

防波堤の耐津波設計ガイドライン（案）と設計実務における簡易照査手法について

高松港湾空港技術調査事務所

建設管理官 竹田 晃

1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東日本大震災では、2万人近くの死者・行方不明者を出し、人命に加えて我が国の経済は大きな損害を被り、その影響は今も続いている。また、防波堤等の港湾構造物の多くも破壊され、その原因については、①防波堤に作用した津波の再現期間が千年に1度の巨大なものであったこと、②防波堤の天端を越流した津波が防波堤背後で強い流れとなり、基礎マウンドや海底地盤を洗掘することで防波堤の安定性を低下させたことが主な原因として考えられている。津波の場合、風波による越波とは異なり、防波堤や防潮堤を越流し始めると、少なくとも数分間は続くことを東日本大震災でまざまざと見せつけられた。しかし、これまでの津波では防波堤を越えるようなことはほとんどなく、また、防潮堤は津波が越流しない天端高を設定していると考えていた。そのため、津波が越流することによって起こる現象とそれが堤体の安定性に与える影響について十分な検討がされてこなかったとも言える。

一方で、東日本大震災直後の東北沿岸部の復旧事業への対応には、教訓を活かした防波堤の耐津波設計の考え方を早急に検討する必要があるがあった。その後、平成24年6月の交通政策審議会（港湾分科会 防災部会）においては、港湾における地震・津波対策のあり方（答申）が出され、その中で、防波堤については設計津波高を超える津波に対しても壊滅的な倒壊はしにくい「粘り強い構造」を目指すべきと示された。これらを受けて、国土交通省港湾局においては、平成25年1月に「防波堤の耐津波設計ガイドライン（案）」（http://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk5_000018.html）（以下、ガイドライン（案））を作成した。ここには、港湾の施設としての防波堤を対象とした耐津波設計の基本的考え方が示され、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成19年）」（以下、港湾基準）に対して付加的に考慮すべき点（技術的指針）がとりまとめられていることは、耐津波設計を考える上では極めて重要なことである。

本稿では、ガイドライン（案）に示される防波堤の耐津波設計の基本的考え方を紹介すると共に、ガイドライン（案）が示す現状の課題を述べる。最後に、設計実務を行う中で、耐津波設計に使用可能と考える簡易な照査方法について紹介する。

2. 東日本大震災における防波堤の津波被害から得られた教訓の一例

東日本大震災における防波堤の被災原因としては、既設断面設定時の波浪条件による違いやケーソン設置水深の違いから津波波力に対する堤体の滑動抵抗力に差があり、隣り合った防波堤ケーソンにおいても被害の程度が異なっていた。また、多くの被災した防波堤は、津波波力により滑動していたが、滑動以外の被災原因として、越流による港内側の基礎マウンドや海底地盤の洗掘により支持力を失い倒壊したと考えられ、これまで想定していなかった破壊形態が原因とされている。そこで、既設断面で保有する耐力を超える津波に対しては、洗掘対策を施し、防波堤の保有性能を活かす工夫が大切である。

3. 港湾における耐津波対策の基本的考え方（二つのレベルの津波の定義と防護目標）

港湾における津波対策の検討にあたっては、「発生頻度の高い津波」及び「最大クラスの津波」の二つのレベルの津波に対して、地域防災計画や海岸保全基本計画等を踏まえた上で、背後地の重要度に応じて、発生頻度の高い津波から最大クラスの津波までの間で設計外力としての津波を「設計津波」として設定すると定義付けられている。

一つ目の発生頻度の高い津波は、偶発作用として対象施設を設置する地点に到達すると想定される津波のうち、最大クラスの津波と比較して発生頻度が高く、かつ、人命、財産又は社会的経済活動に重大な影響を及ぼす恐れのある規模の津波とされ（概ね数十年から百数十年に一回程度の頻度で発生する規模）、防護目標は防災機能を目指すことが示されている。二つ目の最大クラスの津波は、偶発作用として対象施設を設置する地点に到達すると想定される津波のうち、発生頻度は極めて低いものの、人命、財産又は社会的経済活動に極めて重大な影響を及ぼす最大規模の津波とされ（概ね数百年から千年に一回程度の頻度で発生する規模）、防護目標は減災機能を目指すことが示されている。

