

繊維補強軽量 PC 床版の開発

Development of Fiber Reinforced Lightweight concrete PC slab

鈴木 聡^{*1}
SUZUKI Satoshi

北野 勇一^{*2}
KITANO Yuich

川口 千大^{*3}
KAWAGUCHI Chihiro

佐藤 正敏^{*4}
SATO Masatoshi

栄木 辰也^{*5}
EIKI Tatsunari

高度経済成長期に集中的に整備された道路橋において、鋼橋の鉄筋コンクリート（RC）床版の疲労損傷が顕在化している。疲労損傷が進行した RC 床版を対象とした床版更新工事が現在進められている。床版更新工事において更新床版に要求される性能には、急速施工性や耐疲労性等が挙げられ、この観点よりプレキャストプレストレストコンクリート（PC）床版が採用されるケースが多い。また、床版更新工事に伴い高齢化した既設橋梁の鋼主桁や下部工の補強を行う必要があり、補強量を削減の省略するため、更新床版の軽量化という要求も高まっている。そこで川田建設では、この要求にも対応するため、軽量プレキャスト PC 床版の開発に取り組んでいる。

本稿では、繊維補強軽量プレキャスト PC 床版の開発概要を示すとともに、繊維補強軽量 PC 床版の構造安全性および耐疲労性を検証するために実施した静的押抜きせん断試験および輪荷重走行試験の結果について報告する。

キーワード：軽量骨材、PVA 繊維、PC 床版、押抜きせん断耐力、耐疲労性

1. はじめに

鋼橋 RC 床版の更新が各地で行われ、プレキャスト PC 床版の要求が高まっている。高耐久で急速施工が可能なプレキャスト PC 床版（図 1）は詳細な設計施工要領が整備され、採用された事例も多い。その PC 床版の軽量化は、鋼主桁や下部構造の負担を軽減できるメリットがあるが、軽量骨材コンクリートは良質の人工軽量骨材を用いた場合でも、普通骨材を用いたコンクリート（以下、普通骨材コンクリート）に比べてせん断耐力が低下するため、その改善が課題であった。

この解決策として、川田建設では、ビニロン合成短繊維を混入した軽量骨材コンクリート（以下、繊維補強軽量コンクリート）に着目し、その材料物性について実験的に検討した。その結果、繊維混入率（以下 Vf）0.5 vol.% の繊維補強軽量コンクリートであれば PC 床版として要求される強度と単位重量 1.90 kN/m^3 を確保し、破壊エネルギーが軽量骨材コンクリートに対して向上することを確認した。この結果を踏まえ、PC 床版の押抜きせん断挙動について解析的に検討したところ、繊維補強軽量コンクリートを用いることで PC 床版の押抜きせん断耐力を大きく改善できることを確認した。

