

GPS波浪計設置時の波浪ブイと係留索の挙動

岩塚 雄大¹・琴浦 毅²・菅野 泰雅³・吉田 大吾⁴
佐野 正佳⁵・米山 治男⁶・寺田 幸博⁷

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Yuudai.Iwatsuka@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Tsuyoshi.Kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

³五洋建設株式会社 四国支店 (〒790-0011 愛媛県松山市千舟町4-4-3 松山MCビル)
E-mail: Yasumasa.Kanno@mail.penta-ocean.co.jp

⁴五洋建設株式会社 四国支店 (〒790-0011 愛媛県松山市千舟町4-4-3 松山MCビル)
E-mail: Daigo.Yoshida@mail.penta-ocean.co.jp

⁵正会員 国土交通省四国地方整備局 小松島港湾・空港整備事務所
(〒773-0001 徳島県小松島市小松島町字新港9-14)

E-mail: sano-m88s3@pa.skr.mlit.go.jp

⁶正会員 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: yoneyama@pari.go.jp

⁷正会員 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部200-1)

E-mail: terada@ce.kochi-ct.ac.jp

GPS 波浪計の最初の設置から約 10 年が経過し、今後、耐用年数を経過した GPS 波浪計の再設置工事が予定されている。波浪計設置時の係留索はカテナリー状に展張されているのが理想であるが、水深 250 m 以上の大水深の場合は洋上からの自由落下方式によってアンカーや係留索を設置する必要があり、理想的な展張が出来ない場合がある。このときのブイや係留索の挙動はこれまで十分に研究がなされていない。

本研究では、徳島海陽沖 GPS 波浪計設置工事（設置水深 350 m）を模した水理模型実験を行い、あわせて工事のデータ検証を行うことにより施工時のブイと係留索落下・展張の挙動を明らかにすることを目的とした。研究の結果、アンカー投入時のブイ、係留索の一連の挙動と展開長増加の状況が明らかとなった。

Key Words : GPS buoy, mooring chain, anchor, laboratory experiment, catenary

1. はじめに

近年、大水深海域に設置されるGPS波浪計は、沖合波浪観測網¹⁾としての機能だけでなく東日本大震災²⁾や2010年チリ津波³⁾など大規模津波発生時の津波情報取得においても重要な役割を果たしている。また、沖合の観測情報をリアルタイムに利用する開発⁴⁾も行われてきていることから防災安全上の活用の可能性は非常に高い。

GPS波浪計は、国土交通省港湾局によって平成18年度より整備が進められており平成27年3月現在では18基が稼動している⁵⁾。GPS波浪計の設計耐用年数は10年であり、最初の設置から約10年が経過していることから、今後は設計耐用年数を経過したGPS波浪計の再設置工事が予定されている。

GPS波浪計の耐久性については、実証試験用GPS波浪計（高知室戸沖）において調査が行われており、係留索

に偏磨耗が発生しなかったとの報告がある⁶⁾ものの、徳島海陽沖GPS波浪計や青森東岸沖GPS波浪計においては、チェーン立上り部において係留索が破断したことによる当該GPS波浪計の流出が報告されている⁷⁾。

GPS波浪計設置時の係留索はカテナリー状に展張されているのが理想であるが、水深200 m以上の大水深の場合は洋上からの自由落下方式によってアンカーや係留索を設置する必要があり、理想的な展張が出来ない場合が



写真-1 GPS波浪計設置状況

ある。このときの波浪ブイ (以下、ブイ) や係留索の挙動はこれまで十分に研究がなされておらず、依然未解明な部分が多い。

本研究では、平成26年徳島海陽沖GPS波浪計設置工事(写真-1)を模した水理模型実験を行い、あわせて設置工事のデータ検証を行うことにより施工時のブイと係留索の落下・展張の挙動を明らかにした。

2. 徳島海陽沖GPS波浪計の再設置工事の概要

図-1に現在行われているGPS波浪計設置工事の設置方式を示す。また、表-1に各設置方式の施工手順を示す。これまでの設置方式には、方式(a)~方式(c)の3種類があり、それぞれ設置水深などの施工条件により方式が決定されている。設置水深が250m以浅では、方式(b)、方式(c)が採用されているものの、設置水深250m以深の

