

論文

鋼板接着 RC 床版における水平ひび割れ進展過程の分析

南波謙太*, 藤山知加子**, 新名勉***, 青木康素***

*法政大学大学院 都市環境デザイン工学専攻 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

** 工博, 法政大学, 都市環境デザイン工学科 (〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

*** 阪神高速道路株式会社 技術部 技術推進室 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

非線形有限要素解析より, 鋼板接着 RC 床版の輪荷重試験の再現解析を実施し, 水平ひび割れの発生および進展過程の分析を行った. 鉄筋, 鋼板, アンカーボルト等の部材はソリッド要素により構成し, その付着性状は接合要素によりモデル化した. 載荷後の床版断面の下段鉄筋高さにおいて, 水平ひび割れに相当するひずみ分布を確認した. 次に, 下段鉄筋高さ要素のひずみ成分と輪荷重走行位置の関係, さらに同じ高さ平面のひずみ分布を分析した. 水平ひび割れを示す鉛直方向ひずみは, 鉄筋の付着切れやアンカーボルトの影響により発生し, 移動荷重載荷により進展すると考えられた. また実測活荷重データに基づく疲労解析を行い, 実際の活荷重が水平ひび割れの発生や進展に与える影響を検討した.

キーワード: 鋼板接着補強, RC 床版, 水平ひび割れ, FEM

1. はじめに

鋼板接着は, RC 床版の補強工法の一つである. 約 40 年以上前より実施され, 耐荷性能の向上や, 疲労耐久性の改善などの補強効果が確認された¹⁾. しかし現在では鋼板の浮き等の再劣化が報告されており²⁾, 浮きを有する状態の疲労耐久性を確認する研究³⁾などが行われている.

疲労試験後の試験体³⁾や, 供用中の床版からは, 鉄筋位置において水平ひび割れが報告されている⁴⁾. 水平ひび割れは, コンクリートのせん断応力伝達性能を低下させ, 耐荷性に影響を及ぼすが, その発生および進展メカニズムに関して未解明な部分が多い⁵⁾.

本研究は, 鋼板接着 RC 床版を対象に, 非線形有限要素解析による水平ひび割れの発生および進展メカニズムの解明を目的とした. 解析コードは COM3D (3 次元非線形 FE 解析) を用いた. 本コードにおけるコンクリートの構成則は, 分散ひび割れモデルと弾塑性破壊モデルに基づくものである⁶⁾.

2. 解析モデル

2.1 再現対象の試験体

本研究では, 阪神高速道路によって行われた, 鋼板接着 RC 床版の輪荷重試験 (図-1, 2) を対象に, 再現解析を行うため, 検討に用いる解析モデルを構築した. 試験では, 既設 RC 床版の切出しパネルを用いて, 補強鋼

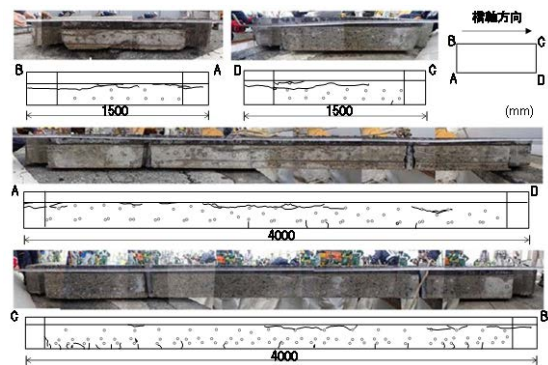


図-1 切出し時の既設 RC 床版の損傷状態

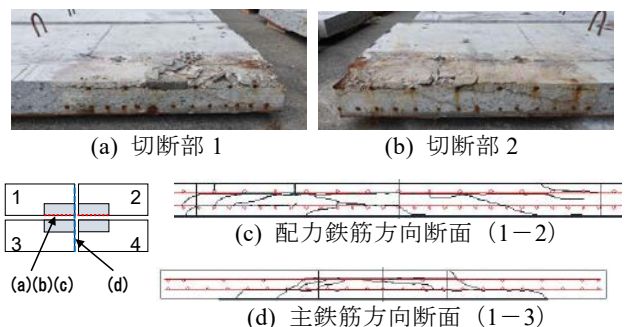


図-2 輪荷重試験後の既設 RC 床版の損傷状態

板の樹脂による接着が剥離した状態における, 疲労耐久性を評価することが目的とされた. 切出された既設 RC 床版を図-1 に示す. この時点で既に, 既往研究⁴⁾において報告されていた, 上段鉄筋位置における水平ひび割れが確認された. 切出しパネル (図-1) において, 輪

