

越流時荷重

防衛大学校
竹中工務店技術研究所

嶋原良典
井上修作

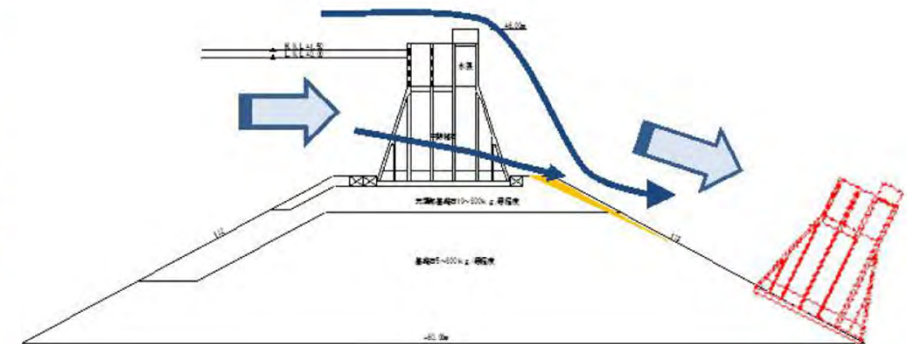
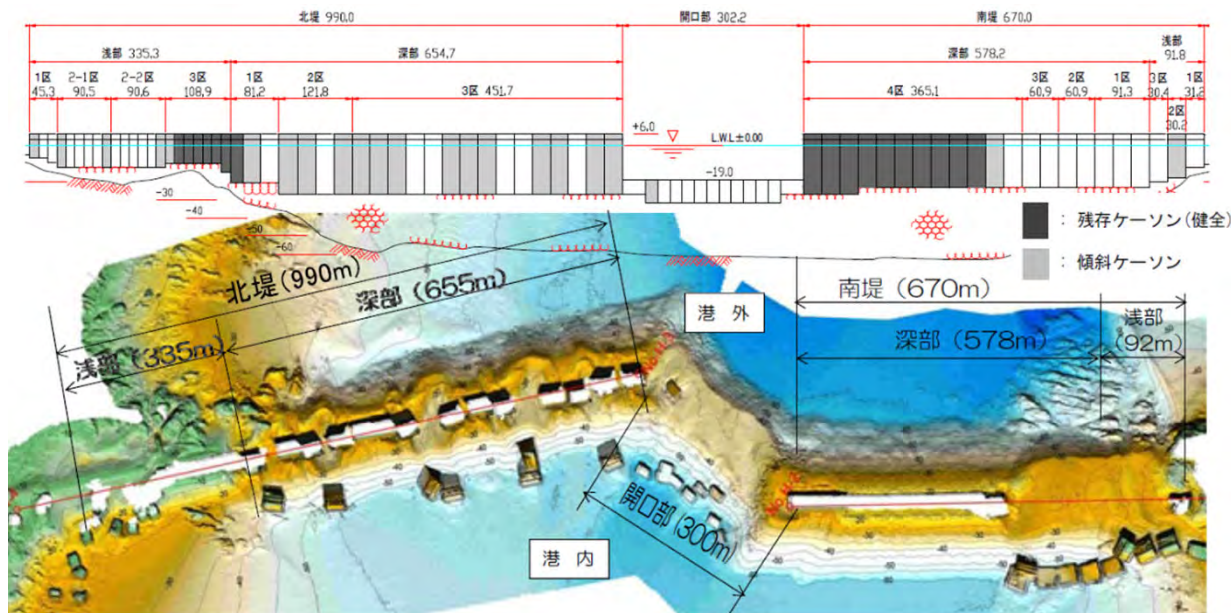
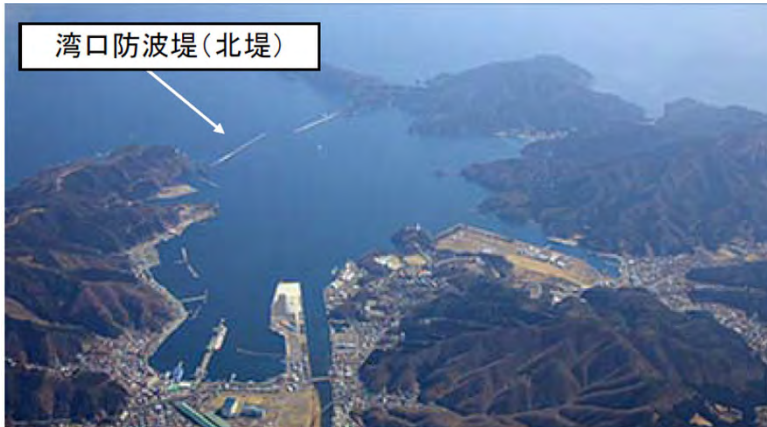


目次

- 5.1 越流時荷重による構造物被災の報告事例
- 5.2 各種設計指針やガイドラインでの越流時荷重の評価の概要
- 5.3 港湾構造物を越流する津波の荷重評価
- 5.4 陸上構造物を越流する津波の荷重評価
- 5.5 遮蔽物背後の陸上構造物に作用する津波の荷重評価

被災事例 釜石湾口防波堤

出典: 防波堤の耐津波設計ガイドライン(国土交通省港湾局)



被災事例 福島第1原発

「出典：東京電力ホールディングス」



砕波段波の衝突もしくは越流後の準定常流により被災

被災事例 釜石市唐丹小白浜



- 港湾の海底部が完全に露出した状態で津波が来襲
- 陸上遡上する段波(サージフロント)として防波堤に衝突

被災事例 釜石市唐丹小白浜(防潮堤, 防波堤)



