

水循環施設における免震・免波構造の効果の 評価に関する検討

有賀 義明¹・佐藤 優乃²・渡辺 高志³・西本 安志⁴・曹 増延⁵
坂下 克之⁶・鈴木 高二朗⁷・有川 太郎⁸・浅井 光輝⁹・堀 宗朗¹⁰

¹フェロー会員 博（工） 弘前大学教授 大学院理工学研究科（〒036-8561 青森県弘前市文京町3）
E-mail:y-a-arig@hirosaki-u.ac.jp

²正会員（株）ニュージェック 都市・地域整備グループ（〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20）
E-mail:satoyn@newjec.co.jp

³正会員 博（工）（株）構造計画研究所 防災・環境部（〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3）
E-mail:takashi-watanabe@kke.co.jp

⁴正会員 博（工）シバタ工業（株）技術部（〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾1058）
E-mail:Yasushi_Nishimoto@sbt.co.jp

⁵Ph.D（株）JPビジネスサービス 社会環境部（〒1358451 東京都江東区深川2-2-18）
E-mail:sou@jpbs.co.jp

⁶正会員 大成建設（株）技術センター 土木技術研究所（〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1）
E-mail:katsuyuki.sakashita@sakura.taisei.co.jp

⁷正会員 博（工） 港湾空港技術研究所 海洋研究領域（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
E-mail:suzuki.k@pari.go.jp

⁸正会員 博（工） 中央大学教授 理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27）
E-mail:arikawa@civil.chuo-u.ac.jp

⁹正会員 九州大学准教授 工学研究院社会基盤部門（〒819-0395 福岡市西区元岡744）
E-mail:katsuyuki.sakashita@sakura.taisei.co.jp

¹⁰正会員 Ph.D. 東京大学教授 地震研究所（〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1）
E-mail:hori@eri.u-tokyo.ac.jp

沿岸域に位置する水循環施設に関しては、強震動に対してのみならず津波に対する安全性の確認と確保が必要になる。強震動と津波に対する対策技術として提案された、免震・免波構造を研究対象とし、その効果の解析評価について検討した。解析モデルは、無対策モデルを1ケース、免震・免波対策モデルを2ケース設定し、免震効果については三次元動的解析により、免波効果については三次元静的解析により検討した。その結果、提案する免震・免波構造の適用により構造物に発生する応力を大幅に低減することが可能なこと、ジョイント要素を用いた解析により構造物の回転・並進の評価が可能なこと、津波の波力を静的荷重として作用させる解析によって免波効果の評価が可能なこと等の結果が得られた。

Key Words: water cycle facility, seismic isolation, tsunami, wave pressure reduction, 3D analysis

1. まえがき

水循環施設は、日常生活や産業活動の維持、公衆衛生の確保等、人々の生活に必要なライフライン施設である。水循環施設の内、下水処理施設は、下水の浄化を担う施設であり、自然災害が発生した場合でも下水処

理機能の継続的な維持が求められる施設である。下水の最終処理を担う浄化センターは、下水が自然流下によって収集されるため沿岸域や河川下流域に多く立地されている。そのため、大地震時には、強震動のみならず津波による被害を受ける危険性がある。また、浄化センターの最終沈殿池等は、維持管理性および経済性から覆蓋が

施されておらず、浸水に対して脆弱であることが多い。

2011年東北地方太平洋沖地震では、沿岸域に建設されていた、多くの下水処理施設で大きな地震被害が発生した¹⁾。仙台市南蒲生浄化センターは、10m以上の津波により大きな被害を受けた。特に、浄化センターにあるポンプ室内の機械・電気設備が浸水により使用不可能となり施設全体の改築が必要な状態となった²⁾。

東日本大震災での被害事例を踏まえ、国³⁾、地方自治体⁴⁾、学協会⁵⁾、⁶⁾等から下水処理施設の耐震・耐波対策に関する調査研究成果が発表されている。将来的には、南海トラフにおける巨大地震の発生が想定されており、沿岸域に位置する下水処理施設の地震対策技術の合理化と実効性の向上が必要であり、強震動に対する健全性ととも、津波に対する健全性の確保と向上が強く求められる。このような必要性から、強震動に対する免震効果と津波に対する免波効果を併せ持つ、免震・免波構造を研究対象として、免震・免波効果の解析評価法について基礎的な検討を行った。なお、高度成長期に建設された多くの施設が、建設後数十年を迎え高経年化が進みつつある。したがって、今後、既存施設の更新の必要性が益々増大すると考えられる。このような時代背景から、免震・免波構造の考え方は、新規施設に対してのみならず、老朽化した既存施設の更新計画において有効に役立てることができると考えられる。

2. 研究目的

(1) 免震・免波構造の概念

免震・免波構造は、強震動や津波の波力が構造物に作用した場合に、構造物の回転や並進（水平移動）を許容することによって構造物内に発生する応力を低減し、構造物の損傷を抑制軽減するという考え方であり、図-1に免震・免波構造の概念を示す⁷⁾。

免震・免波構造は、構造物の底面に免震ゴムを設置し、構造物と周辺地盤との間には流動性のあるアスファルト系免震材⁸⁾を介在させる構造となっている。こうした構造によって、免震効果については、免震ゴムによる強震動の伝播の低減、流動性免震材による構造物の振動抑制が期待され、免波効果については、津波の圧力が作用した際に構造物の回転・並進を励起させることによって構造物内に発生する応力を低減させることが期待できる。

