

# 緩衝材を活用した津波波圧の低減効果について

有賀 義明<sup>1</sup>・市山 誠<sup>2</sup>・渡辺 高志<sup>3</sup>・西本 安志<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 弘前大学 大学院理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

E-mail: y-a-arig@hirosaki-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 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 (〒300-4204 茨城県つくば市作谷 642-1)

E-mail: makoto.ichiyama@tk.pacific.co.jp

<sup>3</sup>正会員 (株) 構造計画研究所 防災・環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央4-5-3)

E-mail: takashi-watanabe@kke.co.jp

<sup>4</sup>正会員 シバタ工業 (株) 新技術開発本部 (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)

E-mail: Yasushi\_Nishimoto@sbt.co.jp

沿岸域に位置する地上構造物の防災・減災に役立てるために、免震・免波という考え方に基づく地震・津波対策技術に関する研究の一環として、剛性の低い緩衝材を活用することによる津波波圧の低減効果について津波模型実験を行い検討した。その結果、構造物の前面に緩衝材を配置することによって構造物に作用する波圧の大きさを低減させることができることを示す結果を得ることができた。更に、三次元FEM解析による応力評価を行った結果、構造物内に発生する応力は波圧の値とその分布形状の設定によって大きく影響を受けることを確認することができた。津波と構造物の間に緩衝材を介在させることによって構造物に対する波圧の影響を低減させることが可能である。

**Key Words:** water cycle facility, tsunami countermeasures, stress reduction, shape of wave pressure, scale model test, 3D FEM analysis

## 1. はじめに

2011年の東日本大震災では、津波と強震動によって甚大な被害が発生した。将来に向けては、南海トラフ地震等の発生が想定されており、内閣府の調査研究結果として、2014年8月には日本海沿岸、2020年4月には太平洋沿岸の津波想定高さが大幅に見直されている。このような状況から、沿岸域に位置する地上構造物に関しては、強震動だけでなく津波に対しても有効な対策の実現が求められている。

本研究では、沿岸域に位置する地上構造物の防災・減災に資するために、強震動と津波の双方に対して有効な対策技術として、剛性が低く変形し易い緩衝材を活用することによって、強震動の影響の低減（免震効果）と津波の影響の低減（免波効果）を両立できるように意図した免震・免波という概念の対策技術<sup>1)</sup>について研究している。免震・免波構造については、これまでにSPH法（Smoothed Particle Hydrodynamics Method）による津波衝突解析<sup>2)</sup>、FEM（Finite Element Method）による強震時および津波衝突時の構造物の変位・応力

解析<sup>3)</sup>等を行って来た。これらの結果を踏まえ、ここでは、津波模型実験を行い緩衝材の活用による津波波圧の低減効果の可能性について検討した。

## 2. 研究の目的

仙台市南蒲生浄化センターでは、2011年東北地方太平洋沖地震の際に10m以上の津波によってポンプ場が大きな被害を受けた他、多くの構造物・施設で甚大な被害は発生した。こうした被害を教訓として、国や学協会等からは、下水道施設の地震・津波対策に関する調査研究結果が発表されている<sup>4)</sup>。従来、津波対策に関しては、防波堤や防潮堤等による海側（海岸線）の対策が主であるが、本研究では、構造物側での津波対策に主眼を置いており、免波対策の基本として、①津波からの回避（津波が到達する場所には構造物・施設を立地しないこと、立地の防災化）を抜本的な対策として位置付けている。抜本的な対策が難しい場合は、現実に即した対策として、②津波からの構造物の隔

離・遮断，③構造物の表面形状，津波の到来方向（構造物に対する入射角）等の工夫による津波波圧の低減，そして，④緩衝材の活用による津波波圧の低減等を位置付けている。

### 3. 緩衝材を活用した津波波圧の低減の概念

緩衝材を活用した免震・免波構造の概念を図-1に示す。構造物地下部に配置した緩衝材は，強震動に対する免震効果とともに構造物の回転・水平移動を発生し易くすることによって津波衝突時の波圧が低減されるように意図したものである。構造物地上部の緩衝材は，緩衝材のクッション効果によって津波の衝撃力や圧力を吸収・低減することを意図したものである。免震・免波構造では，強震動対策と津波対策を別々の方法で行うのではなく，緩衝材の活用という方法によって両立させることに特長がある。緩衝材は，強震動に対しては免震材として，津波に対しては免波材として機能するように意図している。

