

第 3 章

3

防波護岸の耐波・耐震
安定性評価技術

我孫子研究所 水理部 上席研究員 榊山 勉
 我孫子研究所地盤耐震部 上席研究員 金谷 守
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 栃木 均
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 河井 正
 我孫子研究所地盤耐震部 主任研究員 工藤 康二
 前我孫子研究所 上席研究員 研究参事 鹿島 遼一

3 - 1 防波護岸の設計の基本的な考え方 33
 3 - 2 防波護岸の耐波安定性評価技術の高度化 34
 3 - 3 防波護岸の耐震安定性評価技術の高度化 42



榊山 勉（1981年入所）
 海岸・港湾構造物と波とに関わる研究のなかで、特に消波ブロックに作用する波力や護岸の越波の実験スケール効果をテーマにしてきた。越波現象に関しては数値計算モデルを構築した。現象の解明から設計への対応にわたる研究に取り組んでいる。



金谷 守（1984年入所）
 入所以来、原子力発電所の新立地技術の研究開発に携わってきた。第四紀立地では、基礎地盤の安定性評価技術として地盤の有効応力解析手法を開発し、海上立地では、防波護岸の地震時変形解析手法を中心に研究を行ってきた。今後は、電力施設の性能設計に関する技術開発に取り組んでいきたい。



栃木 均（1985年入所）
 これまで、原子力発電所の人工島式立地方式に係わる防波堤・護岸の耐震安定性に関する研究を行い、DEM-FEMハイブリッド手法によるケーソン式護岸の滑動解析など、消波ブロックとの動的相互作用を考慮した解析手法の検討を行った。今後は、ロックフィルダムなどの耐震性の問題に取り組んでいきたい。



河井 正（1993年入所）
 入所以来これまで、原子力発電所の人工島式立地技術に係わる研究に参加し、特に、カリフォルニア大学デービス校において防波護岸の地震時変形を詳細に把握するための遠心力載荷模型実験を行ってきた。今後は、地盤・構造物系の地震時変形予測、耐震性能評価技術の開発に関する研究に取り組む予定である。

工藤 康二（16ページに掲載）

鹿島 遼一（8ページに掲載）

コラム1 遠心模型実験 ゴジラは東京湾に現れるか? 50

田中 幸久（16ページに掲載）
 河井 正（上記掲載）

3 - 1 防波護岸の設計の基本的な考え方

3-1-1 防波護岸に関する新たな設計概念

外洋に面した海域に構築される人工島式立地発電所の防波護岸は、外洋波浪を直接に受けるので、在来立地の陸地を防護する護岸に比べて重要度の高い護岸として設計する必要がある。人工島の防波護岸に関しては、それ自体は放射性物質の流出防止を目的とした構造物ではないが、これが損傷することによりプラントの安全上許容できない事象の発生(地震あるいは越波に起因する原子炉建屋周辺地盤内の地下水位上昇による建屋の安定性不足、越波による埋立土の流出による屋外安全系設備および屋外放射性流体内包設備基礎の支持機能損傷など)が想定されるため、然るべき機能が維持できる設計が必要となる。機能維持を検討するに当たり、対象とする自然外部事象は波浪と地震である。

防波護岸に要求される機能は、波浪や地震による護岸自身の崩壊を防止する耐波、耐震機能と、埋立地ならびに埋立地内の施設を護るのに必要な防波機能である。ここで、防波機能としては、1)越波を過度に生じさせるような変形を引き起こさず護岸の安定性を保持する機能、2)越波を抑制し、生じた越波水を安全に排水する機能が要求される。

防波護岸の設計の基本的な流れを図3-1-1に示す。ここでは、以下に示すような二段階の設計法を採用することにした。第一段階として、現行の設計法に則り「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁽¹⁾に基づいて、所要の安全率を満足する基本断面の設計を行う。第二段階として、さらに厳しい耐力検討用外力に対して、上記1)と2)の防波機能を満足することを確認する⁽²⁾⁽³⁾。このため、まず波浪に対して基本断面を対象に耐力検討海象条件(耐力検討波)に対する消波工の変形および越波制御条件を満たすように構造の修正や排水路などの設定を行い、耐力検討波に対しても越波制御機能が維持される断面構造を決定する。次いで、この断面に対して地震(設計用限界地震)に対する応答解析を行い、ケーソン、背後地盤などの変形を評価する。最後に地震による変形が生じた場合を想定して、応答解析などに基づいて評価した変

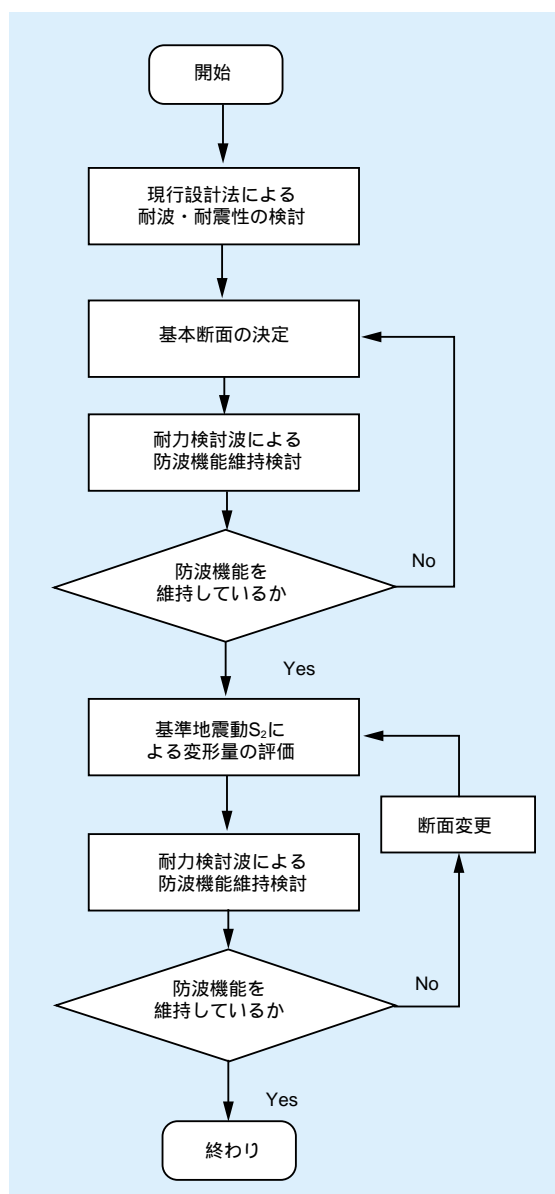


図3-1-1 防波護岸の設計の基本的な流れ

形後の断面が、耐力検討波に対し機能上問題を生じないことを確認し、最終的な護岸構造を決定する。

なお、耐力検討の段階では、波浪と地震を同時に作用させた機能維持の検討は、それぞれの再現期間を考慮した確率的検討から必要ないものとされており、先行事象として地震を想定し、地震により損傷を受けた防波護岸が所要の機能を確保しているかを検討すればよい。

3-1-2 防波護岸の基本設計

防波護岸の構造形式としては、消波工の変形後の修復性と越波の抑制とを考慮して、消波ブロック被覆式護岸を選定し、さらに越波水を排水するための大規模な越波排水路を備える、図3-1-2に示す構造を当面の設計対象とした⁽⁴⁾。

人工島式原子力発電所の防波護岸に対する2段階設計法の概念の成立性を確かめるために、以下の条件を設定して検討を進めた。人工島の設置水深を20mとし、基本設計条件として沖波条件で波高10m、周期16s(100年確率波)を採用した。また、耐力検討用外力の波浪条件としては、基本設計波高の1.5倍の沖波波高を有するきわめて希な厳しい波浪条件を設定した。図3-1-2の断面形状の設計には、水位として、朔望平均潮位差1.5m、高潮偏差を基本設計で1m、耐力検討条件で1.5mとした。基本設計波の沖波波高10mは、構造物設置水深では10.3mに、耐力検討波の沖波波高15mは12.8mとなる。設置位置での基本設計波高10.3mに対して、所要プロッ

クは、法面勾配を1:2としたときに80t型が必要となる。護岸パラペット天端高さは、許容越波流量(基本設計波に対して0.05m³/s/m、耐力検討波に対して0.2m³/s/m)に対して、厳しい基本設計波の条件から決定された。越波排水路は、耐力検討波による越波水に対して余裕をもって排水できる水路断面を確保し、発電所敷地内への越波水の浸入を所定の流量以下に抑えるために敷地側の壁の高さを決定した。埋立地の地盤高さは、既往の考えに準じて津波を考慮し、6mと想定した。一方、ケーソンの幅は、以下の耐震設計から決定される。震度法に基づく静的解析により、ケーソンの滑動・転倒、ケーソンの端し圧によるマウンドのすべりに対する安全率を算定し、すべての安全率が基準値を満足することが要求される⁽¹⁾。ここでは、設計震度として、水平震度 $K_H=0.2$ 、鉛直震度 $K_V=0.0$ を採用した。

以下においては、人工島式原子力発電所の防波護岸を対象に新たに提案した設計概念に対して、解決すべき耐波設計ならびに耐震設計に関わる研究課題とその検討結果を示す。

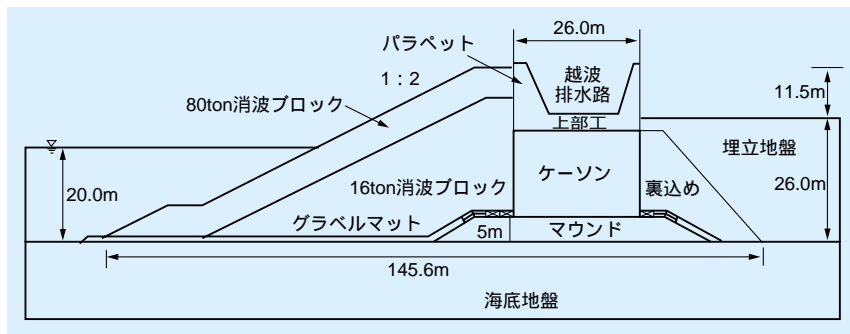


図3-1-2 防波護岸の断面図

3 - 2 防波護岸の耐波安定性評価技術の高度化

3-2-1 はじめに

人工島式立地発電所の防波護岸の設計に関して、3-1-1

で述べたように、その重要度を考慮して現行の設計法で設定される外力を越えるきわめて希な外力(耐力検討外力とよぶ)に対する護岸の機能維持を確認するという新たな設計概念を提案した。そこで、最初の課題となるの

は、基本設計波を越えるきわめて希な波である「耐力検討波」の設定に対する考え方と設定方法である。この耐力検討波に対する消波工の変形を許容した防波護岸の耐波安定性の評価、護岸の機能維持の観点から越波量の評価が耐波設計技術の高度化のための課題となる。

