

人工魚礁の滑動抵抗算定におけるスパイクの 効果に関する基礎的研究

BASIC RESEARCH ON EFFECT OF SPIKE IN SLIDING RESISTANCE CALCULATION OF ARTIFICIAL FISH REEF

瀬戸雅文¹・西岡等²・鈴木信男²

Masabumi SETO, Hitoshi NISHIOKA and Nobuo SUZUKI

¹正会員 水博 福井県立大学 生物資源学部 (〒917-0003 福井県小浜市学園町 1-1)

²株式会社中山製鋼所 エンジニアリング事業部 (〒040-0084 函館市大川町 7-1)

The theory to evaluate the passive earth pressure that acted on the spike arranged in the bottom of the artificial reef was derived. The passive earth pressure of the spike was derived by introducing new coefficient C_v into the passive earth pressure theory of the coulomb and evaluating the 3-D shape of the soil wedge. The spike of an angle type and a cross type was examined in this research, the direction of the sliding and the length of the spike were changed, and the sliding resistance that acted on the spike was measured. As a result, new coefficient C_v greatly depends on the aspect ratio of the spike and it has been understood not to depend so much in the shape of cross-section and the direction of the sliding. The passive earth pressure of the spike can be presumed according to internal frictional angle of sand, and new coefficient C_v .

Key Words: Artificial fish reef, sliding resistance, passive earth pressure, spike

1. はじめに

人工魚礁など水中に設置される漁場造成施設の着底後の安定性に関わる滑動抵抗については、沿岸漁場整備開発事業施設設計指針¹⁾によれば、砂礫地盤の場合は静止摩擦係数 μ を0.6として、滑動に対する安全率が1.2以上を満たすように施設の流体力特性や水中重量などの設計条件を決定するものの、施設底部にH型鋼やアングルなどで新たに滑動対策を講じた場合については、信頼できる滑動安定実験に基づき滑動抵抗の増大を考慮して見掛けの静止摩擦係数を割増してもよいことになっている。

人工魚礁の滑動抵抗増大工法に関する研究は、魚礁底部にチャンネル型鋼やT型鋼²⁾、及び π 型鋼³⁾を二次元配置した場合の模型実験や、十字礁、及び鋼製魚礁の実機実験⁴⁾が実施されている。しかしながら、前者については、理論の展開が二次元形状を前提としていることや比較的大縮尺の模型実験であることに伴う定量的な限界性、後者については、実験砂の土質条件の整合性や施設の底部形状の違いによる滑動抵抗の増加に関わる理論的な検討が実施されていないことなどから、これらの成果を土

質条件や施設条件が異なる任意の実海域に適用する場合には多くの問題点が残されている。

本研究は、主として鋼製魚礁の施設底部に滑動抵抗増大を目的として配置される種々形状のスパイクの見掛けの静止摩擦係数を算定するための簡易理論を構築する。さらに、実機とほぼ同じスケールのスパイク模型を用いた滑動抵抗実験を実施することによって、土質条件や施設条件、およびスパイク条件が異なる場合にも対応可能なスパイクの見掛けの静止摩擦係数の算定手法を提案する。

2. 理論的考察

一般に砂質地盤上に設置された漁場構造物に関する土圧の算定にはクーロンの土圧算定式が使用されるため¹⁾、本研究でも、スパイクの滑動抵抗算定式の導出についてクーロンの受働土圧理論に基づいてモデル化した。任意形状のスパイクに水平方向に応力 P_H が作用した場合に発生する受働土圧 P の最小値 P_0 は、スパイクの滑動に伴い押し上げられる土くさびを取り巻く力の釣り合い条件より近似的に考察することができる。

