

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 850 Dec. 1996

外洋に面した港湾における防波堤ケーソンの
据付時の動揺特性および作業限界条件

石 見 剛
白 石 悟
名 里 健 吾

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. ケーソン設置時の動揺のシミュレーションによる評価法	3
3. 現地観測	5
3.1 現地観測および据付の概要	5
3.2 動揺量およびワイヤーの張力	8
4. 現地観測結果のシミュレーション結果との比較	15
5. 据付限界波高および限界動揺量に関する考察	20
5.1 据付の可否と波高の関係	20
5.2 据付の可否と動揺量の関係	22
6. 結 論	28
7. あとがき	29
参考文献	29

Characteristics of motions of a caisson for breakwater during installation and limit condition of works at ocean-facing ports

Go ISHIMI*

Satoru SHIRAISHI**

Kengo NAZATO*

Synopsis

Motions due to waves become a certain limitation of installation works of caisson for breakwater at ocean-facing ports. In this report, characteristics of motions of a caisson for breakwater during installation are discussed both by result of field observations at port of Kochi and numerical simulations. Numerical simulations of motions of caisson are also carried out for installation examples at several ports where face to the Pacific Ocean in Japan. Then, limit conditions on installation works are presented on motions and wave height.

Key Words: Caisson, Installation, Motions, Field observation, Numerical simulation

* Member of the Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division
** Chief of the Offshore Structures Laboratory, Structural Engineering Division

外洋に面した港湾における防波堤ケーソンの 据付時の動揺特性および作業限界条件

石 見 剛*
白 石 悟**
名 里 健 吾*

要 旨

外洋におけるケーソン据付工事では、波浪の作用に伴うケーソンの動揺が施工上の一つの制約条件となっている。そこで、本資料では高知港におけるケーソン据付工事の際に行った現地観測の結果と、これに対応するよう実施した動揺シミュレーション結果の両者を比較検討して、据付中のケーソンの動揺特性について考察した。また、これに加えて大平洋沿岸域（関東および東北地方）における複数の防波堤ケーソン据付工事事例についても据付中のケーソンの動揺シミュレーションを行ない、据付可否の判断基準として限界動揺量および限界波高を提示した。

キーワード：ケーソン、据付、動揺量、現地観測、動揺シミュレーション

1. まえがき

近年、港湾建設の外洋化に伴い、従来に増してうねり等の長い周期の波が作用する条件の下でケーソンを据付けることが余儀なくされている。浮遊ケーソンあるいは作業船等の浮体は一般に長周期の波浪成分に対して動揺量が大きくなることから、従来に増してケーソン据付作業は困難なものとなる。また、外洋に建設される防波堤あるいは護岸用のケーソンは従来のものと比べて大型化しているが、これに対して作業船あるいは据付用の装置類はケーソンほどには大型化されていない。このことが外洋における大型ケーソンの据付作業を難しいものになっている。

ケーソンの据付はこれまで現場技術者の経験と勘に頼った施工がなされていた。また、ケーソンの据付に関連する模型実験、現地観測はこれまで数例みられるもの全体としてその事例数は多くない¹⁾。そこで、本資料においては以下の2点を明らかにする。

① 外洋波浪中のケーソンの動揺特性を明らかにするこ

と。

矩形ケーソンの据付中の動揺およびワイヤー張力を現地観測を行って詳細に調査し、かつ動揺シミュレーションを行い、両者を比較分析してケーソンの動揺特性を明らかにする。なお、現地観測は運輸省第三港湾建設局高知港工事事務所が実施し、動揺シミュレーションは筆者らが実施した。

② ケーソンの据付限界条件を明らかにすること。

外洋に面した幾つかの港湾におけるケーソン据付作業の実施の可否と、該当日の波浪条件を比較分析し、ケーソンの据付限界条件を明らかにする。

2. ケーソン設置時の動揺のシミュレーションによる評価法

係留浮体が波浪荷重、風荷重などを受けて動揺する際の運動方程式は式(1)のように記述される²⁾。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + N\dot{x} | \dot{x} | + R(x) x = P \quad (1)$$

ここに、

M : 質量マトリックス

* 構造部 海洋構造研究室
** 構造部 海洋構造研究室長

- C : 減衰マトリックス
 N : 非線形減衰マトリックス
 $R(x)$: 静水圧復元力, および防舷材・係留索等
 により構成される係留系による復元力マト
 リックス
 \ddot{x} : 加速度ベクトル
 \dot{x} : 速度ベクトル
 $x|\dot{x}|$: 速度の自乗ベクトル
 x : 変位ベクトル
 P : 荷重ベクトル (波浪荷重, 風荷重, 流れ
 による荷重など)

である。

式(1)は二階の連立微分方程式であり, 浮体に作用する荷重が不規則荷重でかつ係留系の変位復元力特性が非線形である場合は, 時刻歴で動揺シミュレーションを行い動揺量および係留系の変位復元力を計算するのが良い。図-2.1は動揺シミュレーションのブロックチャートである。動揺シミュレーションは以下の手順で行われる。

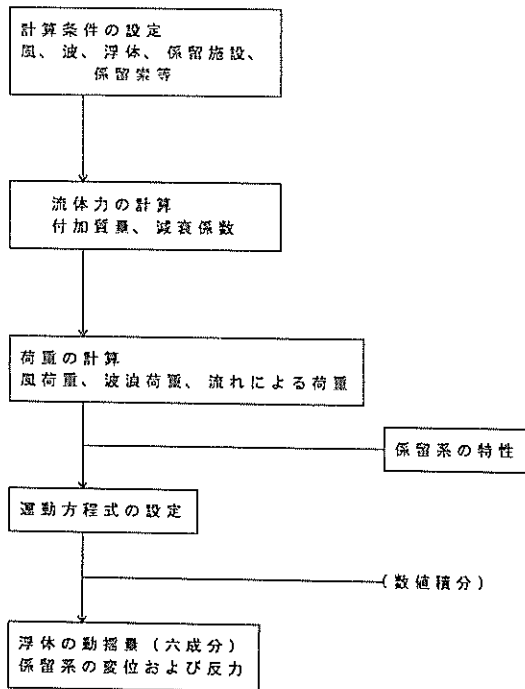


図-2.1 動揺シミュレーションのブロックチャート

① 計算条件の設定

風, 波, 浮体 (この場合はケーソン) の諸元, 係留施設 (この場合はアンカー等), 係留索 (ワイヤー索もしくは繊維索) 等を設定する。

② 流体力の計算

式(1)に示す運動方程式中の M , C , N などの係数値を求める。これらは, 静水中で浮体を強制的に動揺させたときに浮体に働く力 (ラジェーション流体力) より求められる。ラジェーション流体力のうち加速度に比例する成分を付加質量力, 速度に比例する成分を減衰力として係数を求める。

箱形のケーソンに対しては断面分割法 (造船工学分野ではストリップ法とも呼ばれる) あるいは井島らの提案によるポテンシャル接続法が用いられる。断面分割法は二次元流体力を長軸方向に積分するもので, 浮体が細長いときには三次元的に直接求めたものとよく一致するが, 浮体の長さを L , 幅を B として $L/B < 4.0$ となると相違が大きくなることが知られている³⁾。一般にケーソンは長さと同幅がほとんど変わらない場合が多いので, ポテンシャル接続法を用いるのがよい。この手法では, 平面的に任意形状をした三次元柱体構造物に対して領域分割法を適用し, 流体の自由表面条件と水底の境界条件から定まる固有値に対して速度ポテンシャルの級数展開を行い解を求めている。

異形ケーソンについては前述の二つの方法を適用することができない。このときには, 特異点分布法あるいは有限要素法などを適用するが, いずれも要素分割数が大きくなるときは計算時間が長くなる。また, 特異点分布法は浮体の表面のみを有限分割すればよいのに対して有限要素法は周辺の流体領域も含めて要素分割する必要がある。そのため数値計算上の適用性にはさらに制限が加わる。なお, 文献 3) では, 特異点分布法はグリーン関数法に分類されている。これは, その解法においてグリーン関数を用いてポテンシャルに関する境界値問題を積分方程式に変換して解くからである。

③ 荷重の計算

浮体に作用する荷重として風荷重や波浪荷重, 波の非線形性に起因する漂流力等がある。風荷重を考慮する場合, その変動性や大きさに注意する必要がある。波浪荷重については, ②で述べた各手法を用いて計算することができる。また係留系の変位復元力特性が剛な時の漂流力は定量的に小さいので無視することができる。なお, 本稿では漂流力を無視して荷重の計算を行っている。

④ 係留系の変位復元力特性

係留浮体 (この場合はケーソン) は係留索により拘束される。そのため, 浮体の動揺により係留索が伸びることによる反力 (張力) を受ける。また, 係留索は非線形な変位復元力特性を有するので, 浮体の動揺を正しく把握する場合にはこれを考慮することが重要である。

⑤ 運動方程式の設定および数値積分

浮体の動揺を先に示した運動方程式によって解析する場合は、まず波浪や風等の外力によって浮体に作用する荷重を求める。また、静水中における浮体の運動によって生じるラジェーション流体力を算出し、付加質量係数や、減衰係数を求める。さらに、係留索等の変位復元力特性を求め浮体が動揺することによって受ける反力を明らかにする。これらを利用し運動の定式化を行うが、これは後述する6つの運動成分それぞれについて定式化することになるから、(1)式に示した運動方程式は6元二階の連立微分方程式となる。この計算においては、外力が不規則な変動荷重であることや係留索が非線形な変位復元力特性を有することから、不規則波中の動揺を解析的に得ることは困難である。そこで、あらかじめ浮体に作用する荷重と流体力を求めておいて運動方程式に組み入れ、この運動方程式を各時間ステップ毎に数値的に解く方法、すなわち数値シミュレーション法により動揺量を求める。なお数値シミュレーションには、ウィルソン θ 法を用いている。

⑥ 浮体の動揺量（六成分）、係留索の変位および反力

浮体の運動成分は図-2.2に示す六成分（サージ、スウェイ、ヒープの並進三成分、ロール、ピッチ、ヨウの回転三成分）である。また、浮体の動揺特性に大きな影響を及ぼす係留系についても変位および反力の関係を把握する。

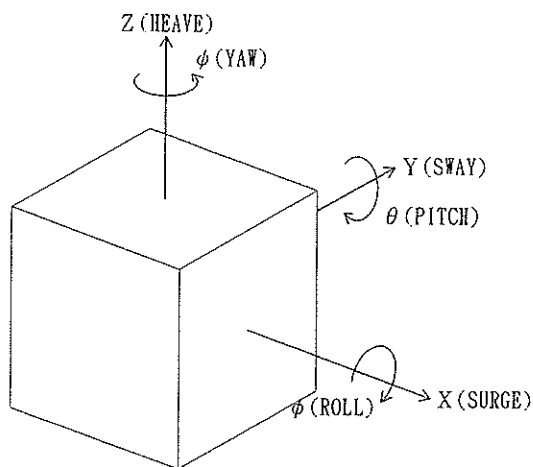


図-2.2 浮体の運動成分

3. 現地観測

3.1 現地観測および据付の概要

高知港では、従来浦戸湾内に港灣施設を建設していたが、貨物量の増加や来港船舶の大型化から外港（高知新港）計画が立案され、平成9年度の第一船入港を目指し

て建設が進められている。現在では南防波堤の一部が完成し、また三里地区においてケーソン式防波堤の建設が進められている。

この高知港において、平成5年5月12日および5月15日に運輸省第三港湾建設局が矩形ケーソン据付時の動揺量の現地観測を実施した。

図-3.1に高知港およびケーソンの施工場所を示す。

ケーソンの現地における据付作業は以下の手順で行われた。

まず、浦戸湾内の岸壁前面に係留されたFD（フローティングドック）上で製作されたケーソンは据付に必要な艀装や、現地観測に必要な各種の装置の取り付けが完了した後、写真-3.1に示すように南防波堤の港内側において進水し、据付場所の捨石マウンド上へと曳航される。ついで、図-3.2に示すように配置された4基の50tアンカーブロックに $\phi 30\text{mm}$ のワイヤーロープを用いてアンカリングがなされた後、据付作業が実施される。写真-3.2は港内側のアンカリングの状況を示す。また、据付においては、水中ポンプによる注水が行われ、ワイヤーロープの張力を調整しつつ注水を進めて、ケーソンが所定位置の捨石マウンド上に着底した時点で据付完了となる。なお、写真-3.3に示すように据付位置の微調整は、ケーソン上に設置した4台のウインチによってアンカーワイヤーを緊張することによりケーソンを法線方向に移動させ所定の位置に誘導している。

現地観測においては表-3.1に示す項目について、据付開始時から完了時まで連続して観測を実施している。

観測には以下のシステムを用いている。まず位置および動揺量については、ケーソン上の磁気の影響を極力受けない位置に設置した慣性測定装置（トキメック社製TOMS-1000）により測定を行った。この慣性測定装置は振動ジャイロ（3成分）、加速度計（3成分）および磁気方位センサ（1成分）と演算ユニットなどを組み合わせて構成されている。この装置で計測された方位角およびケーソンの動揺量は、磁気テープ装置に収録され、据付作業完了後回収し、解析処理を行った。ワイヤー張力については、ケーソン上に設置するシャックルに取り付けた歪みゲージにより負荷荷重を計測している。写真-3.4に計測に用いたシャックルと歪みゲージの貼付状況を示す。なお、歪みゲージの歪量と荷重の関係は、現地観測の前に静的な引張試験を行って検定している。また、波高については既設ケーソンの港外側約250mの地点に超音波式波高計を設置し観測している。なお、入射波向および注水時のケーソンの喫水については目視により観測した。

