

「各種構造物の津波荷重の体系化に関する研究委員会」

成果報告会

2019年2月22日



## 成果報告会の開催にあたって

本委員会は、2004年のスマトラ沖地震津波を契機に、津波被害・災害に対する軽減策を検討する委員会として2005.8～2008.5「津波災害の軽減方策に関する研究委員会」(委員長 松富英夫)が発足され、2008.6～2011.5「津波災害の実務的な軽減方策に関する研究委員会」(委員長 松富英夫)、2011.6～2014.5「津波対策とその指針に関する研究委員会」(委員長 松富英夫)と続き、3期目では、特に2011年3月の東日本大震災の被害を取り纏めてきました。

一方、2011年東日本大震災を受けて国内外で津波荷重に関して室内実験や数値計算による研究が多数実施されてきております。また、各種業種で、津波荷重の評価ガイドや技術集が取りまとめられてきております。

このような背景のもと、2015.6から活動してきました「各種構造物の津波荷重の体系化に関する研究委員会」では、様々な構造物に作用する津波荷重について、既往の実験および数値計算の知見を整理してきました。また、各業種で取り纏められている評価ガイドや技術集を分析することで、津波荷重の評価手法の体系化を目指して活動を行ってきました。そのなかで、前委員長の思いである、「津波荷重のころえ」というものを、将来にわたり構築していきたいと考え、成果報告会を通して、これまでの活動してきた本研究委員会の成果を広く認知いただくとともに、「津波荷重のころえ」の今後の展開のための議論が深められることを期待しています。

2019年2月22日

各種構造物の津波荷重の体系化に関する研究委員会 委員長 有川 太郎

## プログラム

15 : 00～15 : 10	開会挨拶および趣旨説明 委員長 有川 太郎 (中央大学)
15 : 10～15 : 40	津波荷重評価における留意点 松富 英夫 (秋田大学)
15 : 40～15 : 50	討議
15 : 50～16 : 05	津波波圧の評価 ー先端部荷重ー 大家 隆行 (パシフィックコンサルタンツ)
16 : 05～16 : 20	同上 ー非先端部荷重ー 奥野 峻也 (構造計画研究所)
16 : 20～16 : 35	同上 ー越流時の荷重ー 鳴原 良典 (防衛大学校)
16 : 35～16 : 50	漂流物の評価 木原 直人 (電力中央研究所)
16 : 50～17 : 05	洗掘の評価 浅井 竜也 (名古屋大学)
17 : 05～17 : 20	討議
17 : 20～17 : 30	お知らせと閉会の挨拶 委員長 有川 太郎 (中央大学)

委員構成

役職	氏名	所属
委員長	有川 太郎	中央大学
副委員長	嶋原 良典	防衛大学校
副委員長	長谷部 雅伸	清水建設
委員	松富 英夫	秋田大学
委員	中埜 良昭	東京大学
委員	奥田 泰雄	建築研究所
委員	庄司 学	筑波大学
委員	舘野 公一	鹿島建設
委員	内山不二男	構造計画研究所
委員	浅井 竜也	名古屋大学
委員	大家 隆行	パシフィックコンサルタンツ
委員	池谷 毅	東京海洋大学
委員	奥野 峻也	構造計画研究所
幹事	木原 直人	電力中央研究所



# 津波荷重評価における留意点

秋田大学 松富英夫

## 内 容

1. はじめに
2. 動圧の影響
3. 氾濫水密度の影響
4. 非定常性(波周期)の影響
5. おわりに

## 1. はじめに

### ◆津波波圧(力)評価について

先端部荷重(大家委員)

合田先生(力積), 波圧計

非先端部荷重(奥野委員)

越流時荷重(嶋原委員)

### ◆漂流物, 洗掘評価について

漂流物衝突荷重(木原委員)

洗掘(浅井委員)

# ◆津波荷重関連小史

1983年 3月: 防災施設, 防災体制, 防災まちづくり  
(津波対策) ⇨ 既往最大

1983年 5月: 日本海中部地震・津波  
**港研式, 建物, 分散波の計算** ⇨ 既往最大  
(氾濫流速)

1993年 7月: 北海道南西沖地震・津波  
**建物** ⇨ 既往最大

1998年 4月: 地震学・津波数値計算技術の進歩  
⇨ 既往最大または**最大地震で発生する津波**

2004年12月: 北スマトラ島沖地震・津波 ハザードマップの導入(2004)

2011年 3月: 東北地方太平洋沖地震・津波  
⇨ **レベル1~レベル3, 防潮堤の高さ**

## 氾濫流速と建物への流体力



十三湖(青森)

9, 3, 6人  
(救命胴衣なし)



# ◆津波荷重関連小史

1983年 3月: 防災施設, 防災体制, 防災まちづくり  
(津波対策) ⇨ 既往最大

1983年 5月: 日本海中部地震・津波

港研式, 建物, 分散波の計算 (汎濫流速) ⇨ 既往最大

1993年 7月: 北海道南西沖地震・津波

建物 ⇨ 既往最大

>15年

1998年 3月: 地震学・津波数値計算技術の進歩

⇨ 既往最大または最大地震で発生する津波

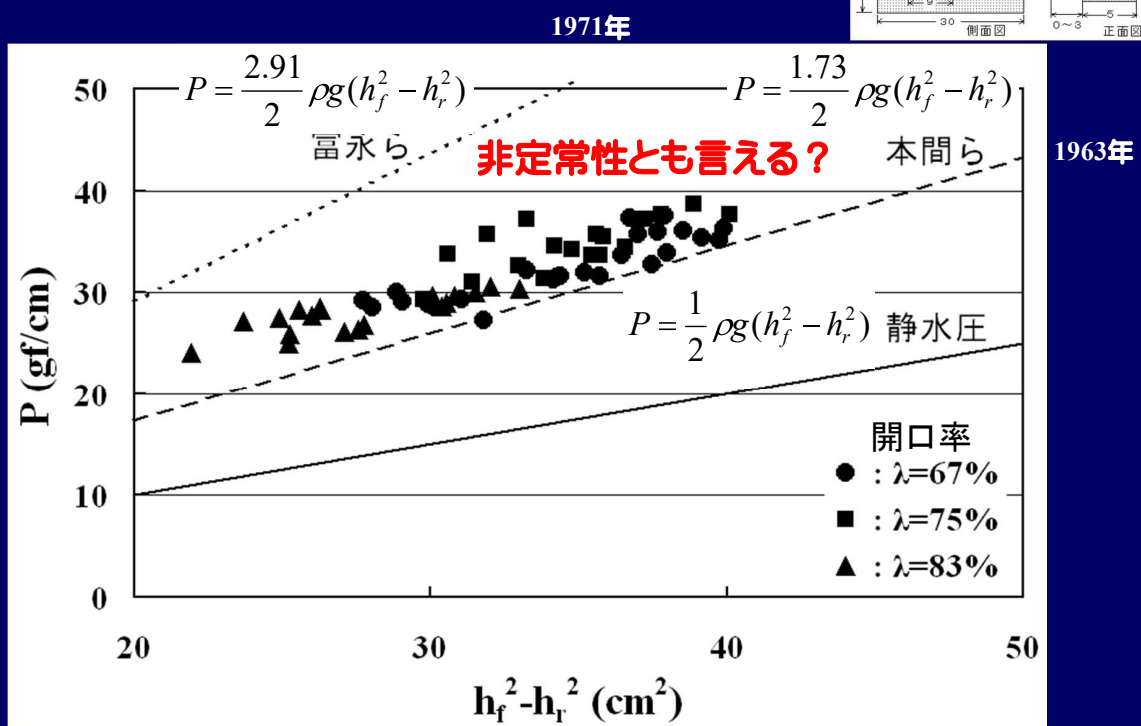
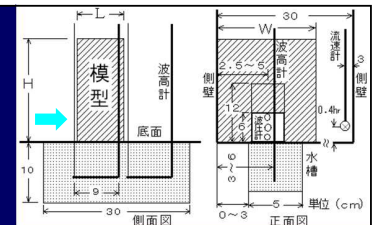
2004年12月: 北スマトラ島沖地震・津波

ハザードマップの導入 (2004)

2011年 3月: 東北地方太平洋沖地震・津波

⇨ レベル1~レベル3, 防潮堤の高さ

## 2. 動圧の影響



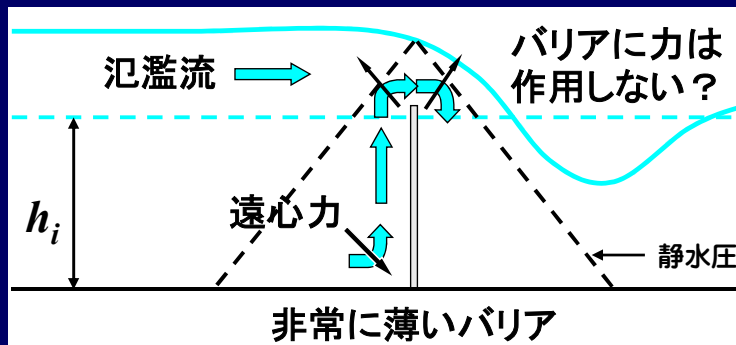
全圧力Pと建築物前・背面浸水深の2乗差( $h_f^2-h_r^2$ )の関係 (2004)



# 動圧の寄与に関する検討例

	対象の現象	現象発生法(定常・非定常)	常流・射流	動圧	動圧/静水圧	対象物
Hiroi (1919)	波浪の碎波	波 (非定常)	—	有	条件付き	鉛直壁
本間ら (1963)	碎波後の波浪	波 (非定常)	—	有	0.73	鉛直壁
富永・九津見 (1971)				有	1.91	鉛直壁
林・松富 (1977)	非碎波津波のサージ	波 (非定常)	—	有	0~0.5 以上	津波水門
松富 (1991)	碎波段波	ゲート急開流れ (準定常)	$F_r=0.8\sim 1.7$	有	条件付き	鉛直壁
福岡ら (1997)	河川の氾濫流	定常流	$F_r=0.55\sim 0.57$	無	—	建物
飯塚・松富 (2000)	段波の氾濫流	ゲート急開流れ (準定常)	常流~射流	有	0.3~1.4	建物
朝倉ら (2000)	正弦波の氾濫流	流量調節	$F_r=2.0$	無	条件付き	建物
池野・田中 (2003)	段波の氾濫流	ゲート急開流れ (非定常)	$F_r=2.4$	無	—	建物
松富ら (2004)	段波の氾濫流	ゲート急開流れ (準定常)	常流~射流	有	0.73~1.91	建物
河原ら (2009)	河川の氾濫流	ゲート急開流れ (非定常)	常流~射流	無	—	建物
齋藤ら (2009)	高波の氾濫流	数値波動水槽 (非定常)	—	有	図示のみ	副堤
森ら (2013)	津波の氾濫流	押し波 (非定常)	射流	有	0~0.48	建物

## 定常・非定常流



## 3. 氾濫水密度の影響

**密度**

奥が深い!

宮古中心部(上)

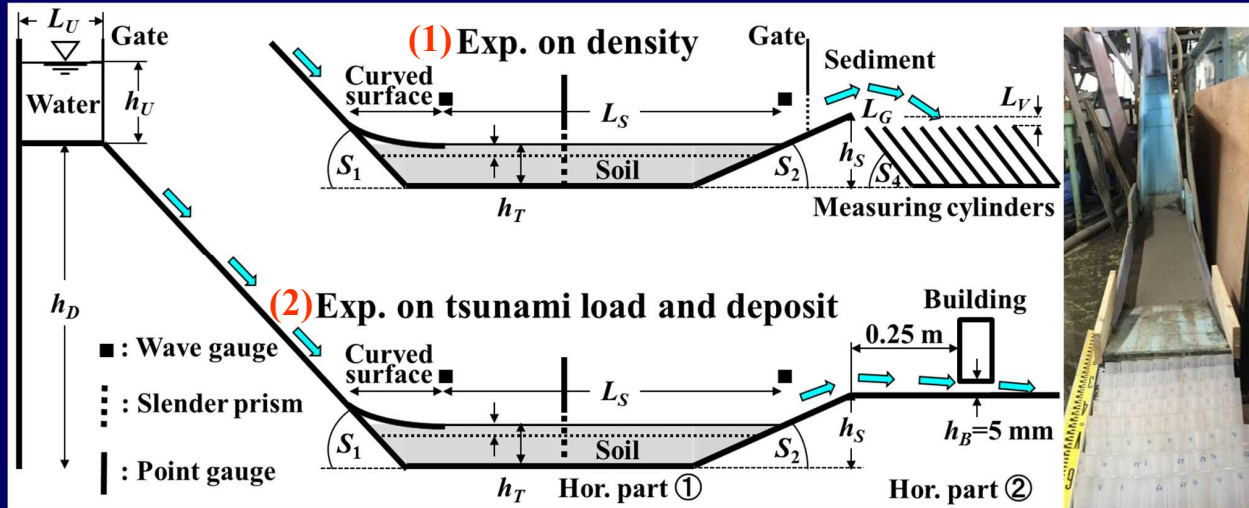
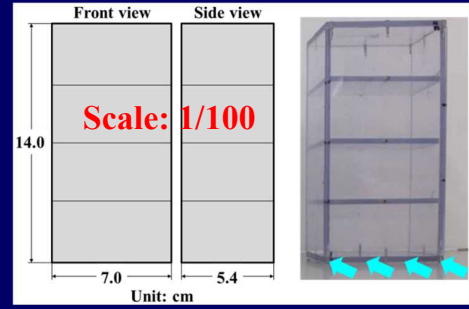


### ◆津波荷重評価の高度化

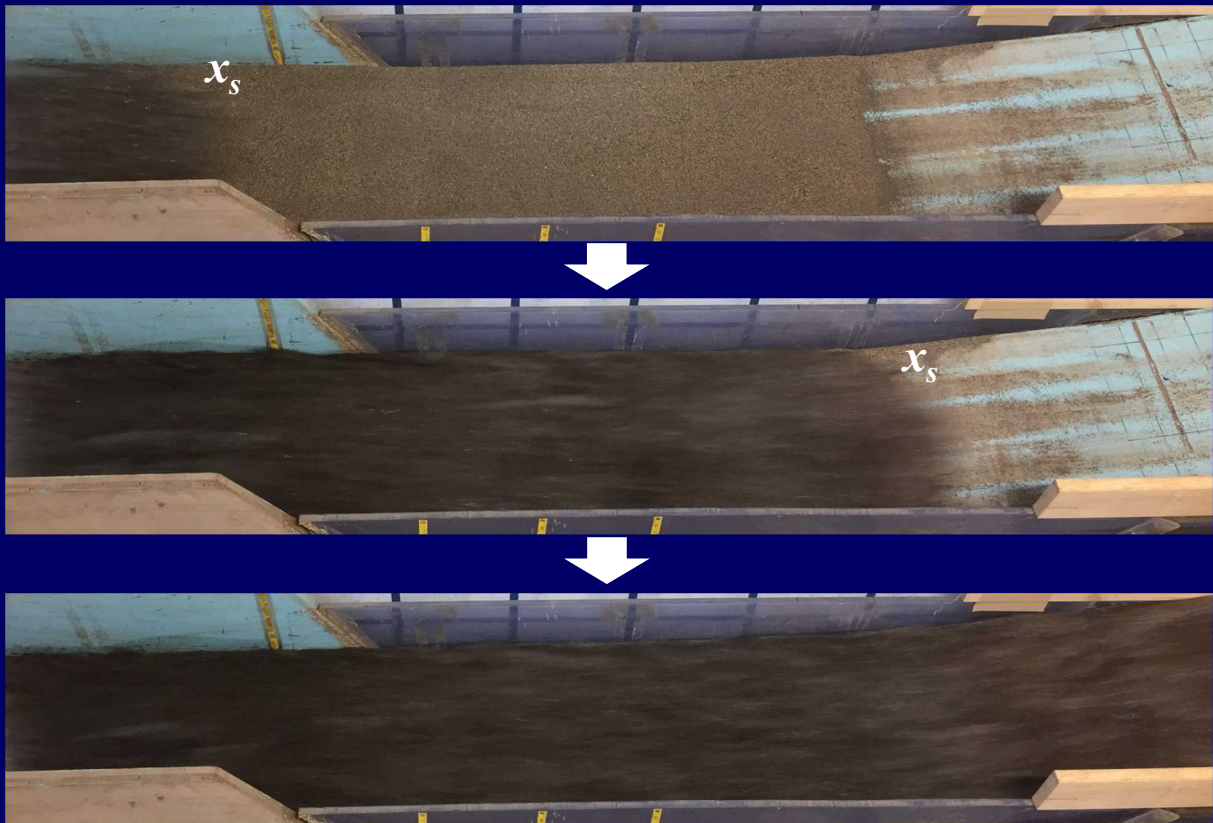
### ◆津波規模評価の高度化

- ・ 氾濫水密度  $\rho$  の入射フルード数  $F_{ri}$  への依存性
- ・ 津波遡上距離  $L_R$ , 土砂堆積距離  $L_{RS}$ , 平均土砂堆積厚  $Z$  の氾濫水密度  $\rho$  への依存性
- ・ 津波荷重 ( $F_x, F_y$ ) の氾濫水密度  $\rho$  への依存性

