

# 徳島海陽沖 GPS 波浪計の新係留方式による係留設備の基本設計

海田 翔平\*・大村 厚夫\*\*・小銭 貴一郎\*\*\*・谷定 大輔\*\*\*\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

\*\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

\*\*\* 国土交通省 四国地方整備局 港湾空港部 海洋環境・技術課 課長補佐

\*\*\*\* 国土交通省 四国地方整備局 港湾空港部 海洋環境・技術課 海洋環境第一係長

徳島海陽沖 GPS 波浪計の係留索は、設置海域の底質特性によるものと思われる異常摩耗が生じている。これを防ぐ構造として、令和元年度より新係留方式が検討されてきた。これまで、設計条件の整理、構造の検討、数値シミュレーション及び水理模型実験などが行われ、令和3年度においては基本設計を行った。

本稿は、令和3年度に検討した新係留方式による係留設備の基本設計についてとりまとめたものである。

キーワード : GPS 波浪計, 係留索, 中間ブイ, シンカー, クラッシングシミュレーション, 基本設計

## 1. はじめに

徳島海陽沖 GPS 波浪計は、海底地盤が泥土質の海域に設置されており、底泥の細粒分の研磨効果によって、係留チェーンに異常摩耗が生じている。これを防ぐ構造として、令和元年度より新係留方式が検討されてきた。令和2年度の検討<sup>1)</sup>において、設計条件及び基本モデルの設定後、数値シミュレーションを実施し、係留安全性等の評価を行った。数値シミュレーションの結果より、図-1に示す最適な係留索の構成を選定し、水理模型実験により交錯状況等の確認を行った。

立上部には、ワイヤケーブルを採用し、軽量化を図っている。また、波浪によるブイ本体及び係留索の上下動によって中間ブイに深に作用する張力を抑えるため、屈曲部チェーンは長さにも余裕をもたせて275mとしている。係留索の全長は628mである。なお、検討の詳細については、沿岸技術研究センター論文集 No. 21(2021)<sup>2)</sup>を参照されたい。

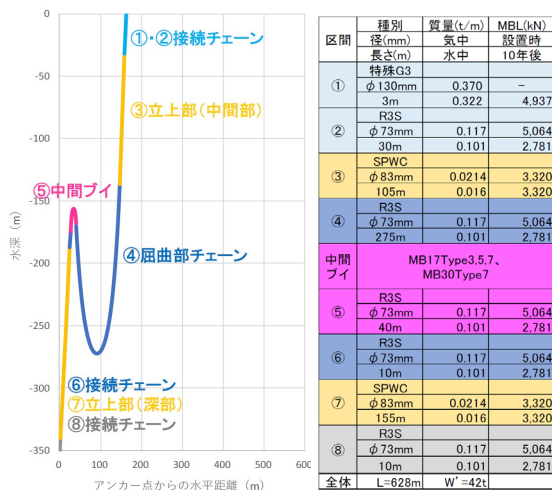


図-1 新係留方式の構成

本稿では、検討が未実施であった中間ブイ、シンカー構造の検討及び新係留方式による係留設備の基本設計について報告する。

## 2. 新係留方式の構造検討

### 2.1 中間ブイ構造の検討

過年度の検討結果を踏まえ、中間ブイの配置方式及び仕様について検討した。なお、令和2年度の検討では、係留索の張力や波浪追従性等の点で、複数のブイを直列に連結する分散ブイ型が有利であるとされている。

中間ブイの検討モデルは、大水深において耐用年数10年で適用可能な浮力体として、図-2に示す大きさの異なる4種類の海外メーカー製のブイを想定した。本検討では、汎用浮体解析ソフトウェア (OrcaFlex 等) を用いて、クラッシングシミュレーション (Crashing Simulation)<sup>3)</sup>を実施し、GPS 波浪計ブイの移動や動揺による「中間ブイ同士の接触」、「中間ブイと係留索の接触」及び「係留索の絡み」の3点に着目して比較検討した。

#### (1) 検討ケース

中間ブイ構造の検討には、図-3に示す6ケースの配置について、解析を実施した。具体的には、MB17-Type3, 5, 7については、必要浮力を満足する個数を直列に連結する構造とした。1個で必要浮力を満足するMB30-Type7については、係留ラインに直列に接続する構造、係留ラインから偏心させて連結する構造及びブイの片側のみをつなぐ構造の3ケースとした。なお、MB17-Type3, 5, 7のブイ同士の間隔は、係留チェーン5リンク分として、1.46mとした。

