

遡上津波の戻り流れによる護岸法先の洗掘

西村 仁嗣*・堀川 清司**

1. 緒 言

長波が陸岸に達し、陸上へと越波、遡上するとき、さらにはこれが戻り流れとなって流下するとき、海岸護岸、岸壁等の構造物法先で洗掘が生じ、構造物の倒壊といった被害を引き起こすことがある。河川における段落ち流れの下流側でも類似の洗掘が見られるが、この場合には一定の流量が相当長時間にわたって流れた結果としての洗掘の状況が問題となる。ここでとり扱う戻り流れは明確なピーク流量を有する有限時間内の流れとなるので、現象は一層複雑である。

この問題に関する限り模型実験を研究の主体とすることは必然であるが、その成果を定量的な意味で現地の現象に当てはめるためには相似則という難問に解答を与えねばならない。本研究は単純化された条件下における洗掘現象の観察を通じて、その機構を把握しようとするものである。

著者らはこうした洗掘の総量および形態に及ぼす断面地形、入射波、底質等の諸要因の効果の概略を知るために広汎な実験を行ない、その成果を発表して来た^{1),2)}。ここでは陸上に遡上した孤立波の戻り流れによって直立壁前面領域の海底に生じる洗掘に的を絞り、実験水槽内の現象を定量的に説明するモデルを作り出す方向で考察を進める。もとより実際の海岸における海底地形、後背陸上地形ならびに構造物断面は一般に複雑であり、こうした領域での津波の挙動を推定することは困難かつ重要である。とくに構造物の法面勾配は戻り流れが堤脚部水層に及ぼす影響、ひいては洗掘の機構をも質的に変化させる。しかしながら、いずれの場合にも以下に示

すとり扱かいの手法自体は応用可能と著者らは考えている。

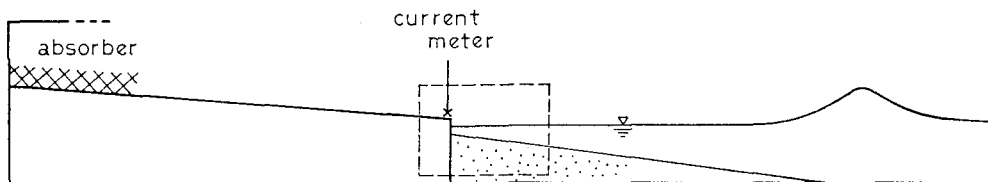
2. 実験設備ならびに実験条件

実験には長さ約 26 m、幅員 60 cm の 2 次元造波水槽を用い、その終端から 5.4 m の位置に高さ 40 cm の直立壁を設定した。直立壁の背後はその天端に続く固定床の陸上部斜面とし、一方前面は移動床の海底斜面とした。海底面の高さは直立壁の位置で水槽底面より 30 cm、すなわち直立壁天端から下方に 10 cm とした。底質は相馬標準砂で、その中央粒径は 0.7 mm である。

孤立波は高水槽内の水塊を自動開閉バルブを介して造波水槽内に急激に導く方式で発生させたが、十分な波高と良好な波形を得るよう仕切板で水路幅を漸縮し、地形断面模型側 18 m 区間の幅員は 30 cm となっている。次節以降の議論は等水深部における定形波高を 22 ± 1 cm とほぼ一定に保った一連の実験の結果に基づくものである。

戻り流れの流速は直立壁天端直上に設置した小型プロベラ式流速計によって測定した。一方、水面および地形の変動についてはモーター・ドライブ・カメラを用いて 0.5 秒間隔の側面撮影を行ない、スライド映像の形で空間的に連続な記録を得た。撮影の範囲は図—1 中に破線の枠で示されている。

陸地勾配 1/30, 1/20, および 1/10, 海底勾配 1/20, 1/10, および 1/5, 堤脚水深 10 cm, 5 cm, 2.5 cm, および 0 cm のすべての組み合わせについて実験を繰り返したが、堤脚水深もしくは陸地勾配が大きい場合には有意な海底地形の変動は見られなかった。