(2) 検討の主旨

本研究の目的は、沿岸域に位置する水循環施設の大地震時の使用性・修復性の確保・向上に役立つ合理的な対策技術の実用化開発であり、ここでは、免震・免波構造の効果の解析評価について基礎的な検討を行った。解析

評価に際しては、主として、構造物の底面形状の影響、構造物と免震材の接触面の非連続的挙動の模擬、構造物の回転・並進の評価、免震・免波構造の有効性の評価に視点を置いた。

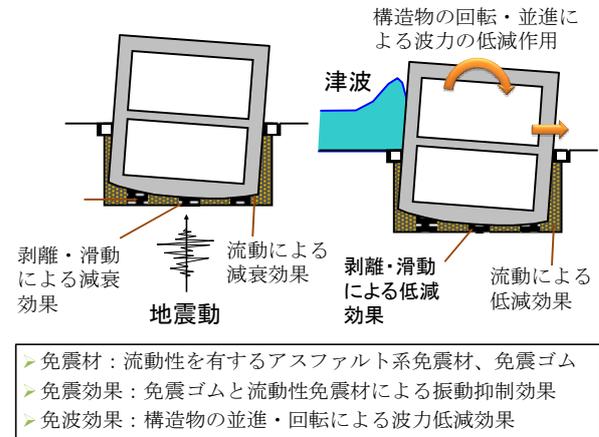


図-1 免震・免波構造の概念

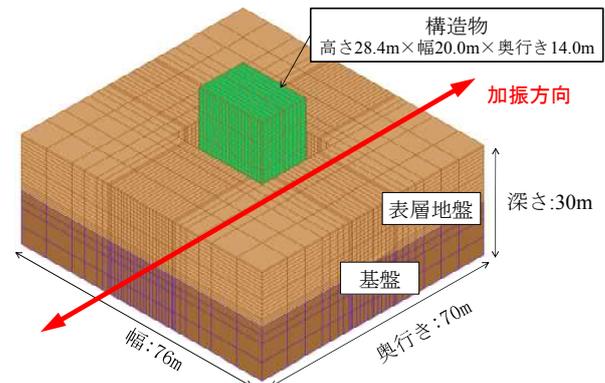


図-2 免震効果の検討のための三次元解析モデル

3. 三次元的解析による免震効果の検討

(1) 概要

免震・免波構造の有効性を評価するために、強震動に対する免震効果と津波の波力に対する免波効果について三次元解析により検討した。検討に際しては、構造物の底面の形状について2種類の条件を設定し、免震・免波構造については3種類の解析モデルを設定して三次元解析を行った。

(2) 地盤・構造物連成系の解析モデル

東日本大震災における浄化センターの被害事例を参考に図-2に示したような解析モデルを設定した。解析対象は、地上2階・地下2階の4階建の鉄筋コンクリート構造物とし、地上部の高さ13m、地下部の深さ15.4m、幅14m、奥行20m、壁と床の厚さ0.5mとした。地盤は軟質

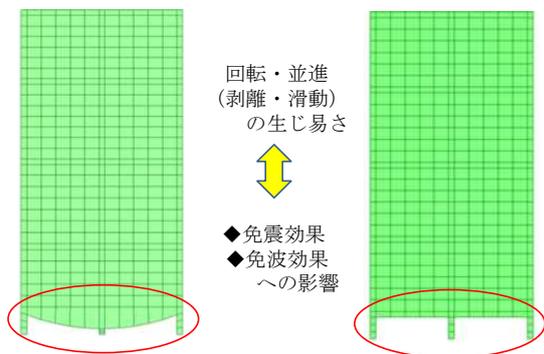
地盤を仮定し、二層の水平成層地盤とし、幅 76 m、奥行 70 m、深さ 30 m の領域をモデル化した。境界条件は、側方境界は粘性境界、下方境界は剛基盤とした。解析には、汎用解析プログラム ISCEF を使用した。

(3) 構造物の底面形状

構造物の回転に着目した場合、構造物の底面形状を曲面にした方が回転が発生し易くなると考えられるが、この場合、常時の回転の抑止が必要になることから、構造物の底面に免震ゴムを配置して常時の安定性を保持することが必要になる。また、構造物の並進に着目した場合は、構造物の底面形状を平面にした方が水平移動が生じ易くなると考えられる。そこで、構造物の底面形状については、図-3 に示したように、曲面と平面の 2 通りの条件を設定して比較解析を行った。

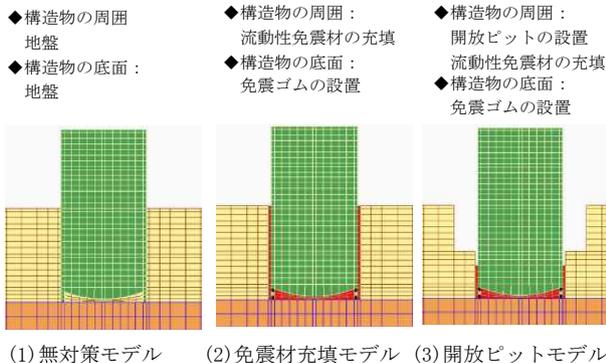
(4) 無対策モデルと免震・免波対策モデル

免震効果を検討するために、図-4 に示したように、無対策モデルを 1 ケース、免震・免波対策モデルを 2 ケース設定した。図-4 では、構造物の底面形状が曲面の場合を記載しているが、平面の場合も曲面の場合と同様である。無対策モデルでは、構造物の周囲は地盤であり、構造物は一般的な半地下構造物に相当する。



