

## FRP製大型海洋構造物の実用性能に関する検討

## A Study of the Actual Performance of a Large-Scale Marine Structure Made of FRP

小牧 秀之\*

池田 哲史\*\*

Hideyuki KOMAKI

Tetsufumi IKEDA

**ABSTRACT** The performance in actual use of a large-scale marine structure made of FRP was studied. A full-size four-piling dolphin for a 500-ton tanker was designed and manufactured on a trial basis using FRP structural components. After the fiber orientation was studied for the design of the FRP components, the C-shape and H-shape components were made from carbon fiber and glass fiber by means of pultrusion molding and the rectangular components by means of filament winding. When the mechanical properties of the FRP components were tested, all of the components met the design targets. Next, a full-size dolphin was assembled from the FRP components and evaluated with a three-dimensional twist test and two-dimensional loading test. The results confirmed that this FRP dolphin has the same properties as the design.

**Keywords :** FRP, 海洋構造物, 引拔成形

FRP, marine structure, pultrusion molding

## 1. はじめに

エジソンが発明した電球用フィラメントが、炭素繊維の最初の実用例として有名であるが、1960年代以降炭素繊維の工業生産が確立され、1970年代に入り宇宙航空用途やスポーツレジャー用途への利用が普及することによって新素材としての地位を築き上げた。また1990年代に入り産業用途やコンクリート構造物補修・補強用途への利用が急激に拡大し、もはや一般的な材料として認められつつある。炭素繊維はガラス繊維等と同様に樹脂を含浸させた複合材料(FRP)として使用されるが、他の材料と比較して、軽量・高強度・高剛性・高耐食性等の特徴を有している。

土木構造物に対しては、従来から鉄鋼やコンクリートが材料として主に使用されているが、耐候性や耐食性の観点での課題が近年取り上げられるようになってきた。また構造物のライフサイクルについても注目されるようになり、構造物の長寿命化が望まれ、高耐候性や高耐食性を有する新材料への期待も高まってきている。また軽量・高強

度・高剛性の特徴を有効に活かして市場が拡大した構造物の補修・補強用途と同様に、一次構造物へとしてのFRP製部材の適用が期待されている。

本研究では、炭素繊維を含めたFRP製大型部材の土木構造物への適用について検討を行った。具体的には、FRPの特徴を適切に反映できる耐候性や耐食性の点で厳しい環境下にある大型海洋構造物への適用を目標に、4本杭形式の500Tタンカー用綱取りドルフィンを対象とし、FRP製大型部材による実寸ベースでの構造物設計および試作を行い、FRP製大型部材の成形技術開発および実用性能について検討を行った。またこのFRP製大型部材を組立て実寸サイズのドルフィンを試作し、3次元ねじり剛性試験および2次元載荷試験によって構造物としての実用性能について評価した。

## 2. 全体設計

対象とした構造物は500Tタンカー用綱取りドルフィンである。構造物の形式は4本杭形式とした。各部材の寸法は実物大とし、海底部より上部のみを対象とした。設計は、港湾の施設の技術上の基準・同解説(日本港湾協会)<sup>[1]</sup>および道路橋示方書・同解説(日本道路協会)<sup>[2]</sup>に準じた。設計条件の一覧を表-1に示し、綱取りドルフィ

\*工修 日石三菱(株)中央技術研究所 主任

(〒231-0815 横浜市中区千鳥町8)

\*\*工修 日石三菱精製(株)横浜製油所 参事

(〒221-0021 横浜市神奈川区子安通3-390)

ン全体図を図-1に示す。

この全体設計をもとに、部材として使用するC型、H型、および角型部材の設計を行った。部材の試作においては、積層構成の決定、および部材成形の検討を行い、実寸ベースでの構成部材の評価試験を実施した。

表-1 大型構造物設計条件

| 項目                       | 値                  | 備考               |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| 一般項目 [m]                 |                    |                  |
| H.W.L                    | KP+2.0             |                  |
| L.W.L                    | KP±0.0             |                  |
| 海底面                      | KP-1.0             |                  |
| 材料の長期許容応力度 [MPa]         |                    |                  |
| SS400                    | 137.2              | 圧縮 <sup>*1</sup> |
|                          | 137.2              | 引張               |
|                          | 137.2              | 曲げ               |
|                          | 91.8               | せん断              |
| 炭素繊維                     | 127.4              | 圧縮 <sup>*1</sup> |
|                          | 245.0              | 引張               |
|                          | 127.4              | 曲げ               |
| 弾性率 [N/cm <sup>2</sup> ] |                    |                  |
| SS400                    | $2.06 \times 10^7$ |                  |
| 炭素繊維                     | $6.86 \times 10^6$ |                  |
| 綱取り荷重 [kN]               | 147.1              |                  |
| 長期許容変位量                  | 70mm               | KP+4m            |

