



より効果的な船の「いかり」とは : 矩形板の挙動に着目して

平野, 舜介

(Citation)

課題研究優秀論文集, 2023:180-200

(Issue Date)

2024-01

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100485449>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100485449>



2023年度 卒業研究最終論文

より効果的な船の「いかり」とは
矩形板の挙動に着目して

神戸大学附属中等教育学校10回生
6年2組26番
平野 舜介
(指導教員 三輪 泰大・若杉 誠)

2023年度 卒業研究最終論文

より効果的な船の「いかり」とは

神戸大学附属中等教育学校10回生 6年2組26番 平野舜介

(指導教員 三輪 泰大・若杉 誠)

要旨

「いかり」は太古から現在も船を停めるために用いられている。しかし、錨がどのようなメカニズムで船を停めているのかは未だ解明されておらず、どのような錨がより効果的に船を停めるのかも分かっていない。

昨年は、実際の錨の形状を再現した模型について、効き具合を測定する実験を行ったが、それぞれ形状が複雑であったため、考察は一般化出来なかった。また、実験の再現性が低いことも問題であった。

そこで、本研究では錨を単純化し、L字型矩形板に対する実験から効果的な錨がどのようなものか考察した。錨を等速で引張したときにかかる力を把駐力、計測した把駐力の最大値を最大把駐力、それを重さで除した把駐係数を用いて、幅や重さ、錘の位置を変えた矩形板の効き具合を評価した。実験にはフォーステスターを用いて、昨年よりも正確な記録が取れるように工夫した。

その結果、幅を大きくしても把駐係数は大きくならないこと、錘の位置を変えると最大把駐力・把駐係数が大きくなることが分かった。

さらに、実験で見られた錨の挙動と把駐力の変移を示す把駐曲線から、錨の引張過程が大きく3つの区間に分けられることを発見し、最大把駐力が観測されるときを力学的にモデル化した。モデル化によって得られた式からは、錨の力とモーメントのつり合いが把駐力に影響を及ぼすことが考えられた。このモデルは上記実験の結果に概ね当てはまった。

しかし、更なる実験の結果、モデル化によって得られた式よりも、錨が砂からどれだけの圧力を受けるかが錨の挙動に影響を与えることが分かった。考察の結果、考察したモデルが成立するには、錨が十分な圧力を砂から受けることが必要であることが考えられた。

これにより、より効果的な錨はフリュークが重く砂を捉えやすい構造をしている錨だと考えられた。

Abstract

Anchors play an important role in sailing. Although previous studies have shown differences depending on types of anchors, the reason why anchors hold on to the seabed has not been fully explored. This paper aims to investigate the dynamics of anchors.

In this article, we look at quadrilateral plates as substance of anchor. We conducted three experiments on relationship between holding power and shape. These experiments follow previous researches, and enable to assess holding power. The result shows that anchor's width doesn't improve holding power. However, we found anchor's balance related to holding power. These results are analyzed that anchor's center of mass affect to holding power. Based on this analyze, we cultivate a model of anchor dynamics. This model can explain results. It is concluded that the holding power of anchor depend on their shapes, especially relate to the center of mass. These findings will help to develop anchor and to sail safer.

目次

第1章	序論	1
第1節	問題意識	1
第2節	本研究における諸定義	1
第3節	先行研究	2
第4節	昨年までの研究	2
第5節	本研究の目的	2
第6節	本研究の流れ	2
第2章	L字型矩形板の幅と把駐力に関する調査	4
第1節	実験内容	4
第2節	実験目的	4
第3節	実験方法	4
第4節	実験結果	5
第5節	考察	6
第3章	L字型矩形板の重心と把駐力に関する調査	8
第1節	実験内容	8
第2節	実験目的	8
第3節	実験方法	8
第4節	結果	9
第5節	考察	9
第4章	模型の挙動と把駐曲線のモデル化	11
第1節	先行研究のモデル	11
第2節	考案したモデル	11
第5章	L字型矩形板の面積と把駐力に関する調査	14
第1節	実験内容	14
第2節	実験目的	14
第3節	実験方法	14
第4節	実験結果	15
第5節	考察	16
第6章	結論	17
第1節	発見	17
第2節	提案	17
第3節	今後の展望	17
参考文献		18

第1章 序論

第1節 問題意識

2018年の9月、台風の影響により関西空港周辺に停泊していたタンカーが流され同空港の連絡橋に衝突した[1]。この事故により関西空港は一時的に孤立し、復旧にも時間がかかった。海路は現在でも広く使われている移動手段の一つであるため、こういった事故が及ぼす影響は決して小さくない。そこで、どうすれば船が流されてしまうという事故を防ぐことが出来るのだろうと考えた。この事故が置きた原因は走錨であり[1]、同日、大阪湾に停泊していた51隻のうち33隻もの船が走錨を起こしていたと言われている[2]。走錨とは、船が強い波や風に押されて錨を下ろしたまま流されること[3]で、その発生には錨の挙動が関わっている。

「いかり」には沢山の種類があり、一般に碇(シンカー)と呼ばれる重さを用いて船を停めるものと、一般に錨(アンカー)と呼ばれる重さに加えて地面に対する食い込み、引っ掛かりを利用して船を停めるものの二つに分けられる。前者は紀元前5000年ごろに[4]、後者は紀元前500年ごろ[5]から使用され、船の主流が汽船へと移り変わるのに伴い多種多様な錨が生み出された[6]。こういった歴史から、現在も様々な種類の錨が停泊に用いられている。

第2節 本研究における諸定義

第1項 錨

本研究では、海底土に刺さり食い込むことで、船舶に対して抗力を与えるものを錨として扱う。そのため、その重さのみで船舶を停めるものに関しては扱わない。よって、本研究で扱う錨は図1のようなものを例示できる。図1においては、flukeと表記されている部分が錨に刺さるフリューク(爪)であり、shankと表記されている部分が引張されるシャンクである。

第2項 把駐力

錨が海底土に刺さり、船舶に対して抗力を与えることを「把駐する」と呼ぶこととする。把駐力はどれだけ錨が把駐するかを評価するために用いられる数値である。佐藤によると[7]、錨の最大把駐力 H は一般に $H = \lambda W$ (λ :把駐力係数、 W :錨の重量)で表される。kgfで表されることが多く、その変移である把駐曲線(把駐力特性曲線)は錨の挙動の分析に用いられる。本研究では把駐力を、錨を等速で引張する際に加わる力とし、単位はNで表す。またこれに関連して、把駐曲線は引張の経過時間を横軸に、把駐力を縦軸に取って描かれるグラフとする。最大把駐力は、試行毎に把駐曲線から読み取られる把駐力の最大値を平均したものとする。把駐係数は、最大把駐力を重さで除したものとする。

第3項 L字型矩形板

本研究ではL字型矩形板を、錨の特徴を簡易的に表したものとして扱う。図1を見ても分かるように、基本的な錨はフリュークとシャンクをそれぞれ持っている。それらの形状は錨によって異なるものの、フリュークは地面に刺さり、シャンクは引張されるという点では共通している。よって、フリュークとシャンクを持つことで錨とみなすことができると考えた。矩形板を用いた実験は野村らの研究[8]でも行われているが、この研究はL字に関して特別に扱われたものではなく、矩形板が錨であることに重きが置かれた研究ではない。本研

