

ブイ・クランプウエイトによるチェーンカテナリ係留における鋼材削減効果に関する検討

Steel Reduction Effects in Chain Catenary Mooring Using Buoy and Clamp Weight

○小澤瞬<sup>1</sup>, 高橋カノン<sup>1</sup>, 神田匠<sup>2</sup>, 鈴木渉<sup>2</sup>, 恵藤浩朗<sup>3</sup>

\* Shun Ozawa<sup>1</sup>, Kanon Takahashi<sup>1</sup>, Takumi Kanda<sup>2</sup>, Wataru Suzuki<sup>2</sup>, Hiroaki Eto<sup>3</sup>

Abstract: Chain catenary mooring in shallow waters requires the use of large chains to ensure sufficient mooring strength. Consequently, increased steel consumption and high costs become major challenges. This study investigated combinations that limit chain size and reduce steel consumption while ensuring the necessary restoring force within the allowable tension range by introducing buoys and clamp weights at intervals along the chain.

1. はじめに

近年、浮体式洋上風力発電は国内外を問わずその開発計画が進められており、今後は施設の大型化やより良い風況を求めて、水深50m以上の比較的浅海域への設置が検討されている<sup>[1]</sup>。従来、水深の深い海域においては、チェーンの自重により位置保持を行うチェーンカテナリ係留が多く採用<sup>[2]</sup>されてきたが、浅海域では必要な自重が確保できず、十分な係留性能を得るためにはチェーン径を大型化する必要がある。その結果、鋼材使用量やコストの増大が課題となる。

そこで本研究では、φ117mmとφ114mmのチェーンを使用し、Figure 1に示すようにブイとクランプウエイト（以下、ウエイト）を取り付け、それぞれの浮力、重量、取付位置を変化させ、復原力( $F_x$ )と張力の条件を共に満足する組合せの検討を行った。また、初期水平方向張力( $T_h$ )を変化させたときにどのような影響を及ぼすかを検討した。

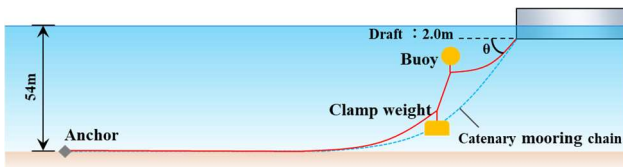


Figure 1 Diagram of chain catenary mooring with buoys and weights

2. 計算条件の検討

2.1. 浮体規模と係留索配置

本研究では、NEDOによる実証実験事例<sup>[3]</sup>を参考に、Figure 2に示すように浮体の3点から放射状に各3条、合計9本のチェーンを配置した浮体モデルを構築した。また、浮体の下部を係留索の浮体側取付点とし、取付点からアンカーまでは同一平面上にあるものと仮定して検討を行った。

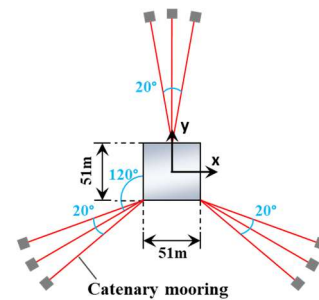


Figure 2 Scale of floating structure and arrangement of catenary mooring chains

Table 1 Parameters of catenary mooring chain

Mooring length	1100 [m]
Initial horizontal tension ( $T_h$ )	900-1100 [kN]
Water depth	54 [m]
Quantity of motion ( $x$ )	5.0 [m]

Table 2 Overview of chain specifications

Nominal diameter	Permissible tension	Breaking force	Submerged unit weight
φ132mm	3810[kN]	11424[kN]	382[kg/m]
φ117mm	3100[kN]	9300[kN]	300[kg/m]
φ114mm	2963[kN]	8890[kN]	285[kg/m]

