

アスファルト系免震材を用いた免震・免波構造の適用性に関する基礎的考察

Fundamental study on applicability of isolation structure against earthquake motion and tsunami
by utilizing asphaltic viscous fluid

渡辺高志*, 有賀義明**, 西本安志***

Takashi Watanabe, Ariga Yoshiaki, Yasushi Nishimoto

* 博(工), 株式会社構造計画研究所, 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3)

**博(工), 弘前大学, 大学院理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町 3 番地)

***博(工), シバタ工業株式会社, 技術開発部 (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

Key Words:(*Seismic isolation, Tsunami, Wave pressure reduction, Shock analysis, Particle method*)

キーワード: 免震, 津波, 波圧低減, 衝撃解析, 粒子法

1. 緒言

下水の最終処理に当たる浄化センターは、その収集方式が自然流下であるため、通常、沿岸域や河川河口域に立地されるケースが多い。例えば、東日本大震災で大きな津波被害を受けた仙台湾域には、石巻東部、仙塩、南蒲生、県南、山元、相馬と 6ヶ所の終末下水処理場が配置されている。一般に、浄化センターの主要な設備である最初沈殿池、反応槽は覆蓋されているが、最終沈殿池などは維持管理性および経済性から覆蓋されていない。そのため、一旦計画水位を突破されれば容易に泥土の浸入を許し、その除去のために長期間にわたって機能制限を余儀なくされるため、浸水に対して無防備な施設であると言える¹⁾。この対策として、主要沈殿池、反応タンクの地下化、もしくは堅固な鉄筋コンクリート製による覆蓋などが考えられるが、運転の制約上、地下構造と密接な連携が必要であり、覆蓋が難しい施設がある。

写真-1 に仙台市南蒲生浄化センターの曝気槽送風機室の津波損傷の事例を示す。これまでの津波災害では、脆弱な壁構造は破壊され、柱-梁構造のみを残す被災事例が多く発生しているが、近代的な柱-梁構造ならびにある程度補強された壁構造の被害を見ると、津波の破壊力の定量的評価と耐波または免波構造の開発が必要であると考えられる。その破壊状況から、津波到来時の衝撃的な力として作用する波圧の影響もあると考えられる。これらの波圧については、電力中央研究所の大型造波水路を使用した模型実験に基づき、ソリトン分裂第 1 波の衝突時と、その後の津浪本体が衝突し重複波を形成した時の波圧についての研究結果がまとめている²⁾。

以上のような被害事例や研究事例を踏まえ、新たな津波対策工として、ソリトン分裂第 1 波の衝突時に対して

は、後退、回転、ねじれといった、三次元的なクッション性能で衝撃的な波圧を軽減するとともに、後続の津波本体に対しては、アスファルトのレオロジー特性を利用して、受圧面の回転とねじれによって、波圧軽減を期待する免震・免波構造を考案した^{3,4)}。本研究では、免震・免波構造の免震効果と免波効果について数値シミュレーションを行い、その適用性と有効性について基礎的検証を行った。



写真-1 曝気槽送風機室外壁の損傷 (仙台市建設局)

2. 免震・免波構造について

免震・免波構造の概要を図-1、図-2 に示す。これは、津波の衝撃的な波圧に対して、後退、回転、ねじれの三次元的なクッション効果によってその波圧を軽減すると共に、構造物外周に充填したアスファルト系免震材のレオロジー特性を利用して、受圧面の回転、ねじれによって、波力のエネルギーを吸収することを期待するもの

である。免震・免波構造の主な着目点と特徴は次の通りである。

①嵩上げゴムにより基礎地盤との縁が切れており、底面に階段状の勾配を有するため、波力を受けた場合、構造物の回転、ねじり変形を誘導できる。また、重心が低く、構造物自体が復元力を有する。

②構造物の周囲は全て、所定の復元力特性を持つ免震材料で充填された回転・ねじりに対応する三次元免震システムである。充填材は、地下構造物などで実績があるアスファルト系免震材を適用する⁵⁷⁾。

