

# 徳島海陽沖 GPS 波浪計の新係留方式の検討

海田 翔平\*・大村 厚夫\*\*・小銭 貴一郎\*\*\*・細川 善広\*\*\*\*

\* (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 調査部 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

\*\*\*\* 前 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 波浪計の係留索に、設置地点の海域特性によるものと思われる異常磨耗が確認された。そこで、徳島海陽沖の海域特性を踏まえた新係留方式が検討されてきた。

本稿では、徳島海陽沖 GPS 波浪計の新係留方式の構造案について、数値シミュレーション及び水理模型実験を実施した結果とともに、新係留方式の設計方法を検討した結果を中間報告する。

キーワード : GPS 波浪計, 係留索, OrcaFlex, 中間ブイ, 数値シミュレーション, 水理模型実験

## 1. はじめに

徳島海陽沖 GPS 波浪計は、水深-350m という大水深に設置しており、設置地点の海底質は泥砂である。係留索はチェーンとアンカーで構成された一点係留方式(図-1)で設置されたが、海底地盤に接する境界部において、波浪等によるブイ本体の上下動によりチェーンと海底地盤の接触が繰り返され、海底質の泥砂が原因とみられる異常磨耗が生じた。その異常磨耗を防ぐ構造として、「GPS 波浪計係留方策検討会」<sup>1)</sup>にて、中間ブイとシンカーを組み合わせた新係留方式(中間ブイ方式)(図-2)が検討されてきた。

徳島海陽沖 GPS 波浪計における新係留方式は、ブイ本体の波浪観測性能を確保しつつ、供用期間(10年間)中、安全に係留することが求められている。全国18カ所に GPS 波浪計が設置されているが、新係留方式は、全国で初めて採用が検討されるものである。

本稿では、国土交通省四国地方整備局発注の「令和2年度 海域特性を踏まえたGPS波浪計の係留手法検討業務」で実施した数値シミュレーション及び水理模型実験について報告するとともに、新係留方式の設計方法について検討した結果を報告する。なお、報告内容は徳島海陽沖 GPS 波浪計の新係留方式の検討における途中経過として報告するものである。

## 2. 新係留方式の検討

### 2.1 新係留方式の基本構造

新係留方式は、ブイ本体の波浪等による上下動等が係留索へ影響しにくく、係留索と海底地盤の接触を防ぎ、海底質が係留索の磨耗に影響を及ぼさない構造として提案された。

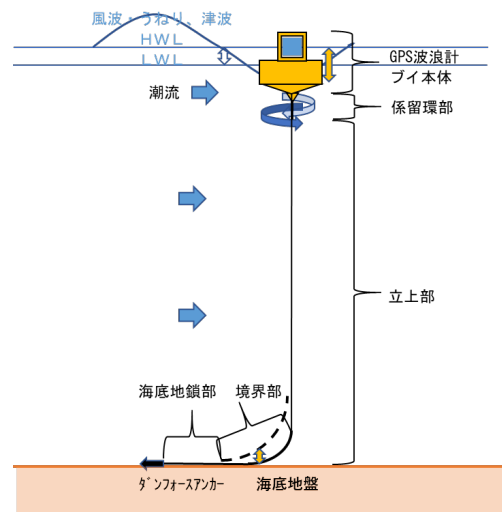


図-1 一点係留方式

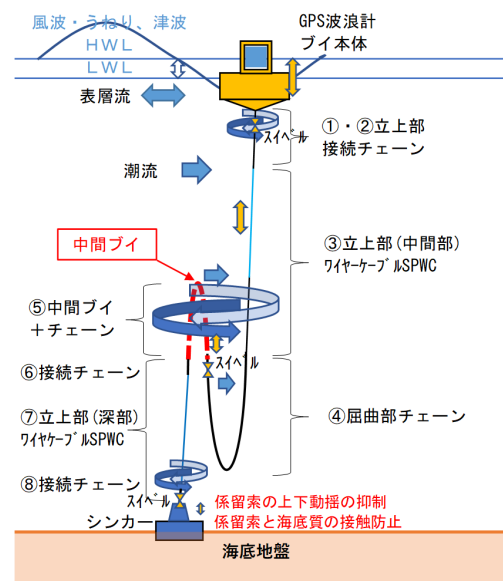


図-2 新係留方式(中間ブイ方式)

