

# 高波による海岸堤防破壊メカニズムの実験的研究

## Experimental Investigation on Destruction Mechanism of Coastal Dyke Due to Big Waves

山本吉道<sup>1</sup>・南 宣孝<sup>2</sup>

Yoshimichi YAMAMOTO and Nobuyoshi MINAMI

Hydraulic experiments and field data show that the destruction of coastal dykes is mainly caused by the suction from those foundations. I.e., repeated wave attacks erode and scour front sand beach, it follows that the shear resistance of the foundation decreases but the shear force produced by back flow increases. As a result, a significant amount of sand is sucked out from the foundation, leading to a dyke break. In this paper, new formulas of shear resistance and shear force are proposed with the analysis of some hydraulic experiments. An examination using those formulas clarifies whether or not the coastal dyke is broken by the suction. Moreover, the protection effect of the suction with the use of crushed stones for the dyke body is also confirmed by hydraulic experiments.

### 1. はじめに

碎波水深より十分に浅い水深、または、前浜に設置された三面張り堤防や二面張り護岸が、それほど大きくない波力で被災した事例が多数存在する。この原因が侵食と洗掘、さらに、吸出しによることは、大河原ら(1983)などが指摘しており、岩崎ら(1995)は、堤防前面被覆に施工不良や老朽化による隙間がなくても、堤体最下端から吸出しが生じることを大型実験で示し、山本ら(2005)は前面水深が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た。洗掘・吸出しに係る基礎理論として、善(1993)が海底砂地盤の波浪による液状化予測モデルを構築し、加藤ら(1996)は海岸堤防に対する同予測モデルによる検討から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。さらに、前野ら(2000)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、中村ら(2006)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。

本研究では、三面張り堤防と二面張り護岸について、前面の砂浜が侵食と洗掘により消失した段階において、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た場合に吸出しが生じると考えて、水理模型実験を基に吸出し破壊機構のモデル化を行い、現地海岸への適用を試みる。また、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碎石に置き換えることによる吸出し防止効果も確認する。

### 2. 洗掘の再現実験

#### (1) 実験装置

図-1(1)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、砂層と図-1(2)に拡大図を示す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。

#### (2) 実験方法

本研究では3種類の実験を実施した。

##### a) ケース1

ケース1では、典型的な高波による災害事例である平成9年台風9号による静岡市広野海岸堤防の破堤を再現した(被災時には最大有義波高6.91m、周期13.9sの高波が来襲した)。被災断面は図-2に示す複断面であったが、

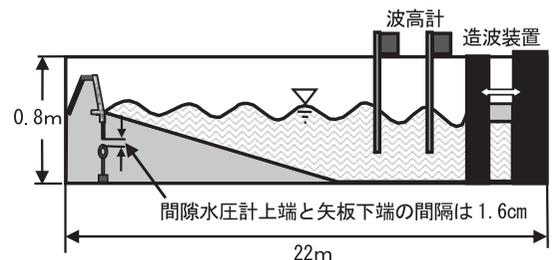


図-1 (1) 実験装置の説明図

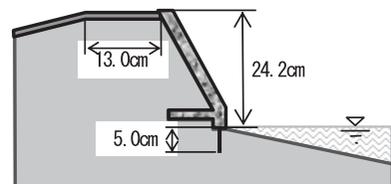


図-1 (2) 模型堤防の断面図

1 フェロー 博(工) 東海大学教授  
2 学生会員 東海大学大学院工学研究科土木工学専攻

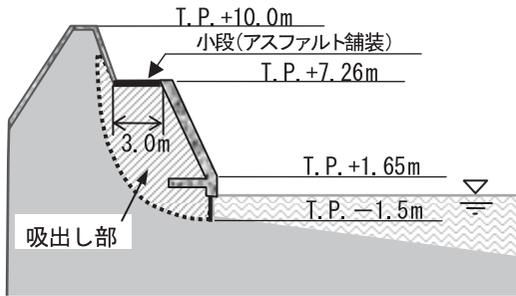


図-2 被災堤防の断面図

小段より上部は吸出し現象再現に対して重要でないと判断して無視し、使用した二次元造波水路の大きさと、その造波能力に合わせて、図-1 (2) に示す1/30スケールの模型堤防を採用した。

入力諸元は、1/30スケールでフルード則を用いた結果、開始から1時間は有義波高21.33cm、周期2.78s、1時間後から0.72時間は有義波高22.33cm、周期2.65sを、1.72時間後から0.36時間は、有義波高20.67cm、周期2.48sの不規則波を実測記録に従って入射させた。