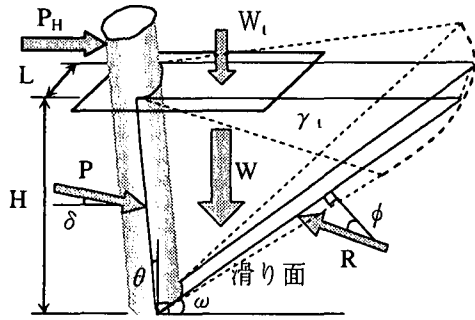


図-1 スパイクの受働土圧概念図

図-1 に示すように、スパイクの滑動に伴ってスパイクの前面に形成される土くさびには、土塊の重量 W (単位体積重量 γ_s) と、施設の底板などを介して土塊の上面より土くさびに作用し、見掛け上、土塊重量の増加と同様な効果をもたらす載荷重 W_i (単位面積当たりの載荷重 w)、滑り面に作用する抵抗 R 、及び、スパイクより受働土圧 P が作用する。壁面の変位より生ずるクーロンの受働土圧の解法と同様な手順で、スパイクの変位により周辺に発生する3次元的な土くさび形状に配慮しながら、最小受働土圧 P_p を定式化すると、近似的に次式で表現できる。

$$P_p = \frac{1}{2} C_v H^2 L \gamma_s K_p + C_A H L \beta K_p w \quad \dots (1)$$

(1)式において右辺第1項は土くさびに直接作用する土圧成分であるが、図-1の点線の領域で示すように、スパイクの周辺には三次元的な土くさびが形成されるものと推定される。従って、スパイクの横幅 L を単位幅とした二次元的な土くさびに作用する受働土圧を基準として、実在の土くさびによる受働土圧を換算するための係数として形状係数 C_v を導入する。また、(1)式の右辺第2項は載荷重に伴い土くさびに間接的に作用する土圧成分であるが、滑動に伴い盛り上がる地盤面の表面積をスパイクの横幅 L を単位幅とした二次元的な土くさびの表面積より換算するための係数として形状係数 C_A を定義する。なお、 β は施設底面の土くさびに及ぼす程度(載荷重の作用面積)を規定する係数でスパイクの配置状況に基づき0~1の範囲で既知の値を取る。なお、 K_p は、受働土圧係数で以下のように記述される。

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi + \theta)}{\cos^2 \theta \cos(\theta + \delta)} \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin \phi}{\cos(\theta + \delta) \cos \theta}} \right)^{-2} \quad \dots (2)$$

ここに、 ϕ は砂の内部摩擦角で圧密非排水三軸圧縮試験より決定される値、 δ はスパイクと砂との摩擦角で人工魚礁などのように施設の荷重で滑動を抑止する構造物は、流体力などに伴う水平応力を受けると砂地盤にめり込みながら滑動するため、 δ の方向は負となり経験的に $\delta \approx -2\phi/3$ をほぼ満足するものと考えられる²⁾。なお、 θ はスパイクの垂直応力と地盤法線との角度であるが、施設設置海域においては、一般的に地盤面は平坦であるため、本研究では無視した。(1)式は、未知数が C_A と C_v の w に関する一次式である。従って、 w が作用しないスパイクのみの滑動抵抗を計測することによって C_v が求まり、 w を段階的に作用させた場合の滑動抵抗の増加率より C_A が決定できる。

3. 実験方法

スパイク滑動抵抗実験の概要図を図-2に、実験条件を表-1に示す。本実験で検討したスパイクの断面形状は、部材幅50mmと100mmの等辺アングル(L字型)、及び等辺アングルの頂部を溶着成形した十字型の二種類である。供試スパイクの長さは、スパイクの断面形状によらず砂層箱の寸法(1520mm×2000mm×250mm)をもとに225mmで統一し、図-2に示すように、スパイクの相互干渉に配慮して滑動方向に対してはスパイク長の2倍の配置間隔(550mm)で板厚6mmの鋼板(1350×1850)に9本複列配置した。この際、滑動方向に対するスパイクの迎え角を、L字型は、0, 90, 135, 315°の4通り、十字型は、0, 45°の2通りに変化させた。

