

# 論文

## 車線別床版取替工法の輪荷重走行試験方法に関する一考察

松井繁之\*, 渡邊輝康\*\*, 可児幸嗣\*\*\*, 藤原俊之\*\*\*\*, 木田秀人\*\*\*\*\*

\*工博, 一般財団法人災害科学研究所 (〒541-0043 大阪市中央区高麗橋4丁目)

\*\* 工修, 株式会社熊谷組, 土木事業本部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2丁目)

\*\*\*修(工), 戸田建設株式会社, 技術プロジェクト部 (〒104-0032 東京都中央区八丁堀2丁目)

\*\*\*\*修(工), 日之出水道機器株式会社, 建築・土木マーケティンググループ (〒849-0101 佐賀県三養基郡みやき町大字原古賀)

\*\*\*\*\*博(工), ショーボンド建設株式会社, 補修工学研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜1丁目)

大都市等重交通区間では車線別床版取替工事が始められている。しかし、この場合橋軸方向に接合部（縦目地）が生じるが、従来の輪荷重走行試験は橋軸直角方向接合部（横目地）の疲労耐久性を評価する方法である。そこで、橋軸方向接合部（縦目地）の疲労耐久性の評価として、車両の走行位置の変動を考慮し走行コースを変化させ、橋軸方向接合部に曲げとせん断力を作用させる輪荷重走行試験（3コース走行載荷法）を検討した。また、継手の無いPC床版を製作し、本法と既往の試験結果を比較した。

キーワード：半断面施工、縦目地、輪荷重走行試験法、3コース走行載荷法

### 1. はじめに

2015年頃より高速道路では交通規制をしながら劣化損傷した既設のRC床版から耐久性に優れたプレキャストPC床版への取替が大規模に進められている。その際、施工の合理化を目的に、橋軸直角方向接合部（以下、横目地と記す）に対して各種継手が開発されている。しかし、従来の床版取替は対面交通規制により1方向を全断面で取替える工事であり、大都市では渋滞、事故リスク等社会的影響が大きい。このため、車線毎に交通規制をしながら床版を取替える幅員方向分割取替工法（以下、半断面施工と記す）の施工が増加している。その際、走行車線と追越車線を結合する橋軸方向接合部（以下、縦目地と記す）が生じるが、その疲労耐久性の評価方法が確立されていない。

そこで、著者らは、この縦目地を含めた床版の疲労耐久性を評価することを目的に、特に幅員方向での縦目地位置と疲労耐久性の関係に着目し、載荷コースを移動させて縦目地に最大曲げと最大せん断力を繰り返し作用させる輪荷重走行試験方法（3コース走行載荷法）を検討した。今回、その概要と、継手の無いPC床版（基準PC版）に関する本試験結果について述べる。

### 2. 半断面施工における特徴

半断面施工について、図-1に示す「NEXCO試験法

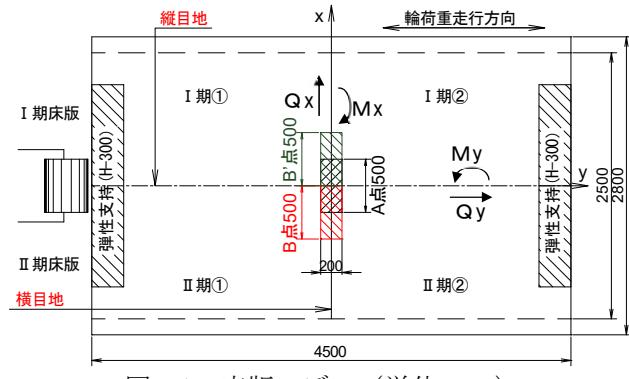


図-1 床版モデル (単位 : mm)

442<sup>1)</sup>で示された形状寸法の床版モデルを用いて説明する。同試験は設計基準強度  $50\text{N/mm}^2$ 、1方向プレキャストPC床版を対象としている。床版支間 2.5m で単純支持し、橋軸方向には H型鋼材を横梁として弾性支持する試験体に対して載荷荷重 250kN を 10万回載荷後、漏水試験を実施し、耐用年数 100 年相当の疲労耐久性の有無を判定するものである。半断面施工では、まず車両の通行をII期床版に制限してI期床版（①, ②等）を順次取り替える。I期床版を全て取替後、車両の走行をI期床版に切り替え、II期床版（①, ②等）を同様に取替える。

