斜角を有する鈑桁橋RC床版の鉄筋腐食による疲労耐久性の解析的検討

房　　捷[*1]　　米田大樹[*1]
高橋佑弥[*2]　　石田哲也[*2]

要　　旨

斜角を有する鈑桁橋RC床版は，鉄筋腐食により，偏載等に起因する疲労損傷が加速することが懸念される．本検討では，鈑桁橋RC床版に異なる斜角と鉄筋腐食率（以下、腐食率という）の条件を設定し，解析的に輪荷重作用下における疲労耐久性を評価した．その結果，鉄筋腐食の進行により床版内部に水平ひび割れが発生し，腐食率が大きいほど床版たわみの増大と床版端部ひずみの進展が顕著となり，疲労余寿命が大幅に低下した．また，斜角が鋭い橋梁ほど腐食によるひび割れが顕著で，疲労余寿命の低下も大きかった．以上より，補修・補強の優先度や疲労余寿命の定量的把握に有用な知見が得られた．

キーワード　RC床版／斜角／腐食／疲労／非線形解析／三次元有限要素法

目　　次

1．はじめに
2．解析モデルおよび解析条件
3．コンクリートと鉄筋腐食に関する構成則
4．解析結果
5．まとめ
6．参考文献

ANALYTICAL EVALUATION OF FATIGUE DURABILITY IN CORRODED RC SLABS OF SKEWED PLATE GIRDER BRIDGES

Jie　FANG　　Taiju　YONEDA
Yuya　TAKAHASHI　　Tetsuya　ISHIDA

Skewed plate girder bridge with RC slabs are vulnerable to corrosion damage and fatigue deterioration induced by eccentric wheel loading. In this study, an analytical investigation was conducted to evaluate the fatigue performance of RC bridge slabs subjected to wheel loading under various skew angles and reinforcement-corrosion conditions. The analytical results showed that reinforcement corrosion caused the development of horizontal cracks within the slab, while increasing corrosion levels significantly increased slab deflection and strain concentration near the slab edges, leading to a substantial reduction in the remaining fatigue life. In addition, slabs with smaller skew angles exhibited more severe corrosion-induced cracking and a more pronounced decrease in fatigue life. The findings contribute to the identification of critical locations requiring priority repair or strengthening and provide a quantitative basis for assessing the remaining fatigue life of deteriorated RC bridge slabs.

＊１本店　ICI テクノロジーセンター土木構造グループ
＊２東京大学大学院　工学系研究科社会基盤学専攻

1. はじめに

国内の道路橋では，建設後 50 年以上を経過する構造物が急増し，老朽化に伴う安全性低下が深刻な課題となっている．これまでの研究により，RC 床版では短期間で突発的な抜け落ちに至る「土砂化」の劣化メカニズムが明らかにされてきた．特に滞水が生じる床版では，土砂化が早期に進行して急激な耐荷力低下を招くことが解析的に示されている [1),2),3)]．実務においても防水工の重要性が広く認識されており，耐久性向上と維持管理費縮減の観点から，予防的既設床版に対しての防水工の施工が近年積極的に進められている．しかし，防水工は主として新たな水分・塩分供給を抑制する対策であり，防水工施工時点で床版内部に既に生じている鉄筋腐食，腐食膨張による床版内部水平ひび割れ，付着劣化等を直接回復させるものではない．

また，点検記録によると，RC 床版では依然としてひび割れおよび鉄筋腐食が主要な劣化要因として多数確認されている．鉄筋腐食は床版耐荷力の低下を招き，劣化が進行すれば大規模な床版更新が必要となるため，維持管理上の重要な課題である．従来の研究 [4),5),6),7)]では，腐食や疲労を扱った検討の多くが単純な梁や平板などの試験体による評価にとどまっており，実橋梁と比較して部材サイズ，構造形状，拘束条件が大きく異なる．そのため，これらの結果を実橋梁へ直接適用することには限界があることが既往の研究 [8)]から指摘した．特に実橋梁では，多主桁構造，斜角構造，支点条件などが複雑に組み合わさるため，応力状態や劣化進行メカニズムが試験体とは異なる可能性が高く，より実構造に即した検討が求められている [2)]．

