

(24) 鋼・コンクリート合成床版のL形鋼ジベル 溶接部の疲労強度

判治 剛¹・館石 和雄²・清水 優³・浅野 浩一⁴
石井 孝明⁴・小林 潔⁵・内田 大介⁶

¹正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科土木工学専攻（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）
E-mail: hanji@civil.nagoya-u.ac.jp

²フェロー会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）
E-mail: tateishi@civil.nagoya-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学大学院助教 工学研究科土木工学専攻（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）
E-mail: shimizu@civil.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 三井 E&S 鉄構エンジニアリング 技術本部（〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-5-15）
E-mail: kasano@mes.co.jp, ishi-t@mes.co.jp

⁵フェロー会員 三井 E&S 鉄構エンジニアリング 技術本部（〒261-7129 千葉県美浜区中瀬 2-6-1）
E-mail: kkoba@mes.co.jp

⁶正会員 法政大学准教授 デザイン工学部（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail: daisuke.uchida.53@hosei.ac.jp

本研究では、L 形鋼をずれ止めに用いた鋼・コンクリート合成床版の溶接継手部の疲労耐久性を実験および有限要素解析により検討した。合成床版試験体に対する静的載荷試験および解析により、L 形鋼溶接部周辺では鋼板が局所的に面外変形し、特にまわし溶接部で高い応力集中が生じることを示した。また疲労試験により、コンクリートにひび割れが生じない程度の荷重を繰返し載荷することで L 形鋼溶接部から疲労き裂が発生することを明らかにし、その疲労強度をホットスポット応力により安全側に評価できることを示した。さらに、合成床版を有する橋梁を対象とした解析を実施し、溶接継手部に生じる実応力挙動を求め、ホットスポット応力による疲労耐久性評価を試みた。

Key Words: steel-concrete composite slab, welded joints, fatigue strength, structural hot spot stress

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版の耐荷性に関する安全性の一つとして、土木学会の設計・施工指針(案)¹⁾では、設計耐用期間に生じる繰返し作用に対して疲労破壊しないことが求められている。合成床版の疲労耐久性の確認方法としては、自動車荷重の移動を模擬した輪荷重走行試験機により、荷重を段階的に引き上げて繰返し載荷を行う階段状漸増載荷法による疲労試験²⁾が一般的に用いられる。これにより、版として包括的に疲労耐久性を確認することができる。一方で、得られた破壊形態と実際に起きうる疲労破壊現象の間には乖離があるとも指摘されており³⁾、輪荷重走行試験の結果だけで鋼・コンクリート合成床版の疲労耐久性を十分に把握できているとはい

いがたい。

そのような背景の中、平成 29 年に改定された道路橋示方書⁴⁾では、鋼・コンクリート合成床版の疲労に対する耐久性の項が新たに追加され、鋼・コンクリート合成床版の鋼材継手部の疲労の照査が明記された。つまり、版としての疲労耐久性の確認だけではなく、鋼部材の各部位ごとに疲労強度を設定し、それに基づく疲労照査が求められるようになった。

鋼・コンクリート合成床版は、ずれ止めと底鋼板の補強材の構造により様々な種類が提案されている^{1,5,9)}。しかし、鋼部材の継手部、特に応力状態が複雑となるずれ止め溶接部の疲労強度を詳細に検討し、その評価法を提案している事例は数少ない。

頭付きスタッドに関する研究^{5,10,11)}では、床版試験体

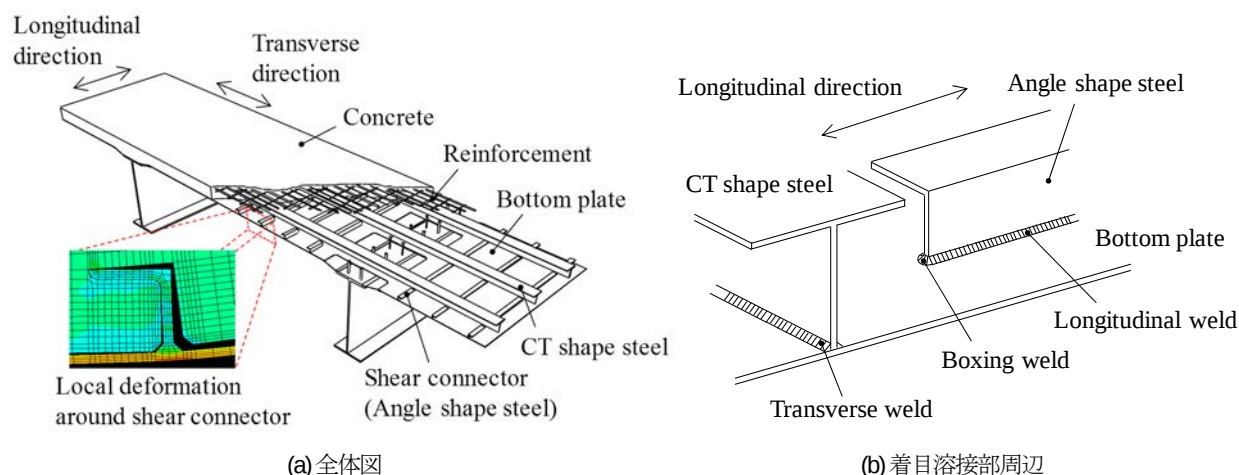


図-1 対象とした鋼・コンクリート合成床版

を用いた輪荷重走行試験により、スタッドが回転せん断力の繰返しによって疲労破壊することを明らかにし、独自に考案した回転せん断疲労試験機を用いて、回転せん断力を受けるスタッドの疲労強度曲線を提案している。また、図-1に示すL形鋼をずれ止めに用いた合成床版においては、第2著者らはL形鋼に発生する公称せん断応力が、せん断応力を受ける一般的な継手の打ち切り限界以下であっても、その溶接部から疲労き裂が発生することを示している¹²⁾。これは、図中に示すように、L形鋼近傍では鋼板の局所的な面外変形が繰り返されるためであり¹²⁻¹⁴⁾、同様の局所変形は頭付きスタッドを対象とした解析結果においても確認できる¹⁵⁾。つまり、鋼・コンクリート合成床版のずれ止めなどの溶接継手部に対しては、鋼部材の局所変形による付加的な応力集中を考慮できる疲労照査法が有効であるといえる。第2著者らの過去の研究^{12-14, 16)}では、ずれ止め溶接部の疲労照査に用いる応力としてホットスポット応力の適用可能性が示されており、本研究でもこのホットスポット応力に着目する。

