

越波現象に及ぼす波の連なりの効果

齋藤典之¹・細田勝也²・関 克己³・水口 優⁴

1966 年静岡県富士・吉原海岸における越波災害時の水理条件の推定結果を念頭に、波の連なり、特に前後の波の関わり合いがどのように越波現象に影響を与えるかという点に着目して実験を行った。①規則波による模型実験の再現実験を行い過去の推定実験の妥当性を確認した。②単独孤立波を用いた実験では越波量が非常に大きくなり、前の波の存在が越波量に大きく影響することがわかった。③二連孤立波を用いた実験では 2 波目の越波量が減少しかつ、2 波目越波量が極小になるような波峰間隔 T_p が存在する。④ 2 波目越波量減少の原因としては碎波時に前の波の反射波と干渉して越波波形が細くなることによる。

1. はじめに

四方を海に囲まれた日本列島では高波による災害例は枚挙に暇がない。記憶に新しいところでは 2004 年に高知県葉生海岸で、台風による高波が海岸堤防を越波し倒壊させるという災害が発生している（葉生海岸調査検討委員会, 2005）。

駿河湾に面した静岡県富士・吉原海岸においても 1966 年台風 26 号の高波が海岸堤防を越波し後背地に流れ込み、甚大な被害を引き起こした。当地ではそれを契機に海岸堤防をかさ上げすることとなり、その高さを決めるため災害当時の水理条件を推定するべく規則波を用いた実験が実施された。その結果被災時は、最大波で周期 $T=20$ s, 沖波波高 $H_0=21$ m と推定され、それに対応するために T.P.17 m という非常に高い（通常の富士吉原海岸の平均汀線は T.P.1.5 m）海岸堤防が築かれた（富永ら, 1967）。

しかしながら上記の推定結果は他に例を見ない程大きな波高であり、規則波による実験が災害時の推定越波量に対応する入射波高の推定にあたって過大評価になっている可能性がある。例えば不規則波の打ち上げ高に関して戻り流れの影響が小さいほど打ち上げ高が大きくなることを実験的に示している（木村ら, 1982）。本研究では孤立波および二連の孤立波を用いて波の連なり、特に前後の波の関わり合いがどのように越波現象に影響を与えるかという点に着目して実験を行った。

2. 水理模型実験の再現実験

被災時の水理条件を再現するために行われた過去の模型実験（富永ら, 1967, 1968）について検討するために、その再現実験を行った。

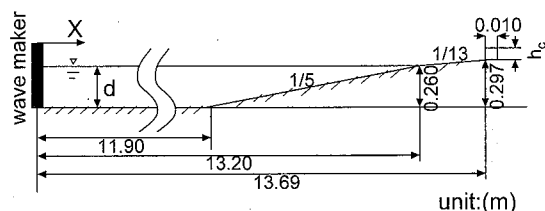


図-1 実験模型概要図

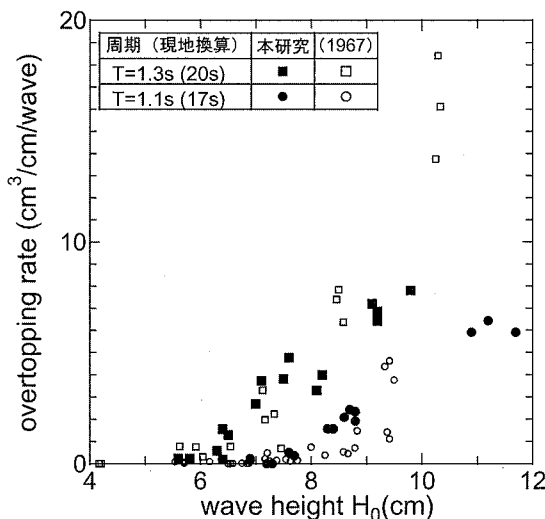


図-2 沖波換算波高と 1 波当たりの越波量の関係 (規則波) (1967 年の結果は本実験のスケールに換算)

