

構造物に作用する津波波圧に対する 構造物の側面勾配の影響

渡辺 高志¹・有賀 義明²・市山 誠³・西本 安志⁴

¹正会員 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 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)
E-mail: y-a-arig@hirosaki-u.ac.jp

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 つくば技術研究センター
(〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)
E-mail: makoto.ichiyama@tk.pacific.co.jp

⁴正会員 シバタ工業株式会社 新技術開発本部 (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾1058)
E-mail: Yasushi_Nishimoto@sbt.co.jp

沿岸域に立地する構造物は、施設の重要度に応じて大地震発生時に生じる津波に対する安全性の確保を図る必要がある。また、構造物が津波衝突を直接受けることで、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る。

津波荷重は衝突時の慣性力と流れから受ける抗力の両方を含むが、衝撃的な波圧には慣性力の影響が大きいため、衝突時の角度や構造物の側面勾配によってこれを往なすことで大きな緩衝効果を得ることが出来る。著者らはこの緩衝効果の確認のために津波模型実験を実施しており、現象の理解と相補的な妥当性確認の観点から実験の再現解析を行った。津波衝突により発生する波圧に対し、構造物の側面勾配がなす効果をSPH法による数値解析で評価し、解析と実験の結果を比較して現象について考察した。

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

1. 緒言

2011年東北地方太平洋沖地震では、地震動のみならず大津波が発生したことにより、沿岸域に建設された陸上構造物に多くの被害を生じた¹⁾。このような津波被害を避けるには、そもそも新設時に対象施設を沿岸域から遠ざけることが一番の対策であったが、一方で施設機能の都合から沿岸域に建設される構造物もある。例えば下水の最終処理を担う浄化センターなどが該当する。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と被災地の衛生環境に与える影響が大きい。従って建設計画時には津波被害を軽減する何らかの対策案を検討しておくべきであろう。

このような背景から著者らは、これまでに強震動と津波の双方に対する被害軽減技術として、従来の剛な構造で被害に耐える耐震・耐波の考えに対し、柔な構造で被害を免れる免震・免波の考えに立脚した研究²⁾や、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について数値解析による検討³⁾を行ってきた。津波の到来方向や

構造物の平面の形状による緩衝効果は、動水圧のみに着目することで水平断面を対象とした解析でも評価可能であるため、低減効果の定量的検討としての研究を実施している。しかしながら、重力や鉛直方向の水面変化の影響、それに関連して構造物の側面形状がなす緩衝効果について検討するには3次元解析を行う必要がある。また、2次元体系の解析では自由度が少なく面的な衝突を生じる条件においては、発生圧力が非常に大きくなるのが問題であり、本研究ではより現実的な条件の検討として、著者らが実施している水柱崩壊による津波模型実験を対象とし、3次元体系のモデルを用いた数値解析の実施を行った。

対象とした津波模型実験は津波との衝突条件や緩衝材による免波効果の確認のために実施しているものであり、直線二次元水路(パシフィックコンサルタンツ(株)つくば技術研究センター)を使用して行った一連の実験ケースの内、矩形建物に正面衝突するものと構造物の側面形状に傾斜を設定したものを対象とした。その他、実験では構造物の壁表面に緩衝材を設置することによる影響検討など、多くの免震・免波技術に関する検討を行っているが、

本研究では構造物の側面勾配による波圧の低減効果にのみ着目している。

2. 数値解析手法について

(1) 数値解析手法

津波が構造物と衝突する際には構造物付近で液面の大変形が生じるため、構造物に作用する波圧評価を行う上では液面の変形を考慮することが重要である。そこで、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た粒子法⁴⁾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の計算を行った。なお、粒子法は離散化の違いにより SPH 法や MPS 法などの手法が知られているが、本研究では SPH 法の一種である ISPH (Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics) 法^{5,6)}を用いて解析を行った。ISPH 法は速度と圧力を分離して計算する手法であり、陽的に算定した仮の流速場が連続の式を満足するよう、圧力分布をポアソン方程式の求解から得て運動を修正する 2 段階の解法である。つまり、圧力計算は陰解法を採用するが、仮の流速場を計算する際の粘性項は陽解法を採用するのであるが、1 段階目に陰解法を適用することも多い。本研究における解析には必要機能を組み込んだ粒子法解析コード「DYBECS」を使用し^{7,8)}、構造物と津波が衝突する条件を想定した数値解析を実施した。

