

つなぎ空間と開口部を有するRC造建築物前面における津波浸水深の推定法*

秋田大学 松富英夫 紺野友恵 高尾駿介

1. はじめに

建築物に作用する津波の水平力や鉛直力は建築物の前面浸水深 h が推定できれば、既往の研究成果を用いて推定可能な状況にある¹⁾。

その建築物の前面浸水深は入射津波の氾濫水深 h_i とフルード数 F_{ri} だけではなく、建築物の形状²⁾、向き（津波の入射角）、配置間隔（つなぎ空間）、開口率 O_p ³⁾にも依存する。津波氾濫流が開口部を有する幅広の孤立した直方体 RC 造建築物へ直角に入射する場合（図-2 左図と図-3 上図参照）の入射津波条件を用いた前面浸水深の推定法（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する方法は除く）は提案済みである⁴⁾。開口部を有する任意幅の直方体 RC 造建築物が津波氾濫流の横断方向に単列、複数あり、各建築物が互いの前面浸水深に影響を及ぼし合う一般的な場合（図-2 右図と図-3 下図参照）の前面浸水深の推定法は未提案である。複列、複数の場合が考えられるが⁵⁾、本研究では対象外で、今後の課題とする。

そこで、本研究は「つなぎ空間と開口部」を有する直方体の RC 造建築物へ津波が直角に入射する場合を対象に入射津波条件を用いた前面浸水深の推定法の一般化を試み、推定値と実験値⁴⁾の比較・検討を通して、提案推定法の有用性を論じる。

2. 前面浸水深の推定法

2.1 反射段波発生条件

図-1 に高さ 0.50 m、幅 0.30 m、全長 12.0 m の両面ガラス張り鋼製矩形水路の定常流実験で得られた直方体（開口部なし）の建築物模型前面における反射段波の発生条件例を示す。図中、 B は建築物幅、 D は建築物奥行、 B' は水路幅、 Q は流量、 h_i は建築物位置における入射水深、 F_{ri} は入射フルード数、 I は底面勾配である。流量と底面勾配が限られ、入射フルード数の実験範囲が狭いが、現段階での建築物前面における反射段波発生条件として式(1)が得られる。

$$\frac{B}{B'} = -0.175 \frac{D}{B'} + 0.111 F_{ri} - 0.084 \quad (1)$$

2.2 推定法の一般化

つなぎ空間と開口部を有する直方体の RC 造建築物へ津波が直角に入射する場合の前面浸水深 h を入射津波条件で推定することを考える。津波が建築物を越流しない場合を対象とする。

水平床上の定常的な入射津波氾濫流を考える。圧力は静水圧分布とする。図-2 右図や図-3 に示すように、建築物間のつなぎ空間が狭くて、前面浸水深が津波氾濫流の縦横断両方向にほぼ一様となる反射段波が発生する場合を考える。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。入射津波衝突後の反射段波領域内におけるつなぎ空間と建築物の直前面での断面平均流速 u_{fop} と u_{fb} は異なると推察される。反射段波領域内上流部における断面平均流速（氾濫流の横断方向に一様と仮定）を u_f 、つなぎ空間直前面における断面平均流速 u_{fop} を $k u_f$ ($k \geq 1$ で、反射段波上流領域の「支配域幅係数」または断面平均流速を表現する「流速係数」)

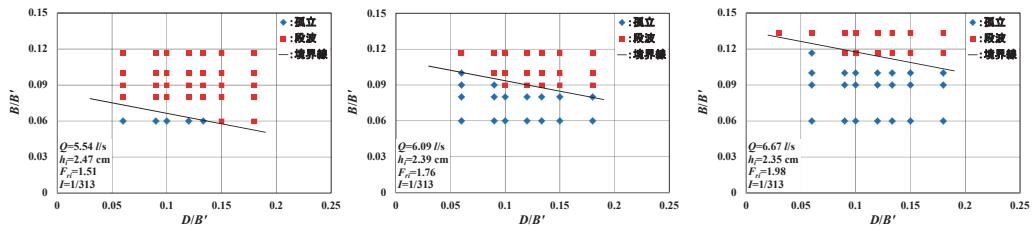


図-1 建築物前面における津波の反射段波発生条件例（定常流）

* A method for estimating the reflected tsunami inundation depth at the front of RC building with a connection space and aperture by Hideo MATSUTOMI, Tomoe KONNO and Shunsuke TAKAO