# ◆ 実 験

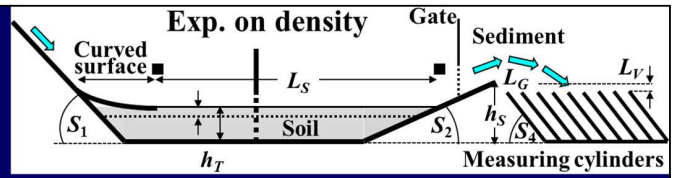


実験水路の概略、測定器具の配置と諸記号の定義

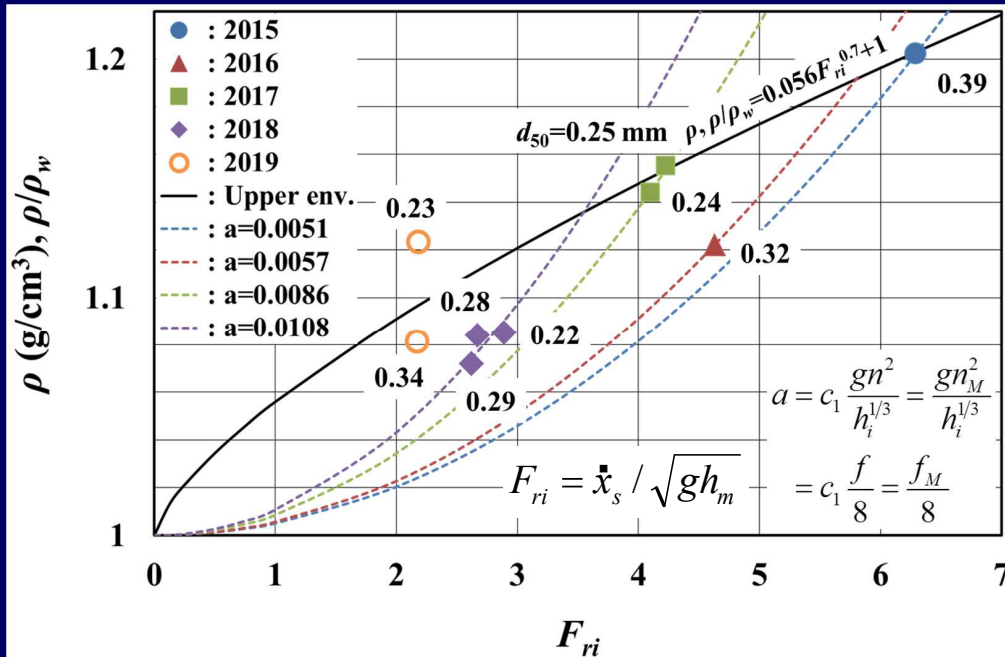


大量の土砂を含んだ氾濫流例 ( $L_s=0.85$  m,  $h_T=6$  cm: 初期の実験)

# ◆ 汜濫水密度 $\rho$

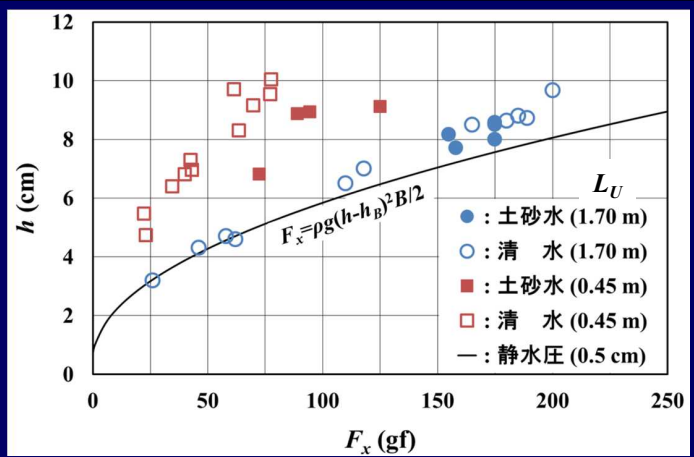
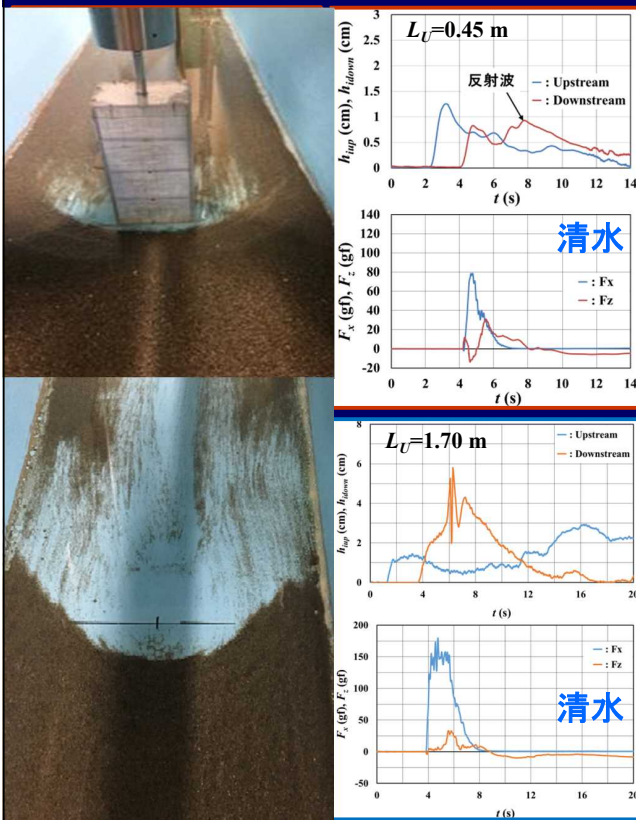


$$\rho = \rho_w (1 + a F_{ri}^2)$$

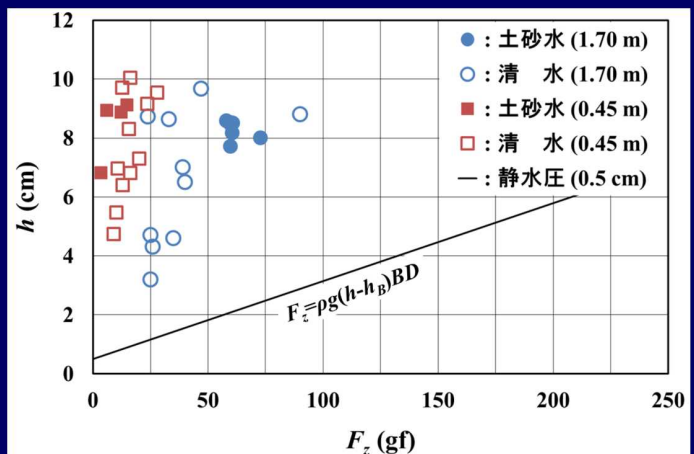


入射フルード数  $F_{ri}$  と汜濫水密度  $\rho$  の関係 ( $h_T=6 \text{ cm}$  に限定)

# ◆ 水平力と鉛直力



水平力  $F_x$  と前面浸水深の関係

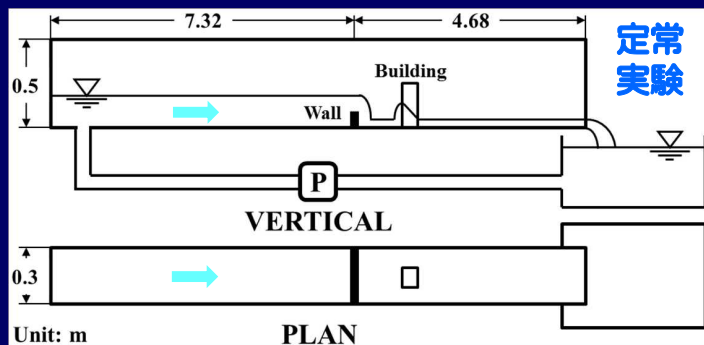


鉛直力  $F_z$  と前面浸水深の関係



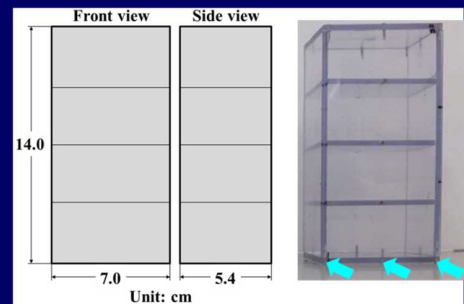
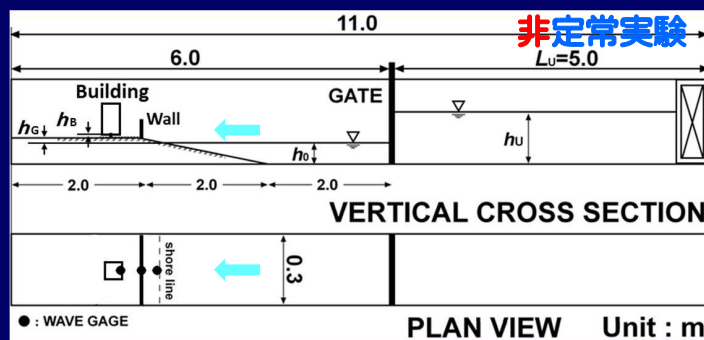
# 4. 非定常性 (波周期) の影響

## ◆ 清水実験



反射段波時の実験状況例

実験水路と胸壁・建築物模型設置位置の概略



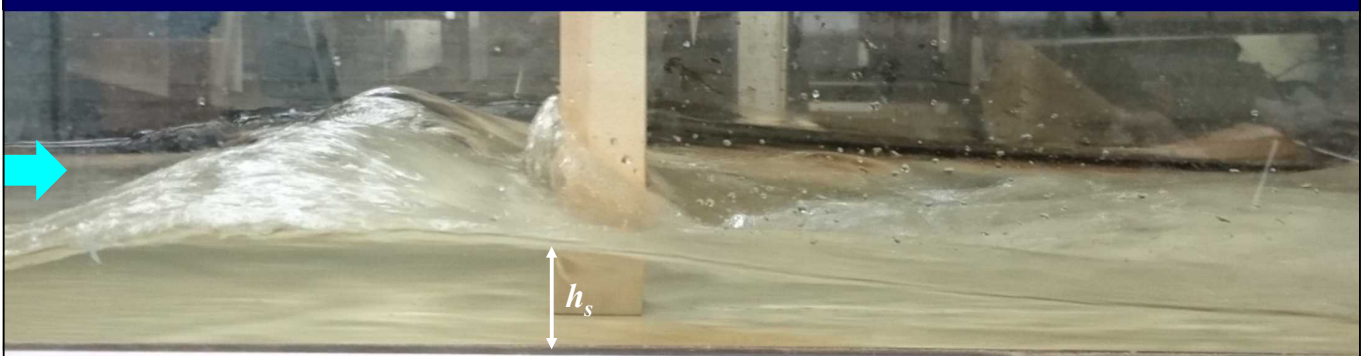
建築物模型の諸元 (開口率  $O_p=0\%$ , 床高  $h_B=5\text{ mm}$ )

実験水路と胸壁・建築物模型設置位置の概略

## ◆ 汜濫流の堰上げ (定常実験)

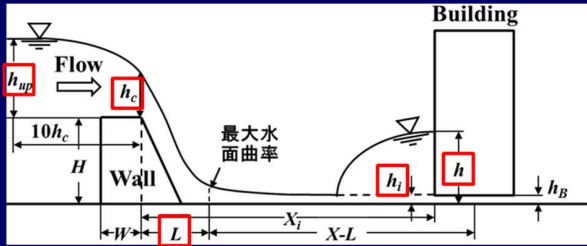


跳水 (孤立) が発生する場合

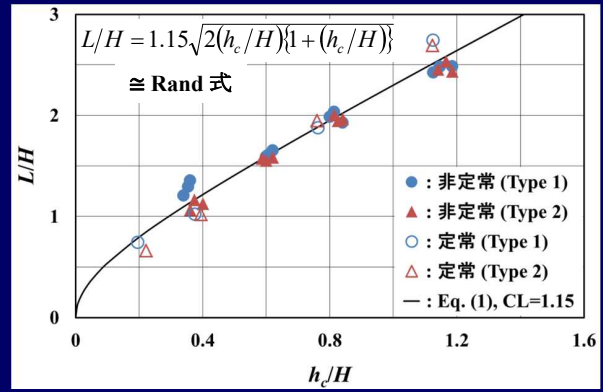


反射段波が発生する場合

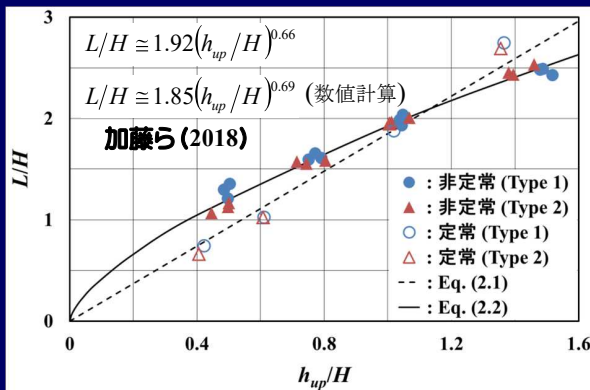
# ◆越流水深と越流水落下位置 $L$



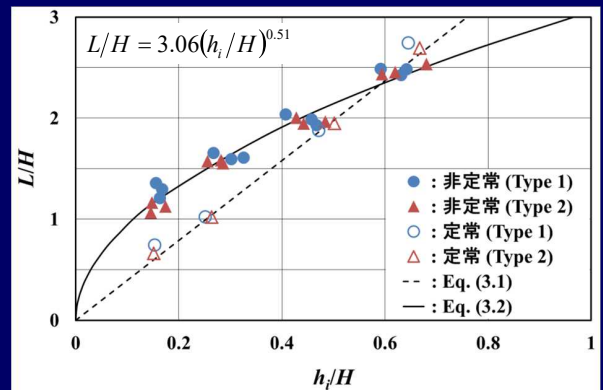
諸記号の定義



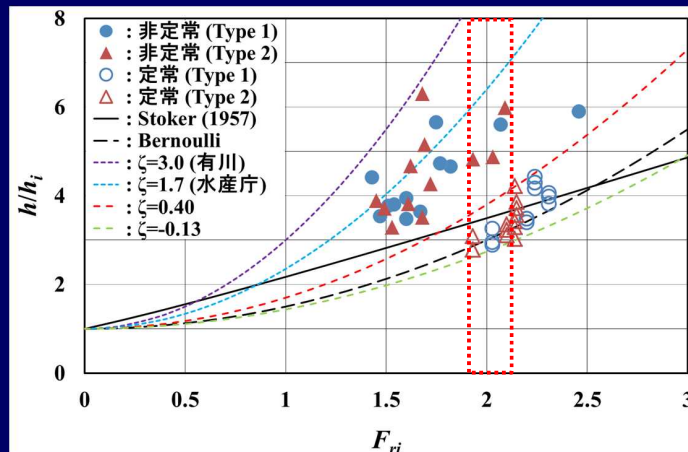
越流水深  $h_c/H$  と落下位置  $L/H$  の関係



越流水深  $h_{up}/H$  (左図) および入射氾濫水深  $h_i/H$  (右図) と落下位置  $L/H$  の関係



# ◆前面浸水深係数 $h/h_i$



入射フルード数  $F_{ri}$  と前面浸水深係数  $h/h_i$  の関係例

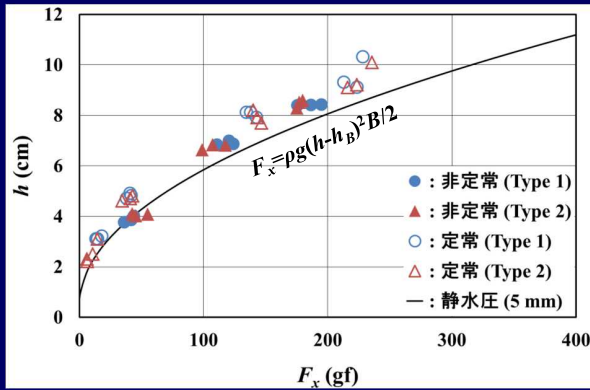
$$\frac{h}{h_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 + \zeta - \left( \frac{u_f}{u_i} \right)^2 \right\} F_{ri}^2$$

既往の入射フルード数と前面浸水深係数の関係式 (有川)

