

# 地上式配水池の耐震安全性能照査法提案

小池 武<sup>1</sup>・渡邊 拓<sup>2</sup>・濱野雅裕<sup>3</sup>・長谷川延広<sup>4</sup>・大沼博幹<sup>5</sup>・党 紀<sup>6</sup>・中川信夫<sup>7</sup>

<sup>1</sup>正会員 Academic Adviser JICA EEHE Project (〒612-8358 京都市伏見区西尼崎町 898)

E-mail: [koike-takeshi@ka3.so-net.ne.jp](mailto:koike-takeshi@ka3.so-net.ne.jp)

<sup>2</sup>非会員 (株)ベルテクノ (〒530-0041 大阪市北区天神橋 2 丁目北 2 番 6 号)

E-mail: [t.watanabe@beltecno.co.jp](mailto:t.watanabe@beltecno.co.jp)

<sup>3</sup>正会員 (株)エイト日本技術開発 (〒164-9801 東京都中野区本町 5-33-11)

E-mail: [hamano-me@ej-hds.co.jp](mailto:hamano-me@ej-hds.co.jp)

<sup>4</sup>正会員 JFE エンジニアリング株式会社 アクアパイプライン事業部

(〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2 丁目 1 番地)

E-mail: [hasegawa-nobuhiro@jfe-eng.co.jp](mailto:hasegawa-nobuhiro@jfe-eng.co.jp)

<sup>5</sup>正会員 大沼水道技術研究所 (〒950-3323 新潟市北区東栄町 2-3-28)

E-mail: [onuma@ae.auone-net.jp](mailto:onuma@ae.auone-net.jp)

<sup>6</sup>正会員 埼玉大学工学部建設工学科 (〒338-0825 埼玉県さいたま市桜区大字下大久保 255)

E-mail: [dangji@mail.saitama-u.ac.jp](mailto:dangji@mail.saitama-u.ac.jp)

<sup>7</sup>正会員 (株)シビルソフト開発 〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4 タカラビル 5F

E-mail: [nakagawa@civil.co.jp](mailto:nakagawa@civil.co.jp)

地上式配水池の多くが更新時期を迎えているが、既存配水池の耐震安全性能照査を手軽に実施できる照査方法が見当たらないため、現状は二次元構造モデルの動的応答解析に基づく照査手法が汎用されている。この問題の解決案として、3次元構造物で1自由度振動モデルが抽出できる構造系の耐震安全性能照査手法を提案する。

さらに、本研究では、性能設計・耐震設計の国際ルールに適合した耐震安全性能照査法を提案するとともに、その簡便な評価手法をレベル2信頼性設計法に基づいて提示する。

**Key Words:** seismic safety assessment, above-ground water reservoir, pushover analysis, reliability-based design

## 1. はじめに

日本の水道施設はその多くが 1960 年代後半から 1970 年代の高度経済成長期に集中的に建設された経緯があり、建設後 50 年を経過した現在、それら水道施設の老朽化が目立つようになってきた。

この 50 年間に経験した大地震を基に耐震設計基準・指針<sup>1)2)3)</sup>がその都度改訂されてきた。その結果、既存水道施設は現行の耐震安全性を満足していないだけでなく、老朽化により一層その耐震安全性を損ねている懸念がある。

水道施設には、送水、配水、給水の各レベルの管路とそれ以外の主要施設が含まれる。とくに、管路網内の重要拠点に配置される配水池は水道水安定供給のための基幹施設である。

配水池の耐震性能照査が必要となるのは、現在供用中の配水池が現行耐震設計基準に不適合なまま供用されているにも関わらず、将来の大地震時の耐震性能が不明の

場合である。

配水池の耐震安全性能は、現行耐震安全設計基準に従って行うことができる。実態的には、設計基準に準拠した設計事例集<sup>4)</sup>の記載手法に忠実に従って、安全性照査が行われてきた。その結果、事例集記載以外の手法は照査方法の根拠資料が不明とのことで、實際上、自主的にそのような照査手法を避けざるを得ない傾向が見られた。これでは新規の照査手法が採用される術が無く、性能設計法の本来の精神である自由な設計法の参入が可能という面が必ずしも実現できて来なかったという経緯がある。

本研究では、新しい配水池耐震安全性能照査法を提案することで、上述の問題を解決し、信頼性設計法の自由度を拡張する提案をする。

ところで、我が国は、世界貿易機構 (WTO) が進める貿易ルールの統一化、製品品質の世界標準化<sup>5)</sup>を実現するため、経済活動のあらゆる分野で世界標準化を推進している。そして、構造設計の分野でも国内設計法を国際基準<sup>5)</sup>に適合させることが積極的に進められている。

現在、既往設計基準・指針の多くが世界標準化に向けて性能設計化<sup>7)</sup>が推進されているが、それは性能設計の持つ設計自由度範囲が明解なため、その範囲で設計技術の自由競争が可能となるためである。

WTO が要請しているのは、配水池の耐震性能照査を世界標準の照査ルールに基づいて行うことである。それによって、関心のある全ての関係者がこの業務へ自由に参入することができることになる。そのためには、性能設計法は以下の要件を持つ必要がある。

- 1) 構造物設計は、構造物設計理論に従う。
- 2) 構造物の安全性評価は、信頼性設計法<sup>8)</sup>に従う。
- 3) 構造物に対するシステムとしての機能性能評価も信頼性設計法に従う。
- 4) 構造物に対するシステムとしての機能性能実現の意思決定は、リスク評価手法に従う。

