津波防御施設としての胸壁天端高 決定手法に関する検討

傳 亮司¹・小竹 康夫²・荒木 進歩³

¹東洋建設株式会社 大阪本店 (〒541-0043 大阪府大阪市中央区高麗橋4-1-1)

E-mail:tsutae-ryoji@toyo-const.co.jp

²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

³正会員 大阪大学大学院 地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail:araki@civil.eng.osaka-u.ac.jp

東北地方太平洋沖地震津波では、胸壁等の陸上部に設置された防潮施設も大きく被災した。従来の津波に対する海岸保全施設の要求性能は、供用年数に応じた確率年による津波波高を設定し、越流がないように天端高さを確保することである。今般の震災を受け、中央防災会議では比較的頻度が高い津波と最大クラスの津波の二つのレベルに分けて防災減災対策を講じる必要性が議論されている。

一方、越流による被害を考慮しコスト面で合理的な天端高を決定する方法も有効であると考えられる。本検討では初期建設費および被災整備費を考慮した年平均費用に着目し、天端高を決定する手法について検討した。その結果、越流率から推定される被災の程度を用い、現地条件に合わせて設定された適切な被災整備費算定式を導入することで、本算定手法の適用可能性を示した。

Key Words : tsunami, lifecyclecost, parapet, crown height, overflow

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波では、湾口部に設けられた津波防波堤や海岸線付近の海岸堤防、また陸上部に設置された胸壁等の海岸保全施設も大きく被災した。中央防災会議では、多重防護の観点から、海岸保全施設等のハード対策に居住地計画や避難対策などソフト対策を適切に組み合わせることの重要性を考慮して、二つのレベルの津波を想定した今後の津波対策を構築する必要性が議論されている¹⁾。

一つは概ね数十年から百数十年に一回程度の頻度で来襲が想定される比較的頻度の高い津波(以下、L1津波と呼ぶ)である。このレベルの津波に対しては、人命・経済活動を守る「防災」の観点から、防潮堤等の海岸保全施設により背後地への浸水を防止する性能が要求される。

もう一つは発生頻度は千年に一回程度と極めて低いが影響が甚大となる最大クラスの津波(以下、L2津波と呼ぶ)である。このレベルの津波に備えて海岸保全施設を整備することは建設費用や海岸の環境・利用に及ぼす影響等から現実的ではない。そのため、人命を守ることを主とした「減災」の観点からソフト面と一体化した対策

が要求されている。

想定津波水位に関しては、①過去に発生した津波の実績津波高さの整理、②シミュレーションによる津波高さの算出、③設計津波の対象津波群の設定、④設計津波水位の設定という手順により、海岸管理者が津波水位を設定する際の指針が示されている²⁾。

一方、臨海地区での産業活動から津波防護の在り方を考えた場合、事業継続計画(BCP:business continuity plan)を策定し、費用対効果を十分に検証したハード対策の立案が望まれる。

本研究では、津波防御施設として胸壁を建設する場合、L1津波から堤内地を防護することは最低限必要な条件とし、それ以上の津波に対してはコスト面で合理的な天端高を決定する方法の提案を目的とした。そして、初期建設費および被災時費用を考慮した、供用期間中の年平均費用に着目し、天端高を決定する手法について検討した。

2. 胸壁天端高決定手法の概要

津波防御施設のライフサイクルコスト算出においては、初期建設費、維持管理費、被災時費用（直接被害費用、間接被害費用）、廃棄に要する費用等、施設の設計供用期間中に発生する全ての費用を見積もる必要がある。しかしながら、本検討で対象とする胸壁に関しては、一般的に維持管理費は初期建設費と比較し非常に小さな値である。また、設計供用期間を過ぎた構造物が直ちに撤去されるわけではないため、初期建設費と被災時費用がライフサイクルコストを構成する主要な因子である。

