

波浪荷重をうける海底粘土地盤の沈下解析

Shakedown Analysis of Clay Seabed under Wave Induced Loading

佐藤 研一*・安原一哉*・斉藤 諭**・兵動正幸***

Ken-ichi Sato, Kazuya Yasuhara, Satoshi Saito and Masayuki Hyodo

This paper describes a method of applying the results of cyclic triaxial tests on undisturbed samples of a marine clay to predict the settlement of a breakwater. The stresses and strains beneath the structure are determined using a finite element analysis allowing the determination of shear deformations under undrained cyclic loading and settlements due to post-cyclic volumetric changes. The results of numerical analysis indicate that the cyclic-induced settlements of a lightweight breakwater on seabed clay are mainly influenced by the kind of breakwater, the direction of wave action and the base width of breakwater.

KEY WORDS : Wave load/Clay seabed/Shakedown Analysis/Breakwater

1. はじめに

近年、海上空港の建設や首都圏を初めとして港湾の埋め立て有効利用するウォーターフロントの開発が盛んに行われるようになってきた。これらの構造物うち、防波堤のような沿岸構造物は波浪により繰返し荷重を受けることになる。この時防波堤下の海底粘土地盤もこの防波堤を媒体とする相互作用により、繰返し応力を受ける。したがって、台風等の波浪の厳しい条件下では地盤が受ける繰返し応力も大きくなり、このため防波堤は沈下したり、不安定になり、場合によっては破壊することも考えられる。このような現象は、土の非排水繰返しせん断と繰返しせん断により蓄積した過剰間隙水圧の消散との2つの現象の重ね合わさることにより生じると考えられる^{1)・2)}。本論文では、粘土地盤上に建設された防波堤を対象とし、上述の2点を考慮した防波堤の沈下解析を室内試験の結果と有限要素弾性解析を組み合わせることにより数値実験を行い、その結果の考察を行った。

2. 波浪荷重を受ける防波堤の沈下解析手法

防波堤の沈下解析における評価法³⁾は表-1に示す通りである。防波堤下の海底粘土地盤は、波の作用の連続性を考えると、防波堤との相互作用により非排水繰返し荷重によるひずみが生じるとともに、地盤内に過剰間隙水圧が累積することになる。また、この過剰間隙水圧は、波が平静時には消散するためにこれに伴う沈下も生じると考えることができる。これら2つの現象は繰返し生じるので、防波堤の安定性を考えた解析を行う際には、これらの現象を考慮に入れる必要があると思われる。著者ら^{3)・4)・5)・6)}は、これまでに非排水繰返し三軸試験結果を用い、繰返し応力下の土のひずみ量と間隙水圧の発生量の予測を提案し、その適用例を示してきた。そこで本論文では、室内試験によって海底より採取された不攪乱試料を用いた非排水繰返し三軸試験を行い、この試験結果^{7)・8)}から任意の繰返し応力と繰返し回数下で生じるのひずみ量と過剰間隙水圧の発生量の予測を行う定式化を行った。次いで、対象となる地盤の状態と、解析対象海面の波の情報から、防波堤に作用する波圧を合田の式⁹⁾により求め、次にこれらのデータを用いて有限要素弾性解析の結果より求められる各要素の最大主応力を波と防波堤の相互作用によって地盤内に生じる繰返し応力と考えると、非排水繰返し荷重によるひずみ量と過剰間隙水圧の発生量の予測式を用いることにより任意の波の繰返し回数時における最大主応力の作用方向に生じるひずみと過剰間隙水圧を求めることが可能となる。また、過剰間隙水圧の消散によって生じる再圧密に伴うひずみ量として安原ら¹⁰⁾が行った室内試験の結果からの予測式を用いて評価し、このひずみ量より沈下量を求めた。このような方法を用い、非排水繰返し荷重による沈下量と過剰間隙水圧の消散による沈下量を重ね合わせて波浪荷重を受ける防波堤下の海底粘土地盤の全沈下量とした。

