

海岸堤防に作用する段波津波の実験

Experimental Study on Bore acting on a Coastal Dike

富永数男¹・中野 晋²・天羽誠二³

Kazuo TOMINAGA, Susumu NAKANO and Seiji AMOU

The properties of tsunami wave pressures acting on a coastal dike were studied in a tsunami experimental tank. The results obtained in this experimental study were as follows; 1) the greatest impulsive pressure occurs when a crest of bore-type tsunami just overtops at an upright coastal dike. 2) The greatest continuous pressure of tsunami generally exceeds the value estimated by Tanimoto's formula (1984). 3) An impulsive pressure of tsunami is not so much affected by sea-bottom slope. 4) In addition, an installation of breakwater in the front of a coastal dike is very effective for decrease of wave pressure.

1. はじめに

わが国の海岸構造物は高潮対策や海岸侵食対策を中心に進められてきた。もちろん、津波対策についても1960年に発生したチリ地震津波以降、三陸沿岸など太平洋沿岸で津波防波堤や防潮堤の整備が進んでいる。全国に建設された防潮堤のほとんどは耐震性や津波波力など海溝型地震を想定した設計は行われていない。特に日本海中部地震津波やインド洋大津波で観測されたように津波の先端が段波状となり、衝撃的な波力を有する段波津波の挙動を考慮して設計された沿岸構造物は数少ない。近い将来に発生が予測される南海地震などの巨大地震対策のためにも海岸構造物に作用する津波波圧の正確な評価が重要な課題となっている。

これまでも福井ら(1962a, 1962b)をはじめ、谷本ら(1984)、松富ら(1994)、水谷ら(2000, 2002)、村上ら(2005)、有川ら(2005, 2006)によって、段波津波の実験が多数行われている。また、最近では3次元数値シミュレーションを用いた解析も進められており、数値解析により構造物への津波力を評価することも可能となりつつある。しかし、数値実験結果を検証するために必要な基礎データの収集は未だ十分とは言えない状況である。

本研究では比較的調査が行われていない急勾配斜面を有する沿岸部を対象とし、斜面を遡上した後の津波波圧の挙動について検討している。また2004年に発生したインド洋津波では、港湾背後とそれ以外で被害の状況が大きく異なった地点が多数確認されている。これは、防波堤などの沿岸構造物が津波波力を軽減した結果と言わ

れている。しかし、これまで防波堤の津波被害軽減効果については定量的な評価はあまりされていない。そこで、本研究ではまず室内実験水路を用いて段波津波実験を行い、急勾配斜面を遡上した段波津波の波高と波速および海岸堤防に作用する波圧を測定し、それぞれについて評価を行う。また急勾配斜面上に防波堤を設置し、防波堤が津波力を軽減する効果について考察している。

2. 段波津波の実験方法

(1) 実験装置と方法

図-1に示す長さ20m、幅0.8m、高さ1mの両面ガラス張り鋼製の長水路を使用して段波津波実験を行った。段波津波は電子制御によりゲートを上昇させることによって発生させている。ゲートから岸側4mの地点から後方部にむけて1/10勾配斜面部を設置し、斜面の終端部位置に海岸堤防を設置した。海岸堤防の寸法は高さ8, 10, 12cmの3種類、幅4, 8, 12cmの3種類で、合わせて9種類の形状のものをを用いた。計測項目は沖での津波波高に相当するゲート直後から斜面勾配部および海岸堤防前面までの波高と波速、海岸堤防前面に作用する波圧である。波圧は三計エンジニアリング社製、P-310-02Sである。サンプリング周波数は衝撃的な波圧変動を測定するために、300Hzとした。海岸堤防前面には2台の波圧計を図-2に示すように底面と天端から堤防高 h_D の1/3の位置に設置した。

(2) 実験ケース

実験ケースは、表-1に示す100ケースである。沖での水深は0.5m、沖合波高は0.02~0.1mの5段階、汀線より沖側に3mの位置に防波堤の有りと無しの条件で実験を行った。なお、想定している模型縮尺は1/50である。

1 学生会員 修(工) 徳島大学大学院先端技術科学教育部博士後期課程
2 正会員 博(工) 徳島大学准教授環境防災研究センター
3 正会員 工修 四国建設コンサルタント㈱

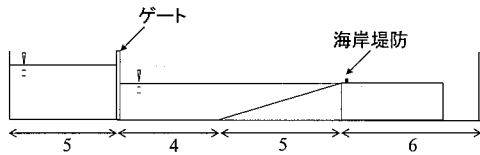


図-1 実験装置の概要図 単位(m)