砂の粒径は現地海岸の底質粒径が主に0.5～1.0mm程度の細粒分と2～3mm程度の粗粒分から成り立っていたので、伊藤・土屋 (1985) の底質に関する相似則を当てはめると、底質粒径のスケールは1/3となり、0.20mmと0.66mmの砂を2:1で混合したものを使用した。

流速計を模型前面に1台設置し、矢板下端に発生する間隙水圧を測定するために間隙水圧計を沖向き方向と岸向き方向にそれぞれ設置した。

なお、本ケースは信頼性を確認するために2回繰り返して行い、同様な現象が再度起こることを確認した。

#### b) ケース2

不規則波実験における過剰間隙水圧 (動的間隙水圧) の変化特性は複雑で把握が困難であったから、過剰間隙水圧の変化傾向の理解を高めるために、ケース1と同じ模型条件で、波高15～25cmの規則波による吸出し実験を行った。

#### c) ケース3とケース4

裏込め材の粒径を大きくすることによる吸出し防止効果を確認するために、ケース1における堤体内の吸出し部に中央粒径1cm程度の碎石を詰め込み、有義波高22.33cm、周期2.65sの不規則波を3.5時間入射させた場合と、その後で、波高15～25cmの規則波を入射させた場合とを実施した。前者をケース3、後者をケース4と呼ぶ。ケース3は2回実施して、その再現性を確認した。

なお、全ケースで、堤防模型の側面等の隙間は全て防水剤を充填して、水と裏込め材が逃げ出さないようにした。

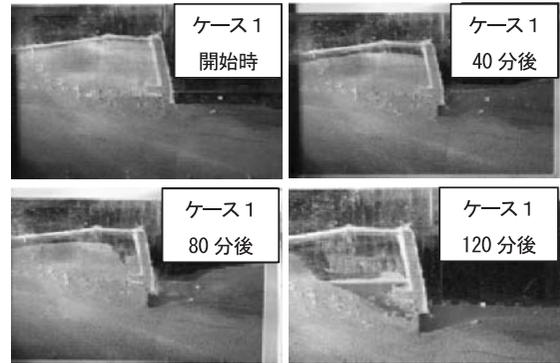


図-3 洗掘被災事例の再現実験

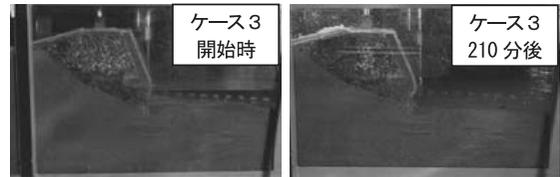


図-4 裏込め材を碎石にした場合の吸出し実験

### (3) 実験結果

#### a) ケース1

ケース1では造波開始と共に前面洗掘が始まり、図-3に示されるように、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へと移動し、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の土砂が吸出されて、「死に体」となった。現地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ことから、本実験による再現能力は十分と判断した。

#### b) ケース3

造波開始と共に前面洗掘が始まり、ケース1と同様に40分後には矢板下端まで掘れるが、現地海岸での高波来襲の実時間 (半日程度) に相当する実験時間を十分に越える3.5時間ほど波を作用させ続けても、前面洗掘が矢板下端を越えて深く進むことはなかった。さらに、図-4に見られるように、碎石の流出もほとんど生じていなかった。

### 3. 吸出しの判定モデル

吸出しが発生し、堤体内が空洞化するかどうかを簡単に判定できる式を、土質力学の静的安定理論を戻り流れ時の最大せん断力と有効せん断抵抗力に適用することから求める。

#### (1) 理論的考察

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、堤体内部から堤防矢板下端

にかけて生じる吸出し部境界面をせん断面と見做した場合の、戻り流れ時の有効せん断抵抗力  $\tau_R$  と最大せん断力  $\tau_F$  の差（正味のせん断抵抗力）で決まり、(1) 式、(2) 式の状態になると考えた。

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

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

有効せん断抵抗力と最大せん断力を求める式は実験データ解析から次のように決定した。

**a) 有効せん断抵抗力**

砂の有効せん断抵抗力  $\tau_R$  は次式で表される。

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

ここで、 $\rho_s$  は砂層の密度 (=1800kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho_w$  は海水の密度 (=1030kg/m<sup>3</sup>)、 $g$  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、 $\phi$  は内部摩擦角（砂質土ならば30度）である。