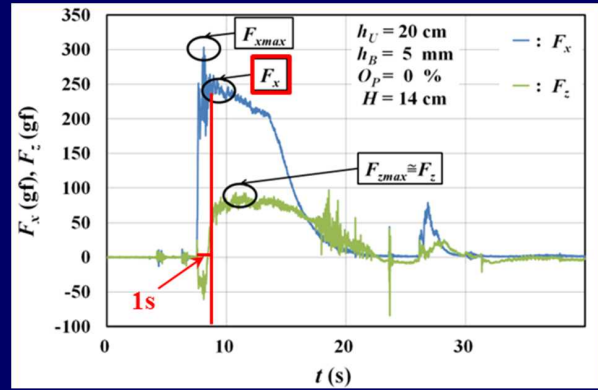
無次元波圧係数 (水深係数)	参照論文
3.0	朝倉ら(2000) <sup>14)</sup>
$1.0+1.2F_{ri}$	Asakura et. al.(2002) <sup>15)</sup>
$1.0+1.3F_{ri}$ 注) 近似式 <b>Stoker (1957)</b>	池谷ら(2013) <sup>18)</sup>
$1.0+1.4F_{ri}$	榊山(2012) <sup>16)</sup> , 大村ら(2014) <sup>19)</sup>
$1.0+0.5F_{ri}^2$	加藤ら(2012) <sup>20)</sup> , 池谷ら(2013) <sup>18)</sup>
$1.0+0.5(1.0+\zeta) F_{ri}^2$ , 注) 建物に対して, $\zeta=0\sim0.8$	松富ら(2013) <sup>21)</sup>
$1.0+0.5(1.0+\zeta) F_{ri}^2$ , $\zeta=1.7$	大村ら(2015) <sup>22)</sup>
$1.0+0.5(1.0+\zeta) F_{ri}^2$ , $\zeta=3.0$	有川(2015) <sup>23)</sup>

\* $\zeta$ は広義のエネルギー損失係数

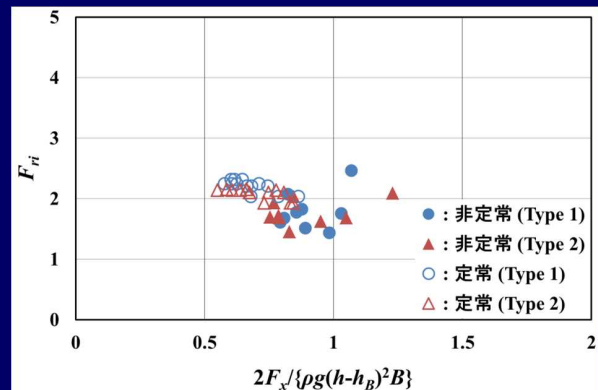
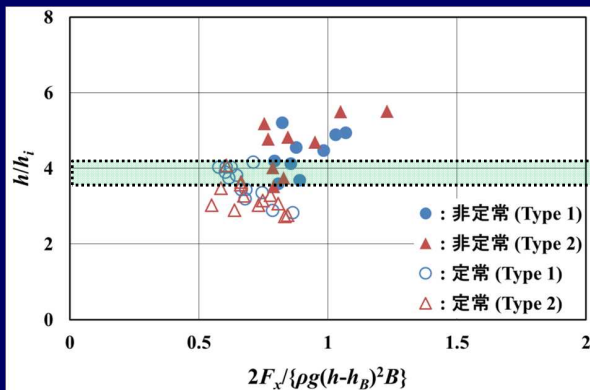
# ◆水平力 $F_x$



水平力と前面浸水深の関係

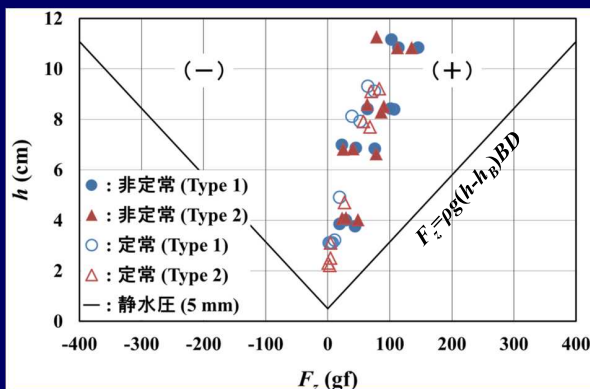


水平力と鉛直力の定義図

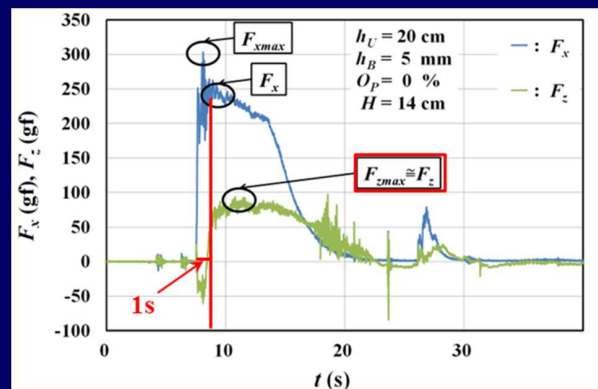


無次元水平力と前面浸水深係数 (左図) および入射フルード数 (右図) の関係

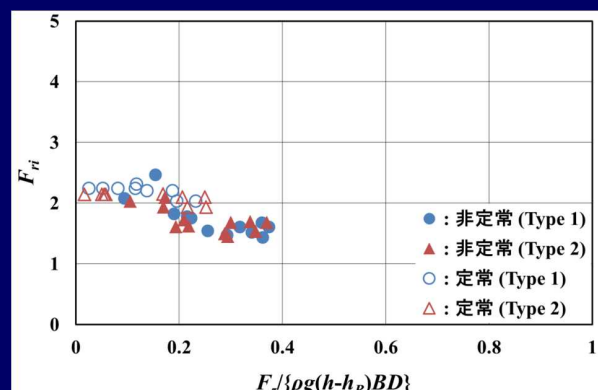
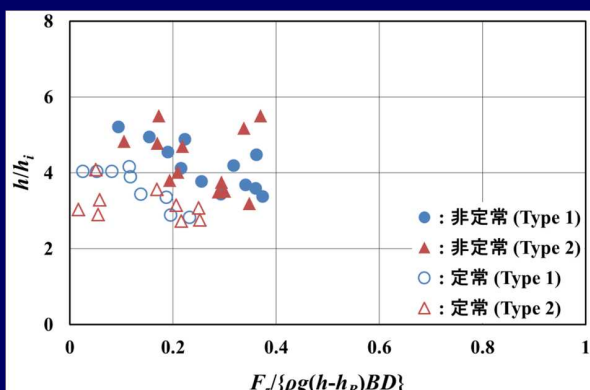
# ◆鉛直力 $F_z$



鉛直力と前面浸水深の関係



水平力と鉛直力の定義図



無次元鉛直力と前面浸水深係数 (左図) および入射フルード数 (右図) の関係

## 5. おわりに

- ◆種々な実験方法（大規模・小規模，定常・非定常，土砂水・清水など）による津波荷重に関する実験結果
- ◆津波実験に関するガイドラインを作成する必要がある（日本地震工学会・津波委員会）
- ◆津波数値実験に関するガイドラインを作成する必要がある（日本建築学会・津波荷重小委員会）
- ◆津波防災施設・地盤・重要建築物システムとして捉える必要があるのでは（木を見て森を見ず）

ご清聴有り難うございました。

# 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

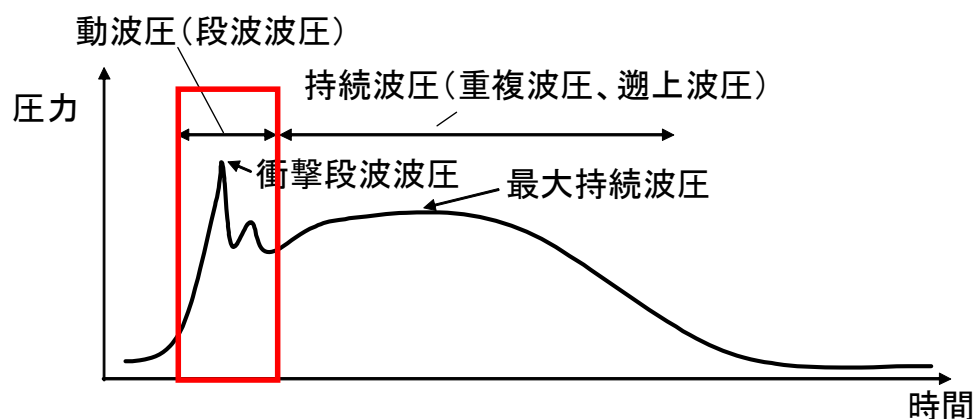


1

## 先端部波圧

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。



2



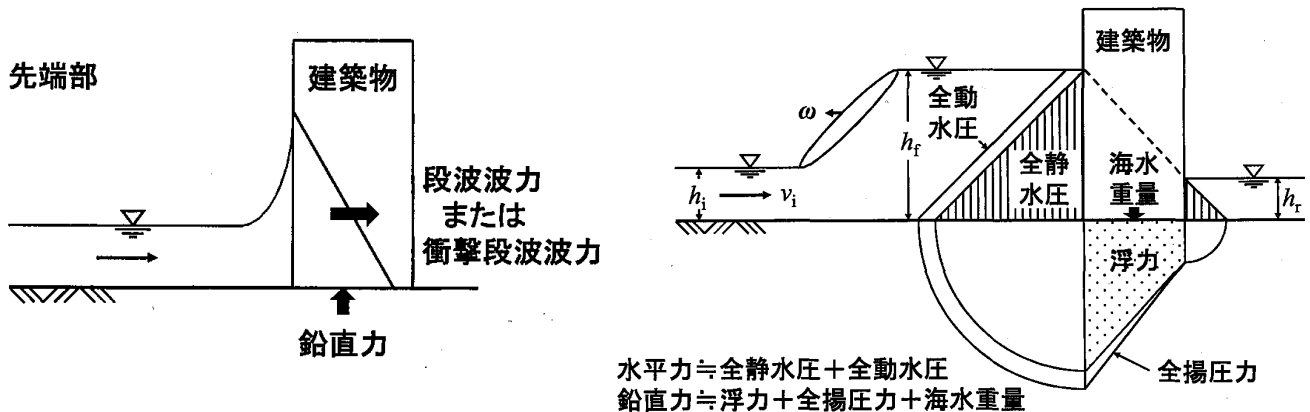
# 津波先端部衝突時に生じる力

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  $\equiv$  全静水圧 + 全動水圧

鉛直力  $\equiv$  浮力 + 全揚圧力 + 海水重量



3

## 各種ガイド・技術集での 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 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（2015）

（時系列水位や流速が得られる場合）

② 設計用浸水深と水深係数 $\alpha$ を用いて算出（一般的）

例えば、建築物荷重指針・同解説（2015）

（時系列水位や流速が得られない場合）

津波避難ビル等の構造上の要件の解説（2012）、  
防波堤の耐津波設計ガイドライン（2013）

4

## 各種ガイド・技術集での 先端部波圧の評価式（その1）

- 建築物荷重指針・同解説（2015）では、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。

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

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

$h$  : 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。

5

## 各種ガイド・技術集での 先端部波圧の評価式（その2）

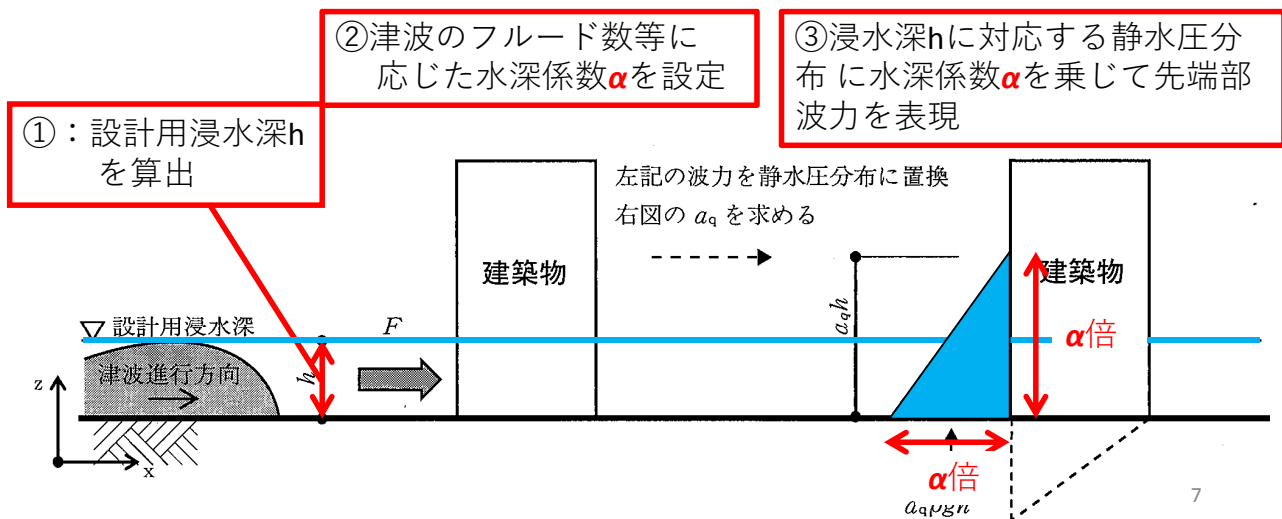
- 構造物前面に作用する津波先端部波力は、設計用浸水深  $h$  と水深係数  $\alpha$  で表現することが多い。

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

$h$  : 設計用浸水深    $z$  : 高さ    $B$  : 施設幅    $\rho$  : 海水密度

# 各種ガイド・技術集での 先端部波圧の評価式（その2）

- 構造物前面に作用する津波先端部波力は、設計用浸水深  $h$  と水深係数  $\alpha$  で表現することが多い。



# 各種ガイド・技術集での 水深係数の評価

文献	水深係数 $\alpha$	文献
建築物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・他の施設により津波波力の軽減が見込まれる場合で海岸から500m以上：<b>1.5</b></li> <li>・他の施設により津波波力の軽減が見込まれる場合で海岸から500mまで：<b>2.0</b></li> <li>・その他の場合：<b>3.0</b></li> </ul>	日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2015）
避難ビル		国土技術政策総合研究所・一般社団法人建築性能基準推進協会：津波避難ビル等の構造上の要件の解説（2012）
海洋構造物 (防波堤・護岸)	<b>3.0</b>	国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン（2013）
橋梁	<b>1.6</b>	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（2015）

# 評価の体系化に向けての論点整理

- 論点 1 :

朝倉らによる水深係数**3.0**が多く使用されているのが現状。東北地方太平洋沖地震津波を受けて想定津波規模（＝設計用浸水深）が見直された昨今では、水深係数を一律**3.0**と設定すると、特に沿岸部の構造物の設計外力が非常に大きくなる。

- 論点 2 :

土砂を含んだ津波（密度大）による波力に関する知見が少ない。

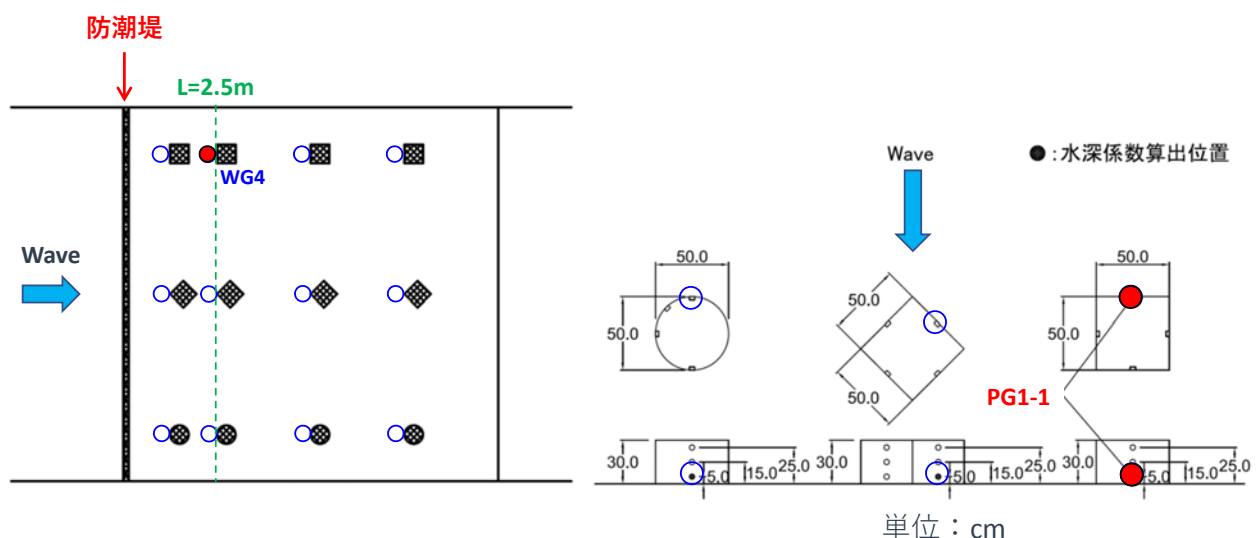
9

## 論点 1 に対する解決策： 数値解析による波圧の直接算出

- 3次元流体解析を実施し、波圧を直接算出する。

事例：CADMAS-SURF/3D を用いた防潮堤背後の建屋に作用する津波力の検討

大家・有川（2014）、土木学会論文集B2（海岸工学）Vol.70, No.2, 2014



10

# 論点 1 に対する解決策： 数値解析による波圧の直接算出

## 再現結果整理

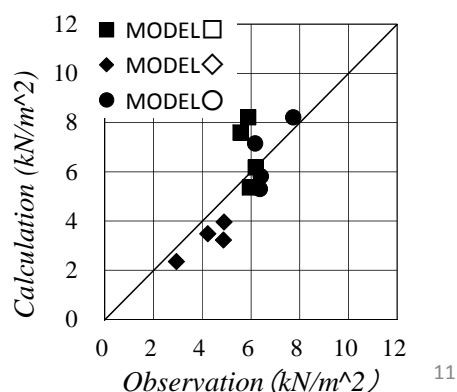
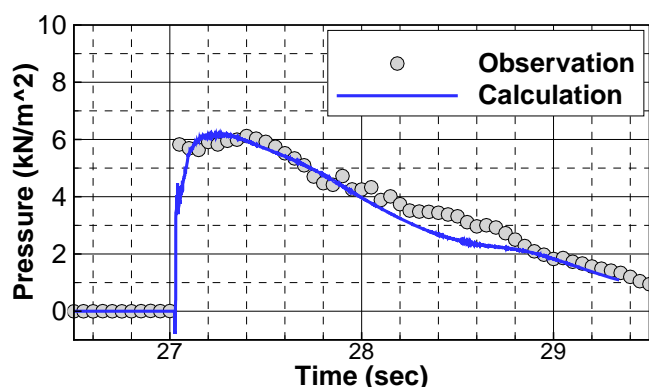
### ■ 水位