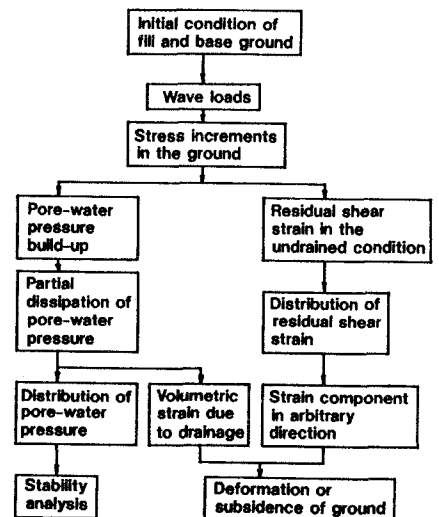


表-1 防波堤の沈下解析の評価法³⁾
(Hyodo et al., 1988)

3. 波浪荷重を受ける軟弱地盤の沈下と安定性の評価手法

3-1 変形予測モデル

兵動ら^{7)・8)}は、不攪乱粘土の繰返し三軸試験に基づいて、繰返し荷重

* 正会員 茨城大学工学部都市システム工学科 (316 日立市中成沢町4-12-1)、** 非会員 神奈川県、

*** 正会員 山口大学工学部社会建設工学科

を受ける粘土の変形と間隙水圧の定量的な評価法を提案した。図-1にこれら三軸試験の結果から不攪乱粘土の変形と間隙水圧の定量的な評価を行う際のフローチャートを示す。予測手法の詳細は別途示している^{1), 7), 8)}。

3-2 地盤内要素の鉛直ひずみの評価^{1), 3)}

室内の繰返し三軸試験では、周知のように側圧 σ_3 が一定で軸圧 σ_1 のみが変化するが、実際の地盤においては繰返し応力によって主応力が常に変動する。また、実験においては軸対称であるのに対し、解析では平面ひずみ状態の結果であることから、この関係を対応づけるために、実験および解析共に45度面の最大せん断応力 τ_{max} の変動量を取り出し対応させることとした。これを用いれば、三軸試験における軸応力、軸ひずみを最大せん断応力及び最大せん断ひずみに変換を行うと非排水条件下では以下ようになる。

$$\sigma_a = 2\tau_{max} \quad \epsilon_a = (4/3)\gamma_{max} \quad \dots\dots\dots(1)$$

以上のような応力とひずみの対応を行うと、解析により所定の波浪荷重などの繰返し作用による地盤内のひずみとして最大せん断ひずみが求められることになる。しかし、現実問題は波浪荷重などによる地盤の沈下量や水平方向への変形量などを評価することが多い。そこで、最大せん断ひずみを用いて、任意の方向の垂直、最大せん断ひずみを求める方法を検討した。図-2に実験と解析のひずみ状態を表すモールのひずみ円を示している。今、非排水状態を考えているので、実験では軸対称の条件で $\epsilon_1 + 2\epsilon_3 = 0$ 、解析では平面ひずみ条件で $\epsilon_1 + \epsilon_3 = 0$ が保たれている。従って、これらのモールのひずみ円は図のような形となる。解析においては、 $\epsilon_1 = \gamma_{max}$ となって最大主ひずみが明かとなり、さらに主ひずみ(応力)軸からの回転角 α が与えられればいずれのひずみ成分も計算することが可能である。主ひずみ軸とひずみ円とのなす角度を α とすると、鉛直ひずみ ϵ_v と水平ひずみ ϵ_h は、

$$\epsilon_v = \epsilon_1 \cos 2\alpha \quad \epsilon_h = \epsilon_3 \quad \dots\dots\dots(2)$$

により求めることが出来る。したがって、地中各要素において鉛直ひずみと水平ひずみを求めることによって、非排水条件における沈下量と側方変位量を求めることが出来る。

3-3 発生間隙水圧の消散による沈下量の評価法¹⁰⁾

非排水条件で、飽和地盤が繰返し荷重を受けると、地盤内には過剰間隙水圧が発生する。この間隙水圧の時間的变化を非排水繰返し三軸試験の結果より、次のようにして予測した。

