

## 論文

## プレストレスジョイントで接合したプレキャスト PC 床版の耐疲労性評価

新名勉\*, 林大輔\*\*, 小林顕\*\*\*, 興石正己\*\*\*\*, 国井優嗣\*\*\*\*\*

\*工修, 阪神高速道路 (株) 技術部技術推進室 (〒541-0056 大阪府中央区久太郎町 4-1-3)

\*\*工修, 清水建設 (株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3 丁目 4-17)

\*\*\*工修, 清水建設 (株) 土木技術本部橋梁統括部 (〒104-8370 東京都中央区京橋 2 丁目 16-1)

\*\*\*\*工博, 清水建設 (株) 土木技術本部開発機械部 (〒104-8370 東京都中央区京橋 2 丁目 16-1)

\*\*\*\*\*昭和コンクリート工業 (株) 技術工事本部 (〒500-8703 岐阜県香蘭 1 丁目 1)

既設鋼道路橋の床版取替に適用するプレキャスト PC 床版を対象として、従来のループ継手を代替し、急速施工が可能、かつ、接合部にプレストレスを導入できる継手工法の開発を進めている。本研究では、この継手を適用した床版の耐疲労性を確認することを目的として、輪荷重走行疲労試験を実施した。その結果、この継手を適用した床版は、継手による接合面を有しない一般的な床版と比較して、ひび割れ性状の違いは生じたが、同等の耐疲労性を有することを確認した。

キーワード：プレキャスト PC 床版、プレストレスジョイント、耐疲労性、輪荷重走行試験

## 1. はじめに

現在、劣化した RC 床版を維持管理していくために、補修・補強対策や損傷した床版の取替工事が実施されている。特に、高速道路の RC 床版では交通量の増大や設計基準の変遷などにより損傷が激しいものもあり、PC 床版や合成床版への取替工事が精力的に進められている。例えば、阪神高速道路においては、昭和 48 年より以前の道路橋示方書で設計され、その後、鋼板接着補強された RC 床版のうち、耐疲労性の低下が懸念される径間については、その低下の程度に応じて、補修、補強、取替等の対策を検討している。

このうち、取替 (床版の更新) に関するニーズとしては、①既設床版と同等以下の重量で、下部構造及び基礎に影響を与えない軽量構造、②更新時の通行止めによる社会的影響、騒音等の環境負荷を抑制できる、急速かつ確実性の高い施工方法、③更新した床版における高い耐久性の確保、などが挙げられる。

これらのニーズに対応した一方策として、床版取替に適用するプレキャスト PC 床版 (以下、“PCa 床版”という) の橋軸方向の接合構造に着目した。現状では、PCa 床版の橋軸方向の接合構造は、ループ継手を用いた場所打ちの RC 構造とし、間詰めコンクリートは、乾燥収縮等によるひび割れの抑制に配慮し、膨張コンクリートの充填を標準としている。しかしながら、この場合、①床版厚は、ループ継手部の鉄筋配置により決定し、更新の

対象とする既設床版と比較して大きくなる、②ループ継手部の配筋、間詰めコンクリート打設・養生など、一定の現場作業を必要とする、③場所打ち RC 構造における長期的な耐久性の懸念など、設計および施工の面で改善の余地が認められる。著者らは、これらの改善点を解決すべく、PCa 床版の橋軸方向の接合部に適用できる継手構造の開発を進めている。

本論文では、この継手を適用した PCa 床版の耐疲労性を確認することを目的に、輪荷重走行疲労試験を実施した内容について述べる。

## 2. 構造概要

開発を進めている継手は、導入する緊張力により、PCa 床版同士を接合することから、ここでは、プレストレスジョイント (以下、PS ジョイント) と呼ぶ。提案する PS ジョイントの構造を図-1 に示す。

