

SPH 法による構造物に作用する津波波圧の評価

渡辺 高志¹・有賀 義明²・西本 安志³
坂下 克之⁴・小西 康彦⁵

¹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

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) シンバタ工業株式会社 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

⁴正会員 大成建設株式会社 技術センター 都市基盤技術研究部 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

E-mail: katsuyuki.sakashita@sakura.aisei.co.jp

⁵正会員 博(工) 株式会社日水コン 事業統括本部 (〒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: konisi_y@nissuicon.co.jp

沿岸域に立地する構造物においては、強震動に対してのみならず、大地震発生時に生じる津波についても安全性の確保を図る必要がある。構造物が津波衝突を直接受けることにより、壁体などの構造部材に損壊を生じ、施設機能の復旧が困難となることを防ぐことが重要であり、何らかの対策を検討するべきであろう。

津波衝突に対する耐性を向上するため、構造部材を補強することで耐力を向上させる、耐波設計のような手法には限界があり、また不経済であることから波を往なす免波のような考え方の導入が合理的である。また、衝撃荷重は壁体と津波の面的な衝突によって生じているため、特別な緩衝機構を設けずとも、構造物に対する津波の衝突角度や構造物の平面形状を調整することで大きな緩衝効果があると考えられる。そこで本研究では、津波衝突による構造物壁体の作用波圧が、衝突角度や平面形状によって低減する効果を、SPH 法による数値解析を用いて評価した。

Key Words: tsunami, wave pressure reduction, numerical analysis, Smoothed Particle Hydrodynamics.

1. 緒言

大地震発生時に生じる津波による被害を避けるには、対象施設自体を沿岸域から遠ざけることが一番の対策である。しかしながら、施設機能上、沿岸部に建設される構造物も多い。例えば下水の最終処理を担う浄化センターは、下水が自然流下で収集されるため、通常、沿岸域や河川河口域に立地されるケースが多い。また、このような水循環施設が被災し、その機能復旧に時間を要することは、被災地の衛生環境に与える影響が大きいことから、施設に対する津波対策の重要性もより高まる。

2011 年東北地方太平洋沖地震では沿岸域に建設された多くの施設で地震被害が発生した¹⁾。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。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、その後の津波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⁾。近代的な柱-梁構造と補強された壁構造に生じた被害を見ると、構造補強のみで耐性を高める耐波のような考え方ではなく、波を往なす免波構造の開発がより合理的であると考えられる。著者らは、このような観点からアスファルト系免震材³⁾を用いた新しい構造形式として免震・免波構造^{4,5)}を提案している。

なお、津波防護技術としては、免震・免波構造のように構造物の付加機能で防護する手法の他に、対象を防護する構造物を陸域や水域に設ける手法もある。また、津波からの回避や隔離以外で最も簡易な対策として、津波の到来方向を考慮した構造物の配置や構造物形状を円柱状にすることで面的な衝突を

避け、波圧を低減する方法が考えられる。津波到来方向が海岸線に垂直であると想定すると、土地利用の効率は少し落ちると考えられるが、構造物の平面配置を調整することが賢明だと考えられる。しかしながら、前述のような津波の到来方向や構造物の表面形状による波力の低減効果は、対象構造物の条件によるところが大きく、あまり調べられていない。

そこで本研究では、数値解析を用いて構造物に津波が衝突する際の動水圧を評価し、矩形平面の構造物を対象として津波の到来方向を変えた際や、構造物の平面形状を円柱状に変化させた際の波力の低減効果についての検討を行った。



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）

2. 津波対策技術の整理

構造物に作用する津波波圧を評価する前に、津波対策技術の全体像について整理を行う。津波対策としての検討優先度の高い順に、(a)津波の回避、(b)津波からの隔離、(c)津波波力の低減が考えられる。これらの津波対策技術を整理して表-1に示す。

構造物を津波から回避することがより確実な対策であり、これが難しい場合に津波からの隔離や波力の低減手法を検討するべきである。津波からの隔離

とは地下化や津波防護施設を用いることで津波との直接の衝突を避ける技術であり、地下化が施設機能やその他の問題で難しい場合、または津波防護施設を用いても津波の到達を防げない場合については有効ではない。津波からの隔離が有効でない場合、津波波力の低減手法を検討することになる。新設の場合は構造物の表面形状や配置を調整することで被害を軽減できる可能性がある。また、既設の場合においても、免震・免波構造のように構造物の機能として緩衝機能を後から追加する手法も考えられる。

