

波動場に置かれた板状構造物における 局所洗掘の発生メカニズムとその対策に関する研究

A STUDY ON THE OCCURRENCE MECHANISM OF A LOCAL SCOUR AROUND A PLATE IN WAVE FIELD AND ITS COUNTERMEASURE

河海工学分野 中原 悠輔

River and Coastal Environmental Engineering Yusuke NAKAHARA

海岸構造物の脚部に生じる局所洗掘は構造物の安定性に大きな影響を及ぼす。それ故、その予測及び対策は極めて重要である。本研究では、水平移動床上に設置された板状構造物を対象に、その高さ、根入れの有無、根入れ深さなどの諸元が洗掘の発生メカニズムおよび洗掘特性に与える影響を水理実験により検討した。得られた知見に基づいて、構造物脚部で発生する洗掘を抑制・防止する対策を考案し、その有用性について検証した。

A local scour around the bottom of a coastal structure inflicts fatal damage to stability of the structure. Therefore, understanding the mechanism of scour occurrence and offering measures are extremely important to design of the structures. The mechanisms of a local scour occurrence at the foot of a relatively low plate was investigated by hydraulic experiments under different plate heights and penetration depths of the plate into the sand bottom. Further, the effect of vortex generated at the edge of the plate and infiltration flow below the plate on the local scour characteristics was examined. Finally, countermeasures to suppress and prevent the scour occurrence was devised and verified.

1 研究背景・目的

周囲を海に囲まれた我が国にとって、海岸の保全は防災の観点から重要な課題のひとつである。波浪および漂砂を制御するために様々な構造物が築造されているが、構造物周辺では局所洗掘が発生し、構造物の安定性が損なわれるとともに、その機能が低下する可能性がある。そのため、予め洗掘の規模を予測して対策を施すことは極めて重要である。

例えば防波堤のような壁状構造物の洗掘対策としては、法先に根固め工やグラベルマット等を敷設したり、消波ブロックを積み上げる等の方法がとられるが一般的である。しかし、鈴木ら¹⁾によって報告されているように、築造からわずか数年の防波堤で洗掘対策工が被災する事例や、山野ら²⁾の検討に見られるように堤体と対策工との間に生じた隙間からの土砂の吸い出しによって洗掘が発生するなど、現状の洗掘対策にはまだ多くの課題が残されている。

粘り強い構造物を実現するにあたり、構造物の形状を一部変化させることで洗掘対策として有用性が示されれば、ライフサイクルコストの観点からも有用であるが、そのような検討例はほとんどない。

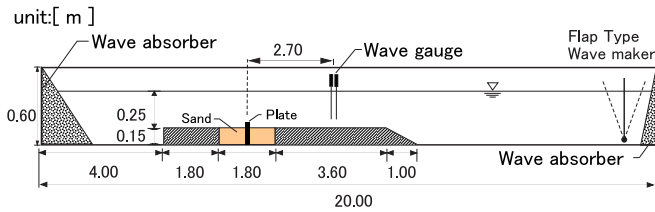
そこで、本研究では単純な構造物の一つである鉛直平板を対象に、その高さ、根入れの有無などの諸元が洗掘特性に与える影響を検討し、新たな洗掘対策を提案する。

2 板高が洗掘特性に与える影響

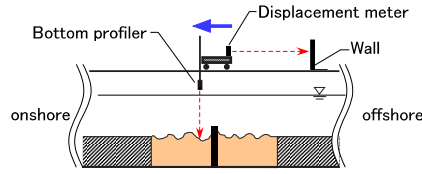
海岸構造物周りに発生する局所洗掘に関しては、これまで数々の研究が行われているものの、構造物の高さと洗掘特性との関係について検証されている研究はそれほど多くない。池田ら³⁾は波動場に置かれた鉛直薄板の高さを変化させて実験を行い、板の高さによって板先端で生じる剥離渦の挙動が異なり、結果として洗掘特性が変化すると報告している。しかし、板高と洗掘特性との詳細な関係について検討されていない。本節では、彼らの実験方法に倣って、板下部の土砂移動を制御した条件において、板高が洗掘特性に与える影響を明らかにする。

