

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

渡辺 高志¹・有賀 義明²・西本 安志³・大峯 秀一⁴
山中 明彦⁵・森崎 啓⁶・坂下 克之⁷・市山 誠⁸

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 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3 番地)

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

³正会員 博(工) シンバタ工業株式会社 技術開発部 (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

E-mail: Yasushi_Nishimoto@sbt.co.jp

⁴正会員 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: oomine_s@nissuicon.co.jp

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 社会イノベーション事業本部 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3-22)

E-mail: akihiko.yamanaka@os.pacific.co.jp

⁶正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 事業強化推進部 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3-22)

E-mail: hiroshi.morisaki@os.pacific.co.jp

⁷正会員 大成建設株式会社 技術センター 社会基盤技術研究部 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

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

⁸正会員 博(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 事業強化推進部 (〒245-0051 東京都千代田区神田錦町 3-22)

E-mail: makoto.ichiyama@tk.pacific.co.jp

沿岸域に立地する構造物は、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対する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、衝撃的な波圧は衝突直後に発生するものであり、壁体と津波の面的な衝突を避けることで緩衝効果が期待できる。しかしながら、このような緩衝効果の定量的評価はあまり行われていない。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 法による数値解析で評価した。また、2次元解析と3次元解析の結果を比較し、解析条件により生じる影響を考察した。

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発生した津波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⁾。津波被害を避けるには対象施設を沿岸域から遠ざけることが一番の対策であるが、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。

陸上構造物に作用する津波波圧の算定には、それまでの設計実務において「津波避難ビル等に係るガイドライン²⁾ (以下、旧ガイドラインと呼ぶ)」が広く基準として用いられてきた。旧ガイドラインでは、朝倉ら³⁾による静水圧を定数倍した波圧評価式が採用されており、東日本大震災の津波被害調査結果を



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)

踏まえて見直しが行われている。例えば遮蔽域や汀線からの距離に応じた波圧の低減係数が提唱されている。なお、構造物の壁面と入射角度による波圧低減効果については旧ガイドライン中でも触れられているものの、低減係数に関する具体的な提言は行われていない。

東北地方太平洋沖地震で津波による被害が発生した例として、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。その破壊状況から、津波到来時に波状段波や碎波が発生することによる衝撃的な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られている⁴⁾。波状段波や碎波によって波圧が大きくなる主因は、構造物との衝突が面的になることで局所的に水撃作用が生じるためと考えられるが、これは津波の到来方向と壁面の角度を調整することや、構造物の形状を工夫することで回避できると考えられる。例えば、有光ら⁵⁾は水理模型実験により遡上津波の入射角による影響を検討し、波圧が低減することを確認している。また、高橋ら⁶⁾は同様の実験により入射角の影響を検討し、矩形建物模型の他に円筒タンク模型を用いた結果を提示し、数値解析との比較も行っている。

著者らは、これまでに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を行ってきた^{7,8)}。本研究では、既往検討で実施した解析の成果を利用し、津波の到来方向や構造物の形状による波圧の低減効果について整理した。また、到来方向や形状効果の水平断面的な検討において、2次元解析を行うことの影響を確認した。

2. 数値解析手法について

(1) 数値解析手法

津波衝突時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

面の大変形を考慮する必要がある。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法が知られているが、本研究ではSPH法の一つであるISPH (Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics) 法^{10,11)}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、陽的に算定した仮流速場が連続の式を満足するように圧力分布をポアソン方程式の求解から得る。圧力計算は陰解法を採り、粘性項は陽解法を採用することが多いが、本研究では粘性項の計算にも陰解法を採用した。解析には必要機能を組み込んだ粒子法解析コード「DYBECS」^{12,13)}を使用し、構造物と津波が衝突する条件の数値解析を行った。

(2) 解析次元の影響

津波衝突時に見られる複雑な液面変形やスプラッシュを捉えるには高い計算分解能が必要となる。また、津波のモデル境界によって生じる影響を抑制するには、可能な範囲で広い領域を解析対象とする必要がある。そのような観点からは3次元の現象を2次元でモデル化することが有効である。また、津波の到来方向や平面形状の影響を検討する上では、水平断面の2次元モデルによる結果の方が現象を理解し易い。しかしながら、水平断面を対象とした2次元解析による検討は解決が難しい問題が多く、鉛直断面を対象とした検討に比べると適用事例は少ない。水平断面モデルでは鉛直自由度がないため、静水圧や重力の影響を考慮することは出来ない他、鉛直方向に対して平面ひずみ、または平面応力的なモデル化とせざるを得ない。従って、津波との衝突は半無限に切り立った水壁に対する衝突問題に置き換わり、結果的に動水圧を非常に高く評価する問題がある。なお、管路内のように逃げ場のない1次元的条件下において、水撃作用によって生じる圧力変化量はJoukowskiの式¹⁴⁾によって評価できる。

$$\Delta p = \rho c \Delta u \quad (1)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 c は流体の音速であり、 Δp は速度変化を Δu とした際の圧力変化量である。