**b) 過剰間隙水圧**

計測の容易さから、入射時の過剰間隙水圧の最大値  $p_{oi}$  を先に検討する。この過剰間隙水圧の最大値は、前面砂層がなくなったならば、砕波後の波圧の式（堀川, 1991）に近づくと仮定する。

$$p_{oi} \approx 2\rho_w gH \quad (d=0) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $H$  は前面入射（砕波）波高であり、 $p_{oi}/2\rho_w gH$  は  $H/d$  が大きくなるほど、1 に近づくと考えられる。したがって、 $p_{oi}/2\rho_w gH = \tanh(H/d)$  の形式の適用が考えられる。さらに、 $\tanh(x)$  は  $x \geq 3$  でほぼ1となることから、 $H \geq 3m$  の波に対して、 $d \leq 0.03m$  の砂層厚の場合に、 $x \geq 3$  になるよう次式を提案する。

$$\frac{p_{oi}}{\rho_w gH} = 2.7 \tanh\left(\frac{0.03H}{d}\right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、式(5)の比例係数を2でなく、2.7としたのは、前述の実験で測定したデータを用いて無次元の最大過剰間隙水圧と無次元の砂層厚の関係を示すと図-5の様になったので、実験結果に合うように修正したからである。

有効せん断抵抗力を知るためには、戻り流れ時の最大

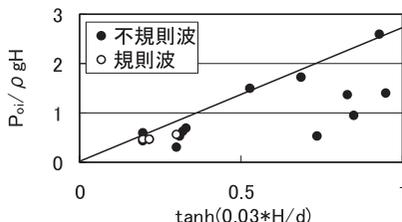


図-5 入射時の最大過剰間隙水圧と無次元波高との関係

過剰間隙水圧を知る必要があるため、入力波に対する入射時と戻り流れ時の最大過剰間隙水圧の関係を前述の実験データを用いて調べると図-6に示す特徴が判った。

その一つは、注目する波の前に大きな波が入射する場合は、この大きな波の戻り流れの影響を受けて、注目する波の過剰間隙水圧が低くなり、先に小さな波が入射する場合は逆になることである。これが、不規則波の過剰間隙水圧がバラ付く原因と考えられる。

二つ目は、堤体内の砂が障害となるため、岸向き過剰間隙水圧の相当な成分が、沖向き過剰間隙水圧測定用の水圧計の受圧面に回り込み、沖向き水圧として計測されてしまうことである。岸向き水圧から、ピーク時に存在する衝撃波力的成分を取り除いた波形の相似形を、破線で沖向き水圧波形に書き加えてあるが、実波形とこの破線との差が正味の戻り流れ時の過剰間隙水圧と見なした。

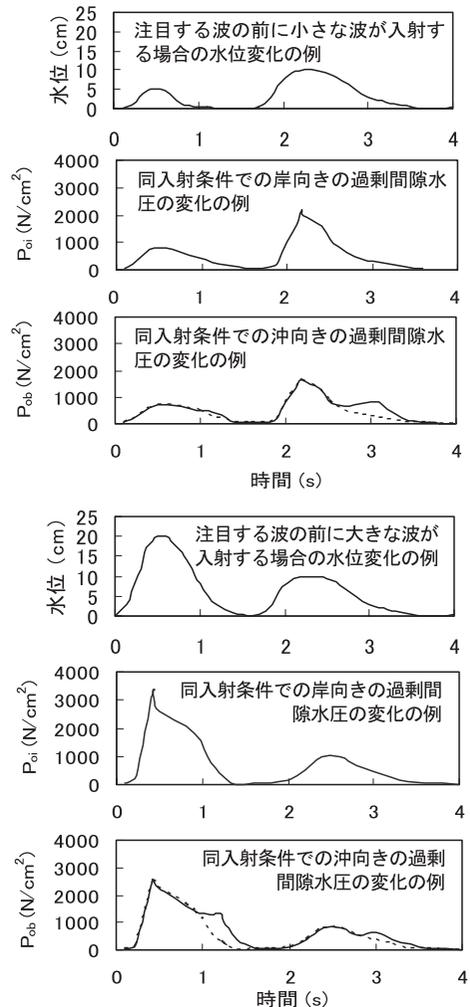


図-6 入力波条件と過剰間隙水圧との関係の説明

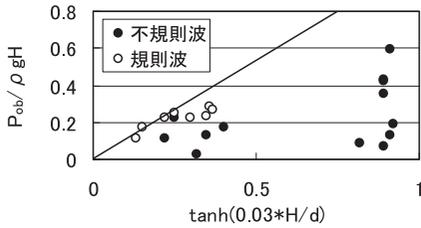


図-7 戻り流れ時の最大過剰間隙水圧と無次元水深高との関係

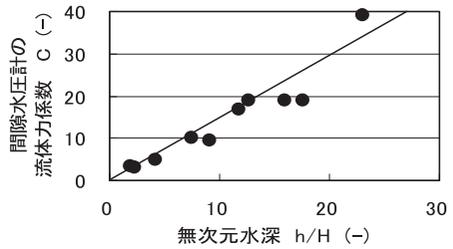


図-8 流体力係数と無次元水深との関係

この処理を行ったデータによる図-7から、戻り流れ時の過剰間隙水圧の算定式を求めると次の様になった。

$$\frac{P_{ob}}{\rho_w g H} = 1.0 \tanh\left(\frac{0.03H}{d}\right) \dots\dots\dots (6)$$

