

論文 鋼コンクリート境界面特性が合成床版疲労破壊機構に及ぼす影響

藤山 知加子^{*1}・櫻井 信彰^{*2}・中山 逸人^{*2}・前川 宏一^{*3}

要旨：リブで底鋼板とコンクリートの合成を期待する鋼コンクリート合成床版について、鋼材とコンクリートの境界面特性が疲労破壊モードに与える影響を、実験と数値解析を用いて検討した。初期付着と摩擦が十分に期待できる場合、高レベルの疲労荷重によってコンクリートは押抜きせん断破壊したが、付着・摩擦による合成機構は失われず、その後の載荷で新たな破壊面が形成された。付着切れから摩擦機構に移行する段階では、鋼とコンクリートのずれと共にたわみが増加して鋼材の降伏が逐次、進行したが、急激な破壊には至らなかった。破壊過程は、初期付着を考慮した接合要素モデルを用いた数値解析において再現された。

キーワード：鋼コンクリート合成床版, 境界面, 初期付着, 摩擦, 非線形有限要素解析, 高サイクル疲労

1. はじめに

道路橋における構造合理化、床版の長支間化のニーズに伴い、様々な形態の鋼コンクリート合成床版（以下、合成床版）が提案され、多くの施工実績が報告されている。その中で、本論文では、底鋼板とコンクリート版のずれ止めにリブを用いたタイプの合成床版¹⁾に着目した。本タイプの合成床版は、これまで静的載荷試験や輪荷重走行試験によって耐力の検討が行われてきた¹⁾が、現時点では、高サイクル荷重下での破壊機構の解明までには至っていない。

筆者らは、本タイプの合成床版の破壊過程が、リブ形状によるコンクリートの拘束効果の度合いと、リブ鋼材表面の摩擦特性に依存すると考え、数値解析および実験的手法を用いて破壊機構の解明を試みている。本論文は、後者の、鋼コンクリート界面の摩擦特性と疲労破壊機構について報告するものである。

コンクリートの疲労損傷を考慮する三次元数値解析には、近年開発された直接経路積分型非線形解析プログラム²⁾を用いた。この解析プログラムを用いたRC床版輪荷重走行試験のシミュレーションの精度と信頼性については、既に検証結果が報告されている³⁾。

2. 研究概要

2.1 実験条件

(1) 試験体諸元

本研究で用いた合成床版試験体の概要を図-1に示す。対象試験体は橋軸方向、直角方向ともに1.5mで、床版支間1.2mで単純支持されている。高さ105mmのI型鋼は300mm間隔で配置し、底鋼板に溶接している。I型鋼の上には、I型鋼に直交する方向にD10鉄筋を250mm間隔で配置した。コンクリート160mmと底鋼板9mmを合

わせ、全厚は169mmである。

(2) 検討ケース

検討ケースを表-1に示す。I-300-01はリブ腹版に孔を設けたもので、リブとコンクリートの一体性の向上を図った。I-300-02は界面摩擦特性が標準的なケースである。I-300-03では、鋼部材（底鋼板およびリブ）にテフロンシートを敷いた上でコンクリート打設した。コンクリートの収縮や経年劣化等の理由により、鋼とコンクリートの付着力や摩擦抵抗が十分に期待できないケースを想定したものである。

(3) 載荷方法

実橋梁では、輪荷重の作用位置に応じて床版に生じる応力状態が変化することから、本研究では、着目するリブC上に荷重が作用する場合、リブとリブの間に荷重が作用する場合、隣接リブB、Dに荷重が作用する場合、という3ケースを想定し、各10万回、計30万回の高サイクル載荷を実施した。荷重の大きさは、道路橋の設計荷重^{4),5)}に従い、版中央1箇所載荷するステップ2-1では120kNとし、載荷位置を2点に分けたステップ2-2、2-3では、中央のリブに生じるせん断力が上記のケースと同程度となるように、それぞれ1箇所208kN、226kNずつを与えた。

次に、再び載荷位置を版中央にのみ移設し、荷重レベルを上げながら繰返し載荷を行った（ステップ2-4）。最後は、静的に単調増加荷重を与え、試験体を破壊させた（ステップ3）。載荷ステップをまとめて、表-2に示す。

