

防潮堤に作用する津波に対する海岸砂丘の効果に関する実験

Experimental Study on the Effect of Coastal Dune against Tsunami Action to Seawall

奥谷哲也⁽¹⁾・岩田奏⁽¹⁾・平石哲也

Tetsuya OKUTANI⁽¹⁾, So IWATA⁽¹⁾ and Tetsuya HIRAISHI

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University, Japan

Synopsis

It is necessary to consider coastal dunes in the design of anti-tsunami structures such as seawalls. This experiment has been conducted in Tsunami Generator in DPRI. We have measured the pressure on the seawall induced by 2 types of tsunamis. They were reproduced in different ways, and defined as solitary wave and long wave. The solitary wave has a short duration and steep peak, and the long wave is a current flow accompanied by the long duration. Then, we have investigated the reduction effect of dune topography and the influence of suspended sediment against wave force. Against the wave force by the solitary wave, coastal dune has had the mitigation effect by reducing both of flow velocity and inundation depth. However, coastal dune did not affect the force by long wave. Besides, seawall has been received larger pressure and force in the case that the sediment from the dune is concentrated in the tip region of wave.

キーワード: 水理実験, 津波波圧, 津波波力, 海岸砂丘, 防潮堤, 孤立波

Keywords: hydraulic experiment, tsunami pressure, tsunami force, coastal dune, seawall, solitary wave

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際には、設計時の想定以上の規模の津波により多くの沿岸構造物が被災した。そのため、近い将来発生することが想定される南海トラフ地震に伴う巨大津波に備えて、防潮堤等のハード整備が必要とされている。その上で、海岸砂丘は我が国の沿岸の総延長のおよそ7%（総延長約1900km）で発達しているとされている地形であり（成瀬，1989），防潮堤整備の際には考慮する必要がある。既往の研究では、海岸砂丘の存在が津波の被害に及ぼす影響に関して、浸

水深や構造物に作用する波圧・波力の観点から検討がなされている。前川ら（2013）の調査では、海岸砂丘による背後地における浸水深の低下が確認され、浸水深と同程度の砂丘高さがあれば家屋の被害も軽減されることが明らかになっている。松山ら（2015）は、長周期を有する波を用いた実験により、前面に盛土を有する防潮堤に作用する津波波力を計測しており、最大波力に及ぼす盛土の影響は小さいことを示している。その一方で、中村ら（2018）は数値シミュレーションを行い、浮遊砂の存在によって水塊密度の増加分以上に、サージフロント波圧が増大することを示している。

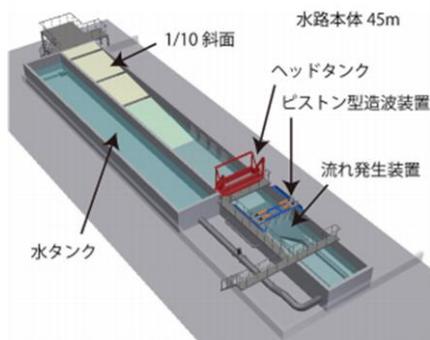


Fig. 1 Bird's eye view of Tsunami Generator

以上のことから、海岸砂丘には津波時における越流量の低減等の減災効果がある一方、砂丘由来の浮遊砂の存在が波力の増大に繋がり、背後の構造物が受ける波力が増大する可能性がある。そこで本研究では、水理実験により津波波力に対する砂丘地形の効果、および浮遊砂による波力の増大の2点について検討を行う。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究では、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの津波再現水槽を使用した。水槽の鳥観図をFig.1に示す。津波再現水槽は長さ45m×幅4m×高さ2mの実験水路であり、ピストン式造波装置、落下式水槽、流水ポンプの3種の造波装置を有している。これらを個々あるいは組み合わせて使用することによって様々な波および流れを発生させることができる。また、水路床から水路端に向かって勾配斜面を有しており、海岸線における碎波の状況や汀線を越えて津波が陸上を遡上する現象を再現することができる。

2.2 実験条件

水路の断面図をFig. 2、実験条件をTable 1に示す。本研究では、汀線から1375mm陸上に設置した高さ250mmの防潮堤に、陸上を遡上した津波を衝突させ、作用する波圧の計測を行った。

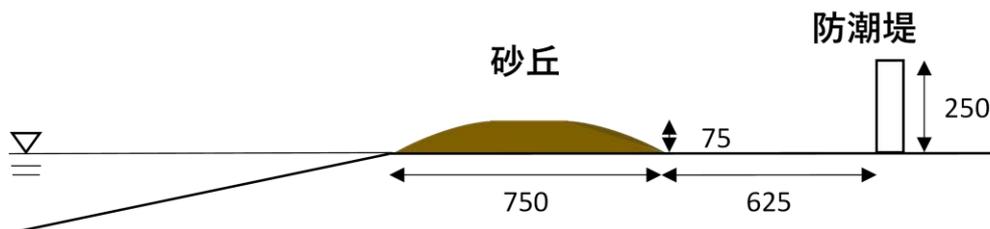


Fig. 2 Cross-section of experimental channel (mm)

Table 1 Experimental condition

	波浪(H=12.5cm)	珪砂粒径	表記
砂丘なし	孤立波	-	NS
	長波	-	NL
固定床(コンクリート砂丘)	孤立波	-	FS
	長波	-	FL
移動床	孤立波	$d_m=0.20\text{mm}$	MS
	孤立波	$d_m=0.11\text{mm}$	MS'
	長波	$d_m=0.20\text{mm}$	ML

汀線から防潮堤までの地形は、砂丘なし、固定床、移動床の3条件とした。砂丘なしの条件は防潮堤前面が平坦な地形の条件であり、固定床および移動床の条件は、防潮堤前面にそれぞれコンクリート製、珪砂製の砂丘を設置した実験である。砂丘は長さ750mm、幅1350mm、高さ75mmであり、海側の端は汀線である。砂丘なしと砂丘ありを比較することにより砂丘地形の影響、固定床と移動床を比較することにより浮遊砂の影響を調べた。なお、移動床-孤立波の実験においては、中央粒径0.20mmの6号珪砂と0.11mmの7号珪砂をそれぞれ用いた2種類の実験(MS, MS')を行っている。砂丘なしの条件については3試行、固定床および移動床の条件については5試行ずつ実験を行った。

