

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04669

研究課題名（和文）鋼床版縦リブ横リブ交差部におけるデッキ進展き裂の疲労耐久性評価方法の確立

研究課題名（英文）Examination of a fatigue durability evaluation method for deck-through cracks at the longitudinal rib to floorbeam connections of orthotropic steel decks

研究代表者

内田 大介（Uchida, Daisuke）

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：30650535

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：道路橋の鋼床版の疲労設計は仕様設計であるが、疲労耐久性評価を行うことにより合理的な設計や維持管理が可能となる。本研究ではデッキプレートと縦リブ溶接部から発生するデッキ進展き裂を対象とし、縦リブと横リブ交差部を抽出した試験体の疲労試験を実施した。そして、デッキ進展き裂が溶接ルート部からデッキ厚の80%程度まで進展して停留した後に、デッキ表面からのき裂で板を貫通することに着目し、既往の疲労試験結果を含めてき裂停留を寿命とした疲労強度曲線の構築を試みた。また、疲労耐久性評価に使用の際にき裂の発生起点となる溶接ルート部の応力範囲を参照するひずみについて、影響面や疲労損傷度の比較により検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

閉断面リブを用いた鋼床版橋梁のデッキプレート厚はデッキと縦リブ溶接部から発生するデッキ進展き裂を抑制するために最小板厚が16mmと規定されているが、橋梁の位置する路線の大型車交通量に応じたデッキ厚の決定は合理化につながる。本研究では疲労試験データを蓄積と既往の疲労試験データを再整理により溶接ルート部から発生したき裂が停留するまでの寿命で疲労強度曲線を構築できる可能性を示した。さらに、当該箇所スカルップを設けない現行構造に対し、き裂の発生起点となる溶接ルート部の応力範囲を参照するひずみを提案した。この研究成果は当該箇所の疲労耐久性評価に必須であり、その実現に大きく近づいたと考えられる。

研究成果の概要（英文）： Fatigue design of orthotropic steel deck bridges is based on specification design, but fatigue durability evaluation leads to rationalization of design and maintenance management. In this study, we focused on deck-through cracks originating from welds between deck plates and longitudinal ribs, and fatigue tests were performed on specimens at the longitudinal rib to floorbeam connections.

As a result, we focused on the fact that deck-through cracks propagated to about 80% of the thickness of the deck plate and then stopped, cracks were generated from the surface of the deck plate, and the cracks penetrated the plate. Then, fatigue strength curves were shown with the fatigue life as the number of loadings until the crack stops, including the results of past fatigue tests. In addition, we investigated the strain reference point for the stress range of the weld root when using it for fatigue durability evaluation.

研究分野：鋼構造

キーワード：疲労 鋼床版

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼橋の鋼床版は比較的薄いデッキプレート (以下、デッキ) に縦リブと横リブを接合した直交異方性板であり、輪荷重載荷時の応力状態は複雑であり、通常の断面計算から公称応力を算出できる部位は限られている。このため、道路橋で疲労設計が実施されるようになった 2002 年から疲労設計は仕様設計となっている。重交通路線に位置する鋼床版橋梁では、2000 年頃からと兵断面縦リブ (以下、トラフリブ) 溶接部の溶接ルート部からデッキの板厚方向へ進展するき裂 (以下、デッキ進展き裂) が報告され始め、2009 年に 12mm であったデッキの最小板厚が疲労への配慮から大型車の輪荷重が常時載荷される位置直下においては 16mm へ増厚された。

前述のように鋼床版の疲労設計は交通量などによらない仕様設計のため、交通量が少ない路線において 16mm のデッキを適用すると、過剰品質となる可能性がある。また、最小板厚が 12mm の時代に架設された鋼床版についても余寿命評価の手法は確立されていない。このため、著者らは横リブ交差部を抽出した試験体で当該箇所の疲労試験を実施し、疲労耐久性評価方法に関する検討を進めていたが、鋼床版の構造ディテールの変遷や、デッキ上面に敷設されるアスファルト舗装の剛性には温度依存性への配慮が不十分であった。

2. 研究の目的

本研究では、鋼床版デッキトラフリブ溶接部の横リブ交差部の疲労耐久性評価法の確立へ向け、疲労試験結果を蓄積する。

そして、き裂進展性状を考慮した疲労寿命の提案と、疲労耐久性評価を実施するための溶接ルート部応力の参照点の提案を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 疲労試験