津波前
2005/4/27



津波後
2011/4/1

1. 越流あり・なしの場合に対する波力評価
2. 構造物の安定性(滑動・転倒)の照査
3. 基礎の安定性→洗掘

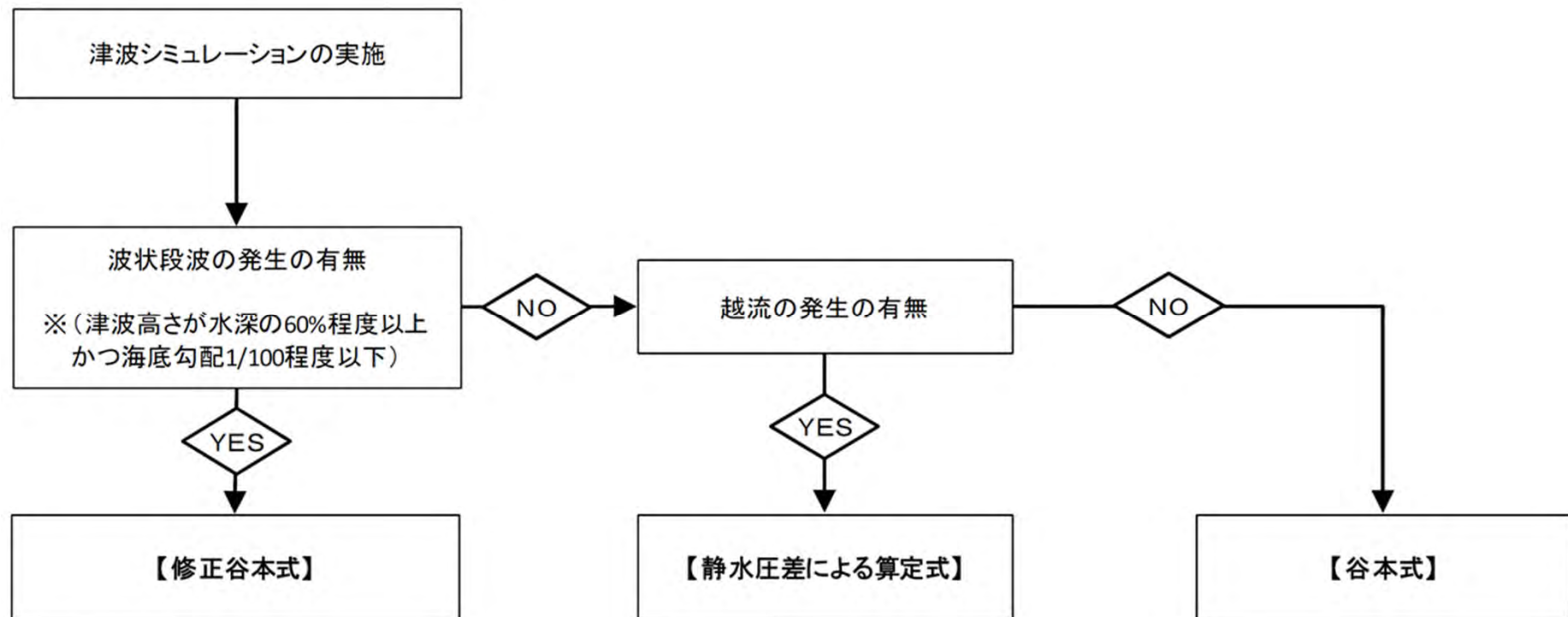
各種設計指針やガイドラインでの越流時荷重の評価

2011年東北地方太平洋沖地震津波以降，津波越流時に作用する各種構造物の荷重評価に関する研究が実施されるとともに推定式が提案されている。

文献	機関・発行年	対象構造物	記載されている評価項目
防波堤の耐津波設計ガイドライン	国交省 港湾局 2013	防波堤	<ul style="list-style-type: none">防波堤に対する津波波力の算定（波状段波，越流なし，<u>越流あり</u>）。直立部（ケーソン）の滑動，転倒および基礎地盤の支持力の安定性評価方法
漁港・漁場の施設の設計参考図書	水産庁 2015	防波堤	<ul style="list-style-type: none">防波堤に対する津波波力の算定（波状段波，越流なし，<u>越流あり</u>）。津波作用に対する被覆石，ブロックの所要質量の評価方法（イスバッシュ式）
港湾における防潮堤（胸壁）の耐津波設計ガイドライン	国交省， 2013	胸壁 防潮堤	<ul style="list-style-type: none">胸壁の全体安定性に対する検証手順の詳解設計津波を超える規模の津波に対する胸壁の「粘り強い構造」の考え方
津波を考慮した胸壁の設計の考え方（暫定版）	水産庁， 国交省 2015	胸壁	<ul style="list-style-type: none">胸壁に対する津波波力の算定（非越流時，<u>越流時</u>）波力算定式の選択フロー付粘り強い構造の考え方．堤体工，水叩工，洗掘対策事例の紹介．

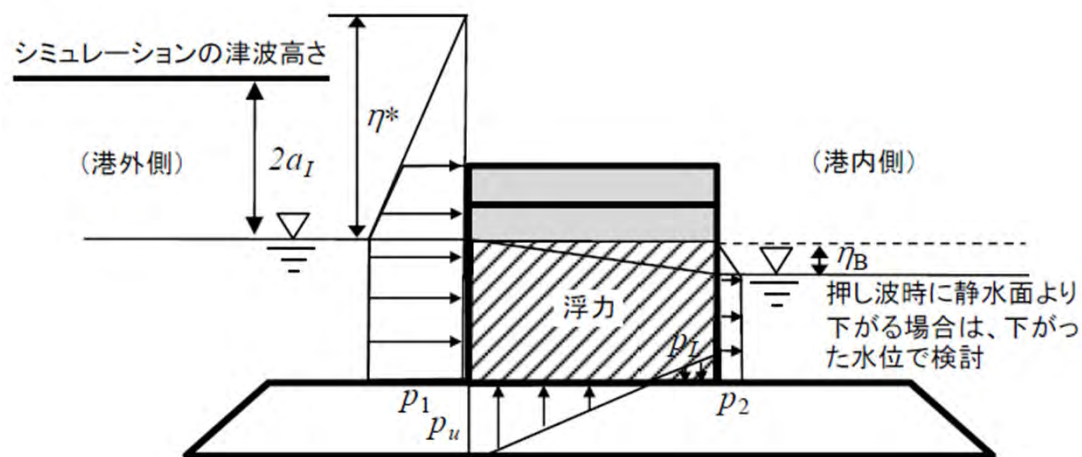
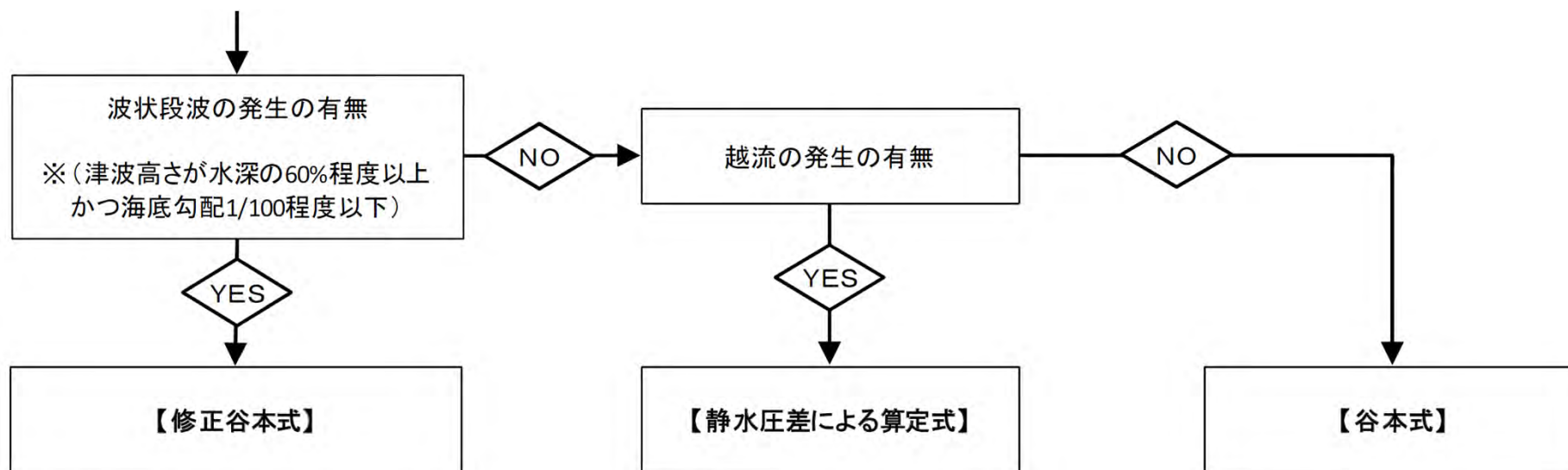
港湾構造物を越流する津波の荷重評価

