

# 津波により海岸堤防に作用する波力に関する大型模型実験

加藤史訓\*・稲垣茂樹\*\*・福濱方哉\*\*\*

津波による堤内地の被害を最小化するためには、海岸堤防が津波の遡上に対して安定でなければならない。海岸堤防は砂浜の背後に設置されることが一般的であることから、斜面上での遡上波の変形を考慮して波力の評価を行う必要がある。そこで、孤立波を用いて縮尺1/10程度的大型模型実験を行い、津波により海岸堤防に作用する波力を評価した。その結果、碎波により瞬間的に大きな波圧が作用することが確認された。また、表のりの波圧は既存の算定式では過小評価となる場合があるが、越流による裏のりの波圧については水谷・今村(2002)の算定式で十分に評価できた。さらに、堤防の端部で波圧が著しく高くなることはなく、堤防の側面の波圧は波高相当の静水圧程度であった。

## 1. はじめに

津波による堤内地での被害を最小化するためには、海岸堤防が津波の遡上に対して安定でなければならない。津波の波力は海岸堤防の被災要因の一つであり、その照査方法の確立が望まれている。既往研究では、海中や陸上に設置された構造物に作用する波力が模型実験により評価されているが、構造物の海側を水平床としていることが多い。海岸堤防は勾配を有する砂浜の背後に設置されることが一般的であることから、このような斜面上での遡上波の変形を考慮して、波力を評価する必要がある。また、垂直壁を対象とした既往研究の成果は、傾斜堤の波圧算定にそのまま適用することはできない。

本研究は、堤防に作用する津波の波力を評価するため、堤防上の波圧を明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験諸元

図-1のように、長さ140m、幅2m、深さ5mの水路に固定床の斜面(海域:1/20勾配、陸域1/100勾配)を造成し、縮尺1/10程度の堤防模型(堤脚からの天端の高さ0.5m、天端幅0.4m)を設置した。堤防模型には、表-1のように、水路を完全に締め切るType1~4と、河口部等を想定して水路を半分仕切るType5を設定した。

Type1~4では、図-2のように、堤防の表のり、天端、裏のりと堤防背後の斜面に約0.1m間隔で波圧計を23個配置した。Type5では、図-3のように、堤防の端部および側面に波圧計を集中させた。波圧のサンプリング周期は、衝撃的な波圧も測定できるように、水谷・今村(2000)に従って0.002sとした。波圧計のほか、堤防の周辺を中心に容量式波高計と流速計を設置し、堤防の陸

側に設置された波高計で得られた水位から越波量を推定した。

潮位は、堤防前面の浜の有無を考慮して、表-2に示す5条件を設定した。潮位3.8mの場合に、汀線は堤脚に位置する。Type1~4については、5条件の潮位を3条件の孤立波と組み合わせて、各模型について15ケースの実験を行った。一方、Type5については、表-2に示す3ケースの実験を行った。

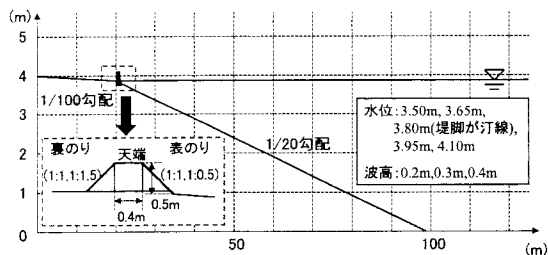


図-1 模型断面図

表-1 模型諸元

Type	幅 (m)	表のりの勾配	裏のりの勾配
1	2	1:1	1:1
2	2	1:1	1:1.5
3	2	1:0.5	1:1
4	2	1:0.5	1:1.5
5	1	1:0.5	1:1

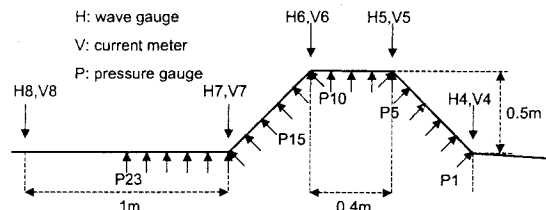


図-2 計測器の配置 (Type 1~4)