(2) 数値解析の省力化手法

メッシュフリー解析手法の一つである粒子法は計算負荷の高い計算手法であるが、特に 3 次元解析の計算規模は大きなものとなる。そのため、対象とする複数の解析ケースの取り扱いなどを検討する上で、計算の省力化を考えることは重要である。対象とした実験の水路は 2 次元であり、両側面の壁摩擦の影響が極小さいことからこれを無視すると、構造物の模型と衝突する直前までの現象については、2 次元解析として取り扱うことが可能となる。しかしながら、同じ離散化手法に基づく計算であっても、解析次元や面外の境界条件を途中で変えるようなことを行うと、切り替え時に不釣り合い力による影響が生じることは自明であり、そのような方法を実際に適用することは出来ない。

そこで、本研究では構造物と衝突する直前までの現象の解析は 2 次元モデルとして扱うのではなく、2 次元水路の面外方向を図-1 に示すように周期境界とするモデル化を行い、上記の不釣り合い力による問題を解決した。構造物に衝突するまでは計算に必要な最小厚さである粒子法の影響半径分のモデルを使用し、2 次元体系の条件に基

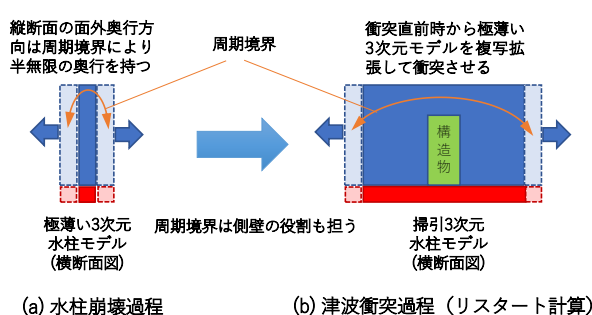


図-1 周期境界処理を用いた解析の省力化

表-1 SPH 法の解析条件

項目	設定内容
水の密度	1000 kg/m ³
水の粘度	0.001 Pa · s
重力加速度	9.807 m/s ²
初期粒子間距離	0.010 m
SPH の影響半径	0.020 m

づく 3 次元解析を行い、構造物の衝突直前から面外に水路幅分のモデルを複写拡張してリスタート計算を実施している。この場合、水路の壁はモデル化されないが流体挙動が面対称となる条件である場合、摩擦の影響を無視した壁としての振る舞いが期待できる。従って、壁のモデル化も省略することが可能である。なお、津波の到来方向の影響や平面形状の検討を行う際、流体挙動が非対称となる場合において、上述の省力化手法を適用することは出来ないので壁体のモデル化が必要である。

(3) 解析に用いる境界条件

津波模型実験の再現解析では、津波の自由液面の境界と、水路床面の境界条件および前述の面外方向の周期境界を用いる。自由液面については、粒子法による流体解析では一般的には負圧は考慮せず、圧力 0 のディリクレ境界条件として取り扱われることが多い。一方で、床面や構造物との接触面は流体粒子が通り抜け出来ない境界であり、圧力については勾配 0 のノイマン境界条件として設定を行う。なお、床面との間には分子粘性や床面の粗度による作用があることで、床面近傍に低速度の境界層が現れるが、低粘度の液体であれば極低速度の領域は極めて薄いため計算分解能が不足する。このような流速場は対数則等の壁関数で薄い層の速度を境界条件として設定することがあるが、Lagrange 粒子の移動で流体運動を取り扱う粒子法にはあまりそぐわない。本研究では水の粘度による床面との作用のみを考慮し、実験で実施された波高検定結果との比較からこの作用の大きさを調整することで床面の滑り条件の設定を行っている。なお、実験では水路を繰り返して使用するため、床面は通水状態にある

