

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波においては、地震と津波によって、多くの防護施設が被災した。その原因の多くは、津波越流時によるものと推定されている。一方で、地震直後には、数多くの余震や誘発地震が発生している。津波到達時にも地震による揺れが発生している可能性が考えられ、構造物が地震と津波の重畳現象によって被災した可能性も考えられる。現在の設計手法では、地震と津波のそれぞれに対して、検討手法が提案されているが、地震と津波が重畳した際の検討手法は提案されていない。

本研究においては、地震と津波の重畳現象を水理模型実験で再現し、既往の設計手法における検討手法の適用性を検討し、地震と津波の重畳時における安定性の検討手法の構築を目的とした。

2. 現状における地震と津波の検討手法

津波に対する検討手法については、1983年に発生した日本海中部地震津波の際に、谷本らによって検討され、直立壁に作用する津波力について提案されている¹⁾。その後、東北地方太平洋沖地震によって、防波堤を越流する際の津波力の考え方が検討され、現在では図-1のような条件によって津波力の検討手法の分類がされた²⁾。

一方で、地震によって発生する動水圧については、Westergaardの近似式が提案されており、現在でも設計に用いられている³⁾。

また、防波堤の地震と津波の安定性の照査については、図-2のとおり、津波に先行する地震について安定性の照査を行い、その後、来襲する津波に対しての安定性の確認を行う³⁾。

3. 地震と津波の重畳の可能性

地震と津波の重畳現象の有無について、東北地方太平洋沖地震津波が発生した時の地震と津波の状況について検討を行った。図-3は東北地方太平洋沖地震発生以降、20分毎の地震の発生状況を示したものである。本震発生から2時間後までは、

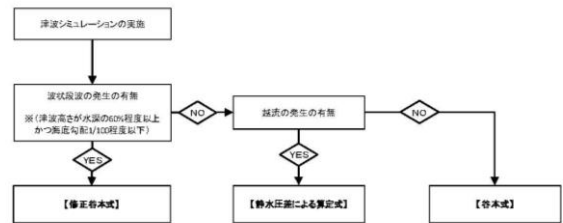


図-1 津波波力の検討手法

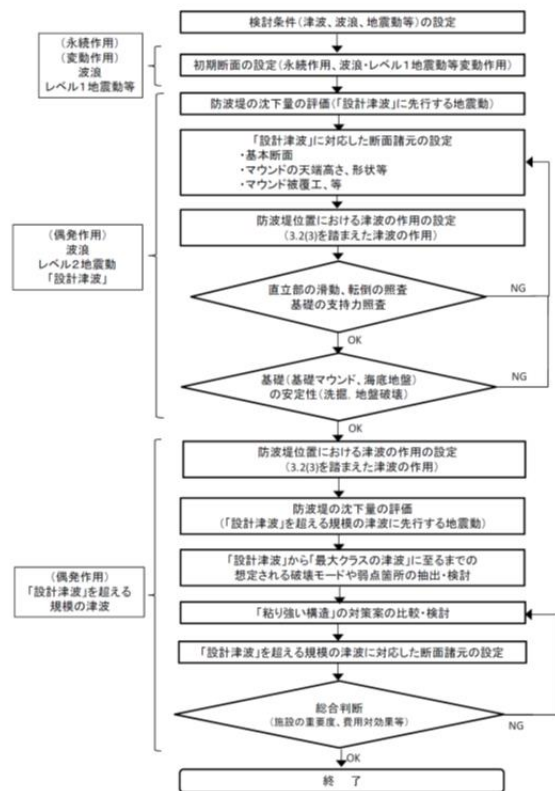


図-2 防波堤の安定性の検討手法

余震が平均 0.84 分/回の多い頻度で発生している。そのうち、震度 4 以上の余震は 24%と、高い確率で大きな揺れが観測されている。

また、図-4 は釜石において、第一波の山・谷の出現時刻と最大水位の発現時刻と余震との関係を整理したものである。第一波の山・谷の出現時刻から、最大水位発現時刻まで、複数回の余震が発生しており、津波来襲時において防波堤が余震の影響を受けている可能性があることが明らかとなった。

