

高波及び津波外力

High Waves and Tsunami

熊 谷 隆 宏 (くまがい たかひろ)

五洋建設 技術研究所 担当部長

1. はじめに

我が国は、国土面積が狭い一方、約3.5万 km の長い海岸線を有している。また、国土の70%が山地であるため、人口は居住空間が広い沿岸域に集中する傾向が強く、それに合わせて、産業も沿岸域を中心に発達している。実際、海岸に面する市町村には、人口の50%が居住し、産業活動については、工業製品出荷額の50%、商業年間販売額の60%が集中している状況である。

一方、我が国の国土は、地震、台風、集中豪雨等の自然災害に対して脆弱である。特に、東北地方太平洋沖地震によって引き起こされた巨大津波は、東北から関東にわたる広い沿岸域に甚大な被害をもたらした。津波等の偶発的な外力に対し、人命を守るための防御策として、多重防護化や、防災施設に対して粘り強さを持たせる対策等が新たに検討されている中、ここでは、高波や津波といった代表的な波浪の外力の特性について説明する。

2. 海の波の分類

海の波として代表的な波は、表一1のように分類される。このうち、風によって発生・発達した波は風波と呼ばれ、10秒程度以下の短い周期を持つ。風波はまず、さざ波として発生し、風が吹き続けると、その方向に波が進行しながら発達していく。このような風波が風域を脱出して進行するとうねりとなる。風波に比べてうねりは、周期が長く波形勾配は緩やかである。このような風によって発生・発達した波は、大きなエネルギーを持つ。

さらに、長い周期の波として、海底地震や火山活動、地すべりなどによって発生する津波や、台風などの気象的な要因によって生じる高潮、また天体の運行に伴って生じる海水面の変動である潮汐がある。なお、津波の発生は、我が国では約95%が地震によるものである。

表一1 海の波の分類

波の種類	代表的な周期	主な成因
風波, うねり	数秒～数十秒	風, 台風
長周期波	数十秒～数分	波の干渉
津波	数分～数時間	地震, 火山
高潮	数時間	台風
潮汐	半日, 1日	太陽や月

3. 海の波によって引き起こされる工学的問題

一般に、海の波によって引き起こされる工学的な問題のうち、代表的なものとして、①越波・浸水、②構造物の安定、③海底地形の変化の3つが挙げられる。

このうち、越波・浸水は、波が護岸や堤防の天端を越えて堤内に流入し、陸域が浸水する問題である。設計においては、波の打上げ高が天端高を越えないように、又は許容越波流量を越えないように天端高が定められる。

構造物の安定性に関しては、直立式のケーソンなど壁体構造物の場合、前面に作用する波力による滑動、転倒及び支持力破壊に対する安定性の確保が求められる。設計では、波力と揚圧力を評価し、構造物の安定性を確保できるように、堤体幅やフーチング等の諸元が決定される。また、傾斜堤や消波ブロックの安定性に関しては、被覆材の散乱や法先部の洗掘などに対する安定性の確保が必要である。被覆材を例にとれば、設計波高に対して Hudson 式¹⁾、又は被覆材上面の流速に対して Isbash 式¹⁾を用いることにより、所要質量を算定できる。また、基礎地盤が洗掘を受けると、構造物の安定性が損なわれるため、洗掘防止工による洗掘対策が実施される。

海底地形の変化に関しては、漂砂移動によって、航路や港口・港内への土砂の流入（堆砂）、周辺海岸の海岸侵食等の問題が発生する。堆砂の問題に関しては浚渫や防砂堤の設置等による対策、海岸侵食の問題に関しては、海岸保全施設の設置や養浜等による対策が実施される。

強風や台風によって発生・発達した波の中で、波高の高い波が高波と呼ばれ、防波堤や護岸といった通常の海岸施設や構造物の耐波設計において、高波に関する確率波浪が設計の外力条件として用いられる。

津波に関しても、上述の3つの問題が基本的に重要となるが、特に、東北地方太平洋沖地震津波による防波堤の被災原因として、有川ら²⁾は、波力としての動水圧、港内外の水位差、基礎マウンドの洗掘、間隙水圧による支持力の低下を挙げている。また、防波堤の被災形態としては、①津波波力型（津波の水平力が主たる要因となって滑動）、②越流洗掘型（津波が越流することにより洗掘され、ケーソンが転倒）、③堤頭部洗掘型（堤頭部でマウンドが洗掘され、ケーソンが傾倒）、④引波水位差型（引波時における港内外の水位差によってケーソンが被災）の4つに分類される³⁾。さらに、津波は、河川や陸上への遡上が問題になる。東北地方太平洋沖地震津

技術手帳

波では、最大の遡上高は約40 mに達し、また遡上により数 kmにわたる陸域が浸水し、広い範囲に被害が及んだ。

4. 津波の波力

防波堤や護岸等の直立壁に作用する津波の波力は、図—1のように、静水位上 $\eta^*=3.0 a_1$ の高さで $p=0$ 、静水位で $p_1=2.2 \rho_0 g a_1$ となる直線分布、静水位以下は一樣となる波圧分布によって求められる⁴⁾。

$$\eta^*=3.0 a_1 \dots\dots\dots (1)$$

$$p_1=2.2 \rho_0 g a_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$p_u=p_1 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 η^* ：静水面上の波圧作用高さ、 a_1 ：入射津波の静水面上の高さ（波高の1/2）、 p_1 ：静水面における波圧強度、 p_u ：前面下端における揚圧力である。

