

## 鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する模型実験\*

秋田大学 松富英夫  
秋田大学 斎藤雅大  
秋田大学 決得元基

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波の経験を経ても、津波氾濫が想定される低平地においては鉄筋コンクリート(RC)造や鉄骨造の津波避難ビルが必要という判断に変わりはない。しかし、東北地方太平洋沖地震津波では複数の鉄筋コンクリート造建物が移動や転倒しており<sup>1)</sup>、鉄筋コンクリート造建物は津波に強いという神話が崩壊した。したがって、津波浸水深に対して津波避難ビルはどのくらいの高さ(>浸水深)や奥行きがなければならないといった定量的な指針が是非とも必要であり、その基礎となる鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力の特性を知る必要がある。そこで、本研究は小型模型実験を行い、その結果に基づいて鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力の特性を論じる。

## 2. 浸水深と建物の被害程度

現地調査や資料に基づいた浸水深  $h$  と鉄筋コンクリート造や鉄骨造建物の被害程度（大破：D, 中破：P.D., 小破：W）の関係を図-1 に示す。図中には東北地方太平洋沖地震津波で得られたデータが多く含まれている。鉄骨造の建物については初の表示であり、国土交通省のデータ<sup>2)</sup>も含まれている。図から、浸水深が同じでも大破するものと中破で済むものが広い範囲で存在することが判る。津波避難ビルは絶対に大破してもらっては困るものであり、本図は浸水深だけで津波避難ビルの被害程度を論じることは許されず、他のパラメータが必要であることを示していると言えよう。

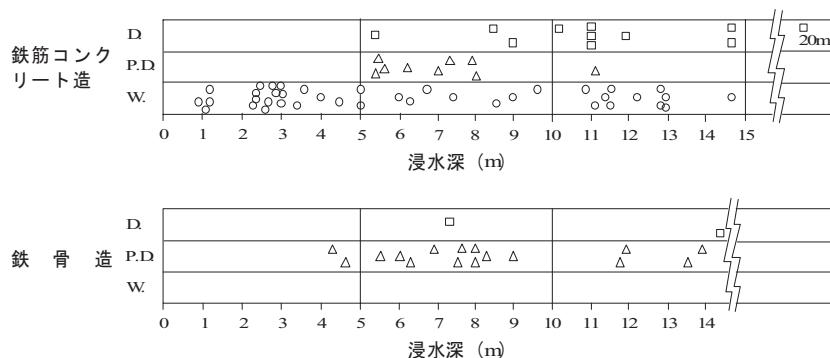
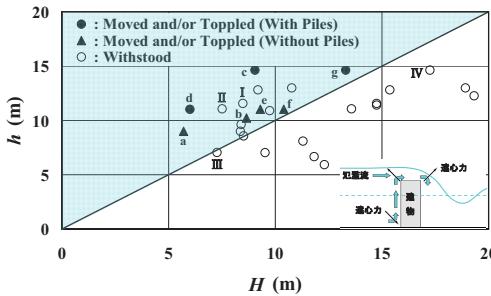
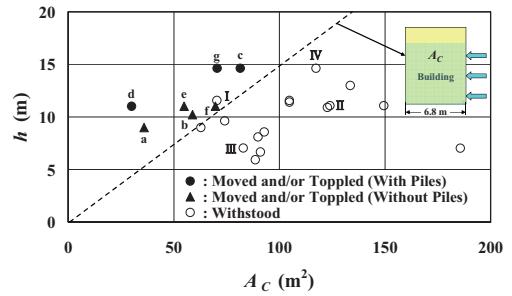
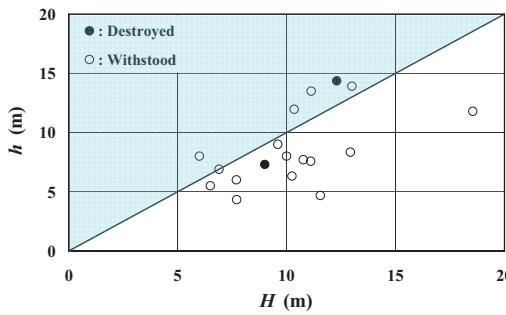
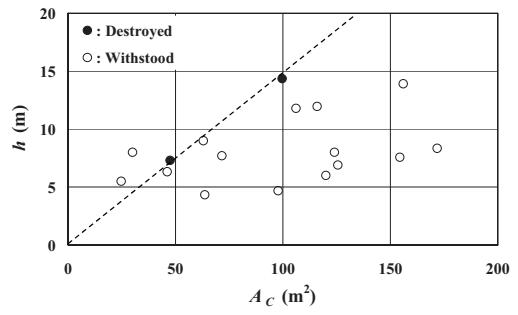


