

動揺シミュレーションによる防波堤ケーソンの 据付限界条件に関する検討

A STUDY ON LIMIT CONDITIONS FOR INSTALLATION OF BREAKWATER CAISSONS BY NUMERICAL SIMULATION OF MOTIONS

米山治男¹

Haruo YONEYAMA

¹正会員 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部 (〒239-0826横須賀市長瀬3-1-1)

The installation works of breakwater caissons at ports facing the open sea often become very difficult by the influence of swells and high waves. In other words, the efficiency of caisson installation works greatly depends on wave conditions. The limit conditions for installation of breakwater caissons such as the limit motions and the limit wave heights are therefore essential as the criterion of judgment in carrying out the caisson installation works under sever wave conditions. However, those limit conditions for installation have not been sufficiently investigated. The author accordingly examined the limit conditions for installation in greater detail by the numerical simulation of motions in this study. In the simulation, the author accurately considered the caisson shapes and the nonlinearity of moorings based on the results of the case investigations for caisson installation works on the Pacific coast. As a result, the calculated limit wave heights agreed largely with the ones estimated from the investigation results on the execution and suspension of the caisson installation works.

Key Words : caisson, breakwater, installation, motions, numerical simulation, limit conditions

1. 序論

外洋に面した港湾における防波堤ケーソンの据付作業は, うねり性の波浪や高波浪の影響により困難な作業になることが多く, 内湾でのケーソン据付作業と比較してその効率が低下する傾向にある。これは, ケーソンの据付作業を実施する上で, 波浪によるケーソンの動揺が施工上の一つの制約条件となっており, ケーソン据付作業の効率は据付作業時における波浪状況に大きく依存することを示している。

現在までケーソン据付作業におけるケーソンの据付可否の判断基準として, ケーソンの据付限界動揺量及び据付限界波高の据付限界条件が提案されている^{1), 2)}。しかしながら, これらの研究では, 特殊な形状である台形ケーソン¹⁾あるいはフーチングを有しない矩形ケーソン²⁾を対象としており, 一般的に用いられるフーチングを有するケーソンを対象とした検討は行われていない。また, 係留系に関しても, ワイヤ索等の単一の係留材質を有する係留系として検討しており, 繊維索, ワイヤ索, チェーン等で構成された係留系の変位復元力特性の非線形性について正確に再現されてはいない。このように, ケーソンの据付限界条件(据付限界動揺量, 据付限界波高)については, これまで十分な検討が行われ

ていない状況にある。

そこで本研究では, 太平洋沿岸域(関東地方及び東北地方)におけるケーソン据付作業の事例調査の結果を基にして, ケーソンの形状及び係留系の非線形性を厳密に考慮した動揺シミュレーションを実施し, 防波堤ケーソンの据付限界条件(据付限界動揺量, 据付限界波高)について詳細に検討を行うこととした。

まず, 太平洋沿岸域(関東地方及び東北地方)における防波堤ケーソン据付工事16事例について事例調査を行った。そして, これらの据付工事事例に対して動揺シミュレーションを実施し, 防波堤ケーソンの据付作業時の動揺量を求めた。次に, 得られたケーソンの動揺特性を用いて, ケーソンの動揺量と据付作業の可否との関係を検討し, スウェイ, ヒープ及びヨウの据付限界動揺量を推定した。最後に, この据付限界動揺量を制約条件として, 動揺シミュレーションによりケーソンの動揺量を計算し, ケーソン据付作業の限界条件である据付限界波高を算定した。