まず、図-1に示したp-q平面上で、繰返し荷重をN回受けたときの間隙水圧は次の式のように与えられる。

$$u_p = p_c' + (q_{yc} - q_a)/3 - q_{yc}/\eta_p \quad \dots\dots\dots(3)$$

このように、軟着堤の施工された海底地盤内では過剰間隙水圧が発生する。しかし、この地盤内に発生した間隙水圧は、波浪がおさまった後にゆっくりと消散することになる。この間隙水圧の消散によって地盤は再圧密され、沈下を起こすと考えられ、波浪による海底地盤の沈下量を評価する際には、この間隙水圧による沈下の影響を考慮する必要がある。この際圧密沈下によって生じるひずみは、次式で計算される¹⁰⁾。

$$\epsilon_{vr} = \alpha \cdot \{C_r / (1 + e_0)\} \cdot \log \{(1 / (1 - u_p / p_c))\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、有明粘土の室内試験の結果を用いて、 α :実験定数、 C_r :再圧縮係数である。また、 e_0 は供試体の初期間隙比である。

3-4 全沈下量の評価法

有限要素解析結果と上述の2つの沈下量の評価法にしたがってそれぞれのひずみ量を算定し、足し合わせた波と防波堤の相互作用によって生じる海底粘土地盤の沈下量の計算を行った。