中でも，斜角を有する鈑桁橋では，直線橋に比べて偏載によるねじりと応力集中が生じやすく，疲労が進行しやすいことが指摘されている [8)]．このような構造で鉄筋腐食が発生した場合，耐荷力や疲労耐久性が直線橋より早期に低下する懸念がある．しかし，斜角構造と腐食を同時に考慮した詳細な解析検討はこれまで行われていない．

合理的な維持管理計画を立案するうえでは，鉄筋腐食進行を考慮した RC 床版の疲労余寿命を定量的に評価する手法の確立が重要である．本検討では，複数の斜橋のフルスケールモデルを対象に，異なる腐食率を導入した RC 床版の疲労耐久性を非線形解析により評価した．斜角および鉄筋腐食が床版の構造挙動に及ぼす影響を明らかにし，維持管理方針や補修優先度の検討に資する基礎的知見の取得を目的とした．

2. 解析モデルおよび解析条件

2.1 解析モデルの概要

本検討では，**図-1** に示す鋼桁と RC 床版から構成される実橋を対象とし，構造解析のためのフルスケール三次元モデルを構築した．本対象橋梁は，全長 28.5 m，幅員 11.5 m，床版厚 20 cm，斜角 60°を有する鈑桁橋である．モデルの作成は，Gmsh の Python API を用いた [9)]．また，既往研究 [10)]で構築したパラメトリック三次元モデル生成システムを用い，橋長や桁数などの設計パラメータを JSON ファイルで指定することで，三次元フルスケールモデルを自動生成した．本システムにより，従来の市販ソフトウェアを用いたモデル作成と比較して，モデル作成時間を約 90%削減している [10)]．**図-2** に示す対象橋梁の解析モデルは，節点数約 73,000，要素数約 51,000 の規模である．

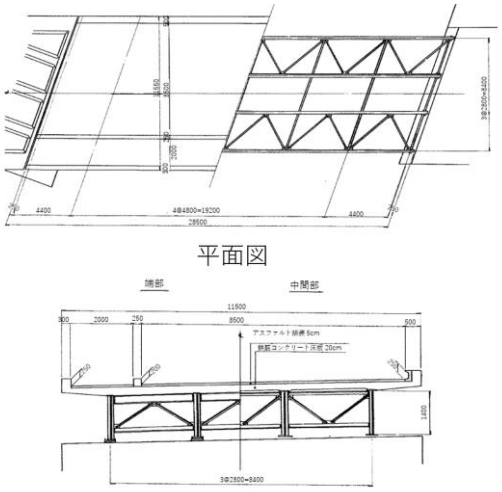


図-1 橋梁設計図
（上：平面図　下：端部および中間部の断面図）

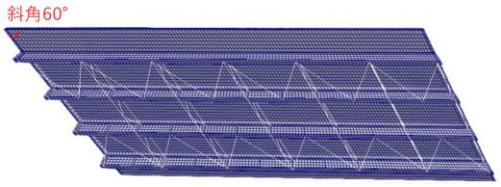


図-2 モデルの様子

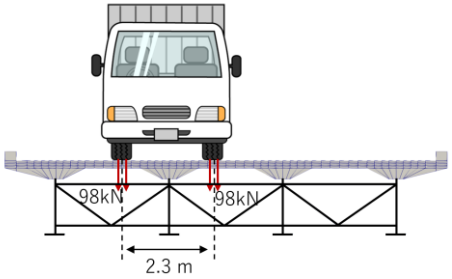


図-3 輪荷重の概念図

2.2 荷重条件および材料特性

輪荷重については，**図-3** に示すようにトラックが橋梁上を走行する状況を想定し，走行速度を 60 km/h，左右輪の載荷間隔を 2.3 m と設定した．斜橋と直線橋の鉄筋が腐食したときの疲労特性を比較するため，既往の文献 [10)]を参考に安全側かつ計算時間を考慮して前後左右 4 輪に分

