

池状構造物の 3 次元効果を考慮した耐震設計事例

(株)三水コンサルタント ○時田 大
北村 拓也

本事例では A 事業者が過年度に実施した耐震診断調査業務委託の成果などを使用し、既往解析モデル（耐震診断）などの業務内容を踏まえ、地震動を変更して再度耐震診断を行った。X 配水池は、1 池で構成されており、運用を停止して耐震補強を行うことができないため、耐震補強対策を最小限にできるよう 2 次元モデルにおける 3 次元効果の効率的かつ合理的なモデル化を行った。耐震性評価の結果、本施設においては現況状態で耐震性を満足することが確認された。ここにその検討事例を示す。

Key Words : 池状構造物、静的 2 次元非線形解析、3 次元効果

1. はじめに

2011 年の東北地方太平洋沖地震、2014 年の熊本地震を筆頭に、多くの地震発生により、新たに観測された地震動や被害事例が蓄積され、最新の知見を取り込んだ「水道施設耐震工法指針・解説」が 2022 年に改訂された。

対象となる X 配水池（1 池構成）は関東地区に位置し、これまで平成 23 年、平成 25 年、平成 27 年に耐震診断調査業務委託が実施されている。いずれの業務委託の診断結果においても、地震時においては耐震性を満足しておらず、補強対策が必要と結論付けられている。本事例では、改訂された「水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版」に準拠し、最新の設計地震動を採用するとともに、3 次元効果を考慮することにより、要求される耐震性能を満足し、耐震補強対策を最小限とすることを目的とした。以下、表-1 に対象施設の諸元を示す。

表-1 対象施設諸元

完成年月	1964 年 (昭和 39 年)	
構造形式	RC フラットスラブ 半地下式	
基礎形式	直接基礎	
有効容量	36.0m×32.0m×4.0m=4,608m ³	
既往解析モデル (H25, H27)	L1	静的 2 次元線形解析
	L2	静的 2 次元非線形解析
今回解析モデル	L1	静的 2 次元非線形解析 (3 次元効果を考慮)
	L2	静的 2 次元非線形解析 (3 次元効果を考慮)

