

地盤の液状化を考慮した池状構造物の二次元動的的非線形解析事例

中日本建設コンサルタント(株) 正会員 ○原田尚慶

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震や2004年に発生した新潟県中越沖地震において、構造物の目地部の破損や埋設管の離脱等の液状化による被害が顕著であった。また、既往の地震被害においても、液状化現象により多くのライフライン施設が被害を受けた。

これらの背景より、液状化発生の防止目的として地盤改良等による対策方法が検討されているが、補強方法は限られており、その対策に膨大な費用を要することが財政面において困難とされる。また、施設の配置状況によっては施工困難な場合があるため、現実的には困難である。

対策方法の検討が進む一方で、液状化現象により、液状化層が地中構造物に対して免震効果が期待できることから、構造物に発生する応力の低減を期待できる研究も進んでいる。

そこで本事例では地中構造物を対象とし、地盤の液状化を考慮した構造物～地盤の連成モデルによる二次元動的的非線形解析手法により耐震性能を評価するとともに、構造物に発生する最大応力の発生時間に着目し、液状化地盤の免震効果について報告する。

2. 既往研究概要

添田¹⁾らは、振動台上に設置した土層(長さ88×幅39×深さ50cm)を加振する模型実験にて、入力加速度が液状化層を通過することにより、構造物への加速度が低減されることを確認し、液状化層の免震効果を明らかにした。

また、吉澤²⁾らは液状化地盤に構築された施設の更新・耐震化を合理的に進める設計手法として地盤応答解析を実施し、液状化層を通過する入力加速度が地表面に至る過程において大幅に低減されることを確認し、液状化層の免震効果により、耐震補強の規模縮小につながることを報告している。

3. 対象施設概要

対象施設は、上載土700mmを有する3池から構成される地中構造物であり、全有効容量50,700m³の浄水池である。表-1に対象施設の概要を示し、平面図及び断面図を図-1、図-2に示す。

