

論文

経路依存性を考慮した数値解析に基づく鋼板接着補強床版の疲労寿命分析

平塚慶達*, 藤山知加子**, 前川宏一***

* ショーボンド建設 (株), 技術本部 (〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町 7-8)

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

*** 工博, 東京大学大学院教授, 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

本稿は鋼板接着補強された既存 RC 床版の再劣化機構について考察したものである。直接経路積分型の非線形有限要素解析を系統的に実施し、湿潤環境条件や床版内の鉄筋腐食が、補強床版の疲労耐久性に与える影響について分析を行った。また鋼板と本体との接着不良域（浮き）の位置をパラメータとして、湿潤環境条件と鋼材の腐食の相互作用にも着目し、補強床版の再劣化過程に重要な因子を定量的に推定した。その結果、鋼板によって補強された床版の再劣化に与える影響に対して、鋼材自身の腐食の影響が大きいことを示した。

キーワード：鋼板接着，鋼板の浮き，湿潤環境下の移動載荷，鉄筋腐食

1. はじめに

道路橋設計基準の変遷に伴って多数生じた既存不適格の道路橋 RC 床版に対し、抜本的な補強対策として多数適用されてきた鋼板接着補強工法は、施工時からの経年に伴い補強部材の再劣化が生じてきている。中でも補強床版自体が抜け落ちに至った例もあり¹⁾、補強床版の再劣化過程の把握と現状の評価手法の開発は急務である。しかし、鋼板接着工法をはじめとした補強工法については補強効果の評価試験を除くと、再劣化過程に関する研究は極めて少ない。補強鋼板の浮きに着目した試験事例²⁾と、著者らによる解析事例³⁾⁴⁾が数例存在する以外には、体系的な実験と解析の両者を取りまとめた検討は、著者らの知る範囲では見当たらなかった。

本稿では補強鋼板の浮き以外にも補強床版の疲労寿命に影響を与える劣化因子として湿潤環境、即ち水の影響と床版内の鉄筋腐食に着目した。これらの劣化因子に加えて、補強鋼板に浮きが生じた場合の相互作用にも着目し、これらの影響については、水と腐食に対する単独での適用性や疲労強度の低下、損傷機構を経路積分により説明できる三次元有限要素解析 COM3D⁴⁾⁵⁾⁶⁾を用いて、複合劣化について疲労寿命を評価することを試みた。

2. 解析概要

対象とした床版は、昭和 39 年鋼道路橋設計示方書に従って設計されたスパン 2500mm、橋軸方向 3500mm、橋軸直角方向 2800mm、厚さ 160mm のハンチ付き RC 床版

である。解析に用いたモデルを図-1 に示す。走行面で二分割した対称モデルとし、8 節点アイソパラメトリック要素を用いた。主桁上フランジも全て三次元個体要素

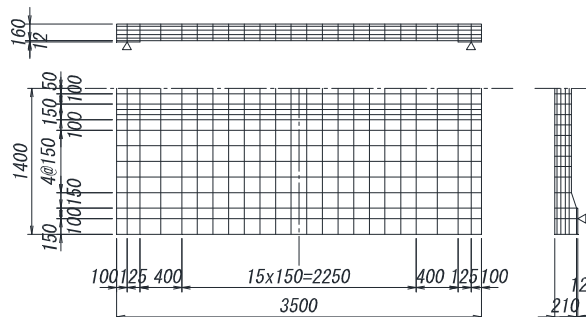


図-1 解析モデル (単位 : mm)

表-1 解析に用いた材料特性

材料	弾性係数 (N/mm ²)	特性値
コンクリート	2.1×10 ⁴	圧縮強度 25.5N/mm ² 引張強度 1.8N/mm ²
鉄筋	2.1×10 ⁵	降伏点 355.0N/mm ²
エポキシ樹脂	1.5×10 ³	付着強度 1.8N/mm ² せん断強度 10.0N/mm ²
補強鋼板	2.1×10 ⁵	降伏点 245.0N/mm ²