\* 正会員 工修 国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室主任研究官  
 \*\* 正会員 工修 国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室交流研究員  
 \*\*\* 正会員 工修 国土技術政策総合研究所 河川研究部海岸研究室長

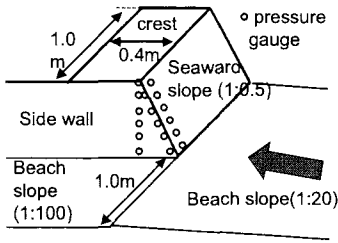


図-3 波圧計の配置 (Type 5)

表-2 潮位・波浪条件

Type	潮位 (m)	入射波高 (m)
1~4	3.50(m30), 3.65(m15), 3.80(pm0), 3.95(p15), 4.10(p30)	0.2, 0.3, 0.4
5	3.80	0.4
	3.95	0.3
	3.95	0.4

3. 波圧の出現過程

図-4 は、Type3の模型に潮位3.8 m、入射波高0.4 mを与えたケースでの、水位 (H4:堤脚, H5:天端のり肩)、流速 (V5:天端のり肩)、表のりの波圧 (P1:堤脚, P3:堤脚の0.2 m上方, P5:堤脚の0.4 m上方)を時系列で示している。斜面上での波の変形により、波高はH4で1.1 m、H5でも0.6 mに達した。また、流速は水位より早くピークに達し、その最大値は2 m/sを超えた。波圧の最大値は、P1とP5では100 gf/cm<sup>2</sup> (9.8 kPa) 程度だったが、P3では遡上波到着直後に0.004秒間だけ500 gf/cm<sup>2</sup> (49.0 kPa) を超えた。このような衝撃的な波圧が、いくつかのケースで測定された。

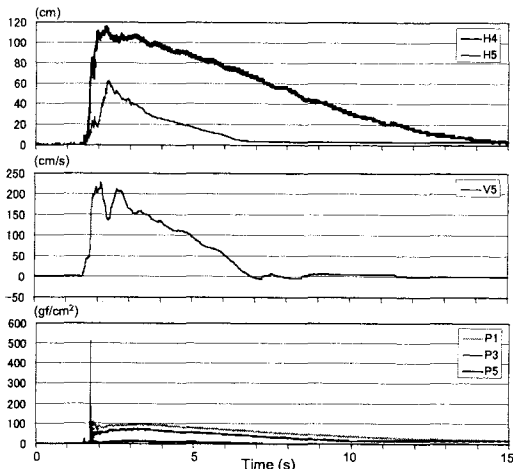


図-4 表のりでの水位・流速・波圧 (Type 3)

4. 波圧の測定結果

(1) 水路を完全に仕切ったケース

図-5~8 は、入射波高0.4 mで潮位が異なる5つのケースについて、堤防模型毎に各点の波圧最大値を示したものである。各図では、波圧計の設置箇所がわかるように、(1)表のり、(2)天端、(3)裏のり、(4)背後斜面に分割している。なお、各図の凡例の末尾 (m30など) は、表-2に示した潮位に対応している。

a) Type1 (表のり勾配1:1, 裏のり勾配1:1)

図-5のように、堤脚が汀線のケース (図中 T1pm0) では、波圧は表のりのP2 (堤脚の0.1 m上方) が最大で、約400gf/cm<sup>2</sup> (39.2 kPa) を記録した。このケースでは、写真-1のように、堤防のすぐ沖での砕波により前方に飛び出した水塊が表のりに衝突していた。そのケースより潮位を0.15 m下げたケース (図中 T1m15) でも、写真-2のように、堤防の沖での砕波で形成されたポアが堤脚から表のりを遡上し、P1で波圧は約300 gf/cm<sup>2</sup> (29.4 kPa) と高かった。このような高い波圧は前章のような瞬間的なものであった。それら以外のケースでは、表のりの最大波圧はP4 (堤脚の0.3 m上方) より下で80 gf/cm<sup>2</sup> (7.8 kPa) 程度で、のり肩周辺ではさらに小さかった。

