

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04237

研究課題名（和文）鋼橋主桁横桁接合部の疲労き裂に対する実用的診断手法の構築

研究課題名（英文）Practical diagnostic method for fatigue cracks at main girder-cross beam connections in steel bridges

研究代表者

村越 潤（Murakoshi, Jun）

東京都立大学・都市環境学部・教授

研究者番号：60355881

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、鋼桁橋の主桁-横桁接合部に発生する二次応力に起因する疲労き裂を対象として、実橋でのき裂の発生傾向分析、き裂着目部位の局部応力・変形挙動の計測・解析を通して、疲労損傷に対する実用的な診断手法について検討した。2橋の解析モデルに対し有限要素解析を行い、局部応力が橋全体系の変形挙動に起因すること、着目部位の変形指標を特定したうえで同指標により構造条件に応じた局部応力の違いを定量的に評価できることを明らかにした。また、き裂進展抑制のための対策として、橋全体系の剛性向上による局所的な変形の抑制と局所的な変形拘束の緩和の二つの観点から、複数の対策の応力軽減効果を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、き裂発生部位の二次応力と損傷要因とされる橋全体系の変形挙動との関係を定量的に明らかにするとともに、複数の応力軽減策の効果を評価しており、適切な対策工法選定のための有用な知見が得られている。今後、提示した変形指標を橋梁設計で適用される構造解析モデルにおける変形パラメータと関連付けることにより、局部応力を簡便に推定し疲労き裂の進展性を概略評価する方法に展開していくことが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study investigated practical diagnostic methods for fatigue cracks caused by secondary stresses at the main girder-cross beam connections in steel girder bridges through field measurements and numerical analysis. Finite element analysis using three-dimensional models of two bridges revealed that local stresses result from the deformation behavior of the entire bridge structure. The proposed deformation indices at crack focal points allow for the quantitative evaluation of local stress under various structural conditions. Additionally, countermeasures for fatigue damage were examined. The effects of various countermeasures to reduce local stress were clarified, focusing on suppressing deformation by increasing girder or deck rigidity and releasing restraints on local deformation.

研究分野：橋梁工学，鋼構造学

キーワード：鋼桁橋 主桁 - 横桁接合部 疲労損傷 診断手法 疲労対策

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼道路橋における疲労事例の大半を占める、主桁-横桁接合部の二次応力に起因するき裂は、重交通を抱える都市内高速道路の橋梁を中心に報告されており、これまで疲労挙動の解明や、き裂発生部位の補強技術に関する研究が行われている。同き裂の進展性には、主桁、横桁、床版から構成される橋全体系の変形挙動の影響が大きいとされているが、高速道路の比較的類似した構造の橋梁を除き、国・地方自治体の様々な構造条件の橋梁に対する系統的な分析は行われておらず、き裂の進展性には未解明な点が多い。このため、点検時にき裂が発見されても対策の要否・方法の判断が難しく、個別に接合部の挙動や局部応力把握のための応力計測や構造解析を行うなど対策選定の詳細検討が必要となり、維持管理上の負担となっている。また、過去の対策事例の中にはき裂の再発事例も報告されており、膨大な数の鋼道路橋を効率的かつ合理的に維持管理していく上で、橋全体系・接合部の構造条件とき裂の進展性の関係性を明らかにし、損傷の進行の懸念される橋梁を抽出できるようにするとともに、構造条件とき裂の進展状況を踏まえた合理的な対策を選定できるような実用的な診断手法を構築することが重要と考えられる。

2. 研究の目的

研究対象のき裂は、大型車載荷時の橋を構成する主桁と床版の変形に起因して発生することが明らかにされている。一方で、既往研究では、橋梁毎の事例分析が中心であり、諸元の異なる様々な鋼桁橋の構造条件(主桁・床版諸元、車線位置・桁配置とき裂発生部位の関係、接合部構造等)と局部応力性状やき裂の進展性については明らかにされていない。このため、接合部の構造ディテールが同じであっても、き裂が進展していくのかという問いに対して、橋梁毎に詳細検討を行い検証せざるを得ない状況にある。

本研究では、鋼橋の主桁-横桁接合部における二次応力に起因する疲労き裂(図-1)を対象として、1) 進展性の高いき裂が発生する構造条件を明らかにすること、2) き裂の進展状況に応じた効果的な対策工法を明らかにすることにより、実用的な診断手法を構築することを目的とする。

