海岸堤防・護岸の被災限界の研究

DAMAGE LIMITATION OF A COASTAL DIKE AND A SEAWALL

山本吉道¹・成吉兼二²・比嘉了規³
Yoshimichi YAMAMOTO, Ryoki HIGA, Kenji NARIYOSHI

¹フェロー 博(工) 東海大学教授 大学院総合理工学研究科 (〒259-1292 平塚市北金目4-1-1)

²学生会員 修(工) 東海大学 大学院総合理工学研究科 (〒259-1292 同上)

³学生会員 東海大学 大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒259-1292 同上)

It is important to know the threshold of the cross-section area of a beach to which a coastal dike and a seawall will come to suffer damage. Therefore, the actual conditions on coastal damage are investigated about 33 beaches in Japan and Thailand. Then, the marginal sizes of the beach required in order that those coastal facilities will not suffer damage to each incident wave are clarified. Moreover, since there are many cases that the destructive mechanism of the dike and the seawall on a sand area or a very shallow area cannot be explained by only the stability calculations of these facilities, scour and suction also need to be taken into consideration. Hence, a practical method of predicting the destruction of the dike or the seawall by using the wave overtopping rate to it and the net effective shearing resistance force in its sucking part is proposed. In addition, the availability of a countermeasure which strengthens the net effective shearing resistance force by using small stones as material of the sucking part is confirmed.

Key Words : Coastal dike, Seawall, damage limitation, beach height, beach cross-section area, suction

1. はじめに

前浜や十分に浅い水深に設置された三面張り堤防や二面張り護岸が、計画沖波波高より小さな来襲波で被災した事例が多数存在する。これらの主たる原因が侵食、洗掘、さらに吸出しによることは、大河原ほか¹⁾などが指摘しており、岩崎ほか²⁾は堤防の表のり被覆に隙間がなくても、堤体の最下端から吸出しが生じ破壊に至ることを大型実験で示し、山本ほか³⁾は堤防前面の水深が3m以浅の場合に、洗掘・吸出しによる被災が卓越することを被災事例検討と安定計算から示している。善⁴⁾は洗掘・吸出しに係る基礎理論として、海底砂地盤の波浪による液化予測モデルを構築し、加藤ほか⁵⁾は同予測モデルを海岸堤防に適用して、透過性を高めると吸出し防止効果を期待できることを示している。また、前野ほか⁶⁾などは矢板式単純護岸に対して多孔質弾性体の浸透理論を用いた有限要素解析に基づく吸出し予測を、中村ほか⁷⁾は捨石式単純護岸に対してVOF-FEM改良モデルによる吸出し検討を行っている。さらに、山本・南⁸⁾は三面張り堤防と二面張り護岸について、洗掘が進み、前面の砂浜が消失するようになってくると、堤体内に侵入した波による戻り流れ時の最大せん断力が有効せん断抵抗力を超えるようになり、堤体裏込材の吸出しが生じると考えて、水理模型実験から両方の力の算定式を求め、被災事例

への適用を試みている。そして、堤体吸出し部の裏込材を透過性とせん断抵抗力の大きな砕石に置き換えることによって吸出しを防止出来ることを示している。

砂浜規模がどの程度以下になれば、海岸堤防や護岸が被災するようになるかを知ることは重要であり、海岸堤防・護岸が被災する限界の砂浜断面諸元や来襲波諸元との関係を求める試みが複数の公的機関で実施されたが、我々は本研究で、タイ国での事例も追加収集して被災限界時のこれら諸元を明らかにする。さらに、極浅海域や砂浜上にある海岸堤防・護岸の破壊機構は波力に対する構造物の安定計算だけでは説明出来ず、洗掘・吸出しも考慮する必要がある。山本・南⁸⁾の研究を発展させて、これらの破壊を来襲波による越波量と正味の有効剪断抵抗力で判断出来る実用的な方法を提案する。