表-1 対象施設概要

構造寸法	幅92.40m×長110.0m×深8.30m
全有効容量	50,700m ³
池数	3池
材質	鉄筋コンクリート
基礎形式	直接基礎

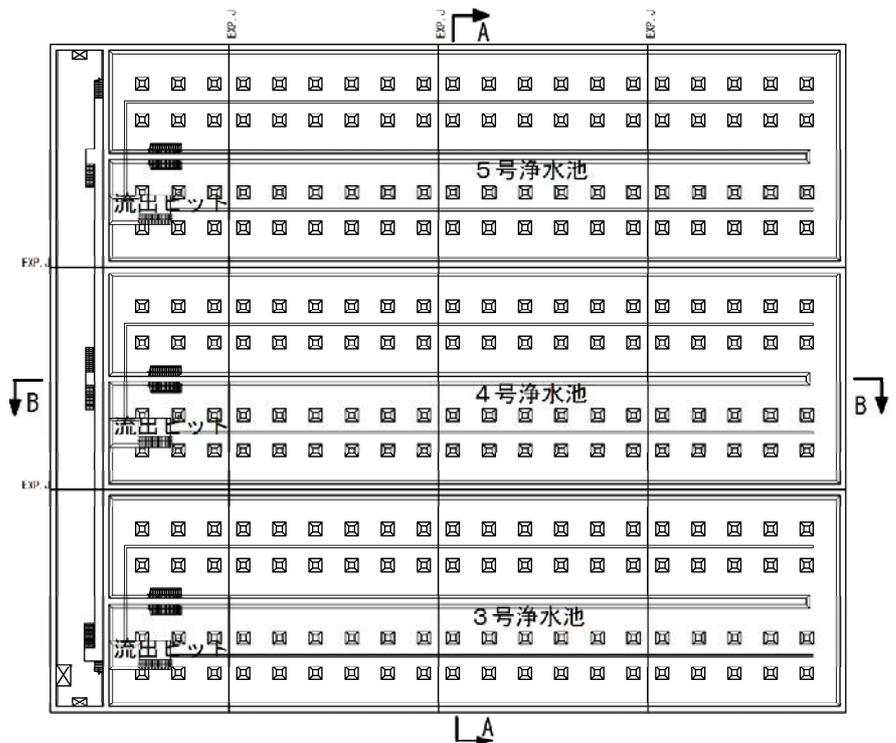


図-1 平面図

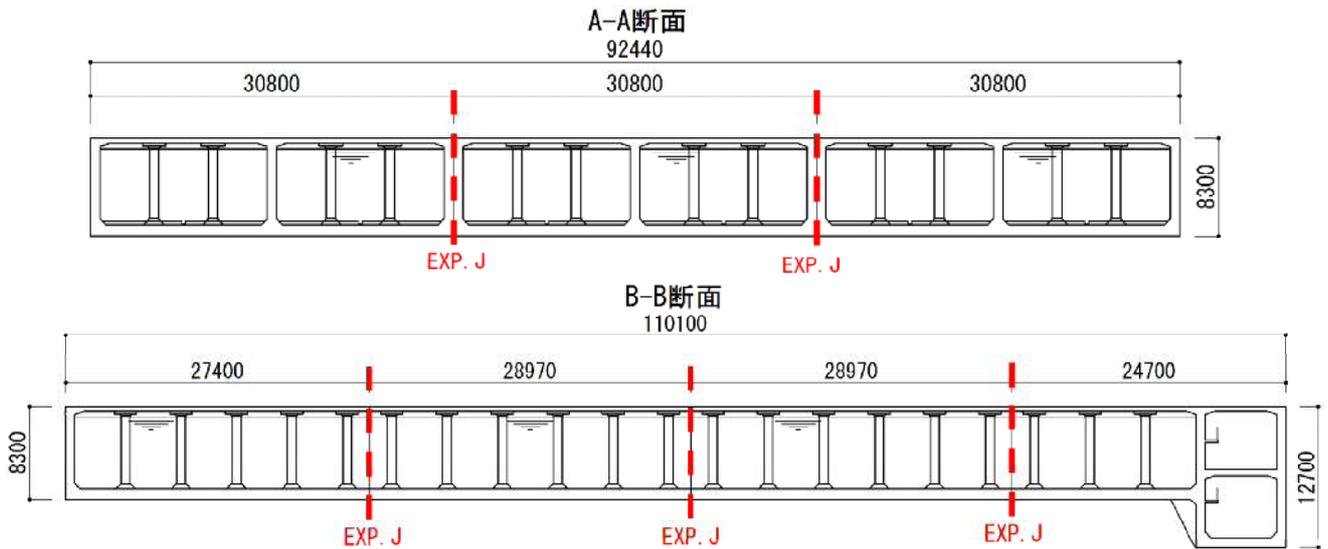


図-2 横断 (A-A 断面) 及び縦断 (B-B 断面) 図

4. 解析モデルの考え方

(1) 液状化層の分類

本事例は動的非線形解析を採用し、繰返し計算実施による収束値を求めることから、液状化特性値を砂層全体にパラメーターとして与えることは計算が煩雑になる。よって、今回は、計算の安定性と計算速度向上のために、事前に FL 法（「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 平成 24 年 3 月」に準拠）により、液状化層と非液状化層の分類を行った。

土層の解析モデルは双曲線モデルとし、FL 法により液状化層と判定された土層の非線形性については、液状化パラメーターを追加した。

(2) モデルの考え方

本事例における解析モデルの考え方を図-3 に示し、連成モデルのイメージを図-4 に示す。

モデル化に際し、地盤については前述に示すとおり液状化層と非液状化層に分類し、FEM 要素を採用した。

また、構造物については二次元の非線形特性を有する梁要素とし、B-B 断面の側壁は、三次元モデルを等価な二次元モデルに置き換え、単位奥行幅のモデル化を行った。伸縮目地部については非線形バネ要素によりモデル化した。

