

令和元年6月17日現在

機関番号：21401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18190

研究課題名（和文）建物の裏面に回り込む津波の波圧力特性の解明

研究課題名（英文）Elucidation of wave pressure characteristics of the tsunami around the back of the buildings

研究代表者

小幡 昭彦（OBATA, AKIHIKO）

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号：30433147

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：先の2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の津波による建築物被害を受け、建物の安全についての設計ルールを定める建築構造分野では対津波設計の確立が喫緊の課題である。本研究は津波災害時に建築構造物に作用する津波の力を津波荷重として評価し、建築構造物の耐津波設計に盛り込むことを目的としている。特に、本検討では建物構造物背面に回り込む津波に着目し、津波荷重、津波波力に及ぼす影響について考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、建築構造物背面に回り込む津波について水路実験を行い、津波の基本的な性状および建築構造物前面および背面における波圧の観察を行った。その結果、津波波力については、本研究で提案した建築構造物背面の波高を考慮した波力計算式が実験結果と良い対応をしている。より精度の高い耐津波設計手法の確立については、建物背面に回り込む津波の性状を把握することが必要であるといえる。この研究成果より、建築構造物の耐津波設計確立への有用な知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：On the March 11, 2011 an earthquake occurred off the Pacific coast of Tohoku. The tsunami caused by the 2011 Tohoku earthquake resulted in severe and extensive structural damage in north-eastern Japan. In this earthquake damage, tsunami-resistant design method is urgently needed in the architectural structure field. The prospect of this study is established tsunami-resistant design method. Therefore, in this issue, the author was focusing on the tsunami wave around the back of the building structure.

研究分野：建築構造学

キーワード：津波荷重 津波波圧 水理実験 建築構造物 構造物背面

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

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。建物の安全についての設計ルールを定める建築構造分野では対津波設計の確立が社会的な責務であるとともに早急に取り組まなくてはならない喫緊の課題である。近年、日本建築学会の「建築物荷重指針・同解説(2015)」<sup>1)</sup>(以下、荷重指針と略す)には、新たにこれまでは無かった津波荷重の項目が盛り込まれた。この項目は、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ている。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問題点が多々存在する。その問題点の多くの場合は、安全側であるという理由で荷重指針では省かれているが、過剰設計となり建築構造設計の実情に即した形での設計指針の整理が必要である。本研究では特に上記のような荷重指針での問題点を整理し、建築構造学の視点からの津波荷重の整理を行う。

## 2. 研究の目的

本研究では、建物背面に回り込む津波に着目し、津波波力に及ぼす影響について検討する。本課題では水路実験を行い、建築物前面および背面における波圧を圧力計により観察し、その傾向を確認した。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験水路および実験模型概要

本実験は、秋田高等専門学校が所有する水理実験施設で行った。図1に実験水路の概要を示す。水路は矩形断面形状であり、貯水槽(約3.0m)を含め水路の全長は約15m、水路の幅は0.6m、高さは0.8mである。実験水路水上側から4.0mの位置に遮水壁が設けられており、津波の押しは貯水槽に水を溜め、遮水壁を瞬間的に開放することで再現する。実験水路水下側端部には消波装置が設置されており、津波は消波装置近辺にある床面の排水溝から排水される。本実験では消波装置によって若干の津波の反射が発生するため、試験模型を遮水壁より6.5mの位置に設置し、反射波が模型に到達するまでの時間に津波の押しによって模型に生じた波力、波圧を観察する。

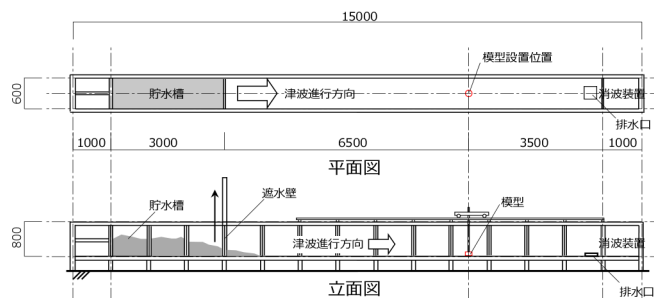


図1 実験水路概要

実験水路水下側端部には消波装置が設置されており、津波は消波装置近辺にある床面の排水溝から排水される。本実験では消波装置によって若干の津波の反射が発生するため、試験模型を遮水壁より6.5mの位置に設置し、反射波が模型に到達するまでの時間に津波の押しによって模型に生じた波力、波圧を観察する。

