

ポンプ場の耐震性能照査のための地震時相対変位の評価について

弘前大学大学院理工学研究科 ○有賀義明
 北海道大学大学院 石川 嵩
 弘前大学大学院 樽井紀和

1. まえがき

水道施設は、生活に必須なライフラインのひとつであり、大都市部、内陸部を問わず地震時の機能保持が強く求められる施設である。1995年兵庫県南部地震以降、わが国では被害地震が頻発しており^{1)~4)}、2011年東北地方太平洋沖地震でも、本震および余震の際に東北地方から関東地方に及ぶ広範囲な地域で水道施設の地震被害が発生した^{5), 6)}。様々な地盤・構造物系の複合体として構成される、水道システムの地震時安全性を向上させるためには、個々の構造物だけに着目した個別的な耐震性能照査ではなく、管路で連結された構造物群等の相互影響を考慮した統合的な耐震性能照査が必要であると考えられる^{7)~9)}。

従来、構造物・施設の耐震設計は、個々の構造物ごとに実施され、隣接する複数の構造物や連結された構造物群の地震時挙動や相互影響を考慮した耐震設計は行われていないのが実情である。そのため、精度・信頼性の高い耐震性能照査を実行するためには強震動に対する地盤・構造物系の相互影響を考慮した定量的な解析評価が必要であると考えられる。そこで、強震動に対する複数の構造物・施設群の相互影響を考慮した耐震性能照査法の確立を目的として、管路で連結されたポンプ場を事例研究対象として、三次元動的解析により構造物間の地震時相対変位の評価について基礎的な検討を行った。

2. 三次元動的解析

2.1 解析対象

既設ポンプ場に隣接して新設ポンプ場が建設され、両者が、ある程度の変位に追随可能な、管路で連結される場合を解析対象として設定した。既設ポンプ場は地下1階の地下構造物、新設ポンプ場は地下1階・地上1階の半地下構造物とし、それぞれの寸法は表-1に示すように設定した。また、新・旧構造物の離間距離は3mとし、管路の長さは5m、直径は0.8mと仮定した。

表-1 新設および既設構造物の寸法

構造物	幅		高さ		奥行	
	地上	地下	地上	地下	地上	地下
新設	19m	19m	5m	5m	13m	26m
既設	16m		5m		26m	

2.2 解析モデル

三次元動的解析に用いた有限要素モデルを図-1に示す。そして、表層地盤を取り除いて

表示したものを図-2 に示す。既設ポンプ場は、土被り 0.5m の位置に設置されている。連結している 2 本の管路は解析モデルを正面からみて、手前側を管路 A、向こう側を管路 B とした。ポンプ場の構造は、新・旧ポンプ場の地震時の相互影響をより単純化して検討することに主眼をおき、基礎と壁とスラブによって構成した。地盤については、幅 76m、奥行 78m、深さ 10m の範囲をモデル化した。解析モデルの節点数は 20,503、要素数は 21,466 である。境界条件は、側方境界は粘性境界、下方境界は剛基盤とした。

2.3 動的物性値

ポンプ場、管路および地盤の動的物性値は、表-2 と表-3 のように設定した。新設ポンプ場と既存ポンプ場は鉄筋コンクリート造とし、管路はダクタイル鋳鉄管として設定した。ダクタイル鋳鉄管は可撓性があり、強震時には所定量の伸縮が可能である。こうしたダクタイル鋳鉄管の伸縮性を考慮する方法としては、ジョイント要素を用いて非連続的な挙動を評価する方法が考えられるが、ここでは、連続体解析によりダクタイル鋳鉄管の伸縮を疑似的に模擬することとし、管路は地盤と同様の地震時挙動を示すと仮定してダクタイル鋳鉄管の動的せん断剛性は管路が埋設されている Soil-1 と同等の値を仮定した。管路