さらに、スパイク上部に底板を伴わないスパイクのみの滑動抵抗を計測する実験では、図-3に示すように、砂層箱の外部に滑動方向に曳行可能な簡易台車(ニードルベアリングで摩擦抵抗を極力抑えている)を配し、台車よりスパイク治具を吊り下げ固定することによってスパイクの埋没深を100, 200mmの2ケース変化させた。

表-1 スパイク滑動実験条件

スパイク形状	L、+
L(m)	0.05~0.20
H(m)	0.01~0.225
アスペクト比	0.22~2.0
w(kPa)	0.0627~2.430
牽引方向(deg)	0,45,90,135,315
牽引速度(m/s)	0.0003
平均牽引距離(m)	0.012
平均浮沈量(m)	0.009

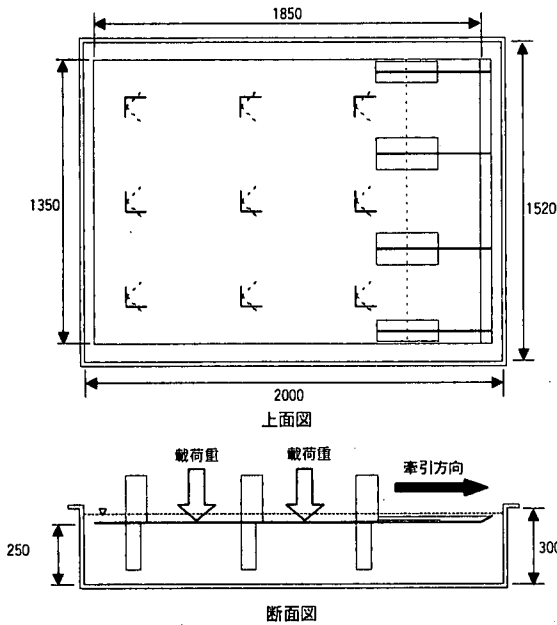


図-2 C_A 推定のためのスパイク
滑動実験概念図

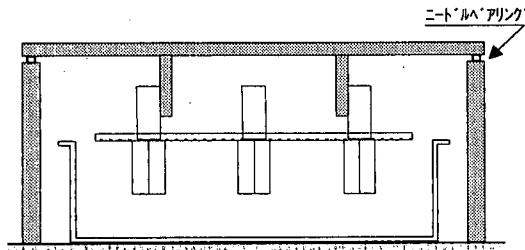


図-3 C_V 推定のためのスパイク
滑動実験概念図

表-2 実験砂の土質特性

土粒子の密度	2.565
湿潤密度	1.750
含水比	19.31
間隙比	0.749
飽和密度	1.895
内部摩擦角	37.90

本実験におけるスパイクのアスペクト比（スパイクの幅に対する高さの比）は0.22～2.0の範囲であった。実験に供した底質は中央粒径0.15mmの7号珪砂で、土質特性は表-2に示すように水中単位体積重量8.771kN/m³、内部摩擦角37.90°（圧密非排水三軸圧縮試験による値）で、滑動実験中は水面が砂地盤面の約10～20mm上方に形成されるように真水を注水し常に飽和状態を維持した。

形状係数 C_V を求めるための実験手順は、図-3に示すように、簡易台車の下部に複列スパイクの溶着された治具を所要のスパイク埋没深で固定し、滑動に伴い治具が鉛直上向きに変位するのを防止するために簡易台車に均等に総計3.744kNの重錘を配置