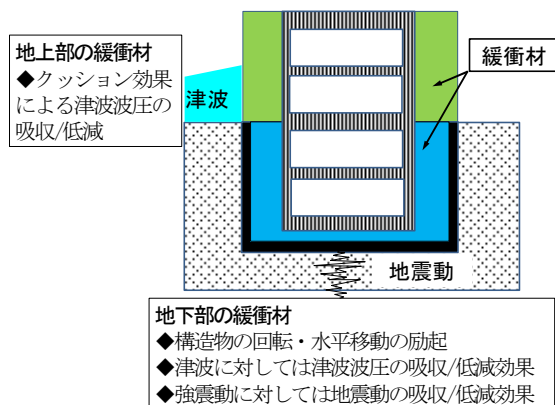


図-1 構造物の周囲への緩衝材の配置による地震・津波作用の吸収・低減の概念

### 4. 緩衝材による津波波圧の低減効果に関する津波模型実験

#### (1) 実験の背景

地上構造物に作用する津波波圧に影響する要因としては，津波の水深，流速，密度，構造物の剛性，形状，津波と構造物の位置関係（入射角）等が考えられる。これらの内，津波の水深と流速の影響に関しては，Froude 数等を指標にした研究成果が数多く報告されている。津波の密度の影響に関しては，水道水，海水，濁水を用いた実験結果が報告されており<sup>5)</sup>，津波の密

度が大きいほど津波波圧・衝撃圧が大きくなるとの報告がなされている。構造物の剛性の影響に関しては研究事例が見られないが，構造物の平面形状の影響に関しては，矩形の場合と円形の場合の実験結果が報告されている<sup>6)7)</sup>。構造物の鉛直断面の形状の影響（構造物の側面勾配の影響等）については研究事例が見られない。津波の入射角の影響に関しては，構造物の正面から津波が入射した場合に比して斜めからの入射の場合は津波波圧が低下するとの実験結果が報告されている<sup>8)9)</sup>。津波に対する地上構造物の対策技術に関しては，流体解析によってタンクの漂流防止法について研究した事例が報告されているが<sup>10)</sup>，対策技術に関する研究事例は少なく，緩衝材を用いた津波波圧の軽減対策等に関してはこれまでに研究事例が見られない。陸上構造物に作用する津波波圧に関する研究としては，水路実験と数値解析による研究事例<sup>6)</sup>が報告されている。このように，地上構造物に作用する津波波圧に関しては，津波の水深，流速，密度，構造物の平面形状，津波の入射角の影響については研究事例が報告されているが，構造物の剛性，鉛直形状の影響，緩衝材を活用した津波対策に関しては研究例が見られない。このような状況を踏まえ，ここでは，津波模型実験を実施して緩衝材を活用した津波波圧の低減効果の可能性について検討した。

#### (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津波波圧の大きさと分布形状を明らかにすることが必要である。また，緩衝材を活用した津波対策技術（免波技術）を実用化するためには，構造物の表面に緩衝材を配置することによって津波波圧を低減させることが可能であるかどうかを明らかにすることが必要である。このような考えから，単純化した構造物模型を作成して津波模型実験を行った。実験計画の立案に際しては，次の事項を勘案して実験ケースを設定した。

- ① 構造物に作用する波圧の分布形状の確認
- ② 構造物の表面形状による波圧の低減効果の検討
- ③ 緩衝材の活用による波圧の低減効果の検討

ここでは，上記事項の内，③緩衝材の活用による津波衝撃圧の低減効果について津波模型実験により検討した結果を記述した。

#### (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。実験では，水路内に設置した構造物模型に流水を作用させ，構造物模型の表面に配置した圧力センサーによ

り波圧を計測した。実験水路の概要を図-2 に示す。実験水路はコンクリート製であり、延長 4.9 m の貯水槽と延長 15.9m の二次元水路で構成されている。上流側の貯水槽の容量は 4.2 m<sup>3</sup> であり、転倒堰で下流側の二次元水路と仕切られている。この転倒堰を一気に倒すことで貯水槽内の水が水路を流下し、津波を発生させる仕組みである。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。

津波高を確認するために、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、10 Hz で波高を計測した。津波高は、使用する水路の最大波高として津波高検定で決定した。津波波圧の計測には、直径 6 mm、厚さ 0.6 mm の小型圧力センサー（共和電業製 PS-C）を用いた。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 個を構造物模型の表面と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形状・寸法は、幅 20 cm、高さ 40 cm、奥行 20 cm の直方体とした。

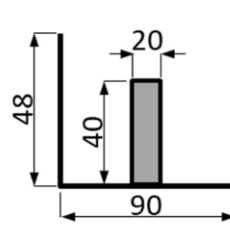


図-3 水路横断面

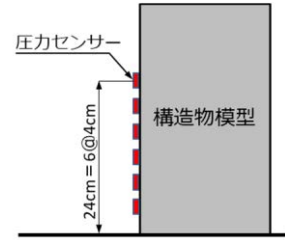


図-4 圧力センサーの配置

表-1 実験ケース

| Case | 構造物  |      | 流水   |             | 緩衝材 |  |
|------|------|------|------|-------------|-----|--|
|      | 側面勾配 | 波高   | 入射角  | 材質/厚さ       | 保護板 |  |
| 1    | 鉛直   | 25cm | 0度   | 無し          | 無し  |  |
| 2    | 鉛直   | 25cm | 正面入射 | EPDM / 5cm  | 無し  |  |
| 12   | 鉛直   | 25cm |      | EPDM / 5cm  | 有り  |  |
| 22   | 鉛直   | 25cm |      | EPDM / 10cm | 有り  |  |

