

## 積層シェル要素を用いた鉄筋コンクリート構造実験の三次元非線形解析

電力中央研究所 正会員 ○松尾 豊史 永田 聖二  
 関西電力 正会員 横田 克哉  
 ニュージェック 正会員 深津 宗祐

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の耐震性能照査で、三次元非線形有限要素解析を適用する場面が増えつつある<sup>1)</sup>。最近では、ソリッド要素を用いた研究が主流であるが、実務的には積層シェル要素のように節点数等を軽減した解析モデルが望まれる場合もある。積層シェル要素は、建築分野で耐震壁等（相対的に面内せん断が卓越）の評価でよく用いられるものの、ボックスカルバート（相対的に面外曲げが卓越）の隔壁や側壁を対象とした土木分野での検討事例は少ない。そこで本研究では、過去に土木分野で行われたRC試験体の静的載荷実験を対象とした再現解析を通して、積層シェル要素の適用性を確認する。

## 2. 再現解析の方針および解析手法の概要

本研究では、過去に解析コード COM3 の積層シェル要素の検証に用いられたRCスラブとRCボックスカルバートの模型実験<sup>2)</sup>、ならびに主にソリッド要素を用いた解析モデルの検証が行われている実規模RC部材実験<sup>3)</sup>を対象とした再現解析を行う。本解析で用いる積層シェル要素は、厚さ方向に層分割し、層毎にコンクリートや鉄筋の構成則を定義する要素であり、面内には平面応力要素、面外にはファイバー要素のように挙動する点に特徴がある。解析には、汎用解析コード TDAPIII<sup>4)</sup>を用いることとし、コンクリートの圧縮特性、引張特性には修正 Ahmad 式、出雲らの式をそれぞれ適用する。また、ひび割れ後のせん断伝達特性や圧縮強度低下特性には長沼らの式を用いる。これに対して、鉄筋の非線形特性を再現するために、Bausinger 効果を考慮した Menegotto-Pinto 型の構成則を適用する。

## 3. 模型実験を対象とした検討

模型実験のRC試験体および解析モデル<sup>2)</sup>を図-1に示す。スラブ試験体は、1辺1,800mm、部材厚100mmの正方形のRC部材であり、D10の鉄筋が縦方向、横方向ともに100mm間隔で2段配置されている。実験では、4辺を単純支持した状態で、スラブ中央に繰返し鉛直荷重を与えた。これに対して、ボックスカルバート試験体の外形寸法は、高さ2,360mm、幅2,320mm、奥行き1,480mmであり、側壁部材厚は160mm、頂版と床版の部材厚は180mmである。いずれの部材でも、主筋（縦筋）としてD16が150mm間隔で2段、配力筋（横筋）としてD10が400mm間隔で2段配置されている。実験では、床版下面で単純支持した状態で、頂版中央からやや偏心させて繰返し鉛直荷重を与えた。

