

# NRA 技術報告における津波の持続波圧評価式の再検討 — 令和 2 年度第 40 回原子力規制委員会指摘事項への対応等 —

令和 3 年 7 月 21 日  
原子力規制庁

## 1. 経緯

原子力規制庁は、平成 26 年から平成 28 年にかけて、津波波圧評価に係る 3 編の NRA 技術報告<sup>1,2,3</sup>を公表した。

「令和 2 年度第 40 回原子力規制委員会（令和 2 年 11 月 25 日）」（以下「第 40 回原子力規制委員会」という。）において、原子力規制庁は、津波波圧の評価手法を審査で確認する観点から、NRA 技術報告を基に「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。）を作成したことを報告した。また、この波圧確認事項を「耐津波設計に係る工認審査ガイド」の別添として反映する作業を実施することが了承された。（【参考】参照）

その際、「最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数 ( $Fr_E$ )<sup>4</sup>と水深係数 ( $\alpha_E$ ) の関係に基づく持続波圧評価式」（以下「持続波圧評価式」という。）に関し、水理試験結果<sup>5</sup>のばらつきの要因及び持続波圧評価式の保守性の考え方について質疑があり、規制庁より説明するよう指摘を受けた。

## 2. 水理試験結果のばらつきの要因

水理試験結果のばらつきの要因について改めて検討を行った。その結果、ばらつきの要因は、波圧計測結果の処理において水深係数 ( $\alpha_E$ ) を保守的に見積もっていること及びフルード数 ( $Fr_E$ ) が大きい領域において流れの乱れが強くなることで作用波圧が低下する可能性があることの両者に起因していると分析した。（【別添 1】参照）

## 3. 持続波圧評価式の再検討

### （1）第 40 回原子力規制委員会で提案した持続波圧評価式

第 40 回原子力規制委員会では、以下の持続波圧評価式を提案した。

- 
- 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
  - 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
  - 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
  - 4 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の一つ。
  - 5 水理試験は、津波の海上伝播及び陸上の遡上を模擬する水路を用い、造波装置により津波を模擬した作用波を発生させた。通過波検定試験では、浸水深及び流速の計測結果を収集した。波圧試験では、水路の陸上の遡上部に設置した防潮堤試験体に作用する波圧の計測結果を収集した。

$$\alpha_E = 1.90 \times (0.50 \times Fr_E^2 + 1) \quad \dots \dots \dots \text{式 (1)}$$

この持続波圧評価式の設定においては、フルード数 (Fr) 1 以下では、水深係数 ( $\alpha$ ) に国土交通省の暫定指針<sup>6</sup>の水深係数 3 を適用することとした。

また、フルード数 (Fr) 1 以上では、フルード数 (Fr) 1 以下との連続性を考慮するとともに、水理試験結果のばらつきを包絡させる方針とした。この方針に基づき、水理試験結果のばらつきを対数正規分布として取り扱い、対数標準偏差 +2 $\sigma$  及び +3 $\sigma$  を考慮した式を検討したうえで、+3 $\sigma$  を考慮した式が方針に合致すると考えた (図-1 参照)。