2. 砂浜による防災効果

(1) 海岸被災実態調査

a) 実態調査法

山本ほか³⁾の実態調査データ(15箇所)へ、国内で2006~2010年に、タイ国タイ湾で2009~2010年に

実施した海岸被災実態調査のデータ（18箇所）を追加し、付録の表-1にまとめる。タイ国でも実施した理由は、同国でも海岸部の開発や侵食が進み、海岸保全問題がクローズアップされるようになってきたことと、日本では少ない換算沖波波高 4 m 以下での被災事例が多くあるからである。国内の事例では管理事務所の公開資料の入手が容易なので、最初にこれを収集し、不足データを現地測量やヒアリング等で補った。タイ国の事例では公開されている資料がほとんど無いので、最初に現地踏査を行い、要所にて実測と、管理事務所や地元民へのヒアリングを行った。ただし、潮位・波浪データはタイ国モンクト王工科大学土木工学科長が自国政府から入手したものを使用した。

表-1において、前面矢板下端深さ、天端高、浜高さと高潮水位の基準水位には、国内では東京湾中等潮位を、タイ国でも極力平均潮位となるように Chaophraya 川河口～Jomthien ビーチで L. L. W. L+2.1m を、Sangchan ビーチ～Leamsadet ビーチで L. L. W. L+1.5m を用いている。

換算沖波波高には、国内では対象とした時化時の最寄りの観測所（水深20m程度か、それ以深）の最大有義波高を代用した。タイ国の部分破壊ケースでは最近1・2年に被災していたが、5年前から同国政府によるブイ式波浪計を用いた沖合観測が中断しているので、それ以前の沖合観測記録による年1回出現頻度の有義波を用いた。同国の非破壊ケースでは最近1・2年間被災していなかったのので、同様に沖合観測記録による年1回出現頻度の有義波を、完全破壊ケースでは原因となった台風 Linda の沖合での最大有義波の推算値を用いた。

潮位には、破壊ケースでは対象とした時化時の最大潮位を、非破壊ケースでは1年間の平均 H. W. L. を用いた。

b) 堤防・護岸が被災しないための砂浜限界諸元

付録の表-1にまとめられたデータを用いて、被災事例の換算沖波波高と見なした沖合有義波高と堤防・護岸前面の砂浜高との関係を黒丸で、非被災事例のそれを白丸で図-1に示した。同様に、被災事例の同沖合有義波高と堤防・護岸前面の砂浜幅との関係を黒丸で、非被災事例のそれを白丸で図-2に示した。さらに、被災事例の同沖合有義波高×沖波波長と平均潮位上の砂浜断面積（＝砂浜高×砂浜幅／2）との関係を黒丸で、非被災事例のそれを白丸で図-3に示した。ここで、換算沖波波高として沖合有義波高を用いた理由は、最寄りの波浪観測所で得られたデータをそのまま利用出来るようにするためである。

図-1, 2, 3において、黒丸の分布域では被災する可能性が極めて高いと判断出来る。そして、コンクリートまたは石積コンクリート被覆の堤防や護岸では、前面砂浜高0mまたは砂浜幅0mの場合でも沖合有義波高1.5m程度まで、前面砂浜高×砂浜幅／2が

0m²の場合でも沖合有義波高×沖波波長が100m²程度までならば被災しにくいことも判った。

図-1 海岸堤防・護岸の破壊する限界の砂浜高と沖合有義波高の関係

図-2 海岸堤防・護岸の破壊する限界の砂浜幅と沖合有義波高の関係

図-3 海岸堤防・護岸の破壊する限界の砂浜断面積と沖合の有義波高×波長の関係

3. 吸出し被害の予測

ここでは、三面張り堤防と二面張り護岸について、山本・南⁸⁾の実験データを見直して、正味の有効剪断抵抗力の算定式の現地事例への適用性を改善する。さらに、堤体吸出し部の裏込材を玉石に置き換える吸出し防止実験を行い、粒径を変えるだけによる吸出し防止効果の有効性も確認する。

(1) 洗掘の再現実験

a) 実験装置

図-4 に示すように、幅0.5m×高さ0.8m×全長22mの二次元造波水路（反射吸収式）に、砂層と表法コンクリート被覆、天端と裏法アクリル板被覆の堤防模型を設置し、表法根元の矢板下端から1.6cm離して間隙水圧計を設置し、吸出し実験を実施した。

