

防潮堤等に作用する津波波圧評価に係る 安全研究成果の審査ガイドへの反映について

令和 2 年 11 月 25 日
原子力規制庁

1. 趣旨

(1) 現行の規制基準は、防潮堤等の外郭防護施設について、津波に対してその防護機能が十分保持できるように設計することを要求し¹、具体的には「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」及び「耐津波設計に係る工認審査ガイド」において、国交省の暫定指針²等を考慮することとしている。

原子力規制庁 技術基盤グループ（以下「基盤 G」という。）は、安全研究において、防潮堤に作用する津波波圧に着目し、水理試験及び解析を実施することで、その適用性等を確認し、この安全研究から得られた知見について、平成 26～28 年度に安全研究の進捗に合わせ 3 回に分けて原子力規制委員会において報告^{3,4,5}した。

平成 28 年度第 42 回原子力規制委員会（平成 28 年 11 月 9 日）の 3 回目の報告の際、この知見について、審査への活用を念頭に津波波圧の評価手法として取りまとめ、関連するガイドの改定を検討することの方針が了承された⁵。

(2) 本安全研究の成果は、原子力規制委員会への報告と並行して次の 3 編の NRA 技術報告として取りまとめられた。また、これらの知見は、既に防潮堤等に係る事業者の申請において参照されている。

- 原子力規制委員会、NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について、NTEC-2014-4001、平成 26 年 12 月
- 原子力規制委員会、NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波段波の影響について、NTEC-2015-4001、平成 27 年 10 月
- 原子力規制委員会、NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数について、NTEC-2016-4001、平成 28 年 12 月

¹ 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）第 5 条及び実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（平成 25 年原子力規制委員会規則第 6 号）第 6 条による。

² 国土交通省「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた 津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」（平成 23 年 11 月 17 日）は、「国土交通省告示千三百十八号 津波浸水想定を設定する際に想定した津波に対して安全な構造方法等を定める件」として、平成 23 年 12 月 27 日に策定されている。

³ 平成 26 年度 第 38 回 原子力規制委員会 資料 3、防潮堤に作用する津波波力に関する安全研究について（中間報告）、平成 26 年 11 月 12 日

⁴ 平成 27 年度 第 28 回 原子力規制委員会 資料 3、防潮堤に作用する津波段波に関する安全研究について、平成 27 年 9 月 9 日

⁵ 平成 28 年度 第 42 回 原子力規制委員会 資料 3、防潮堤に作用する津波波圧評価に関する安全研究について、平成 28 年 11 月 9 日

(3) 今般、これらの3編のNRA技術報告及び先の原子力規制委員会への報告を踏まえ、津波波圧の評価手法を審査で確認する観点から、別添のとおり「津波波圧評価に係る確認事項(案)」(以下「波圧確認事項」という。)として取りまとめたので、了承いただきたい。

また、本日の議論を踏まえ、本内容を「耐津波設計に係る工認審査ガイド」に反映する作業を進めることとしたい。

2. 「津波波圧評価に係る確認事項(案)」について

2. 1 位置付け

耐津波設計方針等に係る設置(変更)許可、設計及び工事の計画の認可審査においては、津波の敷地への流入防止対策(外郭防護1)、漏水による安全機能への影響防止(外郭防護2)、津波防護の多重化(内郭防護)、水位低下による安全機能への影響防止等に関する要求事項の妥当性を確認する。これらに関連するガイドは、「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」及び「耐津波設計に係る工認審査ガイド」である。

これらのうち、別添の波圧確認事項は、津波の敷地への流入防止対策(外郭防護1)に係る施設及び設備のうち、入力津波の影響を直接受ける施設及び設備に作用する津波波圧評価の具体的な確認手順を示しており、津波荷重の算定の妥当性確認に用いられる「耐津波設計に係る工認審査ガイド」に関する内容である。

2. 2 波圧確認事項の概要

(1) 津波波圧の分類及び考慮する知見の確認

津波波圧を衝撃的な段波波圧⁶と静水圧的な持続波圧⁷に分類されていることを確認する。また、段波波圧及び持続波圧の設定の根拠として考慮する知見が示されていることを確認する。(図-1参照)

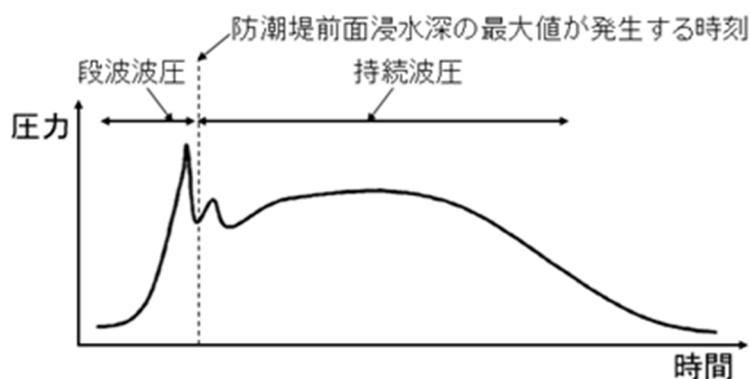


図-1 防潮堤等に作用する津波波圧

⁶ 最初に防潮堤等に衝突する津波が与える短時間で大きく変化する波圧。

⁷ 段波波圧の後の継続時間の長い波圧で、長時間に渡り一定の範囲の波圧が防潮堤等に作用する。

(2) 防潮堤等に作用する段波波圧評価に係る確認

段波波圧を砕波段波波圧⁸及び波状段波波圧⁹に分類し、発生可能性と発生した場合の影響評価について、それが適切に評価されていることを確認する。

(3) 防潮堤等に作用する持続波圧評価に係る確認

国交省の暫定指針¹⁰を用いて持続波圧を評価する場合は、フルード数¹¹が1以下になることを確認する。また、フルード数が1を超える場合は、最大比エネルギー¹²発生時刻におけるフルード数と水深係数の関係に基づく評価式（NTEC-2016-4001の成果、図-2参照）等を用いて評価されていることを確認する。

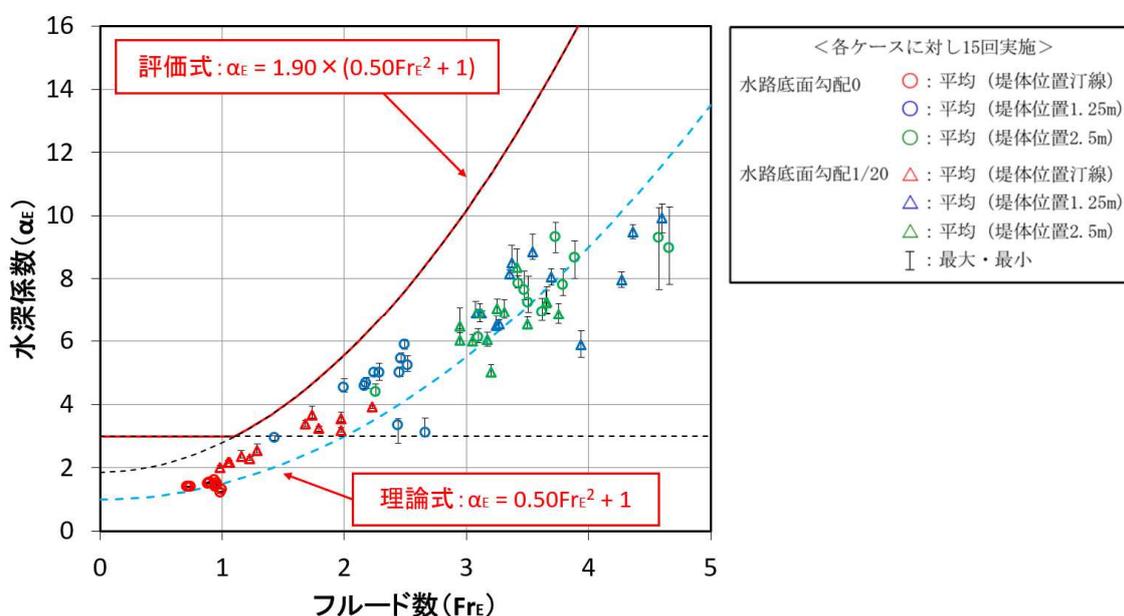


図-2 最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数と水深係数の関係に基づく持続波圧評価式

3. 今後の進め方(案)

波圧確認事項を「耐津波設計に係る工認審査ガイド¹³」の別添として加える改正を令和2年度中に行うこととしたい。

⁸ 津波の先端部が急峻な壁状となった後に波が砕け、防潮堤等に作用する波圧。

⁹ 津波の先端部が複数の波に分裂し、防潮堤等に作用する波圧。

¹⁰ 設計波圧は、防潮堤等が無い場合を想定して求めた防潮堤等の位置での津波の浸水深から得られる設計用浸水深の3倍の静水圧を用いる。

¹¹ フルード数とは流体の慣性力(勢い)と重力との比を表す無次元数で、流体の性状を示す指標であり、防潮堤等に作用する津波の特性を把握する重要な指標となる。

¹² 単位重量あたりの水を持つ全エネルギー(運動エネルギー及び位置エネルギーの合計)を表す。

¹³ 本ガイドは、令和2年度第35回原子力規制委員会(令和2年10月28日)において報告した「審査実績を踏まえた規制基準等の記載の具体化・表現の改善に係る令和2年度の実施計画」において令和2年度中に改正することとしている規則・解釈・ガイドの一つである。