2次元解析では管路内ほど極端な条件ではないが、自由度が少ないことによる制約から3次元解析に比べて圧力が高く評価される点に留意が必要である。本研究では衝突条件の影響の分かり易さから先に2次元断面の検討を行っており、解析次元の影響について確認するため、同様の衝突条件の検討を3次元解析により実施している。従って、一般的な遡上津波によって生じる動水圧に比べ、非常に大きな衝撃力が作用する条件での評価となっている。

(3) 解析に用いる境界条件

津波衝突解析では、津波前面の構造物と衝突する方向にある自由に变形する液面境界と、半無限の広がりを持って反射波を生じさせない、その他の方向の境界面をモデル化する必要がある。更に3次元条件の解析では構造物が立地する陸地の床面と津波上面の自由液面を考慮する必要がある。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、勾配0のノイマン境界条件として設定を行う。

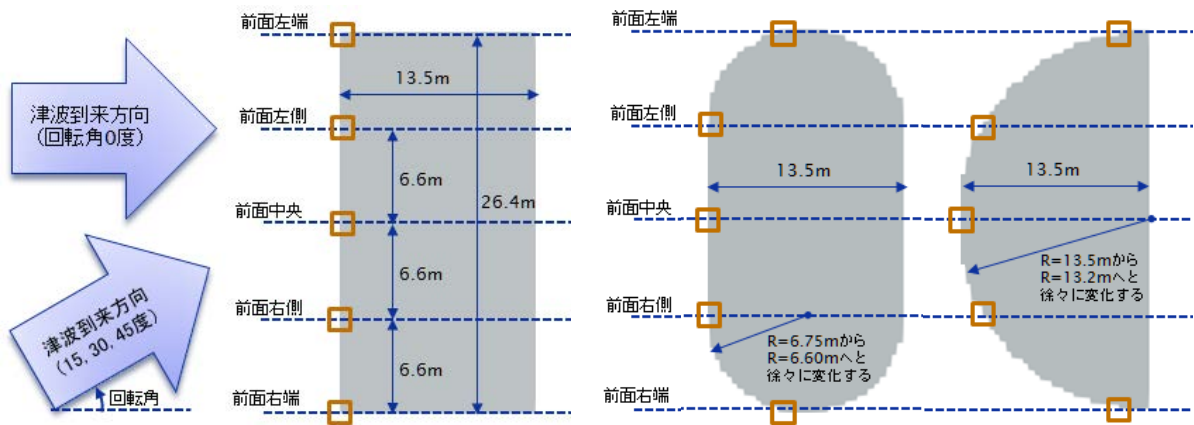
また、津波の前面以外の側面境界は無反射境界であり、衝突で発生した波動が境界で反射しないよう、また形状が崩れてしまわないように設けられる。なお、無反射を実現する上では、境界に進行してくる波を監視し、逆位相の波を衝突させる等の方法があるが、本研究では境界付近で滑らかに流体粘度を大きくすることで反射を防ぐ高粘性境界を設定した。高粘性境界面は自由表面でもあるため、波動の進行で生じる圧力変動は自由端で0となる。また、境界面自体の变形を抑制する必要があるため、最大で内部流体の10万倍の粘度となるように外周領域に位置する流体の粘度を滑らかに変化させた。境界領域の粒子の粘度に乗じる係数は、高粘度を考慮する領域と内部流体の境界面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。