2.2 数値解析条件

(1) 有限要素モデル

リブと直交する方向のみに250mm間隔で配置されているD10鉄筋は、リブ上30mm厚のRC要素層として解析に取り入れた。それ以外は無筋コンクリート領域と規

*1 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (正会員)

*2 新日鉄エンジニアリング(株) 技術開発研究所 (正会員)

*3 東京大学大学院工学系研究科 教授 工博 (正会員)

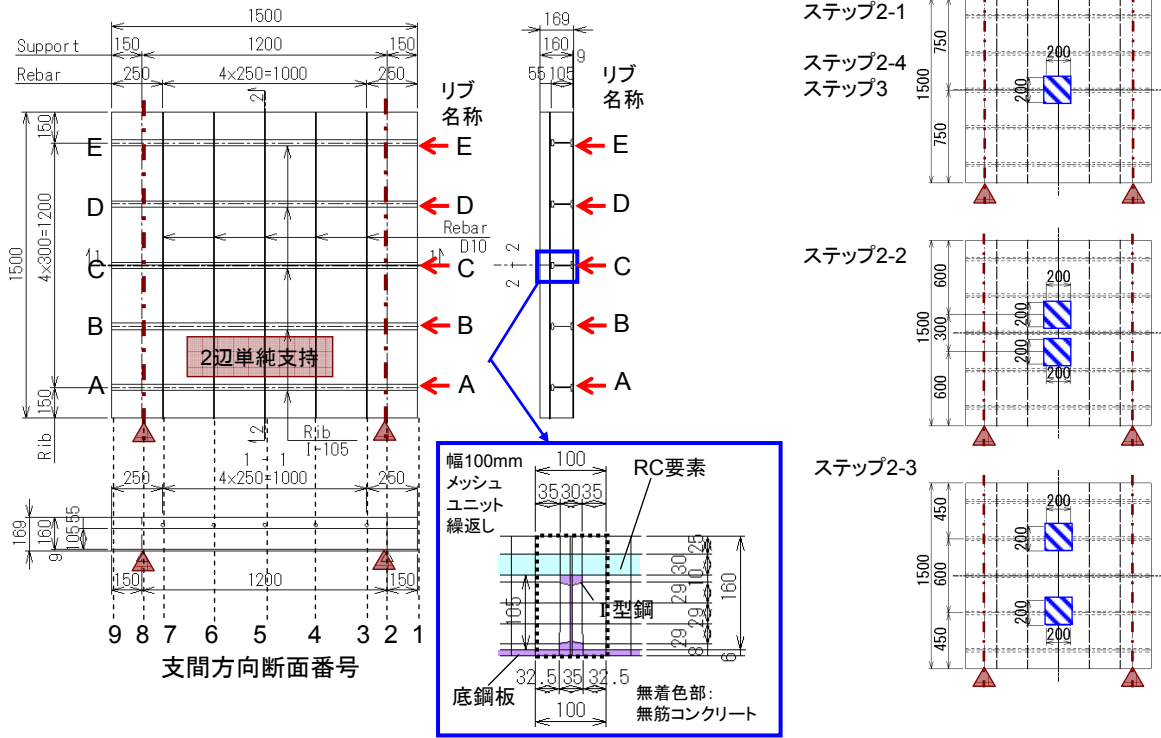


図-1 試験体諸元

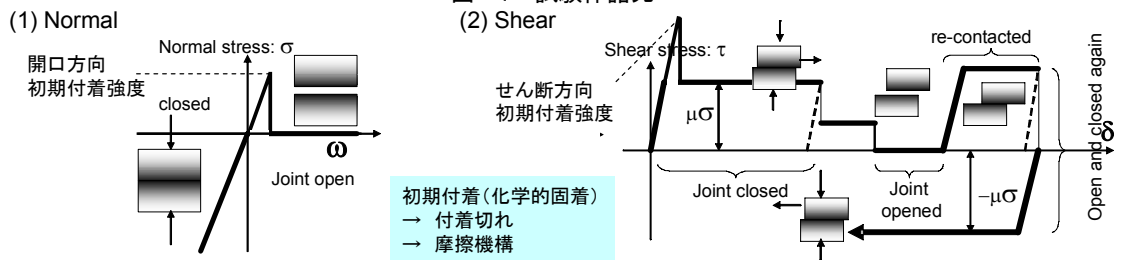


図-2 鋼コンクリート境界要素のモデル

表-1 検討ケース

供試体名	想定境界条件	リブ実処理
I-300-01	高摩擦	孔φ50ctc200
I-300-02	標準	標準
I-300-03	低摩擦	テフロンシート敷設

表-3 解析に用いた材料定数

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	リブ 降伏強度 (N/mm ²)	鉄筋 降伏強度 (N/mm ²)	底鋼板 降伏強度 (N/mm ²)
I-300-01	44.4	400	345	400
I-300-02	43.7			
I-300-03	39.3			