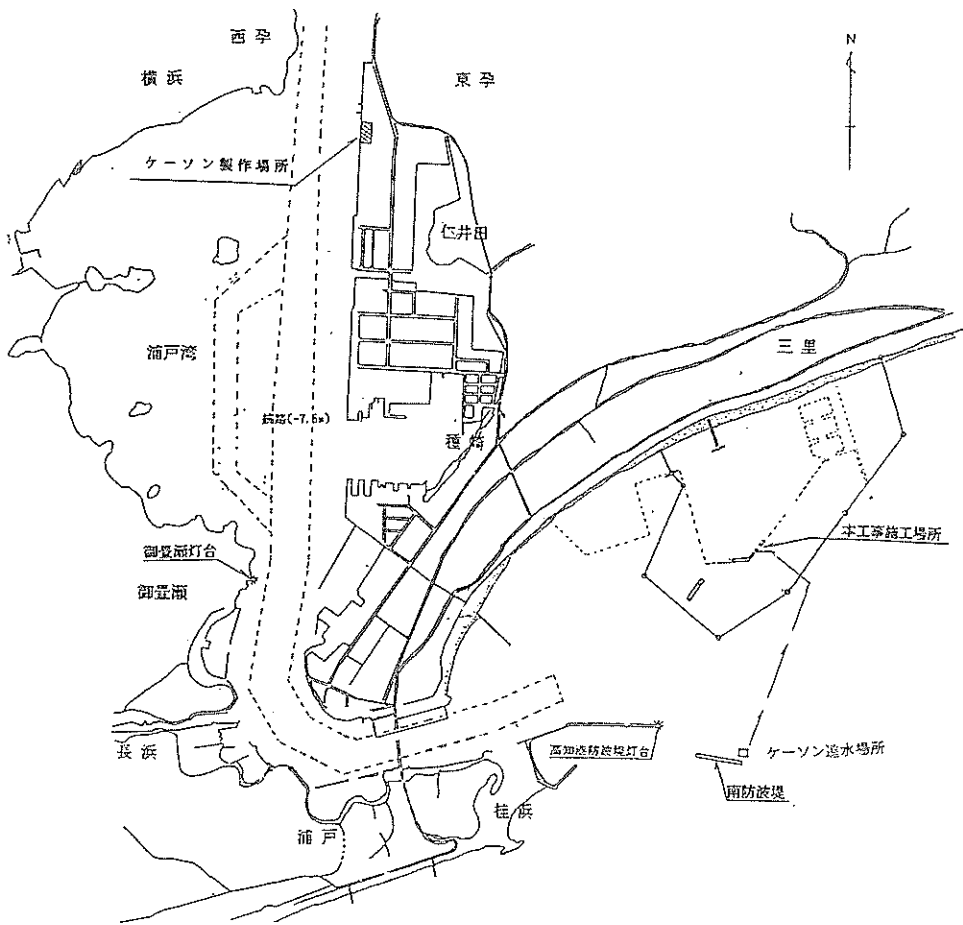


図-3.1 高知港ケーソン施工位置図

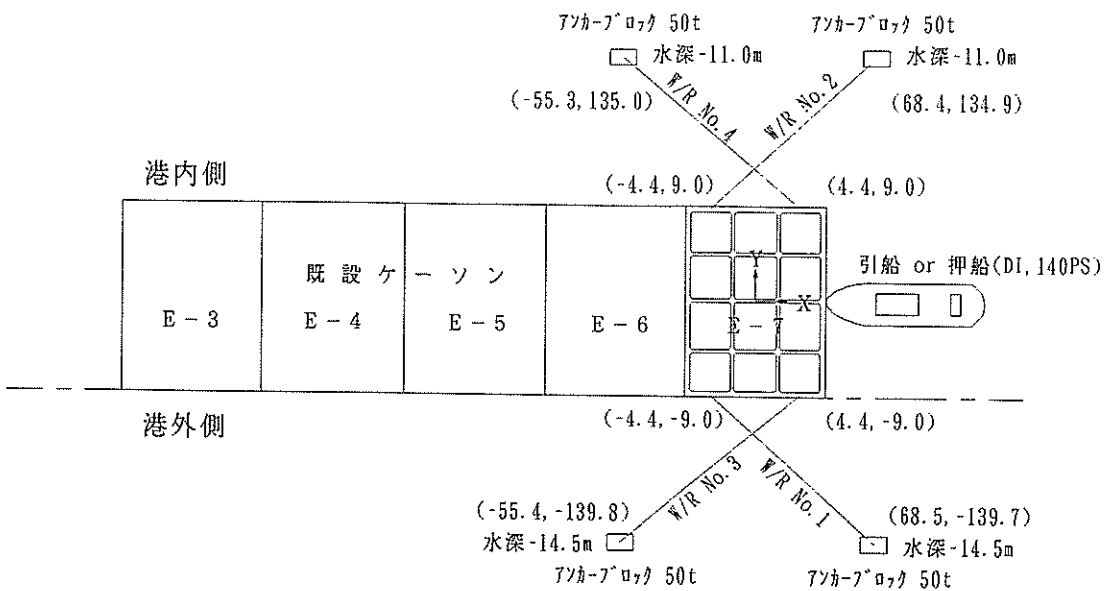


図-3.2 ケーソン係留索配置図

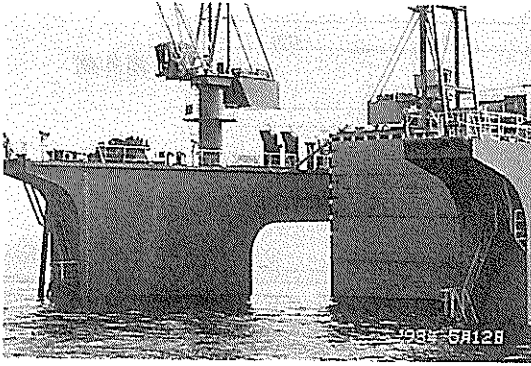


写真-3.1 ケーソン進水状況



写真-3.2 ケーソン係留状況(港内側)

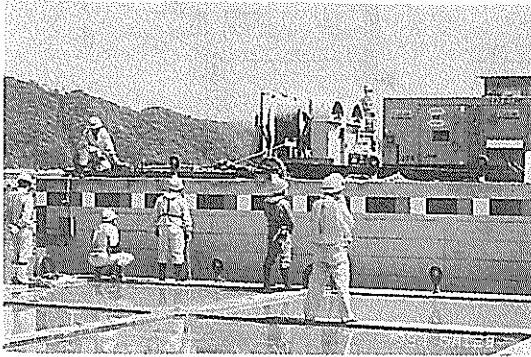


写真-3.3 ケーソン据付位置調整状況

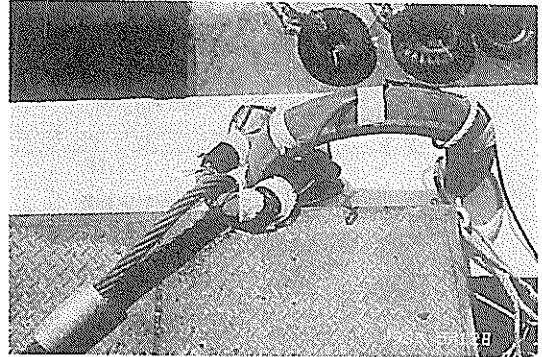


写真-3.4 ワイヤ張力測定用シャックル

表-3.1 据付時のケーソン1函当りの動揺観測点数一覧

観測項目	測定機器	形式	容量	点数	観測方法	観測種別	備要
ケーソン動揺観測	慣性測定装置	トムス (TOMS)	磁気方位 (6成分)	1台 1台	9CH	MT収録	据付時
ワイヤ張力(シャックル)	ひずみゲージ			4台	4CH	MT収録	据付時 個数 8個製作
ケーソン喫水	目視観測					人力対応	据付時
波高観測	磁気記録式波高計			1台	1CH	磁気テープ記録	据付時 観測完了後回収
ケーソン据付状況	ビデオ撮影					テープ記録	据付時 HEAVE, SWAY

図-3.3(1)にケーソン上に設置した据付作業用の各種機器の配置と、観測に用いた慣性測定装置、磁気方位センサー、および歪みゲージを貼付したシャックル(図-

3.3(2)参照)の位置を示す。なお、超音波式波高計の位置は前出の図-3.2に示している。

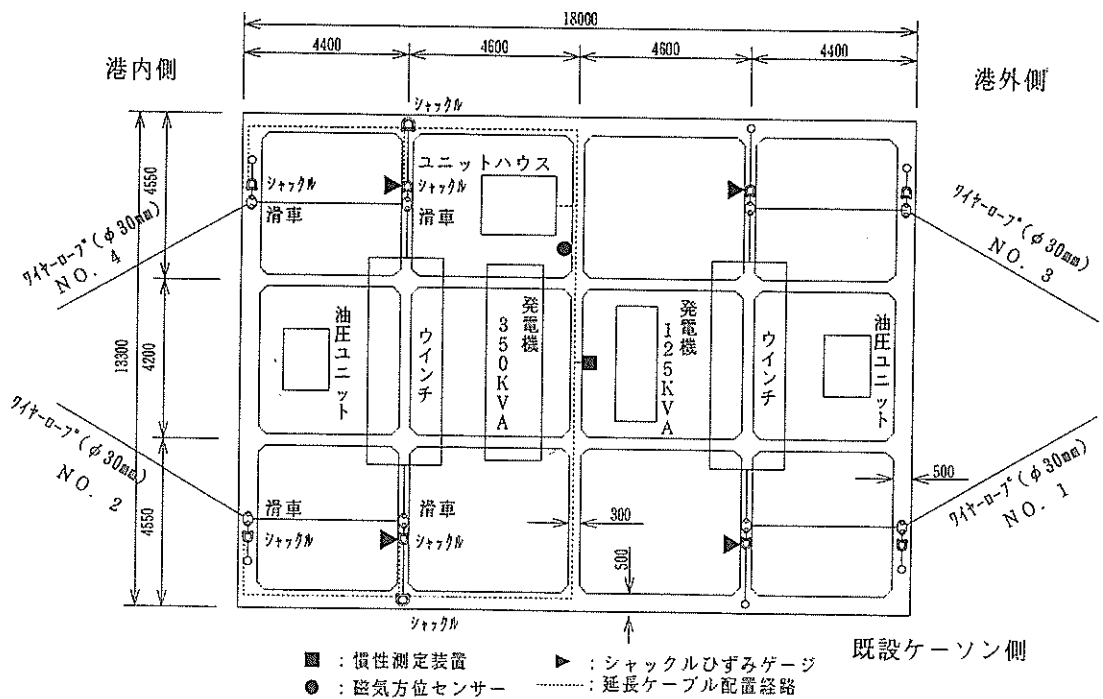


図-3.3(1) 据付作業・観測測定等配置平面図

ワイヤー張力測定用シャックル詳細図

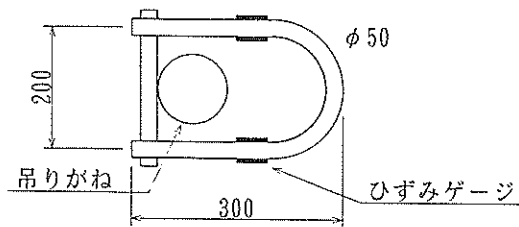


図-3.3(2) ワイヤー張力測定用シャックル詳細図

3.2 動揺量およびワイヤーの張力

(1) 動揺量

高知港におけるケーソン据付時の動揺量(有義両振幅)の現地観測結果を表-3.2に示す。動揺成分のうち、ロール、ピッチ、ヨウの回転三成分は慣性測定装置が直接角度を出力するが、並進成分であるサージ、スウェイ、ヒープについては計測値が加速度であるので計測後にFFTによる二階積分を行って変位を求めている。なお、動揺観測はケーソン据付作業中に連続して実施しているが、解析においてはケーソン据付作業を大きく3工程(進水時・注水時・着底時)に分け、それぞれを代表する20分

表-3.2 現地測定によるケーソンの動揺量

区分	ケース	アンダーキールクリアランス (m)	SURGE (m)	SWAY (m)	HEAVE (m)	ROLL (deg)	PITCH (deg)	YAW (deg)	計測時間	備考
date 5/12 caisson E-7	着底時	0.5	0.055	0.085	0.042	0.270	0.251	0.298	9:45から20分間	$H_{1/3}=0.45\text{ m}$ $T_{1/3}=5.50\text{ Sec}$
	注水時	2.2	0.161	0.266	0.351	1.756	0.780	0.474	10:22から20分間	
	進水時	3.2	0.293	0.340	0.458	1.757	1.291	2.032	12:05から20分間	
date 5/15 caisson E-8	着底時	0.5	0.036	0.103	0.030	0.285	0.127	0.187	11:25から20分間	$H_{1/3}=0.35\text{ m}$ $T_{1/3}=5.50\text{ Sec}$
	注水時	2.2	0.239	0.243	0.401	1.310	1.121	0.577	11:45から20分間	
	進水時	3.5	0.259	0.223	0.390	0.950	0.983	1.416	12:05から20分間	

間の測定結果について統計処理を行い各動揺成分の動揺両振幅の有意値を求めている。また、この表中のアンダーキールクリアランスはケーソンの底面から捨石マウンドまでの鉛直距離である。アンダーキールクリアランスがE-7ケーソンで3.2mの時、またE-8ケーソンで3.5mの時はどちらもケーソンの据付が開始される直前、つまりFDから進水した時の状態（進水時）であり、アンダーキールクリアランスが2.2mの時はケーソンに注水が行われている状態（注水時）、アンダーキールクリアランスが0.5mの時はケーソンが着底する直前の状態（着底時）である。ここに本稿で以降用いる“着底時”という用語については、着底する直前（アンダーキールクリアランス0.5m）の状態を意味することに留意されたい。

なお、前述の動揺6成分について、その正負の方向を図-3.4に示す。

図-3.5(1)~(2)は今回の観測で進水から着底まで連続して観測することのできたE-8ケーソンについて、ヒーブとピッチの動揺の時系列を示したものである。縦軸はケーソンの動揺量、横軸は時間経過を示している。これらの図より据付開始後、注水が進むにつれ動揺量が減少していくことがわかる。なお、着底時10分経過前後（12:15前後）に再び小さな動揺が現れているが、これは着底直前に数分間注水を中断し、ケーソンの法線方向位置の微調整を行っていたため、その影響が出たものと思われる。

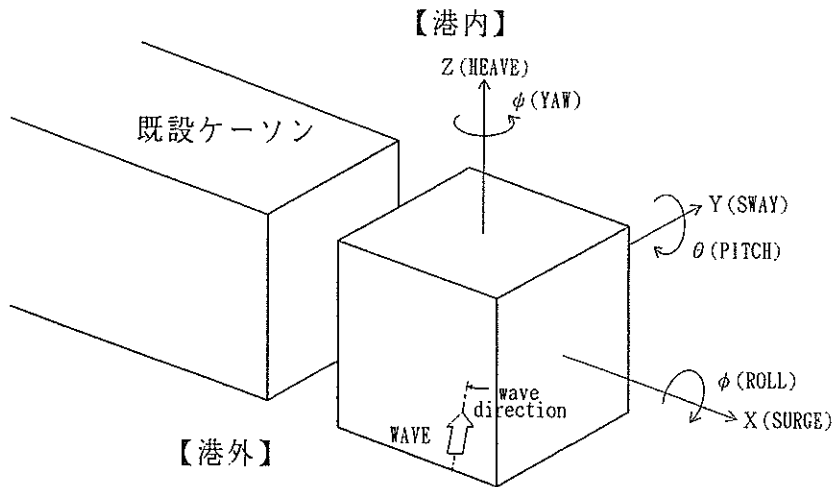


図-3.4 浮体の運動成分および入射波向

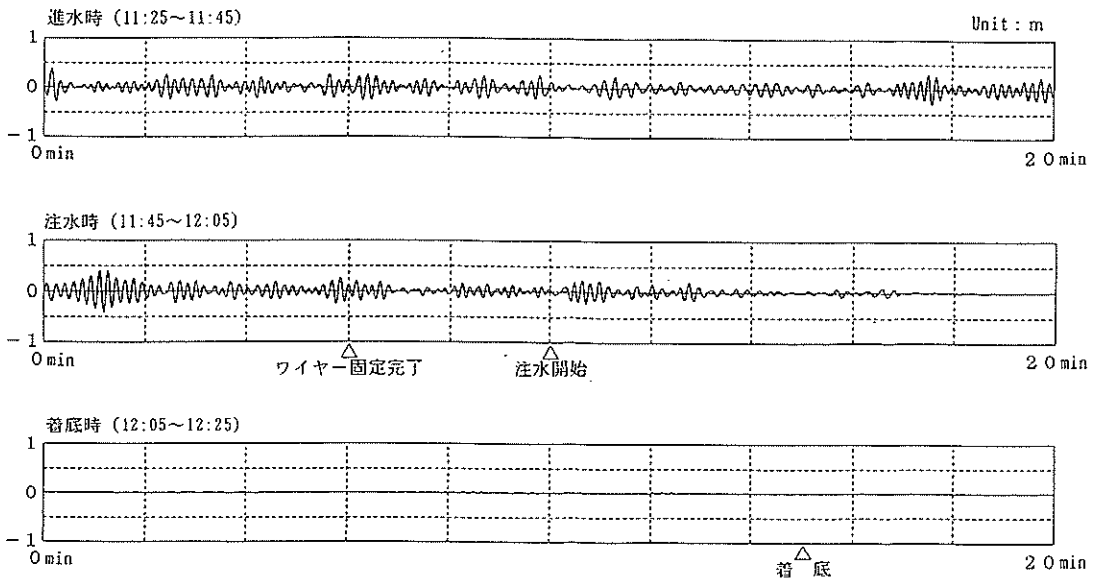


図-3.5(1) 動揺の時系列 (E-8ケーソン：ヒーブ)