WTO が要請する世界標準での設計ルールの共通化は、上記の1), 2)に従うことで実現できる。一方、構造物の安全性能をどの程度、どの方向に向上させ、システム全体としてどのような機能性能達成を図るかは、設計者・事業者の意思決定による。それらは、上記3), 4)の操作を経て初めて実現できる。これは、WTO の要請ではないが、複数の構造物からなるインフラシステムを運営する事業者が、合理的にシステムを運営する場合には必然的に要請される課題である。

本研究では、地上式配水池の耐震安全性能照査法を事例として下記の議論を行なう。

- 1) 現行国内法を性能設計化するための問題点について検討し、
- 2) 性能設計化した新しい耐震安全性能照査法を提案する。

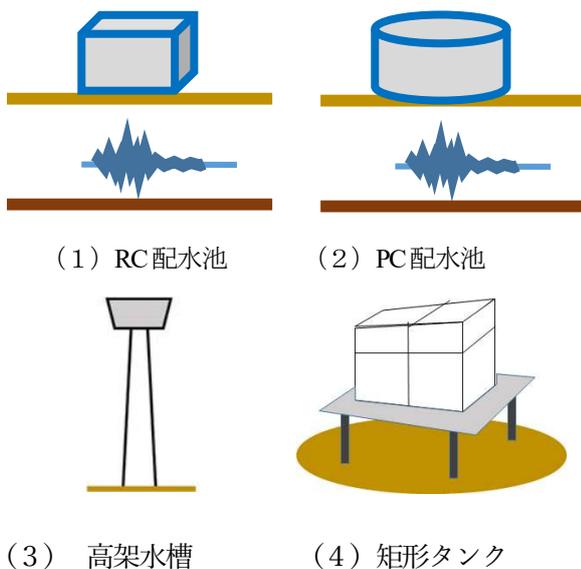


図-1 さまざまな地上式配水池

## 2. 現行耐震安全性能照査法の問題点

### (1) 動的解析と1自由度振動系

一般的な配水池は、図-1 に示すような構造物であり、その破壊モードもさまざまである。

現行設計指針に対する設計事例集<sup>9)</sup>では、2次元モデル化した配水池に対する動的解析による耐震安全性能照査法が例示されている。しかし、配水池が3次元構造物であることから、2次元モデルですべての構造物詳細を評価するには限界があり、今後はかならずしもこのモデルに固執する必要は無いと言える。

非対称性を多く持つ複雑な3次元構造物の場合、構造物の地震時応答も複雑であり、破壊点および破壊モード、破壊荷重を事前に予想することが難しい。この場合は、3次元モデルに対する地震応答解析が有効と判断されよう。

一方、箱型形状の配水池の場合、3次元構造物の面対称性から1自由度振動系にモデル化が可能である。対称面に沿って3次元モデル全体のPushover解析を行うことで、対称面方向の荷重が作用した場合の構造物の代表的な破壊点および破壊モード、破壊荷重を予測することが比較的容易となり、入力と破壊モードを一次元的に結び付けることで耐震性能照査を行うことができる。

動的解析を2次元モデルで解析する事例が一般的であるが、その精度は3次元解析に及ばない。しかし、3次元解析モデルを用いて直接3次元地震応答解析を多数回繰り返して、その破壊事象を全体的に把握するのは必ずしも容易ではない。

このような状況下で、3次元振動モデルを1自由度振動系に置換できるならば、解析計算時間を縮減するのに有効であろう。

### (2) 性能設計化動向

現行耐震安全性能照査法のひとつである水道施設耐震工法指針・解説は、レベル1信頼性設計法（荷重係数設計

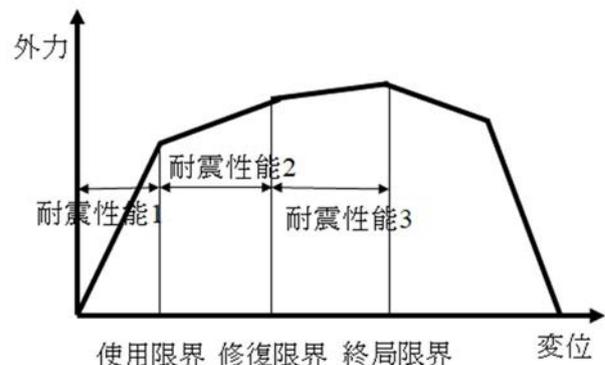


図-2 日本における限界状態モデル

法)に従って、設計変数の不確定性を考慮する設計手法を採用している。

レベル1信頼性設計法の問題点は、設計照査式の妥当性がCode Writerにしかわからず、設計者が自分の設計した対象物が結果的にどの程度の安全性を確保したのか不明なところにある。レベル2信頼性設計法(限界状態設計法)は破壊確率と連結可能な信頼性指標を導入することでこの課題を解決する手法であり、ISOもこの設計法を推奨している。

レベル2信頼性設計法の課題は、設計変数の確率統計特性をすべて統計諸量として収集しなければならない点に実務的な面倒さがあるが、線形照査式の場合は容易に安全性照査ができる。

### (3) 地震動と耐震性能の関係

設計地震動の大きさは、日本<sup>9)</sup>ではレベル1地震動、レベル2地震動という分類がなされているが、米国<sup>10)</sup>では再帰年数を基準にして、再帰年数72年の地震(MOE, Maximum Operational Earthquake), 再帰年数475年の地震(DBE, Design Based Earthquake), 再帰年数2475年の地震(MCE, Maximum Considered Earthquake)に分類されている。そして、MOEは使用限界、DBEは修復限界、MCEは終局限界に対応している。

