

防潮堤に作用する最大持続波圧評価式の提案

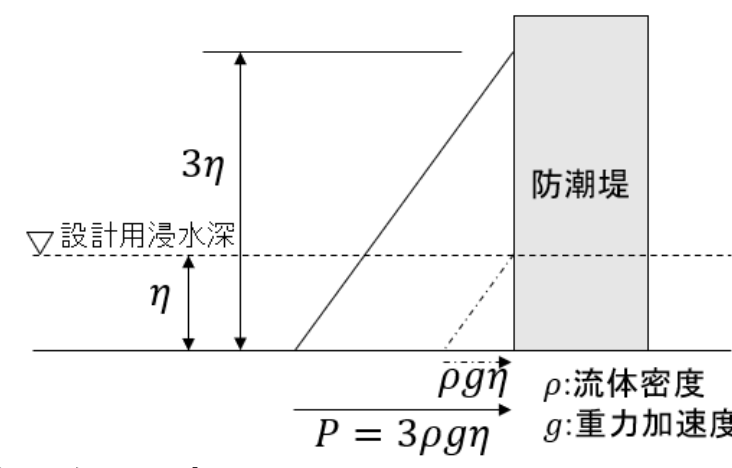
原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ 地震・津波研究部門

○鳥山拓也、石田暢生、山下啓、高松直丘、日比野憲太

背景・目的

本報告の背景

- 津波による損傷の防止に係る規定(概要)
 - 設計基準対象施設に影響を及ぼす津波に対して安全機能が損なわれてはならない：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
 - 津波による荷重(波圧、衝撃力)の設定には、考慮する知見(国交省の暫定指針[1]等)、その適用性を確認すること：基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド
 - 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：耐津波設計に係る設工認審査ガイド
- 考慮する知見:国交省の暫定指針
 - 設計波圧には、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。
 - 水深係数: 津波波圧と、堤体を設置しない条件による設計用浸水深に相当する静水圧との比を表す無次元数
 - フルード(Fr)数: 流体の慣性力(勢い)と重力との比を表す無次元数 数値が高いほど流体の勢いが強いことを意味する。



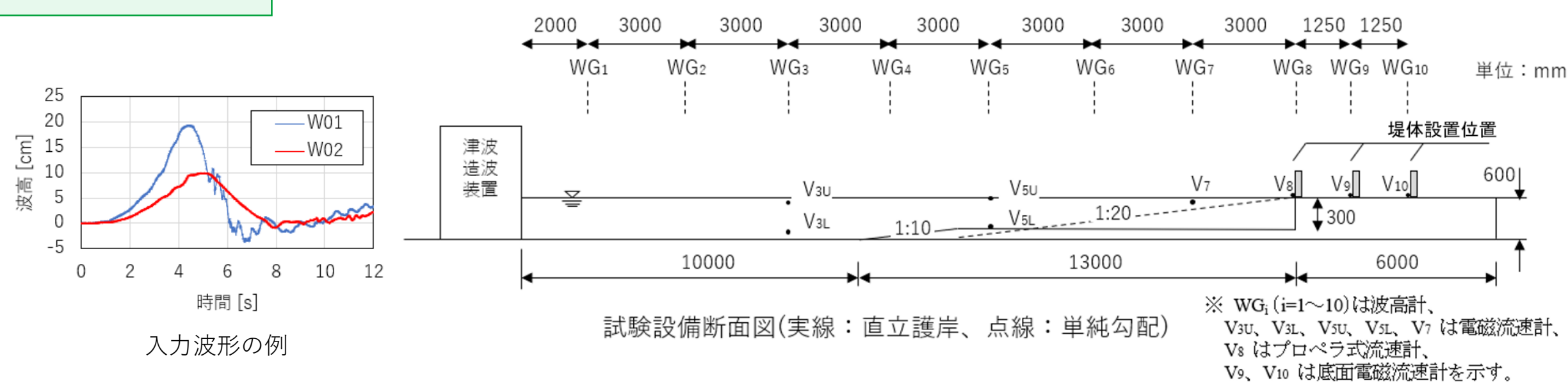
- 地震・津波研究部門では、規制基準及び考慮する知見を踏まえ、防潮堤に作用する津波波圧(段波波圧、持続波圧)の評価に関するNRA技術報告を4編作成してきた。
- 本報告は、4編のうちのNRA技術報告第4報[2]の内容を簡易に纏めたものである。