表-2 解析に用いた配筋

配筋	主鉄筋	配力筋
上面	D16 ctc300 相当	D10 ctc300 相当
下面	D16 ctc150 相当	D13 ctc300 相当

でモデル化した。表-1,2に解析に用いた条件を示す。鉄筋はRC要素でモデル化し、荷重は直接節点に作用させた。解析におけるタイヤの接地面積は試験による載荷面積を考慮して幅300mm×長さ450mmとした。

鋼板接着工法による補強を施す場合、乾燥収縮および無補強状態での載荷でコンクリート部に導入されたひび割れにもエポキシ樹脂が注入、充填されることが確認されている。数値解析では、鋼-コンクリートの付着強度発現のみならず、注入時に各要素の残留ひずみを維持した状態で引張強度と剛性を回復させることで注入を模擬した。床版下面から注入されることを想定し、引張側のコンクリートについてのみ、剛性を数値解析の中で回復させることとした。

3. 湿潤環境下における床版の挙動

3.1 RC床版の挙動

水が床版の疲労寿命に与える影響が大きいことが既往の研究で報告されており⁷⁾、その力学機構も解明されつつある^{5,8)}。本稿ではまず無補強のRC床版について、乾燥状態と湿潤状態について、ひび割れ中にある凝縮水の運動も考慮した Poro-mechanics に立脚する非線形疲労解析でたわみの挙動の推移を確認した。本稿ではゴムタイヤ式の輪荷重走行試験における移動速度3km/hrと、実橋を想定した30km/hr、高速走行する場合の90km/hrで、疲労寿命の差に着目した。移動載荷試験では乾燥収縮が試験結果に及ぼす影響が大きく、養生時の環境条件によって大きく結果が異なると想定されるが⁹⁾、今回は標準的な収縮量を載荷前に与えることとし、載荷中の乾燥収縮は考慮しないこととした。図-2に結果を示す。

輪荷重載荷によりひび割れが開き、ひび割れ内に凝縮水が取り込まれる。除荷時には粘性を有する水分がひび割れの閉塞を阻害する。引張側コンクリートは水が存在していても内在水圧(負圧)は大気圧以下にはなり得ず、構造応答を左右するレベルにまでは達しない。一方でひび割れ閉塞時には、ひび割れ内の水分は圧縮を受ける。ひび割れ閉塞が早い程、高圧を呈するため、ひび割れの閉塞が遅れる。その結果、ひび割れ面に沿ったせん断伝達剛性が低下し、大きなひずみ振幅が形成される。結果として、載荷速度が大きくなれば疲労寿命が、解析上、低下する。

3.2 補強床版の挙動

補強された床版では、床版の静的な耐力が補強前のそれと大きく異なること、中立軸の位置も異なることから、同じ荷重が作用しても、補強前後で各部位の応力状態は異なる。ひび割れ開閉量も異なるため、無補強のRC床版と異なる疲労挙動を示すと考えられる。

図-3に湿潤環境下の補強床版のたわみを示す。1桁程度の疲労寿命の低下は認められるものの、RC床版に比

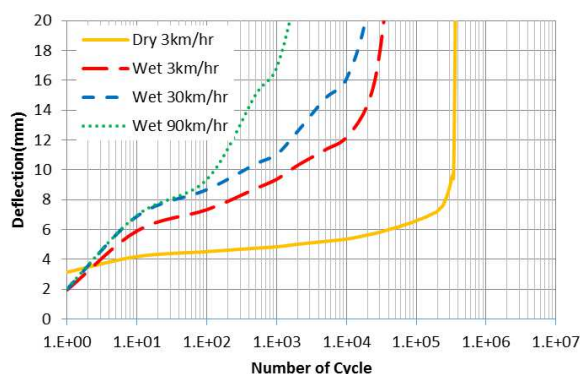


図-2 RC床版のたわみの挙動(160kN)

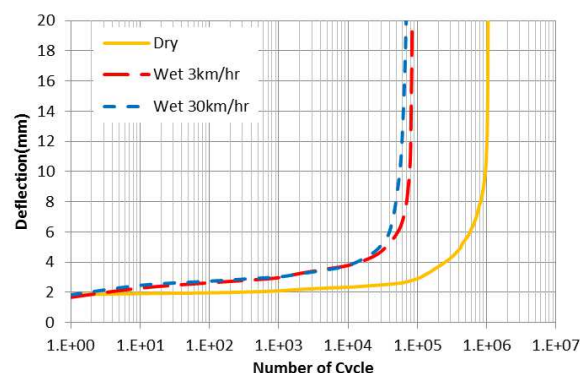


図-3 補強床版のたわみの挙動(250kN)

