

# 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

Fatigue analysis of retrofitted RC bridge slabs: the effect of steel plate debonding

平塚慶達\*, 佐野正\*\*, 山下幸生\*\*\*, 藤山知加子\*\*\*\*, 前川宏一\*\*\*\*\*  
 Yoshisato Hiratsuka, Masashi Sano, Kosei Yamashita, Chikako Fujiyama, Koichi Maekawa

- \* ショーボンド建設(株), 首都圏北陸支社 (〒136-0076 東京都江東区南砂 2-2-17)
- \*\* 工博, ショーボンド建設(株), 補修工学研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1-17)
- \*\*\* ショーボンド建設(株), 補修工学研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1-17)
- \*\*\*\* 工博, 東京大学研究員, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
- \*\*\*\*\* 工博, 東京大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

There is increasing concern about the debonding of steel plates that are currently used for retrofitting RC slab soffit after a few decades of service. To investigate this problem in details, the response of two series of retrofitted RC slabs subjected to fatigue loading is discussed from the viewpoint of analysis and experiment. In the first slab series, a perfect bond is provided between the concrete and the steel plate, while in the other a partial debonding is provided at slab center span. It was found that steel-concrete debonding limits the beneficial effects of steel plate in lengthening the fatigue life of the slab. Finally, debonding was also found to be responsible for extensive concrete fatigue damage at slab soffit.

Key Words: RC slab deck, bonded steel plate, debonding, crack injecting

キーワード: RC 床版, 鋼板接着, 鋼板の浮き, 再損傷

## 1. はじめに

鋼板接着補強工法は疲労により損傷が生じたRC 床版の下面に補強鋼板をアンカーボルトで取り付け、その隙間にエポキシ樹脂を充填させて一体化する補強工法である。1960年代から道路橋床版の補強対策として注目されはじめ、長年にわたって多くの施工実績がある。しかしながら経年に伴って、床版上面からの水分の侵入による影響や施工時の床版下面の状態の影響で、鋼板の浮きが多く発見されるようになってきている<sup>1)</sup>。

著者らは、図-1に示すように鋼板面またはコンクリート面に離型剤を塗布することで人為的に浮きを設けた鋼板接着補強RC床版を作成して輪荷重走行試験を行い、疲労耐久性について評価してきた<sup>2)</sup>。

本稿では、前述の輪荷重走行試験について、弾塑性・破壊構成モデルと分散ひび割れに基づく非線形有限要素解析 COM3D<sup>3)4)</sup>を用いて、RC 床版の輪荷重走行試験を数値解析で再現することを試みた。また試験開始前に、床版に発生している乾燥収縮が疲労耐久性に与える影響について、検討した。なお試験、解析ともに、水の影響は考慮していない。

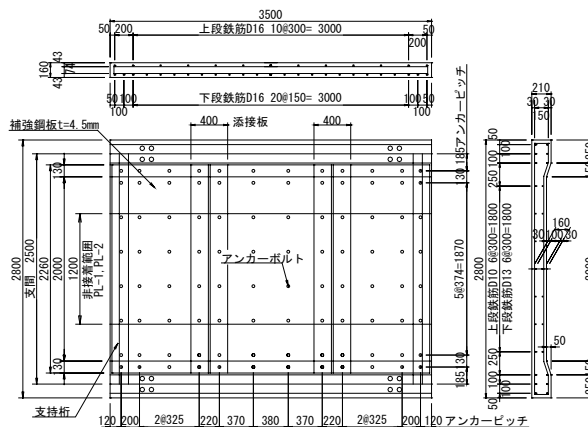


図-1 鋼板接着した RC 床版の形状 (単位: mm)

## 2. 疲労載荷試験

鋼板接着を施す供試体は、昭和 39 年鋼道路橋設計示方書に準じて設計した長さ 3500mm、幅 2800mm、厚さ 160mm のハンチ付き RC 床版で、床版の支持桁間隔は、2500mm とした。鋼板接着に先立ち、本供試体には 160kN で 5000 回の予備載荷を行い、ひび割れを導入した。鋼板

表-1 鋼板接着供試体の種類

供試体 No.	浮きの発生位置	浮きの作り方
PL-1	鋼板面	樹脂と接する鋼板面に離型剤を塗布
PL-2	コンクリート面	樹脂と接するコンクリート面に離型剤を塗布
PL-3	完全接着	非接着範囲なし