NRA技術報告第4報[2]の目的

- NRA技術報告第1報～第3報
 - 防潮堤に作用する津波波圧(段波波圧、持続波圧)評価について包括的に取り纏めた。
- 持続波圧評価に係る課題
 - 国交省の暫定指針の水深係数3は、フルード数1を超える場合に適用範囲を外れることを明らかにしたが、その場合の適切な評価式策定・提案には至らなかった。
 - 評価に係る理論式と試験結果の乖離要因の考察が十分でなかった。
- 防潮堤に作用する最大持続波圧に係る評価式を策定・提案する。
 - 作用波圧の不確かさを考慮し、適切な保守性を持った評価式を提案する。
- 理論式と水理試験結果の乖離要因を考察する。
- 本研究成果を取り纏め、審査ガイドに反映する。

評価式の策定・提案、乖離要因の考察

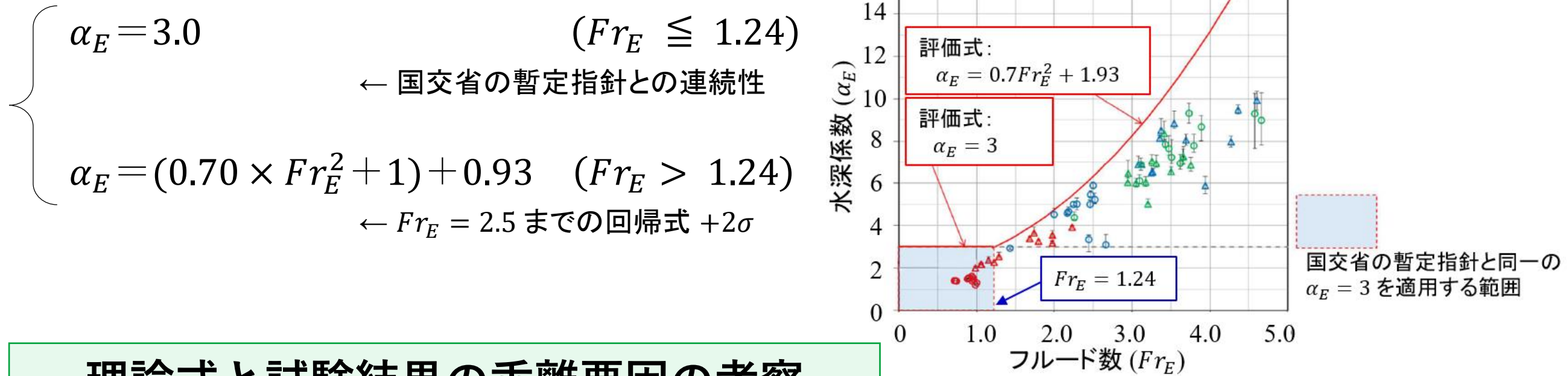
水理試験



- 水路底面勾配、入力波形、堤体(防潮堤模型)位置を変化、同一試験を15回繰り返し実施
- 通過波試験(堤体設置なし): 堤体の想定設置位置(3ヶ所: 汀線、1.25m、2.5m)における、浸水深時刻歴及び流速時刻歴から、フルード数及び最大比エネルギーを評価
- 波圧試験(堤体設置あり): 堤体に作用する持続波圧を計測

