

流動性を有する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

竹内 幹雄¹・有賀 義明²・渡辺 高志³・川口 昇平⁴
西本 安志⁵・堀 宗朗⁶・有川 太郎⁷

¹フェロー会員 博(工) 株式会社日水コン 技術顧問 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿 6-22-1 新宿スクエアタワー)

E-mail:takeuti_mikio@yahoo.co.jp

²フェロー会員 博(工) 弘前大学 大学院理工学研究科教授 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3番地)

E-mail:y-a-arig@cc.hirosaki-u.ac.jp

³正会員 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)

E-mail:takashi-watanabe@kke.co.jp

⁴正会員 修(工) 株式会社奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)

E-mail:shohei.kawaguchi@okumuragumi.jp

⁵正会員 博(工) シンバ工業株式会社 技術部 (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

E-mail:Yasushi_Nishimoto@sbt.co.jp

⁶正会員 Ph.D. 東京大学 地震研究所教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail:horie@eri.u-tokyo.ac.jp

⁷正会員 博(工) 独立行政法人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:arikawa@pari.go.jp

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り収集されることから、通常、沿岸域や河川河口域に多く立地されている。浄化センターには、地下施設と密接な連携が必要なポンプ室等があるが、ポンプ室等が浸水した場合、被災地域では衛生環境の悪化が長期間続くことになる。下水処理施設の地震被害を防ぐためには、津波による衝撃力や波力を受け流すことによる施設の破壊と施設への浸水を防ぐような、靱性の高い構造が必要である。そこで、本研究では、靱性の高い構造として、半地下構造物を想定した新たな免震・免波構造を提案するとともに、その有効性に関して、数値解析により免震性能、免波性能についての基礎的評価を行った。

Key Words: semi-underground structure, seismic isolation, tsunami, wave pressure reduction, numerical analysis

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。下水放流上の見地から、計画洪水水位や既往最高潮位に配慮して、河川管理者や海域管理者と地方自治体が協議の上、計画水位を決定し浄化センターが建設される。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、図-1に示すとおり、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、港湾の防潮防波堤などと同じく、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。これらの代表例として、写真-1, 2に仙台市

南蒲生浄化センターのポンプ室、ならびに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。また、写真-1, 2より、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、ここでは、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、後続の津浪本体に対しては、アスファルトのレオロジー特性（荷重を受けると時間と共に変形し、荷重から解放されると変形が緩和する特性）を利用して、受圧面の回転、ねじれによって、波圧軽減を期待した免震・免波構造を考案した。本研究では、新たな免震・免波構造を提案するとともに、その適用可能性について検討した。また、提案する免震・免波構造の適用施設の適正規模を検討するために、東日本大震災での被災事例を調査するとともに、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、その有効性の基礎的検証を行った。

2. 免震・免波構造の適用対象

表-1 に東日本大震災の際に津波より被災した浄化センターの一覧を示す。また、津波で被災した浄化センターの処理能力と海岸からの距離との関係を図-2 に示す。一般的に水循環ネットワークにおいては、自然流下式が経済性に優れ、また沿岸部では内陸に比べて人口が多くなるため、海に近いほど浄化センターの処理能力は大きくなる傾向がある。施設の海岸からの距離は概ね 1.1km 程度、処理能力では 40 万 m³/日の南蒲生浄化センターが最大であり、施設数では 0.1~0.3 万 m³ の小規模な処理場が多いことが分かる。浄化センター内の構造物には、管理棟、ポンプ棟、機械・電気室、汚泥処理棟、自家発電室などがあり、半地下構造物であるポンプ室棟や付随する機械・電気室は、大きな処理施設では建築面積が 1000 m² を超えるものも存在するが、一般に 200 m² 程度のものが多い。

これらの状況を踏まえ、免震・免波構造の適用対象に関して、以下の事項を想定した。

- ・浄化センターは沿岸地域に多く存在し、津波の被害を想定する必要がある。
- ・ポンプ室等は、気中ポンプのメンテナンスの必要性から内部に吹き抜け構造を持ち、浸水に対して極

