

令和元年6月17日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06096

研究課題名(和文) 液状水が波形鋼板ウェブ橋梁接合部の疲労劣化に与える影響の解明と対策法の提案

研究課題名(英文) Research on the influence of liquid water on fatigue deterioration of embedded joint in corrugated steel web PC bridge and development of effective countermeasures

研究代表者

千々和 伸浩 (Chijiwa, Nobuhiro)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：80546242

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は波形鋼板ウェブPC橋梁の鋼-コンクリートの接合部に水が浸入することで、界面コンクリートが急速に劣化し、構造システムが崩壊する可能性を吟味し、その対策を立案するために実施したものである。検討の結果、波形鋼板ウェブPC橋では懸念されたような劣化損傷は起きにくいことが明らかになった。これはプレストレスによる界面剥離の拘束や、フランジ厚が薄く、ひび割れを通じて、コンクリート内部での水圧が高まりにくく、コンクリートの破砕が進みにくいからである。本研究では、より一般的な対策として、界面に事前処理を施すことによって局所の水圧上昇を抑制し、鋼-コンクリートの接合部劣化を抑制できることも明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波形鋼板ウェブPC橋はその力学的合理性ゆえに、近年多く用いられている構造形式である。鋼-コンクリート間の応力伝達が、構造を成立させる上で重要なポイントとなるが、近年の研究から水によって、この応力伝達機構が急速に破壊される場合があることが示され、波形鋼板ウェブPC橋にリスクが潜在している可能性が浮かび上がった。本研究はこの潜在的危険性の有無を明らかにするべく検討を行ったものであるが、結果として懸念したような問題が生じる可能性は低いことを明らかにすることができた。検討を通じて、水による界面劣化機構がより詳細に明らかになり、これに基づいた一般的な構造物に対する界面劣化抑制策が立案された。

研究成果の概要(英文)：This research aims to examine the possibility of rapid deterioration of anchorage performance of steel web embedded in the concrete flanges in steel corrugate web PC bridge due to the liquid state water, and propose some effective countermeasures for the problem. As a result of the research, it is confirmed that the risk of concerning problem is small. This is because the interface opening is confined by the pre-stressing force, and the water pressure of the interface is limited in low level due to the crack penetration through thin concrete flanges. It is also confirmed that the effectiveness of a new countermeasure with a special treatment on the interface between steel and concrete by suppressing local water pressure.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：液状水 波形鋼板ウェブPC橋梁 接合部 繰り返し荷重作用

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

波形鋼板ウェブ橋梁形式は、同じ程度のスパンを架橋するのに用いられるプレストレストコンクリート橋梁形式に比べて、橋が曲げ外力に抵抗する際の寄与度の高い上下フランジをコンクリート製とし、寄与度の低いウェブ部を鋼板とすることで上部工を軽量化することができ、橋脚等を通常よりも簡素化できる、ウェブ鋼板を伸縮できる波形のものとして、この部位の軸方向への変形抵抗を小さくすることで、上下フランジのひび割れ抑制のために導入するプレストレス緊張力を、上下フランジに集約的に作用させ、緊張具を簡素化できる、という特長を有する比較的新しい橋梁形式である。この高い効率性から近年建設事例が急増しており、一部の事業者では本橋梁形式を標準形式として採用するに至っている。

一方、申請者らの研究から、降雨や降雪によってコンクリート内の準閉鎖空間内へと液状水が浸入した場合、疲労寿命は著しく低下する可能性があることが明らかになった。風車のタワーはコンクリート中に鋼材を埋め込むことで定着されているが、風による揺れによってこの鋼材定着部には押し引きの繰り返し荷重が作用する。通常作用する荷重レベルは極めて小さく、暴風のような最大荷重作用時であっても疲労破壊が起きないよう、万全な設計がなされていると考えられていた構造物において、最悪の場合、供用からわずか数か月のうちに破壊に至る可能性があることが示されたのである。コンクリートの施工現場において、材料分離や収縮によってコンクリートと鋼材には微小な隙間が生じてしまうことが知られている。このために侵入経路となる部位には防水シーリングが施されるが、紫外線の影響で長期のシーリング効果は期待できないことは昨今の常識となりつつあり、排水勾配が設けられていない場合や適切な維持管理が行われていない場合には、液状水は遅からず必ずコンクリート内部へと浸入し、コンクリートへの鋼材定着性能を一気に劣化させるのである。

この研究から明らかになった事実を基に、類似した構造形式を有する構造物がないか調査を行った結果、橋梁支承や鉄筋定着部などいくつかの構造部位において液状水の影響を考慮した再検討が必要であることがわかった。中でも最も構造系に与える影響が大きいと考えられる対象が、本研究申請が取り上げる波形鋼板ウェブ橋梁形式である。波形鋼板ウェブが下フランジコンクリートに埋め込んで接合されている箇所が風車基礎の定着と類似した接合形式であり、さらに埋め込み深さも10cm程度しかないことから、液状水の浸入に対して極めて脆弱である。経年劣化によってシーリングが破れることはもはや常識となりつつあり、雨や雪、結露、漏水等により下フランジに水が滞水している事例も既に報告されていることから、想定する状況は現実において十分に起き得るものである。折しも生産年齢人口の減少により、維持管理予算の縮減が予想されており、シーリング劣化の見落としが生じやすい社会情勢が訪れつつある。