本稿では、これらの結果を受けて、構造安全性を検証するため実施した静的押抜きせん断試験の結果、および

床版の耐疲労性を検証するために実施した輪荷重走行試験の結果について報告する。なお、後者の実験では、PC 床版相互の継手構造には KK 合理化継手¹⁾を用いた。

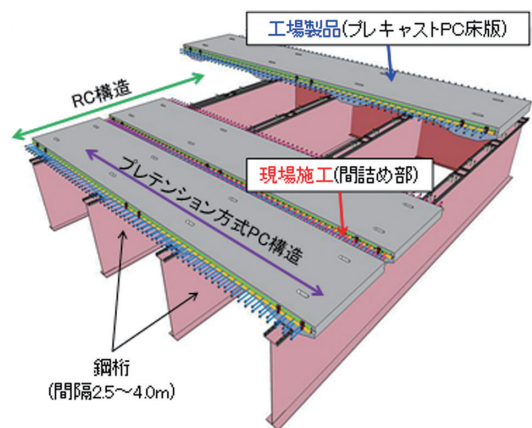


図 1 PC 床版を用いた更新用床版の概略図

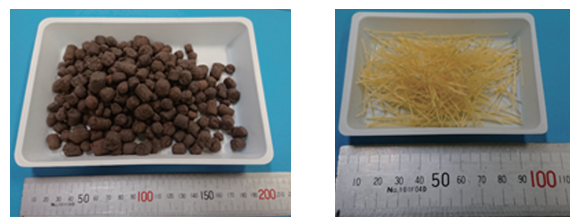


写真 1 軽量骨材（左）および PVA 短繊維（右）の外観

* 1 川田建設(株)技術本部技術開発課 主幹

* 2 川田建設(株)技術本部技術部 次長

* 3 川田建設(株)技術本部技術部技術課

* 4 川田建設(株)プレキャスト本部生産管理部九州工場製造課 課長

* 5 川田建設(株)プレキャスト本部生産管理部九州工場品質管理課

2. 繊維補強軽量コンクリートの概要

繊維補強軽量コンクリートに用いる使用材料を表1に示す。繊維補強軽量コンクリートは、粗骨材として人工軽量粗骨材を用い、かつビニロン合成短繊維（以下、PVA 短繊維）をコンクリート体積の0.5 vol.%を外割で配合したコンクリートである。セメントは早強ポルトランドセメントを、軽量骨材は最大寸法15 mmの人工軽量粗骨材（写真1左）を用いた。軽量骨材は十分な耐凍害性を得るために、含水率2%以下に管理されたものを用いた。表2にPVA短繊維の物性値を示す。PVA短繊維は直径0.66 mmで、軽量骨材コンクリートのヤング係数以上の引張弾性率を有し、かつ、繊維の長さ30 mmのものを用いた（写真1右）。

(1) 目標品質の設定

繊維補強軽量コンクリートの目標品質を表3に示す。設計基準強度は普通骨材コンクリートと同等の50 N/mm²とし、工場製品であるプレキャストPC床版の生産性を損なわないように材齢1日でプレストレスを導入することを目標とした。単位容積質量は普通骨材コンクリートの20%軽量化、ヤング係数と引張強度は同70%程度に設定した。また、塩分浸透性は普通骨材コンクリートと同程度とした。

表1 使用材料

材料	種類	
セメント(C)	早強ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm ³)	
細骨材(S)	砕砂 (表乾密度 2.67g/cm ³)	
粗骨材	普通骨材(N)	碎石 2005 (表乾密度 2.70g/cm ³)
	軽量骨材(L)	人工軽量骨材 (絶乾密度 1.29 ± 0.05g/cm ³ , 24時間吸水率 10 ± 3%, 含水率 2% 以下)
短繊維(F)	PVA 短繊維 (密度 1.30g/cm ³)	

表2 PVA短繊維の物性値

項目	単位	標準物性値
繊維径	mm	0.660
繊維長	mm	30
引張強度	N/mm ²	900
引張弾性率	kN/mm ²	23.0
引張伸度	%	9.0

表3 繊維補強軽量コンクリートの目標品質

項目	目標品質
圧縮強度	設計基準強度 50N/mm ² プレストレス導入時 35N/mm ²
ヤング係数	22.0 kN/mm ² (材齢 28 日)
引張強度	2.2N/mm ² 以上 (材齢 28 日)
単位容積質量	19.0 kN/m ³ 以下 (練上り直後)
塩分浸透抵抗性	普通骨材コンクリートと同程度

(2) 圧縮強度

圧縮強度の測定結果を図2に示す。圧縮強度は、水セメント比を普通骨材コンクリートと同程度以下かつVf=0.5vol.%以下にすることで、普通骨材コンクリートと同等の強度発現性を示すことを確認した。

(3) ヤング係数および引張強度

材齢28日におけるヤング係数は22.0 kN/mm²程度、割裂引張強度は2.2 N/mm²以上を示すことを確認した。

(4) 単位容積質量および均質性

フレッシュコンクリートの単位容積質量は、19.0 kN/m³以下であった。

(5) 塩分浸透抵抗性

繊維補強軽量コンクリートの水セメント比を普通骨材コンクリートより1.5%だけ小さくすることで塩分浸透量が普通骨材コンクリートより減少することを確認した。

(6) 破壊エネルギー

荷重-ひび割れ開口変位(CMOD)曲線を図3に示す。CMOD2.0 mmまでの範囲の破壊エネルギーを算出したところ、破壊エネルギーが軽量骨材コンクリート89 N/mに対して、繊維を混入することで273 N/mと向上することを確認した。

