

屈曲部を有する RC 製地中ボックスカルバート構造物の三次元非線形地震応答解析

電力中央研究所 正会員 ○島端 嗣浩  
 電力中央研究所 正会員 松尾 豊史  
 関西電力 正会員 審 浩年  
 電力計算センター 非会員 布施 貴朗

1. はじめに

地盤・構造物連成系の有限要素解析（以下、FEM 解析）による耐震検討では、二次元解析により実施することが一般的となっている。一方、近年は、FEM 解析技術やパーソナルコンピュータの演算処理能力向上により、三次元による検討も一般的になりつつある[1]。しかしながら、例えば線状構造物の地震応答に及ぼす三次元形状や地震動の入力方向等の影響を直接考慮した三次元非線形 FEM 解析を実施している事例は少ない。

そこで、本検討では主に三次元構造形状に着目し、長手方向に水平屈曲するボックスカルバート構造物を対象とした地盤-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<照査例>2005 年 6 月」照査例 II を基本とした。構造図および地盤条件を図 1 に、検討用地震動を図 2 に示す。

解析コードには COM3[2][3]を用いた。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。解析メッシュを図 3 に示す。同メッシュにおいては、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 13 万である。構造物および地盤は、ソリッド要素（1 次要素）でモデル化した。構造物-地盤間には、剥離とすべりを考慮した BOND 要素を設けた。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、自重解析時には鉛直ローラー、動的解析時には水平・鉛直フリーとした。

解析ケースを表 1 に示す。線状構造物では施工上の観点等から一定区間ごとでブロックが区切られているため、その影響を耐震ジョイントの有無（図 3 中 J）として検討パラメータに含めた。そして、耐震ジョイントを考慮したモデルにおいて、地震動の最大加速度振幅と入力方向に着目した解析を実施した。

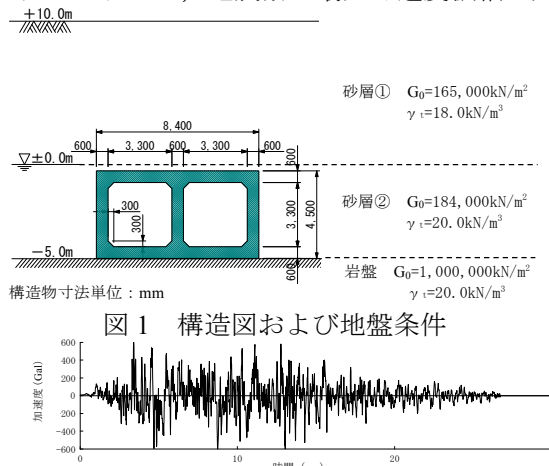


図 1 構造図および地盤条件

表 1 解析ケース

解析ケース	最大加速度振幅	水平入力方向	耐震ジョイント
D-1	600Gal	0°	無
D-2	600Gal	0°	有
D-3	1200Gal	0°	有
D-4	1200Gal	45°	有

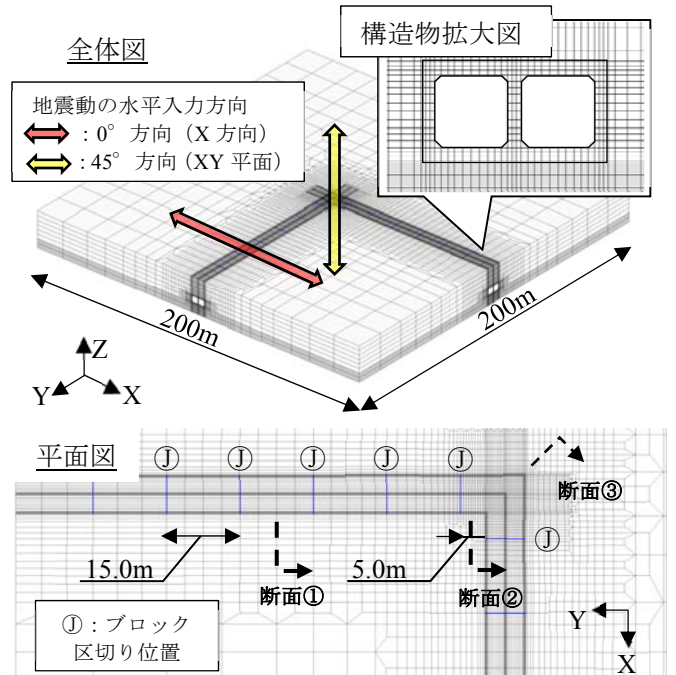


図 3 解析メッシュ

キーワード 三次元解析, 地盤・構造物連成系解析, 鉄筋コンクリート, 耐震性能照査  
 〒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4には、D-3とD-4の結果を用い、図3に示す各断面位置の構造物軸直角方向と入力方向に対応する地盤ひずみと応力を、入力方向の違いを同一尺度で評価するために偏差第二不変量( $\sqrt{J2'}$ ,  $\sqrt{J2}$ )で示している。屈曲部から離れた横断面内の二次元挙動が卓越する