表-2 荷重ステップ

荷重ステップ	荷重 (kN)	荷重回数
2-1	120	100,000
2-2	208	100,000
2-3	226	100,000
2-4	I-300-01	10,000-1,000-100
	I-300-02	
	I-300-03	
3	破壊まで	1

定し、それぞれに引張軟化特性を設定した²⁾。

有限要素は全て8節点固体要素を用い、コンクリートの圧縮強度は、各試験体の荷重日にあわせて実施した圧縮試験の試験値を用い、引張強度および弾性係数は、コンクリート標準示方書⁶⁾に基づき、圧縮強度から推定した。各要素の諸元は、表-3に示す。

解析におけるコンクリートの高サイクル疲労損傷は、1次元の基本構成則（圧縮、引張、ひび割れ面せん断

達)のレベルで考慮されている²⁾。高サイクル荷重によるコンクリートの剛性低下と塑性化の進展を、実際の荷重履歴下で逐次算出するものである。

(2) 鋼コンクリート境界面のモデル

鋼板とコンクリートの界面には、図-2に示す接合要素を配置した。界面の挙動は一般には摩擦則に従うと考えられるが、既往の研究⁷⁾では、鋼とコンクリート間には、高い初期付着力が存在すると指摘されている。そこ

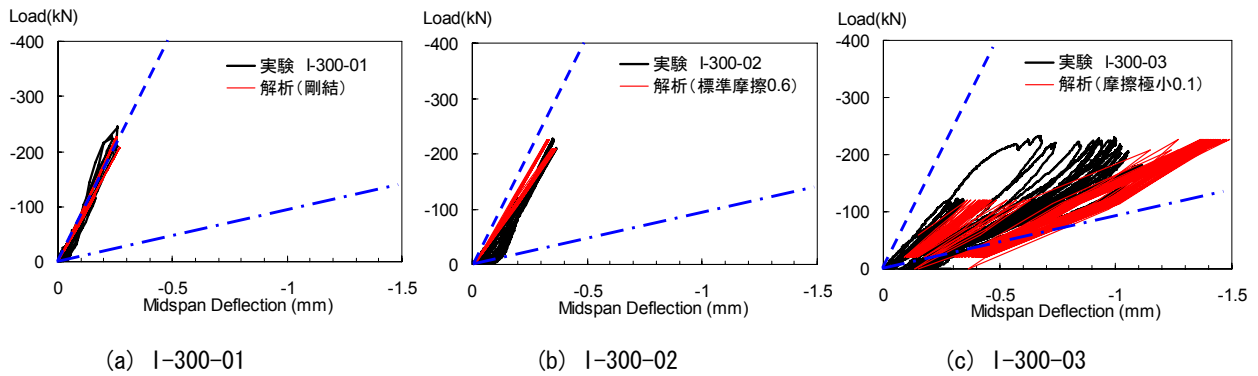


図-3 ステップ2-3（設計荷重相当30万回）の荷重—変位関係

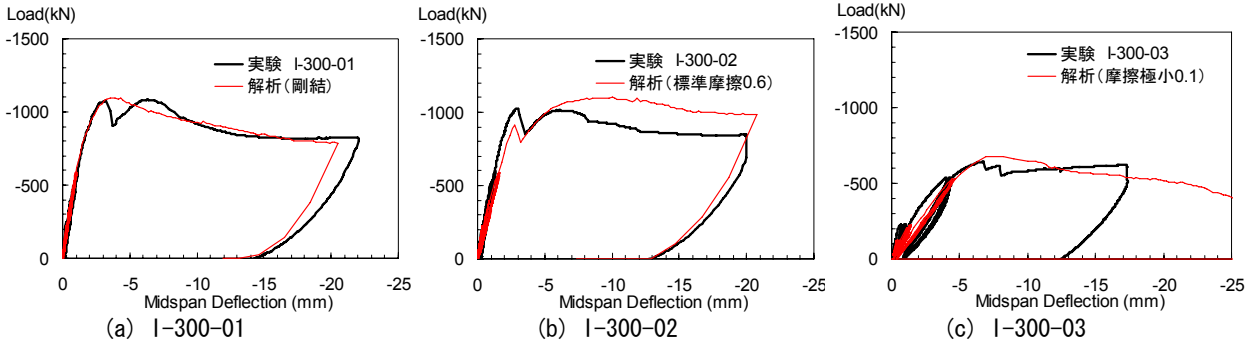


図-4 荷重—変位関係（全ステップ）

で、本研究では荷重初期段階で開口とずれ方向にそれぞれ付着強度を設定するとともに、剥離後（付着切れ後）は二面の再接触のみを考慮し、再接触後のせん断挙動はモールクーロンの線形摩擦則に従うものとした。初期付着強度は、開口方向 $5.0\text{N/mm}^2/\text{mm}$ 、せん断方向 $25.0\text{N/mm}^2/\text{mm}$ を、また摩擦係数は、標準のI-300-02で $\mu=0.6^8$ 、テフロンシート使用のI-300-03では $\mu=0.1$ を一様に与えた。リブに孔を設けて一体性を高めたI-300-01では、この接合要素を用いず、コンクリートと鋼材を剛結とした。

3. 実験および解析結果

3.1 荷重—変位関係