二次元造波水槽内に過去の実験の 1/6 スケールで図-1 のような断面地形を作成した。過去の実験は現地スケールの 1/40 スケールで行われている。実験条件は水深 $d=26.6$ cm, 水槽幅 30 cm, 図-1 の堤防高さ $h_c=1.7$ cm である。この条件は被災時のものであり当時の堤防高さ T.P. 13 m に相当する。ここに $T=1.3, 1.1$ s の正弦波を入射させた。X=6.30 m に水位計、堤防背後に越波集水箱を設置し、越波量は集水箱内水位計の値に箱の断面積を乗じて求めた。水位計のサンプリング周波数

1 修(工) 三井鉱山(株)
2 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻
3 正会員 博(工) 中央大学理工学部助手
4 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

は 50 Hz である。波高は 6 波目から 10 波目の 5 波平均を用い、越波量は集水箱内水位計の傾きを直線近似して求め、単位幅当たりの越波量にしている。

本実験と過去の実験における $X=6.30$ m (一様水深部) での波高を沖波換算したものと越波量の関係を示したものが図-2 である。過去の実験による被災時の推定越波量 $70 \text{ m}^3/\text{m}/\text{wave}$ を本実験のスケールに換算すると $12 \text{ cm}^3/\text{cm}/\text{wave}$ 程度となる。本実験で実験スケールが小さいため富永らの実験より越波量はさらに少ない値となったが、1967 年の結果から規則波で災害が引き起こされるには現地スケールにおいて $T=20$ s で H_0 が 20 数 m 以上必要だということは確かめられた。

なお、図-2 ではどちらの実験においても $T=1.3$ s の方が越波量が周期の比率以上に多くなっている。このことから周期の違いにより越波の定性的な状況が異なるものと考えられる。この違いの要因の一つとして、前の波の反射波との干渉の仕方が越波量に影響を与えると推測される。以下では、主として不規則波を念頭に前後の波の干渉に着目して検討を行った。

3. 単独孤立波入射の実験

波の連なりの影響が無いケースとして単独の孤立波を入射させる実験を実施した。再現実験と同じ水槽、地形で孤立波 1 波を造波する。波高、越波量の取得位置、方法も同様である。

図-3 は孤立波入射の場合の一様水深部 ($X=6.30$ m) での波高と越波量の関係を示している。今回の実験範囲内では越波量は波高に比例して、直線的に増加している。今回のような急勾配地形では規則波と比べて越波量は非常に多く、1 桁違う量となった。単独孤立波は前に波が無く、規則波との比較では周期が非常に長いことに対応

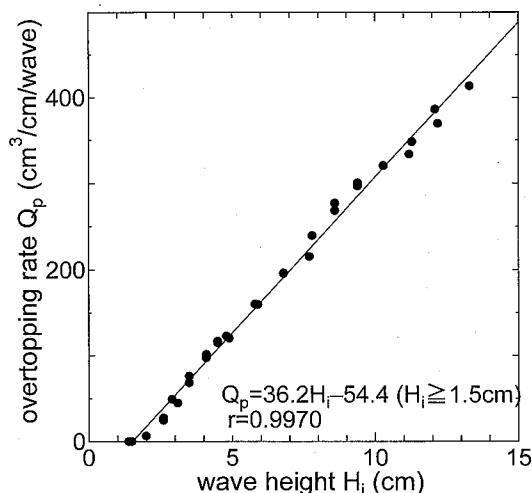


図-3 一様水深部での波高 H_1 と越波量の関係

すると考えられる。なお、図-2 で検討したように、入射波が孤立波だとしたら災害が引き起こされるには実験スケールにおいて $H_i (\equiv H_0) = 2$ cm, 現地スケールに換算して 4.8 m 程度で十分であると推定される。

単独孤立波の波高と越波量の関係を最小自乗法により直線近似した一波あたりの越波量 Q_p の予測式は、図-3 中に示すように次のようになる。

$$Q_p = 36.2H_i - 54.4 \quad (H_i \geq 1.5 \text{ cm}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