- ・ 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**



11

# 論点 1 に対する解決策： 水深係数 $\alpha$ の変化傾向の把握

- 全ての施設の設計において3次元流体解析を実施するのはハードルが高い。
- 事前に津波波形、地形勾配・遡上距離及び水深係数の関係を把握しておけば、適切な水深係数での設計が可能となることが期待される。
- 水深係数 $\alpha$ は、事前の数値計算で算出したフルード数 $Fr$ から、例えば以下のように算出する。

$$\alpha = 1 + \frac{Fr^2}{2}$$

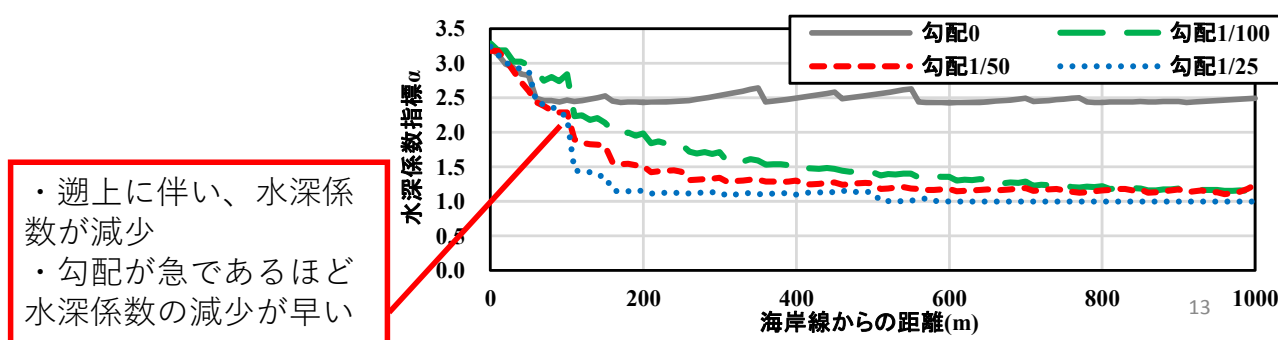
※建築物荷重指針・同解説（2015）に記載の関係式に基づく

## 論点 1 に対する解決策： 水深係数 $\alpha$ の変化傾向の把握

- 数値計算から得られたFrを基に算出した水深係数 $\alpha$ と、津波波形及び地形勾配・遡上距離との関係例を示す。

事例：海岸線からの距離及び標高による津波波力の低減に関する研究  
その2 津波の非先端部を対象とした解析結果  
大家ら（2018）、2018年度 日本建築学会大会

- 陸地勾配0のケースでは、内陸部へ遡上しても $\alpha$ は大きく変化しない。
- 勾配1/100～1/25のケースでは、内陸に遡上するほど $\alpha$ の値が小さくなる。



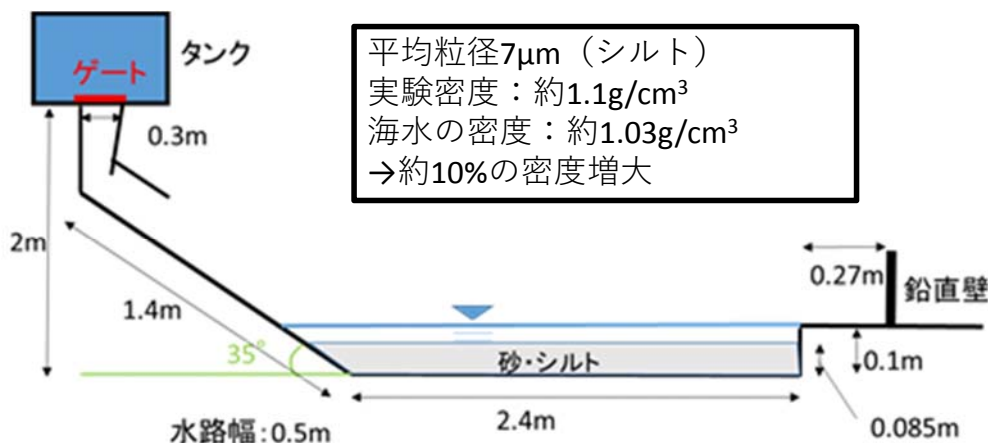
## 論点 2 に対する解決策： 実験による土砂を含んだ津波の波力増大傾向の把握

- 土砂の有無による津波波力を比較することで、土砂を含んだ津波の波力の増大傾向を把握する。

事例：土砂を含んだ津波の波力に関する実験的研究

木瀬（2019）、中央大学海岸・港湾研究室、卒業論文資料

料

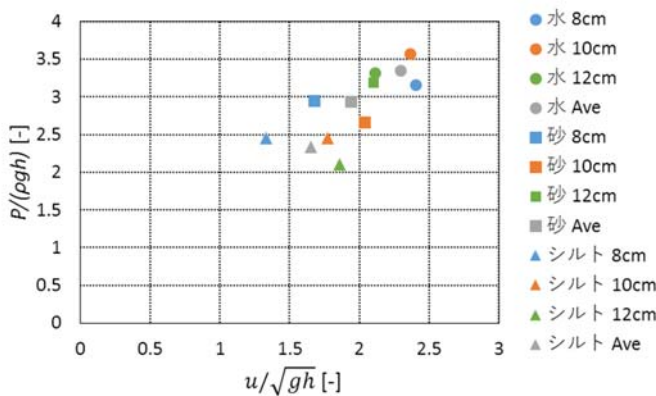


## 論点2に対する解決策：

### 実験による土砂を含んだ津波の波力増大傾向の把握

- 横軸：最大波高時の流速を用いたフルード数
- 縦軸：最大波圧を静水圧で除した無次元最大波圧
- 密度で除しているが傾きは変わらない

→今回の実験範囲では、波圧は密度に比例する。



		フルード数平均	無次元圧力	傾き
水	8cm	2.404	3.164	1.316
水	10cm	2.362	3.577	1.514
水	12cm	2.112	3.315	1.570
水	Ave	2.293	3.352	1.462
砂	8cm	1.676	2.946	1.758
砂	10cm	2.035	2.667	1.311
砂	12cm	2.098	3.192	1.522
砂	Ave	1.936	2.935	1.516
シルト	8cm	1.333	2.455	1.842
シルト	10cm	1.774	2.456	1.385
シルト	12cm	1.857	2.104	1.133
シルト	Ave	1.655	2.338	1.413

15

## まとめ

- 津波先端部波力の評価に当たり、水深係数 $\alpha$ の変化傾向についての知見を充実していくことで、適切な水深係数による設計を行えることが期待される。
- 将来的には、数値解析による波力の直接算定が可能となることが期待される。ただし、実務への適用のためには、空間解像度や各種パラメータと計算精度の関係を収集・整理し、設計時の留意点を整理したマニュアル類を整備する必要がある。
- 今回紹介した実験では、津波波圧が密度に比例することを確認した。ただし、より高密度の津波に対して同様の関係が成立するか、検証が必要。  
(松富ら (2015) によれば、津波氾濫流の密度は  $1.2\text{g/cm}^3$  に到達しうる)

16



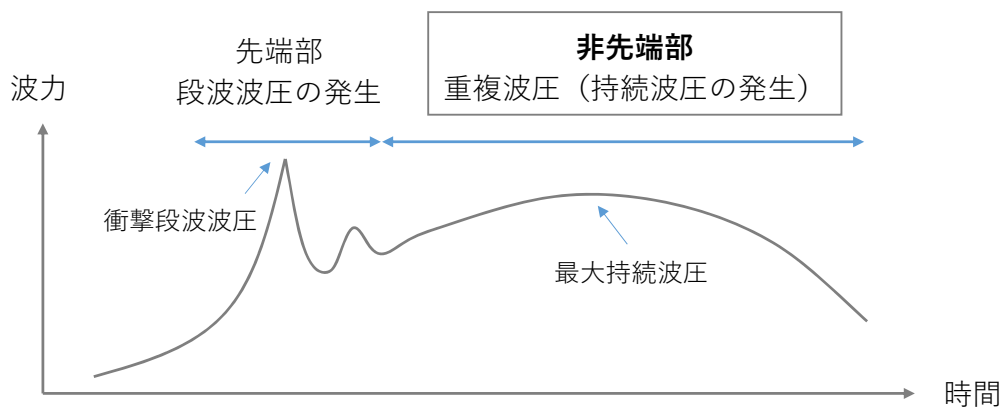
# 津波波圧の評価

## －非先端部荷重－

株式会社構造計画研究所 奥野峻也

### 津波非先端部の定義

- 先端部
  - 津波が構造物に到達した際に衝撃的な波力や波圧が発生する領域
  - 作用時間は短いがスパイク状の大きな波圧、段波波圧の発生
- 非先端部
  - 先端部の後に継続する定常流れに近い領域
  - 作用時間の長い定常的な波圧、重複波圧（持続波圧）の発生





# 対象とする荷重の種類

## ▶ 水平荷重

- ▶ 重複波力（持続波力）：波圧分布を陽に仮定する算定式を対象
  - ▶ 実際には波圧分布を積分することで荷重を算定可能
- ▶ 抗力：抗力の考え方をを用いる算定式を対象
  - ▶ 実際には等価な静水圧分布により波圧を算定可能

## ▶ 鉛直荷重

- ▶ 浮力：没入体積重心に作用する静水圧相当を基本
  - ▶ 全揚圧力：動水圧相当の力、構造物の特性により適切に考慮
- ※適宜海水重量による上載荷重を考慮する必要がある

対象構造物	出展資料（基準・ガイドライン）	発行者	発行年	抗力	揚圧力	浮力
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等の被害分析小委員会	2015.8	○	○	-
原子力 (胸壁,建築物)	原子力発電所耐津波設計技術規定 JEAC4629-2014	(社)日本電気協会 / 原子力規格委員会	2015.8	○	-	-
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※1	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	-	-	○
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	○	○	○
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・一般社団法人建築性能基準推進協会	2012.2	-	-	○
建築物一般	建築物荷重指針・同解説(2015)	日本建築学会	2015.2	○	○	○
避難施設 (港湾)	港湾の津波避難施設の設計ガイドライン	国土交通省港湾局	2013.10	○	-	○
その他	Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis.	FEMA※2	2008.6	○	○	○

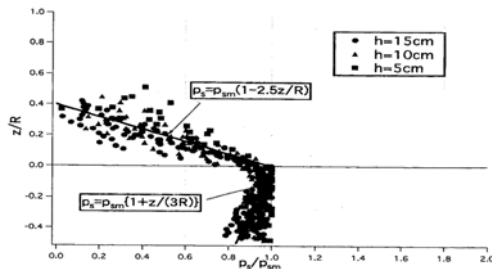
※1 構造躯体に関しては、「津波避難ビル等の構造上の要件の解説、国土交通省国土技術政策総合研究所・一般社団法人建築性能基準推進協会、平成 24 年 2 月」を参考

※2 Federal Emergency Management Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration

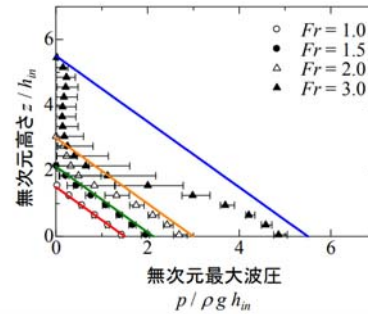
# 水平荷重：重複波力（持続波力）

津波の非先端部が構造物に作用する時の波圧分布は、海水密度・浸水深・流速を用いて鉛直方向に対し線形（または区分線形）の関数で算定する

- ▶ 基本的には構造物最下端を最大とした三角形の波圧分布を仮定する
- ▶ 原子力（胸壁）に関しては、傾斜構造物に対する実験結果※1を元に静水位位置の波圧が最大となる区分線形関数を適用する



原子力（胸壁）における波圧分布（※1より）



原子力（建築物）における波圧分布（※2より）

※1 水谷将・今村文彦：構造物に作用する段波波力の実験，海岸工学論文集，第47巻，pp.946-950 (2000)

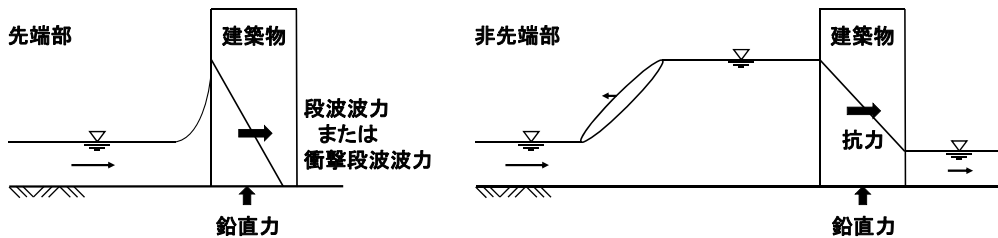
※2 木原直人・高島大輔・吉井匠・池野正明・太田一行・田中伸和：陸上構造物に対する津波流体力評価（その1）—有限幅構造物に対する非越流条件での数値的検討—，電力中央研究所報告，N12010，pp.21-24 (2012)

対象構造物	算定式
原子力（胸壁）	<p>・ 持続波圧（最大・鉛直分布）の評価式 （最大持続波圧）</p> $p_{sm} = 0.14(2 + \sin \theta) \cdot p_{dm} \frac{c^2}{gh} \quad (0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ)$ $p_{sm} = 0.38 p_{dm} \frac{c^2}{gH} \quad (45^\circ \leq \theta)$ <p><math>p_{sm}</math>：最大持続波圧、<math>p_{dm}</math>：最大動波圧、<math>c</math>：段波の波速、<math>\theta</math>：構造物の水平面からの傾斜勾配角度、<math>H</math>：津波段波振幅 （持続波圧の鉛直分布）</p> $p_s(z) = p_{sm} \left(1 - 2.5 \frac{z}{R}\right) \quad \left(\frac{z}{R} \geq 0\right)$ $p_s(z) = p_{sm} \left(1 + \frac{z}{3R}\right) \quad \left(\frac{z}{R} \leq 0\right)$ <p><math>R</math>：遡上高、<math>z</math>：静水面上向き正の座標</p>
原子力（建築物）	<p>・ 構造物から津波水深の5倍程度沖側における浸水深と流速を用いる評価式</p> $F = \frac{1}{2} \rho g \left( h_{in} + \frac{u_{in}^2}{2g} \right)^2 W$ $p = \rho g \left( h_{in} + \frac{u_{in}^2}{2g} - z \right)$ <p><math>F</math>：構造物に作用する流体力、<math>p</math>：構造物に作用する圧力の鉛直分布、<math>\rho</math>：流体密度、<math>W</math>：構造物の幅、<math>h_{in}</math>、<math>u_{in}</math>：対象とする構造物から代表的に流入津波水深の5倍程度上流側へ離れた地点での浸水深・流速</p>

# 水平荷重：抗力

津波非先端部が作用する流れ方向の抗力は、海水密度・流速・構造物水没部の鉛直投影面積、および構造物に応じた適切な抗力係数に基づき算定する

- ▶ 波圧分布を求める場合、基本的には作用荷重と等価な静水圧相当の三角形分布を仮定
  - ▶ 建築物の反対側構面に浸水がある場合、静水圧相当を考慮した台形分布となる
- ▶ 流速・浸水深の定義は算定式により異なる点に注意
  - ▶ 流速・浸水深算定時の構造物有無
  - ▶ 「最大値」の考え方（参考：建築物荷重指針・同解説(2015)）