めて脆弱な構造物である。

- ・ポンプ室やそれに付随する機械・電気室等が浸水した場合、復旧までに長期に渡って処理機能が損なわれ、復興の妨げとなる。

- ・ポンプ室等は、施設規模は概ね 20m×10m、地上 4 階(GL+15m)、地下 2 階(GL-12m)程度の半地下構造物である。



図-1 仙台湾沿岸域の浄化センター（終末下水処理場）



写真-1 ポンプ室外壁の損傷（仙台市建設局）



写真-2 曝気槽送風機室外壁の損傷（仙台市建設局）

表-1 東北地方太平洋沖地震の津波により被災した浄化センターと海岸からの距離

No.	津波で被災した下水処理場	海岸からの距離
1	田老浄化センター	1km 未満
2	大船渡浄化センター	
3	太平洋下水処理場	
4	陸前高田浄化センター	
5	野田浄化センター	1km 以上
6	大槌浄化センター	
7	県南浄化センター	1km 未満
8	石巻東部浄化センター	
9	南蒲生浄化センター	
10	気仙沼終末処理場	
11	山元浄化センター	
12	志津川浄化センター	
13	雄勝浄化センター	
14	あゆかわ浄化センター	1km 以上
15	仙塩浄化センター	
16	津谷街浄化センター	1km 未満
17	相馬市下水処理場	
18	新地浄化センター	
19	広野浄化センター	
20	北泉浄化センター	
21	小高浄化センター	
22	鹿島浄化センター	

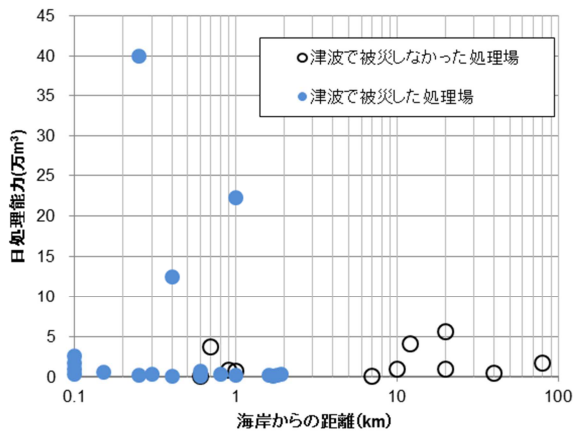


図-2 海岸からの距離と浄化センターの処理能力

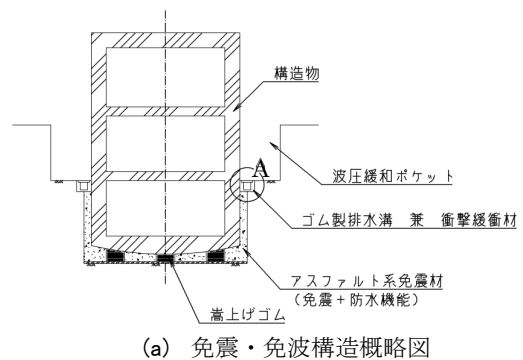
3. 免震・免波構造の提案

提案する免震・免波構造の概要を図-3、図-4 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

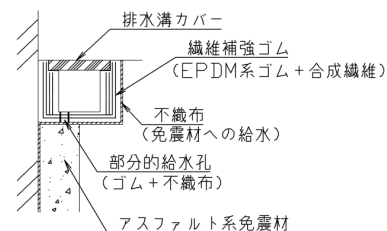
を吸収することを期待するものである。

本研究で提案する免震・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³⁻⁵⁾。免震材は荷重を受けた際、時間と共に変形し、荷重から解放されると変形が緩和するレオロジー特性を有するため、津波の波力の緩和に効果が期待できる。
- 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。そのため、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。さらに、地盤支持力によっては免震システムに不可欠なシステム設置用地下空間を必ずしも必要としないため、建設費のコストダウンが期待できる。
- 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。



(a) 免震・免波構造概略図



(b) A 部詳細図

図-3 地下空間を有する構造物の免震・免波構造

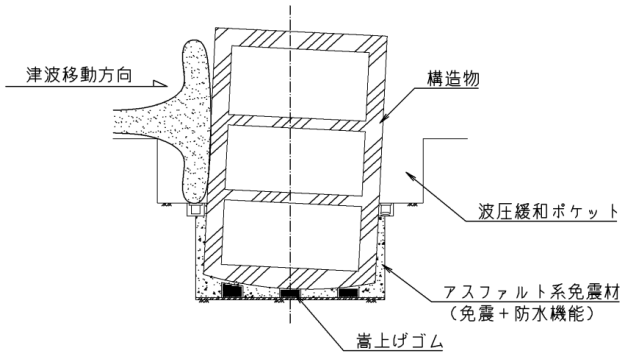


図-4 免震・免波構造の挙動イメージ

4. 免震材と嵩上げゴムの材料特性

(1) アスファルト免震材の物性

地下構造物の免震材として実績のあるアスファルト系免震材は、アスファルト乳剤と吸水性ポリマー、セメント、混和剤などを混ぜ合わせたもので、弾塑性を有する材料である。一方、免震・免波構造においては、速度が速く衝撃的な津波の外力に対して緩衝させる必要があり、より柔らかい粘弾性体としての物性が重要と考えられる。そこで、従来タイプから塑性の性質を与えるセメント分を除いた粘弾性の免震材を適用した。材料試験に使用したアスファルト系免震材の配合を表-2に示す。施工時には、A液とB液を混合して圧送ポンプで注入する。