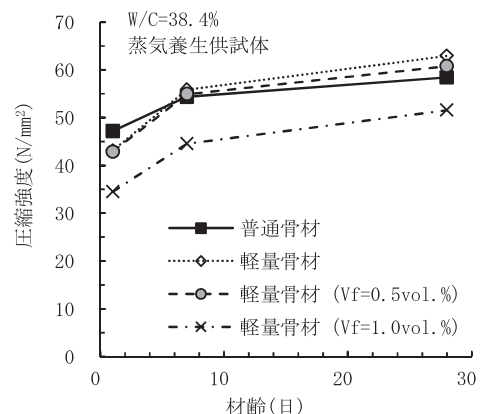


図2 圧縮強度の測定結果

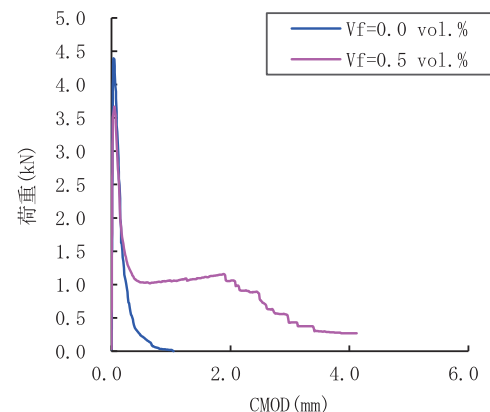


図3 荷重-ひび割れ開口変位 (CMOD) 曲線

表4 押抜きせん断試験体の配合表および圧縮強度試験結果

	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					単位容積質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
		W	C	S	G	L			
N6	36.5	165	452	739	994	-	2,350	70.6	38.1
L6	35.0	160	457	711	-	493	1,822	52.6	21.7
FL6	35.0							56.7	23.5

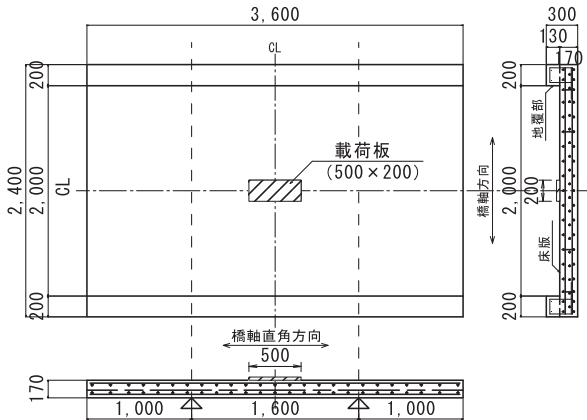


図4 試験体形状



写真2 押抜きせん断耐力試験状況

3. 押抜きせん断耐力試験

(1) 実験概要

押抜きせん断試験体の配合表および圧縮強度試験結果を表4に示す。繊維補強軽量 PC 床版の押抜きせん断挙動を検討するため、普通骨材コンクリート (N6)、軽量骨材コンクリート (L6) および繊維補強軽量コンクリート (FL6) を用いた PC 床版試験体を製作し、静的押抜き試験を実施した。PC 鋼材は橋軸直角方向に配置してプレストレスを 6.0 N/mm² 導入した。なお、試験体はプレストレス伝達長 (65 φ = 65 × 15.2 = 988 mm) を考慮し、橋軸直角方向の支点の外側に 1 000 mm 張り出した。

試験体は床版部分のコンクリートを打込み、蒸気養生を行い、翌日に圧縮強度が 35 N/mm² 以上であることを確認した後、プレテンション方式によりプレストレスを導入した。いずれの試験体も所定のプレストレスが導入されることをひずみ計測により確認した。また、繊維補強軽量 PC 床版のプレストレス伝達長が設計計算で想定する PC 鋼材公称径の 65 倍以下であることを確認した。

(2) 載荷方法

試験体形状を図4に示す。試験体は、厚さ 170 mm、幅 2 400 mm、長さ 3 600 mm であり、載荷板直下の曲げモーメント 2 辺単純支持無限版に近似させるため弾性支持梁を想定して地覆状に増厚して剛性を高めた。床版は、せん断破壊が先行するように支間 1 600 mm の連続版の断面力に近似するよう弾性支持条件として地覆部コンクリートを設けた。また、地覆上に鋼製枕梁を設置し、PC 鋼棒にて床版の浮上りを防止した (写真2)。