③構造物構築の過程で使用する嵩上げゴムは、構造物完成後は、免震材と一体的に免震・免波機能を分担する。ゴムの周囲は免震材で充填されており、従来の鋼板製積層ゴムや沈埋トンネル用ゴムガスケットのように、横倒れによる座屈は生じ難い。高価な鋼板製積層ゴムに換えてこの繊維補強ゴムを用いることは有用である。

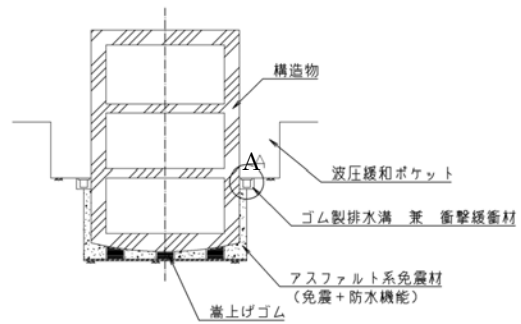
④外力により変形やせん断力が大きくなる地表面付近には、重要なクッション機能を備えるゴム製排水溝を設置する。これは、免震材の紫外線・乾燥からの防護および寄せ波・引き波による洗掘防護の効果が期待できる。

⑤波圧を緩和する目的で波圧緩和ポケットを掘削整形し、第一波の波圧を緩和するとともに、地階部分の拘束を緩和し、構造物の傾倒を許容することで、壁の破壊と構造物内部への浸水を防ぐことができる。

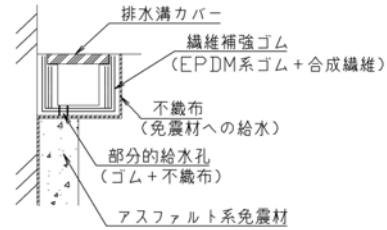
3. 免震・免波性能に関する数値解析による検討

本研究では、免震・免波構造の免震性能および免波性能を確認するために、二次元粒子法による時刻歴解析を実施した。粒子法は物理量の定義点である粒子が移動することにより連続体の運動を計算する数値解析手法であり、本構造形式のように構造躯体が大きく並進および回転運動するような問題に対して適した解析手法である。解析には、著者の一人が開発に関わる粒子法に基づく数値解析プログラム「DYBECS」を用いた。このプログラムは、ISPH法を用いた非圧縮性流体解析⁸⁾と個別要素法による剛体の運動解析を連成可能であり、更に剛体や境界間を接続するばね要素などが使用可能である。2次元解析における嵩上げゴムのモデル化に有効であるため免震・免波効果の検証解析に用いた。

解析は、免震効果を検証する地震応答解析と、免波効果を検証する津波衝突解析に分けて行い、免震・免波構造モデルの材料物性などは共通とした。本解析では、相対的に変形の小さい構造躯体と地盤を剛体としてモデル化し、免震材を高粘性流体、嵩上げゴムはばね要素としてモデル化した。図-3に免震・免波構造の解析モデルを示し、図-4に嵩上げゴムのモデル化に用いたばね要素の構成モデルを示す。



