

東日本大震災による配水池の被害検証を踏まえた合理的な地震対策の検討

日本上下水道設計（株） 成田 健太郎、大嶽 公康

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震において、水道施設は管路を中心に多数の被害を受け、数ヶ月にわたり断水が継続した地域もあった。その一方で、配水池等の池状構造物では、液状化地域を除き、施設機能に影響を与える被害がほとんど生じなかった¹⁾。

震源域に近いX市のA配水池においても、ひび割れ等の軽微な損傷を受けたものの、施設機能の低下に至る損傷は生じなかった。一方、本施設は、静的線形解析（震度法）を用いた耐震診断（以下、既往診断）において、レベル2地震動に対して耐震性能が不足すると判定されており、被害状況に乖離が生じていた。さらに、本地域では直下型の大規模地震の発生が想定されており、地震対策の実施は喫緊の課題であった。

想定地震に対して合理的な地震対策を行うためには、実被害と既往診断との乖離原因を明らかにした上で、耐震性能を適切に評価することが重要である。本稿では、東北地方太平洋沖地震に対する配水池の被害検証を解析的に実施するとともに、その結果を踏まえた合理的な地震対策を実施した事例を報告する。

2. 検討フロー

本検討は、図1に示す手順で実施した。はじめに、対象施設の被害調査を実施して、被害状況を把握した。次に、被害状況の評価が可能な解析モデルを作成し、被災当時の地震波を入力して、施設の地震時挙動を再現した。再現結果と実被害とが乖離する場合は、モデル条件のキャリブレーションを行うことで再現性を高め、解析モデルの精度を向上させた。このモデルを用いて想定地震に対する耐震性能を評価するとともに、再現解析から推定された被害原因を踏まえて、地震対策の検討を行った。

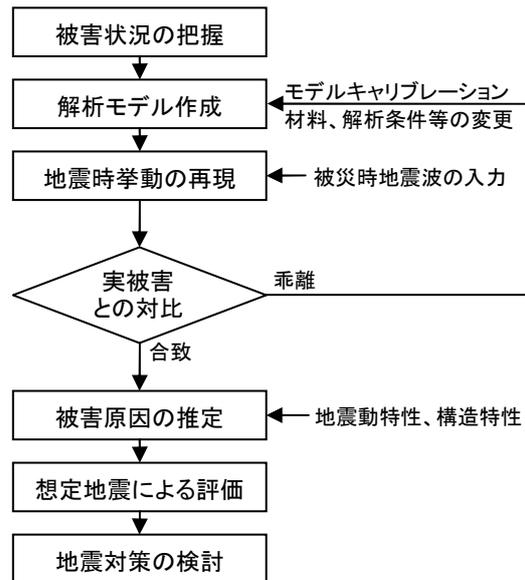


図1 検討フロー

3. 対象施設と被害状況

3.1 対象施設の構造的特徴

対象施設は、東北地方に位置するX市のA配水池である。対象施設は昭和40年代に建設された有効容量75,000m³ (=7,500m³×10池)のRC造りであり、地下式の柱梁・フラットスラブ複