防波堤を越流する場合，静水圧の差から津波波力を算出する。その際，補正係数や鉛直力の評価はガイドラインにより異なる



防波堤に対する津波波力算定手順（国交省，2013）

越流しない場合 (or 波状段波) の場合の算定式



$$\eta^* = 3.0a_I$$

$$p_1 = \alpha\rho_0ga_I$$

$$p_u = p_1$$

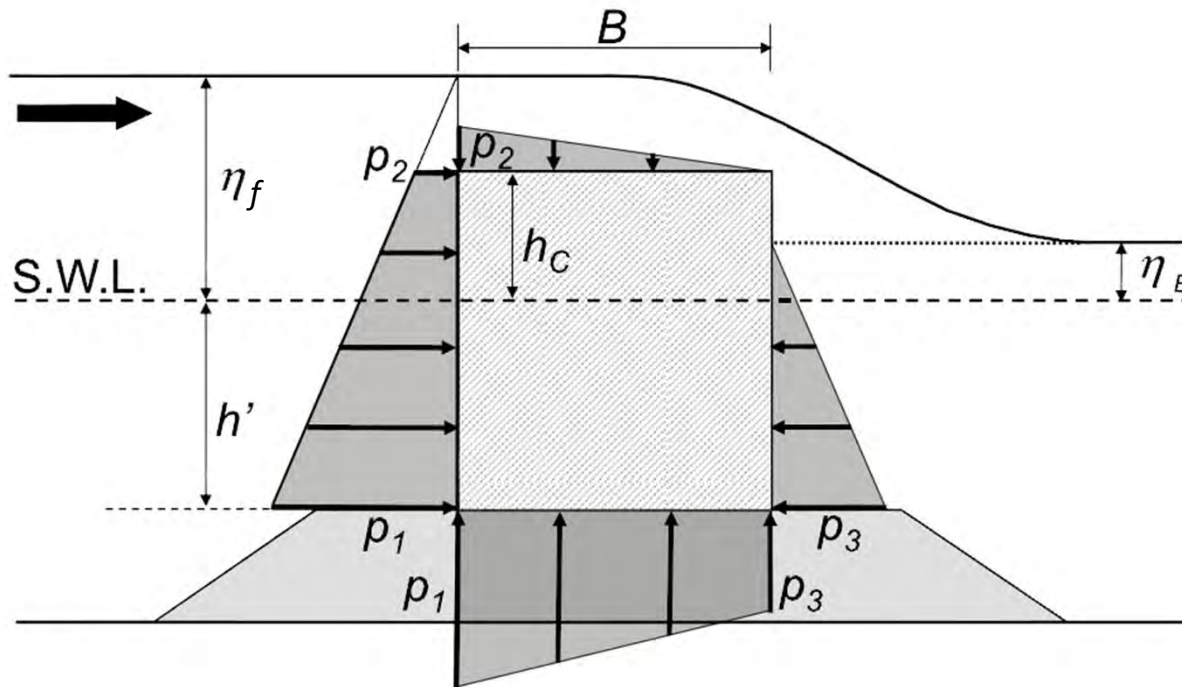
$\alpha = 3.0$ 修正谷本式 (波状段波)

$\alpha = 2.2$ 谷本式 (越流なし)

(国交省, 2013)

越流する場合：静水圧差による算定式

(水産庁, 2015)



水平方向

- 静水圧分布. 前背面の差から津波波力を算出

鉛直方向

- 堤体全体の浮力を考慮 (国交省)
- 堤体上面と下面に作用する圧力を直接評価 (水産庁)

$$p_1 = \alpha_f \rho_0 g (\eta_f + h')$$

$$p_2 = \frac{\eta_f + h_c}{\eta_f + h'} p_1$$

$$p_3 = \alpha_r \rho_0 g (\eta_r + h')$$

補正係数(動水圧による影響)

前面側: $\alpha_f = 1.05$ (国交省), $\alpha_f = 1.1$ (水産庁)

背面側: $\alpha_r = 0.9$

- 港内外の水位差が卓越する条件下では、特に堤体背面の係数が $\alpha_r = 0.9$ から乖離(宮田ら, 2014)

