

長大ケーソン曳航時の動揺低減方策 に関する研究

A EXPERIMENTAL STUDY ON REDUCTION MEASURES OF TOWING HEAVYWEIGHT CAISSON MOTIONS

安野浩一朗¹・森屋陽一²・山口和彦³・今村正⁴・坂井勝洋⁴

Koichirou ANNO, Yoichi MORIYA, Kazuhiko YAMAGUCHI, Tadashi IMAMURA, and
Katsuhiko SAKAI

¹正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 五洋建設(株) 衣浦処分場工事事務所 (〒470-2342 愛知県知多郡武豊町沢田新田89-43)

⁴五洋建設(株) 衣浦処分場工事事務所 (〒470-2342 愛知県知多郡武豊町沢田新田89-43)

The stability of towing heavyweight caisson that is approached by crane barge is investigated. Two types of hydraulic experiments are carried out in a 2-dimensional water flume. One is the experiment for the inspection of roll motion to the towing caisson, and the other is for that of pitch motion.

Through the experiments, we demonstrated that the approached crane barge reduced roll motion of caisson. Finally, we applied this towing method to the actual operation, and completed to carry all caissons to the installation position with no accident.

Key Words : Towing, heavyweight caisson, crane barge, 2-dimensional hydraulic experiments

1. はじめに

現在, 大規模な廃棄物受入施設となる衣浦港3号地廃棄物最終処分場整備事業が愛知県にて進行中である。整備事業においては据付による工期短縮が可能で, 目地を極力減らすことができるために高度な遮水性を保持する上で有利となる長大ハイブリッドケーソン(90m×9函)が採用されている。陸上で製作した長大ケーソンは, 製作ドッグ(津港)から衣浦港までの区間を曳航される。

これまで, 高知港¹⁾などを代表とする長大ケーソンの曳航方法は, 安全性の確保や蛇行航行を防止するために, 4~6隻程度の大型曳船団を用いて同時に曳くのが主流であった。しかしながら, この曳航方法においては, 長大ケーソンを引く各曳船の向きは, 進行方向と異なるため, 長大ケーソンの操舵が難しく, また, RollやPitch動揺が増幅する可能性があるなどの問題があった。

それらの問題を解決するために, 前後各1隻ずつの曳船で曳航し, かつRollやPitch動揺を低減させるために起重機船を長大ケーソンに横付けした状態での曳航を今回新たに試みるに至った。図-1に本施

工に採用した曳航配置図を示す。

そこで本研究では, 数値解析と水理模型実験により, 新たな曳航方法を採用した場合の長大ケーソンの動揺特性の変化について検証し, また, 長大ケーソンの回頭作業を再現した実験を行い, 回頭時のケーソンの安全性について確認することを目的とした。

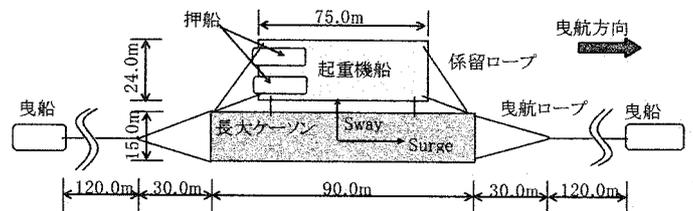


図-1 曳航計画(起重機船横付け)

2. ケーソン曳航時の動揺解析

(1) 解析手法の概要

検討においては, 起重機船を横付けしない状態でケーソンを曳航した場合の動揺量について検証する

ために動揺解析²⁾を行った。

動揺解析において、流体力のうち波強制力、付加質量、造波減衰係数は線形ポテンシャル理論に基づくグリーン関数法で算定した。曳航時の評価については、曳航速度に応じた速度ポテンシャルを考慮し、無限水深と仮定の上計算を行った。風力、潮流力は速度の2乗に比例する抗力として評価した。ロープ張力は使用するロープの張力歪特性に対応した非線形ばねモデルを用いて評価したが、石崎ら³⁾が検討したY字型ロープの張力歪特性ではなく、2本のロープを用いると仮定した上でばね特性が合致するように調整した。

