底面の水平移動に伴う津波の数値解析

柿沼 太郎*·帖佐 育彦**

1. 序 論

海底地震に伴う津波の伝播解析は、 通常、 推定された断層運動によって生じる海底地震 後の地盤の永久変位を算出し, この変位を初 期水面形と仮定して開始する。ところが、津 波は、時間に依存する過程を経て生成される10。 従って, 海底面の永久変位が等しくても, 異 なる水面形が形成される可能性がある. ま た、2024年能登半島地震で発生したような 横ずれ断層地震によって津波が牛成される場 合, どのような津波が生成されるかは, 不明 な点が多い。これまで、モデル地形の水平移 動に伴う津波に関して、基礎研究が行なわれ ている2)-6)。また、実際に発生した横ずれ断 層地震に伴う津波に関しても調べられてきた 7)-12)。更に、津波波源が岸に近い場合、津波 到達時間が短くなる。そのため、沿岸域の横 ずれ断層地震による可能性津波の評価も行な われている¹³⁾。

そこで、本研究では、水平方向成分を有する底面変動による津波の生成・伝播過程に関して、速度ポテンシャルに関する非線形浅水モデルを用いた数値解析によって調べた。ここでは、一様な勾配の海底斜面が、沖向きや岸向きに水平移動する場合を対象とした。

2. 数値解析の手法及び条件

次式のような、速度ポテンシャルに関する 非線形浅水方程式系を適用し、津波の生成・ 伝播過程の数値計算を行なった。

$$\partial \eta / \partial t = \partial b / \partial t - \nabla [(\eta - b) \nabla \phi] \tag{1}$$

$$\partial \phi / \partial t = -\left[g\eta + (\nabla \phi)^2 / 2\right] \tag{2}$$

ここで、式 (1) 及び式 (2) は、それぞれ、連続方程式及び Bernoulli の式であり、 η 、b及び ϕ は、それぞれ、水面変動、底面位置及び速度ポテンシャルである。重力加速度gは、 $9.8~{\rm m/s}^2$ とする。また、 $\nabla=(\partial/\partial x,\,\partial/\partial y)$ は、水平方向の微分演算子である。ここでは、簡単のために、摩擦を無視する。

本研究では、x 軸方向に 1 次元伝播する津波を対象とする。底面変動を式(1)の底面位置 b に与える。そして、空間に中央差分を適用し、前進差分を用いた陽解法により、式(1) 及び式(2) を解いた。ここで、 $\Delta x=1$ m及び $\Delta t=0.01$ s とした。

横ずれ断層による地形変化,または,海底 地すべりを想定し,海底斜面が水平方向に移 動する場合の津波生成過程を考える。一様勾 配斜面を有する海底面の形状を図1に示す。

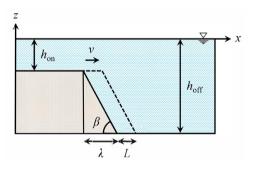


図1 水平移動する海底面

域の静水深を h_{on} 、沖側の深い水域の静水深を h_{off} 、また、斜面勾配を β とし、これらが、それぞれ、一様かつ一定であるとする。そして、この海底斜面が、速度vで水平に移動する場合を対象とする。ここで、v>0のとき、斜面が沖向きに張り出され、逆に、v<0のとき、斜面が岸向きに引き込まれる。また、斜面の水平方向の長さを λ とし、水平方向の移

^{*}鹿児島大学学術研究院理工学域

^{**}西日本高速道路株式会社

動量の最大値をLとする。なお, $\tan \beta = (h_{\rm off} - h_{\rm on})$ $/\lambda$ である。これらのパラメタを表 1 にまとめる。また,各ケースの数値解析条件を表 2 に記す。

表1 斜面を含む海底地形の諸元

パラメタ	記号
斜面岸側の静水深	h_{on}
斜面沖側の静水深	$h_{ m off}$
斜面勾配	β
斜面の水平長さ	λ
斜面の水平移動速度	ν
斜面の水平移動量の最大値	L

表 2 数值解析条件

Case (m) (m) $\tan \beta$ (m) (m/s) (r A 10 15 1 5 2	Z n) 5
B-1 10 15 0.5 10 2	5
B-2 2.5 2	
C-1 10 15 1 5 0.2	5
C-2 12	
D-1 10 20 2 5 2 :	5
D-2 15 1	
E-1 10 15 1 5 2 1	0
E-2 12	
F-1 10 15 1 52 :	5
F-2 -10	
F-3	0
F-4 -12	