以下では、1) 耐力検討波の設定、2) 消波工の変形の評価、3) 越波特性などに関する検討結果を示す。

3-2-2 耐力検討波の設定

耐力検討波は、基本設計波(100年確率波)を越えるきわめて希な波に対して、防波護岸に多少の変形は生じても防波機能が維持されることを確認するための機能維持検討に用いる波浪条件である。基本設計波高に対して、適切に割り増しをすることにより設定する。確率論的な考えに立てば、再現期間1000年オーダーの波を想定することになる。

このような超長期の確率波を推定するためには、ここでは、波浪データよりも長い期間にわたって観測データが得られている気象擾乱を用いて波浪推算を行う方法を採用した。まず、太平洋側に高波浪をもたらす台風と日本海側に高波浪をもたらす低気圧を対象に確率的な気象擾乱モデルを用いて風、気圧の場を算出する。さらに、これらの結果を外力条件として波浪推算モデル⁽¹⁾を用いて波浪を推算する。台風は気圧分布を同心円でモデル化できる。しかし、低気圧の気圧分布は台風とは性質が異なるので、低気圧に対しては、長軸と短軸の異なる楕円を4分割して組み合わせた楕円状の気圧分布を仮定した。これらの台風や低気圧の気象擾乱について、発生から移動を確率的にモデル化し、移動にともなう中心気圧、大きさなどの属性をモンテカルロ法を用いて推定し、仮定の気象擾乱をシミュレートする⁽²⁾⁽³⁾。

図3-2-1は、台風のシミュレーションの1例であり、1年間に発生した台風の経路と台風半径を示している。台風の北上にともなう転向や減衰などが、実際のとり得る経路とよく類似している。

図3-2-2は、1つの低気圧の経路と大きさの変化をシミュレートした例である。作図の便宜上、楕円の長軸と短軸の頂点を結んだ四角形で表示してある。低気圧は時間の経過につれて発達しながら西から北東へ進行し、楕円長軸の傾斜角が反時計方向に回転することが再現され

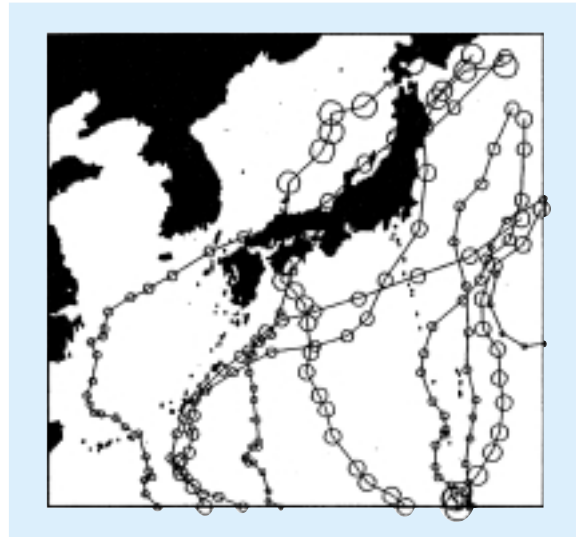


図3-2-1 台風経路のシミュレーション例⁽⁶⁾

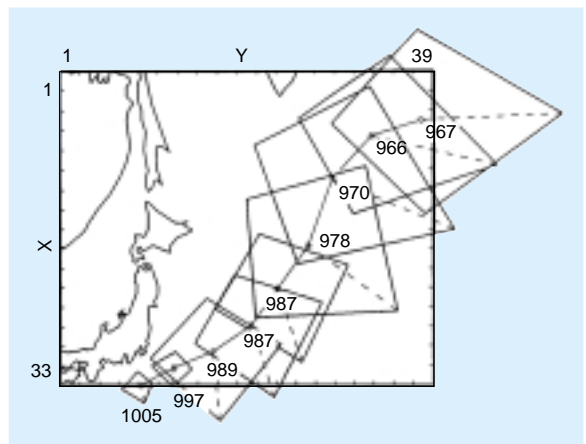


図3-2-2 低気圧経路のシミュレーション例⁽⁷⁾

ている。

このような気象擾乱を1000年間分発生させ、それぞれの風、気圧の場を外力条件として用いて波浪推算モデルにより特定地点での波高、周期を推算する。これらを仮定の波浪観測データとして、通常の観測で得られたデータと同様に極値統計解析を行い、基本設計波である100年確率波と耐力検討波の目安となる1000年確率波を推定する。

表3-2-1に推定結果を示す。100年確率波高 H_{100} に対する1000年確率波高 H_{1000} の比は、台風の場合は1.1～1.3、低気圧の場合は1.2～1.4であった。基本設計波高に対する耐力検討波高の割り増率は、通常1.2～1.3、最大でも1.5程度で設定することができる⁽²⁾。気象擾乱に

表3-2-1 100年確率波に対する1000年確率波の波高比と周期の比較

(a) 波高比

	H_{1000} / H_{100}	計算対象地点
確率的台風モデル	1.1 ~ 1.3	福島沖、石廊崎、高知沖、油津、喜屋武岬
確率的低気圧モデル	1.2 ~ 1.4	福島、柏崎、直江津

(b) 周期

	T_{100}	T_{1000}	計算対象地点
確率的台風モデル	15 ~ 16s	16 ~ 17s	石廊崎沖
確率的低気圧モデル	13 ~ 14s 12 ~ 14s	16s 14 ~ 15s	福島 柏崎、直江津

関する確率モデルを用いた結果は、これらの結果の範囲とほぼ一致し、耐力検討波の設定に確率論的な観点からの説明ができた。また、周期については、1000 確率波のような超長期の周期を予測するための情報がこれまでなかったが、100 年確率波の周期よりも 1 ~ 2 秒程度長くなることが明らかになった。

3-2-3 消波工の変形の評価

これまで、防波護岸の消波工に使われる消波ブロックなどの変形を定量的に評価するに当たっては、水理実験で消波ブロックの移動個数を調べ、移動個数の検査領域内の消波ブロック総数に対する比率で定義された被害率が用いられてきた。ここで、消波ブロック 1 個の長さ以上移動したものを移動したとみなしている。従来のように、消波ブロックが動くかどうかの初期の移動段階のみを対象とする場合にはこのような被害率の定義で充分であったが、消波ブロックの一部が移動しても構造物の重要度に応じて機能が失われなければよいという考え方に立てば、相対的な量で被災と判断するのは妥当ではない。また、この定義では被害率が法面勾配や被覆材の総数に依存するため、異なる断面の研究結果と直接比較することが困難である。

そこで、本研究では消波工の変形量の評価に当たって図 3-2-3 に示すように消波工の侵食面積 A を変形量のパラメータと取り、次式で定義される damage level S を用いることにした⁽⁴⁾。

$$S = \frac{A}{D_n^2}$$

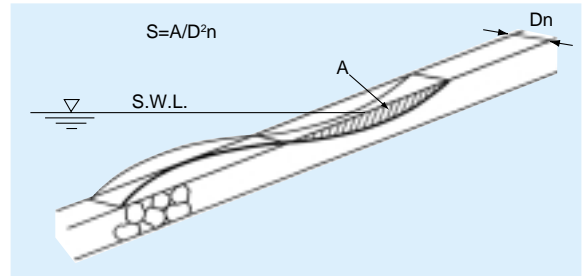


図3-2-3 変形レベルの定義⁽⁷⁾

ここに、 $D_n = (W / \rho)^{1/3}$ は消波ブロックを同重量の立方体に置き換えた場合の 1 辺の長さを表す。W は消波ブロックの重量、 ρ は消波ブロックの単位体積当たりの重量である。したがって、damage level S は幅 D_n 当たりの侵食面積内の消波ブロック移動個数を示す。ただし、消波工の変形を必ずしもそのまま被災とみなさないため、damage level S を本研究では“変形レベル S ”と呼ぶことにした⁽⁵⁾。

本研究では、防波護岸の消波ブロックの変形量と波浪条件との関係について、模型縮尺 1/22.7、1/60、1/87.5 の 3 種類の断面 2 次元造波水路実験と模型縮尺 1/88 の 3 次元多方向不規則波水槽実験を実施した。ここでは主として断面 2 次元造波水路実験に基づいた検討結果を紹介する。

図 3-2-4 は、当研究所の所有する、長さ 205m、幅 3.4m、深さ 6.0m の大型造波水路を使用して実施した防波護岸の実験の様子を示したものである。実験では、設計波高以上の高波浪の作用による消波工の断面形状の変化を調べた。また同時に後述する護岸の機能維持を調べるために、消波工の変形にともなう越波量の変化を調べた。

図 3-2-5 は、基本設計波を越える大きな波の作用により消波工が変形した前後の断面形状を比較したものである。実験結果の変形レベル S の値は 12 であった。この実験では波の作用を 3000 波まで行った。実際の波の作用時間に換算すると約 13 時間に相当する。実際にはこのような高波浪は 13 時間も長時間にわたって作用するものではないが、消波工の変形特性を把握するために、同一の波浪条件のもとで長時間の波を作用させて、消波工の変形の様子を調べた。

図 3-2-6 は基本設計波高 H_D を越える種々の波高 H の波を作用させた場合の変形レベル S の時間変化を示した



図3-2-4 防波護岸の大型模型水理実験

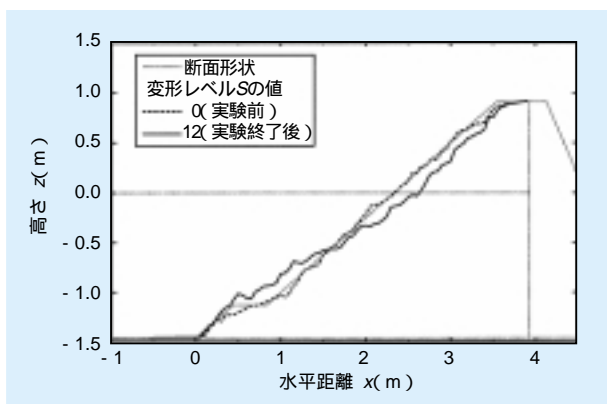


図3-2-5 防波護岸消波工の変形状

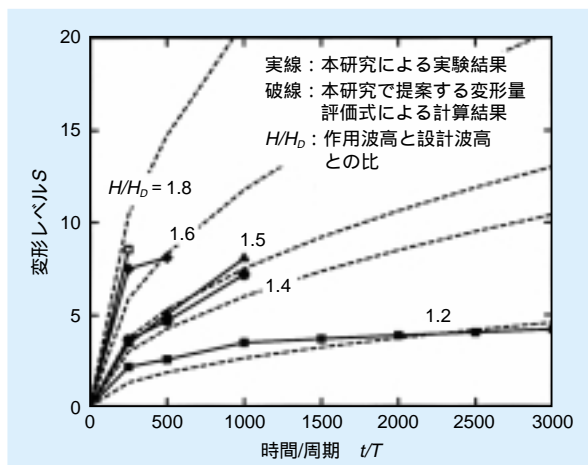


図3-2-6 消波工の断面変形の経時変化と変形量評価式による推定値との比較

ものである。点線で示した結果は、本研究で行った数多くの実験結果を整理して作成した変形量評価式⁽⁶⁾を用いて推定した結果である。この変形量評価式を用いて、基

本設計波を越える任意の波高、周期の波が作用する場合に、消波工の断面形状の変化を、波の作用時間に応じて推定できる。また、本評価式は波の波高や周期が時間的に変化した場合にも適用可能である。