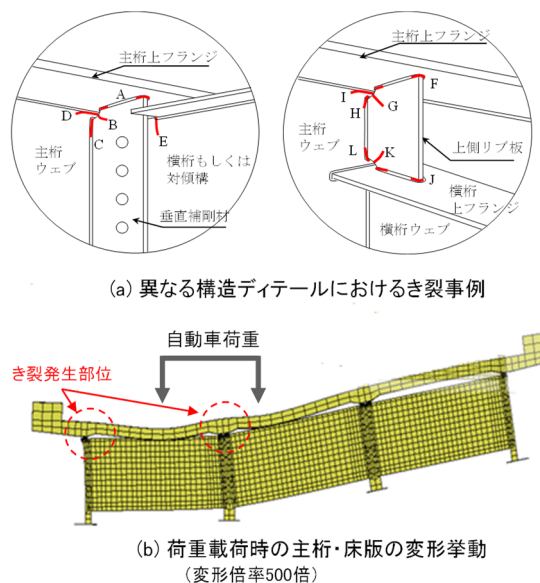


図1 研究対象とした疲労き裂と発生部位

3. 研究の方法

(1) 進展性の高いき裂の発生傾向と構造条件との関係性の検討

橋梁点検データを基に、約10年間の個々のき裂の進展状況の追跡を行い、補強措置が必要となる進展性の高いき裂の傾向と、構造条件との関係を分析した。分析対象は、様々な構造条件の橋が存在し、交通量も比較的多い一般国道の鋼I桁橋780橋(2817径間)とし、点検調査を基に、き裂写真等の定性的なき裂進展情報の数値データ化(き裂長さ、部位、経時変化)を図るとともに、橋梁の構造条件(適用基準、床版・主桁の構造諸元、構造ディテール、車両載荷位置と着目位置の関係等)及び供用状況(交通条件、供用年数等)の情報を抽出した。これらのデータを基に、接合部における複数のき裂(図-1(a))の進展のステップと速度、さらにはき裂の進展性と構造条件との関係性を分析した。

(2) 局部応力性状に基づく進展性の高いき裂の発生する構造条件の評価法の検討

(1)を踏まえ、き裂の進展性の高い橋梁の構造条件に基づき、接合部の挙動を再現可能な橋全体系の解析モデルを作成し、有限要素解析を行い、き裂発生部位の局部応力性状と構造条件の関係を分析した。また、局部応力に影響する床版及び桁変形挙動等に関連する構造パラメータを検討し、局部応力と設定した構造パラメータの関係性について分析した。

上記検討と並行して、実橋のき裂発生部位を対象とした応力計測と解析を行い、橋全体系の解析モデルについて局部応力性状評価への適用性の検証を行った。

(3) 橋全体系挙動を踏まえたき裂進展抑制対策の応力軽減効果の検討

(2)で作成した解析モデルを活用し、各種対策工法によるき裂発生部位の局部応力軽減効果の分析を行った。対策工法としては、橋全体系の変形挙動に着目し、床版損傷の補強や主桁の耐荷力向上との併用を意図した変形抑制策(主桁・床版剛性向上)、及び変形緩和策(横部材の接合の一部除去等)について、着目部位の局部応力や周辺部材の二次応力の変化に着目して適用性を

検証した。

4. 研究成果

(1) 進展性の高いき裂の発生傾向と構造条件との関係性の検討

鋼桁橋 780 橋を、構造的特徴の異なる溶接 I 桁橋と H 形鋼桁橋に区分して、き裂発生状況と供用条件や適用基準、構造形式、構造詳細等の構造条件との関係（一例として、図 2 参照）、さらにその後の点検データに基づく進展経過について分析を行った。橋数、径間数によるき裂発生率は、溶接 I 桁 729 橋(2621 径間)では 8% (5%) で、H 形鋼桁 51 橋(196 径間)では 49% (45%) であり、H 形鋼桁橋と溶接 I 桁橋では発生傾向に違いがみられた。これらのき裂のうち、全長 30mm 以上のき裂とウェブ内に進展する可能性のあるき裂（以下、進展き裂と呼ぶ。図 3 参照）の発生傾向については、両形式ともに、主桁上フランジと垂直補剛材上端もしくはウェブギャップ板上端の溶接部での進展き裂が多く、部位別発生率はそれぞれ 36%、78%であった。また、主桁ウェブに進展き裂がみられる場合には、ほとんどの場合、上端溶接部の破断に至ったき裂が発生しているが、破断に至らない状態でも主桁ウェブへ進展するき裂が発生する事例がみられた。また、1963 年の技術基準適用の橋梁に関して、溶接 I 桁橋では、累積大型車交通量が多くなるほど進展き裂の発生率が高くなるのに対し、H 形鋼桁橋では累積大型車交通量との関係性は明確でなく、比較的少ない場合でも進展き裂の発生率は高かった。H 形鋼桁橋の方が主桁・床版支間が短く、桁高が低く、かつ横桁取合い部の構造詳細が異なっており、これら構造条件の相違がき裂進展に影響していることが示唆された。さらに、横部材取合い部の進展き裂 71 箇所のうち、半数以上のき裂では、その進展性は必ずしも高いわけではなく、対策時期・方法の判断についてはき裂の進展状況、新規き裂の発生状況、交通条件を踏まえ個別事例毎に行うのが妥当であることが示唆された。

