

# 論文

## 半連続プレキャストPC床版の輪荷重走行試験における解析による検証

北慎一郎\*, 櫻井信彰\*, 前川宏一\*\*

\*新日鉄住金エンジニアリング株式会社 (〒141-8604 東京都品川区大崎 1-5-1 大崎センタービル)

\*\*工博, 横浜国立大学教授 都市イノベーション研究院 (〒240-0067 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

プレキャスト PC 床版を充填材のみで橋軸方向に接合する構造を目指し, 提案継手とループ継手を比較する輪荷重走行試験を実施した。事前解析において提案継手はループ継手の疲労耐力と同等かそれ以上と予想したが, 実際には局所的な破壊が充填材継手部に発生した。そこで観察結果をモデルに反映して破壊機構の解析的な検証を進めた結果, 継手部界面近傍での静的な曲げ引張ひび割れにより, 損傷が促進されたことを明らかにした。また, 実交通荷重を想定した疲労解析を行って, 実橋の供用条件下での疲労寿命はループ継手と同等以上であることを確認した。

キーワード: プレキャスト PC 床版, 継手構造, 疲労解析

### 1. はじめに

本体コンクリートより剛性が低い充填材のみで継手部を構成するプレキャスト PC 床版構造では, 工期短縮・省力化が期待できる。異方性により橋軸方向の断面力を緩和するとともに, 輪荷重に対する橋軸方向有効幅を増加することで, 疲労耐久性を向上させる床版構造を本研究で提案している<sup>1)</sup>。構造概要を図-1 に示す。

これまで実大床版を用いた静的載荷試験<sup>2, 3)</sup>などを通じて, 提案継手構造の適用可能性を検証してきた。しかし, 提案継手がループ継手と同等以上の性能を有することを示すには, 疲労耐久性の検証が必要である。そこで, 複数の継手を有したプレキャスト PC 床版を用いた輪荷重走行試験を実施して, 破壊モードおよび疲労耐久性の比較検証を行った。試験を実施するにあたり, 3 次元非線形有限要素解析による予備解析を事前に実施し, 予備解析と試験結果の比較検証から, 提案継手構造の破壊機構の解明を試みた。最後に道路橋示方書<sup>4)</sup>に示される階段状載荷プログラムを, 実交通荷重の繰返し載荷に置き換えた解析を実施して, 提案継手とループ継手の疲労耐久性の比較を行った。本稿では試験方法および結果と解析による検証結果について報告する。

### 2. 試験概要

#### 2.1 試験体

各物性値を表-1 から表-3 に, 試験体の寸法を図-2 に示す。試験体は 5箇所の継手で接合したプレキャスト

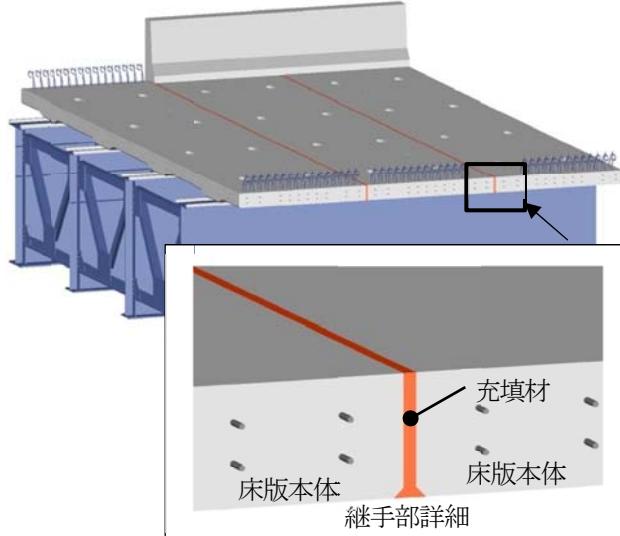


図-1 継手の構造概要

PC 床版(長さ 7000mm, 幅 2800mm, 厚さ 180mm)であり, 床版支間 2.5m の 2 辺単純支持として設計した。各継手には表-2 に示す提案継手構造やループ継手を適用した。

