

防波堤前面勾配が津波ジェット流の流動特性に与える影響

鹿児島大学 工学部 学生会員 ○田中友崇
 鹿児島大学 技術部 正会員 井崎丈
 鹿児島大学 工学部 正会員 長山昭夫

鹿児島大学 工学部 学生会員 坂口凌雅
 鹿児島大学 工学部 正会員 浅野敏之

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では、遡上津波により構造物が甚大な被害を受けた。遡上津波の解明には津波先端部に気固液の3相が混在する問題を解かなければならない。固液界面での接触角に関する研究は、Youngの式¹⁾を基礎としたものが多いが、未解明な点が多い。また津波の作用波圧に関する既往研究においては、構造物形状による津波の界面変動への影響は十分に議論されていない。一方、著者らの研究では直立の壁面で発生する噴流に似た界面変動を津波ジェット流と呼称した(図-1)。これまでの研究²⁾³⁾から、津波ジェット流は構造物周辺の水位変動や波圧に影響を与えることがわかっているが、構造物形状により先端流動の特性がどのように変化するか議論は不十分である。また、これまでの数値解析での津波ジェット流の水位変動の再現精度は6割程度である。そこで、本研究では防波堤前面の勾配が津波ジェット流に与える影響について検討を行うとともに、津波ジェット流の再現精度の向上のためVOFモデルに接触角を導入し、その再現精度の検討を行った。



図-1 津波ジェット流のスナップショット

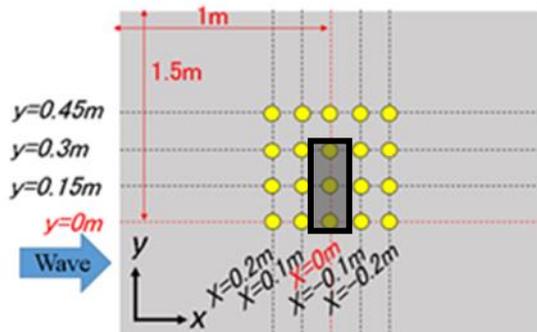


図-2 平面ステージ上における防波堤設置位置(長方形)と水位測定位置(丸印)

2. 防波堤前面勾配が打上高さに与える影響

2.1 模型実験手法

鹿児島大学に存在する長さ26m幅14m最大水深1.2mのプランジャー造波装置付きの大型平面水槽で模型実験を行った。この水槽は、沖側が一樣水深、岸側は11%勾配の斜面があり、斜面の途中で平坦床(以後、平面ステージと呼称)が設置されている。平面ステージ上の防波堤周辺域を図-2に定義する。図-2に示す防波堤設置位置に5種類の勾配の壁面(図-3)を有する防波堤模型AからEを設置し、黄色丸印を模型実験の水位測定位置とした。まず、構造物を設置しない場合の各測定位置における最大水位 H_{0max} を求めた。次に、各模型を設置しそれぞれ最大水位 H_{max} を求め無次元水位を求めた。また、ビデオ画像から各勾配における水塊の最大打上高さ η_{max} を測定した。最大打上げ高さは各勾配それぞれ異なる位置である。

2.2 結果

実験により測定した $y=0.15m$ における無次元水位 H_{max}/H_{0max} と最大打上高さ η_{max} を図-4に示す。全ての地点において1以上を示していることから、津波ジェット流による影響であることが考えられる。まず防波堤直上である $x=0m$ の水位に着目する。この地点の水位は、津波と防波堤の衝突時に打上がった水塊によるものと推定される。無次元水位は1.5~4となる結果になり、模型構造物と津波ジェット流が水位変動に与える影響とわかる。また直立壁E(90°)の場合が最も高く無次元水位は4に達する。これは津波ジェット流がこの周辺で最大値をとり、直立壁以外の条件下では、この位置以外で最大値をとること