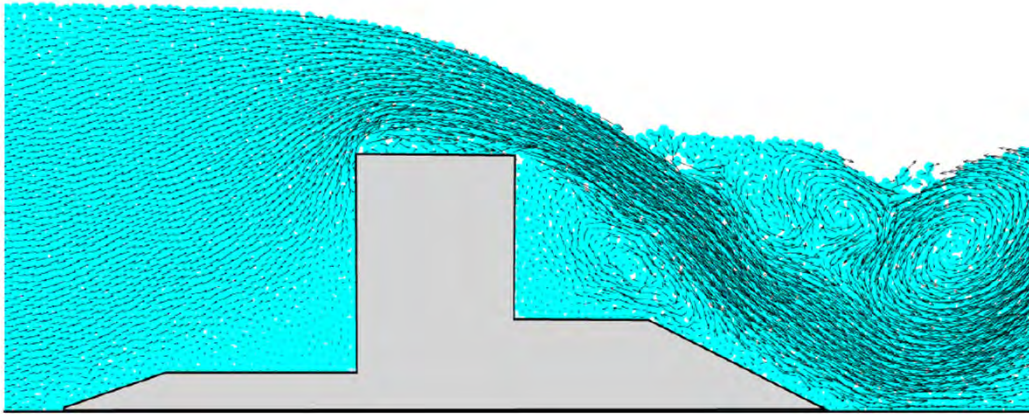


図-2.5 高精度粒子法による越流時の堤体背後乱流の再現スナップショット

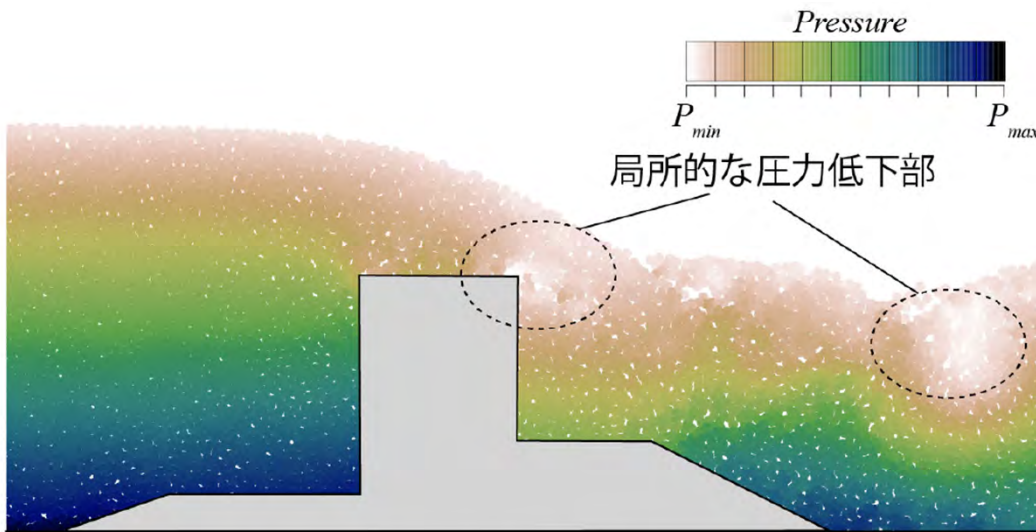
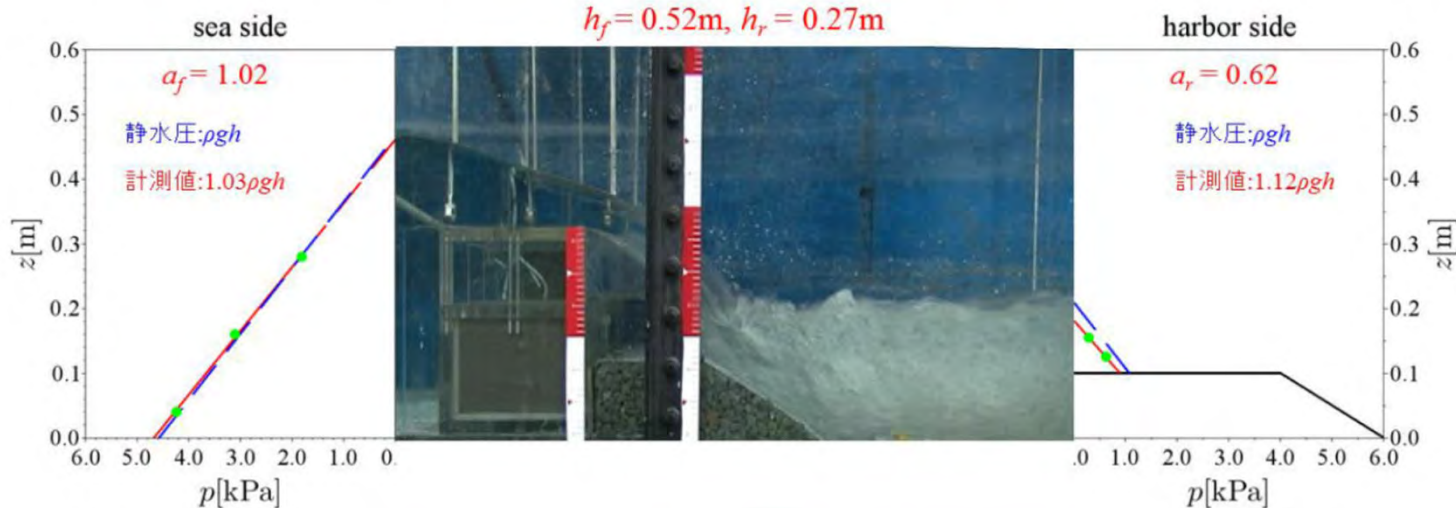
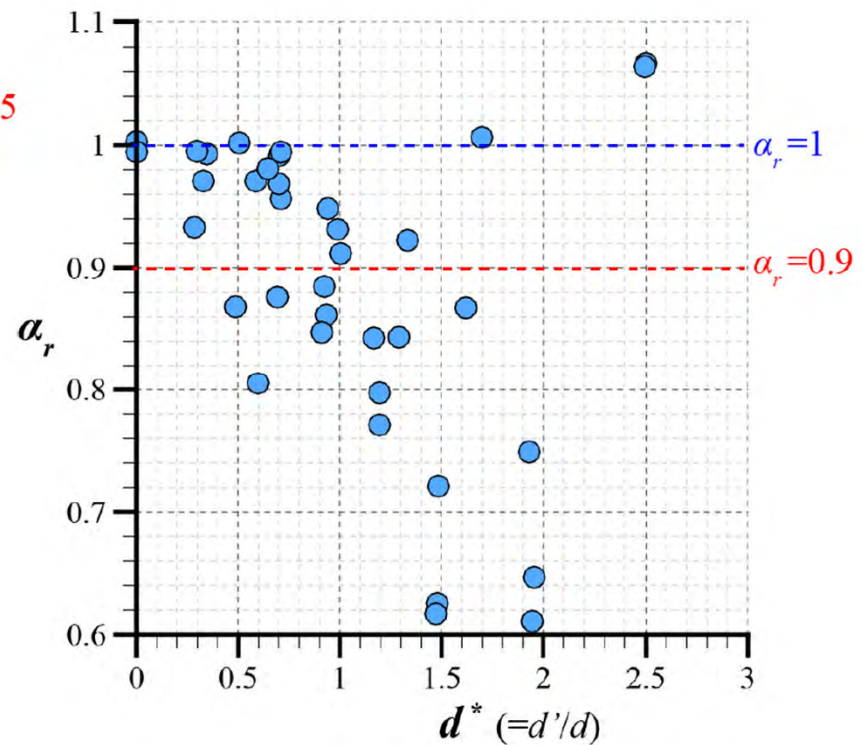
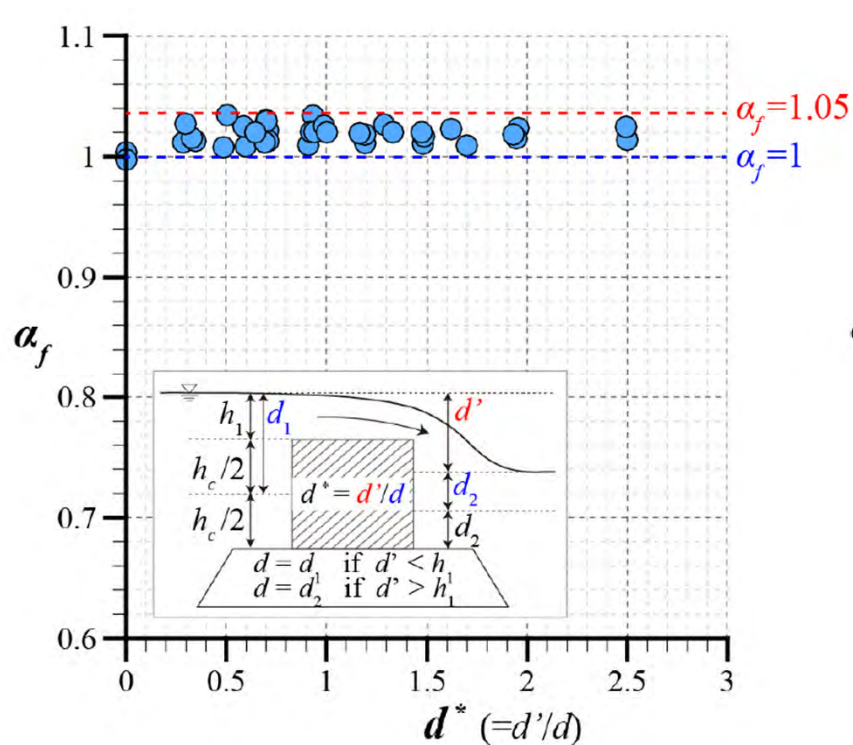


図-2.6 高精度粒子法による越流時の堤体天端部の局所的な圧力低下の再現スナップショット

鶴田ら(2017)

水理実験と数値実験(高精度粒子法)により波力算定式を改良

- 越流した高速流により、渦構造が発生
- 渦中心部で圧力の低下を確認
- 越流水の射出速度, 落下位置, 渦構造の形成位置が堤体背面への作用圧力を決める重要なファクターになる