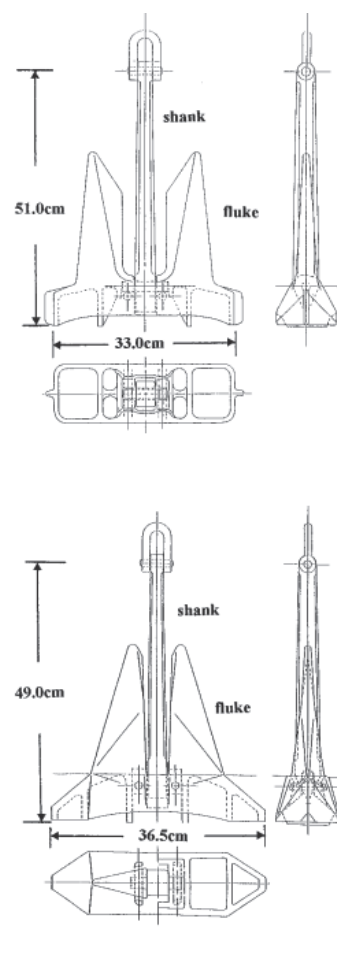


図1 錨の構造/構成 [7]

究では、L字型矩形板の短辺をフリューク、長辺をシャンクとみなしている。

第3節 先行研究

錨は航海学の分野で扱われている。多くの研究は航海における安全性の向上、具体的には走錨を防ぐことを目的として行われてきた。したがって、大半の研究が実用に基づいて行われている。矢野らによる研究[9]では、実際の航海中に起こった走錨の過程を実船から観察して記録している。中野らによる研究[10]では、水槽を用いた実験ではあるものの、扱っている錨は全て実際に運用されている錨である。比較的新しい増田らによる研究[11]では、数値シミュレーションを用いて錨性能を評価する実験を行っているが、これも対象は既存の錨である。このような研究は、安全な航海のため、錨の種類を個別に観察するという点では優れている。しかし、錨に関して一般的に考えられる性質は捉えにくい。

こういった背景から、錨が船を停めるメカニズムは解明されていない。既存の錨に関する研究だけでは、錨のメカニズムを解明することは難しい。このことは、新たな錨の開発においても障壁となると思う。

第4節 昨年までの研究

錨の引張の様子は形状によってことなることが分かっている[12]。既に報告したように[13]、模型を用いた実験でもその差異を確認することができた。実験装置を図2に示す。運用されている錨を3Dプリンターで再現した実験と、矩形板を用いた実験では以下のようなことが分かった。

1. 実際に運用されている錨を再現しても、考察が難しいこと
2. 精度の低い力センサーでは、模型が軽いと正確な測定が難しいこと
3. 重い模型を引くことに、実験装置が耐えられないこと
4. 実験用の水槽が小さく、砂が側壁の影響を受けること

主に実験装置の稚拙さが原因となり、実験の再現性は非常に低いものとなってしまった。正確な測定を行うためには、十分に重さのある模型と、それを安定して引張ることのできる実験装置が必要である。

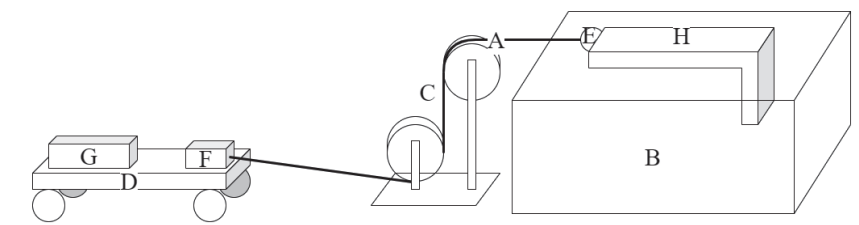


図2 昨年の実験装置

A:滑車、B:バット、C:紐、D:台車、E:カラビナ、F:力センサー、G:加速度センサー、H:模型

第5節 本研究の目的

本研究では、これまであまり研究されていない錨の力学的な特徴を捉えること、そして安全な錨とはどんなものか提案することを目的としている。これらを実際の錨を用いて考えることは難しいため、特に矩形板の挙動に着目して行う。模型を用いた実験を行い、その結果を分析し考察することを基本的な手法とする。そのため、再現性に優れた実験方法を考案することも、より確からしい考察のために必要である。

第6節 本研究の流れ

第2-5章では、錨の挙動とその把駐力に関して、錨の形状を変化させることでそれらがどのように変化するのか実験とモデル作成とを行った。第2章ではL字型矩形板の幅に着目して実験を行い、その幅を大きくしても把駐係数が大きくならないという結果を得た。第3章では、L字型矩形板の重心に着目して実験を行い、その重心がフリュー

クに近い方がより高い把駐係数を示すことが分かった。第4章では、第2、3章の結果を踏まえて、錨の引張過程のモデルを作成した。第5章では、第4章のモデルがどれだけ錨の挙動を正確に示しているのかを調べるため、L字型矩形版の面積に着目した実験を行った。第6章では、以上の実験およびモデルを踏まえ、より効果的な「いかり」の条件の提案を行う。

第2章 L字型矩形板の幅と把駐力に関する調査

第1節 実験内容

本実験では、錨の挙動に関してより一般的な考察を得るためにL字型矩形板を錨を簡易化した模型とみなした。特に、幅に注目して実験を行った。実験方法はフォーステスターや水槽を用いて正確な値を測定できるようにした。また、ユニットスタンドを用いて堅確なものにした。先行研究から、海底土の土質と海水に関して無視することとした。結果から、把駐曲線を作成し、最大把駐力及び把駐係数を得た。考察より、幅は把駐力を高くする主な要因ではないことが分かった。

第2節 実験目的

本実験は新たに考案した実験装置を用いて、L字型矩形板の幅を変えた時の把駐力を測定することを目的として行った。

第3節 実験方法

第1項 乾式実験について

第1章でも述べたように、錨は海中で運用されるため、正確な海中での挙動を得るためには、実海と実船による実験が望ましい。しかし、実海、実船での実験は難しい上に、場所や状況によってそれらの組み合わせは様々である。本田らの研究[14]によると、水中における錨の把駐状態は乾燥砂での実験結果からも知れることが結論付けられている。よって、今回の実験では、水槽を水で満たさず、乾式の実験を用いて模型の挙動を観察した。

また、鈴木らの研究[15]にて、砂の含水率によって錨の効き具合が変わることが示唆されている。さらに佐藤らの研究[16]では、水槽実験においても同様に含水率が効き具合に影響することが示されている。砂の含水率に関しては、調整することが難しく、海底土によって様々である。よって、本研究では砂の特性に関しては扱わない。実験に用いた砂は、校内の運動場から借りてきたものである。

第2項 実験装置・手順

実験はL字型短形板金具を単純化した錨の模型とみなし、砂中の模型を引くときにかかる力をフォーステスターで測定することで、把駐力及びその変移を測定した。図3に実験装置の構成を示す。水槽に取り付けた滑車であるE₁は、予め木板にネジで固定しておき、その木板を水槽に合わせて取り付けすることで位置を合わせた。ユニットスタンドに取り付けた滑車であるE₂は、強い力がかかっても動かないよう針金で縛った。フォーステスターの台座に取り付けた滑車であるE₃は、台座に空いているネジ穴に合わせて金具をかませることで固定した。フォーステスター(MCT-1150、エー・アンド・デイ社)を用いて引張時にかかる力を測定した。実験時のフォーステスターの留意事項については次項に示した。模型は幅と組み方を変えた3種類を用意し実験を行った。模型1は図4における l_1 が15.0cm、 l_2 が7.5cm、 B が3.2cm、模型2は l_1 が15.0cm、 l_2 が7.5cm、 B が6.4cmのもの、模型3は模型1を2つ組み合わせて写真1のようにしたものである。