30万回疲労荷重の荷重—変位関係を図-3に示す。I-300-01およびI-300-02では、解析は実験と良好に一致した。I-300-03では、疲労荷重中に著しい剛性低下がみられ、30万回終了時には鋼材のみの剛性値に近い状態となった。解析においても定性的な傾向は一致したが、剛性は過小評価傾向である。

次に、破壊までの全過程を含んだ荷重—変位関係を図-4に示す。実験では、I-300-03は他のケースに比べ耐力が低く、I-300-02の64%に留まった。一方、他の2ケースは、最初の鋭いピークと2番目の比較的緩やかなピークの後、最後は800kN強の耐荷力にほぼ収束する傾向が一致して見られた。I-300-01はI-300-02に比べて6%耐力が大きかった。解析結果は、概ね実験と一致した。

3.2 破壊形態

(1) 試験体ひび割れ状況

実験後の全供試体切断断面を写真-1に示す。I-300-01、I-300-02では、荷重板下に細かいひび割れが複数、斜め下45度方向に帯状の領域を形成しているのが観察された。ひび割れ帯ではコンクリートの砂利化が進んでおり、疲労荷重の過程で生じたものと考えられる。ひび割れ帯の幅は、鋼とコンクリートの一体性が高いI-300-01の方が広がった。ひび割れ帯の外側には、荷重板端から隣接リブB、Dの上端を経由し、リブA、Eの付け根に至る広い破壊領域が見られた。I-300-03では、ひび割れ帯は見られず、広範囲な破壊領域のみが観察された。

次に、類似したひび割れパターンのI-300-01、I-300-02の代表として、I-300-02について、中央リブCに沿った断面（写真-2(a)）および隣接リブDに沿った断面の破壊状況を示す（写真-2(b)）。(a)では、荷重板より斜め45度下方向に分布したひび割れ帯と、リブフランジ高さに水平に伸びるひび割れとが合流していた。(b)では、底鋼板近くまで伸びたひび割れ帯が、底鋼板から高さ30mm程度で水平方向に展開されていた。

I-300-03では、支間中央部でコンクリート下面から上面に伸びる曲げひび割れが確認された（写真-3(a)）。荷重時の観察では、版中央の曲げひび割れは、荷重20万回後に上面に達していた。また、隣接リブD断面では、鉄筋位置を水平に結ぶひび割れと、そこから上面コンクリートに伸びるひび割れがみられた（写真-3(b)）。

