

# 浮遊ケーソンの動揺低減技術の実海域実験

倉原 義之介・武田 将 英

防波堤等に用いられるケーソンの曳航・据付作業は、波浪の影響を受けやすい工種のひとつである。特に、波の静穏な日が少ない外洋では、波の周期と同調して浮遊ケーソンが大きく動揺する問題がある。著者らは、浮遊ケーソンの波浪による動揺の低減技術として、簡単な直方体型の薄い Flume 式減揺タンクをケーソン天端に直交する形で上下2段に設置し、タンク内の水の移動によってケーソンの回転軸方向の動揺低減を図ることを提案している。本報では、茨城港常陸那珂港区で実物の巨大ケーソン（8,000 t級）に減揺タンクを搭載し、実海域における不規則波中での浮遊ケーソンの動揺低減効果を確認したので、ここに報告する。

キーワード：ケーソン, 浮遊曳航, 動揺低減, 減揺タンク, 実海域実験

## 1. はじめに

我が国では、港の中に大きな波が侵入してくることを防ぐための防波堤や、船を係留し荷揚げするための岸壁などの大型港湾構造物は、「ケーソン」と呼ばれる大きな箱（函体）で構築されることが多い。一般的なケーソンは、鉄筋コンクリート、鉄鋼、これらのハイブリッドのいずれかで構成され、主に陸上のケーソンヤードで製作される。製作後のケーソンは、起重機船で吊られた状態、もしくは海に浮かべられた状態で設置場所まで運搬される。このうち、海に浮かべられた状態のケーソンは、「浮遊ケーソン」と呼ばれ、設置場所までタグボート（曳船）で曳航される。その後、ケーソン内部に注水を行ってケーソンの喫水を下げいき、海底に予め築造された捨石基礎の上へ設置される（設置のことを「据付」と呼ぶ）。

この浮遊ケーソンの曳航・据付作業は、波浪の影響を受けやすい工種のひとつである。特に、波の静穏な日が少ない外洋では、波の周期と同調して浮遊ケーソンが大きく動揺する問題がある。図-1に、鹿島港（茨城県）における浮遊ケーソン（2,000 t級）の動揺の状況を示す。この日は、有義波周期約 8 s、有義波高 0.5 ~ 0.6 m と、据付日の中でも非常に波の静穏な日であった。ところが、浮遊ケーソンは、波と同調（共振）を起こして Roll と Pitch の回転運動（図-2）が大きくなり、ケーソンの端では、人の身長ほどの上下方向の動揺が不規則に発生していた。この浮遊ケーソンの動



図-1 浮遊ケーソン（2,000 t級）の動揺

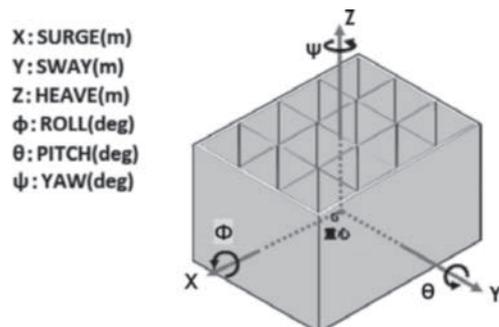


図-2 ケーソンの6自由度の運動

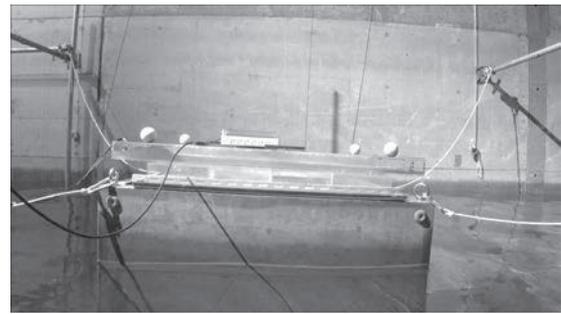
揺がより大きくなると、作業員の海中転落、ワイヤー破断によるはねられ、ケーソン下端との接触による捨石基礎やケーソンそのものの破損などの災害の発生率が高まる。波高が大きくなると、それに比例してケーソンの動揺も大きくなるため、最悪の場合にはケーソンの沈没にもつながる。さらに、ケーソンの動揺は、ケーソンの据付精度や施工の可否（稼働率）にも大きな影響を及ぼす。そのため、浮遊ケーソンの効果的な動揺低減対策が望まれている。