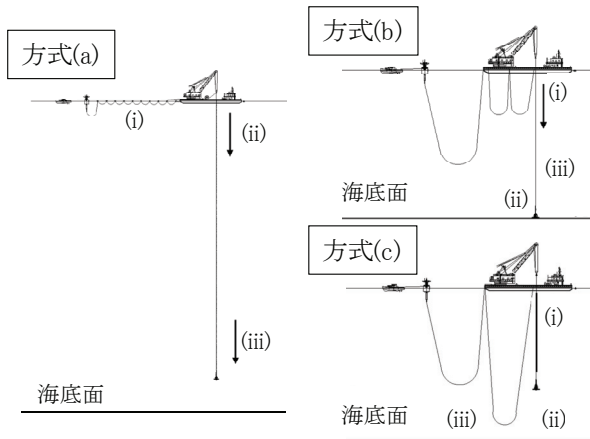


図-1 GPS波浪計の設置方式⁸⁾

表-1 GPS波浪計の設置方式と施工手順⁸⁾

設置方式	施工手順	設置実績 (設置水深)
(a)	(i) チェーンを起重機船側面に設置し、水面上にブイ・ケーブルを展開	288~430m
	(ii) 水面からアンカーを投入	
	(iii) (ii)によりチェーン・ケーブルが落下	
(b)	(i) アンカー・チェーンを段階的に吊下し	90~201m
	(ii) アンカー着底	
	(iii) チェーン切離し	
(c)	(i) アンカー・チェーンを段階的に吊下し	87~210m
	(ii) アンカー投入	
	(iii) (ii)によりチェーンが落下	



図-2 施工場所の概要

場合は、アンカー・チェーンの段階的な吊下しに時間を要することから、施工時の気象状況の変化によるリスクを考慮した方式(a)が採用されている。

GPS波浪計の施工場所を図-2に示す。設置位置は徳島県海陽町南東沖約18kmであり、設計設置水深が約350mとなることから方式(a)で設置した。また、設置予定のブイは、係留索(係留チェーン(1)(19m)、係留ケーブル(281m)及び係留チェーン(2)(365m))を介して、ダンフォースアンカー(156.8kN)に係留する設計である。

3. 水理模型実験

(1) 実験方法

図-3に水理模型実験の概念図を、図-4に実験開始時における各実験模型の配置状況を、表-2に実験諸元を示す。実験縮尺は1/100とし、実験水槽(延長:4m、幅:2m、

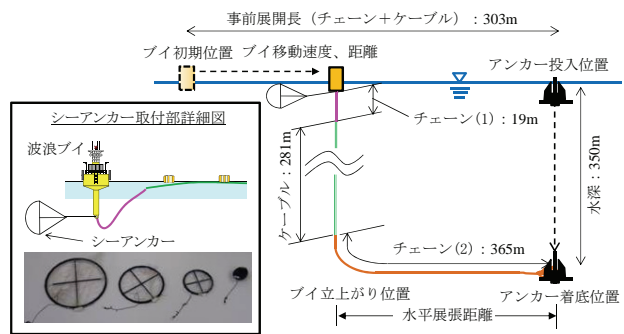


図-3 水理模型実験概念図

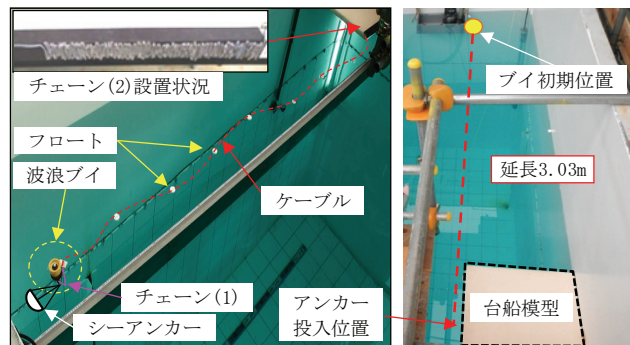


図-4 実験模型の配置状況

表-2 実験諸元(縮尺:1/100)