ここで、解析における境界条件は、構造物の振動又は地盤の不規則構造により生じる散乱波が、モデル内にて反射を繰り返すことにより膨大な解析時間を要し、解析が収束しない

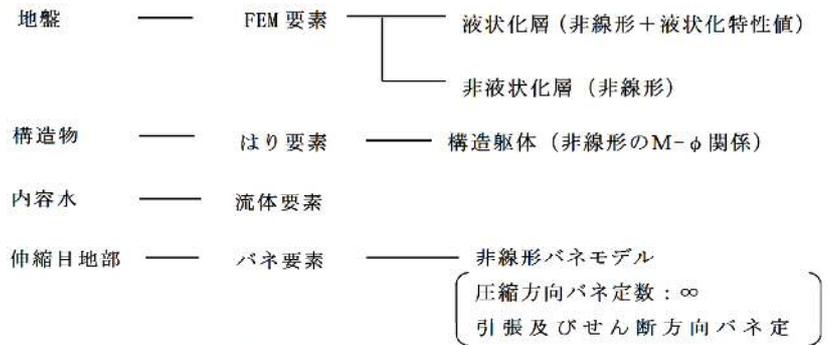


図-3 解析モデルの考え方

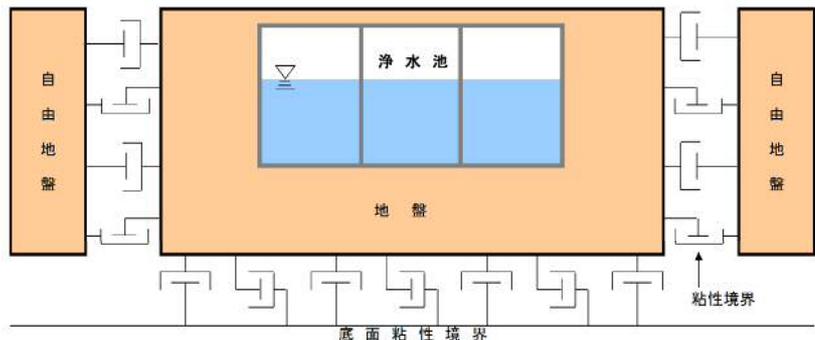


図-4 構造物～地盤の連成モデルのイメージ

状態が想定されることから粘性境界を採用した。解析範囲（側方境界の離隔）は、構造物幅と同程度及び 1/3 範囲を両側に確保することにより解析結果にそれほど差異が生じないという既往研究成果³⁾から、構造物の両側に 1D 程度確保することとした（D：構造物幅）。

地盤構成としては、対象構造物直下（3号池及び4号池）に地盤改良層が位置する。また、5号池側は丘形状であり、3号池側面は液状化層にて構成されている。これらを踏まえた構造物～地盤の連成モデル（横断及び縦断）を図-5、図-6に示す。