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

3. 構造物に作用する津波の波圧の評価

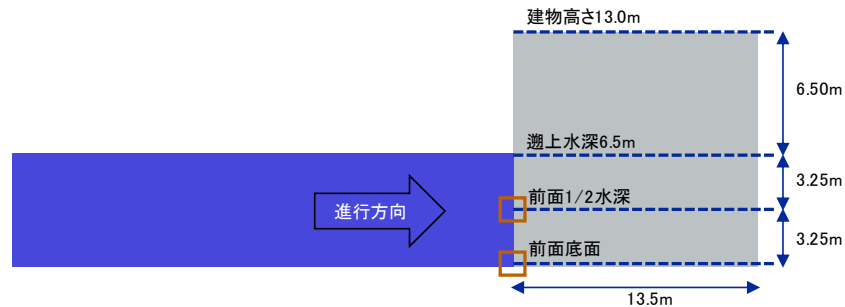
(1) 津波衝突解析の解析ケースと構造物モデル

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。3次元モデルでは構造物の鉛直断面形



(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



(c) 建物中心の鉛直断面図

図-1 構造物モデルの寸法と圧力評価点の位置関係

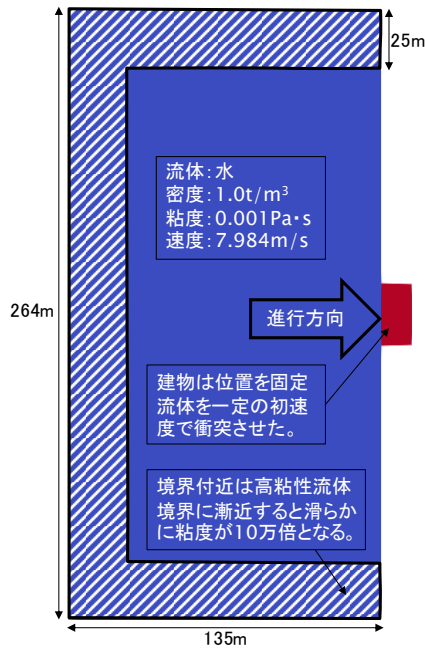
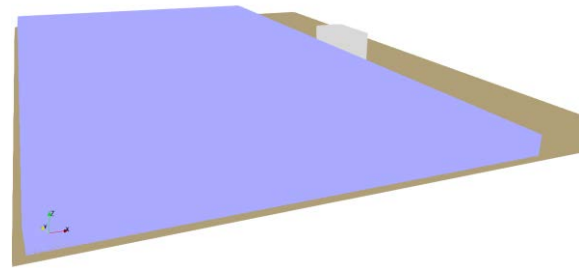
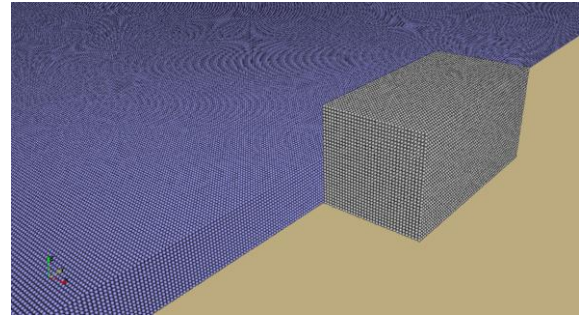


図-2 解析モデル範囲と解析条件



(a) 全体鳥瞰図



(b) 矩形建物付近拡大図

図-3 解析モデル図

状についても検討可能であるが、本研究では 2 次元水平断面を対象に実施した検討結果と比較するため、一様な平面形状を持つ柱状モデルを用いた検討のみを行っている。

津波の到来方向の影響検討については、建物前面の壁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もので、既往検討と同様に建物高さは 13.0m とした。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 間隔で圧力評価点を設け、これを建物底面高さとして想定津波水深 6.5m の 1/2 高さに設定した。ただし、1/2 高さの結果は本論文中には示していない。作成した構造物の寸法と圧力評価点の位置関係を図-1 に示す。

(2) 解析モデルと解析条件

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 の寸法を持つ矩形範囲の津波モデルを作成した。流体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-1 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、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。これらの条件は 2 次元と 3 次元の解析で共通である。

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
初期粒子間距離	0.4 m
SPH の影響半径	1.2 m

構造物モデルは解析モデルの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ることで構造物モデルに衝突させた。2 次元解析と条件を揃えるために無重力条件で計算を行っており、静水圧は考慮していない。津波の衝突速度は、本研究では想定する津波波高を遡上水深として(3)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。

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

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構造物高さの 1/2 に相当する 6.5m と仮定し、津波モデルの流体初速度として 7.984m/s を設定している。これは衝突流のフルード数としては 1.0 に相当し、波力全体に占める抗力の大きさは小さいといえる。

また、構造物との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、前述のとおり高粘性の境界部分を設けており、その幅は自由境界から 25m 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計算が行われる。

4. 解析による検討結果の整理

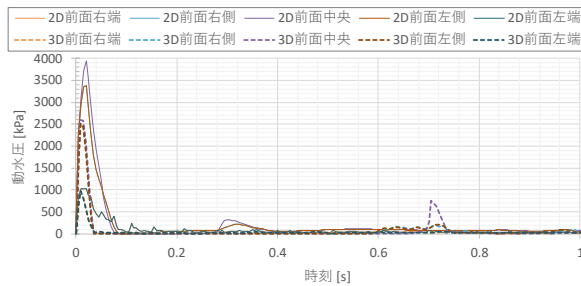
津波の到来方向による影響検討および建物形状による影響検討のための合計 6 ケースの解析結果を整理した。それぞれのケースに対し、2次元モデルと3次元モデルによる解析を実施しており、図-4 に衝突面の動水圧の時刻歴を 2次元ケースは細い実線、3次元ケースは水底の動水圧を太い点線で示す。また、全ケースの代表時刻断面における3次元モデルの衝突面の動水圧の分布を構造物背面から見たものとして図-5 に、水底の動水圧の分布を図-6 に示し、対応する2次元解析モデルの動水圧分布を図-7 に示す。

