

鋼製配水池の耐震設計法に関する一考察

JFE エンジニアリング(株) 正会員 ○今井俊雄
 石油資源開発(株) 正会員 荻久保智隆
 東京都市大学 工学部 正会員 小池 武

1. はじめに

近年、利害関係者間の合意に基づく設計を実現する手段として性能規定型設計法の普及が図られているが、水道システムの基幹施設として位置づけられる鋼製配水池（アンカーのない平底円筒型タンク）については、例えば代表的な設計指針である日本水道協会（JWWA）「水道施設耐震工法指針・解説」¹⁾においても地震時の限界状態が明確化されておらず、したがって既往の設計指針で保証される破壊確率がどの程度なのか不明なまま運用されている。その理由として、実際の地震時被害が少ないことならびに動的解析等の解析事例が少ないことが挙げられる。本報では、鋼製配水池に関する既往の耐震設計指針について、FEM 解析による設計検証を行うことで課題を抽出し、性能規定型設計移行のための資料とすることを目的とする。

2. FEM による解析

(1) FEM 解析

a) 解析モデル

容量 10,000m³（高さ 15.2m, 直径 30.2 m）の鋼製配水池をモデルとして計算を実施した。Fig.1 には FEM モデルの全体図を、Table 1 には主要部の諸元をそれぞれ示す。鋼製部材はシェル要素としてモデル化し、アニュラプレートならびに底板外周部を剛体基礎上に接触要素を介して接続している。使用鋼材は SS400 とし、材料非線形性はバイリニアモデルで評価した。

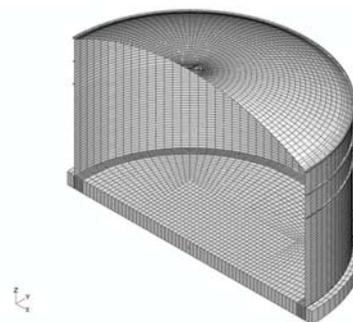


Fig.1 FEM model of a cylindrical steel tank

b) 固有周期

はじめにモデル配水池の固有値解析を実施した。JWWA 指針により与えられる 1 次固有周期は $T_e = 0.306 \text{ sec}$ (3.27Hz) であるのに対して、FEM による固有値計算では $T = 0.420 \text{ sec}$ (2.38Hz) とやや長周期の結果を得た。これは前者が配水池本体を剛体としてモデル化しているのに対し、本解析ではシェル要素としてモデル化しているためであると考えられる。すなわち、鋼製配水池のような薄肉円筒シェルでは、ビーム振動（側板の曲げ振動モード）とともにオーバル振動²⁾（側板円周方向の花びら状振動モード）が同時に発現するために、結果として 1 次固有周期が長く評価されたものと考えられる。

Table 1 Sizes of main parts of the model tank

Section	Size
Annular plate	t = 12 mm, W = 1.2 m
Base plate	t = 6 mm
Shell plate (1 st)	t = 18 mm, H = 2.4 m
Shell plate (2 nd)	t = 14 mm, H = 2.4 m
Shell plate (3 rd)	t = 9 mm, H = 2.4 m
Shell plate (4 th)	t = 6 mm, H = 2.4 m
Shell plate (5 th)	t = 6 mm, H = 2.4 m

c) プッシュオーバー解析

現行の設計指針で想定している配水池の地震時挙動ならびに損傷モードの妥当性を確認するために、プッシュオーバー (PO) 解析を実施した。地震時動水圧については、JWWA 指針のモデル化と同様に Housner³⁾モデルに基づく水平荷重を載荷した。Fig.2 には PO 解析によって得られた地震荷重と、入力側のアニュラ外端部ならびにアニュラと底板の境界部における鉛直変位との関係を示す。アニュラの外端部においては、水平震度 $K_h = 0.2$ 程度で浮き上がりが生じ、地震荷重の増加に伴って浮き上がり量の増加が見られる。またアニュラと側板の境界部（外縁か

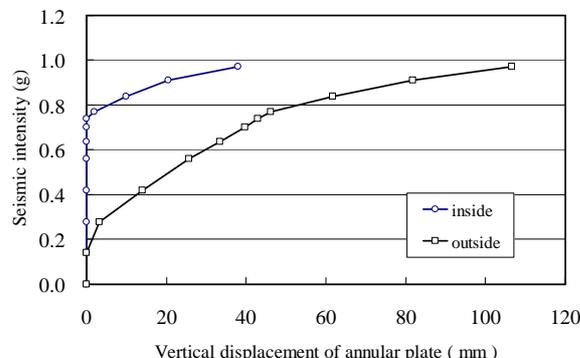


Fig.2 Up-lift of the annular plate

キーワード 鋼製配水池, 象の脚座屈, 性能設計法, 限界状態設計法, 耐震設計, プッシュオーバー解析

連絡先 〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2丁目1番地 JFE エンジニアリング(株) TEL 045-505-7664

ら 1.2m 位置) では, 水平震度 $K_h = 0.77$ で浮き上がりが生じている. PO 解析では, 1 方向荷重のために双方向に地震荷重の作用する動的解析に比較して最大浮き上がり量ならびに範囲を過大に評価しているものと考えられるが, この結果は配水池のロッキング現象を再現しており, 現行指針における配水池挙動のモデル化ならびに損傷メカニズムの妥当性を裏付けている.