各場合の条件を Case A における条件と比較すると、Case B では、海底斜面の斜面勾配 β が Case A と異なる。Case C では、斜面の水平移動速度 v が Case A と異なる。Case D では、斜面岸側の静水深 $h_{\rm on}$ 、または、斜面沖側の静水深 $h_{\rm off}$ が Case A より深い。Case E では、斜面の水平移動量の最大値 L が Case A の 2 倍である。そして、Case F では、v < 0 m/s であり、斜面が岸に向かって移動する。

なお,速さ |v| の比較的大きな値は,地盤表層部の局所的破壊や,地すべり等が起きれば,生じ得るであろう。

3. 海底斜面の沖向き移動に伴う津波に 対する斜面勾配の影響

まず、Case A における水面形の時間変化を図2に示す。ここで、 η は、水面変動である。図2より、海底斜面の移動に伴い、比較的短時間に津波が生じていることがわかる。これは、斜面の水平移動速度と比較して、津波の位相速度が大きいためである。斜面は、急に移動し始め、急に停止した。そのため、津波は、分散性衝撃波(dispersive shock wave)のように、多くの波を示している。ただし、ここで適用した数値モデルでは、波の分散性が考慮されていない。

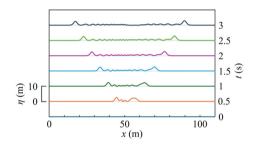


図2 Case A における水面形の時間変化

また、図 2 において注意すべきこととして、斜面進行方向である沖向きに伝播する津波のみならず、岸向きに進む津波も生成されていることが挙げられる。岸向き及び沖向きに進む津波のt=3 s における津波高さは、それぞれ、約 2.4 m 及び約 2.8 m であり、ともに斜面の高さの半分程度となっている。ここで、津波高さは、図中に現れた岸向き及び沖向きに進む各津波の最大水位とする。また、第 1 峰の波長は、沖向きに進行する津波の方が、岸向きに進む津波より長い。

次に、Case B-1 における水面形の時間変化を図3に示す。Case B-1 の斜面は、Case A の斜面と比較して、高さが等しいが、緩勾配

であり、水平方向の長さλが長い。そのため、 沖向きに進行する津波の波長が、Case B-1 において、Case A より大きくなっている。

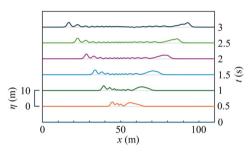


図3 Case B-1 における水面形の時間変化

逆に、Case A の斜面よりも急勾配の斜面 が移動する Case B-2 における水面形の時間 変化を図 4 に示す。この場合、特に、沖向き に進行する津波に着目すると、津波の波長が 短い。そして、津波高さは、上記の二つの場合ほど大きくなっていない。

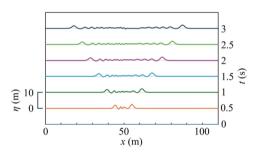


図 4 Case B-2 における水面形の時間変化

4. 海底斜面の沖向き移動に伴う津波に対する斜面の水平移動速度の影響

Case C-1 及び Case C-2 における水面形の時間変化をそれぞれ図 5 及び図 6 に示す。 Case C-1 では、斜面の水平移動速度vが Case A の 1/10 と遅く、津波高さが Case A ほど大きくならなかった。他方、Case C-2 では、vが Case A より大きく、特に、沖向きに進む津波の津波高さが大きくなり、Case A の約 1.9 倍であった。そして、Case C-2 における沖向きに進む津波のピークは、t=3 s にお いて, Case A のそれより約4 m 先行している。しかしながら、岸向きに進む津波の速度は, 両者の場合で, 殆ど違いがなかった。

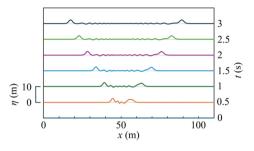


図 5 Case C-1 における水面形の時間変化

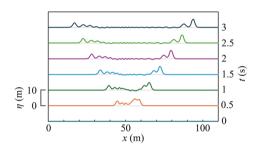


図 6 Case C-2 における水面形の時間変化

5. 海底斜面の沖向き移動に伴う津波に 対する静水深の影響

Case D-1 における水面形の時間変化を図7に示す。Case D-1 では、海底斜面沖側の静水深 h_{of} が Case A より大きく、斜面の高さが Case A の 2 倍である。Case D-1 の斜面は、 $\tan \beta$ も Case A の 2 倍であり、より急勾配であるが、岸向き及び沖向きに進む津波のt=

