

波・流れ中における洗掘防止用袋型根固め材の安定性に関する実験

Experimental Study on Stability of Flexible Anti-Scouring Foot Unit in Wave and Current

平石哲也・橋口萌乃⁽¹⁾

Tetsuya HIRAISHI and Moeno HASHIGUCHI⁽¹⁾

(1) 京都大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Offshore wind power station is strongly demanded to complete the zero-emission society. The stations are usually located in shallow water areas where sea waves and currents may cause the scouring in the monopile-support ground. In order to prevent the scouring at the footstep of the monopile, a permeable and flexible filter-unit is developed. The unit is composed with the strong outside net and inner rubbles. The paper describes the experimental study on the stability of the unit in the stormy wave and currents. The test is done in a large basin 45m long and 4m wide and the scale of the model is 1/60. The limitation wave height and current velocity for 8ton unit is revealed.

キーワード：風力発電，モノパイル構造物，洗掘問題，水理実験，洗掘防止用袋型根固め材

Keywords：Wind power generator, mono-pile structure, scouring problem, hydraulic experiment, flexible foot filter unit for anti-scouring

1. はじめに

二酸化炭素排出量を 2050 年までに 100%削減する政府目標を達成する施策の一つとして，再生エネルギーを利用した発電システムの活用が望まれている．洋上風力発電は，すでに一部の港湾域で試験的に運用が図られている将来有望なシステムである．洋上風力発電システムは，大水深域に作られることが多い浮体式と浅海域に作られる着床式に分けられる．それぞれ各種の課題を抱えているが，着床式の大きな課題は，風を受けるブレードを支えるモノパイルの海底部における地盤洗掘である．今後，波浪や流れが強い港外へ設置が進むと，波・流れによる地盤洗掘は大きな問題となる．緒方ら(2018)によれば，砂地盤の最大洗掘深はモノパイル径の 10%程度になり，モノパイルの安定性に危険を及ぼす．波はピストン型の造波装置で発生させ，流れは軸流ポンプで再現する．水槽内に 1/30 斜面から水平床に変化するような底面を

片山ら(2021)の実験では洗掘影響範囲は，モノパイル径の約 3 倍，洗掘深は径の 3 割にもなる．洗掘を防止するために，現

在，Photo 1 に示すような可撓性の洗掘防止用袋型根固め材を使用する方法が提案されている．これは強化繊維の網の中に碎石を詰めたもので，これまでに導流堤や海浜の浸食防止材，被災後の護岸・堤防の仮止め工などで広く活用されている(黒田ら，2014)．本研究では，この袋型根固め材のモノパイルを対象とした洗掘防止工としての適用性を検討するために，実験で波と流れを作用させて安定性を調べることを目的とした．



