

## Short Report

## 津波浸水時を想定した建築物前面の鉛直方向波圧分布性状に関する水路実験

小幡昭彦<sup>1</sup><sup>1</sup> 秋田県立大学システム科学技術学部建築環境システム学科

先の2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、被害の程度が地震動による構造被害に比べ地震が引き起こした津波による被害が圧倒的に大きかった事を受け、建築構造分野では精度の高い耐津波設計の確立が社会的な責務である。近年、改定された日本建築学会の「建築物荷重指針・同解説（2015）」には、新たに津波荷重の項目が盛り込まれ、海岸工学分野の知見を多く取り入れることで設計指針として整理された。この指針は、まずは一つの指標として設計者に受け入れられ、施主や建築主に対する説明として用いられることになると考えられるが、一方で、海岸工学分野の知見を建築構造物へ転用することによる検討点が残されている。本研究では、水路実験により構造物に作用する津波波力、波圧の計測を行い、荷重指針において十分な検証を得られていないとされている鉛直方向波圧の性状把握を行った。

**キーワード：**津波波力、津波波圧、圧力係数、水路実験

建築構造物に作用する耐津波設計の現状について、アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁の定めたガイドライン（以下、FEMA ガイドラインと略す）には、耐津波設計時に考慮されるべき荷重として津波の流速をもとに建物に作用する力について、抗力式を用いて評価する方法が示唆されている。（図1）この手法では、設計用の検討のため、流速を高さ方向に一律と仮定しており、建物の形状に依存する係数、すなわち抗力係数を一律に2.0としている。日本においても、日本建築学会の「建築物荷重指針・同解説（2015）」（以下、荷重指針と略す）では、流速、浸水深の時系列が示されている場合において、FEMA ガイドラインと同様に抗力係数を定めて、抗力式での設計法を示している。護岸や防潮壁などの土木構造物とは異なり、より確度の高い建築構造物に作用する津波荷重の評価を行うためには、津波波圧の高さ方向分布性状を解明した後に適切な抗力係数の設定を行う必要があるといえる。

本研究で著者は、護岸を越流する津波が建物に差し掛かった時の津波荷重の評価方法について検討を

行う。本報では、水路実験により構造物に作用する津波波力、波圧の計測を行い、鉛直方向波圧の性状把握を行った。将来的にはそれらの関係を整理し、建築構造物の耐津波設計用荷重として整理する予定である。

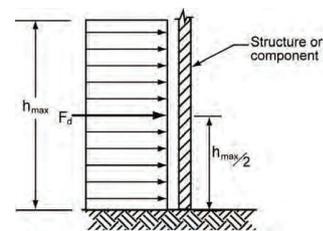


図1 Hydrodynamic force distribution from FEMA Guidelines.

## 水理実験

### 試験体概要

#### 水路実験概要

図2に実験水路概要を示す。実験には、秋田工業高等専門学校環境都市工学科の実験水路を使用した。水路寸法は全長 15000mm、幅内法 600mm、高さ

800mm である。片端から 3000mm の位置に可動式遮水壁が設けられており、遮水壁内側は貯水槽となっている。貯水槽に一定量の水を溜め、遮水壁を開放することで自由流出により津波押し波の流れを再現する。基本的な性状の把握を目的とするため、水路の勾配は設けず障害物等を配しない。実験変数は貯水槽に溜める水量とし、貯水高さで 700mm から 300mm まで 100mm 刻みで貯水量を変化させて実験を行った。建築物を模擬した試験模型は、遮水壁から 7850mm の位置に固定した架台から吊した。

津波流速は、プロペラ式流速計を試験模型設置位置より上流側に 300mm の位置に設置し計測した。津波波高は、ビデオカメラの動画撮影から流速計測位置の波高をフレーム毎に記録した。流速および波高のサンプリング間隔は津波波高の動画撮影記録から 20Hz (0.05s) とした。

### 試験模型概要

図 3 に試験模型概要を示す。本実験に用いる試験模型は、窓ガラスなどの開口部がない状態の矩形構造物を対象とした。試験模型の寸法は水路幅に対して 1/3~1/4 程度とし、幅、奥行き、高さともに 150mm の立方体形状とした。

