

様々な断面形状の防波堤に入射する津波の数値解析

柿沼 太郎*, 永田 浩樹**

1. 序 論

地震及び津波に対しては、ハードとソフトの両面での対策が必要である。そのため、構造物には、避難時間を確保する粘り強さが要求される。また、早急な復興を実現するためにも、粘り強い構造物が求められている。海岸堤防に関して言えば、例えば、諏訪¹⁾は、2011 年東北津波による海岸堤防の被災事例を分析し、裏法尻被覆の有効性を指摘した。また、中尾ら²⁾は、津波の越流による、堤防の幾つかの破壊メカニズムを抽出した。そして、小竹・磯部³⁾は、海岸堤防の裏法を緩勾配とすることが被覆工防護に有効であることを示した。更に、石河ら⁴⁾は、海岸堤防の裏法面形状が粘り強さに与える影響を調べた。そこで、本研究では、構造物の断面形状が津波に与える影響に着目し、防波堤前面に働く圧力や、津波高さの低減効果に関して、数値解析結果に基づき検討する。

また、津波の平面的な伝播特性に、反射⁵⁾、屈折⁶⁾、回折⁷⁾、そして、散乱⁸⁾がある。ここでは、防波堤間や、防波堤と陸地との間の開口部から津波が進入する場合を考える。例えば、柿沼ら⁹⁾は、明治三陸津波が釜石港湾港防波堤に伝播する場合を対象とし、堤近傍の 3 次元的な流れをシミュレートした。そして、開口部下の潜堤直立部に働く圧力分布等を調べたが、回折波の影響には、言及しなかった。本研究では、防波堤開口部から津波が進入する場合を対象とし、堤背後における津波の回折波の影響を検討する。

2. 数値解析の手法及び条件

図 1～図 4 に示すような 4 種類の断面形状の構造物を図 5、または、図 6 に示す領域に設置し、3 次元流体運動を対象として数値解析を行なった。

図 1 に示す防波堤は、断面形状が台形型の防波堤である。ここでは、この防波堤を「台形」

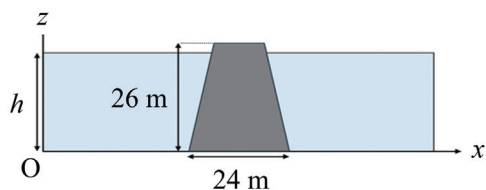


図 1 台形

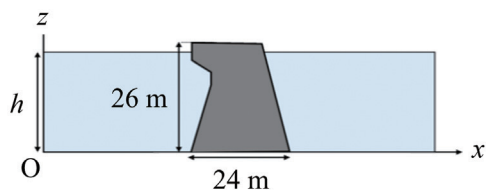


図 2 波返し

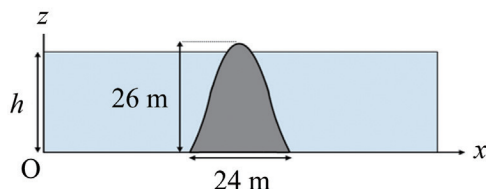


図 3 曲線 I

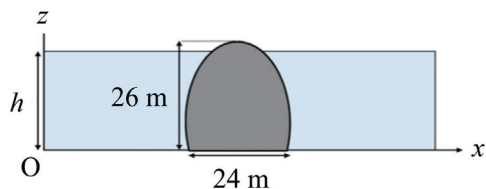


図 4 曲線 II

*鹿児島大学学術研究院理工学域

**鹿児島市水道局

と呼び、これを基本型として比較検討を行なう。図 2 には、海岸防波堤に見られるような、波返し工をモデルとした断面形状を有する防波堤を示す。この防波堤を「波返し」と呼ぶ。また、図 3 及び図 4 には、周に曲線を有する断面形状の防波堤を示す。ここで、図 3 の防波堤は、幅が下方ほど広がる形状を有し、他方、図 4 の防波堤は、海底付近で狭窄する形状を有している。図 3 及び図 4 の防波堤は、それぞれ、「曲線 I」及び「曲線 II」と呼ぶ。これらの防波堤のいずれも、底面幅及び堤高は、それぞれ、 $b = 24 \text{ m}$ 及び $h_s = 26 \text{ m}$ とした。