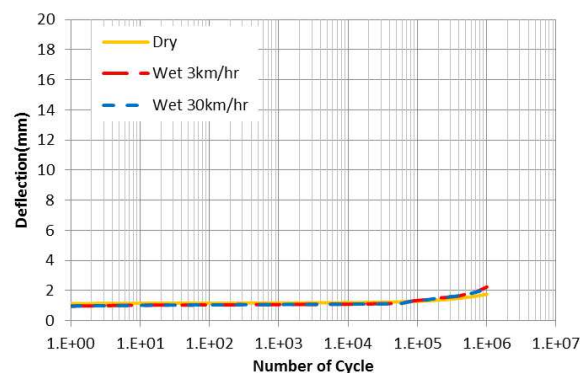


図-4 補強床版のたわみの挙動(160kN)

べて疲労寿命の低下は相対的には顕著ではない。載荷速度を上げても寿命差は僅かであった。鋼板接着補強により床版の静的耐力が大幅に向上し、各所での応力振幅が小さくなったこと、中立軸の移動に伴い圧縮側コンクリートのひび割れ開閉量が少なくなる事などが主因と考えられる。疲労寿命は250kNでも10万回程度を有している。乾燥状態と比較すれば疲労寿命の低下は認められるものの、設計荷重レベルで言えば、湿潤環境が疲労寿命に及ぼす影響は相対的に小さい。

実橋を考慮して、図-4では荷重レベルをRC床版と同様に160kNとして、補強床版に載荷した場合を考える。走行速度にかかわらず、湿潤環境下でも100万回載荷してもたわみの急増は見られず、破壊に至らなかった。補強された床版では応力振幅が小さく、通常の荷重レベル

では湿潤環境の影響が顕著にならないことが分かる。

3.3 下面非排水の影響

鋼板接着で補強された床版では、橋面から供給された水分が床版下面から排水されない。このため、橋面防水を施工しない場合は滞水状態となり、乾燥状態の補強床版と比較して疲労耐久性が著しく低下するであろうと考えられてきた。炭素繊維シート接着などの工法では、格子貼りにすることでひび割れ進展の観察とともに供給された水分の排水口とすることで、水への影響に配慮できる。これらは炭素繊維シートが軽量であることに加え、施工の自由度から鋼板接着よりも優れていると認識される点でもある。しかし、これら水の影響が実際に試験で確認された事例は著者らの知る範囲では見当たらない。現状では無補強床版の事例を補強床版に適用した定性的な観点からの記述にとどまっている。

解析では鋼板接着した補強床版について、実構造物での再現性は困難であるが、床版下面（補強鋼板との界面）から外部への水の移動を許す排水条件と、一般的な鋼板接着で想定される床版下面から外部への水の移動を許さない非排水条件とで比較することで、疲労寿命に与える影響を検討する。湿潤環境の影響を確認するため、荷重は乾燥状態と比較して1桁程度疲労寿命に差が出た250kNを用いた。

図-5に排水条件を変えた解析結果を示すが、床版下面（鋼板接着面）の排水条件を変更しても、滞水状態同士で比較すれば疲労寿命にほとんど影響はなかった。引張側コンクリートは水が存在していても内在水圧(負圧)は大気圧以下にはなり得ず、構造応答を左右するレベルにまでは達せず、疲労寿命には大きく影響しない結果となった。ただし本研究での対象は、床版は常時湿潤状態での解析であり、圧縮側コンクリートは常に水の影響を受けている。床版下面に補強材を設置することは、水分が下面から排出されにくく床版全体は常時滞水状態となりやすい。床版下面を排水条件とすれば、床版上面から常時水が供給されない場合には、圧縮側コンクリートの挙動は異なると考えられる。解析結果の解釈において注意が必要である。

