

## 6. RC 床版薄層増厚補修工法の水張り条件下の疲労耐久性

### Fatigue Durability of Thin Layer Thickening Repair Method for RC Slabs under Water Filling Conditions

技術支援課 櫻田 孝、安藤 哲明、○関口 幹夫

#### 1. はじめに

建設局管理橋梁のうち昭和 48 年以前の道路橋示方書（以下、道示と略記）<sup>1)</sup>の基準（昭和 31 年、39 年など）で建設された鉄筋コンクリート（RC）床版は、床版厚が薄く鉄筋量が少ないなどの要因により、重交通路線では早期にひび割れが発生するなど耐荷性能が劣っていた<sup>2,3)</sup>。このことから、交通規制が不要な床版下面補強対策の鋼板接着や縦桁増設工法などが積極的に進められた。また、損傷が進み補強が困難な場合には、工期短縮が図られ死荷重の増加を抑えて耐荷性能を向上できるプレキャスト PC 床版などに取替えている<sup>4)</sup>。

床版の橋面舗装は、一般都道では概ね 15～25 年サイクルで切削打換え（全層打換え）を繰り返して維持管理している。近年の切削打換え工法では、切削時に床版を過切削させないために防水層より 10mm ほど既設舗装を残して切削し、残りはスクレーパーやバックホーの爪などで剥がす仕様<sup>5)</sup>となっている。しかしながら、施工時間に制約のある夜間工事では、特に床版厚の施工精度が悪い古い床版において、過切削等により床版厚の減少や写真-1 に示す上鉄筋損傷の実態が存在する。

当センターは、過切削等により床版厚が減少している床版や床版上面の砂利化（土砂化）などで損傷が進行して耐荷性能が劣っている床版を対象に、床版上面の被りコンクリートを 20 mm 程度切削して、防水性能を高めた薄層増厚材を設計床版厚

まで回復させる補修や設計床版厚+20mm 程度増厚補強する新しい薄層増厚工法の検討を行っている。

本稿では、昭和 39 年道示<sup>6)</sup>基準の床版厚 190mm の基準床版を 2 体製作し、ゴムタイヤ式輪荷重走行試験機を使用して輪荷重 160kN 走行によりひび割れ密度 10m/m<sup>2</sup>の損傷を与えた。さらに試験体の上面を路面切削機で 20mm 切削して、セメント系の薄層増厚材 2 種類を 20mm 舗設後、水張り条件下で輪荷重 160kN 走行の疲労耐久性を検討した。

#### 2. 輪荷重走行試験の概要

##### (1) 試験体

床版試験体は、昭和 39 年道示の基準に基づいて設計し、形状寸法と配筋図を図-1 に示す。床版の形状寸法は、幅 2.8m（支間 2.5m）橋軸方向の長さ 3.5m 床版厚 190mm とし千葉県美浜区内の試験体製作ヤードで 2 体製作した。



写真-1 過切削による鉄筋損傷

## (2) 使用材料

鉄筋はSD295AのD16、D13、D10で鉄筋の特性値を表-1に示す。コンクリートは、やや品質の劣る材齢28日目標強度を $25\text{N/mm}^2$ とする生コン(18-8-20-N)を使用した。コンクリートの配合表は表-2に特性値は表-3に示す。

コンクリートの乾燥収縮ひずみは、試験体と同

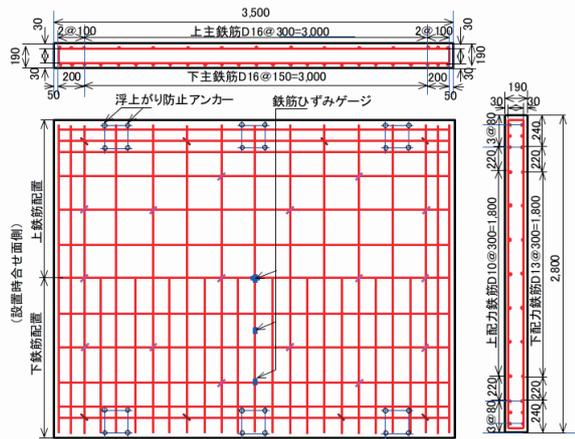


図-1 試験体の形状寸法

表-1 鉄筋の特性値

種類	降伏応力 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強さ ( $\text{N/mm}^2$ )	弾性係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )	伸び (%)
D10	366.1	500.6	174.3	18.6
D13	360.7	501.4	177.4	19.9
D16	361.1	494.3	184.5	18.1

表-2 配合表

配合	配合表( $\text{kg/m}^3$ )						
	W/C	C	W	S1	S2	G	*1
18-8-20-N	67.0%	239	160	627	269	1004	2.39

\*1: AE減水剤

表-3 コンクリートの特性値

材齢 (日)	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	静弾性係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )	ポアソン比	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )
28	24.6	30.5	0.19	2.1

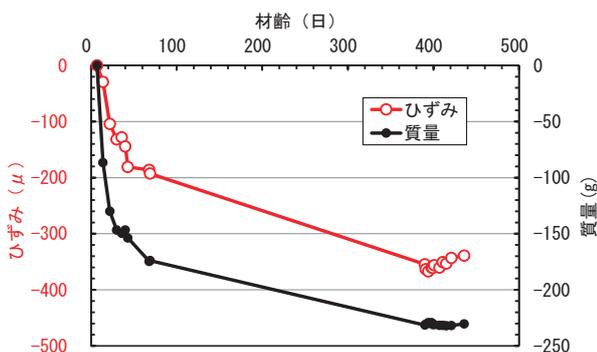


図-2 乾燥収縮と質量変化

じ室内環境下で $10 \times 10 \times 40$  cm供試体のコンタクトストレインゲージ法による測定結果を図-2に示す。走行試験は材齢38日以降に開始し、試験終了時(材齢436日)の収縮ひずみ量は $339\mu$ 、質量減少量は230 gであり通常の範囲である。

## (3) 走行疲労試験方法

輪荷重走行疲労試験は、写真-2のゴムタイヤ自走式の輪荷重走行装置を使用する。試験体は、図-3に示す載荷装置の支持桁上に2体連続(試験体同士の接触面には5mmのゴム板を挿入)して配置し、床版支間中央をタイヤが約6.5m走行する方式である。走行荷重は、都内で観測される輪荷重の最大値に相当する160kN一定とする。

## (4) 水張方法

水張の方法は、図-4に示すようにプラスチック製の目地棒を額縁状に接着剤で設置し、中央横桁上の床版合わせ面には漏水を最小限にすべく止水用コーティング材を充填した。また、床版下面にビ



写真-2 輪荷重走行装置(水張試験)

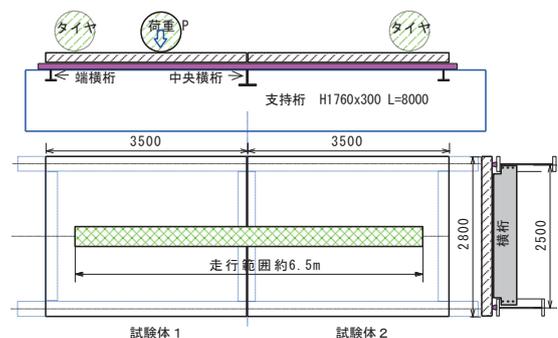


図-3 試験体設置図

ニールシートを設置して漏水を集水するタンクを設置した。走行試験では、水道水を1日1~2回約20l散水して常に水張状態となるように、タイヤ走行部以外に湿潤養生用スポンジマットを敷き、ブルーシートで覆い乾燥防止対策を行った。