#### (4) 実験ケース

緩衝材による波圧の低減効果を検討するために設定した実験ケースを表-1 に示す。Case-1 は、直方体の構造物模型に流水を作用させるケースであり、基本ケースとして位置付けているものである。Case-2、Case-12 および Case-22 は、緩衝材による波圧の低減効果を検討するために設定したケースである。構造物模型の側面の勾配は、鉛直（仰角 90°）とし、構造物模型は厚さ 10 mm の耐水合板を用いて作成し、表面は水性塗料で塗装した。構造物模型は、転倒堰から 6.85 m 下流の水路中央部に設置した。緩衝材を構造物模型の表面に配置した実験では、津波作用側の構造物模型の壁面全体を緩衝材が被覆するように設置した。緩衝材の材質は、EPDM スポンジ（エチレンプロピレンゴムスポンジ）を使用した。緩衝材は、図-5 に示したように厚さは 5 cm と 10 cm とし、構造物模型の表面での緩衝材の設置状況は図-6 に示したとおりである。EPDM スポンジは、柔軟性に優れ、防振材、防滑材等として多用されている材料である。保護板には、厚さ 0.8 mm の塩ビ板を使用した。

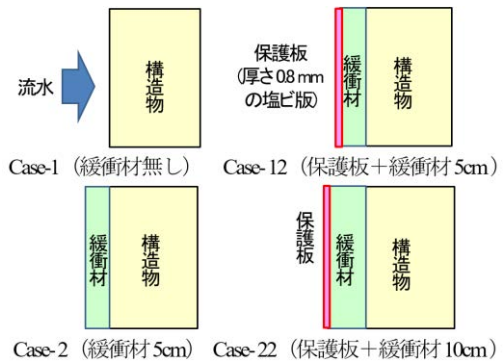
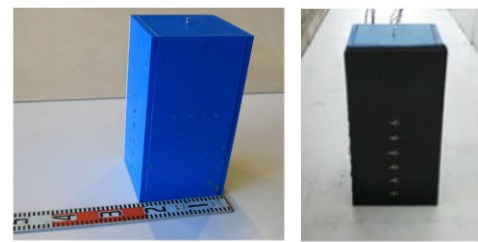


図-5 実験模型の構造（断面）



合板製 (1) 構造物模型の状況 EPDM スポンジ (2) 緩衝材の設置状況

図-6 実験模型の状況

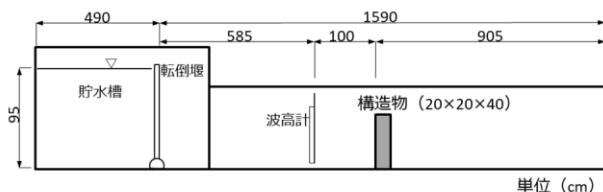
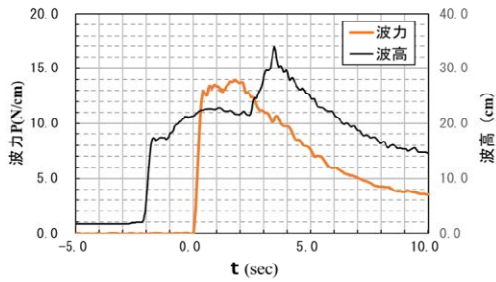


図-2 実験水路の側面

#### (5) 実験結果

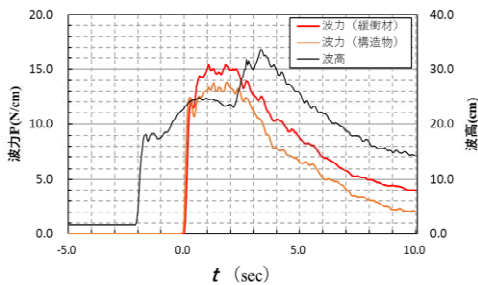
##### a) 波高と波力

Case-1 では、水路内に基本形の構造物模型を固定し、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。