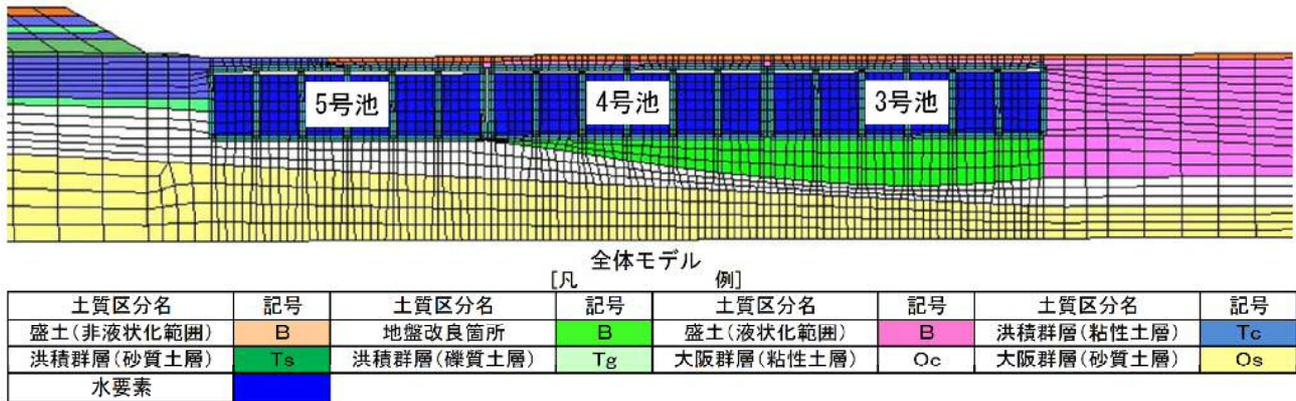


図-5 地盤と構造物一体モデル（横断図）

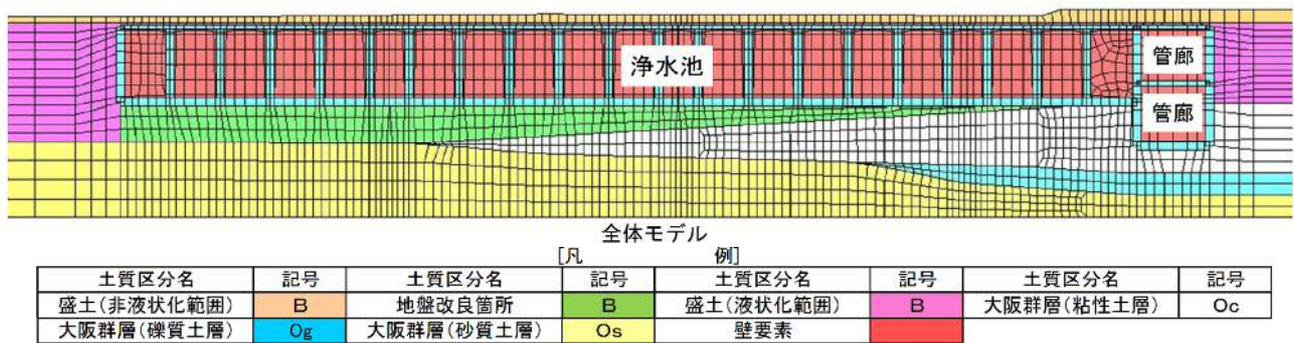


図-6 地盤と構造物一体モデル（縦断図）

5. 地盤応答解析による入力地震動の設定

(1) 想定地震動

対象地域で考慮すべき想定標準地震動（レベル 2 地震動）は、表-2に示す 6 つの地震波形が想定されている。

表-2 対象地域で考慮すべき想定標準地震動

内陸直下型地震	生駒断層帯地震（NS及びEW波）
海溝型地震	東南海・南海地震（NS及びEW波）
	南海トラフ巨大地震（NS及びEW波）

本事例では、6 波形に対する検討を実施するのではなく、1 波形に限定して解析を行う。なお、本施設は地中構造物であり動土圧の影響が支配的となることから、底板下端と頂版上端位置における相対変位量が最大となる地震波を選定することにした。

相対変位量の算出方法として、地盤応答解析（等価線形解析及び非線形解析）を実施した。

(2) 地盤応答解析方法

地盤応答解析では、はじめに表-2に示す地震波形に対し、等価線形解析（SHAKE）を実施した。次に、得られた結果の内せん断ひずみが 1.0%を超える値を示したケースについては、別途非線形解析（H-D モデル）を実施した。ここで非線形解析を用いた理由について述べる。一般的に対象地盤に軟弱地盤が介在する場合、その地盤箇所においてせん断ひずみが 1.0%を超える値を示すことがある。よって、1.0%以上のせん断ひずみが発生した場合、地盤が破壊した状態となることから、破壊箇所より浅い所に位置する地盤の結果値は信

頼することが難しく、等価線形解析が適用できないためである。

今回の解析において、せん断ひずみが1.0%を超過したケースは生駒断層帯地震（NS波形及びEW波形）の2ケースであったため、同波形についてのみ非線形解析を実施した。