記録はフォーステスターをパソコンと接続することで、引張時間とかかっている力のデータを取得した。この時、引張速度は60cm/minに設定した。水槽は奥行き30cm、幅60cm、高さ35cmの、模型に対する大きさが十分なものを

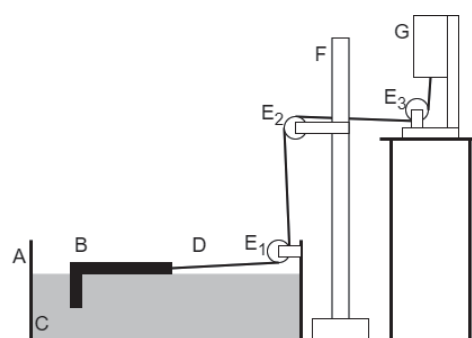


図3 実験装置の構成

A:水槽、B:模型、C:砂、D:チェーン、E:滑車、F:ユニットスタンド、G:フォーステスター

用いて、砂は底から14cm程度の深さになるように入れた。チェーンの重さは76.95g、チェーンの留め具は27.73gであった。

引張は模型を砂面に対して l_1 が平行、 l_2 が垂直になるよう刺した後に開始した。引張はそれぞれの模型について5回ずつ行った。引張毎に砂面は均した。引張毎に0点調整を行い、静止状態の錨にかかる力を記録しないようにした。また、引張の様子を動画で撮影した。全ての試行が終わってから、電子天秤を使って、模型の重さを測定した。

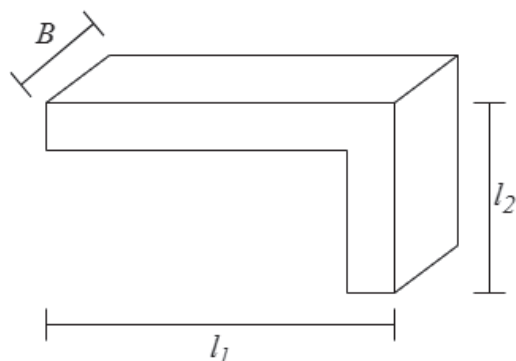


図4 模型の概形

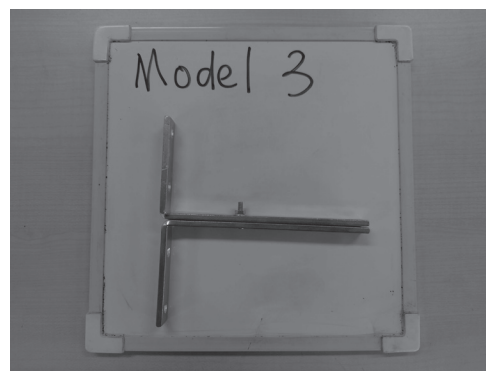


写真 1 模型3の写真

第3項 フォーステスターについて

フォーステスターはエー・アンド・デイ社のMCT-1150を使用した。本体の操作パネルで、引張に切り替え、引張速度を60cm/minに設定した。側部に取り付けられているストロークリミッターは、台座に取り付けている滑車と治具が当たらないように位置を調節した。フォーステスターの故障を防ぐため、チェーンがフォーステスターの引張方向に対して平行になるよう調整した。また、記録はMCT-Loggerを使って行った。本体の引張を開始する前に、MCT-Loggerでの記録を開始することで、引張開始からの記録を取ることが出来た。フォーステスターから得られるデータはCSV形式であり、時間(s)が小数第2位まで、移動量(mm)、荷重(N)は小数第6位まで記録されている。

第4節 実験結果

フォーステスターから得られたデータをもとに、模型1～3について、引張時間を横軸、かかっている力(把駐力)を縦軸に取った散布図を作成した。濃淡は異なる試行を表す。図5から図7はそれぞれの散布図である。

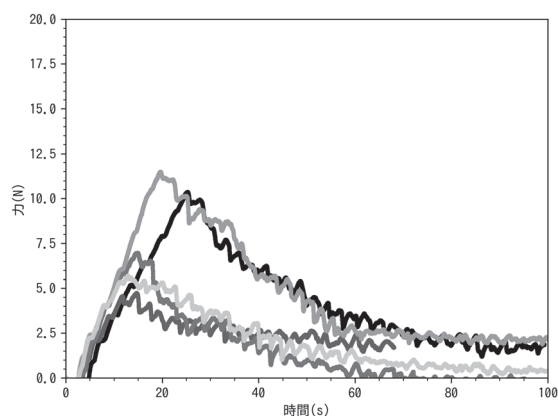


図5 模型1の把駐曲線

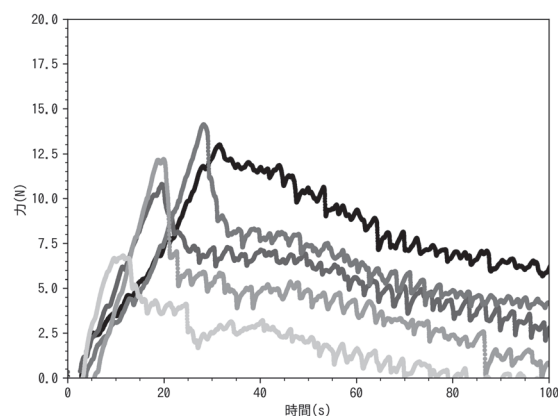


図6 模型2の把駐曲線

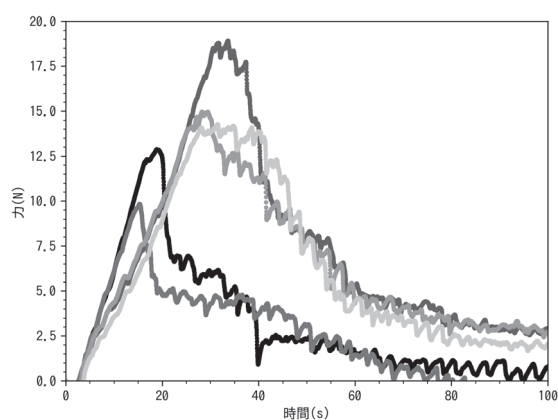


図7 模型3の把駐曲線

それぞれの模型の重さ、引張ごとの力の最大値の平均(最大把駐力)、それを重量で除した結果(把駐係数)を表1に示す。フォーステスターの分解能は0.1Nであるので、模型1については有効桁数を2桁、模型2と模型3については有効桁数を3桁とした。

表1 実験結果

	模型1	模型2	模型3
重さ(kg)	1.183×10^{-1}	2.346×10^{-1}	2.398×10^{-1}
最大把駐力(N)	7.8	11.2	14.1
標準誤差	1.3	1.3	1.5
把駐係数(N/kg)	6.6×10^1	4.77×10^1	5.88×10^1

第5節 考察

第1項 把駐曲線に関する考察

図5(模型1)では、把駐力は20sにかけて上昇し、その後60sにかけて低下したことが分かる。一通り低下すると、力は2.5N程度で安定することが分かる。図6を見てみると、把駐力は20sから30sの間で最大となり、ほとんどの試行では、その後40sにかけて力が低下している。一通り低下すると、どの試行についても一定の値で安定するが、その値は

