

津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験

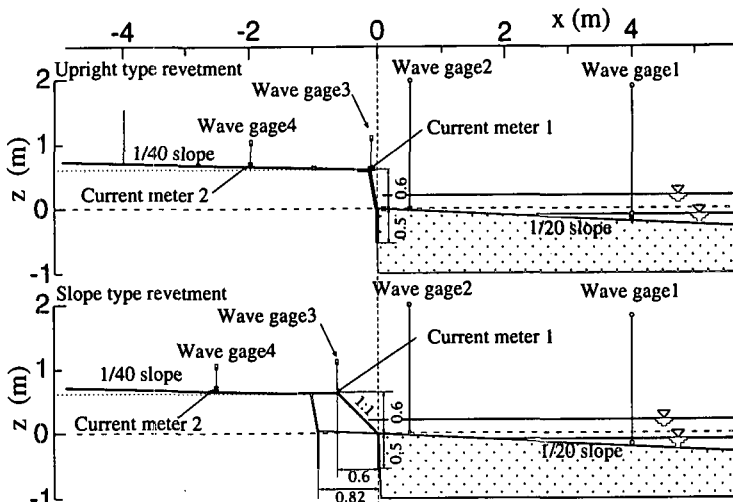
野口 賢二*・佐藤 慎司**・田中 茂信***

1. ま え が き

津波災害に対しては、防災施設、防災体制、防災地域計画から成る総合津波防災対策により備えることが望ましい。これらの要素が、有機的に連携することで最大の効果が得られる。ところで、防災施設は、まさに水際に津波災害の軽減を図るものであることから他の2要素に対する入力条件を決定するものとなっている。そこで、総合津波防災対策を計画する際には、防災施設である海岸保全施設周辺における津波の挙動を把握しておくことが重要である。

日本海中部地震津波や北海道南西沖地震津波の際にも護岸や堤防が津波の来襲により被災した。津波発生時に海岸護岸周辺で生じる被災は、越波による遡上と護岸自体の被災が主たるものである。津波の護岸越波を検討する場合には、越波に至るまで長波に近似して取り扱うのが一般的である。しかし、海岸保全施設前面は一般に浅く、津波来襲時には碎波も生じると考えられる。しかし、護岸やその直前で碎波する波の挙動は十分には把握されていない。一方、堤防前面および背後の洗掘に関しても、水理模型実験における縮尺効果の問題などの点で不明瞭な部分が多い。

津波の護岸被災に関する研究は、日本海中部地震後に行われた(例えば、宇多ほか, 1987)。しかし、従来の研究は、実験条件が狭い範囲に限られており、またスケールが小さいために、前面洗掘の生じる位置、洗掘を生じさせる流れの状況を詳細に把握できないなどの問題点があった。そこで、本研究では、海岸護岸に計画外力を越えた津波が来襲したときの、越波と前面洗掘の機構を大型水理模型実験により解明することを目的とした。



図一 護岸模型と計測器の設置位置

2. 実験方法

実験には、長さ 135 m、幅 2 m、深さ 5.3 m のピストン型津波造波装置付き水路を用いた。海岸護岸模型を中心に海側は 1/20 勾配で整形された移動床とし、陸側はモルタル製固定床とした。護岸模型は、縮尺 1/10 として図一に示すように直立護岸と傾斜護岸の2種類について実験した。基礎工の止水矢板については、0.5 m の根入れを施し護岸内部の吸い出しを防ぐようにした。

水位については、入射波形 ($x=90$ m)、護岸前面波形、護岸天端上水位、岸側斜面上水位を容量式波高計で計測した。流速は、プロペラ流速計により、護岸前面海底面上、護岸天端上、岸側斜面上のそれぞれ波高計設置位置において 0.05 秒間隔で計測した。越波量は、水路を $x=8 \sim 14$ m の間で 2 列に仕切り、片側に護岸法面背後に捕捉用の柵を設置して直接測定した。また、波の来襲・越波状況と護岸前面の洗掘状況をビデオ撮影し解析した。

