

釜石港湾口防波堤の設計に関する技術検討

運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所

大堀 晃一

正会員 小谷 拓

久米 秀俊

はじめに

釜石港湾口防波堤は、最大水深が 60m を越える大水深の場所に建設される世界でも最大級の防波堤である。現在日本各地で建設されている防波堤は設置水深が 20~30m 以下であり、捨石マウンドの上にケーソンを設置した混成堤型式が一般的である。釜石港湾口防波堤でも今までの検討結果では、この型式を基本とし若干の改良を加えたものが最も有利となっているが、このような 60m を越えるような大水深での防波堤の建設事例はなく、これまでに経験したことのない技術上の課題が多い。そのため、計画決定以来、設計のための調査研究を進めているところである。本論においては、釜石港湾口防波堤が大水深であることから、従来の浅い水深での技術では対処できない特に重要な設計上の 3 つの課題 (i) 耐震設計 (ii) 許容堆し圧 (iii) ケーソンの設計 について調査検討の概要を紹介する。

1. 計画の概要

釜石湾は、記録では明らかなものだけでも明治 29 年、昭和 8 年、昭和 35 年と 3 度の大きな津波に見舞われ、尊い人命と貴重な財産が奪われている。このため、入港船舶の安全及び泊地の静穏化を図るとともに、恒久的津波対策として湾口防波堤の建設が昭和 52 年 2 月に計画決定された。

防波堤位置及び法線形状は、計画津波に対して津波数値シミュレーション及び模型実験を実施し、津波減衰効果について十分な検討を行うとともに、津波時の港内擾乱、荒天時の港内静穏度、漁業活動への影響、海水交換等環境の保全などについて検討し、図-1 に示すように鷺ノ巣崎と太刀根崎との間に延長 990m の北堤、670m の南堤、300m の開口部から成る変形ハの字型となっている。

2. 自然条件

防波堤建設位置の海底地形は、図-2 にみえるように鷺ノ巣崎と太根崎側の岩礁地帯から、防波堤中央部へ向かって急斜面で一気に水深 60m 程度まで落込み、防波堤中央部約 1,100m の間は、海底に平均厚さ 40m 程の堆積層が分布するほぼ平坦な面を形成しており、最深部は水深 63m に達する。

また、三陸沖は低気圧が台風並に発達し停滞することが多く、そのため、相当大きい波浪がしばしば来襲する。確率沖波波高は、波浪スペクトル法及びウィルソン法により推算し統計処理した結果、再現期間 150 年で 9.2m となった。

釜石港に襲来した津波は、明治 29 年三陸地震津波が既往最高で、最大痕跡高は T.P. +6.0~7.9m と推定されている。防波堤の計画、設計においては、この津波の T.P. +7.9m を想定し、周期については詳細なデータはないが、釜石湾の固有振動周期等を考慮し 16 分と決定している。

地震については、宇佐美¹⁾の日本被害地震総覧や文献²⁾に示されている東北地方に震央を持つ地震の震央位置とマグニチュードの分布をみると、釜石付近に影響を与える地震の多発地区は 2 つあることが分かる。三陸沖の日本海溝沿いに発生するマグニチュード 8 クラスの地震群と宮城県沖に震央を持つマグニチュード 7 クラスの地震群である。また、数は少ないが釜石に最も震央に近い地震としては、海域で発生した 1717 年、1772 年の 2 つの地震と内陸で発生した 1931 年の地震がある。地震動によるマウンドの崩壊は構造物の致命的な破壊に結び付く恐れ