図—1 実験設備

* 正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

2. 現象の概説

図-2 は孤立波が変形しながら直立壁に衝突し、越波、遡上、後戻り流れとなって洗掘を完了するまでの3つの段階を模式的に描いたものである。各図について以下に説明を加える。

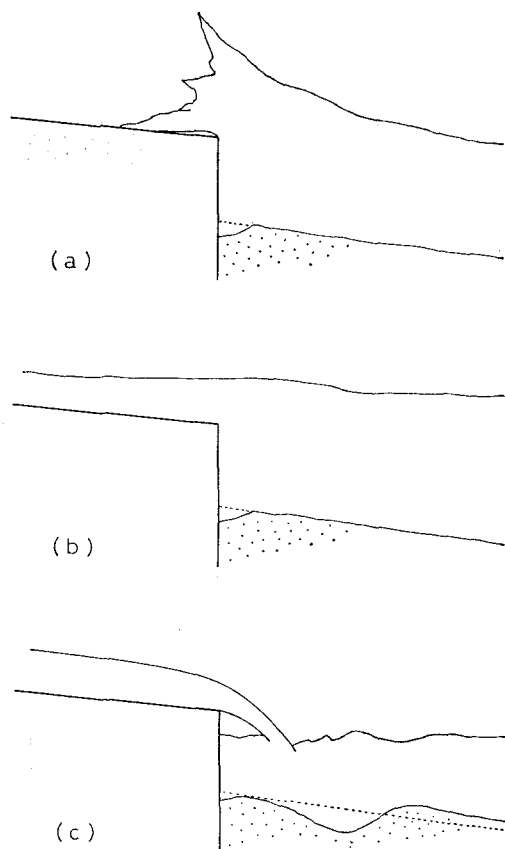


図-2 一次洗掘と二次洗掘

(a) 打ち上げ、越波：ほぼ対称な波形を保ちながら伝播して来た孤立波は斜面上で前傾し、初期水位が低い、あるいは海底勾配が緩やかな場合には砕波に至る。砕波前もしくは砕波直後の波面が直立壁に衝突し、波は天端を越えて陸地斜面上を遡上する。もとよりここで相当程度の反射が生じる。

衝突の瞬間に直立壁脚部に局地的な洗掘を生じることがある。これを便宜上一次洗掘と呼ぶことにしよう。波が砕波前に直立壁に到達するか、砕波の状態で壁面に衝突するかによって爾後の越波の状況に明確な差異が現われるわけではないが、一次洗掘は概してより衝突の激しい後者の場合に発生する。ただしその洗掘範囲は壁面近傍に限定され、最大洗掘深も海底勾配 1/20、初期堤脚水深 0 cm の場合で 2 cm 程度と量的には大きなものではない。被洗掘部の底質は大部分越波水流によって陸地斜

面上に運び上げられるようである。

(b) 越波、遡上：直立壁でせき上げられた形でその前面領域の水位が上昇し、これとともに越波と陸地斜面上への遡上が進行する。水位が下降に移った後、陸地斜面下端領域の流れが停止し、逆流を開始する。この間海底地形には全く変化が見られない。

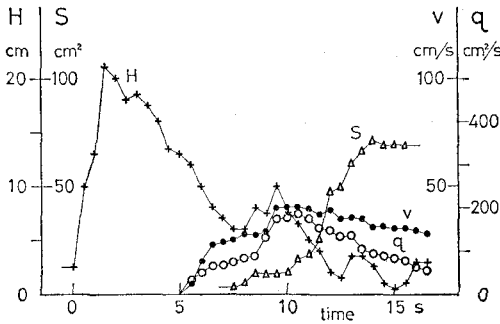
(c) 戻り流れ：全面的な逆流によって戻り流れの流速および流量は次第に増大し、それぞれピークを経て減小に移る。一方、直立壁前面の水位は引き続き低下するので、流下流量の大小に応じて明確な流下水のナップが現われる。ナップの先端が水層中に突入し、砂面を叩く位置の近傍では顕著な洗掘が起る。水中に巻き上げられた底質の大部分は流れによって輸送され、海底斜面下流側に堆積する。流量の増減とともにナップの着底地点も移動するので、結局図のような洗掘地形が形成される。直立壁脚部に生じた一次洗掘がこの段階で埋め戻されてしまう場合もある。一次洗掘に対して上記の洗掘を二次洗掘と呼び分けることにする。