Photo 1 Overview of Flexible Anti-Scouring Unit

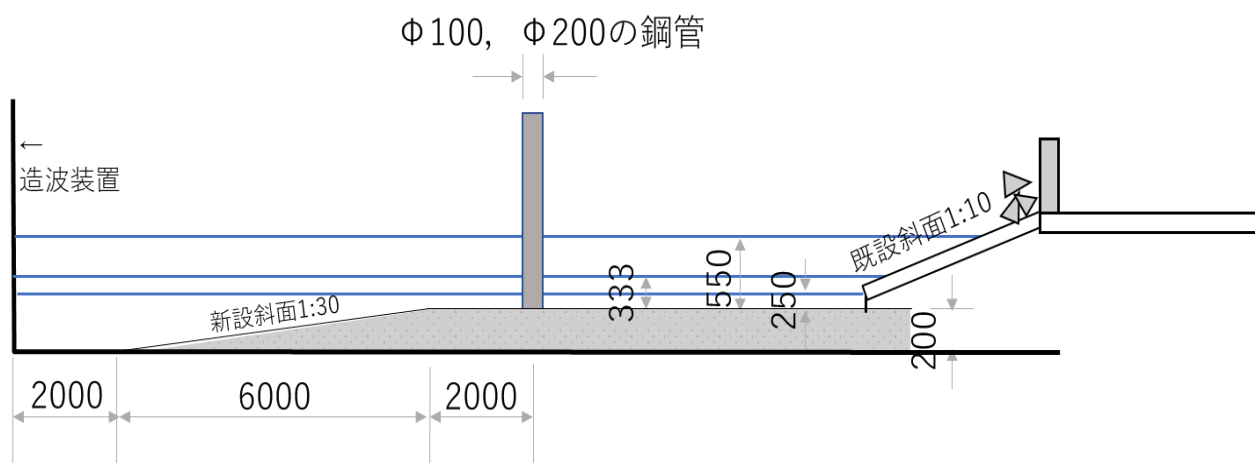


Fig.1 Implementation of Mono-Pile Model in Wave Flume (unit: mm)

2. 実験の内容

使用水槽は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー内の津波再現水槽で、長さ 45m、幅 4m の平面水槽である。波はピストン型の造波装置で発生させ、流れは軸流ポンプで再現する。水槽内に 1/30 斜面から水平床に変化するような底面を作成した。模型縮尺は造波機と流れ発生装置の能力を考慮して 1/60 とした。根固め工模型もフルードの相似則に従って作成している。本実験は固定床の実験であり、根固め材の網材は実機を用いて摩擦係数は実機と同一になるようにしており、縮尺効果は大きく出現しないものとする。

Fig. 1に実験対象水域の断面を示す。海域の水深は、現地量で15m, 20m, 33mし、モノパイルの直径は6m, 12mとした。Photo 2に水槽内のモノパイル模型の設置状況を示す。図の手前が岸側で、奥側に造波装置と流れ発生装置が設置されている。向かって右側のモノパイルが現地換算で直径12m, 左側が6mである。作用させた波と流れは、現地量で、目標値で有義波高 $H_{1/3}=9\sim15\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=10\text{s}\sim20\text{s}$ の不規則波と流速 $V=0\sim2.0\text{m/s}$ の一定の流れとした。Table 1に実験で用いた波と流れの条件をまとめた。



Photo 2 View of Model Mono-Pile (Left side; $\phi=6\text{m}$, Right side, $\phi=12\text{m}$)

Table 1 Current(V) and Wave Period(s) in Experiment (prototype)

モノパイル径 (m)	6.0	12.0		
水深 h (m)	15.0	20.0	33.0	
流速 V(m/s)	1.0	1.5	2.0	
波周期 T(s)	10.0	13.0	16.0	20.0

