

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820228

研究課題名(和文) 構造物に作用する津波サージフロント衝撃力の評価手法に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Evaluation of tsunami surge forces acting on structures

研究代表者

小山 毅 (Koyama, Tsuyoshi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：50572608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、水理模型実験及び数値計算を通して陸上遡上津波のサージフロントが建築構造物に衝突した際に及ぼす衝撃的外力(サージ力)を評価する手法を確立することである。オリフィス付貯水型水路による水理実験を通して、有限幅の板に及ぼすサージ力の代表支配因子を明らかにしてサージ係数の計算式を提案、板状の構造物の弾性応答に及ぼすサージ付加質量・付加減衰係数の影響を調査しその評価手法の提案をそれぞれ行い、また構造物下部の条件次第ではサージ衝突直後においても揚圧力が生じうることを確認した。また、有限体積法に基づく数値流体解析プログラムOpenFOAMを用いてサージ力の適切な評価手法に関して調査を行った。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to establish a method to evaluate the effect of dry bed surges arising from tsunami inundation, especially the surge force, on buildings through hydraulic experiments and computational fluid dynamics. From experiments using a reservoir discharge type flume with an orifice, the governing factors affecting the surge force acting on finite width walls are identified and a formula for the surge coefficient is proposed, the surge added mass and surge added damping coefficient affecting the elastic dynamic response of buildings is investigated and a method of evaluation is presented, and the existence of uplift force at surge impact when certain conditions are met beneath the structure is confirmed. The finite volume method based software OpenFOAM is employed to investigate numerical methods to evaluate surge forces.

研究分野：建築構造

キーワード：津波荷重 サージ力 揚圧力 数値流体解析

### 1. 研究開始当初の背景

東北沿岸地域を津波が襲ってから2年以上が経過し、復興が進む中、宮城・岩手両県26市町村では浸水区域内で再び建築される住宅戸数は40%強である。今後このような地域で、高い防潮堤を建設した防護対策をたてたととしても、冗長性を持った減災計画を実現する上では津波に対する安全性を備えた建築構造物の耐津波設計技術を確立する必要がある。陸上を遡上する津波が建築構造物に及ぼす外力の中で、建物外壁面を通して構造体に伝達される水平力の影響がもっとも大きく、図1の力の時刻歴に示されるように、その性質の違いから「サージフロント衝撃力（サージ力）」と「準定常流による流体力」に分類することができる。前者は津波のサージフロント（水の先端部）が建物に衝突し、水位が急激に変化することで発生し、後者は建物が水位の変化が小さい準定常状態の一樣流れに晒されることで発生する。一般的に、海岸沿いに近い構造物ほど、「サージフロント衝撃力」が「準定常流による流体力」を上回り、非常に大きな被害を生むことが想定されるため、その評価が重要となる。陸上遡上津波が構造物に及ぼす力に関する既往の実験的研究では、そもそも津波作用水平力を「サージフロント衝撃力」と「準定常流による流体力」に分類しているものは少なく、最大水平力がいずれかによるかが明確にされていないまま評価式が提案されている。二つの力の性質が異なった現象によって発生することを考慮すると、このような評価式は実現象との整合性に欠ける。また、サージフロント衝撃力にもっとも影響を与えたと考えられる、サージフロントの形状等も、Ramsdenを含むごく一部の研究を除いて考慮されていない。これに加えて、多くの研究では2次元構造物（防潮堤のような形状）を対象としているため、建物のように側面から水流が回り込む3次元構造物には直接適用できない。最後に、サージフロント衝撃力がごく短時間で発生することから建築構造物への作用は動的な問題となるが、この点も考慮されていない。数値シミュレーション等を用いた解析的研究に関しても同様の状況である。そこで本研究では、重要となるサージフロント形状、構造物の3次元形状特性や動的特性を考慮した水理模型実験及び数値流体解析を行うことで、3次元構造物である建築構造物に作用するサージフロント衝撃力の評価手法の確立を目的とする。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、水理模型実験及び数値解析を通して、陸上を遡上する津波のサージフロント（津波の先端部）が建築構造物に衝突した時に及ぼす衝撃的外力及びその影響を評価する手法を確立することである。沿岸地域に位置する建築構造物は防潮堤等に守られながらも依然として津波の脅威に

さらされている。津波に対する構造物の安全性を評価するためには、津波の作用外力を知ることが重要であり、特にサージフロント衝撃力に関する評価に関しては不明な点が多い。広域津波伝搬解析技術が確立されつつある現在、建築構造物の立地における津波水位・流速時刻歴はおおよそ推定できるため、本提案手法ではこれらを既知入力情報として、構造物の特性を考慮したサージフロント衝撃力を推定する手法の確立を目指す。

