

# 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

東電設計 (株) 正会員 ○島端嗣浩 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<sup>1)</sup>。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。そこで、地盤条件や液状化範囲および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

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」<sup>1)</sup>の 3 章に示すモデルとした。図 1 に解析モデルを示す。図 2 に構造物の詳細モデルを示す。検討用地震動を図 3 に示す。入力地震波は水平動のみ入力した。解析コードは COM3<sup>2),3)</sup>を用いた。節点数、要素数はともに約 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-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、耐震ジョイント (図 2 中①) としてジョイント要素でモデル化している。境界条件について、解析モデル底面は固定境界、側方については、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。表 1 に解析ケースを示す。図 4 に各解析ケースの液状化範囲を示す。C-1 は液状化層の範囲を図 4 に示すように下層の一部の層が液状化する条件とした。C-2, 3 は構造物周辺の全層 (構造物下端~地表面まで) が液状化する条件とした。C-3 では、液状化範囲は C-2 と同じであるものの、液状化強度を大きくすることで、液状化しにくい条件での構造物の地震応答に及ぼす影響を確認することとした。

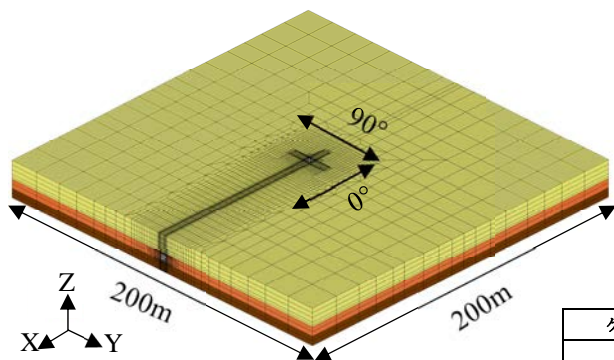


図 1 解析モデル

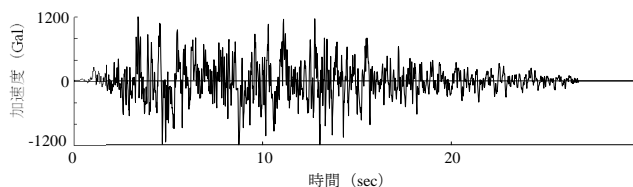


図 3 検討用地震動 (水平方向)

表 1 解析ケース

ケース	液状化層の範囲	解析コード	解析手法	備考
C-0 (基本ケース)	なし	COM3	全応力	技術資料V-2021
C-1	一部液状化	COM3	有効応力	一部液状化の影響
C-2	全層液状化	COM3	有効応力	液状化層の影響
C-3	全層液状化	COM3	有効応力	C-2よりも液状化強度を大きくした液状化強度の影響