本実験では2種類の異なる方法で津波を作成しており、それぞれ孤立波、長波と定義した。Fig. 3に造波装置の模式図、Fig. 4に斜面上における波形を示す。沖合の水深は80cmであり、孤立波と長波の入射波高はいずれも12.5cmである。孤立波と定義した波はピストン式造波装置によって造波される単発の孤立波であり、継続時間がおよそ3.0sの急峻な波である。長波は、入射波高4.1cmの孤立波と流れ発生装置による水位上昇を同時に発生させることによって発生させた津波流であり、汀線における波高は約22cm、継続時間は約60sである。

2.3 計測装置

計測装置の位置をFig. 5に示す。本実験では波高計、流速計、圧力計、および珪砂製砂丘から流出した土砂の密度を調べる濁度計を導入した。

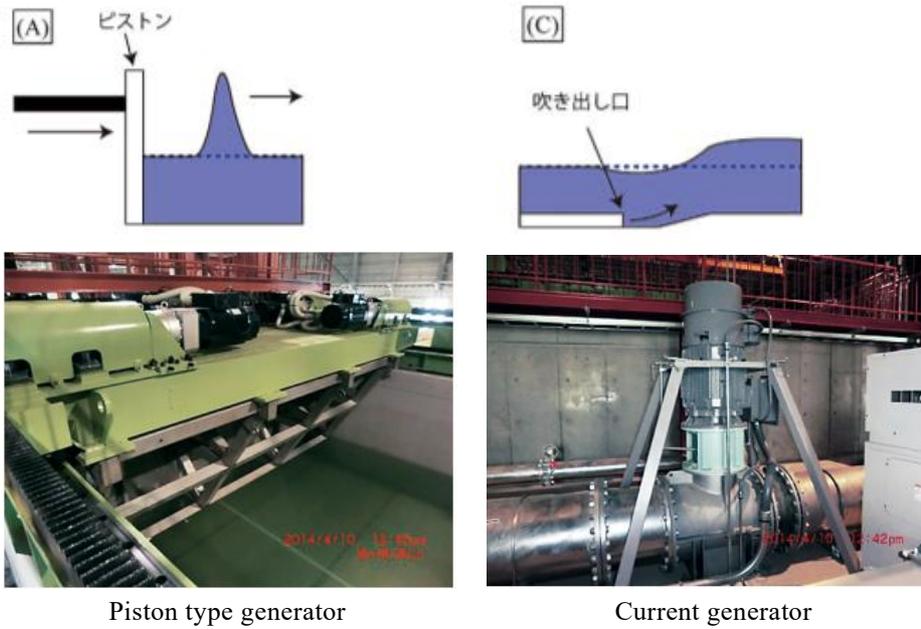


Fig. 3 Wave generators

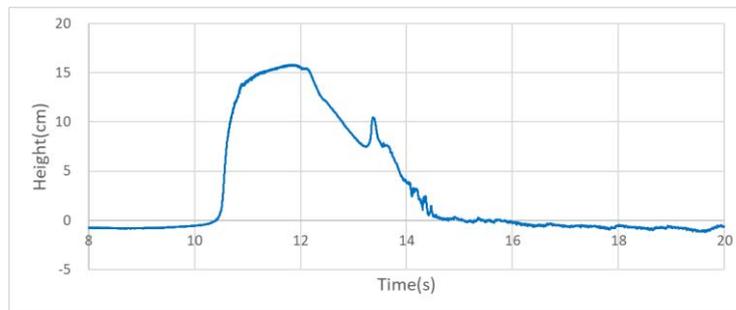


Fig. 4 (a)Profile of solitary wave (WG-6)

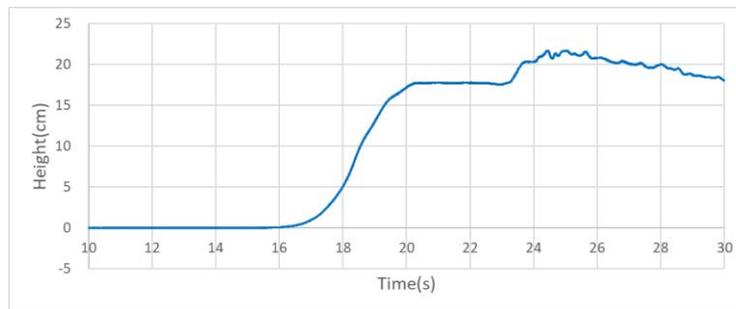


Fig. 4 (b)Profile of long wave (WG-6)

