

密な地盤に液状化が生じた RC 矩形立坑の地震応答に関する解析的検討

東電設計（株） 正会員 ○渡部龍正
 （一財）電力中央研究所 正会員 松尾豊史
 東北電力（株） 熊田広幸
 （株）電力計算センター 島村真介

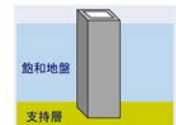
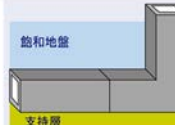
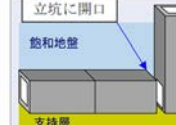
1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 製地中構造物の地震応答評価に、地盤・構造物連成系の三次元有限要素 (FEM) 解析を適用することで、より実挙動に近い評価が可能となり、耐震性能照査の合理化を図ることが可能である¹⁾。しかしながら、地盤の液状化が、三次元 RC 構造物に与える影響について検討した事例は少ない。また、近年は基準地震動が大きくなり、密な地盤であっても液状化が生じることが想定される。既往検討において、地盤条件や液状化範囲の影響を確認したため、本検討では構造物の三次元形状等が実規模 RC 地中構造物の地震応答に及ぼす影響を解析的に評価した。

2. 検討概要

表 1 に解析ケースを示す。ケース 1 は矩形立坑周りの地盤の液状化による立坑の応答を確認する。立坑基部は岩盤に根入れする条件とした。ケース 2, 3 は横坑を有する立坑モデルであり、ケース 2 では屈曲部を一体化し、ケース 3 では横坑と立坑の境界部を接続位置とした。また、開口の影響を評価するために岩盤と底版を剛結としたケース 3 (底面固定) も実施した。対象の解析モデルは「原子力発電所屋外土木構造物の耐震性能照査指針＜技術資料 V＞2021 年 10 月」²⁾の 3 章に示すモデルを基本条件とした。図 1 にケース 1 の解析モデルを示す。検討用地震動を図 2 に示す。入力地震波は最大加速度振幅 1200gal で図 1 の 0° の方向に水平動のみ入力した (ケース 2, 3 は横坑に平行方向に入力)。解析コードは COM3³⁾を用いた。節点数、要素数は約 7 万である。構造物および地盤はともにソリッド要素 (1 次要素) でモデル化しており、構造物ー地盤間は、剥離とすべりを考慮したジョイント要素を設けている。また、線状構造物では施工上の観点等から一定区間ごとに区切られているため、ケース 2, 3 は耐震ジョイントを設けて、ジョイント要素でモデル化している。十分に広い地盤領域を確保した上で、境界条件については、解析モデル底面は固定境界、側方は、自重解析時では鉛直ローラー、動的解析時では水平・鉛直フリーとした。図 3 に各解析ケースの液状化範囲を示す。ケース 1 は液状化層の範囲を図 3(a) に示すように立坑周りの地盤が液状化する条件とし、岩盤部の一部分 (緑の層) を砂層とした。立坑の全高は 20m (うち底版側 5m を岩盤に根入れ) とした。ケース 2, 3 は立坑周りに加えて、横坑の周辺も液状化する条件とした。

表 1 解析ケース

ケース1	ケース2	ケース3
矩形立坑	矩形立坑(開口なし)+横坑	矩形立坑(開口あり)+横坑
		

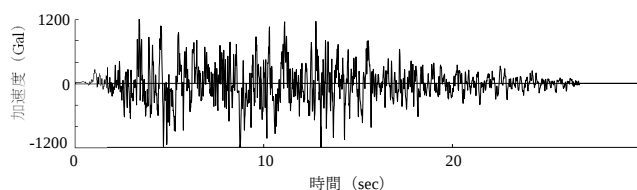


図 2 検討用地震動 (水平方向)

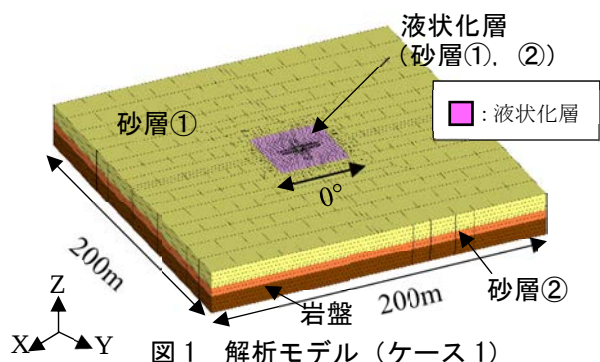
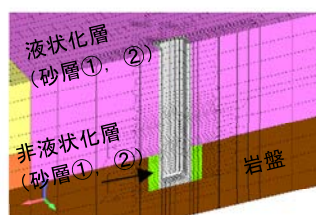
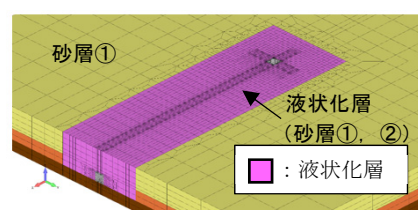


図 1 解析モデル (ケース 1)



