

(100) 海上自衛隊横須賀消磁施設の設計・施工

(株)ピー・エス 東京支店 正会員 ○松本 吉正
 (株)ピー・エス 本社 正会員 川本 幸広

1. まえがき

本消磁施設は、磁気機雷掃海艦の磁界測定を行うためのものであり、横須賀消磁所の消磁施設整備工事の一環として海中に建設されたPC構造物である。この消磁施設は図-1に示すように水中局部とループ部に分けられており、水中局部は杭、受梁および主梁から構成され、ループ部は杭とループ梁から成り立っている。そして、それらはプレテンション方式のプレキャスト製PC杭および各種PC梁を現地の海中に設置し、それらを接合することにより一体構造とするものである。また、これらの構造物は消磁施設としての使用目的上、構造物自体を低磁性とすることが要求され、そのため施工においては、各部材を構成する建設材料も低磁性のものを選定し使用する必要にせまられた。その結果、コンクリート用骨材は鉄分の少ない低磁性の骨材、鉄筋は低磁性鋼、そして緊張材にはより線状の炭素繊維系FRPを使用することとした。

本論文は、この水中局の上部工である受梁と主梁、およびループ部のループ梁について、非磁性PC構造物という観点より、それらの設計と施工について報告するものである。また、梁の製作時において実施した実物主梁の曲げ載荷試験結果についても記述する。

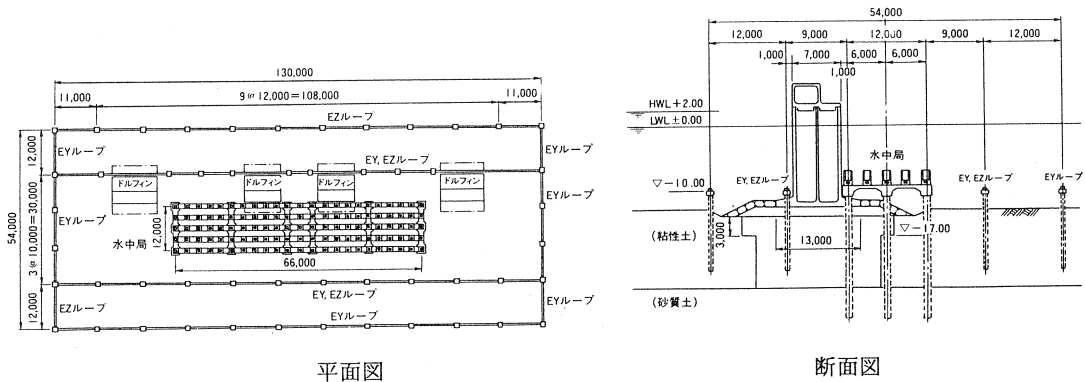


図-1 消磁施設

2. 使用材料

本構造物に使用する材料は力学的特性を満足するだけでなく、その使用目的上、①：比透磁率…1.027以下
 ②：電気抵抗率… $65 \mu \Omega \text{cm}$ 以上、の条件を満たすものでなければならない。

コンクリートは、鉄分の少ない骨材を選定し製造した。そのコンクリートを用いて製作した梁の平均透磁率の測定結果は、1.003であった。

鉄筋の代替材料として使用したハイマンガン鋼は低磁性鋼材であり、力学的特性も普通鉄筋と比べて高靱性、高強度である。

表-1に、ハイマンガン鋼と普通鉄筋の材料特性の比較を示す。

緊張材には、CFRPより線を使用した。CFRPより線は、炭素繊維系FRPをより線状に加工したもので、非磁性、軽量、耐食性材料である。また、PC鋼より線以上の引張強度を有し、コンクリートとの付着性能の高い材料であるので、本構造物のような使用目的のプレテンション方式の緊張材には最適であると

判断した。しかし、CFRPより線は降伏点を持たない材料であり、かつその弾性係数もPC鋼より線の2/3程度であり、従って、それを使用した部材の力学的挙動はPC鋼より線を使用したものと比べて異なった性状を示すと考えられる。

表-2に、CFRPより線とPC鋼より線の材料特性の比較を示し、写真-1に、CFRPより線の形状を示す。

また、海中下における腐食を考慮し、部材に埋め込まれるアンカーボルトも非磁性、耐食性材料とする必要があり、力学的特性、化学的特性、および経済性を総合的に判断し、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304Lを使用することとした。