(1) 構造物の底面形状を曲面とした場合 (2) 構造物の底面形状を平面とした場合

図-3 構造物の底面形状の設定



(1) 無対策モデル (2) 免震材充填モデル (3) 開放ピットモデル

図-4 比較検討のための解析モデル
(構造物の底面形状が曲面の場合を表示)

免震・免波対策モデルに関しては、免震材充填モデルと開放ピットモデルの 2 種類を設定した。免震材充填モデルは、構造物の底面に免震ゴムを配置し、構造物の周囲に流動性免震材を充填したものである。開放ピットモデルは、構造物の周囲に開放ピットを設け津波が構造物に衝突する直前に開放ピットに流下し津波の波力の低減効果を狙ったものであり、構造物の底面には免震ゴムを配置し、構造物の底面付近にのみ流動性免震材と充填したものである。

(5) 解析用物性値

解析に用いた、構造物と免震材の物性値を表-1 に、地盤の物性値を表-2 に示す。構造物の回転・並進については、構造物が剛体的な変位挙動を示すことを想定して、ここでは、構造物のせん断剛性の値を高めに仮定した。地盤については、表層地盤（第一層）は S 波速度 90 m/s、基礎地盤（第二層）は S 波速度 330 m/s を仮定した。

(6) ジョイント要素の配置と物性値

構造物の回転・並進を模擬するためには、構造物と免震材の接触面における非連続的挙動（剥離、滑動）を模擬することが必要になることから、図-5 に示したように、構造物の底面と免震ゴムの接触面、構造物の周囲と流動性免震材の接触面（側面および底面の全面）にジョイント要素を配置した。

表-1 構造物と免震材の物性値

項目	せん断剛性 N/mm ²	密度 t/m ³	ポアソン比
構造物	14600	2.40	0.20
免震ゴム(硬質ゴム)	5000	0.96	0.49
流動性免震材	0.24	1.00	0.49

表-2 地盤の物性値

層	層厚 m	せん断剛性 N/mm ²	S 波速度 m/s	密度 t/m ³	ポアソン比
一層	15.4	16	90	2.0	0.40
二層	14.6	240	330	2.2	0.35

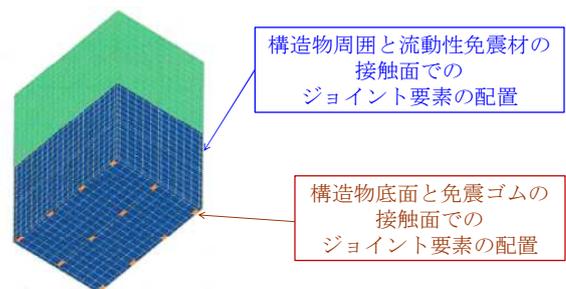


図-5 構造物と免震材の接触面での非連続的挙動を模擬するためのジョイント要素の配置

表-3 ジョイント要素の物性値

項目	剛性 N/mm^2		引張強度 N/mm^2	せん断強度 N/mm^2
	法線方向	せん断方向		
接触面	35040	14600	0.1	0.1

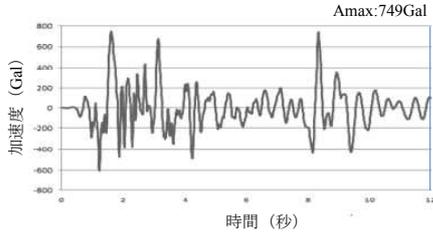


図-6 免震効果の検討に用いた入力地震動⁹⁾

表-4 解析モデルおよび構造物の底面形状による最大加速度の比較

解析モデル	構造物の底面形状	構造物における最大加速度	発生時刻
無対策モデル	曲面	2248.2 Gal	8.52 s
	平面	2404.4 Gal	8.54 s
免震材充填モデル	曲面	498.3 Gal	2.11 s
	平面	398.1 Gal	10.06 s
開放ピットモデル	曲面	462.6 Gal	2.13 s
	平面	361.2 Gal	9.34 s

ジョイント要素（接触面要素）は、2つの平面で構成され、所定以上の引張応力が作用すれば剥離し、所定以上のせん断応力が作用すれば滑動するものであり、物性値は表-3のように仮定した。

(7) 入力地震動

免震効果の解析評価のために用いた入力地震動を図-6示す⁹⁾。加振方向は、図-2に示したように構造物の短軸方向とし、下方入力基盤から入力した。

(8) 免震効果に関する解析結果

a) 加速度応答

3種類の解析モデルに関して、構造物の底面形状が曲面と場合と平面の場合の最大加速度の解析結果を表-4に示す。また、構造物の底面形状が曲面の場合の最大加速度分布を図-7に、底面形状が平面の場合の最大加速度分布を図-8に示す。

表-4より、構造物の底面形状の影響に関しては、無対策モデルでは、底面形状が平面の時に2404.4Galであるのに対して曲面の時に2248.2Galであり、構造物の最大加速度はやや変化した程度であった。免震材充填モデルでは、底面形状が平面の時に398.1Galに対して曲面の時は498.3Gal、開放ピットモデルでは、底面形状が平面の時に361.2Gal、曲面の時は462.6Gal（構造物底面が曲面）と

