

# 論文 低弾性材料で上面増厚補強を施した RC 床版の疲労寿命への水の影響に関する解析的検討

浦島 康希\*1・千々和 伸浩\*2・田中 大介\*3・上條 崇\*4

**要旨:** 静弾性係数の異なる 3 種類のコンクリート系材料による上面増厚補強を施した床版試験体の疲労解析を行った。上面増厚補強を施した一部の実床版では施工後数年以内に界面でははく離が確認されており、母床版と比較して増厚部の静弾性係数が大きいことが原因の一つとして考えられてきた。解析の結果、低弾性増厚材料を使用した試験体のはく離抵抗性は他の試験体と同等であった。また床版内部への水分浸透を考慮した解析では、水分浸透が始まると床版が急速に破壊へと至り、材料による性能差はわずかであった。以上より上面増厚床版の疲労性能向上には防水対策を講じることが重要であることが明らかとなった。

**キーワード:** RC 床版, 上面増厚補強, 疲労, FEM, 輪荷重走行試験

## 1. はじめに

道路橋 RC 床版では日々の交通荷重により絶えず疲労劣化が進行している。特に昭和 48 年の道路橋示方書改定以前に建設された RC 床版は床版厚や鉄筋量に関する基準が現行基準よりも低く、著しい劣化を受けている可能性が高いことから鋼繊維補強コンクリート(SFRC)による上面増厚補強が多く適用されている。一方、上面増厚補強を施した一部の RC 床版において増厚部と既設床版の界面におけるはく離が確認されている<sup>1)</sup>。はく離が生じると剛性が低下するだけでなく、ひび割れや施工目地から浸入した水がその部位の補強材と母材の界面に滞留するようになる。床版表面に水が滞留した状態では、RC 床版の疲労寿命が乾燥状態の 1/100 以下に低下することが報告<sup>2)</sup>されており、はく離の制御は床版の維持管理上非常に重要な課題であると考えられる。

はく離は、床版が変形する際に増厚部と既設床版の剛性差から界面に大きな応力が働くことが原因であると考えられており、その対策として現在では界面への接着剤の塗布や低弾性増厚材料の使用が行われている<sup>3)</sup>。接着剤の塗布による効果は輪荷重走行試験によって評価<sup>4)</sup>されており、界面全体に接着剤を塗布することではく離抵抗性及び疲労寿命が向上することが確かめられている。一方、増厚材料の剛性だけに絞って床版の性能を比較した研究は十分に行われていないのが現状である。

そこで本研究ではコンクリート非線形有限要素解析システム COM3 を用いて、剛性の異なる 3 種のコンクリート系材料による上面増厚補強を施した床版のはく離抵抗性および疲労寿命について検証するとともに、実験では観察の難しい載荷中の床版内部における疲労の進展と水

の影響について分析を行った。解析を行うにあたっては実際の輪荷重走行試験結果を用い、実験との整合性の確認や比較、分析を行った。

## 2. 輪荷重走行試験の概要

### 2.1 試験体諸元及び材料物性

#### (1) 上面増厚床版試験体の諸元

上面増厚床版試験体は昭和 39 年の鋼道路橋示方書に基づく厚さ 190mm の床版の上面を 20mm 切削したのち、界面に接着剤を塗布したうえで 50mm の増厚を施し製作した(図-1)。増厚材料には既存の SFRC, ポリマーセメントモルタル(以下 PCM)に加え、新たに開発されたラテックス改質 SFRC(以下 LSF)を用いた。試験は床版上面に水を張った状態で行い、水分浸透の影響を計るために設けた施工目地部には接着剤を塗布していない。

