

# 周辺に複雑な地形特性を有する直立護岸および陸上直立壁に作用する津波波力について

高橋 研也<sup>1</sup>・菅原 弘貴<sup>2</sup>・小林 拓磨<sup>2</sup>・佐貫 宏<sup>2</sup>・  
中野 正之<sup>3</sup>・高松 賢一<sup>4</sup>・佐々木 慎<sup>5</sup>・河村 美咲<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所土木技術開発部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:kenya.takahashi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

<sup>2</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所土木技術開発部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

<sup>3</sup>正会員 五洋建設株式会社 中国支店土木営業部

(〒730-8542 広島県広島市中区上八丁堀4-1 アーバンビューグランドタワー7F)

<sup>4</sup>正会員 中国電力株式会社 電源事業本部 (建設土木) (〒730-8701 広島県広島市中区小町4-33)

<sup>5</sup>正会員 中国電力株式会社 電源事業本部 (耐震設計土木) (〒730-8701 広島県広島市中区小町4-33)

<sup>6</sup>正会員 中国電力株式会社 上関原子力発電所準備事務所土木・環境部

(〒742-1403 山口県熊毛郡上関町室津288-13)

湾を中心とした半円状の複雑な地形上に直立護岸および陸上直立壁が設置されている海域を対象とし、断面2次元の水理模型実験および津波シミュレーションに加えて、3次元津波シミュレーションにより複雑な地形特性を考慮した3次元流況による津波波力への影響を確認し、既往の津波波力算定式と比較することによってその妥当性を検証した。その結果、地形特性や津波高さおよび押し波継続時間の不確かさを考慮しても波状段波や砕波段波は発生しないこと、実験手法や解析手法による有意な差異はないこと、既往の津波波力算定式による波圧分布が全ての波圧を包絡することが分かった。また、進行波のフルード数が1.5を超える場合においても波圧係数が静水圧と同程度に止まったことから、既往の津波波力算定式が保守的となることも分かった。

**Key Words :** upright seawall, upright coastal dike, tsunami wave force, Asakura's formula, Tanimoto's formula

## 1. はじめに

海中にある直立壁に作用する津波波力の算定には谷本式<sup>1)</sup>が従来使われることが多かったが、東日本大震災後に作成された「防波堤の耐津波設計ガイドライン」<sup>2)</sup>では波状段波の発生の有無を考慮して津波波力を算定することとされた。津波はまず段波状態かそうでないかに分類でき、波長の長い津波先端部が短周期の複数の波に分裂(ソリトン分裂)しながら段波形状になった波状段波については衝撃段波波力が極めて大きな値となる場合があるため、波状段波が発生しない場合には谷本式<sup>1)</sup>を用い、波状段波が発生する場合には津波波力が大きくなるためこれに対応した修正谷本式<sup>3)</sup>を用いることとされた。

陸上の直立壁に作用する津波波力については、「津波を考慮した胸壁の設計の考え方(暫定版)」<sup>4)</sup>において、朝倉ら<sup>5)</sup>の研究を基にした波力算定式が示された。非越流時の津波波力は堤体設置箇所の進行波によるフルード

数 $Fr$ により算定され、 $Fr \leq 1.5$ において波圧作用高さは進行波の最大浸水深の3倍と、作用する波圧も3倍とすることが多い<sup>6)7)</sup>。また、陸上の直立壁から津波が生じる方向に施設または他の構造物がある場合や、海岸から離れていて津波を軽減する効果が見込まれる場合においては、これらの倍率を2または1.5へ低減できるとされている<sup>7)8)</sup>。一方、朝倉ら<sup>5)</sup>は、波状段波の場合に構造物底面近傍の波圧が非分裂波の波圧を1.8倍した値となるとしている。

このように、既往の津波波力算定式は波状段波や砕波段波の発生の有無により適用性が異なるため、周辺に複雑な地形特性を有する直立壁などの設計では入射津波の特性および沿岸の陸海域の地形を考慮した検討を実施する必要がある。図-1に本研究で対象とする地形を示す。湾口が大きく開いている湾を中心とした半円状の複雑な地形上に直立護岸および陸上直立壁が設置されており、その前面に基礎捨石および防波堤を有している。

