

# 沈埋函係留時における係留索のたるみを考慮した 動揺解析

## MOORING ANALYSIS OF IMMERSSED TUNNEL ELEMENT CONSIDERING THE SLACK OF MOORING LINES

吉本靖俊<sup>1</sup>・花田孝美<sup>2</sup>・石橋透<sup>2</sup>・安野浩一朗<sup>3</sup>・森屋陽一<sup>4</sup>・玉井昭治<sup>5</sup>  
Yasutoshi YOSHIMOTO, Takami HANADA, Toru ISHIBASHI, Koichirou ANNO  
Yoichi MORIYA, Syoji TAMAI

<sup>1</sup>正会員 国土交通省九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所  
(〒801-0814 北九州市門司区西海岸1-4-40)

<sup>2</sup>国土交通省九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 (〒801-0814 北九州市戸畑区川代2-1-2)

<sup>3</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

<sup>5</sup>正会員 五洋建設株式会社 九州支店 新若戸道路沈埋函(1号函)製作工事事務所  
(〒801-0021 北九州市若松区響町1丁目地先)

The stability of immersed tunnel element that is under constructing at SHINWAKATO is investigated. While the tunnel element is kept afloat in temporary places, it is completed by placing High-fluidity concrete. Draft of the element is changed by increasing the weight, so the slack of the mooring lines appears. IF the slack appears, it interferes with the stability of the floating element. We proposed the mooring reaction strain model considering the slack by using the observations of waves, winds, and strain of the mooring lines, checked the validity of the model. Next, we studied the necessity and the timing to adjust mooring lines through the mooring analysis considering the slack. The result of study, we judged that the mooring lines are adjusted during under construction.

**Key Words :** mooring analysis, the slack of mooring line, immersed tunnel element

### 1. はじめに

現在、北九州港の響灘地区では国際コンテナターミナルを整備中であり、将来的な交通量の増大対策として、若松地区と戸畑・小倉地区とを7函の沈埋函で連結させる自動車専用道路トンネル(新若戸道路)の建設工事が進行中である。平成17年度に最初の1号函(106.0m×27.9m×8.4m)が製作された。

沈埋函は陸上で鋼殻を製作した後、栈橋に係留した状態で充填コンクリートの浮遊打設を行って完成させる。図-1に鋼殻係留場所を示す。

コンクリートの充填期間は約3ヶ月間であり、その間函体の喫水は未充填時の約1.0mから充填完了時の約8.0mまで推移する。喫水が増すと係留索にたるみが生じて函体が動揺しやすくなり、函体の栈橋への衝突や函上での作業効率の低下などが懸念される。それらを防ぐためには打設中にたるみ調整を行う必要がある。

しかし、本工事では函上にウインチが常設されていないため、たるみ調整にはウインチの設置撤去等を伴う大掛かりな作業が必要であり、函上でコンクリートの浮遊打設作業とたるみ調整作業が輻輳するなどの問題がある。したがって、係留索がたるんだ状態を考慮した沈埋函の動揺シミュレーションを行う必要があった。



図-1 鋼殻係留場所

動揺シミュレーション手法については様々な研究例があり、多くのモデルが提案されている<sup>1)</sup>。しかし、係留索のたるみ量を仮定し、たるんだ状態をモデル化して動揺シミュレーションを実施した例はあるものの<sup>2)</sup>、たるみ量を定量的に評価した上で動揺シミュレーションを行った例はない。

そこで本研究では、施工期間中に全係留索の係留索張力および波浪、風浪の外力条件の観測を行い、観測結果に基づいて係留索のたるみ量を定量的に考慮したバネ特性の設定方法を提案するとともに、動揺シミュレーションを実施し、係留索のたるみ調整の必要性およびその適正時期について検討を行い、実施工への反映を試みた。