#### (2) 材料物性

母床版と増厚に用いたコンクリート系材料の物性を

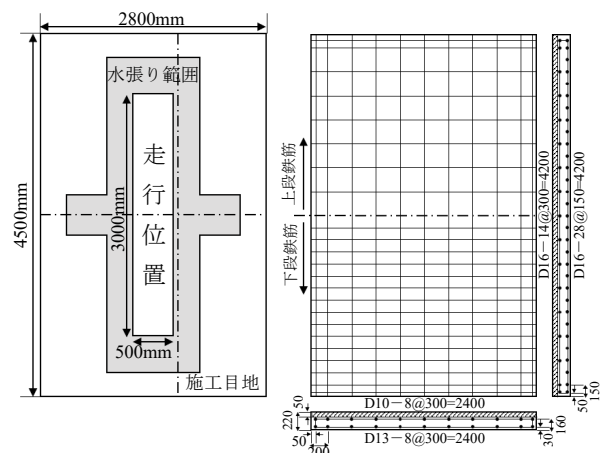


図-1 輪荷重試験体の寸法および配筋図

\*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース (学生会員)

\*2 東京工業大学 環境・社会理工学院准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 (一財)首都高速道路技術センター 構造技術研究所 第一構造研究開発室長

\*4 (一財)首都高速道路技術センター 構造技術研究所 第一構造研究開発室

表一に示す。LSFはSFRCの低弾性化を目的にラテックスによる改質と細骨材の一部を特殊弾性骨材(粒径1~2.5mm)に置換することが行われており、乾燥収縮の小ささと靱性の高さが特徴である。粗骨材の最大寸法はSFRC、LSFともに13mmであり、PCMはモルタルのため粗骨材を含まない。PCMにはビニロン繊維、SFRCとLSFには鋼繊維が体積比で1.27vol%添加されている。

## 2.2 試験方法

輪荷重走行試験では、床版中央に幅500mm、長さ200mmの鋼製ブロックを3mにわたって設置し、その上を鉄輪が所定の荷重をかけながら走行することで疲労を与える。輪荷重は157kNから開始し、4万回走行ごとに荷重を19.6kN上げる階段載荷方式で行った。また一定回数走行ごとに一時試験を中断して静的載荷試験を行い、載荷時と除荷時のたわみを計測した。試験体は橋軸方向の辺を丸鋼による単純支持、橋軸直角方向の辺をH形鋼による弾性支持とし、図一に示す範囲に水を張った状態で試験を行った。

## 2.3 試験結果

表二および図二に輪荷重走行試験の結果を示す。等価走行回数 $N_{eq}$ の算出にあたっては床版の疲労損傷がマイナー則に従うと仮定し、松井<sup>9)</sup>によって提案されたS-N曲線の傾き-1/12.76を用いて式(1)により求めた。

$$N_{eq} = \sum_{i=0}^k \left( \frac{P_i}{P} \right)^{\frac{1}{m}} \times n_i \quad (1)$$

ここで、 $P_i$  :  $i$ ステップ目の載荷荷重(kN)

$P$  : 基準荷重(157kN)

$m$  : S-N曲線の傾き(-1/12.76)

$n_i$  : 走行回数

$i$  : 載荷ステップ

実験の結果、各試験体の疲労寿命はSFRCに対してLSFが1.86倍、PCMが0.99倍であった。SFRC試験体では乾燥収縮によって生じたと思われる、橋軸直角方向目地部のひび割れを通じて試験開始後のごく初期から増厚目地部での漏水が見られた。その後24万回走行時点で床版下面からの漏水が発生、25.8万回走行時点で上面に浮きが発生し、床版下面の漏水範囲の拡大やたわみの急増が見られた。LSF試験体は28.6万回走行後に上面の浮きを確認され、29万回走行時点で下面からの漏水が発生した。PCM試験体は21万回走行後に床版下面の施工目地直下にあたる部分から漏水が発生し、25万回走行時点で漏水範囲が拡大したたわみの急増が見られた。また破壊直前には上面の浮きや施工目地部に段差が見られた。