図 5 は、Case 1 における計算対象領域の平面図を示している。この領域の x 軸方向及び y 軸方向の全長は、それぞれ、 1000 m 及び 125 m である。他方、図 6 は、Case 2 における計算対象領域の平面図を示している。この領域の x 軸方向及び y 軸方向の全長は、それぞれ、 1000 m 及び 1050 m である。図 5 及び図 6 の両者の領域において、図 1～図 4 に示

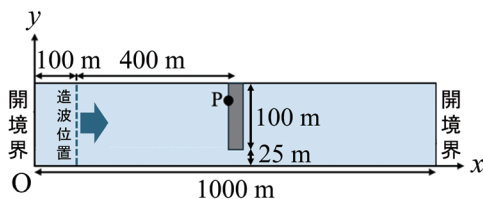


図 5 Case 1 の計算対象領域

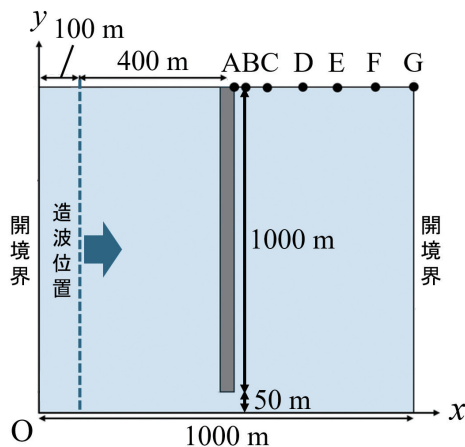


図 6 Case 2 の計算対象領域

す防波堤の底面の x 軸方向の中心位置は、 $x = 500 \text{ m}$ とする。また、図 5 では、防波堤の長さを 100 m 、開口部の幅を 25 m とし、図 6 では、防波堤の長さを 1000 m 、開口部の幅を 50 m としている。ただし、図 5 における $y = 0 \text{ m}$ 及び 125 m と、図 6 における $y = 0 \text{ m}$ 及び 1050 m の境界を完全反射境界とした。そのため、図 5 及び図 6 で対象としている防波堤の長さは、それぞれ、 200 m 及び 2000 m であり、開口部の幅は、それぞれ、 50 m 及び 100 m であると考えてもよい。これら以外の境界には、Sommerfeld の放射条件を適用した。

造波位置は、図 5 及び図 6 の両者において、 $x = 100 \text{ m}$ とする。入射波は、クノイド波とし、その波高を 3 m 、周期を 150 s とした。

数値解析には、CADMAS-SURF/3D^{(10), (11)} を適用した。本モデルを用いた数値解析では、連続方程式、Navier-Stokes 方程式及び圧力に関する Poisson 方程式を 3 次元空間内で解く。また、水面位置の決定には、VOF (volume of fluid) 法を用いる。差分方程式には、一次風上差分を適用し、また、時間積分には、SMAC (simplified marker and cell) 法を適用する。

計算格子間隔は、図 5 では、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2.5 \text{ m}$ とし、図 6 では、 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5 \text{ m}$ とした。計算時間間隔は、CFL 条件を満足するよう自動的に決定した。本研究では、異なる静水深 h の場合に対して数値解析を実施し、解析結果の比較検討を行なう。

3. 断面形状が防波堤前面の圧力分布に与える影響

まず、防波堤長が短い Case 1 において、防波堤の断面形状の差異が、防波堤前面における圧力分布にどのような影響を与えるかを検討する。図 1～図 4 に示す防波堤を、図 5 に示す領域に設置して数値解析を行なった。図 5 に示す地点 P を含む、 $y = 100 \text{ m}$ の位置における防波堤前面の圧力分布を図 7 に示す。ここで、等しい高さ z における、図 1 に