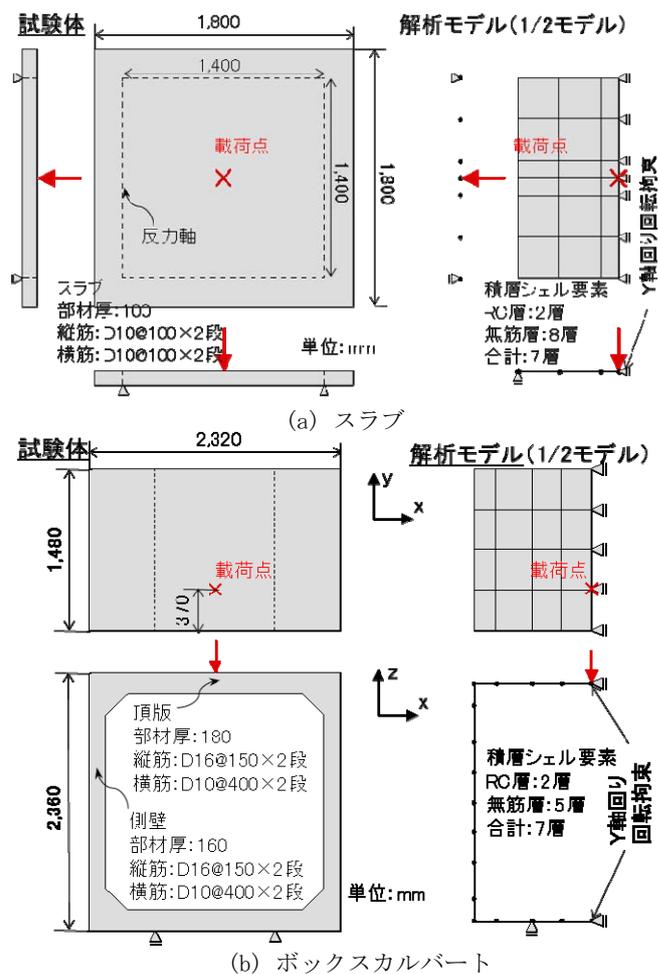
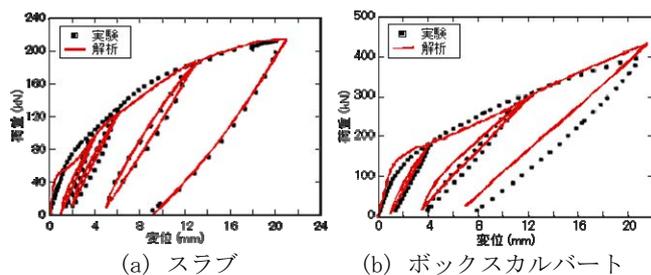
図-1 模型実験の試験体および解析モデル<sup>2)</sup>

図-2 模型実験による荷重-変位関係の再現性

キーワード 三次元非線形解析, 有限要素法, 積層シェル要素, RC部材, 耐震性能照査, 地中構造物

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 TEL 070-6568-9775

解析モデルの要素分割は、図-1 に示した通りであり、両試験体ともに解析条件を文献 2) と合わせている。すなわち、スラブ、壁、頂版、床版を積層シェル要素でモデル化し、RC 層と無筋層に分けて層分割している。また、材料パラメータについても同文献を参照している。各実験に対する再現解析の荷重-変位関係を図-2 に示す。これらによると、いずれも解析でも、最大耐荷力発生時までの実験による繰返し履歴挙動を概ね再現していることが確認できる。

#### 4. 実規模実験を対象とした検討

本解析で対象とする実規模 RC 部材は、せん断破壊先行型の N-1 試験体、これと同様な試験体にあと施工せん断補強筋による一面耐震補強を施して曲げ破壊先行型とした P-1 試験体である<sup>3)</sup>。ここでは、積層シェル要素の面内では、二次元平面応力要素のように軸力・曲げ・せん断の非線形性を考慮可能であるのに対して、面外では、二次元ファイバー要素のように軸力・曲げの非線形性のみ考慮可能であることに着目してモデル化および再現性の検討を行う。

まず、図-3 のように、積層シェル要素の面内方向、面外方向が、それぞれ P-1 試験体のあと施工せん断補強筋無し、有りの方向となるようにモデル化する。要素や層の分割、各材料特性の設定は、文献 3) のソリッド要素モデルと合わせる。次に、面内、面外にそれぞれ単調載荷した時の解析を行い、N-1、P-1 試験体の実験結果<sup>3)</sup>のうち、最初の単調載荷時の履歴曲線とそれぞれ比較検討する。

図-4 は、積層シェル要素の面内載荷、面外載荷による荷重-変位関係を、N-1、P-1 試験体の実験結果とそれぞれ比較して示している。ここでは、文献 3) のソリッド要素 (解析コード COM3<sup>2), 3)</sup> による解析結果も併せて示している。これによると、N-1 試験体 (補強無し)、P-1 試験体 (補強有り) の単調載荷時の最大耐荷力までの挙動については、ソリッド要素とほぼ同様の精度で再現できていることが分かる。

