

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04030

研究課題名(和文) 鋼 - コンクリート混合構造接合部の長期的な力学挙動の解明と設計合理化

研究課題名(英文) Long-term behavior of joint connection in steel-concrete hybrid structural system

研究代表者

牧 剛史 (Maki, Takeshi)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60292645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、鋼 - コンクリート混合構造の異種部材接合部が、構造物の供用期間中に受ける長期的な外力を対象として、接合部内のずれ止めやその近傍のコンクリートに生じる長期変形と、それによって生じる接合部の変形が構造物の全体変形に及ぼす影響を解明することを目的とするものである。頭付きスタッドで接合される鋼 - コンクリート接合部の長期変形を解明することを目的として、スタッド接合部の長期載荷試験と非線形有限要素解析を行うとともに、鋼桁をコンクリート桁に埋め込んでスタッドで接合した鋼合成桁 - PC桁接合部の長期載荷試験を行い、荷重レベルに応じた長期たわみ増加を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The long-term external load acting on steel-concrete joint connection in steel-concrete hybrid structural system may induce additional deformation in shear connectors and their surrounding concrete. The long-term slip increment in shear connecting system leading to the deformation of joint connection is experimentally and numerically clarified in this research. The push-out test specimens with headed stud shear connectors were loaded with sustained external shear force for a month, and the long-term slip was numerically simulated by nonlinear finite element analysis. Furthermore, the long-term sustained loading test of joint connection between composite girder and prestressed concrete girder was also conducted so that the long-term deflection increment under various load level was quantified.

研究分野：土木工学

キーワード：鋼 - コンクリート複合構造 直列混合桁 接合部 長期変形 ずれ止め 押抜き試験 クリーブ

1. 研究開始当初の背景

鋼 - コンクリート混合構造は、鋼部材とコンクリート部材を接合する構造であり、鋼桁と RC 橋脚を剛結する複合ラーメン橋、コンクリートアーチと合成桁を組み合わせた複合アーチ橋、鋼桁と PC 桁を接合する直列混合桁橋などが、橋梁への代表的な適用例である。これらの構造形式は、過去の数多くの研究および技術検討結果に基づき、阿古弥橋、鯉川橋、フランスの Chateaubriand 橋、ノルウェーの Stavanger city bridge や生口橋など、これまでに国内外で数多く建設・供用されている。直列混合桁の接合方式は、支圧接合方式とずれ止め接合方式が一般に存在するが、近年では合成桁の鋼桁部を PC 桁断面に一定長埋め込む方式も提案されている。

このような混合構造の異種部材接合部は通常、構造物全体の設計においてクリティカルとならないよう安全側に設計されるが、その安全余裕度を定量的に評価する方法はまだ十分とは言えず、一般には模型実験や有限要素解析などによって、一般部（接合される部材自体）の耐力に相当する外力で過大な変形や破壊が生じないことを確認するにとどまっている。具体的な対象構造物を念頭に置いて載荷実験や解析を行った研究は国内外を通じて多くあるものの、設計法や解析法を一般化するような研究はこれまでほとんど行われていない。

また、接合部の重要な要素となるずれ止めに関して、その疲労特性については主としてスタッド自体の疲労（すなわち鋼の疲労）を念頭に国内外で多くの研究が行われ、現在のずれ止めの標準化に貢献している。一方、コンクリート自体の疲労やクリープ特性も既に明らかにされつつあり、含水・溜水状態の影響を受けることも知られている。しかし、特にずれ止めの持続荷重に対する検討は研究代表者が行った研究以外に事例がなく、それと疲労特性との関係性についても全く研究されていないのが実状である。さらには、そのような高サイクル繰返し荷重と持続荷重に対する異種部材接合部としての挙動を、耐荷機構の観点から明らかにした研究も皆無である。