### (5) 薄層増厚材の選定

薄層増厚材の選定は、令和2年度に開発中を含めた10種類について事前評価を行ない、表-4に示すタイプA~Dの4種類を選定した。これらは材齢4時間圧縮強度40N/mm<sup>2</sup>以上、薄層増厚20mmの施工が可能で防水性能の高い機能を有する新材料である。タイプEは、現行の代表的な増厚材である超速硬鋼繊維補強コンクリート(SFRC)であり、比較のため掲載している。タイプAは米国で実績の多いレジンコンクリート、タイプBおよびCは特殊セメント系である。タイプEはスイスで開発された特殊セメント系の国産品である。平成5年度は、セメント系のタイプBとCを施工する。

### (6) 試験体の切削と増厚材の施工

試験体の切削方法は、野外の土の作業ヤードに約200mm掘り下げた中に試験体を埋め込む形で設置した。写真-3に示す小型路面切削機を使用して写真-4に示す試験体の長手方向両端部100mmと吊り金具部を除く面を20mm切削した。

増厚施工日は、令和5年8月25日で気温35℃を越す猛暑日のため、ブルーシートで直射日光を

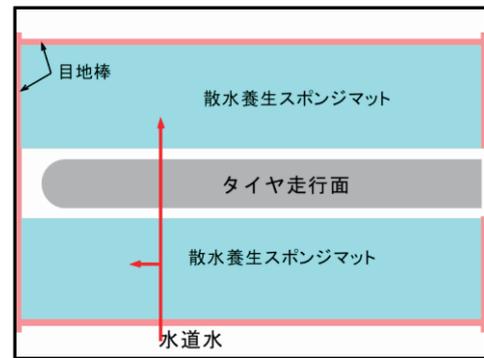


図-4 水張方法の概念図



写真-3 切削状況



写真-4 20mm 切削完了

表-4 薄層増厚材の選定結果

走行試験実施年度	令和6年	令和5年	令和5年	令和6年	—	
項目	タイプA	タイプB	タイプC	タイプD	タイプE	試験法
	材料メーカー(品名等)	ポリエステルポリアマーコンクリート(PPC)	高強度緻密モルタル(ラテックス改質速硬コンクリート[LMC])	繊維補強超速硬ポリアマーセメントモルタル(NEXGO仕様)	超緻密高強度繊維補強コンクリート	超速硬鋼繊維補強コンクリート
材料メーカー(品名等)	日鉄ケミカル & マテリアル(PPC)	太平洋マテリアル(スラブガード)	住友大阪セメント(リフレモルセットSF)	j-ティフコム施工協会(j-ティフコム)	各社(SFRC)	
圧縮強度28d	60N/mm <sup>2</sup> 以上	70N/mm <sup>2</sup> 以上	40N/mm <sup>2</sup> 以上	130N/mm <sup>2</sup> 以上	50N/mm <sup>2</sup> 以上	
静弾性係数28d	15~25kN/mm <sup>2</sup>	25~35kN/mm <sup>2</sup>	26.5±5kN/mm <sup>2</sup>	35~40kN/mm <sup>2</sup>	25~35kN/mm <sup>2</sup>	JIS A 1149
曲げ強度28d	20N/mm <sup>2</sup> 以上	8N/mm <sup>2</sup> 以上	12N/mm <sup>2</sup> 以上	35N/mm <sup>2</sup> 以上	8N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 1171
割裂引張強度28d	6N/mm <sup>2</sup> 以上	5N/mm <sup>2</sup> 以上	3N/mm <sup>2</sup> 以上	13N/mm <sup>2</sup> 以上	5N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 1113
付着強度28d	2.1N/mm <sup>2</sup> 以上*	2.1N/mm <sup>2</sup> 以上*	2.1N/mm <sup>2</sup> 以上*	2.1N/mm <sup>2</sup> 以上*	2.1N/mm <sup>2</sup> 以上*	建研式
乾燥収縮28d	-50μ以下	-300μ以下	-300μ以下	-200μ以下	-400μ以下	JIS A 1129-2
透水試験28d	1.0g以下**	3.0g以下	1.0g以下	1.0g以下	7.0g以下	JIS A 1401
最小施工厚さ(mm)	20	20	10	20	50	
施工実績	海外で有	試験施工	有	有	多数有	
薄層(20mm)で施工可能	○	○	○	○	×	
防水性能が高い	○	○	○	○	△	
早期交通開放が可能	○	○	○	○	○	
耐荷力と疲労耐久性	○	○	○	○	薄層対応不可	
薄層総合評価	○	○	○	○	×	

\*:コンクリート母材、\*\*:JIS A 6909 透水試験方法

避けて施工した。

増厚材の施工前に切削面を清掃後に写真-5 に示すエポキシ系の含浸プライマーをローラー刷毛で塗布し、次に打継用エポキシ接着剤を塗布して増厚材を施工する。増厚材の製造は、プレミックスタイプの材料を強制練りミキサーで練り混ぜて製造した。各配合はメーカー仕様、施工はメーカーおよびメーカーの協力会社が行った。増厚材の特性値は表-5 に示すとおり材齢 3 日の圧縮強度はいずれも 40 N/mm<sup>2</sup>以上である。タイプBは、鋼繊維入りラテックス改質速硬コンクリート系の高強度緻密モルタルで 28 日圧縮強度は 115.5N/mm<sup>2</sup>、静弾性係数は 45.2kN/mm<sup>2</sup>、割裂引張強度は 8.1N/mm<sup>2</sup>であった。一方、タイプCは NEXCO 仕様（早期強度発現と弾性係数を低く抑えている）を満足するビニロン繊維入り超速硬ポリマーセメントモルタルで 28 日の圧縮強度は 49.8N/mm<sup>2</sup>、静弾性係数は 24.4kN/mm<sup>2</sup>、割裂引張強度は 3.5N/mm<sup>2</sup>であった。

タイプBの施工は、鋼繊維入りで粘性が高く、また高温のため硬化が速く、締固めに写真-6 に示す簡易な振動締固め機を使用した写真-7 に示す凹凸に仕上がった。養生後に写真-8 に示す

表-5 薄層増厚材の特性値

	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
タイプB	3	54.0	33.9	0.16	4.87
	28	115.5	45.2	0.20	8.11
	38*	121.5	46.7	0.21	8.64
タイプC	3	43.9	22.8	0.25	3.23
	28	49.8	24.4	0.23	3.55
	38*	55.1	25.6	0.23	3.29

注)\*: 走行試験開始



写真-5 プライマー（無色）と打継接着剤塗布



写真-6 タイプBの振動締固め状況



写真-7 タイプBの仕上げ状況



写真-8 タイプBの研磨機再仕上



写真-9 タイプCの締固め仕上げ状況

表面不陸成形用ダイヤモンド研磨機を使って設計厚  $20 \pm 1\text{mm}$  に仕上げ直した。一方、タイプCは、ビニロン繊維入りでタイプBほど粘性が高くないため、写真-9 に示す簡易な振動締めめでスムーズに施工できた。

### 3. 予備載荷の結果

#### (1) ひび割れの状態

薄層増厚補修時の母床版の損傷レベルは、ひび割れ密度  $10.0\text{m}^2/\text{m}^2$  とした。この損傷レベルは、東京都建設局の「橋梁の定期点検要領 (案) 令和3年12月版<sup>7)</sup>」のひび割れ損傷レベルの「ランクd」に相当する。走行前0回における版中央点の静的載荷におけるひび割れ発生荷重は、いずれも  $100\text{kN}$  で目視観察により確認した。走行1回、100回、1,000回、2,000回におけるひび割れ密度は図-5、ひび割れ図は図-6に示す。

