

## 開口部を有する RC 造建物の前面浸水深，移動・転倒条件 と水平流体力の低減

秋田大学 松富英夫  
秋田大学 嶋津 朋  
秋田大学 決得元基

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 造建物が津波に持ち堪えるかどうかを判断する重要なパラメータとして建物の前面浸水深  $h$  と浸水縦断面積  $A_c$  ( $\propto$  単位幅当たりの建物重量) があり，RC 造建物の移動・転倒条件として現地調査に基づいて次式を提示した<sup>1)</sup>。

$$A_c/h = 6.8 \quad (h \geq 5.4 \text{ m}) \quad (1)$$

建物への津波水平力は建物の開口率  $O_p$  にも依存するが<sup>2)</sup>，その基本特性はまだよく判っておらず，実験的にもほとんど検討されていない。

本研究は入射津波条件を用いた開口部を有する建物の前面浸水深の簡易推定法とその水深を用いた RC 造建物の移動・転倒条件を提示し，津波水平力の開口率への依存性を実験的に検討する。非没水矩形建物の抗力係数の値についても考察する。

### 2. 実験

津波氾濫流はゲート急開流れで模擬した。実験水路の概略，測定機器の配置と諸記号の定義を図-1 に示す。高さが 0.50 m，幅が 0.30 m，貯水長  $L_U$  が 5.0 m，一様水深部 (静水深  $h_0=0.067$  m)，一様勾配斜面部 (勾配  $S=1/26$ )，平坦な陸上部 (地盤高  $h_G=0.01$  m) が 2.0 m，全長が 11.0 m の両面ガラス張り鋼製矩形水路である。

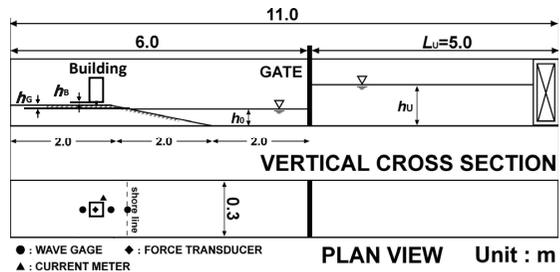


図-1 実験水路，測定機器の配置と記号の定義

実験対象の建物模型を図-2 に示す。縮

尺は 1/100 で，建物の床は各階に設けているが，屋内の間仕切りは設けていない。RC 造建物を模擬しており，2 階建ては高さ 7cm，4 階建ては高さ 14cm で，実際的な「窓 (開口部) あり」 (開口率  $O_p$  は海側，陸側ともに 20%，40%)，仮想的な「窓なし (窓があっても，壊れない)」と「骨組のみ」の計 8 種類を作製した。何れも幅は 7.0 cm，奥行は 5.4 cm である。重量はフルード則<sup>3)</sup>と実際の RC 造建物の平均像が  $1.3 \text{ tf/m}^2$ /階程度であることを考慮して，高さ 7 cm のときの「 $O_p=20\%$ 」が 100 gf (0.98 N)，「 $O_p=40\%$ 」が 91 gf (0.89 N)，「窓なし ( $O_p=0\%$ )」が 109 gf (1.07 N)，「骨組のみ ( $O_p=65\%$ )」が 66 gf (0.65 N)，高さ 14 cm のときの「 $O_p=20\%$ 」が 184 gf (1.80 N)，「 $O_p=40\%$ 」が 168 gf (1.65 N)，「窓なし」が 203

\* Front Inundation Depth, Sliding-Overturning Condition and Decrease in Tsunami Horizontal Fluid Force of RC Building with Aperture by Hideo MATSUTOMI, Tomomi SHIMAZU and Genki KETTOKU