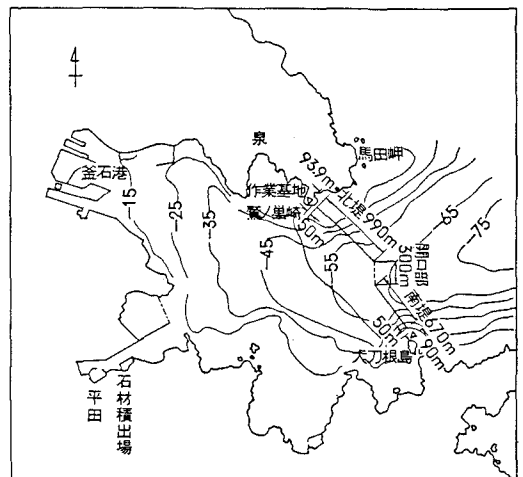


図-1 釜石港湾口防波堤位置図

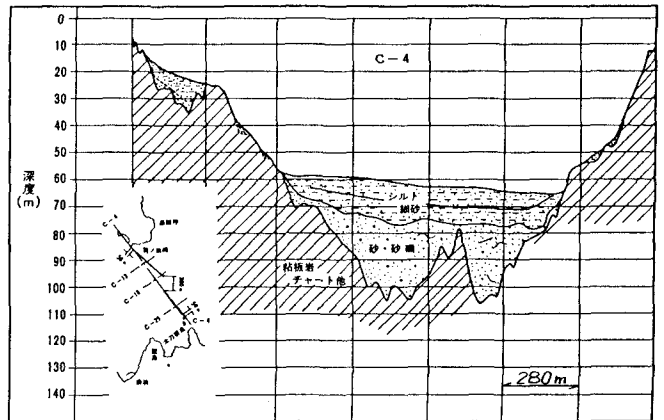


図-2 釜石港湾口防波堤付近の海底地質

があること及び、防波堤が海底地震によって発生する津波の防止機能を持つことを考慮し、防波堤は既往最大級の地震動に対しても耐え得るものであることが望ましい。このため、想定地震動については、既往地震及び研究者が示している断層面を参考とし図-3に示す5種類の断層面及び表-1に示すマグニチュードを想定した。各想定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(断層面距離)により減衰するものとし、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層面距離との関係を求め表-1のように算定した。

表-1 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	マグニチュード	断層面距離	基盤加速度
	傾 斜 方 向	傾 斜 角				
A 地震	N 85° E	45°	180×100	8.3	145	80
B "	N 70° E	20°	180×70	8.1	107	113
C "	N 80° E	20°	30×80	7.4	80	120
D "	N 80° E	20°	40×96	7.6	55	232
E "	* r = 6.3 km		125	6.1	28**	285

*震源域の半径 **実効距離

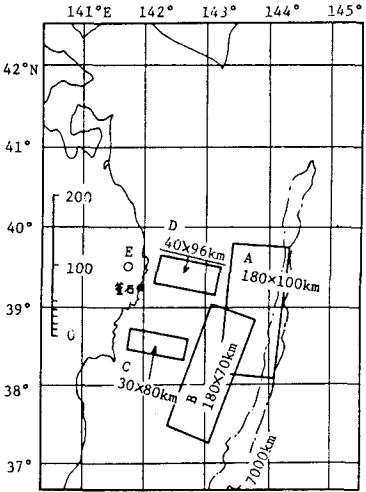


図-3 想定地震の断層面図

3. 設計上の課題

湾口防波堤の構造については、種々の形式について比較検討し、材料の確保が可能で経済性及び施工性等の点で優れているケーソン式混成堤が最適な構造形式として選定された。水深 60m を越える場所でケーソン式混成堤の設計を行う場合の技術上の課題としては以下のような点が挙げられる。

i) 捨石マウンドの天端高を低くしケーソンの設置水深を深くすれば、ケーソン重量は膨大なものとなり、捨石マウンドや海底地盤での支持力を確保することが著しく困難となる。また、ケーソンの製作・据付けも困難になる。逆に、ケーソン設置水深を浅くすれば、捨石マウンド部の断面が増加し捨石材料の確保、経済性の点で不利となる。また、マウンド斜面部での碎波現象に伴う困難な問題が発生する。従って、堤体の安定性、施工性、経済性等の点でバランスの取れた捨石マウンド天端高、ケーソン設置水深とする必要がある。

ii) ケーソン設置水深について、上記のような点について概略の検討を行うと、水深 25~30m 程度が最適となり、現在までの検討によれば図-4に示すような断面が適当であると考えられている。しかしながら、高さ30m以上の捨石マウンド上に 30m を越すケーソンを設置することとなり、このような大形構造物の例は皆無といってよい。水の作用を受ける地震時の堤体の挙動及び大形ケーソンの基礎となる捨石マウンドの締め圧、支持力等マウンドの安定性に係る問題は、一度マウンドが崩壊した場合の影響を想定すると極めて重要な課題である。さらに、水深が60mを越すこのような構造物に対して、従来の波圧力、津波力等の公式をそのまま適用できる保証はなく実験により確認する必要がある。

iii) 大形ケーソンの設計についても、従来の延長上では締め圧、支持力の問題に対処できないため、ケーソン形状の合理化、中詰材の軽減等の思切った工夫を取入れる必要がある。