ひび割れの発生進展は、いずれの試験体も版中央にはほぼ偏りなく発生・進展した。また、走行面に

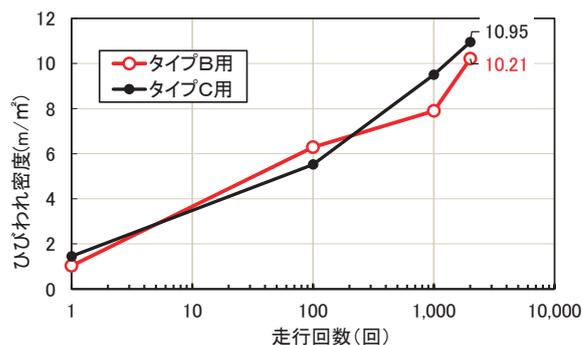


図-5 予備載荷のひび割れ密度の推移

はひび割れは発生しなかった。タイプB用は  $10.95\text{m}^2/\text{m}^2$ 、タイプC用は  $10.21\text{m}^2/\text{m}^2$  で目標に達したため予備載荷を終了した。

#### (2) たわみおよび鉄筋ひずみ

予備載荷の床版中央点の活荷重たわみと計算値の関係を図-7に示す。たわみの計算は、三次元弾性論に基づく厚板理論の多層版解析法によった<sup>8)</sup>。ひび割れの発生したRC床版は、剛性の低下した均

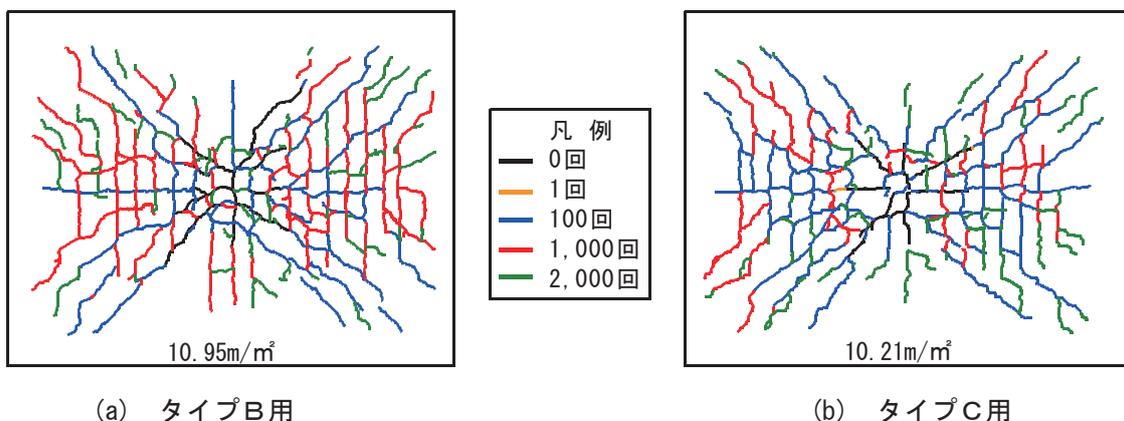


図-6 予備載荷の下面ひび割れ図(見下げ図)

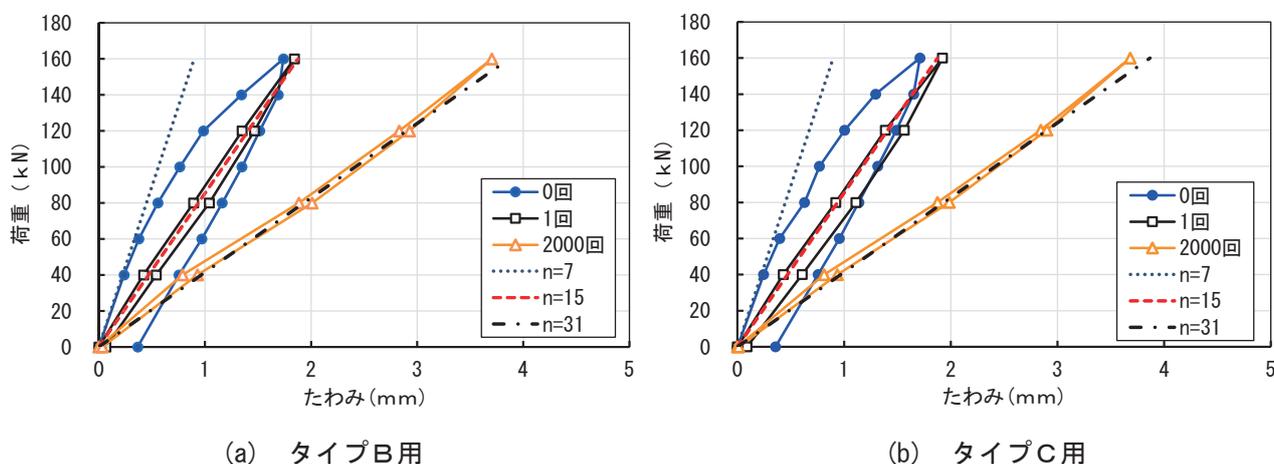


図-7 予備載荷の活荷重たわみと計算値

表-5 たわみ計算結果（多層版解析）

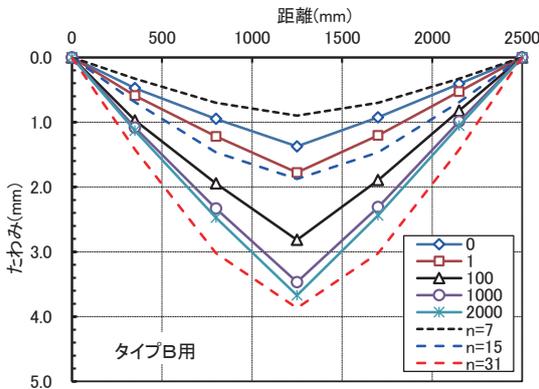
Ec (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	n=Es/Ec	支間(mm)/たわみ(mm)										
			0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
28,000	0.18	n=7	0.000	0.239	0.467	0.670	0.828	0.898	0.828	0.670	0.467	0.239	0.000
13,300	0.20	n=15	0.000	0.500	0.976	1.400	1.730	1.876	1.730	1.400	0.976	0.500	0.000
6,450	0.20	n=31	0.000	1.031	2.013	2.886	3.567	3.867	3.567	2.886	2.013	1.031	0.000

質弾性体と近似的に見なせるとして計算する。ここでは、床版の剛性を便宜的に弾性係数比 (n=Es : 鉄筋の弾性係数/Ec : コンクリートの弾性係数) として取り扱い、通常は n=7 (全断面有効時)、n=15 (ひび割れ発生直後)、n=31 (ひび割れが十分に発生した引張断面無視相当) と仮定する。160kN 載荷時のたわみ計算結果を表-5 に示す。

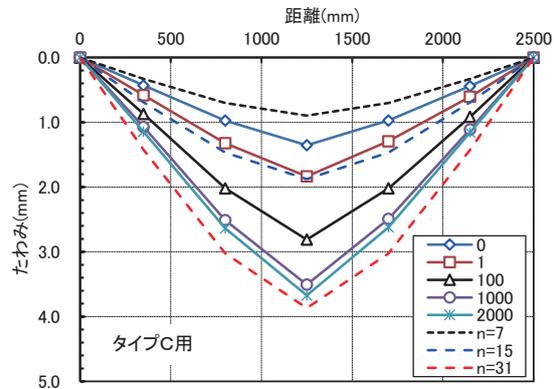
図-7 の走行前 0 回の荷重 0~60kN 区間は、概ね全断面有効の計算値 n=7 に一致している。1 回走行では、ひび割れ断面の計算値 n=15 に一致する。2,000 回では、ひび割れ密度約 10m/m<sup>2</sup> でひび割れが十分に発生した状態の n=31 の計算値に良く一致している。なお、予備載荷の 2,000 回では、貫通ひび割れは確認されていない。