3. 消磁施設的设计

本消磁施設の水中局部、ループ部のPC梁についてはII種PC部材として表-3に示す荷重条件で検討した。

設計は通常のPC桁と同じ許容応力度法で行い、設計荷重に対する検討時期はプレストレス導入直後、桁架設時および海中設置後の3段階とした。なお、桁架設時には、水中局受梁の現場施工後、PC梁に検知器収納ボックスあるいは杭頭キャップ等を取り付けた状態のことである。

(1) 水中局部梁

水中局受梁の構造図を図-2に示す。受梁は2径間連続梁として断面力を算出したが、プレテンション部材であるため、緊張材は1受梁当たり40本のφ12.5 CFRPより線を直線に配置した。従って、プレストレスは短形断面に対して軸力としての導入となり、導入緊張力は約350 tfであり、そのプレストレスは約35 kgf/cm²である

水中局主梁の構造図を図-3に示す。主梁は3 m間隔に配置される磁気検知器収納ボックスを固定するための部材であるので、安定性、浮力等を考慮して断面形状は短期の中空断面とした。主梁の設計は梁長が14.97 mと7.6 mの2種類について行い、緊張材はCFRPより線φ12.5をそれぞれ15本および8本配置した。また、梁

上面にはボックス固定用のインサート(M16用、プラスチック樹脂製)を埋め込み、下面には受梁と固定するためのアンカープレート(t=8, SUS317L製)を配置した。

(2) ループ部

ループ部主梁は水中局の周囲に配置されたループケーブルを格納する梁であるため、U字形の形状とし、上部にRC製のフタを設置する構造とした。杭頭キャップとの固定方法は水中局と同様にSUS317L製のインサー

表-1 鉄筋の材料特性の比較

	低磁性鉄筋 (ハイマンガン鋼)	普通鉄筋 (JIS SD345)
0.2%耐力 (N/mm ²)	383~429	345~440
引張強度 (N/mm ²)	804~845	≥490
伸び (%)	52.8~56.3	≥18.0
比透磁率	1.006程度	2000~4000
電気抵抗率 (μΩcm)	68.3	13.0

表-2 緊張材の材料特性の比較

	CFRPより線 (CFCC 1×7)	PC鋼より線 (SWPR7A)
呼び径 (mm)	φ12.5	φ12.4
公称断面積 (mm ²)	76.0	92.9
単位重量 (kg/m)	0.158	0.729
引張強度 (N/mm ²)	1868	1720
降伏点強度 (N/mm ²)	—	1470
破断時伸び (%)	1.6	≥3.5
弾性係数 (N/mm ²)	137000	196000
付着強度 (N/mm ²)	723	285
比透磁率	1.000	2000~4000
電気抵抗率 (μΩcm)	3000	12

