

異型長大ケーソン曳航時の 挙動特性に関する研究

道前 武尊¹・佐貫 宏²・今村 正³・坂井 勝洋⁴
 ・古賀 大三郎⁵・丹羽 強⁶・伊藤 勇志⁷

¹五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）

E-mail: takeru.michimae@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1）

E-mail: hiroshi.sanuki@mail.penta-ocean.co.jp

³五洋建設（株）名古屋支店 武豊灰捨地護岸工事事務所（〒470-2532 愛知県知多郡武豊町字竜宮1-1）

E-mail: tadashi.a.imamura@mail.penta-ocean.co.jp

⁴五洋建設（株）名古屋支店 武豊灰捨地護岸工事事務所（〒470-2532 愛知県知多郡武豊町字竜宮1-1）

E-mail: katsuhiro.sakai@mail.penta-ocean.co.jp

⁵五洋建設（株）名古屋支店 武豊灰捨地護岸工事事務所（〒470-2532 愛知県知多郡武豊町字竜宮1-1）

E-mail: daisaburo.koga@mail.penta-ocean.co.jp

⁶中部電力（株）衣浦1号地最終処分場建設所 土木建築課（〒470-2532 愛知県知多郡武豊町字竜宮1-1）

E-mail: niwa.tsuyoshi@chuden.co.jp

⁷中部電力（株）衣浦1号地最終処分場建設所 土木建築課（〒470-2532 愛知県知多郡武豊町字竜宮1-1）

E-mail: itou.yuushi@chuden.co.jp

本研究では、大規模廃棄物処分場に採用された異型長大ケーソンに関して曳航時の挙動特性を調べるため、動揺解析ならびに水理模型実験を実施した。非対称なケーソン形状から、進行方向から波が直っすぐに作用した場合でも、RollやSwayが発生することがわかった。一方、波がケーソン真横から作用した場合には、ケーソン下部に設けられたフーチングによってRoll成分が抑えられ、フーチングのない直線函と比べて動搖量が少なくなる事が確認できた。また、実際の曳航を模擬した回頭実験により、ケーソンを安全に回頭するための曳船の旋回半径について明らかにした。

Key Words : asymmetry, caisson, numerical analysis, towing, hydraulic model experiment, rolling

1. はじめに

大規模な廃棄物受入施設となる衣浦1号地最終処分場整備事業が中部電力㈱により現在進行中である。本整備事業においては、据付時の工期短縮や廃棄物護岸の遮水性向上を目的とした長大ケーソンが採用されている。これららの長大ケーソンは、津港にあるドライドッグで製作され、衣浦港までの約60km区間を曳航される計画である。

長大ケーソンの曳航については、直線長大ケーソン（L=90m）を対象とした安野ら¹⁾による既往の研究がある。

従来の長大ケーソンの曳航方法は高知港などを代表する、複数の曳船を用いた大型曳船団による曳航方法が主流であった。それに対し、安野ら¹⁾は前後に曳船を配置し、RollやPitch動搖量の低減を目的に起重機船を長大ケーソンに横付けした状態での曳航方法を提案し、衣浦3号地における整備事業において現地適用を行っている。一方、衣浦1号地で曳航するケーソンは経済性の観点からケーソン幅を縮小し、かつフーチング構造を採用している。また、遮水に対する弱点を作らないことを目的として、図-1に示すように海側端部を含むケーソンの形状が異型となっている。今回のように延長の長い異型ケーソンの



図-1 異型長大ケーソン概要図（東④）

施工例は極めて少なく、土木工事特有の一点もの生産であるため、安全に曳航するためにはケーソン曳航時の挙動特性を事前に把握することが重要となる。

そこで、本研究では、動揺解析および水理模型実験から異型長大ケーソンの挙動特性を把握するとともに、衣浦3号地における既往研究と比較することにより、異型長大ケーソン曳航時における安定性を評価することを目的とした。

2. ケーソン曳航時の動揺解析

(1) 解析手法の概要

検討に際し、まずはじめにケーソンを単独で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、規則波・一様風とした。これらの外力条件を考慮し、浮体の運動方程式を数値積分することで、浮体の動揺量を時系列的に評価した。表-1に外力条件を、表-2に解析対象としたケーソン諸元値を示す。また、動揺量の評価はRoll・Pitch・Yaw・Heaveとし、図-2に動揺の定義をそれぞれ示す。衣浦1号地では異型長大ケーソンの他に直線長大ケーソンもあり、衣浦3号地との相違点は、ケーソン全幅が約2~6mの範囲でスリム化されている点と片側3mのフーチングを有している点が挙げられる。