表-2 a) RC 床版および補強材の物性 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

材料の種類	圧縮強度	弾性係数	降伏点	引張強度	
鉄筋 (SD295A)	D10	—	—	376	516
	D13	—	—	359	505
	D16	—	—	354	503
コンクリート	25.5	2.1×10 <sup>4</sup>	—	1.8	
鋼板(SS400)	—	—	296	470	

b) エポキシ樹脂の物性 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

材料の種類	圧縮強度	弾性係数	粘度 (mPa・s)	引張せん断接着強度
エポキシ樹脂	60	1.5×10 <sup>3</sup>	1000~2000	10

※エポキシ樹脂は材料の品質規格値を示す。2液混合タイプ。

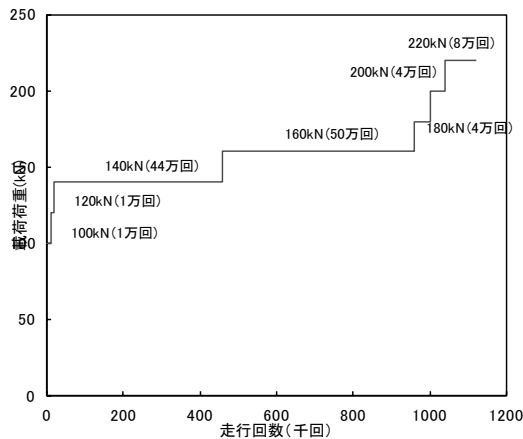


図-2 載荷荷重と走行回数との関係

接着供試体は、浮きの発生位置を変えた3種類とし、阪神高速道路(株)の基準<sup>5)</sup>に従って施工し、床版ハンチ部まで接着した。供試体の作製に使用した材料の物性値を表-2に示す。なお、コンクリートの強度は、鋼板接着直前(材令150日)での結果である。

試験には、航空機用ゴムタイヤを装着した250kN輪荷重走行試験機を用いた。支持条件は、橋軸直角方向を2500mm幅で鋼製の桁で単純支持し、橋軸方向は弾性支持とした。さらに、供試体の隅角部は浮き上がりを防止

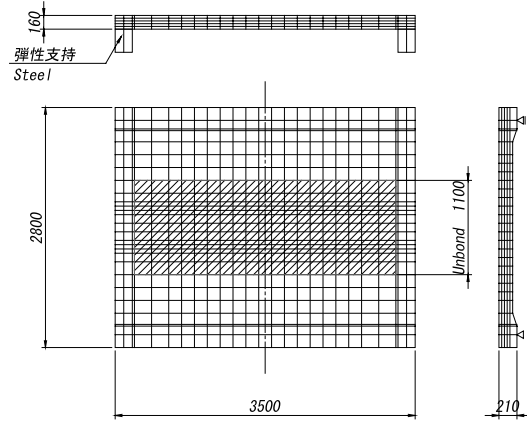


図-3 解析モデル

表-3 解析に用いた材料特性

材料	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	特性値
コンクリート	2.1×10 <sup>4</sup>	圧縮強度 25.5N/mm <sup>2</sup>
鉄筋	2.1×10 <sup>4</sup>	降伏点 355.0N/mm <sup>2</sup>
エポキシ樹脂	1.5×10 <sup>3</sup>	摩擦係数 なし

表-4 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

表-5 解析ケース

ケース	鋼板接着	乾燥収縮の有無
RC-P	無	無
RC-S		有
UB-P	有(浮き有)	無
UB-S		有
FB-P	有(浮き無)	無
FB-S		有

するために固定したが、回転は許容する構造とした。

載荷荷重は道路橋示方書のB活荷重を想定した100kNから20kNずつ漸増させた。載荷荷重と走行回数との関係を図-2に示す。床版のたわみは、床版中央に輪荷重を静止させた状態で負荷時および除荷時の値を計測した。

### 3. 解析詳細

#### 3.1 解析の構成則の概要

本解析は、繰返し荷重による鉄筋コンクリートの疲労損傷挙動を再現することのできる高サイクル経路依存型構成モデル<sup>6,7)</sup>を用いた。この解析プログラムを用いたRC床版の疲労解析に対する信頼性については、すでに検証結果が報告されている。