免震・免波タイプのアスファルト系免震材の粘度およびズリ応力の測定結果を図-5および図-6に示す。測定は、単一円筒回転粘度計を用いて行った。ポリマー添加量の違いにより $10^2 \sim 10^4 \text{Pa}\cdot\text{s}$ 程度の粘性の調整が可能である。また、ポリマー量 3.0%の配合の動的粘弾性率を測定した結果と換算ポアソン比の関係を図-7に示す。なお、換算ポアソン比 ν は、アスファルト系免震材の弾性波速度 C_p 、動的粘弾性率試験から求めたヤング率 E を式(1)に代入してラメ定数を算定し、式(2)より求めた。

$$C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (2)$$

C_p : 弾性波速度 (m/s) E : ヤング率 (N/m²)

λ, μ : ラメ定数 ρ : 弾性体の密度 (kg/m³)

表-2 アスファルト系免震材の配合

配合	A液		B液	密度 (kg/m ³)
	アスファルト乳剤	早強ポルトランドセメント	高吸水ポリマー	
従来タイプ	100	15	3	1200
免震・免波タイプ	100	0	3~5	1100

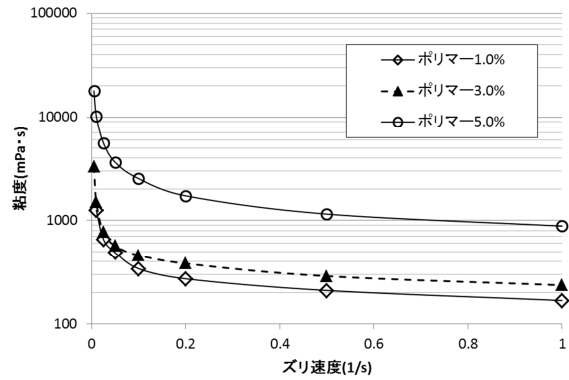


図-5 ズリ速度と粘度の関係

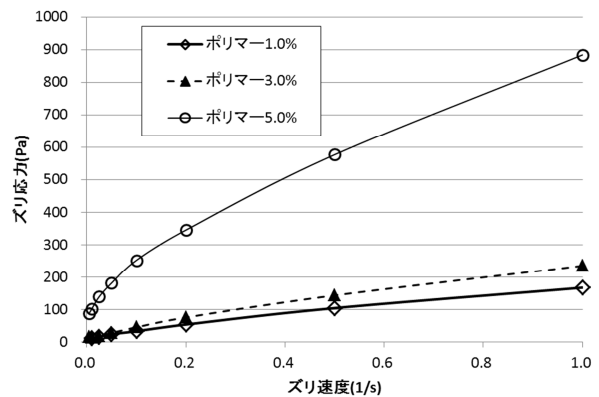


図-6 ズリ速度とズリ応力の関係

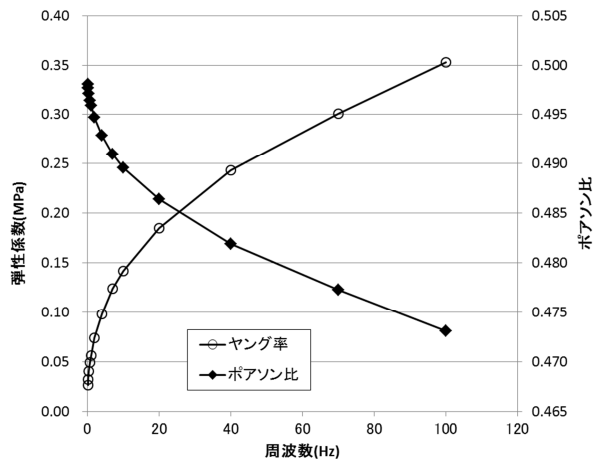


図-7 周波数と弾性係数およびポアソン比の関係

この結果から、遅い伸縮ではポアソン比が 0.5 に近く、早い伸縮でも見かけ上ポアソン比はやや低下するが、非常に弾性的な物性を示すことが分かる。

(2) 嵩上げゴムの物性

嵩上げゴムは、ゴムの中に繊維を積層埋設した積層繊維補強ゴム⁶⁻⁷⁾である。この積層繊維補強ゴムは、ゴムより先に終局を迎える繊維を積層埋設しているため、圧縮時の降伏荷重を明確化できる。さらに、積層埋設する繊維の力学特性(強度や伸び)、積層枚数によって、鉛直剛性や降伏荷重を任意に設定することができる素材である。例えば、図-8に示す

ように、同じ力学特性の繊維の積層枚数を変化させることで、鉛直剛性や耐荷力を調整することができる。この高い鉛直剛性により躯体を支えることが十分に可能であると考えられる。