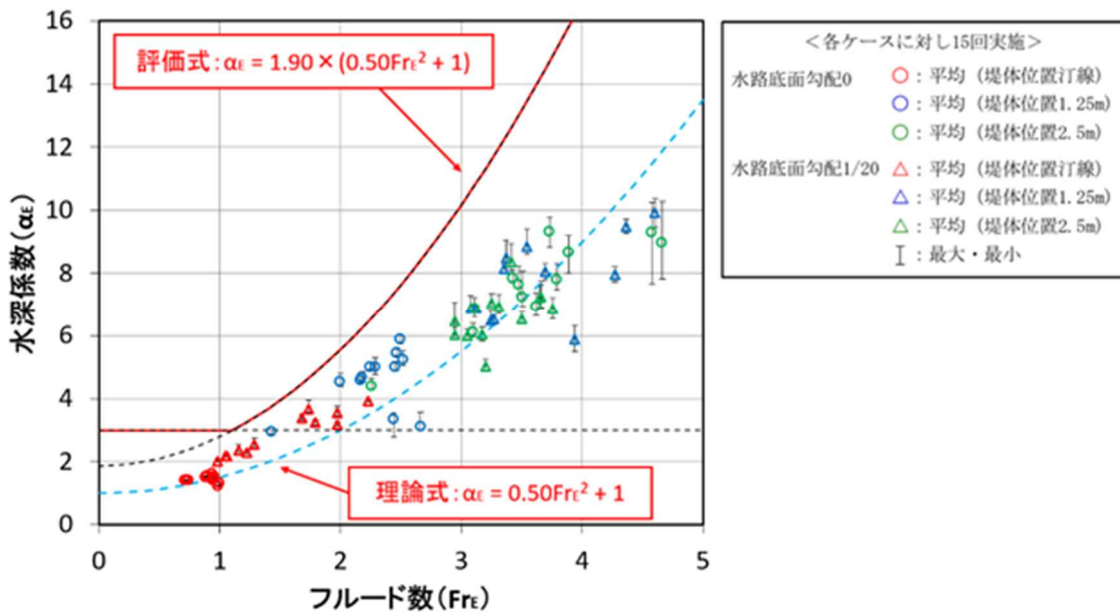


図-1 最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数 ( $Fr_E$ ) と水深係数 ( $\alpha_E$ ) の関係に基づく持続波圧評価式

## (2) 持続波圧評価式の再検討

上記 (1) の持続波圧評価式は水理試験結果のばらつきを対数正規分布として取り扱ったが、その保守性の考え方を整理している過程において、本来は正規分布として取り扱う必要があったことが分かった。このため、式 (1) に代えて、以下に示す持続波圧評価式を改めて設定した。

$$\alpha_E = 3.0 \quad (Fr_E \leq 1.24^7) \quad \dots \dots \dots \text{式 (2)}$$

$$\alpha_E = (0.70 \times Fr_E^2 + 1) + 0.93 \quad (Fr_E > 1.24) \quad \dots \dots \dots \text{式 (3)}$$

6 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

7 フルード数 ( $Fr_E$ ) 1.24 は  $\alpha_E = 3.0$  と  $\alpha_E = (0.70 \times Fr_E^2 + 1) + 0.93$  の交点の値を示す。

式(2)は、国交省の暫定指針の水深係数3の適用について、水理試験結果を包絡する範囲で拡張したものである。

式(3)は、フルード数( $Fr_E$ )0~2.5までの水理試験結果のばらつきを包絡することを基本に、フルード数( $Fr_E$ )0~2.5までの水理試験結果を対象とした回帰式<sup>8</sup>に対し標準偏差+2 $\sigma$ を考慮した。この結果、全水理試験結果のばらつきをほぼ包絡している。

なお、フルード数( $Fr_E$ )0~2.5までの水理試験結果を対象としたのは、実プラントでのフルード数( $Fr_E$ )の実績及びその他の影響等を考慮したことによる。  
 (【別添2】参照)