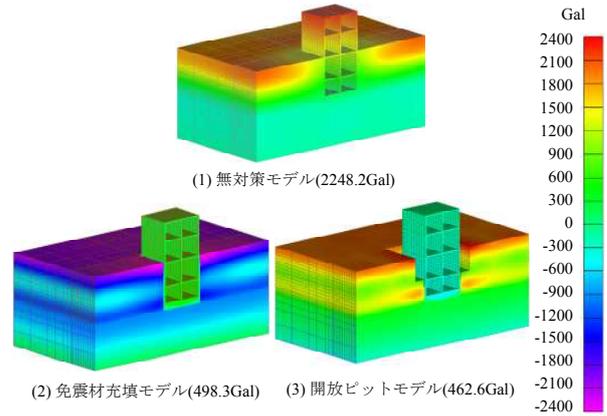


図-7 構造物の底面形状が曲面の場合の最大加速度分布

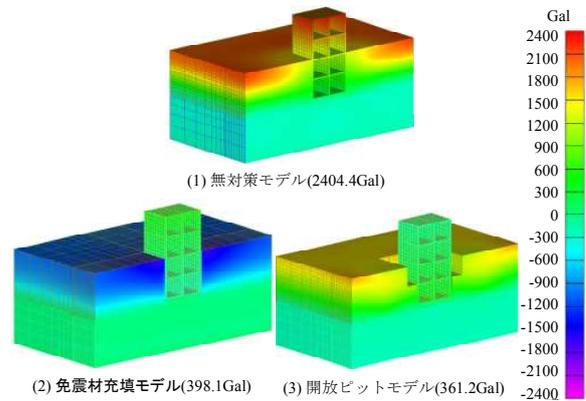


図-8 構造物の底面形状が平面の場合の最大加速度分布

表-5 地震動による構造物の最大変位の比較

解析モデル	構造物の底面形状	構造物における最大変位	発生時刻
無対策モデル	曲面	21.1 cm	1.79 s
	平面	24.1 cm	1.80 s
免震材充填モデル	曲面	29.2 cm	2.18 s
	平面	31.2 cm	2.95 s
開放ピットモデル	曲面	28.3 cm	2.18 s
	平面	29.7 cm	2.93 s

なり、底面形状の影響が比較的目立つようになり平面の場合よりも曲面の方が加速度応答が大きい結果となった。

免震・免波構造の免震効果に関しては、無対策モデルに比して免震材充填モデルと開放ピットモデルでは最大加速度の値が大幅に低減しており、免震材充填モデルおよび開放ピットモデルにおける免震効果の可能性を示す結果が得られた。

b) 変位応答

地震動による構造物の最大変位の比較結果を表-5に示す。また、構造物で最大の変位が発生した時刻の変位分布を図-9（構造物の底面形状が曲面の場合）と図-10（構造物の底面形状が平面の場合）に示す。

無対策モデルでは、構造物における最大変位は、構造物の底面形状が曲面の時は21.1cm、平面の時は24.1cmであった。免震材充填モデルでは、底面形状が曲面の時に29.2cm、平面の時に31.2cm、開放ピットモデルでは、曲面の時に28.3cm、平面の時に29.7cmとなった。免震・免波構造では、構造物の回転・並進といった変位挙動を許容することによって、強震動と津波の波力によって構造物に生じる応力を軽減し、健全性の向上を図ろうとするものであり、想定したとおりに、無対策モデルよりも免震材充填モデルと開放ピットモデルの方が変位量が大きくなった。構造物の底面形状の影響に関しては、曲面よりも平面の方が変位量が大きい結果となった。

c) 地震時応力

地震動によって構造物に発生した応力（最大主応力）の解析結果を表-6に示す。また、構造物で最大の応力が発生した時刻での地震時応力分布を図-11（構造物の底面形状が曲面の場合）と図-12（構造物の底面形状が平面の場合）に示す。

無対策モデルでは、構造物における最大応力（引張応力）は、構造物の底面形状が曲面の時は27.17N/mm²、平面の時は19.35N/mm²であった。免震材充填モデルでは、

底面形状が曲面の時に2.47N/mm²、平面の時に2.39N/mm²、開放ピットモデルでは、曲面の時に2.49N/mm²、平面の時に2.27N/mm²となった。地震時応力は、構造物の損傷・破壊を判定する際の直接的な評価量であることから、免震効果を評価する際の重要な指標になるが、無対策モデルに比して、免震材充填モデルと開放ピットモデルでは地震時応力が大幅に低減しており、免震効果が大きいことを示す結果が得られた。

d) 考察

無対策モデルと免震材充填モデルおよび開放ピットモデルの解析結果の比較により、無対策モデルに比して免震材充填モデルおよび開放ピットモデルでは構造物に発

表-6 地震時応力の比較

解析モデル	構造物の底面形状	構造物における最大応力	発生時刻
無対策モデル	曲面	27.17N/mm ²	1.79 s
	平面	19.35 N/mm ²	1.80 s
免震材充填モデル	曲面	2.47 N/mm ²	2.18 s
	平面	2.39 N/mm ²	2.95 s
開放ピットモデル	曲面	2.49 N/mm ²	2.18 s
	平面	2.27 N/mm ²	2.93 s