2. 解析フロー

X 配水池は半地下構造であり、地震時の挙動は地震による慣性力の影響が大きいため、震度法にて解析を行った。解析フローを図-1 に示す。

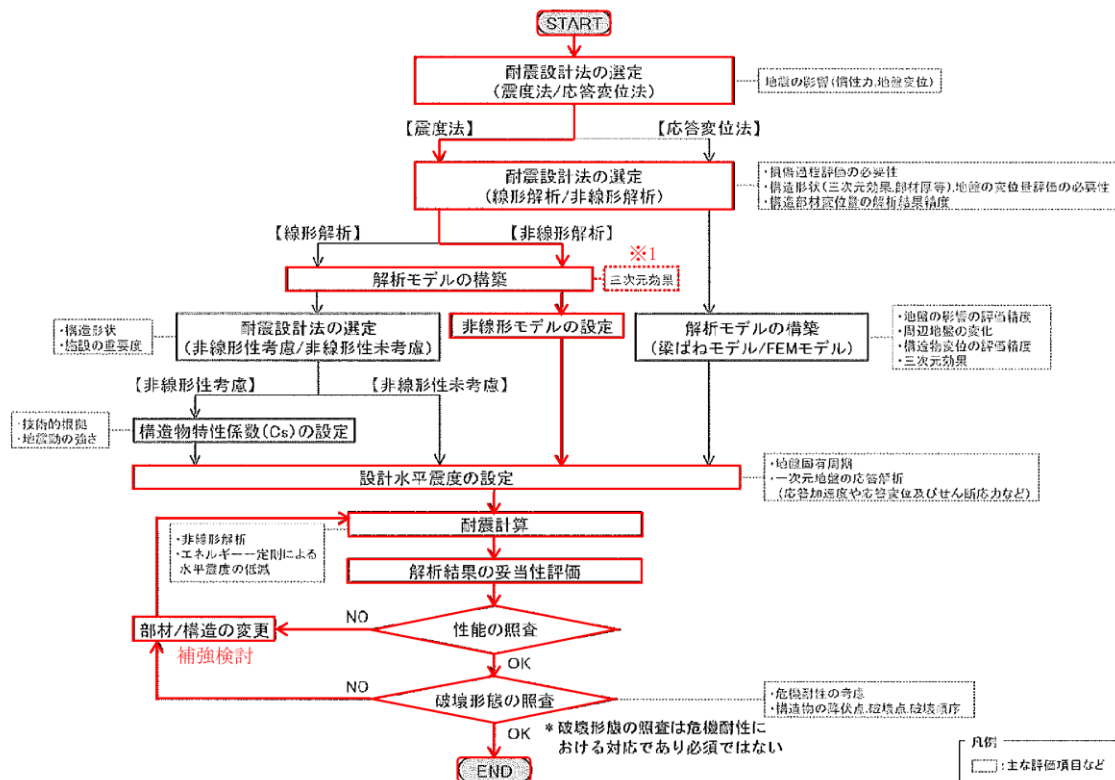


図-1 解析フロー

3. 検討フローおよび検討結果

以下に実施済みの耐震診断結果補強対策を示す。

- ・ 現況状態（覆土有り）では耐震性を満足しないため、盛土を撤去した場合における検討は行われているが、耐震性を満足することができないため、躯体の補強を行うこととされている。（平成 25 年度実施結果より）
- ・ レベル 2 地震動に適用する地震波の見直しに伴い、平成 25 年度の耐震補強設計にて検討された補強後の状態での耐震性の確認が行われており、耐震性を満足する結果となっている。（平成 27 年度実施結果より）

本事例では上記の内容を踏まえ、図-2 に示すフローで検討を行った。具体的な実施内容については以下に示す。

- ① 実施済みの耐震診断および補強対策結果の確認
- ② 「水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版」に準じ、3 次元効果を含めた解析モデルの検討
- ③ 過年度業務にて検討された躯体補強の必要性を確認するため、覆土を撤去した状態での検討を実施。その結果、耐震性を満足することが確認された。