(1) 津波の到来方向による影響

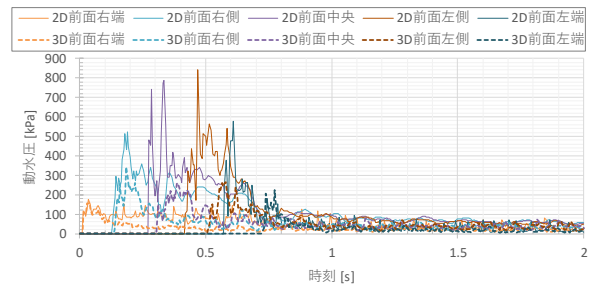
津波の到来方向に対して、衝突を受ける構造物の壁体前面の向きは重要であり、壁面の法線と到来方向がずれることで緩衝効果が期待できる。この影響の大きさを評価するため、津波の衝突角度を 0 度、15 度、30 度、45 度の 4 ケースの解析を実施している。本検討では、図-1 (a) に示される矩形断面の構造物モデルのみを対象とし、2次元と3次元モデルを用いて解析を実施した。解析上の取り扱い、津波の進行方向を変えるのではなく、矩形断面の構造物

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ことで評価を行っている。

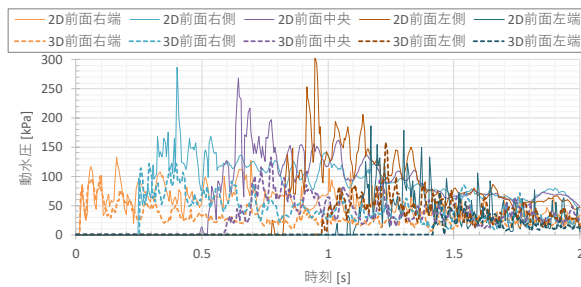
図-4(a)~(d)の各ケースの圧力評価点位置における動水圧の時刻歴より、2次元と3次元ともに衝突角度が大きくなると動水圧のピークが低減することを確認した。衝突角度が小さいケースほど最大波圧が大きく、また構造物の壁面上の位置による違いが大きい。なお、衝突角度が 0 度のケースを除いて、明瞭な衝撃波圧のピークは見られず、衝突角度が大きくなると波圧は小さくなり、位置による差は殆ど見られなくなる。また、全てのケースで3次元解析結果は2次元解析結果に比べて圧力が小さく、また衝撃的な動水圧の発生時間も短くなっている。これは鉛直方向の自由度を考慮することで、水底で大きくなった動水圧が上方の自由液面へ抜けて行くためであり、動水圧の大きくなる水底部の図-6 と図-7 の比較からも明らかである。解析次元による最大波圧の大きさの違いは構造部位によるが、数割程度は3次元結果の波圧が小さく、衝突角度を変更した際の全体的な傾向自体には特に違いは見られない。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で非常に効果的であると確認できる。



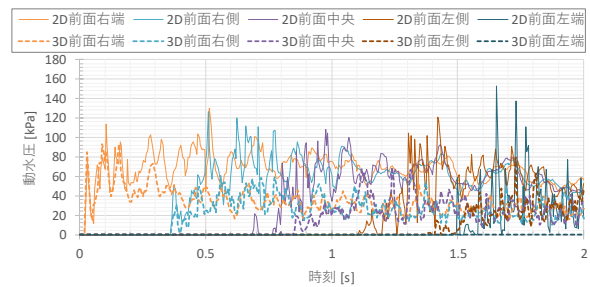
(a) 衝突角度 0 度 (矩形断面)



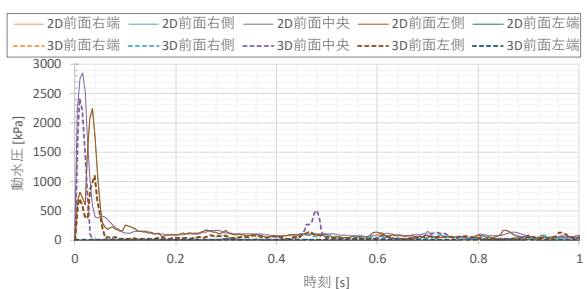
(b) 衝突角度 15 度 (矩形断面)



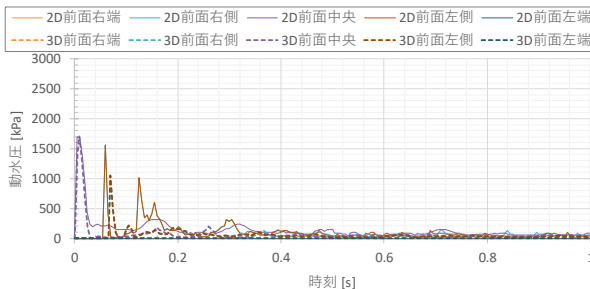
(c) 衝突角度 30 度 (矩形断面)



(d) 衝突角度 45 度 (矩形断面)



(e) 両端円形断面 (衝突角度 0 度)