静的載荷試験および解析による検証では, 充填材のヤング係数を低く設定すると床版の破壊モードが界面近傍でのせん断破壊から押し抜きせん断破壊へと変化して, 静的耐力が向上することを確認した。このことから, 輪荷重走行試験においても充填材のヤング係数を低くすることで耐久性が向上すると予想された。そこで継手 No.3, No.5 にはポリマーセメントモルタル(以下, PCM)をベースに, より低弾性に配合変更したものを利用した。同時に PCM の強度低下も予想されたため, 界面の付着せん

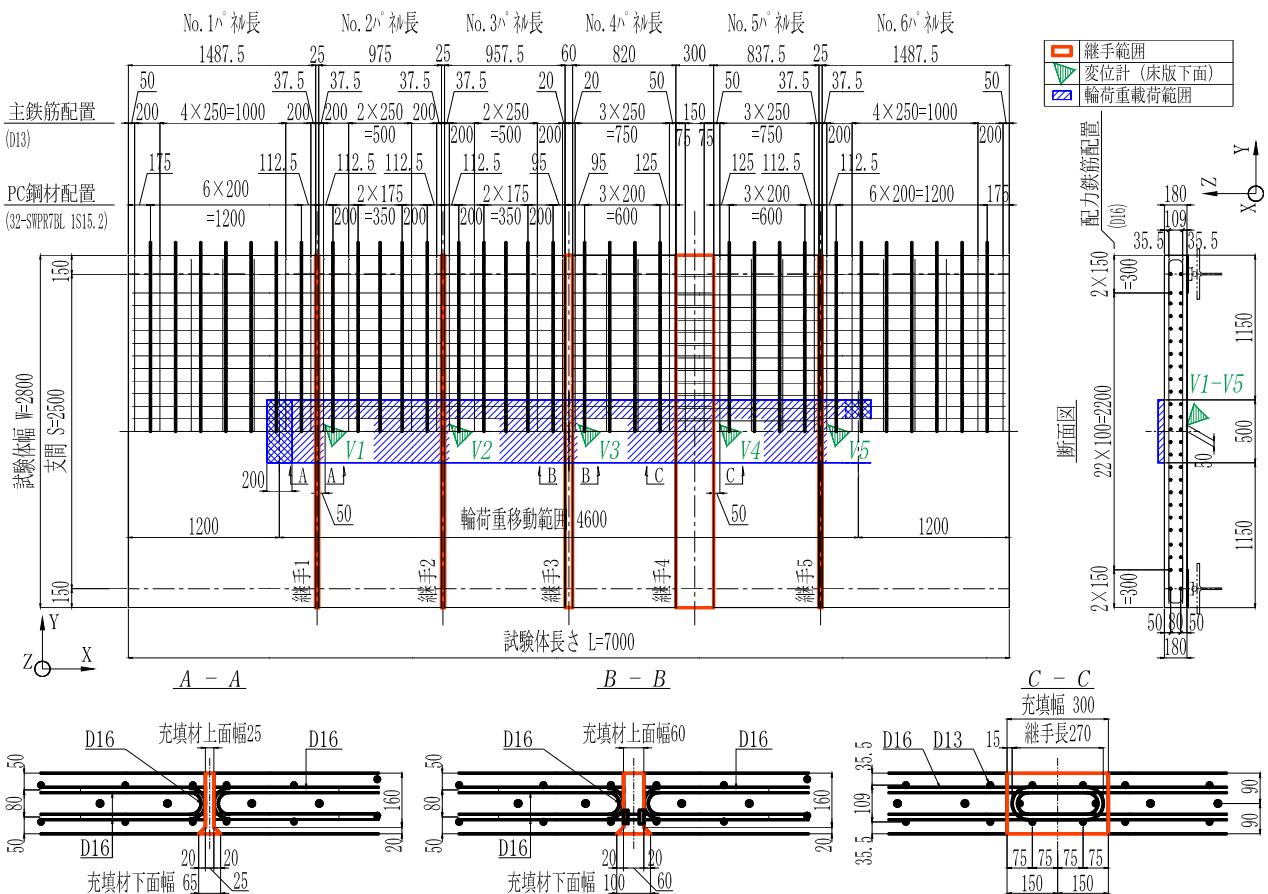


図-2 試験体寸法

断強度を補うために、継手 No.3 では先端に  $40\text{mm}\phi$  の定着金具を溶接した鉄筋(アンカーバー)を突出させ、界面剥離後におけるせん断抵抗力を向上させた。継手 No.5 では界面にエポキシ樹脂プライマーを塗布してからPCMを充填した。結果として本体コンクリートに対して、PCMは約1/3、低弾性PCMは約1/4、エポキシ樹脂モルタル(以下、ERM)は約1/10のヤング係数となった。

