

密な砂地盤中に構築された円形立坑の損傷解析

(株) 大林組 正会員 ○堤内 隆広 正会員 永井 秀樹
 (一財) 電力中央研究所 正会員 山口 和英
 東北電力(株) 熊田 広幸

1. はじめに

原子力発電所の屋外重要土木構造物として代表的な地中に埋設された鉄筋コンクリート製の構造物は、一般的に岩盤上に直接に設置され、構造物周囲を適切な地盤材料にて十分に締固められ施工されている。このような密な地盤であっても地下水位が高い場合には、近年想定されている大規模地震動により液状化が生じ、構造物の曲げ、せん断による損傷、残留ひび割れによる漏水などが懸念されている。本報文では、前編の遠心載荷実験の計画に引き続き、密な砂地盤中に構築された円形立坑に対する影響検討として、構造物の損傷モードおよび損傷メカニズムについて検討した結果を報告する。

2. 円形立坑の損傷解析手法

円形立坑の詳細な損傷状況を把握するために、2段階ステップを踏む解析手法(図1)を適用した。

① 地盤の液状化を考慮した大規模地震時に対する2次元有効応力 FEM の時刻歴解析を行う。なお、円形立坑に $M-\phi$ 関係を考慮し、構造物に非線形性を導入した。その解析結果より、構造物に作用する応答加速度、動土圧を整理し、構造物に対して最も厳しい状況となる時刻の作用荷重を抽出する。

② 3次元 RC 非線形 FEM モデルに対して、上記の作用荷重を載荷する漸増載荷解を行う。解析プログラムは FINAL⁽¹⁾を用いた。円形立坑の構造配筋図を図2に示し、3次元 RC 非線形解析の材料条件および構成則を表1に示す。円形立坑は材料非線形の積層シェル、底版下は地盤バネとする。全体荷重は常時荷重と地震時荷重の組合せとする。常時荷重は自重、土圧、水圧とし、地震時荷重は躯体の慣性力(水平・鉛直動)、地震時土圧(水平・鉛直動)とする。解析結果より円形立坑のひび割れ・損傷・応力状態を確認する。

