

北海道の港湾における防波堤の耐津波性能の検証

港湾空港部 港湾建設課 ○掛水 則秀
岩田 真

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により引き起こされた津波は、東北地方の太平洋沿岸を中心に甚大な被害をもたらした。港湾においても防波堤をはじめ多くの施設が被災し、機能が一時全面的に停止した。防波堤は荒天時等の港湾内水域の静穏性を保つことを目的として建設されているが、津波来襲時には背後地域への到達時間の遅延や浸水高・破壊威力の低減効果が期待される。北海道の太平洋沿岸は日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震防災対策推進地域として指定されるなど、近い将来に津波の来襲が懸念されている。本報では、防波堤の耐津波性能の検証を行い、簡易的な評価法について報告を行う。

キーワード：防災、東日本大震災、防波堤、耐津波性能

1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により引き起こされた津波は、東日本の広い範囲に襲来し、東北地方の太平洋沿岸を中心に甚大な被害をもたらした。特に人的被害については、そのほとんどが津波によるものと考えられる。津波に起因する港湾施設の被害は、防波堤や防潮堤が多いが、岸壁や護岸では地震により損傷した箇所がその後の津波の来襲によって決定的な被害に拡大したと考えられる事例もある。岸壁上の荷役機械は地震による倒壊を免れたものも津波による浸水で電気系統が損傷し稼働不能となった。航路、泊地への車やコンテナ等の流出は船舶入港の妨げとなった。

港湾の背後では地域の生活や就労の場が形成され、人口や財産が密集している。また、港湾は島国である我が国の社会経済活動において重要な役割を担っており、今回のような大規模災害の発生後もその機能を維持し、加えて、迅速な復旧・復興支援の拠点としての機能が求められる。

通常、防波堤は荒天時等の港湾内水域の静穏性を保つことを目的として建設されており、津波に対する照査は行われていないが、津波来襲時には背後地域への到達時間の遅延や浸水高・破壊威力の低減効果が期待される。繰り返し押し寄せる津波に対し、防波堤が壊滅的な倒壊に至らずに粘り強く機能を保持することが背後地域の減災や港湾機能の継続のために重要な意味を持つ。

北海道の太平洋沿岸は、地震常襲地域であり、日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震防災対策推進地域として指定されるなど、近い将来に津波の来襲が懸念されている。本報では、北海道の太平洋沿岸を対象に防波堤の耐津波性能の検証を行い、簡易的な評価法について報告を行う。

2. 津波による防波堤の被災事例と被災パターン

東北地方太平洋沖地震において特に被害の大きかった三陸沿岸は、その地形的な特徴からこれまでも幾度の津波被害を経験している。こうした背景から、岩手県釜石港では、釜石湾沿岸を津波から守るための防波堤が建設された。釜石湾の湾口に位置し、北堤990m、南堤670m、開口部300mからなる世界最大水深に設置された防波堤である（写真-1）。



写真-1 釜石港湾口防波堤¹⁾



写真-2 被災状況(釜石港湾口防波堤 北堤)²⁾

東北地方太平洋沖地震による津波において、釜石港湾口防波堤は結果としておよそ半壊するに至ったが、湾内沿岸への津波到達時間を6分遅延させ、津波高、流速を約半減させる効果があったと推計されている。

東北地方整備局による被災状況調査の結果を図-1及び図-2に示す。南堤ではケーソン22函のうち、最深部（開口部側）から10函は原形を留めたが、11函目が若干傾斜し、12函目以降浅部側はほぼ全函が基礎マウンドから滑落した。開口部はほぼ全函、北堤では深部の約3割、浅部の約5割のケーソンが滑落した。

独立行政法人港湾空港技術研究所を中心として、釜石港湾口防波堤などの今回の津波により被災した防波堤の被災要因の検証が進められている。津波による防波堤の被災パターンは次のとおり考えられている（図-3）。

(1) 水頭差による被災

防波堤によって津波が堰き止められたことにより、防波堤を境界として港内外で水位に変化が生じる。この水頭差により大きな水圧が発生し、防波堤が滑動し被災が生じる。

(2) 水流による被災

防波堤の目地部や港口付近では防波堤に遮られた津波が集中し、非常に速い水流が発生する。この水流により基礎マウンドが洗掘され、防波堤が支持力を失って滑動または転倒し被災が生じる。釜石港湾口防波堤における開口部の被災はこのパターンに該当すると考えられる。

(3) 波面の衝突力による被災

海底勾配の緩やかな遠浅の地形では、津波が海岸に向けて伝播するとともに波形が著しく変形して段波状となる。段波津波が発生した場合、段波津波に変形する前と比べ波圧強度が大きくなり、その衝突力によって滑動または転倒し被災が生じる。