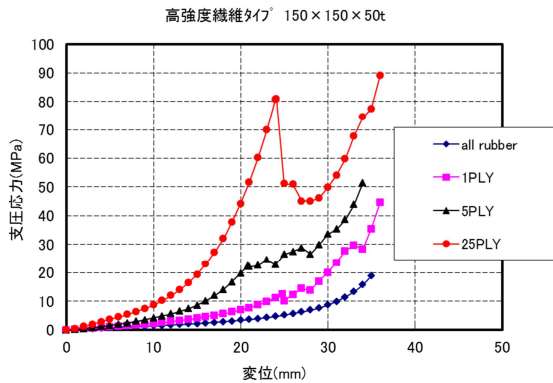


図-8 嵩上げゴムの荷重-変位曲線の一例

5. 免震・免波性能に関する数値解析方法

本研究で提案する、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適した解析手法である。

解析には粒子法に基づく数値解析プログラム「DYBECS」を用いた。この解析プログラムは、ISPH (Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics) 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-9に免震・免波構造の解析モデルを示し、図-10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。図中の K_n と K_s はそれぞれ法線方向と接線方向のばね定数である。接触力の接線成分 F_s は接触面の摩擦角 ϕ と垂直抗力 F_n より計算されるクーロン摩擦限界 τ_f より大きな力には抵抗しないとした。嵩上げゴムをモデル化したばね要素は流体粒子との相互作用を持たないため、免震材の流動を妨げることがなく、二次元解析の適用が可能である。また、使用したばね要素は引っ張りには抵抗せず、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することが可能である。

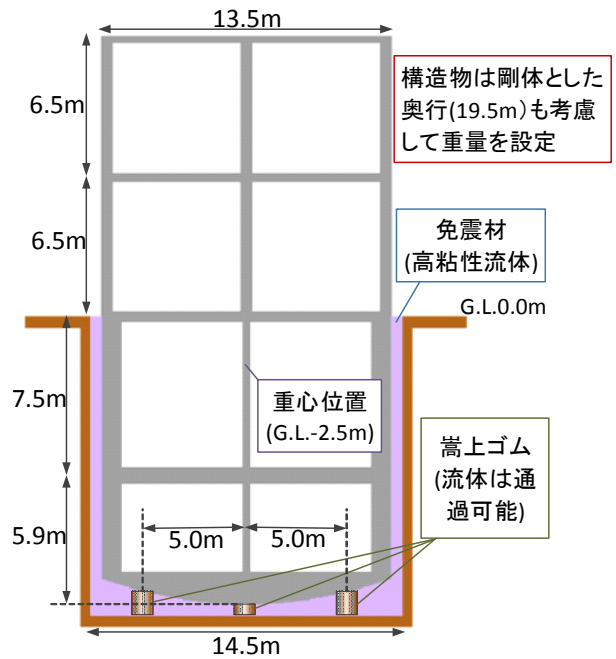


図-9 免震・免波構造の数値解析用モデル

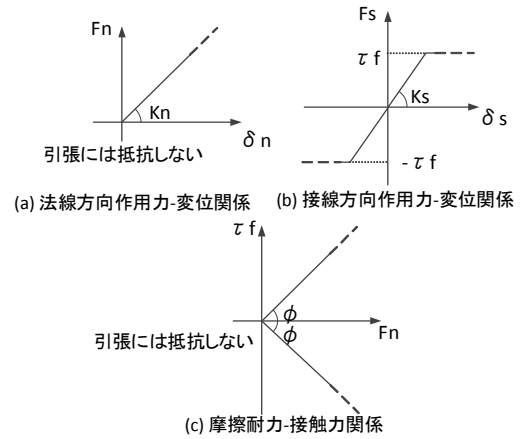


図-10 ばね要素の構成モデル

(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の建物を設定しモデル化を行った。解析モデルはピットの条件を変えて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-11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-11(a)の未対策構造はピットを設けず、地盤と構造物が直接接するモデルである。図-11(b)および図-11(c)のモデルは地盤と構造物間に0.5mの隙間を有するピットを設けたものであり、免震材の液位がそれぞれ異なる。図-11(d)のモデルは図-11(c)のモデルを基に、構造物が波力を受けて傾いた際に、より傾斜角が大きくなるようにピット上部の空間を開放したものである。