試験体の上面中央部には輪荷重を想定した 500 × 200 mm の載荷板を設置し、鉛直荷重を載荷した。

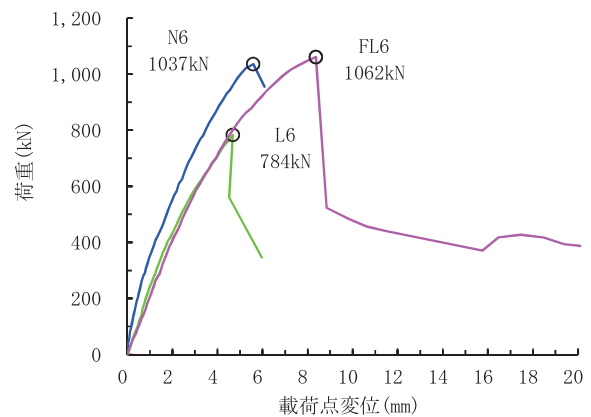


図5 荷重たわみ曲線の結果

(3) 実験結果

荷重たわみ曲線の結果を図5に示す。最大荷重は、N6で1 037 kN、L6で786 kN、FL6で1 062 kNであった。L6の最大荷重はN6の76%程度となったが、FL6の最大荷重はPVA短繊維の架橋効果により、N6と同等となった。ただし、L6およびFL6の荷重に対する変位はN6試験体に比べヤング係数が小さいため、1.3倍程度大きな値となった。破壊形態はN6とL6では最大荷重に達した後に、せん断破壊に至ったのに対して、FL6では最大荷重後に荷重が約50%程度に低下したものの完全なせん断破壊には至らなかった。

床版下面のひび割れ状況を写真3に示す。太線が押抜きにより卓越したひび割れであり、細線はそれ以外のひび割れである。卓越したひび割れに着目すると、橋軸方向の間隔はN6とL6が約1 250 mmであるのに対し、FL6では1 650 mmと長い。また、後者の試験体では微細なひび割れが橋軸方向の隅々まで進展していた。こ

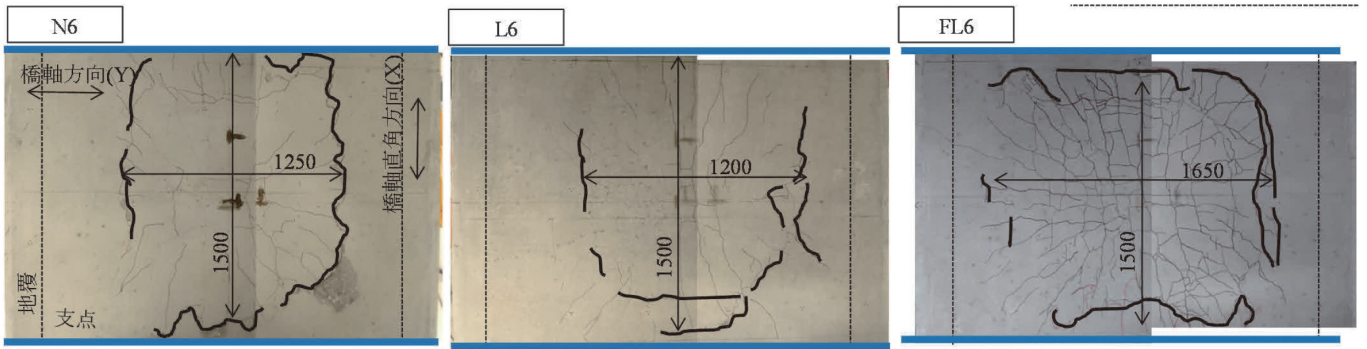


写真3 床版下面のひび割れ状況

表5 輪荷重走行試験の配合表および物性試験試験結果

	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)							単位容積質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	
		W	C	EX	S	G	L	F				
FL 床版	FL	33.5	160	478	-	688	-	497	6.50	1,822	64.7	22.2
	接合部	37.0	165	416	30	742	997	-	-	2,350	71.0	39.2
N 床版	N	36.5	165	452	-	739	994	-	-	2,350	72.1	40.4
	接合部	37.0	165	416	30	742	997	-	-	2,350	71.4	40.2