主鉄筋方向のたわみ分布を図-8 に示す。タイプ B、C いずれもほぼ同じ値で、左右対称の分布形状である。走行 1 回の分布は、n=15 計算値の分布と一致し、1,000 回と 2,000 回は、n=31 計算値の分布と概ね一致している。

主鉄筋のひずみ分布を図-9 に示す。たわみ分布は、いずれもほぼ同じたわみ量であったが、主鉄筋のひずみ分布では、タイプ C 用は、タイプ B 用に比べて載荷点直下 (S4) のみ約 200μ 大きい値で推移している。大きい理由は、タイプ C の S4 位置に 0 回から主鉄筋直角方向 (走行ライン) のひび割れが発生しており、ひび割れの影響と推察できる。設計輪荷重 100kN 換算の応力度は、100~125N/mm<sup>2</sup> であり、ほぼ許容応力度程度である。

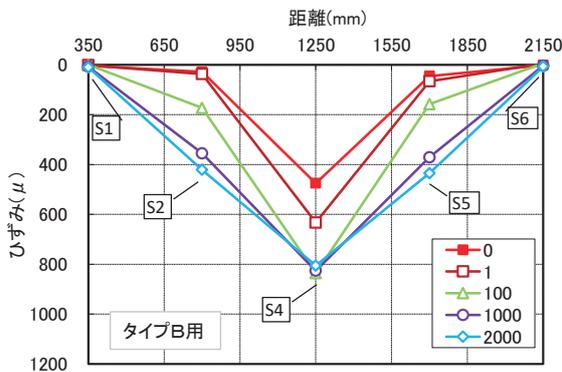


(a) タイプ B 用

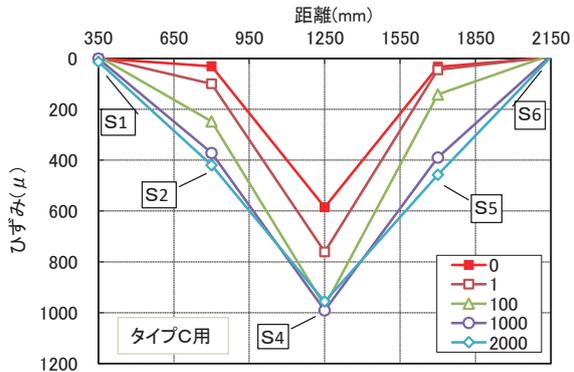


(b) タイプ C 用

図-8 予備載荷橋軸直角方向のたわみ分布



(a) タイプ B 用



(b) タイプ C 用

図-9 予備載荷橋軸直角方向の主鉄筋ひずみ分布

#### 4. 水張走行試験結果

##### (1) 破壊時走行回数と破壊形式

破壊時走行回数は、タイプBは11,255回、タイプCは26,450回でタイプBの約2倍の疲労耐久性を示した。破壊形式は、いずれも押し抜きせん断破壊であったが、通常のRC床版のようにタイヤ接地面が明確に10~20mm程度押し抜かれる現象に対して、タイプBの走行面は、鋼繊維入りのため5mm程度窪んだが明確な押し抜きは生じなかった。下面には明確な押し抜きせん断破壊による剥離が確認された。一方、タイプCは、ビニロン繊維入りで弾性係数がタイプBに比べ小さく、曲げ強度がタイプBに比べ大きいためか走行面は数ミリ凹んだが明確な押し抜きによる段差は生じなかった。

##### (2) 下面ひび割れ発生状況

薄層増厚後の走行回数と下面ひび割れ密度の関係を図-10に示す。破壊時のひび割れ密度は、タ

イプBは16.29m/m<sup>2</sup>、タイプCは18.0m/m<sup>2</sup>でタイプBに比べやや大きいが通常の範囲であった。

下面のひび割れの発生進展状況は、図-11(a、b)に示すように版中央にほぼ偏りなく発生・進展した。また、破壊後の押し抜きせん断破壊による上面走行部の剥落部をハッチで描いており、図-11(c)のタイプBは、図-11(d)のタイプCに比べ剥離面積が大きくダメージが大きい。

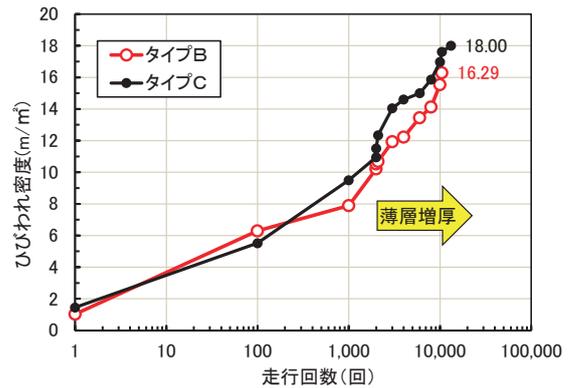
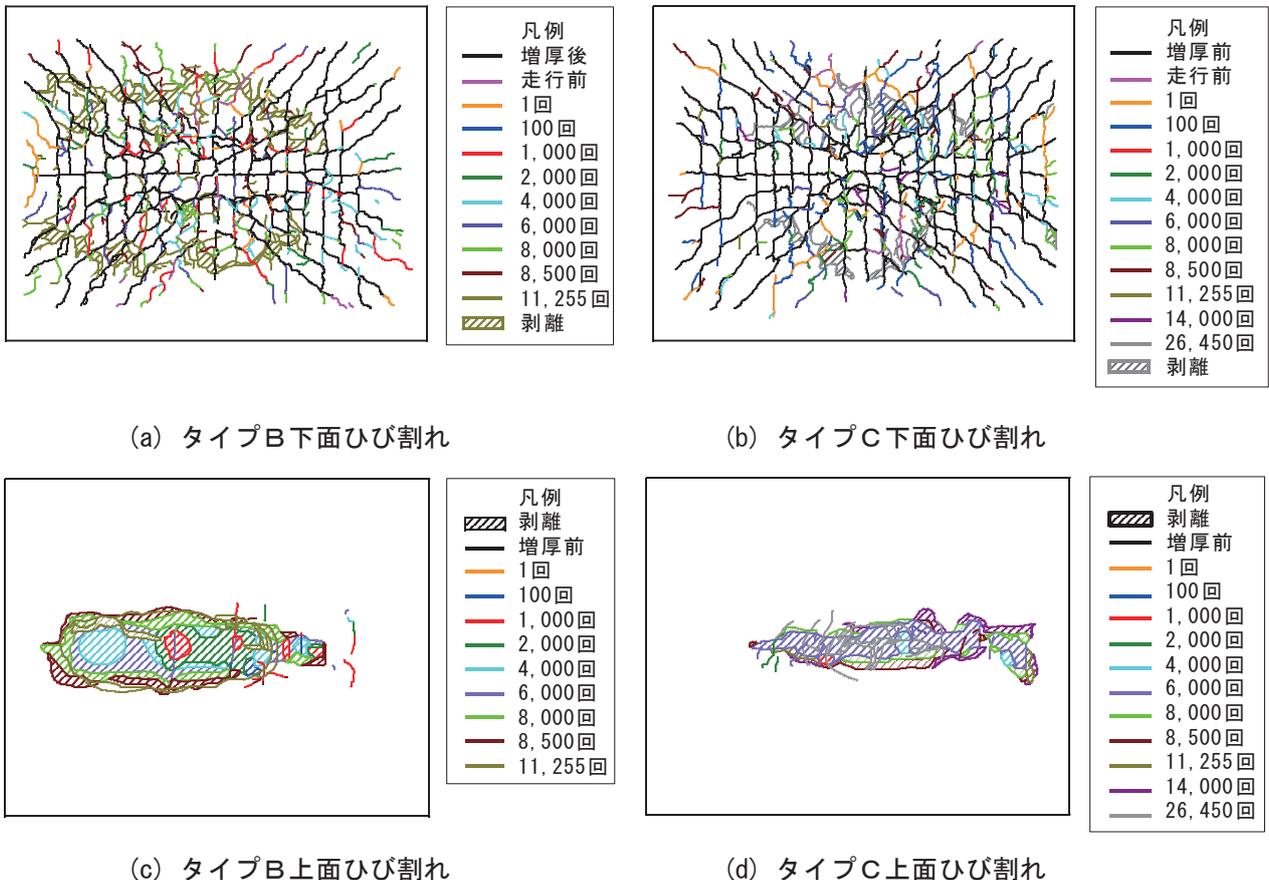