2.1 実験概要および計測手法

実験は、図-1(a)に示す、長さ20m、幅0.5m、高さ0.6mの二次元造波水槽を用いて行った。水槽には造波板から約7m離れた位置に勾配を設け、水路床から0.15mの高さに水平床が設けた。実験では、この



(a) 実験水槽全体図



(b) 地盤高の計測手法

図-1. 実験概要

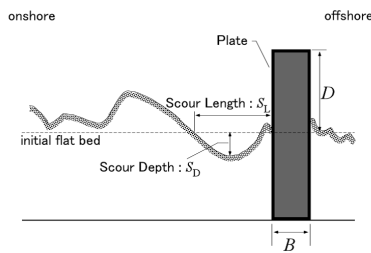
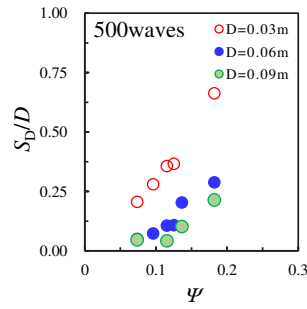


図-2. 洗掘特性量の定義

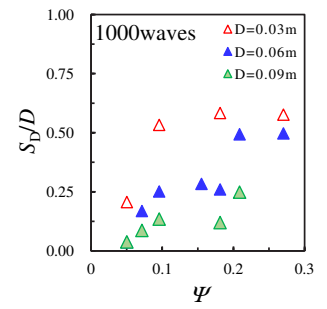
水平床上の水深 h を 0.25m と一定にした。水平床の一部を移動床（長さ 1.8m、幅 0.5m、厚さ 0.15m）とし、底質には中央粒径 $d_{50}=0.25\text{mm}$ 、比重 2.63 の豊浦標準砂を用いた。移動床中央部に板厚 $B=0.036\text{m}$ の耐水ベニヤ製鉛直平板を設置した。鉛直平板は水路床底部に直接固定されており、鉛直平板下部での土砂移動および浸透流の影響が生じないように配慮した。初期砂面から鉛直平板天端までを平板高さ D とし、 $D=0.03, 0.06, 0.09\text{m}$ の 3 パターンに変化させて実験を行った。

作用波は周期 $T=1.46, 2.92\text{s}$ の規則波を対象とし、それぞれの周期で波高を $H=0.039 \sim 0.112\text{m}$ と変化した。鉛直平板から 2.7m 離れた位置に 2 本の容量式波高計 (CHT6-30 : KENEK 製) を設置して、水位変動をサンプリング周波数 50Hz で計測した。作用波高 H は、移動床の初期状態から造波を開始して直後の安定した水位を対象にゼロアップクロス法により求めた。

水底地盤高の計測は図-1(b) に示すように、計測台車にレーザー変位計 (IL-500 : KEYENCE 製) を搭載し、台車を移動させながら計測を行った。水底地盤高の計測位置は、同計測台車に別途搭載したレーザー変位計 (LR-TB5000 : KEYENCE 製) を用いて、固定壁からの距離を計測することによって求めた。これらの計測は、データロガー (NR-2000 : KEYENCE 製)