基本設計波高 H_0 に対して安定な消波ブロックを用いているので、消波工の変形は波作用初期の若干の移動を除いてほとんどないので掲載していない。消波工の変形は、基本設計波高を越える波高の大きさに応じて大きくなる。また、変形の時間的な変化は、変形が進むにつれて変形の進行が緩やかになる。このことは、安定限界を超える波浪に対して、消波工が急激に破壊することはなく、防波護岸に波に対する耐力の余裕があることを意味している。また、本研究で提案した変形量評価式により消波工の変形を定量的に推定することができることが確認できた。

実際には、100年確率波を対象とする基本設計波や1000年オーダーの確率波に相当する耐力検討波が一定の波高で長時間にわたって作用するのではなく、波高や周期が変化する一時化(ひとしけ)中のピークとして出現する。

図3-2-7は、耐力検討波 $H_0=15\text{m}$ を含む一時化の波高の時間的な変化をモデル化した波高の経時変化を示したものである。一時化のピーク値として耐力検討波の波高を設定し、これが来襲する前後で波高の増減を模擬したものである。

図3-2-8は、この一時化の波の作用による防波護岸の消波工の変形について、変形レベルSの時間変化を示し

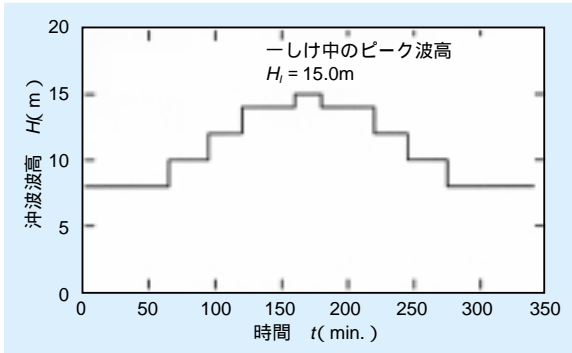


図3-2-7 モデル時系列

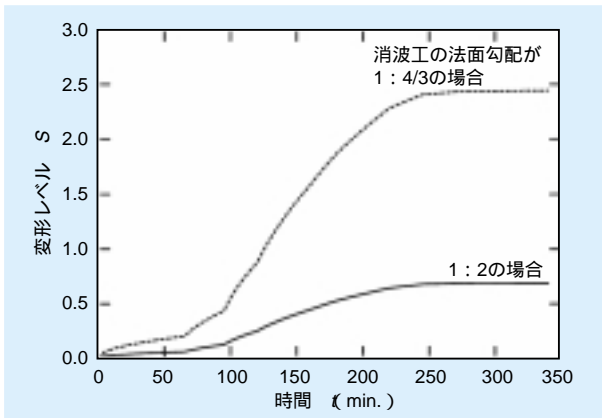


図3-2-8 変形レベルの経時変化

たものである。防波護岸の消波工の法面勾配は、1:2であり、変形レベルは $S < 1$ と比較的小さな値であることが推定された。参考のために、国内で標準的に用いられている法面勾配の1:4/3の消波工に対する推定結果も例示した。法面勾配が急になり変形しやすくなった場合でも変形レベルは $S = 2.4$ である。基礎的な実験で調べた図3-2-5の $S = 12$ の結果に比べて変形レベル S の値は小さく、実際の波浪に対しては消波工の変形は非常に小さいものと推測できる。このことは、消波工被覆護岸が設計波を越える波浪により急激に破壊に至ることはなく、構造的に耐力を有していることを示すものである。

3-2-4 越波特性

(1) 消波護岸の越波に関する水理実験

基本設計波高を越える高波浪に対して、防波護岸の機能維持を確保できる範囲の消波工の変形を許容するという設計概念から、消波工の変形にともなう越波流量の変化を水理実験により調べた。

図3-2-9は、消波工の変形にともなう越波流量の変化を示したものである。この結果は、一定の波高の波が作用する条件のもとで、消波工の変形にともなう越波流量の変化を示したものである。同図では2種類の異なる縮尺模型を用いた実験結果を示した。波高が大きくなるにしたがって、越波流量、変形レベルともに増加する。一定の波高の結果について変形レベルと越波流量との関係を見ると、変形レベル S が大きくなり変形が進むにしたがって越波流量も増加する傾向にある。その増加率は、変形が小さい初期の越波流量の最大2倍程度であることがわかった。

さらに、縮尺模型の異なる2種類の実験結果を比較すると、小スケールの実験結果の越波流量のほうが小さくなっていることがわかる。これは消波工による波のエネルギー減衰に実験スケールの影響があるためである。通常、水理実験では慣性力と重力の比を実物値と模型値で一致させた、フルードの相似則に従って実験諸量を定めて実験を行う。この場合、粘性力に関する相似則は満足されていないので、粘性力による波のエネルギー減衰に関わる水理実験では模型縮尺の影響(実験スケール効果とよぶ)が出る場合がある。特に、消波工内で著しいエネルギー減衰がある現象には実験スケール効果が現れる可能性が高い。そこで、本研究では消波護岸の越波流量に及ぼす実験スケール効果について検討を加えた。

図3-2-10は3種類の縮尺模型を用いた越波流量に関する実験結果を越波流量とレイノルズ数(慣性力と粘性力との比)との関係で表したものである。3種類の縮尺模型実験結果を、実線で示した同じ波高のもとで比較す

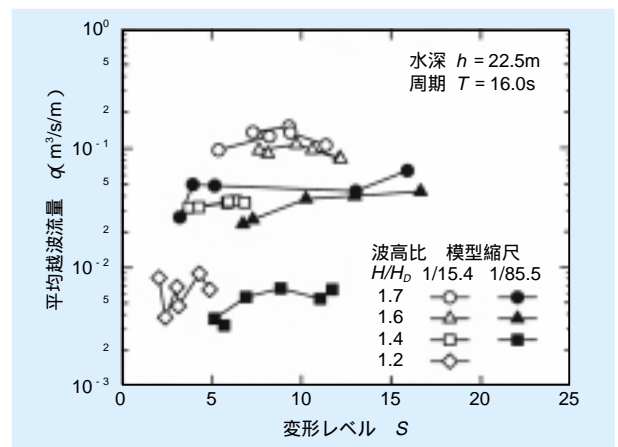


図3-2-9 消波工の変形にともなう越波流量の変化

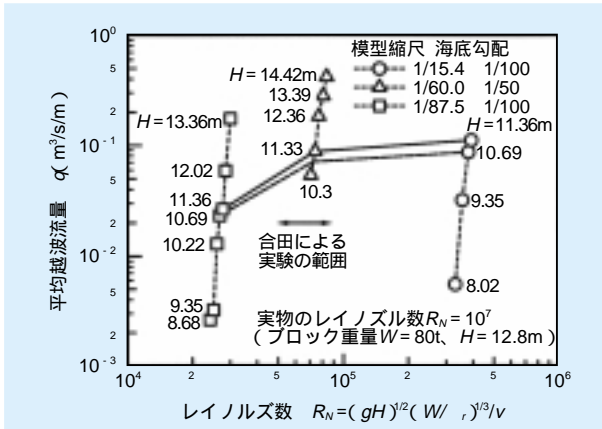


図3-2-10 越波流量に関する実験スケール効果

ると、レイノルズ数が大きくなるにしたがって越波流量も増加する傾向にある。しかし、その増加率は緩やかになり、ある程度の大きさの実験を行えば実験スケールの影響が小さくなることを示している。本実験結果から、この実験スケールの影響がないレイノルズ数を限界レイノルズ数 R_{NC} と定義し、次の値が妥当であると判断した。この限界レイノルズ数以上で実験を行えば越波量に関する再現性は十分に保証されるものと考えられる。

$$R_{NC} = \frac{\sqrt{gH}(W/\gamma r)^{1/3}}{\nu} = 5 \times 10^4 \sim 10^5$$

ここに、 g は重力の加速度を表し、 ν は動粘性係数を表す。

図3-2-11は、限界レイノルズ数を満足する消波ブロックと波高の大きさとの関係を示したものである。通常の模型実験では安定した重量の消波ブロックを使用するので、重量 W と波高 H との関係は法面勾配の余接

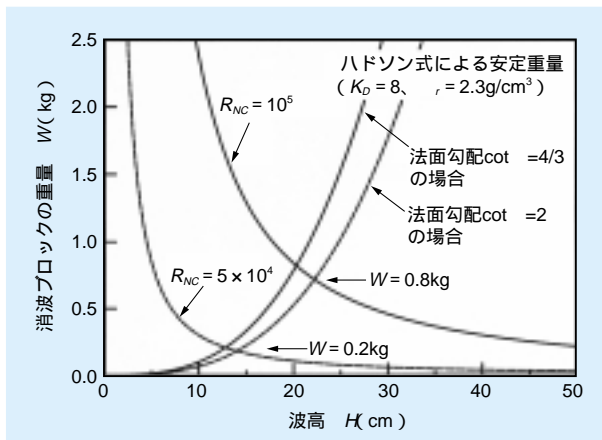


図3-2-11 スケール効果が無視できる消波ブロックの所要重量

\cot をパラメタとして表される。実験スケール効果を回避するためには、 $R_{NC}=10^5$ の曲線で示されるように、約0.8kgの消波ブロック(例えば、テトラポッドの高さで約11cm)を使用し、作用波高は $H=20$ cm程度とする必要がある。ただし、図3-2-10から推定されるように、 $R_N = 5 \times 10^4$ 程度の実験でも越波流量のオーダーが変わるような過小評価にはならない。このことから、図中の $R_{NC}=5 \times 10^4$ のとの交点から、少なくとも消波ブロックの重量は約0.2kg(テトラポッドの高さで約7cm)、波高は13cm程度で実験を行うことが望ましい。

(2) 消波護岸の越波に関する数値解析コードの開発と適用(解析コード名PS-WAVE)

上述のように、これまで越波に関する検討は主として水理実験により行われてきた。しかし、水理実験における実験スケール効果の問題の解明や越波量の推定精度の向上、さらに将来的には水理実験に代わる手段として使用することを目的に、消波ブロックによる波の変形を計算できる数値解析コード(コード名 PS-WAVE)を開発した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本数値解析コードは有限差分法に基づき構築され、砕波や越波時の複雑な水面形状が計算可能である。本解析コードの概要は以下の通りである。透過性構造物の幾何学的・物理的效果を Navier-Stokes 方程式に取り込んだポラスポディモデルの支配方程式を基本とし、水面形状の追跡計算にVOF(Volume of Fluid)法⁽⁹⁾を適用した。自由表面運動は流体の体積率を表すVOF関数の移流計算で行う。また、造波境界条件には有限振幅波理論の摂動解を適用した。

