

福山港泊地における副振動の特徴

向 井 厚 志

要旨

福山港泊地で観測された海面の固有振動に関する数値計算を現実的な海底地形に基づいて実施し、その空間分布の特徴について調べた。同泊地では振動数1.4cph（周期約43分）付近に顕著な潮位変化が生じており、これは泊地最奥部で潮位変化が最大となる副振動を表している。南海トラフ地震発生時に福山港沖合に到来すると予測される津波波形には、この副振動の周期に近い周期約66分の成分が含まれている。そのため、津波が到達した泊地最奥部付近では、福山港沖合よりも約1m高い潮位上昇となることが推察された。これは、満潮時において潮位が標高4.6m弱に達する可能性を示唆している。

キーワード：福山港泊地、副振動、南海トラフ地震、津波

1. はじめに

陸域に囲まれた閉鎖的な海域では、副振動や静振と呼ばれる海面の固有振動が生じている。こうした海面変動は、主に周辺海域の気圧変動によって励起されることが知られている。例えば、小西(2006)は横浜港の潮位観測値を解析し、顕著な気圧変動に伴う強風時に50～150分の周期帯で副振動が繰り返して発生してきたことを報告している。また、浅野他(2014)は鹿児島県上甕島浦内湾で発生した周期24分と周期10.5～12分の副振動が周辺海域の気圧擾乱によって励起されていることを数値計算によって示している。

福山市の福山港泊地も瀬戸内海から福山市立大学まで伸びた細長い閉鎖的な海域であり、副振動や静振といった海面の固有振動が生じている。向井他(2022)は同泊地最奥部付近で得られた潮位観測値を解析し、周期42分付近および12分付近に明瞭なスペクトル・ピークが現れることを報告した。長方形湾における固有周期の解析解との比較から、前者は福山港口に節をもち福山港泊地全体を1/4波長とする

副振動であり、後者は泊地最奥部付近の一部海域で励起された静振であると考えられている。

向井他(2022)は一定傾斜の海底地形を仮定し、非線形浅水方程式系に基づく数値モデルを用いて福山港泊地の海面変動を計算した。その結果、観測された副振動および静振の周期が数値計算によって再現できることが示された。ただし、この計算で使用した海底地形は単純な傾斜面であり、実際の海底地形とは異なっている。一定水深の長方形湾内における副振動および静振の周期の解析解は水深に依存していることから、より現実的な海底地形に基づく数値計算を行い、観測結果を再現できるか確認する必要がある。そこで、本研究では、向井他(2022)の観測結果と比較する数値計算の正確さを向上させるため、航海用海図に基づいて福山港泊地の海底地形データを数値化し、同泊地の海面変動を再計算した。

副振動や静振は主に周辺海域の気圧擾乱によって励起されており、こうした気象状況下では高潮が発生する場合もある。そのため、副振動および静振の発生が高潮災害を拡大させる可能性が指摘されている（例えば、吉岡他、2002）。また、渡久地他(2016)

は伊勢湾に設置された海洋レーダの観測値を解析し、2011年東北地方太平洋沖地震時の津波が到達したとき、同湾内に様々な振動モードの副振動が誘発されていたことを報告している。このことは、津波による潮位変化の周期が湾内の固有周期に近い場合、副振動や静振が励起され、沿岸部の津波高を増大させる危険性があることを示唆している。したがって、来るべき南海トラフ地震発生時の津波が福山港泊地内に侵入する場合にも、副振動や静振によって想定外の潮位上昇が生じることも考えられる。同泊地における津波波形の数値計算に関しては向井他(2022)も実施しているが、海底地形を単純化した数値モデルを用いていた。そこで、本研究では、現実的な海底地形モデルを用いた数値計算を行い、副振動等による福山港泊地内の津波高への影響について明らかにする。

2 福山港泊地で観測された副振動と計算値の比較

福山港泊地は、瀬戸内海に面した福山港から続く距離約8.5kmの細長い水路であり、途中2か所で約90°折れ曲がっている。向井他(2022)は、福山港泊地の海面変動を数値計算する際、同泊地の海底地形として、福山港口の水深を15m、泊地最奥部の水深を3mとした一定傾斜面を仮定した(図1(a))。しかし、実際には水路断面も一定水深ではなく、両岸に近づくほど土砂が堆積して浅くなる湾曲地形となっている。そこで、海上保安庁の航海用海図「福山港」をもとに、平均海水面時における福山港泊地内の水深データを10mメッシュで作成した(図1(b))。航海用海図は干潮時の水深を示していることから、図1(b)はこの水深に海洋潮汐の振幅である2mを加えた値としている。

