

## 緩衝材を活用した地震・津波対策技術の開発\*

弘前大学大学院理工学研究科 有賀 義明

### 1. はじめに

沿岸域の地上構造物に関しては、強震動と津波の双方に対して有効な対策の実現が必要である。本研究では、免震・免波という考え方による地震・津波対策技術<sup>1)</sup>について、これまでにSPH法 (Smoothed Particle Hydrodynamics Method) による津波衝突解析<sup>1)</sup>、三次元動的・静的FEM解析による強震時および津波衝突時の有効性の評価<sup>2)</sup>等を行った。免震技術は既に実用化されているので、ここでは、免波技術に焦点を絞り、緩衝材を活用した場合の津波波圧の低減効果について津波模型実験<sup>3)</sup>を行い検討した。そして、津波波圧の低減効果が構造物の安全性評価にどのような影響を及ぼすかについて三次元FEM解析により検討した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、沿岸域の地上構造物の防災・減災に役立てるために、合理的な対策技術を開発すること及び地震・津波に対する信頼性の高い安全性評価法を開発することである。

### 3. 緩衝材の活用による地震・津波対策技術

従来の津波対策は、防波堤等による海側 (海岸線) での対策が主体となっているが、本研究では、構造物側での津波対策に着眼している。免波対策については、①津波からの回避 (津波が到達する場所には構造物を立地しない) を抜本的な対策として位置付けている。既設構造物の場合や立地上の制約等から抜本的な対策が困難な場合は、次善の策として、②津波からの構造物の隔離 (ドーム化、地下化等)、③津波の遮断 (防護壁等)、④構造物の形状や津波の到来方向等工夫による津波作用の低減、⑤緩衝材を活用した津波作用の低減等を位置付けている。ここでは、これらの内、「⑤緩衝材を活用した津波作用の低減」を研究対象としており、その基本概念を図1に示す。

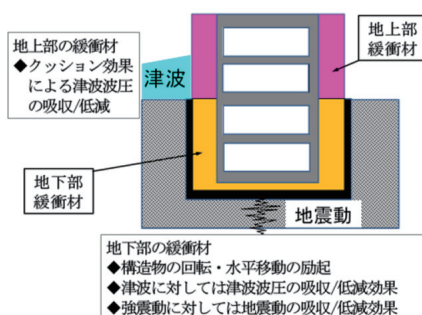


図-1 緩衝材を活用した地震・津波対策技術の基本概念

\*Development of seismic and tsunami measure technology by using cushioning materials by Yoshiaki Ariga

構造物の地下部に配置した緩衝材は強震動に対する免震材として、構造物の地上部の緩衝材は津波に対する免波材として機能するように意図したものである。

#### 4. 津波模型実験による津波波圧の低減効果の検討

##### (1) 実験の背景

地上構造物に作用する津波波圧に関して、津波の水深、流速、密度<sup>3)</sup>、構造物の平面形状<sup>4)</sup>、津波の入射角<sup>5)</sup>等の影響については研究事例が多い。しかし、構造物の鉛直形状の影響、緩衝材の影響等についての研究事例が見られない。そこで、緩衝材を活用した場合の津波波圧の低減効果について津波模型実験により検討した。

##### (2) 実験の目的

津波による構造物の損傷・破壊を評価するためには構造物に作用する波圧を明らかにすることが必要である。また、免波対策の実用化を図るためには構造物の表面に緩衝材を配置した場合に波圧の低減効果がどの程度あるのかを明らかにすることが必要である。このような必要性から、シンプルな構造物模型を作成して津波模型実験を行った。

##### (3) 実験装置と実験模型

実験には、直線二次元水路（パシフィックコンサルタンツ（株）つくば技術研究センター）を使用した。実験水路の形状と寸法を図2に示す。実験水路はコンクリート製であり、長さ4.9 mの貯水槽と延長15.9 mの二次元水路で構成されている。貯水槽と水路は転倒堰で仕切られており、この転倒堰を一気に倒すことで津波を模擬した流水を発生させる仕組みになっている。二次元水路の断面は、図3に示したように、幅0.9 m、側壁高0.48 mの矩形である。

波高は、構造物模型の上流側1.0 mの位置に容量型波高計を設置して計測した。波圧は、直径6 mm、厚さ0.6 mmの円盤型の圧力センサーを用いて計測した。圧力センサーは、図4に示したように、水路床から4.0 cm間隔で6個を構造物模型および緩衝材の表面に接着固定し、20 Hzで圧力を計測した。実験に用いた構造物模型の寸法と形状は、幅20 cm、高さ40 cm、奥行20 cmの直方体である。