4. 二連孤立波による実験

前後の波の干渉を調べるために 2 つの連続した孤立波を入射させる実験を行った。波高は $X=6.30$ m における 1 波目のピーク高を H_1 , 2 波目を H_2 とし、波峰間隔 T_p は $X=11.90$ m での 2 波のピーク間の時間と定義した。波高と周期で計測点が異なるのは、孤立波は周期が長いので $X=11.90$ m では斜面での反射のために正確なピーク高の測定が困難であったためである。実験は 1 波目、2 波目の水深 $d=26.6$ cm での造波波高がそれぞれ (3 cm, 5 cm) と (5 cm, 5 cm) の 2 ケースで行った。

実測越波量 Q_m と Q_p の比と、 T_p との関係を示したも

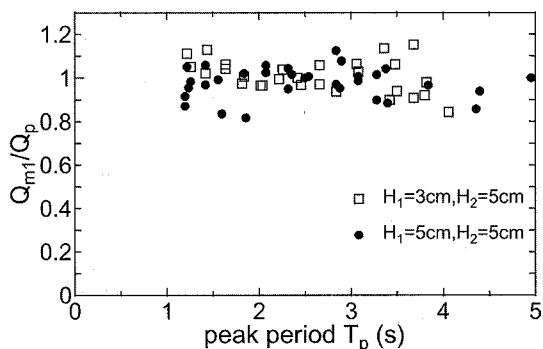


図-4(a) 波峰間隔 T_p と予想単独越波量に対する実測値の割合 Q_m/Q_p (1 波目)

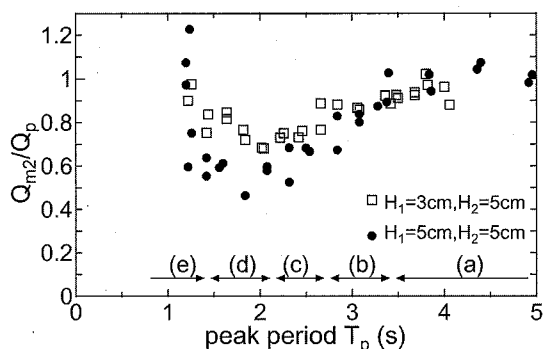


図-4(b) 波峰間隔 T_p と予想単独越波量に対する実測値の割合 Q_m/Q_p (2 波目)

のが図-4(a), (b)である。1波目は二連であることの影響は受けていないが、2波目は明らかに越波量が減少する T_p の範囲が存在することがわかる。両ケース共 $T_p=3.5$ s付近から減少し始め、ある T_p で減少のピークを迎え、その後は再び増加するという傾向になっており、最も減少する T_p は両ケース間で若干ずれて $H_1=5$ cmの方がわずかに小さいように見える。減少率は当然ながら前の波が大きいケースの方が大きい。

5. 2波目越波量減少の原因について

2波目の越波量が減少する原因について検討するために、堤防前($X=13.69$ m)に水位計を設置し越波波形を計測した。2波目越波量が減少する範囲での2波目の越波波形を図-5に示す。この図は二連孤立波のケースはそれぞれ T_p の差の分だけずらして描いたものである。波形後半部はほぼ重なり合っており、越波量が少なくなる原因としては波形前半部が遅れる(切り立つ)ような形で波形が細くなっていることであるといえる。なお、越波波形の最大値はほぼ同じである。単独孤立波の異なる波高のケースについても同様に、越波波形の後半の裾部を合わせて描いたものを図-6に示す。波高の増大と

