

建築物に作用する津波荷重

Tsunami Loads on RC Buildings

松 富 英 夫

Hideo MATSUTOMI

1. はじめに

津波による建築物の被害戸数といった統計は古くから取られている¹⁾。遅くとも1933年昭和三陸地震津波後は津波浸水深と建築物の被害程度の関係が報告されるようになっていく²⁾。1960年チリ地震津波後は集落単位の建築物の被害率も論じられるようになった³⁾。個々の建築物の津波被害が論じられるようになったのは1983年日本海中部地震津波後で、津波浸水深（津波波高）をパラメータに防潮林など他の被害も含めて表-1が1992年に首藤から発表された⁴⁾。その後、個々の建築物の津波被害が氾濫流速や津波荷重（水平方向の抗力）で論じられるようになった^{5), 6)}。2004年インド洋大津波後は、広域の即時被害推定や被害想定を主な目的として、建築物の津波被害関数が論じられるようになった⁷⁾。同時に建築構造やその耐力の地域性が話題となった。また、すでに建築物の津波被害に鉛直力の重要性が指摘されていたが^{8), 9)}、鉛直力の表だった議論は2011年東北地方太平洋沖地震津波後まで待たなければならなかった¹⁰⁾。そして、2015年には日本建築学会の「建築物荷重指針・同解説」が改訂され、津波荷重の章が新設されるに至った¹¹⁾。

以上が建築物の津波被害に対する我々の対応や反応の大まかな歴史である。この歴史に鑑み、本稿では個々の建築物に作用する津波荷重（水平力、鉛直力）を少しでも深く踏み込んで議論できるようになることを目的として、これまでの研究成果を基に、開口部（窓、戸口、シャッターを含む）を有する場合を含めた直方体の RC 造建築物に作用する「津波荷重の特性」例と「津波荷重評価における検討課題」例を紹介する。ここで、RC 造建築物に限定した理由は津波被災後の建築物の外形や骨組は基本的に不変で、検討対象条件を単純化し易いと考えたからである。現段階における建築物に作用する津波荷重の実践的な評価方法は文献11)に詳しい。

表-1 津波による建築物などの被害程度⁴⁾

津波波高(m)	1	2	4	8	16	32
津波形態 緩斜面 急斜面	岸で盛上がる 速い潮汐	沖でも水の壁 第二波砕波 速い潮汐	形態は、左に ほぼ同じだが、 先端の砕波が 増える	どのような場所であっても、潮汐 に似たような上下動を示すことなく、 第一波巻き波砕波		
木造家屋	部分破壊	全面破壊(2m～)				
石造家屋	持ちこたえる				全面破壊(7m～)	
鉄・コン・ビル	持ちこたえる(～5m)					全面破壊
漁船		被害発生	被害率50%	被害率100%		
防潮林	被害軽減 津波被害軽減		部分的被害 漂流物阻止	全面的被害 無効果		
養殖筏	被害発生					
沿岸集落		被害発生	被害率50%	被害率100%		

2. RC 造建築物の津波被害事例

1960年チリ地震津波以前の RC 造建築物の津波被害事例は首藤の論文に詳しい⁴⁾。1946年アリューシャン地震津波はアリューシャン列島の Unimak 島 Scotch 岬にあった RC 造の灯台建築物を大破させた（図-1）。津波

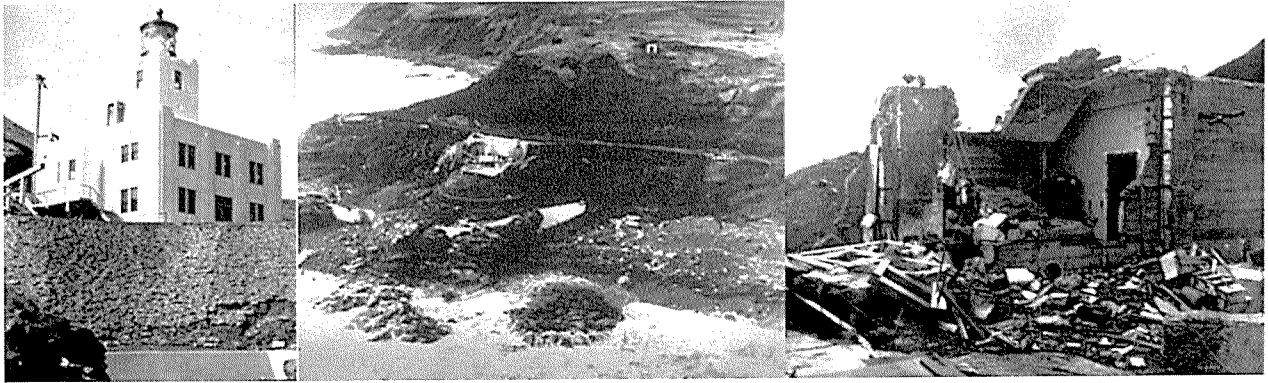


図-1 Unimak 島 Scotch 岬の被災前(左)と後(中央と右)の灯台建築物(出典: Scotch Cap Lighthouse, NOAA)

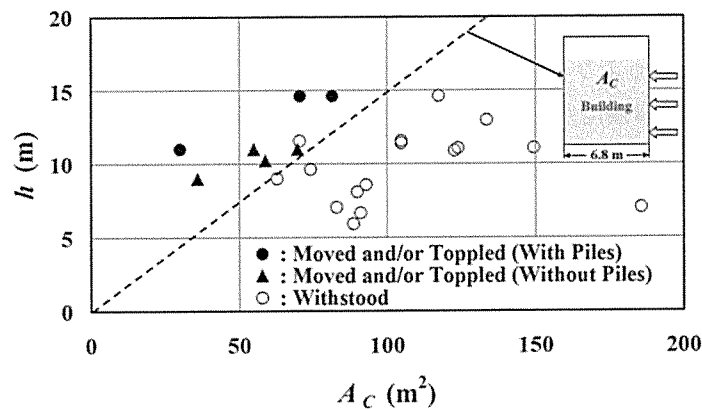


図-2 東北地方太平洋沖地震津波における RC 造建築物の浸水縦断面積 A_c 、前面浸水深 h と被害形態の関係

による RC 造建築物の最初の大破事例とされている⁴⁾。ただし、この灯台建築物は脆弱な構造であったといわれている。灯台建築物が建っていたところの地盤高は約12 m (図-1左)、建築物の高さは一部5階建ての18 m (図-1左)、灯台建築物背後の地盤高は30 m (図-1中央)、内陸へ約200 m 入ったところの地盤高は42 m (図-1中央)、津波遡上高は42 m であった。この灯台建築物の大破浸水深は20 m であり、この大破浸水深を上回るものは2011年東北地方太平洋沖地震津波を経た現在でも存在しない¹²⁾。

1960年チリ地震津波後も1983年日本海中部地震津波をはじめとする国内外の津波災害時に建築物被害の現地調査が行われた。しかし、3階建て以上の RC 造建築物が大破(転倒や移動を含む)するほどの被害事例は東北地方太平洋沖地震津波に限られた。ただし、2004年インド洋大津波では、日本と建築物の構造形式が異なるためか、津波荷重の観点からの現地調査が非常に少なく^{13), 14)}、大破事例が漏れている可能性がある。東北地方太平洋沖地震津波では多くの機関が現地調査を実施しており、津波荷重の観点から被害がまとめられている^{12), 15), 16)}。図-2はその一例で、RC 造建築物の浸水縦断面積 A_c 、前面浸水深 h と被害形態の関係を示したものである¹²⁾。ここで、 $A_c = h \times$ 建築物の奥行長 D である。図から、津波氾濫方向の建築物の浸水縦断面積で建築物の転倒や移動および持ち堪えるがよく分類されることが判る。

東北地方太平洋沖地震津波では、浸水深が15 m に達した宮城県女川町の中心部を代表として、RC 造建築物が転倒や移動の被害を受けた。ただし、4階建て以下の建築物に限られ、完全に水没しなかった建築物は持ち堪えた¹²⁾。これまで4階建て規模の RC 造建築物の転倒や移動例は知られておらず(大破した Unimak 島の灯台建築物は転倒や移動ではない)、この津波による RC 造建築物の転倒や移動は「RC 造建築物に対する神話の崩壊」とまで言わしめた。

インド洋大津波は RC 造建築物の安定性に対する開口部の影響(数値実験)¹⁷⁾、東北地方太平洋沖地震津波は開口部(水理実験)¹⁸⁾、杭基礎、液状化や洗掘¹⁹⁾の影響を検討する契機の津波となった。東北地方太平

洋沖地震津波では、これまで現地調査データがほとんど存在しなかった津波浸水深と鉄骨造建築物の被害程度に関するデータも収集された¹⁸⁾。

3. 津波荷重

津波による RC 造建築物の転倒や移動の議論では、津波の水平力ばかりでなく、鉛直力の情報も必要である。これまでの RC 造建築物に作用する津波荷重の検討は水平力が中心であった^{5), 6), 20) - 22)}。RC 造建築物の津波に対する安定性では鉛直力も重要であることが認識されており^{8) - 10)}、限られた条件下であるが、鉛直力に関する実験的な検討も行われている^{18), 23), 24)}。ただし、その水理実験は小規模水路で行われており、しかも建築物から反射段波が形成される条件下のものに限定されている²⁵⁾。

本章では、建築物の開口率 O_p 、地表面からの底面高（以下、「床高」） h_B 、奥行長 D と入射津波条件をパラメータとした系統的な小規模建築物模型実験の結果に基づき、一般的な条件である「つなぎ空間と開口部」を有する RC 造建築物に作用する津波荷重（水平力と鉛直力）の特性例と津波荷重評価における検討課題を紹介する。

3.1 水平力と鉛直力の経時変化と各種力の定義

図-3に建築物模型（高さ $H=14.0$ cm，幅 $B=7.0$ cm，奥行長 $D=5.4$ cm。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¹²⁾）に作用する水平力と鉛直力の経時変化例および最大水平力 F_{xmax} （津波氾濫流衝突初期の衝撃部で発生）、その後の準定常部の水平力 F_x （以下、「水平力」）、最大鉛直力 F_{zmax} （津波氾濫流衝突初期に発生するとは限らない）と準定常部の鉛直力 F_z （以下、「鉛直力」）の定義を示す。図中の h_U はゲート急開流れにおける上流域の初期貯水深である²³⁾。開口率（模型前面の全表面積に対するもの）が0%と40%の場合のもので（図-18参照）、留意点は0%（開口部なし）の場合は鉛直力が建築物にとって危険側の上向き、40%（開口部あり）の場合は安全側の下向きに作用するということである。図-3の左図から理解されるように、実験ケースによっては「最大鉛直力 $\approx$ 鉛直力」となる場合がある。