### 3.2 解析モデル

解析に用いたモデルを図-3に示す。有限要素はすべて8節点の固体要素を用いた。橋軸方向端部の横桁は弾性支持となるため、等剛性となる鋼要素でモデル化した。床版厚、配筋、および床版支間は試験条件と同じとした。床版と補強鋼板との間には接合要素を用いた。初期の鉛直剛性はエポキシ樹脂の材料規格値の下限値である  $1.5 \times 10^3 \text{N/mm}^2$  を与えるものとした。浮きを有する供試体は、浮きについては解析モデルを簡素化するため、エポキシ樹脂の剛性値は無視することとした。荷重が進むにしたがって接合面は剥離すると考えられるが、接合面の付着が切れた後は鋼板界面にエポキシ樹脂が存在しているため、便宜上摩擦は考慮しないものとした。表-3.4に解析に用いた条件を示す。

解析にあたり、移動荷重は直接節点に作用させるものとし、橋軸方向450mm×橋軸直角方向300mmの16点に集中荷重で荷重した。荷重速度は輪荷重走行試験の平均値で4km/hrとした。

乾燥収縮の影響を確認するため、解析では乾燥収縮の影響を入れたものと入れないものとの比較を行った。収缩量は土木学会のコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>に従って算出した。収縮日数は予備荷重開始日までの150日とした。

試験に用いた供試体は無補強状態で乾燥収縮および予備荷重によりひび割れが生じ、その後鋼板接着を行う際にエポキシ樹脂が乾燥収縮および予備荷重で生じたひび割れに充填され、剛性回復することとなる。本稿では乾燥収縮を考慮しないもの、補強しない状態で乾燥収縮させその後補強したもので比較することとした。また比較のため、補強しないRC床版についても解析を実施した。

荷重荷重は試験で実施した漸増荷重を再現するものとし、浮きを有する供試体は160kNで破壊とみなして荷重を終えているため、UBシリーズおよびRCシリーズは荷重の上限を160kNとすることとした。なお、RC床版の床版厚、配筋等は、補強したものと同一である。表-5に解析ケースの一覧を示す。

## 4. 試験および解析の結果

### 4.1 たわみの比較

#### (1) 試験結果

試験および解析によると各供試体のスパン中央における荷重回数とたわみの関係を図-4に示す。浮きの有無の違いによる影響が顕著に見られた。また薄板理論で求めた引張側無視の床版中央のたわみ値も併せて示す。

破壊時直前の残留たわみは、PL-1が1.80mm、PL-2が1.95mmに達していた。

PL-3の活荷重たわみの傾きは緩やかに増加したものの、浮きの進行がほとんど確認できなかったことから、走行回数32万回の時点で鋼板面をハンマーで叩き、人為的に浮きを作った。この影響によって、浮きの拡大が起

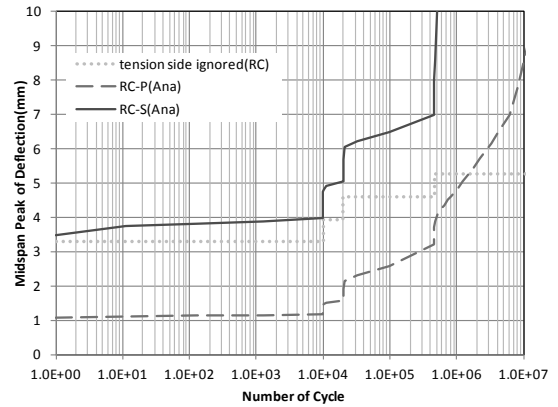


図-4(a) 荷重回数と床版中央のたわみ(RCシリーズ)

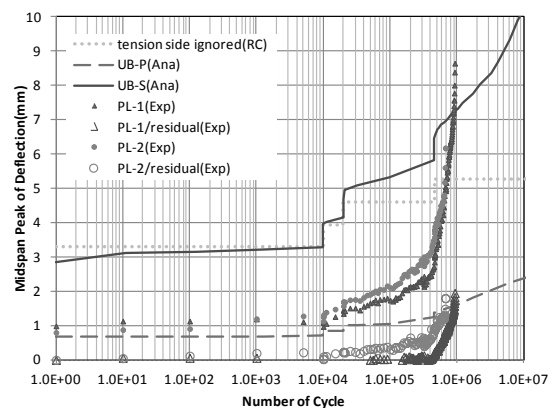


図-4(b) 荷重回数と床版中央のたわみ(UBシリーズ)