4. 防波堤の地震と津波の重畳時における現象の確認

地震と津波の重畳現象の構造物に与える影響について、水理模型実験により検討を行った。実験は、港湾空港技術研究所所有の大規模波動地盤総合水路で行った。水路は長さ 184m、幅 3.5m、高さ 12m の水路で、造波機、還流装置、水中振動台

を備えた施設である。この、還流装置を用いて、防波堤の越流状態を再現し、越流が定常状態になった後に加振を行った。実験の断面と計測器の配置を図-5 に示す。

実験の結果について、地震と津波重畳時の加速度を時刻歴データで確認した。時刻歴の一部を抽出したものを図-6 に示す。砂地盤(AC1)、マウンド(AC2)、ケーソン下側(AC3)の加速度については、どちらのケースにおいても同様な挙動を示していることがわかる。一方で、ケーソン上側(AC4)においては、津波が無いケース(図-6(a))では地震の方向によらず加速度のピークがはっきりしているが、津波と重畳したケース(図-6(b))では、加速度の増大は抑えられるものの、最大値の継続時間が増加している。

地震と津波の重畳現象における防波堤の加速度に与える影響については、津波が防波堤を越流することにより、流れの影響を受けて防波堤上側に

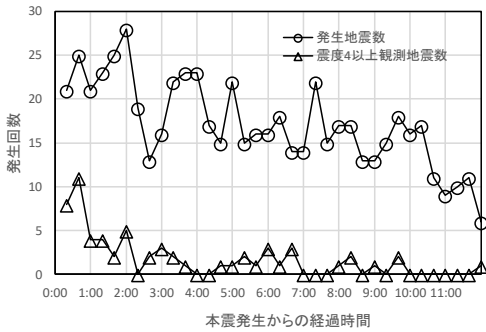


図-3 東北地方太平洋沖地震津波以降の余震の発生状況

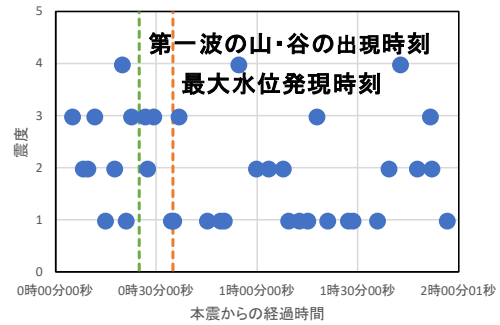


図-4 釜石における津波到達時刻と余震の関係

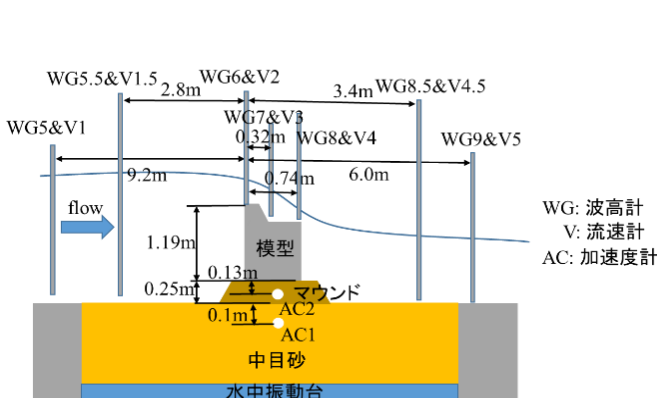


図-5(a) 実験断面図

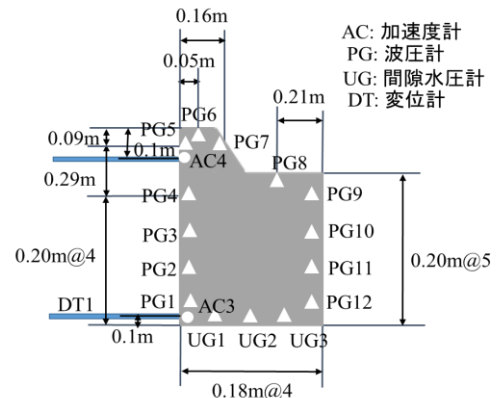


図-5(b) 計測器配置図

図-5 実験模型

おける加速度の増大を抑制する可能性があることが明らかになった。

5. 防波堤の地震と津波の重畳時における荷重の算定手法の提案

地震と津波が重畳した実験ケースにおいて、地震時動水圧の算出に用いられる Westergaard の近似式と津波越流時の波力の算出に用いられる静水圧式を用いて波圧を算出し、実験結果との比較を行い、適用性を検討した。地震時動水圧の算出に用いられる Westergaard の近似式は式 (1) であり、 W_0 は水の単位体積重量、 α は地震の水平震度、 h は水深(m)、 y は水面から任意点までの深さ(m)、 P_{max} は任意深さ y の動水圧(kPa)である。

