

長大型波浪制御構造物（長大ケーソン）の現地実証試験

小島 朗史* ・大 脇 崇**・水 谷 誠***
松尾 義文****・水 谷 雅 裕*****

1. はじめに

近年、貨物量の増大、入港船舶の大型化に伴う既存港湾施設の狭隘化から港湾の沖合展開が活発である。高知港においても、浦戸湾内にある既存の港湾施設のみでは貨物量の増大に対応できなくなり、また、湾内への航路の幅員や水深の制限から船舶の大型化に対応できなくなったため、昭和56年に港湾計画を改訂し、湾外の三里地区に外港（高知新港）を建設することを決定した（図-1参照）。

高知新港は、波浪条件の厳しい外海に建設されるため多大な建設費を必要とすることはもとより、供用開始までに相当な期間を要する。一方で、貨物量の増大や船舶の大型化の傾向は顕著で、地元からは大型岸壁の早期供用の要請があがっていた。そこで、運輸省第三港湾建設局では、三里地区西側岸壁（-12m、-8m）の早期暫定供用を図るため延長300mの仮防波堤を整備することとし、その一部に使用するため通常20m程度の堤体長を100mにまで延長したいわゆる長大ケーソン（図-2

参照）を開発した。なお、この仮防波堤は、平成7年度以降と目される全体供用時には東第一防波堤に移設し、再利用する計画である。

長大ケーソンは、堤体の持つ波力平滑化効果を考慮して堤体幅を縮小できるケーソンであり、より経済的な構造となる。ここで波力平滑化効果とは、「堤体の長いケーソンに作用する波力は、波の位相差により堤体長方向に大小を生じるため、波の位相差を考慮しない短いケーソンに比べ、ケーソン全体でみれば単位幅当たりの波力が平均化され、低減される効果」をいう。また、チャンバーを大きな構造とすることで中詰砂の投入、撤去が容易となり、今回のように移設を前提としている場合には、全体工期を短縮することが可能である。

長大ケーソンの開発については、平成元年度から検討に着手し、平成3年度までに製作、曳航、据付を完了した。波力平滑化効果による波力の低減率（波力平滑化係数）は水理模型実験でその妥当性を確認した上で設計に導入したが、さらに実海域での検証を行う必要がある。また、堤体を長くしたことにより新たに生じる設計、施工上の諸課題についても検証を行うため、曳航の時点より現地観測を実施しているところである。

今後、取得した観測データを基に解析を行い、平成5年度中に長大型波浪制御構造物（長大ケーソン）の設計

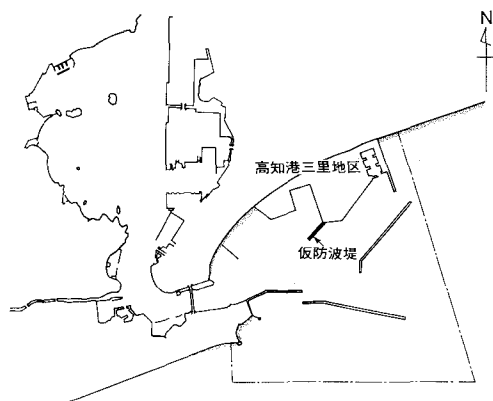


図-1 高知港計画平面図

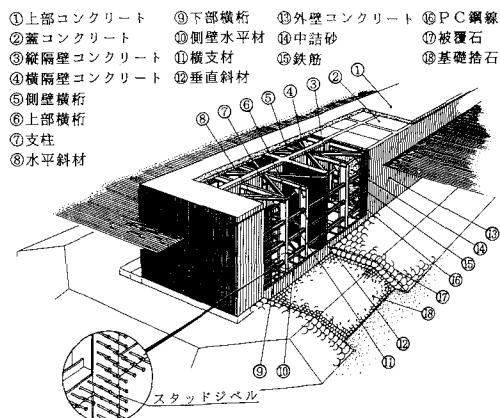


図-2 PC 鈎骨型長大ケーソン概念図

- | | |
|------------|--------------------------|
| * 正会員 | 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所長 |
| ** 正会員 工修 | 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所次長 |
| *** 正会員 工修 | 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所建設専門官 |
| **** | 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所係長 |
| ***** | 工修 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所 |