本研究は、過去の研究¹²⁻¹⁴⁾と同様に、図-1に示す底鋼板、CT形鋼、L形鋼からなる合成床版を対象とする。CT形鋼は底鋼板の補強材として、L形鋼は鋼材とコンクリートのずれ止めとして、それぞれ橋軸直角方向、橋軸方向に配置されている。これまでの検討では、底鋼板とL形鋼の溶接部のうち、縦方向（橋軸方向）のすみ肉溶接部（以下、L形鋼一般部と呼ぶ）を対象としてきた。一方で、L形鋼はCT形鋼間に断続的に配置されるため、その端部にはまわし溶接部が存在するが、その疲労強度は明らかにされていない。

そこで本研究では、ずれ止めとして配置されたL形鋼まわし溶接部の疲労強度を、静的載荷試験、疲労試験および有限要素解析によって明らかにした。さらに、異なる構造諸元の合成床版を有する橋梁の解析を実施し、実橋床版の溶接継手部の疲労耐久性評価を試みた。

2. 静的載荷試験

本章では、L形鋼をずれ止めに配置した合成床版試験体に対する静的載荷試験と有限要素解析を行い、L形鋼まわし溶接部近傍の応力状態について検討した。

(1) 試験体

試験体はCT形鋼とL形鋼を配置した小型合成床版であり、実際の合成床版の床版支間中央部分を模したものである。なお、本実験では図-1(b)に示すL形鋼のまわし溶接部に着目しているが、まわし溶接部に近接するCT形鋼の横方向（橋軸直角方向）の溶接部（以下、CT形鋼溶接部と呼ぶ）もあわせて検討した。

図-2に試験体の形状および寸法を示す。試験体の幅は1350 mm、長さは2300 mm、床版厚は200 mmである。底鋼板の板厚は8 mmとし、その表面にL形鋼（75×75×9 mm）を550 mm間隔で、CT形鋼（125×125×6×9 mm）を600 mm間隔ですみ肉溶接により取り付けている。これらの部材構成は実橋梁での実績に基づいている。

底鋼板に各形鋼を溶接した後、底鋼板の周りに型枠を設置してコンクリートを打ち込んだ。コンクリート打込み後は養生マットを用いて35日間養生した。なお、鋼とコンクリートの間の付着を切る目的で、鋼材表面にグリスを塗布してからコンクリートを打ち込んだ^{12, 13)}。

鋼材のミルシートによる機械的性質と化学成分を表-1に、コンクリートの圧縮強度試験の結果を表-2に示す。圧縮試験用の供試体はコンクリート打込み時に3体製作し、合成床版試験体と同じ環境下で35日間養生した。その後、載荷試験の開始日に圧縮試験を行った。

図-2(b)に示すように、底鋼板の内面と外面にゲージ長1 mmのひずみゲージを貼付し、長手方向のひずみを計測した。ここで、コンクリートと接触する鋼材表面を内面、外側の表面を外面と呼ぶ。ひずみゲージはL形鋼ま

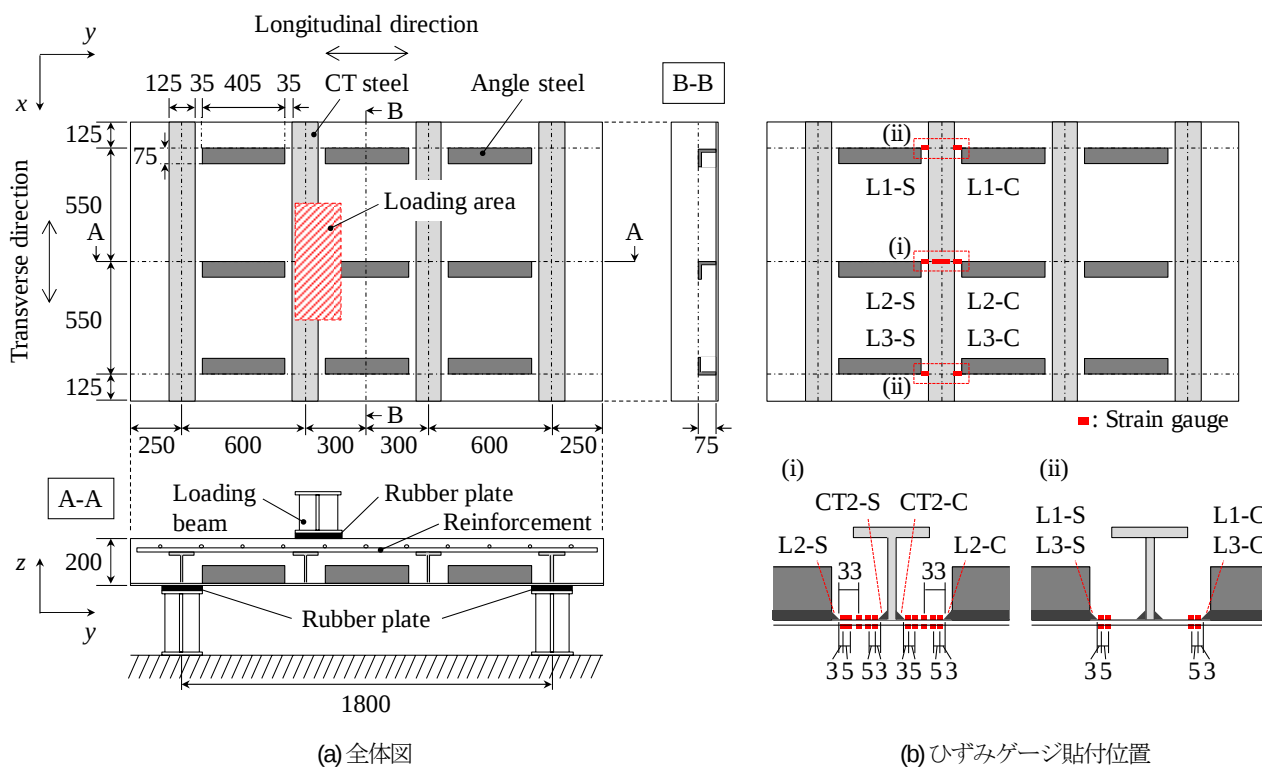


図-2 合成床版試験体（単位：mm）

表-1 鋼材の機械的性質と化学成分（ミルシート値）

Members	Steel grade	Mechanical properties			Chemical compositions (%)				
		Yield stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	C	Si	Mn	P	S
Bottom plate	SM400A	307	449	31	0.18	0.07	0.63	0.020	0.005
Angle shape steel	SS400	333	479	29	0.12	0.19	0.60	0.021	0.021
CT shape steel	SS400	356	435	31	0.12	0.17	0.34	0.021	0.011
Reinforcement	SD345	364	547	27	0.24	0.17	0.87	0.028	0.035