ブイモデル	MB17			MB30
	Type3	Type5	Type7	Type7
断面形状				
浮力(浮力)水深200m	2.526	3.774	5.021	29.401
必要個数 25.6t以上	12個	8個	6個	1個

図-2 検討に用いたブイモデル

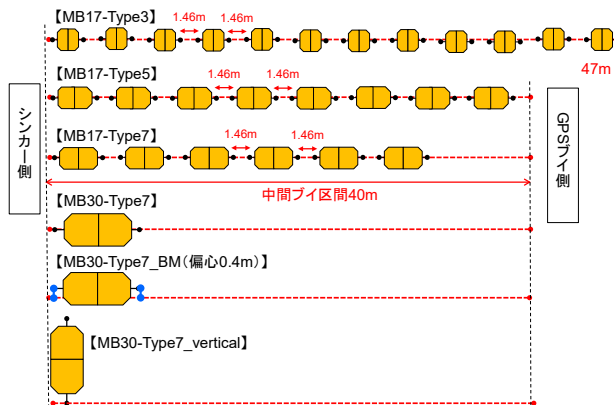


図-3 検討ケース

(2) 解析条件

クラッシングシミュレーションは、ブイ表面接触剛性及び係留ラインクラッシュ剛性を仮定して、動的解析を実施し、係留索と中間ブイあるいは中間ブイ同士の衝突による損傷と係留索の絡みの可能性を確認した。

令和2年度の検討から、波浪や潮流の作用外力が小さい状態の方が係留索の接触が生じやすいことが確認されたため、潮流は考慮せず、波浪条件は比較的静穏な状態を想定し、接触が生じやすい条件とした。

(3) クラッシングシミュレーション結果

中間ブイを複数連結するケースにおいて、「中間ブイ同士の接触」が中間ブイの水深が最も浅くなるブイトップ近傍で発生しやすいことが分かっている。本検討では、水深や係留索の長さの影響から MB17-Type3, 7 で接触が確認された。「中間ブイと係留索の接触」については、いずれのケースにおいても接触が生じた。特に、MB30-Type7を用いたケースでは、より接触しやすく、「係留索の絡み」の発生リスクが高いことが確認された。これら全てのリスクの回避は難しいが、最も重大なインシデントに繋がるのが懸念される「係留索の絡み」を避けることに重点を置き、中間ブイを複数配置するケースを選定した。さらに、その中から「中間ブイ同士の接触」が見られなかった MB17-Type5 を採用した。図-4 に、シミュレーションの状況を示す。

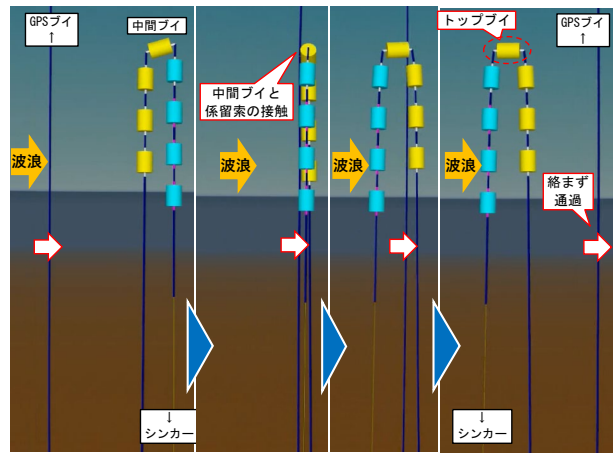


図-4 クラッシングシミュレーション (MB17-Type5)

(4) 詳細設計及び施工における留意点

中間ブイを複数連結させる場合、詳細設計においては、以下の点に留意する必要がある。

- ①「中間ブイ同士の接触」、「中間ブイと係留索の接触」時の中間ブイの損傷度合について、中間ブイの材料特性が不明であり、検討が十分できていない。詳細設計では、中間ブイの材料特性を把握する必要がある。
- ②実際の設置水深が本検討と異なる場合、中間ブイの規格や浮力が変わる。実際の設置水深に対応する規格の中間ブイ浮力を用いて、改めて動的解析を実施しなければならない。
- ③クラッシングシミュレーションにより、静穏時に中間ブイのトップブイが水平に保たれることで、「中間ブイ同士の接触」リスクを小さくできることが確認できた。そのため、静穏時にトップブイが水平に近い角度になるよう、詳細設計時から調整することが望ましい。
- ④係留索の破断強度に合わせて、中間ブイのロッド及び接合部を補強する必要がある。
- ⑤中間ブイのロッド及び接合部の補強を行った場合、重量が変わるため、再度動的解析を実施し、中間ブイの配置バランスを調整する必要がある。