3.4 湿潤環境がS-N曲線に与える影響

補強鋼板の環境条件の違いが床版の疲労寿命に与える影響を確認する目的で、S-N曲線を用いて以後、検討を行う。移動載荷試験における使用限界の判定には、ひび割れ密度や活荷重たわみが用いられることが多い¹⁰⁾。本稿では、鋼板接着した移動載荷試験の160kNでの破壊時のたわみ $D_n \geq 8.65\text{mm}$ を基準とし²⁾、他の荷重の破壊たわみは、これを荷重の比率を乗ずることで定義することとした。

$$D_{fp} = D_n P/P_0 \quad (1)$$

ここに、 D_{fp} は各荷重の破壊時のたわみ値、 D_n は160kN

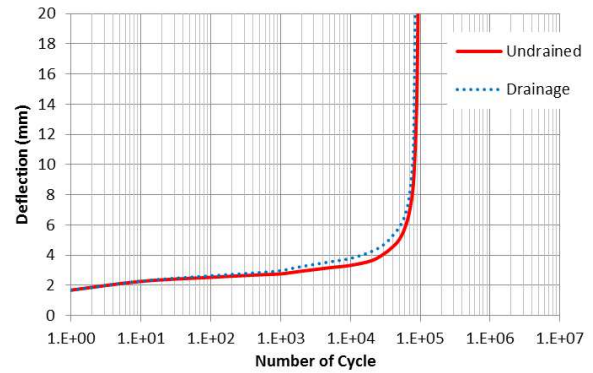


図-5 補強床版の下面非排水の影響

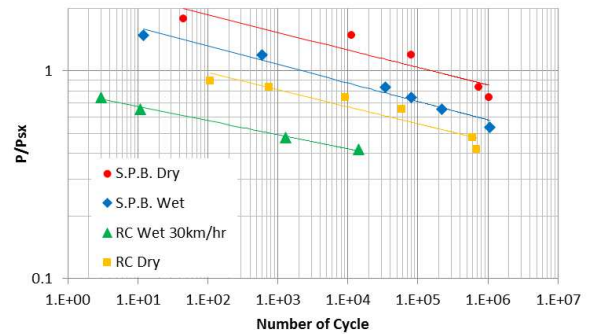


図-6 湿潤環境下におけるRC/補強床版のS-N曲線の比較

の破壊時のたわみ値で8.65mm、 P は荷重、 P_0 は今回基準とした荷重で160kNである。

押し抜きせん断耐力 P_{sx} は松井によるものを用いることとし¹¹⁾、載荷荷重と比較した P/P_{sx} を用いて、図-6にRCおよび補強後(S.P.B.)の乾燥、湿潤条件でのS-N曲線を示す。なお鋼板接着をした場合、無補強の床版と比べ破壊形状が異なるが、本稿では便宜上 P/P_{sx} を準用することとする。RCでは水の影響により疲労寿命は著しく低下するが、補強床版では1-2桁程度の疲労寿命の低下は認められるものの、水が著しく床版の疲労寿命を低下させる要因とはならない。今回のS-N曲線では、180kNと設計荷重よりかなり大きめの荷重でも 1×10^6 程度の疲労寿命を有しており、設計荷重レベルで考えれば、水の影響が補強床版を疲労破壊させる主因とは言い難い。

4. 湿潤環境と補強鋼板の浮きの相互作用

4.1 浮きの発生位置

補強鋼板の浮きは、付着強度やその存在する位置によって疲労寿命に与える影響は異なるが、乾燥状態でも疲労寿命に1桁程度の差が出ることが解析で明らかになっている。浮きは、接着材であるエポキシ樹脂の付着力が十分な場合には疲労寿命を著しく低下させる要因とはならない⁴⁾が、浮きの上部が非合成状態で鋼板と床版が独立して抵抗するのであれば、さらにその影響が大きくな