		現地スケール		実験スケール	
		水深	350 m	3.50 m	
ブイ	寸法	$\phi 5.0 \times 4.5$	m	$\phi 5.0 \times 4.5$	cm
	投影面積	$\phi 1.2 \times 6.0$	m	$\phi 1.2 \times 6.0$	cm
チェーン(1)	重量(気中)	656.6	kN	0.66	N
	長さ	365	m	3.65	m
ケーブル	重量(気中)	65.7	kN	0.07	N
	長さ	281	m	2.81	m
チェーン(2)	重量(気中)	36.3	kN	0.04	N
	長さ	19	m	0.19	m
アンカー	重量(気中)	156.8	kN	0.16	N
シーアンカー	寸法	$\phi 4.8, 12, 16$	m	$\phi 4.8, 12, 16$	cm
事前展開長(ケーブル+チェーン)		303	m	3.03	m

水深：3.5 m) を使用した。初期状態ではブイはアンカー投入位置より3.03 m離れた静水面上に浮かべた状態で設置し、チェーン(2)は台船側面のマグネットシートに貼付け設置した。ブイはチェーン(1)を介しケーブルと接続し、ケーブルは発泡スチロール製のフロートで静水面上へ浮かべた状態とした。なお、マグネットシートはチェーンの落下を妨げない程度の磁力のものを採用し、フロートは展張時の挙動を妨げないよう水中への牽引力が作用した際は速やかに外れる構造とした。ケーブルの展張完了後、アンカーを静水中に静かに自由落下させることにより実験を開始した。

表-3に実験ケースを示す。表中の展張距離は実験結果を示した。実験では水深350 m, アンカー重量156.8 kN (現地スケール) として設定し、シーアンカー直径、チ

表-3 実験ケース (現地スケール)

Case	水深 (m)	アンカー重量 (kN)	シーアンカー直径 (m)	チェーン吊下げ (有/無)	潮流 (m/s)	(実験結果) 展張距離 (m)	備考	
Case1	350	156.8	—	—	—	82	基本ケース	
Case2-1			4	—	—	97	シーアンカー	
Case2-2			8	—	—	120		
Case2-3			12	—	—	135		
Case2-4			16	—	—	148		
Case3			—	有	—	—	84	チェーン吊下げ
Case4			—	—	—	—	111	潮流
Case5-1			4	—	—	1.0	120	潮流 +シーアンカー
Case5-2			16	—	—		175	

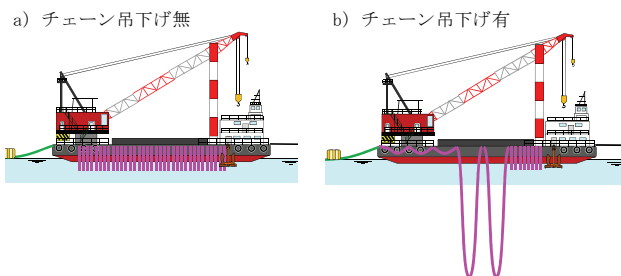


図-5 チェーン吊下げ有無の模式図

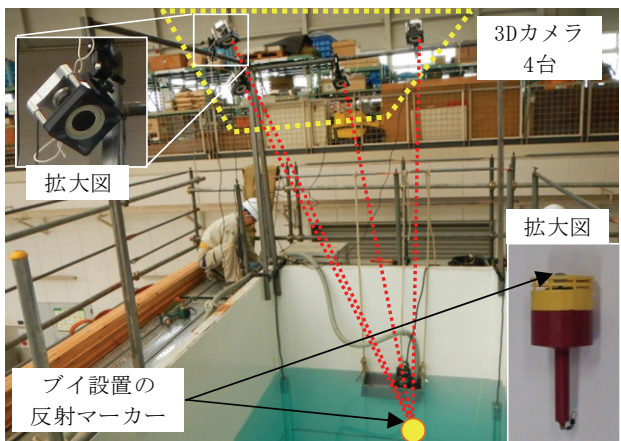


図-6 3次元非接触カメラの配置状況

ェーン吊下げ有無、潮流をパラメータとした。シーアンカーは係留索立上り部での係留索の重なりを抑制し、係留索の水平展張距離 (以下、展張距離) の増加を目的として、ブイ尾筒管の先端部に取付け実験を行った。チェーン吊下げ有は着底時の係留索の落下速度とブイの移動速度の低減を目的として、チェーンの事前吊下しによりチェーンの位置エネルギー減少を図るものである (図-5)。潮流は水中ポンプを使用して台船からブイに向け表層にのみ作用させた。なお、実験はそれぞれ2回以上行い再現性を確認した。

