

釜石港湾口防波堤大型台形ケーソンの設計

運輸省第二港湾建設局 正員 森 好生 正員○恋塚 貴
正員 笹山 博 野上富治

1. はじめに

釜石湾が位置する三陸沿岸は、典型的なりアス式海岸であり、また地震津波の波源域が近くにあることから、これまで幾度となく津波の来襲を受けてきた地域である。明治以降被害が甚大であった津波としては、明治29年及び昭和8年の三陸地震津波並びに昭和35年のチリ地震津波の3つが挙げられるが、なかでも明治29年の三陸地震津波では釜石湾において津波の最大痕跡高T. P + 7.9mを記録している。三陸沿岸における津波対策は、昭和35年のチリ地震津波以降関係当局によって鋭意進められ、大船渡湾で湾口防波堤が建設されたほか、平坦地の水際線に防潮堤が張りめぐらされた。釜石湾においてもこの津波を契機に防潮堤（天端高T. P + 4.0m）が建設されたが明治29年の三陸地震津波クラスの津波には無防備の状態にあり、恒久的な津波対策が地域住民から要望されていた。

釜石港湾口防波堤は、このような釜石湾の津波対策、さらには湾内に創出される静穏化水域の有効利用により地域の発展を図ることを目的として、昭和52年11月に港湾計画で決定され¹⁾、昭和53年度から運輸省第二港湾建設局が建設事業を進めている。図-1に示すとおりこれまでに例のない大水深（最大水深-63.0m）での防波堤建設となったため、大水深防波堤の建設に関する技術的な検討を多く実施してきた²⁾。これらの成果を踏まえて、昭和63年12月から本格的な大水深防波堤となる北堤深部3区（水深-60.0m）の大型台形ケーソンの製作を始めたところである。

本稿は、この大型台形ケーソンの設計の概要を紹介するものである。

2. 湾口防波堤の位置

湾口防波堤の位置は、表-1に示す明治29年及び昭和8年の三陸地震津波並びに昭和35年のチリ地震津波の3つを計画対象津波として数値シミュレーション及び水理模型実験により津波減殺効果を検討するとともに、港内静穏度、船舶航行、海水交換等を考慮して、釜石湾口の鷺ノ巣崎と太刀根島間に決定され、北堤990m、南堤670m及び開口部300mから構成されることとなった。開口部では船舶通航に必要となる水深-19.0mまで潜堤を設けることとしており、これによりいずれの津波に対しても釜石湾での遡上高が防潮堤天端高T. P + 4.0m以下になるように減殺することができる。

3. 基本設計

(1) 設計外力

湾口防波堤北堤深部3区の外力等の設計条件は表-2のとおり設定した。設計外力の基本的な考え方は以下のとおりである。

①設計波浪

湾口防波堤の耐用年数（100年）及び重要度を考慮して再現

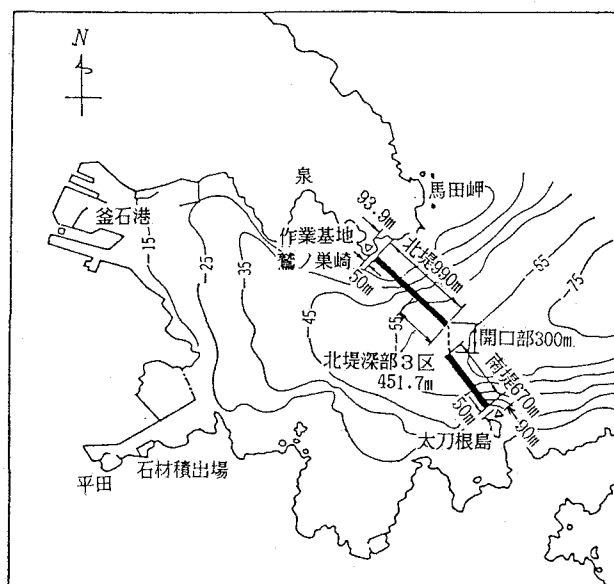


図-1 釜石港湾口防波堤計画図

表-1 計画対象津波

	最大痕跡高(釜石)	周期
明治29年三陸地震津波	T. P + 7.9m	16分
昭和 8年三陸地震津波	T. P + 5.4m	10分
昭和35年チリ地震津波	T. P + 2.9m	45分