表-1 材料特性値

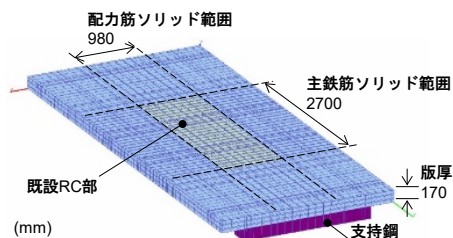
部材	材料	弾性係数 [N/mm ²]	降伏強度 [N/mm ²]	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ポアソン比	単位体積重量 [kN/m ³]
S, SS	SS400 (鋼材要素)	200,000	295	-	440	0.3	77
A	M12 (鋼材要素)	200,000	295	-	440	0.3	77
E	弾性要素	2,250	-	-	-	0.4	25
R	SD295 (鋼材要素)	200,000	295	-	440	0.3	77
C (既設部)	コンクリート要素	19,650	-	25.7	2.14	0.2	23
C (新設部)	コンクリート要素	28,600	-	32	2.67	0.2	23

(R : 鉄筋, C : コンクリート, A : アンカーボルト S : 鋼板, E : エポキシ樹脂, SS : 支持鋼)

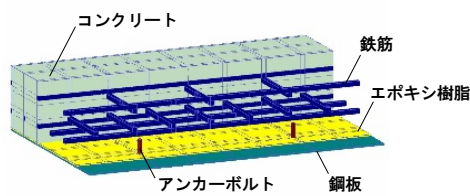
表-2 接合要素 設置概要⁷⁾

設置箇所	モデル化対象	初期付着強度 (N/mm ²)	摩擦係数
R-C	付着性状	28	0.6
R-R	摩擦	-	0.5
A-C	ボルト耐力	388.2	0.6
A-S	ボルト耐力	388.2	0.5
E-S	接着状態	157.5	0.3
E-C	非接着状態	-	0.3
SS-C	摩擦	-	0.6

荷重試験開始前に、試験機に設置できるサイズにするため、切断および新規コンクリートが打設された。図-2は試験終了後の試験体断面である。繰返し荷重により、新しく下段鉄筋位置に水平ひび割れが発生した。以上より水平ひび割れの検討においては、RC 構造や鋼板補強部材のモデル化が重要であると考え、本解析では鉄筋や補強部材をソリッド要素で立体的にモデル化した。



(a) 解析モデル概観



(b) 既設 RC 部内詳細

図-3 解析モデル概要

2.2 構造部材のモデル化

解析モデルの概要を図-3 に、各部材の材料特性値を表-1 に示す。構造部材は既設 RC 部、新設 RC 部、鋼板補強部に分けられる。既設 RC 部では、水平ひび割れの検討のため、鉄筋をソリッド要素でモデル化した。コンクリートと鉄筋の付着性状のモデル化は、要素の境界面に接合要素を設置することにより行った。接合要素による付着性状については次節にて示す。実際の既設 RC 床版の鉄筋には、異形鉄筋が用いられたが、本解析の鉄筋は、節やリブ等の構造は簡略化してモデル化し、異形鉄筋の断面積を有する正方形断面の細長い長方形構造としてモデル化した。また既設 RC 部において、実際の切出しパネルに発生していた曲げひび割れや水平ひび割れ(図-1)による剛性の低下をモデル化する必要がある。よって本解析では、パネルの切出し付近のコンクリートコア抜き試験の結果より得られた、圧縮強度や弾性係数(表-1)を用いることにより、既設 RC 床版の剛性低下状態をモデル化した。

新設 RC 部については、総要素数削減のため、鉄筋は 1 次元線形要素でモデル化した。コンクリートの特性値は設計値に合わせた(表-1)。

鋼板補強部について、鋼板接着工法に用いられる補強鋼板や、接着部材の樹脂、アンカーボルトは全てソリッド要素でモデル化した。アンカーボルトの埋込み長さにおいて、実際は 57mm であるが、解析モデルでは要素分割の影響により、床版下面かぶり厚と同じ長さ (45mm) でモデル化した。部材同士の境界面に接合要素を設置した。対象試験では、補強鋼板の樹脂による接着は剥離した状態とされた。よって、本解析では初期付着を考慮しない接合要素を用いて、樹脂要素と床版下面コンクリート要素の境界面に設置することにより、非接着状態を再現した。