造波条件は押し波による孤立波で表一に示すとおり波高 0.2~0.4 m の間で初期水位を変化させ、16 ケースについて実験を行った。ここで、初期水位は、護岸法先

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室 研究員
 ** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室 室長
 *** 正会員 工修 (財)国土開発技術研究センター
 (前 建設省土木研究所海岸研究室 室長)

表-1 実験ケース一覧

ケース	波高	初期水位	越波形態	越波量 (m^3/m)
	(m)	(m)		
1	0.21	0.3	a	0.56
2	0.42	0.3	b	2.67
3	0.21	0.2	a	0.20
4	0.31	0.2	c1	0.88
5	0.20	0.1	a	0.07
6	0.30	0.1	c1	0.44
7	0.18	0	c1	0.06
8	0.40	0	d1	0.60
9	0.40	-0.1	d1	0.35
10	0.41	-0.1	d2	0.41
11	0.20	0	c2	0.03
12	0.30	0.1	c1	0.66
13	0.20	0.1	a	0.06
14	0.40	0	d1	0.65
15	0.41	-0.1	d2	0.58
16	0.21	0.2	a	0.27

からの高さ、つまり z の値で示してある。Street and Camfield (1966) は、実験により津波等の孤立波の変形・砕波の形式を沖合平坦部における波高水深比と海底勾配により整理している。これによると、孤立波の砕波形式は海底勾配によりほぼ決まる。本研究では海底勾配を $1/20$ と一定にして実験したため、砕波形態はすべて巻き波砕波に相当する条件であった。初期水位を変えることで砕波位置を移動させ、これにより護岸を砕波せずに越波する条件から護岸で砕波する条件、砕波によるボアが護岸を越波する条件までを再現するようにした。

3. 実験結果

3.1 越波形態の比較

護岸上の越波形態の観察結果から、護岸越波の形態は、図-2 に示すように a) 砕波せずに護岸を越流、b) 護岸肩上で飛び出すように砕波、c1) 護岸直前で砕波し護岸肩でジェットが形成、c2) 護岸まで砕波せずに護岸肩でジェットが形成、d1) ボアが衝突し法面に沿って上昇して護岸肩で湧き出す、d2) ボアのままだ法面を這い上がる、の 6 つの越波形態に分類できた。

a) の砕波せずに護岸を越流する現象は、従来より津波の護岸越波の計算で仮定されてきた現象に近い。本研究においては、初期水位が $0.1 \sim 0.3 \text{ m}$ の高い状態で波高が小さいケースにおいて生じた (表-1 参照)。

b) の護岸肩上で飛び出すように砕波する現象は、津波が護岸に至るまでは砕波を生じないが、法肩を越えた

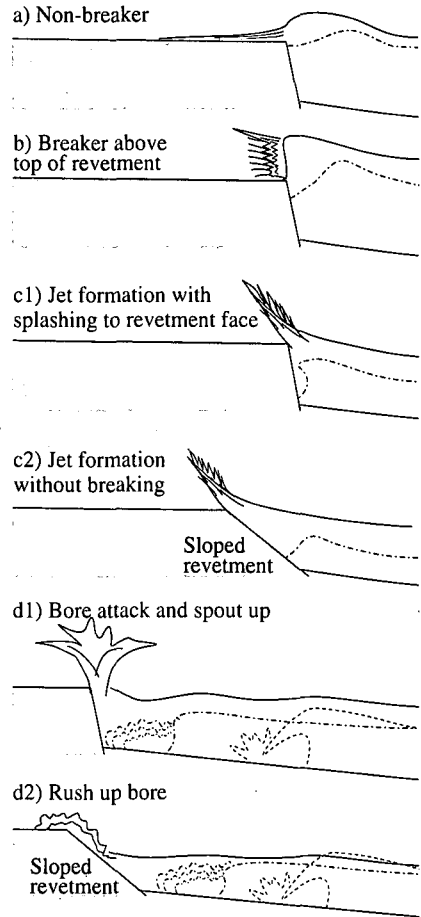


図-2 護岸越波の形態

直後に巻き波砕波を生じるように頂部が前方へ飛び出すものである。

c1), c2) のどちらも護岸肩よりジェットを形成するが、ジェット形成以前の条件が異なる。c1) は、護岸前面で巻き波砕波が生じ、その際に頂部が、直接護岸に衝突するか海底面に衝突したものが反射して護岸に衝突し、護岸に衝突した水塊が護岸表法に沿って上昇し護岸肩でジェットとなり噴き出す。c2) は、ジェット形成に至るまで砕波が生じないで法肩からジェットを形成する現象である。