表-2 外力等の設計条件

最高波高	$H_{max} = 14.0m$
有義波高	$H_{1/3} = 7.8m$
有義波周期	$T_{1/3} = 12.0sec$
波の入射角	$\beta = 0^\circ$
水深	$h = 60.0m$
海底勾配	$i = 1/100$
潮位	$H. W. L. + 1.5m$ $L. W. L. \pm 0.0m$
設設震度	$k = 0.20$
最大津波高	T. P + 5.0m

期間を150年とし、設計沖波を波高 $H_o=9.2\text{m}$ 、周期 $T_o=12.0$ 秒及び波向NEと設定して設計波の諸元を決定した。

②設計地震

港湾構造物に対する耐震設計においては、一般の土木構造物と同様に震度法が適用されている。湾口防波堤北堤深部3区についても基本的には震度法を用いることとしているが、水深が大きい所につくられるため堤体高が大きくなり、地震波の増幅が問題となること

から、マウンド等の応力～ひずみ関係の非線形性を考慮した地震応答解析により耐震性の検討を行った。

設計地震は、過去の被害地震を参考とし、表-3及び図-2に示すとおりとした³⁾。各地震による防波堤建設位置での基盤加速度は、震源域からの距離(断层面距離)により減衰するものとして、東北地方で発生した地震の強震記録をもとに最大基盤加速度とマグニチュード及び断层面距離との関係を求め、これに基づき算定した。地震応答解析の結果、ケーソンの天端と下端の最大応答加速度の平均値は170gal程度であり、震度法による設計震度 $k=0.20$ (196galに相当)が安全側であることが確認された。なお、マウンド斜面の地震時の安定性の検討方法等については参考文献2)を参照されたい。

③設計津波

設計津波の諸元は、釜石湾における明治29年三陸地震津波(最大痕跡高 $T.P+7.9\text{m}$)及び昭和8年三陸地震津波(最大痕跡高 $T.P+5.4\text{m}$)の二つの津波の記録から、これらの津波を数値シミュレーション及び水理模型実験を用いて再現し設定した。ここで、それぞれの津波の周期については、釜石湾の固有振動周期を考慮してそれぞれ16分及び10分と設定している。この津波によると、湾口防波堤建設後の防波堤前面の最大津波高は $T.P+5.0\text{m}$ 程度となった。なお、本防波堤では津波による外力が波浪及び地震と比較して小さいためケーソンの断面形状の決定要因となっていない。

(2)基本断面

防波堤の構造としては、捨石マウンド上に矩形のケーソンを設置し、波力等に対してケーソンの重量で抵抗する混成堤形式が多く用いられている。このような混成堤では、ケーソンは波力等による滑動及び転倒に対して所要の安全率を確保するとともに、偏心傾斜荷重に対する地盤の支持力の検討から安定となるように堤体幅を設計する必要がある⁴⁾。水深が比較的浅い場合の混成堤では、ケーソン設置水深を深くした方が一般的に経済的な断面が得られる^{5), 6)}。しかしながら、大水深混成堤の場合には、ケーソン設置水深を深くすると、滑動の安全率には余裕があるものの地盤の支持力の制約から堤体の所要底面幅を大きくする必要があり、経済的な断面が得られない。

そこで、湾口防波堤北堤深部3区ではケーソンを台形とすることとした。台形ケーソンの特性として、以下のことが挙げられる。

①斜面壁に作用する波力の鉛直成分が加わるため、ケーソンの滑動抵抗が増大するとともに、捨石マウンドの端し圧を軽減できる。

②矩形ケーソンと比較して地震による慣性力(自重×設計震度)が小さくなること及び斜面壁に作用する動水圧の鉛直成分が加わるとともに、水平成分が減少することにより捨石マウンドの端し圧を軽減できる。