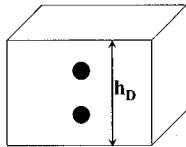


図-2 海岸堤防前面の波圧計の設置状況

表-1 実験ケース

ケース	A1	A2	B1	B2
海岸堤防	無	無	有	有
防波堤	無	有	無	有
水路床勾配	1/10			
波高 (cm)	2, 4, 6, 8, 10			
水深 (m)	0.5			

3. 段波津波実験の結果

(1) 段波津波の定義

図-3に海岸堤防高10 cm, 幅4 cm, $z=3.3$ cmの測点における波圧の時間分布変化を示す。ここで、 z は海岸堤防底面から測った高さである。本研究では海岸堤防に作用する波圧の代表量として図-3に示す4つの量を定義する。

まず、段波津波の状態に沿岸構造物に衝突する瞬間に非常に大きな値を示す衝撃段波津波波圧 P_i 、衝撃段波津波波圧以外の波圧で段波津波の状態で海岸堤防に作用する波圧を段波津波波圧 P_m 、次に段波津波の継続的な到達により発生し、海岸堤防前面において著しい水位上昇が発生したときに発生する持続波圧 P_s 。そして段波津波波圧、持続波圧の最大値を最大段波津波波圧 P_{dm} 、最大持続波圧 P_{ds} と定義する。この瞬間的に発生する大きな波圧は段波津波が海岸堤防を越流する時、特に段波津波の波頂すなわち海岸堤防前面での水深が最大になったときに発生する（写真-1）。この波圧は海岸堤防に限らず沿岸構造物にとって非常に重要な波圧である。

(2) 波速

本研究での段波津波実験の妥当性を検証するために福井ら（1962）が提案している段波津波の波速式との比較を行った。福井らは連続式と運動方程式を用いて式（1）を導き、自ら行った実験により式（1）の有効性を証明している。

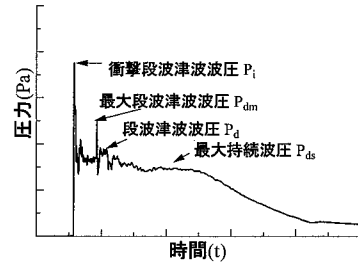


図-3 段波津波波圧の時系変化

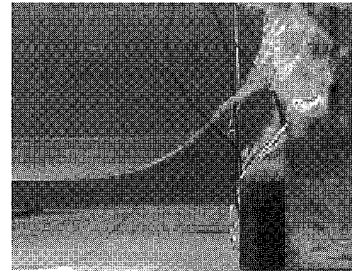


写真-1 最大段波津波波圧発生瞬間

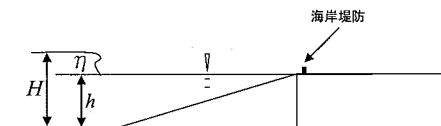


図-4 段波津波の緒量

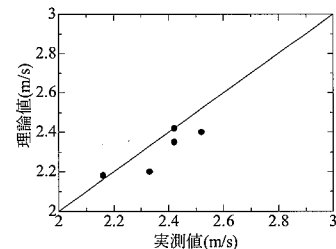


図-5 波速に関する実験値と理論値の比較

$$c = \sqrt{\frac{gH(H+h)}{2(H-\xi\eta)}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 c は波速、 g は重力加速度、 H は段波津波の水深、 h は段波前面での水深、 ξ は抵抗係数、 η は段波津波の波高である。各量の説明図を図-4に示す。図-5は実験で得られた波速と式（1）を比較したものである。バラツキはあるものの大抵式（1）と一致するが、波高に伴って波速が大きくなると実験値は式（1）より小さくなる傾向がある。

(3) 衝撃段波津波波圧

福井ら（1962）は衝撃段波津波波圧に最も影響を与え

る因子を波速と考え、実験結果より衝撃段波津波波圧は波速の4乗に関係するとして式(2)を提案している。

$$P_i = k_o \frac{w_o c^4}{g^2 \eta} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 k_o は無次元波圧係数、 w_o は単位体積重量、 c は波速、 g は重力加速度、 η は段波津波の波高である。