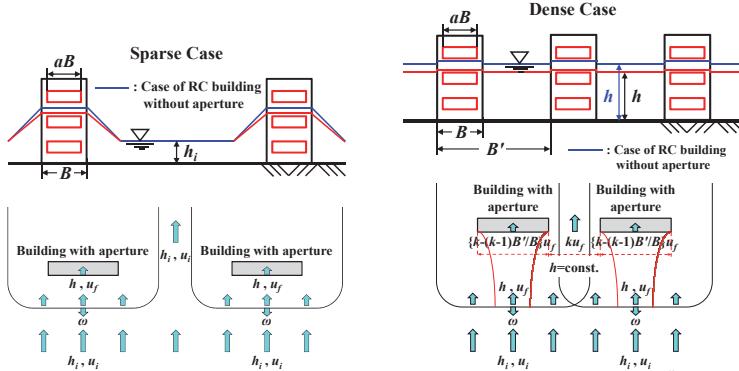


図-2 流れのパターン（左：幅広の孤立したRC造建築物の場合（既報⁴⁾），右：狭いつなぎ空間のRC造建築物の場合（本研究）。青実線の水面は開口部がない場合）

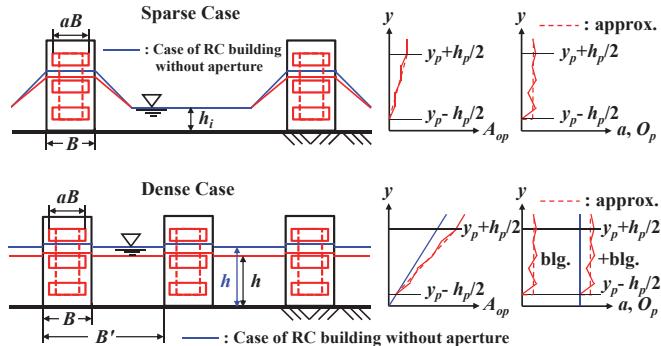


図-3 つなぎ空間と開口部のモデル化（上：幅広の孤立したRC造建築物の場合，下：狭いつなぎ空間のRC造建築物の場合。青実線の水面は開口部がない場合）

とでも呼ぶべき係数。図-2 右図参照。後述）とする。このとき、次式が成立する必要がある。

$$h + \frac{u_f^2}{2g} = h + \frac{u_{JB}^2}{2g} + h_{IB} = h + \frac{k^2 u_f^2}{2g} + h_{lop} = h_i + (1 + \zeta) \frac{u_i^2}{2g} \quad (2)$$

ここで、 h_{IB} は建築物直前面までにおけるエネルギー損失水頭 ($= (k-1)^2 (B'/B-1)^2 u_f^2 / 2g$ で、正值)， h_{lop} はつなぎ空間直前面までにおけるエネルギー利得水頭 ($= -(k^2-1) u_f^2 / 2g$ で、負値)， B' は建築物幅とつなぎ空間幅の合計幅， ζ は広義のエネルギー損失係数⁴⁾， g は重力加速度である。

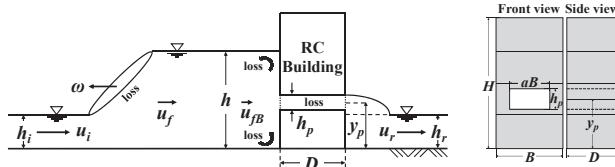
反射段波領域内の上流部から下流部にかけた領域における質量保存則は次式である。

$$B'hu_f = Bhu_{JB} + (B' - B)hku_f = aBh_p u_p + (B' - B)hku_f \quad (3)$$

ここで、 a ($0 \leq a < 1$) は開口部幅 ab / 建築物幅 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。換算法は後述）， u_p は開口部内（断面 $aB \times h_p$ の矩形部内）の断面平均流速であり、「反射段波領域内の浸水深は一定」と「建築物直前面における流体は開口部から全て抜け出る」という仮定を導入している。

