

## 積層シェル要素を用いた RC 地中構造物の耐震実験の三次元非線形解析

電力中央研究所 正会員 ○永田 聖二 松尾 豊史  
JIP テクノサイエンス 正会員 洪 杰

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）地中構造物の耐震性能照査をより現実的かつ合理的に行う場合、三次元非線形解析は有効な手段である<sup>1)</sup>。最近では、ソリッド要素を用いた検討が多く見受けられるが、実務的には、より節点数等が少ない積層シェル要素の適用が望ましい場面もある。しかし、積層シェル要素は、建築分野では耐震壁等の評価に比較的好く用いられるのに対して、ボックスカルバートのような土木構造物に用いた解析事例は少ない。本研究では、RC 地中構造物の耐震実験<sup>2)</sup>に対する解析を行い、積層シェル要素による地震時挙動の再現性を検討する。

## 2. 解析対象とする実験の概要

解析対象は、図-1 に示すように、砂地盤に埋設されたせん断壁付きボックスカルバート試験体<sup>2)</sup>である。せん断土槽底部に試験体を固定し、乾燥砂を埋設した。せん断土槽は、高さ 0.1m の鋼製フレーム 19 段と高さ 0.74m の嵩上げ部で構成される。試験体は、高さ 1.5m、幅 0.8mm、奥行き 2.6m の 1 連ボックスカルバートであり、奥行き方向中央にせん断壁を設置した。側壁、せん断壁、頂版の厚さはそれぞれ 60mm、40mm、100mm である。コンクリート圧縮強度は 35.7N/mm<sup>2</sup>、鉄筋（D4、D6）の降伏強度は 360.7、367.8N/mm<sup>2</sup> である。地盤は、乾燥状態の 5 号珪砂を高さ 250mm 毎にプレートコンパクタで転圧しながら敷き詰めた。実験では、せん断土槽ごと振動台で加振した後、試験体単体の静的载荷（基部固定、頂部水平载荷）を行った。振動台実験の入力波は、漸増域 10 波、最大域 5 波、漸減域 6 波を 1 セットとする正弦波（振動数 3Hz）であり、加速度を調整して 8 ケースの加振を行った。

## 3. 解析モデルおよび解析方法

RC 試験体を埋設したせん断土槽に対して、図-2 に示すように、対称性を考慮して 1/2 モデルを構築した。コンクリートは積層シェル要素で、地盤とせん断土槽はソリッド要素でそれぞれモデル化した。ここでは、汎用解析コード DIANA (ver. 10.4)<sup>3)</sup> を使用し、コンクリートのひび割れモデルとして、同解析コードの前川-福浦モデル<sup>4)</sup> を適用した。積層シェル要素の層分割では、RC 層と無筋層に分け、隔壁、せん断壁、頂版ともに 3 層（積分点数 7）に分割した。コンクリートの圧縮・引張の応力-ひずみ関係、ひび割れ面でのせん断伝達、ひび割れによる圧縮強度低減、ならびに鉄筋の応力-ひずみ関係等は、基本的にコンクリート標準示方書に準拠してモデル化した。地盤の構成則には、Ramberg-Osgood モデルを用いた。コンクリート-地盤間、せん断土槽-地盤間の界面には、インターフェース要素を設置し、圧縮方向には十分剛、引張方向とせん断方向にはほぼ抵抗しない条件とした。