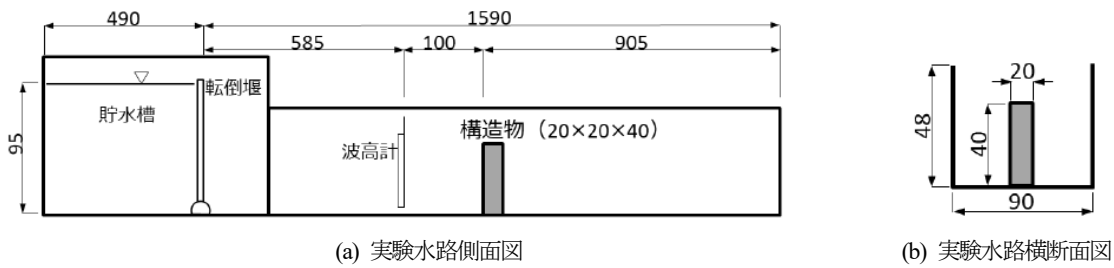


図-2 実験水路および貯水槽の形状寸法

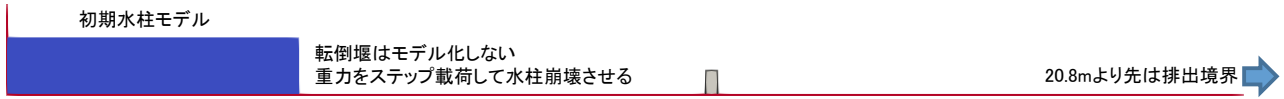


図-3 水柱崩壊前の粒子法解析モデル

ことから比較的床面の影響が生じにくい条件にあると考えられる。この水路の通水状態については、当初はモデル化を行っていなかったが、構造物との衝突を考慮しない波高検定時の波高履歴の比較を行い、通水をモデル化する条件で本計算を行った。

3. 津波模型実験の再現解析

(1) 模型実験の再現解析ケースと解析モデル

本研究では、図-2に示す寸法の水路と実験模型を用いて実施した津波模型実験の再現解析を行った。解析モデルは実験装置の寸法条件に基づいて粒子間距離 1cm の分解能で作成し、図-3に示すような粒子法モデルを使用した。水柱崩壊過程では水路床面に僅かにある通水を考慮し、建物模型より手前では 2 粒子分の水粒子を床面に配置している。なお、水理模型実験のケースとしては多くの条件のものを実施しているが、本研究の解析対象は津波波圧が大きくなる条件を想定し、構造物の前面に直接正面衝突するケースのみを対象とし、構造物の形状は基本となる直方体ケースと前面に仰角 60 度の傾斜を設けたケースのみを実施した。作成した構造物模型の粒子法解析

モデルを図-4に示す。

(2) 解析条件

実験模型の津波モデルに設定する流体物性としては一般的な水を想定した。津波モデルに設定した物性値と解析パラメータを表-1に示す。なお、SPH 解析における影響半径は粒子間距離の 2 倍とし、計算に用いるカーネル関数には 3 次の Spline カーネルを用いた。これらの条件は構造物に衝突する直前までの 2 次元的体系の解析と津波衝突を考慮した 3 次元モデルの解析で共通である。構造物模型のモデルは実験条件と同じ水路の中央部付近の位置に固定し、津波を模した流体モデルが重力により水柱崩壊することで構造物モデルに衝突させた。