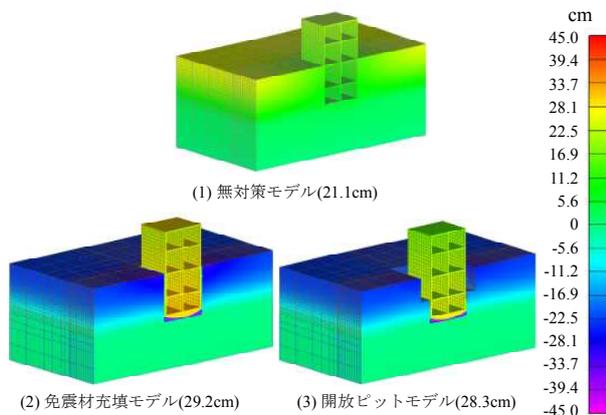


図-9 構造物の底面が曲面の場合の最大変位分布

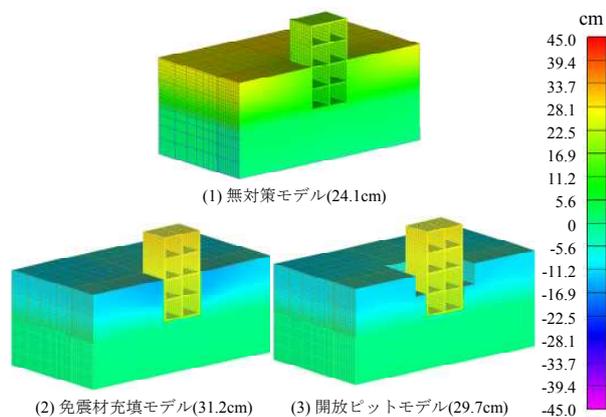


図-10 構造物の底面が平面の場合の最大変位分布

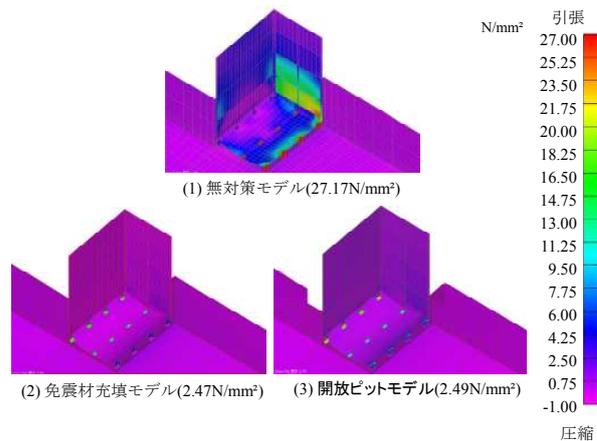


図-11 構造物の底面が曲面の場合の地震時応力分布

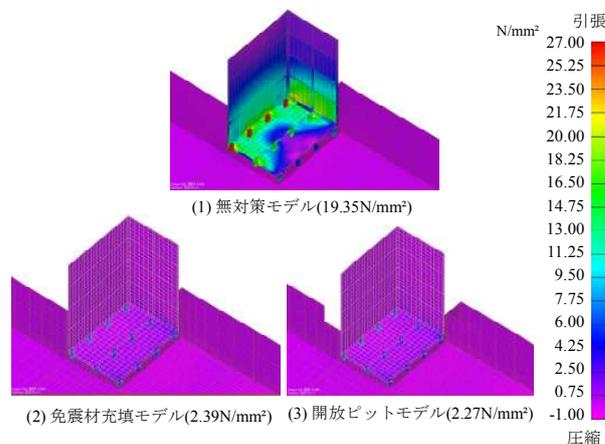


図-12 構造物の底面が平面の場合の地震時応力分布

生ずる地震時応力が大幅に減少した。この結果から、免震効果については大きな効果が期待できるものと考えられる。構造物の底面形状の影響については、曲面よりも平面の方が構造物における地震時応力が小さくなる傾向があることから、底面形状が平面である方が免震効果に優れているものと考えられる。免震材充填モデルおよび開放ピットモデルでは、地震時応力は小さくなる反面、構造物の変位挙動は大きくなる。水循環施設は、管路と構造物が連結された複合構造になることから、構造物の変位挙動が大きい場合は、管路と構造物の相対変位が増大することになるので、許容される変位量との兼ね合いから変位挙動を制御することが必要になると考えられる。

4. 三次元静的解析による免波効果の検討

(1) 概要

免震効果の検討に用いたものと同じ解析モデルを用いて免波効果の解析評価を行った。津波の波力は、SPH法による解析結果⁷⁾に基づいて設定し、構造物の壁面に分布荷重として作用させ、津波の波力が作用した時の構造物の変位と応力を評価した。そして、解析結果に基づいて免波効果について考察し、更に、免波効果の解析評価法について考察した。

(2) 解析モデル

検討に用いた三次元解析モデルを図-13に示す。免震効果の検討と同様に、図-14に示したように、無対策モデルを1ケース、免震・免波構造モデルを2ケース（免震材充填モデルと開放ピットモデル）設定し比較解析を行った。構造物、基礎地盤ともにソリッド要素でモデル化し、免震材充填モデルと開放ピットモデルでは、構造物と免震材の間に非連続的挙動（剥離・滑動）を模擬するためにジョイント要素を配置した。解析は線形解析で行い、解析には汎用解析プログラムISCEFを使用した。

