

開口部を有する RC 造建築物前面における最大浸水深の簡易推定法*

秋田大学 松富 英夫
秋田大学 小野奈那子

1. はじめに

建築物への津波の水平力や鉛直力は建築物の開口率 O_p に大きく依存する^{1), 2)}。限られた条件下であるが、模型実験によりその検討が行われており^{2), 3)}、両力は開口部を有する建築物の前面浸水深が評価できれば、ある程度の精度で評価できる状況となってきてている。

そこで、本研究は入射津波条件を用いた開口部を有する RC 造建築物の前面浸水深の簡易推定法を提示し、実験値との比較を通して提案推定法の有用性を論じる。

2. 模型実験

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。実験水路は高さが 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）が各 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。

建築物模型を図-2 に示す。高さ $H=14$ cm の模型の外形は 2011 年東北地方太平洋沖地震津波のときに被災した宮城県女川町の 4 階建て旅館を模擬している。建築物の開口率 O_p は仮想的な

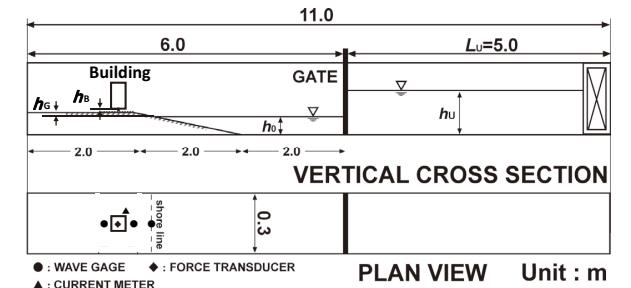


図-1 実験水路の概略、測定機器の配置と諸記号の定義

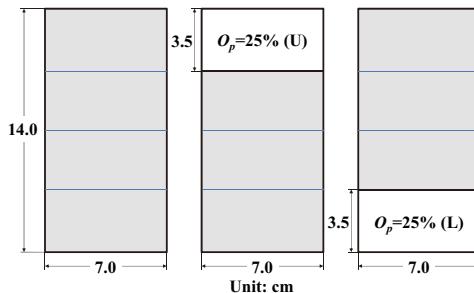
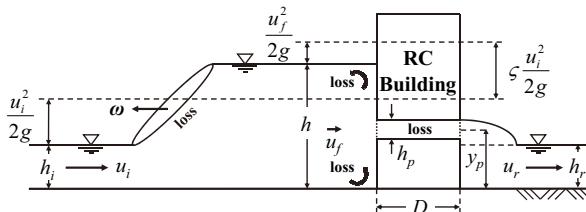


図-2 実験対象の建築物模型諸元の詳細（奥行は全て 5.4 cm, 縮尺 1/100）

* Simple method for estimating the maximum inundation depth at the front of wide RC building with aperture by Hideo MATSUTOMI and Nanako ONO

表-1 実験条件

貯水深 h_U (cm)	25.5, 27
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
開口率 O_p (%)	0, 25
模型の高さ H (cm)	14

図-3 前面浸水深 h の簡易推定モデル

「窓なし（窓があっても、壊れない）」（開口率 0%）と実際的な「窓（開口部）あり」（開口率は海側と陸側の上部または下部が同一の 25%，両側が共に 0%）の 3 種類とした。縮尺は 1/100 で、模型重量（模型材料の種類と厚さ）はフルードの相似則⁴⁾と実際の RC 造建築物が 1.3 tf/m²/階程度であることから決めた。

実験条件を表-1 にまとめて示す。 h_U は初期ゲート上流域の貯水深、 h_B は平坦な陸上部の底面から模型底面までの床高で、今回は開口率を正確にするため 0 cm とした。実験は各ケース 3 回行った。

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_{25} , h_{5} , $h_{7.5}$ 、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 5 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 （一点法）である。模型が設置されていない場合の模型設置位置における入射氾濫水深と入射氾濫流速の測定も行った。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。ただし、本研究では氾濫水深と氾濫流速の結果、およびビデオ映像のみを利用する。

3. 前面浸水深の簡易推定法

開口部を有する RC 造建築物前面における浸水深を入射津波条件で評価することを考える。水平床上の定常的な津波氾濫流（サーボ）を考える。圧力は静水圧分布とする。建築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各々 h_i , u_i 、入射津波衝突後の建築物前面における浸水深と断面平均流速を各々 h , u_f 、建築物背面における浸水深と断面平均流速を各々 h_r , u_r とする。建築物の前面かつ背面や側面に窓などの開口部があれば、 u_f と u_r は零ではない。本研究のモデルを図-3 に示す。

津波は建築物の存在によりその前面で反射段波や跳水を形成し、開口部を通過することによりエネルギーを失うとともにエネルギーを流出させるが、このときの建築物の前面と背面間のエネルギー保存則は式(1)のように表現してもよかろう。

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

ここで、 g は重力加速度、 ζ' はエネルギー損失係数、 u は ζ' の定義流速⁵⁾、 ζ は広義（新定義）のエネルギー損失係数で、反射段波または跳水の形成、開口部通過、非静水圧分布や非定常の効果などによるエネルギー得失も含んでいる。 $u_f=0$ 、つまり $O_p=0$ のとき、式(1)は松富・飯塚の式⁵⁾に他ならず、本理論はこれまでの著者らのものと一貫性を有する。