後、ボールねじ式の牽引装置で簡易台車を水平方向に0.3mm/sの等速度で牽引した。

形状係数 C_A を求めるための実験は、図-2に示すようにスパイクが複列配置された治具（重量1.519～2.323kN、牽引ロッド含む）をスパイク全体が地盤内に埋没しスパイク上部の鋼板が地盤表面に着底するように設置後、治具上部に重錘を0.951～3.724kNの範囲で5段階（重錘なしも含む）に変化させながら均等配置後、0.3mm/sで等速牽引した。今回の実験における平均牽引距離は12mm、平均浮沈量は9mmであった。何れの実験においても、牽引ロッドの中間に水平荷重計測用のロードセル（TOYO BALDWIN社製のTP-2最大荷重19.6kN）を接続し、ロードセルの歪み値を動歪み増幅器（LCT260）を介してペンレコーダに接続して記録紙に出力した。

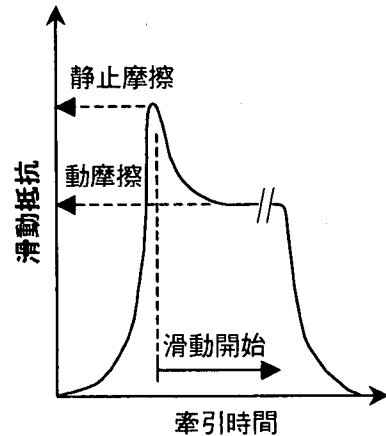


図-4 滑動記録状況概念図

図-4は典型的な滑動抵抗の記録状況パターン概念図を示したものである。牽引開始と同時にロードセルの引張り応力は急増し最大値を記録直後よりスパイク治具が滑動を開始するが、滑動開始とともに応力は減少しながらほぼ一定値に収束する。これら一連の応力変動の最大値と最終的な収束値より最大静止摩擦係数、及び動摩擦係数が算定できる。なお、実験では、スパイク治具の滑動後、再び応力が増加するケースも認められたが、これらは滑動に伴う地盤面の局所的な隆起に起因して治具前面などに新たに受働土圧が発生したことが原因と推定されるため、滑動後に形成される抵抗記録のピーク値はスパイク静止摩擦抵抗値の判定から除外した。また、 C_V 算定に使用する簡易曳行台車の静止摩擦抵抗（静止摩擦係数で0.030）、及び C_A 算定に使用するスパイク治具の鋼板部の静止摩擦抵抗（静止摩擦係数で0.671、図-5参照）については別途滑動抵抗実験を実施し、一連のスパイク滑動実験値より差し引くことにより、これら治具の影響を排除した。

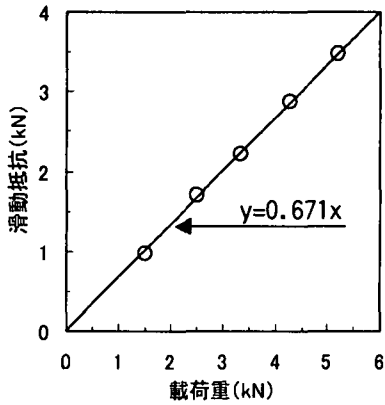


図-5 スパイク治具の滑動抵抗

4. 実験結果および考察

(1) 形状係数 C_v の推定

図-6 は形状係数 C_v を推定することを目的として、埋没深 (H) 毎に各種スパイクの滑動抵抗を部材幅で整理して示したものである。これより、各スパイク共に部材幅の増加 (2 倍) に対する滑動抵抗の増加 (1.09~1.77 倍) の割合や、スパイクの断面形状の違いによる滑動抵抗の増減 (最大と最小の比で 1.47~1.96 倍) と比較して、埋没深の増加 (2 倍) に対する滑動抵抗の増加 (3.71~5.07 倍) の割合が顕著に大きいことが認められる。これは、スパイクの滑動に伴い形成される土くさびが地盤内に埋設されたスパイク先端部より 3 次元的に形成されていることを示唆しており、スパイク幅やスパイク形状と比較してスパイク長が滑動抵抗の増大に大きく寄与することが明らかとなった。更に、スパイクの断面形状による違いについては、滑動抵抗の小さい順に、等辺アングルの迎え角 90° ($\rightarrow L$)、迎え角 0° ($L \leftarrow$)、迎え角 135° ($> \leftarrow$)、迎え角 315° ($< \leftarrow$)、十字型で迎え角 45° ($\times \leftarrow$)、迎え角 0° ($+ \leftarrow$) となるが、十字型は等辺アングル 2 対を溶着成形しているため、スパイク幅が等辺アングルの 2 倍となることを考慮すれば、同一のスパイク幅であれば、断面形状の違いによる滑動抵抗増大効果は大きくは期待できないものと考えられる。図-7 は、図-6 の滑動抵抗値をもとに形状係数 C_v を算出し、アスペクト比による変化を示したものである。これより C_v はアスペクト比の増加とともに減少する傾向を呈し、各スパイク形状毎に図中に示す累乗関数で近似的に推定することが可能である (図-8 参照)。なお、 C_v がアスペクト比の増加とともに減少するのは、図-6 の解釈と同様に、土くさびが三次元的に形成されることを裏付けている。