3. 防波堤の耐津波性能の検証法

東日本大震災による防波堤の被災を受けて、津波波力の算定方法の再検討が進められている（図-4）。津波の越流の有無や地形条件（段波の発生有無）によって、波力の算定方法が異なる。図-5に各算定式における波圧作用のイメージ図を示す。

(1) 谷本式

谷本式³⁾は、津波の波圧強度の算定に多く用いられてきたが、越流を想定したものではないことから、越流が想定される場合には、次項の最大水位差と比較し、厳しい条件となる算定式を用いる。

$$\eta^* = 3.0a_i \quad (1a)$$

$$P_l = 2.2\rho_o ga_i \quad (1b)$$

$$P_u = P_l \quad (1c)$$

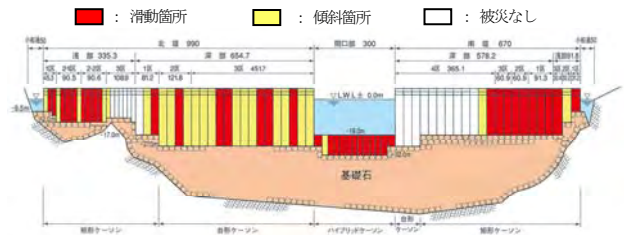


図-1 釜石港湾口防波堤 縦断面図

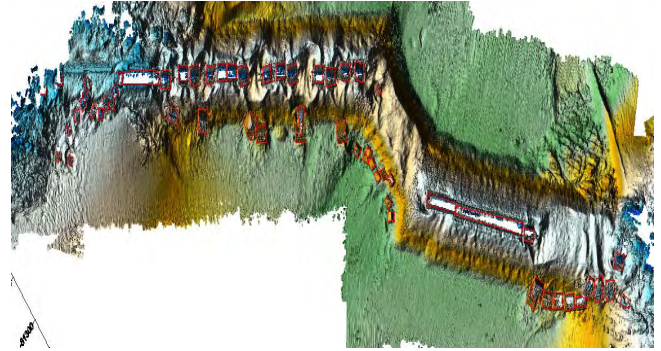
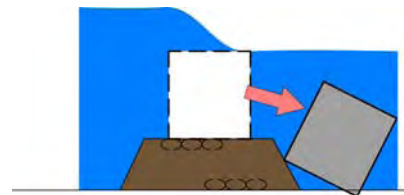
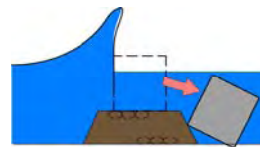


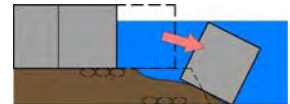
図-2 ナローマルチビームによる 被災状況



(1) 水頭差による被災



(2) 波面の衝突力による被災



(3) 水流による被災

図-3 津波による 被災パターン

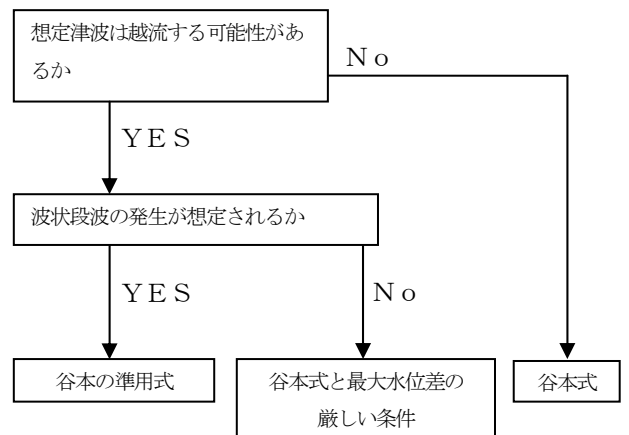


図-4 津波波力の算定方法案

ここに、

- η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
- a_i : 静水面からの津波高さ (m)
- $\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)
- P_l : 静水面における波圧強度 (kN/m²)
- P_u : 前面下端における揚圧力 (kN/m²)

ただし、シミュレーションにより算出した津波高さを
用いる場合、入射波と反射波の重複波となっていること
から、津波高さ a_i はシミュレーション結果の1/2の値を
用いる。

(2) 最大水位差

津波の越流が想定される場合、防波堤背後の水位は上
部工天端まで上昇している可能性がある。これにより、
防波堤全体に浮力が発生し、滑動することが考えられる。

$$P_l = \rho_0 g \Delta \eta \quad (2a)$$

ここに、

- $\Delta \eta$: 水位上昇後の水面からの波圧作用高さ (m)
- $\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)
- P_l : 静水面における波圧強度 (kN/m²)