日本の耐震設計基準・指針では耐震性能1,2,3がそれぞれ次のように定義される。

耐震性能1: 地震によって健全な機能を損なわない性能

耐震性能2: 地震によって小実損傷が軽微であって、地震後に必要とする修復が軽微なものにとどまり、機能に重大な影響を及ぼさない性能

耐震性能3: 地震によって生じる損傷が軽微であって、地震後に修復を必要とするが、機能に重大な影響を及ぼさない性能

耐震性能は図示すると図-2のように設定される。

米国のMOEは使用限界に対応しており、レベル1地震動と同等のものである。MCEは米国の終局限界に対応しており、レベル2地震動と対応するものである。

しかし、日本の指針では、ランクA1水道施設はレベル2地震動に対して耐震性能2を確保するように設計することを要請されている。それを照査する地震動は米国では再帰年数475年の設計地震(DBE)を用いて行うが、日本ではそれを再帰年数2475年相当のレベル2地震動を用いて行うことを要請している。同じ耐震性能照査に対して使用する地震動の再帰年数が違い過ぎる。WTOが主導する設計の世界的標準化からは、両国の設計水準の乖離が大きすぎ、両者の調整が必要なレベルと言わざるを得ない。

また、耐震性能3に対する照査は米国では設計地震動(MCE)を用いて行うことが要請されているが、日本ではランクA1構造物に対してその照査を要請されていない。

しかし、そもそも修復限界という概念は物理的な限界ではなく、修復の容易さを確保するものであり、安全性照査とは異なる概念である。したがって、レベル2地震動に対する安全性照査基準として耐震性能2を要請することに無理がある。本来は、レベル2地震動による応答値は終局限界に対する安全性余裕をより大きく確保するように要請するべきであろう。

### (4) 降伏加速度と経済性照査

日本の耐震設計法で使用されるレベル1地震動は地震危険度条件から決定されるものであり、構造物降伏水準はレベル1地震動よりも大きく設定されねばならない。しかし、経済性照査ではこのチェックがなされないため、最終結果としてレベル1地震動が降伏水準以下に収まっているかどうか不明となる。この点で、現行設計法で推奨されている経済性照査法は構造設計には不適格と言わざるを得ない。

## 3. 地上式配水池耐震安全性能照査法

### (1) 耐震安全性能照査フロー

配水池の耐震安全性能照査フローを図-3に示す。

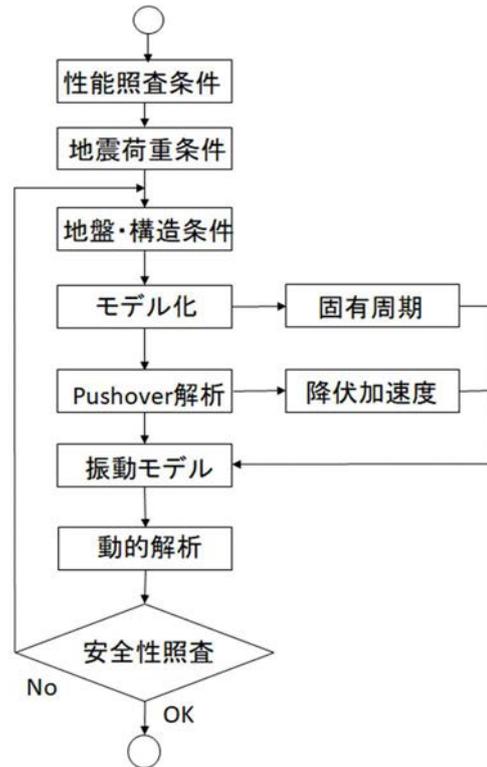


図-3 耐震安全性能照査フロー

この照査フローで設定される3条件（性能照査、地震荷重、地盤・構造条件）は以下に詳述する。モデル化は概略検討から詳細解析まで解析目的に応じた構造モデルが用意されるべきである。しかし、高精度な解析を目指して詳細なモデル化が提案されるが、実務的には簡易な構造モデルによる振動解析手法の要望が多いことから、本研究では簡易モデルによる照査手法を提案する。

#### a) 性能照査条件

降伏加速度は、図-2の使用限界の荷重側限界値（降伏荷重）を加速度単位で表現したものである。降伏加速度はレベル1地震動に対する安全性余裕を確保するために、活荷重、地震荷重の不確実性を考慮して設定される必要がある。

応答変位限界は、図-2の終局限界の変位側限界値である。応答変位限界はレベル2地震動に対する安全性余裕を確保するために、地震荷重の不確実性を考慮して設定される必要がある。

活荷重、地震荷重の不確実性に対する余裕代の設定方法は、簡易法から厳密解析までいくつか存在するが、Code writer から先験的に設定されるのが明解な設計品質を確保する上で実用的であろう。

#### b) 地震荷重条件

レベル1、レベル2地震動は図-2に示す使用限界、終局限界に対する非超過照査を行う前提で設定されている。この地震動を発生させる地震の発生確率はそれに対応する再帰年数（それぞれ72年および2475年）から算定できる。

震源で発生した地震動が到達した対象地点の工学的基盤位置での基盤加速度は距離減衰式で推定し、その予測誤差は推定式の誤差から評価することができる。

#### c) 地盤・構造条件

地盤および構造物の地震応答によってもたらされる不確実性は、最終的には設計加速度応答スペクトルの変動誤差に含まれている。

今日では図-1に示すような構造物は、FEM手法により的確な構造モデルを作成することができる。もし、解析コストを無視できるなら、引き続いて構造物非線形地震応答解析を進めることができる。

それにも関わらず、動的解析とは異なる簡便な地震応答解析法を模索する理由は何なのか？複雑な構造系については、複雑な地震応答挙動を忠実に考慮できる動的解析が適切な手法であるが、構造系の特徴から1自由度振動系としてモデル化できる構造物については、評価位置が適切に把握できれば、構造物の全体的な特性として、主要破壊モードに対する固有周期、降伏加速度、限界変位、1自由度振動系での抽出可否を確認することで、構造物の全体的な振動特性・構造性能を比較的容易に把握

