

NRA 技術報告「防潮堤に作用する最大持続波圧評価式の提案」 について(案)

令和4年7月28日
地震・津波研究部門

1. 背景及び目的

地震・津波研究部門は、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¹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)において、「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、この波圧確認事項を「耐津波設計に係る設工認審査ガイド」の別添として反映する作業の実施が了承された。その際、フルード数が1を超える領域までを対象とした持続波圧評価式(以下「旧評価式」という。)を作成したことに関する報告に対し、水理試験結果のばらつきの要因及び旧評価式の保守性の考え方について説明するよう指摘を受けた。

令和3年度第21回原子力規制委員会(令和3年7月21日。以下「第21回原子力規制委員会」という。)において、ばらつきの要因とともに旧評価式は見直しが必要であること及び見直した持続波圧評価式(以下「新評価式」という。)を報告した(参考参照)。この際、下記の指示があった。

- 新たにNRA技術報告を作成して新評価式を提案するとともに、水理試験結果と理論式²の乖離要因について考察すること
 - 「耐津波設計に係る設工認審査ガイド^{参5)}」の別添として、新評価式を反映した「波圧確認事項」を策定し、原子力規制委員会に意見募集を諮ること
- これを踏まえ、NRA技術報告を新たに策定したことから、その内容と今後の対応について報告する。

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^{参1)}、NTEC-2014-4001、平成26年12月

— 持続波圧を対象に、フルード数が1以下の範囲であれば、国交省の暫定指針^{参2)}の水深係数3を適用できることを確認した。

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^{参3)}、NTEC-2015-4001、平成27年10月

— 一段波波圧を対象に、概して持続波圧による影響よりも小さいことを確認した。段波波圧による影響が持続波圧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確認した。

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^{参4)}、NTEC-2016-4001、平成28年12月

— 持続波圧を対象に、フルード数が1を超える場合、津波の最大比エネルギー発生時刻における浸水深と流速に基づいた評価方法が適用できることを確認した。

² ベルヌーイの定理を基に導出した、通過波の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(α_E)に係る関係式を理論式($\alpha_E = 0.50 \times Fr_E^2 + 1$)という。

2. 本 NRA 技術報告の概要

2.1 新評価式の提案

旧評価式は、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、正規分布として取り扱い整理した。

また、旧評価式(図-1参照)ではばらつきを+3 σ としたが、新評価式(図-2参照)ではばらつきに係る評価を見直し、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+2 σ とした。

新評価式を以下に示す³。なお、理論式については、見直しの対象とはしていない。

$$\alpha_E = 3.0 \quad (Fr_E \leq 1.24)^4 \quad \dots \text{式 (1)}$$

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

α_E : 通過波の最大比エネルギー発生時刻における水深係数

Fr_E : 通過波の最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数

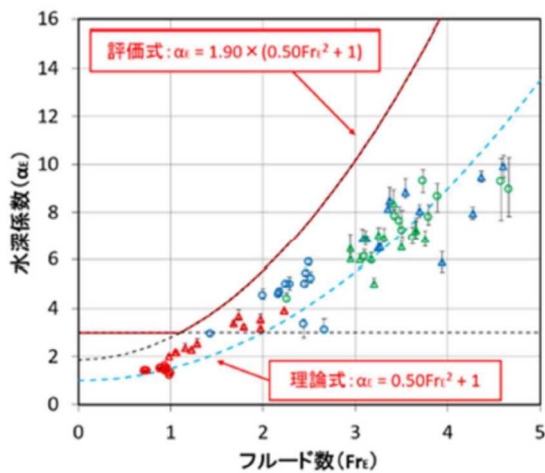


図-1 旧評価式と水理試験結果の関係

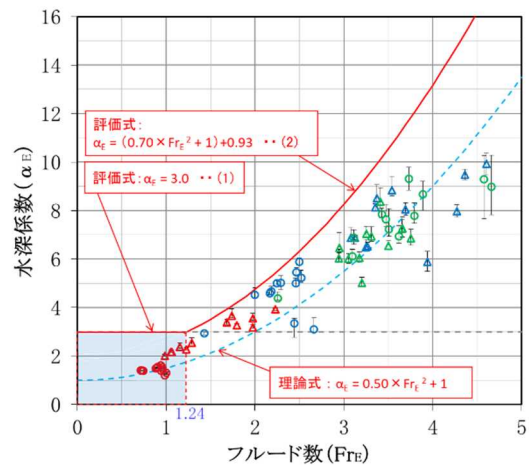


図-2 新評価式と水理試験結果の関係

³ 式(1)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(2)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に対し+2 σ (σ は標準偏差)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。