津波波力および波圧の測定方法については、試験模型設置用の鋼板による曲げひずみによる計測方法と、圧力センサーによる計測方法を用いた。鋼板による波力の計測は、鋼板に貼り付けたひずみゲージから曲げひずみを計測し、鋼材に生じる曲げモーメントをせん断力に変換することで求めた。ひずみゲージは高さ方向に上下 2 か所、間隔を 500mm とし、4 枚ゲージの軸ひずみ消去法を採用した。なお、波力の計測にあたり試験模型の回転によって床との衝突を防ぐため、試験体と水路床との間には 5mm のクリアランスを設けた。津波圧力の計測には、(株)東京測器製の間隙水圧計 KPC-200KPA を圧力センサーとして用いた。圧力センサーは、試験模型の水上側中央の高さ方向に計 4ヶ所とし、最下段となるセンサー01 を水路床から 30mm の位置とし、以降のセンサー02~センサー04 は 33mm 間隔で配置した。

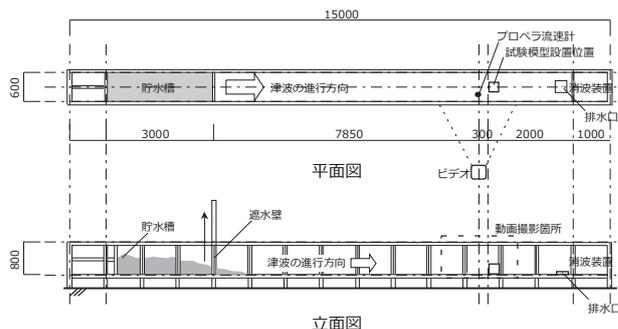


図 2 実験水路概要

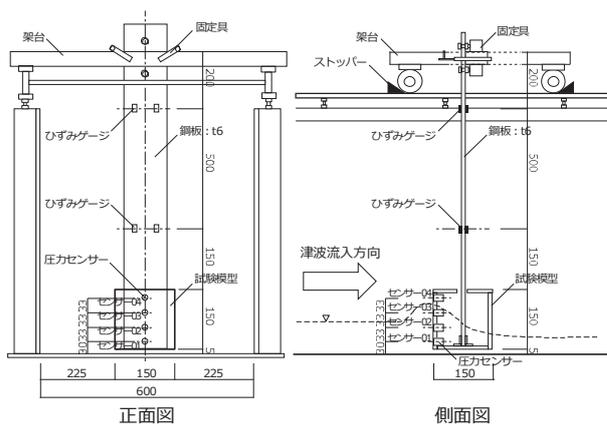


図 3 試験模型および計測概要

## 実験結果

### 流速、波高、波力の時刻歴

貯水高さ 300mm, 500mm, 700mm における試験模型前面の流速、波高、鋼材に貼り付けたひずみゲージから求めた波力の時刻歴を図 4 に示す。なお、測定開始時刻は、流速計のデータ記録開始から 0.1 秒前を基準 (時刻 0.0s) とし、以降も同様に定義する。流速はデータ記録開始直後にピークを向かえ、徐々に減少していく。一方、波高では、時間の経過とともに試験模型前面において滞留が生じたことで、データ記録開始からしばらくして最大の波高に達する。流速と波高の関係では、流速が最大となる時刻での波高は小さく、逆に波高が最大となる時刻での流速は小さい。津波波力は流速記録直後 0.5 秒の範囲でサージフロント波力を確認し、最大の津波波力となる。また、以降は 1.5 秒まで定常的な状態として、ある一定の津波波力を示した。

### 波圧の時刻歴

図 5 に貯水高さ 700mm におけるセンサー01 から 04 までの波圧およびひずみゲージから求めた波力

を波圧に変換した値を示す。後者の波圧は津波波力を(波高×試験模型幅)で除した値である。

波圧計測開始後、センサー01 から 04 までの波圧は若干の差はあるもののおおむね近い傾向を示しており、鉛直方向分布がほぼ一様であることが確認できる。その後、時刻 3.0 秒以降の定常的な状態においては最下段となるセンサー01 がもっとも大きな波圧を示し、計測位置が高くなるにつれて波圧が小さくなる。各センサーの傾向は、貯水高さの大きなケースではセンサー間の値の差は小さいが、貯水高さの小さなケースではセンサー03 および 04 など試験模型上部に取り付けたセンサーの波圧が小さくなるという傾向を示した。ひずみゲージから求めた波圧はセンサーの波圧と比べると、波圧計測開始直後に大きな値を示しており、傾向が異なる。これについては、試験模型に差し掛かった津波により試験模型前面において滞留が生じ、試験模型前面近傍の波高が波高計測位置における波高より若干高くなっており、その影響を受けたものと考えられる。

