

# 平成25年度建築基準整備促進事業

## S3.津波避難ビル等の構造基準の合理化に 資する検討(継続:旧課題49)

一般社団法人 建築性能基準推進協会  
国立大学法人 東京大学 生産技術研究所  
鹿島建設株式会社

## 調査の目的

平成24年の検討では、建築物の形状の異なる建築模型を用いた水理模型実験により、建築物に作用する波圧・波力について整理し、3次元数値波動水槽技術を用いた数値シミュレーションにより、実験結果の再現性を確認した。今年度は、この研究成果を踏まえ、

(イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と  
浮力に関する数値シミュレーション

(ロ)ピロティ構造を有する建築物模型を用いた  
水理実験による検討

(ハ)フルード数、遮蔽物の高さ、海岸線からの距離、  
複数建築物等の津波波力への影響に関する検討

(ニ)木造建築物の津波抵抗性能の向上に資する検討

を行い、津波避難ビル等の構造基準に資する技術資料の蓄積を図る。

# 調査体制

本調査・検討は

一般社団法人建築性能基準推進協会

東京大学生産技術研究所

鹿島建設株式会社

と、独立行政法人建築研究所の共同研究として実施した。  
実施に当たっては、委員会を設置し、詳細な検討を行った。

委員会メンバー（24名＋協力委員7名＋OBS3名）

委員長：中埜 良昭（東大生研）

（建築構造の専門家に加え...）

委員：藤間 功司（防衛大学） ⇒津波荷重

有川 太郎（港空研） ⇒水理実験、数値解析

ほか

# (イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力に関する数値シミュレーション

使用プログラム:数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D\*)

\*昨年度妥当性確認

鉛直2次元 沖合から陸上  
高解像度:建築物 解像  
パラメータ:開口率

鉛直2次元 沖合から陸上  
低解像度:建築物 多孔質体  
パラメータ:多孔質体係数

開口率に応じた多孔質体係数

鉛直2次元 沖合から陸上  
低解像度:建築物 多孔質体  
パラメータ:開口率, 津波高, 周期, 海底勾配, 地盤透水係数

護岸前面での沖側境界条件  
(水位・流速)

3次元 護岸前面から陸域  
高解像度 建築物 解像  
パラメータ:開口率, 津波高, 周期, 海底勾配, 地盤透水係数

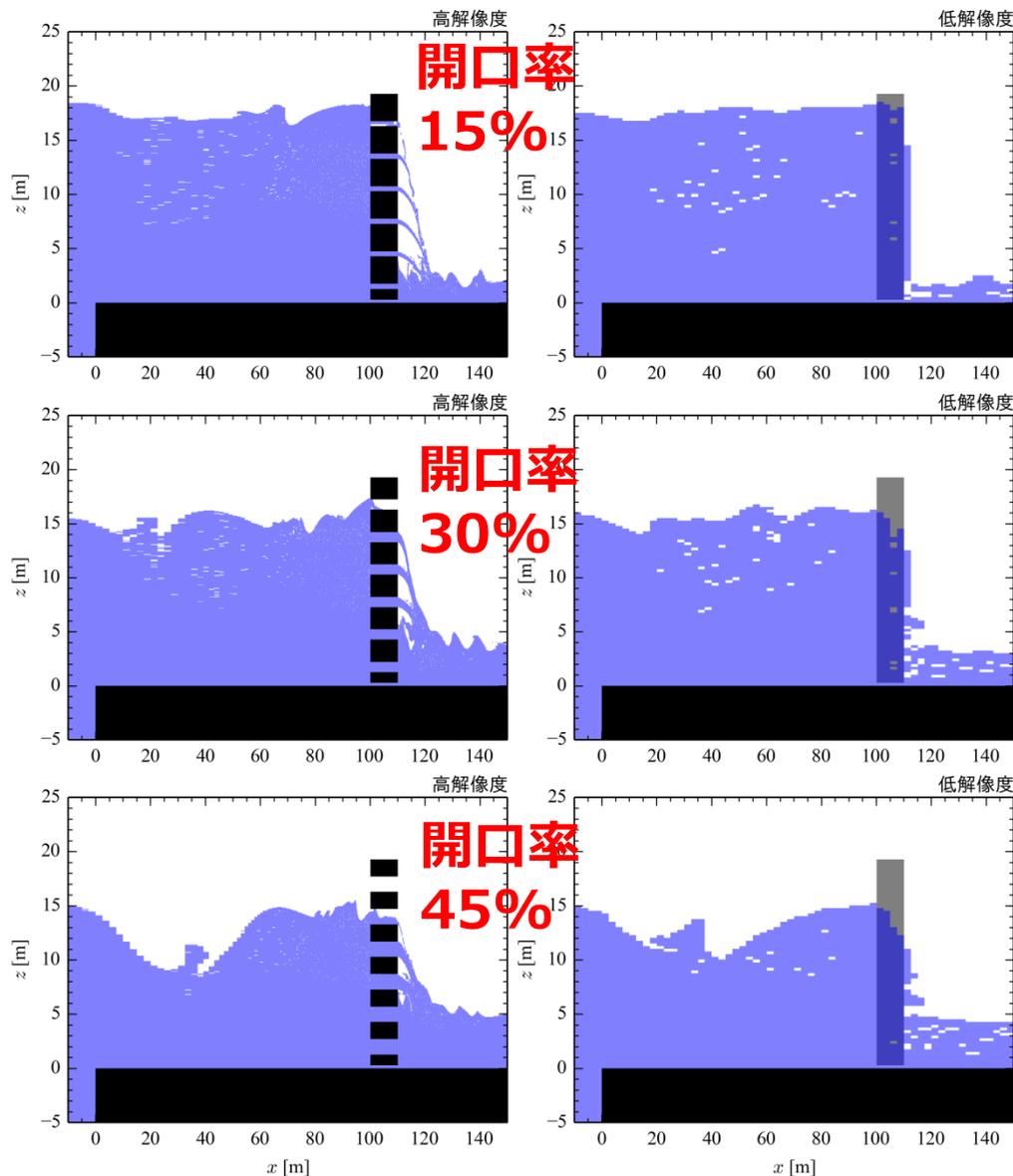
# (イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力に関する数値シミュレーション