1×7 12.5^φ

写真-1 CFRPより線の形状

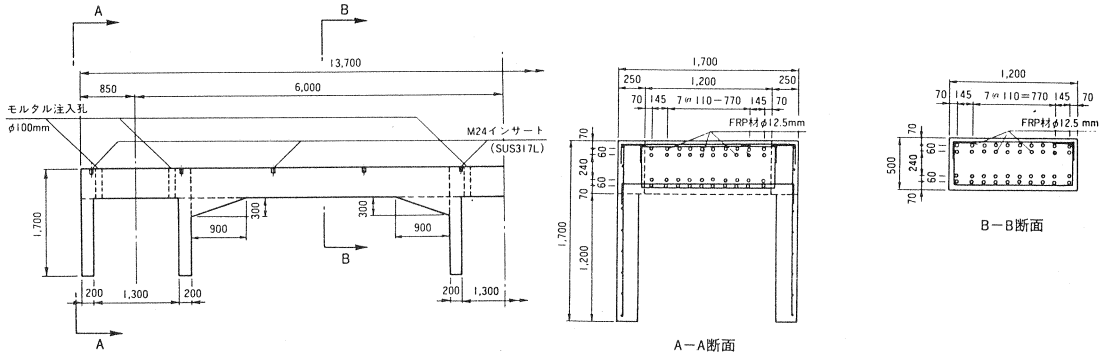


図-2 受梁詳細図

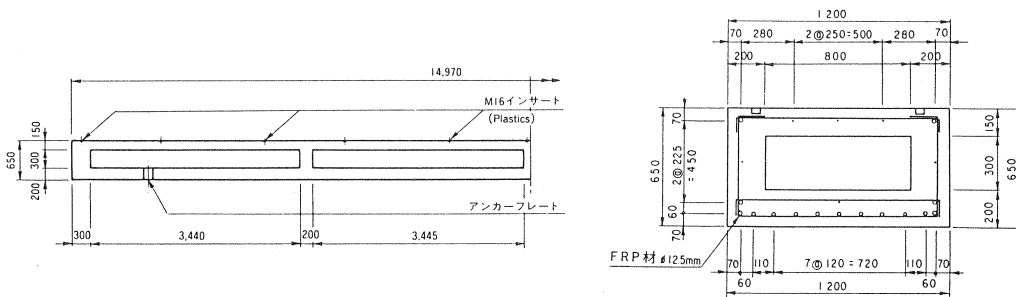


図-3 主梁詳細図

トを杭頭キャップに埋め込み、アンカーボルト等を使用し
て行うこととした。なお、ドルフィンの設置位置との関係
で杭の打設位置が決定されたため、主梁の長さは6.0 m～
16.0mの8種類となった。コーナー部のループケーブルは
半径2.0 mで配置されるため、コーナー部の主梁は上部の
ウェブ部分を切欠いてU字形のFRP製トラフを主梁に取り
付ける方法で対応した。ループ部主梁の各詳細図を図-
4に示す。

表-3 荷重条件

項 目	単位	荷重値
コンクリート (空中)	t/m ³	2.500
〃 (海中)	〃	1.470
海水	〃	1.030
潮流力	t/m ²	0.200
EYループケーブル (海中)	kg/m	6.280
EZループケーブル (〃)	〃	4.030
磁気探知機 (空中)	kg/ヶ	45
砂 (海中)	t/m ³	1.000

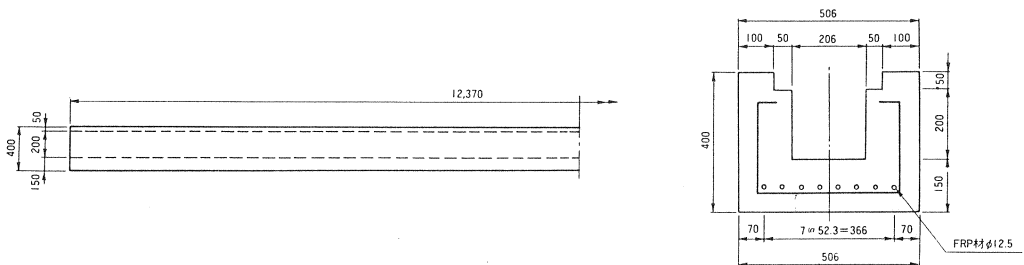


図-4 ループ主梁詳細図

4. 消磁施設の施工

(1) 水中局工

水中局受梁、主梁および検知器収納ボックス据付工事の施工手順を図-5に示す。水中局受梁は、現地ヤードに搬入後、杭頭キャップ部のボックスを現場で施工した。受梁および主梁等の据付け作業は、130 t吊り起重機船でそれらを積み込んだ台船を現地へ曳航し、同じ起重機船を使用して海中に据え付けた。受梁とPC杭は、受梁をPC杭に設置後、受梁ボックス部の壁材とPC杭との空隙部(約200 mm)に無収縮モルタルを充填し結合した。従って、PC

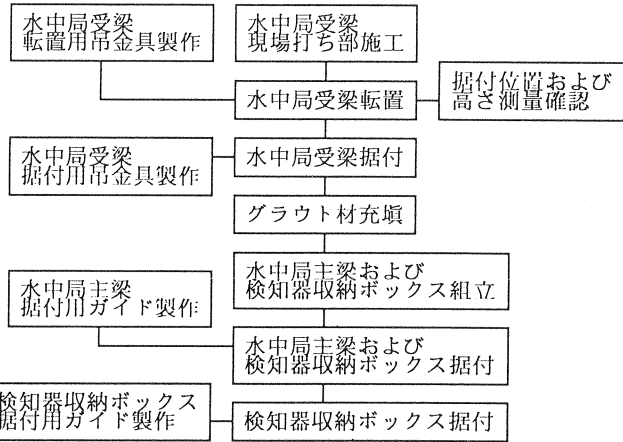


図-5 水中局施工手順

杭上面にはφ100 mmのモルタル注入用孔を各ボックス部に予め設けるものとした。受梁の据付け時の微調整は吊りワイヤーにロープを掛けて行い、据付け終了後、潜水士がケーソンとの離れ、法線とのずれおよび高さ等を測定し、規格内に良好に据付られている事を確認した。

