

# 揚水施設における耐震診断結果に対する 動的解析による検証について

横浜市 ○柳田 祥吾

パシフィックコンサルタンツ株式会社 塩畑 謙

## 1. はじめに

水再生センター内の揚水施設は、下水道施設の耐震対策指針<sup>1)2)</sup>において建築物と土木構造が複合するIV-2類に分類され、主架構を梁、柱、耐震壁で構成する三次元骨組モデル、面外壁は主架構を層間バネに集約して構築した二次元骨組モデルにより耐震性能照査を行うのが標準とされている。しかし、複数の幹線からの流入を受け持つ揚水施設は構造物の規模が大きくなり、深層化することで自重や土圧などが大きく作用することに加え、梁柱及び壁の配置が複雑となることから、設計断面の選択が容易ではなく、面外部材と主架構の応力分担がお互いに影響し合うことが少なくない。このため、実構造物の地震時挙動と設計における計算上の解析結果との乖離が懸念される。そこで、本検討は、図-1に示す施設の主架構と面外壁を併せた三次元モデルを構築し、レベル2地震動に対する静的解析と動的解析による耐震計算を行い、同指針による既往の耐震性能照査結果と併せた三者を比較することで検証を試みたものである。

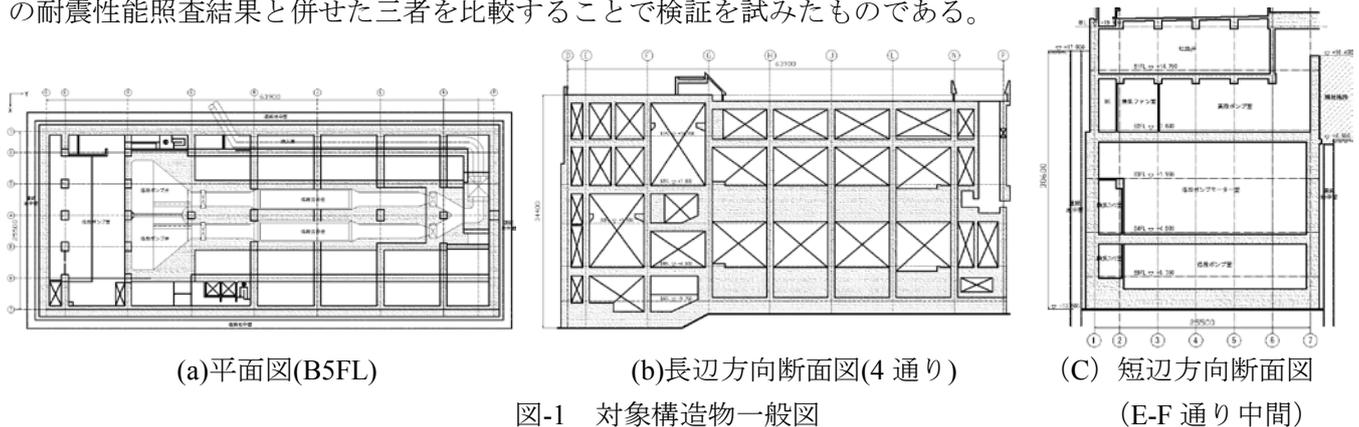


図-1 対象構造物一般図

## 2. 検討方法

図-2に検討手順を示す。既往の耐震検討は、梁・柱部材の曲げ変形に伴う非線形性を考慮した三次元骨組解析（プログラムSS3）および二次元骨組解析（プログラムEngineer's Studio）を組合せ、震度法による部材の曲げおよびせん断照査を行っている。本検討では、解析コードSoil-plus(2017rev.1)により三次元モデルを構築し、静的解析ならびに動的解析を行った。なお、部材は演算時間等に配慮し線形とした。

耐震壁はエレメント置換し、梁バネモデルとするのが一般的であるが、要素数が25000以上と非常に多いため文献3)を参考にシェル要素によるモデル化を適用した。また、開口率16%以下の箇所は耐震壁とし、要素を適宜分割して開口状態を表現した。外壁および底版はシェル要素とし、地盤の変化点や解析精度に配慮して1m×1m程度を目安に細分割を行った(図-3)。