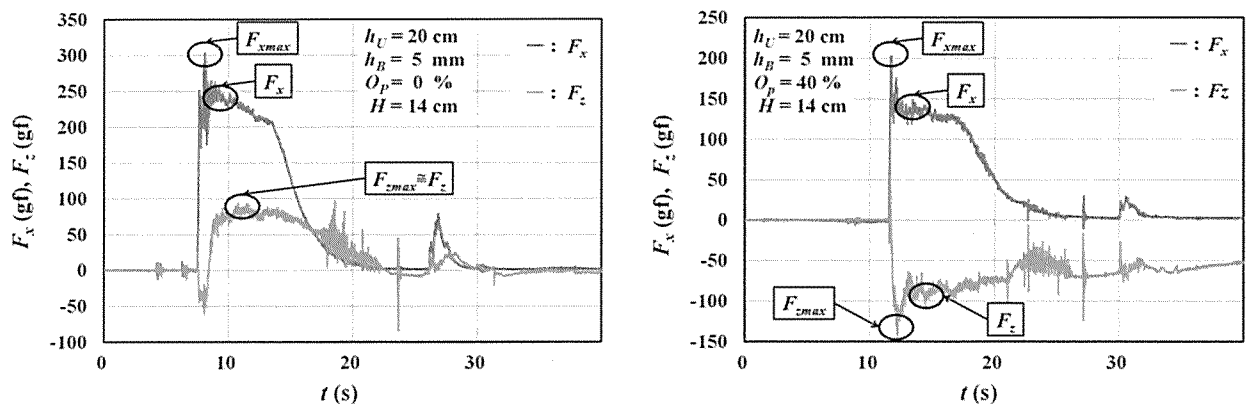


図-3 水平力と鉛直力の経時変化例（左図：開口率0%，右図：開口率40%）²³⁾

3.2 水平力

3.2.1 前面浸水深への依存性

図-4に建築物模型（高さ：14.0 cm，幅：7.0 cm，奥行長：凡例の「● 短」は5.4 cm，「■ 中」は8.1 cm，「▲ 長」は10.8 cm）の開口率，奥行長と床高をパラメータとして，各々最大水平力と模型前面における浸水深 h （以下、「前面浸水深」），水平力と前面浸水深の関係を示す。各図中には実線で前面浸水深と床高に基づく計算上の全静水圧（以下、「前面静水圧」）¹⁸⁾も示されている。両図の解釈では，分力計で測定された実験値は模型背面の全水圧を差し引いた正味の全水圧であることに注意を要する。両図から次のことが判断される。

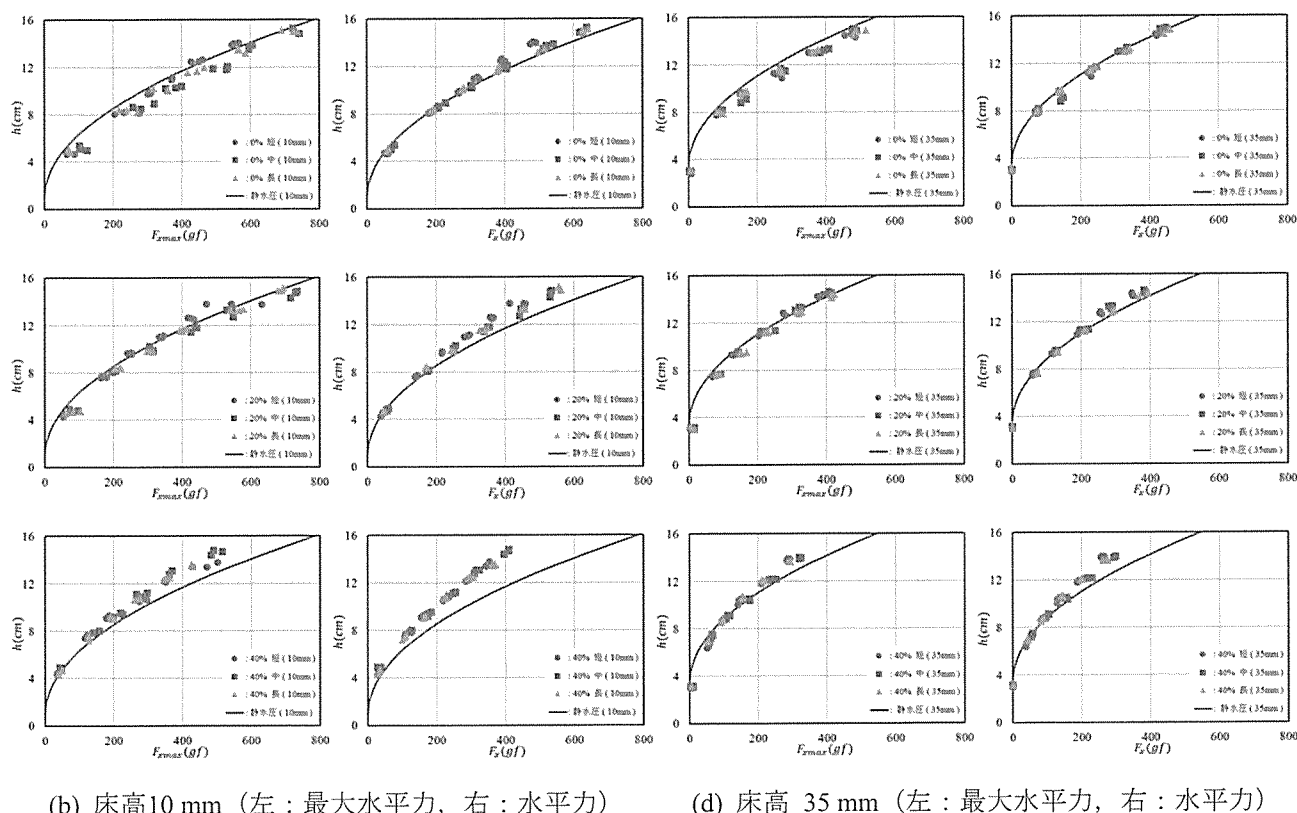
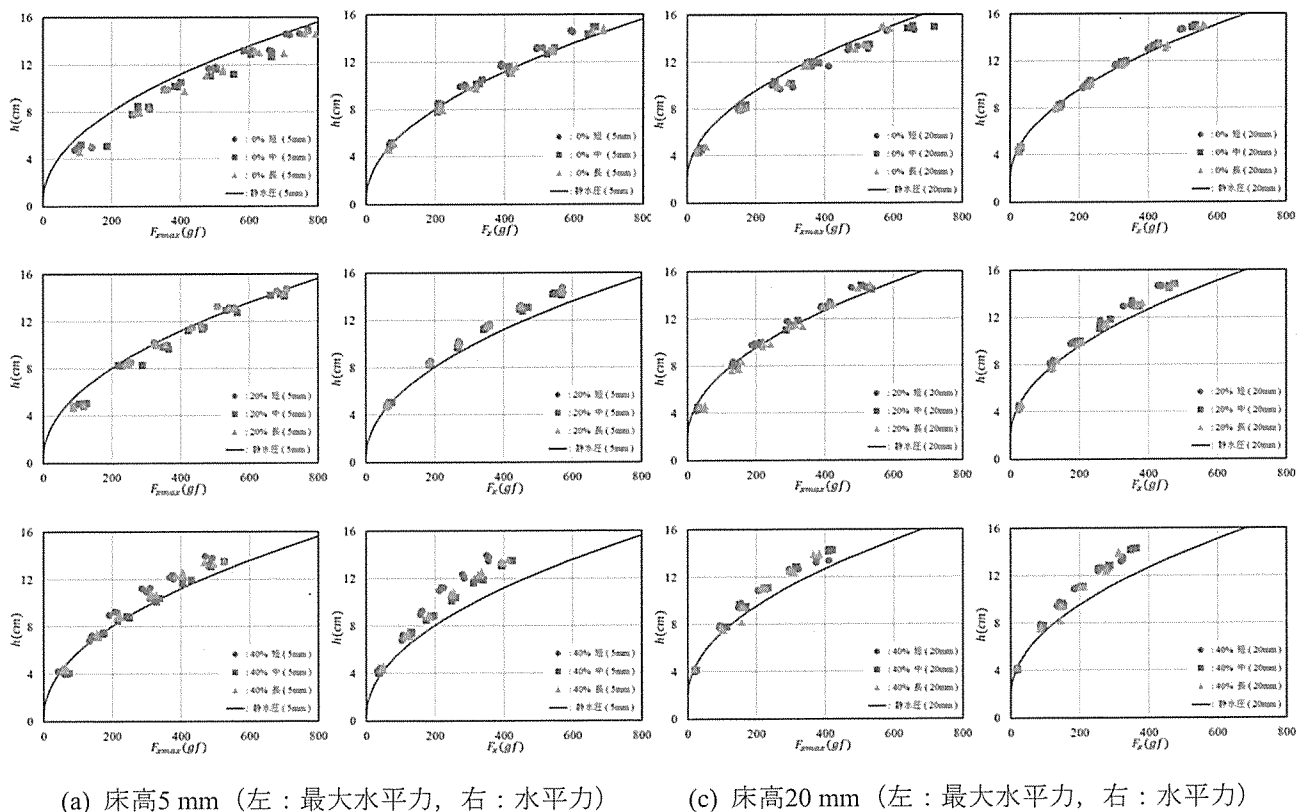


図-4 最大水平力 F_{xmax} (衝撃部) と前面浸水深 h および水平力 F_x (準定常部) と前面浸水深の関係

- 1) 最大水平力は前面静水圧より大きい傾向にある。
- 2) 水平力は前面浸水深が建築物の幅に比べて小さい間は前面静水圧とほぼ同じである。これは水平力に動水圧が寄与していることを示している²⁶⁾。しかし、前面浸水深が相対的に大きくなるにつれて、

前面静水圧より小さくなる傾向にある。この理由として建築物前面側における流れの3次元性の影響増大が考えられる。

3) 最大水平力、水平力と前面浸水深は床高が高くなるにつれて小さくなる。

2)において、水平力の傾向が異なり出す前面浸水深と建築物幅の比の境界値がどのぐらいであるかは検討されていない。

3.2.2 開口率への依存性

図-5と6に各々開口率と最大水平力、開口率と水平力の関係を示す。図中の直線群は開口率0%の場合における実験条件毎の平均値と開口率100%の場合における値0を結んだものである。開口率65%は「骨組のみ」の場合である²¹⁾。これらの図から次のことが判断される。