なお、斜面壁に作用する波圧の算定については谷本らの提案式⁸⁾、同じく動水圧の算定についてはZanger⁹⁾の式を用いることとした。

表-2に示した外力等の設計条件のもとで最適なケーソン形状を検討した結果、図-3に示すような断面を決

表-3 釜石における想定地震と基盤加速度

地震名	断 層 面		破壊面積 (km^2)	マグニチュード	断层面距離 (km)	基盤加速度 (gal)
	傾斜方向	傾斜角				
A地震	N85° E	45°	180×100	8.3	145	80
B地震	N70° E	20°	180×70	8.1	107	113
C地震	N80° E	20°	30×80	7.4	80	120
D地震	N80° E	20°	40×96	7.6	55	232
E地震	$r^*=6.3\text{km}$		125	6.1	28**	285

* 震源域の半径 ** 実効距離

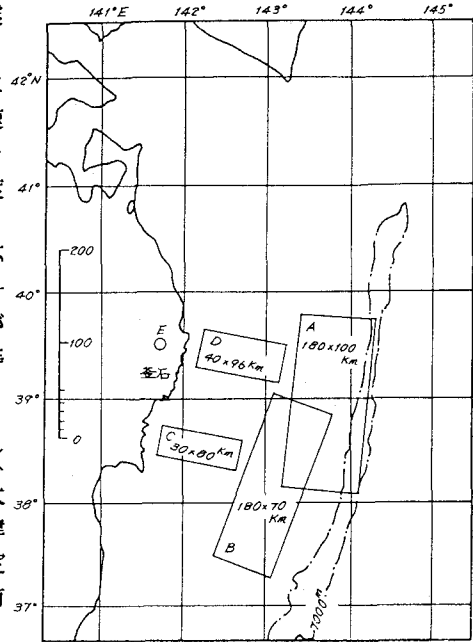
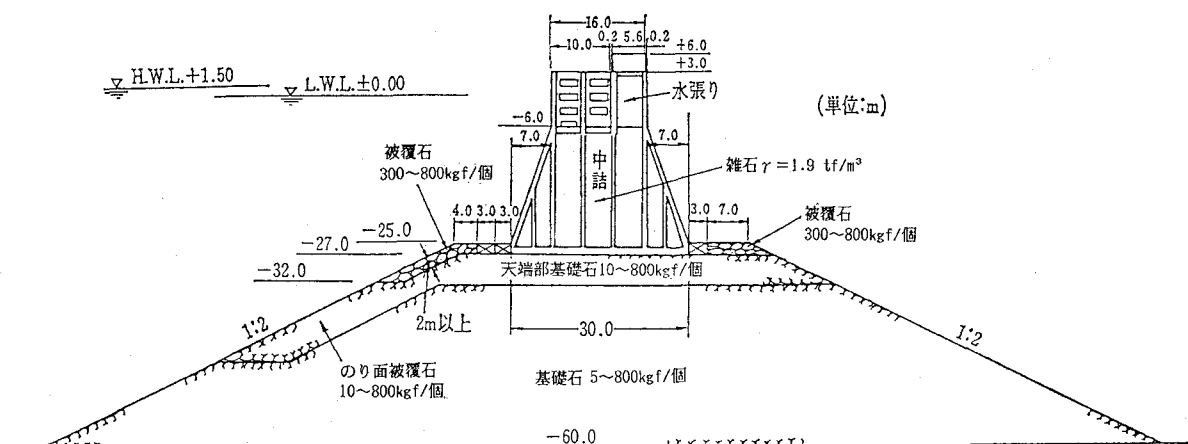