4. 防波堤の耐津波設計

4. 1 防波堤の耐津波設計の基本的考え方

防波堤の耐津波設計にあたっては、設計津波（≡発生頻度の高い津波）に対して防波堤に求められる機能が維持されると共に、設計津波を超える規模の津波が来襲する場合であっても、防波堤に求められる機能が可能な限り維持されるように津波に対して倒壊しにくい「粘り強い構造」を目指すものとする定義付けられている。つまり、設計津波に対しては、しっかりと設計することで防災機能を維持すること。そうすることで、津波発生直後から港内静穏度を確保することが可能となり、港湾物流機能の早期復旧が可能となると考えられる。また、設計津波を超える規模の津波に対しても、出来る限り倒壊しない「粘り強い構造」として減災機能を維持すること。そうすることで、防護ラインに到達する津波高さの低減や到達時間の遅延が可能となると考えられる。

4. 2 「粘り強い構造」とは

ここで、「粘り強い構造」とは分かり易いようで、実は非常に難しい言葉である。つまり、設計を行う上で何を持って「粘り強い構造」と呼べるのかということを見ると、非常に難しい。そこで、学識者の方々の話を取りまとめた文献を引用させていただき、以下に紹介する。学識者の方々の話を総称すると「大変形」「冗長性」「靱性（延性）」「復旧性」「減災」といった性能を具体化したものが“粘り強い構造”と考えられている。

●下迫領域長：(独)港湾空港技術研究所

今回の津波被害を踏まえ、越流による防波堤背後の洗掘対策をまず考える必要がある。防波堤の後ろ側を守るにはいくつかの方法があるが、簡単なのは後ろ側に石などを積み、高くすることである。洗掘をまず防止し、仮にケーソンが動き出してもストッパーの役割を持たせる。

●高橋理事長：(独)港湾空港技術研究所

粘り強さの一つとしてダクティリティ（靱性・延性）の利用を考えなければならない。すなわち、大きく変位しても津波の低減効果がある程度保たれていればいいと考える。例えば、限界状態設計法で言われている安全性能を確保する限界の変形量まで許容することによって、安全と評価できる津波の高さを大きくできる。

●清宮教授：早稲田大学大学院

トラス橋梁で2、3部材が破壊しても全体系はまだ保持している状況である。すなわち、リダンタ

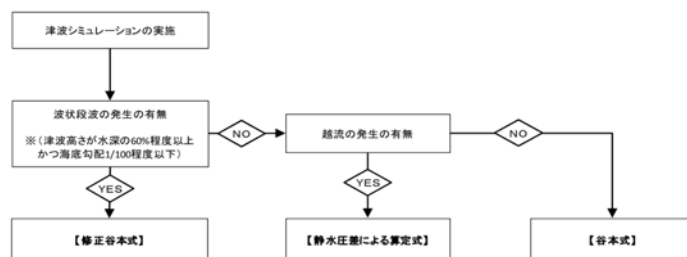
ンシー（冗長性）が大きいほど望ましい。また、粘り強さだけでなく復旧性も重要。今回の地震により新幹線の高架橋が破壊しても目の届く橋脚部下端に被害を集中させたことにより、復旧が早期に行えた。

●高山名誉教授：京都大学

付加的なことをすることによって単に抵抗力が増すのは粘り強い構造ではない。粘り強さとは次のように定義されるだろう。1. 構造物が破壊しにくくなることを前提にして、変形が進むほど抵抗力が増大する構造（ケーソンの背後に裏込石を置くことによって単に初期抵抗力が増大するのは粘り強くなったとは言わない。このようにすることによって構造物の変形が大きくなるにしたがって抵抗力が増す場合には粘り強い構造となる）。2. 他の目的で設置したものが波力低減効果がある場合（反射波低減のために設置した消波ブロックで被覆した防波堤は粘り強い構造だと考える。消波工被覆堤は、重複波のような場合には波力低減効果は小さいが、波高が大きくなって碎波するようになると波力低減効果が大きくなる。つまり、波高が大きくなるほど粘り強くなる）。

