

リーフ海岸の養浜砂の移動に関する基礎的な水理実験

Experimental Study on Sediment Movement in a Channel with Model Reef

平山克也*・丸山晴広**・平石哲也*

Katsuya Hirayama, Haruhiro Maruyama, Tetsuya Hiraishi

An artificial beach has been constructed in coastal region facing to a coral reef. To prevent beach erosion, characteristics of sediment movement on the beach should be investigated in flume experiments. The water velocity becomes very large with wave breaking zone on the reef. Therefore, the critical amplitudes of velocity on reef should be defined for the promotion of beach protection methods. The experiment results demonstrate that the critical velocity is related to the shields number.

keywords: Model Reef, Sediment Movement, Hydraulic Experiment, Shields Number

1. はじめに

本研究は、珊瑚礁リーフ海域における人工海浜の安定工法に関する移動床水理模型実験を行うために、基礎的な情報を得る目的で養浜砂の移動限界に関する断面基礎実験を行ったものである。対象とした海域の海底地形を図-1に示す。移動床水理模型実験においては適切な相似則が未だ確立されておらず、便宜的に波、流れの相似則にフルードの相似則を適用し、養浜砂の粒径、比重に関する縮尺歪みを、模型の鉛直歪みまたは沖波の波形勾配の歪みとして補正する方法が一般的である。今回は歪みなし模型を用いて沖波の波形勾配を歪ませることにより移動床水理模型実験の相似則を満足することとしたため、模型実験における沖波の波形勾配と養浜砂の移動限界との関係を明らかにする必要がある。そこで本研究では、珊瑚礁リーフ上における波の波高、周期、波による流速振幅および養浜砂の比重に着目し、沖波の波形勾配に対する養浜砂の移動限界および挙動特性を2次元水路で検討した。

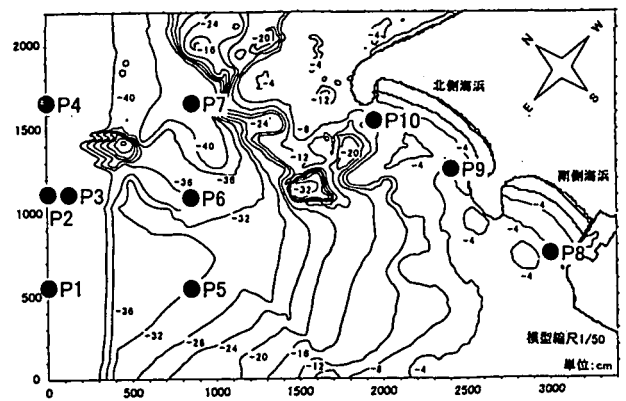


図-1 珊瑚礁リーフ海域

2. 実験方法

2.1 実験条件

本実験では、長さ40mの不規則波造波水路内に、勾配1/10～1/30の斜面と水平移動床を有する模型を図-2のように設置し、モデル化された珊瑚礁リーフ海岸を再現した。模型縮尺は1/50である。

まず、対象海域における波浪条件および潮位から、フルードの相似則より基本となる実験条件を設定し、波の波高、周期、水深および模型砂の比重を表-1のように種々変化させた実験ケースについて断面基礎実験を実施した。なお実験には規則波を用いた。ここで、珊瑚礁リーフ上の移動限界水深は、碎波帯外を対象とした佐藤・田中(1962)¹⁾の移動限界水深 h_i の算定式によると、基本ケースの波浪条件では豊浦標準砂($\rho=2.65$, $d_{50}=0.2\text{mm}$, ρ は比重, d_{50} は中央粒径)で $h_i=6.1\text{cm}$ 、研磨材($\rho=1.5$, $d_{50}=0.2\text{mm}$)で $h_i=18.3\text{cm}$ となった。移動床部の底質砂には、比重に関する挙動特性を把握できるように、粒径がともに0.2mmであり、比重が異なる豊浦標準砂($\rho=2.65$)および研磨材($\rho=1.5$)を用いた。