\*1：座屈は考慮せず

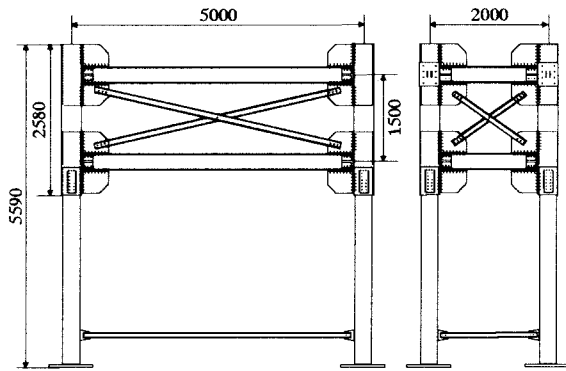


図-1 タンカー用綱取りドルフィンの全体図

### 3. FRP製部材の開発

#### 3.1 C型およびH型部材の作製

構成部材のうち、C型およびH型部材については、図-2に示す引抜成形法により試作を行った。

C型部材については部材設計に基づき、部材寸法は図-3、積層構成は図-4および表-2のとおりとした。部材設計の特徴として、剛性の設計目標を達成するために、炭素繊維単体での引張弾性率が590GPaを有するビッチ系炭素繊維を使用した。特に剛性が求められるフランジ部分で、一方向強化材の使用割合を多くした。

H型部材については、部材寸法は図-5、積層構成は図-6および表-3のとおりとした。強化繊維としてはビッチ系炭素繊維、PAN系炭素繊維、

およびガラス繊維を使用した。C型部材と同様に、剛性が求められるフランジ部分に、ビッチ系炭素繊維の一方向強化材を使用した。

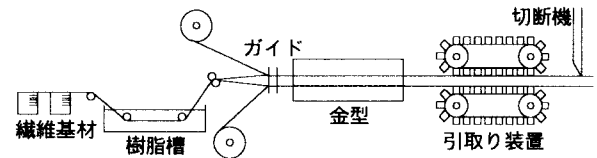


図-2 引抜成形法概要図

表-2 C型部材積層構成および強化材仕様

| 積層番号      | 構成                           | 厚み mm |
|-----------|------------------------------|-------|
| フランジ部 1,9 | GF <sup>2</sup> マット          | 0.50  |
| 2,8       | ビッチ系CF <sup>3</sup> クロス 0/90 | 0.70  |
| 3,7       | GFクロス 0/90                   | 0.85  |
| 4,6       | ビッチ系CF UD <sup>4</sup>       | 0.70  |
| 5         | ビッチ系CF UD                    | 0.80  |
|           | フランジ部計                       | 6.30  |
| ウェブ部 1,9  | GFマット                        | 0.50  |
| 2,8       | ビッチ系CFクロス 0/90               | 0.70  |
| 3,7       | GFクロス 0/90                   | 0.85  |
| 10,11     | ビッチ系CFクロス 0/90               | 0.70  |
| 5         | ビッチ系CF UD                    | 0.80  |
|           | ウェブ部計                        | 6.30  |