2. ケーソン据付工事の事例調査

表-1 据付事例の概要

事例番号	ケーソン種類	ケーソン重量(t)	据付方式	長さ(m)	天端幅(m)	底面幅(m)	高さ(m)	喫水(m)	水深(m)	据付函数(函)	作業日数(日)
1	矩形	1,772	C	15.0	17.0	17.0	14.0	6.75	12.5	2	2
2	矩形 (フーチング)	1,099	B	15.0	9.0	11.0	12.0	7.68	10.5	2	11
3	異形	16,120	D	30.0	30.0	16.0	30.0	24.00	25.0	2	6
4	異形	16,120	D	30.0	30.0	16.0	30.0	24.00	26.0	2	14
5	矩形 (フーチング)	1,580	B	15.0	15.0	17.0	15.5	8.20	13.0	4	10
6	矩形 (フーチング)	2,032	B	15.0	15.0	18.0	15.5	8.77	12.6	3	20
7	矩形 (フーチング)	2,032	B	15.0	15.0	18.0	15.5	8.77	12.7	3	4
8	矩形	1,477	C	15.0	15.5	15.5	12.5	6.17	11.2	1	1
9	矩形	1,296	C	15.0	14.5	14.5	12.0	5.79	9.5	3	29
10	矩形 (フーチング)	3,500	D	14.0	20.0	24.0	19.0	11.92	15.0	1	3
11	台形	6,805	D	15.0	40.0	16.328	22.0	12.88	17.95	1	1
12	台形	6,805	D	15.0	40.0	16.328	22.0	12.88	18.95	1	2
13	矩形 (フーチング)	7,498	D	29.85	21.85	24.85	22.0	10.83	18.5	1	6
14	矩形 (フーチング)	4,800	A	15.0	20.5	24.5	20.0	12.05	16.5	2	2
15	矩形 (フーチング)	4,800	A	15.0	20.5	24.5	20.0	12.05	16.5	2	2
16	矩形	658	A	15.0	9.5	9.5	7.5	4.48	5.7	1	5

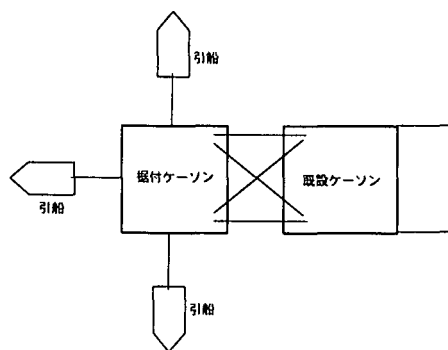


図-1 引船方式 (方式B)

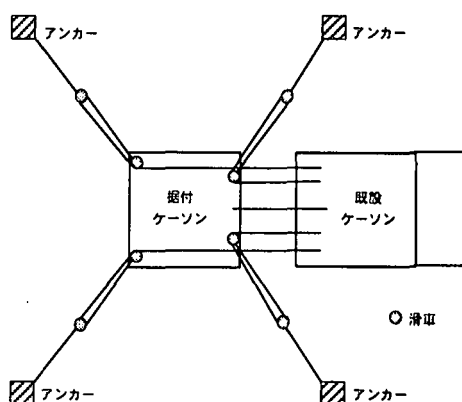


図-2 アンカーワイヤ方式 (方式D)

(1) 概要

現行の防波堤ケーソンの据付方法は、ケーソンの重量、海底地盤とケーソンの喫水の関係及び気象・海象等の現場制約条件により、一般的に中・小型作業船のウインチを用いて浮上させたケーソンを据付ける方法と、大型起重機船のクレーンを用いてケーソンを吊り下げて据付ける方法の2種類に大別される。本研究では、前者の方法による防波堤ケーソンの据付事例を対象とし、太平洋沿岸域（関東地方及び東北地方）の7港湾で実施された16事例のケーソンの据付工事について調査した。

(2) 据付事例

調査した据付事例の概要を表-1に示す。本調査結果によると、据付事例はほとんどが矩形ケーソンであり、中でもフーチングを有する矩形ケーソンの事例が多いことがわかる。なお、異形ケーソンは台形ケーソンの一種である。また、表中の据付方式のA、B、C及びDは、それぞれ起重機船のアンカーを利用した方式、引船のみを使用した方式、ケーソンの片側にアンカーを使用した方式及びケーソンの両側にアンカーを使用した方式を意味する。なお、作業日数とは、ケーソン据付作業の実施に際して、待機から据付完了までの日数を表している。