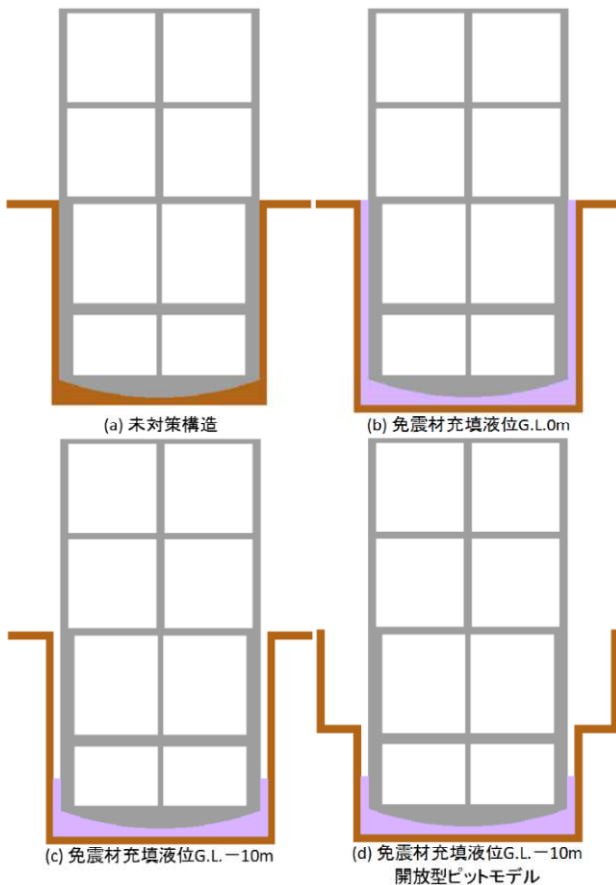


図-11 解析モデル

(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。常時においては建物重量を嵩上げゴムが支えることで免震材の液位が高い場合にも排出を抑制し、また地震時や津波衝突時においては建物の並進および回転運動の抵抗を小さくする構造を想定している。建物の重量は実規模のポンプ場を想定し、面積あたりの荷重は 234.6kN/m^2 とした。この躯体重量では、常時にピットが免震材で満たされた場合でも建物が浮き上がることはない。二次元モデルには含まれない側壁の重量を考慮し、建物の剛体モデルの密度は 4.018t/m^3 に設定した。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ており、個々の粒子に生じた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 $5.0 \times 10^{-4}\text{s}$ から表-3 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基で支えるものとし、解析平面内に3基を配置して単位奥行あたりの剛性を設定した。設定したパラメータを表-4に示す。

表-3 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-4 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) 免震材の解析条件

免震材の物性は材料試験結果から設定し、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るが、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。免震材と水に設定した物性およびSPH解析の計算条件を表-5に示す。

表-5 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

6. 免震性能に関する解析的検討結果

(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であり、仙台河川国道事務所構内の地盤上における東北地方太平洋沖地震の位相特性を持つもの(I-II-2)およびJR西日本鷹取駅構内地盤上の兵庫県南部地震の位相を持つもの(II-II-2)である。検討用地震動の加速度時刻歴波形を図-12と図-13に示す。

地震動は慣性力として入力し、解析モデル全体に入力地震波の符号を反転して作用させた。地盤およびピットは固定境界とし、地震条件は運動する解析モデルと固定境界間の反力として与えられる。

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-11(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。

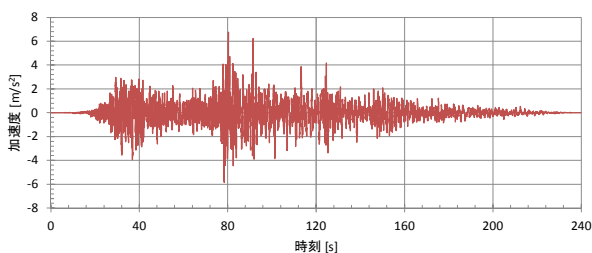


図-12 検討用地震動 I-II-2

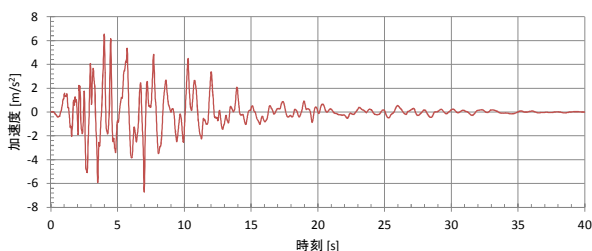


図-13 検討用地震動 II-II-2

(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-14 および図-15 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。

免震効果は躯体の運動だけでなく、免震材の流動による粘性減衰や嵩上げゴムの滑動による影響も受けるため、最適な構造の設定は難しいが、数値解析による検討を行うことである程度の目安を得ることが可能であると考えられる。