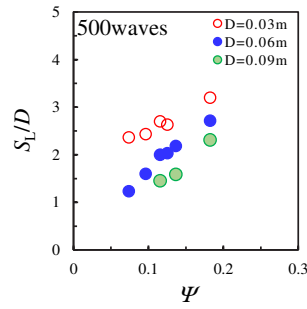


(a) $T=1.46\text{s}$

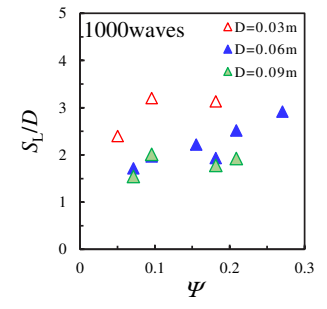


(b) $T=2.92\text{s}$

図-3. 無次元洗掘深とシールド数

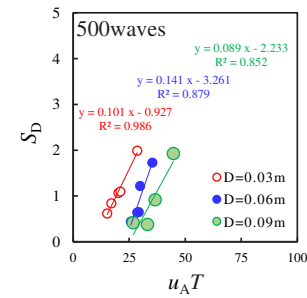


(a) $T=1.46\text{s}$

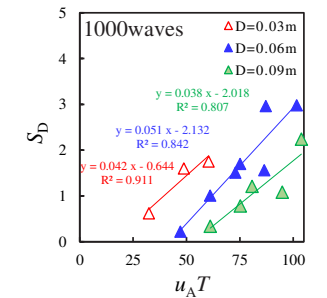


(b) $T=2.92\text{s}$

図-4. 無次元洗掘長とシールド数

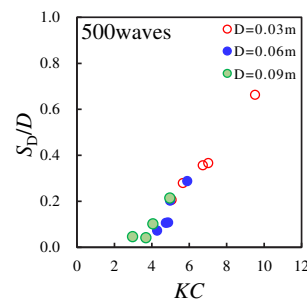


(a) $T=1.46\text{s}$

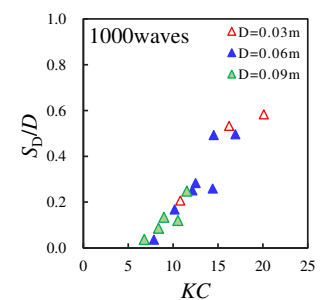


(b) $T=2.92\text{s}$

図-5. 洗掘深と $u_A T$



(a) $T=1.46\text{s}$



(b) $T=2.92\text{s}$

図-6. 無次元洗掘深と KC 数

を介して 100Hz で行った。なお、事前の検討により、地盤高計測用のレーザー変位計と水面との距離を約 0.1m とすると、水を抜くことなく地盤高を精度よく計測できることを確認している。

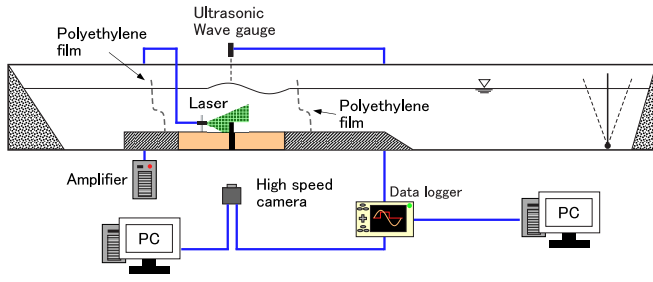


図-7. 可視化実験概要

地盤高の計測は、造波開始から 50, 100, 500, 1000, 2000, 4000 波後に行い、水路幅 0.5m に対し 0.05m 間隔で合計 9 測線の計測を行った。

2.2 実験結果及び考察

本研究では、図-2 のように洗掘特性量を定義する。すなわち、鉛直平板近傍において初期砂面より砂面が低くなっている洗掘領域の長さを S_L 、この領域中の初期砂面からの最大偏差量を洗掘 S_D と定義する。図-3 と図-4 に無次元洗掘深 S_D/D および無次元洗掘長 S_L/D と、各波浪条件から求めたシールズ数 Ψ との関係を示す。シールズ数 Ψ は、以下の式 (1) ~ (3) を用いて算出した^{4), 5)}。

$$\Psi = f_w u_b^2 / 2(s - 1) g d_{50} \quad (1)$$

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log \frac{1}{4\sqrt{f_w}} = -0.08 + \log \left(\frac{u_b}{k_s} \right) \quad (2)$$

$$u_b = \frac{\pi H}{T} \left(\sinh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1} \quad (3)$$

ここに、 f_w ：摩擦係数、 u_b ：底部最大水粒子速度、 s ：比重、 g ：重力加速度、 k_s ：粗度係数、 H ：波高、 T ：周期、 h ：水深である。図-3(a) によると、 $T=1.46s$ の場合には、シールズ数 Ψ の増加に伴っていずれの平板高さにおいても S_D/D は線形的に増大し、板高の低い場合にはその増加率は大きいことがわかる。一方、 $T=2.92s$ の場合には、 Ψ 0.1 の範囲では Ψ の増加に伴って S_D/D は線形的に増加するものの、 $0.1 < \Psi$ ではほぼ一定値を取るようになる。図-4 に示すように無次元洗掘長 S_L/D も、 S_D/D と同じような増加傾向を示すことが分かる。