**実験波圧より算出した圧力係数の鉛直方向性状**

図 6 に貯水高さ 300mm, 500mm, 700mm における圧力係数  $C_d$  の時刻歴を示す。圧力係数は実験で得られた各圧力センサーの波圧  $p_D$  より、以下の式を逆算することで算出する。

$$p_D = \frac{1}{2} \rho C_d v^2 \quad (1)$$

ここに  $\rho$  は水の密度(t/m<sup>3</sup>),  $v$  は津波の流速(m/s)である。圧力係数は貯水高さ 300mm では流速計測開始直後 2.0 秒以降, 500mm と 700mm においては 3.0 秒以降, 流速が落ちたことによりグラフが発散し傾向をつかむことができなくなるが、それ以前の時間帯においては 0.8 から 1.5 程度を推移し一様な傾向を示す。貯水高さ 300mm のケースにおいて、センサー03 およびセンサー04 が若干低い値を示しているが、津波がそのセンサー設置高さまで届いていないことが原因である。計測開始時から 2.0 秒までの圧力係数の平均値は、貯水高さ 300mm で 0.97 (センサー03, 04 除く), 500mm で 0.89, 700mm で 1.06 である。

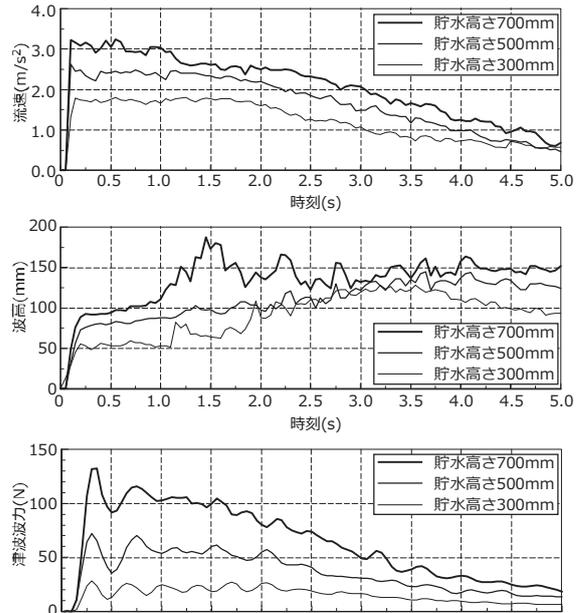


図 4 流速, 波高, 波力の時刻歴

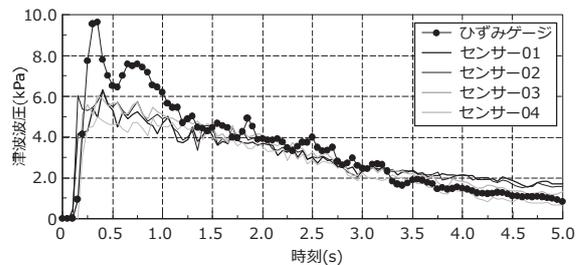


図 5 貯水槽高さ 700mm における波圧の時刻歴

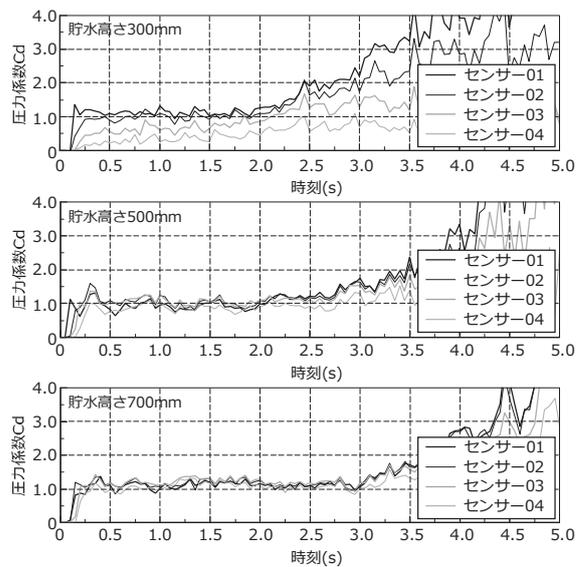


図 6 圧力係数の時刻歴

**津波ガイドラインの評価式に関する検討**

津波ガイドラインの評価式として、津波浸水によ

る静水圧分布を仮定した上で、最大浸水深  $h_{max}$  としての津波波力  $F$  (kN) を以下の式(2)として提示している。

$$F = \frac{\alpha^2}{2} \rho B g h_{max}^2 \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ は水深係数、 $B$ は建築物の見付け幅 (m)、 $\rho$ は流体の密度 (=1.0t/m<sup>3</sup>)、 $g$ は重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)である。また、ガイドラインにおいて水深係数 $\alpha$ は、津波避難ビル設計時の値として3.0を推奨している。図7に本実験より得られた最大波力時の水深係数 $\alpha$ を示す。なお、実験結果から得られた $\alpha$ は式(2)を逆算して求めている。また、鉛直方向における津波波圧分布の比較として、図8に貯水高さ500mmにおける最大波力時の津波波圧分布と、それに相当する水深係数 ( $\alpha=1.88$ ) による波圧分布を示す。図7では、貯水高さに応じて水深係数は比例的な上昇を示し、貯水高さ600mm以上で $\alpha$ が2.0の範囲で頭打ちの傾向にある。一方で、図8では、最大波力時における津波波圧分布においては、算出した水深係数 $\alpha$ による分布の範囲に収まることなく、また分布形状においても大きく異なる。

