

水平二方向地震動に対する地中箱型構造物の耐震性能評価

東北電力(株) 正会員 ○土田 恭平 正会員 伊藤 悟郎
 (株)大林組 正会員 永井 秀樹 正会員 渡辺 伸和

1. 概要

地中箱型構造物のような四面を側壁に囲まれた地中構造物の耐震性照査において、設計に用いる地震動が、断層モデルで作成される水平二成分と鉛直成分の三成分が定義される場合や、スペクトル適合波のように水平については一成分のみが定義されている場合においても、通常の横断面（弱軸断面）による照査に加え、同時に作用する縦断方向地震動の考慮が必要となる場合が多い。

本論文では、xy 平面内の正規化耐力曲線による水平二方向地震動に対する耐震安全性の評価手法を用い、下部側面に開口を持つ地中箱型構造物に対して構造物と地盤の連成解析により、鉛直方向地震動も含めた三方向地震動に対する評価を行った事例を報告する。

2. 評価対象構造物

評価対象構造物は、鉄筋コンクリート製地中構造物であり、図1に示すように側壁下部に開口を持ち、中床版がある2階建て構造とする。上床版がない箱型構造物であり、外寸法は平面寸法 23.9m×32.1m、高さ 29.0m とし、側壁厚は、2m および 3m とした。通常実施される横断面（弱軸断面）による照査位置は、図1の赤破線の切断面となる。

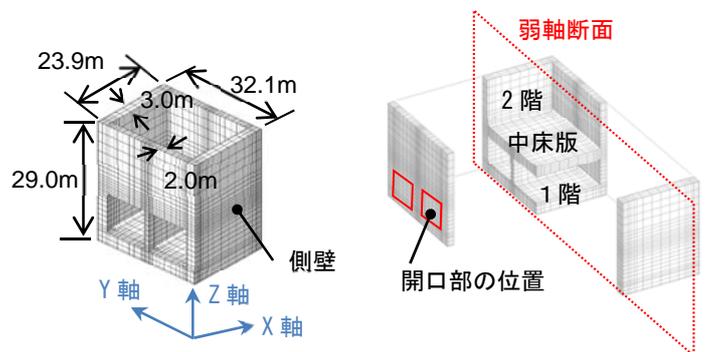


図1 評価対象とする地中構造物とFEMモデル

3. 正規化耐力曲線の設定

構造物の耐力は、三次元材料非線形モデル（解析コード FINAL-GEO）により、躯体の水平慣性力（要素物体力）を漸増させた漸増載荷解析によって算定した。コンクリートおよび鉄筋の構成則を表1に示す。耐力値は、全側壁下端に作用する作用水平力（水平せん断力）の合計値とし、荷重-変位関係および構造物の損傷状態から設定した。

表1 使用材料

使用材料	項目	数値
コンクリート	ヤング係数 E_c	24800 (N/mm ²)
	一軸圧縮強度 f_c	23.5 (N/mm ²)
	一軸引張強度 f_{tk}	1.89 (N/mm ²)
鉄筋	ヤング係数 E_s	200000 (N/mm ²)
	降伏強度 f_{sy}	345 (N/mm ²)
	降伏後の剛性低下率	0.01

使用した鉄筋コンクリートの構成則は参考文献⁽¹⁾を参照

耐力は x 軸方向耐力によって正規化し、地盤や地震動等に依存しない構造物の特性としての耐力曲線を得る。載荷方向は x（強軸，縦断）方向，直交する y（弱軸，横断）方向と 45° 方向の三方向とした。解析は、最初の 2 ステップで常時荷重（自重，土圧，土被り重量，水圧等）による初期解析を実施し、その後、水平に物体力をステップ毎に重力加速度 G の 1/10 刻みで漸増させた。対象構造物の正規化耐力曲線は、x,y 平面内任意角度の荷重に対して次式で定義する。

$$(P_x/P_{ux})^\alpha + (P_y/P_{uy})^\alpha = 1$$

ここに、 P_{ux} : x 方向（強軸）耐力， P_x , P_y : 任意方向の耐力

α は構造物の形状，配筋，更に目標性能によって異なり， $\alpha=2$ で耐力曲線は楕円， $\alpha=1$ で菱形， $\alpha=\infty$ で長方形となる。本検討で，x 方向耐力，y 方向耐力と，45°方向の耐力を求めた結果， $x>0$ 側で $\alpha=1.9$ ， $x<0$ 側で $\alpha=3.3$ となった。

