GPS海洋ブイ係留系の長期耐久特性に関する 実証調査

寺田 幸博¹・永井 紀彦²・加藤 照之³・越村 俊一⁴・川口 浩二⁵・松下 泰弘⁶

¹正会員 高知工業高等専門学校教授 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

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

²フェロー (株)エコー取締役 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

E-mail: t-nagai@ecoh.co.jp

³非会員 東京大学教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail: teru@eri.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-4)

E-mail: koshimura@irides.tohoku.ac.jp

⁵正会員 (独法)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: kawaguchi@pari.go.jp

⁶非会員 日立造船(株) 機械・インフラ本部 (〒559-8559 大阪市住之江区南港北1-7-89)

E-mail: matsushita_ya@hitachizosen.co.jp

室戸岬西方沖13 km水深128 m地点に設置し、3年7カ月間にわたって波浪・津波・潮汐の観測に供した実証試験用GPS海洋ブイに対する揚収実験を実施した。このブイの係留系摩耗損傷状況の調査結果を報告する。実証試験期間中に台風1106号に伴う有義波高8.4 mの高波などの来襲を受けたものの、ブイ尾筒下端的の係留環と係留チェーンとの連結のためのシャックルの最大摩耗量は、6 mm (1.67 mm/年)であった。これは当初想定していた10 mm/年より、はるかに小さい値であった。摩耗量が最も大きかったのは、想定のとおり、年当たり数百万回におよぶ海底との離着をする係留索立ち上がり部のリンクであり、その摩耗量は最大7 mm (1.95 mm/年)であった。この場合も5 mm/年の設計想定摩耗量より小さい値であった。

Key Words : GPS buoy, wave observation, tsunami, mooring, chain, durability

1. はじめに

大水深海域に設置された海面変動センサーは、津波が沿岸に到達する前に津波波形を検知することができることから、沿岸域における津波防災上、非常に有用であることがこれまでに報告されてきた^{1),2),3)}。しかし、津波は、人間社会の時間尺から見ると極めて稀な事象であるため、津波の観測だけをターゲットとした観測システムを、長期間にわたって良好な状態に維持管理し続けることは実務上は困難である。言葉を変えると、リアルタイム津波モニタリングを長期間にわたって継続的に実施していくためには、大水深津波センサーは、波浪やうねりなどの日常的な事象を観測し続けることによって、常時、人々が観測情報を活用し続けていることが重要となる^{4),5)}。

また、常時において誰も見ていない観測情報が、極めて稀に発生する津波来襲時にだけリアルタイムで有効に

活用されるのは、事実上は難しいと言わざるを得ない⁶⁾。このような観点からすれば、大水深海底上に設置される水圧センサーは、津波観測には有効であるものの、通常の波浪に伴う周期の短い水圧変動は大水深海底には届かないため、波浪やうねりなどの日常の海象情報の提供には難点がある。こうした事情によって、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う大津波が来襲した際には、国土交通省港湾局によって全国沿岸に展開されていたGPS波浪計⁷⁾ネットワークだけが、リアルタイムで気象庁による大津波警報の数値更新に貢献することができたものと思われる。

GPS海洋ブイは、一般に、波浪条件を考慮して大水深海域に設置しなければならないため、係留系が重要となる。本稿は、GPS海洋ブイ係留系の設計にあたっての基礎的な参考情報を提供することを目的としている。このために、GPS海洋ブイを3年7カ月間にわたって波浪・津

波・潮汐の観測^{9), 10)}に供した後に、観測システムの設計・施工の基礎データを収集することを目指して実施した揚収実験結果の中から、係留索の摩耗損傷状況を調査した結果を報告する。