本研究においては、平面2次元津波シミュレーション、

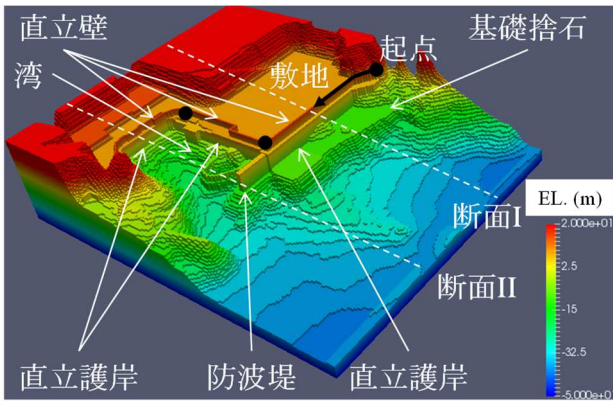
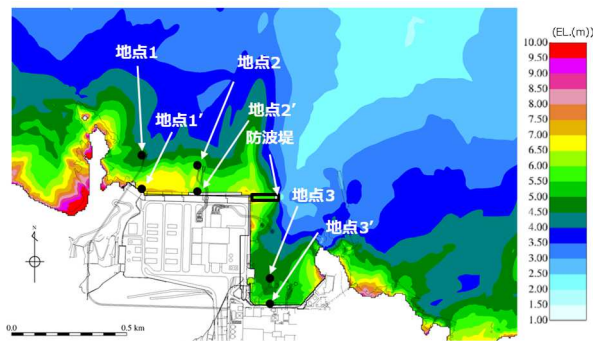
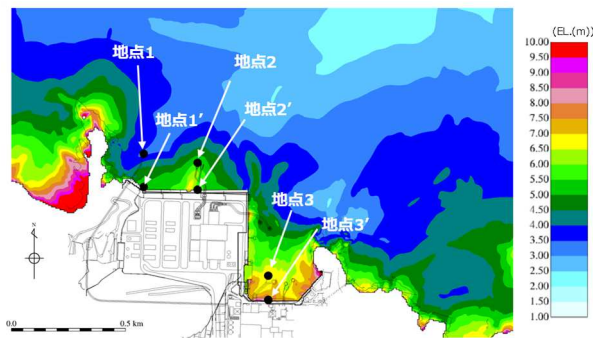


図-1 研究対象地形図 (●: 陸上直立壁法線起点および折点)



(a) 防波堤有



(b) 防波堤無

図-2 平面2次元津波シミュレーションによる津波高さ $2a$ 分布

断面2次元の水理模型実験および津波シミュレーションに加えて、3次元津波シミュレーションにより複雑な地形特性を考慮した3次元的な流況による津波波力への影響を確認し、既往の津波波力算定式と比較することによってその妥当性を検証することを目的とする。

## 2. 平面2次元津波シミュレーションによる検討

津波波力の確認に係る検討に先立ち、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」<sup>2)</sup>に基づき、波状段波の発生の有無を確認した。すなわち、図-1に示した地形を対象に非線形長波式による平面2次元津波シミュレーションを実施した。解析条件については清重ら<sup>9)</sup>と同様とした。

表-1 平面2次元津波シミュレーションの津波高さ $2a$ と水深 $h$

地点	水深 $h$ (m)	津波高さ $2a$ (m, EL.)		$2a/h \times 100$ (%)	
		防波堤有	防波堤無	防波堤有	防波堤無
1	16.0	5.0	4.0	31.3	25.0
2	16.0	6.0	6.0	37.5	37.5
3	17.0	5.0	7.0	29.4	41.2
1'	4.0	7.5	6.0	187.5	150.0
2'	6.0	6.0	6.0	100.0	100.0
3'	5.0	6.0	8.0	120.0	160.0

波状段波の発生条件は、おおむね入射津波高さ $a$ が水深 $h$ の30%以上(平面2次元津波シミュレーションによる津波の重複波の高さ $2a$ が水深 $h$ の60%以上)で、かつ海底勾配が1/100以下程度の遠浅である場合と考えられている<sup>2)</sup>。図-2に津波高さ $2a$ の分布を、表-1に津波高さ $2a$ と水深 $h$ の割合を示す。なお、平面2次元津波シミュレーションにおいては、津波波力に影響する構造物周辺の地形変状の条件設定として防波堤の有無を考慮するとともに、表-1中の津波高さ $2a$ は保守的に切り上げて評価した値を示した。地点1~3においては津波高さ $2a$ が水深 $h$ の60%未満となるものの、水深 $h$ が10 mよりも浅い地点1'~3'においては直立護岸からの反射波の影響によって津波高さ $2a$ が水深 $h$ の60%以上となった。