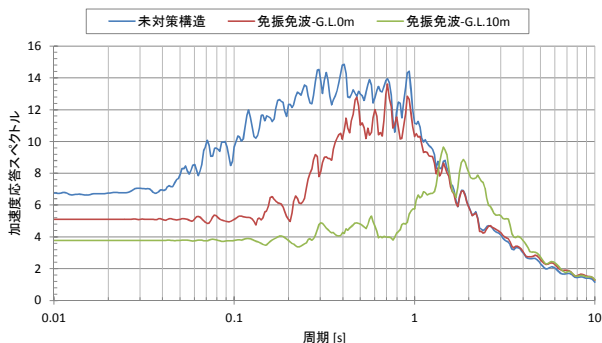


図-14 I-II-2 入力時の建物重心位置の加速度応答

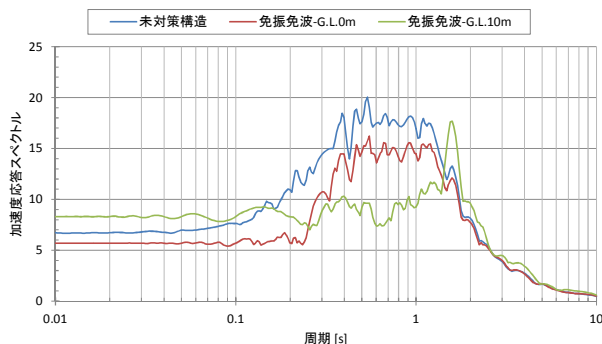


図-15 II-II-2 入力時の建物重心位置の加速度応答

7. 免波性能に関する解析的検討結果

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。

(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。深さ h の表面波の位相速度 C_p は波長を λ として式(3)から計算できる。

$$C_p = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}} \quad (3)$$

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、式(3)は \sqrt{gh} で近似されることから、本検討でも \sqrt{gh} を津波モデルの初速度の計算に用いた。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。

表-6 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

(2) 解析結果と考察

建物壁面に生じた圧力について、図-16、図-17 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いることが確認できる。免震・免波構造の圧力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-18 から図-21 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のが認められる。地下構造部は地上部に比べて構造断面が大きいいため、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。

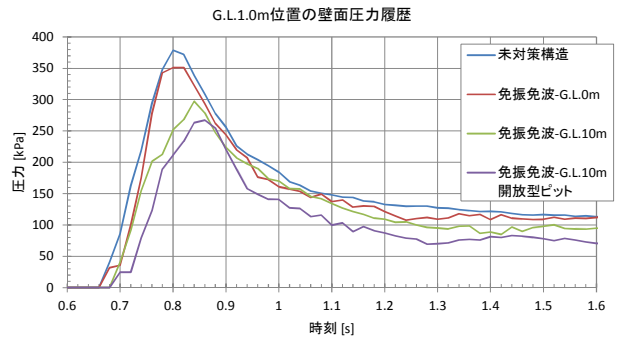


図-16 建物壁面の圧力時刻歴 (G.L.+1.0m)

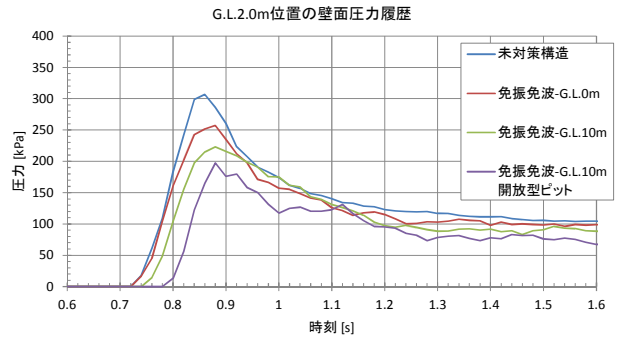


図-17 建物壁面の圧力時刻歴 (G.L.+2.0m)