目視観察によれば、平板岸側に形成される局所洗掘には、板隅角部での水粒子速度が大きく関係していると推察された。そこで、平板天端直上の水粒子速度を電磁流速計 (VM-801H：KENEK 製) により計測した。電磁流速計は水路中心軸上の鉛直平板天端直上 0.015m に固定した。移動床は初期状態のフラットベッドを対象として、造波開始から 2 分間を計測を行った。図-5 に各条件で計測された流速から速度振幅 u_A を求め、波周期 T との積である $u_A T$ と洗掘深

S_D との関係を示す。図-5 によると、いずれの周期においても S_D と $u_A T$ は正の相関関係があることが分かる。図-5 の縦軸および横軸を平板高さ D で正規化したのが図-6 である。 $u_A T/D$ は KC 数を意味するため、図-6 は無次元洗掘深 S_D/D と KC 数との関係を表している。同図によれば、 KC 数の増加に伴って S_D/D が増大することが明らかである。すなわち、洗掘深 S_D は KC 数の関数として表すことが可能であることが分かる。

3 板周辺の流況と洗掘特性との関係

局所洗掘の発生には、構造物付近での流れや乱れが関係していることは、周知の通りである。

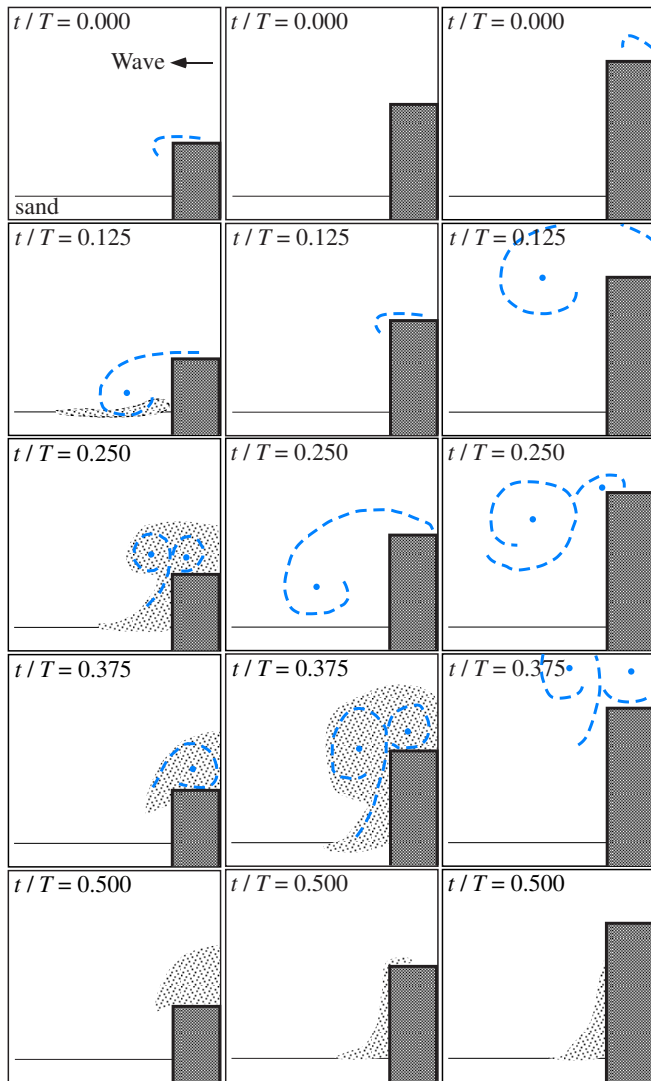
Lin *et al.*⁶⁾ の検討によれば、没水矩形構造物に波が作用した場合、構造物岸側端部を剥離した渦が水底面に到達することによって洗掘が発生することを示唆している。Chang *et al.*⁷⁾ も同様の検討を行っており、波高や波周期の違いによって渦強度が異なることを実験的に明らかにしている。ここでは、前節の結果を踏まえた上で、板によって誘起される流体運動を可視化し、板高や波浪条件が洗掘発生メカニズムに与える影響を明らかにする。