(3) ケーソン据付手法

ケーソンの据付手法は、ワイヤの配置状況やアン

カー及び引船の使用形態により、ケーソンの位置制御用に引船を使用する引船方式（方式A、方式B）、アンカーにワイヤを展張させたアンカーワイヤ方式（方式C、方式D）の2種類に大きく分類できる。ここでは、引船方式（方式B）、アンカーワイヤ方式（方式D）の一例をそれぞれ図-1及び図-2に示す。引船方式は既設のケーソンがある場合、アンカーワイヤ方式は防波堤において最初の据付ケーソンである場合あるいは大型ケーソンである場合に比較的好く用いられる方法である。本研究では、図-1及び図-2に示した据付手法に対してケーソンの据付限界波高を算定することとした。

(4) ケーソン据付時の波浪条件

図-3は、調査した16事例において、ケーソンの据付が実施あるいは中止された時の有義波高と有義波周期の関係を示す。●及び△は、それぞれケーソン据付の実施及び中止を表す。ケーソン据付の実施・中止の判断は、現場海域の気象海象予報や作業日の朝の現場における波浪状態の目視により決定されたものである。なお、有義波高、有義波周期は作業日の朝に測定された値である。この図から、現行の防波堤ケーソンの据付は、一部の例外を除き、おおむね有義波高0.8m以下、有義波周期9.0s以下の波浪条件で実施されていることがわかる。

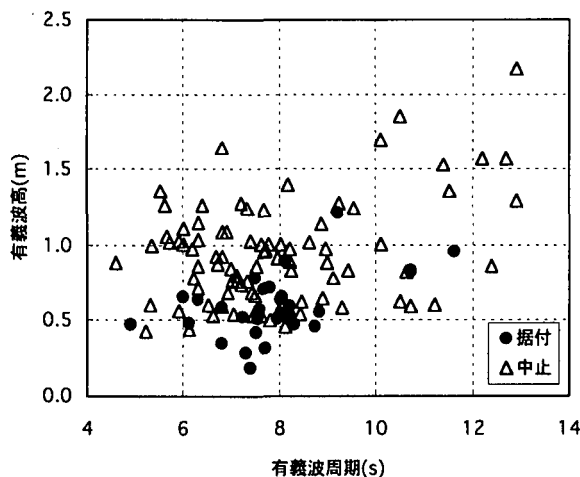


図-3 据付の実施時・中止時の波高と周期の関係

3. ケーソンの動揺シミュレーション手法

(1) 概要

ケーソン据付作業の16調査事例においては、ケーソンの動揺量が観測されていないため、動揺シミュレーションによって動揺量を計算する必要がある。この動揺シミュレーションでは、ケーソンの運動方程式を時間領域で数値積分することにより、ケーソンの動揺量や係留系の張力を時系列的に求めることができる。このような動揺シミュレーション手法は、浮体に作用する外力が不規則であり、かつ係留系の変位復元力特性が非線形である場合に一般的に用いられる方法である。

(2) 波力・流体力の計算方法

防波堤ケーソンは一般的に矩形ケーソン（フーチング無し、フーチング有り）と台形（異形）ケーソンとに分類される。動揺シミュレーションを行う際に必要となる波力・流体力の計算方法は、フーチングを有しない矩形ケーソンに対しては断面分割法³⁾あるいは三次元ポテンシャル接続法³⁾がよく用いられるが、これらの手法はフーチングを有するケーソンや台形（異形）ケーソンに対して適用することができない。従って、本研究では、どのような形状のケーソンにも適用可能な三次元特異点分布法⁴⁾を用いる。また、据付作業の進行に従って時々刻々とケーソンの喫水が変化し、その喫水変化がケーソンの動揺特性に与える影響が大きいことから、ケーソンの進水時（据付開始直前）及び着底時（据付終了直前、ケーソンとマウンド間のクリアランス1.0m）を対象として、波力・流体力の計算を行う。なお、波力・流体力計算では、既設ケーソンが存在することの影響は考慮していない。

