

高知県安芸漁港の高波浪来襲特性

小林 誠¹・片山 裕之²・田村 仁³・佐藤 慎司⁴

¹正会員 五洋建設 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:makoto.kobayashi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 五洋建設 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:hiroyuki.katayama@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 港湾空港技術研究所 海洋利用研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:htamura@p.mpat.go.jp

⁴正会員 高知工科大学 システム工学群 (〒782-8502 高知県香美市土佐山田町)

E-mail:sato.shinji@kochi-tech.ac.jp

土佐湾湾奥部の物部川河口東側に位置する安芸漁港では、台風来襲時に沖防波堤で顕著な高波の打上げが生じることが知られている。本研究では、既往資料調査とともに広域波浪変形解析および数値波動水槽による断面解析を実施し、高知県安芸漁港周辺の高波浪来襲および打上高が助長されるメカニズムの検討を行った。その結果、安芸漁港周辺では底質粒径が粗く、海底地形デジタルデータでは再現されない浅海域において急勾配地形を有していることが示された。また、数値解析より浅海域の海底勾配が高波の打上げに大きな影響を与える可能性が示され、浅海域の波浪来襲状況を検討する際は、必ずしも海図では再現されない地形が大きく影響を与える可能性があり、正確な海底地形の把握が重要であることが分かった。

Key Words : splash height, high wave, wave runup, steep coast, Aki fishing port

1. はじめに

土佐湾湾奥の物部川河口東側に位置する安芸漁港^{注1)} (図-1) では、台風来襲時に沖防波堤で防波堤天端上20~30mにおよぶ顕著な高波の打上げ^{注2)} (図-2) が生じることが知られている。土佐湾沿岸の代表的な港や海岸の打上げ記録を調べると、土佐湾東側の安田港から室戸港側では画像の記録が見つからず、土佐湾中央から西側春野漁港から東側安芸漁港の範囲で見られ、特に安芸漁港では多く見つかった (図-3)。打上げ状況についてヒアリング調査を行った安芸漁業協同組合では、安芸漁港や西浜穴内地区の来襲波浪が特に大きいと考えられている。

土佐湾内では、過去に台風による被害^{注3)}や、顕著な高潮が発生した記録^{注4)}もあるが、特に安芸漁港の打上げに注目した研究は見られない。過去の打上げの記録や漁協へのヒアリングから安芸漁港における打上げが顕著であり、特異な発生メカニズム^{注5)}が考えられる。

本研究は、現地海岸や既往資料の調査を行うとともに、過去に来襲した台風を対象にエネルギー平衡方程式^{注6)}による広域波浪変形解析および数値波動水槽^{注7)}による断面解析を実施し、高知県安芸漁港周辺の高波浪来襲特性および沖防波堤で打上高が助長されるメカニズムの検討を行ったものである。



図-1 高知県安芸漁港全景^{注1)}



図-2 高波の打上げの例 (台風1821号)^{注2)}



図-3 土佐湾内の打上げ記録を調査した港と打上げ記録^{注3)注4)注5)注6)注7)}

2. 来襲波浪特性

(1) 過去の来襲波浪

最近の安芸漁港に来襲した高波を調べるため、打上げ記録のある台風を中心に土佐湾沖の高知室戸岬沖GPS波浪計^{注10)}(N33度4分45秒, E134度11分11秒)の観測記録を確認した。なお、観測記録がない場合には気象庁の沿岸波浪数値予測モデルGPV(CWM, N33度3分, E133度51分)による推算値を参照した。これによると、2011~2022年の12年間に波高9 mを超える高波が10回、そのうち3回は波高13 m程度であった(表-1)。波高13 mは室津の沖波⁴⁾としては10年確率相当、高知の沖波としては30年確率相当である。なお表中にはピーク波高時刻と打上げ記録の有無も記載してあるが、夜間から明け方にピークの擾乱が多く、残されている記録よりも実際には大きな打上げが発生していた可能性もある。また記録としては最大となるT1820で打上げ記録が見つからないのは、沖波向がSEと東寄りであったことが原因と考えられる。一方、波高9 m程度の沖波でも沖防波堤では天端上20~30 m程度の打上げが発生しており、観測記録からも顕著な高波による打上げは毎年来襲する頻度であると推定される。