開口を有する建築物の  
ポーラスメディアによる  
モデル化

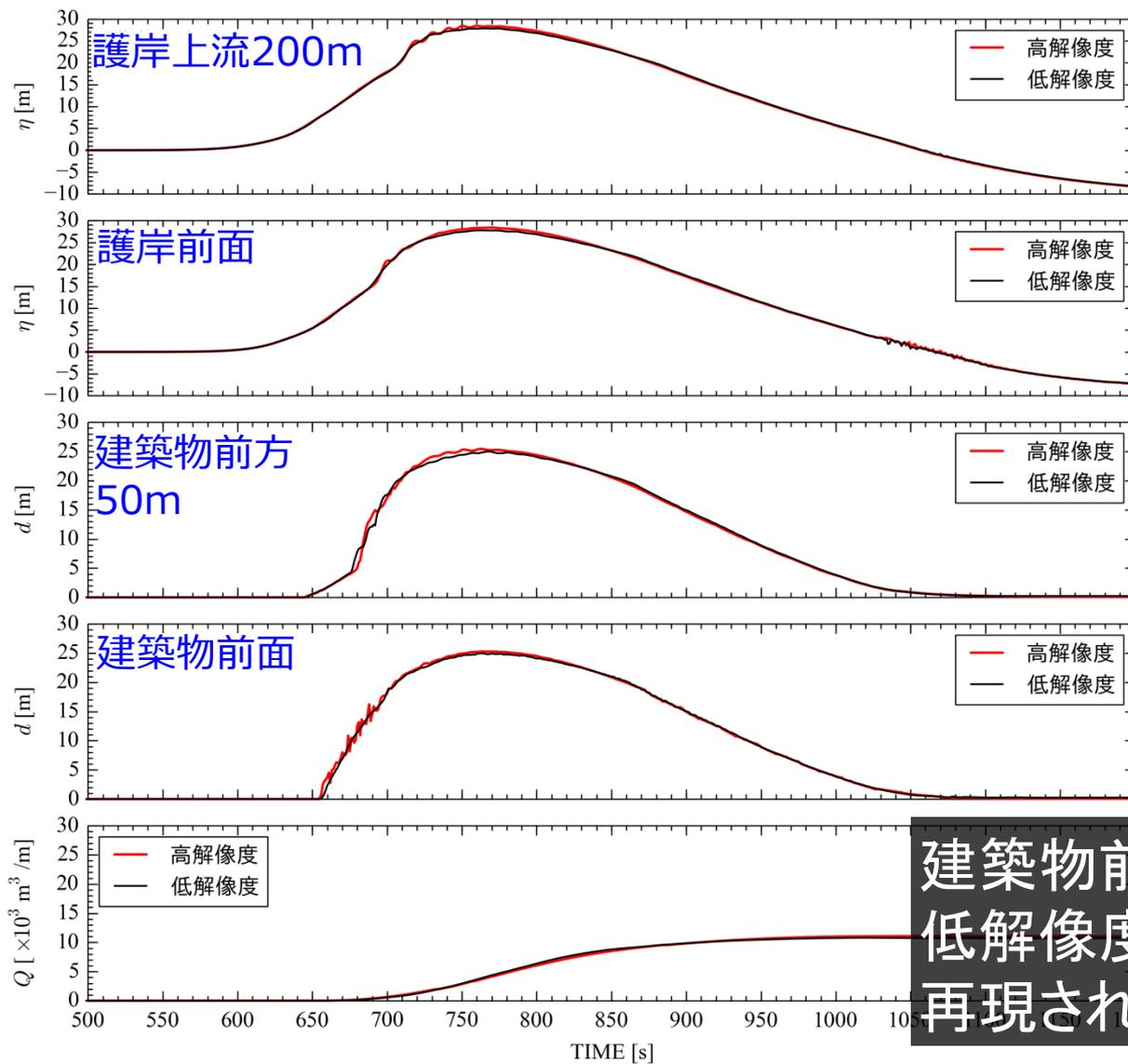
慣性力係数  $C_M = 0$

抵抗係数  $C_D = 0$

開口率ごとに異なる  
建築物周辺の水面形を  
良好に再現



# (イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力に関する数値シミュレーション

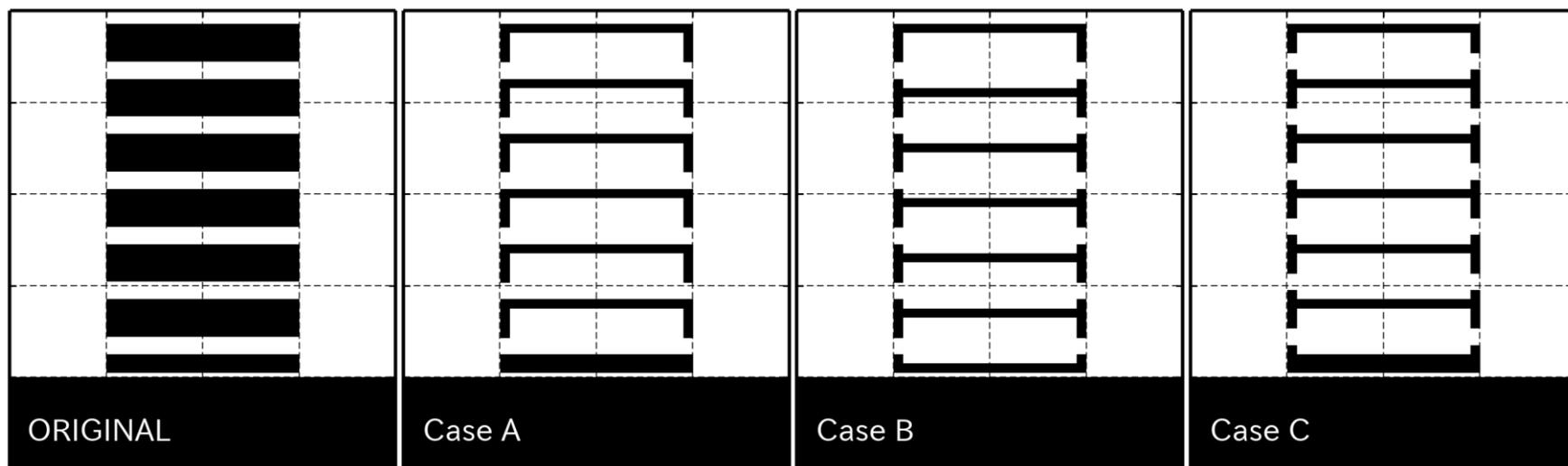


建築物前面の水位時系列が低解像度モデルにより、ほぼ再現されている。

# (イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力に関する数値シミュレーション

## 開口を有する建築物のポーラスメディアによるモデル化

- 慣性力係数や抵抗係数の影響を検討  
→ 影響は(空隙率に比べ)小さい。
- 建築物の内部形状(下図)の影響を検討  
→ 影響は小さく、特に、ネスティングの接続位置(護岸より沖側)では問題とならない。