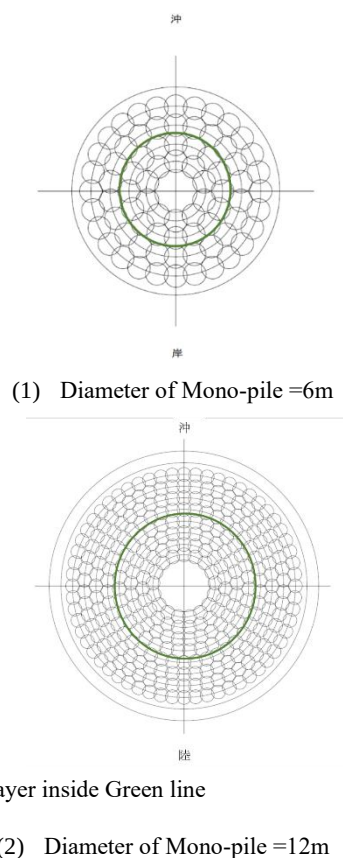


Fig. 2 Plane figure of the set Anti-Scouring Unit

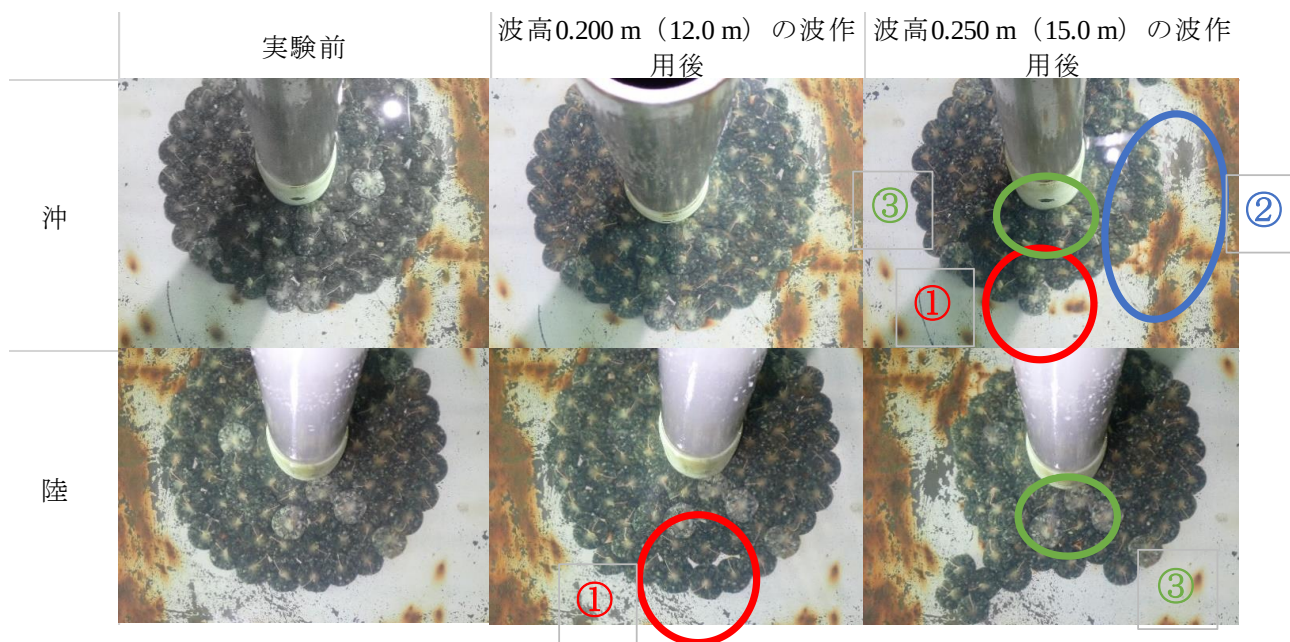


Photo 3 Damage Level of the Unit after 1000 Wave Action
(①Sliding, ②Remarkable Sliding and Rotating, ③Rotating)

質量 8t の根固め材をモノパイルの周りに並べ、径 6m および 12m のモノパイルそれぞれに対して、同心円状に 4 列及び 8 列を配置した。Fig. 2 に根固め材の配置を、径 6m および径 12m のモノパイルについて示す。径 6m の場合、内側 2 列は 2 層として防護効果を高めた。図中の緑の線は、それより内側では 2 層積みをしている範囲を示す。根固め材の総数は、径 6m および径 12m のモノパイルでそれぞれ 75 および 300 個である。根固め材は、繊維製の外周袋材を縛る仕方で 3 種にタイプ分けされる。一つは、底

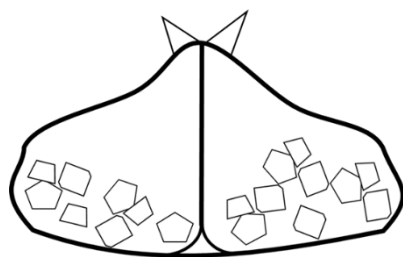


Fig.3 Cross Section of the Anti-Scouring Unit

Table 2 Observed Removed Numbers
(Water Depth 20m, Diameter 12m)

T(s)	H1/3(m)	V=0(m/s)	1.0	1.5	2.0
20	3	-	--	--	--
20	6	--	3	--	-
20	9	1	2	4	5
20	12	0	30	15	30
20	15	30	20	-	-

面から紐を伸ばして袋口を縛ったもの、二つ目は底面の繊維を吊り上げて、縛り口から抜き出して結束したもの、三つ目は底面の結束は無く全体が平たくなるものである。本実験では最初のタイプの根固め材を用いている。Fig. 3 に袋型の根固材の断面イメージを示す。