高知港では台風来襲時に60 cm程度の潮位偏差^{注11)}が観測されることが多く、安芸漁港周辺でも高波に伴い生じていた高潮により波高が増大されていたと考えられる。

(2) 現地海岸特性

安芸漁港周辺の海岸特性を把握するために、現地の安芸漁港東浜海岸を踏査し、前浜や東防波堤前面の状況を確認した(図-4, 図-5)。東防波堤前面では堆積により汀線が防波堤前面まで前進しており、前浜で採取した底

表-1 過去の高波来襲記録

日時	波浪			波高最大時刻	波浪データ	気象要因	潮位偏差高知港	安芸漁港打上げ有無
	波高(m)	周期(s)	波向(deg)					
2011/7/19	10.81	13.2	150	7/19 15:00	CWM	T1106	82cm	×
2014/8/10	9.24	10.2	170	8/10 3:00	CWM	T1411	102cm	○
2015/7/16	9.84	12.3	118	7/16 20:00	室戸岬沖	T1511	43cm	○
2017/9/17	9.36	11.7	212	9/17 20:00	室戸岬沖	T1718	45cm	○
2018/8/23	13.15	14.9	129	8/23 18:00	室戸岬沖	T1820	31cm	×
2018/9/4	12.84	14.1	182	9/4 10:00	室戸岬沖	T1821	29cm	○
2018/9/30	12.71	14.5	204	9/30 18:00	室戸岬沖	T1824	61cm	○
2019/8/15	9.77	11.1	140	8/15 6:00	CWM	T1910	61cm	○
2020/9/7	9.21	11.1	180	9/7 3:00	CWM	T2010	25cm	×
2022/9/19	9.15	13.2	170	9/19 0:00	CWM	T2214	60cm	○

質の粒度試験結果によると中央粒径が4.6 mmと粗く、波打ち際の前浜勾配も急勾配であった。

玉井⁹⁾によると、安芸漁港海岸の前浜の底質粒径は採取した底質と同様に0.5 mm以上と粗く、水中は0.2 mm程度の底質である。また当該海岸の勾配は1/10~1/20勾配程度であるとしている。野志ら⁶⁾を参考に底質粒径分布から前浜安定勾配を推定すると1/3程度となる(図-6, 図-7)。また安芸漁港の西浜断面図(図-8)からは海底勾配を1/20~1/40程度と読み取れる。

また茂木⁷⁾は、1950年代実施の全国砂浜海岸の沿岸断面測量結果を整理し、全国の海岸型の考察をしている。高知海岸については、赤岡から高知港にかけての長い砂浜海岸では1段barが発達しているが、安芸漁港海岸ではbarは発達せず、水深約9 mまで急斜した礫浜としている。

これらのことから、安芸漁港海岸は富山湾や駿河湾と同様に来襲高波浪に対して粗粒砂礫で安定化した急勾配海岸となっていると考えられる。



図4 安芸漁港東浜側からみた東防波堤前面側



図5 安芸漁港東浜の前浜底質の様子

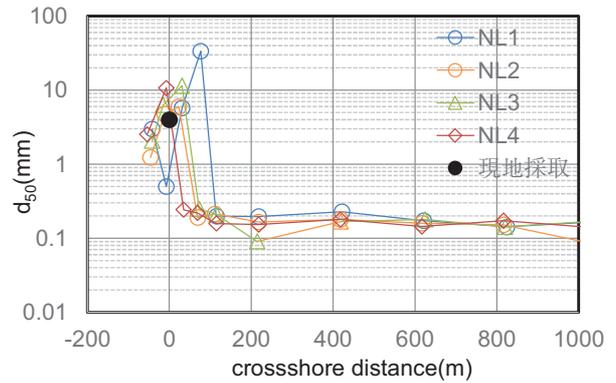


図6 安芸漁港周辺の海底底質と海底勾配
(玉井⁵⁾のデータを加工)