## 2. 施工および観測概要

### (1) 施工および検討工程

現地での施工は、2005年10月～12月にかけて行われた。10/5に鋼殻を進水し、栈橋へ係留した。その後二週間余りの準備期間を経て、10/24にコンクリート充填を開始し、隔壁・中壁、側壁、下床版、上床版の順に充填を行い、12/22に無事完了した。図-2に施工および検討の工程を示す。また、写真-1にコンクリート充填初期の状況を、写真-2に充填完了時の状況を示す。

月 日	10月			11月			12月		
	1	15	30	1	15	30	1	15	30
鋼殻進水	[進水期間]								
鋼殻係留	[係留期間]								
コンクリート充填	[充填期間]								
充填箇所	隔壁・中壁 1,960m <sup>3</sup>			側壁 2,000m <sup>3</sup>			下床版 2,200m <sup>3</sup>		上床版 2,540m <sup>3</sup>
検討項目	バネモデルの設定 妥当性の確認 たるみ調整の必要性、時期の検討 ○ たるみ調整								

図-2 現地での施工および検討工程



写真-1 10/29 充填初期(喫水1.6m時)

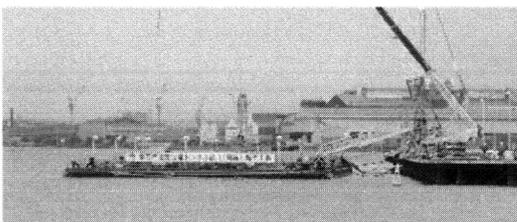
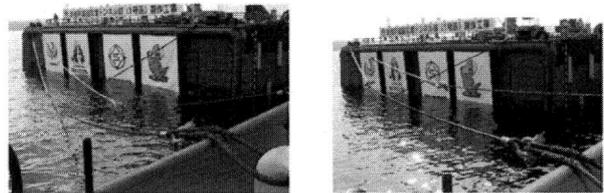


写真-2 12/26 打設完了時(喫水8.0m時)

打設した充填コンクリート量は、約8,700m<sup>3</sup>であり、その間、沈埋函の喫水は1.04mから8.0mまで推移した。検討工程は、10月中旬の充填開始前における張力計測データを用いてたるみを考慮したバネモデルの設定を行い、その後、11月中旬までの計測値をもとにバネモデルの妥当性を確認した。次いで、たるみを考慮した動揺シミュレーションを行い、たるみ調整の必要性およびその時期について検討した。その結果に従って、下床版打設開始直後(11/22)に、ウインチおよび大型クレーンを用いてたるみ調整を実施した。写真-3にたるみ調整前後の係留索状況を示す。また、繊維索(ナイロンロープ)の没水による劣化防止の観点から、充填が完了する直前にも、No.5～10のナイロンロープのたるみ調整を実施した。



たるみ調整前(11/22) たるみ調整後(11/23)  
写真-3 たるみ調整前後の係留索(係留索No.6, No.10)

### (2) 係留配置

沈埋函の浮遊打設時の係留方法は、図-3に示す10点係留である。係留索No.1～4はφ60mmのワイヤーロープと防舷材式緩衝装置を用い、係留索No.5～10はφ45mmのワイヤーロープとφ85mmのナイロンロープの合成索から構成されている。防舷材式緩衝装置は、係留栈橋側と沖側との係留系の非対称性を低減するとともに、ワイヤーロープに大きな張力が作用するのを防ぐ目的で採用されている。図-4に緩衝装置の概要を示す。