具体的には、ブイ本体はφ7mの円筒形を採用し、図-2に示すようにブイ本体に①・②立上部接続チェーンをつなぎ、③立上部（中間部）ワイヤケーブルへ接続する。その先に、波浪時におけるブイ本体及び係留索の上下動を吸収し、中間ブイ以深に作用する張力を抑えるため、長さに余裕をもたせた④屈曲部チェーンを設ける。その先のチェーンに⑤中間ブイを取り付け、⑦立上部（深部）ワイヤケーブルを経由して、シンカーへとつながる。係留索の途中に⑤中間ブイを設置することで、シンカーから係留索を立ち上げ、係留索の海底地盤への接触を防ぎ、チェーンの磨耗を抑える構造としている。また、③と⑦の立上部はチェーンではなく、ワイヤケーブルを採用し、軽量化を図ることで、ブイ本体及び中間ブイへの負荷を軽減する。

## 2.2 検討フロー

令和2年度に実施した数値シミュレーション及び水理模型実験の検討フローを図-3に示す。

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う。数値シミュレーションの結果より、水理模型実験で検討する最適な係留索の構成を選定する。水理模型実験では、交錯状況等の確認を行い、結論として新係留方式の構造を提案する。

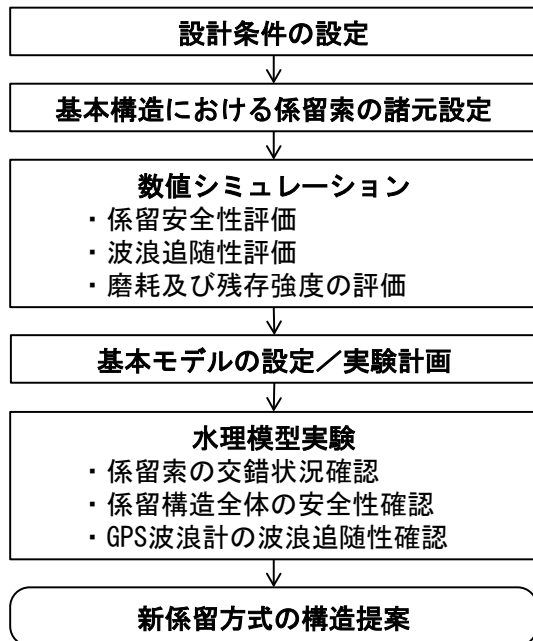


図-3 検討フロー

## 2.3 数値シミュレーション

### (1) 検討概要

数値シミュレーションでは、汎用浮体解析ソフトウェア (OrcaFlex) を用いて動的解析を行った。従来は準静的解析を実施していたが、新係留方式は従来と比較して複雑な係留索形状に作用する潮流・波力による動的挙動を考慮するため、動的解析に変更した。

解析結果より係留安全性、波浪追従性、係留索の磨耗及び残存強度について評価を行う。評価結果から水理模型実験の対象とする係留索の構成を設定する。

係留安全性の評価は、動的解析を実施し、各要素に作用する最大張力の平均値を算出し、検討ケース毎に比較する。

波浪追従性の評価では、入射波の波高とブイ本体の上下動を比較することにより、ブイ本体が波浪を観測できているかを評価する。

最後に、磨耗及び残存強度の評価では、解析結果からブイ本体接続部・中間ブイ設置部・シンカー接続部のチェーン磨耗量を算出し、腐食・磨耗速度を設定する。設定したチェーンの腐食・磨耗速度を用いて、供用後10年のチェーンの残存強度を確認する。

