混成堤ケーソン港内側に作用する越流津波による波力と転倒防止策に関する研究

中村 友昭¹・峯浦 亮²・澤 祐太郎³・水谷 法美⁴・小竹 康夫⁵

¹正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

²学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

E-mail: kobe27mineura@gmail.com

³学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

E-mail: sut_arouwamp@yahoo.co.jp

⁴フェロー 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

E-mail: mizutani@civil.nagoya-u.ac.jp

⁵正会員 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

E-mail: kotake-yasuo@toyo-const.co.jp

津波越流時に混成堤ケーソンの港内側の面に作用する波力の特性と、津波の越流によるケーソンの転倒を防止する対策の効果を現地スケールの数値解析により考究した。その結果、ケーソンの港内側の面に作用する波力は、港内の水位変動から静水圧を仮定して求めた波力に対して低減する現象がみられ、その低減率は相対越流水深の増加とともに上昇する傾向を確認した。また、この傾向に与えるマウンドの透水性の影響がみられたことから、波力を検討する際におけるマウンドの透水性の重要性を示した。さらに、ケーソンの転倒防止効果を有する上部コンクリートの港内側の形状があることを確認した。このとき、潮位の影響も考慮して発生する渦の規模を非常に小さく抑えられるような形状とすることで、ケーソンの転倒を防げる粘り強い構造となる可能性が示唆された。

Key Words : tsunami, caisson, wave force, permeability, overturning, countermeasure, vortex

1. 緒言

東北地方太平洋沖地震津波での防波堤や防潮堤などの海岸保全施設の被災を受けて、被災機構の解明とそれを踏まえた粘り強い構造の開発が急務とされている。ケーソン式混成堤の被災機構に関しては、有川ら^{1,2)}や小竹ら^{3,4)}などによって、津波が越流する際に、ケーソンの港外側では波圧が静水圧より若干増加し、逆に港内側では静水圧より若干減少することでケーソンに作用する水平力が増大する現象が確認されている。また、この港内側でみられる波圧の増加が抑えられる現象は、ケーソン上を越流した流れの剥離に起因し、発生した渦の渦度の大きさで評価できることが明らかとなっている^{5,6)}。さらに、この被災要因を踏まえて、ケーソンの上部コンクリートの港内側の形状を斜面にする対策やケーソンの港外側に係留索を設置する対策が提案されている⁷⁾。しかし、これらの研究では、津波や潮位などの条件が限られ

ており十分な検討が行われているとは言えない。

本研究では、津波の越流による混成堤ケーソンの転倒現象を対象に検討を行っている小竹ら⁴⁾の水理実験との比較により妥当性が確認されている数値計算モデル⁸⁾を使用して、釜石港湾防波堤の規模を想定して上述の水理実験を現地スケールにした計算を行う。そして、津波、潮位、マウンドの透水性の条件を多様に変化させた数値実験を行うことで、ケーソンの港内側の面に作用する波力の特性と転倒防止策の効果を考究する。

2. 数値計算モデルの概要

数値計算モデル⁸⁾は、メインソルバーと3つのモジュールから構成されている。メインソルバーは、透過性材料の間隙内部の流体を含む非圧縮性粘性流体からなる全気液相の流体運動を可動構造物の運動と地形の変化を考

図-1 計算領域の概略図

慮して解析する連続式と Navier-Stokes 方程式に基づく LES (Large-Eddy Simulation) である。そのメインソルバーには、気液界面を追跡する MARS (Multi-Interface Advection and Reconstruction Solver) に基づく VOF (Volume of Fluid) モジュール、可動構造物を取り扱う体積力型 IB (Immersed Boundary) 法に基づく IB モジュール、掃流砂・浮遊砂輸送による地形変化の計算と浮遊砂濃度分布の解析を行う底質輸送モジュールが流体・構造・地形変化の相互作用を解析できるように Two-Way カップリング手法により組み込まれている。ただし、本論では地形の変化は対象としないことから、底質輸送モジュールは使用しなかった。モデルの詳細は中村・水谷⁸⁾を参照されたい。なお、本現象に対するモデルの妥当性については中村ら⁹⁾によって検証されており、津波による水位、水圧、ケーソンの転倒挙動に関して水理実験結果をよく再現できることが確認されている。

