

鉛直屈曲部を有する RC 立坑を対象とした三次元非線形地震応答解析

(一財)電力中央研究所 正会員 ○松尾 豊史 渡部 龍正
 関西電力(株) 正会員 横田 克哉
 (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) 製地中構造物の耐震性能照査は、地盤・構造物連成系の二次元有限要素 (FEM) 解析により、弱軸方向である横断面に対して行われるのが一般的である。一方で、構造物が多軸応答を示す場合や応答挙動を厳密に評価する場合などには、三次元 FEM 解析が有効となる場合もある。そこで、本検討では、耐震性能照査に用いる地震応答解析手法の高度化を目的として、地震動の入力方向の影響が大きいことが想定される三次元構造形状に着目し、鉛直屈曲部を有する RC 立坑を対象とした地盤-構造物連成系三次元非線形地震応答解析を実施した。

2. 解析概要

対象構造物の検討条件は、「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(2018)」(以下、原子力マニュアル) 照査例Ⅱ¹⁾を参考に設定した。構造図および地盤条件を図1に示し、検討用地震動を図2に示す。解析コードは COM3²⁾を用いており、構成則については、地盤は大崎モデルの骨格曲線と Masing 則による履歴特性、構造物は分散ひび割れ型の RC 構成則により材料非線形性をそれぞれ考慮した。解析モデルを図3に示す。十分に広い地盤領域を確保することとし、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) でモデル化した。構造物-地盤間は、剥離とすべりを考慮したボンド要素を設ける。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4中①) としてボンド要素でモデル化した。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。P-1~P-3 では地震動の入力方向の影響を確認し、P-4 については、立坑部の鉄筋比 (基本ケースは D19@150) を図5に示すように、縦筋および横筋 (フープ筋) を地表面に近づくにつれて、要素鉄筋比で約34%まで段階的に低減させた。

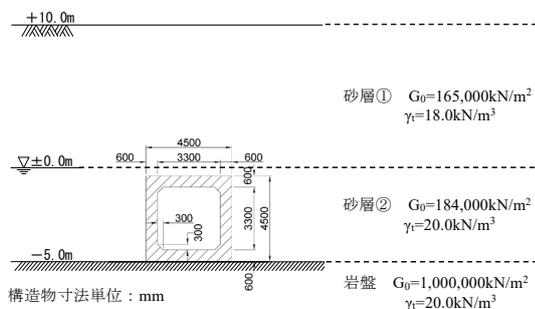


図1 構造図および地盤条件

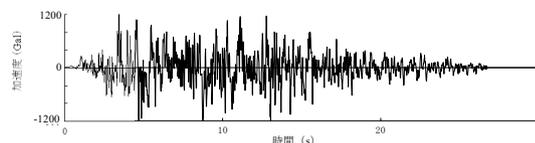


図2 検討用地震動 (水平方向)

表1 解析ケース

解析ケース	地震動の入力方向	構造条件の変更
P-1	0°	—
P-2	90°	—
P-3	45°	—
P-4	0°	立坑部の鉄筋量低減

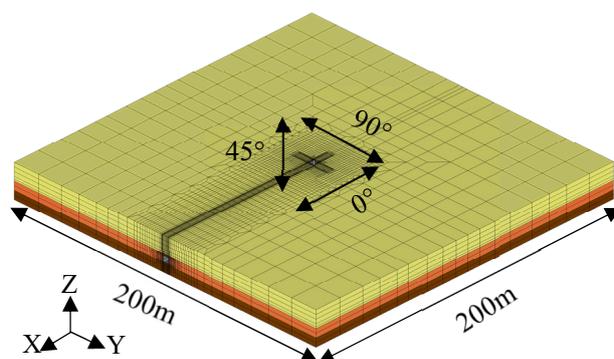


図3 解析モデル

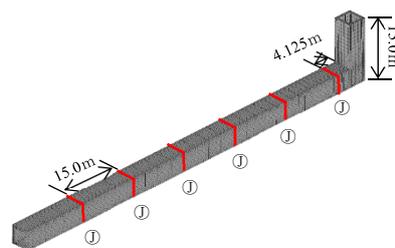


図4 構造物詳細モデル

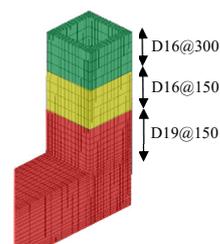


図5 鉄筋諸元 (P-4)

キーワード 鉄筋コンクリート, 地中構造物, 材料非線形, 三次元地震応答解析, 耐震性能照査

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 TEL: 04-7182-1181 (代表)