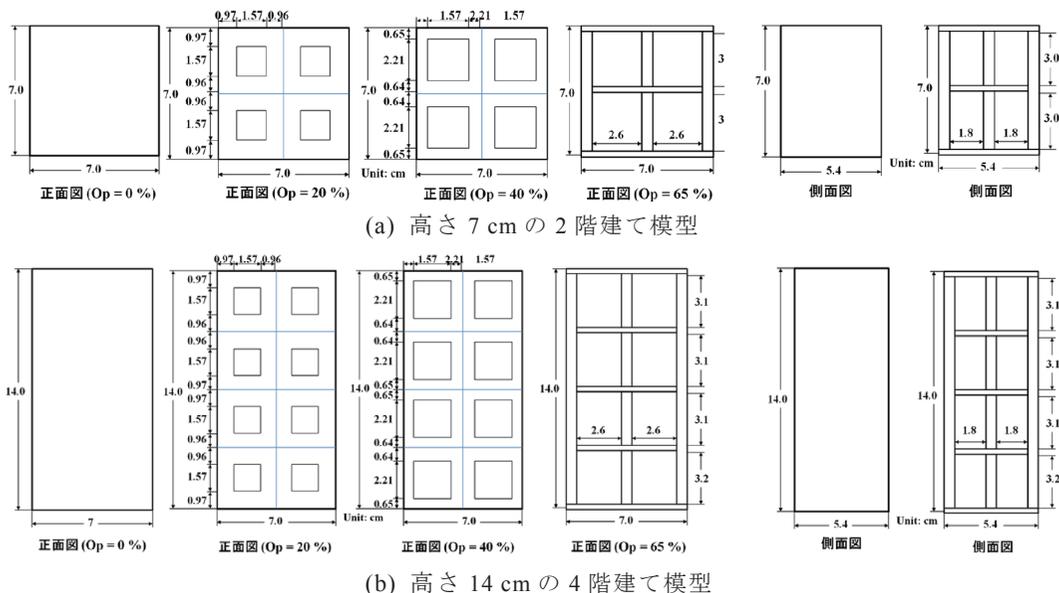


図-2 実験対象の建物模型の詳細 (縮尺 1/100)

表-1 実験条件

貯水深 $h_U$ (cm)	15, 20, 22.5, 25, 27.5
静水深 $h_0$ (cm)	6.7
斜面勾配 $S$	1/26
地盤高 $h_G$ (cm)	1
床高 $h_B$ (cm)	0.1, 0.5, 1, 2, 3.5
開口率 $O_p$ (%)	0, 8, 29, 65
模型の種類	7 cm 0% (109 gf), 20% (100 gf), 40% (91 gf), 骨組 65% (66 gf)
	14 cm 0% (203 gf), 20% (184 gf), 40% (168 gf), 骨組 65% (116 gf)

gf (1.99 N), 「骨組のみ ( $O_p=65\%$ )」が 116 gf (1.14 N) である。「骨組のみ」は柱の幅が 0.6 cm, 厚さが 0.6 cm で, 鉄骨造建物の壁面がはがれた場合を想定した。実際の鉄骨造建物の平均像が  $0.8 \text{ tf/m}^2$ /階程度であることを考えると, 重量は重ためである。

測定項目は模型の前面から 25 cm と 5 cm, 背面から 7.5 cm の 3 位置における超音波式変位計 ((株)KEYENCE 社製, UD-500) による氾濫水深  $h$ , 四分力計 ((株)SSK 社製, 定格容量 1000 gf (9.8 N)) による水平力  $F_x$  と鉛直力  $F_z$ , 模型の前面左端から水路横断方向へ 3 cm 離れた位置におけるプロペラ流速計 (中村製作所製, 直径 3 mm) による氾濫流速  $u$  である。模型がないときの模型設置位置における氾濫水深と氾濫流速 (一点法) も測定した。模型周辺の流況観察のため, 水路の上方と側方からビデオ撮影も行った。

実験条件をまとめて表-1 に示す。 $h_U$  は初期ゲート上流域の貯水深,  $h_B$  は陸上部の水路底面から模型底面までの高さ (床高) で, 各ケース 3 回実験を行った。

水平力  $F_x$ , 水路横断方向に回転軸をもつモーメント  $M$ , 鉛直力  $F_z$ , 浸水深  $h$  の経時変化例を図-3 に示す。開口率  $O_p=0\%$  と  $40\%$  のものである。

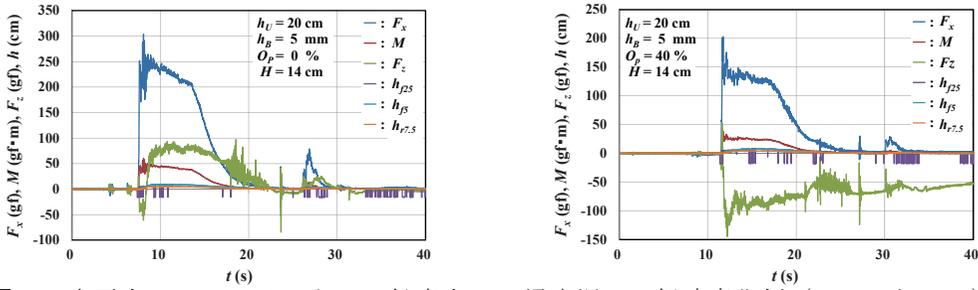


図-3 水平力  $F_x$ ，モーメント  $M$ ，鉛直力  $F_z$ ，浸水深  $h$  の経時変化例 ( $O_p=0\%$  と  $40\%$ )