##### (4) 実験ケース

実験ケースを表1に示す。図5には構造物模型の断面構造を示す。Case-1は、構造物模型に直接流水を作用させるケースである。構造物模型の側面勾配は、鉛直(仰角90度)である。Case-2は、緩衝材として厚さ10 cmのEPDM スポンジ（エチレンプロピレンゴムスポンジ）を配置したケースである。構造物模型と緩衝材の設置状況は図6に示したとおりである。緩衝材の保護板には、厚さ0.8 mmの塩ビ板を使用した。EPDM スポンジは、変形性に優れ、防振材、防滑材等として多用されている材料である。

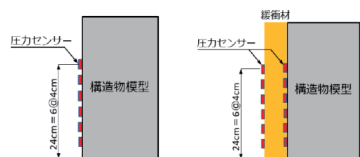
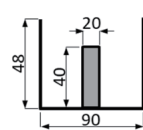
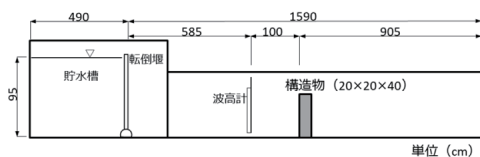


図2 実験水路の縦断面

図3 実験水路の横断面

図4 圧力センサーの配置

表 1 実験ケース

Case	構造物	流水		緩衝材
	側面勾配	波高	入射方向	材質 / 厚さ
1	鉛直	25cm	正面入射	無し
2	鉛直	25cm	正面入射	EPDM / 10cm

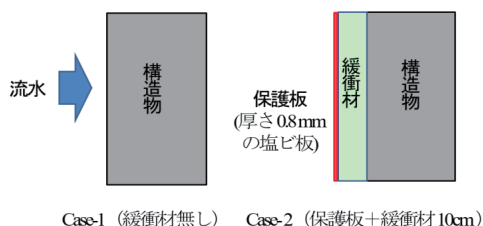


図 5 構造物模型の断面構造

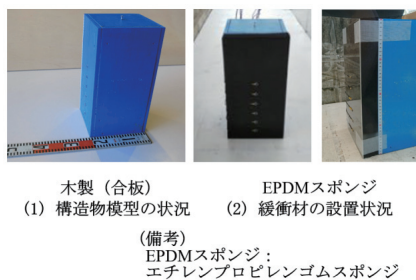
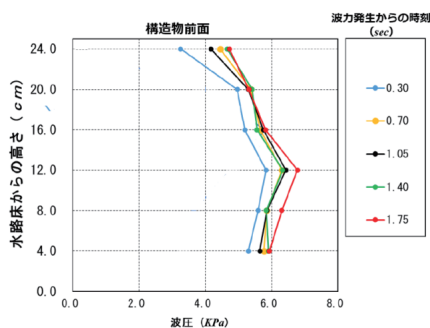


図 6 構造物模型と緩衝材の設置状況

## (5) 実験結果

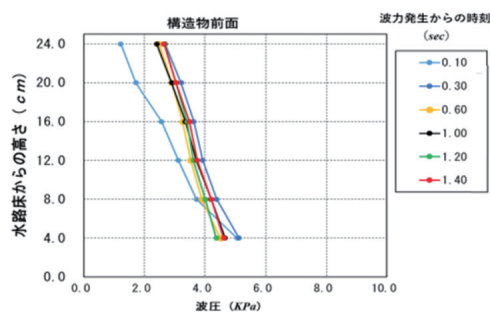
### a) 構造物表面に作用した波圧の大きさと分布形状

実験では構造物模型の上流 1 m 地点で波高が 25 cm になるように設定した流水を作用させた。Case-1 と Case-2 について、構造物表面で計測された波圧の計測結果をそれぞれ図 7 と図 8 に示す。図中の折れ線は、主な時刻での鉛直方向の波圧分布を示す。Case-1 (緩衝材なし、構造物のみ) では、最大波圧は概ね 6.8 kPa であり、水路床からの高さが概ね 4~12 cm の区間では波圧の大きさはほぼ一定であり、水路床からの高さが概ね 12~24 cm の区間では直線的に減少した。波圧の鉛直分布の形状としては、台形もしくは五角形に類似した形状として捉えることが可能である。Case-2 (緩衝材あり、EPDM 10 cm 厚) では、図 8 に示したように、波圧の分布形状はきれいな三角形分布となった。Case-2 での最大波圧は、水路床からの高さが 12 cm の位置で約 4.0 kPa となり、Case-1 (緩衝材なし) の 6.8 kPa に比して約 6 割となり、EPDM スポンジによる波圧の低減効果を示す結果が得られた。