実験に用いる構造物を想定した試験模型は、簡単のため窓ガラスなどの開口部がない矩形構造物とし、アクリル板によって作成した。試験模型の平面形状は正方形とし、平面形状寸法は閉塞率0.20を基準として幅×奥行きが120mm×120mmとなる模型をmodel-1とし、それよりも閉塞率が小さくなる80mm×80mmの模型をmodel-2として、計2種類とした。試験模型の高さは、model-1、model-2ともに120mmとした。

実験で再現する津波の大きさは、貯水槽に溜める水の量を変えることで調整する。本実験では、模型を越流しない程度の津波を最大とし、貯水高さ $h_w$ を4パターン( $h_w = 100\text{mm}$ 、 $140\text{mm}$ 、 $180\text{mm}$ 、 $220\text{mm}$ )での実験を行う。

### (2) 模型設置方法および計測方法

本実験では津波の流速、波高および模型に作用する波力、建物前面および背面の波圧を計測する。流速と波高はそれぞれ模型の前面および背面で計測する。図2に模型設置概要、図3に計測器配置を示す。模型は、模型設置位置上部に取り付けられた架台より鋼板を吊り下げ、鋼板の先端に固定する。模型と水路床面との間には5.0mmのクリアランスを設け、模型が津波を受ける際に水路床面と模型との接触しないようにする。ここで、波力とは模型全体に作用する津波主流方向の力を指し、模型を吊るした鋼板に作用する曲げモーメント勾配より計測する。波圧は局部にかかる圧力を指し、模型に埋め込まれた圧力計を用いて計測する。圧力計は模型前面の中心線鉛直方向に上段、中段、下段(水路底面から20.0mm、40.0mm、60.0mm)の3箇所、模型背面の中心線鉛直方向に中段、下段(水路底面から20.0mm、40.0mm)の2箇所、前面および背面で計5箇所の波圧を計測する。サンプリング周波数は100Hzとする。

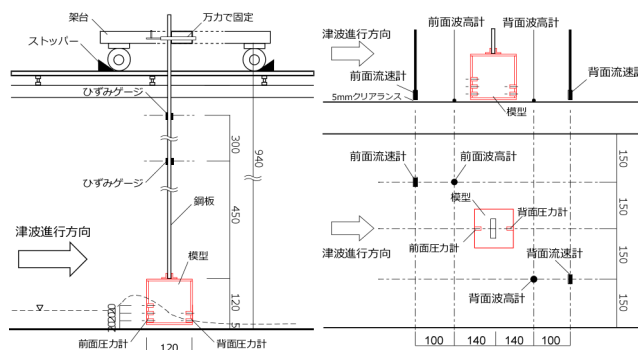


図2 模型設置概要

図3 計測器配置

ここで、波力とは模型全体に作用する津波主流方向の力を指し、模型を吊るした鋼板に作用する曲げモーメント勾配より計測する。波圧は局部にかかる圧力を指し、模型に埋め込まれた圧力計を用いて計測する。圧力計は模型前面の中心線鉛直方向に上段、中段、下段(水路底面から20.0mm、40.0mm、60.0mm)の3箇所、模型背面の中心線鉛直方向に中段、下段(水路底面から20.0mm、40.0mm)の2箇所、前面および背面で計5箇所の波圧を計測する。サンプリング周波数は100Hzとする。