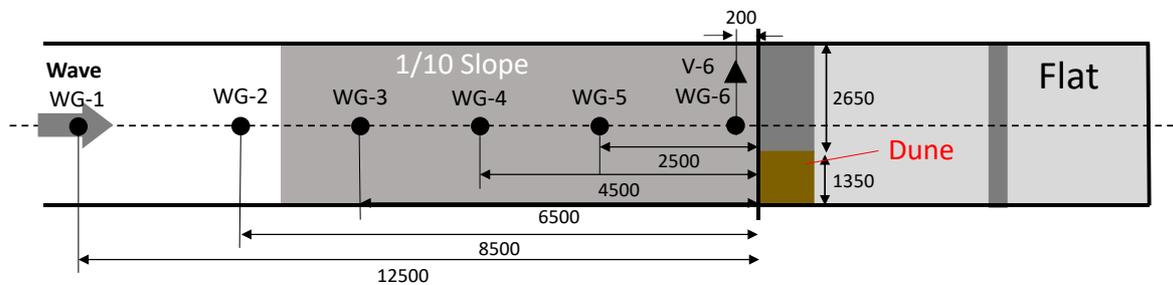


Fig. 5 (a)Measuring devices offshore

波高に関しては、水路内にWG-1~6、水平床上に WG-7,9,10の計9器の容量式波高計を設置した。また、

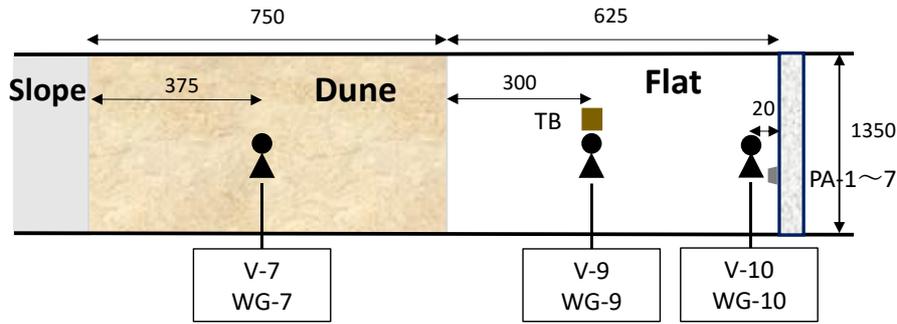


Fig. 5 (b) Measuring devices onshore

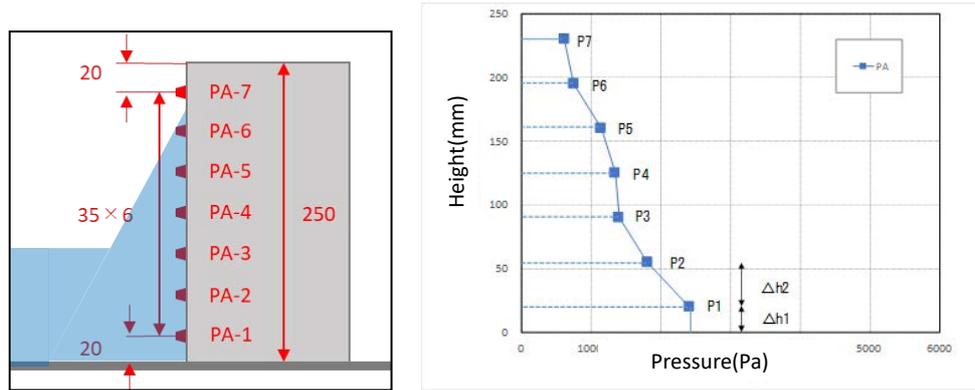


Fig. 6 Pressure gauge and schematic diagram of formula for wave force computation

WG-6~10の位置にはプロペラ式流速計各1基 (V-6~10) を併せて設置している。波圧に関しては, Fig. 6に示すように防潮堤模型の前面に小型圧力計 (型式: PS-05KC, 容量: 50kPa) を鉛直方向に7つ並べて設置した。圧力計は下からPA-1, PA-2, ..., PA-7とし, 計測された波圧を式(1)に従って鉛直方向に積分することにより津波波力を算出した。

$$F = P_1 \times \Delta h_1 + \sum_{i=1}^6 \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \times \Delta h_2 \quad (1)$$

$$\Delta h_1 = 2.0\text{cm}, \Delta h_2 = 3.5\text{cm}$$

さらに, 移動床の実験においては, WG-9の位置に濁度計を設置し, 砂丘由来の浮遊砂の濃度を計測した。データのサンプリング間隔はいずれも1msであり, 1秒間あたり1000個のデータを取得している。

3. 実験結果

本実験で得られた結果を基に, 孤立波および長波の波圧・波力特性, 砂丘地形の影響, 浮遊砂の影響の3点から検討を行う。その上で, 波圧の特性は砂丘の有無で大きく変化しなかったため, 3.1では代表として, FS (固定床-孤立波) およびFL (固定床-長波) で確認された特性について述べる。なお, 波圧および波力は0.01s間隔で平均化した値を用いている。

3.1 波圧および波力の特性

(1) 既往の研究結果

本実験の評価を行う上で参照した津波段波の波圧特性に関する既往の研究についてまとめる。Chanson (2006,2009) によって, 陸上を遡上する津波の挙動はダム崩壊流れで再現可能であるとされており, ゲート急開によって発生させたダム崩壊流れが構造物に作用した際の波圧を求める実験および数値計算が行われている (福井ら, 1962, Kihara et al., 2015, 木原ら, 2016など)。福井ら (1962) は, 段波津波が堤防に及ぼす波圧は, 衝突時の動波圧とそれに続く持続波圧に区別されることを示している。木原ら (2016) においては, 段波波圧の推定方法を示す上で, 段波波圧の中でも衝突直後に発生するパルス状の大きな圧力を「衝撃段波波圧」, それに続く段波波圧を「段波波圧」とする区別がなされており, これに重複波圧を加えた3段階で波圧の特性が変化することが明らかになっている。

また, 一般に構造物設計においては, 津波段波による流体力は式(2)で評価されている (FEMA, 2000)。

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_D V^2 h b \quad (2)$$

ここで, ρ_w : 水の密度, C_D : 抗力係数, V : 遡上流速, h : 浸水深, b : 幅である。矩形断面の構造物を対象とした抗力係数としては, 準静的な波圧に対し