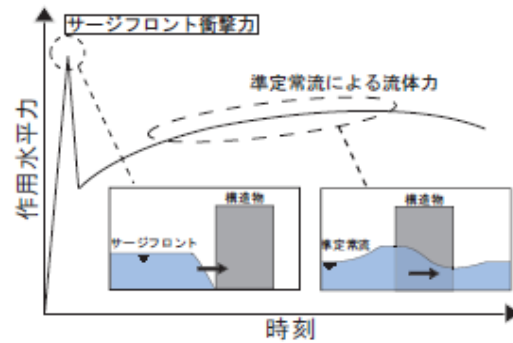


図1 構造物に作用する津波水平力

### 3. 研究の方法

本研究では、サージ力が建築構造物に与える効果を調査及び評価するために、図2のオリフィス付貯水型水路を用いて目的の異なる3種類の水理実験を行った。水路左側の貯水槽に水をため、オリフィスを塞ぐ鉄板を勢いよく取り除くことで、水路にサージを発生させることが可能となる。貯水槽の初期水位及び構造物のオリフィスからの設置位置を変えることで異なるサージを発生させることができ、サージの性質である浸水深時刻歴は静電容量型水位計で、流速時刻歴はプロペラ式流速計、及び高速度カメラを用いたPIV解析によって得る。

(1) 板状および円柱状建築構造物に及ぼすサージ力の評価：図3に示す荷重計測装置（引張圧縮荷重計を2個用いた剛性の高い計測システム）を取り付けた板（及び板に取り付けた3/4部分円柱）を水路内に設置し、作用水平力を計測し、構造物の幾何学的寸法と浸水深・流速時刻歴の相関関係を調査した。浸水深に比べて構造物の壁幅及び円柱の直径を比較的大きくすることで、受圧面のアスペクト比を小さくし、実際の構造物と津波を想定した状況を模擬した。

(2) 板状建築構造物にサージ力が作用した時の弾性応答の評価：図4に示す荷重計測装置（6分力計に鋼棒を介して板を取り付けた一定の柔性を有する計測システム）を取り付けた板を水路内に設置し、作用水平力を計測し、構造物の幾何学的寸法、振動特性（板材質を変えることで固有周期を変化させる）やサージ特性と構造物の弾性応答との関係

を調査する。

(3) 矩形建築構造物にサージ力が作用した時の滑動特性の評価：サージ力の構造物への荷重効果を滑動という崩壊モードを通して検証するために、図5に示す荷重計測装置を取り付けた構造物（アクリル樹脂製の直方体形状）を水路内に設置し、作用水平力及び滑動状況を高速カメラで計測し、底面摩擦抵抗、サージ力構造物重量の関係を調査する。模型と水路底面との滑動抵抗力を高めるためにサンドペーパー上に設置する。滑動は、作用水平力であるサージ力と滑動抵抗力となる摩擦力との大小関係で決定されると考えられ、摩擦力は構造物底面と接地面との間の接触力に依存し、構造物に上向きの揚圧力（サージ力と直交する方向に作用し、重力と逆向きに作用する構造物底面に水が浸入することで発生する水圧による力）が作用すると摩擦力は低減されることが予想される。そこで、揚圧力の効果も検討するため、同形状の模型を用いて別途作用揚圧力を計測し、滑動実験との比較検討を行った。

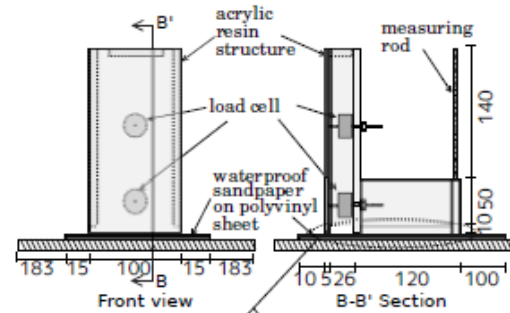


図5 滑動崩壊実験用構造物

また数値流体解析によるサージ力の評価手法の検討を行う。数値計算には、有限体積法に基づくオープンソースソフトウェア OpenFOAM を使い、大規模計算にはメモリの必要性和解析時間短縮のために東京大学 FX10 スーパーコンピューティングシステムを用いる。サージ力の評価には次の2種類の手法を用いる。