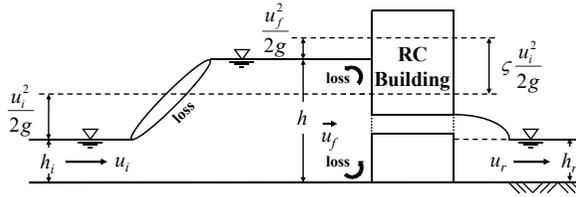


図-4 建物前面浸水深  $h$  の簡易推定モデル

### 3. 前面浸水深の簡易推定法

水平床上の定常的な氾濫流を考える．圧力は静水圧とする．建物の影響を受けていない入射津波の氾濫水深と氾濫流速を  $h_i, u_i$  とする．建物前面における津波衝突後の浸水深と断面平均流速を  $h, u_f$  とする．建物の前面，および背面や側面に窓などの開口部があれば， $u_f$  は零ではない．本モデルを図-4 に示す．

津波は建物と開口部の存在によりエネルギーを失うとともに流出させるが，このときの建物前・背面間のエネルギー保存則は式(2.1)のように表現することが可能である．

$$h + \frac{u_f^2}{2g} = h + \left(\frac{u_f}{u_i}\right)^2 \frac{u_i^2}{2g} = h_r + (1 + \zeta') \frac{u^2}{2g} = h_i + (1 + \zeta) \frac{u_i^2}{2g} \tag{2.1}$$

$$u = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta} \{2g(h - h_r) + u_f^2\}} \tag{2.2}$$

ここで， $g$  は重力加速度， $\zeta'$  はエネルギー損失係数<sup>4)</sup>， $\zeta$  は広義（新定義）のエネルギー損失係数で，反射段波面（場合によっては跳水）におけるエネルギー損失も含んでいる．式(2.1)の全水頭は反射段波（跳水）のときは入射津波のものより大きい（小さい）．建物前面で堰き止められることによる反射段波（跳水）の全水頭（比エネルギー）が入射津波のものより大きく（小さく）なるため，跳水のときは $\zeta$  が負となる． $u_f=0$  のとき，式(2.1)は松富・飯塚の式<sup>4)</sup>に他ならない．式(2.1)から次式を得る．

$$\frac{h}{h_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 + \zeta - \left(\frac{u_f}{u_i}\right)^2 \right\} \frac{u_i^2}{gh_i} = 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 + \zeta - \left(\frac{u_f}{u_i}\right)^2 \right\} F_{ri}^2 \tag{3}$$

