

平成30年 5月18日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06318

研究課題名(和文) 運動量流束とフルード数の有界性に着目した建築物への津波作用外力の評価に関する研究

研究課題名(英文) Estimation of tsunami wave loading on buildings assuming the boundedness of momentum flux and Froude number

研究代表者

松井 徹哉 (MATSUI, TETSUYA)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・上席研究員

研究者番号：70023083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：建築物の設計に用いる津波外力の評価式を提案し、2004年スマトラ島沖地震津波や2011年東日本大震災の被害調査結果に基づく推定値との比較によりその妥当性を検証した。津波外力の評価には流速依存性を考慮できるモリソン式を採用し、運動量流束とフルード数の有界性を仮定することにより、設計上想定すべき津波外力の上限値を浸水深のみの関数として提示した。提案式は水理実験でも観測されている津波波力の時刻歴の2つのピーク、すなわち津波先端部衝突時の衝撃力と後続の定常流作用時の抗力に対応しており、これにより設計用津波外力の評価が津波ハザードマップなどから得られる浸水深の情報を用いて容易に行えるようになった。

研究成果の概要(英文)：A design formula for estimating tsunami wave forces on buildings is proposed. The Morison equation is employed to estimate the wave forces depending on the fluid velocity. Under the hypothesis of the boundedness of the momentum flux and the Froude number, the design formula for tsunami wave forces is presented in terms of the inundation depth, which can be obtained readily from the tsunami hazard map. It corresponds to two peaks of the time-history wave force records observed in the hydraulic test, i.e., the initial impact force at the impact of tsunami leading edge and the drag force under the subsequent stationary flow. The proposed formula for the tsunami wave forces is compared well with the estimation based on the survey reports of the 2004 Indian Earthquake Tsunami and the 2011 East Japan Great Earthquake, confirming its validity.

研究分野：建築学(建築構造・材料)

キーワード：津波荷重 浸水深 流速 静水圧式 モリソン式 津波先端部衝突力 抗力

1. 研究開始当初の背景

建築物に作用する津波外力の評価法については、津波避難ビルを対象とした国交省の暫定指針¹⁾に規定があるのみで、設計者はこれを唯一の拠り所として対津波設計を行っているのが現状であった。同指針では設計用浸水深の a 倍の高さの静水圧に相当する波圧が建築物の前面に作用すると考えて津波波力(水平合力)を算定することとしており、浸水深に乗ずる係数 a を水深係数と定義して、その上限値を $a=3$ とし、遮蔽物の有無や海岸・河川からの距離に応じて $a=2$ または 1.5 に低減できるとしている。

国交省の暫定指針が採用している静水圧分布に基づく津波外力の評価式(静水圧式)は、設計用浸水深を唯一のパラメータとした簡便な表示式になっており、浸水深の情報は津波ハザードマップなどから容易に入手できるので、実用上の取り扱いにも都合が良い。しかし一方で、流速の影響が考慮されていない、建築物背後に回り込む流れの効果が考慮されていないので、防潮堤のような無限幅の構造物には適用できても、三次元形状を有する建築物への適用性には疑問があるなどの問題点も指摘されており、津波の流体力学特性をより適切に反映した評価式の提案が望まれていた。

建築物に作用する津波波力の時刻歴には、一般に津波先端部衝突時の衝撃力と後続の定常流作用時の抗力の2つのピークが存在することが、水理実験でも観測されている。津波先端部の衝突時には、津波はまだ建築物背後に十分回り込むまでには至っていないので、前面にのみ波圧が作用すると考えて静水圧式によって衝撃力の上限値を評価する方法は理に適っていると思われる(図1(a))。しかし、この方法で津波先端部通過後の波力を評価しようとする、建築物背面に回り込んだ流れが波力を減じる方向に働く効果を無視することになり、津波波力を過大評価することになる。

津波先端部の到達から十分時間経過した後の津波波力の評価には、流速依存性を考慮でき、FEMA(米国連邦危機管理庁)の津波避難ビルのガイドライン²⁾にも採用されている