(a) 免震・免波構造概略図



(b) A部詳細図

図-1 地下空間を有する構造物の免震・免波構造

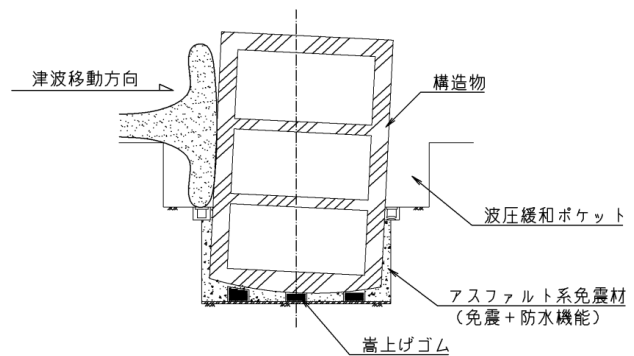


図-2 免震・免波構造の挙動イメージ

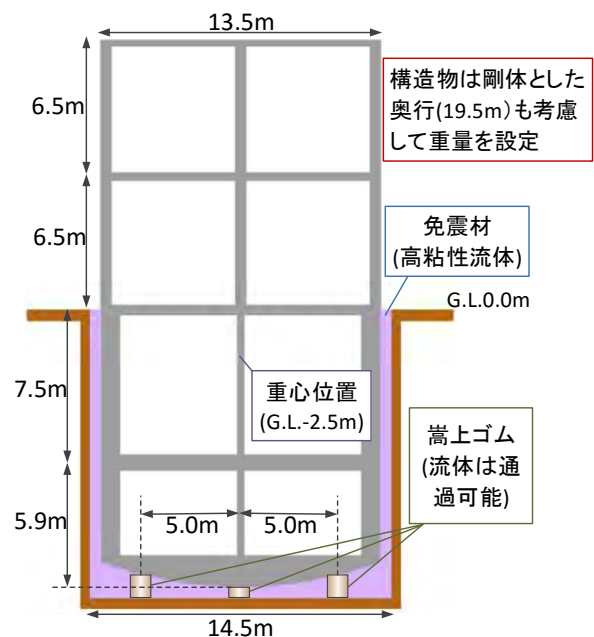


図-3 免震・免波構造の数値解析用モデル

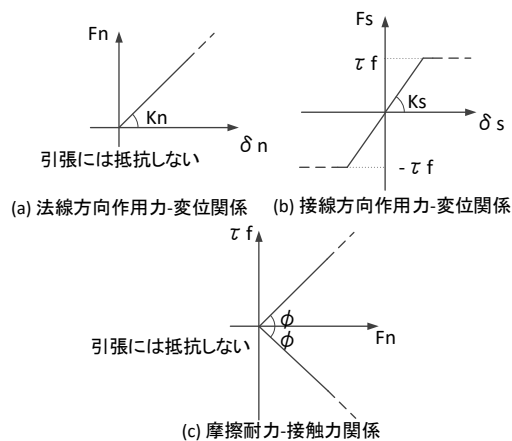


図-4 嵩上げゴムをモデル化するばね要素の構成モデル

用いたばね要素は流体粒子との相互作用を考慮せず、免震材の流動を妨げることがないため、二次元解析への適用が可能である。また、躯体の浮き上がりや接触面の滑動による復元力の消失を表現可能なモデルである。

3.1. 比較解析ケース

地震応答解析および津波衝突解析に共通する構造物として、下水浄化センターのポンプ場を想定した。構造躯体は、地上2階地下2階建ての幅13.5m、高さ26.4m、奥行き19.5mの建物を設定した。解析モデルはピットの状態を変えて4モデル作成し、免震材の液位やピット上部の開放スペースの有無によって図-5に示すように分けられる。なお、嵩上げゴムは図示していないが未対策構造を除いて各モデルに設置している。

