

RC 池状構造物間の地震時相対変位に対する
水道管路の伸縮性に関する地震応答解析

Seismic response analysis for the flexibility of the water pipelines concerning relative displacement between RC tanks

北海道大学大学院工学研究科博士後期課程 〇正 員 猪子敬之介 (Keinosuke Inoko)
北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川俊郎 (Toshiroh Hayashikawa)

1. まえがき

ポンプ場のような水道施設では、機能のバックアップ、応急給水の充実などの観点から、敷地内に複数の RC 池状構造物が隣接し相互が水道管路で接続されていることがある。これらの複合的な水道施設の耐震設計は、隣接あるいは接続する構造物相互の地震時の影響を考慮せずに個別に設計されているのが実情である。このような個別的な耐震設計では構造物間の相対変位を直接的に求められないため、RC 池状構造物間の水道管路に要求される伸縮性を評価することはできない。しかしながら、水道管路の伸縮性に過不足があると、地震時の接続部分の破損による給水停止、不合理な地震対策などに陥ることが想定される。従って、地震後の水道施設のライフラインとしての重要性、水道施設の合理的な地震対策の推進などを踏まえると、構造物間の地震時相対変位を定量的に把握した上で、水道管路の要求性能を評価し、適切な伸縮量を有する継手を選択する必要があると考えられる。

以上の背景より、本論文では構造物間の相対変位や水平変位応答、水道管路の伸縮量に着目し、2 次元動的有限要素解析によるケーススタディを行い、RC 池状構造物間の地震時相対変位に対する水道管路の伸縮性について検討する。

2. 解析モデル

解析対象とした RC 池状構造物の断面を図-1 に示す。本論文では水道施設のうち札幌市南区南沢にあるポンプ場を検討対象とした。同図左、右に位置する 2 つの水道施設は、それぞれ地震時挙動が異なると考えられる地上・地下 1 階の水槽付建築物、半地下式のポンプ井を想定した（以下、前者を建物、後者をポンプ井と呼ぶ）。

地盤各層の物理定数を表-1 に示す。地下水位面は G.L-0.94m に設定している。地盤条件は、札幌市南区南沢の地盤調査結果¹⁾、札幌市域の浅部地下構造モデル²⁾を元に設定したものである。土の非線形特性のモデル化は、室内要素試験から土の強度特性、動的変形特性が得られているため、幅広いひずみ領域でフィッティングが可能な修正 GHE モデル³⁾により設定した。安山岩層は線形弾性体と仮定している。また、多方向のせん断挙動を表現するためにマルチスプリングモデル⁴⁾を用いた。

RC 池状構造物の物理定数を表-2 に示す。骨格曲線はトリリニアモデル、履歴特性は武田モデルを用いた。地盤には平面ひずみ要素、構造物には梁要素を用いた。地盤・構造物全体系の粘性減衰を Rayleigh 減衰とし、

振動数 0.1~10Hz の範囲で減衰が 2%以下になるように仮定した。

水道管路（ダクタイル鋳鉄管）の物理定数を表-3 に示す。水道管路は耐震管として一般的に用いられる鎖構

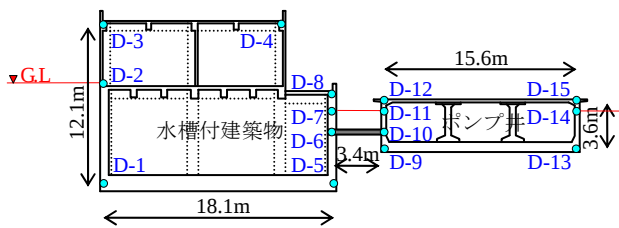


図-1 RC 池状構造物の断面と応答値の出力点

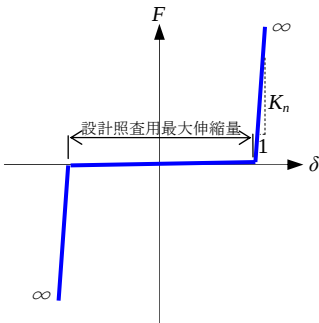


図-2 非線形ばねモデルのイメージ

表-1 地盤の物理定数

土質性状	層厚 H(m)	単位体積 重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	ポアソン 比 ν	せん断波 速度 $V_s(\text{m/s})$
沖積砂礫(Ag)	0.0~ 4.2	18	0.442	355
安山岩(Ka)	4.2~33.0	25	0.378	1,150