図-10 走行回数とひび割れ密度の関係



(a) タイプB下面ひび割れ

(b) タイプC下面ひび割れ

(c) タイプB上面ひび割れ

(d) タイプC上面ひび割れ

図-11 破壊後の上・下面のひび割れ図



写真-10 タイプBの漏水状況

### (3) 漏水状況

走行面直下の剥離に先行して発生した貫通ひび割れは、タイプBの方が速い。下面への漏水は、タイプBは 10,000 回あたりから写真-10 に示すとおり少量発生した。一方、タイプCは、破壊後においてもひび割れからの漏水は生じなかった。

### (4) たわみの推移

床版中央点の薄層増厚前から薄層増厚後の破壊までの活荷重たわみの推移を図-12 に示す。走行 1 回のたわみ初期値は、いずれも 1.6mm、2,000 回は 3.8mm で増厚施工直後は、ほぼ増厚前と変化がない。弾性係数の大きいタイプBの方がたわみは小さく推移したが、走行 10,000 回以降でたわみが急激に増加して破壊した。一方、タイプCは、タイプBに比べ弾性係数が小さいことからたわみはタイプBに比べて大きく推移し、約 20,000 回以降にたわみが急激に増大して破壊した。

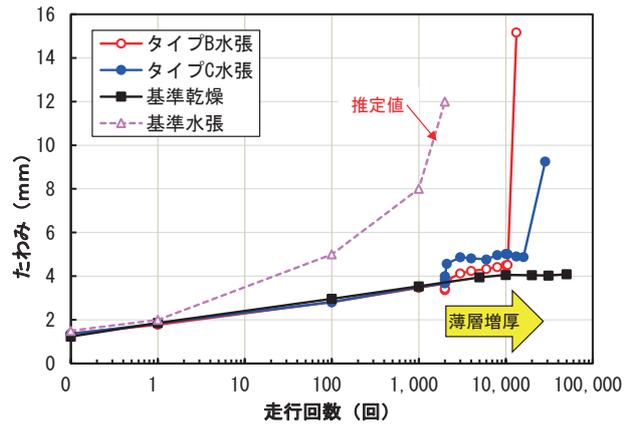
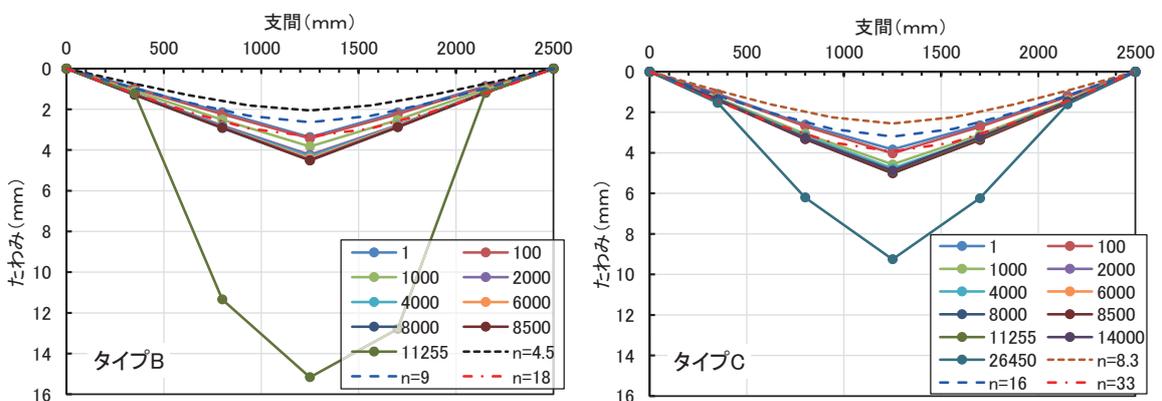


図-12 中央たわみの推移

図-12 の凡例の基準乾燥は、薄層増厚の母床版（基準床版）の乾燥条件下の走行疲労試験結果であり、約 5 万回で破壊している<sup>9)</sup>。また、今後予定している基準床版の水張試験（基準水張）の推定値を参考のため併記した。一般的に水張条件下の走行疲労耐久性は、1/10～1/100 程度に低下すると考えられているので、試験結果の 11,255～26,450 回は、基準乾燥 5 万回の 1/5～1/2 であり、防水性能の高い薄層の効果によって疲労耐久性が改善できたものと推察できる。

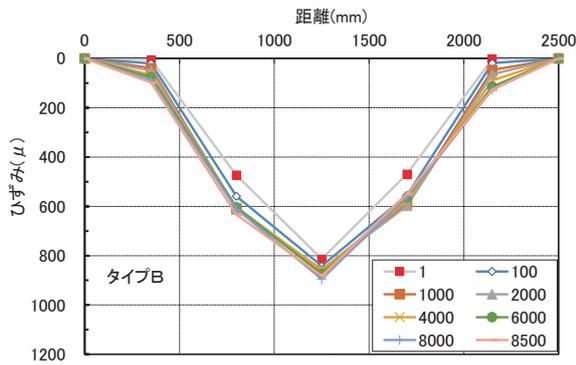
たわみの計算は、三次元弾性論に基づく厚板理論の多層版（薄層+RC 床版の 2 層版モデル）解析法を用いた<sup>8)</sup>。ひび割れの発生した RC 床版は、剛性の低下した均質弾性体と近似的に見なせるとして計算している。増厚後 1 回走行のたわみ実測値と一致する薄層の見かけの弾性係数は、床版本体の弾性係数比を  $n=31$  に仮定したうえで、薄層の表-5 に示した実測弾性係数を考慮して図-13 に示