示す台形断面の防波堤に働く圧力を減じた値 Δp を示している。また、静水深 h は、25 m, 26 m, または、27 m としており、いずれの場合にも越波が生じた。

図7において、曲線Ⅰ及び曲線Ⅱの防波堤では、圧力差 Δp が負の値を示していることがわかる。すなわち、周に曲線を有する断面形状の防波堤は、台形型の防波堤に比べて圧力が低減している。

一方、波返しを有する防波堤では、防波堤の上部においてのみ圧力差 Δp が負の値を示しており、圧力が低減している。これは、波返しの形状により上方向への水の逃げ道が一時的に制限されることによって、水が下方に押し出され、防波堤下部において圧力が上昇

したためと考えられる。このように、波返し型の防波堤は、台形型の防波堤と比較して、圧力低減効果が見込めない。

4. 津波高さの低減効果

次に、防波堤長が長い Case 2 において、防波堤後方における水面変動を調べる。図1～図4に示す防波堤を、図6に示す領域に設置して数値解析を行なった。静水深 h は、26 m とする。図6の $y = 1050$ m に位置する地点 A, B 及び C における水面変動 η を図8に示す。ここで、地点 A, B 及び C の x 軸方向の位置は、それぞれ、 $x = 525$ m, 550 m 及び 600 m である。

図8において、曲線Ⅰ及び曲線Ⅱでは、台形に比べて水面変動の最大値、すなわち、津波高さが低い。そして、曲線Ⅰと曲線Ⅱを比較すると、地点 A では、曲線Ⅰの方が、高い津波高さ低減効果が得られている。これに対し、地点 C 以遠では、曲線Ⅱの方が、曲線Ⅰより津波高さの低減効果が高かった。なお、本稿では、解析結果を割愛するが、静水深 h が 27 m の場合、図6に示す A ~ G のすべての地点において、曲線Ⅱの方が、台形、波返し及び曲線Ⅰよりも、津波高さの低減効果が大きいことを確認した。

一方、波返しでは、地点 A において、台形と同程度の津波高さが現れている。しかしながら、より後方の地点 B 及び C においては、津波高さが台形より低い。これは、波返しの方が、台形より天端幅が長く、天端上での波高低減効果が大きくなったためであると考えられる。

ところで、堤体の体積を考えると、曲線Ⅰでは、曲線Ⅱよりも、材料を後者の約 25% 抑えることができる。従って、津波の想定に基づき、こうした結果を踏まえて、堤防の効果的・経済的な形状及び設置位置を選定する必要がある。

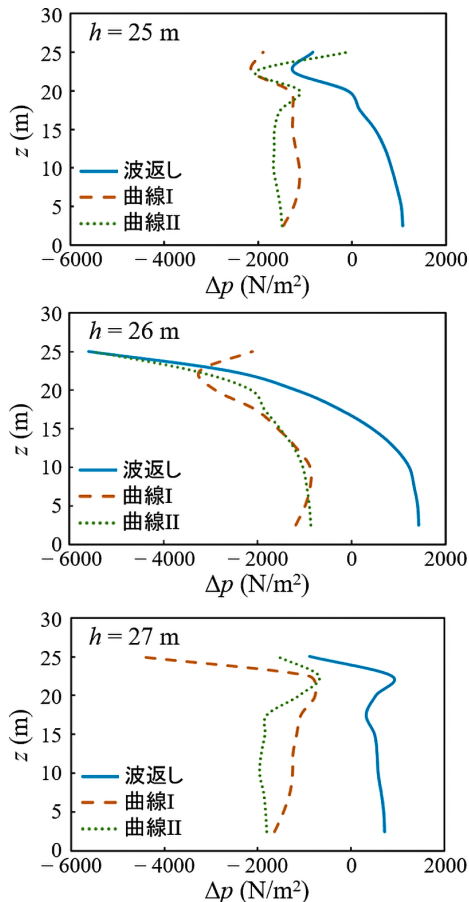


図7 等しい高さにおける台形の場合の圧力を基準とした圧力差 Δp の分布 ($y = 100$ m)