4. 3 防波堤の性能照査（算定手順）

防波堤の性能照査を行う算定手順が示されている。まず「設計津波」に対して防波堤の全体安定性が損なわれないように断面諸元を設定する（安定性照査の手順は、下記フローが参考となる）。次に、「設計津波」を超える規模の津波に対する「粘り強い構造」の検討を行う。その際には、施設の重要度や費用対効果等を踏まえて「粘り強い構造」の断面を総合的に判断して設定する。



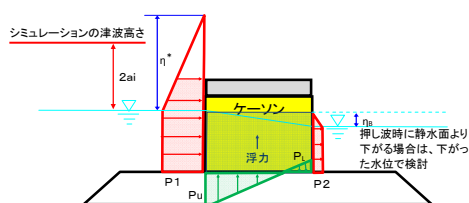
図－1 防波堤に対する津波波力算定手順

4. 4 防波堤波力設定の考え方

防波堤に作用する津波波力の算定にあたっては、適切な方法と設定により津波シミュレーションを実施し、施設前面での津波高を用いることを基本としている。算定フローに示す算定式について具体的に示され、港湾基準に示す谷本式に加えて、新たに越流した場合の静水圧による算定式が示されている。ここで、若干越流した状態に静水圧差による算定式を適用する場合は、越流直前の状態に谷本式を適用した場合と比較し、堤体の安定性に対して不利となる方を採用することに留意する必要がある。

(1) 修正谷本式

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に使用する。

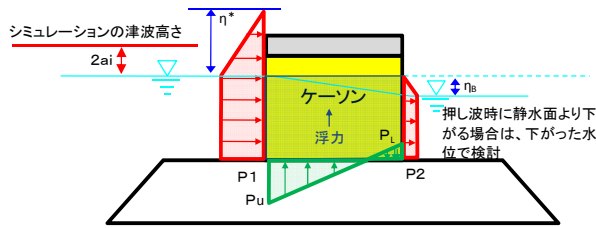


【計算式】

$$\begin{aligned} \eta^* &= 3.0 \cdot a_i \\ P1 &= 3.0 \cdot \rho \cdot 0 \cdot g \cdot a_i \\ P2 &= \rho \cdot 0 \cdot g \cdot \eta B \\ P_U &= P1 \\ P_L &= P2 \end{aligned}$$

(2) 谷本式

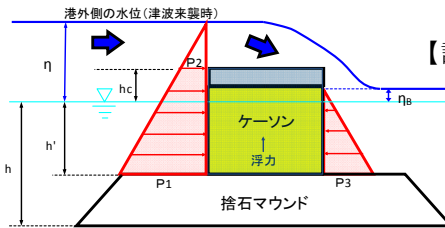
入射津波高さが防波堤を越流しない場合使用する。



$$\begin{aligned} \eta^* &= 3.0 \cdot a_i \\ P1 &= 2.2 \cdot \rho_0 \cdot g \cdot a_i \\ P2 &= \rho_0 \cdot g \cdot \eta \cdot B \\ PU &= P1 \\ PL &= P2 \end{aligned}$$

(3) 静水圧による算定式

入射津波高さが防波堤を越流する場合使用する。この算定式は、水理模型実験による結果により、前面の静水圧に 1.05 倍、背面の静水圧に 0.9 倍した静水圧を用いることになっている。



$$\begin{aligned} P1 &= 1.05 \cdot \rho_0 \cdot g \cdot (h' + \eta) \\ P2 &= (\eta - hc) / (h' + \eta) \cdot P1 \\ P3 &= 0.9 \cdot \rho_0 \cdot g \cdot (h' + \eta \cdot B) \end{aligned}$$

4. 5 滑動・転倒・基礎の支持力に関する照査

港湾基準に示す各モードの照査式に対して、適用する部分係数の設定が示されている。ここでは、構造解析係数を除き全て 1.0 を用いても良いとされ、構造解析係数については、滑動と転倒が 1.2 とし、基礎の支持力が 1.0 を参考値とすることが示されている。