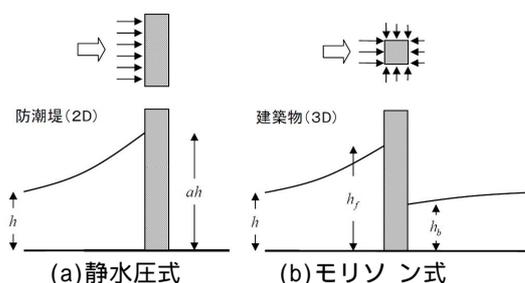


図1 現行の津波外力評価式が想定する津波の流れ

モリソン式の適用が望ましいが(図1(b))、現状の津波ハザードマップはその評価に必要な流速のデータを提供できるまでには整備されていない。

2. 研究の目的

本研究では、運動量流束(流量)とフルード数(流勢)の有界性に着目することにより、津波先端部衝突時の衝撃力と後続の定常流作用時の抗力の2つのピークに対応した津波外力の評価式を提案し、既往の津波被害調査結果やシミュレーション解析に基づく推定値と比較することにより、その妥当性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 設計用津波外力評価式の提案

浸水深の情報のみ得られていることを前提とし、以下の基本方針に基づいて流速依存性を考慮した津波外力の評価式を提案する。

- 津波の流体力学的特性を示す運動量流束とフルード数には上限値が存在し、浸水深や流速値の取りうる範囲はそれによって制限を受けると仮定する(運動量流束とフルード数の有界性の仮定)。
- 津波波力の評価はモリソン式によるものとし、その評価に必要な運動量流束の最大値(設計用運動量流束)を浸水深のみの関数として提示する。

(2) 既往の津波被害調査結果に基づく検証

提案した津波外力評価式の妥当性を、2004年スマトラ島沖地震津波や2011年東日本大震災の被害調査結果^{3), 4)}に基づき検証する。

(3) シミュレーション解析による検証

提案した津波外力評価式の妥当性を検証するためのシミュレーション解析を、次の2段階に分けて実施する。

第一段階では、運動量流束とフルード数の有界性の仮説の検証用データを得ることを目的とし、波源から陸域の観測点至る広域の津波伝播・遡上シミュレーションを行う。解析領域を波源モデルと地形データ(水深、標高)粗度データ、堤防データなどを組み込んだ平面二次元格子でモデル化し、非線形浅水長波理論の支配方程式を離散化して解く。第二段階では、津波外力評価式の妥当性の検証を目的とし、VOF(Volume of Fluid)法による建築物周りの津波流況シミュレーションを行う。解析領域を三次元差分格子でモデル化し、第一段階で得られた流速と浸水深のデータを流入条件として用い、建築物に作用する津波流体力を算定する。

以上のシミュレーション解析により得られた流速、浸水深、津波流体力などのデータをもとに、提案した設計用津波外力評価式の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 運動量流束とフルード数の有界性に着目した津波外力評価式の提案

津波波力の評価はモリソン式

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_d B M \quad (b \geq 1 \text{ のとき}) \quad (1)$$

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_d B b M \quad (b < 1 \text{ のとき})$$

によるものし、その評価に必要な運動量流束 $M = hu^2$ (h : 浸水深、 u : 流速) の最大値 (設計用運動量流束) M_d を、式(2)のように提案した。

$$M_d = (Fr_{\max})^2 gh^2 \quad (h \leq \sqrt{M_{\max}/g}/Fr_{\max} \text{ のとき}) \quad (2a)$$

$$M_d = M_{\max} \quad (h > \sqrt{M_{\max}/g}/Fr_{\max} \text{ のとき}) \quad (2b)$$

ここに、 Fr_{\max} と M_{\max} はそれぞれフルード数 $Fr = u/\sqrt{gh}$ と運動量流束 M の上限値 (具体的な数値は後に与えられる) を示し、 g は重力加速度、 ρ は海水の単位体積質量、 C_d は抗力係数、 B は建築物の幅、 $H = bh$ は建築物の高さである (図2)。