割せずに左右 2 輪のみをモデル化し，それぞれに 98 kN（9.8 t 相当）の荷重が作用する比較的簡易な条件を採用した．本条件は実交通を厳密に再現するものではなく，斜角および腐食率の違いによる床版応答を同一荷重条件下で相対比較するための簡略化条件である．また，本解析で輪荷重の載荷位置は，橋梁設計図に基づき車道範囲を想定したうえで，1 レーン載荷で，一方の輪荷重が主桁間中央付近となるよう，床版の応答が比較的大きくなる位置に設定した．実際には，疲労損傷の進行には車両交通量，車種・車両重量，車線位置，走行速度，タイヤ数など多くの要因が影響することが知られている．これらの要因の影響評価については，今後の課題としてより詳細な検討を行う必要がある．解析に用いた主要な材料特性値を**表-1** に示す．

表-1　解析材料特性値

コンクリートヤング率(N/mm^2)	34300
コンクリート強度(N/mm^2)	40.0（圧縮） 2.7（引張）
鉄筋ヤング率(N/mm^2)	205800
鉄筋降伏強度(N/mm^2)	345

表-2　解析ケース

	斜角	腐食率
ケース 1	60°	0.0%
ケース 2	60°	0.5%
ケース 3	60°	1.0%
ケース 4	75°	0.5%
ケース 5	90°	0.5%

2.3 解析ケース

本検討では，斜角および腐食率の違いが疲労挙動に及ぼす影響を評価するため，**表-2** に示す 5 種類の解析を実施した．まず，**図-2** に示した基本となる斜角 60°の橋梁モデルに対し，床版全域の腐食率を 0.0%，0.5%，1.0%の 3 段階で設定し，腐食進行が疲労耐久性に与える影響を検討した．床版全域の鉄筋に 0.5% の腐食が生じた場合，鉄筋断面積の低下は構造耐力への直接的な影響が小さいものの，腐食生成物の膨張により 微細なひび割れが発生し始める段階と考えられる．一方，1.0% の腐食率に達すると，腐食生成物の体積膨張がより顕著となり，かぶりコンクリートの割裂ひび割れ，浮きが生じやすい劣化段階に入る．

さらに，床版全域の腐食率を 0.5%に固定した条件のもと，斜角 75°および直線橋に相当する 90°（直線橋）のモデルについて同様の解析を行い，斜角の変化による疲労特性の違いを比較した．これにより，腐食の進行と斜角の組み合わせが RC 床版の疲労余寿命に及ぼす相互の影響を評価できるようにした．解析の手順としては，自重，腐食，輪荷重の順に導入した．

本検討では，床版全域に同一腐食率を導入することで，腐食率および斜角の違いによる床版全域の力学的応答を統一的に比較することを主眼とした．特に，既存鉄筋腐食が，輪荷重疲労下の RC 床版のたわみ進展，ひずみ集中および疲労余寿命に及ぼす影響を俯瞰的に把握することを目的とした．

3. コンクリートと鉄筋腐食に関する構成則

本検討の解析には，ひび割れを有するコンクリートの挙動を高精度に表現できるマルチスケール統合解析システム（COM3）[11]を用いた．本システムには，各種 RC 構造の構成則が実装されており，ひび割れ開口方向の正応力伝達機構，ひび割れ面に沿ったせん断伝達，鉄筋とコンクリート間の付着特性，さらにひび割れ位置における

