

福山港内港で予測される津波伝播

向 井 厚 志

要旨

南海トラフ地震発生時に瀬戸内海沿岸部の福山市では最大潮位約4mの津波到達が予測されている。福山港内港は福山港口から約8.5km内陸部へ伸びた細長い水路であり、その地形効果によって津波高が増大すると考えられる。本研究では、福山港内港における津波伝播を数値計算によって求め、その海面上昇量を推定した。満潮時に到達した津波による最大潮位は内港最奥部で5m弱と見積もられた。この海面高は護岸堤防の高さに近いことから、台風接近などの気象条件によっては越水の危険性が危惧される。また、現在議論されている内港の埋め立てが実施された場合でも、新たな最奥部で津波伝播に伴う顕著な海面上昇が生じることとなり、津波対策の検討が必要となる。

キーワード：福山港内港，南海トラフ地震，津波

1 はじめに

福山市は瀬戸内海沿岸部に位置する都市であり、近い将来に発生すると考えられている南海トラフ地震時には、最大約4m高の津波到来が予測されている。この津波は、瀬戸内海に面した福山港から続く距離約8.5kmの細長く折れ曲がった水路である福山港内港にも侵入することになる。その際、海岸線や海底地形の影響によって、内港の津波高が増大する可能性が考えられる。

渡久地他(2016)は、伊勢湾に設置された海洋レーダおよび潮位観測所の観測値を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波が伊勢湾内を伝播する様相を明らかにした。その中で、伊勢湾に侵入した津波が伊勢湾の固有周期帯で増幅しており、沿岸部の防災を考える上で津波伝播に対する地形効果を考慮することが重要であることを示した。大石他(2018)は、南海トラフ地震に伴う津波伝播によって生じる東京湾周辺海域の海面変動を数値計算で求め、海岸線地形に依存した振動モードが卓越し、その固

有周期帯で津波の増幅が生じる可能性を示した。また、山中他(2020)は、1833年庄内沖地震に伴う津波伝播の数値計算を行い、沿岸部の固有周期帯で津波が励起された結果、鳥取県境港市で浸水被害が生じたことを示している。

福山港内港も地形に応じた固有周期をもち、特定の周期帯で海面変動が励起されている。向井(2021)は、広島県港湾漁港整備課が開設した広島県沿岸部の潮位測定局における潮位観測値を用いて、海面変動の周期的な特徴を調べた。その結果、福山港内港で周期40分付近の潮位変化が励起されていることが明らかになった。これを受けて、向井他(2022)は、福山港内港に水圧センサーを設置し、2か月間にわたって潮位変化の連続観測を実施した。その周波数特性には、上記の周期40分付近に加え、周期14分付近に明瞭なピークが現れていた。これらの潮位変化は、細長い水路状の内港で励起された副振動や静振を反映していると推察された。

向井(2023A)は、非線形浅水方程式を用いて、福山港内港に規則波を入射させたときの潮位変化を計

算した。その結果、観測された周期に近い45分および13分付近で潮位変化が3～15倍程度に増幅されることが確認された。これらの増幅は、福山港内港全体で振動する副振動および内港の一部で振動する静振を反映しており、内港地形に依存した固有振動であることが明らかにされた。このように、福山港内港では、地形に依存した潮位変化が明瞭に現れており、内港に侵入した津波に対して地形効果が強く現れる可能性がある。

本研究では、南海トラフ地震に伴う津波伝播が引き起こす福山港内港の潮位変化を数値計算によって求め、吸い上げ効果等を考慮しつつ、越水等による津波被害発生の危険性について評価した。また、現在検討されている福山港内港埋め立て計画の影響や、福山市南東部の工業用地が造成される前の津波伝播の様相についても数値計算に基づいて考察した。

2 津波伝播の数値計算

福山港内港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3か所で折れ曲がっている。本研究では、海上保安庁の航海用海図「福山港」に基づいて、福山港内港の水深データを10mメッシュで作成した(図1)。なお、図1の水深は干潮時の値である。