2. GPS海洋ブイの係留系の特徴

一般の海洋構造物の係留設計は、その構造物の性能を十分に発揮させるため、波浪に伴う動揺をいかに軽減させるかが重要となっている。これに反して、GPS海洋ブイは、津波波形を早期に把握することができるようにするため、大水深海域に設置する必要があるとともに、できる限り波浪に追従させ海面の上下変動を正しくフォローするようにしなければならない。このため、GPS海洋ブイでは、チェーンによる一点係留カテナリー方式が採用されている。現在に至るまで、この係留方式による係留チェーンの長期的な摩耗損傷に関する実証データがほとんど得られていなかったため、GPS海洋ブイの係留系の合理的な設計法はいまだに確立されておらず、将来に向けての技術課題となっている。これまでの現存するGPS海洋ブイにおいては、ブイ直下のチェーンについては、10 mm/年、波浪の影響を受けて海底面との離着が繰り返される係留索立ち上がり部については5 mm/年といった摩耗を仮定し、暫定的な係留系の設計が行われていたが、こうした仮定の妥当性についての根拠は必ずしも十分とは言えなかった。

3. 室戸沖実証実験サイト

本稿で検討対象としたGPS海洋ブイは、室戸岬西方沖13 kmに設置されていたブイであり、水深128 m地点に2008年4月21日に設置されたものである。図-1は、このブイの設置位置を示す。この海域における自然条件として、風速60 m/s、流速(表層)2.6 m/s、有義波高14.9 m、有義波周期16.5 sを設計条件としている。

設置直前の作業台船上の状況を写真-1に示す。総延長348 mの係留チェーン、重量265 kN(水中重量230 kN)のダンフォース型アンカー、直径4.5 mで重量343 kN(排水量477 kN)のGPS海洋ブイ缶体を展開・配置した全景である。ブイに塗装した黄と赤の境界線が喫水であり、GPSアンテナは海面上8.3 mに位置することになる。

このブイの揚収実験を2011年11月25日に実施し、3年7カ月間の摩耗損傷状況を確認することができた。写真-2は、ブイを回収した際の状況を示すものである。このようにして回収したブイの係留系の観察とリンク径の測定を行って、定量的に摩耗損傷状況を把握した。

図-1 室戸沖実証試験サイト

写真-1 設置前のGPS海洋ブイ

写真-2 揚収されたブイの状況

4. 実証実験中の海象

一般に、GPS海洋ブイは波浪条件を考慮して大水深海域に設置されるが、検討対象期間中に得られた室戸沖実証試験ブイで観測された最大有義波は、2011年の台風6号のものであった。台風が襲来した7月19日の前後数日間の有義波高と有義波周期を図-2に示す。図から明らかなように、有義波高は8.4 mが最大値であり、この時の有義波周期は12.7 sであった。50年確率波をもとに設定されたブイの設計有義波高は14.9 mであったため、設計波高の56.4%の波浪が期間中にあったことになる。

これに加えて、2つの津波を運用実験中に観測している。一つは、2010年3月28日（JST）に襲来した2010年チリ地震津波であり、図-3に示すように観測津波高は約20 cmであった^{9), 10)}。図中のデータは、波浪などの高周波成分を除去するために±60 sのFIRフィルタを適用している。他の一つは、2011年3月11日（JST）に襲来した東北地方太平洋沖地震津波であり、図-4に示すように観測津波高は約40 cmであった^{10), 11)}。この場合は、120 sの単純な移動

図-2 台風1106号来襲時の観測有義波高の経時変化

図-3 2010年チリ地震津波波形の観測記録

平均をローパスフィルタとして用いている。両図共、過去1週間の観測値の調和分解計算による予測値を用いて潮汐成分を除去している。

本稿の検討対象期間の海況は、このような海象条件であった。

5. 係留系の構成

図-5は、全長348 mの係留チェーンの構成を示したものである。ここで、リンクNo.1はブイとの接続であり、リンクNo.964は海底アンカーに接続するものである。係留チェーンのリンク径は、係留索の位置によって異なっている。リンクNo.1はシャックルであり、ブイの係留環と係留チェーンを接続する最も重要な部分である。摩耗を10 mm/年であると想定して設計した結果、リンクNo.1のシャックルの直径は139 mmで、ピン長径は170 mmであった。