表-2 コンクリートの圧縮強度試験結果

Compressive strength (N/mm ²)	Elastic modulus (kN/mm ²)	Poisson's ratio
40.8	28.3	0.183
39.1	28.9	0.201
40.2	33.1	0.190

わし溶接部と CT 形鋼溶接部の近傍に設置した。外面にも内面と同じ位置に貼付した。内面に設置したゲージにはコーティングを施した上でコンクリートを打ち込んだ。

(2) 荷重方法

L 形鋼まわし溶接部や CT 形鋼溶接部の疲労強度に対しては、長手方向の応力成分が支配的となると考えられる。そこで、図-2(a)に示すように、両端に配置した CT 形鋼位置の 2 辺を支持する形で実験を行った。

荷重は、支間中央から支点側に 250 mm 離れた位置の幅方向中央に与えた。この荷重位置は、着目溶接部に厳しい条件となるよう後述の解析により決定したものである。荷重範囲は、大型車の後輪を想定して、試験体の長手方向に 200 mm、幅方向に 500 mm とし、面内に均一に力が伝わるよう 25 mm 厚のゴム板を介して荷重した。

鋼・コンクリート合成床版では、ずれ止めの端部など

でコンクリートに局所的に高い引張応力が生じ、荷重の大きさによってはコンクリートの疲労破壊が先行する可能性がある。そのため、コンクリート側のひび割れの発生に注意しながら、表-3 のように、下限荷重を一定とし、上限荷重を段階的に上げながら疲労試験を進めた。疲労試験中、荷重範囲を変更するたびに静的荷重試験を行った。本章では、例として、上限荷重を 105 kN（圧縮）としたときの結果について述べる。

表-3 荷重条件と載荷回数

Upper load (kN)	Lower load (kN)	Load range (kN)	Frequency (Hz)	Number of cycles ($\times 10^4$)	Total number of cycles ($\times 10^4$)	Note
75	5	70	2.0	115	115	No crack
85	5	80	2.0	60	175	No crack
95	5	90	1.8	70	245	No crack
105	5	100	1.8	550	795	No crack
115	5	110	1.8	200	995	No crack
125	5	120	1.6	265	1260	No crack
145	5	140	1.2	2200	3460	Fatigue crack was observed at the outer surface of the bottom plate

(3) 有限要素モデル

合成床版試験体の有限要素解析を行い、L 形鋼まわし溶接部近傍の底鋼板における応力分布を確認した。

解析モデルを図-3 に示す。解析には汎用有限要素解析ソフト Abaqus.6.14 を用いた。8 節点ソリッド要素を用い、コンクリート、底鋼板、L 形鋼、CT 形鋼、支持梁上のゴム板をモデル化した。着目部である底鋼板側の溶接止端部周辺では要素寸法ができるだけ均一となるよう注意して分割した。止端部周辺の要素サイズは約 2 mm である。溶接脚長は設計値の 6 mm とし、すみ肉溶接部の溶接ルートや溶接止端部の曲率半径は再現していない。鋼材とコンクリートの境界面には接触条件を適用し、両者が個別に挙動できるようにした。なお、境界面の隙間はゼロとし、摩擦は考慮していない。また比較のため、鋼材とコンクリートが一体として挙動するように、両者の境界面にある全節点を結合したモデルも作成した。ここで、前者を付着なしモデル、後者を付着ありモデルと呼ぶ。支持条件としてはゴム板下面を固定とした。

鋼材は弾性体とし、弾性係数は 206 kN/mm^2 、ポアソン比は 0.3 とした。コンクリートの弾性係数とポアソン比は、3 体の圧縮試験結果の平均値として、それぞれ 30.1 kN/mm^2 、0.191 とした。軟化挙動を示すコンクリートの弾塑性挙動を表現するために、圧縮側の非線形特性として道路橋示方書¹⁷⁾に示されている応力-ひずみ曲線を設定した。また引張側については、コンクリート標準示方書¹⁸⁾に示されている引張軟化特性を考慮した。なお、コンクリートを弾性体としたモデルも別途解析し、コンクリートの構成則が鋼材の応力に与える影響も確認した。ゴム板は線形弾性体とし、その弾性係数とポアソン比はメーカーの一般的な値である 2.64 N/mm^2 、0.49 とした。

(4) 載荷試験結果と解析結果

合成床版試験体の実験および解析結果を整理するにあたり、L 形鋼のまわし溶接部には図-2(b)に示すようにに名

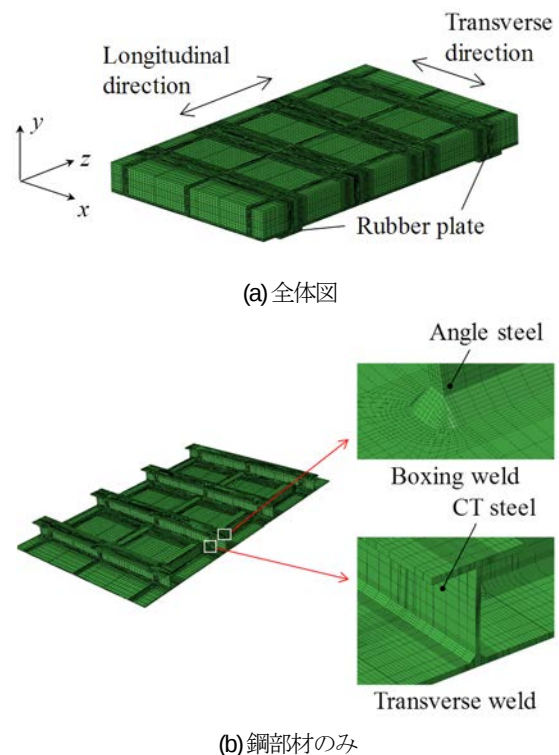


図-3 合成床版試験体の有限要素モデル

称を付けた。幅方向中央の L 形鋼を L2 とし、その両隣をそれぞれ L1, L3 とした。また、長手方向中央に配置した L 形鋼には末尾に C を、端部の L 形鋼には S を付けて区別した。さらに、L2 近傍の CT 形鋼の溶接部に対しても図中に示すように名称を付けた。

a) 着目溶接部周辺の応力分布

静的載荷試験および解析により得られた底鋼板内面の応力分布を図-4 に示す。ここでは、発生応力が最も高い載荷点付近の L 形鋼 (L2-S, L2-C) と CT 形鋼 (CT2-S, CT2-C) の溶接部間の分布を示している。横軸は CT 形鋼の中心からの距離であり、縦軸は長手方向の応力成分である。図中には、鋼材とコンクリート境界面に接触条件を与えた付着なしモデルと、両者が一体として挙動す