福山港内港が瀬戸内海に接する福山港口付近では、中央部の水深が約16mと最も深く、両岸付近で約4mまで浅くなるV字型の海底地形となっている。福山港口から遡上するにつれて水深は緩やかに浅くなり、中央の折れ曲がり地点である図1の縦軸4km付近では、最大水深が約8mとなっている。さらに奥に進むと水深は急速に浅くなり、最大水深が約2mに変わる。また、内港の水路幅は福山港口で940mであるが、その700m北西で幅500mとなり、内港奥部ではさらに幅90m弱まで狭くなる。このように、福山港内港は、福山港口から遡上するにつれて水深が浅くなるとともに、水路幅が狭くなる地形的な特徴を有している。

本研究では、向井他(2023A)の計算方法を用いて、福山港内港に津波波形が入射する場合の潮位変

化を非線形浅水方程式系に基づいて計算した。その際、福山港内港の水深分布として、図1に示す干潮時の水深に、満潮時の海面上昇量である4mを加算した値を使用した。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/s^2 、 $3.0\text{m}^2/\text{s}$ および0.0026である。なお、境界条件として、海岸線上の格子点における流速については、海岸線に直交する成分をゼロとした。

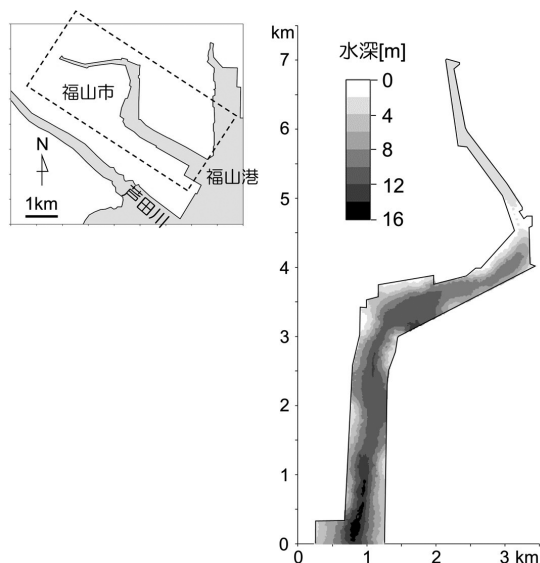


図1. 福山港内港の水深分布

航海用海図に基づく干潮時の水深分布。左上図の破線内を切り出した福山港内港における水深分布を示している。

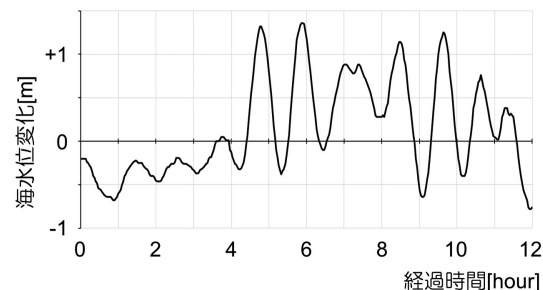


図2. 福山港内港の水深分布

南海トラフ地震発生時に福山港沖合3km地点で生じることが予測される潮位変化(海上保安庁)。横軸は、南海トラフ地震発生からの経過時間を示す。

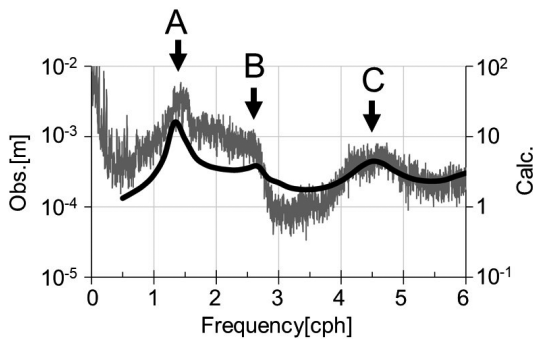


図3. 福山港内港最奥部で観測された潮位変化の周波数特性と計算値の比較

細線は福山港内港最奥部の潮位観測値から求めた周波数特性であり、太線は福山港口に周期的な潮位変化を与えて計算した内港最奥部の潮位変化の増幅率を示す。向井(2023A)のグラフを加工した。図中のA, BおよびCで潮位変化の励起が認められる。

福山港口に入射させる津波波形としては、海上保安庁が公開している南海トラフ地震発生時の福山港沖合3 km地点における潮位変化予測値を使用した(図2)。地震発生時に潮位の低下がみられるが、これは地震に伴う地盤の隆起を反映している。地震発生時の約4.8時間後に最初の顕著な潮位上昇(1.32m)が生じ、その後の約5.9時間後に最大潮位1.36mが現れる。津波波形には、約1時間間隔で上下動する周期的な潮位変化がみられ、約8.5時間後および約9.6時間後にも1 mを上回る海面上昇が生じている。