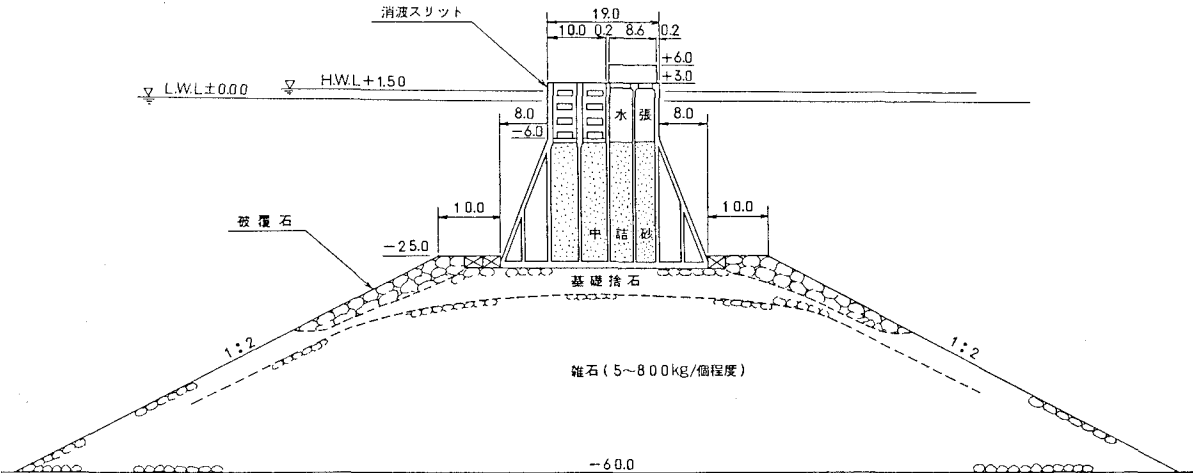


図-4 標準断面案 (北堤、水深60m区間)

以下、これらの設計上の課題に絞り、特にii)の地震時の堤体の挙動、iii)の大形ケーソンの問題について現在までに実施した検討の概要について述べることにしたい。

4. 耐震設計

ケーソン設計水深が20mを越す防波堤においては、地震時の動水圧及び堤体の慣性力が大きく、堤体及び基礎の安定性の点で、地震時外力が波圧力よりも支配的になる傾向がある。また、高マウンド上に大形ケーソンを設置した場合には地震応答が著しくなる可能性がある。このため、湾口防波堤の設計に当たっては、図-5に示すフローに沿って耐震性を検討することとしている。図-5に示した耐震設計の考え方は、現行の震度法による設計法を基本としながらも、現行設計法では実際の現象と乖離が著しく、設計の合理性が保証されず不十分であると考えられる部分について、地震応答解析等の手法を取入れようとするものである。以下にその概要を紹介する。

(1) 設計地震動

設計地点に大加速度をもたらすもの及び長周期成分が卓越し顕著な応答を示す恐れのあるものとして、表-1のうちA、D、Eの3地震を選定し地震応答解析を行うこととした。地震応答解析に用いる地震波形は、表-2のとおりとした。なお、遠距離大規模地震であるA地震については、強震観測記録では十分な精度を有していないと考えられ、土田、井合³⁾の提案する広帯域入力地震合成法による波形を用いることとした。

(2) 地盤の土質条件、マウンド材の物性値

海底地盤の土質条件の設定に当たっては、建設地点の最大水深が63m、延長約2.0kmのうち水深50mを越す区間が約1.5kmに及ぶことから、我が国の港湾構造物建設史上例をみない大水深の土質調査が必要であり、このため、港湾技術研究所で開発された海底着座型土質調査機(MAS 図-6)が採用された。