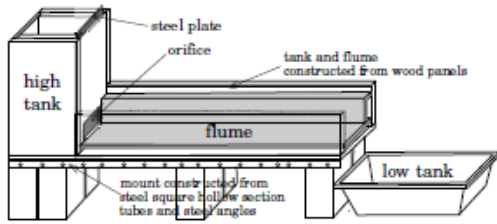


図2 オリフィス付貯水型水路

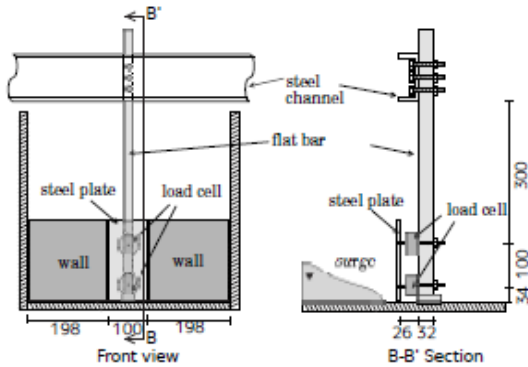


図3 荷重計測用構造物

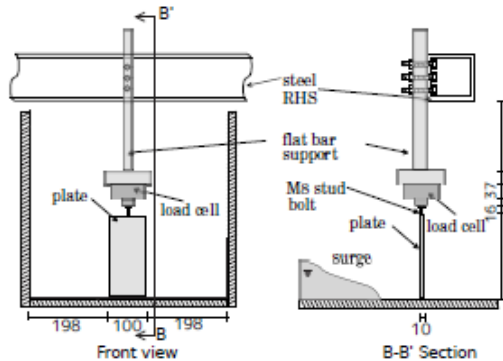


図4 弾性応答計測用構造物

(4) Navier-Stokes 方程式による計算：図6に示す、オリフィス付貯水型水路の2次元断面解析を行い、乱流状態が生じると考えられる津波サージの衝突シミュレーションに最適な乱流モデルの検討を行う。多種多様な乱流モデルの中、代表的 RANS 及び LES モデルを選択して解析を行う。

(5) 浅水方程式による計算：構造物に作用する津波荷重は一般的には Navier-Stokes 方程式 (NS 式) を解く 3次元問題として扱われるが、その計算時間や負荷が大きい。計算時間や負荷を減らすために、津波の伝搬解析では水深方向に NS 式を積分した静水圧分布を仮定した浅水方程式が用いられるが、構造物の荷重評価に関してはその適用可能性の検証は充分ではない。構造物周辺の流れは複雑で非静水圧分布となるため、この点を考慮した方程式の解法が必要である。そこで、構造物回りの複雑な流れや圧力分布を表現するに静水圧分布と動圧分布の和を用いた非静水圧分布モデルを用いる。ここでは、まず開水路内に設置された矩形構造物の定常的な作用力評価への適用性に関してまず検証を行った。

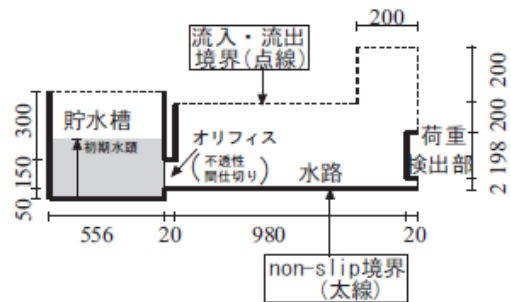


図6 2次元断面数値解析モデル

#### 4. 研究成果

研究成果を第3章の項目別に列挙すると次の通りである。

(1) 津波サージが有限幅の壁に衝突した際に及ぼす力の評価に必要なサージ係数の支配因子を次元解析により特定した。代表支配因子として、サージ先端角度、受圧面アスペクト比（浸水深を構造物の幅で除した値）などが大きく影響し、図7の通りサージ先端角度の増大に伴ってサージ係数は大きくなり、図8の通り受圧面アスペクト比の増大に伴ってサージ係数を低減する係数が小さくなることが分かった。また、これらの因子を反映したサージ係数の提案式を用いてサージ力を評価した結果は、実験と良好に対応していることを示した。

津波サージが円柱に衝突する際には、そのサージ力は有限幅の壁より低減されることを確認した。サージの円柱への衝突現象は、既往研究における円柱の水面衝突を取り扱うスラミング現象に類似はしているが、受圧面のアスペクト比が小さい場合は自由境界面の影響で力が低減されることが明らかとなった。

(2) 固有周期が有限である構造物にサージが衝突した際、サージ力は有限な立ち上がりを有するステップ外力のように構造物に作用するため、立ち上がり時間と構造物固有周期の比で応答は変化する。流体の影響で構造物にはサージ付加質量およびサージ力減衰によって付加減衰が生じ、浸水深の増加とともに固有振動数の低下及び減衰係数の増加が見られることが明らかになった。導出した付加質量及び減衰係数のモデルを用いた等価1自由度系の応答解析から得られる層せん断力時刻歴は、実験結果の固有振動数の減少傾向を再現でき、応答の振動振幅の大きさをおおむね評価できる。(図9に1例を示す。)

