

配水池の危機耐性に関する解析事例

○エイト日本技術開発 東京支社 加藤 初美
エイト日本技術開発 東京支社 岩田 克司

「水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版」では、要求性能の「安全性」で定義した事象を超える地震動・津波・風水害などにより安全性が損なわれた場合に、水道施設が危機的な状態に至る可能性を小さくする性能である「危機耐性」を考慮する必要がある。

本報告では配水池の危機耐性に関する検討として、2次元非線形骨組みモデルを用いたプッシュオーバー解析により躯体の損傷過程を把握し、想定外の地震動に対して最低限の給水機能を確保するための補強費用の算出を行った事例を紹介する。

Key Words : 配水池, 危機耐性, プッシュオーバー解析, 損傷過程の把握

1. はじめに

「水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版¹⁾」では、要求性能の「安全性」で定義した事象を超える地震動・津波・風水害などにより安全性が損なわれた場合に、水道施設が危機的な状態に至る可能性を小さくする性能である「危機耐性」を考慮する必要がある。

札幌市水道局が管理する羊ヶ丘配水池は、被災時の飲料水を確保するため「緊急貯水施設」として位置付けられており、被災した場合の影響度が大きい重要施設と考えられる。

したがって、レベル 2 地震動に対する「安全性」の確保に加えて、その安全性が損なわれたとしても給水が長期間停止する等の危機的な状況に陥ることを避ける必要がある。

本検討では、2次元非線形骨組みモデルを用いたプッシュオーバー解析により対象施設の損傷過程を把握し、想定外の地震動に対する耐震性能照査を踏まえて補強対策を検討した。

2. 施設概要

対象施設は図-1 に示すように札幌市豊平区の丘陵地（標高 170m 程度）に位置し、3つの配水池を有した水道施設である。本検討では、平成 17 年に竣工した No.1 配水池を対象とした。

対象施設の断面形状と地層構成の関係を図-2 に示す。No.1 配水池は鉄筋コンクリート造の壁式構造（W46.5m×D33.4m×H4.8m：池容量 4,346m³）であり、内部に導流壁が設置されている。また、岩盤上に設置された直接基礎形式である。

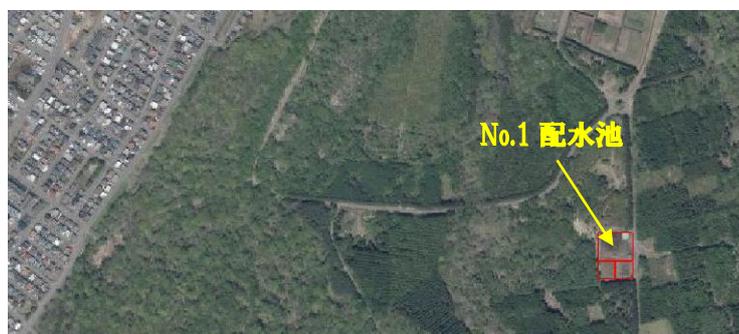


図-1 対象施設の位置図 (Copyright © NTT インフラネット)