外力条件は、現地で曳航時に想定される波浪・風浪条件とし、不規則波としてブレットシュナイダー・光易型スペクトルを、不規則風としてダベンポートのスペクトルを用いた。

表-1 外力条件

諸元	数値	作用方向
曳航速度	3.5kt	-
波浪条件	有義波高	1.5m
	有義波周期	4.5s
風浪条件	平均風速	15.0m/s
潮流	1.0kt	45°

表-2 ケーソン諸元一覧

ケーソンタイプ	曳航時		
	-12M函	-13M函	-14M函
全長(m)	90.0		
全幅(m)	15.0		
全高(m)	15.5	16.5	17.5
喫水(m)	5.0	5.2	5.3
総重量(kN)	68,400	70,600	72,700

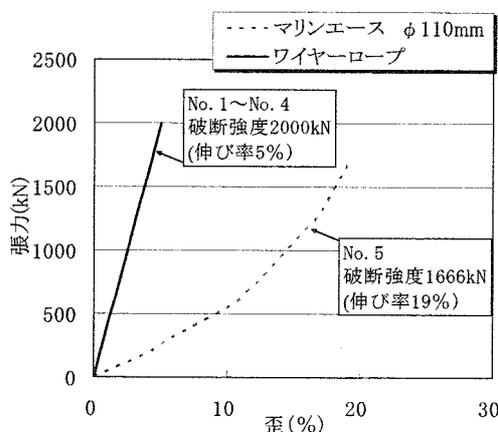


図-2 曳航ロープの張力歪特性

これらの力を考慮して、浮体の運動方程式を数値積分することにより、動揺量やロープ張力を時系列的に評価した。ここで、不規則波に対する解析を行う場合の付加質量、造波減衰係数の算定は、代表周

期として有義波周期に対して行った。表-1に外力条件を、表-2に解析を行ったケーソン諸元をそれぞれ示す。また、解析時に考慮した曳航ロープの張力歪特性値を図-2に示す。

(2) 動揺解析結果

図-3に、2時間の計算を行った動揺解析結果のうち、曳航ロープNo. 1の作用張力の最大値を波向、風向毎に整理した結果を示す。図-3より、作用張力は波向135°、風向90°において最も大きくなる結果を示している。なお、本検討では、曳航ロープNo. 1への作用張力が他よりも常に大きくなる傾向を示していた。また、解析の結果において、作用張力値は一般的に適用される破断強度に対する安全率3を確保できていないため、ロープの安全対策に十分注意する必要性を示している。

図-4にケーソンタイプ別の最大動揺量を示す。最大動揺量は、波向、風向を変化させた解析結果の最大値をタイプ別に示したものである。図-4より、どの函体においてもRoll動揺が大きくなる傾向を示しており、また、-14M函の動揺が最も大きくなる結果であった。また、曳航時のRoll動揺量は、一般的な荷役作業限界である4.0度付近まで発生しているため、曳航時の安全性が損なわれる可能性がある。

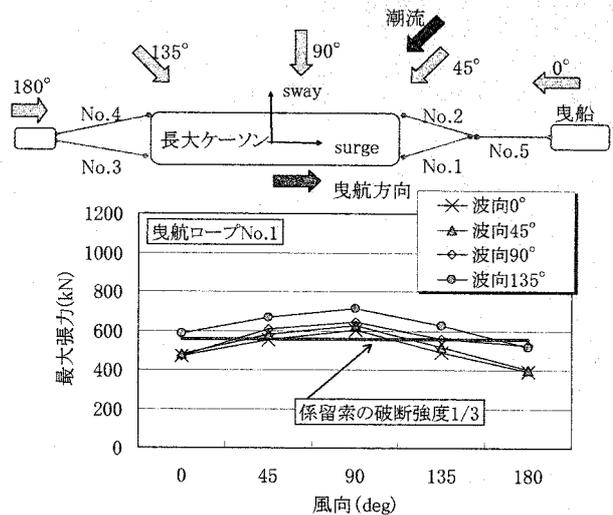


図-3 動揺解析結果 (曳航ロープ最大張力) (-14M函)

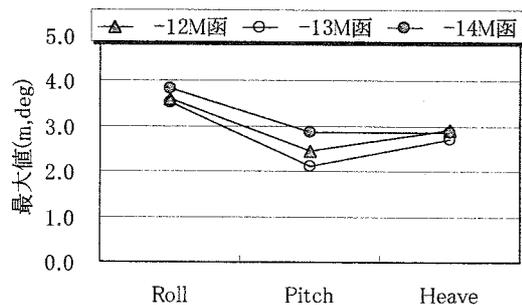


図-4 動揺解析結果 (動揺量)