のことから短繊維の混入により橋軸方向のせん断破壊面積が拡大することを確認した。

このように、静的押抜きせん断試験の結果、従来 PC 床版より約 20 % 軽量化しつつ、従来の PC 床版と同等の押抜きせん断耐力を有することを実験的に確認できた。

4. 輪荷重走行試験

(1) 実験概要

試験体形状寸法および鋼材配置を図6に示す。試験は、普通骨材コンクリートを用いた PC 床版 (N 床版) と繊維補強軽量コンクリートを用いた PC 床版 (FL 床版) の2種類に対して実施した。コンクリートの配合および試験前に行った物性試験結果を表5に示す。なお、接合部はいずれも普通骨材を用いた膨張コンクリートである。試験体は、直角方向に 6.0 N/mm² のプレストレスを導入したプレキャスト PC 床版2枚を、場所打ち接合部で一体化させた1方向の PC 床版である。場所打ち接合部の継手には、KK 合理化継手を採用した¹⁾。

試験体の寸法は、床版厚さ 170 mm、幅 2 300 mm、長さ 3 300 mm である。試験体は、床版支間 2 000 mm で単純支持し、試験体中央部の曲げモーメントが2辺単純支持無限版に近似するように、走行直角方向端部に弾性支持ばりを配置した。

(2) 載荷方法

試験には最大荷重 300 kN、車輪移動範囲 2.0 m の輪荷重走行試験機を使用した。耐用年数相当²⁾ の走行回数算出結果を表6に、H8 道示 RC 床版相当³⁾ の走行回数算出結果を表7に、試験の載荷プログラムを図7に示す。耐用年数相当と H8 道示 RC 床版相当の走行回数は、試験装置の占有期間や試験機の能力を考慮し、載荷荷重 230 kN 一定にてマイナー則を用いて算出した。なお、S-N 曲線の傾きの逆数mは、12.76 を用いた⁴⁾。載荷荷重

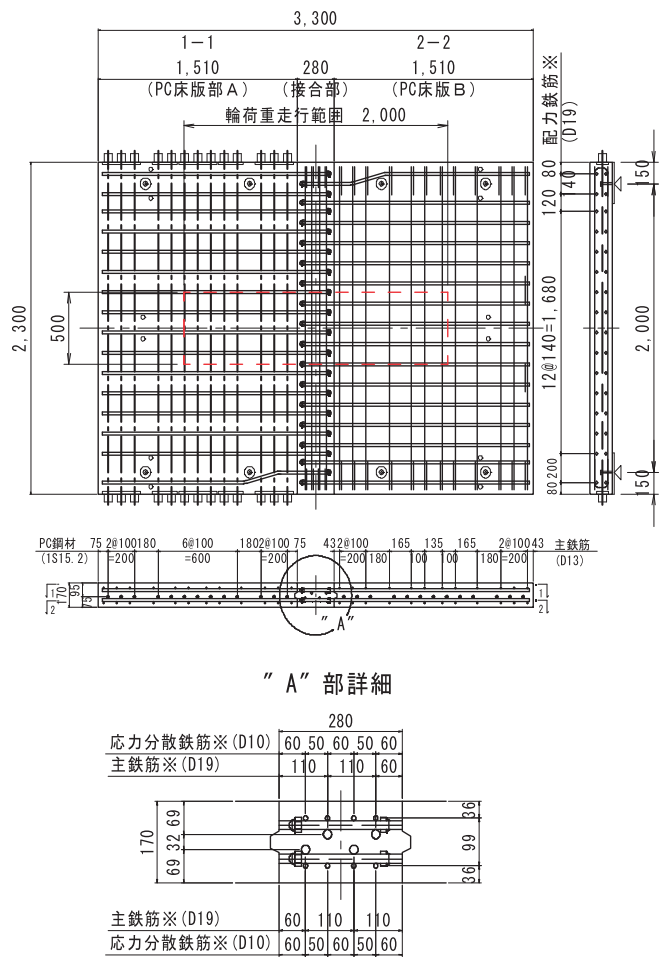


図6 試験体形状寸法および鋼材配置

230 kN 一定での走行回数は、耐用年数相当で 29 万回、H8 道示床版相当で 39 万回であった。これらの結果を共に満足させるものと考えて載荷荷重 230 kN × 41 万回を本載荷とし、総走行回数を予備載荷も含め 46 万回とした。