図 1 に示す疲労試験体について、表 1 に示す試験条件で疲労試験を実施した。疲労試験ではデッキの板厚と材質、横リブウェブの板厚に加え、2002 年の仕様規定前後としてスカラップの有無や、溶接溶込み量をパラメータとした。試験に動的能力が 400kN、あるいは 200kN の電気油圧式サーボ試験機を用い、載荷速度は 4.5~5.0Hz で実施した。試験体の支持条件は横リブの下フランジ全体を 12 本の高力ボルトによる架台への固定とした。荷重はトラフリブ内の直上にシングルタイヤ (載荷面積 200mm×200mm) が載荷される場合を想定した。疲労試験時にはデッキ下面のトラフリブから 5mm 離れた位置 (以下、デッキ内側 5mm 位置) とデッキ上面にひずみゲージ (図 1) を貼付し、5000 回毎に橋軸直角方向ひずみ範囲を計測して、疲労き裂の発生・進展状況をモニタリングした。

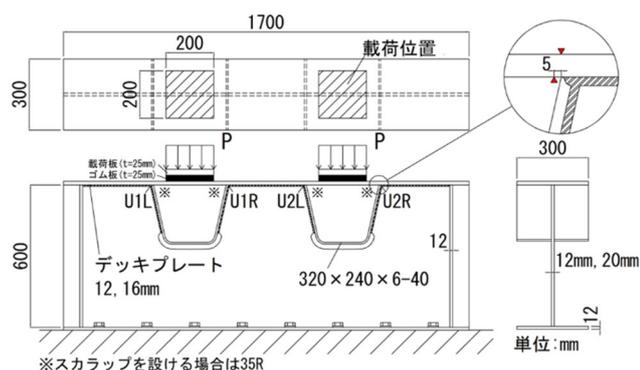


図 1 疲労試験体

表 1 試験体一覧

試験体名称	デッキ厚 (mm)	デッキ材質	溶接溶込み量 (%)	スカラップ	横リブウェブ厚 (mm)	一輪あたりの疲労試験荷重 (kN)	
						下限荷重	荷重範囲
S12Y12SM490_1	12	SM490YA	30	有り	12	5	50
N16Y20SM490Y	16	SM490YA	75	無し	20	5	65
N16Y12SM490Y	16	SM490YA	75	無し	12	5	◎65, ◎70
N16Y20SM400Y	16	SM400A	75	無し	12	5	75
N16Y12SM400Y	16	SM400A	75	無し	20	5	75
S12Y12SM400	12	SM400A	75	有り	12	5	50
S12Y20SM400	12	SM400A	75	有り	20	5	50
N16Y20SM490YB	16	SM490YB	75	無し	20	5	75
S12Y12SM490_2	12	SM490YA	30	有り	12	5	50

(2) ルート部応力参照点の検討

デッキとトラフリブ、横リブウェブの 3 溶接線の交差部にスカラップを設けない現行の仕様を対象とし、デッキ厚、舗装の有無・舗装剛性が参照ひずみの適用性に及ぼす影響について検討を行った。具体的には図 2 に示す鋼床版モデルを対象として溶接ルート部と参照ひずみ位置の影響面を作成し、この影響面を用いて車両走行を模擬して疲労損傷度を出すことで相関性を算出した。参照ひずみ位置としては図 3 に示す 2 点を考えた。点 A は疲労試験でき裂のモニタリングに使用したデッキ内側 5mm 位置。点 B は実橋でのひずみゲージ貼付が容易だと考えられるトラフリブの外側で、デッキ下面のトラフリブ-横リブ溶接線の止端から 10mm、トラフリブ-デッキ溶接線の止端から 5mm の位置である。トラフリブ-横リブ溶接線の止端から 5mm としていないのは、3 溶接線交差部で余盛が大きくなることに配慮したためである。なお、影響面のサイズと車両走行を模擬する方法は文献①と同じである。

解析は MSC Nastran ver2014.1 を用いた線形弾性解析である。鋼材の弾性係数とポアソン比は

200,000N/mm² と 0.3, アスファルト舗装も便宜上弾性体として扱い, 温度依存性は夏季 (500N/mm²), 春秋季 (1,500N/mm²), 冬季 (5,000N/mm²) の 3 種類で表現し, ポアソン比を 0.35 としている。