表-1 津波対策技術の整理

(a) 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
(b) 津波からの隔離 ◇地下化による隔離 ◇津波防護施設の利用 【陸域で防護する手法】 胸壁（防護壁）や盛土構造物による遮断 陸閘（横引きゲート、起伏式ゲート） ドーム構造等による被覆 【水域で防護する手法】 津波防波堤や浮上式防波堤など フラップゲート
(c) 津波波力の低減 ◇構造物の表面形状の効果（平面・曲面） ◇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（エネルギー吸収型材料） ◇免震材の活用（免震・免波構造）

3. 構造物に作用する津波の波圧の評価

(1) 津波衝突解析の概要

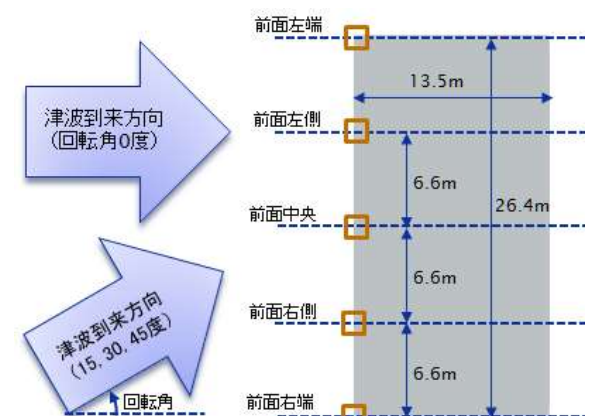
構造物に作用する津波波圧の評価は、津波と地形の条件や構造物とその周辺の条件が複雑に絡み合い、容易には行うことが出来ない。そこで、特に構造物の向きと津波到来方向の関係や、壁体表面の形状の効果に着目し、単純化した構造物モデルに対して津波を衝突させる検討を数値解析により行った。数値解析には、衝突時に生じる自由液面の変化への適用性に優れる粒子法⁹⁾を採用し、Navier-Stokes方程式を解くことで津波衝突時の非圧縮性流体の挙動を計算した。既往の検討事例として、著者らは津波の衝突を受ける半地下構造物に関する検討を、2次元鉛直断面を対象として行っている⁴⁾。本検討においても同様の手法を採用し、ISPH (Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics) 法^{7,8)}に基づく流体解析機能を持つ粒子法解析コードである「DYBECS」^{9,10)}を使用して構造物への津波衝突解析を行った。

(2) 津波衝突解析の解析ケースと構造物モデル

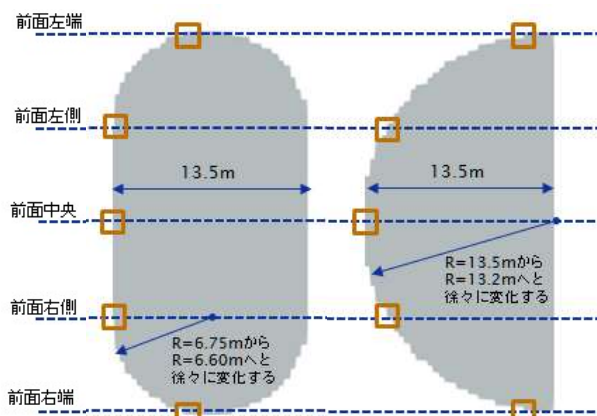
本研究では、(a)津波の到来方向による影響と、(b)

構造物の表面形状による影響について確認するため、構造物モデルの配置角度や形状を変えた解析ケースを設定した。本来は3次元モデルによる解析が好ましいが、現実的には解析の分解能を確保しつつ計算規模を抑制する必要があることから、本検討では構造物の立地する地盤高さにおける水底付近の現象を想定し、2次元水平断面の解析モデルを用いた数値解析を実施した。解析は、想定する津波波高から津波の液塊としての速度を仮定し、水平断面における構造物モデルに衝突させる検討を行った。