PS ジョイントは、シールドセグメントのリング間継手

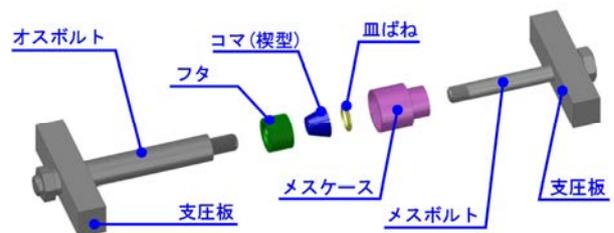


図-1 PS ジョイントの構造

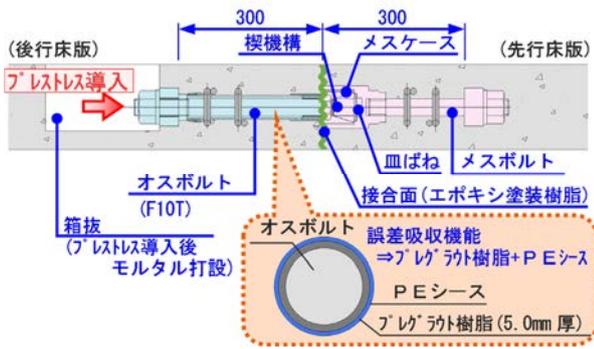


図-2 PS ジョイント床版概要図

(長手方向継手)として利用されているピン挿入型継手の技術をPCa床版に適用したものである。オスボルトをメスケース内の皿バネに押し付けられた楔型のコマに押し込むことで、ボルトをワンタッチで接合させる仕組みで、接合後はコマとフタの楔機構により引抜き力を伝達する機械式継手である。なお、PS ジョイントの引抜き特性や押し込み特性などの基本的な力学特性は実験で確認している<sup>1)</sup>。

PS ジョイントを適用する床版(以下、PSJ 床版)は、①PCa 床版の接合面にPS ジョイントを埋込み、床版同士を押し込み、一体化を図ることで、PCa 床版の薄厚化(軽量化)及び急速施工が可能となる、②オスボルトを拡大径のPE シースで被覆し、プレグラウト樹脂を注入しておくことで、接合する相互の床版間の施工誤差を吸収する機能を具備するとともに、接合後のグラウト作業を不要とする、③接合部にプレストレスを導入することにより、継手部の耐久性が向上する、などの特徴を有する。

PSJ 床版の施工順序は、先行して架設した床版を鋼桁上に固定し、後行に施工する床版を油圧ジャッキで引寄せ、それぞれの床版に埋め込まれたPS ジョイントのオスボルトとメスボルトの楔機構で接合する。その後、接

合したPS ジョイントに油圧トルクレンチを用いてプレストレスを導入する。これらの施工を繰り返すことでPCa 床版を一体化し、最後にプレストレス導入用の箱抜き部を後埋めする。

PSJ 床版は、①床版厚さに制約を与えない継手構造、②場所打ちRC 構造部の解消、③接合部にプレストレスを導入することによる長期的耐久性の向上を目指した構造である。

### 3. 試験体概要

#### 3.1 試験体の設計方針

本試験で用いる試験体は、床版更新の対象である床版厚 180mm の既設橋梁を参考にして設計した床版<sup>2)</sup>を基本として、試験装置の輪荷重寸法(幅 300mm)と道路橋示方書<sup>3)</sup>に示されるT 活荷重の寸法(幅 500mm)の比を考慮した3/5 モデルとして設計を行った。試験体の厚さについては、寸法比を考慮して縮小すべきであるが、PS ジョイントの寸法の制約により縮小厚での製作は困難であった。そのため、床版厚は実構造物相当の180mm とし、3/5 を考慮した設計活荷重に対して、下縁側の応力が同等となるように設計した。鉄筋は、縮小径の鉄筋を用いて鉄筋量を調整し、床版支間方向に配置する横締めPC ケーブルは、導入プレストレスをコントロールすることで考慮した。さらに、床版の接合のためPS ジョイントに導入した緊張力についても、3/5 を考慮した設計活荷重に対して、接合部下端の応力度が実構造物と同等になるように、導入プレストレスを低減させた。