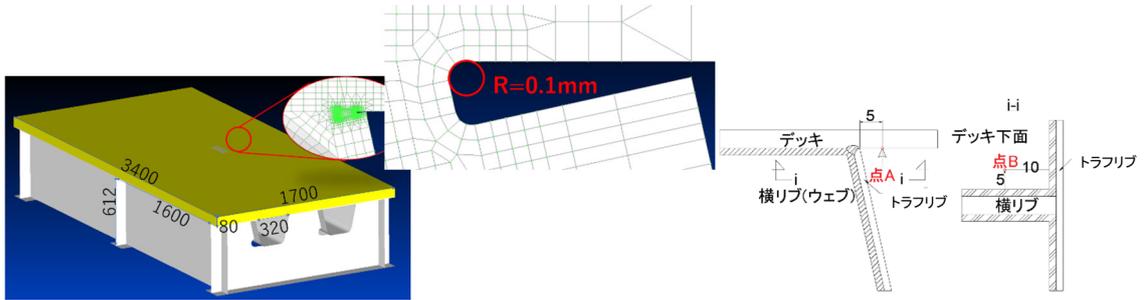


図2 鋼床版パネルモデル

図3 参照ひずみ位置

4. 研究成果

(1) 疲労試験結果の蓄積

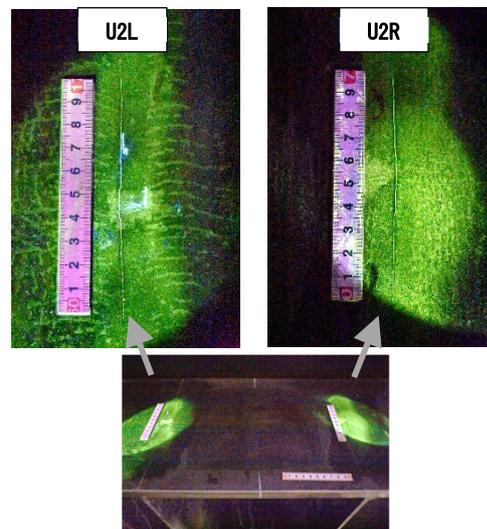
表2に全9体, 36本の溶接線の疲労試験結果を示す. 表中のスカラップからき裂とはデッキ進展き裂が発生したもののスカラップからもき裂が発生し, 試験の継続が困難となったものであり, き裂の停留とはデッキ進展き裂が発生したものの停留状態となり, デッキ貫通き裂は再現できなかったものである. なお, き裂の停留は, デッキ内側5mm位置のひずみ範囲が停留した点, すなわち, その時点から10万回後に初期のひずみ範囲に対するひずみ範囲の変動が±1.0%以下となる载荷回数と定義した. 写真1にデッキ貫通き裂を示す. デッキ厚が16mmの場合の貫通き裂は, 著者の知る限り, 初めての結果である.

表2 疲労試験結果

試験体名称	载荷回数	試験終了時の状況
S12Y12SM490_1	600	スカラップからき裂 (デッキき裂停留前)
N16Y20SM490Y	3,524	デッキき裂の停留
N16Y12SM490Y	①3,000, ②2,000	デッキき裂の停留
N16Y20SM400Y	2,000	デッキき裂の停留
N16Y12SM400Y	378	デッキ貫通
S12Y12SM400	724	スカラップからき裂 (デッキき裂は停留)
S12Y20SM400	665	スカラップからき裂 (デッキき裂は停留)
N16Y20SM490YB	2,000	デッキき裂の停留
S12Y12SM490_2	417.5	スカラップからき裂 (デッキき裂停留前)