実験では、波の周期、流れの速さを固定して、波高を下位レベルから上位へ向けて順次高くしていき袋型根固め材の動きを観測する。1 ケースの作用波数は 1000 波である。根固め材が移動する順序の様子を Photo 3 に示す。

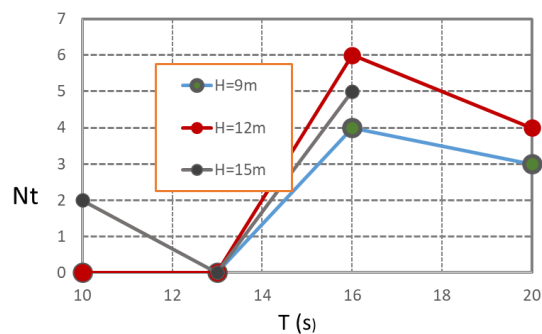
Photo 3 は波高 12.0m および 15.0m の波作用後に 1 つのモノパイルを沖側および岸側から撮影したものである。根固め材の移動する順序は、モノパイルの沖－陸側の外、モノパイルの水路横断方向の外側、内側の上段の順であった。また、数個動くと、隣り合う根固め材が動き出すため、一気に移動数が増えるケースが多かった。根固め材は、ビデオと写真観察によって以下の 2 種類の動きによって移動することが分った；①水粒子の水平運動に伴い、水平に併進運動を行い、初期位置から移動する。②波や流れの乱れ成分によりその場で回転し、場合によって大きく移動する。前者を滑動、後者を転倒と便宜的に呼び、記録上は区別して記録する。同時に生じる場合は転倒とする。両者を足して総移動個数 N_t と以下記述する。各ケースにおける移動個数を整理した結果の一例が Table 2 である。項目毎に表のような整理を行い、波高や周期による移動個数の変化を調べた結果を以下に示す。

3. 実験の結果

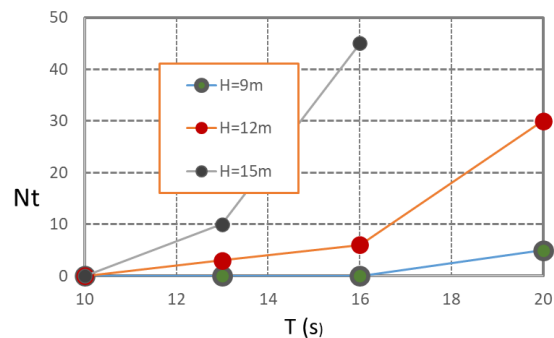
Fig.4 は流速 2.0m/s, 水深 20m の条件で, 移動個数を波高別に示したものである. 波高程度が中程度でも, 移動個数が 0 であったため, 図では波高 9m, 12m および 15m のみのケースを示した. 波高が大きいくほど移動個数は大きくなり, モノパイル径 6m で波高 15.0m の移動個数は波高 9.0m の移動個数の 1.2 倍以上となった. モノパイル径 12m の場合には $T=16s$ で差が大きく, $H=12m$ から $H=15m$ に波高が変化しただけで移動個数は 9 倍になる. 結果のばらつきは, やや顕著ではあるが, パイル径 6m の場合は $T=16s$ が移動個数で最大となること, パイル径が 12m の場合には, $T=20s$ で最大となる傾向が把握できた.

Fig. 5 は水深 20.0m の条件で横軸に周期を取って, 流速をパラメータとして縦軸に移動数をプロットした図面である. 全体として, 周期が大きいくほど滑動および転倒の移動個数は大きくなる傾向にあるが, 流速 1.5m/s のとき, 流速 2.0m/s に比べて最大で 6 個も大きくなる場合もあり, ケース毎のばらつきがやや現れる. パイル径が 12m の場合, 流速が大きくなると移動個数が大きくなる傾向が強くなる. また, 図より, 周期 10.0s および 13.0s では, 大きな流速($V=2.0m/s$)であっても, ほとんど移動が生じないことが分った. 一方, 周期 16.0s および 20.0s では小さな流速でも移動が生じることが確認できた. 図より水深 20m の条件で, 波高 12m の波を作用させたときの移動個数を流速別に検討したところ, 流速 $V=2.0m/s$ のケースが周期 20s について最大となる傾向が確認できた. なお, 水深 33m の条件で, 波高 15m の波を作用させた後の移動個数を流速別に検討したところ, 流速が大きいくほど, 移動個数が大きくなり, 特に $T=16.0s$, および $20.0s$ の条件で根固め材がたやすく動くことが確認できた.

