

ケーソン据付時の動揺及び索張力に関する現地調査

Site investigation on the behavior of a caisson installed under waves and the tension of wires

堀沢真人*・佐藤典之*・坂間 茂**・矢口真光***・滑川正倫****

Masato Horisawa, Noriyuki Sato, Shigeru Sakama, Masamitsu Yaguchi, Masanori Namekawa

In order to elucidate the process of installing caissons and the behavior of caissons under oceanic waves, the waves, the motion of the caisson, and the tension of wires were measured during the installation of a caisson. The motion characteristics of a caisson installed under waves were clarified on the basis of measurement results. Then we simulated caisson motion by considering the reaction force and friction force acting on caissons. We verified the analytical method applied to caisson motion by comparing simulated results with measurement results.

Keywords : caisson motion, tension of wires, site investigation, analytical method

1. はじめに

近年、港湾の建設は外洋に面した場所に展開される傾向にあるが、そこではケーソン据付の限界波高が低いために作業の機会が著しく制限され、建設工程を短縮できない要因となっている。今後は沖合人工島などに厳しい条件下での作業が予想されることから、据付作業の合理化が強く求められている。

現状において、ケーソン据付に用いる使用機材の決定や作業方法は、熟練者の経験と勘に依存している点が多く、ケーソンやマウンドなどの損傷、位置決め用索の切断などが後を絶たない。据付作業を困難にしている要因は、着底直前のケーソンの動揺である。しかし、ケーソン底面とマウンドとの距離（ボトムクリアランス、以下BC）が小さい場合のケーソンの挙動は未解明であり、従来の動揺解析手法では現象を再現できない。堀沢ら（1996）はマウンドとの接触を考慮した計算を実施して、水理模型実験によりその妥当性を確認している。ただし、現地データによる検証は十分とはいえない。

一方、据付作業の実態に関する調査事例は少なく、据付方法や、索張力の緩衝材として用いられるタイヤの妥当性についても十分な検討がなされていない。

本調査は、据付作業時のケーソンの動揺、索張力などを計測し、据付作業の実態や据付時のケーソンの動揺特性を明らかにするとともに、数値計算を実施してその妥当性について検討したものである。

2. 現地調査の概要

(1) 調査方法

現地調査は、常陸那珂港第4埠頭・東護岸建設におけるケーソン据付作業中に実施した。据付場所を図-1に、ケーソンの諸元を表-1に示す。

ケーソン据付作業は、1)仮置場から現地への回航、2)注水による現地マウンド上への仮置き、3)排水による再浮上後、ウインチ操作による位置決め、4)注水に

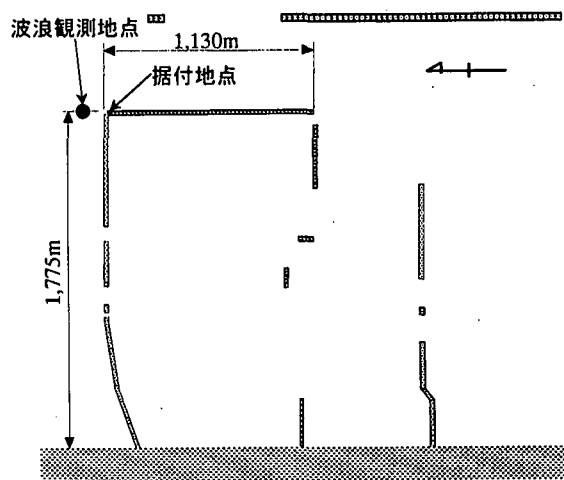


図-1 据付地点

表-1 ケーソン諸元

長さ	L(m)	20.35
幅	B(m)	16.20
深さ	D(m)	16.00
喫水	d(m)	11.75
重心高さ	KG(m)	5.08
メセンタ高さ	GM(m)	2.45
重量	W(t)	4064.3
慣動半径	Kxx(m)	7.87

* 正会員 東亜建設工業株式会社土木本部設計部 (102 東京都千代田区四番町5)