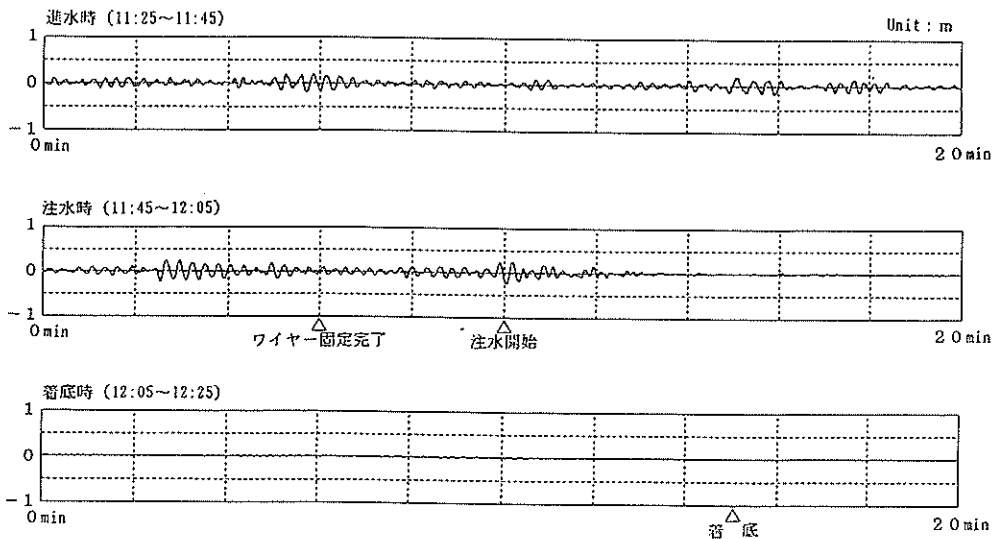


図-3.5(2) 動揺の時系列 (E-8ケーソン：ピッチ)

図-3.6(1)~(6)は横軸にアンダーキールクリアランスを、縦軸にサージ、スウェイ、ヒープ、ロール、ピッチ、ヨウの各動揺成分の有義両振幅をとり、両者の関係を示したものである。この図中の▲印は5月12日に据付けたE-7ケーソンの動揺量を、△印は5月15日に据付けたE-8ケーソンの動揺量を示している。なお、この据付作業時の有義波高および有義波周期は、5月12日は $H_{1/3}=0.45\text{m}$ 、 $T_{1/3}=5.50\text{s}$ であり、5月15日は $H_{1/3}=0.35\text{m}$ 、 $T_{1/3}=5.50\text{s}$ であった。また、入射波向は5月12日、15日ともケーソン法線方向に対して 60° であり、両日の自然条件に顕著な差異はみられない。

各動揺成分とも、E-7ケーソンとE-8ケーソン双方のアンダーキールクリアランスの変化に伴う動揺量の変化はよく一致している。すなわち、すべての動揺成分においてアンダーキールクリアランスが小さくなるにつれ動揺量は小さくなる傾向にある。

例えば図-3.6(3)に示したヒープについては進水時(アンダーキールクリアランス：E-7ケーソン3.2m、E-8ケーソン3.5m)の動揺有義両振幅が、E-7ケーソンで0.458m、E-8ケーソンで0.390mと、それぞれの場合の有義波高とほぼ等しい動揺量を示しているが、アンダーキールクリアランスの変化に伴い動揺量は徐々に減少し、注水時(アンダーキールクリアランス2.2m)から着底時(アンダーキールクリアランス0.5m)にかけて急激に減少している。

一方、図-3.6(4)に示したロールの動揺有義両振幅は、進水時から注水時にかけてE-7ケーソンでは 1.757deg から 1.756deg へ、E-8ケーソンでは 0.950deg から 1.310deg へと推移しており、注水時までには動揺量に目立った変化

はみられないのに対して、注水時から着底時にかけてE-7ケーソンで 1.756deg から 0.270deg 、E-8ケーソンで 1.310deg から 0.285deg へと大きく減少している。

また、図-3.6(6)に示したヨウの動揺有義両振幅は、進水時にはE-7ケーソンで 2.032deg 、E-8ケーソンで 1.416deg であるが、ワイヤーによる拘束が生ずる注水時から着底時にかけては、E-7ケーソンで 0.474deg から 0.298deg 、E-8ケーソンで 0.577deg から 0.187deg と動揺有義両振幅量は進水時に比べてかなり小さく抑えられている。

ここで図-3.6(1)~(3)に示した並進3成分(サージ・スウェイ・ヒープ)について着底時の動揺有義両振幅を比較すると、スウェイの動揺有義両振幅が他の並進2成分の約2倍程度と特に大きくなっている。これは、ケーソンに対して入射波の波向が 60° であるため動揺成分のうちスウェイが卓越すること、およびケーソン着底時に生じる滑動現象の影響を受けていることを表しているものと思われる。ただし、着底時のスウェイの動揺有義両振幅は約10cmであり、本観測においては波浪条件はそれほど厳しくなかったために滑動量自体は極めて小さい。さて、本稿における“滑動”とは、通常、防波堤の耐波安定性の検討で用いられている滑動と少し意味が異なる。据付中のケーソンは注水過程にあるため、その自重が安定性を発揮するまでに至っていない。そこへ比較的大きな波が作用すると据付中のケーソン重量よりも波浪荷重の方が大きくなるため波下側へ漂流することがある。本稿ではこの現象のことを“滑動”と称している。

なお、注水時の動揺量が進水時の動揺量を上回る観測値が記録されたのはE-8ケーソン据付時のみである。

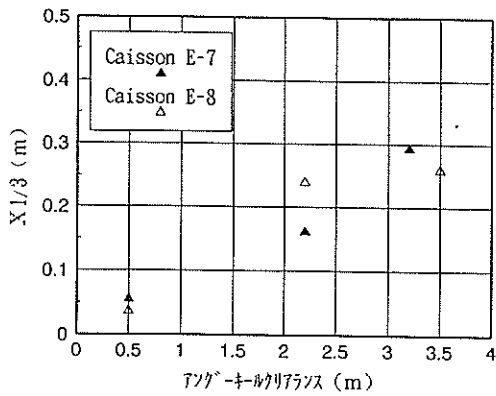


図-3.6(1) アンダーキールクリアランスと動揺量の関係 (サージ)

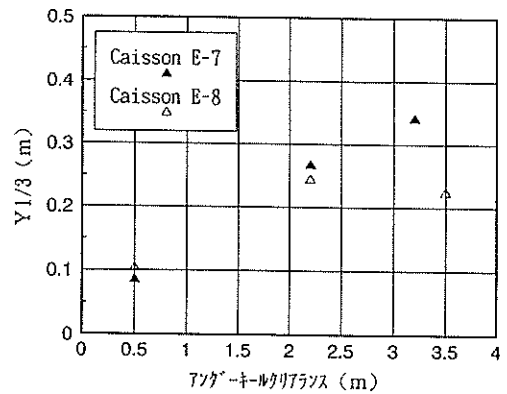


図-3.6(2) アンダーキールクリアランスと動揺量の関係 (スウェィ)

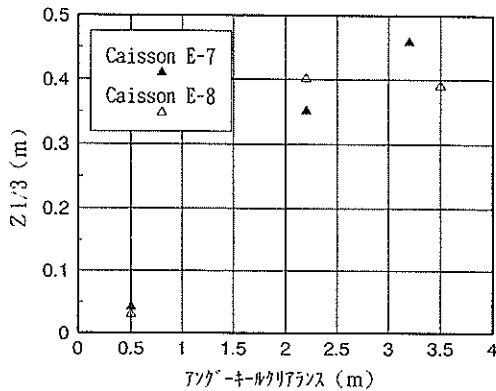


図-3.6(3) アンダーキールクリアランスと動揺量の関係 (ヒープ)

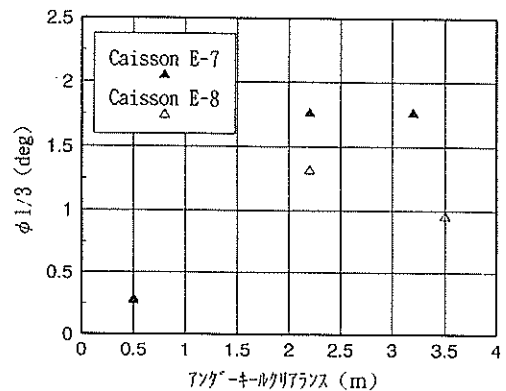


図-3.6(4) アンダーキールクリアランスと動揺量の関係 (ロール)

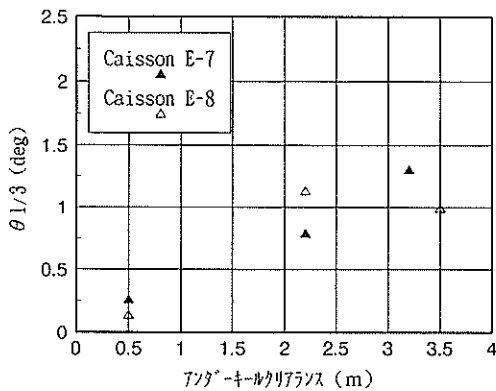


図-3.6(5) アンダーキールクリアランスと動揺量の関係 (ピッチ)

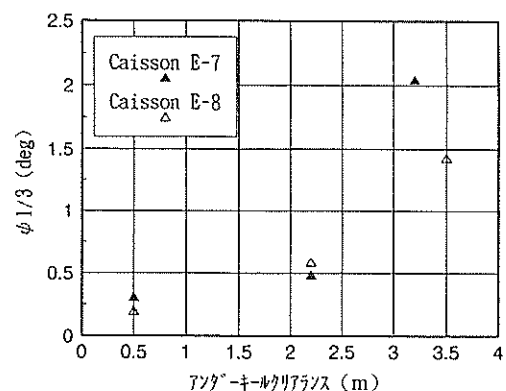


図-3.6(6) アンダーキールクリアランスと動揺量の関係 (ヨウ)

(2) ワイヤーの張力

高知港におけるケーソン掘付時の現地観測では動揺量の測定と同時にワイヤーの張力についても測定を実施した。なお、このワイヤーの張力については、動揺量の場合と同様にケーソン掘付作業を3工程(進水時・注水時・

着底時)に分け、それぞれを代表する20分間の測定結果について考察を行うこととした。

図-3.7(1)~(4)はE-8ケーソン掘付時に使用したワイヤーにかかる張力の時系列を示したものである。縦軸はワイヤーの張力、横軸は時間経過を示している。

ワイヤーの番号は、前出の図-3.2および図-3.3(1)に示したように据付ケーソンの四隅に取り付けられた4本のワイヤーについて、既設ケーソン寄りの港外側から港内側、その対面の港外側から港内側の順にNo. 1～4と番号がふってある。

張力が増加し始めるのはワイヤーによってケーソンが固定されてからであり、注水中から着底時にかけて、張力は増減し、かつ恒常的に作用していることがわかる。

また、図-3.8(1)～(4)は横軸にアンダーキールクリアランスを縦軸にワイヤーの張力の最大値および平均値をとり、両者の関係を示したものである。

図中の▲印および●印は5月12日に据え付けたE-7ケーソンに使用したワイヤーの張力の最大値と平均値を、△印および○印は5月15日に据え付けたE-8ケーソンに使用したワイヤーの張力の最大値と平均値を示す。

進水時の計測は、いずれの場合もワイヤーをアンカーブロックに取り付ける作業中の計測であるため、張力の最大値および平均値はほぼ0となっている。

着底時の張力は注水時の張力と比較して図-3.8(2)に示したE-7ケーソンのワイヤーNo. 2を除き最大値、平均値のいずれもほぼ同等か、それ以上の荷重を記録している。

また、アンダーキールクリアランスの推移による張力の最大値の変化と平均値の変化は各ワイヤーの場合とも、よく似た傾向を示し、注水時から着底時にかけて持続的に大きな負荷を受けている。つまり、注水が進むにつれワイヤーの張力は漸増し、その後着底まではほぼ一定の張力が保持されているものと考えられる。これは前出の図-3.7(1)～(4)に示した張力の時系列からも読みとれる。

張力の平均値が最も大きいのは、E-7ケーソン据付の場合は図-3.8(3)に示した着底時のワイヤーNo. 3で20.7tfである。また、E-8ケーソン据付の場合も同様に着底時のワイヤーNo. 3で19.6tfである。また、このワイヤーNo. 3では、注水時から着底時にかけて張力の最大値が約30tfと他のワイヤーよりも大きく、この港外側のワイヤーに最も大きな負荷が作用している。これは波漂流力の作用によって港外側のワイヤーにより大きな荷重がかかることと、注水が進み着底状態に近づくにつれ波力が増大し固定浮体に働く波力とはほぼ等しい状態になるためである。

なお、この観測結果からは各ワイヤーの位置の相違による張力への影響を読みとることが困難であるが、各ワイヤーにおけるアンダーキールクリアランスの推移に伴うワイヤー張力の変化はおおむねよく一致している。

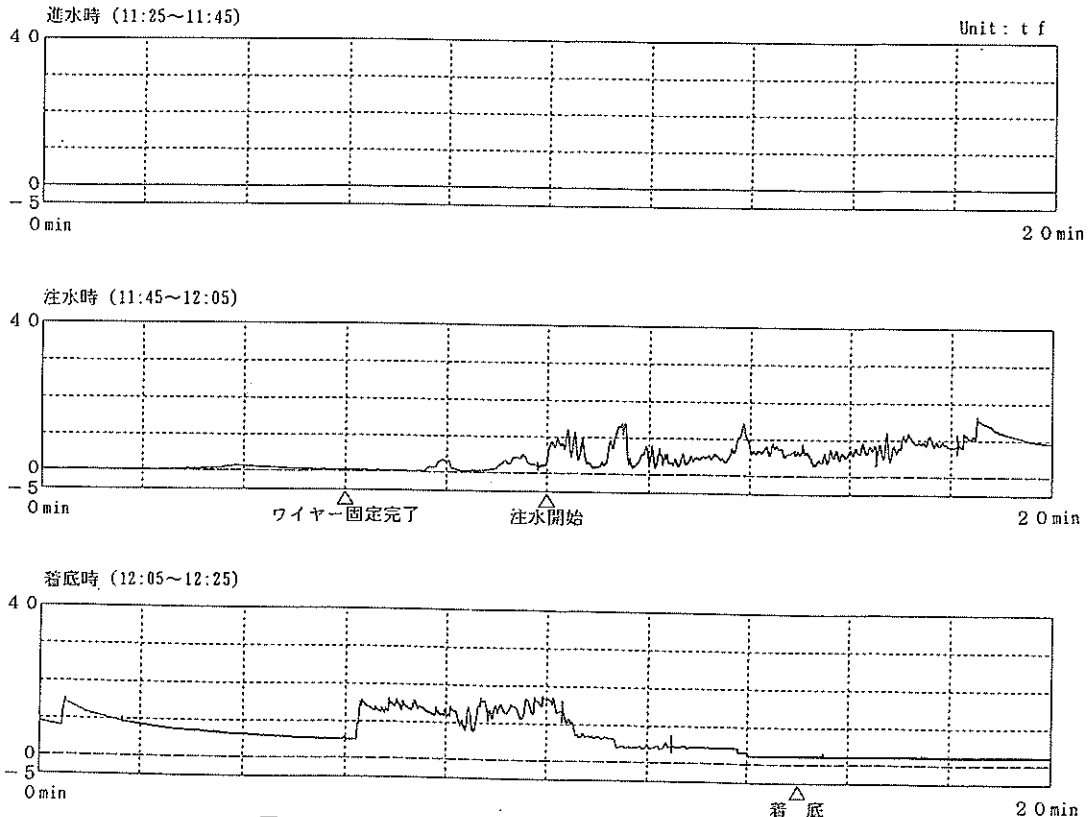


図-3.7(1) ワイヤー張力の時系列 (E-8ケーソン: No. 1)