その後、縦目地を接合しI期床版とII期床版を一体化する。

ここで、橋軸直角方向（主鉄筋方向）を x 軸、橋軸方向（配力鉄筋方向）を y 軸とする。そして、x 軸に直角

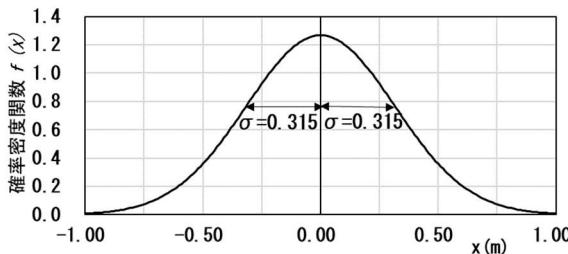


図-2 車両走行位置の確率密度関数  $f(x)$

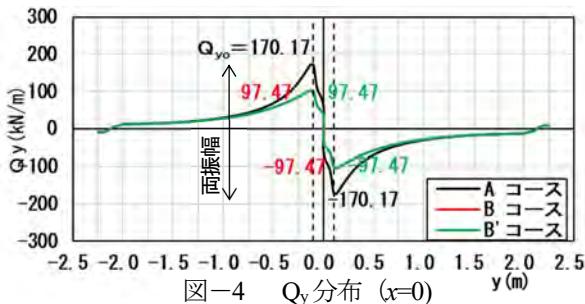


図-4  $Q_y$  分布 ( $x=0$ )

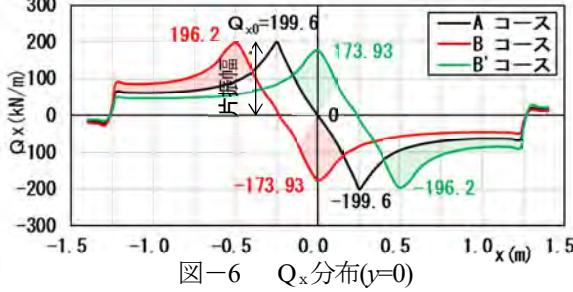


図-6  $Q_x$  分布 ( $y=0$ )

な断面に作用する曲げモーメントならびにせん断力を  $M_x$ ,  $Q_x$  と略記し,  $y$  軸に直角な断面に作用する曲げモーメントならびにせん断力を  $M_y$ ,  $Q_y$  と略記する。

## 2.1 床版に作用する断面力

車両の走行位置は、図-2 に示すように偏差 30cm 程度を持つ正規分布に従うことが確認されている<sup>2)</sup>。その影響を把握するため、平面 FEM 解析を用いて図-1 に示す A 点, B 点, B' 点に 250kN 載荷した際の各種断面力分布 ( $M_x$ ,  $Q_x$ ,  $M_y$ ,  $Q_y$ ) を図-3~7 に示す。図より  $M_x$ ,  $M_y$  は A 点から B 点, B' 点に移動しても原点 (0m) で値は約 20% 低減するだけであるが、同じ移動量でも  $Q_x$  は 0 から ±173kN に大幅に変化する。これより、曲げは走行位置のバラツキに対して鈍感であるが、せん断力はピークを示す走行位置の幅が狭く、その範囲外では影響は少ないといえる。この他、正負交番のねじりモーメント(以下、 $M_{xy}$ ) が載荷位置の斜め 45° 方向に発生する。

### (1) $y$ 軸に直角な断面に作用する断面力 ( $M_y$ , $Q_y$ )

$M_y$  は図-3 に示すように載荷面中央に最大値が生じる。一方、 $Q_y$  は図-4 に示すように載荷面の両端 (±100mm) で最大・最小となり、載荷中央で “0” となる。

このため、図-7 に示すように横目地の接合面には車両 1 台毎に最大曲げと正負両振幅の交番繰り返しのせん断力が作用する。

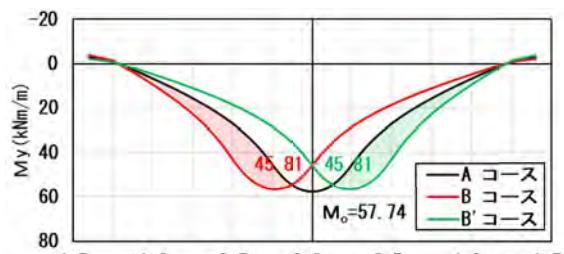


図-3  $M_y$  分布 ( $y=0$ )