図-4 実験装置の説明図

b) 実験方法

山本・南⁸⁾の研究では、平成9年台風9号による静岡市広野海岸堤防の被災再現実験から吸出しの再現性を確認した後に、日本での年1回来襲有義波高6m～7mをフルード則で1/30に縮小し、堤体内と底質の粒径として国内でよく見かける0.5～2mm程度の砂を選び、伊藤・土屋⁹⁾の底質に関する相似則を当てはめて、粒径の縮小スケールを1/3（換算粒径は0.20～0.66mm）とした実験を行っている。そして、堤体内への侵入波は先行した波の戻り流れの影響を強く受けることと、砂層内での侵入波と戻り流れの間隙水圧を分離することは非常に難しいことから、規則波による実験も行っている。また、全ケースで、堤防模型の側面等の全ての隙間には防水剤を充填して、水と裏込め材が逃げ出さないようにしてあった。

c) 実験結果

図-5は山本・南⁸⁾による実験結果の一例である。

図-5に示されるように、波が作用し始めると共に前面洗掘が始まり、40分後には前面洗掘が矢板下端まで進み、土砂の吸出しが無視できなくなってきた。それにより堤体内部の土砂が矢板下端から外側へ移動し、堤体内の上部の空隙が大きくなってきた。2時間後（フルード則による実時間換算では、11時間後）には堤体内の2/3の土砂が矢板下端から吸出されて、「死に体」となった。広野海岸でも半日後には同様な洗掘・吸出し状態になり、次の台風来襲時に簡単に大破した。

図-5 洗掘被災事例の再現実験例

(2) 吸出しの判定モデルの改良

a) 吸出し判定モデル

山本・南⁸⁾は、吸出しが発生し、堤体内が空洞化するかどうかを判定する方法として、土質力学の静的安定理論を戻り流れ時の最大剪断力と有効剪断抵抗力に適用している。すなわち、前法面と天端を不透過材で被覆されている堤防や護岸の吸出しに対する安定性は、前面矢板下端の吸出し部での、戻り流れ時の有効剪断抵抗力 τ_R と最大剪断力 τ_F の差（正味の有効剪断抵抗力）で決まり、式(1)、式(2)の状態になると考えた。

$$\text{原則的に非破壊： } \tau_R - \tau_F > 0 \quad (1)$$

$$\text{半破壊～全壊： } \tau_R - \tau_F < 0 \quad (2)$$

有効剪断抵抗力と最大剪断力を求める式は次のようである。

砂の有効剪断抵抗力は次式から求められる。

$$\tau_R = \{(\rho_s - \rho_w)gd - p_{ob}\} \tan \phi \quad (3)$$

ここで、 ρ_s は砂層の密度(=1800kg/m³)、 ρ_w は海水の密度(=1030kg/m³)、 g は重力加速度、 d は堤体前面の地表面から矢板下端までの砂層厚(m)、 p_{ob} は矢板下端における戻り流れ時の過剰間隙水圧（動的間隙水圧）の最大値、 ϕ は内部摩擦角（砂質土ならば30度）である。

最大剪断力は次式から求められる。

$$\tau_F = \frac{f}{2} \rho_w v^2 \quad (4)$$

$$v^2 = \frac{2p_{ob}}{C\rho_w} \quad (5)$$

ここで、 f は剪断力係数、 v は戻り流れ時の最大流速、 C は戻り流れ時の流体力係数である。

b) 過剰間隙水圧算定式の改良

有効剪断抵抗力を知るためには、戻り流れ時の矢板下端部での最大過剰間隙水圧を知る必要がある。

山本・南⁸⁾は堤防前面の入射波高 H を用いて $\rho_w g H \times \tanh(0.03H/d)$ に比例する式を提案したが、その式では $\tanh(0.03H/d)$ が1に近い範囲で過大な値を与えることから、図-6に示す彼らの実験データを見直して、式(6)を提案する。

図-6 戻り流れ時の最大過剰間隙水圧と無次元波高との関係

c) 流体力係数算定式の改良

最大剪断力を知るためには、戻り流れ時の矢板下端部での流体力係数を知る必要があり、山本・南⁸⁾は矢板下端までの水深 h を用いて、 h/H に比例する式を提案したが、実際の海岸では矢板下端までの水深がゼロまたは負の値になる場合のあることが分かったので、図-7に示す彼らの実験データを見直して、式(7)を提案する。

