

移動床模型実験の相似率

榎 木 亨

1. はじめに

近年海岸及び港湾の構造物の建設計画に当って、波浪変形、海浜変形などの諸問題を解決するのに数多く数値解析、数値シミュレーションの手法が用いられてきている。しかしながら数値シミュレーションの場合、確立された方程式があり、境界条件も明らかな時には妥当な解を与えるけれども、砕波の様にまだ十分な解が求められていない現象、特に砕波に伴って生じる漂砂現象の結果生起する海岸侵食、港湾埋没に対しては、数値シミュレーションの結果、解が得られたとしても疑問が残り、水理実験による確認を求める人も多い。

しかし水理実験を主張する人も、拘束性の強い実験水槽での実験、まだ確立されていない移動床の相似則に論が及ぶと頭をかかえ込んでしまう。この様に大きな問題点はかかえている漂砂実験の中でも、特に岸一沖方向漂砂が卓越する現象を対象とする研究においては、岸一沖漂砂量の定式化が行なわれていないせいもあり、水理実験でその傾向でも知ろうとする努力がとられている。しかしながら、このような水理実験で相似則を誤ると、例えば侵食する場所が堆積したり、河口閉塞する河川が閉塞しないといった全く逆の答を出すことがあるので、その相似則については実験を行なう前に慎重に検討しておく必要がある。

本文はまず従来の移動床の実験例について紹介し、ついで、代表波の決定法、模型底質の決定法について言及し、ついで実験波の継続時間をどれくらいにとるべきか、などについて検討する。そしてそれらを用いて行った模型実験結果をケース・スタディとして紹介しておこう。

2. 従来の移動床の実験例

ここでは従来わが国で行われた移動床実験のうち海岸工学講演会論文集に記載された実験例にもとづいて既往の実験例に対して考察を進めていこう。

移動床の場合、砂を動かすだけの波の力を必要とするために、広範囲な実験対象地域の場合、水平縮尺(n_l)と異なった鉛直縮尺(n_z)を用いることがある。このように n_l と n_z が異なる場合を歪模型と称している。この歪模型の採用については波の相似、漂砂移動の相似については幾つかの問題点が指摘されており、以下の論議においても歪模型と歪無し模型にわけて検討を進めていくが、特に注意しなければならないのは、歪模型の場合海浜勾配が明らかに急峻になり、砂の安息角による安定を考えると歪度は当然限界があることである。

表-1は先に述べた海岸工学講演会論文集に発表された模型実験の n_l 、 n_z 及び現地波浪、模型波浪の特性、底質粒径(d_0)を一覧表に示したもので、添字 p は現地の値を、 m は実験の値を表わしている。また表中底質部分に特別表示してあるのは軽量底質を模型砂として用いた場合であり、 n_{ts} は地形変動の時間縮尺である。

この表からもわかるように一般に水平縮尺が $1/100$ 以上の小縮尺の模型では歪模型を用いることが多い。またこれらの実験の再現性については、汀線あるいは海浜断面形状について検証され、この再現性のもっとも良い模型波を代表波として選んでいる。さらに地形変動の時間縮尺については台風時の現地観測

表-1 既住の移動床実験例

Objective topography or structure	year	investigator	n_s	n_e	H_{0p} m	T_p sec	H_{0m} cm	T_m sec	d_p mm	d_m mm	n_{ts}
river mouth, jetty	1958	Kubo et al.	1/300	1/300	2.8	9.3				0.2	
fishery harbour, jetty	1959	Yoshitaka	1/100	1/200			3.2 ~7.0	0.96 ~1.48	0.4 ~1.0	0.28	
fishery harbour, jetty	1961	Ozaki	1/60 ~1/120	1/120	3.5 ~4.0	7.5 ~13.0			0.3 ~1.2	0.3	
harbour entrance, breakwater	1970	Agemori et al.	1/50	1/100			7.3	1.4	0.3 ~0.6	0.19 ~0.28	4hr 2year
offshore break- water	1970	Nagai et al.	1/60	1/60	6.0	13.0					
beach nourish- ment	1970	Horikawa et al.	1/50	1/50	2.53	8.0			0.3	0.16 0.17(p) 0.18(m)	5hr/0.8year 5hr/3.3year
beach nourish- ment	1970	Sato et al.	1/50	1/100	2.0	6.0 ~10.0	4.0	1.2	0.3	0.2	1hr/1year
T-shape jetty	1973	Agemori et al.	1/50	1/50	1.0 ~4.6	10.0				0.28	
jetty	1973	Ichikawa et al.	1/120	1/120	3.0	12.0	4.0	1.38		0.24	1hr/1year
reclamation	1978	Sato et al.	1/50	1/200	1.2	10.0	8.5	1.41	0.2	0.29	2hr/5year
beach nourish- ment	1978	Sato et al.	1/50	1/50	1.5	6.0	3.0	0.86	0.3	0.2	4hr/1year
breakwater	1978	Arakida et al.	1/200	1/200			2.25	0.85	0.2 ~0.15	0.73(sd)	
fill-up of fishery harbour	1966	Noda	1/50	1/50	3.5	9.0	14.0	1.4	0.2	0.13(p)	

底質：(p) パーライト，(m) メサライト，(sd) 木くず，(V) 塩化ビニール

結果と実験結果とを比較して決定している。このように移動床の模型実験の場合，代表波の決定においてすら試行錯誤的な決定方法であって，そこには統一的な方法が確立されていなかったといっても過言ではない。

3. 代表波浪の選定

代表波浪の選定方法は実験目的によって二つの方法がある。一つは長期間の汀線変化を求める場合であり，他の一つは台風等による短期間の海岸変形を求めようとする場合である。前者の場合は主として沿岸漂砂に左右されるので，沿岸漂砂量が同じとなるような代表波を選べばよい。一般に全沿岸漂砂量 Q_y は砕波点における波のエネルギーフラックスの沿岸方向成分に比例するので，この式(1)で示される波のエネルギーフラックスが等しくなる様に代表波高及び周期，波の入射角を決定してやればよい。¹⁾

$$\sum_{i=1}^n H_{bi}^2 C_{gbi} \sin \alpha_{bi} \cos \alpha_{bi} p_i = H_{sb}^2 C_{gsb} \sin \alpha_{sb} \cos \alpha_{sb} P \quad (1)$$