⁴ 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。

2.2 水理試験結果と理論式の乖離要因についての考察

水理試験結果から得られた水深係数は、多くの試験ケースにおいて理論式よりも高くなっており乖離が生じていた。

その要因の整理を行った結果、水深係数が高くなる要因としては落水による衝撃圧力の影響が大きいと考えた。そこで、水理試験時の高速度カメラの画像から、入力波の流れの様子について分析した。また、最大比エネルギー発生時刻と最大持続波圧発生時刻の関係についても分析した。

水理試験設備の概要を図-3に、水理試験結果の一例を図-4に示す。図-4の堤体位置汀線(a.)において、入力波は最大堤体前面浸水深を計測した時刻の近傍(≒最大比エネルギー発生時刻)で、堤体を打ち上ることなく沖側へ戻った。この場合、ほぼ同時刻で最大持続波圧を計測した(図-4、a.①及び図-5、a.①参照)。堤体位置 1.25m(b.)及び 2.5m(c.)において、入力波は最大堤体前面浸水深を計測した後すぐには沖へ戻らず、堤体を打ち上がった。打ち上がった入力波が落水した時刻で、最大持続波圧を計測した(図-4、b.②、c.③及び図-5、b.②参照)。この結果から、落水現象により生じる衝撃的な圧力が作用波圧に付加されることがわかった。これより、落水現象により生じる衝撃的な圧力により津波波圧が高く計測され、水深係数が高くなったものと推定できる。

理論式は、ベルヌーイの定理を基に導き出されたものであり、流れが定常流であることを前提としていた。したがって、水理試験結果と理論式との乖離の主要因は、理論式の導出に当たり、流れは定常状態と仮定したことに大きく関係すると結論した。

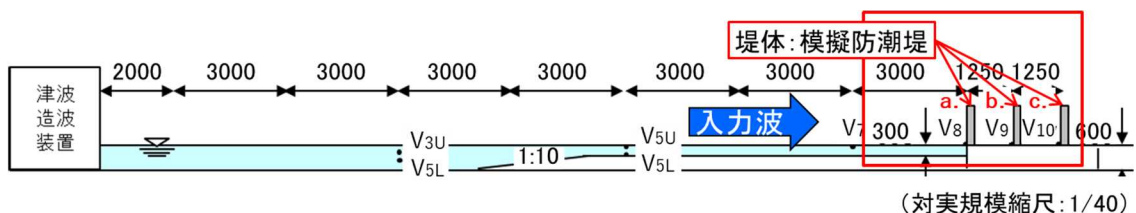


図-3 水理試験設備の概要図(直立護岸の場合)