以上のように、特に進展き裂のみられる橋梁の供用条件、構造条件、き裂の進展性について有用な知見が得られた。

(2) 局部応力性状に基づく進展性の高いき裂の発生する構造条件の評価法の検討

解析モデルの作成に際して、疲労損傷が発生し対策の講じられた H 形鋼桁橋と静的載荷試験による応力計測を実施した溶接 I 桁橋の 2 橋を解析対象とした。

H 形鋼桁橋（図 4）については、横桁接合部の垂直補剛材上端部におけるき裂の発生・進展状況と、き裂の発生に直接関係する局部応力を比較した結果、き裂の外桁・内桁接合部での差異、外桁接合部での各横桁間での差異、及び補剛材両面の進展長さの差異と局部応力とは概ね対応することを確認した。また、横桁が接合される垂直補剛材上端部の局部応力発生の構造要因として、横桁接合部の構造詳細（モーメント連結板の有無）の影響が大きいこと。外桁においては壁高欄の有無が同外桁の変形を拘束し、局部応力を増加させる要因となることを確認した。さらに、外桁を対象として主桁上フランジとウェブの回転角差、及び垂直補剛材の面外変位を变形指標（図 5）として提示するとともに、それぞれの指標が垂直補剛材上端部の膜応力及び曲げ応力と相関性が高いことを示した。図 6 に一例として、支間中央断面において、疲労照査用荷重 200kN を幅員方向に位置を変えながら載荷した場合の着目部位（図 4 の応力評価位置）の膜・曲げ応力を示すが、2 つの変形指標がそれぞれ曲げ応力、膜応力と相関性が高いことがうかがえる。そのうえで、同指標により、構造条件（壁高欄の有無、床版厚、主桁剛性）が異なる場合でも、局部応力性状を同一の線形回帰式で推定可能であることを示した。

溶接 I 桁橋についても同様に、荷重条件に対する局部応力と橋全体系の変形挙動の関係性、構造条件に応じた局部応力の変化と同変形指標との関係性を明らかにした。また、き裂発生部位を対

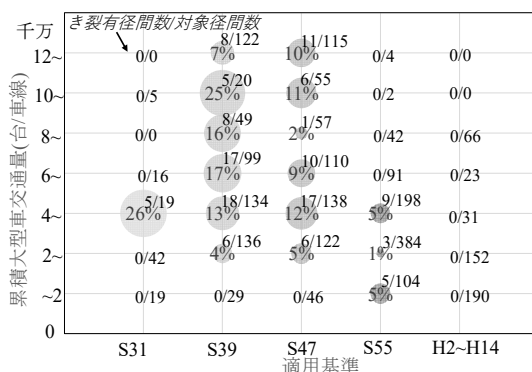


図 2 適用基準と累積大型車交通量によるき裂発生率（溶接 I 桁の場合）



図 3 進展き裂の例(矢印部)

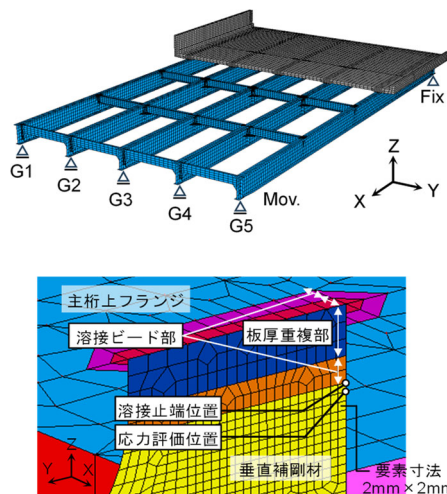


図 4 H 形鋼桁橋の解析モデルと疲労着目部位

象とした局部応力に関して、本研究における解析モデルにより荷重条件に対する局部応力計測値の変化傾向を概ね評価できることを確認した。

今後、提示した変形指標を橋梁設計で適用される解析モデルによる変形パラメータと関連付けることにより、局部応力を簡便に推定し局部応力を概略推定する方法に展開していくことが期待される。

