

開口部を有する RC 造建築物前面における津波浸水深の簡易推定法

秋田大学 学生員 ○小野奈那子 正員 松富英夫 学生員 決得元基

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)}. 限られた条件下ではあるが、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 $h_0=0.050\sim0.087$ m），一様勾配斜面部（勾配 $S=1/26$ ），平坦な陸上部（地盤高 $h_G=0\sim0.037$ m）が各々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。

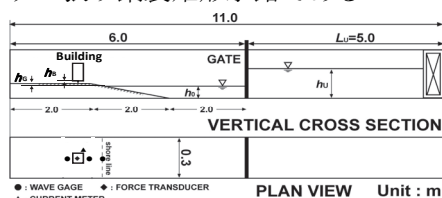


図-1 実験水路の概略、測定機器の配置と諸記号の定義

建築物模型を図-2に示す。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「窓なし（窓があっても、壊れない）」（開口率0%）と実際の「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、模型重量はFroude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 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による汜濫水深 h_{f25} , h_{f5} , $h_{r7.5}$, 四分力計による水平力 F_x と鉛直力 F_z , 模型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による汜濫流速 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汜濫水深と入射汜濫流速の測定も行った.

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

表-1 実験条件

貯水深 h_U (cm)	25.5, 27
静水深 h_0 (cm)	5.0, 6.7, 8.7
斜面勾配 S	1/23
地盤高 h_G (cm)	3.7, 2, 0
床 高 h_B (cm)	0
開口率 O_p (%)	0, 25
模型の高さ H (cm)	14

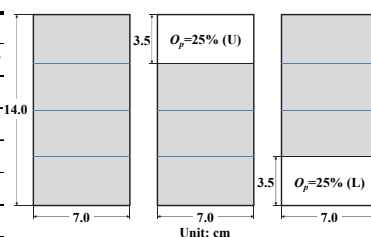


図-2 実験対象の建築物模型諸元の
詳細（奥行は全て 5.4 cm, 縮尺 1/100）

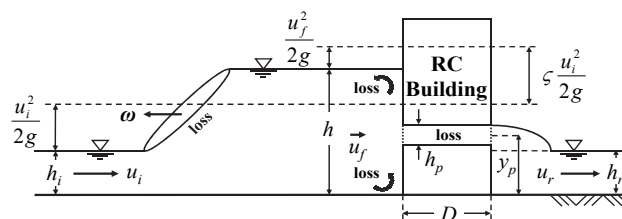


図-3 前面浸水深 h の簡易推定モデル

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_f , 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. 本モデルを図-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らう。

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

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式と一貫性を有する。式(1)の2と4番目から次式を得る。

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

式(2)から、無次元前面浸水深 h/h_i は ζ 、無次元前面流速 u_f/u_i や入射津波の Froude 数 F_{ri} (以下、入射 Froude 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。

入射津波が定常的で、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に考えられる。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。

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

$$g(h - y_p)h_p + h_p u_f^2 \approx h_p u_p^2 + f(1 + h_p/aB)Du_p^2 + gA \quad (7)$$

ここで、 a (=0~1) は開口部の幅/建築物の幅 B 、 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、 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。

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

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

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

$$u_f = \sqrt{\frac{g(h - y_p)h_p^3 - gAa^2h_p^2}{h_p + f(1 + h_p/aB)Dh_p^2 - a^2h_p^3}} \quad (10)$$

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

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

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とする。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

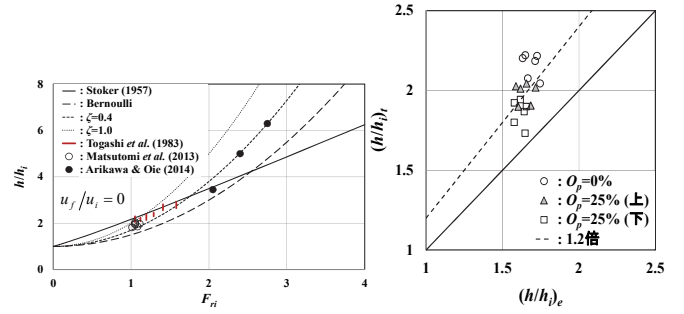


図-4 h/h_i の理論値 (式(2))

図-5 h/h_i の理論値 (式(12))

と実験値の比較

と実験値の比較

理論値と実験値の比較を図-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を図-5に示す。 $f=0.02$ 、 $a=1$ 、 $B \gg h_p$ を採用している。理論値が実験値より 1.2 倍程度大きい。理由として静水圧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。

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： 科学研究費(基盤研究(C), 24510244) (代表：松富英夫) の補助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国総研資料 No.673, 2012.
- 2) 松富ら：土論集 B2, Vol.69, No.2, pp.326-330, 2013.
- 3) 松富ら：土論集 B2, Vol.70, No.2, pp.371-375, 2014.
- 4) 松富ら：海工論文集, 第 51 巻, pp.301-305, 2004.
- 5) 松富・飯塚：海工論文集, 第 45 巻, pp.361-365, 1998.
- 6) Stoker, J. J.: Water Waves, pp.326-333, 1957.
- 7) 岩崎・富樫：第 14 回海講講演集, pp.179-181, 1967.
- 8) 富樫・古賀：第 30 回海講講演集, pp.332-336, 1983.
- 9) 池谷ら：土論集 B2, Vol.69, No.2, pp.816-820, 2013.
- 10) 池谷ら：土論集 B2, Vol.70, No.2, pp.386-390, 2014.
- 11) 有川・大家：土論集 B2, Vol.70, No.2, pp.806-810, 2014.
- 12) 加藤ら：日本地震工学シンポジウム集, pp.2610-2619, 2014.