津波の到来方向の影響検討については、建物前面の壁体法線方向に対し真正面から到来する方向を基本とし、15度刻みで45度まで回転した全4ケースの衝突角度を設定した。また、構造物としては水循環施設の内、下水の最終処理を担う浄化センターを想定し、幅26.4m、奥行き13.5mの平面寸法の矩形断面を想定した。構造物壁体の表面形状の違いによる影響検討としては、津波の衝突面がフラットな矩形断面の形状を基本とし、構造物の外形寸法はそのまま、構造物の両端を円形の断面に変更したものや、衝突面全体が円柱状の平面形状を持つ構造物モデルの3ケースを設定した。各構造物モデルには、津波波圧を評価するため前面部に6.6m間隔で合計5点の圧力評価点を設けた。作成した構造物の平面モデルの形状寸法と圧力評価点の位置を図-1に示す。



(a) 津波の到来方向による影響の検討



①両端が円形断面 ②前面全体が円形断面
(b) 構造物の表面形状による影響の検討

図-1 構造物モデルと圧力評価点の位置

(3) 解析モデルと境界条件

SPH 解析による検討では、矩形の構造物モデルの平面寸法に対し、10 倍の大きさの範囲を対象とし、図-2 に示す 264×135m の寸法を持つ矩形の水平断面の津波モデルを作成した。物性としては一般的な水を想定し、津波モデルの物性値と解析パラメータを表-2 に示す。なお、SPH 解析における影響半径は粒子間距離の3倍として、計算に用いるカーネル関数には5次のSplineカーネルを用いた。

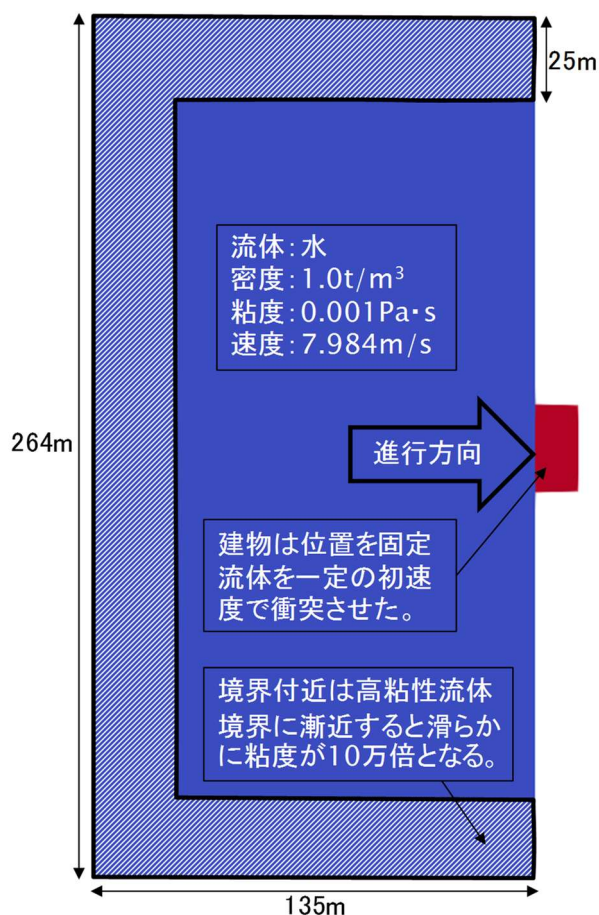


図-2 解析モデルと解析条件

表-2 SPH の解析条件

項目	設定内容
水の密度	1000 kg/m ³
水の粘度	0.001 Pa・s
初期粒子間距離	0.4 m
SPH の影響半径	1.2 m

構造物の水平断面モデルは解析モデル中央部の位置に固定し、津波を模した流体モデルに一定の初速度を与えて構造物モデルに衝突させた。津波の衝突速度は、本研究では想定する津波波高を水深として(1)式に示される有限深さの波の位相速度 C_p から設定した。なお、津波の波長 λ に対して想定する水深 h は非常に浅いことから、 $C_p = \sqrt{gh}$ として計算した。具体的には、構造物の壁前面に到来した津波の水深を6.5mと仮定し、津波速度として7.984m/sを設定し