表6 耐用年数相当の走行回数

要求性能		試験方法		
載荷荷重 Pi (kN)	走行回数 ni	Pi/P0 (P0=230kN)	(Pi/P0) ^{12.76}	換算回数 ni × (Pi/P0) ^{12.76}
250	100,000	1.09	2.900	290,000

表7 H8 道示 RC 床版相当の走行回数

要求性能		試験方法			
NO	載荷荷重 Pi (kN)	走行回数 ni	Pi/P0 (P0=230kN)	(Pi/P0) ^{12.76}	換算回数 ni × (Pi/P0) ^{12.76}
1	157	40,000	0.68	0.007	292
2	177	40,000	0.77	0.036	1,424
3	196	40,000	0.85	0.126	5,028
4	216	40,000	0.94	0.454	18,164
5	235	40,000	1.02	1.288	51,500
6	255	40,000	1.11	3.787	151,488
7	275	15,649	1.20	10.241	160,265
合計		255,649			388,161

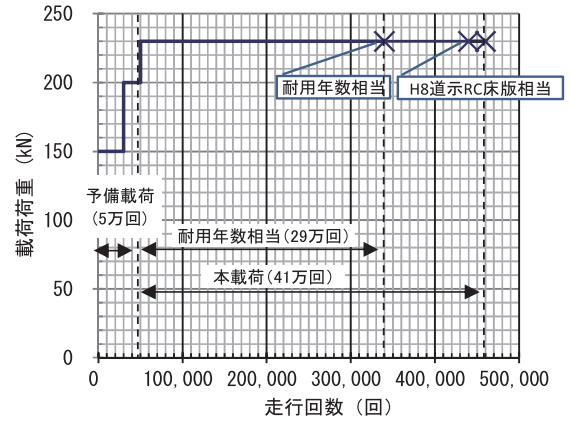


図7 試験の載荷プログラム

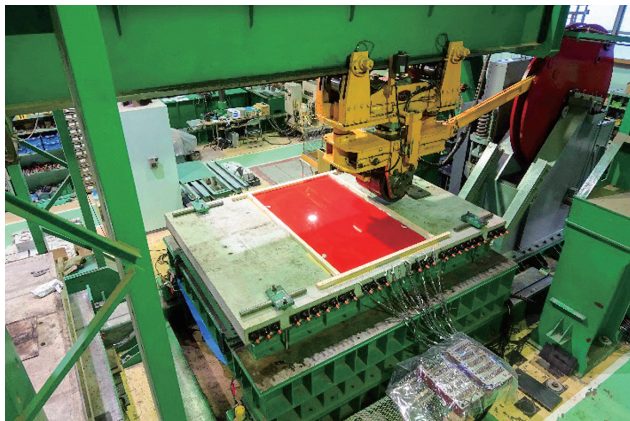


写真4 漏水確認試験状況

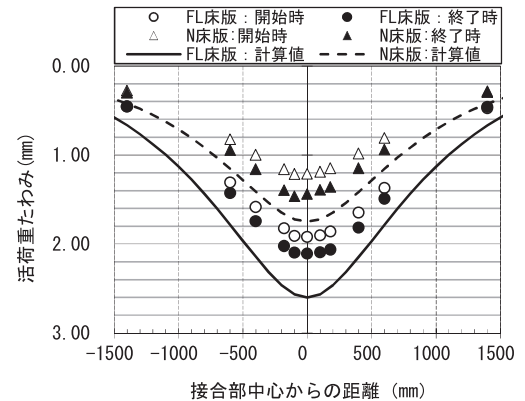


図8 橋軸方向の活荷重たわみ分布

(3) 測定項目

輪荷重走行試験の所定回数完了時点で静的載荷試験を実施し、床版のたわみ、ひび割れ幅を測定した。載荷荷重（活荷重）は、移動荷重と同値とし、載荷位置は試験体の中央とした。