MAS-78は、釜石湾湾口防波堤の土質調査のために、本格的な実用機として第二港湾建設局において製作されたものであり、船上の制御室から遠隔操作により海底に着座させた調査機が地盤を掘削し、不攪乱試料採取及び水中N値試験を行うことができる⁴⁾。地震応答計算等に必要となる海底の土質条件はMAS-78で採取した不攪乱試料を用いた各種試験により、また、基盤層は弾性波探査の結果により設定した。

マウンドの材料常数等については、マウンド材料が大きな割石であり、通常の試験装置を用いて試験することが不可能なので、大船渡湾湾口防波堤の強震観測記録に基づいた地震応答計算より推定⁵⁾した。

(3) 地震応答解析

釜石湾湾口防波堤は混成堤であり、地震動による防波堤の挙動は一種の構造物-地盤連成系と考えられる。また、防波堤はほとんどが海中にあり構造物-水連成系でもある。さらにマウンド材及び海底地盤は非線形性を示しており、地震時における混成堤は非常に複雑な動力学的特性を有している。そこで上記の特性を考慮し、地震応答解析では2種のモデルを用いている。

第1のモデルは材料の非線形性、つまり、せん断弾性係数及び減衰常数のひずみ依存性を考慮できるものである。このプログラムとしては、等価線形手法を用いた有限要素プログラムであるFLUSH⁶⁾を用いた。また、FLUSHでは構造物周囲の水及びマウンド内の間隙水の影響を考慮できないため、振動模型実験及び大船渡湾湾口防波堤の強震観測記録に基づく検証を行った上で付加質量の形で考慮した。

第2のモデルは、同じく有限要素法であるが、動水圧の評価ができるように防波堤とその周辺の水との相互作用を取り込んだモデルである。ただし、このモデルはマウンド材料として線形なものしか設定できないため、第2のモデルによる応答計算では、第1のモデルによる応答計算の結果を参考にして材料の非線形性を応答計算

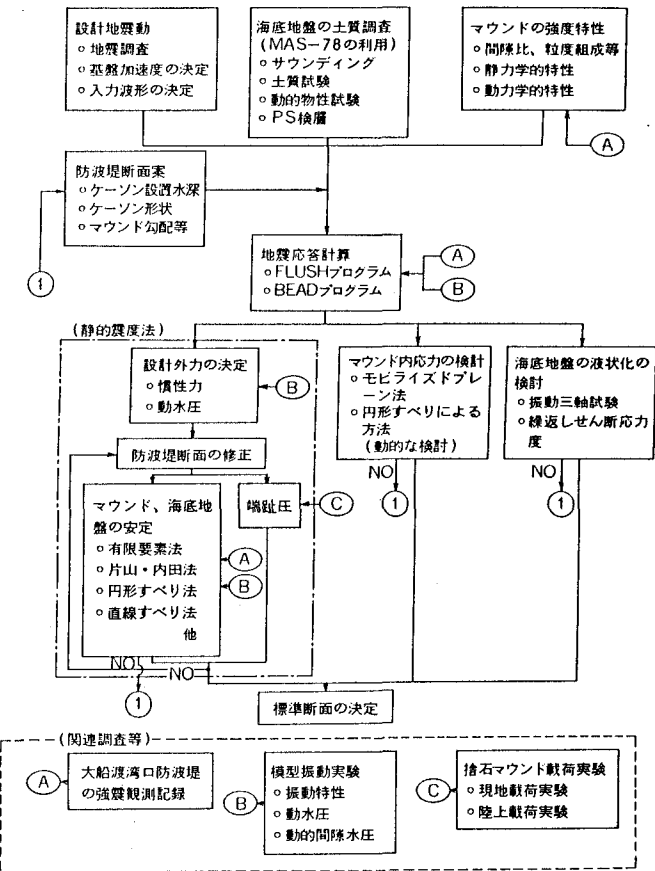


図-5 耐震設計のフロー

表-2 設計に使用する地震動

地震名	基盤加速度	入力波形
A地震	80gal	広帯域入力地震波形(大船渡E-W)
D地震	230gal	宮城県沖地震(大船渡記録E-W)
E地震	285gal	Park field地震(Tembler地震)