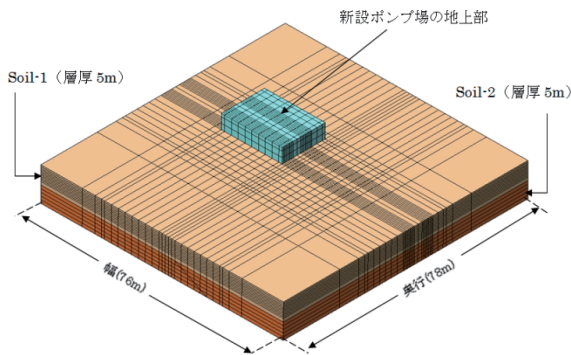


図-1 三次元解析モデル（全体）

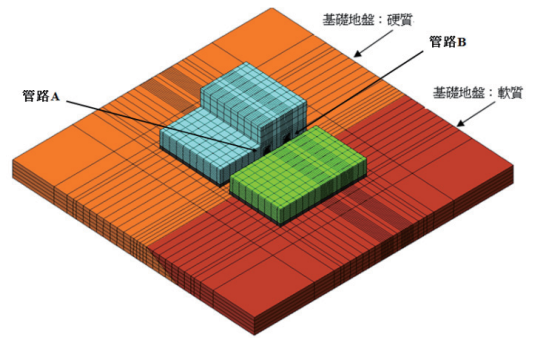


図-2 解析対象とした構造物と管路
(表層地盤を除いて表示)

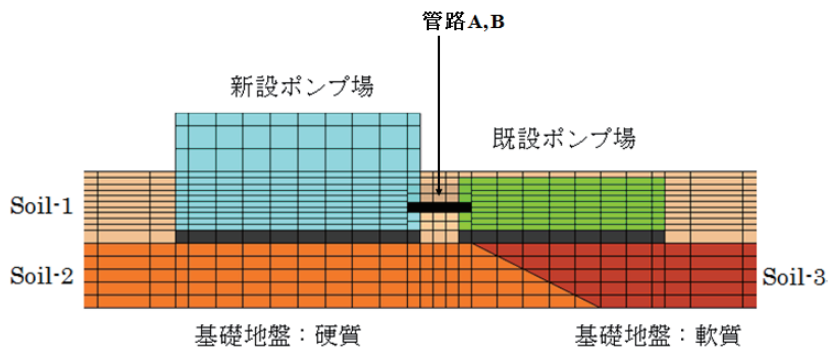


図-3 解析モデルの断面(管路 A の縦断面)

の減衰定数については、強震時のひずみ依存性を念頭に置いて、一般的に想定される値よりもやや大きい4%を仮定した。なお、地盤の動的せん断剛性に関しては、強震時のひずみ依存性を考慮して、初期剛性の1/5程度の値を用いた。同様に、減衰定数についても、一般的に想定される値よりも大きい8%を仮定した

表-2 構造物と管路の動的物性値

項目	新設ポンプ場	既設ポンプ場	管路 A	管路 B
せん断剛性 (N/mm ²)	9400	9400	12	12
密度 (g/cm ³)	2.35	2.35	7	7
ポアソン比	0.2	0.2	0.28	0.28
減衰定数	0.04	0.04	0.04	0.04

表-3 地盤の動的物性値

地盤構成	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	ポアソン比	せん断剛性 (N/mm ²)	減衰定数
Soil-1	5	180	1.98	0.4	12	0.08
Soil-2	5	330	1.96	0.4	40	0.08
Soil-3	5	180	1.98	0.4	12	0.08

2.4 入力地震動

入力地震動には、図-4に示したような、レベル2地震動として策定された模擬地震動¹⁰⁾を使用した。入力地震動の最大加速度は633.64galであり、新・旧ポンプ場の横断方向（管路の軸方向）に入力した。

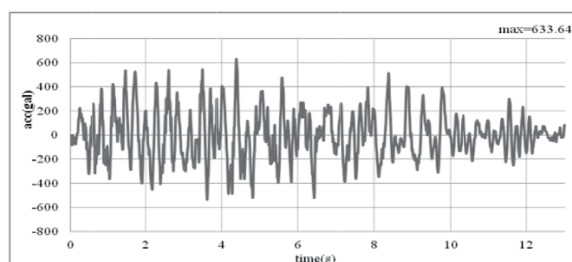


図-4 解析に用いた入力地震動

2.5 解析結果

1) 加速度応答

三次元動的解析で得られた最大加速度応答の分布状況を図-5（管路Aの縦断面）と図-6（連結部拡大）に示す。新設ポンプ側の管路A上端および管路B上端の最大加速度は、それぞれ1196.1galと1203.1gal、既設ポンプ場側ではそれぞれ1394.6galと1394.8galとなった。