図-2 想定地震の断層面図



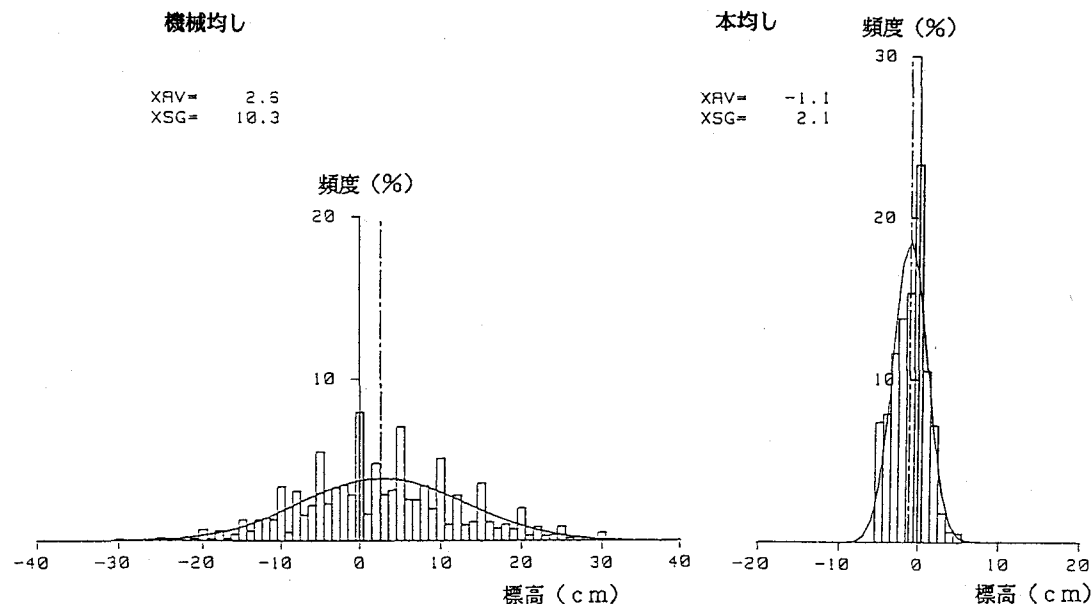
定した⁷⁾。澁口防波堤北堤深部3区で採用した大型台形ケーソンの特徴を述べると次のようになる。

- ①ケーソン設置水深が大きく、これまでの防波堤ケーソンには類例のない－25.0m（沈下後は－27.0m）となっている。
- ②防波堤前面が漁業操業区域になっていることから反射波を抑える必要があり、このためケーソン上部には斜め入射波の反射をも低減できる新しいタイプの二重横スリットからなる遊水室を設けている。
- ③ケーソン形状は、幅30.0m（上部は16.0m）、長さ30.0m、高さ30.0mであり、その総重量は12,500tf（カウンターバラストを除く。）に達し、従来の最大規模の防波堤ケーソンの約二倍に相当する。

4. マウンドの不陸を考慮したケーソンの応力解析

(1) 不陸のあるマウンドへの対応

港灣工事における捨石マウンド表面の均し作業は、通常、潜水士によって割石を１つずつ動かして行われており、手間を要する作業である。この方式では、大水深になると、作業能率の低下のほか、適格な潜水士の確保、安全性等の問題がある。このようなことから、第二港湾建設局においては、捨石均し機の開発を進めており、釜石港湾口防波堤北堤深部でのマウンドの捨石均しに試験的に捨石均し機を採用することとした。機械均しとする場合は、従来に比べ精度（±5cm）を緩和することが現実的であり、このようなマウンド上にケーソンを据付けた場合、マウンドの不陸（凹凸）によりケーソン底板に不均等な反力（集中荷重）が作用し、現行設計法で考え



ている応力よりも大きな応力が発生しケーソンの補強が必要となる^{10)、11)}。

このようなことから、実際のマウンド天端形状の調査を行い、実際のケーソンで応力状態を確認することが必要であり、小名浜港の沖防波堤において、現地実証試験を行い、据付けたケーソンの応力計測を行った。また、マウンドの不陸を考慮したケーソンの応力解析手法について実測値と計算値の比較を行い検討した。

(2) 現地実証試験の実施

機械均しマウンドの均し面の特性を把握するため、第二港湾建設局が開発した捨石均し機を使用しての機械均し及び潜水士による本均し(精度 $\pm 5\text{cm}$)マウンドを造成し、マウンドの天端高を30cmピッチで測量した。なお、本実験結果は、捨石マウンド天端に割石規格 30~200kgf/個程度のものを用いた場合である。