初期建設費と被災時費用を来襲津波高 $\eta_T(m)$ 、地表面からの胸壁天端高 $h_c(m)$ の関数として、胸壁のライフサイクルコスト $LCC(h_c)$ を式(1)のように定式化した。

$$LCC(h_c) = C_I(h_c) + \int_{h_c}^{\infty} f(\eta_T) \cdot T \cdot C_R(h_c, \eta_T) d\eta_T \quad (1)$$

ここで、 $C_I(h_c)$ は h_c に対する初期建設費、 $C_R(h_c, \eta_T)$ は h_c, η_T に対する被災時費用、 $f(\eta_T)$ は高さ η_T の津波発生の確率密度関数、 $T(\text{year})$ は設計供用期間である。

式(1)の右辺第1項は初期建設費であり、天端高相当の来襲津波を外力とした胸壁の安定計算により算定するものとした。つぎに右辺第2項は被災時費用であるが、この項に含まれる津波発生の確率密度関数を設定するためには、特定の海岸に対して津波が影響を及ぼすと考えられる複数の断層を設定し、その各々に対して実施した津波シミュレーション結果を用いた手順が必要になる。本検討では簡単のため、津波高さと発生間隔が与条件として与えられたものとし、津波高さに対応する被災時費用をその津波の発生間隔の逆数である発生確率を掛けて平均化したものを採用することとした。

また、今次津波により大きく被災した防潮施設のように、供用期間中に設計高さを超える津波が来襲し倒壊した場合と、津波が来襲しても設計高さを超えることが無く被災もしない場合では、背後地防御の機能を有する期間が異なる。そこで供用期間の年平均費用を算出し比較することとした。式(2)に供用期間の年平均費用 $LCC_{1yr}(h_c)$ の算定式を示す。

$$LCC_{1yr}(h_c) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{\eta_T=0}^{\eta_{T2}} \left(\frac{C_I(h_c)}{S(h_c, \eta_T)} + \frac{C_R(h_c, \eta_T)}{R(\eta_T)} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\eta_{T2}(m)$ はL2津波高、 $S(h_c, \eta_T)$ (year)は倒壊を考慮した基準期間、 $R(\eta_T)$ (year)は高さ η_T の津波の発生間隔である。また本検討では津波高さを離散的に与えており、 M は場合分けした津波高さの個数である。倒壊を考慮した基準期間 $S(h_c, \eta_T)$ とは、対象とする津波の発生間隔が設計供用期間より短く、かつ津波が胸壁を越流する場合は津波の発生間隔とし、それ以外の場合は供用期間とする。これにより、初期建設費の1年間あたりの負担額を算出することができる。

一般にライフサイクルコストを算出する際、維持管理

図-1 天端高決定フロー

費用等将来に発生する費用は、社会的割引率を乗じて現在価値に換算する手法が用いられる。しかし本検討では簡単のため考慮していない。式(2)により年平均費用を算出し、天端高を決定するフローを図-1に示す。

3. 年平均費用の算定

(1) 来襲津波の設定

来襲津波の想定については、海岸管理者が設定する津波水位(L1津波、L2津波)とすべきであるが、今般の震災後、想定津波に関しては各研究機関で活発な議論が行われているところである。例えば、近い将来にその発生が危惧される南海トラフで発生する巨大地震による津波シミュレーション結果が南海トラフの巨大地震モデル検討会により示されている³⁾。本検討では算定手法の妥当性の検証を目的としているため、特定の海岸におけるモデルケースは検討せず、L1津波として2mの津波が100年に一度、L2津波として6mの津波が1000年に一度とする条件が与えられたと仮定する。

津波来襲の確率分布を適切に与えるためには、超過確率等を用いた議論ができることが望ましいが、現在の技術では極めて困難と言わざるを得ない。また海岸ごとに来襲する津波の特性が異なることから、汎用的な議論は難しい。そこで特定の海岸に対して津波が影響を及ぼすと考えられる複数の断層を設定し、その各々に対して実施した津波シミュレーション結果を用いた手順が必要になる。しかし本検討では、特定の海岸におけるモデルケースの検討が目的ではないため、確率分布の定式化の