図-3 は海底勾配 1/20、堤脚水深 2.5 cm の場合をとり上げ、陸地勾配 1/30、1/20、および 1/10 の3つのケースについてそれぞれ時間経過にともなう海底斜面上の水位の変動、戻り流れの消長、および二次洗掘の進行状況を同時に示したものである。これらの図において水位 H は壁面から前方に 30~60 cm 離れた領域の平均的な水位であって、堤脚部における初期海底面を基準として測られている。壁面直前領域の水面形は戻り流れの影響で時間的にも空間的にも極めて複雑な変動を示し、この領域の平均的な水面を想定することが困難である以上、より安定した上記の平均水位を用いることは現実的な措置と言えよう。

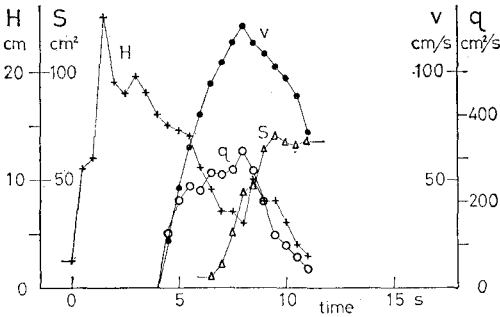
単位幅当りの流量 q は直立壁天端から 0.5~1.0 cm の高さにセットされた小型プロベラ式流速計による流速測定値 v と流下水の層厚から算定した。流速の測定値と流下水面形状の間に良好な相関が認められることから、推定された流量も妥当な値を与えるものと判断される。100 cm/sec 以上の高流速は使用した流速計の測定範囲を超えるので、水層厚およびナップの形状から逆に推定した。

単位幅当りの総洗掘量 S は排除された底質の全量を表示するために低下海底面と初期海底面の差異を側面積で示したものである。洗掘終了後に S の値がいく分減小しているが、これは水中に巻き上げられた底質の沈降によって底面が上昇するためである。

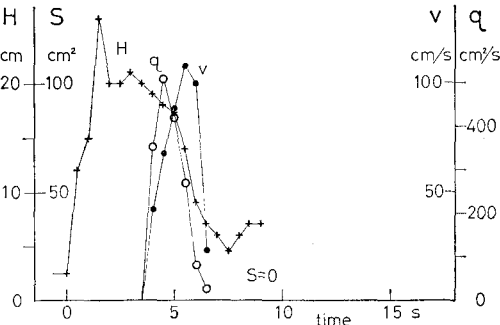
陸地勾配 1/30 なる場合には水位の下降後に比較的大きな流下流量が継続するために顕著な洗掘が生じる。これに対して陸地勾配が 1/10 と急になると越波水の流下が早い時期に起こり、この時点では直立壁前面の水位が高いので、段落ち流れのような状況は発生しない。したがって、ピーク流量が大きいにも拘らず洗掘は全く生じ



(a) 陸地勾配 1/30



(b) 陸地勾配 1/20



(c) 陸地勾配 1/10

図-3 水位、流速、流量および総洗掘量の変化
(海底勾配 1/20, 初期水位 2.5 cm)

ていない。陸地勾配 1/20 の場合には前者に近い状況が見られる。

水位変動中に現われる第2、第3の小波動は直立壁による反射波が沖側で再度反射してこの領域に達したもので、実験施設の規模の制約から避け難い事象である。陸地斜面上を遡上する流れもその勾配が緩やかな場合には水槽端に達し、段波が斜面を下降するようになる。これを避けるために斜面上端の1.5 m 区間に消波装置を置いた結果、流下流量にいく分の脈動が現われている。