2.3 接合要素モデル

本解析では、異なる部材要素の境界面に接合要素を設置した。接合要素では、初期付着強度や摩擦係数を与えることにより、部材間の付着または摩擦性状をモデル化

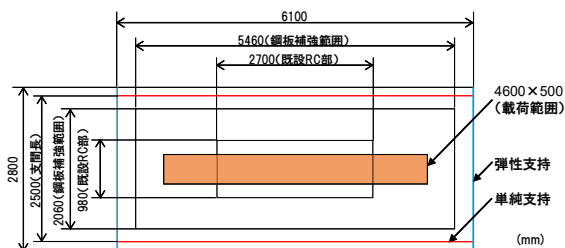


図-4 支持条件

することができる⁷⁾。本解析における接合要素の設置概要を表-2 に示す。この時、鉄筋の初期付着強度は、コンクリート標準示方書⁸⁾におけるコンクリートの付着強度算定式(1)に基づいて算出した。

$$f_{bok} = 0.28 f'_{ck}{}^{2/3} \quad (1)$$

なお、式(1)の算出値を、正方形断面でモデル化された鉄筋の初期付着強度として用いた場合、実際の異形鉄筋の付着強度より小さくなることが確認されている⁹⁾。本研究において、接合要素は、少なくとも付着状態として再現できることや、付着切れした状態におけるひずみ挙動を分析するために用いた。

2.4 荷重および支持条件

支持条件は、支間方向端部において単純支持、橋軸方向端部において梁による弾性支持(図-4)とした。解析モデルにおける弾性支持梁は、本来の H 形鋼を、同断面二次モーメントを有する角形鋼としてモデル化した。

荷重条件は、再現対象の輪荷重試験に準じて、階段状

荷重漸増載荷方式（図-5）とした。載荷荷重は 157kN を初期荷重とし、走行回数 4 万回毎に 19.6kN (2tf) ずつ荷重を増加させた。

3. 再現解析結果

3.1 走行回数-たわみ関係

図-6 に本解析と試験における走行回数-たわみ関係を示す。たわみは床版下面中央部から算出し、活荷重たわみ、残留たわみを含めた総たわみを示す。試験では走行回数 120,000 回 (STEP4) からたわみの増加量が大きくなり、走行回数 290,450 回 (STEP8) にて破壊に至った。破壊形態は押し抜きせん断破壊で、STEP8 時の荷重は 294.2kN であった。

次に試験で破壊が起きた STEP8 まで解析を実施した。図-6 より解析におけるたわみは、STEP 初期では試験結果と同程度であった。STEP 増加による荷重増加に伴い、たわみの増加はみられたが、試験結果のような急激な増加はみられなかった。この原因として、本解析における既設 RC 床版のひび割れによる剛性低下状態のモデル化方法の影響が考えられる。本解析では、コア抜き試験より得られた、コンクリート圧縮強度などの特性値を用いた。この場合、剛性低下時の低い強度をもつコンクリートを再現することはできるが、実際のひび割れのような局所的な損傷や、疲労を再現することはできない。そのため、STEP 初期では試験結果と同程度のたわみを示したが、STEP4 以降、それらの影響による、たわみ増加を再現することができなかったと推察される。

3.2 ひずみ分布

(1) 配力鉄筋方向断面

図-7 に、STEP8 終了後の既設 RC 部の配力鉄筋方向断面におけるひずみコンター算出結果を示す。なお算出断面には配力鉄筋は含まない。コンターレベルの上限は、コンクリートのひび割れ発生に相当する 200μ とした。図-7(a)の主ひずみコンターより、算出断面中央部や下段鉄筋位置において、 200μ を超えるひずみが見られた。ここで、主鉄筋方向ひずみのみを図-7(b)に示す。下段主鉄筋を沿うようにひび割れ相当のひずみが分布したことから、この位置にて水平ひび割れが発生したと考えられる。また試験結果における同様の断面（図-2(c)）と比較して、試験により新しく発生した下段鉄筋位置の水平ひび割れに相当するひずみを再現できたと言える。