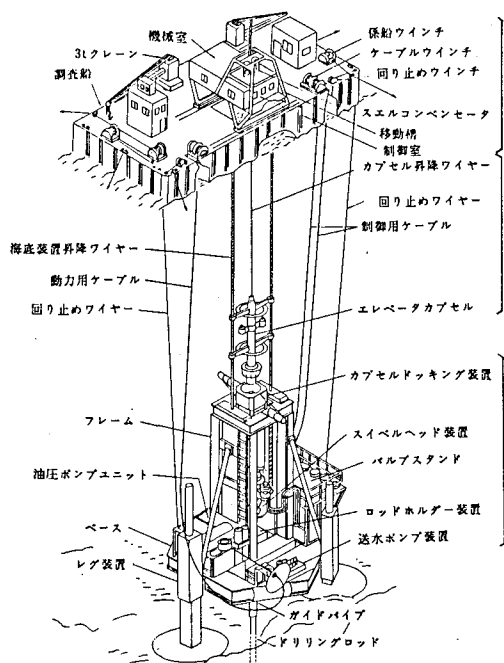


図-6 MAS-78装置概念図

直壁に対してはWestergaard式を、同じく斜面壁に対しては Zanger式を適用できることを確認して、それぞれの公式を用いることとした。

混成堤のマウンドの安定性については、マウンドに作用する慣性力及び動水圧、さらにマウンド内部に発生する動的間隙水圧を評価し安定計算に取入れる必要がある。現在の震度法による検討では、これらの外力をどのように取り扱うかは明確にされていない。地震時のマウンド内の動的間隙水圧の発生・消散メカニズムについては未だ研究段階であるが、マウンドの透水性について相似則を満たした条件での振動模型実験が港湾技術研究所で実施されており²⁾、マウンド内部で動水

圧の発生が確認されている。これがマウンドの安定に対しどのように影響するか定量的な評価はなされていないが、定性的には次のように考えられる。震度法を適用した円形すべり法では、図-7 に示すように、ある仮定したすべり面より上の土塊に慣性力が作用する一方で、すべり出そうとする土塊の部分の空隙が増大する傾向となり負の間隙水圧が増大するため、マウンドの安定性を増す作用をすると考えられる。実際に、第二港湾建設局で実施した振動模型実験結果について、実験に用いられた材料の強度常数等を用いて円形すべり法により検討を行ってみると、マウンド材に作用する慣性力をそのまま外力として取扱うことは明らかに過大な設定であることが確認されている。動的間隙水圧を考慮した安定性検討手法の開発が必要となっている。

震度法によるマウンド及び地盤の安定性の検討手法としては、種々のものがあるが、一般の設計で用いられる円形すべり法、片山-内田法及び直線すべり法³⁾による他、小林⁴⁾が最近開発した弾-粘塑性理論による計算方法を取入れた有限要素法による検討も行うこととしている。有限要素法による検討は、円形すべり法のように破壊線を予め設定する必要がなく、また、複雑な条件に対しても解析が可能で、強度常数を適切に設定すれば、任意のマウンド形状に対しても極限支持力を計算できる。この有限要素法による検討に当たっては、大船渡湾口防波堤において観測された宮城県沖地震(1978)の強震記録をもとに計算を実施し、有限要素法の適用性を検討するとともに安全率の設定を行った。また、弾性係数等のモデル常数を適切に設定することができれば、有限要素法により沈下量についても精度のよい推定が可能であろう。破壊に至らないまでもマウンドの大きな沈下変形は設計上重要な問題であり、今後さらに検討を進めることとしている。

に反映するものとした。この水-構造物連成系の地震応答プログラムとしては、横浜調査設計事務所が開発したプログラムBEAD (Bank Earthquake Analysis with Dynamic Water Pressure)を用いた。

設計震度の設定、マウンドの安定性の検討、液状化に対する検討にはFLUSHによる計算結果を、動水圧の検討、振動モード、防波堤の固有振動数の検討にはモード解析プログラムであるBEADによる計算結果を用いることとした。

(4) 震度法による耐震設計

基礎の支持力の検討を行う場合、一般の港湾構造物の設計と同様に設計震度を決定して行う方法と、地震応答解析計算により求まるマウンド及び地盤内の動的応力度を用いて検討する方法が考えられる。湾口防波堤の検討に当たっては、震度法による検討を基本としたが、後者の方法についても参考的に実施している。