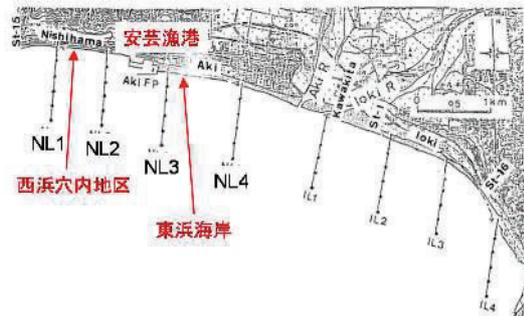


図7 海底底質調査位置図(玉井⁵⁾に加筆)

3. 広域波浪変形特性

(1) エネルギー平衡方程式による広域波浪変形解析

過去に来襲した台風を対象に、エネルギー平衡方程式による広域波浪変形解析を行った。海底地形は海底地形デジタルデータM7003^{注12)}に漁港周辺の地形(図-9)を考慮した。計算領域は東西は室戸岬から高知新港まで入る範囲を、沖側は台風時の沖波を入射するため500 m以深とし、東西6850 m×南北5500 m(格子間隔100 m)とした。対象はT1820の波浪諸元(沖波波高13 m, 周期15 s)とし、波向をSEからSWの5方位に対して計算を行った。潮位は安芸漁港のH.W.L.(=+1.8 m)に潮位偏差として40 cmを加算した+2.2 mとした。

波浪解析結果のうち、沖波向SとSSWの有義波高分布図を示した(図-10(a)(b))。沖波向SEからSWの解析の結果、沖波向がSSWの時に安芸漁港沖で波高が大きくなり、特に安芸漁港から西浜穴内地区前面で波高11 mのコンターが広がっておりヒアリング結果を示すものと考えられる。沖波向Sより東寄りの波向では屈折の効果により来襲波浪は減衰する。

解析の結果、水深10~12 mの沖防波堤に8~10 mの有義波高が来襲する結果となり、比較的浅水域まで高波浪が来襲する傾向が見られた。またT1820(波高13.2 m, 沖波向SE)とT1821(波高12.8 m, 沖波向S)では沖防波堤への到達波高が逆転することも確認できた。

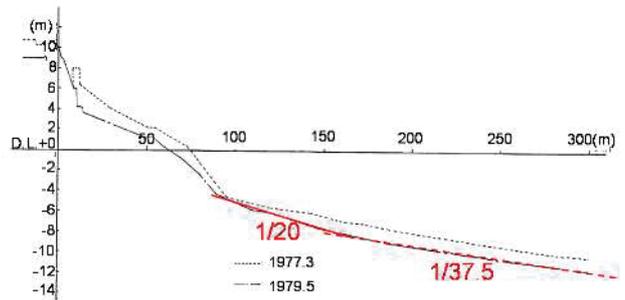


図8 安芸漁港西浜海岸断面図¹⁾

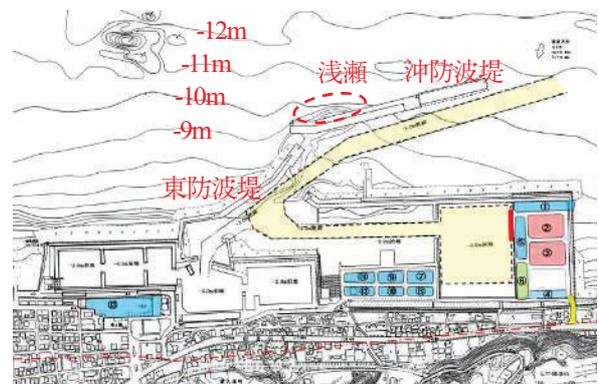
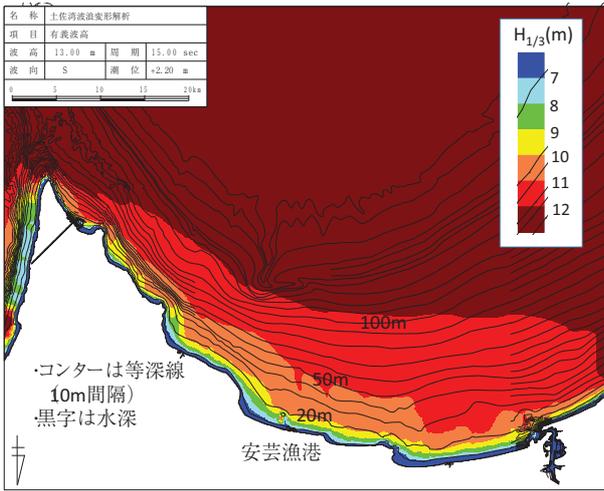
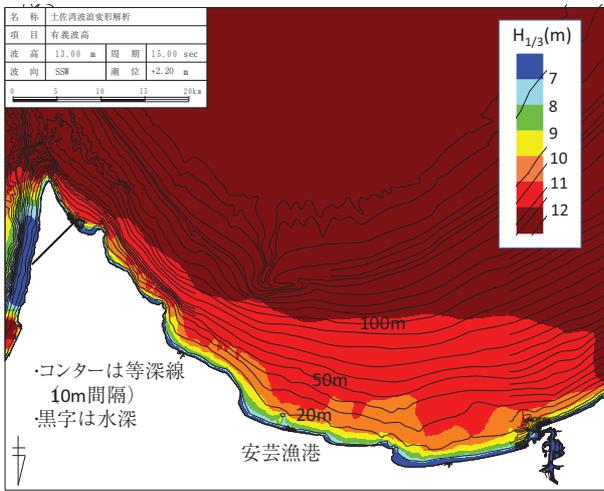


