

## 論文 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

北 慎一郎\*1・櫻井 信彰\*1・前川 宏一\*2

**要旨：**複数のプレキャスト PC 床版を、充填材のみで接合した一体化構造の静的載荷試験を実施した。適切な物性値を有する充填材料で接合することで、道路橋示方書に示す設計荷重に対して、十分な耐力を有する床版が構成できることを示した。さらに、耐荷機構の解明を目的とした再現解析を行い、影響因子が構造耐力等に及ぼす感度の分析から、継手のない床版の押抜きせん断破壊と同等の耐荷性能を発現させるに足る、充填材のヤング係数と強度の閾値を得た。すなわち、提案構造を実現させるための定量的な材料開発目標を、構造工学の観点から提示した。

**キーワード：**プレキャスト PC 床版, 静的載荷試験, 継手構造, 再現解析

## 1. はじめに

筆者らは、プレキャスト PC 床版において、本体コンクリートよりヤング係数が低い充填材のみで継手部を構成することで、工期短縮・省力化だけでなく、異方性により橋軸方向の断面力を緩和するとともに、かつ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提案している<sup>1)</sup>。構造概要を図-1に示す。

等方性の連続する RC 床版と提案継手構造を有したプレキャスト PC 床版では、静的載荷時および移動輪荷重の繰返し載荷時において、破壊モードが異なる可能性がある。そのため、RC 床版で求められた S-N 曲線<sup>2)</sup>の適用可能性は明らかでない。そこで、提案する継手構造にて一体化した床版の静的耐力を照査するため、静的載荷試験を実施した。また、最大耐力および破壊モードの違いを比較検討するため、ループ継手を有した床版も同様に試験を行った。

これらの試験に対して、本稿では3次元非線形有限要素解析による検討について紹介する。まずは機構解明のための応答解析を行って、各試験体の破壊モードが再現できることを確認した。次に、提案する継手構造であってもヤング係数や圧縮強度、引張強度を適切に設定すれば、継手のない床版と同等の破壊モードと耐荷性能を発現できることを示すため、充填材の物性値における感度解析を行って、破壊モードが押抜きせん断破壊となる場合の各物性値の閾値について検証した。最後にこれまで筆者らが充填材料として使用してきたポリマーセメントモルタル(以下、PCM)とエポキシ樹脂モルタル(以下、ERM)について、物性試験値と感度解析の結果を踏まえて、新材料開発における目標値を定量的に明らかにする道筋を提案する。

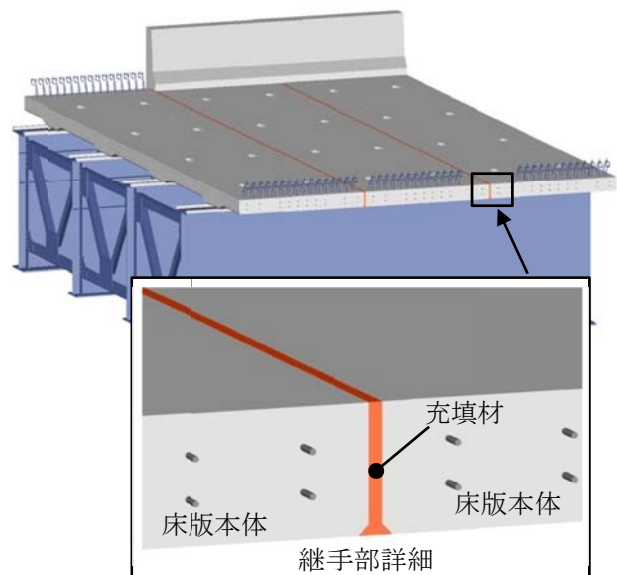


図-1 床版の構造概要

## 2. 試験概要

## 2.1 試験体

各物性値を表-1から表-3、試験体の寸法を図-2に示す。No.0 試験体はループ継手を、No.1 試験体は提案継手構造を有したプレキャスト PC 床版(長さ 4500mm, 幅 2800mm, 厚さ 180mm)であり、床版支間 2.5m として設計した。継手長さは No.0 試験体が 300mm である一方、No.1 試験体は 25mm であり、界面には凝結遅延材による目粗しを施すとともに、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。