震度法による検討では、地震応答計算で得られた最大加速度分布より、ケーソン部に1つの設計震度を決定し、この設計震度から堤体に作用する慣性力及び動水圧を計算で求めることとした。また、動水圧は振動模型実験による検証及びBEADによる検討計算の結果から、ケーソンの鉛

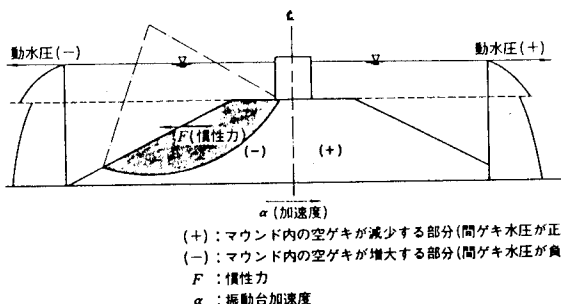


図-7 すべり土塊に作用する慣性力、動水圧及び動的間隙水圧の関係

(5) 動的な耐震設計

大規模フィルダムの耐震性の検討においては、地震応答解析の結果を数値的に解析しようとする方法が盛んに研究されている。これらの検討手法についても補助的に用いることとした。

静的解析により計算される初期応力と地震応答解析によって計算された動的応力を重ね合わせたマウンド内の合応力を用いて、(i)モビライズド-プレーン法¹⁰⁾ (ii)任意の円形すべり線を設定する方法¹¹⁾によりマウンドの安定性を検討した。ここで、(i)のモビライズド-プレーン法とは、任意の時刻における要素毎のモークロンの破壊基準への接近度である局所安全率 ($F_s = \tau_r / \tau = \{2C \cdot \cos \phi - (\sigma_1 + \sigma_2) \sin \phi\} / (\sigma_1 - \sigma_2)$ で表わされる。)を求め、それが1.0以下になる要素に着目し、最も滑る可能性の高い面(主応力から $\pm(\pi/4 + \phi/2)$ だけ傾いた面で、モビライズド-プレーンという。)の方向を求め、隣接する要素毎のモビライズド-プレーンの連なりから、マクロ的な破壊を判定する方法である。その検討結果の1例を図-8に示す。また、(ii)の任意の円形すべり線を設定する方法とは、すべり線が切る総ての要素について、すべり線上に作用するせん断応力と抵抗応力を求め、安全率を定義する方法である。安全率は、

$F_s = (\sum \tau_{ri} \cdot li) / (\sum \tau_i \cdot li)$ で表わされる。ここで、 li はすべり線が通過する任意の要素*i*のすべり線長である。また、 τ_{ri} はすべり線上の抵抗応力であり $\tau_{ri} = C + \sigma \tan \phi$ で表わされ、 τ_i はすべり線上のせん断応力である。その検討結果の1例を図-10に示す。これらの検討手法によっても一応の安定性を確認できたが、前にも述べたようにFLUSH等ではマウンド内の間隙水圧は考慮し得ず、計算で求めるマウンド内の有効応力状態は実際とは異なると考えられる。しかし、これらの新しい手法は有効であると考えられるので、今後さらに検討を進める必要があろう。

海底地盤の液状化については、MAS-78で採取した不攪乱試料の振動三軸試験を行って評価した液状化強度と、地震応答解析で計算された地盤のせん断応力から液状化の可能性について検討を加えた。