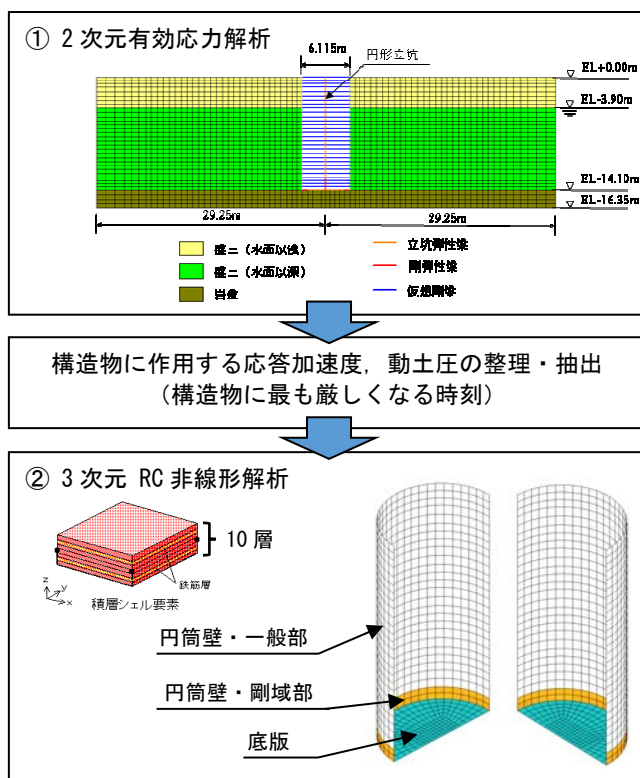


図1 構造物の損傷解析手法のフロー

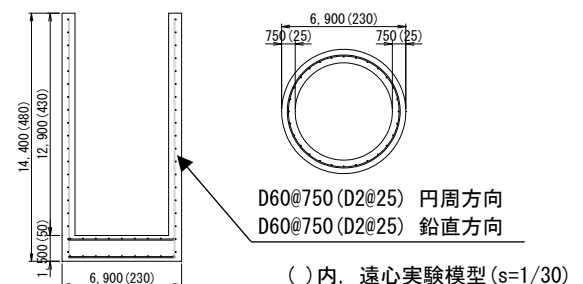


図2 円形立坑の構造配筋図

表1 3次元 RC 非線形解析の材料条件

種類	弾性係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν	圧縮強度 降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	重量密度 (kN/m ³)
コンクリート	2.5×10^4	0.2	24	1.91	24
鉄筋	2.0×10^5	0.3	345	—	77

	非線形特性	適用モデル
引張特性	テンションスティフニングモデル	出雲モデル ($c=1.0$)
圧縮応力~ひずみ 曲線と破壊条件	圧縮強度点までの応力~ひずみ曲線モデル	修正Ahmadモデル
	圧縮破壊条件	Ottosenの4パラメータモデル
圧縮軟化域特性と 強度時ひずみ	ひび割れ後の圧縮強度低減	低減あり
	圧縮強度到達後のひずみ軟化域モデル	修正Ahmadモデル
ひび割れ後のせん断 伝達特性	ひずみ軟化域固定フラッグ	固定しない
	ひび割れ後のせん断伝達特性モデル	長沼の提案モデル
ひび割れ後のせん断 伝達特性	既存のひび割れと新たなひび割れが成す角度の最小値	20°
ひび割れ後の軟化 域特性	ひび割れ軸の数	第1軸のひび割れに斜交する第2軸と第3軸のひび割れも許容
ひび割れ後の軟化 域特性	土木学会コンクリート標準示方書のコンクリート破壊エネルギーに基づく軟化特性	

キーワード 円形立坑, 損傷解析, 積層シェル, 三次元非線形有限要素法

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 TEL 070-2459-1891

3. 解析結果：2次元有効応力 FEM の結果より，側壁下端（魚骨モデル下端）の「せん断力最大時刻」および「モーメント最大時刻」における側壁全体の応答加速度と土圧分布の比較を図3に示す。応答加速度は，両者で大きな差はないが，水平土圧の分布では「せん断力最大時刻」で側壁下部に大きな土圧を示し，「モーメント最大時刻」では側壁上部で逆転している。液状化程度のバラツキを考慮したケースとして「非液状化ケース（地盤モデルを非液状化としたケース）」と「液状化程度を増加させたケース（マルチスプリングモデルを適用したケース）」について「せん断力最大時刻」の土圧分布を前編の図6に追記した。カクテルグラスモデルの基本ケースと比較して，鉛直方向の周面摩擦力および水平方向の動土圧が上層部で僅かに大きい値を示す。

3次元 RC 非線形 FEM 解析では，「せん断力最大時刻」と「モーメント最大時刻」における荷重を漸増载荷し，2パターンでの損傷状況を比較検討した。载荷終了時の損傷状況を図4に示す。「せん断力最大時刻」では，側壁下端に大きな鉛直鉄筋の降伏域が見られ，一部で最小主ひずみが 2000 μ を超え，コンクリートも降伏ひずみに達した。一方で「モーメント最大時刻」では，ひび割れ範囲も限定的で，僅かに鉛直鉄筋に降伏が見られるのみである。なお，両者ともに側壁下端での曲げ損傷モードである。頂版変位と側壁下端のモーメントとの関係を図5に示す。カクテルグラスモデルの基本ケースの水平土圧が最も小さいにも関わらず，3次元 RC 非線形 FEM 解析による頂部変位は最も大きくなる。2次元解析での側壁下端の梁部材モーメントとの関係も追記したが，3次元解析と概ね同じような変位~モーメント関係の骨格線となっており，M~ ϕ 関係の導入が妥当であったことを示す。