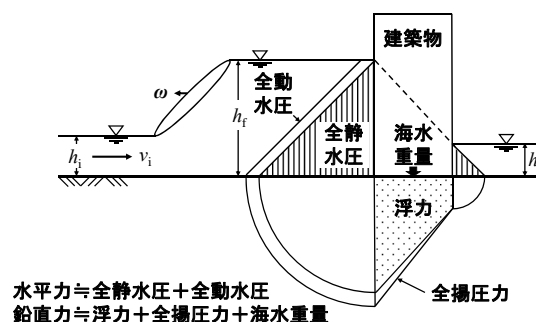
※建築物荷重指針・同解説(2015)より

対象構造物	算定式
橋梁（上部構造）	$F_x = F_{xf} + F_{xw}$ $F_{xf} = \frac{1}{2} \rho C_d v^2 A_h, F_{xw} = \alpha \rho g \eta'_H A_h$ $C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & 1 \leq B/D < 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/D \end{cases}$ <p><math>F_x</math>：水平作用力(N)、<math>F_{xf}</math>：流れによる水平作用力(N)、<math>F_{xw}</math>：擾乱による水平作用力(N)、<math>\rho</math>：海水の密度(=1030kg/m<sup>3</sup>)、<math>g</math>：重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)、<math>C_d</math>：抗力係数、<math>B</math>：橋の総幅(m)、<math>D</math>：橋の総高(m)、<math>v</math>：シミュレーションで得た桁位置における桁が無い場合の最大水平方向流速(m/s)、<math>\alpha</math>：擾乱高さに乗じる係数(=1.9)、<math>A_h</math>：有効鉛直投影面積(m<sup>2</sup>)</p>
原子力（建築物）	$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 A = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 h_f B / g$ $= 0.61 \gamma_w C_D h_f^2 B$ <p><math>F_D</math>：抗力、<math>\rho</math>：流体の密度、<math>C_D</math>：抵抗係数、<math>u</math>：陸上での流速、<math>A</math>：構造物浸水面積、<math>h_f</math>：前面浸水深、<math>B</math>：構造物の幅、<math>\gamma_w</math>：流体の単位体積重量                  ※構造物を考慮した条件での津波遡上解析で流速や浸水深を求めることを想定</p>
建築構造物	<p>・浸水深と流速の時系列が利用できる場合</p> $F_D = \frac{1}{2} \rho C_D (v^2 h_i)_{max}$ <p><math>h_i</math>：入射津波の浸水深(m)、<math>v</math>：津波の非先端部での流速(m/s) ※運動量フラックス最大時を使用</p> <p>・「最大浸水深と最大流速が利用できる場合」および「最大水深が利用できる場合」</p> $F_D = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 h_i B$ <p><math>v</math>：最大流速(m/s)、<math>h_i</math>：入射津波の最大浸水深(m) ※遡上水深と流速が各時系列で最大時を使用</p> <p>・最大浸水深が利用できる場合</p> $h_{im} = \frac{1}{36gt^2 \cos \theta} (2t\sqrt{2gR} - gt^2 \sin \theta - 2x)^2$ $v = \frac{1}{3t} (t\sqrt{2gR} - 2gt^2 \sin \theta + 2x), t = \sqrt{\frac{2x}{g \sin \theta}}$ <p><math>R</math>：遡上高(m)、<math>\theta</math>：斜面勾配</p>

対象構造物	算定式
港湾施設（港湾） 柱状骨組構造物	$\vec{f}_n = \frac{1}{2} C_D \rho_0  \vec{u}_n  \vec{u}_n D \Delta S + C_M P_0 \vec{a}_n A \Delta S$ <p><math>f_n</math>：部材軸方向に微小長さ<math>\Delta S</math>(m)に作用する、部材軸と水粒子運動方向の共通面における部材軸に直角な方向の力(kN)、<math>u_n</math>、<math>a_n</math>：部材と水粒子運動方向の共通面における部材軸直角方向の水粒子速度成分(m/s)及び加速度成分(m/s<sup>2</sup>)、<math>C_D</math>：抗力係数、<math>C_M</math>：慣性力係数、<math>D</math>：<math>f_n</math>の方向から見た部材軸直角方向の部材幅(m)、<math>A</math>：部材実に垂直な面で切った部材断面積(m<sup>2</sup>)、<math>P_0</math>：海水の密度(=1.03t/m<sup>3</sup>)</p>
高压ガス、 その他（FEMA）	$F_d = \frac{1}{2} \rho_s c_d B (hu^2)_{max}$ $(hu^2)_{max} = gR^2 \left\{ 0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 \cdot \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right\}_{max}, R = 1.3 \times R^*$ <p><math>F_d</math>：流体力(N)、<math>\rho_s</math>：海水密度(1200kg/m<sup>3</sup>)、  <math>C_d</math>：形状抵抗係数(推奨値2.0)、<math>B</math>：構造物の幅(m)、<math>h</math>：水深(m)、<math>u</math>：流速(m/s)、<math>R^*</math>：予想された津波の最大遡上高(m)、<math>z</math>：構造物基礎の標高(m)</p>

## 鉛直荷重

- ▶ 鉛直荷重 $F_A$ は、浮力 $F_B$ 、全揚圧力 $F_{UL}$ 、（構造物内部へ流入した）海水荷重 $F_W$ の合力で表現される： $F_A = F_B + F_{UL} - F_W$ 
  - ▶ 実際には津波や構造物、地盤などの実況次第で構成が変わりうる
  - ▶ 指針によっては必ずしも独立に算定されない
- ▶ 本報告においては浮力および全揚圧力に関して取りまとめるが、場合によっては適切な海水荷重を考慮する必要がある
  - ▶ 海水荷重の考慮については建築物荷重指針およびFEMAを参照のこと

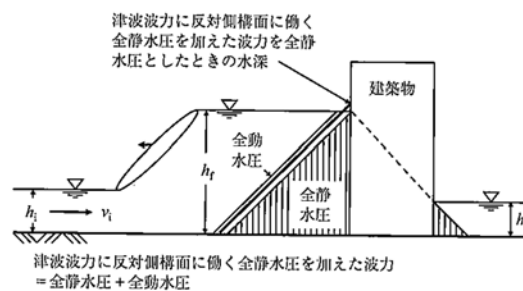


※建築物荷重指針・同解説(2015)より

# 鉛直荷重：浮力

浮力は没水した構造物の体積に作用する静水圧相当の力として算定する

- 橋梁（上部構造）、下水道施設、港湾施設（港湾）、津波避難ビル、高圧ガス、FEMAいずれも没水した構造物体積に海水密度と重力加速度を乗ずる算定式である
- 建築物に関しては、津波作用構面と反対側構面の水位差を陽に考慮した式となっており、また次節で考慮する全揚圧力を含む算定式である（下図）



※建築物荷重指針・同解説(2015)より

11

対象構造物	算定式
橋梁（上部構造）、下水道施設、港湾施設（港湾）、津波避難ビル、高圧ガス、その他（FEMA）	$F_B = \rho g V$ <p><math>\rho</math>：海水密度、<math>V</math>：津波に浸水した建築物の体積</p>
建築構造物	$F_B = \frac{1}{2} \rho g (h_f + h_r) A$ <p><math>h_f</math>：津波作用構面における浸水深(m)、<math>h_r</math>：反対側構面における浸水深(m)  <math>A</math>：建築物の水没部の水平投影面積 (m<sup>2</sup>)</p> <p>※<math>h_f</math>は同指針の段波波力および非先端部の波力算定式に、反対側構面に働く全静水圧を加えた波力を全静水圧としたときの水深のうち、最大のものを採用。<math>h_f</math>は、浸水深・流速の時系列が利用できる場合は<math>h_f</math>発生時の入射津波の浸水深を、それ以外の場合は入射津波の最大浸水深を採用。ただし、反対側構面のすぐ背後が崖などの場合は<math>h_f = h_r</math>。</p>

12

# 鉛直荷重：全揚圧力

全揚圧力は動水圧に起因する鉛直上向きの力であり、  
構造物の形状に応じて適切に考慮する

- 橋梁（上部構造）、FEMAおよび高圧ガスでは水位上昇時における構造物上部への抗力として考慮する
  - 橋梁では波面の擾乱による作用力を想定し、同報告書の段波波力と同一の式に基づき算出する
  - FEMAおよび同指針を採用した高圧ガスでは、流体の鉛直方向流速と構造物上部の作用面積から、抗力係数を用いて算出する
- 建築物では、全揚圧力の圧力分布として津波作用構面で最大、反対側構面で零の三角形分布を仮定し算出する
  - 同指針の浮力算出時に動水圧を考慮した浸水深を用いるため、同指針の浮力を採用するならば新たに全揚圧力を考える必要はない

13

対象構造物	算定式
橋梁（上部構造）	$F_{zw} = \rho g (\beta \eta'_H) A_v$ <p><math>F_z</math>：鉛直作用力(N)、<math>F_f</math>：流れによる鉛直作用力(N)、<math>F_{zw}</math>：擾乱による鉛直作用力(N)、<math>\rho</math>：海水密度(=1030kg/m<sup>3</sup>)、<math>g</math>：重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)、<math>B</math>：上部構造の体積(m<sup>3</sup>)、<math>\eta'_H</math>：擾乱高さ(m)、<math>\beta</math>：擾乱高さに乗じる係数(=0.53)、<math>A_v</math>：有効水平投影面積(m<sup>2</sup>) ※橋脚や橋台については考慮しない</p>
建築構造物	同指針の津波先端部の評価方法に同じ。同指針の浮力はいずれの算定フローにおいても全揚圧力を含み、新たに全揚圧力を足し合わせる必要はない。
高圧ガス、 その他（FEMA）	$F_u = \frac{1}{2} C_u \rho_s A_f u_v^2,$ $u_v = u \tan \alpha.$ <p><math>F_u</math>：構造物に働く上向き流体力、<math>\rho_s</math>：海水密度、<math>A_f</math>：床面積、<math>u_v</math>：流体の垂直方向速度又は上昇速度、<math>C_u</math>：定数(通常3.0)、<math>u</math>：流体の水平速度、<math>\alpha</math>：地面の傾斜角</p>

14

# 評価の体系化に向けての論点整理

- 論点1：各種構造物に対応する抗力係数が体系的に整理されていない
- 論点2：荷重算定のために津波シミュレーションを要求する算定式が多い

15

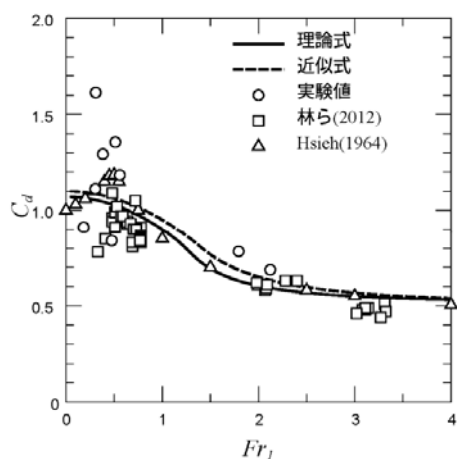
## 論点1：各種構造物に対応する抗力係数が体系的に整理されていない

- 各種構造物の形状に応じた抗力係数が示されていない場合がある
- 抗力係数算定時の水位・流速の条件が必ずしも統一されていない
  - 通過波・非通過波、運動量フラックス最大時、流速最大時など
- 通常抗力係数は実験に基づき算定されるが、津波シミュレーションの水位・流速を代入して得られた荷重の妥当性は検証されていない
- 抗力係数の適用範囲（フルード数など）が明確でない場合も
- 付加質量係数とその考慮の必要性

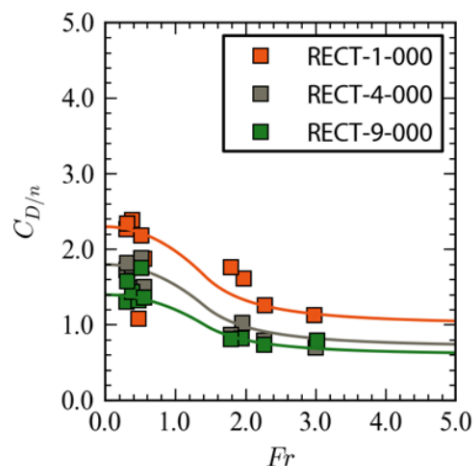
16

## 抗力係数のフルード数、構造物設置条件への依存性

- ▶ 実際には抗力係数はフルード数、柱の設置条件等に依存
  - ▶ フルード数の増大に伴い抗力係数は低減する
  - ▶ 柱の本数、設置位置により抗力係数は異なる



円柱の抗力係数とフルード数  
池谷ら (2014)



角柱の設置数と抗力係数  
末長ら (2014)

17

## 論点 2：津波荷重算定のために津波シミュレーションを要求する算定式が多い

- ▶ 多くの算定式で水位・流速の時系列（または最大値）を必要とする
  - ▶ 通常、任意地点の時系列データは入手できないため荷重算定のために津波シミュレーションが必要となる
- ▶ そもそもシミュレーションによる流速のばらつきはどの程度か？
- ▶ 津波荷重は想定される多くの荷重の中の一部に過ぎず、実務では（重要インフラ構造物を除き）津波荷重算定のためだけに津波シミュレーションを行うのは現実的でない場合も多い

18



## 論点 2：津波荷重算定のために津波シミュレーションを要求する指針が多い

- 結果的に通過波・非通過波、先端部・非先端部を区別せずハザードマップの浸水深に水深係数3を適用してしまう事例も
- 建築学会の荷重指針のように、得られる情報に依存した算定フローが好ましい
- 共通フォーマットによる津波シミュレーションの時空間データ共有など

19

## まとめ

- 各種構造物に応じた適切な抗力係数とその適用範囲の整理が望まれる
- 津波シミュレーションを前提とした算定式だけでなく、入手できる情報に応じた算定ルートが望まれる
- 津波シミュレーションや算定式のばらつき、施設の重要性を加味した算定式の整理が望まれる