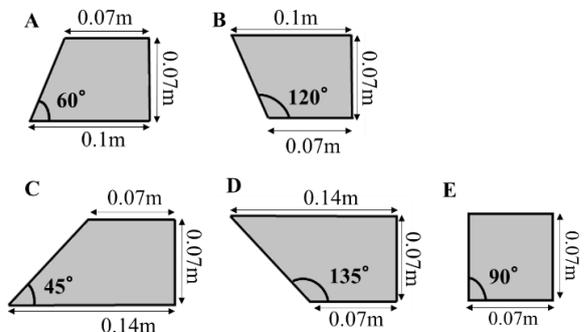


図-3 防波堤模型の側面図

が影響している。次に鋭角勾配に着目すると、A(60°)の打上高さは2.4、C(45°)の場合、1.7となり勾配が小さくなるに従い、小さくなる傾向にあることがわかる。これは、前面角度が鋭角の場合、津波ジェット流は鉛直真上に打ち上がらず、壁面に沿って岸側上空へ斜め前方に飛び出すためであることを画像解析や模型実験から確認している。また鈍角勾配では、B(120°)の打上高さは2.9、D(135°)では2.4となり、勾配が大きくなるほど小さくなる傾向にあることがわかる。これも壁面角度により津波ジェット流が鉛直真上に打ち上がらず一旦沖側に飛び出した後に、湾曲しながら岸側に着水するためであることがわかつ

ている。次に、水塊の最大打上高さに着目する。x=0mにおける無次元水位の大きさの順と同様の傾向が見られ、E(90°)の場合に0.36mと最大値を示した。90°から同値の差の鋭角と鈍角に着目すると、鈍角の方が鋭角よりも打上高さが1.7~2.8倍ほど高い傾向にある。これは鈍角の衝突面は津波先端部に対して被さるような形状であるため、壁面衝突後から水塊射出までに津波先端部の運動エネルギーが増加し、射出時の水塊の流速が大きくなったためと考えられる。また、90°との差が大きいくほど、この現象は顕著になる傾向が見られる。

3. 動的接触角の導入による再現精度の検討

3.1 解析手法

解析ツールにOpenFOAM(Open Source Field Operation Manipulation)を用いた。使用ソルバは混相流計算であるinterFoamをベースに造波、境界条件を改良したolaFoamとした。気液界面の補足にはVOF法を用い、さらに今回、Faghriらの式⁴⁾で定義される動的前進(後退)接触角を導入した。このモデルでは、接触角の境界条件を満たすように壁に対して平行な速度U成分を正規化しU_{wall}を求め界面を再構築する。なお、動的接触角の値についてはYokoiらの実験結果⁵⁾を参照し、動的前進角を114°、動的後退角を52°とした。このモデルを用いて防波堤模型E、A、Bの真上の水位変動をサンプリングし検討を行う。妥当性についてはBreaking dam flows⁶⁾による精度検討を事前に行っている。

3.2 結果

防波堤模型Eでのx=0mにおける水塊打上高さについて、ビデオ画像から得た結果をcase01、動的接触角を導入しない場合の数値計算値をcase02、動的接触角を導入した場合の数値計算値をcase03、容量式波高計から得られた値をcase04とし、比較図を図-5に示す。この図より、動的接触角を導入することで打上水塊の最大高さがEの場合、20%程度向上した。さらに他の防波堤模型の場合、Aでは7%、Bでは3%の再現精度の向上を確認し、これらの再現精度は、case01と比べEが64%、Aが82%、Bが76%の結果となった。これは、防波堤模型前面に津波先端部が衝突した直後の液相の再現精度が向上したことが想定される。防波堤模型Eに津波先端部が衝突し鉛直上向きに打ち上げられた際の断面図を図-6に示す。この図より水塊が鉛直上向きに打ち上がる過程で、動的接触角導入前は水塊先端部が分裂してしまうが、動的接触角を導入したことで先端部は分裂せず最大高さまで達していることがわかる。さらに防波堤模型A、Bにおいても同様の現象が確認された。