本研究で使用した数値計算の妥当性を確認するため、福山港内港で観測された副振動が数値計算によって再現できることを示す。図3は向井(2023A)から引用したグラフであり、内港最奥部の潮位観測値から得られた潮位変化の周波数特性を計算値と比較している。この計算値は、福山港口に与えた潮位変化に対する内港最奥部の潮位変化の比(増幅率)を示している。

潮位変化の観測値、計算値ともに、図3のA(周期約45分)、B(周期約23分)およびC(周期約13分)付近にスペクトル・ピークが確認できる。向井(2023A)は、数値計算で得られた潮位変化の増幅率の空間分

布を調べ、周期約45分の潮位変化は全長約8.5kmの内港全体で生じる副振動であり、周期約23分および約13分の潮位変化は内港最奥部から折れ曲がり地点までの水路上で生じる静振を表していることを示した。このように数値計算によって得られた潮位変化は観測結果をほぼ再現できているとともに、物理的に予測される固有振動の空間分布を表すことができていることから、本研究で使用した数値計算は妥当であると考えられる。

3 福山港内港における津波伝播の計算結果

図4は、福山港口に図2の津波波形を入射させて求めた福山港内港における潮位変化の計算値を示す。なお、海面が高い満潮時を想定するため、地震発生時の潮位はいずれも約2 mとなっている。図4に示す4か所の潮位変化を比較すると、津波伝播による潮位の変動幅は福山港口から遡上するにつれて増大していることがわかる。入射波である津波波形の最大潮位は地震発生時の5.9時間後に現れる約3.6mであるが、内港最奥部の点Aではその5分後の約4.8mが最大潮位となっており、内港を伝播する中で津波波形

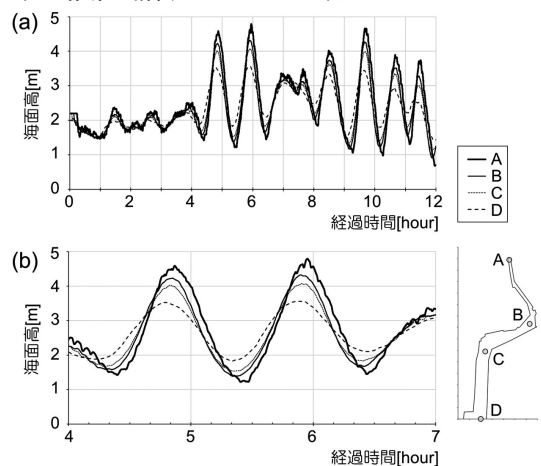


図4. 津波伝播に伴う福山港内港の潮位変化

(a)右下の地図に示す点A(太線)、点B(細線)、点C(点線)および点D(破線)における津波伝播に伴う潮位変化の計算値。(b)上図のうち、地震発生から4～7時間後の潮位変化を拡大して示す。