第40回原子力規制委員会での提案と今回設定した持続波圧評価式の比較を以下に示す(図-2参照)。

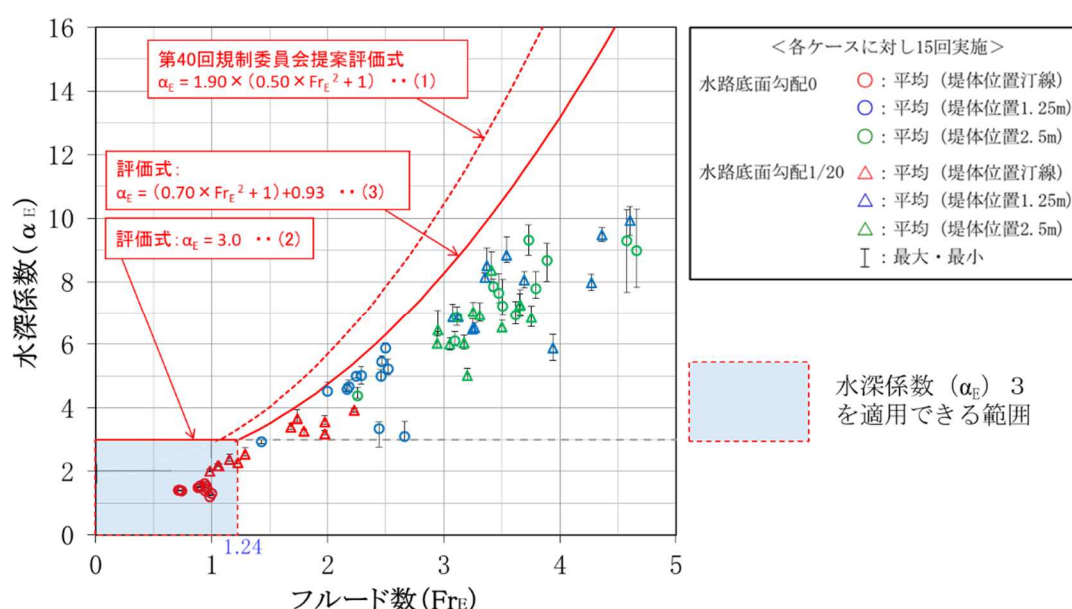


図-2 第40回原子力規制委員会での提案と今回設定した持続波圧評価式の関係

#### 4. 今後の進め方

NRA 技術報告<sup>3</sup>では、第40回原子力規制委員会での提案した持続波圧評価式を評価式導出例として記載しており、今回改めて策定した持続波圧評価式を反映のうえ改訂することとしたい。

「耐津波設計に係る工認審査ガイド」の別添となる波圧確認事項に、今回改めて策定した持続波圧評価式を反映のうえ、今後「耐津波設計に係る工認審査ガイド」の改訂案を原子力規制委員会に諮ることとしたい。

<sup>8</sup>  $\alpha_E = 0.70 \times Fr_E^2 + 1$ : フルード数 ( $Fr_E$ ) 0~2.5 までの水理試験結果から導出した。

**<別紙、別添、参考>**

別添 1 水理試験結果のばらつきの要因

別添 2 持続波圧評価式の再検討

参考 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 年度 第 40 回 原子力規制委員会 資料 3、令和 2 年 11 月 25 日

## 水理試験結果のばらつきの要因

### 1) 水深係数 ( $\alpha_E$ ) の算出方法

持続波圧評価における保守性確保の観点から、持続波領域の作用波圧の最大値に基づく水深係数 ( $\alpha_E$ ) を採用しており、最大比エネルギー発生時刻における作用波圧に基づく水深係数 ( $\alpha_E$ ) を上回る可能性がある。