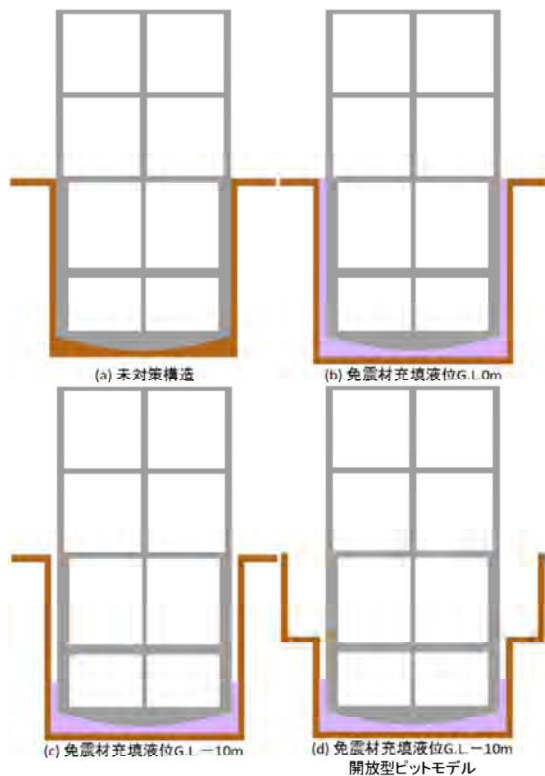


図-5 4 ケースの解析モデル

3.2. 構造躯体の解析条件

建物底部は円弧状の断面形状とし、直接あるいは嵩上げゴムを介して剛地盤に接地する条件とした。建物の重量は実規模のポンプ場を想定し設定した。剛体モデルの接触力については個別要素法によって計算し、要素の作用力を剛体重心に合算し、並進と回転の運動を計算した。ばね定数は最大の時間増分で安定に計算可能な範囲で大きな値を設定し、時間増分可変で行う解析における初期時間増分 5.0×10^{-4} s から表-1に示す値を設定した。建物を支える嵩上げゴムの解析パラメータは、繊維補強ゴムの試験値より、1基あたり 0.5m^2 の嵩上げゴム 3×4 列 = 12 基を想定し、解析平面内に3基を配置して単位奥行きあたりの剛性を設定した。パラメータを表-2に示す。

表-1 建物の形状・寸法と物性

項目	内容
躯体外寸	13.5m×26.4m (地上部 13.0m)
・底部接触面の形状	曲率半径 20m の円弧形状
剛体密度 (奥行き方向の壁重量含む)	4.018 t/m ³
剛体接触時の法線ばね定数	10.0MN/m
剛体接触時の接線ばね定数	2.5MN/m
剛体接触時の減衰定数	0.1
剛体接触時の摩擦係数	0.57735

表-2 嵩上げゴムの物性

項目	鉛直剛性 (MN/m)	水平剛性 (MN/m)	摩擦係数	減衰比
嵩上げゴム	38.42	0.03842	0.6	0.1

3.3. 免震材の解析条件

免震材は高粘性のニュートン流体としてモデル化した。免震材の粘度はある程度調整可能であり、本検討では $100\text{Pa} \cdot \text{s}$ の粘度を設定した。粒子間距離は免震層の厚さを10分割として設定し、SPH近似のカーネル関数として5次のスプライン関数を用い、粒子間距離の3倍を影響半径とした。SPH解析の計算条件を表-3に示す。

表-3 SPHの解析条件

項目	内容
免震層の密度	1.1 t/m ³
免震層の粘度	100.0 Pa · sec
水の密度	1.0 t/m ³
水の粘度	0.001 Pa · s
初期粒子間距離	0.05 m
SPHの影響半径	0.15 m

4. 免震性能に関する解析的検討

4.1. 検討用地震動

本研究では検討用地震動としては道路橋示方書 H24

に示されるレベル2地震動を設定した⁹⁾。採用した地震動はII種地盤を対象とした設計用地震動2波であり、検討用地震動の加速度時刻歴波形を図-6に示す。

地震動は慣性力として入力した。未対策構造では構造躯体が地盤によって固定されるため、入力地震動と構造物の加速度応答は同じであり、また免震材の液位が低いケース間においてピット上部の構造による違いは、地震時の検討については違いがないため、図-5(a)および(d)に示されるモデルの解析ケースは実施しなかった。

4.2 解析結果と考察

解析結果より、入力地震動と同じ応答を示す未対策構造と免震・免波構造のそれぞれの絶対加速度応答スペクトルを図-7に示す。どちらの地震条件についても長周期側にピークがシフトし、応答加速度が低減しており、免震効果があることが確認できた。免震効果は免震材の液位の浅いモデルの方が大きく、建物を拘束する作用を小さくする必要があることが認められる。一方、II-II-2入力時の応答加速度のピークは液位の深いケースの方が小さくなっているが、これは液位の浅いケースで躯体とピットの衝突が発生したためであり、躯体の衝突を抑制する対策が必要であることを示唆している。

