

津波波圧の評価 — 先端部荷重 —

中央大学

有川太郎

パシフィックコンサルタンツ株式会社 大家隆行



公益社団法人 日本地震工学会
Japan Association for Earthquake Engineering

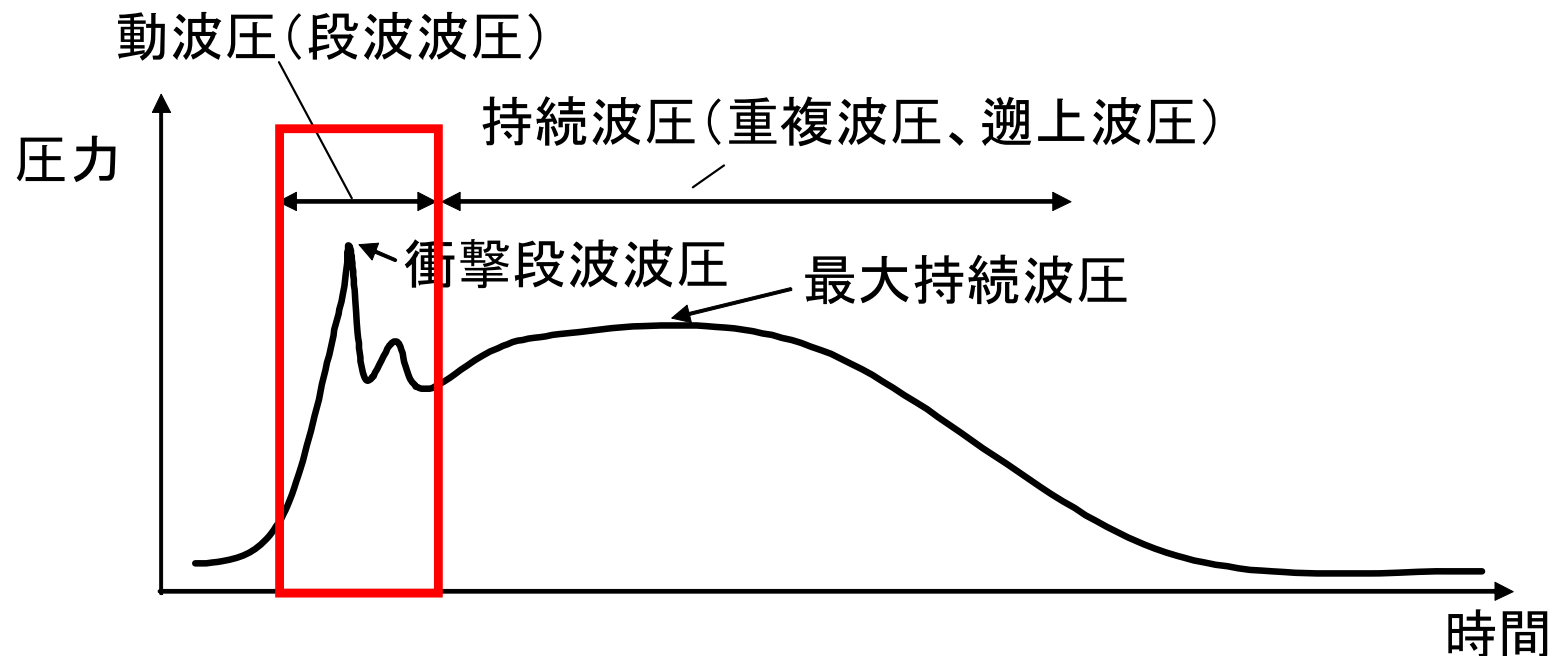
目次

- 3.1 先端部波圧の概要 : P.2～4
- 3.2 各種設計指針やガイドラインでの
先端部波圧の評価 : P.5～6
- 3.3 先端部波圧の評価手法①
(浸水深及び水深係数による評価) : P.7～12
- 3.4 先端部波圧の評価手法②
(時系列水位及び流速による評価) : P.13
- 3.5 先端部波圧のその他の評価手法
(数値解析による波力の評価) : P.14～16

3. 1 先端部波圧の概要

建築物荷重指針(2015)、津波の辞典など

- 津波の力は、主として津波の先端部において生じる水塊の衝突運動によって生じる力(先端部波圧)と、水位が比較的一定となったときに生じる力(非先端部波圧)に分類される。
- 先端部波圧: 砕波もしくはソリトン分裂変形することにより生じる段波波力を指す。