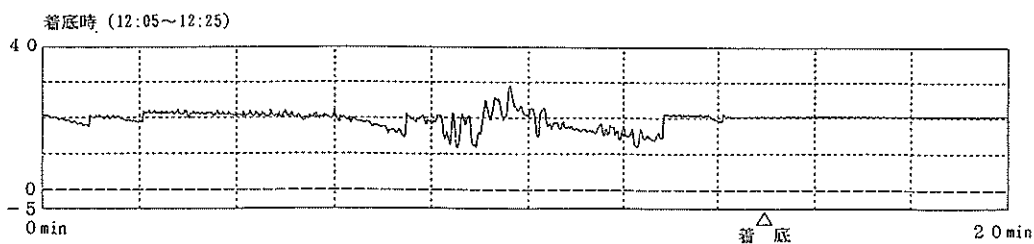
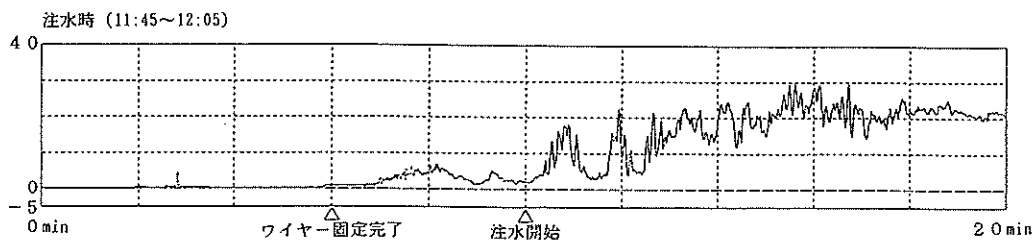
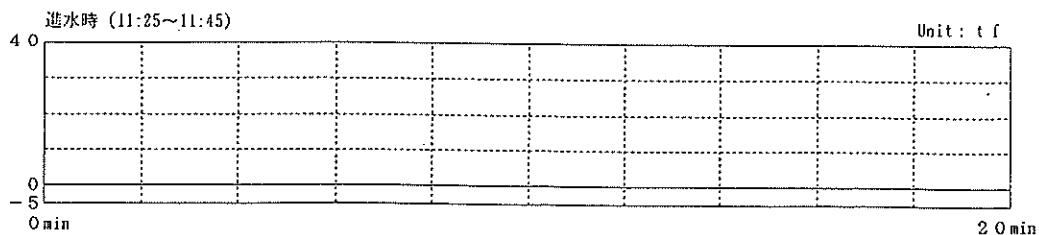


図-3.7(2) ワイヤー張力の時系列 (E-8ケーソン: No. 2)

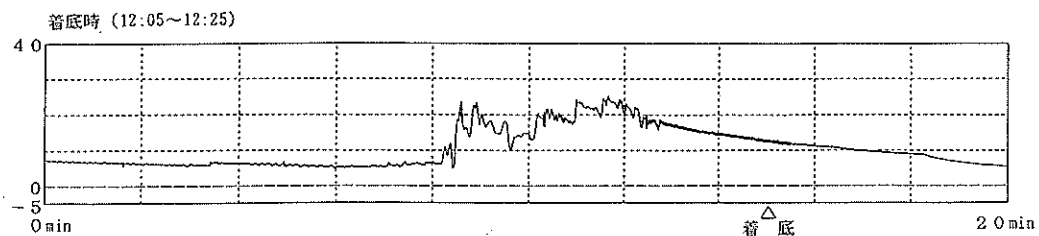
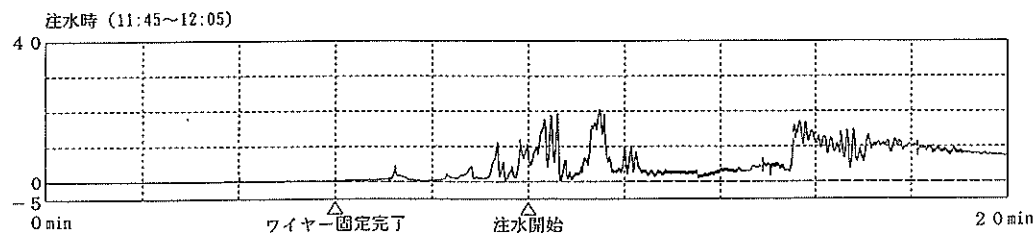
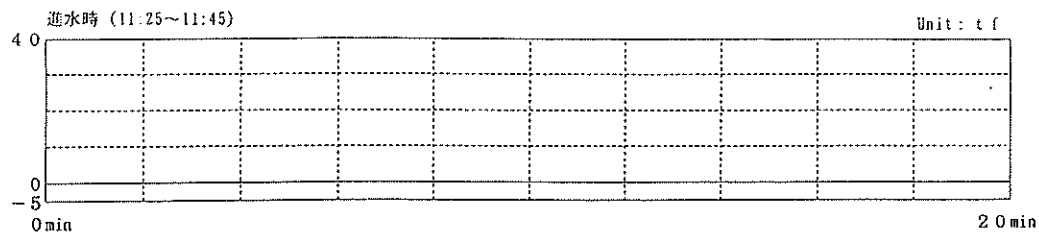


図-3.7(3) ワイヤー張力の時系列 (E-8ケーソン: No. 3)

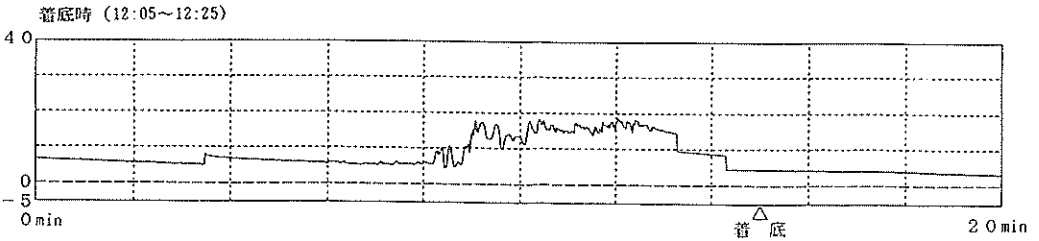
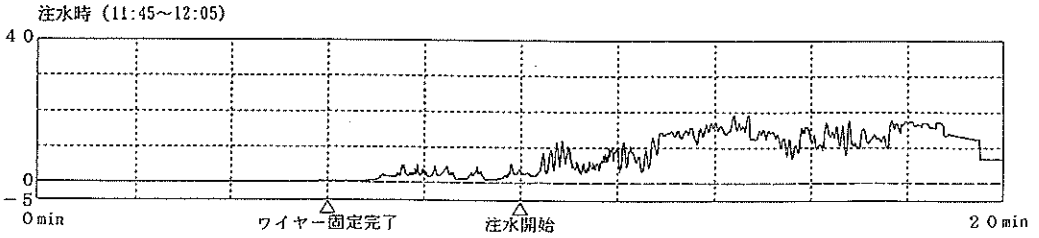
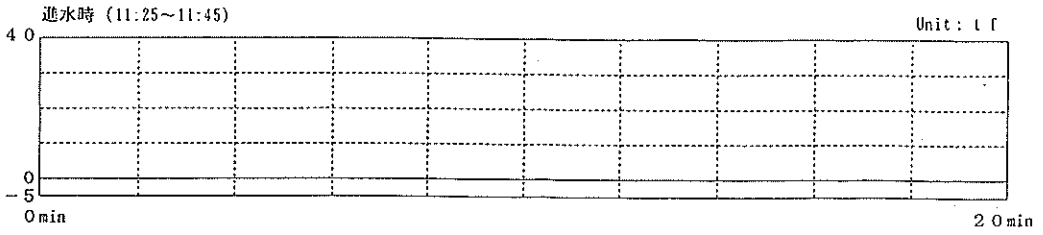
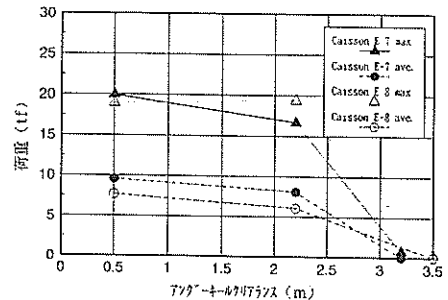
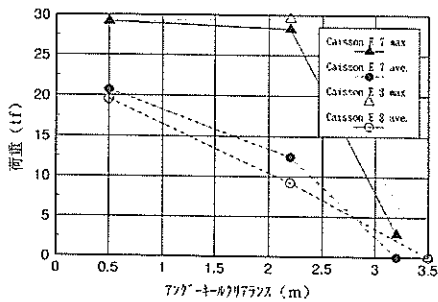
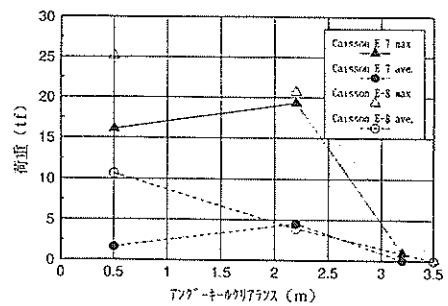
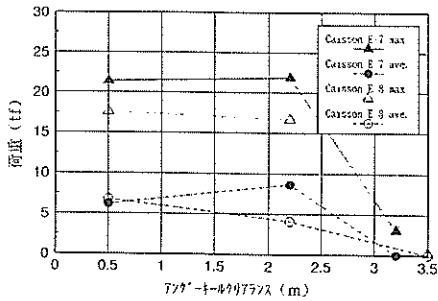


図-3.7(4) ワイヤー張力の時系列 (E-8ケーソン: No. 4)



4. 現地観測結果のシミュレーション結果との比較

(1) アンダーキールクリアランスによる動揺量の相違

ここでは、高知港において実施したケーソン据付時の動揺量の現地観測の結果と、動揺シミュレーションにより得られた計算値との比較を行う。

観測値としては、ケーソンの据付が開始される直前の時（進水時：アンダーキールクリアランス：E-7ケーソン3.2m, E-8ケーソン3.5m）と、注水が行われていた時（注水時：アンダーキールクリアランス2.2m）および、ケーソンが着底する直前（着底時：アンダーキールクリアランス0.5m）の3ケースについて記録が得られている。

動揺シミュレーションでは、E-7ケーソンの場合、進水時から順にアンダーキールクリアランスが3.2m, 2.5m, 2.0m, 1.5m, 1.0m, 0.5mの時の動揺量を、またE-8ケーソンではアンダーキールクリアランスが3.5m, 2.5m, 2.0m, 1.5m, 1.0m, 0.5mの時の動揺量を計算している。

計算は、各喫水毎にそれぞれの流体力をポテンシャル接続法により求め、これを用いて動揺シミュレーションを実施した。この動揺シミュレーションは20分間行い、その統計量（有義両振幅）で評価している。ただし、ポテンシャル接続法で流体力を求めるにあたってはその手法上の制約条件からケーソンをフーチング部の存在しない矩形浮体とみなしている。

なお、計算においてはヒープ、ロール、ピッチの減衰定数を補正している。これはポテンシャル接続法あるいは特異点分布法などによるラジエーション流体力の解析においては浮体周辺の造渦などに起因する非線形減衰力が求められるためである。また、特に浮体の固有周期と波周期が近づくにつれてその影響が大きくなるため、解析的に求められた値を補正することとした。表-4.1は、ポテンシャル接続法によって得られたラジエーション流体力から求めた減衰定数と補正值を示したものである。補正は、従来の水理模型実験等²⁾を参考にアンダーキールクリアランスが1.0m, 1.5mの時のヒープの減衰定数を0.05とし、ロール及び、ピッチの減衰定数はすべて計算値の2倍に置き換えている。

さて、ここで現地観測と比してアンダーキールクリアランスの変化を細かく分割してシミュレーションを行っているのは、喫水変化による動揺量の変化をより詳細に把握するためである。なお、動揺成分の正負の方向は前

出の図-3.4に示すとおりである。

ケーソン据付時の動揺の状況は前述の3. に詳しいが、ここで動揺シミュレーションから得た計算値と観測値との比較を図-4.1(1)~(6)に示す。

図-4.1(1)~(2)に示したサージとスウェイでは、アンダーキールクリアランスが大きいときほど観測値が計算値を大きく上回る結果となっている。計算においてはケーソンの係留状態を比較的緊張された状態と仮定して計算を行っているが、現地観測における進水時には、ケーソンがアンカーワイヤーによって緊張拘束されていないことや、固定されてからも進水時から注水時の初期にかけて拘束が小さいこともあり、そのために長周期波成分による動揺の影響を大きく受けているものと考えられる。ただし、現地観測では用いた観測機器の分解性能が制約条件となり、周期が20sをこえる動揺成分について観測されていない。そこで、計算においてもまず現地観測より得た有義波高および有義波周期を用いて、ブレッダシュナイダー・光易型の標準スペクトルに基づき波浪の成分波を求め、これに単位波高当たりの波力を乗じて不規則波浪外力を算定するものとし、長周期波成分の影響を考慮しないこととした。

なお、サージ、スウェイ共、着底時の観測値と計算値は進水時や注水時と比べ比較的よく一致している。これはケーソンが着底する直前のワイヤーが、かなり緊張状態となっているので係留系の固有周期は短くなり、長周期波成分の影響がさほど大きくないと考えられるためである。

表-4.1 減衰定数の補正

区分	アンダーキールクリアランス (m)	減衰定数			備考
		HEAVE	ROLL	PITCH	
date 5/12 caisson E-7	0.5	0.015	0.054 0.108	0.113 0.226	H _{1/3} =0.45 m T _{1/3} =5.50Sec
	1.0	0.017 0.050	0.054 0.108	0.112 0.224	
	1.5	0.018 0.050	0.052 0.104	0.106 0.212	
	2.0	0.018	0.048 0.098	0.099 0.198	
	2.2	0.019	0.046 0.092	0.092 0.184	
	3.2	0.020	0.041 0.082	0.081 0.162	
date 5/15 caisson E-8	0.5	0.014	0.056 0.112	0.119 0.238	H _{1/3} =0.35 m T _{1/3} =5.50Sec
	1.0	0.016 0.050	0.056 0.112	0.117 0.234	
	1.5	0.017 0.050	0.053 0.106	0.111 0.222	
	2.0	0.017	0.050 0.100	0.104 0.208	
	2.5	0.018	0.047 0.094	0.096 0.192	
	3.5	0.019	0.049 0.080	0.080 0.160	

※ 着色部：上段=補正前の値、下段=補正後の値

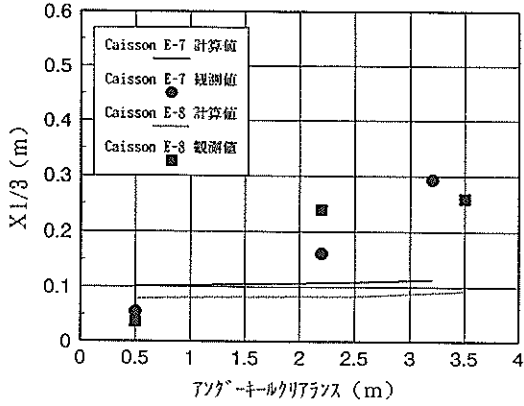


図-4.1(1) 観測値と計算値の比較 (サージ)

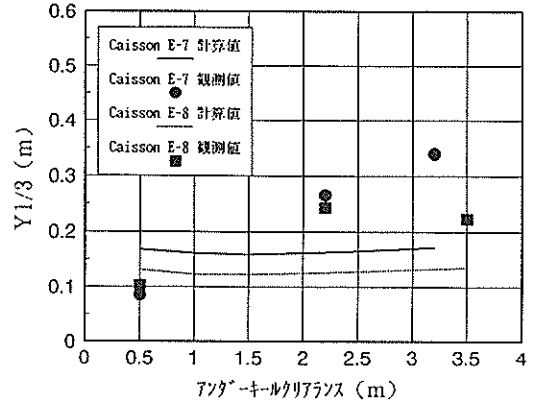


図-4.1(2) 観測値と計算値の比較 (スウェイ)

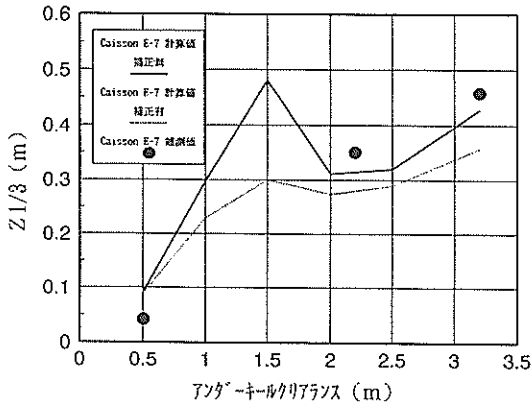


図-4.1(3)a 減衰定数の補正による影響 [E-7ケースン] (ヒーブ)