向井他(2022)は図1(b)の点A、BおよびCにIn-Situ社製水位計Rugged TROLL 100を設置し、2021年9月1日～11月4日に15秒間隔で潮位変化の連続観測を実施した。図1(b)の点Dは広島県港湾漁港整備課の潮位測定局であり、5分ごとに得られた潮位観測値が広島県土木建築局河川課「広島県河川防災情報システム」で公開されている。本研究で使用する福

山港泊地の潮位観測値は、これらの潮位観測点で得られたものである。

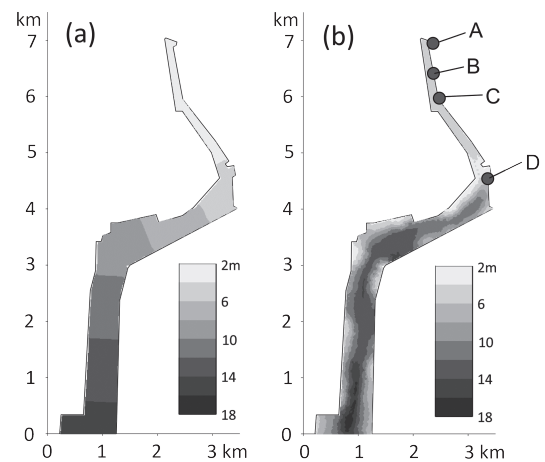


図1. 福山港泊地の水深分布

(a)向井他(2022)で使用した一定傾斜の水深分布、(b)本研究で使用した航海用海図に基づく水深分布。ここでは平均海水面時の水深としている。図中●印の点A、BおよびCは向井他(2022)の潮位観測点であり、点Dは広島県港湾漁港整備課の潮位測定局を示す。

本研究では、向井他(2022)の計算方法と同様に、規則波が入射する場合の福山港泊地の潮位変化を非線形浅水方程式系に基づいて10m間隔で計算した。その際、福山港泊地の水深分布として航海用海図に基づく図1(b)を使用した。この計算で使用した重力加速度、水平拡散係数および海底摩擦係数は、それぞれ9.8m/s²、3.0m²/sおよび0.0026である。境界条件として、海岸線上の格子点では海岸線に直交する流速をゼロとした。

図2は、点A～Dにおける潮位変化について、福山港口への入力波に対する増幅率の計算値を潮位観測値の周波数特性とともに示している。潮位観測値のスペクトルには、いずれの観測点においても振動数1.4cph(周期約43分)付近に明瞭なピークがみられる。また、潮位観測値が5分値であり、3cph以上の高振動数帯域のスペクトルが得られない点Dを除くと、点A～Cのいずれの観測点においても振動数4.5cph(周期約13分)付近に幅広いピークが現れて