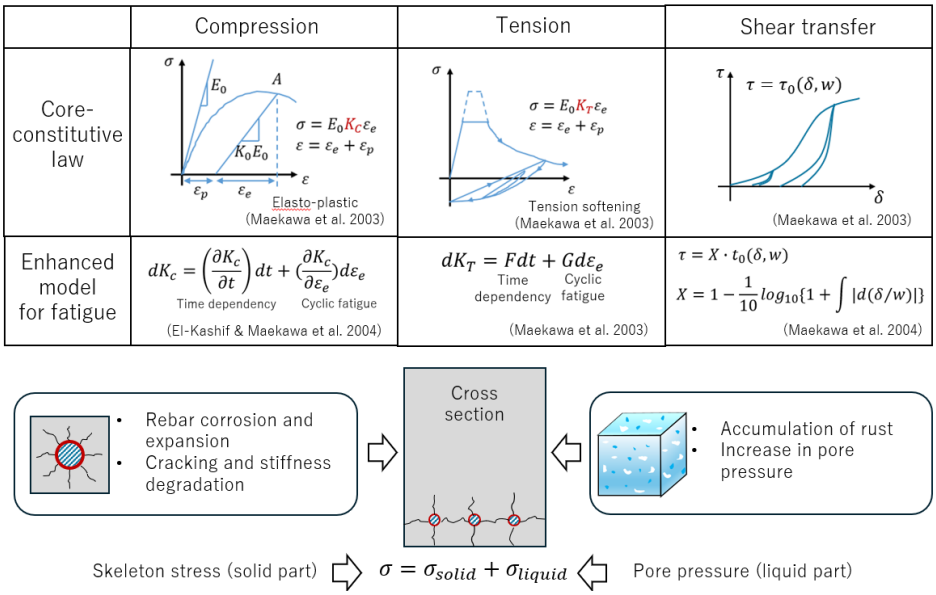


図-4　解析モデルにおけるコンクリートと鉄筋腐食に関する構成則 [11),12)]

鉄筋の塑性局所化などが，有限要素法の平均ひずみ-平均応力関係として統合されている（**図-4**）．これらの構成則をひずみ経路に沿って積分することで，応力状態と塑性損傷の進行を直接評価することが可能である．疲労損傷を考慮したモデルも導入され，圧縮，引張，せん断それぞれに対し，高サイクル疲労に伴う損傷進行を表現できる．繰返し載荷により塑性変形が蓄積するとともに，内部微細ひび割れの発達により弾性剛性が徐々に低下する．この挙動は圧縮領域では破壊パラメータの低下として，鉄筋とコンクリートの付着劣化は引張側の損傷として反映される．また，ひび割れ面に沿ったせん断応力伝達モデルには，繰返し回数に応じてせん断抵抗が低下する微細損傷項が組み込まれている．これらの疲労モデルの妥当性は，既往研究[2,3]において検証されている．

鉄筋腐食によって生じる腐食生成物は，固相と液相の混相として考慮されている[12]．腐食生成物のうちの固相分は鉄筋周囲で膨張圧を発生させ，コンクリートに応力を与える．一方，液相分はひび割れや細孔へ移動し，内部に等方的な圧力を生じさせる．本検討で用いる計算モデルでは，固相腐食生成物による骨格応力と，液相生成物の移動によって生じる細孔圧の両方を混相として考慮し，腐食の進行とその力学的影響を評価することが可能である．また，本検討で用いた腐食・疲労連成モデルは，既往研究[13]において腐食 RC 梁へ適用され，実験結果との比較により妥当性が検証されている．一方，腐食した実橋規模の RC 床版を対象として，腐食進行から輪荷重疲労に至る一連の挙動を実験結果と直接比較した検証例は限定的である．このため，本研究では疲労余寿命の絶対値を実橋の寿命予測値として扱うのではなく，同一の解析条件下で腐食率および斜角を変化させた場合の，相対たわみ，最大主ひずみ，損傷集中位置および限界輪荷重サイクル数の相対的な変化に着目して評価した．