実験時のブイの変位はブイの挙動を妨げないよう3次元非接触カメラ (図-6) にて位置計測し、3次元位置座標 (x,y,z) を取得した。落下時のチェーン挙動は、水槽側面及び水面付近に設置した水中ビデオカメラ (3次元非接触カメラと同期計測) により取得し画像解析した。アンカー及びチェーン落下の際の位置情報は、水槽内の側面及び底面にあらかじめ明示した目盛線 (20 cm間隔) をもとに、水中ビデオカメラ解析により計測した。

また、係留索とシーアンカーに作用する張力を張力計を用いて計測した張力確認実験を別途行った。

(2) 実験結果

図-7にCase1実験時のブイの挙動を示す。また、図-8にCase1実験時のブイと係留索の時刻歴を示す。なお、実験値はすべて現地スケール換算して整理した。アンカー落下の際のブイ及び係留索は、(1)アンカー投入、(2)投入位置直下にアンカー着底、(3)ブイ最大速度発生、(4)チェーン水平展張開始、ブイ速度減少、(5)ケーブルが直線状に張る、(6)アンカー付近の滞留チェーン繰り出しによる展張距離の増加、(7)チェーン展張終了、(8)ブイ停止という挙動を示した。この時のブイ最大水平移

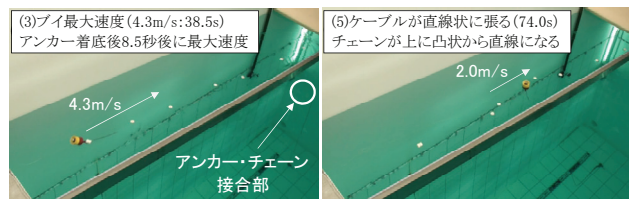


図-7 実験時のブイの挙動 (Case1)

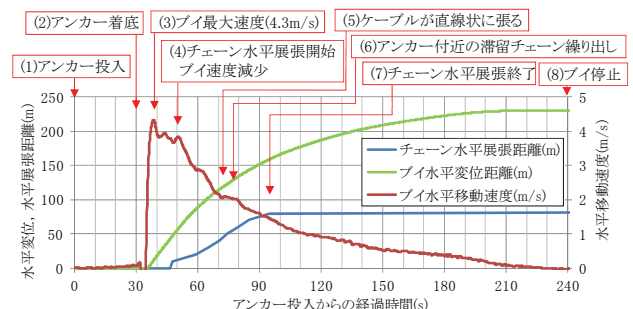


図-8 実験時のブイと係留索の時刻歴 (Case1)

動速度は4.3 m/s, 係留チェーン展張距離は82 m, 最大張力は約200 kNであった. なお, チェーン吊下げ効果を比較したCase3では展張距離は84 mとなり, Case1より若干大きいものの効果は小さいことが分かった.

図-9にシーアンカー直径別の展張距離とブイ最大移動速度の比較を示す. シーアンカー設置により展張距離の増加が確認され, ブイ最大移動速度は低下する効果が確認された. また, シーアンカー直径が大きくなることによって, その効果も大きくなる傾向を示した.

図-10にシーアンカーに作用する張力の時刻歴を示す. 作用張力はシーアンカー直径が大きくなるにつれて増加し, $\phi 12$ m, $\phi 16$ mではCase1の係留索張力と同じ約200 kNとなった. この時, Case1ではブイの抗力が, $\phi 12$ m以上ではシーアンカーの抗力が支配的であったものと考えられる.

図-11にシーアンカー径ごとのブイ水平変位の時刻歴の比較を示す. また, 図-12に滞留チェーンの展張状況を示す. シーアンカーの抗力が作用する以前(図-11-(i))はブイの変位に差は無いが, シーアンカー作用後(図-11-(ii))の時点では大きく異なっている.