また、海底勾配が1/100以下で非常に緩い場合、浅海域における非線形効果によって津波は前傾化し、その先端部で複数の周期の短い分裂波が発生する（ソリトン分裂）。この現象は、通常の高波の波形には見られない波長の長い津波に特有の現象である。

図—2⁵⁾は、津波の波圧の時系列を模式的に示すものである。津波の波圧は、先端部の砕波やソリトン分裂変形によって生じる衝撃的な段波波圧、そして、津波の平均的な高さに対応する準静的な重複波圧に分けられる。段波形状になった津波による衝撃段波波圧は、極めて大きな値になるため、段波波圧が発生する条件に対しては、式(2)に対して、無次元波圧強度を2.2から3.0に割り増す式(4)が池野ら⁶⁾によって提案されている。

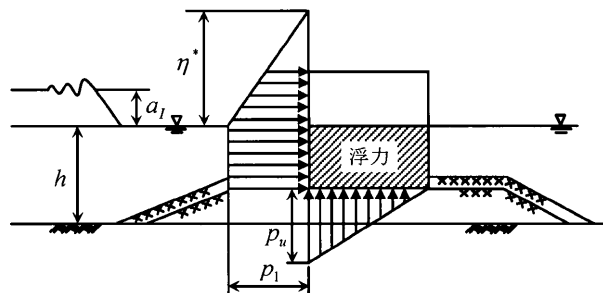
$$p_1=3.0 \rho_0 g a_1 \dots\dots\dots (4)$$

直立壁前面に作用する高波の波圧強度として、一般に波高相当の静水圧 $1.0 \rho_0 g H_{\max}$ を越えることは少ないが、式(2)又は(4)で示される津波の波圧は、 $1.1 \sim 1.5 \rho_0 g H_{\max}$ に相当し、津波の持つエネルギーが大きいことが分かる。

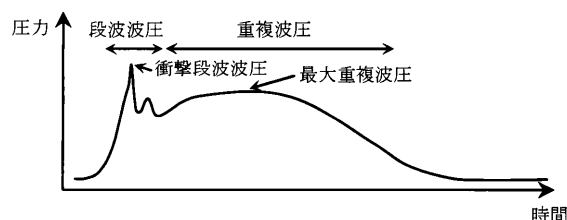
また、津波が防波堤を越流する条件では、静水圧差による波圧の算定式が提案されている⁷⁾。

5. おわりに

防波堤の耐津波研究では、滑動、転倒、支持力破壊に対する安定性の検討を念頭に置き、従来、外力である波圧の特性の解明や評価法に関する研究を中心に行っていた。しかしながら、津波による被災メカニズムの検討により、基礎の洗掘や間隙水圧による支持力の低下等、地盤に関わる問題も重要であることが新たに認識され始めている。洗掘に関しては、従来の海岸工学や水工学的なアプローチ（流速変動）だけでなく、地盤工学的なアプローチ（地盤の有効応力変動）も重要であることが近年の研究（例えば、中村ほか⁸⁾）で明らかにされている。



図—1 津波波力の考え方



図—2 津波波圧の時系列

また、防波堤の耐波安定性に関して、基礎地盤の挙動を考慮する必要性が認識されており、波浪—構造物—地盤の連成解析による変形や破壊メカニズムに関する研究が実施されている（例えば、蔣ほか⁹⁾、熊谷¹⁰⁾）。

被災は単独の要因で生じるものでなく、複数の要因が重なって生じる。学際的な取り組みによって技術を統合し、防災技術を発展させていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 財団法人港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp. 552～562，2007.
- 2) 有川太郎ほか：東日本大震災における釜石湾口防波堤の被災メカニズムに関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），No. 2，pp. I 826～I 830，2012.
- 3) 有川太郎ほか：釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討，港空研資料，No. 1251，p. 52，2012.
- 4) 谷本勝利ほか：1983年日本海中部地震の実態と二、三の考察，港研資料，No. 470，p. 299，1983.
- 5) 有川太郎ほか：護岸・陸上構造物に対する津波力の大規模実験，海岸工学論文集，第52巻，pp. 746～750，2005.
- 6) 池野正明ほか：ソリトン分裂と砕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，pp. 751～755，2005.
- 7) 国土交通省 港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン（案），p. 35，2012.
- 8) 中村友昭ほか：遡上津波による陸上構造物周辺の局所洗掘に関する研究，海岸工学論文集，第54巻，pp. 856～860，2007.
- 9) 蔣勤ほか：波・地盤・構造物の相互作用に関する VOF-FEM 予測モデルの開発，海岸工学論文集，第47巻，pp. 51～55，2000.
- 10) 熊谷隆宏：VOF-弾塑性 FEM 連成モデルによる基礎地盤および構造物の変形解析と破壊メカニズムに関する考察，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. B2-65，No. 1，pp. 871～875，2009.

（原稿受理 2013.4.12）