

多層マウンド上のケーソンと波の 非線形相互作用に関する研究

NONLINEAR INTERACTIONS BETWEEN WAVES AND A CAISSON
CONSTRUCTED OVER A MULTI-LAYERED BASE

水谷法美¹・モスタファアイマン²

Norimi MIZUTANI and Ayman M. MOSTAFA

¹正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 博士(工学) 名古屋大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻(同上)

A study has been conducted to investigate the nonlinear interactions among waves, composite breakwater and a multi-layered base. The problem has been simulated numerically by two models, BEM-FEM model and poro-elastic FEM model. These models, developed by the authors, can simulate the nonlinear wave field and its interactions with the porous media. Modifications have been made in the models to account for the multi-layered base and applications have been made to various configurations and properties of the breakwater. It has been found that the nonlinear effects become more significant in case of a high base and the fine material of the base may suffer from tensile stresses. The base may also fail at smaller wave heights than that needed for causing a failure in the caisson.

Key Words : Wave-structure-foundation nonlinear interaction, multi-layered base, composite breakwater, stability analysis

1. 緒言

混成堤は日本で最も広く採用されている防波堤の一形式である。最近、混成堤の動的な耐波安定性を解析する手法の一つとして、海底地盤の波浪応答まで含めた波・構造物・海底地盤の相互作用問題の数値解析手法がいくつか提案されている^{1) 2)}。一般的な混成堤は、いくつかの材質により複数の層で構築された捨石マウンド上に鉛直壁を持つケーソンを有する構造であるが、これまでの解析は、波・構造物のみの相互干渉問題も含め、マウンドを単層の均一透水性マウンドとして取り扱っている^{1) 3)}。

一方、最近ではマウンドの天端を高くし、ケーソンを小さくする高基混成堤が提案されている^{4) 5)}。これにより、建設コストの軽減が可能であるだけでなく、ケーソンの小型化により耐波安定性を向上させることも可能である^{4) 5)}。マウンドの天端水深が浅くなると、波と構造物の相互作用における非線形性は強くなると同時に、マウンドの層の性状を含めた多層系の影響も重要になると考えられる。

また、マウンドの建設コストを軽減させるために、捨石マウンドの粒径を小さくすることが考えられる。

マウンド構成材自身の耐波安定性が確保されれば、マウンド内部の間隙水圧などは粒径が小さいほど鉛直方向の減衰が大きいという利点もある。したがって、波・構造物の相互作用問題は、マウンドを多層系として扱ってこれらの効果を検討しておく必要がある。しかしながら、これまで多層系マウンドを考慮した波・構造物の非線形相互作用問題はほとんど解析されておらず、その実態は解明されていない。

本研究は、著者らの開発した数値解析手法¹⁾を多層系マウンドを有する混成堤の非線形相互作用問題へ拡張し、多層系マウンドがケーソンの耐波安定性に及ぼす影響や、多層系マウンド自身の波浪応答とそれにとりもなう不安定性について考究するものである。

2. 数値解析

図-1に本研究で対象とする構造物の概略を示す。構造物は、基礎マウンド上に構築された捨石マウンドとその上に設置される不透過ケーソンにより構築される。簡単のため、基礎マウンドは二層からなり、下層は上層よりも粒径の小さい材質で構築されると