d1), d2) は、護岸前方で砕波した津波がボアを形成して護岸に到達し生じる。しかし、護岸の法勾配の違いにより越波現象が異なる。直立堤のときには湧き出しのような現象となり護岸肩から岸沖両方へ伝播する (d1)。一方、傾斜堤ときには法面をボアが這い上がりそのまま陸側へ遡上して行く (d2)。

3.2 津波の変形と遡上

測定結果の例として、のちに洗掘現象について説明す

るケース8を図-3に示す。このケースの越波形態はd1であった。津波は護岸に到達して一部は越波して残りは反射される。波高計1の22秒付近で見られるピークは反射波によるものである。

護岸天端上に設置した流速計1によると津波の寄せ波の流速は1 m/s近くになる。引き波時について流速計1は、護岸天端から5 cmの高さに設置してあるために引き波の水脈が薄い場合には測定ができないことがあった。流速計2は、単方向のプロペラ流速計であるため戻り流れも正の値であらわされている。波形を見ると24.5秒で流れが一瞬止まりその後再び流速が上昇する。よって、この時刻付近で流れは戻り流れへと逆転したと考えられる。戻り流れは約15秒の長時間にわたり継続し、最大0.6 m/s程度の流速が生じていた。

3.3. 越波量の検討

越波量の推定法としては、越流公式を用いるのと同様な相田 (1977) の方法と質量流束の時間積分値を求める手法が考えられる。そこで、護岸天端上で計測された水位と流速を用いてそれぞれ算出したものと越波捕捉堤で測定された越波量 (Q_m) を比較した (図-4)。相田の方法についての検討は、

$$Q_1 = \int_{t_s}^{t_e} \frac{1}{2} \eta \sqrt{g \eta} dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

に波高計からの計測値のみを入力して算出した。質量流束の時間積分値については、

$$Q_2 = \int_{t_s}^{t_e} \eta \cdot u dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

に波高計と流速計の計測値を入力して算出した。それぞれ、 t_s は護岸への寄せ波が始まった時刻で、 t_e は寄せ波が終了した時刻である。これらの時刻は、護岸直上の流速計1の記録により決定した。図-4によると、質量流束の時間積分値 Q_2 は概して Q_1 より相関が高いと言える。

次に、入射津波波形から越波量を算定することを考える。越波量は、来襲する津波により輸送される水の量と護岸で反射される水の量の差であるといえる。また、その量は、図-5に定義するように、護岸天端から水面までの高さ ($Z_r - \xi$, $Z_r: z=0$ からの護岸高さ, ξ : 初期水位), にある係数値 α を掛けた高さで入射波形を切り取った部分の水量に比例すると考え、越波量を次式 (3) のようにあらわす。

$$Q_3 = \int_{x_s}^{x_e} \{\eta - \alpha \cdot (Z_r - \xi)\} dx \quad \dots\dots\dots (3)$$

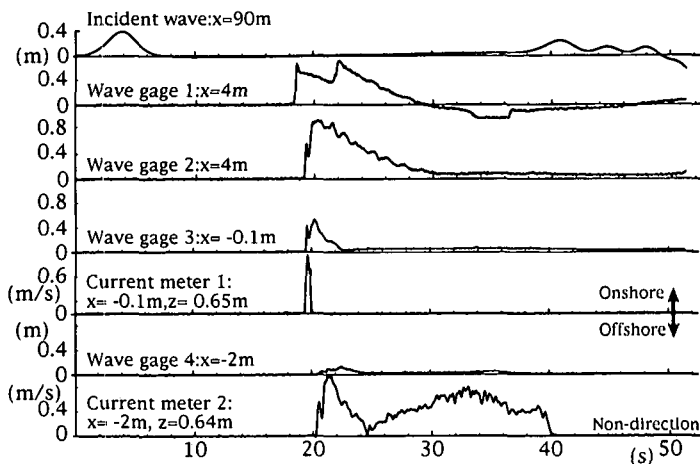


図-3 計測波形 (ケース8)