Fig.6 は, 流れが無い状態での波高 15m の波を作用させたときの移動個数を水深別に示したものである. 水深 15m と 20m の間で移動個数にあまり相違はみられないものの, 水深が小さいほど, 移動個数が多くなる傾向が読み取れる. 転倒のケースではこの傾向が顕著になり, その比は, 1.7 から 4.0 倍となっていた. これは, 浅い水域では, 波の一部が砕波によって海底に大きな乱れを与えるからと考えられる. また, 図から水深 33m のケースについてモノパイル径 12m と 6m について移動個数を比較した. 比較は, モノパイル回りの洗掘防止材の総数に対する移動個数の割合で行った. その結果, 流速 1.0m/s 以外の条件ではモノパイル径 6.0m の方がモノパイル径 12m よりも, 残置個数が顕著に大きくなり, モノパイル径が設計について大きな要素となることが判明した.

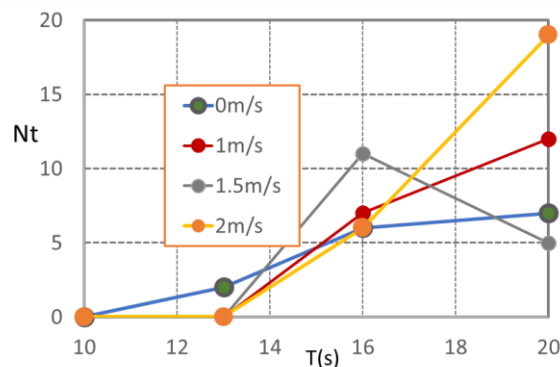


(1) In case of Diameter = 6m

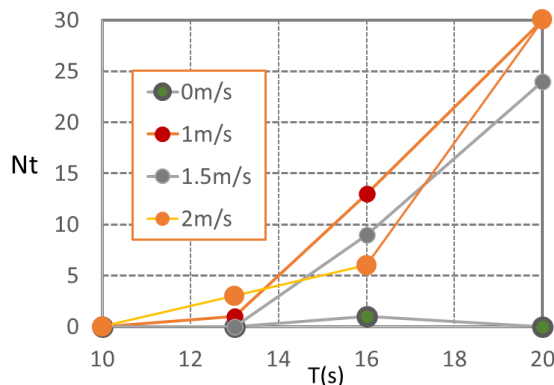


(2) In case of Diameter = 12m

Fig. 4 Variation of Numbers of Removed units for Wave Height and Period (Current = 2.0m/s)

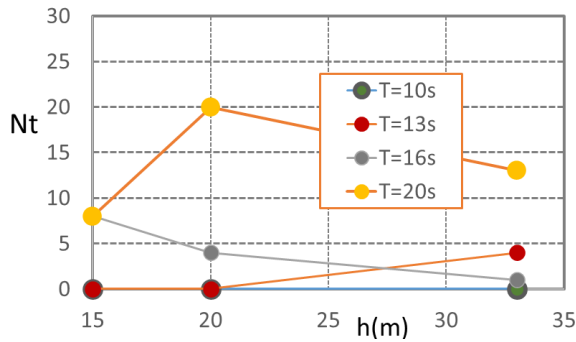


(1) In case of Diameter = 6m

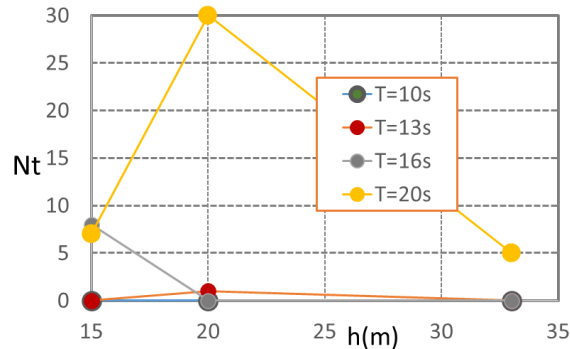


(2) In case of Diameter = 12m

Fig.5 Variation of Removable Unit Numbers for Wave Period and Current (Wave Height=12m)