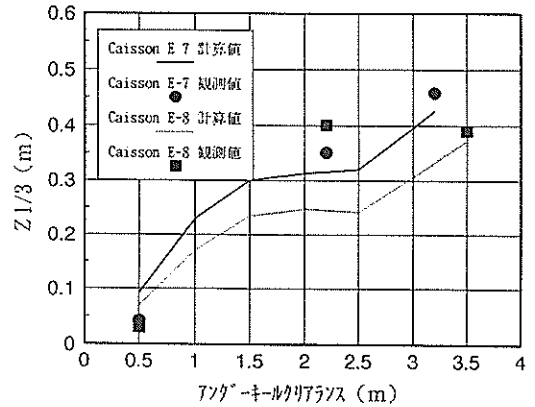


図-4.1(3)b 観測値と計算値の比較 (ヒーブ)

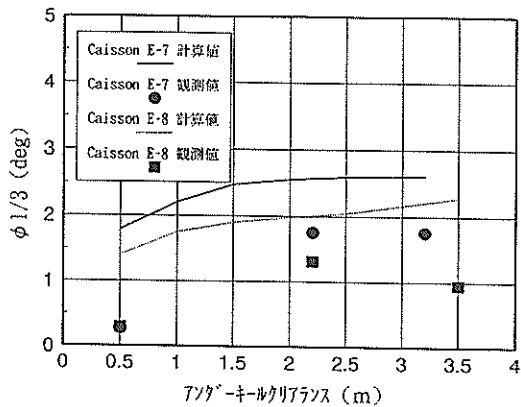


図-4.1(4) 観測値と計算値の比較 (ロール)

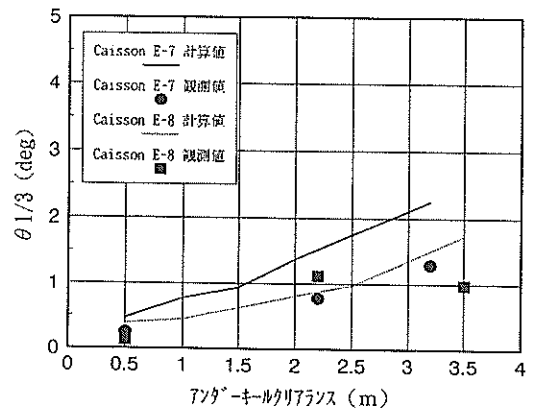


図-4.1(5) 観測値と計算値の比較 (ピッチ)

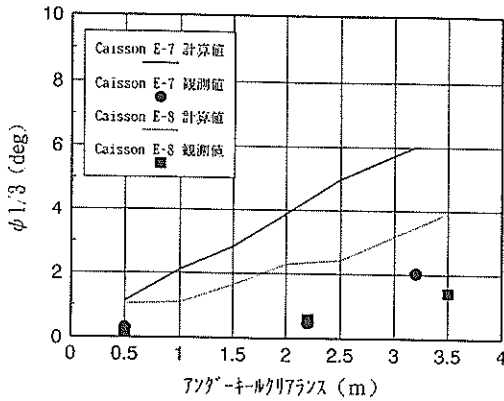


図-4.1(6) 観測値と計算値の比較

図-4.1(3)aはヒープについてE-7ケーソンを例にとり、すべてのアンダーキールクリアランスにおいて減衰定数を補正した計算値、補正しない計算値および観測値を比較したものである。この図から分かるとおり、アンダーキールクリアランスが1.0mと1.5mの時に減衰定数の補正が大きく動揺量を抑制することになっている。このことからアンダーキールクリアランスが1.0mと1.5mの時にはポテンシャル接続法により求めることのできない非線形減衰力の影響が、特に大きくなっているものと考えられる。そこでヒープについては前述したとおり、アンダーキールクリアランスが1.0mと1.5mの時のみ前出の表-4.1に示した減衰定数の補正を実施している。

図-4.1(3)bに示した減衰定数の補正を実施したヒープについてはE-7ケーソン据付、E-8ケーソン据付のいずれも計算値と観測値はおおむね一致しているが、E-8ケーソン注水時のみ観測値と計算値の差異が大きい。

図-4.1(4)に示したロールについては動揺シミュレーションにおいて、ケーソン底部にあるフーチングによる動揺の低減効果を考慮に入れていないこともあり計算値が観測値をかなり上回る結果となっている。また、特に着底時（アンダーキールクリアランス0.5m）は、計算値と観測値の差が大きい。ケーソン底部にあるフーチングは特にロールの減衰に対して大きな効果を及ぼしているものと思われるので、この点について別途、流体力の計算モデルを特異点分布法に変えて補足検討する。

なお、計算においては理論値の2倍に補正した減衰定数を用いているが、先に述べたとおりフーチングの影響を考慮していないことから減衰定数が補正した値よりさらに大きいものと考えられる。

図-4.1(5)に示したピッチは、サージやスウェイと反対に、アンダーキールクリアランスが大きいほど計算値

が観測値を上回る結果となっているが、アンダーキールクリアランスの変化に伴い動揺量が減少する状況は計算値と観測値とにおいてよく似ている。

また、図-4.1(6)に示したヨウについてはいずれの時点でも計算値は観測値を上回りその差異も大きい。その理由として、現実には据付作業におけるアンカリングがクロス配置となっているので、鉛直軸回転方向の運動に対する抑制効果が大きかったものの、計算ではこれを十分に再現できていなかったものと考えられる。なお、現地の目視状況から波向を60°として計算しているが、実際にはケーソンの据付法線に対してより直角方向、すなわち波向が90°に近い方向から入射していた可能性も否定できない。このほかにも、ラジェーション流体力の算定においては既設函の存在の影響を考慮していないが、既設函が存在することによる流体力の変化がヨウ運動に影響している可能性もある。

以上、記したように細部については計算値と観測値に差異がみられるものの定性的には両者はよく一致している。

(2) フーチングが有する減衰効果に関する検討

ここでは、ケーソン底部にあるフーチングが動揺量に及ぼす影響を検討する。

前述したとおりポテンシャル接続法によりケーソンのラジェーション流体力を求めるには、ケーソンをフーチング部の存在しない矩形浮体とみなさなくてはならない。

そこでフーチングの影響を考慮するにあたっては任意形状の浮体においてその表面を有限な要素に分割して計算を行う三次元特異点分布法によりラジェーション流体力を求め、これを用いて動揺シミュレーションを行い動揺量を算出することとした。また、比較のため4.(1)のポテンシャル接続法で求めたラジェーション流体力を利用した検討と同じく、ケーソンを矩形に置き換えフーチングの影響を考慮しないモデルについても三次元特異点分布法によりラジェーション流体力を求め、これを用いて動揺シミュレーションを実施し、フーチングの有無による動揺量の差異を検討した。

この動揺シミュレーションでは、4.(1)と同様にE-7ケーソンの場合、進水時から順にアンダーキールクリアランスが3.2m、2.5m、2.0m、1.5m、1.0m、0.5mの時の動揺量を、またE-8ケーソンではアンダーキールクリアランスが3.5m、2.5m、2.0m、1.5m、1.0m、0.5mの時の動揺量を計算している。この動揺シミュレーションは20分間行い、その統計量（有義両振幅）で評価している。

フーチングを有することにより大きな影響を受けると考えられる動揺成分はヒープとロールである。すなわち、

フーチングがあることによりラジェーション流体力が大きくなりヒープ（上下動）が抑制され、また、ロール（回転運動）も抑制されると考えられる。そこで、このヒープとロールについて、動揺シミュレーションにより求めたフーチングの影響を考慮した計算値と考慮しない計算値、および観測値の三者について比較して図-4.2(1)~(2)に示す。

図中の太い実線はフーチングの影響を考慮したE-7ケーソンの動揺量の計算値を示し、太い点線はフーチングの影響を考慮したE-8ケーソンの動揺量の計算値を示す。また、細い実線はフーチングの影響を考慮しないE-7ケーソンの動揺量の計算値を示し、細い点線は、フーチングの影響を考慮しないE-8ケーソンの動揺量の計算値を示す。すでに述べたとおり図中のフーチングの影響を考慮しない計算値は、流体力を求める際に特異点分布法を用いた場合の計算値であり、前出の図-4.1(3)~(4)に示したポテンシャル接続法を用いて流体力を求めた動揺量の計算値（フーチングの影響を考慮していない）とは異なることに注意する必要がある。なお、●印はE-7ケーソンの動揺量の観測値を、▲印はE-8ケーソンの動揺量の観測値を示している。

図-4.2(1)に示したヒープでは、E-7ケーソン、E-8ケーソンのいずれも進水時（アンダーキールクリアランス E-7ケーソン3.2m E-8ケーソン3.5m）を除いてフーチングの影響を考慮した場合の計算値が考慮しない場合の計算値より小さくなっている。また、アンダーキールクリアランスが小さくなるにつれてフーチングを考慮した場合の計算値と考慮しない場合の計算値の差異が小さくなっている。アンダーキールクリアランスの推移に伴う動揺量の変化について観測値とよく一致しているのはフーチングを考慮した場合の計算値であるが、E-8ケーソン注水時（アンダーキールクリアランス2.2m）では計算

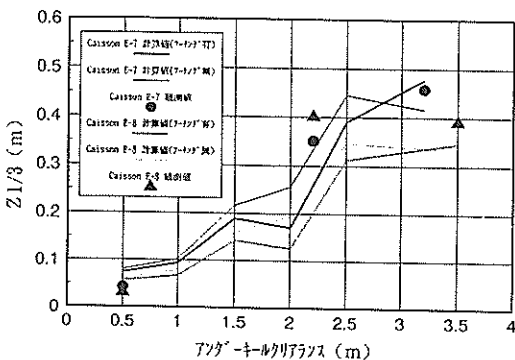


図-4.2(1) 観測値と計算値（フーチング有・無）の比較（ヒープ）

値と観測値の差異が大きい。

図-4.2(2)に示したロールではE-7ケーソン据付、E-8ケーソン据付のいずれもフーチングの影響を考慮した場合の計算値が考慮しない場合の計算値より小さくなっている。また、アンダーキールクリアランスが小さくなるにつれてフーチングを考慮した場合の計算値と考慮しない場合の計算値の差異が大きくなっている。アンダーキールクリアランスの推移に伴う動揺量の変化ではフーチングを考慮した場合の計算値は、考慮しない場合の計算値と比べて、より観測値に近づいているが依然として観測値との差異は大きい。これは、ラジェーション流体力の計算においてはフーチングがあることによる付加質量および減衰係数の増加は評価されているものの、浮体の動揺によりフーチング周辺で生じる渦の影響が考慮されていないためである。つまり、ロールの動揺では造渦に起因する非線形減衰力が大きく影響しているものと考えられる。通常このような非線形減衰力について解析的に求めることは困難であり、実験的に求めることが必要となる。

以上、フーチングの有無による動揺量の相違を比較したが、ラジェーション流体力についても以下に比較して示すこととする。具体的には加速度に比例する成分から付加質量係数、または付加慣性モーメント係数を求め、速度に比例する成分から減衰定数を求めて比較する。

図-4.3(1)~(2)は、横軸にアンダーキールクリアランスをとり縦軸に有義波周期5.5sにおけるヒープの付加質量係数あるいはロールの付加慣性モーメントをとって、両者の関係を示したものである。図中の太い実線はフーチングの影響を考慮したE-7ケーソンの付加質量係数あるいは付加慣性モーメントの計算値を示し、太い点線はフーチングの影響を考慮したE-8ケーソンの付加質量係数あるいは付加慣性モーメントの計算値を示す。また、

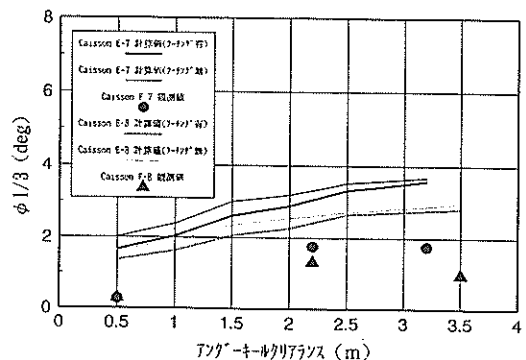


図-4.2(2) 観測値と計算値（フーチング有・無）の比較（ロール）

細い実線はフーチングの影響を考慮しないE-7ケーソンの付加質量係数あるいは付加慣性モーメントの計算値を示し、細い点線は、フーチングの影響を考慮しないE-8ケーソンの付加質量係数あるいは付加慣性モーメントの計算値を示す。

図-4.3(1)に示したヒープではアンダーキールクリアランスが小さくなるにつれ付加質量係数が大きくなるが、アンダーキールクリアランスが2.0mの時に一度値が大きくなっている。また、いずれのアンダーキールクリアランスにおいてもフーチングの影響を考慮した場合の方が考慮しなかった場合と比べ付加質量係数が大きくなっているが、差異はさほど大きくない。両者の差異が最も大きいのはアンダーキールクリアランスが2.0mの時で、係数値の差はE-7ケーソン、E-8ケーソンとも0.16となっている。

図-4.3(2)に示したロールではヒープと同様にアンダーキールクリアランスが小さくなるにつれ付加慣性モーメント係数が大きくなっているが、フーチングの影響を考慮した場合と考慮しなかった場合との差異は平均で0.12とやや大きい。

図-4.4(1)~(2)はヒープとロールについて減衰定数の計算値とアンダーキールクリアランスの関係を示したものである。図中の太い実線はフーチングの影響を考慮したE-7ケーソンの減衰定数の計算値を示し、太い点線はフーチングの影響を考慮したE-8ケーソンの減衰定数を示す。また、細い実線はフーチングの影響を考慮しないE-7ケーソンの減衰定数の計算値を示し、細い点線はフーチングの影響を考慮しないE-8ケーソンの減衰定数の計算値を示す。

図-4.4(1)に示したヒープではアンダーキールクリアランスが小さくなるにつれ減衰定数が小さくなるが、付加質量係数と同様にアンダーキールクリアランスが2.0mの時に一度値が大きくなっている。また、アンダーキールクリアランスが2.0mの時を除けば、フーチングの影響を考慮した場合の方が考慮しなかった場合と比べ減衰定数が小さくなっているが、その差異は小さく動揺に対する影響はさほど大きくないものと考えられる。

図-4.4(2)に示したロールではアンダーキールクリアランスが小さくなるにつれ減衰定数が大きくなる傾向にある。しかしながら、E-7ケーソンにおいてはアンダーキールクリアランスが2.5mの時に急激に減衰定数が大きくなっている。また、フーチングの影響を考慮した場合は考慮しなかった場合と比べて、減衰定数が小さくなっている。なお両者の減衰定数の差は、平均で0.007とやや大きくなっている。

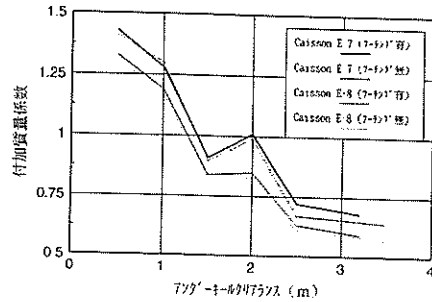


図-4.3(1) アンダーキールクリアランスと付加質量係数の関係 (ヒープ)

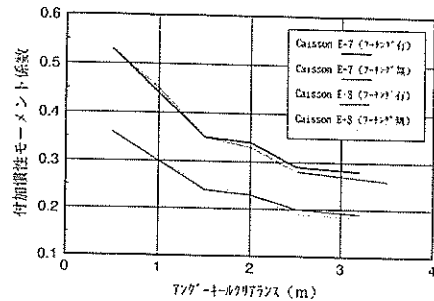


図-4.3(2) アンダーキールクリアランスと付加慣性モーメント係数の関係 (ロール)