ている。

$$C_p = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}} \quad (1)$$

解析における境界条件としては、衝突により生じた圧力波動が境界で反射することを防ぎ、また境界面の形状変化を出来るだけ抑制するため、衝突面を除く境界部の流体は高粘度の自由境界とした。具体的な取り扱いとしては、境界から **25m** の範囲内では境界面に漸近するに従い流体粘度が滑らかに大きくなり、境界端部で内部流体の **10 万倍** の粘度となるように設定を行った。なお、境界領域の粘度に乗じる係数は、高粘度層境界からモデル境界までの正規化距離 r の関数とし、任意の定数 $\alpha = 8.0$ と $\beta = 2.0$ を設定して(2)式から計算した。

$$f = \frac{1 - \exp(-\alpha r^\beta)}{1 - \exp(-\alpha)} \quad (2)$$

4. 解析による検討結果の整理

(1) 津波の到来方向による影響の検討

津波の到来方向に対して、衝突を受ける構造物の壁面前面の向きは重要であり、壁面の法線と到来方向がずれることで緩衝効果が期待できる。この影響の大きさを評価するため、津波の衝突角度に関する検討を行った。本検討では、図-1 (a)に示される矩形断面の構造物モデルのみを対象とし、津波の到来方向を変更したケーススタディを実施した。解析上の取り扱いは、津波の進行方向を変えるのではなく、