図-7 流体力係数と無次元水深との関係

(3) 現地海岸被災実態データへの適用

表-1にまとめた国内とタイ国の被災実態データを用いて、式(1)～式(7)に当てはめて得られた結果を図-8に示す。ここで、剪断力係数には $f=1$ を用い、越波量の算定には山本・堀川¹⁰⁾の式を用いた。図中の横軸0の位置の縦線は、堤防の吸出しに対す

る安定性の境界線である。吸出しが素因で壊れたケースは、この縦線左側領域に分布しており、越波量が大きくなるほど、破壊の程度がひどくなっている。縦線右側領域でも壊れたケースがあるが、これらは越波量が左側領域に比べて大きく、表-1の被災機構との対応から、主に波力によって壊れたことが分かる。そして、越波量が $0.05\text{m}^3/\text{m/s}$ を超えると、吸出しに関係なく壊れる可能性が高くなると言える。

ただし、現地海岸データの式(6)と式(7)への適用では、堤防・護岸前面から換算沖波波高の5倍ほど沖側位置での入射有義波高を用いている。この理由は、高波来襲時は危険であるから、浅い水深で埋め戻しが起きてしまった高波終了後に測量している場合が多いため、前面水深データが破壊時の最深値を示していないことが少なくないことと、合田の波圧算定式を用いるときの考え方によった。

図-8 海岸堤防・護岸の破壊に関する正味の有効剪断抵抗力と越波量の関係

(4) 裏込め材に小石を用いた場合の検討

式(3)から、戻り流れ時の過剰間隙水圧を小さくするか、内部摩擦角を大きくすれば、吸出しに対する抵抗力を高められるから、山本・南⁸⁾は直径が1cm程度の碎石を図-5の吸出し部へ充填した実験を行い、過剰間隙水圧の大幅な低下と内部摩擦角の増加から良好な吸出し防止効果を得られることを示した。

今回、同模型で直径が1cm程度の玉石を吸出し部に充填した実験を行った。この場合も良好な吸出し防止効果を得た。測定し読み取った戻り流れ時の過剰間隙水圧と無次元砂層厚データを元に、戻り流れ時の過剰間隙水圧の算定式を求めると次のようになった。

$$\frac{P_{ob}}{\rho_w g H} = 0.3 \left[\tanh \left(\frac{0.03H}{d} \right) \right]^{0.1} \quad (8)$$

式(6)と式(8)との比較から分かるように、裏込め材が砂の場合に比べて、玉石の場合は過剰間隙水圧が相当に小さくなっていることが判る。

4. 主要な結論

以下に主要な成果をまとめる。

- a) 日本とタイ国での海岸被災実態調査を行い付録に示す一覧表を作成した。それを基に、図-1, 2, 3を作図した。これらの図において、黒丸の分布域では被災する可能性が極めて高い。そして、コンクリート被覆の堤防や護岸では、前面砂浜高0mまたは砂浜幅0mの場合でも有義波高1.5m程度まで、前面砂浜高×砂浜幅／2が0m²の場合でも有義波高×波長が100m²程度までならば被災しにくいことが判った。
- b) 海岸堤防・護岸の表のり面に亀裂が無くても、前面洗掘が進み前面砂浜厚が薄くなってくると、前面矢板下端からの吸出しによる空洞化が進み“死に体”となる。この吸出しは矢板下端部での戻り流れ時の正味の有効剪断抵抗力が分かれば予測できる。本研究では現地海岸に適用出来る正味の有効剪断抵

抗力の算定法を提案できた。本算定法を現地海岸に適用したところ図-8を得た。本図より、正味の有効剪断抵抗力が負の場合は、吸出しが生じるため、越波量が小さくても被災し、同抵抗力が正の場合は越波量が0.05m³/m/s以上になると、十分に大きな波力が作用しているため被災するようになる。

謝辞：本研究は文部科学省の科研費（基盤研究C，21510197）に負うところ大である。また、モンクット王工科大学の土木工学科長であるNunthawath Charusrojthanadech准教授にも多大な援助を受けた。これらの援助に対して心からの謝意を表します。