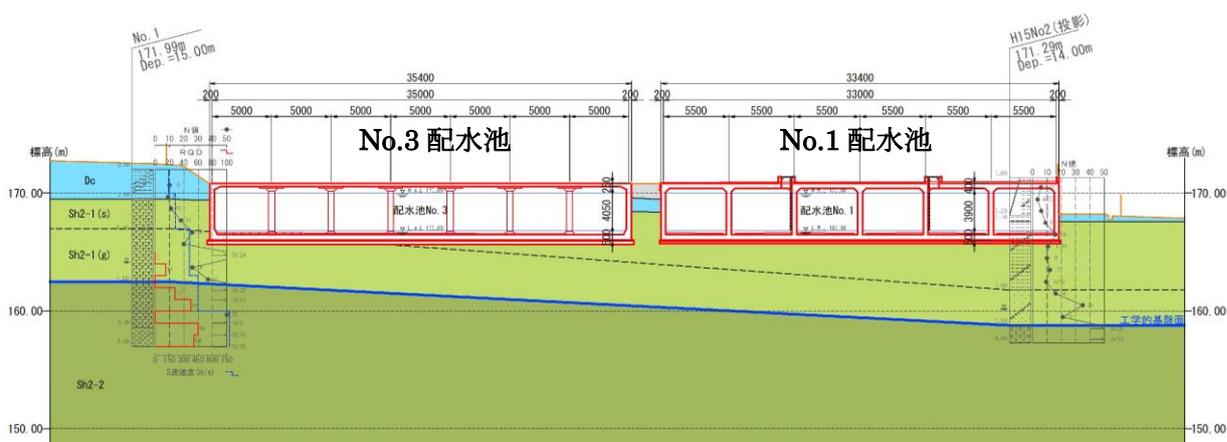


図-2 対象施設の断面形状と地層構成

3. 検討方針

3.1 危機耐性として想定される災害リスク

対象施設は丘陵地に位置しており、住宅地から 500m 程度の距離があるため配水池の倒壊等が近隣住宅地へ及ぼす影響は無い。また、周囲の河川からは約 20m 高い位置にあるため洪水等による浸水の可能性は低い。さらに、札幌市周辺の津波による浸水想定は石狩湾沿岸部であるため、津波被害の可能性は無い。

以上のことから、危機耐性として想定される災害リスクとしては、想定外の地震動による構造物被害と、それに伴う給水機能の喪失であると考えた。

3.2 解析方針

本検討では、水平震度を漸増する荷重増分法によるプッシュオーバー解析（静的解析）を行い、図-3 に示す限界状態 1（鉄筋降伏点）や限界状態 2（最大耐荷力点）を超過し、安全限界を超える限界状態 3（曲げ終局点）までの損傷過程を把握した。また、設計地震動が作用した時の耐震性能を照査し、補強諸元の検討を行った。

ここで、鉄筋降伏点や曲げ終局点は後述する鉄筋コンクリートの非線形モデルに基づき判定を行う。また、最大耐荷力点については「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編²⁾」を参考に耐震性能 2 に対する許容塑性率に相当する曲率（安全係数 $\alpha=1.5$ ）により判定することとした。

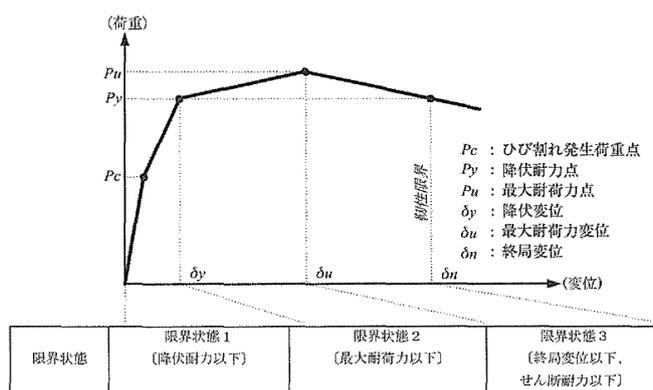


図-3 水道耐震指針に示される限界状態と損傷状態

3.3 解析モデル

解析モデル図を図-4 に、荷重図を図-5 に示す。配水池躯体は 2 次元非線形梁要素でモデル化し、鉄筋コンクリートの曲げモーメントと曲率の非線形特性 ($M-\phi$) を、ひび割れ点 C、降伏点 Y、終局点 U を結ぶトリリニアモデル型として考慮した。

周辺地盤は非線形地盤ばねでモデル化することとし、地震の作用方向を解析モデルの左側から右側とした場合は、側面の地盤ばねは解析モデルの右側側面に設置し、左側側面には地震時土圧を作用させた。また、側面には水平方向とせん断方向、躯体底面には鉛直方向およびせん断方向の地盤ばねを設置し、受働土圧強度や極限支持力等に相当する上限値を設定³⁾した。なお、地盤と躯体の剥離を考慮するために、地盤ばねと躯体梁要素の間にはジョイント要素を設置³⁾した。

対象施設は妻壁や導流壁が配置されているため、2次元モデルの作成に当たっては躯体の 3次元形状を適切に考慮する必要がある。このため、別途 3次元 FEM モデルによる解析を行った結果に基づき、解析モデルには躯体の 3次元効果を考慮するための仮想板要素を設置している。