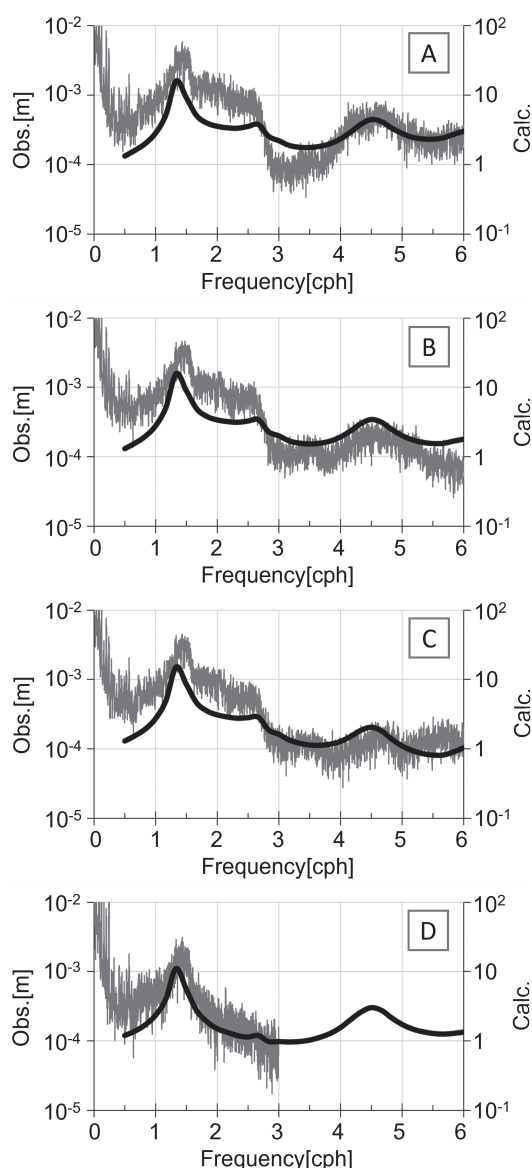


図2. 福山港泊地の潮位観測値および数値計算結果の周波数特性

上段から図1(b)の点A～Dにおける潮位変化の周波数特性を示す。灰色の細線は海洋潮汐成分を取り除いたのちの潮位観測値にFFTを適用して得られた周波数特性であり、太線は数値計算によって求められた入力波に対する増幅率を表している。

いる。さらに、不明瞭ではあるものの、点A～Cでは振動数2.6cph（周期23分）付近にもシグナルの存在が伺える。

潮位観測値に現れた振動数1cph以上のスペクトル・ピークは、本研究の数値計算でもほぼ再現できている（図2）。振動数2.6cph付近に関しては、いずれの観測点における数値計算にもピークが認められるが、点Dの計算結果に現れたピークは観測ノイズに埋もれるほど小さい。そのため、同振動数付近のシグナルは潮位観測値のスペクトルで判別できなかったと考えられる。

なお、点Cで観測された潮位変化のスペクトルでは、振動数5.7cph（周期11分）付近にもピークが現れているものの、計算結果では再現できていない。点Cの下流側にヨットの停泊所が整備されていることから、こうした人工構造物や土砂等の堆積の影響によって狭い海域内での固有振動が生じている可能性がある。

3 福山港泊地で生じる副振動等の振動モード

図2に見られるように、観測値および計算値のいずれにおいても、振動数1.4cph、2.6cphおよび4.5cph付近に潮位スペクトルのピークが確認できる。それらは、福山港泊地で発生した副振動または静振によるものと考えられる。それを確認するため、前章の数値計算に基づいて各振動数成分の振幅分布を調べた。図3は、振動数1.4cph、2.6cphまたは4.5cphの規則波が福山港口で発生したときに数値計算によって得られた潮位変化の振幅分布を示す。図中の縦軸は規則波に対する振幅の増幅率である。

図3(a)にみられるように、振動数1.4cphにおける振幅分布は空間的にやや揺らぎがあるものの、泊地奥に向かうほど大きくなる傾向を示す。これは、長方形湾内で開口端に節、他端が最大潮位変化となる1/4波長の副振動に対応している（図4（a））。この副振動では、福山市立大学直近の泊地最奥部で約8倍にも潮位変化が増幅されており、同振動数付近の海面変動に対して注意が必要であると言える。

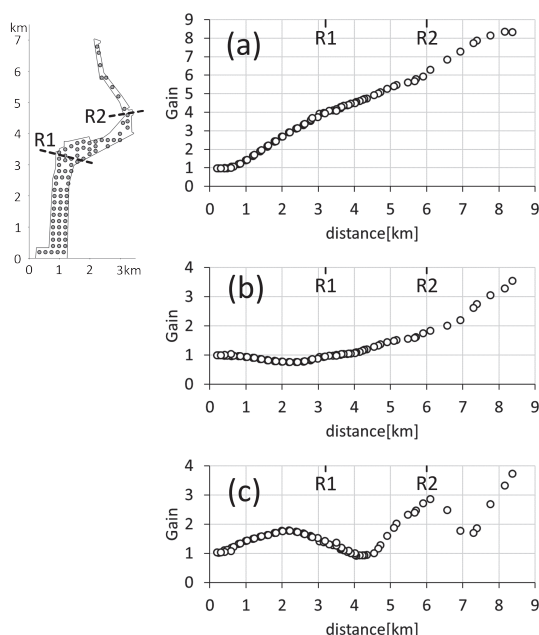


図3. 入力波に対する増幅率の分布

(a)振動数1.4cph (周期約43分)、(b)2.6cph (約23分) および(c)4.5cph (約13分) の規則波が福山港口 (左上図の縦軸0km地点) で発生したときに数値計算で得られた潮位変化の増幅率を示す。横軸は福山港口からの遡上距離である。左上図は、増幅率を求めた格子点分布を示す。図中のR1およびR2は、水路の折れ曲がり地点付近を示す。