(2) 動揺解析結果

ケーソンタイプ別の最大動揺量を図-3に示す。最大動揺量は、波向、風向を変化させた解析結果全体の最大値を示したものである。同様に、衣浦3号地において最も動揺量の大きかった-14m函についても示している。図-3よりPitch・Yaw・Heaveについては衣浦3号地に対して同等もしくは小さい動揺量となるケースが多い。

一方で、南①と南②のRoll量が大きく増大する結果となった。Roll方向の揺れの周期を確認すると他のタイプのケーソンに比べ、波周期に近い値であった。このことより、波による共振の可能性があるため、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。固

表-1 外力条件

諸元	数値	作用方向
曳航速度	3.5kt	-
波浪条件	波高 周期	1.5m 4.5s
風浪条件	風速	15.0m/s
	潮流	1.0kt
	135°	90°
	90°	45°
	180°	0°
係留索No.4	潮流	風向
係留索No.2	波向	曳船
係留索No.3	曳航方向	係留索No.1

表-2 ケーソン諸元値（衣浦1号地）

ケーソンタイプ	直線	直線	異型	直線
	北③	北④	東①	東②
全長(m)	90.0	90.0	90.0	90.0
全幅(m)	9.0	10.0	13.0	10.0
全高(m)	14.2	15.2	16.2	16.2
喫水(ケーソン下端からの距離)(m)	7.0	7.0	5.9	7.5
総重量(kN)	61,980	69,259	77,519	73,202
重心x(中心からの距離)(m)	0.0	0.0	0.9	0.0
重心y(中心からの距離)(m)	0.0	0.0	1.9	0.0
重心z(水面から下向きの距離)(m)	3.4	3.2	1.7	3.5
係留索位置(水面から上向きの距離)(m)	2.2	2.0	2.5	2.1
ケーソン下端から重心zまでの距離(m)	3.6	3.8	4.2	4.0
横メタセンタ-高さ(m)	0.5	0.6	0.8	0.5
縦メタセンタ-高さ(m)	95.9	95.7	111.8	89.4
回転慣性モーメント Roll(kN·m ²)	148,337	194,762	2,786,347	225,377
回転慣性モーメント Pitch(kN·m ²)	4,351,881	4,880,272	53,890,544	5,177,683
回転慣性モーメント Yaw(kN·m ²)	4,287,891	4,803,177	53,287,085	5,076,672
ケーソンタイプ	異型	直線	直線	
	東④	南①	南②	
全長(m)	90.0	90.0	90.0	
全幅(m)	10.0	13.0	12.0	
全高(m)	16.2	16.2	15.7	
喫水(ケーソン下端からの距離)(m)	7.5	5.7	6.1	
総重量(kN)	73,202	72,643	70,740	
重心x(中心からの距離)(m)	2.0	0.0	0.0	
重心y(中心からの距離)(m)	-0.3	0.0	0.0	
重心z(水面から下向きの距離)(m)	3.5	1.4	4.6	
係留索位置(水面から上向きの距離)(m)	2.1	2.1	2.2	
ケーソン下端から重心zまでの距離(m)	4.0	4.3	2.6	
横メタセンタ-高さ(m)	0.4	0.6	0.5	
縦メタセンタ-高さ(m)	89.6	116.4	94.4	
回転慣性モーメント Roll(kN·m ²)	225,377	266,234	1,487,896	
回転慣性モーメント Pitch(kN·m ²)	5,188,857	5,138,132	43,651,469	
回転慣性モーメント Yaw(kN·m ²)	5,087,847	5,080,472	43,009,624	