(1) In case of Pile Diameter=6m



(2) In case of Pile Diameter=12m

Fig.6 Variation of Removed Unit Number for Water Depth ($H_{1/3}=15\text{m}$, No Current)

4. 限界安定係数の提案

全実験ケースの洗掘防止用袋型根固め材が波の作用時間内で転倒し、移動する限界状態に達したケースとなる全 19 ケースを調べると、限界状態に達した直前と直後で転倒の個数が 0 個から 5 個以上となったものが 10 ケース、0 個から 2~4 個となったものが 14 ケース、1 個から 5 個以上となったものが 3 ケース、1 個から 2 個となったものが 2 ケースであった。よって、ほとんどのケースで限界状態である 2 個を一気に越えるような転倒が起こったといえる。そこで、2 個転倒した直前と直後の値から平均もしくは重み付き平均を取って限界状態の波高を求めることはせず、単に限界状態に達した直前の波高レベルを、限界波高 H_L とした。

イスパッシュ数の導出の式 (Coastal Engineering Research Center, 1977) と同じ形で限界安定係数を求めることとすると、次式で限界安定係数 y_L が求まる。

$$M = \frac{\pi \rho_y U_L^6}{48 g^3 y_L^6 (S_y - 1)^3} \quad (1)$$

ここで、

g = 重力加速度(9.8m/s^2)
 ρ_y = 中詰め材の密度(kg/m^3)
 S_y = 中詰め材の水に対する比重

$$U_L = \frac{H_L \omega}{2 \sinh kh} + V \quad (2)$$

である。式(2)中の限界波高 H_L は本実験では、各ケースにおいて、有義波高 $H_{1/3}$ を用い、流速は有義波高による水底における水粒子速度の最大値と作用流速の和で計算した。この時、波の分散関係式は流れの中での式となり、次式で示される (平山・峯村, 2004)。

$$\omega = \sqrt{gk \tanh kh} + kV \quad (3)$$

ここで、 ω :波の角周波数、 k :波数である。

この式を用いて、計算した限界安定係数と近似値である一般的な分散関係式 $\omega = \sqrt{gk \tanh kh}$ を用いて計算した値では、限界安定係数の結果で 5%以内の差であったので、全ケースの計算では、近似値を用いて計算を実施した。

Fig.7 に限界安定係数の計算結果を示す。横軸には流速値を取っている。この図では、限界安定係数は流速にほぼ比例した値を取る。Fig.8 は、横軸に波周期の値を取ったものである。Fig.8 から限界安定係数は 0.6 から 0.9 の値を取ることが分かる。本来は、質量を一定として、実験を行っていることで、限界安定係数は、一定値に近づくことが望ましいが、実験のばらつきや、限界状態を離散的に決定していることの影響で、限界安定係数がばらつきを有するものと考えられる。ただ、ばらつきとしては、オーダーの範囲であり、ほぼ同オーダーで解を得られており、推算値として、0.6~0.9 を妥当値とし、危険側の解として 0.6 を提案できる。

Table 3 は、限界安定係数を用いて、洗掘防止用袋型根固め材の必要質量を計算してみたものである。所要質量としては、ケースによってかなりばらつくものの、参考値として設計に用いることができる。ただし、式(1)から分るように、限界安定係数 y_L と推算される質量 M とは、以下の関係にある。

$$My_L^6 = f(U_L^6) = \text{const.} \quad (4)$$

ここで、 $f(U_L^6)$ は、式(1)の右辺から y_L^6 を除いた式を表し、流速、波高が決まっておれば一定である。

いま、ある条件で y_L が 0.8 と設定され、 $M=20\text{t}$ が得られたと仮定する。 y_L の 6 乗は 0.26 であり、 $My_L^6=5.2$ となる。ここで、 y_L が 0.7 に置きなおされると、 y_L の 6 乗は 0.12 となり、 $M=43\text{t}$ に推算値が倍程度に変化する。したがって限界安定係数 y_L の採用にあたっては、慎重な考察が必要であり、本実験のケースのみでは、十分な推定値を得られるものではなく、より多くの実験条件での検討が必要である。本研究では限界安定係数による洗掘防止用の袋型根固め材の所要質量の設定法を提案したことを成果とする。

