

上水道施設耐震解析に関する一考察

エンジニアリング本部防災情報部

今井 博行

1. はじめに

2009 年版として改訂された「水道施設耐震工法指針・解説」において、動的解析や、3 次元解析の採用が示唆されている。

本稿では配水池を例にとりて、動的解析と静的解析の関係、及び 2 次元解析と 3 次元解析の関係についての考察を行い、解析手法を選択する際の判断基準の参考に資するものとする。

2. 動的解析と静的解析

例に取った配水池は縦 120m、横 60m、高さ 5.2m であり、底版厚=壁厚=0.5m、頂版厚=0.4m である。

短辺方向の断面について、まず動的解析を行い、次に静的解析を行って、それらの結果について比較し、考察を加える。

2.1 動的解析

動的解析には、液状化解析プログラム LIQCA を用いた。入力地震波として、上町断層系の直下型地震を用いた。

地震継続時間=36 秒

最大加速度=507gal

波形図を図 1 に示す。

境界条件は、

底面=粘性境界

側面=等変位境界

とした。要素のモデル化は、

砂質土=砂の弾塑性モデル

粘性土=R-O モデル

躯体=非線形梁要素

とした。

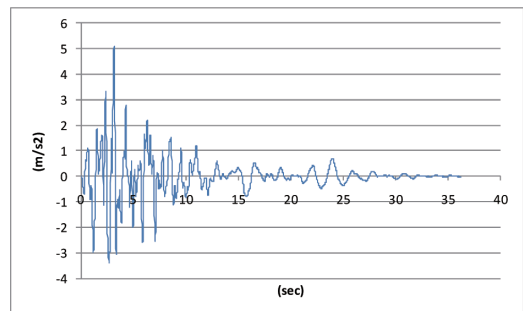


図 1 入力地震波形

変形図、過剰間隙水圧比図を図 2、図 3 に示す。
(変形図は、変形前:青線、変形後:赤線で示している。)

壁下端に発生した最大応答曲げモーメントは 354kN-m/m であり、壁上下端の相対変位の最大値は 0.012m となった。また、配水地直下の砂層が激しく液状化しているのが認められる。

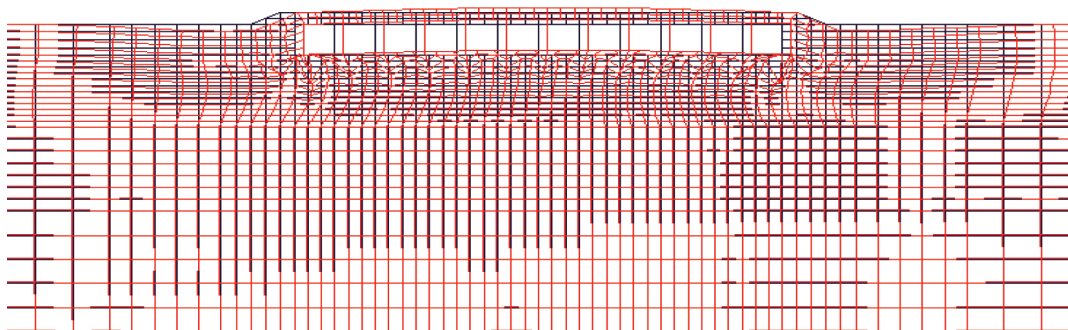


図2 変形図(動的解析)

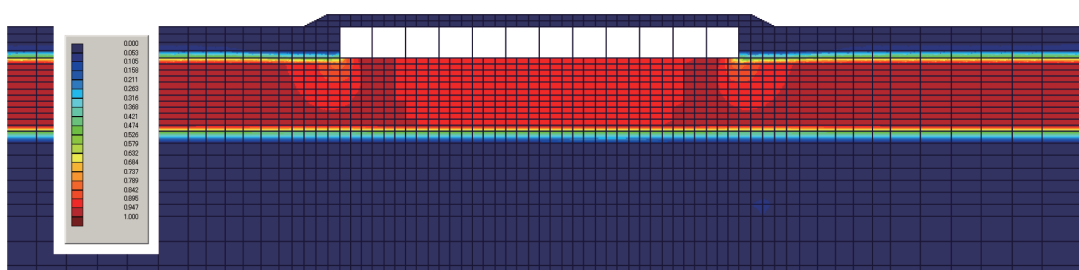


図3 過剰間隙水圧比図(動的解析)

2.2 静的解析

この動的解析との比較として静的解析を行う。

静的解析には応答震度法と応答変位法が有る。応答震度法は構造物と周囲の地盤からなる FEM 解析モデルに対して地震時の慣性力を与える手法であり、応答変位法は構造物を骨組みモデルとして、地震時の地盤のせん断変形による荷重を骨組みモデルに与える手法である。