指針をとりまとめる予定である。

2. 施工上の課題

(1) 曳航時における堤体の動揺安定性

平成元年度に実施した概略設計では、曳航及び据付時のケーソンの動揺安定性について図-3のフロー図に示す「動揺シミュレーション」を用いて検討している。その結果、動揺6成分（サージング、スウェーイング、ヒービング、ローリング、ピッチング、ヨウイング）について、曳航時は概ね周期が10秒以下の場合、据付時は周期が9秒以下の場合、急激な増幅がないことを確認した。さらに、曳航・据付作業限界等を勘案し、曳航限界波浪($H_{1/3}=2.0\text{ m}$, $T_{1/3}=10\text{ s}$)、据付限界波浪($H_{1/3}=0.5\text{ m}$, $T_{1/3}=9\text{ s}$)を設定した。

ここでは、動揺シミュレーションの適用性を検証する目的で、取得した波浪条件等を入力条件とする動揺シミュレーションを実施して動揺量を算出し、別途実測した動揺量と比較した。

① 観測データの取得

観測データの取得は、曳航中の平成4年3月8日5時30分から3月10日5時にかけて行い、20分間連続観測データを48ケース取得した。観測データとして、ケーソン底面に設置した波圧計で取得した揚圧力データ(8点)及び観測室内に設置した慣性測定装置で取得した動揺量データ(6成分)がある。

② 観測データの整理

波高、周期は、堤体中央付近の3点で取得した揚圧力データから動揺による水圧変動を除き、それを水位変動に変換して求めた。また、波向は、4点での水位変動を用いて方向スペクトル解析した結果と沖波からの推算値を、近傍で取得した波向データと比較して決定した。

③ 観測データの解析

今回解析対象としたケースは、表-1に示す、比較的波高、周期の大きな8ケースである(曳航位置は図-4参照)。各ケースの波高、周期及び波向並びにケーソン諸元等を入力条件とする動揺シミュレーションを実施し、別途実測した動揺量と比較検討した。

その結果、事前検討の動揺シミュレーションと同じ手法では、計算値と実測値が合致しないことが分かり、次に示す2点を修正することとした。

- ・速度ポテンシャルの無限級数項の計算項数を増やした。
- ・理論値としてのローリングの減衰係数を3倍に修正した。

以上を考慮して計算した動揺量と実測動揺量の比較図を図-5に示す。

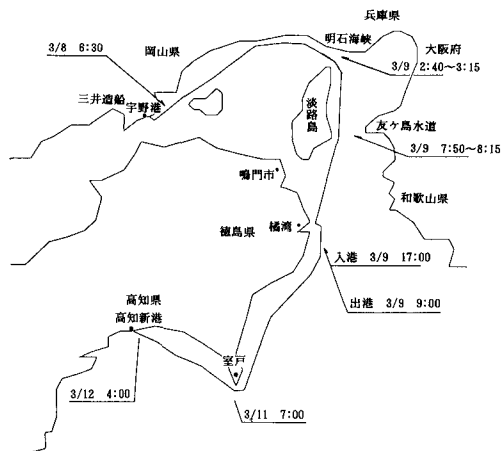


図-4 曳航コースと通過時刻

表-1 曳航時の動揺解析対象ケース

(年月日:1992/03/09)