(3) 計測項目と比較内容

実験は水柱崩壊により実施するため、構造物位置で所定の浸水深となるかについて事前に確認を行っている。想定した浸水深は 25cm であり、構造物の 1m 手前と構造物前面の位置で水位を計測しており、解析でも水柱崩壊により実験と同様の水位履歴が再現されることを 2 次元的体系の水柱崩壊解析で確認している。なお、構造物と津波が衝突すると飛沫が舞い上がり水位の計測が困難となるため、津波模型実験時は 1m 手前の水位のみ計測している。また、構造物模型の中央部には小型圧力センサーを底面から高さ 4cm 毎に設置しており、津波衝突により生じた水圧を計測している。再現解析の結果は、構造物の手前 1m 位置の水位と構造物模型中央の圧力分布の履歴について実験結果との比較を行った。

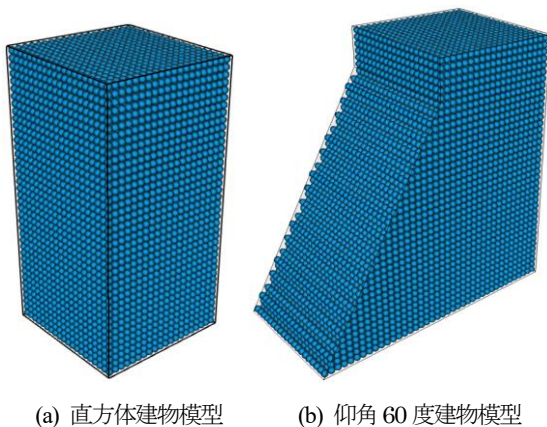
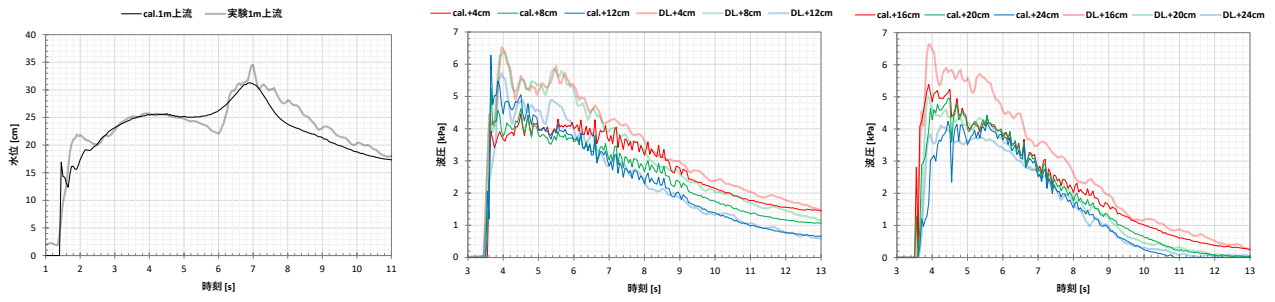