継手長さはループ継手を適用した継手 No.4 が 300mmとした一方で、提案継手構造を適用した継手 No.1, No.2, No.5 は 25mm とした。継手 No.3 はアンカーバー周りの充填性や定着を考えて、継手長さを 60mm とした。各継手部界面は凝結遅延剤による目粗しを施し、さらに提案継手においては下端部を 45 度に面取りすることで、剥離強さの向上を図った。

## 2.2 試験設備、載荷方法、および計測項目

試験は G&U 技術研究センターが所有する輪荷重走行試験機にて実施した。図-2 に載荷範囲および代表する鉛直変位計の設置位置を示す。接合した PC 床版を、2 辺単純支持となるように架台上に設置した。実橋と同様に無限連続版として挙動するように、橋軸方向における床版端部には弾性支持梁を設けた。試験機の走行範囲において、 $200\text{mm} \times 500\text{mm}$  の載荷板を 23 ブロック設置して、その軌道上で試験機を走行させた。

表-1 本体コンクリートの特性

ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		圧縮	割裂引張
$3.93 \times 10^4$	0.21	84.9	3.70

表-2 継手部の構成

継手 No.	継手部の構成
1	ポリマーセメントモルタル(PCM)による継手
2	エポキシ樹脂モルタル(ERM)による継手
3	アンカーバーを有する 低弾性 PCM による継手
4	充填コンクリートによるループ継手
5	界面にプライマーを塗布した 低弾性 PCM による継手



図-3 輪荷重走行試験機

載荷方法には道路橋示方書に示される階段状載荷プログラムを適用した。実交通における最大荷重である157kNから19.6kNずつ、4万回走行ごとに増加させた。各ステップで2回程度の静的載荷(157kN)を行って、大きな段差などが生じて連続性が失われていないかを確認した。ひとつの継手が破壊した場合は、その継手の影響が隣接する継手に影響しないように、図-3に示す通り弾性支持梁と床版の間に高強度モルタルブロックなどでバックアップして、試験を継続した。

### 3. 試験結果

図-5に荷重-破壊回数と、静的載荷における活荷重たわみ量の履歴を示す。なお、活荷重たわみ量は各箇所における載荷前のたわみ量と最大たわみ量の差分である。破壊に至った荷重および載荷回数は、継手No.1が294kN/29.4万回、継手No.3が314kN/32.3万回、継手No.5が314kN/33.4万回、継手No.2が333kN/40万回であった。提案継手構造の破壊モードはいずれも界面近傍の本体コンクリートにおける局所せん断破壊であり、図-4に示すように継手部の一部が床版本体の一部と一緒に剥落した状態で剥落した。継手No.4のループ継手は未破壊であったが、継手No.3の上部が圧縮疲労破壊したため、走行継続できなくなり、353kNの載荷途中で試験終了とした。図-5には比較対象として、平成8年版の道路橋示方書で設計したRC床版(RC8o-1)とPC床版(PC8-1, 2)の試験結果<sup>5)</sup>を掲載している。いずれの継手においてもRC8o-1より耐久性があるが、PC8-1, 2より劣る結果であった。活荷重たわみについて、継手No.1近傍に設置したV1は、およそ255kN/24万回載荷後から急増して破壊に至った。V4は294kN/32万回載荷まではたわみが増加したが、以降は試験終了まで変化しなかった。

図-6に上面段差量の履歴を、図-7にひび割れの推移を示す。継手No.1に着目するとSTEP5の235kN載荷において、輪荷重走行位置直下で界面のひび割れが発生して、255kN/24万回載荷後ではひび割れは試験体全幅に達した。その後、上面段差量は急激に増加しており、STEP8で充填材の剥落に至った。継手No.4ではSTEP1においてループ筋に沿ったひび割れが発生し、STEP6においては界面に沿ったひび割れが発生した。以降、ひび割れ密度は増えるものの、剥落は見られなかった。