ここに添字 b は砕波点の値を示し，添字 i は実際の発生波，添字 s は想定代表波を示す。また p_i は発生頻度， P は発生頻度の総和， C_g は群速度， H_b は砕波高， α_b は砕波角をそれぞれ表わしている。

式(1)中の群速度の算定には代表波の周期 T_s が必要であるが， T_s の算定においては実測波の周期 T_i の発生頻度 p_i を考慮して次式で与えられる。

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^n p_i T_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (2)$$

式(2)で与えられる T_s を用いると式(1)中の C_{gs} が求まるが、 H_s と α_{sb} は一義的には定めることができない。いま造波板の角度が固定されている時は α_{sb} は自から定まり、したがって H_s も式(1)より定まる。

しかし任意に造波板の角度が変える場合には沖におけるエネルギーフラックスを等しいとした次式で代表波高を選定する方が望ましい。

$$\sum_{i=1}^n C_{g0} H_{i0}^2 p_i = H_{s0}^2 C_{gs0} P \quad (3)$$

ここに添字 0 は沖における波を表わすが、ここで沖の波とは沖波でなくとも実験水槽における一様水深に相当する水深の波でよい。

式(3)によって沖の H_{s0} が求められると浅水変形、屈折変形を考慮して式(2)の H_{sb} が求められるので式(2)より α_{sb} が求められる。

つぎに短期間の海浜変形に対する代表波の選定方法について述べておこう。この場合の海浜変形は主として岸一沖方向漂砂が支配的要因となる。そして一年を通じて最も平均的な波(これを通常時波浪と呼ぶ)によって構成される海浜地形から異常時波浪と呼ばれる台風時波浪あるいは低気圧に伴う波浪によってどの程度汀線が後退し変化するかを知ろうとすることが多い。この為にはまず通常時波浪によって形成される海浜地形に、異常時波浪を作用せしめてその地形変化を実験によって求めなければならない。このためには通常時波浪の選定を波浪の実測記録あるいは気象条件からの追算を行い、年間の波浪記録より式(3)を用いて求めなければならない。また異常時波浪については、その時の実測記録あるいは追算した値をそのまま用いればよい。

4. 模型底質の選定

模型底質を相似せしめる条件は従来の実験においても検討されているが、それらを取りまとめると以下の3つの条件となる。

- (i) 砂の移動限界水深の相似条件
- (ii) 海浜断面の相似条件
- (iii) 砂の移動形態の相似条件

以下上述の3つの条件について詳細に述べていく。

- (i) 砂の移動限界水深より求める相似則

砂の移動限界水深を示す式は数多く提案されており、その代表的なものを取りまとめると表-2のようになる。表中 u_{*c} は移動限界時の摩擦速度、 d は平均粒径、 σ は底質の密度、 h_i は移動限界水深、 u_b は底部流速、をそれぞれあらわしている。

これらの移動限界水深を相似する条件を求めてみると、例えば、

$$\left. \begin{array}{l} \text{石原・樫木}^{2)} \text{ の上式より, } n_d = \mu^4 n_o^{-3} \\ \text{佐藤・田中}^{3)} \text{ の下式より, } n_d = \mu n_o^{-2\sigma'} \\ \text{Komar}^{4)} \text{ の上式より, } n_d = n_o^{-2} \end{array} \right\} \quad (4)$$

といった様に種々の関係式が求められる。ここに n は模型と現地の比を表わす値であり、 μ は模型の鉛直縮尺をあらわす。また $\sigma' = \sigma / \rho - 1$ である。

このように数多くの相似条件があると実験者はいずれの条件を適用すべきか迷ってしまうし、また仮に一つの相似条件を採用したとしてもこの相似則に基づくと余程大きい模型でない限り極めて小さい粒径の

表-2 各研究者による底質の移動限界水深

石原・樫木 ²⁾ (初期移動)	$\frac{u_{*c}^2}{\sigma'gd} = 0.114 \left(\frac{u_{*c}d}{\nu} \right)^{-2/3}, \quad u_{*c} \cdot d < 10$ $\frac{u_{*c}^2}{\sigma'gd} = 0.028, \quad 10 < u_{*c} \cdot d < 60$																
佐藤・田中 ³⁾	$\frac{H_0}{L_0} = 1.35 \left(\frac{d}{L_0} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h_i}{L} \left(\frac{H_0}{H} \right) : \text{集団移動}$ $\frac{H_0}{L_0} = \left\{ 0.4243 \frac{2}{\pi} \sigma' \right\}^{2/3} \left(\frac{d}{L_0} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h_i}{L} \left(\frac{H_0}{H} \right) : \text{全面移動}$																
堀川・渡辺 ⁵⁾ (初期移動)	$\frac{\sigma'gd \tan \varphi}{u_b^2} = B \left(\frac{u_b \delta}{\nu} \right)^A \dots\dots\dots \text{滑 面}$ $\frac{\sigma'gd \tan \varphi}{u_b^2} = B \left(\frac{u_b}{wd} \right)^A \dots\dots\dots \text{粗 面}$ $w = 2\pi/T, \sigma' = \frac{\sigma}{\rho} - 1, \delta = \sqrt{\nu/w}, \varphi$: 砂の安息角 A, Bは下に示す常数																
Komar ⁴⁾	$\frac{u_b^2}{\sigma'gd} = 0.21 \left(\frac{d_0}{d} \right)^{1/2}, \quad d \leq 0.05 \text{ cm}$ $= 0.46 \pi \left(\frac{d_0}{d} \right)^{1/4}, \quad d > 0.05 \text{ cm}$ $d_0 = \frac{1}{\pi} u_b T$																
樫木・出口 ⁶⁾	$\left\{ \left(\frac{H}{H_0} \right) \left(\frac{1}{\sinh kh} \right) \right\}^{-1} = c N_s \left(\frac{d}{L_0} \right)^m$ $N_s = H_0/T/\sqrt{\sigma'gd}$ $c = 400, \quad m = 0.6 \quad \text{for} \quad \text{侵食型}$ $c = 20, \quad m = 0.3 \quad \text{for} \quad \text{堆積型}$																
	<table><tr><td>-A</td><td>log B</td><td></td></tr><tr><td>層 流</td><td>1.00</td><td>1.075</td></tr><tr><td>滑面乱流</td><td>0.74</td><td>0.508</td></tr><tr><td rowspan="2">粗 面</td><td>0.53</td><td>0.322</td><td>$\frac{H_0}{L_0} \leq 120 \left(\frac{d}{L_0} \right) \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right) \left(\frac{H_0}{H} \right)$</td></tr><tr><td>0.45</td><td>0.176</td><td>$> 120 \quad "$</td></tr></table>	-A	log B		層 流	1.00	1.075	滑面乱流	0.74	0.508	粗 面	0.53	0.322	$\frac{H_0}{L_0} \leq 120 \left(\frac{d}{L_0} \right) \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right) \left(\frac{H_0}{H} \right)$	0.45	0.176	$> 120 \quad "$
-A	log B																
層 流	1.00	1.075															
滑面乱流	0.74	0.508															
粗 面	0.53	0.322	$\frac{H_0}{L_0} \leq 120 \left(\frac{d}{L_0} \right) \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right) \left(\frac{H_0}{H} \right)$														
	0.45	0.176	$> 120 \quad "$														

