

海浜断面の領域区分と相似則

河田恵昭*・西根秀平**・内海泰幸***・井上雅夫****

1. 緒 言

海浜変形に関する移動床模型実験を行う場合、現地と模型との間で、外力となる波と漂砂現象の相似性について満足されなければならない。しかしながら、漂砂現象の相似性についてはいまだ定式化されていない。そのため、従来、波の諸量の縮尺はフルードの相似則に従うものとし、底質粒径の決定には種々の工夫がなされてきた。一般には、既往の実験結果を参照して底質粒径を求め、それによる海浜断面の再現実験を行って確認する方法が取られてきた。漂砂現象の相似性の判定基準の1つは、海浜断面の特性が現地と模型で一致することであり、様々なパラメーターが提案されているので、これによる判断も1つの基準となってきた。しかし、いわゆる縮尺効果が存在するため、模型と現地の対応が不確かなままであり、しかも、軽量骨材の選択法も明らかにされていない。

このような問題を解決すべく著者らは、漂砂運動が最も活発な砕波帯が海浜変形を支配する海域であると仮定して、新しいパラメーターの有効性を検討した。さらに、これに関係して、軽量骨材を含む底質粒径の求め方と、地形変化時間縮尺についても検討することにした。

2. 海浜相似パラメーターの提案

(1) 海浜断面の領域区分の現状

海浜断面の領域区分については、これまで多くの研究が行われてきた。わが国では、岩垣・野田(1961)、Sunamura・Horikawa(1974)及び竹田・砂村(1982)による領域区分が代表的なものであり、そこで用いられたパラメーターが等価であることはすでに証明されている(河田ら, 1990a)。これらは、基本的には次元解析と実験式を組み合わせたものであり、縮尺効果を含んでいる。一方、Dean(1973)は、沖波の波形勾配と無次元沈降速度($\pi w/gT$)による領域区分を示し、その物理的な解釈

は、後年、服部ら(1978)が明らかにしている。しかしこの領域区分でも縮尺効果が入っていることをDalrymple(1992)が指摘しており、いまだいずれの領域区分においてもこの問題は解決されていないと言える。

一方、漂砂現象の相似性として従来、指摘されていないもう1つの重要な条件がある。それは、浅海域で発生する砂れんに関するものである。砂れんは現地では粗度要素であるが、実験では砂れんのスケールは水深スケールとなるため、粗度というよりも、波動や漂砂そのものに直接影響するものとなる。したがって、相似性の観点からは実験において、とくに nearshore zone で砂れんが発生しない方が望ましく、この点からも砂れんを発生しない軽量骨材粒子を使用することの有利さが浮上してくる。

(2) 海浜相似パラメーター

すでに、樫木(1984)が指摘しているように、模型の底質の選定において用いられる相似条件は、①砂の移動限界水深、②海浜断面、及び③砂の移動形態の3つにまとめることができる。その中で、①の条件は、いずれの移動限界水深を与える式を適用しても、大縮尺模型でない限り、砂の場合では極めて小さな粒径になるので好ましくなく、②あるいは③の相似条件を用いて相似則を決める方がよいとされている。

そこで、ここでは②あるいは③を満足させるような相似則を検討することにする。砂粒の運動形態の掃流から浮遊への変化は、開水路における実験から、摩擦速度と砂粒の沈降速度との比が1を越える場合に起こると考えられてきた。波動場では、高シールズ数領域におけるシートフロー状態を除き、底面には一般に砂れんが存在する。そこでは、掃流状態で砂れんの背面上を移動してきた漂砂が渦に取り込まれて浮遊状態に入っていく過程が繰り返される。したがって、波の位相によって水粒子速度が零になる場合、沈降して海底に戻るというように、いわば、強制的に波によって一時的に浮遊状態に移行している。