図-2 津波高さと発生間隔の分布

違いによる影響の考察を目的として、指数、累乗、および線形で近似した確率分布を用いることとした。近似式に基づく津波高さと発生間隔の関係を図-2に示す。図の横軸は津波高、縦軸は対応する津波高を有する津波の発生間隔である。津波高が2mから6mの範囲では、線形近似の場合に発生間隔が一番長く、発生確率が一番低い設定となっている。

(2) 初期建設費の検討

a) 胸壁構造諸元

本検討で対象とする胸壁は、海岸線より陸側に離れた位置に設置されるもので、従来より、海岸保全施設として津波による浸水を防止する機能を有する施設と位置付けられてきた。したがって、設計供用年数に応じた確率年の津波高さを上回る天端高さを有し、津波波力に対する安定性を確保するように設計が行われてきた。

L2津波に対してはハード、ソフト両面の対策を講じる方針であることから、これらの津波に対しては越流を許容することとなる。設計値以上の外力に対しても構造物の安全性・修復性を確保すべく粘り強い構造が議論されているところではあるが、本検討では越流津波に対する粘り強さは考慮せず、簡単のため越流に対する安全率も1とした。すなわち、初期建設費を算定するための胸壁諸元は、胸壁天端までの津波高さに対して安定を確保するように決定した。

胸壁の代表的な構造形式は、表-1の通り4種類に分類される⁴⁾。これらから現地の地盤条件や背後地の土地利用計画により適切な構造形式が選択されるものであるが、本検討では単塊型重力式胸壁を対象として検討を行う。構造諸元の決定に対する外力条件としては津波を想定する。津波による波力が構造物に与える影響は未だ不明な点が多い。そのため一般的には、津波の周期が数十分と長いことから、天端を越流しない津波に対しては、水位上昇による静水圧を用いることが多い⁹⁾。本検討においても、津波による外力は静水圧とする。

図-3の胸壁構造図において、滑動および転倒による胸壁の安定計算を行った。概算費用算出のため、滑動、転

表-1 構造形式による胸壁の分類

堤体型による分類	支持形式による分類
単塊型	重力式
	杭式・鋼矢板式
L型・逆T型	重力式
	杭式・鋼矢板式

図-3 胸壁構造図

倒ともに式(3)により算定される安全率1.2以上を満たす断面の内、断面積が最小となるよう構造諸元を設定した。

$$F_s = \frac{\mu \times (W - F - P_u)}{P_w + P_a - P_p} \quad (3a)$$

$$F_o = \frac{W \cdot x - F \cdot x - P_u \cdot x}{P_w \cdot y + P_a \cdot y - P_p \cdot y} \quad (3b)$$

ここで、 F_s は滑動安全率、 F_o は転倒安全率、 μ は底面摩擦係数 ($\tan 30^\circ$ とする)、 $W(\text{kN})$ は堤体重量、 $F(\text{kN})$ は堤体に作用する浮力、 $P_w(\text{kN})$ は津波による静水圧の合力、 $P_a(\text{kN})$ は津波による揚圧力の合力、 $P_u(\text{kN})$ は主働土圧の合力、 $P_p(\text{kN})$ は受働土圧の合力、 $x(\text{m})$ は抵抗モーメントの腕の長さ、 $y(\text{m})$ は転倒モーメントの腕の長さである。

b) 初期建設費の算出

初期建設費の算定にあたり、直接工事費の工種ごとの施工単価は、一般的な港湾工事の金額⁹⁾を算定した。また、間接工事費は一律直接工事費の4割と設定した。図-4に胸壁高さと初期建設費の関係を示す。図の横軸は胸