上田ら⁴⁾を参考にして長大ケーソンの動揺の固有周期を算出した。表-3に算出結果を示す。固有周期の算出結果から、Pitchについては、想定される波との共振により動揺が増幅する可能性があることを示している。

表-3 動揺の固有周期

固有周期	-12M 函	-13M 函	-14M 函
Surge	100s 以上		
Sway	100s 以上		
Heave	52.9s	53.8s	54.6s
Roll	9.6s	11.2s	13.7s
Pitch	7.1s	7.2s	7.3s

3. 水理模型実験（曳航実験）

(1) 実験概要（曳航実験）

長水路を用いた縮尺1/50の水理模型実験を行い、提案した起重機船横付け時の動揺特性の変化を把握した。動揺解析の結果を受け、実験は-14M函のケーソンを対象とし、波との共振が生じる可能性のあるPitch方向および、解析時の動揺量が大きいRoll方向について、それぞれ分けて行うことで動揺成分毎の特性を詳細に検討することとした。表-4に実験模型の諸元を示す。なお、実験においては、図-1に示す押船のモデル化までは行っていない。実験は、規則波とし、周期を変化させたケースについて行うとともに、曳航状態を模擬した流速を作用させた条件についても行った。表-5に実験ケースを示す。実験模型の変位量、回転角はあらかじめ取り付けた複数のマーキングを画像解析することで算出した。

表-4 実験模型の諸元

諸元	単位	実験スケール(現地スケール)	
		ケーソン	起重機船
全長	m	1.80(90.0)	1.50(75.0)
全幅	m	0.30(15.0)	0.48(24.0)
全高	m	0.35(17.5)	0.100(5.0)
喫水	m	0.107(5.3)	0.042(2.1)
総重量	N	581.8(72,700kN)	30.2(37,000kN)
重心位置 (底面から)	m	0.102(5.3)	0.05(2.5)

表-5 実験ケース

実験 模型	起重 機船	実験スケール(現地スケール)			
		水深 (m)	波高 (m)	周期 (s)	流速 (m/s)
Pitch	あり なし	0.45	規則波 0.03 (1.5)	0.424(3.0)	無
				0.636(4.5)	0.073(1.0kt)
				0.707(5.0)	0.255(3.5kt)
Roll	あり なし	0.45	規則波 0.03 (1.5)	0.990(7.0)	無
				1.273(9.0)	0.073(1.0kt)

(2) Pitch・Roll実験の模型概要（曳航実験）

Pitch実験の配置図を図-5に示す。実際の起重機船は、押船を用いてケーソンと平行に航行していくため、係留ロープおよび緩衝用のタイヤのみがケーソンのPitch動揺へ影響を及ぼすものと想定される。したがって、本実験における起重機船は、喫水のみを合わせた状態で水槽片側壁に固定して現地の状況を再現した。また、実験時の起重機船は水槽内での波浪場の局所的な変化をさけるために実物よりも幅を縮小した模型を用意した。図-6にPitch実験時の拘束状況を示す。ロープの配置については、水槽の壁に金車を設置し、余長分を真上に折り返すことで係留ロープの長さや角度が実際の配置と合うように調整した。

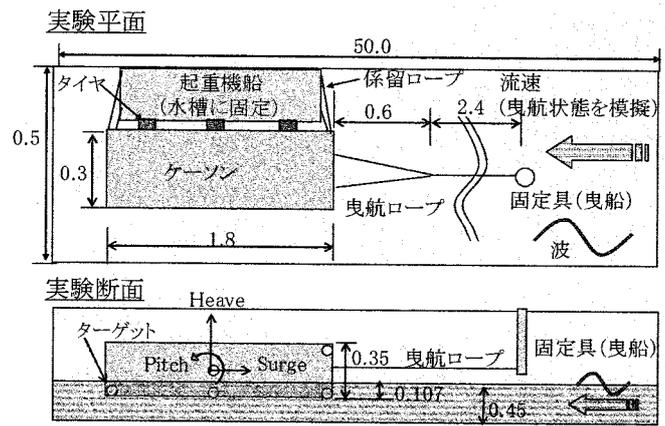


図-5 Pitch実験の配置図 (単位:m)