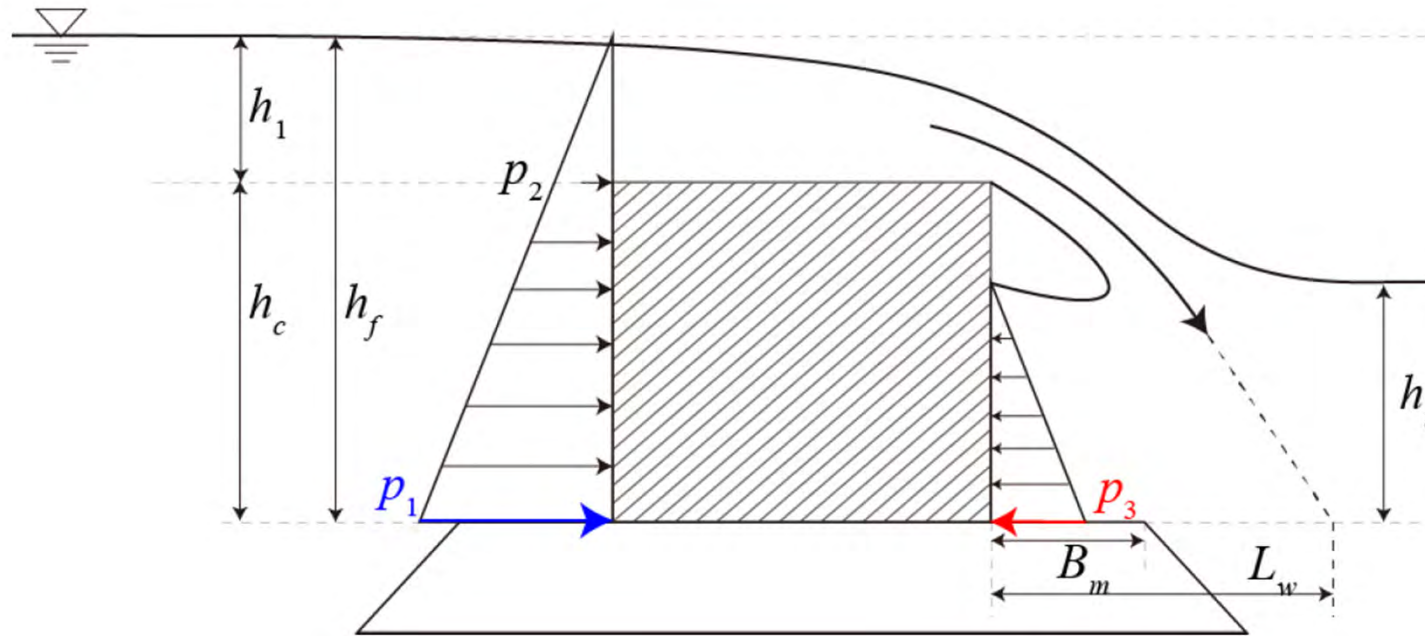
防波堤の越流実験
腹付工を付加した場合
(鶴田ら, 2017)

- 前面側は水位差の規模に関係なく1程度(現行の1.05は安全側)
- 背面側の補正係数は, 水位差が大きく背後水位が小さい場合に0.9を下回る傾向(パラペットがある場合は最大約0.4まで減少)

(港外側)

(港内側)

鶴田ら(2017)



$$p_1 = \alpha_f \rho_0 g h_f$$

$$p_2 = \frac{h_1}{h_f} p_1$$

$$p_3 = \alpha_r \rho_0 g h_r$$

$$\alpha_r = 1 + \frac{0.1 \{ (L_m - B_m) / B_m - 1 \}}{h_r / h_f}$$

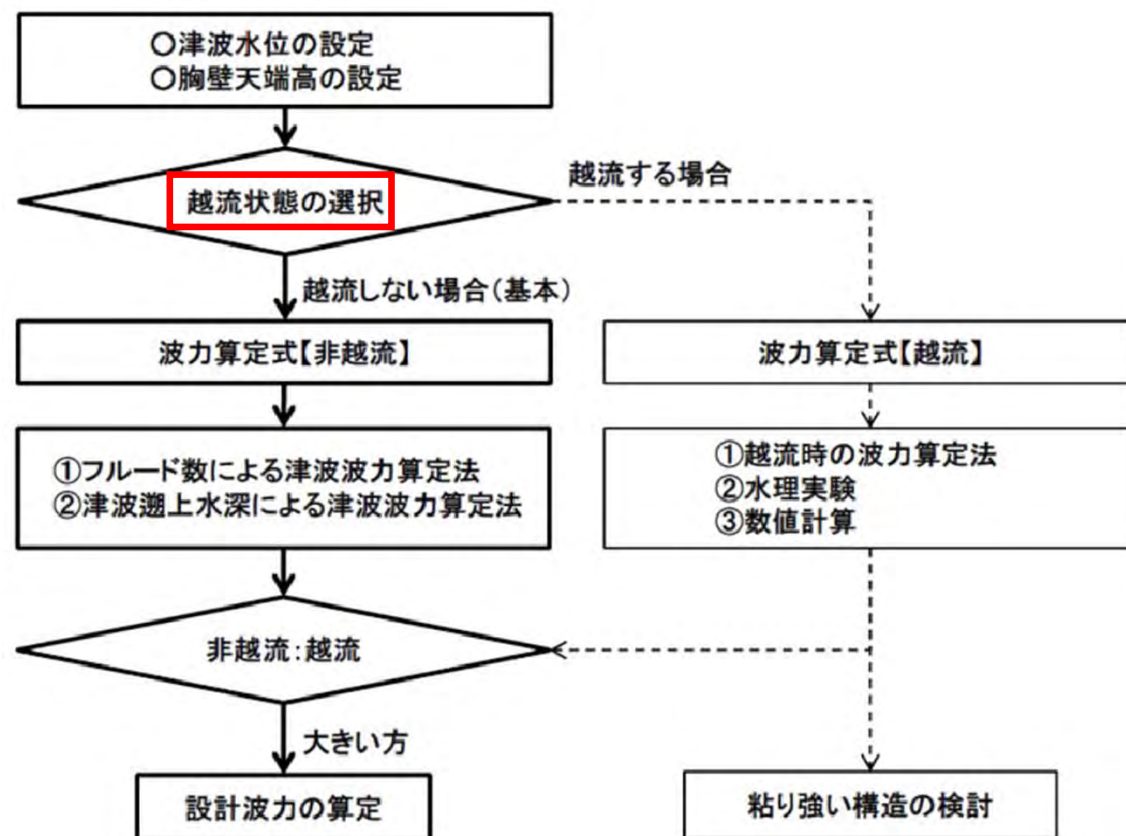
水理実験より、**従来式を改良**

- ✓ 越流水塊の挙動、透水・不透水マウンド、腹付工を考慮
- ✓ L_w (越流水の着水距離) を与える必要がある → 自由落下理論 or 数値計算
- ✓ 上部工 (パラペット) を付加する場合は、 p_3 の別途検討が必要

- 透水・不透水マウンド、腹付工における安全側を取った場合

陸上構造物を越流する津波の荷重評価

津波波力算定の考え方

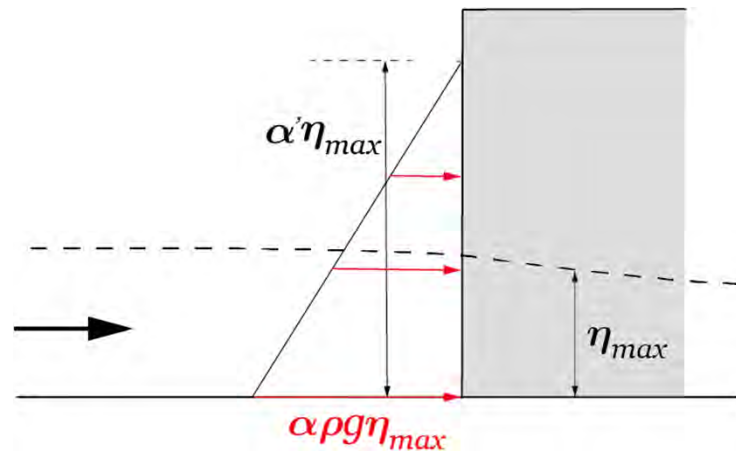


- 原則として胸壁を津波が越流しない場合を基本とする
- 胸壁の天端高を超える場合は越流時の波力算定式を使用
- 越流の有無は、数値シミュレーションで確認
- 得られた波力から提体の安定性(滑動・転倒)を照査
- 越流時は背後の洗掘を評価

水産庁・国交省(2015)