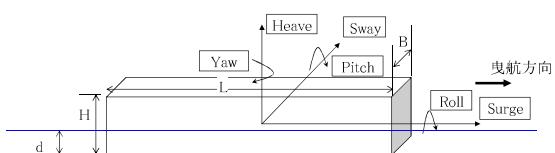


図-2 動揺の定義

□ 北③ × 北④ × 東① △ 東② ◇ 東④ + 南① ○ 南② ● -14m函

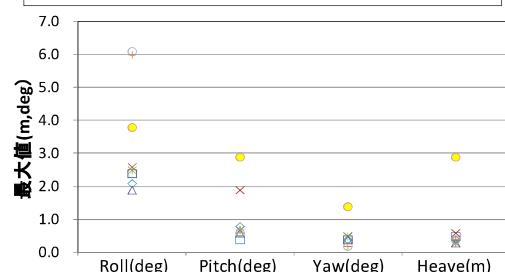


図-3 動揺解析結果

有周期の算出結果から南①および南②のRoll方向の固有周期が波周期の約3倍となっており、このことがRoll量が増大した一つの要因と考えられる。また、安野らの実験でRollが最大になった-14m函も固有周期が13.7秒であった。表-3に算出結果を示す。南①および南②のRoll量が衣浦3号地の結果に対して大きくなっているもう一つの原因として、線形ポテンシャル理論に基づく動揺解析のため、フーチング周りで発生する渦による損失が考慮されていない点が挙げられる。

さらに、異型である東①および東④については、施工上問題となる動揺量ではないが、異型ケーソンの場合、重心位置が中心軸からずれているため、進行方向から波を受けた際にもRollが最大で0.6°発生した。

3. 水理模型実験（断面実験）

フーチングによるケーソン動揺量の低減効果、および異型部分のケーソン挙動に対する影響を水理模型実験により確認した。

(1) 実験概要（断面実験）

長水路を用いた縮尺1/50の水理模型実験を行い、フーチングによる影響を調べた。この実験ではケーソン真横から波や流れが作用した際の横揺れを想定し、水路幅に収まる長さの1/50ケーソン断面模型を作成した。動揺解析の結果を受け、南①のケーソンを対象とし、解析時の動揺量が大きく、フーチングによる動揺量低減効果が期待できるRoll方向を対象に実験を行った。実験配置図および実験ケースをそれぞれ図-4および表-4に示す。なお、実験においては曳船の詳細モデル化までは行っていないが、曳航ロープを水路の両側壁に固定する形でこれを模擬した。実験では模型に取り付けた複数のマーカーをターゲットとして、画像解析により動揺量を算出した。また実際の施工では起重機船にケーソンを横抱きして曳航するケースも考えられるため、曳航時の両者の干渉についても確認した。

また、ケーソン先端部にもフーチングを有している構造のため、曳航時にフーチングが水の流れを阻害し、ケーソン先端部が深く沈みこむ懸念があった。そこで、図-5に示すように実形状の1/50異型ケーソン模型（東④）を製作し、異型部の位置を変えた2ケースで進行方向から想定曳航速度である3.5ktの流れを作成させ、ケーソン模型の動きを確認した。実験模型の諸元値を表-5に示す。

実験に用いた係留・曳航ロープ模型は、それぞれ現地で用いるものと張力歪特性がほぼ同等であるものを選定した。Roll方向の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φ1.1mmのゴムを選定してシリコンゴムを選定して用いた。また、没水量確認実験

表-3 動揺の固有周期

固有周期	北③	北④	東①	東②
Roll	10.2	10.4	14.8	11.3
Pitch	8.3	8.3	7.6	8.6
固有周期	東④	南①	南②	-14m函
Roll	11.3	13.5	13.6	13.7
Pitch	8.6	7.5	7.8	7.3

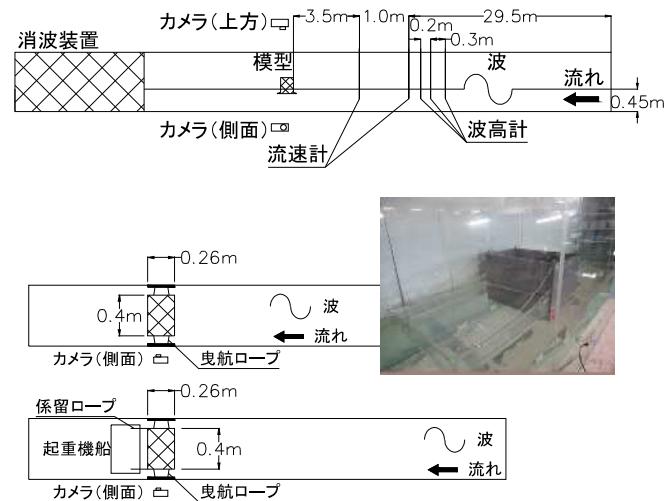


図-4 実験配置図 (Roll方向)