ここで， $F_{ri}$  は入射津波のフルード数である．

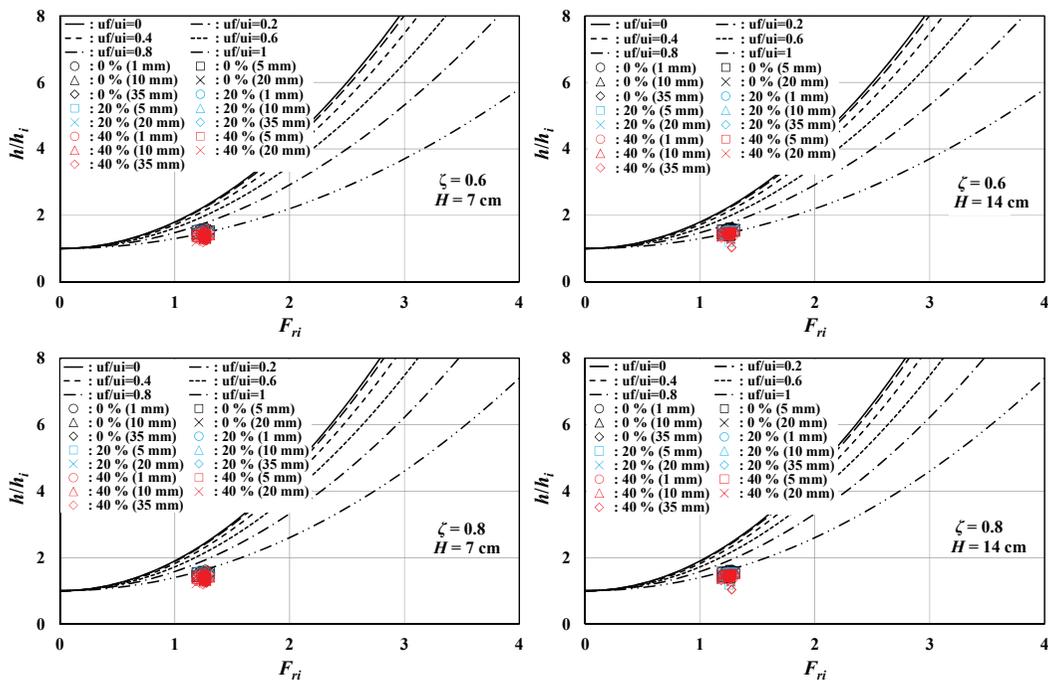


図-5 無次元前面浸水深 ( $h/h_i$ ) と入射フルード数  $F_{ri}$  の関係

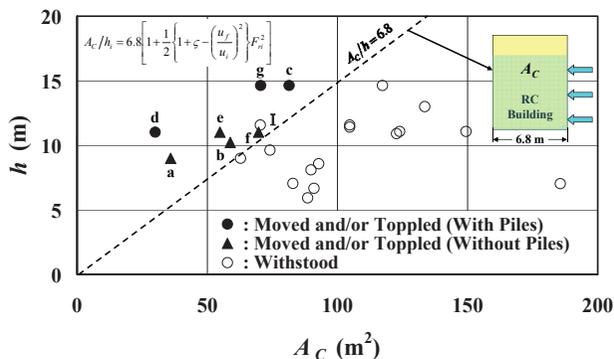


図-6 建物の浸水縦断面積  $A_C$ 、浸水深  $h$  と被害形態の関係

表-2 移動や転倒した鉄筋コンクリート造建物の一覧

場所	階数・用途	表記	開口率 (%)
大 槌	2階・民家	(a)	0
陸前高田	3階・民家	(b)	-
女 川	2階・冷凍庫	(c)	10
女 川	2階・警察署	(d)	6
女 川	3階・集合住宅	(e)	-
女 川	3階・店舗	(f)	5
女 川	4階・旅館	(g)	8
陸前高田	3階・集合住宅	l	26

$(u_f u_i)^2$  と  $\zeta$  の値次第で、 $h/h_i$  はベルヌーイの定理から導かれるものより大きくなったり、小さくなったりする。 $u_f u_i$  や  $\zeta$  は建物の開口率、形状や建物への津波入射角に依存する。式(3)の計算例や本研究実験値との比較例を **図-5** に示す。図から理解されるように、 $\zeta$  (未定) の調整で実験結果の説明が可能であり、本推定法は有用と判断される。

既報の RC 造建物の移動・転倒条件式(1)と式(3)から、入射津波条件を用いた開口部を有する RC 造建物の移動や転倒の条件として式(4)を得る (**図-6**)。

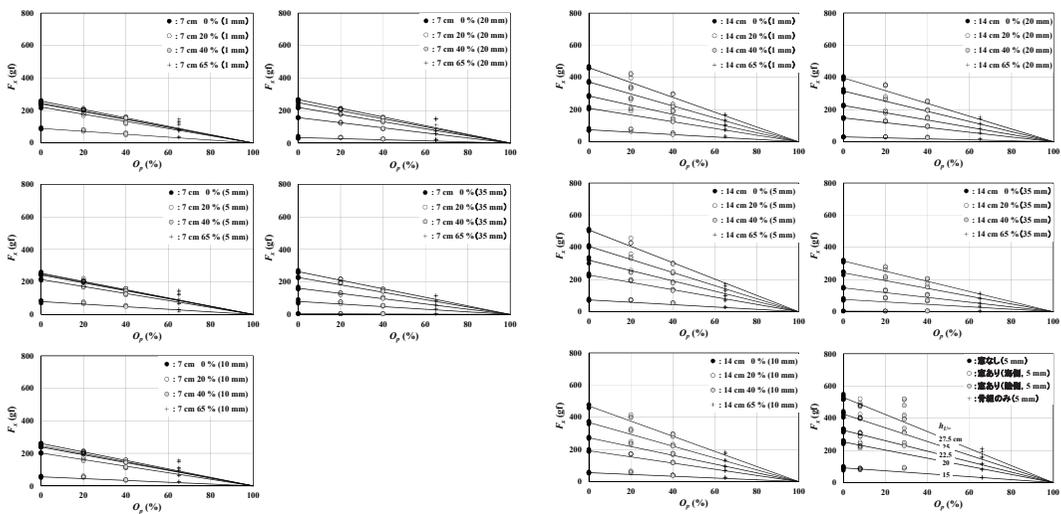
$$\frac{A_C}{h_i} = 6.8 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left\{ 1 + \zeta - \left( \frac{u_f}{u_i} \right)^2 \right\} F_{ri}^2 \right] \quad (4)$$