# (イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力に関する数値シミュレーション

## 開口率・海底勾配・津波条件・空隙の抵抗係数\*1に対する依存性を検討

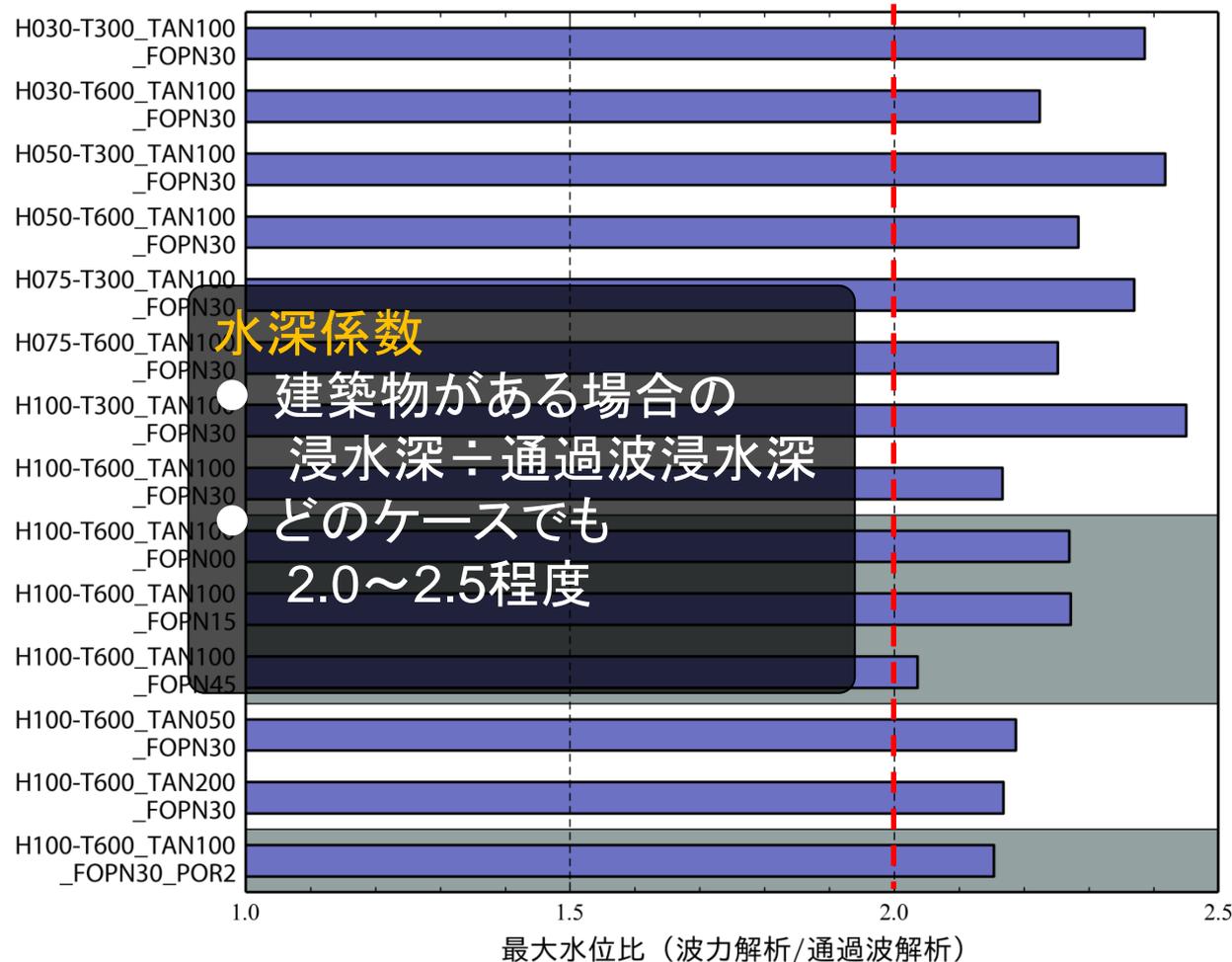
\*1 空隙の抵抗係数は地盤の透水係数に対応

	開口率	海底勾配	津波条件		空隙の抵抗係数
			波高	周期	
H030-T300_TAN100_FOPN30	30%	1/100	3.0m	300秒	$C_{DB0}$
H030-T600_TAN100_FOPN30	30%	1/100	3.0m	600秒	$C_{DB0}$
H050-T300_TAN100_FOPN30	30%	1/100	5.0m	300秒	$C_{DB0}$
H050-T600_TAN100_FOPN30	30%	1/100	5.0m	600秒	$C_{DB0}$
H075-T300_TAN100_FOPN30	30%	1/100	7.5m	300秒	$C_{DB0}$
H075-T600_TAN100_FOPN30	30%	1/100	7.5m	600秒	$C_{DB0}$
H100-T300_TAN100_FOPN30	30%	1/100	10.0m	300秒	$C_{DB0}$
H100-T600_TAN100_FOPN30	30%	1/100	10.0m	600秒	$C_{DB0}$
H100-T600_TAN100_FOPN00	0%	1/100	10.0m	600秒	$C_{DB0}$
H100-T600_TAN100_FOPN15	15%	1/100	10.0m	600秒	$C_{DB0}$
H100-T600_TAN100_FOPN45	45%	1/100	10.0m	600秒	$C_{DB0}$
H100-T600_TAN050_FOPN30	30%	1/50	10.0m	600秒	$C_{DB0}$
H100-T600_TAN200_FOPN30	30%	1/200	10.0m	600秒	$C_{DB0}$
H100-T600_TAN100_FOPN30_POR2	30%	1/100	10.0m	600秒	$2C_{DB0}$

# (イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力に関する数値シミュレーション

開口率・海底勾配・津波条件・空隙の

抵抗係数に対する依存性を検討 2.0 2.5



# (イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力に関する数値シミュレーション

## 開口率・海底勾配・津波条件・空隙の抵抗係数に対する依存性を検討

ケース名	波高 [m]	周期 [s]	海底 勾配 [1]	開口率 [%]	前面の 面積 [m <sup>2</sup> ]	空隙の 抵抗係数	出現 時刻 [s]	波力		
								Fx [kN]	Fz [kN]	My [kN・m]
H030-T300_TAN100_FOPN30	3.0	300	1/100	30	4350		676.9	773.9	-932.4	2411.0
H030-T600_TAN100_FOPN30	3.0	600	1/100	30	4350		830.6	585.6	-717.8	1586.5
H050-T300_TAN100_FOPN30	5.0	300	1/100	30	4350		655.5	2308.6	-1398.4	12359.4
H050-T600_TAN100_FOPN30	5.0	600	1/100	30	4350		785.8	1889.3	-1201.9	9451.9
H075-T300_TAN100_FOPN30	7.5	300	1/100	30	4350		646.5	5027.4	-2666.4	38096.9
H075-T600_TAN100_FOPN30	7.5	600	1/100	30	4350		756.7	4114.6	-2131.9	28826.0
H100-T300_TAN100_FOPN30	10.0	300	1/100	30	4350		650.7	8116.8	-2641.3	71967.9
H100-T600_TAN100_FOPN30	10.0	600	1/100	30	4350		777.5	6203.8	-2407.4	52978.2
H100-T600_TAN100_FOPN00	10.0	600	1/100	0	5700		728.0	8644.1	-191.8	68002.0
H100-T600_TAN100_FOPN15	10.0	600	1/100	15	5025		753.5	7564.4	-1973.4	65389.4
H100-T600_TAN100_FOPN45	10.0	600	1/100	45	3675		783.0	4604.1	-2717.1	37819.7
H100-T600_TAN050_FOPN30	10.0	600	1/50	30	4350		755.5	6283.9	-2530.6	53995.5
H100-T600_TAN200_FOPN30	10.0	600	1/200	30	4350		753.4	6287.0	-2104.5	52362.9
H100-T600_TAN100_FOPN30_POR2	10.0	600	1/100	30	4350	倍	772.5	6112.4	-2417.9	52248.3