5. 許容擁し圧の検討

捨石マウンド上の港湾構造物の支持力の検討では、従来、マウンド上面での擁し圧を $40 \sim 50 \text{ tf/m}^2$ 以下に制限する方法が取られており⁸⁾、大水深で大形ケーソンとなった場合は、この擁し圧の制限により堤体幅が決定されることが多くなる。 $40 \sim 50 \text{ tf/m}^2$ という許容値は、基礎マウンド形状、堤体幅等に関係なく経験的に決定されているものであり、釜石港湾口防波堤のように従来の設計条件の範囲を大きく越えるものに対してもそのまま適用することには問題がある。このため、許容擁し圧について抜本的な見直しを行う目的で、第二港湾建設局において現地載荷実験(図-9)等を行い検討を進めているところであり、現在のところ一般的にいえる結論までは出ていないが、条件によっては 50 tf/m^2 を越す擁し圧を許しても良い場合があるようであり、支持力の問題としての解析を進めているところである。また、実験では、 50 tf/m^2 を越す大きな圧力がマウンドに働くと、割石の破碎に起因すると思われるマウンドの変形がみられているが、 90 tf/m^2 ぐらいまではあまり大きな変形を示していない。現地載荷実験結果の1例を図-11に示す。空隙の極めて大きい捨石マウンドの強度の評価については、莊司¹²⁾が大形三軸圧縮試験を行って検討したもの他は、ほとんど研究が進められていない現状であり、割石の破碎現象を伴うマウンド材の強度等の評価は、今後の大水深港湾構造物の設計に当たって重要な課題の1つとなる。

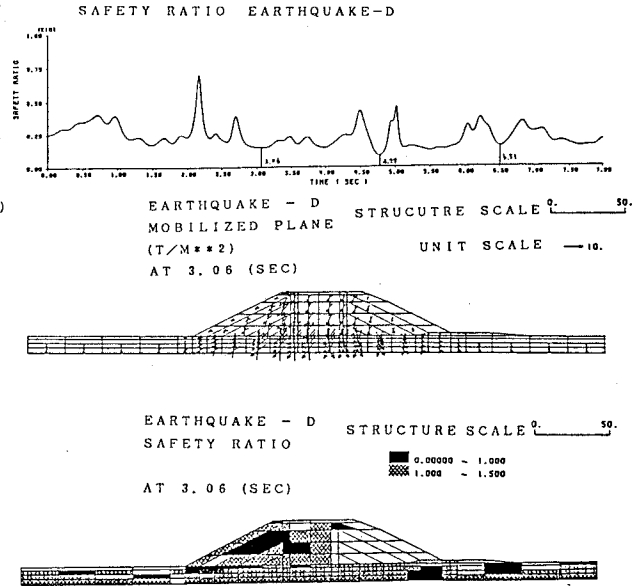


図-8 モビライズド-プレーン法による検討結果の例

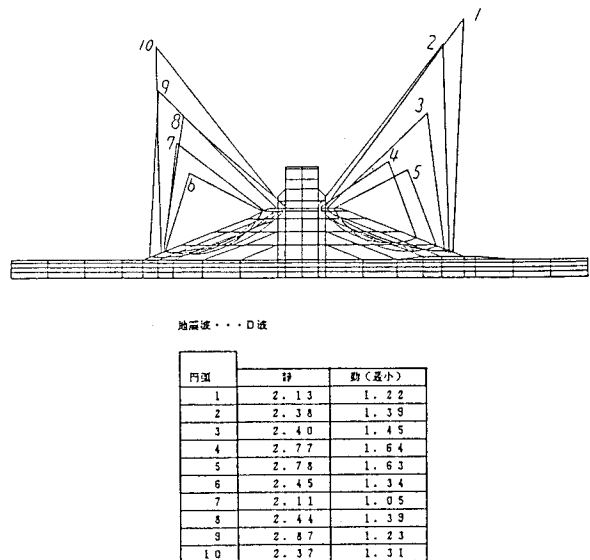


図-9 任意の円形すべり線を設定する方法の検討結果の例

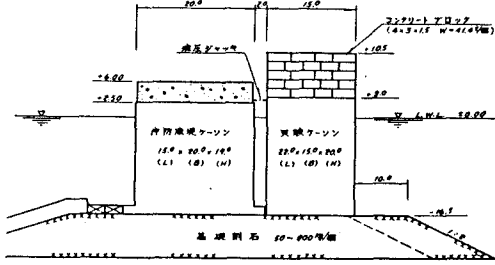


図-10 現地載荷実験概要図(於 小名浜港)