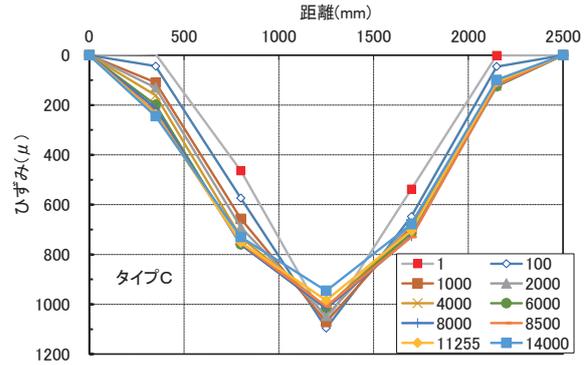
(a) タイプB

(b) タイプC

図-13 橋軸直角方向の増厚後のたわみ分布

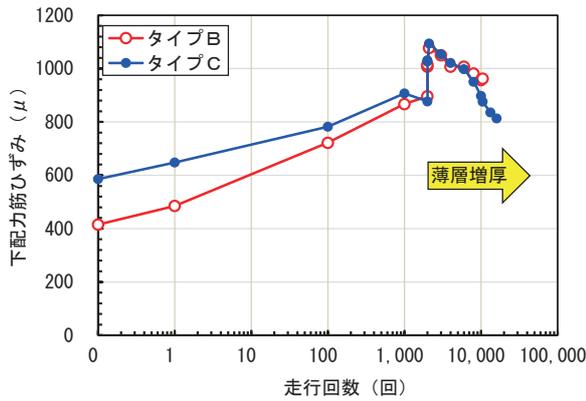


(a) タイプB主鉄筋ひずみ

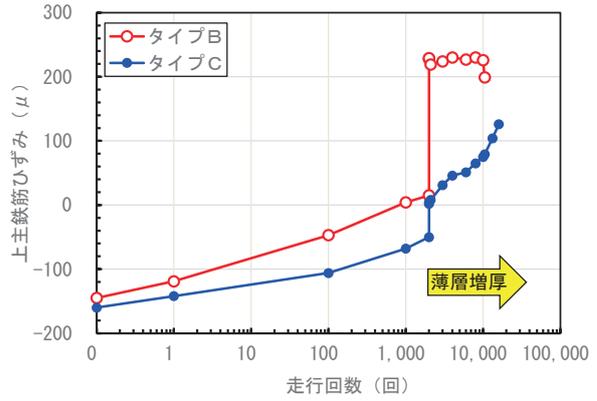


(b) タイプC主鉄筋ひずみ

図-14 橋軸直角方向の増厚後の下側主鉄筋ひずみ布



(a) 下配力筋ひずみ



(b) 上主鉄筋ひずみ

図-15 鉄筋のひずみ

す弾性係数比 ( $n$ ) で検討した。その結果、タイプBは $n=18$ 、タイプCは $n=33$ と仮定するとほぼ一致する。

走行1回から8,500回までのたわみ分布は、タイプBおよびタイプCいずれもほぼ同一のたわみ値で分布している。タイプBの中央は、11,255回で押し抜きせん断破壊後によりたわみが15mmに急増している。一方、タイプCは、1回から14,000回まで $n=33$ の計算値をやや上回った状態のたわみ分布である。その後26,450回で押し抜きせん断破壊したものの押し抜きの範囲が狭くたわみの最大値は、約9mmに増加した。

### (5) 鉄筋ひずみの推移

薄層増厚後の主鉄筋（橋軸直角）のひずみ分布を図-14に示す。いずれの試験体もたわみ同様にほぼ左右対称である。タイプBに比べてタイプCは、予備荷荷の初期値からひび割れの影響で約200 $\mu$ 大きく、その影響が薄層増厚後も継続して推移し

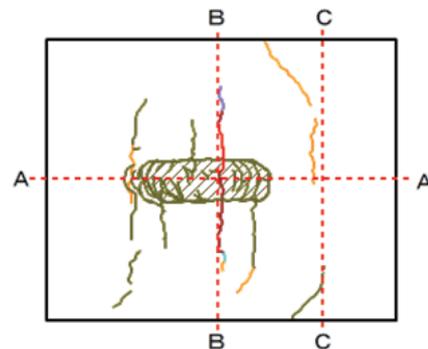
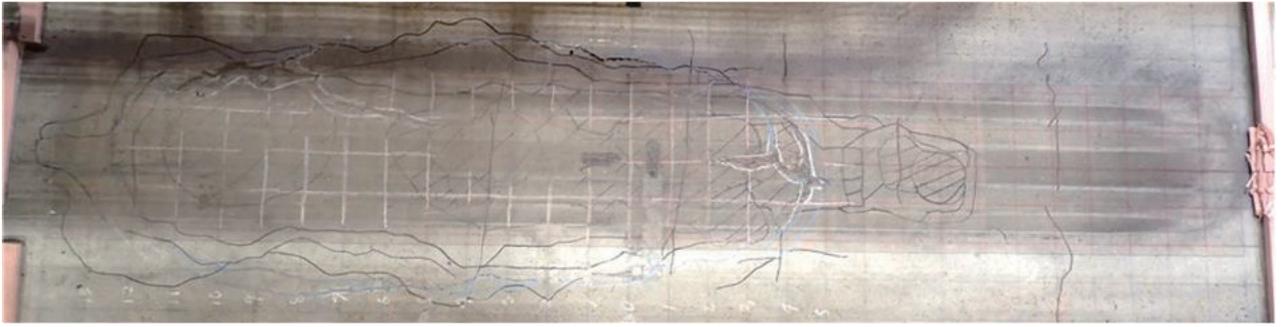


図-16 切断位置

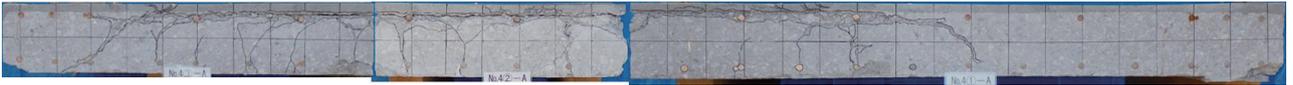
ている。また、設計輪荷重100kN換算の応力度は、予備荷荷時から大きく増加することなく、ほぼ許容応力度程度である。

下側配力筋のひずみ分布を図-15(a)に示す。タイプBに比べてタイプCは、予備荷荷の初期値からひび割れの影響で約200 $\mu$ 大きかったが、増厚時900 $\mu$ 以降に約1,100 $\mu$ に上昇した。その後は低下傾向となりほぼ同一の値で推移している。

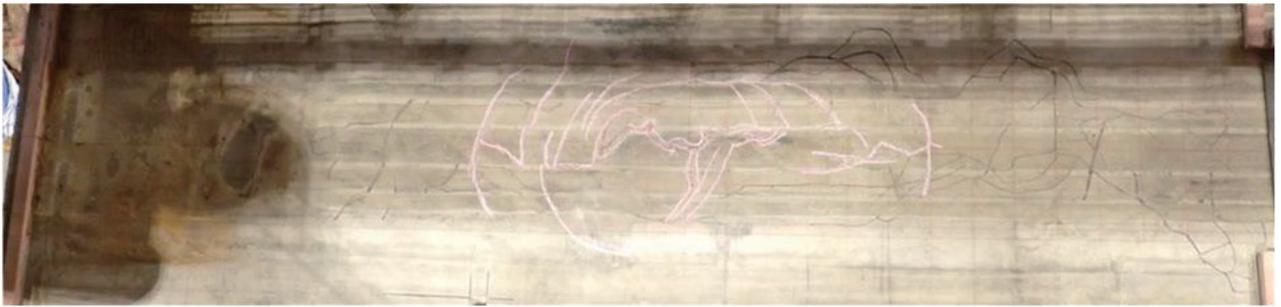
上側主鉄筋ひずみの推移は図-15(b)に示す。増



(a) タイプB上面



(b) タイプB A-A断面



(c) タイプC上面

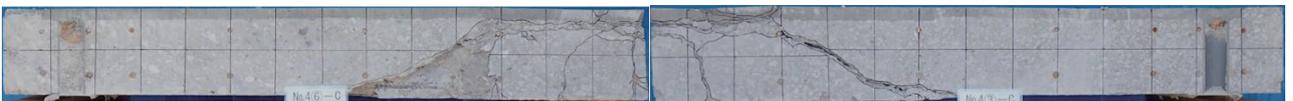


(d) タイプC A-A断面

写真-11 橋軸方向切断面



(a) タイプB B-B断面



(b) タイプB C-C断面



(c) タイプC B-B断面



(d) タイプC C-C断面

写真-12 橋軸直角方向切断面

厚後タイプBは、引張側へ200 $\mu$ 増加し、その後変化がなく、破壊時には引張ひずみで終了している。一方、増厚Cは、増厚後ひずみ値は0から引張側に130 $\mu$ 増加する変化が見られた。