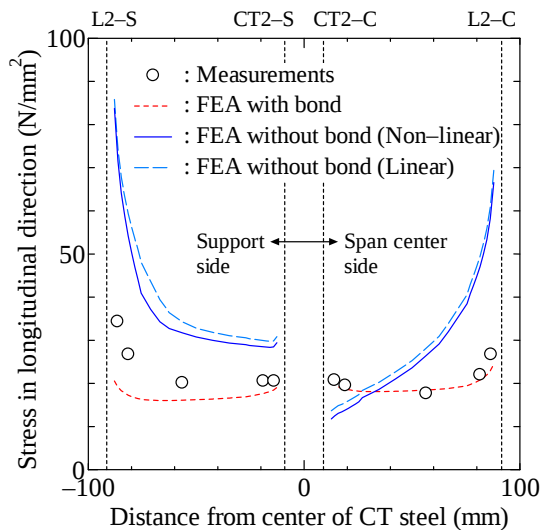


図4 底鋼板の応力分布

る付着ありモデルの解析結果も併記している。また、実験値はゲージ値に弾性係数を乗ずることにより求めている。なお、縦の点線は各形鋼の溶接止端位置である。

解析結果において、境界面のモデル化により発生応力が大きく異なることがわかる。付着ありモデルでは、ほぼ様な応力分布であるのに対し、付着なしモデルでは、L形鋼とCT形鋼の間で応力が大きく変化しており、L形鋼まわし溶接部で高い応力集中が生じている。

実験値については、L2-SとCT2-S間では両解析モデルの結果の間に位置し、L2-CとCT2-C間では付着ありモデルの結果に近い分布を示している。これは、コンクリート打込み前に鋼材表面に塗布したグリス量が十分ではなく、鋼材とコンクリートの付着が完全に切れていなかったためと考えられる。なお、上限荷重を145kNに上げた後も傾向は同様であった。試験体における実際の付着の程度は確認できていないが、実験値は極端な付着状態を想定した両解析結果の間に分布していることから、本解析モデルにより底鋼板に生じる応力の分布傾向をおおむねとらえることができていると考えられる。

実際の鋼・コンクリート合成床版では、鋼材とコンクリートの間にある程度の付着は見込まれる¹²⁾。その一方で、輪荷重走行試験中や実橋において付着切れの発生が報告されていることから^{9,19)}、長期にわたる床版の耐久性を議論する際には、鋼部材にとって厳しい条件となる付着なしモデルの結果に基づいて考察するのが安全側であるといえる。よって、以降の解析では付着なしモデルを用いて検討する。

b) コンクリートのモデル化の影響

次にコンクリートの構成則が底鋼板の応力分布に与える影響を確認した。図4中にはコンクリートを弾性体と考えた解析モデルの応力分布も示している。図より、両モデルの応力分布はほぼ一致していることがわかる。よ

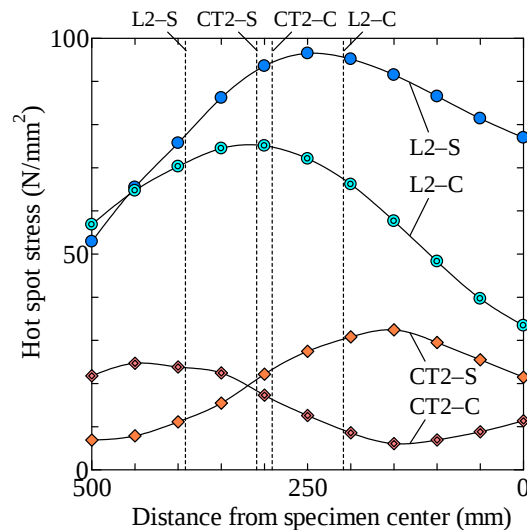


図5 載荷位置による各溶接部の応力の変化

って、コンクリートに顕著なひび割れが生じない比較的小さい荷重条件では、コンクリートのモデル化が底鋼板の応力分布に与える影響は小さいといえる。

c) 長手方向の載荷位置と溶接継手部の応力

長手方向の載荷位置による溶接継手部の応力の変化を確認するために、荷重を支間中央から着目溶接部のある支点側に50mm間隔で移動させて解析を行った。

ここでは溶接止端部におけるホットスポット応力を用いて検討した。ホットスポット応力は、溶接ビードによる局所的な応力集中は含まず、継手形状や板厚変化などに起因する構造的な応力集中を含む溶接止端位置の応力として定義される^{20,21)}。ホットスポット応力の算出には種々の方法が提案されているが、ここでは国際溶接学会や日本鋼構造協会の疲労設計指針^{20,21)}において代表的な方法として推奨されている2点法を用いた。2点法では、溶接止端から0.4t, 1.0t (tは底鋼板厚)の位置の応力から止端位置に線形外挿してホットスポット応力を求める。

載荷位置を移動させたときのホットスポット応力の変化を図5に示す。図4と同様に、載荷点付近のL形鋼まわし溶接部(L2-S, L2-C)とCT形鋼溶接部(CT2-S, CT2-C)に着目する。横軸は支間中央から荷重中心までの距離であり、縦軸は各溶接止端のホットスポット応力である。また、縦の点線は各形鋼の溶接止端位置である。

いずれの溶接止端においても、その直上からやや離れた位置に載荷したときに応力が最大となる。例えば、L2-SやCT2-Sでは150mm程度離れた位置(支間中央からはそれぞれ250mm, 150mmの位置)に載荷したときに最大値をとる。それぞれの最大値を比較すると、L形鋼まわし溶接部の方がCT形鋼溶接部よりも2倍以上大きいことがわかる。これより、合成床版試験体に対しては、支間中央から250mm離れた位置に載荷すれば、疲労上最も厳しい応力状態での実験となるといえる。

支間中央から 250 mm の位置に載荷したときの変形図を図-6に示す。図中の白線は鋼部材の輪郭を明示するために付加したものである。図より、コンクリートと鋼材が個別に挙動しており、床版がたわむと CT 形鋼と底鋼板が局所的に変形し、鋼材とコンクリートの間に隙間が生じることがわかる。さらに、L 形鋼端部ではコンクリートとの接触が起きており、特に載荷位置から離れた L 形鋼のまわし溶接部で高い応力が生じている。

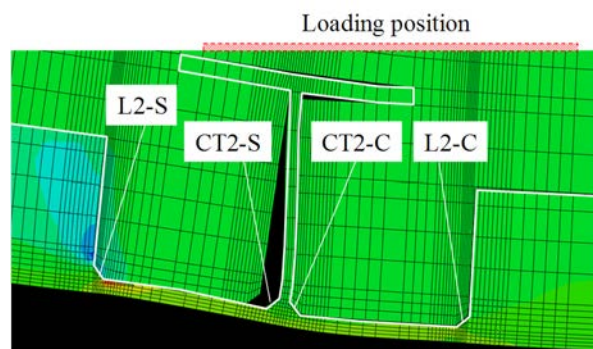


図-6 L形鋼と CT形鋼周辺の変形図 (250 倍)