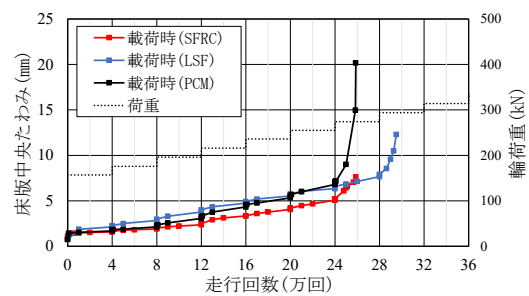
SFRC試験体の実験では局所振動試験<sup>9)</sup>によって層間はく離などの変状の有無を検査した。結果を図三に示

表一 材料試験結果

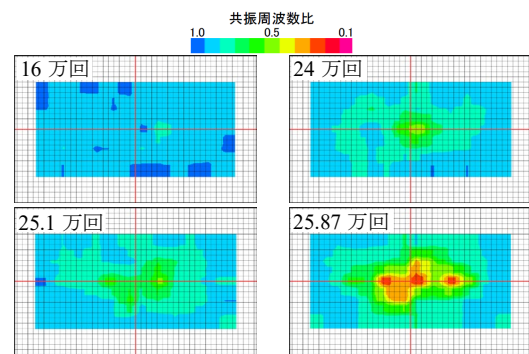
材料	圧縮強度	引張強度	静弾性係数
母床版	36.3 N/mm <sup>2</sup>	2.5N/mm <sup>2</sup>	26.5 kN/mm <sup>2</sup>
SFRC	74.8 N/mm <sup>2</sup>	4.1 N/mm <sup>2</sup>	39.2 kN/mm <sup>2</sup>
LSF	49.6 N/mm <sup>2</sup>	4.2 N/mm <sup>2</sup>	26.4 kN/mm <sup>2</sup>
PCM	39.6 N/mm <sup>2</sup>	3.6 N/mm <sup>2</sup>	18.3 kN/mm <sup>2</sup>

表二 輪荷重走行試験結果

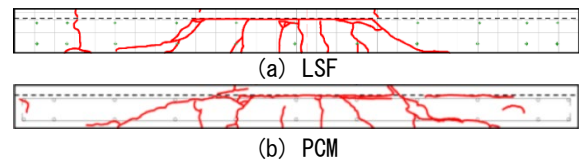
試験体	走行回数	157kN 等価走行回数(比率)
SFRC	258,770	53,606,152 (-)
LSF	286,270	99,493,108 (1.86)
PCM	258,370	53,101,229 (0.99)



図二 載荷時たわみと走行回数の関係



図三 局所振動試験結果



図四 橋軸直角方向切断面のひび割れ状況

す。この試験では載荷前の健全な状態での共振周波数と各載荷段階における共振周波数の比を取得しており、共振周波数比が0.4を下回るとその範囲の6割程度に空隙が存在すると考えられている。走行回数16万回時点では空隙がほとんど存在せず、24万回時点で空隙が床版中央に現れはじめ、破壊時には走行範囲の付近に大きな空隙が存在していると思われる。

試験終了後、LSF、PCMの各試験体を切断しひび割れ

状況の確認を行った(図-4)。両試験体ともに下面からの曲げひび割れのほか、増厚界面付近に水平方向のひび割れが見られる。PCM 試験体は増厚層にまでせん断ひび割れが進展していた。これは粗骨材の噛み合わせによるせん断抵抗が発揮されないため生じたものと考えられる。

### 3. 解析概要

前章での実験結果をもとに、以降は非線形有限要素解析を実施し実験との比較を行う。

#### 3.1 解析システム

解析にはコンクリート非線形有限要素解析システム COM3<sup>7)</sup>を用いた。本解析システムには圧縮、引張、せん断の構成則にそれぞれ疲労損傷を反映するパラメータが組み込まれており、これまで床版の疲労解析<sup>8),9),10)</sup>に用いられてきた実績がある。