剛域の設定、梁の細分割ならびに照査位置の設定は文献6)に準拠した。また、構造物と地盤の動的相互作用

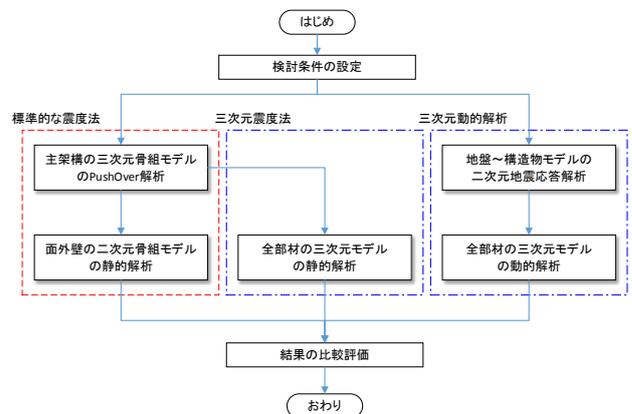


図-2 本検討のフローチャート

用による影響を考慮するため、構造物～周辺地盤一体系の二次元地震応答解析を実施し、構造物底版位置の時刻歴応答加速度を入力地震動とした。

### 3. 検討条件

#### (1)三次元静的解析（震度法）

構築した三次元モデルにおいて底面は地盤バネによる支持とし、自重、積載荷重、静水圧、常時土圧等を与え初期応力解析を行った後に、既往の耐震検討（非線形骨組モデルによる PushOver 解析）における設計震度を用いた慣性力、地震時土圧増分および動水圧を地震時作用として与え、静的解析を実施する。

#### (2)三次元動的解析

三次元モデルに入力する時刻歴加速度は、神縄・国府津・松田断層を震源としたM8.0 の地震を想定し、構造物～地盤系の二次元地震応答解析により求めた（図-4）。二次元地震応答解析は平面ひずみ条件を前提とし、せん断ひずみに依存してせん断剛性Gおよび減衰定数hが変化する特性を与えた等価線形化法を適用する。これにより、構造物の地震時挙動を把握し、底版下面での時刻歴応答加速度ならびに構造物周辺地盤の強震時物性を求める。構造物の側面および底面には地盤バネを配置する。なお、地盤バネの設定は道路橋示方書<sup>5)</sup>の式を適用し、外周面要素を構成する全節点に直方向、せん断方向に付加した。

### 4. 検討結果

#### (1)三次元静的解析

図-5に短辺方向の各階におけるQ～δ曲線を示す。既往の検討では主架構梁柱の非線形性を考慮しており、短辺方向では、顕著に頭打ちの傾向が認められる。これに対し、三次元モデルは線形のため直線の特性を示しており、壁の多い階は比較的高い剛性で評価されていることがわかる。

#### (2)三次元動的解析

二次元地震応答解析における最大応答加速度の変形図（図-6）を示す。構造物は比較的剛体的ではあるがわずかにせん断変形とロッキングが複合したモードとなっている。底版下面位置の時刻歴加速度（図-7）、加速度応答スペクトル（図-8）を示す。構造物と周辺地盤の動的な相互作用により水平成層地盤条件よりも加速度がかなり小さく抑制されている。

三次元動的解析における最大応答加速度の変形図（図-9）および最大応答加速度の比較（表-1）を示す。地中部は二次元地震応答解析と同様に剛体的な変位モードとなっているが、最大変位が短辺方向で0.2cm、長辺方向で0.06cmと非常に小さい。対照的に地上部構造が若干大きく変位している。これは、長辺方向の応答加速度が設計震度に比べ小さくなっているためと推察される。図-10にE-F通り中間位置における曲げモーメントの比較図ならびに静的解析における底版上面の短辺方向応力度分布を示す。外壁や柱の存在により、底版における曲げモーメントは既往の面外部材骨組解析に比べ応力が分散し、値が緩和されている。また、図-11にN通りの曲げモーメント図を比較として示す。どの手法でも耐震壁に隣接する梁柱に断面力が集中する傾向を示すが、動的解析では断面力が比較的小さい。これは、二次元地震応答解析で明らかのように深