④ ③にて耐震性を満足する結果が得られたため、覆土撤去の必要性を確認するため、現況状態（覆土有り）での検討を実施。その結果、耐震性を満足することが確認された。

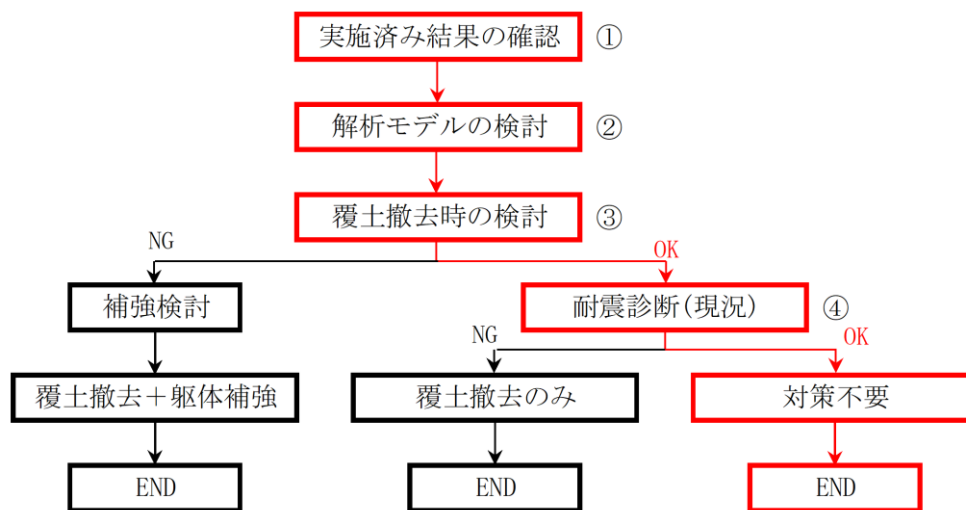


図-2 検討フロー

以下、表-2 として実施項目および結果について、過年度実施（H25,H27）と本事例の比較表を示す。

表-2 検討内容比較表

実施年度		平成25年度	平成27年度	令和4年度(本事例)
目標耐震性能	レベル1地震動	1	1	1
	レベル2地震動	2	2	2
設計地震動		固有周期を考慮した設計水平震度	地盤種別により算定される地表面の設計水平震度	地盤種別により算定される地表面の設計水平震度
	Kh1	0.20	0.16	0.16
	レベル2地震動	南関東地震	大正型関東地震	発注者から提供の設計水平震度
	地表面加速度	925 (gal)	1356.1 (gal)	877.98 (gal)
	Kh2	0.94	1.38	0.90
耐震計算法	解析モデル	2次元梁モデル	2次元梁モデル	2次元梁モデル
	3次元効果	未考慮	未考慮	考慮
	レベル1地震動	震度法(静的線形解析)	震度法(静的線形解析)	震度法(静的非線形解析)
	レベル2地震動	震度法(静的非線形解析)	震度法(静的非線形解析)	震度法(静的非線形解析)
照査方法	レベル1地震動	許容応力度法	限界状態設計法	限界状態設計法
	曲げ	$\sigma_c \leq \sigma_{ca}, \sigma_s \leq \sigma_{sa}$	曲率 \leq 降伏曲率	曲率 \leq 降伏曲率
	せん断	$\tau \leq \tau_a$	せん断力 \leq せん断耐力	せん断力 \leq せん断耐力
	レベル2地震動	限界状態設計法	限界状態設計法	限界状態設計法
	曲げ	曲率 \leq 降伏曲率	曲率 \leq 降伏曲率	曲率 \leq 降伏曲率
せん断	せん断力 \leq せん断耐力	せん断力 \leq せん断耐力	せん断力 \leq せん断耐力	
検討結果(現状)	レベル1地震動	NG(曲げ)	-	OK
	レベル2地震動	NG(曲げ)	-	OK
	構造物特性係数	0.257	-	0.913
検討結果(盛土撤去)	レベル1地震動	NG(曲げ)	-	OK
	レベル2地震動	OK	-	OK
	構造物特性係数	0.386	-	0.931
検討結果(盛土撤去+補強)	レベル1地震動	OK	OK	-
	レベル2地震動	OK	OK	-
	構造物特性係数	0.370	0.315	-

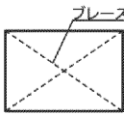
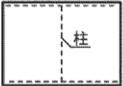
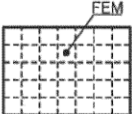
以上の検討結果から、3次元効果を考慮することにより X 配水池は現況状態（覆土有り）で耐震性を満足する結果となり、耐震補強対策は不要となった。

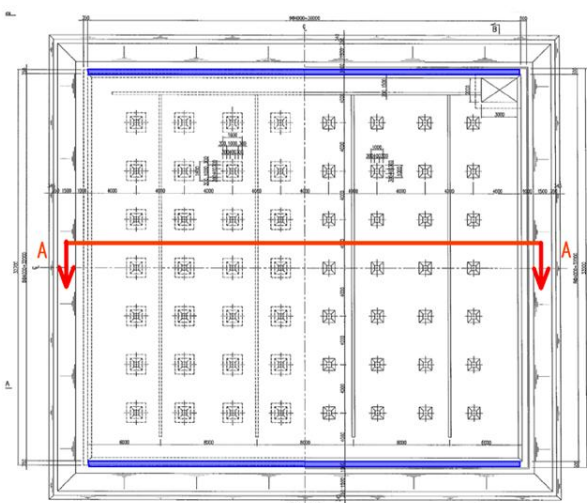
4. 耐震診断詳細

(1) 検討方針

- ・ 応力解析は静的非線形解析とし、レベル 2 地震動においては、プッシュオーバー解析により構造物特性係数を算出する。
 - ・ レベル 1 地震動における設計地震動は、固有周期が短く、また地表面付近に設置されている。
 - ・ レベル 2 地震動における設計地震動は、発注者提供の想定地震動により設定する。なお、X 配水池は基盤面に支持されているため、基盤面の加速度をそのまま使用する。
 - ・ X 配水池は、壁、頂版、底版、柱部材からなるフラットスラブ構造であるため、解析モデルは鉛直方向の 2 次元フレームモデルとする。3 次元効果のモデル化方法については、一般的に表-3 に示す方法が挙げられる。この中から、最も精度が高いとされる、平面ひずみ置換により考慮する。
- 本事例での解析モデルを図-3、図-4 に示す。