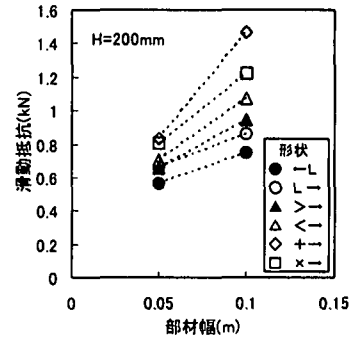
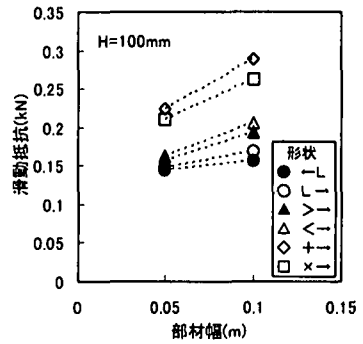


図-6 スパイク滑動抵抗の部材幅および埋没深による変化

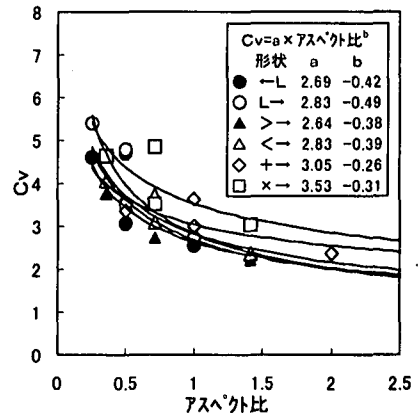


図-7 形状係数 C_v のアスペクト比による変化

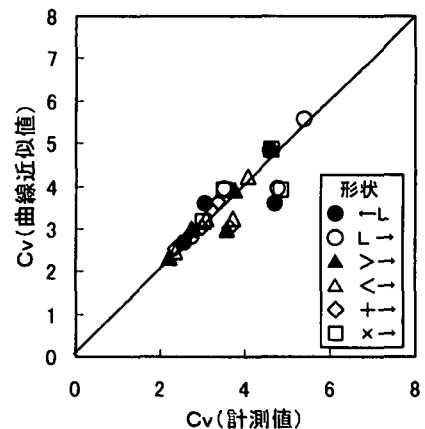


図-8 形状係数 C_v の計測値と曲線近似値の比較

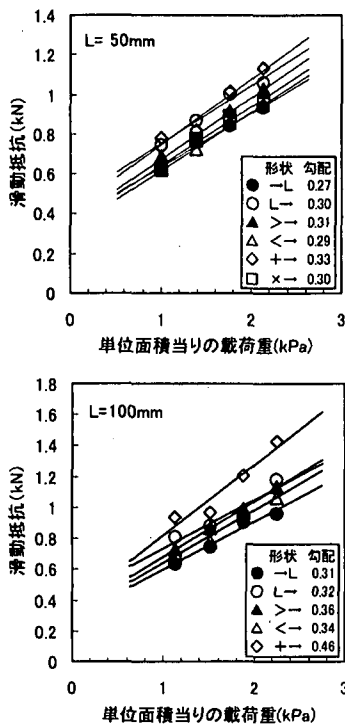


図-9 スパイク滑動抵抗の載荷重による変化

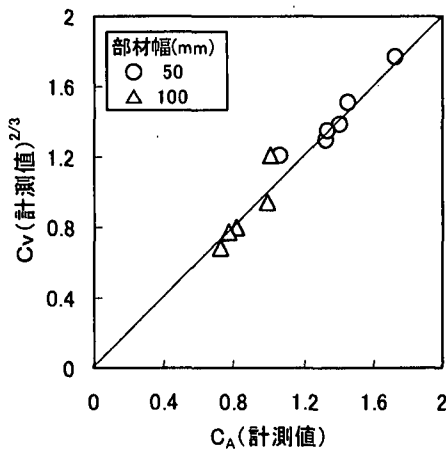


図-10 形状係数 C_A と C_V の関係

(2) 形状係数 C_A の推定

図-9は、形状係数 C_A を推定することを目的として、スパイク上部の鋼板上より周辺地盤に載荷重 (w) を作用させた場合の、 w の変化に対するスパイクに作用する滑動抵抗の変動特性を部材幅毎に示したものである。これより、単位載荷重当たりの滑動抵抗の増加量はスパイクの断面形状や部材幅による差は少なく、スパイク1本当たり、概ね0.3~0.36kN程度の値を取る。図-9をもとに C_A を算出し、同様に計測抵抗より算出される $C_V^{2/3}$ と比較し

て示すと図-10となる。形状係数 C_A は本来、スパイクの滑動に伴ってスパイクの周辺に発生する土くさびの地盤面に露出した部分の面積を、二次元土くさびを基準として規定する無次元数としての物理的な意味を持つため、スパイク周辺に発生する土くさびの容積を規定する形状係数 C_V とは、 $C_A \doteq C_V^{2/3}$ の関係が想定されるが、図-10よりこれらの関係の合理性が確認された。