(3) 外力の設定

ケーソンの動揺に与える影響が最も大きい外力は、波浪荷重であるので、外力は波浪荷重のみとし、風荷重、流れによる荷重及び波漂流力については考慮

していない。なお、波浪は一方向不規則波とし、現地観測より得た有義波高及び有義波周期を用いて、長周期波成分の影響を考慮しないブレットシュナイダー・光易型の標準スペクトルに基づき設定する。

(4) 係留系の設定

係留系は、繊維索、ワイヤ索、チェーン等により構成され、一般的に非線形な変位復元力特性を有することから、この変位復元力特性を正確に再現して考慮する。据付作業時のケーソンは、通常、引船には繊維索で係留され、アンカーにはチェーンとワイヤ索を接続した係留索でカテナリー係留され、また既設ケーソンにはワイヤ索で係留される。

(5) 動揺シミュレーションの方法

動揺シミュレーションでは、進水時及び着底時における波力・流体力を三次元特異点分布法により求め、得られた波力・流体力を用いて20分間の動揺シミュレーションを実施し、動揺量の統計量（有義両振幅）を算定する。

なお、防波堤の法線方向のケーソンの動揺をサージ、法線直角方向の動揺をスウェイ、上下方向の動揺をヒープ、法線方向を軸とする重心点回りの動揺をロール、法線直角方向を軸とする重心点回りの動揺をピッチ、鉛直軸回りの動揺をヨウと定義する。

4. 流体力係数の修正

(1) 概要

波力・流体力の計算では、ポテンシャル理論に基づく三次元特異点分布法を用いているため、ケーソンの周辺に発生する渦等に起因する非線形粘性減衰力を求めることができない。従って、三次元特異点分布法による流体力の計算値は、実際のケーソンの動揺における減衰力を過小評価していると考えられる。この影響は、特にロール及びピッチの動揺成分に対して大きく、フーチングを有するケーソンや台形（異形）ケーソンの場合に大きくなる。そこで、本研究では、動揺シミュレーションに用いる流体力係数（付加質量及び付加慣性モーメント、造波減衰係数）のうち、ロール、ピッチ及びヒープの造波減衰係数を修正した。

(2) 修正の方法

造波減衰係数の修正では、各動揺成分（ヒープ、ロール、ピッチ）に対して粘性減衰力を考慮した減衰定数を適切な方法で設定し、この減衰定数から造波減衰係数を求め、特異点分布法で得られた計算値と置き換える方法を用いた。このとき、付加質量及び付加慣性モーメントは、三次元特異点分布法によりおおむね正確に評価されていると仮定した。

非線形粘性減衰力を正確に評価して減衰定数を設定するためには、ケーソンの自由振動実験を行う必

表-2 減衰定数の設定値

ケーソン種類	動揺成分		
	ヒーブ	ロール	ピッチ
矩形	0.05	0.10	0.10
矩形(フーチング)	0.10	0.15	0.10
台形(異形)	0.10	0.15	0.10

要がある。しかし、台形ケーソンの自由振動実験結果はある¹⁾が、矩形ケーソン(フーチング無し、フーチング有り)のものはない。そこで、矩形ケーソン(フーチング無し)のロール及びピッチの減衰定数については、防波堤ケーソンの自動設置システムの開発⁵⁾において実施した自由振動実験の結果(10回の平均値)を利用した。また、矩形ケーソン(フーチング有り)の減衰定数については、矩形ケーソン(フーチング無し)及び台形ケーソンの減衰定数の値から類推して設定した。ここでは、減衰定数がケーソンとマウンド間のクリアランスにほとんど依存しないもの^{1)、2)}として、進水時と着底時に対して同じ減衰定数を用いている。