乾燥条件下での輪荷重走行試験と水張り条件下での輪荷重走行試験を再現するため、それぞれで異なる解析モデルを作製した。乾燥条件のモデルはコンクリートを8節点アイソパラメトリック要素で表現し、増厚界面には任意の引張付着強度及びせん断付着強度を設定できる接合要素を用いた。水張り条件のモデルは、力を受け持つ骨格要素と微細空隙やひび割れ部分での水分移動を受け持つ空隙要素の重ね合わせとしてコンクリートを表現したものを用いた<sup>11)</sup>。この空隙要素には空隙水の飽和度や水分透水性をパラメータとして設定することができ、ひび割れの開閉による水圧の変化やそれに伴うコンクリートの損傷を追跡することができる。

#### 3.2 解析モデル

解析は SFRC、LSF、PCM の各増厚試験体を、その対称性から半面のみモデル化して行った(図-5)。床版の全厚は 220mm であり、母床版(170mm)と増厚部(50mm)の間に表-3 の物性値をもつ接合要素を設定した。接合要素に接着強度を超える応力が働いた場合を剥離とし、以降はその要素の開口時の剛性を 1/100 に低下させる。また実験と同一の床版支間とするため、支間が橋軸方向に 4200mm、橋軸直角方向に 2500mm となるよう節点に鉛直方向の拘束をかけている。

荷重は実際の輪荷重走行試験と同じ条件で荷重が移動しながら往復作用するものとして、水平移動速度が折り返しの瞬間にゼロとなり、支間中心で最大速度となるような単振動往復運動をするように与えた。載荷領域の移動速度は走行領域 3m を 3 秒で 1 往復するものとする。また輪荷重の接地面積は幅 500mm、長さ 200mm とした。

材料モデルの構築にあたっては切り欠きはりの破壊エネルギー試験を実験と解析の両方で実施し、その妥当性を確認した(図-6)。繊維補強コンクリートは繊維混入相当量の鉄筋比を三方向に与えた RC 要素によって表現

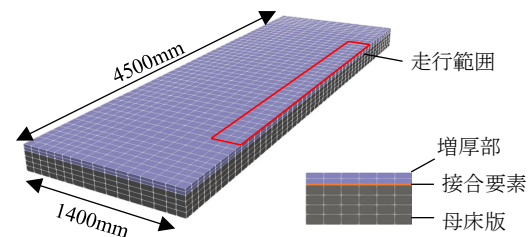


図-5 試験体モデル

表-3 接合要素の物性値

	閉口時	開口時
引張接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.50	
せん断接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	4.50	
直方向抵抗係数 (N/mm <sup>3</sup> )	2650	26.5
せん断方向抵抗係数 (N/mm <sup>3</sup> )	9.81	0.0981

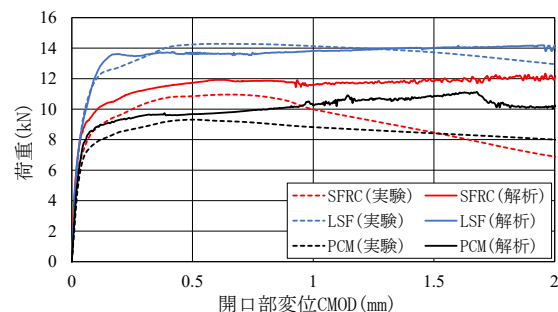


図-6 切り欠きはりの破壊エネルギー試験

表-4 繊維補強コンクリートのパラメータ

増厚材料	SFRC	LSF	PCM
見かけの鉄筋降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	588	588	539
見かけの鉄筋破断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	589	589	540
コンクリート引張降伏率 (μ)	開始	73	118
	終了	366	1296
コンクリート引張軟化係数	0.4	0.3	0.5

表-5 解析シリーズ

シリーズ	階段荷重	一定荷重	水分浸透
Dry-S	○	×	×
Dry-C	×	○	×
Wet-S	○	×	○
Wet-S-24	○	×	24 万回～
Wet-S-28	○	×	28 万回～

することとした。なおその際、繊維の架橋効果や引き抜け、破断を表現するため、補強繊維に相当する見かけの鉄筋降伏強度と破断強度、およびコンクリートの引張降伏率と引張軟化係数は表-4のように設定した。