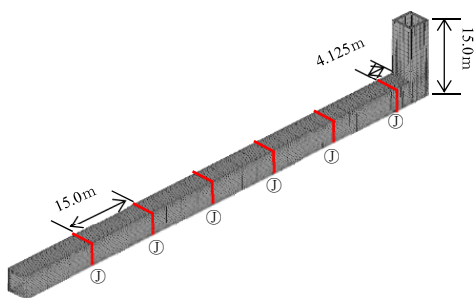


図 2 構造物詳細モデル

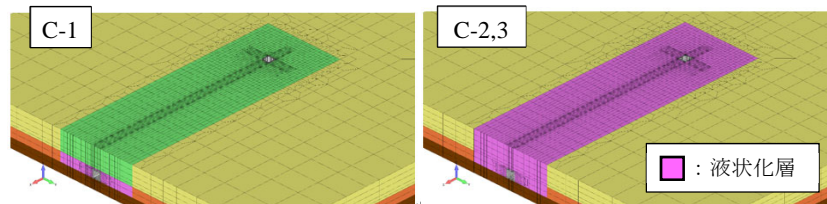


図 4 液状化範囲概要図

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 : 03-6372-5588

### 3. 解析結果および考察

図5に各解析ケースにおける立坑の変位時刻歴を示す。図5より、立坑変位は一部液状化条件であるC-1の変位が最大であったが、10s付近まではC-2の立坑変位が最も大きい結果となり、11s以降はC-1、C-3の立坑変位がC-2よりも大きくなった。この立坑の挙動について、まず、C-2での傾向は、10s付近までと11s以降で液状化の程度が異なっていたことが影響したと考える。図6に立坑周辺(A, B, C地点)の過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。C-2は、11s付近まではA, B地点で水圧の減少とともに所々に負圧も確認された一方で、11s以降は過剰間隙水圧比が1.0、完全に液状化したことが確認できた。つまり、約10sまでは液状化に完全には至っておらず、地盤ひずみが発生しやすい条件かつ地盤剛性が回復する現象も見られたことでC-2での変位が大きくなり、11s以降では、地盤が完全に液状化に至ったことで構造物をすり抜けていく現象が生じ、立坑の変位が小さくなったと考える。C-1が最も立坑変位が卓越したことについては、11s以降で一部液状化層が完全に液状化に至ったことが図6から確認でき、その結果、上層の剛性を有する地盤からの荷重が立坑に作用したためと考える。C-3については、図6に示す水圧の上昇が緩やかとなったことは確認できるものの、A, B地点ともにC-2と同様の水圧上昇傾向となっており、C地点(地表面)においては水圧の上昇がみられなかった。このことから、地盤が一部液状化条件(地表面は非液状化層)に近い状態となったと推察され、C-2よりもC-1に似た挙動を呈したものと考える。

図7に立坑変位最大時の変位コンター図を示す。C-2は立坑変位よりも地盤変位の方が大きく、地盤が構造物をすり抜けている様相を呈した。液状化強度を大きくしたC-3は、立坑をすり抜けていく様子がC-2に比べ見られなかった。液状化対象層が下層の一部で存在するC-1では、地盤のすり抜け効果をほとんど確認できなかった。

### 4. おわりに

本検討では、密な地盤が下層の一部で液状化する条件の方が、全層液状化とした条件よりも立坑変位が大きくなった。全層液状化条件(C-2)の場合、液状化に至れば(過剰間隙水圧比=1.0)、立坑を地盤がすり抜ける効果により、立坑に作用する荷重は小さくなると考えられる。

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) 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
- 2) 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。
- 3) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003.

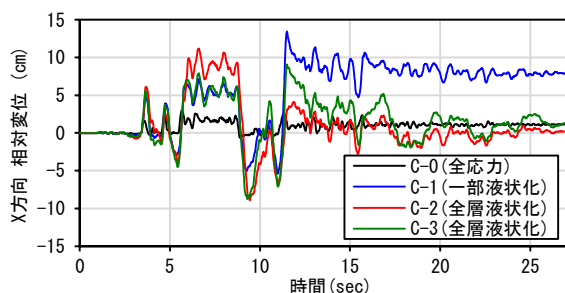


図5 立坑の変位時刻歴結果

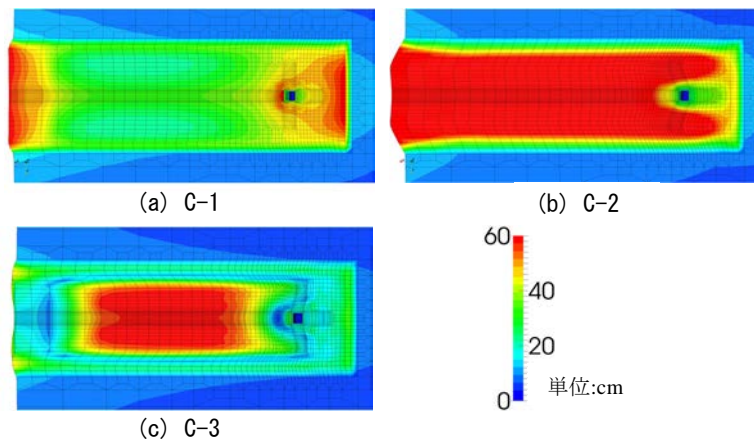


図7 立坑変位最大時の変形コンター図(変形倍率:5倍)

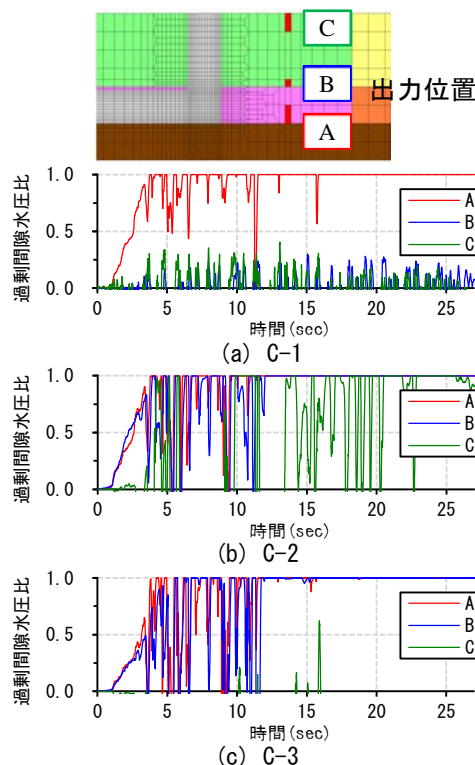


図6 過剰間隙水圧比時刻歴