振動数2.6cphの潮位変化に関しても泊地最奥部で最大振幅を示すが、福山港口から最初の折れ曲がり地点R1までは増幅率がほぼ1前後となっており、入力波である規則波がそのまま伝わっている (図3(b))。しかし、R1地点よりも泊地奥に向かうにつれて増幅率が增大し、泊地最奥部では約3.5倍に潮位変化が増大している。この振幅分布は、R1地点付近に節があり、泊地最奥部で最大潮位変化となる1/4波長の振動モードを示しており、図4(a)の副振動に対応している。

振動数4.5cphの潮位変化に関してはやや複雑な増幅率の空間分布を示しており、その極大値が福山港口からの遡上距離2km、6kmおよび8.5km付近に現れている (図3(c))。こうした空間分布から、福山港

口に節をもつ高次の副振動が生じている可能性も考えられるが、極大値が現れる隣接地点間の距離が大きく異なること、また、極大値が現れる地点が泊地の折れ曲がり付近であったり、水深が特に浅くなるR2地点付近であることから、少なくとも泊地最奥部からR2地点付近の海域では、図4 (b) に示す静振が生じていると考えられる。

以上のように、福山市立大学に近い泊地最奥部付近では、振動数1.4cph、2.6cphおよび4.5cph付近の海面変動に対して共鳴し、潮位変化の励起が生じている。特に振動数1.4cph (周期約43分) 付近の副振動は顕著であり、福山港口の潮位変化に対して8倍以上の増幅率を示している。

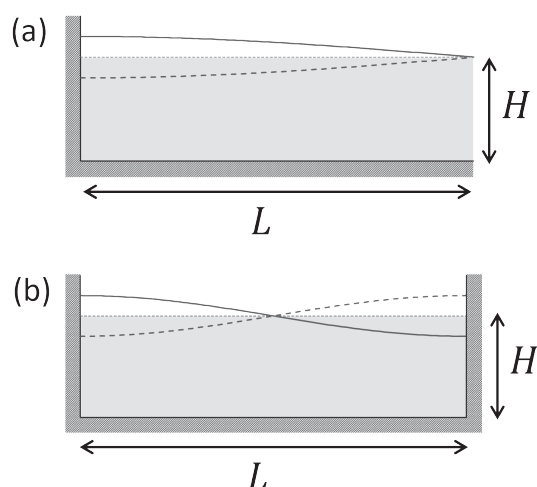


図4. 副振動および静振の基本モード

(a)右端が開いた一定水深の長方形湾内で発生する副振動の基本モード、(b)両端が閉じた一定水深の長方形湾内で発生する静振の基本モード。Lは水路の長さ、Hは平均水深。

4 福山港泊地に到来する津波に対する副振動の影響

図5(a)は、南海トラフ地震発生時の津波が福山港沖合3km地点に到達したときに予測される潮位変化を示す (海上保安庁)。横軸は地震発生からの経過時間であり、地震発生時の潮位低下は地震に伴う地盤の隆起を反映している。地震発生の約4.8時間後に最

初の顕著な潮位上昇が生じ、その後の約5.9時間後に最大潮位1.36mが現れる。

この津波波形をみると、ほぼ一定の時間間隔で潮位の上下動が生じていることがわかる。実際、この津波波形の自己相関関数を計算すると、約66分のラグで相関係数+0.66の極大値が現れる（図5(b)）。このことは、津波到来に伴う潮位変化に1時間強の周期成分が含まれていることを示している。この周期は福山港泊地における顕著な副振動の周期43分（振動数1.4cph）に近いことから、同泊地に侵入した津波がある程度増幅されることが推測される。

実際、向井他(2022)は、図1(a)の一定傾斜をもつ海底地形の仮定のもとで、南海トラフ地震発生時の津波到来に伴う福山港泊地最奥部の潮位変化を計算し、福山港沖合の最大潮位よりも約1m高い最大潮位が現れることを示した。本研究では、計算の正確さを高めるため、図1(b)に示す航海用海図に基づく現実的な海底地形を用いて津波到来時の潮位変化を再計算した（図6）。

図6にみられるように、津波到来による泊地内の潮位変化は福山港沖合と相似な時間変化を示すが、その潮位変化の大きさは福山港沖合よりも大きい。福山港沖合における津波の最大潮位が+1.36mであるのに対して、福山港口から遡上距離約3kmの点P3における最大潮位は+1.91m、遡上距離約6kmの点P2における最大潮位は+2.13m、泊地最奥部付近の点P1における最大潮位は+2.32mとなっている。特に泊地最奥部付近では福山港沖合の最大潮位よりも約1m高い潮位の上昇が生じることになる。