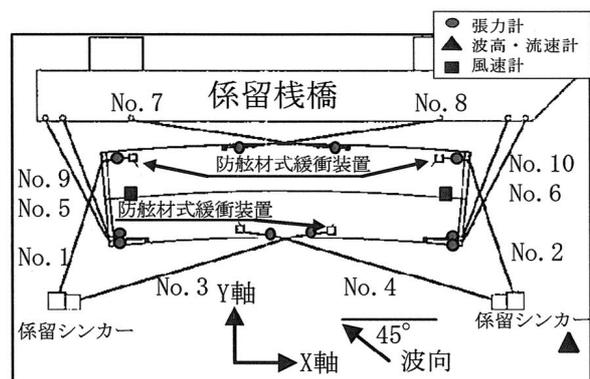


図-3 係留および計測機器配置図

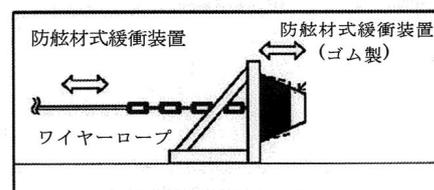


図-4 防舷材式緩衝装置の概要

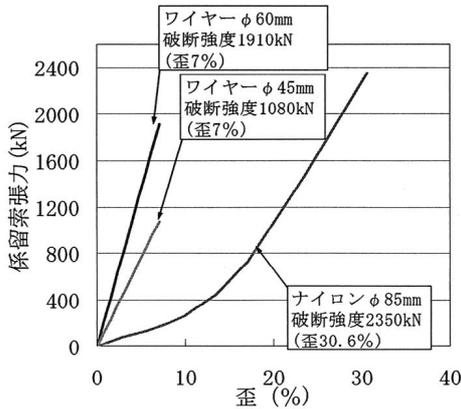


図-5(1) ワイヤーおよびナイロンの反力歪特性

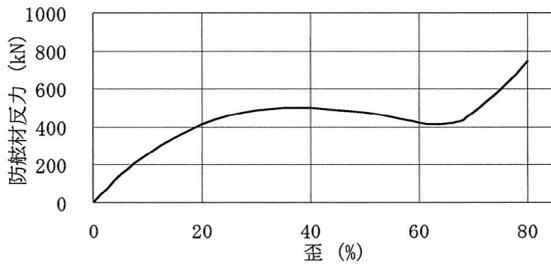


図-5(2) 防舷材式緩衝装置の反力歪特性

図-5(1)および図-5(2)に係留に用いたワイヤーロープ、ナイロンロープおよび防舷材の反力歪特性を示す。なお、動揺シミュレーションにおいては、これらの反力歪特性に基づき係留に用いている合成索の反力歪特性を評価して設定した。本検討における座標の定義は図-3に示すように、係留栈橋に対して直角方向をY軸、その平行方向をX軸として整理した。また、X軸方向の変位をSurge、Y軸方向の変位をSway、X軸回りの回転をRollとした。

### (3) 計測機器配置

計測機器は、図-3に示すように、全係留索に張力計を設置し、波高・流速計1台および風速計2台を設置した。張力と風速は、1.0秒間隔で連続計測とした。波高・流速計は海底設置型であり、水圧、水位および水平2方向流速について毎正時をはさむ20分間を0.5秒間隔で計測した。

## 3. 現地計測結果

計測期間(10/11~12/31)における係留索No.1の平均張力と沈埋函の喫水、有義波高、平均風速、平均潮位を図-6に示す。喫水は沈埋函の4角と長手方向の中央の計6地点で計測した結果の平均である。計測期間中の有義波高は平均0.2m程度で、最大が0.5mであった。コンクリート充填開始に合わせ喫水が増加し始めると共に、係留索張力が低下した。11/23にたるみ調整を行ったことで張力が再度増加した。また、2回目のたるみ調整時も係留索張力は同様の傾向を示した。

図-7(1)、(2)に係留索No.1の張力計測結果の例を示す。図は正時をはさむ前後の計20分間を出力した結果である。図-7(1)はコンクリート充填開始前を示し、図-7(2)は3,200m<sup>3</sup>程度までコンクリート充填が完了した段階での計測値を示している。この時の波高、風速の計測値は、共に有義波高0.3m、周期3s、平均風速7m/s程度であった。喫水1.04m時は40kNを平均にとりながら、短周期の張力変動が生じている。一方、喫水3.39m時は平均値が18kNまで低下し、張力変動が殆ど見られない。この特性の違いは、係留索にたるみが生じたことによるバネ定数の低下、および沈埋函重量の増加による固有周期の長周期化によるものと考えられる。

