作業員の指示に着目した防波堤ケーソン据付工事におけるケーソンの挙動に対する一考察

秋本 早紀¹・鈴木 崇之²・小竹 康夫³・後藤 潤也⁴

¹ 横浜国立大学 大学院都市イノベーション学府
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
E-mail: akimoto-saki-mt@ynu.jp

² 正会員 横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)
E-mail: suzuki-t@ynu.ac.jp

³ 正会員 東洋建設(株) 鳴尾研究所
(〒669-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 1-25-1)
E-mail: kotake-yasuo@toyo-const.co.jp

⁴ 正会員 東洋建設(株) 東北支店
(〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央 2-9-27 プライムスクエア広瀬通 7F)

防波堤築造工事等の海上工事においては、近年作業員の高齢化や減少、技術の継承が問題となっている。これまで、ケーソンの動揺や自動据付に向けた検討は行われているが、実務適用には十分とは言えず検討の余地がある。そこで本研究では、作業指示者の動きに着目し、据付時における波浪やケーソンの動揺と作業指示との関連性を見出すことを目的とする。ケーソンの位置変化と、作業指示者によるウインチ操作者への指示状況を解析し、作業工程を引き寄せ段階、着底段階に分類した結果、ケーソン引き寄せ段階では移動に伴う動揺が顕著となり、また、着底段階では引き寄せ時より高頻度の指示を出しケーソンを制御していた。加えて、作業指示者へのヒアリングを行い、指示の内容、タイミングや指示者の感覚等について把握した。

Key Words : Caisson behavior, installation, instruction, field measurement, interview

1. はじめに

東日本大震災での津波により多くの防波堤が倒壊し、復旧工事が急がれている。防波堤築造工事などの海上工事においては、気象状況のみならず海象変動等を考慮しながら作業を進める必要があり、作業可否¹⁾や作業日数に関する検討²⁾も行われている。また、海上工事における一連の工程では多くの作業員を必要とするとともに、作業員の経験に培われた高度な技術が求められる。しかし近年、作業員の高齢化や減少、技術の継承が問題となっている。

これまで、ケーソン据付時の動揺に関する現地計測や水理実験等の検討は行われてきており、防波堤におけるケーソンの据付工事を例にとると、ケーソンの曳航・据付時の動揺、および索張力に関する検討³⁾や、ケーソン沈設過程での挙動⁴⁾、また、数値シミュレーションを用いた据付限界条件に関する検討⁵⁾などが行われている。また、ケーソン据付作業の自動化、無人化に向けた検討も行わ

れている。米山ら^{6),7)}は、ケーソン据付工事に対する自動設置システムの開発のために位置制御アルゴリズムを作成し提案している。また、草刈ら⁸⁾は操作の無線化による無人化システムについての検討を行っている。無人化施工は、ケーソン上の作業員を少なくすることで、危険因子を取り除く安全への取り組みのひとつとして考えることが出来る。小竹ら⁹⁾は作業員の指示に着目し、実工事における種々の計測データとの関連性を検討している。このように、海上工事における作業の効率化や無人化へ向けた検討が実施されているが、実際の現場での測定データはまだ十分とは言えず、また、作業指示とケーソンの動揺との関連性についても検討の余地がある。

そこで本研究では、宮城県女川湾での湾口防波堤ケーソン据付工事を対象とし、作業員の指示に着目し各種計測を行った。計測されたデータより、据付時における海象変動、ケーソン挙動と指示との関連性を見出すことを目的として解析を行う。加えて、作業指示者へのヒアリングを行い、工事作業指示の意図を明らかにし、また、

計測されたケーソンの動揺の情報を考慮することで、作業指示者がどのようにケーソン動揺を制御しているのかについても把握を行う。

2. 現地計測の概要

本研究では、宮城県牡鹿郡女川町に位置する女川港の湾口防波堤築造工事を対象として検討を行った。女川港は、津波により海岸構造物の多くが被災したが、現在、復旧工事が行われている。特に防波堤は、台風等による高波浪からの防御の面においても早期の復旧が必要である。ケーソンの据付方法はいくつか存在するが、本工事では、ケーソンを浮体として製作場所から曳船により防波堤築造場所まで曳航した後、据付を行った。本研究では、この据付工程を対象として解析を行った。

ケーソン据付工事は、ワイヤーにより新設ケーソンを起重機船で緩やかに係留しつつ、既設ケーソン側と4本

図-1 据付工事における機材配置 (2015年6月3日)