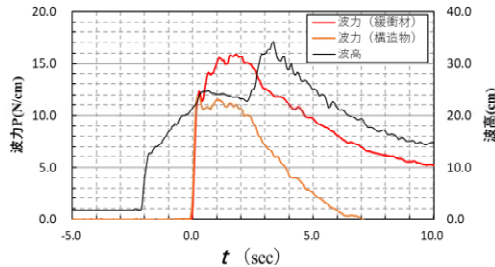
Case-1 緩衝材なし，構造物のみ

図-7 Case-1での波高と波力



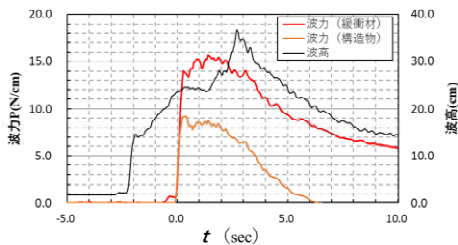
Case-2 緩衝材あり，EPDM 10cm厚，保護板あり

図-8 Case-2での波高と波力



Case-12 緩衝材あり，EPDM 5cm厚，保護板あり

図-9 Case-12での波高と波力



Case-22 緩衝材あり，EPDM 10cm厚，保護板あり

図-10 Case-22での波高と波力

図-7 は、波高と構造物表面に作用した波力の時刻歴である。t=2.5秒からt=5秒の区間では波高が急に高くなっているが、これは、構造物模型に衝突した後の流水のせり上がりや反射によるものであり、概ね t=2秒あたりまでの区間が構造物模型に作用した水流の波高と考えることができる。Case-1 では t=1.2秒の波高 22.8 cm が構造物模型に作用した最大波高である。図中に示した波力は、鉛直方向に 4 cm 間隔で配置した圧力計の値を積分し、単位幅あたりの波力 (N/cm) として示したものである。最大の波力は、Case-1 では 14.0 N/cm であった。

本実験は、相似則の面で実際の構造物や津波作用と直接対応するものではないが、本実験での波高 25 cm に対して、実規模の津波高を 10 m と仮定すると、模型縮尺は 1/40 となる。この模型縮尺を仮定した場合、Case-1 について実規模換算を試みると構造物に作用する波力の最大値は、構造物中心線上で 560 N/cm 程度になると推定される。

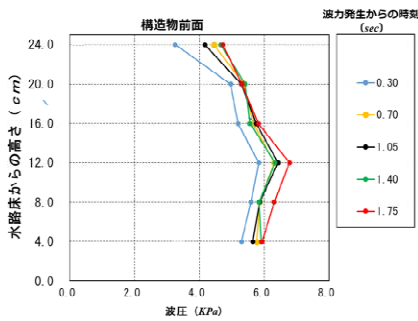
図-8、図-9、図-10 は、それぞれ Case-2、Case-12、Case-22 における波高と構造物表面に作用した波力と緩衝材表面の波力の時刻歴である。本実験では、緩衝材を配置した場合に構造物表面にどのような波圧が作用するかの検討が主眼であり、緩衝材表面で計測した波圧の結果は参考として記載した。図-7～図-10 より、最大波高時に構造物表面に作用した波力は、Case-1 では 14.0 N/cm、Case-2 では 13.8 N/cm、Case-12 では 12.3 N/cm、Case-22 では 9.1 N/cm となった。このように、緩衝材を配置しない Case-1 では 14.0 N/cm であった波力が、厚さ 10cm の EPDM スポンジを配置した Case-22 では 9.1 N/cm にまで低下した。

#### b) 構造物表面に作用した波圧に対する緩衝材の影響

構造物表面に作用した波圧について、Case-1、Case-2、Case-12、Case-22 での計測結果をそれぞれ図-11～図-14 に示す。t=0秒は、圧力センサーが流水に反応した瞬間であり、図中の折れ線は、各時刻での波圧分布を示す。

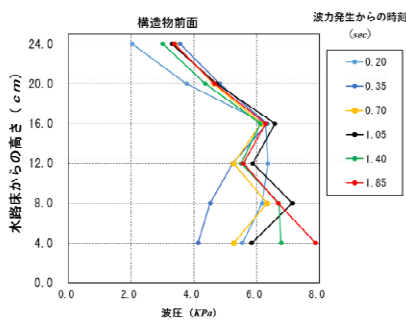
Case-1 (緩衝材なし，構造物のみ) では、最大波圧は概ね 6.8 kPa 程度であり、波圧の鉛直分布は、水路床からの高さが 4～12cm の区間では波圧の大きさはほぼ一定であり、水路床からの高さが 12～24cm の区間では直線的に減少していることが分かる。したがって、波圧の鉛直分布の形状としては、台形もしくは五角形に類似した形状であると捉えることが可能である。

Case-2 (緩衝材あり，EPDM 5cm 厚，保護板なし) では、最大波圧は概ね約 6.6 kPa 程度であり、波圧の鉛直分布は、水路床からの高さが 0～16cm の区間ではバラツキが大きい結果となった。これは、水流が緩衝材に衝突した際に、緩衝材が変形し易いために水流が



