

強震動と津波の双方に対して有効な免震・免波構造の研究*

弘前大学大学院理工学研究科 有賀 義明

1. まえがき

上下水道施設は、日常生活や産業活動の安定継続に必要な不可欠な施設である。上下水道施設の内、下水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、強震動と津波の双方によって被害を受ける危険性がある。2011年東北地方太平洋沖地震では、沿岸域の多くの施設が津波被害を受け¹⁾、仙台市南蒲生浄化センターは、10m以上の津波により大被害を受けた²⁾。将来的には、南海トラフ巨大地震等の発生が想定されており、沿岸域の構造物・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・免波構造について検討した。

2. 免震・免波技術のバリエーション

強震動に対する免震対策としては、表-1に示したように、地下化による地震動の低減、免震材の活用による地震作用の低減が考えられる。津波に対する免波対策としては、津波からの回避、隔離・遮断、構造物の表面形状等の工夫による津波波圧の低減、免震材の活用による津波波圧の緩衝・低減等の方法が考えられる。免震材の活用によって、免震効果の発現のみならず免波効果も併せて発現させるという概念が研究の主眼である。

3. 免震・免波構造の概念

免震・免波構造は、強震動および津波の波圧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る。図-1に免震・免波構造の概念を示す。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を介在させる構造となっている³⁾。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、津波の波圧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される。

4. 三次元的解析による免震・免波構造の効果の評価法の検討

(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圧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、免震・免波構造について3種類の解析モデルを設定して比較検討した。

*Study on isolation structure against strong earthquake motion and Tsunami by Yoshiaki Ariga

(2) 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して図-2に示したような3種類のモデルを設定した。三次元解析に用いた有限要素モデルの全景は図-3に示したとおりである。解析対象とした構造物は、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76m、奥行70m、深さ30mの領域をモデル化した。地盤と構造物は8節点のソリッド要素でモデル化した。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。

表-1 免震・免波技術のバリエーション

1. 強震動対策
(1) 地下化による地震動の低減効果
(2) 免震材による地震動の低減効果⇒免震効果
2. 津波対策
(1) 津波の回避
◇津波が到達しない場所での立地
◇新設：土地利用の防災化⇒抜本的津波対策
◇既設：高経年化による再開発に伴う移転
(2) 津波からの隔離
◇地下化による隔離
◇ドーム構造等による被覆
◇壁構造による遮断
(3) 津波の波力の低減
◇構造物の表面形状の効果（平面、曲面）（鉛直面、水平面）
◇津波の到来方向を考慮した構造物の配置
◇構造物の表面材料の効果（エネルギー吸収型の材料）
(4) 免震材の活用
◆津波の波力の吸収⇒免波効果
◆構造物の回転・並進による応力の低減⇒免震効果
3. 強震動&津波対策
◆免震材による免震効果と免波効果の両立⇒免震・免波構造

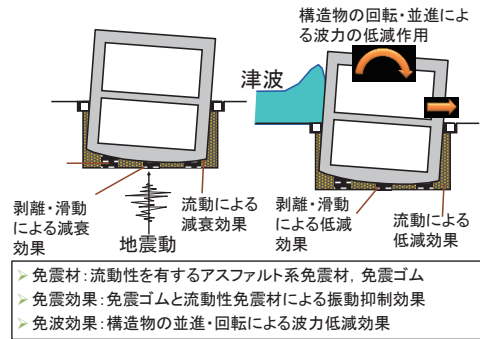


図-1 免震・免波構造の概念

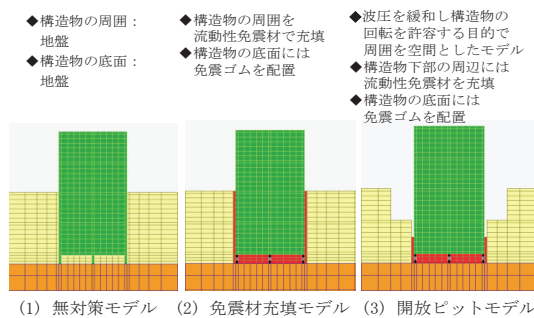
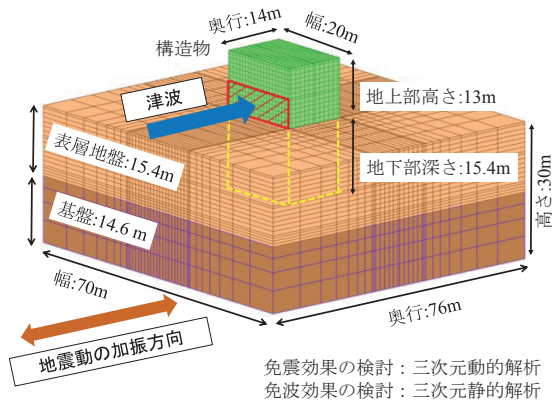


