄色で示した上側鉄筋付近の水平ひび割れは、レーダー信号処理の結果との相関性は見られなかった。コンクリートと大気の水誘電率の差が小さいこと、調査に使用したレーダーの周波数は 200MHz~3GHz と波長が比較的長いことから、コンクリートと大気境界での電磁波の反射が弱く、乾燥したひび割れ面の検出は困難であると考えられる。図-8 に青で示す舗装内のひび割れ、空隙は、網目状で複雑につながっていたため、切断面付近に限られた位置しか把握できなかった。それでもひび割れ・空隙が調査範囲全体にわたって確認されたことから、アスファルト舗装には相当量のひび割れや空隙が存在し、降雨時にはこれらに滞水が生じると考えられる。水の水誘電率はアスファルトコンクリートの約 20 倍と高いことから、図-6 の広い範囲で見られる黄色やオレンジ色の異常箇所は舗装内の滞水によるものと考えられる。

今回使用した GPR で検出できるのは、基本的に滞水箇所である。滞水は凍害、塩害、ASR を引き起こす原因であり、疲労破壊を促進する。そのため、レーダー信号処理によって滞水箇所を早めに把握し、手当てをして滞水を無くすことが、RC 床版の効果的な予防維持管理方法のひとつといえる。レーダー信号処理から滞水の原因を直接特定することはできないものの、定期的な計測を行えば、滞水箇所の変化から、新たな劣化箇所と劣化速度を把握することができる。本研究では舗装打換えから 3 年経過した床版で舗装内の滞水を発見した。撤去時においても上面からの変状は見られなかったため、レーダー信号処理では、目視で確認されるよりもかなり前に、舗装内の劣化を検知できるといえる。

4. 2 床版下面のひび割れ画像解析

図-9(a)に示すように、コンクリート床版下面において 0.2mm 程度の解像度の 1 億画素画像を撮影し、(b)のようなひび割れトレース画像を作成した。また、同じ画像を AI モデルでひび割れ判定したところ(c)のような結果が得られた。このような比較を約 20 個の異なる橋梁床版において実施したところ、AI 判定とトレース画像との整合率は平均で 86%となり、比較的高い値となった。また、False positive が 11%、False negative が 3%であり、見落としが少ない傾向となった。トレース画像の作成には人力で 1 枚あたり 2 時間ほどを要する。AI モデルは計算時間が約 1 分であり、時間と労力を大幅に削減することが可能となる。

一方、AI モデルの精度向上については課題が残された。人の判断によって作成される正解データ自体が作成者によって大きく揺らぐためである。不完全なデータに対する精度検証方法の構築が必要となる。

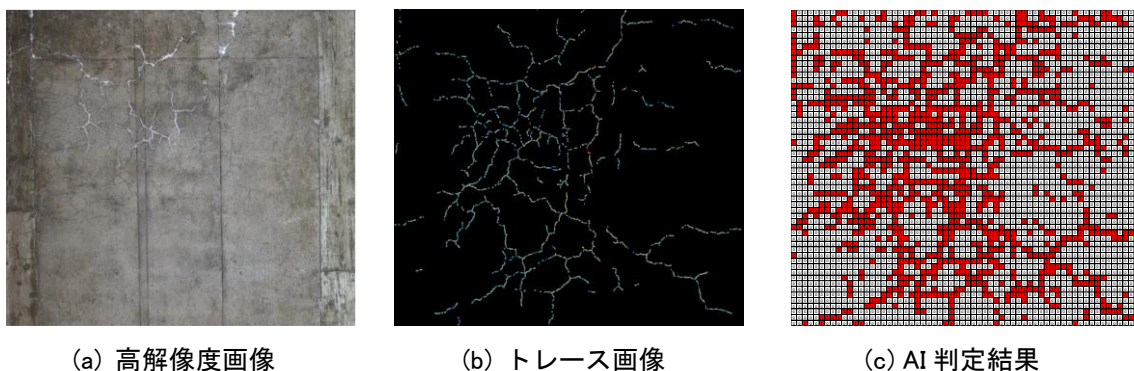


図-9 AIによるコンクリート床版下面のひび割れ検出結果の例

このような画像解析によるひび割れ判定を、実際の床版の維持管理へ活用するために、同じコンクリート床版において下面の撮影を 2 年間にわたり複数回行い、ひび割れ幅を画像解析によって推定し、疲労余寿命の評価を行った。図-10 に撮影日とひび割れによる平均ひずみの関係を示す。ひび割れ幅は季節変動を生じているようであり、時間の経過によって必ずしも拡大するわけではなかった。撮影頻度が少ない場合の、ひび割れ幅に着目した劣化度評価には注意を要するといえる。同図には、疲労解析によって同定された破壊時のひび割れひずみを限界値として示した。このように画像解析によってひび割れ幅を推定できれば、現時点における床版の疲労破壊に対する余裕度を可視化することができる。