また、敷地近傍から沖合2,500 mまでの平均海底勾配は約1/35、沖合200 mまでの最小海底勾配は約1/20であり、いずれの海底勾配においても1/100より急になっていた。

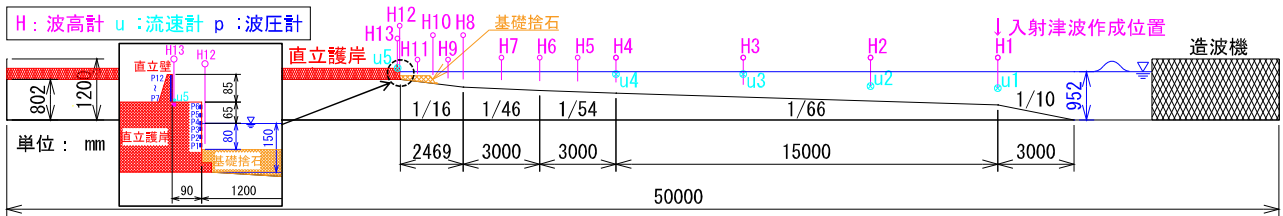
以上より、波状段波が発生しないと考えられたが、流体の挙動を直接確認できる断面2次元の水理模型実験および津波シミュレーションを実施して津波波形の検証を行うとともに、津波波力の確認も行うこととした。

## 3. 断面2次元の水理模型実験および津波シミュレーションによる検討

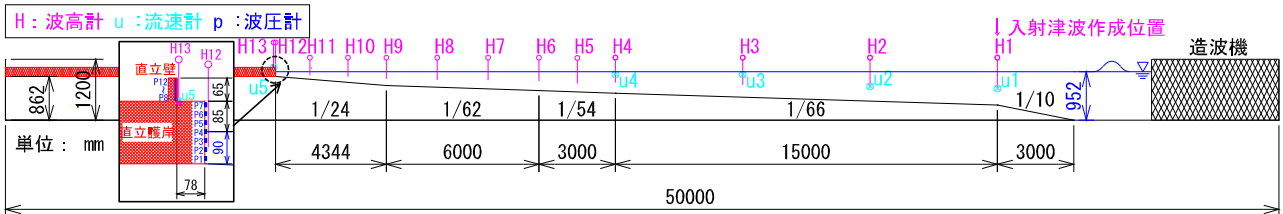
### (1) 条件整理

断面2次元の水理模型実験および津波シミュレーションは、波状段波や碎波段波の発生の有無および直立護岸・陸上直立壁に作用する津波波力、並びに陸上直立壁設置箇所の進行波によるフルード数 $Fr$ を確認することを目的に実施した。図-1に示した地形特性および津波特性の観点から津波波力に影響するサイト特性を整理し、不確かさを含めて実験条件および解析条件を設定した。

敷地前面の海底地形および津波の伝播特性を踏まえ、検討断面は護岸法線直角方向とした。図-3に検討断面を示す。長さ50 m×幅0.6 m×高さ1.2 mの水路に護岸沖合約2.5 kmから陸側の範囲を再現し、実験縮尺を1/100とした。表-2に検討ケース一覧表を、図-4に入射津波水位時刻歴を示す。非線形長波式による平面2次元津波シミュレ



(a) 検討断面I (ケース1~3)



(b) 検討断面II (ケース4~6)

図-3 検討断面 (縦横比=2:1, 実験縮尺=1/100)

表-2 検討ケース一覧表

検討ケース	検討断面	津波高さ $2a$ (m, EL.)	押し波継続時間 (s)
1	I	10.7	175
2	I	15.0	175
3	I	15.0	87
4	II	11.9	178
5	II	15.0	178
6	II	15.0	89

表-3 断面2次元津波シミュレーションにおける解析条件

解析領域	入射津波作成位置 $H$ より岸側 (図-3)
格子間隔	$\Delta x = 0.0048 \sim 0.2000$ m, $\Delta t = 0.0050 \sim 0.0101$ m
解析時間	40.0 s
造波方法	造波境界 (図-4 の入射津波の押し波最大波)
初期水面	EL $\pm 0.0$ m
境界条件	流速・圧力: スリップ, VOF 関数 $F$ : フリー