別添：津波波圧評価に係る確認事項（案）

参考：平成 28 年度 第 42 回 原子力規制委員会 資料 3、防潮堤に作用する津波波圧評価に関する安全研究について、平成 28 年 11 月 9 日

津波波圧評価に係る確認事項(案)

1. 基本事項

本書は「耐津波設計に係る工認審査ガイド」のうち「4.津波防護施設に関する事項」の「4.1 津波防護施設の設計方針」及び「4.5 荷重評価」並びに「5.浸水防止設備に関する事項」の「5.3.2 荷重及び荷重の組合せ」に関連するものであり、外郭防護に係る施設及び設備に作用する入力津波の波圧・波力(以下「津波波圧」という。)評価の一例を示すものである。

以下に、ガイドの規定箇所及び本書の適用対象、本書の適用範囲を示す。

【ガイドの規定箇所】

4.5 荷重評価 【確認内容】 d)～f)

5.3.2 荷重及び荷重の組合せ (3)① (例えば、外郭防護に係る津波防護施設に付属する水密扉等)

【本書の適用対象】

外郭防護に係る施設及び設備のうち、津波波圧の影響を直接受ける陸域の構築物、海域にあり設置面が露出する構築物等(以下これらを総称して「防潮堤等」という。)

【本書の適用範囲】

津波波圧の分類及び分類に応じた津波波圧の評価方法並びにこれらの確認の手順及び内容

なお、本書は防潮堤等に作用する荷重のうち入力津波による津波荷重を対象とし、それ以外の荷重及び荷重の組合せ、許容限界等の確認事項については「耐津波設計に係る工認審査ガイド」の記載の通りとする。

2. 防潮堤等に作用する津波波圧評価に係る確認事項及び解説

2.1 津波波圧の分類及び考慮する知見の確認

防潮堤等に作用する津波波圧の分類に係る確認手順を図 2.1 に示す。

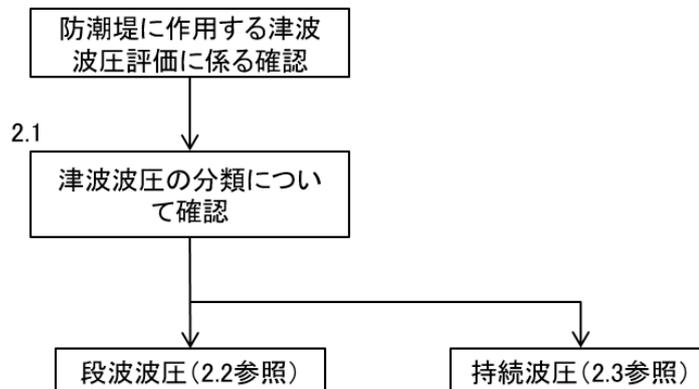


図 2.1 防潮堤等に作用する津波波圧の分類に係る確認手順

【確認事項】

①津波波圧として、段波波圧及び持続波圧の両波を評価対象としていること。また、段波波圧及び持続波圧の分類の考え方について示されていること。

段波波圧と持続波圧の分類例として、防潮堤等前面浸水深^{*1}の最大値が発生する時刻より前の時間帯(段波領域)に生じる津波波圧を段波波圧、それよりも後の時間帯(持続波領域)に生じる津波波圧を持続波圧とする。

【解説】 段波波圧及び持続波圧の分類例

- ・防潮堤等に作用する津波波圧には図 2.2 に示すように、段波波圧と持続波圧の 2 種類があり、防潮堤等の設計に当たっては、この 2 種類の津波波圧を個別に考慮する必要がある。
- ・段波波圧は、最初に防潮堤等に衝突する津波が与える短時間で大きく変化する波圧である。
- ・持続波圧は、段波波圧の後の継続時間の長い波圧で、長時間に渡り一定の範囲の波圧が防潮堤等に作用する。

*1: 津波が防潮堤等に作用してせり上がった際の前面における津波の深さ。

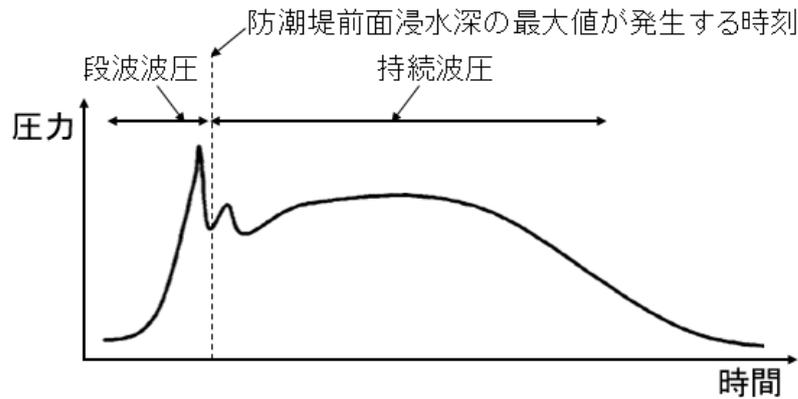


図 2.2 防潮堤等に作用する津波波圧の分類例

【確認事項】

②津波波圧(段波波圧及び持続波圧)の設定方法が示されていること、段波波圧及び持続波圧の設定の根拠として考慮する知見を明示していること及びこの知見の適用性について評価していること。

【解説】 津波波圧の設定根拠として考慮する知見の例

・「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」では、「津波による荷重(波圧、衝撃力)の設定に関して、考慮する知見(例えば国交省の暫定指針^{*2}等)及びそれらの適用性を確認する」こととしている。この場合、国交省の暫定指針が考慮する知見として明示されている必要がある。

*2:国土交通省「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」(平成 23 年 11 月 17 日)は、「国土交通省告示千三百十八号 津波浸水想定を設定する際に想定した津波に対して安全な構造方法等を定める件」として、平成 23 年 12 月 27 日に策定されている。

・国交省の暫定指針では、防潮堤等に作用する津波波圧を設計用浸水深の 3 倍の高さに相当する静水圧より求めることとしている。(図 2.3 参照)

・津波波圧の分類(段波波圧及び持続波圧)は言及されていないため、設定においては 2.1①を参照するものとする。

・地方公共団体によるハザードマップ等に示された想定浸水深により津波の設計用浸水深(η)を設定するとあるが、その詳細には言及していない。

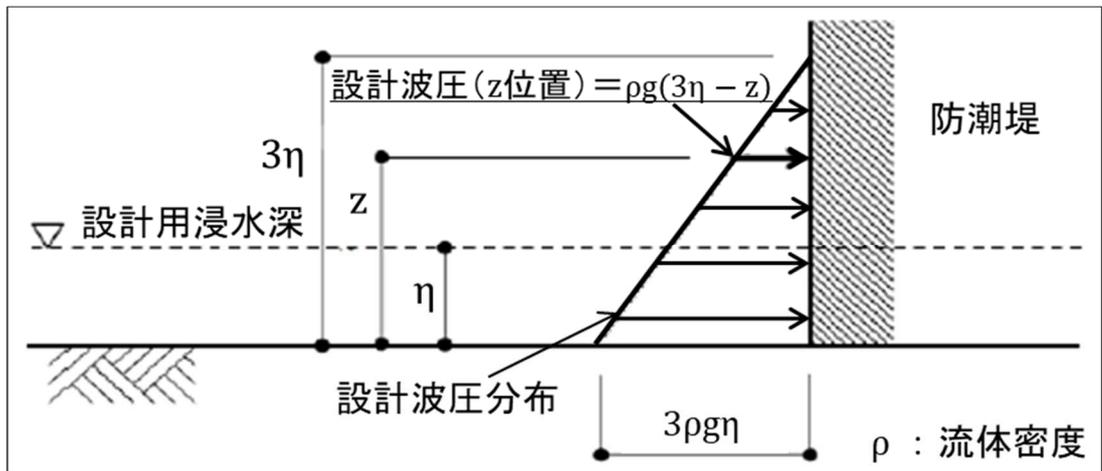
そのため、設計用浸水深(η)は、水理試験及び解析あるいはそのいずれかにより設定するものとする。国交省の暫定指針が参照する朝倉らの研究^(参4)では、防潮堤等が無い場合を想定し、防潮堤等設置位置での津波の通過波の浸水深を設計用浸水深(η)に設定してい