(2) ループ工

ループ部主梁および杭頭キャップ据付工事の施工手順を図-6に示す。杭頭キャップの据付けは、キャップを個々に据付けた場合キャップの通りを確保することが非常に困難な作業となるので、図-7に示すように事前に陸上でキャップと主梁を先に組み立ててから海中にて据付けた。この方法を用いることによって、キャップの通りを容易に合わせることができ、キャップおよびループ主梁の据付けに要する時間を短縮することができた。杭頭キャップ内のPC杭との空隙部は、水中局と同様にコンクリートポンプを使用して、無収縮モルタルを充填した。ループ主梁の据付けは、125 tクレーン付き台船を使用して実施した。水中での誘導および微調整は潜水士によって行なわれ、キャップおよび主梁が所定の位置や高さに据付けられていることを確認した。

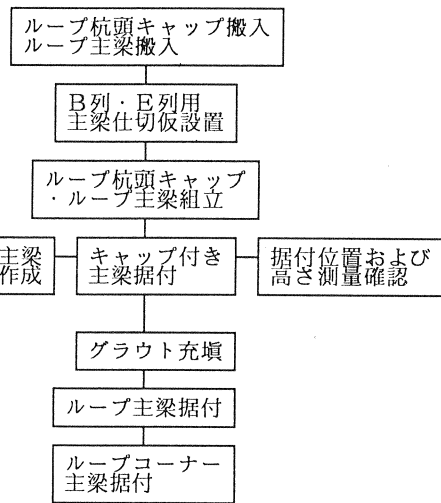


図-6 ループ局施工手順

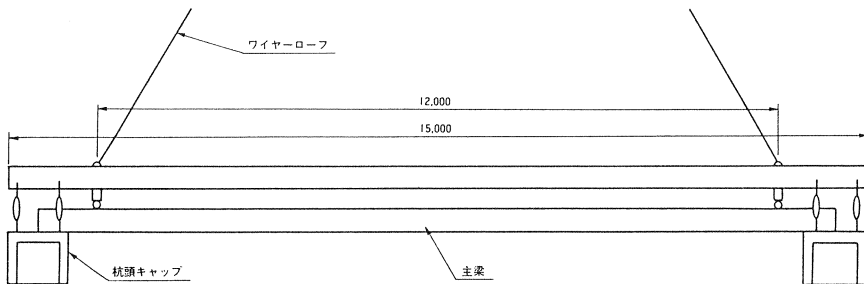


図-7 ループ梁の据付け状況

5. 主梁の曲げ載荷試験

降伏点を持たないCFRPより線を緊張材に使用した部材が、計算値とおりに挙動することを実証すると同時に、緊張材の弾性係数に影響されるひび割れ幅とひび割れ発生後のたわみの特性を解明することを目的に、15m級主梁を用いて曲げ載荷試験を実施した。図-8に載荷状況を示す。

表-4にひび割れ発生時、表-5に曲げ破壊時の諸数値の比較を示す。ひび割れ発生時までは、全断面有効として扱うことができるので、II種PCの設計で何ら問題はない。一方、曲げ破壊時には、緊張材に降伏点が存在しないためPC鋼より線のような急激なひずみ増加は起こらず、上縁コンクリートが圧縮破壊を引き起こす前に、CFRPより線の引張破断となる。しかし、その場合でも表-5に示すように計算値と非常に良く合致し、その挙動は十分設計可能であると考えられる。

ひび割れ幅は、以下に示す土木学会式により推定する。

$$w = k \times \{4 \times c + 0.7 \times (C_s - \phi)\} \times \frac{\sigma_{pe}}{E_p}$$

kは緊張材の付着に関する係数であり、付着性状の大きいものほど小さい値を用いる (k ≥ 1.0)。

また、各種材料を付着力の大きさで比較すると、CFRPより線 > 異形鉄筋 > PC鋼材であり、異形鉄筋は最低値である1.0を使用するのでCFRPより線もk=1.0により計算した。その計算値と本試験における実測値の比較を図-9に示す。結果的には、計算値の方が0.025~0.03mm程度大きい値となっているが、安全側の設計となるので本構造においてはk=1.0を用いればそのひび割れ幅の設計が可能であると推察する。

たわみ量の計算値は、Branson式により求める。以下に示す換算断面二次モーメントの計算式 $I_e = (M'_{cr}/M')^n \times I + \{1 - (M'_{cr}/M')^n\} \times I_{cr}$

においてn=2.5として計算し、実測値と比較すると図-10のようになり、比較的良く合致する。これは、PC鋼材の場合は一般にn=3を用いるが、CFRPより線はPC鋼材のように降伏後の伸びが期待できないので、見掛け上の曲げ剛性が低下しないとし、換算断面二次モーメント値をPC鋼材の場合よりも評価しようとするものである。