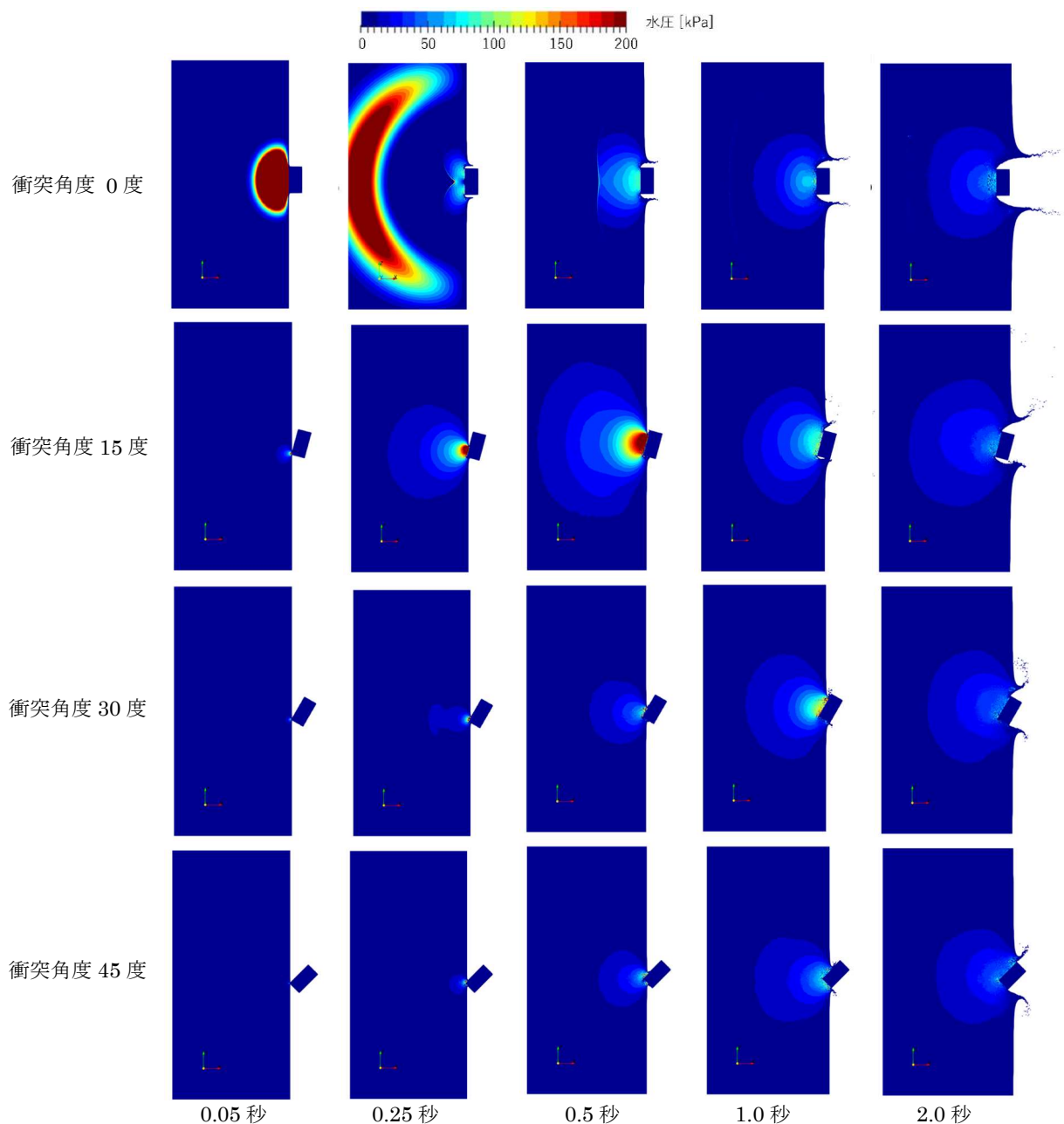


図-3 衝突から一定経過時における動水圧分布 (津波到来方向による影響の検討)

矩形断面の構造物モデルを回転して初期位置で固定し、津波を模した水塊を衝突させる検討を実施した。津波到来方向の衝突角度を変えて0度、15度、30度、45度の4ケースを対象として、得られた解析結果を