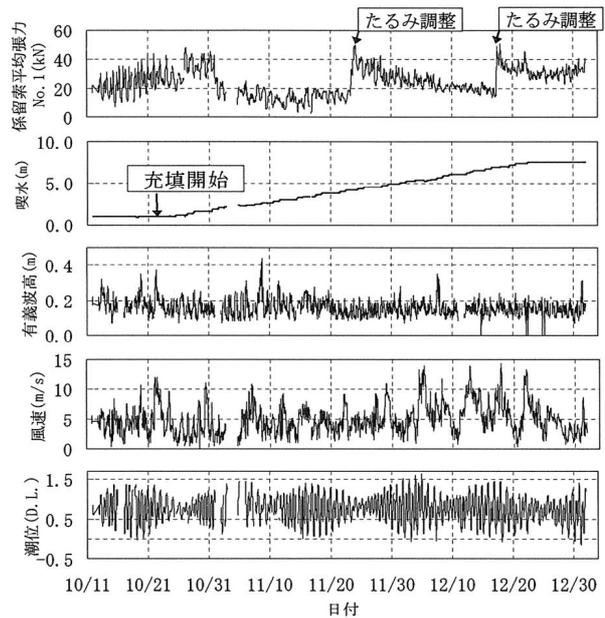


図-6 観測期間(10/11~12/31)の計測結果例

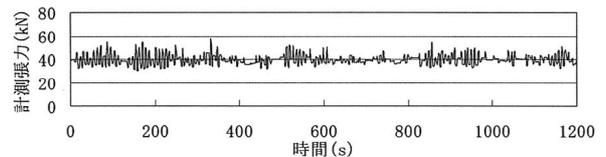


図-7(1) 張力計測結果 No.1 (10/19 21:00, 喫水1.04m)

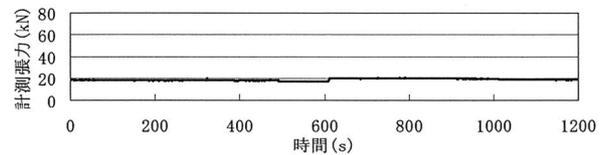


図-7(2) 張力計測結果 No.1 (11/17 09:00, 喫水3.39m)

## 4. たるみを考慮したバネモデルの設定

コンクリート充填前の7日間(10/16~10/22)の計測データにより、それぞれの係留索についてのたるみ量を考慮したバネ特性を推定した。まず、有義波高が小さ

い時間帯の平均張力値を抽出し、計測張力から風荷重の平均値に相当する張力分を差し引くことで係留索に外力が作用していない時の張力(初期張力)を推定し、潮位毎に整理した。ここで、風荷重の算定において、抗力係数は $1.5^3$ とした。図-8(1)に係留索No. 1、図-8(2)に係留索No. 8の初期張力を推定した結果を示す。図中には近似線とその相関係数を示しており、潮位変動と初期張力は比例関係にあると考えられる。

ここで、係留索のカテナリー性状による張力への影響を確認するために、係留索No. 1を例に、カテナリー理論を用いた場合の潮位と張力の関係について検討した。潮位1.5m、1.0mおよび0.5m時において、係留索の水平投影長(係留索端点同士の水平距離)は変化しないものと仮定し、水深のみ変化させた場合の係留索張力を計算したところ、それぞれ4.0kN、3.8kNおよび3.6kNであり、潮位との相互関係はほぼ線形的な関係を示した。また、計測値は35.0~50.0kN程度であるため、計算値は計測値のほぼ1割以下となり、計測値へのカテナリー性状による影響は極めて小さいと考えられる。よって、本検討ではカテナリー性状の影響を無視し、線形関係があるものとして、初期張力の推定を行うこととした。

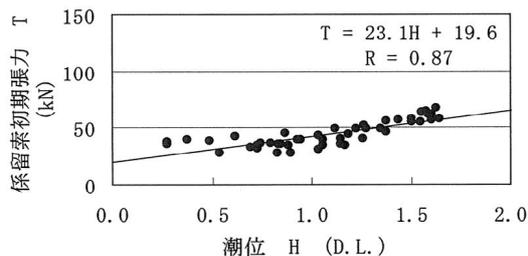


図-8(1) 係留索張力の計測結果(係留索No. 1)