Table 3 Overview of buoys and weights

Nominal diameter	Installation position		Buoyancy/Weight	
	Buoy ( $L_b$ )	Weight ( $L_w$ )	Buoy ( $B$ )	Weight ( $W$ )
φ117mm	5-100[m]	40-140[m]	0-100[kN]	60-100[kN]
φ114mm	5-100[m]	40-140[m]	0-250[kN]	180-230[kN]

2.2. 係留システムの諸元

Table 1に係留システムの設定パラメータを示す。 $T_h$ の設定については鈴木<sup>[1]</sup>の論文を参考に1000kNを基準とし、前後100kNの値を比較した。また、Table 2に使用するチェーンの規格概要を示す。各規格の許容張力の設定については、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>[4]</sup>を参考に、チェーンの破断荷重の1/3とした。本研究で比較対象とする国内最大級のφ132mm<sup>[5]</sup>チェー

1:日大理工・学部・海建 2:日大理工・院(前)・海建 3:日大理工・教員・海建

ンによる係留では、浮体が Surge 方向に 5.0m 移動した際に 6284kN の  $F_x$  が生じることを事前計算より確認した。そのため、 $F_x$  が 6284kN を上回り、かつチェーンに生じる最大張力 ( $T_{max}$ ) が許容張力未滿となる範囲を、 $\phi 132\text{mm}$  チェーンを使用した係留と同等以上の性能を有する条件として評価する。

### 2.3. ブイ・ウエイトの概要

事前計算の結果を基に、ブイとウエイトの概要を Table 3 に示す。また、ウエイトの設置位置を  $L_w$ 、ブイの設置位置を  $L_b$  とする。ブイとウエイトの取付位置 5m 刻み、ウエイトの重量 10kN 刻み、ブイの浮力  $\phi 117\text{mm}$  は 1kN 刻み、 $\phi 114\text{mm}$  は 5kN 刻みで解析を行った。

### 3. 計算結果および考察

各条件の中から、 $F_x$  が最大、 $T_{max}$  が最小、鋼材削減量が最大となる 3 つの Case について Table 4 に示す。

#### 3.1. 計算結果

$\phi 117\text{mm}$  について各 212,100 通り計算した結果、 $T_h=900\text{kN}$  の時は条件を満たす組合せが 9325 通り、 $T_h=1000\text{kN}$  の時は 4121 通りあり、 $T_h=1100\text{kN}$  の時には存在しなかった。 $\phi 114\text{mm}$  について各 128,520 通り計算した結果、 $T_h=900\text{kN}$  の時は条件を満たす組合せが 4304 通り、 $T_h=1000\text{kN}$  の時は 2451 通り、 $T_h=1100\text{kN}$  の時には 126 通りであった。

$T_h=900\text{kN}$  の場合に条件を満たす組合せが最も多く見つかり、使用可能範囲も広くブイやウエイトに対する条件の自由度が高いことが確認された。 $\phi 114\text{mm}$  では鋼材削減量が大きく、特に  $T_h=900\text{kN}$  において、高い削減効果と十分な  $F_x$  を得ることができた。 $T_h=1000\text{kN}$  では条件を満たす組合せが減少してしましたが、ブイの取付位置を調整することで十分な  $F_x$  を許容張力内で得ることが可能である。 $T_h=1100\text{kN}$  では  $T_{max}$  が許容張力を上回る組合せが大半で、条件を満たす組合せは極めて限定的であった。

#### 3.2. 考察

条件を満たす組合せを比較した結果、 $T_h=900\text{kN}$  の際に最も高い  $F_x$  を確保しつつ使用可能範囲も広い。特に  $\phi 114\text{mm}$  では  $T_h=900\text{kN}$  で十分な  $F_x$  を得られつつ、大幅な鋼材量削減を実現することが期待できるため、有効性が高いと考えられる。一方、 $T_h=1000\text{kN}$  は使用可能範囲が狭まるものの、条件次第では安定した性能を発揮できる補間的な選択肢となりえる。 $T_h=1100\text{kN}$  では  $T_{max}$  の超過により使用可能範囲が少ないので設計上の適用には向いてない。以上から、鋼材削減量を重視する場合は、 $\phi 114\text{mm} \cdot T_h=900\text{kN}$ 、設計自由度を重視する場合は  $\phi 117\text{mm} \cdot T_h=900\text{kN}$  が有効であると考えられる。