3. 疲労試験

(1) 試験方法

載荷方法は静的載荷試験と同様であり、定点の繰返し載荷により疲労試験を行った。表-3に示すように、段階的に上限荷重を上げ、最終的には上限荷重を 145 kN、下限荷重を 5 kN (ともに圧縮) として、鋼部材に疲労き裂の発生が確認されるまで載荷を継続した。荷重は正弦波で与え、載荷速度は 1.2~2.0 Hz とした。

鋼・コンクリート合成床版では、継手部がコンクリートで覆われているためき裂の発生を視認できない。そこで、10 万回載荷するたびに定期的にひずみの変動範囲を記録し、その変化からき裂発生の有無を判断した。

疲労試験は、荷重範囲を 140 kN に上げてから 2,200 万回繰り返した時点 (総繰返し数 3,460 万回) で終了とした。なお、試験終了までコンクリート表面には目立ったひび割れは確認されなかった。

(2) ひずみ範囲の変化とき裂発生状況

図-7にひずみ範囲と繰返し数の関係を示す。ひずみ範囲とは、繰返し載荷における下限荷重から上限荷重までのひずみの変動範囲である。ここでは、L1 のまわし溶接止端から 3 mm に貼付したゲージの値を示す。横軸は疲労試験を開始してからの総繰返し数で整理している。

荷重範囲を 140 kN に増加させた後、L1-S および L1-C の底鋼板内面においてひずみ範囲の急減がみられ、それと対応して外面の値も変化し始めている。これは、まわし溶接止端から発生した疲労き裂が底鋼板の板厚方向に進展したためと考えられ、実際に 2,750 万回 (140 kN で 1,490 万回) 時に、L1-S のまわし溶接部の外面において約 32 mm の疲労き裂を確認した。その後も繰返し載荷に伴ってき裂は少しずつ進展し、試験終了時 (140 kN で 2,200 万回) には外面において約 80 mm まで成長していた。なお、L1-C では外面にき裂を確認できていないが、L1-S と同じようにまわし溶接部にき裂が発生し、底鋼板内に伸びている状態と考えられる。その一方で、L2 や L3 の L 形鋼まわし溶接部ではひずみ範囲にほとんど変化がみられなかった。

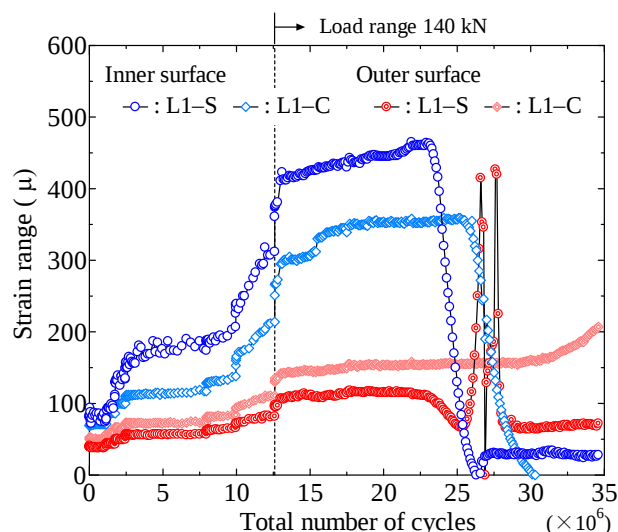


図-7 ひずみ範囲の履歴 (L1 のまわし溶接部)

(3) 疲労寿命の整理

まず、公称応力で整理することを考える。ここで公称応力は、合成床版試験体を 2 辺単純支持版として L 形鋼まわし溶接止端位置の曲げモーメントを求め、それと鉄筋、底鋼板、コンクリートからなる合成断面として算出した断面剛性から求めた、底鋼板内面における長手方向の応力である。なお、この応力の算出方法は現行の鋼・コンクリート合成床版の設計法に準拠したものである。

L 形鋼まわし溶接部を面外ガセット溶接継手とみなせば、その疲労強度等級は G 等級であり、打ち切り限界は 32 N/mm² とされている²⁰⁾。一方、き裂が発生した L1-S と L1-C における公称応力範囲は、それぞれ 23 N/mm², 27 N/mm² 程度であった。この結果は、公称応力が打ち切り限界以下であってもき裂が発生する可能性があることを意味する。つまり、鋼・コンクリート合成床版の溶接継手部に対して、公称応力に基づく疲労照査を適用すると危険側の評価となる場合があるといえる。

図-8にホットスポット応力範囲によって整理した疲労試験結果を示す。ホットスポット応力は、荷重範囲を 140 kN に上げた直後のひずみの実測値を用いて 2 点法により算出した。その際、ゲージ位置 (止端から 3 mm) と参照点 (止端から 0.4t 位置) が若干異なるため、今回

表-4 対象とした合成床版橋梁の構造諸元

Analysis case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Number of main girders	Three main I-girders	Two main I-girders	Two main I-girders	Two main I-girders
Bridge width (mm)	10200	9500	11200	14500
Girder spacing (mm)	3700	5300	6500	8100
Slab thickness (mm)	200	240	270	310
Bottom plate thickness (mm)	8	8	8	8
Angle shape steel	75×75×9 mm (725 mm intervals)	75×75×9 mm (750 mm intervals)	75×75×9 mm (682.9 mm intervals)	75×75×9 mm (800 mm intervals)
CT shape steel	100×100×5.5×8 mm (800 mm intervals)	125×125×6×9 mm (800 mm intervals)	175×175×7×11 mm (750 mm intervals)	200×200×8×13 mm (800 mm intervals)
Maximum value of hot spot stress range (N/mm ²)	45.5	55.5	55.1	55.4