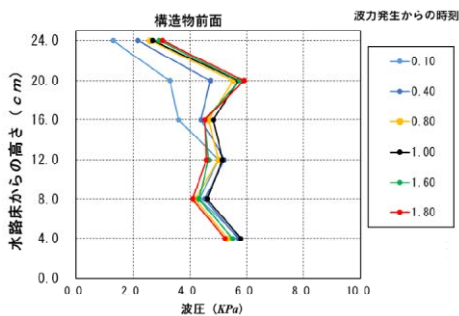
Case-1 緩衝材なし，構造物のみ

図-11 Case-1での最大波圧分布



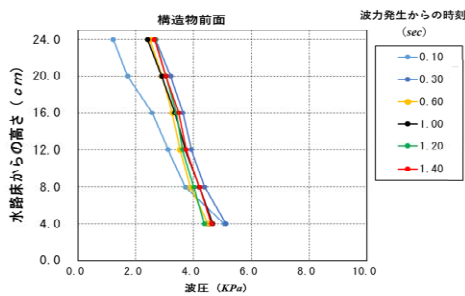
Case-2 緩衝材あり，EPDM 5cm厚，保護板なし

図-12 Case-2での最大波圧分布



Case-12 緩衝材あり，EPDM 5cm厚，保護板あり

図-13 Case-12での最大波圧分布



Case-22 緩衝材あり，EPDM 10cm厚，保護板あり

図-14 Case-22での最大波圧分布

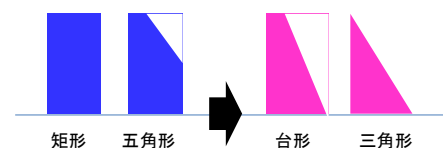
不規則に挙動したためであると考えられる。このように、Case-2では波圧の分布にバラツキが大きかったことから波圧のバラツキを小さくし波圧の分布を平滑化するために、Case-12（緩衝材あり，EPDM 5cm厚，保護板あり）では、緩衝材の表面に薄い保護板（厚さ 0.8mm）を設置して実験を行った。その結果，図-13に示したように，水路床からの高さが 0~16cm の区間でのバラツキは減少し平滑化され，意図したような結果を得ることができた。

Case-22（緩衝材あり，EPDM 10cm厚，保護板あり）では，緩衝材の厚さを 10cm とし保護板を設置して実施した実験結果であり，図-14に示したように水路床からの全区間でバラツキが非常に小さくなり，波圧の分布形状もきれいな三角形分布となった。Case-22での最大波圧は，水路床からの高さが 12cm の位置で約 4.0 kPa となり，Case-1（緩衝材なし）での 6.8 kPa に比して小さく，EPDM スポンジによる波圧の低減効果を示す結果となっている。EPDM スポンジは，柔軟性に富む材料であり，流水が衝突した際は大きく変形するものの，流水が衝突した後に除荷されると原型を戻ることができるので，津波波圧の低減には有用であると考えられる。免波効果を発揮させるために求められる緩衝材の材質，変形特性，通水特性等については，引き続き検討する予定である。

### c) 構造物表面に作用した波圧の分布形状

図-11 と図-14 を比較することにより，緩衝材がない場合は矩形か五角形に類似した分布形状であるものを緩衝材を活用することによって台形か三角形に近い形状に変化させることが可能であることが分かる。

波圧の分布形状を模式的に図-15 に示すが，津波に対する構造物の健全性を評価する場合，津波の波圧分布を台形か三角形として設定するか，あるいは，矩形か五角形として設定するかは，構造物内に発生する応力に影響を及ぼすと考えられるため，緩衝材を活用することによって津波波圧の分布形を変化させることができれば，健全性評価の観点から重要な効果になると考えられる。



- ◆ 緩衝材による波圧の分布形状の変化
  - ・ 緩衝材が無い場合：分布形状は矩形，五角形
  - ・ 緩衝材が有る場合：分布形状は台形，三角形
- ◆ 安全性評価における津波波圧の分布形状の設定
  - ・ 三角形の設定は安全性評価では危険サイドの評価
  - ・ 矩形の分布形状を三角形にできれば構造物にとって有利

図-15 波圧の分布形状の模式

## 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健全性評価では、津波波圧の大きさとともに、その分布形状の設定が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。津波模型実験の結果、地上構造物の周囲に緩衝材を配置することによって、構造物に作用する波圧の大きさを軽減させることが可能なこと、そして、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可能であることを確認することができた。一方、津波に対する構造物の安全性評価で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のかについては未検討の課題が多い。そこで、この課題について検討するために三次元静的 FEM 解析を行った。津波波圧の分布形状と大きさについては、表-2 と図-16 に示したように、①矩形分布・400kPa、①矩形分布・260kPa、①三角形分布・400kPa の 3 ケースを設定して比較解析を行った。津波波圧の大きさについては SPH 法による津波衝突解析の結果<sup>2)</sup>、分布形状については津波模型実験の結果を参考にして設定した。図-16 と図-17 に示した解析モデルは、免震効果の評価（三次元動的解析）と免波効果の評価（三次元静的解析）の両方に使用できるように工夫して作成したものであり、構造物地下部に配置した緩衝材は、三次元動的解析により免震効果を評価する際の主に免震材としての機能を持たせたものである。

