

海浜変形の相似則に関する実験的研究

土 屋 義 人*・伊 藤 政 博**

1. 緒 言

二次元海浜変形に関する相似則の研究は古くから行なわれており、1947 年に Beach Erosion Board¹⁾ では、原型に対して模型実験に使用する底質砂の粒径、波高、波長および造波水槽水深をすべて 1/2 に縮小した場合、両者がかなり良い相似性を示すことを実験的に確かめた。さらに、Saville (1957) や岩垣・野田 (1961) らは、原型に対する模型の実験条件を Froude の相似則に従って縮小すると、縮尺効果の影響によって海浜断面形状が必ずしも相似にならないことを指摘した。この後、多くの研究者が相似則を理論的・実験的に研究し、模型の底質に比重の軽い物質を使った場合についても検討されてきたが、いまなお実用に十分供し得る段階には至っていない。

そのため、現在、海浜変形に関する模型実験を行なう場合、模型の海浜形状が現地海岸と相似になるように、外力と底質の縮尺関係を試行錯誤的に決定し、場合によっては模型に幾何学的歪を与えて、その相似性を保たせるよう努力が払われている。

本研究は、二次元海浜変形を対象にして、模型の底質砂の粒径を原型とは無関係に数種の中から定めるが、波の特性は Froude の相似則に従って決定するものとする。したがって、同一粒径の下で実験ごとに波の縮尺を変化させて、他の粒径についてもこのような実験を行なう。これらの結果から、海浜断面形状が相似となる粒径と波の実験条件の関係を見出すことを試みる。さらに、こうして求められた相似則の成立する領域と従来発表された海浜断面特性式から求めた相似則との関連についても検討を加える。

2. 実験方法・実験装置

(1) 実験方法

まず、砂で様な初期浜勾配を有する海浜を造り、出来る限り現地海岸に近いスケールの波を作用させて得られる海浜を原型とする。一方、模型は水平および鉛直方

向の縮尺に歪を与えないものとし、造波水槽水平床部の水深、波高、波長、周期などの外力としての波の特性はすべて Froude の相似則で決定する。また、模型に使用する底質としては、両者の海浜断面形状が相似となるものを見つけるため数種の粒径の砂を用意し、その中から底質砂の粒径を Froude 相似則によらずに定めて、様な初期浜勾配の海浜を造るものとする。また、原型と模型で造波装置の形式、造波水槽の長さ・幅、初期汀線から造波板までの距離などの諸寸法については、相互の間に幾何学的相似則が成立するように配慮した。しかし、模型の縮尺によってはこれらの相似条件を十分満足できなかった場合も生じた。

(2) 原型と模型の実験装置

前述の実験方法に基づいて、まず原型としては、京都大学防災研究所附属宇治川水理実験所の長さ約 78 m、幅 1 m、高さ 1.5 m のコンクリート造のフラッター式造波機を取付けた波浪水槽で行なった実験結果を対象とする。また、Saville^{2),3)} は砂で 1/15 の初期浜勾配を造り、California の Mission Beach と同程度の波を 40 時間させた実験を行なっているため、これらの実験条件および結果も原型として取扱う。一方、模型実験は、名城大学理工学部土木工学科の長さ 28 m、幅 1 m、高さ 1 m の鋼鉄製片面ガラス張りのフラッター式造波機を取付けた造波水槽を幅約 50 cm に中仕切板で仕切って、その片側を使用して行なった。模型実験は表-1 で示されるように、底質砂の粒径を一定にしたまま、波に関する縮尺を実験ごとに变化させた。この場合、波は 24 時間作用させた。しかし Saville の実験に対する模型については、Froude の相似則に従って定めた時間だけ波を作用させた。

3. 原型と模型との相似性の判定

(1) 判定基準

二次元海浜変形において、模型が原型に対して相似になるためには、一般に次の諸現象が相似とならなければならないであろう。

- a) 海浜断面形状
- b) 漂砂の移動に関する移動形式や漂砂量 (二次元の

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工修 名城大学講師 理工学部土木工学科

型の実験結果を示し、かつ相似性の照合判定の一例を示すものである。照合判定した実験資料の中で、B. E. B.の実験は、前浜から、外浜にかけて $i_0=1/10$ 、沖浜部分では $i_0=1/20$ からなる複断面の一樣初期浜勾配を有するものである。さらに静岡県による田子の浦海岸侵食対策に関する模型実験⁵⁾では、年数回生じる時化時の波を対象として、現地の海浜断面形状を前浜から沖浜にかけて、 $1/14.3$ および $1/3$ の複断面の初期海浜を扱っている。