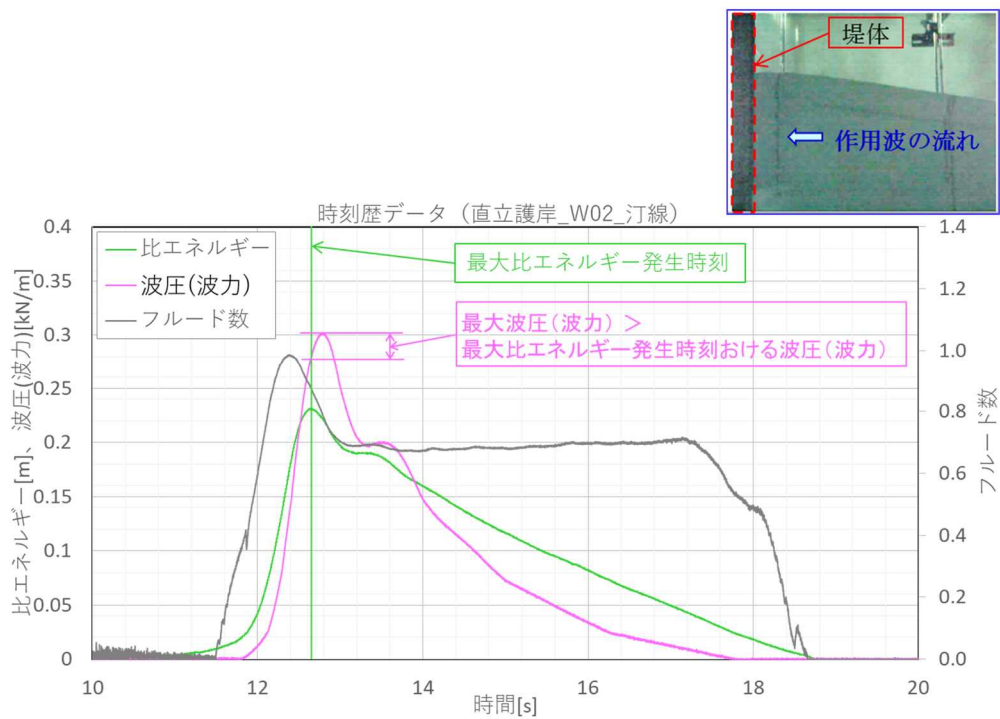
フルード数 ( $Fr_E$ ) が 1 以下のケースでは、最大比エネルギーや最大浸水深等の各パラメータの最大値の発生時刻は比較的接近していることから、流れの乱れが少なく定常流に近い特性と見なせる一方で、最大比エネルギー発生時刻における波圧と最大波圧には 10% 程度の相違が認められた (別図 1-1 参照)。

フルード数 ( $Fr_E$ ) が 1 を大きく超えるケースでも、最大比エネルギー発生時刻における波圧と最大波圧には 10% 程度の相違が認められた (別図 1-2 参照)。

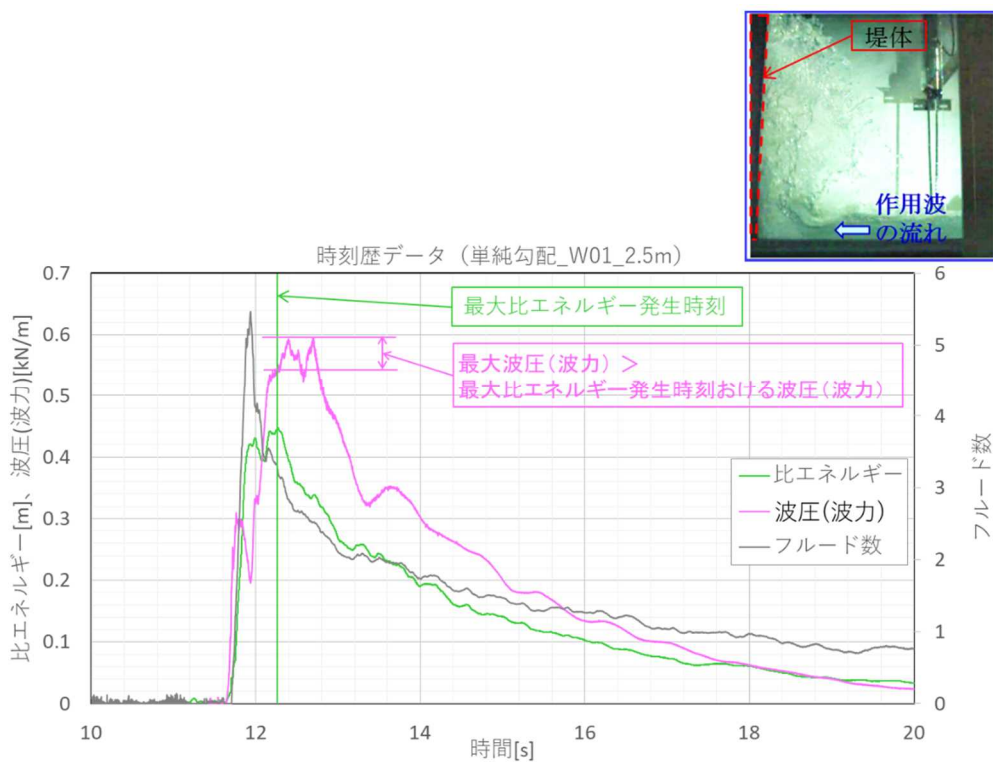
### 2) フルード数 ( $Fr_E$ ) が大きい領域における、流れの乱れ等