(3) 地盤応答解析結果と入力地震動の設定

想定標準地震動における地盤応答解析結果を表-3に示す。地盤応答解析結果より、構造物の底版下端と頂版上端位置の相対変位量を算出した結果、「生駒断層帯地震（NS波形及びEW波形）」の相対変位量が他の地震動と比較し大きくなった。

図-6に、生駒断層帯地震のNS波形とEW波形の相対変位量図を示す。同図より、EW波形がNS波形より大きな値を示すことが理解される。

ここで、レベル2地震動として設定した入力地震動（生駒断層帯地震EW波形）の地震エネルギーの妥当性を検証するため「水道施設耐震工法指針・解説 2009年版」⁴⁾（以降水道耐震）のⅡ種地盤における加速度応答スペクトルと今回設定した生駒断層帯地震EW波形の加速度応答スペクトルの比較を行った（図-7）。

また、参考として生駒断層帯地震NS波形も比較した。

同図より、池状構造物の一般的な構造物固有周期0.1~1.0secの範囲内において採用したレベル2地震動（生駒断層帯地震EW波形）は、水道耐震に示されたレベル2地震動の波形と比較して大きな乖離がないことが確認できたため、レベル2地震動クラスの入力地震動の設定としては妥当であると判断した。

表-3 レベル2地震動における相対変位量の比較

No.	地震動名称	方向	加速度(gal)		
			基盤面入力最大加速度 gal (cm/sec ²)	底版と頂版の相対変位量 (mm)	地表面応答最大加速度
1	生駒断層帯地震	NS	958.0	53.0	500.307 (1.50%)
		EW	1590.0	65.0	539.414 (1.601%)
2	東南海・南海地震	NS	230.0	6.8	262.110 (0.105%)
		EW	154.0	5.0	191.380 (0.0790%)
3	南海トラフ巨大地震	NS	173.0	5.9	182.520 (0.0840%)
		EW	383.0	12.5	458.500 (0.225%)