以上の実験資料を原型と模型で相似、擬相似および非相似に照合・判定・分類し、縦軸に模型と原型の底質砂の粒径比の逆数； $1/\lambda_a=1/[(d)_m/(d)_p]$ を、横軸に沖波波高比、いわゆる Froude の相似則による実験縮尺の逆数； $1/\lambda_{H_0}=1/[(H_0)_m/(H_0)_p]=n$ を取って、図-3 に整理した。さらに、図-3 を相似、擬相似および非相似の三領域で区分すると、海浜変形が相似となる領域が存在することがわかる。

(3) 平衡状態への移行過程における相似性

図-3 で相似と判定された実験結果について、さらに平衡状態への移行過程でその相似性が保たれているかどうかを調べる。一例として、図-3 中、④で示されるものについて、Froude の相似則によって波の作用時間を原型と模型で定めて、両者の海浜形状を比較したものが図-4 である。その結果、図-3 に示した相似領域では、波の作用時間を Froude の相似則で定めれば、初期状態から平衡状態への移行過程においても海浜変形の相似性が保たれていることがわかる。

4. 従来の海浜断面特性式による相似則と実験結果との比較

(1) 海浜変形の無次元式による相似則

岩垣・野田 (1961) は、一樣な初期浜勾配 i_0 に波が作用した場合の海浜変形を次元解析により、次式で表わした。

$$\frac{l}{L_0} = f \left\{ \frac{h}{L_0}, \frac{d}{H_0}, i_0, \frac{H_0}{L_0}, \frac{t}{T}, \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right), \frac{\nu}{d\sqrt{gH_0}} \right\} \quad (1)$$

ここに、 l ：海浜の寸法、 L_0 ：沖波波長、 h ：造波水槽水平床部の水深、 d ：底質の粒径、 H_0 ：沖波波高、 t ：波の作用時間、 T ：波の周期、 σ ：底質の密度、 ρ ：流体の密度および ν ：流体の動粘性係数である。

筆者らによる実験では、原型と模型で縮尺を歪めず、比重がほぼ同じ底質砂を使用し、その粒径と波の縮尺を独立に定めた。こうすると、式 (1) の右辺で h/L_0 、 i_0 、 H_0/L_0 、 t/T および $(\sigma/\rho - 1)$ の無次元量は原型と模型で相似となるが、 d/H_0 と $\nu/d\sqrt{gH_0}$ については相似とならない。いま、この二つの無次元量について、原型と模型の関係を調べると、次式のようになる。

$$\left(\frac{d}{H_0} \right)_m / \left(\frac{d}{H_0} \right)_p = \left(\frac{d}{H_0} \right)_m / \left(\frac{d}{H_0} \right)_p = \lambda_a \lambda_{H_0}^{-1} = 1,$$

したがって、

$$\lambda_a = \lambda_{H_0} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\nu}{d\sqrt{gH_0}} \right)_m / \left(\frac{\nu}{d\sqrt{gH_0}} \right)_p = \lambda_a^{-1} \lambda_{H_0}^{-1/2} \lambda_g^{-1/2} \lambda_v = 1,$$

上式で、 $\lambda_g=1$ および原型と模型で同じ流体（水）を使用すると、 $\lambda_v=1$ となるから、

$$\lambda_a = \lambda_{H_0}^{-1/2} \quad (3)$$

ここに、添字 m 、 p はそれぞれ模型、原型に対応する量を表わす。式 (2) の関係は底質粒径と波の幾何学的相似則を表わし、いわば Shields の Froude 数⁶⁾と同じである。また式 (3) の関係は底質粒径と波に関する Reynolds 数に依存する相似則である。式 (2) および (3) の相似