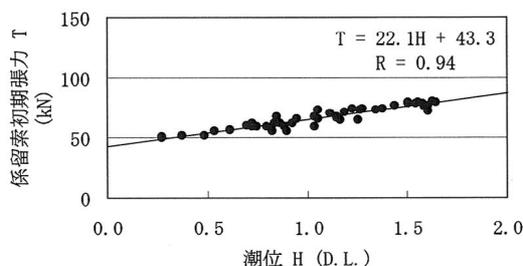


図-8(2) 係留索張力の計測結果(係留索No. 8)

次に、喫水変化が係留索張力に与える影響と潮位の変化が係留索張力に与える影響は等価であると考え、喫水が変化した場合の初期張力の変化を打設前の初期張力と潮位との近似線から推定した。また、係留索張力の下限値は係留索の自重とし、推定した初期張力が下限値を下回った場合は、たるみが生じていると考え係留索長と係留索端点同士の斜距離の差をたるみ量と仮定した。

最後に、動揺シミュレーション上の係留索の反力歪特性において、たるみは歪(係留索の両端点間の距離)が増加しても張力が一定値(自重と同じ値)を取る領域として定義し、係留索本来の反力歪曲線にその領域

を付加したものを、たるみを考慮した係留索モデルとした。図-9に例としてたるみを考慮した係留索No. 1のバネ特性を示す。

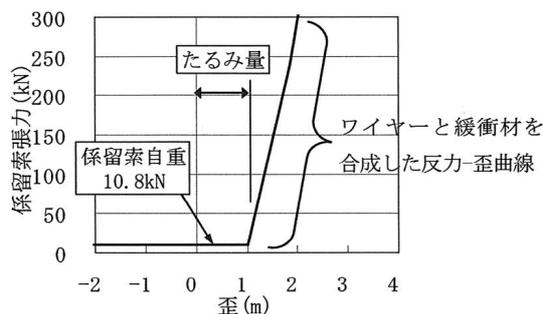


図-9 たるみを考慮した係留索の反力歪特性曲線(係留索No. 1 充填完了時 L.W.L.)

たるみを考慮したバネ特性モデルの妥当性は、充填初期の係留索にたるみが発生し始めた時期(10/25~11/10)を対象に波と風が作用した場合の動揺シミュレーションを実施し、全係留索の平均張力及び最大張力について計測結果と解析結果を比較することにより確認した。使用データは平均風速が10m/s以上であった4時間分である。動揺シミュレーション手法は、浮体の運動方程式にメモリー影響関数を導入した時系列解析<sup>4)</sup>とした。図-10にたるみを考慮した場合と考慮しない場合の解析結果と計測結果との比較図を示す。初期張力はたるみの有無に関わらず喫水の変化に応じて設定した。たるみを考慮した場合の方が、考慮しない場合よりも計測結果と解析結果の整合が良好であり、たるみを考慮したバネ特性を用いることにより、解析結果は計測結果と概ね対応する傾向を与えられ