図-1 浸水深  $h$  と建物の造り別の被害程度 (東北地方太平洋沖地震津波によるものを含む)

\* Experiments on Tsunami Fluid Force acting on a RC Building

by Hideo MATSUTOMI, Masahiro SAITO and Genki KETTOKU

図-2 RC 造建物の高さ  $H$ , 浸水深  $h$  と被害形態の関係図-3 RC 造建物の浸水縦断面積  $A_C$ , 浸水深  $h$  と被害形態の関係図-4 鉄骨建造物の高さ  $H$ , 浸水深  $h$  と被害形態の関係図-5 鉄骨建造物の浸水縦断面積  $A_C$ , 浸水深  $h$  と被害形態の関係

東北地方太平洋沖地震津波の現地調査に基づいて鉄筋コンクリート造建物の移動や転倒の条件を検討した（図-2 と 3）<sup>1)</sup>。その結果、この条件は浸水深  $h$  の他に建物の浸水縦断面積  $A_C$  や壁面の開口率  $O_p$  が大きく関係することが判明した。 $A_C$  は特に重要なパラメータで、津波氾濫方向における単位幅あたりの建物重量に対応しており、力学的にも道理にかなったものである。本章では、既報のこの条件を鉄骨造の建物に適用し、その妥当性をクロスチェックする。

図-4 と 5 は東北地方太平洋沖地震津波で得られた鉄骨造建物に関するデータの整理結果を示す。国土交通省のデータ<sup>2)</sup>も含まれている。図-4 によると、鉄骨造の建物では水没せずとも移動や転倒したものがある。鉄骨造建物の特徴の一つは壁面が壊れやすいことである。この移動や転倒した建物には漂流物が多く引っかかっていた<sup>2)</sup>。鉄筋コンクリート造の建物に比べて耐力が弱いと考えれば、この被害結果は理解できることである。図-5 によると、移動や転倒したものは既報の条件をほぼ満足している。また、破線の左上に位置しながら持ち堪えたものは壁面が壊れたと考えれば理解できる被害結果であり、既報の提案条件が否定されるものではない。

### 3. 実験

津波氾濫流は一様水深部、一様勾配斜面部を伝播した後、平坦な陸上部を氾濫するゲート急開流れ（段波）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-6 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）が各々 2.0 m で、全長が 11.0 m の両面ガラス張り鋼製矩形水路である。水路下流端の壁は撤去しており、氾濫流はそこを自由に透過できる。一様勾配斜面部と平坦な陸上部は塩化ビニール樹脂製である。

実験に用いた建物模型を図-7 に示す。宮城県女川町の鉄筋コンクリート造の旅館を模擬しており、実際的な「窓あり」の場合（開口率は海側 8%，陸側 29%，側面 0 と 13%）と仮想的な「窓なし」の場合の 2 種類を作成した。縮尺は 1/100 で、高さ 13.3 cm, 幅 7.0 cm, 奥行き 5.3 cm, 模型重量はフルードの相似則<sup>3)</sup>と実際の鉄筋コンクリート造建物の平均像が 1.3 tf/m<sup>2</sup>/階であることを考慮して、「窓あり」の場合が 195 gf, 「窓なし」の場合が 204 gf とした。また、上記模型の「骨組のみ」のもの（118 gf）も作成した。「骨組のみ」の模型は鉄骨造建物の壁面がはがれた場合を想定した。

測定項目は建物模型の前背面から各 5 cm と背面から 30 cm の 3 位置における超音波式変位計（（株）キーエンス、UD-500）による氾濫水深  $h$ , 四分力計（（株）エス・ケイ）による水平力  $F_x$ , 鉛直力  $F_z$  と氾濫方向のモーメント  $M_y$ , 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。氾濫流速は一点法（模型がないときの最大氾濫水深時の 6 割水深位置）で測定した。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建物模型底面までの高さ（床高）で、各ケース 3 回ずつ実験を行った。

#### 4. 実験結果とその考察

図-8 と 9 にそれぞれ最大水平力  $F_{xmax}$ （衝突初期の衝撃部で発生）、その後の準定上部の水平力  $F_x$ （以下「水平力」と呼ぶ）と建物模型前面における浸水深  $h$ （以下「前面浸水深」と呼ぶ）の関係を示す。床高  $h_B$  が 5 mm の場合のもので、各図中には前面浸水深のみに基づく静水