図3-2-12は海底斜面上で砕波した波が消波護岸を越波する様子を計算したものである。水中の色の変化は圧力の変化を表す。本解析コードを用いて流速や圧力も同時に計算できる。本計算では規則的な波を対象としている。本計算結果による越波流量と水理実験結果の越波流量との差は約20%であった。越波は変動の大きい現象であり、越波流量のオーダーの推定が基本的な課題であることから、本解析コードによる越波流量の推定精度は実務上充分であることが確認できた。

(3) 越波現地観測

護岸の越波流量は、水理実験に基づく越波流量算定⁽¹⁰⁾

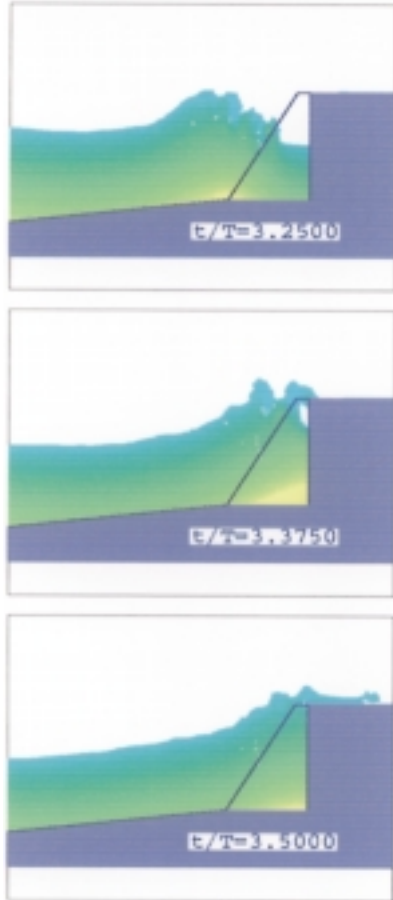


図3-2-12 越波の数値計算例

やこの算定図を定式化した実験式⁽¹⁾を用いて算定している。しかし、人工島式原子力発電所の防波護岸のような重要な構造物や、上記の方法の適用範囲外の条件に対し

ては水理実験により確認する必要がある。消波護岸の越波のように波のエネルギー減衰を伴う水理実験ではレイノルズ数が小さいと越波量を過小評価する場合がある。実験スケール効果を検討するに当たっては、縮尺を変えた実験データに加えて現地観測データが重要な役割を果たす。しかし、越波の現地観測事例はきわめて少ない⁽²⁾。また、不規則波を対象にした水理模型実験結果と現地観測による越波量との比較も行われていない。

そこで、越波に関する現地データの取得方法の検討や現地観測結果と水理実験結果との比較を行うために現地観測を行った⁽³⁾。現地観測は、1996年1月11日から3月2日期间に、福井港の護岸(総延長2350m)のほぼ中央において行った。護岸の前面水深は8.0mで、被覆工には16t型の消波ブロックが使用されている。図3-2-13に観測施設と越波の状況を示す。幅10mの越波排水路を兼ねた管理用道路を横断方向に遮蔽し、長さ30mの観測施設を建設した。越波流量はこの30mの区間に越波して貯まった水を長さ8m、幅2mの水路内の堰で排水させながら、堰の越流水深を測定することにより算定した。この測定方法により、通常設計の指針に用いられている平均越波流量(1時間もしくは2時間の平均値、越波流量の指標になっているが、実際には越波現象の実態を現していない)のみならず、高波が連続して続く数波(時間にして30秒から1分間の平均値で、より実態に近い現象を把握できる)の越波流量(短時間越波流量とよぶ)を求めることができた。



図3-2-13 越波量現地観測

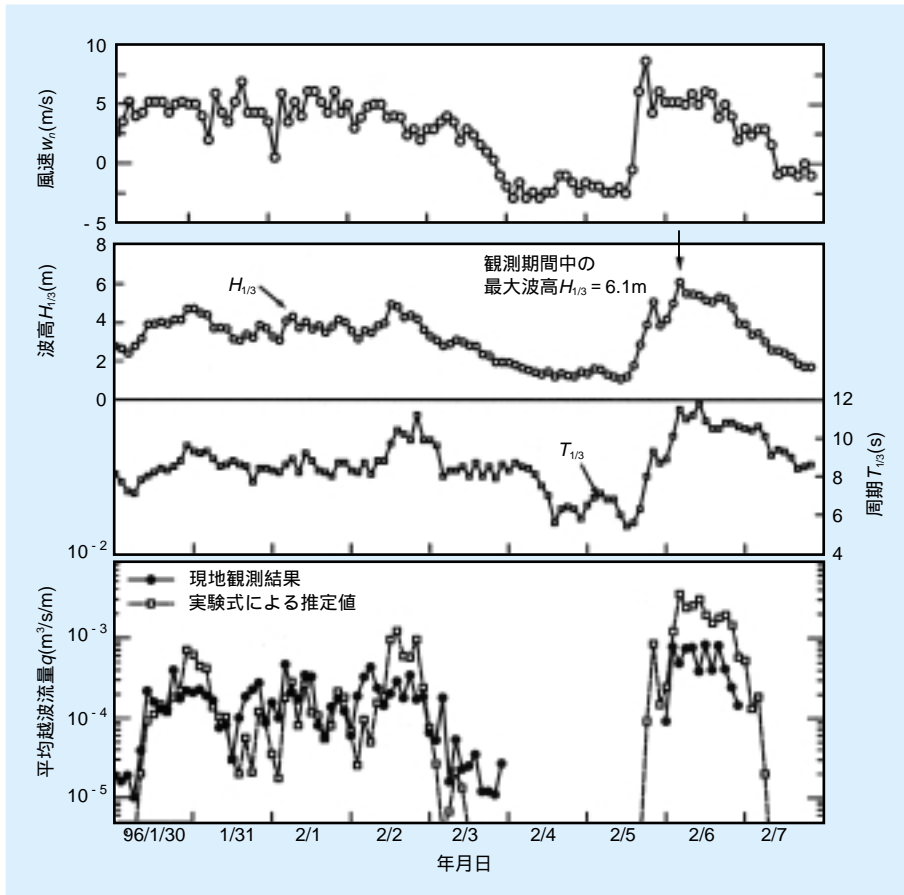


図3-2-14 現地観測結果

図3-2-14に現地観測結果を示す。上段から風速の護岸に対する垂直成分、中段に波高と周期、下段に観測結果の平均越波流量(1時間平均値)の経時変化と波浪条件から実験式を用いて算出した平均越波流量の経時変化を示した。観測された平均越波流量の変化は波高と周期の変化に対応し、実験式の傾向とほぼ一致している。

短時間越波流量は平均越波流量の大きさに依存するが、平均越波流量が 10^{-4} m³/s/mから 10^{-3} m³/s/mの範囲で、これらの10倍から数倍となることが分かった。このような短時間越波流量の情報は、越波排水路の設計に考慮される。

3-2-5 まとめ

人工島式立地原子力発電所の防波護岸の耐波設計技術を高度化するために、耐波機能、防波機能に関する検討を実施した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- ① 耐力検討外力の設定方法に関して、確率的台風モデル、確率的低気圧モデルと波浪推算モデルを適用し、100年確率波である基本設計波に対する1000年確率波の波高の割増率や周期の増加分を示し、その設定方法の妥当性を確認した。
- ② 防波護岸の消波工の変形量を評価するために、広範条件の下での水理実験結果から作成した変形量評価式の適用性を基礎的な波浪条件のもとで検証した。また、実際のな波浪条件のもとでは消波工の変形量は小さく、防波護岸の消波工が設計波を越える波浪に対して構造的に耐力があることが明らかになった。
- ③ 消波工の変形に伴う越波流量の変化を把握し、越波に対する防波機能が維持されることを確認した。
- ④ 越波に関して、水理実験の実施、数値解析コードの適用、現地観測など多くの観点から検討し、人工島式発電所の重要構造物である防波護岸の防波機能としての越波制御、越波排水路の設計に反映するための基本的情報を詳細に取得できた。

3 - 3 防波護岸の耐震安定性 評価技術の高度化

3-3-1 はじめに

機能維持の観点から防波護岸の耐震性を考えた場合、3-1-1に示したように、現行の設計法で設計された防波護岸の基本断面に対して、地震(設計用限界地震)によって変形を生じた後の防波機能、とりわけ越波によって敷地が過度に浸水することを防ぐ越波防止機能を確保できるかどうかを適切に評価することが要求される。この場合、防波護岸が地震を受けたときの変形量を高い精度で予測することが重要となる。人工島式原子力発電所では、防波護岸も発電プラント本体と同様に、海底の岩盤上に本体を設置することが基本とされているが、海底砂層の厚さや密度条件、必要に応じて海底地盤を改良することなどにより、要求される機能を維持できる範囲内に地震時変形を留めることも可能であると考えられる。

以下では、主に防波護岸直下に海底砂層が存在する条件を想定し、(1)地震時における防波護岸の変形挙動を把握するための模型振動実験、(2)防波護岸の地震時変形を数値解析によって予測するための解析手法の開発とその適用性の検証、(3)これらの成果に基づく実規模防波護岸の地震時変形量の予測と機能維持の検討、を行った結果について示す。

3-3-2 遠心载荷模型振動実験による防波護岸の地震時変形挙動の把握

地震による防波護岸の変形モードを把握し、変形量を適切に評価する方法のひとつとして、模型振動実験による検討がある。この場合の実験手法としては、1Gの重力場において可能な限り実防波護岸と幾何学的に相似な模型を作成し振動を加える方法と、模型に大きな遠心力をかけ、幾何学的に相似な模型内により実物に近い応力場を再現した状態で振動を加える方法が挙げられる。しかし、地盤材料のように強度・変形特性が拘束圧すなわち応力レベルに依存する材料を含む模型の変形問題を対

象とする場合には、後者の方法を用いることが、変形量の定量的評価という観点からも有効であるといえる。したがって、本研究では、遠心力载荷試験装置(コラム参照)を用いた防波護岸の模型振動実験を実施した⁽¹⁾。

(1) 模型実験の概要

実験には、世界最大級のカリフォルニア大学デービス校の遠心载荷装置(有効回転半径9.1m、最大遠心加速度53G、最大搭載重量4.9ton)を用いた。実験は、図3-3-1に示す防波護岸のモデルを土槽内に作成し、30Gの遠心加速度のもとで加振する。模型は、実規模防波護岸を1/120に縮尺したモデルであり、遠心加速度が30Gであることから、実物に対して1/4(=30/120)のスケールおよび応力場を再現した実験に相当する。今回の実験では、海底砂層の厚さ(実規模換算で0m~5m)、海底砂層の密度(相対密度60%~90%)、海底砂層の改良範囲(マウンド直下~消波ブロック下)を変化させた実験を行い、それぞれが防波護岸の地震時変形に及ぼす影響を比較した。加振時の波形は、振動数約90Hz、波数12波の正弦波とし、ひとつのモデルに対して最大加速度振幅を3G、10G、15Gと順次増加させる多段階加振を行った。