る。なお、通過波とは、防潮堤等が無い場合の津波の流れを指し、主に陸側における浸水深や流速等の津波の特性の把握に用いる。

- ・防潮堤等の最下部に作用する圧力(P)と設計用浸水深(η)に相当する静水圧との比を表す無次元数を水深係数(α)という。

$$\alpha = \frac{P}{\rho g \eta} \quad (1)$$

- α : 水深係数
- P : 防潮堤等の最下部に作用する圧力
- ρ : 海水(流体)密度
- g : 重力加速度
- η : 設計用浸水深



※出典:国交省の暫定指針 1.4 図 4-1 に対して一部加筆

図 2.3 国交省の暫定指針における設計波圧算定手法

- ・海水(流体)密度の設定は、海水密度をそのまま用いることを基本としつつ、砂移動の解析条件である浮遊砂濃度の上限設定を用い、不確かさを考慮する必要がある。

2. 2 防潮堤等に作用する段波波圧評価に係る確認

防潮堤等に作用する段波波圧評価に係る確認手順を図 2. 4 に示す。

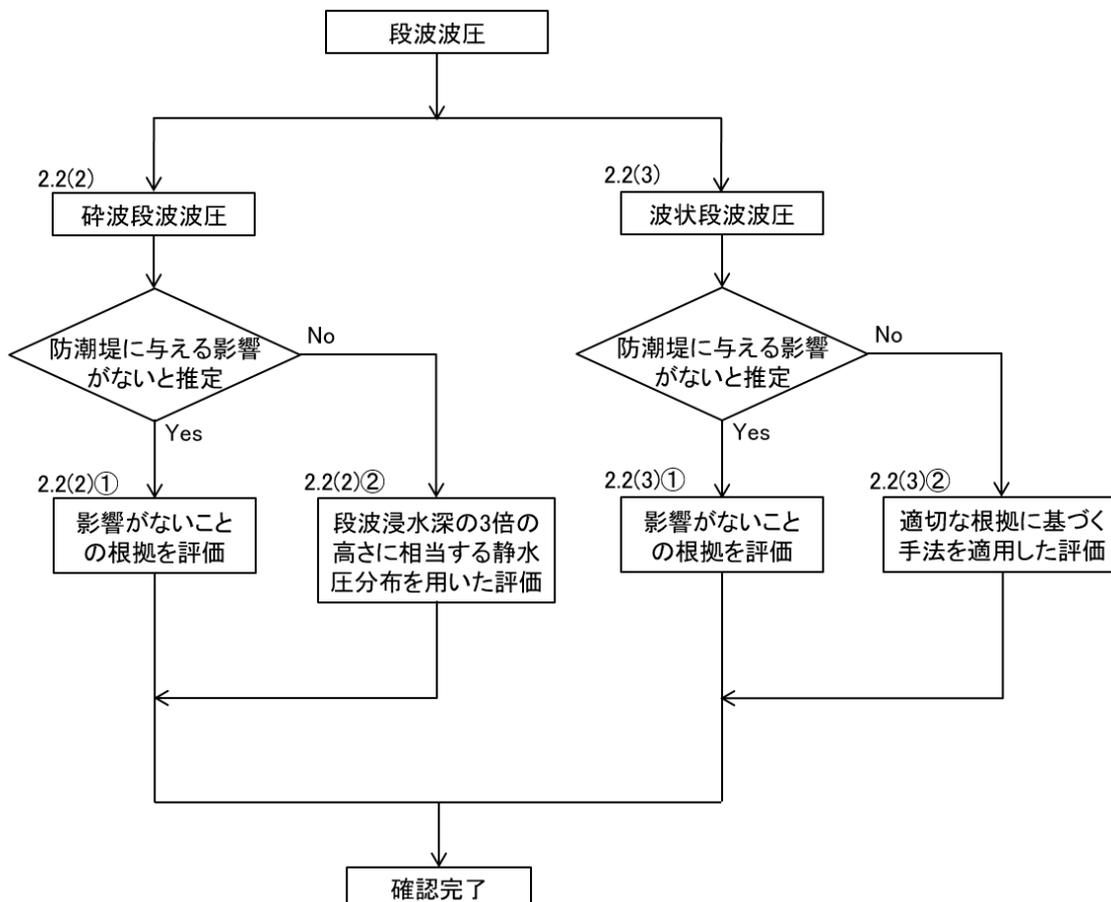


図 2. 4 防潮堤等に作用する段波波圧評価に係る確認手順

(1) 段波波圧の分類

【確認事項】

- ① 防潮堤等に作用する段波波圧を碎波段波波圧及び波状段波波圧に分類し、両波を個別に評価対象としていること。

【解説】 碎波段波波圧及び波状段波波圧の分類

- ・ 段波波圧は、碎波段波波圧及び波状段波波圧に分類される。
- ・ 碎波段波波圧は、津波の先端部が急峻な壁状となった後に波が砕け(碎波)、防潮堤等に作用する波圧である。
- ・ 波状段波波圧は、津波の先端部が複数の波に分裂(ソリトン分裂波)し、防潮堤等に作用する波圧である。

- ・両波の先端部の形状はいずれも急峻な壁状となる特徴を有しており、防潮堤等に作用した場合、構造健全性に与える影響が考えられることから、両波について個別に評価が必要である。

(2) 碎波段波波圧の影響評価

【確認事項】

- ①防潮堤等に作用する碎波段波波圧の影響が無いと推定する場合、その根拠が明確になっていること。津波の碎波発生の有無及び発生位置を根拠とする場合は、適切な条件による水理試験及び解析あるいはそのいずれかにより評価していること。

【解説】 津波の碎波発生の有無及び発生位置と碎波段波波圧の影響の関係

- ・碎波段波波圧の影響は、津波の碎波発生の有無及び発生位置によって大きく異なる。
- ・碎波段波波圧が防潮堤等の構造健全性に与える影響は、防潮堤等が海岸線近傍に設置されるとともに、防潮堤等の近傍で碎波が発生する等、複数の条件の重畳によっては、碎波段波波圧による影響が持続波圧による影響よりも大きくなることから、防潮堤等と海岸線の離隔距離、津波の碎波発生的位置等の条件及び碎波段波波圧を確認することが重要である。
- ・碎波段波波圧の影響を評価するためには、防潮堤等の近傍における津波の碎波発生の有無を水理試験及び解析あるいはそのいずれかにより推定することが重要である。碎波発生の可能性や発生場所等は、沖側波高、波形、周期、水深、海底の形状、海岸線の形状、陸側の形状等の複合要因に依存する。これらの複合要因を踏まえたうえで防潮堤等が無い場合の津波通過波の波高、波形等を確認することによって、防潮堤等の近傍での碎波の直前又は碎波発生の有無を確認することができる。
- ・津波の碎波発生の影響が無いと推定する場合の例として、水理試験から得た通過波の沖側波高及び浸水深に係る時刻歴データを図 2.5 に例示する。
- ・この例では、津波が沖側から海岸線に近づくとつれ沖側波高の上昇や周期が短くなる状態は認められない。よって、海岸線近傍で碎波の発生は無いとみなすことができる。
- ・また、この例では、津波は遡上した後に陸側で碎波は発生していない。よって、海岸線から陸側に一定距離以上離れた場所(例えば 50~100m 以上)に防潮堤等が設置される場合においても、碎波段波波圧による構造健全性に与える影響は小さいとみなすことができる。

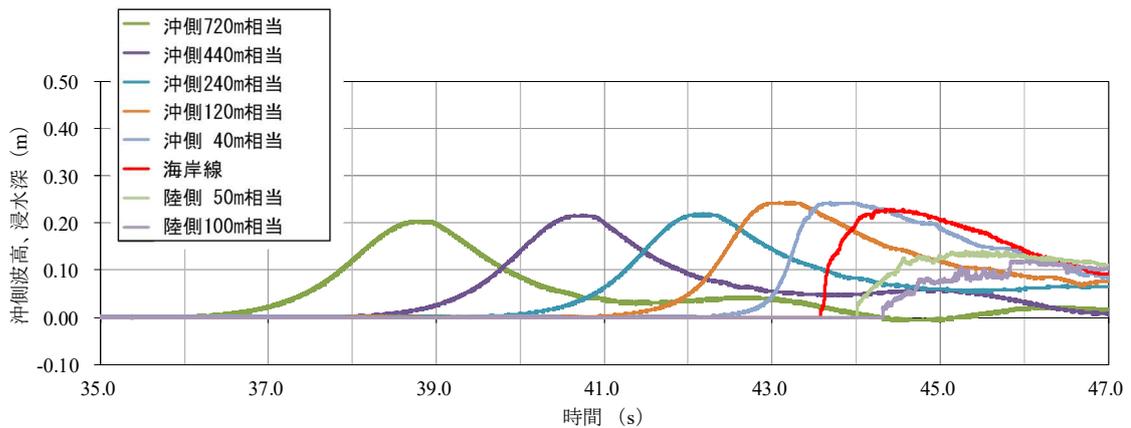


図 2.5 津波の碎波発生が無いと推定する場合の水理試験から得た時刻歴データの例

- ・碎波段波波圧の影響があると推定する場合の例として、水理試験から得た通過波の沖側波高及び浸水深に係る時刻歴データを図 2.6 に例示する。
- ・この例では、津波が沖側から海岸線に近づくとつれ沖側波高が高くなりかつ周期が短くなり、海岸線近傍で碎波直前の最大浸水深及び最小周期となる特徴的な状態を示している。さらに、海岸線より陸側(約 50m 相当)では、碎波後の低い浸水深の状態を示しており、このことから、海岸線近傍で碎波が発生するとみなすことができる。
- ・防潮堤等が海岸線近傍に設置されるとともに、海岸線近傍で碎波が発生する場合には、碎波段波波圧による構造健全性に与える影響の方が、持続波圧による影響よりも大きくなる場合がある。したがって、このような場合には碎波段波波圧が防潮堤等の構造健全性に与える影響を評価する必要がある。