1) 最大水平力、水平力と前面浸水深は開口率の増大とともに減少する。

2) 最大水平力は、開口率が増加するにつれて、直線的に減少するとは言い難い。

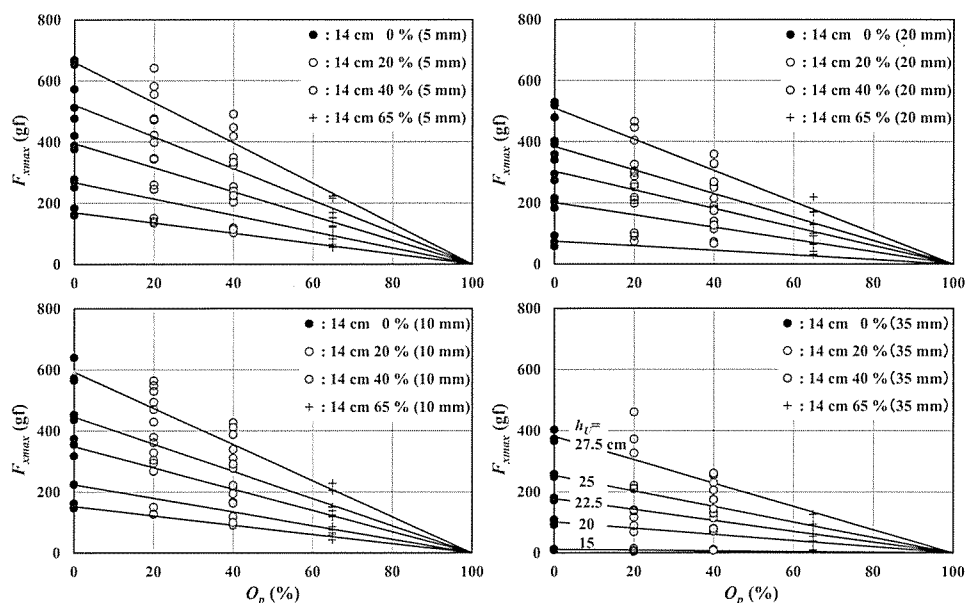


図-5 開口率 O_p と最大水平力 F_{xmax} の関係（衝撃部。 h_U は貯水深）²³⁾

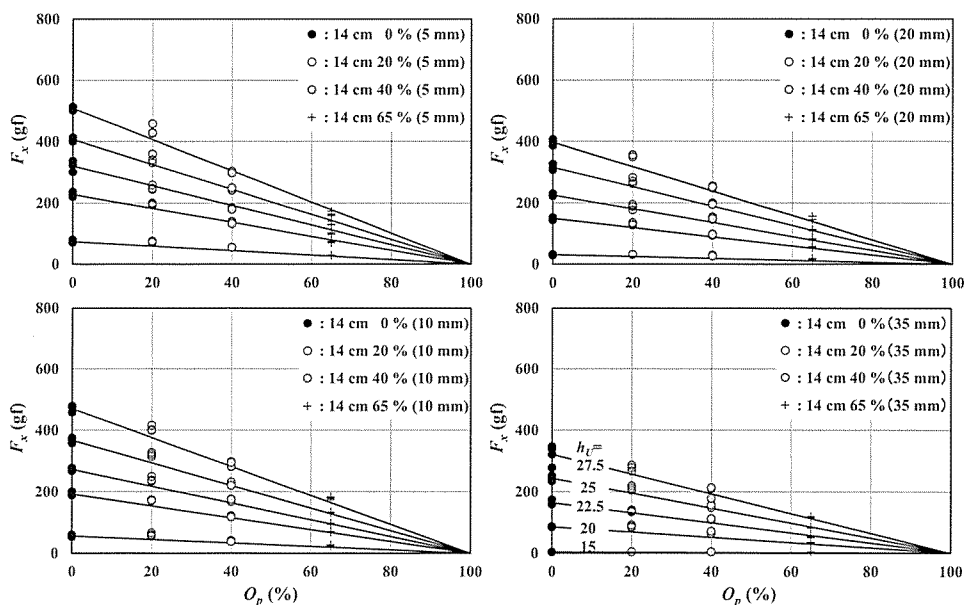


図-6 開口率 O_p と水平力 F_x の関係（準定常部。 h_U は貯水深）²³⁾

- 3) 海側と陸側の開口部の配置と開口率が同じ場合の水平力は、開口率が増加するにつれて、ほぼ直線的に減少する。ただし、建築物の奥行長（後述）、両側面の開口率、屋内の柱や壁も水平力に関係すると考えられることから²⁷⁾、この結果は本稿に示した実験条件下でのものと考えらるべきである。
- 4) 海側と陸側の開口率が異なる場合の水平力は、開口率の大小が海側と陸側のどちらであろうとも、小さい方の開口率に支配される。

2011年当時の東北地方太平洋沿岸に実在する RC 造建築物の開口率は最大で38%程度である¹²⁾。一般に屋内には柱や壁が存在し、それらの影響をも考慮すると、「開口部による水平力の低減は3割でとどめる」とする国土交通省の告示¹⁰⁾は妥当と言える。

3.2.3 奥行長への依存性

図-4から、奥行長が増すと（図では1.5倍と2倍）、建築物の底面と両側面の面積増加による摩擦力の増大や背面浸水深の変化（減少）のため、水平力は少し増加する傾向にあることが判る。

3.2.4 越流する場合

津波氾濫流が建築物を越流する場合についてはほとんど検討が行われていない。入射氾濫水深の増加率の割に水平力の増加率は鈍り、水平力は一定値に漸近する傾向を示すことが指摘されている程度である²³⁾。津波荷重を考慮する建築物では越流する場合を想定する必要はないかもしれないが¹¹⁾、建築物が粘り強い津波防災施設として機能することも考えられ、越流する場合の水平力の検討は必要である。

3.2.5 水平力の低減

これまでの建築物に作用する津波荷重の低減に関する検討は水平力が中心である。Al-Faesly ら²⁸⁾は建築物前面から建築物幅（建築物が正方形断面であるため奥行長でもある）の1倍と3倍の前面位置に高さ10～15 cm の直立曲面壁、直立壁、傾斜壁を設置し、氾濫水深25～45 cm の氾濫流を入射させて水平力の減少を論じている。伊藤ら²⁹⁾は建築物周りに各種形状の杭を各種平面形状に配置して水平力の低減を論じている。これらの研究では定性的な水平力の低減特性が明らかにされているが、普遍的なものはまだ得られていない。水平力の低減法も今後の検討課題である。

水平力の低減は建築物への入射氾濫水深、入射氾濫流速または両者の低減で実現される。これらの低減に、諸刃の剣の面があるが、植生の利用が考えられる³⁰⁾。

津波避難ビルや原子力発電所建屋群などの重要建築物を除いた一般の建築物に対しては、耐津波ではなく、対津波という考え方がある³¹⁾。この考え方は水平力だけに限るものではあるまい。

3.3 鉛直力

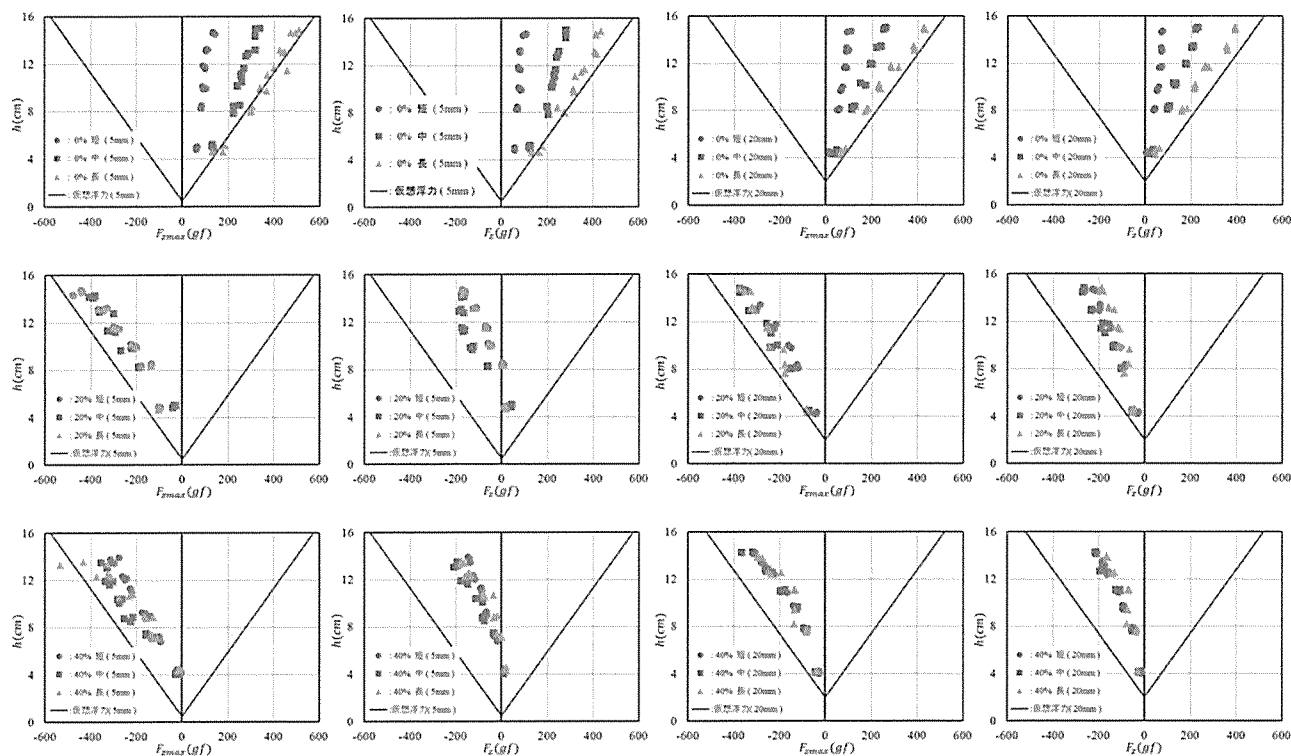
鉛直力も建築物の安定性に大きく関係する。本節では鉛直力の特性や検討課題と低減法の現状を紹介する。

3.3.1 前面浸水深への依存性

図-7に建築物模型の開口率、奥行長と床高をパラメータとして、各々最大鉛直力と前面浸水深、鉛直力と前面浸水深の関係を示す。各図中の実線は奥行長5.4 cm の建築物模型の周囲浸水深を前面浸水深とした場合の浮力（以下、「仮想浮力」）である。下向き鉛直力の大きさの目安として、仮想浮力の負値も示してある。両図から次のことが判断される。