(2) き裂進展性状を考慮した疲労寿命の提案

過去の同じような疲労試験結果 (文献②~④) に本研究で得られた疲労試験結果を追加し, 疲労耐久性評価を行うための S-N 線を描いた. 表3に疲労試験体の一覧を示す. なお, 本研究ではデッキ貫通き裂のデータを取得することができたが, 既往の研究を含めても貫通き裂のデータは少ない. そこで, これまで実施した疲労試験において, き裂が停留した試験体の破断面を曝露すると, き裂がデッキ厚の80%程度となっていることに着目し, き裂の停留を疲労寿命として整理することを考えた. デッキ内側5mm位置のひずみ範囲で整理したき裂の停留寿命を, スカラップの有無とデッキ厚で分けて図4に示す. 図中凡例は表3で示したものを参照しており, 実線が疲労強度曲線, 破線が -2σ における疲労強度曲線, 一点破線がひずみ範囲の下限値の結果を基にした疲労強度曲線である. 鋼材材質, トラフリブ板厚, 横リブウェブ厚によらず, き裂が停留するまでの寿命について, 1本の疲労強度曲線で整理できる可能性のあることがわかる.



(a) 磁気探傷試験結果



(b) 曝露した破断面の例

写真1 デッキ貫通き裂

表 3 疲労強度曲線構築に用いた疲労試験結果

当研究での ID	グループ	出典論文	論文内での呼称	トラフリップ厚 (mm)	横リブ厚 (mm)	供試鋼材	デッキ貫通
1	N12	②	N12U6,N12-1	6	12	SM490A	
2	N12	②	N12U8	8	12	SM490A	
3	N12	③	N12-2	6	12	SM490YA	○
4	N12	④	N12-4	6	12	SM490YA	○
5	S12	③	S12-1	6	12	SM490A	○
6	S12	③	S12-2	6	12	SM490YA	○
7	S12	本報告	S12Y20SM490	6	20	SM490YA	
8	S12	本報告	S12Y12SM400	6	12	SM400	
9	S12	本報告	S12Y20SM400	6	20	SM400	
10	N16	②	N16U6,N16-1	6	12	SM490A	
11	N16	②	N16U8	8	12	SM490A	
12	N16	③	N16-2	6	12	SM490YA	
13	N16	④	N16-4	6	12	SM490YA	
14	N16	本報告	N16Y20SM490Y	6	20	SM490Y	
15	N16	本報告	N16Y12SM490Y	6	12	SM490Y	
16	N16	本報告	N16Y20SM400Y	6	20	SM400	
17	N16	本報告	N16Y12SM400Y	6	12	SM400	○
18	N16	本報告	N16Y20SM490YB	6	20	SM490YB	
19	S16	③	S16-1	6	12	SM490A	
20	S16	③	S16-2	6	12	SM490A	
21	S16	④	S16-4	6	12	SM490YA	

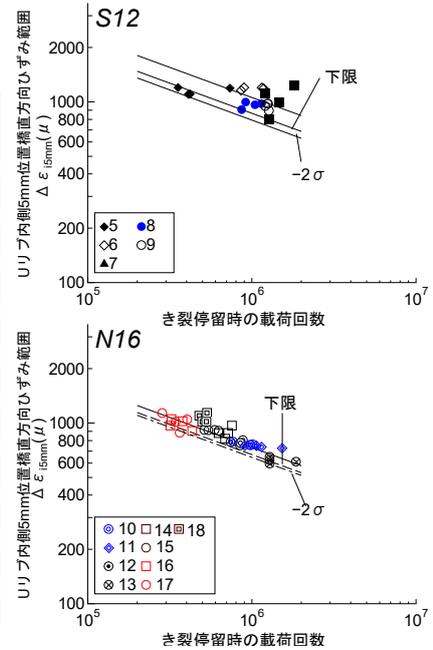


図 4 疲労強度曲線の一例

(3) 現行仕様に対する応力参照点の提案

溶接ルート部の橋直方向応力の影響面の一例を図 5 に示す。このような影響面をデッキ厚や舗装ごとに溶接ルート部応力と点 A, B のひずみを対象として作成し、影響面内での各節点荷重位置における値の相関を確認した結果が図 6 である。図中の R は相関係数を表す。デッキ厚と舗装剛性毎に整理する必要があり、舗装の剛性が高くなるとや相関が低くなるが、点 A や点 B の橋直方向ひずみで溶接ルート部の橋直方向応力を参照できる可能性がある。次に、影響面を用い、鋼床版の橋直方向

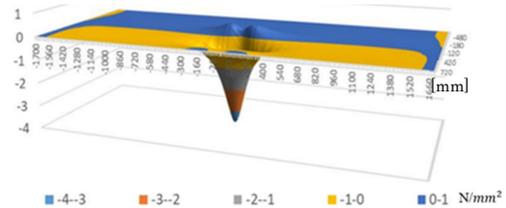


図 5 影響面の一例 (デッキ厚 12mm 夏季)