底質となり、模型底質の剪断特性が現地のそれと著しく異なってくることも予想される。したがって移動床の底質粒径の決定は以下述べる (ii), (iii) の条件より導き出される相似則に基づく方が好ましい結果を与えるようである。

(ii) 海浜断面の相似条件

海浜断面は、岸—沖漂砂量の海浜断面に沿う分布からみて図-1 に示すように、汀線が侵食し、沖側に堆積する型（これを侵食型と呼ぶ）、汀線に砂が堆積し、沖側が侵食する型（これを堆積型と呼ぶ）、及び沿岸砂洲が発生するような中間型に大別される。模型実験において最も注意しなければならないのは、現地では侵食型の海浜断面であるのに模型では堆積型の海浜断面になることである。この海浜断面の侵食型、堆積型の発生条件については堀川⁷⁾、砂村⁸⁾、樫木・出口⁶⁾らの研究がある。

堀川、砂村らによるとその発生条件は式 (5) で示す無次元量であらわされている。

$$c = (H_0/L_0) (d/L_0)^{-0.67} (i)^{0.27} \quad (5)$$

ここに i は初期海浜勾配である。

堀川らは実験によりこの c が 3 より小さい時は堆積型、8 より大きい時は侵食型であると報告しているが、その後砂村らは実測結果より $c < 18$ の時堆積型となり、 $c > 18$ の時侵食型となることを示している。

一方樫木・出口は式 (6) で示す無次元量で堆積型、侵食型を分けている。

$$N_{sr} = gTd/2\pi\nu \leq 10^3 \quad \begin{matrix} \text{堆積型} \\ \text{侵食型} \end{matrix} \quad (6)$$

しかし式 (6) は波高の効果が考慮されていない欠点を有している。

式 (5) あるいは式 (6) から導かれる相似則は、

$$\left. \begin{aligned} n_d &= \mu && \text{from 式 (5)} \\ n_d &= \mu^{1/2} && \text{from 式 (6)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

となる。式 (7) の条件によれば (i) と同様に底質粒径が小さくなり過ぎたとしても、上述の侵食型、堆積型の条件を満足するように底質を選定しなければならない。

(iii) 砂の移動形態の相似条件

岸—沖方向の漂砂移動において、沖方向漂砂は浮遊砂が卓越し、岸向き漂砂は掃流砂が卓越していることはよく知られている。図-1 からわかるように、浮遊砂は侵食型の海浜変形に大きく寄与し、掃流砂は堆積型の海浜変形において卓越するといえる。したがって模型における漂砂の移動形態を現地の漂砂移動形態と相似せしめることは、海浜断面の相似条件とも一致する。

一般的に開水路の砂の移動形態は u_*'/w_0 によって規定され、1 より小さい時は掃流砂が卓越し、1.7 より

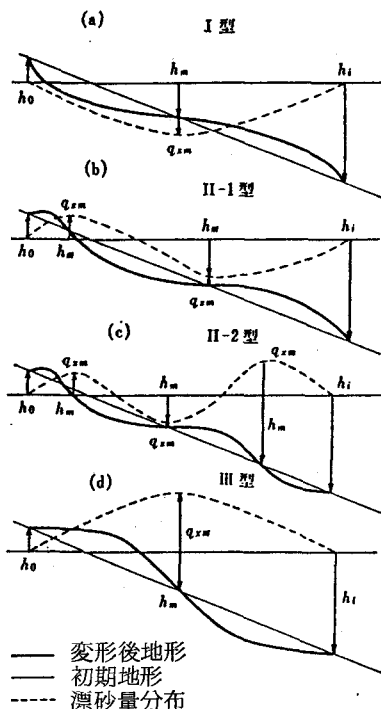


図-1 代表海浜断面

り大きい時は浮遊砂が卓越するといわれている。著者らはこの基準値を波による漂砂の移動形態に適用して、ほぼ同じ現象を示すことを確めている⁶⁾。したがって、漂砂の移動形態の相似条件は次式で与えることができる。ここに u_* は摩擦速度であり、 w_0 は砂の静水中の沈降速度である。