式(3)から建築物直前面における断面平均流速 u_{JB} として $\{k-(k-1)B'/B\} u_f$ を得る。 k は $1 \leq k \leq B'$ ($B'-B$) の値域で、一般に未定である。建築物の前背面における本研究の縦断モデルを図-4 示す。

入射津波が定常的で、圧力が静水圧分布する場合、Stoker 理論⁶⁾はつなぎ空間や開口部がある場合へ拡張できる。2 次元直立壁（越流を含む）やつなぎ空間、建築物の開口部を想定して、岩崎・富樫⁷⁾、富樫・古賀⁸⁾、池谷ら⁹⁾⁻¹¹⁾と松富・小野⁴⁾がその拡張理論を提示しており、基礎式は式(4)と(5)である。

図-4 建築物前面浸水深 h の推定モデルと開口部の定義

$$h_i(\omega - u_i) = h(\omega - u_f) \quad (4)$$

$$h_i(\omega - u_i)u_i - h(\omega - u_f)u_f = \frac{1}{2}gh_i^2 - \frac{1}{2}gh^2 \quad (5)$$

ここで、 $\omega (\leq 0)$ は反射段波伝搬速度である。式(4)と(5)から次の前面浸水深係数 h/h_i に関する 3 次式が得られ、岩崎・富樫⁷⁾、富樫・古賀⁸⁾、池谷ら⁹⁾と松富・小野⁴⁾が(数値)解を導いている。

$$\left(\frac{h}{h_i} \right)^3 - \left(\frac{h}{h_i} \right)^2 - \left\{ 1 + 2F_{ri}^2 \left(1 - \frac{u_f}{u_i} \right)^2 \right\} \frac{h}{h_i} + 1 = 0 \quad (6)$$

前面浸水深は、つなぎ空間と建築物の開口率が同じであっても、開口部の位置や形状、内部状況などで異なるはずである。式(6)は u_f/u_i と F_{ri} をパラメータとして解かれるが、 u_f/u_i と開口率や開口部の位置、形状、内部状況、つなぎ空間などとの関係は不定で、無数に考えられる。そこで、個々のつなぎ空間と建築物の諸元に対応できる近似解法を提案する。

建築物の開口部領域における質量と運動量の保存則は式(7) (式(3)を変形) と(8)である。

$$\left\{ k - (k-1) \frac{B'}{B} \right\} hu_f = ah_p u_p \quad (7)$$

$$g(h - y_p)h_p + \left\{ k - (k-1) \frac{B'}{B} \right\}^2 h_p u_f^2 \approx h_p u_p^2 + f \left(W + \frac{h_p}{aB} \right) Du_p^2 + gA \quad (8)$$

ここで、 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、 W は開口部の上端位置が前面浸水位以下の場合は 1、前面浸水位より上の場合は 0.5、右辺の () 内は無次元化された潤辺の半値、開口部内の壁面せん断応力 τ_0 の定義と A (建築物背面からの静水圧力項) は ρ を流体密度として次式である。

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \rho f u_p^2 = \frac{1}{2} \rho f \left[\frac{\{k - (k-1)B'/B\}hu_f}{ah_p} \right]^2 = \frac{1}{2} \rho f \left[\frac{\{k - (k-1)B'/B\}u_f}{O_p} \right]^2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A &= (h_i - y_p)h_p & h_i > y_p + \frac{h_p}{2} \\ &= \frac{1}{2} \left(h_i - y_p + \frac{h_p}{2} \right)^2 & y_p + \frac{h_p}{2} \geq h_i > y_p - \frac{h_p}{2} \\ &= 0 & h_i \leq y_p - \frac{h_p}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

式(7)と(8)から u_f と h の関係式を得て、その関係式を式(6)に代入すると最終的に解くべき式(11)を得る。

$$\left(\frac{h}{h_i} \right)^3 - \left(\frac{h}{h_i} \right)^2 - \left\{ 1 + 2 \left(F_{ri} - \frac{1}{\{k - (k-1)B'/B\}} \sqrt{\left(\frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i} \right) a^2 \frac{h_p^3}{h_i^3} - A a^2 \frac{h_p^2}{h_i^4}} \right)^2 \right\} \frac{h}{h_i} + 1 = 0 \quad (11)$$