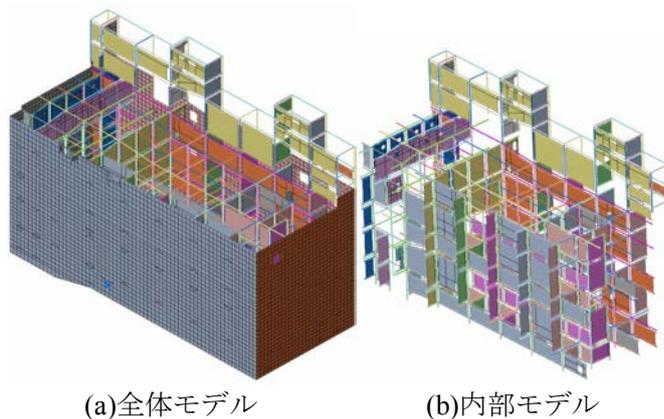


図-3 三次元モデルの構築

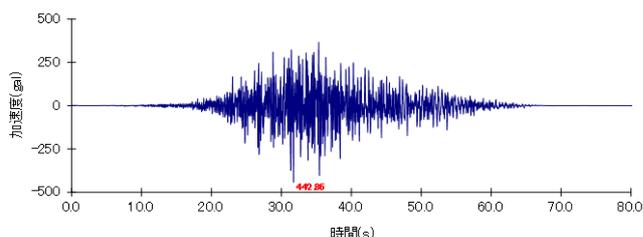


図-4 入力地震動（基盤露頭，時刻歴加速度）

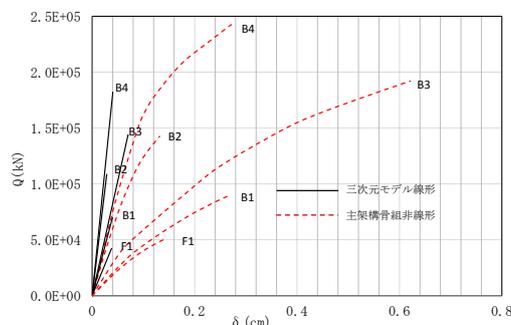


図-5 Q～δ 図（短辺方向）

層階の加速度が設計震度に比べて抑制されたためと推察される。

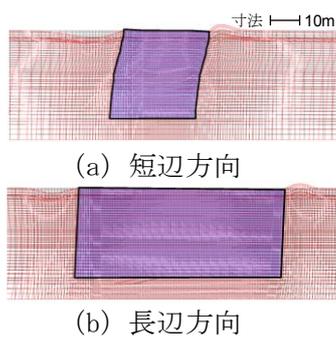


図-6 加速度最大時の変形図 (変位倍率 50 倍)