そこで、著者らは、浮遊ケーソンの動揺のうち、回転運動である Roll と Pitch を抑えるために、薄い Flume 式（直方体）の減揺タンクをケーソン天端に直交する形で上下2段に設置する方法を提案し、これまでに室内水理実験（小規模、大規模）と数値解析により、その効果を確認してきている<sup>1)~8)</sup>。本報では、茨城港常陸那珂港区で実物の巨大ケーソン(8,000 t 級)に減揺タンクを搭載し、実海域における不規則波中での浮遊ケーソンの動揺低減効果を確認したので、ここに報告する。

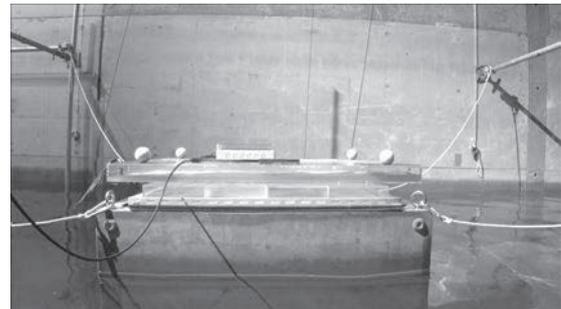
## 2. 減揺タンクの原理

本研究における減揺タンクは、ケーソンの幅と長さ方向に渡る矩形タンクであり、それぞれの内部の水の動きで Roll（幅方向の回転）や Pitch（長さ方向の回転）を減少させようとするものである。Roll を例に挙げると、その原理は次の通りである。減揺タンク内の流体の動きとケーソンの Roll は位相差を持つ。減揺タンク内の流体が動くと、その重量に起因する回転モーメントが発生し、この回転モーメントとケーソン動揺の位相差が $-90^\circ$ となるとき、ケーソンの Roll を減少させる方向に作用する。Pitch も同様である。

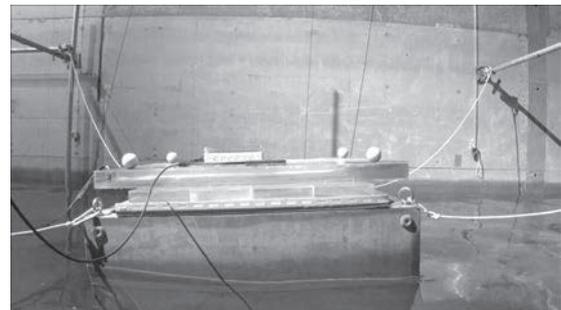
図-3 に、大規模実験（縮尺 1/15）における波浪中のケーソンの Roll と減揺タンク内の水の動きを示す。図のケーソンは、位相角が $+90^\circ \sim 0^\circ \sim -90^\circ$ の順に反時計回りの Roll 回転をしている状況である。この Roll に対しては、上段にある減揺タンク内の水（色の濃い部分）の動きが動揺を減少させる効果をもつ。ケーソンの Roll の位相角が $0^\circ$ のとき（図-3 (b)）に、減揺タンク内の水が右側に移動していると、 $-90^\circ$ の位相となる（図-3 (b) の位相差は $-90^\circ$ より若干大きい）。この水の重量によって時計回りの回転モーメントが生じ、反時計回りに回転しようとするケーソンを抑え込む形になり、浮遊ケーソンの Roll が小さくなる。



(a) ケーソンのRoll位相角 $+90^\circ$



(b) ケーソンのRoll位相角 $0^\circ$



(c) ケーソンのRoll位相角 $-90^\circ$

図-3 ケーソンの Roll と減揺タンク内の水の動き

## 3. 実海域実験

### (1) 実験概要

茨城港常陸那珂港区で東防波堤の延伸に用いられる実物の巨大ケーソン（8,000 t 級）を用いて、2022年7月31日、8月3日の2日間に、実海域における不規則波中での減揺タンクによる浮遊ケーソンの動揺低減効果を確認する実験を行った。実海域実験は、国土交通省関東地方整備局の実海域実験場提供システムの適用を受け、茨城港常陸那珂港区を管理する茨城県への水域占用許可申請、茨城海上保安部への作業許可申請を行い、港湾利用者との調整しながら実施した。

本実験で用いたケーソンは、2021年度に製作され、据付まで港内に仮置中のものである。長さ 28.7 m、幅 24.3 m、高さ 24.5 m の質量 7,927 t の RC 製の矩形ケーソンであり、国内でも最大級の大きさである。本実験では、ケーソン内にバラスト水を注水してケーソンの喫水を 15.0 m とした。これは、最もケーソンの動揺が問題となるであろう、捨石基礎への進入時の喫