図7は、満潮時に津波が到来したときに予測される福山港泊地の最大潮位分布を示す。福山港付近の海洋潮汐は満潮時に約2mの潮位上昇をもたらすことから、図6に示す南海トラフ地震時の潮位変化予測に2m加算した時間変化から最大潮位を求めている。図3(a)に示した振動数1.4cph付近の副振動と同様に、泊地奥に向かうにつれて最大潮位が上昇しており、同振動数付近の固有振動による共鳴が影響を及ぼしていることがわかる。

満潮時に到来した津波による最大潮位は福山港口からの遡上距離4km付近で標高4mに達し、泊地最奥

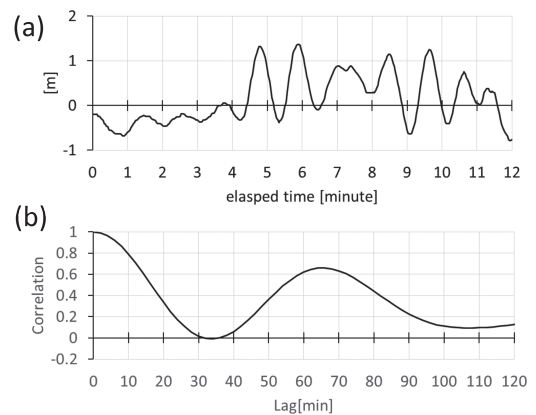


図5. 福山港沖合における南海トラフ地震時の津波予測 (a) 福山港沖合3km地点における南海トラフ地震発生後の潮位変化予測（海上保安庁）、(b) その自己相関関数。

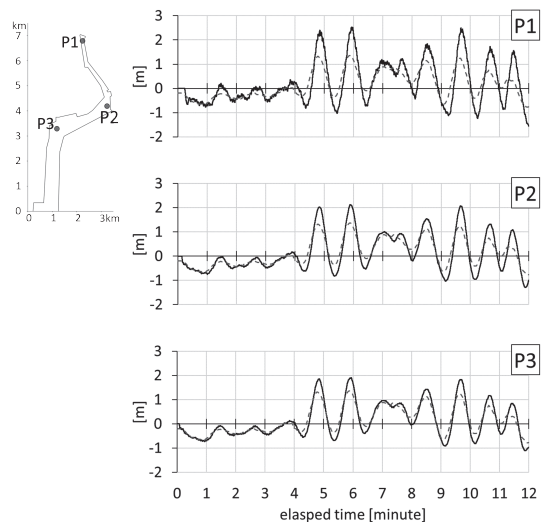


図6. 福山港泊地内に伝播する津波予測

南海トラフ地震発生に伴う津波が福山港泊地に到達したときに、左図の点P1、P2およびP3において予測される潮位変化（実線）を示す。図中の破線は、図5(a)に示した福山港沖合の津波波形である。

部付近で標高4.6m弱まで上昇している。福山港沖合に到達した津波による最大潮位は満潮時に3.36mとなるが、これよりも0.5m高い標高3.86m以上の潮位が遡上距離3km以上の海域で現れることとなる。そうした標高3.86m以上の高潮位が継続する時間は泊

地奥に向かうほど長く、泊地最奥部付近ではのべ約40分間にもなる（図7(b)）。また、福山港沖合の最大潮位よりも1m高い標高4.36m以上の高潮位も遡上距離7km以上の泊地最奥部付近で現れている。そうした高潮位が現れる時間は長くないものの、福山市立大学直近の泊地最奥部ではのべ約10分間、標高4.36m以上もの高い潮位にさらされる可能性がある。

南海トラフ地震発生時に福山港泊地最奥部付近では、到来した津波に固有振動が励起され、以上のような高潮位が現れる可能性が考えられる。したがって、同地域においては、そうした潮位上昇を念頭においた津波対策を検討する必要があると言える。