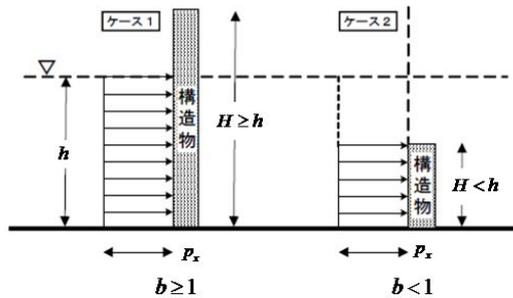


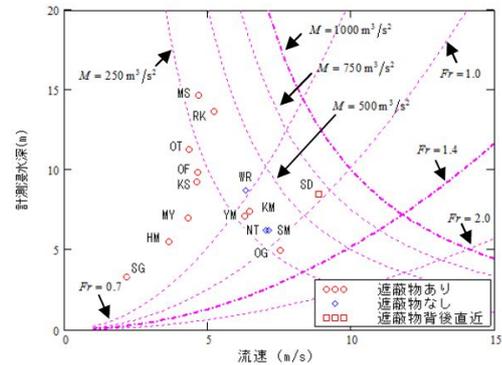
図2 モリソン式による津波外力の評価

提案した運動量流束の2つの限界式(2a)、(2b)はそれぞれフルード数と運動量流束の有界性の仮説に基づいたもので、式(2a)は津波先端部衝突時の衝撃力が卓越する場合の、式(2b)は後続の定常流作用時の抗力が支配的である場合の限界値にそれぞれ対応している。提案式は設計用浸水深を唯一のパラメータとして含み、その情報は津波ハザードマップなどから容易に入手できるので、実用上も好都合である。

(2) 既往の津波被害調査結果に基づく検証

式(1)、(2)を用いて建築物に作用する津波外力を評価するには、設計上想定すべき運動量流束とフルード数の上限値 M_{\max} と Fr_{\max} を具体的な数値として設定する必要がある。

東大生産技術研究所と(独)建築研究所の共同研究グループ(以下、東大&建研グループ)⁴⁾では、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ⁵⁾による現地調査データをもと



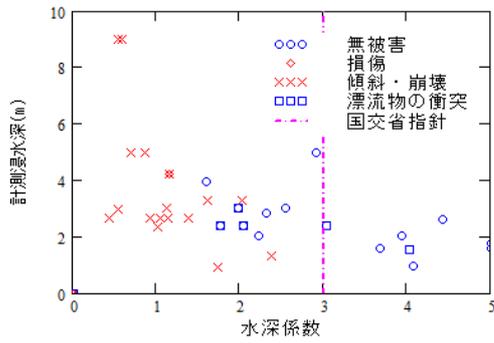
: 遮蔽物の背後直近の建築物にて推定したため、局所的に大きな流速値となっている

図3 流速推定値と浸水深の関係 (遮蔽物がある場合)⁴⁾

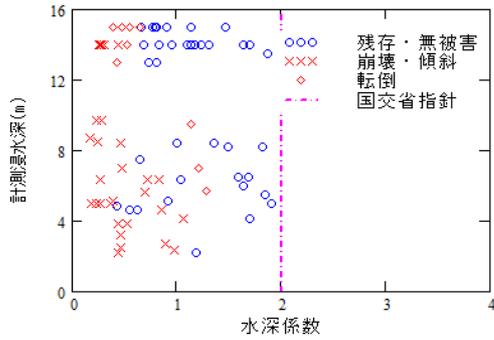
に、建築物前・背面津波高の計測値を用いた流速推定やビデオ映像による流速推定を行い、その結果を流速と浸水深の相関図として示している。図3はその結果に運動量流束とフルード数の等高線を重ね描きしたものである。運動量流束は概ね $M_{\max} = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 以下、フルード数は概ね $Fr_{\max} = 1.4$ 以下の値となっており、浸水深と流速値は後に設定される2つの限界曲線 $M \leq M_{\max}$ と $Fr \leq Fr_{\max}$ (図3の鎖線) に囲まれた範囲に分布している。

中埜³⁾と東大&建研グループ⁴⁾は、2004年スマトラ島沖地震と東日本大震災の津波被害調査結果をもとに調査対象建築物の構造耐力相当時の水深係数を評価し、被害程度と関係づけることによって、図4に示すような結果を得ている。同図で残存・無被害(以下、無被害)と崩壊・傾斜・転倒(以下、被害)とを区分する境界線が実際に作用した津波波力に対応する水深係数の値と考えられる。この結果を詳細に見ると、サンプル数の少ない東日本大震災の遮蔽物がない場合(図4(c))を除けば、無被害と被害とを区分する水深係数の値は、浸水深が比較的浅い場合には浸水深にかかわらずほぼ一定となっているが、浸水深がある限度を超えると、浸水深の増加とともに小さくなっていることに気づく。この傾向は水深係数を一定とする(流速依存性を考慮しない)静水圧式では、浸水深が高くなった場合に波力を過大評価する結果につながることを意味している。これは建築物背面に回り込んだ流れが波力を減じる方向に働く効果(図1(b))を無視しているためである。