4. 解析結果

4.1 腐食率による影響

図-5 に腐食率の異なる条件における床版中央断面の鉛直ひずみ分布を示す．腐食率が 0.5%に達した場合，最大ひずみは床版底面よりも内部で大きく，内部で水平ひび割れが発生している可能性が示唆される．内部に生じた水平ひび割れは床版の一体性を低下させ，曲げ剛性とねじり剛性の低下によって，たわみが増加する要因となる．たわみの解析結果（**図-6**）では，腐食率の増加に伴い全サイクル域で相対たわみが増大した．床版の相対たわみは，輪荷重位置における床版底面の絶対たわみ（全体たわみ）と，両側主桁の平均たわみとの差として算出される．現場計測において曲げ変形が最大となる橋軸方向中央断面で計測することが一般的であることなどを踏まえ，解析においても同中央断面におけるたわみ値を抽出した．腐食率 0.0% → 0.5% → 1.0%と進行するにつれて，同一

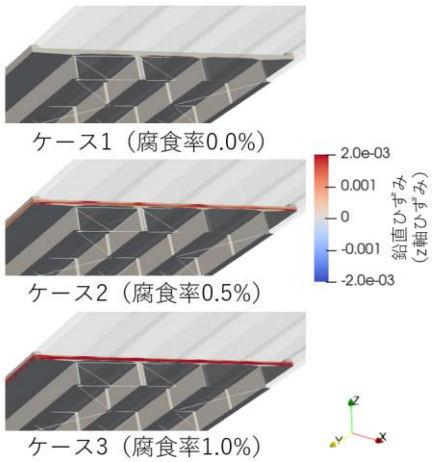


図-5 腐食導入後の橋梁中央断面の鉛直ひずみ分布

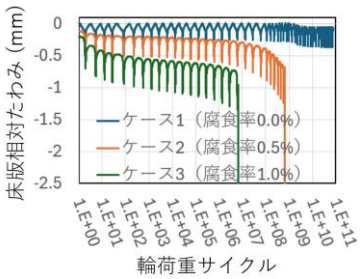


図-6 異なる腐食率における床版相対たわみの進展

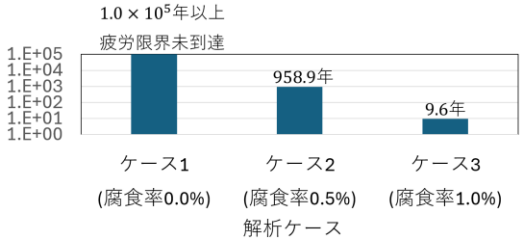


図-7 各腐食率において等価大型車交通量を用いて算出した疲労余寿命

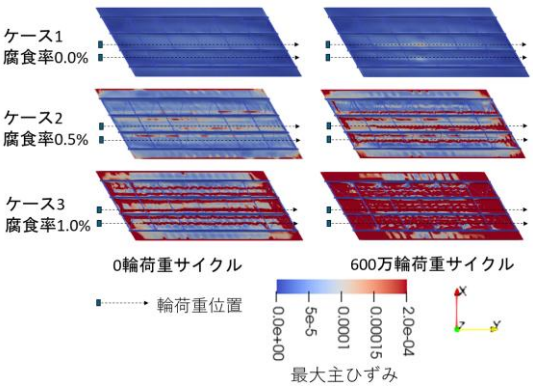


図-8 輪荷重載荷前後の異なる腐食率における最大主ひずみ分布
（各腐食率，左：腐食導入後（0 サイクル時），右：600 万サイクル時）

サイクル時点のたわみ値が段階的に大きくなり，限界輪荷重サイクル数は大きく減少する傾向が確認された．ケース 1 は 1.0×10^{11} 回の輪荷重サイクルでも疲労限界に到達せず，腐食率 0.5%では健全の場合より少なくとも疲労余寿命が 2 オーダー低下し，1.0%ではさらに 2 オーダー低下した．腐食率が 0.5%から 1.0%に増加すると疲労余寿命が大幅に短縮されたことから，鉄筋腐食を抑制する早期の予防保全が重要である．