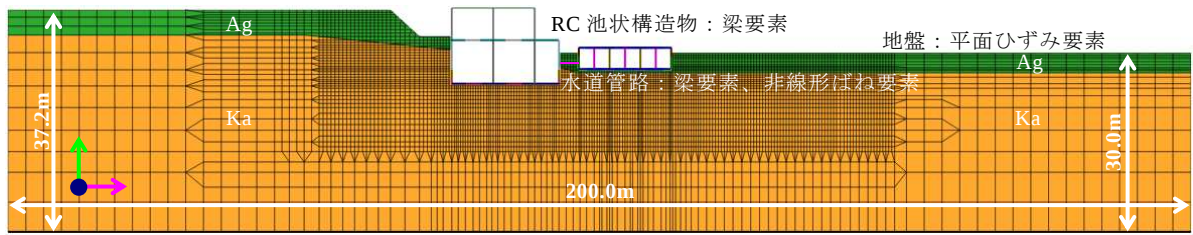
※ 地盤各層の層厚は解析左端部の値である。

表-2 RC 池状構造物の物理定数

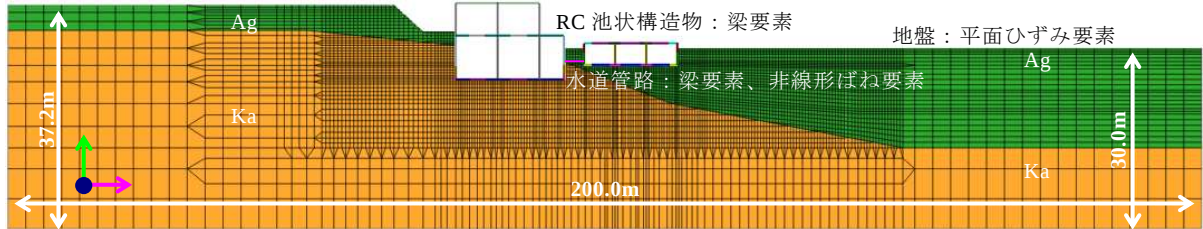
単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	ポアソン比 ν	ヤング係数 $E(\text{kN/m}^2)$
24.5	0.1667	2.35×10^7

表-3 水道管路（ダクタイル鋳鉄管）の物理定数

口径 $D_1(\text{mm})$	外径 $D_2(\text{mm})$	管厚 t(mm)	ポアソン比 ν	ヤング率 $E(\text{kN/m}^2)$
400	426	9	0.28	1.60×10^{11}



(a) ケース 2 (水道管路有り、基盤傾斜無し)



(a) ケース 4 (水道管路有り、基盤傾斜有り)

図-3 有限要素モデルの例 (ケース 2、4)

表-4 解析ケース

解析ケース	水道管路	基盤傾斜	節点数	要素数
ケース 1	無し	無し	7,756	7,771
ケース 2	有り	無し		
ケース 3	無し	有り		
ケース 4	有り	有り		

表-5 最大水平変位の比較 (mm)