** 正会員 東電環境エンジニアリング株式会社環境事業本部

*** 正会員 東京電力株式会社富津火力建設所

**** 正会員 東亜建設工業株式会社東京支店

より着底，の順序で行われた．この間の波浪，ケーソンの動揺を連続的に計測し，3)及び4)の状態では索張力も計測した．波浪観測点を図-1中に示す．計測項目及び計測器の一覧を表-2に示す．また，位置決め時の各作業船及び計測器の配置を図-2に示す．

(2)位置決め時の係留系のバネ特性

図-2に示すように，索張力の緩衝のため，位置決め時には古タイヤ（トラック用）を5本重ねて，各ラインのアンカー部分に配置している．これまで，このような使い方をする場合のタイヤの伸びー張力特性は明らかになっていないため，ケーソン据付に用いているものと同種のタイヤの引張試験を実施した．試験結果を図-3に示す．ここには2つのタイヤの試験結果が示されているが，どちらも張力が10tf（伸び0.25m）程度までは張力と伸びは概ね線形の関係にある．それ以上の張力では，両者でやや異なるものの，剛性が大きくなり緩衝材としては機能しなくなる．

位置決め時には，後述するように全体で最大20tfの張力を作用させていることから，1本あたりでは約4tfの張力ということになる．よって，タイヤは概ね線形範囲内で使用されている．

線形範囲のバネ定数は約40tf/mであるが，これと鋼索のバネ定数を(1)式によって求め，鋼索とタイヤによって構成される各ラインのバネ定数を算定した結果を表-3に示す．これより，各ラインとも80～100tf/mのバネ定数となっていることがわかる．

$$k = \frac{EA}{l} \dots\dots\dots (1)$$

ここに， k ：索のバネ定数， E ：弾性係数（ $E=8,000\text{kgf/mm}^2$ ）， A ：索の断面積， l ：索長である．

3. 数値計算の概要

数値計算は，ケーソンに真横から波が入射する場合を想定し，簡単のため二次元問題として扱う．

ケーソンはBCの減少とともに動揺が小さくなり，BCが非常に小さい状態ではケーソン底面がマウンドに接触するようになり，動揺が制限される．計算ではこの点を考慮することが必要である．ここでは，堀沢ら(1996)と同様に，鉛直方向バネをケーソン底面両端部に配置したモデルを用いるが，マウンドとケーソン底面の摩擦力の影響も大きいと考えられるため，図-4に示すように，さらにバネ反力に応じた摩擦力（Coulomb摩擦）をSWAYの運動方向と逆方向に作用させた．摩擦力は（2）式で与えられる．

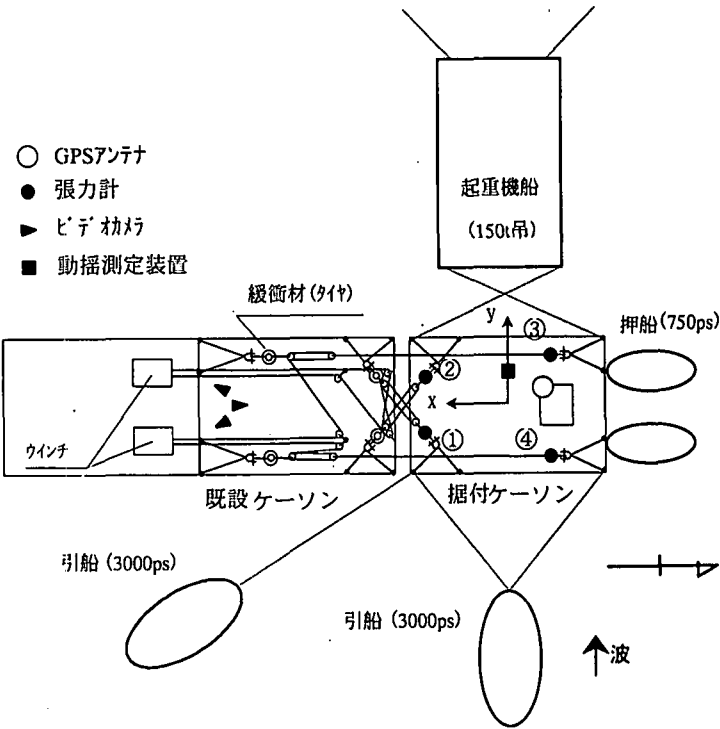


図-2 計測器配置(位置決め時)