出典: 例えば、建築物荷重指針を活かす設計資料1、P.434等に追記

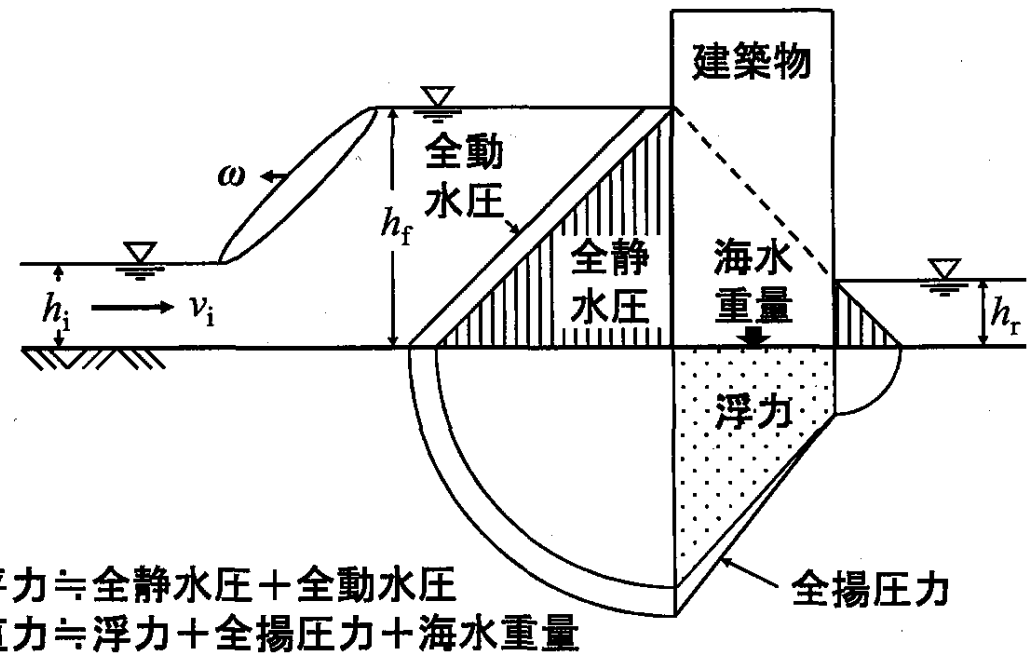
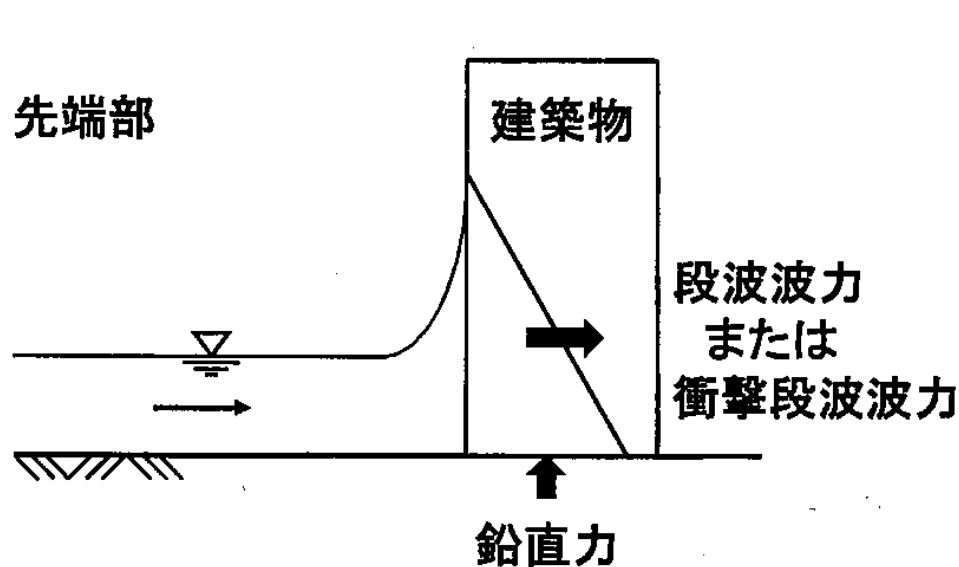
3. 1 先端部波圧の概要