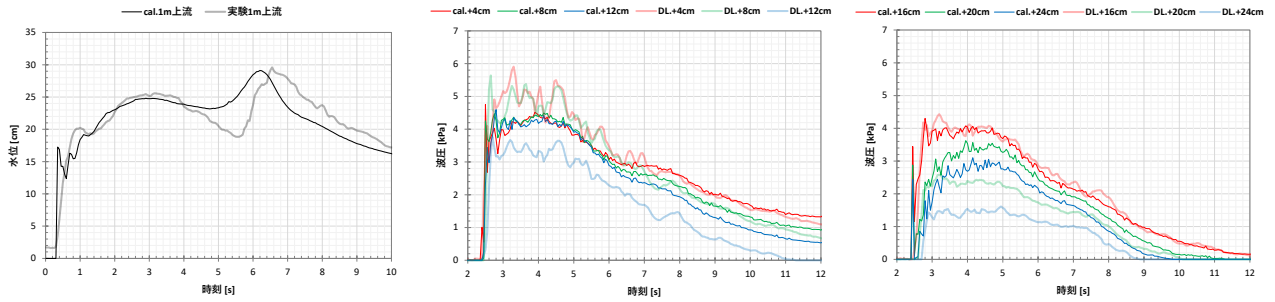
図-4 構造物模型の解析モデル

4. 解析と実験結果の比較考察

構造物の側面勾配による津波波圧の低減効果の確認のため、直方体建物模型と仰角 60 度建物模型を用いた津波



(a) 直方体ケースの水位履歴の比較 (b) 直方体ケースの下部波圧履歴の比較 (c) 直方体ケースの上部波圧履歴の比較



(a2) 仰角 60 度ケースの水位履歴の比較 (b2) 仰角 60 度ケースの下部波圧履歴の比較 (c2) 仰角 60 度ケースの上部波圧履歴の比較

図-5 解析結果と実験結果の建物 1m 手前の水位と各圧力計測位置の波圧の時刻歴比較

模型実験の再現解析を行い、その結果を整理して実験結果と比較した。図-5 に建物模型の手前 1m 上流地点における水位履歴の比較および建物模型中心の底面から上へ 4cm 毎に計測した水圧波形を波圧の比較として示す。波圧の波形は下部 3 点と上部 3 点で分けて示している。

(1) 水位の変化について

図-5 の(a1)と(a2)はそれぞれのケースの構造物手前 1m 地点の水位の時刻歴であり、衝突の影響が現れるまでは実験での想定遡上高さ 25cm 程度となっている。手前 1m 地点に到達した直後、水位が急激に跳ね上がっているがこれは通水の影響と考えられ、事前に実施検討した通水をモデル化しない条件では見られていない。通水により床面の摩擦効果が抑制され、極浅い前方の水を押し退けて水流の先端が乱れることで生じていると考えられるが、実験結果ではより高い位置まで上昇している。その後、模型との衝突過程で主流と合流し、衝突流が上方へ舞い上がった後に一時的に水位が低下し、直ぐに反射波が生じることで水位は大きく上昇している。直方体に比べて仰角 60 度では反射が小さくなるため、衝突後の水位がやや小さくなっており、解析結果からもこれを確認できる。なお、衝突後の反射の影響で水位の上昇も下降する時刻も解析の方が早く、後述の圧力履歴からも確認できるように表面付近の流速が実験結果に比べて大きい傾向にある。

(2) 構造物の側面勾配による波圧の影響

図-5 の(b1)と(b2)および(c1)と(c2)はそれぞれのケースの波圧の時刻歴比較であり、下部の計測点は実験結果に

比べて圧力が小さく、上部になると同程度かやや大きい波圧が発生していることが確認できる。このことから、下部ほど実験結果に比べて流速が小さく、上部ほど大きくなり自由表面付近の流れは実験結果に比べて流速が大きくなっていることが分かる。実験と解析で津波が到達する時刻は波高検定時に床面の影響を踏まえて調整しているため、中間高さ付近の圧力履歴は比較して整合的であり、床面や自由表面の近くで差異が大きくなっていることが確認できる。この速度の差異は、分解能の不足から生じる床面付近の境界層の速度分布の再現性や、速度の大きい自由表面付近については乱流モデルなどを本研究では採用していないことが原因であると考えられる。

図-6 に各計測位置の波圧波形の平均の時刻歴を比較したものを示す。計測点は等間隔であり、これは波力の時刻歴の比較に相当するものである。直方体ケースでは解析

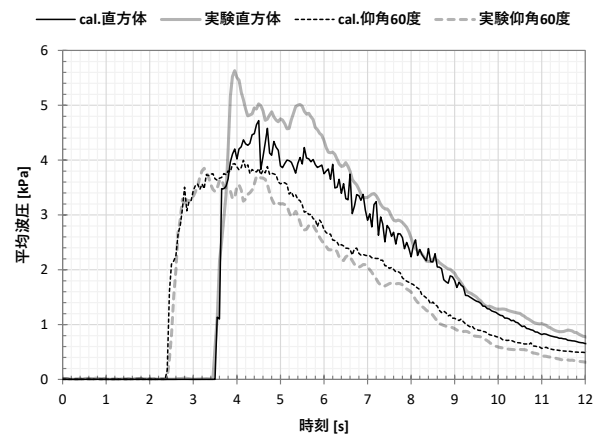


図-6 平均波圧履歴の解析と実験結果の比較

結果のピークはやや小さく、仰角 60 度ケースではやや大きくなっているが、全体的な波圧の経時変化としては解析と実験間で整合的である。衝突後 10 秒程度経過した後の平均波圧にもケース間で大きな差があり、構造物の側面勾配による効果が大きいことが確認できる。