4. 波浪荷重を受ける防波堤の弾性解析

4-1 波浪荷重を受ける防波堤の概要 図-3に今回解析の対称とした防波堤と地盤の概要を示す。基礎地盤は層厚20mの一樣な粘土で構成されていると仮定した。

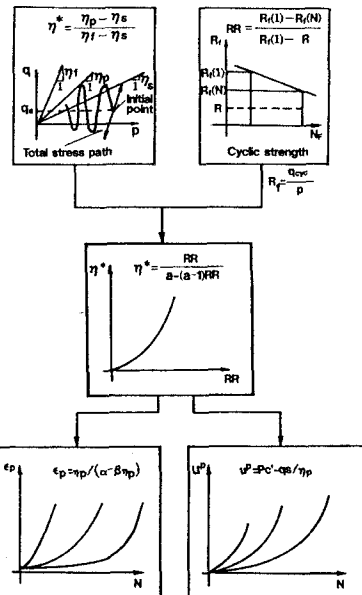


図-1 変形と間隙水圧の予測手法

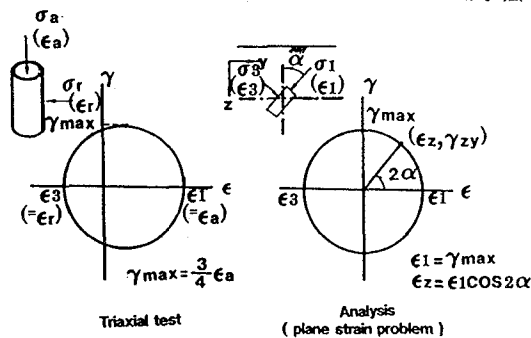


図-2 実験と解析のひずみの状態³⁾

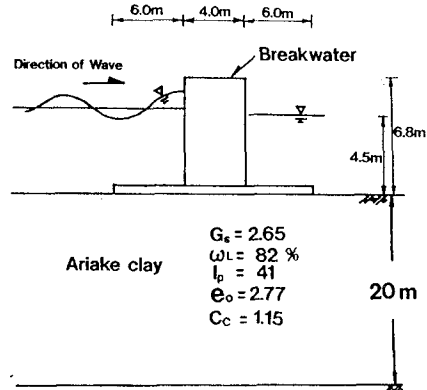


図-3 防波堤と海底粘土地盤の概要

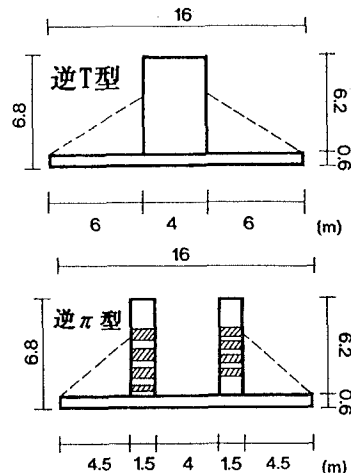


図-4 解析に用いた防波堤の形状

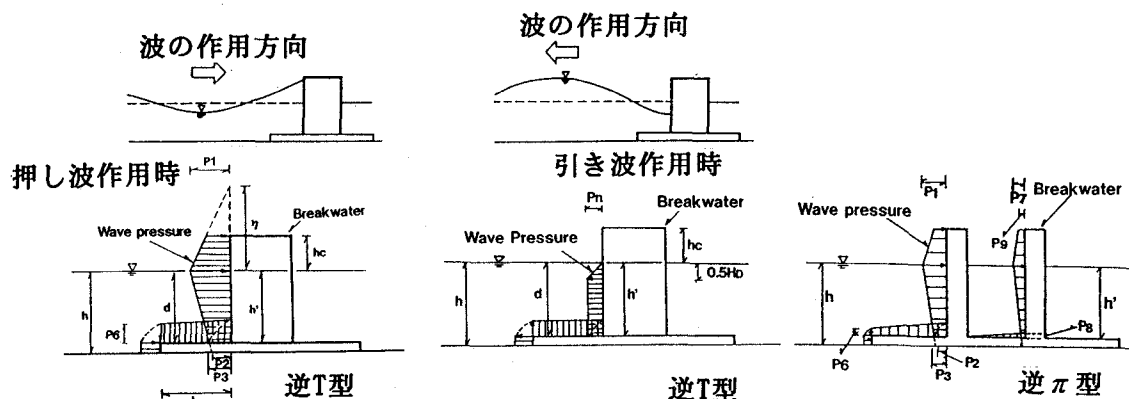


図-5 防波堤に作用する波圧分布⁹⁾

また、防波堤は幅16m、高さ6.8mの大きさを標準的な防波堤とした。また、粘土地盤の物理的性質も図中に示している。今回解析対象とした防波堤は、軟弱地盤着底式防波堤（軟着堤）¹¹⁾と呼ばれ、地盤改良をしない軟弱地盤上に軽量のケーソンを直接設置する方式のものである。また波の特性は、熊本港の有義波のデータ（周期：5.44(s)、波長：39(m)）を用い、波数は各波高（0.5～5.0mまで0.5mおき）の波浪が6、12、24、48時間続くと考え、各時間に相当する波数を計算して解析を行った。

図-4に今回解析の用いた逆T型と逆π型の防波堤の形状と大きさを示す。また、図-5にその波圧分布を示す。逆T形の防波堤は、波をふせぐ鉛直壁部と地盤とが接触し付着力を発揮する堤版部から構成されている。また逆π型は、防波堤前部壁面に作用する波圧を軽減するために、開口部があり波圧の軽減が施されているが、防波堤中央部にも波が入るために、後部壁にも波圧が生じる点が逆T型と異なる。防波堤自身の自重を軽減するためにこのような形状が考えられた。これらの防波堤に生じる波圧分布は、防波堤壁面に波の峰があるときと波の谷があるときの2つの場合について考え、合田の式⁹⁾により求めた。

4-2 解析条件

解析は、有限要素法による地盤解析用プログラム¹²⁾を用いて、非排水状態及び平面ひずみ状態の弾性解析を行った。図-6に解析に用いたモデルを示している。粘土地盤厚さ20m、地盤幅を100mとし、地盤の解析モデルは要素数500、節点数286の三角形要素とした。このモデルの上に前記の各形状の防波堤を想定した。表-2に解析に使用した構造物（防波堤）と地盤（粘土）の弾性係数、ポアソン比を示す。海底粘土地盤の弾性係数については、三軸試験の結果の応力ひずみ曲線を用い、初期接線勾配を用いて算定した。このようにして求められるパラメータを用いて弾性解析を行い、地盤内応力（最大主応力）とその方向を求めた。解析では防波堤自身の自重を考慮せずに解析を行っている。また、数値実験は波の作用方向、波数、波高、防波堤の形状をパラメータとして行い、その計算結果から、それぞれ沈下量、発生間隙水圧に及ぼす影響について考察をした。