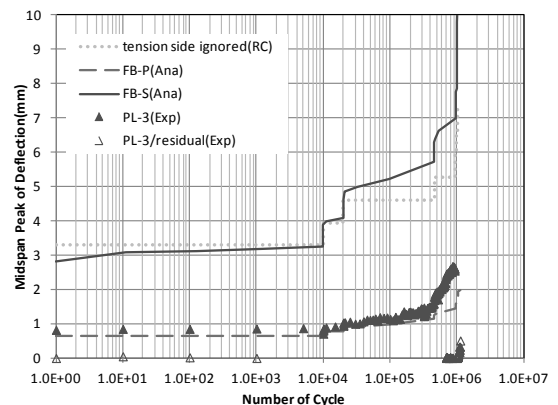


図-4(c) 荷重回数と床版中央のたわみ(FBシリーズ)

こり、活荷重たわみも徐々に増加した。

#### (2) 解析結果

解析におけるたわみ値は、所定の回数を動的に荷重した後、動的荷重を一旦停止し、版中央に荷重荷重を静的に荷重させて得ることとした<sup>9)</sup>。

それぞれの結果とも乾燥収縮の有無が、各荷重回数でたわみに与える影響が大きくなった。RCシリーズでは、乾燥収縮のないRC-Pは、引張側無視の理論値に達した

のは、載荷荷重 160kN の累積 150 万回であったのに対し、乾燥収縮のある RC-S は、1 回目の載荷時から引張側無視の理論値を超過した。これは実験において乾燥収縮量を計測していないため参考値となるが、無補強 RC 床版において、乾燥収縮が疲労耐久性に与える影響が大きいことが分かる。

浮きを有する UB シリーズの解析結果は、乾燥収縮を考慮しない UB-P は試験値より小さくなった。特に載荷荷重を 160kN に変更した 46 万回あたりから、その乖離率が大きくなる傾向がある。試験では 46 万回あたりから破壊が急激に進んでいると推定されるが、解析ではそれが表現されていない。なお解析結果は浮き位置の違いを明確に考慮できていないため、便宜的に試験における PL-1 の結果と比較することとした。一方で乾燥収縮を考慮した UB-S は試験値よりかなり大きな結果となった。

鋼板接着により完全に接着した供試体のたわみは、試験では 32 万回で人為的に浮きを生じさせており、そこから試験供試体のたわみの増加がみられるため単純な比較はできないが、FB-P はおおむね一致していると言えるが、FB-S はたわみ値が大きく、乾燥収縮の影響が大きいことが分かる。

乾燥収縮を考慮しない UB-P、FB-P のたわみが実験値に近く、UB-S、FB-S のたわみが過大なのは、鋼板接着時にエポキシ樹脂が乾燥収縮で生じたひび割れに注入され、RC 床版そのものの剛性が回復しているためであると考えられる。

#### 4.2 初期たわみを一致させた疲労解析

コンクリート構造物の疲労解析においては、初期たわみの差が疲労寿命に与える影響が大きい。コンクリートの破壊荷重のばらつきは大きい、破壊時のひずみのばらつきが小さいことに着目すれば、初期たわみを一致させて疲労寿命を求めることは、合理的であると考えられる。このため、試験で測定された初期たわみとなるように便宜的に荷重を変更して解析を行うこととした。解析は、乾燥収縮を与えずに鋼板で補強し、100kN で 1 回走行させて、初期たわみを得た。試験値との比較を表-6 に示す。試験では走行回数に応じて荷重を変化させているため、初期たわみにおける解析値と試験値の比率を使って、各載荷段階における荷重を与えるものとした。床版中央のたわみ値を図-5 に示す。浮きを有する供試体は引張側無視のたわみ値に近づいた場合を破壊と仮定すれば、UB-L については試験値が 69 万回であるのに対し、解析値は 123 万回とやや過大であった。接着が健全な供試体は試験でも破壊に至っておらず、FB-L の解析値が良好に一致し、試験結果を再現できている。