4. 二次洗掘の総量とその形態

本節では二次洗掘の進行状況について定量的な説明を試みる。先ず戻り流れのナップの着水地点に関しては初速度 v で陸地斜面から空中に放出された流体粒子の自由

落下を想定することによりほぼ算定が可能である。したがって直立壁前面に水の層がないものとした場合のナップ先端の着底地点、すなわち 図-4 の P 点も容易に定義

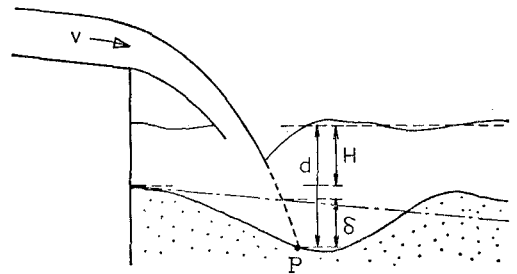


図-4 平均水位と水層厚

される。この仮想着底地点から直立壁前方領域の平均水面までの高低差 d は戻り流れを受ける実質的な水層厚と見なすことができる。

洗掘の進行速度 dS/dt を決定する主たる要因が単位幅当りの流下流量 q および水層厚 d であることは前節の観察結果から明らかである。そこで各実験ケースについて 図-3 に対応するグラフを作成し、洗掘開始および終了の時点における q と d の組み合わせを拾い出してプロットすると 図-5 が得られる。図中×印は洗掘開始

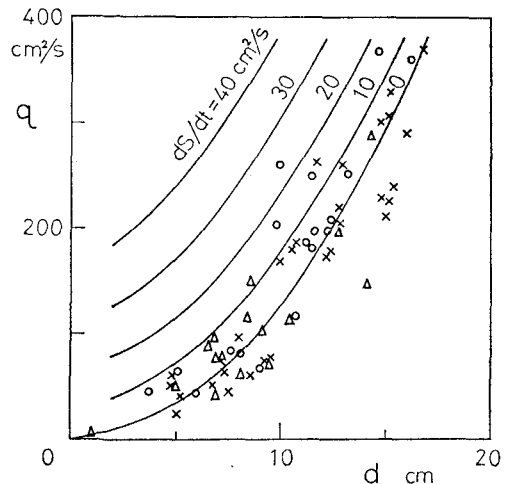


図-5 等洗掘速度曲線

直前もしくは終了直後の底質がほとんど移動していない状態、○印は洗掘開始直後もしくは終了直前の底質が移動している状態、また△印はその中間のわずかに底質が移動している状態を示している。 $q-d$ 平面上で3種の点が入り乱れているのは当該領域が洗掘の限界条件に相当しているためであり、これより流量の大きい領域には○印のみ、逆に流量の小さい範囲には×印のみが現われるものと考えてよい。

図-6 は各実験ケースについて単位幅当りの流下流量

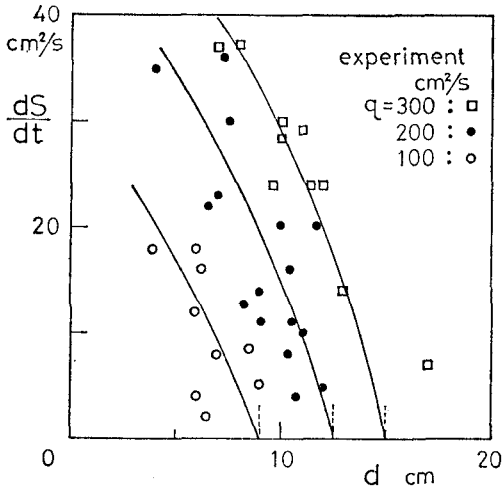


図-6 洗掘速度と水層厚の関係

$q=100, 200$, および $300 \text{ cm}^2/\text{sec}$ をそれぞれ現出した時点における総洗掘量の増加速度 dS/dt と水層厚 d の関係を示したものである。データにはかなりのばらつきが見られるが、図-5 で得られた洗掘限界を参照しながら本図から種々の条件下における洗掘速度の概略を知ることができる。これらを総合して $q-d$ 平面内の等洗掘速度曲線の形に表現したのが 図-5 中の曲線である。