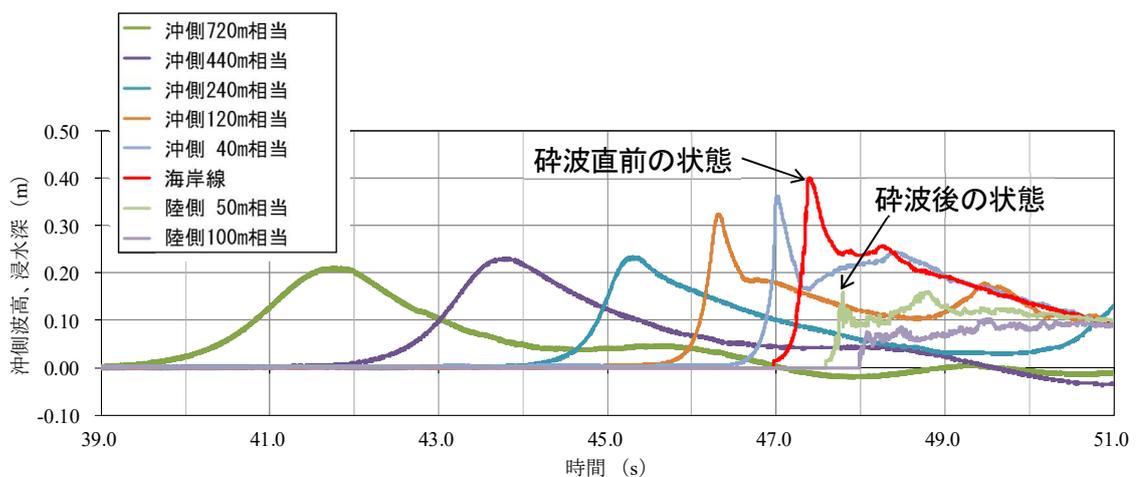


図 2.6 碎波段波波圧の影響があると推定する場合の水理試験から得た時刻歴データの例

【確認事項】

②防潮堤等に作用する砕波段波波圧の影響があると推定する場合、防潮堤等設置位置において防潮堤等が無い場合の津波の砕波直前の最大浸水深(以降、「段波浸水深(η_{\max_1st})」という。)の3倍の高さに相当する静水圧分布を用いて、砕波段波波圧の影響を評価していること。

【解説】 砕波段波波圧の影響があると推定する場合の根拠例

・段波浸水深(η_{\max_1st})の3倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{1st})を、式(2)に示す。

$$P_{1st} = 3\rho g \eta_{\max_1st} \quad (2)$$

P_{1st} : 段波浸水深(η_{\max_1st})の3倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力

η_{\max_1st} : 段波浸水深

ρ : 海水(流体)密度

g : 重力加速度

【解説】 段波浸水深(η_{\max_1st})

・図 2.7 は、水理試験から得た防潮堤等設置位置における通過波の浸水深の時刻歴の一例であり、海岸線近傍で砕波直前の最大浸水深及び最小周期となる特徴的な状態を呈している。

・津波の砕波直前の最大浸水深を段波浸水深(η_{\max_1st})という。図 2.7 の例では、段波浸水深(η_{\max_1st})は、防潮堤等設置位置における段波領域での通過波の最大浸水深を表す。

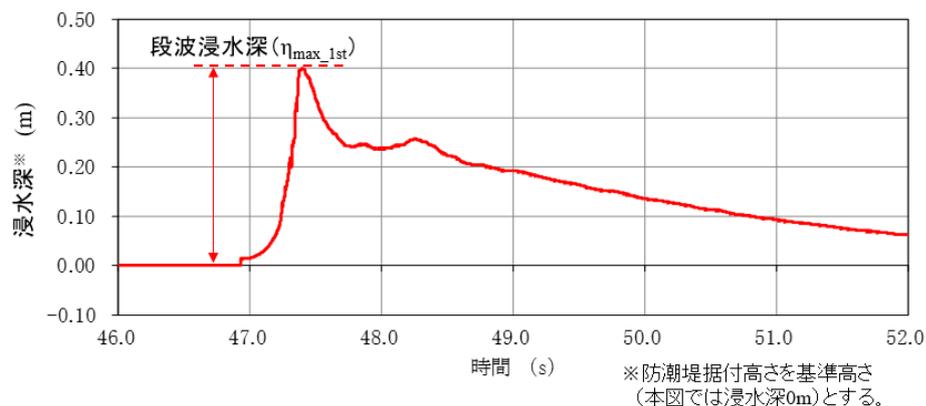


図 2.7 段波浸水深(η_{\max_1st})の例

(3) 波状段波波圧の影響評価

【確認事項】

- ①防潮堤等に作用する波状段波波圧の影響が無いと推定する場合、その根拠が明確になっていること。既往知見を根拠とする場合は、適切な条件による水理試験及び解析あるいはそのいずれかにより適用性に係る評価が示されていること。

【解説】 波状段波波圧の影響がないと推定する場合の妥当性

- ・「国土交通省港湾局、防波堤の耐津波設計ガイドライン」^(参5)、平成 25 年 9 月 では、おおむね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 以下程度の遠浅である場合に、波状段波が発生するとしている。
- ・「適切な条件」については、既往知見(例えば、「国土交通省港湾局、防波堤の耐津波設計ガイドライン」^(参5))との整合性を確認すること。

【確認事項】

- ②防潮堤等に作用する波状段波波圧の影響があると推定する場合、既往知見で提案されている評価手法等を用いて波状段波波圧の影響を評価していること。また、評価に用いた知見の適用性に関する文献等の根拠が示されていること。

【解説】 波状段波波圧による影響評価例

- ・「国土交通省港湾局、防波堤の耐津波設計ガイドライン」^(参5)、平成 25 年 9 月 では、波状段波が発生する場合には、津波波力が大きくなるため、これに対応して修正した谷本式(修正谷本式)を波力算定に用いることとしている。
- ・修正谷本式(池野ら(2005)^(参6))による津波波力の算定のうち、背面の水位が押し波時に基準面より下がらない場合を式(3)及び式(4)に示す。(図 2.8 参照)

$$\eta^* = 3.0a_I \quad (3)$$

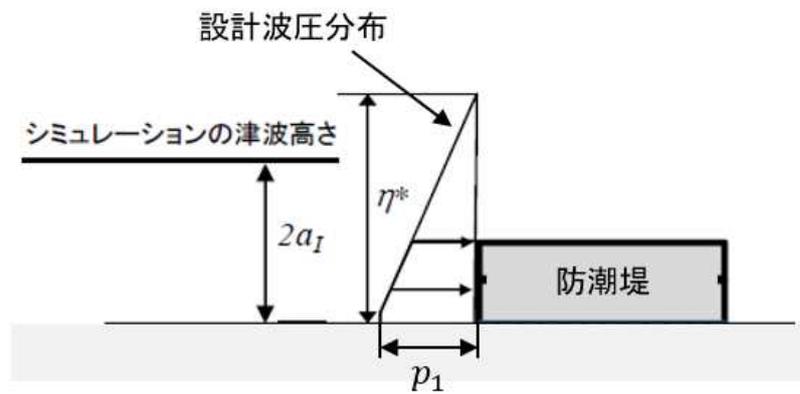
$$p_1 = 3.0\rho_0ga_I \quad (4)$$

η^* : 波圧作用高さ(m)

a_I : 入射津波の静水面上の高さ(振幅)(m)

ρ_0g : 海水の単位体積重量(kN/m³)

p_1 : 波圧強度(kN/m²)