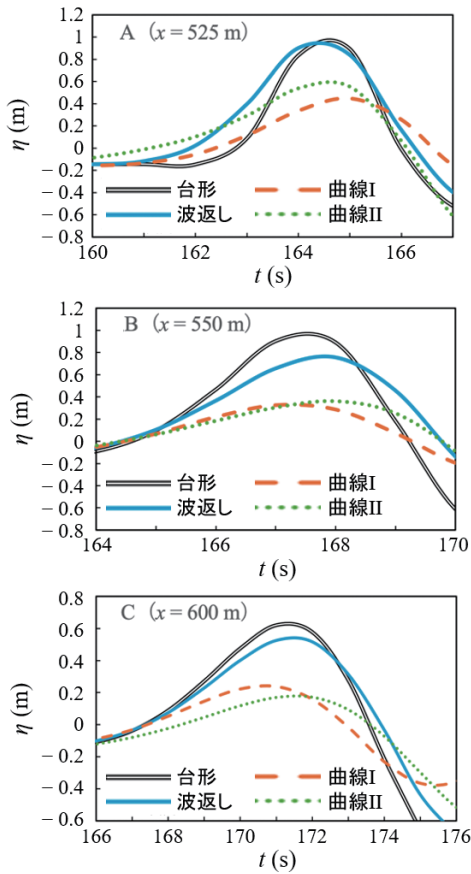


図 8 静水深 $h = 26$ m の場合における図 6 に示す地点 A, B 及び C における水面変動 $\eta(y = 1050 \text{ m})$

5. 回折波の影響

更に、防波堤長が長い Case 2 において、防波堤背後に伝播する回折波に着目する。図 1～図 4 に示す防波堤を図 6 に示す領域に設置した。静水深 h が 24 m 及び 25 m の場合の、防波堤後方の $x = 1000 \text{ m}$ における最大水位 $\eta_{\max}$ の y 軸方向の分布をそれぞれ図 9 及び図 10 に示す。

図 9 に示す、静水深が浅い $h = 24 \text{ m}$ の場合には、越波が生じないため、開口部から y 軸方向に離れるに従って、最大水位 $\eta_{\max}$ が単調に低減している。他方、図 10 に示す、静水深が大きい $h = 25 \text{ m}$ の場合には、 $\eta_{\max}$ が開口部から単調に低減する傾向が見られない。

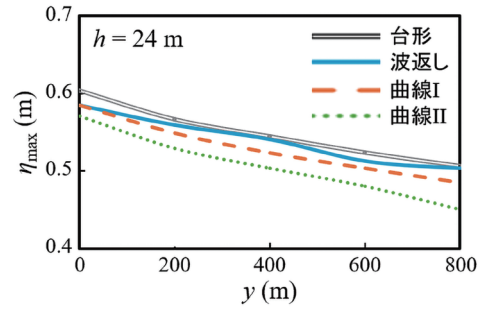


図 9 静水深 $h = 24 \text{ m}$ の場合における最大水位 $\eta_{\max}$ の分布 ($x = 1000 \text{ m}$)

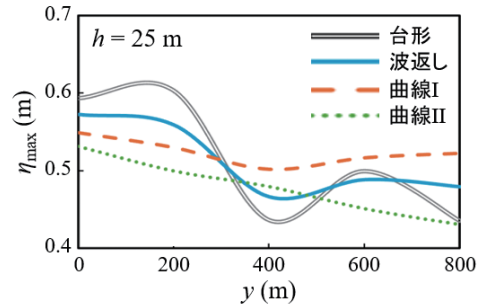


図 10 静水深 $h = 25 \text{ m}$ の場合における最大水位 $\eta_{\max}$ の分布 ($x = 1000 \text{ m}$)