(2) 支間中央直角断面

図-8 に STEP8 終了後の既設 RC 部の主鉄筋方向断面におけるひずみコンター算出結果を示す。この断面においても主鉄筋は含まず、コンターについては、図-8(a)は $0\sim 200\mu$ の範囲、図-8(b)はせん断ひずみであるため $-200\sim 200\mu$ の範囲とした。図-8(a)の主ひずみコンターよ

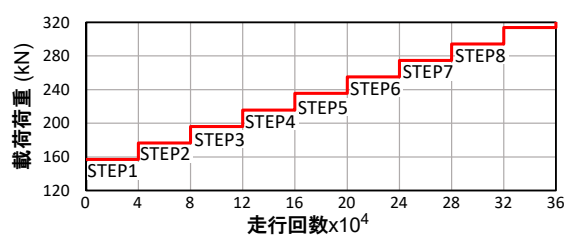


図-5 載荷荷重と載荷 STEP

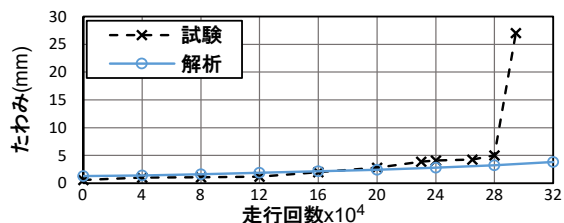


図-6 走行回数-たわみ関係

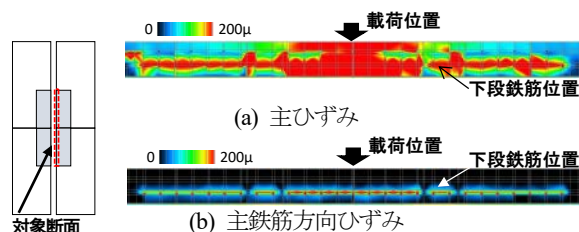


図-7 配力筋方向断面ひずみコンター

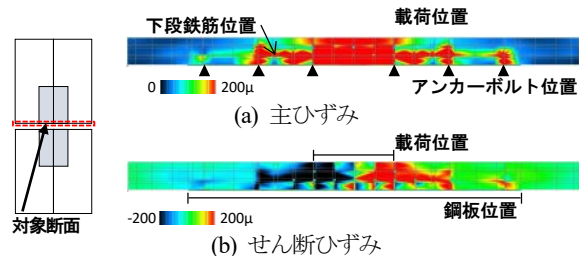


図-8 主鉄筋方向断面ひずみコンター

り、載荷位置直下や下段鉄筋位置、またアンカーボルト周りにひずみの集中が見られた。図-8(b)のせん断ひずみ分布では、載荷位置から斜め方向にせん断ひずみが分布した様子が見られた。試験結果（図-2(d)）においても、そのような斜めひび割れや鋼板端部周りのひび割れが見られた。以上よりひずみ分布において、本解析は試験結果を概ね良好に再現したと言える。

4. 水平ひび割れ分析

4.1 下段鉄筋位置におけるひずみ成分

3.2(1)項より、水平ひび割れに相当する主鉄筋方向のひずみが見られた。そこで、水平ひび割れのメカニズムを分析するため、下段鉄筋位置における要素を対象に、ひずみ成分の輪荷重位置による影響線と、載荷時期との関係を算出した（図-9）。着目要素位置を図-10 に示す。要素は下段配力筋高さに位置し、それぞれ A-I, A-II, B-I, B-II と名付けた。ひずみは、X ひずみ（主鉄筋方向ひずみ）、Y ひずみ（配力鉄筋方向ひずみ）、Z ひずみ（鉛直方向ひずみ）、XY ひずみ（平面内せん断ひずみ）