解析の手軽さから、応答変位法が用いられることが多いが、本考察では両方の解析を行うこととする。

2.2.1 応答震度法

動的解析において地表面の最大応答加速度が 221gal となったので、水平震度 $0.23(=221/980)$ と

して応答震度法を行った。

解析モデルは動的解析に用いたものと同じモデルとし、底面の境界条件のみ、粘性境界を固定境界に変えた。

解析プログラムとして、同じく LIQCA の静的解析機能を用いた。

応答震度法では、深さ方向に設計震度を低減することもあるが、LIQCA においては、残念ながらこの機能は無いので、今回の解析では深さ方向に一定の震度を与えている。

壁下端に発生した曲げモーメントは 249kN-m/m、壁上下端の相対変位は 0.015m となった。しかし、液状化についてはこの解析からは求められない。また、得られた値は最大値のみであり、地震終了後の残留変位等は得られない。

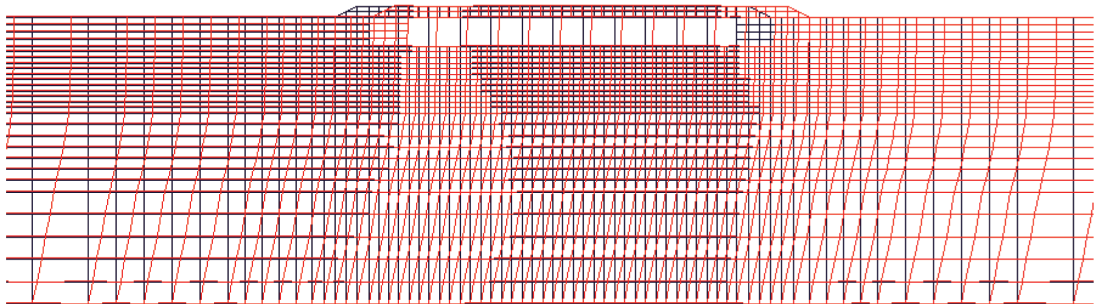


図 4 変形図(静的解析、応答震度法)

変形図を図 4 に示す。(変形図は、変形前:青線、変形後:赤線で示している。)

2.2.2 応答変位法

次に応答変位法であるが、動的解析に用いた地震波形を工学的基盤に入力し、1 次元波動伝播解析プログラム Shake を用いて配水池壁体位置の地盤変位を求めたものが、図 5 である。

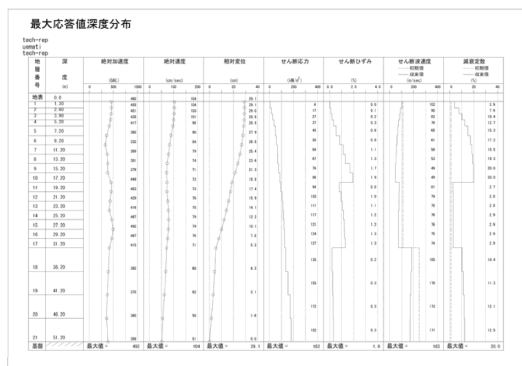


図 5 Shake の結果

これによると壁体上下端の相対変位は 0.006m であり、水平方向地盤反力係数 $K_h=8670\text{kN/m}^3$ を掛けると、 52.0kN/m^2 の荷重強度が得られる。

この荷重を用いて骨組み解析を行うのが応答変

位法であり、その計算結果は、壁下端の曲げモーメントは 291kN-m/m 、壁上下端の相対変位は 0.018m となった。

2.3 結果の比較

動的解析、静的解析:応答震度法、静的解析:応答変位法の 3 つの手法を、配水池耐震解析に適用したが、その結果は表 1 に示すように、M、 δ いずれも最大値が最小値の 1.5 倍程度という範囲内に収まっている。

表1

	①動的解析	②静的解析 応答震度法	③静的解析 応答変位法
M	354	249	291
δ	0.012	0.015	0.018

ここに、M:壁下端の曲げモーメント(kN-m/m)

δ :壁上下端の相対変位(m)

この 3 つの手法を比較すると、解析作業に要する時間は①>②>③であり、解析精度も①>②>③と見なすのが一般的である。

液状化については、①では解析結果の一部とし

て求められるが、②、③では、別途、液状化判定を行う必要がある。

管状構造物(ボックスカルバートなど延長の長い構造物)では直土圧に加えて、周面せん断力も考慮する必要があるが、①、②の FEM モデルを用いた解析では、周面せん断力が自動的に考慮されるのに対し、③では、周面せん断力も荷重として載荷することが必要となる。