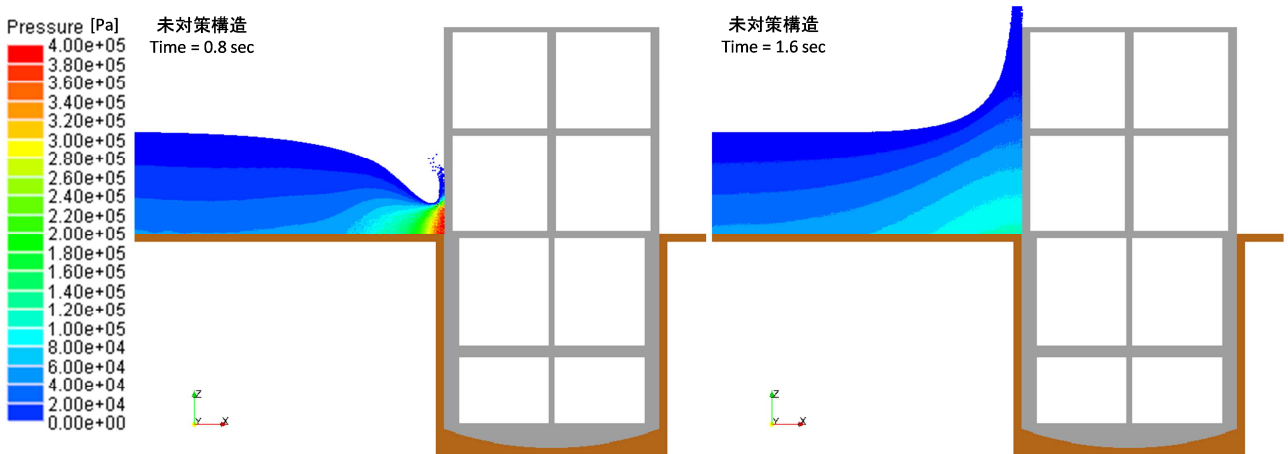


図-18 未対策構造モデルの水圧分布

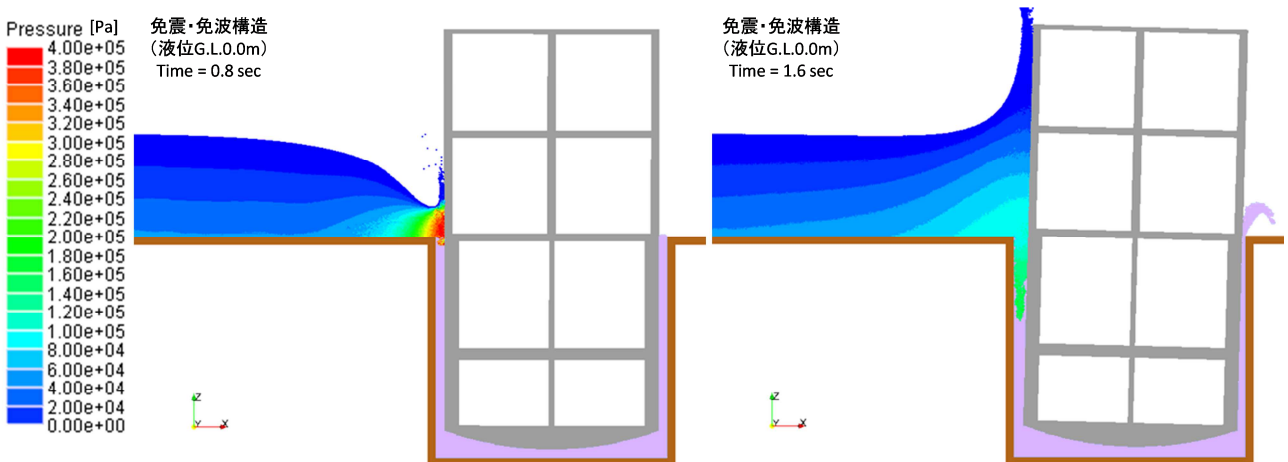


図-19 免震・免波構造（免震材充填液位 G.L. 0m）モデルの水圧分布

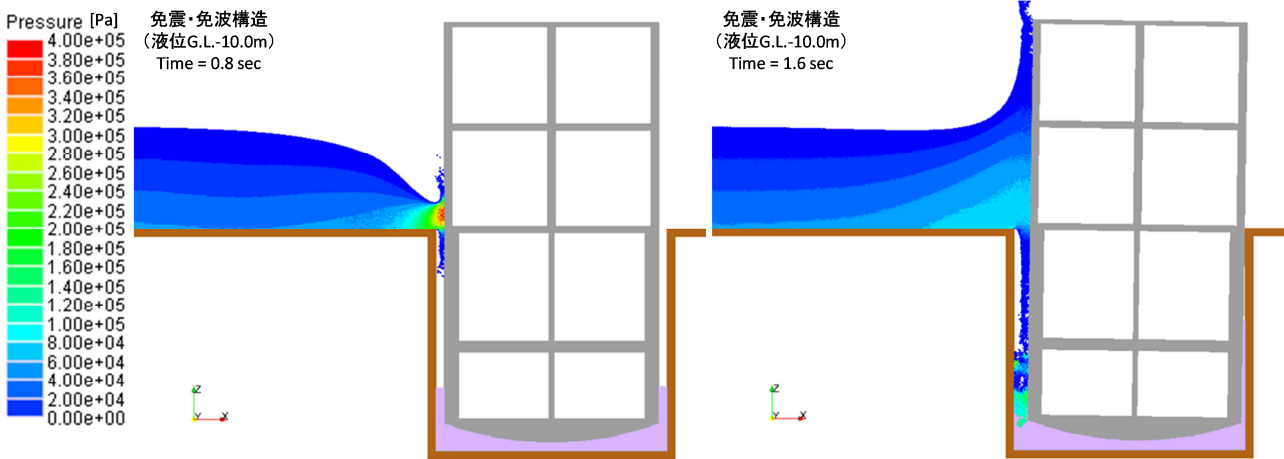


図-20 免震・免波構造（免震材充填液位 G.L.-10m）モデルの水圧分布

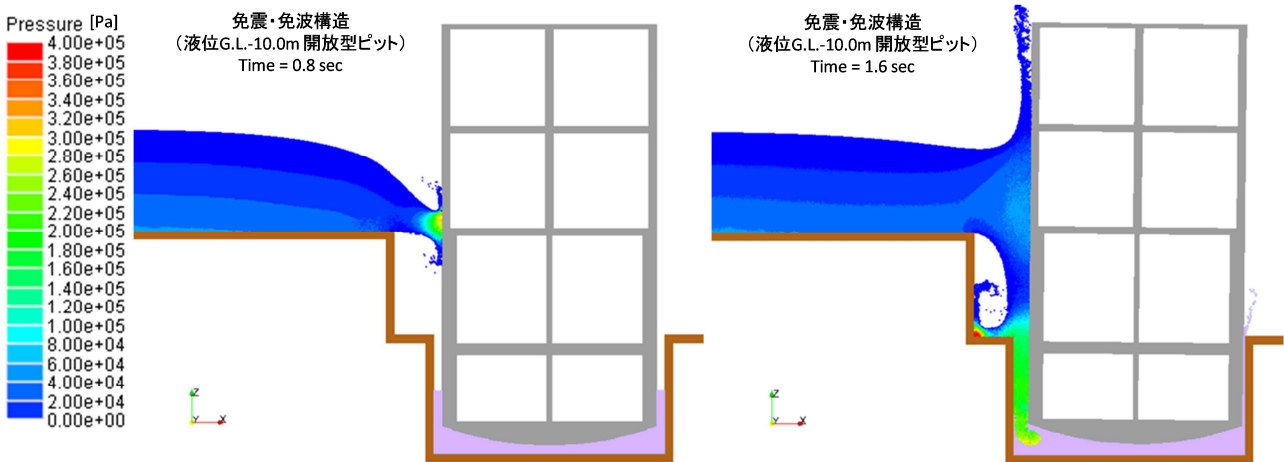


図-21 免震・免波構造（免震材充填液位 G.L.-10m 開放型ピット）モデルの水圧分布

8. 結言

本研究では、ミレニアム地震発生時に想定される下水の浄化センター施設の被害を軽減し、被災地の上下水道機能の早期復旧を可能とするため、半地下化構造物に適用する免震・免波構造を提案した。

本研究で得られた成果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 津波の衝撃的な波圧に対して三次元的（後退，回転，ねじれ）クッション性能にてその波圧を軽減すると共に，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免震・免波構造を提案した。
- 2) 東日本大震災での被災事例の調査結果を踏まえ，提案する免震・免波構造を適用する施設規模について検討した。
- 3) 免震・免波構造に適用するアスファルト系免震材や嵩上げゴムに使用する積層繊維補強ゴムの材料特性を評価した。
- 4) SPH 法を用いた地震応答解析により，免震・免

波構造の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。

- 5) SPH 法を用いた津波衝突解析により，提案した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。
- 6) 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。
- 7) 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。

提案した免震・免波構造は，流動性を有するアスファルト系免震材を用いることで，地震動に対する

免震効果のみならず、沿岸部において想定される津波衝突による波圧の低減を図るものである。本研究では、SPH法を用いた数値解析の実施により、免震性能および免波性能の確認を行った。今後は、数値解析による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に対応できるような可とう管などのデバイスの開発も合わせて検討する必要があると考えている。

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・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