合構造である（図2）。基礎形式は直接基礎である。躯体はEXP.Jで全65ブロックに分割され、池内に耐震壁が設置されておらず、構造偏心を有した形状である。

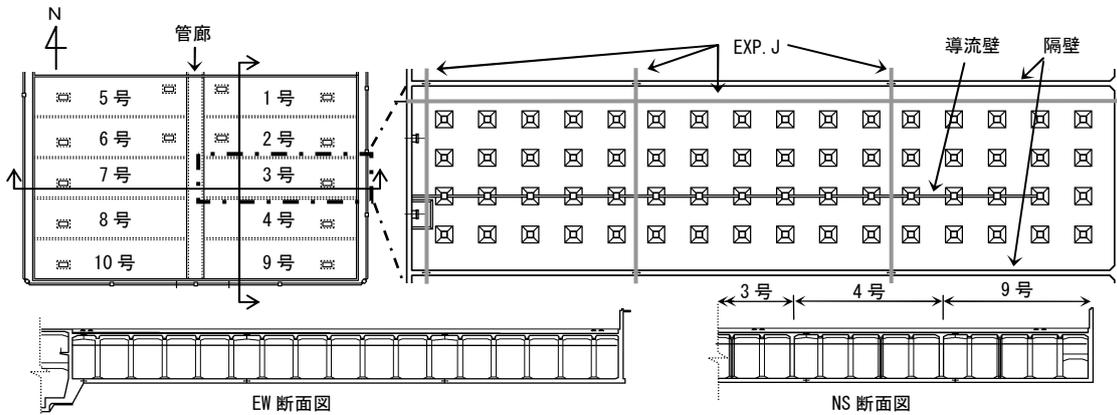


図2 配水池構造図

2.2 対象施設の地盤条件

施設周辺は丘陵地を造成して整地されており、対象施設は切土上に築造されている。EW断面の地層構成を図3に示すが、表層厚は5m程度で粘性土、礫質土が主体であり、工学的基盤面は凝灰岩層の上面と判断した。地盤の固有周期 T_G は1/4波長則から0.1秒（I種地盤）と算定された。また、地層構成から、液状化の生じる可能性は極めて低いものと判断した。なお、図示していないが、NS断面でも同様の地層構成となっている。

旧地形では施設の西から東に向かって谷地形となっており、場内道路の構築を目的として、施設東側には函塊工が設置されている。そのため、配水池の左右で土圧条件が異なる状況にある。

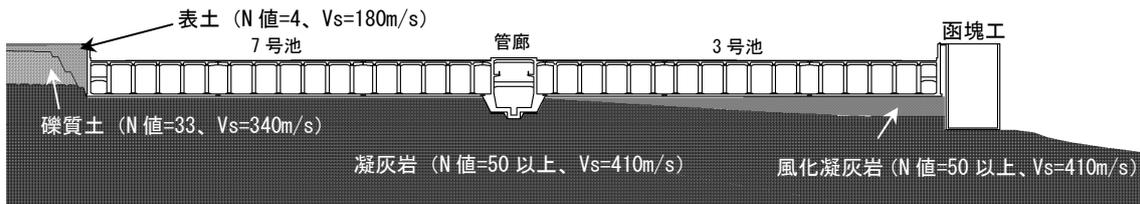


図3 地層構成（EW断面）

2.3 地震被害の概要

(1) 地震動の特徴

当該地点は2011年東北地方太平洋沖地震の本震において震度5強の揺れに見舞われた。図4に当該地点における地表面加速度波形を示す。当該地点には強震計が設置されていないため、この波形は周辺の地震観測点で測定された地震波を距離減衰により補正したものである。地表面最大加速度は 709cm/s^2 （NS）、最大速度は 34cm/s （EW）であり、設計水平震度に換算すると0.72に相当し、水道施設耐震工法指針・解説²⁾のI種地盤のレベル2地

震動の地表面設計水平震度 0.70 と同程度であった。

(2) 被害状況

震災当時、A 配水池は地震直後の初期点検において異常が認められなかったことから、運転停止することなく配水が継続されていた。そのため、池内の詳細調査は、3号池及び7号池を対象として、施設運用に影響がなくなった2011年12月に実施した。調査は、目視により行い、ひび割れやコンクリート剥落等の損傷状況を確認するとともに、損傷図として記録した(図5)。

対象施設は、EXP.Jの端部コンクリートの剥落や一部の柱脚部のひび割れなどの軽微な損傷を受けたものの、漏水等の施設機能に影響を与えるような被害は生じていなかった。また、損傷は7号池に集中し、3号池では地震による損傷が確認されなかった。