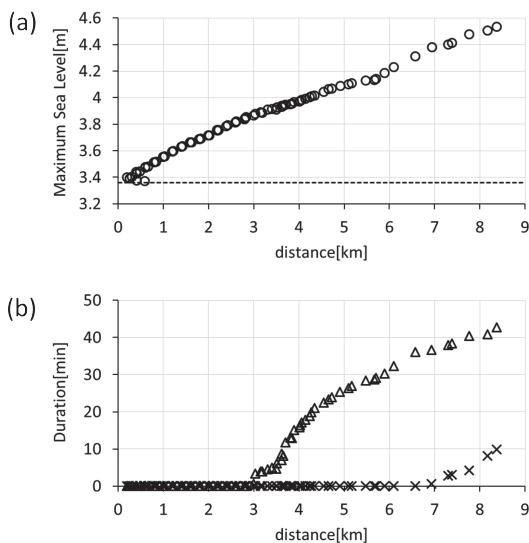


図7. 福山港泊地内の津波高分布

(a)南海トラフ地震時の津波が福山港泊地に到達したときの最大潮位予測、(b)津波到達時の潮位が3.86m以上となる時間（△印）および4.36m以上となる時間（×印）。横軸は福山港口からの遡上距離を示す。

5 まとめ

福山港泊地で生じる海面変動の固有振動について、航海用海図に基づく海底地形を用いて数値計算を実施し、その空間分布の特徴について調べた。同泊地で観測された潮位変化には、振動数1.4cph（周期約43分）、2.6cph（約23分）および4.5cph（約13分）

付近に明瞭なシグナルがみられた。各振動数の規則波を与えたときの潮位変化を計算したところ、泊地内における振幅分布から、前者2つの振動成分は泊地全体で生じている副振動であり、後者は泊地最奥部付近で生じている静振であると考えられた。特に振動数1.4cphの副振動は顕著な共鳴現象であり、福山港口で生じた潮位変化が8倍以上に増幅されている。

南海トラフ地震発生時に福山港沖合に到達すると予測される津波波形には、約66分の周期成分が含まれている。この周期は福山港泊地で発生する副振動の周期約43分（振動数1.4cph）に近く、泊地内で津波が増幅される危険性がある。航海用海図に基づく海底地形を用いて福山港泊地に伝播する津波波形を計算したところ、泊地最奥部付近では福山港沖合よりも約1m高い潮位上昇が生じる可能性が推察された。これは満潮時において標高4.6m弱まで潮位が上昇することを示唆しており、こうした潮位上昇を考慮した津波対策の検討も必要と考えられる。

参考文献

- 浅野敏之・山城徹・齋田倫範・田中健路、2014.「九州東シナ海沿岸で副振動災害を引き起こす気象津波の発生機構に関する研究」『土木学会論文集B2（海岸工学）』70（1）：79-96.
- 海上保安庁、「津波防災情報 福山港」
https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAIYO/tsunami/6/06_FUKUYAMA/index.html
 （2023年9月29日閲覧）
- 小西達男、2006.「横浜港の海面変動の特徴について—その他の日本沿岸の海面変動との比較—」『神奈川自然誌資料』2006（27）：1-8.
- 吉岡洋・芹沢重厚・高山知司、2002.「高潮災害における副振動の影響」『海洋開発論文集』18：125-130.
- 渡久地優・藤井智文・日向博文、2016.「海洋レーダを用いた伊勢湾における津波の到来・副振動観測」『土木学会論文集B2（海岸工学）』72（2）：I_1723-I_1728.
- Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M. and Ishiguro, M. 1991. A procedure for tidal analysis with a

bayesian information criterion. Geophys. J.
Int. 104: 507-516.

Characteristics of the Secondary Undulation in Fukuyama Inner Harbor Area

Atsushi MUKAI

Abstract

Numerical calculations based on the realistic seafloor topography were carried out to investigate the characteristics of the spatial distribution of the normal modes of sea level changes observed at the Fukuyama inner harbor area. In this area, the sea level changes at a frequency of 1.4 cph (period about 43 minutes) can be observed. These changes are due to the secondary undulation which has the maximum change at the innermost part of the harbor area. The tsunami due to the Nankai Trough earthquake is predicted to have the periodic component with a period about 66 minutes around the offshore area of Fukuyama Port. This period is close to that of the above secondary undulation. Therefore, the sea-level rise due to the tsunami at the innermost part of the harbor area could be about 1 m higher than that at the offshore of Fukuyama Port. This suggests that the sea level could rise to an elevation about 4.6 m during a high tide.

Keywords : Fukuyama inner harbor area, the secondary undulation, Nankai Trough Earthquake, tsunami

DOI : 10.15096 / UrbanManagement.1610