5. 免波性能に関する解析的検討

免震・免波構造の津波波力に対する免波性能を確認するため、免震性能の検討と同様の数値解析モデルを用いて検討を行った。

5.1. 検討用津波の条件

解析では建物前面より10m手前の位置に、衝突時の衝撃的波力の継続時間に対して一定の水位を保てる奥行の水柱モデルを設定し、解析開始時に初速度を与えた上で水柱崩壊させ、これを検討用津波条件とした。水柱には予め想定する津波の初速度を与えており、有限深の表面波の位相速度から計算した速度を初速度として設定した。津波のように、波長が長く、陸域において遡上過程にある浅い水深の場合、深さhの表面波の位相速度は \sqrt{gh} に近似される。津波モデルの水深は建物高さの1/2である6.5mに設定した。津波の衝突条件を表-4に示す。

表-4 津波の条件

津波条件	初期水深 (m)	水柱奥行 (m)	初速度 (m/s)
建物高さ 1/2	6.5	50.0	7.984

5.2. 解析結果と考察

建物壁面に生じた圧力について、図-8に圧力の大きい壁面高さにおける圧力履歴を示す。免震・免波構造を採用したモデルでは各ケースにおいて壁面に生じた圧力が低減しており、緩衝効果が確認できる。

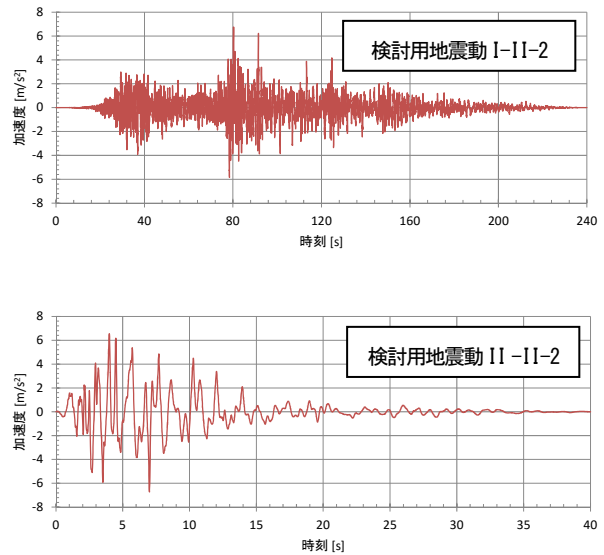


図-6 検討用地震動

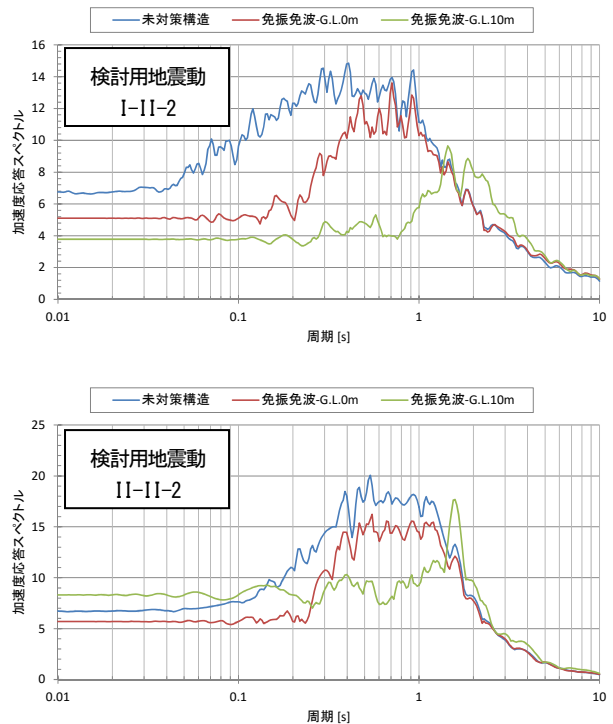


図-7 I-II-2 入力時の建物重心位置の加速度応答

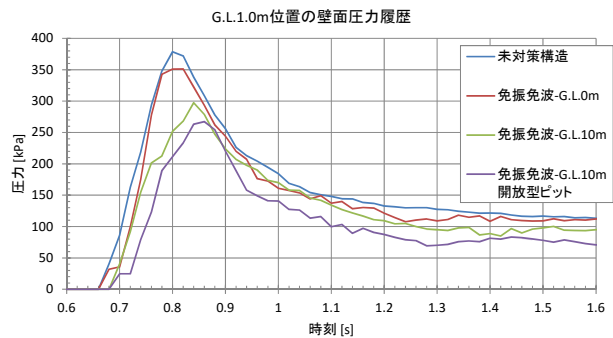
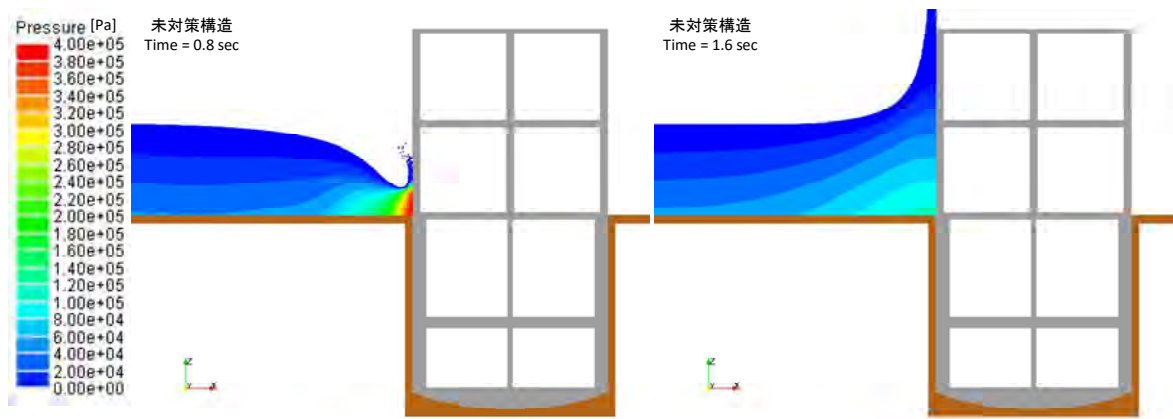
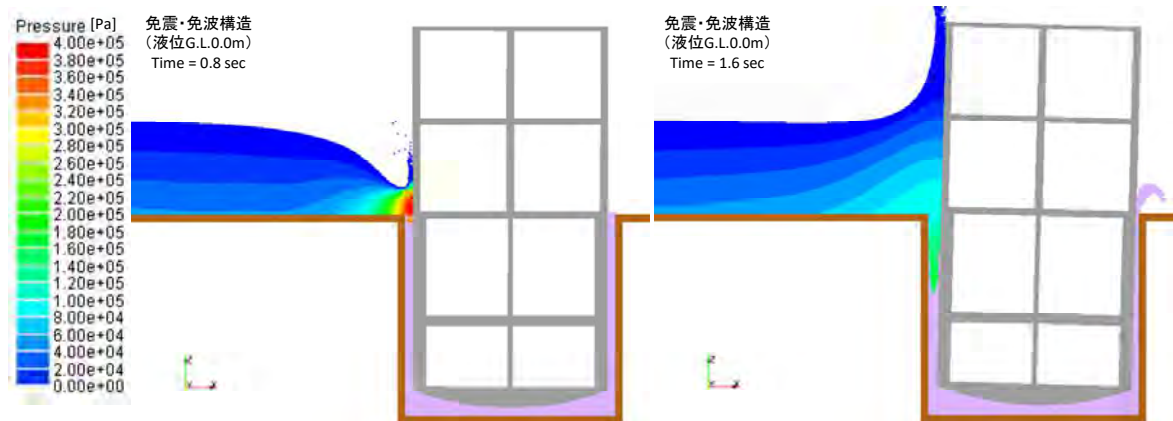