(2) 実験結果の考察

振動による防波護岸の変形モードの特徴は、以下の通りである。

- ① ケーソンは、海側への水平変位と傾斜、沈下をともなうように変位する。
- ② 海底砂層では、海向きに残留変形をともなうせん断変形モードが卓越する。
- ③ 消波ブロックは、斜面に沿うように海側に移動し、全体的には天端の沈下と海側への斜面のはらみだしをともなう変形モードを示す。

一方、海底砂層の厚さ、密度、改良範囲がケーソン上のパラペット天端における残留変位量に及ぼす影響については、以下の傾向が得られた。

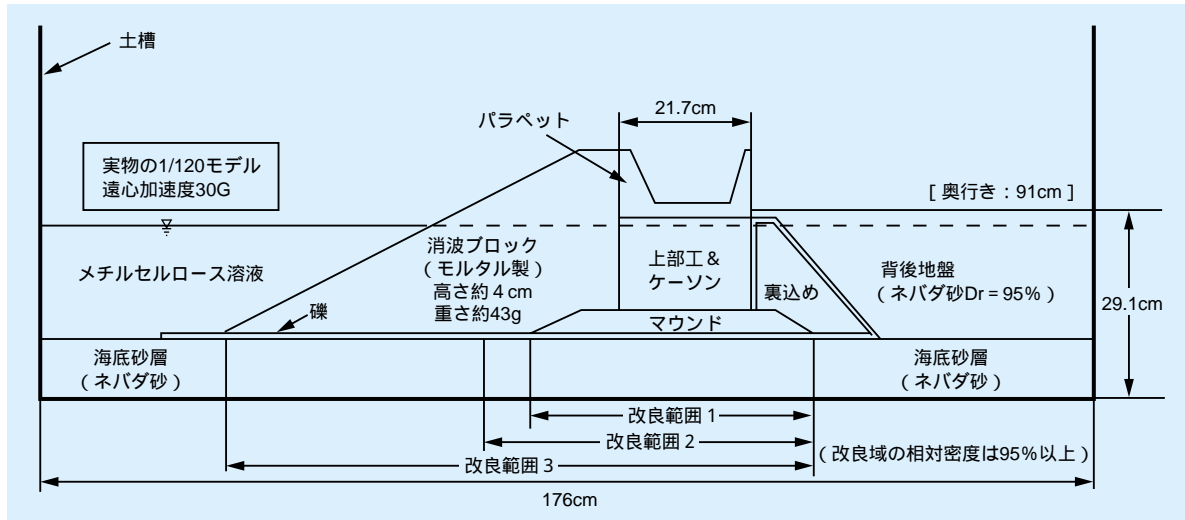


図3-3-1 遠心载荷模型振動実験における防波護岸の実験モデルの概要

- ① 海底砂層が厚くなるほど、パラペット天端の水平・鉛直残留変位は大きくなる。ただし、砂層厚さがゼロ、すなわち岩盤上に防波護岸が設置された場合には、残留変位はほとんど生じない(図3-3-2)。
- ② パラペット天端の水平・鉛直残留変位は、海底砂層の密度が大きく、締まった状態であるほど小さくなる傾向がある。しかし、相対密度が70%程度以上になると、パラペット天端の残留変位に対して、密度の違いによる影響はほとんどない。
- ③ 海底砂層を締め固めによって地盤改良することは、パラペット天端の残留変位の低減につながる。この場合、改良範囲が広がるほど残留変位が小さくなる傾向があるが、マウンド直下のみ改良を施すだけでも残留変位の低減効果が大きく、合理的改良範囲を設定する上で有用な情報を与えるものである(図3-3-2)。

3-3-3 防波護岸の地震時変形予測解析手法 (SEAWALL-2D) の開発と適用性の検討

(1) 地震時変形解析手法 (SEAWALL-2D) の開発

昨今の計算技術の進歩により、地盤や構造物の非線形挙動ならびに塑性変形についてもかなりの精度で解析的に予測することが可能になってきた。一方、人工島式原子力発電所を対象とする防波護岸の地震時変形解析に要求される主な項目を列挙すると、以下のようになる。

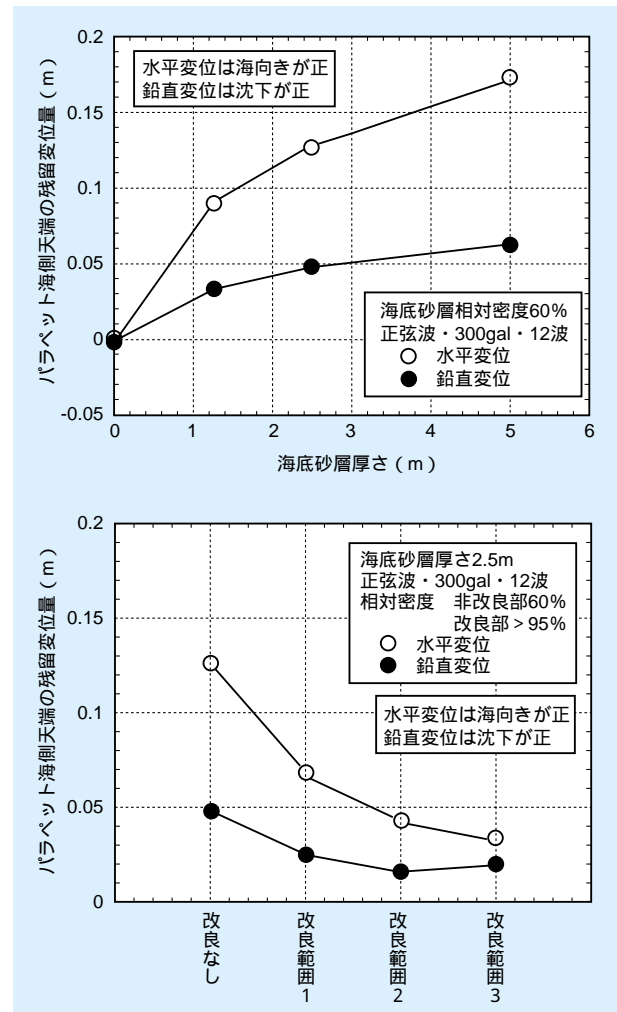


図3-3-2 パラペット天端の変位位置に及ぼす海底砂層厚さ、海底砂層の改良範囲の影響

- ① 海底地盤、マウンド、背後地盤などの地盤材料に対して、材料の非線形性を考慮できる。
- ② ケーソンの滑動や海底地盤・背後地盤・マウンドなどの残留変形(塑性変形)を求めることができる。
- ③ 液状化現象など水の存在の影響を考慮できる。
- ④ 消波ブロックの影響を考慮できる。

これらの内、①～③の要求に対しては、有限要素法(FEM)などの連続体力学をベースにして、ケーソンの滑動を表現するためのジョイント要素を適用した有効応力解析手法などを用いることにより対応することができる。防波護岸の地震時変形解析で最も重要な点のひとつは、④に示すように複雑な形状をした消波ブロックの動的挙動をいかにして適切にモデル化するかにある。この点を克服するため、当研究所では、消波ブロックの領域を個別要素法(DEM)による非連続体解析領域とし、ケーソン、マウンド、海底地盤、背後地盤などの領域を有限要素法(FEM)による連続体解析領域とすることによって、合理的かつ高精度で防波護岸の地震時変形を予測できるDEM-FEMカップリング解析手法(SEAWALL-2D)を新たに開発した⁽²⁾。

SEAWALL-2Dは、図3-3-3に示すように2つの大きな解析コードで構成されている。ひとつは、DEMによる消波ブロックの2次元動的応答解析手法(TSLIDE-2D)であり、消波ブロックのような形状をもつ材料の集合体が地震を受けたときの個々のブロックのすべりや転がりといった現象を考慮した解析を行うことができる⁽³⁾。もう一方は、地震時における地盤の液状化現象や塑性変形

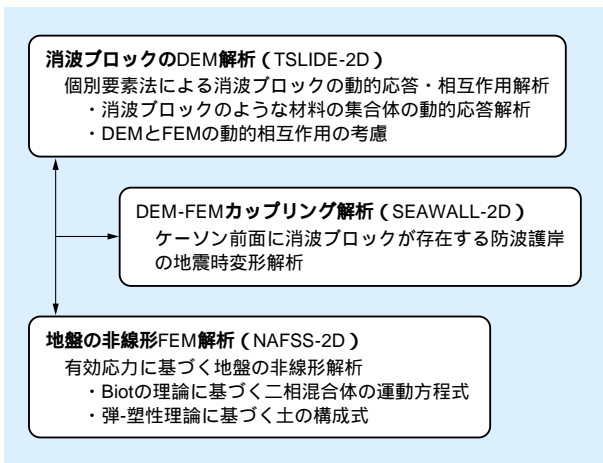


図3-3-3 防波護岸の地震時変形解析手法(SEAWALL-2D)の構成

を予測することを目的としたFEMによる地盤の2次元有効応力解析手法(NAFSS-2D)である⁽⁴⁾。NAFSS-2Dは、繰り返し載荷時の土の変形挙動を弾-塑性理論に立脚した構成式で表現し、Biotの二相混合体理論に基づく土粒子骨格-間隙水の連成運動方程式を適用することによって、震動中の地盤の透水も考慮し得る真の有効応力解析手法である。

SEAWALL-2Dでは、DEM解析を行う消波ブロック部と、FEM解析を行うケーソンや地盤部に対して、それぞれ時間領域において別々に応答解析が行われる。しかし、地震時に両者はそれぞれ独立に運動しているのではなく、互いに相互作用を及ぼし合いながら運動しており、それは防波護岸の地震時変形に大きな影響を及ぼすと考えられる。このような動的相互作用を考慮するためSEAWALL-2Dでは、震動中の各時刻において、DEM解析領域とFEM解析領域の境界面に作用する荷重を合理的に算定し、それらの荷重を境界面荷重として運動方程式に組み込んだ上で、個々の運動方程式を短い時間ステップで解析することにより、相互の力のやり取りを再現している⁽²⁾。

(2) 模型振動実験の数値シミュレーション

SEAWALL-2Dの適用性を検証するため、図3-3-1で示した防波護岸の遠心載荷模型振動実験のうち、代表的なケースを取り上げ、数値シミュレーションを行った。

図3-3-4に解析モデルを示す。本ケースでは、海底に相対密度 $Dr=70\%$ 程度の比較的緩い砂層が存在し、消波ブロック下の一部から裏込め下にかけて海底砂層を締固め改良($Dr=95\%$)しており、背後地盤については $Dr=95\%$ 程度の締まった地盤とする条件になっている。

FEM解析部では図のようなメッシュ分割を行い、ケーソンの陸側側面ならびに底面に、震動時の滑動を考慮するためのジョイント要素を配置している。非線形解析領域となる海底砂層、背後地盤といった砂層の解析用物性値については、模型実験時と同等の相対密度、拘束圧条件下で行われた液状化試験結果から決定した。同様に、砕石で構成されたマウンド、裏込めについては、動的変形試験の結果を参考に解析用物性値を決定した。DEM解析部である消波ブロックについては、ブロックの積み上げ解析を行うことにより、図のような初期状態を設定した。解析用入力物性値については、模型実験に用いた