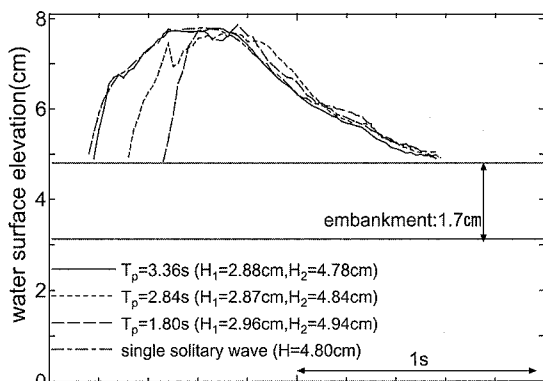


図-5 二連孤立波2波目越波波形

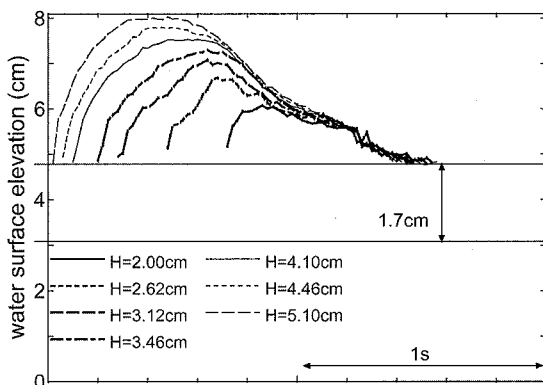


図-6 単独孤立波越波波形

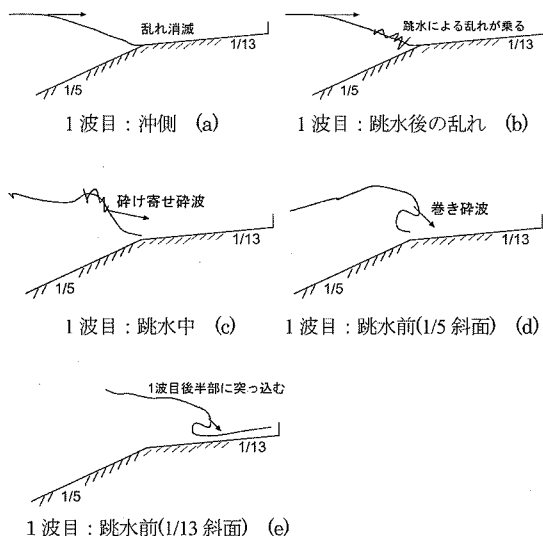


図-7 砕波(乱れ)の形式

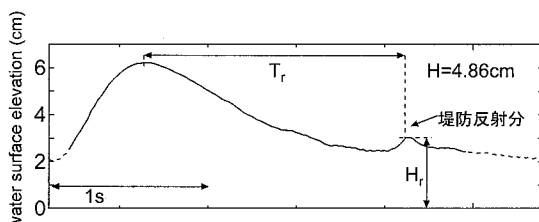


図-8 斜面勾配変化点 ($X=13.20$ m) と水位計時系列 (単独孤立波)

共に越波波形はほぼ相似なまま高く広くなっていく事がわかる。

ついで越波波形が細くなる原因として2波目の砕波状況の違いについて調べた。ビデオを用いた観察から、1波目の反射波は岸側の1/13斜面上ではある程度の波形を維持しながら沖方向に進行し、1/5斜面上では射流状となり、ある地点で跳水現象を起こす。図-7に2波目の砕波状況とその時の1波目の状態の関係を模式的に示した。図に示すように、2波目砕波時の1波目の状況により T_p の大きい方から順に(a)から(e)の5段階に分けることができる。(d)のケースの砕波が最も激しく、エネルギーロスが大きい上に波の進行もブロックされていると考えられる。ただし、ここでの砕波は一般的な最高点から砕波する形ではなく、急勾配斜面に特徴的な砕け寄せ波型で孤立波先端のみが砕波し、その後に砕波していない部分が押し寄せてくるという形態である。この5つの分類と T_p および越波量の減少率の関係は図-4(b)に示した。