3. 解析結果および考察

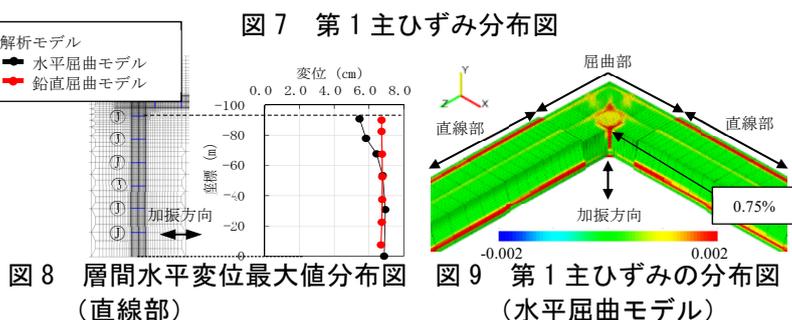
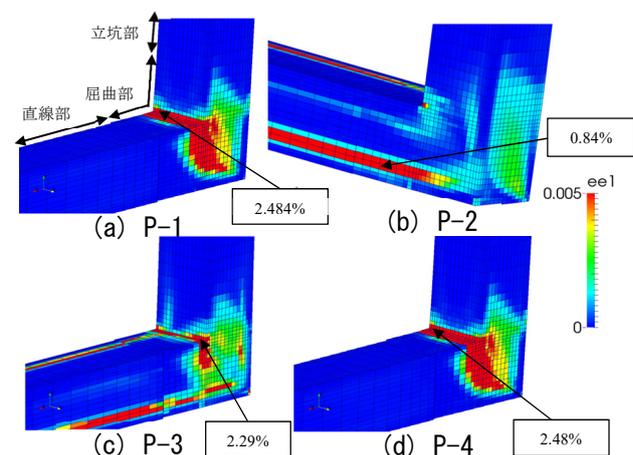
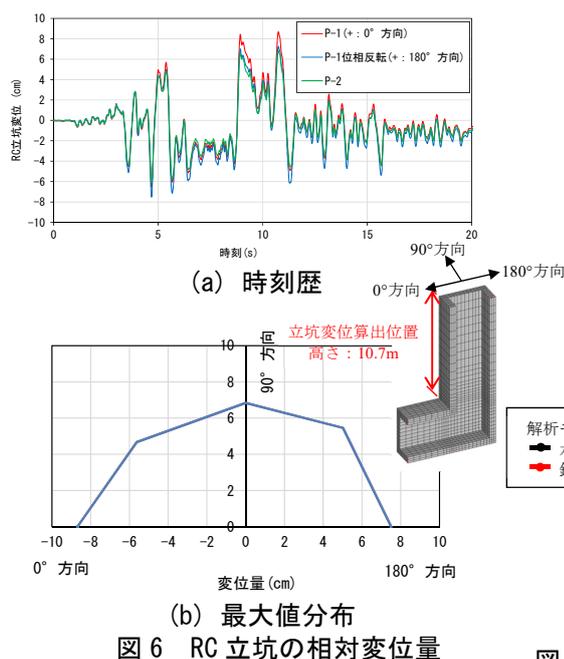
図6にRC立坑の相対変位量を示す。立坑の変位は、 0° 方向の変形（屈曲部が閉じる変形）が最も大きい結果（8.7cm）で、他はほぼ同等の変位量であった。これは 0° 方向の変形の際、直線部の影響で底部が剛固定のようになるため、屈曲部にひずみが集中し、変形が大きくなったものと考えられる。図7にRC立坑変位最大時の第1主ひずみ分布を示す。ひずみもP-1が最も大きく、ひずみの大きい領域が広範囲であることが確認された。

次に、①直線部、②屈曲部、③立坑部に分け（図7(a)）、水平屈曲モデルの結果（照査例Ⅱ¹⁾）と比較して考察する。なお、水平・鉛直屈曲モデルは、同じ地震動を入力しており、地盤条件・構造形状もほぼ同じである。

① 図8に直線部の弱軸方向に地震動を入力した時の水平・鉛直屈曲モデルの頂底板層間変位の最大値分布を示す。変位応答は、両モデルともにほぼ同じ結果であった。ただし、屈曲部近傍では違いがみられた。これは、屈曲部に近づくにつれて直交する水平ダクトの影響を受けて変位が小さくなったものと考えられる。

② 図9に水平屈曲モデルの第1主ひずみの最大値分布を示す。図7(a)と図9を比較すると、ひずみの最大値は鉛直屈曲モデルの方が大きく、ひずみ集中領域も広くなる傾向が認められた。これは、立坑部には耐震ジョイントがないため、立坑部に作用する荷重が屈曲部にも影響したためと考えられる。

③ 鉛直屈曲モデルの立坑部は、どの加振方向でもひずみが小さい結果であった。立坑部の地表面付近は土圧も小さく、解析結果から立坑部に大きなひずみが発生していないことから、立坑部の鉄筋量を低減（P-4）させて解析を行った。図7(a)と(d)を比較すると、ひずみの最大値、領域ともにほぼ変わらない。このため、地表面付近の土圧が小さい領域では、鉄筋が降伏しない範囲であれば鉄筋量を低減しても構造物変形やひずみに対する影響は小さいと考えられる。



4. おわりに

今後は、地盤条件などに着目したパラメータ解析を行うとともに、地中構造物の耐震性能照査に対する三次元FEM解析の適用性や評価基準等についての検討を行い、地盤-構造物連成系の三次元非線形地震応答解析を用いた照査手法の実用化を図る予定である。

謝辞：本研究の一部は、電力9社と日本原子力発電（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環で実施したものである。また、本解析を実施するにあたり、「地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会」前川宏一委員長には多大なご支援を頂きました。ここに、謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 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・照査例 2018, 2018.10.
- 2) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, SPON PRESS, 2003.