試行ごとに異なることが分かる。図7を見てみると、20sから30sの間で最大把駐力を記録し、その後は力が低下している。図5とは異なり、低下し始める時間や低下した後の力は試行によって異なっている。全ての模型に関して異なる挙動を示しているものの、共通して考えられることは、力は上昇した後に低下しその後安定するということである。

井上らの研究[3]によると、走錨は把駐力が低下したのちに錨が海底を引きずられておこると報告されている。図5から図7の把駐曲線を見ると、どれも最大把駐力を記録して以降の把駐力が低下するという特徴がみられる。これは、井上らの研究における走錨の発生過程と類似している。このことから、本実験においても錨の引張過程で走錨が発生していることが考えられ、走錨を防ぐためには最大把駐力を高くすることが重要であることも分かる。

同じ模型であっても描く把駐曲線が異なったのは、試行毎に0点調整を行ったことが原因である可能性がある。

第2項 最大把駐力及び把駐係数に関する考察

表1を見てみると、最大把駐力は高い方から順に模型3、模型2、模型1となっている。標準誤差を見てみても、結果が誤差の範囲とは考えられないため、3つの模型は異なる最大把駐力を示していると考えられる。把駐係数は高い方から順に模型1、模型3、模型2となっている。

第3項 まとめ

幅と最大把駐力の関係について考える。模型1と模型2を比較すると、模型2の幅は模型1に対して倍であり、最大把駐力も大きいことが分かる。しかし、模型2と模型3の比較からは、模型3の幅は模型1と同じく模型2の半分であるのに、最大把駐力は大きいことが分かる。このことは、模型3に関しては幅以外の要因で最大把駐力が高くなっていると考察できる。

幅と把駐係数の関係について考える。模型1と模型2を比較すると、最大把駐力とは反対に模型1の方が高い把駐係数を示していることが分かる。模型2は模型1のおおよそ倍の重さである。このことから、模型2の最大把駐力が高い主な要因は重さであることが考えられる。

以上のことから、幅以外の要因が把駐力に強い影響を与えていることが考えられる。

模型3に注目してみると、同程度の重さである模型2よりも、最大把駐力が大きいことが分かる。この違いが重さ、幅による影響ではないとすると、模型の組み方が影響していることが考えられる。推測される要因としては、模型の重心の変化が挙げられる。

第3章 L字型矩形板の重心と把駐力に関する調査

第1節 実験内容

本実験では第2章にて示唆された錨の重心の違いが把駐力に影響する可能性を検証するために行った。実験方法は、第2章で確認された、同模型の試行による把駐曲線のずれを解消するため、調整を行った。実験には錘を用いて、模型の重心を変えることで、L字型矩形板模型の重心と把駐力の関係を得られるようにした。結果から、把駐曲線を作成し、最大把駐力及び把駐係数を得た。考察より、錨の重心をフリューク部分によせることで把駐性能が高くなることが考えられた。

第2節 実験目的

本実験はL字型矩形板の重心を変えたときの把駐力を測定することを目的として行った。

第3節 実験方法

実験は第2章と同じように、L字型短形板金具を単純化した錨の模型とみなし、砂中の模型を引くときにかかる力をフォーステスターで測定することで、把駐力及びその変移を測定した。図3に実験装置の構成を示す。水槽に取り付けた滑車である E_1 は、予め木板にネジで固定しておき、その木板を水槽に合わせて取り付けすることで位置を合わせた。ユニットスタンドに取り付けた滑車である E_2 は、強い力がかかっても動かないよう針金で縛った。フォーステスターの台座に取り付けた滑車である E_3 は、台座に空いているネジ穴に合わせて金具をかませることで固定した。

模型は錘を着けた2種類を用意した。模型5は模型1の l_1 側に金具で錘を固定したものである。写真2は模型5の様子である。模型6は模型1の l_2 側に金具で錘を固定したものである。写真3は模型6の様子である。

記録はフォーステスターをパソコンと接続することで、引張時間とかかっている力のデータを取得した。この時、引張速度は60cm/minに設定した。水槽は奥行き30cm、幅60cm、高さ35cmの、模型に対する大きさが十分なものを用いて、砂は底から14cm程度の深さになるように入れた。チェーンの重さは76.95g、チェーンの留め具は27.73gであった。

引張は模型を砂面に対して l_1 が平行、 l_2 が垂直になるよう刺した後に開始した。引張はそれぞれの模型について5回ずつ行った。引張毎に砂面は均した。第2章とは違い、引張毎の0点調整は行わなかった。代わりとして、実験装置を組み立てる前に、フォーステスターに何もつけない状態で0点調整を行った。また、引張の様子を動画で撮影した。全ての試行が終わってから、電子天秤を使って、模型の重さを測定した。

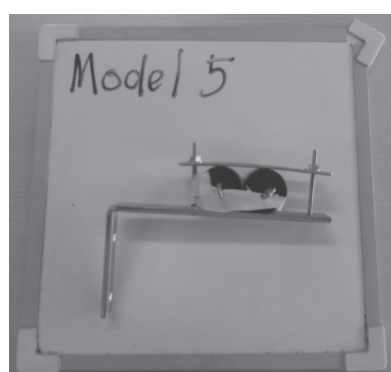


写真 2 模型5の写真

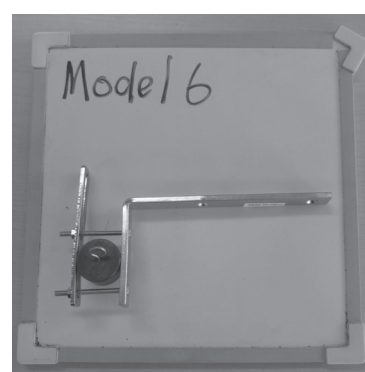


写真 3 模型6の写真

第4節 結果

フォーステスターから得られたデータをもとに、模型5と模型6について、引張時間を横軸、かかっている力(把駐力)を縦軸に取った散布図を作成した。図8、図9はそれぞれの散布図である。

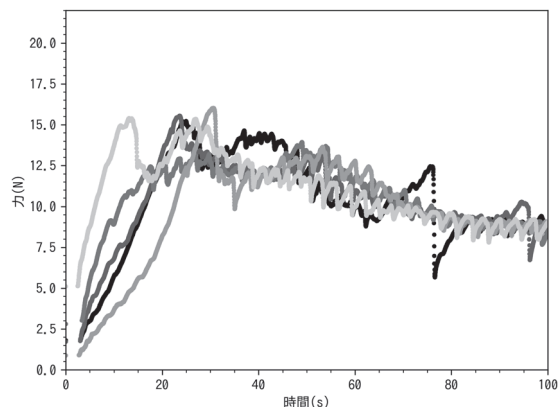


図8 模型5の把駐曲線

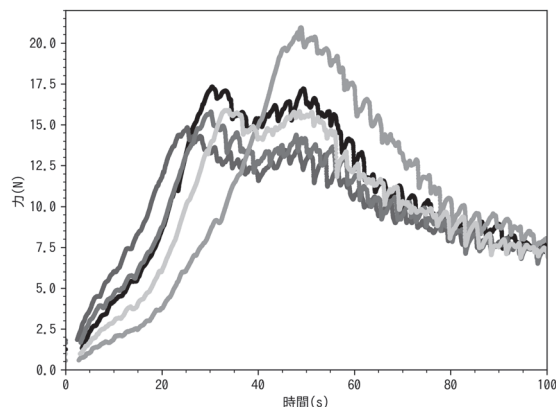


図9 模型6の把駐曲線

それぞれの模型の重さ、引張ごとの力の最大値の平均(最大把駐力)、それを重量で除した結果(把駐係数)は表2の通りである。フォーステスターの分解能は0.1Nであるので、有効桁数は3桁とした。