鉄筋は、支間方向は D13 ctc 250mm で上下に配置して、橋軸方向は D16 ctc 100mm で上下に配置した。なお、ループ継手における曲げ半径を確保するために、鉄筋のかぶりは上下面ともに 29mm とした<sup>3)</sup>。

本体コンクリートは PC 鋼線を用いてプレテンション

\*1 新日鉄住金エンジニアリング(株) 事業創出センター 事業開発企画部 (正会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科 教授 工博 (正会員)

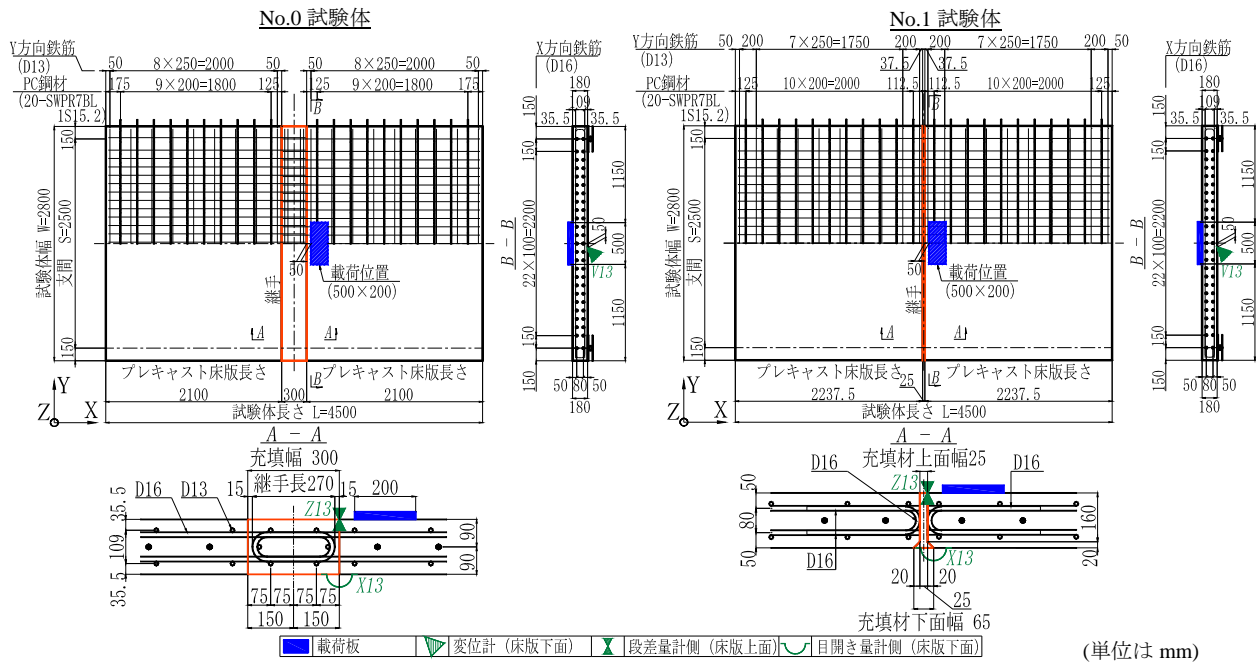


図-2 試験体寸法

で緊張した。これは実際に製作するプレキャスト床版に極力近づけるためであり、PC 鋼棒では鋼材の曲げ剛性等が耐力に与える影響が少なくない、と判断したためである。プレストレス量は設計荷重時に全断面有効となるように計算して、有効プレストレス量  $4.26\text{N/mm}^2$  となるように、緊張力を導入した。

提案継手構造における充填材料には PCM と ERM の 2 種類を使用した。本稿では紙面制約上、PCM を報告する。PCM の材料特性は表-3 に示す通りであり、ヤング係数は本体コンクリートの約 1/3 であった。

## 2.2 試験設備、荷重方法、および計測項目

試験は大阪工業大学、八幡工学実験場が有する荷重試験機にて実施した。図-2 に荷重面の位置および代表的な計測機器の位置を示す。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材を設けた。200mm×500mm の荷重板は、提案継手構造において、せん断力が作用する位置が耐荷力に対して最も厳しいと予想して、継手部界面近傍に荷重板縁端が位置するようにセットした。また計測機器として、荷重板直下の鉛直変位量を計測する V13、支間中央上面の継手部界面で発生する段差量を計測する Z13、支間中央上面の継手部界面で発生する目開き量を計測する X13 などを設置した。