3.1 可視化実験概要

可視化実験の概要を図-7 に示す。水槽および移動床と平板の諸元は前節のものと同様であるので、図-1(a) を参照されたい。実験は暗条件で行い、水中に固定した可視化用連続光源 (DPSS Green Laser DPGL-5W：日本レーザー製) からのレーザーシートを水路の流軸方向と平行に照射し、これを計測断面とした。撮影する高速度カメラには Phantom Miro 320 (Nobby Tech 製) を用い、レンズは Ai Micro-Nikkor 55mm f/2.8 (Nikon 製) を用いた。フレームレートは 1/200s 間隔、露光時間は 4996 μ s で撮影した。レンズと対象物との距離とカメラの画素数によって定まる空間解像度は 8.33×10^{-3} cm/pix であった。トレーサーには、比重 1.01、粒径 0.25mm のイオン交換樹脂 (HP20：三菱ケミカル製) を用いた。なお、移動床中央から約 2.4m の領域を厚さ 0.02mm のビニール膜によって仕切り、繰り返し波を作用させてもトレーサー密度が保たれるよう配慮した。ビニール膜は波動および砂移動にほとんど影響を与えないように設置した。水槽には非接触型変位計 (UD-320：KEYENCE 製) を設置し、鉛直平板直上の水面変動量 η を計測した。高速度カメラと変位計を同期させることによって、撮影画像と波の位相を対応付けた。

3.2 実験結果及び考察

平板直上の水位が上昇しながら平均水面を切るゼロアップ時を基準として、波の一周期を 16 分割し、流



(a) $D=0.03\text{m}$ (b) $D=0.06\text{m}$ (c) $D=0.09\text{m}$

図-8. 各位相における渦流と砂移動のスケッチ

況と砂移動との関係について検討した。各位相における、平板岸側での渦流と砂移動との関係を模式的に示したのが図-8である。図-8には、平板岸側で渦が生成して消滅する $0.000 \leq t/T \leq 0.500$ の位相のみを示している。 $D=0.03\text{m}$ の場合、 $t/T=0.000$ に鉛直平板岸側の隅角部において剥離が生じ、次第に反時計周りの渦が形成されていく。平板直上における水位となる $t/T=0.125$ のとき、すなわち岸向き流速が最大となるときに渦は水底面に到達し、この渦に巻き込まれるようにして大量の砂が舞い上がる。 $t/T=0.250$ から渦は平板の斜め上方へ打ち上げるように移動し、対の渦を形成しながら平板直上を沖側へ移動する。やがて渦は消失していくものの、舞い上がった砂は砂雲となって平板の直上でやや留まった後、平板の沖側へ輸送される。 $D=0.06\text{m}$ の場合は、ゼロアップ時よりも後の位相で流れの剥離が生じる。 $D=0.03\text{m}$ の場合と比べて、大きな範囲で渦が形成されるものの、渦が水底面に到達することはない。渦はしばらく変形・自走した後、板周辺の砂を巻き上げながら沖側へ移動する。

$D=0.09\text{m}$ の場合は、板によって流線が大きく歪む様子が見てとれる。ゼロアップ時に平板の沖側端部を剥離した渦は、歪んだ経路を辿って平板の岸側に現れる。渦は水底面に到達することなく約 $1/4$ 周期の間自走した後、沖側へ移動する。

前節で得られた結果によると、鉛直平板が低い場合には、高い場合と比べて洗掘深および洗掘長が大きくなる傾向がある。ここで行った可視化実験の結果と併せて考えれば、鉛直平板天端で生成された渦流が水底面に到達することが、大規模な洗掘を引き起こす要因であると結論づけることができる。

4 平板下部で発生する局所洗掘の特性

Summer *et al.*^{7),8)} がパイプラインを対象に行った検討によれば、洗掘の発生要因はパイプ上部周辺における擾乱とパイプ下部における浸透流によって生じるとしている。すなわち、波動場中の砂地盤上に物体が置かれることによって生じる乱れによる影響と、物体前後の圧力差に起因して生じる浸透流による影響によって洗掘が発生するとしている。本研究では鉛直平板が移動床の下端にまで達した条件で実験を行ってきたので、浸透流の影響は考慮していなかった。ここでは、鉛直平板の下端が砂面上に位置するようにして、板下部の浸透流や砂移動を拘束せずに実験を行った。