フルード数 ( $Fr_E$ ) 1 付近までの領域の流れは比較的緩やかな一方で、フルード数 ( $Fr_E$ ) が 1 付近を大きく超えるケースでは、最大比エネルギーや最大浸水深等の各パラメータの最大値の発生時刻には顕著な違いが見られる。これは、流れの勢いが強くなることに伴い流れの乱れも強くなることで、作用波圧が低下する可能性を示している (別図 1-2 参照)。

これより、水理試験結果に基づく回帰式のばらつきの主な要因は、波圧計測結果の保守的な処理に伴う水深係数 ( $\alpha_E$ ) の上昇及びフルード数 ( $Fr_E$ ) が大きい領域における流れの乱れと作用波圧の低下に起因していると考えられる。



別図 1 - 1 水深係数 ( $\alpha_E$ ) 算出に用いる最大波圧と最大比エネルギー発生時刻における波圧の関係 (フルード数 ( $Fr_E$ ) 1 以下の場合)



別図 1 - 2 水深係数 ( $\alpha_E$ ) 算出に用いる最大波圧と最大比エネルギー発生時刻における波圧の関係 (フルード数 ( $Fr_E$ ) が 1 を大きく超える場合)

## 持続波圧評価式の再検討

### 1) 各式の導出

全水理試験結果を対象とした回帰式(1)に対し、水理試験結果が正規分布であるとして、標準偏差+2 $\sigma$ を考慮した式(2)を導出した。

$$\alpha_E = 0.49 \times Fr_E^2 + 1 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\alpha_E = (0.49 \times Fr_E^2 + 1) + 2.13 \quad \dots \dots \dots (2)$$

さらに、これまでの審査で確認された実プラントの防潮堤設置位置におけるフルード数( $Fr_E$ )は1.5程度までであること及び防潮堤の設置位置、周辺地形等の違いによる影響を考慮し、フルード数( $Fr_E$ )0~2.5までの水理試験結果を対象として、回帰式(3)及び回帰式(3)に対し標準偏差+2 $\sigma$ を考慮した式(4)を導出した。

$$\alpha_E = 0.70 \times Fr_E^2 + 1 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\alpha_E = (0.70 \times Fr_E^2 + 1) + 0.93 \quad \dots \dots \dots (4)$$

式(3)及び式(4)の、二次項の係数は理論式<sup>9</sup>( $\alpha_E = 0.50 \times Fr_E^2 + 1$ )の0.50に対して0.70となった。

### 2) 導出した各式の比較

全水理試験結果を対象とした回帰式(1)及び回帰式(1)に対する標準偏差+2 $\sigma$ の式(2)と、フルード数( $Fr_E$ )0~2.5までの水理試験結果を対象とした回帰式(3)及び回帰式(3)に対する標準偏差+2 $\sigma$ の式(4)を比較した(別図2-1参照)。

全水理試験結果を対象とした回帰式(1)に対する標準偏差+2 $\sigma$ の式(2)は、全水理試験結果をほぼ包絡し、十分な保守性を確保できると考えられる一方で、フルード数( $Fr_E$ )が大きい領域における流れの乱れ等による作用波圧の変動が、フルード数( $Fr_E$ )が小さい領域にも影響することにより、この領域では、国交省の暫定指針の水深係数( $\alpha_E$ )3を上回った。