以上の結果に基づいて与えられた水理条件、すなわち流下流量ならびに水面形の時間変動から洗掘の進行状況を推定することを考えよう。水層厚 d は洗掘深 δ を包含しているので、これを算定するためには各時点におけるナップの形状のみならず海底の断面地形をも推定する必要がある。かくして総洗掘量の増分 ΔS の空間的分布が問題となる。いま、かりに Δt 秒間の洗掘深の増分 $\Delta \delta$ がナップ先端の仮想着底地点で最大値 $(\Delta \delta)_{\max}$ をとり、その前後にそれぞれ $10(\Delta \delta)_{\max}$ の拡がりをも有する三角形の分布をなすものとして 図-3 (b) の水理条件から総洗掘量 S を追算すると、図-7 破線の結果を得る。同図中の実線は実測された二次洗掘量の変化を示したものであり、洗掘量の増加状況は上述の試算によってよく再現されていることがわかる。ただし、実際の洗掘は試算されたそれよりも常に 0.5 秒程度遅れて進行している。同

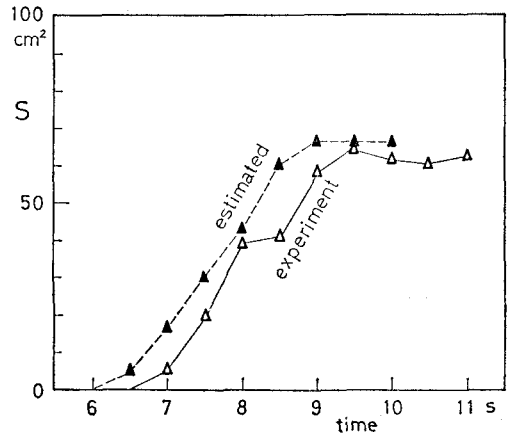


図-7 総洗掘量の変化

様の傾向は他の実験ケースに関しても認められる。

計算で得られた洗掘地形は 図-8 中で実測地形と比較されている。壁面に近い領域の海底地形は一次洗掘および二次洗掘後半の流量減少の過程で決定されるが、前者は計算の対象外である。また、後者の段階の底質移動は局部的であって、必ずしも総洗掘量の増加には寄与しない。ここでは総洗掘量 S を指標とする解析が行なわれている関係で、小流量の効果が過小評価され、逆に最大洗掘深が過大評価されることになる。堆砂領域の底質移動および地形変化については別個のとり扱いかが必要である。

津波の場合には第1波に引き続いて第2波以降が陸岸に達し、その波高も一定ではないので、この間の越波、遡上、さらには戻り流れの状況を解析することは至難である。図-9 はやはり 図-3 (b) のケースをとり上げ、洗掘後の地形条件下で同一波高の第2の孤立波を作用させたときの v, q, H , および S の時間変動を示している。第1波と独立した現象とすれば、この程度の地形変化による水理現象面での変化は顕著ではない。図-10 は第4波目までを繰り返して作用させた場合の洗掘地形の変化を示したものである。