(3) 解析用物性値

津波の波力は構造物に短時間に作用するので載荷速度が速い条件下での物性値を設定するのが望ましいと考えられることから、構造物、免震材、地盤およびジョイント要素の物性値は、前出の表-1、表-2、表-3に示した値を用いた。

(4) 津波の波力

津波の波力については、構造物に動的荷重として作用させる方法、静的荷重として作用させる方法等が考えられるが、ここでは、基礎的な検討として後者により検討した。静的荷重として作用させる場合、津波の波力の大き

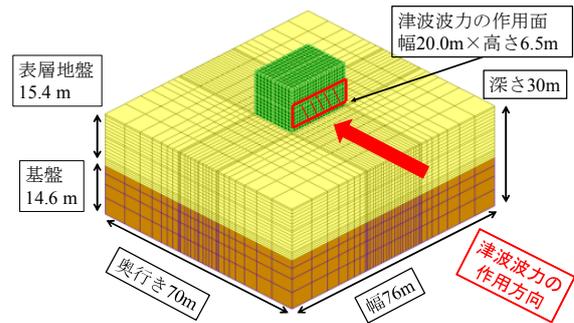


図-13 免波効果の検討に用いた三次元解析モデル

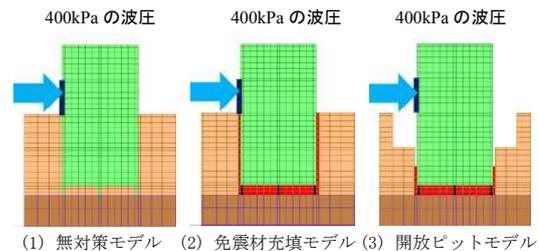


図-14 津波の波力の設定

きさ、鉛直面内の分布形状、水平面内の分布形状等の設定が必要になるが、津波の波力の大きさに関しては、図-14に示したように、無対策モデル、免震材充填モデル、開放ピットモデルともに400kPaと設定した。分布形状については、三角形分布、台形分布等が考えられるが、ここでは、鉛直分布、水平分布ともに単純な矩形分布を仮定した。津波波力の作用方向は、図-13に示したように、構造物の短軸方向とし、地表面から高さ6.5m×幅20.0mの矩形のエリアに作用させた。

(5) 解析結果

a) 変位

津波の波力による構造物の最大変位の値を表-7に示す。また、底面形状が曲面の場合と平面の場合の構造物の変位状況をそれぞれ図-15に図-16に示す。無対策モデルでは、構造物の下半分が地盤内にあるため、構造物の変位は基本的に小さく、底面形状が曲面の場合は3.25cm、底面形状が平面の場合は3.39cmとなった。開放ピットモデルでは、3種類の解析モデルの中では構造物の回転・並進が最も生じやすいことを反映して、構造物の変位は大きくなり、底面形状が曲面の場合は56.78cm、底面形状が平面の場合は70.48cmとなった。免震材充填モデルでは、構造物と地盤の間に流動性アスファルト系免震材が介在するため、構造物の変位は無対策モデルよりは大きく開放ピットモデルよりは小さい結果となり、底面形状が曲面の場合は10.13cm、底面形状が平面の場合は16.40cmとなった。図-15と図-16より、特に開放ピットモデルの解析結果から、ジョイント要素を用いた解析によ

表-7 津波の波力による最大変位量の比較

解析モデル	構造物の底面形状	構造物での最大変位
無対策モデル	曲面	3.25 cm
	平面	3.39 cm
免震材充填モデル	曲面	10.13 cm
	平面	16.40 cm
開放ピットモデル	曲面	56.78 cm
	平面	70.48 cm

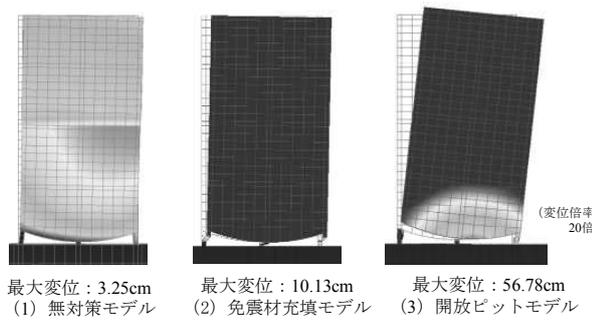


図-15 津波の波力による構造物の変位挙動
(底面形状が曲面の場合の結果の比較)

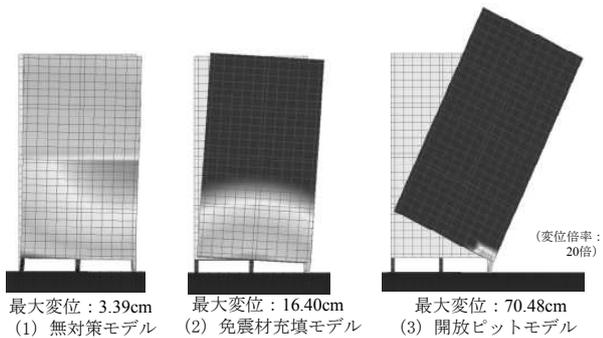


図-16 津波の波力による構造物の変位挙動
(底面形状が平面の場合の結果の比較)