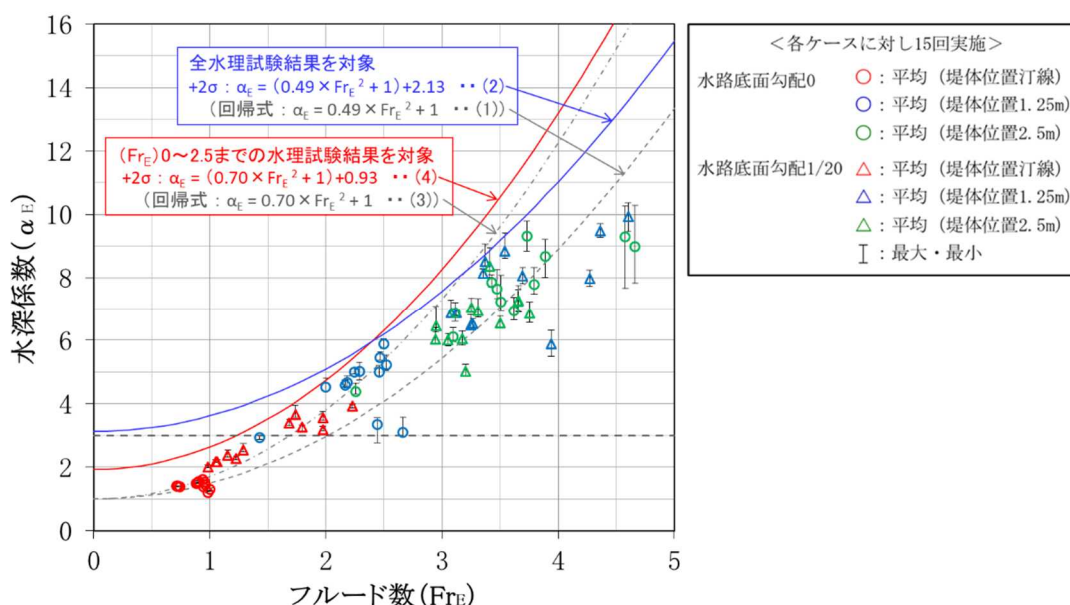
フルード数( $Fr_E$ )0~2.5までの水理試験結果を対象とした回帰式(3)に対する標準偏差+2 $\sigma$ の式(4)は、この領域の水理試験結果をほぼ包絡し、十分な保守性を確保できると考えられるとともに、フルード数( $Fr_E$ )1付近では、国交省の暫

<sup>9</sup> 理論式は、理想的な定常流を前提としたベルヌーイの定理を基に、全水頭を浸水深×倍率(水深係数に相当)とし、速度水頭及び圧力水頭はフルード数( $Fr_E$ )を変数とした項に置き換え、位置水頭は0(平坦路)の関数とした。

$$E = \frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} \quad E: \text{全水頭} \quad \frac{v^2}{2g}: \text{速度水頭} \quad z: \text{位置水頭} \quad \frac{p}{\rho g}: \text{圧力水頭}$$

定指針の水深係数( $\alpha_E$ )3を少し下回った。また、式(4)をフルード数( $Fr_E$ )2.5を超える領域への適用を想定する場合、式(2)に比べ保守性は大きくなった。

式(2)と式(4)の比較結果を踏まえると、フルード数( $Fr_E$ )0~2.5までの領域に対しては、式(4)が評価式への適用性を有していると考えられる。また、フルード数( $Fr_E$ )2.5を超える領域に対しては、式(2)及び式(4)のいずれも評価式への適用性を有していると考えられる。



別図2-1 全水理試験結果を対象とした回帰式に対する標準偏差+2 $\sigma$ の式とフルード数( $Fr_E$ )0~2.5までの水理試験結果を対象とした回帰式に対する標準偏差+2 $\sigma$ の式の比較

### 3) 持続波圧評価式の策定に当たっての考慮事項

1) 2) の比較結果を踏まえるとともに、フルード数( $Fr_E$ )1以下の領域では、国交省の暫定指針の水深係数( $\alpha_E$ )3を適用する。また、実際に発生する可能性の高いフルード数( $Fr_E$ )が1付近であることから、フルード数( $Fr_E$ )1付近において、当該暫定指針の水深係数( $\alpha_E$ )3との連続性を考慮する。