建築物荷重指針(2015)、津波の辞典など

➤ 津波先端部が建築物に衝突した時、以下の力が生じる。

水平力≡全静水圧+全動水圧

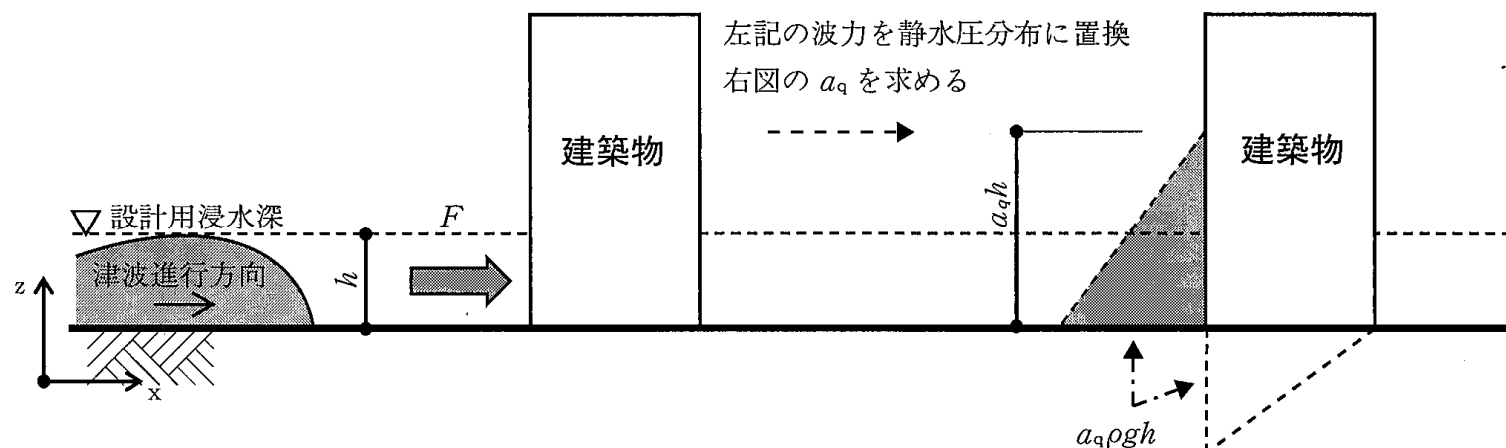
鉛直力≡浮力+全揚圧力+海水重量



出典: 建築物荷重指針を活かす設計資料1、P.360～361

3. 1 先端部波圧の概要

- 波圧は場所ごとで異なる非一様な分布を取るが、一般的には構造物の最下端部での圧力を最大とし、津波の作用高さにおける圧力を0と仮定して、その間を直線で近似した分布とすることが多い。最下端部の圧力は、水深係数 a を用いて算定するのが一般的である(詳細は後述)。
- 波長の長い津波先端部が短周期の複数の波に分裂(ソリトン分裂)して波状段波が形成される場合には、極めて衝撃的な段波波力が発生する場合がある。
- 「港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年5月」では、ソリトン分裂の発生条件を、入射津波高さが水深の30%以上(シミュレーション等による津波の重複波の高さが水深の60%以上)で、かつ海底勾配が1/100以下程度の遠浅の場合としている。



3. 2 各種設計指針やガイドライン での先端部波圧の評価

➤ 各種施設において考慮されている津波荷重の一覧を示す。

対象施設		出典資料	発行者	発効年	荷重の種類			
					衝撃段波荷重	段波波力	波力	全揚圧力
防波堤		・ 港湾の施設の技術上の 基準・同解説 ・ 防波堤の耐津波設計ガイドライン 等	(社) 日本港湾協会 国土交通省港湾局	2018.5 2013.9	○	○	○	○
胸壁	港湾	・ 港湾の施設の技術上の 基準・同解説 ・ 港湾における防潮堤（胸壁）の 耐津波設計ガイドライン 等	(社) 日本港湾協会 国土交通省港湾局	2018.5 2013.11	○	○	○	○
	漁港	・ 津波を考慮した胸壁の設計の 考え方（暫定版）	水産庁漁港漁場整備部 防災漁村課 国土交通省港湾局 海岸・防災課	2015.11	－	波力と区別無し	○	－
建築物	一般	建築物荷重指針・同解説（2015）	日本建築学会	2015.2	○	波力と区別無し	○	○
	原子力施設	原子力発電所耐津波設計技術規程 JEAC4629-2014	(社) 日本電気協会 原子力規格委員会	2015.8	－	○	○	○
津波避難施設	津波避難ビル	津波避難ビル等の構造上の要件の解説	国土交通省国土技術 政策総合研究所 (社) 建築性能基準 推進協会	2012.2	－	波力と区別無し	○	－
	津波避難タワー	道路上に設置する津波避難タワーの 標準仕様設計基準	静岡県吉田町防災課	2012.9	－	波力と区別無し	○	－
橋梁		東日本大震災による橋梁等の 被害分析小委員会最終報告書	土木学会地盤工学委員 会 東日本大震災による橋 梁被害調査委員会	2015.8	－	波力と区別無し	○	○
下水道施設		耐津波対策を考慮した下水道施設 設計の考え方	国土交通省下水道部 下水道地震・津波対策 技術検討委員会	2012.3	－	波力と区別無し	○	－
ガス貯蔵施設		高圧ガス取扱施設における地震・ 津波時の対応に関する調査報告書	経済産業省 高圧ガス保安協会	2013.2	－	○	○	○