図-6 中の $dS/dt=0$ に対応する曲線は洗掘限界を与えるものであり、これから継続する同一条件の波によ

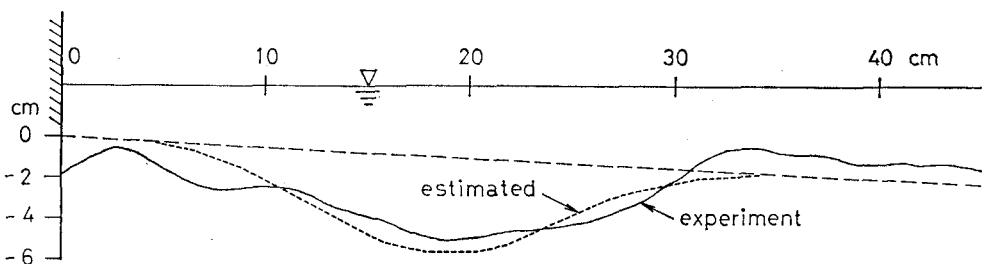


図-8 洗掘地形

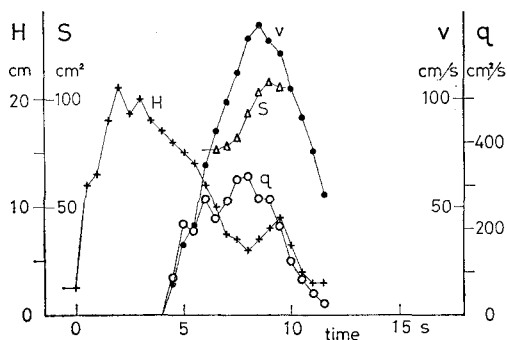


図-9 第2波による洗掘

て形成される最終的な平衡地形が推定される。図-10の点線は第4波の水理条件がそのまま繰り返されるものとして求めた最終洗掘地形であるが、壁面側の地形変化が十分に評価されていない点は図-8の試算例におけると全く同様である。

5. 結 語

本論文においては長波が海岸構造物を越えて陸上に遡上するという前提に立ち、これにともなう洗掘現象について実験的な検討を加えた。設備、計測両面の技術的な制約のために、得られたデータが十分な精度を有するものとは言い難い。しかしながらその集積の中から抽出されたいくつかの特徴的な事象は現象全般の本質をなすものと言えよう。

ここでは洗掘量を流下流量および水層厚の関数と考え

て解析を試みたが、さらに戻り流れの流速の効果も大いに考慮の余地がある。このことは定常な段落ち流れによる洗掘を扱った Doddiah ら³⁾の実験式が上、下流側の落差を考慮する形となっていることから首肯されるところである。この場合、我々の問題においては天端高が越波水量に対する寄与と併せて二重の相反する効果を有することになる。

流れの加速度の効果は比較的小さいと考えられるが、さらに精確な議論に際しては当然検討されねばならない。

謝 辞： 本研究は文部省科学研究費補助金 自然災害特別研究「流れとしての津波」(研究代表者：東京大学地震研究所 梶浦欣二郎教授)の一環として行なわれたものである。また、実験の遂行にあたっては当時東京大学学生であった玉村祐一君(大林組)および三谷勝明君(熊谷組)の大いなる協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 読摩武史, 茅野浩一, 西村仁嗣: 孤立波による護岸法先の洗掘に関する実験的研究, 第32回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第2部, 1977.
- 2) Nishimura, H., K. Horikawa and A. Watanabe: Scouring at the toe of a seawall due to tsunami, Proc. 16th Coastal Eng. Conf.
- 3) Doddiah, D., M. L. Albertson and R. A. Thomas: Scour from jets, Proc. Minn. IAHR, 1953.

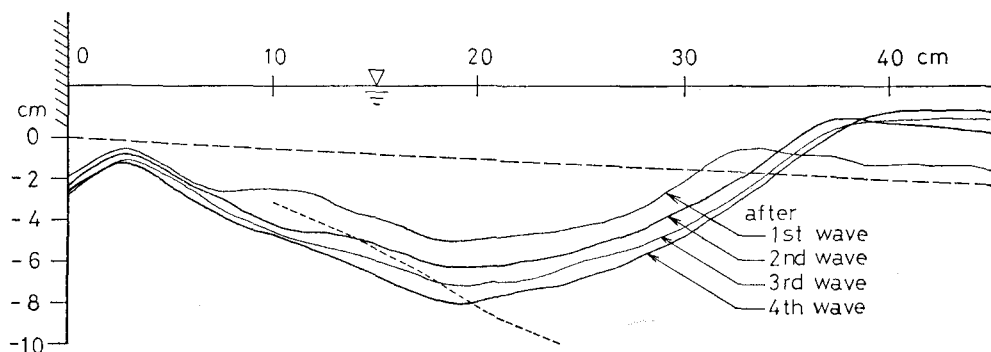


図-10 平衡地形