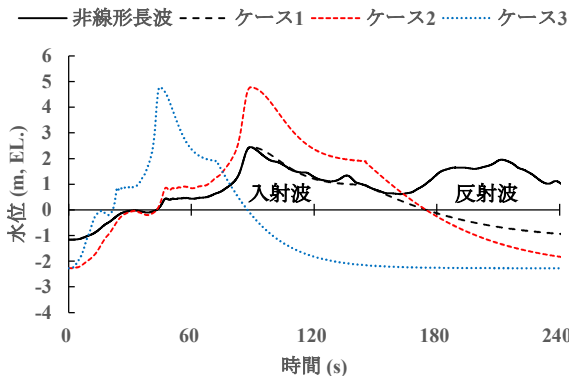
シミュレーションから求めた護岸沖合約2.5 kmの水位と流速を用いて入射波成分と反射波成分に分離し、臼井ら<sup>10)</sup>を参考に入射波成分から造波板変位を計算することにより最大押し波1波を造波した(ケース1, 4)。これに不確かさを考慮して、反射波の影響を含む津波高さ $2a$ が直立壁天端高さであるEL+15.0 mとなる津波(ケース2, 5)および押し波継続時間が半分となる津波(ケース3, 6)も設定した。併せて、陸上直立壁がない状態での津波遡上状況を確認するケースも実施した。

## (2) 断面2次元津波シミュレーションによる検討の方法

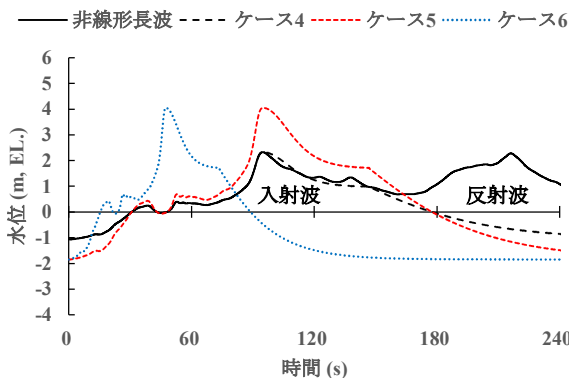
ケース1, 2, 4, 5について、波状段波および砕波段波を表現可能な数値波動水路CADMAS-SURF (V5.1)<sup>11)</sup>による断面2次元津波シミュレーションを水理模型実験と同じ条件にて実施し、津波波形の検証によって水理模型実験結果の再現性および波状段波や砕波段波の発生の有無を確認するとともに、直立護岸および陸上直立壁に作用する津波波力を直接算定した。表-3に解析条件を示す。

## (3) 検討の結果

図-5に断面2次元の水理模型実験および津波シミュレーションにおける水位の時刻歴波形を示す。いずれのケースにおいても、計算結果は実験結果と同等の津波水位波形を再現できており、基礎捨石や各種の不確かさを考慮しても沖合から敷地近傍において波状段波や砕波段波



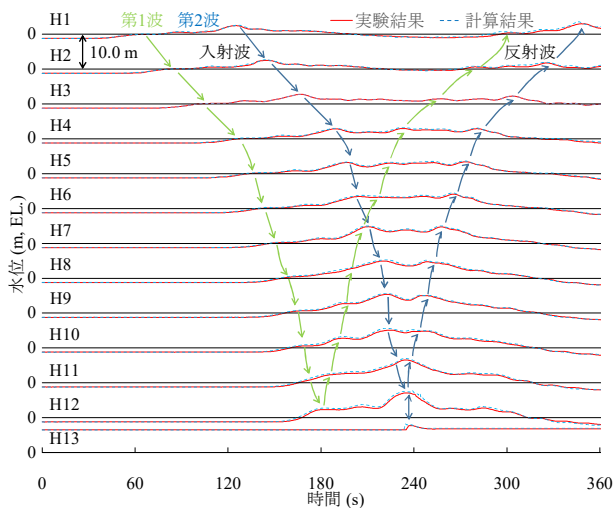
(a) 検討断面I (ケース1~3)