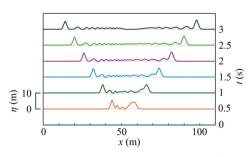


図7 Case D-1 における水面形の時間変化

3 s における津波高さが、ともに Case A の約 2.1 倍となった。

他方、Case D-2 における水面形の時間変化を図8に示す。Case D-2 では、 h_{on} 及び h_{off} の両者が Case A より大きいが、斜面の高さと勾配は、Case A と等しい。この場合、Case A とほぼ等しい大きさの津波高さが現れている。なお、ここでは、波の分散性を考慮していないため、同一の地形変化に対して、静水深が大きいほど、生成される津波の津波高さが低減するという特性 11 は、表現されていない。

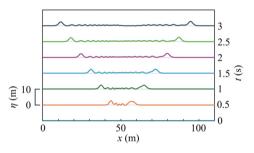


図 8 Case D-2 における水面形の時間変化

また、図2と図8を比較して、静水深が大きい Case D-2 では、水平床上における津波の伝播速度が大きくなっている。従って、斜面岸側の水域が深い場所では、浅い場所よりも、岸向きに進む津波の海岸到達時刻が早くなることに注意する必要がある。

6. 海底斜面の沖向き移動に伴う津波に 対する斜面の水平移動量の最大値の 影響

海底斜面の水平移動量の最大値 L が Case A の 2 倍である Case E-1 における水面形の時間変化を図 9 に示す。L 以外の条件が等しい Case E-1 と Case A の結果,すなわち,図 9 と図 2 を比較すると,両者に有意な差が認められない。これは,津波が短時間で生じており,L の影響が殆ど現れなかったためである。他方,Case E-2 における水面形の時間変化を図 10 に示す。Case E-2 では,v 以外の

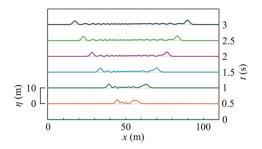


図9 Case E-1 における水面形の時間変化

条件が Case E-1 と等しいが、大きな津波高さが、特に、沖向きに進行する津波に現れている。 Case E-2 の沖向きに進む津波の t=3 sにおける津波高さは、Case A の約 2.7 倍に達している。そして、この津波高さは、v が等しく、L が半分の長さである Case C-2 よりも大きい。 Case C-2 及び Case E-2 において、v=12 m/s であるが、 $\sqrt{gh_{\rm off}}\simeq 12.1$ m/s であり、斜面の水平移動速度が、斜面沖側における線形浅水波の位相速度に近い。従って、これらの場合、Proudman 共鳴 14 に類似した増幅効果が大きくなり、L が大きいほど、沖向きに伝播する津波の津波高さが大きくなった。

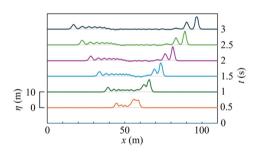


図 10 Case E-2 における水面形の時間変化

7. 海底斜面の岸向き移動に伴う津波

海底斜面が岸に向かって移動する場合の津波生成過程を調べる。Case F-1 における水面形の時間変化を図 11 に示す。Case F-1 においても、Case A と同程度の津波高さを有する岸向き及び沖向きの津波が生成された。ただし、特に、t=0.5 s において、岸向き及び沖向きの津波の間の水面が、Case A より僅

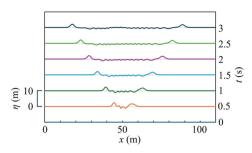


図 11 Case F-1 における水面形の時間変化

かに低下している。

また、斜面が移動する速さを Case F-1 より大きくした Case F-2 における水面形の時間変化を図 12 に示す。この場合の津波高さは、Case F-1 ほど大きくならなかった。そして、Case F-2 では、t=0.5 s において見られるように、津波の生成過程において、比較的大きな津波の谷が形成されたが、これは、特筆すべきことである。

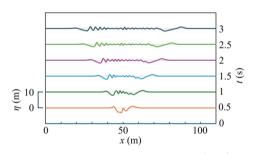


図 12 Case F-2 における水面形の時間変化

一方,斜面の水平移動量の最大値 L が Case F-2 の 2 倍である Case F-3 における水面形の時間変化を図 13 に示す。両者の場合,v=-10 s であり, $\sqrt{gh_{on}} \simeq 9.9$ m/s であるから,斜面の水平移動速度が,斜面岸側における線形浅水波の位相速度に近い。従って,これらの場合の結果に L の大きさの違いが現れ,図 13 では,岸向きに進行する津波において,谷の増幅が顕著である。ただし,t=3 s において,岸向きに進む津波の峰は,それほど高くなっていない。また,沖向きに伝播する津波の津波高さは,両者の場合で違いが殆ど見られない。