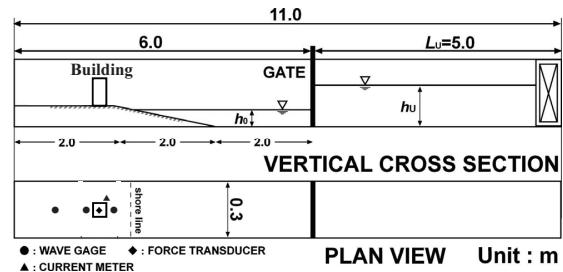


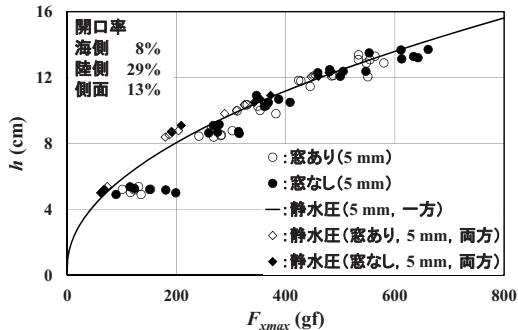
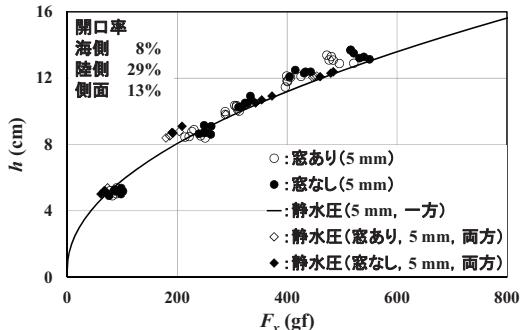
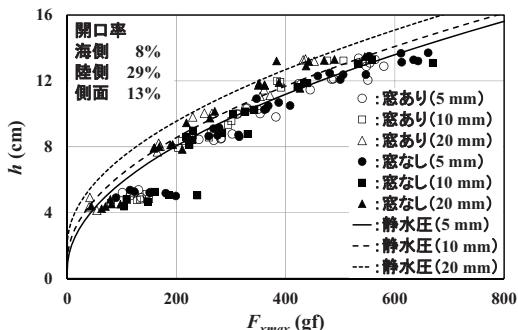
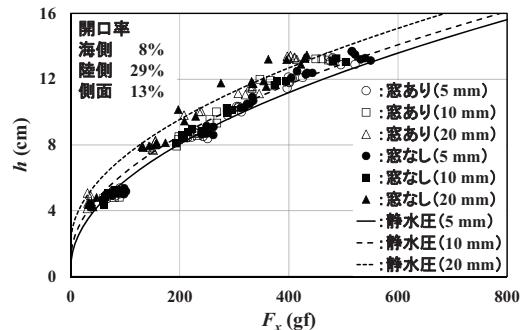
図-6 実験水路と測定機器の配置



図-7 塩化ビニール樹脂製の建物模型（左：Google Earth, 右：陸側正面（左）と南側側面（右））

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
床 高 $h_B$ (cm)	0.5, 1, 2
地盤高 $h_G$ (cm)	1
斜面勾配 $S$	1/26
模型の種類	窓あり(195 gf), 窓なし(204 gf), 骨組のみ(118 gf)