表-2 計測項目及び計測器

計測項目	計測器
波浪	2成分電磁流速計付き 超音波波高計
ケーソン動揺	慣性測定装置
ケーソン変位	リアルタイムキネマティック方式GPS
係留索張力	歪みゲージ式荷重計
ウインチ操作状況	ビデオカメラ

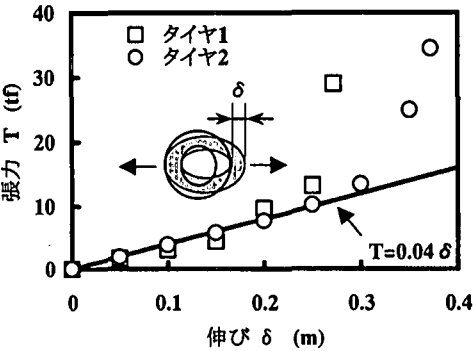


図-3 タイヤの伸びー張力特性

表-3 係留系のバネ定数

ライン	$k(\text{tf/m})$
No.1	99.5
No.2	100.8
No.3	79.2
No.4	81.0

$$\left. \begin{aligned} F &= \mu R \\ R &= k\delta \quad (\delta \geq 0) \\ R &= 0 \quad (\delta \leq 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta = -c - z + \frac{B_b}{2}\phi$$

ここに、 F ：摩擦力、 μ ：摩擦係数、 R ：反力、 k ：バネ定数、 c ：ケーソンとマウンドとのクリアランス、 z ：Heave、 ϕ ：Rollである。

4. 計測時の波浪条件

解析は、回航時、仮置時、位置決め時の3状態について行った。回航時では、水深、喫水、ケーソンへの入射波向が同じような状態が連続する6分～8分間のデータを3ケース抽出した。各状態におけるケーソン喫水、水深及び波浪条件を表-4に示す。ケーソン据付の作業限界条件は、 $H_{1/3}=0.8\text{m}$ 、 $T_{1/3}=9\text{秒}$ であり、計測時の波浪は $H_{1/3}=0.7\text{m}$ 以下、 $T_{1/3}=7\text{秒}$ 以下となっており、据付作業にとって比較的静穏な状況であったといえる。

計測時の方向スペクトルの一例を図-5に示す。E方向が卓越しているが、この傾向は計測時のどの状態においても変化していない。計測時のケーソンはほぼ幅方向がE-Wを向いており、ケーソンに対しては真横から波が入射することになる。

5. 回航時の動揺特性

各動揺の計測データには、移動に伴う長周期成分が含まれているため、周期30秒のハイパスフィルタによって波による動揺成分のみを抽出した。そのデータから波別解析によって求めた動揺の有義値を表-5に示す。この状態では動揺が比較的大きく、有義波高に対する動揺有義値の比でSwayは1.2～1.6、Heaveは1.1～1.3となっている。なお、計測時の波の卓越方向はケーソンに対して真横方向であるが、Pitch、Yawなどの動揺も発生していることがわかる。

図-6は、Case-2の状態について、(3)式によって求めた動揺の周波数応答関数と数値計算結果を比較したものである。

$$|G(f)|^2 = \frac{S_M(f)}{S_W(f)} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 G ：周波数応答関数、 S_M ：動揺のスペクトル、 S_W ：波のスペクトル、 f ：周波数である。

両者とも計測点の動揺である。これより、Roll、Heaveの固有周期はそれぞれ11秒、10秒付近にあることがわかる。この状態では、ケーソンは引船に繋がれたナイロンロープで位置保持している状態であり、Swayの固有周期は100秒を超える。したがって、SwayのピークはRollとの連成によるものである。