表-4 実験ケース (Roll方向)

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)
あり なし	0.45	規則波 0.03 (1.5)	0.424(3.0) 0.636(4.5) 0.707(5.0) 0.990(7.0) 1.273(9.0)	無 0.073(1.0kt)

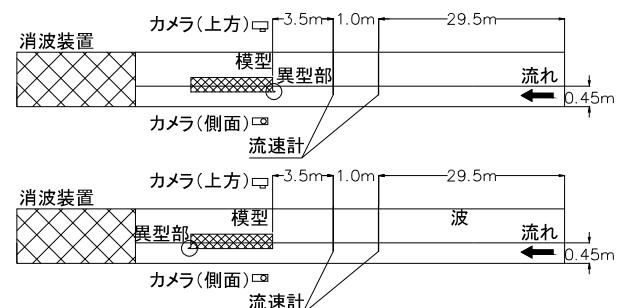


図-5 実験配置図 (没水量確認)

表-5 実験模型の諸元値

諸元	単位	実験スケール(現地スケール)		
		ケーソン(Roll用)	ケーソン(異型)	起重機船
全長	m	1.80(90.0)	1.80(90.0)	1.50(75.0)
全幅	m	0.26(13.0)	0.20(10.0)	0.48(24.0)
全高	m	0.324(16.2)	0.324(16.2)	0.100(5.0)
喫水	m	0.114(5.7)	0.150(7.5)	0.042(2.1)
総重量	N	581.1(72,643kN)	585.6(73,202kN)	30.2(37,000kN)
重心位置 (底面から)	m	0.086(4.3)	0.080(4.0)	0.05(2.5)

で用いた。起重機船とケーン間の係留索はφ3.0mmのシの曳航ロープはφ1.5mmの繊維紐を選定し、この曳航ロープは平面実験でも同じものを用いた。

(2) 実験結果（断面実験）

図-6に、ケーン単独曳航時の衣浦1号地、衣浦3号地の水理模型実験結果および衣浦1号地の動揺解析結果におけるRoll量を示す。解析で得られた動揺量に対し、実験結果は27%程度の低減が確認できた。これは、解析時に考慮されていなかったフーチングによる動揺量低減効果であると考えられる。ケーン単独曳航時のRoll量は周期4.5秒で最大値を取り、すべての周期において衣浦3号地と比較して大きな低減効果が確認できた。周期4.5秒でRollが最大となった原因としては、ケーンの固有周期が13.5秒であることや、波の半波長がケーン幅と同等になるため、ケーン前面と背面の水位差によって発生した傾きであると考えられる。

また、図-7に起重機船横抱き時の衣浦1号地および衣浦3号地の水理模型実験結果を示す。起重機船を横抱きしたケースでは、衣浦1号地と衣浦3号地のRoll最大値に対して大きな差異はなく、ケーン単独曳航時と同様に周期4.5秒において最大値を取ることが確認できた。これより、起重機船を横に抱いた際は起重機船の動きが係留索を通じてケーンに伝わり、起重機船の動きが支配的な要素になるとされる。衣浦3号地の場合は、起重機船の有り無しで大きな変化は見られなかつたが、衣浦1号地では起重機船を横に抱くことでRoll量がやや増加する結果となった。この結果から、起重機船とケーンを結ぶ係留策になるべく張力が発生しない、係留金具位置や曳航方法について検討する必要がある。

一方、すべてのケースにおいてSway量が増加したが、ケーン下端部における水の流れをフーチングが止めることで、側面の圧力が増大したためと考えられる。また、ケーン側面のフーチングと起重機船の干渉は確認されず、異型ケーン先端のフーチングによる没水量はフーチングが無い向きに対して現地スケールで10cm程度の差異であったため、曳航に支障をきたす要素でないことが確認できた。

4. 水理模型実験（平面動揺実験）

(1) 実験概要（平面動揺実験）

平面水槽を用いた縮尺1/50の水理模型実験を行い、実際の施工を想定した曳航実験および回頭実験を実施した。図-8、表-6および図-9に実験配置図および実験ケースを示す。異型ケーン模型（東④）および係留策は前述した同様のものを用いた。断面水槽実験から、今回の曳航に関して、係留策に張力が掛った状態で起重機船を横に