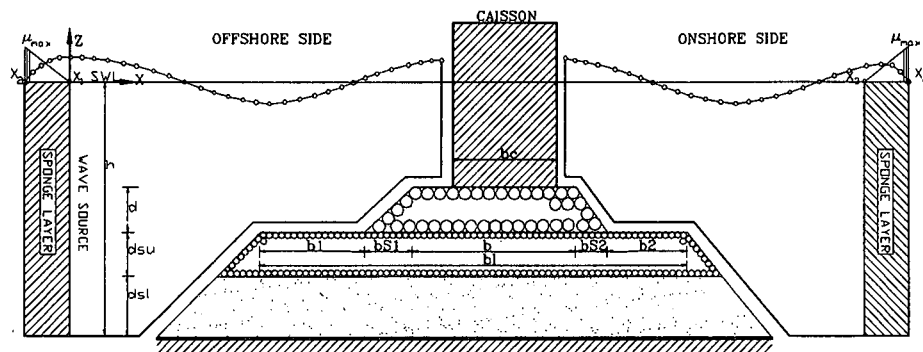


図-1 モデルの概念図

する。

まず、計算領域を、構造物の沖側と岸側の波動場と基礎マウンドと捨石マウンドで構成される透水層に分ける。

構造物の沖・岸側の波動場領域では、非圧縮性完全流体の非回転流れを仮定し、速度ポテンシャルと水位変動を未知数として境界要素法による定式化を行う。一方、透水層内部の流れ場は非圧縮性流体の回転運動を仮定し、水平・鉛直流速 u と w 、および圧力 p を直接有限要素法によって定式化する。さらに、波動場と透水層の境界面上で、流量と圧力の連続条件を課し、両者を同時に解いて波動場と流れ場の時間発展の計算を行うBEM-FEMモデルで解析する¹⁾。

さらに、透水層では、BEM-FEMモデルで計算した透水層表面での圧力を入力とし、Biotの方程式⁹⁾に基づくporo-elastic FEMモデルで波浪応答の解析を行う¹⁾。

計算条件は以下のように設定した。静水深を $h=22\text{m}$ とし、入射波は周期 $T=8\text{s}$ の規則波とした。ただし、波高を 1m から 5m まで変化させた。これはStokes波の2次から

3次近似解に相当する。捨石マウンド高さは $d=3\text{m}$ 、二層で構成される基礎マウンド高さは $ds=7.5\text{m}$ （上層厚 $dsu=3.0\text{m}$ 、下層厚 $dsl=3.5\text{m}$ ）とし、法面勾配は沖側が $1/2$ 、岸側が $1/1.5$ とした。また、構成材の中央粒径を、特別なケースを除き、捨石マウンドで $D_s=70.0\text{cm}$ 、基礎マウンド上層部で $D_f=20.0\text{cm}$ 、基礎マウンド下層部で 0.1cm とした。

3. 結果と考察

(1) 水位変動

図-2にケーソン前後の水位変動の時間変化を例示する。ケーソン前面（沖側）では波の重複により波高は入射波高の約2倍程度となる。一方、ケーソン後面（岸側）での波高は入射波高の約0.2倍と小さいものの無視できない大きさの波が透水層を通じて港内側に伝播しうる。

図-3と図-4に各点の水位変動を調和解析を行って求めた3次までの調和成分の振幅の空間変動と重複波の節の位置の近傍における水位変動の時間変化を例示する。ケーソン前面では高次の調和成分の混在が顕著であり、特に節の位置では3次の調和成分も有意な大きさとなっていることがわかる。