# (イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力に関する数値シミュレーション

開口率・海底勾配・津波条件・空隙の  
抵抗係数に対する依存性を検討

## ①津波条件の影響

波高が高いほど、周期が短いほど最大水平波力が大きい

## ②開口率の影響

開口がある場合の水平波力はない場合の値に  
(1-面積開口率)をかけた値よりも小さい

## ③海底勾配の影響

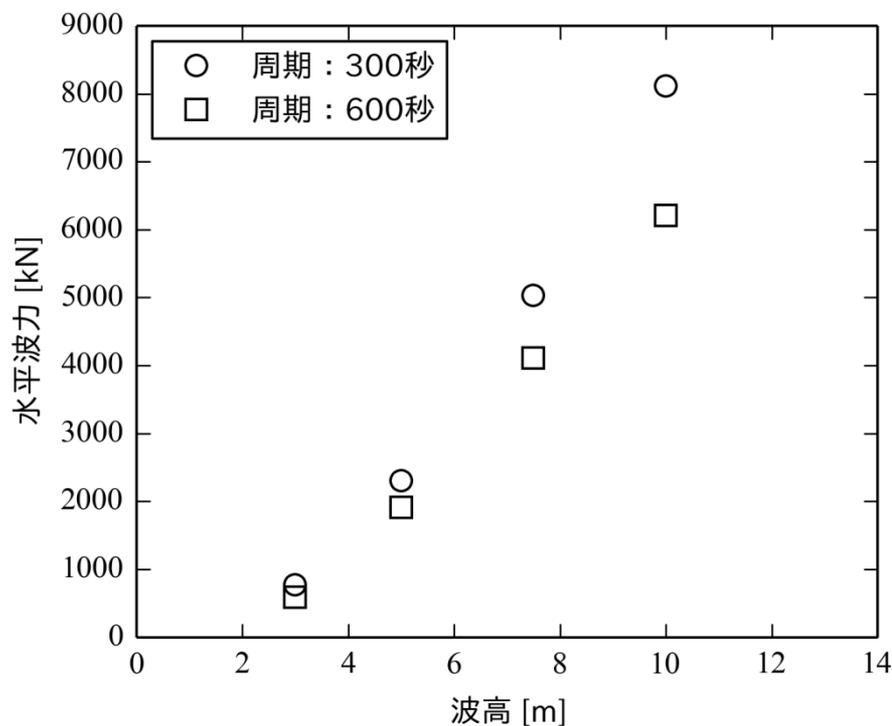
本検討のパラメータ範囲では影響なし

## ④空隙の抵抗係数に対する依存性

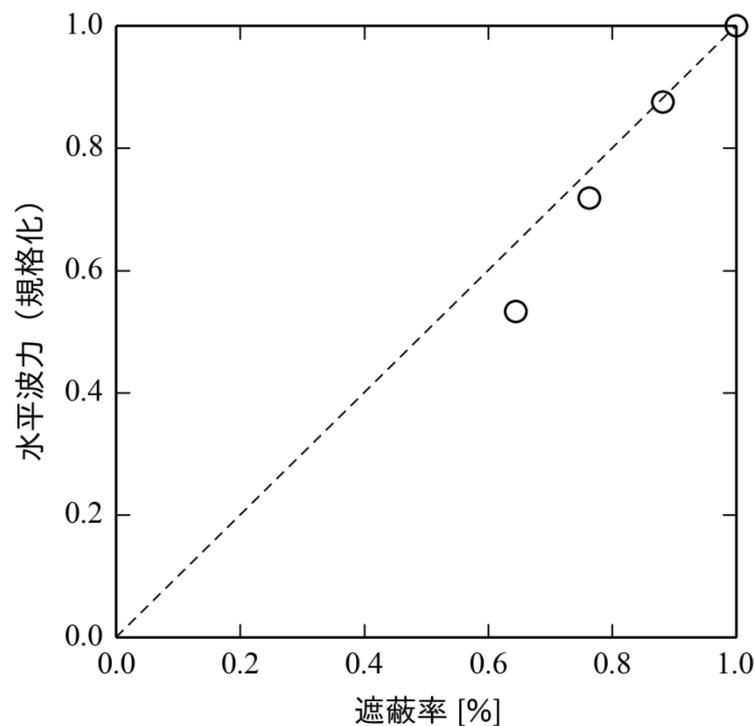
抵抗係数が高い場合に底面の波圧が相対的に高くなるが、  
今回検討した条件では建築物内部に侵入する水の重量の方が鉛直波力に対して支配的となる。