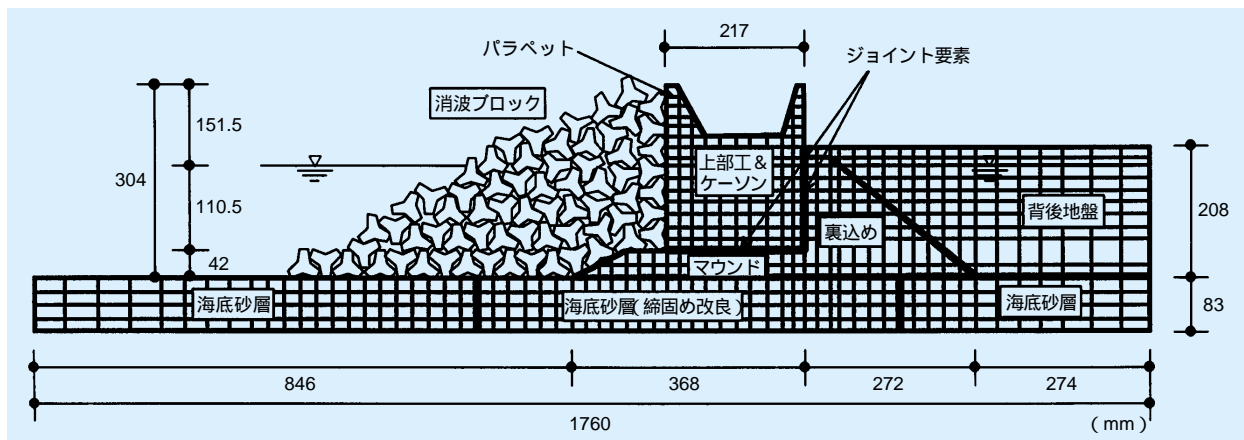


図3-3-4 遠心模型実験の数値シミュレーションに用いた解析モデル

消波ブロックの载荷試験結果から接触点でのばね定数を推定し、すべりに対する摩擦係数については、静止摩擦係数 $\mu_s = 0.6$ 、動摩擦係数 $\mu_d = 0.5$ を用いた。また、本来3次元的な形状を持つ消波ブロックに対して、2次元平面ひずみ条件で解析を行うため、要素の質量、慣性モーメントなどについても3次元と等価となるような値に調整して、設定した。

入力波(振動数約90Hz、波数12波の正弦波)は、模型実験時に実際に振動台上で計測された加速度波形とし、最大加速度振幅3G、10G、15Gの3通りの解析を行った。

図3-3-5に、解析による消波ブロックの移動状態を示す。模型実験によると、消波ブロックは斜面に沿って海側に移動するような変位を示していたが、解析でも実験結果と同様の傾向を示す。図3-3-6には、入力加速度振幅とケーソン上部工の水平変位(DH1)、鉛直変位(DV1、DV2)の残留値の比較を示す。水平変位については解析による変位が小さめになっているが、全体的に実験値と解析値は良い一致を示しており、防波護岸の機能維持の

検討で最も重要となるケーソンの残留変位予測に対して、SEAWALL-2Dが十分な適用性を有することが示された。

3-3-4 実規模防波護岸の地震時変形と機能維持検討

(1) 遠心模型実験による地震時変形量の評価

遠心模型実験は、実規模の防波護岸に対して1/4のスケールに縮尺されたモデルを再現したものである。したがって、遠心模型実験によるパラベット天端での変位量から、実規模の防波護岸におけるパラベット天端の変位量を予測するためには、少なくとも、

- ① 海底砂層の厚さの差が変位に及ぼす影響
- ② ケーソンの幅の差が変位に及ぼす影響

について定性的な検討を行っておく必要がある。そこで、ケーソン式護岸に対する過去の地震被災事例を分析し、これらの影響を検討した結果、以下のことが判明した⁽⁵⁾。

- ① 海底砂層が厚いほど沈下量が大きく、おおむね海底

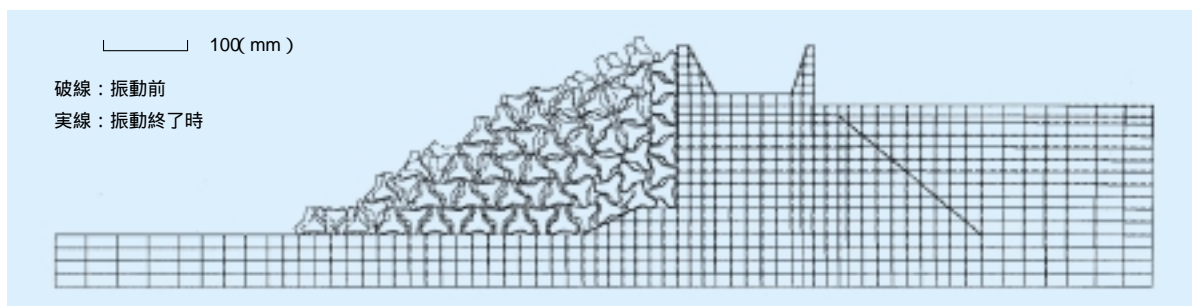


図3-3-5 解析によって得られた振動による消波ブロックの移動状態

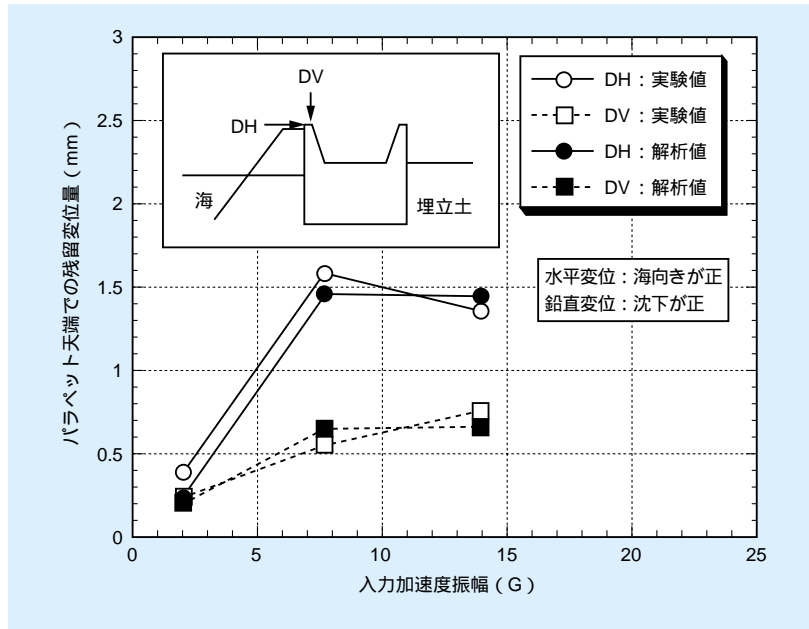


図3-3-6 パラベット天端の残留変位に関する実験と解析の比較

砂層厚さと比例的に沈下量が大きくなる傾向がある。

- ② 対象とする防波護岸のケーソン寸法と比較的相似な護岸では、ケーソンの幅と沈下量の間には明瞭な相関性は認められない。

これらの分析結果より、1/4スケール遠心模型実験で得られた沈下量を4倍して実規模の防波護岸に生じる変位量とすることは、実際に生じる変位と工学的にほぼ同等と見なすことができ、遠心模型実験で計測されたパラ

ベット天端での沈下量を4倍し、海底砂層厚さとの関係をまとめた。その結果を図3-3-7に示す。データの採用にあたっては、基準地震動S₂クラスの地震動と同程度の加振条件を想定し、正弦波、300gal、12波の入力を行った結果に限定した。図より、海底砂層の相対密度がDr=60%程度で、砂層の厚さが10m程度である場合のパラベット天端での沈下量は約0.2m程度であることがわかる。

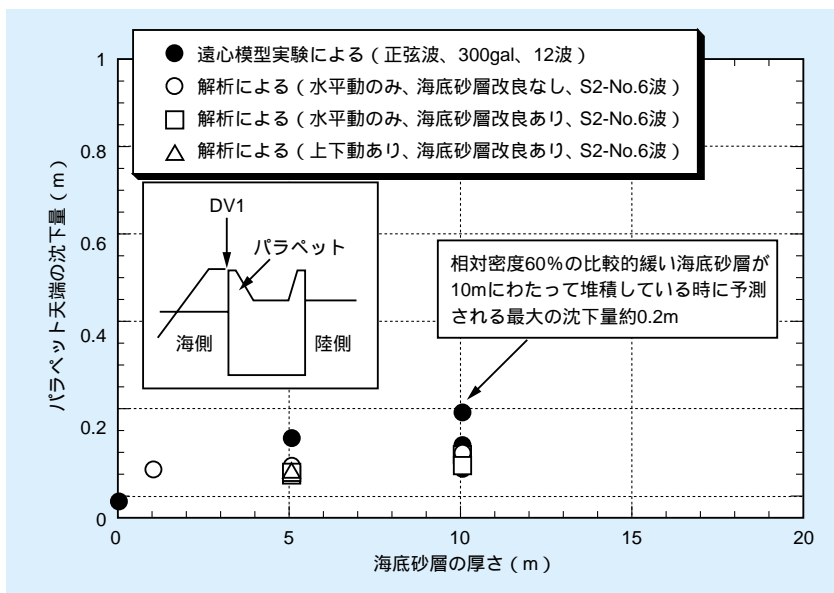


図3-3-7 遠心模型実験や数値解析による実規模防波護岸の地震時沈下量

(2) 数値解析による実規模防波護岸の地震時変形量の評価

実規模の防波護岸が基準地震動 S_2 クラスの地震を受けた時の変形量を数値解析によって予測するため、海底砂層の条件や上下動の有無をパラメータとしたケーススタディを実施した⁽⁵⁾。解析には、遠心模型実験の数値シミュレーションによりその適用性が確認されたDEM-FEMカップリング解析手法(SEAWALL-2D)を用いた。

1) 解析ケースと解析モデル

解析では、海底砂層の厚さを1m、5m、10mの3種類に設定した。海底砂層の密度条件(締め具合)については、本来建設地点ごとに異なるものであるが、ここでは相対密度で50～60%程度の中密な状態を想定した。また、海底砂層厚さ5mと10mのケースについては、原地盤のままの状態(改良なし)と、基礎捨石下を相対密度80%程度に一部締め改良した状態(改良あり)の2種類を設定した。埋立土については、地震時に激しい液状化が発生することがないように、相対密度で80%程度まで締めることを前提とした。