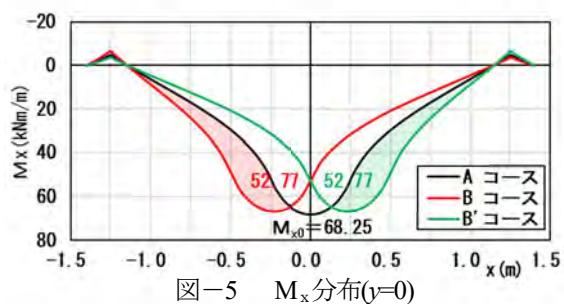
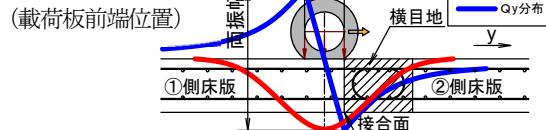
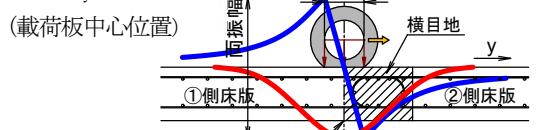


図-5  $M_x$  分布 ( $y=0$ )

### ●最小 $Q_y$ 作用



### ●最大 $M_y$ 作用



### ●最大 $Q_y$ 作用

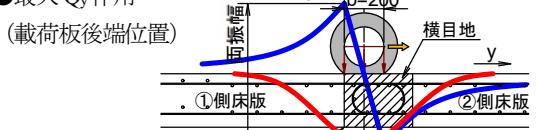
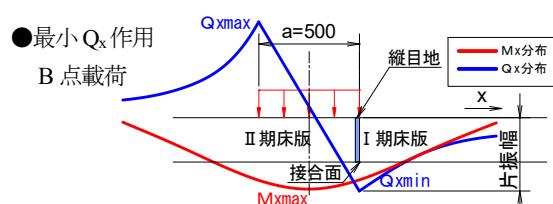
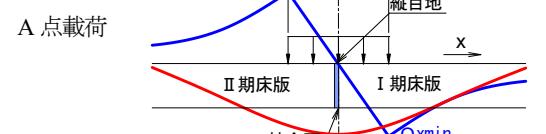


図-7 移動載荷に伴う橋軸方向断面力の変化 (単位 : mm)



### ●最大 $M_x$ 作用



### ●最大 $Q_x$ 作用

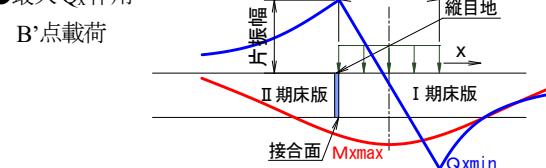


図-8 走行コース毎の  $M_x$ ,  $Q_x$  分布 (単位 : mm)

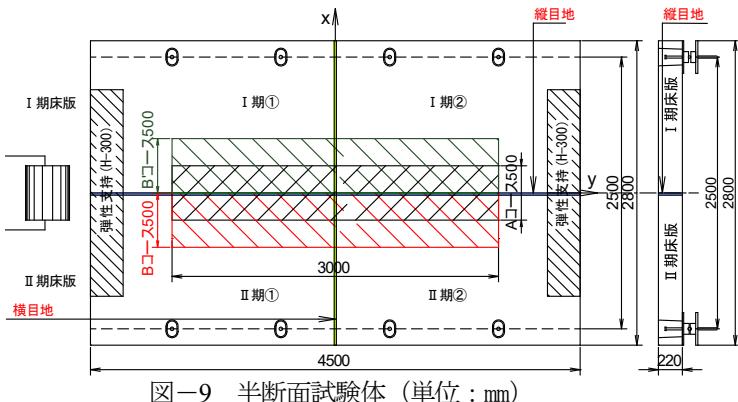


図-9 半断面試験体（単位：mm）

## (2) $x$ 軸に直角な断面に作用する断面力 ( $M_x$ , $Q_x$ )

図-5, 6 より  $M_x$  は  $M_y$  と同様に載荷面中央に最大値が生じ、 $Q_x$  は  $Q_y$  と同様に載荷面両縁端で最大・最小となり、載荷中央で “0” を示す。このため、図-8 に示すように、A点載荷では載荷面中央には  $M_x$  が作用するが  $Q_x$  は作用しない。一方、B点、B'点載荷では  $M_x$  の他、最大・最小  $Q_x$  が作用するが、車両 1 台毎に片振幅のせん断力が作用することとなる。すなわち載荷位置により  $M_x$  と  $Q_x$  の組み合わせが異なる。この点が橋軸方向と橋軸直角方向の断面力の作用の違いである。