図-4 胸壁高さと初期建設費

壁高さ、縦軸は建設費用であり、建設費用は胸壁高さが高くなるほど単調に増加する。またこの初期建設費は、胸壁高さに相当する津波が来襲した場合に、その規模の来襲津波を防ぐためのハード対策費と捉えることができる。

(3) 被災時費用の検討

a) 被災整備費

津波により被災時に発生する費用は、2種類に大別できる。一つは直接被害費用であり、被災状況により構造物の補修・撤去、洗掘箇所の整備等に要する費用である。もう一つは間接被害費用であり、背後地の経済活動に影響を及ぼすことにより発生する。

間接被害費用は、適用する場所における背後地の利用状況から算出した資産額と津波による被害率を乗じることにより算定できる⁷⁾。しかし、胸壁によって防御される背後地は場所ごとに利用状況が異なり、汎用的なモデルを構築することが困難である。一方、地震による間接被害費用に関しては、柴崎ら⁸⁾が行った重力式岸壁に対する研究があり、間接被害費用は直接被害費用の1～8倍程度であるとされている。本検討は、手法の検討を目的とし、特定モデルを対象としていないため、資産額の算出は困難である。そのため、間接被害費用の算定は対象としないものとする。ただし、供用期間中のコスト算出における間接被害額の影響は無視することができない。そこで柴崎ら⁸⁾を参考に、つぎに述べる被災整備費に含まれる係数を変化させることによって、間接被害費用の影響検討を試みた。そこで被災時費用としては建設地点の局所的整備費（被災整備費）と定義し、式(4)を用いて算定するものとした。以下では、被災時費用を被災整備費と称する。

$$C_R(h_c, \eta_T) = \alpha \times \beta \times EC \times OF \quad (4)$$

ここで、 $C_R(h_c, \eta_T)$ は h_c 、 η_T に対する被災整備費、 α は相当胸壁建設費に乘じる倍率、 β は災害時の建設物価上昇係数、 EC は相当胸壁建設費、 OF は津波越流率である。各変数および係数に対する定義は後述する。

図-5 越流率概念図

b) 津波越流率

津波による堤体および背後地の被害は、来襲津波が胸壁天端を超えて堤内に越流したときに初めて発生すると仮定する。胸壁が無い場合の津波運動エネルギーに対する、胸壁天端高さより上側の越流水塊の位置エネルギーの比を越流率と定義し、津波越流による被害額は越流率に比例すると考える。図-5に越流率の概念図、式(5)に越流率の算定式を示す。なお、越流率算定に伴う流量等の算定値はすべて単位奥行き当りの値とする。

$$OF = E_o / E_T \quad (5a)$$

$$E_o = Q_o \times g \times h_o, \quad E_T = 1/2 \times Q_T \times v^2 \quad (5b)$$

$$Q_o = \Delta h \times v, \quad \Delta h = h - h_c, \quad h_o = \Delta h / 2 + h_c \quad (5c)$$

$$Q_T = h \times v, \quad v = \sqrt{g \times h} \quad (5d)$$

ここで、 E_o は胸壁がある場合に越流する津波の位置エネルギー、 E_T は胸壁がない場合の津波の運動エネルギー、 Q_o (m^2/s)は胸壁がある場合の越流量、 g (m/s^2)は重力加速度、 v (m/s)は胸壁がある場合の越流流速であり、胸壁が無い場合の陸上での津波流速に等しいと考える。また、 h_o (m)は胸壁高さより上側の越流厚中央の高さ、 Δh (m)は越流厚、 h_c (m)は胸壁高さ、 Q_T (m^2/s)は胸壁がない場合の流入量、 h (m)は浸水深さである。またここでは、津波高さを地表面を基準とした水位上昇量と定義し、 $h = \eta_T$ である。

図-6には、胸壁高ごとの津波高と越流率の関係を示す。この図に示される通り、来襲津波高さが胸壁高さを超えるまでは越流率は0であり、津波高の増大とともに1に漸近していくことが分かる。