No.10からNo.200の191リンクの径は70 mm、No.203からNo.235の33リンクの径は82 mm、No.236からNo.396（平均海面から下119.6 m）のリンクの径は68 mmの一定値とした。これらのチェーンは、設計で想定した最大波浪によるブイの上下運動時にも海底に接することはないと考えられるため、係留系全体のバランスを維持する中で可能な限り軽量のチェーンを用い、ブイや係留系全体の軽量化をはかった。

海底面との頻繁な着離が発生すると考えられる係留索立ち上がり部のNo.400からNo.562（平均海面からの長さ169.8 m）の間では、リンクの径を76 mmとし、5 mm/年の摩耗を見込んでも、必要な引張強度を確保できるようにした。

海底常時接地の地鎖部分に比較的重量の大きなリンクを配置したのは、チェーンの浮き上がりを極力避ける配

図-4 2011年東北太平洋沖地震津波波形の観測記録

図5 係留チェーンの構成図

慮であり、No.566からNo.658との間のリンクの径は132 mmの一定値とし、No.662とNo.962との間のNo.811からNo.813のコネクタ部分以外のリンクの径は111 mmの一定値とした。この地鎖部では、安全をみて3 mm/年の摩耗を見込んでいる。

6. 回収した係留チェーンの状況

写真-3は、10 mm/年の摩耗を設計上の想定値としていたリンクNo.1と係留環部の状況である。この写真からわかるように、貝殻や海藻が係留環とシャックルに取りついている状況を見ることができるが、大きい損傷は見受けられない。

また、写真-4は、回収後の係留チェーンを作業台船上に確保した状態である。チェーンの回収は、GPS海洋ブイ直下のチェーンから順番に台船クレーンの揚程の範囲で繰り返し引き上げる方法で行った。海面下30 m程度までは、海洋生物の付着が多かった。これらを含む海底との接触が無い懸垂部では、写真のような塗装のままのチェーンが台船上に確保出来た。係留索立ち上がり部の海底128 m近傍の約20 m程度の範囲は、海底との接触によって磨かれた金属光沢のチェーンが揚がってきた。それ以降の地鎖部では、塗装のままのチェーンが再度確認さ

写真-3 係留環部とリンクNo.1 (回収後)

写真-4 回収後のチェーン

図6 リンク径の計測位置

れた。目視による係留索全体の観察において、強度劣化を示すような状況は見られず、係留系は健全性を保っている状況が確認できた。

揚収したチェーンは、図-5に示した番号の各リンクに対して、それぞれの形状ごとに図-6に示すリンク径を大型ディバイダを用いて計測した。

まず、係留環部については、計測箇所の全てにおいて摩耗がほとんど認められなかった。リンクNo.1のシャックルは、図-6(ii)に示す直径 a 及び直径 c を計測した結果、それぞれ6 mmと5 mmの摩耗量であった。年あたりに換算すると1.67 mm/年と1.40 mm/年である。この係留環部、リンクNo.1及び特殊形状のリンクについての摩耗量計測結果を表-1に示す。GPS海洋ブイ設置前に全数の計測は実施していないが、抜取検査でプラス側の公差があることを確認している。このため、摩耗量はこれより大きい可能性がある。測定値の方が大きい場合は摩耗量 0 と表示している。表-1の結果から、ブイ下端部において実測された摩耗量は、設計想定値を大きく下回っていることが明らかとなった。

次に、リンクNo.420からNo.423の間の状況を写真-5に示す。このようにNo.421からNo.439の19 リンクの間で、16 個のリンクについてスタッドの脱落が見られた。リンクのスタッドはチェーンのキンク防止用であり、片側