(4) 漏水確認試験

漏水確認試験状況を写真4に示す。本試験29万回走行後、接合部を中心に長さ1.2 m × 幅2.0 mの範囲で着色水を6時間滞水させ、下面への漏水の有無を確認した。

(5) 実験結果

本載荷の試験前後における橋軸方向の活荷重たわみ分布図を図8に示す。図中の計算値は、版理論にて、試験体中央部の載荷面（200 × 500 mm）に輪荷重（230 kN）を載荷した2辺単純支持2辺弾性支持版の計算結果である。なお、弾性係数は実ヤング係数を、断面剛性は主鉄筋方向および配力鉄筋方向ともに、引張域を無視した断面剛性を用いた。

FL床版およびN床版ともに、たわみ分布は接合部での角折れなど生じず、滑らかな分布を示した。また、活荷重たわみは計算たわみよりも小さかった。

次に、載荷点直下のたわみ経時変化曲線を図9と図

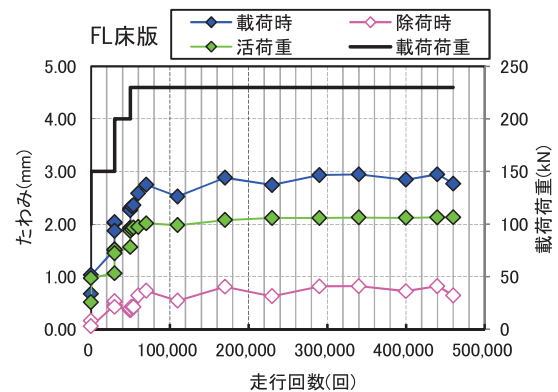


図9 たわみの経時変化 (FL床版)

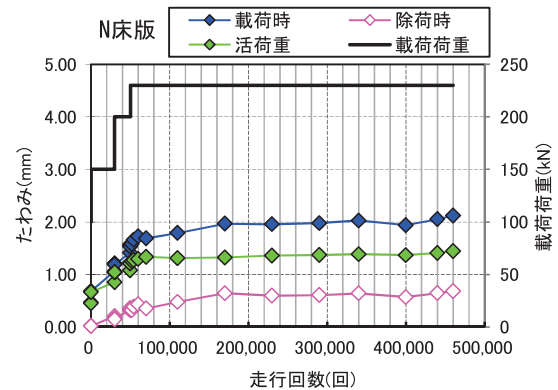


図10 たわみの経時変化 (N床版)

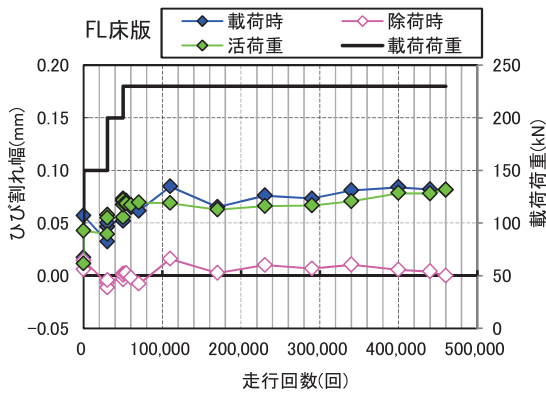


図 11 ひび割れ幅の経時変化 (FL 床版)

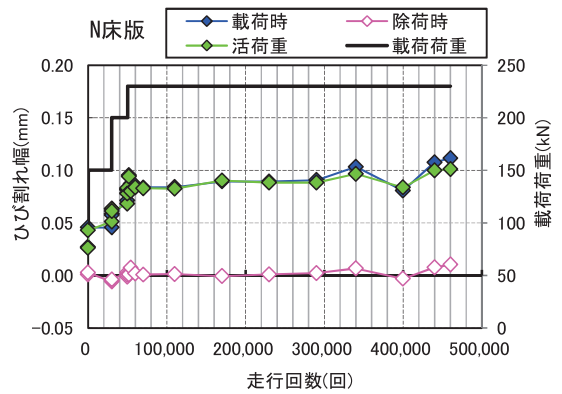


図 12 ひび割れ幅の経時変化 (N 床版)