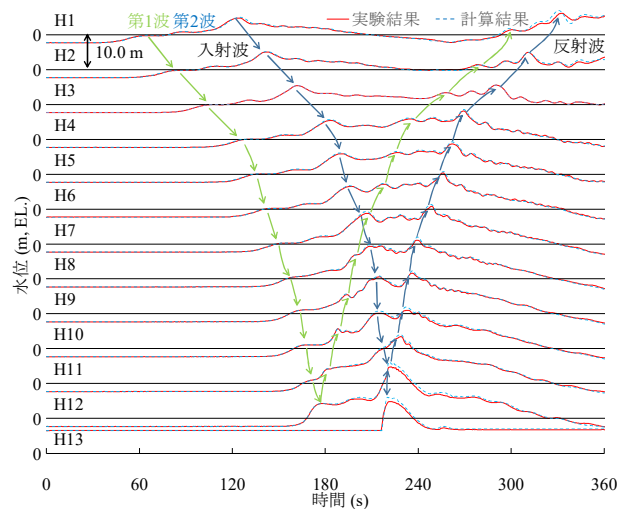
(b) 検討断面II (ケース4~6)

図-4 入射津波水位時刻歴

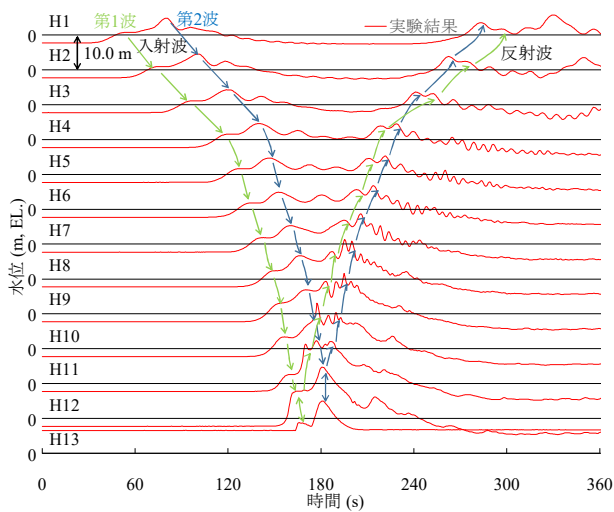




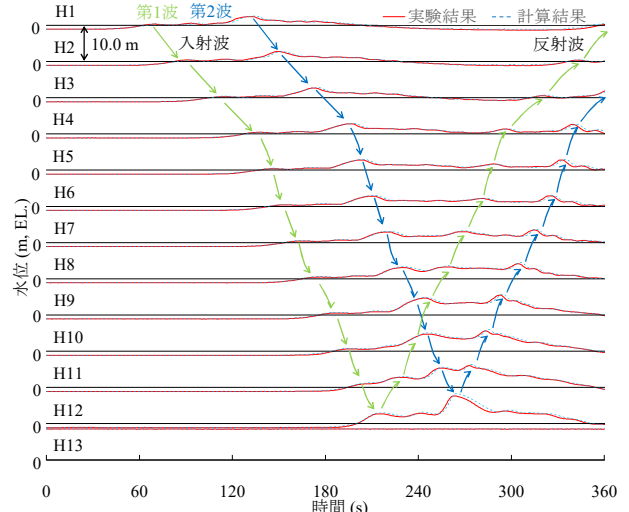
(a) ケース1 ( $2a_l=10.7$  m, 押し波継続時間=175 s)



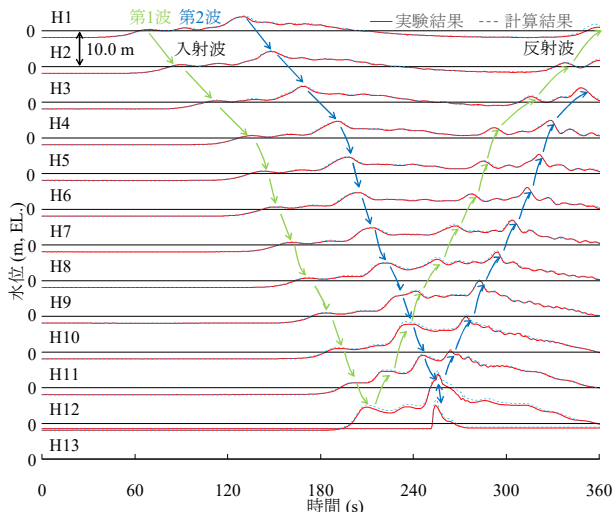
(b) ケース2 ( $2a_l=15.0$  m, 押し波継続時間=175 s)