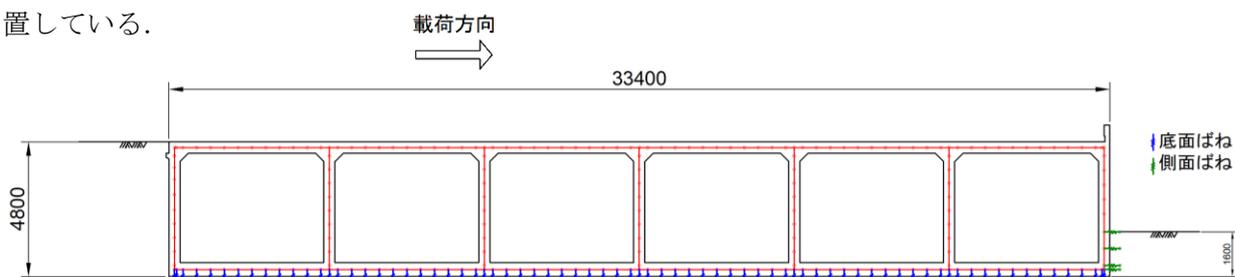


図-4 解析モデル図

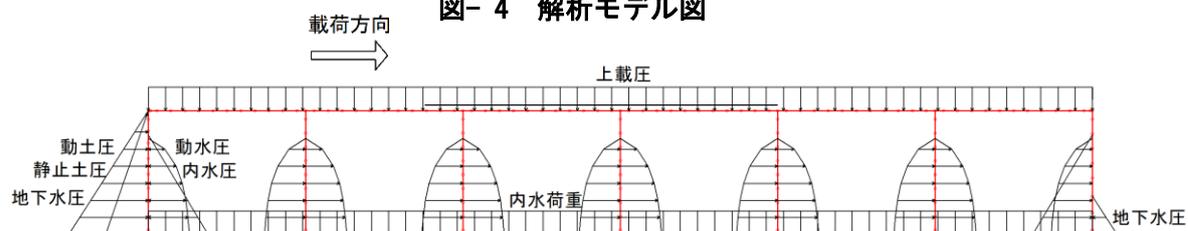


図-5 荷重図 (常時+地震時)

3.4 設計地震動

レベル 2 設計地震動は、対象地点の耐震設計上の基盤面が $V_s=600\text{m/s}$ 程度であったことから、札幌市第 4 次地震被害想定 (令和 3 年度公表) で設定された工学的基盤面波形をそのまま用いることとした。また、別途実施した配水池と地盤を一体で考慮した FEM モデルによる固有値解析から、主要モードの固有周期は 0.21 秒~0.25 秒程度であった。この固有周期帯と工学的基盤波形の加速度応答スペクトルを重ね合わせた結果から、レベル 2 地震動の設計水平震度を $kh=2.0$ と設定した。また、危機耐性の検討においては、想定レベルを超える地震動としてレベル 2 地震動の 1.75 倍となる設計水平震度 $kh=3.5$ を設定した。

4. 検討結果

4.1 躯体の損傷状態の確認

プッシュオーバー解析（静的解析）から得られた躯体の荷重-変位曲線を図-6 に示す。この図の横軸は頂版中央部の水平変位 δ (mm)，縦軸は作用させた設計水平震度 kh をプロットしている。また，静的解析においては，最初に常時荷重を解析モデルに作用させ，変位をゼロクリアさせた状態から地震時荷重を漸増させている。

図-7 には躯体の曲げおよびせん断に対する損傷図を示す。この図は各限界状態や地震動作用時の躯体の各部材の損傷状態を色別で表示したものである。

躯体の損傷過程を確認したところ， $kh=1.23$ において左から 2 番目の柱下端で降伏が生じ，限界状態 1 となる。また， $kh=2.12$ において左から 2 番目の柱下端で最大耐力相当に達するため限界状態 2 となる。さらに荷重を作用させると， $kh=2.51$ において多くの柱下端で曲げ終局点に達するため限界状態 3 となる。

最大耐力点相当の限界状態 2 以降は，本来は耐力が落ちるため，水平震度は低下する。しかし，本解析モデルの非線形特性（ $M-\phi$ 関係）には剛性低下を考慮できていないため，最大耐力点以降も水平震度が大きくなっている。このような現象を表現するためには，躯体を非線形

FEM 要素等でモデル化し，変位制御法でプッシュオーバー解析を行う必要があり，実務レベルでは一般的ではないことに留意が必要である。

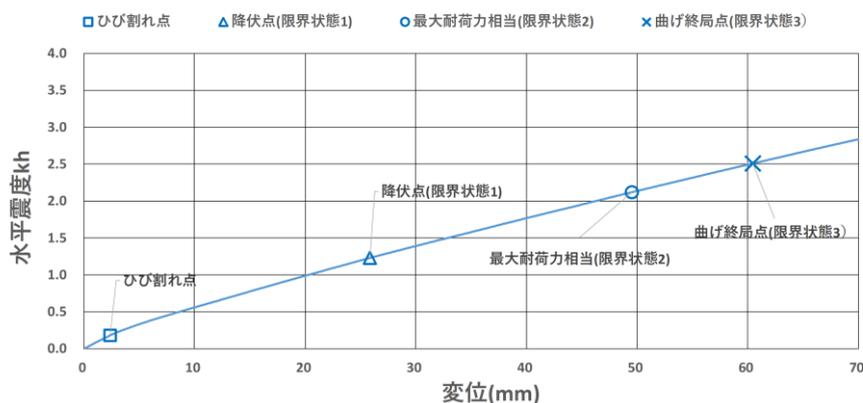


図-6 躯体の荷重変位 (P- δ) 曲線

4.2 地震時非線形応答の比較

構造物の非線形応答はプッシュオーバー解析で得られた構造物の荷重-変位曲線から，エネルギー一定側を用いて評価する。

想定レベル 2 地震動である水平震度 $kh=2.0$ 相当および，危機耐性で考慮する水平震度である $kh=3.5$ 相当について，非線形応答を算出した結果を図-8 に示す。