CASE No.	時	波 高 [m]				周 期 [s]			
		$H_{\max}$	$H_{1/10}$	$H_{1/3}$	H_{mean}	$T_{\max}$	$T_{1/10}$	$T_{1/3}$	T_{mean}
28	08:30:48	0.371	0.173	0.123	0.068	3.5	5.5	5.5	3.8
29	09:30:48	0.324	0.204	0.151	0.089	5.4	5.5	5.2	4.1
30	10:30:48	0.348	0.195	0.148	0.085	3.9	7.0	6.4	4.6
31	11:30:48	0.363	0.247	0.197	0.120	8.0	7.8	7.3	5.3
32	12:30:48	0.429	0.311	0.245	0.143	7.5	8.8	8.3	6.0
33	13:30:48	0.448	0.354	0.289	0.180	6.9	7.9	7.8	6.1
34	14:30:48	0.472	0.367	0.299	0.186	7.2	8.4	8.1	6.4
35	15:30:48	0.430	0.276	0.221	0.129	7.1	8.0	8.0	5.9

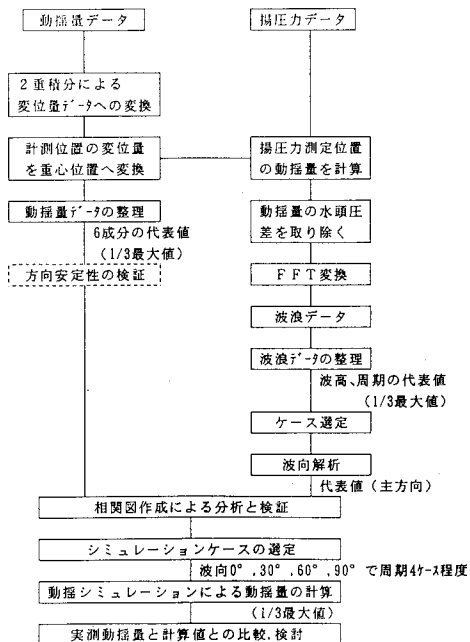


図-3 動揺安定性の検証フロー

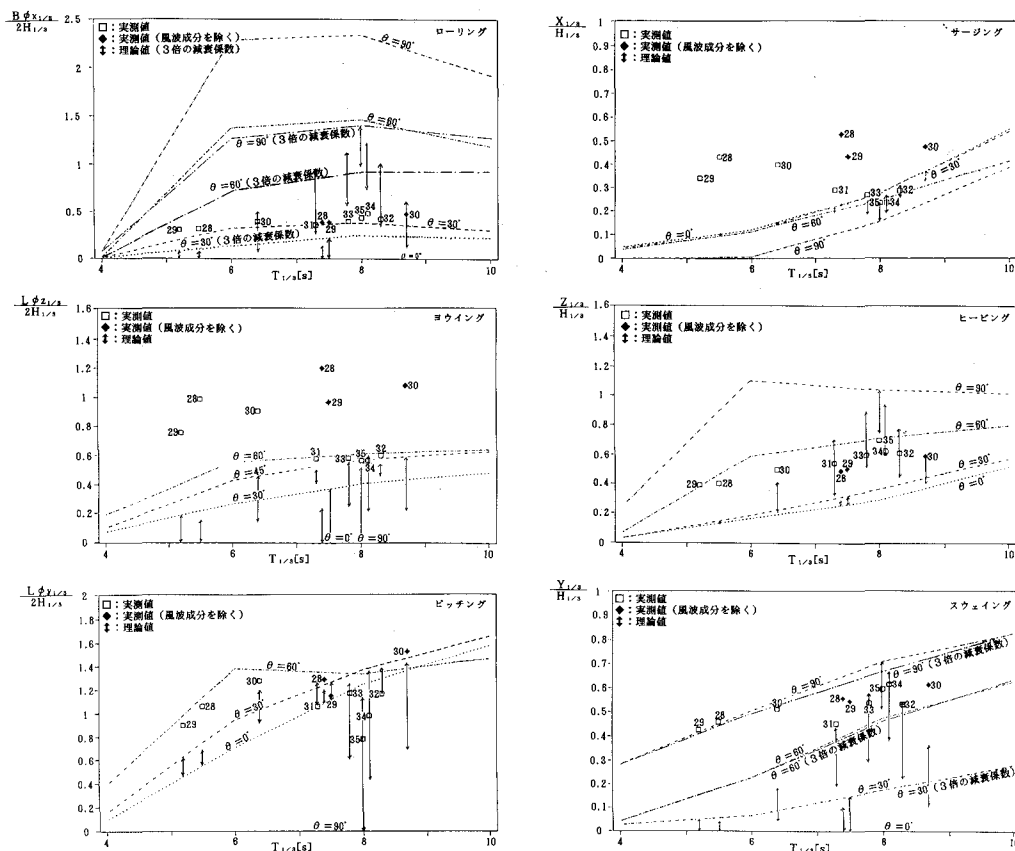


図-5 曳航時の動揺量

(2) 据付時における堤体の動揺安定性

曳航時と同様の検討を行い、据付限界波浪 ($H_{1/3}=0.5$ m, $T_{1/3}=9$ s) を設定した。