# (イ)開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力に関する数値シミュレーション

## 開口率・海底勾配・津波条件・空隙の抵抗係数に対する依存性を検討



津波条件の影響

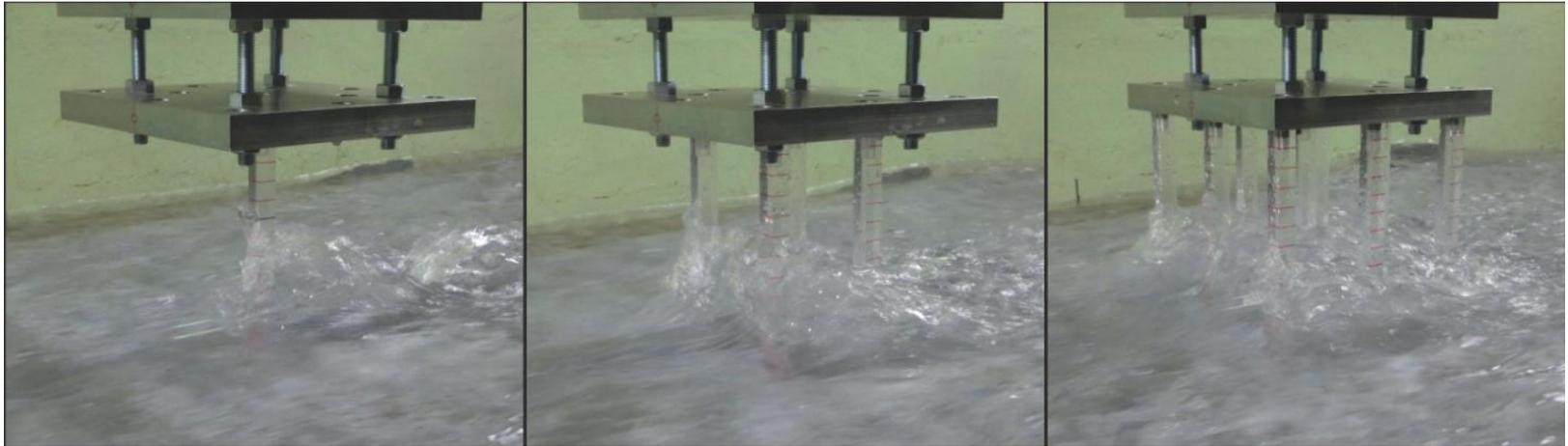


開口率の影響

# (ロ) ピロティ構造を有する建築物模型を用いた水理実験による検討

## 実験A

### ピロティ構造の柱部分を対象とした実験



## 実験B

### ピロティ構造を有する建築物を対象とした実験

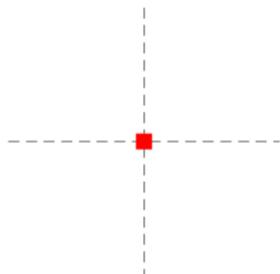


実験A

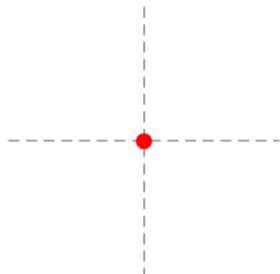
ピロティ構造の柱部分を対象とした実験

柱の形状・本数・間隔, 津波入射方向の異なる9種の模型ケース

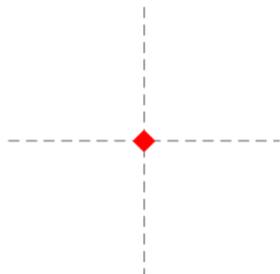
RECT-1-000



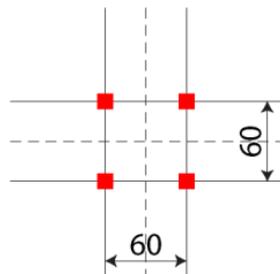
CIRC-1-000



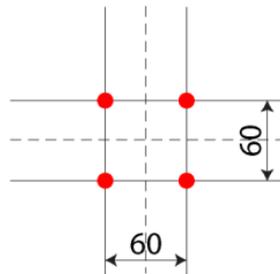
RECT-1-045



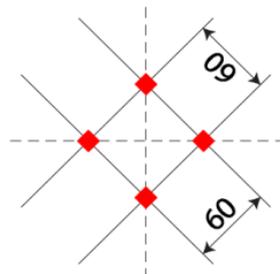
RECT-4-000



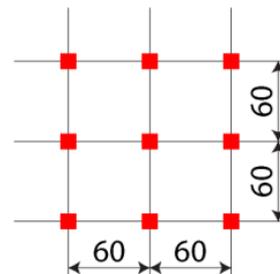
CIRC-4-000



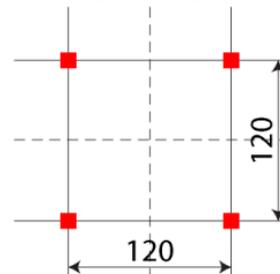
RECT-4-045



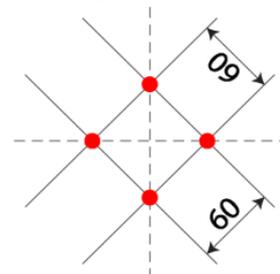
RECT-9-000



RECT-4-120mm-000



CIRC-4-045



# (ロ) ピロティ構造を有する建築物模型を用いた水理実験による検討

## 実験A

## ピロティ構造の柱部分を対象とした実験

#	台形型堰 有無	ポンプ 回転数	下流端堰 角度	W10 [cm]	U02 [cm/s]	Fr [-]	水温 [°C]	Re [-]	Q [m <sup>3</sup> /min]	
1	無	6rps	15.0度	5.78	8.10	0.11	15	4104	0.32	
2		7rps	9.0度	5.81	22.96	0.30	15	11683	0.63	
3		8rps	0.0度	5.64	35.31	0.47	15	17467	0.87	
4		8rps	17.0度	8.02	16.29	0.18	15	11449	0.68	
5		10rps	9.5度	8.09	34.12	0.38	15	24181	1.21	
6		12rps	0.0度	7.91	49.24	0.56	15	34132	1.69	
7		8rps	38.0度	11.00	0.11	0.001	15	105	0.32	
8		10rps	24.0度	10.99	16.75	0.16	15	16129	1.03	
9		12rps	16.5度	10.87	31.86	0.31	15	30356	1.54	
10		16rps	0.0度	10.82	52.83	0.51	15	50099	2.48	
11	有(小)	10rps	0.0度	2.67	99.79	1.95	15	23356	1.12	
12		14rps	0.0度	4.06	113.10	1.79	15	40220	1.96	
13	有(大)	10rps	0.0度	1.47	116.67	3.07	15	15076	0.72	
14		13rps	0.0度	2.81	121.37	2.31	15	29893	1.43	
				最大値	11.00	121.37	3.07	15	50099	2.48
				最小値	1.47	0.11	0.001	15	105	0.32

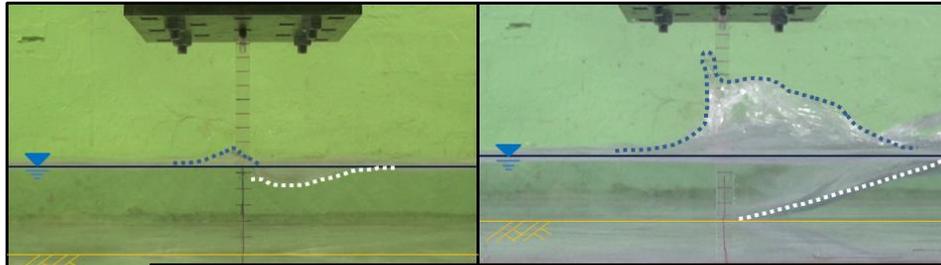
浸水深・流速の異なる幅広いFr範囲の津波条件

\* 計測精度の問題から#1, 4, 7, 8は解析から除外

# (ロ) ピロティ構造を有する建築物模型を用いた水理実験による検討

## 実験A

## ピロティ構造の柱部分を対象とした実験



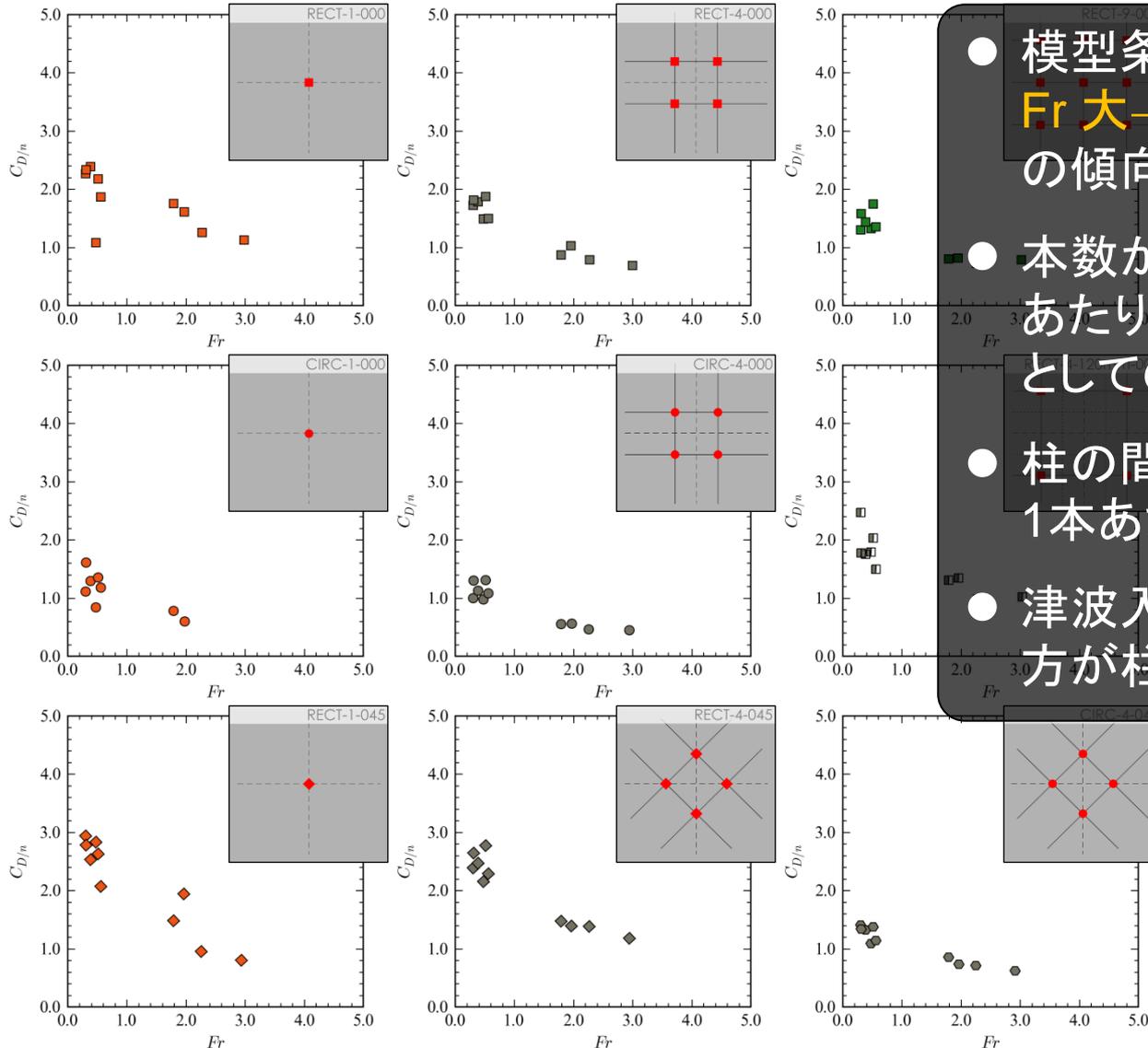
Frにより水面形状に違い  
高Fr時の特徴：  
背面での『空洞化』

柱の形状	常流	射流	
	$Fr < 1$	$1 < Fr < \sqrt{2}$	$\sqrt{2} < Fr$
角柱 (入射角 $0^\circ$ ) 鈍い物体			
円柱 鈍い物体			
角柱 (入射角 $45^\circ$ ) 尖った物体			

# (ロ) ピロティ構造を有する建築物模型を用いた水理実験による検討

## 実験A

## ピロティ構造の柱部分を対象とした実験



- 模型条件によらず,  
 $Fr$  大  $\rightarrow$   $C_D$  小  
の傾向
- 本数が増えるほど、柱1本あたりの  $C_D$  は減少(全体としての荷重は増加)
- 柱の間隔が大きい方が、柱1本あたりの  $C_D$  大
- 津波入射向45度の方が柱1本あたりの  $C_D$  大