静的設計荷重  $P_{sd}$  は、T 荷重に衝撃係数を考慮した 138kN とした。 $P_{sd} \times 1.0$  で荷重除荷を 3 回繰り返した後に、 $P_{sd} \times 約 2.5$  (350kN) で荷重除荷を 1 回実施し、最後に終局状態まで荷重を行った。

表-1 本体コンクリートの特性

試験体 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
0	44.5	0.20	69.4	3.17
1	43.7	0.20	69.1	2.94

表-2 継手部の充填材料

試験 No.	充填材料種類
0	充填コンクリート
1	ポリマーセメントモルタル(PCM)

表-3 充填コンクリートおよび充填材料の特性

試験体 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
0	32.1	0.20	56.0	3.59
1	13.0	0.24	29.7	3.75

表-4 最大耐力試験値

試験体 No.	試験値 (kN)	試験値 / $P_{sd}$	破壊モード
0	767	5.6	押抜きせん断破壊
1	580	4.2	界面近傍の本体コンクリートにおけるせん断破壊

## 3. 試験結果

### 3.1 破壊荷重

各試験体の破壊荷重を表-4 に示す。No.0 試験体は押抜きせん断破壊、No.1 試験体は界面近傍の本体コンクリートでのせん断破壊であった。いずれも設計荷重  $P_{sd}$  の 4 倍以上であり、十分な耐力を有することが確認できた。