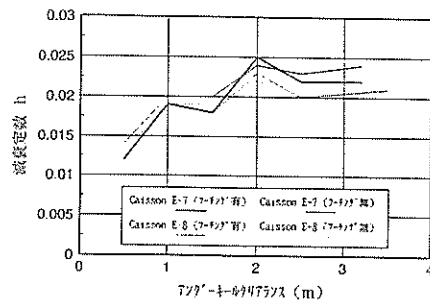


図-4.4(1) アンダーキールクリアランスと減衰定数の関係 (ヒープ)

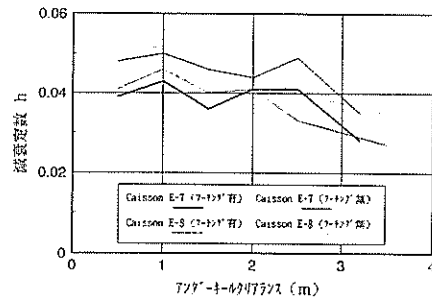


図-4.4(2) アンダーキールクリアランスと減衰定数の関係 (ロール)

さて、以上示したようにアンダーキールクリアランスの変化あるいはフーチングの存在が流体力係数および動揺に及ぼす影響は明らかとなったが、ここで動揺量の計算値と流体力係数（付加質量係数あるいは付加慣性モーメント係数、減衰定数）との関係を改めて整理する。

一般に流体力係数はその値が大きくなるほど動揺が抑制されることになるが、前出の図-4.3(1)に示したとおりヒープでは付加質量係数はフーチングの影響を考慮した場合の方が考慮しない場合よりも大きい。一方、図-4.4(1)に示したとおり減衰定数はアンダーキールクリアランスが2.0mの時を除きフーチングの影響を考慮した場合の方が考慮しない場合よりも小さくなっているがその差異は小さい。そのため図-4.2(1)に示したようにヒープの動揺量の計算値はフーチングの影響を考慮した場合の方が考慮しない場合より小さくなっているものさほど大きな違いとなって現れていない。

また、フーチングの有無にかかわらずアンダーキールクリアランスの変化に注目すると、アンダーキールクリアランスが小さくなるにつれ図-4.3(1)に示した付加質量係数は大きくなるが図-4.4(1)に示した減衰定数は小さくなっている。動揺量はアンダーキールクリアランスが小さくなるのに伴い減少しているので、アンダーキールクリアランスの変化に伴う動揺量の変化については、付加質量係数による影響がより支配的であると考えられる。また、アンダーキールクリアランスが2.0mの時には図-4.3(1)に示した付加質量係数、図-4.4(1)に示した減衰定数とも一度値が大きくなっている。この時の付加質量係数では、フーチングの影響を考慮した場合と考慮しない場合の差異が最大となっている。そのため、図-4.2(1)に示した動揺量の計算値もアンダーキールクリアランスが2.0mの時に一度動揺量が急激に減少し、この時フーチングの影響を考慮した場合の動揺量の計算値と考慮しない場合の動揺量の計算値の乖離が最も大きくなっている。

ロールでは前出の図-4.3(2)に示したとおり、付加慣性モーメント係数はフーチングの影響を考慮した場合の方が考慮しない場合よりもかなり大きい。一方、図-4.4(2)に示したように減衰定数はアンダーキールクリアランスが2.0mの時を除きフーチングの影響を考慮

した場合の方が考慮しない場合よりもやや小さくなっている。そのため図-4.2(2)に示したとおりロールの動揺量の計算値は、フーチングの影響を考慮した場合の方が考慮しない場合より小さくなっているものの当初予想した程には大きな違いとなって現れていない。

また、フーチングの有無にかかわらずアンダーキールクリアランスの変化に注目すると付加慣性モーメント係数、減衰定数ともアンダーキールクリアランスが小さくなるのにしたがいは増加しているため、それに伴って動揺量も小さくなっているが、依然として観測値と計算値の差異は大きい。この理由としては、前述したとおり特異点分布法によるラジェーション流体力の計算においては考慮されていない造渦による非線形減衰力が、フーチングを有することによる減衰効果としてより大きく作用していることによるものと考えられる。

なお、以上に述べたフーチングと造渦による非線形減衰力をより詳細に求めるためには、水理模型実験を行って系統的に数値を調べていく必要がある。

5. 据付限界波高および限界動揺量に関する考察

5.1 据付の可否と波高の関係

外洋に面した港湾の防波堤等へのケーソン据付作業は、海象条件の影響を受け易く、据付を実施するか否かの判断には海域の海象条件を見極めることが大切である。

そこで、これまで3.および4.でとりあげた高知港のケーソン据付工事の事例と、港湾技術研究所と財団法人土木学会が共同で調査した太平洋沿岸域（関東および東北地方）の防波堤ケーソン据付工事事例より、ケーソン据付の可否と波高の関係を明らかにする。

表-5.1(1)~(2)はここで検討を行った事例の一覧を示したものである。ここでとりあげた事例はすべて矩形ケーソンの事例である。表中の幅は防波堤法線直角方向のケーソンの寸法を示し、長さは防波堤法線方向の寸法を示している。また底面幅にはフーチングの幅が含まれている。なお対象日数とは、ケーソン据付の実施に際して待機に入ってから据付完了に至るまでの日数を示している。なお、据付回数に対して対象日数が極めて大きくなっている事例がみうけられることは、外洋におけるケーソン据付がいかに困難であるかを物語っている。

表-5.1(1) 事例一覧（高知港）

事例番号	重量 (tf)	天 線 幅 (m)	底 面 幅 (m)	長 さ (m)	型 深 さ (m)	喫 水 (m)	据付回数 (回)	対象日数 (日)
1	2685	18.00	20.40	13.30	17.50	10.76	2	19

表-5.1(2) 事例一覧 (太平洋沿岸域)

事例番号	重量 (tf)	天 梁 幅 (m)	底 面 幅 (m)	長 さ (m)	型 深 さ (m)	喫 水 (m)	据付回数 (函)	対象日数 (日)
1	1772	17.00	17.00	15.00	14.00	6.75	2	2
2	1099	9.00	11.00	15.00	12.00	7.68	2	11
3	1580	15.00	17.00	15.00	15.50	8.20	3	10
4	1910	15.00	18.00	15.00	15.50	8.24	3	20
5	2023	15.00	18.00	15.00	15.50	8.77	3	4
6	1477	15.50	15.50	15.00	12.50	6.17	1	1
7	1296	14.50	14.50	15.00	12.00	5.79	3	29
8	3500	20.00	24.00	14.00	19.00	11.92	1	3
9	7498	21.85	24.85	29.85	22.00	10.832	1	6
10	4800	20.50	24.50	15.00	20.00	12.05	2	2
11	4800	20.50	24.50	15.00	20.00	12.05	2	2
12	658	9.50	9.50	15.00	7.50	4.48	1	5

(1) 高知港の事例

図-5.1(1)は、高知港におけるケーソン据付の可否と波高の関係を示したものである。図中の横軸は有義波周期を、縦軸は有義波高を表している。また、●印はケーソン据付を実施した場合を、□印はケーソン据付を待機した場合を示す。なお、波高および周期は当日朝(おおむね午前6時)に観測した値を用いている。

この高知港の事例では、据付の実施が予定されていた19日間のうちに据付けられたケーソンはE-7ケーソンとE-8ケーソンの2函である。据付が行われた当日朝(おおむね午前6時)の波浪条件は、有義波高0.45m、有義波周期4.8sおよび有義波高0.38m、有義波周期3.8sであり、図に示すように観測期間中最も良い波浪条件の下で据付が行われた。

(2) 太平洋沿岸域における事例

前出の表-5.1(2)に示す太平洋沿岸域において調査を行った12事例では、合計24函のケーソンが据付けられ、また延べ95日間にわたりケーソン据付の可否判断と当日の波浪条件が調査された。これらを整理し、ケーソン据付の可否と波高の関係を示したものが図-5.1(2)である。なお、図中の横軸は有義波周期を、縦軸は有義波高を表している。また、●印はケーソン据付を実施した場合を、□印はケーソン据付を待機した場合を示す。

この図より、一部の例外を除けばケーソンの据付は有義波高0.8m、有義波周期9.s以下という条件の下で実施されていることがわかる。

先にとりあげた高知港の事例とこの太平洋沿岸域の事例とを比較すると、高知港の事例は後者に比しても非常に静穏な状況で据付けられたことが分かる。

なお、前記した有義波高0.8m、有義波周期9.s以下と

いう条件内でも据付が実施されなかった例が見られるが、これは据付予定日の前日に中止を決定したものの、当日の波浪条件が前日の予想以上に良好であった場合や、早朝の波浪条件が良くとも当日の天候が崩れる可能性が大

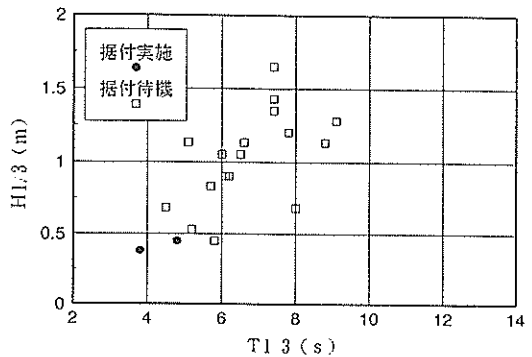


図-5.1(1) 高知港におけるケーソン据付可否と波高の関係

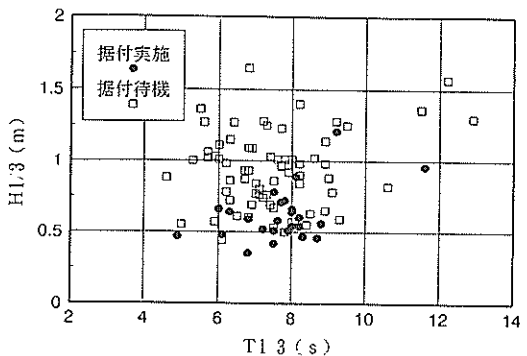


図-5.1(2) 太平洋沿岸域におけるケーソン据付可否と波高の関係

きな場合、あるいは工程上になんらかの制約が発生した場合等は、据付を見合わせる事が多いためである。

また、ここで示した条件は、ケーソンのサイズ、据付に使用する作業船等の機材、据付の可否を判断する者の経験や据付作業従事者の熟練度等が異なるものを同一の図により比較して得たものである。よって実際には据付限界となる波浪の条件はこれらの要素により左右されるものと思われる。

5.2 据付の可否と動揺量の関係

ここでは前出の表-5.1(1)~(2)に示した高知港の事例と太平洋沿岸域における複数の事例から据付の可否と動揺量の関係を明らかにする。

なお、動揺量についてはいずれの事例も現地観測を実施していない。そこで、ケーソン据付の可否にかかわらず、すべての調査対象日におけるケーソンの動揺量を動揺シミュレーションにより推定した。推定にあたって動揺シミュレーションを用いたのは、既に4.で示したように若干の相違はあるものの、動揺シミュレーションにより現場のケーソンの動揺をおおむね再現できることである。

この動揺シミュレーションは、喫水変化による動揺量の推移を把握するため、ケーソンの据付を開始する直前（進水時）と、ケーソン据付が終了する直前の状態（着底時：実際にはアンダーキールクリアランス1.0mの状態）について実施した。計算においては、現地の波浪条件を基に、ケーソンをフーチング部の存在しない矩形とみなしてポテンシャル接続法で求めた波力および流体力係数を用いた。また、ここで用いた現地の波浪条件は該当日早朝（おおむね午前6時）のものとして全事例の統一をはかっている。

なお、この動揺シミュレーションにより求めた動揺量のうち据付作業に対して特に影響が大きいと思われるヒープおよびスウェイの2成分の有義両振幅について分析を行った。

(1) 高知港の事例

図-5.2(1)~(4)は高知港におけるケーソン据付の可否と動揺量の関係を示したものである。図中の横軸は有義波周期を、縦軸は動揺量の有義両振幅を表している。また、●印はケーソン据付を実施した場合を、□印はケーソン据付を待機した場合を示す。

なお、観測を行った期間中に据付けられたケーソンはE-7ケーソン、E-8ケーソンの2函でありそれぞれ前述したとおり平成5年5月12日、5月15日に据付が実施されている。

動揺量はヒープ、スウェイのどちらも有義波周期が大きくなるほど大きくなっているが、特にヒープではその傾向が顕著である。また、ヒープでは有義波周期が9sより短い時は、着底時の動揺量が進水時よりもやや小さくなっている。これは前述したようにアンダーキールクリアランスが小さくなるにしたがって、ヒープに対する付加質量係数が大きくなり動揺量が減少するためである。一方、スウェイでは進水時と着底時の間において、動揺量に明確な差異は認められない。

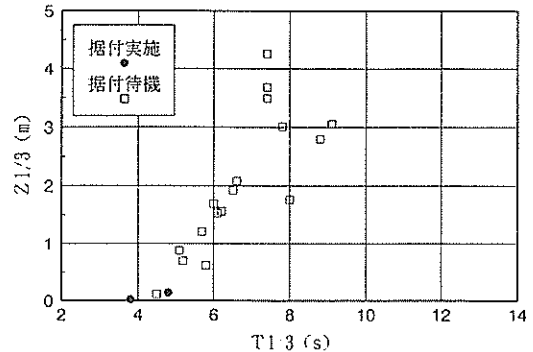


図-5.2(1) 高知港におけるケーソン据付可否と動揺量の関係（ヒープ：進水時）

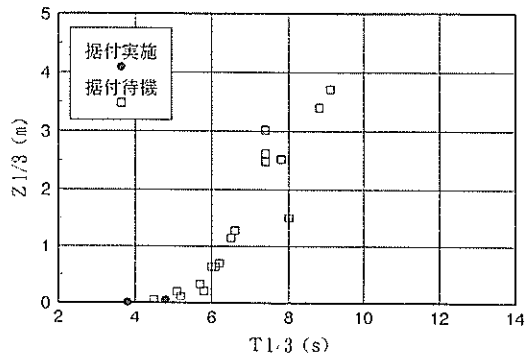


図-5.2(2) 高知港におけるケーソン据付可否と動揺量の関係（ヒープ：着底時）

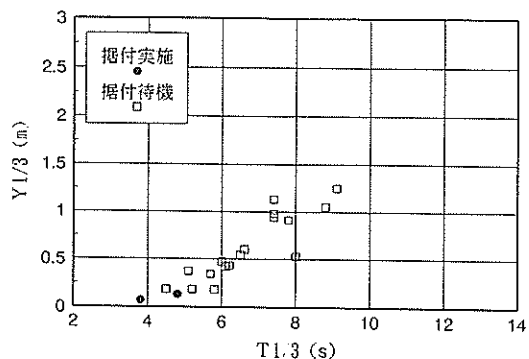


図-5.2(3) 高知港におけるケーソン据付可否と動揺量の関係（スウェイ：進水時）

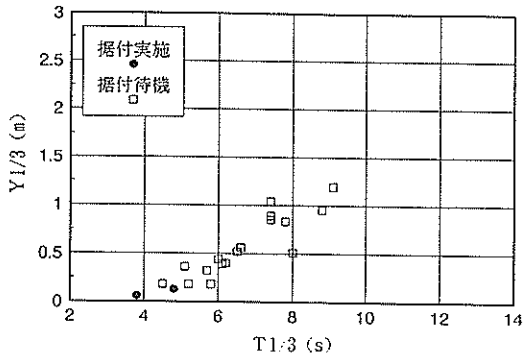


図-5.2(4) 高知港におけるケーソン掘付可否と動揺量の関係 (スウェイ：着底時)

ケーソンの掘付を実施した当日朝 (おむね午前6時) の波浪条件はE-7ケーソンでは有義波高0.45m, 有義波周期4.8s, E-8ケーソンでは有義波高0.38m, 有義波周期3.8sである。