3. ケーソンの港内側の面に作用する波力の特性

(1) 計算条件

釜石港湾防波堤の北堤深部3区の規模を想定して、小竹ら⁴⁾の水理実験を Froude の相似則に基づいて 100 倍した図-1 に示す現地スケールの計算領域を用いて解析を行った。同図に示すように、1/19 勾配の斜面、1/50 勾配の斜面、水平床を順に設定し、その水平床上に約 10 kg/個を想定した中央粒径 $d_{50} = 0.2$ m の捨石からなるマウンド (天端幅 50.0 m, 高さ 33.0 m, 空隙率 0.3) とケーソン (高さ 30.0 m, 幅 16.0 m, 密度 $1.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) を固定した。そして、波高 $H_i = 6.20 \sim 15.00$ m, 周期 $T = 200 \sim 350$ s, 水平床上の静水深 $h = 58.0 \sim 62.0$ m の範囲で変化させた 30 ケースの引き波初動の長周期波を作用させた。このうち、 $H_i = 10.26, 12.60$ m, $T = 200$ s, $h = 60.0$ m の 2 ケースについては、マウンドの中央粒径 d_{50} を、透水性なしを想定した $d_{50} = 0.0$ m から小竹ら⁴⁾の水理実験を現地スケールにした $d_{50} = 4.0$ m までの 7 パターン変化させた。座標軸は、ケーソンの港外側の面を原点とする水平岸向

図-2 ケーソンの港内側の面に作用する波力の低減率 $r_{\max}$ ($d_{50} = 0.2$ m)

き座標を x 軸, $h = 60.0$ m のときの静水面を原点とする鉛直上向き座標を z 軸とした。計算格子は、ケーソンの周辺 ($-17.0 \leq x \leq 34.0$ m, $-37.0 \leq z \leq 13.0$ m) に $1.0 \text{ m} \times 1.0$ m の等間隔格子を、それ以外の領域には不等間隔格子を用いた。透水性に関するパラメータとして、付加質量係数 C_A は -0.04 , 非線形抵抗力係数 C_{D1} は 0.45 , 線形抵抗力係数 C_{D2} は 25.0 を用いた。その他のパラメータと境界条件については中村ら⁹⁾を参照されたい。

(2) 波力の特性

ケーソンの港内側の面に作用する単位法線幅当たりの波力 F_{bn} に関して、中村ら⁹⁾と同様にケーソンから港内側に若干離れた H4 での水位変動から静水圧を仮定して求めた波力を F_{buH4} としたとき、 F_{buH4} の最大値 $F_{buH4}^{\max}$ に対する F_{bn} の最大値 $F_{bn}^{\max}$ の低減率 $r_{\max}$ を

$$r_{\max} = \frac{F_{buH4}^{\max} - F_{bn}^{\max}}{F_{buH4}^{\max}} \times 100 \quad (1)$$

と定義する。なお、 F_{buH4} と F_{bn} には位相に差があることから、それぞれの最大値から $r_{\max}$ を求めた。また、H4 を含む $x \geq 100.0$ m の範囲では水位変動の最大値の分布はほぼ一様であり、 $x \geq 100.0$ m の範囲内であれば H4 の位置が $r_{\max}$ に与える影響は小さいことを確認している。

図-2 に、マウンドの中央粒径 $d_{50} = 0.20$ m のときの $r_{\max}$ と相対越流水深 $(H3_{\max} - h_f) / h_b$ の関係を示す。ここで、 $H3_{\max}$ はケーソンから港外側に若干離れた H3 での水位変

図-3 H4での水位変動 H_4 , H6での水位変動 H_6 , ケーソンの港内側の面に作用する波力 F_{bn} の時間変化に与える周期 T の影響 ($H_i=10.26\text{m}$, $h=60.0\text{m}$, $d_{50}=0.2\text{m}$)

動の最大値, h_f はケーソンの余裕高であり, $(H3_{\max}-h_f)/h_b$ はケーソンの港外側の面で完全反射としたときの越流水深を表す。また, 有川ら²⁾を参考に, ケーソンの下面から H4 での最大水位までの距離 h_b で無次元化した。なお, h_b はケーソンの高さを上限値とした。