#### 3.3 解析シリーズ

解析シリーズを表-5に示す。乾燥条件下での解析結

果 (Dry-S, Dry-C) では水分浸透を考慮しておらず、繰り返し荷重による疲労の影響のみを評価したものである。また階段載荷方式による荷重増加の影響を取り除くため、157~294kN の各荷重で一定荷重方式での解析 (Dry-C) も別途行った。

水張り条件での解析では初期段階から水分浸透を考慮したシリーズ (Wet-S) に加え、走行 24 万回、28 万回から水分浸透を考慮したシリーズ (Wet-S-24, Wet-S-28) の解析も行った。これは次章で述べるように、床版内部への水分浸透が増厚界面付近の水平ひび割れ発生以後であるという仮定の下で行ったものである。

実験では水の影響を計るために床版に十字型の施工目地が設けられている。解析ではこの目地にあたる要素の水分透過性を通常の 10 万倍とすることで、目地からの水の浸入や排出を表現した。また水張りの範囲は実験と同一とし、範囲内の空隙要素に対して空隙水の初期飽和度を 100% と設定した。

## 4. 解析結果

### 4.1 乾燥条件下の解析

#### (1) Dry-S シリーズ

図-7 に Dry-S シリーズのたわみと走行回数との関係を示す。初期たわみ量は大きい順に PCM, LSF, SFRC であり、増厚材の剛性の低い順となった。床版の破壊基準をたわみが床版支間の 1/200 である 12.5mm を超えた点と定義すると、各試験体の 157kN 等価走行回数は SFRC が 10.5 億回、LSF が 4.8 億回、PCM が 2.0 億回であった。これは、圧縮縁に位置する増厚材料が低弾性化されることで床版全体の剛性が低下し、母床版の受けるひずみ振幅が増大したためと考えられる。

増厚界面の接合要素に接着強度を超える応力が働いた瞬間をはく離の発生と定義すると、はく離は LSF, PCM 試験体ともに走行回数が 28 万回を超え、輪荷重が 19.6kN 引き上げられた直後に発生したが、SFRC 試験体はたわみが破壊基準を超えるまではく離は発生しなかった。

一方各試験体において、走行回数 24 万回前後で増厚界面の直下に水平方向のひび割れが発生した (図-8)。同様のひび割れは実験でも確認されており、増厚界面の引張付着強度  $2.5\text{N/mm}^2$  よりも母床版コンクリートの引張強度が小さいため、はく離に先んじて発生したと思われる。そのため以降はこの水平ひび割れの発生をはく離と同等のものとして扱う。

水平ひび割れはいずれの試験体でも走行回数 24 万回を超えたところで顕著になりはじめ、材料ごとの差はほとんど見られなかった。PCM のような低弾性材料の場合、母床版との静弾性係数の差は縮まるものの、たわみそのものが大きくなることで結果として増厚界面に働く引張

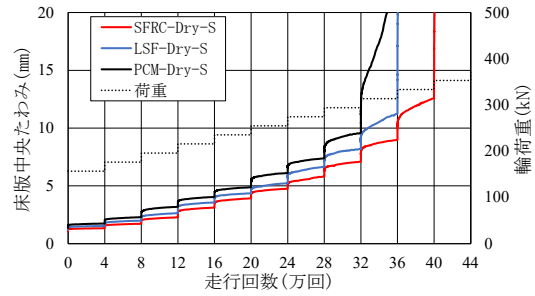


図-7 たわみと走行回数の関係 (Dry-S)

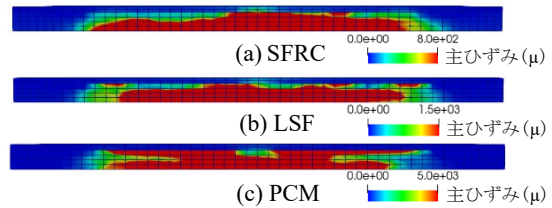


図-8 橋軸方向主ひずみ分布 (走行回数 32 万回)