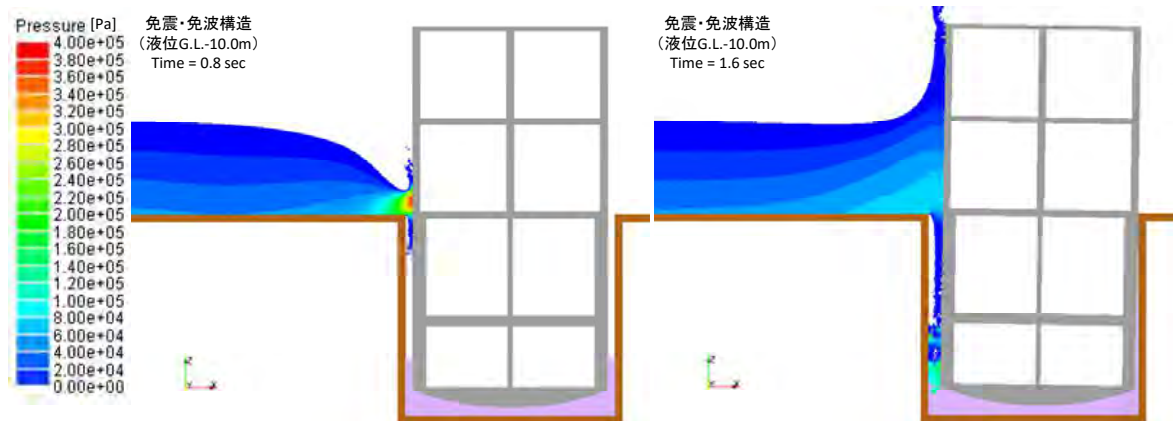
図-8 建物壁面の圧力時刻歴 (GL.+1.0m)



