減揺タンクによる浮遊ケーソンの動揺低減技術

倉原　義之介 [1]

[1] 東亜建設工業株式会社　技術研究開発センター（〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町 1-3）

ケーソン天端に設置した減揺タンクにより，えい航・据付時の浮遊ケーソンの回転運動（Roll，Pitch）を低減する技術を開発した．タンク内の水がケーソンの傾きにより，遅れて移動し，動揺を抑える方向の回転モーメントを生じさせる仕組みである．茨城港常陸那珂港区において 8,000 t 級ケーソンを用いた実海域実験により効果を確認し，2025 年度には伏木富山港の岸壁工事で実施工に適用した．

キーワード：ケーソン，えい航・据付，減揺タンク，動揺低減技術

1. はじめに

港湾の防波堤や岸壁には，大型のコンクリート製函体であるケーソンが広く用いられる．製作したケーソンを海に浮かべ，タグボートで設置場所までえい航した後，内部に注水して捨石マウンド上へ据え付ける．本稿では，この「浮遊ケーソン」の動揺を低減する技術を紹介する．

浮遊ケーソンのえい航・据付は，波浪の影響を受けやすい．特に外洋では，波の周期とケーソンの固有周期が近づくと共振し，Roll（幅方向の回転）や Pitch（長さ方向の回転）が大きくなる．**図-1** にケーソンの動揺方向の定義を示す．**図-2** は鹿島港における 2,000 t 級ケーソンの動揺状況である．有義波高 0.5～0.6 m の比較的穏やかな条件でも，ケーソン端部には人の身長ほどの上下動が生じた．動揺の増大は，作業員の転落，ワイヤー破断時のはねられ，ケーソンや捨石マウンドの損傷などの危険を高め，据付精度や施工可否にも影響する．

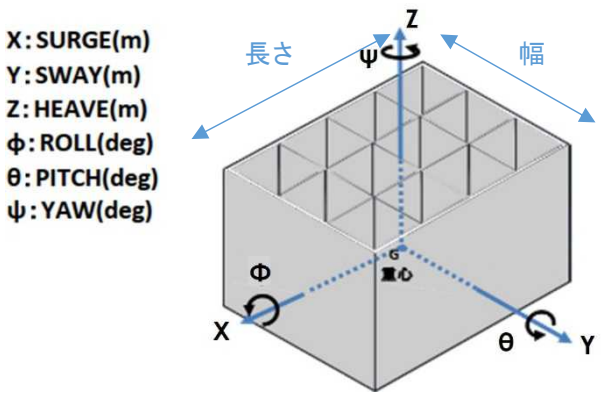


図-1　ケーソン動揺方向の定義

そこで，当社では Roll と Pitch を低減するため，単純な形状の薄い Flume 式（直方体）の減揺タンクをケーソン天端に設置する方法を開発した．これまでに，水理実験と数値解析により効果を確認している [1)~8)]．

本稿では，減揺タンクの原理，8,000 t 級ケーソンを用いた実海域実験，および伏木富山港における実施工への適用結果を紹介する．なお，実海域実験は，国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所の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」にて行ったものである．



図-2　浮遊ケーソンの動揺状況

2. 減揺タンクの原理

浮遊ケーソンのHeave，Roll，Pitchには，浮力による復原力があり，振り子と同様に固有周期がある．ケーソンは数百トン～数千トンの重量を有する巨大な構造物であるため，波が一波作用しても動揺量はそれほど大きくならない．しかしながら，固有周期に近い波が連続して作用すると，共振によって動揺が増大する．

図-3に減揺タンクによる動揺低減の原理を示す．波による動揺で生じたケーソンの傾きからやや遅れて，減揺タンク内の水が移動する．この遅れを位相差と呼ぶ．動いた水の重量バランスによる回転モーメントがケーソンに発生する．この回転モーメントとケーソン動揺の位相差が-90 °に近づくときに，ケーソンの回転速度を抑える方向のモーメントが作用し，ケーソンの動揺が減衰する．ケーソンの幅方向と長さ方向に減揺タンクをそれぞれ設置することによって，RollとPitchを減少させることができる．