越流しない場合の波圧

通過波水深・流速を使用する場合

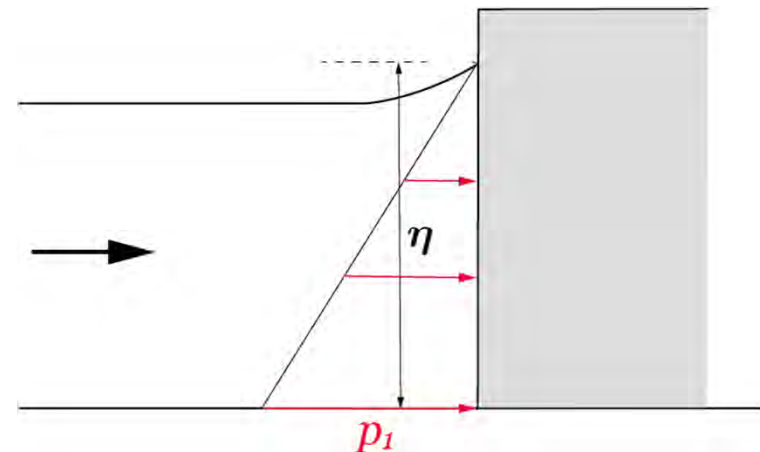


$$\frac{p_{max}}{\rho g \eta_{max}} = \alpha \left(1 - \frac{Z}{\alpha' \eta_{max}} \right) \quad 0 \leq \frac{Z}{\eta_{max}} \leq \alpha'$$

$$\alpha = 1.0 + 1.35 Fr^2 \quad 0 \leq Fr \leq 1.5$$

- 無次元作用高 α' の最大は3
- $Fr = 1.5$ で $\alpha = 4.04$, さらに大きい場合は別途検討が必要
- Fr が不明な場合は, 谷本式 ($\alpha'=3, \alpha=2.2$) を適用

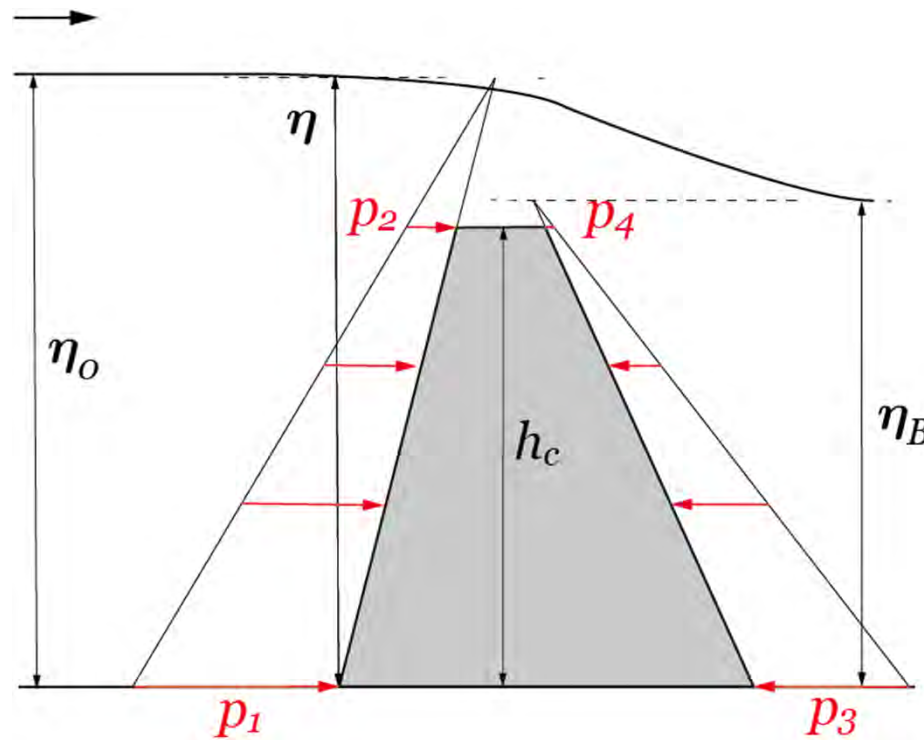
胸壁を考慮した状態の津波高を使用する場合



$$p_1 = \rho g \eta \times a_I \quad \text{波圧係数} \quad a_I = 1.1$$

- 構造物前面の遡上水深を使用
- 砕波段波が発生する場合, $a_I = 1.1$ を上回る可能性がある

越流する場合の波圧



基本的には
静水圧 × 波圧係数 (a_I, a_{IB})
 として算定

前面

$$p_1 = \rho g \eta \times \underline{a_I}$$

$$p_2 = p_1(\eta - h_c)/\eta$$

$$P_I = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)h_c$$

$$a_I = -0.17h_c/\eta + 1.27 \quad (0.4 \leq h_c/\eta < 1.0)$$

$$a_I = 1.1 \quad (\text{沖合水深 } \eta_0 \text{ を使用})$$

背面

$$p_3 = \rho g \eta_B \times \underline{a_{IB}} \quad h_{cB} = \min(\eta_B, h_c)$$