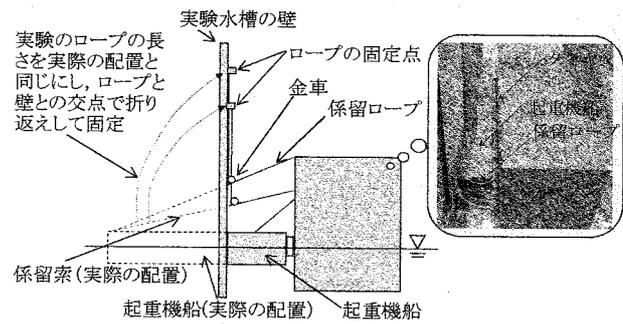


図-6 Pitch実験時の拘束状況

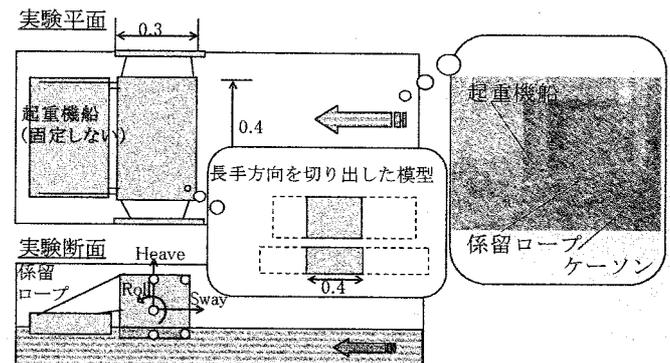


図-7 Roll実験時の配置図 (単位:m)

Roll実験の配置図を図-7に示す。ケーソンのRoll動揺へ影響を与えるのは、起重機船自体の復元特性や係留ロープであるため、本実験では、起重機船とケーソンはロープを介して横付けする条件とした。また、Pitch実験とは別途に、長さ0.4m分を切り出した模型を用意し、全長比に応じて重量を減じさせた。

実験に用いた係留・曳航ロープの模型は、Pitch実験では実物のロープと張力歪特性がほぼ同等となるゴム、Roll実験では実物に対して切り出した長さの比に応じた張力特性を持つ繊維紐を選定して用いた。ゴム、紐の材料は、解析結果を参考にして、破断強度の1/3を実験時の作用張力範囲と想定し、その付近の張力歪特性がほぼ同等であるものを選定した。図-8に曳航ロープの張力歪特性の比較例を示す。

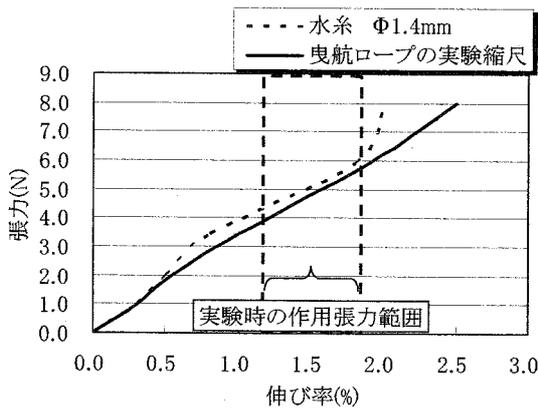


図-8 張力歪特性の比較例 (曳航ロープ)

(3) 実験結果 (曳航実験)

図-9にケーソン単独曳航時のPitch実験の結果を示す。実験は50波の作用時間とし、プロット値は実験ケース毎のPitch最大値を示している。図-9から、Pitch動揺の固有周期に近い波周期7sのケースにおいて、Pitch角が 2.0° 程度まで増幅している。また、実験結果はややばらつきが生じているものの、流速の違いによる明確な差は見られない。