次に図-4(b)で見られる1波目波高が3cmと5cmのケースの違いについて考えるために海底勾配の切り替わ

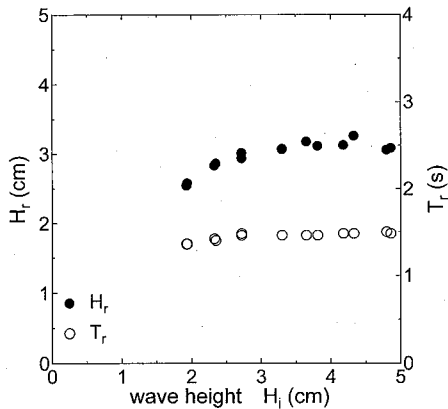


図-9 入射波高 H_i ($X=6.30\text{m}$) と反射ピーク高 H_r , 反射時間 T_r

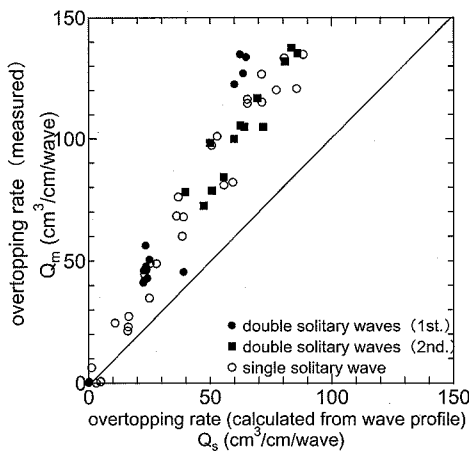


図-10(a) 実測越波量と波形から計算された越波量の関係 ($d=\eta(t)$)

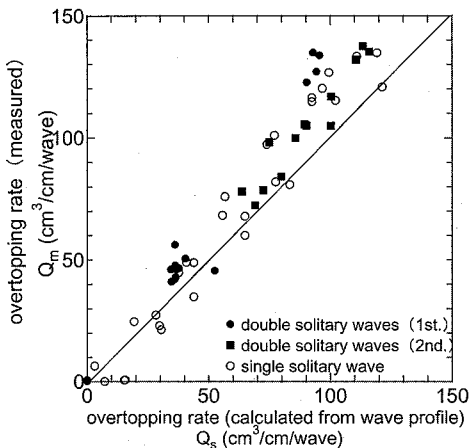


図-10(b) 実測越波量と波形から計算された越波量の関係 ($d=h_c+\eta(t)$)

る地点 ($X=13.20\text{ m}$) に水位計を設置し、単独孤立波を入射させた場合の1波目の堤防反射波の波高による違いを測定した。図-8は $X=13.20\text{ m}$ での水位計時系列である。1つ目のピークが入射波、2つ目が反射波である。入射波ピークと反射波ピーク間の時間を T_r とし、 $X=6.30\text{ m}$ での入射波高との関係を示したものが図-9である。 $H_i=2.5\text{ cm}$ 以上ではほとんど変化していないことが分かる。同様に、反射波のピーク高さ H_r と $X=6.30\text{ m}$ での入射波高との関係も図-9に示した。入射波高 H_i が小さい時は波高の増大と共に H_r は大きくなっているが、波高がある値以上に大きくなると越波量が大きくなるだけで反射波の波高は頭打ちの傾向となる。本模型の堤防高さ 1.7 cm に対しては、 $H_i=3\text{ cm}$ 付近を境に反射波高は頭打ちになっている。なお、 $H_i=3\text{ cm}$ と $H_i=5\text{ cm}$ ではわずかな差が見られる。この結果、反射した後に戻る1波目の水量が大きいために2波目の越波量そのものを減少すると考えられる。

また、両ケース間では $1/5$ 斜面上での跳水現象を起こす位置がわずかに異なっていた ($H_i=3\text{ cm}$ は $X=13.28\text{ m}$ より約 15 cm 沖、 $H_i=5\text{ cm}$ は $X=13.28\text{ m}$ より約 20 cm 沖)。最も越波量の減少する T_r は、前の波の跳水地点でちょうど2波目が碎波する場合と考えられる。そこで、跳水地点 $X=13.1\text{ m}$ 付近から堤防位置 $X=13.7\text{ m}$ までの往復所要時間を図-9の結果を参考に推定すると $1.5 \times (0.6/0.5) = 1.8\text{ s}$ となり、図-4(b)中の(d)の領域とよく対応する。