ここでは、据付時における動揺シミュレーションの適用性を検証する目的で、取得した波浪条件、係留条件等を入力条件とする動揺シミュレーションを実施して動揺量を算出し、別途実測した動揺量と比較した。

① 観測データの取得

観測データの取得は、据付時の平成4年3月12日6時から16時及び3月14日6時50分から10時50分にかけて行い、20分間連続観測データを29ケース取得した。

② 観測データの整理

波高、周期は、高知沖の波浪観測データより推算した結果を用いた。また、波向は、曳航時と同じ4点での水位変動を用いて方向スペクトル解析した結果と沖波からの推算値を、近傍で取得した波向データと比較して決定した。

③ 観測データの解析

今回解析対象としたケースは、吃水条件の異なる6ケースである。各ケースの波高、周期及び波向並びにケー

ソン諸元等を入力条件とする動揺シミュレーションを実施し、別途実測した動揺量と比較検討した。

その結果、事前検討の動揺シミュレーションと同じ手法では、ローリングとヨウイングの計算値と実測値が合致しないことが分かり、次に示す2点を修正することとした。

- ・理論値としてのローリングの減衰係数を2倍に修正した。
- ・多方向性不規則波による動揺シミュレーションを行う。

以上を考慮して計算した動揺量と実測動揺量の比較図を図-6に示す。

3. 設計上の課題

(1) 曳航時における断面力計算法

曳航時波浪により、長大ケーソンには縦曲げモーメント、縦せん断力、ねじりモーメント等の断面力が生ずる。平成2年度に実施した細部設計では、「浮体の動揺を考慮した断面力計算法(上田らの式)」と「ミューラーの式」から計算した断面力の結果を比較検討し、浮体の動揺を