※1 一覧表に示される()内数値は最大せん断歪を示す

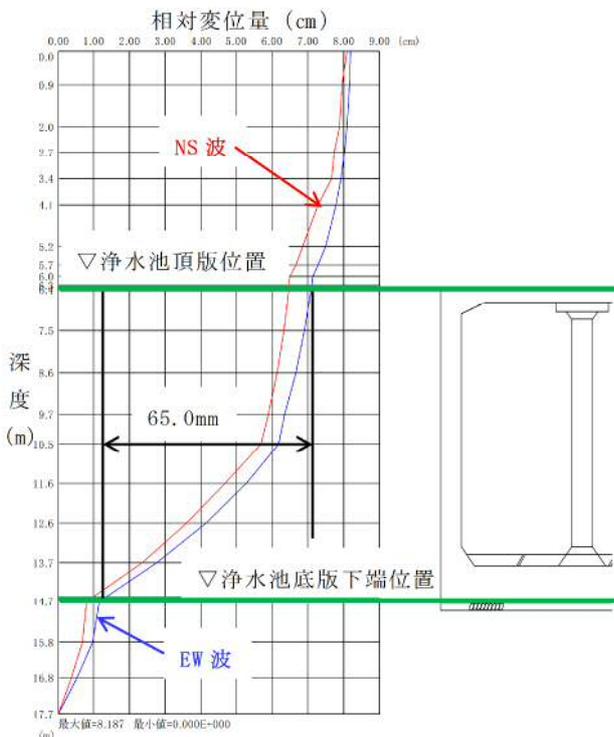


図-6 生駒断層帯地震の相対変位量図

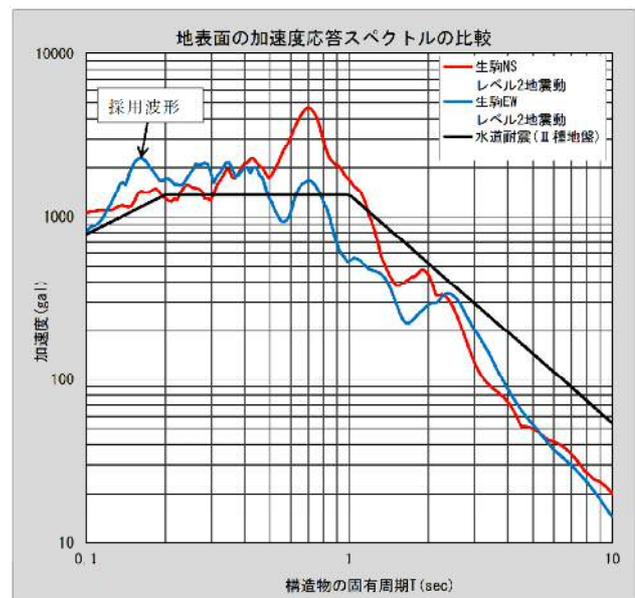


図-7 水道施設耐震工法指針（Ⅱ種地盤）と生駒断層帯地震の応答スペクトルの比較

6. 耐震性能照査方法

水道耐震におけるレベル2地震動の応力照査方法は、図-8に示すように限界状態設計法による終局耐力照査 (M_u) である。

しかし、本施設の浄水池は高度な水密性及び耐震性が要求される施設であることから、自治体の照査基準に基づきレベル2地震動の耐震性能照査を鉄筋の降伏耐力 (M_y) にて照査を行った。

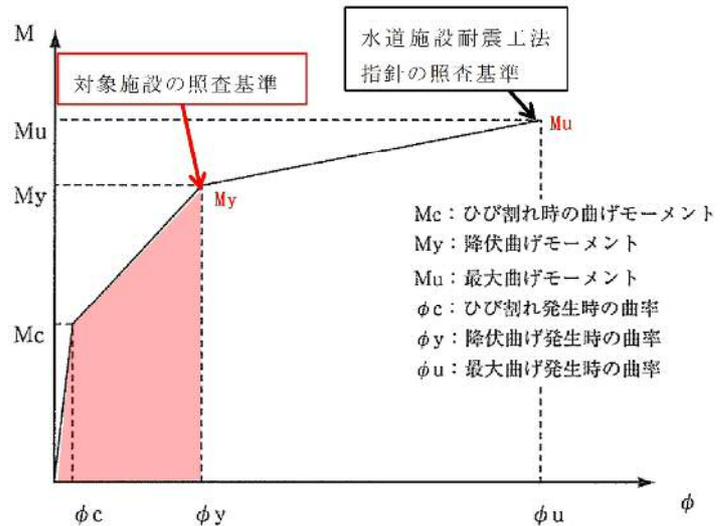


図-8 曲げ耐力の照査基準値の考え方

7. 構造物の動的解析の結果

レベル2地震動における動的解析結果に基づく断面照査の結果、柱上下端部の発生曲げモーメントが照査値 (M_y) を超過する結果が多く見られた。ここで、断面照査結果に基づく耐力不足箇所の断面図を図-9に示す。