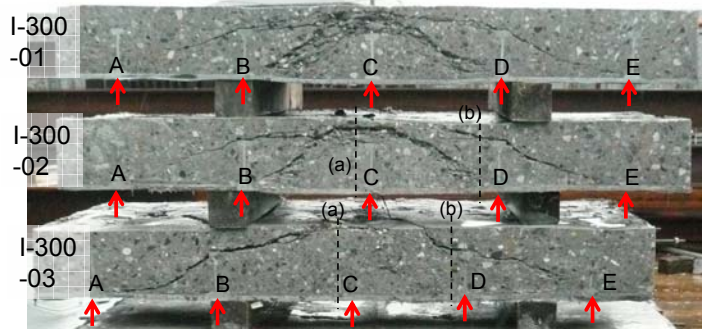
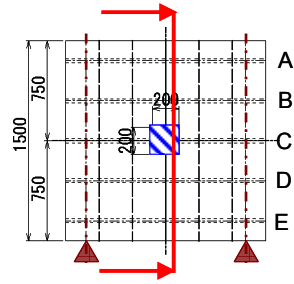
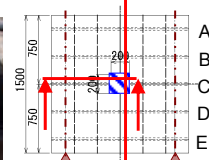


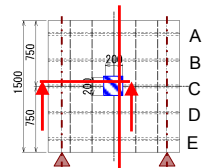
写真-1 試験体切断面



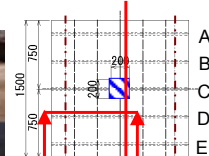
(a) リブ C+50mm 位置切断面



(a) リブ C+50mm 位置切断面



(b) リブ D+50mm 位置切断面



(b) リブ D+50mm 位置切断面

写真-2 I-300-02 試験体切断面

写真-3 I-300-03 試験体切断面

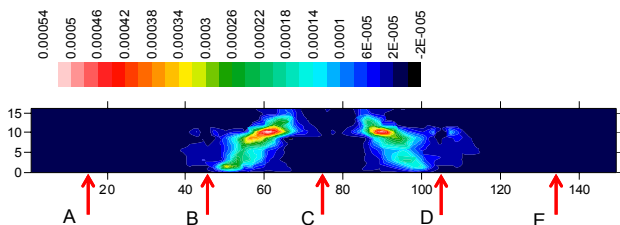
(2) 解析による破壊モードとの比較

I-300-01 および I-300-02 の、リブ断面方向のひずみ分布の推移を、図-5 および図-6 にそれぞれ示す。ステップ 2-3 終了時点では、いずれのケースでも顕著な損傷はみられなかった。荷重レベルを上げたステップ 2-4 終了後、図-5(a) では、押抜きせん断ひびわれ状の領域に顕著な残留ひずみが確認された。

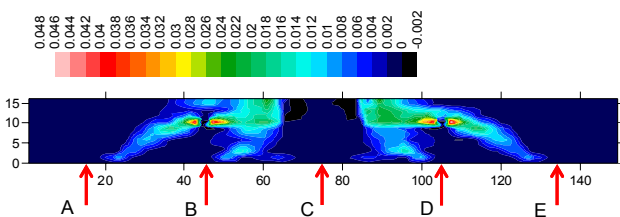
I-300-01 の、解析におけるピーク荷重時の主ひずみ分布(図-5(b))では、図-5(a)の領域に加えて、リブ B、D の上フランジを経由してリブ A と E の付け根とを結ぶ広い破壊面が形成されていた。この新たな高ひずみ領域

の発生を解析ステップごとに確認したところ、荷重 800kN (たわみ 1.5mm) の時点で発生、進展していた。さらに、実験での第 2 ピーク荷重時と同等の、たわみ 6.4mm のときの主ひずみ分布を確認したが、新たな高ひずみ領域はなく、ひずみの値のみが増加していた。

一方、I-300-02 では、ステップ 2-4 終了後も、実験で観察された疲労クラック領域に、残留ひずみはみられなかった(図-6(a))。解析での最初の荷重ピーク時では、リブ B、D の上フランジを経由する領域はみられたが(図-6(b))、リブ A と E の付け根へと伸びると思われた部分は、I-300-01 ほど明確でなかった。ただし、下面の曲