### (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、静穏時～高波浪時までの再現波17ケースを設定し、表-1に示す高波浪時の再現波を設計波とした。また、係留索の強度は、従来は安全率5としていたが、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・磨耗速度は、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/年と、数値シミュレーションで試算した磨耗速度1.0mm/年を足して、腐食・磨耗速度を2.0mm/年と設定する。

表-1 設計条件

項目	内容
設計水深	350m
海底地質	泥砂
設計波 有義波高 : $H_{1/3}$ 有義波周期 : $T_{1/3}$ ピーク周期 : $T_p$	13.95m 17.3s 19.2s
風速 10分間平均風速 : $U_{10}$	60.0m/s
流速 海水流速	2.6m/s

### (3) 検討ケース

数値シミュレーションの検討ケースを表-4に示す。事前に「③・⑦立上部の材質（ワイヤケーブル又は合成繊維ロープ）（表-2）」と「⑤中間ブイの設置方法（分散ブイ又は集中ブイ）（表-3）」の組合せで解析を実施し、最大張力の抑制に着目してTypeA2, A5, B2, B5（係留索全長603m, 中間ブイ水深-175m）を抽出した。次に、優位性の高いTypeA2（ワイヤケーブル, 分散ブイ）と比較するため、中間ブイ水深-200m, 中間ブイ浮力300kNとしたTypeA1, さらに、両者を合成したTypeA1.5（中間ブイ水深-175m, 中間ブイ浮力300kN）を追加して比較した。

表-2 ③・⑦立上部の材質

チェーン	ワイヤケーブル	合成繊維ロープ
φ73mm MBL=5,063kN	φ70mm MBL=5,344kN	φ137mm MBL=5,754kN

表-3 ⑤中間ブイの設置方法

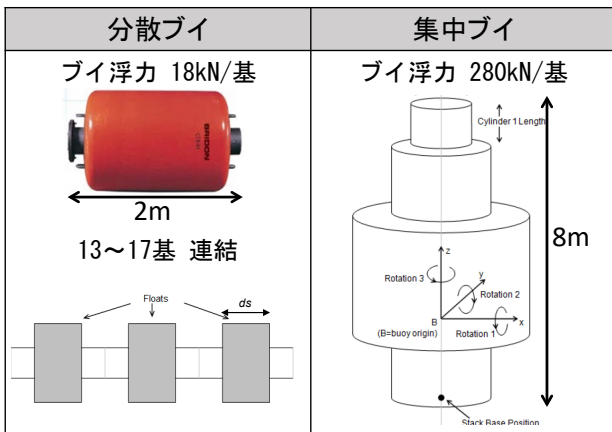


表-4 数値シミュレーションの検討ケース

Type	③・⑦立上部	⑤中間ブイ			係留索全長
		設置方法	浮力	設置水深	
A1	ワイヤケーブル	分散ブイ	300kN (40m)	水深-200m	628m
A1.5	ワイヤケーブル	分散ブイ	300kN (40m)	水深-175m	628m
A2	ワイヤケーブル	分散ブイ	220kN (30m)	水深-175m	603m
A5	ワイヤケーブル	集中ブイ	280kN	水深-175m	603m
B2	合成繊維ロープ	分散ブイ	220kN (30m)	水深-175m	603m
B5	合成繊維ロープ	集中ブイ	280kN	水深-175m	603m

(4) 検討結果

各検討ケースの係留索要素に作用する最大張力を図-4に示す。全ての検討ケースにおいて、ブイ本体接続部(①上)で全要素における最大張力が生じているが、屈曲部の余裕長によって、中間ブイに作用する張力(⑤上)を抑えている。TypeA1, A1.5, A5については、係留索に作用する最大張力を750kN程度に、シンカー接続部の最大張力を600kN程度に抑制している。