写真-1 ケーソン据付工事の様子 (2015年7月27日)

表-1 気象海象状況

日付	降水量	平均 気温	平均 風速	最多 風向	有義 波高	有義波 周期
2015 6/3	0 mm	17.8 °C	1.9 m/s	西北西	0.29 m	5.32 s
2015 7/27	0 mm	26.6 °C	1.5 m/s	北北西	0.16 m	7.43 s

のワイヤーで繋ぎ、新設ケーソンを既設ケーソン側に引き寄せる方法で行われた。施工フローの詳細は小竹ら⁹⁾を参照されたい。検討工事における機材配置、および現場の写真をそれぞれ図-1、写真-1に示す。防波堤の法線方向に張っている2本のワイヤーAとBは、新設ケーソンを既設ケーソン側に引き寄せる役割がある。また、交差して張っている2本のワイヤーCとDは、法線直角方向の誘導と波浪によるケーソンの振れを抑制する役割を果たしている。

本研究では、2015年6月3日、及び同年7月27日に行われた2回の据付工事にて計測したデータをもとに解析を行った。両日の観測時間帯における女川町女川浜宇大原の観測所での気象データ（気象庁）、および据付位置よりもやや沖側に設置されたADCPにより取得した波浪データを表-1に示す。据付工事は気象海象状況に大きく影響を受けるため、波浪が穏やかな時に工事を行う。しかしながら、静穏な状況であっても据付工事中には、ケーソンを動揺させるような波が作用する場合がある。このような動揺に対して、指示者がウィンチ操作者に指示を出し、ケーソンの動きの制御を行う。

2015年6月3日の工事では、B工区ケーソン（ $L=15$ m, $B=12$ m, $H=14$ m, 法線方向3分割, 幅方向3分割の9隔室）の据付作業が行われた。この日の天候は穏やかであり（表-1）、風によるケーソンの動揺への影響は小さいと考えられる。作業指示者による指示内容を確認するため、既設ケーソン上からビデオで指示者の動きを録画した。また、新設ケーソンの岸沖両端にGPS計測器を取り付け、時々刻々のケーソン位置を計測した。このケーソンの挙動（移動、動揺）とビデオ映像から抽出した作業指示状況から両者の関連性を検討した。

7月27日では、C工区ケーソン（ $L=20$ m, $B=12$ m, $H=8.5$ m, 法線方向4分割, 幅方向3分割の12隔室）の据付作業が行われた。6月に取得した種々のデータに加え、各ワイヤーの張力も併せて計測した。作業日の気象状況は6月の作業日と同様に穏やかであり（表-1）、風によるケーソン動揺への影響は小さいと考えられる。7月の工事においても、GPSにより取得された新設ケーソンの挙動情報、ワイヤーの張力、および指示状況の各種データを比較検討することにより、ケーソンの挙動と作業指示の関連性を検討した。

3. ケーソン据付工事の計測結果および考察

本章では、2015年6月（B工区ケーソン）と7月（C工区ケーソン）に実施したケーソン据付作業における計測データ、およびその解析結果を示す。

(1) B工区ケーソン据付工事

a) GPS 位置データと指示の関係

始めに、6月3日のB工区ケーソンの据付工事に対する計測結果を示す。計測は9時15分～50分頃まで行った。図-2にGPSにより計測したケーソンの位置変化(x : 港外向きを正, y : 既設函向きを正, z : 鉛直上向きを正, 図-1参照)と、ビデオデータから抽出した作業指示者によるウィンチ操作者への指示状況を示す。

作業指示は大きく9時20分～30分頃と36分～50分頃までの2つの時間帯に集中していることが分かる。前半の指示は、ケーソンを据付位置付近まで近付ける引き寄せ段階である。大きな変化があった9時22分頃は、それまで起重機船に緊張係留していたロープを緩める作業であることがビデオデータより確認できた。その後一旦指示間隔が大きくなる。この時間帯は、指示者が既設ケーソン上から新設ケーソンの動きを観察していた。9時36分頃から再び指示が頻繁となっている。この後半の指示は、据付完了位置にケーソンを精度良く据え付けるための着底段階であり、 z 軸方向の変化からもケーソン内への注水によりケーソンが徐々に沈設されている様子が分かる。また、ウィンチ操作者への指示は、引き寄せワイヤーA, Bと振れ止めワイヤーC, Dが概ね対して行