表2 実験結果

	模型5	模型6
重さ(kg)	3.647×10^{-1}	2.518×10^{-1}
最大把駐力(N)	15.2	17.0
標準誤差	2.0	1.1
把駐係数(N/kg)	4.14×10^1	6.75×10^1

第5節 考察

第1項 把駐曲線に関する考察

図8を見てみると、第2章の実験結果のような把駐力の変移が見えにくいことが分かる。詳しく見てみると、最大把駐力を記録した後の把駐力の減少は、ある程度どの試行にも見られているため、引張の過程で把駐状態にあったと判断した。最大把駐力の記録後に再度把駐力が増加する試行に関しては、一度砂から抜けた模型のシャンク部分が引張過程で再度砂に刺さるという現象が見られていることが分かった。写真4は、前述の現象が起きている引張過程を撮影した動画の一部分から切り出したものである。図9は、図8とは異なり第2章のような把駐力の変移が見られている。具体的には、ほとんどの試行で30s付近で最大把駐力を記録し、その後把駐力は減少に転じて、おおよそ7.5N程度の力で安定することが分かる。

どちらの模型についても、最大把駐力を記録したのちに再度、把駐力が上昇する減少が見られている。これは実験装置を組み立てる際、滑車E₁の位置が少し下になってしまい、引張の過程でシャンク部分が砂に刺さりやすくなってしまった可能性がある。

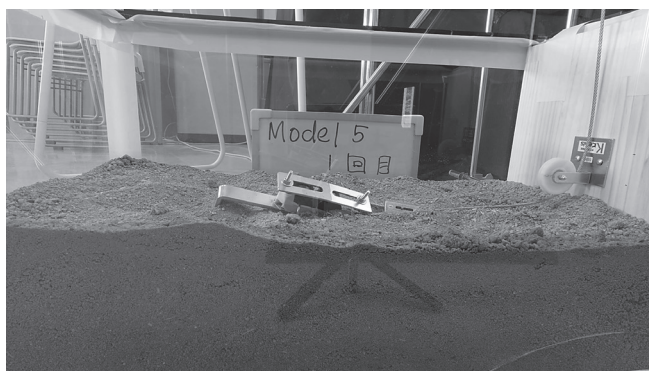


写真 4 模型5の引張過程の一部

第2項 最大把駐力及び把駐係数に関する考察

表2を見てみると、最大把駐力、把駐係数ともに模型6の方が高くなっていることが分かる。標準誤差を見ると、模型5と模型6の最大把駐力には大きな差は無いと考えられる。しかし、重さは模型6の方が模型5に対して100g以上軽い
ため、把駐係数を比較すると模型6の方が明らかに高くなる。

第3項 まとめ

模型の重心と把駐係数の関係について考えると、重心が l_1 側によっている方がより強い把駐力を示すことが分かる。シャंक部分が重さにより前傾したこと、引張位置が低かったことにより、把駐曲線は模型5の方が安定した。これは、錨が最大把駐力を記録して以降であるので、把駐係数には影響していない。このことから、模型6の方が高い把駐力を示すことが考えられる。模型6の l_1 側は実際の錨においてはフリュークの部分である。よって、本実験からは錨の把駐力はその重心の影響を受けることが分かり、フリューク部分が重い方がより効果的だと考えられる。

この結果は、これまで単純に把駐係数に重さをかけることで求まっていた最大把駐力が、同質量であってもその重心の違いにより差が出ることを示唆している。錨の把駐性能が把駐係数に重さをかけることで評価されていることを考えると、この結果はその慣習とは反することとなる。どうしてこのような結果となったのかについて、より明解な考察が必要である。

第4章 模型の挙動と把駐曲線のモデル化

第1節 先行研究のモデル

浦による研究[17]では、以下のようなモデルが考案されている。爪・フリュークの長さ錨の代表長さ L としたとき、実験によって得られたデータから錨の把駐係数 H_{max}/W が L^3 に比例していることが分かった。よって、砂質の海底におけるアンカーの最大把駐力は

$$H_{max} = C_d \gamma L^3 \quad (1)$$

で表される。ここで C_d はアンカーの形状と海底土の剪断特性に関する無次元量であり、把駐力係数と区別するため無次元最大把駐力とする。 γ は浮力を除いた海底土の見掛けの比重量である。また、最大把駐力とアンカーの重量との関係を考察する。海底土中を一定の速度で水平に引かれて移動するアンカーに作用する力は図10のようになる。ここでアンカーに作用する力とモーメントのつり合い式は

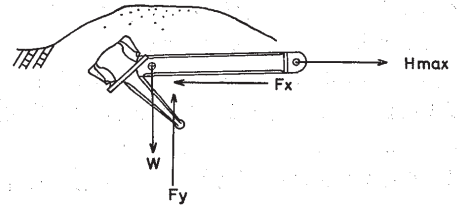


図10 錨にかかる力のモデル図 [17]

$$\begin{aligned} F_x^f + F_x^r &= H_{max} \\ F_y^f + F_y^r &= W \\ M^f + M^r &= M^W \end{aligned}$$

で表される。ここで F_x^f 、 F_y^f 、 M^f は爪に作用するアンカーの移動方向と逆向きの力、鉛直方向の力、およびアンカー・シャックルまわりのモーメントであり、 F_x^r 、 F_y^r 、 M^r は残りの部材に作用する力およびモーメントである。 M^w はアンカーの重量によって生じるアンカー・シャックルまわりのモーメントである。最大把駐力係数 H_{max}/W が大きい場合には、アンカーの共同を支配する方程式において海底土から受ける力が支配的になり、アンカー重量の効果を無視できる。したがって、

$$\begin{aligned} F_x^f + F_x^r &= H_{max} \\ F_y^f + F_y^r &= 0 \\ M^f + M^r &= 0 \end{aligned}$$

この結果、(1)式で示されるように、 H_{max} は海底土より力を受ける面の形状により定まり、アンカーの挙動を支配する方程式において海底土から受ける力が支配的になり重量に原理的には比例しないこととなる。

このモデルは実際の実験結果に基づいている点で優れている。しかし、実際の運用において、フリューク部分を際限なく大きくすることは出来ないため、より効果的な錨の提案には結びつかない。また、第2章と第3章の実験について、(1)式を書き換える。模型の無次元最大把駐力を C'_d 、海底土の比重を γ' とすると、

$$H_{max} = C'_d \gamma' l_1^3$$

と書き換えることが出来る。ここで、どの模型についても l_1 の値は7.5cmで等しくなるため、

$$H_{max} = (4.2 \times 10^1) C'_d \gamma'$$

が成立する。実験に用いた砂は同様のものであるため、 γ' はどの実験においても一定である。幅や錘による影響は全て C_d に含まれてしまうため、実験結果を明解に説明することは難しい。