### (2) 三次元 FEM 解析モデル

東日本大震災における浄化センターの被害事例を参考に、図-17 に示したように、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、地上部の高さ 13m、地下部の深さ 15.4m、幅 20m、奥行 14m、壁と床の厚さ 0.5m とした。地盤は軟質地盤を仮定し、二層の水平成層地盤とし、幅 76 m、奥行 70 m、深さ 30 m の領域をモデル化した。構造物は、鉄筋コンクリート造とし、基礎地盤（S 波速度 330m/s）に設置されている状況を設定した。地盤と構造物は、共に 8 節点ソリッド要素でモデル化した。解析は、三次元静的 FEM 解析により行い、解析には、汎用解析プログラム ISCEF を使用した。

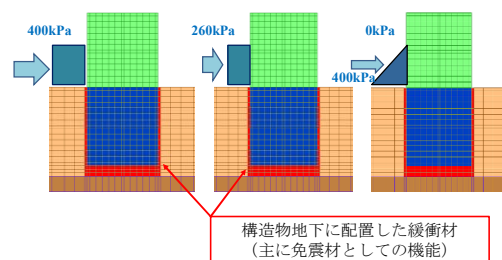
### (3) 解析用物性値

解析に用いた構造物と緩衝材の物性値を表-3に、地盤の物性値を表-4に示す。構造物の回転・並進については、構造物が全体的な変位挙動を示すことを模擬するために、ここでは、構造物のせん断剛性の値は高め

に仮定した。地盤については、表層地盤はS波速度90m/s、基盤はS波速度330m/sを仮定した。

表-2 解析ケース

| 解析ケース | 津波荷重   |        |
|-------|--------|--------|
|       | 波圧分布形状 | 波圧の大きさ |
| 1     | 矩形分布   | 400kPa |
| 2     | 矩形分布   | 260kPa |
| 3     | 三角形分布  | 400kPa |



(1) 矩形分布 波圧400kPa (2) 矩形分布 波圧260kPa (3) 三角形分布 波圧400kPa

図-16 波圧の大きさと分布形状の設定

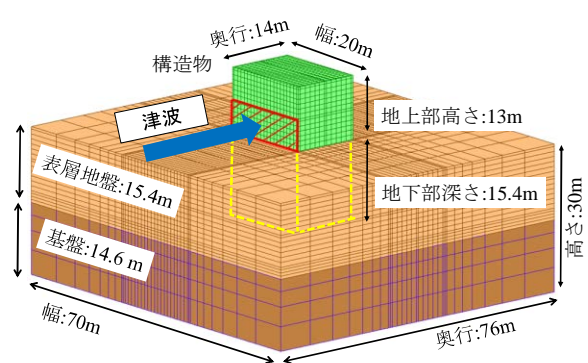


図-17 三次元 FEM 解析モデル (全体図)

表-3 構造物と緩衝材の物性値

| 項目  | せん断剛性<br>N/mm <sup>2</sup> | 密度<br>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-4 地盤の物性値

| 層  | 層厚<br>m | せん断剛性<br>N/mm <sup>2</sup> | S 波速度<br>m/s | 密度<br>t/m <sup>3</sup> | ポアソン比 |
|----|---------|----------------------------|--------------|------------------------|-------|
| 表層 | 15.4    | 16                         | 90           | 2.0                    | 0.40  |
| 基盤 | 14.6    | 240                        | 330          | 2.2                    | 0.35  |

#### (4) 津波波圧の設定

津波波圧の大きさは400kPaと260kPaの2種類を設定し、鉛直方向の分布形状は矩形と三角形分布の2種類を設定した。波圧は、構造物の正面の高さ0mから6.5mの区間、幅20mの矩形の区域に等分布荷重として静的に作用させた。