表-3 浮きの位置を変えた解析ケース

ケース	浮きの位置	浮きの割合
Center	床版中央軸方向	48%
Transverse	直角方向 (床版中央)	51%
Outer	外側軸方向	52%

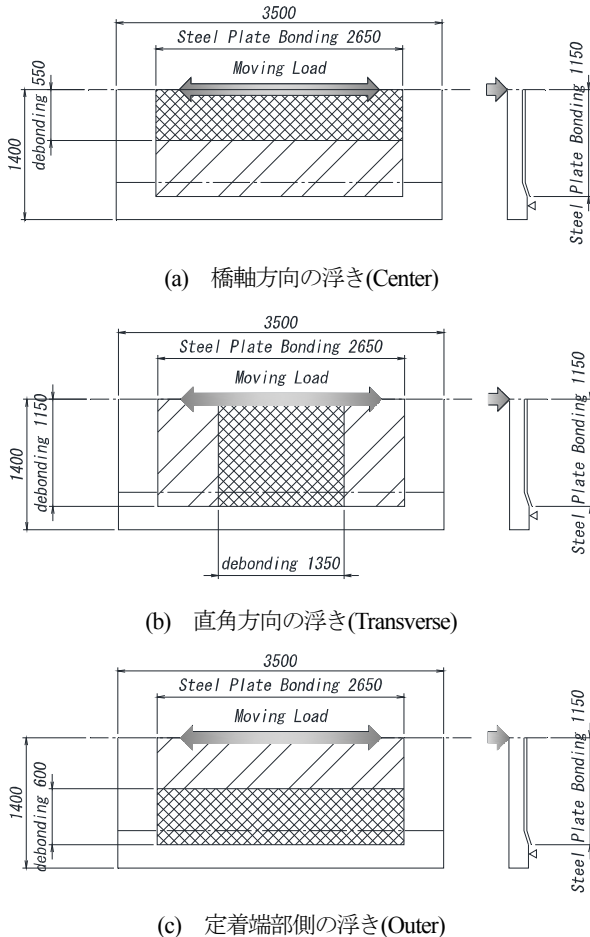


図-7 補強鋼板の浮きの発生位置

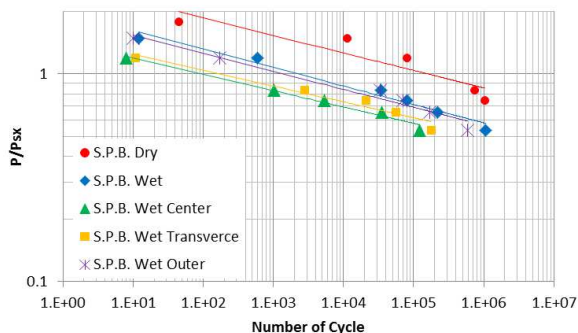


図-8 浮きの発生による補強床版の S-N 曲線の変化

ることが考えられる。このため、湿潤環境下で浮きが存在する場合の、補強床版の挙動について検討する。解析では、補強鋼板は接合要素によりコンクリートに定着させた。補強鋼板の浮きは、コンクリートと補強鋼板の境界面で接着力ゼロと設定して表現した。対象としたケー

表-4 腐食を考慮した解析ケース

ケース	環境条件	腐食量 (D16)
Dry	乾燥	なし
Wet	湿潤	なし
Corr 20mg	乾燥	0.64%
Corr 50mg	乾燥	1.60%

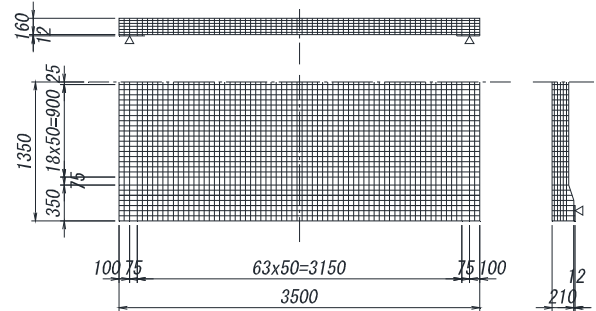


図-9 腐食の解析モデル (単位 : mm)

スを表-3 に示す。乾燥状態での試験で用いた浮きの面積を大きく変えない条件で、浮きの発生位置が疲労耐久性に与える影響を検討することとした。図-7 に浮きの発生位置を示す。

