ケーソン据付時の係留索に作用する張力特性 把握を目的とした現地計測の試み

小竹 康夫¹・後藤 潤也²・小倉 勝利³・
阿部 寛⁴・山口 陽介⁴・加藤 直幸⁵

¹ 正会員 東洋建設(株) 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 1-25-1)

E-mail: kotake-yasuo@toyo-const.co.jp

² 東洋建設(株) 東北支店 (〒980-0021 仙台市青葉区中央 2-9-27)

E-mail: goto-junya@toyo-const.co.jp

³ 東洋建設(株) 東北支店 (〒980-0021 仙台市青葉区中央 2-9-27)

E-mail: ogura-katsutoshi@toyo-const.co.jp

⁴ 東洋建設(株) 東北支店 (〒980-0021 仙台市青葉区中央 2-9-27)

⁵ 東洋建設(株) 土木技術部 (〒135-0064 東京都江東区青海 2-4-24 青海フロンティアビル 12F)

建設現場では、技術者の確保や若い世代への技術の継承が課題となっている。本研究では、防波堤築造工事において、新設するケーソンを安全かつ高精度に据え付けるための係留ワイヤの取り付け方法やウィンチ操作技術に着目し、技術者の経験値を数値化する試みの第一歩として、実施工を対象とした現地計測を実施した。具体的には、防波堤ケーソンの据付作業において係留ワイヤに作用する張力を測定し、ウィンチ操作者および据付状況を撮影したビデオ映像から函の動揺を読み取って、ウィンチ操作と係留ワイヤに作用する張力および函の動揺の関係を調べた。その結果、本研究で対象とした施工方法および波浪条件では、引き寄せ時と着底時で大きな張力が作用するワイヤが異なること、引き寄せ時により大きな張力が作用していた。

Key Words : mooring cable, tension, oscillation of a floating body, caisson installation, field measurement

1. はじめに

防波堤の築造工事において、新しいケーソン(新設函)を据え付ける方法はいくつか存在する。その一例を図-1に示す。多くの場合、新設函は防波堤から離れた製作ヤードで製作され、据付までの期間、海域に設けられた仮置き場所に注水した状態で仮置きされる。その後、図-1のフローに示す通り、仮置き場所で排水、浮上させた後、曳船により防波堤築造場所まで曳航し、据え付ける。据付に際しては、複数本の係留ワイヤで既設防波堤などをつないだうえで、注水作業により新設函を沈めながら、ウィンチ操作により平面的な位置を調整し、基礎マウンド上に着底させる。この間、常に波浪により新設函は動揺した状態での作業となるため、ウィンチ操作による新設函の動揺制御が、所定の位置に精度よく据え付けるための鍵となる。

据付時のケーソンの動揺制御に関する研究は、防波堤設置位置の大水深化が進んだ1990年代に数多く実施されている。堀沢ほか¹⁾は、据付時に新設函が動揺すること

図-1 施工フローの一例

図-2 施工イメージと張力計の配置

により、ケーソン下端とマウンド天端が接触した状況を考慮した計算を実施し、水理模型実験により計算結果の妥当性を評価している。ただし現地作業の実態を十分に把握できていないとの認識のもと、堀沢ほか²⁾では実施工時の現地調査を行い、動揺量と係留ワイヤーに作用する張力を評価している。一方、石見ほか³⁾は据付時の作業限界に着目し、実施工における現地計測結果に対応する動揺シミュレーションを拡張し、他地域における限界動揺量や限界波高などの作業可否判断指標を提示している。また米山⁴⁾も同様に動揺シミュレーションにより、断面形状の異なる複数のケーソンに対して、据付限界状態の検討を行うなど、波浪外力とケーソンの動揺量、係留ワイヤーに作用する張力を取り扱う研究が見受けられる。また石崎ほか⁵⁾は、施工中のワイヤー破断時の動揺量をスペクトル解析することにより、破断原因を推定するとともに、曳航時にまで検討手法を拡張し、動揺量スペクトルと波浪外力の関係を評価している(石崎ほか⁶⁾)。

ここで、ワイヤーの破断は作業員の人命にかかわる重大事故につながりかねず、係留ワイヤーに作用する張力の評価は安全面からも重要なパラメータであるが、波浪外力のみではなく、係留ワイヤーの引き込み、送り出しなどの状況にも影響を受けると考えられる。係留ワイヤーの引き込みや送り出しは、ウィンチ操作者に対する指示者の指示により実施されており、熟練技術者の経験を必要とする作業のひとつである。

しかしながら近年、建設現場では少子高齢化による技術者不足や若い世代への技術の継承が深刻な問題となっている。そこで本研究では、防波堤築造工事において、新設するケーソンを安全かつ高精度に据え付けるための