5. 解析結果および考察

5-1 非排水繰返しによって生じる沈下量

(a)波の作用方向が防波堤の沈下量に及ぼす影響 解析では波の振幅の特性を取り込むことを考え、波が防波堤壁面に作用する波圧の計算時において、壁面に波の峰があたる場合（押し波）と谷（引き波）があたる場合の2つに分けておこない、それぞれの波が連続的に防波堤にあたると仮定して沈下量

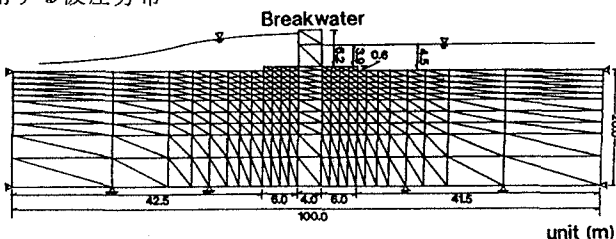


図-6 解析に用いたモデル

表-2 弾性解析に使用した入力定数

	海底粘土地盤	構造物(軟着堤)
水平弾性係数 E_h	357 kPa	2.8×10^7 kPa
鉛直弾性係数 E_v	357 kPa	2.8×10^7 kPa
水平ポアソン比 ν_{hh}	0.25	0.2
鉛直ポアソン比 ν_{vv}	0.25	0.2
$G = E / (2(1 + \nu))$	143 kPa	1.17×10^7 kPa

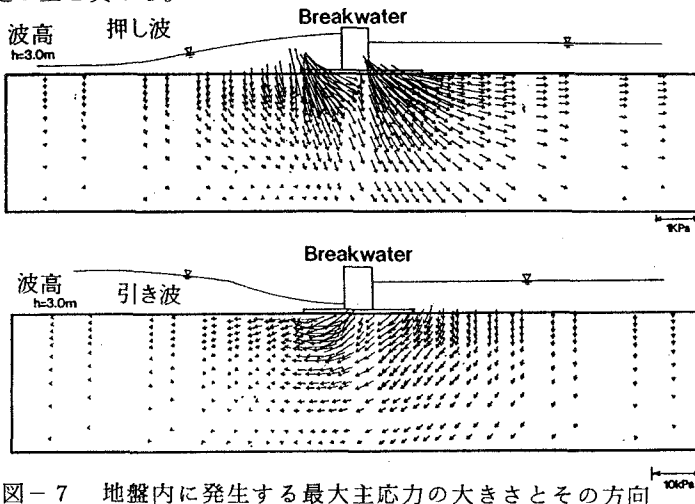


図-7 地盤内に発生する最大主応力の大きさとその方向

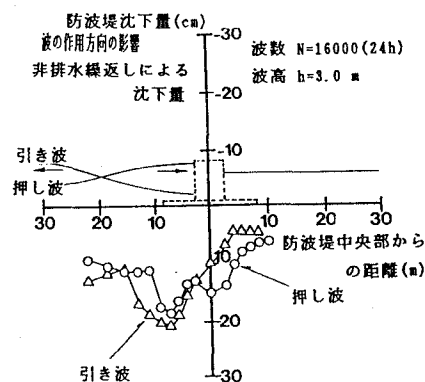


図-8 波の作用方向が沈下量に及ぼす影響

の計算を行った。図-7に弾性解析によって求められる海底粘土地盤内に発生する最大主応力の大きさと方向を示す。これらの図より、最大主応力は防波堤の前端部と後端部に集中していることがわかる。また、押し波と引き波では、最大主応力の大きさが異なり、その方向も反転していることがわかる。

このことは、実際の地盤内ではこ

のように主応力の方向と大きさが複雑に入れ替わると思われ、防波堤の安定性を考える際には、この影響を考える必要があることを示唆している。図-8には防波堤に作用する波の方向（波数： $N=16000$ (24h)、波高： $h=3.0$ m）が非排水繰返しせん断によって生じる沈下量に及ぼす影響を示した。この結果では、波の作用方向の影響はさほど見られない。一方、押し波時と引き波時の波の繰返し回数によって防波堤が沈下していく様子を模式的に示した図-9によれば、押し波時では、波の繰返し回数の増加に伴って防波堤前端部が倒れ込み、防波堤全体が沈むように沈下しており、引き波時では、繰返し回数の増加とともに防波堤後端部を中心として、防波堤前端部がかなり大きく沈下しており、両者は異なった沈下形態を示すことがわかる。これは、地盤内に発生する最大主応力の方向と大きさが波の作用方向によって異なることによる影響と考えられる。