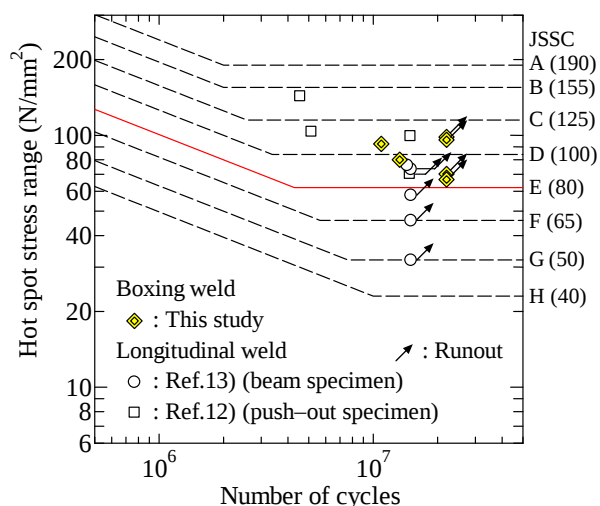


図-8 疲労試験結果

は計測値から内挿して参照点の値を求めた。繰返し数は荷重範囲を140kNに上げてからの載荷回数とし、ゲージ値に変化がみられた溶接部については、安全側の寿命設定となるよう底鋼板内面のひずみが最大値から5%減少したときを疲労寿命と定義した。具体的には、L1-Sで1,090万回（総繰返し数2,350万回）、L1-Cで1,330万回（総繰返し数2,590万回）である。その他の溶接部は未破断として整理した。また図中には、L形鋼一般部を対象とした過去の押抜きせん断疲労試験¹²⁾、合成梁の曲げ疲労試験¹³⁾の結果も併記している。

ホットスポット応力範囲で整理した場合、疲労設計指針では参照すべき疲労強度曲線をE等級としている²⁰⁾。試験数は少ないが、継手形式の異なるL形鋼のまわし溶接部や一般部の試験結果はすべてE等級を満足していることから、溶接部のホットスポット応力を求め、それとE等級の疲労強度曲線を照らし合わせるにより、継手形式によらず安全側の疲労照査が可能であるといえる。

4. 合成床版を有する橋梁の有限要素解析

本章では、合成床版を有する橋梁を用いた解析を行い、実橋床版における底鋼板溶接部の応力挙動を確認し、ホットスポット応力による疲労照査を試みた。

(1) 対象橋梁

解析に用いた橋梁は構造諸元の異なる4種類であり、その諸元を表-4に、断面図を図-9に示す。これらは対象とした合成床版の実績に基づき、それらを包括するように設定したものである。

(2) 解析モデル

2章で示したように、鋼・コンクリート合成床版の溶接継手部の局所的な応力を求めるためには、ソリッド要素により溶接部を再現し、かつ細かく要素分割した解析モデルが必要となる。さらに、鋼材とコンクリートの境界面の接触を考慮することも求められる。一方、橋梁の全体挙動を再現するには、橋軸方向および橋軸直角方向に広い範囲をモデル化することが望ましく、このような大規模な解析に上記の詳細なモデル化を直接取り込むことは容易ではない。そこで、橋梁全体系の解析と着目部周辺のみを詳細にモデル化した解析を組み合わせで解くズームング手法により、溶接継手部の局所的な応力挙動を求めた。解析には汎用有限要素解析ソフトAbaqus.6.14を用いた。以下に各モデルについて述べる。

a) 橋梁全体モデル

全体モデルの例を図-10に示す。鋼部材、コンクリートともにソリッド要素でモデル化した。要素分割はできるだけ粗くした。橋軸方向にはCT形鋼で区切られるパネルの32個程度の範囲をモデル化した。橋軸方向の