式(1)の 2 番目と 4 番目から次式を得る。

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

式(2)から理解されるように、無次元前面浸水深（水深係数） h/h_i は ζ 、無次元前面流速 u_f/u_i や入射津波のフルード数 F_{ri} （以下、入射フルード数）の値次第で入射津波の無次元全水頭 $h_{BE}/h_i (=1+F_{ri}^2/2)$ より大きくなったり、小さくなったりする。 ζ や u_f/u_i は F_{ri} 、 O_p 、建築物の形状、建築物への津波入射角などに依存する。

入射津波（サーボ）が定常的で、圧力が静水圧分布する場合、 ζ は Stoker 理論⁶⁾やその理論を開口部がある場合へ拡張することで評価可能である。この拡張理論は 2 次元直立壁や建築物間の開放部、建築物の開口部を想定して、各々岩崎・富樫⁷⁾、富樫・古賀⁸⁾と池谷ら^{9), 10)}が提示しており、基礎式（質量と運動量の保存則）は式(3)と(4)である。

$$h_i(\omega - u_i) = h(\omega - u_f) \quad (3)$$

$$h_i(\omega - u_i)u_i - h(\omega - u_f)u_f = \frac{1}{2}gh_i^2 - \frac{1}{2}gh^2 \quad (4)$$

ここで、 ω は反射段波伝搬速度で、 $\omega \leq 0$ である。

式(3)と(4)から次の h/h_i に関する 3 次式が得られ、岩崎・富樫⁷⁾、富樫・古賀⁸⁾と池谷ら⁹⁾が解を導いている。

$$\left(\frac{h}{h_i} \right)^3 - \left(\frac{h}{h_i} \right)^2 - \left\{ 1 + 2F_{ri}^2 \left(1 - \frac{u_f}{u_i} \right)^2 \right\} \frac{h}{h_i} + 1 = 0 \quad (5)$$

ただし、富樫・古賀は k を実験定数 ($=0.23$) として、 $u_f/u_i = kh_i/h$ の関係を導入して式(5)を解いている。

前面浸水深は建築物の開口率が同じであっても、開口部の位置や形状、内部などの状況次第で異なるはずである。式(5)は u_f/u_i と F_{ri} をパラメータとして解くことになるが、 u_f/u_i と開口率や開口部の位置などの関係は不定で、無数考えられる。そこで、個々の建築物の諸元に対応できる近似解法を以下に提示する。

建築物の開口部における質量と運動量の保存則は式(6)と(7)である。

$$hu_f = h_p u_p \quad (6)$$

$$g(h - y_p)h_p + h_p u_f^2 \cong h_p u_p^2 + fDu_p^2 + gA \quad (7)$$

ここで、 h_p は開口部の換算高さ（単数または複数の任意形状の開口部を 1 つの矩形開口部に換算したときの高さ。換算法は今後の課題）、 u_p は開口部内の流速、 y_p は地面から開口部中心ま

での高さ, f は合成摩擦係数 (開口部の換算に起因), D は建築物の奥行幅で, 開口部内の壁面せん断応力 τ_0 の定義と A は ρ を流体密度として次式である。

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \rho f u_p^2 = \frac{1}{2} \rho f \left(\frac{h u_f}{h_p} \right)^2 = \frac{1}{2} \rho f \left(\frac{u_f}{O_p} \right)^2 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A &= (h_i - y_p) h_p & h_i > y_p + \frac{h_p}{2} \\ &= \frac{1}{2} \left(h_i - y_p + \frac{h_p}{2} \right)^2 & y_p + \frac{h_p}{2} \geq h_i > y_p - \frac{h_p}{2} \\ &= 0 & h_i \leq y_p - \frac{h_p}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

式(6)と(7)から h と u_f の関係として式(10)または(11)を, 式(10)または(11)を式(5)に代入すると式(12)を得る。

$$u_f = \sqrt{\frac{g(h - y_p)h_p^3 - gA h_p^2}{(h_p + fD)h^2 - h_p^3}} \quad (10)$$

$$\frac{u_f}{u_i} = \frac{1}{F_{ri}} \sqrt{\frac{\left(\frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i}\right)h_i^3 - A \frac{h_i^2}{h_i^4}}{\left(\frac{h_p}{h_i} + f \frac{D}{h_i}\right)h_i^2 - \frac{h_p^3}{h_i^3}}} \quad (11)$$