以下に示す。

図-3 に衝突直後から津波衝突面が砕けるまでのケース毎の動水圧分布の履歴を示す。衝突直後における水塊との接触面積が大きくなる衝突角度が小さい

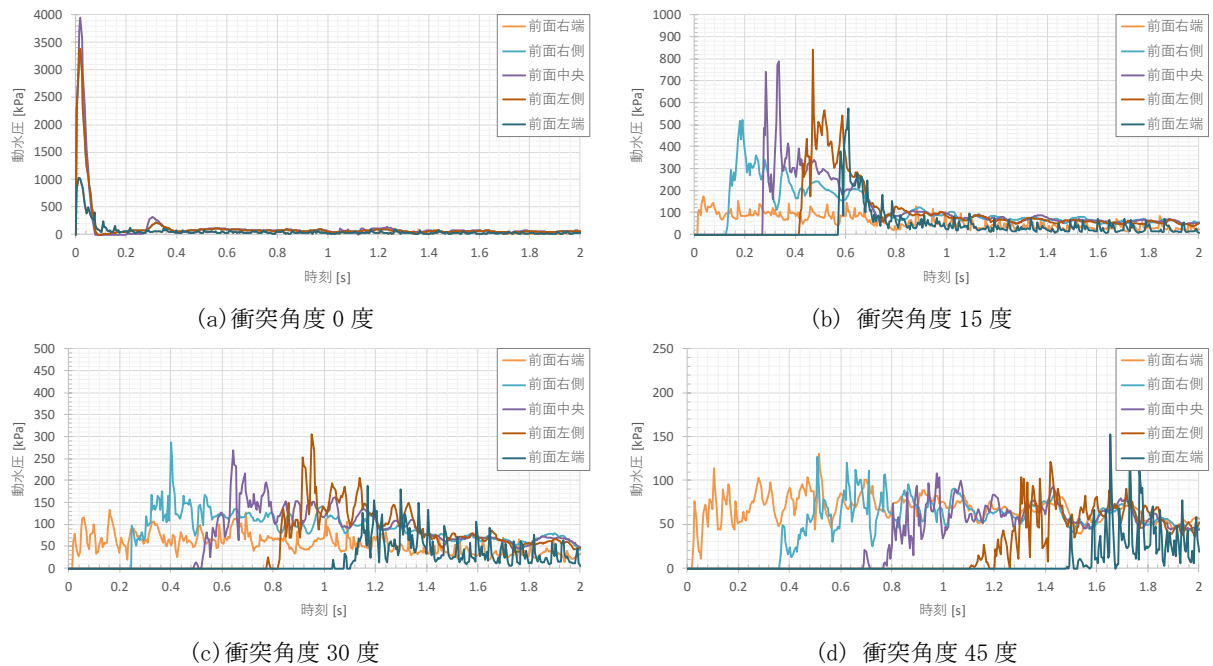


図-4 津波到来方向による影響を検討した各ケースの圧力評価点位置の動水圧時刻歴

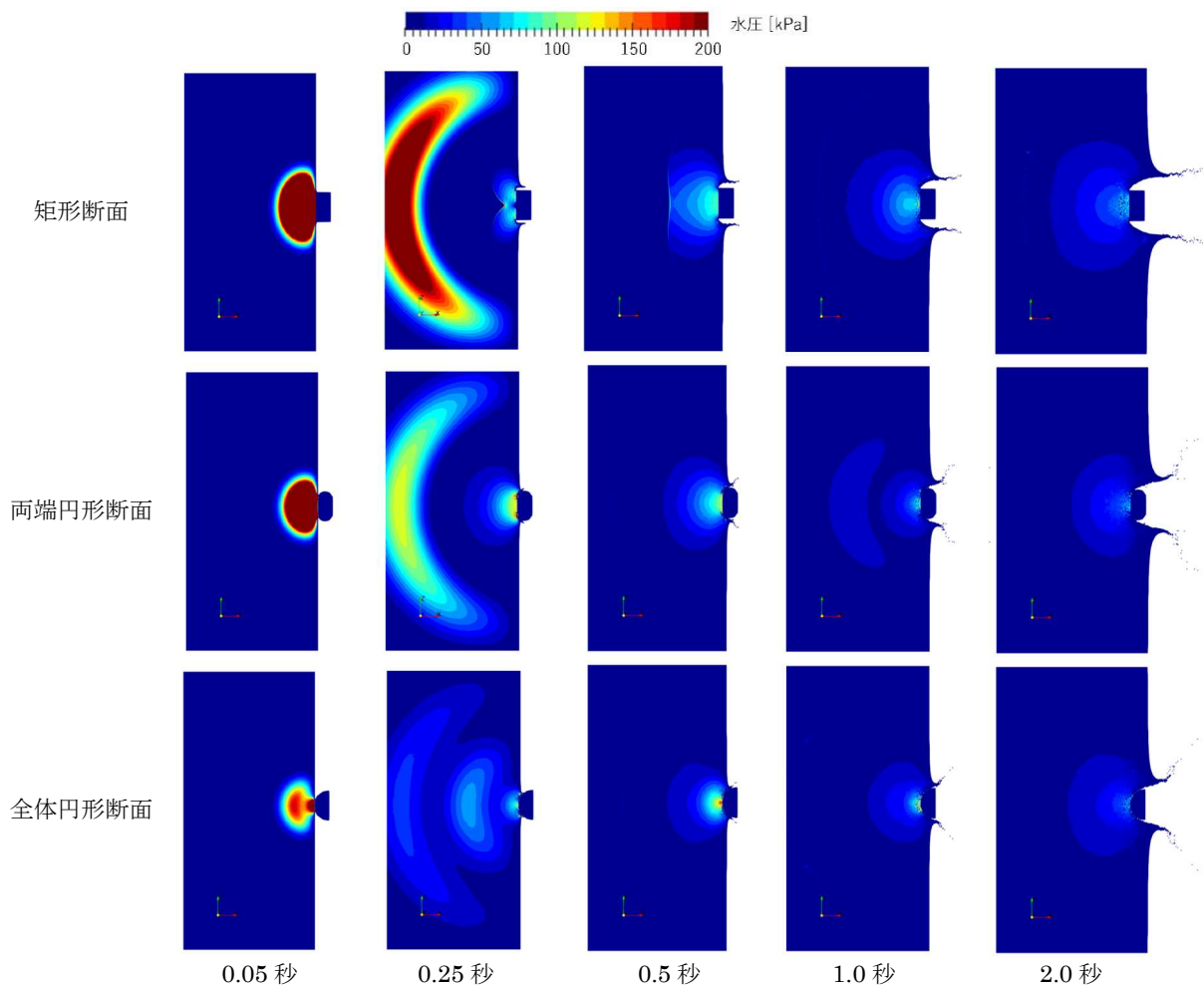


図-5 衝突から一定経過時における動水圧分布（構造物表面形状による影響の検討）

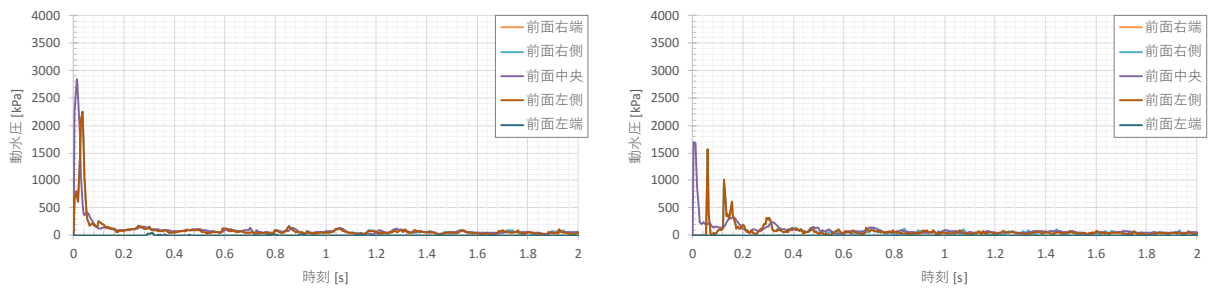


図-6 構造物表面形状による影響を検討した各ケースの圧力評価点位置の動水圧時刻歴

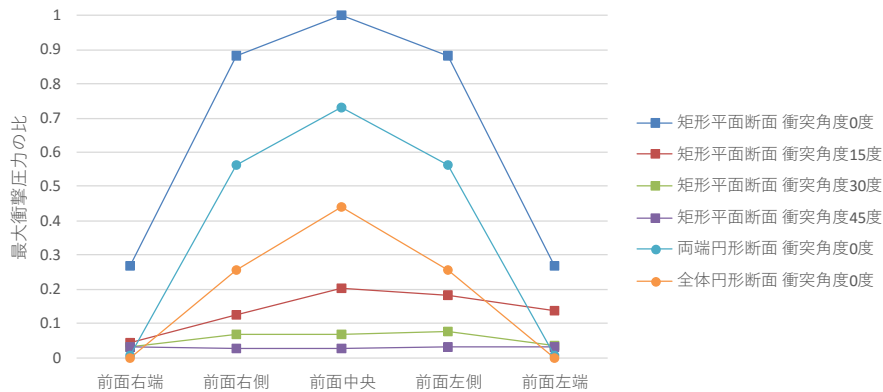


図-7 正規化した各ケースの圧力評価点位置の最大衝撃圧力の比

ケースでは、面的な衝突により非常に大きな動水圧が発生しているが、衝突角度が大きくなり 45 度に近づくにつれて圧力上昇前に津波前面の形状が崩れており、衝撃的な動水圧が生じなくなることがケース間の比較図より確認できる。また、衝突角度の小さいケースでは、初期時に大きな動水圧波の伝播が認められるが、境界で反射することなく想定通りの解析が行えていることが確認できる。

図-4 に各ケースの圧力評価点位置における動水圧の時刻歴を示す。衝突角度が小さいケースほど波圧の立ち上がりが大きく、構造物の壁体の位置による違いが大きい。衝突角度が大きくなると波圧は小さくなり、位置による差は殆ど見られなくなる。これらの結果から、構造物を津波到来方向に対して 45 度傾斜させて配置することが施設の津波被害を軽減する上、非常に効果的であると確認できる。