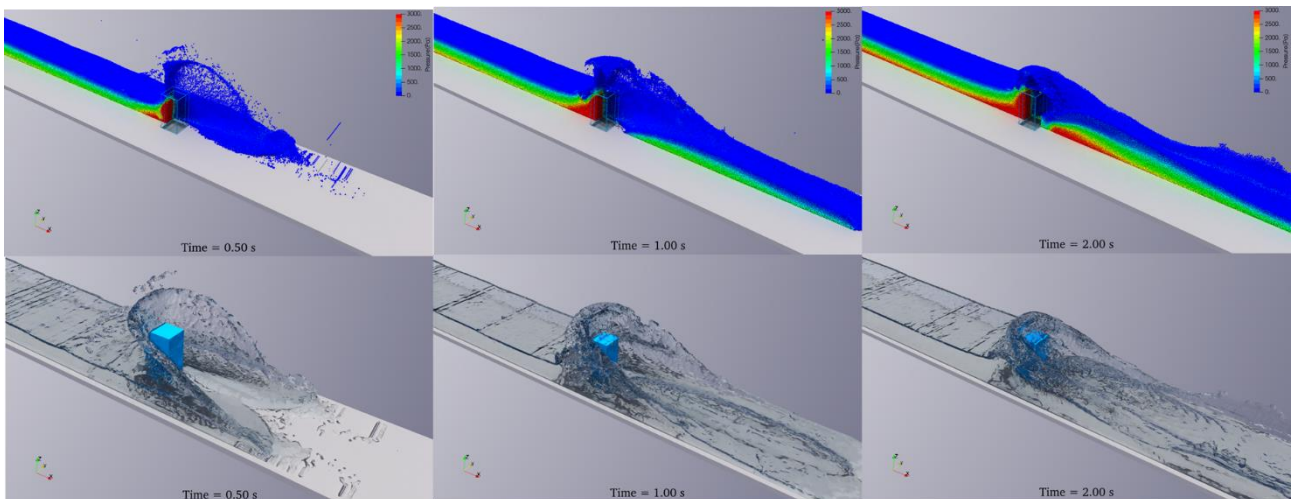
側面勾配による緩衝効果としては、ピーク値に着目すると解析結果は過小評価であり、実験結果の方が形状の効果が大きく現れている。なお、仰角 60 度の条件では面直方向の作用力成分の割合と作用面の面積の比率から直方体ケースに比べて 75%の波力に低減されると考えられるが、解析結果のピーク値では 85%に低減、実験結果のピーク値では 67%に低減される効果が確認された。