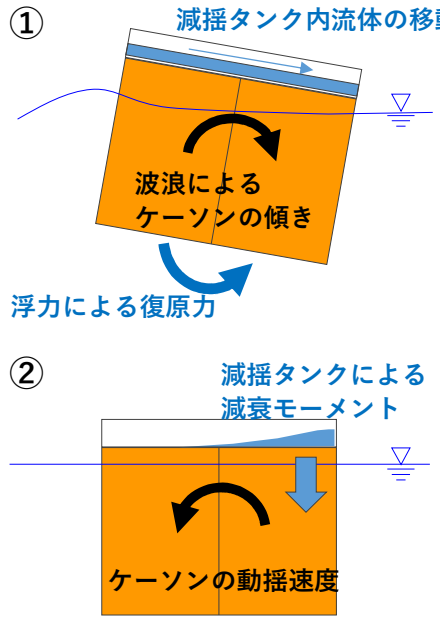


図-3　減揺タンクによる動揺低減の原理

図-4は，2,000 t級ケーソン模型のPitch自由動揺を示す．図に示すように浮遊状態のケーソンは初期傾斜を与えると，外力のない状態では減衰しながら一定の周期で動揺を続ける．この時の周期が固有周期である．減揺タンクがない場合は動揺が長く続くが，減揺タンクを設置し，タンクの長さと水量を適切に調整すると，動揺が短時間で収まる．このように，減揺タンクによって減衰を大きくすることで，共振を抑えられる．

3. 実海域実験

(1) 実験概要

2022年7月31日と8月3日に，茨城港常陸那珂港区で8,000 t級ケーソンを用いた実海域実験を行った．実験では，移動のない浮遊状態での波浪による動揺（以下，波浪中）およびえい航中における減揺タンクの効果を確認した．

対象は，長さ 28.7 m，幅 24.3 m，高さ 24.5 m，質量 7,927 t の RC ケーソンである．喫水は，捨石マウンド進入時を想定して 15.0 m とした．この条件での固有周期は，Roll が 13.7 s，Pitch が 12.7 s である．

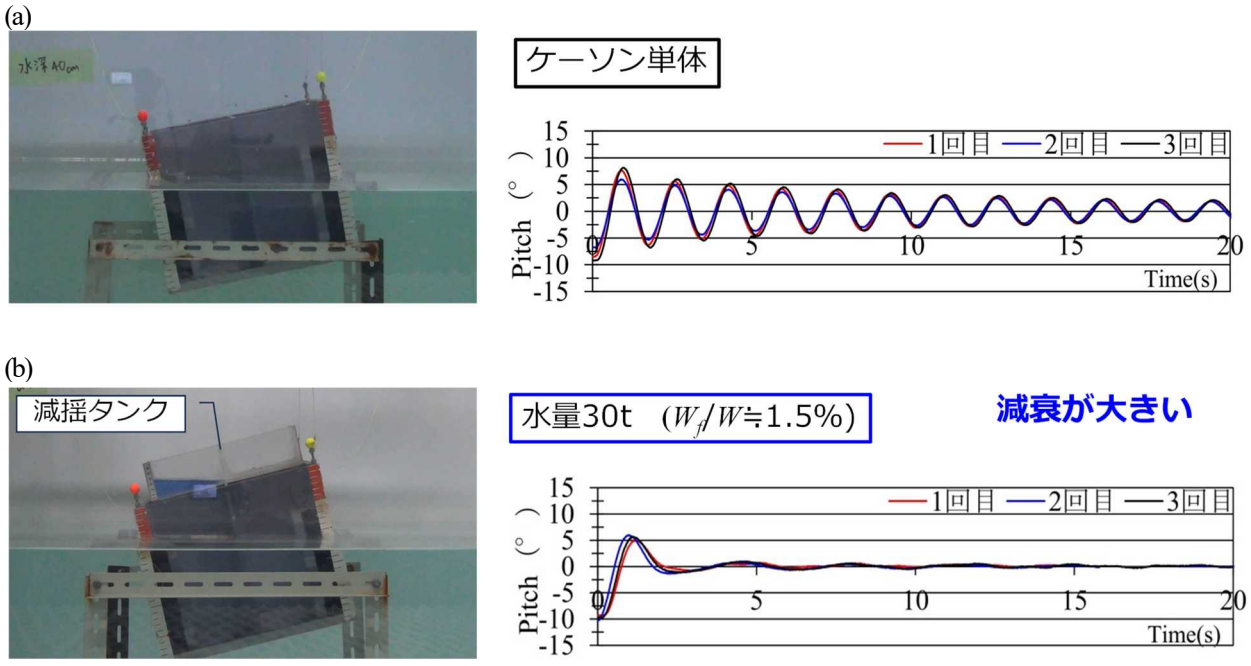


図-4　浮遊ケーソンの自由動揺（上：減揺タンクなし，下：減揺タンクあり）

ケーソンの天端に設置した減揺タンクは，**図-5** に示すように下段に Pitch 用が 5 本，上段に Roll 用が 6 本である．**図-6** に示すように各種形鋼を主要部材として，陸上ヤードで組立てた．タンク長さは Roll 用が 18.4 m，Pitch 用が 27.4 m で，どちらも幅が 1.7 m，高さが 0.6 m である．タンク内の水の動きが分かるように上部を開放したタンクを用いている．