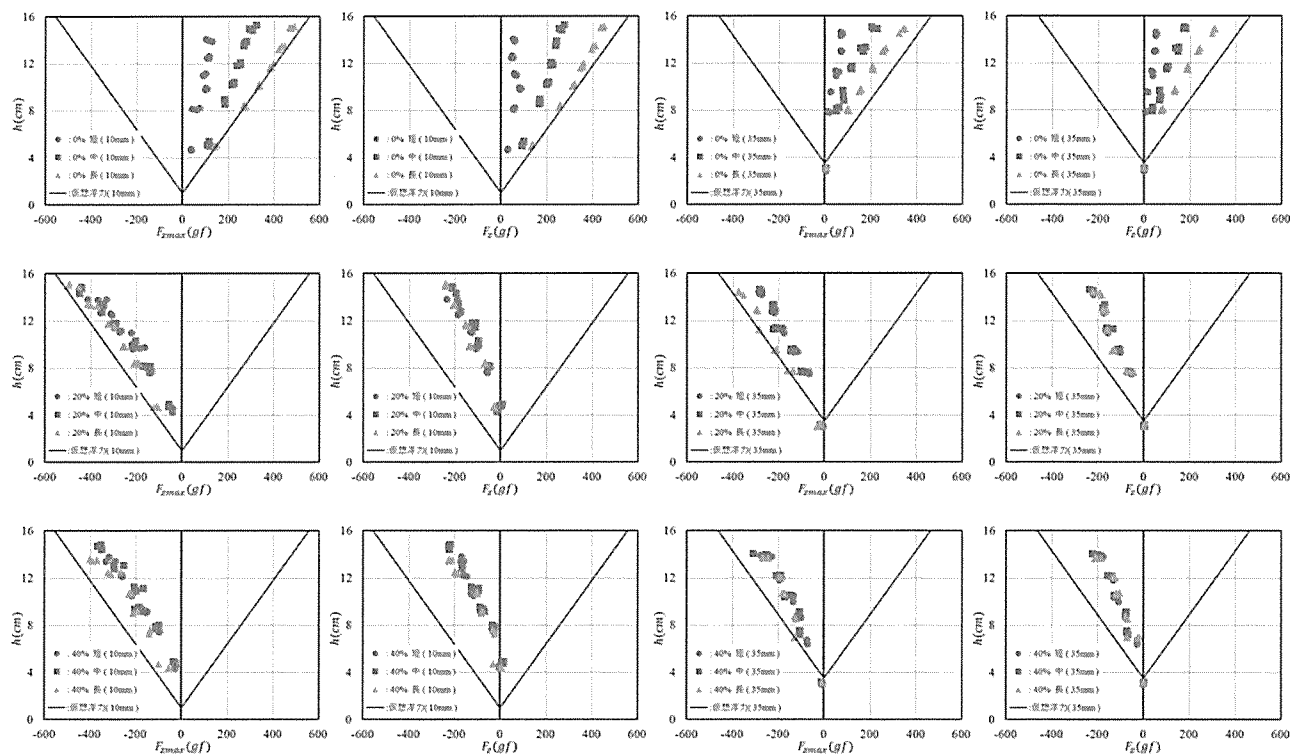
- 1) 最大鉛直力と鉛直力ともに、開口部がある場合や「骨組のみ」の場合は下向き、開口部がない場合は上向きの力である。開口部がある場合の下向きの力は氾濫水が開口部から流入し、建築物内に貯まることに起因する。ただし、開口率が小さい場合は、建築物内への流入水量が少なく、上向きの場合がある。
- 2) 開口部がない場合の最大鉛直力と鉛直力は仮想浮力以下である。
- 3) 開口部がない場合の最大鉛直力と鉛直力は、前面浸水深が大きくなるにつれて、仮想浮力に対する割合が低下する傾向にある。
- 4) 「骨組のみ」の場合、建築物内に流入水の貯まる場所がなく、鉛直力は小さな下向きの力にとどまる。

これは、外壁を壊れ易くして水平力を低減させる案において、1階や1階の床近傍の外壁を壊れ易くする方法は水平力の低減では効果的であるが、鉛直力の低減では逆効果になり得ることを示している。開口部がある場合は開口部から屋内へ流入する水脈の天井や床への衝突による動水圧¹⁷⁾，流入した海水の



(a) 床高5 mm (左：最大鉛直力，右：鉛直力)

(c) 床高20 mm (左：最大鉛直力，右：鉛直力)



(b) 床高10 mm (左：最大鉛直力，右：鉛直力)

(d) 床高35 mm (左：最大鉛直力，右：鉛直力)

図-7 最大鉛直力 F_{zmax} (衝撃部) と前面浸水深 h および鉛直力 F_z (準定常部) と前面浸水深の関係

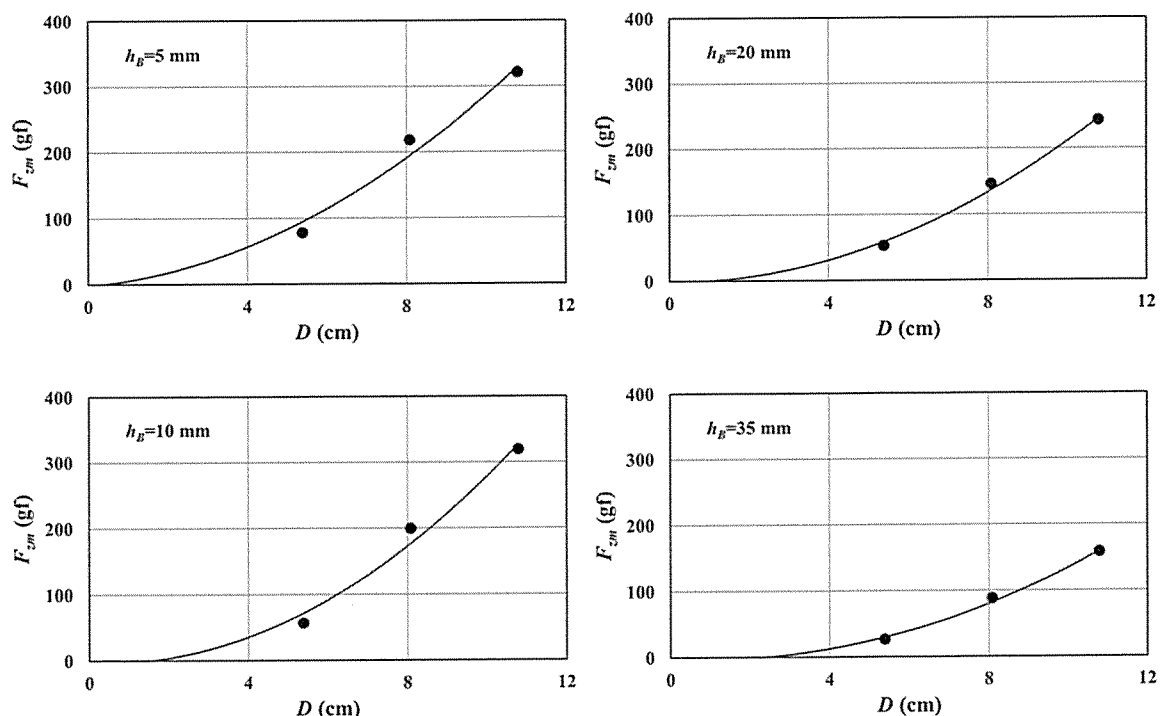


図-8 奥行長 D に対する平均鉛直力 F_{zm} の非線形性 ($O_p=0\%$)

重量¹¹⁾や天井（床下）に残った空気による浮力も作用することが指摘されている。

3.3.2 開口率への依存性

図-7から次のことが判断される。

- 1) 開口率が十分に大きく（例えば20%以上）、比較対象の両方が同じように開口部を有し、その下端高さが同じ場合、鉛直力は開口率にほとんど依存しない。
- 2) 開口率が大きくなるにつれて、開口部の下端高さが低くなる場合、下向き鉛直力の大きさは小さくなる²³⁾。
2)は、開口率が小さいほど、各階に貯まり得る流入水量が多いからである。

3.3.3 奥行長への依存性

図-7から次のことが判断される。

- 1) 開口率が十分に大きい（例えば20%以上の）場合、奥行長の影響はほとんど認められない。
- 2) 開口部がない場合、奥行長が鉛直力に大きく影響し、鉛直力は奥行長に対して非線形的に大きく増加する。

2)の非線形的な増加は、奥行長が長い場合と短い場合における水平力と前・背面浸水深に差がそれほどないことを考えると（3.2.3項や図-4の各図上段の右図参照）、模型底面に作用する揚力や揚圧力¹¹⁾の流れ方向分布の変化が関係していると推察される。この検証は今後の課題である。

図-8は奥行長と貯水深を除いた同一条件下の鉛直力の平均 F_{zm} （各々18個の平均）の関係を示す。図から、奥行長が1.5倍になれば鉛直力は2～3倍、2倍になれば4～7倍と非線形的に増大することが判る。これは、建築物の奥行長が長い場合の鉛直力は、入射氾濫水深まで建築物が浸水するとして鉛直力（浮力）を算定する国土交通省の告示¹⁰⁾によるものより大きくなるかもしれないことを示唆している。

3.3.4 越流する場合

津波氾濫流が建築物を越流する場合の鉛直力についてもほとんど検討が行われていない。開口部のない建築物を越流する場合の鉛直力は浮力、揚圧力、建築物底面における下向きの揚力、建築物上面における上向きの揚力からなり、越流水深が少し増加するだけで、上向きの鉛直力は大きく増加することが指摘されている²³⁾。

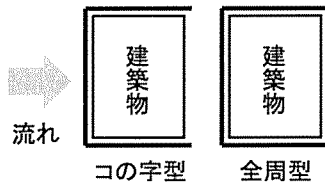


図-9 鉛直力低減工（太実線）の平面配置

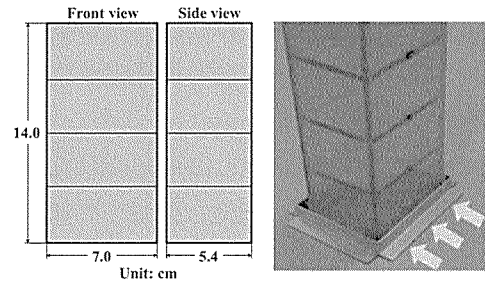


図-10 建築物模型の諸元と全周型鉛直壁の設置例 ($h_w=7\text{ mm}$, $B_{gap}=3\text{ mm}$)

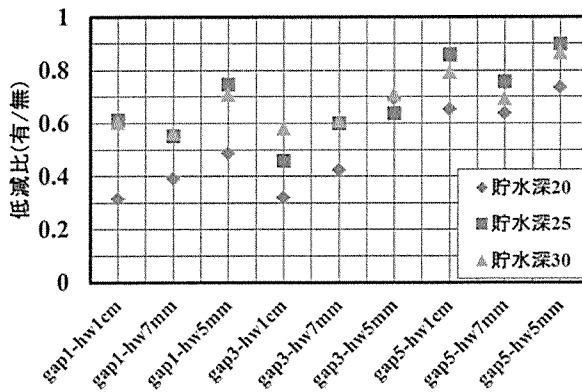


図-11 「コ字型」における隙間 B_{gap} , 鉛直壁高 h_w , 入射氾濫水深（貯水深）毎の低減比

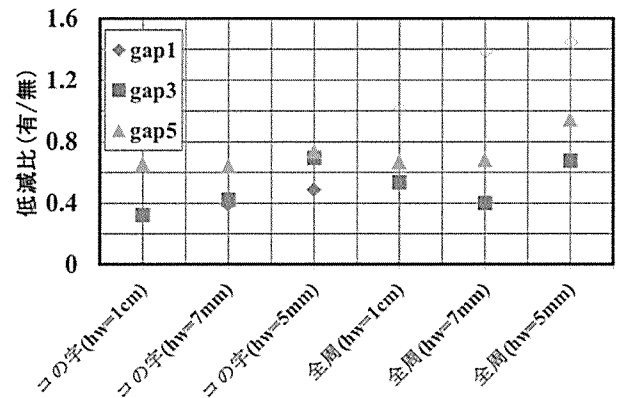


図-12 低減工，鉛直壁高 h_w ，隙間 B_{gap} 毎の低減比（貯水深 $h_U=20\text{ cm}$ ）

3.3.5 鉛直力の低減

これまでの建築物に作用する津波荷重の低減に関する検討は水平力が中心であり（3.2.5項参照），鉛直力の低減に関する検討例は極めて少ない．本項では最悪の場合を想定して，「杭基礎を有する建築物では，地震に伴う地盤の液状化や津波氾濫流による地盤浸食により，建築物底面への氾濫水の流入阻止は難しい」という考えに基づく，そして既設の建築物にも適用できる鉛直力低減法の検討実験例を紹介する^{24), 32)}．