想定レベル 2 地震動が作用すると非線形応答は頂版変位で 31.5mm となるが，曲率については最大耐力点（限界状態 2）を超えないため曲げ補強は不要となる。ただし，柱下端や側壁において発生せん断力がせん断耐力を超過しているためせん断補強が必要となる。

一方で，危機耐性で考慮する水平震度が作用すると，非線形応答は頂版変位で 58.2mm となり，最大耐力点（限界状態 2）を超えるため曲げ補強が必要となる。また，柱下端や側壁に加えて一部の底版においても発生せん断力はせん断耐力を超過する。

ただし、曲げ終局点（限界状態 3）には達していないことから、構造物を構成する多くの部材は塑性化するが、塑性変形吸収能力は喪失せずに構造物全体として鉛直荷重を支持できる状態であると考えられる。したがって、鉄筋挿入等によるせん断補強を行えば想定地震の 1.75 倍程度の地震動に対しては構造物自体は直ちに崩壊しないため、最低限の給水機能は確保されるものと考えられる。

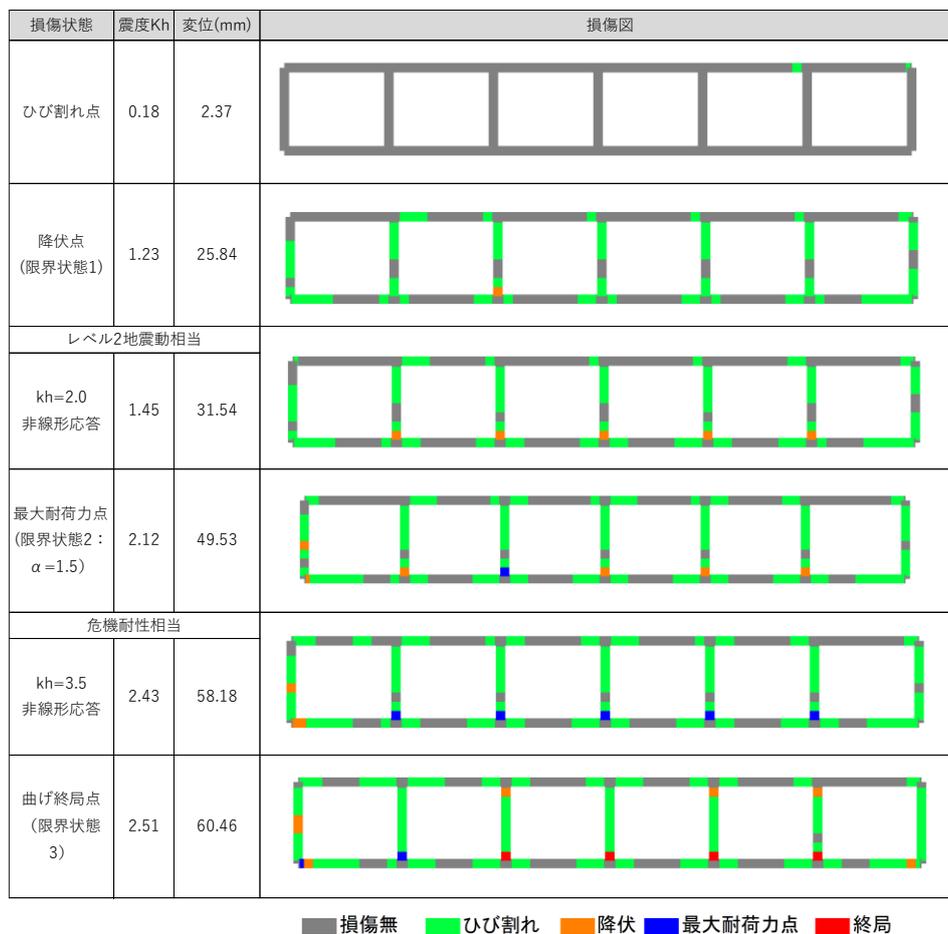


図-7 躯体の損傷図

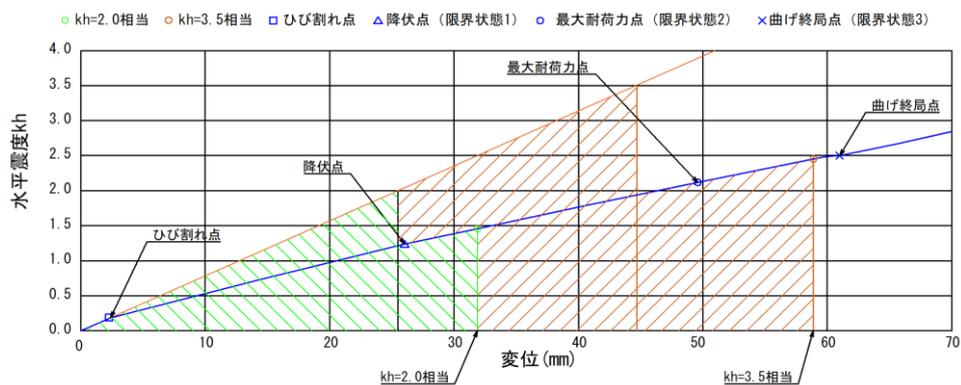


図-8 非線形応答の算出

4.3 概算工事費の比較

対象施設においてせん断耐力が NG となった箇所を図-9 に示す。また、NG 箇所に対してあと施工鉄筋挿入工法によるせん断補強を行った場合の概算工事費を算出した結果を表-1 に示す。

想定レベル 2 地震動 ($kh=2.0$) に対してせん断補強を行うと 1 億 1 千万円程度の工事費が必要となる。一方で、危機耐性に対する対策として、想定外の地震動 ($kh=3.5$) に対して躯体を崩壊させないためには、せん断補強の費用として 2 億 4 千万円程度が必要となる。