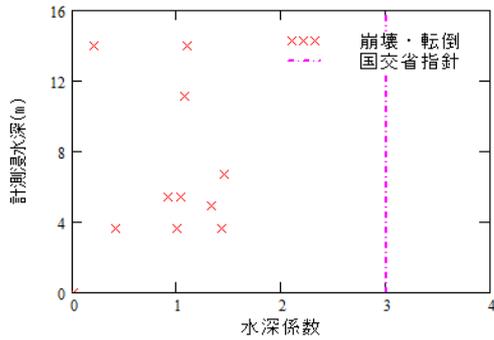
静水圧式における水深係数の流速依存性について検討するために、運動量流束を横軸にとって図4をプロットし直したのが図5である。ただし、抗力係数を $C_d = 2$ としている。サンプル数の少ない東日本大震災の遮蔽物がない場合(図4(c))を除けば、無被害と被害とを区分する運動量流束の値は、浸水深が



(a) スマトラ島沖地震津波



(b) 東日本大震災（遮蔽物あり）

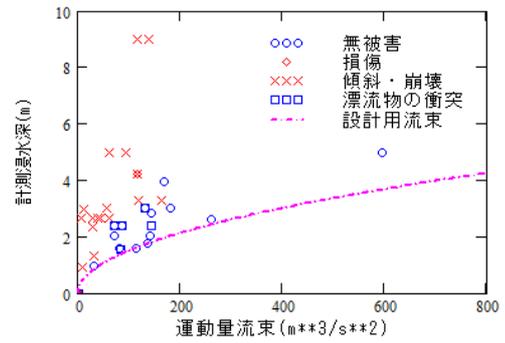


(c) 東日本大震災（遮蔽物なし）

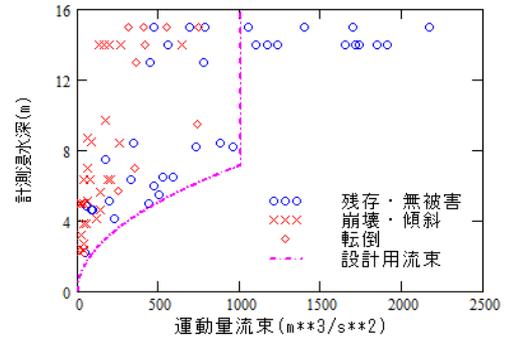
図 4 調査建築物の構造耐力相当時の水深係数^{3), 4)}

低いところでは浸水深とともに増加しているが、浸水深が高くなるにつれてほぼ一定の値に収束していることが分かる。従って、この結果を参考に設計上想定すべき運動量流束の最大値が設定できれば、モリソン式(1)を用いて津波波力の上限值が評価できることになる。

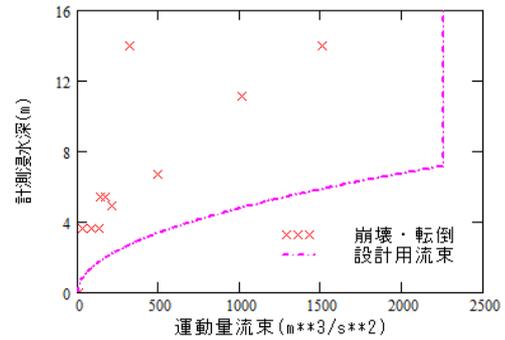
そこで、比較的サンプル数の多い東日本大震災の遮蔽物がある場合の調査結果を基準に、設計上想定すべき運動量流束の上限值を設定することとした。その際、浸水深の計測や構造耐力の評価にばらつきが存在することを考慮し、流速推定値に基づく運動量流束(図3)や被害建築物の構造耐力相当時の運動量流束(図5(b))を余裕をもって包絡する $M_{\max} = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}^2$ ($h = 10 \text{ m}$ で $u = 10 \text{ m/s}$ を想定したことに相当)を、浸水深が高くなった場合の運動量流束の上限值とし、式(2b)に用いた。



(a) スマトラ島沖地震津波



(b) 東日本大震災（遮蔽物あり）



(c) 東日本大震災（遮蔽物なし）

図 5 調査建築物の構造耐力相当時の運動量流束

浸水深が低い場合には、無被害と被害とを区分する水深係数 a の値が浸水深にかかわらずほぼ一定（遮蔽物がある場合 2 以下）となることから（図 4(b)）、 $a = 2$ に対応する $Fr_{\max} = \sqrt{2}$ をフルード数の上限値として定め式(2a)に用いた。