3. 2次元解析と3次元解析

矩形の配水池の構造解析として一般に行われる方法は、直交する2方向の断面を取り出して2次元解析を実施し、その結果から全体系の安全性を類推するというものである。

2次元解析では、解析断面の手前や奥にある、(つまり、加振方向に平行な)外壁や耐力壁、導流壁を無視することが多い。これは、一部の構造部材の剛性を無視しており、安全側の解析となっているが、換言すれば、不経済側の解析であるとも言える。

対象構造物が解析奥行き方向に十分長い場合には、問題とならないが、幅と奥行きが近い値になってきた場合には、2次元解析では全体構造系の剛性を過小評価しすぎることになるので、3次元解析が望ましいこととなる。

本考察で対象とした配水池は幅 60m、奥行き 120m であるが、これの幅 60m は一定とし、奥行きを増やして3次元解析を行い、2次元解析の適用可能な範囲を推測する。即ち図6の左側(配水池)に対して3次元解析を行い、「L が B の何倍以上になれば、3次元構造の中央部 a-b-c-d と2次元解析モデル e-f-g-h の振舞いが等しくなる

か」を求める。

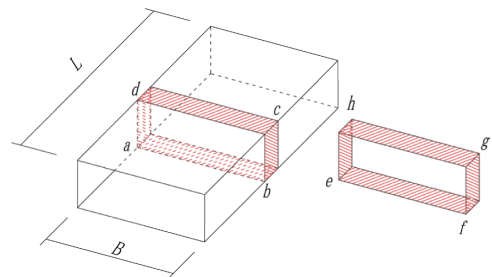


図6 3次元解析

解析プログラムは、自社開発の3次元汎用構造解析プログラム FEM3d_str4.5 を用いた。

本プログラムでは、3角形要素と4辺形要素は通常のアイソパラメトリック要素を用いているが、長方形要素には、参考文献3)より、以前から広く用いられ、優秀性が実証されている ACM 要素を用いている。

また、3次元のシェル要素(平面応力要素+板曲げ要素)では面内回転(θ_z 、ドリリングとも呼ばれる)に対する剛性は計算では求められないが、これを零のままとしておくと、2枚のシェル要素が浅い角度で交わる場合に計算が不安定となる。これを回避するために、参考文献3)より、 θ_z に対応する剛性として経験的な小さな値を与えている。もちろんこれは計算を円滑に行わせる便法であり、力学的根拠は薄い。

配水池のモデル化は、壁、底版、頂版はシェル要素、柱は梁要素とし、ドロップパネル及びハンチは無視した。

荷重は、動的解析において発生した土圧の最大値 66.1kN/m^2 を、面荷重として壁体に載荷し、支持条件としては、底版を構成する節点に、x,y,z 方向の拘束を与えた。

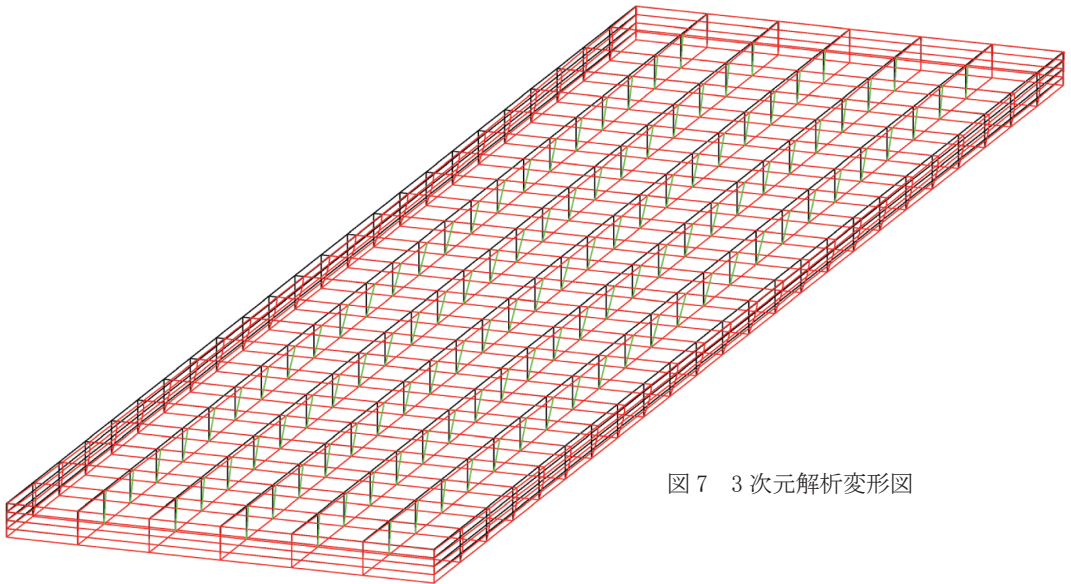


図 7 3次元解析変形図

図 7 に示す変形図は、要素辺を表示するワイヤフレーム図であり、変形前を黒、変形後のシェル要素を赤、変形後の梁要素を緑で示しており、変形倍率は 200 倍としたものである。