3. 2 各種設計指針やガイドライン での先端部波圧の評価

構造物前面に作用する津波先端部波力は、主に以下の2つの方針で算出される。

①設計用浸水深と水深係数 α を用いて算出(一般的)

例えば、

- 防波堤の耐津波設計ガイドライン
- 津波避難ビル等の構造上の要件の解説
- 建築物荷重指針・同解説(時系列水位や流速が得られない場合)

②津波の時系列水位や流速を用いて算出

例えば、

- 建築物荷重指針・同解説(時系列水位や流速が得られる場合)

3. 3 先端部波圧の評価手法① (浸水深及び水深係数による評価)

- 構造物前面に作用する津波先端部波力(段波波力)は、設計用浸水深 h と水深係数 α で表現することが多い。

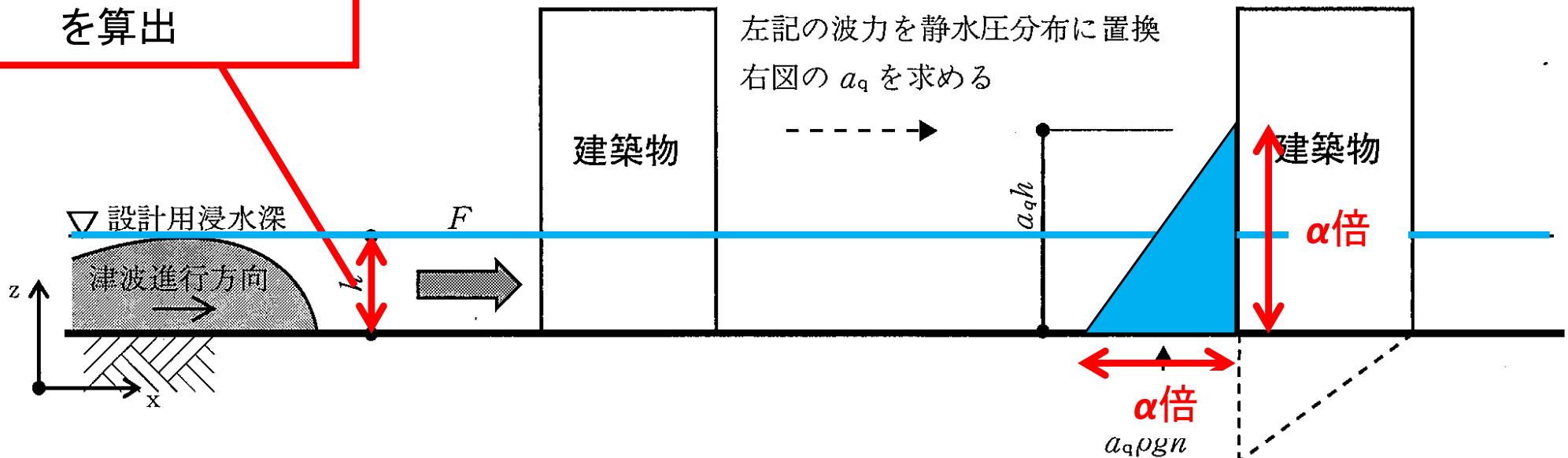
$$F = \rho g \int (\alpha h - z) B dz$$

h : 設計用浸水深 z : 高さ B : 施設幅 ρ : 海水密度

①: 設計用浸水深 h を算出

②津波のフルード数等に応じた水深係数 α を設定

③浸水深 h に対応する静水圧分布に水深係数 α を乗じて先端部波力を表現