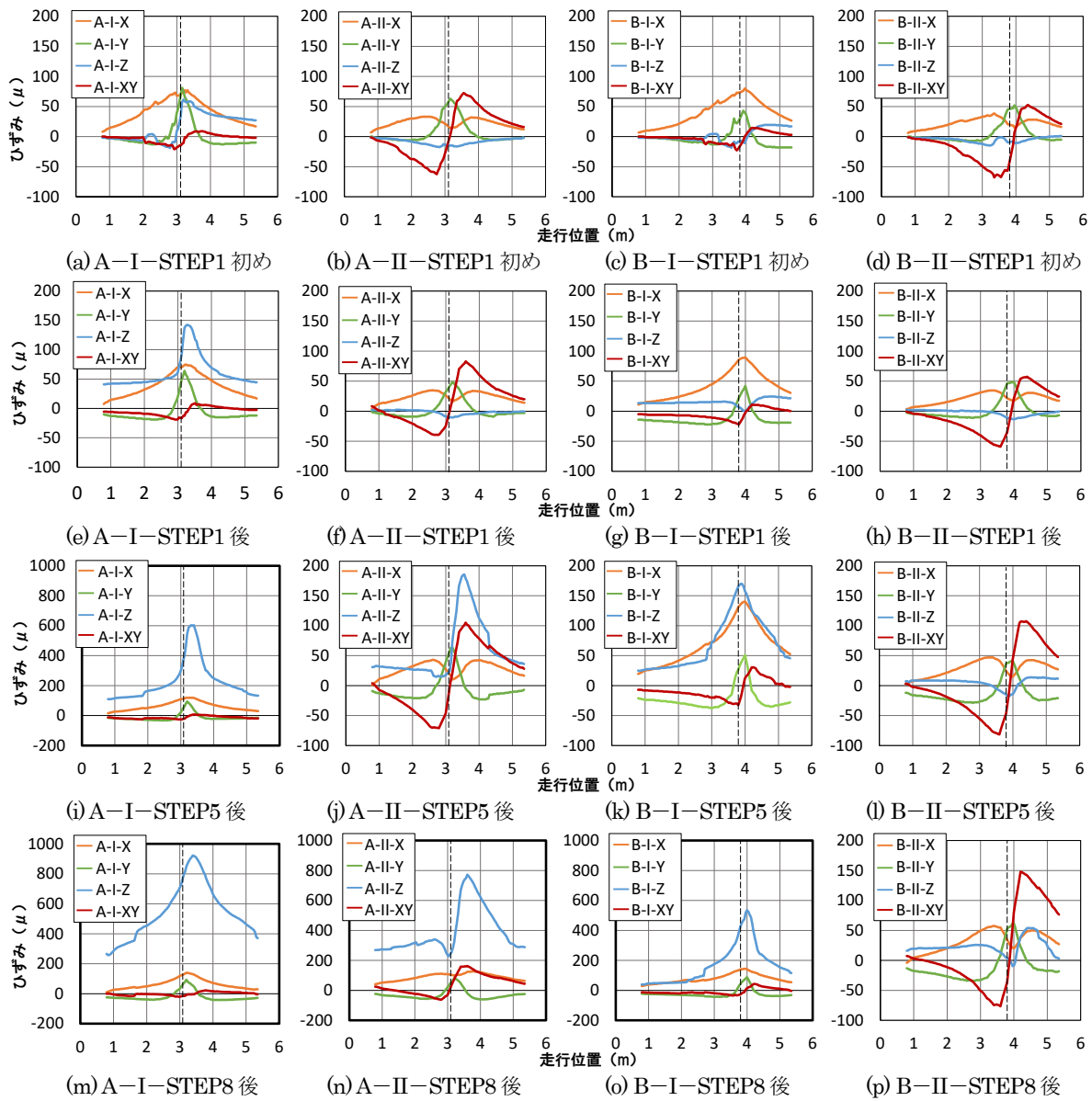


図-9 ひずみ成分の影響線 (橋軸方向)

を算出した。また図-9中の横軸に対する点線は、着目要素の位置を示す。A-I, A-IIは3.1m, B-I, B-IIは3.8mに位置する。着目した载荷時期は、STEP1開始時および終了時、STEP5, 8終了時である。

初めにSTEP1開始時(図-9(a,b,c,d))において、支間中央に位置するA-I, B-Iでは、Xひずみが大きかった。またA-II, B-IIではXYひずみが大きく、輪荷重の通過前後において正負の逆転が顕著にみられた。

STEP1終了時(図-9(e,f,g,h))において、A-IのZひずみがSTEP1開始時より大きくなり、最大で150 μ 程度となった。STEP1の繰り返し载荷により、A-I付近の鉄筋において付着切れが発生し、Zひずみが増加したと考えられる。他の要素については、STEP1開始時より大きな変化はみられなかった。

STEP5終了時(図-9(i,j,k,l))では、STEP1終了時と比較して、A-IのZひずみの増加は顕著にみられ、最大600 μ 程度となった。さらにA-II, B-Iにおいても、Z