表-1 試験体一覧

試験体名	寸法 (mm)	概要
PSJ-No.1,2	2400×1600×180	接合
NS-No.1,2	2400×1600×180	一体型

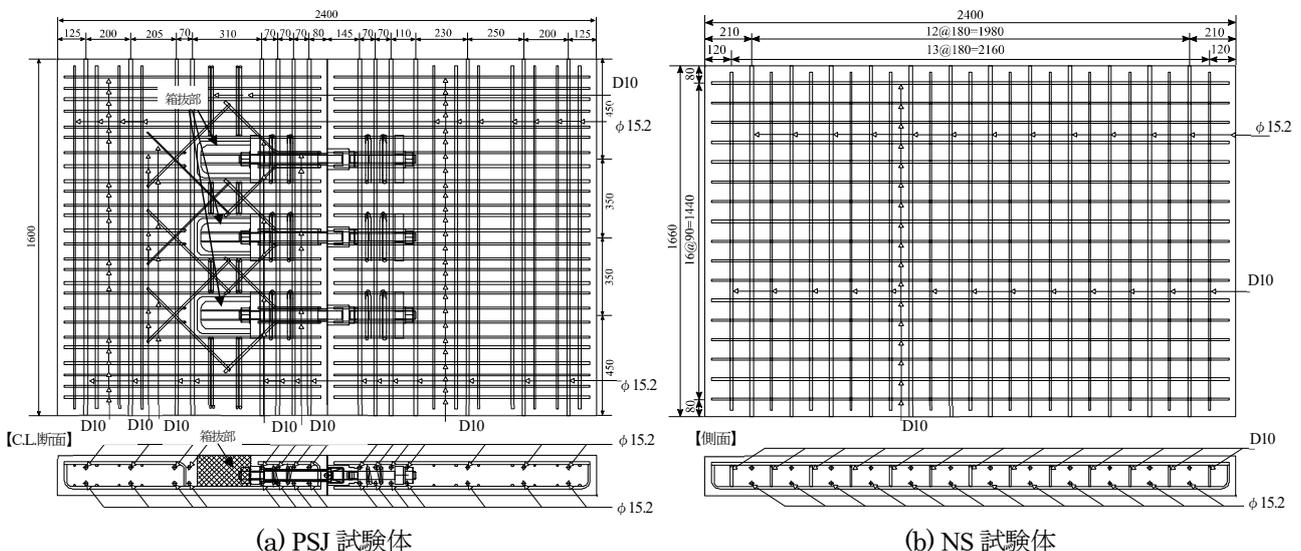


図-3 試験体寸法および鉄筋配置

### 3.2 試験体概要

試験ケースを表-1に示す。PS ジョイントを用いて接合した試験体 (PSJ) 2 体と、一体で打設した試験体 (NS) 2 体の計 4 体について試験を実施した。試験体は、図-3に示すように 2400×1600×180mm の床版試験体である。配筋は、一般的な PCa 床版のものを参考とした。PSJ 試験体は、長軸方向に 2 分割して製作した 2 体の床版試験体を、3 本の PS ジョイント (M36) を緊張することで接合した。

### 3.3 使用材料

コンクリートは、設計基準強度 70N/mm<sup>2</sup> の早強コンクリートを使用した。コンクリート強度は、厚さ 180mm の床版が、活荷重と PS ジョイントのプレストレスによる支圧力の双方に対する抵抗性を確保するように設定した<sup>2)</sup>。また供試体は、載荷条件にあわせた縮小試験体であるため、最大粗骨材寸法は 15mm に設定した。また、PSJ 試験体の箱抜き部には、PS ジョイント緊張後に無収縮モルタル (設計強度 80N/mm<sup>2</sup>) を打設した。疲労試験開始時のコンクリートの強度試験結果を表-2に示す。

鋼材の特性を表-3に示す。試験体を使用した鉄筋はすべて SD345 の D10 の呼び径のものである。PC 鋼材については、φ15.2 の 7 本より PC 鋼線を使用した。PS ジョイントボルト部には、SCM435 (クロムモリブデン鋼) を使用した。載荷試験時は、オスボルト周りのプレグラ