図9 安芸漁港・漁港啓開計画平面図^{注13)}

また、台風来襲時には長周期うねり性波浪となり、地形急変部などで局所的な波浪集中を促すこともある。長周期成分の分布を把握するために波高1 m, 周期30 sの長



(a) 沖波向S



(b) 沖波向SSW

図-10 土佐湾・安芸漁港周辺の波浪解析結果(有義波高分布)

周期波の屈折計算も実施した。図-11には沖波向SSWの屈折係数分布を示した。これより安芸漁港沖の水深100m超の滯筋により長周期波がトラップされ、滯筋岸側で特徴的な屈折係数分布を示し、安芸漁港と西浜側で周辺より屈折係数がやや大きくなる傾向が見られた。長周期成分はエネルギーとしては波動成分より小さいが、ヒアリング結果にある安芸漁港や西浜穴内側で波高が大きくなる傾向を助長する可能性もある。

4. 打上高の推定

(1) 数値波動水槽による数値解析

(a) 波浪条件による検討

沖防波堤に作用する波浪特性を把握するために数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D Ver.1.5)を用いて断面2次元解析を行った。地形データは、海底地形デジタルデータの

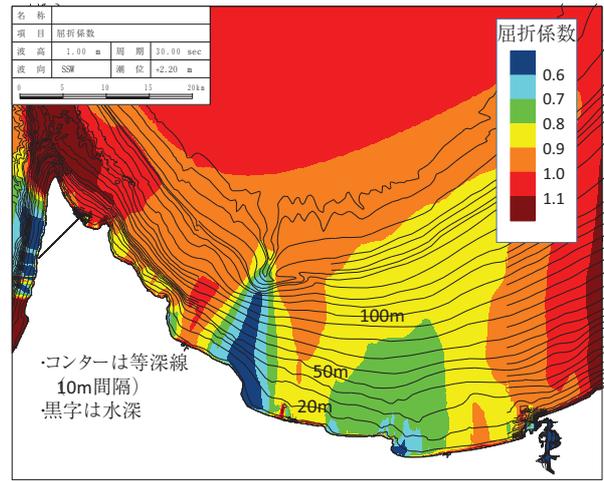


図-11 長周期成分(周期30s)の屈折係数分布(沖波向SSW)

表-2 数値波動水槽解析条件

	ケースA	ケースB	ケースC
時間間隔	Auto (安全率: 0.2)		
格子間隔	$\Delta x = \Delta z = 0.5m$ (y方向1メッシュ)		
波浪条件	9.5m, 10.5m, 11.5m 13.0s, 14.0s, 15.0s	10.5m 14.0s	
造波モデル	造波境界 (規則波)		
差分スキーム	Donorパラメータ: 0.2		
海底勾配	1/100	1/100 (浅瀬有) 1/100 (浅瀬無)	1/10, 1/20, 1/30 1/50, 1/100