水を想定している。この喫水での、ケーソン函体の計算上の固有周期は、Rollが13.7s、Pitchが12.7sである。ケーソンの天端に設置した減揺タンクは、図-4に示すように上段にRoll用が6本、下段にPitch用が5本である。図-5に示すように仮設鋼材を主要部材として、陸上ヤードで組立てた。長さはRoll用が18.4m、Pitch用が27.4mで、どちらも幅が1.7m、高さが0.6mである。減揺タンクを、300t吊の起重機船に積み込み、ケーソン仮置場所(図-6)まで海上運搬後、ケーソン上に設置・固定した。実験ではタンク内の水の動きが分かるように上部を開放した。

実験海域実験の方法を図-7に示す。最初に、減揺タンク内の水がない状態(減揺タンクなしに相当)

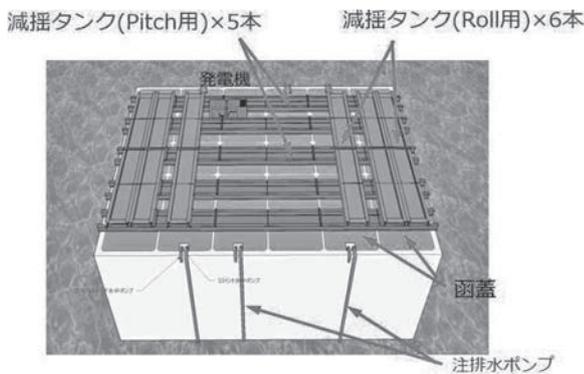


図-4 ケーソンおよび減揺タンク概要

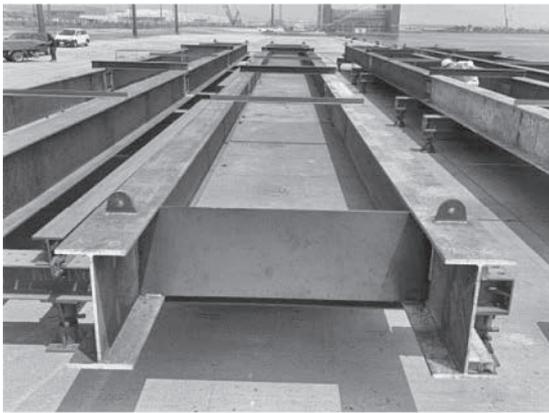


図-5 減揺タンク

での実験を行った。図-6のケーソン仮置場所(波がなく静穏な場所)から動揺計測位置(防波堤の外から波が侵入してくる場所)まで浮遊ケーソンを曳航した(図-7(a))。動揺計測位置では、ケーソンの動揺に影響しないよう、曳船とケーソンを結ぶ曳航索を弛ませた状態(図-8)で、ケーソン正面から波を受けてPitchが大きくなるように、ケーソンを浮遊させた(図-7(b))。次に、減揺タンク内に注水を行った状態(減揺タンクあり)で、同様に浮遊させた(図-7(c))。最後に、動揺計測位置からケーソン仮置場所まで浮遊ケーソンを曳航した。減揺タンクへの注水量は、タンク内の水深で調整を行った。1日目が0.1,