(3) 減衰定数の設定値

設定した減衰定数を表-2に示す。矩形ケーソン(フーチング無し)のヒーブの減衰定数については、自由振動実験結果がないため、従来の検討結果²⁾を参考にして設定した。また、矩形ケーソン(フーチング有り)については、フーチングが存在することによりヒーブ及びロールの減衰定数が大きくなり、台形ケーソンの場合と同程度になるとした。

5. 係留系の変位復元力特性の設定

(1) 概要

ケーソン据付作業時の係留系は、繊維索、ワイヤ索、チェーン等により構成され、非線形な変位復元力特性を有する。本研究では、繊維索及びワイヤ索の変位復元力特性をそれぞれ非線形及び線形な伸び特性とした。また、チェーンはワイヤ索と接続してカテナリー係留として用いられるため、このチェーンとワイヤ索から構成される係留索のカテナリー特性及びワイヤの伸び特性を考慮して、その変位復元力特性を計算した。

(2) 設定の方法

ワイヤ索は線形ばねとして、索長、索の断面積及び索の引張弾性係数を用いてばね定数を求め、変位復元力特性を設定した。このとき、ワイヤ索が二重になっている部分は並列ばねとして計算した。また、繊維索の変位復元力特性は、繊維索の強伸度特性を用いて非線形な伸び特性として設定した。一方、チェーンとワイヤ索から構成される係留索の変位復元力特性は、チェーンとワイヤ索のカテナリー特性及びワイヤの伸び特性を考慮して設定した^{6)、7)}。

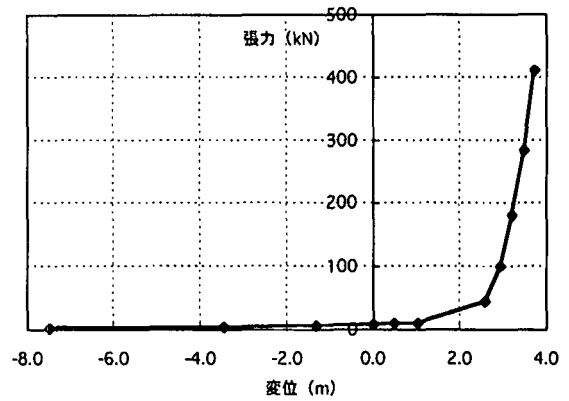


図-4 係留索(チェーンとワイヤ索)の変位復元力特性

ここで、チェーンは伸びないとして、チェーンが立ち上がる時にはワイヤ索は緊張状態になり、それ以前のワイヤ索はカテナリー形状を有すると仮定した。

チェーンとワイヤ索から構成される係留索の変位復元力特性の一例を図-4に示す。このような係留索は、ある一定の変位を越えると張力が急に増加する特性を有している。

6. ケーソンの据付限界動揺量

(1) 概要

先に示した防波堤ケーソン据付工事の16事例について動揺シミュレーションを実施し、ケーソンの進水時及び着底時における動揺量を計算した。また、ケーソンの動揺量と据付作業の可否との関係を検討し、スウェイ、ヒーブ及びヨウの据付限界動揺量を算定した。

動揺シミュレーションでは、事例調査の16種類のケーソンについて、ケーソン据付の可否にかかわらず全ての作業日を対象とし、全部で118ケースの計算を行った。波浪条件は、図-3に示した現地観測の結果を用いた。また、係留系については、ケーソンの進水時及び着底時に対して、ケーソン据付方式ごとに異なる係留索の配置状況やその変位復元力特性を調査結果に基づいて正確に再現した。このとき、進水時及び着底時における据付ケーソンと既設ケーソン間の距離は、それぞれ10.0m及び1.0mとした。また、引船による牽引力は19.6kNの一定荷重と仮定し、係留索の初期荷重は4.9kN程度として設定した。