# (ロ) ピロティ構造を有する建築物模型を用いた水理実験による検討

## 実験A ピロティ構造の柱部分を対象とした実験

既往研究等を踏まえ、柱1本あたりの抗力係数  $C_D$  を  $Fr$  の関数としてモデル化(近似式)

$$C_D = \begin{cases} C_{D\min} + (C_{D\max} - C_{D\min}) \left(1 - \frac{Fr^2}{4}\right) & : Fr < \sqrt{2} \\ C_{D\min} + (C_{D\max} - C_{D\min}) \cdot \frac{1}{Fr^2} & : Fr \geq \sqrt{2} \end{cases}$$

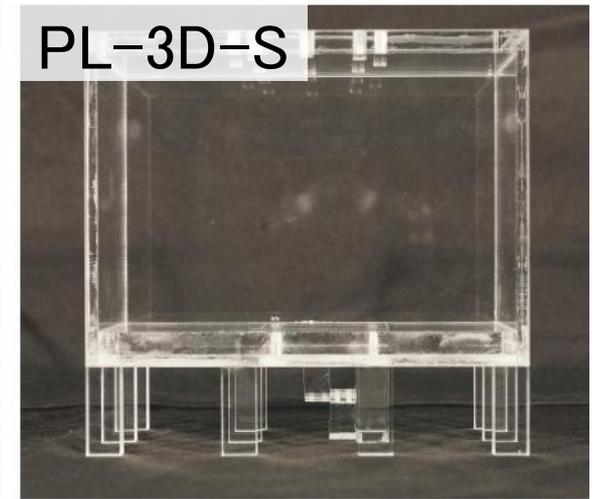
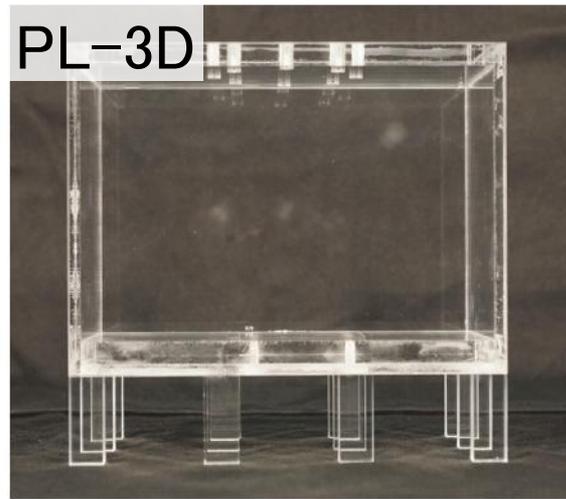
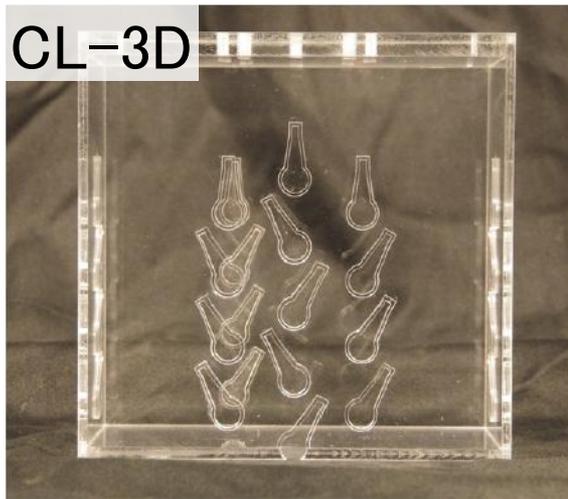
模型条件	$C_{D\max}$	$C_{D\min}$
RECT-1-000	2.10	1.20
RECT-4-000	1.75	0.60
RECT-9-000	1.50	0.60
CIRC-1-000	1.25	0.45
CIRC-4-000	1.15	0.35
RECT-4-120mm-000	1.95	0.95
RECT-1-045	2.75	0.85
RECT-4-045	2.50	1.05
CIRC-4-045	1.30	0.55

実験結果より、  
各模型条件の  $C_{D\min}$  と  $C_{D\max}$  を  
推定

# (ロ) ピロティ構造を有する建築物模型を用いた水理実験による検討

## 実験B

## ピロティ構造を有する建築物を対象とした実験



開口なし(左)・ピロティ(中)・ピロティ+階段(右)の3種の模型

	浸水深	半周期
H030-T60	3.0cm	60秒
H050-T30	5.0cm	30秒
H050-T60	5.0cm	60秒

津波条件3種

# (ロ) ピロティ構造を有する建築物模型を用いた水理実験による検討

## 実験B

## ピロティ構造を有する建築物を対象とした実験

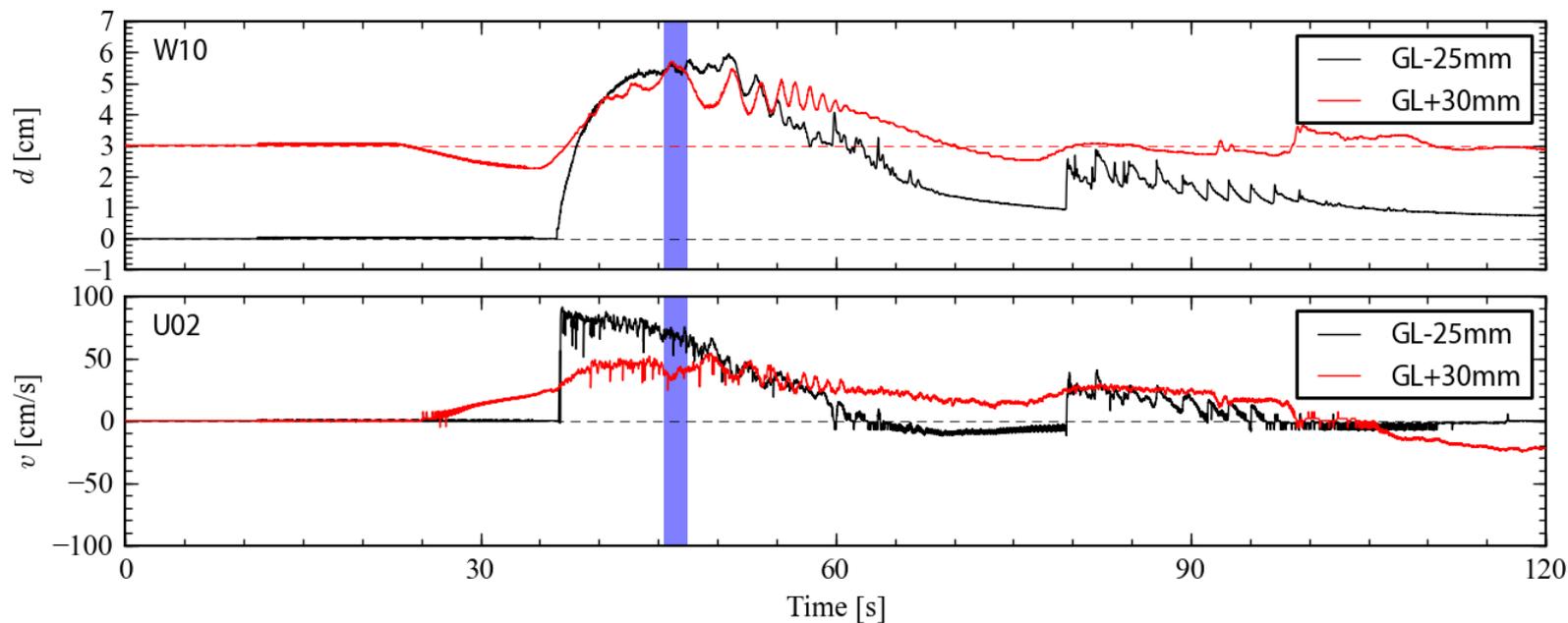
	津波条件	CL-3D	ピロティ		ピロティ/CL-3D	
			PL-3D	PL-3D-S	PL-3D	PL-3D-S
$F_x$	H030-T60	1.44N	0.59N	0.63N	41.0%	43.9%
	H050-T30	8.75N	5.35N	5.49N	61.1%	62.7%
	H050-T60	6.01N	3.36N	3.58N	56.0%	59.5%
$F_z$	H030-T60	3.94N	0.47N	0.54N	12.0%	13.6%
	H050-T30	7.15N	0.78N	1.25N	11.0%	17.5%
	H050-T60	6.63N	1.97N	1.77N	29.8%	26.8%
$M_y$	H030-T60	0.0272Nm	0.0163Nm	0.0167Nm	60.0%	61.4%
	H050-T30	0.5810Nm	0.3826Nm	0.3933Nm	65.9%	67.7%
	H050-T60	0.3345Nm	0.1997Nm	0.2177Nm	59.7%	65.1%