この場合、外力特性は波高によってほぼ支配される。しかし、掃流と浮遊状態の漂砂が共存する場合、その移動層の厚さは波高ではなく水深で規定される。とくに、

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

** 正会員 五洋建設株式会社

*** 正会員 西松建設株式会社

**** 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

漂砂現象が碎波帯でもっとも活発であるという事実から、漂砂帯全域にわたる漂砂の特性がこの碎波帯における物理量では規定されると考えるのは至極妥当である。そうすると、碎波水深全域にわたって漂砂が存在するかどうかということが、漂砂の特性を表わす、より大きな指標になると考えられる。つまり、掃流漂砂か浮遊漂砂のいずれが卓越するのかを表す浮遊漂砂パラメータ（河田ら、1991）が海浜相似パラメータとして重要になってくる。

そこで、Dean にならって、以下の関係式が誘導される。まず、漂砂の移動層厚が碎波水深に比例すると仮定する。

$$Z = \alpha h_b \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 α ：比例定数、 h_b ：碎波水深である。漂砂がこの空間に均等に分布し、それが波の半周期に完全に沈降するかどうかの判定は、近似的に次式に従う。

$$\frac{Z}{w} = \frac{\alpha h_b}{w} = \frac{T}{2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 w ：漂砂の沈降速度である。したがって、沖波の関係式を式(2)に代入して変形すれば、結局、次式が得られる。

$$\frac{H_o}{L_o} = \frac{\pi}{\alpha} \cdot \left(\frac{h_b}{wT} \right) \cdot \left(\frac{w^2 H_o}{g h_b^2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

(π/α) は定数であるから、改めて α とおけば、

$$\frac{H_o}{L_o} = \alpha \left(\frac{h_b}{wT} \right) \cdot \left(\frac{w^2}{g h_b} \right) \cdot \left(\frac{H_o}{h_b} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$= \alpha \left(\frac{w}{gT} \right) \cdot \left(\frac{H_o}{h_b} \right) \dots\dots\dots (5)$$

以上のように、最終的には海浜断面は沖波波形勾配と右辺の浮遊漂砂パラメータなどの関係で表示できることが示唆される。とくに、式(5)で、沖波波高と碎波水深の比を一定とすれば、Dean の結果と完全に一致する。また、式(4)において、沈降速度と碎波点での長波の伝播速度の比は現在のところどのようなメカニズムに支配されているかどうか不明であるが、式(4)の右辺第1項のみで領域区分が行われるのであれば、逆にこれが一定とみなせることになる。このことは碎波点の粒径がその水深における長波の伝播速度に規定されることを示しており、岸沖方向への底質のふるいわけを考えると、非常に興味深い結果を示している。

(3) 模型底質選定の付加的条件

今回、誘導した関係は、底質として軽量骨材を用いる場合にも適用可能な表示となっている。ここでは、底質を選ぶ際の付加的条件について述べる。その1つは、底質として砂を用いた場合、次のような問題が起こることである。それは、水理実験において、nearshore zone には通常砂れんが発生し、その砂れんのスケールはほぼ水深スケールになるので、そこに1つの縮尺効果が入って

くる可能性があることである。前述したように、現地海岸では、海底に発生する砂れんの波長あるいは波高は水深に比べて十分小さい。すなわち、波動運動に対しては粗度になっているが、模型実験では粗度ではなく波動の場を規定するようなスケールになっている。したがって、実験において砂れんが発生すると、そこで発生する漂砂現象が、直ちに現地とは相似でないような現象が起こることが考えられる。そのため、例えば1/49あるいは1/64の模型縮尺で砂を使うと、砂れんのため漂砂の相似性が満足されなくなり、その結果としての海浜変形の特性も妥当であるかどうかを判断することが極めて難しい問題に直面することになる。