表-2 コンクリート強度

試験体名	強度試験結果		材齢
	圧縮	割裂引張	
PSJ-No.1	90.9(N/mm <sup>2</sup> )	5.34(N/mm <sup>2</sup> )	126(日)
PSJ-No.2	89.9(N/mm <sup>2</sup> )	5.07(N/mm <sup>2</sup> )	183(日)
NS-No.1	93.1(N/mm <sup>2</sup> )	5.71(N/mm <sup>2</sup> )	98(日)
NS-No.2	94.3(N/mm <sup>2</sup> )	5.17(N/mm <sup>2</sup> )	253(日)

表-3 鋼材強度

	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
鉄筋	205,000	392	549
PC 鋼材	194,000	—	1,975
PS ボルト	200,000	1,010	1,122

表-4 PS ジョイント導入ひずみ (オス側ボルト)

試験体	ボルト位置	軸ひずみ(μ)
PSJ-1	右	1,114
	中央	1,076
	左	1,149
PSJ-2	右	1,132*
	中央	734*
	左	1,142

※片側ゲージの破損により、曲げの影響を含む

ウト樹脂は未硬化であり、コンクリートとの付着はなされていない状況であった。

床版を接合時に導入したプレストレスを測定するために、PS ジョイントのボルト軸部に張り付けたひずみゲージの値を表-4に示す。

## 4. 試験概要

### 4.1 輪荷重走行疲労試験

輪荷重走行疲労試験は、日本大学生産工学部が所有する走行振動試験装置を用いて実施した。使用した試験装置は、クランク式に分類され、試験装置中央に設置されたアクチュエータにより荷重を加えつつ、試験体を設置した台車をクランクアームにより往復走行させることで、床版に作用する走行荷重を導入する。

試験の載荷条件を図-4に示す。本試験では、PS ジョイント床版の基本的な耐疲労特性を把握するために、ジョイント直上に載荷を行った。輪荷重の走行方向と平行に試験体を単純支持し、輪荷重幅 300mm、走行範囲 1200mm で載荷を行った。ただし、載荷荷重が 200kN を超える走行回数 (20 万回) 以降では、曲げモードによる