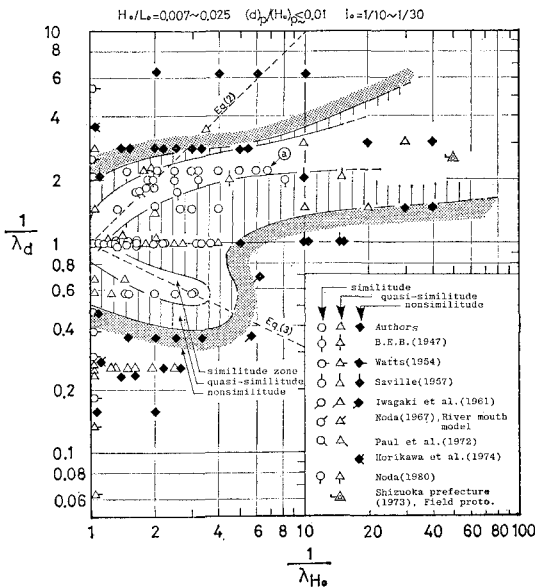


図-3 海浜変形の相似性が成立する領域

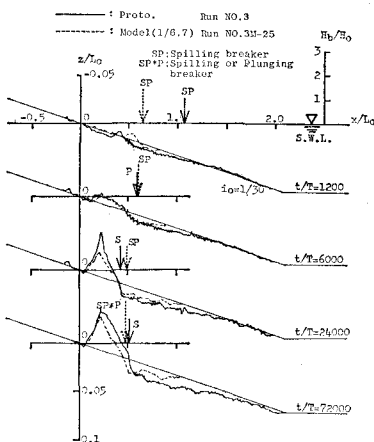


図-4 平衡状態への移行過程における海浜変形の相似性 (図-3 の④で示す実験条件)

表-2 従来の海浜断面特性式による相似則

No.	発 表 者	海浜特性表示式 及び図の種類	相 似 則	$\lambda_s=1, \lambda_v=1, \lambda_g=1$ $\lambda_{H_0}=\lambda_{L_0}, \lambda_x=\lambda_y$ における相似則	備 考
A	Johnson (1949)	海浜断面形状の正常・暴風海浜の区分	$\lambda_{H_0}=\lambda_{L_0}$	左に同じ	底質粒径の影響は無視, 図的表示
B	岩垣・野田 (1961)	同 上	$\lambda_{H_0}=\lambda_{L_0}, \lambda_{H_0}=\lambda_d$	$\lambda_d=\lambda_{H_0}=\lambda_{L_0}$	図的表示
C	Nayark (1970)	同 上	$\lambda_{H_0}=\lambda_{L_0}, \lambda_{H_0}=\lambda_d \lambda_\sigma$	$\lambda_d=\lambda_{H_0}=\lambda_{L_0}$	図的表示
D	Zwarborn et al. (1970)	同 上	$\lambda_{H_0}=\lambda_{L_0}, \lambda_\omega \lambda_{H_0}^{-1/2} \lambda_g^{-1/2}=1$	$\lambda_\omega=\lambda_{H_0}^{1/2}$	図的表示
E	Noda (1972)	汀線付近の海浜断面形状	$\lambda_d \lambda_\sigma^{1.85} \lambda_y^{-0.55}=1$ $\lambda_x \lambda_y^{-1.32} \lambda_\sigma^{0.386}=1$	原型のみ成立	底質に比重の軽い物質を使用すれば模型可
F	Dean (1973)	正常・暴風海浜の区分表示式	$\lambda_\omega \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{1/2} \lambda_g^{-1}=1$	$\lambda_\omega=\lambda_{H_0}^{1/2}$	
G	砂村・堀川 (1974)	海浜変形のタイプ分け表示式	$\lambda_d^{0.67} \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{0.83} \lambda_{\tan \beta}^{-0.27}=1$	$\lambda_d=\lambda_{H_0}$	
H	服部・川又 (1978)	砕波帯内の海浜地形分類表示式	$\lambda_\omega \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{1/2} \lambda_{\tan \beta}^{-1}=1$	$\lambda_\omega=\lambda_{H_0}^{1/2}$	
I	堀川・砂村・近藤 (1974)	汀線の最終変化量表示式	$\lambda_d \lambda_{H_0}^{-2} \lambda_{L_0}^{-1} \lambda_{\tan \beta} \lambda_g \lambda_g^{-1/2}=1$, $\lambda_d \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{\tan \beta}=1$	$\lambda_d=\lambda_{H_0}$	
J	堀川・砂村・近藤・岡田 (1975)	汀線の前進・後退の限界表示式	$\frac{10}{18} \lambda_d^{0.67} \lambda_{H_0}^{-1} \lambda_{L_0}^{0.33} \lambda_{\tan \beta}^{-0.27}=1$	$\lambda_d=2.38 \lambda_{H_0}$	
K	尾崎・渡辺 (1976)	同 上	* $\lambda_d^{1.8} \lambda_{H_0}^{-1.125} \lambda_{L_0}^{0.625} \lambda_{\tan \beta}^{-1.071} \lambda_g^{0.5}=1$	$\lambda_d=\lambda_{H_0}^{1/3.6}$	* Méhauté-Koh の式を用いて変形
L	伊 藤・増 田 ⁸⁾	多変数多項式による汀線移動量の表示式	(省 略)	$\lambda_d=\lambda_{H_0}^{-1/2}, \lambda_{H_0}=1$, $\lambda_d=\lambda_{H_0}^2, \lambda_d=\lambda_{H_0}^{1/2}$, $\lambda_h=\lambda_{H_0}, \lambda_{t_0}=1$	試算法により相似則を求む
M	Rector (1954)	前浜勾配表示式	$\lambda_d^{0.1} \lambda_{H_0}^{-0.42} \lambda_{L_0}^{-0.32}=1$	$\lambda_d=\lambda_{H_0}$	