図-6に本実験と福井ら(1962)の実験結果を示す。福井らは $c=2$ (m/s) 付近のデータから $k_o=0.33 \sim 0.51$ (直立構造物では $k=0.51$, 傾斜が緩やかになるにつれて0.33に近づく。)を採用している。本研究では波高8, 10 cmでは福井らの提案式にはほぼ一致するが、波高6 cmでは小さくなる。

(4) 段波津波波圧の鉛直分布

図-7に無次元最大段波津波波圧の無次元鉛直分布を示す。縦軸に z/η の無次元鉛直高さ、横軸に $P_{dm}/\rho g \eta$ の無次元最大段波津波波圧をとったものである。この最大段波津波波圧は衝撃段波津波波圧を除くその他の波圧に比べて非常に大きな波圧値を示す。この波圧は海岸堤防を越流するときの段波津波の形状によっては衝撃段波津波波圧と同等の値を示す特徴がある。しかし最大段波津波波圧は全ての条件において大きい値を示すわけではなく、海岸堤防の形状および越流時の波形によっても複雑に変化する。そこでこの波圧を現在津波に対する沿岸構造物設計に奨励的に使用されている谷本ら(1984)の式との比較を行った。すると図-7に示すように谷本らの式を大幅に上回ることがわかった。図-8に海岸堤防前面での無次元最大段波津波波圧分布を示す。構造物前面での波高 η_{max} を対象とした最大波圧の評価は、護岸を越流した後構造物に作用する波圧式を提案している朝倉ら(2000)の式がある。朝倉らによると構造物前面での最大波圧は静水圧に対して3倍以内で収まるとしているが、本実験での最大段波津波波圧では収まりきらない。全体の傾向では z/η_{max} の値が減少するにつれて $P_{dm}/\rho g \eta_{max}$ の値は大きくなる傾向がある。本研究においては海岸堤防下部付近は海岸堤防上部に比べてかなり大きな波圧が発生していることがわかった。また沖合波高および構造物前面での段波津波波高を基準とした最大持続波圧は1/30, 1/50勾配の実験条件で有川ら(2005)によって行われている。有川ら(2005)の実験では沖合波高を対象としたときは谷本ら(1984)の提案式に従い、また海岸堤防前面での波高を対象とすると静水圧に従うとしている。本研究においては沖合波高・海岸堤防前面波高を対象とした無次元鉛直分布では谷本ら(1984)の提案式では収まらない。また全体的に海岸堤防下部において既往の提案式よりも大きな値を示す。また海岸堤防前面での波高を対象とした最大持続波圧も静水圧よりも大きな値を示した。

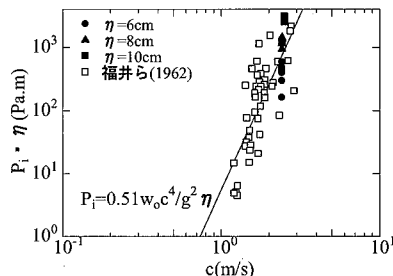


図-6 衝撃段波津波波圧の既往結果との比較

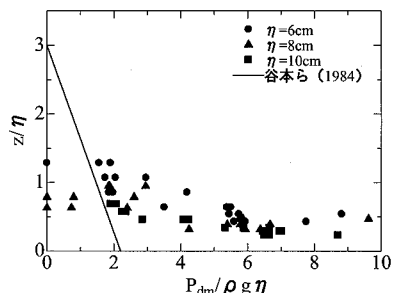


図-7 無次元最大段波津波波圧の無次元鉛直分布

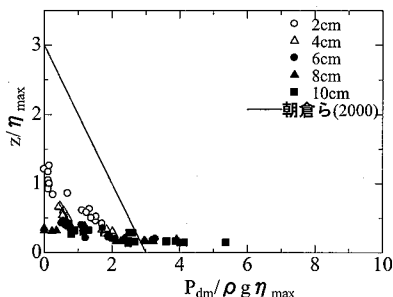


図-8 無次元最大段波津波波圧の無次元鉛直分布

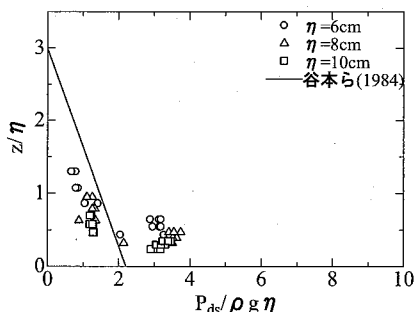


図-9 無次元最大持続波圧の無次元鉛直分布

(5) 最大段波津波波圧と最大持続波圧の関係

図-10に最大段波津波波圧と最大持続波圧の関係を示す。有川ら(2005)は斜面勾配が1/30, 1/50勾配の実験条件、全波圧の最大値である最大津波波圧 P_{max} と最