4) 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

5) 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

6) 西本安志・梶田幸秀・石川信隆・西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.46A，pp.1865-1874，2000.3.

7) 西本安志・梶田幸秀・石川信隆・西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの落錘式衝撃実験と伝達荷重の予測に関する一考察，構造工学論文集 Vol.47A，pp.1655-1664，2001.3.

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，2012.3

FUNDAMENTAL STUDY ON APPLICABILITY OF ISOLATION STRUCTURE AGAINST EARTHQUAKE MOTION AND TSUNAMI BY UTILIZING ASPHALTIC VISCOUS FLUID

Mikio TAKEWUCHI, Yoshiaki ARIGA, Takashi WATANABE,
Shohei KAWAGUCHI, Yasushi NISHIMOTO,
Muneo HORI and Taro ARIKAWA

Wastewater treatment plants are usually constructed at coastal zone and river mouth area because of gravity system for collecting sewage. Consequently, they can be attacked by not only strong motion but also tsunami at earthquake time. In this study, we proposed isolation structural method against strong earthquake motion and tsunami by utilizing asphaltic viscous fluid isolator. Applicability of the method was examined by numerical analyses based on incompressible smoothed particle hydrodynamics. As a result, it is considered that wave pressure induced by tsunami can be reduced due to three-dimensional cushion effect of isolator.