図-2 比較検討のためのモデル設定



免震効果の検討：三次元動的解析
免波効果の検討：三次元静的解析

図-3 三次元解析モデルの全景

(3) 免震材の配置

構造物底面の免震ゴムは、図-4に示したように、3列×4箇所計12箇所配置した。個々の免震ゴムの寸法は、幅0.5m、長さ1.0m、高さは1.5mとした。

(4) 地盤と構造物の解析用物性値

構造物と免震材の物性値を表-2に、地盤の物性値を表-3に示す。構造物の回転・並進については、構造物が剛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は高めに仮定した。地盤については、表層地盤（第一層）はS波速度90m/s、基礎地盤（第二層）はS波速度330m/sを仮定した。

(5) ジョイント要素の配置と解析用物性値

構造物と免震材の接触面における非連続的挙動（回転、並進、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、構造物底面と免震ゴムの接触面、構造物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。ジョイント要素の物性値は表-4のように仮定した。

表-2 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	5000	0.96	0.49
流動性免震材	0.24	1.00	0.49

表-3 地盤の物性値

項目	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

表-4 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

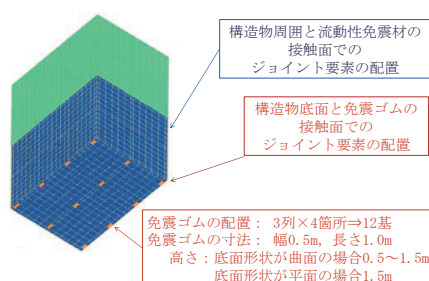


図-4 構造物と免震材の接触面でのジョイント要素の配置

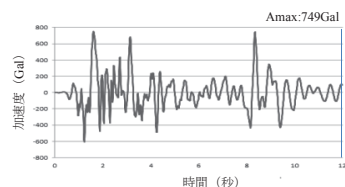


図-5 免震効果の検討に用いた入力地震動

(6) 免震効果の検討に用いた入力地震動

免震効果の解析評価のために用いた入力地震動を図-5に示す⁴⁾。加振方向は、図-3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。

(7) 構造物に対する津波の波圧

津波の波圧については、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、基礎検討として後者により検討した。津波の波圧に関しては、波圧の大きさ、鉛直面内および水平面内の分布形状等の設定が重要になるが、ここではSPH法による解析結果³⁾を踏まえ、図-6に示したように、波圧の大きさは400kPaと設定し、分布形状については、四角形分布を仮定した。津波波力の作用方向は、図-3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。

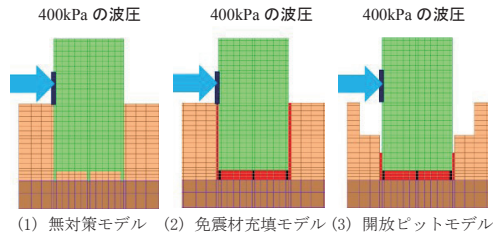


図-6 免波果の検討に用いた入力地震動

5. 三次元解析結果

5.1 三次元動的解析による免震効果の評価

(1) 強震動による加速度応答

3種類の解析モデルに関して構造物の最大加速度の解析結果を表-5に、最大加速度分布を図-7に示す。表-5より、無対策モデルでは2404.4Galであるのに対して、免震材充填モデルでは398.1Gal、開放ピットモデルでは361.2Galとなった。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する結果となった。

表-5 構造物での最大加速度の比較

解析モデル	最大加速度	発生日刻
無対策	2404.4 Gal	8.54 s
免震材充填	398.1 Gal	10.06 s
開放ピット	361.2 Gal	9.34 s

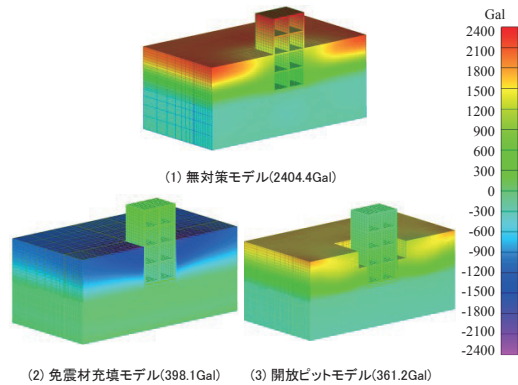


図-7 最大加速度分布

表-6 構造物での最大主応力の比較

解析モデル	最大応力	発生日刻
無対策	19.35 N/mm ²	1.80 s
免震材充填	2.39 N/mm ²	2.95 s
開放ピット	2.27 N/mm ²	2.93 s