評価式の策定・提案

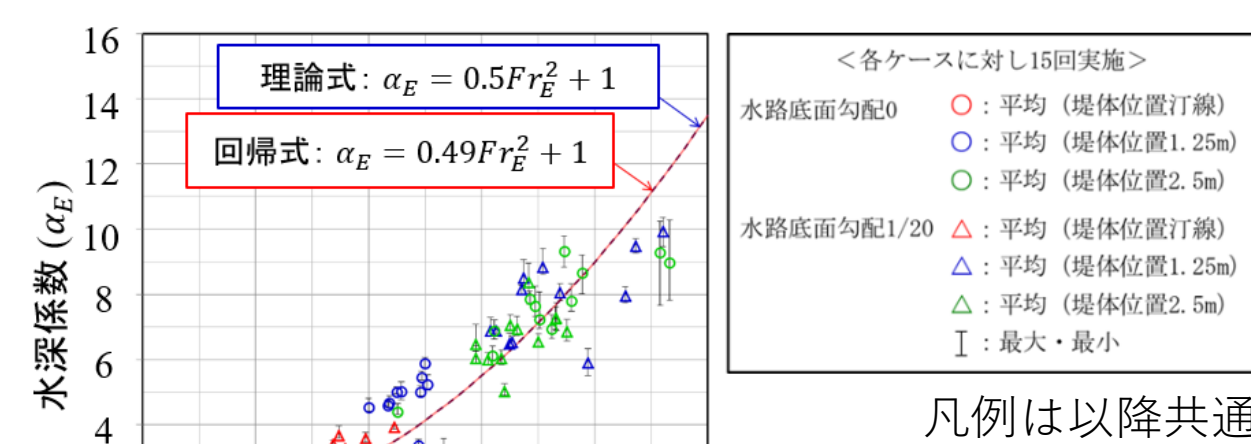
- 下記の方針の基、評価式を策定・提案した。
 - 理論式と試験結果の乖離要因の分析に基づく評価: これまでの審査で確認された実プラントのフルード数も踏まえ、結果的に全領域にわたり水理試験を包絡した、フルード数(Fr_E) 0~2.5 の試験結果を対象とした回帰式(+2σ)で代表させた。
 - 既往の評価手法との関係: フルード数(Fr_E)の小さい領域では、国交省の暫定指針の評価手法との連続性を考慮し、水深係数3を下回らない値とした。



水理試験結果の整理

- 水理試験結果[3]を基に、下記の考えの基、水理試験結果を整理した。
- 理論式導出: 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
 - 非圧縮性定常一次元のナビエ・ストークス方程式を基に、いくつかの仮定を置いて理論式を導出。
 - フルード数の代表時刻として、一般的に用いられる最大浸水深発生時刻ではなく、最大比エネルギー発生時刻を用いた。