### (3) 予備実験

本実験を行うにあたり、本実験水路での津波の性状を確認するため予備実験を行った。予備実験では、実験模型を設置せず流速計および波高計のみを設置した状態で、貯水高さ  $h_w$  毎の 4 パターン放水を行い、流速および波高を計測する。予備実験に当たり、図 3 に示した通り、流速計および波高計の設置位置は津波の流れに対して前面および背面で列に並ぶように設置している。そのため、予備実験のような一様流れに近い場においては、前面の波高計、背面の流速計はそれぞれ水上に設置されている前面の流速計、背面の波高計により流れを侵され、それぞれの値が小さく計測される。乱れの無い状態での各貯水高さにおける津波の性状を確認する必要があるため、予備実験での流速は前面流速計で得られた値を使用し、波高は背面流速計より得られた値を用いる。貯水高さ毎に 5 回の実験を行い、それぞれで流速および波高の計測を行った。

図 4 に一例として貯水高さ  $h_w=100\text{mm}$  および  $220\text{mm}$  における 5 回の実験結果流速時刻歴の比較を示す。測定開始時刻は、前面流速計のデータ記録開始を基準(時刻 0.0s)とし、以降時刻歴による時間軸は本実験も同様に定義する。図 4 のように各回の比較を行うと最大値発生時の時刻や最大値などに若干の差が生じているものの、おおまかな傾向の差は見られない。図 4 の赤実線は、5 回の実験結果についてのアンサンブル平均値を示す。アンサンブル平均値は 5 回の実験結果についてほぼ中央値を示しており、実験結果の傾向をよく捉えていると考えられる。以後、本報では実験結果について、各実験変数において 5 回行った実験結果のアンサンブル平均値で検討を行っていく。

図 5 に各貯水高さにおける予備実験の流速、波高、フルード数の時刻歴を示す。フルード数  $F_r$  は以下の式より算出される。

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

ここに、 $U$  は津波の流速(m/s)、 $g$  は重力加速度( $=9.8\text{m/s}^2$ )、 $h$  は津波の波高(m)を示す。

図 5 より流速、波高、フルード数は貯水高さが高くなるにつれて大きな値を示すことが確認できる。また、流速は記録開始直後に最大値を示しているのに対し、波高はそれより若干遅れて最大値をとる。流速が最大値をとる時刻と波高が最大値をとる時刻が必ずしも一致しないことが確認できる。フルード数の時刻歴では、記録開始直後にフルード数が極めて高く記録されている時間帯があるが、これは流速計および波高計を設置した位置が一致しておらず、流速のみが記録され波高が記録されない時間帯が存在することによるものである。その時間帯を除けばフルード数は貯水高さ  $220\text{mm}$  の場合であれば 2.0 付近、貯水高さ  $100\text{mm}$  の場合であれば 1.5 付近から時間が経つにつれて徐々に低下しており、6.0s から 8.0s 程度の時刻で射流から常流に切り替わっていることが確認できる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 流速、波高、波力の時刻歴

図 6、図 7 にそれぞれ model-1、model-2 における各貯水高さの流速、波高、波力の時刻歴を示す。流速、波高の時刻歴ではそれぞれ前面の計測値を実線で、背面での計測値を破線で示す。波力の時刻歴では、実線で鋼板に添付したひずみゲージより得られた波力計測値を示し、破線は前面流速、前面および背面の波高を用いて計算した算出波力  $F_{eq}$  を示す。算出波力  $F_{eq}$  は下記の式より求めた。

$$F_{eq} = \frac{1}{2} C_D \rho v_f^2 B (h_f - \phi) + \frac{1}{2} \rho g B \{ (h_f - \phi)^2 - (h_b - \phi)^2 \} \quad (2)$$

ここに、 $C_f$  は矩形断面柱の抗力係数( $=1.2$ )、 $\rho$  は水の密度( $=1.0\text{ ton/m}^3$ )、 $v_f$  は前面流速(m/s)、 $B$

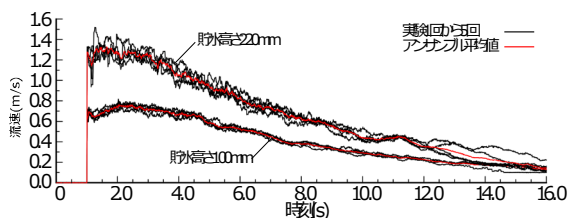


図 4 水路実験結果、流速の時刻歴(実験回数ごとの比較)