上記を踏まえて、MB17-Type5 をベースとして、詳細設計では、中間ブイの個数及び仕様を調整し、再度動的解析を実施しなければならない。

2. 2 シンカー構造の検討

過年度の検討結果を踏まえ、安定性、耐久性、施工性を考慮したシンカー構造を検討した。吊環高さを確保しかつ、姿勢を保持するとともに転倒しにくい形状として、図-5 に示すタワーシンカー型を基本とした。

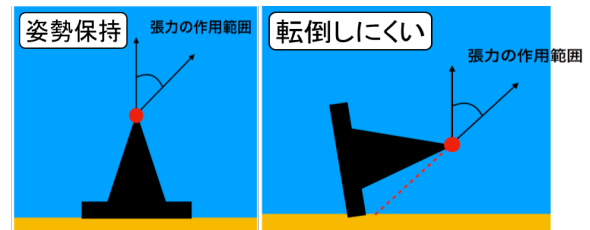


図-5 シンカー形状のイメージ (タワーシンカー型)

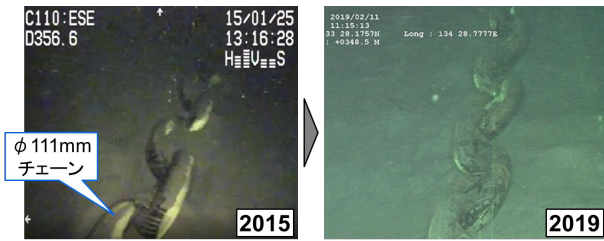


図-6 海底部チェーンの状況写真（徳島海陽沖）

(1) 検討条件

設置地点の海底地盤は泥質で、地盤許容支持力  $20\text{kN}/\text{m}^2$  を想定している。なお、図-6 に示すように既往 GPS 波浪計の海底部チェーンには沈み込みが見られないことから、シンカーの圧密沈下はほとんどないものとする。また、過年度調査で実施した ROV 調査の映像からは、海底地盤の急な傾斜や大きな凹凸は確認できなかった。

外力条件には、動的解析で算出したシンカー吊環における最大張力の水平力  $450\text{kN}$ 、鉛直力  $290\text{kN}$  を用いた。

(2) シンカー諸元の設定

図-7 に示すようにシンカーの底板は H 鋼などの鋼材を仕込んだ鉄筋コンクリート構造とした。柱部は中空の鋼管とし、重心を低くすることで、転倒しにくい構造とした。また、底板の形状は、設置時に作用応力が偏らない、また据付時に潮流の影響を受けにくい円形とした。想定した起重機船の吊り能力の制約から、底板径  $\phi 8\text{m}$  以下、水中重量  $1,000\text{kN}$  程度以下とした。

過年度のチェーン破断部調査報告書<sup>4)</sup>より、海底から  $4\text{m}$  程度の高さにおけるチェーンリンクの年間摩耗量が  $3\text{mm}$  程度と想定されることから、シンカーの吊環の年間摩耗量を  $3\text{mm}$  としたうえで、シンカー高さを  $4\text{m}$  と設定した。従来のダンフォースアンカー構造と異なり、シンカー構造では中間ブイの浮力により接続部のチェーンの上下動はほぼ生じないため、底質の巻き上げも少なく、年間摩耗量は想定  $3\text{mm}$  以下に抑えられると考えられる。

(3) 安定性照査

シンカーの安定性については、把駐力、転倒及び地盤支持力の照査を実施した。把駐力の照査では、「浮体構造物技術マニュアル<sup>5)</sup>」を参照し、アンカーとして照査しているが、重力式シンカーとしての滑動安定性等の検討も必要と考える。また、底板径及び水中重量は、地盤支持力が決定根拠となっているが、地盤許容支持力  $20\text{kN}/\text{m}^2$  は、写真等から推定しているため、詳細な地盤調査が必要と考える。