### 3.2 終局荷重までの挙動

終局状態までの挙動を図-3 に示す。鉛直変位量において、450kN 程度まではいずれの試験体も同様の傾向を

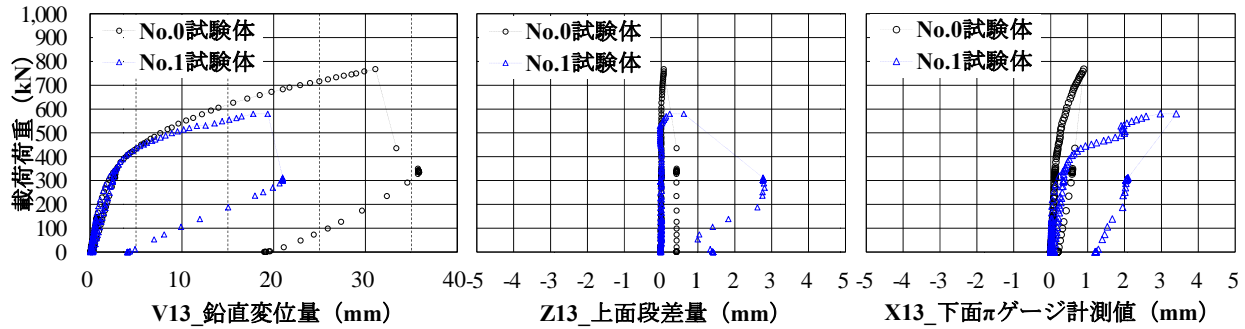


図-3 各種計測値と載荷荷重の関係

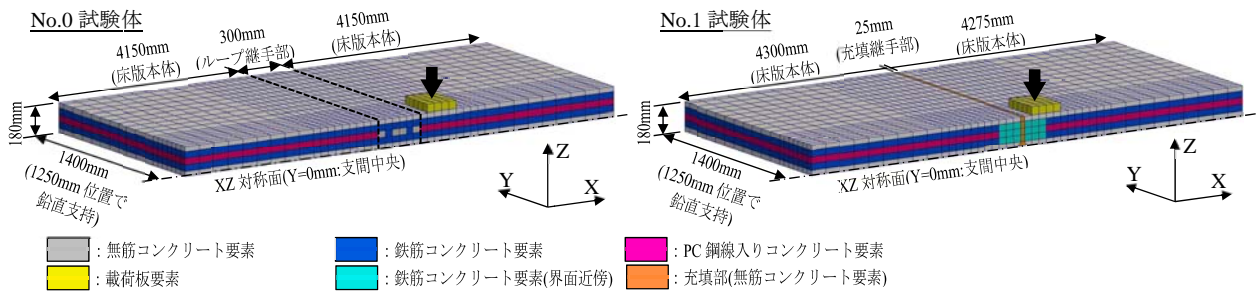


図-4 解析モデル概要

示した。その後 No.1 試験体の変位量が先行して大きくなり、終局破壊に至った。

上面段差量において No.0 試験体は破壊直前まで値に大きな変化はなかった。No.1 試験体では 530kN 程度から急激に大きくなり、また下面では継手部内部のひび割れが確認できたことから、継手におけるせん断伝達機能を失って、版として機能しなくなったものと思われる。

下面ゲージ計測値では、No.1 試験体において 400kN 程度から急激に大きくなり、界面の剥離が顕著となった。

#### 4. 再現解析検討

##### 4.1 再現モデルの概要

試験結果の理解を深めるために、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応答解析を行った。モデルの概要を図-4 に示す。座標軸は橋軸方向を X、支間方向を Y、鉛直方向を Z とした。支間中央を対称面とした 1/2 モデルを作成した。試験体では無限連続版として挙動するように弾性支持材を設けたことから、解析モデルでは橋軸方向を十分に長く設定した。有限要素は 8 節点 enhanced strain 要素を用いた。試験体の下側鉄筋、上側鉄筋位置に相当する高さに鉄筋コンクリート要素層を設けて、PC 鋼線高さには、初期ひずみを導入できる要素層を設けた。ただし、No.1 試験体の界面近傍は鉄筋が密であることを考慮して、上下端部の要素を除いた全層に平均化した鉄筋比を設定した。それ以外は無筋コンクリート領域として、それぞれに破壊エネルギーから引張軟化特性を設定した。床版本体は高強

度コンクリートに相当するピークひずみとせん断伝達係数を設定した<sup>4)</sup>。コンクリートの引張強度には、乾燥収縮と鋼材拘束による初期引張応力を大まかに考慮するために、材料試験値の 70% の値を設定した。これにより、初期曲げひび割れ荷重は試験と解析で一致する。

充填材は無筋コンクリートの材料構成則を援用できると仮定して、充填材の物性値を有した無筋コンクリート領域として設定した。充填材に配合している最大骨材粒径は PCM で 2.4mm、ERM で 2.0mm と小さいことから、高強度コンクリートと同様に、せん断伝達係数を低減して数値解析を実施した。

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>5)</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、一旦界面でのせん断力もしくは剥離方向の引張力が初期付着強度を超えた後は、Mohr-Coulomb 摩擦則に従うものとした。PCM を用いた提案継手構造における界面の付着強度は、引張付着強度、せん断付着強度は充填材料の引張強度、せん断強度と同等とした。せん断強度は、コンクリートに適用される式(1)<sup>6)</sup>が PCM にも適用できるものと仮定して、圧縮強度から算出した。

$$f_{cv0} = 0.656(f_c)^{0.606} \quad (1)$$

$f_{cv0}$  : コンクリートせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_c$  : コンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

