

水平二方向地震動に対する三次元地下構造物の耐震性能評価

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

1. 概要

奥行き一様断面のカルバートだけではなく、発電施設等の地下に建造されるポンプ室や、取水口の様に非常に複雑な RC 構造物を弱軸断面である横断方向の地震動に対し照査することは、一般的な手法である。

一方、設計に用いる地震動は、断層モデルで作成される水平二成分+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一成分のみが定義されている場合、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な場合もある。既報⁽²⁾でカルバートに対する水平二方向地震動に対する耐震安全性の評価手法を提案した。

本報告では、既報で提案した手法により三次元構造物であるポンプ室や、取水口の耐力曲線を定義し、各種の地震動に対する評価を行った。

2. 水平二方向地震動に対する耐震性能評価手法

構造物の x, y 平面内任意角度の荷重に対する耐力を次式で定義する。

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

ここに、 P_{ux} : x (弱軸) 方向耐力, P_{uy} : y 方向耐力

α は構造物の形状、配筋、更に目標性能によって異なる。 $\alpha=2$ で耐力曲線は楕円、 $\alpha=1$ で菱形、 $\alpha=\infty$ で長方形となる。例えば、 $P_{uy} = 2 \times P_{ux}$ とすると弱軸方向耐力で正規化した耐力曲線は α によって図 1 の様になる。

実際には、 x 方向耐力、 y 方向耐力と、それ以外の角度、例えば 45° 方向の耐力が求まると構造物形状により α を設定できる。作用地震力の xy 平面内の分布を耐力曲線に重ね合わせ、照査を実施する。正規化耐力曲線に対し、任意の 1 方向での照査結果により全方向評価が可能となる。

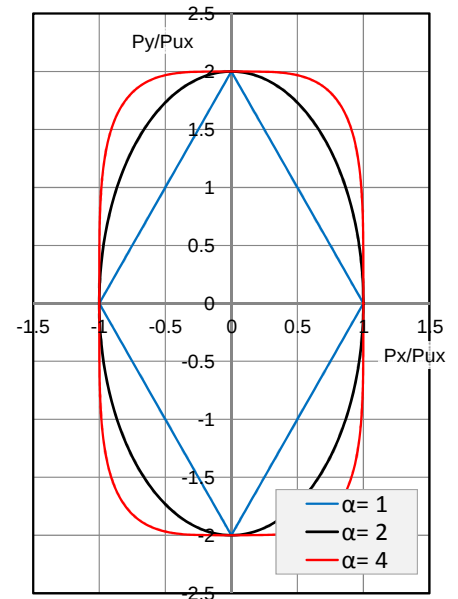


図 1 構造物の水平面内耐力曲線

3. 評価対象構造物

評価対象は、いずれも鉄筋コンクリート製地下構造物である。各構造物の三次元非線形 FEM モデルを下図に示す。既報のカルバートとポンプ室および取水口である。カルバートの長さは 16m、ポンプ室の全長は 47.6m、取水口の全幅は 39m である。いずれの構造物でも弱軸は横断方向と考えられ、一般的には地震力はその弱軸 x 方向に作用させて設計を行う。

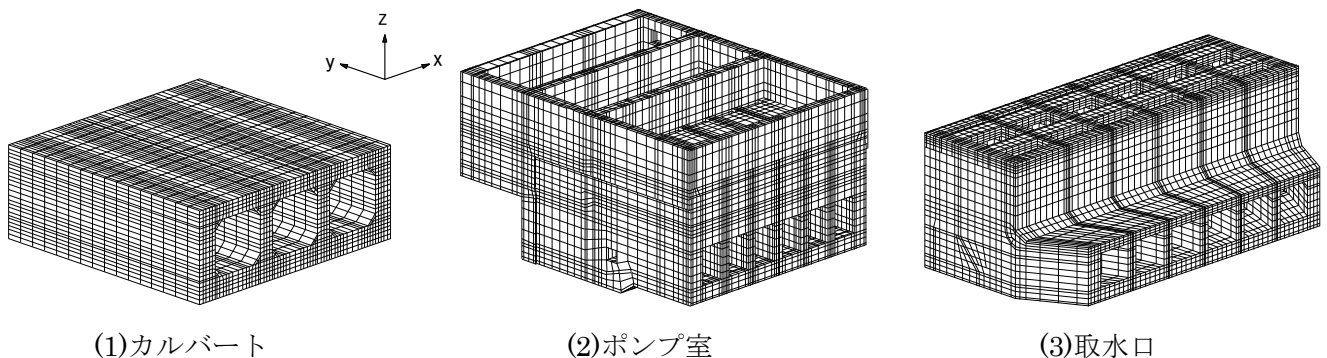


図 2 評価の対象とする地下構造物と FEM モデル

4. 耐力曲線の設定

耐力は、三次元材料非線形モデル（解析コード **FINAL-GE0**）によって算定した。コンクリートおよび鉄筋の

キーワード 鉄筋コンクリート、地中構造物、三次元構造物、耐震性能照査、多方向入力
連絡先 〒980-8550 仙台市青葉区本町 1-7-1 TEL 022-799-6103 FAX 022-262-5851