2番目の問題は、軽量骨材を使うことにより発生する問題である。ここで示したパラメータを使うと、比重が限りなく1に近いような軽量骨材を用いると、原理的にかなり大きな粒径をもつ軽量骨材を使うことができることになる。しかし、このような比重だけで軽量骨材を決めると、問題が発生する。それは、もともと漂砂現象というのは bed material load としての摩擦過程に支配されており、それはミクロな目でみれば砂同士がどのように接触し、どのように反発するかというような条件に規定されることになる。ところが、たとえば軽量骨材としてプラスチックを使うと、プラスチックの粒子同士の反発などの機構が砂同士のそれと同じであるかどうかという問題が発生する。もしそれが異なると、底質の移動形態そのものが、砂と軽量骨材とで変わることになる。すでに、プラスチックやポリプロピレンのような軽量骨材を用いると、波動の場では移動床全体が振動するような現象が発生することがわかっている。このような例が示すように、底質は、比重だけで定めるのではなく、底質同士の摩擦を含めた力学関係が砂同士のそれと同じような関係にあるようなものを選ぶなければならないことがわかる。

3. 海浜相似パラメータの適用性

(1) 新パラメータによる海浜断面分類

ここでは、前章で示した沖波波形勾配と浮遊漂砂パラメータという無次元量を用いて、従来の海浜断面に関する実験結果を整理することを試みた。図-1は式(5)にしたがって、縦軸に H_o/L_o 、横軸に $w/gT \cdot H_o/h_b$ を取って従来の結果を図示したものである。海浜断面の領域区分としては、図中に示した形状によってⅠ、Ⅱ及びⅢ型に分けてある。ここでは、このⅠ～Ⅲ型の海浜断面が、著者らによって誘導された無次元量で、どの程度区分できるかを調べた。

図-1から明らかなように、複数の海浜断面が共存する部分が若干認められるが、図中の曲線によってかなり

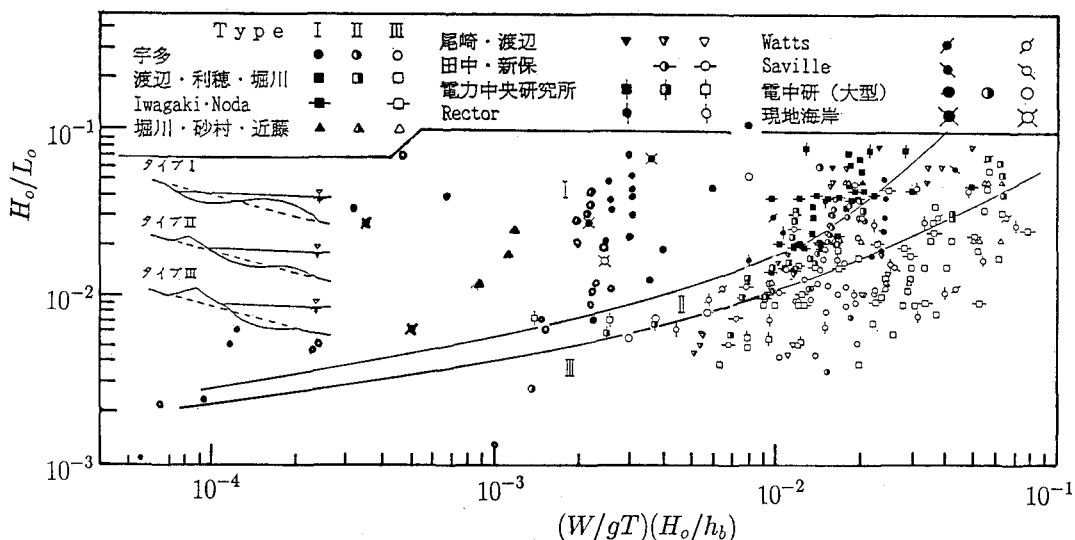


図-1 海浜相似パラメータによる海浜断面の領域区分

の程度実験結果が区分できることがわかる。また、従来の海浜断面の区分で認められるような縮尺効果がほとんど認められない。もちろん、実験結果の中には、海浜断面の判定が非常に困難なものが含まれており、それを考慮すると、今回誘導した無次元量でかなりの程度区分できるといえる。

つぎに、図-2 は、式 (4) の右辺第 1 項である h_b/wT と左辺の沖波波形勾配との関係で従来の結果を図示したものである。これからも、海浜断面の領域区分にかなりの程度適用できることや縮尺効果がそれほど認められないことがわかる。この事実、漂砂の沈降速度と碎波点での長波の伝播速度とに何らかの関係が存在する可能性を示唆している。