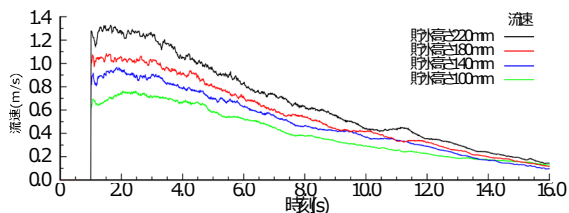


図 5-1 流速時刻歴

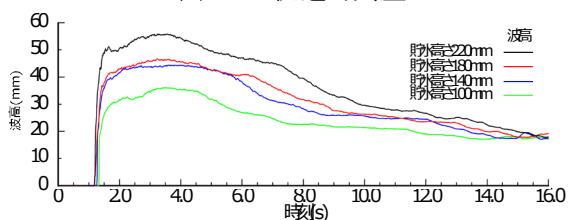


図 5-2 波高時刻歴

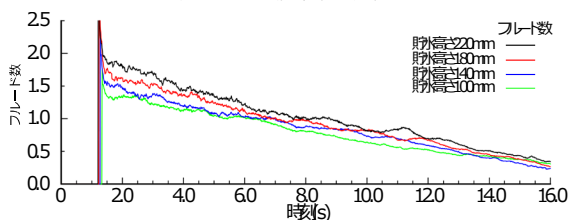


図 5-3 フルード数時刻歴

図 5 予備実験における流速、波高、フルード数の時刻歴

は模型幅(m)、 $h_f$ は前面波高(m)、 $h_b$ は背面波高(m)、 $\phi$ は模型と水路床面とのクリアランス(=0.005m)である。式(2)は、右辺第一項に津波の動圧による波力を表し、右辺第二項に津波の静圧による波力を示している。式(2)における右辺第一項に含まれる抗力係数 $C_f$ は構造物前面および背面の抗力係数を加算した値であり、右辺第二項については構造物前面と背面で津波波高に差が生じることによって構造物に生じる水平力を算出している。したがって、式(2)は構造物背面の影響を含んだ式となっているといえる。

貯水高さが高くなるにつれて、流速、波高、波力でそれぞれ値が大きくなることが確認できた。前面流速はデータ記録開始直後にピークを向かえ、その後急激に減少する様子が確認できるが、背面流速は徐々に減少している。前面流速と背面流速で流速の最大値はほぼ同じ値となっている。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。本実験において、波力は波高が最大となる時刻付近で最大となることが確認できた。

波力時刻歴について、式(2)より算出した波力 $F_{eq}$ は、1.0sから6.0sまでの間においては実験での波力計測値を若干上回っているが、6.0s以降には実験での波力計測値とよい対応を示している。本実験において6.0s以降については、図5に示した通りフルード数 $F_r$ が1.0を下回り常流に相当する流れ場になっていると考えられる。したがって、式(2)による算出波力は常流下でより対応が良いといえる。