係留ワイヤーの取り付け方法やウィンチ操作技術に着目し、技術者の経験値を数値化する試みの第一歩として、実施工を対象とした現地計測を実施した。

2. 現地計測の概要

(1) 対象工事の概要

現地計測は、宮城県発注の女川湾口防波堤災害復旧(その5)工事において施工管理の一環として実施した。この工事は、2011年東北地方太平洋沖地震津波により被災した女川湾口に位置する混成堤式防波堤を復旧するものであり、鉄筋コンクリート製函体(ケーソン)を捨石マウンド上に据え付ける作業を計測対象とした。施工イメージと現地計測用の張力計配置を図-2に示す。

ケーソン据付作業での係留ワイヤーの取り付け方法にはいくつかのパターンがあるが、今回対象とした工事では、新設函を、据え付け済みのケーソン(既設函)に4本のワイヤーで係留し、ウィンチの操作で新設函を既設函側に引き寄せながら、新設函に注水することで、所定位置に着底させた。ここで4本のワイヤーのうち防波堤法線に平行な2本(張力計A, Bに対応)は、防波堤法線方向の引き寄せ、クロス掛けの2本(張力計C, Dに対応)は、防波堤法線直角方向の振れ止めを目的としている。

なお図-2に示される通り、港内側には起重機船が一定の離隔をとって新設函に横付けされている。そのため、新設函の動揺量や係留ワイヤーに作用する張力にも一定の影響が見込まれるが、今回はそれらを考慮せずに検討するものとした。したがって、起重機船の影響については

引き寄せ (AE) 振れ止め (AG)

(a) 係留ワイヤのモデル化

(b) 揺れの定義

(c) 縦揺れ (ピッチ) の比較

図-3 事前実験結果の一例

今後の課題である。

(2) 係留ワイヤに働く張力

施工時における現地計測項目は、係留ワイヤに作用する張力とし、各ワイヤの新設函側の固定端部に取付けた張力計で測定した。現地計測に先立ち、引き寄せワイヤと振れ止めワイヤの効果を確認するために断面水路を用いて予備実験を実施した。図-3(a)に係留ワイヤの取付け

状況を示す。波向きに対して左側の2本のワイヤで係留索をモデル化しており、ケースAEは引き寄せワイヤのみの場合、ケースAGは振れ止めワイヤのみの場合である。なお右側の2本は模型の流出防止用として、十分に長いワイヤを配置した。各々のケースに対して複数の波高、周期の規則波を作用させて、実験状況を撮影した映像から画像解析により動揺量を算定した。図-3(b)には揺れの定義、図-3(c)に結果の一例として、波浪周期と縦揺れの関係を示す。図より、振れ止めワイヤは引き寄せワイヤに比べて、縦揺れの抑制効果が高いことが分かる。また上下揺れに対しても抑制効果が高いことを確認している。

(3) ケーソンの動揺量

計測器材の都合により、ケーソンの動揺量を直接計測することができなかったため、据付作業への影響が少ない既設函上のやや離れた地点に固定したビデオ映像から算定することとした。読取に用いた画像の一例を図-4に示す。手前が既設函、奥が新設函である。新設函上の特定の2点に着目し、コマ送りの静止画から位置を読み取った。そして水平および鉛直方向の変位量は、2点の各量の平均値、傾斜角は2点の傾きとして算定した。なお読み取り時刻は、30秒の一定間隔に加え、次に示すウィンチ操作者への指示のタイミングとした。ただし動揺量測定を目的として撮影した映像ではないため、絶対値としての精度は確保されていないことに留意が必要である。

(4) ウィンチ操作者への指示

ケーソン動揺量の読み取りに用いたビデオ映像から、ワイヤの動きも参考に、ウィンチ操作者への指示のタイミングと指示内容を可能な範囲で記録するものとした。図-2および図-4に示す通り、既設函に2台のウィンチが据え付けられており、各々のウィンチには各1名のウィンチ操作者が配置されていて、指示者の指示によって、引き寄せワイヤあるいは振れ止めワイヤを制御する。

図-4 読み取りに用いた画像の一例

(a) 係留索に作用する張力変動

(b) 新設函の鉛直および水平（正：港外侧）変位と傾斜角（正：反時計回り）の時間変動

図-5 ウィンチ操作者への指示状況と係留ワイヤに働く張力および新設函の動揺

（操作指示の塗潰しは引き込み指示，白抜きは送り出し指示，横線は指示の継続を示す）

3. 計測結果

(1) 係留索に働く張力および新設函の動揺と指示

現地計測は平成26年12月5日午前の新設函据付作業に合せて実施した。図-5に、ウィンチ操作者への指示状況と係留ワイヤに働く張力および新設函の動揺量の時間変動を示す。図-5(a)は係留ワイヤに取付けた張力計の測定結果（左側縦軸）と既設函天端から新設函天端までの鉛直位置（右側縦軸，新設函の相対高），図-5(b)は新設函の水平および鉛直方向の変位量（左側縦軸）と傾斜角（右側縦軸）であり，ともに横軸は時刻である。図-5(b)では，