Case-1: 緩衝材なし, 構造物のみ

図 7 Case-1 の鉛直方向の波圧分布形状



Case-2: 緩衝材あり, EPDM 10cm厚, 保護板あり

図 8 Case-2 の鉛直方向の波圧分布形状

## b) 考察

津波模型実験を行った結果、緩衝材を活用することによって津波衝突時の波圧を低減することが可能であることを確認できた。また、緩衝材がない場合は矩形・五角形に類似した形状であったものを緩衝材を配置することによって台形・三角形に類似した形状へと変化させることが可能であることを確認できた。緩衝材の有無による波圧の分布形状の変化を模式的に表現した結果を図9に示す。津波に対する構造物の安全性を評価する場合、波圧分布形状を三角形とするか矩形とするかに応じて、構造物内に発生する応力に大きな影響を及ぼすと考えられるので、緩衝材を活用することによって波圧の分布形状をコントロールすることが可能であることは、津波に対する構造物の安全性の向上を考える際に有用である。

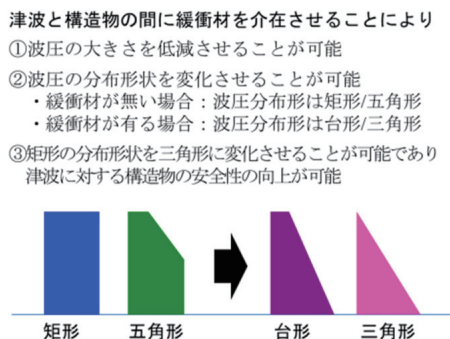


図9 緩衝材による波圧の分布形状の変化の模式

## 5. 三次元 FEM 解析による構造物内に発生する応力の評価

### (1) 解析の目的

津波に対する構造物の安全性評価に関しては、津波波圧の大きさや分布形状の設定が評価結果にどのような影響を及ぼすかについて未検討の課題が多い。そこで、三次元 FEM 解析により検討した。津波波圧の大きさと分布形状は、図10に示したように①矩形分布 400 kPa、①矩形分布 260 kPa、①三角形分布 400 kPa の3ケースを設定した。波圧の大きさは SPH 法による津波衝突解析の結果<sup>2)</sup>を参考に、波圧の分布形状は津波模型実験の結果を参考に設定した。

### (2) 三次元解析モデル

東日本大震災で被害を受けた仙台市南蒲生浄化センター第三ポンプ場の事例を参考に解析モデルを設定した。解析対象は、地上2階・地下2階の4階建の鉄筋コンクリート構造物とし、その形状と寸法は図11に示したとおりである。地盤は、二層の水平成層地盤を仮定した。地盤と構造物は、共に8節点ソリッド要素でモデル化し、解析は、三次元静的解析により線形解析として行った。解析には、解析プログラム ISCEF を使用した。

### (3) 解析用物性値

解析に用いた構造物と緩衝材の物性値は表2に、地盤の物性値は表3に示す。

### (4) 津波波圧の設定

津波波圧の大きさは400 kPaと260 kPa、鉛直方向の分布形状は矩形と三角形分布を設定した。波圧は、構造物正面の高さ0 m～6.5 m、幅20 mの矩形のエリアに等分布荷重として静的に作用させた。

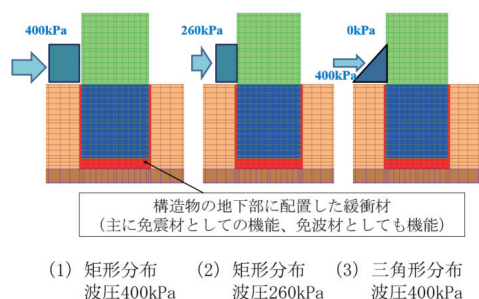


図10 波圧の大きさと分布形状の設定

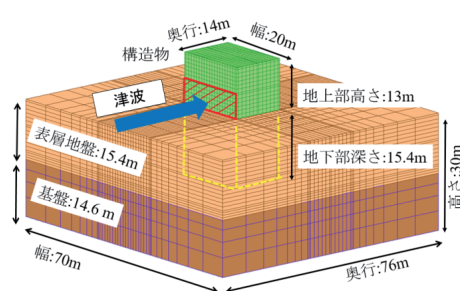


図11 三次元 FEM 解析モデル

表2 構造物と緩衝材の物性値

項目	せん断剛性 N/mm <sup>2</sup>	密度 t/m <sup>3</sup>	ポアソン比
構造物	14600	2.40	0.20
緩衝材	0.24	1.00	0.49

表3 地盤の物性値

層	層厚 m	せん断剛性 N/mm <sup>2</sup>	密度 t/m <sup>3</sup>	ポアソン比
表層	15.4	16	2.0	0.40
基盤	14.6	240	2.2	0.35