- ピロティ構造により水平波力が4～6割に低減  
低減の割合は津波条件に依存
- 階段の影響により水平波力が1割弱増加

# (ハ) フルード数、遮蔽物の高さ、海岸線からの距離、 複数建築物等の津波波力への影響に関する検討

## ①フルード数の影響検討

初期水位を GL+3.0cm・GL-2.5cm と変えることで、  
浸水深が等しくフルード数の異なる津波を再現



初期水位	浸水深	流速	Fr
GL-2.5cm	5.47cm	68.4cm/s	0.93
GL+3.0cm	5.49cm	37.9cm/s	0.52

## (ハ) フルード数、遮蔽物の高さ、海岸線からの距離、 複数建築物等の津波波力への影響に関する検討

### ①フルード数の影響検討

初期水位	浸水深	流速	Fr
GL-2.5cm	5.47cm	68.4cm/s	0.93
GL+3.0cm	5.49cm	37.9cm/s	0.52

初期水位	最大 水平波力	前面水深
GL-2.5cm	8.75N	10.22cm
GL+3.0cm	4.14N	7.33cm

- 同程度の通過波浸水深であってもフルード数の違いにより、最大水平波力に倍もの違い
- フルード数大 → 建築物前面水深大 → 水平波力大

(ハ)フルード数、遮蔽物の高さ、海岸線からの距離、  
複数建築物等の津波波力への影響に関する検討

②遮蔽物の影響検討

遮蔽物なし・あり2種の模型条件に対して実験



遮蔽物設置状況

津波条件

	浸水深	半周期
H050-T30	5.0cm	30秒
H075-T30	7.5cm	30秒

# (ハ) フLOOD数、遮蔽物の高さ、海岸線からの距離、 複数建築物等の津波波力への影響に関する検討

## ② 遮蔽物の影響検討

津波条件	遮蔽物	最大 水平波力	水平波力最大時		通過波検定			水深係数
			前面水深	背面水深	最大浸水深	流速	Fr	
H050-T30	なし	8.75N	10.22cm	2.24cm	5.93cm	47.1cm/s	0.62	1.72
	あり	7.02N	8.91cm	1.81cm	3.53cm	97.1cm/s	1.65	2.52
H075-T30	なし	16.71N	14.48cm	2.97cm	7.70cm	95.9cm/s	1.10	1.88
	あり	15.09N	12.49cm	2.32cm	5.54cm	109.6cm/s	1.49	2.25

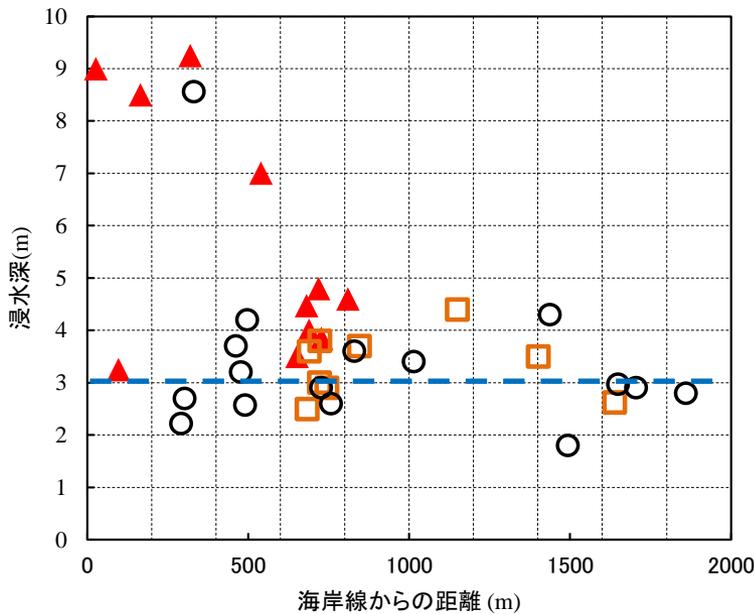
遮蔽物の効果（遮蔽物がある場合は…）

- A) 最大浸水深は減少
- B) 陸上部のFLOOD数は増加（水深係数も増加）
- C) 建築物前面水深および水平波力は減少  
\* 上記2つの効果の組合せによるもの

陸上部のFLOOD数は遮蔽物から建築物までの距離や陸上部の地形条件にも依存するため、さらなる検討が必要

## (二) 木造建築物の津波抵抗性能の向上に資する検討

被害状況を精査するため、壁体内の空間が維持されると仮定した場合の浮力、及び床下空間にできる空気溜まりに起因する浮力を考慮した場合について、津波波力算出の際の水深係数を算定し、より詳細な検討を行った。