4.3 磁気計測による鋼材腐食破断の検出

10個の3軸磁気センサーを鉄筋軸方向に走査することで図-11に示すような磁束密度分布が得られた。鉄筋がない場合にはy軸方向成分のみが現れるのに対して、鉄筋がある場合にはz軸方向成分が観測されるようになる。鉄筋が軸方向に連続して配置されている場合には、永久磁石（図の手前側に設置）からの距離に従い、z軸方向の磁束密度は滑らかに漸減した（図-11(a)）。一方、鉄筋破断がある場合には破断位置で磁束密度が急激に減少した（図-11(b)）。鉄筋から放射状の磁場が形成されることを仮定し、2個のセンサー計測値から磁束密度ベクトルの交点を求めたものが図-12である。外れ値を除外し、平均を取れば、おおむね実際の配筋と一致した。ここに磁束密度の大きさをコンターによって重ねることで破断位置が可視化できるようになる。スターラップや複数鉄筋を有する配筋で同様の計測と解析を行ったところ、鉄筋の配置と破断の有無、破断の位置を評価できることが確認された。

ひずみによる劣化進行度予測（乾燥）

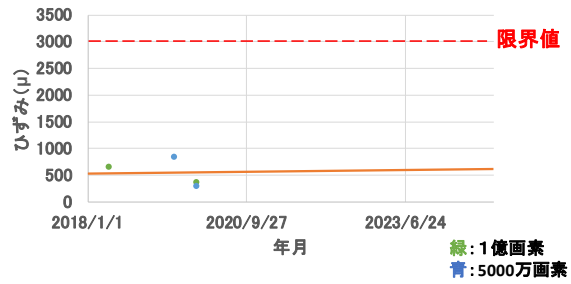
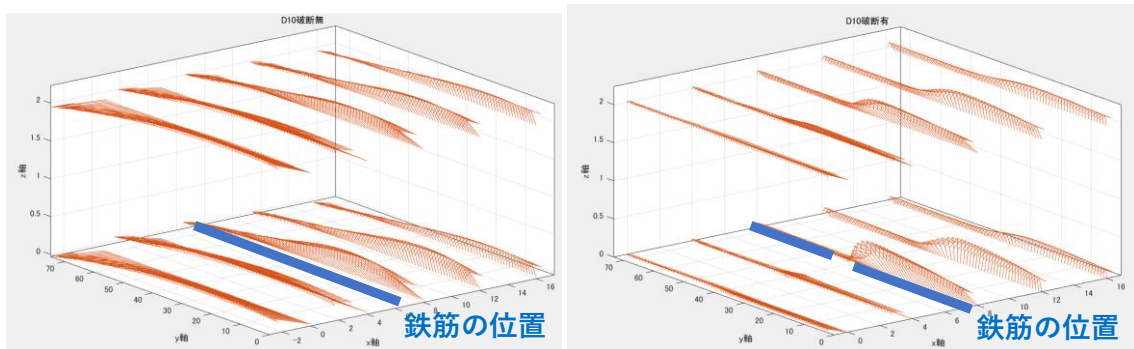
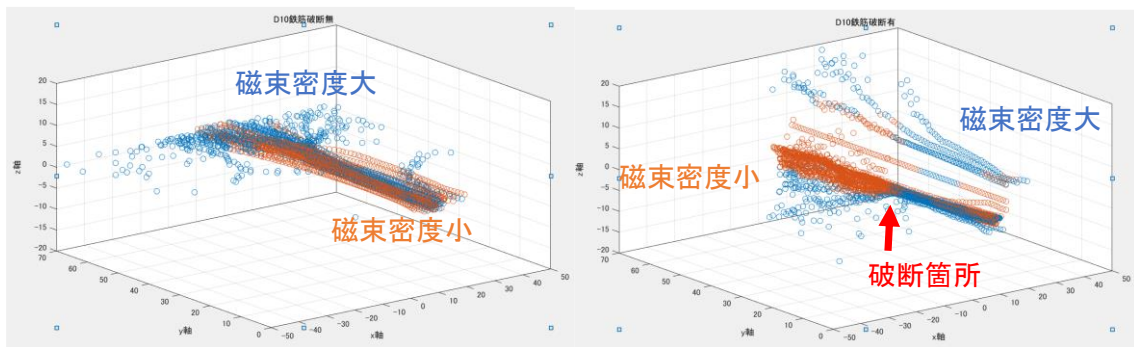