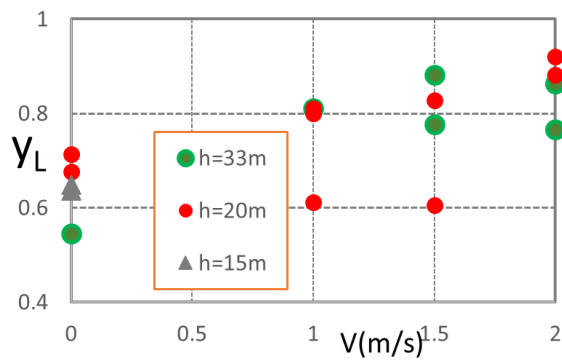


Fig.7 Variation of Limited Safety Coefficient y_L for Current Velocity $V(m/s)$

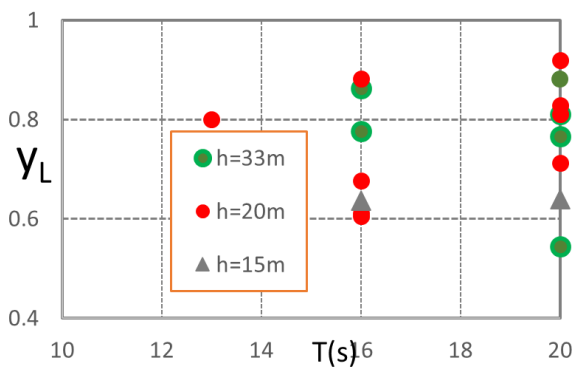


Fig.8 Variation of Limited Safety Coefficient y_L for Wave period $T(s)$

Table 3 Estimation of Unit Mass Necessary for Stability
(Wave Period 20s, Wave Height 15m)

流速	$V(m/s)$	水深 $h(m)$	質量 $M(ton)$
	0	33	7.9
	0	20	11.0
	0	15	8.3
	2.0	33	16.3
	2.0	20	10.3

4. まとめ

本実験研究では、着底式洋上風力発電システムのモノパイル基部の洗掘防止用の袋型根固め材の波と流れの中での安定性について検討を行った。その結果、水深が浅く、流れの流速が大きくなるほど、滑動と転倒を加えた総移動個数が大きくなることが確認できた。移動限界を決めて限界安定係数 y_L を計算し、今回の実験範囲では凡そ 0.6～0.9 となる係数を提案し、設計の参考資料としたが、根固め材の推算質量は限界安定係数によって変化し、設定には慎重を期す必要がある。

参考文献

- 1) 緒方ゆり・増子雅洋・藤井直樹・阿部光信・athnayaka Dilan・Pathirana Sachini・田島芳満(2018)：洋上風力発電におけるモノパイル基部まわりの洗掘に関する実験的研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.74, No.2, I_820-I_826.
- 2) 片山裕之・青木健太・鶴飼亮行・三浦成久(2021)：波浪によるモノパイル基礎局所洗掘および対策工効果の実験的検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.77, No.2, I_553-I_558.
- 3) 黒田美里・井上和徳・土橋和敬・平石哲也(2014)：海岸用網袋式ユニットの性能評価に関する実験的研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.70, No.2, I_247-I_252.
- 4) Coastal Engineering Research Center(1977)：Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers., Vol.II, pp.7_213-7_216.
- 5) 平山克也・峯村浩治(2005)：河口部における波高増幅率の簡易算定手法，海洋開発論文集，第 21 巻，pp.314-318.

(論文受理日：2022 年 8 月 31 日)