付録

表-1 高波による被災実態調査結果一覧表

国名と海岸名		被災年と被災原因	被災程度	被災機構	前面矢板下端深さ(m)	天端高(m)	浜幅(m)	前面浜高(m)	換算沖波波高 H_o' (m)	周期 T (s)	潮位(m)	$5H_o'$ ほど沖側の波高 H_b (m)	正味の有効剪断抵抗(kN/m^2)	越波量($m^3/m/s$)
日本	富士海岸吉原	1966, 台風No26	部分破壊	侵食と波力	1.0	13.80	130	7.0	10.00	20.0	1.50	1.50	25.4	0.056
	富士海岸富士	1966, 台風No26	完全破壊	侵食, 洗掘と吸出し	1.0	14.00	15	1.0	10.00	20.0	1.50	5.00	-50.7	0.080
	駿河海岸大井	1968, 台風No4	完全破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-1.5	6.20	0	-1.5	3.50	13.9	0.56	4.13	-34.5	0.064
	高知海岸戸原	1979, 台風No16	部分破壊	侵食と波力	-2.0	10.00	30	3.0	9.80	13.2	0.97	5.88	15.2	0.055
	駿河海岸大井	1979, 台風No20	部分破壊	侵食と波力	-1.5	6.20	80	4.0	8.00	13.0	1.10	2.00	23.1	0.069
	静岡県静岡海岸	1979, 台風No20	完全破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-1.5	7.26	0	0.0	10.20	13.0	1.10	6.94	-12.0	0.111
	静岡県清水海岸	1979, 台風No20	非破壊	侵食	-1.5	7.26	100	7.1	10.20	13.0	1.10	1.53	37.1	0.019
	静岡県静岡海岸	1981, 台風No15	部分破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-1.5	7.26	0	-0.5	6.85	14.0	0.95	5.48	-11.4	0.043
	静岡県清水海岸	1981, 台風No15	非破壊	侵食	-1.5	7.26	90	7.0	6.85	14.0	0.95	1.03	36.8	0.007
	静岡県静岡海岸	1982, 台風No18	部分破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-1.5	7.26	0	-1.0	7.62	12.9	0.92	6.10	-26.1	0.044
	静岡県清水海岸	1982, 台風No18	非破壊	侵食	-1.5	7.26	80	6.9	7.62	12.9	0.92	1.14	36.3	0.031
	高知海岸長浜	1991, 台風No9	部分破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-1.0	11.50	0	-1.0	3.89	10.0	0.61	3.70	-31.6	0.000
	静岡県広野海岸	1997, 台風No9	部分破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-1.5	7.26	0	-1.5	6.91	13.9	0.00	5.39	-49.5	0.024
	静岡県広野海岸	1997, 台風No18	完全破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-1.5	7.26	0	-2.0	4.45	13.6	0.70	5.07	-45.6	0.063
	富士海岸今井, 大野	2001, 台風No11	非破壊	侵食	1.0	17.00	70	11.0	5.79	12.2	1.00	0.58	43.4	0.000