出力点	ケース 1		ケース 2		ケース 3		ケース 3	
	正	負	正	負	正	負	正	負
D-1	8.4	23.2	8.4	23.2	8.1	22.4	8.1	22.4
D-2	9.0	23.9	9.0	23.9	8.8	23.2	8.8	23.2
D-3	10.0	25.7	9.9	25.6	9.9	25.1	9.8	25.1
D-4	10.0	25.7	9.9	25.6	9.9	25.1	9.8	25.0
D-5	8.2	23.0	8.2	23.0	7.9	22.2	7.9	22.2
D-6	8.3	23.1	8.2	23.1	8.1	22.4	8.1	22.4
D-7	8.5	23.3	8.5	23.3	8.4	22.7	8.4	22.6
D-8	8.9	23.8	8.9	23.8	8.7	23.1	8.7	23.1
D-9	8.1	22.9	8.1	22.9	8.3	22.6	8.3	22.6
D-10	8.2	23.0	8.1	23.0	8.3	22.6	8.3	22.5
D-11	8.2	23.0	8.1	23.0	8.5	22.7	8.4	22.7
D-12	8.1	23.0	8.1	22.9	8.6	22.8	8.6	22.8
D-13	8.0	22.9	8.0	22.9	8.5	22.8	8.5	22.8
D-14	8.1	22.9	8.1	22.9	9.1	23.4	9.1	23.4
D-15	8.1	22.9	8.1	22.9	8.7	22.9	8.7	22.9

※ 正はモデル右側、負はモデル左側の最大値である。

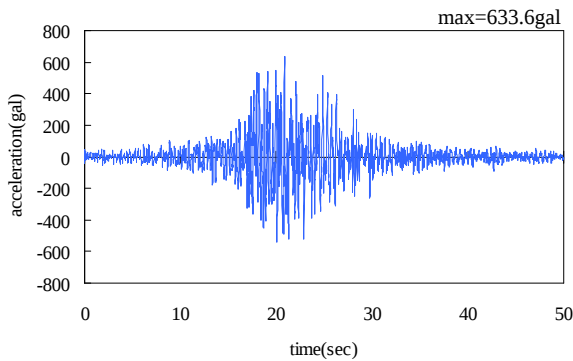


図-4 時刻歴加速度波形

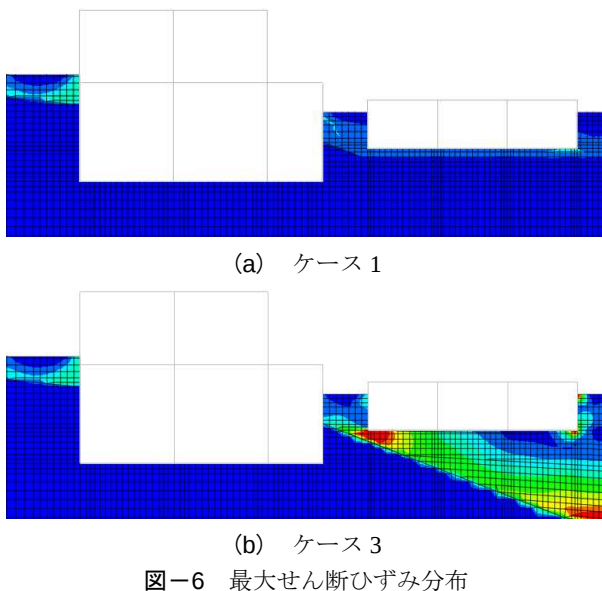
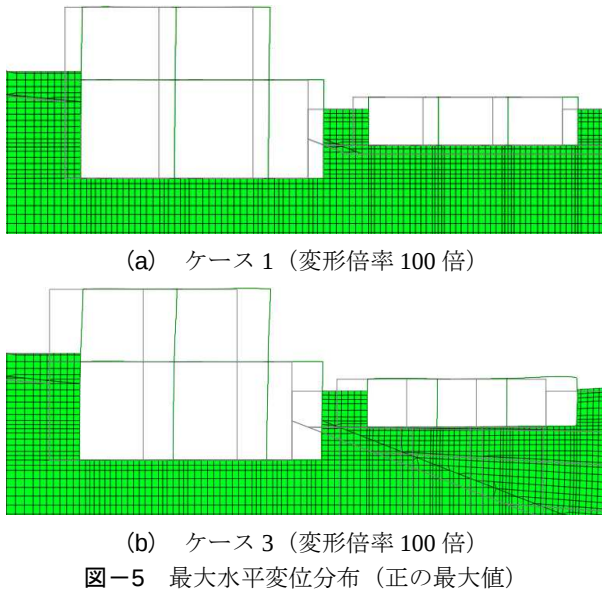
造継手のうち NS 形継手とし、配管の施工条件を考慮して継輪 1 個 (継手 2 箇所) の使用を想定した。水道管路のモデル化は、線状構造物の継手構造の不連続な挙動を考慮するため、管体に梁要素、継手に非線形ばね要素を用いた。非線形ばねのモデル化は、圧縮・引張の伸縮量を NS 形継手の設計照査用最大伸縮量 $\pm 120\text{mm}$ ($\pm 60\text{mm} \times \text{継手 2 箇所}$)⁵⁾とし、伸縮量を超過した場合に離脱防止力 (圧縮力・引張力) が ∞ に作用するモデルとした⁶⁾。非線形ばねモデルのイメージを図-2 に示す。