不確定要素をできるだけ除くため，開口部なしの建築物模型を検討対象とする．鉛直力の低減工（低鉛直壁の設置）は鉛直力の大きな低減が期待できる図-9に示す前面と両側面を囲む「コ字型」と全周を囲む「全周型」の2種類である．鉛直壁（アルミ製）の厚さは1 mm，高さ h_w は5 mm，7 mm，1 cm の3種類，建築物と鉛直壁間の隙間 B_{gap} はどこでも同じ1 mm，3 mm，5 mm の3種類，床高は5 mm である．図-10は建築物模型と全周型鉛直壁の設置例である．

図-11に「コ字型」の低減工における隙間，鉛直壁高，入射氾濫水深（ゲート急開流れにおける貯水深と換言してもよい）毎の準定常部の鉛直力の低減比（＝低減工がある場合の鉛直力／低減工がない場合の鉛直力），図-12に貯水深が20 cm の場合における低減工，鉛直壁高，隙間毎の準定常部の鉛直力の低減比を示す．これらの図から鉛直力の低減について次のことが判断される．

- 1) 「全周型」，「コ字型」の順で鉛直力の低減比は小さくなり，提示の低減工により最大で70%程度の鉛直力の低減が期待できる³²⁾．
- 2) 低減工の鉛直壁高が高いほど鉛直力の低減比は小さくなる傾向にある．ただし，鉛直壁高が床高より少し高い場合は，その傾向が度々逆転する．その理由は不明で，今後の検討課題である．
- 3) 「コ字型」では，低鉛直壁と模型の隙間が狭いほど低減比は小さくなる．
- 4) 2)と3)の傾向は隙間をなくし，建築物の底面に氾濫水が入らないようにすれば，浮力や揚圧力，揚力が作用しないことと合致する．

- 5) 鉛直力の低減は低減工に起因した建築物前・背面の底面近傍と底面下における流況変化による揚圧力や下向き揚力の流れ方向分布の変化が原因と推察される。これについては波圧計などを用いた水理実験による検証が待たれる。

参考までに、鉛直壁高（ ≤ 10 mm）が前面浸水深（ $= 8 \sim 14$ cm. 図-5などを参照）に比べて十分に低い提示の低減工では、水平力の低減は低減工の種類にほとんど依存せず、生じてもわずかである。

津波氾濫流が開口部なしの建築物模型を越流しない場合、建築物に作用する鉛直力の時間波形は摩擦力を除けば基本的に下向きの揚力と上向きの「浮力＋全揚圧力」の時間波形の合成である。したがって、鉛直力作用直後から急増する下向きの揚力と揚力に比べて増加が遅い上向きの「浮力＋全揚圧力」の合成鉛直力の時間波形は極小、極大の順で2つの極値を持つことになる（図-3左図参照）。下向きの極小値とその後の上向きの極大値（最大鉛直力）の大きさは、1) 入射氾濫水深が大きくなるにつれて、大きくなり、2) 隙間が小さくなるにつれて、小さくなる傾向が指摘されている³²⁾。これらの傾向は「コの字型」や「全周型」といった型に依存しない。

3.4 その他

図-4や7から理解されるように、建築物の前面で反射段波が形成される場合、前面浸水深は開口率にあまり強く依存しない。これは、後述するように（図-15や16参照）、建築物幅に比べてつなぎ空間幅が十分に広い場合でも反射段波が形成され、一般に開口部の流水断面積に比べてつなぎ空間の流水断面積が十分に大きいためと考えられる。

津波氾濫水の密度は静水圧式や抗力式などから理解できるように津波荷重へ線形的に影響を及ぼす。氾濫水の最大密度または土砂の最大飽和濃度については、津波氾濫に比べて比較的身近な洪水氾濫の場合でさえも定説がなく、実験的検討が開始された段階である³³⁾。

杭基礎に建築物の沈下だけでなく転倒防止の役割をも持たせる場合は、「てこの原理」から理解できるように、杭基礎は建築物の中心部に設けるのではなく、周辺部に設けた方がより効果的であることが指摘されている²⁴⁾。これは建築物だけに限るものではあるまい。

水理実験において分力計を水路の底面下と模型上方のどちらに設置しても、力の測定結果に差はほとんどなく、実験値の再現性と信頼性が確認されている³⁴⁾。

4. 前面浸水深の推定法

3.2.1項で述べたように、水理実験に基づき水平力に関して次の結果を得ている。

「準定常部の水平力 F_x は前面浸水深が建築物の幅に比べて相対的に小さい間は前面静水圧とほぼ同じである。これは水平力に動水圧が寄与していることを示している。しかし、前面浸水深が相対的に大きくなるにつれて、前面静水圧より小さくなる傾向にある。」

この結果に基づき、準定常部の水平力を前面静水圧として評価すれば、安全側に評価することになる。換言すれば、前面浸水深が判れば、準定常部の水平力が評価できることになる。日本建築学会の「建築物荷重指針・同解説」¹¹⁾も、限られた条件下であるが、水平力を前面浸水深から推定する方法を提示している。したがって、まだ動水圧の寄与度の問題が残されているが²⁶⁾、前面浸水深推定法の考案が必要ということになる。

全動水圧の寄与度については、寄与しないを含めて、諸説がある。全動水圧は全静水圧の4割5分程度に達する場合があるとの報告もある^{9), 35)}。津波が構造物（胸壁）を越流する場合としない場合で全静水圧に対する全動水圧の比率は異なるとも言われている^{36), 37)}。

前面浸水深が相対的に大きくなるにつれて、前面静水圧より小さくなる傾向の理由として「建築物前面における流れの3次元性の影響増大が考えられる。」としているが、推測の域を出ておらず、これも今後の検討課題である。

これまでに提案されている前面浸水深推定法の取りまとめとして有川のものがある³⁸⁾。推定法は運動量保存則とエネルギー保存則に基づくものの2系統がある。本章では先ず建築物前面における反射段波と跳水の発生境界条件を紹介し、一般的である反射段波が発生する条件下において任意の「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、運動量保存則に基づく入射津波条件を用いた RC 造建築物前面における浸水深の推定法の研究状況や残された検討課題などを紹介する。

エネルギー保存則に基づくものについて一言述べておく。エネルギー保存則に基づくものは最終的にエネルギー損失係数や広義のエネルギー損失係数（邪道であるが非定常や非静水圧に起因するエネルギーの補正を担わせることも可能）¹⁸⁾を伴う。これらを適切に推定する必要があるが、そのためには様々な条件下における対象現象の経験やデータの蓄積が必要で、これがエネルギー保存則に基づくものの宿命である。

4.1 既往の研究

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} だけでなく、建築物の大きさ、形状^{39)・42)}、向き（津波の入射角）^{40)・43)}、配置間隔（「つなぎ空間」の幅）⁹⁾、開口率 O_p ¹⁸⁾にも依存する。これまで、建築物などの構造物にとって危険側を想定して、津波氾濫流が構造物へ直角に入射する場合を対象に、2次元直立壁（開口部ありや越流する場合を含む）^{18), 37), 44) - 49)}、柱体（開口部ありを含む）^{18), 47), 48)}、開口部がない有限

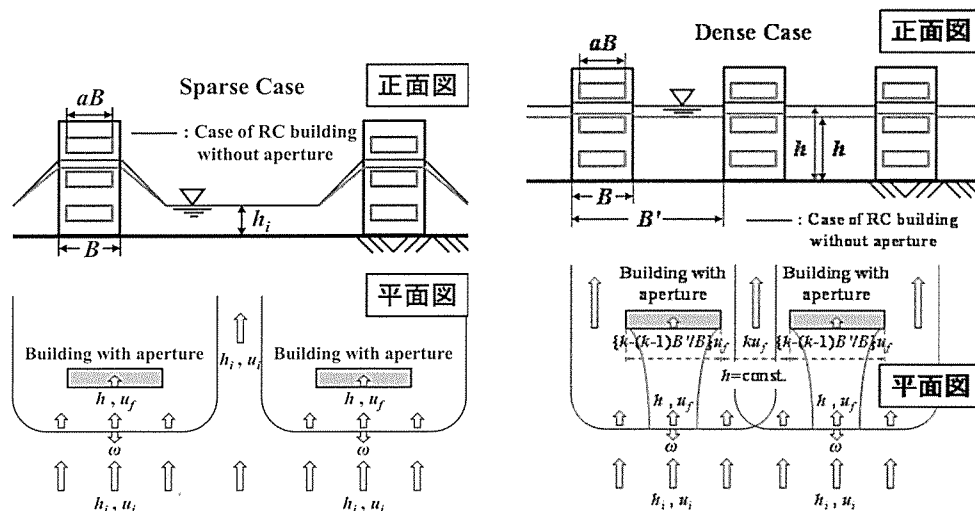


図-13 流れパターンのモデル化（左：幅広の孤立した RC 造建築物（既報⁵¹⁾），右：狭いつなぎ空間を有する RC 造建築物（本稿）。青実線の水面は開口部がない場合）

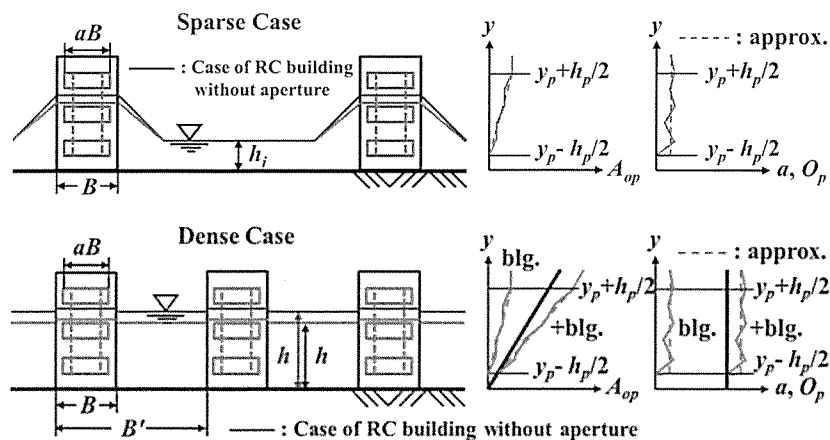


図-14 開口部のモデル化（上：幅広の孤立した RC 造建築物（既報⁵¹⁾），下：狭いつなぎ空間を有する RC 造建築物（本稿）。青実線の水面は開口部がない場合，右2つの図における太実線はつなぎ空間部）