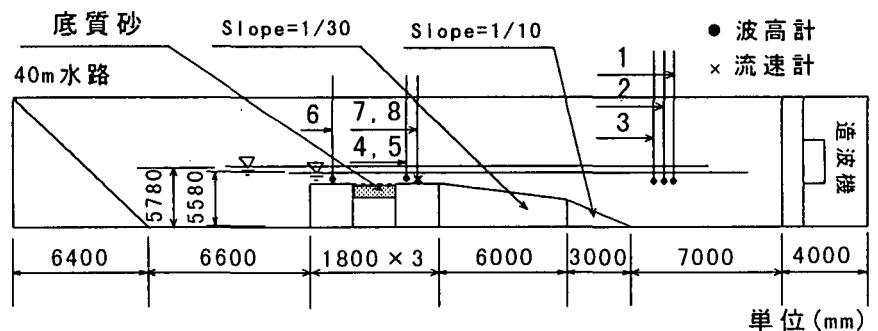


図-2 模型および計測器の配置図

条件を設定し、波の波高、周期、水深および模型砂の比重を表-1のように種々変化させた実験ケースについて断面基礎実験を実施した。なお実験には規則波を用いた。ここで、珊瑚礁リーフ上の移動限界水深は、碎波帯外を対象とした佐藤・田中(1962)¹⁾の移動限界水深 h_i の算定式によると、基本ケースの波浪条件では豊浦標準砂($\rho=2.65$, $d_{50}=0.2\text{mm}$, ρ は比重, d_{50} は中央粒径)で $h_i=6.1\text{cm}$ 、研磨材($\rho=1.5$, $d_{50}=0.2\text{mm}$)で $h_i=18.3\text{cm}$ となった。移動床部の底質砂には、比重に関する挙動特性を把握できるように、粒径がともに0.2mmであり、比重が異なる豊浦標準砂($\rho=2.65$)および研磨材($\rho=1.5$)を用いた。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

** 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室

2. 2 計測方法

水平リーフ上の移動床部分の模式図を図-3に示す。移動床中央部には、岸沖方向と平行にアクリル板を設置し、“奥側”、“手前側”に分けて模型砂の挙動変化を観測した。

海底面の砂面高の計測には定点式砂面計を用い、水路幅方向に中央アクリル板からそれぞれ10cm離れた2測線（奥側・手前側）上に岸沖方向に14点ずつ、計28点の測点を設定した。ここで底面が変化する特性は、底質砂の比重によって異なるので、砂移動状況が定常に達した地形を最終地形と判断し、各底質砂について、定常状態になるまでに要する時間（豊浦標準砂：90分、研磨材：15分）から計測を実施する時間間隔（計測は各底質砂とも3回）を設定した。なお砂面高の計測は造波を一時停止して行った。本実験においては補砂箱等を用いて漂砂量を測定することは困難であったため、測線上における断面変化量の絶対値を移動量と定義し、これを漂砂量とみなして底質移動の定量的な評価を行った。

沖波波高およびリーフ上での波高、流速の観測には、図-2に示す位置に設置された波高計および流速計を用いた。また、全体的な砂移動の様子を目視により観測するために、砂面高の計測と同時に上方よりカメラ撮影を実施した。

3. 実験結果

2. 2に示したように、本研究では、波によるリーフ上の岸沖漂砂量について、測線上の地形変化量の絶対値を用いて移動量と定義した。一方、Madsenら(1976)²⁾は、振動流による漂砂量の多数の実測結果に基づいて岸沖漂砂量を次式のように定式化した。

$$\frac{q_s}{w_f \cdot d_{50}} = 12.5 \psi^3$$

ここで、 q_s は岸沖漂砂量、 w_f は沈降速度であり、 ψ は次式で示すシールズ数である。

$$\psi = \frac{u_*^2}{\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right) g \cdot d_{50}}$$

ここで、 u_* は摩擦速度である。

本研究では、リーフ上の岸沖漂砂量を砂面計により測定するとともに、あわせてMadsenらによる岸沖漂砂量の算定式を用いて理論値を算出し、両者の比較を行った。ここでMadsenらの算定式に用いるシールズ数は、造波機前面で計測された波高から首藤の浅水係数を用いてリーフ上の波高を算定し、一次のクノイド波理論からリーフ上の流速振幅を推定して求めた。以下に示すリーフ上の波による移動量の実験結果を示した図では、Madsenらによる岸沖漂砂量の算定式による計算結果をあわせて示すこととする。