周期 $T=200\text{s}$ のとき, 図-2より, 相対越流水深 $(H3_{\max}-h_f)/h_b$ の増加とともに低減率 $r_{\max}$ も増加する傾向が確認できる。上述したように, 波力の低減はケーソン上を越流した流れの剥離に起因し, 発生した渦の渦度の大きさに評価できることが確認されている^{3,9)}。したがって, $(H3_{\max}-h_f)/h_b$ の増加とともに越流の規模が大きくなり, 流れの剥離に伴う圧力の低下も大きくなったことから $r_{\max}$ も増加したと推測され, この $r_{\max}$ の増加は発生した渦の渦度の大きさに評価できると考えられる。また, 図-2より, $(H3_{\max}-h_f)/h_b=0.3$ のとき $r_{\max}$ は5%程度となっており, 軸の定義が若干異なっているものの, 有川ら²⁾の実験スケールの結果との対応が確認できる。ここで, $T=200\text{s}$ の結果に対して近似式を求めると,

$$r_{\max} = 28.6 \frac{H3_{\max} - h_f}{h_b} - 3.6 \quad (2)$$

となる。したがって, ケーソンの港外側と港内側に生じる最大水位が平面2次元計算などから得られれば, 式(2)によりケーソンの港内側の面に作用する波力の低減率 $r_{\max}$ が簡便に推定できる。なお, 図-2より, $(H3_{\max}-h_f)/h_b$ が小さいときは, $r_{\max}$ が負値となっている。具体的には, 式(2)より, $(H3_{\max}-h_f)/h_b$ が0.13を下回ると, $r_{\max} < 0$ となることが分かる。このとき, 越流の規模が小さく, 流れの剥離に伴う圧力の低下も小さかったと推測される。その一方で, ケーソンのすぐ港内側の位置で生じた局所的な水位の上昇の影響を受けたと推測されることから, 上述したように $r_{\max}$ が負になったと考えられる。また, 式(2)は有川ら²⁾や宮田ら⁹⁾の結果から判断すると $(H3_{\max}-$

図-4 ケーソンの港内側の面に作用する波力の低減率 $r_{\max}$ に与えるマウンドの透水性の影響

図-5 ケーソン上部の概略図とケーソンの挙動

$h_f)/h_b > 0.3$ にも適用できると推測されるものの, 式(2)の適用範囲については検討の余地を残している。

また, 図-2より, 波高 H_i や静水深 h が同一の条件でも, 周期 T によって低減率 $r_{\max}$ に若干のばらつきがみられることが分かる。図-3に, H4での水位変動 H_4 , H6での水位変動 H_6 , ケーソンの港内側の面に作用する単位法線当たりの波力 F_{bn} の時間変化に関して, T による比較を例示する。なお, ケーソンのすぐ港外側の H5 の位置での水位変動にゼロアップクロス法を適用して位相を合わせた。図-3より, H_4 , H_6 , F_{bn} の波形に与える T の影響は顕著には認められないことが分かる。ただし, $T=200, 300\text{s}$ のケースでは, F_{bn} が瞬間的に増加する現象が $t/T=0.20\sim0.25$ 付近に確認できる。そのため, それらのケースでは $F_{bn}^{\max}$ が大きくなったことから, 図-2に示すように他のケースと比較して $r_{\max}$ が若干小さくなったと考えられる。図示しないが, 同様の現象は, $H_i=7.8\text{m}$, $h=60.0\text{m}$, $T=250\text{s}$ のケースでも確認できた。この一時的な F_{bn} の増加のために $r_{\max}$ に若干のばらつきがみられるものの, 本研究の範囲では, $r_{\max}$ は T によらず式(2)により概ね評価できると考えられる。

図-4に低減率 $r_{\max}$ に与えるマウンドの透水性の影響を

 図-6 ケーソンの挙動の差異 ($H_i=8.2$ m, $T=200$ s, $h=61.0$ m, $d_{50}=0.2$ m)