また、配水池の幅 B を一定値($=60\text{m}$)とし、奥行き L を変化させた結果が表 2 である。この結果より、奥行き L が幅 $B(=60\text{m})$ の約 10 倍以上であれば、十分長い構造物と見なして、3 次元解析の代用として 2 次元解析の適用が可能となることが推察される。

表 2

L	M	δ	備考
単位幅	349.2	0.021	e-f-g-h
120	98.4	0.0026	a-b-c-d
240	162.4	0.0074	a-b-c-d
480	293.4	0.018	a-b-c-d
720	318.0	0.018	a-b-c-d
1200	330.1	0.020	a-b-c-d

ここに、 L :奥行き(m)

M :壁下端の曲げモーメント(kN-m/m)

δ :壁上下端の相対変位(m)

3 次元解析の副産物として、地盤反力分布に興味深い結果が得られた。

図 8 は地盤反力分布を等高線表示したものであるが、隅角部に極端な応力集中が認められる。隅角部は直交する 2 枚の壁体の剛性が直接影響する位置なので、この応力集中は直感的にも納得できるが、その集中度は少し極端すぎる気もする。今回の解析では底版の支持条件は固定としているので、これをバネ支持に変えると応力の集中度はかなり緩和されると思われる。

この、地盤反力の隅角部における応力集中は、2 次元解析では決して得られないものであり、配水池が傾斜地盤上に配置される場合などは、3 次元解析が、より望まれることとなる。

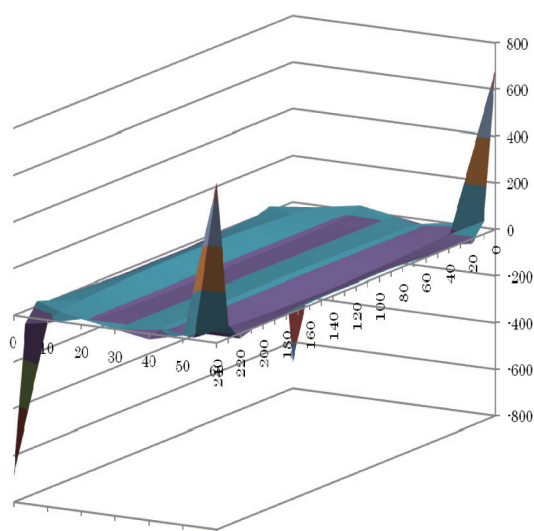


図8 地盤反力分布図

4. まとめ

- ・ 動的解析と静的解析（応答震度法、応答変位法）の3手法では、最大値が最小値の約1.5倍程度の範囲に収まるという結果が得られた。
- ・ 地震後の残留変位が必要な場合には動的解析が必要となる。
- ・ 長辺が短辺の約10倍以上であれば、十分長い構造物と見なして、2次元解析が3次元解析の代用となる。
- ・ 地盤反力の応力集中が懸念される場合は3次元解析が必要となる。

以上が、本考察で得られた結果である。

上水道施設の耐震解析に際しては、主として用いられるのは、2次元応答変位法である。その理由としては、手法の簡便性の他に、以下に示すような3次元解析プログラムの未整備が挙げられる。

- ・ 3次元解析のプログラムは構造関係が主流であ

り、土要素（当然ソリッド要素となる）をライブラリーに搭載しているものは少ない。また、搭載していても、その構成則はR-Oモデルなど液状化を考慮出来ない場合が多い。

- ・ 液状化を考慮できるLIQCA、FLIPに関しては、それぞれLIQCA開発グループ、FLIPコンソーシアムにおいて3次元ソルバーを開発中であるが、実用にはまだまだ時を要する。
- ・ シェル要素に非線形性を考慮するのが、非常にハードルが高い。（主応力の方向と主筋の方向が一致しないので、 $M-\phi$ 特性が決まらない。）

これらの未整備点が解決され、3次元解析が、より身近なものになることが望まれる。

<参考文献>

- 1)「LIQCA2009 公開版マニュアル」（平成21年11月、LIQCA開発グループ）
- 2)「有限要素法ハンドブックⅠ 基礎編」（鷲津久一郎他、昭和56年9月、培風館）
- 3)「有限要素法概論」（戸川隼人、1981年11月、培風館）
- 4)マトリクス有限要素法（O.C.ツィエンキーヴィッツ他、昭和45年3月、培風館）
- 5)水道施設耐震工法指針・解説（平成21年7月、日本水道協会）