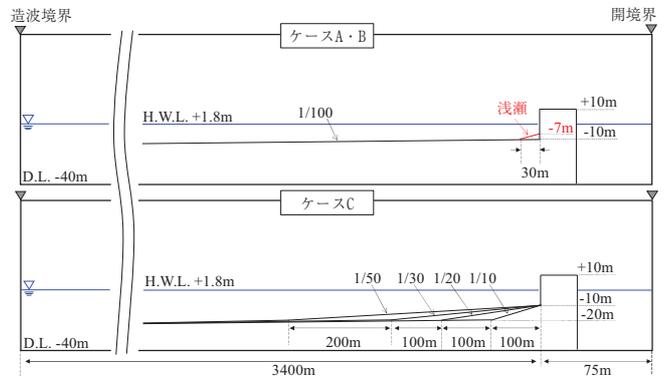


図-12 数値波動水槽計算領域

M7003を参考に1/100の一樣勾配とし、入射波条件は広域波浪変形解析結果から算出した安芸漁港沖合水深40mの波浪(10.5m, 14.0s)とした(表-2, 図-12)。

数値解析結果のうち代表的なケースの最大打上高のスナップショットを図-13(1)~(3)に、また各ケースの打上高を表-3に整理した。なお、ここでは打上高は防波堤天端から水塊の最高到達点までの距離として定義した。

数値解析結果の打上高をみると、波浪条件の違いによって打上高は変化するものの、図-2にみられるような顕著な打上げは発生せず、波浪条件の他に打上げを助長する要素があると考えられた。