これより、フルード数( $Fr_E$ )1付近までの領域の持続波圧評価式は、水深係数( $\alpha_E$ )3の式とする。また、フルード数( $Fr_E$ )1付近を超える領域の持続波圧評価式は、水深係数( $\alpha_E$ )3との交点を起点とした式とする。

なお、式(2)及び式(4)を基にフルード数( $Fr_E$ )2.5前後の領域に分けることもできるが、評価の容易性等を勘案し一つの二次関数の式で代表させることとする。

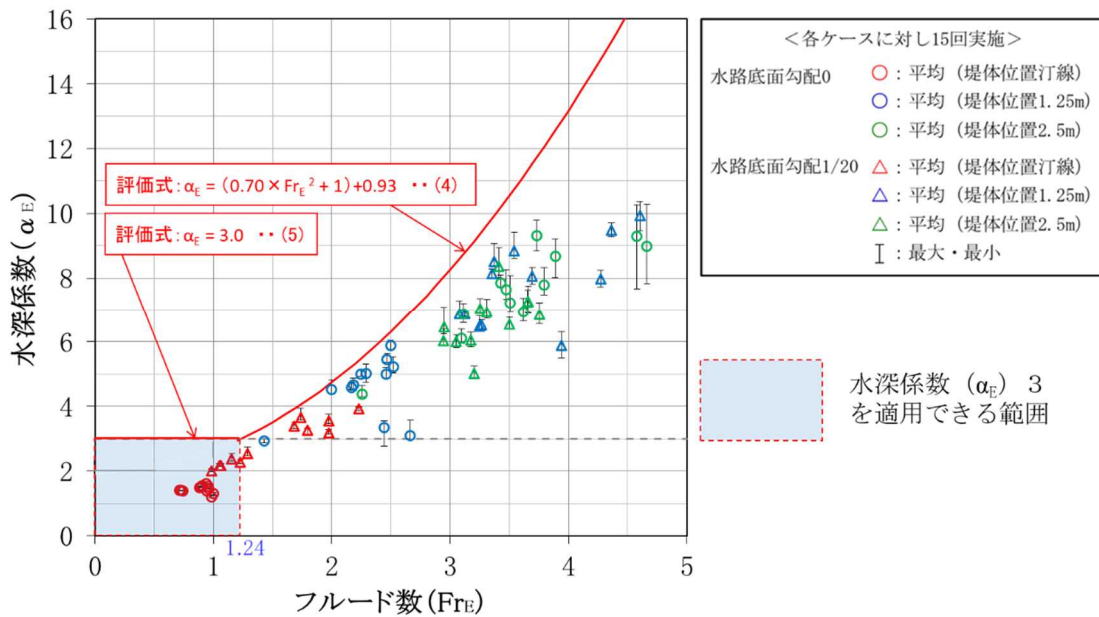


#### 4) 持続波圧評価式の再設定

3) を踏まえ、フルード数 ( $Fr_E$ ) 1.24 以下の領域は国交省の暫定指針の水深係数 ( $\alpha_E$ ) 3 とする式 (5) とする。また、フルード数 ( $Fr_E$ ) 1.24 を超える領域は、式 (4) を持続波圧評価式として策定した (別図 2-2 参照)。式 (4) は、フルード数 ( $Fr_E$ ) 0 ~ 2.5 までの水理試験結果を基としているが、フルード数 ( $Fr_E$ ) 2.5 を超える領域についても、水理試験結果を包絡している。

$$\alpha_E = 3.0 \quad (Fr_E \leq 1.24) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\alpha_E = (0.70 \times Fr_E^2 + 1) + 0.93 \quad (Fr_E > 1.24) \quad \dots \dots \dots (4)$$



別図 2-2 持続波圧評価式と全水理試験結果の関係

## 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<sup>1</sup>、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<sup>2</sup>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<sup>3,4,5</sup>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<sup>5</sup>。

(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

<sup>1</sup> 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。

<sup>2</sup> 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。

<sup>3</sup> 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

<sup>4</sup> 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

<sup>5</sup> 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<sup>6</sup>と静水圧的な持続波圧<sup>7</sup>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)