波浪追従性については、分散ブイが波浪観測の相対誤差が小さく、集中ブイよりやや有利であることが確認できた。TypeA1.5の波高及び周期におけるGPS波浪計の追従性を図-5に示しているが、周期6~8s付近は応答にやや差異があるものの、一点係留方式と同等であり、追従性は確保されている。

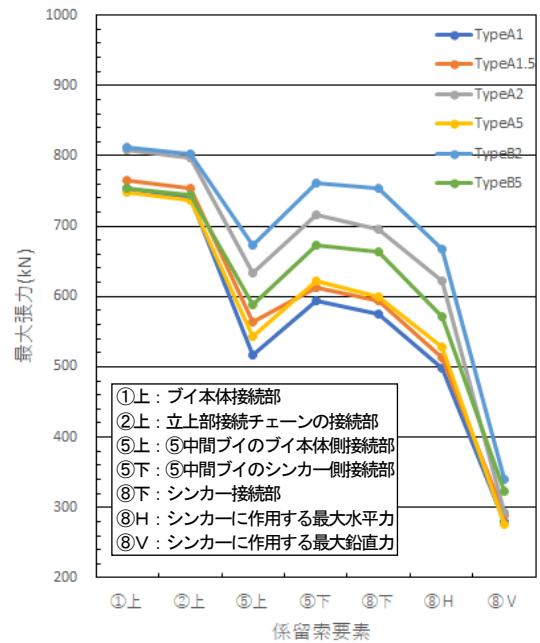


図-4 各検討ケースの係留索要素における最大張力

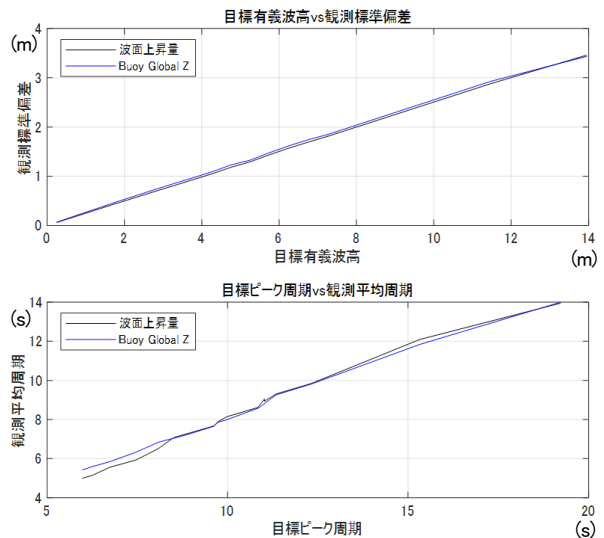


図-5 TypeA1.5の波高・周期の比較

③・⑦立上部の材質について、メーカーヒアリングにより、合成繊維ロープは年10%の強度低下の可能性があり、10年で強度が3割まで低下することを見込む必要があることから採用を断念した。一方、ワイヤケーブルはGPS波浪計係留索としての実績もあり、耐腐食性も確認されており適用性が高い。

腐食磨耗量について10年後のチェーン破断強度を、ブイ本体接続部、中間ブイのシンカー側接続部、シンカー接続部の3箇所において評価した。シンカー接続部におけるチェーンの安全率を図-6に示す。3箇所とも全ケースで、2.0mm/年の腐食磨耗量に対して10年後のチェーン破断強度の安全率3以上を確保でき、TypeA1及びA1.5において、余裕があることがわかった。