式(11)の解析解の導出は難しいので、本研究では逐次計算により解を得ることにする。ただし、 k は幅広の孤立した RC 造建築物 ($k=1$) と狭いつなぎ空間で開口部がない RC 造建築物 ($k=B'/(B'-B)$) の場合を除いて未定で、別途その評価方法を考案する必要がある(後述)。

3. 開口部の換算法と前面浸水深の計算法

多様な開口部に対応するため、単数や複数の任意形状開口部を1つの矩形開口部に換算する。
3.1 幅広の孤立したRC造建築物の場合

(1) 建築物に開口部がない場合

開口部がないため、開口部の換算は必要ない。

前面浸水深はStoker理論を用いて計算する。具体的には $u/u_i=0$ として、式(6)を解く⁴⁾。

(2) 建築物に開口部がある場合

前面浸水深が大きくなるにつれて、一般に開口部面積 A_{op} の増加率や a 、開口率 O_p は図-3上図の右2つの図の赤実線で示すように変動する。本研究の換算ではそれらの平均的な値(図-3上図の右2つの図の赤破線)を採用し、1つの矩形開口部に換算する。具体的には、開口部の下端位置($=y_p-h_p/2$)と上端位置($=y_p+h_p/2$)は実際の位置を採用し、実際の開口部と換算した矩形開口部の $f(W+h_p/aB)$ が一致するように換算する。

前面浸水深は、孤立したRC造建築物の場合の k は1であり、 $k=1$ として式(11)から計算する。ただし、前面浸水位が開口部の上端位置に達しない場合は、前面浸水位を開口部の上端位置と仮定し、開口部上端面の合成摩擦を無視、すなわち $W=0.5$ とする。具体的な計算法は、初期に小さめの h_p を仮定し、 h_p を微増させながら、上端位置と式(11)から計算される前面浸水位が一致するまで逐次計算を実施する。

3.2 狹いつなぎ空間のRC造建築物の場合

(1) 建築物に開口部がない場合

開口部がないため、開口部の換算は必要ない。

前面浸水深の計算法として次の2つが考えられる。

1つは床下換気を目的とした通風口などを想定し、仮想的に小さな開口部($O_p=0.1\%$ 程度)を地面付近に設ける方法(仮想開口部法I)である。具体的な計算法は次項の3.2(2)で述べる。この方法には仮想開口部の大きさと位置次第で前面浸水深が変化する欠点がある。とは言え、対象事例が多い3.2(2)で述べる計算法との一貫性や前面浸水深を大きめ(安全側)に評価する(図-7(b)参照)ことを考えると、この方法が推奨されよう。

もう1つは建築物幅とつなぎ空間幅の合計幅 B' を建築物幅 B と考え、つなぎ空間幅($=B'-B$)と B' の比を a と考える方法(仮想開口部法II)である。この場合、実際の k は $B'/(B'-B)$ であるが(この k の場合、式(11)は利用できない)、 $k=1$ の開口部を有する幅広の孤立した建築物とも見なせる。開口部の下端位置は常に地面($y=0$)である。あとは3.1(2)の前面浸水位が開口部の上端位置に達しない場合と同じ解析を行えばよい。この方法にはつなぎ空間の流れに式(7)と(8)を適用してよいかという問題がある(後述)。

本条件の場合については、池谷ら¹¹⁾が別の考え方で評価法を示している。

(2) 建築物に開口部がある場合

開口部の換算は3.1(2)の場合と同様に行う。

この場合の k は未定で、その評価法を以下に示す。

開口部を通過する流量を Q_B 、つなぎ空間と開口部を通過する合計流量を Q_T とした場合、 k を用いて表現した両者の比 R_t は次式である。

$$R_t = \frac{Q_B}{Q_T} = \left\{ k - (k-1) \frac{B'}{B} \right\} \frac{B}{B'} \quad (12)$$