一方、構内側では、水位変動は有意な大きさであるが、高次周波数成分は港内側ではほとんど認められず、透水層が高次周波数成分のフィルターの機能を果たしているといえる。

(2) 水粒子速度

沖側の基礎マウンド表面（斜面上と天端上）における接線流速の時間変化を図-5に示す。また、基礎

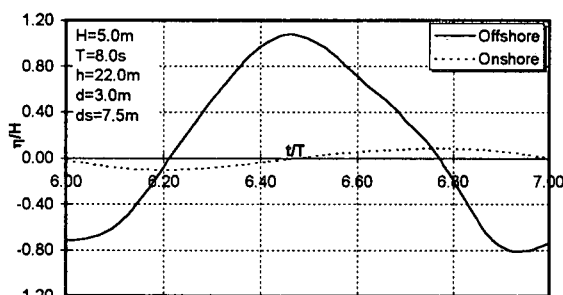


図-2 ケーソン前・後面の水位変動の時間変化の例

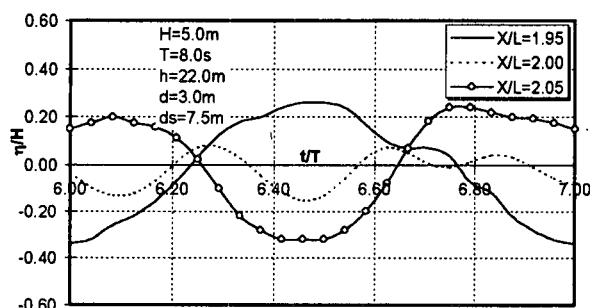


図-3 節の近傍における水位変動の時間変化の例

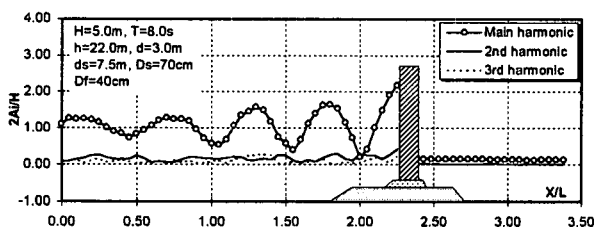


図-4 水位変動の高次周波数成分の空間変化の例

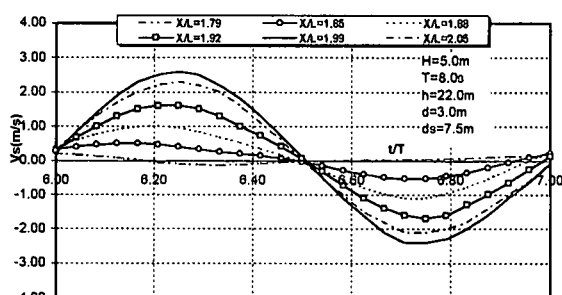


図-5 基礎マウンド表面の接線方向流速の時間変化

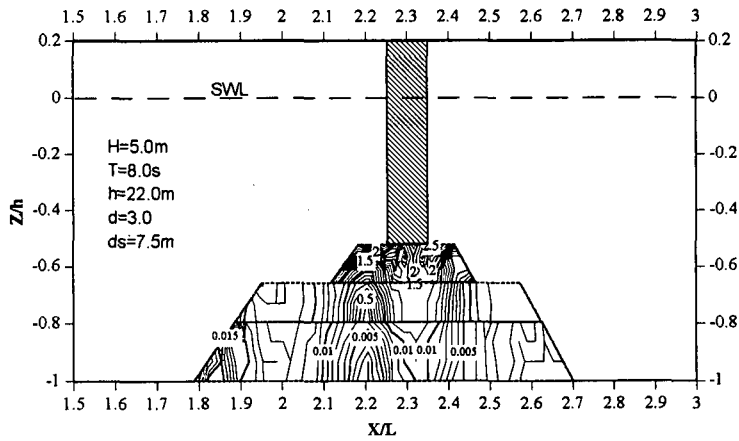


図-6 マウンド内の流速の最大値の分布

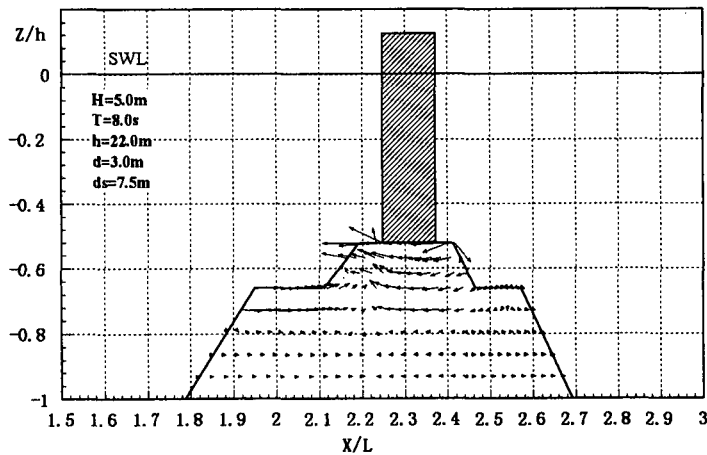


図-7 流速ベクトルの空間分布の例

マウンド、および捨石マウンド内における実流速の最大値の空間分布を図-6に、また、ケーソン前面の水位が谷の位相での流量流速ベクトルの空間分布を図-7にそれぞれ示す。基礎マウンド内の上層部における流速は、下層部の流速に比べて非常に大きくなっていることが明瞭に認められる。この不連続性は、透水層の粒径やそれにとりまう抵抗の差によって生じる結果であり、本計算手法が境界面で接線方向流速の連続条件を課していないために再現が可能となっている。上層部の粒径 D_f が流速に及ぼす影響を調べるために、異なる D_f に対して基礎マウンド内の境界面における上層と下層の水平方向流速の時間変化を比較したのが図-8である。