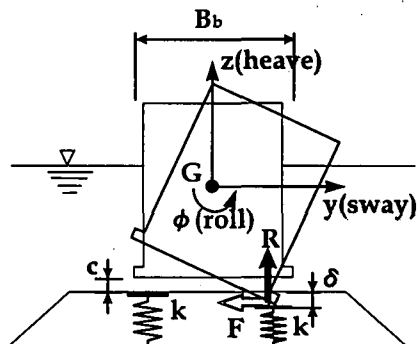


図-4 計算モデル

表-4 計測条件

	回航時			仮置時	据付時
	CASE-1	CASE-2	CASE-3		
喫水(m)	11.75	11.75	11.75	11.75 ～13.81	13.80
水深(m)	20.70	19.74	18.81	13.81	13.81
BC(m)	8.95	7.99	7.06	2.06 ～0.0	0.01
$H_{1/3}$ (m)	0.70	0.74	0.71	0.66	0.69
$T_{1/3}$ (m)	6.4	6.9	7.0	6.5	6.8

※BC：ボトムクリアランス

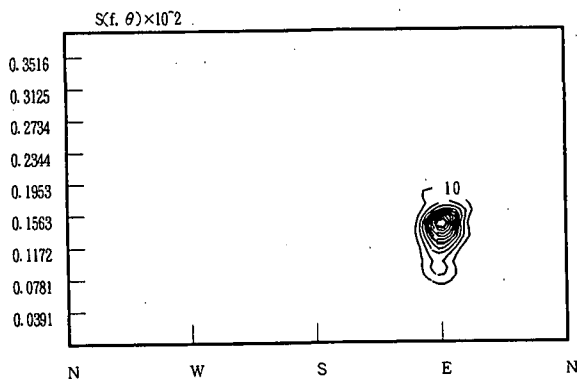
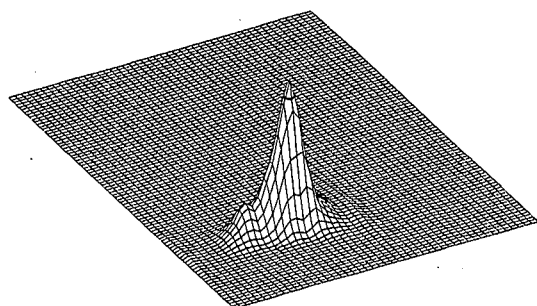


図-5 方向スペクトル

表-5 動揺の有義値(回航時)

Case	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
	$X_{1/3}$ (m)	$Y_{1/3}$ (m)	$Z_{1/3}$ (m)	$\phi_{1/3}$ (deg)	$\theta_{1/3}$ (deg)	$\psi_{1/3}$ (deg)
1	0.69	0.86	0.76	2.38	2.54	2.58
2	0.91	1.18	0.98	4.28	3.32	2.19
3	0.60	1.00	0.76	3.09	2.24	2.00

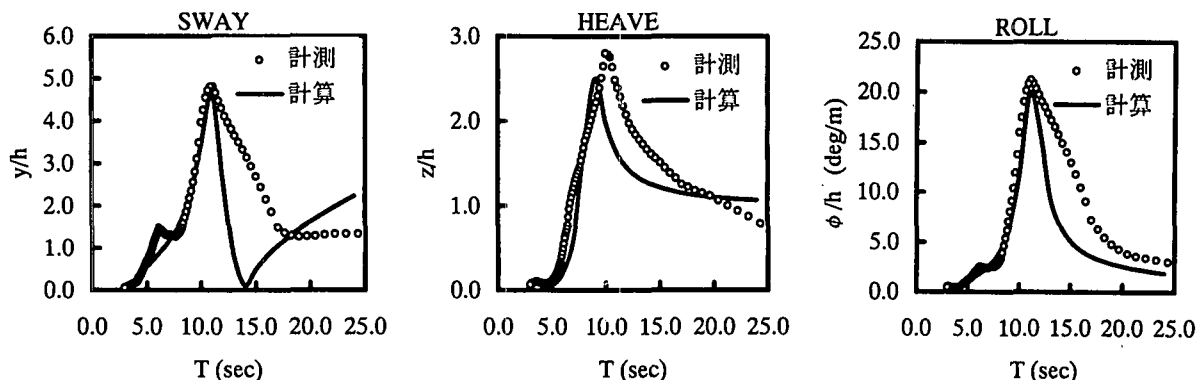


図-6 動揺の周波数応答関数(回航時)