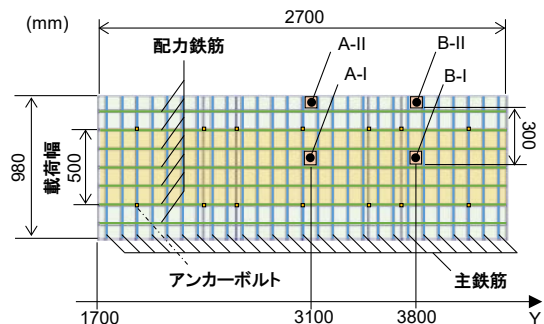


図-10 着目要素位置 (既設RC部)

ひずみの増加がみられ200 μ 近くなった。この原因の一つとして、A-Iで発生したZひずみが大きくなり、A-II, B-Iに進展したことが考えられる。この場合、水平ひび割れは発生した後、繰り返し载荷によるZひずみの増加に伴い、同じ平面内で進展すると考えられる。また、A-I, A-II, B-Iにおいて、Zひずみが最大となるの

は輪荷重が通過した後であった。このことから、Z ひずみは移動荷重により増加すると考えられる。

最後に STEP8 終了時 (図-9(m,n,o,p)) において、A-I、A-II、B-I における Z ひずみは、他のひずみより卓越して大きくなった。B-II における Z ひずみは、STEP5 終了時までと比べると、荷重通過後に最大となる移動荷重の影響がみられたが、大きさは 50μ 程度と小さいため、水平ひび割れの発生はなかったと言える。

4.2 下段鉄筋高さにおける鉛直ひずみの平面分布

4.1 節より水平ひび割れは、鉛直ひずみにより進展すると思われた。下段配力筋高さ平面における、既設 RC 部の鉛直ひずみコンターを図-11 に示す。荷重時期は STEP1,3,5,8 終了時であり、床版中央荷重時とした。

STEP1 終了時 (図-11(a)) では、 200μ 以下のひずみが点在した。中央位置のひずみは、4.1 節で述べたように、鉄筋の付着性状の影響であり、他の位置におけるひずみは、アンカーボルト位置と一致したため、その付着による引張ひずみだと考えられる。なお、アンカーボルトの埋込み長さは、下面かぶり厚と同じであり、実際より短くモデル化されたが、それに起因する鉛直ひずみは配力筋高さまでみられた。ただしモデル化長さにより、ひずみが発生する高さは変わると考える。

STEP3 終了時 (図-11(b)) では、ひずみはほぼ全域にみられ、中央位置で 200μ を超えるひずみがみられた。その位置を考慮すると、鉄筋やアンカーボルトが発生要因であると考えられる。

STEP5 終了時 (図-11(c)) には 200μ を超えるひずみ範囲が拡大した。主に STEP1 終了時にひずみがみられた中央位置とアンカーボルト位置において、 200μ を超えるひずみがみられた。鉄筋やアンカーボルトを起因にして発生した鉛直ひずみが、繰返し荷重により増加し、その発生範囲を広げたと考えられる。

STEP8 終了時 (図-11(d)) では、ほとんどの位置においてひずみが 200μ を超えたが、主鉄筋方向端部においては、ひずみの増加傾向がみられなかった。この原因として、鉄筋のモデル化手法の影響が考えられる。既設 RC 部の主鉄筋方向端部の配力鉄筋はソリッド要素でモデル化されていない (図-3)。つまり、配力鉄筋をソリッド要素によりモデル化した範囲でのみ、鉛直ひずみの増加がみられた。よって着目平面における鉛直ひずみの進展は、ソリッド要素でモデル化された鉄筋の中でも、主鉄筋より配力鉄筋の影響のほうが大きいと考えられる。