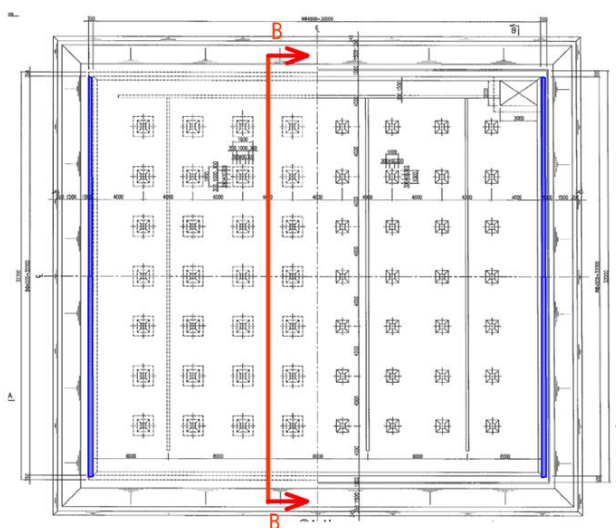
表-3 3次元効果のモデル化方法

項目	ブレース置換	壁エレメント置換	平面ひずみ置換
モデル化			
特徴	壁をせん断剛性が等価なブレースに置換してモデル化する。	壁をせん断剛性と曲げ剛性が等価な柱に置換してモデル化する。	壁を板要素に分割し、柱とはり線を線材としてモデル化する。
剛性の評価手法	既往の理論式が適用可能	既往の理論式が適用可能	三次元モデルとの変位量の比較計算等が必要



■ : 3次元効果

図-3 解析モデル



■ : 3次元効果

図-4 解析モデル

(2) 3次元効果の考慮方法

- ① 2次元モデルと3次元モデルとの比較解析（静的線形解析、頂版慣性力：水平震度1.0）により同等の変形量（側壁天端 $\delta A = \delta B$ ）が得られる2次元モデルを適用する。
- ② 構造形状（縦断比や幅高比）の変化に伴う3次元効果の変化は、図-5に示すとおり、2次元モデルの内部空間に配置する有限要素法（FEM）モデル（仮想妻壁）の剛性により評価する。

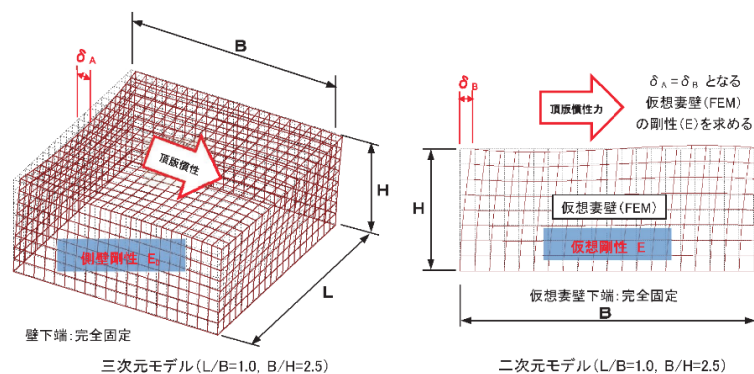


図-5 3次元効果の解析モデル（配水池イメージ）

(3) 3次元効果の算出

2次元モデル、3次元モデルの頂版にそれぞれ 100kN/m^2 の荷重を載荷し、平板要素の剛性を設定した。平板要素の剛性は表-4に示すとおり、2次元モデルと3次元モデルとの変位差が0%となる $E=2.794\text{E}+06$ (kN/m^2) とし、図-6に3次元効果算出時のコンター図を示す。

表-4 平板要素の剛性算出表

	2次元	3次元	2次元	3次元	2次元	3次元	2次元	3次元	2次元	3次元	2次元	3次元	2次元	3次元
変位(m)	1.898E-03	9.469E-03	6.887E-03	9.469E-03	8.402E-03	9.469E-03	8.999E-03	9.469E-03	9.255E-03	9.469E-03	9.370E-03	9.469E-03	9.424E-03	9.469E-03
剛性(kN/m2)	2.350E+07		4.711E+06		3.427E+06		3.040E+06		2.889E+06		2.824E+06		2.794E+06	
変位差(%)		80%		27%		11%		5%		2%		1%		0%