表-1 評価位置の応答倍率

	曲げモード	剪断モード
頂版	$C_B^U$	$C_S^U$
底版	$C_B^B$	$C_S^B$
側壁	$C_B^S$	$C_S^S$
中柱	$C_B^C$	$C_S^C$

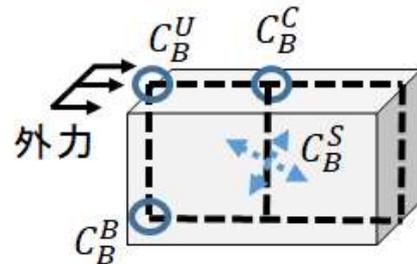


図-4 出力評価位置（曲げモード）

できる。

次に図-3の照査フローではPushover解析<sup>11)</sup>を行い、3次元構造物各部位の曲げモーメント  $M_B$ 、剪断力  $S$  を算定する。図-4に示すそれぞれの部位で頂版、底版、側壁、中柱での出力を求め、頂版に対する他部位の増減割合を表-1の形で算定する。また、変位・荷重曲線から構造物の降伏変位・荷重を設定する。

#### d) 高次元振動系（動的解析）と1自由度振動系

非対称の複雑な形状を持つ構造物は、地震応答により側壁面外座屈、柱座屈、bulging現象、地盤基礎構造物相互作用などの挙動を示すことがある。複雑な形状の構造物によるこれらの挙動は3次元モデルに対する動的解析により高精度の地震応答解析が期待できる。

一方、構造物の曲げ応答と剪断応答のみを検討し、座屈やbulging現象の影響を考慮しない場合は、簡易モデルでの検討も可能であろう。たとえば、配水池が面对称性から1自由度振動系としてモデル化できる場合は、構造物非線形応答解析に関して後述する簡便法を適用することができる。

### (2) 降伏加速度と限界変位

#### a) レベル1地震動と降伏加速度

地上式配水池が、固有周期  $T$  を持つ1自由度振動系であるとする。議論を簡単化するため、その非線形特性は完全バイリニア特性を示し、その降伏加速度および対応する降伏変位は、それぞれ  $A_y$ 、 $\delta_y$  とする。そして、入力地震動  $A_{max}^{L1}$ 、 $A_{max}^{L2}$  はそれぞれレベル1地震動およびレベル2地震動に対応する設計加速度スペクトル  $S_A^{L1}(T)$ 、 $S_A^{L2}(T)$  から次式で与えられるも

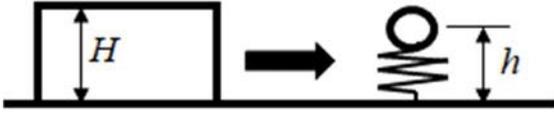


図-5 3次元構造物の1自由度振動系モデル化

のとする。

$$A_{max}^{L1} = A_{max}^{MOE} = C_j^i \frac{H}{h} S_A^{L1}(T) \quad (1)$$

$$A_{max}^{L2} = A_{max}^{MCE} = C_j^i \frac{H}{h} S_A^{L2}(T) \quad (2)$$

ここで、 $i=U,B,S,C$ および $j=B,S$ 。さらに、 $h$ は構造物の重心位置、 $H$ はモデル構造物の頂版高さ、 $\delta_{max}^{L2}$ はレベル2地震動による構造物重心点での最大応答変位、 $\hat{\delta}_{max}^{L2}$ はレベル2地震動による構造物頂版での最大応答変位であり、次式で与えられる。

$$\hat{\delta}_{max}^{L2} = \frac{H}{h} \delta_{max}^{L2} \quad (3)$$

このとき、構造物頂版の加速度および変位から降伏加速度および限界変位は下記の不等式を満足する必要がある。

$$A_{max}^{L1} < A_y \quad (4)$$

$$\hat{\delta}_{max}^{L2} < \delta_{cr} \quad (5)$$

次に、レベル1地震動に対する荷重重畳（死荷重 $D$ 、活荷重 $L$ 、地震荷重 $E$ ）の場合を考える。

$$\begin{aligned} I &= D + L + E \\ &= \mu_D + (1 + \beta_L \delta_L) \mu_L + (1 + \beta_E \delta_E) \mu_E \\ &= \mu_D + \phi_L \mu_L + \phi_E \mu_E \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \beta_L &= \alpha_L \beta_{cr}, & \phi_L &= 1 + \beta_L \delta_L \\ \beta_E &= \alpha_E \beta_E, & \phi_E &= 1 + \beta_E \delta_E \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 $\alpha_X, \delta_X, \beta_{cr}$ はそれぞれ変数 $X$ に対する特性係数、変動係数、基準安全性指である。また、地震荷重は次式で与えられる。

$$\mu_E = E[A_{max}^{L1}] \quad (8)$$

このとき、重畳荷重に対する設計条件は次式となる。

$$\frac{I}{M} \leq A_y \quad (9)$$

現行耐震設計指針では、レベル1地震動を従来法ある

いは経済性照査法で設定することを規定している。設計条件としてレベル1地震動が与えられた場合には、設定可能なのは降伏加速度である。

降伏加速度は、超過確率を用いると次式で与えることができる。

$$A_y = E[A_{max}^{L1}] + \Phi^{-1}(1 - p_f^{L1}) \sigma_{A_{max}^{L1}} \quad (10)$$

ここで、 $p_f^{L1}$ は $A_y$ に対する超過確率、 $\Phi$ は標準正規分布関数、 $E[X]$ はランダム変数 $X$ の期待値、 $\sigma_X$ はその標準偏差。