3. 3 各種設計指針やガイドラインにおける水深係数

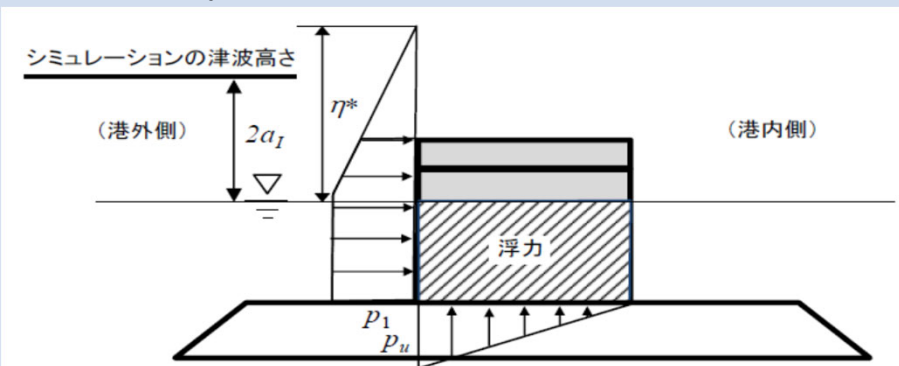
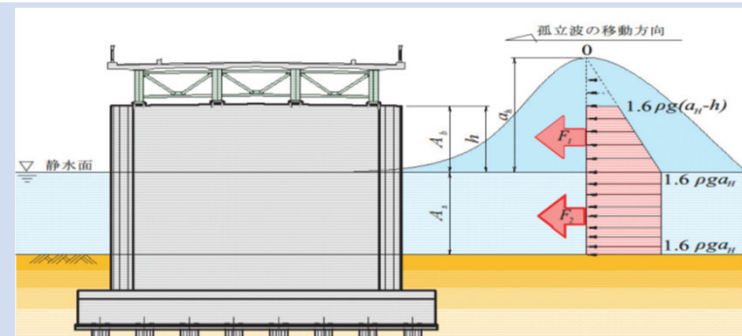
➤ 各種設計指針やガイドラインに記載されている水深係数は、主として以下の3通りに分類される。

- ① 条件によらず一定
- ② 海岸からの距離等に応じて変化
- ③ フルード数 Fr に応じて変化

水深係数		構造物
固定値	条件によらず一定	防波堤 胸壁(港湾) 橋梁(橋脚・橋台)
	海岸からの距離等に応じて水深係数の採用値を変化	建築物 津波避難ビル・避難タワー 下水道施設
フルード数 Fr に応じて変化	Fr のみを考慮	胸壁(漁港) 建築物(原子力) ガス貯蓄施設
	Fr に加えて損失係数も考慮	—

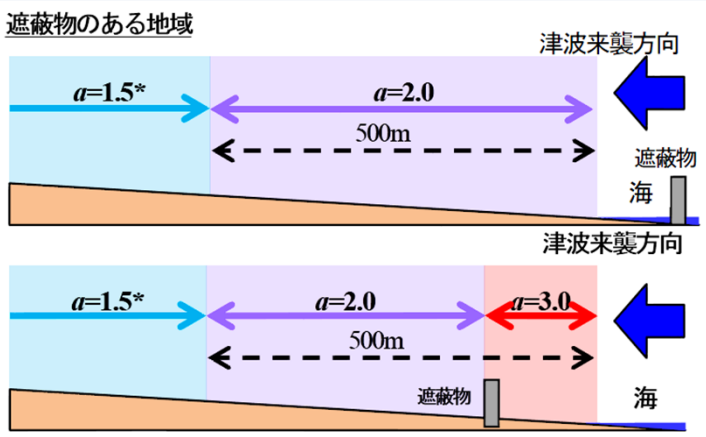
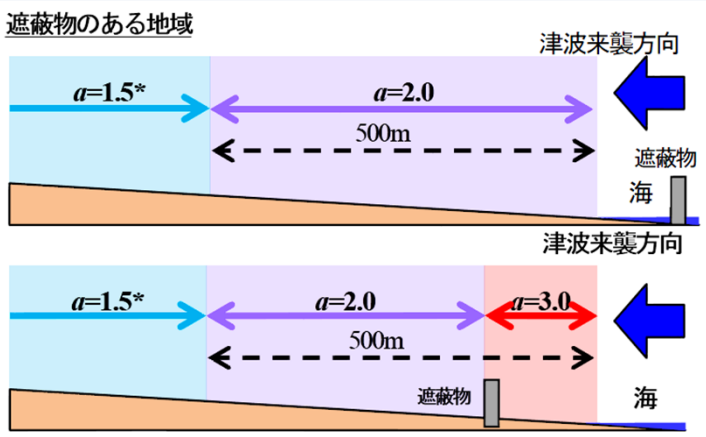
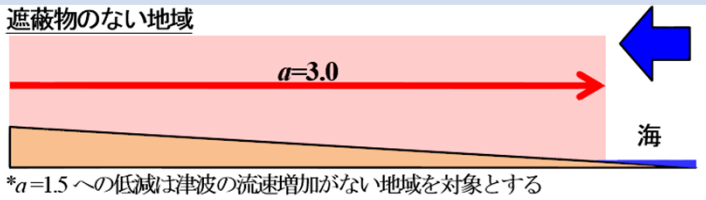
3. 3 各種設計指針やガイドラインにおける水深係数