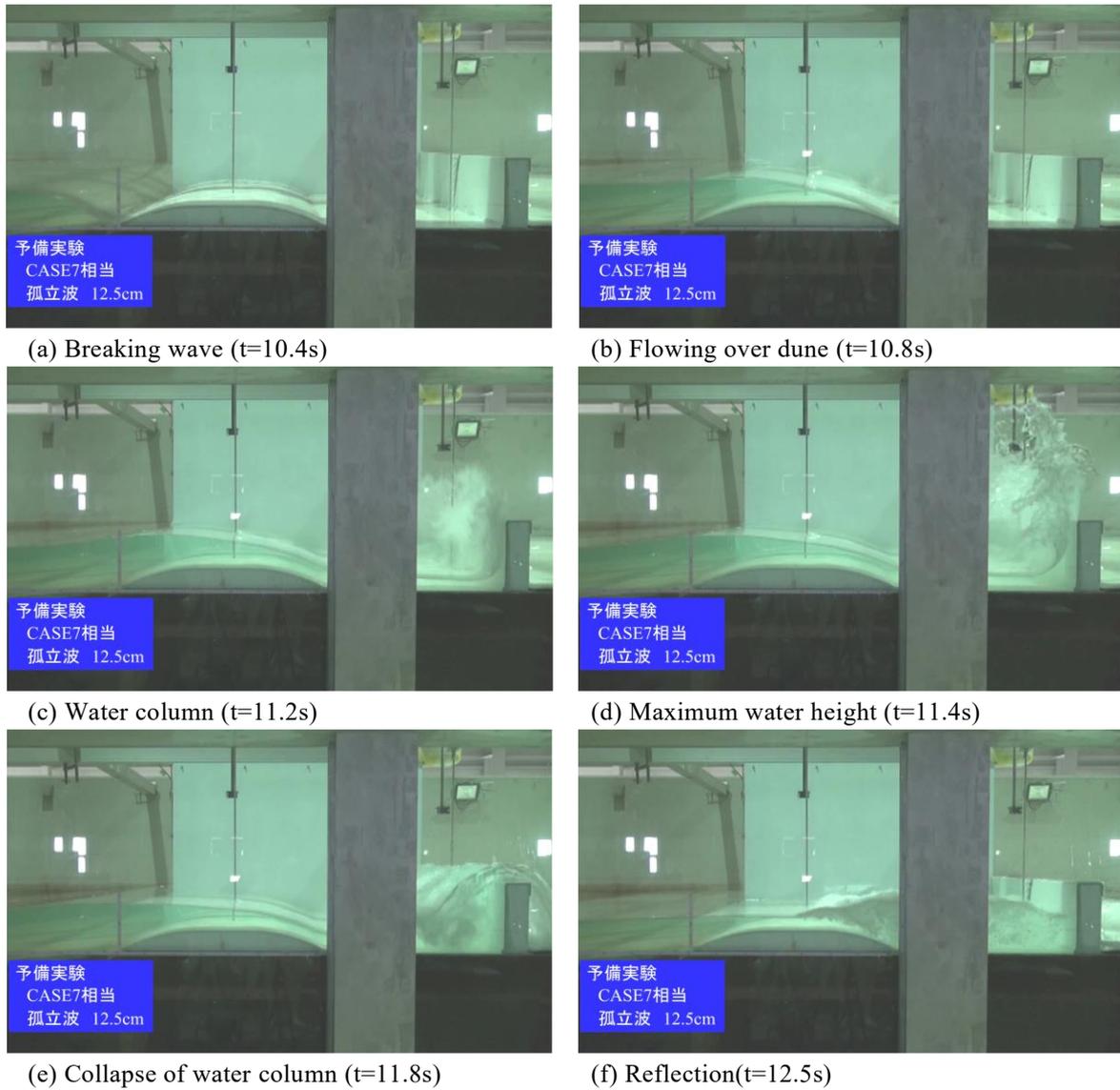


Fig. 7 Snapshot of FS (Fixed bed/Solitary wave) case

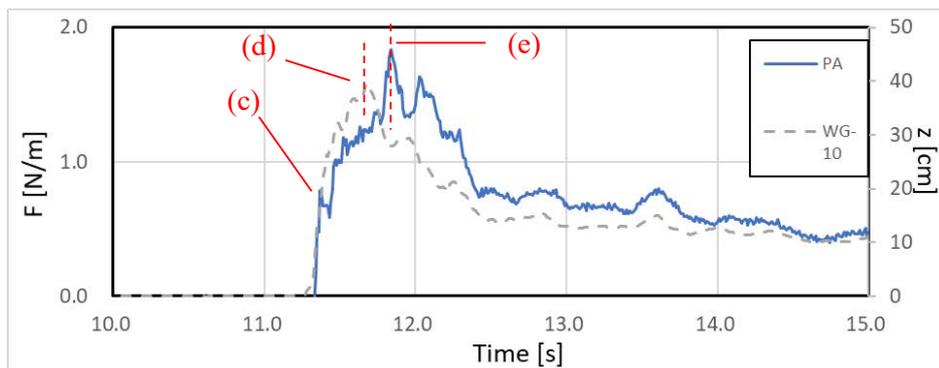


Fig. 8 Time history of wave force and WG-10

て $C_D = 2.0$ (Arason et al., 2009), 段波波圧に対して $C_D = 3.0$ (Yeh, 2006など) が提案されている。

(2) 孤立波の波圧特性

Fig. 7にFS (固定床-孤立波) の実験のスナップショット, Fig. 8にWG-10と波力の時間変化, およびFig.

9に各時刻における波圧分布を示す。時刻は孤立波が造波された時刻を0sとしている。斜面上で砕波した孤立波 (Fig. 7 (a)) は, 段波状となって砂丘上を通過し(b), 防潮堤に衝突した(c)。段波の衝突時, 水塊が跳ね上がることで, 浸水深 (5cm) の8~9倍の高さの水柱が発生した(d)。その後, 水柱は崩壊し(e), 小

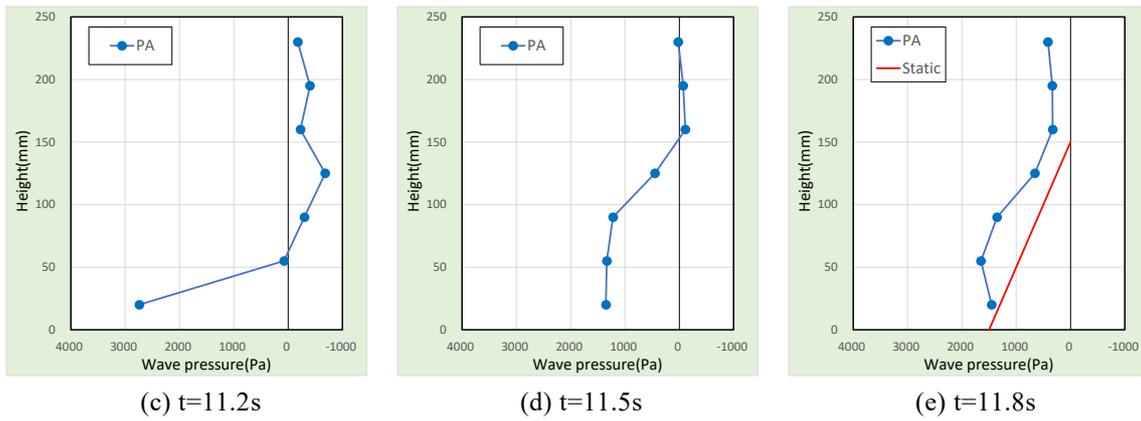


Fig. 9 Pressure profile of solitary wave

小さな気泡を多く含む反射波となった(f).