4.1 実験概要

水槽および移動床の諸元は図-1(a)と同様である。鉛直平板は図-9に示すように水路床底部に直接設置されたアクリル製台座(長さ 0.04m 、幅 0.04m 、高さ 0.15m)上に固定した。アクリル製台座は水槽両側壁部にのみ埋め込まれているため、鉛直平板下部の土砂移動は制御していない。事前に行った検討によると、平板を固定するアクリル製台座の影響は水槽壁面からそれぞれ 0.1m 離れた測線にはその影響が見られなかった。初期水底面から鉛直平板天端までを平板高さ D とし、 $D=0.03, 0.06\text{m}$ の2パターンとして実験を行った。波浪条件の詳細は表-1に示す通りである。地盤高の計測は、造波開始から $100, 500, 1000, 2000$ 波後に鉛直平板を取り除き、静水状態で計測を行った。計測は、水路横断方向に 0.05m 間隔で合計 9 測線の計測を行った。

4.2 実験結果及び考察

本節における、洗掘特性量の定義は図-10の通りである。図-11及び図-12に無次元洗掘深および無次元洗掘長とそれぞれの波浪条件から求めたシールズ数との関係を示す。図-11と図-12には洗掘深 S_D が最大となった作用波数の計測結果をプロットしている。同図によれば、おおよそ全ての条件において ψ の増加に伴い、 S_D/D および S_L/D が増大し、板高の高い場合

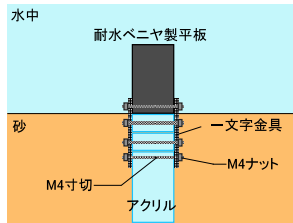


図-9. 平板の固定方法

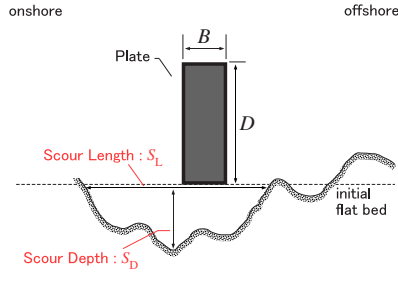


図-10. 洗掘特性量の定義

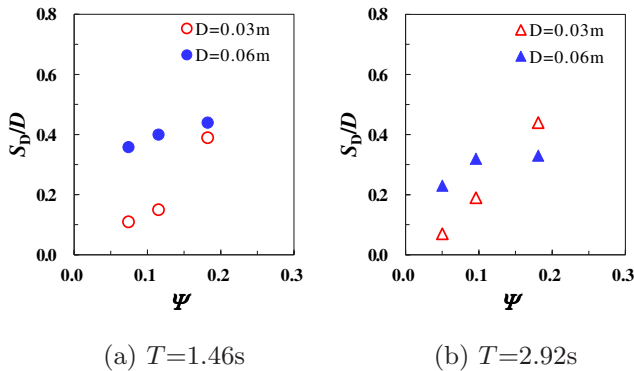


図-11. 無次元洗掘深とシールドズ数

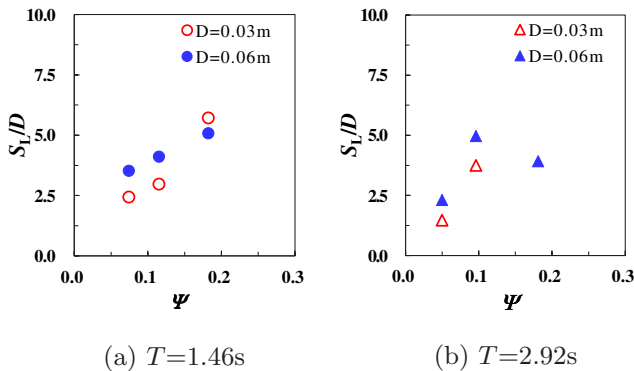


図-12. 無次元洗掘長とシールドズ数

でそれらの値が大きくなる事が分かる。これは、波高および板高の大きい場合で、平板下部を通過する浸透流が強くなるためであると考えられる。板下部の土砂移動を制御した条件の結果を併せて考えれば、板高が低い場合には天端で生成される渦流の影響が、板高の高い場合には浸透流の影響が大きくなる傾向があることが分かる。

表-1. 実験条件

h [m]	T [s]	L [m]	H [m]	u_b [m/s]	Ψ [-]
0.25	1.46	2.11	0.057	0.151	0.076
			0.076	0.201	0.115
			0.102	0.268	0.182
	2.92	4.48	0.039	0.117	0.050
			0.060	0.178	0.096
			0.090	0.267	0.181