D_f が小さくなるにしたがい、上層の流速は小さくなる。しかし、下層の流速は D_f が10倍以上変化してもほとんど差は生じない。また、 D_f が小さい場合には、上層と下層で流速に大きな位相差はないが、 D_f が大きくなると両層における流速に大きな位相差が生じる。この位相差は、上層の速い流れによる下層表面の洗掘や吸い出しなどの破壊を助長する一要因でもと考えられ、このような粒径の異なる層間には、ジオテキスタイルのようなシート等による保護工の設置の検討が必要と考えられる。

(3) ケーソンの作用波力

ケーソン表面の圧力の積分により求めた波力と転倒モーメントを図-9に例示する。なお、ケーソン前面の作用波力 F_{XL} は岸向きが正、後面の波力 F_{XR} は沖向きが正である。ケーソン前面の作用波力は非線

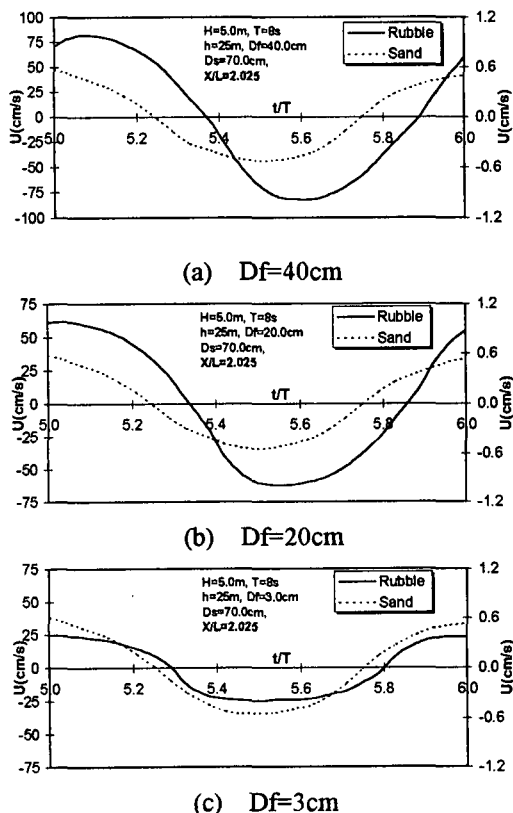


図-8 基礎マウンド境界面での水平方向流速

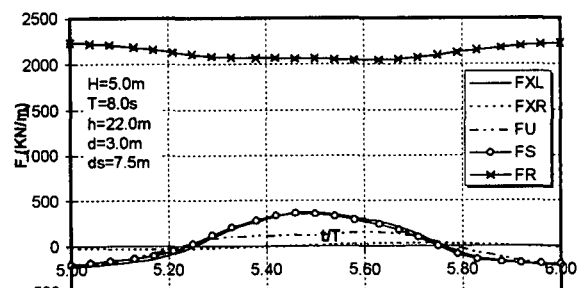


図-9 ケーソンの作用波力の時間変化

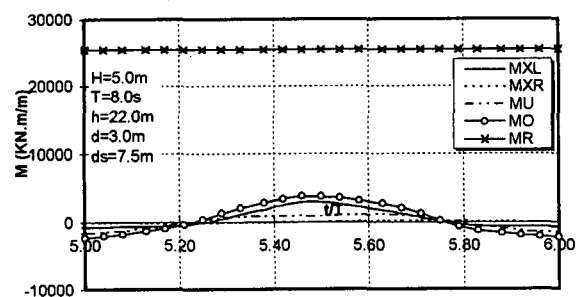


図-10 後趾端周りの転倒モーメントの時間変化

形性を帯びた波形となっており、正方向の波力は負方向波力の約2倍程度の大きさになる。一方、後面のFXRには、FXLとの間に位相差があり、また、値はFXLの約10%程度である。ただし、波形は上下非対称な波形になっている。これらは、波動場に含まれる高次周波数成分の効果によると考えられる。

一方、揚圧力FUもやはり非線形な挙動を示す。FUの大きさはFXLの約40%～50%であり、また、FXLとの間に若干の位相差がある。ただし、揚圧力に関しては、負の値、すなわちマウンドに向かう力が上向きの値よりも大きい。これは、主にケーソン前面に作用する岸向きの波力がケーソンを押しつける作用をすることによると考えられる。