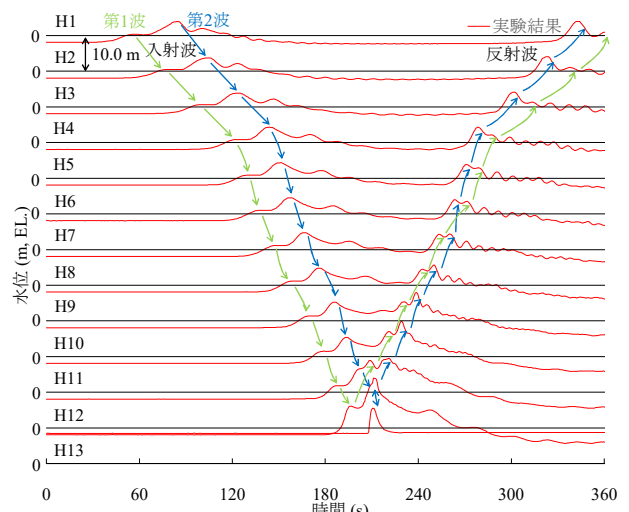
(c) ケース3 ( $2a_l=15.0$  m, 押し波継続時間=87 s)



(d) ケース4 ( $2a_l=11.9$  m, 押し波継続時間=178 s)



(e) ケース5 ( $2a_l=15.0$  m, 押し波継続時間=178 s)



(f) ケース6 ( $2a_l=15.0$  m, 押し波継続時間=89 s)

図-5 断面2次元の水理模型実験および津波シミュレーションにおける水位の時刻歴波形

は発生せず、津波水位は緩やかに上昇することが分かった。なお、断面2次元津波シミュレーションによる水位の空間分布の結果を基に最大水面勾配を確認した結果、ケース1においては1.40度、ケース4においては1.83度で

あり、これらの値は松山ら<sup>12)</sup>が示した碎波限界である30～40度に比べて十分に小さいことが分かった。

表-4にケース2, 5における陸上直立壁設置箇所での進行波による最大浸水深 $\eta_{max}$ および同時刻におけるフルード

表4 最大浸水深 $\eta_{\max}$ および同時刻におけるフルード数 $Fr$

検討ケース	最大浸水深 $\eta_{\max}$ (m)	フルード数 $Fr$
2	3.6	1.18
5	2.0	1.66

表5 3次元津波シミュレーションにおける解析条件

解析領域	岸沖方向：2,175 m, 沿岸方向：1,125 m (図-1)
格子間隔	$\Delta x=6.25$ m, $\Delta y=6.25$ m, $\Delta z=1.0\sim 2.0$ m
解析時間	1,079 s
造波方法	造波ソース (図-4の入射津波の押し波最大波)
初期水面	EL $\pm$ 0.0 m
境界条件	流速・圧力：スリップ, VOF 関数 $F$ ：フリー

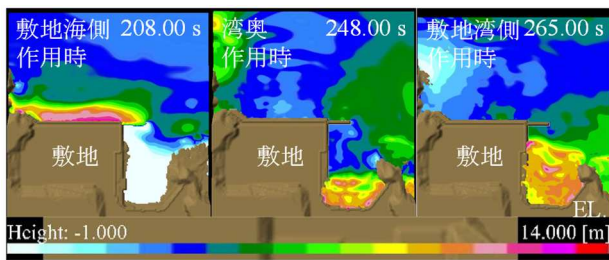


図6 3次元津波シミュレーションの津波の状況 (ケース2,5)

数 $Fr$ を示す。検討断面IIにおいて津波高さの不確かさを考慮すると、フルード数が1.5を超えることが分かった。

#### 4. 3次元津波シミュレーションによる検討

##### (1) 検討概要および解析条件

前章において行った断面2次元の水理模型実験および津波シミュレーションでは代表断面を対象としたが、実際は図-1の通り複雑な地形であるため、ケース2,5を対象に数値波動水槽CADMAS-SURF/3D (Ver1.5)<sup>13)</sup>による3次元津波シミュレーションを実施した。表-5に解析条件を示す。シミュレーションで対象とした地形については図-1の通りとし、直立壁前面における津波高さ $2a_1$ および最大波圧 $p_{\max}$ を算定した。