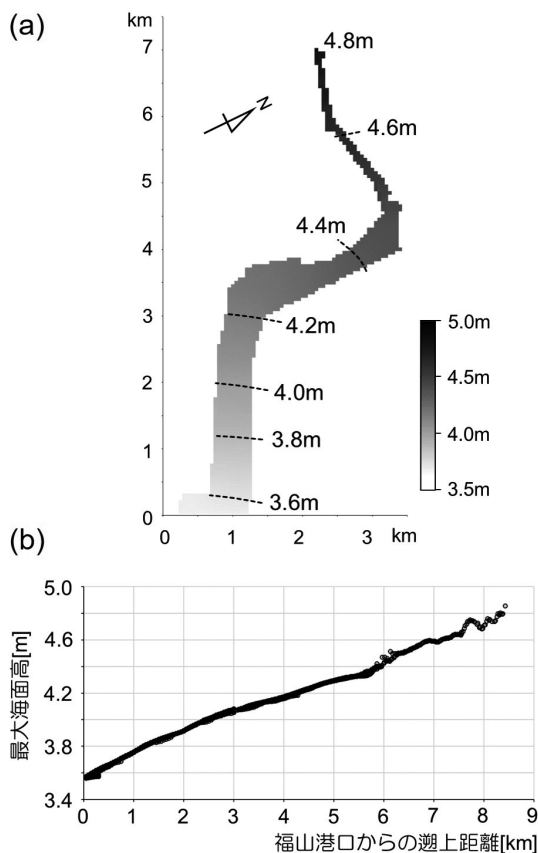


図 5．津波伝播によって生じる福山港内港の最大潮位分布
(a)数値計算によって得られた津波伝播に伴う福山港内港の最大潮位分布，(b)福山港口からの遡上距離を横軸として示した最大潮位分布．

こうした津波波形の増幅は最大潮位となる5.9時間後だけでなく，その前後の時間帯にもみられ，内港最奥部で極大となる潮位はいずれも入射波の1.2～1.4倍に増幅している．また，図 4 (b)にみられるように，極大の潮位が現れる時刻は福山港口から遡上するにつれて遅れ，内港最奥部では1～14分の遅れとなる．

図 5 は，地震発生の5.9時間後に現れる最大潮位の空間分布を示している．図 4 でもみられるように，最大潮位は福山港口から遡上するにつれて緩やかに増大しており，内港最奥部付近では最大潮位4.6～4.8mに達している．一般に遡上するにつれて最大潮

位はやや鈍化しながら増大し続けているが，内港の折れ曲り地点である遡上距離 4 km，5.7km，7.5km 付近で，最大潮位の増大傾向が大きくなる特徴がみられる(図 5 (b))．これらの地点では，津波の進行方向が大きく変化したり，水路幅が狭くなったりした結果，海水の滞留が生じて顕著な潮位上昇をもたらしていると考えられる．

4 福山港内港で予測される最大海面高

福山港内港最奥部では，津波伝播によって地震発生の5.9時間後に最大潮位約4.8mが現れる(図 4)．その前後の4.8，8.5，9.6，10.6および11.3時間後にも1mを超える潮位上昇がみられ，特に9.6時間後には最大潮位に近い約4.7mまで海面が上昇している．これらの潮位は，満潮時の最大潮位2.2mに津波伝播による海面上昇を加えた結果であり，海洋潮汐の影響を考慮した見積もりとなっている．

海面を上昇させる要因は海洋潮汐や津波だけでなく，気圧や風向・風速などの気象現象も無視することができない．向井(2023B)は，福山港内港最奥部付近の潮位変化に及ぼす気象影響として，気圧低下に伴う吸い上げ効果および風による吹き寄せ効果を調べた．吸い上げ効果の応答係数は $-0.015 \sim -0.013 \text{ m/hPa}$ と見積もられ，1 hPaの気圧低下によって約1 cmの潮位上昇が生じている．また，吹き寄せ効果は内港最奥部の水路方向に沿った東風で最大となり，その応答係数は $+0.10 \sim +0.17 \text{ m}/(\text{m/s})^2$ と推定された．

福山特別地域気象観測所で得られた過去10年間の気象データを調べたところ，その最低気圧は979hPaであり，標準気圧より34hPa低い．この値を用いて吸い上げ効果を見積もると，その海面上昇量は $+0.44 \sim +0.51 \text{ m}$ となる．また，同観測所で得られた風向・風速観測値によると，2022年9月18日09:00～9月19日11:00の約1日間，風速5m/s以上の東風成分が続いた事例がみられた．向井(2023B)の応答係数に風速5m/sを当てはめると，2.5～4.3mもの海面上昇が生じることになる．この上昇量は現実的な値ではなく，上記の応答係数は過剰な値が見積もられ

ていたと考えられる。向井(2023B)の2か月間にわたる観測期間には連続した東風成分が現れておらず、応答係数の推定精度が低かった可能性がある。少なくとも1年以上の長期間にわたって観測を行い、内港における吹き寄せ効果を正確に推定する必要がある。