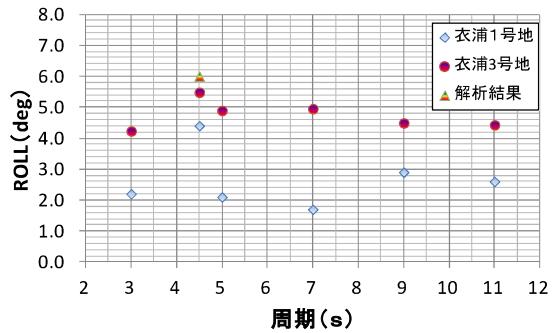


図-6 Roll量（潮流1.0ノット、起重機船なし）

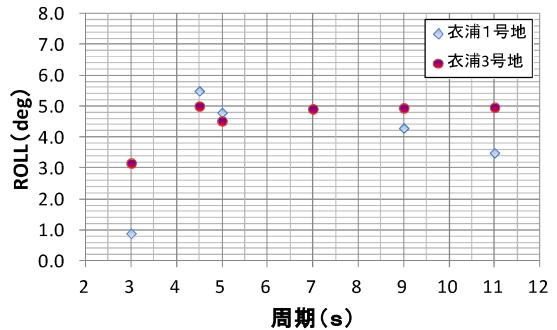


図-7 Roll量（潮流1.0ノット、起重機船あり）

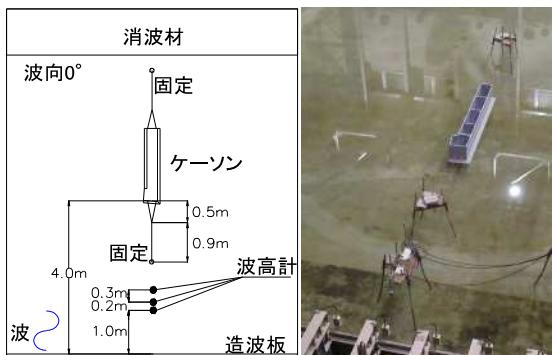


図-8 実験配置図（平面水槽実験：波向0°）

表-6 実験ケース（平面実験）

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)	波向 (°)
なし	0.45	規則波	0.424(3.0)	0
		0.03	0.636(4.5)	90
		(1.5)	0.707(5.0)	180
			0.990(7.0)	270
			1.273(9.0)	

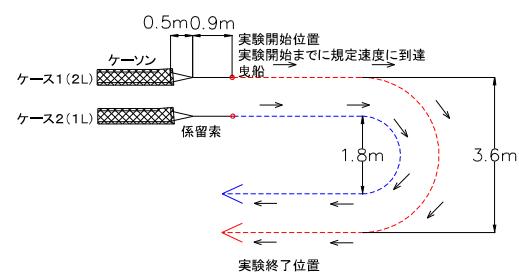


図-9 実験配置図（平面水槽実験：回頭実験）

配置すると動搖量が大きくなる結果が得られたため、ケーソン単独曳航を想定した。後方の曳船はブレーキ船であり、現地において回頭する際は通常使用しないため前方に位置する主曳船の影響のみを考慮した。また、異型部を前方もしくは後方どちらにした方が曳航性能が高いか判断できないため、曳航実験では波浪外力による動搖量の計測だけでなく、曳航時の異型部の位置（異型部を前方とするか後方とするか）による挙動の違いについても確認した。さらに回頭実験では波浪外力を与えない状態で、曳船を模擬した移動台車を3.0kt（速度一定）で航行・回頭させ、回頭半径によるケーソン挙動の変化について検討した。

(2) 実験結果（平面動搖実験）

図-10および図-11に衣浦1号地と衣浦3号地の実験結果の比較図を示す。進行方向から波を受ける場合（波向き0°および波向き180°）はPitchとHeaveについて比較し、進行方向横向きから波を受ける場合（波向き90°および270°）はRollとHeaveについて比較した。

進行方向から波を受ける両ケースにおいて同様の傾向が見られた。ケーソンのPitchおよびHeaveとともに衣浦3号地の結果に比べ、同等もしくは安定的な結果が確認できた。特に、周期7秒以下においては大きく低減されていることが分かる。一方、ケーソン延長よりも波の半波長が長くなる周期9秒以上の波については、ケーソンの動搖が水面の上下運動にほぼ支配され、双方に大きな差異は見られなかった。