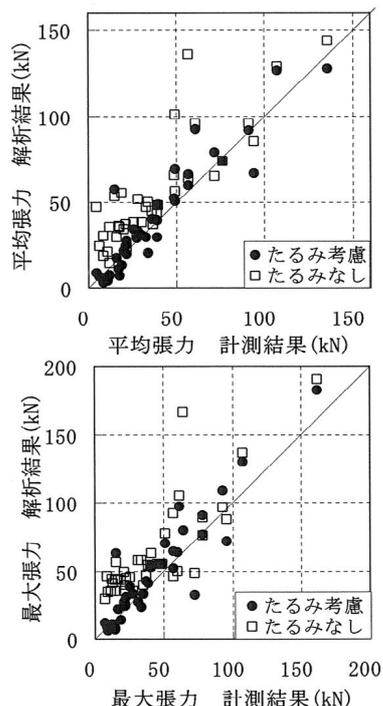


図-10 係留索張力の計測結果と解析結果の比較

## 5. たるみ調整の必要性に関する検討

### (1) 検討条件

たるみ調整の必要性に関する検討は、暴風時における函体の栈橋への衝突の危険性、および常時における函上での作業効率の低下の観点から、コンクリート充填を実施していない鋼殻時、下床版まで充填完了した下床版打設後、およびコンクリート充填が完了した充填完了時を対象に、動揺シミュレーションを用いて行った。各施工段階における沈埋函の条件を表-1に示す。また、表-2に示す3潮位条件についてそれぞれ検討を実施した。なお、沈埋函係留位置における水深はD.L. -11.5mであった。

表-1 検討モデル

状態		鋼殻時	下床版打設後	充填完了時
全長	L (m)	106.00		
型幅	B (m)	27.90		
型深	Ht (m)	8.40		
喫水	d (m)	1.08	5.90	8.18
函体総重量	kN	32235.66	177561.00	241512.39
受風面積	Ax (m <sup>2</sup> )	775.92	69.75	23.32
	Ay (m <sup>2</sup> )	204.23	265.00	6.14

表-2 潮位条件

L. W. L.	D. L. +0.0m
M. W. L.	D. L. +0.8m
H. W. L.	D. L. +1.6m

函体の栈橋への衝突の危険性は、再現期間20年に相当する波浪・風浪条件(以下、異常時)に対する沈埋函の動揺シミュレーションにより、沈埋函の栈橋側隅角部の栈橋方向への最大変位量を算定し、栈橋と沈埋函との距離が2.0m以下となるかどうかにより判定することとした。ここで、波浪条件には、藍島地点のNOWPHASの観測値をもとに波浪伝播シミュレーションにより推定した長周期波成分を考慮した。

函上での作業効率は、施工期間中に頻繁に来襲すると想定される波浪・風浪条件(以下、常時)を用いた動揺シミュレーションにより、SurgeとSwayの最大値のいずれかが1.0m(陸上クレーンの作業中止基準(水平動揺量1.0m以下))となった場合に低下したと判定することとした。判定基準の設定は、過去の沈埋函製作工事の担当者からのヒアリング結果に基づき設定した。

ここで検討した外力条件を表-3に示す。波浪はBretschneider-光易型スペクトル、風浪はDarvenport型スペクトルに基づき不規則性を考慮した。また、波向は図-3に示す方向に固定し、風向は16方位それぞれについて、検討を実施した。

表-3 外力条件

	波浪条件		風浪条件	摘要
	有義波高	周期	平均風速	
異常時	0.42m	9.0s	18.0m/s	長周期波成分を考慮
常時	0.30m	3.0s	10.0m/s	

### (2) 沈埋函の動揺特性

図-11に、異常時の動揺シミュレーション結果(波と風を同じ方向から作用させたケース)のうち、各施工段階別のSway, Rollの2つのモードに関する時系列図を示す。図は動揺シミュレーション初期の立上り時間200s以降の20分間について整理している。

Swayは、鋼殻時に0.3m程度の振幅で短周期運動を繰り返す傾向を示し、下床版打設後で比較的長周期の運動になり、コンクリート充填後には微小振幅でさらに長周期化した運動となっている。一方、Rollは喫水の増加につれて回転量が明らかに減少している。