## (6) 切断面のひび割れ

### 1) 上面走行ライン切断面のひび割れ

破壊後に試験体内部のひび割れの状態を調べるため図-16に示す6分割にダイヤモンドカッターにより切断した。写真-11(a)~(d)は、タイプBの走行面とA-A切断面の状態である。走行面の写真-11(a)および(c)の押し抜きせん断破壊の橋軸方向の領域は、タイプBは床版中央でタイヤ幅方向の範囲が狭く、タイプCはタイヤ幅方向の範囲がやや広いが、通常のRC床版走行面に発生する円弧状のひび割れが少ない。その要因は、いずれの薄層増厚材も鋼繊維入りB、ビニロン繊維入りCであり、繊維補強による曲げ強度や引張強度が普通コンクリートに比べ高い性質が影響しているものと推察される。写真-11(a)の走行ライン直角の主鉄筋方向の幾つかのひび割れは、上主鉄筋間隔(300mm)位置に発生していることから貫通ひび割れと考えられるが、防水性能が高い材料特性を持っているため漏水に直結していない。

写真-11(b)、(d)のA-A切断面では、ほぼ主鉄筋間隔(150mm)の貫通ひび割れに囲まれた梁状化したブロックが確認できる。また、上鉄筋位置に水平ひび割れとかぶりコンクリートが骨材化(砂利化)が確認できる。

### 2) 主鉄筋方向の切断面のひび割れ

写真-12(a)、(b)のタイプBの押し抜きせん断破壊の橋軸直角方向の領域は、タイヤ幅から約40度の角度で押し抜きせん断破壊面が確認できる。上鉄筋位置に水平ひび割れとかぶりコンクリートの骨材化(砂利化)が確認できる。

一方、写真-12(c)、(d)のタイプCの押し抜きせん断破壊面もタイプB同様にタイヤ幅から約40度の角度で破壊面が確認できるが、写真-4(d)の破壊面は、ひび割れ幅が狭く、ダメージが少ない。上鉄筋位置に水平ひび割れとかぶりコンクリート

の骨材化(砂利化)が確認できるが、タイプBに比べ損傷の程度は少ない。

## 5. 劣化度の検討

RC床版の劣化度の評価は、松井<sup>10)</sup>の式(1)を適用する。なお、引張り無視の状態は、ひび割れが十分に発生・進展した状態の弾性係数比(n=31)と仮定し、健全度ランクd相当のひび割れ密度約10m/m<sup>2</sup>に相当する予備載荷2,000回時の計算結果を表-6に示す。タイプB用劣化度は0.93、タイプC用は0.93である。いずれも劣化度1.0をやや下回っている状態である。

$$D_{\delta} = \frac{(W - W_o)}{(W_c - W_o)} \dots \text{式(1)}$$

ここに、 $D_{\delta}$ : 劣化度

$W$ : 実測活荷重たわみ(mm)

$W_o$ : 全断面有効のたわみ計算値(mm)

$W_c$ : 引張無視のたわみ計算値(mm)

走行回数と劣化度およびひび割れ密度の関係を図-17に示す。劣化度が1.0となる走行回数は、

表-6 予備載荷の劣化度

試験体	タイプB	タイプC	備考
活荷重たわみ $W$ (mm)	1回 1.778	1.834	走行
	2000回 3.671	3.672	走行
たわみ計算値 $W_o$ (mm)	0.898		n=7
	$W_c$ (mm) 3.867		n=31
劣化度 $D_{\delta}$	0.93	0.93	2000回時
ひび割れ密度(m/m <sup>2</sup> )	10.21	10.95	

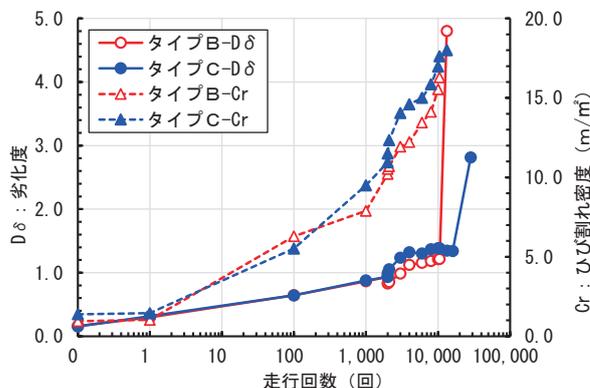


図-17 走行回数と劣化度・ひび割れ密度

タイプB、Cいずれも約 2,000 回であり予備載荷の 2,000 回は妥当な値となっている。東京都の現行の「橋梁の点検要領(案)令和 3 年度版」<sup>6)</sup> の健全度ランク d のひび割れ密度 10~15m/m<sup>2</sup>は、妥当な閾値であることが確認できる。

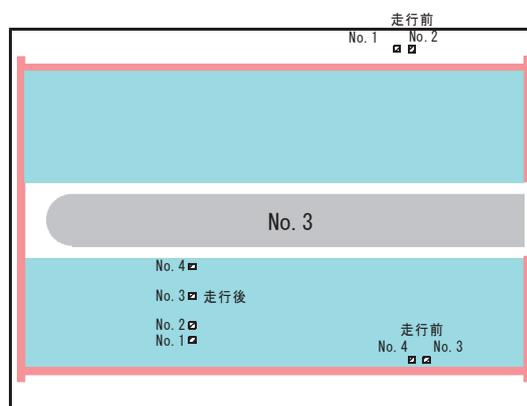


図-18 接着強度試験箇所(タイプC)

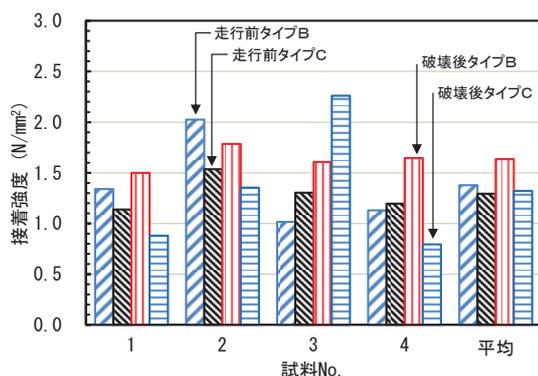
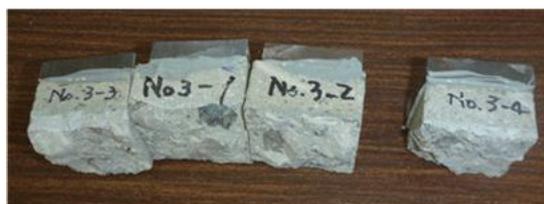


図-19 接着強度



(a) タイプB (No. 4)



(b) タイプC (No. 3)

写真-13 引張試験の破断面

## 6. 接着（付着）強度と防水性能試験Ⅱ

### (1) 接着（付着）強度

現行のジェットセメントを用いる上面増厚工法（SFRC：鋼繊維入り超速硬コンクリート）では、床版上面切削時に有害なマイクロクラックが発生する脆弱部が残ることから、脆弱部をショットブラスト（SB）により研掃することで接着（付着）強度を確保している。今回は令和 3 年度に実施した増厚材の材料特性試験<sup>11)</sup>において、含浸タイプのエポキシ系プライマーと打継用エポキシ接着剤を組み合わせることで、ショットブラスト「有り・無し」に明確な差がなかったため、施工時間短縮を目指してショットブラストを省略している。