結論として、TypeA1とA1.5と比較し、中間ブイ設置水深が浅く、比較的中間ブイの負担が小さいTypeA1.5を実験モデルに設定した。

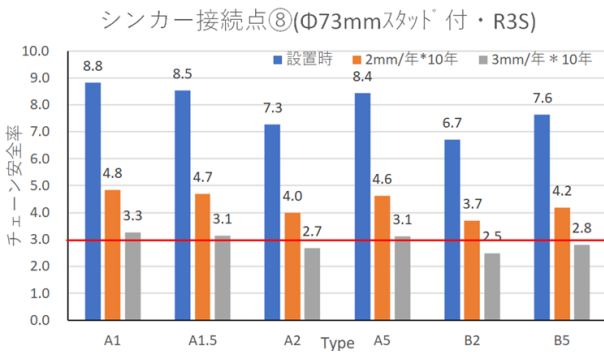


図-6 シンカー接続部における係留チェーンの安全率

## 2.4 水理模型実験

### (1) 実験目的

新係留方式では、静穏時に波浪や潮流等により係留索がシンカー直上付近に集中して動揺した場合、ブイ本体から中間ブイまでの係留索 (③及び④) と中間ブイからシンカーまでの係留索 (⑤、⑥及び⑦) が交錯することが懸念される。一方、波浪時は係留索が展開され交錯はしないが、屈曲部の余裕状態と発生張力の確認が重要である。そこで、実験①では、係留索の中間ブイ付近における交錯状況の確認を目的とし、実験②では、係留索の安全性確認と波浪追従性確認を目的として実施した。

### (2) 実験①

#### 【実験内容】

実験①は、1/20 スケールで模型を製作し、出現頻度が高い比較的静穏な状況を想定して実験を行った。実験①の概要図を図-7 に示す。波浪条件は、想定海域の3年再現波及び5年再現波を想定して、表-5 に示す波高及び周期を目標値とした。潮流の流速は、0.8m/s 程度とし、潮流なしのケースも実施した。

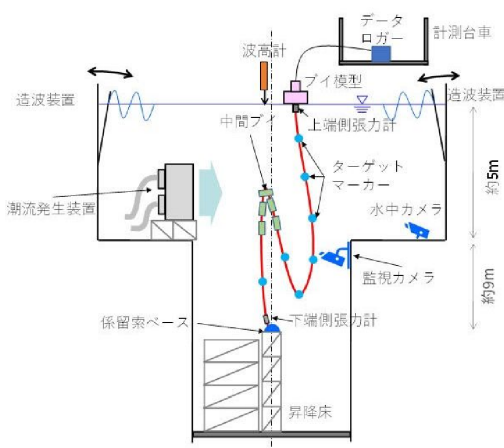


図-7 実験①の概要図

表-5 実験①の波浪条件

波浪	有義波高 Hs	ピーク波周期 Tp
3年再現波	1.25m	6.74s
5年再現波	2.25m	8.08s

実験は、造波開始前に初期位置までブイ本体を移動させておき、造波開始と同時にブイ本体をリリースする。波浪及び潮流等によりブイ本体が移動し、ブイ本体及び係留索に大きな動きがなくなるまで造波及び計測を継続する。このときの中間ブイ付近の係留索の挙動を水中カメラで観察し、係留索と中間ブイ、または係留索同士の交錯状況を確認する。なお、波浪の再現が難しくなるため、風は作用させていない。

#### 【実験結果】

図-8 に示す水中カメラ映像から、潮流ありのケースでは、係留索の交錯はほとんど発生しなかった。シンカー接続部と中間ブイ接続部に設置したスィベルがよく機能している様子が確認できた。一方で、潮流なしのケースでは、屈曲部のチェーンと立上部のワイヤケーブルの交錯が生じた。ブイ本体接続部に設置した張力計の計測値 (図-9) から交錯を確認することができ、交錯時にはスパイクが確認された。

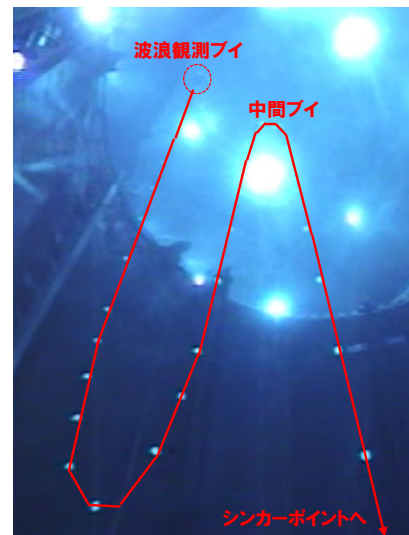


図-8 実験①の水中カメラ画像 (潮流あり)

