静的非線形解析による配水池の合理的耐震補強設計

－破壊過程の可視化に基づく補強範囲の最適化－

株式会社建設コンサルタントサニー

概　要

令和６年能登半島地震では、耐震化未実施の基幹施設等の被害により広範囲の断水が発生し、復旧も長期化した。これを受け国は、配水池等を上下水道システムの「急所施設」と位置付け、耐震化を推進している。本報の減圧水槽は、既往耐震診断（線形解析）で補強が必要と判定された配水施設であるが、本検討では、想定地震動を用いたプッシュオーバー解析（静的非線形解析）を行って損傷の進展過程を追跡することで、付帯施設の終局を起点とする施設全体の破壊メカニズムを把握した。最終的に補強範囲を本体の損傷部位に限定し、合理的な耐震補強を実現した事例を報告する。



設計条件

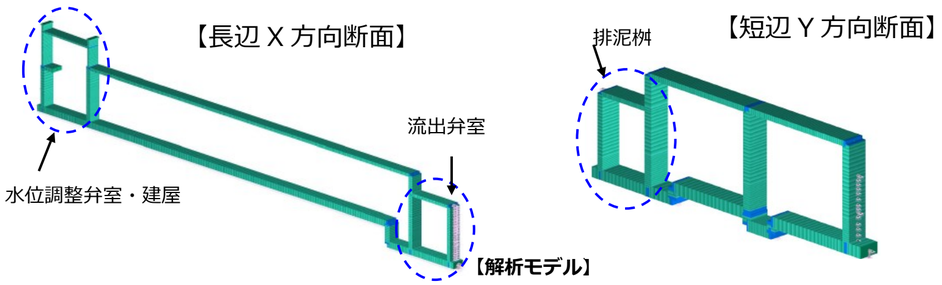
■**対象施設形状：**半地下式配水施設（有効容量 1,300m³、33.8m×5.5m×3.5m×2 池）

■**材　　料：**コンクリート：21 MPa（既設）
鉄筋　　：SD295 （既設）

■**部材モデル：**レベル 1 は弾性梁要素、レベル 2 は M-φ 要素（トリリニア型）

■**地 盤 ば ね：**底版下面に鉛直ばねとせん断ばね、側壁に水平ばねとせん断ばね

■**解析モデル：**減圧水槽本体だけでなく、水位調整弁室・建屋、流出弁室、排泥桝等の付帯施設も一体で組み込み、構造全体の損傷の進展過程を追跡。



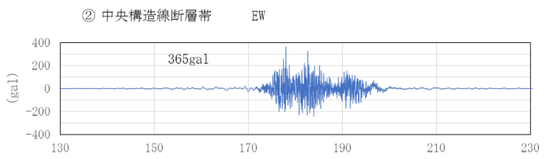
【解析モデル】

■**基 本 方 針：**重要度ランク A1 の配水施設として、レベル 1 地震動に対しては使用性（限界状態 1）、レベル 2 地震動に対しては復旧性（限界状態 2）と安全性（限界状態 3）を確保する。

■**設計地震動：**kh1＝0.14（2009 年版指針、 I 種地盤、地域別補正係数 Cz＝0.90）
kh2＝0.38（大分県地震被害想定調査 H30、中央構造線断層帯 EW 成分、
地表面最大加速度 365gal）

■**照 査 方 法：**レベル 1 地震時：許容応力度法
レベル 2 地震時：限界状態設計法　曲げ照査、せん断照査

■**地 盤 種 別：**I 種地盤



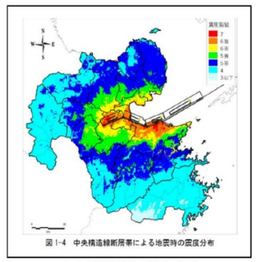


図 1-4　中央構造線断層帯による地震時の震度分布

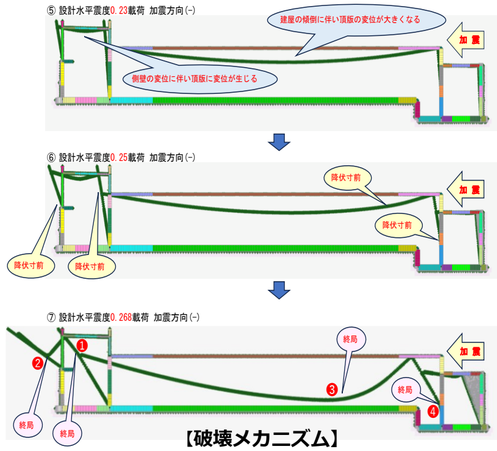
① 中央構造線断層帯による地震

耐震性能照査

■**破壊メカニズム（長辺 X 断面）**

設計水平震度 0.23 付近：変位が発生
0.25 付近：建屋部材が降伏寸前
0.27 付近：❶❷建屋部材が終局
❸本体頂板,❹流出弁室側壁が終局

建屋部材は降伏とほぼ同時に終局
断面寸法と配筋に起因



【破壊メカニズム】

■**既設耐震性能結果**

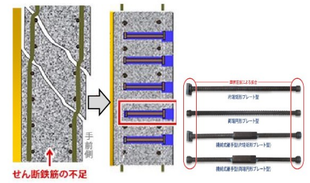
レベル 1・レベル 2 地震動ともに減圧水槽本体の一部で補強が必要となったが、プッシュオーバー解析により水槽本体が傾倒する破壊メカニズムを可視化し、損傷の範囲と順番を詳細に把握することができた。既往診断で補強が必要とされた底版はすべて照査を満足した。