## b) レベル2地震動と限界変位

レベル2地震動による耐震性能照査は、非線形応答変位が限界変位を超過する確率を用いて、式(11)で評価する。

$$\hat{\delta}_{max}^{L2} = \frac{H}{h} \{ E[\delta_{max}^{L2}] + \Phi^{-1}(1 - p_f^{L2}) \sigma_{\delta_{max}^{L2}} \} \quad (11)$$

ただし、 $p_f^{L2}$ は $\hat{\delta}_{cr}$ に対する超過確率。

## 4. レベル2地震動に対する非線形地震応答

地上式配水池が1自由度振動系としてモデル化できる場合について図-6を用いて検討する。

### (1) 1自由度振動系の非線形地震応答変位

いま、水道施設耐震工法指針に基づいて、構造特性係数 $C_S$ および塑性率 $\mu$ を以下の式で定義する。

$$C_S = \frac{A_y}{A_{max}^{L2}}, \quad \mu = \frac{\delta_{max}^{L2}}{\delta_y} \quad (12)$$

ここで、 $\delta_y$ は降伏変位であり、 $A_y$ は降伏加速度である。

エネルギー保存則に従うと、両者は次の関係で結ばれている。

$$C_S = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \quad (13)$$

以上の準備が整うと、レベル2地震動に対する最大応答変位 $\delta_{max}^{L2}$ および降伏加速度 $A_y$ を以下の手順で求めることができる。

$$A_y = C_S \cdot A_{max}^{L2} \quad (14)$$

$$\delta_{max}^{L2} = \mu \cdot \delta_y \quad (15)$$

ここで、

$$\delta_y = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 A_y \quad (16)$$

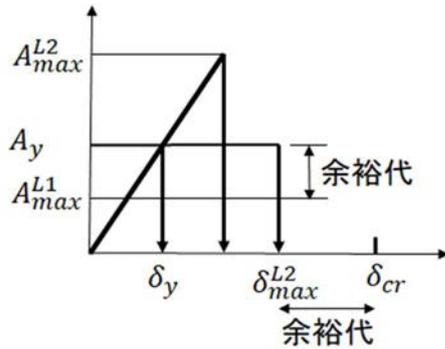


図6 エネルギー保存則による構造物の弾塑性関係

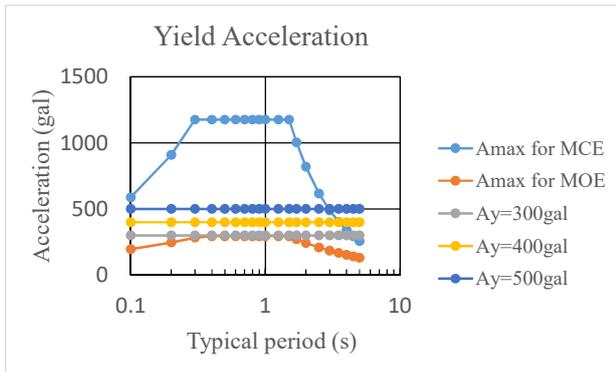


図7 入力加速度と降伏加速度の関係 (III種地盤)

ところで、1自由度振動系の非線形応答変位と固有周期の関係について、柴田<sup>12)</sup>は短周期の領域ではエネルギー一定則が長周期で変位一定則が比較的有効であること指摘している。この指摘を踏えて固有周期1秒以上で変位一定則を適用すると、以下のように定式化できる。

$$A_y = \frac{1}{\mu} A_{max}^{L2} \quad (17)$$

$$\delta_{max}^{L2} = \mu \cdot \delta_y \quad (18)$$

以上を総合して、固有周期に対する降伏加速度の関係を示したのが図7である。

このとき、要請される設計条件はレベル1地震動に対する最大加速度は降伏加速度を上回ってはならないし、レベル2地震動による最大応答変位 $\delta_{max}^{L2}$ は漏洩限界変位 $\delta_c$ を超過してはならない。したがって、図7に示すよう

に降伏加速度 $A_y$ はレベル1地震動、レベル2地震動の間に位置しなければならないことになる。

固有周期1秒前後で適用式を変えたHybrid方式を適用した場合の最大応答変位( $\delta_{max}^{L2}$ )と設計応答加速度スペクトルに適合する地震動を入力加速度とした動的地震応答解析に基づく最大応答変位( $u_{max}$ )とを比較した結果を図8に示す。

固有周期が1.0秒以下では、最大応答変位が両者でよい一致を示していることが判る。また、降伏加速度300galの場合には、固有周期全般に亘って良い一致を示している。一方、降伏加速度400gal, 500galでは、とくに固有周期1.0秒以上では両者の一致度はかならずしも高くない。このことから、1秒以下の固有周期が卓越する地上式配水池では、上述の解析式は非線形応答変位予測において動的解析と等しい精度で十分に適用できることが確認できた。

