

京都大学防災研究所 正員 室 土 屋 義 人
 京大工業教員養成所 正員 野 田 英 明
 京都大学大学院 学生員 〇 井 保 武 寿

1. まえがき

海浜における底質移動の機構を解明する場合、波による砂の移動特性の一つとして、その移動限界あるいは移動限界水深に着目し、多くの研究がなされてきた。例えば Ippen および Eagleson は *null point* を考え、また Manohar は水底に作用する力がある値以上になると底質が動き出すという限界として、*initial movement* および *general movement* と定義した。しかし、波の挙動が砂の移動に及ぼす効果についての考察が十分でなく、たゞ実験的にその移動限界流速を求めたにすぎない。最近、石原・榎木両博士は岩垣博士の限界掃流力理論を適用し、水平床における波による層流境界層内の砂移動について、理論的および実験的考察を行ない、Manohar の実験結果と比較検討して、移動限界水深を与えた。Goddet, 佐藤・田中らも同じ考えにより、砂層の每一層が一様に動き出す全面移動限界を示す場合の水深を求めた。以上の研究の多くは、その仮定に若干の相違はあるが、大部分、砂の移動限界流速を与えているにすぎず、またその表示方法はそれぞれ異なり、これらの結果を統一して比較検討することは容易ではない。著者らは、これらの結果を比較検討するとともに、統一的な表示方法を思ひ出するため、石原・榎木両博士が行なったと同じ方法で、波による砂の移動限界時の掃流力を波運動の加速度および揚力の効果をも考慮して考察し、さらに実験を行なってつぎに示す結果を得た。

2. 実験装置および方法

実験は幅 50 cm, 深さ 65 cm, 長さ 70 cm の鉄製で一部ガラス張りの水槽に、ポンプ・式連波機をとりつけ、水路中央の水平部 3 m に、厚さ 5 mm, 高さ 15 cm のプラスチック板で 6 コの仕切を設けた。砂の移動限界を見出すため、7 種類の粒径の砂とそれぞれの仕切板の間に 3 cm の厚さに敷いて、波高および周期を変化させ、突出した粒子がいくつか動出したときの波高および周期を記録した。実験に用いた砂は、木津川および堂浦標準砂で、粒径とそろえるため、0.15 ~ 0.11 mm ($S = 2.60$), 0.25 ~ 0.15 mm ($S = 2.60$), 0.30 ~ 0.25 mm ($S = 2.65$), 0.40 ~ 0.30 mm ($S = 2.65$), 0.60 ~ 0.40 mm ($S = 2.65$), および 1.2 ~ 0.85 mm ($S = 2.62$), 2.5 ~ 1.2 mm ($S = 2.62$) の範囲に筛合けたものを用いた。砂が動きはじめた限界を明確に判定するため、個人誤差を小さくするよう 2 人で観測した。波高は自動平衡式記録計に自記させ、周期は *stop watch* で確かめた。

3. 実験結果の考察

波による層流境界層の厚さが底質の粒径よりかなり大きいと仮定する。このとき、水底の表面にある比較的突出した球状の粒子が、波によってまきに動き出そうとする限界にある場合、砂粒に働く力の平衡式は

$$R_T = \{(\sigma - \rho) g d^3 \pi / 6 - R_L\} \tan \varphi \quad (1)$$

となる。ここに R_T は波運動の加速度を考慮した粒子に働く水平方向の力であり、 R_L は揚力である。若垣博士によると (1) 式は

$$\left(\frac{\sigma}{\rho}-1\right)gd\tan\varphi = \frac{3}{4}C_{ou}U_d^2 + C_{MT}d\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_d + C_{ML}d\left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)_d \tan\varphi \quad (2)$$