進行方向に対して、横から波を受ける両ケースにおいて

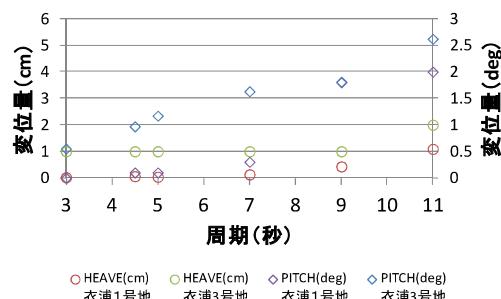


図-10 PITCH・HEAVE 比較図（左：波向0°、右：波向180°）

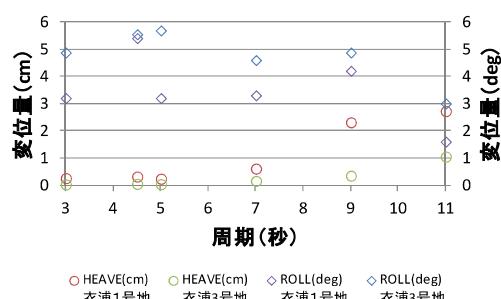


図-11 ROLL・HEAVE 比較図（左：波向90°、右：波向270°）

ても同様の傾向が見られた。ケーソンのRollおよびHeaveとともに衣浦3号地の結果に比べ、同等もしくは安定的な結果となった。断面実験と同様に水位差に依存する周期4.5秒で最大値を取り、双方に大きな差異は見られなかった。それ以外の周期においては衣浦3号地よりも安定的な結果であることが確認できた。

全体的な動搖量では衣浦3号地に比べて安定的な挙動を示したが、進行方向から波を受けた際に直線函では発生し得なかったRollやSwayが発生することが確認できた。

曳航方向に対し右側（現地では沖側）から波を受けることを前提とすると、異型部を前方として曳航した際は波向き0°と270°の組み合わせ、後方として曳航した際は180°と90°の組み合わせとなる。図-12に進行方向から波を受ける場合の動搖量について相関図を示す。図-12からも分かるようにSwayに多少のばらつきがあるものの

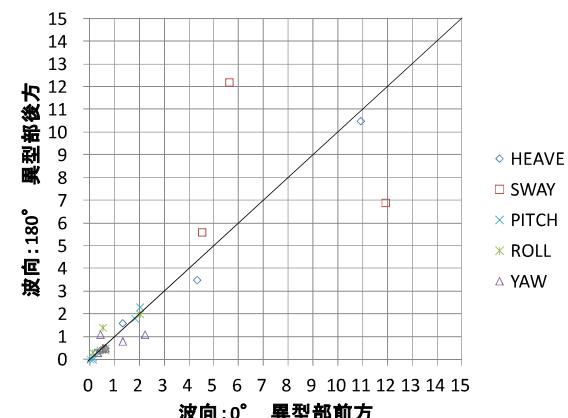
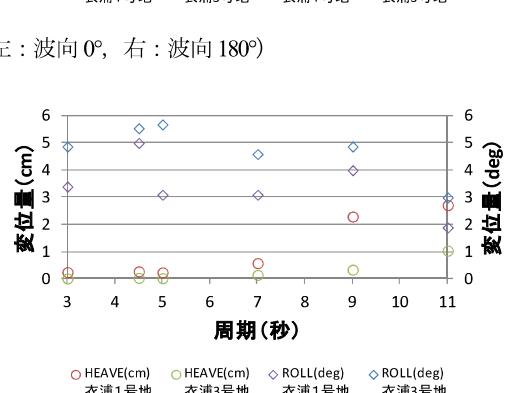
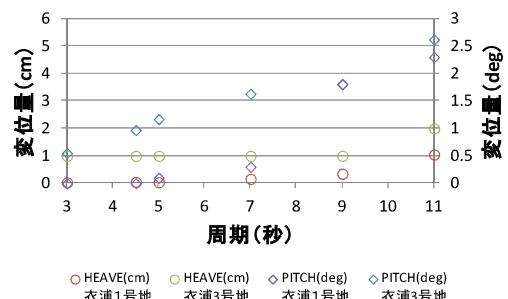