図6は内港最奥部の南北断面図を描いており、海洋潮汐、津波、吸い上げ効果から見積もった南海トラフ地震発生後に生じる最大の海面上昇量を示している。内港最奥部の北側には、約4m幅の道路が通る幅広の護岸堤防が整備されている。一方、南側には70m前後の幅で標高5m程度の土地が造成されており、その海側に高さ約0.5m、幅数10cmのコンクリート製の堤防が設置されている。内港における海洋潮汐は、満潮時に最大2.2mまで海面を上昇させる。この海洋潮汐に津波伝播による海面上昇を加えると、その最大値は約4.8mとなる(図4、図5)。吸い上げ効果としては、上述した過去10年間の気圧変化から見積もった値である約+0.5mを用いた。これらの要因を考慮したとき、潮位は最大5.3mに達することになる。福山港内港最奥部の護岸堤防は標高5.5m以上であり、この最大潮位よりも高い。したがって、台風通過時のように極端な気圧低下が生じたとしても、堤防の破損等がなければ越水することがないように思える。

ただし、図6には吹き寄せ効果が含まれていない。上述のように、向井(2023B)の吹き寄せ効果の応答係数は過剰に大きく見積もられている可能性があり、妥当な吹き寄せ効果の見積もりができていない。高野他(2006)は、中国地方を縦断した2004年台風16号による瀬戸内海沿岸の潮位変化を数値計算で求め、風速約20m/sの風で1.0m前後の吹き寄せ効果が現れたことを示している。この応答係数約 $0.0025\text{m}/(\text{m/s})^2$ を用いると、風速5m/sによる吹き寄せ効果は+0.06mと見積もられる。

海面上昇の要因としては、さらに海洋擾乱によって励起される副振動も挙げられる。例えば、2021年台風14号の通過時に観測された潮位変化では、副振動によって約0.3mの潮位上昇が引き起こされた(向井, 2023B)。こうした吹き寄せ効果や副振動による

海面上昇が加わると、極端な気象条件下では海水面が護岸堤防の上端に達することになる。護岸堤防の破損がない場合であっても、液状化現象によって護岸堤防の地域で地盤低下が生じると、海水が市街地に流れ出す危険性も考えられる。

こうした越水は地震発生の5.9時間後だけでなく、最大潮位に近い9.6時間後の海面上昇時にも発生する可能性がある。津波に対する防災対策としては、時間差を置いて顕著な海面上昇が生じ、越水が繰り返される危険性にも注視する必要がある。また、福山港内港には小型船舶用泊地が整備されており、常時、複数の小型船舶が係留されている。津波到来時には小型船舶が押し流され、護岸堤防の破損をまねくことも危惧される。2011年東北地方太平洋沖地震時には、湾外または湾内の比較的安全な海域に漁船を避難させた事例が多くみられた(例えば、阿部他(2020))。したがって、南海トラフ地震発生時には、顕著な津波が到来する約4時間の間に小型船舶を移動させる等の対策も重要となる。

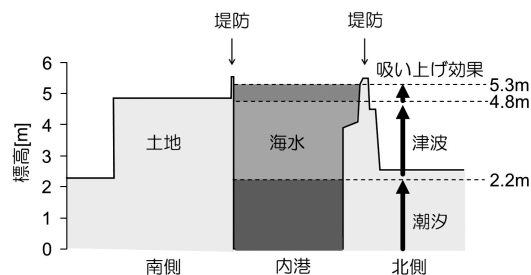


図6. 津波伝播時における福山港内港最奥部の最大潮位
福山港内港最奥部の南北断面図に南海トラフ地震発生に伴う潮位上昇を描いた図。図中の「潮汐」は海洋潮汐、「津波」は津波伝播、「吸い上げ効果」は気圧低下による海面上昇の最大値を表す。

5 過去および未来の福山港内港における津波伝播

福山市では現在、福山港内港最奥部の約1km区間を埋め立てる計画が検討されている。この埋め立てが実施された場合、内港の全長が約7.5kmと短くなることから、津波伝播の様相に影響を及ぼすことになる。そこで、図1の水深分布のうち、埋め立てが

予定されている海域を陸地化した水深分布を作成し、埋め立て後の内港に図2の津波波形が入射したときの潮位変化を計算した。図7は、その最大潮位分布を示している。

図7の空間分布は、現在の内港地形に基づく図5の最大潮位分布のうち、埋め立て予定区域を取り除いた後の分布に近いものとなっている。埋め立て後の内港においても、津波伝播による最大の海面上昇は新たな内港最奥部に現れており、満潮時における最大潮位は約4.6mとなる。ここに気圧低下に伴う吸い上げ効果(約+0.5m)を加えると、海面高は最大約5.1mまで上昇する。

