

沿岸波浪観測における複合構造方式の 海底・係留ケーブルの開発と現地施工

DEVELOPMENT AND FIELD APPLICATION OF COMPOSITE TYPE SUBMARINE CABLES FOR COASTAL WAVE OBSERVATION

永井紀彦¹・中山政勝²・中島博靖³・井上 満⁴・清水康男⁵・中川 透⁶
Toshihiko NAGAI, Masakatsu NAKAYAMA, Hiroyasu NAKASHIMA, Mitsuru INOUE
Yasuo SIMIZU and Tohru NAKAGAWA

¹正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所海象情報研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²非会員: (前) 国土交通省九州地方整備局・博多港湾空港整備事務所第一工務課長
(現) 総務省沖縄総合事務局・那覇港湾空港工事事務所副所長

³非会員: 国土交通省九州地方整備局・博多港湾空港整備事務所第一工務課建設管理官

⁴非会員: (株) カイジョー九州支店

⁵非会員: 協和商工 (株) 技術部長

⁶非会員: (株) OCC上三川事業所技術部

A new type of submarine cable named as "Composite Cable" has been developed and put into practical use in order to increase reliability of mooring and seabed cables. "Composite Cable" unified the signal transmission part and surrounding protection part consisted of many bands of steel wires, which proves the strength against the tension out-force without losing flexibility. This paper describes results of field applications of the Composite Mooring Cable and of real time coastal wave monitoring system using the cable. It also describes prototype Composite Seabed Cable design and installation at one of the NOWPHAS stations.

Key Words : Composite cable, NOWPHAS, mooring cable, seabed cable, wave observation

1. はじめに

我が国の沿岸波浪観測は、欧米諸国とは異なり、津波や長周期波などの周期の長い波の観測が可能な海底設置式センサーを中心に実施されている^{1)・2)}。海底設置式の沿岸波浪観測において、リアルタイムに波浪観測情報をモニタリングするためには、海底のセンサーから陸上観測局まで、データを伝送することが必要である。データ伝送法としては、海底ケーブルによって陸上に直接データ伝送する方式と、データ伝送用の洋上ブイまでデータを引き上げた後に無線で陸上にデータ伝送する方式とに大分される。

前者の直接方式では、海図に明示されているにもかかわらず、アンカーリングや漁具等により海底ケーブルが損傷・切断されるトラブルが後を絶たないのが現状である。このため、ケーブルの敷設にあたっては、海底が砂地盤であれば、埋設機を用いた海底下1 m程度へのケーブル埋設が行われることが

多い。しかし、ケーブルの埋設作業は高価であるばかりでなく、漁業資源に悪影響を及ぼす危険がある。また、高額を投じて埋設した海底ケーブルが、時化による洗掘や海底砂の液状化によって海底砂地盤上に露出し、その後、アンカーリング等の人為的なミスで損傷・切断されるような事例も多く発生している。このため、安全な海底ケーブルの改善が強く求められている。

後者の方式は、長期にわたり種々の海況下でも安定した海底センサーから洋上ブイまでのデータ転送が困難であったことから、これまで長期観測用としては適用困難とされていた。これは、信号伝送用の柔らかいケーブルと、ブイ係留用の高強度ケーブルとを、海底センサーとブイとの間に併設した場合、高波浪時には2本のケーブルの絡み合いによって信号伝送ケーブルが切断されてしまうためである。このため、海底ケーブルの敷設が困難な条件下におけるリアルタイム波浪監視のためには、大規模浮体構

造物を構築した高価なシステムを採用せざるを得なかった。

本稿は、こうした問題を解決するために、複合ケーブルと呼ばれる新たな構造の係留・海底ケーブルを考案・開発し、実用化に成功したことを紹介するものである。

2. 複合係留ケーブルと波浪監視計の開発

(1) 波浪監視計の構想と構造

複合ケーブルとは、信号伝送部を中心にして、その周囲を束ねられたワイヤーより線で保護した構造を持つものである。

はじめに、複合ケーブルは、波浪監視計³⁾の主要要素として、データ伝送用の洋上パイまでデータを引き上げる係留ケーブルと信号伝送ケーブルを複合させた複合係留ケーブルと呼ばれる方式で導入された⁴⁾。