## 2.2 曲げモーメントとせん断力の同時作用による床版の疲労劣化の特徴

床版に各種断面力が繰り返し作用することで、以下の損傷過程を経て床版の疲労劣化は進行する。まず、輪荷重の載荷により曲げ強度の小さい橋軸に直角の断面に  $M_y$  による橋軸直角方向ひび割れが一方向に床版下面に生じる。そして、輪荷重の繰り返し載荷によりこのひび割れ本数が増加し床版の異方性化が進行する。このため、曲げが橋軸に平行な断面に再配分され、 $M_x$  によるひび割れが床版下面に発生し、二方向ひび割れに進展する。二方向ひび割れは、せん断力  $Q_x$ ,  $Q_y$  や  $M_{xy}$  により床版下面全体に進展し、亀甲状ひび割れへと進展する。また、 $M_y$  により主桁付近で水平せん断力が卓越し、床版上面においても橋軸に直角な断面にひび割れが発生する。さらに、 $Q_x$  の作用により下面のひび割れは上面からのひび割れと連結して貫通することで梁状化する。貫通ひび割れは、雨水の浸透を招き、研磨作用で劣化を促進する。

## 3. 半断面施工用輪荷重走行試験 (3 コース走行載荷法)

上述の疲労劣化過程を示す床版において、橋軸方向 ( $y$  方向)、橋軸直角方向 ( $x$  方向) それぞれ最大曲げ発生位置と最大最小せん断力発生位置は異なる。ここで、載荷コースが 1 本である現行の輪荷重走行試験は、横目地に対しては自動的に  $M_y$ ,  $Q_y$  が繰り返し作用するため妥当な方法である。しかし、縦目地に対しては  $M_x$  のみしか作用しないため、 $Q_x$  の影響を試験法に組み込む必要がある。

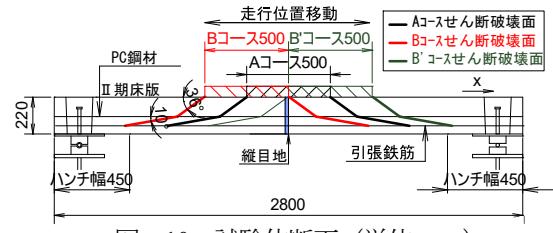


図-10 試験体断面（単位：mm）

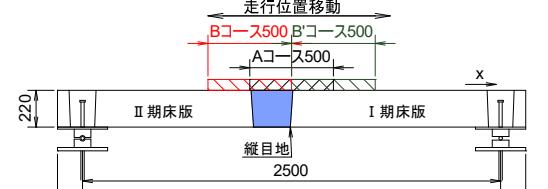


図-11 縦目地幅の広い工法の載荷位置（単位：mm）

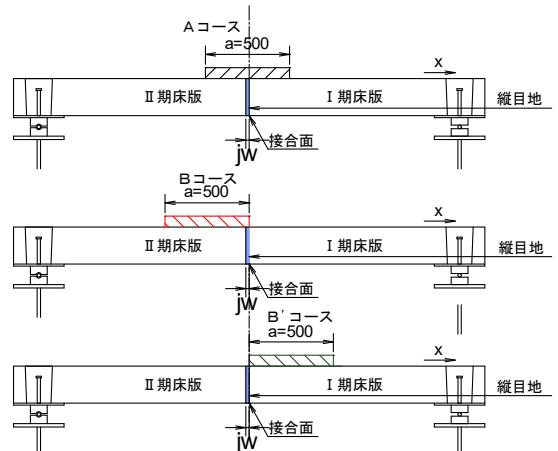


図-12 載荷コース（単位：mm）

そこで、複数のコースを走行させることでこの影響を考慮することとした。検討した試験概要を図-9 に示す。

### (1) 試験体、境界条件

過去に行われた多くの実験との比較検証を可能とするため、試験体寸法および境界条件は、文献<sup>1)</sup>に準拠した。

ただし、文献<sup>1)</sup>では試験体にはハンチを設ける構造である。しかし、3 コースを走行するとひび割れ発生範囲が拡大するが、ハンチがひびわれの進行を妨げてしまう。

そこで図-10 に示すようにひび割れの進行を妨げないようにハンチ無しとした。

### (2) 縦目地

接合面が最も引張抵抗に弱いことを踏まえ、縦目地接合面は  $M_x$  が最大となる支間中央に配置する。なお接合幅の広い工法の場合、図-11 に示すように片側接合面を支間中央に配置する等、工法に応じた配置を検討する。

### (3) 載荷コース

本来載荷は、図-2 に従い走行コースを連続的に移動させることが望ましいが、試験装置と試験期間の制約上、図-12 に示す 3 コースとした。床版の疲労破壊は曲げにより発生進行することから、A コースは文献<sup>1)</sup>に準じて支間中央に載荷させ、縦目地接合面に最大  $M_x$  を作用させる。また過去の実験<sup>3)</sup>で走行位置端部付近から押し抜