(f) 全体円形断面 (衝突角度 0 度)

図-4 各ケースの圧力評価点位置の動水圧時刻歴

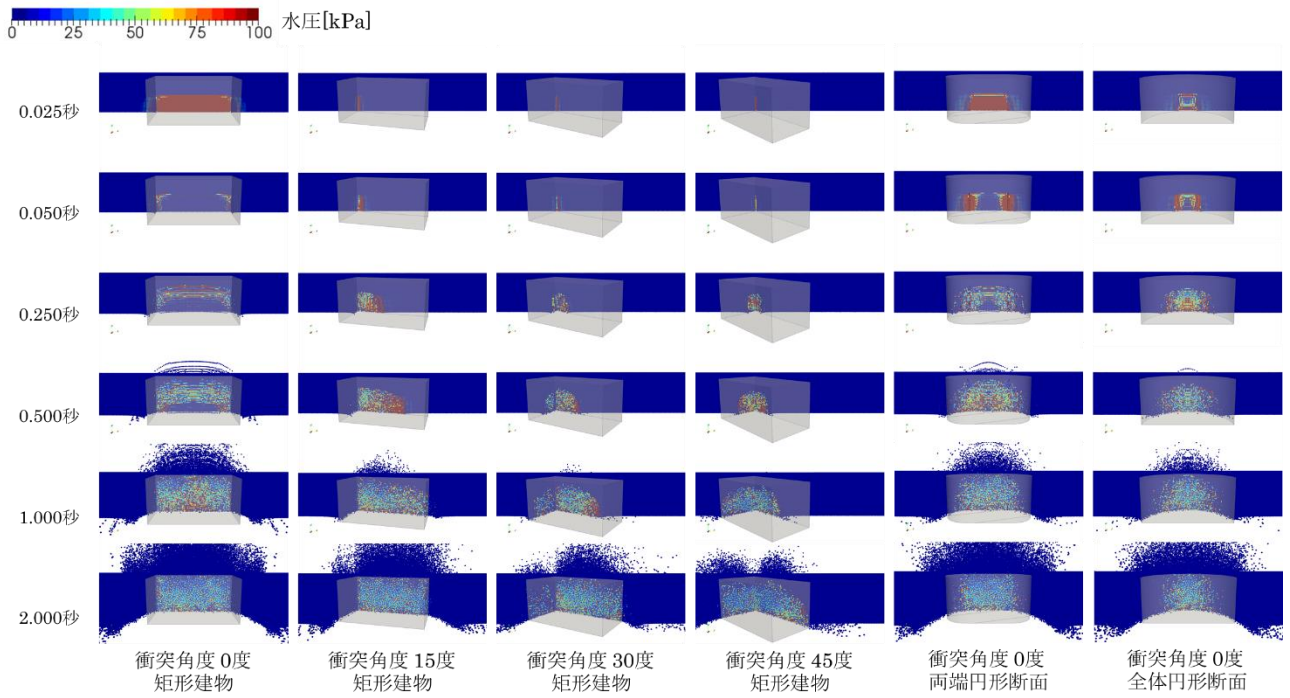


図-5 3次元ケースの解析結果より衝突から一定経過時における衝突面の動水圧分布

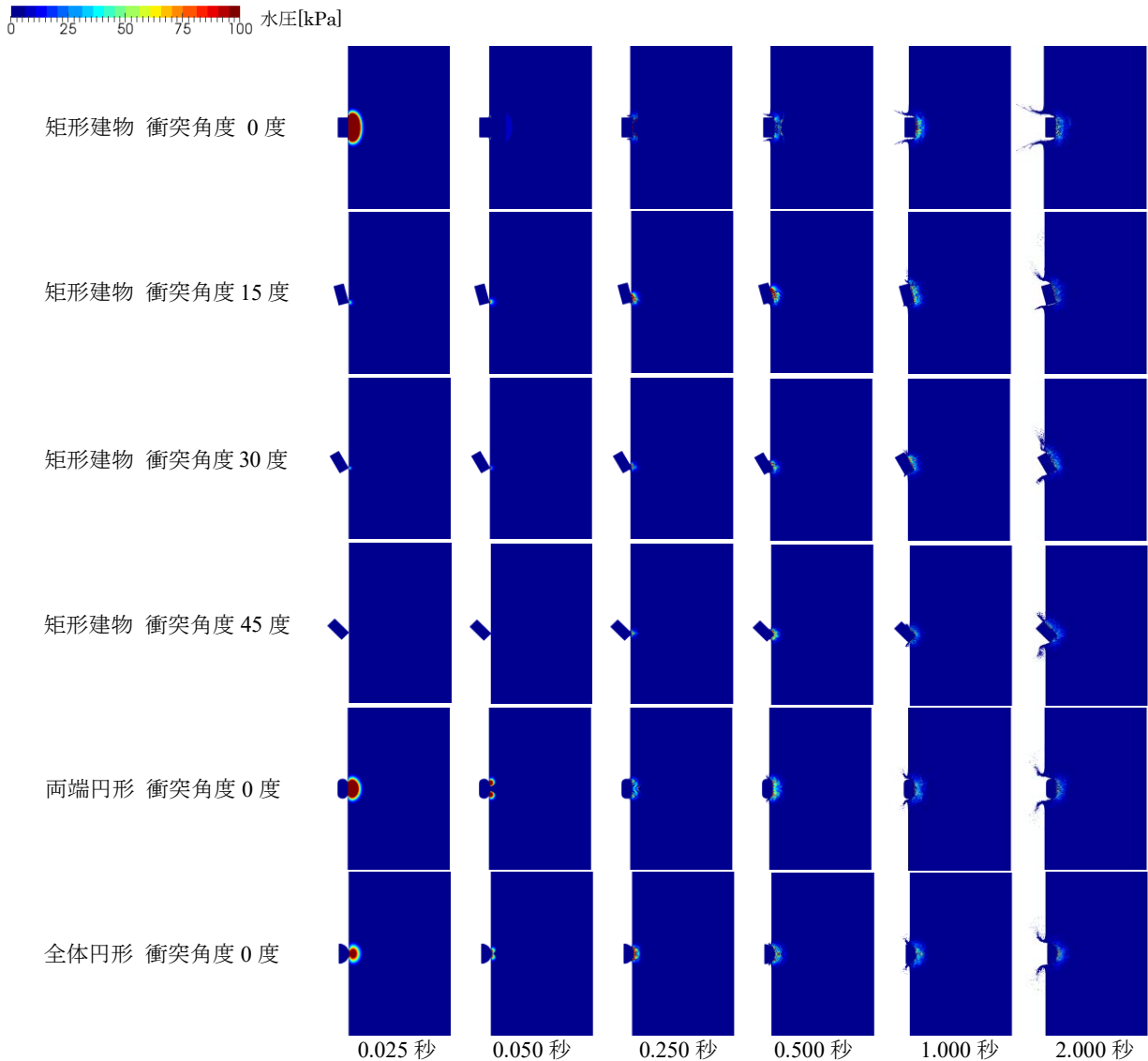


図-6 3次元ケースの解析結果より衝突から一定経過時における水底の動水圧分布

図-6 は水底における動水圧の分布が分かるように解析モデルの裏（水底）側から見た図である。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 0 度のケースでは、面的な衝突によって水撃的な作用を生じ、非常に大きな動水圧が発生している。衝突角度が大きくなり 45 度に近づくにつれて動水圧の上昇前に津波前面の形状が崩れ、衝撃的な動水圧が生じなくなることがケース間比較より確認できる。なお、衝突角度が 0 度以外のケースでは最初に前面右端先端が衝突するが、この部位の動水圧時刻歴には 2 次元と 3 次元解析間での違いは殆ど見受けられない。衝突角度がある程度大きい場合、最大波圧は建物中央部付近で発生するが、これは衝突後の後続の流れに対する抗力が支配的となることから、ケース間に見られる違いはあまり大きくない。

(2) 構造物の表面形状による影響

構造物の表面形状による影響は、構造物の水平断面形状を矩形から変更した 2 ケースとの比較を行い検討した。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 ケースを比較検討している。

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ほぼ 0 となった。なお、2 次元解析結果に比べ、3 次元解析では最大波圧が小さくなっているが、矩形断面の場合、2 次元と 3 次元解析の結果に見られる違いは小さくなっている。

検討ケース間の動水圧分布の比較より、2 次元と 3 次元解析の両方において、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を実施した、構造物の隅角部が津波波面と斜め衝突するように設定したケースに比べると最大波圧に対する緩衝効果は小さくなっていることを確認した。矩形断面の隅角部の曲率は極大値であり、