➤ 条件によらず値を一定としている構造物における水深係数は以下の通りである。

対象 構造物例	文献	水深係数 α
防波堤	<ul style="list-style-type: none"> ・港湾の施設の技術上の基準・同解説 ・防波堤の耐津波設計ガイドライン 	ソリトン分裂が生じる場合： <u>3.0</u> // 生じない場合： <u>2.2</u> $\eta^* = 3.0a_I$ $p_1 = 3.0\rho_0ga_I$ $p_1 = 2.2\rho_0ga_I$
胸壁(港湾)	<ul style="list-style-type: none"> ・港湾の施設の技術上の基準・同解説 ・港湾における防潮堤(胸壁)の耐津波設計ガイドライン 	 <p>図-5.3 修正谷本式による津波波力の考え方 (背面の水位が押し波時に静水面より下らない場合)</p>
橋梁 (橋脚・橋台)	東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会最終報告書	<u>1.6</u> 

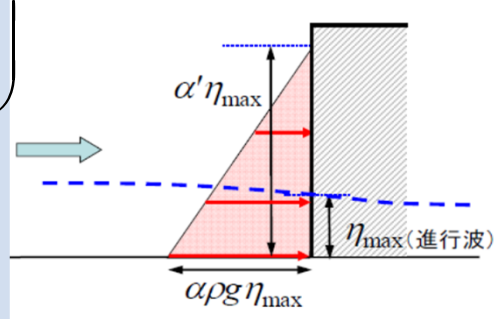
3. 3 各種設計指針やガイドラインにおける水深係数

- 海岸からの距離等に応じて値を変化させる構造物における水深係数は以下の通りである。

対象 構造物例	文献	水深係数 α
建築物	<ul style="list-style-type: none"> ・建築物荷重指針・同解説(2015) ・原子力発電所耐津波設計技術規程 等 	<p>堤防等により波力の軽減が見込まれる場合で、海岸から500m以上離れている施設:<u>1.5</u> // 海岸から500m以内の施設:<u>2.0</u></p> 
津波避難ビル・ 避難タワー	<ul style="list-style-type: none"> ・津波避難ビル等の構造上の要件の解説 ・道路上に設置する津波避難タワーの標準仕様設計基準 	
下水道施設	耐津波対策を考慮した下水道施設設計の考え方	<p>波力の軽減が見込めない施設:<u>3.0</u></p>  <p><small>*$\alpha=1.5$への低減は津波の流速増加がない地域を対象とする</small></p>

3. 3 各種設計指針やガイドラインにおける水深係数

➤ フルード数 Fr に応じて値を変化させる構造物における水深係数は以下の通りである。

対象 構造物例	文献	水深係数 α
胸壁(漁港)	津波を考慮した胸壁の設計の考え方(暫定版)	$\frac{P_{\max}}{\rho g \eta_{\max}} = \alpha \left(1 - \frac{Z}{\alpha' \eta_{\max}} \right)$ $\alpha' = \max \{ 3, \alpha \}$ $\alpha = 1.0 + 1.35 Fr^2$ $(0 \leq Fr \leq 1.5)$ 
建築物 (原子力)	原子力発電所耐津波設計技術規程	$P_{\max}(z) = \rho g (\alpha h_{i\max} - z)$ $\alpha = 1.2 Fr + 1.0 \quad (\text{Asakura et al 2002})$ $\alpha = 1.4 Fr + 1.0 \quad (\text{榊山 2012})$
ガス貯蓄施設	高圧ガス取扱施設における地震・津波時の対応に関する調査報告書	$F_{tH} = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \rho g [h_x^{\max}(\theta)]^2 \cdot R \cdot \cos \theta \cdot d\theta$ $h_x^{\max}(\theta) = \alpha \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 p_m \cos m\theta$ $\alpha : Fr \text{を考慮した水深係数(例えば1.8)}$

3. 3 その他の水深係数

- この他、フルード数 Fr に加えて損失係数も考慮して水深係数を設定する考え方も提案されている。

対象 構造物例	文献	水深係数 α
—	松富ら(2013) 開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験	$1.0 + 0.5(1.0 + \zeta)Fr^2$ 建物に対して、 $\zeta = 0 \sim 0.8$
—	大村ら(2015) 胸壁に作用する津波波力に関する実験的研究	$1.0 + 0.5(1.0 + \zeta)Fr^2$ $\zeta = 1.7$
—	有川(2015) 水理模型実験による防潮壁に作用する孤立波の波圧特性に関する検討	$1.0 + 0.5(1.0 + \zeta)Fr^2$ $\zeta = 3.0$