図-4は、捨石マウンド天端標高の頻度分布である。この図から以下の均し面の特性を把握することができる。
①機械均し及び本均しマウンドの標高の頻度分布はほぼ正規分布となる。また、平均天端高に対する標準偏差は、機械均し10.3cm、本均し 2.1cmである。

②ケーソン底版の断面力に最も影響を及ぼす均し基準面からのマウンド突起高の最大値は、機械均しの場合30cm程度である。また、本均しの場合 5cmであり、これは潜水士が手作業で均し作業を行っていることから、最大突出高が均しの許容範囲($\pm 5\text{cm}$)以内に抑えられているためである。

不陸マウンド上のケーソン応力解析手法は、図-5に示すように、捨石マウンド天端面に $x-y$ 平面を設け、この平面上に解析用格子を組み、格子点に剛性の等しいバネをおいて、バネの長さにより不陸を表現するモデル(以下地盤バネモデルという)を用い、バネによって支持されたケーソンを剛体と仮定して、力の釣合条件とバネ定数及びバネの縮み量から、バネの反力すなわち地盤の反力(底版反力)を計算し、得られた反力から有限要素法によりケーソン応力を計算するものである。この応力解析手法の妥当性の検討を行うため、実際のケーソンに鉄筋計、波圧計等の計器を取付け、ケーソン据付け時及び定期的(常時)には静的な、また、波浪来襲時(異常時)には動的な測定を行ってケーソンの応力状態を確認している。

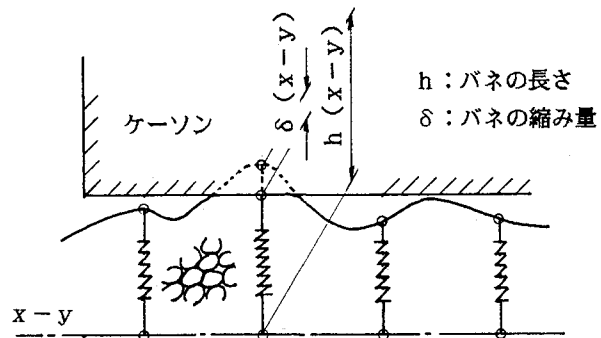


図-5 地盤バネモデル

図-6は、機械均しマウンド上に据付けたケーソンの据付け時の曲げモーメントの実測値と、捨石マウンドのバネ定数を500tf/m³として、各隔壁毎に側壁、隔壁に囲まれた四辺固定版として計算した値を示したものである。この図から読み取れるように、底版の中央部及び中間部の曲げモーメントについては、実測値と計算値は概ね一致している。なお、端部については、計算値に側壁あるいは隔壁との間で伝達される不釣合いモーメントを考慮しなかったため、実測値と乖離している。

これらの実験結果より、不陸マウンド上のケーソン応力解析手法として地盤バネモデルを用いることができると判断した。

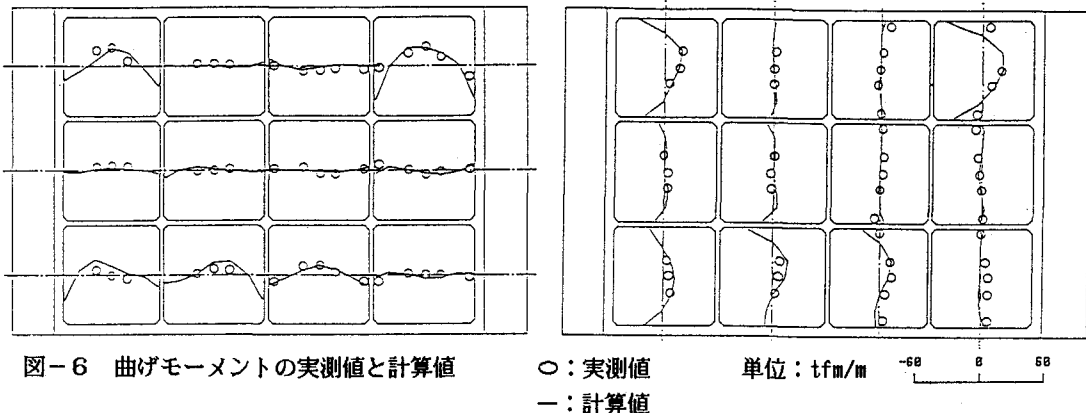


図-6 曲げモーメントの実測値と計算値

○：実測値
—：計算値

単位：tfm/m

5. ケーソンの設計

(1) 底版の設計

不陸を考慮した底版の設計は、不陸マウンド上のケーソン応力解析手法を用いて図-7に示すようなフローで行った。この場合、捨石マウンドのバネ定数を適切に設定することが重要で