表-1 実験ケース表

実験ケース名	天端上水深	波高(cm)	周期(s)
* GH001	5.6	2.3	1.13
GH003		1.8	1.13
H004		2.8	1.13
GH005		3.3	1.13
GH006		2.3	0.99
H007		2.3	1.27
GH008		2.3	1.41
G017		1.3	1.13
G018		2.3	0.85
GH002		2.3	1.13
GH009	7.6	1.8	1.13
H010		2.8	1.13
GH011		3.3	1.13
GH012		2.3	0.99
H013		2.3	1.27
GH014		2.3	1.41
G015		1.3	1.13
G016		2.3	0.85

*印は、フルードの相似則より求めた基本実験条件
H: 豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$, $d_{50} = 0.2\text{mm}$)
G: 研磨材 ($\rho = 1.5$, $d_{50} = 0.2\text{mm}$)

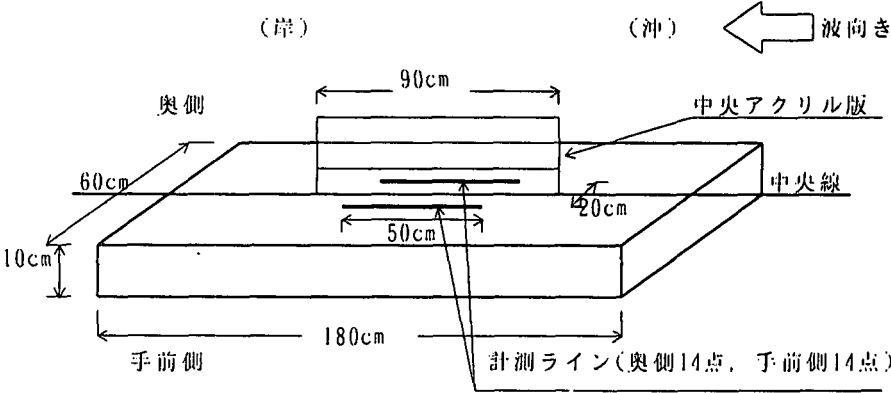


図-3 砂箱内の計測範囲

3. 1 波高に対する底質砂の移動特性

珊瑚礁リーフ上の波高変化の再現性については、首藤の浅水係数 (1974)³⁾ および次に示す合田の碎波式 (1973)⁴⁾ より検討した。

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left[1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^{10} \theta) \right] \right]$$

図-4 (a) は水深 5.6cm の場合、図-4 (b) は水深 7.6cm の場合におけるリーフ上の波高の浅水係数による計算値および実験値である。また、図中の点線は合田式による碎波限界波高である。ここで、合田の碎波式の係数 A は 0.12 と設定した。

図-4 より、本実験におけるリーフ上の波高および碎波は、首藤の浅水係数および合田の碎波式により、よく説明されることがわかる。また図-4 より、本実験で設定したケースにおいては、水深 5.6cm の場合は碎波現象を含むケースとなっており、水深 7.6cm の場合は、非碎波のケースとなっていることがわかる。これは、実験で目視により確認された現象とよく一致している。