各運動とも周期10秒付近までは、計算結果と計測結果の対応は良好であるが、それより長い周期では違いがみられる。数値計算では重心位置の動揺振幅と位相情報を用いて計測点の動揺に換算している。GPSアンテナの位置は重心位置から外れているため、Heave, Swayの計測結果には、計算で考慮していないPitch, Yawなどの影響が含まれる。長周期側では、Pitch, Yawなどの運動も大きくなるため、その影響が現れているものと考えられる。その点を勘案すれば、BCが大きい状態では計算によって概ね推定可能といえよう。

6. 仮置き時の動揺特性

既設ケーソンからの索取りは、浮いた状態ではケーソンが動揺するため危険であるので、一度据付地点付近のマウンド上に仮置きしてから実施される。

図-7は、沈設開始(BC=1.0m)から終了(BC=0.0m)までの動揺の計測結果と計算結果を

比較したものである。各動揺モードとも上段が計測結果、下段が計算結果を示している。計測結果、計算結果とも周期30秒のハイパスフィルターによって動揺成分のみを抽出している。計算では、計測された水位変化の時系列を入力として用い、マウンドのバネ定数を5000tf/mとした。ケーソン底面には摩擦増大用のゴムマットが施工されており、その実験結果(佐藤ら、1996)から摩擦係数を0.8とした。

これより、計算結果は、沈設とともに動揺が小さくなっている状況を概ね再現していることがわかる。ただし、BCが0付近では、計算結果がやや大きい。摩擦力を考慮していない堀沢ら(1996)の計算結果と比較すると、計測結果に近づいているが、着底前後の動揺減少を十分には説明できていない。

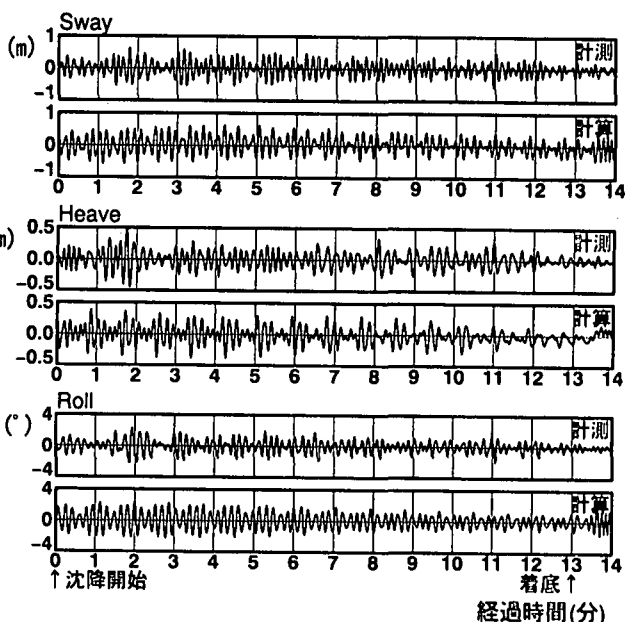


図-7 動揺の計測結果と計算結果の比較(仮置き時)

7. 据付時の動揺と索張力

(1) 据付作業の実態と索張力

据付は、ケーソン内から排水することにより僅かに浮上させた後、ウインチを操作することにより行われた。位置決め時の索張力及びSway, Heaveの時間変化を図-8に示す。下段の索張力の時間軸上には、ウインチ操作のタイミングも示した。これより、つぎのことがわかる。