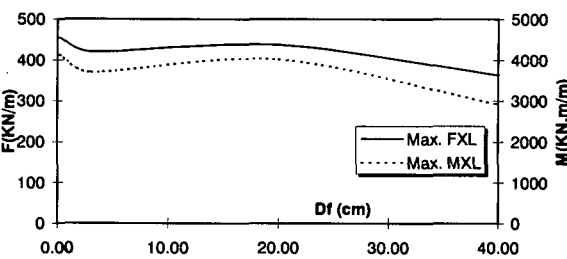
図-10はケーソン後趾端周りの転倒モーメントを例示したものである。なお、図中、MXL、MXRとMUはそれぞれFXL、FXRとFUによって生じる後趾端周りのモーメントの成分である。なお、基本的に時計回りを正としているが、MXRのみ反時計回りを正としている。

正のMXLは負の値よりも非常に大きくなっているが、MXRとMUは両方向とも同程度の値である。また、MXLの時間変化はFXLと異なり、クノイド波のような形状となる。MUは、ケーソン前面水位が最高点に達する位相の前後でしばらくの間ほぼ同じ値をとり続ける。これはケーソン下部の非線形成分波の干渉によると考えられる。なお、同時に計算した抵抗力FR、抵抗モーメントMRから計算される

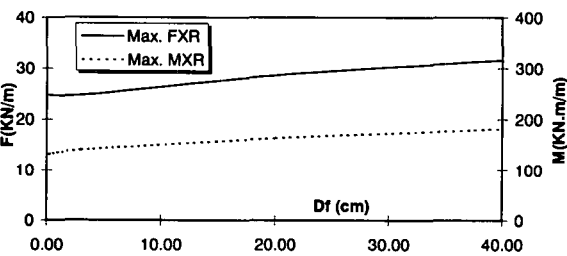
ケーソンの滑動と転倒に対する安全率から本計算条件ではケーソンは充分安定であることが確認された。

基礎マウンドの上層部の粒径Dfが波力に及ぼす効果を図-11に示す。Dfを0.2cmから40.0cmに増加させた場合、FXLとMXLは急激に減少した後、入射波と反射波の干渉により若干増加する。そして、その後再び徐々に減少する。一方、ケーソンの反対側に作用するFXRとMXRは、Dfの増加にともない増加する。これらの結果は、Dfが大きくなることにより、港内側への透過波が大きくなると同時に、ケーソン前面での反射波が減少することによる。これに対して、揚圧力FUとそれによるMUはDfの増加に対してわずかに増大する程度である。

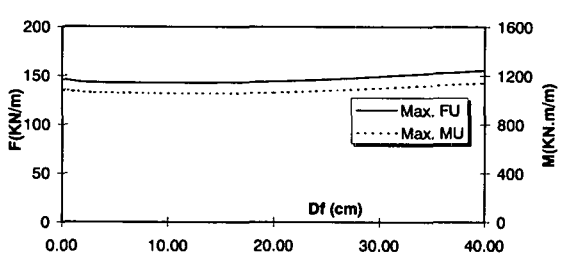
上記Dfの効果は捨石マウンドの粒径Dsの場合も同様に現れる。図-12は、Dsを20cmから70cmまで増加させた場合の波力とモーメントの変化を示した例である。FXLとMXLはDsが増加するにしたがって、多