(b) 防波堤の形状が防波堤の沈下量に及ぼす影響 今回の解析では、防波堤の形状が防波堤の安定性に及ぼす影響について調べた。

図-10に逆T型和逆 π 型の2タイプにおける、防波堤に押し波（波数： $N=16000$ (24h)、波高： $h=3.0$ m）が作用する場合に非排水繰返し荷重によって生じる沈下量を比較している。この図から、防波堤の形状により沈下形態が異なり、逆T型では防波堤前端部が沈下するのに対し、逆 π 型では防波堤中央部から後端部にかけての沈下が生じている。これは、逆 π 型が後壁部でも波圧を受けているためと思われる。

(c) 防波堤底部の幅(B)が防波堤沈下量に及ぼす影響 防波堤底部の幅(B)が防波堤の安定性に及ぼす影響を調べるために、防波堤底部の幅を $B=13$ m、 $B=16$ mの2種類を考えて解析を行った。図-11に各底部幅の防波堤に押し波（波数： $N=16000$ (24h)、波高： $h=3.0$ m）が作用する場合に、非排水繰返しによって生じる沈下量に及ぼす影響を示す。この図から、底部幅が狭い方($B=13$ m)は、防波堤中央部に急激な沈下がみられるが、底部幅が広い方($B=16$ m)では、防波堤前端部に沈下の片寄りはあるものの全体に均等に沈下していることがわかる。このことから、防波堤の底部の幅が広い方が安定性が良いと言える。

(d) 波の繰返し回数(波数)が防波堤の沈下量に及ぼす影響 一般的に波浪は、不規則な波高をもってランダムに防波堤に作用し、またその回数(波数)もまちまちである。このような波の特性を簡単に扱うために、波高の高さを固定し、かつ波数は有義波のデータを用い、その周期からそれぞれ任意の時間での波数の計算を行い解析に用いた。逆T型の標準防波堤に波高 $h=3.0$ mの押し波および引き波が $N=10, 100, 500, 1000, 8000, 16000$ 回あたった時の非排水繰返しに伴う沈下量をそれぞれ、図-12に示す。これらの結果から、地盤の沈下量は、波の繰返し回数に影響され、押し波、引き波とも波の作用回数が増加するとともに沈下が進んで行く様子がわかる。

5-2 過剰間隙水圧の消散によって生じる再圧密にともなう沈下量 図-13に $h=3.0$ mの押し波と引き波が逆T型防波堤にそれぞれ $N=4000, 16000$ 回作用したときに海底粘土地盤内に発生した過剰間隙水