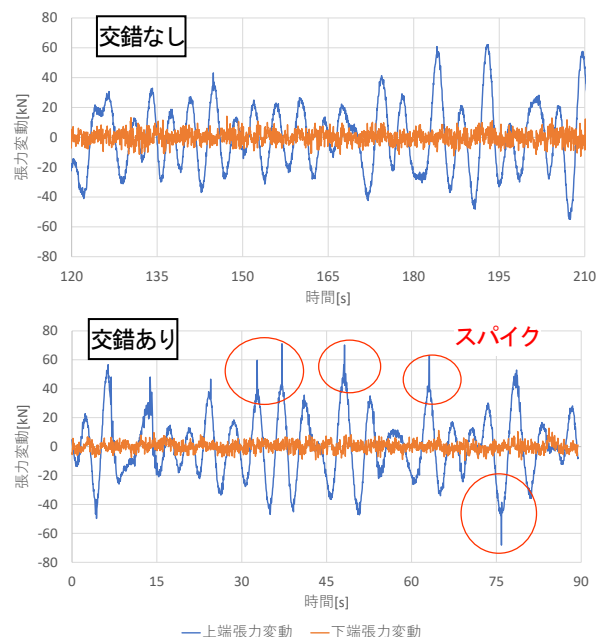


図-9 張力の時系列



(3) 実験②

【実験内容】

実験①と比べ長期間の再現波とより強い潮流による新係留方式の安全性確認とそのような極限状態におけるブイ本体の波浪追従性について確認するため、1/60スケールで実験を実施した。実験②の概要図を図-10に示す。波浪は、表-1に示す設計波を目標値とし、潮流の流速は2.3m/s程度とした。

実験は、まず潮流のみを発生させて、係留索が平衡釣合状態にあるところから造波を開始する。その後、波浪及び潮流等によりブイ本体が平衡釣合位置に至り、ブイ本体及び係留索に大きな動きがなくなるまで造波及び計測を継続した。ブイ本体の挙動については、ブイ本体内に設置したジャイロとブイ本体に取り付けたターゲットマーカーを追跡する光学式3次元挙動計測装置によって計測し、波浪追従性を評価した。また、係留系ベースに設置した3分力計を用いてシンカーに作用する水平力及び鉛直力を計測した。なお、実験①と同様に、風は作用させていない。

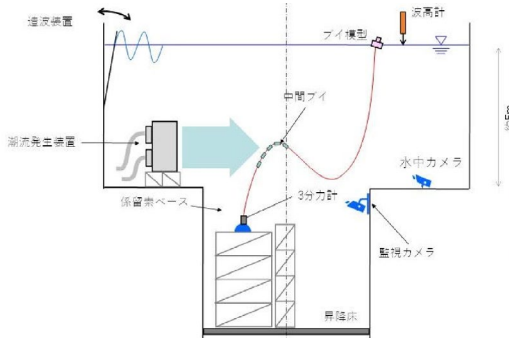


図-10 実験②の概要図

【実験結果】

図-11に示す水中カメラ映像及び計測結果から、ブイ本体の上下動は屈曲部で吸収され、中間ブイの上下動は抑制されていた。また、シンカーに作用する張力は、数値シミュレーション結果と実験結果で同程度であり、若干実験結果のほうが小さいことを確認した。