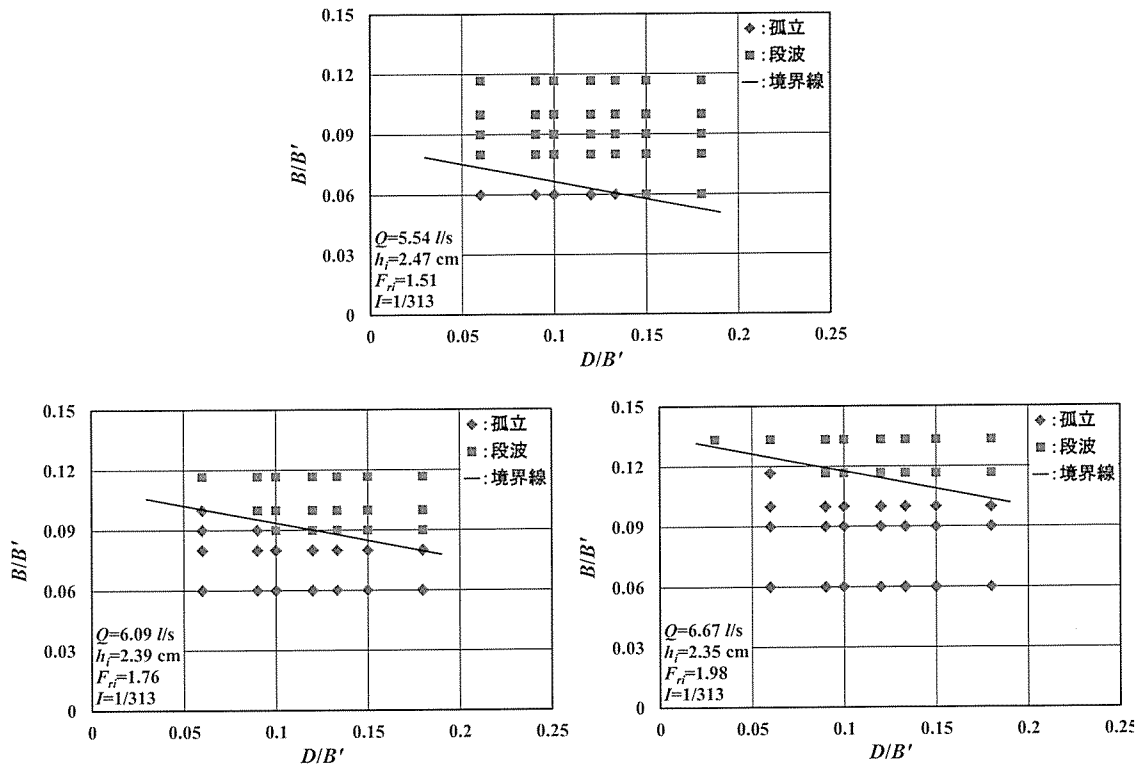


図-15 建築物前面における津波による反射段波と跳水の発生境界条件例（定常流実験）

幅の建築物（「つなぎ空間」を有する建築物と言える^{21), 41), 50)}、開口部を有する幅広の孤立した建築物（図-13左図と14上図参照⁵¹⁾）に対して前面浸水深の推定法が提案されている。しかし、任意の「つなぎ空間と開口部」を有する有限幅の RC 造建築物が津波氾濫流の横断方向に単列で、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-13右図と14下図参照）の前面浸水深の推定法は未提案である。もちろん、複列で、複数配置の場合⁵²⁾も未提案である。

鉛直力は作用しないとして、建築物にとって危険側の水平力だけを考えればよいのであれば、開口部がない有限幅の建築物に対する前面浸水深の推定法があればよい。しかし、実際の建築物には開口部が存在し、津波荷重を低減させることを目的として、建築物低層部の外壁を壊れ易くするといった考えもある。したがって、任意の「つなぎ空間と開口部」を有する有限幅の RC 造建築物前面における浸水深の推定法が是非とも必要である。

4.2 反射段波と跳水の発生境界条件²⁵⁾

単独の柱体前面には跳水、無限幅や有限幅の建築物前面には反射段波が形成されるが、両者の発生境界条件はよく判っていない。この条件は前面浸水深の推定法の一般化と適用において是非とも必要である。

4.2.1 発生境界条件

図-15に小規模水路実験で得られた直方体（直角入射、開口部なし）の建築物模型前面における反射段波（■：段波）と跳水（◆：孤立）の発生状況例を示す²⁵⁾。津波氾濫流は定常流で模擬している。建築物模型は実験水路横断方向の中央に設置している。図中、 B は模型幅、 D は模型奥行長、 B' は水路幅、 Q は流量、 h_i は模型設置位置における入射水深、 F_{ri} は入射フルード数、 I は水路底面勾配である。この実験における入射フルード数は1.51～1.98である。入射フルード数の範囲が狭いが、現段階での模型前面における反射段波と跳水の発生境界条件として図中に実線で示されている式(1)が提案されている²⁵⁾。

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

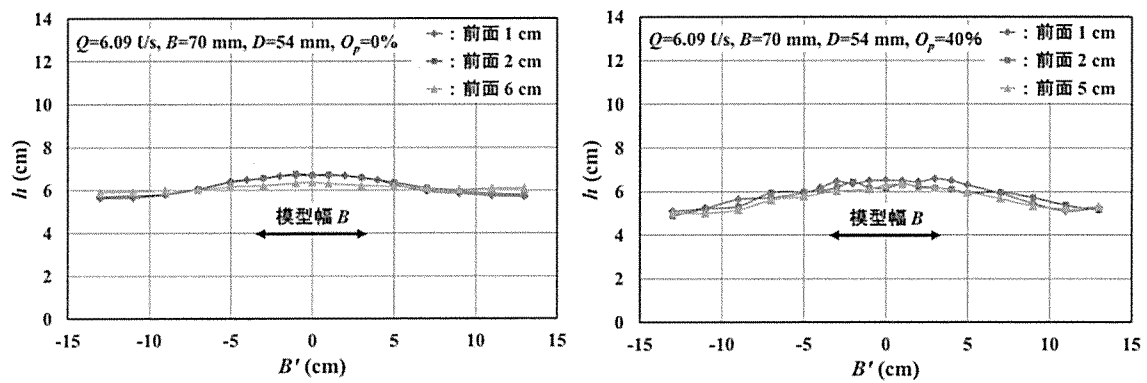


図-16 模型前面における浸水深の分布例 ($h_i=2.39$ cm, $F_{ri}=1.76$)

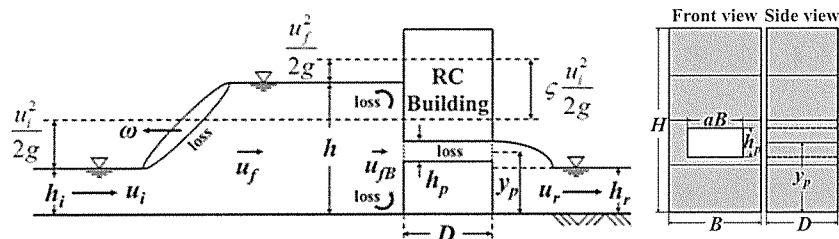


図-17 建築物前面浸水深 h の推定モデルと開口部の定義

図-15と式(1)から、反射段波と跳水の発生境界条件は入射フルード数ばかりでなく、模型の奥行長にも依存することが判る。後者の理由として、模型側壁における摩擦の増減²⁴⁾のほか、水路側壁からの反射の影響が考えられる。また、 $B/B'=0.06$ 程度であっても、つまり建築物幅に比べて相当に広いつなぎ空間幅であっても反射段波が形成されることが判る。これは、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推定法の適用頻度が高いことを示している。

4.2.2 前面浸水深の横断方向分布

流量が6.09 l/s、建築物模型幅が70 mm ($B/B' \approx 0.23$, $D/B' = 0.18$) で、開口率が0%と40%の場合の模型前面における水路横断方向の水深分布例を図-16に示す²⁵⁾。反射段波が発生した場合で、凡例の前面5 cmと6 cmの位置は水位ピーク発生位置である。図から、 B/B' が0.23程度にもなると、1) 反射段波域内の水深は水路横断方向にほぼ一様である、2) 反射段波域内であれば、水路横断方向の水深は前面距離にあまり依存しない、3) 開口率40%は実存する建築物の最大値に近いが¹²⁾、開口率が0%と40%の場合の水路横断方向の水深とその分布に大差はないことが判る。

4.3 前面浸水深推定法の一般化²⁵⁾

4.3.1 反射段波領域のモデル化

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-13右図と14下図に示すように、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の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(図-16)。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を h_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。反射段波領域内の上流部における流速(氾濫流の横断方向に一樣と仮定)を u_f 、つなぎ空間直前面における断面平均流速 u_{fop} を ku_f ($k \geq 1$ で、反射段波域内における上流部の「支配域幅係数」またはつなぎ空間直前面における断面平均流速を表現するため

の「流速係数」と呼ぶべき係数．図-13右図参照）とする．建築物の前背面における本稿の縦断モデルを図-17示す．この場合，反射段波領域内の上流部から下流部にかけての領域における質量保存則は次式である．

$$B'hu_f = Bhu_{fB} + (B' - B)hku_f = aBh_pu_p + (B' - B)hku_f \quad (2)$$

ここで， B' は建築物幅とつなぎ空間幅の合計幅（4.2.2項では水路幅）， a ($0 \leq a < 1$) は開口部幅 aB / 建築物幅 B の開口部幅係数， 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つの一様な矩形開口部に換算したときの高さ．換算法は後述）， u_p は開口部の断面平均流速であり，「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(2)から建築物直前面における断面平均流速 u_{fB} として次式を得る（図-13右図参照）．

$$u_{fB} = \left\{ k - (k-1) \frac{B'}{B} \right\} u_f \quad (3)$$

k は $1 \leq k \leq B'/(B'-B)$ の値域で，本章対象の「つなぎ空間と開口部」を有する RC 造建築物では未定で，その評価法は後述する（4.4.1項参照）．狭いつなぎ空間を有し，開口部がない RC 造建築物では $k=B'/(B'-B)$ である．

4.3.2 理論

入射津波が定常的で，圧力が静水圧分布する場合，Stoker 理論⁴⁴⁾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（開口部ありや越流する場合を含む）や建築物のつなぎ空間，開口部を想定して，岩崎・富樫⁴⁵⁾，富樫・古賀⁴⁶⁾，池谷ら⁴⁸⁾⁻⁵⁰⁾と松富・小野⁵¹⁾がその拡張理論を提示しており，その基礎式は式(4)と(5)である．

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

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

ここで， $\omega (\leq 0)$ は反射段波の伝搬速度（図-13，17参照）， g は重力加速度である．

式(4)と(5)から式(6)の前面浸水深係数 h/h_i に関する3次方程式が得られ，岩崎・富樫⁴⁵⁾，富樫・古賀⁴⁶⁾，池谷ら⁴⁸⁾と松富・小野⁵¹⁾が解（数値解を含む）を得ている．

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

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，建築物の諸元と開口部の諸元に対応できる近似解法を解説する²⁵⁾．

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(2)を変形）と(8)である．

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

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

ここで， y_p は地表面から換算した開口部の中心までの高さ， f は合成摩擦係数， W は潤辺補正係数と呼ぶべきもので，開口部の上端が前面浸水位以下の場合は1，前面浸水位より高い場合は0.5，右辺の()内は無次元化された潤辺の半値， A は建築物背面からの静水圧力項である．開口部の合成壁面せん断応力 τ_0 と静水圧力項

の定義は ρ を流体密度, $h_r \approx h_i$ として次式である.