入力地震動については、海底岩盤のS波速度が700m/sであることから、海底岩盤表面を解放基盤表面とし、 S_2 クラスの模擬地震動(最大加速度388.4gal)を海底岩盤表面に設定した。ただし解析では、海底岩盤表面から20mの位置を解析上の入力基盤と定め、解放基盤表面に設定した模擬地震動の引き戻し計算によって得られた入射波を解析用の入力地震動とした。

機能維持に関する検討では、震度0.1の上下動を不利な方向に作用させて検討することになっている。ここで

は、海底砂層厚さ5mで改良ありの条件に対して、上下方向の震度0.1を考慮した解析も行い、上下動の有無の影響を比較した。

解析モデルの代表例として、図3-3-8に海底砂層厚さが5mで、海底砂層の一部を締め改良したケースのモデルを示す。

2) 解析用物性値の設定

FEM解析領域のうち、埋立土、海底砂層などの砂層については、各々の相対密度に対応した液状化強度を参考にして解析用物性値を設定した。透水係数は、 $k=10^{-2} \text{cm/s}$ である。一方、基礎捨石、裏込めなどの捨石の解析用物性値については、実物のケーソン護岸を対象とした地震観測結果や、実物と相似な粒径を持つ碎石の室内動的変形試験結果を参考にして推定した。捨石の透水係数については、遠心模型実験などから、この領域ではほとんど間隙水圧が上昇しないことを考慮して、いずれも十分大きな値($k=10^2 \text{cm/s}$)とした。ケーソンの陸側側面ならびに底面には、模型実験のシミュレーション解析と同様、震動時の滑動を考慮するためのジョイント要素を配置した。

DEM解析領域である消波ブロックの諸元については、解析が2次元解析であることを考慮して、重量、個数、密度、慣性モーメントを換算した。また、消波ブロック間の接触点におけるばね定数については、コンクリートの一般的なヤング係数、ポアソン比から解析的に推定した。接触点における摩擦係数は、静止摩擦係数 $\mu_s=0.6$ 、動摩擦係数 $\mu_d=0.5$ とした。

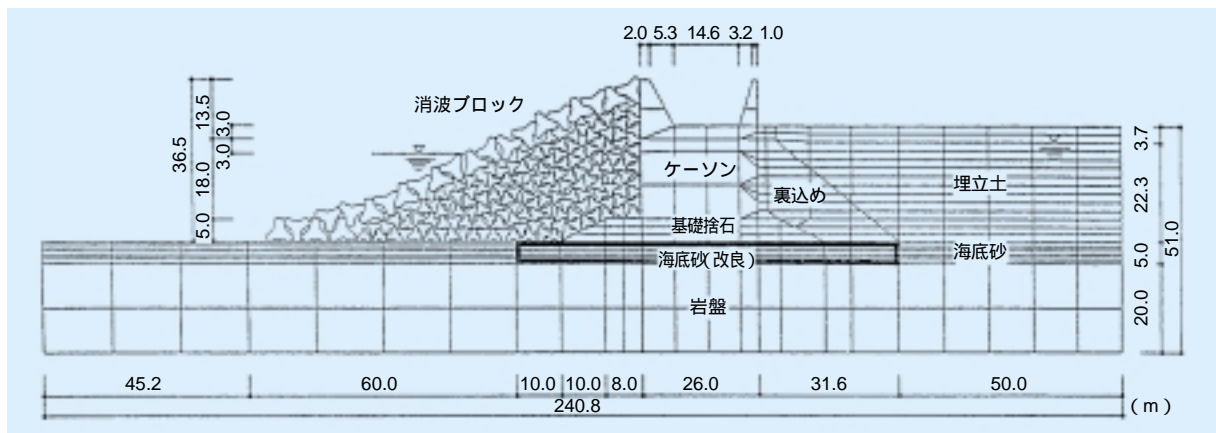


図3-3-8 実規模防波護岸の数値解析に用いた解析モデル(海底砂層厚5m、海底砂層の改良あり)

3) 解析によるパラペット天端の沈下量の評価

解析によって得られたパラペット天端の沈下量と海底砂層の厚さの関係を図3-3-7に併記した。図より、海底砂層厚が厚くなるにしたがって沈下量が大きくなる傾向が認められる。また、海底地盤の改良の有無による沈下量の違いに着目すると、砂層厚さ5m、10mのいずれの場合にも改良を施した方が沈下量が小さく、海底砂層が厚くなるほど改良効果が大きくなる傾向が認められる。ただし、海底砂層厚さが10mで、海底砂層に改良を施していない場合でも、パラペット天端の沈下量は0.12m程度であり、海底砂層に対してケーソン自重や消波ブロックによる押さえ効果が沈下の低減につながっているものと推測される。図3-3-7には、上下動の有無によるパラペット天端の沈下量の比較も示している。震度0.1程度の上下動は、パラペット天端の沈下量にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

(3) 地震後の変形量からみた防波護岸の機能維持検討

防波護岸に要求される最も重要な機能のひとつは、地震によって変形を生じた防波護岸に大きな波浪が来襲し、それともなって越波量が増大しても、敷地が過度に浸水することを防ぐ越波防止機能である。越波量の変化につながる防波護岸の地震時変形は、地震による消波ブロックの変形とケーソン上のパラペット天端の沈下であると考えられる。言うまでもなく、機能維持に対する具体的な許容値は、防波護岸の立地条件や構造上の差など、様々な条件に依存することから、特定の値を一律に定めることはできないが、ここでは図3-1-2に示す基本断面を対象に、地震による消波ブロックの変形およびパラペット天端の沈下の2つの事象に対して、地震後の越波防止機能の検討を行った⁽⁵⁾。

1) 地震による消波工の変形と越波防止機能

防波護岸の遠心模型実験より、消波ブロックは加振によって法面勾配が緩やかになるとともに、天端高さが低下する傾向があった。模型実験で得られたこれらの知見をもとに、地震による消波ブロックの法面勾配と天端高さの変化が越波流量に及ぼす影響を調べるために水理実験を行った。実験には、長さ51m、深さ1.2m、幅0.9mの反射波吸収式2次元造波水路を用い、実規模防波護岸の1/60スケールの模型を対象に、フルードの相似則に

基づいた実験を行った。消波ブロックの法面勾配および天端の沈下量は、模型実験の結果を参考に、法面勾配を設計断面における1:2.0を基準に1:2.2、1:2.5の3種類、天端の沈下量を0m、-1.5m、-3.0m、-4.5mの4種類に設定した。実験は、これらを組み合わせた12断面を対象に越波流量を測定した。

図3-3-9に実験結果の代表例を示す。同図は、横軸に作用波高と基本設計波高の比 H/H_0 をとり、現地換算越波流量 q の変化を示したものである。これより、地震による消波ブロック法面勾配の緩勾配化、天端の沈下による越波流量の減少がわかる。すなわち、遠心模型実験で得られた程度の地震による消波ブロックの変形量では、地震後に大きな波浪が来襲しても越波流量が増加することはなく、越波防止機能を維持する上で問題ないことが示された。

2) 地震によるパラペット天端の沈下量と越波防止機能

遠心模型実験ならびに実規模防波護岸を対象とした数値解析結果から、防波護岸が基準地震動 S_2 クラスの地震動を受けた時のパラペット天端における沈下量を海底砂層の厚さに対してプロットしたのが、図3-3-7である。これによると、海底砂層の厚さが10m以下で、相対密度が60%程度以上である場合に、実規模防波護岸のパラペット天端に生じる沈下量は0.2m程度以下であることがわかる。

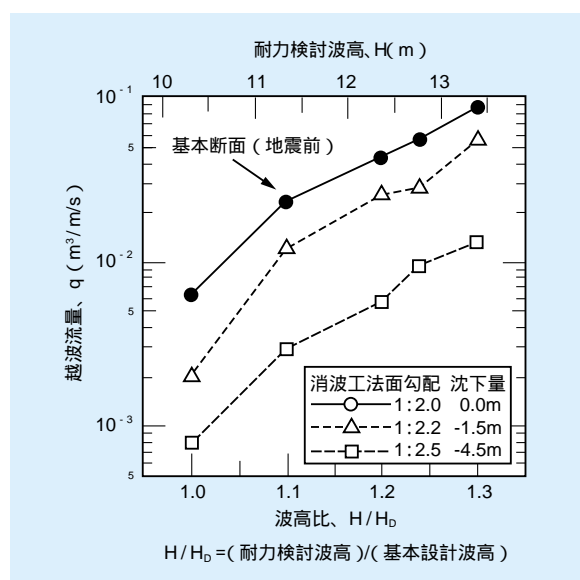


図3-3-9 消波ブロックの法面勾配の変化や天端の沈下が越波流量に及ぼす影響

ところで、越波した海水はケーソン上に設けられた越波排水路を流下し、**図3-3-10**の人工島平面図に示す越波排水路の左右隅角部に設けられた排水口より再度海に戻される。この場合、越波水の水深が最大となる位置は、2つの排水口の間付近となる。この中心点から排水口までの距離を500mと想定した場合の中心点付近における最大水深は、数値解析的検討により6.25mと推算されている。一方、パラペット天端高さとの関係については、合田ら⁽⁶⁾の越波流量の算定図や高山ら⁽⁷⁾の式で評価することができる。これらを参考に、パラペット天端の沈下量と越波流量比の関係を示したのが**図3-3-11**である。越波流量比は、地震前の状態(パラペット天端の沈下0m)での越波流量に対するパラペット天端沈下後の越波流量の比を表している。ここで、最大水深位置である排水路中心点での水深として、上記の最も厳しい条件である6.25mに対する安全性を検討するとすると、

越波排水路高さが10.5mであることから、越波排水路が許容し得る最大の越波流量比は $1.68 (=10.5/6.25)$ となる。これは、パラペット天端の沈下量に換算すると1.36mとなり、最大限1.36mまでの沈下を許容できることになる。それに対して、地震によって生じるパラペット天端の沈下量は、海底砂層の厚さが10m程度で、相対密度が60%程度であっても0.2m程度であり、想定される立地条件下(岩盤もしくは数メートル程度の砂層上に防波護岸を建設する)において、地震後の越波防止機能は十分に維持できるものと判断される。

3-3-5 ま と め

防波護岸の耐震安定性評価技術の高度化研究によって得られた結果をまとめると以下ようになる。

- ① 遠心載荷装置を用いた模型振動実験により、地震時における防波護岸の変形挙動を明らかにした。
- ② 地震時における防波護岸の変形量を数値解析によって予測するための数値解析手法を開発し、模型振動実験の数値シミュレーションにより、その適用性を確認した。
- ③ 基本設計で設定された防波護岸の基本断面を対象に、地震によって変形を生じた防波護岸の越波防止機能について検討し、想定される立地条件下において防波護岸は地震後の越波防止機能を十分に維持できることを明らかにした。