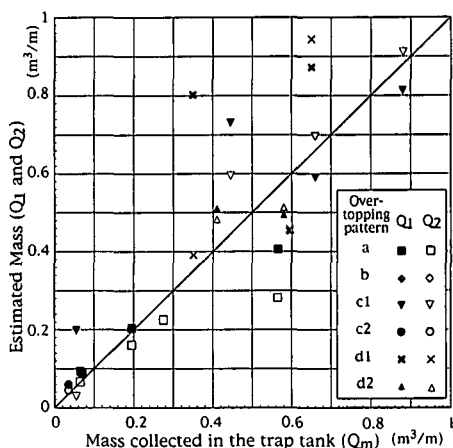


図-4 直接計測と間接計測の関係

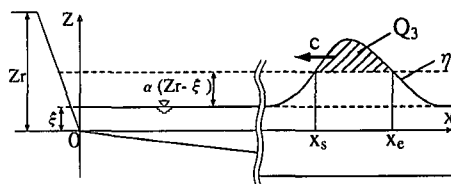


図-5 沖からの越波量算定概念

実際には x に関する積分を、沖の波高計記録と波速 $c = \sqrt{g \cdot h}$ (h : 沖の波高測点での水深) を用いて時間積分に置き換えて評価した。 α の値を変化させて Q_3 と Q_m の相関を調べたところ、 $\alpha=0.3$ としたとき $Q_m \approx Q_3$ となり、しかも良好な相関が得られた。このときの、 Q_3 と Q_m の相関を越波形態で分類して図-6に示す。 Q_3 と Q_m は、 $Q_m=0.98 Q_3$ に沿った良い相関を示している。しかし、越波形態 d1 および d2 は、この直線からほぼ一定の割合で

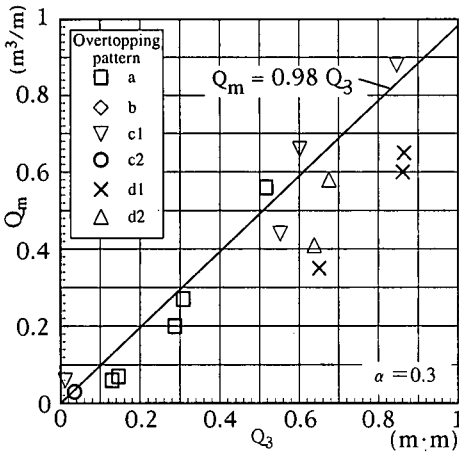


図-6 入射波高からの越波量算出

計算値が大きくなっている。これは越波形態 d1 および d2 が護岸の前方で砕波し、ボアを形成して護岸へ来襲するケースであったためと考えられる。これらのケースの護岸へ到達する波高は、実際にはボアによるエネルギー逸散により減衰する。このため算出値が他のケースに比較して大きく評価されたと考えられる。

3.4 護岸の前面洗掘

前面洗掘の発生状況をビデオにより解析した。前面洗掘は、護岸からの反射波により生じる場合と戻り流れにより生じる場合が考えられる。寄せ波時の洗掘は、初期水位が低く比較的波高が大きいときに生じたものの、その規模は小さかった。戻り流れによる洗掘は、戻り流れが継続している間に護岸前面に発達する定在渦により生じる。洗掘の深さは、渦の大きさと同程度で、戻り流れの継続に伴い渦が大きくなり渦が最大となったときに洗掘深も最大となった。最大洗掘深となった後、渦の大きさが小さくなると渦に取り込まれていた砂が沈殿して大量の埋め戻しが生じた。