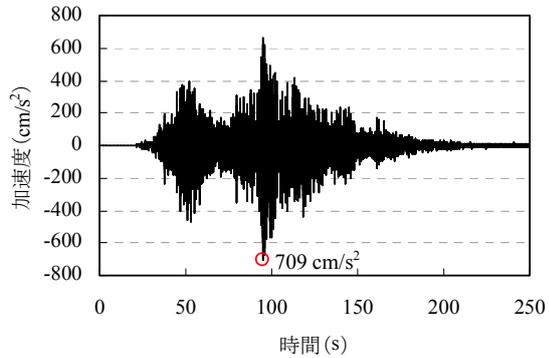


図4 当該地点における東北地方太平洋沖地震の地表面加速度波形 (NS)

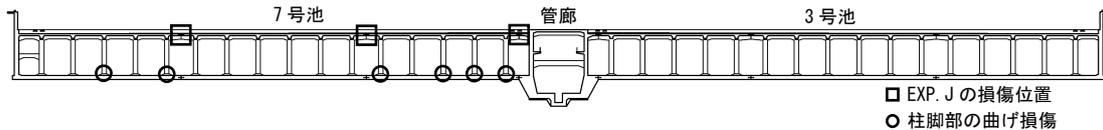


図5 地震被害と推測された躯体損傷の位置

4. 動的非線形解析による地震時挙動の再現

4.1 解析方法及びモデル

実被害と震度法を用いた既往診断結果との乖離状況を踏まえ、解析方法には地震動の動的挙動を時々刻々とシミュレートでき、RC部材の損傷過程の再現が可能な動的非線形解析法を用いた。

解析モデルは、周辺地盤との動的相互作用や地震動の地下逸散減衰を適切に考慮するため、二次元FEMモデルにより構造物と地盤とを一体で表現した(図6)。EXP.Jは、衝突による被害を再現するため、非線形ばね要素を用いて伸縮を表現し、20mm縮むと接触するモデルとした。

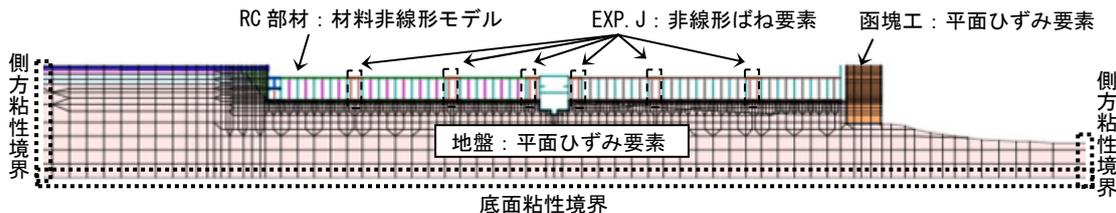


図6 解析モデル (構造物: 非線形骨組モデル、地盤: FEMモデル)

4.2 再現解析の結果

再現解析による各部材の損傷状態と EXP.J の伸縮量の時刻歴応答を図7に示す。柱・梁の端部や側壁の隅角部では、大きな曲げモーメントが発生し、一部の柱脚部では鉄筋の降伏に至る結果となった。実被害では柱脚部にひび割れが生じており、損傷状態を概ね再現することができた。

EXP.J では、底版においてほとんど伸縮が生じないが、頂版において20mm以上の伸縮が生じ、EXP.J 端部の衝突を再現できた(図中のマイナス変位が20mmで衝突)。

表1には、実被害と再現解析結果及び既往診断結果との比較を示す。再現解析では実被害とはほぼ整合する結果であったが、既往診断では入力地震動の最大加速度が同程度であったにもかかわらず、実被害と乖離する結果であった。