図-13に潮流(1.0 m/s)を表層に作用させた場合と潮流無しの場合のチェーン立上り位置とアンカー落下位置を示す. ここで, チェーン立上り位置とアンカー落下位置の差が展張距離を示す. 潮流作用時の展張距離は一様に30 m程度増加した. なお, 実験ではアンカーには潮流を作用させていないため落下地点には有意な差異は見られないが, 計算⁹⁾によりアンカーに潮流を作用させた場合の

水平移動量を算出すると水深350 mの場合では, 約30 mであることから, 潮流が鉛直一様に作用した場合, 展張距離は潮流なしの条件と同等となるものと考えられる. 参考ケースとして, 潮流なしの条件下でブイを初期位置にて保持し, チェーン展張完了後に保持を解除したケース(シーアンカー直径: 無限大に相当)を行ったところ展開長は180 mであり, 潮流作用時のシーアンカー($\phi 16$ m)の展開長175 mと近い値を示した.

実験より海底チェーンの挙動は, ブイ側の水平抗力作用以前(図-11-(i))はすべてのケースで違いが見られないが, シーアンカーによる水平抗力作用後(図-11-(ii))はブイの移動速度の低下が見られた. このタイミング以降は, 係留索重量とブイ側の抗力が作用し, カテナリーに向かう係留索張力, ブイの位置, 速度, 海底摩擦力などのバランスにより, 必要に応じて滞留チェーンが繰り出される挙動(図-12-b))を示し, これらはシーアンカー直径が大きくなることにより, より顕著となったものと考えられる.

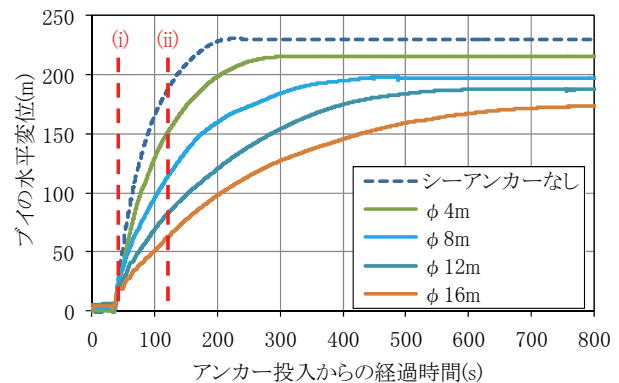


図-11 シーアンカーによるブイ水平変位の比較 (Case1, Case2)

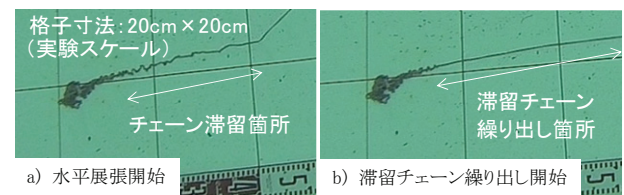


図-12 滞留チェーンの展張状況 (Case2シーアンカー $\phi 8$ m)

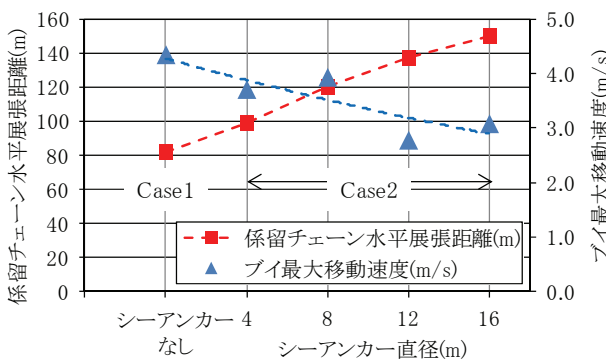


図-9 シーアンカー直径別の展張距離と最大移動速度の関係

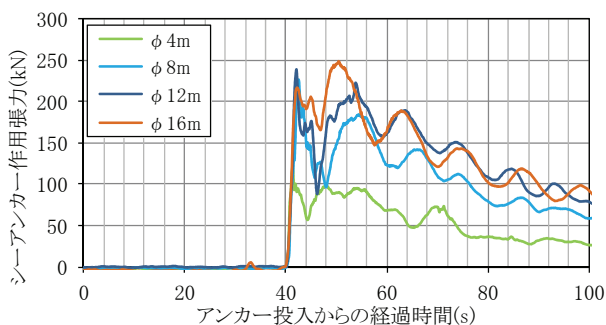


図-10 シーアンカーに作用する張力 (Case2)