5. 活荷重実測データに基づく疲労解析

5.1 概要

次に、実道路橋床版が受ける交通荷重を想定した疲労解析を行った。実際の交通荷重は、疲労試験のように一定荷重ではなく、過積載車による過大荷重が疲労損傷の

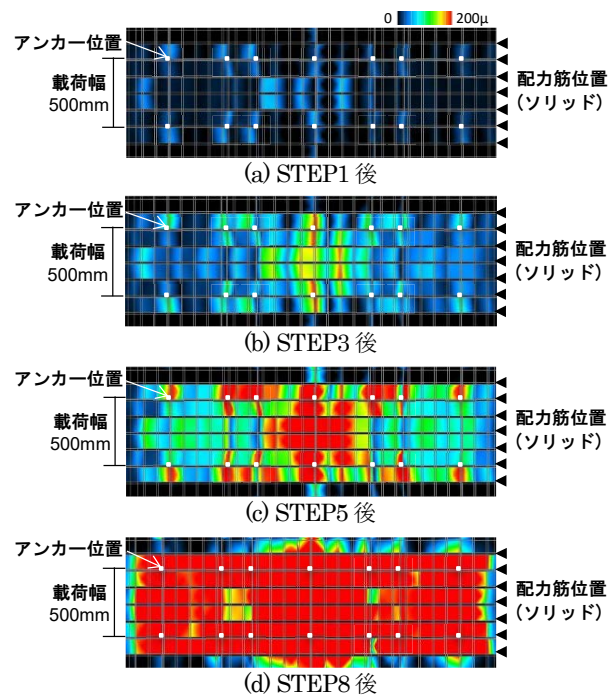


図-11 鉛直ひずみ平面コンター (配力筋高さ)

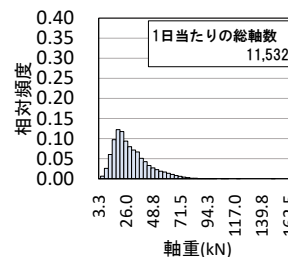


図-12 軸重頻度分布

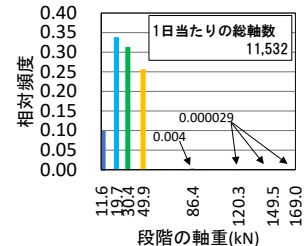


図-13 軸重の段階分け

進行に大きく影響を及ぼすという考えがある。本研究では過大荷重が特に水平ひび割れの発生および進展に与える影響について検討した。

5.2 解析条件

本解析で用いた軸重頻度分布 (1 日当たり) を図-12 に示す。この軸重頻度分布は、阪神高速道路の実態活荷重調査のデータであり、阪神高速道路内の集約料金所における軸重計から計測された。軸重単体の評価であり、軸重の連行の影響は考慮していない。本解析では、図-12 に示す全軸重を 8 段階に分けて評価した (図-13)。この時軸重が 100kN を超える過大荷重は、個別に評価し、一つの軸重段階とした。また荷重条件は、各軸重段階が頻度に応じた回数分、順に荷重する条件とした。図-13 は 1 日当たりの軸数を示すため、本解析ではそれを 5 年分の軸数 (1 日当たりの軸数 \times 365 日 \times 5 年) に換算し、5 年単位で荷重を実施した。

解析モデルは前述した鋼板接着 RC 床版をベースとする。ここでは、鋼板接着が下側水平ひび割れの発生要因であるか検討するため、無補強状態とした。また、コンクリートの特性値は既設部を新設部に合わせ (表-1)、供用開始後の状態をシミュレーションした。

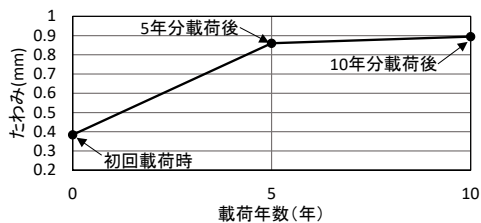


図-14 軸重 49.9kN におけるたわみ

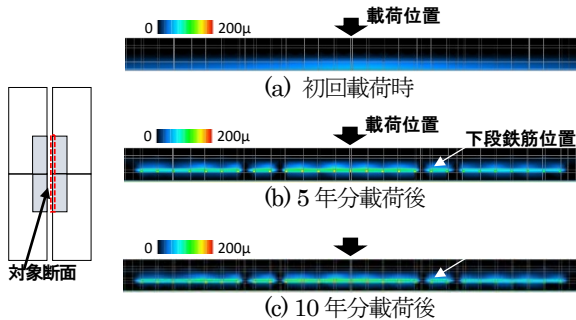


図-15 主鉄筋方向ひずみコンター

5.3 10年分の疲労解析結果

(1) 荷年数-たわみ関係

図-14 に荷年数とたわみ関係を示す。荷重は、軸重段階の荷重より 49.9kN とし、移動荷重を行った時の最大たわみを算出した。初回荷重時（疲労解析未実施の状態）のたわみは約 0.4mm であったことに対して、5年分荷重後は約 0.86mm、10年分荷重後は約 0.9mm であり 2 倍以上大きかった。これは過大荷重の影響だと考えられる。初回荷重時では過大荷重を受けていないため、たわみが比較的小さかった。また、5年分、10年分荷重後におけるたわみ差は、過大荷重を含む 5年分の総軸数差によって生じたと考えられるが、初回荷重時と 5年分荷重後におけるたわみ差より小さかった。理由として、一般的な RC 床版の疲労荷重試験において、初期のたわみ増加量は大きいことが挙げられるが、本解析では過大荷重がそれを促進させた可能性が考えられる。