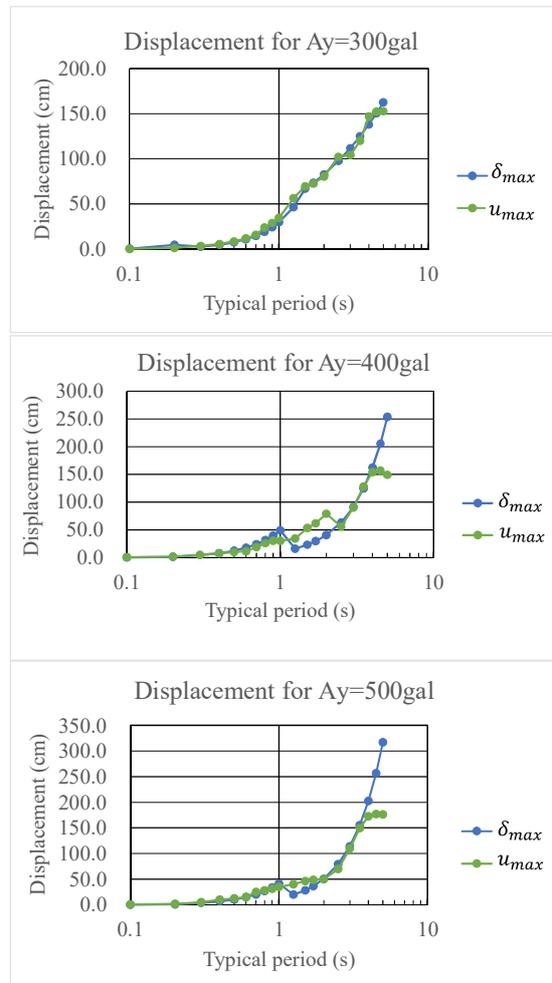


図8 変位予測式の適用性検証

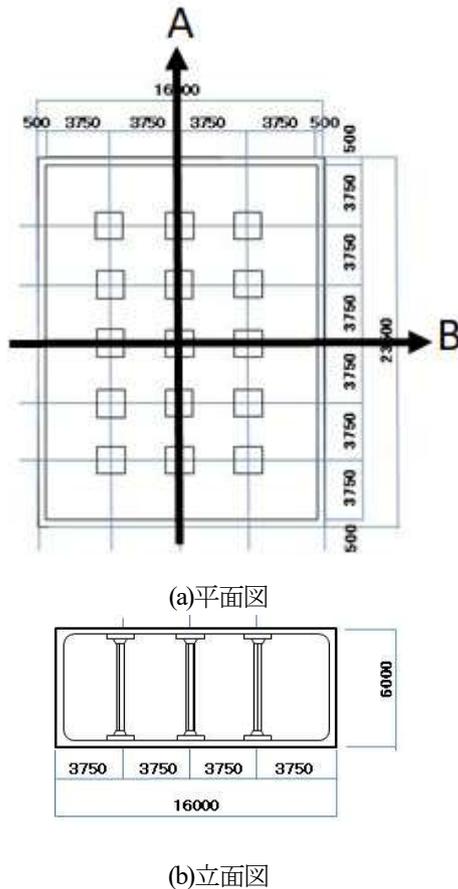


図-9 地上式配水池のモデル

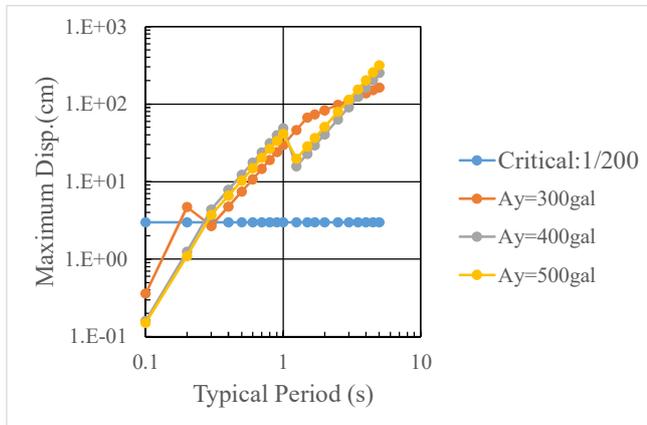


図-10 最大応答変位とクラック発生限界変位  
(III種地震, レベル2地震動)

## 5. 限界状態の設定

### (1) 漏洩限界変位

図-9は地上式配水池の平面図と側面図である。この構造物は、内部に3x5列の柱を配置している。この構造物は図中に示す2方向の対称軸A, Bを持ち、それぞれの方向に二次元断面を切り出すことができる。実際、設計事例集の2次元モデルもそのような手続きで切り出され

たものと推定される。

その一断面について、いま配水池壁の漏洩開始ひずみ角度が $\theta_{cr}$ で与えられるとする。この値は漏洩という破壊現象を示す限界値であり、本質的に不確実事象を象徴する不確定量である。このとき、超過確率 $p_f^{L2}$ を満足する漏洩限界変位は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \delta_{cr} &= H \cdot \theta_{cr}^* \\ &= H \cdot \left\{ \theta_{cr} - \Phi^{-1} \left( 1 - p_f^{L2} \right) \frac{\sigma_{\delta_{max}}^{L2}}{h} \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 $H$ は壁高、 $h$ は重心高さ、 $\theta_{cr}$ は漏洩開始開始ひずみ角度。

### (2) 限界応答値の推定

コンクリート部材の表面ひび割れ幅の許容値<sup>13)</sup>は一般的に0.2mm以下とされているのを参考にして、弾性限界ひずみは1/2500程度のひずみとした。また、終局限界ひずみは、降伏変位の約10倍と仮定して1/200とした。

### (3) 地震応答変位と限界変位の関係

図-10は、最大応答変位とクラック発生限界変位の関係を示したものである。同図によると、固有周期0.2秒以上の配水池では、最大変位応答値がクラック発生限界変位3cm (1/200相当)より大きく、漏洩破壊の可能性のあることがわかる。

3種類の降伏加速度 $A_y$ に対して、壁天端の最大変位 $\delta_{max}^{L2}$ をそれぞれ算定する。一方、壁天端の限界変位 $\delta_{cr}$ は、限界角度 $\theta_{cr}^*$ 、壁高 $H$ により算定する。

固有周期0.2秒以下では、壁天端最大変位は限界変位の3cm以下のため漏洩しない。一方、固有周期0.2秒以上の構造物では壁天端変位はいずれもクラック開始変位を上回るため漏洩が発生すると推測される。

したがって、配水池の固有周期が0.1秒以下の場合、壁天端変位は1cm以下となり、クラック開始変位以下でありクラック発生の懸念はなくなる。

既存配水池の固有周期が0.1秒以下となっている場合が多いのは、その領域での壁天端変位がクラック開始変位より小さいことを踏まえた設計がなされてきたものと判断される。