波力に関しては、孤立波の衝突時に衝撃段波波圧が計測されている (Fig. 8 (c)) が、堤体の底面近傍に局所的にしか作用しないため (Fig. 9 (c))、波力としては小さなピークを取るのみであった。(d)は水柱の発生により堤体前水位が最大となった時刻である。この時、水位は45cmまで上昇しているが、Fig. 9の波圧分布をみると有意に波圧が作用している高さは $z=15\text{cm}$ 程度までであることがわかる。水柱の崩壊時(e)には、静水圧に加えて落下した水塊による動的な力が作用したことで、全時間において最大の波力が発生した。グラフ中には水柱の崩壊までに有意に波圧が作用していた高さ($z=15.0\text{cm}$)における静水圧分布を示している。(e)における波圧分布は、静水圧分布に比べて動圧の寄与が大きいことから、本実験

における最大波力は段波波圧によるものであると考えられる。上記の結果はKihara et al. (2015)のダム崩壊流れを用いた大規模実験における、津波段波の衝突～水柱の崩壊の現象と類似している。一方で、本実験の孤立波は継続時間がおよそ3.0sと短いため衝突からおよそ1.0sで沖方向の流れが発達し、堤体前に水が停滞しなかった。そのため、ゲート急開による実験のような重複波圧による顕著な波力は発生しなかった。

したがって、本実験における孤立波の最大波力は、動的な波圧と静的な波圧両方の性質を有しており、評価する上では水位と流速の両面を考慮することが適当であると考えられる。

(3) 長波の波圧特性

Fig. 10にFL (固定床-長波)の実験のスナップショット

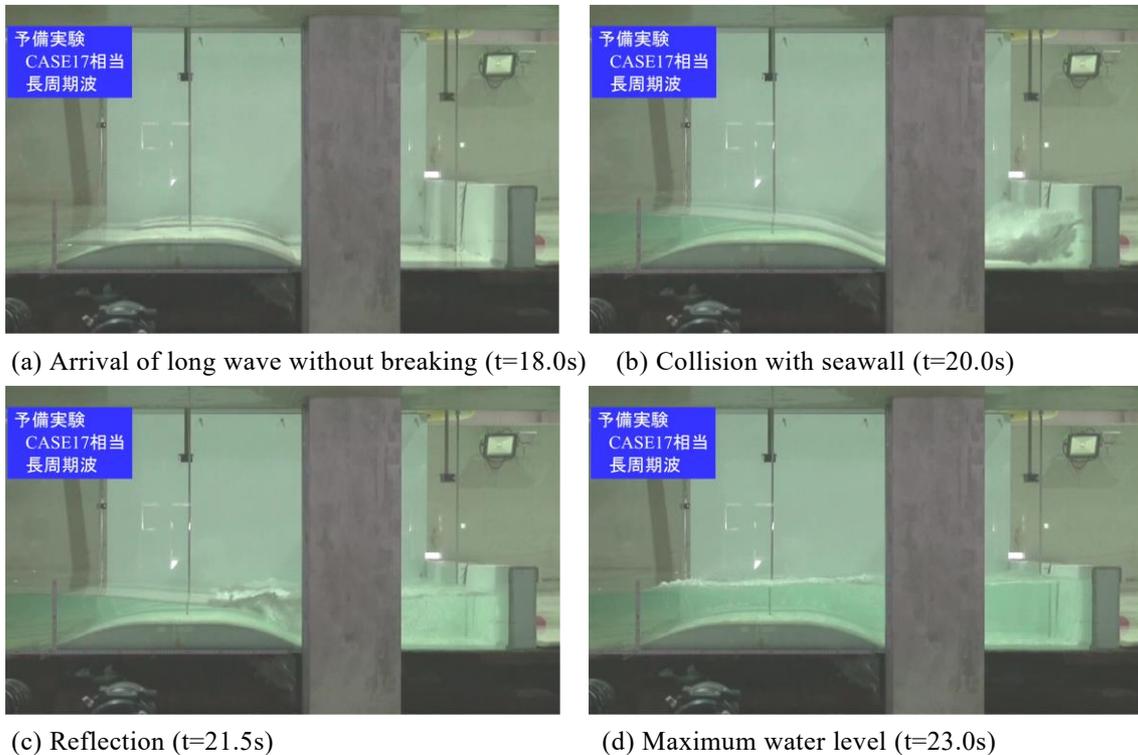


Fig. 10 Snapshot of FL (Fixed bed/Long wave) case

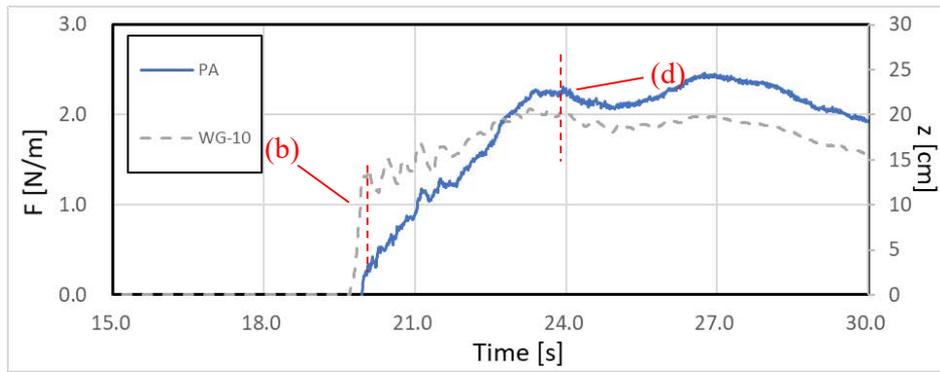


Fig. 11 Time history of wave force and WG-10

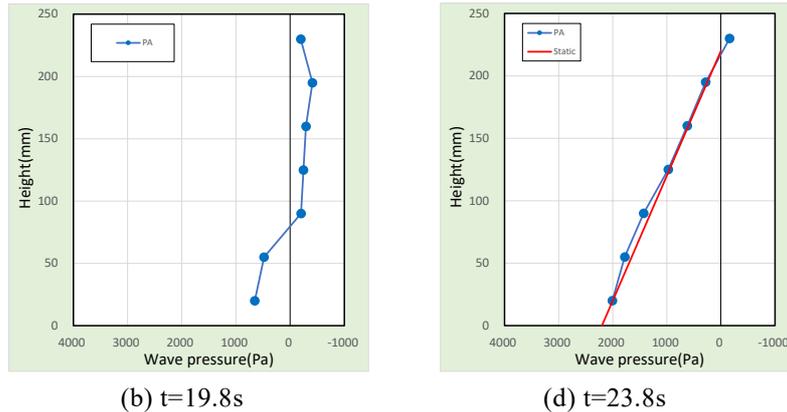


Fig. 12 Pressure profile of long wave

ット, Fig. 11にWG-10と波力の時間変化, およびFig. 12に各時刻における波圧分布を示す. 60sの長い継続時間を有する長波は, 砕波することなく比較的緩やかに砂丘上を遡上し (Fig. 10(a)), 堤体前まで到達した(b). 到達後は防潮堤から沖へ向かう反射流れが発達し(c), その後堤体前の水位が最大となった(d).