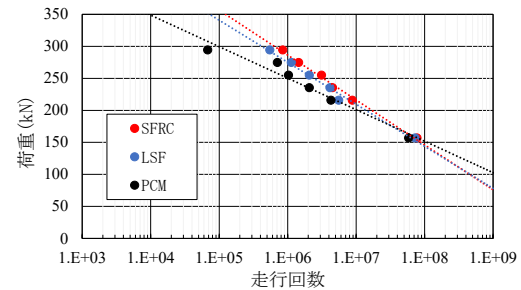


図-9 荷重レベルと疲労寿命の関係 (Dry-C)

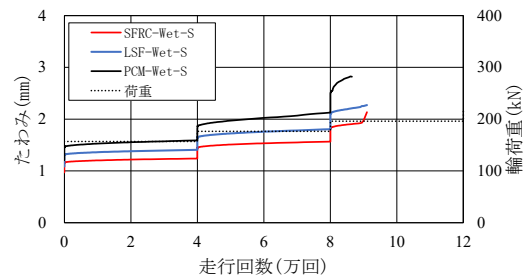


図-10 たわみと走行回数の関係 (Wet-S)

応力に SFRC との差があまり現れなかったと考えられる。

#### (2) Dry-C シリーズ

図-9 に Dry-C シリーズの荷重レベルと疲労寿命の関係を示す。Dry-S シリーズと同様 PCM 試験体の性能がやや劣る結果となっているが、その差は荷重レベルが低いほど縮まる傾向にある。荷重レベルが下がるほど増厚部が損傷を受けずに母床版のみが疲労破壊するようになる傾向があり、また輪荷重走行時のたわみの差も小さくなるため、材料による差が現れづらくなると考えられる。

### 4.2 水張り条件下の解析

#### (1) Wet-S シリーズ

図-10 に Wet-S シリーズのたわみと走行回数との関係を実験結果と合わせて示す。破壊時の走行回数はいずれの試験体も 9 万回前後であり、157kN 等価走行回数に直す

と実験の 1/100~1/200 程度となる。このことから Wet-S シリーズの解析条件と実験には乖離があると予想される。

解析における床版中央部の空隙内水圧を図-11 に示す。水張り範囲内の空隙要素は初期から水分で飽和しており、輪荷重の走行によって逃げ道を失った水分が数 MPa の水圧を発生させる。解析ではこの水圧が、セメント硬化体の骨格を破壊していくことによって、破壊が早期化していく。一方 SFRC 試験体の実験では初期から増厚目地部からの漏水が見られたものの、漏水中にはセメント粒子による濁りがあまりみられなかったことから、初期段階においてセメントペーストの破碎は起きていなかったものと捉えることができる。さらに床版上面の浮きが検出された時点の前後で、たわみの急増や漏水の拡大が確認されている。

以上より、载荷初期段階では床版の疲労に水が与える影響は小さく、床版上面の浮き、すなわち離や水平ひび割れが発生した後に水の影響が顕在化するという仮定の下、Wet-S-24, Wet-S-28 シリーズの解析を実施した。

#### (2) Wet-S-24 および Wet-S-28 シリーズ

Wet-S-24 および Wet-S-28 シリーズの解析結果を表-6 と図-12 に示す。このシリーズにおいて水平ひび割れの発生は走行回数 20~24 万回の間で確認され、実験結果とも一致する結果となった。走行回数は Wet-S-24, Wet-S-28 とともに水張り条件に移行してから 1,000 回前後で破壊に至っており、材料ごとの差は大きくは現れなかった。

図-13 に Wet-S-28 シリーズの破壊時の主ひずみ分布および水分移動量を示す。水分移動量は各部位のコンクリート中での水分移動距離の累積和を表したものであり、損傷を受けて骨格が破壊されるほどその量も大きくなる。水分移動量が特に多いのは、曲げの影響を最も受ける床版中央部と車輪の折り返し地点となる走行範囲の端部である。床版中央部では他の箇所よりも多くのひび割れが形成されることでひび割れを通じた水分浸透が多くなったと考えられる。また車輪は走行範囲内を単振動する形で与えているため、走行範囲の端部では車輪の滞在時間が長くなる、すなわち持続载荷時間が長くなることで、損傷が累積し、水分移動量も大きくなったと考えられる。