①ウインチ操作を何度か繰り返すことによって、所定の位置に誘導している。

②波によるケーソン動揺はほとんどなく、索張力の変化はウインチ操作によるものである。

③据付の最終段階では、No.2ラインの張力がNo.1ラインよりも約8tf大きくなっている。これは、この波条件での平均波漂流力にほぼ等しい値である。

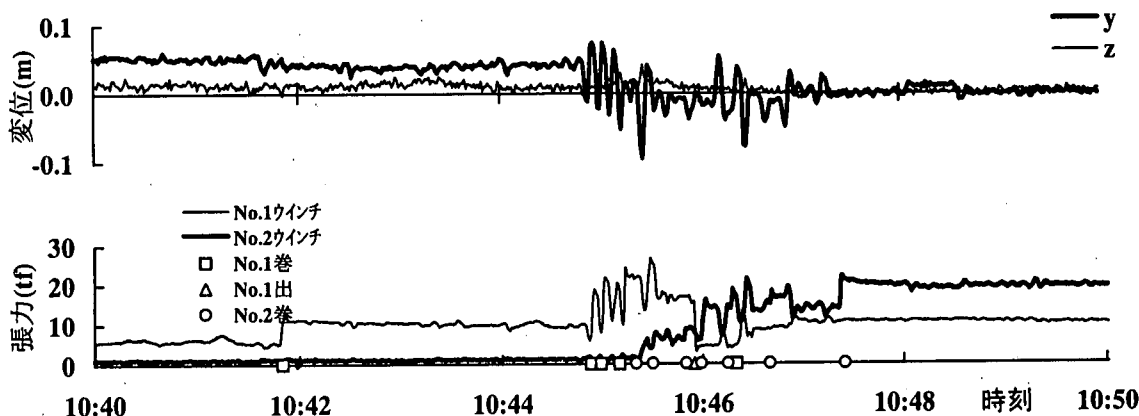


図-8 索張力及び動揺の時間変化(据付時)

(2) 動揺の計測結果と計算結果の比較

位置決めに使用された3000psの引船のボラードプルは最大でも30tf程度であり、また押船によって既設ケーソン側に押しつけているが、その押しつけ力も10～20tf程度であることから、それらのケーソン動揺への影響は小さいと考えられる。よって、計算では既設ケーソンからとった索の影響のみを考慮する。ただし、計算は二次元問題として近似しているため、クロスにとった①及び②のラインをケーソンの左右頂部に線形バネ(バネ定数100tf/m)として配置した。

図-9は、位置決め時の動揺の計測結果と計算結果を比較したものである。これより、計算結果はすべてのモードで過大となっていることがわかる。Swayの違いが顕著であるので、摩擦係数を2倍として計算したが、あまり変化はみられなかった。よって、動揺低減はマウンドとケーソン底面の間の摩擦だけでは説明できず、BCが0に近い状態では、運動を抑止する何らかの拘束力が存在するものと考えられる。その要因は明らかではないが、係留系の剛性の違いやマウンドによる水平運動の拘束などの可能性がある。図-10は、係留索のバネ定数を実際の20倍(2000tf/m)とした場合の計算結果である。Sway及びRollでは動揺がかなり小さくなり、計測結果に近づくことがわかる。ただし、さらに波浪条件が悪い状態での据付では、据付の最終段階でも大きく動揺する場合があることが知られており、動揺低減のメカニズム解明のためには、さらに現地データを蓄積する必要がある。

(3) 張力低減のための緩衝材

前述のようにタイヤは線形範囲で使用されているが、位置決めのために初期張力を与えると、0.1～0.2mのSwayで索の切断張力に達することになる。当地点では、この据付設備で $H_{1/10}=0.8\text{m}$ 程度の波高までの据付実績があり、索の切断事故は皆無であるが、さらに波高が高い条件での施工を実現するためには、緩衝材を変更する必要があると考えられる。