(3) 谷本の準用式

入射津波高さが水深の30%以上（シミュレーション等
による津波高さが水深の60%以上）で、かつ海底勾配が
1/100以下程度の遠浅の場合、波状段波が発生が想定さ
れる。このような条件においては谷本式における波圧強
度算定式の係数を割り増しする（2.2→3.0）。なお、本
報では、便宜上の谷本の準用式と称する。

$$\eta^* = 3.0a_i \quad (3a)$$

$$P_l = 3.0\rho_0 g a_i \quad (3b)$$

$$P_u = P_l \quad (3c)$$

ここに、

- η^* : 静水面上の波圧作用高さ (m)
- a_i : 静水面からの津波高さの1/2の値 (m)
- $\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)
- P_l : 静水面における波圧強度 (kN/m²)
- P_u : 前面下端における揚圧力 (kN/m²)

ただし、シミュレーションにより算出した津波高さを
用いる場合、入射波と反射波の重複波となっていること
から、津波高さ a_i はシミュレーション結果の1/2の値を
用いる。

4. 北海道の防波堤の耐津波性能の検証

3. で示した津波波力の算定方法を用いて、北海道太平洋
沿岸の第1線防波堤を対象に耐津波性能の検証を行う。
なお、本来は、それぞれの防波堤位置において想定され
る津波高をもとに安定性の検討を行うが、現在、中央防

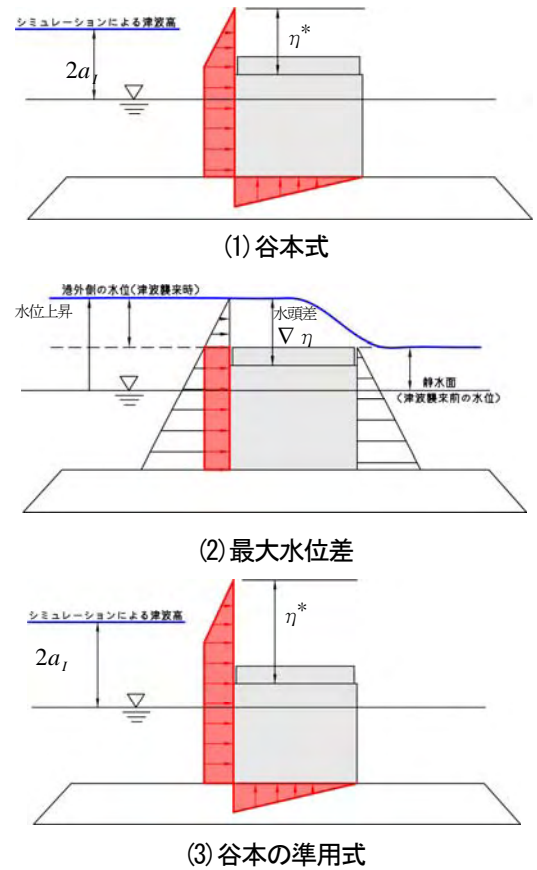


図-5 算定式の波圧分布図

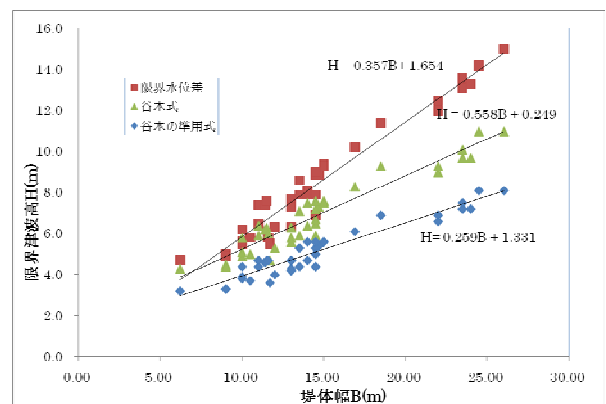


図-6 堤体幅と限界津波高（胸壁タイプ）

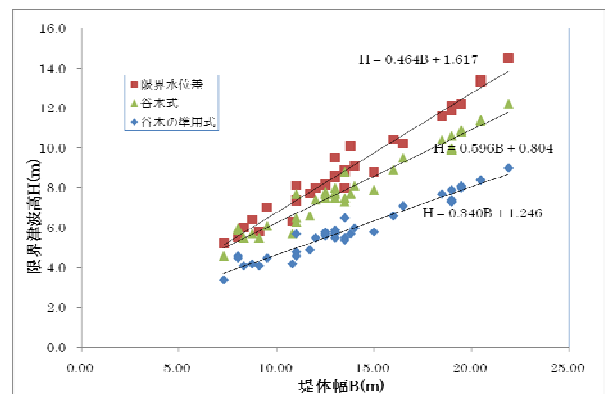


図-7 堤体幅と限界津波高（全断面タイプ）

災会議等において想定津波高の見直しが行われているところである。ここでは、算定式を逆算することにより、各防波堤が耐えうる限界の津波高（以下、限界津波高）を算出する。図-7及び図-8に胸壁タイプと全断面タイプの構造形式ごとに防波堤堤体幅と限界津波高の関係を示す。当然のことながら、堤体幅に比例して限界津波高が大きくなる。