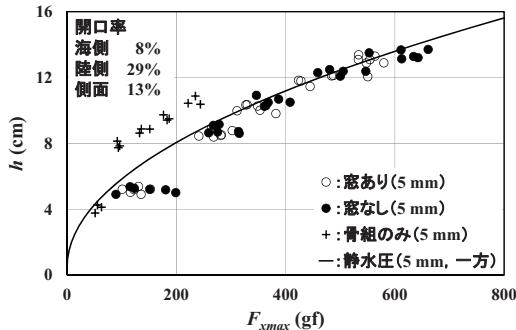
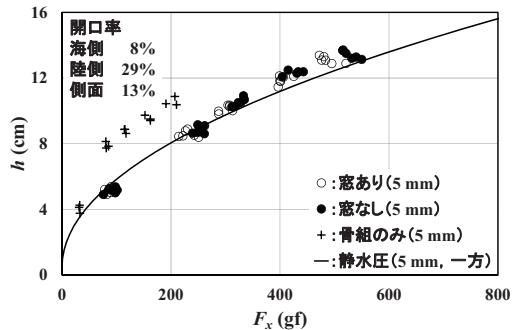
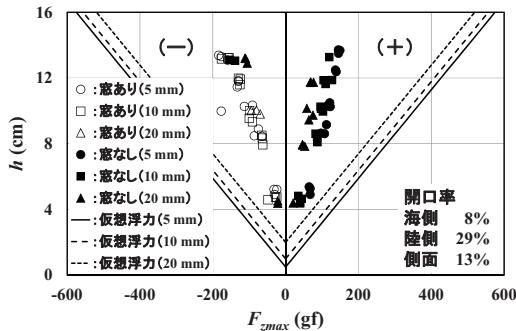
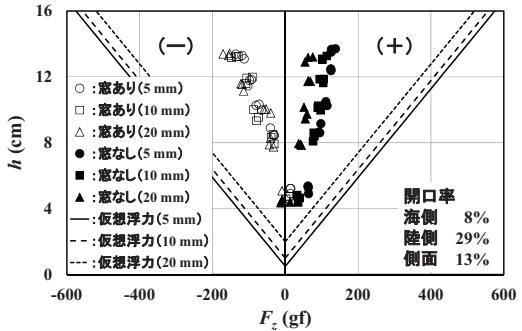
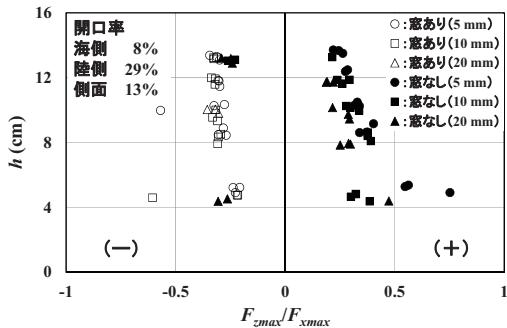
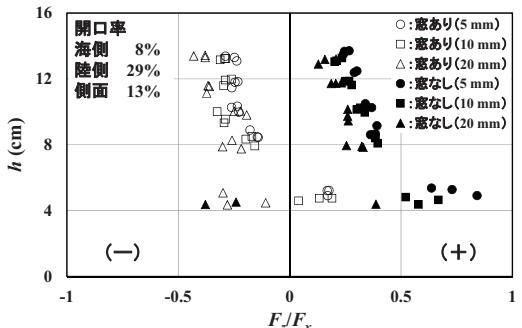
図-8 最大水平力  $F_{xmax}$  と前面浸水深  $h$  の関係図-9 水平力  $F_x$  と前面浸水深  $h$  の関係図-10 最大水平力  $F_{xmax}$  と前面浸水深  $h$  の関係図-11 水平力  $F_x$  と前面浸水深  $h$  の関係

圧（実線、以下「前面静水圧」と呼ぶ）と背面における浸水深に基づく静水圧を差し引いた正味の静水圧（以下「正味静水圧」と呼ぶ）も示してある。両図から、①最大水平力は、正味静水圧はもちろんのこと、前面静水圧よりも大きい傾向にある、②水平力は正味静水圧より大きいが、前面静水圧とほぼ同じかやや小さい傾向にある、③最大水平力の変動幅は広い、④「窓あり」と「窓なし」では、当然のことながら、最大水平力、水平力、前面浸水深のいずれも「窓なし」で大きい傾向にあることが判る。②は水平力に動圧が寄与していることを示している<sup>4)</sup>。また、前面浸水深が大きくなるにつれて、前面静水圧より水平力が小さい傾向が明確化している。④の「窓あり」と「窓なし」での差はあまり大きくなく、その一因として開口率が8%と小さいことが考えられる。

図-10と11に床高を5, 10, 20 mmと変化させた場合のそれぞれ最大水平力、水平力と前面浸水深の関係を示す。各図中には各床高における前面静水圧も示してある。両図から、①最大水平力と水平力の前面静水圧に対する傾向は図-8と9の場合と同じである、②最大水平力、水平力と前面浸水深は、当然のことながら、床高が高くなるにつれて、小さくなることが判る。

図-12と13に床高が5 mmで、「骨組のみ」の場合を加えたときのそれぞれ最大水平力、水平力と前面浸水深の関係を示す。「骨組のみ」の場合は、当然のことながら大幅に最大水平力、水平力と前面浸水深が減ることが判る。

図-14と15にそれぞれ最大鉛直力  $F_{zmax}$ （衝突初期の衝撃部で発生とは限らない）、準定上部の鉛直力  $F_z$ （以下「鉛直力」と呼ぶ）と前面浸水深の関係を示す。各図中には前面浸水深の

図-12 最大水平力  $F_{xmax}$  と前面浸水深  $h$  の関係図-13 水平力  $F_x$  と前面浸水深  $h$  の関係図-14 最大鉛直力  $F_{zmax}$  と前面浸水深  $h$  の関係図-15 鉛直力  $F_z$  と前面浸水深  $h$  の関係図-16 無次元最大鉛直力  $F_{zmax}/F_{xmax}$  と前面浸水深  $h$  の関係図-17 無次元鉛直力  $F_z/F_x$  と前面浸水深  $h$  の関係