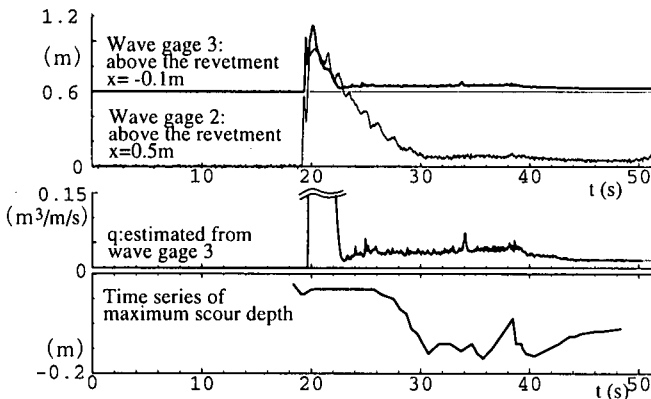


図-7 洗掘の経時変化と水位変化（ケース 8）

最大洗掘深の時系列の例としてケース 8 によるものを図-7 の下段に示した。ケース 8 は、寄せ波時の洗掘、戻り流れによる洗掘、埋め戻しの現象がすべて生じたケースである。図上段には護岸直上の測点において計測された水位変化と護岸前面の水位変化を津波来襲の経過として比較するために併せて示してある。ここでは水位変化を初期水位からの高さで表わして、2 測点を同じ座標面上に示してある。波高計 3 の津波到着以前の水位が 0.6 m 高くなっているのは前面水位と護岸天端の高さの差は 0.6 m でここに波高計を設置してあるためである。寄せ波時にわずかな洗掘が生じるが、前面水位の低下後に洗掘が大きくなることが分かる。しかし、ある程度洗掘が進むとそれ以上の洗掘は進まなくなり、渦の強さが弱まるにしたがい徐々に埋め戻しが生じた。

図-8 に洗掘に関する諸量の定義を示す。 z_f は最大洗掘が生じたときの護岸前面の水位から護岸天端までの高さ、 D を最大洗掘深、 R を定在渦の直径、 η を護岸天端での戻り流れの水位とする。

定在渦の大きさと洗掘深はほぼ等しいことから、定在渦の大きさを求めることで洗掘深を見積もることを考える。洗掘深は越波量と高い相関があったため、式(3)で越波量が評価できれば洗掘深を予測できることになる。しかし、現地条件では戻り流れが一ヶ所に集中することも考えられるので、護岸肩から流下する流量と護岸肩の高さから定在渦の大きさ R を求めることにする。この定在渦を維持するためのエネルギーは護岸肩から流入する水塊のエネルギーに比例すると仮定する。さらに、洗掘深が最大となる状態では、護岸上からの流量も一定で定在渦も十分発達して定常状態であるとする。以下では、単位幅単位時間当りエネルギーについて議論を進める。

まず、定在渦は一様な乱流場を形成していると考え、エネルギー散逸率を $\varepsilon \sim k^{3/2}/l$ (例えば、Jones and Laun-