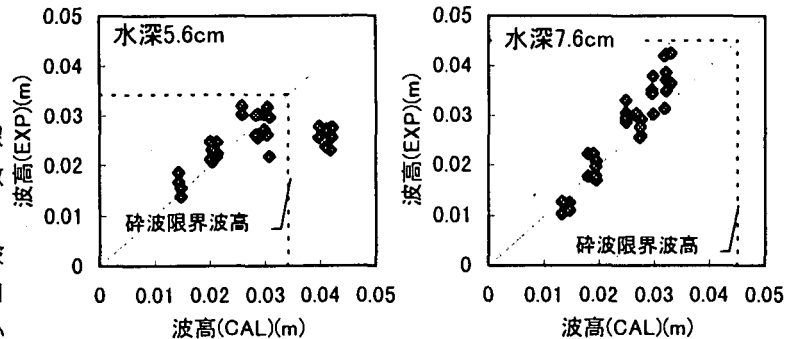


図-4 (a) 水深 5.6cm

図-4 (b) 水深 7.6cm

図-4 リーフ上波高の再現性

底質砂の移動特性について、豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$) の場合、非碎波条件である水深 7.6cm のときは、図-5 に示すようにリーフ上の波高の増加とともに移動量は増加し、Madsen らによる沖波漂砂量の算定式より求められた移動量の計算値とよく一致していた。また、碎波条件を含む水深 5.6cm のときは、図-6 に示すようにデータのばらつきが大きくなり移動特性を把握するまでには至らなかった。しかしながら、Madsen らによる岸沖漂砂量の計算値はオーダー的には実験値とおおむね一致していた。なお、図-5、図-6 中の点線は、佐藤・田中の移動限界水深算定式において、移動限界水深をそれぞれ 5.6cm および 7.6cm としたときに得られる移動限界に相当する波高を示している。

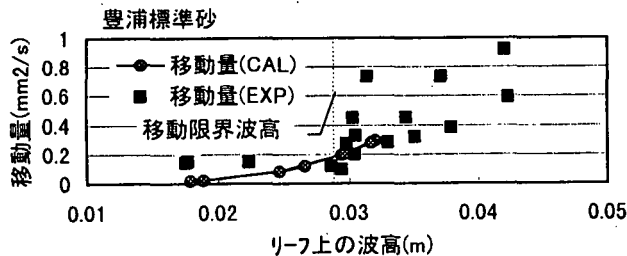


図-5 波高と移動量の関係 (水深 7.6cm, 周期 1.13s)

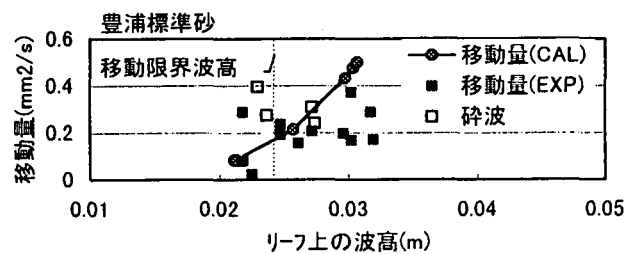


図-6 波高と移動量の関係 (水深 5.6cm, 周期 1.13s)

3. 2 周期に対する底質砂の移動特性

珊瑚礁リーフ上の波の周期について、水深 7.6cm の場合には沖波周期と比べ変化はみられなかったが、水深 5.6cm の場合には沖波周期が 1.41s のとき波形の時系列解析および波形グラフより波の分裂現象が認められた。底質砂の移動特性について、豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$) の場合、リーフ上水深 7.6cm のときは、図-7 に示すように周期の増加とともに移動量が増加する傾向がみられたが、Madsen らによる計算値は、それらをうまく説明することはできなかった。また、リーフ上水深 5.6cm のときは、図-8 に示すようにデータが大きくばらつき移動特性を把握するまでには至らなかった。これは、波の分裂現象のほか、実験において一定となるべき入射波高がばらついたことが影響しているものと考えられる。

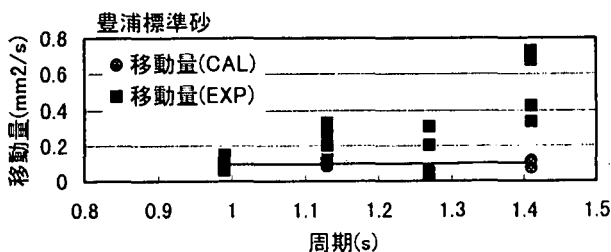


図-7 周期と移動量の関係 (水深 7.6cm, 波高 2.3cm)

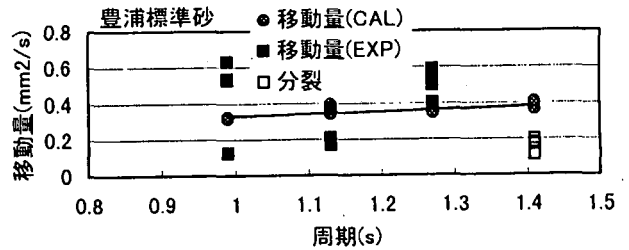


図-8 周期と移動量の関係 (水深 5.6cm, 波高 2.3cm)