(2) 算定結果

図-5～図-7は、それぞれケーソンの進水時におけるスウェイ、ヒーブ及びヨウの動揺量(有義両振幅)とケーソン据付の可否との関係を未超過確率分布で示したものである。これらの図を見ると、ケーソンの据付が実施された時の動揺量は、据付が中止された時の動揺量よりも小さいことがわかる。ここで、ケーソンの据付が可能な動揺量の限界値(据付

表-3 ケーソンの諸元

ケーソンサイズ(t)	重量(t)	長さ(m)	天端幅(m)	フーチング厚(m)	フーチング幅(m)	高さ(m)	喫水(m)	水深(m)
1,000	1,060	12.0	12.0	1.0	1.0	13.0	7.15	11.15
3,000	2,947	17.0	17.0	1.5	1.5	18.0	9.90	13.90
5,000	4,872	20.0	20.0	1.5	2.0	21.5	11.83	15.83
8,000	7,821	23.5	23.5	2.0	2.0	25.0	13.75	17.75

限界動揺量)は、ケーソン据付実施時の未超過確率分布を用いて、適当な未超過確率値に対応する動揺量として推定できる。この適当な未超過確率値を決定するための明確な方法はないが、本研究では未超過確率90%に近く、据付限界動揺量が切りのいい数値となる87%とした。従って、ケーソンの据付限界動揺量は、未超過確率87%に対応する動揺量として、スウェイは0.75m、ヒープは1.50m、ヨウは8.0°と推定した。なお、得られたケーソンのスウェイ及びヒープの据付限界動揺量は、矩形ケーソン(フーチング無し)のみを対象とした算定値(未超過確率約80%に対応する動揺量)²⁾と一致している。

7. ケーソンの据付限界波高

(1) 概要

ケーソンのスウェイ、ヒープ及びヨウの据付限界動揺量を制約条件として、ケーソンサイズ、波向、波周期別に動揺シミュレーションによりケーソンの動揺量を計算し、ケーソン据付作業の限界条件である据付限界波高を算定した。

ケーソンの据付限界波高の算定では、ケーソンの形状は矩形(フーチング無し、フーチング有り)とし、ケーソン据付手法が引船方式(図-1)及びアンカーワイヤ方式(図-2)の場合を対象とした。計算に用いたケーソンの諸元を表-3に示す。計算ケースは、ケーソンサイズ4種類(1,000t, 3,000t, 5,000t, 8,000t)、波向2種類(90°, 60°)、有義波周期4種類(6s, 8s, 10s, 12s)を組み合わせ設定し、有義波高を0.2mから1.5mの間で5種類変化させて動揺シミュレーションを行うことによりケーソンの動揺量を求めた。そして、据付限界動揺量(スウェイ0.75m以下、ヒープ1.50m以下、ヨウ8.0°以下)に相当する有義波高のうち、最小の有義波高をケーソンの据付限界波高とした。

(2) 算定結果

図-8~図-11は、波向90°の場合について、ケーソンサイズ別の据付限界波高と有義波周期の関係を示す。これらの図には、据付作業の可否の事例調査結果をケーソンサイズ別に1,000t級(2,000t未満)、3,000t級(2,000t以上4,000t未満)、5,000t級(4,000t以上6,500t未満)、8,000t級(6,500t以上)と4区分して同時に示している。