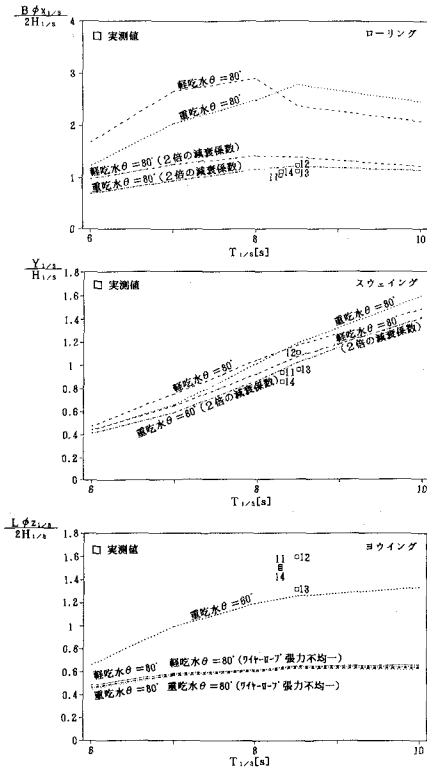


図-6 据付時の動揺量

考慮した断面力計算法を用いることとした。

ここでは、浮体の動揺を考慮した断面力計算法の適用性を検証する目的で、取得した波浪条件等を用いた計算値から算出した部材応力と別途取得した部材応力を比較した。

① 観測データの取得

観測データは、2. (1)①と同じ48ケース取得した。観測データとしては、ケーソン底面に設置した波圧計で取得した揚圧力データ、底版と側壁に設置した鉄筋・コンクリートひずみ計で取得した鉄筋・コンクリート応力データ及び側壁と隔壁に設置した三軸ひずみゲージで取得したせん断応力データがある。

② 観測データの整理

波高、周期及び波向は2. (1)②と同じ。縦曲げモーメントに対応する部材応力は底版中央付近のコンクリート応力、縦せん断力とねじりモーメントに対応する部材応力はせん断応力とした。

③ 観測データの解析

今回解析対象としたケースは、2. (1)③と同じである。部材応力の計算値と実測値を比較した。その結果、コンクリート応力については計算値と実測値が比較的对応したが、せん断応力については対応せず、次に示す点

を検討することとした。

- ・入射波向を計算上理想化した波向としているが、実際の波向には多方向性がある。
- ・ケーソンを剛体として解析しているが、実際には弾性体挙動をしている可能性がある。
- ・解析上のせん断力分布と実際の相違。

(2) 波力平滑化効果

波浪制御構造物（ケーソン）を長大化することによって、図-7に示すようにケーソンの法線方向の各点において波力がピークとなる時期に位相差が生じ、波力の低減効果が生まれる。この波力の低減は空間的な平均をとることによるものであり、波力の平滑化と呼んでいる。ケーソンの長さを l_B 、波の入射角を θ 、波長を L で表すと、波向き方向に対するケーソンの投影長さ $l_B \sin \theta$ と波長の比 $l_B \sin \theta / L$ が大きいほど波力の平滑効果が大きくなる。波力の時間的変化が正弦波的な場合には、波力の平滑化係数 δ_B は式(1)で表される(高橋・下迫, 1990)。

$$\delta_B = \frac{\sin(\pi l_B \sin \theta / L)}{\pi l_B \sin \theta / L} \quad (1)$$

しかし、実際に作用する波力は正弦波形ではなく、いわゆる双峰型の波形となる。特にマウンドが高く波高が大きい場合には、波圧波形のピークが切り立ち、作用時間の短い衝撃的な波力が作用する。したがって、合田式に基づいたより現実に近い波形として、図-8に示すように正弦波の項 a_1 と作用時間が周期 T の $1/20$ の三角波とした項 a_2 を考える。この場合、波力の平滑化係数はケーソンの相対長さだけでなく、 a_1 と a_2 の比によっても異なり、式(4)で表される。

$$\delta_{B1} = \frac{\sin(\pi l_B \sin \theta / L)}{\pi l_B \sin \theta / L} \quad (2)$$

$$\delta_{B2} = \begin{cases} L/40 l_B \sin \theta & : (l_B \sin \theta \geq L/20) \\ 1 - (10 l_B \sin \theta) / L & : (l_B \sin \theta < L/20) \end{cases} \quad (3)$$

$$\delta_B = \frac{\delta_{B1} a_1 + \delta_{B2} a_2 \cos^2 \theta}{a_1 + a_2 \cos^2 \theta} \quad (4)$$

① 観測データの取得

観測データの取得は平成4年6月24日から12月16日にかけて行い、20分間連続観測データを821ケース取得した。観測データとして、ケーソン側面に設置した波圧計で取得した波圧データ(13点)、ケーソン底面に設置した揚圧力計で取得した揚圧力データ(7点)及び波高計、波向計で取得したデータがある。