これは、越波が発生するためである。越波が回折波に重合することによって、最大水位の局所的な変動が生じる。図 10 において、例えば、台形では、 $y = 200 \text{ m}$ 及び 600 m の 2 地点において、 $\eta_{\max}$ が大きくなっている。最大水位 $\eta_{\max}$ は、このように、開口部と構造物後面の両者からの距離に依存して分布するため、津波防波堤を設置する際には、海域及び陸域の地形を考慮しながら、越波と回折波の両者の影響を考慮する必要がある。

図 1 に示す台形断面の防波堤を、図 6 に示す領域に設置したときの、静水深 h が 24 m 及び 26 m の場合における水位分布の時間変化をそれぞれ図 11 及び図 12 に示す。

図 11 及び図 12 の両者において、回折波の津波高さも有意な大きさとなっていることは、特筆すべきことである。また、静水深が大きな図 12 の場合、防波堤上を通過して分裂した越波と、開口部から伝播した回折波が重合して、津波高さが局所的に大きくなる地

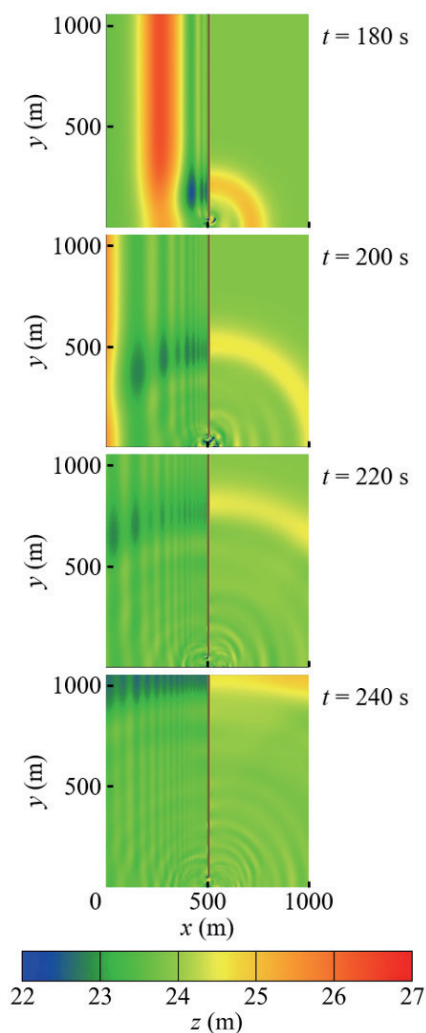


図 11 図 1 に示す台形断面の防波堤周辺の水
位分布の時間変化 ($h = 24$ m)