表のり上部から天端、裏のり中央部にかけては、いずれの潮位でも最大波圧は100 gf/cm<sup>2</sup> (9.8 kPa) 以下であった。しかし、裏のり尻辺りから最大波圧は増加し、潮位が低いケース以外ではP22 (裏のり尻より0.4 m陸側) で極大となった。

b) Type2 (表のり勾配1:1, 裏のり勾配1:1.5)

Type1とType2は表のりの勾配が同一であるが、入射波のわずかな相違により、図-6のように汀線が堤脚のケース (図中 T2pm0) などでは表のりの最大波圧が小さくなった。これは、衝撃的な波圧が局所的に生じていることを暗示している。一方、表のり上部から裏のり中

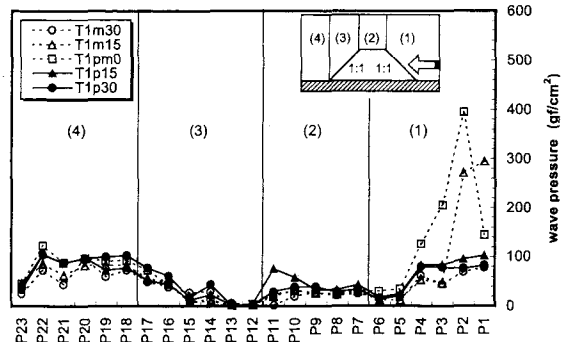


図-5 各点の波圧最大値 (Type 1)

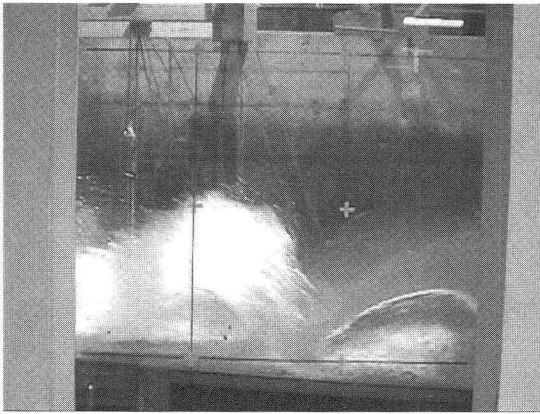


写真-1 堤防沖側での破波 (T1pm0)

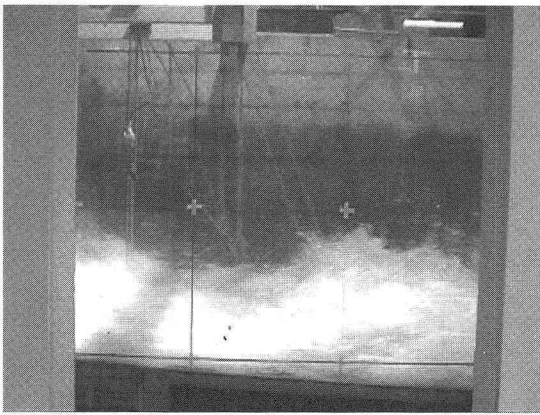


写真-2 堤防沖側での破波 (T1pm15)

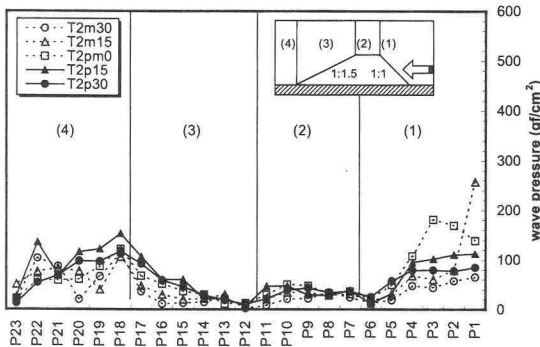


図-6 各点の波圧最大値 (Type 2)

中央部の範囲で最大波圧が100 gf/cm<sup>2</sup> (9.8 kPa) 以下となり、その陸側で最大波圧が大きい傾向は同じであった。

堤防の陸側に着目すると、Type1と異なり、P18 (裏のり尻) で波圧が比較的大きくなっている。水谷・今村 (2002) の実験では勾配1:1.5の裏のりについては衝撃的な波圧は生じなかったと報告されているが、今回の実