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

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

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)に代入すれば, 最終的に解くべき式(11)を得る.

$$\left(\frac{h}{h_i} \right)^3 - \left(\frac{h}{h_i} \right)^2 - \left\{ 1 + 2 \left(F_{ri} - \frac{U}{\{k - (k-1)B'/B\}} \right)^2 \right\} \frac{h}{h_i} + 1 = 0 \quad (11)$$

ここで,

$$U = a \sqrt{\left\{ \left(\frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i} \right) \frac{h_p^3}{h_i^3} - A \frac{h_p^2}{h_i^4} \right\} \left/ \left[\left\{ \frac{h_p}{h_i} + f \left(W + \frac{h_p}{aB} \right) \frac{D}{h_i} \right\} \frac{h^2}{h_i^2} - a^2 \frac{h_p^3}{h_i^3} \right] \right.}$$

式(11)を解析的に解くことは難しいので, 本稿では逐次計算により数値解を得ることにする.

4.3.3 開口部の換算法

多様な開口部へ簡便に対応するため, 単数や複数の任意形状の開口部を1つの矩形開口部へ換算することを考える.

前面浸水深が増大するにつれて, 開口部面積 A_{op} の増加率や開口部幅係数 a , 開口率 O_p は図-14上下の右2つの図において赤細線で示すように変化する. 本稿ではそれらの平均値 (図-14上下の右2つの図おける赤破線) を採用して, 1つの矩形開口部へ換算する. 具体的には, 開口部の下端 ($=y_p - h_p/2$) と上端 ($=y_p + h_p/2$) は実際の位置を採用し, 実際と換算した矩形の全開口部の面積 A_{op} と合成摩擦項 $f(W + h_p/aB)$ の両方が一致するように換算する. 式(11)の U の構成から理解されるように, 同じ形と大きさ, 中心高さの矩形開口部が複数ある場合を除いて, この換算は近似的なものである. 換算例は後述する.

4.4 前面浸水深の計算法²⁵⁾

4.4.1 開口部がある一般的な場合

まず k の評価が必要である. 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, 通過する流量はつなぎ空間や開口部といった場所の違いに関係なく, オリフィスから流出する場合の Bernoulli の定理から計算される流速 ($=\sqrt{2g(h-y)}$, y は地表面が原点の鉛直座標) と流積要素 ($= (aB + B' - B) dy$) の積の積分で求めると仮定すれば, 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. この考え方では分子と分母の流量係数が互いに打ち消し合い, 流量係数という曖昧なものなくなる.

$$R_m = \frac{Q_B}{Q_T} = a \left(H_1^{\frac{3}{2}} - H_2^{\frac{3}{2}} \right) \left/ \left\{ \left(\frac{B'}{B} - 1 \right) \left(\frac{h}{h_i} \right)^{\frac{3}{2}} + a \left(H_1^{\frac{3}{2}} - H_2^{\frac{3}{2}} \right) \right\} \right. \quad (13)$$

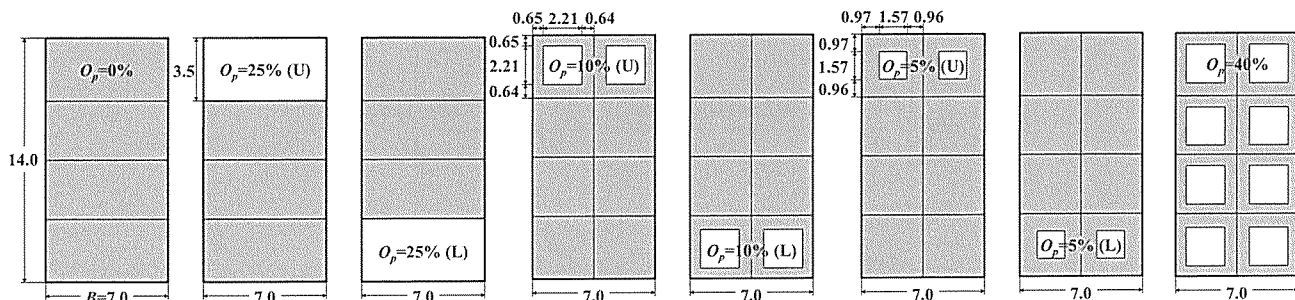


図-18 建築物模型諸元の詳細（縮尺は1/100，単位は cm，奥行長 D は全て 5.4 cm，開口率 O_p は模型前面の全表面積に対するもの）

ここで，

$$H_1 = \frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i} + \frac{1}{2} \frac{h_p}{h_i}, \quad H_2 = \frac{h}{h_i} - \frac{y_p}{h_i} - \frac{1}{2} \frac{h_p}{h_i}$$

k は式(12)と(13)が一致する場合として決定される。

前面浸水深 h は式(11)～(13)を連立させて計算する。前面浸水位が開口部の上端に達しない場合は，前面浸水位を開口部の上端と仮定し，開口部上端面の合成摩擦を無視，つまり $W=0.5$ とする。この場合の具体的な計算手順は，計算初期に小さめの h_p （仮想の上端）を仮定し， h_p を微増させながら，仮想の上端と式(11)から計算される前面浸水位が一致するまで計算を繰り返す。

4.4.2 開口部がない特殊な場合

前面浸水深は，床下の換気を目的とした通風口などを仮想し，小さな矩形開口部（ $O_p=0.1\%$ 程度）を地表面と接するように設け，式(11)～(13)を連立させて計算する。この場合，前面浸水位は必ず開口部の上端以上である。

この計算法には仮想開口部の大きさ次第で前面浸水深が変化するという欠点がある。しかし，開口率を 0.1% 程度としておけば，前面浸水深の変化量と通過流量は無視できる程度である。4.4.1項に示した事例が多い場合の計算法と一貫性もある。

4.5 結果と考察

図-18に示す左7種類の模型に対する既報実験値（準定常流）⁵¹⁾や両端2種類の模型に対する本稿実験値（定常流）との比較を通して本推定法の有用性を解説する。模型前・背面の開口部は急拡・急縮状態で，模型各階の床は止水されており，模型内に隔壁などはない。床高は開口率を正確にするため 0 cm としている。

4.5.1 開口部の換算例

図-18における開口率が10%と40%の場合の開口部換算例を示す。両者の開口部は全て正方形で，辺長は2.21 cm である。

(1) 10%の場合

開口部は完全に水没するとし，換算後の開口部幅を x ，換算前の合成摩擦係数を f_b ，摩擦損失係数 f_0 を 0.005，入口（急拡）損失係数 f_{sc} を 0.5，出口（急縮）損失係数 f_{sc} を 0.5，径深を R とすれば，開口部の面積が同一条件より，

$$2_{\text{個}} \times (2.21 \text{ cm})^2 = 2.21 \text{ cm} \times x \quad \therefore x = 4.42 \text{ cm}$$

抵抗項が同一条件より，

$$2_{\text{個}} \times f_b (1 + 2.21/2.21) = f (1 + 2.21/4.42) \quad \therefore f = 2.67 f_b$$

壁面摩擦に起因する損失水頭に掛る係数 $f_0 D/R$ は，

$$f_0 D/R = 0.005 \times 5.4 / \{2.21^2 / (4 \times 2.21)\} = 0.0489 \approx 0.05$$

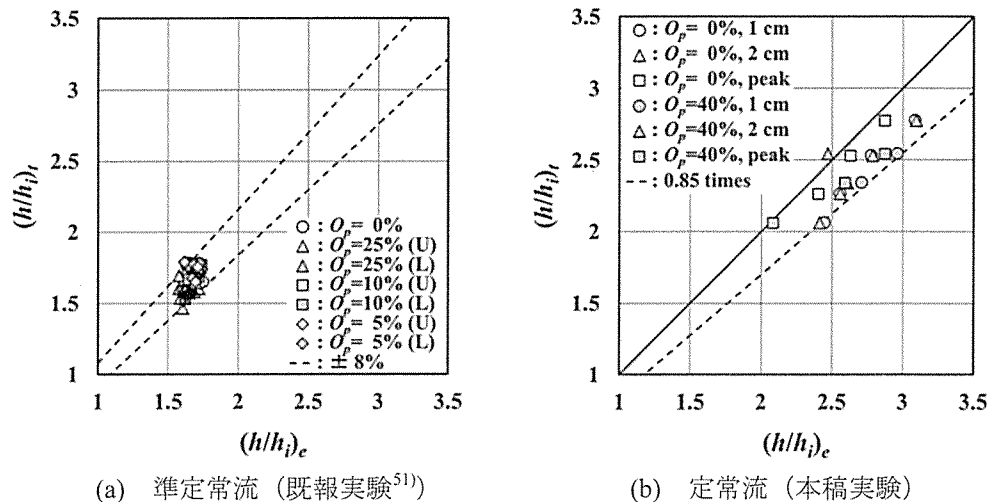


図-19 前面浸水深係数 h/h_i の推定値 (式(11)) と実験値の比較

全損失水頭に掛る係数 $f_b D/R$ は,

$$f_b D/R = 0.5 + 0.5 + 0.05 = 1.05 \quad \therefore f_b = 0.1074$$

したがって, $f = 2.67 f_b = 0.286$ となる。

(2) 40%の場合

開口部の面積が同一条件より,

$$8_{\text{個}} \times (2.21 \text{ cm})^2 = (14 - 1.29) \text{ cm} \times x \quad \therefore x = 3.07 \text{ cm}$$

抵抗項が同一条件より,

$$8_{\text{個}} \times f_b (1 + 2.21/2.21) = f (1 + 12.71/3.07) \quad \therefore f = 3.12 f_b$$

壁面摩擦に起因する損失水頭に掛る係数 $f_0 D/R$ は,

$$f_0 D/R = 0.005 \times 5.4 / \{2.21^2 / (4 \times 2.21)\} \approx 0.05$$

全損失水頭に掛る係数 $f_b D/R$ は,

$$f_b D/R = 0.5 + 0.5 + 0.05 = 1.05 \quad \therefore f_b = 0.1074$$

したがって, $f = 3.12 f_b = 0.335$ となる。

4.5.2 推定法の有用性

前面浸水深係数 h/h_i に関する推定値と既報⁵¹⁾および本稿実験値の比較を図-19に示す。図-19 (a)が既報実験値, 図-19 (b)が本稿実験値との比較で, 両図の推定計算では $B=7.0 \text{ cm}$, $B'=30 \text{ cm}$, $f_0=0.005$, $f_{se}=f_{sc}=0.5$ としている。開口部がない場合の仮想開口部は図-19 (a)では高さ $h_p=0.15 \text{ cm}$, 幅 $aB=0.70 \text{ cm}$, 中心高さ $y_p=0.075 \text{ cm}$, 図-19 (b)では $h_p=0.15 \text{ cm}$, $aB=0.28 \text{ cm}$, $y_p=0.075 \text{ cm}$ のものを設定した。本推定法では開口部の左右方向位置は結果に影響しない。