一方、厳密さを捨て、通過する流量は開口部やつなぎ空間といった場所の違いに関係なく、大きな貯水容器のオリフィスから水が流出する場合のBernoulliの定理から計算される流速($=\sqrt{2g(h-y)}$)。ここで、 y は容器底面(地面)を原点とした鉛直座標)と流積要素($=(aB+B'-B)dy$)の積の積分で求まると仮定すれば、開口部を通過する流量と合計流量の比 R_m は次式である。

$$R_m = \frac{Q_B}{Q_T} = \frac{a \left\{ \left(\frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i} + \frac{1}{2} \frac{h_p}{h_i} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i} - \frac{1}{2} \frac{h_p}{h_i} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}}{\left(\frac{B'}{B} - 1 \right) \left(\frac{h}{h_i} \right)^{\frac{3}{2}} + a \left\{ \left(\frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i} + \frac{1}{2} \frac{h_p}{h_i} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i} - \frac{1}{2} \frac{h_p}{h_i} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}} \quad (13)$$

k は式(12)と(13)の比が一致する場合として決定される。

前面浸水深 h は式(11)、(12)と(13)を連立させて計算する。前面浸水位が開口部の上端位置に達しない場合は3.1(2)の場合と同じ解析を行う。

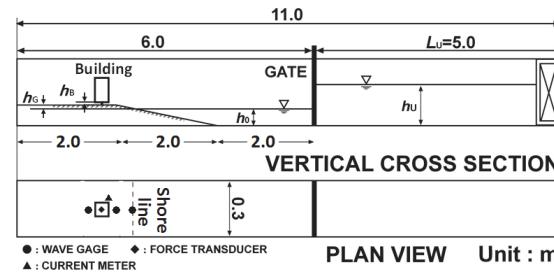


図-5 実験水路の概略、測定機器の配置と諸記号の定義

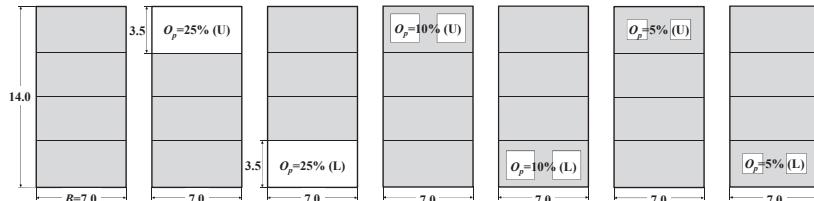
図-6 建築物模型諸元の詳細（縮尺は 1/100, 単位は cm, 奥行 D は全て 5.4 cm, 開口率 O_p は建築物前面の全表面積に対するもの）

表-1 模型実験の条件

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	1/26
地盤高 h_G (cm)	3.7, 2, 0
床 高 h_B (cm)	0
開口率 O_p (%)	0, 5, 10, 25
模型の高さ H (cm)	14
模型の幅 B (cm)	7
模型の奥行 D (cm)	5.4

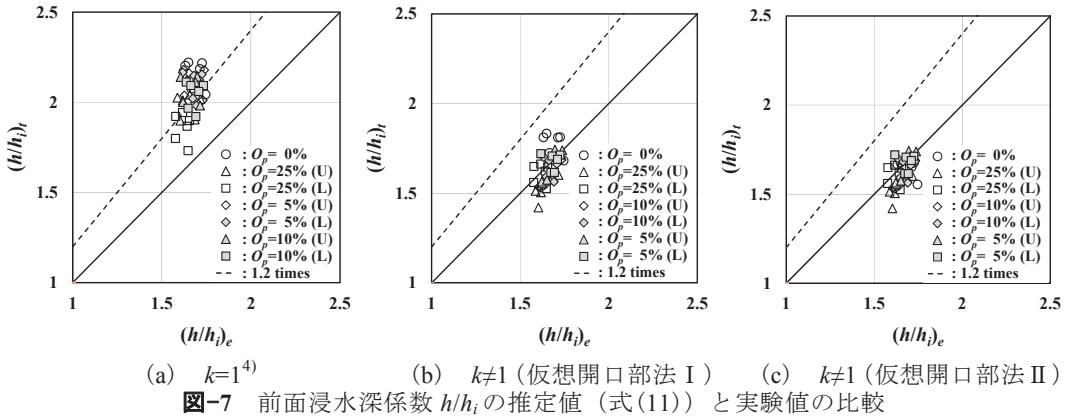
4. 模型実験

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-5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。