解析ケースを表-4 に示す。解析ケースは、RC 池状構造物間に水道管路を設定しないケースと設定したケースに加え、本解析が構造物間の相対変位や水平変位応答、水道管路の伸縮性に注目していることから、一般にポンプ場が位置する山間部の地盤条件を加味してポンプ井直下の基盤面の傾斜のないケースと傾斜のあるケースの計

4 ケースを対象とした (以下、ケース 1~4 と呼ぶ)。本解析に用いた有限要素モデルを図-3 に示す。

地盤調査結果¹⁾から、対象地盤は図-3 の断面において地層が傾斜しており、奥行き方向に地形・地質的な不整形性を有していない。RC 池状構造物間の地震時挙動は同図の断面方向で卓越すると考えられるため、本解析の目的より、この断面の水平方向の変位挙動特性に焦点を絞り、解析次元を 2 次元として扱った。解析には Soil Plus Dynamic を使用し、全応力非線形解析とした。

モデル化領域は、地盤の不整形性の影響を考慮するとともに、2 つの構造物を設定した場合に構造物と地盤の動的相互作用の影響が十分に小さくなる遠方地盤となるように⁷⁾、幅 200.0m、左右端部の深さをそれぞれ 37.2m、30.0m に設定した。側方境界には粘性境界、底面境界には鉛直変位の合成の影響により水平変位が過小評価され



ないように水平粘性境界、鉛直固定境界を設定した。

3. 検討用地震動

検討用地震動は水道施設耐震工法指針・解説におけるレベル2地震動の設定方法⁹⁾のうち、方法2による地域防災計画の想定地震動を使用し、解析領域下方から入力した。解析に用いた札幌市地域防災計画²⁾の工学的基盤面における時刻歴加速度波形を図-4に示す。検討用地震動の最大加速度振幅は633.6galである。

4. 解析結果と考察

まず、ケース1～4の各出力点における最大水平変位の比較を表-5に、ケース1、3の最大水平変位分布、最大せん断ひずみ分布の拡大図を図-5、6に示す。応答値の出力点は図-1に示すとおりである。

表-5の最大水平変位を比較すると、水道管路を設定しないケース(ケース1、3)と設定したケース(ケー

表-6 RC池状構造物間の最大相対変位量(mm)

ケース1		ケース2		ケース3		ケース4	
最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.4	0.5	0.4