$\tan \beta$: 初期浜勾配, ω : 底質の沈降速度, x : 水平方向の寸法, y : 鉛直方向の寸法

則と 図-3 との関係と比較するために, これらの関係破線で図中に示した。その結果, 式 (2) と実験による相似領域とは, $1/\lambda_d=1\sim2$ および $1/\lambda_{H_0}=1\sim2$ の範囲で両者の傾向が一致するが, $1/\lambda_{H_0}>2$ では一致しなくなる。このことは, 一般に波の縮尺 (実験縮尺 $S=1/n$) が小さくなるにつれて, 模型の底質粒径を式 (2) から求められる値より若干粗く, かつ原型の粒径よりやや細かい値, すなわち, $(d)_p/n < (d)_m < (d)_p$ の条件を満足する部分に相似領域が存在することを示す。さらに, $1/\lambda_{H_0}=1\sim4$ の範囲では, 式 (3) の相似則を満足する部分でも相似領域が存在していることは興味深い。

(2) 海浜の断面形状特性式による相似則

正常海浜・暴風海浜, 汀線移動量, 汀線の前進後退の限界などについて, これらを分類する図や表示する関係式は数多く発表されている。そこで, これらの図や関係式を用いて, 4. (1) のような方法で相似則を求め, その結果を表-2 に一括表示した。この表で, No. A~H は海浜断面形状の分類, N. I~L は汀線移動, No. M は前浜勾配などを表示するものである。これらの関係式から, 本研究の主旨に従って整理した相似則を表中第5列に示してある。このように相似則を整理集約すると, 表中 No. D, F および H はいずれも底質粒径が沈降速度の縮尺で表わされている。そのため, 粒径と沈降速度と

の関係を求めた上で, 再表示すると理解しやすくなる。一般に, 沈降速度表示式は, その速度および流体の性質に依存する Reynolds 数によって, その適用範囲に限界がある。各沈降速度表示式⁷⁾ から相似則を求め, 原型と模型で共に水を使用し, 底質に砂を使用した場合について整理すると, 次のような関係式が得られる。