#### 4.3 初期載荷時の応力分布

UB-L と FB-L について、図-6 に初期載荷時の鋼板の橋軸直角方向応力を示す。浮きを有する供試体の場合には特

表-6 初期たわみ値の比較

ケース	鋼板接着	試験値	解析値	比率
UB-L	有(浮き有)	0.99	0.68	1.46
FB-L	有(浮き無)	0.82	0.63	1.30

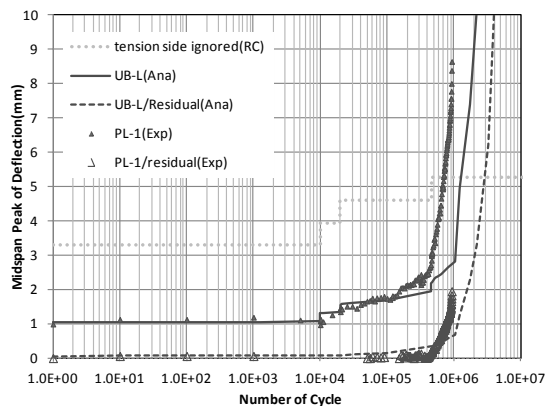


図-5(a) 載荷回数と床版中央のたわみ(UB-L)

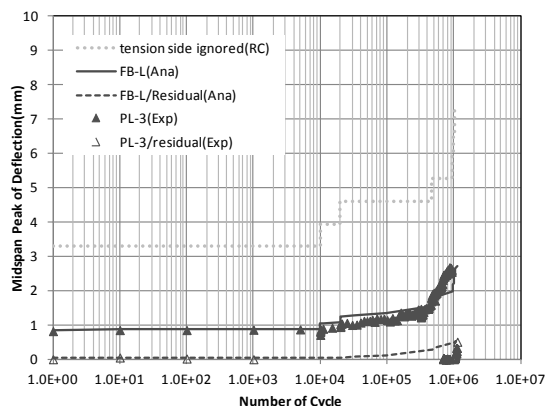


図-5(b) 載荷回数と床版中央のたわみ(FB-L)

に橋軸方向にも影響範囲が大きくなっていることが分かる。ピーク値は浮きのない供試体に比べて大きくなっており、鋼板の応力分担範囲が変化していることが分かる。図-7 はコンクリート下面の橋軸直角方向応力である。応力のピーク値は接着が健全な FB-L の方が大きい、浮きを有する UB-L は載荷点の周辺に限らず広範囲にわたって応力の大きな範囲が広がっており、特に浮き部と健全部の境界付近の応力値が卓越している。一方 FB-L は UB-L と比べて、応力の大きな範囲は限定的である。以上のことから、鋼板の浮きはコンクリートおよび鋼板の応力分布を変化させ、特に浮き部と健全部の境界に応力集中が起こっていることが伺える。

#### 4.4 破壊過程

##### (1) 試験結果

鋼板に離型剤を塗布した PL-1 は、走行回数 924,602 回で押し抜きせん断破壊が生じ、試験を終了した。浮きは

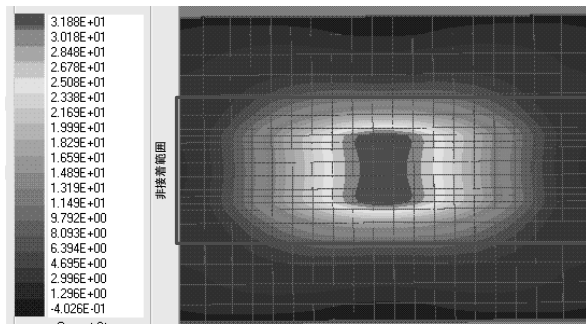


図-6(a) 鋼板下面の直角方向応力(UB-L)