4. まとめ：3次元 RC 非線形 FEM 解析を行う上で，「せん断力最大時刻」及び「曲げモーメント最大時刻」での解析を行った結果，「せん断力最大時刻」の荷重の方が構造物の損傷に対して厳しい荷重状態となっていることが分かった。地盤の液状化程度のバラツキの検討では，過剰間隙水圧が上昇し地盤変位が大きくなる一方で，地盤剛性がある程度保たれる状況の場合に，構造物の損傷も最も大きくなることが分かった。今後，更にパラメータ解析を行い，詳細検討を進める予定である。

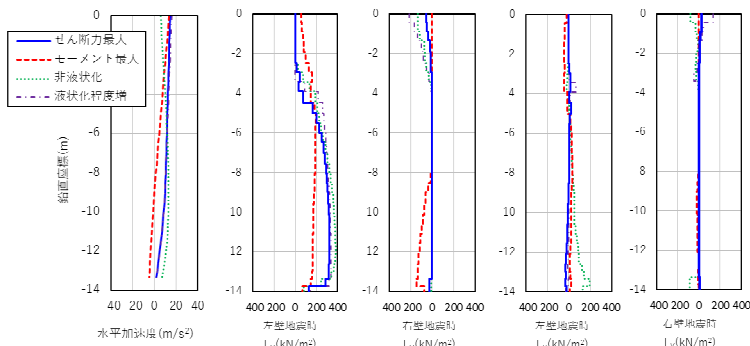


図3 円形立坑の応答水平加速度・水平土圧・鉛直土圧

謝辞:本研究は，電力8社と日本原子力発電(株)，電源開発(株)，日本原燃(株)が実施する研究の一環として実施した。関係各位に謝意を表す次第である。

参考文献：(1) Naganuma,K., Yonezawa,K., Kurimoto,O. and Eto,H. : Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three dimensional finite element method, 13th WCEE, Paper No.586, Aug., 2004.

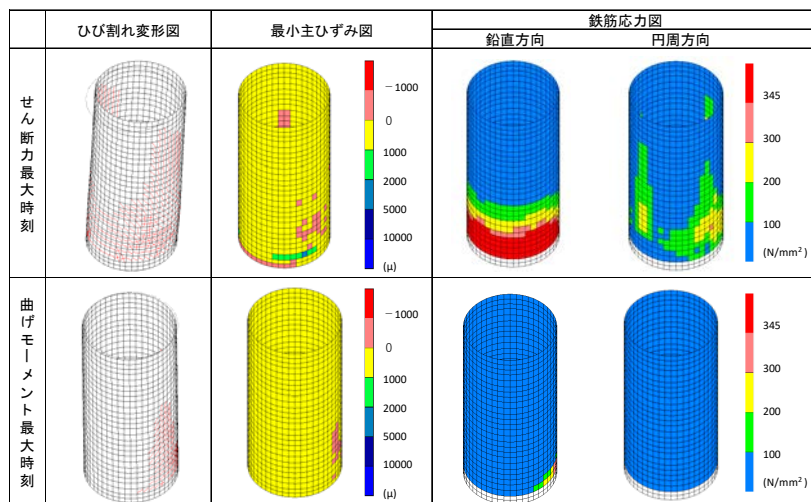


図4 構造物の損傷状況の比較

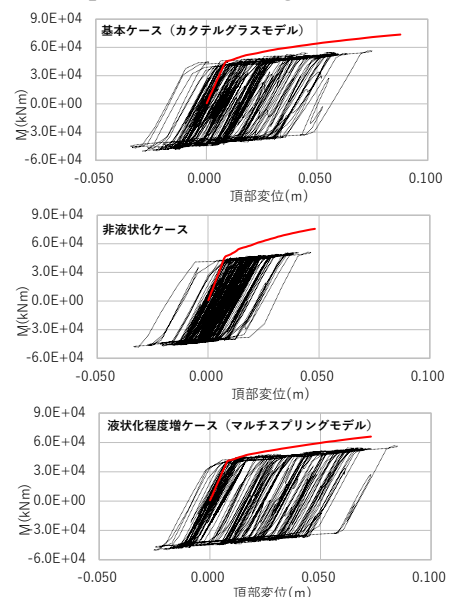


図5 側壁下端モーメント~頂部変位関係