3. 4 先端部波圧の評価手法②

(時系列水位及び流速による評価)

- 建築物荷重指針・同解説(2015)では、平面二次元計算等により津波の時系列水位及び流速が得られる場合の津波先端部波力の算出式を以下のように示している。

$$F = \frac{C_{D1}}{2} \rho (h v^2)_{max} B$$

$$C_{D1} = 2.0 + 5.4 h_{max} / D \quad \text{適用範囲: } 0.1 < \frac{h_{max}}{D} < 0.17$$

h : 水深 v : 流速 B : 施設幅 D : 海岸からの距離

任意の地点の時系列水位及び流速が得られる事例は少ない。
浸水想定結果から得られる最大浸水深を使用するケースが多い。

3. 5 先端部波圧のその他の評価手法 (数値解析による波力の評価)

再現結果整理(防潮堤無し)

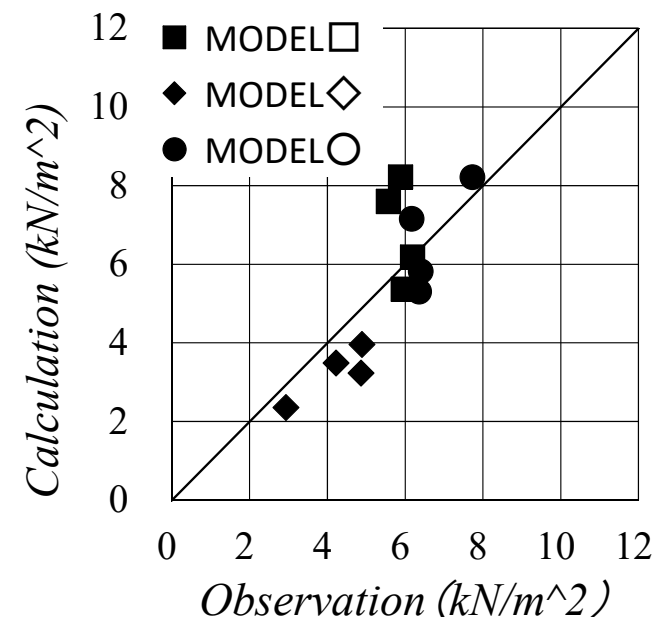
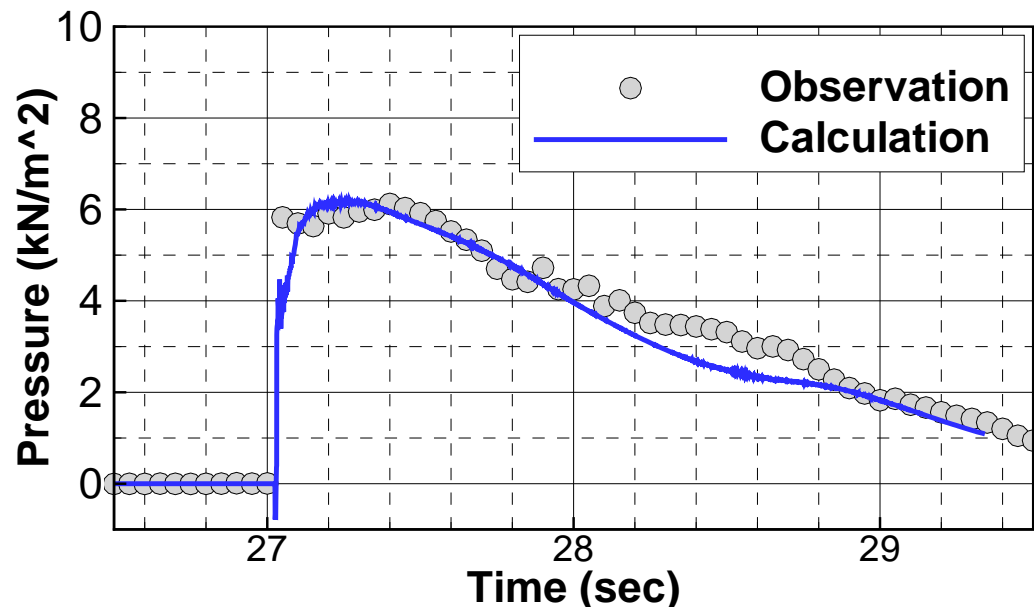
■ 水位

- ・WG4における実験結果と計算結果の時系列水位はほぼ一致する
- ・円形模型前面を除き, 最大値についてもほぼ一致する

■ 波圧

- ・PG1-1における実験結果と計算結果の時系列波圧及び最大値はほぼ一致する

→ 再現性は良好



3. 5 先端部波圧のその他の評価手法 (数値解析による波力の評価)