$$p_4 = p_3(\eta_B - h_{cB})/\eta_B$$

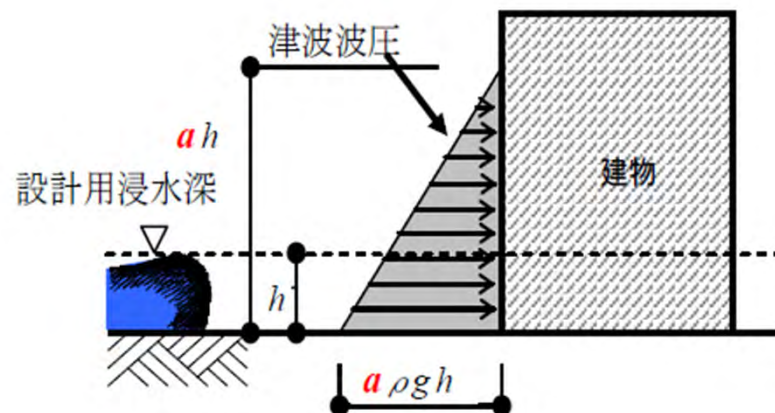
$$P_B = \frac{1}{2}(p_3 + p_4)h_{cB}$$

$$a_{IB} = \underline{0.4} \quad (h_c/\eta_B < 0.8)$$

$$a_{IB} = 0.0 \quad (h_c/\eta_B \geq 0.8)$$

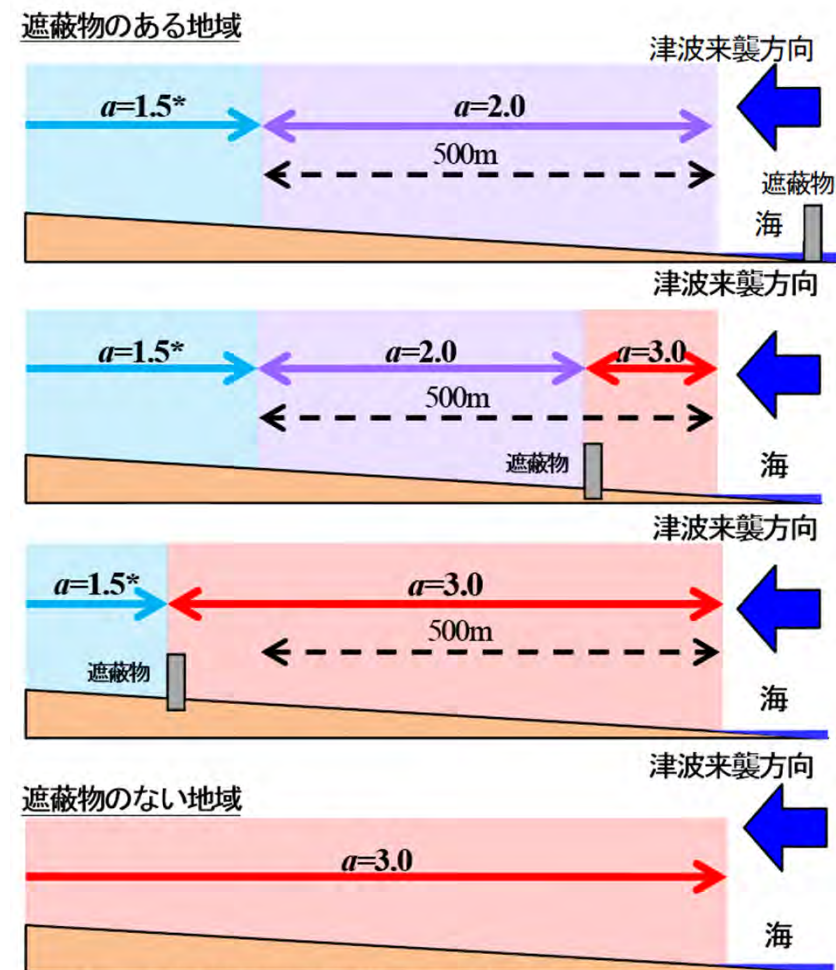
遮蔽物背後の陸上構造物に作用する津波の荷重評価

遮蔽物としては防潮堤、胸壁、建物群等が挙げられる。前方に遮蔽物がある場合でも、津波荷重低減効果が見込まれない場合がある。荷重評価方法については、各種の方法が提案されている。



a : 水深係数、 h : 設計用浸水深(m)、 ρ : 水の単位体積質量(t/m^3)、 g : 重力加速度(m/s^2)

波の勢いが軽減されることが見込まれる場合には、水深係数を低減できる

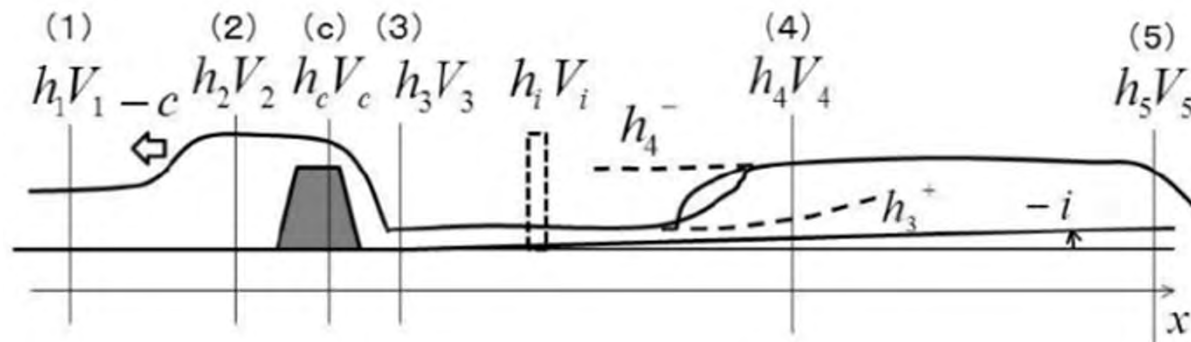


* $a=1.5$ への低減は津波の流速増加がない地域を対象とする

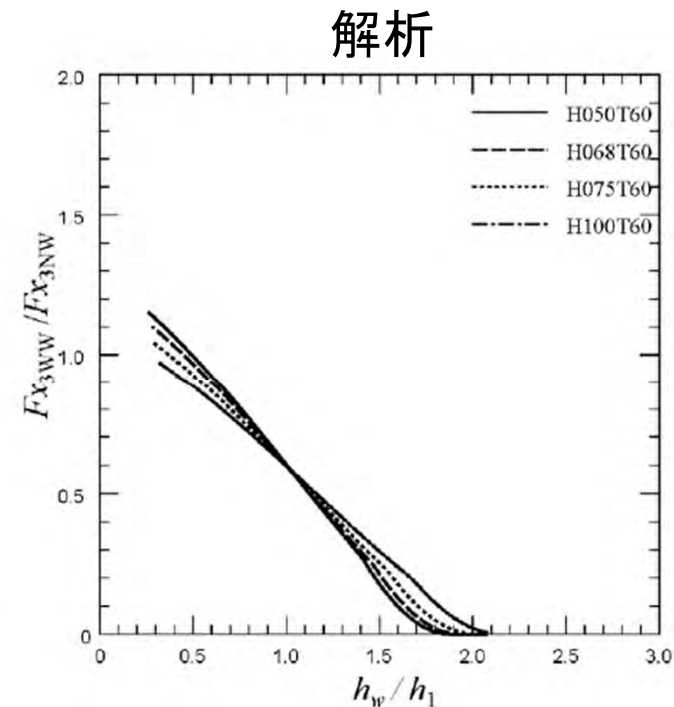
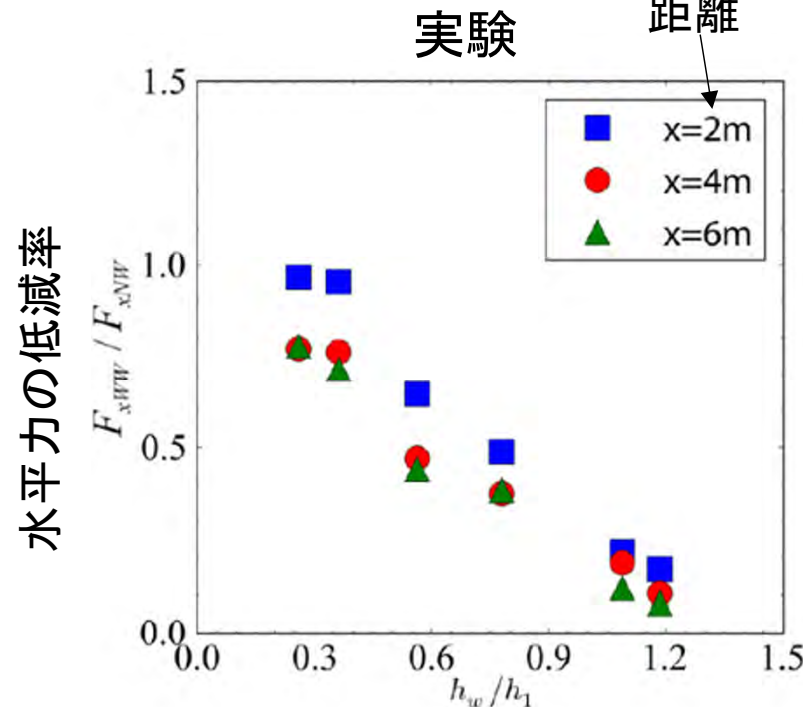
遮蔽物背後の陸上構造物に作用する津波の荷重評価