表－1 構造解析係数の参考値

照査項目	構造解析係数
直立部の滑動	1.2
直立部の転倒	1.2
基礎の支持力	1.0

4. 6 マウンド被覆材の所要質量に関する照査

防波堤の基礎マウンドが洗掘等の被災を受けることにより、堤体自体の安定性を失うことは津波被害から得られた教訓の一例において述べた。そのため、被覆材の安定照査（所要質量の算出）にあたっては、当面、港湾基準に記載のある流れに対する被覆石及びブロックの所要質量の算定式「イスパッシュの式」(1) 式を用いることが示されている。津波による洗掘に関する照査としては、開口部（堤頭部を含む）での流れに対する安定性や防波堤前面の津波の沿い流れに対する安定性、津波が防波堤を越流する場合の背後マウンド被覆材の安定性の照査が該当すると考えられる。

$$M_d = \frac{\pi \rho_r U_d^6}{48 g^3 y_d^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3}$$

Md : 所要質量 (t)
 rho_r : 捨石又はブロックの密度 (t/m3)
 g : 重力加速度 (m/s2)
 Sr : 捨石又はブロック比重
 Ud : 流速 (m/s)

[イスパッシュ係数]
 埋込: yd=1.02
 露出: yd=0.86

..... (1)

4. 7 水理模型実験や数値解析の活用

防波堤の性能照査に示す算定手順に従って断面設定を行ったとしても、現時点では十分に解明されていない点が多くある。例えば、設計津波を超える規模の津波に対して設定された「粘り強い構造」

断面について、現時点では変形モード（粘り強さ）を適切かつ定量的に評価することが困難である。そのため、ガイドライン（案）では、水理模型実験や数値解析を最大限活用することにより、その対策の効果を確認することが望ましいとしている。なお、水理模型実験を実施することが困難である場合においては、腹付工や被覆工等の洗掘対策の方針が示され、それらを設計者の判断に基づき活用することが出来るとしている。

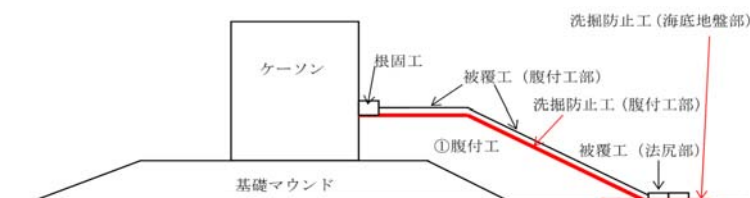


図-2 越流対策の断面設定例

5. 設計ガイドライン（案）の課題

ガイドライン（案）は、防波堤を対象とした耐津波設計の基本的な考え方を示したものであるが、内容は現段階で得られている知見について、その要点を取りまとめたものであるため全てが必ずしも明確になっていない。そのため、今後も継続して技術的検討を継続すべき分野であり、ガイドライン（案）ではその成果を順次反映し、改訂していくことを前提としている。そして、ガイドライン（案）で示されている適用可能な防波堤の構造形式は重力式の混成堤及び消波ブロック被覆堤を主たる対象としていることから、他の構造形式や防潮堤、水門、陸閘、胸壁等の耐津波設計の基本的考え方については、今後の課題として残されている。

6. 簡易な照査方法の例

水理模型実験や数値解析によって洗掘や粘り強さを確認することが望ましいところであるが、設計実務として大きな投資を行う前に、事前に簡易な方法で確認したいところである。そこで、簡易な照査方法を紹介する。

例1. ケーソン隙間からの流速の算定方法（噴流式）

ケーソン目地部からの流速によって、マウンドの捨石等が洗掘されないか確認するためには、イスバッシュ式に代入する流速が必要である。そこで、水理公式集等に掲載されている「噴流式」(2)式を用いることで、簡易に照査することも出来ると考える。

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{J}{\rho g x}} (1 - \tanh^2 \eta) \quad \text{ここに、} \begin{cases} J = \rho b (\sqrt{2gh})^2 & b: \text{開口幅} \\ \sigma = \frac{1}{7.67} & h: \text{最大水位差} \\ \eta = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \frac{y}{x} & J: \text{全運動量束} \\ & x: \text{噴出方向のx軸} \\ & y: \text{x軸と直角方向} \end{cases} \dots (2)$$