従って、この構造形式においてはn=2.5とすれば、ひび割れ発生後のたわみ量を推定できる。

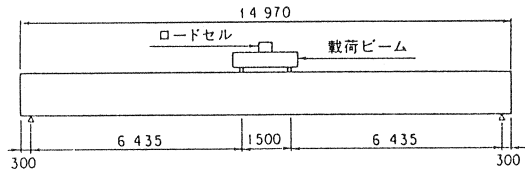


図-8 載荷状況

表-4 ひび割れ発生時の諸数値の比較

項目	計算値	実測値		
		平均	最大~最小	
ひび割れ発生荷重 (kgf)	10714	10500		
コンクリートひずみ ($\times 10^{-6}$)	上縁	145	128	155~113
	下縁	-135	-132	-159~-113

表-5 曲げ破壊時時の諸数値の比較

項目	計算値	実測値		
		平均	最大~最小	
ひび割れ発生荷重 (kgf)	26993	27750		
コンクリートひずみ ($\times 10^{-6}$)	上縁	1214	1439	1592~1289
緊張材ひずみ ($\times 10^{-6}$)	下縁	8407	7367	8268~6459

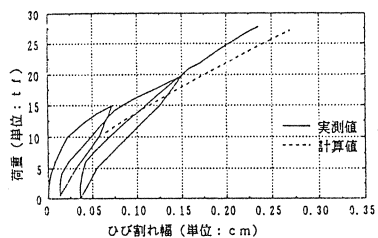


図-9 ひび割れ幅の比較

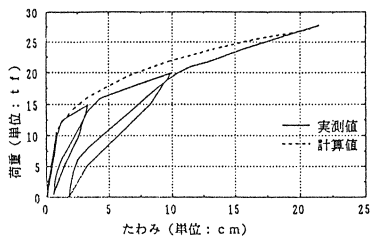


図-10 たわみの比較

6. あとがき

一般に海洋構造物はその厳しい自然環境から通常の構造物より高い耐久性が要求されるが、今回の構造物は更に非磁性の要素が要求され、材料の選定には十分に留意した。

今後のPC構造物の在り方を考えると、本文に取り上げたような非磁性等、使用目的の多様化が進むと考えられる。従って、そのような要求に応えるためには、従来からのコンクリートと鋼材だけの組合せにより構造物を設計することは困難となり、その目的に応じた材料を選定する必要がある。しかし、その選定には使用する材料の基本的性質、信頼性、使用実績、あるいは施工法や経済性等を十分把握し、決定しなければならない。

その意味では、本消磁施設は、ハイマンガン鋼、CFRPより線、ステンレス鋼等の新しい素材をその施工材料として使用し、得意な目的の構造物を施工した貴重な実績であると考え。特に、PC構造物の主材料である緊張材の代替材料として、繊維系FRPの一種であるCFRPより線を全面的に使用したことは、本構造物の貴重な特徴である。CFRPを含む繊維系FRPの研究は、近年来より、塩害対策の一環としてPC構造物の鋼材代替材料の開発として各方面で行われてきているが、非磁性の性質を全面的に利用したのは今回の消磁施設が始めてである。

今後、非磁性構造物を計画するに当たっての課題は繊維系FRP(新素材)を使用したコンクリート部材の構造特性の研究、示方書の整備を含めた設計法・施工法の確立、経済的な材料の供給体制を図っていくことが重要であると考え。

最後に、本工事は、五洋建設(株)・(株)浅川組・(株)ピー・エスのJVにより施工されたものである。そして、本工事の御発注元であると同時に、その設計・施工にあたり御指導いただいた横浜防衛施設局に感謝の意を表するとともに、本報告が今後計画される非磁性構造物の設計上の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会連続繊維研究小委員会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートライブラリー72
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート工学，Vol.29，No.11 1991
- 3) 山下武秋，木内武夫，犬飼晴雄，岩崎達彦：新素材によるPC橋-新宮橋の建設，プレストレストコンクリート，Vol.31，No.2，pp.71~78，MAY-JUN.，1989
- 4) 片岡真二，二宮 理，酒井徳久，中村 修：炭素繊維で補強されたCFRP栈橋の試験施工，橋梁，Vol.29，No.5，pp.19~24，1993
- 5) 本間雅人，丸山武彦，榎本 剛，島 弘：CFCCの付着応力-すべりに関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，第13巻第2号，pp.823~826，1991