(3) 津波衝突直後の構造物周辺の流況

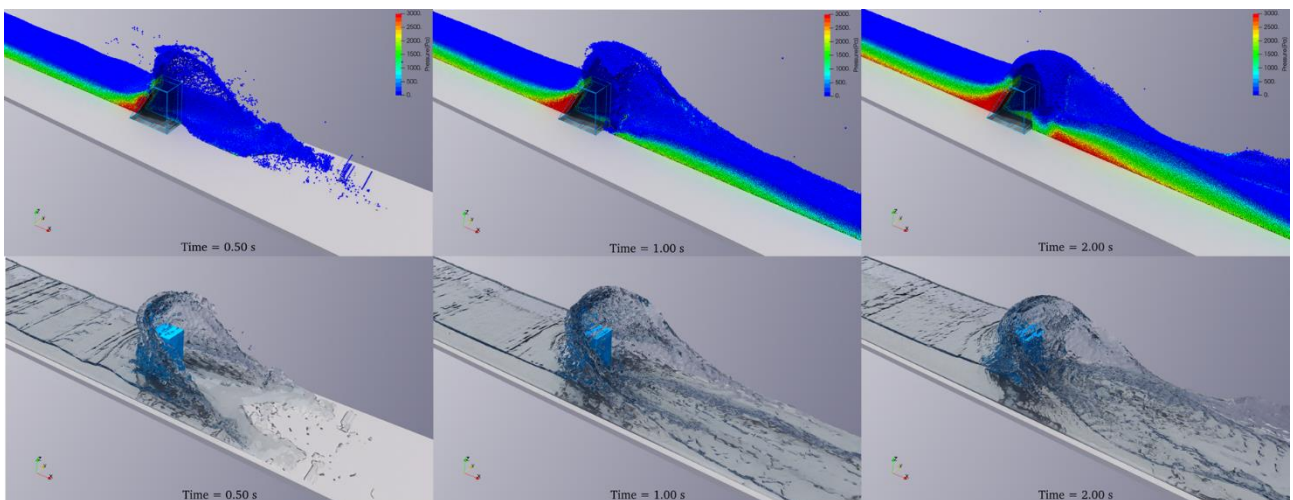
本研究の解析では約 430 万粒子を用いて非圧縮性流体の SPH 解析を実施しており、実験では取得が難しい長い水路の各部位における圧力や流速を確認することが可能

である。図-7 にそれぞれの解析ケースの結果より構造物模型周辺の水路中央断面の水圧分布の履歴を示す。また、衝突により大きく変動する水面形状の様子の履歴を示す。解析結果は粒子位置におけるものであるが、後処理として計算格子位置で SPH 法のカーネル関数を用いて密度を評価し、これを閾値に界面を描画することで視覚的に分かりやすい流況を確認でき、オープンソースプログラムである ParaView を用いて描画を行った。各図に示された時刻は衝突時刻を 0 とし、衝突により舞い上がった液面の様子や背後の流況のケース間の違いが確認できる。

中央断面の圧力分布から衝突後 0.5 秒時点では構造物模型の 1/2 高さ付近の圧力が大きくなっており、特に直方体ケースについて衝突時の流速が大きかったことが確認できる。直方体ケースでは 1.0s 経過時以降も建物模型の上部の圧力が大きい状態は継続し、静水圧分布との違いから動水圧の影響が大きいことが確認できる。また、水面変動に着目すると、衝突直後は直方体ケースで飛沫が高



(a) 直方体ケースの中央断面の圧力分布と液面変化の様子の履歴



(b) 仰角 60 度ケースの中央断面の圧力分布と液面変化の様子の履歴

図-7 衝突時から各経過時における圧力分布と液面変化に関する解析結果の比較

く舞い上がるが、仰角 60 度ケースの方が衝突流体の速度が落ちないため、構造物模型の背面に回り込んだ水位が高くなっていることが確認できる。

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軽減策として構造物の配置や形状に着目し、実施した津波模型実験の再現を ISPH 法による数値解析で行った。メッシュフリーによる 3 次元解析は計算規模が大きいため省力化の工夫を行っており、実験ケースの内 2 ケースを対象として実施した解析結果から得られた成果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 3 次元解析における計算規模の抑制策として、流れが面対称である条件については面外方向の周期境界を壁体の代用として適用できることを示した。実施した解析の結果より、津波模型実験の境界条件として適切に機能していることを確認した。
- 2) 構造物の側面勾配の形状効果により、津波波圧が低減することを解析と実験の 2 ケース間の結果から確認した。低減効果は実験結果の方が大きく、構造物勾配や作用面積の比率からの想定より大きいものに対し、解析結果から得られた低減効果は小さく評価された。
- 3) 解析と実験結果の高さ方向で平均した波圧の履歴は概ね整合的であるが、高さ方向の分布に違いがある。解析では下部の流速を小さく、上部の流速はやや大きく評価しており、この原因は床面付近の分解能の不足や速度の大きい領域で乱流を評価していないためと考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP21K04603 の助成を受けて実施したものです。研究に際しては、土木学会「水循環施設の合理的な地震・津波対策研究小委員会」WG1 の委員の方々のご協力をいただきました。記して感謝の意を表します。