4.2 浮きが S-N 曲線に与える影響

図-8 に浮き位置を変えた場合の S-N 曲線を示す。乾燥状態と同様に Center や Transverse では湿潤状態での完全接着の場合と比較して、1桁程度の疲労寿命の低下がみられた。ただし、これらも 180kN では 1×10^5 程度の疲労寿命を有しており、低レベルの荷重では、著しい疲労寿命の低下とはいえず、補強床版の抜け落ち現象を水と補強鋼板の浮きだけで説明するには無理がある。

5. 鉄筋腐食が床版に与える影響

5.1 解析モデル

実橋での鉄筋の腐食は部分的に集中することが多いが、本研究では、引張圧縮側双方の鉄筋が床版全体で腐食している最も単純かつ厳しい条件をまずは考察の対象としたい。腐食解析に用いたパラメータを表-4 に示す。

鉄筋腐食による腐食ゲルの生成から腐食ひび割れのモデル化は既往の研究で確認されている⁹⁾。一般的に疲労解析に用いる床版のモデルは、平面方向の鉄筋位置は細かく考慮せずに、全体に均等になるよう配置している(以下 Layer モデルという)。一方で、鉄筋腐食を考慮する解析モデルは、鉄筋位置を考慮できる要素分割とし、床版全体が鉄筋腐食により層状の破壊が生じることを防ぐようにモデル化した。要素分割を図-9 に示す。

5.2 RC 床版の挙動

要素分割が異なるため、解析モデルの妥当性も含めて、

RC 床版の疲労寿命について検討する。図-10 は 160kN 載荷時のたわみの挙動である。腐食が生じていない場合は、鉄筋位置を考慮しない Layer モデルでも鉄筋位置を考慮した場合も、たわみの挙動にあまり影響はない。一方で鉄筋腐食が生じた場合、鉄筋位置を考慮できない Layer モデルでは床版が層状に破壊しやすくなるため、早期にたわみが急増する。このため鉄筋位置を考慮する必要があることがわかる。

図-11 は鉄筋腐食の状態が異なる S-N 曲線の低下である。鉄筋腐食を伴わない場合、水の影響などでは S-N 曲線の傾きは大きく変わらず、疲労寿命を低下させるだけであった。これらは既往の試験結果⁷⁾とも整合している。一方で鉄筋腐食を伴う場合、S-N 曲線の傾きが異なっており、荷重が大きくなると著しく疲労寿命が低下する。破壊判定たわみに達した際の変形性状を確認したところ、鉄筋腐食に伴う床版の層状化で、破壊形態が押し抜きせん断破壊から、床版上面での曲げ圧縮破壊へ移行したためである。低サイクル疲労での移動載荷試験では、疲労寿命は健全な場合と比較して 1 桁も変わらなかったが¹²⁾、高サイクル疲労については、破壊形態が変化した結果、疲労寿命が著しく低下することが解析で示された。

5.3 補強床版の挙動

鋼板接着に伴い引張側のコンクリートのひび割れにはエポキシ樹脂が注入される。エポキシ樹脂の注入に伴って断面剛性は回復するが、鉄筋に生じている腐食ゲルの膨張でさらにひび割れが生じる。同じ腐食量でも補強時期によって挙動が変わることも考えられる。エポキシ樹脂の注入による断面剛性の回復程度の評価や腐食ゲルの挙動は今後の課題とするが、今回は危険側を想定しひび割れ注入を考慮しないこととした。

図-12 は鉄筋腐食の状態が異なる場合の S-N 曲線の低下である。腐食量の増大に伴い疲労寿命が著しく低下する。鋼板接着補強では引張側の補強鋼板が床版と合成されて抵抗するため、中立軸の移動に伴い圧縮側コンクリートに対する応力の低減効果も見込まれる。しかし、鋼材腐食などの要因でコンクリートが損傷しているような場合にはコンクリートが層状に破壊され、重ね梁として抵抗することとなるため、補強効果が著しく低下することが解析で示された。

通常の設計荷重レベルでは、水の存在下でも 100 万回を超える疲労寿命を有しており、水の影響だけで抜け落ち現象を説明することはできない。あくまで水はひび割れの存在の元で大きな影響を及ぼす。しかし、鉄筋腐食を伴うことで補強床版の疲労寿命はさらに大きく低下し、実橋梁の現状と符合する。鋼板接着した補強床版の抜け落ちた事例では、切り出した床版の圧縮側コンクリートが層状に破壊していたことが報告されている。腐食やアルカリ骨材反応のように、圧縮側コンクリートの損傷を進行させるような原因に伴って、補強床版としての耐荷