本検討で導入した越流率の定式化は仮定の段階であり、今後は、水理模型実験や数値解析等により越流率の妥当性を検証する必要がある。

c) 相当胸壁建設費

本来であれば、適用する現地条件に基づき胸壁が無い場合の被害程度を想定し、それに対する費用を見積もる

図-6 津波高さと越流率

必要がある。

一方で、来襲津波高相当の胸壁があれば被害を防ぐことができるとの観点から、胸壁が無い場合の被害額に対応する費用として、来襲津波を防ぐためのハード対策費である相当胸壁建設費を定義することができる。そこで相当胸壁建設費を来襲津波の被害規模を金額に換算する指標と考え、その算定は初期建設費の算定に準じた。

d) 相当胸壁建設費に乗じる倍率

α は来襲津波の規模に対応する金額である相当胸壁建設費から越流率を用いて被災整備費を算定する倍率に相当する。本検討では背後地被害額等の間接被害費用の算定を対象外としているが、この値を変化させることにより被災整備費の算定額に与える影響を検討することが可能となる。すなわち、 α の大小により模擬的に背後地の間接被害費用の大小を表すものとした。

e) 災害時の建設物価上昇係数

大規模な災害発生により復旧・復興工事を行う場合、通常時に比べ建設工事に要する費用の上昇が考えられる。例えば、平成23年3月以降の東北地方の建設物価は地震発生前と比べて3～5%程度上昇しており⁹⁾、今後さらに上昇傾向にある。これらの価格傾向を反映させるため、災害時の建設物価上昇度を示す係数 β を導入するものとする。 β の算定方法は式(6)で定義する。

$$\beta = 1 + 0.10 \times (\eta_T / \eta_{T2})^2 \quad (6)$$

(4) 年平均費用の算定

前節までの手法を用いることにより、ある胸壁高さに対する供用期間中の年間費用を見積もることができる。

図-7 指数近似, $\alpha=10$ の場合の来襲津波高と年間費用

図-8 指数近似, $\alpha=10$ の場合の胸壁天端高と年平均費用

ここで設計供用期間は50年と設定する。図-7には算定結果の一例として、3mの胸壁高に対して、確率分布を指数近似とし、 $\alpha=10$ の場合の来襲津波高と年間費用の関係を示す。この図に示す通り、来襲津波高さが胸壁天端高以下の場合、年間費用は一定である。これは被災整備費が発生せず、初期建設費を供用期間で除した値となっているためである。一方、胸壁天端高を超える津波については、発生間隔に応じた被災整備費が加算されている。各津波高さに対する年間費用を合計し、場合分けした津波の数で平均化したものを胸壁高に対する期待年平均費用として図-8に示す。この図は確率分布が指数近似、 $\alpha=10$ の場合であり、胸壁天端高3.0mで極小値を示すことから、コスト面で合理的な天端高は3mと決定される。

つぎに図-9には α を変化させた場合の年平均費用の変化傾向を示す。この図から、 α の値が大きく、間接被害費用の影響が大きいと仮定するほど、L1津波対応の天端高さに近い胸壁では年平均費用が増大し、合理的な天端高さがL2津波対応の天端高さに近づく傾向にあることが分かる。

また図-10は確率分布の近似式および α を変化させた場合の年平均費用分布の変化を示したものである。横軸は

図-9 α の変化と年平均費用 (指数近似)

図-10 確率分布と α を変化させた場合の年平均費用分布

L2津波の津波高に対する胸壁高さ、縦軸はL2津波対応の胸壁を建設した場合に対する供用期間中の年平均費用である。この図から、確率分布の与え方によって年平均費用の分布が異なり、特に α の値が大きいほどその影響が顕著であることが分かる。 $\alpha=10$ の場合を例にとると、年平均費用はL2津波高に対する胸壁高が2/3以上では確率分布の違いによる差は小さく、1/3では13%程度の開きが生じる。一方、最適胸壁高はL2津波の津波高6mに対して指数近似で3.0m、累乗近似で2.5m、線形近似で2.0mとなり、確率分布が算定結果に大きく影響を与えることが分かる。