第2節 考案したモデル

このモデルの目的は以下の内容を含むことである。

1. L 以外の変数に注目する
2. 模型6の優位性を説明する
3. 引張過程で起こっている現象を説明する

実験によって得られた把駐曲線と撮影した動画から、引張過程を大きく3つに分類した。

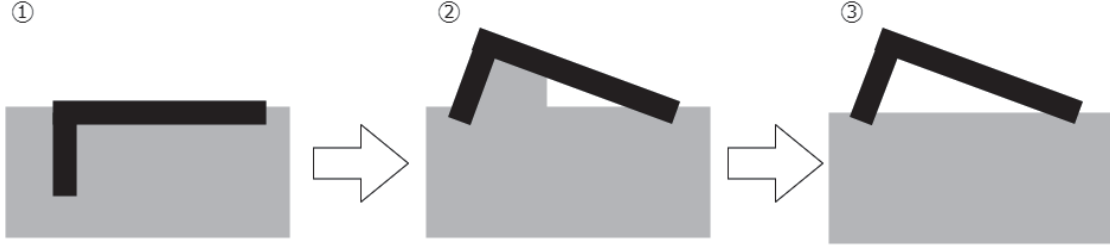


図11 模型の挙動

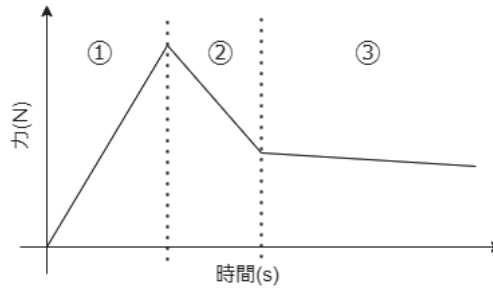


図12 把駐曲線の区分

図11と図12より、錨の挙動を3つの区間に分けると、把駐力が大きくなりながら模型の姿勢は砂面に対して平行な状態を保っている区間①、模型が回転し捉えていた砂を横に流しながら把駐力が減っていく区間②、砂を捉えなくなり引きずられ把駐力が低い状態で安定する区間③に分けられると考えることが出来る。よって、一定程度の引張で発生する把駐力の減少は①から②の状態へと移り変わるときに起こると考えられる。

砂面に対して平行に等速直線運動をしていた模型が回転するとき、①から②へと状態が移り変わるので、模型の挙動を力とモーメントのつり合いに着目してモデルを立てた。このとき、砂と模型の間に摩擦力は働かないと仮定した。以下はその計算過程である。

垂直抗力の作用点を x 、砂から受ける圧力の圧力中心を y 、砂から受ける圧力を p 、模型の幅を B 、模型の質量を m 、 l_1 側の面の面積を S_1 、 l_2 側の面の面積を S_2 、引張する力を F 、垂直抗力を N 、重力加速度を g とすると、模型にかかっている力は図13のようになる。これが等速度運動をするとき、地面に対して平行な力と垂直な力はつり合うので、以下の式が成立する。

$$F = pS_2 \quad (2)$$

$$mg = N \quad (3)$$

時計回りのモーメントは以下のようになる。

$$\left(y - \left(\frac{l_2}{2} \times \frac{l_2}{l_1 + l_2} \right) \right) \times pS_2 + \left(\frac{l_2}{l_1 + l_2} \times \frac{l_2}{l_1 + l_2} \right) \times F \quad (4)$$

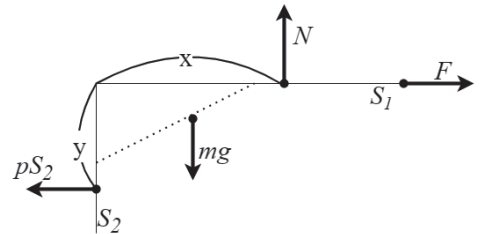


図13 模型に働く力

垂直抗力の作用点： x 圧力中心： y 砂から受ける圧力： p 模型の質量： m l_1 側の面の面積： S_1 l_2 側の面の面積： S_2 引張する力： F 垂直抗力： N 重力加速度： g

反時計回りのモーメントは以下になる。

$$\left(x - \left(\frac{l_2}{2} \times \frac{l_1}{l_1 + l_2}\right)\right) \times N \quad (5)$$

よって、(4)と(5)より、模型が時計回りに回転するまでは以下の式が成立する。

$$\left(y - \frac{l_2^2}{2(l_1 + l_2)}\right) pS_2 + \frac{l_2^2}{2(l_1 + l_2)} F \leq \left(x - \frac{l_2^2}{2(l_1 + l_2)}\right) N \quad (6)$$

この式に(3)を代入すると

$$\left(y - \frac{l_2^2}{2(l_1 + l_2)}\right) pS_2 + \frac{l_2^2}{2(l_1 + l_2)} F \leq \left(x - \frac{l_2^2}{2(l_1 + l_2)}\right) mg \quad (7)$$

これを F について整理すると、

$$F \leq \frac{2x(l_1 + l_2) - l_1^2}{l_2} mg - \frac{2y}{l_2} pS_1 + (l_2 - 2y)Bp \quad (7')$$

となる。(7')式は、模型が回転するまでの区間①における F の範囲を示す。

よって、最大把駐力を F_{max} とすると、ある x_m 、 y_m 、 p_m において F_{max} は以下のように表される。

$$F_{max} = \frac{2x_m(l_1 + l_2) - l_1^2}{l_2} mg - \frac{2y_m}{l_2} p_m S_1 + (l_2 - 2y_m)Bp_m \quad (8)$$

(8)の式を模型6に当てはめてみる。模型6ではフリューク側に錘を着けたので、その錘が与える反時計回りのモーメントを M_f とすると、(5)より反時計回りのモーメントは

$$\left(x - \left(\frac{l_2}{2} \times \frac{l_1}{l_1 + l_2}\right)\right) \times N + M_f \quad (9)$$

ここで、(4)より、模型が時計回りに回転するまでは以下の式が成立する。

$$\left(y - \frac{l_2^2}{2(l_1 + l_2)}\right) pS_2 + \frac{l_2^2}{2(l_1 + l_2)} F \leq \left(x - \frac{l_2^2}{2(l_1 + l_2)}\right) N + M_f \quad (10)$$

ここに(3)を代入し、 F について整理すると模型6における F_{max} は

$$F_{max} = \frac{2(l_1 + l_2)}{l_2^2} M_f + \frac{2x_m(l_1 + l_2) - l_1^2}{l_2} mg - \frac{2y_m}{l_2} p_m S_1 + (l_2 - 2y_m)Bp_m \quad (11)$$

$M_f > 0$ なので、(11)において F_{max} が大きくなるのが分かる。このことは、実際の模型6の結果とも合致している。

このモデルは摩擦力を無視しているものの、重心の変化による最大把駐力への影響をある程度説明することができている。(7')式を見てみると既知の値である B や S_1 も錨の把駐力に影響していることが分かる。しかし、未知数がかかっている項でもあるため、実験前に調整することのできる値を変えたとき把駐力がどうなるかは分からない。

第5章 L字型矩形板の面積と把駐力に関する調査

第1節 実験内容

第4章で考案したモデルは、把駐力とモーメントの関係を説明する上で有効であったが、様々な数値が関係していた。本実験では、そのモデル中の面積に注目した。実験には、模型を組み合わせることで、面積がシャンク部分のみ小さい模型を用意して、L字型矩形板模型とその面積の関係を得られるようにした。結果から、把駐曲線を作成し、最大把駐力及び把駐係数を得た。考察より、錨の面積を小さくしても把駐力が大きくなるわけでは無いことが分かった。また、錨の面積は砂から受ける圧力に関係し、把駐力に影響を与えることが分かった。