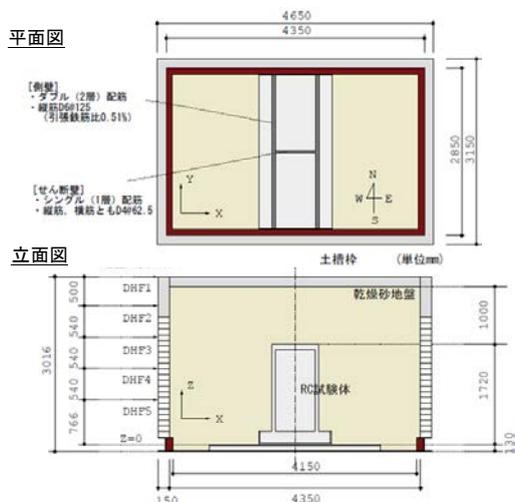


図-1 RC 試験体を埋設したせん断土槽<sup>2)</sup>

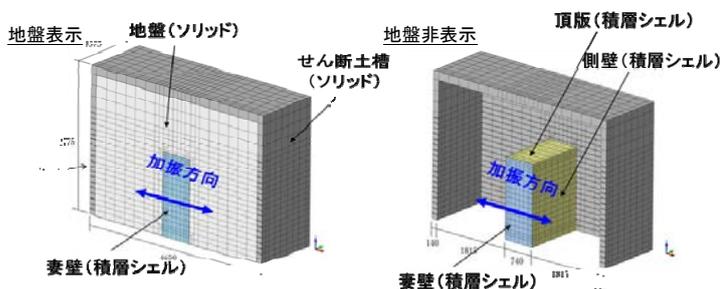


図-2 RC 試験体を埋設したせん断土槽のモデル化

表-1 固有値解析の主な結果

モード次数	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)
1	14.77	73.1
2	26.27	0.0
3	29.59	0.5
4	30.84	0.0
5	31.09	0.1

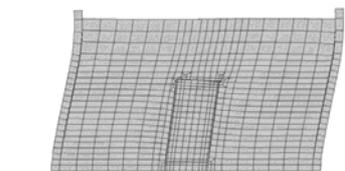


図-3 一次固有モード (14.77Hz)

キーワード 三次元非線形地震応答解析, 積層シェル要素, RC 構造物-地盤連成系, せん断土槽, 振動台実験  
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

振動台実験の再現に際しては、モデル底面の全自由度、対称面の法線方向自由度をそれぞれ拘束した上で、自重解析を行い、試験体が塑性化した加振5～8の振動台加速度を入力として地震応答解析を行った。減衰は、地盤と構造物の非線形性による履歴減衰に加えて、剛性比例型の粘性減衰を設定する。具体的には、表-1と図-3に示す一次固有モードの固有振動数に対する減衰定数を1%と設定した。その後、地震応答解析後の応力状態を保持した状態で地盤やせん断土槽等を表す要素を取り除いて、RC試験体単体の静的載荷実験を模擬した静的解析を実施した。

#### 4. 振動台実験とその後の静的載荷実験に対する解析

振動台実験と地震応答解析の各加振によるRC試験体頂部の水平変位、鉛直変位の時刻歴をそれぞれ図-4、図-5に示す。これらによると、地震応答解析によって、RC試験体の最大応答変位（実験値：6.7mm、解析値：6.1mm）、ならびに鉛直変位の増大と加振後の残留（最終残留値：0.4mm）を概ね追跡している。図-6は、振動台実験（実験終了後）と地震応答解析（最大応答時）におけるRC試験体のひび割れ状況である。せん断壁に斜めひび割れが生じ、側壁基部に水平ひび割れが顕著となるという実験によるひび割れの傾向を、本解析によってうまく再現していることが分かる。図-7は、加振後の静的載荷によるRC試験体の水平荷重－水平変位関係を示している。ここでは比較のため、加振未考慮の場合の解析結果も併せて示している。これらによると、積層シェル要素を用いた本モデル化と地震応答解析後の応力状態を考慮した静的解析によって、振動台実験後の静的載荷実験による水平荷重－水平変位を全体的に精度よく再現できていることが確認できる。