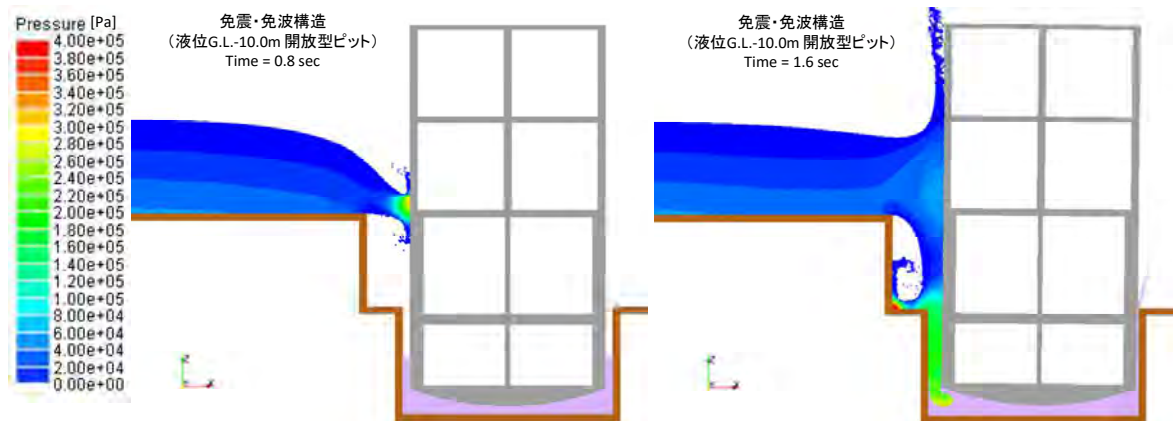
(a) 未対策構造モデル



(b) 免震・免波構造 (免震材充填液位 GL.0m) モデル



(c) 免震・免波構造 (免震材充填液位 GL.-10m) モデル



(d) 免震・免波構造 (免震材充填液位 GL.-10m 開放型ピット) モデル

図-9 各モデルの0.8秒経過時および1.6秒経過時の水圧分布

免震・免波構造の衝撃的波圧力に対する緩衝効果は、構造躯体の水平移動と回転によって生じていると考えられるが、免震材の液位が浅いケースや圧力緩和ポケットを有するケースでは、衝突流体を下方へ逃がすことによる影響も大きい。図-9 に衝突流体の圧力分布と建物回転の様子を示し、未対策構造モデルで最も圧力が大きくなる時刻断面と壁面移動が収束する時刻断面の結果を比較した。圧力分布から免震・免波構造による緩衝効果を確認することができるとともに、免震・免波構造では構造躯体が大きく並進/回転運動する様子が確認できる。また、地上部の圧力を大きく低減できる免震材液位の浅いケースでは地下構造部の圧力が大きくなることが認められる。地下構造部は地上部に比べて構造断面が大きいので、このような地下構造部へ負荷を分配する構造は効果的であると考えられる。

6. 結言

本研究で実施した数値解析より得られた成果を要約すると以下のとおりである。

- 1) SPH 法を用いた地震応答解析により、免震・免波構造を対象に免震性能を確認した。液体状の免震材を採用することと充填量を抑えることで構造物が移動し易い条件を満たし、高い免震性能が発揮されることを確認した。
- 2) SPH 法を用いた津波衝突解析により、免震・免波構造の免波性能を評価した。免震性能が発揮される条件と同様に、構造物が移動し易い条件において高い免波効果を確認した。
- 3) 提案した構造形式では、津波波力を受ける構造物の傾斜角を大きくするため、ピット上部の空間を広くすることで衝突流が分けられ、波力のピーク値を抑制する上で効果的であることが確認された。
- 4) 免波性能に関しては、地下構造部で津波による圧力が大きくなることも推察されるので、地下構造部の応力状態、構造物の浮き上がりや転倒については適切な配慮をすることが必要になると考察される。
- 5) 免波性能を得るには構造物の大きな剛体移動を許容する必要がある。また、ピットが浸水し、さらに遡上水深が増すと浮力で構造物が浮き上がる可能性があり、施設の管路や係留方法について十分な検討が必要である。

今後は、より詳細な検証を実施するとともに、模型実験

による実証を重ねていく他、免震・免波構造の津波作用時における水平移動や浮き上がりにも対応するため、可とう管や係留のためのデバイス開発も合わせて検討する必要がある。また、本研究の検討ケースの内、ピット上部を開放した構造の緩衝効果が大きく、衝突流を分散させることで緩衝効果を得る方法論についても、免波技術の一つとしての検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、財団法人鹿島学術振興財団の研究助成（2011 年度、2012 年度）を受けて得られた成果である。ここに記して感謝の意を表します。

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・地下構造物の合理的な地震対策研究小委員会編「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) 電力中央研究所：自然災害軽減技術，津波・波浪災害軽減技術，pp.51-52
- 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・消波構造の適用性に関する基礎的考察，土木学会論文集 A1，Vol.71，No.4，pp.L_235-L_245，2015.2.
- 4) 有賀義明，佐藤優乃，渡辺高志，西本安志，曹増延，坂下克之，鈴木高二朗，有川太郎，浅井光輝，堀宗朗：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，土木学会論文集 A1，Vol.73，No.4，pp.L_721-L_729，2017.
- 5) 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.93-106，2000.9
- 6) 建設省土木研究所，土木研究センター他 17 社：地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書（その 3）－地下構造物の免震設計マニュアル（案）－，第 154 号，1997.3
- 7) 地下構造物の合理的な地震対策研究小委員会：地下構造物の耐震性能照査と地震対策ガイドライン（案）本編 8.3 節，免震構造，pp.91-99，土木学会，2011.9
- 8) 浅井光輝・別府万寿博・石川信隆・眞鍋慶生・斉藤展・丹羽一邦：数値流体シミュレーションによる流体衝撃力評価に関する基礎的研究，構造工学論文集 Vol.58A，pp.1021-1028，土木学会，2012.3
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，丸善，2012.