験では波圧は瞬間的に大きくなっていた。

c) Type3 (表のり勾配1:0.5, 裏のり勾配1:1)

堤脚が汀線のケース (図中 T3pm0) では、堤防のすぐ沖側で碎波して越波しており、図-7のように最大波圧は表のりのP3 (堤脚の0.2 m 上方), P4 (堤脚の0.3 m 上方) で500 gf/cm<sup>2</sup> (49.0 kPa) を超え、P6 (のり肩) でも極大になっている。一方、このケースより潮位を0.15 m 下げたケース (図中 T3m15) では、碎波は前述のケースより沖で生じ、表のりの最大波圧は140 gf/cm<sup>2</sup> (13.7 kPa) 以下になり、Type1や Type2と比べて小さかった。逆に、潮位が堤脚より0.15 m 高いケース (図中 T3p15) では、写真-3のように表のりの上部に津波が激しく衝突し、P6 (のり肩) で267 gf/cm<sup>2</sup> (26.2 kPa) と比較的大きい波圧を記録している。

天端から裏のり中央部にかけての範囲では、最大波圧は比較的小さい。裏のりののり尻から背後にかけては、潮位が低いケースを除くと、最大波圧は100 gf/cm<sup>2</sup> (9.8 kPa) 程度であった。

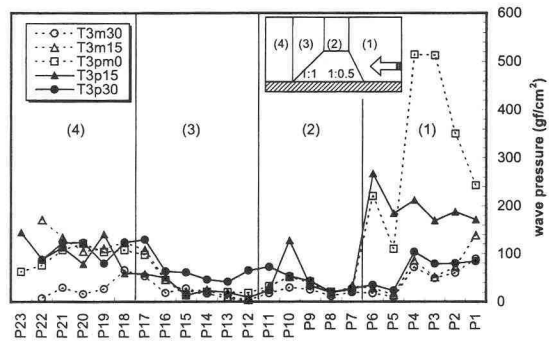


図-7 各点の波圧最大値 (Type 3)

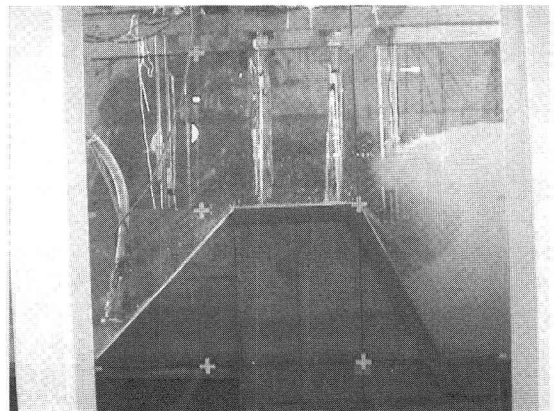


写真-3 表のり上部へ衝突する直前の遡上波 (T3pm15)

d) Type4 (表のり勾配1:0.5, 裏のり勾配1:1.5)

図-8のように、表のりの最大波圧は Type3と同様の

傾向であり、堤脚が汀線のケース（図中 T3pm0）やそれより潮位が0.15 m 高いケース（図中 T3p15）で大きかった。堤防の陸側については、Type2と同様に、P18（のり尻）で最大波圧が比較的大きく、ここでは瞬間的に波圧が大きくなっていた。

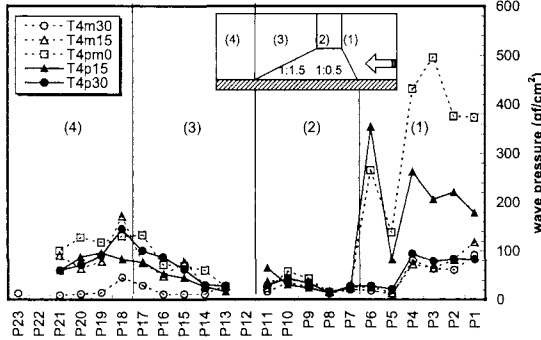


図-8 各点の波圧最大値 (Type 4)