※ 最大は管路の圧縮側、最小は管路の引張側である。

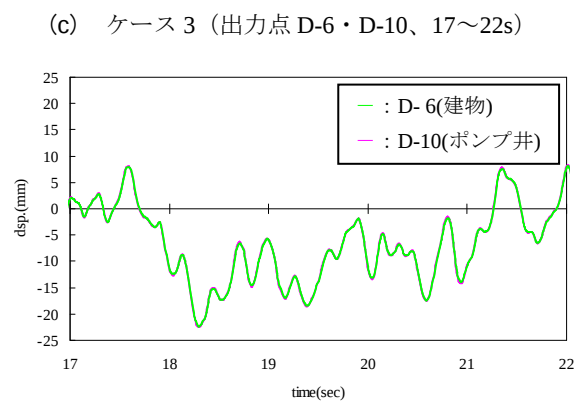
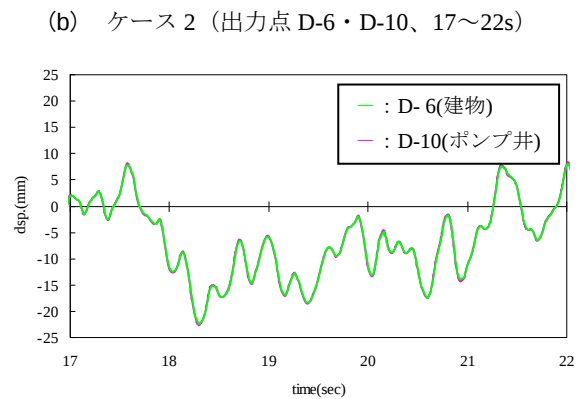
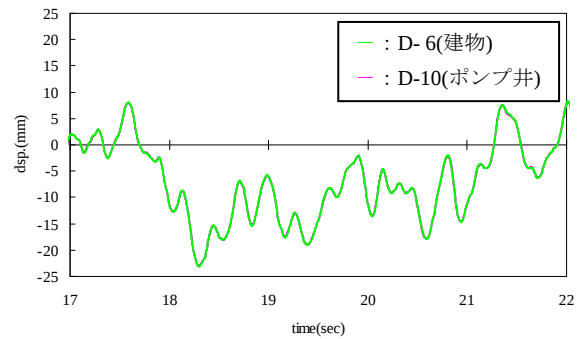
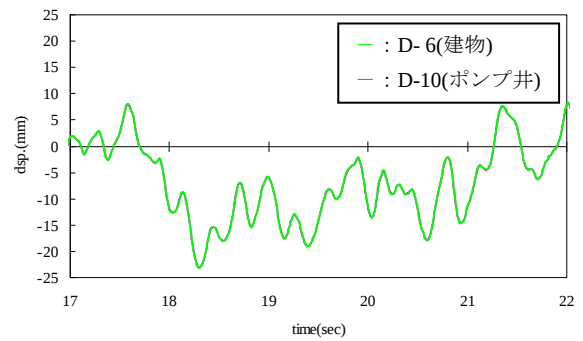


図-7 RC池状構造物間の水平変位応答の比較

ス 2、4) とで数値の変化はほとんど見られない。この比較において水平変位 0.1mm の差は、図-2 のように非線形ばねモデルの伸縮量±120mm の平坦な領域の間に数値解析上わずかな剛性を与えていることに起因するものと考えられる。一方、基盤面の傾斜のないケース（ケース 1、2）と傾斜のあるケース（ケース 3、4）とでは、傾斜のあるケースのポンプ井の水平変位が比較的大きくなっている。このことを、図-5 で見ると、表層の沖積砂礫層（Ag）のせん断波速度 V_s が大きいために、ケース 1、3 とともに図中の水平変位分布に大きなコントラストはないが、ケース 3 の方が水平方向に構造物が変位している。また、図-6 のように沖積砂礫層と安山岩層（Ka）との境界付近でケース 1 に比べてケース 3 のせん断ひずみが大きくなっており、基盤面の傾斜の影響によりポンプ井が変位し易くなったと推察される。

次に、ケース 1~4 の管路中心位置（D-6、D-10）における RC 池状構造物間の最大相対変位量の比較を表-6 に、地震動の主要動部（17~22s）における RC 池状構造物間の水平変位応答の比較を図-7 に示す。図中、緑線は建物（D-6）、紫線はポンプ井（D-10）の水平変位応答を表している。