図-10 床版下面のひび割れによる平均ひずみの経時変化



(a) 破断無し (b) 破断有り

図-11 磁束密度分布における鉄筋破断の影響



(a) 破断無し (b) 破断有り

図-12 配筋と破断位置推定結果

4.4 まとめ

本研究は、現在、道路システムの維持管理で最も問題となっているコンクリート床版に対して、その点検診断に有用である技術の抽出と開発を行い、それらが実働するための検討と各種提案を行った点に大きな社会的意義がある。道路橋コンクリート床版の診断では、劣化を加速させる滞水現象の把握と、疲労損傷の進展具合を表す内部ひび割れの把握、コンクリートおよび鋼材の材料劣化の把握が重要である。現状ではそれらは目視調査と破壊試験で実施されている。本研究では、水谷らが開発したレーダー信号処理技術が床版の滞水を目視よりもはるかにはやい段階で検出できることを実橋計測により明らかにした。床版ひび割れの把握に関しては、下面を撮影した画像からAIにより検出する手法を構築し、ひび割れ情報から疲労余寿命を簡易に評価する方法を提案した。材料劣化に関しては、磁気計測と解析を組み合わせることで、鋼材破断が検出できることを明らかとした。このように、本研究で着目・開発した技術によれば、コンクリート床版の劣化状況について非破壊で情報を取得し、定量的な診断・評価が可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Fathalla Eissa, Tanaka Yasushi, Maekawa Koichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Fatigue Life of RC Bridge Decks Affected by Non-Uniformly Dispersed Stagnant Water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 607 ~ 607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9030607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fathalla Eissa, Tanaka Yasushi, Maekawa Koichi	4. 巻 17
2. 論文標題 Fatigue Lifetime Prediction of Newly Constructed RC Road Bridge Decks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 715 ~ 727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.17.715	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 武田健太, 田中泰司, 伊藤裕章, 大谷拓矢, 登石清隆, 樋口徳男	4. 巻 66A
2. 論文標題 鋼材の腐食劣化が進行したPC連続箱桁橋の構造性能評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 712-724
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 Ryojiro KATO, Chikako FUJIYAMA and Januarti Jaya Ekaputri	4. 巻 41
2. 論文標題 FATIGUE STRENGTH AND DEFORMATION BEHAVIOR OF FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1997-2002
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 Eissa Fathalla, Yasushi Tanaka and Koichi Maekawa	4. 巻 171
2. 論文標題 Remaining fatigue life assessment of in-service road bridge decks based upon artificial neural networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering structures	6. 最初と最後の頁 602-616
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fathalla Eissa, Tanaka Yasushi, Maekawa Koichi, Sakurai Akito	4. 巻 17
2. 論文標題 Quantitative Deterioration Assessment of Road Bridge Decks Based on Site Inspected Cracks under Stagnant Water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 16 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/jact.17.16	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Eissa Fathalla, Yasushi Tanaka, Koichi Maekawa and Akito Sakurai	4. 巻 17
2. 論文標題 Quantitative deterioration assessment of road bridge decks based on site inspected cracks under stagnant water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of ACT	6. 最初と最後の頁 16-33
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fathalla Eissa, Tanaka Yasushi, Maekawa Koichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Fatigue Life of RC Bridge Decks Affected by Non-Uniformly Dispersed Stagnant Water	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 607 ~ 607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9030607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平林和浩
2. 発表標題 CFRTPを緊張材に用いたPC部材の力学性能評価のための基礎研究
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴崎晃
2. 発表標題 プレキャストPC床版の輪荷重走行試験に関する再現解析（1）
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楠畑菜津子
2. 発表標題 プレキャストPC床版の輪荷重走行試験に関する再現解析（2）
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋正也，藤山知加子，田中泰司，土田智，中野聡
2. 発表標題 擬似クラック法を用いた既設RC床版のモデル化条件の検討
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤修, 田中泰司, 大田孝二
2. 発表標題 高性能カメラによる撮影画像のRC床版の維持管理への適用に関する一検討
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土田智, 中野聡, 宮村正樹, 藤山知加子, 田中泰司
2. 発表標題 固有振動数を用いた道路橋RC床版の疲労による剛性評価方法の検討
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鍋田仁人, 宮村正樹, 中野聡, 藤山知加子, 田中泰司
2. 発表標題 既設RC床版における疲労損傷度別S-N関係図を用いた床版余寿命予測に関する検討
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤山知加子, 本多弘樹, 長尾千瑛, 後藤俊吾
2. 発表標題 数値解析によるプレキャストPC 床版の耐疲労性能評価にむけたモデル化手法の検討
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋正也, 藤山知加子, 田中泰司
2. 発表標題 全橋モデルと格間モデルを用いたRC床版のモデル化条件の比較検討
3. 学会等名 第10回道路橋床版シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤山知加子, 小林崇
2. 発表標題 軽量骨材を用いたPC床版の破壊過程および耐荷力の検討
3. 学会等名 プレストレストコンクリート工学会第27回シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 土木学会構造工学委員会	4. 発行年 2019年
2. 出版社 土木学会	5. 総ページ数 290
3. 書名 数値解析による道路橋床版の構造検討小委員会成果報告書	

〔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
研究分担者	藤山 知加子 (Fujiyama Chikako) (60613495)	横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授 (12701)	

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
---------	---------