波力に関しては, 衝突時(b)における波圧および波力は小さく, 波力のピークは見られない. 波力が最大となる時刻は堤体前の水位が最大となる時刻と一致した(d). Fig. 12 (d)には最大浸水深 ($z=22.0\text{cm}$)の静水圧分布を示しており, 波圧分布が静水圧分布と類似した形状であることが確認される. このことから長波による最大波力は堤体前に溜まった水塊による静的な力であることが想定される. したがって, 長波の最大波力を評価する上では, 浸水深のみを考慮することで検討可能であると考えられる.

3.2 砂丘形状の影響

本節では, 砂丘の有無による波力最大値の変化を調べ, 砂丘形状が防潮堤に作用する津波波力に及ぼす影響について検討を行う.

(1) 孤立波における影響

Fig. 13に孤立波を用いた実験における最大波力を示す. グラフ内の縦軸には平坦地形の場合(NS)の波力で無次元化した無次元波力を示している.

$$F^* = F/F_{NS}$$

この結果から, いずれの材質においても, 砂丘地形がある場合に波力が低減されていることが確認される. また, その割合は二〜三割であった. なお, FSよりもMSおよびMS'の方が波力が大きい傾向にあり, 浮遊砂によって波力が增大することが想定される. 浮遊砂の影響については後の3.3で検討を行う.

Fig. 14に(a)WG-9, (b)WG-10における最大水位, および(c)V-9における最大流速を示す. (a)および(c)は防潮堤から325mmの砂丘側の水平床上における計測結果であり, 砂丘が存在する場合 (FS) に, 最大浸水深および遡上流速が低下していることが確認される. (b)の堤体前水位を計測したWG-10においては, FSの方が大きな浸水深が計測されているが, これは孤立波が防潮堤に衝突して跳ね上がった際の最高点

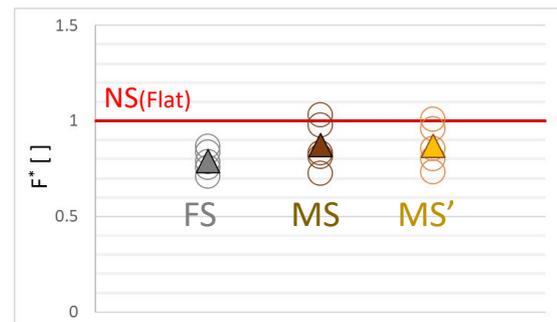
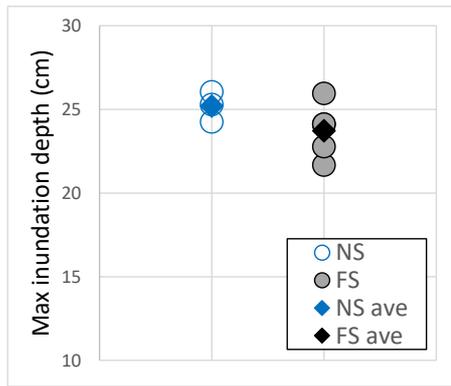
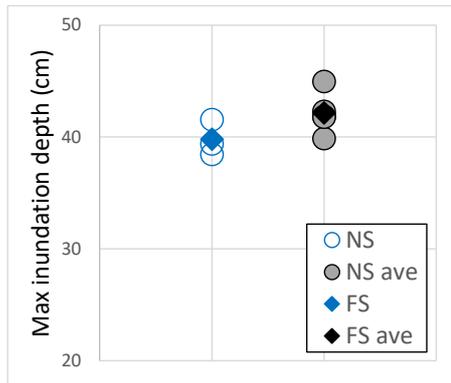