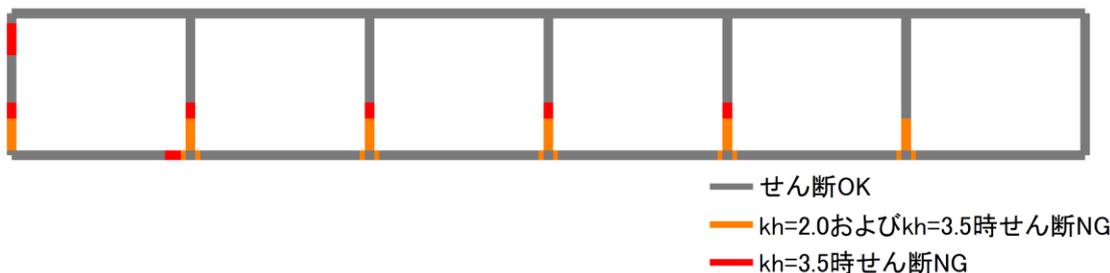


図-9 せん断耐力が NG となった箇所

表-1 耐震補強に必要な概算工事費

種別	解析手法	地震動	耐震補強	概算工事費
危機耐性の検討	静的非線形解析	kh=2.0 相当 (想定レベル 2 地震)	せん断補強 (鉄筋挿入工法)	1 億 1 千万円
		kh=3.5 相当 (想定 1.75 倍)	せん断補強 (鉄筋挿入工法)	2 億 4 千万円

5. おわりに

危機耐性の検討として、想定外の地震動に対する損傷状態の評価と対策費用の算出を行った。既設の構造物に対して想定外の被災シナリオの対応を行うことは多額の費用が必要となるため、投資効果等を勘案して総合的に判断する必要がある。一方で、新設の構造物であれば、事前にせん断補強筋を多く配置することは費用面でも比較的容易である。

インフラ老朽化が進む中で強靱で持続可能な上下水道を構築するためには、経営広域化の流れの中で配水池の集約化や更新が必要となるケースが増加すると考えられる。更新設計においては、想定外の災害に備えるために危機耐性という視点が重要になると考えられる。また、本検討では 2 次元非線形骨組み解析を用いた検討を行ったが、解析モデルの設定法やプッシュオーバー解析の手法にも改良の余地があると考えられる。このため、危機耐性に関する今後の検討事例の蓄積が望まれる。

【参考文献】

- 1) 水道施設耐震工法指針・解説－2022 年版－，日本水道協会，2022 年 6 月
- 2) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，日本道路協会，平成 14 年 3 月
- 3) 大型のボックスカルバートの耐震性照査手法に関する研究，国総研資料第 1247 号,2023.4