支点条件について、本試験床版は丸鋼を介して桁で支

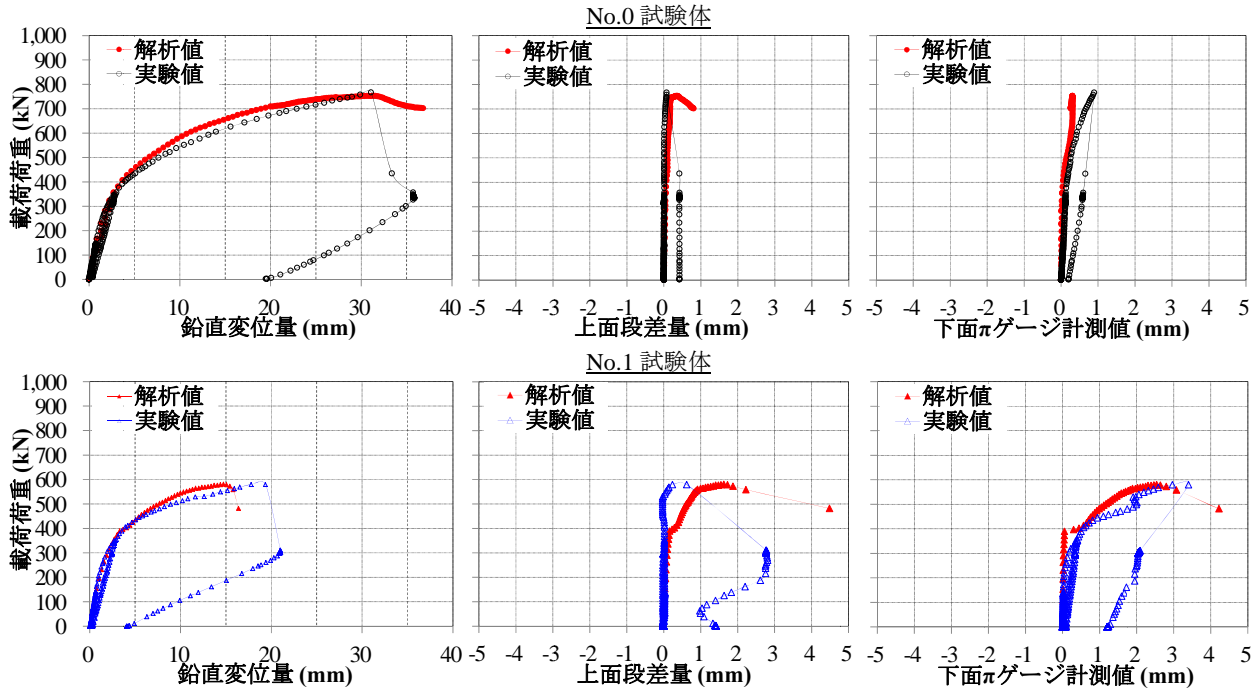


図-5 荷重変位関係の比較

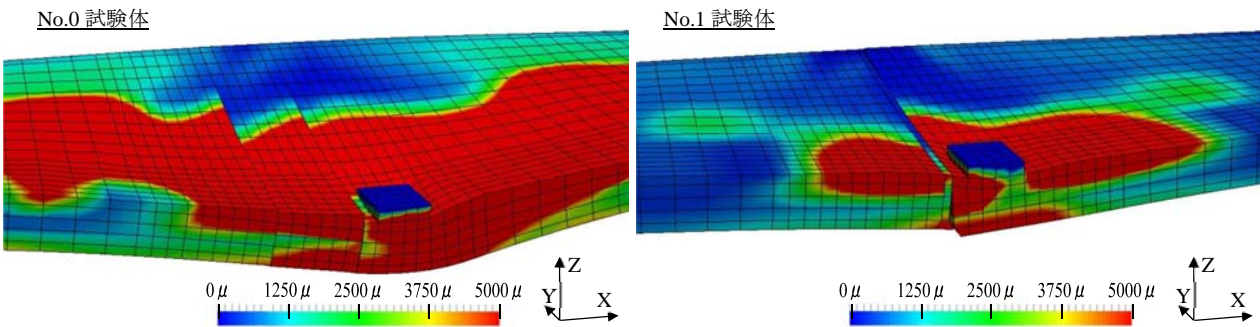


図-6 最大主ひずみ(引張が正)と変形図(変形を10倍に強調)

持されており、橋軸および支間方向への移動は、摩擦により多少拘束された状態になっていた。そこで解析モデルでは、継手部下面界面から X 方向に 330mm 離れた両側 2 点を完全固定することにした。

以上を踏まえて、総節点数 9492、要素数 7400(うち Solid 要素 7220, Interface 要素 180)のモデルを作成した。

#### 4.2 再現解析結果

最大耐力における試験結果と解析結果の比較を表-5 に、試験値との比較結果を図-5 に示す。最大耐力および鉛直変位量の推移において、No.0 試験体の解析結果は試験値と適合した。No.1 試験体では最大耐力は一致しているが、鉛直変位量は試験値に比べてやや小さかった。これは支点条件の表現方法による影響と思われる。上面段差量や下面  $\pi$  ゲージ計測値においては、No.0 試験体、No.1 試験体ともに値に差異があるものの、傾向は再現された。図-6 に最大耐力を示した Step における変形図を示す。No.0 試験体では荷重板近傍の上端部コンクリート

表-5 最大耐力の比較

試験体 No.	試験値 (kN)	解析値 (kN)	解析値 / 試験値
0	767	753	0.98
1	580	581	1.00

要素においてせん断変形がみられ、押抜きせん断破壊の特徴が再現された。No.1 試験体においても、界面下部における引張力による剥離破壊と、充填部界面近傍の床版上面のコンクリートでせん断変形が確認でき、破壊モードがほぼ再現できたものとする。

#### 5. 感度解析による破壊モードの検証

No.1 試験体は充填部界面近傍の本体コンクリートにおけるせん断破壊であったが、適切な充填材を適用すれば最大耐力は向上して、No.0 試験体と同様に押抜きせん断破壊となる可能性がある。そこで、充填材の物性値について表-6 にあるパラメータで感度分析を行い、最大耐力や破壊モードの検証を行った。

### 5.1 Study-1: ヤング係数と引張強度を変化させた場合

ヤング係数と引張強度を変化させた場合の感度分析結果を図-7 に示す。なお、界面下面における剥離が確認できた際の耐力を剥離荷重と定義している。

充填材のヤング係数が本体コンクリートの 1/10 以下で、引張強度が 12.5N/mm<sup>2</sup> 以上の場合、界面が剥離せずに最大耐力を迎えており、押抜きせん断破壊のモードが現れた。それ以外のケースでは最大耐力以下の荷重で界面剥離が発生して、界面近傍におけるせん断破壊のモードとなった。図-8 はヤング係数 4.37kN/mm<sup>2</sup>、圧縮強度 40N/mm<sup>2</sup>、引張強度 15N/mm<sup>2</sup> の場合の最大耐力時の変形図である。界面は剥離しておらず、載荷板近傍の上端部コンクリート要素にせん断変形が見られ、図-6 に示す No.0 試験体の変形図と類似している。また充填材のヤング係数が本体コンクリートの 1/2 の場合は、引張強度を大きくしても耐力は向上せず、せん断力による界面剥離破壊を起点とした破壊モードであった。界面のせん断付着強度を圧縮強度の関数と定義したことで、いずれのケースもせん断付着強度が一定であること、また充填材のヤング係数が高いため界面に発生する応力が他のケースに比べて大きいことが原因と考えられる。

### 5.2 Study-2: 圧縮強度と引張強度を変化させた場合

圧縮強度と引張強度を変化させた場合の感度分析結果を図-9 に示す。充填材の圧縮強度が 40 N/mm<sup>2</sup> 以上で引張強度が 12.5N/mm<sup>2</sup> 以上の場合、もしくは 30 N/mm<sup>2</sup> 以上で引張強度が 25N/mm<sup>2</sup> のケースで押抜きせん断破壊のモードとなった。それ以外のケースでは界面近傍におけるせん断破壊のモードとなった。また、充填材の引張強度が 7.5N/mm<sup>2</sup> 以下の場合、最大耐力は圧縮強度の影響を受けなかった。しかし 10N/mm<sup>2</sup> を超えると圧縮強度が小さいほど耐力は小さくなり、圧縮強度 20N/mm<sup>2</sup> のケースではいずれもせん断による界面剥離を起点とした破壊であった。

以上から、提案継手構造においては充填材料のヤング係数が本体コンクリートの 1/10 より小さく、圧縮強度が 40N/mm<sup>2</sup>、引張強度 12.5N/mm<sup>2</sup> 以上であれば押抜きせん断破壊のモードへ移行することが確認できた。しかしながら、充填材料におけるせん断強度および、界面における付着強度の評価については、今後研究が必要である。

## 6. 充填材における目標物性値の提案

PCM および ERM について、筆者らがこれまで各種試験で得た材料物性試験の結果を図-10 および図-11 に示す。PCM において、ヤング係数は本体コンクリートの 1/2.5~1/3.5 程度であり、圧縮強度は 29~46N/mm<sup>2</sup>、引張強度は圧縮強度の 1/6~1/8 程度の大きさであった。ERM はサンプル数が 2 と少ないが、ヤング係数は本体コン

表-6 解析パラメータ

Study	パラメータ1:		パラメータ2:	パラメータ3:
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	本体コンクリートに対する比	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1	21.4, 4.37, 2.14	1/2, 1/10, 1/20	40	2.5, 5.0, 7.5, 10, 12.5, 15,
2	4.37	1/10	20, 30, 40	20, 25

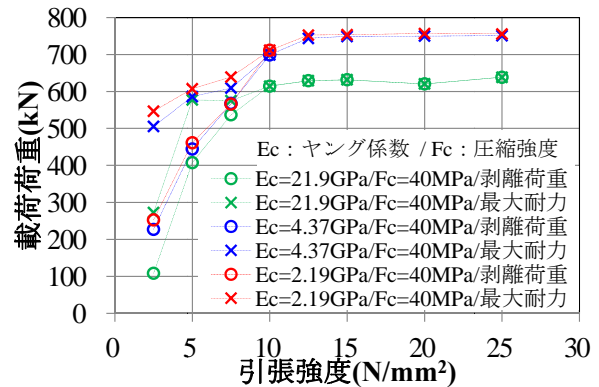


図-7 Study-1 における感度分析結果

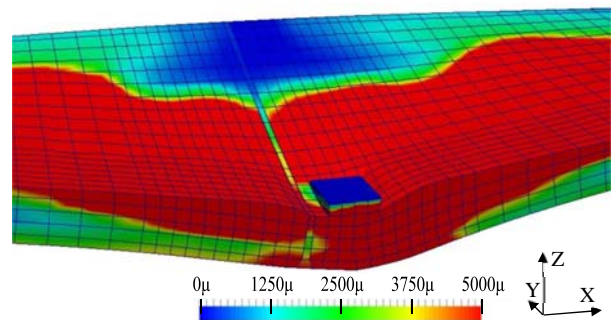


図-8 提案継手構造における押抜きせん断破壊の例 (最大主ひずみ(引張が正)と変形図(変形を10倍に強調))

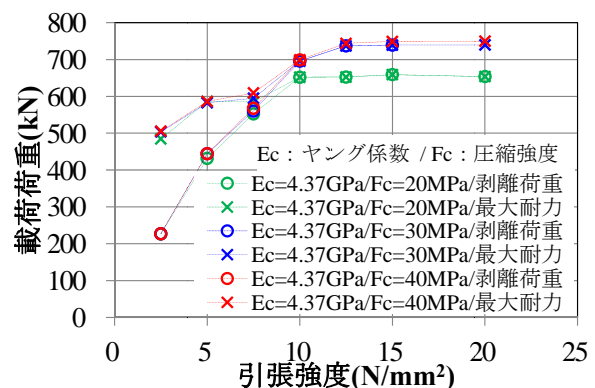


図-9 Study-2 における感度分析結果

クリートの 1/6~1/8 程度で、圧縮強度は 40~44N/mm<sup>2</sup>、引張強度は圧縮強度の 1/4~1/5 程度の大きさであった。

これらの材料特性踏まえた目標物性値と、これらを用いて解析した結果を表-7 に示す。前章で示した破壊モードが押抜きせん断破壊となる充填材料の閾値と比較

して、PCM はヤング係数が大きいことから、破壊モードが押抜きせん断破壊となるような物性値の改善は難しいと考えられる。しかし、配合変更で現行のヤング係数を極力小さくして、かつ圧縮強度および引張強度の低減を抑制することで、最大耐力は向上すると考えられる。

一方 ERM のヤング係数は小さく、閾値に近い。そのため配合変更によるヤング係数の低減と、強度の向上が達成できれば、破壊モードが押抜きせん断破壊となる充填材料が開発できると考えられる。

## 7. まとめ

本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 提案継手構造においても適切な充填材料を選定することで、設計荷重に対して十分な耐力を有した床版を構成することができる。
- (2) FEM 解析においてプレストレスおよび継手部界面や充填材料の物性値を適切に設定することで、静的載荷試験の結果を良好に再現できる。
- (3) 感度分析を行うことで、提案継手構造を有する床版構造において破壊モードが押抜きせん断破壊となる場合の充填材料のヤング係数、圧縮強度、引張強度の閾値が得ることができる。
- (4) PCM の材料特性から配合変更による最大耐力の向上には限界があり、破壊モードは界面近傍のせん断破壊に留まると考えられる。ERM ではヤング係数が小さく強度が高いことから、配合変更により破壊モードを押抜きせん断破壊へ移行できると考えられる。