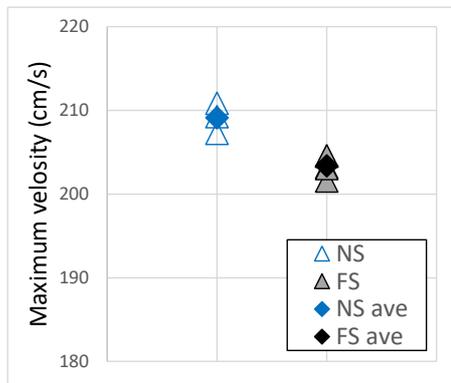
Fig. 13 Maximum force normalized by NS



(a) WG-9



(b) WG-10



(c) V-9

Fig. 14 Comparison of NS and FS

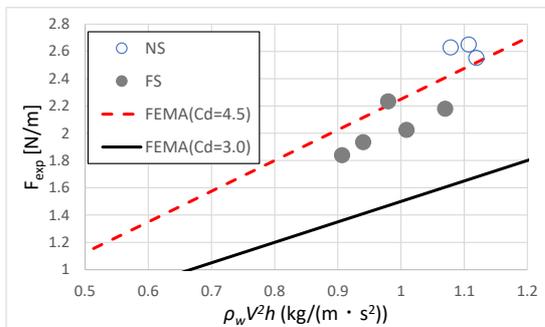


Fig. 15 Evaluation by kinetic energy

が計測されており、前述したように波圧が有意に作

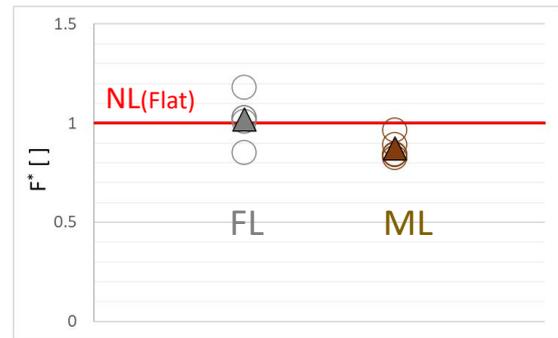


Fig. 16 Maximum force normalized by NL

用する高さはこの1/3程度であるため、堤体前の最高水位と波力との関連性は確認されなかった。

次に、WG-9およびV-9の計測結果から、FEMA(2000)の波力算出式(式(2))に合わせて運動エネルギー($\rho_w V^2 h$)を算出した。Fig. 15に算出された運動エネルギーと波力の関係を示す。図中の直線はFEMAの式から算出される値を示している。Yehらによって提案されている抗力係数 $C_D = 3.0$ (図中実線)の場合には過小評価となっており、実験値は上記の式において $C_D = 4.5$ とした場合(図中破線)とよく一致した。また、運動エネルギーと波力の間に線形関係が確認されたことから、砂丘が存在することによる浸水深と流速両方の低下が最大波力の減衰に繋がったものと考えられる。

(2) 長波における影響

Fig. 16に長波を用いた実験において計測された最大波力を示す。孤立波の結果と同様に、波力は平坦地形の場合(NL)の波力で無次元化している。

$$F^* = F/F_{NL}$$

この結果から長波に対しては砂丘による波力の減勢効果は小さいことがわかる。固定床(FS)に関しては、5試行中4試行で平坦地形の場合よりも波力が増加している。これは砂丘が存在することにより防潮堤前の水が沖合に流れ出にくくなったためであると考えられる。Fig. 17にWG-10における水位変化を示す。この結果から、砂丘の存在によって長波先端部の水位は低下されるものの、一定時間(3.0s程度)が経過すると水位が上昇し、最大波力は減衰されていないことがわかる。

3.3 浮遊砂の影響

Fig. 18に濁度の時間変化を示す。計測結果から、本実験においては孤立波、長波ともに砂丘由来の土砂は波の先端部分にのみ含まれていることが明らかとなった。そのため、到達から有意な波力の発生まで時間を要する長波の実験に関しては、浮遊砂が波力に及ぼす影響を確認できなかった。よって、本節では孤立波にのみ着目して検討を行う。