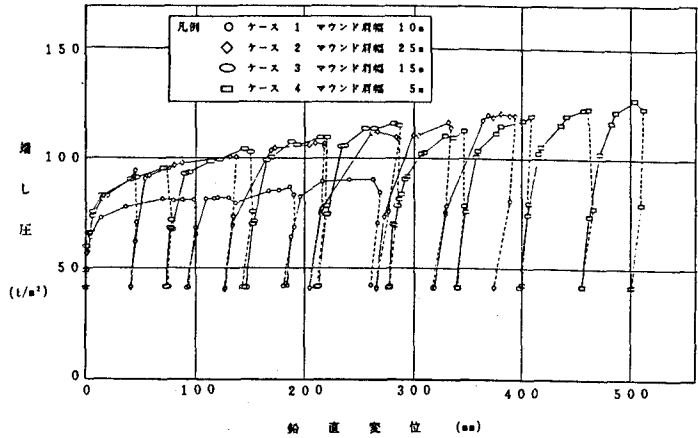


図-11 現地載荷実験結果の1例(端し圧と鉛直変位との関係)

6. ケーソン形状の検討

以上に述べたとおり、水深 30m程度にケーソンを設置する場合、マウンドの支持力が大きな問題となる。マウンドの支持力についての検討と平行して、ケーソンの設計に当たっても、ケーソンに働く外力を軽減し、マウンドに対する端し圧等の条件を緩和するように努めることとした。

種々のアイデアについて検討した結果、(i)台形型、ロケット型等の広底版を有する異形ケーソンを用いること、(ii)中詰材を適度に減らし水張り部を設けることが有効であることが判明した。特に台形型のケーソンは側壁に斜面部を有するため、地震時の動水圧及び波力を軽減することができ、また、有限要素法による構造解析を行った結果では、隔壁等の部材でせん断応力の集中が少ないなど優れた点が多く、製作の面や浮遊時の安定性の点でやや問題はあられるかもしれないが、大水深域では極めて合理性の高い形状であることが明らかとなった。

おわりに

ここまで、釜石港湾口防波堤の設計を進める上で問題となった点、特に耐震設計の考えかた等について述べてきた。しかし、本文でも述べたとおり捨石マウンドの地震時の挙動や強度については、未解明な点が数多く残されており、設計面でも改善する余地も少なからず残されている。これらの問題は、今後の大水深港湾構造物、海洋構造物の建設にとっても重要な課題となるものと思われる。本稿では、触れることはできなかったが、釜石港湾防波堤の建設に当たっては、施工技術の点でも、捨石マウンドの築造、大形ケーソンの製作・据付け等、数多くの課題があり、これまでに多くの技術開発が実施されている。

参考文献

- 1) 宇佐美 龍夫：資料 日本被害地地震総覧，東京大学出版会，1975年3月
- 2) 気象庁：日本付近の主要地震の表(1926年～1956年)，地震月報 別冊1，1958年6月
勝又 護：最近の顕著な地震の表(1951年～1960年)，地震時報，26巻 4号，1961年
徳水 規一，勝又 護：最近の顕著な地震の表(1961年～1970年)，地震時報，36巻 3,4号
- 3) 井合 進，土田 肇：広帯域入力地震動の合成方法の提案，港湾技術研究所報告，Vol.19，No.1，1980年3月
- 4) 平野 忠告：海底着座土質調査機による釜石湾口防波堤土質調査，第27回全国港湾工事報告会報告概要，日本港湾協会，1981年12月
- 5) 上部 達生，土田 肇，倉田 栄一：大形混成式防波堤の強震観測記録に基づく水一構造物連成系の地震応答解析，港湾技術研究所報告，Vol.22，No.2，1982年6月
- 6) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.-F. and Seed, H.B.: FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, EERC 75-30, 1975
- 7) 港湾技術研究所，地震防災研究室：混成防波堤の振動実験報告所，1978年3月
- 8) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1979年3月
- 9) 小林 正樹：地盤の安定・沈下解析における有限要素法の活用，昭和58年度港湾技術研究所講演会講演集，1980年4月
- 10) 渡辺 啓行，馬場 恭平：ロックフィルダムの耐震設計手法に関する一考察，電力中央研究所報告，379027，1980年4月
- 11) 渡辺 啓行，馬場 恭平，平田 和太：フィルダムの動的解析に基づくすべり安定検討手法の一考察，電力中央研究所報告，381020，1981年12月
- 12) 荘司 喜博：大形三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察，港湾技術研究所報告，Vol.22，No.4，1983年12月