(4) 施工上の留意点

シンカー形状及び重量は、施工条件に大きく制約を受けるため、シンカー据付時に使用する起重機船等を想定し、施工方法を詳細に検討する必要がある。また、据付時に吊りワイヤと係留索が絡まないように工夫が必要である。

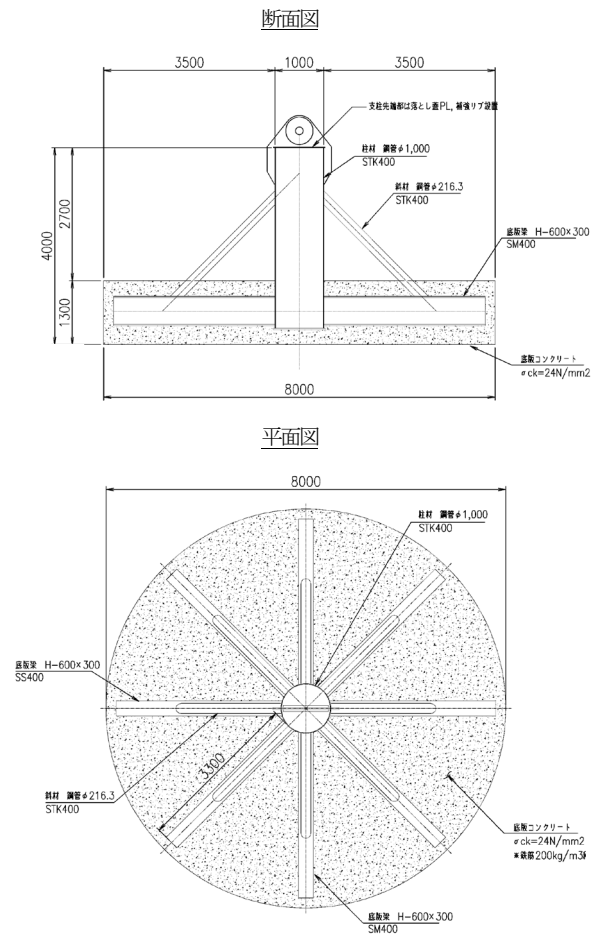


図-7 シンカーの概略形状

3. 新係留方式の基本設計方針

(1) 設計方法

中間ブイ構造の検討、シンカー構造の検討及び過年度業務検討結果を踏まえつつ、新係留方式の基本設計を図-8 に示す設計フローで行った。

【GPS ブイの静的計算】

係留索構成の設定後、係留カタナリー計算を実施し、様々な条件による影響や感度分析を簡易的に行うことにより、復元性や安定性を確認する。

【係留動揺シミュレーション（動的解析）】

従来は準静的解析を実施しているが、新係留方式では、従来と比較して潮流及び波力が複雑な係留索形状に作用するため、動的挙動を考慮する必要がある。汎用浮体解析ソフトウェア (OrcaFlex 等) を用いて、時間領域解析を実施する。解析結果より係留安全性、波浪追従性、係留索の摩耗及び残存強度について評価を行い、係留索の構成及び仕様を決定する。

【水理模型実験】

動的解析により決定した構造に対して、必要に応じて水理模型実験を実施し、GPS 波浪計ブイの移動や動揺による中間ブイの挙動及び係留索の交錯状況等を確認する。

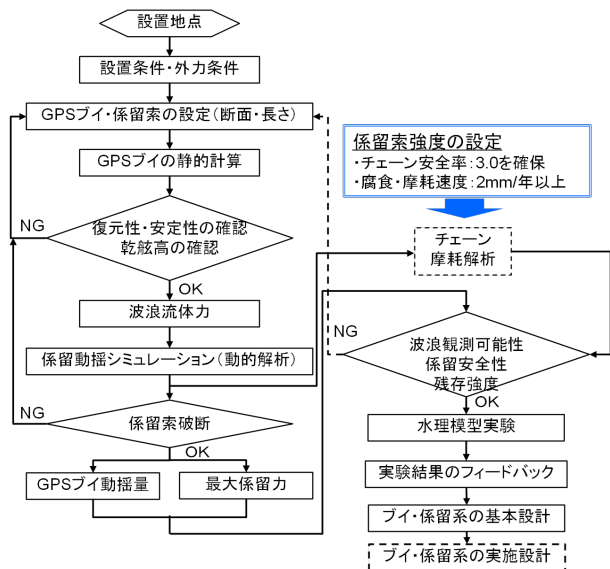


図-8 設計フロー

(2) 設計条件

設計条件は、既設の GPS 波浪計と同じ条件とした。外力条件としての波浪は、検討した静穏時～高波浪時の再現波 17 ケースのうち、表-1 に示す高波浪時の再現波を設計波とした。