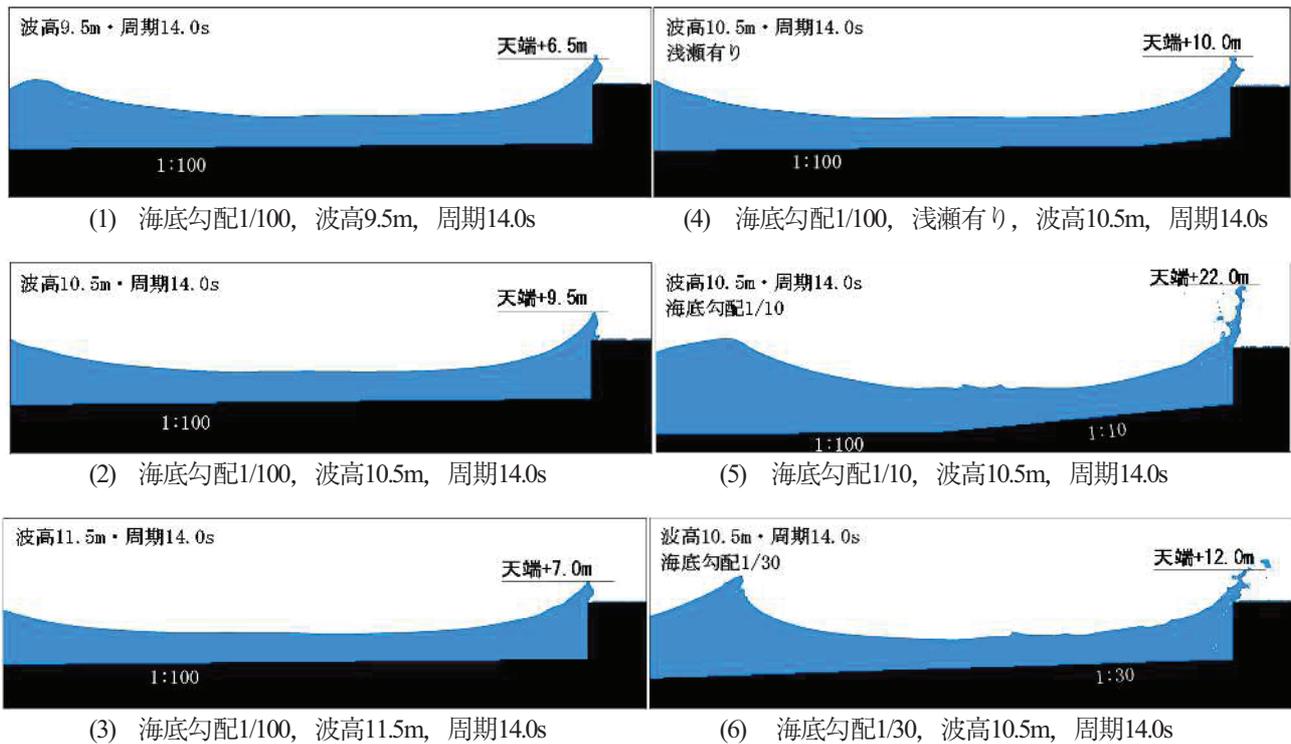


図-13 数値波動水槽解析結果例

(b) 防波堤前面の浅瀬の影響の検討

沖防波堤屈曲部付近に地形デジタルデータでは再現されない水深7m程度の浅瀬が見られたため(図-9), 浅瀬を再現した地形においても解析を実施した(図-13(4)). 表-3に示すとおり, 浅瀬の有無による打上高の違いは大きくなく, 入射波長に対して浅瀬の影響が小さいことが示された.

(c) 海底勾配の影響の検討

M7000シリーズの海底地形デジタルデータに基づいて, 海底勾配を設定する場合, 浅海部では水深20mと水深10mのコンターからの線形補間となることから, 安芸漁港沖合では海底勾配が1/100程度となる. しかし, 2章で示したとおり, 現地の底質粒径は比較的粗く, 海底勾配は1/20~1/40程度と推定されることから, 水深20m以浅の海底勾配を変えたケースについても計算した.

各ケースの打上高を表-3に, 代表ケースとして海底勾配1/10と1/30のスナップショットを図-13(5)(6)に示す. 海底勾配を急勾配としたケースについては, 定性的には現地を確認されたような打上げを再現することができた. これは, 沖防波堤沖側の急勾配地形により, より沖防波堤近くで碎波が促進され, 沖防波堤に作用する衝撃碎波により大きな打上げが生じていたものと推測される. なお, 数値波動水槽ではVOF法を用いて水表面の計算をしており, 水塊や水しぶきは計算格子依存性があるため, 本解析における打上高は定量的な評価ではないものの,

表-3 数値波動水槽解析結果

ケース	計算条件			打上高(m)
	波高(m)	周期(s)	海底勾配	
A	9.5	13.0	1/100	4.5
		14.0		6.5
		15.0		9.5
	10.5	13.0		6.0
		14.0		9.5
		15.0		8.0
	11.5	13.0		7.5
		14.0		7.0
		15.0		10.0
B	10.5	14.0	1/100(浅瀬無)	9.5
			1/100(浅瀬有)	10.0
C	10.5	14.0	1/10	22.0
			1/20	17.0
			1/30	12.0
			1/50	10.5
			1/100	9.5

波浪条件および海底勾配によって直立壁への打上げが顕著に変化することを評価できたと考えられる.

また, 本解析では現地の打上高をやや過小評価しているが, 規則波による検討では再現できない不規則波の波群特性による高波作用時の水位の影響や, 高波浪時の風の影響なども考慮すると, 今回の解析結果より更に大きな打上げとなる可能性が高い. 即ち, 記録にあるような現地安芸漁港の沖防波堤における打上げとなる可能性が高いことから, 現地安芸漁港の打上の様子を定性的には再現できたものと考えられる.

(2) 打上高の評価

数値波動水槽の解析結果から、安芸漁港における顕著な打上高は前面の急勾配の影響が大きいと考えられる。

一方、Hunt⁸⁾による最大遡上高さ R の式は、汀線を対象にしているものではあるが、規則波に対する経験式として次式で表される。

$$R/H_0 = K \times \xi \tag{1}$$

ここに、 H_0 ：入射波波高、 K ：係数(=1.01)、 ξ ：Iribarren数である。 ξ は海底勾配 $\tan \beta$ と波形勾配 $\sqrt{H_0/L_0}$ の比として次式で表される。

$$\xi = \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0} \tag{2}$$

Huntの式では、最大遡上高さを打上高 R と考えれば、Iribarren数が大きくなるほど高くなる。言い換えると、海底勾配が急なほど、あるいは波形勾配が小さいほど打上高が高くなるということになる。田村ら⁹⁾も、定性的に打上高がIribarren数に大きく影響されるとして、2019年台風15号による横浜港における打上高を整理している。ここでは田村ら⁹⁾を参考に、Iribarren数と数値波動水槽による無次元打上高 R/H_0 を整理した(図-14)。Iribarren数が大きくなるほど無次元打上高 R/H_0 が大きくなる傾向が見られるものの、Huntの式の $K=1.01$ では解析結果の打上高を過小評価している。解析結果の打上高を表現すると K は4.0を超えることになる。またIribarren数が大きくなるほど K が小さくなる分布となっていることから、沖合の防波堤直立部における高波の打上高は、Huntの式で表される汀線際の護岸部打上高より顕著に大きいことが確認された。