(2) 損傷モードに関する検討

現行指針では, 配水池の浮き上がりに伴う底板の曲げ引張による亀裂漏水ならびに反対側の側板下部における象の脚座屈を損傷モードとして耐震照査が行われる.

a) 側板損傷モード

Fig.3 には水平震度 $K_h = 0.0, K_h = 0.74$ (現行基準における設計震度相当) ならびに $K_h = 0.97$ における圧縮側側板の水平方向変位分布の解析結果を示す. 初期状態においては静水圧により側板下部に若干の変位が見られるが, 動水圧の増加に伴って側板上部の水平変位が増加傾向を示し, 設計水平震度を超えて $K_h = 0.97$ に至ると, 高さ 5.4m (3 段目側板) において象の脚座屈と思われる局所的な変位が生じている. これらの結果から, 現行指針において配水池の浮き上がりに伴う圧縮側側板下部の象の脚座屈を損傷モードとして想定していることは妥当であると判断できる. ただし, 現行指針では最も高い水圧が作用する側板最下段における座屈照査に注意が向けられているが配水池の側板厚さは離散的に設定されることから, それ以外の側板についても照査が必要であることが示唆される.

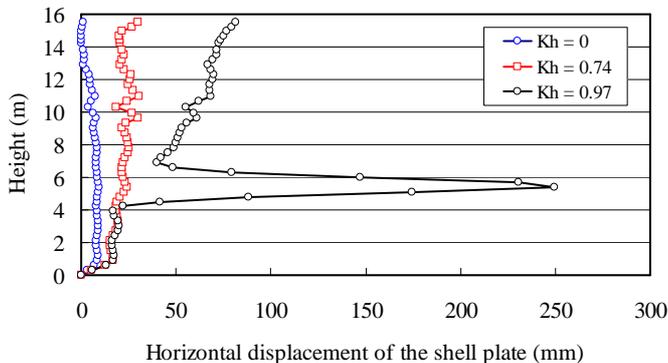


Fig.3 Horizontal displacement of the shell plate.

b) 底板損傷モード

Fig.4 には, 水平震度 $K_h = 0.97$ におけるアニュラの応力分布を示す. 浮き上がりは同図の右側に生じており, 浮き上がり量の増大に伴って配水池中心方向ならびに円周方向への引張応力が複合的に発生した結果, アニュラの中心部において応力が最大となり, この領域で局所的な塑性化が生じている. 底板の損傷モードは, 配水池の浮き上がりに伴うアニュラの引張亀裂の発生と考えられるが, 同計算結果のようにアニュラ端部が 100 mm 以上浮き上がった状態においてもアニュラは全断面降伏に至っておらず, 引張ひずみは 0.03% 程度と, 鋼材の破断ひずみ 20~25% にははるかに及ばないレベルである. このことから, 底板の損傷モードとしてはアニュラの引張破断ではなく繰り返し荷重に伴う低サイクル疲労による亀裂漏水もしくはアニュラに隣接する底板部の破断ひずみと想定するのが妥当であろうと考えられるが, 現行指針においてはこの点に関する照査について規定されていない.

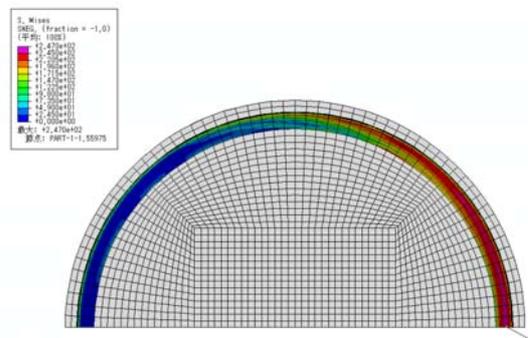


Fig.4 Profile of annular stress at $K_h = 0.97$.

3. まとめ

FEM 解析結果に基づき, 鋼製配水池に関する現行の耐震設計指針に関する課題抽出を試みた. その結果, 配水池の浮き上がり挙動に伴う圧縮側側板の象の脚座屈を損傷モードとして想定している点は妥当であるが, 底板の損傷モード設定については低サイクル疲労を考慮した評価が必要であるとの知見を得た.

参考文献

1) 日本水道協会, 「水道施設耐震工法指針・解説」, 日本水道協会, 1997. 2) 石田和雄, 小林信之: アンカーのない円筒タンクのロッキングに対する耐震解析法, 日本機械学会論文集 (A 編), 50 巻, 453 号, pp.1042-1048, 1984. 3) Housner, G.W.: Dynamic pressures on accelerated containers, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.47, pp.15-35, 1957.