c) 最大せん断力

最大せん断力は次式で表される。

$$\tau_F = \frac{f}{2} \rho_w v^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$v^2 = \frac{2P_{ob}}{C \rho_w} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $f$ はせん断力係数、 $v$ は戻り流れ時の最大流速、 $p_{ob}$ は戻り流れ時の最大過剰間隙水圧で式(6)から求まる。式(8)の流体力係数 $C$ は判らないので、この値の支配パラメータを知るために、砂層の無い単純な場合の水圧 $p$ の関係式を微小振幅波理論から求めると、

$$p = \frac{C}{2} \rho_w v^2 = \frac{C}{2} \rho_w \left( \frac{\sqrt{gh} H}{h} \right)^2 \dots\dots\dots (9)$$

さらに、

$$p = \rho_w g \frac{H}{2} \dots\dots\dots (10)$$

両式の比較から、 $C \propto h/H$ なる関係式を得られる。

したがって、前述の装置による実験から得られた流体力データを、無次元水深で整理すると、図-8のようになり、次式を得る。

$$C = 1.4 \left( \frac{h}{H} \right) \dots\dots\dots (11)$$

(2) 実際の被災データへの適用

山本ら(2005)がまとめた日本の主要な被災事例一覧の中で洗掘と吸出しによる事例に、この一覧の中の静岡県清水海岸と石川県小松海岸における被災時に壊れなかった箇所のも加えて、式(3)と式(6)、および、式(7)、式(8)と式(11)を当てはめて得られた結果を図-9に示す。図中の横軸0の位置の縦線は、堤防の安定性の境界線である。縦線右側領域では、堤防は非破壊であり、縦線左側領域では、堤防は半破壊か破壊することを示している。全壊と半壊事例のほぼ全てで、有効せん断抵抗力-最大せん断力

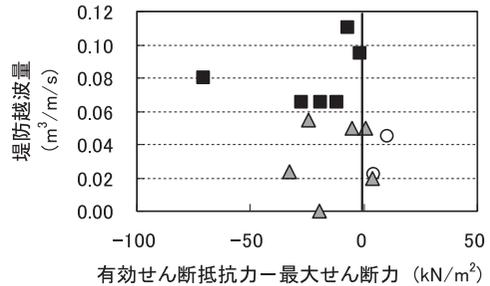


図-9 破壊程度と正味のせん断抵抗力および越波量との関係

せん断力がマイナスになっており、吸出しによる空洞化が生じていることと整合している。この値がマイナスになっていない半壊事例が2つあるが、この原因は対象ケースの砂層厚データの精度が低いことによる(高波来襲時は危険であり、測量は静穏期にしか出来ないため、砂層厚のデータが最小値を示している保証がない)。

本図は、有効せん断抵抗力-最大せん断力がほぼ同じ値でも、破壊の程度が違うケースが複数あったので、縦軸に堤防越波量を用いて整理してある。この越波量は合田の算定図から求めており、吸出しによって空洞化を生じた堤防本体の破壊程度を表していると考えられる。

基礎部矢板前面に砂地盤が残っており、来襲波の波高が6m台(年1回程度の来襲頻度)で、来襲時間が1日程度以下の場合、前面洗掘が堤体基礎の矢板下端までは急速に進むが、それより深くはほとんど洗掘しない。この矢板下端より下側に砂地盤が残っている場合は、有効せん断抵抗力-最大せん断力による吸出しの判定ができる。ただし、侵食が大規模に進み、海岸堤防の縦寸法と同等か、それを超える巨大な高波が来襲するようになれば、矢板下端よりもはるかに下側まで洗掘が進み、堤体内部からの吸出しでなく、堤体本体の破壊が考えられる。

(3) 裏込め材に碎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と考えられる。それゆえ、図-10に示す直径が1cm程度の碎石をケース1の吸出し部へ充填したケース3とケース4の実験で測定されたデータを用いる