きせん断破壊を生じていることからB, B'コースはAコースから250mmずつ移動させ、M<sub>x</sub>によりひび割れ範囲を広げるとともに、縦目地接合面に最大・最小Q<sub>x</sub>を作用させる。ここで、B, B'コースを走行することでAコース単独に比べ図3, 5, 6のハッチング領域の曲げやせん断力が増加する。これにより、ひび割れが橋軸直角方向(x方向)に広がり劣化が促進される。

#### (4) 各コースの載荷回数

輪荷重の走行位置に応じて縦目地に作用する断面力は変化する。走行位置xの確率密度関数をf(x)とすると、各コースの載荷回数は、任意の断面力を各載荷コースで生じる基本断面力に換算した等価繰り返し回数として、式(1),(2)で表すことができる<sup>2)</sup>。

$$N_{eq} = C_1 \cdot N_T \quad (1)$$

$$C_1 = \int_{\alpha}^{\beta} \eta^{m_1} f(x) dx \quad (2)$$

ここに、N<sub>eq</sub>：等価繰り返し回数、N<sub>T</sub>：100年間の走行回数、η：縦目地を通る橋軸直角方向断面上における縦目地の断面力の影響線、m<sub>1</sub>：S-N曲線の傾きの絶対値の逆数、α、β：輪荷重中心の走行位置の限界値、本試験の場合±1.0m

ここで、式(2)は任意の走行位置により縦目地に生じる断面力(M<sub>x</sub>, Q<sub>x</sub>)を基本断面力に換算した等価確率を示す。そこでAコースではM<sub>xmax</sub>、BコースではQ<sub>xmax</sub>、B'コースではQ<sub>xmin</sub>を基準断面力とすれば、各コースの発生確率は式(3)～(5)で表される。なおm<sub>1</sub>は、一般に荷重とせん断耐荷力の比P/P<sub>sc</sub>で整理され、PC床版では7.43を示すが、現段階では各断面力に対して値が定まっていないため、安全側の見地より考慮しないこととした。

$$P_r(A) = \int_{-1}^1 \left( \frac{M_x}{M_{xmax}} \right) f(x) dx \quad (3)$$

$$P_r(B) = \int_{-1}^0 \left( \frac{Q_x}{Q_{xmax}} \right) f(x) dx \quad (4)$$

$$P_r(B') = \int_0^1 \left( \frac{Q_x}{Q_{xmin}} \right) f(x) dx \quad (5)$$

上述の確率を求めるに当り、P(x)は図2を用いることとした。その際、走行位置の偏差は文献<sup>2)</sup>に従い、σ=車線幅B×0.09=3.5m×0.09=315mmとした。また、図13に示すように輪荷重の載荷位置をx方向に順次移動し、縦目地(x=0mm)でのM<sub>x</sub>, Q<sub>x</sub>を算出した。載荷中心位置と各断面力の関係(影響線)を図14, 15に示す。以上を基に各コースの発生確率、載荷回数の算出結果を表-1に示す。Aコースの走行回数は、従来の輪荷重走行試験と同様のコースであることから、文献<sup>1)</sup>との整合性を図り10万回とした。また、B, B'コースは、Aコースとの確率比を算出した結果3万回とした。

以上より、半断面床版に関する輪荷重走行試験の耐用年数100年相当の載荷STEPを表-2に示す。

#### (5) 漏水試験

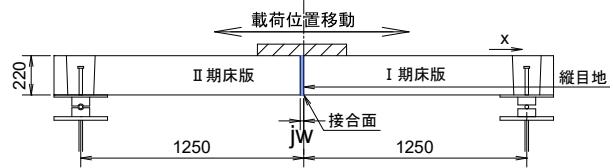


図-13 載荷位置と接合面(x=0)での位置関係(単位:mm)