※出典：国土交通省港湾局、防波堤の耐津波設計ガイドライン 参考②(その3)に対して一部加筆

図 2.8 背面の水位が押し波時に基準面より下がらない場合の津波波力評価例

2.3 防潮堤等に作用する持続波圧評価に係る確認

持続波圧評価に係る確認手順について、フルード数(Fr)が1以下の場合について図 2.9 に示し、フルード数(Fr)が1を超える場合について図 2.10 に示す。

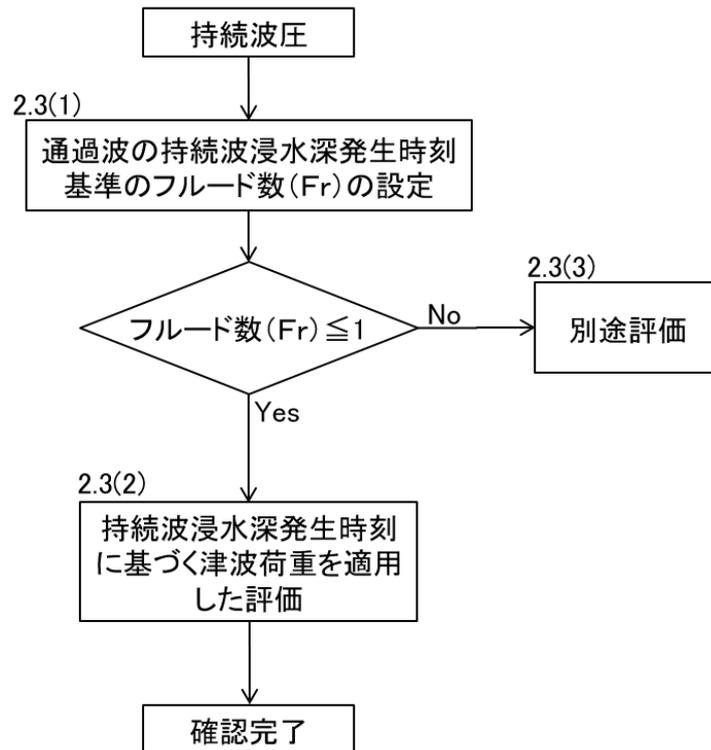


図 2.9 防潮堤等に作用する持続波圧評価に係る確認手順(フルード数(Fr)が1以下の場合)

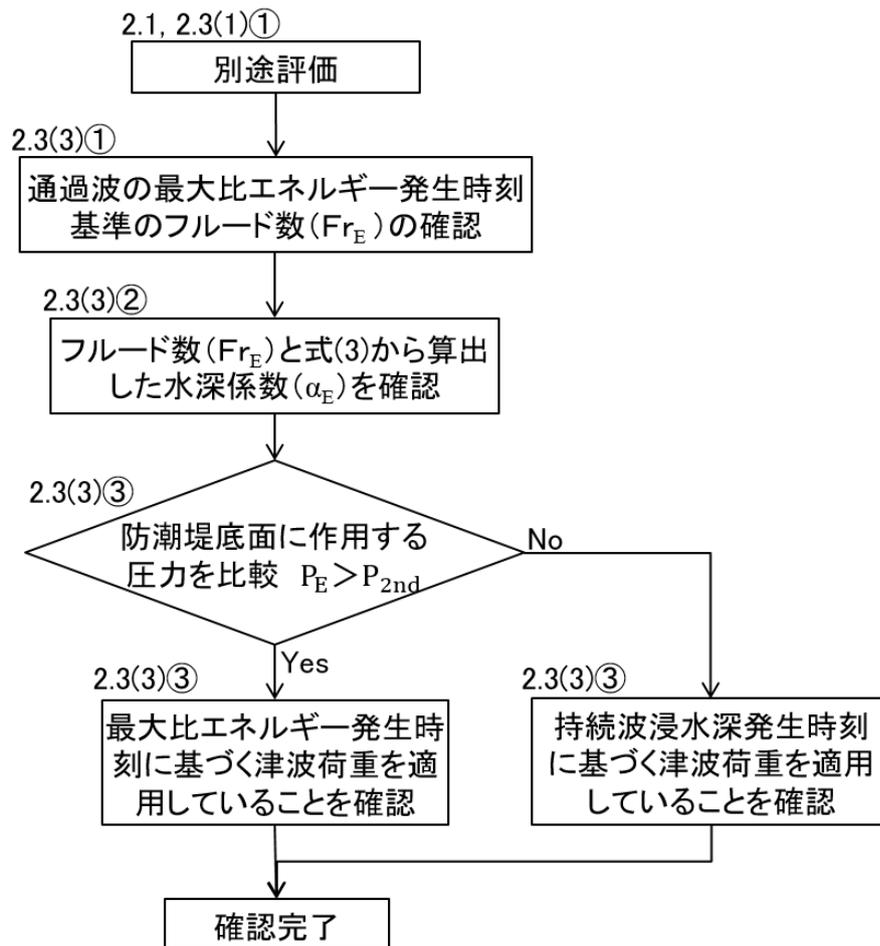


図 2.10 防潮堤等に作用する持続波圧評価に係る確認手順(フルード数(Fr)が1を超える場合)

(1) 持続波圧の影響評価

持続波波圧の設定に関する根拠が明確に示されていること。

【確認事項】

①通過波の持続波領域における防潮堤等設置位置での最大浸水深(以降、「持続波浸水深(η_{\max_2nd})」という。)及び持続波浸水深(η_{\max_2nd})発生時刻におけるフルード数(Fr)を適切に算出していること。上記と異なる設計用浸水深及び流速を用いてフルード数(Fr)を算出する場合は、算出した数値の保守性を明示していること。

なお、持続波圧による荷重設定に関する根拠として、国交省の暫定指針の知見を用いる場合は、持続波浸水深(η_{\max_2nd})を設計用浸水深として用いていること。

【解説】 持続波浸水深(η_{\max_2nd})発生時刻におけるフルード数

- ・フルード数は流体の慣性力(勢い)と重力との比を表す無次元数で、流体の性状を示す指標であり、防潮堤等に作用する津波の特性を把握する重要な指標となる。
- ・フルード数の算出に当たっては、通過波による防潮堤等設置位置での浸水深の時刻歴及び流速の時刻歴を用いるが、基準とする時刻によって浸水深及び流速は変動することからフルード数は異なる値となることに留意する。図 2. 11 に水理試験から得た、持続波浸水深(η_{\max_2nd})及び最大比エネルギーの発生時刻の関係について例示する。

式(5)より持続波浸水深(η_{\max_2nd})発生時刻におけるフルード数(Fr)を算出する。

$$Fr = \frac{V_{\eta_{\max_2nd}}}{\sqrt{g\eta_{\max_2nd}}} \quad (5)$$

η_{\max_2nd} : 持続波浸水深

$V_{\eta_{\max_2nd}}$: 持続波浸水深(η_{\max_2nd})発生時刻における津波の流速

g : 重力加速度

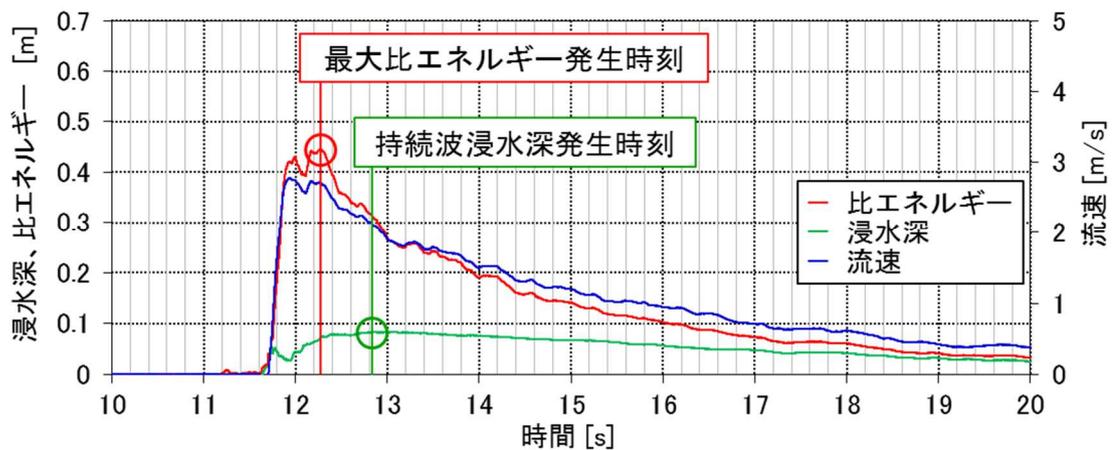


図 2. 11 最大比エネルギー及び持続波浸水深(η_{\max_2nd})の発生時刻の関係の例

(2)フルード数(Fr)が1以下の場合

【確認事項】

- ①フルード数(Fr)が1以下の場合、国交省の暫定指針を適用することができる。具体的には、持続波浸水深($\eta_{\max,2nd}$)の3倍の高さに相当する静水圧分布を用いて持続波圧による荷重を評価していること。

【解説】フルード数(Fr)が1以下の場合の持続波圧による荷重評価

- ・持続波浸水深($\eta_{\max,2nd}$)の3倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{2nd})を、式(6)に示す。

$$P_{2nd} = 3\rho g \eta_{\max,2nd} \quad (6)$$

P_{2nd} : 持続波浸水深($\eta_{\max,2nd}$)の3倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部*に作用する圧力