2) 変位応答

新設ポンプ場と既存ポンプ場の連結部が最も遠ざかった時の変位図を図-7（管路 A の縦断面）と図-8（連結部拡大）に示す。

3) 連結部の相対変位

図-9 に示した代表出力位置の相対変位量を表-4 に示す。正の値は、新・旧ポンプ場が互いに遠ざかったとき値であり、負の値は、互いに近づいたときの値である。不均質地盤モデルを用いた解析での管路両端の相対変位量は、管路 A では最大約 10.8mm、管路 B でも最大約 10.8mm となった。

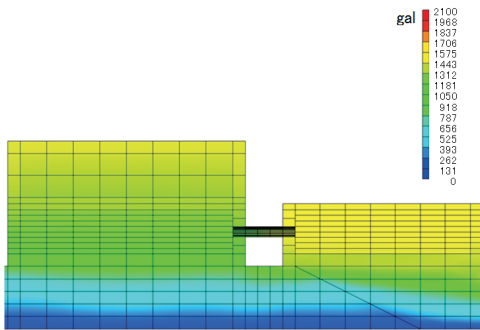


図-5 最大加速度の分布（管路 A の縦断面）

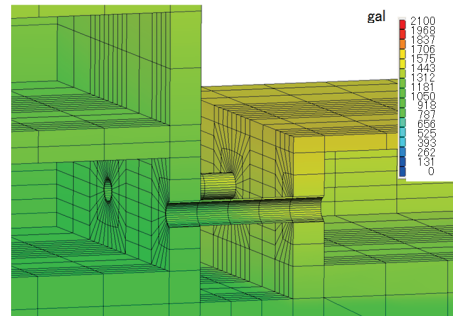


図-6 最大加速度の分布（連結部拡大）

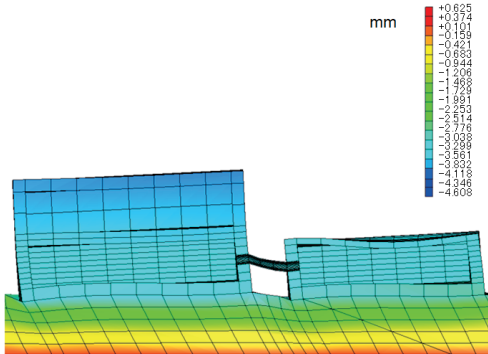


図-7 新・旧ポンプ場が最も離れた時の変位図（変位倍率 80 倍）

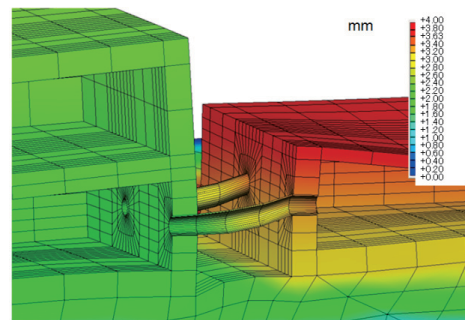


図-8 新・旧ポンプ場が最も離れた時の変位図（連結部拡大、変位倍率 80 倍）

2.6 考察

管路で連結された新・旧ポンプ場を検討対象として、管路両端の相対変位量に着目して三次元動的解析により基礎的な検討を行った。その結果、動的剛性が比較的高い構造物の下に動的剛性が低い基礎地盤がある場合、構造物の加速度応答は小さくなる反面、構造物の変位挙動は大きくなり、管路両端の相対変位量が增大することが確認できた。