国名と海岸名			被災年と被災原因	被災程度	被災機構	前面矢板下端深さ(m)	天端高(m)	浜幅(m)	前面浜高(m)	換算沖波波高 Ho' (m)	周期 T (s)	潮位(m)	$5Ho'$ ほど沖側の波高 H_b (m)	正味の有効剪断抵抗(kN/m ²)	越波量(m ³ /m/s)
日本	静岡県	静岡県御前崎海岸	2003, 春の時化	部分破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-	7.08	0	0.0	5.04	10.9	0.74	3.68	-	0.006
		富士海岸 今井, 大野	2004, 台風 No.22	非破壊	侵食	1.0	17.00	70	11.0	5.63	12.6	1.00	0.56	43.4	0.000
		富士海岸 今井, 大野	2004, 台風 No.23	非破壊	侵食	1.0	17.00	70	11.0	5.35	10.6	1.00	0.27	43.5	0.000
		高知県なべ海岸	2004, 台風 No.23	部分破壊	波力	-	9.80	5	0.5	13.55	15.8	2.86	7.72	-	0.045
	石川県	石川県小松海岸	1994, 冬期風浪	部分破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-4.0	5.40	0	-2.0	4.38	12.3	0.44	5.69	-1.1	0.020
		石川県小松海岸	2000, 冬期風浪	部分破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-4.0	5.40	0	-2.0	6.00	10.5	0.50	5.46	-0.4	0.050
		石川県小松海岸	2001, 冬期風浪	完全破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-4.0	5.40	0	-2.2	5.58	11.7	0.71	5.52	-1.9	0.096
		石川県小松海岸	2001, 台風 No.15	完全破壊	侵食, 洗掘と吸出し	-2.5	5.40	0	-1.5	6.00	10.5	0.58	5.10	-8.9	0.065
		富山県入善海岸	2008, 冬期風浪	完全破壊	侵食, 洗掘と波力	-3.5	5.70	0	0.0	9.92	16.1	0.21	6.35	6.3	0.151
タイ	タイ	Chao Phraya 川河口	雨期モンスーン	部分破壊	侵食と波力	-1.0	2.00	0	-0.5	2.50	6.1	1.54	1.63	-0.4	0.039
		Khlong Dan 海岸	雨期モンスーン	部分破壊	侵食と波力	-0.6	2.00	0	-0.1	2.50	6.1	1.73	1.68	-0.6	0.047
		Wam ビーチ		非破壊		-1.0	2.40	5	1.9	2.00	6.1	1.40	1.50	11.9	0.034
		Wam ビーチ		非破壊		-	2.40	30	2.4	2.00	6.1	1.40	0.10	-	0.012
		Pattaya ビーチ		非破壊		-3.5	3.50	20	2.6	2.25	6.1	1.40	0.23	26.6	0.000
		Jomthien ビーチ		非破壊		-3.5	3.40	20	2.7	2.50	6.1	1.40	0.50	27.0	0.000
		Sangchan ビーチ	1997, 台風 Linda	完全破壊	侵食と波力	-1.0	2.40	30	1.8	3.75	6.2	1.17	1.13	11.7	0.123
		Chao Lao ビーチ	雨期モンスーン	部分破壊	侵食と護岸劣化	-1.5	3.10	5	0.5	2.80	6.5	1.14	2.24	6.7	0.059
		Learn Sadet ビーチ	雨期モンスーン	部分破壊	洗掘と波力	-1.5	2.50	5	0.5	2.80	6.5	1.14	2.24	6.7	0.054

参考文献

- 1) 大河原満・橋本宏・斉藤雄三郎：被災事例から見た海岸堤防・護岸に関する一考察，第 30 回海工論文集，pp. 264-268, 1983.
- 2) 岩崎複久・田中茂信・佐藤慎司・名合宏之・前野詩朗・小谷裕司：海岸堤防の空洞化発生機構に関する実験的研究，海工論文集，第 42 巻，pp. 1026-1030, 1995.
- 3) 山本吉道・川島理・福濱方哉：高波と津波による海岸施設の破壊機構と破堤限界値の現地海岸適用，海工論文集，第 52 巻，pp. 1281-1285, 2005.
- 4) 善功企：海底地盤の波浪による液状化に関する研究，港湾技研資料，No.755, 112p., 1993.
- 5) 加藤史訓・佐藤慎司・田中茂信：波浪による海岸堤防周辺地盤の間隙水圧変動，海工論文集，第 43 巻，pp. 1011-1015, 1996.
- 6) 前野詩朗・小谷裕司・星山知恵：変動水圧場における護岸裏込め土砂の流失限界に関する研究，海工論文集，第 47 巻，pp. 926-930, 2000.
- 7) 中村友昭・許東秀・水谷法美：捨石護岸背後の埋立土砂の吸い出し機構，土木学会論文集 B, Vol. 62, No. 1, pp. 150-162, 2006.
- 8) 山本吉道・南宣孝：高波による海岸堤防破壊メカニズムの実験的研究，土木学会論文集 B2, Vol. B2-65, pp. 901-905, 2009.
- 9) 伊藤政博・土屋義人：二次元海浜変形の相似則について，土木学会論文集，第 357 号/II-3, pp. 177-186, 1985.
- 10) 山本吉道・堀川清司：新しい越波量算定式の提案，海洋開発論文集，Vol. 7, pp. 25-30, 1991.