(2) 新パラメータの軽量骨材への適用

軽量骨材を用いた実験結果に適用したものが図-3 である。これから、データが非常にバラついていて、新しいパラメータの妥当性は明らかではない。むしろ前章で示したように、軽量骨材の性質によっては移動形式が砂の場合と非常に異なることから、海浜断面の形状そのものが砂の場合と違う結果が発生するというのである。石炭粉を使ったものについては、図中の曲線によってかなりの程度領域区分できることがわかるので、前述した砂に近い性質をもつ軽量骨材を使うことの意義がある程度認められたと考えられる。

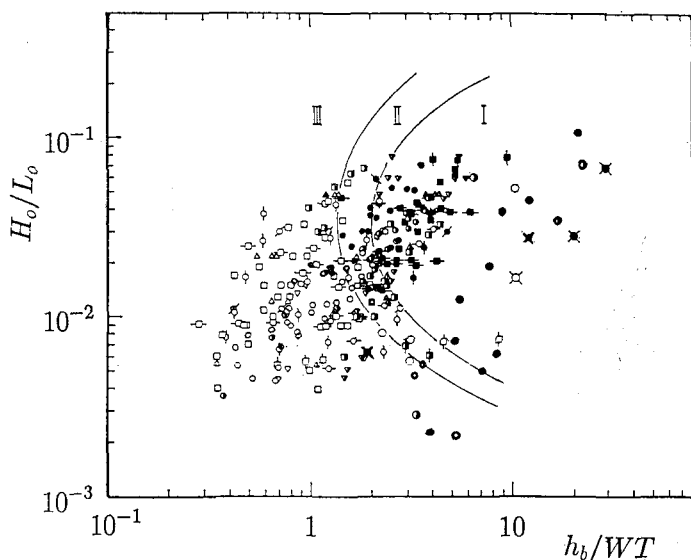


図-2 浮遊漂砂パラメータによる海浜断面の領域区分

つぎに実際の 3 次元移動床模型において、従来行なわれた実験の底質について試算した結果を表-1 に示す。ここで、表中の簡易解と名付けたものは、底質の沈降速度が粒径と密度の積の平方根に比例するとした場合の解であり、また、厳密解としたのは、Rubey の式に代入して粒径を求めた場合である。今後、基礎的な実験を行って、この妥当性を確かめる必要がある。

4. 時間縮尺の検討

水理模型実験を行う場合に、現地スケールでどの程度の時間経過した後の地形を模型実験で再現しているかを

(2) 時間縮尺

式(6)から縮尺関係を求めると、次のようになる。

$$\lambda_t = \lambda_{qx} \lambda_{qz}^{-1} \lambda_h \lambda_x \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 λ は模型と原型との比を表す。式(7)の漂砂量式の右辺を展開し、 ϕ_0 を一定とすると、つぎの2つの縮尺関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{qx} &= \lambda_{fw}^{3/2} \lambda_H^{-3} \lambda_T^{-3} \lambda_{\sinh(kh)}^{-3} \lambda_s^{-1} \lambda_g^{-1} \\ \lambda_{qx} &= \lambda_{fw}^{1/2} \lambda_H \lambda_T^{-1} \lambda_{\sinh(kh)}^{-1} \lambda_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

式(8)と(9)から時間縮尺を求めると、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_t &= \lambda_i \lambda_{fw}^{-3/2} \lambda_H^{-3} \lambda_T^{-3} \lambda_{\sinh(kh)}^{-3} \lambda_s \lambda_g \lambda_h \lambda_x \\ \lambda_t &= \lambda_i \lambda_{fw}^{-1/2} \lambda_H^{-1} \lambda_T \lambda_{\sinh(kh)}^{-1} \lambda_d \lambda_h \lambda_x \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、つぎのような関係が成立すると仮定する。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_s &= 1, \quad \lambda_g = 1 \\ \lambda_i &= \lambda_x = \lambda_h = \lambda_H = \lambda_L = \lambda_{H0} = \lambda_{L0} \\ \lambda_T &= \lambda_{L0}^{1/2}, \quad \lambda_{H0/L0} = 1, \quad \lambda_g = 1, \quad \lambda_v = 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