## 6. 構造物のモデル化

### (1) Pushover解析

3次元構造物としての地上式配水池に対するPushover解析<sup>14)</sup>は、それぞれの軸方向に水平方向の地震時慣性力を全構造部材に作用させて行うことができる。ただし、議論を単純化するため動水圧の影響は無視することにする。

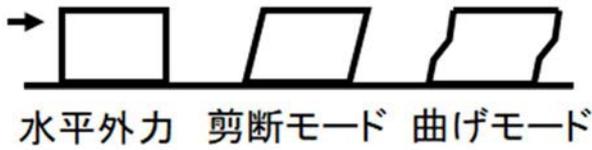


図-11 主要モードとしての剪断モードと曲げモード

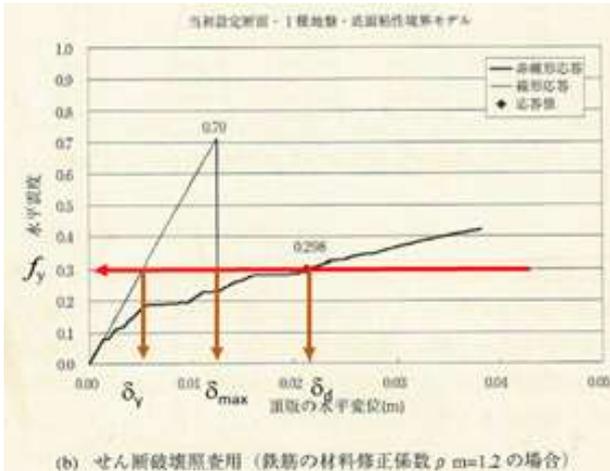


図-12 地上式配水池2次元モデルに対する Pushover 解析結果

構造物の上端部に水平方向に静的荷重を載荷すると、主要モードとして、図-11に示すような剪断モードと曲げモードの応答が生成される。それぞれのモードについて Pushover 解析により表-1に対応する構造物各部位の応答値を算定することができる。

図-12は現行設計指針に従った設計事例集の解析結果を転載、加筆したものである。3次元モデルから2次元断面を取り出し、地震時慣性力を作用させた場合の解析結果の一例である。横軸は頂版水平変位、縦軸は水平荷重を表示している。同図には赤矢印線が書き込まれているが、これはエネルギー一定則による非線形挙動との関係を見るために加筆したものである。

図-12から図中赤矢印線により、降伏加速度、降伏変位、剛性勾配などを求めることができ、すなわち、Pushover 解析の結果は完全なバイリニア曲線を示していないが、この曲線から以下の手順に従ってバイリニア曲線の特徴値を決定する。まず、入力加速度の最大値はレベル2地震動の設計地震動として0.7g（設計事例集の設計条件）と設定されているので、この加速度  $A_{max}$  に対応する最大変位  $\delta_{max}$  を設定する。エネルギー一定則に従えば、対応する非線形変位は  $\delta_i$  として求められる。ここから、この構造物の降伏加速度  $A_y$  は0.298gとなる。それに対応する降伏変位は  $\delta_y$  で求められる。以上より、1自由度振動系の固有周期を次式のように取り出すことができる。

1自由度振動系の復元力

$$K = \frac{A_y}{\delta_y} \quad (20)$$

1自由度振動系の固有周期

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (21)$$

ここで、 $M$ は構造物質量である。

## 7. 既存配水池の耐震改修計画への適用

### (1) 地上式配水池の破壊確率

配水池頂版の漏洩クラックは、頂版の最大変位が限界変位を超過した時発生する。したがって、その漏洩クラック発生確率は次式で定義できる。

$$p_f^{System} = P[\delta_{cr} - \delta_{max}^{L2} < 0 | EQ2] \cdot P_{EQ2} \quad (22)$$

ここで、 $P_{EQ2}$ は地震発生確率であり、 $P[EQ2]$ はレベル2地震動(EQ2)による応答加速度が与えられた条件下で、配水池壁天端最大変位が限界変位を上回る確率を意味している。したがって、上式では、 $\delta_{cr}$ 、 $\delta_{max}^{L2}$ はいずれも確率変数であり、その統計量は平均値( $E[\dots]$ )および変動係数(cov)により与えられるものとする。確率変数はそれぞれ特有の確率分布関数に従うが、ここでは、簡単のために、両確率変数は正規分布に従うものとする。

### (2) 応答変位の変動係数評価

図-13に示す設計応答加速度の上下値は、想定される応答加速度の平均値から上下方向に一定の変動幅を設定したものと解釈できる。そこで、設計応答加速度の上限値と下限値の差が標準偏差の2倍であると仮定すると、

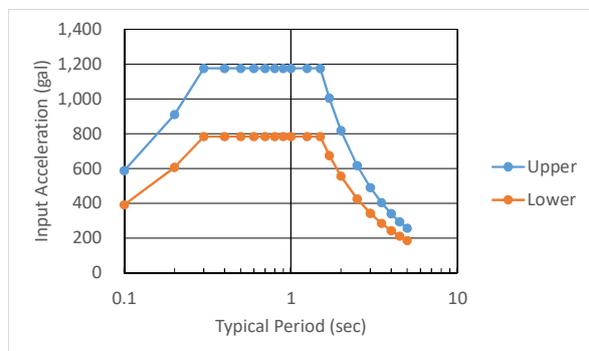


図-13 設計応答加速度の上下値  
(III種地盤、レベル2地震動)