表-3 形状係数 C_V

形状	迎え角(度)	推定式
L型	0 ←L	$C_V = 2.69 \times A_R^{-0.42}$
	90 L→	$C_V = 2.83 \times A_R^{-0.49}$
	135 >→	$C_V = 2.64 \times A_R^{-0.38}$
	315 <→	$C_V = 2.83 \times A_R^{-0.39}$
十字型	0 +→	$C_V = 3.05 \times A_R^{-0.26}$
	45 ×→	$C_V = 3.53 \times A_R^{-0.31}$

5. おわりに

L型及び十字型断面形を有する任意形状のスパイクの受働土圧 P_p を算定するためには、先ず、対象とするスパイクのアスペクト比(表-3中の A_R) を求めた上で、表3よりスパイクの形状係数 C_V を算定後、(1)式より求めることができる。人工魚礁などに配置されたスパイクによる見掛けの静止摩擦係数の算定は、各スパイク毎に(1)式より求まる受働土圧を施設全体で積算した上で人工魚礁の水中重量で除すことによって算定できる。

参考文献

- 1) 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針編集委員会編：沿岸漁場整備開発事業施設設計指針,(社)全国沿岸漁業振興開発協会,1993.
- 2) 糸洸長敬,中村充,瀬戸雅文,早川健二：魚礁の滑動抵抗に関する研究,水産土木,第26巻2号, pp.13-18,1991.
- 3) 糸洸長敬,中村充,瀬戸雅文,早川健二：魚礁の滑動抵抗に関する研究(Ⅱ),平成3年度日本水産工学会学術講演会論文集,pp.41-42,1991.
- 4) 清水道彦,佐藤道郎,熊谷勝朗,内山裕三,高木儀昌：魚礁の滑動抵抗に関する実機実験,平成6年度日本水産工学会学術講演会論文集,pp.155-156.