第2節 実験目的

本実験は面積を変化させた模型の把駐力を測定することを目的として行った。

第3節 実験方法

実験は第2章と同じように、L字型短形板金具を単純化した錨の模型とみなし、砂中の模型を引くときにかかる力をフォーステスターで測定することで、把駐力及びその変移を測定した。図3に実験装置の構成を示す。水槽に取り付けた滑車である E_1 は、予め木板にネジで固定しておき、その木板を水槽に合わせて取り付けすることで位置を合わせた。ユニットスタンドに取り付けた滑車である E_2 は、強い力がかかっても動かないよう針金で縛った。フォーステスターの台座に取り付けた滑車である E_3 は、台座に空いているネジ穴に合わせて金具をかませることで固定した。

模型は図14のシャンク部分の面積を変えた2種類を用意した。模型7は図14のように、模型1を2つ用いて、間にアルミ板を挟み、シャンク部分の面積を小さくしたものである。写真5と写真6は模型7の様子である。模型8は模型7のフリューク部分をガムテープで塞いだものである。

記録はフォーステスターをパソコンと接続することで、引張時間とかかっている力のデータを取得した。この時、引張速度は60cm/minに設定した。水槽が破損したため、模型に対する大きさが十分な衣装ケースを用いて、砂は底から14cm程度の深さになるように入れた。チェーンの重さは76.95g、チェーンの留め具は27.73gであった。

引張は模型を砂面に対して l_1 が平行、 l_2 が垂直になるよう刺した後を開始した。引張はそれぞれの模型について5回ずつ行った。引張毎に砂面は均した。第2章とは違い、引張毎の0点調整は行わなかった。代わりとして、実験装置を組み立てる前に、フォーステスターに何もつけない状態で0点調整を行った。また、引張の様子を動画で撮影した。全ての試行が終わってから、電子天秤を使って、模型の重さを測定した。

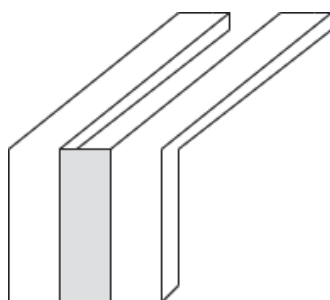


図14 模型7の概形

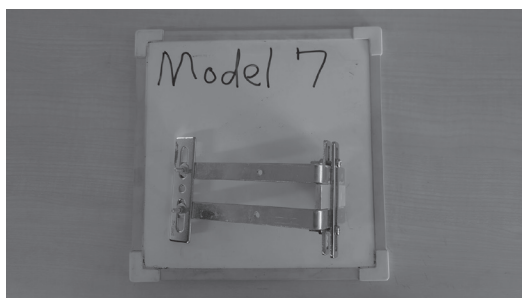


写真 5 模型7の写真(上)

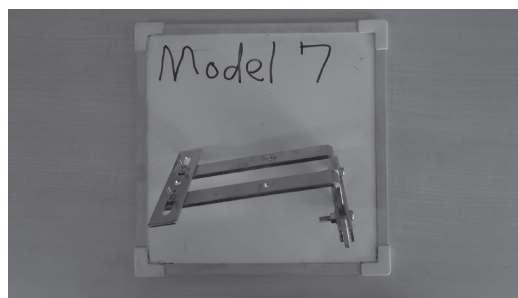


写真 6 模型7の写真(横)

第4節 実験結果

フォーステスターから得られたデータをもとに、模型7と模型8について、引張時間を横軸、かかっている力(把駐力)を縦軸に取った散布図を作成した。図15、図16はそれぞれの散布図である。

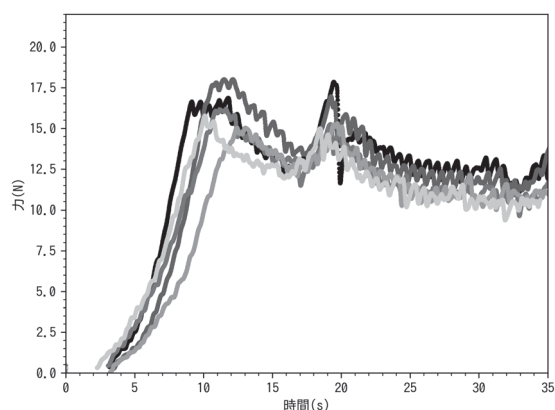


図15 模型7の把駐曲線

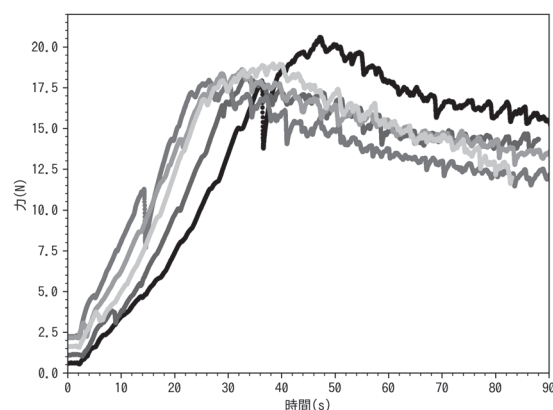


図16 模型8の把駐曲線

それぞれの模型の重さ、引張ごとの力の最大値の平均(最大把駐力)、それを重量で除した結果(把駐係数)は表2の通りである。フォーステスターの分解能は0.1Nであるので、有効桁数は3桁とした。

表3 実験結果

	模型7	模型8
重さ(kg)	3.547×10^{-1}	3.765×10^{-1}
最大把駐力(N)	16.4	19.0
標準誤差	0.5	0.5
把駐係数(N/kg)	4.62×10^1	5.05×10^1

模型7については、引張の過程で一度浮き上がったのち、先端部分が再度砂に引っ掛かり、把駐力を高めることがあった。表3では一度目の浮き上がりを最大把駐力として記録している。

第5節 考察

第1項 把駐曲線に関する考察

図15を見てみると、把駐力が10s付近で一度上昇したのち、20s付近で再度上昇していることが分かる。撮影した動画では、引張の過程でフリューク部分が砂に刺さっていることが確認できた。写真7はその様子である。これは、金具によって先端が重くなっていたこと、実験水槽の変更により滑車 E_1 の位置が低くなっていたことが原因として考えられる。一通り引張された後は引きずられて、およそ12.5Nで安定する。



写真 7 模型7の引張過程の一部

図16を見てみると、ほとんどの試行において、30sから40sの間で最大把駐力を記録している。最大把駐力を記録した後の把駐力の低下は比較的緩やかである。これは、ガムテープによって捉えている砂が流れにくくなり、砂から受ける圧力を維持している可能性がある。

第2項 最大把駐力及び把駐係数に関する考察

表3を見てみると、最大把駐力、把駐係数ともに模型8の方が高くなっていることが分かる。標準誤差を見ると、模型5と模型6の最大把駐力には差があると考えられる。

第3項 まとめ

第4章で考案したモデルと本実験の結果を比較する。(7')式において、模型7と模型8では S_1 が異なるので、 S_1 の大きい模型8の方が最大把駐力は低くなるように考えられる。しかし、実験の結果からは模型8の方が強い最大把駐力を示し、把駐曲線も安定していることが分かった。また、模型7と模型8が最大把駐力に達するまでの引張時間を比較すると、模型7の方が早く最大把駐力に達していることが分かる。これらのことから、模型7は第4章で考案したモデルでは説明できないことが起きていると考えられる。これは、模型7の S_1 が小さいことが、未知数である p に影響しているからだと考えた。