20

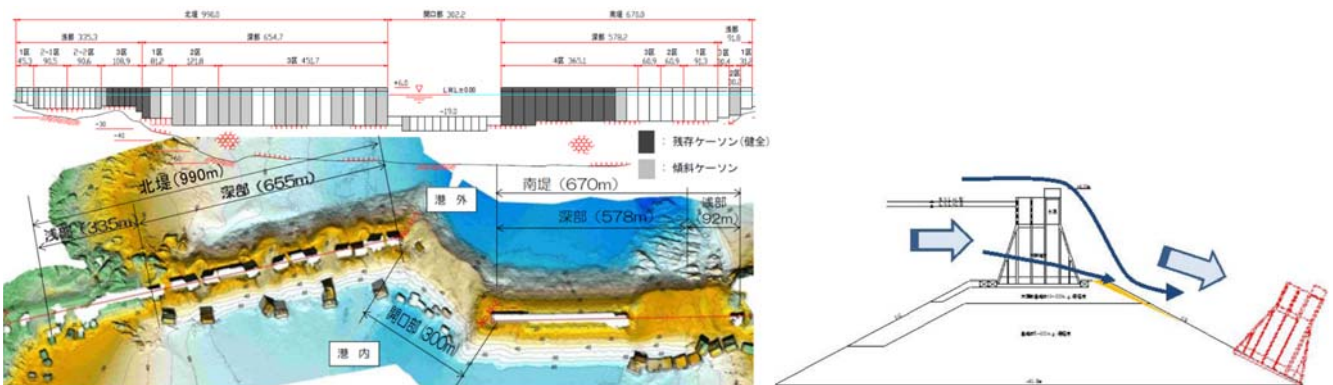
# 津波波圧の評価 －越流時荷重－

防衛大学校 鳴原良典



## 防波堤の被災事例 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)



# 防波堤の被災事例 福島第1原発

「出典：東京電力ホールディングス」



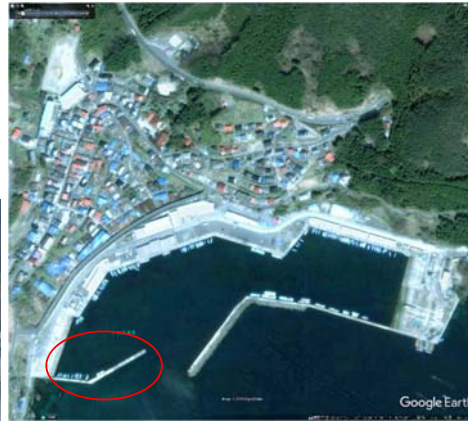
砕波段波の衝突もしくは越流後の準定常流により被災

# 防波堤の被災事例 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

# 防潮堤の被災事例 釜石市唐丹小白浜



津波前  
2005/4/27



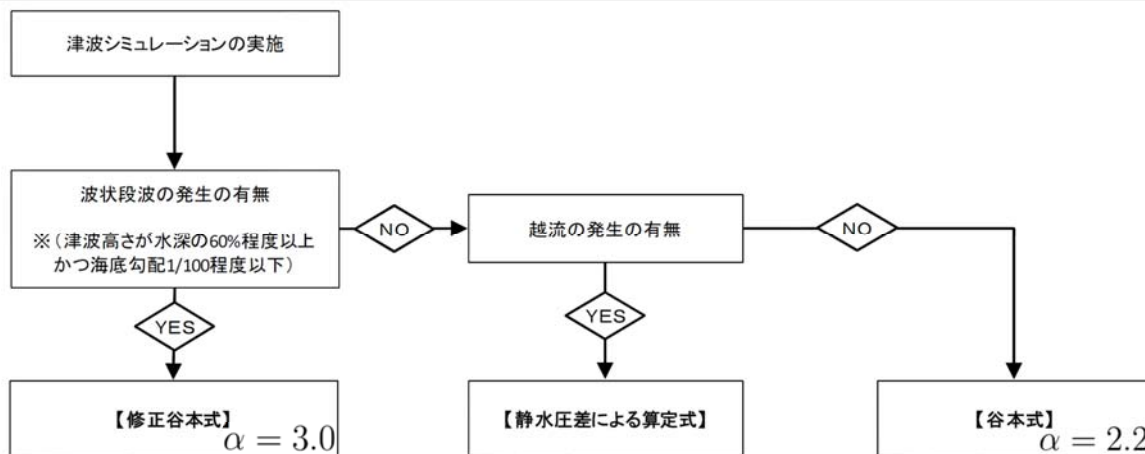
津波後  
2011/4/1

## 各種ガイド・技術集での越流時荷重の評価

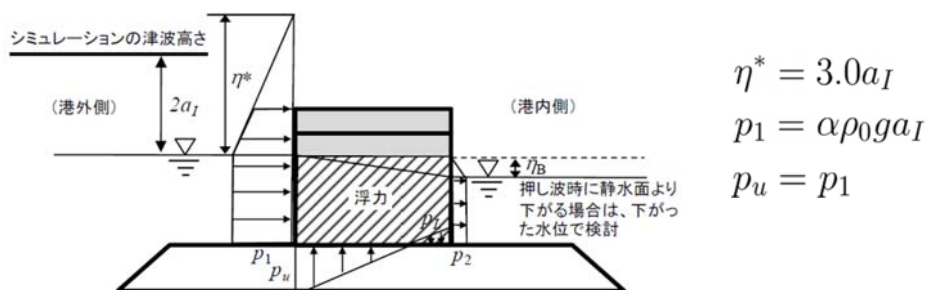
文献	機関・発行年	対象構造物	記載されている評価項目
防波堤の耐津波設計ガイドライン	国交省 港湾局 2013	防波堤	<ul style="list-style-type: none"> <li>防波堤に対する津波波力の算定(波状段波, 越流なし, 越流有). <b>静水圧差による算定式</b></li> <li>直立部(ケーソン)の滑動, 転倒および基礎地盤の支持力の安定性評価方法</li> </ul>
漁港・漁場の施設の設計参考図書	水産庁 2015	防波堤	<ul style="list-style-type: none"> <li>防波堤に対する津波波力の算定(波状段波, 越流なし, 越流有). <b>水工研式</b></li> <li>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)</li> </ul>
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"> <li>胸壁の全体安定性に対する検証手順の詳解</li> <li>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</li> </ul>
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"> <li>胸壁に対する津波波力の算定(非越流時, 越流時)</li> <li>波力算定式の選択フロー付</li> <li>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.</li> </ul>



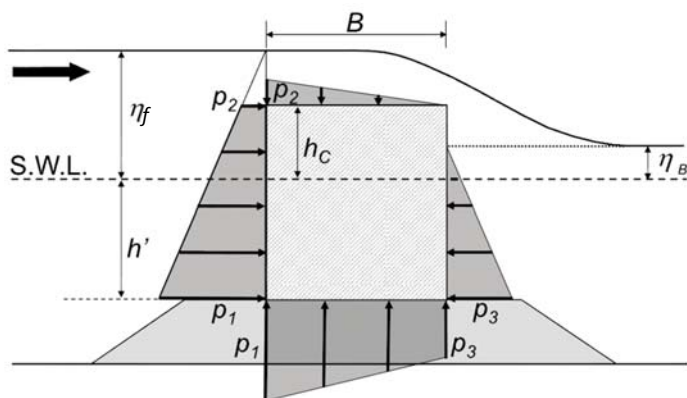
# 防波堤の耐津波設計ガイドライン(国交省港湾局,2013)



## 越流しない場合の波圧算定式



## 越流する場合: 静水圧差による算定式



### 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)

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

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

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

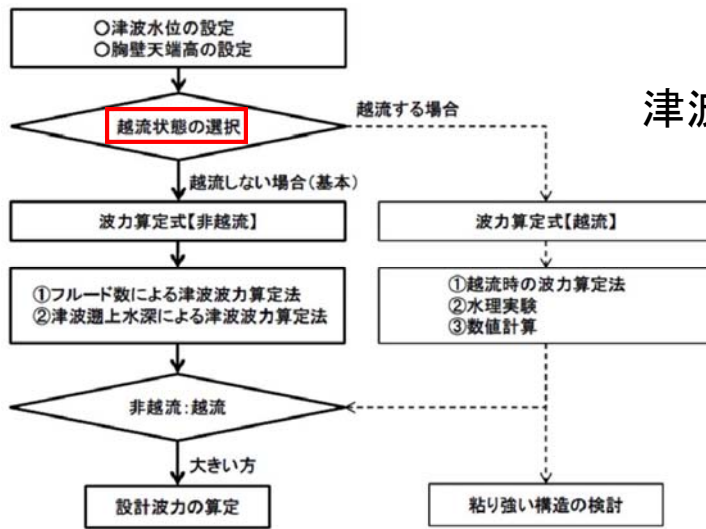
補正係数(動水圧による影響)

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

背面側:  $\alpha_r = 0.9$

- 波圧は静水圧分布として問題ない?
- 補正係数もこれで十分?
- 隅角部や堤端部などの局所的な箇所の評価手法が不十分

# 陸上構造物を越流する津波荷重の評価

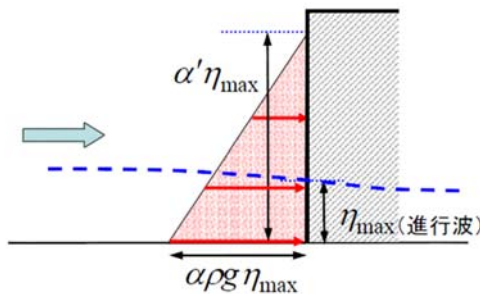


## 津波波力算定の基本的考え方

- 原則として胸壁を津波が越流しない場合とする
- 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

## 越流しない場合

通過波水深・流速を使用する場合

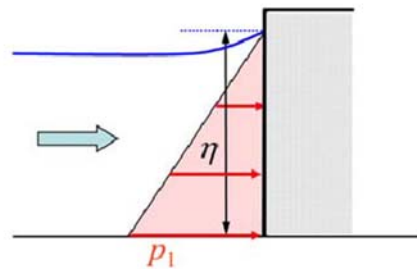


$$\frac{p}{\rho g \eta_{max}} = \alpha \left( 1 - \frac{Z}{\alpha' \eta_{max}} \right) \quad 0 \leq \frac{Z}{\eta_{max}} \leq \alpha'$$

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

- 無次元作用高 $\alpha'$ の最大は3
- $Fr$ が1.5を超える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

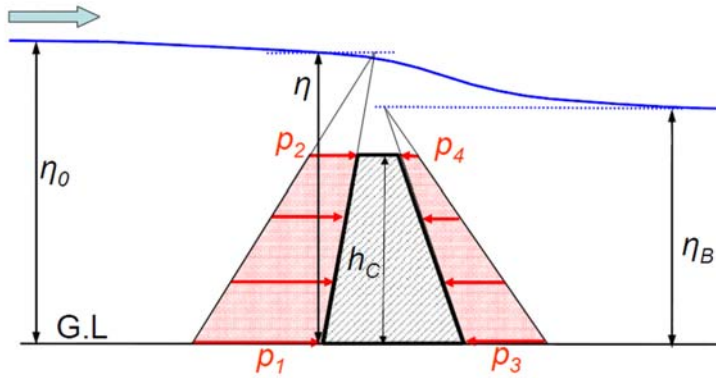
胸壁を考慮した状態の津波高を使用する場合



$$p_1 = \rho g \eta \times a_I \quad a_I = 1.1$$

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

# 越流する場合



基本的には  
静水圧 × 波圧係数  
として算定

前面

$$p_1 = \rho g \eta \times a_{I1}$$

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

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

$$a_{I1} = -0.17h_c/\eta + 1.27 \quad (0.4 \leq h_c/\eta < 1.0)$$

$$a_{I1} = 1.1 \quad (\text{沖合水深 } \eta_0 \text{ を使用})$$

背面

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

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

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

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

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

## 評価の体系化に向けての論点整理

- 論点1:

越流する構造物に作用する波圧分布は静水圧分布で十分？

防波堤の補正係数は前面側1.05, 背面側0.9として問題ない？

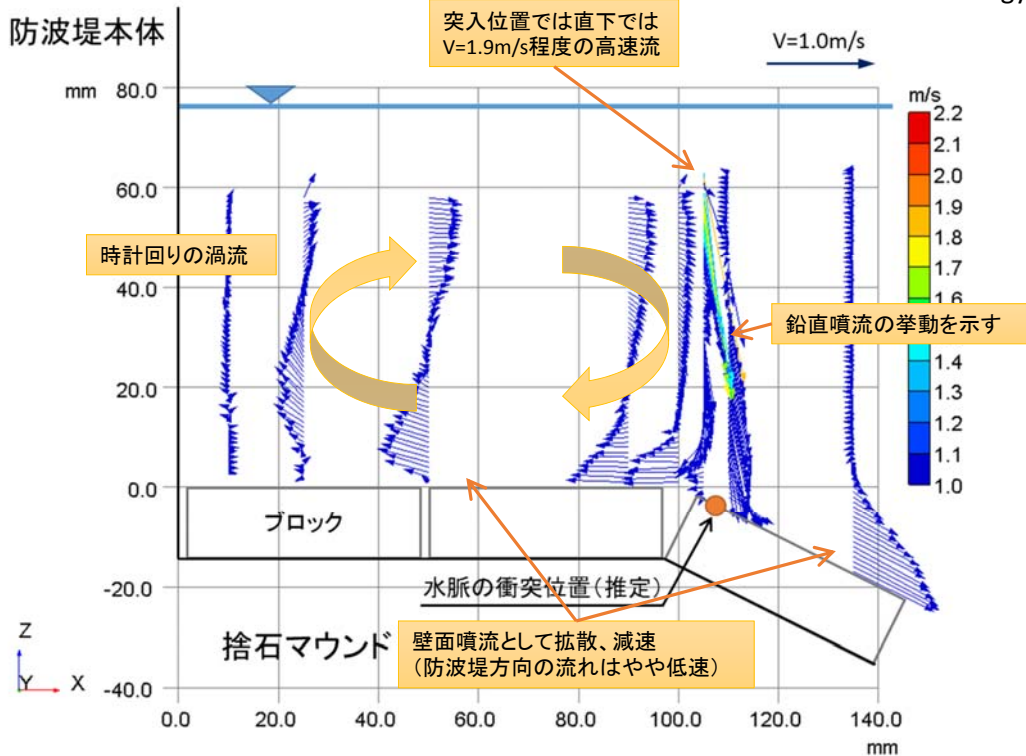
- 論点2:

防波堤, 胸壁などの線上構造物で弱点になりやすい部分(隅角部, 端部)の流体力評価, 対策方法は確立されていない.

\* 論点2については現在, 水産庁で検討中

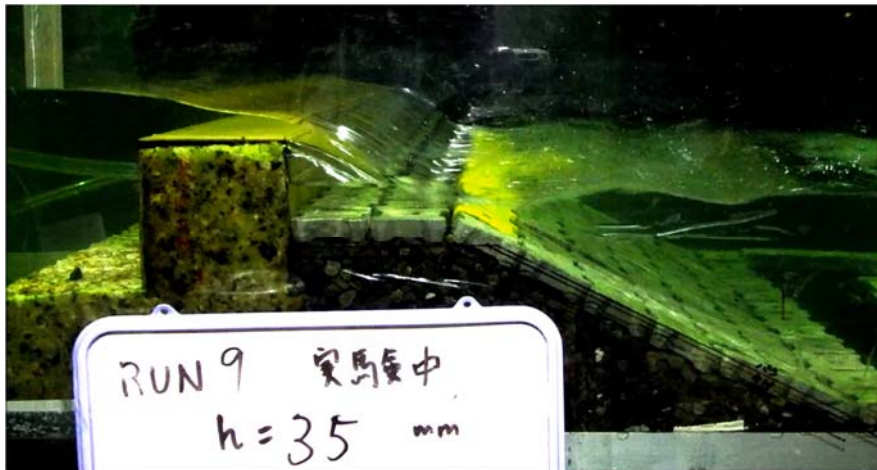
(平面水槽による実験と数値計算による再現)

©Giken Kogyo Co., Ltd.



構造物越流背後の流況は複雑. 津波の規模によっても大きく変化

論点1



(大井ら, 2018)

- 津波による越流の規模が増大すると, マウンドに被害が及ぶ(洗掘, 被覆ブロックの転倒). 堤体の安定性にも影響
- 特に, 防波堤背後域の流況や圧力分布の解明が必要  
 → 数値解析的な検討が必須



# 論点1

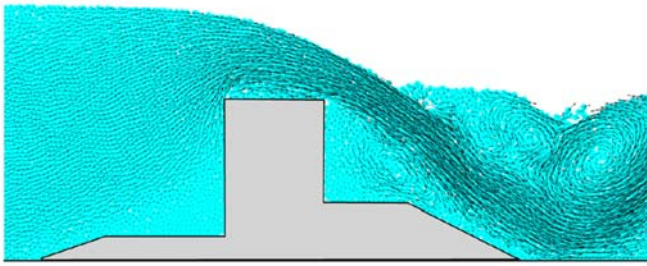


図-2.5 高精度粒子法による越流時の堤体背後乱流の再現スナップショット

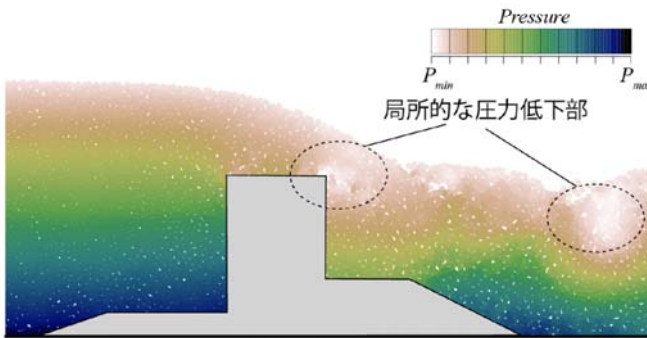
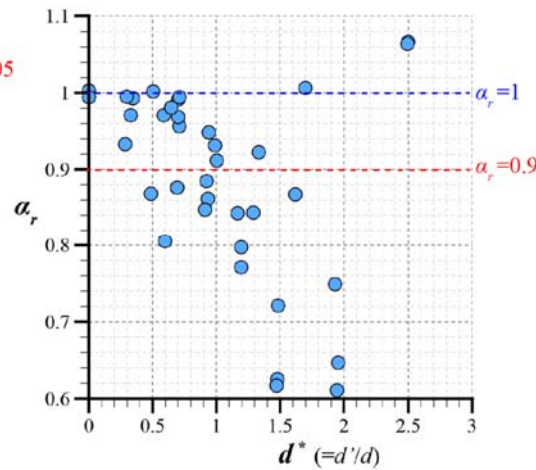
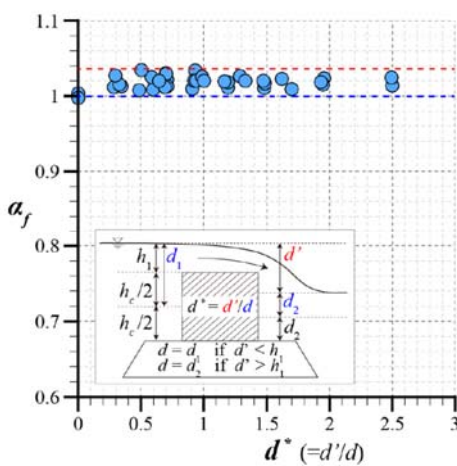


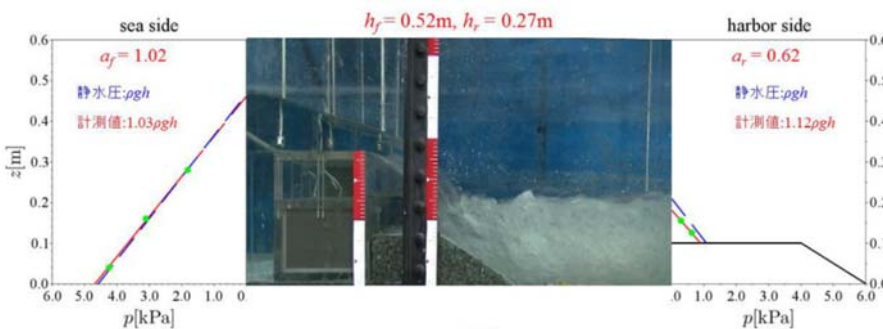
図-2.6 高精度粒子法による越流時の堤体天端部の局所的な圧力低下の再現スナップショット

鶴田ら(2017,港研報告)  
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



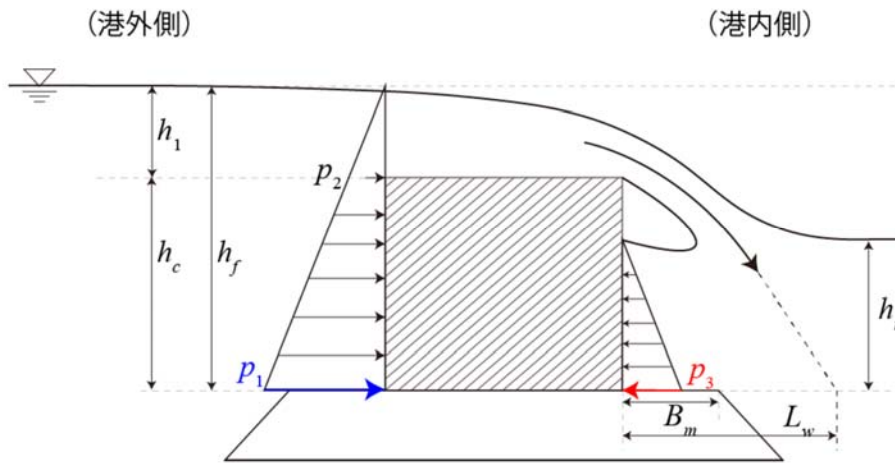
# 論点1



防波堤の越流実験  
腹付工を付加した場合  
(鶴田ら2017,港研報告)

- 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)

# 論点1



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

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

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

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

- 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

鶴田ら(2017,港研報告)

水理実験より、**静水圧差式を改良**

- ✓ 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

## まとめ

- 防波堤背後の波圧特性をさらに明らかにした上で、既存の波力算定式のアップデート(ガイドラインの改定)が必要
- 越流時の複雑な非定常乱流を再現できる数値解析手法の構築が必要
- 平面場(隅角部、端部など)に対する津波荷重評価方法の提案が望まれる



# 漂流物の評価

(一財)電力中央研究所 木原直人  
(国研)建築研究所 奥田泰雄



## 東日本大震災での漂流物被害事例（1）

高橋ら：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No.1231, 2011.