とあらわされる。ここに σ, ρ はそれぞれ砂粒および水の密度、 g は重力の加速度、 d は砂の代表粒径、 φ は砂の水の中における内部摩擦角、 C_{ou} は波の場合の抵抗係数、 C_{MT}, C_{ML} はそれぞれ水平および鉛直方向の仮想質量係数であり、 $U_d, \left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_d$ および $\left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)_d$ はそれぞれ砂が動き出すときの砂粒頂部における波の進行方向の流速、加速度および鉛直方向の加速度である。(2) 式において U および W は Longuet-Higgins による進行波の層流境界層内における流速を用い、また最大摩擦速度 U_0^* および砂粒頂部の最大流速 U_0 を導入して変形すると次式が成立する。

$$\frac{U_0^{*2}}{(\sigma/\rho-1)gd\tan\varphi} = \frac{1}{\phi} \quad (3)$$

ここに、

$$\phi = \frac{3}{4}C_{ou}\left(\frac{U_0}{U_0^*}\right)^2 f_1(\beta d) + \left(\frac{U_0^* d}{\nu}\right)\left(\frac{U_0}{U_0^*}\right)^{-1} \{C_{MT} f_2(\beta d) - C_{ML}(kd) f_3(\beta d) \tan\varphi\} \quad (4)$$

$$f_1(\beta d) = \{ \sin(\omega t) - e^{-\beta d} \sin(\omega t - \beta d) \} \omega t = \kappa$$

$$f_2(\beta d) = \{ \cos(\omega t) - e^{-\beta d} \cos(\omega t - \beta d) \} \omega t = \kappa$$

$$f_3(\beta d) = \left\{ \sin(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - \pi/4) - e^{-\beta d} \sin(\omega t - \pi/4 - \beta d) \right\} \omega t = \kappa$$

また $\beta = \sqrt{\omega/2\nu}$, $\omega = 2\pi/T$, $k = 2\pi/L$ であり、 ν は水の動粘性係数、 T および L は波の周期と波長である。また κ は ϕ が最大になるときの ωt の値である。

C_{ou} は定常流の場合の抵抗係数と同じであると仮定すると、Reynolds 数の関数となり、 $U_0^* d/\nu$ および U_0/U_0^* の関数となり、また βd も同様の関数となる。 C_{MT} および C_{ML} は従来の研究から一定と考えられ $C_{MT} = C_{ML} = 1$ とする。したがって、波による境界層流力の無次元表示 $U_0^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd\tan\varphi$ は $U_0^* d/\nu$ と U_0/U_0^* の関数となり、

図-1 の実線は (3) 式の関係を $U_0^* d/\nu$ をパラメーターとして示したものである。またこの図の点線は若垣博士の遮蔽係数 $\varphi = 0.4$ を考慮して示したものである。さらに、 $\tan\varphi = 1$ とし、 $U_0/U_0^* = 0.08$, および 0.10 における著者らの実験結果が、Manohar, Gaddet および佐藤・田中のものと同時にプロットしてある。この図

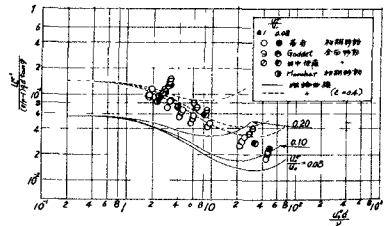


図-1

から実験における砂の移動限界の判定は非常に困難であり、かなり実験値が散らばっているが理論曲線と傾向は非常によく一致している。しかし、 U_0/U_0^* の効果はその値が 0.08 および 0.10 の場合のみで、十分に実証できなかった。また $U_0^* d/\nu$ の値が 25 は近より大きくなると実験値の値がかなり小さくなる。このことは流速や粒径が大きくなって、層流境界層から乱流境界層へ移るためとも考えられ、さらに砂粒の混合効果の影響なども入っているかも知れない。この点については今後さらに研究を重ねるつもりである。しかし、波による砂の移動限界が南水路と同様に境界層流力の無次元表示 $U_0^{*2}/(\sigma/\rho-1)gd\tan\varphi$ で統一されるといふことは注目してよいと思われる。最後に終始適切な御指導となされた石原藤次郎教授ならびに若垣権一教授に深く感謝するとともに、文部省科学研究費による研究の一部であることと併記する。