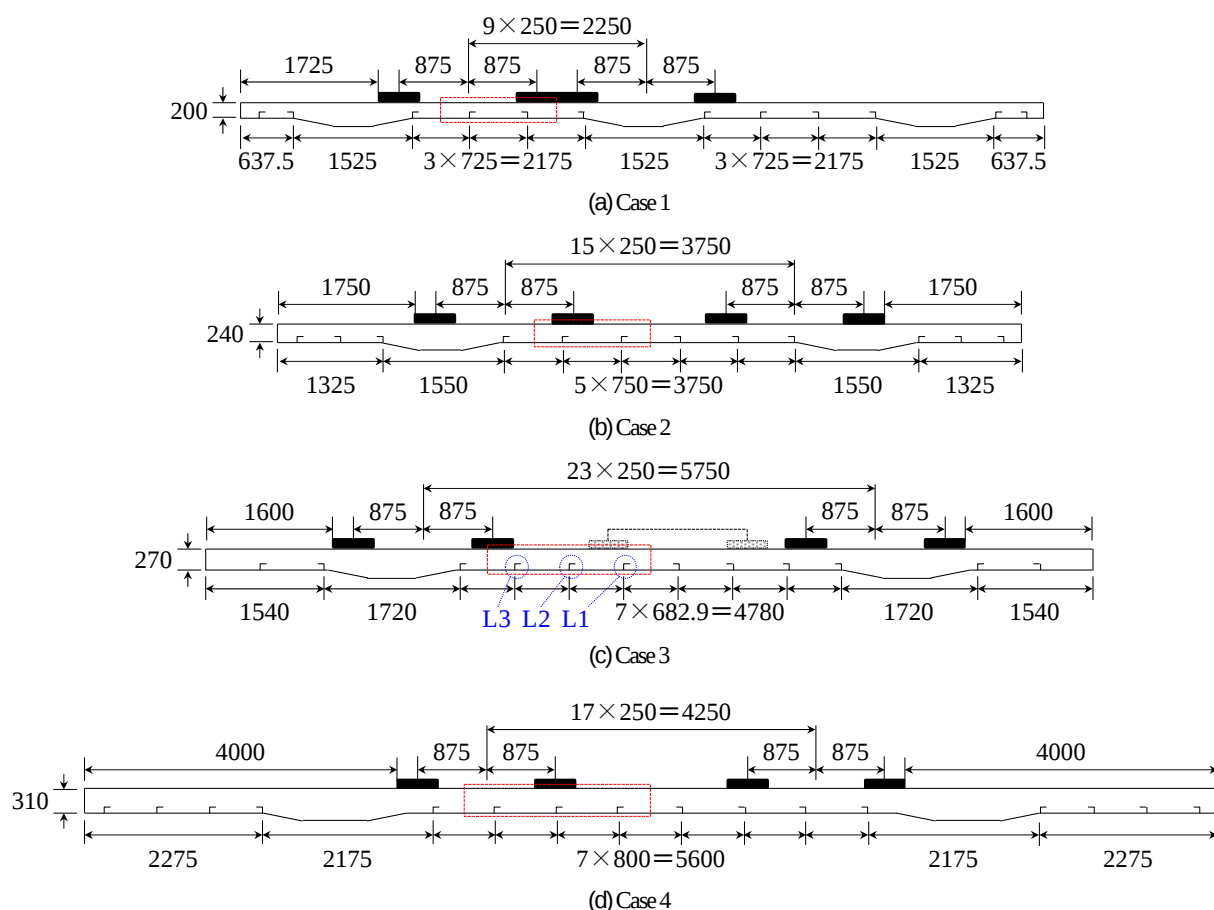


図-9 対象とした合成床版橋梁の断面図（単位：mm）

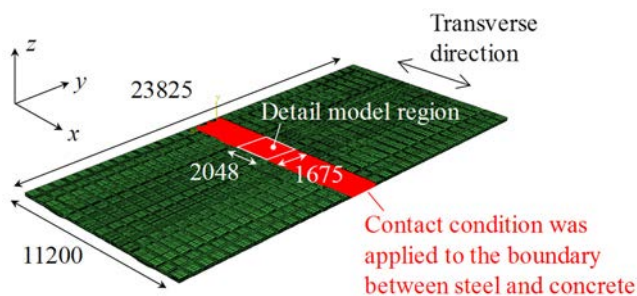


図-10 橋梁全体モデルの例（Case3, 単位：mm）

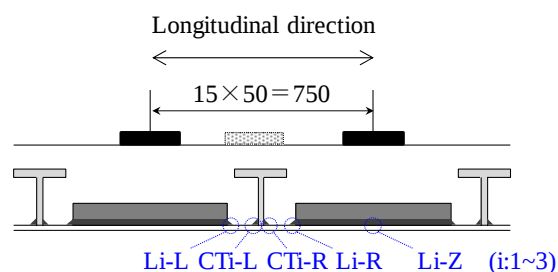


図-11 橋軸方向の荷重位置（Case3, 単位：mm）

モデル長さに関しては、事前解析により橋梁全体の变形挙動を再現するのに十分な長さであることは確認している。また、橋軸直角方向は断面の全幅をモデル化した。

図中の赤色の領域には、付着切れを想定して鋼材とコンクリートの境界面に接触条件を与えた。接触を考慮した範囲を変えた解析を実施したが、橋軸方向に2パネル以上であれば着目溶接部の応力にほとんど差がみられなかったことから、ここでは2パネル分としている。

境界条件としては、主桁ウェブ位置において床版下面を単純支持とした。2章の検討を踏まえ、鋼材とコンクリートは弾性体とした。鋼材の弾性係数とポアソン比はそれぞれ 206 kN/mm^2 , 0.3 とし、コンクリートは圧縮強度 30 N/mm^2 を想定して 28 kN/mm^2 , 0.167 とした¹⁷⁾。

b) 着目部周辺の詳細モデル

図-10 中の白線で囲む領域を詳細モデルとして抽出した。橋軸直角方向には2列または3列分のL形鋼を含む領域（図-9中の赤線で囲む領域）とし、橋軸方向には全体モデルで接触条件を与えた2パネル分とした。ハンチ部近傍や張出し部のL形鋼には断面変化や支持条件などの固有の影響が含まれる可能性があるため、それらの影響が小さい床版支間内の中央付近のL形鋼を対象とした。

詳細モデルは2章の解析と同様の方法でモデル化した。溶接止端周辺ではできるだけ均一に要素分割し、要素サイズは約 2 mm とした。詳細モデルの境界面には全体モデルから得られた変位を境界条件として与えた。

(3) 荷重方法

鋼・コンクリート合成床版に対する疲労設計荷重の規定はないため、荷重には T 荷重⁴⁾を準用し、片輪あたり 100 kN の等分布荷重とした。図-9 中には各ケースにおける橋軸直角方向の荷重位置を示している。詳細モデルの抽出範囲を含むように 250 mm 間隔で 9~24 箇所に荷重した。橋軸方向に関しては、図-11 に例示するように、詳細モデル内の中央にある CT 形鋼をまたぐように 50 mm 間隔で 15~16 箇所に荷重した。これらの結果から、T 荷重が走行したときのホットスポット応力範囲の最大値を求めた。

(4) 解析結果

以下では発生応力が比較的大きかった Case 3 の結果を示す。なお、詳細モデル内にある L 形鋼の橋軸直角方向および橋軸方向の位置によって、図-9(c)、図-11 中に示すように各溶接部に名称を付けた。L 形鋼まわし溶接部と CT 形鋼溶接部に加えて L 形鋼一般部も対象とした。

橋軸直角方向に荷重を移動させたときのホットスポット応力の変化を図-12 に示す。橋軸方向には図-11 中に点線で示した位置に荷重した。横軸は床版支間中央から荷重中心までの距離である。なお、荷重位置によってまわし溶接部の応力集中点は変化するが、溶接止端に沿ったホットスポット応力の分布から最大値をとって整理した。

L 形鋼と CT 形鋼のいずれにおいても 2 箇所でピークをもつ分布となっており、このピーク位置は T 荷重の片輪が L 形鋼のほぼ直上に載ったときに対応している。

荷重を橋軸方向に移動させたときのホットスポット応力の変化を図-13 に示す。橋軸直角方向には図-9(c)中に点線で示した位置に荷重した。横軸は CT 形鋼の中心から荷重中心までの距離である。L1 から L3 の一般部のうち大きな応力が生じた L 形鋼の結果も示している。

ホットスポット応力は L 形鋼まわし溶接部で最も大きく、Case 3 の場合、ホットスポット応力範囲の最大値は、L 形鋼まわし溶接部で約 55 N/mm²、CT 形鋼溶接部で約 22 N/mm²、L 形鋼一般部で約 15 N/mm²であった。この L 形鋼一般部の結果は過去の解析結果¹²⁾とほぼ同程度である。なお、床版コンクリートに生じた引張応力は合成床版試験体の解析結果より小さかった。

(5) ホットスポット応力による疲労耐久性評価

各ケースにおいて得られたホットスポット応力範囲の最大値を表-4 中に示す。どのケースでも L 形鋼まわし溶接部で最大となった。図-8 に示すように、ホットスポット応力を用いる場合、E 等級の疲労強度曲線と照らし合わせることで安全側の疲労照査が可能である。今回の結果は、付着が完全に切れた状態を想定しても E 等級の打ち切り限界である 62 N/mm²を下回っていることがわかる。