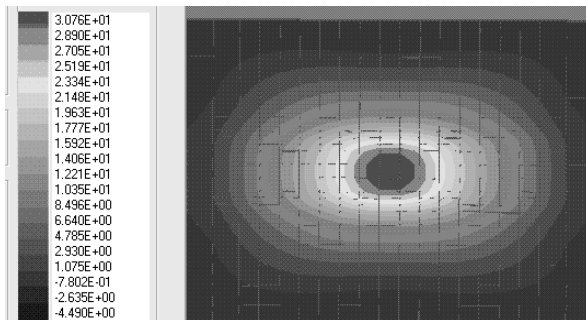


図-6(b) 鋼板下面の直角方向応力(FB-L)

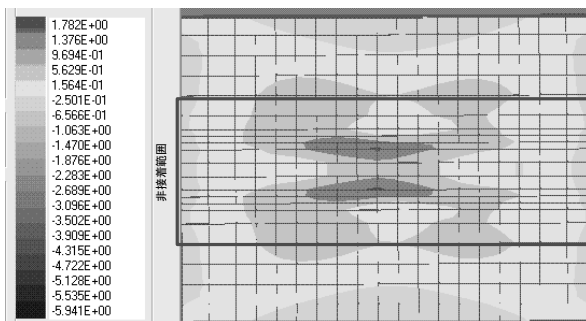


図-7(a) コンクリート下面の直角方向応力(UB-L)

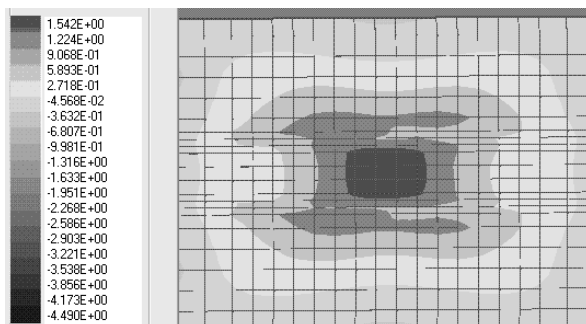


図-7(b) コンクリート下面の直角方向応力(FB-L)

離型剤を塗布した範囲と塗布していない範囲との境界を起点として浮きが徐々に広がり、載荷荷重を 160kN に上げた走行回数 50~60 万回の間でハンチ部にまで達した。写真-1 および図-8 は試験終了後の供試体を切断した断面を示しているが、輪荷重直下の走行方向には上段鉄筋に沿った水平ひび割れが、走行方向と直角の方向には押し

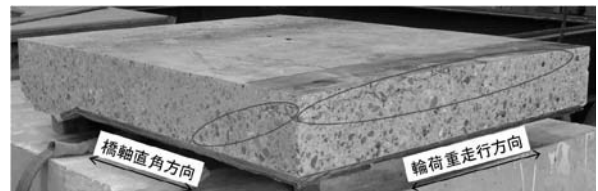


写真-1 切断面の状況 (PL-1 試験終了後)

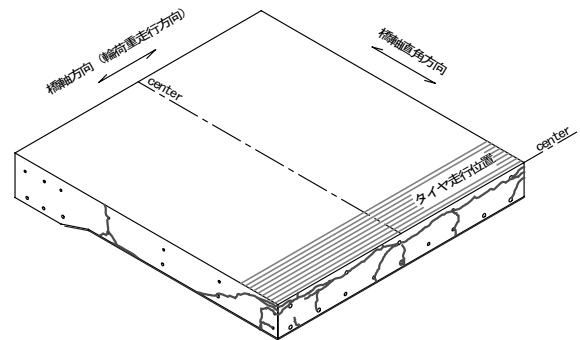


図-8 切断面の状況 (写真-2 の模式図)



写真-2 PL-2 試験終了時の状況

(上：床版上面，下：鋼板撤去後の床版下面)

抜きせん断破壊を証明する斜めひび割れが観察された。コンクリート面に離型剤を塗布した PL-2 の浮きの拡大は、鋼板面に離型剤を塗布した PL-1 と同様、離型剤を塗布している部分と塗布していない部分との境界を起点として発生した。しかし、PL-1 と比較して、浮きの拡大範囲が小さく、ハンチ部まで達しないうちに押し抜き

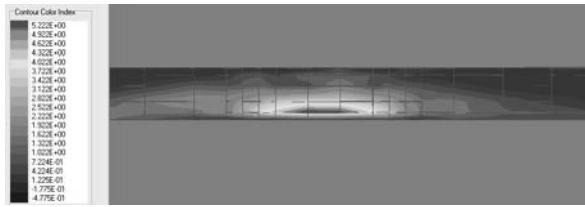


図-9(a) UB-L 直角方向断面の主応力(100 万回)