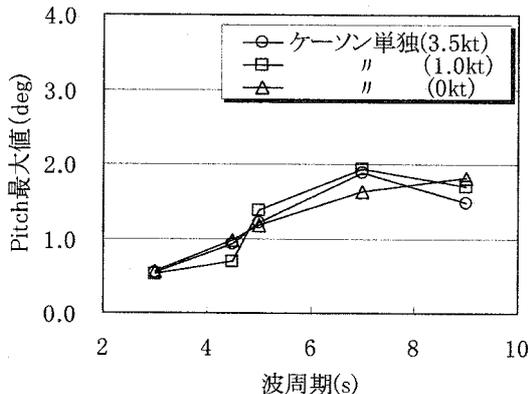


図-9 実験結果 (ケーソン単独)

次に、起重機船を横付けした場合のPitch動揺の低減効果についてケーソン単独曳航時との比較を行った。図-10にPitch動揺の応答値を示す。なお、応答値は、Pitch角の最大値にケーソン全長を乗じて、入射波高で除して整理したものである。

起重機船横付け時とケーソン単独時とのPitch応答値を波周期毎に比較すると、ややばらつきは見られるものの両者はほぼ同値である。したがって、ケーソンのPitch動揺については、起重機船の有無による変化が生じないものと考えられる。本実験の結果、ケーソンのPitch動揺については起重機船を横抱きしても低減効果を得られないものと考えられる。

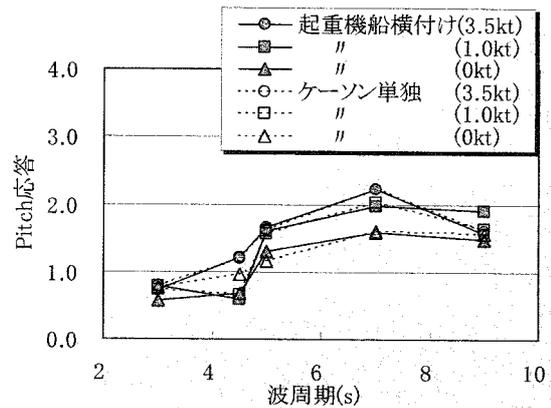


図-10 実験結果 (Pitch応答)

図-11にRoll実験の結果を示す。応答値は、Roll角の最大値にケーソン全幅を乗じて、入射波高で除して整理したものである。図-11から、波周期5s以下のケースにおいては、起重機船横付け時の方が応答値は小さく、7sよりも長い周期のケースになると、逆の傾向に移行している。その傾向は、流速の有無にかかわらず明確に分かれている。以上から、波周期5s程度までは、起重機船を横付けすることによりケーソンのRollは十分な低減効果が得られるものの、7sを超えた周期に対しては、逆効果となると考えられる。

波周期が7s以上で、起重機船の横付けによる動揺低減効果が明確に分かれたのは、波周期が長くなると、ケーソンと起重機船の衝突が頻繁に生じて相互干渉が発生し、ケーソンの動揺量が逆に増加したからである。頻繁に衝突が生じたのは、ケーソンではなく、起重機船のRoll動揺が急激に大きくなったためであり、その要因は、起重機船のRollの固有周期が6.5s程度であるため、7s付近では起重機船の動揺が増幅し、その結果ケーソンの動揺へ悪影響を及ぼしたと考えられる。

以上から、現地においては、起重機船によりケーソンのRoll低減効果が得られる波周期5s以下の条件下で作業を実施するように、施工管理へ反映させた。

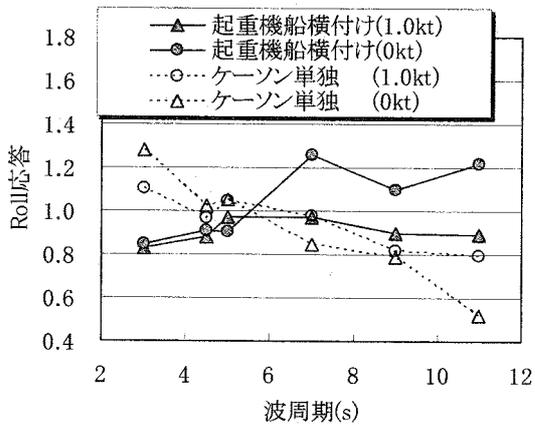


図-11 実験結果 (Roll応答)

4. 水理模型実験 (回頭実験)

(1) 実験の概要 (回頭実験)

縮尺1/150の平面実験を行い、ケーソン回頭時の航行経路に関する検討を行った。なお、本実験は矩形水槽 (全長4.0m×高さ1.5m×幅2.0m) にて行い、波浪外力は作用させていない。