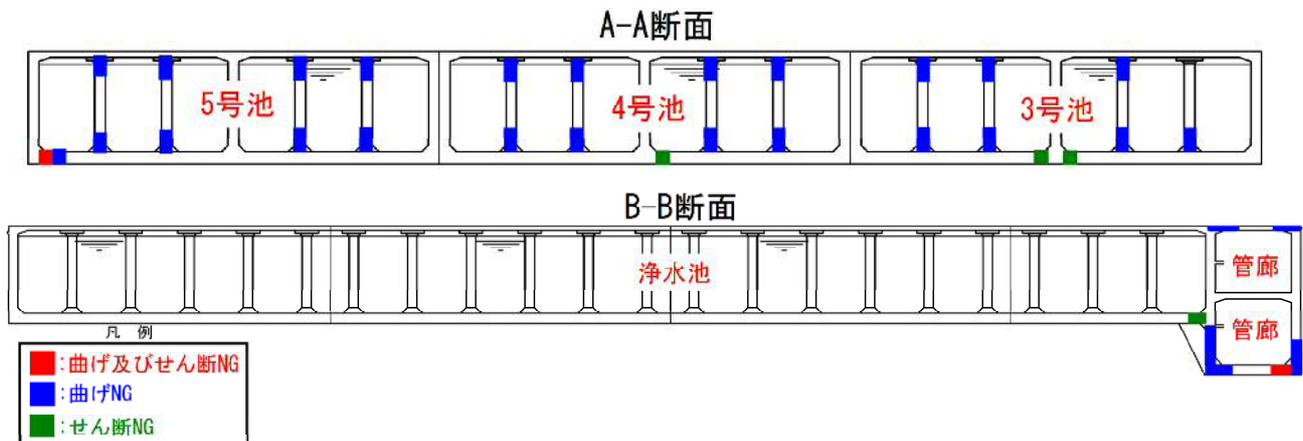


図-9 耐力不足箇所位置図 (横断面 (A-A 断面) 及び縦断面 (B-B 断面))

8. 構造物の動的解析結果に対する考察

構造物の動的解析に用いた入力地震動の生駒断層帯地震 (EW 波) を図-10に示す。

同図より、地震の大きな揺れは約 8.0 秒から開始し、約 12.0 秒あたりに振幅が大きくなっており、継続時間はそれほど長くない。

ここで、図-5における解析モデルでは5号池側の地山が丘形状であり、3号池の側壁に接する地盤は液状化対象層となっていることを考慮し、両池に接する地盤挙動に着目する。また、本事例では冒頭で述べたように、液状化地盤の免震効果による構造物への影響を評価することから、図-4に示す3号池側の液状化対象層の過剰間隙水圧比に着目した。

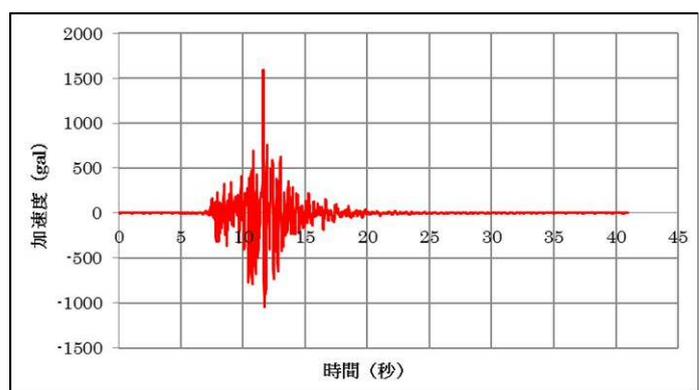


図-10 生駒断層帯地震波形 (EW 波)

過剰間隙水圧比図を図-11に示す。同図より、主要動開始の約 8.0 秒から過剰間隙水圧比が急激に上昇し、大きく波を打ちながら、地震波形の最大振幅あたりの約 12.0 秒付近より、過剰間隙水圧比がほぼ 1.0 となり、地震終了まで一定の値を示すことから、対象地盤が液状化していることが読み取れる。また、図-12に示す5号池及び3号池の地盤に接する側壁上端部の最大曲げモーメントの発生時刻に着目すると、5号池側は 12.62

秒、3号池については8.31秒に発生している。

ここで、同図より、5号池は入力地震動が最大加速度を示す時刻と、側壁に発生する最大曲げモーメントの発生時刻がほぼ同時刻となるが、液状化層が隣接する3号池については最大加速度位置より数秒早く側壁に最大曲げモーメントが発生する。

仮に、地盤モデルが成層モデルかつ構造モデルが左右対称であるならば、最大加速度発生時刻と最大曲げモーメント発生時刻が近くなることが予想される。本事例における解析モデルでは、構造モデルについては左右対称であるが、地盤モデルについては左右非対称であり、なお且つ液状化層を含む複雑な地層構造であるため、最大応力発生時刻が異なる結果となった。このような時刻差は、3号池の側壁に接する地盤が、図-10に示す入力地震動の