$$n_{u*}/w_0 = 1 \quad (8)$$

w_0 にもフルードの相似則が適用できるので式 (8) より、

$$n_{u*} = n_{w_0} = \mu^{1/2} \quad (9)$$

となる。

一方、アメリカの Shore Protection Manual⁹⁾ において記載されている様に net の岸あるいは沖方向への砂の移動は図-2 に示す様に H_0/w_0T 及び H_0/L_0 によって表示される。すなわち漂砂の移動方向を規定する値 C_0 は次式の様にあらわすことができる。

$$C_0 = f(H_0/w_0T, H_0/L_0) \quad (10)$$

したがって、この C_0 を相似させる条件として次式が求められる。

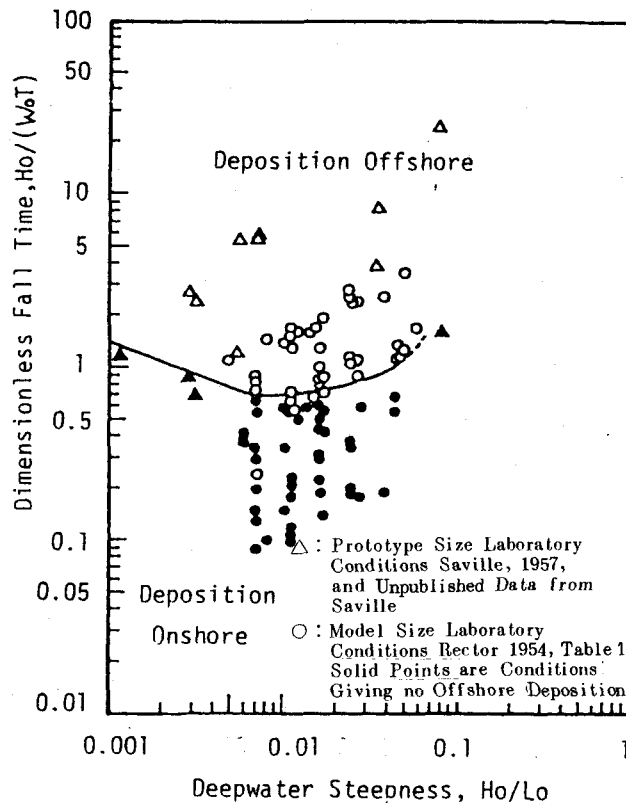


図-2 堆積型、侵食型海浜の判別図
(Shore Protection Manual より)

$$n_{c_0} = n_{H_0} n_{w_0}^{-1} n_T^{-1} = n_{H_0} n_{L_0}^{-1} = 1 \quad (11)$$

$$n_{w_0} = n_{H_0} N_T^{-1} = \mu^{1/2}$$

式(11)は式(9)と全く一致する条件である。

この沈降速度 w_0 は一般に d , σ 及び ν の関数で与えられる。Yalin¹⁰⁾はこの沈降速度を図-3のように表示しているがこれによると、

$$w_0 \propto d^2 \quad \text{for } \sigma' d^3 g / \nu^2 < 50, \quad \sigma = 2.65 \text{ の時 } d < 0.015 \text{ cm} \quad (12)$$

$$w_0 \propto d^{1/2} \quad \text{for } \sigma' d^3 g / \nu^2 > 10^6 \quad \sigma = 2.65 \text{ の時 } d > 0.04 \text{ cm} \quad (13)$$

と近似できる。

式(12)を式(11)に代入すると、

$$n_d = \mu^{1/4} \quad \text{for } \sigma = 2.65 \quad d < 0.015 \text{ cm} \quad (14)$$

式(13)を式(11)に代入すると、

$$n_d = \mu \quad \text{for } \sigma = 2.65 \quad d > 0.04 \text{ cm} \quad (15)$$

となる。 $50 < \sigma' d^3 g / \nu^2 < 10^6$ の領域に対しては図-3より求めていかざるを得ない。

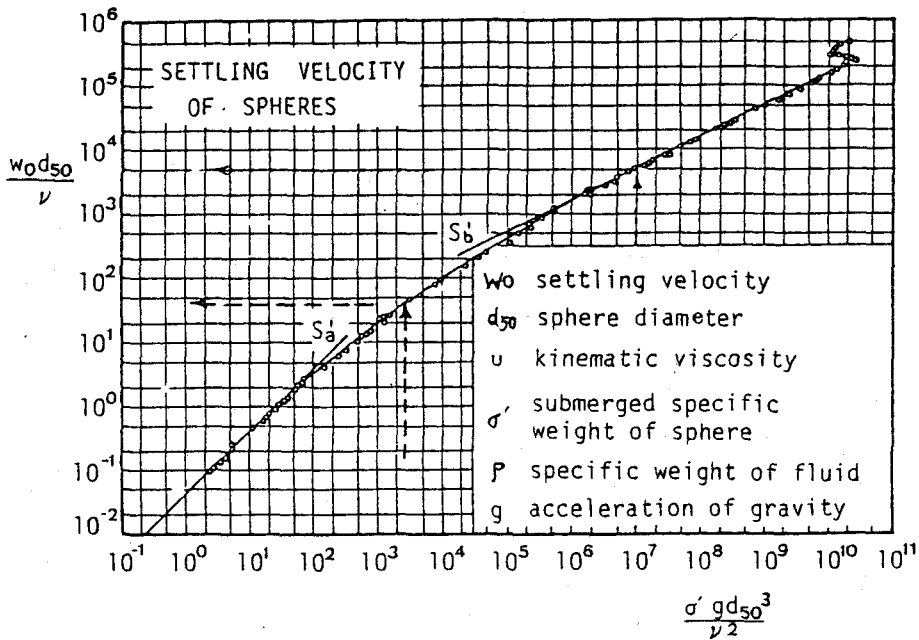


図-3 w_0 の図 (Yalinより)