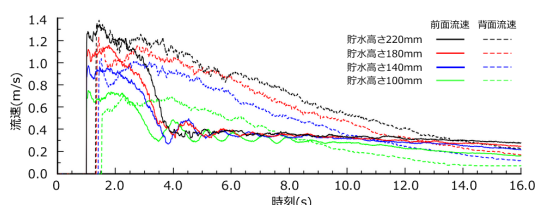


図 6-1 流速時刻歴

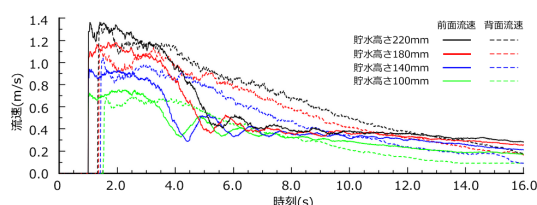


図 7-1 流速時刻歴

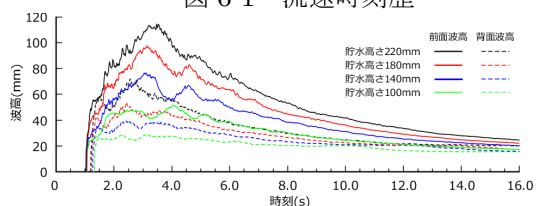


図 6-2 波高時刻歴

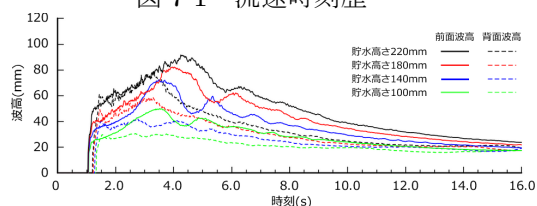


図 7-2 波高時刻歴

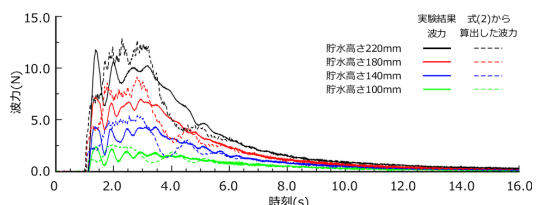


図 6-3 波力時刻歴

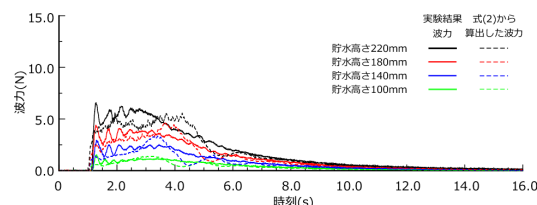


図 7-3 波力時刻歴

図 6 model-1 における流速、波高、波力の 時刻歴 図 7 model-2 における流速、波高、波力の 時刻歴

## (2) 波圧の時刻歴

図 8、図 9 にそれぞれ model-1、model-2 における各貯水高さの波圧の時刻歴を示す。前面の波圧に関しては、貯水高さが高くなるにつれてどちらのモデルでも波圧の値が大きくなっている。下段と中段はほぼ同じ傾向、値を示しており、上段は下段、中段と比べて傾向は似ているものの値が小さい。また、背面の波圧については下段が全ての実験ケースにおいて 0.3~0.5kPa 程度生じており、津波の背面への回り込みが確認できた。また、model-2 の貯水高さ 220mm の場合のみ背面中段での波圧が計測できており、この場合のみ回り込んだ津波がより高い位置まで到達していることが分かる。

圧力計での波圧の妥当性を検討するため、流速および波高の実験値を用いて圧力計位置の波圧を算出する。図 10 に各圧力計位置における波圧計測値と算出波圧の比較の一例を示す。算出前面波圧 $p_{eqf}$ は式(3)、算出背面波圧 $p_{eqb}$ は式(4)によって求めた。

$$p_{eqf} = \frac{1}{2} C_f \rho v_f^2 + \rho g (h_f - z_i) \quad (3)$$

$$p_{eqb} = \frac{1}{2} C_b \rho v_b^2 + \rho g (h_b - z_i) \quad (4)$$

ここに、 $C_f$ は構造物前面の抗力係数(=0.8)、 $C_b$ は構造物背面の抗力係数(=-0.4)、 $v_b$ は背面流速(m/s)、 $z_i$ は水路床から圧力計までの距離(m)である。図 10 より前面算出波圧は実験計測波圧と



比較し、傾向は似ているものの値が小さい。これについて、圧力計は模型中心線上に設置しているため、模型前面に生じる波圧の水平方向の分布特性が影響し、周囲よりも大きな波圧値を得ているのではないかと推測される。構造物に生じる津波波圧の特性をとらえるためには、水平方向の分布性状を検討する必要がある。背面算出波圧は貯水高さが低いケースにおいてはほぼゼロとなっており、負圧となる動圧と正圧になる静圧が打ち消されている。貯水高さが高いケースにおいては、静圧が勝り正の圧力が生じていることが確認されるが、発生する時間帯など傾向が異なる。