(a) FXL, MXL

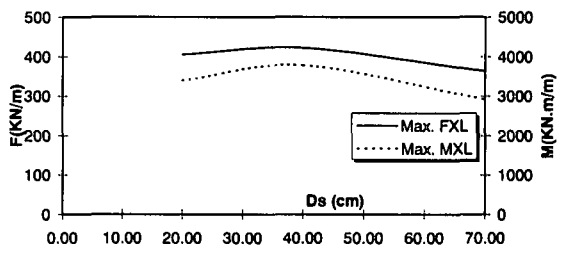


(b) FXR, MXR

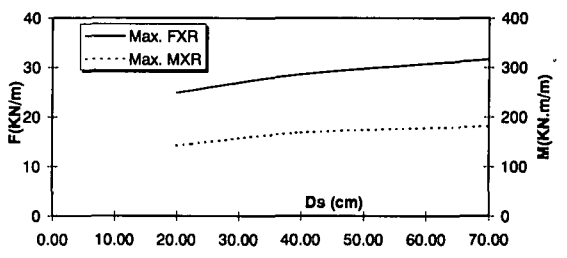


(c) FU, MU

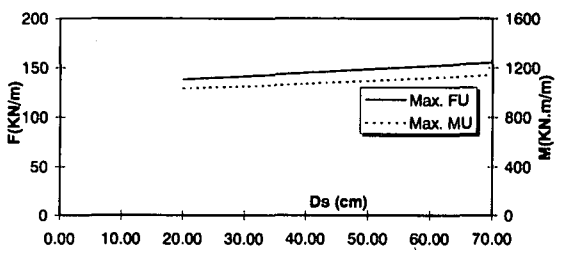
図-11 波力とモーメントに及ぼすDfの効果



(a) FXL, MXL



(b) FXR, MXR



(c) FU, MU

図-12 波力とモーメントに及ぼすDsの効果

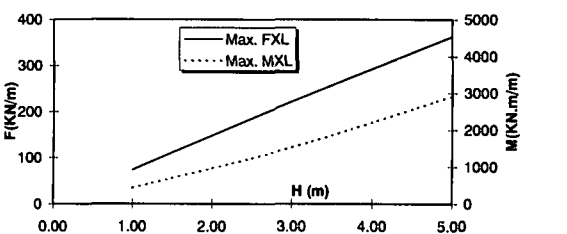


図-13 FXL, MXLに及ぼす波高の効果

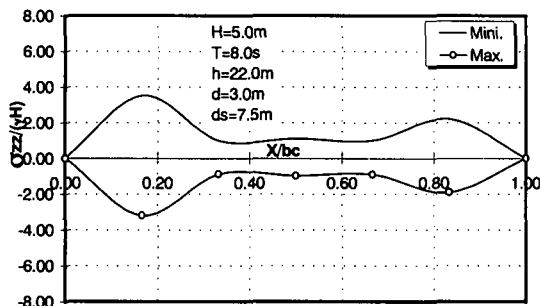


図-14 ケーソン下面に作用する鉛直有効応力

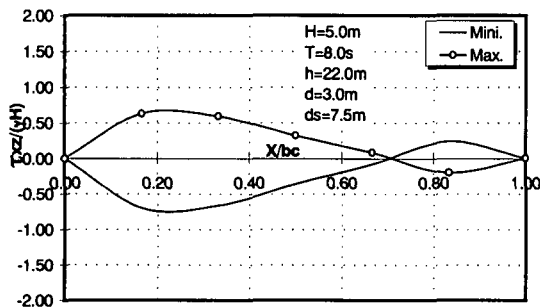
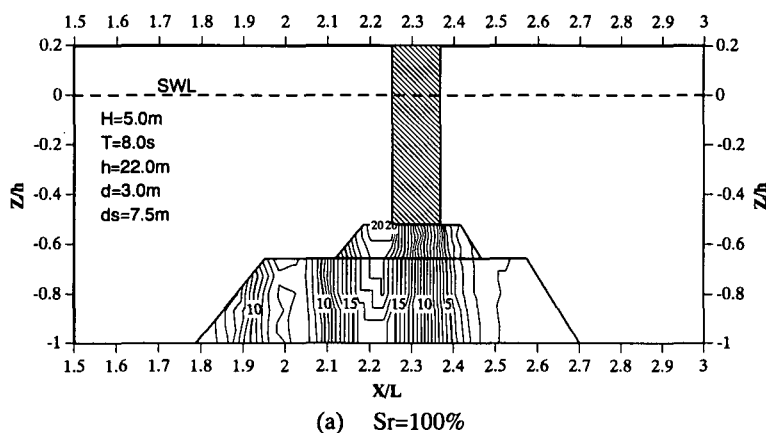
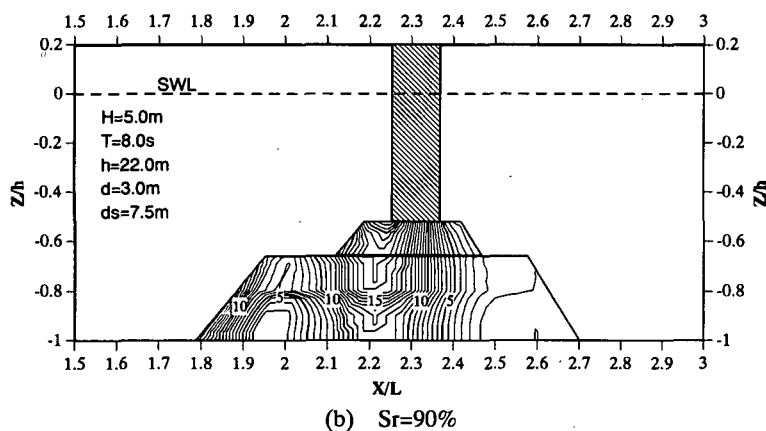