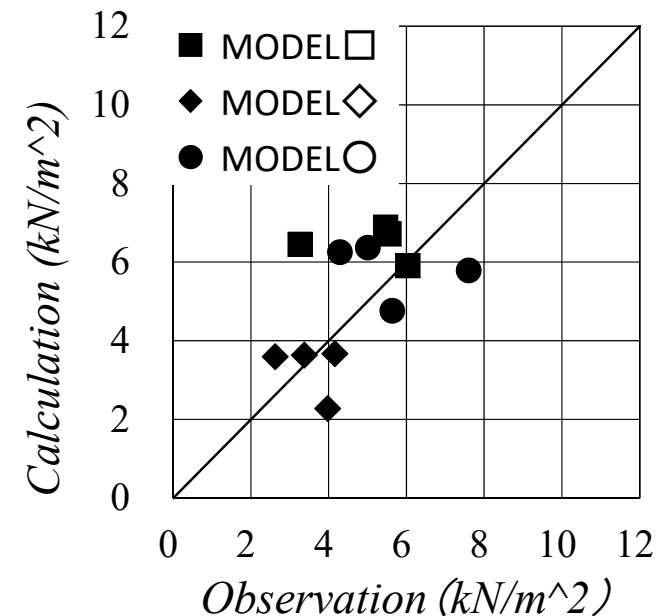
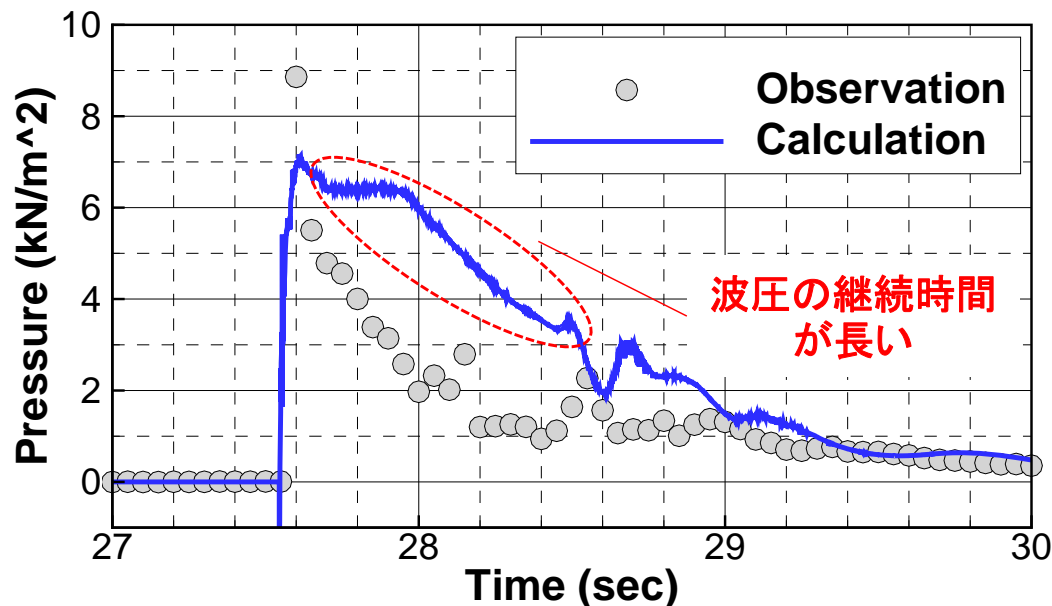
再現結果整理(防潮堤有り)

■ 水位

- ・実験結果と計算結果の時系列水位及び最大値はほぼ一致する

■ 波圧

- ・計算による波圧の持続時間が実験値より長くなる→今後の課題
- ・最大値にややばらつきが見られるが、両者の比は1対1の直線の近辺に分布する
→再現性は概ね良好



おわりに

- 浸水深 h に対応する静水圧分布に水深係数 α を乗じて先端部波力を表現を行うのが基本。
- 各種設計指針やガイドラインに記載されている水深係数は、主として以下の3通りに分類される。
 - ① 条件によらず一定
 - ② 海岸からの距離等に応じて変化
 - ③ フルード数 Fr に応じて変化
- 平面二次元計算等により津波の時系列水位及び流速が得られる場合の波力算定式も提案されているが、任意の地点の時系列水位及び流速が得られる事例は少ない。
- 波力(波圧)を計算可能な数値解析により、直接評価する方法もあるが、計算コストや精度上の課題から、実務に広く適用されるには至っていない。