つぎに上述の方式に基づいて具体的に模型底質を定める方法を述べておこう。

いま模型は歪無し模型として $\lambda = \mu = 1/30$ の模型を考える。ここに λ は水平縮尺である。さらに現地の底質粒径が 0.5 cm とすると、図-3中の点線より現地底質の沈降速度 w_{0p} は 40 cm/sec という値をうる。この値を式(11)中に代入すると、模型底質の沈降速度 w_{0m} は次式のように求められる。

$$w_{0m} = (1/30)^{1/2}, \quad w_{0p} = 8 \text{ cm/sec}$$

この値を用いて、図-3の破線をたどって模型底質の平均粒径を求めると、 $50 < \sigma' g d^3 / \nu^2 < 10^6$ の領域であるが、 $d_m = 0.05 \text{ cm}$ という値をうる。したがってこの場合は $d_m / d_p = 1/10$ という模型砂の縮尺比を示すことになる。

つぎにこの漂砂の移動形態に関連して軽量底質の是非について論じておこう。

現地の砂の比重と同じ比重をもつ底質を模型に用いると、模型波では移動しにくいということから動き易い軽量底質例えばベークライト、メサライト、コークス粉らを用いることがある。しかしながらこれらの軽量底質を用いた実験の是非については論じられた論文が少く、わずかに Paul¹¹⁾ が $d\sqrt{gH}/\nu$ 及び $\rho g H_0 / \sigma' d$ を一定条件に保って自然砂とベークライト粉 ($\sigma = 1.6$) を比較した実験の他 E. K. Noda の実験¹²⁾ があるに過ぎない。Paul によると、自然砂を用いた海浜断面が $H_0 / L_0 > 0.025$ の波では侵食型になるにも拘らず、軽量底質を用いた海浜断面は $H_0 / L_0 > 0.04$ の波を与えても侵食型とはならず、また汀線が極めて前進し易いという結果を得ている。この理由は明らかではないが、軽量底質と自然砂との安息角の差異あるいは波のエネルギーの吸収度合の相異によるものと考えられる。したがって、先述の沈降速度を用いた相似則において σ' を考慮されているからといって、模型底質の比重を考慮して模型底質の粒径を定めることはできない。この場合には沈降速度の相似以外に安息角の相似、エネルギー吸収率の相似等他の相似条件が付随してくるはずである。しかし現在、これらの相似条件について十分な検討資料を持ち合せていないので、軽量底質を用いる実験においては慎重な検討を必要としよう。

5. 時間縮尺の決定

模型実験を行った時、1時間波を作用せしめたならばそれが現地で何時間後の地形に相当するのか迷うことが多い。一般には地形の時間変動も時間縮尺であるからフルードの相似則から導かれる時間縮尺で換算すれば良いと考えがちである。また同じ考え方であるが、模型波の作用波数を計算して、現地の代表波の周期を用いて現地の時間に換算する方法もとられている。しかし、この考え方の根底にあるのは、現地の移動状況が完全に模型で再現され得るとした時の考え方であり、4.の例題においても述べた様に沈降速度の相似条件を用いるならば、たちまち底質粒径はその模型砂の粒径によって異なった縮尺になってしまうので、波から得られる時間縮尺を直接地形変動の時間縮尺に適用することはできない。ここでは砂の移動の面から地形変動の時間縮尺について考察しておこう。

地形変動の時間縮尺は次式で示す砂の連続方程式から求められる。

$$\frac{\partial h}{\partial t_s} = \frac{\partial h_x}{\partial t_s} + \frac{\partial h_y}{\partial t_s} = \frac{1}{1-\varepsilon} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (16)$$

ここに t_s は地形変動の経過時間、 ε は底質の空隙率、 q_x, q_y は単位時間、単位幅当りの岸-沖方向漂砂量及び沿岸漂砂量であり、 x, y はそれぞれ沖方向及び汀線方向への距離を示す。式(16)中の q_y は

全沿岸漂砂量 Q_y と次式の関係がある。

$$Q_y = \int_{x_0}^{x_r} q_y dx \quad (17)$$

ここに x_0 及び x_r は沿岸漂砂の岸及び沖の限界点であり, $x_r - x_0 = B$ は漂砂帯の幅をあらわす。

式(16)より相似条件は岸—沖漂砂, 沿岸漂砂それぞれに対して次式を得る。

$$n_{ts} = \mu \cdot \lambda n_{qx}^{-1} \quad (18)$$

$$n_{ts} = n_B \mu \cdot \lambda n_{qy}^{-1} \quad (19)$$

いま B が水平縮尺で相似されるとすると,

$$n_{ts} = \mu \cdot \lambda^2 n_{qy}^{-1} \quad (19')$$

となる。以下式(18)及び式(19)に基づいて考察を進めていく。

(i) 岸—沖方向漂砂による地形変動の時間縮尺

式(18)からわかるように岸—沖漂砂量が定式化できなければ, この場合の時間縮尺は決定することはできない。

そこでいま q_x として樫木らが提案した次式⁶⁾を用いることとする。

$$q_x = q_{x_0} \exp(-At_s/T) \quad (20)$$

ここに q_{x_0} は海浜変形初期の漂砂量であり, A は図-4で与えられる減衰常数であり, 図中の $N_s = H_0/T/\sqrt{\sigma'gd}$ である。いま q_{x_0} が水平床における漂砂移動量と同様の表示¹³⁾であらわされるとすると次式の様になる。

$$q_{x_0}/w_0 d \propto (u^2/\sigma'gd)^3 \quad (21)$$

一方 A については樫木らの研究によると

$$A \propto (H_0/T/\sqrt{\sigma'gd})^4 \quad (22)$$

のようになるので, 式(20), (21), (22)を考慮すると式(18)は以下の様になる。

$$\left. \begin{aligned} n_{ts} &= \mu^{-3/2} \cdot n_d^2 \exp \left\{ \frac{A_m}{T_m} t_{sp} (n_{ts} - \mu^{-3/2} \cdot n_d^2) \right\} \\ \text{or } n_{ts} &= \mu^{-3/2} \cdot n_d^2 \exp \left\{ \frac{A_m}{T_m} t_{sm} (1 - \mu^{-3/2} \cdot n_d^2 \cdot n_{ts}^{-1}) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