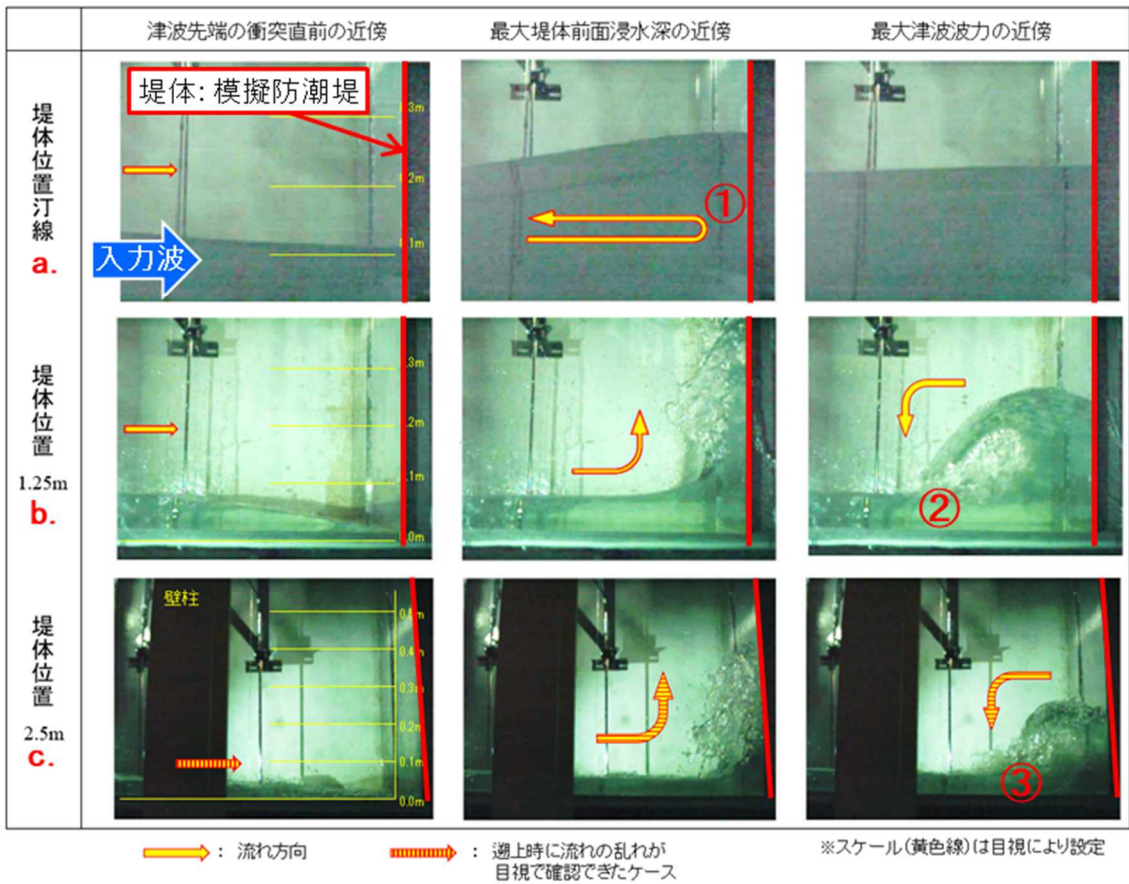


図-4 衝突直前、最大堤体前面浸水深、最大津波波力の時刻近傍での画像(直立護岸の場合)