式(10)と(11)から、時間縮尺は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_t &= \lambda_{fw}^{-3/2} \lambda_i^{1/2} \\ \lambda_t &= \lambda_d^{-1} \lambda_{fw}^{-1/2} \lambda_i^{3/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

そこで、粒径縮尺と実験縮尺が同じ($\lambda_d = \lambda_i$)のとき、 $\lambda_{fw} = 1$ となるので、式(12)の時間縮尺はすべて $\lambda_t = \lambda_i^{1/2}$ となり、フルード則と一致する。

すでに第2章で述べたように、従来、底質粒径の決定法が実験的な側面をかなり有していたために、この継続時間についてもいくつかの方法が提案されてきたが、その理論的な背景がそれほどはっきりしたものではなかったといえる。今回のこの手順に沿って決めていくと、時間縮尺もフルードの相似則によって一義的に定めてよいことになる。

5. 結 語

以上、碎波帯の漂砂の移動現象に注目し、海浜相似パラメータの海浜断面形状の領域区分への適用性、底質粒径の縮尺及び時間縮尺決定法について検討した。その結果から、碎波水深が重要な変数であることがわかったが、そこには海浜勾配の影響が含まれており、従来の結果をも包含するものとなっている。得られた知見は、つ

ぎのように要約される。

1) 現地スケールの大型模型実験あるいは現地海岸のデータも合わせて海浜断面の領域区分への海浜相似パラメータの適用性を調べた結果、従来みられたような明らかな縮尺効果は存在せず、よく区分できることがわかった。軽量骨材についても石炭粉のような砂に近い性質を持つようなものについては、ある程度適用できることがわかった。

2) 小縮尺模型実験において、砂の粒径が十分大きく漂砂現象が摩擦過程で再現できる場合にはフルードの相似則により底質を縮小する。再現できない場合には、砂に近い性質の軽量骨材を用いて式(4)あるいは(5)とRubeyの沈降速度を与える関係式を用いて決めることを提案した。

3) 河田の誘導した漂砂量則に基づいて地形変化の時間縮尺を検討し、粒径縮尺と模型縮尺が同じであるとき、フルードの相似則と一致することがわかった。

参 考 文 献

- 伊藤政博(1990): 海浜変形の移動床模型実験における時間縮尺について, 土木学会論文集, 第423号/II-14, pp. 151-160.
- 岩垣雄一・野田英明(1961): 海浜変形に及ぼす scale effect の研究, 京大防災研年報, 第4号, pp. 210-220.
- 河田恵昭(1989): 傾斜海浜における漂砂量則について, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 289-293.
- 河田恵昭・西 良一(1990a): 沖浜における海浜断面形状の形成, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 324-328.
- 河田恵昭・土屋義人(1990b): 岸沖・沿岸漂砂量則の統一表示, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 259-263.
- 河田恵昭・西 良一(1991): 掃流・浮遊漂砂の接続法と全漂砂量の算定, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 221-225.
- 榎木 亨(1984): 移動床模型実験の相似率, 1984年度水工学に関する夏期研修会講義集(Bコース), pp. B-5-1-B-5-14.
- 武田一郎・砂村継夫(1982): パーハの形成条件と高さ, 地形, 第3巻, 第2号, pp. 145-157.
- 服部昌太郎・川又良一(1978): 碎波帯内の海浜変形過程, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 218-227.
- Dalrymple, R. A. (1992): Prediction of storm/normal beach profiles, J. WPCE, ASCE, Vol. 118, No. 2, pp. 193-200.
- Dean, R. G. (1973): Heuristic model of sand transport in the surf zone, Proc. 1st ACCE, pp. 203-214.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional shore transformation due to waves, Proc. 14th ICCE, pp. 920-938.