大持続波圧 P_{ds} の関係を実験結果により示している。その関係は 1/30, 1/50 勾配の実験で $P_{max}=1.17P_{ds}$ および $P_{max}=1.27P_{ds}$ としている。また本研究においては最大段波津波波圧と最大持続波圧の関係は $P_{dm}=1.97P_{ds}$ の関係を示した。図-10 の点線括弧内は、最大段波津波波圧と最大持続波圧の関係が平均値よりも大きな値を示したものである。最大段波津波波圧は最大持続波圧との関係において、周囲の平均的な波圧値に対し点線部内のような非常に大きな波圧値を示す傾向があり、有川ら (2005) の 1/30 実験においても確認されている。この点線括弧内の波圧は、すべての実験パターンで発生しているわけではないが、他の最大段波津波波圧の平均的な値に比べて非常に大きな波圧であるため、今後発生条件を解明する必要がある。

4. 防波堤設置による津波への影響

現在までに日本では沿岸域に数多くの防波堤が設置されている。しかし防波堤を越流した津波に関して、津波がどのような変化をしているのかは明らかにされていない。そこで防波堤 ($h_{cb}=3$ cm) を越流した後の汀線付近での波高、波速および海岸堤防に作用する波圧の低減率を 2. と同等の実験ケースを用いて全 50 ケースの実験を行った。また防波堤の堤体幅は実際の防波堤に比べて 1/10 以下と考えられるが波圧の低減効果を調べる目的では問題がないと考える。防波堤の設置状況を図-11 に示す。

(1) 防波堤設置による段波津波波圧の低減率

図-12 は防波堤設置の有無の条件での海岸堤防に作用する段波津波波圧の関係を示したものである。最大持続波圧に関しては η/h_{cb} がおよそ 2 から 3 の場合では波圧の低減比はおよそ半減するが、3 を越えると最大持続波圧の低減比も 2 割程度低下することがわかった。最大段波津波波圧の場合は、 η/h_{cb} が 2.67 の場合には最大持続波圧と同等の比率を示すが、最大持続波圧の場合とは異なり、沖での津波の波高が増加していくにつれて低減比は増加する。衝撃段波津波波圧の場合は他の段波波圧に比較すると、沖での波高が小さいほど、低減率は著しく増加し、沖での津波波高が増加するにつれて低減比は著しく減少する。インド洋津波では、モルジブにおいて日本から資金援助を受け建設された防波堤が津波に対して被害を低減させたということが現地調査により確認されている。また有川ら (2005) の研究によると津波の沿岸域における家屋倒壊被害には衝撃性波圧が関係していると推測されている。モルジブにおいて津波による家屋被害が減少した理由の一つとして、本研究により得られた結果から防波堤設置による衝撃段波津波波圧の減少があったことが理由の一つとして考えられる。

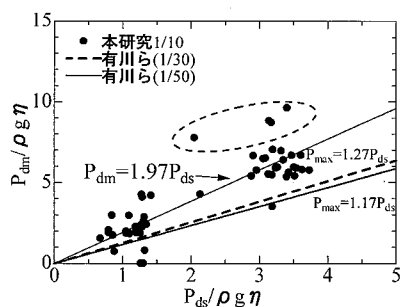


図-10 各勾配における P_{dm} と P_{ds} の関係

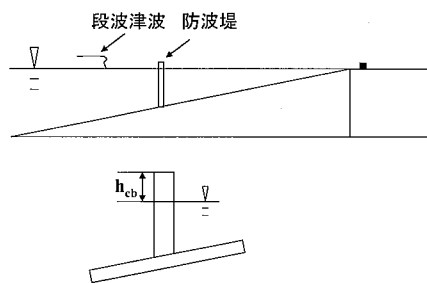


図-11 防波堤の概要図 単位(m)