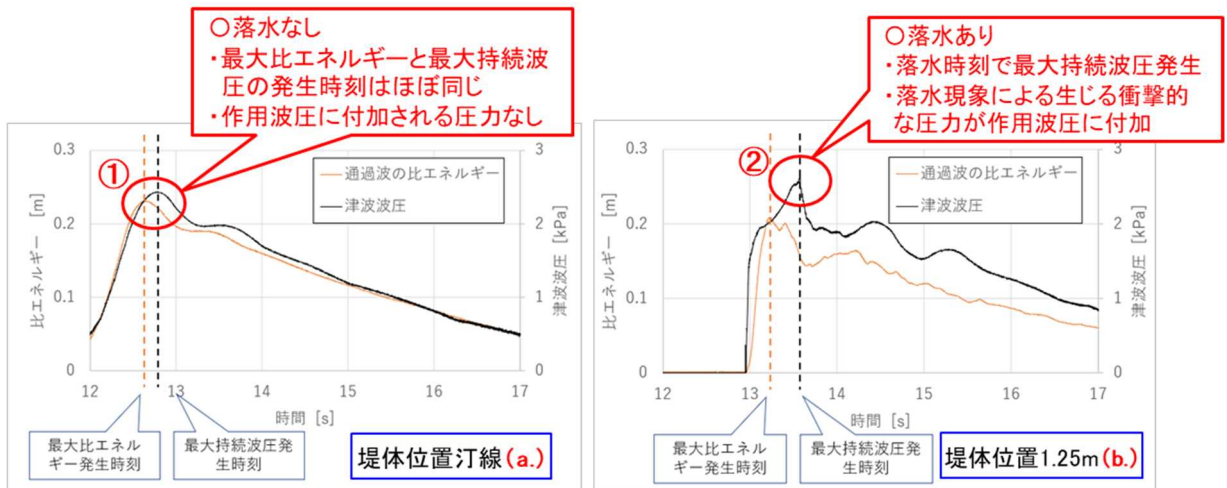


図-5 堤体位置訂線(a.)及び堤体位置 1.25m(b.)における最大比エネルギー発生時刻と最大持続波圧発生時刻の関係

3. 今後の対応

本検討に基づき、フルード数が 1 を超える領域までを対象とした新評価式を提案した。また、水理試験結果と理論式の乖離について、落水現象が生じた際に、衝撃的な圧力が作用波圧に付加され、水深係数が高くなることが主な要因であることを考察した。これらの検討結果は、NRA 技術報告として令和 4 年 7 月 25 日に公表した。

これまでの審査においては、持続波圧の設定に際し防潮堤等の設置位置でのフルード数が 1 を超えるプラントはなく、本知見による審査結果への影響はないが、今後の審査においては、防潮堤等の設置位置でのフルード数が 1 を超えるプラントの可能性も考えられることから、本 NRA 技術報告で提案した持続波圧評価式を反映した「波圧確認事項」を策定し、「耐津波設計に係る設工認審査ガイド」の別添とする改定作業を行う予定としている。

改定に係る概略スケジュールは以下のとおり。

- ・ 令和 4 年 10 月 : 規制委員会(ガイド改定に係るハブコメ開始に係る審議)
- ・ 令和 5 年 1 月 : 規制委員会(ガイド改定に係るパブコメ結果の公示)

<参考>

参考 令和3年度第21回原子力規制委員会（令和3年7月21日）資料7 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—

<主な用語の定義>

持続波圧	持続波（段波の後の津波本体の波）によって防潮堤（堤体）に作用する継続時間の長い波圧
段波波圧	段波（津波先端部の波）によって防潮堤（堤体）に作用する、短時間で大きく変化する波圧
フルード数	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（勢い）を示す指標の一つ
水深係数	津波波圧と、防潮堤（堤体）を設置しない条件による代表浸水深に相当する静水圧との比を表す無次元数
最大比エネルギー	速度水頭及び位置水頭の和で表されるエネルギー水頭の最大値（次元は長さ）
浸水深	陸側における入力波の高さの時刻歴
流速	入力波の沖側及び陸側の流速の時刻歴
ベルヌーイの定理	密度が一定の非圧縮性流体の一次元の定常流では、同一流線上でエネルギーが保存されるとの定理

$$E = \frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g}$$

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

入力波	水理試験に用いた模擬津波
堤体	水理試験で用いた模擬防潮堤
最大堤体前面浸水深	堤体前面における入力波の高さの最大値

＜参考文献一覧＞

- 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、2014.
- 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”、2011.
- 3 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、2015.
- 4 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、2016.
- 5 原子力規制委員会、“耐津波設計に係る設工認審査ガイド”、原管地発第 1306196号、2013.

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^{1,2,3}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)⁴と水深係数(α_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⁵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(α_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 (α) に国土交通省の暫定指針⁶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 σ 及び +3 σ を考慮した式を検討したうえで、+3 σ を考慮した式が方針に合致すると考えた (図-1 参照)。