$$P_{max} = \frac{7}{8} W_0 \alpha \sqrt{h y} \quad (1)$$

式(1)における地震の水平震度 α については、模型前面に設置した2カ所の加速度計の値を重力加速度で除したものを平均して用いた。水面から任意点までの深さ y については、水面からそれぞれの

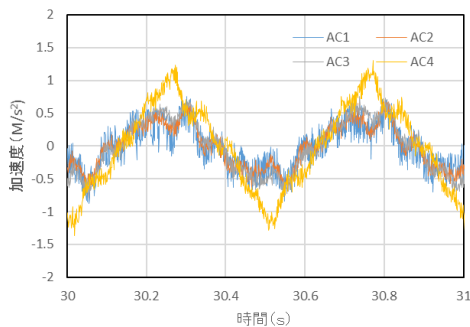


図-6(a) 水位差なし, 50Gal

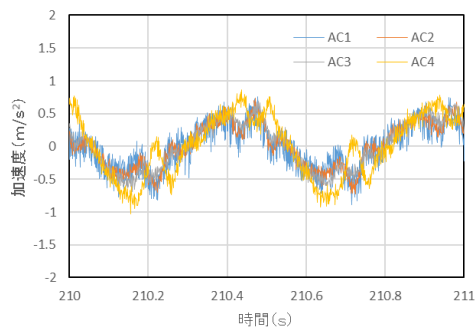


図-6(b) 水位差 0.14m, 50Gal

図-6 地震と津波重畳時における加速度時刻歴

波圧計までの深さとして、それぞれの波圧計位置における動水圧を算出した。越流については、有川ら⁴⁾は水理模型実験を行い、混成堤において津波越流に対して津波が越流する場合においては、静水圧差による算定を行い、現時点では、防波堤前面の静水圧に $\alpha_F=1.05$ 、背面の静水圧に $\alpha_B=0.9$ 倍した静水圧を用いるのが良いと提案されている。この検討結果をもとに、越流時における波圧を算出した。津波越流時に 50Gal で加震し、沖から岸方向への振動時の結果を図-7 に示す。図-7において、縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸が Westergaard の近似式と静水圧式で求めたものの足し合わせと実験で得られた最小もしくは最大値で除したものである。

津波と地震が重畳した場合は、模型前面においては 1.08 倍、模型背面では 0.87 倍程度となっている。また、模型背面においては、越流時の水位差が増大するにつれて、水面に近い模型上面の波圧は計算値と実験値の差が大きくなり、最大で 0.8 倍程度となった。

この結果より、地震と津波の重畳時においては最大で 2 割程度の差はあるが、安全側の結果を示していることから、適用が可能であることが明らかとなった。以上のことより、地震と津波の重畳時における外力の設定手法として、地震時動水圧の算出に用いられる Westergaard の近似式と津波越流時の波力の算出に用いられる静水圧式を用いることを提案する。

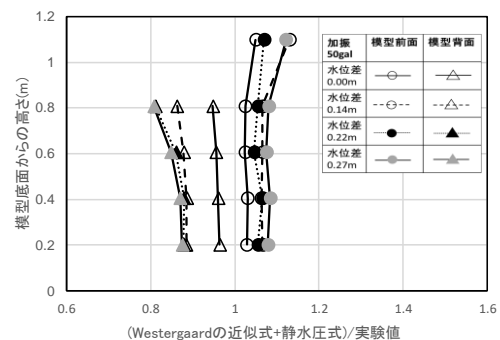


図-7 Westergaard の近似式と静水圧式の和と実験値の比較(地震津波重畳時)