示す。同図には、マウンドの中央粒径 $d_{50}=0.2$ mに対する式(2)も同時に示した。図-4より、 d_{50} が大きくなり透水性が上がるにつれて、全体的にプロットが左下へ移動する傾向が確認できる。これは、マウンドの透水性が上がる、港外側のH3での水位変動の最大値 $H_{3\max}$ が小さくなり相対越流水深 $(H_{3\max}-h)/h_b$ が減少するとともに、港内側のH4での水位変動の最大値が大きくなり $r_{\max}$ も減少したためと考えられる。また、越流の規模が小さくなり、流れの剥離に伴う圧力の低下も小さくなったことも影響していると推測される。したがって、波力の評価を行う際には、マウンドの透水性を適切に設定することの重要性が示唆される。ただし、マウンドの透水性が $r_{\max}$ に与える影響を定量的に評価するまでには到っていないことから、さらなる検討が不可欠である。

4. ケーソンの転倒防止策の効果

(1) 計算条件

ケーソンの転倒防止策として、図-5に示すように、中村ら⁷⁾と同様に上部コンクリートの港内側の形状を斜面に変更する対策 (Type A) に加えて、斜面として切り取った部分と同面積の段落ちとする2種類の対策 (Type B, C) を対象とした。そして、それらの対策を講じたケーソンを中央粒径 $d_{50}=0.2$ mの捨石からなるマウンドの上に設置し、波高 $H_i=7.8, 8.2, 8.6$ m, 周期 $T=200$ s, 静水深 $h=59.0, 60.0, 61.0$ mの9パターンの引き波初動の長周期波を作用させた。ただし、上部コンクリートの形状がケーソンの挙動に与える影響を検討するために、初期状態でのケーソンの水中重量が矩形的ケーソンと等しくなるようにケーソンの密度を調整した。また、中村ら⁹⁾においてケーソンの転倒が再現できることが確認されていることから、マウンド天端のケーソン後趾の位置に長さが2格子分、深さが1格子分の窪みを設けるとともに、マウンドとケーソンの静止摩擦係数 μ_k を0.44、動摩擦係数を0.40とした。なお、図-5にはケーソンの転倒の有無も

 図-7 ケーソンに作用する水平力 F_x 、鉛直力 F_z 、最大静止摩擦力の時間変化の差異 (図-6と同ケース)

示したが、詳細は後述する。

(2) ケーソンの挙動

ケーソンの転倒防止策の効果を検討するために、ケーソンを移動可能な状態とした解析を行った。

図-6に、波高 $H_i=8.2$ m, 静水深 $h=61.0$ mのときのケーソンの挙動を例示する。ここで、 ω は反時計回りを正とする渦度である。また、図-7に、ケーソンに作用する単位法線幅当たりの水平力 F_x と鉛直力 F_z の時間変化を示す。ここで、 F_z はケーソンがマウンドから受ける反力を除いた成分である。また、 F_x のグラフには、 $-\mu_k F_z$ から求めた最大静止摩擦力も同時に示した。

図-6より、Type A-61mの場合には対策実施後もケーソンに転倒が生じたものの、Type B-61mの場合にはケーソンの転倒が抑えられたことが分かる。このとき、図-7に示すように、 $t/T=1.3$ の少し前までは、 F_x 、 F_z 、最大静止摩擦力ともに転倒防止策による差は認められない。しかし、その後はType A-61mの方がType B-61mよりも F_z が若干大きく、その影響を受けて最大静止摩擦力が若干小さかったことが分かる。そのために、Type A-61mでは F_x が最大静止摩擦力を上回ったことを確認しており、最終的に図-6(a)に示すようにケーソンが後趾回りに回転し転倒した。その一方で、Type B-61mの場合には、 F_x は最大静止摩擦力に漸近しているものの上回らなかったことを確認しており、そのために図-6(b)に示すようにケーソンに転倒は生じなかった。

以上の結果として、ケーソンの転倒の有無をまとめた

図-8 ケーソンに作用する水平力 F_x が最大となる瞬間の渦度 ω と圧力変動 P の分布 ($H_i = 8.2\text{ m}$, $h = 61.0\text{ m}$; ケーソン固定時)