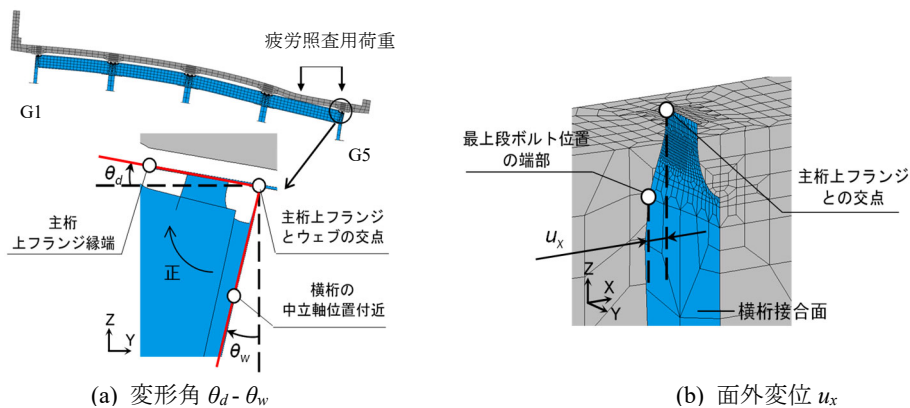


図5 支間中央断面における主桁—横桁接合部の変形指標 $\theta_d - \theta_w$ と u_x (G5 桁に着目)

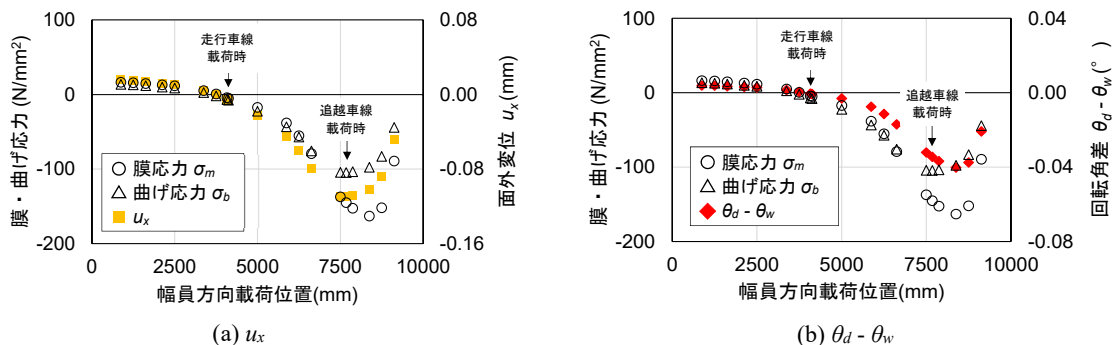


図6 G5 桁の着目部位における膜・曲げ応力と変形指標の関係

(3) 橋全体挙動を踏まえたき裂進展抑制対策の応力軽減効果の検討

(2)で用いた H 形鋼桁橋の解析モデルを基に、き裂進展抑制のための対策として、橋全体の剛性向上による変形抑制と局部的な変形拘束緩和の観点から、複数の対策を適用した場合の解析を行い、局部応力の軽減効果と周辺部材への影響について検討した。橋全体の剛性向上策として、疲労設計導入前の床版・主桁に対して、現行の設計基準に合わせて、それぞれの剛性を向上させた 2 方法(床版厚を再設計し 180mm から 230mm に増加、主桁断面剛性を 1.25 倍に増加)を、局所変形の緩和策として、横桁接合部において最上段ボルトを外す方法を対象とした。

局部応力が最大値となる荷重条件に対して、床版厚増加の場合、主桁・床版の変形が抑制され、補剛材上端の膜・曲げ応力の応力軽減効果がみられること (いずれも 26%減少) を確認した。一方、主桁剛性増加の場合には、主桁変位は抑制されるものの応力軽減効果は小さいこと (4%減少)、最上段ボルト除去の場合には、補剛材上端の面外曲げ変形は抑制され曲げ応力は軽減する (24%減少) もの、膜応力の軽減効果は小さいこと (4%減少) を確認しており、局部応力軽減に有効な工法選定のための有用な知見が得られた。

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 2件）

1. 著者名 山本 亨介、村越 潤、上仙 靖	4. 巻 28
2. 論文標題 橋梁点検データに基づく鋼桁橋における主桁-横部材取合い部の疲労損傷事例の分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 112_89 ~ 112_100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11273/jssc.28.112_89	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 吉川 聡平、村越 潤、岸 祐介、浦野 悟、長谷 俊彦	4. 巻 70A
2. 論文標題 H形鋼桁橋における主桁と横桁の接合部の疲労挙動と損傷要因に関する解析的検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 428 ~ 437
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/structcivil.70A.428	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本 亨介
2. 発表標題 鋼桁橋の主桁-横桁接合部の疲労挙動把握のための全橋FEM解析の適用性
3. 学会等名 土木学会
4. 発表年 2022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
---------	---------