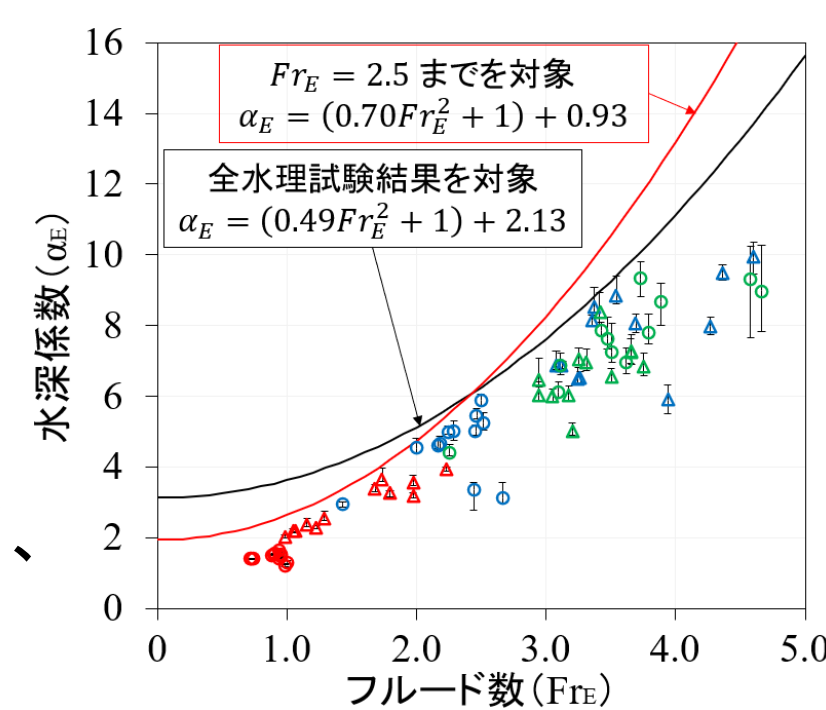
$$\alpha_E = 0.5Fr_E^2 + 1$$



- 理論式と回帰式の比較
 - 理論式と同様に定数項1の二次関数とし、試験結果の最小二乗法で回帰式を導出した。
 - 理論式と回帰式はほぼ一致したことから、フルード数の代表時刻を、最大比エネルギーの発生時刻で定義することは適正であると考えた。