池谷ら(2015)による実験と理論解析

- 水深係数 $f(\text{Fr}) < 3$
- 入射波水深とフルード数および堤防高を条件から波力を解析することが可能



防潮堤から
建物までの
距離



防潮堤の高さ／入射波水深

おわりに

- 構造物を越流する津波の荷重評価

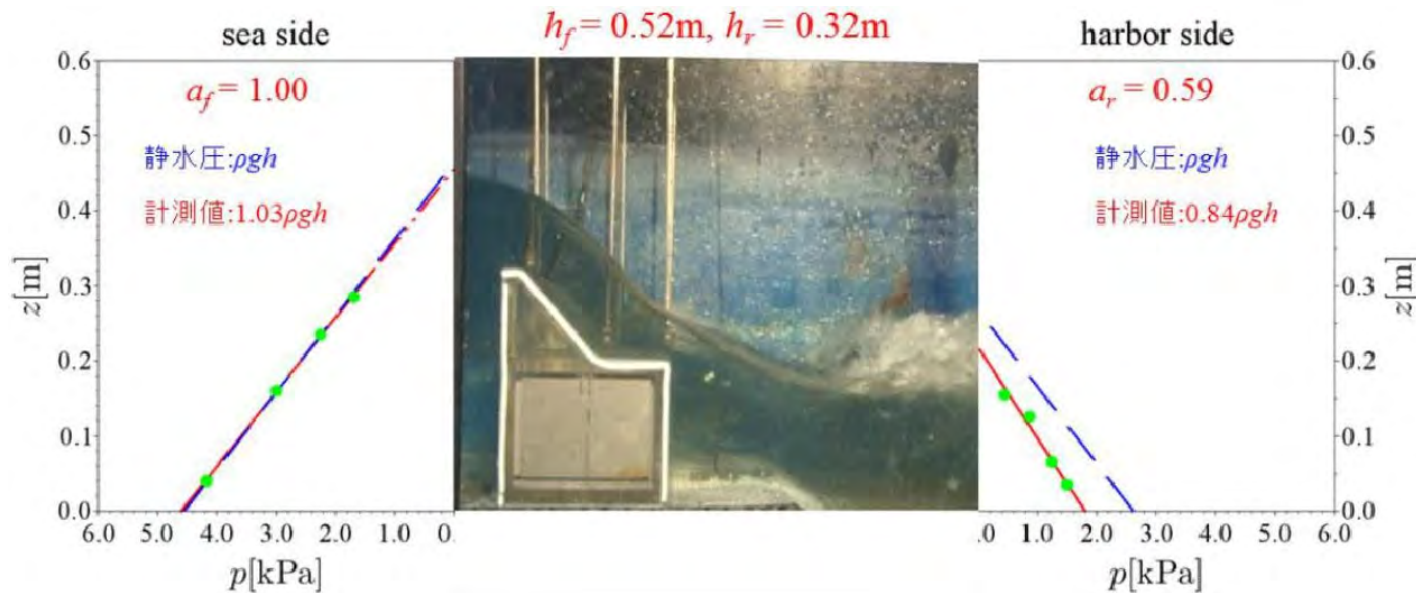
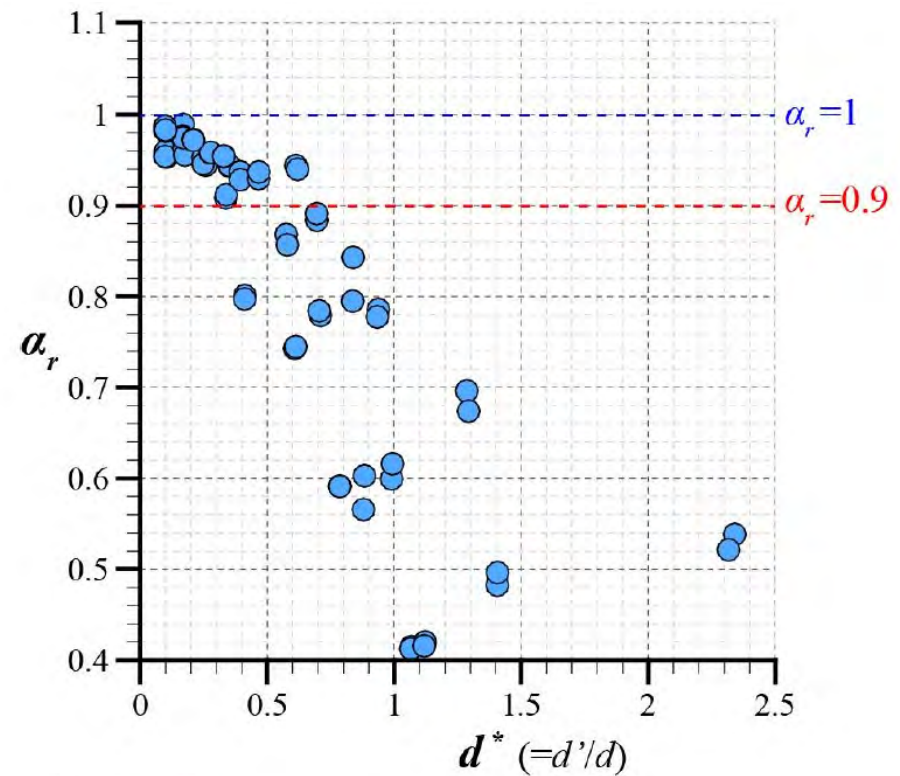
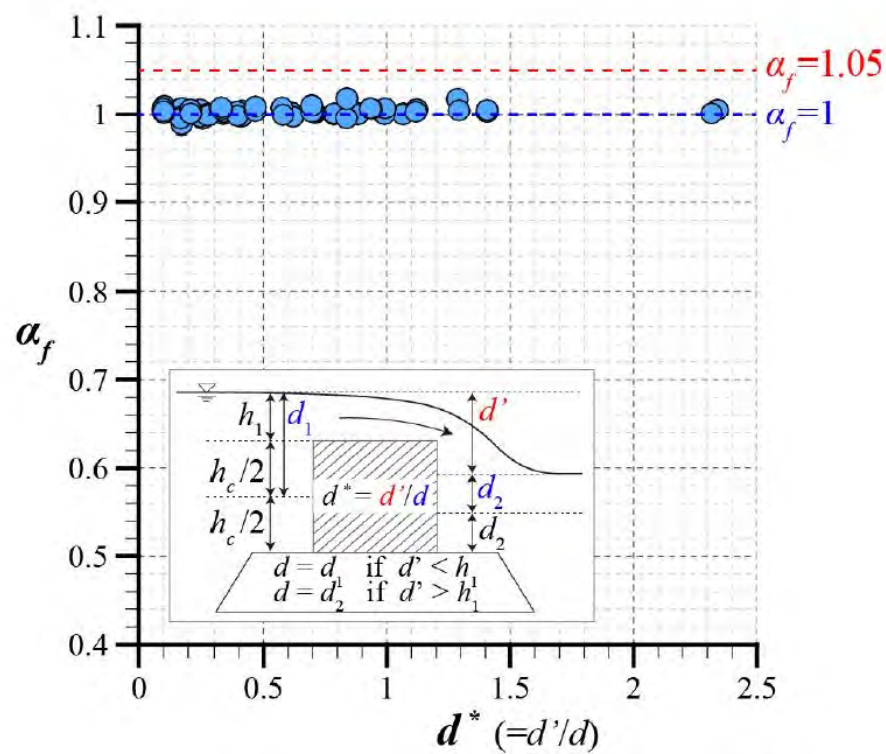
基本は静水圧型の式

防波堤 : 国交省, 水産庁が提案(ガイドライン)
改良型(鶴田ら,2017)

胸壁 : 水産庁 & 国交省(2015),
非越流が基本. 越流・非越流の大きい方を採用

- 遮蔽物背後の構造物に作用する荷重

荷重低減効果が見込まれる場合の評価はある程度可能
荷重低減効果が見込まれない場合の評価に課題



防波堤の越流実験
パラペットを付加した
場合(鶴田ら, 2017)

- 前面側は水位差の規模に関係なく1程度(現行の1.05は安全側)
- 背面側の補正係数は, 水位差が大きく背後水位が小さい場合に0.9を下回る傾向