これらの図を見ると、動揺シミュレーションを用いて求めた据付限界波高は、一部の例外的な事例を除き、据付作業の可否の実態とおおむね一致して

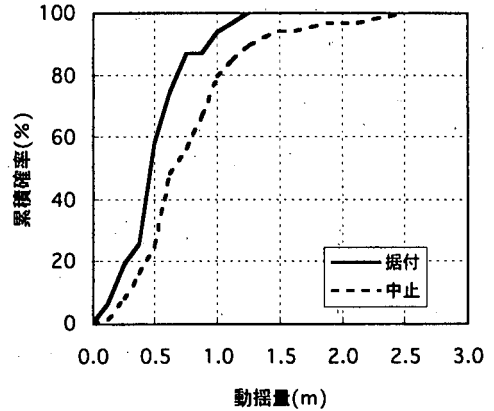


図-5 スウェイの累積確率分布と据付作業の可否の関係

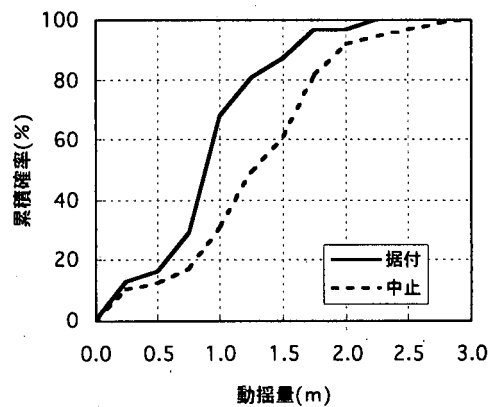


図-6 ヒープの累積確率分布と据付作業の可否の関係

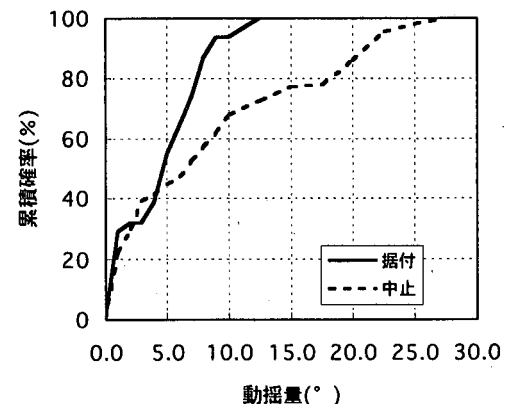


図-7 ヨウの累積確率分布と据付作業の可否の関係

いる。同時に、ケーソンサイズが小さい場合ほど、また有義波周期が長い場合ほど、据付限界波高が低下している。また、ケーソンの形状については、矩形ケーソン(フーチング無し)の場合に据付限界波高が低下する傾向にある。一方、ケーソン据付手法

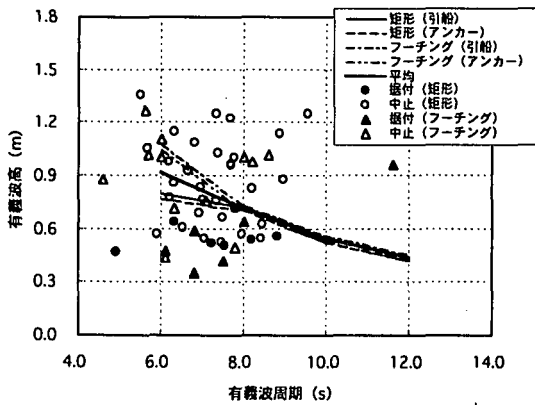


図-8 据付限界波高と据付作業の可否の関係 (1,000t)

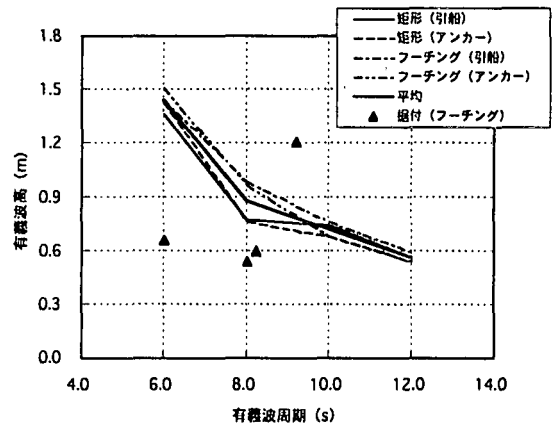


図-10 据付限界波高と据付作業の可否の関係 (5,000t)