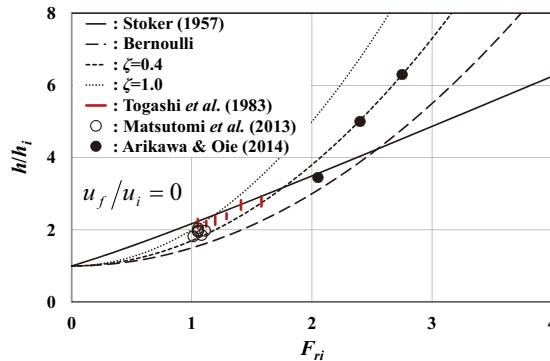
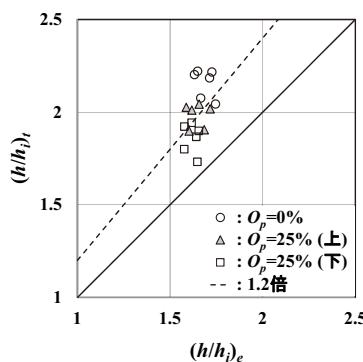
$$\left(\frac{h}{h_i}\right)^3 - \left(\frac{h}{h_i}\right)^2 - \left\{ 1 + 2 \left[F_{ri} - \sqrt{\frac{\left(\frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i}\right)h_i^3 - A \frac{h_i^2}{h_i^4}}{\left(\frac{h_p}{h_i} + f \frac{D}{h_i}\right)h_i^2 - \frac{h_p^3}{h_i^3}}} \right]^2 \right\} \frac{h}{h_i} + 1 = 0 \quad (12)$$

式(12)の解析解を得ることは難しいので, 本研究では逐次計算により解を得ることにする。式(2)と(11)の組合せの場合でも逐次計算により解を得ることになる。

$u_f/u_i=0$ (2 次元直立壁) の場合の h/h_i に関する式(2)の理論値と実験値の比較例を図-4 に示す。図中の松富ら²⁾の実験値は床高 h_B が 5 mm, 開口部なしの孤立建築物模型に対するもので, 2 次元直立壁に対するものではない。Stoker の理論値や富樫・古賀の実験値 (値域表示) より値が小さいのはこのためと考えられる。図から, ζ が適切に推定されれば, 式(2)は実験値の変化傾向をよく説明できることが判る。図中の有川・大家¹¹⁾の実験値と同じ変化傾向の実験値・数値計算値を加藤ら¹²⁾が報告している。

開口部を有する場合の h/h_i に関する式(12)の理論値と本研究実験値との比較例を図-5 に示す。ただし, $f=0.02$ を採用している。理論値が実験値より平均的に 1.2 倍程度大きい。この理由の一部として静水圧分布や定常の仮定が考えられる。

式(2) (式(2)と(11)の組合せでもよい) を利用する場合, 現状では直面する状況 (条件) 毎に ζ や u_f/u_i を推定した後 (式(2)と(11)の組合せを用いる場合は u_f/u_i を必要としない), h/h_i を評価することになる。式(5)を利用する場合, 現状では直面する状況毎に u_f/u_i を推定した後, h/h_i を評価することになる。式(12)はパラメータが多いが, 実際の建築物に対応できる点で有用と思われる。ただし, 静水圧分布や定常の仮定を採用する限り, 理論値は実験値に対して Stoker 理論や式(5)と同様の傾向を持つことは免れない。

図-4 h/h_i の理論値（式(2)）と実験値の比較図-5 h/h_i の理論値（式(12)）と実験値の比較

4. おわりに

入射津波条件を用いた開口部を有する RC 造建築物の前面浸水深の簡易推定法を提示した。広義のエネルギー損失係数 ζ （非静水圧分布や非定常の効果を含めることが可能）が適切に推定され得るならば、式(2)または式(2)と(11)の組合せによる推定法が推奨される。ただし、 ζ を適切に推定するには経験を積み重ねる必要がある。

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

参考文献

- 1) 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.
- 2) 松富英夫・決得元基・齋藤雅大：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、土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69, No.2, pp.326-330, 2013.
- 3) 松富英夫・決得元基・嶋津朋・長沼駿介・桜井亮：開口部を有する RC 造建物における津波の水平力と鉛直力の低減、土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.70, No.2, pp.371-375, 2014.
- 4) 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 卷, pp.301-305, 2004.

- 5) 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.
- 6) Stoker, J. J.: Water Waves, Interscience Publishers, Inc., New York, pp.326-333, 1957.
- 7) 岩崎敏夫・富樫宏由: 遷上津波に対する陸堤の効果に関する研究, 第14回海岸工学講演会講演集, pp.179-181, 1967.
- 8) 富樫宏由・古賀克志: 直立壁による反射津波段波の水理と波力のメカニズム, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.332-336, 1983.
- 9) 池谷 肇・秋山義信・岩前伸幸: 陸上構造物に作用する津波持続波圧に関する水理学的考察, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.816-820, 2013.
- 10) 池谷 肇・岩前伸幸・秋山義信・福山貴子・末長清也・鈴木紀雄・館野公一: 開口影響を考慮した陸上構造物に作用する津波持続荷重の評価法, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.386-390, 2014.
- 11) 有川太郎・大家隆行: 防潮堤背後の建物に作用する津波力に関する実験的検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.806-810, 2014.
- 12) 加藤広之・米山正樹・成田賢仁・大村智宏・八木 宏・中山哲嚴・中村克彦・門 安曇・岩瀬浩之: 漁港海岸の胸壁に作用する津波波力に関する研究, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2610-2619, 2014.