われていることがわかった。さらに、9時26分～9時28分の x 軸方向と y 軸方向にケーソンが大きく移動する時間帯に着目すると、各ワイヤーへの指示に呼応して、ケーソンは数秒以内に反応し移動していることが分かった。

b) 動揺諸量および水位変動のスペクトル解析

作業指示者の指示状況を勘案し、解析時間帯を以下の3つに区分した上でGPSデータのスペクトル解析を実施した。時間帯A: 引き寄せ段階(9時25分～29分)、時間帯B: 挙動観察(9時29分～38分)、時間帯C: 着底段階(9時38分～46分)。それぞれの時間帯におけるGPSデータのスペクトル解析結果を図-3(a)～(c)にそれぞれ示す。また、計測時間帯における水位変動のスペクトル解析結果も併せて図-3(d)に示す。図より、18秒辺りと5秒辺りにピークがあることがわかる。

時間帯Aにおいて、 x , y 軸方向への長周期の変動が見られるが、これはケーソンの移動に伴うものと言える。 x , y 軸方向の変動には水位変動のピークに一致する周波数にピークは見られないものの、 z 軸方向変動には15秒辺りにややピークが見られる。一般にケーソンの据付作業は波が静穏な時期に行われるが、今回は特に静穏であったこともあり、短周期の波の変動はどの方向の変動へも影響がなかったと考えられる。しかし、やや周期の長

図-2 B工区ケーソン据付時 (a) ケーソン挙動, (b) 作業指示状況

図-3 B工区ケーソン据付時のスペクトル解析結果 (a) 時間帯A, (b) 時間帯B, (c) 時間帯C, (d) 水位変動

い 18 秒程度の水位変動については z 方向変動に影響したと考えられる。

引き寄せを行った時間帯 B においては、各ワイヤーへの指示が 6 回実施されている。スペクトルを見ると、3 方向ともほぼ同様の動きをしており、10 秒と 15 秒程度にピークが見られる。 x , y 軸方向に関しては、指示によるケーソンの引き寄せによる影響と考えられる。 z 軸方向に関しては、時間帯 A よりもスペクトルパワーが上昇しており、ケーソンの移動に伴う動揺の影響が加味されたためと考えられる。着底段階の時間帯 C においても、3 方向は同様の傾向が見られるが、時間帯 B と比べるとパワーはやや小さい。 x , y 方向変動を見ると、6 秒程度に弱いピークが見られる。これらは微調整指示に伴う変動であると考えられる。また、 z 方向変動にはやや周期の長い変動が見られるが、これは注水によるケーソンの沈降が現れたものと考えられる。

(2) C 工区ケーソン据付工事

a) GPS 位置データと指示の関係

7 月に実施された C 工区ケーソン据付時においても各種計測を実施した。6 月の際の計測項目に加え、4 本のワ

イヤーそれぞれに張力計を設置した。図-4 に GPS により計測したケーソンの位置変化 (x 軸, y 軸, z 軸方向の挙動) と、ビデオデータから抽出した作業指示者によるウインチ操作者への指示状況を示す。 z 軸方向の移動から、マウンド上にケーソンを一度仮置きしてから (9 時 34 分まで)、再浮上させて、据付をしている様子が明確に示されている。9 時 25 分～30 分の指示は、仮置きした状態でワイヤーを張る作業に対応している。

9 時 35 分以降の時間帯は、6 月と同じように引き寄せから着底、微調整の段階に分けることができるが、今回はこれらの間に指示を出さない時間帯が存在しない。これは、前回の工事よりも波浪の影響がより少なかったため、新設ケーソンの動揺も少なく、連続的に微調整段階に入ったためである。図より、再浮上後は、引き寄せから着底、微調整段階へと連続的に作業指示が出されている。

C 工区据付ではワイヤーの張力についても計測を行ったが、指示やケーソン挙動との関連性は見いだせなかった。張力は指示の影響だけではなく、ケーソンの挙動によっても値が計測されるため、指示の要因の影響を分離することは困難であることがわかった。

図-4 C 工区ケーソン据付時 (a) ケーソン挙動, (b) 作業指示状況

図-5 C 工区ケーソン据付時のスペクトル解析結果 (a) 時間帯 A, (b) 時間帯 B, (c) 時間帯 C, (d) 水位変動

b) 動揺諸量および水位変動のスペクトル解析

B 工区ケーソン解析時と同様に、仮置きや作業指示者の指示状況、着底から微調整への連続性を勘案し、解析時間帯を以下の3つに区分した上でGPSデータのスペクトル解析を実施した。時間帯A：仮置き段階（9時25分～34分）、時間帯B：引き寄せ段階（9時34分～38分）、時間帯C：着底段階（9時38分～47分）。それぞれの時間帯におけるGPSデータのスペクトル解析結果を図-5(a)～(c)にそれぞれ示す。また、計測時間帯における水位変動のスペクトル解析結果も併せて図-5(d)に示す。