表-6にケーソン模型の諸元を、表-7に実験ケースをそれぞれ示す。実験方法は、曳船を模擬した移動台車を一定速度で航行・回頭させることとし、曳船の旋回圏 (回頭半径の2倍) や、速度の違いによるケーソン挙動の変化について検討することとした。

図-12に実験平面、および図-13に実験配置をそれぞれ示す。実験時には、水槽上からビデオ撮影を行い、撮影データの画像解析によりケーソンの平面的な挙動を把握した。

表-6 ケーソン模型

諸元	単位	実験スケール
		縮尺1/150 (回頭実験)
全長	m	0.600
全幅	m	0.100
全高	m	0.117
喫水	m	0.036
排水質量	N	21.552
重心位置	m	0.034

表-7 実験ケース (L: ケーソン全長)

実験スケール(現地スケール)			
水深 (m)	旋回圏	速度	起重機船
0.5	0.6m (1L)	0.042 (1.0kt)	なし
		0.147 (3.5kt)	
	1.2m (2L)	0.042 (1.0kt)	
		0.147 (3.5kt)	

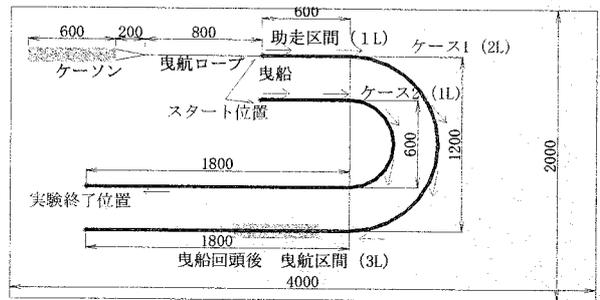


図-12 実験平面 (単位mm)

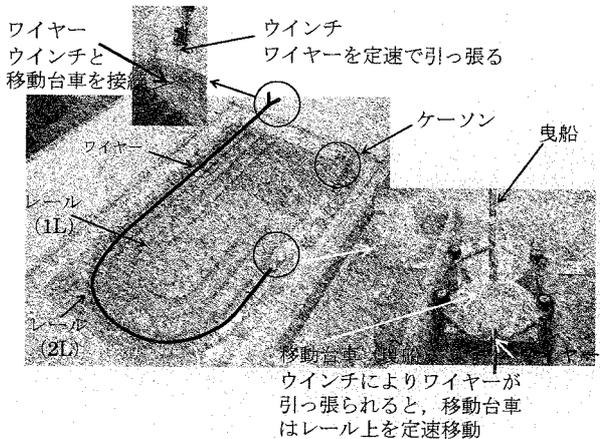


図-13 実験配置

(2) 実験結果 (回頭実験)

図-14および図-15に回頭実験におけるケーソンの軌跡を示す。曳船の旋回圏1L、速度1.0ktのケースにおいては、実験開始から40~50s間でケーソンは大きく旋回している。旋回の際のケーソンは急激に傾斜し、目視による確認では10~20°程度のRoll回転が発生していた。また、旋回前後におけるケーソン中心位置は鋭角な軌跡を描いており、実施工においては危険を伴う作業となるものと考えられる。一方、図-15に示す旋回圏2Lのケースでは、ケーソンの軌跡は旋回前後においてもなめらかな円弧を描いており、安全面において概ね支障がないように見える。その軌跡は曳船の軌跡よりも外側に膨らんでおらず、また、比較的曳船と同じ経路を辿っているため、周囲の航行船舶との衝突を回避するための保安区域の設定も容易であると考えられる。図-15には、速度1.0ktのケースにおけるケーソン中心位置の軌跡も合わせてプロットしたが、速度の違いによる軌跡の差は殆どなかった。したがって、今回の実験においては、回頭時のケーソンの挙動は曳船の旋回圏によりほぼ決定されているものと考えられる。

実際の作業は、安全性を損なわないように、曳船の速度や曳航方向を随時調整していくため、実験が実情を詳細に再現できているとはいいがたいものの、今回の実験結果からでは、3.5ktまでの速度で曳船の旋回圏を2L程度以上にしておけば、回頭作業を概ね安全に行うことが可能であるものと想定できる。