Stokes 式

$$(Re < 4.6, \text{ 砂の粒径: } d_{\text{mm}} < 0.15),$$

$$\lambda_\omega = \lambda_d^2$$

Allen 式

$$(4.6 \leq Re < 300, 0.15 \leq d < 1.1),$$

$$\lambda_\omega = \lambda_d$$

Kármán 式

$$(300 \leq Re < 3200, 1.1 \leq d < 5.8),$$

$$\lambda_\omega = \lambda_d^{2/3}$$

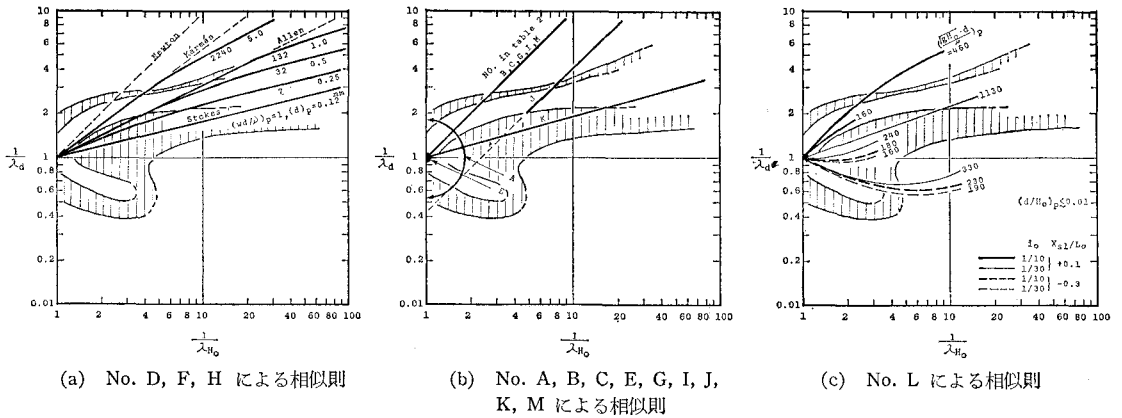
Newton 式

$$(3200 \leq Re < 10000, 5.8 < d),$$

$$\lambda_\omega = \lambda_d^{1/2}$$

.....(4)

これらの関係式を用いて, 表-2 の No. D, E および H の相似則を再整理した結果を原型の Reynolds 数をパラメータに取って, 図-5 (a) に示してある。さらに, 表-2 の No. A, B, C, D, E, G, I, K および M の



図—5 表—2 の各種相似式と実験結果との比較

関係を 図—5 (b) に示す。図—5 (b) で、No. J の汀線の前進後退を判別する関係式の定数は、現地と実験とで異なる値を取るの、現地と実験の縮尺を考慮した上で、その相似則を図示してある。したがって、この相似則は実線で示される部分のみで成立していると考えられる。また、表—2 の No. L は、汀線の移動量を式 (1) の右辺の無次元量で構成された多変数多項式を用いて表示しているので、試算法で相似則を求めて 図—5 (c) に示してある。以上の相似則と実験による相似領域との対応性は、沈降速度を用いた関係式から求まる相似則が実験の傾向と良く一致している。しかし、式 (3) の関係を満足する相似領域との対応性は見られない。その点、No. L による相似則は、原型の Reynolds 数 $(\sqrt{gH_0d}/\nu)_p$ の値によって、 $1/\lambda_d$ と $1/\lambda_{H_0}$ の関係が変化するので、全体に実験による相似領域と良い対応を示すことがわかる。

5. 結 語

(1) 二次元海浜変形における相似条件を底質砂の粒径と波との縮尺の関係において表示することができた。この相似領域では、平衡状態へ移行する海浜変形過程においても、波の作用時間を Froude の相似則で定めれば、相似性を確保することができる。

(2) 底質の沈降速度や Reynolds 数を用いた海浜断面の特性式から誘導される相似則は、実験によって求めた著者らの相似領域とその傾向がよく一致する。このこ

とは、水の粘性効果が海浜変形の相似則に大きな影響を与えていることを裏付けているといえる。

最後に、本研究の実験を行なうに際して、京都大学防災研究所海岸災害部門関係者ならびに名城大学理工学部土木工学科、河海工学部門大学院生および卒業研究生の諸氏より好意的な協力を得た。ここに付記して感謝の意を表わす。

参 考 文 献

- 1) Beach Erosion Board: A study of comparative action of waves on model beaches of different scales, Bulletin, B.E.B., Vol. 1, No. 2, pp. 8~12, 1947.
- 2) Saville, T. Jr.: Scale effects in two dimensional beach studies, Proc. 7th General Meeting, I.A.H.R., pp. A3-1~8, 1957.
- 3) U. S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore protection manual, Vol. I, 1973.
- 4) 伊藤政博: 海浜変形の再現実験における実験誤差、——特に汀線の移動について——、第 36 回年次学術講演会講演概要集, 1976.
- 5) 静岡県: 因子の浦海岸侵食対策水理模型実験報告書, p. 211, 1973.
- 6) Paul, M. J., J. W. Kamphuis and A. Brekner: Similarity of equilibrium profiles, Proc. 13th Conf. Coastal Eng., pp. 1217~1236, 1972.
- 7) 土木学会水理公式改訂委員会編: 水理公式集, 昭和 38 年増補改訂版, p. 613, 1967.
- 8) 伊藤政博・増田重臣: 重回帰分析による二次元海浜変形における汀線移動量の表示について, 土木学会論文報告集 (投稿中).