6. 越波波形と越波量

大量越波時の越波波形と越波量について以下のような検討を行った。なお検討の対象は孤立波を用いた全てのケースである。堤防上の越波波形より越波量を求めるためには堤防上での流速を知る必要がある。堰の越流に基づく従来の考え方では単純化すれば、現象を定常と考え堤防上で Froude 数が1と考えて流速を、

$$u = \sqrt{gd} \quad (2)$$

とおくことである。しかしながら水深 d として堤防上水深 $\eta(t)$ を取った場合の計算越波量は図-10(a)に示したように、実測値に比べてかなり小さくなった。この理由は従来の考え方では越波量が小さく前面の波はほぼ重複波の腹 (水平流速0) と見なせる場合のものである事によると考えられる。そこで流速が堤防前の進行波としての波速 (もしくは流速) で与えられるものとして次の堤防前水深 d を用いる。

$$d = h_c + \eta(t) \quad (3)$$

h_c : 堤防高さ (1.7 cm), $\eta(t)$: 堤防上での水面変動

(堤防上を0とする). この場合の越波量 Q_s は次のようになる.

$$Q_s = \int_{\eta(u)>0} \sqrt{g(h_c + \eta(t))} \cdot \eta(t) dt \dots\dots\dots (4)$$

式(4)を用いて求めた Q_s と実測の越波量 Q_m との関係を示したものが図-10(b)で両者の一致は良好である. 越波量が特に大きい場合はさらに碎波による変形が波速に加わり実測値の方が大きくなっていると考えられる.

7. 富士・吉原海岸の越波災害と推定波高について

規則波, 孤立波による模型実験結果を現地スケールに戻すと表-1 のようになる. 孤立波では小さな波高でも越波を開始し, すぐに被災時の推定越波量に達してしまう. 周期が越波量に大きく影響していることは明らかである.

さらに, 図-4(b)に示すように現地で $T=20$ s に対応する $T=1.3$ s では1波目の影響により越波量が抑えられる範囲である. これらのことから $H_0=21$ m よりも小さな波高で越波災害が発生した可能性が指摘できる.

なお, 孤立波造波の水深と長周期の規則波の平均水位を等しいものとしている事に注意を要する.

表-1 実験と現地での越波開始, 被災時の波高

		実験(cm)	現地(m)
規則波	越波開始	5	12
	被災時	11~12	26~29
孤立波	越波開始	1.5	3.6
	被災時	2	4.8

8. おわりに

以下に主要な結論を列記する.

- ① 台風 6626 号時の富士・吉原海岸の水理条件を推定する模型実験の再現実験を行い, その結果を確認した.
- ② 規則波と単独孤立波の越波量を比べると, 単独孤立波の方が1桁以上越波量が多い. また周期の異なる規則波実験でも周期が長い方が越波量が多い. これらのことから越波量は周期に大きく影響される.
- ③ 二連孤立波の越波では2波が干渉し始める T_b が存在し, 干渉の結果2波目の越波量が減少する. また2波目の越波量が極小になるような T_b も存在する. ただし T_b が非常に小さい場合は2波が重なり合って個々の波の越波量を議論するのは難しい.
- ④ 2波目越波量減少の原因としてはある程度波高が大きい場合においては越波波形が細くなることによる. それは2波目の碎波状況により, 1波目の反射波とのタイミングで干渉するかで決まる.
- ⑤ 堤防での越波波形から越波量をだまかに計算することができる.

今後の課題としては, 基礎的な実験を行うなどしてパラメータを整理する事により定量的な評価方法を見出すことであろう. なお越波現象には波峰高が重要であるため, 孤立波, 規則波, 不規則波間の比較にあたっては個々波に対する水深の取り方についても検討が必要であろう.

参 考 文 献

- 木村晃・瀬山明・若狭聡(1982): 波のうちあげ高におよぼすどり流れの効果, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 380 - 384.
- 富永正照・橋本宏・中村隆(1967): 富士・吉原海岸模型実験報告書, 土木研究所資料, 第266号, 62p.
- 富永正照・橋本宏・中村隆(1968): 吉原海岸模型実験報告書, 土木研究所資料, 第369号, 65p.
- 菜生海岸調査検討委員会(2005): 倒壊メカニズムについて(最終報告), 国土交通省, 12p.