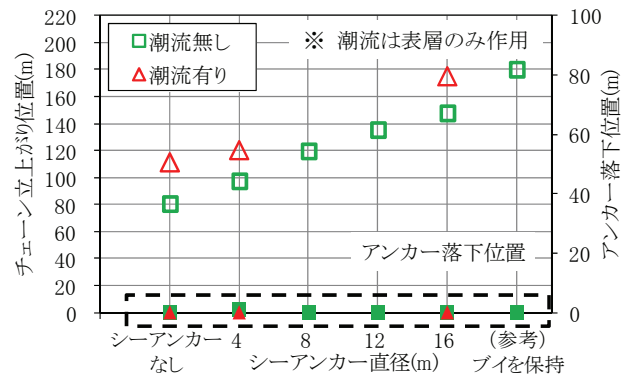


図-13 シーアンカーによるブイ最大移動速度の変化

4. 実施工での検証

(1) 検証方法

徳島海陽沖GPS波浪計設置工事における検証に際し、起重機船にGPSを設置し位置情報を記録した。ブイの変位及び傾斜は施工時のブイのログより、施工完了後の水中のチェーン展張状況はROV搭載の水中カメラより、アンカー設置完了位置、立上り位置はそれぞれROV搭載のトランスポンダにて計測した。また、施工時の現場海域の潮流はADCPにて計測した。なお、実施工時では実験結果と施工性を考慮してシーアンカー(φ8m)を尾筒管基部に設置した。

(2) 検証結果

図-14に投入前のチェーン配置と実験時と実施工時のブイの傾斜状況を、図-15に実験と実施工時のブイの挙動の時刻歴を示す。なお、実施工時のブイ最大傾斜角度は 67° であった。実施工時のアンカー投入から着底までの時間は33秒、ブイ最大水平移動速度は4.2 m/sであり、実験で得られたそれぞれ30秒、3.9 m/sと対応する。また、アンカー投入より40秒から80秒の間において最大移動速度が継続する様子が見られ実験時の継続時間より短い。

実施工ではチェーンは起重機船側面に破断強度の低いワイヤーロープを用いて仮固定し、チェーンに鉛直力が作用した際に破断するシステムとしたが、落下時間が実験と同等であることからワイヤーロープ破断による鉛直力の影響は無視できるものと考えられる。

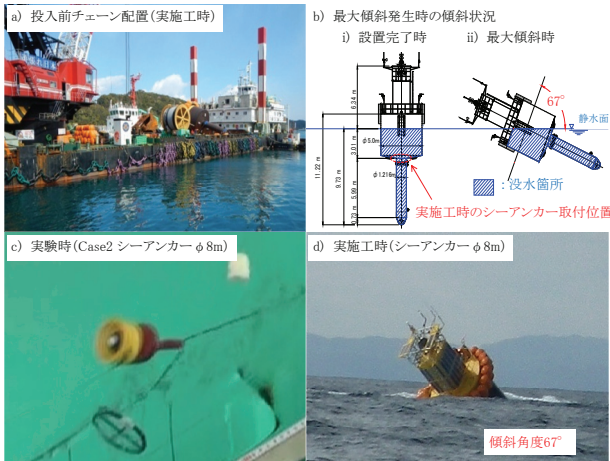


図-14 実験時と実施工時の傾斜状況とチェーン配置

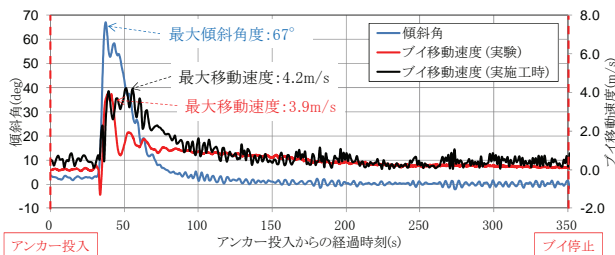


図-15 実施工時のブイの挙動

図-16に実施工時のアンカー投入位置、アンカー設置完了位置、ROVにより確認した海底立上り部の位置を示す。なお、位置は平面直角座標系(iv系)にて示した。実施工時のチェーン展張距離は98.9mであり実験時の120mより短い。また、アンカー投入から着底までの距離は10.6mであり潮流の影響を考慮したアンカーの移動量計算と同等であった。上記より、アンカー投入時のチェーンによる水平力の影響は無視できるものと考えられる。