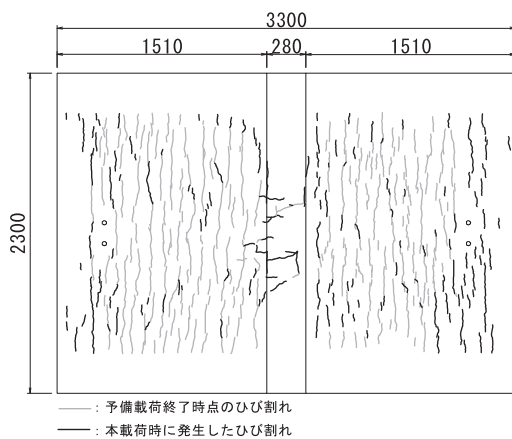


図 13 ひび割れ分布図 (FL 床版)

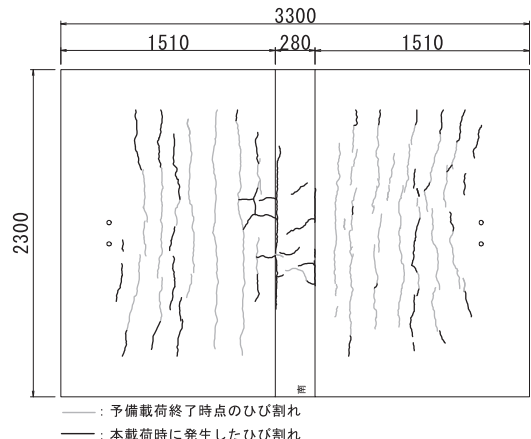


図 14 ひび割れ分布図 (N 床版)

10 に示す。FL 床版の活荷重たわみは 2.0 mm 程度で、N 床版の活荷重たわみは 1.5 mm 程度で一定であった。除荷時の載荷点直下のたわみは FL 床版で最大 0.92 mm、N 床版で最大 0.68 mm であった。

接合目地のひび割れ幅の経時変化を図 11 と図 12 に示す。活荷重によるひび割れ幅は、FL 床版と N 床版ともに、接合目地部で最大であった。FL 床版のひび割れ幅は 0.08 mm 程度、N 床版のひび割れ幅は 0.10 mm 程度で、概ね一定に推移した。

実験終了時まで、いずれの試験体のたわみやひび割れ幅は安定した挙動を示した。

試験終了時点での PC 床版下面のひび割れ分布図を図 13 と図 14 に示す。FL 床版と N 床版ともに、予備載荷時点で一様に主鉄筋方向のひび割れが発生したが、本試験でのひび割れの進展はわずかであり、耐用年数相当の回数走行後の漏水確認試験では、FL 床版と N 床版ともに、下面への漏水がないことを確認した。

5. まとめ

押抜きせん断試験では、従来 PC 床版より約 20 % 軽量化しつつ、従来の PC 床版と同等の押抜きせん断耐力を有することを確認できた。

輪荷重走行試験では、実験終了時までたわみやひび割

れ幅が安定した挙動を示し、耐用年数相当の走行回数時に行った漏水試験では、床版部や接合部からの漏水がないことを確認できた。これらにより、繊維補強軽量 PC 床版および普通骨材 PC 床版ともに、耐用年数かつ H8 年道示 RC 床版相当以上の耐疲労性を有することを確認した。また、接合部に異常な損傷が生じないことを確認した。

参考文献

- 1) 吉松秀和, 松井繁之, 大澤浩二, 中山良直, 水野浩, 表真也: 床版取替え用プレキャスト PC 床版の合理化継手の開発, 構造工学論文集, vol.60A, pp.1159-1168, 2014.3
- 2) 長尾千瑛, 広瀬剛: プレキャスト PC 床版継手の疲労耐久性照査試験, 第 26 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.189-192, 2017.10
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国土技術政策総合研究所資料, 第 28 号, 2002.3
- 4) 松井繁之: 橋梁の寿命の予測 - 道路橋 RC 床版の疲労寿命予測 -, 安全工学, Vol.30, No.6, 1991.