- 東日本大震災における、船舶の打ち上げや車両や材木、タンク、コンテナの漂流が報告されている。
- 漂流物の衝突によると思われる被害も報告されている。

# 東日本大震災での漂流物被害事例（2）

伊勢・沢田・古川：東日本大震災における港湾設備の被災状況と復旧. 新日鉄住金技報, 405号, pp.31-38, 2016.

- 船舶の衝突による被害
  - 全天候バースの半壊（釜石製鉄所）
  - 出荷クレーンの倒壊（鹿島製鉄所）
  - 鋼矢板の破損（鹿島製鉄所）



船舶の衝突による岸壁構造物の損傷



船舶衝突により損傷したと思われる全天候バース

# 東日本大震災での漂流物被害事例（3）

土木学会 エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会：東日本大震災におけるエネルギー施設（火力・水力・送変配電・ガス）の被害状況と今後への展開について, 2014.

土木学会 原子力土木委員会 津波評価小委員会：津波評価技術2016, 2016.

土木学会 鋼構造委員会：東日本大震災鋼構造物調査特別委員会報告書, 2012.

齋藤・森・内海博：東日本大震災による火力発電所土木構造物の被害と対策. 電力土木, No. 360, pp.7-11, 2012.

- 船舶衝突による被害
  - 揚炭栈橋の一部損傷（原町火力発電所）
  - 燃料バースドルフィン損傷
- 漂着タンクによる道路の閉塞
- がれき流入による送電鉄塔の倒壊



土木学会, 津波評価技術2016付属編図8.3.3-37

# 各種ガイド・技術集での 漂流物の評価

文献（略称）	記載されている評価項目	文献
津波評価技術2016	衝突力算定手法	土木学会 原子力土木委員会 津波評価小委員会：津波評価技術2016, 2016
道路橋示方書	衝突力算定手法	日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I共通編, 2017.
FEMA2012	衝突力算定手法 漂流物による開口部閉塞の影響評価	FEMA, Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Second Edition, FEMA P-646, 2012.
ASCE7-16	漂流物ハザード領域の設定法 衝突力算定手法 構造物の応答解析手法	ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-16, 2016.

衝突荷重の評価手法が主体であり、評価の全体フローが示されていないものが多い。

## 荷重算定方法について(1)

甲斐田・木原：原子力発電所における津波漂流物の影響評価技術－現状調査とその適用に関する考察－，電力中央研究所報告，O16010，2017.

評価の考え方	評価式	文献
衝突による運動量の変化と力積の関係 $m(v' - v) = \int_0^{\Delta t} F dt$	$F = \frac{\pi}{2} \frac{vm}{\Delta t/2}$ $F = 2\rho_w \eta B_c v^2 + \left(m \frac{v}{\Delta t}\right)$ <small>F：衝突力，m：漂流物の質量，B<sub>c</sub>：漂流物の幅，η：最大浸水深，Δt：衝突時間，ρ<sub>w</sub>：水の密度，v：衝突速度</small>	ASCE 7-10. US Army Corps and Engineers, ERDC/CRREL TR-02-2, 2002. 水谷ら：エプロン上のコンテナへの津波の作用と漂流衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第53巻，pp.791-795, 2006.
衝突による運動エネルギーの変化と仕事の関係 $\int_0^S kx dx = \frac{1}{2} mv^2$	$F = \frac{mv^2}{4S}$ <small>F：衝突力，m：衝突船舶の質量，v：衝突速度，S：衝突船舶の停止距離</small>	海洋架橋調査会：本州四国連絡橋技術関係基準集，下巻，下部構造設計基準・同解析，1978.
1自由度系の運動方程式 $m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0$	$F = 1.3v \sqrt{\hat{k}m(1+c)}$ <small>F：衝突力，c：付加質量係数，v：漂流物を運ぶ流体の最大流速，m：漂流物の質量，<math>\hat{k}</math>：漂流物の有効軸剛性</small>	FEMA, Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Second Edition, FEMA P-646, 2012.



# 荷重算定方法について(2)

評価の考え方	評価式	文献
Hertzの弾性接触理論	$F = \gamma_p \chi^{\frac{2}{5}} \left( \frac{5}{4} m \right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}}$ $\chi = \frac{4\sqrt{a}}{3} \frac{E}{1-\nu^2}$ <p><math>F</math>: 衝突力, <math>m</math>: 漂流物の質量, <math>v</math>: 衝突速度, <math>\nu</math>: 漂流物のポアソン比, <math>a</math>: 球体の半径, <math>E</math>: 漂流物のヤング率</p>	有川・織田・黒田・下迫: 消波高によるケーソン壁面衝突力に関する大規模実験. 海岸工学論文集, 第50巻, 2003, pp. 716-720, 2003.
その他 (衝突による運動量の変化と力積の関係 + 次元解析)	$\frac{F}{\gamma D^2 L} = 1.6 C_{MA} \left( \frac{v}{(gD)^{0.5}} \right)^{1.2} \left( \frac{\sigma_f}{\gamma L} \right)^{0.4}$ <p><math>F</math>: 衝突力, <math>\gamma</math>: 流木の単位体積重量, <math>D</math>: 木材の直径, <math>L</math>: 木材の長さ, <math>g</math>: 重力加速度, <math>C_{MA}</math>: 見かけの質量係数 (水の緩衝機能も加味), <math>v</math>: 衝突速度, <math>\sigma_f</math>: 木材の降伏応力</p>	松富: 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No.621, pp.111-127, 1999.

- どんな種類の漂流物に適用できる？
- 多くの式で弾性変形が仮定されているが、漂流物が塑性化する程の速度で衝突した場合は？
- 評価に必要なパラメータはどうやって入手できる？

## 評価の体系化に向けての論点整理

### • 論点 1 :

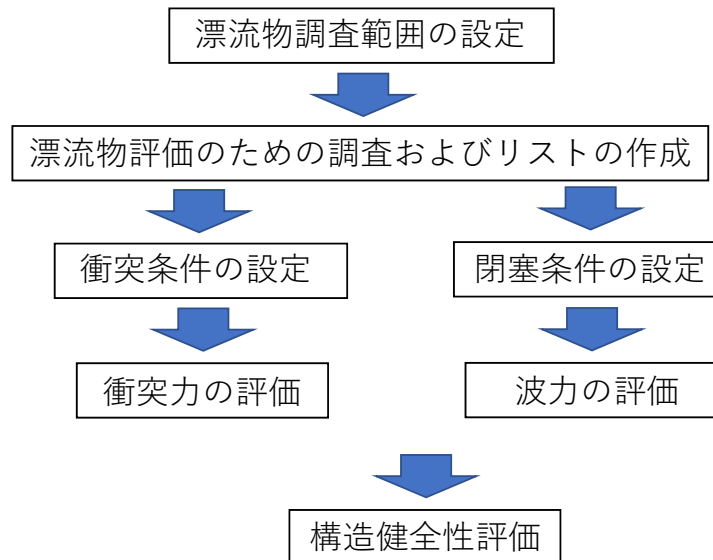
既存のガイドや技術集では、衝突荷重の評価手法が主体であり、評価の全体フローが示されていないものが多い。

### • 論点 2 :

衝突力算定式の適用性、適用限界が不明確であり、また、簡単には入手できないパラメータの設定が必要

# 論点 1

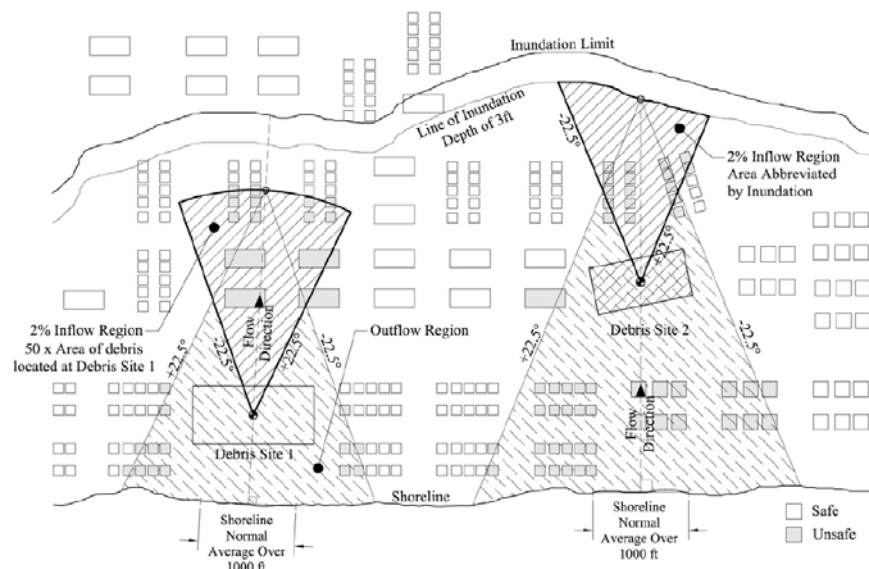
- 評価フローと、各項目で活用できる評価技術の提示



9

## 漂流物調査範囲の設定

- 例えばASCE7-16では、
  - 船舶用コンテナや船舶、台船のそれぞれの漂流物発生源に対して漂流物ハザード領域を特定する。
    - 流入津波による漂流物の漂流範囲と引き波による漂流範囲の設定



## 衝突条件の設定

- 衝突速度、位置、確率の評価への、漂流物の移動を解く数値解析コードの活用
  - 下記外力を考慮した漂流物の運動方程式
    - ✓ 流れからの流体力、漂流物同士の接触力、構造物との接触力、底面との摩擦

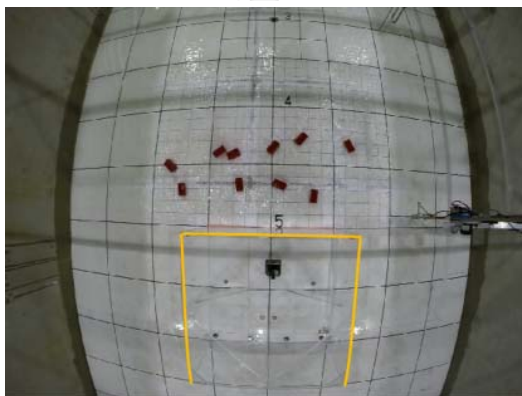
流れのモデル	漂流物のモデル化	主な文献
平面2次元	質点	後藤ら(1982), 後藤(1983), 野島ら(2014), 小園ら(2016)
	直方体	藤井ら(2005), 橋本ら(2009), 本多ら(2009), 木原ら(2013), 嶋原ら(2016)
3次元	球体結合	後藤ら(2006), 後藤ら(2009)
	剛体	米山ら(2008), 牛島ら(2008), 川崎ら(2007), 中村ら(2011)

## 衝突条件の設定

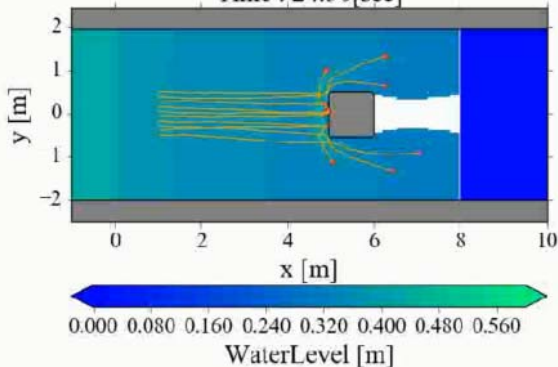
甲斐田・木原：陸上遡上津波中の漂流物挙動に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72(2), I\_1159-I\_1164, 2016.

直方体漂流物衝突実験の平面2次元再現計算

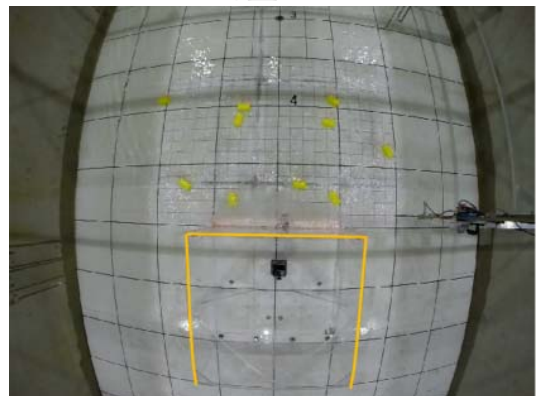
比重0.3



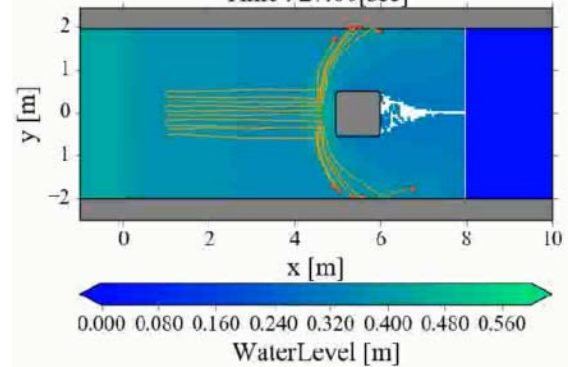
Time : 24.50[sec]



比重0.6



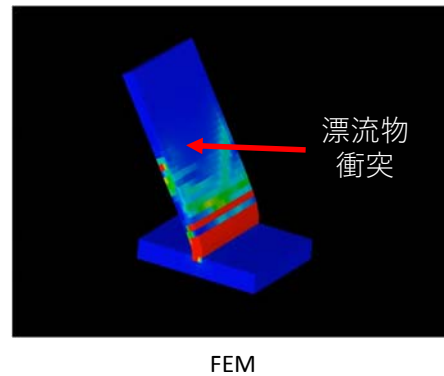
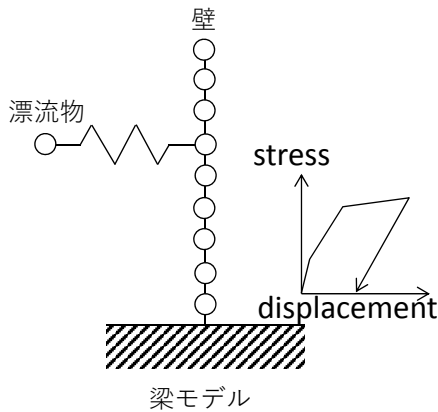
Time : 27.00[sec]



構造健全性評価

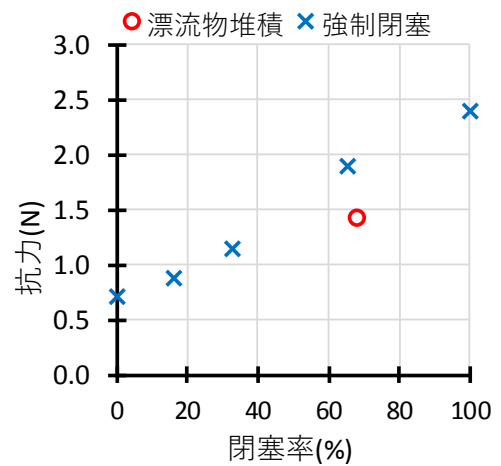
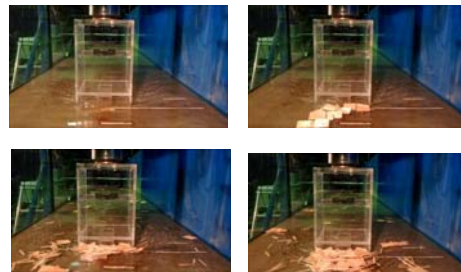
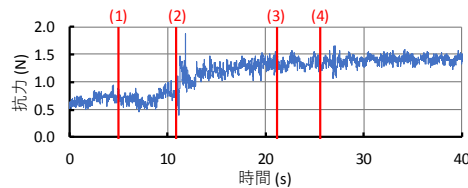
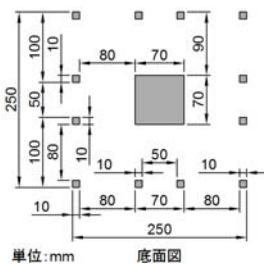
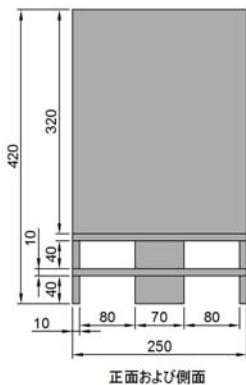
- 荷重評価
- or
- 構造物変形量評価

柴山ら：津波波力と漂流物衝突力を受けるコンクリート壁の応答評価法の提案, 電力中央研究所報告, O17002, 2018.