#### 4.3 実験との比較

SFRC 試験体の実験では増厚目地部からの漏水が载荷初期より見られたが、漏水中にセメント分が含まれていなかった。よって実験の初期段階においては、水は床版の表層を流れるだけで疲労に与える影響は小さかったものと考えられる。

一方、床版上面の浮きの発生や局所振動試験で空隙が確認される段階になると漏水の拡大やたわみの急増といった現象が見られた。水の影響を考慮した Wet-S シリーズでは、乾燥状態の結果に比べて急速に疲労破壊が進行

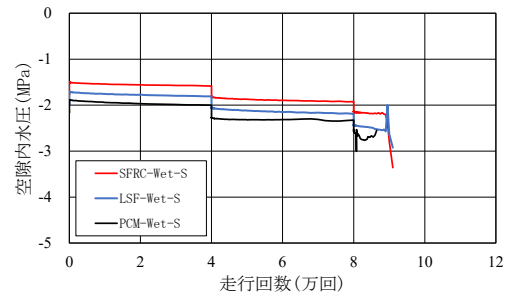


図-11 床版中央部の空隙内水圧 (Wet-S)

表-6 各シリーズの解析結果

シリーズ	試験体	走行回数	157kN 等価 走行回数
Wet-S-24	SFRC	240,800	30,922,468
	LSF	241,300	31,553,623
	PCM	241,600	31,932,315
Wet-S-28	SFRC	281,800	85,884,812
	LSF	281,000	83,449,323
	PCM	280,800	82,840,450

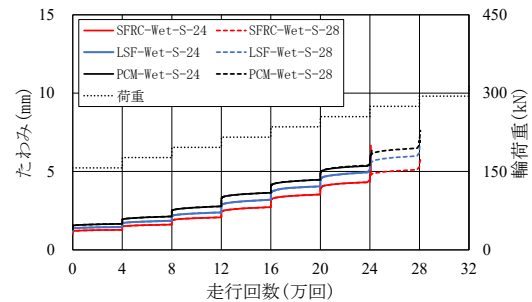


図-12 たわみと走行回数の関係 (Wet-S-24, 28)

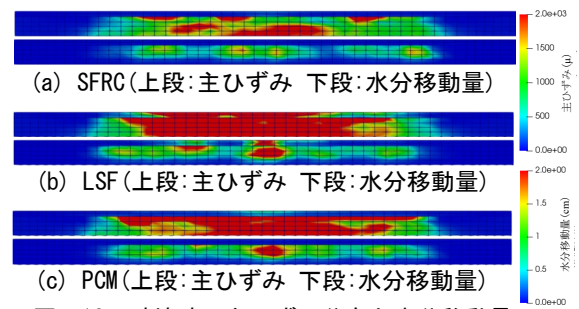


図-13 破壊時の主ひずみ分布と水分移動量

するという結果が得られていることから、疲労により床版内部にも水が浸入するようになったことで、そこから疲労損傷が急激に進行するようになったものとみられる。

床版内部で高水圧が生じるためには、圧縮力を受けた水が周囲に散逸せずその場に留まり続ける必要がある。実験において SFRC 試験体の初期に見られた漏水は乾燥収縮によって生じた目地部のひび割れから水が浸入したもののだが、このときひび割れの経路長が短く、圧縮力を受けた水は直ちに目地から床版外部へ排出され、水圧は低いレベルに抑えられたと考えられる。一方、床版内部