E-7ケーソンの場合の動揺量は進水時のヒープが0.14m, スウェイが0.13mであり, 着底時のヒープが0.05m, スウェイが0.13mであった。また, E-8ケーソンの場合の動揺量は進水時のヒープが0.02m, スウェイが0.07mであり, 着底時のヒープが0.01m, スウェイが0.06mとなっていた。いずれも掘付予定期間中で最も波浪条件の良い時期に掘付が実施されていることから, 計算による動揺量もほぼ最小の値となっている。

なお, これら動揺量の計算値は5.2に前述したとおり, 該当日早朝の波浪条件の下に計算して得た値であり, 4.で一連の比較検討に用いた動揺量の計算値とは波浪条件の決定時刻が異なることに留意する必要がある。

(2) 太平洋沿岸域における事例

太平洋沿岸域におけるケーソン掘付の可否と動揺量の関係を図-5.3(1)~(4)に示す。図中の横軸は有義波周期を, 縦軸は動揺量の有義両振幅を表している。また, ●印はケーソン掘付を実施した場合を, □印はケーソン掘付を待機した場合を示す。

動揺量はヒープ, スウェイとも, 有義波周期が長くなるほど大きくなる傾向にある。また, ケーソンの掘付を実施した時と待機した時とを比較すると, データにばらつきがあるもののケーソン掘付を実施した時の方が待機した時より小さい動揺量となっている。

進水時と着底時の比較では, ヒープ, スウェイのいずれについても値のばらつきが大きく, 特に目立った傾向は見られない。

掘付を実施した場合の進水時の動揺有義両振幅の最大値は, ヒープが2.11m, スウェイが1.59mである。また, 同じく着底時の動揺有義両振幅の最大値はヒープが1.83

m, スウェイが1.42mと進水時と比べ若干小さい。

さて, ここで進水時の動揺量に注目し, ケーソン掘付の可否と動揺量 (ヒープ, スウェイ) の関係を超過確率分布で示したものが図-5.4(1)~(2)である。図中の横軸は動揺量の有義両振幅であり, 縦軸は超過確率である。また実線はケーソン掘付を実施した場合の分布であり, 点線は掘付を待機した場合の分布を示す。なお, ここでは高知港の事例も加え, 計13の事例を基に超過確率を求めている。

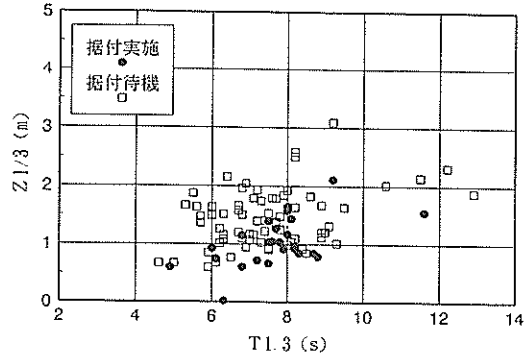


図-5.3(1) 太平洋沿岸域におけるケーソン掘付可否と動揺量の関係 (ヒープ：進水時)

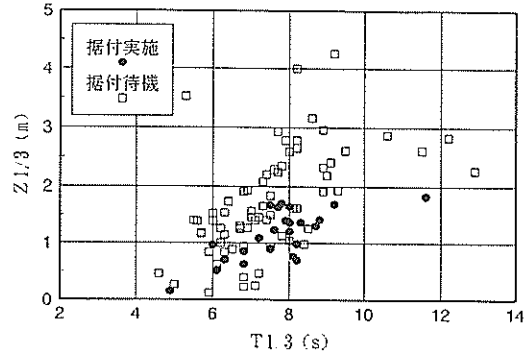


図-5.3(2) 太平洋沿岸域におけるケーソン掘付可否と動揺量の関係 (ヒープ：着底時)

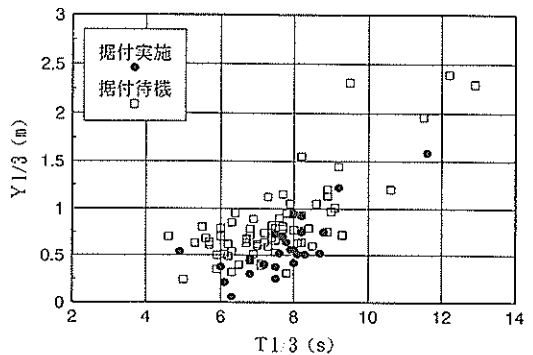


図-5.3(3) 太平洋沿岸域におけるケーソン掘付可否と動揺量の関係 (スウェイ：進水時)

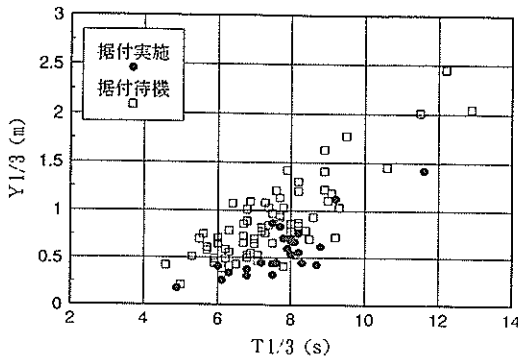


図-5.3(4) 太平洋沿岸域におけるケーソン据付可否と動揺量の関係（スウェー：着底時）

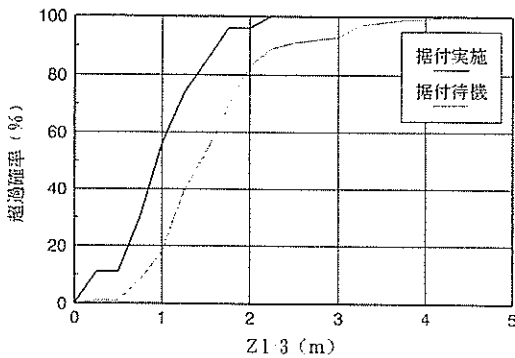


図-5.4(1) 動揺量の超過確率分布（ヒープ）

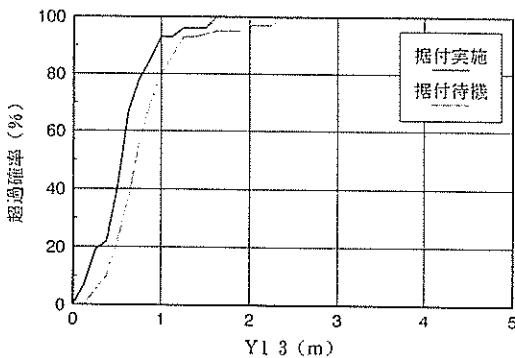


図-5.4(2) 動揺量の超過確率分布（スウェー）

この図に示した超過確率分布から、据付を実施した場合のケーソンの動揺量はヒープ、スウェーのいずれも据付を待機した場合の動揺量より明らかに小さくなっていることがわかる。

また、この図より超過確率がおおむね80%となる動揺量を目安としてケーソン据付が可能な動揺量の限界値（限界動揺量）を求めると、ケーソン据付が可能なヒープ

の動揺量は1.50m以下（超過確率85%）であり、スウェーの動揺量は0.75m以下（超過確率78%）となっている。

なお、この80%という数値が適切であるか否かについては若干の議論もあるが、現場において実施したヒアリングで回答された限界動揺量も、おおむねここで得られた計算値と大差がないので、ここではこれらをベースに次の解析を試みる。

(3) 動揺量を考慮した据付限界波高

図-5.5(1)~(2)は、前出の図-5.3(1), (3)について、据付を実施した場合より有義波高0.8m, 有義波周期9sのいずれかを超えるものを除外し、かつ据付を待機した場合のうち有義波高0.8m, 有義波周期9sを超えるものを抽出した上で再度図化を行なったものである。よって、この図中の●印は波浪の条件からみて据付が可能な場合に据付が実施されたケーソンの動揺量を示している。また、図中の□印は波浪の条件からみて据付が不可能な場合に据付を待機したケーソンの動揺量を示している。

図示した動揺量は動揺シミュレーションにより得た計算値であるから実際の動揺量との間に多少の誤差が含まれているものの、●印で示した事例の中には波浪の条件（有義波高0.8m以下, 有義波周期9s以下）からみると

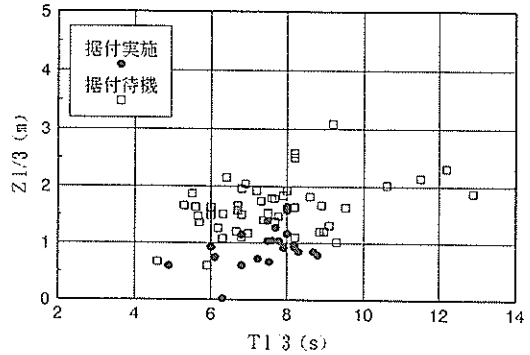


図-5.5(1) ケーソン据付可否と動揺量の関係（ヒープ：進水時）

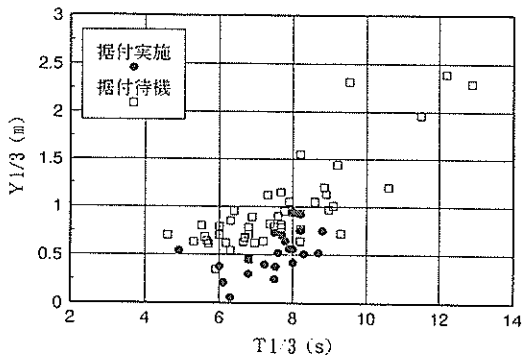


図-5.5(2) ケーソン据付可否と動揺量の関係（スウェー：進水時）

据付が可能であっても、据付が可能な限界動揺量（ヒープ1.5m以下、スウェイ0.75m以下）を超え、実際には据付が不可能であろうと思われる例が見られる。また□印で示した事例の中には、波浪の条件からみると据付が不可能でも、限界動揺量を超えず据付が可能と判断できる場合がある。

この原因としては、先にも述べたとおり前日の波浪予測により中止と判断を下したが当日の条件が良好であった場合や、予想外の天候変化により据付中に波浪条件が悪化した場合等が挙げられるが、ケーソンのサイズを配慮して考察していないことも一因として考えられる。

そのため、ケーソンの据付可否を波浪の条件から判断する場合には、ケーソン据付に対する限界動揺量を考慮した条件をケーソンサイズごとに設定する必要がある。そこで、先に求めたケーソンの限界動揺量に基づいて、改めて据付可否の判断根拠となる波浪条件（以下、限界波高）を明らかにする。

表-5.2に示すとおり、検討に際してケーソンサイズの違いによる限界波高の相違を明らかにするため、ケーソンを1000tf、3000tf、5000tf、8000tfの4つの代表的なサイズに区分した。防波堤ケーソンの寸法は設置される海域の波浪条件や地形条件等により様々であるが、先に示した太平洋沿岸域における複数の事例から長さ、幅、喫水等について平均的な寸法の関係を求めて各サイズごとのケーソンの諸元を決定した。

ケーソンの係留状態は、波浪条件やケーソンサイズ等の設置条件によりまちまちであるが、ここでは高知港における事例を参考に、表-5.3に示す状態で係留されているものとしている。なお、係留に使用するワイヤーの規格はケーソンのサイズごとに異なるものを用いるものとし、これらは前出の表-5.2に示している。

また表-5.4に示すように、それぞれのサイズごとに波向を60°と90°の2ケース、有義波周期を6、8、10、12sの4ケース、有義波高を0.1mから1.5mの間で3ケースと複数ケースの設定を行い、1サイズ当り24ケース（2×4×3ケース）、合計96ケース（4サイズ×24ケース）について動揺シミュレーションを実施して各ケースごとの動揺量を求めた。次いで、5.2.(2)で示した限界動揺量（ヒープ1.5m以下、スウェイ0.75m以下）に相当する限界波高をケーソンのサイズ別にそれぞれ求めた。なお、波力およびラジェーション流体力の計算にはポテンシャル接続法を用いている。

以下に上述した手順に従って求めたケーソン据付の限界波高を示す。

図-5.6(1)~(2)は、3000tfのケーソンについて波向60°

の時の有義波高を横軸に、ヒープあるいはスウェイの動揺量の計算値を縦軸にとり両者の関係を示したものである。また図中の実線、点線、一点鎖線、二点鎖線はそれぞれ有義波周期6s、8s、10s、12sの時のヒープあるいはスウェイの動揺有義両振幅の計算値の変化を示している。

図-5.6(1)に示したヒープではケーソン据付が可能な限界動揺量1.50mに相当する波高は、有義波周期6sでは0.97m、有義波周期8sでは0.77m、有義波周期10sでは0.80m、有義波周期12sでは0.88mとなっている。

また、図-5.6(2)に示したスウェイではケーソン据付が可能な限界動揺量0.75mに相当する波高は、有義波周期8sでは0.96m、有義波周期10sでは0.60m、有義波周期12sでは0.50mとなっている。なお、有義波周期6sの時には、与えた波高から求めた動揺量は限界動揺量より十分に小さく、かつ同周期のヒープで限界動揺量に相当する波高が得られていることからここではスウェイに対する限界波高を求めていない。

それぞれの有義波周期における限界波高は、ヒープ、スウェイの限界動揺量に相当する波高のうち小となる方を採用した。そのため3000tfのケーソンについて波向60°の入射波が作用するときの限界波高は、有義波周期6sでは0.97m、有義波周期8sでは0.77m、有義波周期10sでは0.60m、有義波周期12sでは0.50mとなる。

同様にしてすべてのケースの有義波周期と限界波高の関係を求め、両者の関係を波向別に示したものが図-5.7(1)~(2)である。図中の横軸は有義波周期であり、縦軸は有義波高を示す。また実線、点線、一点鎖線、二点鎖線はそれぞれ1000tf、3000tf、5000tf、8000tfのケーソンの限界波高を示す。

図に示すとおり波向の如何に関わらず、いずれのサイズのケーソンでも有義波周期が長くなるにつれ限界波高は小さくなる傾向にある。また、ケーソンのサイズが大きいくほど限界波高は大きくなっているが、3000tfのケーソンと5000tfのケーソンの限界波高にはあまり差異がみられない。

表-5.2 ケーソンサイズ一覧

caisson size	重量 (tf)	天端幅 (m)	長さ (m)	型深さ (m)	喫水 (m)	係留に使用するワイヤー
1000tf	1060	12.00	12.00	13.00	7.15	6×24 φ20mm
3000tf	2947	17.00	17.00	18.00	9.90	6×24 φ32mm
5000tf	4872	20.00	20.00	21.50	11.83	6×24 φ42mm
8000tf	7821	23.50	23.50	25.00	13.75	6×24 φ52mm

表-5.3 ケーソンサイズ別係留配置状況

	caisson size				
	1000tf	3000tf	5000tf	8000tf	
(x1, y1)	(5, 6)	(7.5, 8.5)	(9, 10)	(10.75, 11.75)	
(x2, y2)	(-65, 124)	(-62.5, 121.5)	(-61, 120)	(-59.25, 118.25)	
(x3, y3)	(-5, 6)	(-7.5, 8.5)	(-9, 10)	(-10.75, 11.75)	
(x4, y4)	(65, 124)	(62.5, 121.5)	(61, 120)	(59.25, 118.25)	
(x5, y5)	(5, -6)	(7.5, -8.5)	(9, -10)	(10.75, -11.75)	
(x6, y6)	(-65, -124)	(-62.5, -121.5)	(-61, -120)	(-59.25, -118.25)	
(x7, y7)	(-5, -6)	(-7.5, -8.5)	(-9, -10)	(-10.75, -11.75)	
(x8, y8)	(65, -124)	(62.5, -121.5)	(61, -120)	(59.25, -118.25)	