### 4. 解析による機構検討

#### 4.1 予備解析と試験結果との比較

本試験に臨む前に、継手No.1とNo.4については弾塑性・破壊構成モデルと非直交多方向固定ひび割れモデルによる非線形有限要素解析(COM3D)を実施した。モデルの概要を図-8に示す。モデルは提案継手構造を有したPC床版に対する静的載荷の再現を検討した参考文献2)

表-3 充填コンクリートおよび充填材の特性

継手 No.	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
			圧縮	割裂引張
1	1.33×10 <sup>4</sup>	0.21	30.7	4.10
2	0.37×10 <sup>4</sup>	0.35	44.9	8.30
3, 5	0.89×10 <sup>4</sup>	0.24	27.7	3.60
4	3.88×10 <sup>4</sup>	0.21	80.2	3.80



図-3 弾性支持梁設置状況



図-4 継手 No.1 破壊状況

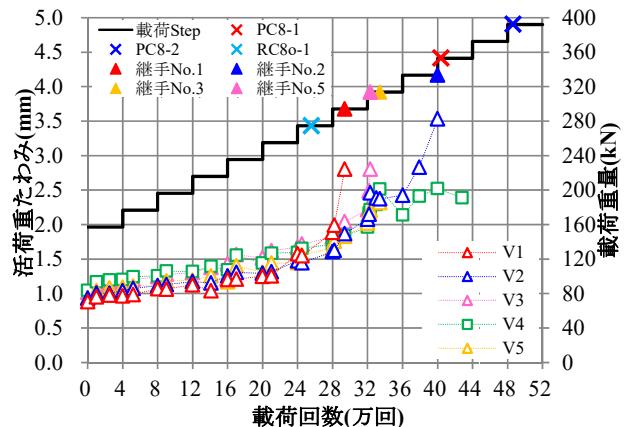


図-5 荷重-破壊回数および活荷重たわみの履歴

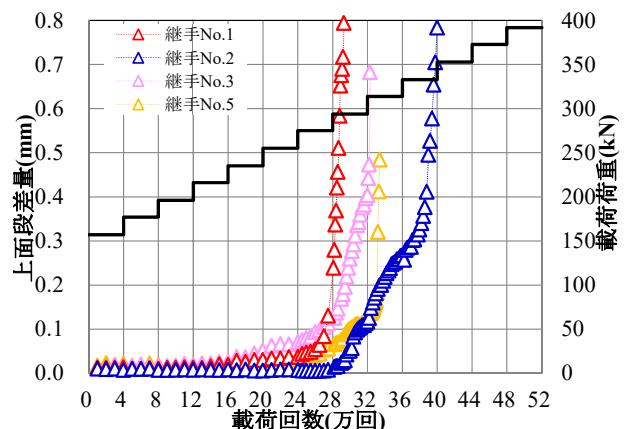


図-6 上面段差量の履歴

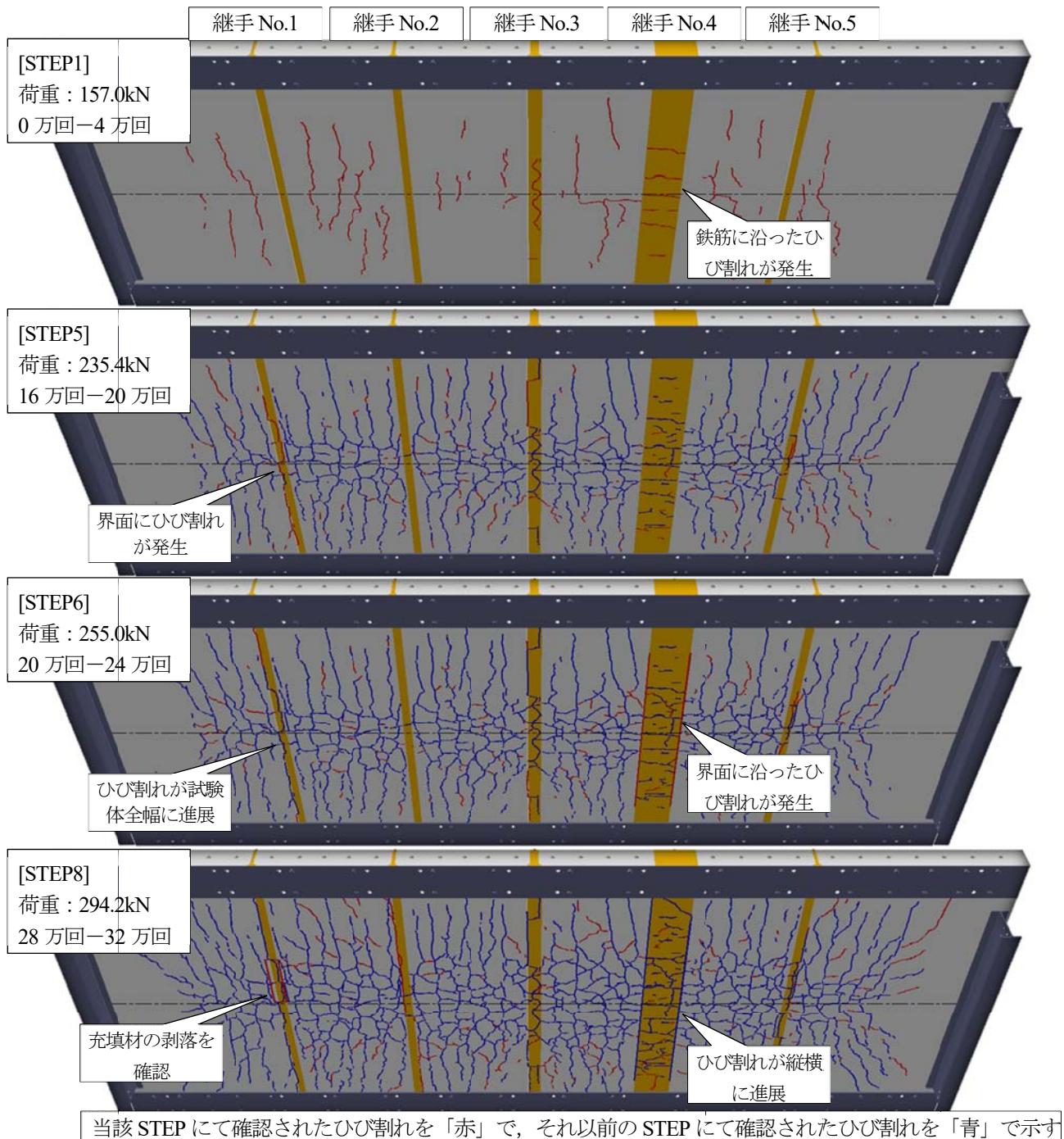


図-7 床版下面におけるひび割れの推移

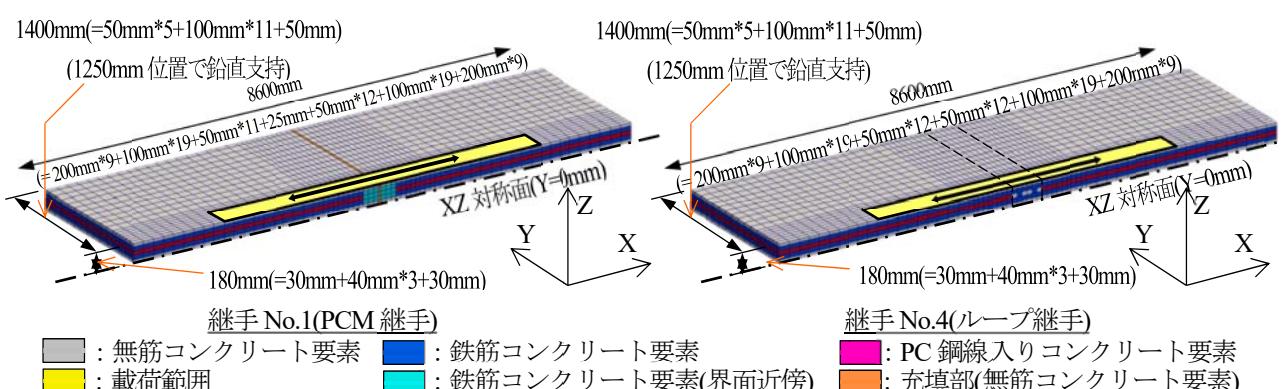