REFERENCES

- 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. [Takeuchi, M., Oguro, A., and Omine, S.: Damage cases of coastal sewage treatment centers in the Great East Japan Earthquake and future issues, Guidelines for Seismic Performance Verification and Earthquake Countermeasures for Underground Structures (Draft), Japan Society of Civil Engineers, pp.394-402, 2011.]
- 2) 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. [Takeuchi, M., Ariga, Y., Watanabe, T., Kawaguchi, S., Nishimoto, Y., Hori, M. and Arikawa, T.: Fundamental study on applicability of isolation structure against earthquake motion and tsunami by utilizing asphaltic viscous fluid, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering), Vol. 71, No. 4, I_235-I_245, 2015.]
- 3) 渡辺高志, 有賀義明, 西本安志, 大峯秀一, 山中明彦, 森崎啓, 坂下克之, 市山誠: 衝突条件の違いによる陸上構造物に作用する津波波圧の低減効果の検討, 土木学会論文集 A1, Vol. 77, No. 4, pp. I_659-I_669, 2021. [Watanabe, T., Ariga, Y., Nishimoto, Y., Yamanaka, A., Morisaki, H., Sakashita, K., and Ichiyama, M.: Study on the effects of different impact conditions on the reduction of tsunami wave pressure on land structures, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering), Vol. 77, No. 4, I_659-I_669, 2021.]
- 4) 越塚誠一: 粒子法, 丸善, 2005. [Koshiduka, S.: Particle method, Maruzen, 2005.]
- 5) Shao, S. and Lo, E. Y. M.: Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface, *Advances in Water Resources*, Vol. 26, No. 7, pp. 787-800, 2003.
- 6) 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, 2012. [Asai, M., Beppu, M., Ishikawa, N., Manabe, Y., Saito, H., and Niwa, K.: Fundamental study on estimation of fluid impact force by computational fluid dynamics, Journal of Structural Engineering, Japan Society of Civil Engineers, Vol.58A, pp.1021-1028, 2012.]
- 7) 渡辺高志, 登柳正夫, 嶋村洋介, 榎谷浩: 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, 2014. [Watanabe, T., Tonagi, M., Shimamura, Y., and Masuya, H.: SPH-FEM coupling analysis for sloshing problem of a fixed roof tank, Proceedings of the 11th symposium on impact problems in civil engineering, 2014.]
- 8) 渡辺高志, 榎谷浩, 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. [Watanabe, T., Masuya, H., and Mitsuhashi, Y.: Study on the calculation procedure of wall boundary with large deformation by smoothed particle hydrodynamics method, Transactions of JSCES, Paper No.20130021, 2013.]

EFFECT OF WALL TILT OF STRUCTRE ON TSUNAMI WAVE PRESSURE ACTING ON STRUCTURE

Takashi WATANABE, Yoshiaki ARIGA, Makoto ICHIYAMA,
and Yasushi NISHIMOTO

Structures located along the coastline, depending on the importance of the facility, it is necessary to ensure safety against tsunamis generated by a major earthquake. It is important to prevent structures from being damaged by the tsunami impact, which would make it difficult to restore the facility functions.

The tsunami load includes both inertia and drag force, but inertia force has a large effect on the impact wave pressure, and the angle of impact and the side slope of the structure can have a large reduction effect.

The authors have conducted a tsunami model experiment to confirm this reduction effect, and in this study, the experiment was reproduced and analyzed from the viewpoint of understanding the phenomenon and complementary validation. The phenomena are then discussed by comparing the results of the analysis and the experiment.