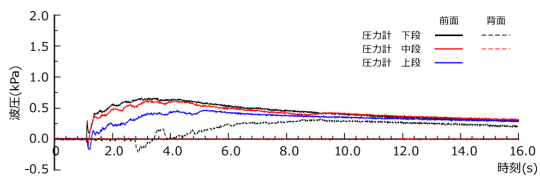


図 8-1 流速時刻歴

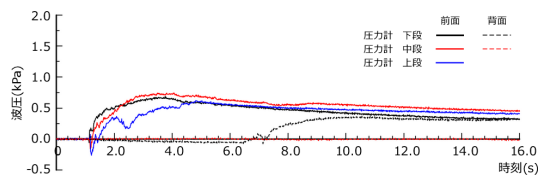


図 9-1 流速時刻歴

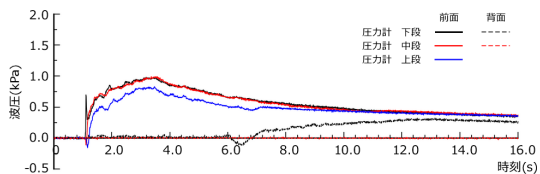


図 8-2 波高時刻歴

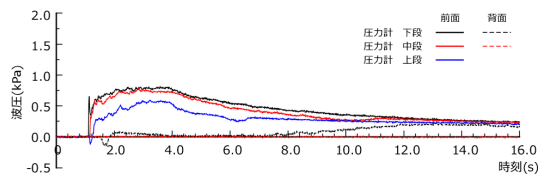


図 9-2 波高時刻歴

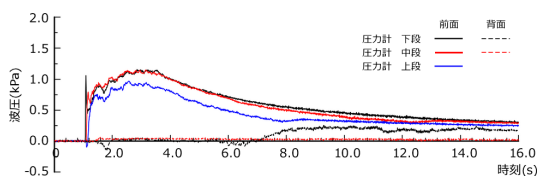


図 8-3 波力時刻歴

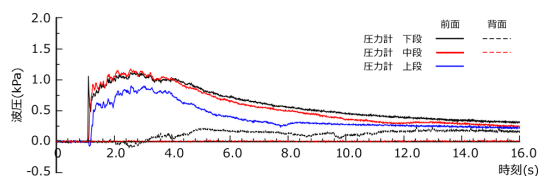


図 9-3 波力時刻歴

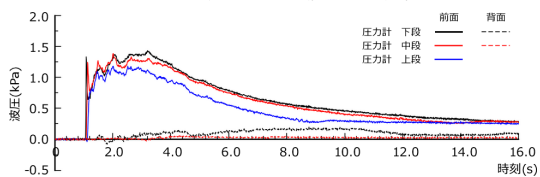


図 8-4 波力時刻歴

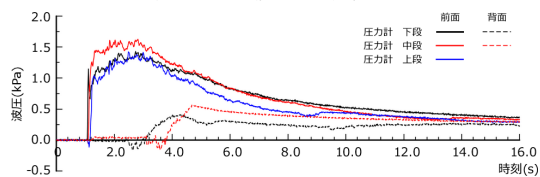


図 9-4 波力時刻歴

図 8 model-1 における波圧の時刻歴

図 9 model-2 における波圧の時刻歴

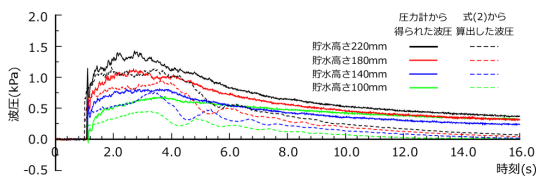


図 10-1 流速時刻歴

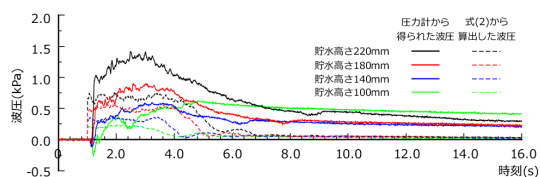


図 10-2 流速時刻歴

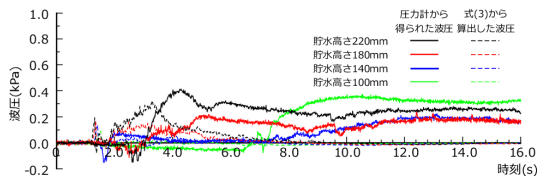


図 10-3 流速時刻歴

図 10 波圧計測値と算出波圧の比較一例

本報では、構造物背面に回り込む津波について水路実験を行い、津波の基本的な性状および建築物前面および背面における波圧を圧力計により観察した。津波波力については、本研究で提案する式(2)において良い対応が得られているといえる。また、津波波圧については、波圧計測値と算出波圧の比較を行ったところ、前面算出波圧は実験計測波圧と比較し、傾向は似ているものの値が小さい。これについて、圧力計は模型中心線上に設置しているため、模型前面に生じる波圧の水平方向の分布特性が影響し、周囲よりも大きな波圧値を得ているのではないかと推測される。構造物に生じる津波波圧の特性をとらえるためには、水平方向の分布性状を検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 建築物荷重指針・同解説書 (2015) 日本建築学会、2015
- 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、第 80 巻、第 713 号、pp1001-1011、2015.7
- 3) 桑村仁：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、第 81 巻、第 720 号、pp219-228、2016.2
- 4) 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 54 巻、pp.841-845、2007
- 5) 東京大学生産技術研究所：平成 23 年 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 中間報告その 2、2011
- 6) 高橋保、中川一、加納茂紀：洪水氾濫流による家屋流失の危険度評価、京都大学防災研究所年報、第 28 号 B-2、pp.455-470、2005