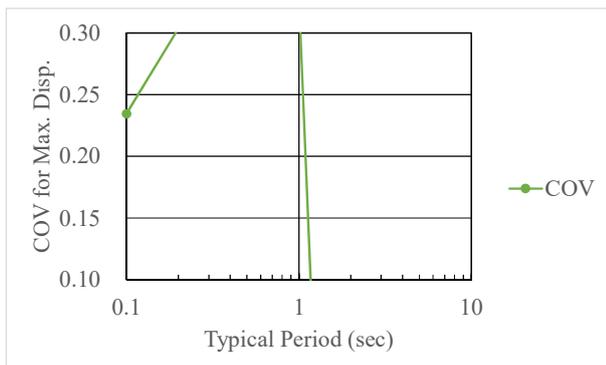


図-14 壁天端での最大応答変位に関する変動係数

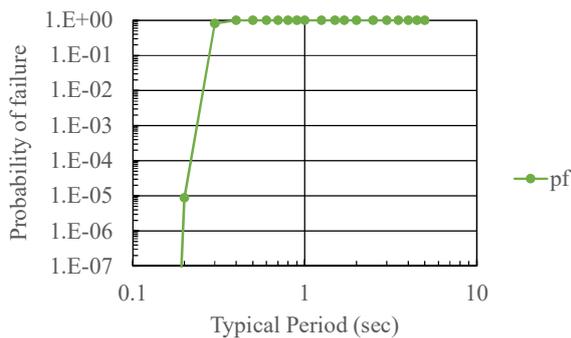


図-15 レベル2地震動に対する地上式配水池の破壊確率

壁天端最大変位の変動係数は次式で表される。

$$\text{cov of } \delta_{max} = \frac{\delta_U - \delta_L}{\delta_U + \delta_L} \quad (23)$$

ここで、 $\delta_U$ 、 $\delta_L$ はそれぞれ最大変位の上下限值である。

図-14 は、壁天端最大応答変位の変動係数と固有周期の関係を示す。同図によれば、固有周期1秒以降で変動係数がゼロになっているが、これは降伏加速度を固定して変位一定則を適用したため、上下界入力加速度に対応するそれぞれの最大応答変位が一致するために生じたものである。壁面底板部に漏洩クラックが発生する限界剪断角度(radian)  $\theta_{cr}$  の統計量を次式の平均値と変動係数で与えられると仮定する。

$$E[\hat{\delta}_{cr}] = 3 \text{ cm}, \text{cov of } \delta_{cr} = 5\% \quad (24)$$

このとき、地上式配水池の漏洩開始確率は図-15 のように求めることができる。

第 III 種地盤に設置された地上式配水池は、その固有周期が 0.3 秒以上の場合は、レベル 2 地震動を受けた時、壁に漏水クラックが発生する確率が高いことを示している。逆に、0.3 秒以下の固有周期の場合は、相対的に発生確率が小さいことを示している。

## 8. 結論

地上式配水池の耐震安全性照査法について、信頼性設計理論に基づいて性能設計法の定式化を行い、下記の成果を得た。

- (1) 地上式配水池の耐震安全性照査法についてレベル 2 信頼性設計法に基づいた定式化を行った。
- (2) 1 自由度振動系にモデル化できる場合は、動的解析と同精度の耐震安全性照査手法を提案した。
- (3) 一般的な 3 次元地上式配水池は必ずしも軸対称形状をしているに限らないが、軸対称形状を持つ地上式配水池について 1 自由度振動系へのモデル化手法を提示した。

**謝辞:**本研究は、(一財)災害科学研究所の支援により実施できたものであり、その研究会に参加した学識経験者、水道事業者、民間企業の研究会メンバーの議論を踏まえて達成できた成果である。ここに、研究所および研究会参加メンバー各位に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・同解説，日本水道協会，1976.
- 2) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・同解説，日本水道協会，1996.
- 3) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・同解説，日本水道協会，2009.
- 4) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・同解説設計事例集，日本水道協会，2009.
- 5) 土木学会技術推進機構・ISO 対応特別委員会：土木技術と国際標準・認証制度，土木学会，2008.
- 6) ISO：ISO2394-1998, General principles on reliability for structures, 1998.
- 7) 構造工学委員会：信頼性設計法に基づく土木構造物の性能照査ガイドライン，土木学会，2018. 社団法人日本鋼構造協会，2001..
- 8) Ang, A.H.-S & Wilson, H. Tang：Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume I- Basic Principles, Wiley, 1976.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，日本道路協会，2002.
- 10) Chamey, hFinley A. Seismic Loads, Guide to the seismic load provisions of ASCE 7-05, ASCE Press, 2007.
- 11) Chopra, Anil K.：Dynamics of Structures, Prentice Hall, 2012.
- 12) 柴田明憲：最新耐震構造解析，森北出版，1981.
- 13) 日本建築学会：容器構造設計指針同解説，日本建築

- 14) 中川信夫：池状構造物の立体モデルへの適用、橋梁  
&都市PROJECT，橋梁編纂委員会刊，2006. 4.

## PERFORMANCE-BASED SEISMIC SAFETY ASSESSMENT METHOD FOR ABOVE-GROUND RESERVOIRS

Takeshi KOIKE, Taku WATANABE, Maahiro HAMANO, Nobuhiro HASEGAWA,  
Hiromiki ONUMA, Dang Ji and Nobuo NAKAGAWA

Many above-ground water reservoirs constructed more than 50 years ago are deteriorated and always threathend for seismic risk. There are not any conventional method to assess the seismic safety of above-ground water reservoirs. Proposed method includes a new performance-based seismic assessment based on Level 2 reliablity formulation which is appropriate with world standard rules requested from WTO. A numerical sample is given how to assess the seismic safety of the reservoir which is modeled to be one-degree-of-freedom vibration system.to be simplified from the symmetry of a 3D model.