\*2：ガラス繊維 \*3：炭素繊維

\*4 Uni-Directional 一方向強化材

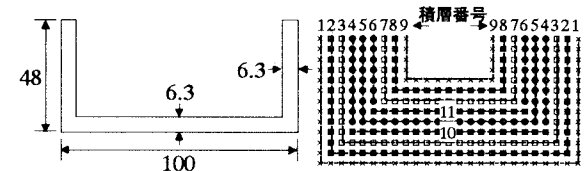


図-3 C型部材寸法 図-4 C型部材積層構成

表-3 H型部材積層構成および強化材仕様

| 積層番号       | 構成             | 厚み mm |
|------------|----------------|-------|
| フランジ部 1,19 | GFマット          | 0.50  |
| 2,18       | GF UD          | 0.60  |
| 3,17       | ビッチ系CF UD      | 3.60  |
| 4,11       | PAN系CFクロス ±45  | 1.90  |
| 5,12       | ビッチ系CFクロス 0/90 | 0.90  |
| 6,13       | GFクロス ±45,0/90 | 0.90  |
| 7,14       | PAN系CFクロス ±45  | 0.50  |
| 8,15       | ビッチ系CFクロス 0/90 | 0.60  |
| 9,16       | GFマット          | 0.50  |
|            | フランジ部計         | 10.0  |
| ウェブ部 9,16  | GFマット          | 0.50  |
| 8,15       | ビッチ系CFクロス 0/90 | 0.60  |
| 7,14       | PAN系CFクロス ±45  | 0.50  |
| 6,13       | GFクロス ±45,0/90 | 0.90  |
| 5,12       | ビッチ系CFクロス 0/90 | 0.90  |
| 4,11       | PAN系CFクロス ±45  | 1.90  |
| 10         | GFクロス ±45,0/90 | 3.40  |
|            | ウェブ部計          | 14.0  |

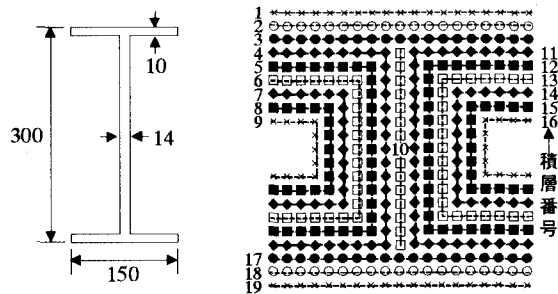


図-5 H型部材寸法 図-6 H型部材積層構成

### 3.2 角型部材の作製

構成部材のうち角型部材については、図-7に示すフィラメントワインディング法により試作を行った。この方法は、ゴルフシャフトや産業用ローラーなどの管状成形体の製造方法として一般的である。具体的には繊維基材に樹脂を含浸させ、ノズルを一定速度で動かし、一定速度で回転するマンドレルに巻きつけて部材を成形する方法である。

角型部材については部材設計に基づき、部材寸法は外寸 350mm 角、肉厚 10mm とし、積層構成は表-4 のとおりとした。C型およびH型部材と同様に、剛性の設計目標を達成するために、引張弾性率が 590GPa を有するピッチ系炭素繊維を部材軸方向に配向させた。

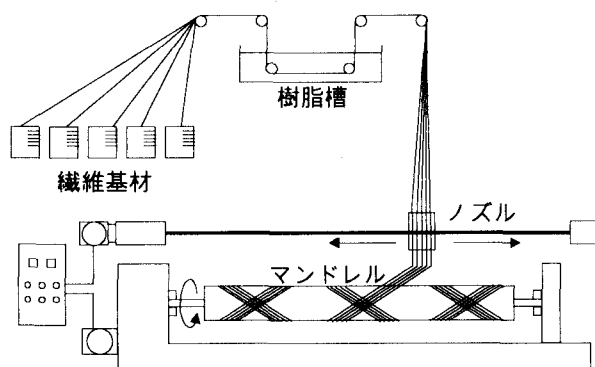


図-7 フィラメントワインディング法概要図

表-4 角型部材積層構成および強化材仕様

|     | 材料     | 積層角度 deg | 厚み mm |
|-----|--------|----------|-------|
| 最内層 | GF     | ±45      | 0.8   |
|     | PAN系CF | 90       | 1.0   |
|     | ピッチ系CF | 90       | 1.0   |
|     | ピッチ系CF | ±5       | 1.4   |
|     | ピッチ系CF | ±45      | 1.4   |
|     | ピッチ系CF | ±5       | 1.4   |
|     | ピッチ系CF | 90       | 1.0   |
|     | PAN系CF | 90       | 1.0   |
| 最外層 | GF     | ±45      | 1.0   |
|     | 計      |          | 10.0  |

### 3.3 FRP製部材の評価

部材設計に基づき試作した構成部材について、C型部材は引張および圧縮試験によって、H型部材および角型部材については引張および曲げ試験により評価を実施した。評価結果を表-5に示す。C型、H型、および角型部材の等価弾性率については、いずれの部材も設計目標値をクリアし、引張強度については、設計目標まで荷重をかけて耐用できることを確認した。C型部材の圧縮強度および角型部材の曲げ強度については、純粋な荷重を測定できなかった。H型部材の曲げ強度については設計目標を達成できた。