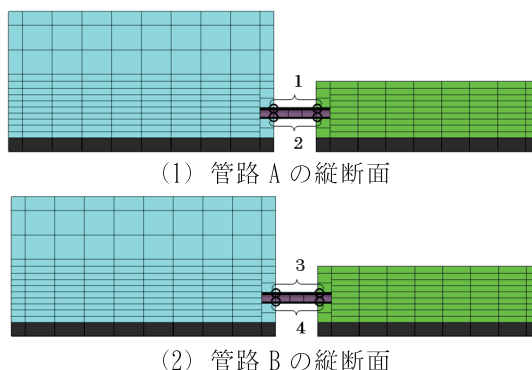


図-9 相対変位の代表出力位置

表-4 管路両端の相対変位量

位置		最大相対変位 (mm)	最小相対変位 (mm)
1	管路 A 上端	10.8	-10.2
2	管路 A 下端	10.8	-9.97
3	管路 B 上端	10.8	-10.2
4	管路 B 下端	10.7	-10.0

(備考) 正：離反時、負：接近時

大河川の最下流域にある沖積平野では軟弱地盤が広く厚く分布しているため、こうした地域にある水道施設に関しては、地盤・構造物連成系の長周期化の影響によって加速度応答は小さくなる反面、強震時には構造物が互いに逆位相で挙動するようになり構造物間の相対変位は増大し、こうした相対変位によって管路や構造物が損傷・破壊を受ける可能性があるものと考察される。

S波速度が低い軟弱地盤では、こうした傾向がより顕著になるものと考えられることから、地震動の長周期化・長時間化、構造物の変位挙動の長周期化、相対変位量の増大、相対変位による構造物・施設の損傷・破壊等について定量的な解析評価を平素から実施しておくことが必要であると考察される。

3. あとがき

形状が異なる二つの構造物を解析対象として、三次元動的解析によりそれらの地震時挙動を解析した結果、両者が互いに逆位相で変位挙動することによって両者間の相対変位が大きくなることを確認することができた。こうした相対変位の増大によって、管路や構造物が損傷・破壊を受ける可能性があるものと考察される。地震時挙動が異なる構造物によって構成される、複合構造的な施設の耐震性能照査に際しては、強震時の隣接構造物や連結構造物の相互影響、基礎地盤の硬軟の影響等を的確に考慮することが重要であると考えられる。

水道施設の地震被害は、構造物の耐震構造的な問題だけではなく、基礎地盤や周辺の地形条件にも大きく依存するものと考えられる。そのため、精度・信頼性の高い耐震性能照査を行うためには、構造物と地盤の相互影響、隣接構造物や連結構造物の相互影響、精緻な変位評価・相対変位評価等が重要であると考えられる。今後の課題としては、管路の継手部のモデル化（ジョイント要素を活用した解析）、地震動の作用方向の影響（管路横断方向加振、縦断方向加振、三方向同時加振等）、動的物性値の非線形性の影響等について検討を深める予定である。

謝辞

研究の実施に際しては、札幌市水道局の猪子敬之介様から検討対象について貴重な情報提供をしていただきました。また、解析プログラム DIANA を用いたラン作業に際しては、JIP テクノサイエンス株式会社の竹原和夫様から有益な助言を多くいただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 新潟県中越地震水道現地調査団(厚生労働省健康局水道課)：新潟県中越地震水道被害調査報告書，2005.2
- 2) 平成 19 年(2007 年)能登半島地震水道施設被害等調査団(厚生労働省健康局水道課)：平成 19 年(2007 年)能登半島地震水道施設被害等調査報告書，2007.8
- 3) 平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震水道施設被害等調査団(厚生労働省健康局水道課)：平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震水道施設被害等調査報告書，2008.3
- 4) 厚生労働省健康局水道課，日本水道協会：平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震水道施設被害等調査報告書，2009.6
- 5) 厚生労働省健康局水道課，日本水道協会：平成 23 年(2011 年)東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書，2011.9
- 6) 鋤田泰子，片桐信：土木学会東日本大震災被害調査団(地震工学委員会)緊急地震被害報告会，2011.4
- 7) 厚生労働省：水道の耐震化計画等策定指針，2008.3
- 8) 厚生労働省健康局水道課，水道施設の技術的基準を定める省令の一部改正と水道施設耐震化の推進について，水道協会雑誌，第 77 巻第 10 号(第 889 号)，p.43-46, 2008.10
- 9) 日本水道協会：水道施設耐震化の課題と方策，2008.12
- 10) 札幌市地震防災検討委員会：地震防災対策に関する提言，2005