図-1は、波浪監視計のシステム構成を示したものである。複合係留ケーブルを用いることによって、陸上監視局と海底設置センサーの間を、海底ケーブルで結ぶ必要がなく、簡易かつ安価に波浪をリアルタイムでモニタリングすることが可能なシステムとなった。

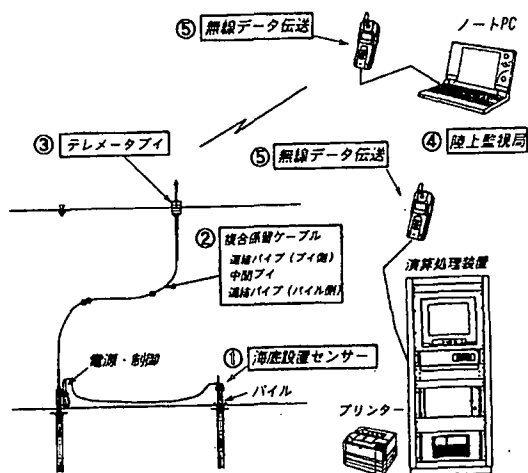


図-1 波浪監視計のシステム構成

図-2は、複合係留ケーブルの断面を、次章以降で述べる複合海底ケーブルの断面とあわせて表示したものであり、表-1は、複合係留ケーブルの基本仕様を示したものである。複合係留ケーブルを波浪監視計の主たる構成要素とする際に、もっとも注意を払ったのは、強い曲げとせん断力を受ける海底における海底設置センサーと複合係留ケーブルとの接続部分についてであった。

図-3は、海底定着部の構造を示したものである。複合係留ケーブルの中心部の信号伝送線に無理な力が加わらないように、引留固定部におけるケーブルと海底架台との固定は、複合係留ケーブルの外側のワイヤー部を強く締めて行っている。さらに引留部における極端な曲げが生じないように、海底の

ケーブルは、海底部のショック吸収機構としてのコイルスプリングと数段の連結パイプで保護される構造となっている。連結パイプによって、局部的に大きな曲げが生じないようにしながら、最大約56°までの傾斜張力に対応できる構造としている。

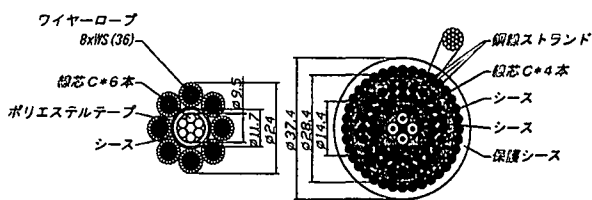


図-2 複合係留・海底ケーブルの断面

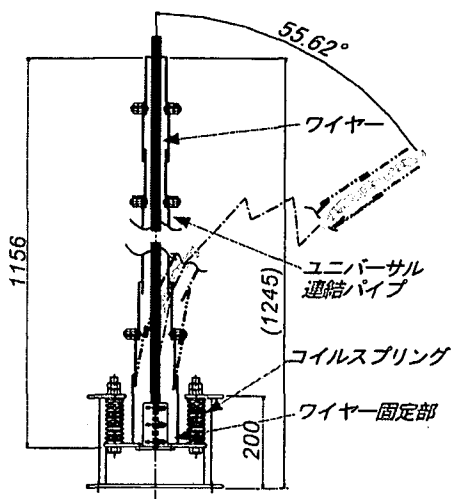


図-3 海底定着部の構造

表-1 複合係留ケーブルの基本仕様

項目	規格
形式	CW24-8-6C
構成	6芯+8・WS (36)
メッキ	亜鉛メッキ
直径	24mm
破断荷重	302KN
導体部	6芯 1.25sq
重量	2.1kg/m