閉塞時の波力の評価

小畠ら：定常流実験における木材漂流物の投入手法の検討, 土木学会第72回年次学術講演会, 367-368, 2017.  
 長谷川ら：陸上構造物に対する津波漂流物の影響に関する水理模型実験, 土木学会第72回年次学術講演会, 369-370, 2017.



循環流装置を有する長さ50m、幅1.0m、高さ1.5mの二次元水路での実験  
 模型縮尺：1/100、フルード数：0.45  
 漂流物による閉塞による波力は、開口部の強制閉塞による波力よりも小さいことが確認された。

## 論点 2

- 衝突力算定式の適用性、適用限界の明確化
  - 漂流物が顕著に塑性変形するような衝突が生じる場合の評価
  - 船舶、木材、車両、コンテナ等々、漂流物種類に応じた評価式の適用性の明確化
- 評価に必要なパラメータの整備
  - 軸剛性
  - 衝突作用時間

## まとめ

- 衝突力算定式だけでなく、漂流物影響に関わる評価のフローおよび関連技術の体系化が望まれる。
- 衝突力算定に当たっては、各算定式が適用可能な衝突体の種類や、適用可能な衝突速度の上限の明確化が必要
- また併せて、衝突力算定に必要な各種パラメータを、学協会で合理的に収集・整備することが望まれる。

# 洗堀の評価

名古屋大学 浅井竜也  
鹿島建設 舘野公一



1

## 過去の津波における洗堀被害事例

- 越流した波による構造物背後の洗堀



マウンドの洗堀が被災の一因であった可能性が指摘されている (有川ら2013)



防潮堤背後が40cmほど洗堀された。

2



# 過去の津波における洗掘被害事例

- 陸上構造物周囲の局所的な洗掘



【出典：左上：建築研究所 東北地方太平洋沖地震調査研究（速報）,2011  
他：東京大学生産技術研究所 中埜研究室：東北地方太平洋沖地震による建築物の地震被害および津波被害調査報告, 2011】

3

# 過去の津波における洗掘被害事例

- 陸上構造物周囲の局所的な洗掘



【出典：EERI：Tsunami Inundation Scour of Roadways, Bridges and Foundations, 2006】

4

# 各種ガイド・技術集での洗掘の評価

文献	記載内容
国土交通省港湾局：港湾における防潮堤（胸壁）の耐津波設計ガイドライン2013	越流や浸透流等の流れを考慮して適切な対策を講じるよう示されているが、定量的な評価手法は示されていない。
土木学会 原子力土木委員会 津波評価小委員会：津波評価技術2016	砂移動の計算手法は提示されているが、簡便に設計に引用可能な評価手法は示されていない。
日本建築学会：建築物荷重指針・同解説	洗掘への工法的な対策は示されているが、定量的な評価手法は示されていない。
ASCE：Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-16, 2016	直立堤防背後の洗掘，建物周りの局所洗掘の定量的な評価手法を提示している。

洗掘対策を実施することは明記されているものの、定量的な評価手法が示されていないものが多い。

5

## 評価の体系化に向けての論点整理

- 論点 1：  
津波洗掘の評価の体系化のためには、洗掘に関わる諸因子の影響に着目した検討が必要。
- 論点 2：  
津波による洗掘深さや洗堀幅の評価手法に関する研究はあるものの、ガイドや技術集では設計に用いることが可能な評価手法が提示されていない。

6

# 論点 1

- 洗掘に対する構造物の健全性評価フロー

諸条件の設定

- 津波：継続時間，流量，浸水深，流速，落下高，入射角など
- 構造物および地盤：形状，粒径

洗掘深さ，幅の評価

構造物の健全性評価

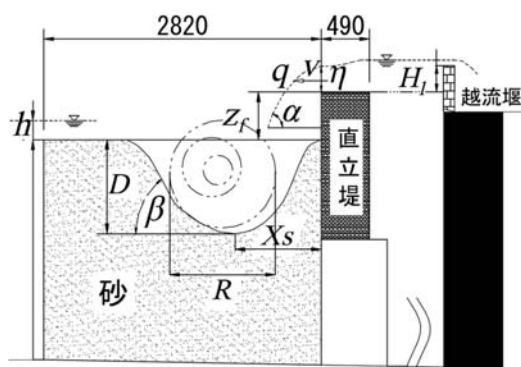
7

## 直立堤背後の洗掘

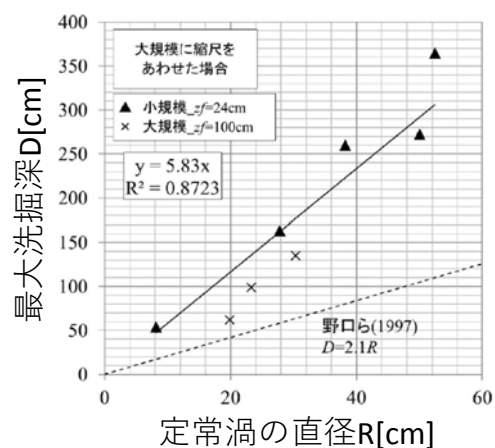
- スケールの影響 (有川ら2014)
  - パラメータ：実験スケール (1/42および1/10)
  - 異なるスケールの結果は，沈降速度 (山野ら2013) を用いた相似則により統一的に評価可能。

$$w_{0m} / w_{0p} = (l_m / l_p)^{1/2}$$

$w_0$ ：沈降速度， $l$ ：代表長， $m$ ：模型， $p$ ：実機



(1/42スケール実験の断面図)



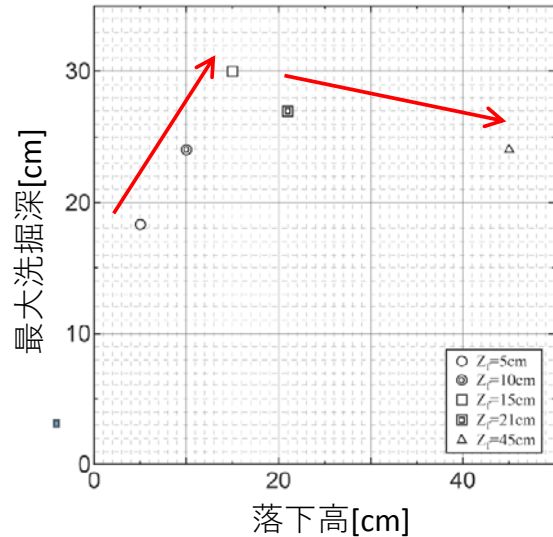
8

# 直立堤背後の洗掘

## ● 落下高 $Z_f$ の影響 (有川ら2016)

- パラメータ： $Z_f = 5\text{cm}, 10\text{cm}, 15\text{cm}, 21\text{cm}, 45\text{cm}$
- 落下高が高くなるにつれて入水角度が増大し、 $90$ 度に近づくと逆に定常渦・洗掘深さが小さくなる。

$Z_f(\text{cm})$	入水角度 $\alpha$ (度)
5	61
10	69
15	73
21	77
45	84



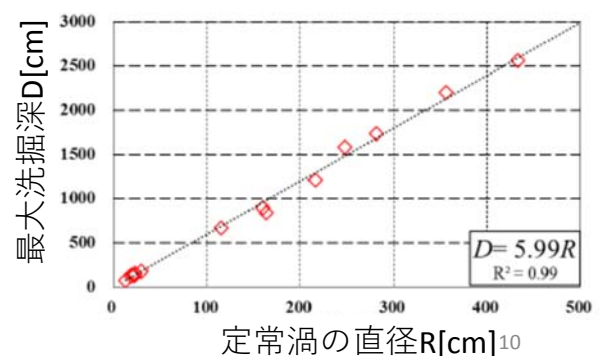
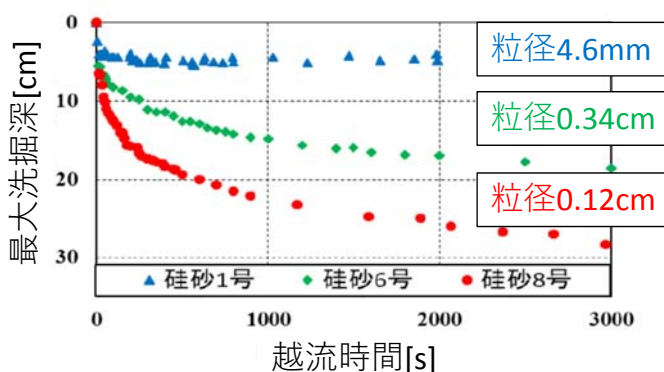
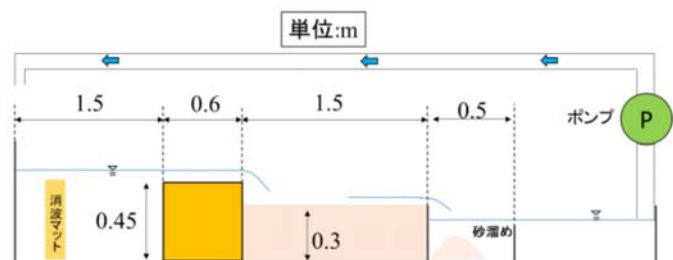
9

# 直立堤背後の洗掘

## ● 洗掘深 $D$ の時間変化 (鈴木・有川2019)

- パラメータ
  - 粒径 $d$
  - 落下高 $Z_f$
  - 越流水深 $\eta$  (流速 $v$ )

⇒ 粒形の影響は沈降速度を考慮した相似則により評価可能。



# 直立堤背後の洗掘

- 洗掘深の時間変化（鈴木・有川2019）

- 時系列をワイブル累積分布関数により表現。

$$\frac{D(T)}{D_{max}} = 1 - \exp[-A_1 T^{A_2}]$$

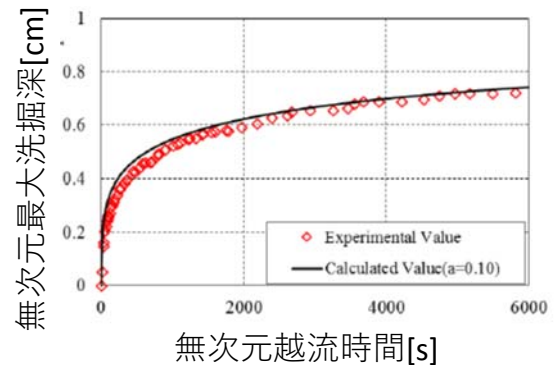
T: 無次元時間  
A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>: 実験定数

- 最大洗掘深D<sub>max</sub>は粒径dの影響を考慮すべく無次元掃流力を用いて表現。

$$D_{max} = 10.3 \left[ \frac{(u^* c^2 / sgd)}{0.0479} \right]^{0.594} R$$

$$R = g^{-1/4} q^{1/2} Z_f^{1/4} \quad (\text{野口ら1997})$$

s: 砂の水中比重, d: 砂の粒径  
R: 渦の直径, q: 流量, Z<sub>f</sub>: 落下高



以上の算定式により洗掘深の時間変化を評価可能

11

## 論点 2

- 洗掘に対する構造物の健全性評価フロー

諸条件の設定

- 津波: 継続時間, 流量, 浸水深, 流速, 落下高, 入射角など
- 構造物および地盤: 形状, 粒径



洗掘深さ, 幅の評価



構造物の健全性評価



# 直立堤背後の洗掘

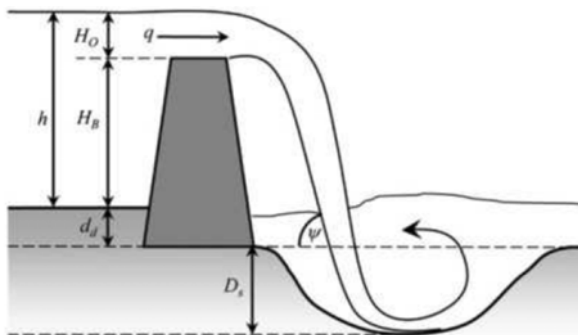
## ASCE7-16の評価式

- ダム背後等の既往の洗掘評価式において、洗掘深の調査結果 (Tonkin et al. 2013) と整合性が良いものを採用。

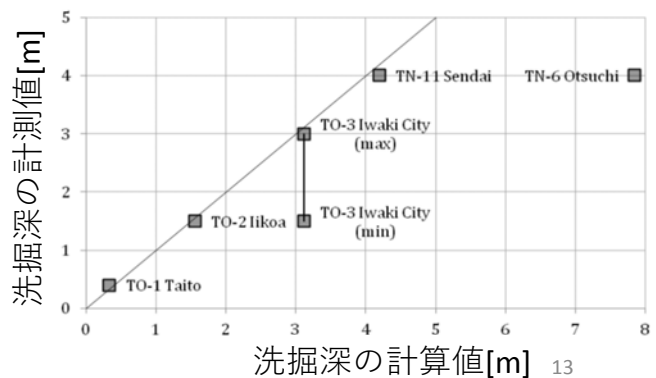
$$D_s = c_{2V} \sqrt{\frac{qU \sin \psi}{g}} \quad (\text{Hoffmans et al. 1997})$$

$$q = C_{dis} \frac{2}{3} \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad C_{dis} = 0.611 + 0.08 \frac{H_0}{H_B}$$

$$U = \sqrt{2g(h + d_d)} \quad c_{2V} = 2.8$$



粒径の影響は考慮  
されていない



# 陸上構造物周囲の局所的な洗掘

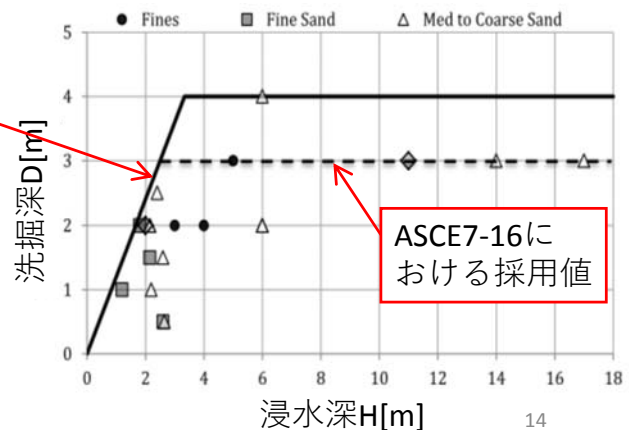
## ASCE7-16の評価式

- 建物周囲の局所洗掘の調査結果 (Tonkin et al. 2013) の包絡線として設定。  
⇒ 粒径による明確な違いは見られない。
- 包絡線の傾きは、津波による地盤内における間隙水圧の勾配を考慮して求まる式と一致。

$$D < \Delta P / \Lambda_T \quad (\text{Tonkin et al. 2003})$$

$$= H \gamma_w / (\Lambda_T \gamma_d) = 1.2H$$

- D : 洗掘深さ
- H : 津波浸水深
- $\Delta P$  : 津波による圧力変化
- $\Lambda_T$  : 間隙水圧の勾配による浮力に関する係数 (最大0.5)
- $\gamma_w$  : 水の単位重量
- $\gamma_d$  : 浮力下での地盤の単位重量



ASCE7-16に  
おける採用値



## まとめ

- 洗掘に対する構造物の健全性評価の体系化に向けて、
  - 直立堤背後の洗掘では、
    - 洗掘深に対する各パラメータの影響の定量化がされつつある。
    - さらに諸条件を変えた検討により適用範囲を明確化すると共に、体系的な設計式を検討する必要がある。
  - 陸上構造物周囲の局所的な洗掘では、
    - 洗掘深と各パラメータの関係に関する検討事例は極めて少ない。
    - 洗掘量の定量化に向けた体系的な検討が必要。