#### 5. まとめ

本研究では、RC地中構造物の三次元非線形解析における積層シェル要素の適用性を把握するために、既往のRC構造物-地盤連成系耐震実験を対象とした再現解析を行った。その結果、振動台実験による応答変位やその後の静的載荷実験の顕著な非線形履歴特性の傾向をある程度追跡可能である見通しを得た。今後は、実構造物の耐震性能照査への適用を念頭において、応力やひずみレベルの考察および評価基準の適用性検討を実施する予定である。

#### 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) 宮川義範，末広俊夫，松尾豊史，大友敬三：動的非線形解析に基づいたせん断壁を有する鉄筋コンクリート製地中構造物の損傷評価，土木学会論文集E2，Vol.72，No.1，pp.1-18，2016。3) DIANA FEA BV：DIANA 10.4 User's Manual，2020。4) 福浦尚之，前川宏一：非線形支配ひび割れ面の三次元同定と空間平均化構成則の高度化，土木学会論文集E，Vol.65，No.1，pp.118-137，2009。

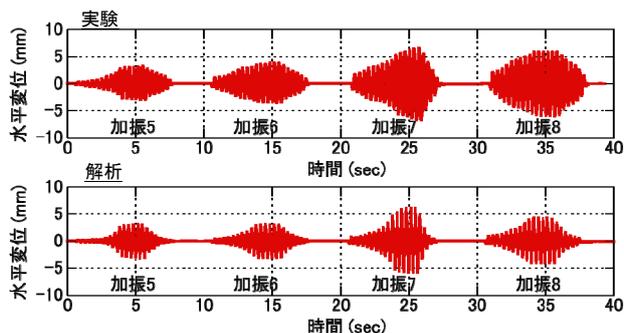


図-4 各加振によるRC試験体頂部の応答変位

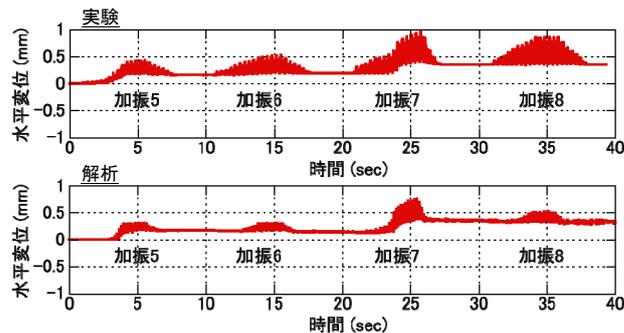


図-5 各加振によるRC試験体頂部の鉛直変位

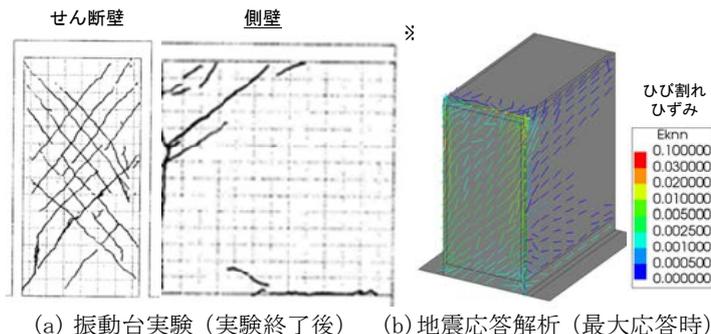


図-6 加振によるRC試験体のひび割れ状況

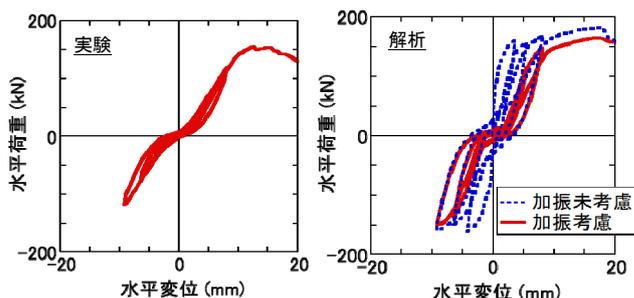


図-7 加振後の静的載荷による荷重－変位関係