図-12 相関図（波向0°と波向180°）



異型部の前後に関わらず、同等の挙動を示すことが確認できた。回頭実験結果は衣浦3号地の結果と同様に、回頭半径 $1L$ (L はケーソン長さ) では回頭時にケーソンが急旋回する結果となり、ケーソン上部が著しく傾倒する結果となった。しかし、回頭半径 $2L$ では曳船の軌跡上をケーソンが進み、安定的に回頭できる事を確認した。

6. おわりに

本研究において以下の主要な結論を得た。

- ・動搖解析の結果、RollおよびPitchについて衣浦3号地における既往研究と比較したところ、同程度の動搖量となつた。施工上問題となる動搖量ではないが、異型ケーソンの場合、重心位置が中心からずれていれば、進行方向から波を受けた際にもRollが発生することを確認した。
- ・断面水槽実験の結果、フーチングの影響が明らかとなつた。Rollについては周期4.5秒で極大となる傾向が見られ、フーチングのない衣浦3号地の既往研究に比べ全ての周期帯で動搖量は小さく、安定性が増す結果となつた。一方Swayについては変位量が増大する結果となり、フーチングによって下端方向への流れが阻害されていることが原因と考えられる。
- ・断面水槽実験の結果、起重機船を配置した場合は係留索を通じてケーソンに影響を及ぼす起重機船の動搖が支配的であることが確認できた。対策として、ケーソン側の係留金具位置をケーソン天端からケーソン側面に移すことによって、起重機船の動搖によるケーソンの動搖量を低減する。また、自航式の起重機船を使用することである程度係留策に張力が掛らない状態で曳航することが必要であると考えられる。

- ・断面水槽実験の結果、異型部を前方にして曳航すると、異型部より前方に張り出したフーチングによって、フーチングが無い場合に比べて、現地スケールでケーソン前方が10cm程度沈み込む傾向がみられたが、曳航に影響を及ぼすほどの没水量ではなかった。
- ・平面水槽実験の結果、ケーソン前方より波が作用する場合（波向 0° ），半波長がケーソン延長を超える周期9秒あたりからPitchが大きくなつた。また直線函では発生し得ないRollやSwayが発生する結果となつた。一方、波がケーソンの真横より作用するケース（波向 90° ）では、断面実験と同様、フーチング効果によりRollは低減するが、Heaveに対しては既往研究に比べて若干増加する結果となつた。さらに回頭時の軌跡として、 $3.0kt$ 程度の曳航速度で曳船の旋回圈を $2L$ 程度以上（ L ：ケーソン全長）確保すれば、概ね安全に回頭することが確認できた。

参考文献

- 1) 安野浩一郎, 森屋陽一, 山口和彦, 今村正, 坂井勝洋: 長大ケーソン曳航時の動搖低減方法に関する研究, 海岸開発論文集, 第 26 卷, pp.825-830, 2010.
- 2) 流体研究グループ, 「船舶流体学ノート(3)」3 次元波動流場のグリーン関数を求める方法, 日本造船学会誌, vol.536, 昭和 49 年 2 月.
- 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・据付時の動搖および索張力, 海岸工学論文集, 第 46 卷, pp841-845, 1999.
- 4) 上田茂, 白石悟, 柳沢雄博: 超巨大タンカーの係留時動搖特性, 海岸工学論文集, 第 25 卷, pp602-606, 1978.

(2018.3.15 受付)

SEAKEEPING PROPERTIES OF TOWING A MASSIVE AND ASYMMETRIC CAISSON

Takeru MICHIMAE, Hiroshi SANUKI, Tadashi IMAMURA, Katsuhiro SAKAI,
Daisaburo KOGA, Tsuyoshi NIWA and Yuushi ITOU

Kinuura-1 Landfill Waste Disposal Site Development Project which will expand as Large Scale Waste Receiving Facility is presently in progress by Chubu Electric Power Co. Inc. In this development projects, massive caissons were adopted aiming at reducing the leakage risk by shortening the construction period and reducing the number of joints between caissons during installation. Even among them, the shape of the caisson on the ocean-side is asymmetry and the stability evaluation during towing is regarded as important.

In this paper, the behavioral characteristics of the massive and asymmetric caissons during towing has been confirmed by fluctuation analysis and hydraulic model experiment and reported.