あるほか、各格子点のバネの長さを不陸に応じて適切に設定する必要がある。バネ定数は現地実証試験の結果から 500tf/m^3 を用いることとし、捨石マウンド天端の不陸状況はケーソン据付け面毎に異なることから、設計に用いる不陸状況、すなわち、解析用格子点のバネの長さは、均し実験等の結果と標準偏差が同じになる正規分布確率密度関数を用い、この関数に乱数を発生させて設定した。乱数によるバネの長さの設定は計算時間等を考慮して計 100 ケースとし、さらに、計算の結果得られた各々 100 ケースの断面力の分布形は正規分布であると仮定して統計処理を行い、平均値、標準偏差を求めて非超過確率99%の値を底版の設計用断面力とし、この断面力に対して所要の配筋を行った。

不陸を考慮した底版の設計で、最大設計断面力が生じる位置での配筋結果は、現行設計法での配筋量に対して約 1.5 倍となった。

(2) ねじれに対しての側壁及び隔壁の補強

図-8に示すように、ケーソン全体を平板要素でモデル化した有限要素法による三次元構造解析を、マウンドに不陸がない場合と不陸がある場合について行い、計算の結果得られる曲げモーメントの差のピーク値をねじりモーメントとした。このねじりモーメントを現行設計法で算出される曲げモーメントに加算した値を、側壁及び隔壁の設計用断面力とし、この断面力に対して所要の配筋を行った。なお、マウンドに不陸がある場合の構造解析には、不陸を考慮した底版の設計で得られる底版反力を荷重として用いた。

(3) 面内力に対しての側壁及び隔壁の補強

図-9に示すように、ケーソン断面を平板要素でモデル化した有限要素法による部分三次元構造解析を行って面内力を受ける面部材の設計断面力を求めた。この断面力に対して、現行設計法によって縦横二方向に配筋された面部材の設計耐力を限界状態設計法¹²⁾により求めて照査を行い、必要に応じ鉄筋の補強を行った。