図-8 解析モデル概要

と、PC8-1, 2 の試験結果の再現を試行した参考文献 6)を踏まえて構成した。ループ継手と提案継手構造における界面には接合要素を設けている。ループ継手では界面剥離面での応力伝達と貫通している鉄筋によるダウエル効果が考慮できるモデル<sup>7)</sup>を採用した。提案継手構造においては付着強度を超えるまでは線形応答と仮定し、界面でのせん断力あるいは引張力が初期接合強度を超えた後は Mohr-Coulomb 摩擦則に従うものとした。提案継手構造における界面の付着強度は充填材の引張強度、せん断強度と同等とした。解析モデルでは条件を単純化して無限延長を模した床版の中央に継手を 1 つだけ設けて、継手を挟んだ 3m の範囲において輪荷重を繰返し載荷した。

予備解析により得られた活荷重たわみの履歴と、試験結果との比較を図-9 に示す。解析では、継手 No.1 は継手 No.4 と同等以上の疲労耐久性を有すると予想したが、試験では早期に継手部近傍の局所破壊に至った。また、継手 No.1 は STEP6 終了時点で床版下面界面のひび割れが試験体全幅に見られたが、解析では 372.6kN/46 万回では下面界面は剥離せず、剥離の起点は上端部であった(図-10)。継手 No.4 においては、解析では 40 万回載荷以降でたわみ量が急増しているが、試験では 294kN/32 万回載荷以降でたわみ量の増大は見られず、傾向が異なった。