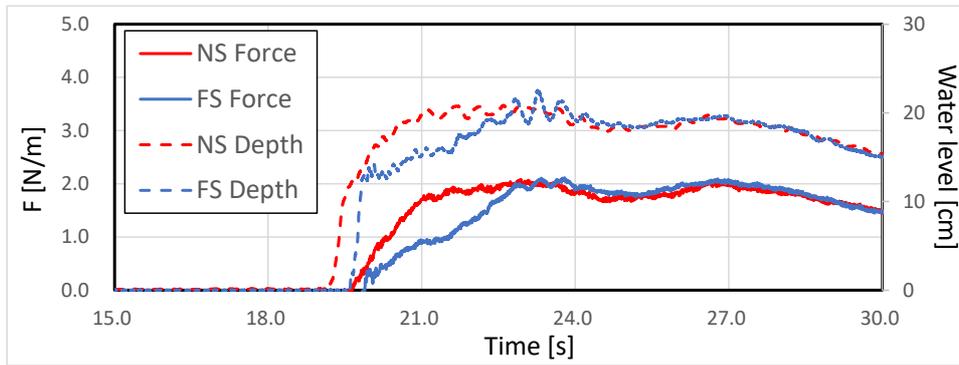


Fig. 17 Time history of PA and WG-10 in NS and FS

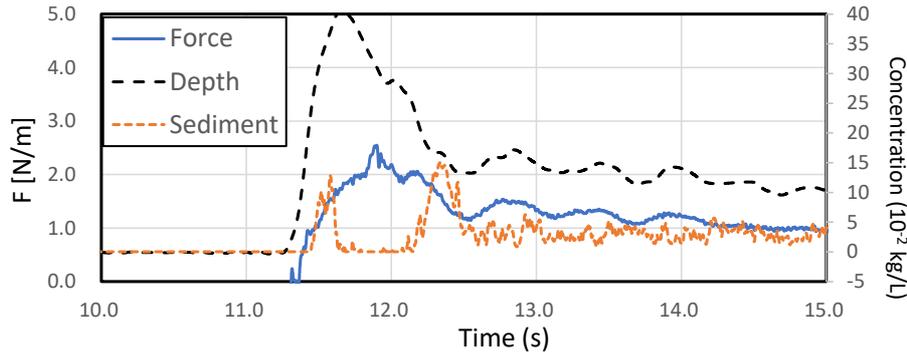


Fig. 18 (a) Time history of turbidity in solitary wave case

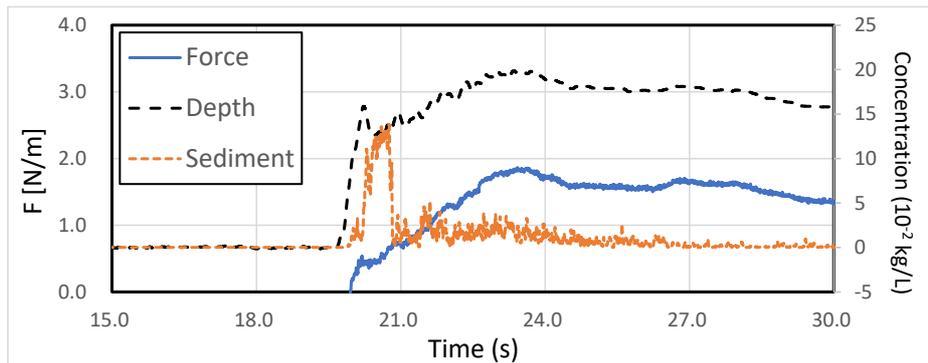


Fig. 18 (b) Time history of turbidity in long wave case

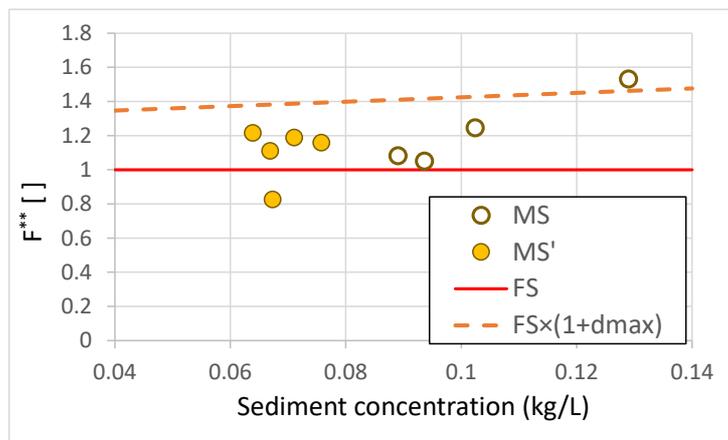


Fig. 19 Evaluation by sediment concentration

Fig. 18(a)のように、孤立波に含まれる土砂の濃度は二つのピークを有していた。これらのうち、一つ

目のピークは孤立波の到達時に砂丘から巻き上げられた土砂が計測されたものであり、二つ目のピーク

Table 3 Summary of experimental results

	波力の特性	砂丘地形	浮遊砂
長波	堤体前の水位上昇による静水圧.	影響なし (津波先端部の水位は低下したが、最大波力は減勢されず)	影響なし (浮遊砂が波の先端部にのみ含まれていたため)
孤立波	堤体に衝突した際の動的な波力と、跳上がった水塊の落下による水位上昇.	砂丘を越えた後の流速Vおよび水深hの低下と、 V^2h に比例する波力の低下が見られた.	浮遊砂の存在により、波力が1.2倍程度まで増加するケースが多く見られた.

は防潮堤からの反射流れに含まれる土砂が計測されたものであった。そこで、浮遊砂の濃度と波力の関係を調べるために、一つ目のピークが生じる時刻における波力を比較することで検討を行った。

Fig. 19に最大土砂濃度とその時刻における波力の関係を示す。なお、縦軸はFS（土砂濃度0kg/L）の実験において計測された波力で無次元化した値である。

$$F^{**} = F/F_{FS}$$

グラフ中の破線は、水の密度を 1.0g/cm^3 として、土砂が含まれることによる密度増加を仮定したものである。すなわち、土砂による水塊密度の増加率に比例して波力が増大すると仮定した際の直線である。

まず、最大土砂濃度に関してはMS ($d_m = 0.20\text{mm}$)の方がMS' ($d_m = 0.11\text{mm}$)よりも大きい傾向にあった。これはMS'の方が空隙率が低く、土砂が移動し難かったためであると考えられる。次に、波力に関しては、浮遊砂を含む段波の衝突によって、波力の増大が確認され、MSおよびMS'の9試行中、6試行で水塊密度の増加分(破線)以上の波力が発生した。増大度合いは、土砂密度にかかわらず1.2倍程度のものが多く見られた。

4. まとめ

本研究では、防潮堤前面の地形およびその材質が異なる条件で実験を行い、防潮堤に作用する津波波力を調べる水理実験を行った。本実験から得られた結果をTable 3にまとめる。この結果から、以下のことが明らかとなった。

(1)孤立波の砕波によって再現した津波段波に関しては、砂丘地形が背後地における浸水深および流速を低下させることによる減勢効果が確認された。一方、砂丘由来の浮遊砂による波力の増大も確認されたものの、最大波力に関しては砂丘形状による波力低減効果の方が顕著であり、海岸砂丘は減勢効果を有すると考えられる。

(2)松山ら(2012)の研究でも示されていたように、

本実験においても継続時間の長い長波による波力の最大値に対しては、海岸砂丘の効果は見られなかった。

(3)本実験では、孤立波先端部が浮遊砂を含むことにより、防潮堤に作用する波力が1.2倍程度まで増大する現象が確認された。ただし、土砂濃度と波力の増大の間に明瞭な関係を確認することはできず、波力増大の要因となる物理現象を明らかにする必要があると考えられる。

参考文献

- 木原直人・甲斐田秀樹(2016)：直立壁に作用する段波波圧の推定方法，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.72，No.2，I_973-I_978.
- 中村友昭・中井裕斗・趙容桓・水谷法美(2018)：陸上構造物に作用する津波力に与える浮遊砂の影響に関する研究，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.74，No.2，I_210-I_215.
- 成瀬敏郎(1989)：日本の海岸砂丘，地理学評論，62 A-2，pp.129-144.
- 平石哲也・森信人・安田誠宏・東良慶・間瀬肇(2015)：京都大学防災研究所津波再現装置の特性，自然災害科学 J. JSNDS 34 -1 15 -21.
- 福井芳朗・白石英彦・中村充・佐々木泰雄(1962)：津波の研究(Ⅱ) 段波津波の堤防に及ぼす影響一，第9回海岸工学講演会講演集，pp.54-54.
- 前川俊明・二瓶泰雄・中田遥香(2013)：海岸砂丘・盛土による津波減災効果の検討，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.69，No.4，I_1453-I_1458.
- 松山昌史・内野大介・橋和正・田中良仁・榊山勉・仲村治朗・稲葉大輔(2012)：盛土を越流する津波に対する防波壁の効果に関する実験，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，I_236-I_240.
- Arnason, H., Petroff, C., Yeh, H. (2009)：Tsunami bore impingement onto a vertical column. J. Disaster Res. 4 (6), 391-403.

Chanson, H. (2006) : Tsunami surges on dry coastal plains: application of dam break wave equations. *Coast. Eng. J.* 48 (04), 355–370.

Chanson, H. (2009) : Application of the method of characteristics to the dam break wave problem. *J. Hydraul. Res.* 47 (1), 41–4

Federal Emergency Management Agency (FEMA), (2000) : FEMA Coastal Construction Manual. Publication Number FEMA55.

Naoto Kihara, Yasuo Niida, Daisuke Takabatake, Hideki Kaida, Atsushi Shibayama, Yoshinori Miyagawa (2015) : Large-scale experiments on tsunami-induced pressure on a vertical tide wall, *Coast. Eng. J.* 99, 46-63.

Yeh, H. (2006) : Maximum fluid forces in the tsunami runup zone. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 132 (6), 496–500.

(論文受理日 : 2021年8月5日)