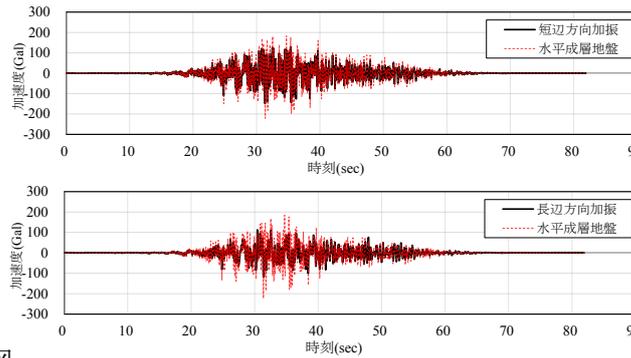


図-7 底版位置時刻歴応答加速度

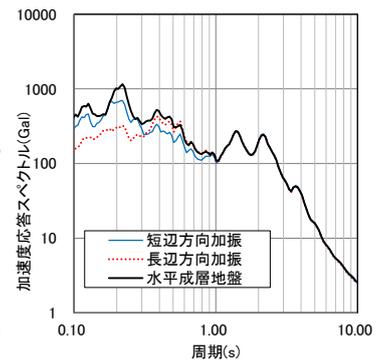


図-8 加速度応答スペクトル

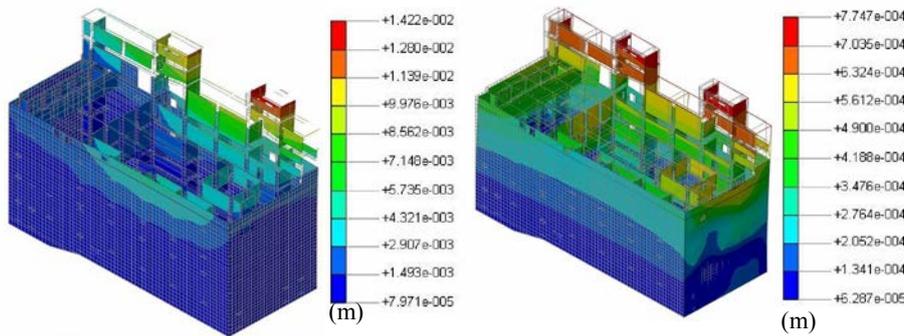


図-9 加速度最大時の変形図

表-1 応答加速度の比較

加振	階	構造特性 Cs	設計震度	3次元動的	2次元
				構造中心	地震応答
短辺方向	1FL	0.77	0.462	657	422
	B1FL		0.439	514	355
	B2FL		0.391	301	274
	B3FL		0.366	230	286
	B4FL		0.307	208	177
	底版位置		0.273	216	149
長辺方向	1FL	1.00	0.600	284	262
	B1FL		0.570	262	252
	B2FL		0.508	163	212
	B3FL		0.475	160	196
	B4FL		0.399	125	135
	底版位置		0.354	125	120

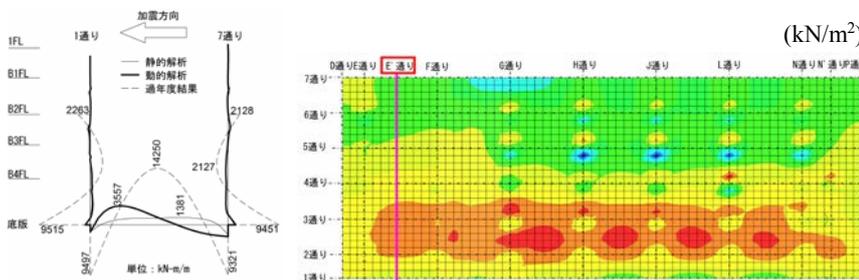


図-10 E と F 中間通り曲げモーメント比較図と底版上面応力分布 (三次元静的解析)

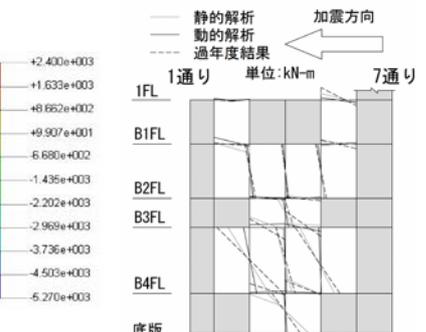


図-11 N 通り曲げモーメント比較

## 5. まとめ

本検討では、下水道施設の耐震対策指針に示されるレベル2地震動を想定した標準的な手法に対し、面外壁を含めた三次元モデルを構築し、静的解析と動的解析による検証を試みた。その結果、梁・柱構造および耐震壁が負担する応力が三次元的に再配分されること、また、動的解析の適用により深層階の応答加速度が小さくなり断面力が軽減されることが確認された。

### 【参考文献】

- 1) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針，2014. 5，
- 2) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針計算例，2015. 6，
- 3) 陳、壁谷澤：鉄筋コンクリート建物の構造解析における耐震壁のモデル，コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 22、No. 3、2000、pp481-486，
- 4) 横浜市環境創造局下水道施設部下水道施設整備課：横浜市下水道施設（水再生センター・ポンプ場等）耐震設計指針（案）平成 27 年度版，2015. 8，
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，2012. 3，
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，2013. 12

問い合わせ先：横浜市環境創造局下水道施設整備課 〒231-0017 横浜市中区港町 1-1  
TEL：045-671-2847 E-mail：sh00-yanagida@city.yokohama.jp