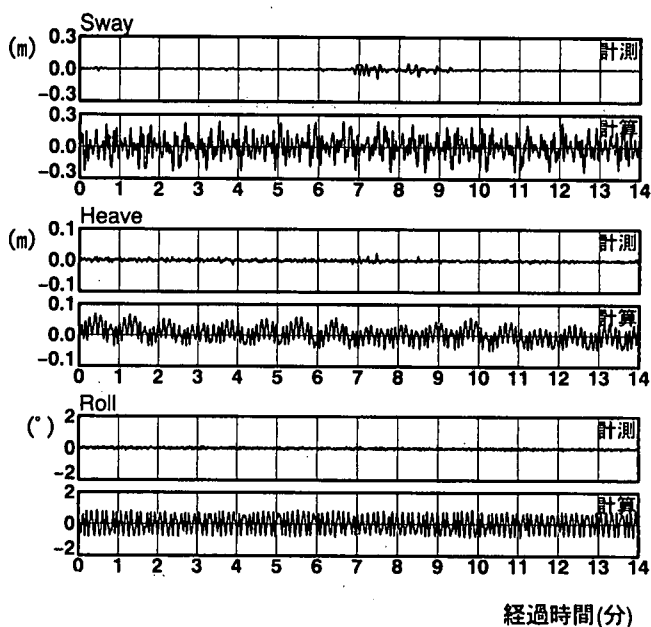


図-9 動揺の計測結果と計算結果の比較(据付時)

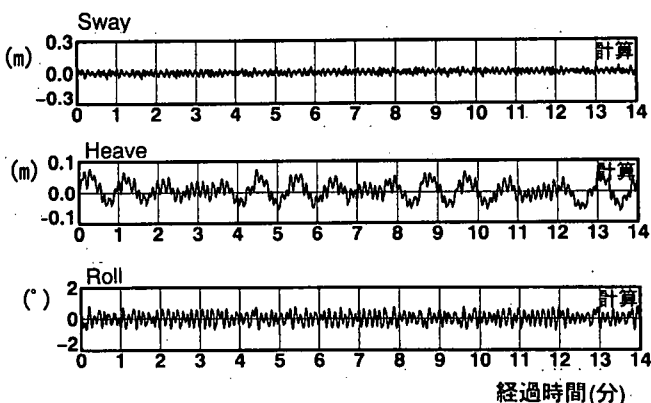


図-10 係留索バネ定数 $k=2000\text{tf/m}$ とした場合の計算結果

緩衝材としては、初期張力に対しては伸びが小さく許容変位量の大きい定反力型防舷材のようなバネ特性を有するものが望ましい。その設計における動揺量は、ここで示した計算法によれば安全側の推定となる。

8. おわりに

ケーソン据付作業中にケーソンの波浪中動揺特性や索張力特性を明らかにするために現地調査を実施した。その結果、つぎのことが明らかになった。

①回航時(BCが大きい状態)の動揺は、通常の動揺解析法で推定可能である。

②仮置時では、BCの減少とともにケーソンの動揺が小さくなる。BCが非常に小さい状態では、動揺によってケーソンの底面がマウンドに接触し動揺が制限される。この現象は、マウンドに接した時点で鉛直反力が作用するようなバネをケーソン両端部に配置し、さらにバネ反力に応じてSwayの運動方向と逆の摩擦力を作用させた計算モデルによって概ね説明できるが、BCがほぼ0となった状態では計算結果がやや大きい。

③据付時ではBCが1~2cmであったが、計測時の波浪状態($H_{1/10}=0.69\text{m}$, $T_{1/10}=6.8\text{秒}$)では、どのモードもほとんど動揺していない。ここでの計算結果は過大であり、動揺低減はマウンドとケーソン底面の間の摩擦だけでは説明できない。運動を抑止する何らかの拘束力が存在するものと考えられる。

④据付で索張力の緩衝材として用いられる古タイヤの緩衝効果は小さく、さらに波高が高い条件での施工を実現するためには、許容動揺量の大きな緩衝材とする必要がある。

今回の調査は、波浪が比較的静穏な条件でのものであり、さらに波浪条件が悪い状態等について議論するには十分とはいえない。現象解明のためには、さらに据付時における動揺等のデータを蓄積する必要がある。

なお、現地計測あたり、東京電力(株)常陸那珂火力建設所、東亜建設工業(株)機電部電気課の方々の協力をえた。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

堀沢真人・佐藤典之・大橋裕寿・赤村重紀・坂間茂・吉倉敬治(1996)：ケーソン沈設過程の波浪中挙動，海岸工学論文集，第43巻，pp.1001-1005

佐藤潤一・今井澄雄・矢口真光(1996)：常陸那珂港北ふ頭東護岸の設計と施工，海岸工学論文集，第43巻，pp.1276-1280