5 洗掘対策の検討

前節の検討によれば、平板下部の土砂移動を制御しない場合には、平板直下近傍において最大洗掘深が見られた。構造物下部に著しい局所洗掘が生じた場合、構造物の倒壊や破壊につながる可能性がある。そこで、本研究では前節に示した鉛直平板下部において発生する局所洗掘の対策として (1) 平板下端を根入れする、(2) 平板下部に盛土を設ける手法を考案し、各周期の最大波高を対象として、その効果について検証した。

5.1 根入れによる効果

前節において行った検討によれば、鉛直平板下部に発生する洗掘深は、最小で 0.007m、最大で 0.024m であった。そこで、洗掘に寄与する浸透流を阻害するために平板下端を根入れすることで、洗掘の発生を制御することは可能であるか検討した。平板高さ D を $D=0.06m$ とし、初期水底面から鉛直平板下端までの根入れ深 D_P を $D_P=0.015m$ 、 $0.030m$ の 2 パターンとした (図-13)。図-14 に各根入れ深における 2000 波作用後の水底地盤高を示す。図-14 によれば、いずれの条件においても平板下部での洗掘は発生していない。また、根入れ深さの違いによって鉛直平板付近で生じる地形変化に大きな差異は見られないことがわかる。すなわち、構造物下部の浸透流を抑制することによって洗掘を抑制することが可能であることが示されたと結論づけられる。

5.2 盛土による効果

前述のように、構造物下部の浸透流を抑制することは洗掘対策として極めて有用であることが明らかになった。しかし、実作業において現地海底を掘ったうえで構造物を設置・構築することは困難であり、現実的ではない。そこで、図-15 に示すように、水底面上に構造物を設置し、その後、その脚部に 1:2 の盛土を設けることで浸透流の抑制効果が期待できるかについて検討した。盛土の作成には、移動床と同じ豊浦標準砂を用いた。図-16 に、各条件における水底地盤高の時間変化を示す。図-16 によると、本実験の条件下では、盛土は崩壊せず、平板下部での洗掘は発生しないことが分かる。

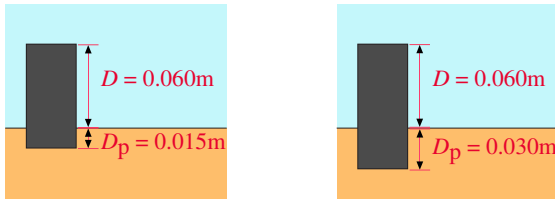
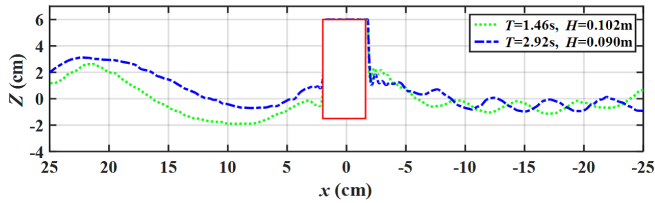
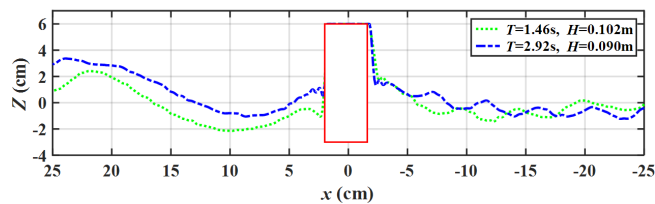


図-13. 根入れの諸元



(a) $D=0.06\text{m}$, $D_P=0.015\text{m}$



(b) $D=0.06\text{m}$, $D_P=0.030\text{m}$

図-14. 根入れによる効果

根入れ及び盛土をした条件では、5000 波まで引き続き波を作用させたが、盛土をした $T=1.46\text{s}$, $H=0.102\text{m}$ の条件でのみ、約 3000 波で盛土が崩壊し、平板下部で洗掘が発生した。そのため、盛土による対策効果の評価をする際には、作用波高及び作用波数の設定方法に関する検証が必要であると考えられる。