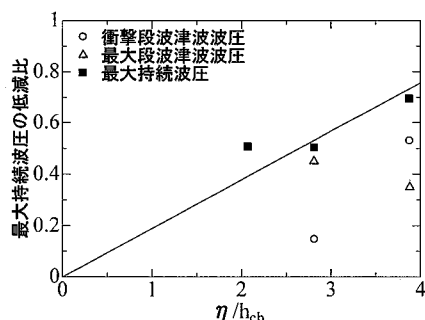


図-12 防波堤設置による段波津波波圧の低減比

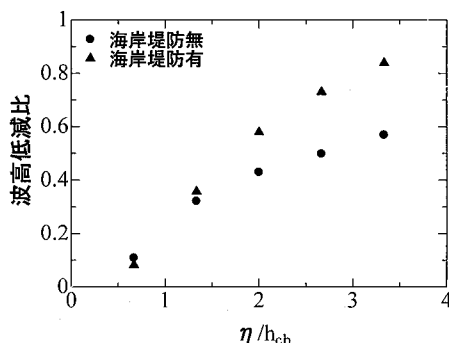


図-13 防波堤設置による波高の低減比

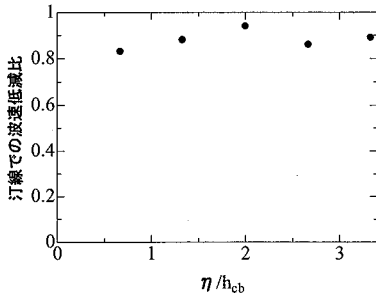


図-14 防波堤設置による波速の低減比

(2) 防波堤設置による波高・波速への影響

浸水災害に関して、浸水深の影響は非常に大きい。津波の場合に関しても浸水高の増加と津波被害の関係は比例関係にある。また沿岸構造物において構造物前面での打ち上げ高さは沿岸構造物設計時に非常に大きな影響を与え、沿岸構造物背後の越波量との関係にも大いに影響する。

津波は長波であり、その特徴として水面から海底まで同等の流速で流れているという特徴ある。特に沿岸域の水深の浅い場合には特に顕著になる。

図-13に防波堤を越流した後の訂線における波高、図-14に防波堤を越流した後の訂線における波速の低減率を示す。訂線に海岸堤防設置の有無の違いにより、海岸堤防を設置していないほうが低減比が小さいことがわかった。また波速に関しては低減比が0.8からほぼ1の関係を示しており、防波堤設置による波速の低減効果はあまり大きくないことがわかった。

5. ま と め

今回、急勾配斜面を遡上した後の海岸堤防に作用する段波津波の波圧を測定した。さらに海岸堤防の前面の斜面上に防波堤を設置し、防波堤による津波波圧の低減効果について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

1) 今回の実験では段波津波の波頂が海岸堤防前面を越流するとき、瞬間であるが海岸堤防に大きく作用する波圧を確認した。

- 2) 最大段波津波波圧と最大持続波圧は、現在津波設計に奨励的に使用されている谷本らの算定式と比較すると過小評価になることがわかった。
- 3) 衝撃段波津波波圧の値は沖での津波波高を基準とすると、海岸堤防前面が水平床または傾斜勾配であろうがほぼ同等の値を示す。
- 4) 防波堤を設置すると最大持続波圧、防波堤背後の波高は減少するが、波速はあまり減少しない。

参 考 文 献

- 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(2000): 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.
- 有川 太郎・池辺将光・山田文則・下迫建一郎・今村文彦(2005): 護岸・陸上構造物に対する津波力の大規模実験, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 746-750.
- 有川 太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫建一郎・高橋重雄・今村文彦・松富英夫(2006): 遡上津波力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 796-800.
- 合田良實(1997): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 104-107.
- 谷本勝利・鶴屋広一・中野 晋(1984): 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, 海岸工学論文集, 第31巻, pp. 257-261.
- 福井芳郎・白石英彦・中村 充・佐々木康雄(1962a): 津波の研究(I) - 段波津波の波速について -, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 44-49.
- 福井芳郎・白石英彦・中村 充・佐々木康雄(1962b): 津波の研究(II) - 段波津波の堤防におよぼす影響 -, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 50-54.
- 松富英夫, 首藤伸夫(1994): 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 第41回海岸工学論文集, pp. 246-250.
- 水谷 将・今村文彦(2002): 津波段波の衝撃性および越流を考慮した設計外力算定フローの提案, 第49回海岸工学論文集, pp. 731-735.
- 水谷 将・今村文彦(2000): 構造物に作用する段波波力の実験, 第47回海岸工学論文集, pp. 731-735.
- 村上啓介・村上真章・山口俊朗(2005): 直立護岸を遡上越流する段波津波の特性と浸水深および流速の制御について, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 151-156.