3. 3 流速に対する底質砂の移動特性

珊瑚礁リーフ上の流速振幅の再現性について、1次のクノイド波理論を用いて検討を行った。図-9は、波高、周期および水深を変化させた場合における珊瑚礁リーフ上の流速振幅の実測値および計算値である。ここで流速計はリーフ上水底から2cmの位置に設置している。図より流速振幅の実測値は計算値より若干大きめの値をとるが、おおむねよく一致している。また、流速振幅の計算値が0.4m/s程度に達したとき、実測値の中には小さな値をとるものがみられるが、これは、これらの点が波の分裂現象がみられた実験ケースに対応しており、1次のクノイド波理論ではこのような現象を表現できないためであると考えられる。

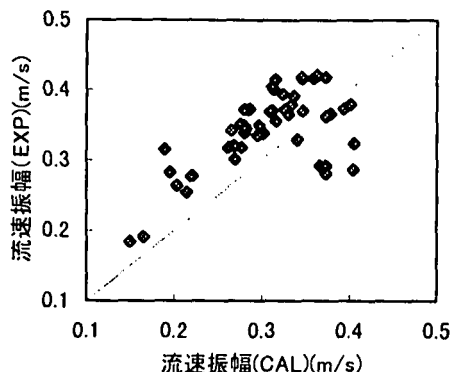


図-9 リーフ上流速振幅の再現性

底質砂の移動特性について、豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$) の場

合、図-10、図-11に示すように水深5.6cm、7.6cmの場合とも流速振幅の増加とともに移動量の増加がみられることが確認された。とくに水深5.6cmのときには、碎波、分裂現象を含むケースにおいても、リーフ上の流速振幅で整理することにより非碎波条件のケースと同様な傾向を把握することができた。さらに、Madsenらによる岸沖漂砂量の計算値は、実験結果とよく一致することが確認された。なお、このように流速振幅で整理した場合、流速振幅は水深の関数であることから、移動量を図-10、図-11のようにリーフ上水深で区別して検討する必要はないものと考えられる。このことは、図中のMadsenらの算定式による計算結果を比較すれば明らかである。

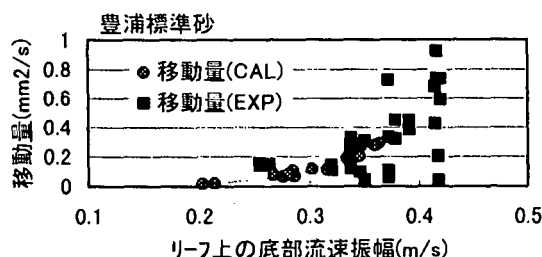


図-10 流速振幅と移動量の関係 (水深7.6cm)

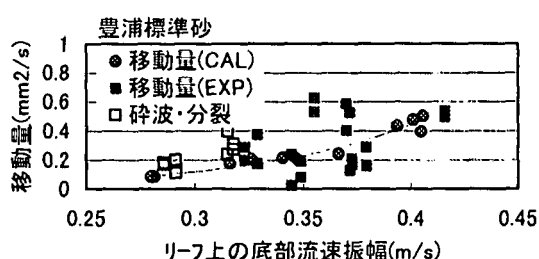


図-11 流速振幅と移動量の関係 (水深5.6cm)

3. 4 底質砂の比重と移動特性

3. 1、3. 2および3. 3では、底質砂に豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$) を用いた場合について、珊瑚礁リーフ上における波、流れと移動量の関係について議論した。ここでは、底質砂の比重の影響を調べるために粒径が同じで比重が小さな研磨材 ($\rho = 1.5$) を底質砂として採用し、同様にリーフ上の波、流れと移動量の関係について整理した。リーフ上の波高および周期と移動量の関係は、底質砂に豊浦標準砂を用いた場合と同様、全体的には波高あるいは周期の増加とともに移動量が増加する傾向がみられたが、波の碎波および分裂現象が生じる条件ではデータがばらつく傾向が確認された。また、図-12、図-13に示すように、リーフ上の流速振幅と移動量の関係についても豊浦標準砂を用いた場合と同様、流速振幅の増加とともに移動量が増加する傾向がみられたが、移動量の値は豊浦標準砂に比べて1オーダー大きくなることが確認された。