② 観測データの整理

波高、周期は各ケースの有義波周期、主方向(波向)を代表値とし、波長は周期の代表値と水深から計算した。また、波力平滑化係数 δ_B の実測値は、水平波圧(9点)と揚圧力(5点)から計算した。

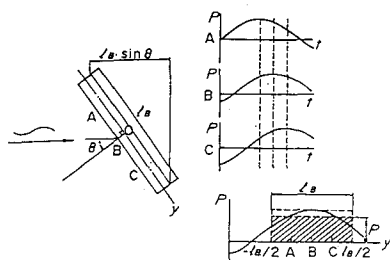


図-7 長大ケーソンの波力の平滑化

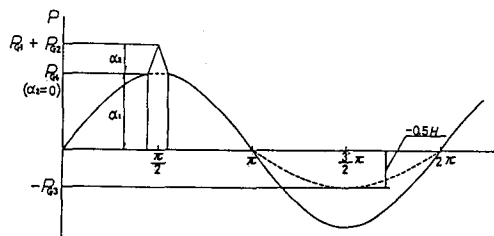


図-8 台法式に基づく波力波形

③ 観測データの解析

今回解析対象としたケースは、波高が比較的大きいケースから周期と波向の異なったケースを選定し、8ケースとした。各ケースについて、波力平滑化係数の実測値と波長及び波向の代表値から計算した計算値を比較したものを図-9に示す。図中の(●)は、 H_{max} に対する理論値としての平滑化係数を示す。曲線は位相差のみによる平滑化係数 δ_{B1} の理論曲線である。参考として設計波 $H_D=11.8\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=15.5\text{ s}$ (H. W. L.時)における平滑化係数 δ_B を破線で示した。

(3) 波力に対する部材の安全性

① 観測データの取得

観測データの取得は、平成4年6月24日から平成5年3月8日にかけて行い、861ケース取得した。観測データとして、鉄筋応力データ(10点)、コンクリート応力データ(10点)がある。

② 観測データの解析

代表ケースとして3ケースを選び、これらのケースにおける波圧、揚圧力、部材応力の最大値、平均値、最小

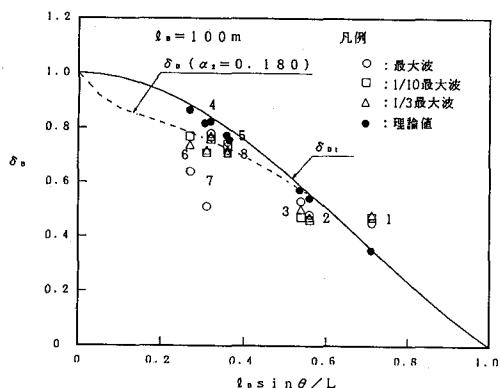


図-9 水平波力の平滑化係数

値を求め、設計値と比較した。

3. おわりに

長大型波浪制御構造物の開発については、平成元年度より検討を進めてきた。既存の防波堤の設計法及び水理模型実験結果を踏まえた設計による長大ケーソンの仮防波堤位置への据付を平成4年3月に完了し、現在は、上部工の一部を除いてほぼ完成の状況にある。

さらに、平成4年3月の曳航時より、開発に必要な観測データの取得と解析を並行的に行っており、その結果を踏まえ、平成5年度には長大型波浪制御構造物の設計指針のとりまとめを行う予定である。

最後に、今回の開発に当たり、合田良実横浜国立大学教授を委員長とする長大型波浪制御構造物技術検討委員会の各委員に御指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 高橋重雄・下迫健一郎 (1990): ケーソンの長大化による波力の低減と耐波安定性の向上, 第37回海岸工学講演会論文集, pp. 634-638.
- 上田 茂・白石 悟・甲斐一夫 (1984): 箱型浮体の波浪によるせん断力と縦曲げモーメントの計算法について, 港湾技研資料, No. 505, 運輸省港湾技術研究所.