図-15 ケーソン下面に作用するせん断力

少ではあるが一度増加し、その後減少する。しかし、FXRとMXRはDsの増加とともに大きくなる。これらの結果もDfの場合と同様、反射波と透過波の差による。一方、FUとMUは、Dsが大きくなると若干大きくなる。これは捨石マウンド内の流速の振幅がDsが大きくなるにともない増大し、これにともな



(a) $S_r=100\%$



(b) $S_r=90\%$

図-16 マウンド内の間隙水圧の分布

圧力の振幅も増大するためであると考えられる。

図-13は、波高の増大にともなう波力とモーメントの変動特性について、FXLとMXLの場合の結果を示したものである。波力に対しては、ほぼ線形的な増加傾向を示しているが、モーメントについては、わずかであるが下に凸となる変動特性となっている。これは、水位変動の効果と考えられる。

(4) マウンド内の応力と間隙水圧

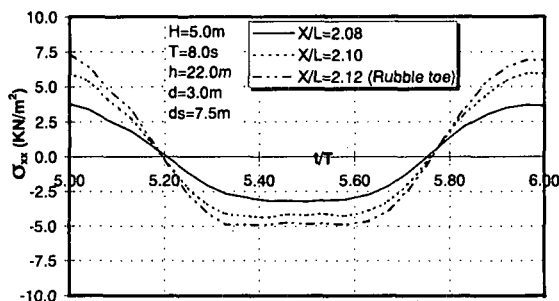
ついでporo-elasticモデルによる堤体内の応力と変位について考察する。なお、せん断弾性係数は、捨石マウンドは 2×10^7 N/m²で一定としたが、基礎マウンドは、深さ方向に変化させ、最上層の 2×10^7 N/m²から最下層の 5×10^7 N/m²まで増加させて計算を行った。また、空隙の飽和度 S_r は他の研究⁷⁾と同様、90～100%の間で変化させた。さらに、異なる層の等価透水係数はMizutani⁸⁾にしたがって計算した。

図-14にケーソン下面に作用する鉛直有効応力を示す。通常の静的な解析で使われるような線形的な変化とは異なり、鉛直有効応力は、ケーソン両端近傍で極値をとる双峰型の分布となる。この結果は静的な解析と異なる結果であり、したがって、マウンド内の波浪応答は、マウンドの変位を考慮した解析が必要であることが指摘できる。

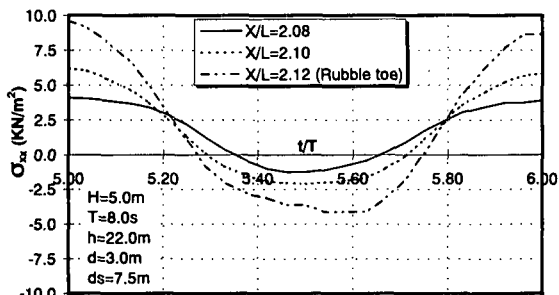
一方、ケーソン下面に作用するせん断力は、図-15に例示するように、後趾端から中央にケーソン幅の約1/3程度離れた位置でゼロとなる非対称な分布形となる。

図-16に飽和度 S_r が100%と90%に対する最大間隙水圧の空間分を示す。水平方向の圧力勾配が捨石マウンド法先付近とケーソン下部の全般で大きくなる。さらに飽和度が小さくなると基礎マウンドの沖側法面で圧力勾配が大きくなる。