また、表-2 に示すように、係留索の強度は、従来は安全率 5 としているが、港湾基準及び漁港基準を参考に安全率 3 として評価する。チェーンの腐食・摩耗速度は、従来は実績から要素毎に設定していたが、新係留方式では、類似事例が少ないため、ISO 基準に準拠し設定した腐食速度 0.8mm/年に、数値シミュレーションで試算した摩耗速度 1.0mm/年を加えて、余裕をみて腐食・摩耗速度を 2.0mm/年と設定する。

表-1 設計条件

項目	設計値
設計水深	350m
海底地質	泥砂
設計波	有義波高 $H_{1/3}$ 13.95m 有義波周期 $T_{1/3}$ 17.3s
風速	10 分間平均 $U_{10}$ 60.0m/s
流速	海水流速 2.6m/s

表-2 係留索の安全率及び腐食・摩耗量

構造	新係留方式	従来 (一点係留方式)
解析手法	動的解析	準静的解析
安全率	チェーンワイヤケーブル	チェーン:5 または 3 ワイヤケーブル:5
	シンカー把駐力	1.2
腐食摩耗速度	腐食 0.8mm/年 + 摩耗 1.0mm/年 ≒ 2.0mm/年	立上部:1mm/年 海底立上部:5mm/年 海底部:3mm/年
耐用年数	10 年	10 年

(3) 実施設計の留意点

今後、設置に向けて実施設計を行う上での留意点を以下に整理する。

・設計水深 350m を想定しているが、水深が想定より大きく変化する場合、動的解析により係留安全性を確認

し、設計用係留張力の算定と係留設備の破断強度を照査しなければならない。

・係留索は、全長 628m、屈曲部長 275m と設定している。設計水深の相違により、全長及び屈曲部長を大きく変更する場合、係留索の発生張力が影響を受ける。慎重な検証が不可欠であるが、屈曲部長を短縮することで、静穏時に係留索が絡むリスクを低減できる。

・中間ブイについて、破断張力やシャックル・チェーンとの接合を考慮した詳細設計が必要となる。中間ブイの詳細設計に伴い、中間ブイの浮力が増減する場合、中間ブイ個数の調整により、必要浮力を確保しなければならない。なお、中間ブイの自重及び浮力が変化する場合、動的解析により係留安全性を確認することを基本とする。

・基本設計においてシンカーの水中重量を 1,000kN 程度としているが、シンカー底面と海底地盤との付着力も考慮して、撤去・引上げ作業時の係留索の張力を検討する必要がある。屈曲部以深の係留索について、10 年供用後の摩耗や腐食代を考慮して、安全率に余裕をもたせる等の検討が必要である。

4. まとめ

本検討において、GPS 波浪計の新係留方式に関して、過年度業務検討結果を踏まえ、中間ブイ及びシンカー構造の検討を行い、新係留方式の基本設計を実施した。そのうえで、実施設計に向けて、基本設計段階における留意点を整理した。

今後、実施設計及び施工検討を進める上で、特に留意点について、引き続きの検討が必要である。

謝辞

本稿は、国土交通省四国地方整備局発注の「令和 3 年度 海域特性を踏まえた GPS 波浪計の係留手法検討業務」の成果の一部をとりまとめたものである。業務実施にあたっては、「GPS 波浪計係留方策検討会」の委員の皆様及び関係各位から貴重なご意見、ご指導をいただいた。また、水理模型実験等において、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所のご協力をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 国土交通省四国地方整備局：海域特性を踏まえた GPS 波浪計の係留手法検討業務，2020。
- 沿岸技術研究センター：沿岸技術研究センター論文集 No. 21 (2021)，2021。
- OrcaFlex：“Line theory: Clashing”，<https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Content/html/Linetheory,Clashing.htm>，(2022.08.08 参照)。
- 国土交通省四国地方整備局：徳島海陽沖 GPS 波浪計観測ブイ揚収・陸揚業務 (チェーン破断部調査報告書)，2018。
- 沿岸技術研究センター：浮体構造物技術マニュアル，1991。