はじめにタンク内が空の状態，次に注水した状態でケーソンを浮遊させ，それぞれの動揺を計測した．計測時は，**図-7** に示すようにケーソンが正面から波を受け，Pitch が卓越する向きに保持した．

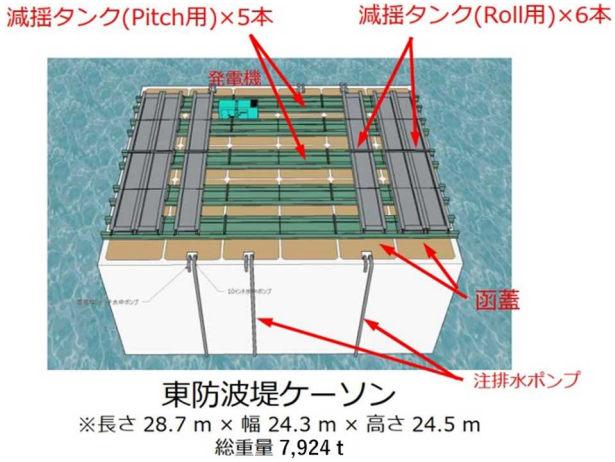


図-5　実海域実験で用いたケーソンおよび減揺タンクの配置



図-6　実海域実験で使用した減揺タンク

実験中の有義波高は 0.24～0.42 m，有義波周期は 6.0～7.4 s であった．波高は低かったが，ケーソンを動揺させやすい長周期成分が含まれていた．

図-8 に計測した Pitch の時系列データを示す．減揺タンクへの注水なしでは，共振による振幅の増大が見られたが，減揺タンクに 0.25m の高さまで注水した計測結果では，共振による振幅の増大が起こらず，振幅が低く保たれた．

表-1 に計測した動揺の有義値を算出し，計測時の有義波高で単位波高当たりの値(Pitch*)に整理した結果を示す．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．また，えい航時には Roll 方向の動揺が卓越していた．この時の計測値を同様にまとめた結果を**表-2** に示す．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，波浪中とえい航中のいずれでも，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．

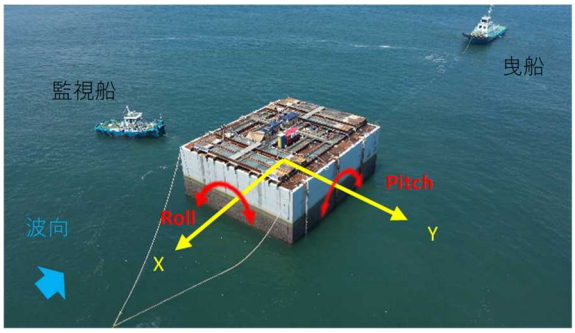


図-7　動揺計測位置での実験状況

表-1　波浪中におけるPitch*と動揺低減率

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

表-2　えい航中におけるRollと動揺低減率

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

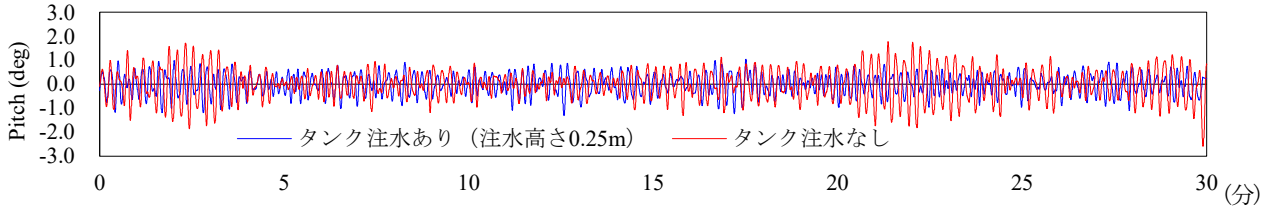


図-8　波浪中におけるケーソンのPitch時系列

4. 実施工への適用

(1) 適用概要

2025 年 10 月に「伏木富山港（富山地区）岸壁（-10m）（2 号）（改良）築造工事（その 2）」において，本技術を現場導入し，適用状況および動揺低減効果を確認した [9]．本工事は，富山新港に仮置きされたケーソンを富山港までえい航し据付するものである．全 4 函の施工のうち 2 函目のケーソンえい航時に本技術を適用した．