表1 実被害と解析結果の比較

項目	実被害	再現解析	既往診断
解析方法	—	動的 非線形解析	静的 線形解析
解析モデル	—	二次元FEM	二次元骨組み
入力地震動の最大加速度	709cm/s ²	709cm/s ²	686cm/s ² (水平震度換算)
躯体	頂版	無被害	部材端部等で 曲げ破壊
	底版	無被害	
	側壁	無被害	
	柱	柱脚部で ひび割れ	
EXP.J	頂版目地の衝突	頂版目地の衝突	評価不可
再現性	—	○	×

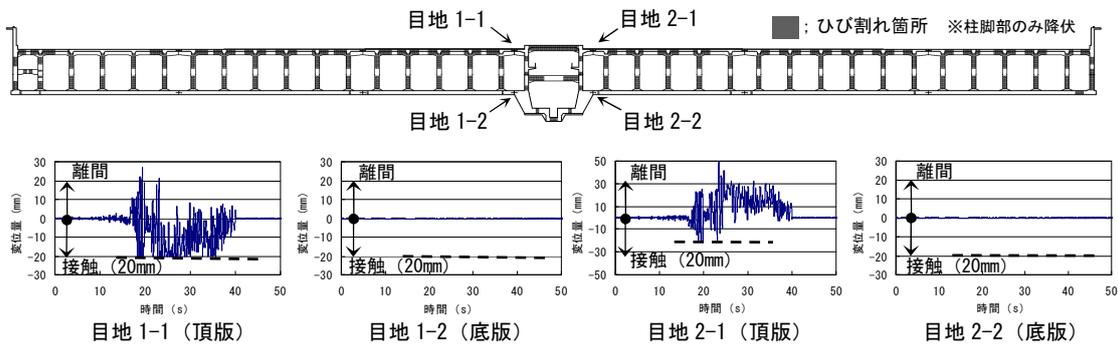


図7 解析による各部材の曲げ損傷状態と EXP.J の伸縮量

4.3 被害状況と地震動特性との関係

(1) 周期特性の影響

表1に示したとおり、既往診断においては、再現解析と同程度の入力地震動を作用させたにもかかわらず、実被害との乖離が生じていた。ここでは東北地方太平洋沖地震の周期特性に着目して、この原因を評価した。

図8には2011年東北地方太平洋沖地震における当該地点の地震動と、構造物の被害が多く発生した1995年兵庫県南部地震における観測波のスペクトル特性を示す。当該地点の地震動の加速度応答スペクトルは、0.1~0.2秒付近の短周期域で兵庫県南部地震を大幅に上回っており、短周期成分が卓越した地震動であることを示している。一方で、構造物の被害との相関が高いとされる1~2秒付近の速度応答は、兵庫県南部地震(200~300cm/s)に

比べ 20%程度 (40cm/s) であった。このことから、当該地点の地震動は、短周期の加速度が大きいものの、構造物に被害を与えるような特性を有していなかったものと推察された。

この仮説を検証するため、再現解析モデルへ JMA 神戸 NS 波を入力した解析を行った。結果は図示しないが、JMA 神戸を用いた解析では再現解析に比べて部材の損傷が深刻になることを確認している。このことは、東日本大震災で被害が小さかったものの、地震動の特性によっては、本施設でも大きな被害が生じる可能性があることを示唆している。