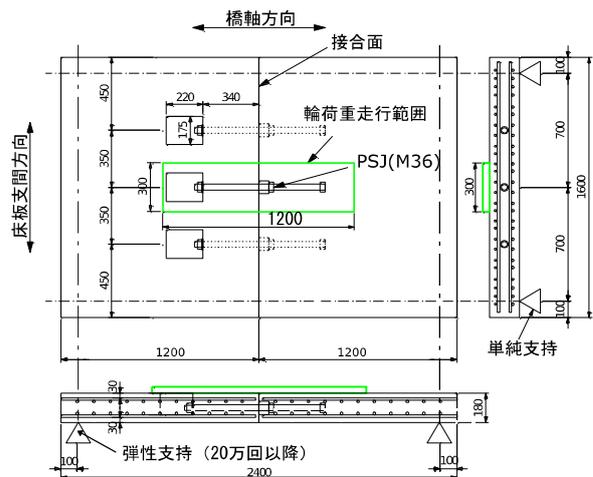


図-4 載荷条件

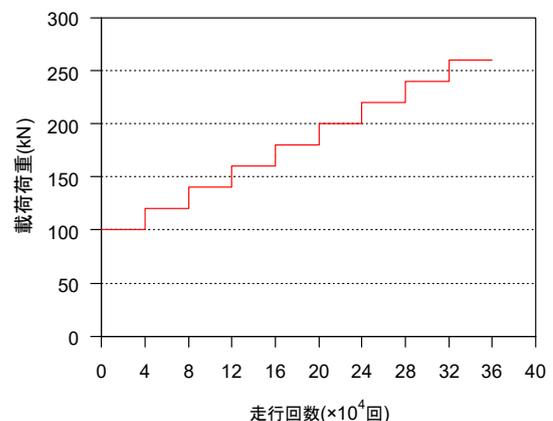


図-5 載荷プログラム

破壊を防ぐため、試験体短軸方向にも弾性支持条件を追加した。

#### 4.2 荷重プログラム

荷重プログラムを図-5に示す。本試験では、4万回の走行回数ごとに荷重を増加させる階段状荷重漸増載荷とした。

使用した走行振動試験装置の車輪幅 300mm は、道路橋示方書<sup>2)</sup>で規定されるT活荷重の設計幅 500mm の3/5である。初期荷重についても、既往の試験<sup>4)</sup>の初期荷重 157kN に対して、3/5の接地面積を考慮して 100kN に設定した。また、4万回走行ごとに荷重を 20kN ずつ漸増させ、試験体が破壊に至るまで増加させた。

### 5. 試験結果

#### 5.1 走行回数-たわみ関係

試験より得られた走行回数-中央たわみ関係を図-6に、試験終了時の走行回数を表-5に示す。ここで示すたわみは、一定の走行回数ごとで、試験体中央に各ステップでの荷重を静的に与えた場合に、試験体中央で計測された鉛直たわみである。

NS-No.2, PSJ-No.1 については、走行回数が徐々に増加していき、最終的にたわみが急増した時点で破壊に至ったと判断した。すべてのケースについて、内部の鉄筋に降伏は確認できていないことから、コンクリートの損傷がたわみ増大の支配的な要因だと考えられる。

最終的に破壊に至った走行回数について着目すると、試験体間にばらつきは見られるものの、NS 試験体と PSJ

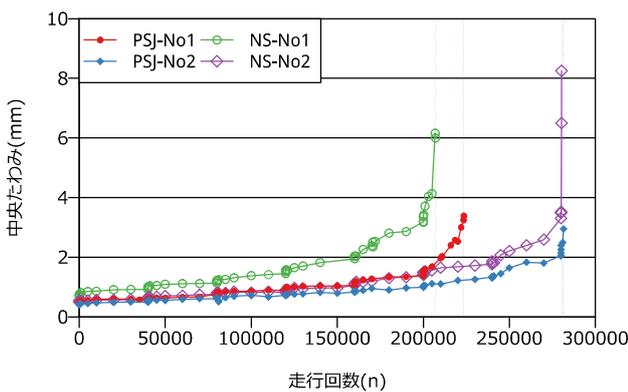


図-6 走行回数-中央たわみ関係 (総たわみ/静的)

表-5 破壊時の走行回数

試験体名	走行回数 (回)	破壊時の荷重 (kN)
PSJ-No.1	223,540	200
PSJ-No.2	281,540	240
NS-No.1	207,112	200
NS-No.2	280,290	240

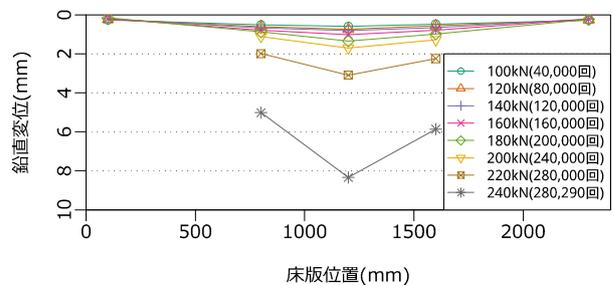
試験体間に明瞭な違いは確認できない。

#### 5.2 たわみ分布

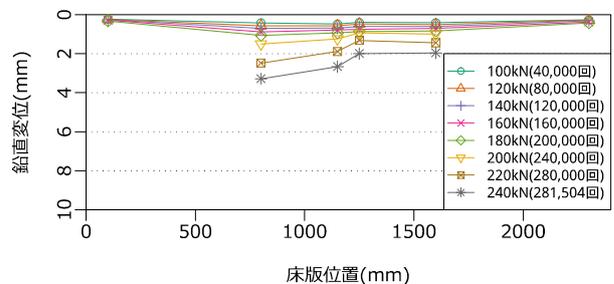
各荷重ステップで得られた輪荷重走行方向のたわみ分布を図-7に示す。ここで示すたわみ分布は、図-6で示した中央たわみ計測時に、走行方向に設置した測点のたわみを、中央の測点に加えて整理したものである。