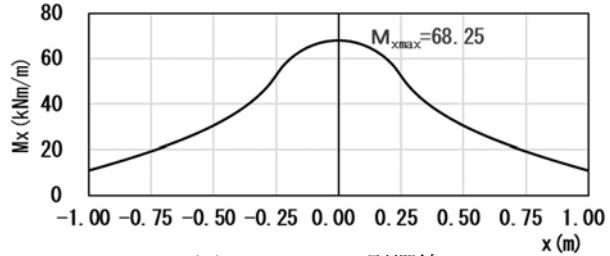


図-14 M<sub>x</sub>の影響線

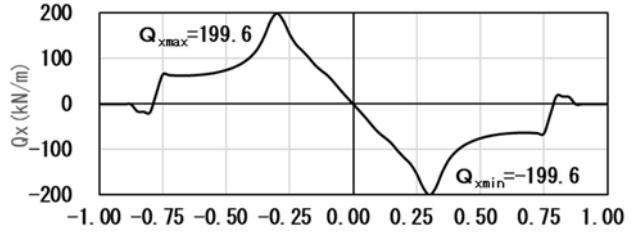


図-15 Q<sub>x</sub>の影響線

表-1 各コース走行回数の算出

走行コース	最大値・最小値 Pr( )	走行確率 耐用年数100年 載荷回数
Aコース	M <sub>xmax</sub> =68.25 (kNm/m)	0.768 10万回
Bコース	Q <sub>xmax</sub> =199.6 (kN/m)	0.230 0.230/0.768×10万回 =2.99→3万回
B'コース	Q <sub>xmin</sub> =-199.6 (kN/m)	0.230 同上

表-2 載荷STEP

	STEP1	STEP2	STEP3	STEP4
載荷コース	A	B	B'	A
載荷荷重(kN)	250	250	250	250
載荷回数(万回)	5	3	3	5
累計(万回)	5	8	11	16

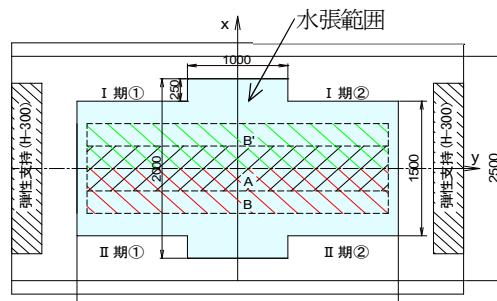


図-16 漏水試験(単位:mm)

輪荷重試験終了後、図-16に示すように全ての走行コースを網羅する範囲に漏水試験を実施する。5mm以上の水深で6hr経過後、床版下面より漏水がないことで耐用年数100年を有するものとした。

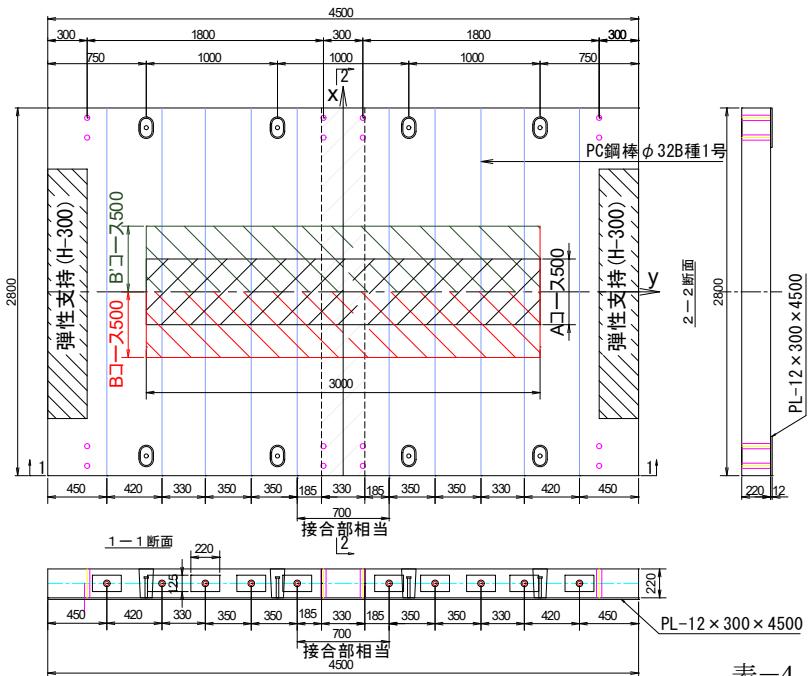


図-17 基準PC版概要 (単位:mm)



写真-1 支持桁移動

写真-2 試験状況

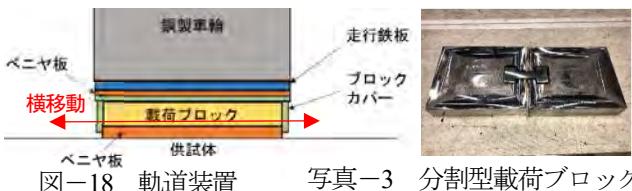


写真-3 分割型載荷ブロック

#### 4. 基準PC版の輪荷重走行試験

##### 4.1 試験概要

###### (1) 試験体

本試験法がPC床版に及ぼす影響を調べること、および各種の車線別床版取替工法の相対評価の資料とすべく、継手の無いPC床版（基準PC版）について本試験を実施することとした。試験体、支持条件は図-17、表-3に示すように文献<sup>1), 3)</sup>に準じた。試験開始時の試験体諸元を表-4に示す。なお、荷重の偏心、走行の蛇行、試験機の破損を防止するため、走行コース毎に段差が2mm以内に収まるように試験体を平坦に仕上げた。