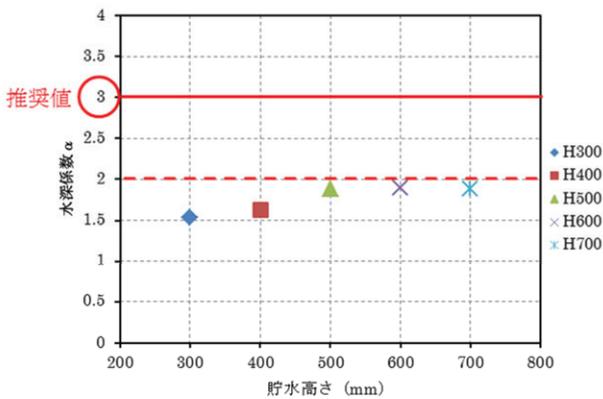


図7 最大波力時における水深係数 $\alpha$

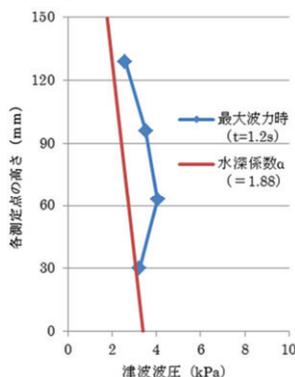


図8 最大波力時における鉛直方向の津波波圧分布

## まとめ

本研究では、建築物に作用する津波荷重における性状の把握を目的に、遡上浸水時を想定した水理模型実験を行った。

実験の結果より、圧力係数は計測開始時から2.0秒程度の時間帯においては0.8から1.5程度を推移し一様な傾向を示していることが確認できた。また、津波波力より算出した水深係数 $\alpha$ については2.0以下に収まった。しかし、鉛直方向における津波波圧分布においては、算出した水深係数 $\alpha$ による分布の範囲に収まることなく、また分布形状においても大きく異なる結果となった。

今後の検討事項として、静水圧と動水圧との性状を把握した上で、水深係数 $\alpha$ と抗力係数との相関関係を明らかにすることで、合理的な津波荷重評価式につなげることが可能であると考えている。

## 文献

- FEMA (2008), Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, 6.5 Tsunami Loading, pp.69-81, Retrieved from <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=3463>
- 日本建築学会 (2015). 『建築物荷重指針・同解説書 (2015)』. 日本建築学会
- 内閣府政策統括官 (2010), 『津波避難ビル等に係るガイドライン』. 内閣府
- 日本建築センター (2007). 『2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書』. 全国官報販売協同組合
- 小山毅 (2015). 「有限幅の壁に作用する津波サージ力」『日本建築学会構造系論文集』 80(713), 1001-1011
- 桑村仁 (2016). 「氾濫流に建つ直方体構造物の抗力と揚圧力、-河川自然流を用いた水理実験 その2-」『日本建築学会構造系論文集』 81(720), 219-228
- 緑川雄貴, 小幡昭彦, 寺本尚史, 西田哲也 (2016). 「遡上浸水時を想定した建築物の津波荷重に関する実験的研究」『日本建築学会東北支部研究報

告集』 79, 1-4

〔 平成 28 年 7 月 20 日受付  
平成 28 年 7 月 31 日受理 〕

## Hydraulic Test for Investigating the Distribution of Fluid Pressures on Buildings and Structures under Overflow Tsunami

---

Akihiko Obata<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Architecture & Environment Systems, Faculty of Systems Science & Technology, Akita Prefectural University*

On March 11, 2011, an earthquake occurred off the Pacific coast of Tohoku. The tsunami caused by this earthquake resulted in severe and extensive damage to structures in northeastern Japan. Consequently, the establishment of safer design methods has become a matter of social responsibility. In this study, tests were conducted using a hydraulics model. The purpose of these tests is to clarify the force and pressure characteristics for buildings subjected to the tsunami load. The results of these tests indicate that an evaluation formula concerning tsunami load can be established.

**Keywords:** tsunami load, tsunami pressure, pressure coefficient, hydraulic test