ブイ本体の波浪追従性については、ブイ本体の上下動と波高計の計測データから有義値及び平均周期を算出し、実用上、図-12に示すとおり問題なく検出できると考えられる。

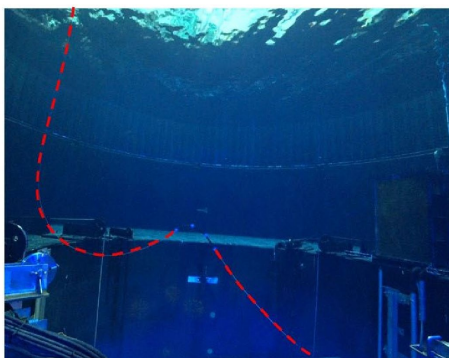


図-11 実験②の水中カメラ画像

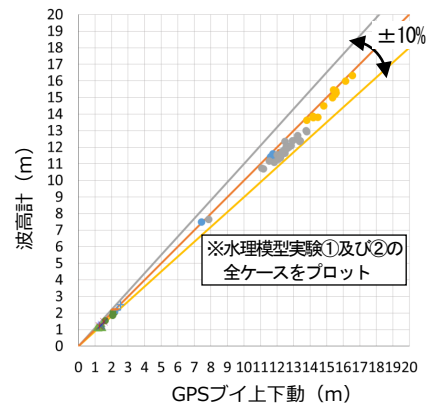


図-12 ブイ本体の上下動の計測結果の比較

(4) 結論と今後の検討

水理模型実験の結果より、数値シミュレーションから設定したTypeA1.5の係留索構成で問題ないと考えられる。

今後の検討として、新係留方式はスイベルが機能することが前提にあるため、スイベルが機能しなかった場合、どういった事象が生じるのか検証が必要と考える。また、スイベルの最適な個数及び配置について、冗長性の確保の観点から検討が必要である。

3. 新係留方式の設計方法の提案

新係留方式に限定した設計方法として、動的解析による係留動揺シミュレーション結果で係留安全性を照査する方法を提案した。フローを図-13に示す。当面は、従来方式の設計方法<sup>2)</sup>でのチェックも必要と考える。

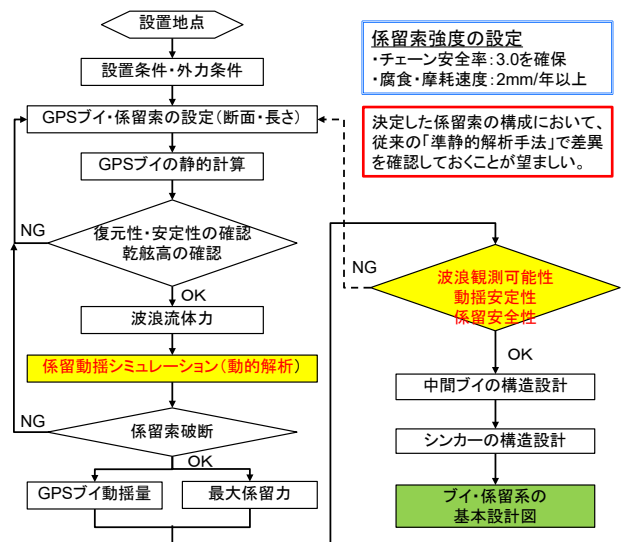


図-13 新係留方式の設計フロー

## 4. まとめ

GPS 波浪計の新係留方式に関して、数値シミュレーション及び水理模型実験を実施し、新係留方式の設計方法を検討した。

数値シミュレーションにより、係留安全性・波浪追従性・磨耗及び残存強度を評価し、水理模型実験により、係留索の交錯状況・係留構造全体の安全性・GPS 波浪計の波浪追従性を確認した。

今後は、中間ブイ付近やシンカー接続部等における耐久性及び冗長性について、引き続き検討が必要であると考えられる。

## 謝辞

本稿は、国土交通省四国地方整備局発注の「令和 2 年度 海域特性を踏まえた GPS 波浪計の係留手法検討業務」の成果の一部を取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（委員長：高山知司京都大学名誉教授）」<sup>1)</sup>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

- 1) 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，2019
- 2) 国土交通省四国地方整備局：徳島海陽沖 GPS 波浪計設置工事，2014