5. おわりに

安芸漁港沖防波堤の顕著な打上げが発生する要因を明らかにするため、文献調査および数値計算を実施した。

その結果、安芸漁港周辺海岸は底質粒径が粗く急勾配海岸であることが分かり、海底地形デジタルデータではこの浅海域の急勾配地形が再現されていない可能性があることが示された。

また、台風時の広域波浪変形解析からは、沖合の地形特性から安芸漁港周辺で来襲波浪の大きくなる波向特性が見られた。同時に、断面数値波動水槽解析による打上高の結果より、浅海域の海底勾配が高波の打上げに大きな影響がある可能性が示され、安芸漁港における台風時の顕著な打上げメカニズムが定性的に理解された。なお、全国の急勾配海岸でも高波時に類似した特性の打ち上げ

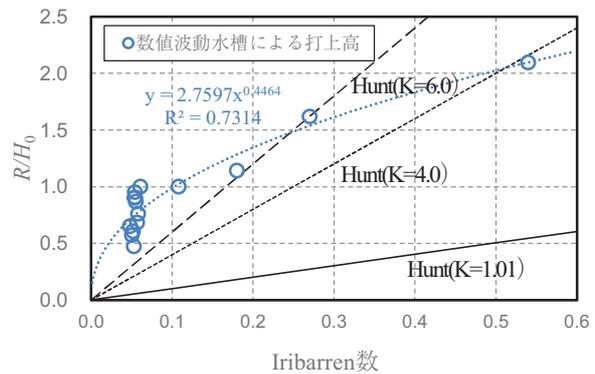


図-14 Iribarren数と無次元打上高

が生じる可能性はあるが、防波堤の設置水深と碎波点との位置関係によると思われる。

本検討結果からは、浅海域の波浪来襲状況を定量的に再現する際は、必ずしも海図では再現されない地形が大きく影響を与える可能性があり、正確な海底地形の把握が重要であることが示唆された。

NOTES

- 注1) 安芸漁港協同組合 HP, <http://www.jf-aki.jp/>
- 注2) <https://twitter.com/livedoornews/status/1036871323111239680>
- 注3) <https://mainichi.jp/articles/20170808/k00/00m/040/040000c>
- 注4) <https://www.nishinippon.co.jp/item/o/182396/>
- 注5) <https://blog.goo.ne.jp/maa85kg/e/9843bbf8fad9c032db83ed09d99ae5c>
- 注6) <http://blog.livedoor.jp/tosakatsuo/archives/45577354.html>
- 注7) https://www.yamagata-np.jp/news_core/index_pr.php?kat e=Main&no=2022091901000532
- 注8) 清水琢三, 鶴飼 亮行, 原 基久, 磯部 雅彦: 多方向不規則波の屈折・回折・碎浪変形計算法の現地適用性、海岸工学論文集、Vol.39、pp.181-185、1992.
- 注9) 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、No.39、235p., 2010.
- 注10) 全国港湾海洋波浪情報網, <https://nowphas.mlit.go.jp/>
- 注11) 気象庁潮汐観測資料, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>
- 注12) 日本水路協会: 海底地形デジタルデータ, <https://www.jha.or.jp/shop/products/btdd/index.html>
- 注13) 高知県, 安芸漁港の啓開計画平面図, <https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/040501/files/2021030300258/akikei kai.pdf>

REFERENCES

- 1) 上森千秋, 玉井佐一, 土屋義人, 安田孝志: 台風7617,9716,7920 による高知海岸の災害について、pp.485-508, 京都大学防災研究所年報, 第24巻 B-2号, 1981. [Agemori, C., Tamai, S., Tsuchiya, Y. and Yasuda, T.: Disasters of seawalls caused by typhoons 7617, 7916 and 7920 at Kouchi coast, DPRI, No.24, Vol.B-2, pp.485-508, 1981.]