表-1 係留環及びシャックルの摩耗量測定結果

単位: mm						
番号	呼び径	計測部位	a	b	c	d
係留環部	—	設計値	190	190	145	—
		計測値	191	191	144	—
		摩耗量	0	0	1	—
		年摩耗量	0	0	0.28	—
1	Φ81AS	設計値	139	113	170	113
		計測値	133	116	165	113
		摩耗量	6	0	5	0
		年摩耗量	1.67	0	1.40	0
564	Φ84AS	設計値	118	118	176	118
		計測値	117	121	173	116
		摩耗量	1	0	3	2
		年摩耗量	0.28	0	0.84	0.56
660	Φ111AS	設計値	155	155	233	155
		計測値	155	155	230	156
		摩耗量	0	0	3	0
		年摩耗量	0	0	0.84	0
964	Φ97AS	設計値	136	136	204	136
		計測値	133	133	201	135
		摩耗量	3	3	3	1
		年摩耗量	0.84	0.84	0.84	0.28

写真-5 リンクNo.420からNo.423の状況

だけを溶接で取り付けている。破断強度はリンク部だけで確保しており、海底からの立ち上がり部におけるスタッド脱落は想定範囲内であった。

また、係留チェーンの代表的なリンクの摩耗量の計測結果を表-2に示す。データの表記は表-1の場合と同様に行っている。リンクNo.419からNo.435の係留索立ち上がり部の実測摩耗量分布を図-7に示す。係留チェーン摩耗量は、類似の浮体構造物である表層浮魚礁の摩耗量調査実績¹²⁾（既往調査の摩耗最大値）等を参考に設定しており、係留索立ち上がり部は、5 mm/年を設計想定摩耗量としていた。測定された最大の摩耗は、リンクNo.427で見られた7 mmであり、年あたりに換算すると1.95 mm/年であった。

表-2 代表的なリンクの摩耗量測定結果

単位: mm									
番号	呼び径	設計値		測定値		摩耗量		年間摩耗量	
		a	b	a	b	a	b	a	b
13	Φ70C	70	70	70	73	0	0	0	0
209	Φ68E	82	82	82	83	0	0	0	0
239	Φ68C	68	68	68	70	0	0	0	0
402	Φ76C	76	76	73	78	3	0	0.84	0
419	Φ76C	76	76	73	76	3	0	0.84	0
421	Φ76C	76	76	73	75	3	1	0.84	0.28
423	Φ76C	76	76	72	73	4	3	1.12	0.84
425	Φ76C	76	76	72	72	4	4	1.12	1.12
427	Φ76C	76	76	69	71	7	5	1.95	1.40
429	Φ76C	76	76	70	72	6	4	1.67	1.12
431	Φ76C	76	76	70	72	6	4	1.67	1.12
433	Φ76C	76	76	71	73	5	3	1.40	0.84
435	Φ76C	76	76	73	74	3	2	0.84	0.56
567	Φ132C	132	132	130	135	2	0	0.56	0
815	Φ111C	111	111	112	115	0	0	0	0

図-7 海底面への離着がある立ち上がり部の実測摩耗量

7. まとめ

GPS海洋ブイの係留チェーンについて、摩耗調査を行った結果を要約すると、次のとおりである。

- (1) 3年7カ月にわたって係留されていたGPS海洋ブイの係留チェーンは、貝殻や海藻の付着は見られたものの、係留チェーンの強度劣化を示すような状況は見られず、係留系は健全性を保っている状況が確認された。
- (2) 実測されたチェーンの摩耗量は、ブイ下端の係留環部においても、海底面との着離が発生する係留索立ち上がり部においても、設計上想定した摩耗量より小さかったことから、安全率緩和の可能性が示唆された。
- (3) 最大の摩耗量が発生したリンクは、海底面との着離が最も頻繁に発生すると考えられる係留索の立ち上がり部にあることが明らかにされた。

謝辞：本研究は、科研費基盤研究(S)21221007で実施した。港湾空港技術研究所 富田孝史氏、河合弘泰氏、高川智博氏、国交省港湾局 辰巳大介氏、日立造船(株) 吉田晴彦氏、三宅寿英氏、阿部知宏氏、西村史睦氏、今田成之氏らの共同研究者に感謝します。また、高知高専の協力学学生及びGPS海洋ブイの設置・揚収作業に従事した日立造船(株)の数多くのご担当者に感謝いたします。