表-5.4 ケーソンサイズ別計算条件一覧

caisson size	波向 (°)	T _{1/3} (s)	H _{1/3} (m)			caisson size	波向 (°)	T _{1/3} (s)	H _{1/3} (m)		
1000 tf	60	6	0.20	0.50	1.00	5000 tf	60	6	0.20	1.00	1.50
		8	0.20	0.50	1.00			8	0.20	0.50	1.00
		10	0.20	0.30	0.50			10	0.20	0.50	1.00
		12	0.20	0.30	0.40			12	0.20	0.50	1.00
	90	6	0.20	0.50	1.00		90	6	0.20	1.00	1.50
		8	0.20	0.50	0.80			8	0.20	0.50	1.00
		10	0.10	0.15	0.20			10	0.20	0.50	1.00
		12	0.10	0.15	0.20			12	0.20	0.50	0.80
3000 tf	60	6	0.20	0.50	1.00	8000 tf	60	6	0.50	1.00	1.50
		8	0.20	0.50	1.00			8	0.50	1.00	1.50
		10	0.20	0.50	1.00			10	0.50	1.00	1.50
		12	0.20	0.50	1.00			12	0.50	1.00	1.50
	90	6	0.20	0.50	1.00		90	6	0.50	1.00	1.50
		8	0.20	0.50	1.00			8	0.50	1.00	1.50
		10	0.20	0.40	0.60			10	0.50	1.00	1.50
		12	0.20	0.40	0.60			12	0.50	1.00	1.50

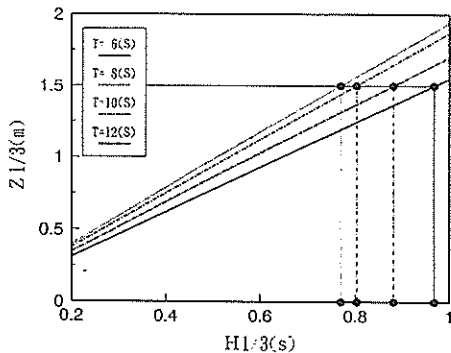


図-5.6(1) 波高と動揺量の関係
[3000tfケーソン入射波高60°] (ヒープ)

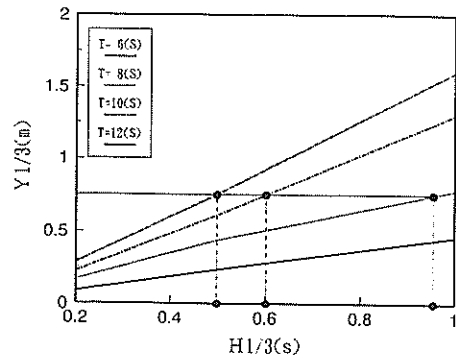


図-5.6(2) 波高と動揺量の関係
[3000tfケーソン入射波高60°] (スウェイ)

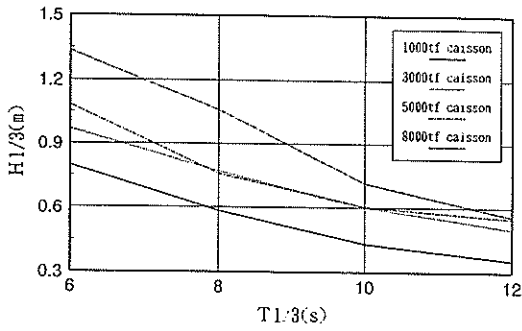


図-5.7(1) 限界波高(入射波向60°)

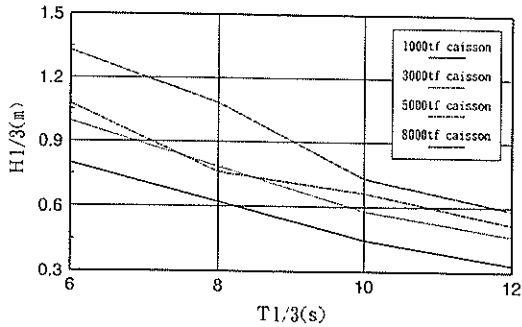


図-5.7(2) 限界波高(入射波高90°)

なお、有義波周期 9 s、波向60°の時の限界波高は、サイズ別に1000tfでは 0.51m、3000tfでは 0.69m、5000tfでは0.68m、8000tfでは0.89mとなり、有義波周期 9 s、波向90°の時の限界波高は、1000tfでは0.53m、3000tfでは0.68m、5000tfでは 0.71m、8000tfでは 0.91mとなっている。すなわち、波周期が同一条件であればケーソンサイズが大きいきほど限界波高が大きい。

5.1.(2)では、ケーソンサイズの違いや入射波向にかかわらず前出の図-5.1(2)に示すケーソン据付可否と波高の関係から一律に有義波高0.8m以下、有義波周期 9 s以下という条件の基でケーソンの据付作業が可能であると提示した。この条件の上限にあたる波高は有義波周期 9 sの時で0.8mとなるが、図-5.7(1)~(2)に示すとおり先に求めた限界波高は、ケーソンのサイズにより多少異なるもののおおむねこれに近い値となっている。なお、波向の相違による限界波高の違いは小さい。

図-5.8(1)~(4)は縦軸に有義波高をとり、横軸に有義波周期をとって、ケーソンのサイズ別に限界波高、ならびに据付可否と波高の関係を示したものである。据付可否と波高の関係は前出の表-5.1(1)~(2)に示した13事例について1000tf級(2000tf未満)、3000tf級(2000tf以上4000tf未満)、5000tf級(4000tf以上6500tf未満)、8000tf級(6500tf以上)と4区分し、それぞれを1000tf、

3000tf、5000tf、8000tfのケーソンの限界波高に重ね合わせて示している。

なお、図中の実線は波高が60°の時の限界波高を、点線は波高が90°の時の限界波高を示し、●印はケーソン据付を実施した場合を、□印はケーソン据付を待機した場合を示す。

いずれのサイズのケーソンにおいても、据付限界波高に対して、入射波向(波向60°と90°)が与える影響はほとんど無視できるほど小さい。

また、ケーソン据付を実施した時の波高は、1000tf級で有義波高0.96m、有義波周期11.6s(前出の表-5.1(2)に示す事例2)の時、および5000tf級で有義波高1.21m、

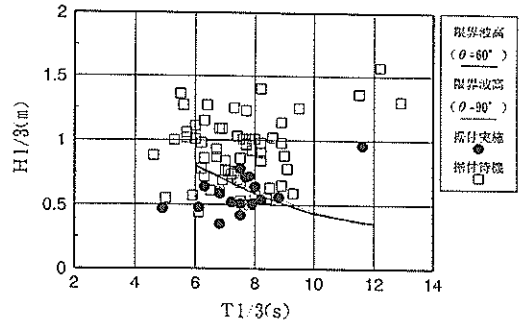


図-5.8(1) 限界波高と据付事例(1000tf)

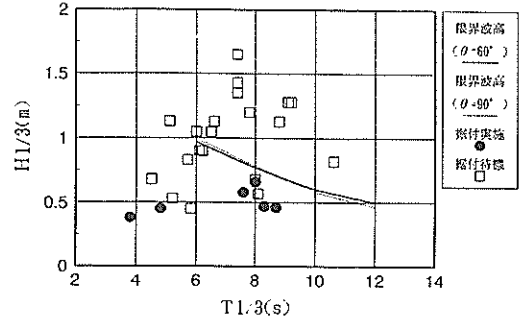


図-5.8(2) 限界波高と据付事例(3000tf)

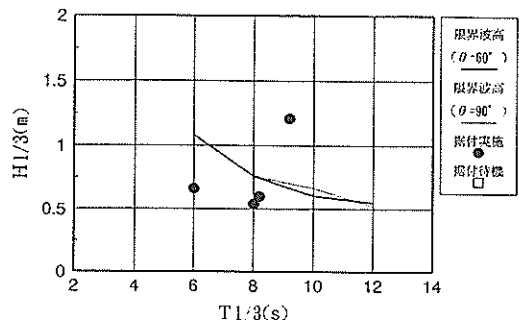


図-5.8(3) 限界波高と据付事例(5000tf)

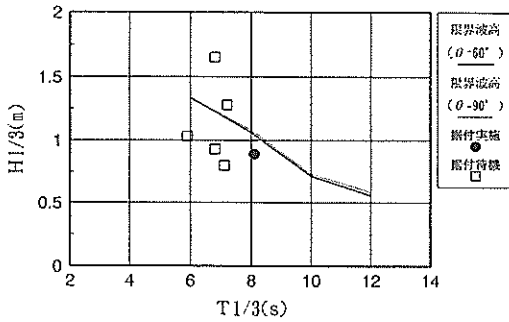


図-5.8(4) 限界波高と据付事例 (8000tf)

有義波周期9.2s (前出の表-5.1(2)に示す事例 11) の時の2例を除き、おおむね動揺シミュレーションにより求めた限界波高内に収まっている。

ただし、図-5.8(1)に示す1000tf級のケーソンでは、限界波高をわずかに上回る波高の時に据付けられたケースが数例みられる。しかし、これらはいずれも2000tf近いケーソンに対するものであり、限界波高の計算は1000tfのケーソンに対して行っているため、図上ではこのように限界波高内に収まらない結果となったものである。

なお、短周期波側では限界波高が大きくなる傾向にあり、特に大型のケーソンでは1mを超える場合もある。しかしながらこのような場合、実作業において揚錨船や監視船等の小型作業船舶の運行に支障をきたすため、短周期波側の限界波高はケーソンの動揺量を制約条件として求めた計算値を下回ることが予想される。

以上述べたように、ケーソンの動揺量に基づいて求めた据付作業時の限界波高は、短周期波側では若干大きめに与えられているものの、据付事例にもおおむね対応しており、ケーソン据付作業において、その実施の可否を判断する有効な指標となり得ると思われる。

6. 結 論

本資料においては、外洋に面した港湾における防波堤ケーソンの据付時の動揺特性を解明するために、高知港のケーソン据付工事において第三港湾建設局が実施した現地観測結果に対して動揺シミュレーションを行い、これにより求めた動揺量の計算値と、現地観測結果とを比較検討した。

またこれに加えて、太平洋沿岸域 (関東および東北地方) における複数の工事事例に対して実施した動揺シミュレーション結果を活用し、外洋に面した港湾の防波堤へのケーソン据付作業の限界条件 (限界動揺量, 限界波高) を提示した。

なお、ここでとりあげたケーソンはすべて矩形ケーソン

であるが、動揺シミュレーションに用いた波力およびラジェーション流体力の計算においては、フーチングの影響を考慮しない場合にはポテンシャル接続法あるいは三次元特異点分布法を、フーチングの影響を考慮する場合には三次元特異点分布法を用いている。

以下に、本資料の主要な成果をとりまとめる。

① ケーソンの波浪中の動揺特性について

(1) ケーソン据付時の動揺特性を把握するために、高知港におけるケーソン据付工事の事例について動揺シミュレーションを実施し動揺量の計算値を求め、現地観測より得た動揺量の観測値との比較検討を行った。

その結果、各動揺成分の観測値と計算値の喫水変化に伴う動揺量の変化は、細部においては差異が認められるものの定性的には両者はよく一致した。

(2) また、ケーソン底部にあるフーチングがロールおよびヒープの動揺成分に対して与える影響を考慮するため、三次元特異点分布法によりラジェーション流体力を求め、動揺シミュレーションを行なってフーチングの影響を考慮したモデルを計算し、影響を考慮しないモデル、並びに現地観測結果との比較を行った。

その結果、フーチングの影響を考慮したモデルと考慮しないモデルの計算値の間に大きな差はなく、特にロールにおいてみられた計算値と観測値との差異は、流体力計算において考慮することのできないフーチング部の造渦に起因する非線形減衰力の影響が大きいためであることを究明した。

② ケーソン据付の限界条件について

(1) 太平洋沿岸域 (関東および東北地方) における複数の矩形ケーソン据付工事事例をもとに動揺シミュレーションを実施し、ケーソン据付の可否と据付作業に対して影響が大きいと思われるヒープ、スウェイの並進2成分について限界動揺量を求めた。

ケーソンの据付が可能な動揺量の限界 (限界動揺量) は、おおむねヒープが1.5m以下、スウェイが0.75m以下である。なお、このヒープ、スウェイの動揺量は、いずれも有義波周期が長くなるほど大きくなる傾向がみられた。また、ばらつきはあるもののケーソンの据付が実施されたときの動揺量は、据付を中止したときの動揺量よりも小さい。

(2) さらに高知港の事例を加えた13事例をもとに、限界動揺量からケーソンのサイズ別に据付作業が可能な限界波高を導いた。図-5.7(1)~(2)に示したとおりこの限界波高はケーソンのサイズが小さくなるほど、また、有義波周期が長くなるほど小さくなる。また、短周期波側では若干実際の限界波高よりも大きくなっているものの、

実際の据付可否と波高の関係を照らし合わせた結果、この限界波高をケーソン据付実施の可否を判断する参考指標として利用が可能であるとの結論を得た。

7. あとがき

現行のケーソン据付工法では、外洋に面した港湾におけるケーソン据付作業の稼働条件の向上、ケーソン上に設置した係留施設（ウインチ等）周辺での危険作業の回避、作業員の高齢化や熟練技術者の減少傾向に対する方策等、数多くの問題を内包している。そこで、これらの問題を解消する工法として港湾技術研究所においてケーソン自動設置システムの開発を進めている^{4),5)}。これは電子計算機を用いてケーソンの動揺を予測し、従来人力にたよっていたウインチ操作による据付作業を自動で実施可能にするシステムである。また、このシステムは危険を伴うケーソン上の作業の無人化をも目指している。このシステムは実験室レベルにおける段階では良い成果が得られているため、できるだけ早い機会に現場においても採用されることを願うものである。

ところで、本研究は当初ケーソン据付最終段階の滑動現象を観測することを最大の目標としていた。しかしながら高知港における現地観測時の波浪条件が比較的良好であったため、この点に関しては有意なデータが得られなかった。従って注水時の動揺特性を比較整理すること、また、ケーソンの作業限界をまとめることに主眼を置いた。

本資料の作成においては、白石が研究の全体計画とそのとりまとめを、石見が観測結果の評価分析、数値シミュレーションの実施、考察、および報告書のとりまとめを、名里が外洋性港湾における作業限界条件の検討の一部を分担した。本資料が防波堤ケーソンの据付作業に伴う諸々の現象をすべて解明しているとは言い難いが、今後、波浪条件の厳しい環境下で同様な工事を施工する際の参考資料となれば幸いである。

最後に現地観測データの提供等、御助力いただいた運輸省第三港湾建設局高知港事務所の関係各位、現地観測の計画、実施に尽力された内藤了二氏（当時、港湾技術研究所構造部海洋構造研究室、現、第二港湾建設局）、太平洋沿岸域におけるケーソンの工事事例調査に御尽力いただいた松井創氏（当時、港湾技術研究所機械技術部計測施工研究室長、現、第四港湾建設局前任工事検査官）、並びに(株)日本埋立浚渫協会の関係各位に謝意を表するとともに、外洋性港湾におけるケーソン据付作業の安全を願う結語とする。（1996年9月27日受付）

参考文献

- 1) 上田 茂・白石 悟・板生考司・内藤了二：“台形ケーソンの洋上接合時および設置時の動揺特性について”，港湾技研資料No.754，1993年6月，46p
- 2) 上田 茂・白石 悟：“大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究（第2報）—数値シミュレーション手法の検討—”，港湾技術研究所報告，第19巻第2号，1980年9月，pp.105～143
- 3) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会：“海岸波動—波・構造物・地盤の相互作用の解析法”，土木学会，1994年7月，pp.313～330
- 4) 米山治男・白石 悟・名里健吾・上田 茂・松井 創・岡山義邦・高橋英俊：“引き船方式による防波堤ケーソンの自動設置システムの開発および水理模型実験による評価”，第13回海洋工学シンポジウム論文集，日本造船学会，1995年7月，pp.459～466
- 5) 白石 悟・米山治男・高橋英俊：“特集：施工の自動化合理化技術・防波堤ケーソンの自動設置システム”，土木施工第36巻第10号，1995年9月，pp.77～82

港湾技研資料 No.850

1996・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (有)つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute.
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1996) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted into a
maching language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複
写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。