###### (2) 載荷方法

半断面床版の輪荷重走行試験では、走行位置の移動に対応可能な写真-1に示す試験機を用いた。本試験機において走行装置は固定され移動できないが、写真-2に示すように支持桁を橋軸直角(x軸)方向に移動させると

表-3 基準PC版諸元

試験体名称	基準PC版	NEXCO-N2 NEXCO-N3
床版寸法	2.8×4.5×0.22m	
床版支間	2.5m	
PC鋼材	SBPR B種 φ32	SBPR B種 φ23
PC定着種類	ポストテンション1段配置	
コンクリート設計基準強度	50N/mm <sup>2</sup>	早強ポルトランドセメント
PC鋼材	橋軸直角方向 SBPR φ32 ctc330~420	
鉄筋	SD345 エポキシ樹脂塗装鉄筋	
上段鉄筋	橋軸方向 D19 ctc150mm 橋軸直角方向 D13 ctc125mm	
下段鉄筋	橋軸方向 D19 ctc150mm 橋軸直角方向 D13 ctc125mm	

表-4 基準PC版コンクリートの試験開始時諸元

試験体名称	材齢(日)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )
基準PC版	47	62.3	31.4

ともに、図-18に示す軌道装置を走行装置直下に移動することで、任意の位置（限界移動量±420mm）での輪荷重走行が可能である。また載荷ブロックは、写真-3に示すように床版の不陸、荷重、たわみへの追従性が良好な分割型載荷ブロックを用いた。本ブロックは、載荷面積(500×200mm)を2分割(250×200mm)し、それぞれ上面を5cm幅で平坦とし、端部に向かい1mmの傾斜を設けた構造である。走行試験は表-2に従い実施し、STEP4終了後に漏水が無いことを確認した後、水張りを撤去し更にSTEP5としてAコースを400kN×10万回走行させた。

#### 4.2 試験結果

##### (1) たわみ

床版下面に図-19に示すたわみ計を配置した。載荷回数と原点( $x=y=0$ )における活荷重たわみの関係を図-20に示す。図中には文献<sup>3)</sup>での試験結果を併記した。図より基準PC版の活荷重たわみは縦目地の無いNEXCO-N2、N3と同程度で推移することがわかる。次に、Aコース各走行回数における載荷荷重と活荷重たわみ量の関係を図-21に示す。図より250kNでは勾配はほぼ一定であり剛性低下は無いが、400kNになると若干非線形性を呈し剛性の低下がうかがえる。また各STEPの最大たわみ量との比率分布を図-22、23に示す。図より、載荷荷重が異なっていてもたわみ量の比率分布が同程度であることから、床版全体の剛性の低下は僅かといえる。

##### (2) ひび割れ

試験体下面のひび割れを図-24に示す。図よりSTEP4までは橋軸直角方向ひび割れが卓越すること、ハンチが

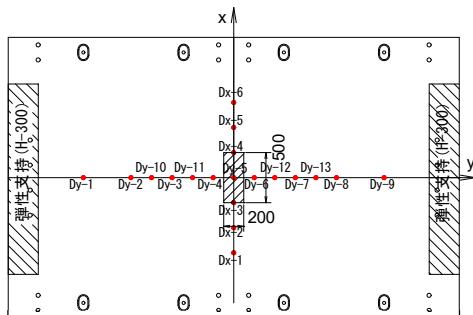


図-19 たわみ計設置位置

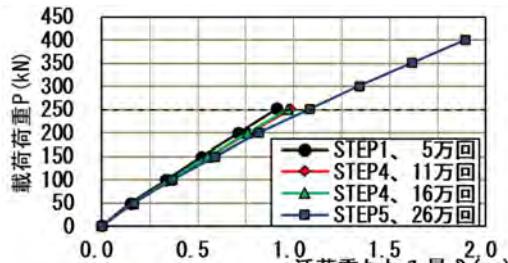


図-20 載荷回数一活荷重たわみ量関係図

無いことや載荷位置を横方向に移動するため、NEXCO-N2, N3 に比べひび割れ範囲が広いことが確認できた。さらに、STEP5において載荷中心と A コース両端付近に橋軸方向にひび割れが生じた。