複合ラーメン橋の直角接合部は、応力伝達経路が多岐にわたり複雑なため、桁や橋脚から伝達されるマクロな断面力に対して、接合部内のずれ止めにどの程度の力が作用しているのかが判断しにくい。特に、設計荷重下における設計断面力はそれほど大きくない場合でも、ずれ止め機構におけるコンクリート応力は局所的に大きくなり、スタッド等のずれ止めの疲労およびその周囲のコンクリートの疲労損傷やクリープ変形に伴って変形が増長されることも考えられる。

混合桁の直列接合部は一般に、設計曲げモーメントのインフレクションポイント近傍とするのが一般的であるが、スパン割りや桁重量バランスの兼ね合い、あるいは実際に作

用する荷重状態によっては、接合部で大きな曲げモーメントを受ける場合がある。インフレクションポイント付近では一般にせん断力が大きい傾向にあるため、例えば上述の埋め込み接合の場合などは、繰返しせん断力に伴う接合部の疲労損傷が無視できない可能性もある。さらに、鋼桁と PC 桁をずれ止めによって接合する場合、ずれ止め付近のコンクリートは一般にプレストレス作用状態にある。したがって、ずれ止めに作用するせん断力の方向によっては、周囲のコンクリートに過大な応力が生じる可能性があり、局所クリープ変形に伴う構造系全体のたわみ増加が懸念される。

2. 研究の目的

本研究は、鋼 - コンクリート混合構造の異種部材接合部が構造物の供用期間中に受ける長期的な疲労荷重および持続的荷重を対象として、これらの外力によって接合部内のずれ止めやその近傍のコンクリートに生じる疲労損傷やクリープ変形が異種部材接合部としての長期的な力学性能に及ぼす影響を解明する。さらに、現行の異種部材接合部の設計の妥当性と安全余裕度を検証し、ずれ止め配置の観点から異種部材接合部の設計合理化を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

異種部材接合部の重要な応力伝達要素であるずれ止め自体の長期変形性状を実験的に解明し、数値モデル化を行う。頭付きスタッドを対象として、ずれ止めの押し抜き試験体を用いた載荷試験を実施する。得られた実験結果に基づき、ずれ止めの長期挙動の数値モデルの開発を行う。

また、高サイクル繰返し荷重および持続荷重を受ける異種部材接合部の剛性や耐力などのマクロな力学性状に影響を及ぼす接合部内でのずれ止め等の抵抗機構を実験的および数値解析的に評価する。鋼桁を PC 桁に埋め込む直列接合方式を対象とした載荷試験を行う。鋼桁ひずみ等を詳細に計測することによって、載荷履歴に応じたずれ止めの局所挙動および桁としてのマクロな挙動との関係を定量的に、実験で明らかにする。

得られた実験結果を詳細に分析して、直列接合部の長期挙動を実験的に明らかにする。さらに、本試験体の再現解析を実施して、接合部の曲げモーメントおよびせん断力作用下における内部メカニズムを、接合部内の各種抵抗機構による分担率の変化の観点から定量的に明らかにする。

現行の異種部材接合部の設計の妥当性を、接合部の長期的力学性能の観点から検討し、安全側であるならばその安全余裕度を定量的に示す。その場合は、接合部内ずれ止めの配置変更等、異種部材接合部の設計合理化の可能性を示す。