建築物模型諸元の詳細を図-6に示す。模型の外形は 2011 年東北津波のときに被災した宮城県女川町の 4 階建て旅館³⁾を模擬している。建築物の開口率 O_p は仮想的な「窓（開口部）なし」（開口率 0 %）と実際的な「窓あり」（開口部は海側と陸側の上部または下部にあり、両者の開口率は同一の 5, 10, 25 %, 両側壁は 0 %）の 7 種類とした。模型の各階の床は止水されており、開口部から流入した水はその階に止まる。また、海側と陸側の開口部は急拡・急縮状態であり、模型内は隔壁などのない空洞状態となっている。縮尺は 1/100 で、模型重量（材種と材厚）はフルードの相似則¹²⁾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冲方向に 25 cm と 5 cm、背面から岸方向に 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 , $h_{7.5}$ 、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 （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。



5. 結果と考察

狭いつなぎ空間と開口部を有する場合の前面浸水深係数 h/h_i に関する本研究の推定値と実験値の比較を図-7 に示す。図-7 (a) は幅広の孤立した RC 造建築物として推定した場合⁴⁾、図-7 (b) は狭いつなぎ空間の RC 造建築物として計算した場合のものである。ただし、両図とも $B=7.0$ cm, $f=0.02$ 、図-7 (b) では $B'=21$ cm ($\neq 30$ cm) とし、開口部がない場合の仮想床下換気口は縦 0.15 cm、横 0.70 cm の矩形とし、 $y_p=0.075$ cm の位置に 1 箇所想定した。

両図から、図-7 (a) の推定値と実験値における 2 割程度の差の理由として「建築物模型の幅が前面浸水深の割に広くないこと（幅広でないこと）、静水圧分布や定常の仮定が考えられる。」としていたが⁴⁾、狭いつなぎ空間を考慮することで差の大部分が改善されることが判る。

図-7 (b) によると、狭いつなぎ空間を考慮すれば、推定値と実験値の一致度がよくなるよう見える。しかし、よく見ると、狭いつなぎ空間で開口部がない場合（図中の○）と狭いつなぎ空間で開口部があり、前面浸水位が開口部の上端位置に達しない場合（特に $O_p=25\%$ の△）の 2 条件において両者の差が大きい傾向にあり、改良の余地が認められる。狭いつなぎ空間で開口部がない場合において、「建築物幅とつなぎ空間幅の合計幅 B' を建築物幅 B と考え、つなぎ空間幅と B' の比を a と考える方法」による推定値は実験値に比べて逆に小さめの値を与えた（図-7 (c)）。この理由として、上述の前面浸水位が開口部の上端位置に達しない場合と同様に、本来ならば水面下の開口部へ適用されるべき式(7)と(8)を、自由水面を有する開口部やつなぎ空間へ適用していることが考えられる。

6. おわりに

「つなぎ空間と開口部」を有する直方体の RC 造建築物へ津波が直角に入射する場合の入射津波条件を用いた前面浸水深 h の推定法の一般化を試みた。推定値と実験値の比較・検討を通して、狭いつなぎ空間で開口部がない場合と狭いつなぎ空間で開口部があり、前面浸水位が開口部の上端位置に達しない場合の 2 条件において改良の余地があるが、提案推定法は全般的に、特に開口部を有し、それが水没する場合に有用であることを確認した。

参考文献

- 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、pp.577-579、2015。
- 岡本、松富：津波氾濫流速の簡易推定法に関する基礎的研究、海岸工学論文集、第 56 卷、pp.296-300、2009。
- 松富、決得、齋藤：開口部を有する鉄筋コンクリート造建築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。
- 松富、小野：開口部を有する RC 造建築物における津波浸水深の推定法、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.71、No.2、pp.361-366、2015。
- 後藤、首藤、笠川：陸上大障害物群の津波氾濫時における抵抗、第 25 回水理講演会論文集、pp.125-132、1981。
- Stoker, J. J.: Water Waves, Interscience Publishers, Inc., New York, pp.326-333, 1957.
- 岩崎、富樫：遡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。
- 富樫、古賀：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。
- 池谷、秋山、岩前：陸上構造物に作用する津波持続波压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。
- 池谷、岩前、秋山、福山、末長、鈴木、館野：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。
- 池谷、末長、福山、秋山、鈴木、館野：反射特性を考慮した陸上構造物に作用する津波波力の評価法、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol.71、No.2、pp.985-990、2015。
- 松富、大沼、今井：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。