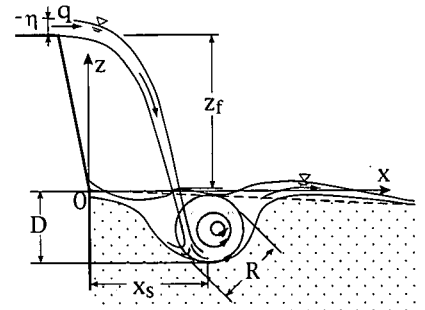


図-8 定在渦を算定するときの概念図

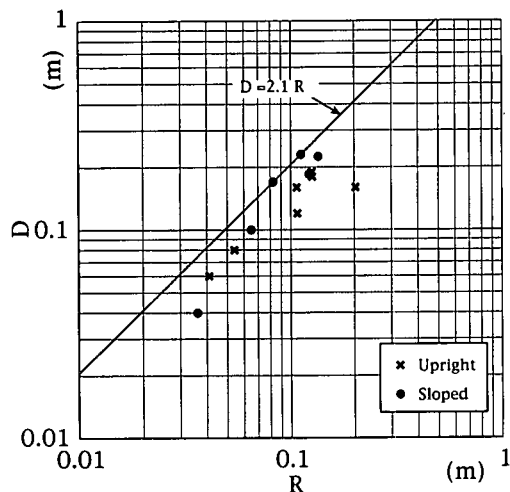


図-9 算定した定在渦の大きさと最大洗掘深の関係

der (1973) など) とすると, 渦によるエネルギー逸散量 E_v は,

$$E_v \sim \rho \frac{k^{3/2}}{l} \pi r^2 \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで, k : 乱れのエネルギー, l : 乱れの代表長さ, πr^2 : 渦の面積である。代表流速 u' として, 落下水が水面に達するときの鉛直速度: $(2gz_f)^{1/2}$ をとり, k は u' に比例するとすると,

$$E_v \sim \rho \frac{\sqrt{2gz_f^3}}{l} \pi r^2 \dots \dots \dots (5)$$

となる。

一方, 護岸から落下する水流によって供給されるエネルギー E_i は,

$$E_i \sim \rho g q z_f \dots \dots \dots (6)$$

と表わすことができる。

渦が定常状態で維持されるためには, $E_i \sim E_v$ であることから, それぞれ代入して整理すると

$$r \sim (ql)^{1/2} (gz_f)^{-1/4} \dots \dots \dots (7)$$

となる。さらに, r を洗掘深と等しいと仮定した定在渦の直径 R に置き換え, また, 代表長さ l に前面水面から護岸天端までの高さ z_f を用いると洗掘深 R は,

$$R \sim g^{-1/4} q^{1/2} z_f^{1/4} \dots \dots \dots (8)$$

と表現できることになる。

実験で計測された諸量を用いて式 (8) により R を求

める。落下水の流量 q は護岸直上における水位記録から堰の越流公式により推定した。この様にして推定された流量の時間変化は図-7 の中段に示されている。護岸肩から流出する流量から見積もった R とビデオ解析により求めた最大洗掘深 D の比較には, 安全側という意味より q の最大値を定常状態の q として用いた。図-9 に R と測定された D の関係を示す。この図によると計算値と実測値の間には良い相関があると言える。また, 図中の実線は, 洗掘深を見積もる際に最も安全側となるように引いた直線で次式で表わされる。

$$D = 2.1 R \dots \dots \dots (9)$$

乱れスケールの選定において, 大胆な仮定を導入している点など議論の余地が残るものの, 護岸肩から流下する戻り流れの諸量から最大洗掘深が評価できる。

4. 主な結論

本研究による主な結論を次に示す。

- 1) 護岸を越波する津波の形態を分類した。
- 2) 越波量は, 護岸直上の水位のみから評価したものよりも水位と流速の実測値から評価した質量流束の時間積分値と高い相関があった。
- 3) 護岸まで碎波を生じない場合の越波量を沖の津波波形より算定する手法を提案した。
- 4) 津波の寄せ波時の洗掘は, 護岸前面の初期水位が低い場合には生じるが規模は小さかった。
- 5) 護岸前面では戻り流れが継続している期間に形成された定在渦によって, 大規模な洗掘が発生した。
- 6) 最大洗掘深を護岸からの戻り流れ流量より算定する手法を提案した。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1977): 陸上に溢れる津波の数値実験—高知県須崎および宇佐の場合—, 地震研究所彙報, Vol. 52, pp. 441~460.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1987): 津波遡上に関する実験報告書—構造物の効果を中心として—, 土研資料, 第2486号.
- Jones, W. P. and B. E. Launder (1973): The calculation of low-reynolds-number phenomena with a two-equation model of turbulence, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16, pp. 1119~1130.
- Street, R. L. and F. E. Camfield (1966): Observations and experiments on solitary wave deformation, Proc. 10th Int. Conf. Coastal Engineering, pp. 284~301.