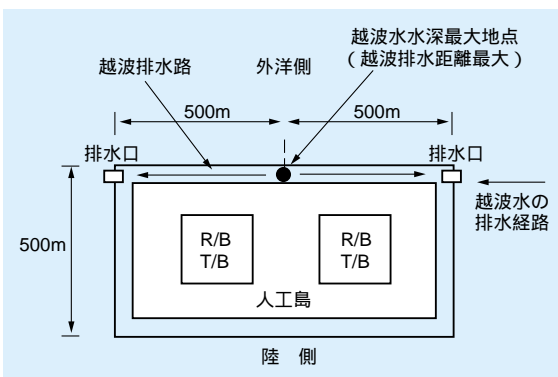


図3-3-10 人工島平面図と越波水の排水口の位置

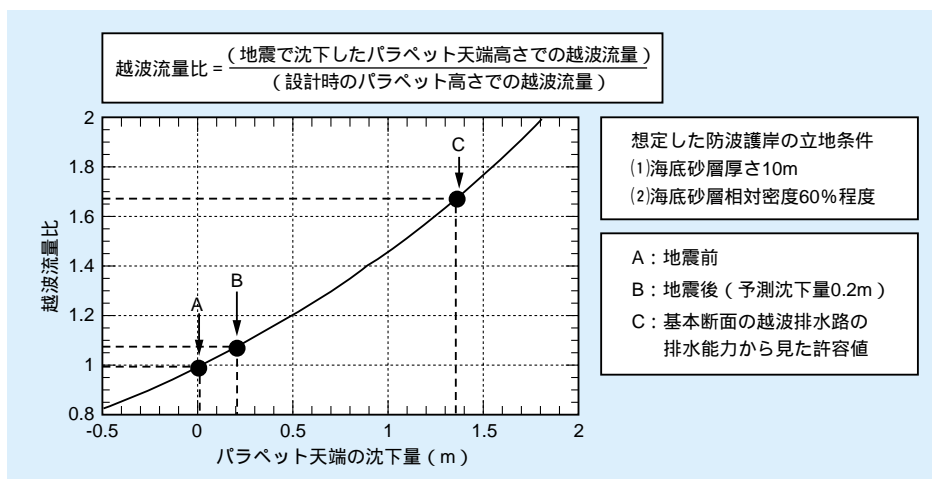


図3-3-11 パラペット天端の沈下量と越波流量比の関係

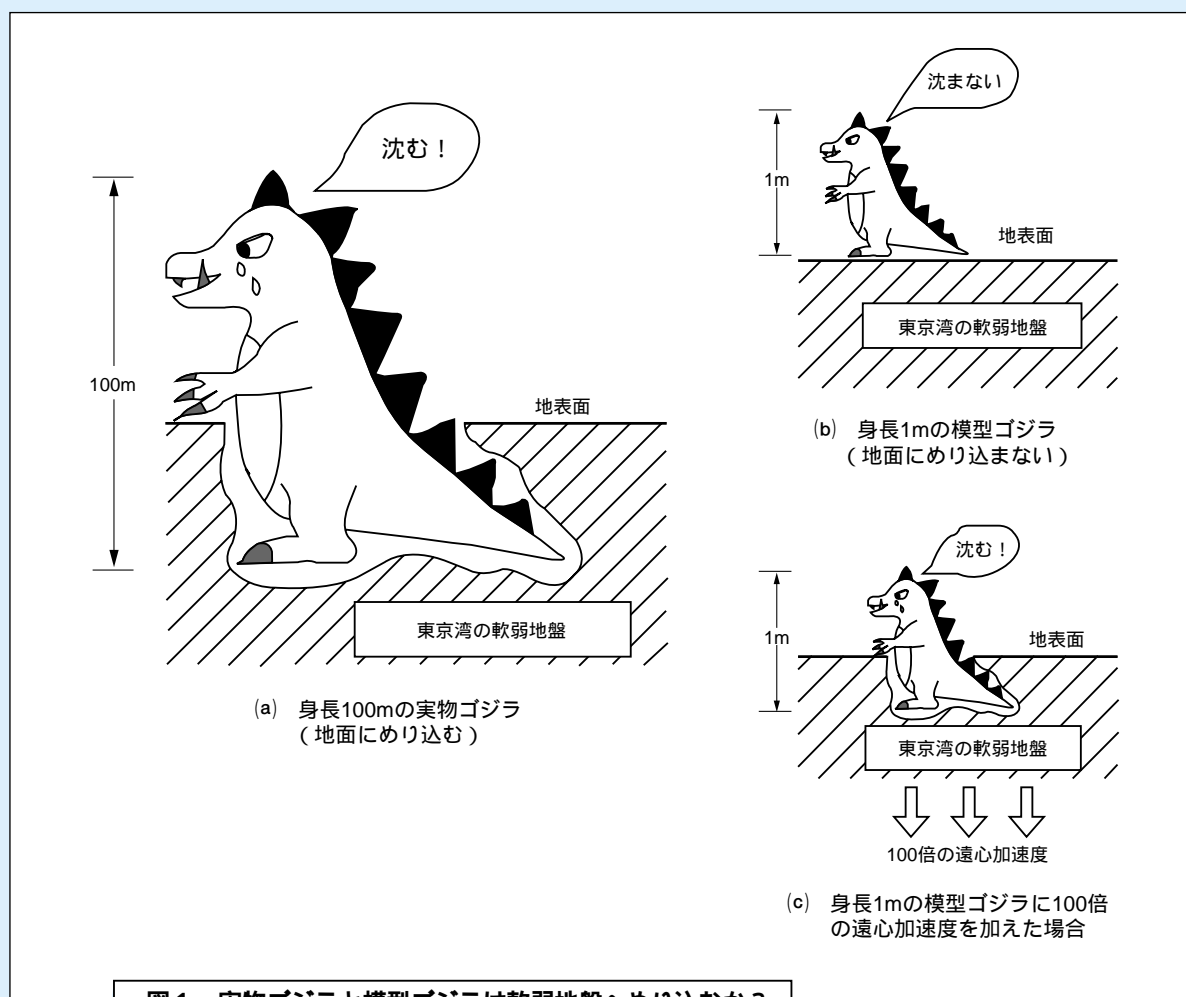
コラム1 遠心模型実験 - ゴジラは東京湾に現れるか? -

2～3年前ゴジラの映画がアメリカで製作され、評判になりました。日本でも公開され、昔懐かしく御覧になった方もあると思います。日本製ゴジラの名場面の中に、ゴジラが東京湾に現れるシーンがあります。子供の頃にワクワクしたシーンですが、子供心に「本当かな」と思った人も多いはず。大人の目から見ると、東京湾は軟弱地盤が大半であるため、身長100mのゴジラの体重を支え切れず、ゴジラは軟弱地盤の中へズボズボめり込んでしまうことが容易に想像できます(図1(a))。したがって、子供心の直観は正しく、仮にゴジラが存在したとしても東京湾にはゴジラは出現できません。

このことをもっとマジメに考えてみましょう。仮にゴジラの1/100の模型を作って同じ地盤上に置いたらどうなるでしょうか。この場合は、模型ゴジラの重量が軽いので地盤中へめり込みません

(図1(a))。これも子供の頃の潮干狩りの経験を思い出せばわかると思います。以上で述べたことは、「なーんだ。あたり前じゃないか。」と思われることばかりですが、ここに遠心模型実験の秘密があります。模型ゴジラと地盤に100G(重力の加速度の100倍)の遠心加速度を下向きに加えてやれば模型ゴジラの体重は100倍になり、模型ゴジラの足の裏の地面を押す圧力は実物ゴジラと同じ大きさとなり、実物ゴジラと同様に地盤にズボズボめり込みます(図1(c))。つまり、自重(図1ではゴジラの体重)が関与する現象では、小規模な模型実験でも遠心加速度を下向きに加えてれば実物と同様な現象を生じさせることができます。このことを「力学的相似性が成立する」と言います。これが遠心模型実験の原理のざっぱな説明です。

地盤の安定問題には、土の自重が関係するものが多いため、遠心模型実験がよく行われます。図



2は斜面の安定問題の説明したのですが、すべり落ちる土塊の重量をゴジラの体重に置き換えて考えれば、遠心模型実験の有効性がわかると思います。ただし、土の性質も土の自重によって生じる土中の圧力の大きさによって変化するので、遠心模型実験の原理は前述したほど簡単ではありません。しかし、詳しい検討結果によれば、そうし

た影響を考慮しても力学的相似性が成立することがわかっています。

本レビュー第3章では、防波護岸の地震時変形問題に遠心模型実験を使用していますが、その理由は、上述した原理により遠心模型の変形量から実物の変形量を容易に推定できるためです。

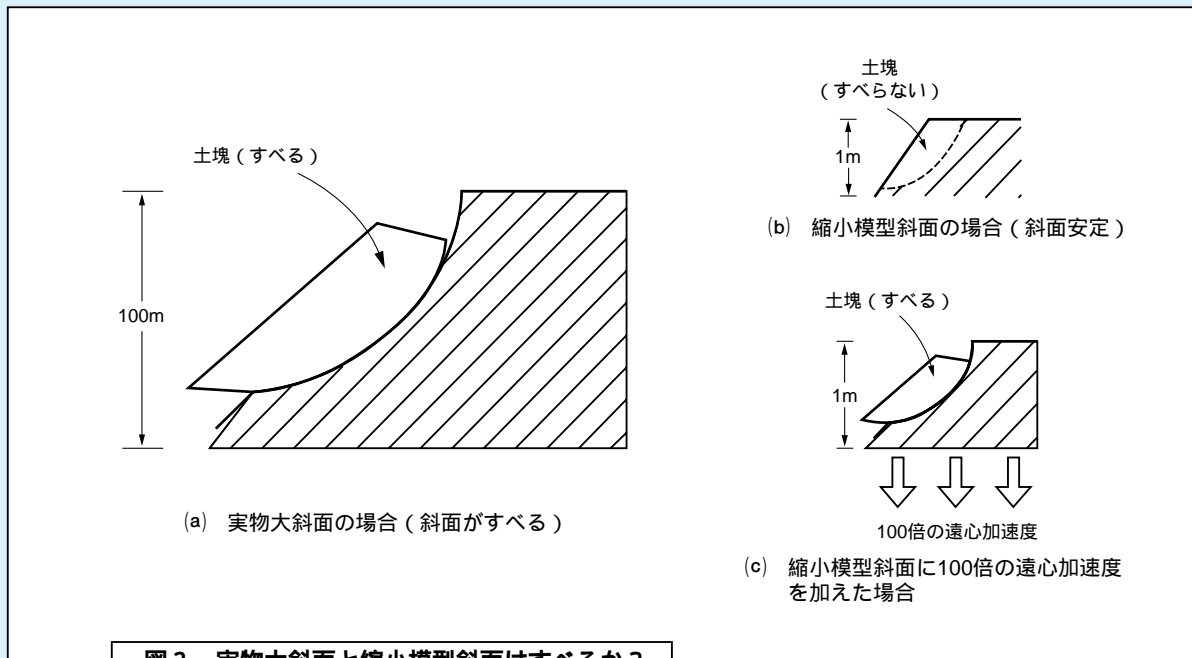


図2 実物大斜面と縮小模型斜面はすべるか？