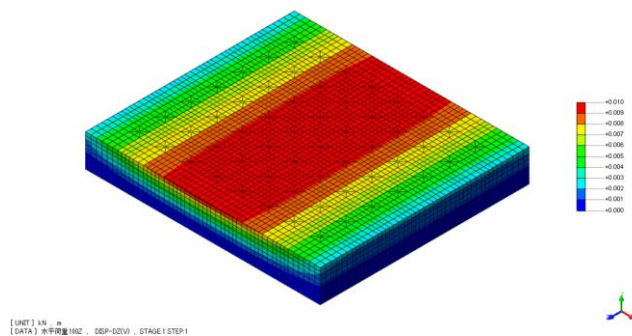


図-6 3次元効果算出時のコンター図

(4) 検討ケース

検討ケースは、覆土撤去時および現況状態（覆土有り）における L1 満水、L1 空水、L2 満水、L2 空水時の計 8 ケースにより照査を行うこととした。覆土撤去時および現況状態（覆土有り）の土圧分図を図-7、図-8に示す。

① 覆土撤去時

- Case-1 : L1 満水 覆土無し
- Case-2 : L1 空水 覆土無し
- Case-3 : L2 満水 覆土無し
- Case-4 : L2 空水 覆土無し

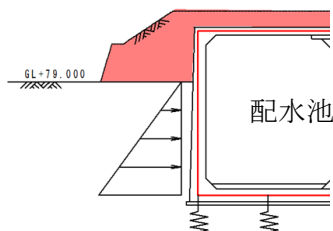


図-7 覆土撤去時の土圧分布

② 現況状態（覆土有り）

- Case-1 : L1 満水 覆土有り
- Case-2 : L1 空水 覆土有り
- Case-3 : L2 満水 覆土有り
- Case-4 : L2 空水 覆土有り

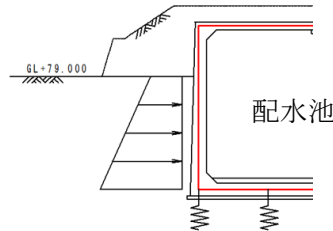


図-8 現況状態（覆土有り）の土圧分布

(5) 本事例での診断結果および過年度診断結果との比較

過年度実施の診断結果では、現況状態（覆土有り）の状態ではレベル 1 およびレベル 2 地震動ともに曲げ NG となる箇所がある結果となっている。また、H23 年度実施の診断結果では、レベル 2 地震動のみの照査であるが、同様に NG 箇所が発生している。過年度の両診断では、土圧の低減（上載土および側面盛土の撤去）を図ることにより、耐震性を確保することと結論付けている。

表-5 診断結果比較表（曲げ照査結果抜粋）
現況状態（覆土有り）、満水時

	H25年度診断結果(曲げ)		本事例での診断結果(曲げ)	
	レベル1地震動	レベル2地震動	レベル1地震動	レベル2地震動
左側壁上部	OK	OK	OK	OK
左側壁下部	NG	OK	OK	OK
右側壁上部	OK	OK	OK	OK
右側壁下部	OK	OK	OK	OK
床版左端	NG	OK	OK	OK
床版右端	NG	NG	OK	OK
床版柱列部	OK	OK	OK	OK
床版バ・社部	NG	OK	OK	OK
底版左端	NG	OK	OK	OK
底版右端	NG	OK	OK	OK
底版柱列部	OK	OK	OK	OK
柱上部	NG	NG	OK	OK
柱下部	NG	NG	OK	OK

5. おわりに

池状コンクリート構造物は、3次元的に見ると導流壁の存在などにより構造系全体のせん断剛性が大きい施設が多く、耐震計算時にその特徴の考慮の有無によって、応答値が大きく変わり、照査結果に影響が及ぶことがある。3次元効果の考慮にあたっては、3次元モデルでの解析に比べて不明確な一面もあり、採用にあたっては設計者の適切かつ慎重な判断が必要である。また、過剰に3次元効果を見込むことにより危険側の照査となることもあるため、本事例では構造物全体に影響する側壁のみを3次元効果として考慮することに留めた。その結果、補強を実施することなく耐震性を満足する結果となったことから、経済的にも優れる成果となった。今後は、3次元モデルの採用とともに本事例での手法についても積極的に検討していくものとする。

- 【参考文献】 1) 公益社団法人 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2022年版
2) 公益社団法人 日本水道協会：水道施設の耐震設計入門