各量に対して30秒間隔で読み取ったデータと，指示のタイミングで読み取ったデータを同時にプロットしている。データの性格上，これらを線で結ぶことは適切ではないが，変動傾向の参考として，水平および鉛直変位については30秒間隔，傾斜角は指示のタイミングのデータを点線で結んでいる。また図-5(a)の新設函の相対高は図-5(b)の鉛直変位と同一である。

撮影を開始した9:19から9:27頃にかけては，鉛直変位が徐々に減少しながら，水平方向には周期的な振動があり，この時間帯は新設函に注水しながら引き寄せている段階であることが分かる。9:27以降は鉛直，水平変位と

図-6 動揺諸量および水位変動のFFT解析結果

も安定しており、新設函を所定位置に着底する段階であることが分かる。着底段階で一定の鉛直変位が残っているのは、撮影角の影響による読み取り誤差である。この時、係留ワイヤに作用する張力の変動と指示の状況に着目すると、引き寄せ段階と着底段階で大きく傾向が異なっている。

まず引き寄せ時には指示の頻度が高く、振れ止めワイヤ（張力計C）で波浪による港外側から港内側への動揺を制御しながら、引き寄せワイヤ（張力計A）で新設函を引き寄せようとしていることが分かる。この段階では、新設函は浮体構造物の挙動を示し、図-5(b)で分かる通り、水平変位や傾斜角が振動している。ここで波浪が防波堤の法線にほぼ直角に入射すると仮定すると、波向きに対して水平変位は前後揺（正が港外側）、傾斜角は縦揺れ（正が反時計回り）に相当する。比較的大きな前後揺が観測される9:25頃までは、港内側（前後揺が負）に新設函が変位するタイミングで張力計Cに対応する振れ止めワイヤへの指示が頻繁に出されるとともに、前後揺がゼロに近づくと、張力計Dに対応する振れ止めワイヤにも指示が出されて、振れを制御しようとしていることが伺える。

着底に向けた最終段階と推測される9:25頃から9:27頃にかけては、4本のワイヤのいずれか1本、あるいは複数に対して継続的に指示が出されており、前後揺、縦揺れともに小さな値となっている。

着底段階の9:27以降は、引き寄せ段階とは異なる2本のワイヤ（張力計B, Dに対応）操作により、新設函の位置決めをしているものと考えられる。この時、引き寄せ時に作用する張力は着底時に作用する張力より大きい。この差が生じる要因としては、波浪外力や据付時の新設函への注水に伴う質量増加、重心変化が推定される。但し今回の検討では原因の解明には到っておらず、今後の課題である。

(2) 新設函の動揺と波浪外力

当日午前9時の波浪条件は、ナウファス石巻港の速報値⁷⁾によると、有義波周期5.0s、有義波高0.38mであり、

施工に適した条件であった。ただしナウファス石巻港の波浪計測地点は、女川湾と牡鹿半島により隔てられており、ナウファスデータが施工地点の波浪を直接的に示すものではないと考えられたため、据付場所から200m沖側、水深約20m付近の海底面に超音波水圧併用式波高計を設置し、1時間ごとに正時を挟む20分間の波浪観測を行った。平成26年12月5日8時50分から9時10分までの計測では、有義波周期4.0s、有義波高0.4mである。

この観測値とケーソン動揺各諸量との関係を比較するため、各々の時間変動に対してFFT解析を行った。結果を図-6に示す。横軸は周波数、縦軸は各量のパワースペクトルであり、FFT後のピリオドグラムを矩形フィルターにより平滑化している。ケーソン動揺諸量に関しては、引き寄せ段階の時間帯を対象に、指示のタイミングで読み取った時間間隔の不均一なデータを補間、補外することによって、均一な時間間隔のデータに変換した後にFFT解析した。上下揺に関しては、時間変動を示す図-5(b)からも分かる通り、明瞭なピークは存在していない。前後揺については、0.01Hz付近にピークが存在しており、図-5(b)の時間変動からも同程度の周期運動が確認できる。水位変動の解析結果からは明瞭ではないものの、その付近の周波数帯で極大値が存在しており、波浪の長周期成分に対する応答と考えられる。一方、水位変動がピークを示す0.1Hz付近では明瞭な応答が見られない。縦揺れに関しては、水位変動の0.1Hzおよび0.02Hz付近のピークに対応する極大値が存在している。

以上より、今回計測対象とした施工可能な波浪条件下において、縦揺れは風波領域の波浪、前後揺は長周期成分の影響を受けるが、上下揺は影響を受けにくいことが定性的に分かった。