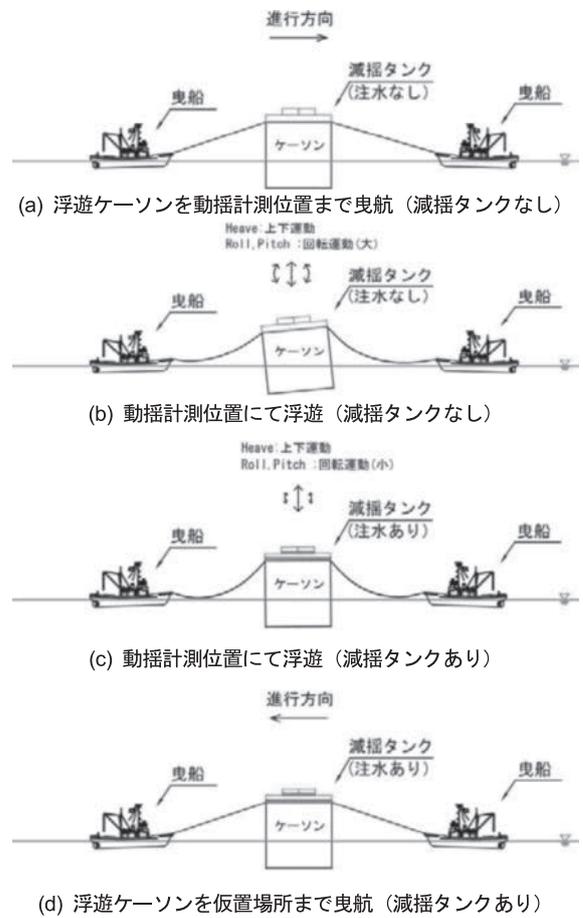


図-7 実海域実験の方法

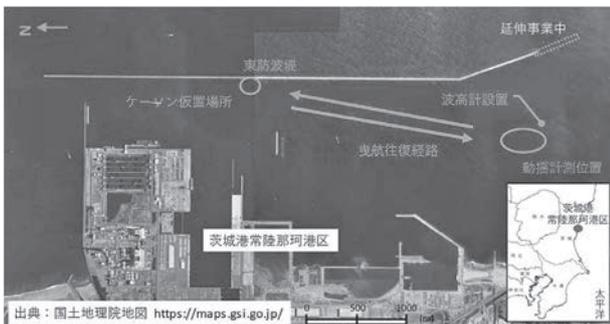


図-6 実海域実験場所

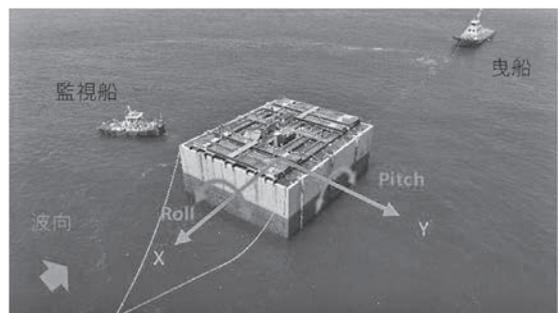


図-8 動揺計測位置における実験状況

0.2, 0.25 m と段階的にタンク水深を大きくしたのに対し、2日目はタンク水深 0.25 m のみとした。それぞれのタンク水深において、30 分間の動揺計測ができるようケーソンを浮遊させた。

実験中における浮遊ケーソンの動揺は、2種類の方法で計測を行った。1つ目はシリコンセンシングシステムズジャパン社製の姿勢角検出器 AMU-lite を用いて、Roll, Pitch, Yaw を 10 Hz で計測した。2つ目は、RTK-GPS を用いて、ケーソン 4 隅の 3ヶ所の座標を 2 Hz で取得した。計測した 3 点の座標から、ケーソンの重心位置と Roll, Pitch, Yaw を計算した。AMU-lite と RTK-GPS の動揺は、ほぼ一致したことから、本論では AMU-lite による動揺量を採用した。

また、動揺計測地点近くの海底に超音波式波高計を設置して、5 Hz で水面変動を取得した。得られた水面変動データを 20 分間毎に分割し、有義波高、有義波周期を求めた。実験中の動揺計測位置における波浪の代表値を表 1 に示す。1日目、2日目ともに、茨城港常陸那珂港区としては波高が低く穏やかな日であったが、若干の周期の長い波（うねり）が存在している状況であった。

(2) 実験結果

波浪中におけるケーソンの動揺を図 9、曳航中におけるケーソンの動揺を図 10 に示す。これらは、減揺タンクなしと減揺タンクあり（タンク水深 0.25 m）における 1 日目の計測結果である。

最初に、波浪中における減揺タンクによる浮遊ケーソンの動揺低減について述べる。前述の通り、波浪中では Pitch による動揺が卓越するようにケーソンを配置したため、図 9 (a) の Roll は、Pitch に比べるとかなり小さく、減揺タンクの有無による違いはほとんどみられなかった。図 9 (b) の Pitch は、減揺タンクなしでは、波浪と共振して Pitch の振幅が 2 ~ 3 倍程度大きくなる時間が見られた。その一方で、減揺タンクありでは、減揺タンクなしのような共振による Pitch の振幅増大は見られず、全体的に Pitch が小さく抑えられることを確認できた。表 1 に示すように、波浪中の実験では、同一の実験日であっても計測時間帯が異なるため、波浪条件に若干の差異が生じる。そこで、減揺タンクの設置に伴う動揺低減率を適切に評価するため、計測時間中の Pitch の有義値をそのときの有義波高で除した Pitch\* を算出した。同一の実験日における Pitch\* から減揺タンクによる動揺低減率を求め、これらを表 2 に示した。減揺タンクによる Pitch の動揺低減率は、1 日目が 37%、2 日目が 29% となった。