## (5) 解析結果

### a) 構造物内に発生したせん断応力

波圧によって構造物に発生した最大せん断応力の解析結果を図12に示す。構造物に発生した最大せん断応力は、矩形分布400 kPaで2.02 N/mm<sup>2</sup>、矩形分布260 kPaで1.32 N/mm<sup>2</sup>、三角形分布400 kPaで0.59 N/mm<sup>2</sup>となった。波圧の大きさが同じ400 kPaであっても、矩形分布では2.02 N/mm<sup>2</sup>、三角形分布では0.59 N/mm<sup>2</sup>となり約3割まで低下した。構造物に発生する応力は、波圧の大きさ及び分布形状の設定に応じて直接的に大きく変化することが確認できた。

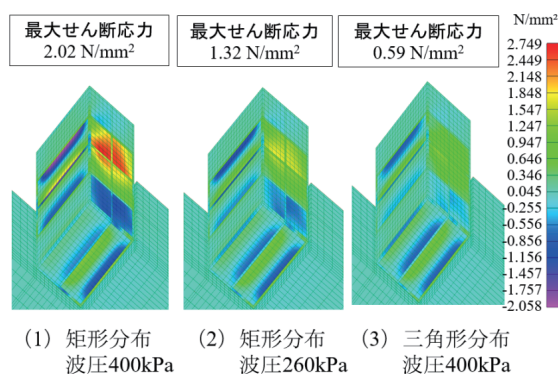


図12 波圧の設定による構造物に発生する最大せん断応力の比較

### b) 考察

構造物の耐波設計に関する現行の指針・基準類<sup>6)</sup>では、津波波圧の分布形状は三角形分布を設定するのが通例である。しかし、津波模型実験を行った結果、構造物に対する破壊力が大き

い津波衝突時の波圧の分布形状は矩形に類似した形状となった。また、三次元FEM解析により応力評価を行った結果、三角形分布に比して矩形分布を設定した場合は、構造物に発生する応力が増大することを確認した。すなわち、三角形分布を設定した安全性評価は、矩形分布の設定よりも危険サイドの評価になることが確認できた。波圧の分布形状は構造物に発生する応力に大きな影響を及ぼすので、津波に対する構造物の安全性を精度良く評価するためには、構造物に作用させる波圧の大きさのみならず分布形状の設定が重要である。

## 6. まとめ

◇緩衝材の活用により構造物に作用する津波荷重を低減する技術を提案し、その効果について津波模型実験により検討した。その結果、緩衝材を活用することにより、構造物に作用する津波の波圧を低減することが可能であり、津波に対する構造物の安全性を向上させることが可能であることを確認できた。

◇緩衝材として EPDM スポンジを用いて津波模型実験を行った結果、緩衝材を介在させることによって波圧の大きさの低減のみならず、波圧の分布形状を矩形・五角形に類似した形状から台形・三角形に類似した形状へと変化させることができることを確認できた。

◇三次元FEM解析により検討した結果、波圧の大きさと分布形状の設定は、安全性評価に直接的に大きな影響を及ぼすことが確認できた。現行の指針・基準類では、安全性評価の際に三角形分布（静水圧分布）の波圧分布を設定することが通例になっているが、三角形分布の設定は、矩形分布の設定よりも危険サイドの設定になるので、信頼性の高い安全性評価を実行するためには、波圧の大きさと共に波圧の分布形状を適正に設定することが必要である。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP21K04603 の助成を受けて実施しました。解析プログラム ISCEF の使用に際しては、センチュリテクノ(株)の中川弘明様から多大なるご配慮をいただきました。津波模型実験の実施では、パシフィックコンサルタンツ(株)の市山誠様から、SPH 法による流体解析では、(株)構造計画研究所の渡辺高志様から多大なるご協力をいただきました。研究に際しては、土木学会地震工学委員会水循環施設の合理的な地震・津波対策研究小委員会 WG1 の委員の方々から多大なるご協力をいただきました。記して深謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 渡辺高志, 有賀義明, 西本安志, 大峯秀一, 山中明彦, 森崎啓, 佐藤優乃: 粒子法を用いた陸上構造物に作用する津波波圧の衝突条件による影響評価, 土木学会第 39 回地震工学研究発表会講演論文集, C12-1470, pp. 1-8, 2019.
- 2) 有賀義明, 佐藤優乃, 渡辺高志, 西本安志, 曹増延, 坂下克之, 鈴木高二朗, 有川太郎, 浅井光輝, 堀宗朗: 水循環施設における免震・免波構造の効果の評価に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No. 4, I\_721-I\_729, 2017.
- 3) 松富英夫, 岡田隼人, 久保田友寛, 今野史子: RC 造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 74, No. 2, I\_265-I\_270, 2018.
- 4) 榊山勉: 陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, I\_771-I\_775, 2012.
- 5) 高橋研也, 前田勇司, 西畑剛, 古牧大樹: 陸上構造物に作用する津波波圧と波向の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, I\_306-I\_310, 2014.
- 6) 日本下水道協会: 下水道施設の耐震対策指針と解説, 408p., 2014.