なおケーソンの動揺諸量の解析結果については、データ数の制約で、長周期（低周波数）側データの有意性が確保されていないことに留意する必要がある。また係留ケーブルを含めた新設函の固有周期については、本研究では検討しておらず、今後の課題である。

4. おわりに

防波堤ケーソンの据付作業において係留ワイヤに作用する張力の現地計測を行い、ビデオ映像からの読み取った新設函の動揺諸量や係留ワイヤのウィンチ操作への指示との関係を調べた。結果は以下の通り。

- ① 今回の施工および波浪条件では、引き寄せ時と着底時で大きな張力を生じるワイヤが異なり、引き寄せ時により大きな張力が作用していた。
- ② 引き寄せ時の新設函は係留された浮体として動揺し、防波堤法線に直角に入射する波浪に対して縦揺れは風波領域の成分の影響を受け、前後揺は長周期成分の影響を

受けるが、上下揺に対する波浪の影響は小さい。

③ 係留ワイヤのウィンチ操作に対する指示は、引き寄せ段階の前後揺に対応する水平変位が大きくなるタイミングで、振れ止めワイヤに対して出され、その後、水平変位が大きくなると、反対側の振れ止めワイヤに対して指示が出される。

ただしここでの取りまとめは、1ケースの現地計測結果を整理したに過ぎない。本研究の目的は技術者経験値の数値化であり、1ケースのみの取りまとめでは十分といえない。さらに、実施工における起重機船の影響などを考慮するためには、水理模型実験や数値解析などによる起重機船の有無での比較検討なども有効と考えられる。そこで、今後は以下の計画により数値データとしての信頼性を高める予定としている。

現地計測の実施

新たな現地計測では、ウィンチ操作と張力変動および動揺諸量との関係を明確にすることを目的に、据付作業後に指示者にヒアリングを行うなど、データの信頼性向上に努めるとともに、数多くのデータを蓄積する

水理模型実験の実施

実施工を単純化したモデルにより波浪と張力変動および動揺諸量との関係を求め、現地計測との差異から、ウィンチ操作や起重機船などの影響を評価する

数値解析の実施

水理模型実験結果をもとに数値解析の精度確認を行い、現地計測や水理模型実験では再現が難しい多様な条件下での検討を行うことで、データの蓄積を図る

謝辞：本論文は、宮城県発注の女川湾口防波堤災害復旧（その5）工事において施工管理の一環として計測したデータを取りまとめたものである。宮城県、石巻港湾事務所の皆さまには、今後の現場精度の向上や若手技術者の負担軽減を目的としての論文取りまとめにご快諾頂いたことを記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 堀沢真人, 佐藤典之, 大橋裕寿, 赤村重紀, 坂間茂, 吉倉敬治: ケーソン沈設過程の波浪中挙動, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1001-1005, 1996.
- 2) 堀沢真人, 佐藤典之, 坂間茂, 矢口真光, 滑川正倫: ケーソン据付時の動揺及び索張力に関する現地調査, 海洋開発論文集, Vol.13, pp.429-434, 1997.
- 3) 石見剛, 白石悟, 名里健吾: 外洋に面した港湾における防波堤ケーソンの据付時の動揺特性および作業限界条件, 港湾技研資料, No.850, 29p, 1996.
- 4) 米山治男: 動揺シミュレーションによる防波堤ケーソンの据付限界状態に関する検討, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.659-664, 2003.
- 5) 石崎崇志, 倉田克彦, 荒木英二: ケーソンの据付時動揺特性, 土木学会第54回年次学術講演会概要集, VI-223, pp.446-447, 1999.
- 6) 石崎崇志, 荒木英二, 藤原隆一, 倉田克彦, 永田修一, 吉田尚史, 田中洋: ケーソンの曳航・据付時の動揺および索張力, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.841-845, 1999.
- 7) ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)ホームページ, 過去データ, 2014年連続データ(速報値) http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/static/sub320_2014e.htm.

FIELD MEASUREMENT OF TENSION OF MOORING CABLES DURING INSTALLATION OF BREAKWATER CAISSON

Yasuo KOTAKE, Junya GOTO, Katsutoshi OGURA, Satoru ABE,
Yosuke YAMAGUCHI and Naoyuki KATO

Lack of technical experts and inheritance of skills to the next generation has been serious problems in construction sites. In this study, the authors try to quantify experiences and skills of technical experts on how to handle a mooring cable and how to operate a winch. In the trial, the tension in the mooring cable and the oscillation of the caisson were measured in installing caissons. The authors show that the cable with larger tension at the time when a caisson is drawn is different from that at the time at the time when a caisson is placed on a rubble mound under the conditions targeted in this study. They also show that the tension of each cable is the largest when a caisson is drawn.