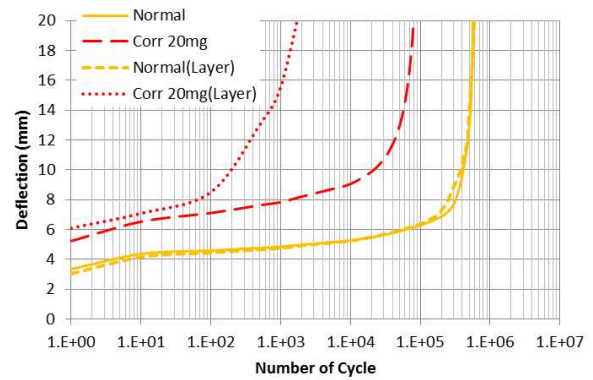


図-10 RC 床版の鉄筋腐食環境下のたわみの挙動

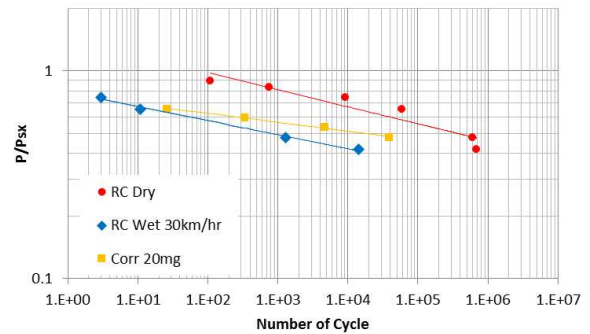


図-11 鉄筋腐食による RC 床版の S-N 曲線の低下

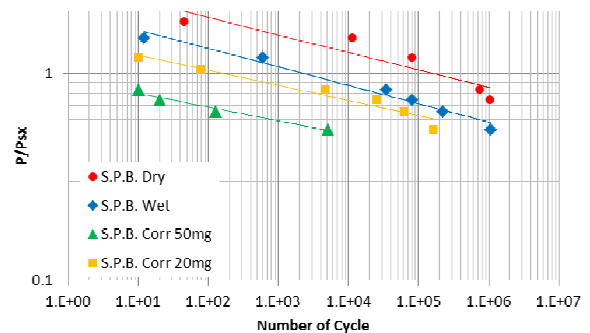


図-12 鉄筋腐食による補強床版の S-N 曲線の低下

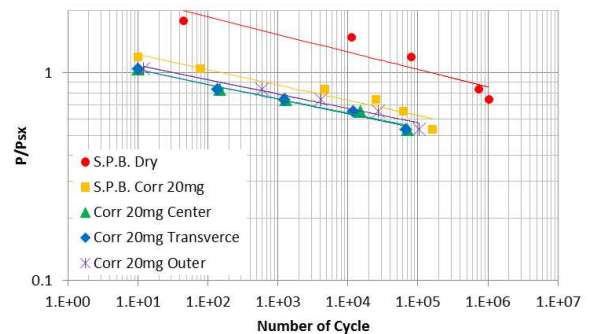


図-13 浮きの発生による補強床版の S-N 曲線の変化

力も著しく低下し、抜け落ち事例に至ったものと考えられる。

5.4 鉄筋腐食と浮きの相互作用

水と補強鋼板の浮きの場合と同様に、鉄筋腐食と補強鋼板の浮きの相互作用についても検討する。腐食量の増大に伴って疲労寿命の著しく低下する様子が S-N 曲線で示された。本稿では水の影響を受けた場合の S-N 曲線とあまり差がなかった Corr 20mg について、浮きとの相互作用を検討することとした。解析ケースは湿潤環境との相互作用を検討した表-3 に示した 3 ケースとする。

図-13 に S-N 曲線を示す。鉄筋腐食が生じて接着が健全な場合と比較して、浮きの影響は顕著にならなかった。図-8 に示したように湿潤環境との相互作用では 1 桁程度の低下があったことを考えれば、浮きの影響は相対的に小さいと言える。