4. 研究成果

(1) 頭付きスタッド接合部の時間依存変形に関する検討

H 形鋼の両フランジに頭付きスタッドを溶接し、その周囲にコンクリートを打設したずれ止め接合部の押抜き試験体（図-1）を用いた載荷試験を行い、持続載荷を受ける頭付きスタッドの長期ずれ変形挙動を検討した。試験パラメータは、スタッドに作用する持続せん断力レベル（静的耐荷力の30%および60%）、コンクリートブロックに作用するプレストレスレベル（静的圧縮耐力の30%および45%）、持続載荷期間（1ヶ月、3ヶ月および荷重レベルを変化させて1.5+1.5ヶ月）とした。その結果、持続せん断力を静的耐荷力の30%として1ヶ月間の持続載荷を施したケースで、静的ずれ変位の0.5~1.0倍程度のずれ変位増加が生じることが明らかとなった（図-2）。このようにずれ変位が時間とともに増大する主たる要因は、せん断力作用時にスタッド近傍コンクリートが局所的な高応力を受けることにより、クリープ変形を生じたためと考えられる。これらの持続載荷試験で得られたせん断力-ずれ変位関係を、島らが定式化した既往の関係式と比較した結果、持続載荷によるずれ変位増大の影響により、既往のモデルとは乖離するものの、持続載荷後の再載荷曲線は再び島らの式に漸近すること、持続載荷の有無によらず、各荷重レベルから除荷した際の残留ずれ変位は経験最大ずれ変位と一意的な関係にあることが示された。また、コンクリートブロックへのプレストレスレベルは、持続せん断力によるずれ変位の増加に大きく影響しないが、一時的にせん断力を除荷した際の残留ずれ変位に主として影響することが明らかとなった。これらの実験結果に対して、コンクリートの時間依存型材料構成則を導入した非線形有限要素解析を実施した結果、持続せん断力によるずれ変位増加量を精度よく評価できることが明らかとなった。また、このずれ変位増大は、前述の通り、スタッド近傍コンクリートの局所的な高応力に伴うクリープひずみの増大に起因することが解析的に示された（図-3）。さらに、本モデルを用いて10年間の長期挙動解析を実施したところ、最終ずれ変位増加量は最初の数ヶ月程度で収束する結果となった。

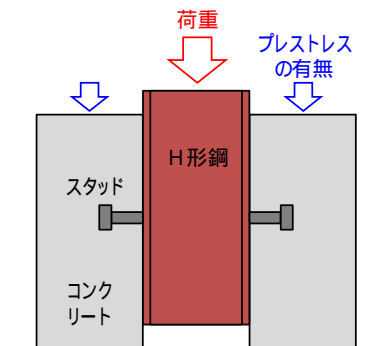


図-1 押抜き試験体

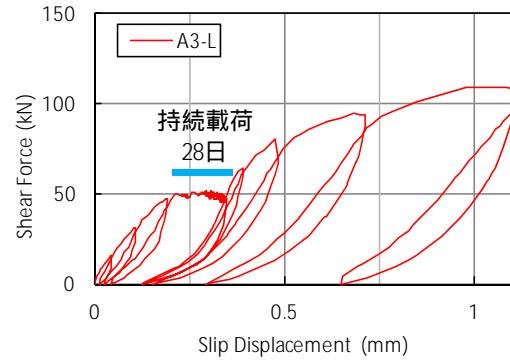
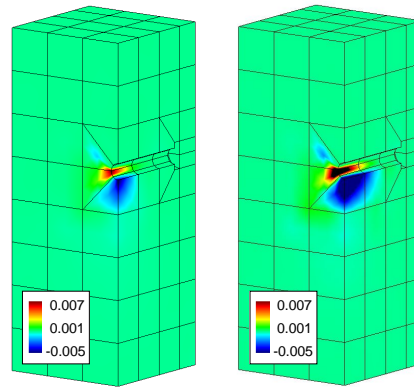


図-2 持続載荷試験結果（30%、28日）



持続載荷開始時 ⇨ 終了時(28日)

図-3 コンクリートの鉛直ひずみコンター

(2) 鋼合成桁 - PC 桁直列接合部の時間依存変形に関する検討

鋼合成桁とPC桁を直接に接合した直列混合桁の長期的な変形挙動を明らかにすることを目的として、鋼桁をコンクリート桁に埋め込み、その埋め込み部にスタッドを多数溶接してずれ止めによって力を伝達させる直列混合桁の模型試験体（図-4）を作製し、持続載荷試験を実施した。試験体は3体準備し、破壊に至るまで静的単調載荷を行った試験体 No.1 に加え、死荷重 + 活荷重相当の荷重を2段階で2週間ずつ（計4週間）持続させたケース（試験体 No.2）、死荷重相当および死荷重 + 活荷重相当の荷重を5段階で2週間ずつ（計10週間）持続させたケース（試験体 No.3）を実施した。その結果、活荷重相当の荷重レベルにおいて、2週間で約10~20%程度のたわみ増加が見られた（図-5）。圧縮を受ける上縁コンクリートはクリープ変形を生じる応力レベルに達していないことから、たわみ増加の原因は、接合部に配した頭付きスタッドがせん断力を受けることによって、スタッド近傍コンクリートに局所的な高圧縮応力が作用したことによるクリープ変形の影響と考えられる。鋼桁下フランジとPC桁とのずれ変位の変化傾向（図-6）は、たわみの変化傾向と一致しており、下フランジに溶接したスタッドにおいてその影響が大