表-6 より、水道管路を梁要素、非線形ばね要素でモデル化（ケース 2、4）しても、モデル化していないケース（ケース 1、3）と応答値に差は見られない。一方、最大水平変位の比較と同様に相対変位についても基盤面の傾斜の影響が表れており、基盤面の傾斜のないケースに比べ傾斜のあるケース（ケース 3、4）の方が構造物間の相対変位の値は 2~5 倍程度大きくなっている。また、図-7 より、基盤面の傾斜のないケース（ケース 1、2）では建物とポンプ井の水平変位応答が一致しているのに対し、基盤面の傾斜のあるケース（ケース 3、4）では建物とポンプ井との微小な変位振幅の差が見られ、建物よりも基盤面の傾斜直上に位置するポンプ井の方が変位していることが分かる。しかしながら、何れのケースにおいても圧縮側・引張側ともに解析結果の相対変位量が極めて小さく、設計照査用最大伸縮量±120mm を大きく下回っており、解析による応答値が照査用限界値を超えていない。この結果から、RC 池状構造物間の水道管路に高い伸縮性をもつ高価な伸縮可とう管³⁾を用いずに、耐震管として一般的に用いられる鎖構造継手（NS 形、S 形、SII 形等）を用いても、水平方向の地震時相対変位に対しては十分に変位吸収可能な範囲と判断される。このように解析結果に応じて RC 池状構造物間の水道管路の継手方式を適切に選択すれば、過不足のない合理的な地震対策が実施できると考えられる。

5. まとめ

本論文では、2 次元動的有限要素解析を用いた一つのケーススタディを通して RC 池状構造物間の地震時相対変位に対する水道管路の伸縮性について考察、評価した。本論文で検討を行った範囲において得られた結論は次のとおりである。

- ここで示した問題では、継手構造の不連続な挙動を考慮し梁要素（管体）、非線形ばね要素（継手）で

モデル化した水道管路を RC 池状構造物間に設定しても、圧縮側・引張側ともに構造物間の相対変位量が小さいために、水道管路を設定していないケースとの間に応答の差は見られなかった。

- 基盤面の傾斜の影響により、地層境界付近のせん断ひずみが大きくなり、RC 池状構造物が変位し易くなるため、基盤面の傾斜のないケースに比べて基盤面の傾斜のあるケースの方が相対変位量の値は 2~5 倍程度大きくなる。
- 本論文のケーススタディにおいては、何れのケースにおいても圧縮側・引張側ともに解析結果の RC 池状構造物間の相対変位量が小さく、照査用最大伸縮量を大きく下回っており、解析による応答値が照査用限界値を超えていない。
- RC 池状構造物間の水道管路に高い伸縮性をもつ高価な伸縮可とう管³⁾を用いずに、耐震管として一般的に用いられる鎖構造継手を用いても、水平方向の地震時相対変位に対して十分に変位吸収可能な範囲と判断される。解析結果に応じて RC 池状構造物間の水道管路の継手方式を適切に選択すれば、過不足のない合理的な地震対策が実施できると考えられる。

6. あとがき

本検討の結果から、山間部における RC 池状構造物間の地震時相対変位量に対して水道管路の伸縮性が十分にあるという結論を得ることができた。しかしながら、この結果は、対象地盤の特性と構造物の位置関係によるところが大きいと判断される。

今後の課題として、入力地震動、地盤剛性、構造物の位置や形状など、実際の建設事例に応じた解析を多数行い、RC 池状構造物間の地震時相対変位に対する水道管路の伸縮性に関して検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 札幌市水道局：南沢第 1 ポンプ場改修工事補足設計 土質調査業務、2012。
- 2) 札幌市：地震動及び被害の評価事業、2008。
- 3) 室野剛隆：強震時の非線形動的相互作用を考慮した杭基礎の耐震設計法に関する研究、鉄道総研報告、特別第 32 号
- 4) 社団法人地盤工学会：地盤の動的解析－基礎理論から応用まで－、61p、2007。
- 5) 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説Ⅱ各論、pp.33-38、pp.5-6、2009。
- 6) 畑中哲夫、太田正博、山本吉彦、喜多川眞好：剛継手により一体化された管路の地震挙動解析、クリモト技報No.49、pp.2-8、2003。
- 7) 公益社団法人土木学会：コンクリート標準示方書[設計編：標準]、pp.272、2012。
- 8) 社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説Ⅰ総論、pp.36-40、2009。