図-18 は、走行前（薄層施工後材齢 3 日）と破壊後（材齢 400 日）の建研式による接着強度試験箇所を示す。走行前の試験箇所は、走行に影響しない主桁近傍の床版端部とした。破壊後は、走行部の剥離箇所を除く箇所とした。図-19 は接着強度（N/mm<sup>2</sup>）の試験結果を示す。引張破断面は写真-13 に示すとおりすべて床版母材であった。走行前のタイプBは 1.0~2.0N/mm<sup>2</sup> 平均 1.4N/mm<sup>2</sup> とばらついている。タイプCは、1.1~1.5N/mm<sup>2</sup> 平均 1.3N/mm<sup>2</sup> でばらつきは少ない。いずれも床版母材の割裂引張強度 2.1N/mm<sup>2</sup> 以下であり、含浸タイプのプライマーを使用しているがショットブラストを省略している影響が考えられる。一方、走行試験終了後の接着強度は、タイプBは平均 1.6N/mm<sup>2</sup> でばらつきは少ない。タイプCは平均 1.3N/mm<sup>2</sup> でばらつきは大きい。母床版の割裂引張強度を上回ったのは、タイプCの 1 か所のみであったことから、ショットブラスト省略の影響については、別途水張試験による検討が必要である。

### (2) 防水性能試験Ⅱ<sup>12)</sup>

走行試験終了後に床版上面増厚部で浮きのない部分から直径 100mm のコアを各 3 本採取して防水性能試験Ⅱ（タイプB材齢 104 日、タイプC材齢 103 日）の結果を図-20 に示す。タイプBの B-1、B-2 は、24 時間 0.5MPa の加圧で注水総量約 32ml 全量が減水（浸透）した。写真-14(a)タイプB (B-

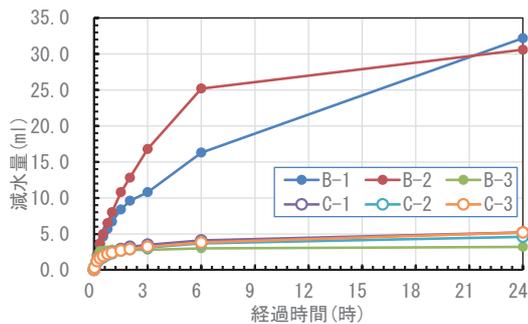
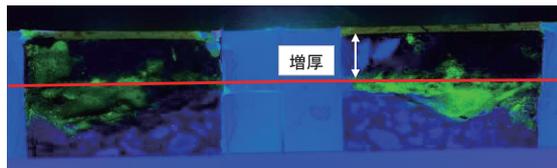


図-20 防水性能試験Ⅱ



(a) タイプB (B-2)



(b) タイプC (C-2)

写真-14 防水性能試験Ⅱの破断面浸透状況

2) のコア破断面の浸透状況に視られるとおり、床版切削面のプライマー位置まで浸透（黄緑の蛍光色）していることが確認できる。3 試料のうち 2 試料は不合格 1 試料合格であった。

タイプCは、図-20 に示すとおり 24 時間で減水量は 3 試料とも約 5ml (約 15%) と少なく、写真-14(b)タイプC (C-2) に示すとおり増厚内部への浸透がほとんどないことが確認でき 3 試料とも合格である。

## 7. まとめ

薄層増厚タイプB（鋼繊維補強ラテックス改質高強度緻密モルタル）とタイプC（ビニロン繊維補強超速硬ポリマーセメントモルタル）の水張走行疲労試験の検討結果について、以下の知見が得られた。

(1) タイプBの施工性は、鋼繊維入りで粘性が高く、夏季高温下では簡易な振動式仕上げ機使用でも不陸が生じて、厚さが 5~20mm 程度大きく仕上がる。養生後に研磨機で所定の 20mm 厚さに修正する必要性が生じた。一方、タイプ

Cは、粘性がタイプBほど高くないことから所定の厚さに容易に施工できた。

(2) 破壊時走行回数は、タイプBは 11, 255 回、タイプCは 26, 450 回でタイプBの約 2 倍の疲労耐久性を示した。タイプCの疲労耐久性が優れていた理由は、防水性能が高く弾性係数が床版に比べやや小さく、増厚部への応力集中が少ないことが想定される。破壊形式は、いずれも押し抜きせん断破壊であった。

(3) 通常の RC 床版ではタイヤ走行面が明確に 10~20mm 程度押し抜かれて段差が発生するのに対して、タイプBの走行面は、鋼繊維入りのため 5mm 程度窪んだが明確な押し抜きによる段差は生じなかった。一方、タイプCは、ビニロン繊維入りで弾性係数がタイプBに比べ小さく、曲げ強度がタイプBに比べ大きいため走行面は数ミリ凹んだが明確な押し抜きによる段差は生じなかった。なお、いずれも下面には押し抜きせん断破壊の剥離が確認できた。

(4) いずれも走行面に明確な貫通ひび割れは発生しなかったが、タイプBは 10, 000 回あたりから走行面に剥離が発生進展し、貫通ひび割れから漏水が少量確認された。タイプCは押し抜きせん断破壊後であっても漏水は発生しなかった。

(5) 薄層増厚材の接着強度は、走行前および走行破壊後いずれの状態でも約 1.3~1.6N/mm<sup>2</sup> であり、床版母材の引張強度 2.1N/mm<sup>2</sup> の約 70% 程度であった。破断面はすべて母床版であったことからショットブラストを省略してエポキシ系含浸プライマーと打継用エポキシ接着剤を併用する仕様では、切削時マイクロクラックによる接着強度低下の影響を十分に改善する効果は期待できない。今後ショットブラストの影響については、水張試験で確認する必要がある結果となった。

(6) 防水性能試験Ⅱは、タイプBは透水し不合格、タイプCは不透水で合格であった。

## 8. あとがき

令和6年度は、薄層増厚材タイプA（ポリエステルポリマーモルタル：PPC）、タイプD（超緻密高強度繊維補強モルタル：J-ティフコム）の水張試

験を行って、4種類の薄層増厚材の疲労耐久性を評価することにより、都道に最適なタイプを絞り込む予定である。

## 参 考 文 献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説（昭和48年2月）
- 2) 国広哲男(1968)：道路橋床版の問題点、橋梁と基礎、Vol.2、No.7、1-5
- 3) 太田実(1970)：床版の破損と対策、橋梁と基礎、Vol.4、No.10、30-33
- 4) 関口幹夫(2020)：第2章 総論コンクリート床版の課題と対策、橋梁と基礎、Vol.54、14-17
- 5) 東京都建設局：橋面舗装設計施工要領（案）、平成21年12月
- 6) (社)日本道路協会：鋼道路橋示方書（昭和39年6月）
- 7) 東京都建設局：橋梁の点検要領（案）、令和3年12月
- 8) 関口幹夫、佐々木俊平(2007)：IISによる各種床版の健全度の評価、平19.都土木技術センター年報、229-240
- 9) 時吉賢、前田洋平、関口幹夫、櫻田孝(2023)：昭和39年道路橋示方書基準のRC床版厚160mmと190mmの疲労耐久性、令5.都土木技術支援・人材育成センター年報、63-75
- 10) 松井繁之、前田幸雄(1986)：道路橋RC床版の劣化度判定方法の一提案、土木学会論文集、第374号、419-426
- 11) 笹木俊一、前田洋平、関口幹夫、大石雅登(2022)：RC床版の薄層増厚補修における防水性能を有した増厚材の材料特性、令4.都土木技術支援・人材育成センター年報、71-76
- 12) (社)日本道路協会「道路橋床版防水便覧」、平成19年3月