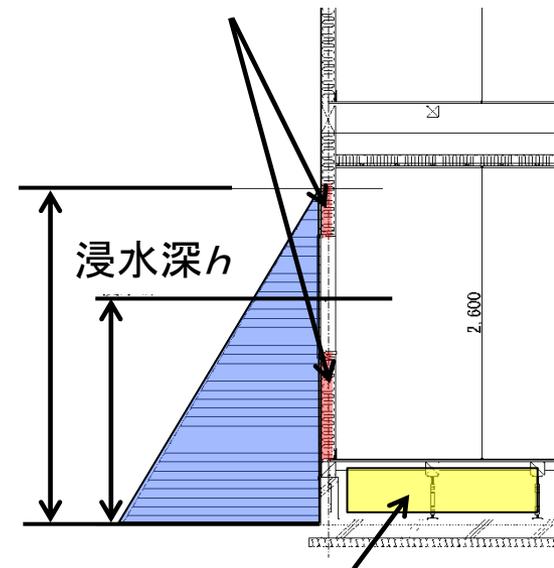


調査物件の浸水深と建物被害の関係

断熱材の種類により壁体内の空間を考慮

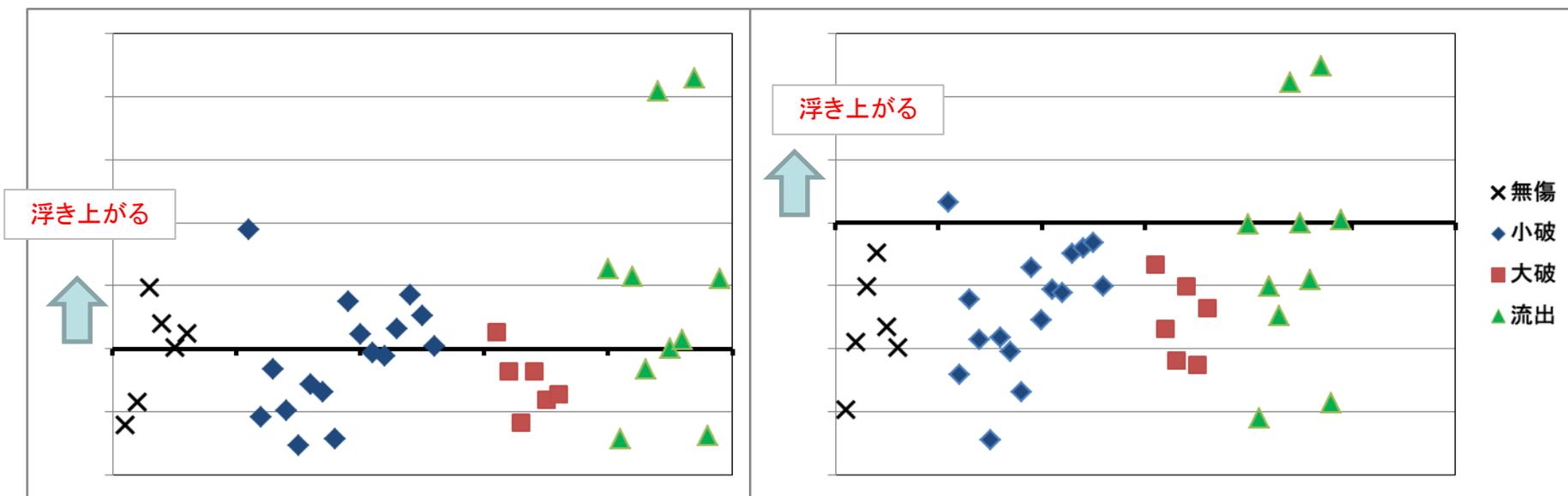


$ah$   
水深係数



床下収納の空間

## (二) 木造建築物の津波抵抗性能の向上に資する検討



壁体内の空間及び床下空間を考慮

壁体内の空間のみ考慮

① 壁体内の空間＋床下空間部分の浮力

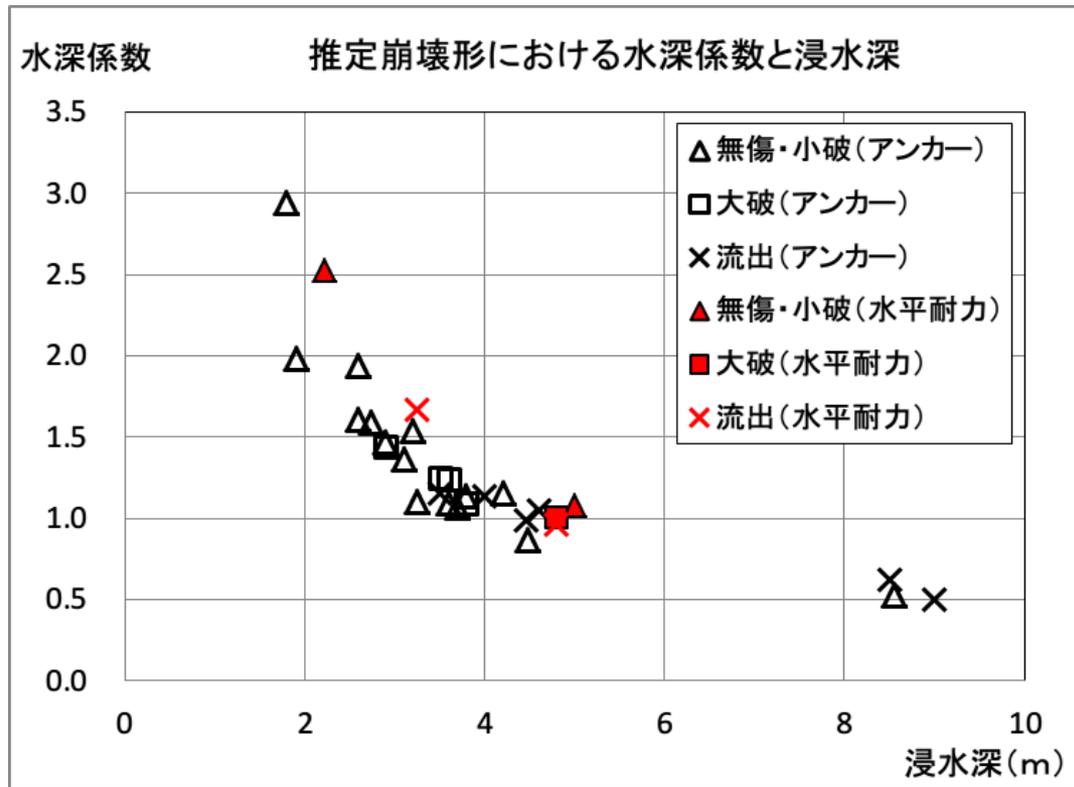
② 壁体内の空間のみの浮力

の2ケースの浮力を考慮して、  
実際の被害状況と比較した結果、  
壁体内の空間のみの浮力を

考慮した場合が被害状況を良く説明出来る。



## (二) 木造建築物の津波抵抗性能の向上に資する検討



津波による建物の崩壊形を推定すると、  
アンカーボルト接合部のせん断破壊で決定する場合が多かった。  
(ただし、基礎の滑動・転倒を除く)

## (二) 木造建築物の津波抵抗性能の向上に資する検討

### まとめ

- ・ 壁の内部と床下に空気溜まりが出来ることを考慮して浮力の検討を行った結果、壁内部の浮力を考慮した検討結果が被害状況と良く一致していた。
- ・ 崩壊形から基礎の滑動・転倒を除いて、津波による建物の崩壊形を推定するとアンカーボルト接合部のせん断破壊で決定するが多かった。

### 今後の課題

- ① アンカーボルト接合部の引張、せん断の複合応力の検討が必要である。
- ② 柱脚・柱頭接合部の引張破壊の検討が必要である。

# まとめ

(イ) 開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力(数値シミュレーション結果から)

- ①波力に対する影響は、フルード数、開口率が最も大きい。
- ②開口の存在は、水平力を $(1 - \text{開口率})$ に減少させ、  
浮力を建物内の水の重量分減ずる。

(ロ) ピロティ構造に作用する津波波力(水理模型実験結果から)

- ①抗力係数がフルード数の増加とともに減少する。
- ②多列柱体の場合は、単独柱体に比べて波力が減少する。
- ③ピロティ構造を有する建築物の波力は40～60%に低減する。

(ハ) フルード数、遮蔽物に関する水理実験結果から

- ①フルード数が大きい程、水深係数が大きくなる。
- ②遮蔽物の存在により波力が低減するデータを得た。

(ニ) 木造建築物の被害状況の精査から

- ① アンカーボルト接合部のせん断破壊で決定するケースが多い。
- ② 壁体内の空気溜まりの浮力を考慮した検討が重要。

# 今後の課題

- (イ) 開口を有する建築物に作用する津波波力と浮力(数値シミュレーション)
  - ・有限幅で開口を有する建築物に対する波圧低減特性の把握
  - ・建物の内部に作用する津波波力の特性把握
  - ・地盤透水係数を考慮して浮力の特性の把握
  - ・耐津波設計を可能にする水平波力、浮力の概算モデルの構築
- (ロ) ピロティ構造に作用する津波波力(水理模型実験)
  - ・複数列の柱体に対する波力低減モデルの構築
  - ・ピロティ構造に対する設計に用いることができる簡便な波力評価方法の構築
- (ハ) フルード数、遮蔽物等の津波波力への影響
  - ・海岸線からの距離、地盤勾配、粗度などのパラメータを考慮した波力評価法
- (ニ) 木造建築物の津波抵抗性能の向上
  - ・アンカーボルト接合部の引張、せん断の複合応力の検討
  - ・柱脚・柱頭部の引張破壊の検討