したがって模型実験において μ , n_d , A_m 及び模型波の作用時間 t_{sm} が与えられると, 上式により n_{ts}

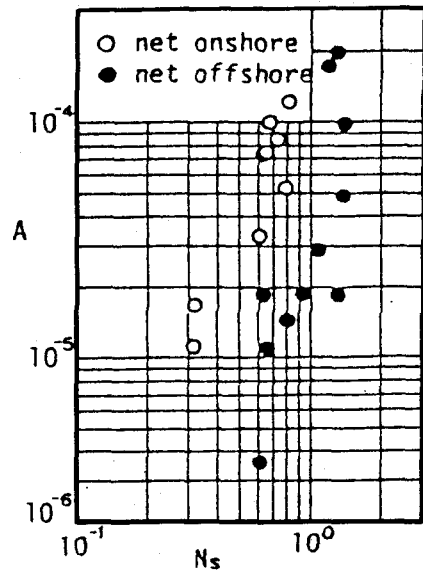


図-4 減衰常数 A の変化

が求まり現地の時間換算ができる。なお A_m は図-4を用いて求めることができる。

(ii) 沿岸漂砂による地形変動の時間縮尺

3.で述べた様に全沿岸漂砂量は砕波点における波のエネルギーフラックスの沿岸方向成分に比例するので次式のようにあらわすことができる。

$$Q_y = \frac{1}{8} r \rho g H_b^2 C_{gb} \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b = r E_a \quad (24)$$

ここに r は常数であり、 C_{gb} は砕波点における群速度、 α_b は砕波角、添字 b は砕波点での値を示す。また E_a は波の沿岸方向のエネルギーフラックスである。

式(24)から全沿岸漂砂量の縮尺は次式であらわされる。

$$n_{Qy} = n_r \mu^{5/2} \quad (25)$$

式(24)における r は一般に底質特性によるといわれているがまだ十分その関係については明らかにされていない。したがって、現地観測によって r_p を求め、模型実験により r_m を求めることが望ましいが、参考の為に従来実測によって得られた r_p の値を示すと¹⁴⁾、Savage は 0.217、佐藤は 0.12 という値を与えている。また大阪湾での実測によると、0.03 という値をえている。なおこの場合エネルギーフラックスの単位は $[t-m/日/m]$ 、 Q_y は $[m^3/日]$ という単位であらわされた場合の値である。

以上の様に n_{Qy} が求まると、漂砂帯幅 B が水平縮尺に比例するとすれば式(19)' から n_{ts} は容易に求められる。しかしながら 4.(i)、(ii)で述べた様に漂砂の移動形態の相似条件と移動限界水深の相似条件とは一致しがたいので、 $n_B = \lambda$ とはおきかたない。このとき n_{ts} は式(19)より次式の様に表わさなければならない。

$$n_{ts} = n_B n_r^{-1} \lambda \cdot \mu^{-3/2} \quad (26)$$

すなわち n_r の決定と同様に n_B についても代表波に対する現地の移動限界水深を求めて B_p を算定し、模型においても模型波、模型底質を与えて B_m を求め、 $B_m/B_p = n_B$ として与えてやる必要があろう。

6. 実験例

以上の相似条件を考慮して著者らが行った移動床模型実験の結果を述べ考察しておこう。

(i) 二次元実験の場合

実験の幾何学的縮尺は代表波の特性と造波能力より $1/30$ と決定した。実験対象海岸の海浜断面は図-5に示すように汀線付近で $1/7$ 、それより深い所で $1/25$ という勾配を示している。またこの海岸の汀線の季節的変動は最大 $10 \sim 15$ m に達し、夏期に汀線は前進し、冬期に後退している。またこの海岸の底質粒径は汀線近傍で $0.3 \sim 1.0$ cm、水深 $0 \sim 3$ m の範囲は $5 \text{ cm} \sim 20 \text{ cm}$ 、5 m より深い水深では 0.1 cm の値を示しているが、模型対象の底質粒径として汀線近傍の値を参照して 0.5 cm と決定した。代表波の決定については波高記録から冬期の通常時波浪として $H_{0p} = 1.5 \text{ m}$ $T_p = 7.0 \text{ sec}$ (W_1)、1年間に数回は必ず生じる最大波として $H_{0p} = 4 \text{ m}$ $T_p = 10.0 \text{ sec}$ (W_3)、また過去の最大波浪として、 $H_{0p} = 8.1 \text{ m}$ $T_p = 13.0 \text{ sec}$ (W_5) を選定した。

以上の資料に基づいて実験計画を樹てるに当たって、まず底質の選定は、4.(ii)の例題で示した方法で決定し、 $d_m = 0.05 \text{ cm}$ $n_d = 1/10$ という値をえた。

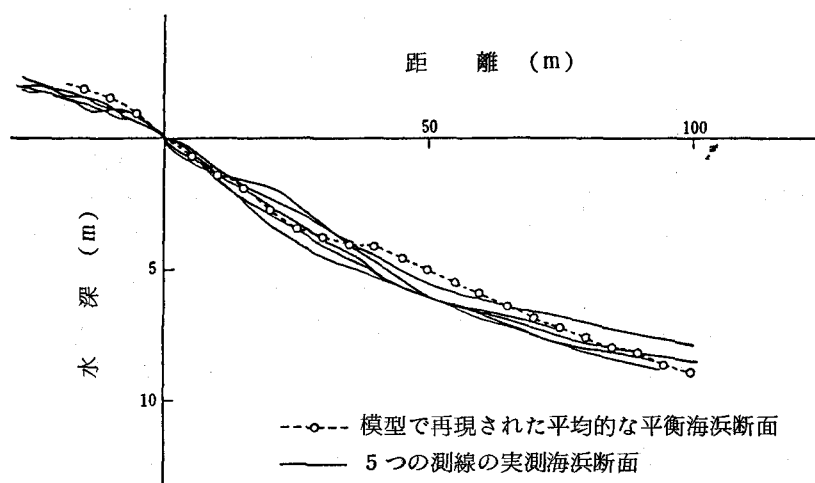


図-5 実験対象海岸の海浜断面

表-3 各代表波に対する

Wave No.	H_{op}	T_p sec	$(H_0/L_0)_p$	$(\Delta l)_p$	n_{ts}	t_{sp}
W 1	1.5	7.0	0.0192	0.9 m	1/16	18.7 hr
W 2	3.0	7.0	0.0391	- 3.0 m	1/40	46.8 hr
W 3	4.0	10.0	0.0255	0.9 m	1/15	17.5 hr
W 4	4.5	12.0	0.0200	- 1.5 m	1/19	22.2 hr
W 5	8.1	13.0	0.0308	- 11.1 m	1/27	31.5 hr
W 6	4.5	7.0	0.0588	- 6.9 m	1/12	14.0 hr