(2) 波浪監視計による観測結果

こうした海底定着構造は、さまざまな現地設置事例の中から段階的に改良が進められたものである。表-2は、波浪監視計による観測実施事例を、複合係留ケーブルの海底定着法の改良の歴史とともに、各事例ごとの構造・水深・長さ・定着法に注目して、整理したものである。表中には、各波浪監視計による観測実施期間、期間中の観測最大有義波高、対応最高波高および起時を、あわせて示している。

波浪監視計に用いる複合係留ケーブルは、海底のセンサーとの定着部に連結管とコイルバネを設けて衝撃力を緩和させることによって、高波浪条件への

適用性が高まり、有義波高6.3m、有義波周期12.3秒の厳しい環境下でも、システムは正常に機能した。

表-2 波浪監視計による観測実施事例

設置地点	海底定着部構造	設置水深(m)	長さ(m)	観測期間	最大観測有義波		対応最高波		起時
					波高(m)	周期(s)	波高(m)	周期(s)	
A	連続パイプ・SP	12.5	17	7年	6.30	12.3	8.95	19.0	2002/10/02 00:
B	連続パイプ・SP	12.0	18	3年	5.38	12.1	6.61	12.0	1998/08/31 05:
C	連続パイプ・SP	10.0	15	1年	2.20	6.5	3.60	6.8	1998/07/09 11:
D	連続パイプ	16.5	22	4年	3.18	8.1	5.36	7.7	2002/04/03 23:
E	連続パイプ・SP	14.5	21	4年	2.01	5.9	3.48	5.6	2001/08/21 23:
F	網に添わせ	13.5	30	1年	1.51	5.0	3.44	5.6	1999/05/27 08:
G	連続パイプ・SP	12.5	17	9月	1.35	4.5	3.15	2.9	1999/10/27 10:
H	連続パイプ・SP	45.0	60	8月	4.92	9.8	7.97	15.1	2001/08/21 22:
I	連続パイプ	45.0	60	8月	3.43	9.5	5.51	9.6	2002/09/05 07:

SP:ショック吸収機構に設けられたバネを装備

3. ナウファスにおける海底ケーブルのトラブル

沿岸波浪観測における海底ケーブルのトラブルが体系的にとりまとめられている事例は、今までに報告されてはいない。これは、波浪観測が多くの異なる機関によって実施されていること、観測担当機関の多くは観測におけるトラブルを積極的に公表しようとはしないこと、観測データの測得状況を含めた沿岸波浪観測情報が、ネットワーク情報として広く公開されている事例が少ないこと、などによるものである。

表-3 ケーブル切断によるナウファス長期欠測(概ね最近10年間100日間以上のものを抽出)

地点名	機器設置水深	欠測期間
秋田	29.5m	1995.11.-1996.2.
金沢	20.2m	1994.2.-1994.6., 2000.12.-2001.10.
福井	21.3m	1994.6.-1994.10.
柴山	42.0m	1997.5.-1997.10., 1999.5.-2000.1.
浜田	51.0m	1995.5.-1996.11.
玄界灘	41.0m	2002.5.-2002.12.
伊予島	30.0m	1994.10.-1995.3.
むつ小川原	49.0m	2000.8.-2001.3.
宮古	49.0m	1993.11.-1994.3., 1997.2.-1997.12.
釜石	49.0m	2000.1.-2000.5.
石巻	20.0m	1997.12.-1999.1.
相馬	16.0m	1993.12.-1994.5.
小名浜	20.0m	1996.12.-1997.6.
常陸那珂	30.0m	1993.2.-1993.12.
鹿島	23.4m	1995.1.-1995.9., 1998.3.-1998.7.
波浮	49.0m	2000.7.-2001.1., 2002.9.-2003.3.
室津	30.0m	1992.12.-1993.8., 1995.7.-1996.8.
宮崎	29.0m	2000.10.-2001.2.
那覇	51.0m	1997.9.-1998.3., 2001.11.-2002.5.
平良	25.2m	1998.12.-1999.7., 2002.7.-2003.2.