以上の結果より部材設計の有効性および試作部材の物性が確認されたため、実寸モデルでの全体組立品を作製し、構造体として所定の機能を発揮し、かつ設計どおりの強度を有するかどうかを確認する載荷試験を実施した。

表-5 構成部材の評価結果

| 構成部材 | 試験項目    | 等価弾性率<br>GPa | 荷重<br>(Pmax)<br>kN    | モーメント<br>(Mmax)<br>kN・m |
|------|---------|--------------|-----------------------|-------------------------|
| C型部材 | 引張 設計目標 | 68.6         | 123.6                 | —                       |
|      | 引張 評価結果 | 94.6         | (125.1) <sup>*5</sup> | —                       |
|      | 圧縮 設計目標 | 68.6         | 113.7                 | —                       |
|      | 圧縮 評価結果 | 82.4         | (125.1)               | —                       |
| H型部材 | 引張 設計目標 | 58.8         | 45.9                  | —                       |
|      | 引張 評価結果 | 59.1         | (394.0)               | —                       |
|      | 曲げ 設計目標 | —            | —                     | 37.2                    |
|      | 曲げ 評価結果 | —            | —                     | 48.5                    |
| 角型部材 | 引張 設計目標 | 68.6         | 71.1                  | —                       |
|      | 引張 評価結果 | 70.4         | (278.8)               | —                       |
|      | 曲げ 設計目標 | —            | —                     | 102.0                   |
|      | 曲げ 評価結果 | —            | —                     | (121.4)                 |

\*5：括弧内は試験を途中で中断した時の値

### 4. 全体組立品の実用性能評価

全体組立品の性能評価としては、3次元組立品を用いた3次元ねじり剛性試験、および2次元組立品を用いた2次元載荷試験により実施した。3次元ねじり剛性試験の概要を図-8に、2次元載荷試験の概要を図-9に示す。

2次元載荷試験は、2条件で実施した。2次元載荷試験その1は設計した通りの鋼製柱を有するFRP製上部工全体についての載荷試験であるのに対して、2次元載荷試験その2はFRP製上部工の直下に支点を設け、上部工のみに荷重が作用するように載荷した試験である。

3次元ねじり剛性試験および2次元載荷試験で得られた微小変形時の剛性試験結果と、2次元載荷試験で得られた強度試験結果を表-6に示す。3次元ねじり剛性試験と2次元載荷試験その1で得られた見かけの弾性率は、上部工に比較して剛

性が低く変形しやすい状態であった鋼製角柱の変形が大部分を占めた値であると考えられる。上部工にのみ載荷した2次元載荷試験その2では、その1と比較して3倍以上の剛性を示した。2次元載荷試験における破壊は、いずれにおいても圧縮プレスの座屈、H型梁フランジの降伏、ボルト接合部の損傷であり、その時の荷重は設計荷重(103.9kN)のそれぞれ1.6倍、2.2倍となっており、一応所定の機能は得られたが、これはあくまでも常時荷重での載荷状態の場合である。

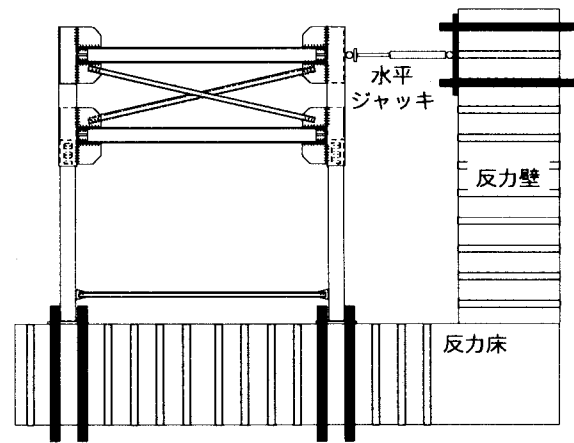
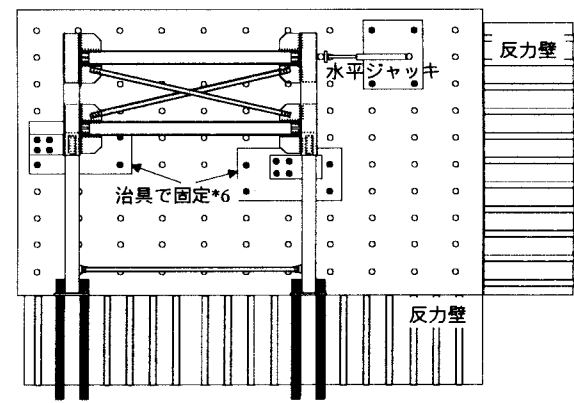