※前面の据付高さを基準高さ(防潮堤等の最下部の高さ)とする。

$\eta_{\max,2nd}$: 持続波浸水深

ρ : 海水(流体)密度

g : 重力加速度

(3)フルード数(Fr)が1を超える場合

【確認事項】

- ①フルード数(Fr)が1を超える場合、防潮堤等位置での通過波の最大比エネルギー発生時刻における浸水深($\eta_{E,max}$)を設計用浸水深として用いていること及び最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数(Fr_E)を適切に算出していること。

【解説】最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数(Fr_E)

- ・最大比エネルギー(比エネルギー*3の最大値)発生時刻におけるフルード数(Fr_E)の算出方法を式(8)に示す。

*3: 比エネルギーは、単位体積重量の水の持つ全エネルギー(全水頭)を表す。ベルヌーイの定理を基に非粘性、定常及び一次元流れを対象とする。

$$E(t) = \frac{v(t)^2}{2g} + \eta(t) \quad (7)$$

$E(t)$: 比エネルギー

$\eta(t)$: 防潮堤等が無い場合の陸側における津波の浸水深の時刻歴

$v(t)$: 防潮堤等が無い場合の陸側における津波の流速の時刻歴

g : 重力加速度

$$Fr_E = \frac{v_{E_max}}{\sqrt{g\eta_{E_max}}} \quad (8)$$

η_{E_max} : 最大比エネルギー発生時刻における津波の浸水深

v_{E_max} : 最大比エネルギー発生時刻における津波の流速

g : 重力加速度

【確認事項】

②式(9)より、フルード数(Fr_E)から最大比エネルギー発生時刻に基づく水深係数(α_E)を算出していること。式(9)によらない場合は、水理試験及び解析あるいはそのいずれかにより適用性に係る評価が示されていること。

$$\alpha_E = 1.90 \times (0.50Fr_E^2 + 1) \quad (\text{ただし、}\alpha_E < 3 \text{ では } \alpha_E = 3 \text{ とする}) \quad (9)$$

α_E : 最大比エネルギー発生時刻に基づく水深係数

Fr_E : 最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数

【解説】 水深係数(α_E)の評価式についての解説

・「防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数について」^(参3)では、非粘性、定常及び一次元流れの条件において、フルード数(Fr_E)から水深係数(α_E)を推定する理論式($\alpha_E = 0.50Fr_E^2 + 1$)を導出した。式(9)はこの理論式を踏まえた上で、非定常性を有する津波を模擬した水理試験によるばらつき等を考慮し導出した。

・水深係数(α_E)の最小値は3とし、式(9)で水深係数(α_E) < 3と算出される場合、水深係数(α_E)は3と設定する。なお、式(9)の適用範囲は、フルード数(Fr_E)4程度までとする。

【確認事項】

③最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})の水深係数(α_E)倍に相当する静水圧分布を用いて持続波圧による荷重を評価していること。最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})の水深係数(α_E)倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_E)を、式(10)に示す。

さらに、②で評価した持続波浸水深(η_{max_2nd})の3倍の高さに相当する静水圧分布を用いた荷重と比較し、値が大きくなる方を持続波圧による荷重に適用していること。荷重の比較にあたっては、両者とも静水圧分布と考えるため、防潮堤等の最下部に作用する圧力を比較してよい。したがって、式(6)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{2nd})と式(10)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_E)を比較し、値が大きくなる方を用いて持続波圧による荷重として設定していること。

$$P_E = \alpha_E \rho g \eta_{E_max} \quad (10)$$

P_E : 最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})の水深係数(α_E)倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力

η_{E_max} : 最大比エネルギー発生時刻における浸水深

ρ : 海水(流体)密度

g : 重力加速度

【解説】 持続波浸水深(η_{max_2nd})発生時刻に基づく持続波圧による荷重及び最大比エネルギー発生時刻に基づく持続波圧による荷重の比較についての解説

持続波浸水深(η_{max_2nd})発生時刻に基づく持続波圧による荷重は、式(6)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{2nd})を最大値とする静水圧分布荷重となる。

最大比エネルギー発生時刻に基づく持続波圧による荷重は、式(10)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_E)を最大値とする静水圧分布荷重となる。

よって、式(10)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_E)と式(6)で算出される防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{2nd})を比較して、値が大きくなる方を用いて持続波圧による荷重として設定する。

すなわち、($P_{2nd} = 3\rho g \eta_{max_2nd}$)及び($P_E = \alpha_E \rho g \eta_{E_max}$)なので、($3\eta_{max_2nd}$)及び($\alpha_E \eta_{E_max}$)のそれぞれの値を比較したうえで設定する。

ここで、水深係数(α)=3の適用範囲であるフルード数(Fr)が1を超える場合には、フルード数(Fr_E)及び式(10)より水深係数(α_E)を算出するが、この水深係数(α_E)が3を超える場合でも、持続波浸水深(η_{max_2nd})の方が最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})よりも大きな値であれば、 $3\eta_{max_2nd} \geq \alpha_E \eta_{E_max}$ となる可能性がある。

なお、防潮堤等の最下部から防潮堤等の高さ(h_d)までの範囲にかかる静水圧分布荷重について、防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_E)を最大値とする場合の持続波圧による荷重(F_E)は式(11)及び式(12)で表され、防潮堤等の最下部に作用する圧力(P_{2nd})を最大値とする場合の持続波圧による荷重(F_{2nd})は式(13)及び式(14)で表される。

$$F_E = \frac{1}{2} (P_E \cdot \alpha_E \eta_{E_max}) \quad \text{ただし、} h_d \geq \alpha_E \eta_{E_max} \quad (11)$$

$$F_E = \frac{1}{2} \{P_E + (P_E - \rho g h_d)\} \cdot h_d = P_E h_d - \frac{1}{2} \rho g h_d^2 \quad \text{ただし、} h_d < \alpha_E \eta_{E_max} \quad (12)$$

F_E : 最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})の水深係数(α_E)倍に相当する静水圧分布による持続波圧による荷重

P_E : 最大比エネルギー発生時刻における浸水深(η_{E_max})の水深係数(α_E)倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力

ρ : 海水(流体)密度

g : 重力加速度

h_d : 防潮堤等の高さ

$$F_{2nd} = \frac{1}{2} (P_E \cdot 3\eta_{max_2nd}) \quad \text{ただし、} h_d \geq 3\eta_{max_2nd} \quad (13)$$

$$F_{2nd} = \frac{1}{2} \{P_{2nd} + (P_{2nd} - \rho g h_d)\} \cdot h_d = P_{2nd} h_d - \frac{1}{2} \rho g h_d^2 \quad \text{ただし、} h_d < 3\eta_{max_2nd} \quad (14)$$

F_{2nd} : 持続波浸水深(η_{max_2nd})の3倍の高さに相当する静水圧分布による持続波圧による荷重

P_{2nd} : 持続波浸水深(η_{max_2nd})の3倍の高さに相当する静水圧分布で防潮堤等の最下部に作用する圧力

ρ : 海水(流体)密度

g : 重力加速度

h_d : 防潮堤等の高さ

参考文献

- 参 1 原子力規制委員会、NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について、NTEC-2014-4001、平成 26 年 12 月
- 参 2 原子力規制委員会、NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波段波の影響について、NTEC-2015-4001、平成 27 年 10 月
- 参 3 原子力規制委員会、NRA 技術報告、防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数について、NTEC-2016-4001、平成 28 年 12 月
- 参 4 朝倉良介、ほか、護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究、海岸工学論文集、第 47 巻(2000)、pp.911-915
- 参 6 池野正明、松山昌史、榊山勉、柳沢賢、ソリトン分裂と碎波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究、海岸工学論文集、第 52 巻(2005)、pp.751-755

参考規格・基準類

- 参 5 国土交通省港湾局、防波堤の耐津波設計ガイドライン、平成 25 年 9 月

防潮堤に作用する津波波圧評価に関する安全研究について

平成 28 年 1 1 月 9 日
原子力規制庁

1. 背景

(1) 防潮堤に作用する津波波圧の概要

段波波圧は、最初に防潮堤に衝突する津波が与える短時間で大きく変化する波圧のことである。持続波圧は、段波波圧の後の継続時間の長い波圧であり、防潮堤には長時間で一定の範囲の波圧が作用する。(図-1 参照)

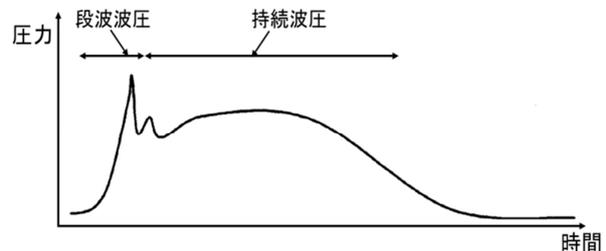


図-1 防潮堤に作用する津波波圧

(2) 耐津波設計に係る規定

津波に対し防潮堤等の防護機能が十分保持できるように設計がなされるために「基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド」では、「津波による荷重（波圧、衝撃力）の設定に関して、考慮する知見（例えば国交省の暫定指針*1 等）及びそれらの適用性を確認する」こととしている。また、「耐津波設計に係る工認審査ガイド」では、津波荷重の算定に当たって、「施設に作用する津波波圧の経時変化（段波波圧、持続波圧）に留意する」こととしている。