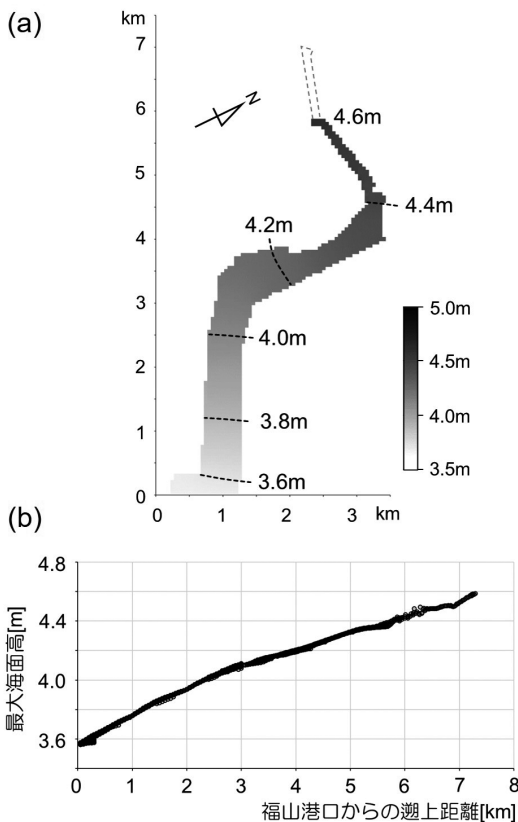


図7. 福山港内港埋め立て後における津波伝播による最大潮位分布

(a) 図中の破線部分を埋め立てた後の福山港内港における津波伝播に伴う最大潮位分布の計算結果、(b) 福山港口からの遡上距離を横軸として示した最大潮位分布。

この海面高は高さ5.5m以上の護岸堤防より約0.4m低く、現在の内港最奥部と比べて越水の危険性も下がることになる。しかし、吹き寄せ効果や副振動による海面上昇および液状化現象による地盤低下の可能性を考慮すると、護岸堤防の破損がなかったとしても安心することはできない。

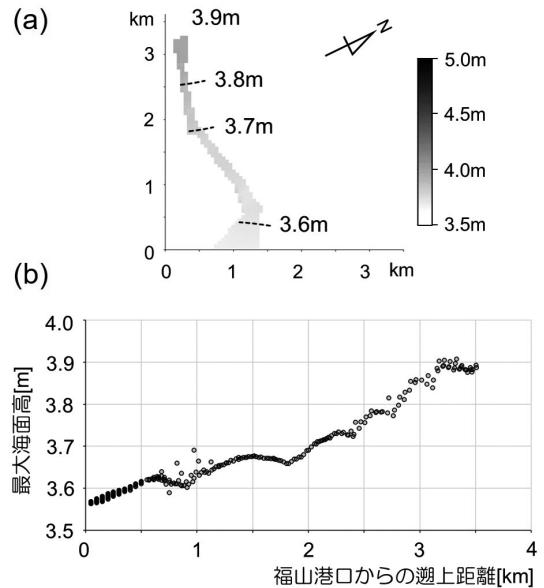


図8. 1946年南海地震発生時の福山港内港における津波伝播による最大潮位分布

(a) 1946年南海地震発生時の福山港内港に図2の津波波形が入射したときの最大潮位分布の計算結果、(b) 福山港口からの遡上距離を横軸として示した最大潮位分布。

福山市南東部の工場用地は1960年代前半に埋め立てによって造成された土地であり、それ以前の福山港内港は図1の縦軸4km以上の区域のみであった。そのため、1946年南海地震発生時には、現在よりも短い内港に津波が侵入したことになる。1952年発行の国土地理院地図をもとに当時の内港地形を再現し、そこに図2の津波波形が入射した場合の最大潮位分布を数値計算で求めた(図8)。図2の津波波形は1946年南海地震発生時の津波とは異なることに注意する必要があるが、内港の全長が短いため、津波の増幅が小さかったことが伺える。当時の内港最奥部では、福山港口よりも高々数10cmの海面上昇が

生じるに留まっている。福山市史等に1946年南海地震時の津波被害に関する記録がないことから、当時、現在とは異なり、内港における津波の増幅が小さく、顕著な津波被害が発生しなかったことが推察される。