(2) 端部での波圧

図-9 は、Type5の堤防模型の側面で測定した各点の波圧最大値を最大水深とともに示している。図中の実線は、最大水深に対応する底面での静水圧を示している。堤防の表のりとは異なり、側面の波圧は、最大でも最大水深に対応する静水圧をわずかに上回る程度である。

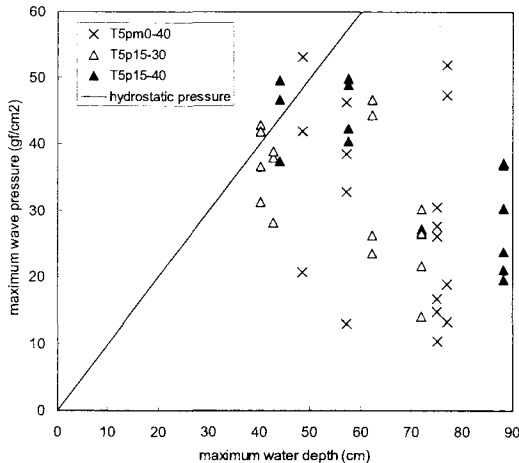


図-9 側面での最大水深と最大波圧

図-10 は、Type5の模型に潮位3.8 m、波高0.4 m を与えたケースでの、各点の波圧の最大値を示している。Type3（図中：T3pm0）と比べると、表のり端部の波圧は底面から0.3 m の範囲で半分以下となっており、側面端部やその陸側に位置する天端側面の波圧はさらに小さくなっている。このケースより潮位を上げたケースでも、側面の波圧は表のりより小さかった。以上のことか

ら、表のり端部の波圧はその周辺と比べて著しく大きくなることはなく、側面の波圧は表のりよりかなり小さくなると思われる。

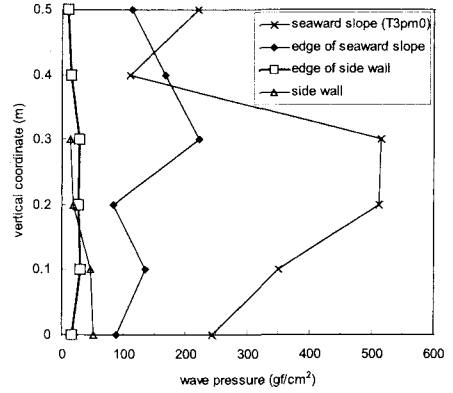


図-10 端部の波圧最大値

5. 考 察

(1) 表のりの波圧

図-11~12 は、表のりの波圧の鉛直分布を示している。横軸は堤脚での波高 H などを用いて無次元化した最大波圧、縦軸は静水面を基準として無次元化した鉛直座標である。図中には、押波初動の正弦波が垂直の防波堤に衝突する模型実験による谷本ら (1984) の算定式、ゲート急開に伴う段波が海域の垂直壁に衝突する模型実験による池野ら (2001) の算定式、ゲート急開に伴う段波が陸上の垂直壁に衝突する模型実験による池野ら (2003) の算定式による波圧の鉛直分布も合わせて示している。表のり勾配1:1では、多くのケースで谷本ら (1984) に従って得られる波圧より小さく、池野ら (2003) の算定式を使えばほとんど全てのケースで過小評価とならない。一方、表のり勾配1:0.5では、堤脚が汀線となるケースを中心に、静水面より少し上方での波圧が池野ら (2003) の算定式でも過小評価となることがある。

(2) 裏のり・背後の波圧

図-13 は、裏のり尻付近の最大波圧を水谷・今村 (2002) の式で得られる線とともに示している。水谷・今村 (2002) は、水平床上に設置した堤防模型を段波が越流する模型実験を行い、越流による堤防背後の最大波圧の算定式を提案している。実験データはこの算定式で得られる値を上回るものでないことから、孤立波の場合でも前述の式を適用できると判断される。