#### (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内に発生したせん断応力について、矩形分布・400kPa、矩形分布・260kPa、三角形分布・400kPaの時の比較結果を表-5に示す。図-18は、構造物の中央断面におけるせん断応力の出力位置である。構造物に発生したせん断応力は、位置5（構造物側面、G.L.+3.8m、手前側）では、矩形分布・400kPaで2.02N/mm<sup>2</sup>、矩形分布・260kPaで1.32N/mm<sup>2</sup>、三角形分布・400kPaで0.59N/mm<sup>2</sup>となった。同じ矩形分布でも、波圧が400kPaから260kPaになるとせん断は2.02N/mm<sup>2</sup>から1.32N/mm<sup>2</sup>に減少した。波圧の大きさが同じ400kPaであっても、矩形分布では2.02N/mm<sup>2</sup>であった値が三角形分布では0.59N/mm<sup>2</sup>になり約0.29倍にまで低下した。位置8（構造物側面、G.L.+3.80m、奥側）でも、矩形分布・400kPaでは2.18N/mm<sup>2</sup>、矩形分布・260kPaでは1.41N/mm<sup>2</sup>、三角形分布・400kPaでは0.75N/mm<sup>2</sup>となった。構造物に発生するせん断応力は、波圧の大きさと分布形状の設定に応じて直接的に大きな影響を受けることが確認できた。

##### b) 考察

津波に対する構造物の健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設定が大変重要である。波圧の大きさのみならず、波圧の分布形状も構造物内に発生する応力に対して非常に大きな影響を及ぼす。従来、津波に対する矩形もしくは指針・基準類では津波波圧の鉛直方向の分布形状は、静水圧分布に準じて三角形分布が設定されているのが通例である。しかし、津波模型実験で計測された波圧の分布形状は矩形もしくは五角形に類似した形状であり、三次元FEM解析の結果を踏まえると、三角形分布の設定は安全性評価の観点からは危険サイドの条件設定になると考えられる。

## 6. まとめ

沿岸域に位置する地上構造物の防災・減災に資するために免震・免波という考え方に拠る地震・津波対策技術について研究を行い、その一環として、津波と構造物の間に緩衝材を介在させることによって津波波

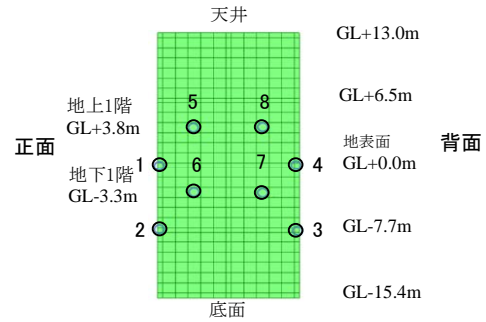


図-18 構造物のせん断応力の出力位置

表-5 波圧の作用方法の相異による構造物内に発生する最大せん断応力の比較

| 出力位置 |                | 波圧の分布形状と大きさ  |              |               |
|------|----------------|--------------|--------------|---------------|
|      |                | 矩形<br>400kPa | 矩形<br>260kPa | 三角形<br>400kPa |
| 1    | 右側面・GL+0.0m・正面 | 0.29         | 0.18         | 0.17          |
| 2    | 右側面・GL-7.7m・正面 | 0.32         | 0.20         | 0.15          |
| 3    | 右側面・GL-7.7m・背面 | 0.36         | 0.25         | 0.19          |
| 4    | 右側面・GL+0.0m・背面 | 0.26         | 0.17         | 0.12          |
| 5    | 右側面・GL+3.8m・手前 | 2.02         | 1.32         | 0.59          |
| 6    | 右側面・GL-3.3m・手前 | 1.58         | 1.05         | 0.92          |
| 7    | 右側面・GL-3.3m・奥  | 1.43         | 0.92         | 0.77          |
| 8    | 右側面・GL+3.8m・奥  | 2.18         | 1.41         | 0.75          |

圧の低減が可能であるかどうかを検討するために津波模型実験を行った。実験は、緩衝材がない場合と緩衝材としてEPDMスポンジを使用した場合について実施し比較検討した。

その結果、緩衝材としてEPDMスポンジを使用した場合は、津波波圧の大きさを低減させる可能性があること、そして、津波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に移行させることが可能であることを示す結果を得ることができた。

また、構造物の健全性評価の観点から波圧の設定方法が構造物内に発生する応力にどのような影響を及ぼすかを検討するために、三次元FEM解析を行った。その結果、波圧の大きさと分布形状は、共に、構造物内に発生する応力に直接的に著しい影響を及ぼすことが確認ができた。特に、波圧の分布形状に関しては、構造物の健全性評価では、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条件設定になるので留意が必要である。正確な健全性評価をめには、津波の波圧の大きさのみならず分布形状を正確に設定することが必要である。

なお、津波模型実験の実施によって、緩衝材の活

用により波圧の分布形状を変化させることが可能であることを確認することができたことは、構造物の健全性評価の観点から用な結果であったと考えられる。津波の影響を低減するために効果的な緩衝材の材料、緩衝材に求められる力学的特性等については、今後も検討を重ねる予定である。