第4章において、区間①では等速直線運動が起きており錨は砂面に対して平行に運動していると仮定した。しかし、実験では完全な等速直線運動をすることはなく、L字型矩形板の角に砂が溜まり模型を押し上げており、引張にしたがって溜まる砂は増えていく。よって、引張していくとモーメントのつり合いとは関係なく錨は回転すると考えられる。ここで、 S_1 が小さい模型7は砂から受ける圧力が抜け、 p は小さくなる。(2)式より、 p が小さくなると把駐力も小さくなる。これによって、模型7は十分な把駐力を受けない内に回転するため最大把駐力が低くなったと考えることができる。

第6章 結論

第1節 発見

本研究で扱うL字型矩形板の様々な要素と把駐力の関係を調査する実験を行い考察した。第2章では、L字型矩形板の幅と把駐力に関する実験を行った。結果から、幅を大きくしても把駐力が大きくなるというわけではなく、他の要素が把駐力に影響することが考えられた。また、把駐曲線からその挙動と走錨の類似性を発見し、最大把駐力を高めることが走錨の防止に重要であることが分かった。第3章では、第2章で示唆されたL字型矩形板の重心と把駐力の関係を調査するための実験を行った。結果から重心が把駐力に影響を与えることが考えられた。この結果は、従来考えられてきた錨の重量と把駐力の単純な比例関係を否定するものであった。第4章では、第3章で考察された錨の重心と把駐力の関係をモデルを用いて検証した。考案したモデルは、無視した事象や未知数はあるものの、第3章で見られた結果を説明できるものであった。第5章では、第4章で立てたモデルを面積から捉えた実験を行った。結果はモデルから考えられる予想とは異なるものとなった。考案したモデルが成立するには、砂から十分な圧力を受ける必要があると考えられた。

第2節 提案

以上のことから、より効果的な錨の条件は以下のようなものが考えられる。

1. 砂から十分な圧力を受けることができる
2. シャンクに対してフリュークの方が重い

第1節より考えられた条件を、実際の錨の運用で活かすことを考える。本研究から、同重量、同形状の錨であっても重さの偏り方によって把駐力に差が生まれることが考えられる。これを活かすと、現在運用されているような錨の全体の重さ自体を変えなくても、フリュークとシャンクの重さのバランスを変えるだけで、把駐力の向上が期待出来る。このことは、船舶の把駐性能を向上させる上で、船舶の大きさに対して重い錨でなく、現在使われているものと同じ重さの錨でも効果が期待できる。

揚錨機に着目すると、その揚錨可能な重量には限界がある。よって、錨を大きく重いものにすると揚錨機の取り換えが必要になってしまう。しかし、本研究において示されたように、フリュークをシャンクに対して相対的に重くすることで把駐力を高くすることが出来れば、揚錨機を交換する必要を無くすることが出来る。

こういったことから、既存の錨においてもフリュークとシャンクの重量比を調節することを提案する。この提案からは、現在用いられている錨の運用方法を変える必要なく、錨をより効果的に把駐させることを期待できる。

第3節 今後の展望

今後の展望は、より正確なモデルを立てることである。第4章にて立てたモデルは多くの未知数を残している。そのため、厳密に錨の把駐性能を求めることは難しい。また、理論値も実験して得られる値とは大きくことなると予想される。本研究では摩擦、海底土の性質は無視し、その他の作用点についても詳しい結果は得られていない。これらの未知数を明確にすることで、より正確に錨の挙動を反映したモデルを立てることができるだろう。

また、本研究で得られた結果が実海での錨の挙動に対応しているかどうか、今後明らかにしていきたい。L字型矩形板は錨をかなり簡易化しているため、実際に運用されている錨の多くの要素を無視している。今後、より効果的な船の錨を提案するためには、モデルと実験結果を数値的に対応付けることが必要である。

参考文献

- [1] 運輸安全委員会. 船舶事故調査報告書「油タンカー宝運丸衝突（橋梁）」, 2019.
- [2] 朝日新聞デジタル. 「関空連絡橋にタンカー衝突なぜ 踏みとどまろうとしたが」. <https://www.asahi.com/articles/ASL964DGQL96PTIL00X.html>. (Accessed on 01/19/2023).
- [3] 井上欣三, 臼井英夫. 走錨危険指数から見た錨泊の設計指針: 風速, 水深と錨鎖長. 日本航海学会論文集, Vol. 90, pp. 233–241, 1994.
- [4] 合同会社中村技研工業. 「錨の歴史 ～錨の始まり～」. <http://www1.ttcn.ne.jp/~vulcan-anchor/AnchorHistory01.html>. (Accessed on 01/31/2023).
- [5] 合同会社中村技研工業. 「錨の歴史 ～木の錨～」. <http://www1.ttcn.ne.jp/~vulcan-anchor/AnchorHistory02.html>. (Accessed on 01/31/2023).
- [6] 合同会社中村技研工業. 「錨の歴史 ～鉄の錨～」. <http://www1.ttcn.ne.jp/~vulcan-anchor/AnchorHistory03.html>. (Accessed on 01/31/2023).
- [7] 佐藤治夫. 錨の把駐性能に関する一考察. 東海大学紀要海洋学部, Vol. 30, No. 3, pp. 31–39, 2005.
- [8] 野村士平, 鞠谷宏士. 矩形板の把駐力について: 錨の把駐力の基礎的研究. 日本航海学会論文集, Vol. 49, pp. 7–17, 1973.
- [9] 矢野吉治, 若林伸和. 実船における走錨時の挙動と走錨検知. 日本航海学会論文集, Vol. 114, pp. 119–125, 2006.
- [10] 中野和夫, 窪田八洲洋, 神田修治. マッシュルーム錨の特性に関する実験研究. 関西造船協会誌, Vol. 126, pp. 9–15, 1967.
- [11] 増田光弘, 南清和. 粒子法による錨の把駐力推定シミュレーション法整備のための基礎的研究. 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 23, pp. 225–226, 2016.
- [12] 中村彰一, 本田啓之輔. アンカーの把駐性に関する実験的研究. 関西造船協会誌 149, pp. 31–42. 公益社団法人 日本船舶海洋工学会, 1973.
- [13] 平野舜介. 錨の形状による種類と効き具合に関係はあるのか. 2021年度課題研究II論文, 2021.
- [14] 本田啓之輔, 片上圭四郎, 杉浦昭典. 水槽実験によるアンカーの把駐特性: アンカーの把駐力に関する実験研究その一(日本航海学会第22回講演会). 日本航海学会誌, Vol. 22, pp. 143–155, 1960.
- [15] 鈴木常夫, 佐藤治夫, 鈴木金弥, 佐藤志郎, 川島久, 河内尚. 海底土と錨効きの実験研究. 航海, Vol. 87, pp. 95–102, 1986.
- [16] 佐藤治夫, 福江正治. 錨の水槽実験に関する一考察. 日本航海学会論文集, Vol. 102, pp. 339–345, 2000.
- [17] 浦環. アンカーの最大把駐力係数. 日本航海学会論文集, Vol. 71, pp. 37–45, 1984.