時間帯Aは、ケーソンの仮置きにより位置変動が見られなかった期間であり、スペクトルパワーも他の時間帯に比べて小さい。引き寄せ時間帯Bにおいて、 x , y 軸方向の変動にピークが見られないことからスムーズな動きで引き寄せがなされたと考えられる。 z 軸方向の変動には17秒辺りにピークが見られるが、これはケーソンの移動に伴う動揺と考えられる。指示の多い着底段階の時間帯Cでは、3軸方向共に16秒辺りにやや弱いピークが見られる。これらは微調整指示に伴うケーソンの変動であると考えられる。

4. ヒアリング概要

(1) 作業指示者へのアンケートとヒアリング

ケーソン据付工事における作業指示者に対して、作業の内容や据付の感覚などに対する内容、指示の目的や注水のタイミングなどに関する項目を含めたアンケートを作成し、6月3日の作業後に作業指示者に送付し、回答を得た。さらに、7月27日の作業終了後には、現場事務所に移動して作業指示者に対面式でおよそ1時間のヒアリングを行った。ヒアリングでは、指示の内容、指示者を出すタイミングの判断基準等について、また、これまでのケーソン据付工事に対する経験やその他の工種の経験等について尋ねた。加えて、ケーソンの着底の感覚や作業無人化に対する考えなどについても聞き取りを行った。

今回ヒアリングを行った作業指示者は、作業船や起重機船を用いた仕事を25年間経験している作業員であり、これまでに消波ブロック据付や基礎マウンド構築、また、東日本大震災時の瓦礫撤去、漁礁据付等を経験している。作業指示者にとって、作業プロセスを考慮して指示を出すことが重要であり、これまでの現場の経験と状況判断能力が必要となる。本工事における作業指示者は、起重機船での多種多様な仕事を様々な立場を経験しており、ヒアリング対象者として十分な経験を有していると判断できる。

(2) ヒアリング結果

作業指示者へのアンケート、およびヒアリングを行い、以下のことが明らかとなった。

a) 注水ポンプ作業員への指示

起重機船には注水ポンプが搭載されており、指示者はケーソンへの注水時にケーソンの傾斜を見ながら注水ポンプ操作者に指示を出していた。注水の指示について確定論的な手法が存在するわけではなく、作業指示者の経験により最適値を判断し実施されている。6月3日に据付を行ったケーソンは、計9隔室（4台のポンプが3隔室、2隔室、2隔室、2隔室に対応）に分割されており、同時に同量の注水を行うと隔室数の違いによりケーソンが傾いてしまう。よって、全てのポンプで同時に注水した後、指示者はケーソンが水平になるよう傾斜を観察しながら、個別のポンプに指示し調整を行っていることが改めて確認できた。

b) 作業指示の無い時間帯

6月3日の据付時、作業指示が減少している時間帯が存在した（図-3、9時28分～37分）。これは、作業指示者が新設ケーソンの動揺を観察している時間であった。この間、指示者は据付ケーソンの傾斜とワイヤーの張り具合を見ており、この後の作業に対する方向性など、作業内容をイメージする時間でもあるとのことであった。

c) ウィンチ操作者への指示

ケーソン据付工事の終盤では、誘導者がケーソンの法線直角方向のずれを測量し、1秒から2秒間隔で指示者に対してその結果を伝えている（図-3、9時38分～46分）。作業指示者は、誘導者からの無線を聞きながらケーソン移動に伴う動揺や波浪等による揺れを考慮しつつ所定位置に目がけ、ウィンチ操作者に指示を出していた。既設ケーソンへ引き寄せに関しては法線ワイヤー（A、B）を用いて、また、交差ワイヤー（CとD）で揺れを制御しながら調整の指示を行っていた。波浪の状況や据付ウィンチの特性、ウィンチ操作者の癖など、あらゆる状況を考慮して指示者の経験に基づく判断で指示を出していることがわかった。

d) 作業全般について

作業指示者は、第一には工事作業が安全に進むよう配慮し、第二にはケーソンを設計値に対して誤差を最小限に抑え、精度良く据付ける作業プロセスの組み立てに集中しながら指示を行っている。ケーソンがマウンドに着底し、波浪などの影響により動揺や移動の可能性がなくなるまで指示を出し続けている。作業指示者が最も重視していた点は、据付作業全体を考慮した上で作業の方向性を立てることであった。何に配慮し作業を進めていくのか、指示者自身でのイメージを持つことが重要であると考えられる。また、気をつける点としては、時々刻々変化する気象海象状況により、ウィンチの引き方なども