図-10 ケース3で用いた碎石

と図-11と図-12を得られた。

これらの図から、入射時と戻り流れ時の過剰間隙水圧の算定式を求めると次の様になった。

$$\frac{P_{oi}}{\rho_w g H} = 1.0 \tanh\left(\frac{0.03H}{d}\right) \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{P_{ob}}{\rho_w g H} = 0.5 \tanh\left(\frac{0.03H}{d}\right) \dots\dots\dots (13)$$

式 (5), (6) と式 (12), (13) との比較から、裏込め材が砂の場合に比べて、碎石の場合は過剰間隙水圧が半分か、それ以下になっていることが判る。

また、実験に使った碎石について一面せん断試験を行い、内部摩擦角を測定したところ、数値が相当にバラ付いていたが、全ての試験ケースで内部摩擦角 = 40° 以上であった。

4. 結論と課題

以下に主要な成果と課題をまとめる。

- a) 平成9年台風9号による静岡県広野海岸堤防の破堤再現実験を2回行ったところ、洗掘が前面矢板下端まで短時間で進むと、吸出しが顕在化し実際と同様な空洞化が生じて破堤直前までいった。これにより伊藤・土屋の相似則に基づく模型実験は十分な精度を持っていることと、極浅海域では洗掘と吸出しが破壊メカニズム上重要であることが確認できた。
- b) 本実験結果に基づいて、戻り流れ時の有効せん断抵抗力と最大せん断力の差より吸出しの有無を判定する式を提案できた。また、この判定法を現地の被災事例に当てはめた結果、適応度は良好であった。ただし、本判定法の対象となる海岸構造物は、洗掘と吸出しがボディ・ブローのように効いてくる極浅海域に設置された三面張りの堤防か二面張りの護岸である。また、高波の来襲時間が1日程度以内で、前面砂地盤が矢板下端より深く洗掘しない場合に適用でき、高波により矢板下端よりも深く洗掘が生じる場合は、本判定法を用いるまでもなく、破堤するであろう。したがって、侵食・洗掘の程度を予め予測しておく必要がある。
- c) 過剰間隙水圧を低下させるために、堤体内吸出し部の裏込め材の透過性を高めれば、また、有効せん断抵

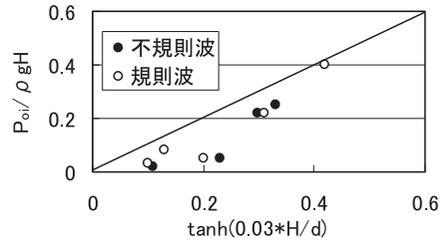


図-11 入射時の最大過剰間隙水圧と無次元波高との関係

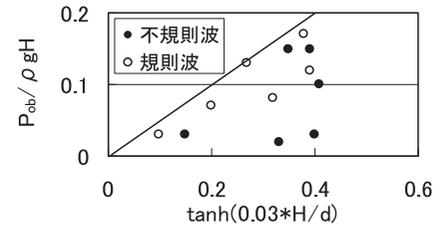


図-12 戻り流れ時の最大過剰間隙水圧と無次元波高との関係

抗力式の内部摩擦角を大きくすれば、吸出しに対する抵抗力の増加を期待できる。平均粒径1cm程度で内部摩擦角40°以上の碎石を吸出し部に詰め込んだ実験では、吸出しをほぼ防止できた。なお、実験で用いた碎石を伊藤の相似則を用いて現地スケールに換算すれば、碎石の平均粒径は3cm程度となる。しかし、この伊藤の相似則図の境界線のぶれ幅は大きく、読み取りを少しずらすと倍の6cm程度に変わるため、実際に現地試験を行い、吸出し防止効果を確認することが必要である。また、海岸堤防に適用する場合は、堤内地への透水防止工が必要になる。

参考文献

伊藤政博・土屋義人 (1985)：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。  
 岩崎復久・田中茂信・佐藤慎司・名合宏之・前野詩朗・小谷裕司 (1995)：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。  
 大河原満・橋本 宏・斉藤雄三郎 (1983)：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。  
 加藤史訓・佐藤慎司・田中茂信 (1996)：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。  
 善 功企 (1993)：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.755，112 p。  
 中村友昭・許 東秀・水谷法美 (2006)：捨石護岸背後の埋立土砂の吸出し機構，土木学会論文集B，Vol.62，No.1，pp.150-162。  
 堀川清司：[新編] 海岸工学，東京大学出版会，1991。  
 前野詩朗・小谷裕司・星山知恵 (2000)：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。  
 山本吉道・川島 理・福濱方哉 (2005)：高波と津波による海岸施設の破壊機構と破壊限界値の現地海岸適用，海工論文集，第52巻，pp.1281-1285。