図-5より、本研究の範囲では、Type B, Type A, Type Cの順に転倒防止効果が高いことが分かる。また、 $H_i = 8.2\text{ m}$ のType Aのうち $h = 61.0\text{ m}$ のときのみ、 $H_i = 8.6\text{ m}$ のType Bのうち $h = 59.0\text{ m}$ のときのみにはケーソンの転倒が生じたことから、波高が同じであっても、Type Aの場合はケーソンの天端から静水面までの高低差が小さくなると、またType BとType Cの場合は上部コンクリートの港内側の水平部から静水面までの高低差が小さくなると、転倒防止策の効果が低下する可能性が示唆される。したがって、上部コンクリートの形状を決定するに際して、潮位の影響も考慮に入れて検討を行う必要性が示唆される。

(3) ケーソンの転倒機構

ケーソンに転倒が生じないように固定し、その固定したケーソンに波高 $H_i = 8.2\text{ m}$ の津波を作用させて、ケーソンの挙動に差異が生じた要因を検討する。

図-8に、ケーソンに作用する水平力 F_x が最大となった瞬間の渦度 ω と圧力変動 P の分布を示す。ケーソンに転倒が生じた場合には、図-8(a)と(b)に示すように、ケーソン上を越流した流れによりケーソンのすぐ港内側に渦が形成されていることが分かる。そのため、ケーソンのすぐ港内側での圧力の上昇が抑えられたことから、ケーソンの港内側の面に作用する冲向きの波力の上昇も抑えられ、ケーソンの転倒に到ったと考えられる。一方、ケーソンに転倒が生じなかった場合には、図-8(c)に示すように、渦は水面に沿って形成されていることが分かる。そのため、ケーソンのすぐ港内側での圧力の上昇と、それに伴うケーソンの港内側の面に作用する冲向きの波力の上昇は上記のケースほどは抑えられていなかったことから、ケーソンの転倒には到らなかったと考えられる。

そこで、この波力の低減は発生した渦の渦度の大きさで評価できることが確認されていることから⁹⁾、ケーソンの港内側の面のうち、上部コンクリートの形状を変更した影響を受けない天端から8.0 m下のCh 9 (図-1(b)参照)の位置に生じる渦度 ω_{Ch9} に着目した。図-9に、 F_x の最大値 F_{max} とその瞬間の ω_{Ch9} の大きさ $|\omega_{Ch9}|$ の関係を示す。

図-9 ケーソンに作用する最大水平力 F_{max} とその瞬間の渦度の大きさ $|\omega_{Ch9}|$ の比較 ($H_i = 8.2\text{ m}$; ケーソン固定時)

図-10 ケーソンに作用する水平力 F_x が最大となる瞬間の渦度 ω の分布 (Type A-61m; $H_i = 8.2\text{ m}$, $h = 61.0\text{ m}$; ケーソン固定時)

ここで、Originalは対策未実施の矩形のケーソンを表す。

図-9より、 $|\omega_{Ch9}|$ が非常に小さいときには F_{max} も小さく抑えられる傾向があり、上部コンクリートの形状を適切に変更することでケーソンの転倒が生じにくくなっていることが分かる。ただし、図-9に示すように、Type A-61mの場合には、 $|\omega_{Ch9}|$ や F_{max} が小さく抑えられているにも関わらず、ケーソンに転倒が生じている。このときの渦度 ω の分布を図-10に示す。同図と図-8の比較より、 ω の分布に関しては、ケーソンに転倒が生じなかった場合(図-8(c))との類似が確認できる。そのため、図-7に示したようにType A-61mとType B-61mで F_x に差は認められなかったと考えられる。その一方で、上述したように、 F_x はType A-61mの方が若干大きく、そのために最大静止摩擦力が若干小さかったことから、 F_x の差は小さいものの、ケーソンの転倒に到っている。

以上より、発生する渦の規模を非常に小さく抑えられるように上部コンクリートの形状を決定することで、ケーソンの転倒を防ぐことができ粘り強い構造となることが示唆される。ただし、ケーソンに作用する鉛直力の差でケーソンの転倒の有無が決まるときには、上部コンク