6 結論

本研究では、波動場に置かれた板状構造物を対象に、その高さ、根入れの有無などの諸元が洗掘特性に与える影響を検討した。次に、新しい対策手法として平板下端を根入れする手法及び平板脚部に盛土を設ける手法を考案し、その効果について検証した。以下に得られた知見を列挙する。

- 平板下部での土砂移動を制御した条件では、平板隅角部を剥離した渦流によって洗掘が発生し、板高の低い場合で、無次元洗掘深および無次元洗掘長が大きくなる傾向を示す。
- 平板下部での土砂移動を制御しない条件では、平板下部での浸透流が洗掘の発生には支配的となり、板高の高い場合で、無次元洗掘深および無次元洗掘長が大きくなる傾向を示す。
- 平板下部での洗掘対策として根入れおよび盛土を施す手法を考案し、一部の条件を除いてそれらの有用性を確認した。

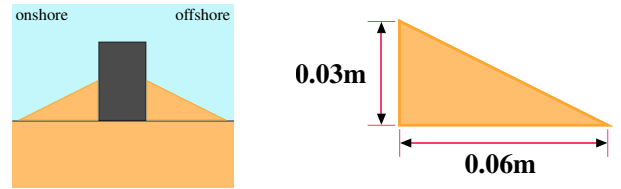
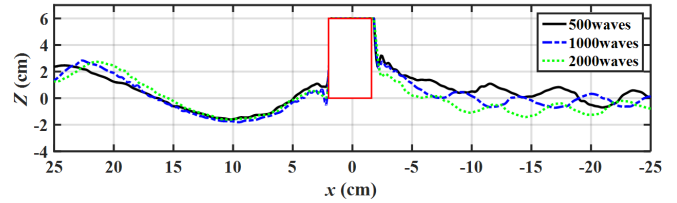
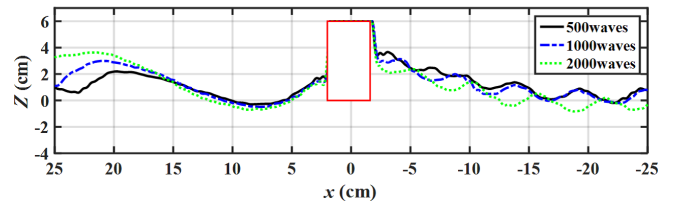


図-15. 盛土の諸元



(a) $T=1.46\text{m}$, $H=0.102\text{m}$



(b) $T=2.92\text{m}$, $H=0.09\text{m}$

図-16. 盛土による効果

参考文献

- 1) 鈴木高二朗, 渡邊和重, 山本悟, 梅崎康浩, 小澤康彦, 村上俊春: 防波堤基礎工における洗掘防止工の実態調査, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.726-730, 2004.
- 2) 山野貴司, 藤原隆一, 野村浩二: 海底勾配の違いによる低天端有脚式離岸堤の洗掘特性と対策工の効果に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 第 68 巻, pp.738-743, 2012.
- 3) 池田駿介, 浅枝隆, 杉本光由, 玉川 雅文: 波動場に置かれた垂直板付近の流れと砂の移動に関する研究, 海岸工学講演会論文集, 第 30 巻, pp.284-287, 1983.
- 4) T.Shibayama, K.Horikawa: Sediment transport and beach transformation, Proc.18th Coastal Eng.Conf., pp.1439-1458, 1982.
- 5) Jonsson.I.G: Wave boundary layers and friction factors, Proc.10th Coastal Eng.Conf., pp.127-148, 1966.
- 6) Meng-Yu Lin, Liang-Hsiung Huang: Vortex shedding from a submerged rectangular obstacle attacked by a solitary wave, Journal of Fluid Mechanics, Vol.1651, pp. 503-518, 2010.
- 7) Kuang-An Chang, Tian-JianHsu, Philip L.-F.Li: Vortex generation and evolution in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle: Part II: Cnoidal waves, Coastal Engineering, Vol.152, No.3, pp. 257-283, 2004.
- 8) Sumer,B.M., Fredsoe.J.: Scour below pipelines in waves, J.Waterway,Port,Coastal and Ocean Engineering, Vol.116, No.3, pp.307-323, 1990.
- 9) Sumer,B.M., Fredsoe.J.: Onset of scour below pipeline exposed to waves, J.Offshore and Polar Engineering, Vol.1, No.3, pp.30-35, 1991.