遮蔽物がない場合はサンプル数が少ないので、水深係数を遮蔽物がある場合の 1.5 倍とする国交省暫定指針¹⁾の考え方に従い、フルード数および運動量流束の上限值を、それぞれ遮蔽物がある場合の 1.5 倍および 2.25 倍とした。

以上により得られた設計用運動量流束 M_d と浸水深 h の関係を、式(3)および図 6 にまとめる。

遮蔽物がある場合

$$M_d = 2gh^2 \quad (h \leq 7\text{m}) \quad (3a)$$

$$M_d = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}^2 \quad (h > 7\text{m})$$

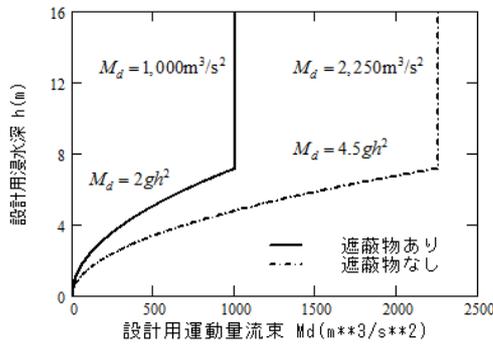


図 6 設計用運動量流束と設計用浸水深の関係

遮蔽物がない場合

$$M_d = 4.5gh^2 \quad (h \leq 7\text{m}) \quad (3b)$$

$$M_d = 2,250\text{m}^3/\text{s}^2 \quad (h > 7\text{m})$$

(3)シミュレーション解析による検証と今後の課題

本研究では、運動量流束とフルード数の有界性に着目した津波外力の評価式を提案し、既往の津波被害調査結果^{3), 4)}との比較によりその妥当性を検証した。提案式は水理実験でも観測されている津波波力の時刻歴の2つのピーク、すなわち津波先端部衝突時の衝撃力と後続の定常流作用時の抗力に対応しており、これにより設計用津波外力の評価が津波ハザードマップなどから得られる浸水深の情報を用いて容易に行えるようになった。特定の津波に調査データが限定されていること、データ数が十分でないこと、浸水深の計測や構造耐力の評価にかなりのばらつきが存在することなどを考慮すると、ここで設定した運動量流束やフルード数の上限値についてはまだ検討の余地が残されており、今後検証用データの蓄積を図りつつ、その妥当性を検証して行く必要がある。

本研究の開始当初には、シミュレーション解析による妥当性の検証を達成目標としていたが、その後現有する流体解析ソフトウェアの適用に限界があることが判明し、自作のプログラムコードの開発に予定外の時間を費やしたため、津波伝搬・遡上シミュレーションに用いる波源モデルや地形データ(水深、標高)、祖度データ、堤防データなどの地理データベースの整備を行ったほかには、特記すべき成果を上げることはできなかった。シミュレーション解析による妥当性の検証については今後の課題としたい。

引用文献

- 1) 国土交通省住宅局：東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針、2011.11

- 2) FEMA P646: Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. 2008
- 3) 中埜良昭：2004年スマトラ島沖地震津波の被害調査結果に基づく津波避難施設の設計外力評価、日本建築学会技術報告集、第13巻、第25号、pp. 337-340、2007.6
- 4) 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」中間報告書、2011.7、同その2、2011.10
- 5) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：東北地方太平洋沖地震津波情報、<http://www.coastal.jp/ttjt>、2011年9月1日参照

謝辞

本研究には東京大学生産技術研究所および(独)建築研究所による津波被害調査のデータを使用させて頂いた。貴重な調査データを提供して頂いた関係者各位に謝意を表す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. 松井徹哉、空間構造の破壊モードの抽出、シェル空間構造セミナー2016「新たなる荷重に対する備え～津波・洪水・土石流～」資料、日本建築学会、31-46、2016.12

〔学会発表〕(計 件)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：

取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

1. 松井徹哉、退官して10年、生涯研究者を目指して、名古屋大学建築学科創設50周年記念事業「わたしの仕事」展、
<http://www.nuac.nagoya-u.ac.jp/50th/Matsui.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 徹哉 (MATSUI TETSUYA)
公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他
他部局等・研究員
研究者番号：70023083

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()