って回転・並進（剥離・滑動）といった非連続的挙動を模擬することができることを確認することができた。構造物の底面形状に関しては、底面形状が下に凸の曲面の場合、免震ゴムが、むしろ構造物の回転・並進を抑制するようになり、底面形状は平面の方が回転・並進を生じ易くなることを確認することができた。

b) 応力

津波の波力が作用した場合の構造物での応力分布について、構造物の底面形状が曲面の場合と平面の場合の解析結果をそれぞれ図-17と図-18に示す。図-17と図-18の比較から津波の波力によって生じた応力は、底面形状が曲面の場合よりも平面の場合の方が小さいことが分かる。図-19に示した代表位置の最大応力の値を表-8に示すが、これらの値からも、底面形状が曲面の場合よりも平面の方が応力が小さいことが理解できる。

底面形状が曲面の場合、免震材充填モデルでは、構造

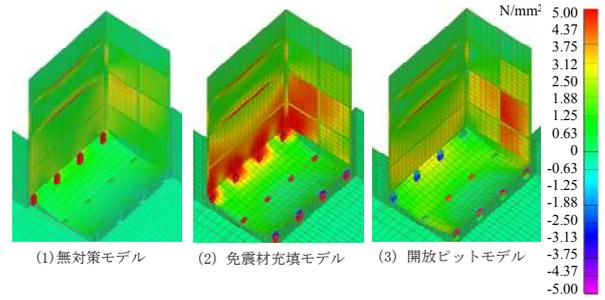


図-17 構造物の底面形状が曲面の場合の津波波力により生じた最大応力分布

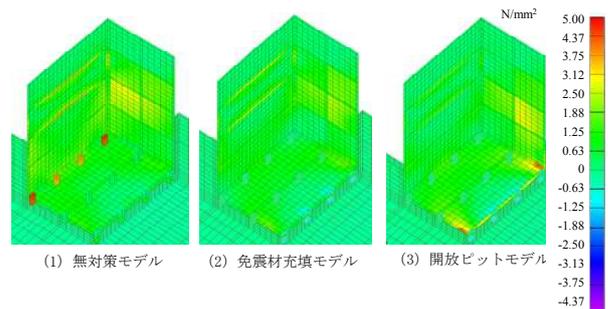


図-18 構造物の底面形状が平面の場合の津波波力により生じた最大応力分布

表-8 津波の波力による構造物での応力の比較

解析モデル	構造物の底面形状	最大主応力 N/mm ²	
		位置 A (構造物正面)	位置 B (構造物側面)
無対策モデル	曲面	4.319	3.049
	平面	3.490	2.644
免震材充填モデル	曲面	4.472	4.331
	平面	0.146	1.721
開放ピットモデル	曲面	2.146	3.270
	平面	0.140	0.601

(+ : 引張、- 圧縮)

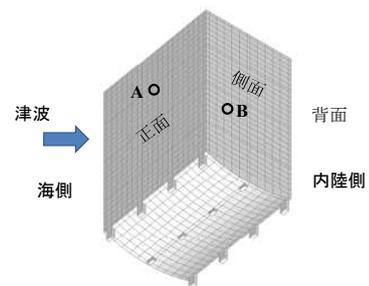


図-19 津波の波力による応力の代表出力位置

物の回転が生じていないため応力解放が起こらず構造物の正面下部に応力が発生したものと考えられる。開放ピットモデルでは、構造物の正面底部で回転（剥離）が発生し、それに伴って応力解放が生じ構造物の正面下部では応力が低減したと考えられる。一方で、構造物の背面

底部が回転の支点となったため、構造物の背面側の側面下部では応力が増大したものと考えられる。

底面形状が平面の場合は、免震材充填モデルでも開放ピットモデルでも構造物の正面底部で回転（剥離）が生じたことから、応力解放によって曲面の場合よりも応力が低減したものと考えられる。

c) 考察

構造物の底面形状については、曲面よりも平面の方が構造物の回転・並進が発生しやすいと考えられるため、曲面よりも平面の方が免波効果を考える上では有利であると考えられる。今回の解析では下に凸の曲面を設定したが、回転を考えた場合には上に凸の曲面というアイデアも可能なのではないかと考察される。

3種類の解析モデルの比較においては、無対策モデルでは、構造物の下半分が地盤内にあるため、津波の波力を作用させた場合、構造物の回転・並進は生じないので構造物の変位は小さく、構造物には大きな応力が発生することが確認できた。免震材充填モデルと開放ピットモデルでは、回転（構造物底面での剥離）が励起されるため、構造物の変位は大きくなるが、応力解放が起こるので構造物に発生する応力は大幅に低減される結果となった。これらの結果から、本研究で提案している免震・免波構造は、津波の波力が作用した際に構造物に発生する応力を低減する効果があり、免波効果があるものと考えられる。免震材充填モデルと開放ピットモデルの比較に際しては、流動性免震材の有無あるいは多少の影響として解釈することも可能と考えられ、構造物に許容される変位や応力を設定することによって、例えば、管路と構造物の相互影響を考慮する必要がある場合等には、要求される条件に応じて流動性免震材の剛性や層厚、深さ等を調整することも可能になるものと考察される。

5. まとめ

沿岸域に位置する水循環施設の耐震性能の確保・向上に役立てるために、免震・免波構造に着目し、その効果および解析評価法について検討した。検討に際しては、無対策モデル、免震材充填モデル、開放ピットモデルの3種類の解析モデルを設定し三次元解析により比較解析を行った。

地震動を作用させた比較解析では、無対策モデルに比して免震材充填モデルと開放ピットモデルでは構造物に発生する地震時応力が大幅に減少したことから、大きな免震効果が期待できるものと考察される。