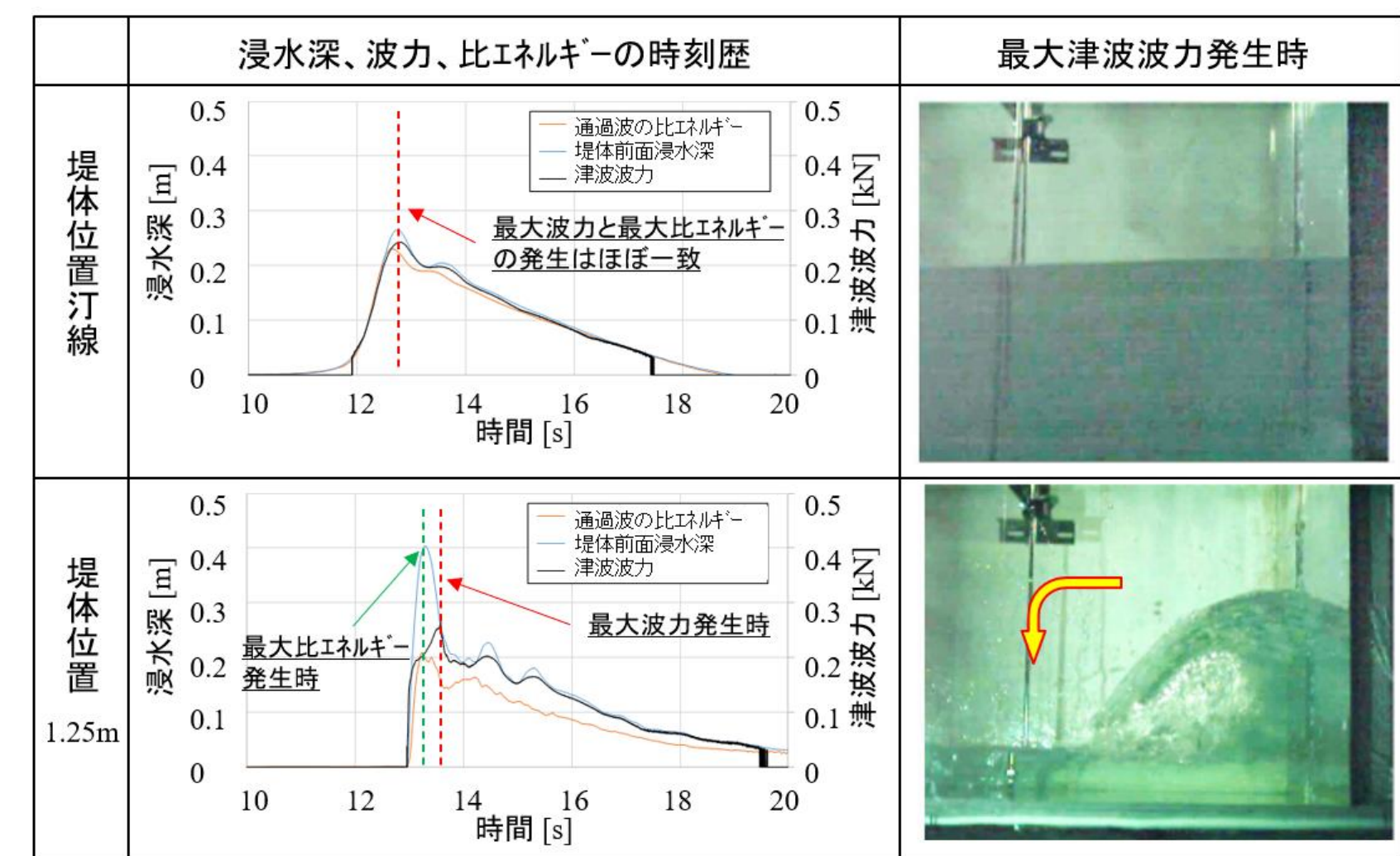
$$\alpha_E = 0.49Fr_E^2 + 1$$

- 回帰式に含める水理試験結果の範囲
 - 全水理試験結果を対象とした回帰式(+2σ)は、フルード数(Fr_E) 2.5程度に生じる試験結果のバラツキの影響を強く受けた。結果、回帰式(+2σ)は低フルード数領域の試験結果に対して過大な値となり、この回帰式(+2σ)を基とした評価式は現象を適切に表現できないと考えた。
 - フルード数(Fr_E) 0~2.5 の試験結果を対象とした回帰式(+2σ)は、フルード数(Fr_E) 0~2.5 の水理試験結果をおおむね包絡するとともに、全領域にわたり水理試験を包絡した。



理論式と試験結果の乖離要因の考察

- 理論式と水理試験結果で乖離が生じる要因について、理論式の導出過程で除外した因子を分析した。理論式では、通過波の最大比エネルギー発生時刻における津波波圧が、最大持続波圧と一致すると仮定したが、水理試験では一致しない場合があった。その要因を考察するため、最大持続波圧計測時の流れの様子を高速度カメラ画像で確認した。
- 直立護岸(水路底面勾配:0)、堤体位置汀線の条件: 入力波は堤体をせり上げることなく沖側へ戻った。
- その他の条件(堤体位置1.25m、堤体位置2.5m): 入力波は堤体をせり上がり、最大堤体前面浸水深発生後、せり上がった水の落水(=着水)時刻に、最大持続波圧を計測した。
 - 落水による波力の増加が、理論式と水理試験結果の乖離に大きな影響を与える要因であることを明らかにした。



- 落水による圧力の影響因子等については、今後、第70回海岸工学講演会で発表する。

- フルード数が1を超える場合における、防潮堤に作用する最大持続波圧の評価式を策定・提案した。
- 理論式と水理試験結果で生じた乖離の主要な原因は、落水現象に起因することを明らかにした。

成果の活用・公表

○成果の活用

- 「耐津波設計に係る設工認審査ガイド」改定(令和5年1月): 本研究成果を取り纏めた「津波波圧評価に係る確認事項」をガイドの別添として追加した。

○成果の公表(11月発表予定)

- 土木学会 第70回海岸工学講演会、鳥山拓也・石田暢生・山下啓、「鉛直壁に衝突した津波が着水する時に生じる衝撃力に関する一考察」

本報告は、[2]に含まれる成果を簡易に纏めたものである。水理試験及び水理試験データは、[3]の成果として取り纏められたものである。

[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11月17日)

[2] 鳥山拓也、石田暢生、山下啓、高松直丘、日比野憲太: 防潮堤に作用する最大持続波圧評価式の提案, NRA 技術報告 NTEC-2022-4001, <https://www.nra.go.jp/data/000398963.pdf>, 2022.

[3] 大成建設株式会社: 平成27年度原子力施設等防災対策等委託費(耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理実験(その1))事業 成果報告書, <https://www.nsr.go.jp/data/000186577.pdf>, 2015.