参考文献

- 1) 永井紀彦, 小川英明, 寺田幸博, 加藤照之, 久高将信: GPS ブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1411-1415, 2003.
- 2) Nagai, T., Ogawa, H., Terada, Y., Kato, T. and Kudaka, M.: GPS Buoy Application to Offshore Wave Tsunami and Tide Observation, ASCE, *Proc. of the 29th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'04)*, Vol. 1, pp. 1093-1105, 2004.
- 3) Nagai, T., Kato, T., Moritani, N., Izumi, H., Terada, Y. and Mitsui, M.: Offshore Tsunami Monitoring Network Design using GPS Buoys and Coastal on-site Sensors, ASCE, *Proc. of the 30th International Conference on Coastal Engineering (ICCE'06)*, Vol. 2, pp. 1529-1540, 2006.
- 4) 永井紀彦: 波浪観測網の強化による海の安全の確保—GPS 波浪計 2006 年度より配備開始!—, 土木学会誌 (2006 年 9 月号), pp. 78-79, 2006.
- 5) 永井紀彦: GPS 波浪計による沖合の波浪の観測, 土木学会誌 (2009 年 4 月号), pp. 50-53, 2009.
- 6) Nagai, T., Shimizu, K., Lee, J. H., Iwasaki, M., Fujita, T. and Kudaka, M.: Development Of Multi-Purpose Offshore Observation System Using GPS Buoy, *Proceedings of Coastal Structures 2007 International Conference*, Vol. 1, pp. 669-680, 2007.
- 7) 高山知司 監修・海象観測情報の解析・活用に関する研究会 編集: 波を観る, 沿岸技術ライブラリーNo.42, 一般財団法人沿岸技術研究センター, p. 152, 2013.
- 8) Terada, Y., Kato, T., Koshimura, S. and Yoshida, H.: A development of tsunami monitoring system using GPS buoy, 3rd International Tsunami Field Symposium, Tohoku University, 2010.
- 9) Kato, T., Terada, Y., Nishimura, H., Nagai, T. and Koshimura, S.: Tsunami records due to the 2010 Chile Earthquake observed by GPS buoys established along the Pacific coast of Japan, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp. e5-e8, 2011.
- 10) Terada, Y., Kato, T., Nagai, T., Koshimura, S., Miyake, T., Nishimura, H. and Kunihiro, S.: Development of a tsunami monitoring system using a GPS Buoy, *Proc. IGNS 2011*, International Global Navigation Satellite Systems Society, Paper No. 14, pp. 1-12 (CD-ROM), 2011.
- 11) Terada, Y., Kato, T., Nagai, T., Kawaguchi, K., Koshimura, S. and Matsushita Y.: An improvement of the GPS buoy system for detecting tsunami at far offshore, *Book of Abstract, the International Association of Geodesy (IAG) Scientific Assembly*, p. 409, 2013.
- 12) 例えば, 高知県: 平成 21 年度広漁場第 1 号, 室戸東地区 (室戸岬沖 16 工区) 広域漁場整備工事, 表層型浮魚礁 (黒牧 16 号) 性能仕様書, p. 9, 2009.

(2013. 10. 28 受付)

LONG-TERM MOORING CHAIN SYSTEM DURABILITY OF THE GPS TSUNAMI-WAVE METER

Yukihiro TERADA, Toshihiko NAGAI, Teruyuki KATO, Shunichi KOSHIMURA,
Koji KAWAGUCHI and Yasuhiro MATSUSHITA

This paper introduced observation data of proto-type GPS buoy's mooring chain at 3 years and 7 months after the installation, in order to provide information for practical design of future safer and more economical design of the mooring system. Following findings may be important for the future GPS buoy design. (1) Mooring chains stayed in good performance even after 3 years and 7 months of severe ocean field conditions, although they were covered by large amount of sea plants like shells and several studs disappeared from some of the chains located at frequently suffering from landing and dis-landing action by the buoy motion. (2) The quantity of real frictional wear was considerably smaller than assumed one at all the part of the mooring system. (3) Maximum real frictional wear was observed at chains located at frequently suffering from landing and dis-landing action by the buoy motion.