PSJ 試験体の特徴として、走行回数が 24 万回以降のたわみ分布において、試験体中央に載荷しているにも関わらず、750mm 位置のたわみが大きいことが挙げられる。この位置には、PS ジョイントの緊張のために設けた箱抜きがあり、床版一般部と比べて比較的鉄筋量が少なくなっており、ここに損傷が集中して進展していったと考えられる。

PSJ 試験体については、箱抜き周辺で局所的にたわみ量が増大していったため、図-6に示す中央たわみでは



(a) NS-No.2



(b) PSJ-No.2

図-7 走行方向たわみ分布 (総たわみ/静的)

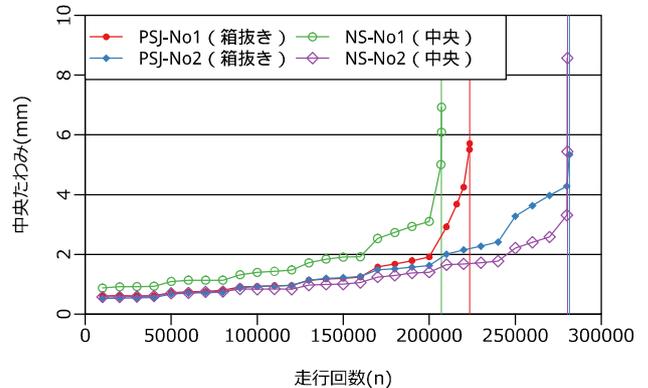


図-8 走行回数-最大たわみ関係 (総たわみ/動的)