図-6 に示す輪荷重サイクル解析結果より疲労余寿命を評価した．疲労余寿命年数は，限界輪荷重サイクル数を 20 トン車換算の等価大型車交通量（2,000 台/日）および 365 日で除することで算定した．また，疲労限界は既往研究に基づき，活荷重たわみが初期値の 3 倍に達した時点とした [2]．**図-7** に示すように，腐食率 0.5%の場合には，計算上では十分な疲労余寿命（約 950 年）を有することが確認された．一方，腐食率 1.0%の場合には，前述のとおり，疲労余寿命は腐食率 0.5%の場合と比較して 2 オーダー程度低下し，数年規模にまで短縮される．したがって，本解析条件では腐食率が 1.0%程度に達した段階では，数年規模まで疲労余寿命が短縮される結果となり，床版更新を含む抜本的対策を早期に検討する必要性が示された．

図-8 に，輪荷重載荷前後における各腐食率の床版下面の最大主ひずみ分布を示す．輪荷重疲労に伴う曲げ損傷の進展，床版剛性の低下，および損傷集中箇所を把握するため，床版下面の最大主ひずみに着目した．床版下面の最大主ひずみは，土砂化や抜け落ちを評価する指標ではなく，腐食を有する RC 床版が輪荷重疲労を受けた際の損傷進展傾向を比較するための評価指標である．腐食率の増加に伴い，床版下面に生じるひずみレベルは全体的に増大し，劣化がより早く進行する傾向が確認できる．特に腐食率 1.0%の場合，600 万サイクル時点では端部を中心にひずみの増大が顕著であり，腐食が進行するほど端部での損傷が加速することが示されている．このことから，腐食が進行した床版では端部が弱点となる可能性があり，点検や補修において端部の状態を重点的に確認する必要があると考えられる．

4.2 斜角による影響

斜橋では，曲げモーメントに加えてねじりの影響が作用する．**図-9** に示すように，斜角 60°および 75°の橋梁では，腐食率 0.5%導入時点で床版に顕著なねじり変形が発生しており，特に，中央部に位置する鉛直変位の大きい領域（青色部）は変形の卓越箇所であり，床版の変位分布は左右非対称となる傾向が確認された．一方，直線橋（斜角 90°）では曲げ変形が支配的であり，ねじり成分はほとんど認められない．既往研究によれば，初期応力状態は腐食ひび割れの発生位置や規模に大きく影響する [14]．斜橋では，(1) 主桁間のねじり作用が増大し，(2) 横桁が斜めに配置されることによりせん断応力が増加するため，