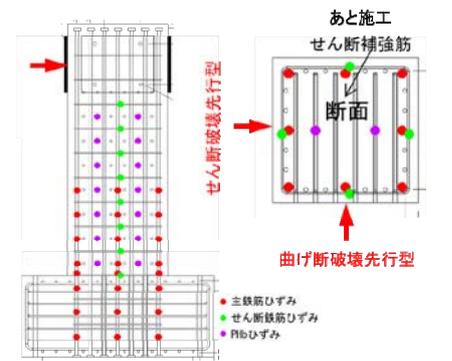
#### 5. まとめ

本研究では、三次元非線形解析を用いた耐震性能照査の合理化・実用化に資するため、ソリッド要素より計算負荷軽減を図れる積層シェル要素を用いた既往実験の再現解析を通して、土木構造物への適用の見通しを示した。今後も引き続き、異なる断面形状や複雑な載荷履歴、あるいは周辺地盤の影響等を考慮した解析を実施予定である。

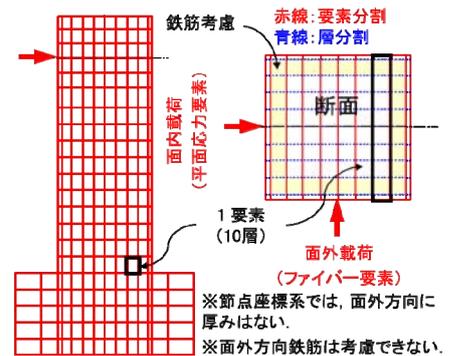
**謝辞:** 本研究は、電力 9 社、日本原子力発電 (株)、電源開発 (株)、日本原燃 (株) による原子力リスク研究センター共通研究の一部として実施したものである。関係各位に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例，2018。
- 2) P. Irawan and K. Maekawa: Path-Dependent Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells, J. Materials, Conc. Struct., Pavement, JSCE, No. 557/V-34, 1997。
- 3) 小松怜史, 永田聖二, 松尾豊史, 畑明仁, 前川宏一：水平二方向力が作用する実規模 RC 部材の破壊挙動の数値解析による分析，構造工学論文集, Vol. 67A, 2021。
- 4) アーク情報システム：TDAPⅢ バッチ版使用手引書 ver. 3. 12, 2020。

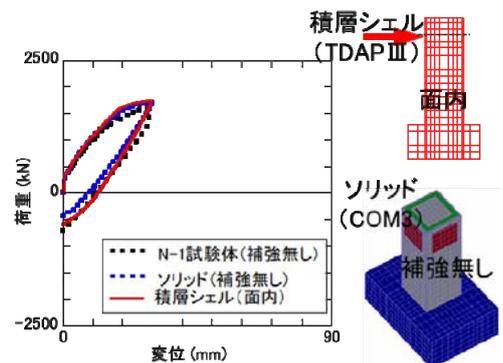


(a) 実規模 RC 部材<sup>3)</sup>

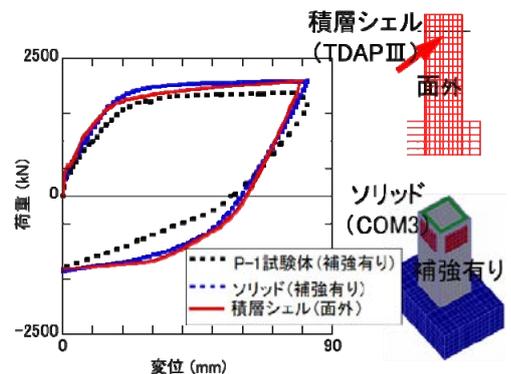


(b) 解析モデル (要素と層の分割を表示)

図-3 実規模 RC 部材および解析モデル



(a) 面内載荷 (補強無しの再現)



(b) 面外載荷 (補強有りの再現)

図-4 実規模 RC 部材の耐力の再現性