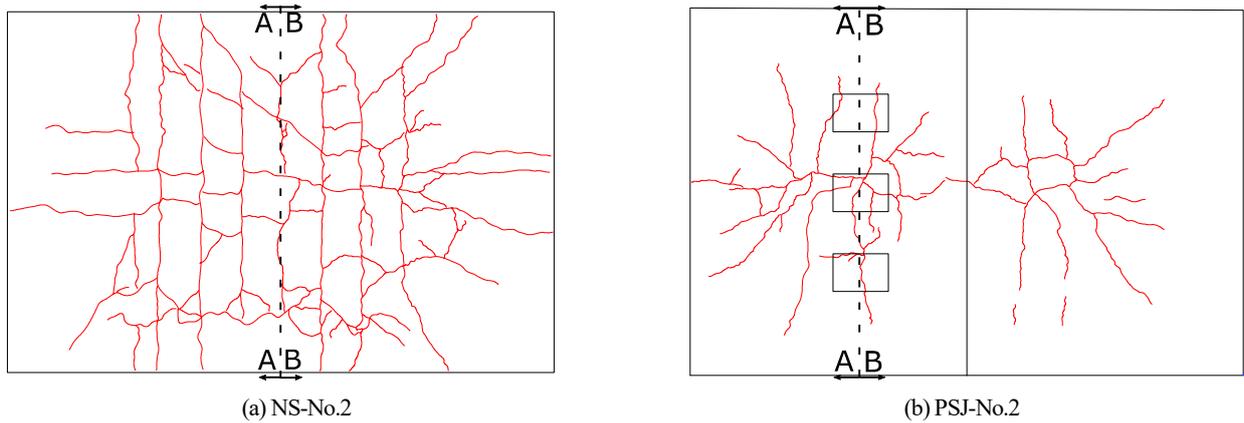


図-9 試験体下面ひび割れ性状

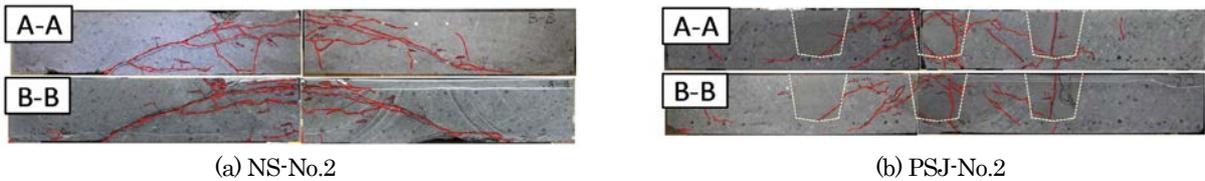


図-10 内部ひび割れ性状

PSJ 試験体の箱抜き部の損傷の進展を適切に評価できない恐れがある。そこで、PSJ 試験体については箱抜き近傍の測点、NS 試験体については試験体中央の測点をそれぞれ対象に、輪荷重走行時に動的に計測した総たわみを用いて走行回数-床版たわみの関係を整理した。結果を図-8 に示す。

図-8 と図-6 を比較すると、PSJ 試験体のたわみ増加の傾向が異なることが確認できる。走行回数 20 万回以降でのたわみ量に着目すると、試験体中央のたわみ量よりも、箱抜き近傍のたわみ量の方が大きくなった。ただし、たわみが増加する走行回数については、違いはみられなかった。

### 5.3 ひび割れ性状

図-9 に試験終了後の試験体下面のひび割れ性状を示す。試験体上面については、特徴的なひび割れは観察されなかった。

NS 試験体については、試験体下面に格子状のひび割れが形成され、最終的にはせん断ひび割れの発達により破壊に至った。これは、RC 床版で典型的とされる押抜きせん断破壊のモードであると判断した。

PSJ 試験体については、接合部周辺に発生したひび割れが少なく、それぞれに製作した床版パネルの中央部分を中心にひび割れが進展した。接合部周辺でのひび割れ発生が少ない原因については、プレストレスの効果であると考えられる。一方で、PS ジョイントの定着板付近には複雑なひび割れの発生が認められる。

試験終了後、図-9 中の位置において試験体を走行直交方向に切断し、内部のひび割れ性状を確認した結果を図-10 に示す。NS 試験体については、下面に形成され

た格子状のひび割れからも推察されたように、試験体中央に斜めひび割れが進展し、押抜きせん断破壊のモードを示している。

PSJ 試験体については、たわみ分布の結果より、箱抜き付近の変形が大きかったことから、この断面で内部ひび割れの観察を行った。図-10(b)より、PSJ 試験体の箱抜き断面も同様に斜めひび割れが進展しており、特に中央の箱抜き部の底面に、ひび割れ幅の大きなせん断ひび割れが形成されていた。これより、押抜きせん断破壊のモードで破壊に至ったと判断した。

### 5.4 接合部の目開き

図-11 に、PSJ 試験体の接合部中央で  $\pi$  型変位計を用いて計測した床版接合部の開口変位を示す。破壊に達した段階でも、開口変位は 0.2mm と小さいこと、走行回数と開口変位の関係に変化が見られないことから、試験終了時まで接合面は開口しなかったと判断できる。また、目視においても接合部の開きは確認できなかった。

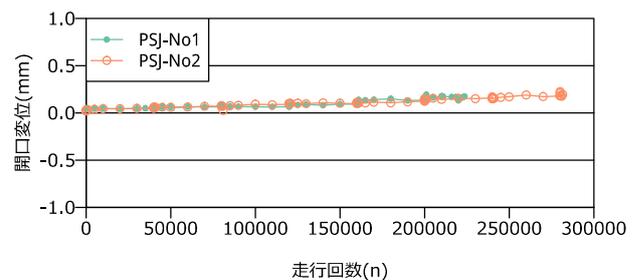


図-11 床版接合部の開口変位 (PSJ-No.2)

## 6. 耐疲労性の評価

輪荷重走行疲労試験の結果をもとに、床版の耐疲労性の評価を行う。輪荷重走行疲労試験は、4万回ごとに荷重を増加させる階段載荷としたことから、等価走行回数を算出して耐疲労性の評価を行う。

等価走行回数が、マイナー則に従うと仮定すると、基準荷重  $P_0$  に対する等価走行回数は、次式で与えられる。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^m \times n_i \quad (1)$$