図-8 3次元ねじり剛性試験概要図



\*6：2次元載荷試験その2のみ実施

図-9 2次元載荷試験概要図

表-6 全体組立品の試験結果

| 試験       |                        | 3次元ねじり<br>剛性試験       | 2次元載荷試験                                       |                                                                       |
|----------|------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|          |                        |                      | その1<br>(鋼製脚有り)                                | その2<br>(鋼製脚無し)                                                        |
| 剛性<br>試験 | 最大変位 mm                | $5.5 \times 10^{-4}$ | 4.0                                           | 2.6                                                                   |
|          | 荷重 kN                  | 14.7                 | 19.6                                          | 39.2                                                                  |
|          | 弾性率 <sup>*</sup> kN/mm | $2.7 \times 10^4$    | 4.9                                           | 15.1                                                                  |
| 強度<br>試験 | 最大変位 mm                | —                    | 55                                            | 50                                                                    |
|          | 終局荷重 kN                | —                    | 166.6                                         | 224.9                                                                 |
|          | 終局状態                   | —                    | ・圧縮 <sup>7</sup> で座屈<br>・H型フランジクラック<br>・鋼製脚降伏 | ・圧縮 <sup>7</sup> で座屈<br>・引張 <sup>7</sup> でボルト<br>接合部損傷<br>・H型フランジクラック |

\*7：剛性試験結果は微小変形時

\*8：弾性率は見かけの弾性率(荷重/最大変位)

設計荷重(103.9kN)載荷時の各部応力の設計値と実測値の一覧を表-7に、測定位置を図-10に示す。各部応力の設計値は各接合点を剛結とし、また各部材を線に置き換えてフレーム解析した場合の値である設計値と実測値を比較すると、柱部材においては実測値が計算値より小さく、梁部材においては逆に実測値が計算値より大きい値を示したが、許容範囲内であると考えられる。またプレス材については概ねよい一致を示した。

以上の結果より、FRP製部材を用いた全体組立品においても所定の剛性、および強度が得られ、実用性能上十分に耐えうる構造体であると考えられる。

表-7 2次元載荷試験での  
計算値と実測値比較

| 測定<br>番号 | 軸方向応力 (MPa) |      |     |
|----------|-------------|------|-----|
|          | 計算          | 実測   | 許容  |
| S1       | 9.3         | 4.1  | 245 |
| S11      | 10.6        | 5.1  | 115 |
| H3       | 24.6        | 37.9 | 111 |
| H4       | 23.1        | 39.6 | 111 |
| H7       | 30.4        | 42.1 | 245 |
| H8       | 0.4         | 1.0  | 245 |
| H9       | 31.2        | 52.4 | 245 |
| H10      | 30.4        | 47.1 | 245 |
| H12      | 31.2        | 32.3 | 245 |
| C3       | 45.9        | 42.1 | 245 |
| C7       | 52.0        | 36.0 | 245 |

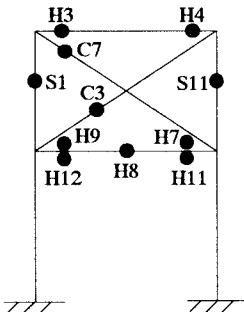


図-10 応力評価位置

5. まとめ

- (1) タンカー網取りドルフィンを構成する FRP製C型、H型、および角型部材の設計を実施し、C型およびH型については引抜成形法、また角型部材についてはフィラメントワインディング法による成形技術を確立した。
- (2) FRP製部材の物性を評価し、設計値を十分に反映した性能を有していることを確認した。
- (3) FRP製部材を使用した全体組立品についても所定の強度が得られ、十分実用に耐えうる構造体であることを確認した。

[謝辞]

この研究は、(財)石油産業活性化センターによる石油産業高度化技術開発事業の一部として行われた。関係各位に謝意を表する。

[参考文献]

- [1] 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説
- [2] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説