##### (2) 検討の結果

図-6に3次元津波シミュレーションのケース2,5における最大押し波の作用状況を示す。津波来襲時にはまず敷地海側に作用し、続いて湾内に流入した津波が湾奥に作用し、最後に湾奥による反射波が敷地湾側に作用する、という流れであった。図-7に陸上直立壁前面における津波高さ $2a_1$ および最大波圧 $p_{\max}$ の分布を示す。防波堤基部付近において津波高さおよび波圧が最大となる一方、湾内において防波堤の遮蔽効果や隅角部の増幅効果も認められ、複雑な地形を考慮した3次元的な流況を評価できていることが分かった。

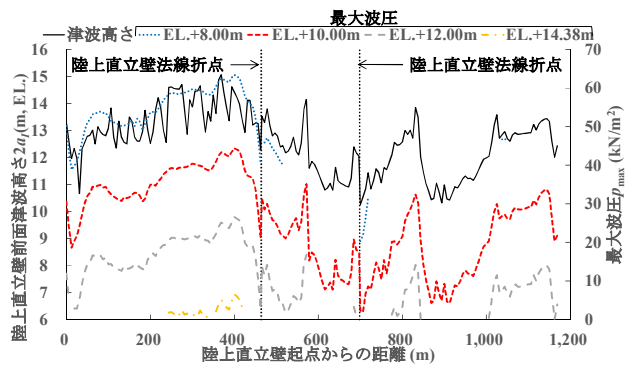


図7 陸上直立壁前面の津波高さ $2a_1$ および最大波圧 $p_{\max}$ の分布

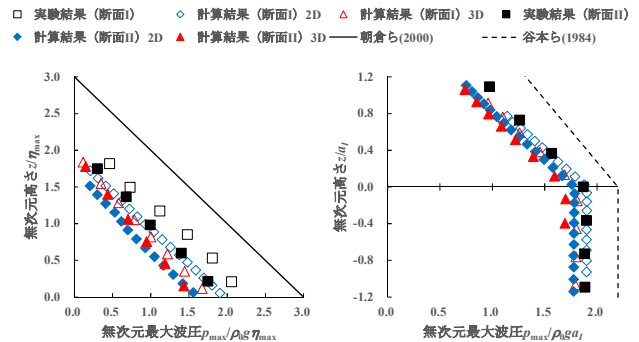


図8 実験と解析による無次元最大波圧分布 (ケース2,5)

#### 5. 既往の津波波力算定式との比較

図-8にケース2,5における水理模型実験、断面2次元および3次元津波シミュレーションによる陸上直立壁および直立護岸に作用する無次元最大波圧分布の比較を示す。陸上直立壁においては、進行波の最大浸水深 $\eta_{\max}$ によって無次元化し、朝倉ら<sup>9)</sup>による式(1)と比較した。

$$p_{\max} = \rho_0 g (\alpha \eta_{\max} - z) \quad (1)$$

ここに、 $\rho_0 g$ は水の単位体積重量、 $z$ は波圧作用位置の地盤からの高さ、 $\alpha$ は無次元波圧係数であり、朝倉ら<sup>9)</sup>は非分裂波の場合の $\alpha$ は最大で3.0となるとしている。なお、本研究においては $\eta_{\max}$ を陸上直立壁がある状態での最大浸水深の1/2と保守的に仮定して津波波圧を算定した。また、直立護岸においては、入射津波高さ $a_1$ によって無次元化し、谷本ら<sup>14)</sup>による式(2),(3)と比較した。

$$\eta^* = 3.0 a_1 \quad (2)$$

$$p_1 = 2.2 \rho_0 g a_1 \quad (3)$$

ここに、 $\eta^*$ は静水面上の波圧作用高さ、 $p_1$ は静水面における波圧強度である。

いずれの結果もばらつきの小さい線形の波圧分布となり、本研究の条件の範囲内においてはこれらの実験手法や解析手法による有意な差異はなく、既往の津波波力算定式による最大波圧分布が全ての波圧を包絡することが分かった。また、進行波のフルード数 $Fr$ が1.5を超える場合においても波圧係数が静水圧と同程度に止まったこ