ここで、

- $N_{eq}$  : 等価走行回数
- $P_i$  : 載荷荷重
- $P_0$  : 基準荷重 (72kN)
- $n_i$  : 試験走行回数
- $m$  : S-N 曲線の傾きの逆数 (12.67)

試験体は PC 床版であるが、ここで S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値  $m$  には、RC 床版を対象に松井らにより提案された値 12.67 を用いた<sup>9)</sup>。また、基準荷重については、阿部らによる既往の研究<sup>9)</sup>を参考に、設計活荷重 (T 荷重) 100kN の 3/5 に安全率 1.2 を考慮した 72kN に設定した。

図-8 に示す、走行回数とたわみの関係に対し、式(1)を用いて等価走行回数に換算した結果を図-12 に示す。各ケースの終局時での等価走行回数は、1 オーダー程度のばらつきに収まっており、同等の耐疲労性を有していると評価できる。

今回の試験条件では、継手の無い NS 試験体を床版一般部、PS ジョイントを適用した PSJ 試験体を床版継手部ととらえることができる。本結果より、継手部で生じるひび割れ性状は異なるものの、床版一般部と継手部では同等の耐疲労性を有していると推察することができる。

## 7. まとめ

PS ジョイントを適用したプレキャスト PC 床版の耐疲労性を評価するために、輪荷重走行疲労試験による繰返し動輪試験を実施した。試験より得られた結果を以下にまとめる。

- 1) PS ジョイントにより接合された床版試験体と一体で打設した床版試験体を比較すると、最大たわみの発生位置は異なるものの、走行回数と最大たわみ量の増分の関係については、同様の傾向を示した。
- 2) 段階的に荷重を増加させた今回の試験条件では、PS ジョイントで接合された床版の接合面は、試験終了まで開口せず、良好に接合されていた。
- 3) PS ジョイントで接合された床版の最終的な破壊形態は、ジョイントの緊張施工のために設けたオスボ

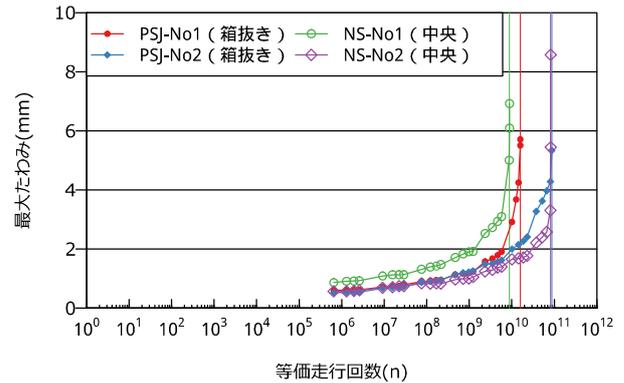


図-12 等価走行回数-たわみ関係 (基準 72kN)

ルト定着板背面の箱抜き部で生じた押抜きせん断破壊であった。

- 4) 実験より得られた走行回数に対して、マイナー則を仮定した上で、基準荷重に対する等価走行回数に換算して比較を行った。結果、PS ジョイントで接合した床版は、一体で打設した床版と同等の耐疲労性を有することを確認した。

## 謝辞

本論文は、阪神高速道路 (株)、清水建設 (株)、ユニタイト (株)、住友電工スチールワイヤー (株)、昭和コンクリート工業 (株) による共同研究の一部成果の報告である。実験にあたり、日本大学生産工学部の阿部教授、水口准教授にご指導いただいた。ここに記し感謝の意を表わす。

## 参考文献

- 1) 興石正己, 新名勉, 林大輔, 小林顕: プレストレスジョイントを用いた PCa 床版の静力学特性, 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, 2018. (投稿中)
- 2) 小林顕, 新名勉, 興石正己: プレストレスジョイントを用いた PCa 床版の設計, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp 499-504, 2018.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2012.
- 4) 中谷昌一, 内田賢一, 西川和廣他: 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.
- 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) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 川井豊: 道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐力および耐疲労性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.1, pp.39-54, 2011.

(2018 年 7 月 20 日受付)