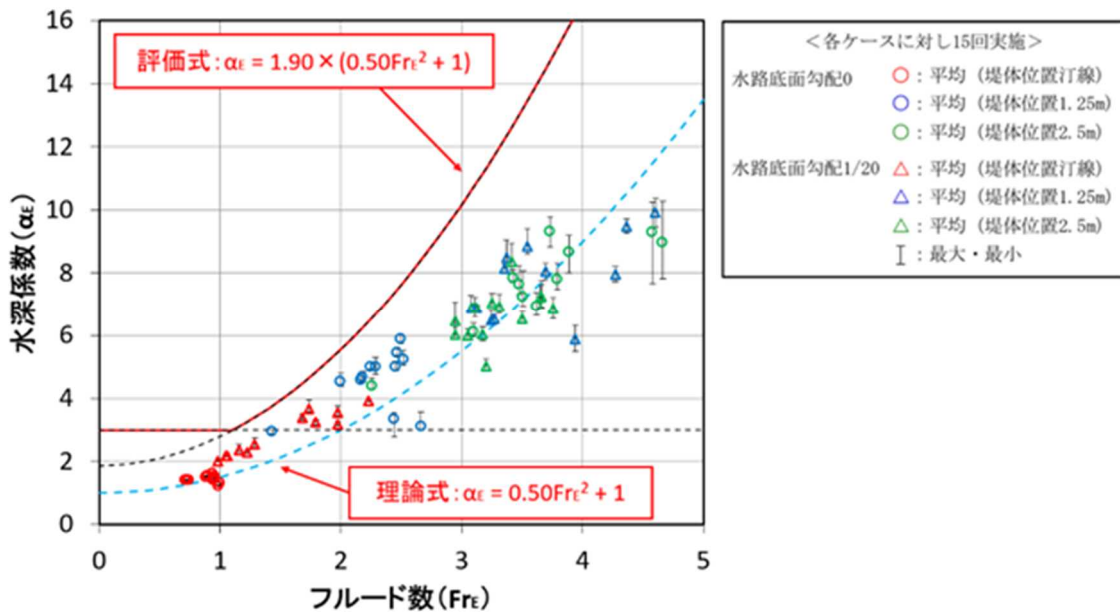


図-1 最大比エネルギー発生時刻におけるフルード数 (Fr_E) と水深係数 (α_E) の関係に基づく持続波圧評価式

(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⁸に対し標準偏差+2 σ 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)。

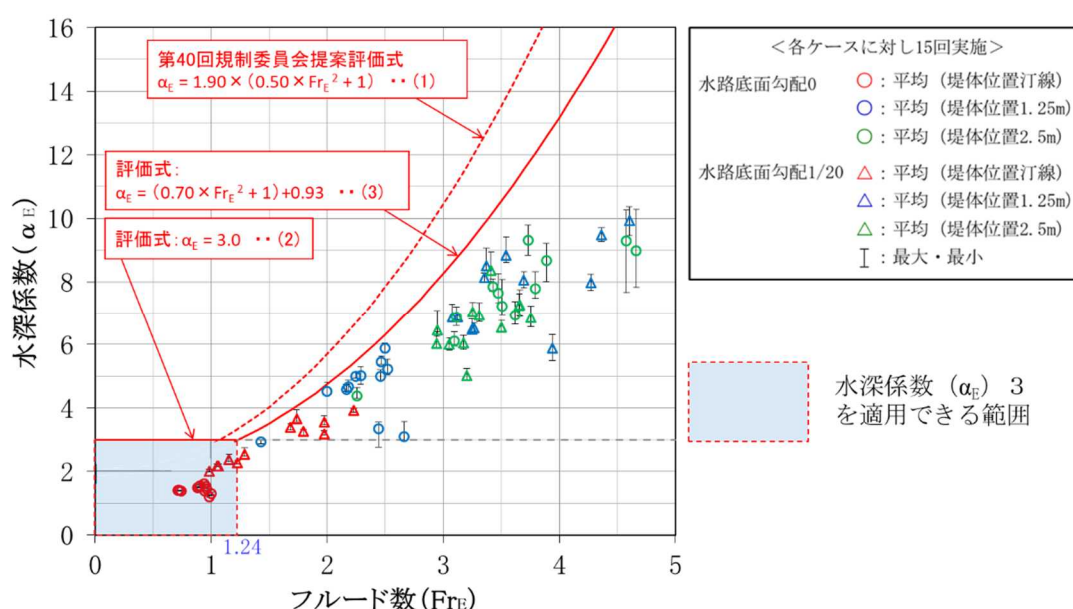


図-2 第40回原子力規制委員会での提案と今回設定した持続波圧評価式の関係

4. 今後の進め方

NRA 技術報告³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。

⁸ $\alpha_E = 0.70 \times Fr_E^2 + 1$: 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