(3) サージ衝突直後において構造物四方が水に浸水していなくても、構造物底面に水が浸入することができる場合には揚圧力が生じ、滑り摩擦力が低減されることが明らかとなった。

(4) DNS(乱流モデル無し)、RANS、LES、の比較を行った結果、LES(局所化ダイナミック1方程式渦粘性モデル)による結果がもっとも実験結果を追跡できることが明らかになった。また、サージフロントは初期条件にも強く影響を受け、サージフロント形状を正確に捉えるためには、水路のオリフィスを塞ぐ扉が有限時間で開く状況を正確にモデル化することが重要であることも判明した。

(5) 静水圧分布を仮定した場合では、構造物周辺の流れは既往実験の結果と異なり、線形または2次曲線の動圧分布を導入すること

でより実験結果に近い流れが表現できることが分かった。

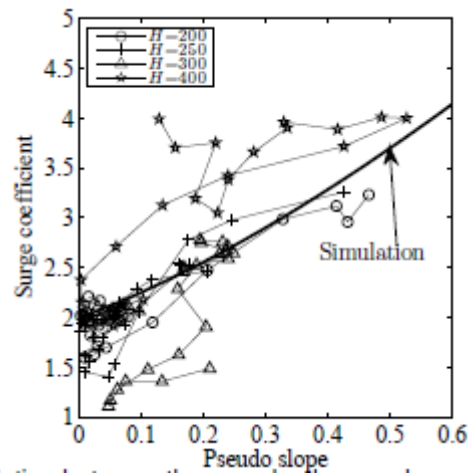


図7 サージ先端角度とサージ力係数の関

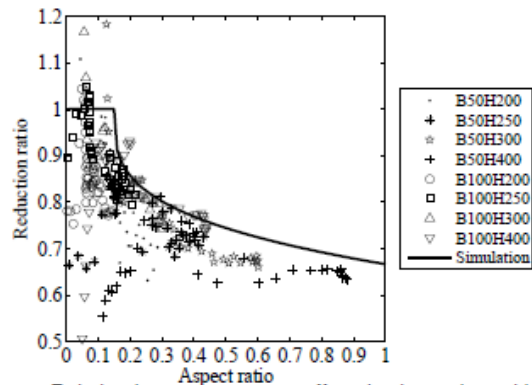


図8 受圧面アスペクト比と低減係数

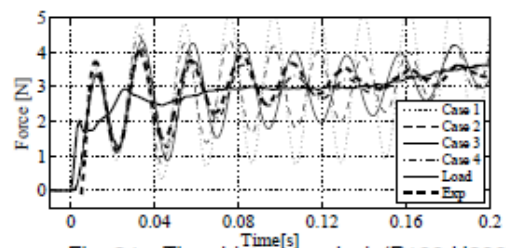


Fig. 24 Time history analysis(P100,H200)

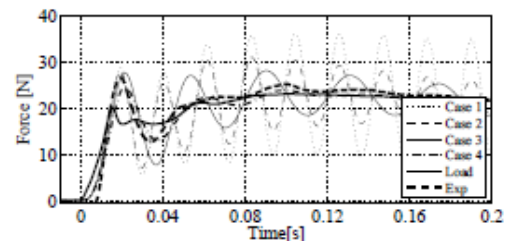


図9 等価1自由度系の応答解析(1例)

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 2 件)

①小山 毅 : 津波サージ力による 1 自由度系の弾性応答、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol. 82, No. 731, pp. 41-52, 2017. 1.

②小山 毅 : 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、査読有、Vol. 80, No. 713, pp. 1001-1012, 2015. 7.

[学会発表] (計 2 件)

①北奈苗, 小山毅, 桑村仁 : 津波サージ力係数に対するサージ先端角度と受圧面アスペクト比の影響、日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp. 385-388, 2015. 3, 日本大学 (東京都・千代田区)

②小山毅, 北奈苗, 桑村仁 : 2 次元直立壁に作用する津波サージフロント衝撃力の算定における数値流体解析乱流モデルの適用性: 津波サージフロント衝撃力に関する研究 その2, 日本建築学会大会 (近畿) 学術講演会・建築デザイン発表会, 2014. 9. 12-2014. 9. 14, 神戸大学 (兵庫県・神戸市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 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 0 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山 毅 (KOYAMA, Tsuyoshi)

東京大学・大学院工学系研究科建築学先行・助教

研究者番号 : 50572608

(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

( )