それらに対応しなければならないことである。

最後に、施工の無人化について質問したところ、個人の意見として、湖などの波浪影響が小さい状況であれば可能性はあるが、大きな課題は気象海象変動であり、実現するには作業時にケーソンに乗っていないと分からない感覚をどう伝えるか、その方法を考える必要があり、また、補助機能とする計器が大きくなってしまふなどの問題が新たに出てくることを危惧された。

5. おわりに

防波堤ケーソンの据付工事においてB工区、C工区ケーソンを対象とし、測定した種々の計測データを用いて指示作業員に着目した検討を行った。主要な結論を以下に示す。

(1) GPSにより計測したケーソンの位置変化と、ビデオデータから抽出した作業指示者によるウィンチ操作者への指示状況より、作業工程を引き寄せ段階、着底段階に分類できた。(2) 引き寄せ段階ではケーソン移動に伴う動揺が顕著に見られた。また、着底段階では引き寄せ時より高頻度に指示を出し、ケーソンを制御していることがわかった。(3) 張力の計測を行ったが、指示のみならず他要因によっても値が変動するため、解析に用いることは困難であった。(4) 作業指示者へのヒアリングにより、指示者は組み立てる作業全般の流れをイメージしながらケーソンの動揺に対する指示を行っていた。

今回、作業指示者とケーソンの移動・動揺の関連性については検討ができたが、その数値化までは至っていない。指示者はケーソンの動揺、気象海象条件、ワイヤーの張りなど様々な状況を考慮しながら作業を行っており、今後はこれらをどのように数値化しているかが課題と言える。

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様には、今後の出来形精度の向上や海上現場施工の無人化に向けたデータ収集および若手技術者の負担軽減を目的としての論文を取りまとめるにあたり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) 琴浦毅，森屋陽一，関本恒浩：波浪推算の計算領域が海上作業可否の判定精度に及ぼす影響，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol. 67, No. 2, pp. I_880-885, 2011.
- 2) 柳青魯，李明浩，崔石官：防波堤建設の作業限界と作業日数推定に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第38巻，pp. 956-960, 1991.
- 3) 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.
- 4) 堀沢真人，佐藤典之，大橋裕寿，赤村重紀，坂間茂，吉倉敏治：ケーソンの沈設過程の波浪中挙動，海岸工学論文集，第43巻，pp. 1001-1005, 1996.
- 5) 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条件に関する検討，海洋開発論文集，第19巻，pp. 659-664, 2003.
- 6) 米山治男，白石悟，名里健吾：防波堤ケーソンの据付作業の自動化に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 47A, pp. 939-950, 2001.
- 7) 米山治男，白石悟：防波堤ケーソンの自動設置システムの開発とその実験的検証：土木学会論文集，No. 728/VI-58, pp. 93-106, 2003.
- 8) 草刈成直，加藤直幸，竹内克昌：ケーソン無人化据付システムの運用とその評価，建設の施工企画，pp. 25-28, 2012.
- 9) 小竹康夫，後藤潤也，小倉勝利，阿部覚，山口陽介，加藤直幸：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，Vol. 71 No. 2 p. I_1035-I_1040, 2015.

(2016.2.4 受付)

A STUDY ON THE BEHAVIOR OF BREAKWATER CAISSON DURING THE INSTALLATION FOCUSING ON A OPERATION LEADER INSTRUCTIONS

Saki AKIMOTO, Takayuki SUZUKI, Yasuo KOTAKE and Junya GOTO

Declining workers and technical skills to the next generation have been problems in the offshore construction sites. Until now, investigations of construction works have been done. However, there is more space to consider this matter. In this study, we focusing on instructions of an operation leader, and considered the correlations between the instructions, wave and weather conditions, and caisson behavior. During the installation of the caissons, based on the instructions, construction processes can divide into two stages; a moving stage, and a settlement stage. The caisson was easily affected by waves during the moving stage. Also, in the settlement stage, spectrum peak appeared in the high-frequency region. Moreover, from the interview with the operation leader, we realized the timing of the instructions and the meanings of each behavior.