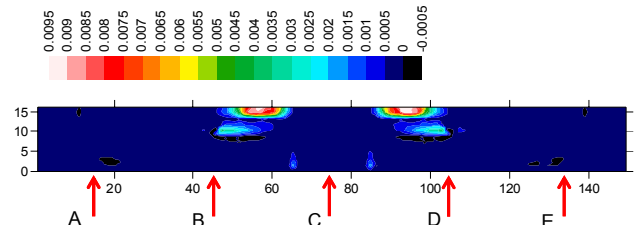


(a) ステップ 2-4 (300kN~600kN サイクル) 終了時

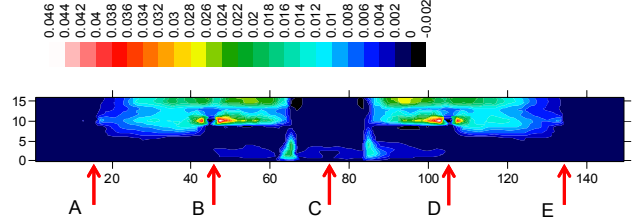


(b) ステップ 3-ピーク荷重時

図-5 I-300-01 リブ断面方向主ひずみ分布



(a) ステップ 2-4 (300kN~600kN サイクル) 終了時



(b) ステップ 3-第 1 ピーク荷重時

図-6 I-300-02 リブ断面方向主ひずみ分布

げ引張りひび割れと思われるひずみ分布が確認された。

図-7に、I-300-03 の設計荷重相当 30 万回載荷終了時の主ひずみ分布の解析値を示す。支間中央付近の曲げひび割れ発生位置に、コンクリート下面から上面にかけて高ひずみ領域がみられた。ステップ 2-4 以降については、この曲げひび割れ領域と、載荷点付近で上面コンクリートに局所的な高ひずみ領域が確認された。

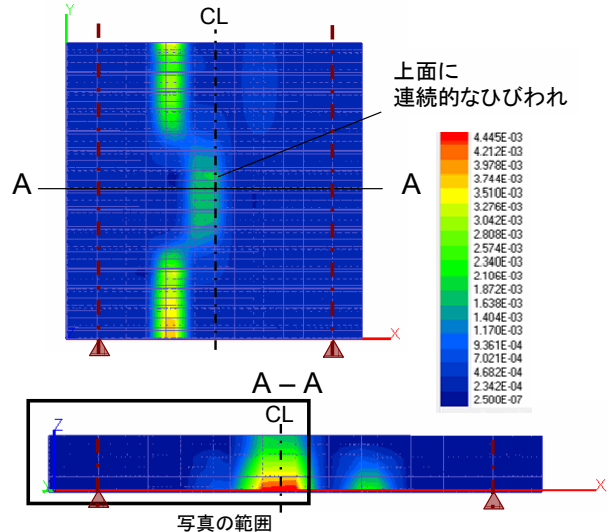


図-7 I-300-03 30 万回載荷終了後主ひずみ分布

4. 破壊機構についての考察

4.1 初期付着および摩擦が期待できる場合

I-300-01, I-300-02 の両者とも、3 節で確認された高サイクル荷重による押し抜きせん断破壊の後も、依然として耐荷力を有したまま、第 1 のピークに至る。実験で計測された、第 1 ピーク前後の各断面のリブ軸方向ひずみを図-8 に示す。第 1 ピーク後は全断面で平面保持しないことから、第 1 ピークでの新たな破壊面が形成に伴い、リブとコンクリートとの付着切れが誘発されたと推察される。一方、解析では、剛結を仮定した I-300-01 では、付着切れに起因する第 1 のピークは現れない。また、I-300-02 の解析では、第 1 ピークの値が実験よりも小さいことから、初期付着力の設定が過小であった可能性がある。

次に、試験体側面で計測した中央リブ C とコンクリートとの水平ずれ（リブ C 上フランジ中心と、その 25mm 上方のコンクリートとで測定した水平変位の差）を見ると（図-9）、ずれは第 2 ピーク後に急激に進んでいた。第 1 ピーク時の付着切れは部分的なもので、端部では依然として有効に付着が働いたものと考えられる。また、第 1 ピーク後は緩やかに耐力が回復して第 2 ピークに至った。支間中央付近の部分的な付着切れによってリブに沿った方向でタイドアーチ機構が形成されて耐荷力が再上昇した後、付着切れが端部まで及んでタイドアーチ機構が消滅し、端部で計測されるリブとコンクリートの水平ずれが増加しはじめたと推察される。第 2 ピーク後は界面全体が初期付着の消失した単純な線形摩擦則へと移行し、ずれの増加とともに耐力が低下したと考えられる。一方、解析では、部分的な付着切れによるタイドアーチ機構は確認されず、また I-300-02 では、第 2 ピーク以降の残存耐力が実験よりも幾分か大きかった。これより、摩擦係数の設定が過大であったと推測される。