きいものと考えられる。また、別途実施したスタッドの持続荷重試験およびFEMシミュレーションの結果と比較すると、ずれ変位の増加率が直列混合桁ではかなり小さく、多数のスタッドを溶接していることによる分担効果により、上述のクリープ変形が全体たわみに及ぼす影響が軽減されているものと推察される。ただし、今回対象とした直列混合桁の接合部は、上下フランジに溶接されたスタッドは荷重荷重に対して一方のせん断力を受けているが、ウェブに配されたスタッドは斜め方向にせん断力を受けると共に、たわみの時間増加に伴ってせん断力の主方向が微小ではあるが変化している可能性があり、このせん断主方向の回転が接合部全体としての変形増大のどのように寄与しているかについては今後検討する必要がある。

なお、直列混合桁は、上記で実施したずれ止めで全荷重を伝達させるずれ止め方式の他に、ずれ止めと支圧板で力の伝達を分担する方式があるが、本研究で得られた結果に基づくと、力の一部を支圧板によって伝達する接合方式では、支圧板近傍コンクリートの応力レベルが下がるため、桁全体としてのたわみ増加はより軽減されるものと考えられる。

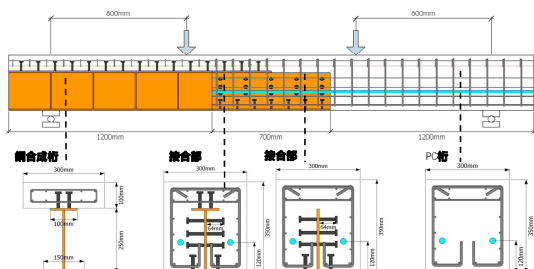


図-4 直列混合桁試験体

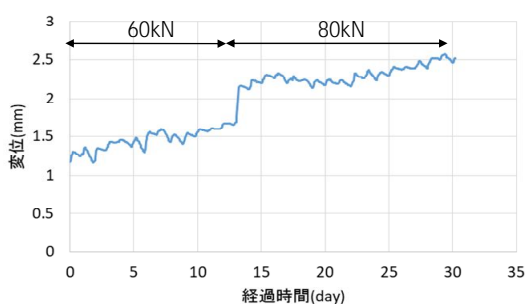


図-5 桁中央たわみの時間変化 (No.2)

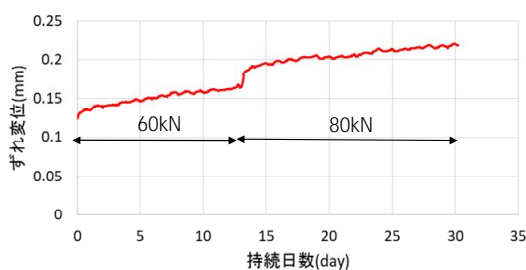


図-6 桁間ずれ変位の時間変化 (No.2)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

佐々木 惇, 牧 剛史: 持続荷重を受ける合成桁 - PC 桁接合部の曲げ挙動, 土木学会第73 回年次学術講演会, 2018

牧 剛史, 渡辺 遼, 張 鵬: 持続せん断力下における頭付きスタッド接合部の変形性状, 第 11 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 土木学会, 2015

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牧 剛史 (MAKI, Takeshi)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 60292645

(2) 研究分担者

斉藤 成彦 (SAITOH, Shigehiko)

山梨大学・総合研究部・教授

研究者番号: 00324179

浅本 晋吾 (ASAMOTO, Shingo)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 50436333

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし