

# 論文 合成床版の実験再現解析によるずれ止め分散モデル化手法の検証

木作 友亮\*<sup>1</sup>・藤山 知加子\*<sup>2</sup>

**要旨**：本研究では、孔あき鋼板ジベルおよび頭付きスタッドを有する合成床版の静的載荷実験と、ずれ止めをジョイント要素で分散的に線形要素としてモデル化した非線形有限要素解析の結果とを比較し、実現現象の再現性を検証した。その結果、解析では荷重の増加に伴い鋼リブを起点とする水平ひび割れが卓越し、実験で見られたような斜め引張破壊に至る挙動とは一致しなかったが、載荷実験の荷重-支間中央たわみ関係や各構成要素のひずみは高精度に再現することができた。

**キーワード**：合成床版, 非線形解析, FEM, ジョイント要素, 孔あき鋼板ジベル, 頭付きスタッド

## 1. はじめに

2012年に制定されたコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、非線形有限要素解析を近未来の性能照査の基幹技術に位置付けており、複合構造標準示方書<sup>2)</sup>も同様の方針を踏襲している。非線形有限要素解析の活用により、ずれ止めが配置された鋼コンクリート複合構造の力学挙動を予測できる可能性がある。鋼コンクリート複合構造のずれ止めには、頭付きスタッドや孔あき鋼板ジベル（以下、PBLと略記）が用いられている。複合構造標準示方書<sup>2)</sup>では、異種材料間の接触面に生じる接触力やはく離、摩擦力やすべりが構造物の力学挙動に影響を及ぼす際は、これらを境界面の力学モデルとして考慮しなければならないとしている。

非線形有限要素解析でずれ止めをモデル化する手法として、(A) ずれ止めの形状を忠実にモデル化する方法、(B) バネ要素やジョイント要素に置き換える方法の2種類が挙げられる。(A)の方法は、ずれ止め周辺の局所的な損傷を評価する際は有用であるが、大規模な構造解析や疲労解析では、モデルの作成が煩雑になるとともに、計算に要する時間が増大してしまう。(B)の方法の例として、近年の事例では、頭付きスタッドを線形バネと非線形バネに置き換えた部材剛性や接合面のずれ変位の違いの検討<sup>3)</sup>、ジョイント要素でのモデル化でスタッドの有効領域を定めるためのゾーニングの検討<sup>4)</sup>、ジョイント要素を用いてずれ止めを非線形バネでモデル化した混合桁橋の実験再現<sup>5)</sup>といった解析事例や、ずれ止め面外方向拘束を考慮したジョイント要素構成則の検討<sup>6)</sup>等が行われている。しかし、PBLと頭付きスタッドの両方をジョイント要素でモデル化した複合構造の解析例は無い。

そこで本研究では、代表的な鋼コンクリート複合構造である合成床版を対象に、ずれ止めをジョイント要素に置き換えた解析を実施し、鋼コンクリート複合構造の力学挙動が再現できるかを検証した。また、解析結果の妥

当性を判断できるようにするため、頭付きスタッドとPBLを配置した合成床版の載荷実験を行った。

## 2. 合成床版の載荷実験

### 2.1 実験方法

#### (1) 試験体

本実験に用いた試験体の概要を図-1に示す。底鋼板の板厚は8mm、床版厚は260mmとし、短辺幅は1200mm、長辺幅は3500mmとした。床版内には、PBLを設けた平鋼のリブと頭付きスタッドを配置した。床版の上面には、主鉄筋(D19ctc120mm)と配力鉄筋(D19ctc200mm)を配置した。PBLの円孔部および頭付きスタッドを除いて、鋼材の表面には剥離剤を塗布し、コンクリートの付着を除去した。

#### (2) 使用鋼材およびずれ止めの諸元

底鋼板の材質はSM400A、その他の鋼材はSS400、鉄筋はSD345とした。PBLの孔径は60mmとし、頭付きスタッドはφ16×150mmのものを用いた。

#### (3) コンクリートの配合および管理方法

膨張材を20kg/m<sup>3</sup>混和した普通セメントを用い、水セメント比は51.5%とした。スランプは10.0±2.5cm、空気量は4.5±1.5%で管理した。試験体は室温で保管し、7日間の湿潤養生を施した。脱型は、コンクリートの打設後8日目に行った。強度試験用の供試体を製作し、試験体と同環境（以降、現場養生と呼ぶ）および水中で養生した。強度試験は、材齢7日と28日に実施した。

#### (4) 載荷方法

本実験の載荷要領を図-2に示す。材齢28日目に、載荷点スパン400mm、支点間スパン3000mmの4点曲げ載荷試験を行った。せん断スパン比a/d（せん断スパンaと有効高dの比）は5.1である。支点および載荷点は、自由に回転できるようにした。載荷点は、石こうで試験体表面の不陸を調整してから、載荷板（鋼板）を敷いた。

\*1 (株) IHI 基盤技術研究所 構造研究部 (正会員)

\*2 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科准教授 工博 (正会員)

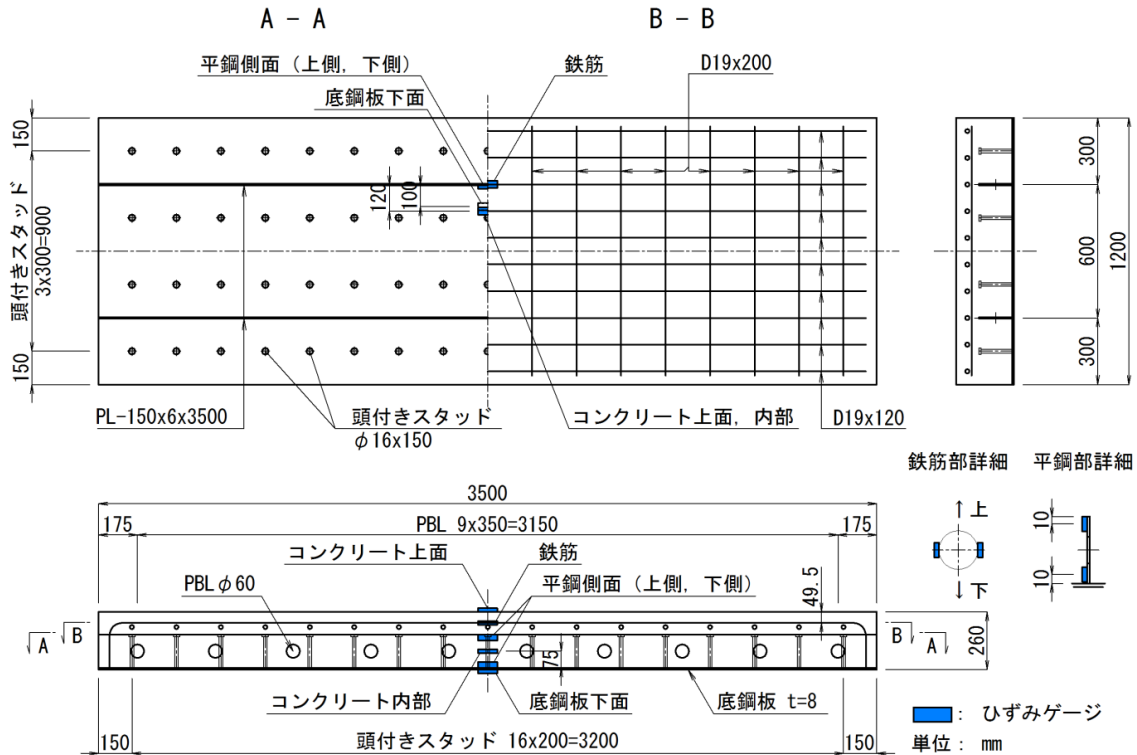
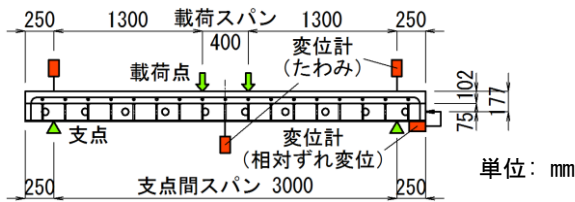


図-1 試験体概要およびひずみの計測位置



\* 変位計は2箇所ずつ設置(試験体中心から150mmの位置)

図-2 荷重要領および変位計の設置位置

荷重時には、荷重が800kNに達するまで、200kN毎に除荷と再荷重を繰り返した。

### (5) 計測方法

ひずみの計測位置を図-1に示す。支間中央において、コンクリート上面、主鉄筋、平鋼側面(上側、下側)、コンクリート内部、底鋼板下面の試験体長手方向のひずみを一軸ひずみゲージおよびモールドゲージで計測した。

試験体の変位は、図-2に示す位置に設置した棒変位計で計測した。変位計の設置には不動梁を用いた。試験体端部の底鋼板下面に、変位計を固定したマグネットスタンドを設置し、底鋼板とコンクリート部の相対ずれ変位を計測した。試験体に生じたひび割れは、それぞれの除荷完了時に記録した。

## 2.2 実験結果

### (1) 強度試験

強度試験の結果を表-1に示す。現場養生した供試体は、材齢28日の圧縮強度が42.4N/mm<sup>2</sup>、静弾性係数が26.5kN/mm<sup>2</sup>、割裂引張強度が2.62N/mm<sup>2</sup>であった。

表-1 強度試験結果

養生方法	材齢	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
現場養生	7日	30.4	---	---
	28日	42.4	26.5	2.62
水中養生	7日	31.6	---	---
	28日	45.3	32.1	---

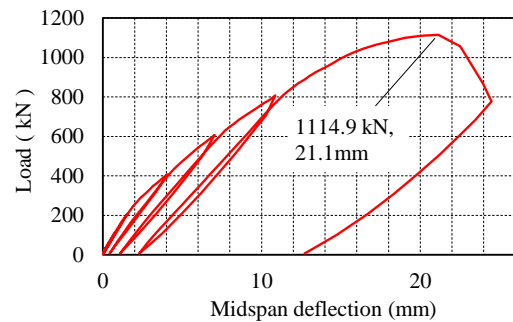


図-3 荷重-支間中央たわみ関係

### (2) 荷重-支間中央たわみ関係

荷重と支間中央たわみの関係を図-3に示す。図-3のたわみは、支間中央の変位平均値から支点上の変位平均値を減じて算定した。荷重が400kNに達した後は、除荷後に変形が残留し、荷重1114.9kN、支間中央たわみ21.1mmで破壊に至った。

図-4に荷重-支間中央たわみ関係と理論値(全断面有効とした場合とコンクリートの引張抵抗を無視した場合

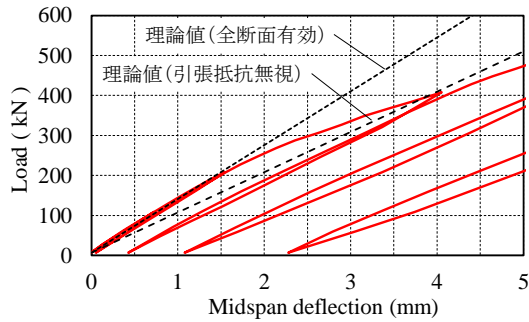


図-4 理論値との比較

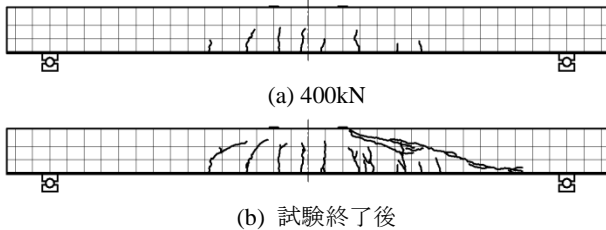


図-5 試験体のひび割れ状況

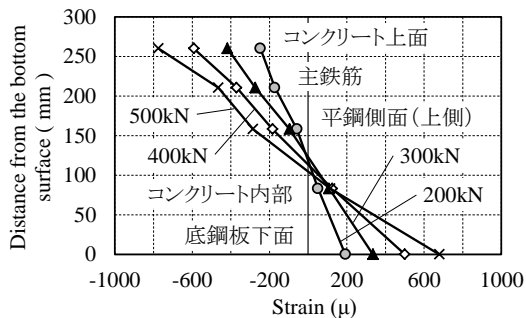


図-6 高さ方向のひずみ分布（支間中央）

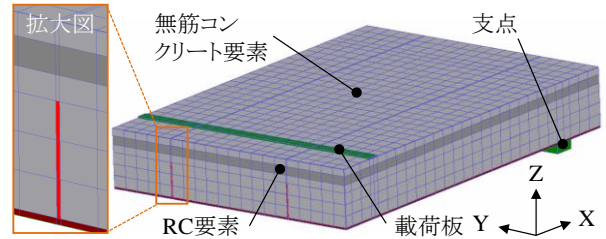
合の曲げ剛性)を比較する。約 200kN で全断面有効の理論値から、約 400kN でコンクリートの引張抵抗を無視した理論値から乖離することが確認された。

### (3) 試験体のひび割れ状況

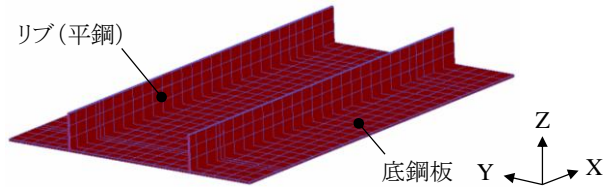
図-5 に、試験体のひび割れ状況を示す。最大荷重を 200kN から 400kN に漸増する段階で支間中央付近に曲げひび割れが生じ始め、荷重の増加に伴ってひび割れの本数が増加し、成長していく傾向を示した。図-4 に示した荷重-支間中央たわみ関係が全断面有効の理論値から乖離する現象は、曲げひび割れの発生が関係していると考えられる。本実験では、底鋼板が降伏し、破壊に至る直前に載荷点と支点の間に斜めひび割れが発生した。よって試験体は、斜め引張破壊を呈したと判断された。

### (4) 断面のひずみ分布

支間中央の高さ方向のひずみ分布を図-6 に示す。400kN から鋼とコンクリートの一体性が失われ始め、平面保持の仮定が成立しなくなることが分かった。この結果は、図-4 で引張断面無視の剛性から乖離する荷重と一致する。



(a) 解析モデル全体



(b) リブおよび底鋼板

図-7 解析モデルの概要

表-2 解析ケース

	異種材料の境界面 (平鋼上面)	ずれ止め部 (PBL, 頭付きスタッド)
A-1	剛結	剛結
A-2	ジョイント要素	ジョイント要素

## 3. 載荷実験の再現解析

### 3.1 数値解析の条件

#### (1) 解析コード

再現解析には、非線形解析コード COM3D を用いた。

#### (2) 解析モデル

解析モデルの概要を図-7 に示す。解析モデルは、対称性を考慮した 1/2 モデルとした。コンクリートや鋼材は、全てアイソパラメトリック要素の 8 節点ソリッド要素を用いた。PBL や頭付きスタッドの形状は模擬せず、後述するジョイント要素でモデル化した。対称面で X 軸並進方向を拘束し、支点の中央で Z 軸並進方向、支点の 1 節点について Y 軸並進方向を拘束した。

#### (3) 解析ケース

解析ケースを表-2 に示す。比較のため、異種材料の境界面とずれ止め部のモデルを変えた 2 ケースの解析を実施した。

#### (4) 材料特性

コンクリートのポアソン比は 0.20 とし、物性値は材齢 28 日の現場養生の試験値を使用した。鋼材および鉄筋は、弾性係数を 206000N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比を 0.30 とした。降伏強度、引張強度、伸び等の材料物性は、表-3 に示すミルシートの値を用いた。

#### (5) 材料のモデル化

コンクリートのモデル化には、岡村、前川が提案した多軸応力を考慮した構成則<sup>7),8)</sup>を用いた。分散ひび割れモデルには、非直交固定ひび割れモデルを用いた。床版

上面の鉄筋を含む領域のコンクリートは RC 要素、他の領域は無筋コンクリート要素でモデル化し、それぞれに引張軟化特性を考慮した。図-8 に、一軸状態におけるコンクリートの応力ひずみ関係を示す。なお、本研究では床版内部の鋼材形状を再現するため、要素分割が比較的細かい。そこで、要素寸法に応じて軟化勾配を調整した<sup>2)</sup>。構造鋼材および鉄筋はバイリニア、載荷板と支点上の鋼材は線形でモデル化した。

### (6) 異種材料の境界面のモデル化

A-2 の解析では、平鋼の上面にモールクーロンの線形摩擦則を適用したジョイント要素を配置し、接触、剥離、ずれを考慮した。複合構造標準示方書<sup>2)</sup>を参考に、接触摩擦係数は 0.5 に設定した。

### (7) ずれ止めのモデル化

A-2 の解析では、ずれ止めの形状をモデル化せず、線形モデルのジョイント要素でずれ挙動を表現した。接触面の法線方向には、線形弾性のバネ剛性を与えた。閉合方向は、過大な要素の重なりが生じないように十分に大きな剛性を設定した。開口方向は、孔の合計面積にコンクリートのヤング係数を乗じ、それをジョイント要素の全面積で除したバネ剛性を与えた。PBL および頭付きスタッドの荷重-ずれ変位関係は、複合構造標準示方書<sup>2)</sup>に記載されている次式を用いた。

$$V_{ps} = V_{psud}(1 - e^{-\alpha\delta_{ps}/d})\beta \quad (1)$$

$$V_{ss} = V_{ssud}(1 - e^{-\alpha\delta_{ss}/d_{ss}})\beta \quad (2)$$

ここに、 $V_{ps}$ 、 $V_{ss}$  は PBL、頭付きスタッド 1 個あたりのせん断力、 $V_{psud}$ 、 $V_{ssud}$  は PBL、頭付きスタッド 1 個あたりの設計せん断耐力、 $\delta_{ps}$ 、 $\delta_{ss}$  は相対ずれ変位、 $d$  は PBL の孔径、 $d_{ss}$  は頭付きスタッド軸径、 $\alpha$ 、 $\beta$  は係数である。 $V_{psud}$ 、 $V_{ssud}$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  および各ずれ止めの終局ずれ変位は、複合構造標準示方書<sup>2)</sup>に準じて算定した。

ずれ止め 1 個あたりのずれ剛性を図-9 に示す。係数  $\alpha$ 、 $\beta$  の値も同図に示した。頭付きスタッドの押抜き試験方法 (案)<sup>9)</sup>を参考に、最大せん断力の 1/3 荷重点における初期割線勾配を用いた。ジョイント要素には、全ずれ止め分のずれ剛性をジョイント要素の全面積で除した平均的な剛性を与えた。ジョイント要素の面積は、PBL が平鋼の側面 (4 面)、頭付きスタッドは平鋼部を除いた底鋼板の上面である。ずれ止め部のジョイント要素では、摩擦の影響を無視した。

### (8) 載荷方法

載荷実験において、ピーク後に荷重が低下する挙動を示したため、変位制御による増分解析を行った。再現解析では、載荷実験で行った除荷・再載荷の履歴は再現せず単調載荷とした。

表-3 材料物性 (ミルシートより)

	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
鉄筋	397	558	22
平鋼	337	457	29
底鋼板	274	443	28

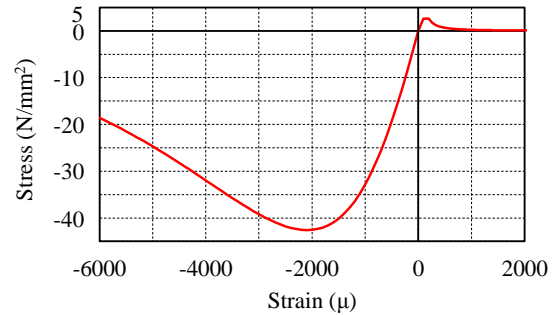


図-8 コンクリートの応力ひずみ関係 (一軸)

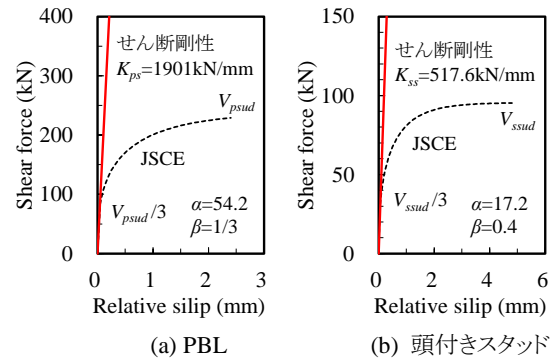


図-9 ずれ止め 1 個あたりのずれ剛性

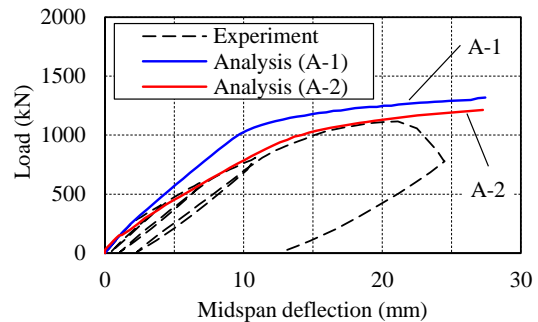


図-10 荷重-支間中央たわみ関係の比較 (A-1, A-2)

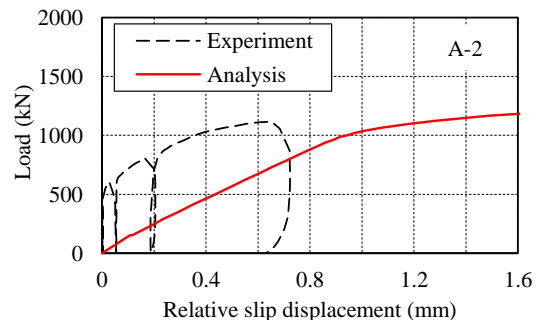


図-11 荷重-相対ずれ変位関係の比較 (A-2)

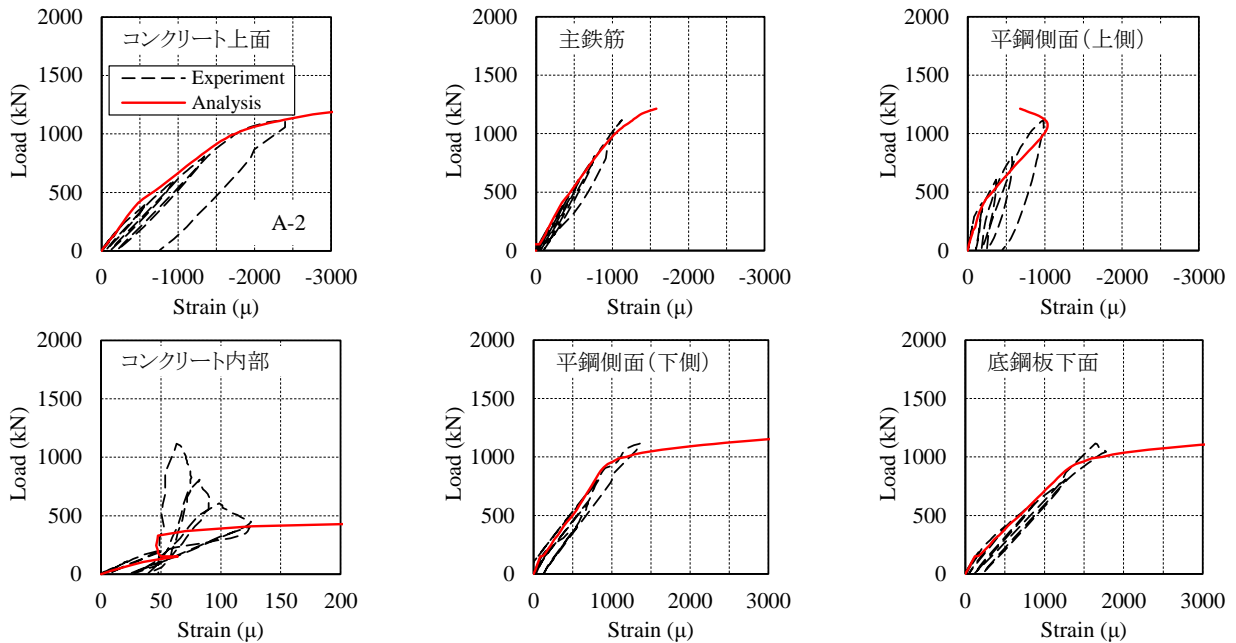


図-12 荷重-各種ひずみ関係の比較 (A-2)

### 3.2 数値解析の結果

#### (1) 荷重-支間中央たわみ関係

図-10で、荷重-支間中央たわみ関係の実験結果と解析結果を比較する。A-1は、270kN程度まで実験の傾きを再現できているが、その後の剛性低下を表現できず、たわみの増加に伴って実験結果から乖離する傾向を示した。これに比してずれ止め部を線形のジョイント要素でモデル化したA-2は、試験体が破壊する1114.9kNまで、載荷実験の包絡線を高精度に再現できていることが分かる。その後、載荷板位置の節点変位を27.0mmまで増加させたが破壊には至らなかった。以後は、再現性の高いA-2の解析結果のみに着目する。

#### (2) 荷重-相対ずれ変位関係

図-11に、荷重と試験体端部の相対ずれ変位の関係を解析A-2での結果と比較する。載荷実験では、450kN程度まで殆ど相対ずれ変位が生じていない。これは、鋼材に剥離剤を塗布したものの、初期付着の影響を完全に除去できなかったからだと考えられる。一方、解析では載荷開始から相対ずれ変位が増加し、実現象を再現できていない。この点は、ジョイント要素に初期付着<sup>10)</sup>を見込むことで、付着破壊が生じるまで相対ずれが生じなくなり、実現象に近い相対ずれ変位が得られると考えられる。

#### (3) 荷重-ひずみ関係

図-12に、コンクリート上面、主鉄筋、平鋼側面(上側, 下側)、コンクリート内部、底鋼板下面の荷重-ひずみ関係を示す。各ひずみの解析値は、概ね実験と整合している。解析によるコンクリート内部のひずみは、約150kNで一度減少し、約350kNから再び増加する挙動を示した。コンクリート内部のひずみは、実験でも複雑な

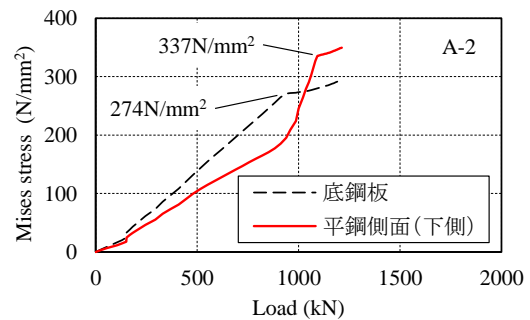


図-13 Mises 応力-荷重関係 (A-2)

挙動を示しているが、実験と解析で挙動が一致していない。この点は、後に改めて分析する。

平鋼側面(上側)のひずみも1000kN付近から減少する挙動を示す。図-13に底鋼板および平鋼側面(下側)のMises相当応力-荷重関係の解析結果を示す。同図から、底鋼板と平鋼側面(下側)は、それぞれ約940kNと約1090kNで降伏応力に達していることが分かる。これらの降伏により、床版断面の引張領域が上方に拡大し、平鋼側面(上側)のひずみが減少したと考えられる。

図-11に示した相対ずれ変位が解析と実験で乖離しているにも関わらず、図-10や図-12の傾きは実験を概ね再現できている。本解析では、境界面の初期付着力および付着切れに伴う非線形挙動をモデル化していないが、実験では初期付着によるずれ剛性の増加と同時に部分的に逐次進行する付着切れによるずれ剛性の低下が相殺された結果、全体挙動が類似した可能性がある。これらの影響を把握するのが今後の課題と認識している。

#### (4) 主ひずみの分布

図-14に、1212.4kN(最終ステップ)時点の試験体表

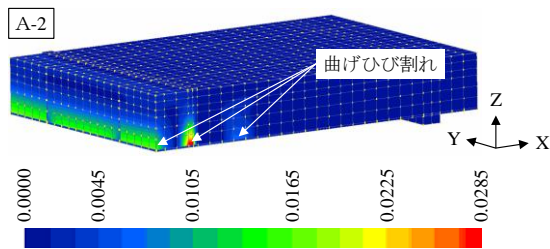


図-14 試験体表面の最大主ひずみ分布 (1212.4kN)

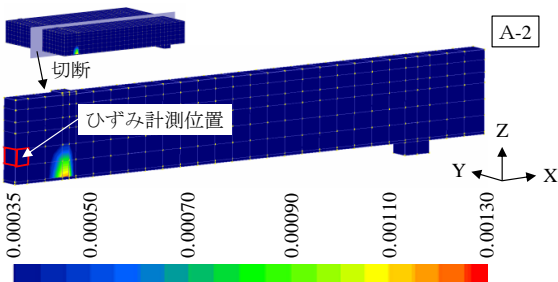


図-15 ひずみ計測位置の最大主ひずみ分布 (152.3kN)

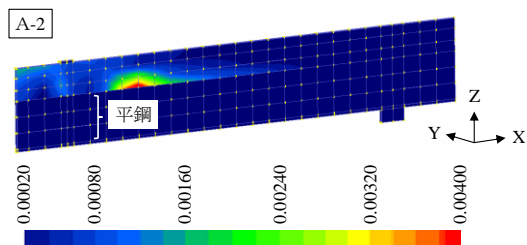


図-16 平鋼位置のZ方向ひずみ分布 (1212.4kN)

面の最大主ひずみ分布を示す。複数の曲げひび割れが確認されるが、斜めひび割れは生じていない。このことが、載荷実験と解析の破壊荷重が乖離する原因だと考えられる。現時点で斜め引張破壊が再現できない理由は不明であり、原因の解明は今後の課題である。

図-15には、コンクリート内部のひずみ計測位置における最大主ひずみ分布を示す。152.3kNに達した時点から、支間中央に近い引張縁に曲げひび割れが生じ始めている。このことから、計測位置の近くで曲げひび割れが発生したことが、図-12に示したひずみの緩和をもたらしたことが分かる。また、コンクリート内部のひずみが約350kNから再び増加するのは、図-14に示したように、当該要素に曲げひび割れが生じるためである。

#### (5) Z方向ひずみの分布

図-16に、1212.4kN時点の平鋼位置におけるコンクリートのZ方向ひずみ分布を示す。合成床版は、リブ上端を起点に水平ひび割れが発生することが知られている。本研究の実験中は、試験体内部のひび割れを把握していないが、解析では平鋼の上縁から水平ひび割れが発生しており、数値解析で水平ひび割れの発生を再現し得ることが確認された。

#### 4. まとめ

本研究で得た知見を以下に整理する。

- (1) 異種材料の境界面およびずれ止め部を剛結とした解析(A-1)は、載荷初期の荷重-支間中央たわみ関係を再現できたが、その後は実験結果から乖離した。
- (2) 鋼材に剥離剤を塗布して試験体を製作したが、実験結果にコンクリートの付着の影響が現れ、実験と解析の結果が乖離する一因となった。
- (3) ずれ止めを線形のジョイント要素でモデル化した解析(A-2)は、高精度で荷重-支間中央たわみ関係を再現できた。また、ひび割れ発生位置近傍を除き、各部位のひずみも実験結果を良好に再現できた。しかし、初期付着と付着切れに伴うずれ止めの非線形挙動が与える影響は今後さらに検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書 設計編，土木学会，2013
- 2) 土木学会複合構造委員会：複合構造標準示方書 原則編・設計編，土木学会，2015
- 3) 坂口淳一，渡辺忠朋，池田 学：ずれ止めに非線形のせん断力-ずれ変位関係を考慮した合成部材の2次元解析，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，Vol.68，No.CS，pp.29-30，2013.9
- 4) 萩原嵩樹，高橋良輔，斉藤成彦：鋼板コンクリート合成版のFEM解析におけるスタッドのせん断抵抗領域のモデル化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1093-1098，2015.
- 5) 篠崎裕生，浅井 洋，紙永祐紀，牧 剛史，睦好宏史：少数主桁形式の鋼合成桁とPC桁のずれ止め方式による接合構造の研究，構造工学論文集，Vol.60A，pp.861-871，2014.3
- 6) 牧剛史，篠崎裕生，有川直貴，浅井洋：接合面における面外拘束を考慮した鋼合成桁-PC桁接合部の非線形解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1075-1080，2015.
- 7) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991
- 8) Maekawa, K., Pimanmas, A., Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003
- 9) 日本鋼構造協会：JSSC テクニカルレポート No.35 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状，日本鋼構造協会，1996
- 10) 藤山知加子，櫻井信彰，前川宏一：ずれ止め諸元が鋼コンクリート合成床版の損傷モードに及ぼす影響，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.1，pp.1-15，2012.1