第 2 ピーク以降の終局状態では、鋼材とコンクリートの一体性が失われ、たわみが増加し、C4 および C6 位置にあたるリブ腹板は、実験でも解析でも、せん断降伏に達していた（図-10）。

4.2 初期付着および摩擦が期待できない場合

I-300-03 では、載荷初期から鋼とコンクリートの合成機構は期待できず重ね版として挙動していたが（図-3）、

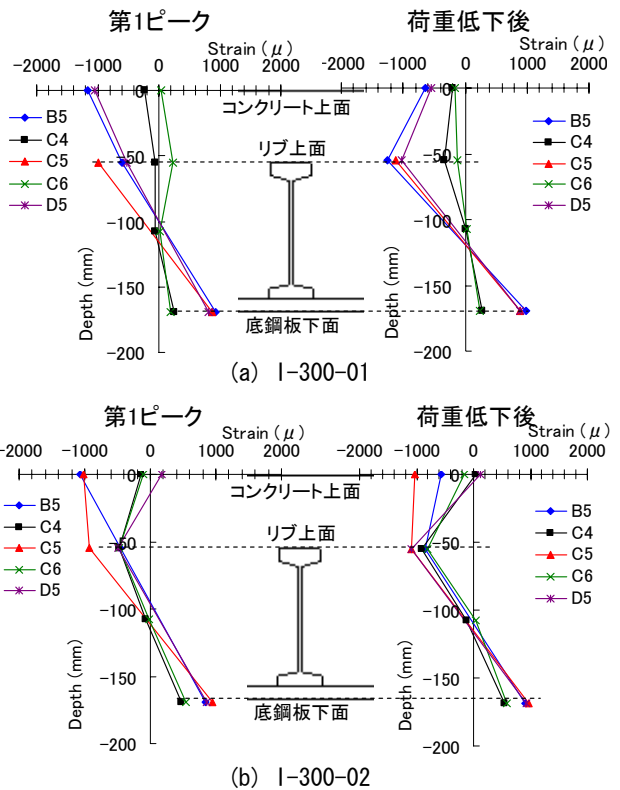


図-8 第 1 ピーク前後のひずみ計測値（リブ方向）

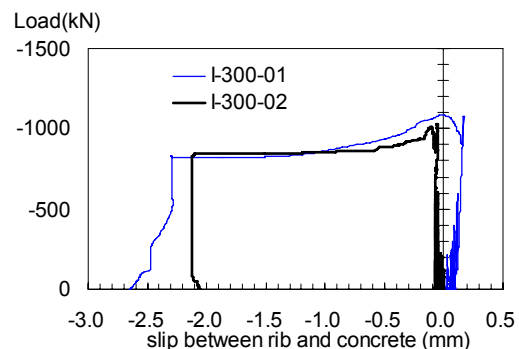


図-9 リブ C とコンクリートとの水平ずれ計測値

設計荷重相当の荷重繰返しによるひびわれの進展で徐々にコンクリートが破壊し、やがて鋼材のみで荷重を負担するようになったと推察される(図-7)。

また、コンクリートが有効に圧縮力を負担できないことから、リブ上フランジが圧縮降伏し(図-11)、たわみが増加して終局に至った。この破壊過程は、摩擦係数を0.1と仮定した本稿の解析でも概ね機構を再現できたが、写真-1で見られた破壊領域の広がりやの予測精度については、まだ十分とはいえない。

4.3 今後の課題

本研究で提案した、初期付着を考慮した接合要素モデルでは、境界面軟化特性の支圧方向とせん断方向の相互依存性は考慮していない。また、リブタイプの合成床版では、コンクリートの乾燥収縮および膨張剤使用が初期挙動に与える影響も少なくない。引き続き検討したい。