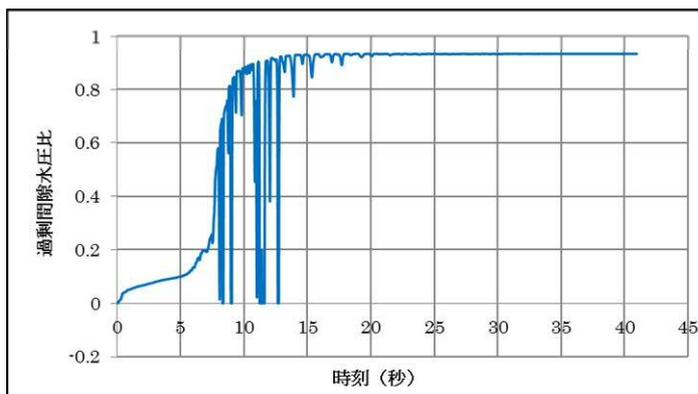


図-11 過剰間隙水圧比

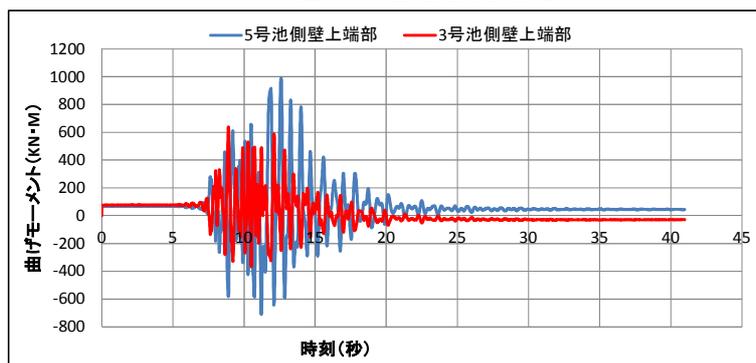


図-12 5号池及び3号池側壁上端部の発生応力時刻歴

8.0秒あたりから既に液状化が発生していると考えられ、その液状化発生による地盤の剛性低下により入力地震動の最大振幅を示した時間帯においても側壁に発生する曲げモーメントは増幅されなかったと推測される。

以上を踏まえ、本事例では、構造物の側壁に発生する最大曲げモーメントの時間と、その後の入力地震動の振幅及び継続時間並びに過剰間隙水圧比に着目し、液状化層による免震効果を確認できたと判断した。

9. おわりに

構造物～地盤の連成モデルによる二次元動的非線形解析を実施した結果、レベル2地震動時における発生応力が降伏耐力値を超える箇所が多数発生し、耐震補強が必要となる結果が得られた。これは、レベル2地震動時の許容値を鉄筋の降伏耐力以下に設定していることが起因していると考えられる。

本事例では、液状化層による免震効果の発生を確認できたことから、構造物への加速度入力の低減が考えられ、耐震補強量が液状化を考慮しない場合と比較し、減少していると推測される。

今回は、液状化層による免震効果にて構造物への発生応力低減について確認できたが、全応力解析結果（液状化を考慮しない）と比較し、どの程度低減できたかについては不明である。

今後は、同じ解析モデルによる有効応力解析結果（液状化を考慮）と全応力解析結果（液状化を考慮しない）の比較を行い、液状化地盤が構造物へ与える応力について定量的な評価・分析を行うことで、同様な解析に対して有効かつ効果的な手法を提案していきたい。

参考文献

- 1) 添田裕友・大川秀雄・保坂吉則・神立秀明：液状化層による免震効果の基礎的検討。
- 2) 吉澤源太郎・野々内幹夫・岩田晴之・鈴木淳也：液状化地盤にある浄水処理施設の耐震補強設計法。
- 3) 日本大学 理工学研究所 環境・防災都市共同研究センター
プロジェクト I-6 防災都市構築における地域耐震性能評価に関する研究 平成19年度成果。
- 4) 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2009年版 I 総論。