図-17に施工完了後にROVにて撮影した各地点のチェーン展張の状況を示す。図中のa)~d)は、それぞれ図-16のa)地点~d)地点に対応する。アンカー直上では、チェーンは折り重なるように集積されている。また、アンカー付近のチェーン水平展張の開始箇所ではチェーンは蛇行しながら展張されている。さらに、アンカーと海底立上り部の中間付近ではチェーンは直線状に伸びて展張されて海底土砂中に埋もれている。しかし、海底立上り部付近では、チェーンは中間付近と同様に伸びて展張されているが、海底土砂中に埋もれている様子は見られない。つまり、中間付近のチェーンは実験で見られた挙動と同様にブイに水平力が作用する以前はアンカー直上に自由落下し、その後の水平力の作用に伴って水平展張が

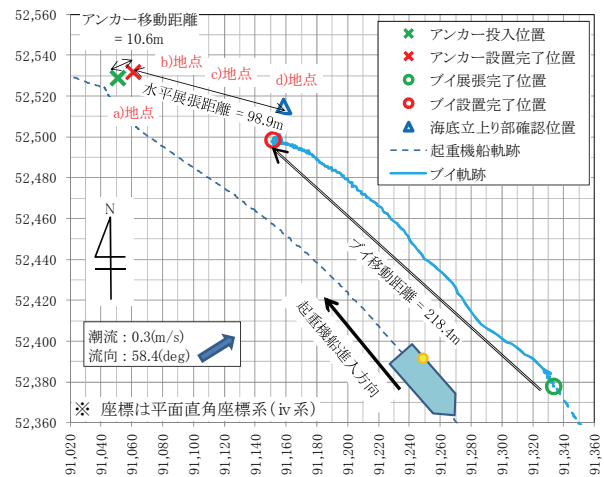


図-16 実施工完了時の各地点の位置

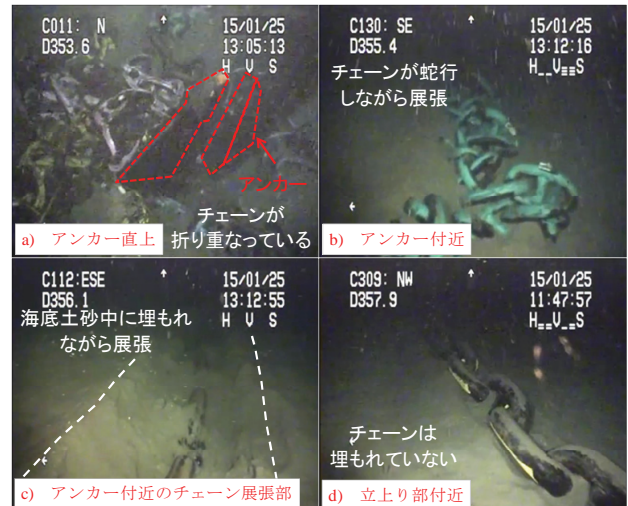


図-17 実施工後のチェーン展張の状況

開始され、アンカー付近の滞留チェーンが水平方向に繰り出されながら展張されているものと考えられる。また、最終的にチェーンがカタナリー状になった際には、水平方向の繰り出しは収まり海底面上に静かに落下するような挙動を示したのと考えられる。

実施工では、シーアンカー取付位置を尾筒管基部に変更したことや、アンカー投入時のビデオ画像よりブイ後方でシーアンカーが上方に逃げるような挙動が見られること、波浪や潮流の影響などの環境条件が実験時とは異なることから、シーアンカーは実験ほど効果的には再現されなかったのと考えられる。また、実験時は水槽底面を滑面としており、海底摩擦の影響を考慮していないため、ブイの水平移動が開始された後にチェーンが繰り出される挙動が見られたが、実施工箇所は底質が海底摩擦の影響を受けやすい砂質土であり、チェーンの繰り出しが抑制されて展張距離減少の一因になったものと考えられる。