こうした中で、国土交通省港湾局関係機関が構築・運営しているナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)では、毎年の波浪観測年報で、各観測地点における観測状況が明示されている。また、5年毎を

目途に刊行されている観測施設台帳⁵⁾において、海底ケーブルのルートや設置条件が示されるとともに、やはり5年毎を目途に刊行されている長期統計報⁶⁾において、長期にわたる欠測期間も観測地点ごとに整理されており、海底ケーブルに関するトラブルの抽出が比較的容易である。

表-3は、ナウファスにおける最近発生した海底ケーブル切断に伴う長期欠測期間を抽出したものである^{7)・8)}。表中には、海底ケーブル切断後、システム復旧に至る欠測期間を、海底設置センサーの水深とともに示している。各観測地点の海底ケーブルの延長と経路に関しては、文献5)を参考に詳しく示している。抽出事象には漏れがある可能性も大きい。海底ケーブルの切断事故に伴う沿岸波浪観測情報の中断は、きわめて多くの観測地点で頻繁に発生している。波浪観測におけるケーブル改善の必要性が叫ばれる所以である。

4. 玄界灘における複合海底ケーブルの適用

(1) 波浪観測システム

複合海底ケーブルは、ナウファスの一つの観測地点であり九州地方整備局博多港湾・空港事務所が管轄する玄界灘波浪観測システムで、初めて導入された。以下に、この現地施工記録について紹介する。2002年5月に発生した海底ケーブル切断事故後、ただちに水深30mの中継架台と水深45mの海象計設置箇所との間の延長800mの区間に対し、新しい海底ケーブルの設計・施工がなされた。図-4は、センサー・海底ケーブル・観測局の位置を、ケーブルの切断箇所とともに示したものである。なお、玄界灘では、海底設置波浪観測センサーとして、1997年以降、沖波の方向スペクトルの観測が可能な海象計⁹⁾が導入されている。

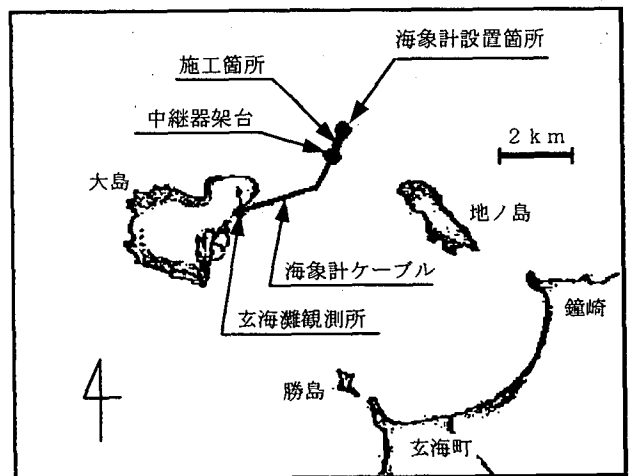


図-4 海象計・海底ケーブル・観測局設置位置図

(2) 複合海底ケーブルの設計と製作

複合海底ケーブルの設計にあたっては、以下の条件が考慮された。

- ① 中心の信号電送部は既存ケーブルと同じ外径14.4mmのものを採用し、既設の中継架台や海象計へ

の接続配線上の問題を避けることとした。

②切断されにくい構造とするため、引張強度を極力強くした。

③海底におけるケーブルのキンクや浮き上がりを避けるため、また、施工性を向上させるため、曲げに柔軟に対応する構造とした。

④漁業資源に悪影響を与えないよう埋設工事を避けた。このため、比重を3以上とし、高波浪時に液状化する砂地盤中に自沈することを期待した。

表-4に、複合海底ケーブルの諸元を、従来の非鎧装ケーブルや鎧装ケーブルと比較して示す。ここで、曲げ剛性力 B (Nm^2)とは、ケーブルの柔軟性を示す指標であり、片持ち梁に印荷した際の変位量 y を求めることによって、式(1)で算定することができる。すなわち、 B が小さい値を示すほど、ケーブルは柔軟性に優れた構造である。