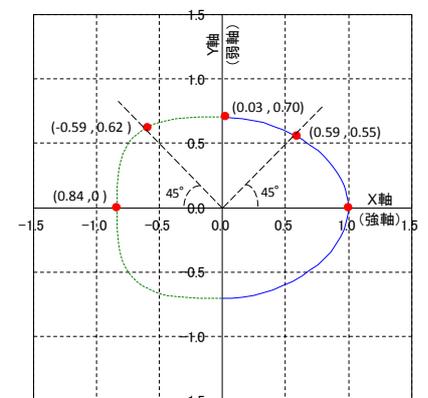


図2 箱型構造物の正規化耐力曲線

4. 連成解析による応答値の算定

連成解析の解析モデルは、図3に示すように構造物および地盤を六面体ソリッド要素（要素数：37060，節点数：59740）とした。構造物は、岩盤上に直接設置される基礎構造とし、地盤構成則は、カルバート直下の岩盤を弾性体とする。上層の埋戻土や表土には、地盤の非線形化を考慮できる修正 GHE モデルを適用する。履歴法則は Masing 則を改良することにより、任意の $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係、 $h \sim \gamma$ 関係と強度特性（せん断応力の上限值）を満足できる。三次元モデルに拡張するために、要素の局所座標 xy, yz, xz 平面における剪断ひずみに対する応力・剛性を修正 GHE モデルにより求め、三平面の最小せん断剛性を用いて、直応力・ひずみ成分の応力～ひずみ関係のマトリックスを算定し、逐次、要素剛性を更新する。地盤境界は、周期境界条件（左右モデル端部の地盤節点の三方向変位を同一とする）とし、底面を粘性境界とした。構造物と地盤間には、ジョイント要素を設定し、相互のすべりおよび剥離を表した。地震波は、図4に示す水平二方向、鉛直一方向の三方向同時加振とした。水平二方向地震波の xy 平面内の方向性を図5に示す。2011年東北地方太平洋沖地震の太平洋側にある発電施設の観測記録より、水平最大加速度 464Gal，継続時間約 165 秒のうち、30 秒分を切り出し、モデル下面より入力した。

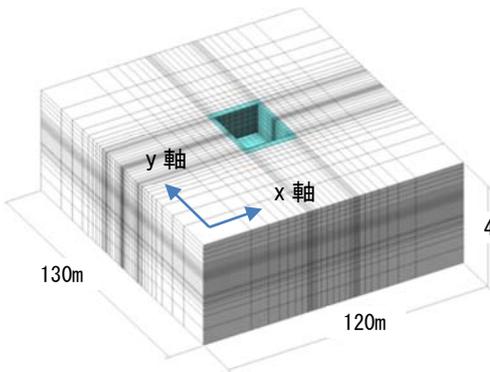


図3 全体モデル（地盤，構造物）

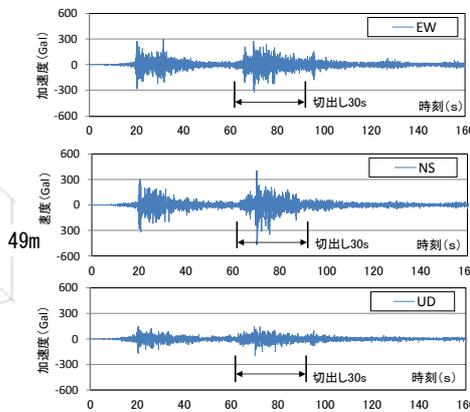


図4 三方向の入力地震波
(2011年東北地方太平洋沖地震)

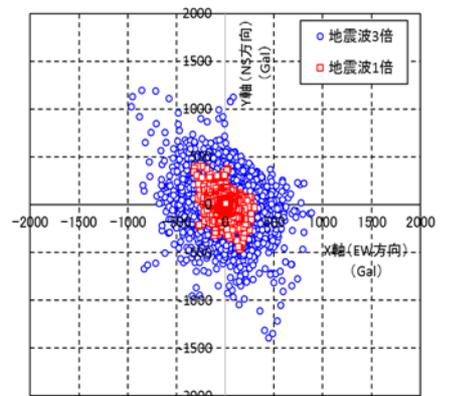


図5 xy 平面内の地震波の方向性

5. 評価結果

地震波 3 倍（加速度を水平二方向のみ 3 倍にした地震波）のケースの側壁上部と底版間の y 軸方向の最大層間変形時（解析時刻 $t=8.4s$ ）のひび割れ変形図を、図6に示す。開口部側の壁下端とせん断壁側（妻壁側）の壁下端においてコンクリートが圧縮軟化した要素が見られ、 y 軸（弱軸）方向への変形に伴う損傷が発生していることが分かる。

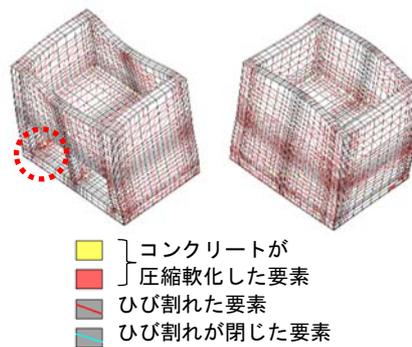


図6 ひび割れ変形図(地震波 3 倍)

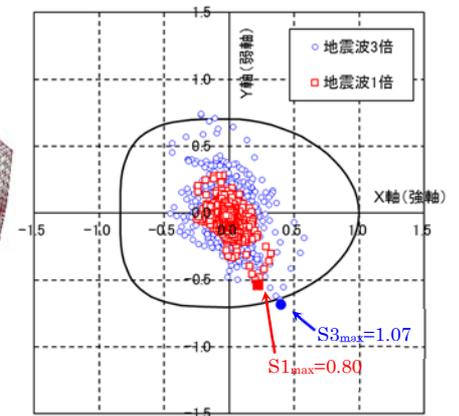


図7 正規化耐力曲線と応答値

地震波 1 倍および地震波 3 倍のケースについて作用地震力の xy 平面内の分布を正規化耐力曲線に重ね合わせた結果を、図7に示す。正規化耐力曲線に対し、任意方向での作用地震力の算出結果により全方向評価が可能となる。地震波 1 倍では、正規化耐力曲線の内側に全応答値がある。一方で、地震波 3 倍では正規化耐力曲線の外側に応答値があり、構造物に対して耐力を超える応答が発生していることが分かる。照査値の最大値（ $t=8.4s$ ）は、図7に示す着色点であり、地震波 1 倍で 0.80，地震波 3 倍で 1.07 となった。今後、本評価手法が、水平二方向地震動に対する耐震安全性の評価手法として、実務の耐震設計および照査の中で適用されることを期待する。

参考文献：(1) Naganuma, K., Yonezawa, K. : Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three Dimensional Finite Element Method, 13th WCEE, Paper No.586, Aug. , 2004.