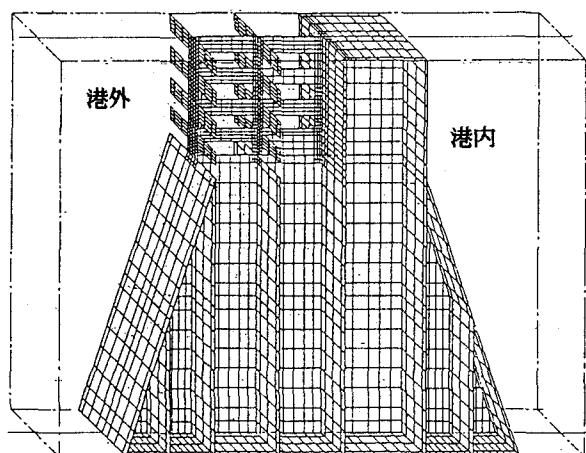


図-9 ケーソン部分三次元構造解析モデル

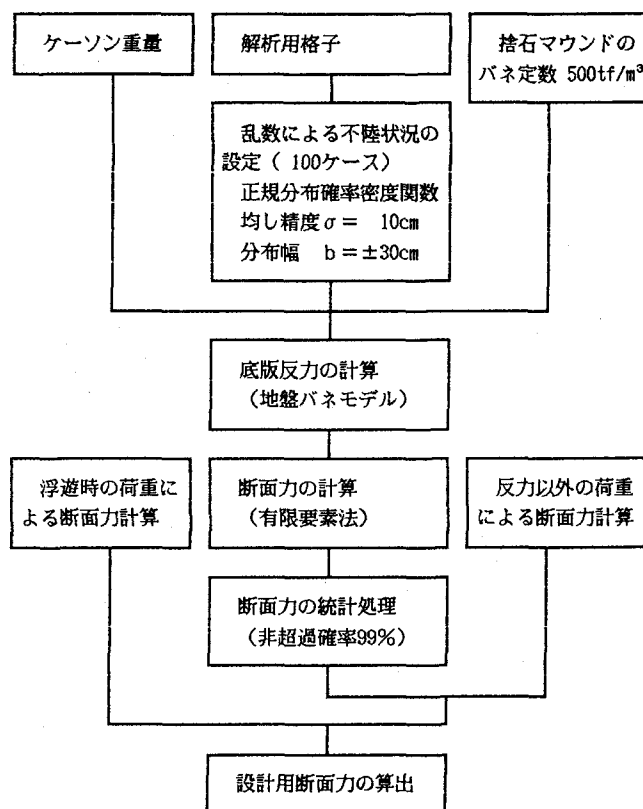


図-7 設計フロー

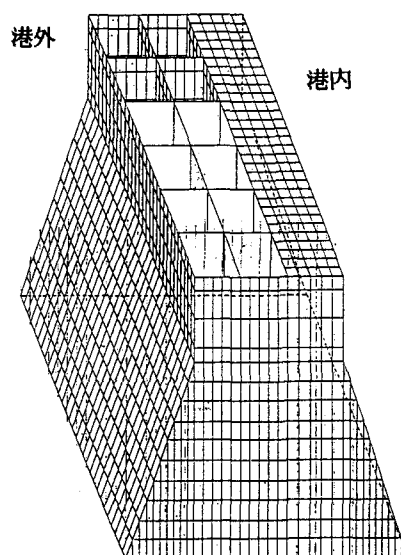


図-8 ケーソン全体三次元構造解析モデル

6. おわりに

釜石港において運輸省第二港湾建設局が製作を開始した湾口防波堤北堤深部3区の大型台形ケーソンの設計の概要について紹介した。本防波堤はこれまでにない大水深に建設されるものであり、これまで多くの技術的な検討を実施してきたが、先に紹介したように本ケーソンの設計は、基本、細部とも従来の防波堤ケーソンの設計法をさらに

進めた考え方で行った。

今回製作を開始したケーソンを、平成元年度末には現在並行して築造中の捨石マウンド上に曳航、据付ける予定である。また、第2号函においては、本ケーソンの設計法の妥当性の確認、さらに南堤の設計へ活用するためケーソン応力、波圧、強震等の観測を行うこととしており、現在そのための作業を進めているところである。

参考文献

- 1) 釜石港港湾管理者：釜石港港湾計画書－改訂－、昭和52年11月。
- 2) 大堀晃一、小谷拓、久米秀俊：釜石港湾口防波堤の設計に関する技術検討、土木学会第10回海洋開発シンポジウム、昭和60年6月。
- 3) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所、日本港湾協会：釜石港湾口防波堤の耐震性調査報告書、昭和56年2月。
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、改訂版、平成元年2月。
- 5) 山本修司、塩沢俊彦：混成式防波堤の最適設計、港湾技研資料№301、昭和53年9月。
- 6) 山本修司、内田豊彦：混成式防波堤の最適設計（その2）、港湾技研資料№347、昭和55年6月。
- 7) 豊田奉節、石井一郎、笹山博：大水深混成堤における直立部形状の検討、土木学会第43回年次学術講演会、昭和63年10月。
- 8) 谷本勝利、木村克俊：台形ケーソンの水理特性に関する実験的研究、港湾技研資料№528、昭和60年9月。
- 9) 久保慶三郎：地震と土木構造物、昭和56年9月。
- 10) 外山進一：ならし精度を考慮した底版の計算、港湾技研資料№512、昭和60年5月。
- 11) 横田弘、南兼一郎、清宮理：ケーソン式港湾構造物への有限要素法の適用、港湾技研資料№403、昭和56年12月。
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書、昭和61年制定、設計編。