■**補強設計**

補強対象は、貯水機能を担い復旧が困難な減圧水槽本体に限定した。付帯施設は損傷しても漏水による二次被害のおそれがなく、復旧も容易なため補強対象外とした。補強工法は施工条件を踏まえ、部位ごとに適用性と経済性を比較して選定した。

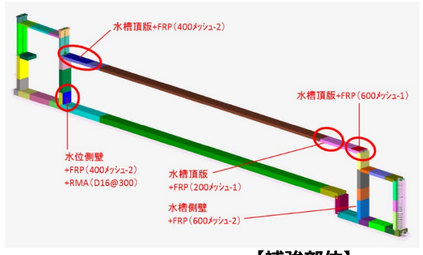
■補強部位：頂版（曲げ）、側壁（曲げ・せん断）、隔壁（せん断）の損傷部位。

■採用工法：曲げ補強　：炭素繊維シート接着工法
せん断補強：後施工型せん断補強鉄筋工法

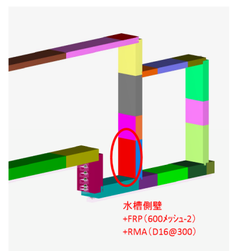


■**補強後の照査結果：**

本体の全部材で照査を満足した。
（レベル 2 地震時の照査値比率：曲げ 0.03～0.44、せん断 0.57～0.85）。



【補強部位】



(4) 07-L2満水時左方向(−) kh=0.38

07-満水時 加震方向左(−) kh=0.38	L2地震時【M-φ要素】							
	終局曲率(μ1/m)				せん断耐力(kN)			
	応答曲率φ	終局曲率φu	比率	判定	必要せん断耐力 γi・Vd	せん断耐力 Vyd	比率	判定
01水位底版	88641	334957	0.265	OK	87.23	103.93	0.84	OK
02水槽底版	−81031	−334315	0.242	OK	49.62	103.72	0.48	OK
03ピット壁	−89	−334756	0.000	OK	−62.53	−107.60	0.58	OK
04ピット底版	1111	334051	0.003	OK	50.26	103.93	0.48	OK
05流出底版	2913	334466	0.009	OK	−65.31	−103.93	0.63	OK
06左側壁(※)	194	338112	0.001	OK	34.15	90.88	0.38	OK
07階段スラブ	−66	−332968	0.000	OK	5.99	73.70	0.08	OK
08水位側壁+FRP+RMA	5559	12630	0.440	OK	−81.99	−96.90	0.85	OK
09水槽側壁+FRP+RMA	−5779	−54874	0.105	OK	50.76	96.90	0.52	OK
10右側壁(※)	−93445	−336876	0.277	OK	108.03	90.88	1.19	NG
11水槽頂版+FRP	−6418	−21217	0.303	OK	22.46	62.92	0.36	OK
12流出頂版(※)	−294811	−332713	0.883	OK	29.55	64.05	0.46	OK
13建屋左壁(※)	20351021	333947	60.941	NG	−9.68	−41.06	0.24	OK
14建屋右壁(※)	28111326	333162	84.377	NG	−10.63	−41.06	0.26	OK
15建屋頂版(※)	1335	330248	0.004	OK	9.35	34.47	0.27	OK

※本体構造以外の部材では照査結果にNGが発生しても本体構造のNGとは判断しない。

【レベル 2 地震時照査結果】

まとめ

- 既往の静的線形耐震検討で補強が必要と判定された配水池に対し、M-φ要素を用いたプッシュオーバー解析を適用し、レベル 1・レベル 2 地震動に対する非線形耐震性能を照査した。
- 付帯施設は復旧も比較的容易なため、補強範囲を減圧水槽本体の損傷部位に限定した。
- プッシュオーバー解析により水槽本体が傾倒する破壊メカニズムを可視化し、損傷する順番に補強を行うことで、既往診断で補強が必要とされた底版を含め、多くの部材で補強が不要と判明した。
- 本手法により、従来の線形解析では補強対象となっていた施工困難な部位の補強を回避できた。工事費は従来の約 90 百万円から、付帯施設の復旧費を含む約 70 百万円となり、約 2 割（約 20 百万円）削減できた。また、有効容量への影響もほとんどない。
- 配水池は上下水道システムの「急所施設」であり、耐震化が急務である。本手法による補強範囲の合理化は、限られた予算での耐震化促進に寄与し、同規模の池状構造物への展開も期待される。