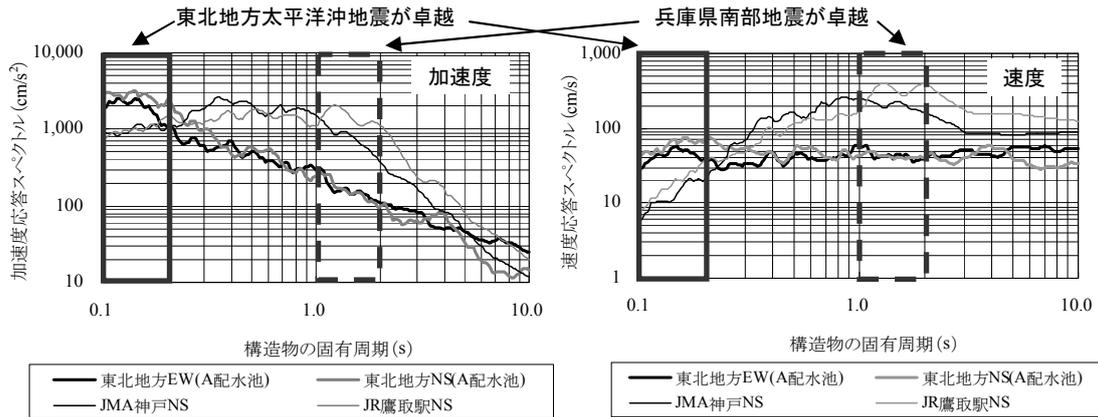


図8 当該地点における東北地方太平洋沖地震と既往地震の周期特性

(2) 既往診断の評価

既往診断で用いた震度法では、加速度に基づく設計水平震度を外力として作用させることから、前述のような地震動の速度は考慮されない。そのため、同程度の地表面加速度に対して、実構造物及び再現解析の被害が軽微となる一方で、既往診断では大きな被害が生じる結果になったと推定された。

5. 設計地震動に対する地震対策の検討

5.1 設計地震動

設計地震動は、地域防災計画で想定されており、構造物への影響が大きい B 断層を震源とする直下型地震 (以下、B 断層直下型地震) とした。設計地震動の地表面最大加速度は、951cm/s² (NS)、最大速度は 87cm/s (NS) である (図9)。

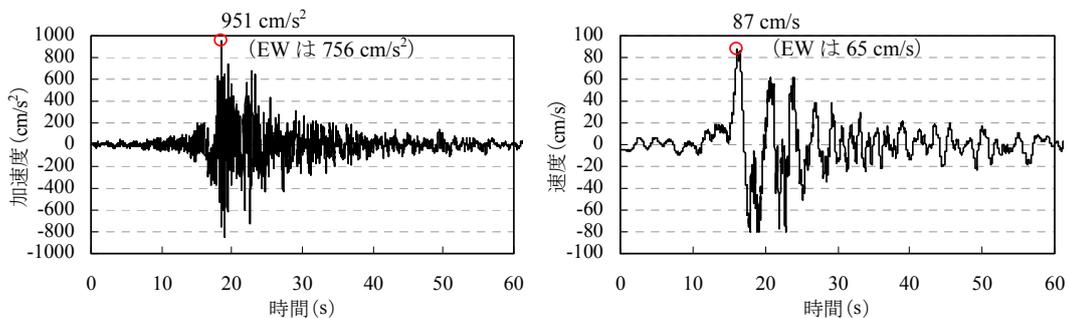


図9 設計地震動の地表面加速度波形と速度波形

5.2 耐震診断結果

耐震診断では、柱の下端における曲げ破壊、側壁・梁・柱におけるせん断破壊及びEXP.Jにおける目開き・衝突が生じ、所要の耐震性能が確保できず、東北地方太平洋沖地震に比べ、被害は大きくなるものと想定された。

耐震性が低い結果であった要因には、地震動の強さと、EXP.Jによって壁部材が平面的に偏心して設置されていることによる構造的な脆弱性が挙げられる。

図10に、東北地方太平洋沖地震とB断層直下型地震の応答スペクトルを示す。B断層直下型地震の1~2秒付近における応答加速度(最大700cm/s²)及び応答速度(最大150cm/s)は、いずれも東北地方太平洋沖地震を上回っていた。このことから、地震動の強さは東北地方太平洋沖地震に比べB断層直下型地震が大きく、より大きな外力が作用したことから、再現解析よりも損傷が大きくなったものと推察された。