みに基づく浮力（以下「仮想浮力」と呼ぶ）も示してある。両図から、①最大鉛直力と鉛直力とともに、基本的に「窓あり」の場合は負値（下向きの力）、「窓なし」の場合は正值（上向きの力）である、②床高が低いほど、最大鉛直力と鉛直力の絶対値は大きい傾向にある、③最大鉛直力と鉛直力は、本実験条件の範囲では仮想浮力の半分以下で、前面浸水深が大きくなるにつれて、その割合が低下する傾向にあることが判る。「窓あり」の場合の負値は窓（開口部）から氾濫水が流入することに起因している。

図-16と17にそれぞれ無次元最大鉛直力  $F_{zmax}/F_{xmax}$ 、無次元鉛直力  $F_z/F_x$  と前面浸水深の関係

を示す。両図から、①無次元最大鉛直力と無次元鉛直力とともに、前面浸水深が小さいときは「窓なし」の場合が大きい、②無次元最大鉛直力と無次元鉛直力とともに、前面浸水深や床高が大きくなるにつれて、「窓あり」の場合はそれらの絶対値が大きく、「窓なし」の場合は小さくなることが判る。②の床高に関するこれらの傾向は無次元鉛直力で顕著である。

## 5. おわりに

- 本研究における現地調査や実験の範囲で得られた主な結果は次の通りである。
- ①津波避難ビルの転倒や移動の条件は浸水深だけでは論じられない。
  - ②鉄筋コンクリート造建物の転倒や移動に関する既往の提案条件式は否定されない。
  - ③衝突初期の衝撃部における最大水平力  $F_{xmax}$  は、計算上の正味静水圧はもちろんのこと、前面静水圧よりも大きい傾向にある。
  - ④準定上部の水平力  $F_x$  は正味静水圧よりも大きいが、前面静水圧とほぼ同じかやや小さい傾向にある。正味静水圧より大きいことは水平力に動圧が寄与していることを示している。
  - ⑤「窓あり」と「窓なし」では、最大水平力、水平力、前面浸水深のいずれも「窓なし」で大きい傾向にある。
  - ⑥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。
  - ⑦「骨組のみ」の場合は最大水平力、水平力と前面浸水深が大幅に小さくなる。
  - ⑧最大鉛直力  $F_{zmax}$  と準定上部の鉛直力  $F_z$  ともに、基本的に「窓あり」の場合は下向きの力、「窓なし」の場合は上向きの力である。
  - ⑨床高が低いほど、最大鉛直力と鉛直力の絶対値は大きい傾向にある。
  - ⑩最大鉛直力と鉛直力は、本実験条件の範囲では仮想浮力の半分以下で、前面浸水深が大きくなるにつれて、その割合が低下する傾向にある。
  - ⑪無次元最大鉛直力  $F_{zmax}/F_{xmax}$  と無次元鉛直力  $F_z/F_x$  ともに、前面浸水深が小さいときは「窓なし」の場合が大きい。
  - ⑫無次元最大鉛直力と無次元鉛直力ともに、前面浸水深や床高が大きくなるにつれて、「窓あり」の場合はそれらの絶対値が大きく、「窓なし」の場合は小さくなることが判る。床高に関するこれらの傾向は無次元鉛直力で顕著である。

**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）と北東北国立3大学連携推進研究費（堺 茂樹）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) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)調査研究(速報)（国総研・建研）：<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311quickreport.html>, 2011.07.15 参照。
- 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：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、海岸工学論文集、第56巻, pp. 836-840, 2009.

貯水深 $h_U$ (cm)	15, 20, 22.5, 25, 27.5
静水深 $h_0$ (cm)	6.7
床 高 $h_B$ (cm)	0.5, 1, 2
地盤高 $h_G$ (cm)	1
斜面勾配 $S$	1/26
模型の種類	窓あり (195 gf), 窓なし (204 gf)

貯水深 $h_U$ (cm)	15, 20, 22.5, 25, 27.5
静水深 $h_0$ (cm)	6.7
床 高 $h_B$ (cm)	0.5, 1, 2
地盤高 $h_G$ (cm)	1
斜面勾配 $S$	1/26
模型の種類	窓あり (195 gf), 窓なし (204 gf), 骨組のみ (118 gf)

窓なしの場合が 203.9gf, 窓あり 195gf, 骨組のみ 118 gf  
 鉄筋コンクリート造 (1.3 tf/m<sup>2</sup>/階) や鉄骨造 (0.8 tf/m<sup>2</sup>/階)