*1：国土交通省「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」（平成 23 年 1 1 月 17 日）
設計波圧は、防潮堤が無い場合を想定して求めた防潮堤位置での津波の浸水深から得られる設計用浸水深の 3 倍（以下「水深係数 3」という。）の静水圧を用いることとしている。

(3) 原子力規制庁におけるこれまでの研究内容

平成 26 年度第 38 回原子力規制委員会（平成 26 年 1 1 月 12 日）及び NRA 技術報告「防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について」（NTEC-2014-4001）において、持続波は、フルード数 (Fr) *2（以下「 Fr 数」という。）が 1 以下の範囲であれば、国交省の暫定指針の考え方を適用できることを報告した。

平成 27 年度第 28 回原子力規制委員会（平成 27 年 9 月 9 日）及び NRA 技術報告「防潮堤に作用する津波段波の影響について」（NTEC-2015-4001）において、段波が防潮堤の構造健全性に与える影響は、概して持続波による影響よりも小さいことを報告した。さらに、段波による影響が持続波よりも大きくなる場合においても、国交省の暫定指針の考え方を適用できることを報告した。

また、上記報告では、持続波を対象に、 Fr 数が 1 を超える場合の防潮堤に対する作用波圧の評価方法を今後の検討課題として挙げた。

*2：フルード数 (Fr) は、流体の慣性力（勢い）と重力の比を表す無次元数で、流体の性状を示す指標の一つである。防潮堤が無い場合の持続波の最大浸水深及びその発生時刻における流速より算出した。

2. 本研究の目的

本研究では、上記検討課題への対応を目的として、持続波を対象に、Fr 数が 1 を超える場合の防潮堤に対する作用波圧の評価方法について検討を行った。

3. Fr 数が 1 を超える場合の作用波圧の評価

水理試験及びシミュレーション解析を実施することで、持続波を対象とした Fr 数が 1 を超える場合の作用波圧の評価方法について確認した。

(1) 水理試験の概要

水理試験に当たっては、津波の海上伝播及び陸上の遡上を模擬するための水路を用い、造波装置により津波を模擬した作用波を発生させた。

水路は、縮尺 1 / 40 とした。作用波の種類（孤立波、正弦波及び長周期波）、防潮堤試験体（以下「堤体」という。）の設置位置及び水路底面勾配（1 / 20 及び 0）をパラメータとした水理試験を行い（図-2 参照）、通過波検定試験において浸水深及び流速並びに波圧試験において堤体に作用する波圧を計測した。



図-2 水理試験の状況

(2) 水理試験結果

①従来評価方法の検証結果及び課題の確認

国交省の暫定指針の考え方に基づき、堤体への作用波圧を計測するとともに、堤体位置における Fr 数及び水深係数 (α) *3 (以下「 α 」という。) の関係を整理した (図-3 参照)。

Fr 数が大きくなるに従って α も大きくなり、Fr 数が 1 を超えると α が国交省の暫定指針の水深係数 3 の適用範囲から外れることを確認した。この結果は N T E C - 2 0 1 4 - 4 0 0 1 で実施した水理試験結果とも整合した。

また、Fr 数が 1 を超える領域では、ほぼ同じ Fr 数でも作用波の種類や堤体位置等の違いにより α は広範囲に分布し、Fr 数及び α の関係が把握しにくくなる課題があることが分かった。

これは、Fr 数が 1 を超える領域では流速の効果が大きくなる一方で、最大浸水深に基づき算出した Fr 数は流速の効果が適切に考慮されていないためと考えられる。

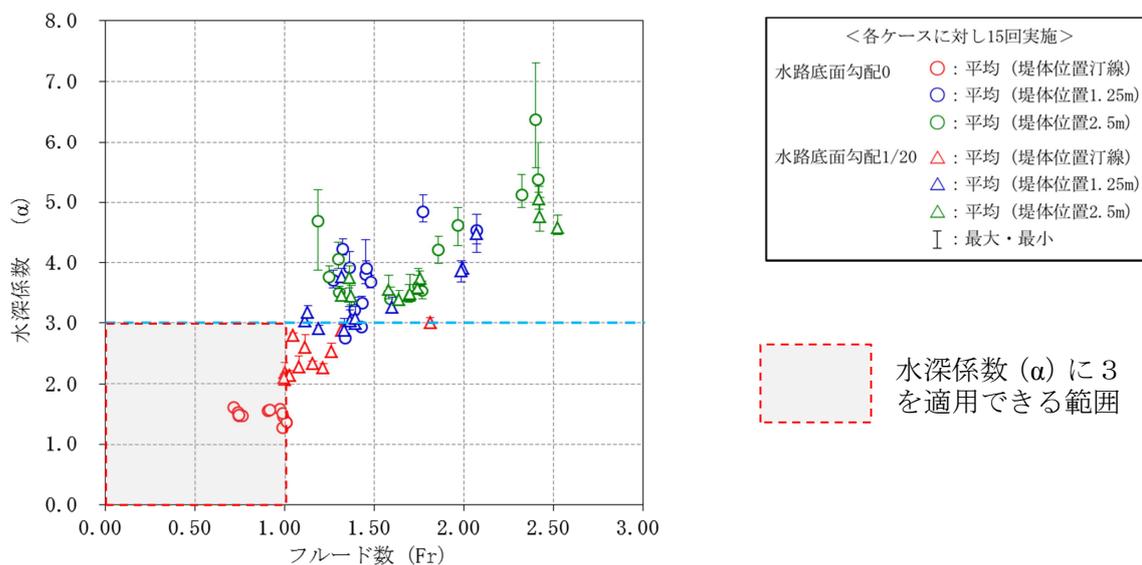


図-3 フルード数 (Fr) 及び水深係数 (α) の関係

*3: 水深係数 (α) は、堤体が無い場合の最大浸水深及び堤体を設置した場合の最大持続波圧から算出した。

②Fr 数が 1 を超える場合の評価結果

①における課題を踏まえ、水理試験結果の整理に当たっては、作用波の流速の効果も勘案したエネルギー特性に係る指標が適切と考えた。

そこで、作用波圧に係る流れの特性を適切に把握するため最大比エネルギー (E_{max}) *4 に着目し、通過波の最大比エネルギー (E_{max}) 発生時刻に基づいたフルード数 (Fr_E) *5 (以下「 Fr_E 数」という。) 及び水深係数 (α_E) *6 (以下「 α_E 」という。) を用いて水理試験結果を整理した。

また、通過波の最大比エネルギー (E_{max}) 発生時刻に基づいた Fr_E 数及び α_E に係る理論式(1) *7 と回帰式(2) *8 は、ほぼ一致した (図-4 参照)。

これより、本水理試験結果の整理は、理論的に適正であることが分かった。

理論式： $\alpha_E = 0.50Fr_E^2 + 1$ (1)

回帰式： $\alpha_E = 0.49Fr_E^2 + 1$ (2)