また、Madsenらによる岸沖漂砂量の計算値は、底質砂に比重の小さな研磨材 ($\rho = 1.5$) を用いた場合、実験値に比べかなり小さくなることがわかった。ただし、実験値の妥当性の検討には、研磨材の材質、粒径および比重のばらつきを考慮する必要があると思われる。

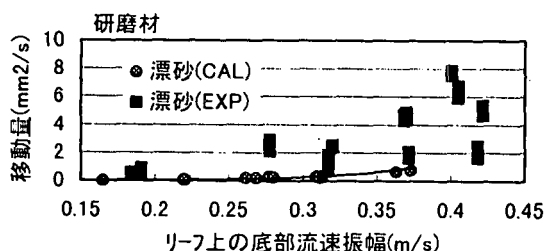


図-12 流速振幅と移動量の関係 (水深7.6cm)

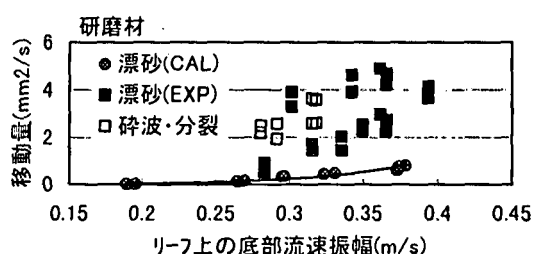


図-13 流速振幅と移動量の関係 (水深5.6cm)

4. 底質砂の移動限界の推定

4. 1 シールズ数による底質砂の移動限界の推定

底質砂の移動限界の決定には、目視により底質砂の移動を確認する方法が一般的である。しかし、この方法では、実験者の主観により移動限界と判断する値が大きく異なる可能性があり、その妥当性の評価が非常に困難である。そこで、本研究では、底質砂の移動限界を、定常状態における移動量が、砂面計測長 500mm に対して測線 1mm あたり平均 2mm 厚の砂層が移動したときに相当する 1000mm^2 に達するときとして定義した。この定義に従えば、 1000mm^2 の移動量は、豊浦標準砂の場合には単位時間あたり 0.2mm^2 の移動量に、研磨材の場合には単位時間あたり 1.1mm^2 の移動量に相当する。これらの値は、図-5、図-6 に示した移動限界に相当する波高における移動量の値に一致している。

移動量を流速振幅で整理した図-10、図-11 および図-12、図-13 をシールズ数 ϕ で整理しなおしたものを図-14、図-15 に示す。図より、今回の実験結果においては、移動量を流速振幅で整理したときと、シールズ数 ϕ で整理したときの両者の相関性は、ほぼ同様によいことがわかる。ここで、本実験において設定した移動量の定義に従うと、底質砂に豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$) を用いた図-14 より、リーフ上の底質移動限界シールズ数は $\phi_c = 0.018$ となる。同様に、底質砂に研磨材 ($\rho = 1.5$) を用いた場合には、図-15 より $\phi_c = 0.025$ となることがわかる。一方、Madsen らによって整理された既往の底質の移動限界に関する実験結果より、本実験ケースにおける底質移動限界シールズ数は、豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$) で $\phi_c = 0.04$ 、研磨材 ($\rho = 1.5$) で $\phi_c = 0.08$ であり、本研究により求められたリーフ上の ϕ_c の値はこれらよりやや小さめとなっている。

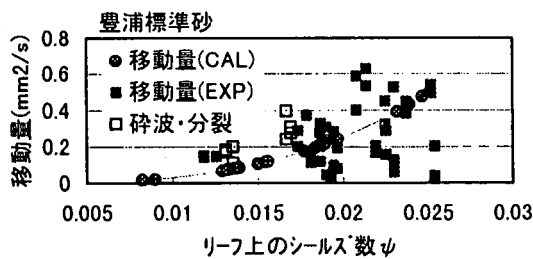


図-14 シールズ数と移動量の関係 (豊浦標準砂)