リートの形状の効果は渦の規模では説明できないことから、この場合の評価には課題を残している。

5. 結論

本研究では、津波越流時にケーソンの港内側の面に作用する波力の特性と、津波の越流によるケーソンの転倒を防止する対策の効果を現地スケールの数値解析により考究した。その結果、得られた結論を以下にまとめる。

1. ケーソンの港内側の面に作用する波力は、ケーソンの港内側の水位変動から静水圧を仮定して求めた波力に対して低減する現象がみられ、その低減率は相対越流水深の増加とともに上昇する傾向を示した。また、その傾向に与える周期の影響は小さいことを確認した。その一方で、マウンドの透水性の影響はみられたことから、波力の評価を行う際にマウンドの透水性を適切に設定することの重要性が示唆された。
2. ケーソンの転倒防止効果を有する上部コンクリートの港内側の形状があることを確認した。ただし、その効果は波高だけではなく潮位の影響も受けることが判明した。また、ケーソンの港内側に生じる渦の規模を非常に小さく抑えられれば、ケーソンに作用する水平力も低減でき、転倒が生じにくくなることを確認した。したがって、潮位の影響も考慮して渦の規模を非常に小さく抑えられるように上部コンクリートの形状を決定することで、ケーソンの転倒を防げる粘り強い構造となることが示唆された。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究(A)（代表：水谷法美）の補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 辰巳大介, 廉 慶善, 高橋研也：釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討—水理特性を中心とした第一報—, 港空研資料, No. 1251, 52 p., 2012.
- 2) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 長谷川 徹, 稲垣茂樹, 佐藤正勝, 下澤 治：東日本大震災における釜石湾口防波堤の被災メカニズムに関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_826-I_830, 2012.
- 3) 小竹康夫, 松村章子, 山野貴司, 金澤 剛, 荒木進歩：天端を越流する津波が防波堤の安定性に与える影響について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. I_766-I_770, 2011.
- 4) 小竹康夫, 荒木進歩, 松村章子：天端を越流する津波が混成堤式防波堤のケーソン部に与える波圧特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp. I_264-I_269, 2012.
- 5) 中村友昭, 安藤康平, 山田裕貴, 水谷法美, 小竹康夫：津波の越流に伴う混成堤ケーソンの挙動とその機構に関する数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_831-I_835, 2012.
- 6) 中村友昭, 安藤康平, 水谷法美, 小竹康夫：津波の越流による混成堤ケーソン岸側での水圧の低下機構に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_389-I_394, 2013.
- 7) 中村友昭, 安藤康平, 水谷法美, 小竹康夫：津波の越流による混成堤ケーソンの転倒防止策に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_906-I_910, 2013.
- 8) 中村友昭, 水谷法美：3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルに基づく遡上津波による陸上構造物周辺の局所洗掘現象に関する数値シミュレーション, 第24回数値流体力学シンポジウム, E10-4, 9 p., 2010.
- 9) 宮田正史, 小竹康夫, 竹信正寛, 中村友昭, 水谷法美, 浅井茂樹：防波堤を越流する津波の水理特性に関する実験的研究, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, 2014, 投稿中.

STUDY ON WAVE FORCE ACTING ON THE HARBOR SIDE OF A CAISSON DURING TSUNAMI OVERFLOW AND COUNTERMEASURES AGAINST THE OVERTURNING OF THE CAISSON

Tomoaki NAKAMURA, Ryo MINEURA, Yutaro SAWA, Norimi MIZUTANI
and Yasuo KOTAKE

Prototype-scale numerical analyses are carried out to investigate wave force acting on the harbor side of a caisson during tsunami overflow and effectiveness of countermeasures against overturning of the caisson. Numerical results show that the wave force acting on the harbor side of the caisson is overestimated by the force calculated from water surface elevation on an assumption of hydrostatic pressure, and its overestimation becomes large with an increase in a relative overflow height. This relationship is found to be affected by the permeability of the rubble mound, suggesting that the permeability of the rubble mound is essential when evaluating the wave force. Furthermore, it is revealed that there are effective configurations of the upper part of the caisson to prevent its overturning motion, and the effectiveness of the change in the configuration can be assessed using the scale of vortices.