(a) ケース 1



(b) ケース 2, 3

図 3 液状化範囲概要図

キーワード：三次元材料非線形解析、地盤・構造物連成解析、液状化、密な地盤

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F 東電設計（株） TEL：03-6372-5393

3. 解析結果および考察

まずは、横坑の有無の影響を確認するために、ケース1と2の立坑変位時刻歴を図4にて比較した。ケース2は横坑の接合がある影響でケース1に比べて変形が小さくなる傾向にあり、横坑と立坑が開く方向に変位が残留することが確認された。図5(a)によれば、ケース2では屈曲部にて大きな引張ひずみが生じていることが分かる。

次に、横坑と立坑の接合位置の影響を確認するために、ケース2と3の立坑変位時刻歴を図6にて比較した。ケース3はケース2と比べて-X方向の変形が大きくなり、横坑と立坑が開く方向の残留変位も大きくなった。図5(b)ではケース2で生じた屈曲部におけるひずみ集中が生じず、横坑部には大きなひずみは確認されなかった。これは、ケース3では立坑部が剛体回転したため、開口部の変形が大きくなる一方で、立坑部に生じる損傷としては小さくなったものと考えられる。

さらに、開口の有無の影響を評価するために、ケース1と3（底面固定）の立坑変位時刻歴を図7にて比較した。ケース3（底面固定）はケース1と概ね同様な傾向を示しているが、最大変位量・残留変位量はケース1よりも大きくなった。図8,9によれば、ケース3（底面固定）はケース1と比べて最大・残留変形時ともに開口部に引張ひずみが集中する傾向があった。これは、開口がある影響で剛性が小さくなり、加振方向だけではなく、加振直交方向の側方土圧の影響も受けるためであると考えられる。なお、開口部は実際には補強されるため、本解析はパラメータ解析として実施した。

4. おわりに

今後は、円形断面を有するRC立坑を対象として密な地盤の液状化を考慮した三次元材料非線形解析を実施するとともに、二次元解析の適用性についても検討する予定である。

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)によ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) 島端嗣浩, 渡部龍正, 松尾豊史, 熊田広幸, 島村真介：密な地盤に液状化が生じたRC鉛直立坑の三次元材料非線形地震応答解析, 土木学会第77回年次学術講演会概要集, CS10-77, 2022.
- 2) 土木学会原子力土木委員会：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, 2021.
- 3) 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.

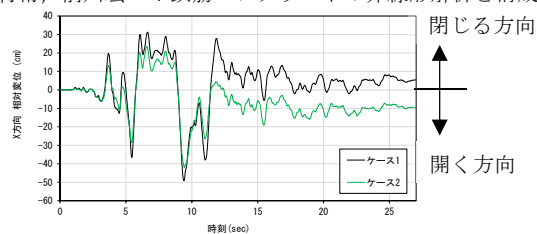


図4 立坑変位時刻歴（横坑の有無）

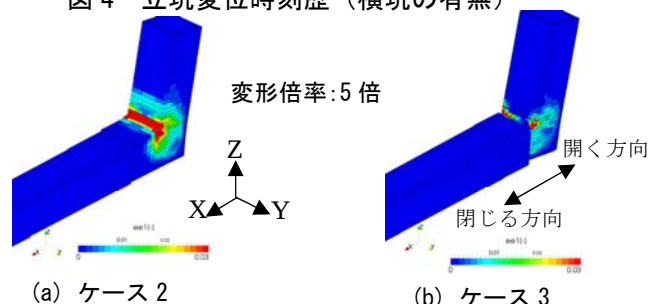


図5 立坑と横坑の接合位置の違い
(変形+第1主ひずみ：最大変形時)

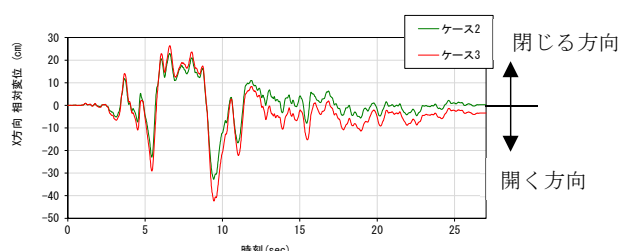


図6 立坑変位時刻歴（接合位置の影響）

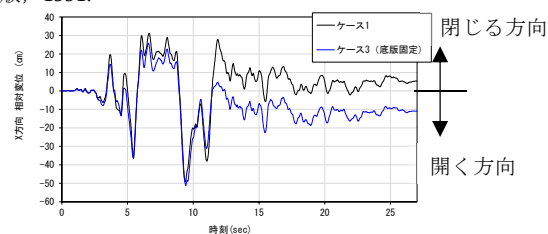


図7 立坑変位時刻歴（開口の有無）

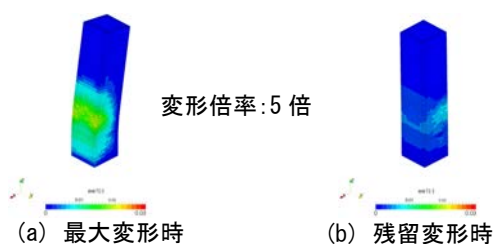


図8 変形+第1主ひずみ分布（ケース1）

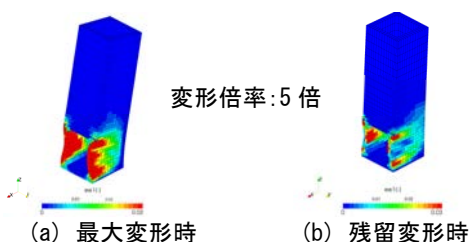


図9 変形+第1主ひずみ（ケース3：底面固定）