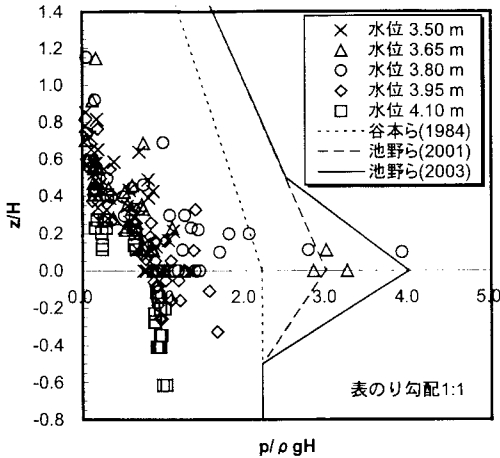


図-11 波圧の鉛直分布 (表のり勾配1:1)

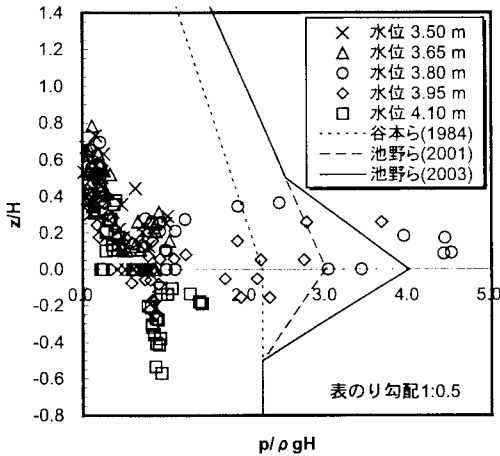


図-12 波圧の鉛直分布 (表のり勾配1:0.5)

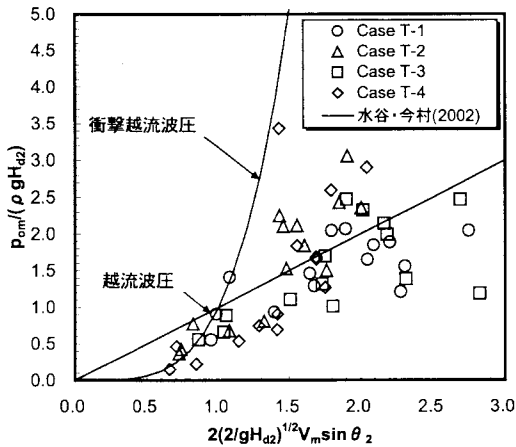


図-13 最大越流波圧

### 6. 結 論

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- ・斜面を遡上してきた孤立波が汀線付近の傾斜堤に衝突する際に、表のりで瞬間的に大きな波圧が局所的に生じるケースがあった。そのような衝撃的な波圧の発生には、堤防付近での碎波が影響している。
- ・表のりの波圧最大値は、下部で比較的大きいが、表のりの勾配が1:0.5の場合、表のりの上部に津波が激しく衝突して著しく大きくなるケースがあった。また、汀線が堤脚にある場合、池野ら(2003)の算定式で得られる値を上回ることがある。
- ・裏のりの勾配が1:1.5の場合、裏のり尻で瞬間的に波圧が大きくなるケースがあった。また、裏のりの波圧最大値は、裏のり勾配により最大点の位置が変わるものの、水谷・今村(2002)の算定式で評価できることが確認された。
- ・表のりの端部において波圧が著しく高くなることはなかった。また、堤防側面の波圧最大値は、水深の最大値に対応する底面での静水圧をわずかに上回る程度である。

今回の実験では堤防の直交方向から孤立波を入射している。堤防に対して津波が斜めに入射する場合、端部では今回の実験より大きい波圧が生じる可能性があり、今後の検討が必要である。

### 7. おわりに

本実験の実施に際しては、(株)アイ・エヌ・エーの佐藤勝文氏および山田牧雄氏にご尽力いただいた。ここに記して謝意を表します。

### 参 考 文 献

池野正明・森 信人・田中寛好(2001)：碎波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第48巻，pp. 846-850。

池野正明・田中寛好(2003)：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第50巻，pp. 721-725。

谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋(1984)：1983年日本海中部地震津波による津波力と埋立護岸の被災原因の検討，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 257-261。

水谷 将・今村文彦(2000)：構造物に作用する段波波力の実験，海岸工学論文集，第47巻，pp. 946-950。

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，海岸工学論文集，第49巻，pp. 731-735。