$$B = (L^3 / 3) \cdot (F / y) \quad (1)$$

ここに、 L は片持ち梁のスパン(m)であり、 F は、印荷加重(N)である。 B を算定するための室内試験は、JIS-C-6851(光ファイバーケーブル特性試験法：平成13年3月20日制定)に示す19.4方法E17Bに準拠して実施した。表-4に示されるように、複合海底ケーブルの曲げ剛性力は $5.6Nm^2$ であり、従来の沿岸波浪観測で最も汎用的に採用されている1重外装ケーブルの半分以下の値となっている。反面、複合海底ケーブルの引張強度は極めて高く、1重外装ケーブルの10倍以上、特殊な場合に採用されている2重外装ケーブルの4倍以上の強度を示している。

表-4 複合海底ケーブルの基本仕様

種類	外径(mm)	空中重量(kg/m)	引張強度(kN)	比重	曲げ剛性力(Nm ²)
非鎧装ケーブル	14.4±1.0	0.28	2.3	1.7	0.12
1重鎧装ケーブル	26.8±3.0	1.73	43.0	3.0	13.8
2重鎧装ケーブル	39.2±4.0	4.20	110.0	3.4	37.4
複合海底ケーブル	37.4±3.7	3.42	480.0	3.1	5.6

図-5は、複合係留ケーブルの製作・設置作業フローを示したものであり、図-6は複合海底ケーブルの製作長を示したものである。中継架台や海象計架台における接続にあたっては、将来のメンテナンスを行ないやすいように、船上に計器等を引き上げることができるように、それぞれ80mづつのケーブル余長を非外装構造として確保している。ただし、海底ケーブルに引張外力が作用した場合には、外力は非外装部には伝わらず、架台が直接受けとめることができるように、外装部の端部を複数箇所架台と一体化するように強く締め付けた。

写真-1は、複合海底ケーブルの工場試験の状況を示したものであり、①耐電圧試験および②寸法試験を、それぞれ紹介している。

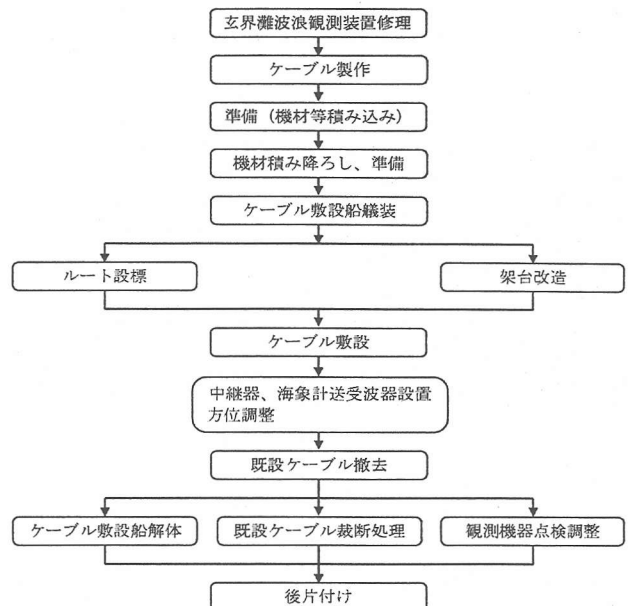


図-5 複合海底ケーブルの製作・設置作業フロー

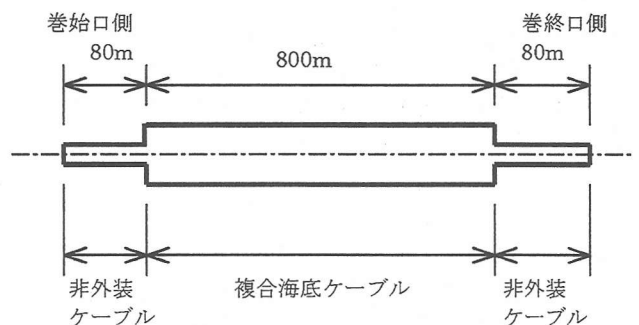
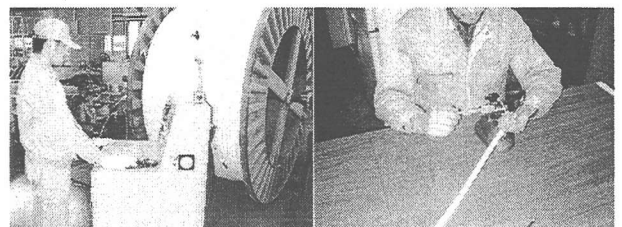


