

建設構造物に作用する津波力について

水工学研究室 沓掛 亮太

指導教員 細山田 得三

1. はじめに

2004年に発生したスマトラ沖地震や2011年に発生した東日本大震災では数多くの人命が失われた。この二つの震災で共通なことかつ特徴的なことは津波により壊滅的な被害を受けたことである。

橋梁などの構造物の激しい損傷、構造物の流出と移動、海岸堤防の決壊、港湾施設の壊滅的な被害といった、インフラ施設の被災である。その物理的な理解のためには遡上時の流速分布を与える必要があり、波の遡上の力学的性質や地形との干渉について研究が必要となってくる。

スマトラ沖地震以降、津波力について研究が進められてきた。しかし津波力に対応する橋梁被害を予測することは未だ困難である。

2. 研究目的

従来、津波の運動は、水深と波長の比が小さいとして浅水理論が適用されている。この場合、水平流速が鉛直方向に一様な分布となる。海底から水面までを鉛直方向に積分した形で、連続の式と運動方程式を非線形浅水波長方程式で表すことができる。

現在、津波の衝突のおそれがある堤防等の港湾施設は港湾基準式を用いて作用する津波力について設計している。しかし橋梁のような静水面の間に大きな空間がある場合はこの式が当てはまるかは不明なのが現状である。本研究ではナビエ・ストークスの直接計算を用いて、鉛直方向の分布も考慮し数値計算を行い、圧力を出力した。そして計算した圧力と港湾基準式と比較した。

3. 数値計算方法

海岸域における波浪場の解析では、海底斜面や透過性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えることが必須となる。このため基礎方程式には、2次元非圧縮粘性流体を対象とした連続式およびナビエ・ストークス方程式をポララスモデルに基づいて拡張した式(1)、(2)、(3)を使用した。

- 基礎方程式

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

- 運動方程式

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_v g \quad (3)$$

ここで、 t : 時間, x, y : 水平, 鉛直座標, u, v : 流速の水平, 鉛直成分, ρ : 密度, p : 圧力, v_e : 分子動粘性係数と渦粘性係数の和, g : 重力加速度, γ_v : 空隙率, γ_x, γ_z : 水平, 鉛直方向の面積透過率である。

4. 港湾基準式(谷本式)による津波力の算定

谷本らは、日本海中部地震津波における施工途上に直立護岸の被災状況およびその後の実験シミュレーションから、波圧に関する合田公式を長波にあてはめ、直立壁に作用する津波力について以下の算定式を提案した(図-1)。

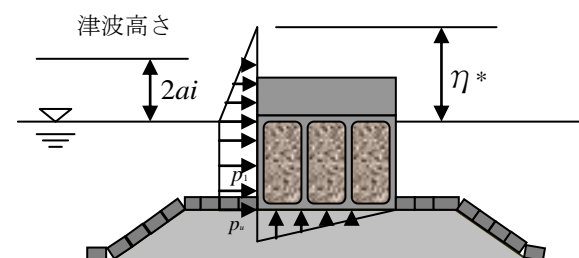


図-1 直立壁に作用する津波力の算定法

静水面上 η^* での 0 から静水面での p_1 まで直線分布, 静水面下は p_1 で一様と仮定し,

η^*, p_1 を(4), (5)のように与える。

$$\eta^* = 3.0\alpha_i \quad (4)$$

$$p_1 = 2.2w_0\alpha_i \quad (5)$$

ここに、 α_i は入射津波の静水面上の高さ(振幅)であり、 w_0 は流体の単位体積重量である。この静水面は段波津波の場合には段波来襲直前での水位をとる。ただし、直立壁前後面で静水位に差がある場合には、これによる静水圧差を考慮する必要がある。図-1にはこれを考慮した分布が示されており、 h_1, h_2 はそれぞれ直立壁前後面での水深である。 $h_2 > h_1$ の場合には直立壁背後から前方へ向かう静水圧力が働く。このとき浮力は水没体積に対して考慮する必要がある。

5. 解析条件

入射波には2011年3月11日に発生した東日本大震災において気象庁が宮城県中部沖でGPS波浪計を用いて観測した潮位データを使用した(図-2)。周

期は 284 秒, 解析時間は 852 秒, 時間刻み幅は 0.001 秒とした。

東日本大震災では沿岸地形条件により, 津波の遡上の型が違う。仙台湾や一般的な海岸でみられる沿岸地形は海底勾配が緩く, 水深 10m~100m 地点で 1/200~1/500 勾配となっている。この沿岸地形を参考に海底勾配, 陸上勾配ともに 1/200 と設定した。計算領域は鉛直方向に 40m, 水平方向に 1830m の領域を格子幅 $dx, dy=1.0m$ の格子で覆った(図-3)。陸上部に構造物を設置しその構造物にかかる津波力を計算した。また, 透過性を再現するため陸上部と構造物の間には空間を設けた。