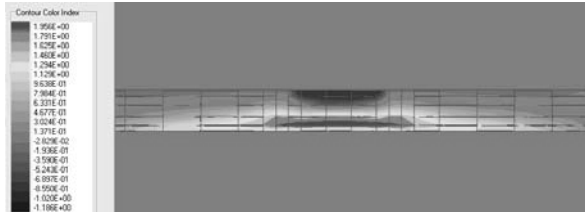


図-9(b) FB-L 直角方向断面の主応力(100 万回)

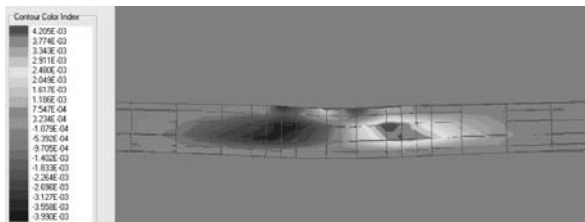


図-10 UB-L 直角方向断面の残留ひずみ(600 万回)

ん断破壊した。破壊時の走行回数は675,373回であった。試験終了時の供試体上面および鋼板撤去後の下面状況を写真-2に示す。上面では、広範囲にわたって砂利化している箇所がみられた。下面をみると、コンクリートはブロック状に破壊していた。

## (2) 解析結果

図-9は160kN 載荷時の100万回のUB-L,FB-Lの主応力である。床版のたわみはUB-Lで2.8mm,FB-Lで2.4mmと大きな差は出ていないが、UB-Lは下面かぶりコンクリートが応力を分担できなくなっており、実験で見られたブロック状の破壊が進行していると推定される。さらに図-10に示すように、UB-Lの600万回載荷時の残留ひずみは押し抜きせん断の様子を呈している。一方でFB-Lでは1300万回載荷後もコンクリートの内部でのひずみの著しい増加は見られなかった。

## 5. まとめ

本稿で得られた知見を取りまとめると、以下のとおりである。

- (1) 鋼板接着で補強した供試体に、移動荷重による解析を試み、疲労損傷することが確認された。
- (2) 無補強のRC床版においては、乾燥収縮が疲労耐久性に与える影響は大きい、鋼板で補強することに

よりその影響は小さくなった。

- (3) 健全な鋼板接着供試体では、本稿における荷重履歴の範囲では疲労破壊せず、鋼板とコンクリートの接着、すなわち合成効果が疲労耐久性に与える影響が大きいことが解析においても確認できた。
- (4) 広範囲な浮きがある場合は、床版は鋼とコンクリートの重ね版として抵抗しているが、疲労によりコンクリート下面から損傷が進行する傾向がみられた。
- (5) 便宜的に初期たわみを合わせた解析では浮きを有する鋼板接着補強床版の疲労解析をある程度把握できた。これは今後解析プログラムを変更することでひび割れに注入されたエポキシ樹脂がコンクリートの剛性回復に寄与していることを示唆しており、今後の見通しが得られたと考えている。

今後は補強した床版について、浮きの存在する範囲やその大きさ、水が疲労耐久性に与える影響について、明らかにする必要がある。

## 参考文献

- 1) 道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性, 阪神高速道路公団, 阪神高速道路管理技術センター, 1991.12.
- 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) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003.
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, London, 2008.
- 5) 道路構造物の補修要領, 阪神高速道路公団, 1990.6.
- 6) Maekawa, K., Toongoenthong, K., Gebreyouhannes, E. and Kishi, T.: Direct Path-Integral Scheme for Fatigue Simulation of Reinforced Concrete in Shear, Journal of Advanced Concrete Technology, 4(1), 2006, pp.159-177.
- 7) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X. : Three-Dimensional Fatigue Simulation of RC Slabs under Traveling Wheel-Type Loads, Journal of Advanced Concrete Technology, 4(3), 2006, pp.445-457.
- 8) 2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 土木学会, 2008.3.
- 9) 藤山知加子, 商峰, 櫻井信彰, 前川宏一: 直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.106-116, 2010.3.