**Table 4** Bouy and weight combinations for each case

Case	$W$ [kN], $L_w$ [m]	$B$ [kN], $L_b$ [m]	$F_x$ [kN]	$T_{max}$ [kN]	Reduction [%]
$\phi 117\text{mm}, T_h=900\text{[kN]}$					
1	100, 140	100, 55	<b>6739</b>	3099	13.9
2	100, 125	96, 60	6288	<b>2925</b>	16.1
3	100, 140	86, 40	6289	2948	<b>16.9</b>
$\phi 117\text{mm}, T_h=1000\text{[kN]}$					
1	100, 120	92, 30	<b>6536</b>	3098	14.2
2	100, 120	77, 25	6287	<b>3017</b>	15.8
3	100, 140	1, 70	6284	3059	<b>16.6</b>
$\phi 114\text{mm}, T_h=900\text{[kN]}$					
1	190, 135	195, 65	<b>7559</b>	2960	19.3
2	230, 120	180, 65	6295	<b>2490</b>	27.9
3	230, 125	155, 60	6288	2514	<b>28.6</b>
$\phi 114\text{mm}, T_h=1000\text{[kN]}$					
1	230, 130	160, 65	<b>7567</b>	2957	21.5
2	230, 105	155, 60	6483	<b>2650</b>	25.0
3	230, 120	145, 55	6355	2701	<b>25.6</b>
$\phi 114\text{mm}, T_h=1100\text{[kN]}$					
1	230, 105	115, 65	<b>6641</b>	2951	21.0
2	230, 115	120, 50	6313	<b>2920</b>	22.5
3	230, 125	85, 45	6303	2947	<b>23.4</b>

ブイとウエイトの取付位置に対する傾向において、ウエイトは 90~120m に設置した際に条件を満たす割合が多い。120m 以降では浮遊長の増大により  $T_{max}$  が過大となり、90m 未滿では浮遊長不足により  $F_x$  が不足するためだと考えられる。ブイは 50~90m に設置した条件を満たすことが多い。これはウエイトと同様に、90m 以降に設置すると浮遊長の増大により  $F_x$  を得ることができても  $T_{max}$  が大きくなりやすいためだと考えられる。

### 4. おわりに

本研究では、浅海域におけるカテナリ係留に対し、ブイとウエイトを併用することでチェーン規格を抑えつつ十分な  $F_x$  を確保できる条件を明らかにした。特に、 $\phi 114\text{mm} \cdot T_h=900\text{kN}$  では大幅な鋼材削減が可能であり、また  $\phi 117\text{mm} \cdot T_h=900\text{kN}$  は設計自由度の高い有効な選択肢である事が確認された。さらにブイとウエイトの設置位置に関しても一定の傾向が見られ、設計指針として活用できる知見を示した。今後、 $T_h$  をさらに変化させ、より効果的な配置条件の把握を行い、更なる規格縮小の可能性について検討する。

### 参考文献

- [1] 鈴木英之: 浮体式洋上風車用浅海域係留の静的係留特性の最適化, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 22, pp.95-100, 2015.
- [2] 小林理市: わかりやすい海洋建築物の設計, pp.37, 1995.
- [3] 国立研究開発法人: 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究, <https://www.nedo.go.jp/floating/project.html>, 2025.7 参照
- [4] 公益社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (中巻), pp.1244, 2018.
- [5] 大久保寛: 福島浮体式洋上ウインドファームの係留システムについて, 日鉄エンジニアリング技報, Vol.13, pp.20-38, 2022.