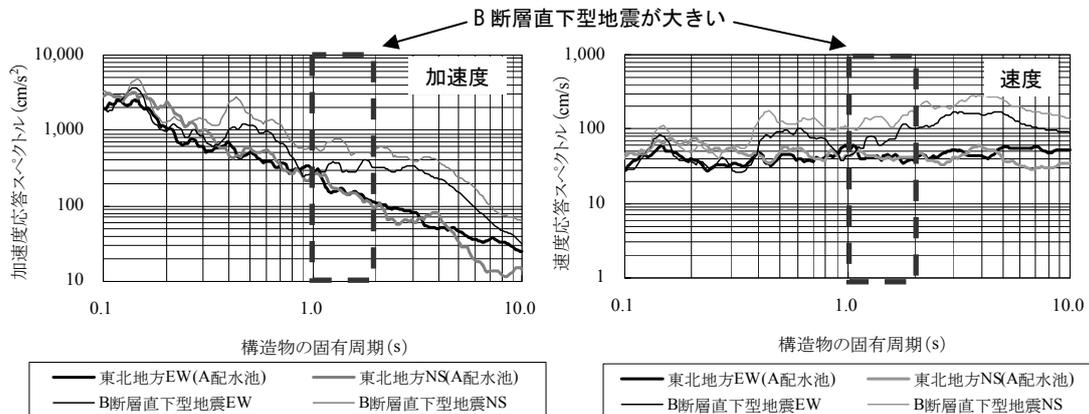


図10 東北地方太平洋沖地震と想定地震の周期特性の比較

5.3 補強対策

被害検証や耐震診断結果を踏まえ、補強工法を検討した。比較検討の結果、補強方法には、せん断剛性の向上を図ることで偏心やそれに伴うねじれを解消し、断面力の発生を低減させるとともに、EXP.Jにおける伸縮を抑制することができる耐震壁設置工法を採用した(表2)。なお、表2には参考として既往診断の補強対策も示している。補強費用は、既往診断に比べ大幅に抑制され、60%の工事費削減が図られた。

表2 本検討と既往診断との対策方法の比較

項目	本検討(動的解析)		既往診断(静的解析)	
補強概要	耐震壁設置	180枚	柱増打ち	800本
	導流壁増打ち	150枚	梁炭素繊維	1800本
			壁増打ち	4700m ²
			底版増打ち	17600m ²
経済性	費用比率0.4 (○)		費用比率1.0 (×)	

6. おわりに

本稿では、東北地方太平洋沖地震を経験した配水池を対象に、被害検証を踏まえた地震対策の事例を報告した。本検討で得られた知見を以下に示す。

(1) 東北地方太平洋沖地震を経験した施設の耐震性評価

東北地方太平洋沖地震を経験した施設では、当該地震で無被害だったとしても、周期特性が異なる地震を受ければ、被害が生じる可能性があることを示した。その要因として、東北地方太平洋沖地震は、周期 1~2 秒付近の速度応答が小さく、兵庫県南部地震に比べ地震動が弱かった可能性が指摘される。地震を経験して無被害であった施設でも、直下型地震では異なる被害が発生する可能性があり、想定される地震に対して、適切な耐震性能の評価及び地震対策の検討を行う必要がある。

(2) 合理的な耐震計算法の選択

従来用いられてきた震度法では、地震動の特性を十分反映できない可能性がある。したがって、構造物の耐震性能を適切に評価するためには、動的解析法等の高度な解析手法の適用が推奨される。動的解析に用いる設計地震動の選定では、地震動の周期特性として加速度でなく速度の大きさに着目するとともに、特性が異なる複数の地震波を用いることが重要である。

(3) EXP.J で分割された構造物の耐震性評価

EXP.J で分割され、構造偏心が大きい構造物は、柱や側壁下端、EXP.J において被害が生じる可能性が高いことを示した。構造偏心の評価に当たっては、構造物の形状や特性に応じ、三次元モデル等を適用することも検討する必要がある。

参考文献

- 1) 厚生労働省：平成 23 年東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書、2011 年
- 2) (社) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説、2009 年