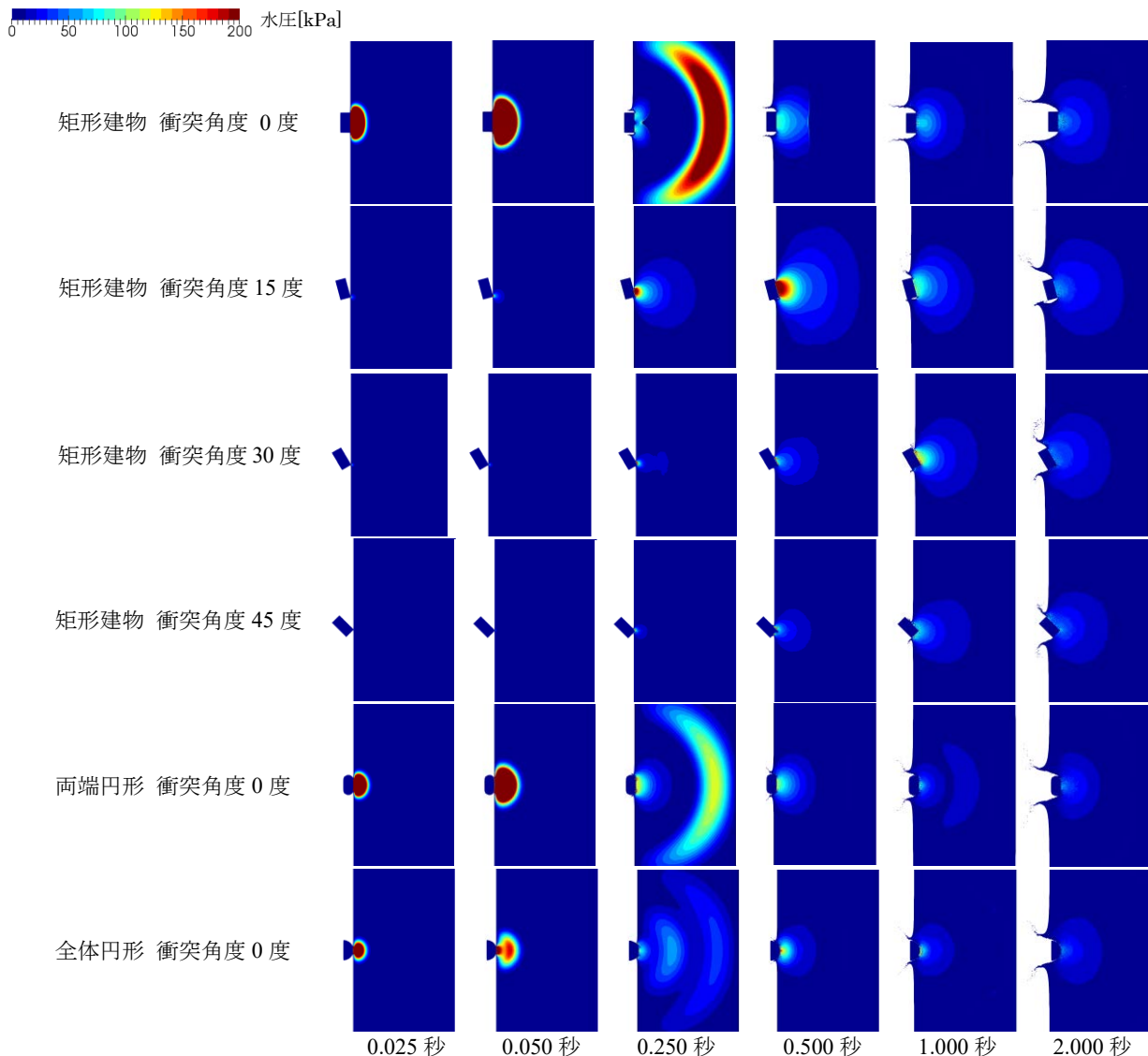


図-7 2次元ケースの解析結果より衝突から一定経過時における水底の動水圧分布

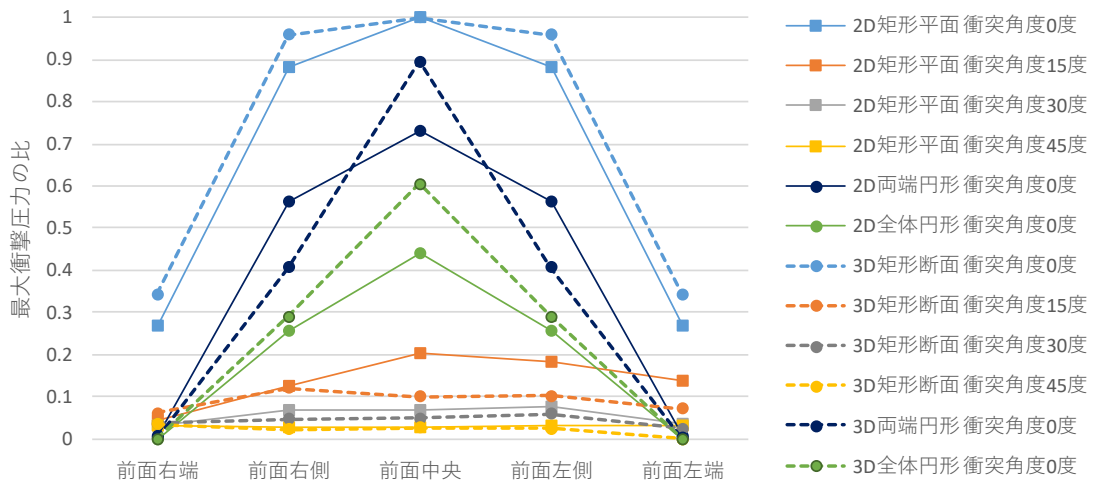


図-8 解析次元別に正規化した各ケースの圧力評価点位置の最大衝撃圧力の比

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。

(3) 波圧の緩衝効果検討における解析次元の影響

本研究では、平面形状が矩形断面の構造物に対する津波到来角の検討と、前面壁体が曲率を持つ平面形状の構造物に対する津波衝突の検討を3次元解析によって実施した。2次元条件に近い3モデルを想定しており、2次元解析結果と比較すると最大波圧は小さくなる傾向にあるものの、全体の傾向については概ね一致することが確認された。一方で、衝撃的な波圧の継続時間は何れのケースも短くなっており、解析モデルが鉛直自由度を持つことで水底から上面へ波動が抜けていることが確認された。