(2) 配力鉄筋断面におけるひずみ分布

図-15 に配力鉄筋方向断面における、主鉄筋方向ひずみコンター算出結果を示す。図に示す範囲はソリッド要素による鉄筋モデル化範囲（前述した既設 RC 部と同範囲）である。荷重は 5.3(1)と同様に 49.9kN であり、コンターレベルの上限は、3.2(1)と同様に 200 μ とした。図-15(a)より初回荷重時において、ひずみは床版下面位置にみられたが、図-15(b,c)より 5年分、10年分荷重後においては、ひずみは下段鉄筋位置に集中した。これは、3章に示したひずみ分布（図-7(b)）と同様の傾向であり、実荷重下でも疲労によって下段鉄筋位置に水平ひび割れが発生する可能性が考えられる。しかし、既往研究⁴⁾で報告されるような上段鉄筋位置の水平ひび割れが発生する傾向はみられなかった。よって、上段鉄筋位置における水平ひび割れの発生には、繰返し移動荷重以外に他の要因があると推察した。

6. まとめ

本研究は、鋼板接着 RC 床版の剥離状態における輪荷重試験の再現解析や、無補強状態の RC 床版の活荷重実測データに基づく疲労解析を実施し、以下の結果を得た。

- (1) 鋼板接着 RC 床版の再現解析では、繰返し移動荷重により、水平ひび割れに相当する主鉄筋方向のひずみや、鉄筋の付着切れやアンカーボルトを起因とした鉛直方向のひずみが、下段鉄筋位置に発生した。
- (2) 鋼板接着 RC 床版において、繰返し移動荷重により鉛直方向のひずみが発生し、ソリッド要素でモデル化された配力鉄筋間にて、ひずみ発生範囲が拡大したことから、水平ひび割れの進展が推察された。
- (3) 無補強状態の RC 床版を対象に、実態活荷重に基づく疲労解析を行った結果、下段鉄筋位置に水平ひび割れが発生する可能性が考えられた。

参考文献

- 1) 堀川都志雄, 加藤暢彦, 吉川紀, 山口良弘, 園田恵一郎: 鋼板接着工法で補強されたひび割れ損傷 RC 床版の耐久性について, 構造工学論文集, Vol.44A, pp1038-1094, 1998.
- 2) 前川敬彦, 久利良夫, 佐々木一則, 飛ヶ谷明人, 青木康素: 鋼板接着補強 RC 床版の維持管理に関する検討, 第七回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp13-18, 2012.
- 3) 佐野正, 山下幸生, 松井繁之, 堀川都志雄, 久利良夫, 新名勉: 浮きを有する鋼板接着補強 RC 床版の疲労耐久性および樹脂再注入の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.1, pp27-38, 2011.
- 4) 一色智彦, 鈴木真, 藤原理絵, 鎌田敏郎: 供用中の鋼板接着補強 RC 床版における弾性波による内部損傷の非破壊調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp1309-1314, 2018.
- 5) 横山広, 浦修造, 関口幹夫, 堀川都志雄: 床版の劣化現象および床版補強工法に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp451-456, 2010.
- 6) K. Maekawa, E. Gebreyouhannes, T. Mishima, X. An: Three-Dimensional Fatigue Simulation of RC Slabs under Traveling Wheel-Type Loads, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 3, pp445-457, 2006.
- 7) 藤山知加子, 櫻井信彰, 前川宏一: 鋼コンクリート境界目特性とリブ諸元が合成床版疲労損傷機構に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.1, pp193-206, 2011.
- 8) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2008.
- 9) 南波謙太, 藤山知加子, 新名勉: 接合要素を用いた異形鉄筋とコンクリート間の付着特性再現性の検討, 土木学会第73回年次学術講演会概要集 V, 2018.

(2018年7月20日受付)