東北地方太平洋沖地震津波において移動や転倒した RC 造建物の開口率は **表-2** に示すように 10%以下 (平均 6%) である<sup>1)</sup>。したがって、開口部による水平力の低減は小さいと考えられ (**図-7** 参照)、式(4)は厳しい条件下に対するものと言える。

#### 4. 水平力の開口率への依存性

開口率  $O_p$  と準定常部の水平力  $F_x$  の関係を **図-7** に示す。図中の直線群は開口率 0% (窓なし) における実験条件毎の実験平均値と開口率 100% における値 0 を結んだものである。図から、開口率 29% のときを除いて (**図-7(b)右下の図**)<sup>5)</sup>、開口率が增大するにつれて、水平力は直線的に減少することが判る。開口率 29% の水平力は 8% のものとほぼ同じである。これは、海側、陸側に関係なく、どちらか小さい方の開口率で水平力が決まることを示している<sup>5)</sup>。もちろん、建物の両側壁や屋内壁の開口率も水平力に関係しよう。

実在する RC 造建物の開口率は最大で 38% 程度である<sup>1)</sup>。屋内壁の影響を考えると、「開口部による水平力の低減を 3 割で止める」<sup>2)</sup> ことは妥当な判断である。



(a) 高さ 7 cm の 2 階建て模型

(b) 高さ 14 cm の 4 階建て模型

**図-7** 開口率  $O_p$  と水平力  $F_x$  の関係 (準定常部)

## 5. 抗力係数

建物背面の静水圧を考慮したときの建物に働く全水平力  $F_x$  は次式となる.

$$F_x = \frac{1}{2}(1-\beta)\rho gh_i^2 B + \rho h_i u_i^2 B - \rho h_i u_i \omega B - \rho h u_f^2 B + \rho h \omega u_f B - \alpha \quad (5)$$

ここで,  $\beta$  は建物背面に働く全静水圧と建物の影響を受けていない入射津波の全静水圧の比 (0~1 の値),  $\rho$  は流体 (濁水) 密度,  $B$  は建物幅,  $\omega$  は反射段波伝播速度,  $\alpha$  は反射段波領域における横流出に伴う運動量項である.  $u_f=0$  のときは,  $\omega \leq 0$  (0 のときは跳水) より, 次式を得る.

$$F_x = \frac{1}{2}(1-\beta)\rho gh_i^2 B + \rho h_i u_i^2 B - \rho h_i u_i \omega B > \frac{1}{2}\rho C_D u_i^2 h_i B \quad (6)$$

フルード数が小さいとき,  $\beta \doteq 1$ ,  $\omega < 0$  である. 大きいとき,  $\beta \doteq 0$ ,  $\omega \leq 0$  である. したがって,  $u_i$  と  $h_i$  を用いた抗力では, 建物が角柱型であれば, 何れにしても  $C_D > 2$  となる.

## 6. おわりに

入射津波条件を用いた開口部を有する建物の前面浸水深  $h$  の簡易推定法と RC 造建物の移動・転倒条件を提示した. 津波水平力の開口率への依存性と低減の限界, 非没水矩形建物の抗力係数の値も論じた.

**謝辞**: 本研究を実施するにあたり科学研究費 (基盤研究 (C), 24510244) (松富英夫) の補助を受けた. ここに記して謝意を表する.

## 参考文献

- 1) 松富英夫・山口枝里子・直江和典・原田賢治: 東北地方太平洋沖地震津波における鉄筋コンクリート造建物と海岸黒松の被害条件, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.351-355, 2012.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 津波避難ビル等の構造上の要件の解説, 国総研資料 No.673, 2012.
- 3) 松富英夫・大沼康太郎・今井健太郎: 植生域氾濫流の基礎式と植生樹幹部の相似則, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.301-305, 2004.
- 4) 松富英夫・飯塚秀則: 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.361-365, 1998.
- 5) 松富英夫・決得元基・嶋津 朋: 開口部を有する RC 造建物の前面浸水深, 移動・転倒条件と水平力の低減, 日本地震工学会大会梗概集, pp.41-42, 2013.