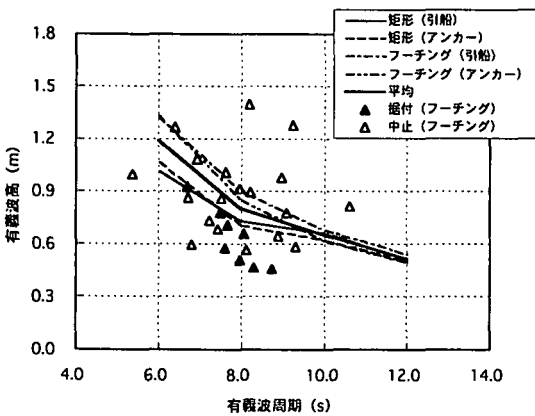


図-9 据付限界波高と据付作業の可否の関係 (3,000t)

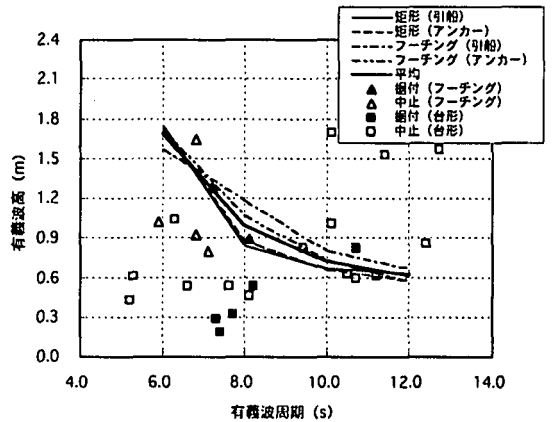


図-11 据付限界波高と据付作業の可否の関係 (8,000t)

の相違や、ここでは示していないが、波向の相違が据付限界波高に与える影響は比較的小さい。以上のことから、ケーソン据付作業の可否を正しく判断するためには、ケーソンのサイズ及び形状を考慮した上で、工事当日の波高の予測値だけではなく、波周期の情報にも注意を払う必要があるといえる。

8. 結論

- 1) 防波堤ケーソンの据付工事16事例に対して動揺シミュレーションを実施し、ケーソンの動揺量と据付作業の可否の関係を比較検討した。その結果、ケーソンの進水時における据付限界動揺量をスウェイ0.75m、ヒープ1.50m、ヨウ8.0°と推定した。
- 2) 動揺シミュレーションを用いて求めた据付限界波高は、防波堤ケーソンの据付作業の可否の調査結果とおおむね一致した。また、ケーソンサイズが小さい場合、有義波周期が長い場合、矩形ケーソン（フーチング無し）の場合に据付限界波高が低下する傾向があること、波向やケーソン据付手法の相違の影響は比較的小さいことがわかった。

謝辞：太平洋沿岸域における防波堤ケーソンの据付工事の事例調査は、運輸省港湾技術研究所と社団法人日本埋立浚渫協会が共同で実施したものである。ここに記して、関係者各位に深甚なる謝意を表する。

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. 754，46p.，1993。
- 2) 石見剛，白石悟，名里健吾：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，港湾技研資料，No. 850，29p.，1996。
- 3) 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），港湾技術研究所報告，第19巻第2号，pp. 105-143，1980。
- 4) 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，pp. 313-330，1994。
- 5) 米山治男，白石悟：防波堤ケーソンの自動設置システムの開発とその実験的検証，土木学会論文集，No. 728/VI-58，pp. 93-106，2003。
- 6) 上田茂，白石悟：カタナリー理論による最適係留鎖の選定法および計算図表，港湾技研資料，No. 379，55p.，1981。
- 7) 白石悟，石見剛：アンケートおよび動揺シミュレーションによる作業船の海上作業限界条件に関する検討，港湾技研資料，No. 898，78p.，1998。