表 1 実験中の動揺計測位置における波浪

実験日	ケース	減揺タンク	有義波高	有義波周期
1 日目	2	なし	0.40 m	7.4 s
	5	あり	0.42 m	7.0 s
2 日目	8	あり	0.25 m	6.1 s
	9	なし	0.24 m	6.0 s

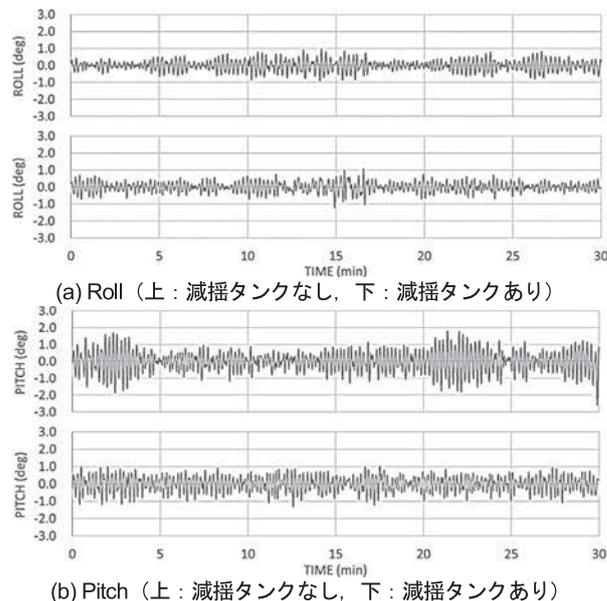


図 9 波浪中におけるケーソン動揺の時系列

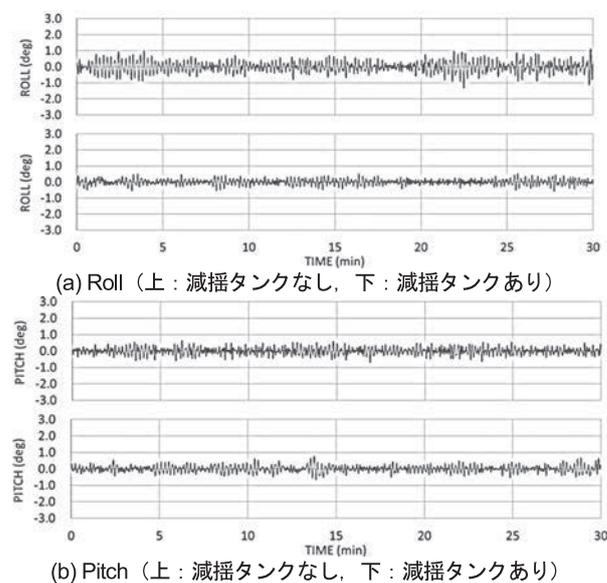


図 10 曳航中におけるケーソン動揺の時系列

次に、曳航中における減揺タンクによる浮遊ケーソンの動揺低減について述べる。曳航中のケーソンは防波堤背後に位置しており、波の作用は小さかった。そのため、ここでは波による評価は行わない。図 10 から、曳航中のケーソンは、減揺タンクなしの状態では、曳航方向と直角の向きの Roll が卓越していることが分かる。この時の Roll の周期は約 13 s で、浮遊ケーソンの Roll の固有周期 13.7 s とほぼ一致した。図 10 (a) の減揺タンクな

表一 2 波浪中における Pitch\*と動揺低減率

実験日	ケース	減揺タンク	Pitch*	動揺低減率
1日目	2	なし	6.08°/m	37%
	5	あり	3.81°/m	
2日目	9	なし	5.85°/m	29%
	8	あり	4.16°/m	

表一 3 曳航中における Rollと動揺低減率

実験日	ケース	減揺タンク	Roll	動揺低減率
1日目	1	なし	1.22°	31%
	6	あり	0.85°	
2日目	10	なし	0.95°	29%
	7	あり	0.67°	

しの Roll は、図一 9 (b) の Pitch と同様に、波浪と共振して Roll の振幅が 2～3 倍程度大きくなる時間が見られた。その一方で、減揺タンクありでは、減揺タンクなしのような共振による Roll の振幅増大は見られず、全体的に Roll が小さく抑えられることを確認できた。図一 10 (b) の Pitch は、Roll に比べるとかなり小さく、減揺タンクの有無による違いはほとんどみられなかった。同一の実験日における Roll から減揺タンクによる動揺低減率を求め、これらを表一 3 に示した。減揺タンクによる Roll の動揺低減率は、1 日目が 31%、2 日目が 29% となった。