(2) 構造物の表面形状による影響の検討

構造物の表面形状による影響を検討するため、構造物モデルの水平断面の形状を変更した解析を実施した。検討は、津波到来方向の検討で用いた図-1(a)に示される建物の平面形状が矩形断面のモデル、同じ寸法で両端が円形断面の図-1(b)の①に示されるモデル、同じ寸法で構造物の前面全体が円形断面の図-1(b)の②に示される合計 3 ケースの検討を実施し、得られた解析結果を以下に示す。

図-5 に衝突直後から津波衝突面が砕けるまでのケース毎の動水圧分布の履歴を示す。矩形断面モデルの結果については再掲したものである。検討ケース間の動水圧分布の比較より、壁体の表面形状の平均

的な曲率が大きくなるほど発生する動水圧が小さくなることを確認できる。一方で、津波到来方向による影響の検討において、検討ケース間で圧力の比較を実施した、構造物の隅角部を津波波面に斜め衝突するように設定したケースに比べると緩衝効果は小さくなっていることが分かる。矩形断面の隅角部の曲率は極大値となり、緩衝効果もより高いため、津波到来方向が予測できる場合においては矩形断面の平面配置を検討する方が有利である。

また、構造物の壁体表面に配置した圧力評価点より、表面形状が曲率を持つ構造物の壁体にかかる動水圧の影響を、津波の進行方向から見た構造物前面の各部位の動水圧の経時変化を図-6 に示す。なお、矩形平面断面の波圧の時刻歴については図-4(a)に示されている。何れの構造物の平面形状も津波進行方向に対して対称であることから、動水圧も対称に発生している。また、衝突直後は津波前面が 2 方向に分かれて壁体端部には水圧がかからないため、端部の評価点圧力は 0 となっている。