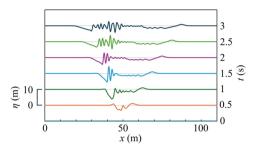


図 13 Case F-3 における水面形の時間変化

なお、図13において、岸向きに進行する 津波では、引き波が先行している。逆に、沖 向きの津波では、押し波が先行し、その後ろ に長波長の谷が続いている。

更に、Case F-4 における水面形の時間変化を図14に示す。この場合、斜面の水平移動速度が、斜面沖側における線形浅水波の位相速度に近いが、沖向きに進行する津波の津波高さは、Case F-3 と殆ど違いがない。

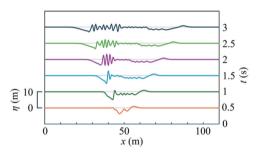


図 14 Case F-4 における水面形の時間変化

8. 結 論

速度ポテンシャルに関する非線形浅水モデルを適用し、一様勾配の海底斜面が水平移動する場合における、津波の生成・伝播過程の数値解析を行なった。沿岸域に存在する斜面が水平移動する場合、津波が沖向きのみならず、岸向きにも伝播し、海岸にも、数多くの津波が到達し得る。

斜面が沖向きに移動する場合,斜面勾配が 大きいと,津波が発生しにくいが,斜面の高 さが大きいと,岸向き及び沖向きに進行する 両者の津波の津波高さが大きくなる。更に, 斜面の水平移動速度が、斜面沖側の線形浅水 波の位相速度に近いと、沖向きに伝播する津 波が共鳴によって増幅される。

また、斜面が岸向きに移動する場合、斜面 の水平移動速度が斜面岸側の線形浅水波の位 相速度に近く、斜面の水平移動距離が大きい と、特に、岸向きに進行する津波の谷が増幅 される。

本研究の数値解析では、短時間に生成される、比較的短波長の津波が現れた。今後、波の分散性等も再現するために、速度ポテンシャルの高次成分を導入し、底面の変形の影響をより正確に考慮して、現地条件を想定した数値解析を行ないたい。

参考文献

- 柿沼太郎,秋山 実:海底面の変動に伴う 津波発生過程の数値解析,土木学会論 文集B,62,388-405,2006.
- Wu, T.Y.: Generation of upstream advancing solitons by moving disturbances, Journal of Fluid Mechanics, 184, 75-99, 1987.
- Kakinuma, T., Akiyama, M.: Numerical analysis of tsunami generation due to seabed deformation, In Smith, J.M., Ed.: Coastal Engineering 2006, World Scientific Publishing Co., Pte. Ltd., Singapore, 1490–1502, 2007.
- 4) Dalphin, J., Barros, R.: Optimal shape of an underwater moving bottom generating surface waves ruled by a forced Kortewegde Vries equation, Journal of Optimization Theory and Applications, 180, 574-607, 2019.
- Hu, C., Wu, Y., An, C., Liu, H.: A numerical study of tsunami generation by horizontal displacement of sloping seafloor, Journal of Earthquake and Tsunami, 14 (4), 2050018, 2020.
- 6) Michele, S., Renzi, E., Borthwick, A.G.L., Whittaker, C., Raby, A.C.: Weakly nonlinear theory for dispersive waves generated

- by moving seabed deformation, Journal of Fluid Mechanics, 937, A8, 2022.
- 7) 阿部邦昭,岡田正実:横ずれ断層地震による津波の励起-1990年2月20日伊豆大島近海地震津波-,地震,2(46),25-34,1993.
- Tanioka, Y., Satake, K.: Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom, Geophysical Research Letters, 23 (8), 861–864, 1996.
- 9) 韓 世燮,河田恵昭,岡村 真,松岡裕美: 海底横ずれ断層での津波ポテンシャル について,海岸工学論文集,49,261-265,2002.
- 10) Tony Song, Y., Fu, L.-L., Zlotnicki, V., Ji, C., Hjörleifsdóttir, V., Shum, C.K., Yi, Y.: The role of horizontal impulses of the faulting continental slope in generating the 26 December 2004 tsunami, Ocean Modelling, 20 (4) , 362-379, 2008.
- Nosov, M.A., Kolesov, S.V., Levin, B.W.: Contribution of horizontal deformation of the seafloor into tsunami generation near the coast of Japan on March 11, 2011, Doklady Earth Sciences, 441, 1537–1542, 2011.
- 12) Suleimani, E., Freymueller, J.: Near-field modeling of the 1964 Alaska tsunami: The role of splay faults and horizontal displacements, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125 (7), e2020JB019620, 2020.
- 13) 山下 啓,今村文彦,サッパシーアナワット,林 晃大,菅原大助,岩間俊二:可能性津波の評価解析,東北大学災害科学国際研究所編:平成28年熊本地震に関する報告書,80-90,2017.
- 14) Proudman, J.: The effects on the sea of changes in air pressure, Geophysical Journal International, 2 (s4), 197–209, 1929.