前述の通り、津波来襲確率分布の汎用的な議論は難しいことから、ここでは3種類の分布曲線をもとに検討した。特定の海岸をモデルとした検討においては、確率分布の与え方によってコスト面で合理的な胸壁高が異なることに留意が必要である。

4. まとめ

初期建設費および被災整備費を考慮した供用期間中の年平均費用に着目し、天端高を決定する手法を提案した。このうち被災時費用として越流率から推定される被災整備費を直接被害費用を基に算出し、さらに間接被害費用の影響についても考察した。適用にあたっては、現地条件に合わせて設定された適切な被災整備費算定式を導入することが不可欠であるが、算定例から本算定手法の適用可能性を示した。また津波発生の確率分布を3種類の近似式で与えたところ、年平均費用や最適胸壁高の算定結果が確率分布により異なることから、確率分布の与え方の重要性を指摘した。地震や津波の発生確率については、今般の大震災以降一般市民からも特に注目されている内容であるが、現在の技術では定式化が難しい。そこ

で本手法を用いることで、確率分布の影響を可視化し、当事者間の合意形成の一助とすることが期待できる。

このように本算定手法はコスト面で合理的な天端高決定を行うための有効な支援手法であると考えられる。しかし実用化するためには改善すべき項目も残っている。今後は越流率定式化の妥当性検証とともに、モデルケースを設定し背後地の被害額も考慮した検討が必要である。

参考文献

- 1) 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会：第 28 回中央防災会議報告資料 1-1, http://www.bousai.go.jp/chubou/28/28_shiryo1-1.pdf, 2011.
- 2) 海岸における津波対策検討委員会：平成 23 年東北地方太平洋沖及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方, http://mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000429.html, 2011.
- 3) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震による深度分布・津波高について, http://www.bousai.go.jp/chubou/nankai_though/1st_report.pdf および http://www.bousai.go.jp/chubou/nankai_though/kanmatsu_shiryou.pdf, 2012.
- 4) 海岸保全施設技術研究会：海岸保全施設の技術上の基準・同解説, pp3-73, 2004.
- 5) 土木学会：海岸施設設計便覧, pp423, 2000.
- 6) 日本港湾協会：港湾土木請負工事積算基準, 2011.
- 7) 農林水産省農村振興局, 農林水産省水産庁, 国土交通省河川局, 国土交通省港湾局：海岸事業の費用便益分析指針（改定版）, pp49-53, 2004.
- 8) 柴崎隆一, 森星陽一, 渡部富博, 安間清：貨物輸送費用も考慮した港湾施設の耐震設計における経評価手法の構築, 国総研資料, No.125, 2003.
- 9) .国土交通省総合政策局：建設工事デフレーター <http://www.mlit.go.jp/toukeijouhou/chojou/def.htm>, 2012.

PROPOSAL OF METHOD OF DETERMINING CROWN HEIGHT OF PARAPET AGAINST TSUNAMI

Ryoji TSUTAE, Yasuo KOTAKE, and Susumu ARAKI

The 2011 off the Pacific coast Tohoku Earthquake Tsunami caused serious damages to coastal protection facilities constructed on the land. In the present design for coastal protection facilities against tsunamis, the crown heights have to be designed in order to prevent the overflow by the tsunami whose return period is equal to the designed service lifetime of the facilities.

On the other hand, more reasonable crown heights can be designed on the basis of the amount of damage by tsunami overflow. In this study, the method of determining the crown heights of parapets against tsunami is proposed in which the initial construction cost and the amount of damage are estimated. The applicability of the proposed method is discussed by introducing the index to express the extent of the damage and the appropriate estimate of the amount of damage.