### (3) 3成分変位計

図-24 に示す A コース中心付近のひび割れを跨いで、写真-3 に示す 3 成分変位計を用いてひび割れ相対変位量を動的に計測した。STEP4 までは往路復路同様の片振幅であったが、図-25 に示す 26 万回走行時ではせん断力により鉛直方向段差  $\delta_z$  が両振幅の傾向を示すとともに、ピーク後の戻り量に差異が生じ梁状化の兆候を示す。また、ねじりにより x 方向ズレ  $\delta_x$  も増加傾向を示した。

## 5. まとめ

走行位置のバラツキを有する活荷重に対する縦目地の疲労耐久性を評価するため、曲げの他にせん断力の影響を組み込んだ 3 コース走行載荷法による輪荷重走行試験を考案した。また、縦目地と横目地の無い床版（基準 PC 版）についても本試験を適用した。今後は、走行位置の確率分布を再現できるよう往路復路の走行コースを任意に切り替える逐次移動載荷法に取り組む予定である。

### 謝辞

本試験の検討に当り、高速道路総合技術研究所橋梁研究室よりご助言ご指導を頂いた。記して謝意を表します。

### 参考文献

- 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社,

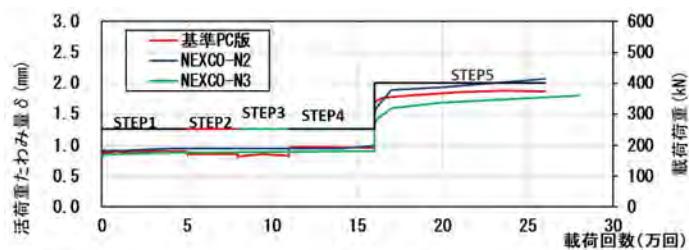


図-21 載荷回数一活荷重たわみ量関係図

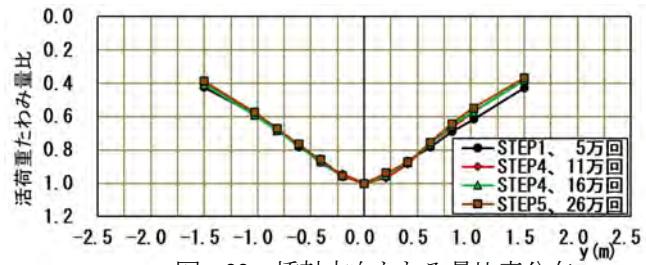


図-22 橋軸方向たわみ量比率分布

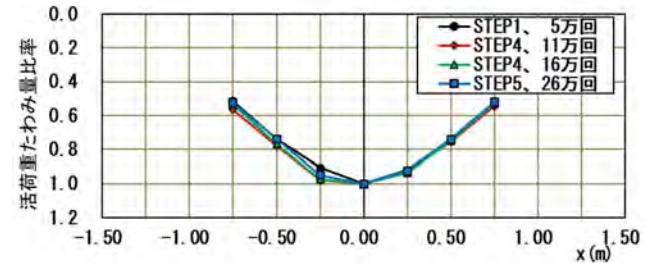


図-23 橋軸直角方向たわみ量比率分布

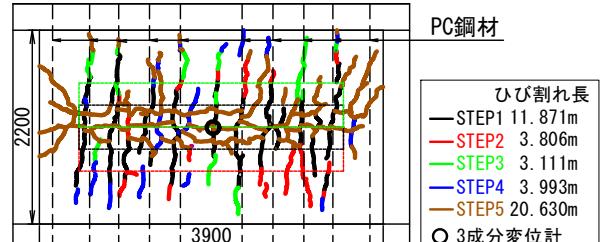


図-24 ひび割れ図



写真-3 3成分変位計

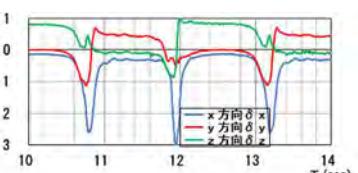


図-25 3成分変位測定結果 (26万回目)

西日本高速道路株式会社 : NEXCO 試験方法, 第 4 編 構造関係試験方法, 試験法 442 プレキャスト PC 床版 接合部の疲労耐久性試験方法, pp.86-89, 2020.

- 2) 松井繁之 : 道路橋床版, 森北出版, 2007.10.
- 3) 後藤俊吾, 長谷俊彦, 本間淳史, 平野勝彦 : PC 床版 の疲労耐久性評価方法の提案, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp.762-773, 2020.

(2024年7月12日受付)