6. 実地形への適用

5. において提案した方法を用いて、実地形における地震と津波の重畳が防波堤に与える影響について検討した。検討は釜石港の湾口防波堤を対象に、東北地方太平洋沖地震津波に対して重畳する地震を 50Gal~300Gal まで変化させ、検討した。結果を図-8 に示す。図-8 において縦軸が津波波力に対して地震と津波が重畳した場合の動水圧の割合、横軸は防波堤延長である。津波のみの場合に対して、余震が津波と重畳した場合は、防波堤に与える波力が 50Gal の地震が重畳したケースでは概ね 2.0%程度の増加であるが、300Gal の地震が重畳したケースでは 10.0%程度増加していることが明らかとなった。

7. 防波堤の地震と津波の重畳時における数値計算の適用性の検討

地震と津波の重畳時において、数値計算における再現性について検討を行った。計算手法としては、粒子法を用いて検討した⁵⁾。計算の設定は、構

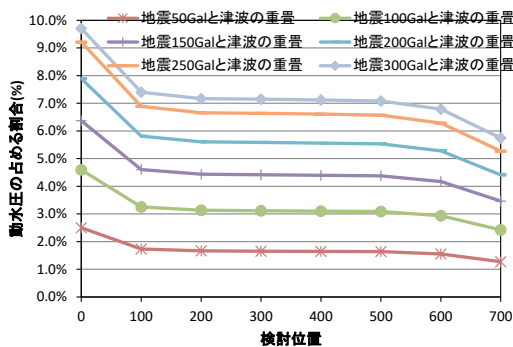


図-8 地震と津波重畳時における余震による動水圧の割合

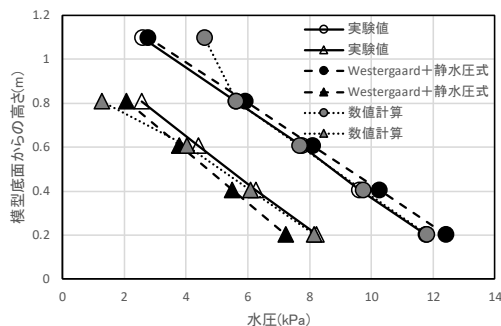


図-9 計算値と実験値の比較 (地震と津波重畳時)

造物を造波粒子として、実験同様、越流状態を再現した後に、構造物を振動させることにより地震と津波の重畳状態を再現した。その際の波圧を、実験値および Westergaard の近似式と静水圧式によって求めた値と比較して、再現性の確認を行った。50Gal で加震し、沖から岸方向への振動時の結果を図-9 に示す。数値計算で求められた波圧は、水位表面付近は再現性が認められないが、それ以外部分においては、ほぼ実験値と同様な値を示し、数値計算での再現が可能であることが判明した。

8. まとめ

本研究では、地震と津波の重畳の可能性が確認され、既往の計算手法を用いることにより、地震と津波の重畳時における波力が把握できることから、検討手法として提案した。提案した手法を用い、実地形での検討を行い、地震と津波が重畳した際の防波堤に与える波力の違いが明らかとなった。また、数値計算の適用性も確認し、数値計算でも再現が可能であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 谷本勝利, 高山知司, 村上和男, 村田繁, 鶴谷広一, 高橋重雄, 森川雅行, 吉本靖俊, 中野晋, 平石哲也: 1983 年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾空港技術研究所資料 No.470
- 2) 防波堤の津波設計ガイドライン, 国土交通省港湾局
- 3) 港湾の技術上の基準・同解説 平成 19 年, 日本港湾協会
- 4) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 廉慶善, 丹羽竜也: 津波越流時における混成堤の被災メカニズムと腹付工の効果, 港湾空港技術研究所, 資料, 1269
- 5) 後藤仁志, 鈴木高二朗, 五十里洋行, 有川太郎, Abbas Khayyer, 鶴田修己: 高精度粒子法を用いた高機能型数値波動水槽の開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol73, No.2, I_25-I_30, 2017