また、全ケースの解析結果より、最大の衝撃波圧を発生した矩形断面の衝突角度 0 度の場合の時刻歴最大の衝撃波圧を用いて、各ケースの圧力評価点位置の最大波圧をケース毎に正規化し、その空間分布を図-7 に示す。全ての検討ケースを比較して、津波到来方向に対して建物配置をすることが有効である。

5. 結言

本研究では、沿岸域に位置する構造物に生じる津

波波圧による被害の軽減策について検討するため、構造物の表面に作用する津波波圧の評価と、津波の到来方向と構造物の配置の関係や、構造物の表面形状による緩衝効果について、数値解析による評価を行った。SPH 法による 2 次元水平断面の解析結果を整理し、津波の到来方向や構造物の表面形状による緩衝効果を確認した。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) 沿岸域に位置する構造物を対象に、SPH 法による数値解析を実施し、津波衝突時に生じる波圧の評価を実施した。検討した条件下では構造物の表面形状や平面配置の工夫によって高い緩衝効果が確認された。
- 2) 構造物の表面形状が平坦である場合、津波波面と平面的に衝突することで大きな衝撃力が発生する。また、構造物の端部付近では水流が外へ抜けるため壁面の位置による波圧変動が大きい。
- 3) 構造物の表面形状が曲面である場合、曲率が大きくなるほど衝撃力は小さくなる。なお、一般的な矩形断面の構造物の隅角部は曲率が極大となるため、津波到来方向が壁面と直交しない場合には大きな緩衝効果を発揮する。
- 4) 津波到来方向を考慮して、矩形断面の構造物の平面配置を斜めにした場合、到来方向に対して傾斜角が 45 度に近づくほど緩衝効果は大きくなる。また、大きな衝撃力が発生しないため壁面の位置による波圧変動が殆ど見られない。
- 5) 施設機能上、沿岸域に建設せざるを得ない構造物については、津波による被害軽減のために海岸線に沿って 45 度傾けた平面配置が有効である。

参考文献

- 1) 竹内幹雄, 小黑明, 大峰秀一: 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) 池野正明, 松山昌史, 榊山勉, 柳沢賢: 模型実験に基づく砕波を伴うソリトン分裂津波の波力評価, 電力中央研究所報告, V05009, 2006.4.

- 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) 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.I_235-I_245, 2015.2.

- 5) 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.I_721-I_729, 2017.

- 6) 越塚 誠一: 粒子法, 丸善, 2005.

- 7) S. Shao, E. Y. M. Lo: Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface, *Advances in Water Resources*, 26, No.7, pp. 787-800, 2003.

- 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) 渡辺高志, 登柳正夫, 嶋村洋介, 榊谷浩: 固定屋根式タンクのスロッシング問題を対象とした SPH-FEM 連成解析, 第 11 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 2014.10.

- 10) 渡辺高志, 榊谷浩, 三橋祐太: 壁面境界の大変形を考慮した粒子法の計算手法に関する基礎的研究, 日本計算工学会論文集, No.20130021, 2013.12.

EVALUATION OF WAVE PRESSURE IN THE STRUCTURE SURFACE CAUSED BY TUNAMI COLLISION BY SMOOTHED PARTICLE HYDRO METHOD

Takashi WATANABE, Yoshiaki ARIGA, Yasushi NISHIMOTO,
Katsuyuki SAKASHITA, Yasuhiko KONISHI

Structures present along the coast line, should be ensured for safety against not only strong ground motion but also against the onset of a tsunami. Especially in the case of life-line structures, countermeasures against the damages suffered due to tsunami is important.

Designing tsunami collision-resistant structures usually results in highly uneconomical structures, due to the large demand of forces on them. As the collision force is dependent on the planar surface area of the collision-resistant wall exposed to the tsunami, the force demand on the collision walls can be significantly reduced by modifying the structure's planar shape and angle of collision of the tsunami. This paper involves a numerical study using the SPH, on the effects of planar shape and angle of collision, on the reduction of the tsunami wave pressure incurred by the structures.