6 まとめ

南海トラフ地震発生時には、最大1.4m弱の海面上昇をもたらす津波が福山港沖合に到来することが予測されている。この津波が福山港内港に侵入したときに生じる潮位変化を数値計算に基づいて推測した。津波伝播に伴う最大潮位は内港最奥部で現れ、満潮時における海面高は約4.8mとなる。そこに気圧低下に伴う吸い上げ効果を考慮すると、海面高は最大約5.3mに達する。この海面高は内港を取り囲む護岸堤防の高さ5.5m以上よりも約0.2m低く、護岸堤防の破損等がなければ越水することがない。しかし、風による吹き寄せ効果や副振動も海面上昇の要因として存在し、極端な気象条件下では護岸堤防の上端に達する海面上昇も起こりうる。また、液化化現象による地盤沈下や流れ出した小型船舶による護岸堤防の破損等を考えると、海水の市街地流出の危険性がまったくないとは言いがたい。現在計画されている内港埋め立てが実施された際も、大きく海面高の上昇が改善されるわけでないため、内港周辺地域で想定される津波被害について注意する必要がある。

参考文献

- 阿部幸樹・高野伸栄・加藤広之・岩瀬浩之・穴戸雄太・高師拓也・山田彬央, 2020.「湾口部が狭隘な湾における津波来襲時の漁船避難に関する考察」『土木学会論文集B3(海洋開発)』76(2): I_1097-I_1102.
- 大石裕介・古村孝志・今村文彦・山下啓・菅原大助, 2018.「南海トラフ巨大地震による津波の東京湾周辺での振動特性」『土木学会論文集B2(海岸工学)』74(2): I_205-I_210.
- 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
 (2024年9月30日閲覧)

- 高野洋雄・鎌倉和夫・峯松宏明・依岡幸広・久重和久・清水栄一・佐藤祐一・福永昭史・谷脇由彦・谷條薫一, 2006.「2004年の台風第16号(Chaba)による瀬戸内海における高潮の発生メカニズム」『天気』53(11): 845-856.
- 向井厚志, 2021.「広島県沿岸地域の潮位変化の特徴」福山市立大学都市経営学部紀要『都市経営』14: 165-174.
- 向井厚志・堤行彦・石尾広武・澤田結基・加藤誠章・横山真, 2022.「福山内港地域における津波災害の拡大要因について」福山市立大学都市経営学部紀要『都市経営』15: 157-166.
- 向井厚志, 2023A.「福山港泊地における副振動の特徴」福山市立大学都市経営学部紀要『都市経営』16: 121-128.
- 向井厚志, 2023B.「福山港泊地の海面変動に及ぼす局地気象学的な影響」『土木学会論文集』79(5): 論文ID:22-00152.
- 山中悠資・島津希来・下園武範・檜垣敬真, 2020.「日本海西部域における1833年庄内沖地震津波の広域沿岸挙動に関する研究」『土木学会論文集B2(海岸工学)』76(2): I_271-I_276.
- 渡久地優・藤井智史・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.

Tsunami Propagation Predicted in Fukuyama Inner Harbor

Atsushi MUKAI

Abstract

A tsunami due to the Nankai Trough earthquake is predicted to arrive at Fukuyama City in the coastal region of Seto Inland Sea with a height up to 4 meters. The Fukuyama Inner Harbor is the narrow channel with a distance about 8.5 km from the port, and such channel might increase the tsunami height due to its topographical effect. In this study, I calculated the tsunami propagation and the sea level rise in the Fukuyama Inner Harbor numerically. The tsunami arrival during high tide could raise the sea level about 5 m above the mean sea level around the deepest part of the Fukuyama Inner Harbor. This sea level rise is close to the embankment height of the inner harbor, and the tsunami could spread out in the urban area in the extreme weather conditions such as approaching typhoons. Even if the currently discussed reclamation of the inner harbor is executed, the tsunami propagation could raise the sea level significantly at the new deepest part of the inner harbor. Therefore, we should consider the tsunami countermeasures in the region around the inner harbor.

Keywords : Fukuyama Inner Harbor, Nankai Trough Earthquake, tsunami

DOI : 10.15096 / UrbanManagement.1710