風車基礎の鋼材定着性能に関する研究から、鋼-コンクリート接合部位にひとたび液状水が浸入すると接続部のコンクリートが急速にスラッジ化し、また事後補修も難しいことも分かっており、波形鋼板ウェブ橋梁のような合理性が高く相対的に冗長性の低い構造物においては、接続部としての機能が失われることで、橋梁システムが破たんする可能性は否定できない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、経年劣化により波形鋼板ウェブ橋の波形鋼板ウェブ-下フランジ接続部の防水シーリングが破れた状況下で橋梁が供用された場合、接続部のコンクリートがスラッジ化し、接続部としての応力伝達能力が失われるのか、その原因機構から解明し、現象理解に基づいた設計法の改良、事象発生後に適した補修材の特性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

中型波形鋼板ウェブ試験体と小型部分試験体での繰り返し載荷試験、液状水作用による鋼-コンクリート界面劣化を表現する数値モデルを用いた数値解析実験を組み合わせ、効率的に波形鋼板ウェブ橋梁の鋼ウェブ-コンクリートフランジ間の接合部応力伝達性能の低下に与える液状水の影響を解明する。鋼-コンクリート定着部位における鋼材形状や埋め込み深さ、配筋等といった構造諸元の違いが液状水作用による界面劣化に与える影響を明らかにし、得られた知見を基に液状水の影響を抑制するための設計対策を提案する。既設橋梁における事象発生に備えるため、使用済み試験体に対して各種補修材による補修効果検証実験を行い、液状水作用によって接合性能が劣化した部材の性能回復に適した補修材特性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 中規模試験体を用いた検証実験

中規模試験体により、液状水作用が波形鋼板ウェブ橋の鋼ウェブ-コンクリートフランジの接合部の性能劣化に与える影響について検討を行った。実験では下フランジ上面に水をはった状態で、1Hzでの繰り返し載荷を行った。各部位のひずみ変化やたわみの推移について計測を行ったが、主だった変化は見られず、最大で設計荷重を超える荷重レベルまで荷重を与えた上で載荷を行ったものの、それでもやはり変化は見られない結果となった。本研究のベースとなった風車基礎における埋込み定着部では鋼-コンクリート界面から内部に液状水が浸入したことにより、周囲のコンクリートが破砕され急速な引き抜けが生じたのに対して、今回の実験結果は予想と大きく異なるものであった。両者の条件の違いに着目して変化の原因を推定したところ、2つの相違点が明らかになってきた。一つ目の相違点は、波形鋼板ウェブ橋では軸方向に

プレストレスが作用しており、コンクリートと鋼の間で開口やせん断ずれが生じにくい状況にあることである。外力によって界面が一体化されていることによって、界面に水が入る余地がなく、液状水による劣化促進がスタートしないことになったと考えられる。もう一つの相違点は、波形鋼板ウェブ PC 橋では上下フランジ厚が小さく、ひび割れが直ちに部材を貫通し、水が内部に浸入しても、被圧時に速やかに外部に排出されることである。事実、実験において荷重レベルを上げた時には曲げひび割れが発生し、鋼-コンクリート界面やひび割れ面から白いスラッジが噴出するようになったものの、全体挙動にも顕著な影響がみられなかった。ひび割れ発生後、ウェブ上に滞水させていた水は、下フランジのひび割れを通じて試験体下面側のひび割れから滴下するようになってしまっており、鋼-コンクリート界面やひび割れ面において水圧上昇が抑制されたものと推測される。またスラッジの発生量は載荷回数とともに減少していた事実は、スラッジは鋼-コンクリート界面やひび割れ面の凹凸が開閉の繰り返し作用によって平滑化される過程で生じたものであって、空隙中の水圧増加によるコンクリートの破砕から生じたスラッジではないことを示しているものと考えられる。

(2) 数値解析による現象の分析

実験結果から、鋼コンクリート接合部における水に関わらず、両者とも大きな違いは見られない結果となった。そこでコンクリートとその空隙中の水の挙動を Biot の二相モデルによって表現し、コンクリートと鋼の界面には通常の接合要素モデルを配置した数値モデルを用いて現象機構の検証を行うこととした。プレストレス拘束の有無や載荷速度を変えた計算結果から、実験で見られたようなスラッジが生じて、それがたわみ増加に寄与する程度は微小であることが明らかになった。実験結果から推測されたように、波形鋼板ウェブ PC 部材の部材厚さは薄く、鋼やコンクリートの界面での水圧上昇が抑えられることがこの原因であると考えられ、液状水作用による急速な定着部の破壊を抑制する上では、排水による液状水浸入を防ぐとともに、浸入した水を速やかに外部に排出することの重要性が明らかになった。なお実験において、クリープや乾燥収縮によってプレストレスが低減し、鋼-コンクリート界面やひび割れが開口しやすくなり、実験が意図した状況と異なっていた可能性がある。そこで、地中 RC カルバートの長期変形の再現解析によって数値解析による長期時間依存変形量の再現精度を確認し、実験でも十分な量のプレストレスが作用し、実験計画通りの挙動をしていたことを別の視点から確認している。