**謝辞**：本研究は、JSPS 科研費 JP21K04603 の助成を受けて実施しました。汎用解析プログラム ISCEF の使用に際しては、センチュリテクノ株式会社の中川弘明様、小沢良明様、安江卓様より多大なるご配慮をいただきました。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の WG1 委員の方々のご協力をいただきました。記して深謝の意を表します。

## REFERENCES

- 1) 竹内幹雄, 有賀義明, 渡辺高志, 川口昇平, 西本安志, 堀宗朗, 有川太郎: 流動性を有するアスファルト系免震材を用いた免震・消波構造の適用性に関する基礎的考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No. 4 (地震工学論文集第 34 巻), I\_235-I\_245, 2015. [Takeuchi, M., Ariga, Y., Watanabe, T., Kawaguchi, S., Nishimoto, Y., Hori, M. and Arikawa, T.: Fundamental study on applicability of isolation structure against earthquake motion and tsunami by utilizing asphaltic viscous fluid, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 71, No. 4, I\_235-I\_245, 2015.]
- 2) 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. [Watanabe, T., Ariga, Y., Nishimoto, Y., Omine, S., Yamanaka, A., Morisaki, H., Sakashita, K. and Ichiyama, M.: Study on the effects of different impact conditions on the reduction of tsunami wave pressure on land structures, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 77, No. 4, I\_659-I\_669, 2021.]
- 3) 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. [Ariga, Y., Sato, Y., Watanabe, T., Nishimoto, Y., CAO, Z., Sakashita, K., Suzuki, K., Arikawa, T., Asai, M. and Hori, M.: Study on safety evaluation of seismic isolation structure for water cycle facility against earthquake motion and tsunami, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 73, No. 4, I\_721-I\_729, 2017.]
- 4) 日本下水道協会: 下水道施設の耐震対策指針と解説, 408p., 2014. [Japan Sewage Works Association: Seismic countermeasure guidelines and commentaries for sewerage facilities, 408p., 2014.]
- 5) 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. [Matsutomi, H., Okada, H., Kubota, T. and Konno, F.: Experiments on the dependency of tsunami load on RC building on the density of tsunami inundation water, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 74, No. 2, I\_265-I\_270, 2018.]
- 6) 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. [Sakakiyama T.: Tsunami inundation flow and tsunami pressure on structures, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 68, No. 2, I\_771-I\_775, 2012.]
- 7) 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. [Takahashi, K., Maeda, Y., Nishihata, T. and Furumaki, D.: Experimental study on influence between tsunami wave direction and wave pressure acting on structures, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 70, No. 2, I\_306-I\_310, 2014.]
- 8) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 小林俊彦, 大田和正: 定常自由表面流中の正角柱に働く流体力, 水工学論文集, 第 46 巻, pp. 827-832, 2002. [Akiyama, J., Shige-da, M., Kobayashi, T. and Oota, K.: Hydrodynamic force exerting on a square pillar in steady free surface shear flows, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol. 46, pp. 827-832, 2002.]
- 9) 有光剛, 大江一也, 川崎浩司: 陸上構造物への作用波圧に及ぼす遡上津波の入射角の影響, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, I\_414-I\_419, 2014. [Arimitsu, T., Ooe, K. and Kawasaki, K.: Effect of incident wave angle on tsunami wave pressure acting on land structure, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol. 70, No. 2, I\_414-I\_419, 2014.]
- 10) 坂本佳子, 坂本義則, 菅付紘一, 原田隆典, 野中哲也: 貯蔵タンクの津波漂流対策についての検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, I\_949-I\_954, 2016. [Sakamoto, Y., Sakamoto, Y., Sugatsuke, K., Harada, T. and Nonaka, T.: Examination of a method of countermeasure for storage tank drifting during tsunami, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 72, No. 2, I\_949-I\_954, 2016.]

## EFFECTS FOR REDUCING TSUNAMI WAVE PRESSURE BY UTILIZING CUSHIONING MATERIALS

Yoshiaki ARIGA, Makoto ICHIYAMA, Takashi WATANABE  
and Yasusi NISHIMOTO

For social infrastructures located in coastal area, it is necessary to realize a safe structure against both strong earthquake motion and tsunami. In this study, for the purpose of developing rational countermeasure technology, we have been conducted the research on the seismic and tsunami isolation structure based on the idea of seismic isolation and wave isolation. As a part of this study, we conducted a tsunami model experiment on the possibility of reducing tsunami wave pressure by using a cushioning material with low rigidity. As a result, it was found that it is possible to reduce the tsunami wave pressure and to advantageously change the distribution shape of tsunami wave pressure by interposing a cushioning material between the tsunami and the structure. Furthermore, as a result of the stress analysis of the structure by 3D FEM analysis, it was confirmed that the stress generated in the structure is greatly affected by the value of the tsunami wave pressure.