一方時間縮尺は $\mu = 1/30$, $n_d = 1/10$ を式(23)に代入して求めると、次式のようにあらわすことができる。

$$n_{ts} = 1.64 \exp \left\{ A_m \frac{t_{sm}}{T_m} (1 - 1.64 n_{ts}^{-1}) \right\} \quad (27)$$

式(27)中の A_m は図-4においてもわかるように、波高及び周期によって変化するので、上述の各代表波に対して異った値をとる。この値を用いて n_{ts} を求めた結果を表-3に記載してある。

実験方法としては最初2時間一様勾配海浜に冬期通常時波浪 W_1 を作用せしめて形成された海浜断面を初期海浜断面として、後 W_3, W_5 などの異常時波浪を作用せしめた。

この時の再現性の検証は初期海浜断面について行った。その結果を図-5中の○印で示す。これによると十分この模型底質は冬期通常時波浪に対して再現性があることが確められた。ついで W_3, W_5 などの高波浪時の実験を繰返したが、その結果70分間の模型波の作用時間後にえられた汀線の前進後退量を表-3に示す。また t_{sp} は模型波70分間に相当する現地換算時間であり、 Δl の正は堆積、負は後退量を示す。

この実験では夏期の前進量が示されていないので先に述べた一年間の季節変動量10～15mに比して Δl の値は小さいが、ほぼ変動量も現地と一致すると考えてよからう。

(ii) 三次元実験の場合

この場合は主として沿岸漂砂にともなう長期間の地形変動をとられるのを目的としているので、まず年間の入射波のエネルギーフラックスの沿岸成分を算出する。そして 3. で述べた手法を用い、使用する実験水槽の規模を考慮して代表波高、波向きを決定し、模型の幾何学的縮尺の選定をする。

実験対象を新潟県の漁港新設にともなう汀線変化の予測実測に選ぶと、幾何学的縮尺は歪無し模型の $\mu = \lambda = 1/125$ となる。またこの海岸の 1976 年から 1978 年までの 3 年間の年平均波エネルギーフラックスの沿岸成分は、東から西へ $5 \times 10^4 \text{ ton} \cdot \text{m}/\text{year}/\text{m}$ という値がえられた。このうちの大部分は冬期季節風による波浪であったので、代表波として冬期風浪の通常波浪 $H_0 = 1.5 \text{ m}$, $T = 7.0 \text{ sec}$ (前述) を選び波の入射角 α_0 としては 20° を決定した。

底質の決定は(i)の場合と同様砂の移動形態の相似条件より求める。(i)において述べた様に $d_p = 0.5 \text{ cm}$ とすると $w_{0p} = 40 \text{ cm}/\text{s}$ という値を得るので式(11)により

$$w_{0m} = \mu^{1/2} \cdot w_{0p} = 40/\sqrt{125} = 3.57 \text{ cm}/\text{sec}$$

という値をうる。この w_{0m} に相当する底質粒径を図-3より求めると $d_m = 0.02 \text{ cm}$ という値をうる。すなわち $n_d = 0.02/0.5 = 1/25$ という値となる。

一方時間縮尺を考えてみよう。この三次元実験の場合時間縮尺は式(19)であらわされる。すなわち

$$n_{ts} = n_B \lambda \cdot \mu n_{Qy}^{-1} = n_B \cdot \mu^2 (n_T n_{Ea})^{-1} \quad (28)$$

先に求めた様に現地の E_a は $5 \times 10^4 \text{ ton} \cdot \text{m}/\text{year}/\text{m}$ であるから、式(28)中の n_{Ea} は次の様にして求められる。

$$n_{Ea} = \frac{\frac{1}{8} \rho g H_{0m}^2 (C_g)_{0m} \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 K_{bm}^2}{5 \times 10^4 \text{ ton} \cdot \text{m}/\text{year}/\text{m} \cdot K_{bp}^2} \quad (29)$$

ここに $K_b = H_b/H_0$ (屈折係数) である。

式(29)に $H_{0m} = 1.2 \text{ cm}$, $\alpha_0 = 20^\circ$ を代入し、 $K_{bm} \simeq K_{bp}$ として n_{Ea} を求めると、 $n_{Ea} = 1/560$ という値をうる。

一方式(28)中の n_B は底質の相似条件において移動限界水深の相似を満足させていないので、先に選定した模型底質に対する移動限界水深と現地の移動限界水深より算定しなければならない。いま移動限界水深として、表-2に示す樁木・出口の式を用いるとすると、代表波として選んだ波浪特性は表-3からもわかる様に堆積型であるので、

$$\left\{ \frac{H}{H_0} \frac{1}{\sinh(2\pi h_i/L)} \right\}^{-1} = 20 N_s (d/L_0)^{0.3} \quad (30)$$

という式で求められる。

現地代表波の特性 ($H_{0p} = 1.5 \text{ m}$, $T_p = 7.0 \text{ sec}$) 及び $d_p = 0.5 \text{ cm}$ を式(30)に代入して移動限界水深 h_i を求めると $h_{ip} = 6 \text{ m}$ という値がえられる。一方模型波の特性 ($H_{0m} = 1.2 \text{ cm}$, $T_{0m} = 0.63 \text{ sec}$) 及び d_m