図-6 複合海底ケーブルの製作長



(1)耐電圧試験 (2)寸法試験

写真-1 複合海底ケーブルの工場試験

(3) 海底ケーブル復旧工事の概要

複合海底ケーブルは、工場製作・検査後、2002年12月14日に敷設作業が完了した。既存の外装ケーブルとは異なり、しなやかに曲げることができる柔構造であるため、冬季の厳しい環境下にもかかわらず、施工が容易に行われ、敷設作業はわずか実質5時間で完了した。その後、波浪観測は欠測なく順調であり、本ケーブルの安定性が確認されている。

図-7は、施工の概念を紹介したものである。複合海底ケーブルの設置にあたっては、特に端部処理に注意を払った。図-8は、複合海底ケーブルの端部処理法を模式的に示したものである。

写真-2は、ケーブル敷設船による作業状況を紹介したものであり、①作業の全容、②甲板上的状況、③ドラムからのケーブルの繰り出し、④ケーブルの海底への落とし込み、の状況をそれぞれ示している。写真-3は、複合海底ケーブルの端部施工の状況を、①海中溶接部、②端部の固定部、についてそれぞれ示したものである。

ケーブルを繰り出すドラムの必要外径は、一般にケーブル外径の16倍以上とされているが、複合海底ケーブルは、既存の1重あるいは2重外装ケーブルよりもフレキシブルな構造であるため、必ずしも16倍以上としなければならない必然性は小さかったが、専用のドラムがなかったため、今回の施工では、2重外装ケーブル用のドラムをそのまま用いた。

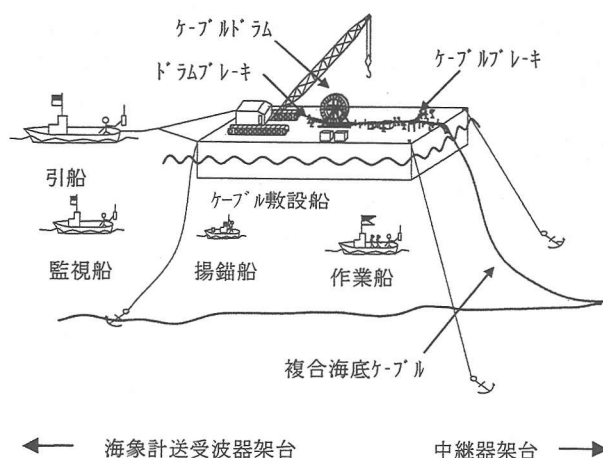
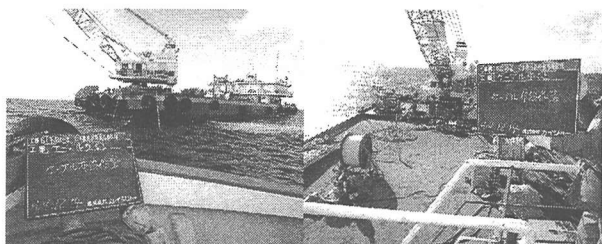
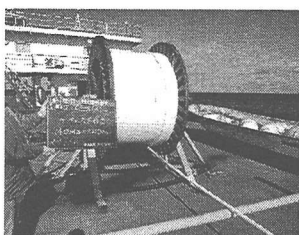