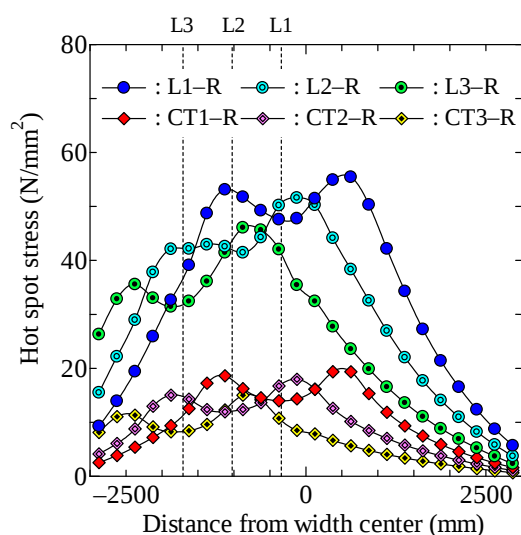


図-12 橋軸直角方向の荷重位置による応力の変化

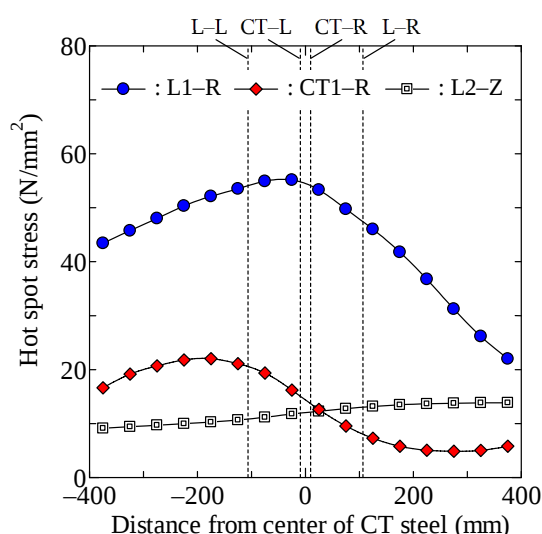


図-13 橋軸方向の荷重位置による応力の変化

5. まとめ

本研究では、L 形鋼をずれ止めに用いた鋼・コンクリート合成床版を対象に、L 形鋼溶接部の応力挙動や疲労強度を明らかにし、実橋床版の溶接継手部に対する疲労耐久性評価を試みた。以下に得られた主な成果を述べる。

- ・鋼材とコンクリートの間の付着が切れた場合、溶接継手部近傍で鋼板が局所的に変形し、特に L 形鋼のまわし溶接部で高い応力集中が生じる傾向にあった。
- ・溶接部に対して求めたホットスポット応力範囲と E 等級の疲労強度曲線を照らし合わせることで、継手形式によらず安全側の疲労照査を行うことができる。
- ・合成床版を有する橋梁に対して、T 荷重の移動を模擬した解析を実施した。その結果、完全に付着が切れた状態を想定しても、溶接継手部のホットスポット応力範囲の最大値は E 等級の打ち切り限界以下であった。た

だし、荷重のばらつきは考慮できておらず、今後の課題である。

謝辞：本研究は名古屋大学の研究室学生（白井晴也氏、加納俊氏、益田裕太氏）の協力のもと実施されたものである。ここに記して深謝します。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼コンクリート合成床版設計・施工指針（案），複合構造シリーズ 07，2016.
- 2) 土木研究所：道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書（その5）－評価編－，No.277，2001.
- 3) 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.472，2008.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017.
- 5) 街道浩，松井繁之：鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のスタッドの疲労強度評価，土木学会論文集 A，Vol.64，No.4，pp.765-777，2008.
- 6) 永田淳，高田和彦：帯鋼ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版の疲労耐久性，第 2 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.225-230，2000.
- 7) 中川敏之，阿部幸夫，井澤衛，松井繁之：トラス鉄筋により補強された型枠鋼板付き合成床版の疲労強度特性，第 1 回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.219-224，1998.
- 8) 鹿島孝之，山本晃久，橋本靖智，小出宣央：トラス型ジベル合成床版の疲労耐久性に関する実験的研究，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，CS-280，2000.
- 9) 深沢恵志，酒井正和，須藤典助，小林潔：鋼・コンクリート合成床版橋 MESLAB の疲労耐久性及連続合成桁への適用性について，三井造船技報，No.176，pp.8-18，2002.
- 10) 松井繁之，佐々木洋，福本嘸士，梶川靖治：走行荷重下における鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性に関する研究，構造工学論文集，Vol.34A，pp.409-420，1988.
- 11) 松井繁之，文兌景，福本嘸士：鋼板・コンクリート合成床版中のスタッドの疲労破壊性状について，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1303-1311，1993.
- 12) 館石和雄，崔誠珉，内田大介，浅野浩一，小林潔：L 形鋼をずれ止めに用いた鋼・コンクリート合成床版の疲労耐久性，鋼構造論文集，Vol.14，No.55，pp.123-132，2007.
- 13) 浅野浩一，内田大介，小林潔，崔誠珉，館石和雄：ずれ止めとして L 形鋼を用いた鋼・コンクリート合成梁の疲労強度，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，I-436，pp.871-872，2008.
- 14) 館石和雄，崔誠珉，内田大介，浅野浩一，小林潔：鋼・コンクリート合成床版の L 形鋼ジベル溶接部の局部応力挙動に関する研究，鋼構造論文集，Vol.16，No.63，pp.57-66，2009.
- 15) 吉田賢二，早川清，大成隆，中尾祐一郎，水野浩：回転せん断力を受けるスタッドの疲労耐久性の向上に関する研究と実橋への適用，川田技報，pp.1-6，Vol.34，2015.
- 16) 浅野浩一，内田大介，小林潔，崔誠珉，館石和雄：孔あき鋼板をずれ止めに用いた鋼・コンクリート合成梁の疲労強度，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，I-497，pp.993-994，2009.
- 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，2017.
- 18) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2012.
- 19) 松井信武，笠太一，磯光夫，街道浩，澤田敦則，松井繁之：初期点検における合成床版底鋼板の打音異常発生の原因検討と防止対策，土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集，I-410，pp.819-820，2013.
- 20) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説 2012 年改定版，2012.
- 21) Hobbacher, A. F.: *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*, 2016.

(Received August 30, 2019)

FATIGUE STRENGTH OF WELDED JOINTS IN STEEL-CONCRETE COMPOSITE SLAB USING ANGLE SHAPE SHEAR CONNECTORS

Takeshi HANJI, Kazuo TATEISHI, Masaru SHIMIZU, Koichi ASANO,
Takaaki ISHII, Kiyoshi KOBAYASHI and Daisuke UCHIDA

In this study, fatigue strength of welded joints in steel-concrete composite slabs was investigated by a fatigue test and finite element analysis. In the test, fatigue cracks occurred at toes of boxing welds of angle-shape shear connectors and propagated into a bottom plate, which were caused by stress concentration due to local out-of-plane bending deformation of steel plates around the boxing weld. This local deformation can be caused because concrete and steel plates locally behave separately near welds when bond between them is lost. The test result demonstrated that fatigue assessment of welded joints in the steel-concrete composite slab can be performed using the structural hot spot stress approach. Then, actual composite slabs with different structural dimensions were analyzed to investigate local stress behavior around welded joints, and their fatigue performance was assessed based on the hot spot stress approach.