5. まとめ

GPS波浪計設置時のブイと係留索の挙動についての研究の結果、以下の結論を得た。

- (1) 水理模型実験によって、アンカー投入時のブイと係留索の一連の挙動を明らかにした。また、シーアンカー利用による展張距離の増加とブイ最大移動速度の低減効果を定量的に示した。
- (2) 実施工時は、ブイと係留系器材に対して位置計測と水中カメラによる観察を行った。その結果、施工・環境条件の相違から、シーアンカーによる展張距離増加の効果は実験と比較して低下したものの、実施工でも水理模型実験で得られた係留索の挙動の知見を定量的に確認することができた。

謝辞: 本研究にともない、GPS波浪計測設備係留方策検討会(国土交通省四国地方整備局港湾空港部)より意見を頂いた。ここに記して感謝を表す。

参考文献

- 1) リアルタイムナウファス: <<http://nowphas.mlit.go.jp/>>, 国土交通省港湾局
- 2) 鈴木史朗, 宮島正悟: GPS 波浪計を活用した沖合波浪観測網の構築について, 沿岸技術研究センター論文集, No.6, 2006.
- 3) 河合弘泰, 佐藤 真, 川口浩二, 関 克己: GPS 波浪計で捉えた平成 23 年度東北地方太平洋沖地震津波, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_1291-I_1295, 2011.
- 4) 河合弘泰, 佐藤 真, 永井紀彦, 川口浩二: 東北~四国沿岸の GPS 波浪計ネットワークで捉えた 2010 年チリ津波, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.266-270, 2010.
- 5) 富田孝史, 高川智博: 沖合津波観測データを利用したリアルタイム津波ハザードマップシステムの開発, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I_55-I_60, 2014.
- 6) 別紙 GPS 波浪計設置状況, GPS 波浪計を活用した沖合波浪観測について: <<http://www.mlit.go.jp/common/001083451.pdf>>, 国土交通省
- 7) 寺田幸博, 永井紀彦, 加藤照之, 越村俊一, 川口浩二, 松下泰弘: GPS 海洋ブイ係留系の長期耐久特性に関する実証調査, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, No.1, pp.13-18, 2014.
- 8) GPS 波浪計測設備係留方策検討会報告書 - 徳島海陽沖 GPS 波浪計の流出原因の推定と再発防止策 - : GPS 波浪計測設備係留方策検討会, pp.1-16, 2013.
- 9) 熊谷 隆宏, 山本省吾, 平山 達也, 真鍋 匠, 清水 英久, 川口 毅, 平田 賢治, 小宮 一成, 小林 一美: ブロック直投方式を用いた人工海底山脈築造に関するブロックの落下挙動および拡散特性に関する研究, 海岸工学論文集, Vol.51, pp. 801-805, 2004.

(2015.3.18 受付)

THE BEHAVIOR OF THE GPS BUOY AND MOORING LINE DURING THE INSTALLATION

Yuudai IWATSUKA, Tsuyoshi KOTOURA, Yasumasa KANNO, Daigo YOSHIDA, Masayoshi SANO, Haruo YONEYAMA and Yukihiko TERADA

About 10 years have passed since the first GPS buoy installation in Japan. Due to the 10 years' service life of the buoys, their reinstallation will be scheduled in the future. An ideal shape of the mooring line is a catenary during the GPS buoy installation. On the other hand, the anchor and mooring line must be thrown by a free-fall from the sea surface at the water depth over 250m. Therefore, it is more difficult to stretch the mooring line with the catenary shape. However, there have been few studies on the behavior of the buoy and mooring line so far. In this study, we carried out the hydraulic model experiments for the GPS buoy reinstallation work off Tokushima Kaiyo (the water depth of 350m). We also examined the validity of the experiments by comparing the experimental results with the actual operation ones. As a result of the study, we clarified the behavior of the buoy and mooring line during the GPS buoy installation.