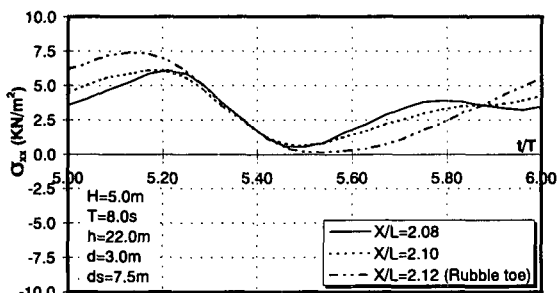
つぎに、マウンドの不安定性が生じる一原因である引張力の発生領域について、基礎マウンドを取りあげて検討する。図-17に高さの異なる3地点における水平有効応力の時間変化を示す。捨石マウンド法先にあたる $x/L=2.12$ では、最も有効応力の変動範囲が大きい。そして、法先から沖側にかけて引張力が発生する。応力の振幅はマウンド表面の $z=-14.5$ mの位置が最大で、 z が小さくなる、すなわち、マウンド内部に進むにしたがって応力の振幅は小さくなり、引張力の発生領域は狭くなる。そして、例示したケースでは、表面から約1.5mの深さで引張力の発生は無くなる。この引張力の発生は、粒子間の拘束力の消失を意味するもので、マウンド構成材の粒径が小さい場合は、局所洗掘などの不安定性の原因になりうるもので、最終的にはケーソンの破壊にまでつながる可能性もある。既述したように、この条件においては、ケーソンは、滑動、



(a) $z=-14.5\text{m}$



(b) $z=-15.25\text{m}$



(c) $z=-16.0\text{m}$

図-17 基礎マウンドの水平有効応力

転倒，さらには過剰応力による破壊に対して安全であった。したがって，ケーソンの限界よりも小さい波でマウンドが破壊する可能性も充分考えられ，基礎マウンドも構築に際して，マウンドの波浪応答を十分検討しておく必要が指摘できる。

4. 結論

本研究では，波，混成堤と多層系マウンドの非線形相互作用について検討を加え，非線形波変形，ケーソンに作用する波力とマウンド内の応力場について考究した。本研究の成果を以下に要約する。

1) マウンド上の混成堤近傍では，高次周波数成分の

波動成分が有意な大きさとなり，非線形性を考慮した波浪変形計算が必要である。

- 2) ケーソン下部の捨石マウンドと基礎マウンド上層部では流速は大きく，その下層表面の粒径の細かい粒子の安定性に影響を及ぼす可能性がある。
- 3) 岸側のケーソン壁面に作用する波力は，マウンド粒径が小さくなり，マウンドの透水性が低くなるほど小さくなる。
- 4) 波高の増大は，揚圧力の高次周波数成分に強く影響を及ぼすが，岸側の壁面の波力には明瞭に影響を及ぼさない。
- 5) ケーソン前面に形成される部分重複波の節にあたるマウンドでは，有意な深さまで引張力が発生しうる。これにより，混成堤の安定性は大きく減少する。
- 6) 基礎マウンドの破壊は，ケーソンの破壊よりもより小さな波で発生しうる。

参考文献

- 1) 水谷法美・Mostafa, A.M.: 混成堤および潜堤の基礎地盤の波浪応答と局所洗掘に関する研究，海岸工学論文集，第45巻，pp.881-885，1998。
- 2) Mase, H., Sakai, T. and Sakamoto, M.: Wave-induced porewater pressures and effective stresses around breakwater, Ocean Eng., Vol.21, No.4, pp.361-397, 1994。
- 3) Sulisz, W.: Numerical modelling of the stability of rubble bases, Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.1799-1809, 1992。
- 4) 高橋重雄・鈴木健二郎・三浦裕信・斉藤祐一: 低天端型防波護岸の越波に関する一実験，海洋開発論文集，Vol.11, pp.193-198, 1995。
- 5) 下迫健一郎・高橋重雄・斉藤祐一・Muttray, M.・Oumerachi, H.・細川泰廣: 高基混成堤の水理特性および耐波安定性に関する大型模型実験，海岸工学論文集，第44巻，pp.826-830, 1997。
- 6) Biot, M. A.: General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., Vol.12, pp.155-164, 1941。
- 7) Hsu, J.R.C. and Jeng, D.S.: Wave-Induced soil response in an unsaturated anisotropic seabed of finite thickness, Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.18, pp.785-807, 1994。
- 8) Mizutani, N., Mostafa, A. and Iwata, K.: Numerical modelling of the nonlinear dynamic interaction between composite breakwaters and waves, Jour. of Hyd., Coast. & Env. Eng., JSCE, Vol.614, pp.121-133, 1999。

(1999. 4. 19受付)