#### 4.2 解析による破壊機構の検証

試験結果から、継手 No.1 は 255kN 以上の荷重で、界面近傍において静的な曲げ引張ひび割れが生じて、その後ひび割れが成長して抵抗断面が減少することで、早期に耐久性を喪失してせん断破壊に至ったと推測される。解析ではこのひび割れが再現されず、試験と解析の結果に差異が生じたものと考えられる。

この推測の可否を定性的に検討するため、破壊の起点となったと思われる曲げ引張ひび割れを解析上でモデル化して、破壊機構の再現を試みた。STEP6 終了時点で確認された界面近傍のひび割れ幅は 0.1mm~0.2mm 程度であったことから、剥離はごく浅い範囲で留まっていたと考えられる。そこで、解析において簡単に早期ひび割れを再現するために、下端から 30mm 高さまでの位置にある接合要素において、付着引張強度を  $0.1\text{N/mm}^2$  まで低減して、以降の疲労解析を継続することとした。

再現解析結果を図-12 に示す。STEP6 終了時点で部分剥離を再現した解析では、当初の予備解析と比べて早期にたわみが増大して破壊に至っている。継手 No.1 は過大な静的荷重の作用、あるいは充填材の強度不足等で、早期に耐力を喪失したことが推定される。

継手 No.4 は、試験において 294kN/32 万回載荷以降で活荷重たわみが増加していないことから、継手 No.3, No.5 が破壊して弾性支持梁を設置したことが原因で、破壊機構が変化したものと推測される。ここで検証をさらに進める上で、継手 No.3, No.5 の破壊と、弾性支持梁の影響を正しく表現する必要がある。継手 No.4 の検証につ