中心から、着目する溶接ルート部方向に 0~500mm の範囲にシングルタイヤ(200×200mm)と、-100~700mm の範囲にダブルタイヤ(2×200×200mm, タイヤ間隔 100mm)の走行を模擬し、1 輪通過時の疲労損傷度を算出した。図 7 に、一例として夏季について、デッキ厚 12mm と 16mm に分けて整理した溶接ルート部応力と点 B の疲労損傷度の比較を示す。両者の相関は高く、輪走行時の疲労損傷度からも点 B を溶接ルート部応力の参照ひずみの計測点として使用できると考えられる。

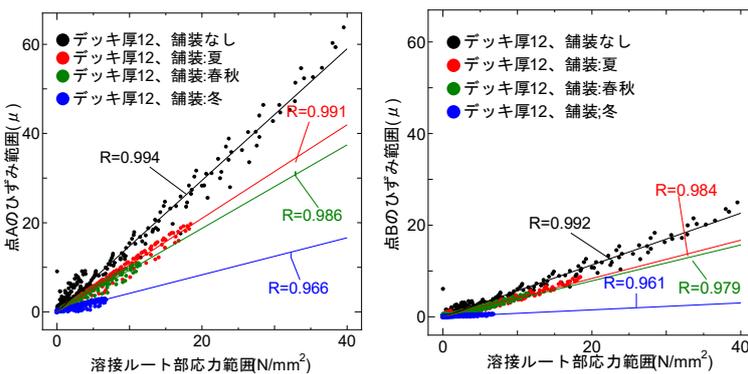


図 6 影響面内の荷重点位置の値の相関の例 (デッキ厚 12mm)

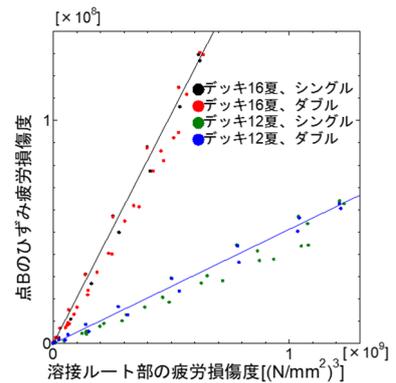


図 7 疲労損傷度の相関の例 (夏季)

引用文献

- ①森猛, 金子想, 林暢彦, 小笠原照夫, 内田大介: 交差部デッキ進展き裂を対象とした鋼床版の疲労耐久性評価のためのひずみ参照点の検討, 土木学会論文集 A1 Vol74, No1, pp.21-31, 2018.1.
- ②井口進, 内田大介, 川畑篤敬, 原田英明, 森猛: デッキプレート貫通型疲労き裂の発生・進展性状に対する板厚の影響, 鋼構造年次論文報告集, 第 18 巻, pp.113-120, 2010.11.
- ③原田英明, 森猛, 内田大介, 川崎靖子: 鋼床版デッキプレート・トラフリップ・横リブ交差部のデッキプレート貫通き裂の発生・進展性状に対するデッキプレート厚とスカラップの影響, 鋼構造論文集, 第 19 巻第 73 号, pp.65-74, 2012.3.

- ④森猛, 内田大介, 川畑篤敬, 山本一貴: 鋼床版デッキプレート・トラフリブ・横リブ交差部のデッキプレートを進展する疲労き裂の進展性状に対する荷重範囲の影響, 鋼構造論文集, 第 21 巻第 82 号, pp.29-38, 2014.6.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 内田大介、吉田黎
2. 発表標題 鋼床版トラフリブ-横リブ交差部のデッキ貫通き裂に関する検討
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田黎、内田大介
2. 発表標題 鋼床版トラフリブ-横リブ交差部のデッキ進展き裂の疲労強度評価に用いる参照ひずみに関する検討
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田黎、内田大介
2. 発表標題 鋼床版トラフリブ-横リブ交差部のデッキ進展き裂の停留に関する報告
3. 学会等名 土木学会全国大会
4. 発表年 2023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
研究協力者	吉田 黎 (Yoshida Rei)	法政大学 (32675)	

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