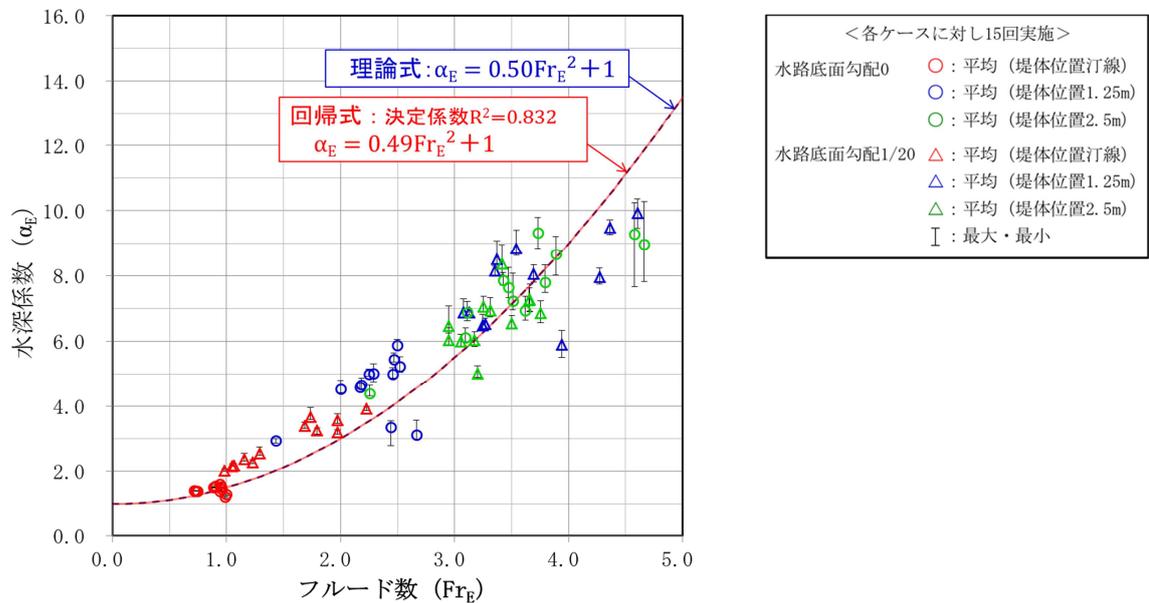


図-4 フルード数 (Fr_E) 及び水深係数 (α_E) 並びに理論式及び回帰式の関係

*4：最大比エネルギー (E_{max}) は単位体積重量の水の持つ全エネルギーの最大値で、通過波の浸水深及び流速より算出した。

$$E_{max} = \frac{v_{E_{max}}^2}{2g} + \eta_{E_{max}}$$

$v_{E_{max}}$ ：通過波の最大比エネルギー (E_{max}) 発生時刻における流速

$\eta_{E_{max}}$ ：通過波の最大比エネルギー (E_{max}) 発生時刻における浸水深

*5：フルード数 (Fr_E) は、堤体が無い場合の堤体位置における持続波の最大比エネルギー発生時刻における浸水深及び流速より算出した。

*6：水深係数 (α_E) は、最大比エネルギー発生時刻における浸水深及び堤体に作用する最大持続波圧から算出した。

*7：理論式(1)は、ベルヌーイ定理を基に定常及び一次元流れを対象とし、界面における摩擦等は無視した条件より導出した。

*8：回帰式(2)は、理論式(1)と同様に二次項と定数項1の二次関数 ($y=ax^2+1$) として導出した。

また、Fr 数が 1 を超える場合の作用波圧の評価の観点から、Fr_E 数及び α_E の関係をより適切に表すことのできる一次、二次、三次関数の回帰式(3) (4) (5)を導出した。

$$\text{回帰式(一次)} : \alpha_E = 2.17Fr_E - 0.36 \quad \dots \quad (3)$$

$$\text{回帰式(二次)} : \alpha_E = -0.05Fr_E^2 + 2.42Fr_E - 0.60 \quad \dots \quad (4)$$

$$\text{回帰式(三次)} : \alpha_E = -0.07Fr_E^3 + 0.53Fr_E^2 + 1.05Fr_E + 0.27 \quad \dots \quad (5)$$

さらに、上記のいずれの回帰式に対しても対数標準偏差+2σ を考慮すると、全ての水理試験データを包含した。以上の結果から、作用波圧の評価に当たっては、下記評価式(6) (7) (8)が適用できると考える (図-5 参照)。

$$\text{評価式(一次)} : \alpha_E = 1.34 \times (2.17Fr_E - 0.36) \quad \dots \quad (6)$$

$$\text{評価式(二次)} : \alpha_E = 1.35 \times (-0.05Fr_E^2 + 2.42Fr_E - 0.60) \quad \dots \quad (7)$$

$$\text{評価式(三次)} : \alpha_E = 1.34 \times (-0.07Fr_E^3 + 0.53Fr_E^2 + 1.05Fr_E + 0.27) \quad (8)$$

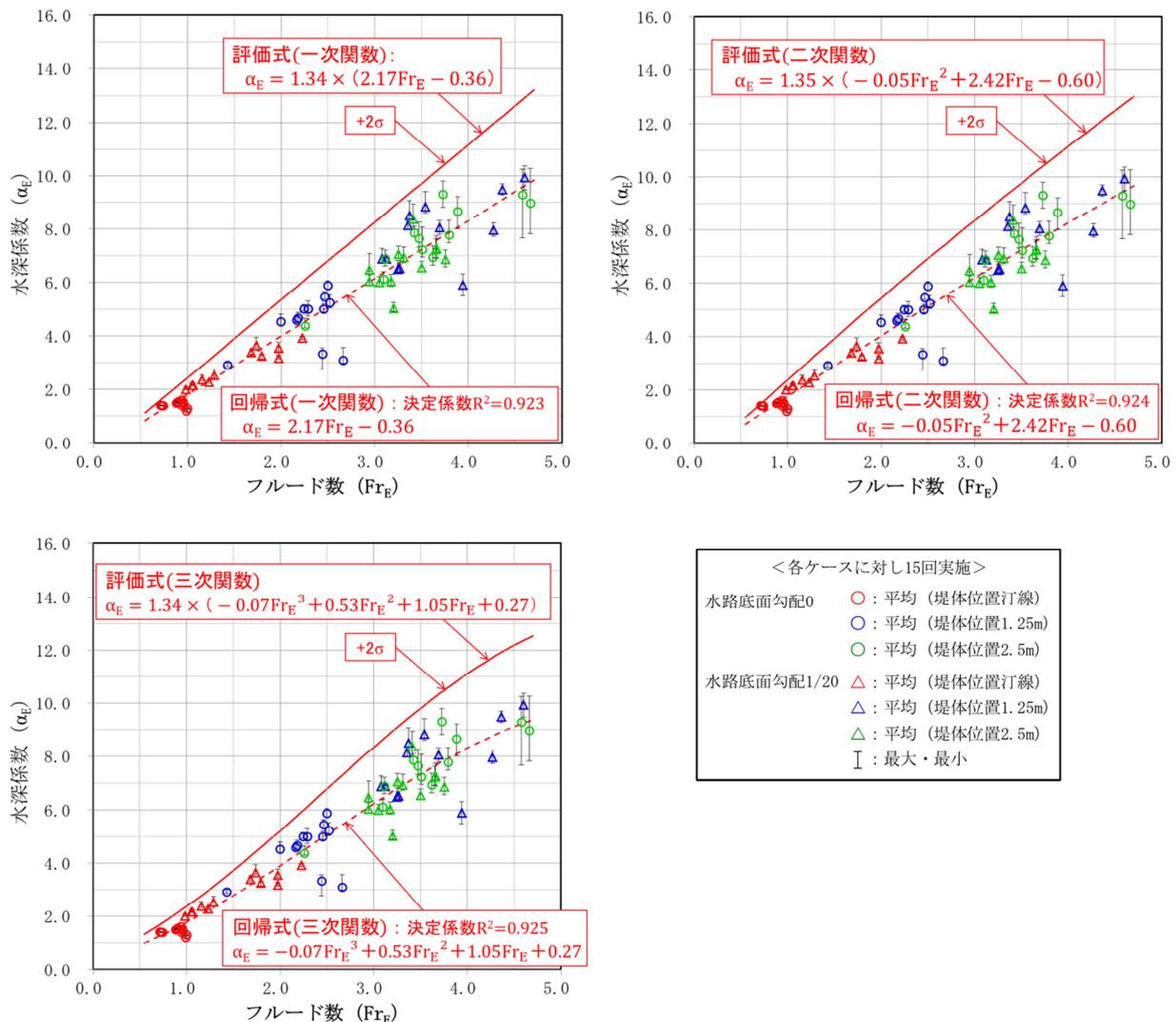


図-5 フルード数 (Fr_E) 及び水深係数 (α_E) 並びに回帰式及び評価式の関係

(3) 通過波の浸水深及び流速の評価方法

通過波の最大比エネルギー発生時刻における浸水深及び流速は、解析によって算定できることを水理試験結果に対するシミュレーション解析の結果から確認した。

4. まとめ

本研究結果から、通過波の最大比エネルギー (E_{\max}) 発生時刻に基づいた Fr_E 数及び α_E の関係を用いた水理試験結果の整理は、理論的に適正であることが分かった。さらに、堤体に対し Fr 数が 1 を超える広範囲の作用波圧の評価方法として、 Fr_E 数及び α_E の関係をより適切に表す評価式を導出した。

したがって、上記評価式等を用いることで、作用波圧の評価ができると考える。

また、本評価方法の適用に当たって、津波の通過波の最大比エネルギー発生時刻における浸水深及び流速は、プラントごとに海陸の条件を考慮した解析等により算定できると考える。

なお、 Fr 数が 1 以下の領域では、流速の効果は比較的小さく従来評価方法と本研究による評価方法はほぼ同じとみなせる。したがって、従来評価方法で Fr 数が 1 以下になることが確認済であれば、 α には国交省の暫定指針の水深係数 3 を適用でき、これまでの評価を変える必要はない。

5. 今後の予定

今回の安全研究の成果を、NRA 技術報告「防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数について」として公開する。

さらに、今回の安全研究の成果、NTEC-2014-4001 及び NTEC-2015-4001 の内容を踏まえ、審査への活用を念頭に津波波圧の評価手法として取りまとめを行う。また、審査ガイドについては、取りまとめの結果を踏まえ、記載内容の充実等の観点から改定を検討する。

以上