使用したケーソンはスリット付 RC 製で，長さ 15m，幅 10m，高さ 11m，質量約 1300t，えい航喫水 9m である．減揺タンク 3 本（Roll 低減用として長さ 7.5m×幅 3.0m を 2 本，Pitch 低減用として長さ 6.0m×幅 3.0m を 1 本）を設置した．なお，スリットはえい航中の隔室への海水流入を防ぐため止水板により閉じている．減揺タンクの寸法および注水量は，事前の数値流体解析により適切に決定した．**図-9** に示す沖合のえい航区間（動揺低減技術適用区間）において本技術を適用した．ケーソンのえい航時は**図-10** に示すように起重機船によりケーソンの上向きにテンションをかけて（部分吊り状態）動揺を抑制し，曳船によりえい航した．

減揺タンクの設置状況を**図-11** に示す．実海域実験では，鋼製の減揺タンクの設置・撤去に起重機船を用いており，設置・撤去に要する時間が実用化の課題となっていた．その課題を改善するため，人力での設置・撤去が可能なシート素材の減揺タンクを使用した．結果として，減揺タンク一式の組立時間は 2 人での施工条件で約 2 時間，注水は約 30 分，排水および解体は合計約 40 分であり，本技術が前後工程への影響を抑えて適用可能であることが確認された．

(2) 導入効果

えい航中のケーソンの動揺量（Roll と Pitch）をジャイロセンサ（住友精密工業製：AMU-Lite）を用いて計測し，ケーソン傾斜角の時系列データを取得した．また，えい

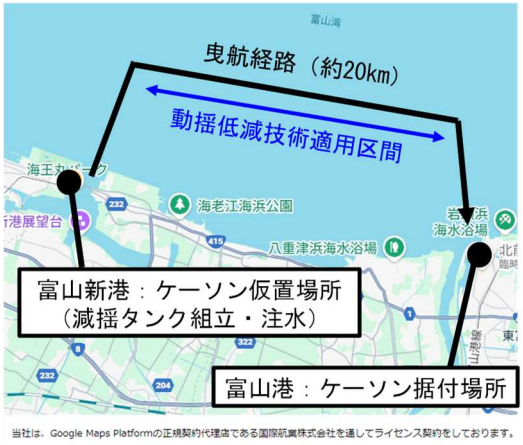


図-9 えい航経路・動揺低減技術適用区間



図-10 ケーソンえい航状況



図-11 減揺タンクの施工状況（ダイジェスト）

航中にタンク内の水を排水し，減揺タンク効果の有無（注水あり，なし）の動揺を比較した．有義値で比較すると，減揺タンクへの注水ありと注水なしで，Roll は19%低減し，Pitch が 24%低減した．ただし，本結果は波浪等が変化する中で，起重機船による部分吊りを併用した条件で得られた点に留意が必要である．

5. おわりに

減揺タンクは，タンク内の水の移動を利用して，浮遊ケーソンのRollとPitchを低減する技術である．8,000 t級ケーソンを用いた実海域実験では約29～37%，伏木富山港の実施工ではRoll 19%，Pitch 24%の動揺低減を確認した．また，シート製タンクの採用により，人力で設置・撤去できる施工方法を構築した．

本技術は，浮遊ケーソンのえい航・据付時の安全性と施工性の向上に寄与する．今後は適用実績を重ね，より現場で使いやすい技術，自動据付への応用などへ発展させたい．

謝辞：革新的社会資本整備研究開発推進事業においては，委託元である港湾空港技術研究所をはじめ，委員会の先生方からは多くのご助言・ご指導を賜りました．また，実海域実験の実施にあたりましては，国土交通省港湾局，国土交通省関東地方整備局，茨城県土木部港湾課，茨城海上保安部の皆様に，工事適用では国土交通省北陸地方整備局の皆様に多大なるご協力をいただきました．ここに記して，関係各位に深く感謝の意を表します．

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.
9) 柴田雄也，倉原義之介，川岸靖，加藤雅大：減揺タンクを用いたケーソン動揺低減技術の実施工への適用結果について，土木学会第 81 回年次学術講演会, No. II-133, 2026.