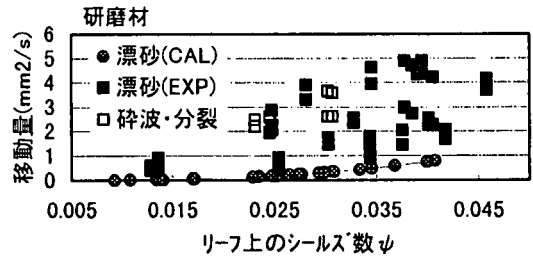


図-15 シールズ数と移動量の関係 (研磨材)

4. 2 流速振幅による底質砂の移動限界の推定

4. 1 では、リーフ上の底質砂の移動限界として底質移動限界シールズ数 ϕ_c を用いることが有効であることが確認された。しかしながら、本研究の目的は平面移動床実験における底質砂の移動限界に関する基礎資料を得ることであり、本研究の成果がそのまま実験場において使用できるように整理しておくことが望ましい。また、平面実験に用いる底質砂の材質、粒径および比重等は、汀線変化、水深変化、移動形態等のプロファイリング、あるいは入手の容易さなどを総合して決定されるため、移動限界を検討する際にはあらかじめ決定されていることが多い。そこで本研究では、実用上の使い勝手を重視して、図-10、図-11 および図-12、図-13 より底質移動限界流速振幅 V_c を求めることとした。限界シールズ数 ϕ_c を求めたときと同様に移動限界流速 V_c を求めると、豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$) では $V_c = 0.34\text{m/s}$ となり、研磨材 ($\rho = 1.5$) では、 $V_c = 0.25\text{m/s}$ となった。このようにして求められた V_c は、底質砂の粒径および比重ごとに各々決定する必要があるものの、底質砂がすでに決定されている場合には、流速計によりその地点における流速振幅を計測することにより、リーフ上の波高、周期および水深、あるいは碎波帯内外の区別なく移動限界の推定に利用できるものと考えられる。ただしここで求めた限界流速振幅は無次元量ではないため模型縮尺が 1/50 程度のときにのみ適用できることに留意する必要がある。

5. 結論

- (1) 底質砂の移動量をリーフ上の波高あるいは周期を用いて整理した場合、波の碎波および分裂現象を生じないケースでは、波高の増加とともに移動量が増加する傾向がみられたが、波の碎波あるいは分裂現象を含むケースでは、底質砂の移動特性を把握するまでには至らなかった。
- (2) 底質砂の移動量をリーフ上の流速振幅あるいはシールズ数で整理した場合には、波の碎波および分裂現象の有無に関わらず、底質砂の移動量とそれらとはよい相関が得られた。またグラフの相関性に関して両者の違いは、ほとんどみられなかった。
- (3) Madsen らによる岸沖漂砂量の算定式から求めた底質砂の移動量の計算値と実験値を比較すると、豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$) の場合は、計算値は実験値をよく再現していたが、研磨材 ($\rho = 1.5$) の場合は、実験値と比較してかなり小さな値となった。
- (4) リーフ上における限界シールズ数 ϕ_c は、豊浦標準砂のとき 0.018、研磨材のとき 0.025 であり、これらは、

Madsen らが示した値より若干小さな値であった。

- (5) リーフ上における移動限界の指標として、実用上、リーフ上における流速振幅を用いることが有効であり、模型縮尺を 1/50 としたとき、底質砂に豊浦標準砂 ($\rho = 2.65$, $d_{50} = 0.2\text{mm}$) を用いた場合には移動限界流速は $V_c = 0.34\text{m/s}$ 、研磨材 ($\rho = 1.5$, $d_{50} = 0.2\text{mm}$) を用いた場合には移動限界流速は $V_c = 0.25\text{m/s}$ であった。

参考文献

- 1) 佐藤昭二, 田中則男: 水平床における波による砂移動について, 第 9 回海岸工学講演会論文集, 1962, pp. 95 ~ 100.
- 2) Madsen, O.S. and W.D Grant: Quantative description of sediment transport by waves, proc.15th Coastal Eng.Conf., ASCE, pp. 1093 ~ 1112, 1976.
- 3) 首藤伸夫: 非線型長波の変形 - 水路幅, 水深の変化する場合 -, 第 21 回海岸工学講演会論文集, 1974, pp. 57 ~ 63.
- 4) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 12 巻 第 3 号, 1973, pp. 31 ~ 69.