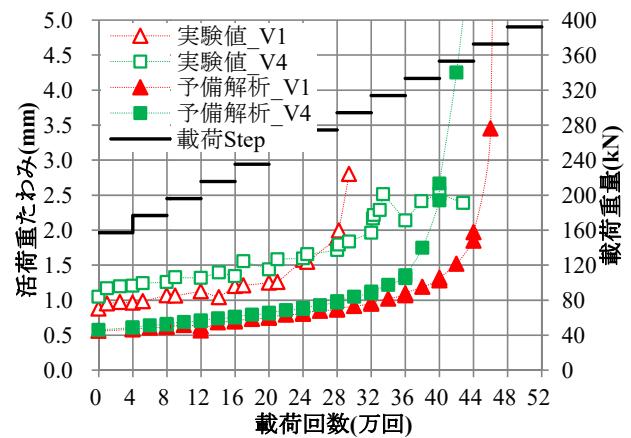


図-9 予備解析結果と試験結果の比較

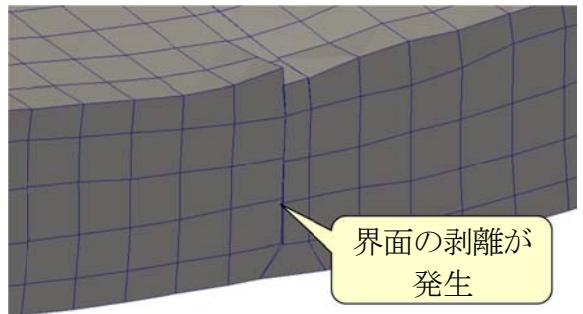


図-10 変形図(372.6kN/46 万回終了時, 20 倍に強調)

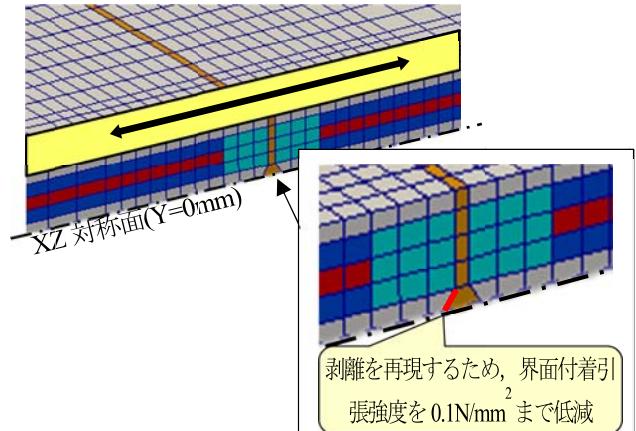


図-11 継手部における微小ひび割れの再現

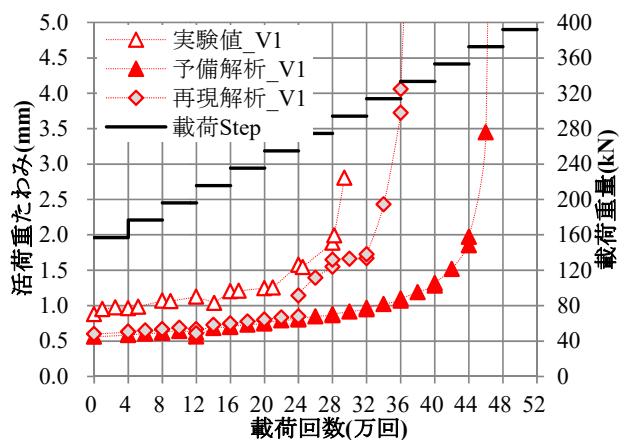


図-12 継手 No.1 の再現解析結果

いては今後の課題としたい。

#### 4.3 実交通荷重の繰返し載荷による疲労解析検討

道路橋示方書に示される階段状載荷プログラムを適用すると、提案継手構造は静的な曲げ引張ひび割れの発生により、早期に耐久性を喪失することがわかった。しかし、実交通荷重における最大値は157kNであり、実橋の供用条件下における破壊機構は試験とは異なると考えられる。そこで、実交通荷重の繰返し載荷を解析的に実施することで、再度ループ継手と比較検証した。

階段状載荷プログラムはコンクリート系床版においてS-N曲線が適用できることを前提としている。実交通における最大荷重である157kNを基準とした場合の換算回数と供用年数は、式(1)および式(2)を用いると表-4に示す通り算出される。

$$N_{1\text{Year}} = (ADTT_{SL} \times 365) \quad (1)$$

$N_{1\text{Year}}$  : 1年間に大型車が通行する回数

$ADTT_{SL}$  : 車線日あたりの大型車交通量

$$N_i = \sum \{ N \times (P/P_d)^m \} \quad (2)$$

$N_i$  : 合計換算回数

N : 載荷回数

P : 載荷荷重

$P_d$  : 基準荷重(157kN)

m : RC床版における $\delta - N$ 曲線の傾きの逆数

なお、 $ADTT_{SL}$ は2,000台/日と想定した。またmはRC床版のS-N曲線が適用できると仮定して、12.76<sup>8)</sup>とした。

157kNでの繰返し載荷を行った解析結果を図-13に示す。階段状載荷プログラムの52万回に相当する1.0E+10回の載荷後においても、継手部近傍の活荷重たわみは約1.4mmに留まっており、ループ継手と同等以上の耐久性を確認した。