図-7 施工概念図

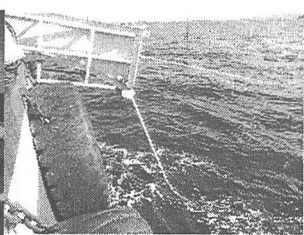


(1) 全容

(2) 甲板上

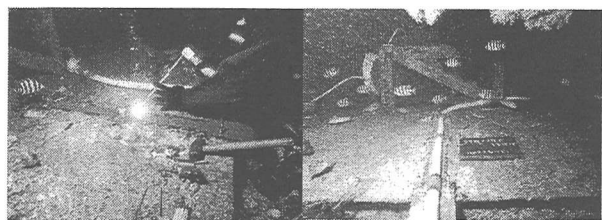


(3) ドラムからの巻出

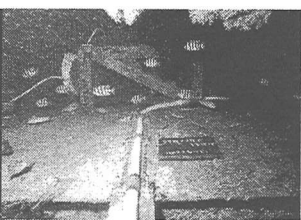


(4) ケーブルの海底への落とし込み

写真-2 ケーブル敷設船による作業状況



(1) 海中溶接



(2) 端部の固定

写真-3 複合海底ケーブルの端部施工

(4) 観測復旧後の波浪観測記録とケーブルの状況

図-9は、観測再開後の玄界灘観測点における有義波高・周期の経時変化を、本稿執筆時に至るまでの最も高い有義波高を観測した2003年1月29日4時の観測値と(有義波高5.05m, 有義波周期8.3s: 対応最高波高7.46m, 対応最高波周期8.0s), 最も高い最高波高を観測した2003年2月20日10時の観測値を(有義波高4.30m, 有義波周期8.7s: 対応最高波高7.64m, 対応最高波周期8.8s)それぞれ含む概ね

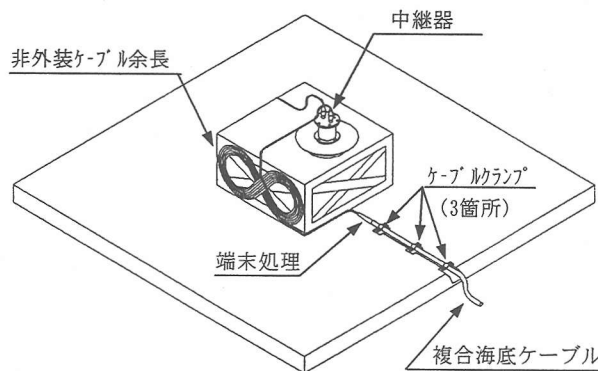


図-8 複合海底ケーブルの端部処理

1か月間の有義波高・周期の経時変化を示したものである。陸上部システム調整が完了した2002年12月18日の観測再開後は、欠測なく高波浪時の記録も順調に測得されていることがわかる。

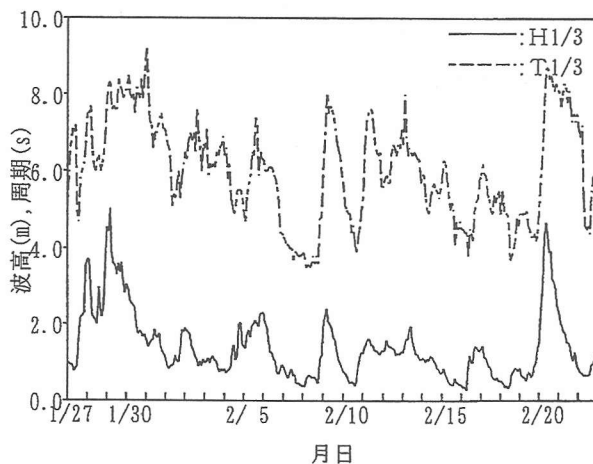


図-9 有義波高・周期の経時変化図 (2003.1-2)



写真-4 海底ケーブル追跡調査(2003. 3. 26)

写真-4は、2003年3月に行なわれた海底ケーブルの追跡調査成果の一部である。ケーブルの海底砂地盤への自沈はまだ不十分であり、完全に埋没するには至っていなかった。しかし、ケーブルの位置は安定しており、キंक現象は見られなかった。