5. 結論

実験と数値解析両者によって、高サイクル荷重を含む鋼コンクリート合成床版の破壊機構を考察した。本研究の結論を、以下に列挙する。

- (1) 初期付着と接触摩擦が期待できる場合、高サイクル荷重によるコンクリートの押抜きせん断破壊後面形成後も耐荷力を有し、急激な破壊には至らない。
- (2) 初期付着と摩擦が期待できるケースでは、静的載荷時に耐荷力が一旦低下する。これは新たな破壊面の形成後、リブとコンクリートに部分的な付着切れが生じたためと考えられる。
- (3) 版中央部から外側へ付着切れが進行し、タイドアーチ機構が形成されることで、耐荷力が一旦低下した後、一時的に耐荷力が回復することが、実験から推察された。
- (4) 初期付着と摩擦が期待できない場合、設計荷重相当の繰返し荷重でコンクリートが疲労破壊し、荷重をほぼ鋼材のみで負担する状態となる。このため、耐力と剛性は著しく低下することが実験、解析両面から認められた。
- (5) 鋼材とコンクリートの界面状況により、終局状態におけるリブの降伏原因と主要な破壊位置は異なる。
- (6) 本研究で提案された、初期の付着を考慮した鋼コンクリート合成床版の境界面モデルにより、境界面特性の違いが合成構造の疲労破壊機構に影響を及ぼすことが、数値解析によって大凡、示された。

謝辞

実験の実施にあたり、大阪工業大学の松井教授に助言を頂いた。本研究は、平成20年度土木学会吉田研究奨励賞を授与された研究課題であり、平成19年度科学研究費補助金(基盤研究A・課題番号80157122)、平成20年度科学研究費補助金(特別研究員奨励費・課題番号

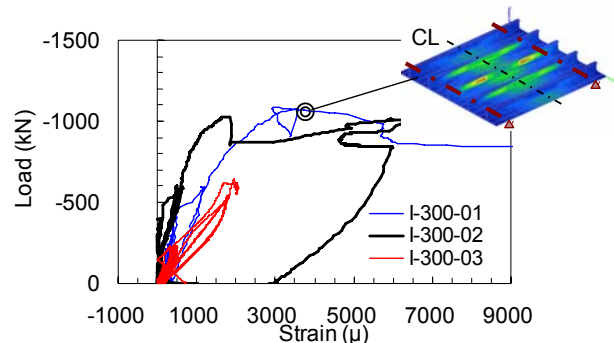


図-10 リブC4腹板のせん断ひずみ計測値

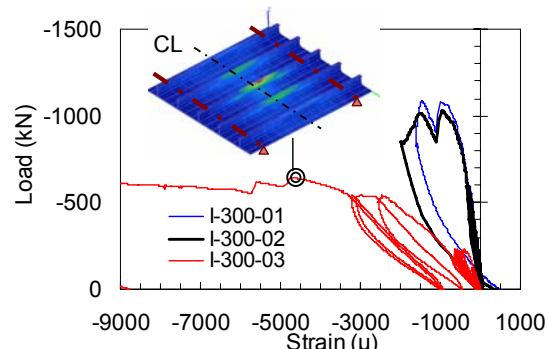


図-11 リブC5上フランジの軸方向ひずみ計測値

20-56191)の助成を受けた。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 櫻井信彰, 藤川敬人, 水上繁樹, 松井繁之, 長井正嗣: 形鋼橋梁の構造合理化に関する研究, 土木学会論文集 Vol. 2005, No. 794/I-72, pp.67-86, 2005.
- 2) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008.
- 3) Fujiyama, C., Gebreyouhannes, E. and Maekawa, K.: A Proposal of Durability Assessment for Existing Bridge Decks Subjected to Heavy Traffic, Society for Social Management Systems, <http://management.kochi-tech.ac.jp> serial No. SMS09-149, 2009.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 日本道路協会, 2002.3,
- 5) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 日本道路協会, 2004.3
- 6) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2008.
- 7) 中島章典, 猪股勇希, 斎川幾美, 大江浩一: 付着, 機械的作用を有する鋼・コンクリート接触面の静的・疲労性状に関する実験的検討, 土木学会論文集 A, Vol63, No.4, pp.758-767, 2007.
- 8) Rabbat, B. G. & Russell, H. G.: Friction Coefficient of Steel on Concrete or Gorout., *Journal of Structural Engineering* 111(3), pp.505-515, 1985