点が多数存在する。これらの津波が伝播して来るタイミングに依存して、各地点における水位が変動するのである。

6. 結 論

様々な断面形状を有する防波堤に入射する津波の 3 次元数値解析を行ない、防波堤前面の圧力分布や、津波高さの低減効果、そして、堤背後の回折波の影響に関して調べた。

防波堤前面に働く圧力は、周に曲線を有する断面形状の防波堤が、台形型の防波堤より

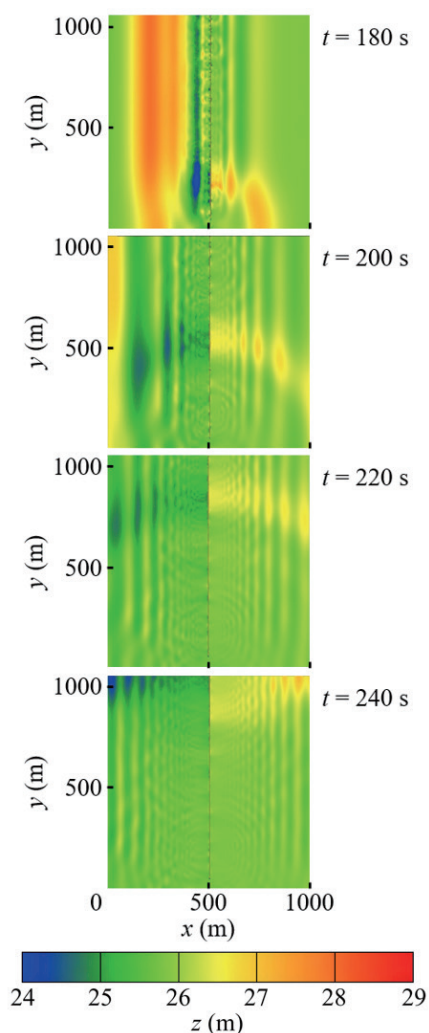


図 12 図 1 に示す台形断面の防波堤周辺の水
位分布の時間変化 ($h = 26$ m)

も低く抑えることができ、津波によって倒壊するまでの時間を長くできる可能性のあることがわかった。

また、堤背後の津波高さに関しては、対象とした条件において、波返しを有する防波堤や、周に曲線を有する断面形状の防波堤が、台形型の防波堤に比べて、概ね津波高さの低減効果が大きかった。しかしながら、静水深や防波堤からの距離によっては、あまり効果の認められない場合があるため、地形や想定される津波を考慮して、防波堤の断面形状及び設置位置を適切に決める必要がある。

更に、回折波に関しては、越波よりも、防波堤開口部を通過して回折した津波の津波高さの方が大きくなる条件があった。そして、回折波と、分裂した越波が重合した場合、堤後方に、最大水位が局所的に大きくなる地点が多数現れた。回折波の波高を低減するために、開口部付近の潜堤や、回折波の波向きを制御する構造物等を設置するといった配慮が必要であろう。

参考文献

- 1) 諏訪義雄：粘り強く機能を発揮する海岸堤防，東日本大震災あれから 1 年そしてこれから～巨大災害と社会の安全～，土木学会東日本大震災特別委員会，pp. 13-16, 2012.
- 2) 中尾秀之，佐藤慎司，Yeh, H.: 津波の越流による海岸堤防の破壊メカニズムに関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 68 (2)，pp. I_281-I_285, 2012.
- 3) 小竹康夫，磯部雅彦：津波の越流時に海岸堤防の法面に作用する圧力特性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 68 (2)，pp. I_891-I_895, 2012.
- 4) 石河雅典，上月康則，山中亮一，大久保陽介：数値計算を用いた粘り強い耐津波海岸堤防裏面形状に関する考察，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 73 (2)，I_1069-I_1074, 2017.
- 5) 越村俊一：陸棚斜面に入射した津波の多重反射，土木学会論文集，No. 705/II-59，pp. 151-160, 2002.
- 6) 羽鳥徳太郎：能登半島における津波の屈折効果，地震 第 2 輯，Vol. 52 (1)，pp. 43-50, 1999.
- 7) Takagi, H., Siddiq, N. L., Tanako, F., De La Rosa, D. P. B.: Locally amplified tsunami in Iida Bay due to the 2024 Noto Peninsula Earthquake, Ocean Engineering, Vol. 307, 118180, 2024.
- 8) Koshimura, S., Hayashi, Y., Munemoto, K., Imamura, F.: Effect of the Emperor seamounts on trans-oceanic propagation of the 2006 Kuril Island earthquake tsunami, Geophysical Research Letters, Vol. 35 (2), 2008.
- 9) 柿沼太郎，富田孝史，秋山 実：海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波の数値計算，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 286-290, 2003.
- 10) 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究開発，沿岸技術ライブラリー，2010.
- 11) Arikawa, T., Chida, Y., Seki, K., Takagawa, T., Shimosako, K.: Development and applicability of multiscale multiphysics integrated simulator for tsunami, Journal of Disaster Research, Vol. 14 (2)，pp. 225-234, 2019.