また、噴流式を表計算ソフト等で整理すると、影響範囲等を把握することも可能である。例えば、イメージ図では、流速の違いを色分けしており、影響範囲のトレンドを把握することが出来る。

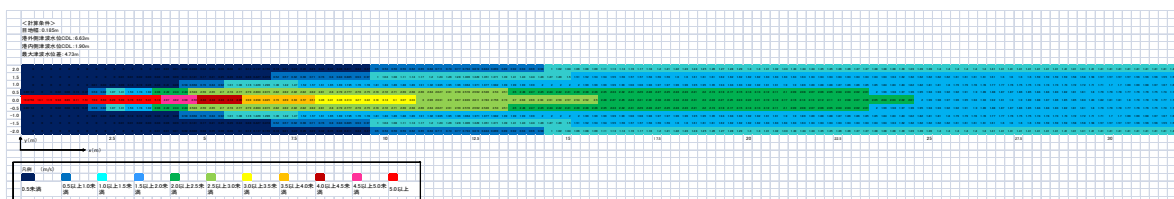


図-3 噴流式を用いた影響範囲把握のイメージ図

例2. 防波堤を越流した時の背後流速の算定方法（せきの越流式）

防波堤天端を越流した津波流速によって、背後捨石等が洗掘されないか確認するためには、イスバッシュ式に代入する流速が必要である。水理公式集等に掲載されている「せきの越流式」を用いることで、簡易に照査することも出来ると考える。

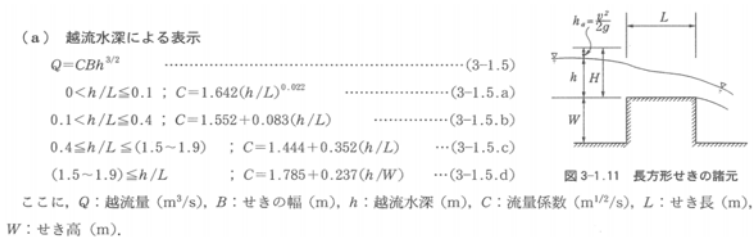


図-4 長方形堰の越流量，[出典]水理公式集

例3. 地震に伴う防波堤の沈下量の算定

近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所で開発された、沿岸構造物のチャート式耐震診断システム（以下、チャート式）を活用すれば、地震に伴う防波堤の沈下量をある一定のレベルで安全側に算定することが可能である。ここで、チャート式は、地盤が液状化層である混成堤を対象として作られていることから、標準的なモデルと異なる場合には、入力に必要な等価N値等の設定方法や算定値の扱いには留意が必要である。

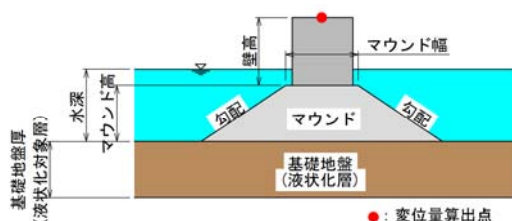


図-5 チャート式耐震診断システムによる防波堤のモデル図

7. おわりに

耐津波設計を考える上で、ガイドライン（案）が作成されたことは極めて重要なことである。また、本稿においては、ガイドライン（案）で示された内容の他に設計実務を行う中で、耐津波設計に使用可能と考える簡易な照査方法について紹介した。そのため、津波高の設定を除けば、地震による沈下量から堤体の安定性及び被覆材等の安定性の照査に至る一連の設計照査をある一定のレベルを持って可能となったと考える。一方で、防波堤の要求性能、性能規定を設定する上では、構造物としての防波堤の性能の他、周辺施設等を含めた要求性能、性能規定の設定がこれまで以上に重要になると考える。

参考文献

1. 国土交通省港湾局，防波堤の耐津波設計ガイドライン（案），平成25年1月
2. 山下徹，沿岸技術研究センター論文集，No.12(2012)
3. 竹田晃，沿岸構造物の耐震性評価を安価で簡易に診断するシステムの開発について，平成23年度近畿地方整備局研究発表会 論文集，調査・計画・設計部門 I
4. 土木学会，水理公式集[平成11年版]，P244