に水平ひび割れやはく離による空隙が生じると、その空隙を通じて、水は床版内部深くまで浸入するようになる。このとき輪荷重による圧縮力を受けると、水は周囲に逸散することができず高水圧状態となり、セメント硬化体骨格を破砕するなどして床版に深刻な損傷を与える。この時に損傷が発生するのは増厚部ではなく母床版側であり、増厚による延命効果を得るためには、内部への水の浸入をとめることがまず重要になる。そのためには、接着剤の塗布によるはく離の抑制や確実な防水層の設置を行うとともに、床版上に長時間滞水させないための道路排水勾配の確保が有効であると考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では剛性の異なる3種のコンクリート系材料による上面増厚補強を施した床版の輪荷重走行試験解析を実施し、実験との比較を行った。得られた結論を以下に示す。

- 1) 実験では床版下面からの漏水や床版内部の空隙が確認されて以降、たわみの急激な増大が見られた。また試験終了後の切断面の観察から、増厚界面付近で水平方向のひび割れが確認された。
- 2) 上面増厚に低弾性材料を用いた場合、材料の変形追随性によって界面剥離が抑制されるものの、床版全体としての剛性が低下し、たわみが大きくなることによって、疲労载荷による界面への負荷が大きくなる。その結果、増厚界面でははく離や水平ひび割れの発生タイミングについて、高弾性材料を用いた場合と大きな差が見られない結果となった。
- 3) 一定荷重下での解析では荷重レベルが下がるほど材料ごとの差が縮まり、母床版側の破壊が支配的になる傾向が見られた。
- 4) 水分浸透を考慮した解析では疲労の進行が著しく加速し、破壊時の等価走行回数は解析と同条件で行った実験の1/100~1/200程度となった。
- 5) 解析結果との比較から、実験において床版の疲労性能に水が影響を与え始めるのは、水平ひび割れやはく離によって床版内部に大きな空隙が生じた以後である可能性がある。
- 6) 疲労の進行した床版の内部に水が入り込むと急速に破壊に至るため、床版あるいは道路舗装面における防水対策を講じることが重要である。

今後の課題として、今回の検討は乾燥あるいは湿潤条件で行ったものであり、乾湿による乾燥ひび割れの形成とそこへの水の浸入の影響を十分に評価できていない点が挙げられる。今回の実験解析では増厚材による差がみられていないが、増厚材の乾燥収縮が小さく、ひび割れ

が入りにくいような場合には、実供用環境下においてより大きな効果を生む可能性があり、今後の検証が必要であると考えられる。

## 謝辞

本研究遂行にあたり一般財団法人首都高速道路技術センターをはじめ、関係の皆さんには多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 長谷俊彦, 和田圭仙, 後藤昭彦: 上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の検討, コンクリート工学, Vol.50, No.3, pp.245-253, 2012.3
- 2) 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, Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987.9
- 3) 青木聡, 染谷厚徳, 山本一貴, 蔵治賢太郎: 損傷した床版上面を補修・補強する技術PCM舗装の開発, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.1, No.1, pp.153-162, 2022.3
- 4) 阿部忠, 鈴木寛久, 貴志豊, 野本克己: RC床版のSFRC上面増厚補強法における接着剤が耐疲労性に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1084-1091, 2013.3
- 5) 松井繁之: 道路橋床版設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007
- 6) 内藤英樹ほか: 局所振動試験に基づく道路橋RC床版の内部損傷評価, 土木学会論文集E2, Vol.73, No.2, pp.133-149, 2017.4
- 7) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Non-Linear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, 2003
- 8) 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, Vol.4, No.3, pp.445-457, Oct. 1987
- 9) 藤山知加子, Gebreyouhannes, E., 千々和伸浩, 前川宏一: 移動荷重下の床版疲労寿命に影響を及ぼす各種要因の数値解析に基づく分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.727-732, 2007.7
- 10) 平塚慶達, 千田峰生, 藤山知加子, 前川宏一: RC床版の疲労余寿命に及ぼす先行荷重履歴の影響, 土木学会論文集E2, Vol.72, No.4, pp.323-342, 2016.10
- 11) Maekawa, K. and Fujiyama, C.: Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high-cycle loads, Engineering Computations, Vol.30, No.6, pp.825-841, Aug. 2013