とから、既往の津波波力算定式の波圧係数の取り方が実験結果などより大きすぎることも考えられ、実験・解析の結果の方が現実的であるということが示唆された。これらの傾向はケース1,3,4,6においても同様であった。

## 6. 結論

津波は風波より周期が長く、津波波力は最高水位の静水圧と関連付けて評価される場合が多い。しかし、実際は流れに伴う動的な影響や作用の継続時間による影響が考えられ、複雑地形で精度良く津波波力を評価するために、断面2次元の水理模型実験および津波シミュレーションに加えて、3次元津波シミュレーションを実施した。

その結果、本論の条件の範囲では流れに伴う動的な影響や作用の継続時間による影響が軽微であることが分かった。また、実験・解析の手法による有意な差異はなく、波状段波や砕波段波は発生せず、既往の津波波力算定式による波圧分布が全ての波圧を包絡する結果となり、実験・解析の結果の方が現実的であることが示唆された。

## 参考文献

- 1) 谷本勝利, 鶴谷広一, 中野晋: 1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.257-261, 1984.
- 2) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン(一部改訂), 37p., 2015.
- 3) 池野正明, 松山昌史, 榊山勉, 柳沢賢: ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.751-755, 2005.
- 4) 水産庁漁港漁場整備部防災漁村課, 国土交通省港湾局海岸・防災課: 津波を考慮した胸壁の設計の考え方(暫定版), 22p., 2015.
- 5) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.911-915, 2000.
- 6) 石田暢生, 森谷寛, 東喜三郎, 鳥山拓也, 中村英孝: 防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数について, NRA技術報告, NTEC-2016-4001, 2016.
- 7) 国土交通省住宅局: 東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針, 4p., 2011.
- 8) 国土交通省港湾局: 港湾の津波避難施設の設計ガイドライン, 61p., 2013.
- 9) 清重直也, 吉次真一, 大久保佳美, 河原和文, 西畑剛, 伊野同, 琴浦毅: 島根原子力発電所における浸水解析を用いた津波防波壁の設計, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 70, No.2, pp.I\_307-I\_312, 2014.
- 10) 臼井彰宏, 青木伸一, 川崎浩司: 自走式造波装置による任意波形の造波に関する数値的検討, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 73, No.2, pp.I\_234-I\_239, 2017.
- 11) 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF実務計算事例集—数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書—, 沿岸技術ライブラリー, No.30, 306p., 2008.
- 12) 松山昌史, 池野正明, 榊山勉, 柳沢賢, 藤井直樹: 大陸棚上におけるソリトン分裂した津波の砕波に関する無ひずみ模型実験, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.241-245, 2005.
- 13) 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D数値波動水槽の研究・開発—数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会報告書—, 沿岸技術ライブラリー, No.39, 235p., 2010.

(Received March 17, 2022)

(Accepted July 21, 2022)

## TSUNAMI WAVE FORCES ACTING ON UPRIGHT SEAWALL AND UPRIGHT COASTAL DIKE WITH COMPLEX TOPOGRAPHIC CHARACTERISTICS IN THE SURROUNDING AREA

Kenya TAKAHASHI, Hiroki SUGAHARA, Takuma KOBAYASHI, Hiroshi SANUKI, Masayuki NAKANO, Kenichi TAKAMATSU, Makoto SASAKI and Misaki KAWAMURA

The study area was a sea area where an upright seawall and an upright coastal dike were installed on a complex semicircular topography centered on a bay. In addition to two-dimensional cross-sectional hydraulic model tests and tsunami simulations, three-dimensional tsunami simulations were conducted to confirm the effect of three-dimensional current on tsunami wave force by taking into account the complex topographical characteristics, and the validity of the existing tsunami wave force calculation formulas was verified by comparing with experimental and simulation results. As a result, it was found that undular bores and breaking bores were not generated even when the topographic characteristics and uncertainties of the tsunami height and the tsunami duration were taken into account, that there were no significant differences among experimental or simulation methods, that the tsunami wave pressure distribution based on the existing tsunami wave force calculation formulas enveloped all wave pressure data. And, it was also found that the existing tsunami wave force calculation formulas were on the safe side because the tsunami wave pressure coefficient remained at the same level as the hydrostatic pressure even when the Froude number of the progressive tsunami wave exceeded 1.5.