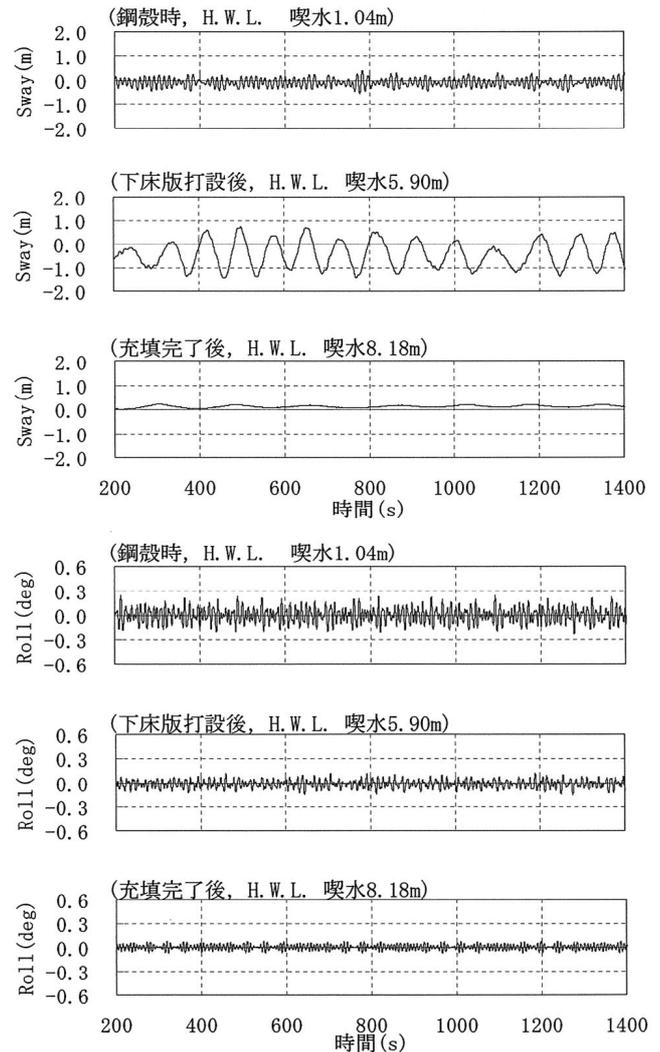


図-11 動揺シミュレーション時系列結果例

### (3) 沈埋函の動揺の周波数特性

図-12に図-11と同じ外力条件での計算時間60分の動揺シミュレーション結果から得られた、SwayおよびRollの周波数スペクトルを示す。図の縦軸は動揺のスペクトル $S(f)$ を水位変動のスペクトル $P(f)$ で除したものである。Swayのピーク周期は、鋼殻時で25s付近、下床版打設後で50s付近、充填完了時は200s付近である。

固有周期は重量の増加に従って長周期化していくため施工が進むにつれて沈埋函のSwayは長周期化していくと考えられる。また、Rollのピーク周期は、鋼殻時に比べて下床版打設後および充填完了時にはやや長周期側へ移行する傾向を示している。これは、浮体のメタセンター高の増加に起因するものと推察される。

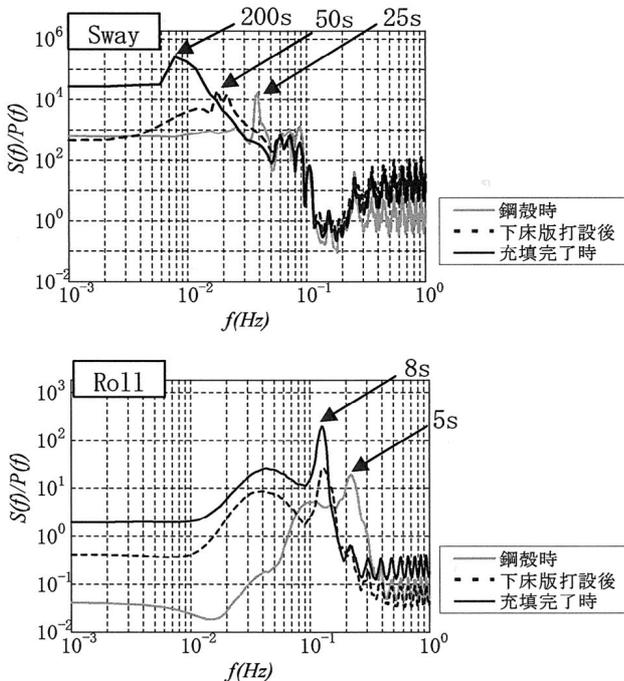


図-12 周波数スペクトル

(3) たるみ調整の必要性およびその時期

図-13に異常時の動揺量が最大となった風向条件における、栈橋から沈埋函隅角部までの離隔距離を示す。また、図-14に常時のSurgeおよびSwayの両振幅の最大値を示す。異常時はコンクリート充填完了時、常時は下床版打設後に、それぞれ判定基準を満たさない結果となった。