津波の波力を作用させた比較解析では、無対策モデルでは構造物の下半分が地盤内にあるため回転・並進は生じないが、免震材充填モデルと開放ピットモデルでは構

造物に回転が生じ、構造物の変位は大きくなるが、回転に伴う応力解放によって構造物内に発生する応力を低減させることが可能であり、大きな免波効果が期待できるものと考察される。構造物の底面形状については、免震効果、免波効果ともに曲面（下に凸の曲面）よりも平面の方が有利であるとの結果を得た。

なお、免震・免波効果の解析評価法に関しては、構造物の回転・並進の模擬、免震材のモデル化、津波の波力の設定とその作用方法、免震・免波効果の判定指標等が課題であると考えられる。これらの内、構造物の回転・並進の模擬に関しては、ジョイント要素を活用することによって模擬が可能であり、構造物と免震材の接触面の非連続的挙動の模擬に有用であると考えられる。効果の判定指標については、構造物の損傷・破壊に関しては強震動および津波の波力によって発生する応力、管路と構造物の相互影響に関しては相対変位が重要な指標になると考えられるが、今回の検討では、構造物の損傷・破壊に着目し、応力を基本的な評価指標とした。

6. あとがき

免震・免波構造の解析評価に関する今後の課題としては、免震材の物性値、津波波力の分布形（鉛直面内の分布形、水平面内の分布形）、津波波力の作用方法（静的荷重、動的荷重としての入力）、津波の到来方向と構造物の位置関係（正面、側面、隅角部等からの到来）、構造物の正面形状の影響（曲面、平面）等の検討があると考えている。

今後、老朽化した既設構造物・施設が急速に増加し、それに伴って既設構造物・施設の更新の必要性が急速に増加して行くものと想定される。沿岸域に位置する既設構造物・施設の更新に際しては、強震動対策と津波対策の両立が必要になり、免震・免波構造の考え方は、地震対策技術の合理化、安全・安心な構造物・施設の実現に有効に役立てることが可能であると考えられる。

謝辞：本研究の推進に際しては、故竹内幹雄様（元株式会社日水コン）から多大なるご指導とご協力をいただきました。汎用解析プログラム ISCEF の使用に際しては、センチュリテクノ株式会社の中川弘明様、小沢良明様、安江卓様から多大なるご配慮とご協力をいただきました。三次元解析のラン作業においては、加藤恵佑君（研究当時、弘前大学4年。現在、札幌市勤務）、斗内陸人君と松橋勇輝君（現在、弘前大学理工学部地球環境学科4年）から多大な協力を得ました。記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 竹内幹雄, 小黑明, 大峯秀一: 東日本大震災における沿岸域浄化センターの被害事例と今後の課題, 土木学会地下構造物の耐震性能照査と地震対策ガイドライン(案), 資料編 3.5節, pp.394-402, 2011.9
- 2) 南蒲生浄化センター復旧方針検討委員会: 仙台市南蒲生浄化センター復旧方針に係る提言書, 2011.9
- 3) 国土交通省: 下水道地震・津波対策技術検討委員会報告書—東日本大震災における下水道施設被害の総括と耐震・耐津波対策の現状を踏まえた今後の対策のあり方—, 2012.5
- 4) 東京都下水道局: 下水道施設の地震・津波対策整備計画, 2012.12
- 5) 日本下水道協会: 下水道施設の耐震対策指針と解説, 2014.5
- 6) 原田賢治, 鳴原良典, 瀬尾直樹, 小西康彦, 山崎宣良, 松本貴久, 砂坂善雄, 小黑明, 石野好彦, 長谷川浩市, 鈴木一仁: 下水道施設における地震・津波対策の効果的な対策規模の基礎的検討, 土木学会第 34 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1-13, 2014.10
- 7) 竹内幹雄, 有賀義明, 渡辺高志, 川口昇平, 西本安志, 堀宗朗, 有川太郎: 流動性を有するアスファルト系免震材を用いた免震・消波構造に関する基礎的考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, I_235- I_245, 2015
- 8) 竹内幹雄, 亀田茂, 三澤孝史, 大角恒雄, 佐久間和弘, 佐藤誠一, 栗田明: 地下構造物に適用するアスファルト系免震材の特性, 土木学会論文集, No.658, IV-48, pp.93-106, 2009
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書耐震性能照査編, pp.110, 2002

STUDY ON SAFETY EVALUATION OF SEISMIC ISOLATION STRUCTURE FOR WATER CYCLE FACILITY AGAINST EARTHQUAKE MOTION AND TSUNAMI

Yoshiaki ARIGA, Yuno Sato, Takashi WATANABE,
Yasusi MISHIMOTO, Zengyan CAO, Katsuyuki SAKASHITA,
Koujiro SUZUKI, Taro ARIKAWA, Mitsuteru ASAI and Muneo HORI

Water cycle facilities are usually constructed at coastal area because of sewage collecting system by gravity flow. So, seismic performance against not only earthquake motion but also tsunami should be secured. In this study, we have proposed isolation structural method against strong earthquake motion and wave force of tsunami by utilizing asphaltic viscous fluid isolator. Effectiveness of the proposed method was examined by three-dimensional FEM analyses. As a result, it is considered that stress within the structure induced by earthquake motion and tsunami can be largely reduced by buffer effect of isolator.