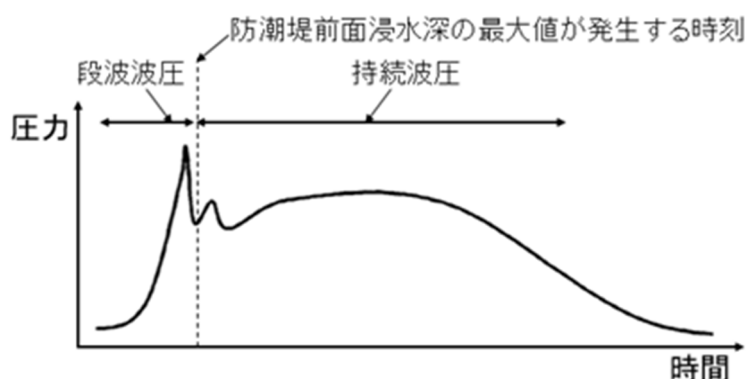


図-1 防潮堤等に作用する津波波圧

<sup>6</sup> 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。

<sup>7</sup> 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

段波波圧を碎波段波波圧<sup>8</sup>及び波状段波波圧<sup>9</sup>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<sup>10</sup>を用いて持続波圧を評価する場合は、フルード数<sup>11</sup>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<sup>12</sup>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。

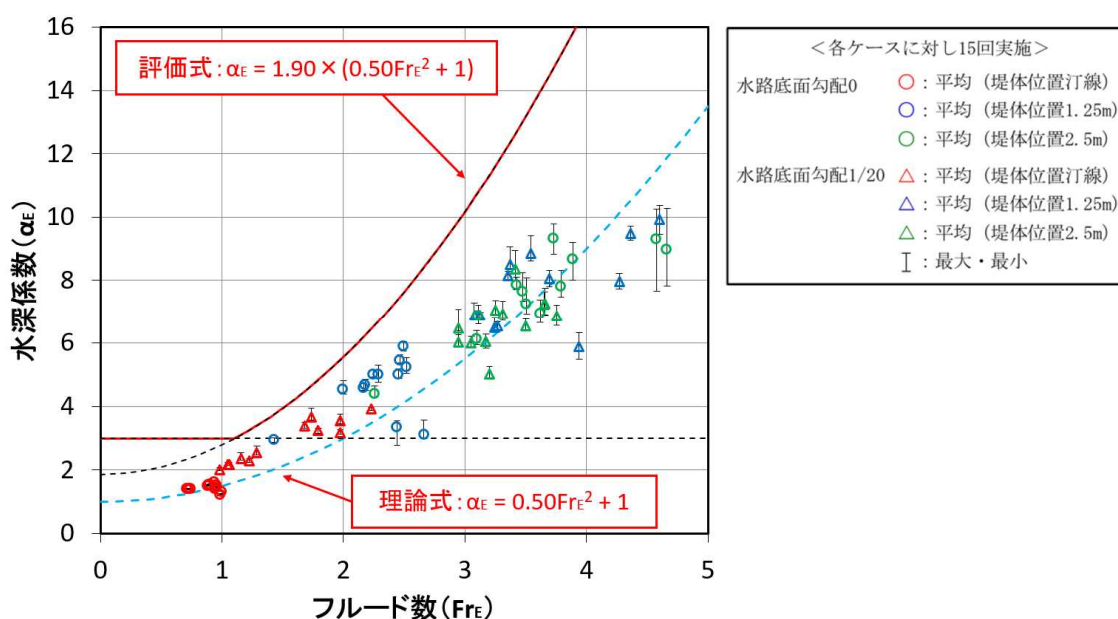


図-2 最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数と水深係数の関係に基づく持続波圧評価式

## 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<sup>13</sup>」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。

<sup>8</sup> 津波の先端部が急峻な壁状となった後に波が碎け、防潮堤等に作用する波圧。

<sup>9</sup> 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。

<sup>10</sup> 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。

<sup>11</sup> 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。

<sup>12</sup> 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。

<sup>13</sup> 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