- 2) 稲垣茂樹, 加藤史訓, 福濱方哉, 柴木秀之: 台風 0423 号来襲時の室戸岬周辺における高潮の特性, 海岸工学論文集, Vol.52, pp.231-235, 2005. [Inagaki, S., Kato, F., Fukuhama, M. and Shibaki, H.: Characteristics of Storm Surge near the cape Muroto Caused by the Typhoon No.0423, Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, Vol.52, pp.231-235, 2005.]
- 3) 柴木秀之, 加藤史訓, 山田浩次: 密度成層と Wave Setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算, 海岸工学論文集, Vol.48, pp.286-290, 2001. [Shibaki, H., Kato, F. and Yamada, K.: Numerical Simulation of the Abnormal Storm Surge in Tosa Bay Considering Density Stratification and Wave Setup, Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, Vol.48, pp.286-290, 2001.]
- 4) 高田悦子, 諸星一信, 平石哲也, 永井紀彦, 竹村慎治: 我が国沿岸の波浪外力の分布, 国総研資料, 第 88 号, pp.92-93, 2003. [Takada, E., Morohoshi, K., Hiraishi, T., Nagai, T. and Takemura, S.: Distributions of the Wave, Storm Surge and Tsunami Design Conditions on Japanese Nationwide Coastal Structures, TECHNICAL NOTE of NILIM, No.88, pp.92-93, 2003.]
- 5) 玉井佐一: 安芸市西浜・伊尾木海岸の底質分布と海底地形変化, pp. 49-59, 高知大学黒潮圏研究所所報, No.2, 1988. [Tamai, S.: Akishi nishihama Ioki kaigan no teishitsubunpu to kaiteichikeihenka, Report of the Institute of the Kuroshio Sphere Kochi University, pp. 49-59, 1988.]
- 6) 野志保仁, 小林昭男, 宇多高明, 芹沢真澄, 熊田貴之: 局所勾配算定式の適用範囲と底質特性の新しい評価指標, 海岸工学論文集, Vol.52, pp.406-410, 2005. [Noshi, Y., Kobayasi, A., Uda, T., Serizawa, M. and Kumada, T.: A Method Predicting for Longitudinal Slope Using Grain Size and a New Index Expressing Characteristics of Bed Materials, Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, Vol.52, pp.406-410, 2005.]
- 7) 茂木昭夫: 日本の海浜型について (沿岸州の地形学的研究 第 1 報), 地理学評論, 第 36 卷 5 号, pp.245-266, 1963. [Mogi, A.: On the Shore Types of the Coasts of Japanese Islands, Geographical Review of Japan, Vol.36, pp.245-266, 1963.]
- 8) Hunt, I.A.: Design of seawalls and breakwaters, Journal of Waterways and Harbours Division, ASCE85(WW#), 123-152, 1959.
- 9) 田村仁, 川口浩二, 加島寛章: 2019 年台風 15 号による横浜港での波浪外力, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.77, NO.2, pp.I_271-I_276, 2021. [Tamura, H., Kawaguchi, K. and Kashima, H.: Wave force at the port of Yokohama due to typhoon FAXAI in 2019. J.JSCE, Ser.B2, Coastal engineering, pp.I_271-I_276.2019.]

(Received March 16, 2023)

(Accepted July 20, 2023)

A STUDY ON CHARACTERISTICS OF HIGH WAVE SPLASH AT AKI FISHING PORT, KOCHI PREFECTURE

Makoto KOBAYASHI, Hiroyuki KATAYAMA, Hitoshi TAMURA and Shinji SATO

Aki fishing port, located on the east side of Kochi Prefecture, is known to produce high wave splash ~ 35 m at the offshore breakwater during typhoon storms. We investigated the mechanism of the high wave splash by conducting 2DH wave deformation analysis and 1DV numerical computation by using a VOF model. We conjectured that the nearshore topography close to the shore must be very steep since the beach sediments there are coarse, in a range of 1-10 mm. The 1DV numerical analysis demonstrated the height of the wave splash is highly sensitive to the bottom slope in front of the breakwater and the splash height can reach ~22 m in case the bottom slope was assumed to be 1/10. The use of accurate bathymetry in front of the structure is found to be an essential key to the prediction of the high wave splash.