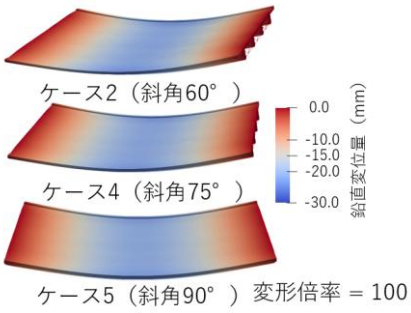


図-9 鉄筋腐食導入後の異なる斜角における鉛直変位量（腐食率 0.5%）

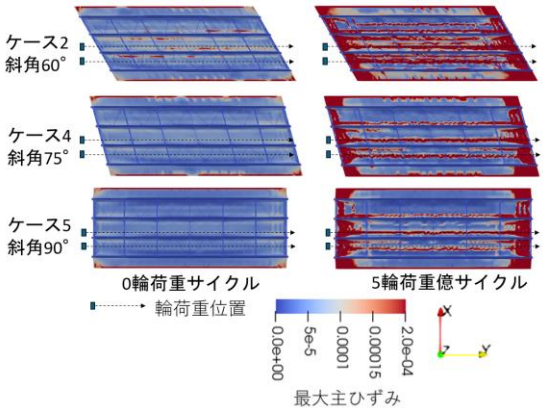


図-10 輪荷重載荷前後の異なる斜角における最大主ひずみ分布
（腐食率 0.5%，左：腐食導入後（0 サイクル時），右：5 億サイクル時）

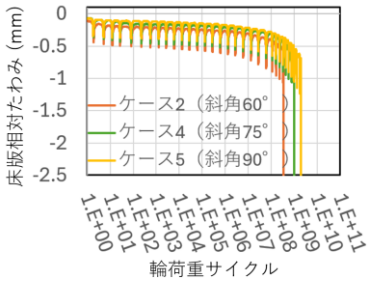


図-11 異なる斜角における床版相対たわみの進展（腐食率 0.5%）

床版に生じる初期応力が相対的に大きくなる [8]．この結果，腐食膨張に対する抵抗が低下し，腐食導入後のひずみが増大したと考えられる．**図-10 左**は，腐食導入後の異なる斜角条件における床版底面の最大主ひずみ分布である．斜角が鋭いほどねじり作用の影響が増大するため，床版に生じるひずみが大きくなり，腐食によるひび割れが進行しやすい傾向が確認できた．

図-11 に，同一の腐食率条件下（本検討では 0.5%）で斜角を 60°，75°，90°（直線橋）とした場合の床版相対たわみを示す．各輪荷重サイクルにおける相対たわみは，斜角 60°が最大であり，続いて 75°，直線橋（90°）の順番となった．たわみの進展についても同様の傾向が確認された．これは，前述のように斜角が鋭くなるほどねじり

作用が強まり，床版の有効剛性が低下して繰返し載荷に対する応答が増幅されることで，損傷が早期に蓄積するためと考えられる．また，今回は腐食率および斜角の違いによる床版全域の剛性低下および疲労損傷の進展傾向を統一的に比較するため，中央断面の相対たわみに着目した．一方で，端部損傷をより定量的に評価するには，端部のひずみや局所変形などの指標を用いる必要があり，今後の課題である．

5 億サイクル時の最大主ひずみ分布を**図-10 右**に示す．斜角が鋭いほど，ねじりの影響が強く，ひずみの進展が早い結果となった．また，下面では端部近傍を起点として高ひずみ領域が形成され，拡大する傾向が確認された．直線橋でもこの傾向は同様であった．端部は斜角の有無にかかわらず疲労損傷が先行しやすい領域であり，この結果から点検時には端部の状態確認を優先すべきであるとも考えられる．なお，本検討では床版全域の鉄筋に同一腐食率を導入しており，排水部，伸縮装置近傍などに生じる局所腐食を考慮したものではないが，一様腐食条件下においても，斜角が鋭いほど端部付近でひずみ進展が先行する傾向が確認された．この結果は，端部が斜角に起因するねじり作用や応力集中により，疲労損傷が集中しやすい力学的弱点となり得ることを示している．

4.3 考察

本解析では，腐食率の増加に伴い，床版内部における水平ひび割れの発生，床版相対たわみの増大および疲労余寿命の低下が確認された．これは，鉄筋断面積の減少による影響に加え，腐食生成物の膨張に伴う内部ひび割れの発生によって，床版の一体性ならびに曲げ・ねじり剛性が低下したためと考えられる．

また，斜橋では，偏載に伴うねじり作用や応力集中に加え，横桁の斜め配置によるせん断応力の増加が生じる．このため，直線橋と同程度の腐食率であっても，腐食膨張によるひび割れと輪荷重による疲労損傷が複合し，床版の損傷が加速する可能性がある．

さらに，本解析結果は，床版端部が斜角に起因するねじり作用や応力集中の影響を受けやすく，疲労損傷が集中する力学的な弱点となり得ることを示している．したがって，実橋の点検では，床版中央部だけでなく，端部，伸縮装置近傍および漏水が生じやすい箇所について，ひび割れや鉄筋腐食の状態を重点的に確認することが重要と考えられる．

一方，本検討で算定した疲労余寿命は，一定の等価大型車交通量，輪荷重条件および一様な腐食率を仮定した解析結果である．実橋への適用にあたっては，車両交通量，車両重量，走行位置，腐食分布，既存ひび割れ，漏水および土砂化などの影響を考慮する必要がある．

今後は，排水部，伸縮装置近傍および鉄筋継手部などに生じる局所的な腐食をモデル化するとともに，実橋の損傷状態と交通条件を反映した感度分析を行い，本解析手法の適用性を検討する必要がある．