4. まとめ

- 1) 津波ジェット流の発生により、構造物周辺では津波の入射波高以上の水位変動が生じる。
- 2) 水塊の最大打上高さは90°の直立壁の場合で最も大きい。鋭角の場合は勾配が小さく、鈍角では勾配が大きくなるほど水塊の打上高さが低くなる。
- 3) 90°から同値の差の鋭角と鈍角では鈍角の方が最大打上高さは高くなり、90°との差が大きくなるほどその差は大きくなる。

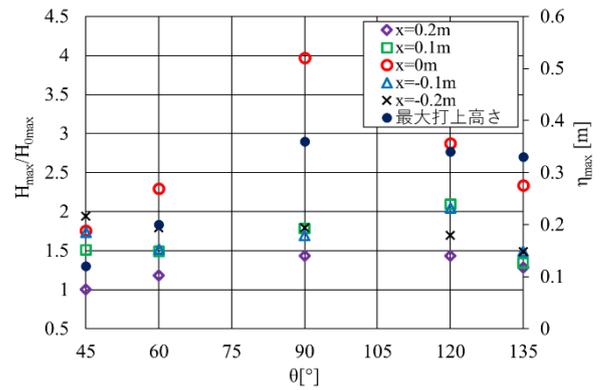


図-4 y=0.15mにおける無次元水位と各勾配における水塊の最大打上高さ

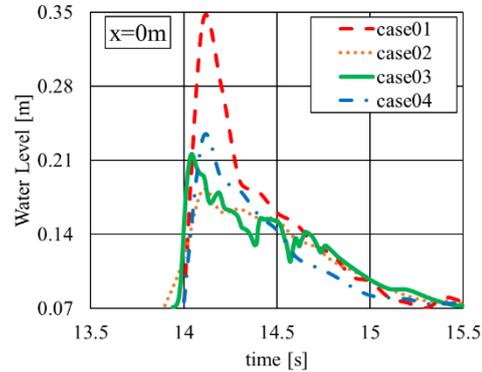


図-5 防波堤Eの直上位置における水位変動比較

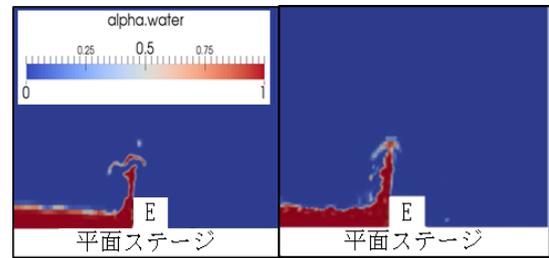


図-6 接触角導入前(左)後(右)の界面変動

参考文献

- 1) Tadmor, R.: Line Energy and the Relation between Advancing, Receding, and Young Contact Angles, *Langmuir*, Vol.20, pp.7659-7664, 2004.
- 2) 長山昭夫, 石本健司, 種田哲也, 井崎丈, 浅野敏之: 遡上津波による直立型構造物周辺の水位変動の数値解析, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol.73, No.2, I, 889-1, 894, 2017.
- 3) 水谷夏樹, 梅田尋慈, 池本将大: 構造物に衝突し打ち上がった水塊の落水によって生じる波力特性について, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol.73, No.2, I, 919-1, 924, 2017.
- 4) Faghri, A, Zhang, Y.: *Transport phenomena in multiphase systems*, Academic Press, pp.342-347, 2006.
- 5) Yokoi, K., Vadillo, D., Hinch, J., Hutchings, I.: Numerical studies of the influence of the dynamic contact angle on a droplet impacting on a dry surface, *Phys. Fluids*, 21, 072102, 2009.
- 6) Zhou, Z.Q., De Kat, Buchner, B.: A nonlinear 3-D approach to simulate green water dynamics on deck, *Proceedings of the Seventh International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, pp.01-15, 1999.

4) 動的接触角を導入した数値計算により津波先端部の再現精度が改善され、打上水塊の最大高さの再現精度が直立壁の場合で約20%、60°勾配で約7%、120°勾配で約3%程度向上する。