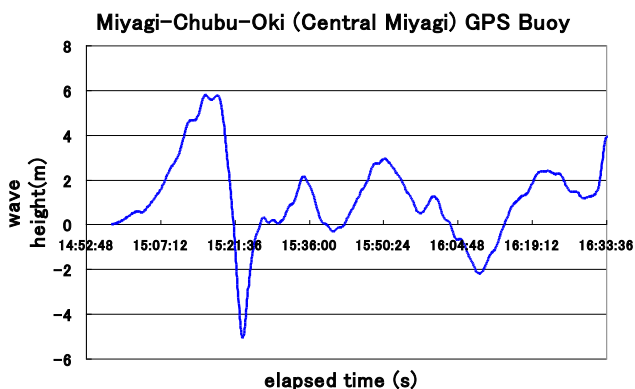


図-2 宮城県中部沖の潮位データ



図-3 一般的な海岸のモデル

6. 解析結果

図-4 に解析した構造物の圧力の計算結果を示す。縦軸に圧力, 横軸に経過時間を示してある。色の違いは建設構造物の圧力の出力した位置の違いを表している。

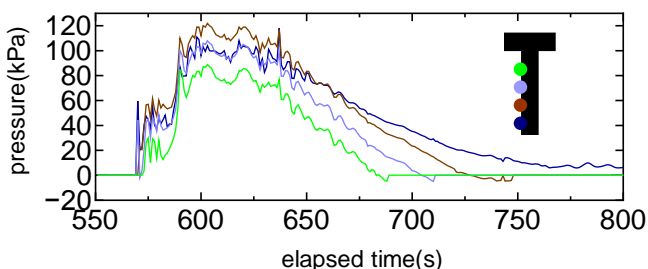


図-4 構造物にかかる波力

圧力は波が構造物に衝突すると同時に上昇していき, 波が構造を越波した時刻と同時刻頃に圧力が最大の値を示した。越波後は徐々に波が引いてき同じように, 圧力も低下していく。

最大圧力となった時の構造物周辺のベクトル図を図-5 に示す。波が構造物を越波している様子がわかる。また透過性を再現するために作成した, 空間か

ら水が流れて出ていく様子がわかる。

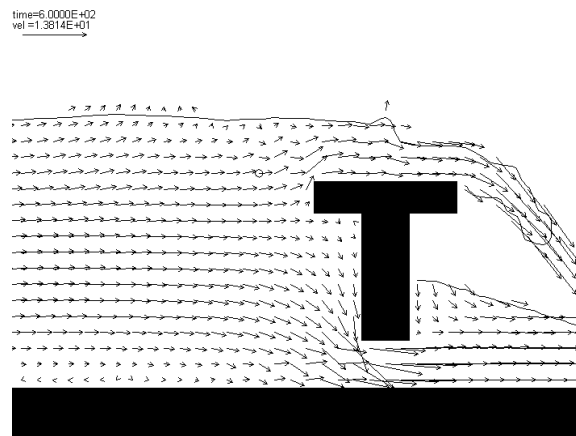


図-5 構造物周辺のベクトル図

ここで出力された最大圧力と港湾基準式で求めた圧力を比較したのが図-6 である。

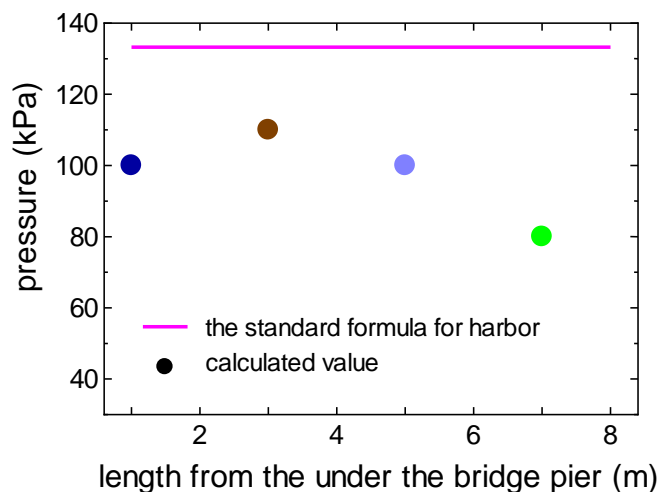


図-6 計算結果と港湾基準式(谷本式)との比較

最大圧力は茶色の点で示した位置で 120kPa という結果となった。また港湾基準式と比較すると全ての点において圧力は下回る結果となった。

7. まとめ

本研究は, ナビエ・ストークスの直接計算で計算された圧力と港湾基準式により計算された圧力を比較・検討をした。その結果, 港湾基準式より計算された圧力が低いことより, 橋脚のような建設構造物に対する津波波圧は安全側に評価できる。しかし今回の数値計算においては, 衝撃波圧を含めた計算を行っていない。今後の課題として衝撃波圧を含めた津波波圧の検討が必要である。

8. 参考文献

- [1] 谷本勝利・本浩司・石塚修次・合田良実：防波堤の設計波力算定式についての検討, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp11~pp16, 1976