5. おわりに

全国の沿岸波浪観測情報は、リアルタイムで気象情報と統合され、精度と信頼性の高い波浪予測が全国沿岸で実施されている。また、海洋工事などが行なわれている海域では、こうした全国ネットワークと、オンサイトで観測された波浪・潮位・越波流量などの値とを統合することによって、より安全で確実な沿岸域の開発や利用が、多くの海域で実践されている¹¹⁾、¹²⁾。しかしながら、こうした沿岸波浪情報の信頼性は、海底ケーブルや係留ケーブルに負うところが多く、ケーブルの切断や損傷によって必要な波浪観測情報が入手できなくなる事態も、現実には数多く発生している。

振り返るに、現在、我が国の沿岸波浪観測で最も汎用的に用いられている外装ケーブル(特に1重外装ケーブルの使用例が多い)は、40年以上も前に開発が行なわれたものである。その後の沿岸波浪観測や波浪観測情報の活用に関する飛躍的な進歩発展¹⁾に対応した開発・改良は、必ずしも十分とは言えなかった。ここで紹介した複合ケーブルは、今後の沿岸波浪観測の信頼性をより一層高めるために大きな貢献を果たすことが期待されるので、今後とも、著者らは、複合ケーブルの普及と改良に努めていきたいと考えている。

最後に、複合ケーブルの開発と実用化は、2002年4月に定年退官された菅原一晃氏(前独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部主任研究官)のご発案によって、検討が始められたものであったことを紹介する。あわせて、本稿のとりまとめにあたっては、ナウファスの定常的な運営にご尽力頂いてい

る(社)海洋調査協会、(財)沿岸開発技術研究センター、(株)エコーおよび沿岸海洋調査(株)のご担当の方々に、資料提供と図表のとりまとめをして頂いたことを述べ、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 合田良実監修, 海象観測データの解析・活用に関する研究会編集: 波を測る(沿岸波浪観測の手引き), (財)沿岸開発技術研究センター, 212p., 2001.
- 2) 永井紀彦・橋本典明・川口浩二・佐藤和敏・菅原一晃: ナウファスの連続観測化による我国沿岸の長周期波の観測, 港湾技術研究所報告第38巻第1号, pp.29-69, 1999.
- 3) 菅原一晃・永井紀彦・橋本典明・鈴木高二朗・清水康男・波間雅晶: 波浪監視計の開発, 港湾技研資料 No.860, 25P., 1997.
- 4) 菅原一晃・永井紀彦・清水康男・波間雅晶: 波浪監視計の改良と活用範囲の拡張, 海洋調査技術第11巻第2号, 海洋調査技術学会, pp.37-41, 1999.
- 5) 菅原一晃・佐藤和敏・永井紀彦・川口浩二: 全国港湾海洋海象観測施設台帳(ナウファス施設台帳Ⅲ), 港湾技研資料 No.941, 49P.(付録339P.), 1999.
- 6) 永井紀彦: 全国港湾海洋波浪観測30か年統計(NOWPHAS 1970-1999), 港湾空港技術研究所資料, No.1035, 388p., 2002.
- 7) 永井紀彦・佐藤和敏・菅原一晃: 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2000), 港湾空港技術研究所資料 No.1017, 423P., 2002.
- 8) 永井紀彦・小川英明: 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2001), 港湾空港技術研究所資料 No.1041, P86., 2003.(各港波浪観測統計図表はCD-ROM化)
- 9) 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫: 水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発, 海岸工学論文集第42巻, 土木学会, pp.1081-1085, 1995.
- 10) Nagai, T.: Development and Improvement of the Nationwide Coastal Wave Observation Network, Techno-Ocean'2002, Paper-TI-1-2, 4p., 2002.
- 11) 菅原一晃・永井紀彦・平石哲也・清水康男: 簡易かつ安価なオンサイト海象観測システムの構築をめざして, 第29回土木学会関東支部技術研究発表会講演集, pp.252-253, 2002.
- 12) 永井紀彦・平石哲也・服部昌樹・清水康男: オンサイト越波計の開発について, 第14回研究成果発表会講演要旨集, 海洋調査技術学会, pp21-21, 2002.