5. まとめ

本検討では，斜角および腐食率の異なる鈑桁橋 RC 床版を対象として，腐食と輪荷重疲労を考慮した非線形解析を実施した．得られた主要な知見を以下に示す．

1. 腐食率の増加に伴い，床版内部の水平ひび割れ，床版相対たわみおよび床版下面の最大主ひずみが増大した．
2. 斜角 60° の解析では，腐食率の増加に伴って限界輪荷重サイクル数が減少し，腐食率 1.0%では疲労余寿命が大幅に短縮された．
3. 腐食率 0.5%の条件では，斜角が鋭いほど床版相対たわみおよび最大主ひずみが大きくなり，疲労損傷の進展が早くなる傾向が確認された．
4. 斜角および腐食率によらず床版端部でひずみが増大する傾向がみられ，特に鋭角な斜橋では端部における損傷の進展が顕著であった．

以上より，鉄筋腐食と斜角の組合せが RC 床版の疲労耐久性に大きく影響することを解析的に示した．

参考文献

1) Fathalla, E., Tanaka, Y. and Maekawa, K.: Fatigue life of RC bridge decks affected by non-uniformly dispersed stagnant water, Applied Sciences, Vol. 9, No. 3, Article No. 607, 2019.
2) Fang, J., et al.: Full-scale fatigue simulation of the deterioration mechanism of reinforced concrete road bridge slabs under dry and wet conditions, Engineering Structures, Vol. 245, Article No. 112988, 2021.
3) Takahashi, Y., Furukawa, T., Fang, J., Ishida, T. and Tsuchiya, S.: Full-scale fatigue simulations for reinforced concrete bridge slabs with multi-scale FEM system with solid-liquid two-phase model, IABSE Reports, Vol. 118, pp. 1668-1675, 2022.
4) Yang, D.-H., Yi, T.-H. and Li, H.-N.: Coupled fatigue corrosion failure analysis and performance assessment of RC bridge deck slabs, Journal of Bridge Engineering, Vol. 22, No. 10, Article No. 04017077, 2017.
5) Sun, J., Ding, Z. and Huang, Q.: Corrosion fatigue life prediction for steel bar in concrete based on fatigue crack propagation and equivalent initial flaw size, Construction and Building Materials, Vol. 195, pp. 208-217, 2019.
6) Xiang, D., et al.: Fatigue behavior and failure mechanism of steel-concrete composite deck slabs with

perforated ribs, Engineering Structures, Vol. 250, Article No. 113410, 2022.

7) Song, L. and Yu, Z.: Fatigue performance of corroded reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets, Construction and Building Materials, Vol. 90, pp. 99-109, 2015.

8) 房捷，米田大樹，高橋佑弥，石田哲也：斜角を有する橋梁 RC 床版の応力分布と疲労耐久性に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 47，No.2，pp. 139-144，2025.

9) Geuzaine, C. and Remacle, J.-F.: Gmsh: A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 79, No. 11, pp. 1309-1331, 2009.

10) Yoneda, T., Fang, J., Otani, H., Tsuchiya, S., Oishi, S. and Ishida, T.: Development of a 3D finite-element modelling generation system based on data processing platform and fatigue analysis of full-scale reinforced-concrete bridge, IABSE Reports, Vol. 118, pp. 415-422, 2022.

11) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: Non-linear Mechanics of Reinforced Concrete, CRC Press, 2003.

12) Toongoenthong, K. and Maekawa, K.: Simulation of coupled corrosive product formation, migration into crack and propagation in reinforced concrete sections, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 3, No. 2, pp. 253-265, 2005.

13) Tanaka, Y., Takahashi, Y. and Maekawa, K.: Computational fatigue life assessment of corroded reinforced concrete beams, Proceedings of CONCREEP 10, pp. 1308-1315, 2015.

14) Zeng, B., et al.: Corrosion-induced cracking pattern analysis of RC beam under sustained load considering the poromechanical characteristics of corrosion products, Buildings, Vol. 12, No. 12, Article No. 2256, 2022.