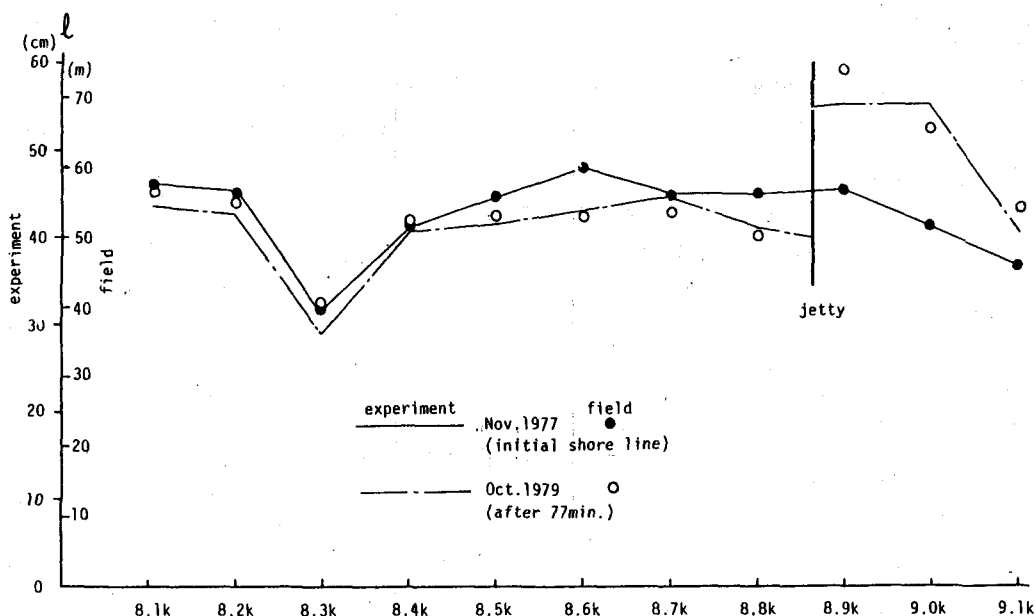


図-6 三次元実験の再現性の検証

$= 0.02 \text{ cm}$ を用いて計算すると $h_{im} = 3 \text{ cm}$ という値が求められる。漂砂帯の幅は水深に比例すると考えられるので、 $n_B = 3/600 = 1/200$ という縮尺となる。以上の値を用いると、 n_{ts} は式(28)より次のように与えられる。

$$n_{ts} = n_T^{-1} (1/5580) \quad (31)$$

しかしながら、なお n_T が未知であるから十分な決定はできない。 n_T の決定法については、既に5.(ii)で述べたが、本実験の場合、現地での漂砂観測結果がないので、現地の汀線変化速度と、模型の汀線変化速度から n_{ts} を決定した。

図-6は1977年11月から1979年の10月までの1年11ヶ月間の突堤建設に伴う現地における汀線変動を示したものであって、同時に波の作用時間77分間の模型の汀線変動も示してある。この図から77分という波の継続時間が、現地の1年11ヶ月に相当するであろうことが推定できる。この場合 $n_{ts} = 1/13100$ となり式(31)より n_T を求めると $n_T = 2.34$ という値をうる。即ち現地に比較して模型での砂の移動が激しいことがわかる。

7. 結 語

以上移動床による模型実験の相似率、及び模型での波の継続時間の現地での時間換算について、具体的な例を挙げて説明してきたが、相似性の検証は野外調査結果に負うところが大きい。したがって地形変動の将来予測を行う為には、現状の海岸特性の把握が必ず必要となることは十分心得ておかねばならないことがらであろう。なお本文は1983年の台湾成功大学における水理模型実験講習会のテキストの一部を引用したものであり、大阪大学の出口講師の協力を得たことを付記する。

参考文献

- 1) 榎木 亨：漂砂と海岸侵食，森北出版，1982，pp. 155～156.
- 2) 石原藤次郎，榎木 亨：漂砂の移動限界流速，限界水深及び移動量について，第7回海岸工学講演会講演集，1960，pp. 47～57.
- 3) 佐藤昭二：漂砂，水工学に関する夏期研修会講義集，B.海岸港湾コース，昭41.
- 4) Komar, P. D. and M. C. Miller : Sediment Threshold under Oscillatory Waves, Proc. of 14th Conf. on Coastal Eng., 1974, pp. 756～776.
- 5) 堀川清司，渡辺 晃：波による砂移動に関する一考察，第13回海岸工学講演会講演集，1966，pp. 128～134.
- 6) Sawaragi, T. and I. Deguchi : On-offshore Sediment Transport Rate in the Surf Zone, Proc. of 17th Conf. on Coastal Eng., 1980, pp. 1194～1214.
- 7) 堀川清司，砂村継夫，近藤浩右：波による二次元海浜変形に関する実験的研究，第21回海岸工学講演会論文集，1974，pp. 193～200.
- 8) 砂村継夫：自然海浜における汀線位置の時間的变化に関する予測モデル，第27回海岸工学講演会論文集，1980，pp. 255～259.
- 9) U. S. Army Coastal Engineering Research Center : Shore Protection Manual, Vol. 1, 1972, pp. 4～82.
- 10) Yalin, M. S. : Mechanism of Sediment Transport, Pergamon Press, 1972. p. 289.
- 11) Paul, M. J., J. W. Kamphuis and A. Brebner : Similarity of Equilibrium Beach Profile, Proc. of 13th Conf. on Coastal Eng., 1972, pp. 1093～1112.
- 12) Noda, E. K. : Equilibrium Beach Profile Scale-model Relationship, Proc. ASCE, Vol. 98, No. WW. 4, 1972, pp. 511～528.
- 13) Madsen, O. S. and W. D. Grant : Sediment Transport in Coastal Environment, Proc. of 15th Conf. on Coastal Eng., 1976, pp. 1093～1112.
- 14) 堀川清司：海岸工学，東京大学出版会，1973，P. 226.