本研究では継手のない版の押抜きせん断破壊と同等とする際の、充填材の物性値を検討した。しかしながら、プレキャスト床版においては、床版全体が損傷する押抜きせん断破壊より、継手部界面近傍のみが損傷する破壊モードの方が、維持管理が容易であるとの判断も考えられ、破壊モードの優劣においては議論の余地が残る。

本研究では継手のない版の押抜きせん断破壊と同等とする際の、充填材の物性値を検討した。しかしながら、プレキャスト床版においては、床版全体が損傷する押抜きせん断破壊より、継手部界面近傍のみが損傷する破壊モードの方が、維持管理が容易であるとの判断も考えられ、破壊モードの優劣においては議論の余地が残る。

また、解析検討における充填部および界面の物性値の設定については仮定が含まれており、基礎的な試験を通じた予測精度の向上が必要と考える。

最後に、提案継手構造がループ継手と同等の性能を有することを示すためには、床版の疲労耐久性の検証が必要である。今後は継手を含んだ床版に対して輪荷重走行試験を実施して、疲労耐久性を検証するとともに、これらの再現解析、感度分析についても検証する予定である。

## 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.

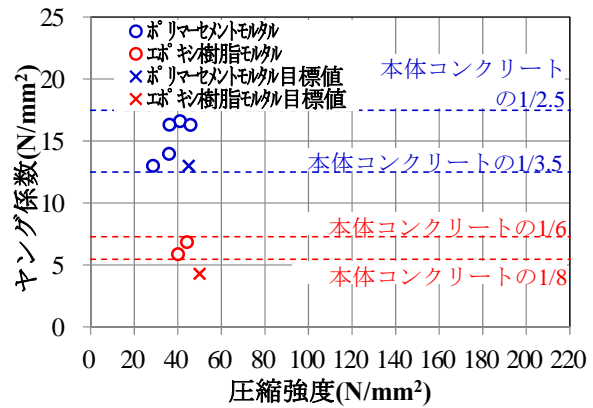


図-10 ヤング係数と圧縮強度の関係

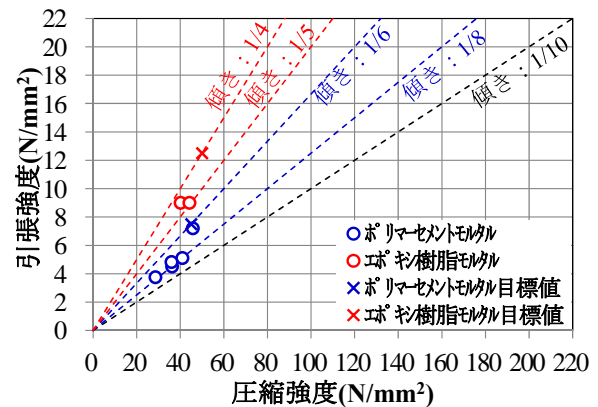


図-11 圧縮強度と引張強度の関係

表-7 充填材料の目標物性値

充填材料	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) (本体コンクリートに対する比)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	解析結果
PCM	13.0 (1/3.3)	45	7.5	界面近傍のせん断破壊 (最大耐力:576.1kN)
ERM	4.37 (1/10)	50	12.5	押抜きせん断破壊 (最大耐力:747.2kN)

- 2) 松井繁之: 道路橋床版の長寿命化技術, 森北出版, 2016.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2012.
- 4) 土屋智史, 三島徹也, 前川宏一: 高強度構成材料を用いた RC 梁部材のせん断破壊と数値性能評価, 土木学会論文集, No.697/V-54, 65-84, 2002.2
- 5) Koichi Maekawa and Juneid 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
- 6) 東山浩士, 松井繁之, 水越睦視: PC 床版の押抜きせん断耐力算定式に関する検討, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1347-1354, 20