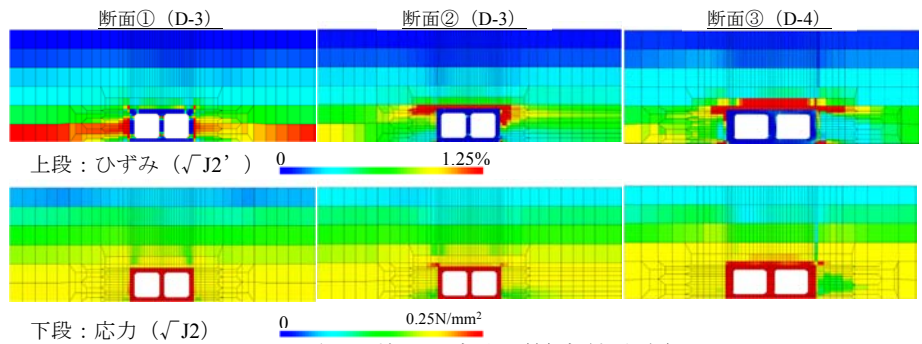


図4 地盤ひずみ・応力(最大値分布)

と考える断面①では、構造物側方の広い範囲で大きなひずみが分布する傾向であった。また、屈曲部近傍の断面②③では、頂版上部の範囲でひずみが集中しているものの、構造物側方の地盤ひずみは断面①と比較して小さい結果となった。これは、屈曲部近傍では直交する側壁の面内せん断の影響で構造物の剛性が大きいことにより、側方地盤のせん断変形を拘束したためと考える。一方で、地盤応力は、ひずみ分布と比較して、頂版と側壁位置で若干異なる傾向も見られるものの、構造物剛性の影響は小さく、構造物周辺の応力分布は大きくは変わらない結果であった。

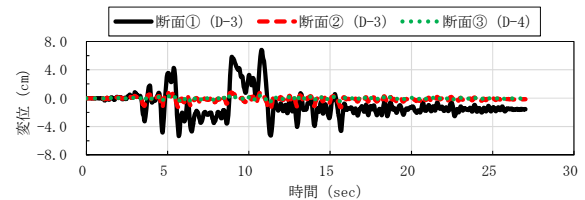


図5 構造物水平層間変位時刻歴

次に、構造物横断面の頂底板間水平層間変位時刻歴(図5)より、断面①と比較して断面②③の変位が小さくなっていることが確認できる。この結果は、本解析条件での屈曲部から十分に離れた構造物横断面の耐震検討において、水平層間変位に着目した場合は安全側の評価となることを示すものとする。

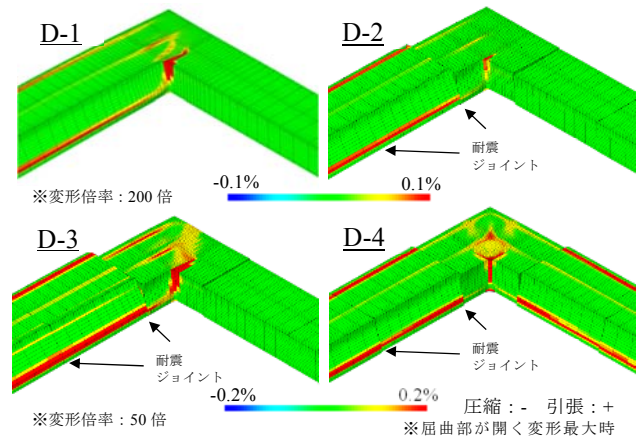


図6 第一主ひずみ分布図

図6には、屈曲部が開く変形時の第一主ひずみ分布を示している。いずれのケースにおいても屈曲部で局所的にひずみが集中しており、このひずみ集中領域は耐震ジョイントを考慮することで軽減されていることが確認できる(D-1, D-2)。また、屈曲部近傍を除く範囲では、耐震ジョイントの有無に関わらず、構造物横断面でのせん断変形により生じる隅角部のひずみが卓越する結果となっている。最大加速度振幅を大きくした場合(D-2, D-3)では、ひずみの値は大きくなるものの、局所的なひずみが生じる傾向は変わらなかった。一方、入力方向が異なる場合(D-3, D-4)では、屈曲部の局所的なひずみの生じる方向や範囲が若干異なる結果であった。これは、一度ひび割れが生じた箇所ではひずみが集中しやすくなること等によると考えられる。ただし、入力方向が異なっても加速度振幅は同じであるため、屈曲部の損傷程度に与える影響は大きくなかったものとする。

### 4. おわりに

三次元非線形地震応答解析を実施することで、本解析条件におけるRC製線状ボックスカルバート構造物に及ぼす三次元的形状や地震動の入力方向等による影響に関する結果を示した。今後は、本解析とは異なる三次元構造条件に着目した検討等を実施するとともに、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も検討を行う予定である。

謝辞：本研究は、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、東京大学大学院工学系研究科の前川宏一教授、前田建設工業の三島徹也博士には多大なご支援を頂いた。ここに、謝意を表す次第である。  
参考文献

[1]土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 設計編，丸善出版，2013。  
[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., Okamura, H. and Pimanmas, A.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, SPON PRESS, 2003.