ここで、沈埋函はコンクリート充填に伴い、受風面積および係留索にたるみが生じ張力が減少する。一方、受流面積および沈埋函重量は増加する。

異常時においてコンクリート充填完了時の栈橋との離隔距離が最小となる傾向を示すのは、沈埋函の動揺に及ぼす長周期波成分を含む波力の影響が大きいためである。

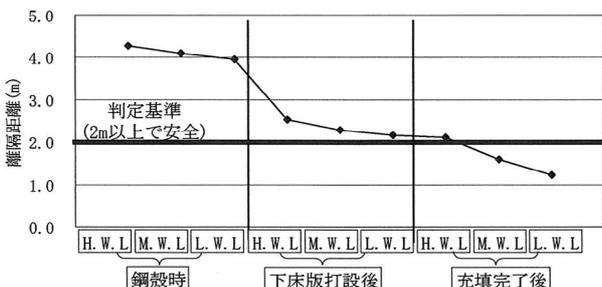


図-13 栈橋から沈埋函までの離隔距離(異常時)

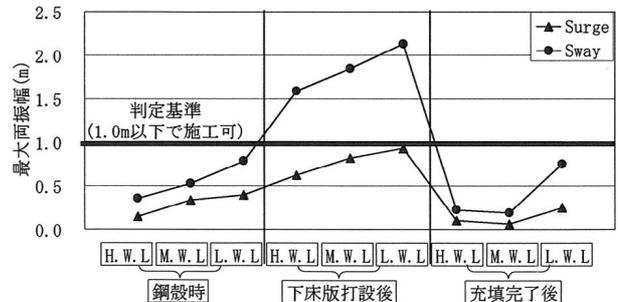


図-14 SurgeおよびSwayの最大両振幅値(常時)

常時において下床版打設後の動揺量が最も大きい傾向を示すのは、風力と係留索張力のバランス関係に起因している。鋼殻時においては、受風面積は大きい、係留索張力も大きいために、動揺量は小さく、充填完了時は、係留索張力は小さいが、受風面積も非常に小さいため、結果として動揺量が小さくなるものと考えられる。

以上から、充填期間中にたるみ調整を実施する必要があると判断でき、また、その時期は下床版打設終了前と考えられる。それを現地の施工に反映させた。

6. おわりに

沈埋函係留時における係留索張力を計測し、計測結果に基づきたるみを考慮した係留索のバネ特性を設定し、それを用いた動揺シミュレーションにより、たるみ調整の必要性の判断およびその時期を決定した。

(1)たるみを考慮したバネ特性は、たるみを歪が増加しても張力が一定値を取る領域として定義し、係留索本来の反力歪曲線にその領域を付加させたモデルとした。また、たるみ量は係留索長と沈埋函の喫水変化に伴う斜距離の差として設定した。そして、計測値と比較することでその妥当性を確認した。

(2)たるみを考慮した動揺シミュレーションにより、コンクリート充填期間中にたるみ調整が必要であることを示した。たるみ調整は下床版打設終了前に行う必要があると判断し、この結果を現地での施工へ反映させ、無事に施工完了に至った。

参考文献

- 1) 久保雅義, 笹健児, 白石悟, 榊原繁樹: 数値計算手法が長周期波作用下における長周期船体動揺へ及ぼす影響について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.236-240, 1997
- 2) 上田茂: 係留船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No.504, 1984
- 3) 日本港湾協会編: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), pp56-57, 2000
- 4) 久保雅義, 斎藤勝彦, 下田直克, 岡本俊策: 岸壁前面: 岸壁前面係留浮体の不規則波による船体動揺の時系列解析について, 海岸工学論文集, 第35巻, pp.687-691, 1988