(1)限界津波高の簡易的算出法

防波堤堤体幅と限界津波高の関係から、次式により簡易的に限界津波高を算出することが出来る。

1) 胸壁タイプ

$$\text{谷本式} \quad H = 0.357B + 1.654 \quad (4a)$$

$$\text{最大水位差} \quad H = 0.558B + 0.249 \quad (4b)$$

$$\text{谷本の準用式} \quad H = 0.259B + 1.331 \quad (4c)$$

ここに、

B : 防波堤堤体幅 (m)

H : 限界津波高さ (m)

2) 全断面タイプ

$$\text{谷本式} \quad H = 0.464B + 1.617 \quad (5a)$$

$$\text{最大水位差} \quad H = 0.596B + 0.804 \quad (5b)$$

$$\text{谷本の準用式} \quad H = 0.340B + 1.246 \quad (5c)$$

ここに、

B : 防波堤堤体幅 (m)

H : 限界津波高さ (m)

ただし、背後盛石がある場合は滑動抵抗力が増加するため、上記の式は用いることが出来ないので注意が必要である。

(2)東日本大震災における被災事例との比較

防波堤の設計波は一般的に水深が深くなるにつれて大きくなる傾向がある。防波堤の堤体幅は設計波に比例して広くなることから、防波堤の耐津波性能は、水深が浅い箇所と比べ、深い箇所が有利となる。これは、釜石港湾口防波堤における深部と浅部の被災状況と概ね合致する。

(3)谷本式と最大水位差の関係

津波波力の算定方法において、越流は想定されるが波状段波は想定されない場合、谷本式と最大水位差を比較し、厳しい条件となる算定式を用いることとなっている。防波堤堤体幅と限界津波高の関係においては、防波堤堤体幅が胸壁タイプでは7m程度、全断面タイプでは6m程度を越えると谷本式による算定方法が厳しい条件となる。

(4)消波ブロックによる津波の減衰効果

消波工の天端が直立壁の天端と同程度であって、波の作用に対し消波ブロックの安定が十分に確保されるとき、

合田の準用式を用いて防波堤の構造検討を行っている。この場合、直立堤に比べ、消波ブロック被覆堤に作用する波圧は低減されることから、防波堤の堤体幅は小さくなる。しかし、津波は、非常に周期の長い波であることから、消波ブロックによる波圧の減衰効果を見込むことができない。このことから、耐津波性能において、消波ブロック被覆堤は混成堤に比べ不利となる。

6. まとめ

津波波力の算定方法を基に、北海道の太平洋沿岸地域を対象に防波堤の耐津波性能の検討をおこなった結果、以下のことが明らかとなった。

(1)限界津波高の簡易算出法

胸壁タイプと全断面タイプの構造形式ごとに、防波堤堤体幅を用いて、簡易的に限界津波高を算出できることがわかった。

(2) 限界津波高の算出式

胸壁タイプで防波堤堤体幅が7m、全断面タイプで防波堤堤体幅が6mを越えるとき、段波が発生しない場合は谷本式による検討、段波が発生する場合は谷本の準用式による検討となることがわかった。

(3) 消波ブロックによる耐津波性能の検証

消波ブロック被覆堤の場合、消波ブロックによる波圧低減効果によって堤体幅を小さくすることが出来る。しかし、消波ブロックは津波に対して波圧低減効果を期待できないことから、耐津波性能に対しては不利となる。

7. 今後の課題

(1) 簡易算出法の適用範囲

本報は、北海道太平洋沿岸を対象に耐津波性能の検証を行った。他の沿岸域においても同様の算出法が適用可能か検証が必要である。

(2)水流による被災の評価方法の確立

津波により発生した水流における被災のメカニズムは不明な点が多く、評価方法が確立されていない。防波堤の堤頭部では、水流が主な要因となることがあるため、評価方法の確立が必要である。

(3)粘り強い構造の確立

繰り返し押し寄せる津波に対し、防波堤が壊滅的な倒壊に至らずに粘り強く機能を保持することが今後求められている。限界津波高を想定津波高を超えた場合、背後盛石等により抵抗を増す方法が考えられるが、津波の水流や段波に対する効果検証や照査方法の確立が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省 東北地方整備局 釜石港湾事務所（ホームページ）：<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/kamaishi/port/km04.html>
- 2) 独立行政法人：港湾空港技術研究所資料 NO. 1231.
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説