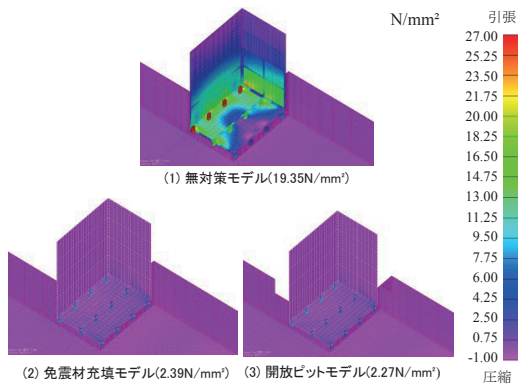


図-8 地震時の最大応力分布

(2) 強震動による応力

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、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-8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 19.35N/mm^2 であったのに対して、免震材充填モデルでは 2.39N/mm^2 、開放ピットモデルでは 2.27N/mm^2 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り免震効果の重要な評価指標になることから、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。

5.2 三次元静的解析による免震効果の評価

(1) 津波による変位応答

津波の波圧による構造物の最大変位の値を表-7に示す。また、構造物の変位状況を図-9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、 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 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 16.40cm となった。図-9に示したように、ジョイント要素を用いた解析によって構造物の回転・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できた。

表-7 津波の波圧による最大変位量

解析モデル	構造物の最大変位
無対策	3.39 cm
免震材充填	16.40 cm
開放ピット	70.48 cm

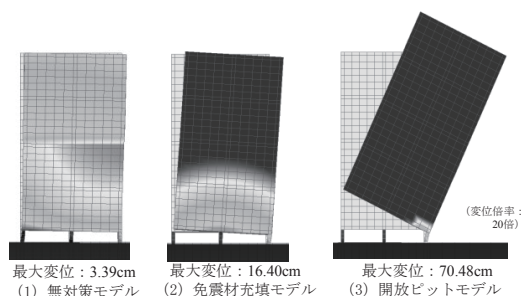


図-9 津波の波圧による変位挙動

(2) 津波による応力

津波の波圧が作用した場合の構造物での応力分布を図-10に示す。また、図-11に示した代表位置の最大応力の値を表-8に示す。無対策モデルでは、構造物は地盤によって拘束されているため変位挙動が生じにくく、その分、構造物での応力が大きくなった。免震材充填モデルと開放ピットモデルでは構造物の正面底部で回転（剥離）が生じ、応力解放に伴って構造物での応力が低減した。

6. まとめ

地震動に対しては、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構造物

に発生する地震時応力が大幅に減少し、免震効果が期待できる。津波の波力に対しては、無対策モデルでは構造物の下半分が地盤内にあるため回転・並進が生じにくい、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、免震効果が期待できる。

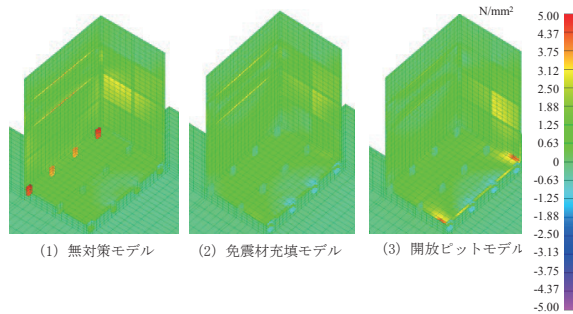


図-10 津波の波圧による応力分布

表-8 津波の波圧による構造物での応力

解析モデル	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	3.490	2.644
免震材充填	0.146	1.721
開放ピット	0.140	0.601

(+ : 引張, - 圧縮)

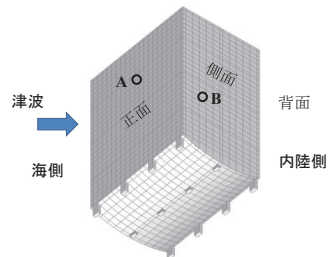


図-11 応力の代表出力位置

あとがき

高度成長期に建設された多くの施設で高経年化が進みつつあり、今後、老朽化施設の更新の必要性が益々増大すると考えられる。免震・免波構造の考え方は、新規構造物のみならず老朽化した既設構造物の更新においても有効に活用することが可能である。

参考文献

1. 竹内幹雄, 小黒明, 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.
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.
3. 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, pp.I_235-I_245, 2015.
4. 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.