図-19 (a)から, 推定値と既報実験値の差は最大で8%程度であることが判る。幅広の孤立した RC 造建築物として計算した場合, 両者の差 (推定値が大きい) は平均で20%程度であった⁵¹⁾。その理由として「模型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。」としたが, 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-19 (a)を詳細に見れば, 推定値は開口部が低位置(L)にあり, 完全に水没する場合は大きめ, 高位置(U)にあり, 自由水面を有する場合は小さめであることが判る。この理由として, 4.5.1項の開口部の換算例から理解されるように, 自由水面を有する場合は完全に水没する場合と比べて合成摩擦係数 f が小さめに換算されることが考えられる。

図-19 (b)によれば, 全体的に実験値が大きめである。特に模型の前面1~2 cm と開口率が40%の場合で差が目立つ。図-19 (a)に示す既報実験値の測定位置は模型の前面5 cm で⁵¹⁾, 図-19 (b)の凡例 peak は水位ピーク発

生位置、つまり模型の前面5～6 cm の位置を示す（図-16参照）²⁵⁾。したがって、図-19 (a)と同等な比較・検討は peak に対するものが対象となる。この場合、開口率が0%では差は5%以内、40%では10%以内となっている。開口率が40%での差が大きい理由として、開口部の換算法が考えられる。開口率が40%の場合、各開口部の形と大きさは全く同じであるが、中心高さが階毎で異なっており、換算が近似的となっている。このように開口部が複雑な場合（形や大きさ、中心高さが異なる複数の開口部）の換算法の改良が今後の検討課題である。

5. おわりに

津波による RC 造建築物の被害事例や被害条件例を示すとともに、津波荷重を水平力と鉛直力に分けて小規模水理実験に基づいたそれらの特性例、津波荷重に密接に関係する建築物前面における流れパターンの分類条件と前面浸水深の推定法を取り上げ、研究の現状と検討課題例を簡単に紹介した。本稿を通して、多くの方々にこれらの話題や話題に関する検討課題例に関心を持っていただければ幸いである。ただし、本稿で紹介したことが独善的になっていないか心配である。

RC 造建築物に作用する津波荷重の評価では多くの場合で津波ハザードマップが活用されることになると思われる¹¹⁾。現在の津波ハザードマップは実際の建築物（群）を配置した津波数値シミュレーションに基づいて作成されていないことに注意を要する。また、波の分散性を考慮せずに津波ハザードマップが作成されており、地域（海域および陸域の地形）によってはこの点にも注意を要する。

本稿で取り上げた項目のどれ一つとして「満足に解決されたものはない」、と言っても過言ではあるまい。一津波研究者として、また人として分を尽くし、諸課題の解決に向けて少しでも貢献できればと願っている。

謝辞：本稿の実験では多くの秋田大学の卒研究生と大学院生から助力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、渡辺偉夫：日本被害津波総覧，東京大学出版会，p.206, 1985.
- 2) 東京大学地震研究所：昭和8年3月3日三陸地方津波に関する論文及報告，東京大学地震研究所彙報別冊，第1号，1934.
- 3) 相田 勇，影山正樹：女川，石巻間（宮城），1960年5月24日チリ地震津波に関する論文及び報告，チリ津波合同調査班，pp.289-302, 1961.
- 4) 首藤伸夫：津波強度と被害，津波工学研究報告，第9号，pp.101-136, 1992.
- 5) 松富英夫，首藤伸夫：津波の浸水深，流速と家屋被害，海岸工学論文集，第41巻，pp.246-250, 1994.
- 6) 飯塚秀則，松富英夫：津波氾濫流の被害想定，海岸工学論文集，第47巻，pp.381-385, 2000.
- 7) 越村俊一，行谷佑一，柳澤英明：津波被害関数の構築，土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, pp.320-331, 2009.
- 8) Shuto, N.: Damages to houses by the 1964 tsunami in Crescent City, California, IUGG XXIII General Assembly, JSS07/09P/A02-003, 2003.
- 9) 松富英夫，大向達也，今井健太郎：津波氾濫流の構造物への流体力，水工学論文集，第48巻，pp.559-564, 2004.
- 10) 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，国土技術政策総合研究所資料，No.673, 2012.
- 11) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，pp.563-592, 2015.
- 12) 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. 被災した建築物の諸元等の情報が必要な場合は，Matsutomi, H., E. Yamaguchi, K. Naoe and K. Harada: Damage to

Reinforced Concrete Buildings and Coastal Trees due to the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, Proc. of Intl. Conf. on Coastal Eng., No.33, Santander, Spain, Paper #: management.51, 2013. Retrieved from <http://journals.tdl.org/ICCE/>

- 13) 松富英夫, 高橋智幸, 松山昌史, 原田賢治, 平石哲也, Seree Supartid, Sittichai Nakusakul: タイの Khao Lak と Phuket 島における2004年スマトラ島沖津波とその被害, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1356-1360, 2005.
- 14) 松富英夫, 榊山 勉, Sindhu Nugroho, 都司嘉宣, 谷岡勇市郎, 西村裕一, 鎌滝孝信, 村上嘉謙, 松山昌史, 栗塚一範: Banda Aceh と周辺における2004年インド洋津波と被害想定からみた課題, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1366-1370, 2005.
- 15) 国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報), 国土技術政策総合研究所資料 No.636, 建築研究所資料 No.132, 2011.
- 16) 東京大学生産技術研究所: 平成23年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討(研究代表者: 中埜良昭)」報告書, 2012.
- 17) 奥田泰雄, 坂田 升: 建築物に作用する津波のシミュレーション(その2)開口部の影響, 日本建築学会大会学術講演会梗概集 B-1, pp.77-78, 2008.
- 18) 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.
- 19) 佐川隆之, ファムバンフック, 長谷部雅伸, 坂本眞一: 開口を有する建築物を対象とした三次元津波荷重解析と転倒判定法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.801-805, 2012.
- 20) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷 毅, 高尾 誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.911-915, 2000.
- 21) ファウジアフマド, 嶋原良典, 藤間功司, 水谷法美: 陸上構造物に作用する津波波力の推定手法に関する考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.321-325, 2009.
- 22) 有光 剛, 大江一也, 川崎浩司: 構造物前面の浸水深と流速を用いた津波波圧評価手法に関する水理実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.776-780, 2012.
- 23) 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.
- 24) 決得元基, 松富英夫, 藤井俊典, 富井達也: RC 造建築物に作用する津波鉛直力とその低減法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.367-372, 2015.
- 25) 松富英夫, 紺野友恵, 高尾駿介: 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, 秋田大学工学資源学部附属地域防災力研究センター報告, 第10号, pp.12-20, 2016.
- 26) 松富英夫: 津波氾濫流による流体力への動圧の寄与と漂流物の衝突力の確率分布, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.836-840, 2009.
- 27) 青木 悟, チャトラマナワセカラ, 水谷法美, 平川信也, 芦澤 哲: 津波避難ビル内部の空間形状に着目した作用津波力に関する実験的考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.846-850, 2013.
- 28) Al-Faesly, T., Palermo, D., Nistor, I. and Cornett, A.: Experimental modeling of extreme hydrodynamic forces on structural models, *International Journal of Protective Structures*, Vol.3, No.4, pp.477-505, 2012.
- 29) 伊藤一教, 羽角華奈子, 織田幸伸, 今村文彦: 漂流物対策として防衝工を配置した津波避難ビルに作用する津波波力に関する水理実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.811-815, 2013.
- 30) 例えば, 松富英夫: RC 造建築物に作用する津波荷重と海岸植生の影響, 2015年度日本建築学会大会(関東)構造部門(荷重)パネルディスカッション資料, pp.42-55, 2015.
- 31) 濱本卓司: 対津波設計か耐津波設計か ―海洋建築委員会と研究・提言部会からの報告―, 2015年度日本建築学会大会(関東)構造部門(荷重)パネルディスカッション資料, pp.8-17, 2015.

- 32) 登丸夏希, 松富英夫: RC 造建築物に作用する津波鉛直荷重の低鉛直壁隙間間隔への依存性, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集 (CD-ROM), II-71, 2016.
- 33) 松富英夫, 川島 峻: 津波氾濫流の密度に関する基礎実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.355-360, 2015.
- 34) 佐々木瞭, 松富英夫: RC 造建築物に作用する津波荷重の奥行への依存性, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集 (CD-ROM), II-73, 2016.
- 35) 森 勇人, 中村友昭, 水谷法実, 仲村治朗, 田中良仁, 内野大介, 青木俊介, 佐藤嘉則: 防波壁を越流した津波の挙動および構築物に作用する津波力に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.206-210, 2013.
- 36) 大村智宏, 八木 宏, 中山哲蔵, 森 健二, 河野大輔, 加藤広之, 門 安曇, 滑川 順: 胸壁に作用する非越流時の津波波力に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.881-885, 2014.
- 37) 大村智宏, 八木 宏, 中山哲蔵, 米山正樹, 成田賢仁, 加藤広之, 門 安曇, 滑川 順: 胸壁に作用する津波波力に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.991-996, 2015.
- 38) 有川太郎: 防護施設のねばり強さ, 土木学会2015年度 (第51回) 水工学に関する夏期研修会講義集, B コース, pp.B-3-1-20, 2015.
- 39) 岡本憲助, 松富英夫: 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巻, pp.296-300, 2009.
- 40) 加藤史訓, 諏訪義雄, 藤田光一, 岸田弘之, 五十嵐崇博, 岡村次郎, 林雄一郎: 建築物等による津波のせき上げの評価方法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.331-335, 2012.
- 41) 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.
- 42) 青木 悟, 水谷法美, 平川信也, 芦澤 哲: 建物ビルに作用する津波力に及ぼす建物形状および津波作用方向の影響に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.811-815, 2014.
- 43) 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.
- 44) Stoker, J. J.: Water Waves, Interscience Publishers, Inc., New York, pp.326-333, 1957.
- 45) 岩崎敏夫, 富樫宏由: 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.
- 46) 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回海講論文集, pp.332-336, 1983.
- 47) 榊山 勉: 陸上遡上津波の伝播と構築物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.771- 775, 2012.
- 48) 池谷 毅, 秋山義信, 岩前伸幸: 陸上構築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.
- 49) 池谷 毅, 岩前伸幸, 秋山義信, 福山貴子, 末長清也, 鈴木紀雄, 舘野公一: 開口影響を考慮した陸上構築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.
- 50) 池谷 毅, 末長清也, 福山貴子, 秋山義信, 鈴木紀雄, 舘野公一: 反射特性を考慮した陸上構築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.
- 51) 松富英夫, 小野奈那子: 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.
- 52) 後藤智明, 首藤伸夫, 笹川稔郎: 陸上大障害物群の津波氾濫時における抵抗, 第25回水講論文集, pp.125-132, 1981.