以上より、波浪中と曳航中のいずれにおいても、著者らの提案する減揺タンクによる浮遊ケーソンの Roll と Pitch に対する動揺低減効果を実海域実験によって確認できた。

#### 4. おわりに

防波堤等に用いられるケーソンの曳航・据付作業は、波浪の影響を受けやすい工種のひとつである。特に、波の静穏な日が少ない外洋では、波の周期と同調して浮遊ケーソンが大きく動揺する問題がある。著者らは、浮遊ケーソンの波浪による動揺の低減技術として、簡単な直方体型の Flume 式減揺タンクをケーソン天端に直交する形で設置し、タンク内の水の移動によってケーソンの回転運動である Roll と Pitch の低減を図ることを提案している。本報では、茨城港常陸那珂港区で実物の巨大ケーソン (8,000 t 級) に減揺タンクを搭載し、実海域における不規則波中での浮遊ケーソンの動揺低減効果を確認した。

本技術によって、浮遊ケーソンの曳航・据付作業の安全性が向上するため、波の静穏な日が少ない外洋に面した港湾や長距離曳航が必要となる離島港湾で特に効果を発揮すると考える。また、実績を積んでいくことによって、将来的にはケーソン据付作業の稼働率の

改善 (荒天による待機日減少)、ケーソンの自動据付技術への応用などが期待される。

#### 謝 辞

本研究は、(国研) 海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所の委託研究として実施した革新的社会資本整備研究開発推進事業「浮遊ケーソンの動揺低減技術の研究開発」の実験結果を使用した。また、実海域実験に当たっては、国土交通省港湾局、国土交通省関東地方整備局、鹿島港湾・空港整備事務所、茨城港出張所、茨城県土木部港湾課、茨城港湾事務所、茨城海上保安部、鹿島海上保安署の皆様にはお世話になった。ここに記して関係各位に謝意を示す。

JICMA

#### 【参考文献】

- 1) 江口三希子, 武田将英, 岩本浩明, 松田信彦: 減揺タンクを用いた浮遊ケーソンの動揺特性に関する自由動揺実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No. 2, pp.I\_979-I\_984, 2017.
- 2) 江口三希子, 武田将英, 倉原義之介, 松田信彦, 西山大和: 減揺タンクを搭載した浮遊ケーソンの波浪中動揺低減に関する水理実験, 土木学会第 73 回年次学術講演会, No.II-175, pp.349-350, 2018.
- 3) 中村友昭, 大沼史都, 趙容桓, 水谷法美, 江口三希子, 倉原義之介, 武田将英: 浮遊ケーソンの動揺に与える減揺タンクの効果とその簡易的な評価手法に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 75, No.2, pp.I\_403-I\_408, 2019.
- 4) 中村友昭, 竹山俊介, 白井開斗, 趙容桓, 水谷法美, 倉原義之介, 武田将英: 減揺タンク付浮遊ケーソンの動揺に与える波浪諸元の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.78, No.2, pp.I\_253-I\_258, 2022.
- 5) 倉原義之介, 武田将英, 原知聡, 中村友昭, 水谷法美: 減揺タンクを用いた浮遊ケーソンの動揺低減に関する数値解析手法の開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.78, No.2, pp.I\_259-I\_264, 2022.
- 6) 倉原義之介, 武田将英, 原知聡, 中村友昭, 水谷法美: 不規則波中における浮遊ケーソンの動揺および減揺タンクを用いた動揺低減効果の検討, 土木学会論文集, Vol.79, No.17, 23-17121, 2023.
- 7) 倉原義之介, 平林隆, 八木久貴, 武田将英, 原知聡, 中村友昭, 水谷法美: 実海域における減揺タンクを搭載した浮遊ケーソンの動揺低減効果, 土木学会論文集, Vol.79, No.18, 23-18064, 2023.
- 8) Shirai, K., Nakamura, T., Cho, Y. H., Mizutani, N., Kurahara, Y., Takeda, M.: Development of Coupled Numerical Model between Floating Caisson and Anti-Oscillation Tanks, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol.11, No.9, 1669, 2023.

#### 【筆者紹介】

倉原 義之介 (くらはら よしのすけ)  
東亜建設工業(株)  
技術研究開発センター 水圏技術グループ  
主任研究員



武田 将英 (たけだ まさひで)  
東亜建設工業(株)  
技術研究開発センター 水圏技術グループ  
リーダー