図-6と図-7の比較から、2次元解析では面外に逃げ場がないため、水底に大きな衝撃圧を発生し、高粘性境界で吸収されるまで衝撃波動が領域外へ進行することが分かる。一方で、3次元解析では上方の水面に抜けるため、水底の圧力が大きくなり、水撃的な効果が小さくなることを確認された。3次元モデルでは外側の境界条件の重要性は相対的に低い。

また、2次元と3次元の全ケースの動水圧の時刻歴を参照し、最大の衝撃波圧を発生した衝突角度0度で矩形建物に衝突したケースの2次元と3次元解析のそれぞれ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、建物壁面の位置毎に整理して図-8に示す。構造物の前面形状に曲率がある場合や、衝突角度が小さい場合において2次元と3次元の条件の違いが見られるが、最大波圧の低減効果はそれぞれで同様の傾向がある。検討結果より、津波到来方向を参考に建物配置を検討することの有効性が認められた。

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。ISPH法による3次元および2次元水平断面の解析結果を合わせて整理し、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、ISPH法による数値解析を実施することで、津波衝突時に生じる波圧の評価を実施し、検討した条件下において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らである場合、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の差が大きい。
- 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、波圧が大きくなる前に衝突波面が砕けるため、衝撃的な波圧は殆ど発生しない。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り、動水圧はほぼ抗力の作用のみとなる。従って、壁面の位置による最大波圧の差が小さくなる。
- 5) 施設機能上、沿岸域に建設せざるを得ない矩形平面の構造物については、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非常に有効である。
- 6) 切り立った段波との衝突を想定する場合、2次元解析による検討も有効である。自由度が拘束されるため水撃作用により衝撃的な波圧と継続時間を過大に評価することに留意が必要であるが、衝突条件に対する緩衝効果の評価に利用できる。

参考文献

- 1) 竹内幹雄, 小黒明, 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) 内閣府: 津波避難ビル等に係るガイドライン, 2005.6.
- 3) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.911-915, 2000.
- 4) 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.
- 5) 有光剛, 大江一也, 川崎浩司: 陸上構造物への作用波圧に及ぼす遡上津波の入射角の影響, 土木学会論文集 B3, Vol.70, No.2, I 414-I 419, 2014.
- 6) 高橋研也, 前田勇司, 西畑剛, 古牧大樹: 陸上構造物に作用する津波波圧と波向の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2, Vol.70, No.2, I 306-I 310, 2014.
- 7) 渡辺高志, 有賀義明, 西本安志, 坂下克之, 小西康彦: SPH 法による構造物に作用する津波波圧の評価, 土木学会第 38 回地震工学研究発表会講演論文集, 2018.10.
- 8) 渡辺高志, 有賀義明, 西本安志, 大峯秀一, 山中明彦,

森崎啓, 佐藤優乃: 粒子法を用いた陸上構造物に作用する津波波圧の衝突条件による影響評価, 土木学会第 39 回地震工学研究発表会講演論文集, 2019.10.

9) 越塚 誠一: 粒子法, 丸善, 2005.

10) 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.

11) 浅井光輝, 別府万寿博, 石川信隆, 眞鍋慶生, 齊藤展, 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.

12) 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.

13) 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.

14) Tijsseling, A. S., and Anderson, A. : *The Joukowski Equation for Fluids and Solids*, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, CASA-Report No. 0608, 2006.

STUDY ON THE EFFECTS OF DIFFERENT IMPACT CONDITIONS ON THE REDUCTION OF TSUNAMI WAVE PRESSURE ON LAND STRUCTURES

Takashi WATANABE, Yoshiaki ARIGA, Yasushi NISHIMOTO,
Shuichi Omine, Akihiko YAMANAKA, Hiroshi MORISAKI,
Katsuyuki SAKASHITA, Makoto ICHIYAMA

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.

Tsunami loads include both inertia and drag from the flow, but the shocking wave pressure occurs immediately after the collision, and a buffering effect can be expected by avoiding the surface collision of the wall with the tsunami. However, such buffering effects have not been quantitatively evaluated quantitatively.

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. Furthermore, the results of the two-dimensional analysis were compared with those of the three-dimensional analysis, and the effects of the analysis conditions were discussed.