## 5.まとめ

本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 輪荷重走行試験の解析的検討から、ポリマーセメントモルタルのみで接合した継手は、実交通荷重より大きい255kNの載荷により静的な曲げ引張ひび割れが生じて、早期に耐久性を喪失したことを定性的に確認した。
- (2) ループ継手は両隣の継手が先に破壊して、弾性支持梁を設置したこと、破壊機構が変化したと推測される。
- (3) 実交通荷重の繰返し載荷を適用すると、提案継手は静的に破壊されず、ループ継手と同等以上の疲労耐久性を示すことが確認できた。

本研究では輪荷重走行試験の結果を解析的に検討して、破壊機構の解明や、提案継手構造の優位性を検証した。今後は材料耐久性の検証や、製作や施工における諸課題を解決することで実橋への適用を検討する予定である。

表-4 載荷プログラムと換算回数および供用年数

STEP	載荷荷重P(kN)	載荷回数N(万回)	累計載荷回数ΣN(万回)	換算回数Ni(万回)	累計換算回数ΣNi(万回)	供用年数(年)
1	157.0	4	4	4	4	0
2	176.6	4	8	18	22	0
3	196.2	4	12	69	91	1
4	215.8	4	16	232	322	4
5	235.4	4	20	702	1,025	14
6	255.0	4	24	1,949	2,974	41
7	274.6	4	28	5,014	7,988	109
8	294.2	4	32	12,085	20,074	275
9	313.8	4	36	27,521	47,595	652
10	333.4	4	40	59,624	107,219	1,469
11	353.0	4	44	123,591	230,810	3,162
12	372.6	4	48	246,286	477,095	6,536
13	392.2	4	52	473,737	950,832	13,025

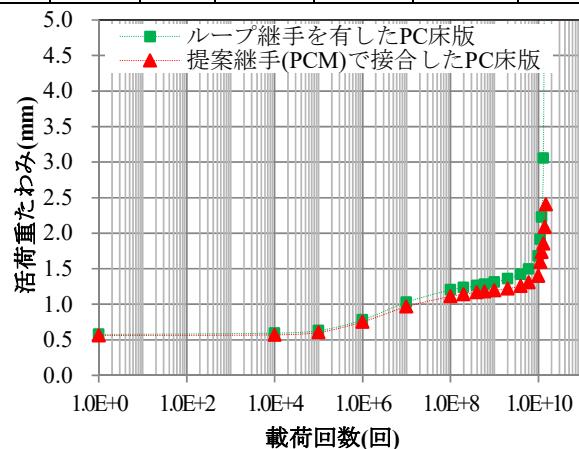


図-13 実交通荷重の繰返し載荷による解析結果

## 参考文献

- 1) 北慎一郎、櫻井信彰、前川宏一、松井繁之：床版取替に向けた半連続プレキャスト床版構造の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No.2、pp.67-72、2016.
- 2) 北慎一郎、櫻井信彰、前川宏一：半連続プレキャストPC床版の静的載荷試験における再現解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.40、No.2、pp.355-360、2018
- 3) 櫻井信彰、前川宏一、松井繁之：プレキャストPC床版用半剛接合継手、橋梁と基礎、2018.9
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、2012.
- 5) 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、国総研資料第28号、2002.3.
- 6) 北慎一郎、土屋智史、米津薰：PC床版の輪荷重走行試験再現解析、第45回土木学会関東支部技術研究発表会、2018
- 7) Koichi Maekawa and Junaid Qureshi : Stress Transfer Across Interfaces in Reinforced Concrete Due to Aggregate Interlock and Dowel Action, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.557/V-34, 159-172, 1997 February
- 8) 松井繁之：道路橋床版の長寿命化技術、森北出版、2016.  
(2018年7月20日受付)