- 7) 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の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.I\_776~pp.I\_780、2012

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 小幡 昭彦：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、秋田県立大学ウェブジャーナル B (研究成果部門)、査読無、Vol.3、pp.45-50、2016.9

〔学会発表〕(計 8 件)

- ① 小幡 昭彦、亀谷 裕紀、佐藤 公亮、寺本 尚史、植松 康：円筒形構造物に作用する津波力に関する基礎的検討、その 1：水理実験概要、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、査読無、構造I、pp.77-78、2018.9
- ② 亀谷 裕紀、小幡 昭彦、高館 祐貴、佐藤 公亮、植松 康：円筒形構造物に作用する津波力に関する基礎的検討、その 2：数値流体解析、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、査読無、構造I、pp.79-80、2018.9
- ③ 小幡 昭彦、西田 哲也：建築物背面に回り込む津波に関する実験的検討、その 2：矩形構造物の幅、奥行に関する考察、日本建築学会東北支部研究報告集、査読無、第 81 号、構造系、pp.117-120、2018.6
- ④ 亀谷 裕紀、佐藤 公亮、植松 康、寺本 尚史、小幡 昭彦：円筒形構造物に作用する津波力に関する水理模型実験、東北地域災害科学研究、査読無、第 54 巻、pp.187-192、2018.3
- ⑤ 小幡 昭彦、西田 哲也：建築物背面に回り込む津波に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、査読無、構造I、pp.47-48、2017.9
- ⑥ 小幡 昭彦、西田 哲也：建築物背面に回り込む津波に関する実験的検討、日本建築学会東北支部研究報告集、査読無、第 80 号、構造系、pp.87-90、2017.6
- ⑦ 小幡 昭彦、寺本 尚史、西田 哲也：遡上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実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、査読無、構造I、pp.55-56、2016.9
- ⑧ 緑川 雄貴、小幡 昭彦、寺本 尚史、西田 哲也：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、査読無、第 79 号、構造系、pp.1-4、2016.6

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

研究分担者氏名：小幡 昭彦

ローマ字氏名：OBATA AKIHIKO

所属研究機関名：秋田県立大学

部局名：システム科学技術学部建築環境システム学科

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：3 0 4 3 3 1 4 7

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：寺本 尚史

ローマ字氏名：TERAMOTO NAOFUMI