改めて、鋼とコンクリート界面における水の動きを精緻に追跡することが現象解明の上で重要であることが明らかになったことから、過去の実験から水の浸入によって低下していく過程が記録されている、コンクリートへの鋼埋め込み定着部を対象に、数値解析による追加分析を行った。ここでは中規模波形鋼板ウェブ試験体の解析と同じく、コンクリートとその空隙中の水の挙動を Biot の二相モデルによって表現し、コンクリートと鋼の界面には通常の接合要素モデルを配置して、静的引き抜けや動的繰り返し載荷の状況の再現解析を行った。静的引き抜けの再現結果から、鋼とコンクリートの界面における局所要素の開口時の特性が、全体の引き抜け挙動に極めて大きな影響を与えていることが明らかになり、鋼材の微小な傾きや、引き抜けによる滑り発生時に瞬間的に生ずる動的挙動が実験結果に大きな影響を与えていることが明らかになった。静的挙動に近い挙動を表すことのできる特性を接合要素の与えた数値モデルによって、繰り返し挙動を再現した結果からは、水の影響を考慮することで引き抜けが早くなるという実験事実と同じ傾向が示された一方、載荷速度が遅いほど寿命が延びるという実験と逆の結果が得られた。この原因は、実験では繰り返し載荷の中で外部からの水が徐々に空隙中に浸入してくる状況であったのに対して、数値解析モデルでは空隙中に水が飽和していることが前提であったことと考えられ、空隙中の水の状態やそこに作用する応力が、全体挙動に大きな影響を与えていることが浮かび上がる結果となった。

(3) 対策法の立案と検証

鋼-コンクリートの界面への水の浸入と破砕が液状水による破壊促進の主原因であることから、これを直接抑制するような対策についての検討も行った。

一つはコンクリートの空隙特性に着目したものであり、配合の調整によって遷移帯をさせ、コンクリート中への水の浸入を抑制できるかを検討した。化学物質の添加や特殊材料を用いることによる硬化速度の調整による材料分離の低減について検討した結果、意図したように遷移帯領域の面積を減少できることを確認し、液状水作用に強いコンクリートの配合設計の可能性が見いだされた。

もう一つは鋼-コンクリート界面における局所への応力集中の緩和である。空隙が水で飽和されたコンクリートに対して高い応力がかかると、空隙骨格が破壊されてしまうが、応力レベルを極力低下させることで破壊を抑制することが可能になると考えられる。そこで鋼の界面に特殊処理を施し、接合界面の応力状態を変えることで、液状水による促進作用を抑えるのかについて検討した。その結果、接合界面の形状や処理方法を調整することによって、水による定着性能低下を抑制することができることが分かった。またこの検討を通じて、埋め込み部位の中で、どこがどのような機能を果たしているのかについても明らかにすることができた。

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

Youhei Ito, Nobuhiro Chijiwa. THE INFLUENCE OF THE LIQUID WATER ON FATIGUE PERFORMANCE AT EMBEDDED JOINT OF CORRUGATED STEEL WEB PC BRIDGE, 8th Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering (RSID8), 2A-5, Oct. 2018.

C. Panitodom, M. Iwanami, N. Chijiwa. Improvement of water penetration resistance of concrete-steel bond by pozzolanic materials and superabsorbent polymer, Second Symposium on Concrete and Structures for Next Generation, Sep. 2017.

木原 亮太, 千々和 伸浩, 洪 汶宜. 地中RCボックスカルバートの遅れせん断ひび割れ発生機構に関する検討, 土木学会第72回年次学術講演会, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, 公益社団法人土木学会, pp. 625-626, Sep. 2017.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: コンクリート部材と鋼材の接合構造

発明者: 千々和伸浩、篠崎裕生、齋藤智久

権利者: 東京工業大学、三井住友建設、ユーラスエナジージャパン

種類: 特許

番号: 2017-218531

出願年: 2017

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名: 岩波 光保

ローマ字氏名: IWANAMI Mitsuyasu

研究協力者氏名: 佐々木 栄一

ローマ字氏名: SASAKI Eiichi

研究協力者氏名: 田村 洋

ローマ字氏名: TAMURA Hiroshi

研究協力者氏名: 篠崎 裕生

ローマ字氏名: SHINOZAKI Hiroo

研究協力者氏名: 齋藤 智久

ローマ字氏名: SAITO Tomohisa

研究協力者氏名: 前川 宏一

ローマ字氏名: MAEKAWA Koichi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。