物性値を表 1 に示した。構造物の耐力は、漸増載荷解析による。耐力値は、構造物の不静定次数が高く形状が複雑で、更に荷重の載荷方向も固定しない本検討では、荷重－変位関係、部材の変形角、要素ひずみレベル、収束計算時の不釣り合い力の推移、構造物の損傷状態などから総合的に設定した。荷重は、躯体の水平慣性力（要素物体力）を漸増させた。

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 （弱軸、横断）方向、直交する y （強軸、縦断）方向と 45° 方向の 3 方向とする。二軸対称でないポンプ室と取水口では $-y$ 側の耐力も必要だが、本報では $+y$ のみの第 1/4 象限の耐力曲線を対象とした。解析は、最初の 2step で常時荷重（自重、土圧、土被り重量、水压等）による初期解析を実施し、その後、水平に物体力を各 step 毎に重力加速度 G の 1/10 刻みで漸増させた。

5. 設計地震動による表示例と照査での必要照査値 β （耐力低減係数）

多種の地震動に対する作用荷重の x,y 面内での定義と、耐震安全性を確保するための係数 β を下図に示す。

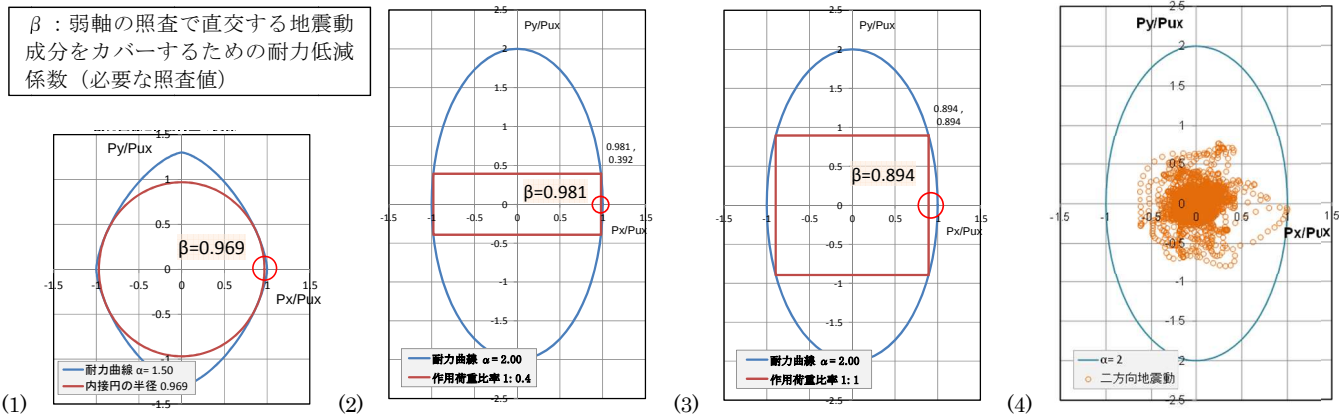


図 3 種々の地震力の耐力曲線上での表示例と弱軸方向の必要照査値 β

青は正規化耐力曲線、橙色は(1)一方向地震動の入力方向を特定しないケース、(2) ,(3)弱軸で考慮した地震力の 0.4 倍、 1.0 倍を同時に直交方向に考慮するケース、(4)断層モデル波のように直交二方向の地震動が設定されているケースで作用荷重を耐力曲線に内接する状態を示し同時に、弱軸照査に必要な耐力低減係数（必要な照査値=安全率の逆数） β を示している。

6. 評価結果の概要

各構造物の正規化耐力曲線のパラメータと、地震動に対し、水平面内全方向で耐震安全性の確保に必要な弱軸方向での耐力低減係数 β を右表に示した。

表から強軸／弱軸耐力比が大きいほど、耐力曲線係数 α が大きいほど、弱軸方向で安全性が確保されていれば、全ての方向にわたって安全性が確保されている場合は多いと考えられる。そこで必要となる耐力低減係数 β は 1:0.4 同時入力であっても、今回対象とした構造物では 0.98 以上となる。

参考文献

(1)宮川義範；水平二方向の変形を受ける鉄筋コンクリート壁体のマクロモデルに関する検討 電力中央研究所報告 研究報告：N05055 平成 18 年 6 月 財団法人電力中央研究所
(2)土田、伊藤「水平二方向地震動に対する地下構造物の耐震性能評価手法の提案」2015/9, 土木学会第 70 回年次学術講演会
(3)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.

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(3)を参照

表 2 各構造物の正規化耐力曲線と耐力低減係数 β

構造物	カルバート	ポンプ室	取水口
正規化 Y 方向耐力 P_{uy}/P_{ux}	2.15	1.69	2.10
耐力曲線係数 α	3.5	2.6	2.0
(1) 一方向地震動	1.0	1.0	1.0
(2) 1:0.4 同時入力時 β	0.999	0.991	0.986
(3) 1:1 同時入力時 β	0.981	0.916	0.903