6. まとめ

鋼板接着された RC 床版を対象とし、水と鉄筋腐食と鋼板の浮きとの三者の相互作用が疲労寿命に与える影響について、力学機構の観点から検討を行った。以下に得られた知見を取りまとめる。

(1) 補強床版では、一般の RC 床版に比較して、水の影響による疲労寿命の低下は相対的に小さく、設計荷重レベルでは湿潤環境でも疲労寿命を維持していた。床版下面を非排水に設定しても、床版内の湿潤乾燥環境が変わらなるとすれば、排水状態との差は見られなかった。

(2) 湿潤状態で浮きを有する場合、相互作用により湿潤状態と比較してさらに 1 桁程度、補強床版の疲労寿命は低下した。ただし、解析上、設計荷重レベルでは補強床版の抜け落ちまでには至らなかった。

(3) RC 床版が腐食した場合、高サイクル疲労を受けると押し抜きせん断破壊から曲げ圧縮破壊へと破壊形態が変化する結果となった。破壊モードの転換ゆえに、他の要因では S-N 曲線の傾きはあまり変化しないが、腐食の場合はその傾きが異なる結果となった。

(4) 補強床版の鉄筋が腐食した場合、コンクリートが層状ひび割れによって重ね梁状態となり、静的耐力とは異なり、疲労寿命は低下することが数値解析で示された。

(5) 腐食と補強鋼板の浮きの相互作用はそれほど顕著にならず、補強した床版が抜け落ちた現象は鋼材腐食や ASR 等、コンクリート床版を層状に破壊させる作用によると解析から推定された。

本解析では、接着要素の疲労破壊と施工時に打設する仮止め用のアンカーは考慮していない。今後の検討事項としたい。本稿では既往の研究成果から示された種々の条件を用いて、複合作用を解析により予見を提示したものである。これら力学的観点から想定される破壊進行と現実との整合性に関して、今後の実証が望まれる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 (23226011) の一部を受けて行ったものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 玉越隆史, 大久保雅憲, 星野誠, 横井芳輝, 強瀬義輝: 道路橋の定期点検に関する参考資料 (2013 年版) — 橋梁損傷事例写真集一, 国総研資料第 748 号, 2013.
- 2) 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, Vol.67, No.1, pp.27-38, 2011.
- 3) 平塚慶達, 佐野正, 山下幸生, 藤山知加子, 前川宏一: 浮きを有する鋼板接着補強 RC 床版の解析的検討について, 道路橋床版シンポジウム講演論文集, Vol.7, pp.275-280, 2012.6.
- 4) 平塚慶達, 前川宏一: 鋼板接着補強工法における鋼板の浮き位置が床版の疲労寿命に与える影響, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I -014, pp.27-28, 2014.9.
- 5) 前川宏一, 藤山知加子, 石田哲也: ひび割れ間に捕捉される水分の動的挙動とコンクリート構造の累積損傷, 耐久性力学に基づく収縮影響評価研究委員会報告書 (基調講演), pp.1-12, 2012.10.
- 6) Kukrit Toongoenthong, Koichi Maekawa: Simulation of Coupled Corrosive Product Formation, Migration into Crack and Propagation in Reinforced Concrete Sections, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 3, No.2, 253-265, 2005.6
- 7) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集 9-2, pp.627-632, 1987.
- 8) 藤山知加子, 千々和伸浩, 川中勲, 前川宏一: 移動荷重と水分の影響を同時に受ける RC 部材の疲労破壊特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, 2008.
- 9) Yoshisato Hiratsuka, Koichi Maekawa.: The Influence of the Drying Shrinkage on the Fatigue Life RC Slabs, Conference on Ageing of Materials & Structures, Delft, Netherlands, pp.362-369, 2014.9.
- 10) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋 RC 床版劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, Vol.374, pp.419-426, I -6, 1986.10.
- 11) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.
- 12) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎: 融雪剤による塩害を受けた道路橋 RC 床版の疲労耐久性評価, 土木学会第 66 回年次学術講演会, V -259, pp.517-518, 2011.9.