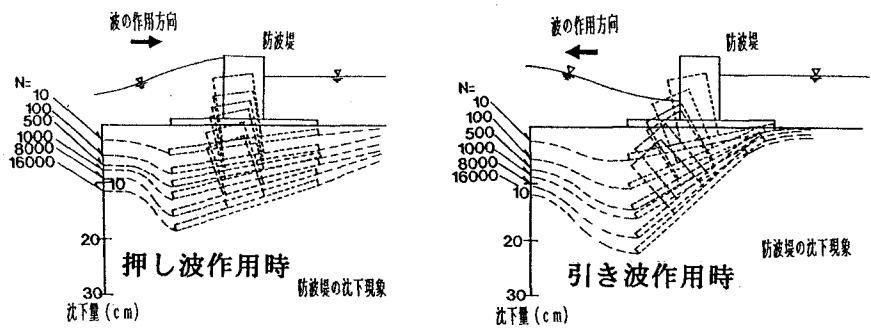


図-9 波の作用方向の違いによる防波堤の沈下現象

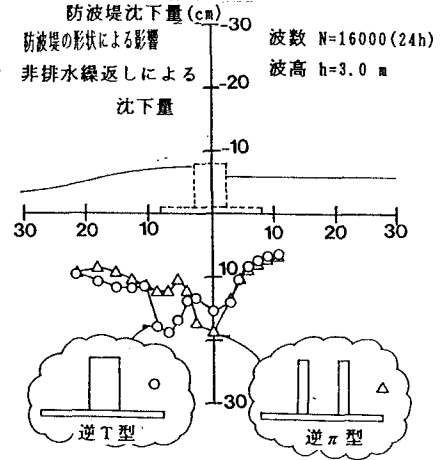


図-10 防波堤の形状が沈下量に及ぼす影響

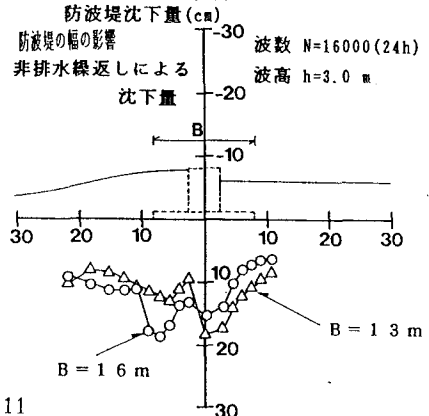


図-11 防波堤底部の幅(B)が沈下量に及ぼす影響

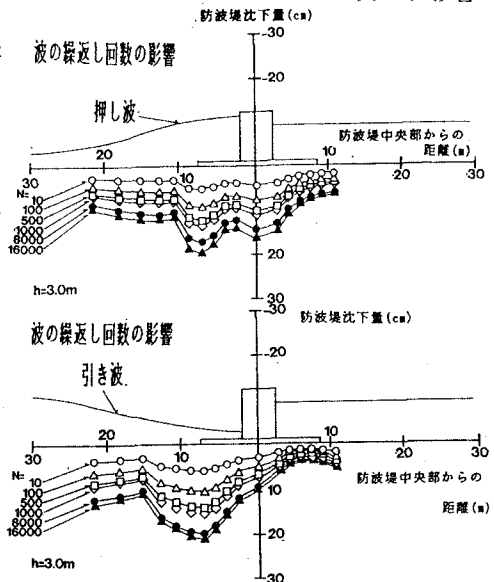


図-12 波の繰返し回数が防波堤沈下量に及ぼす影響

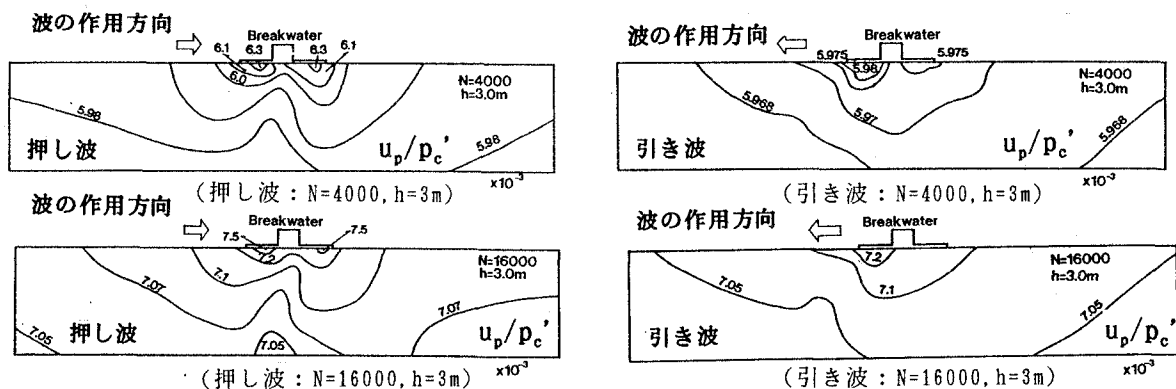


図-13 地盤内に発生する過剰間隙水圧の分布

圧の分布を示す。押し波が作用した場合は、防波堤の前端部及び後端部最大の過剰間隙水圧の発生がみられ、徐々に地盤全体に広がって行く様子がうかがえる。引き波作用時の場合は発生する間隙水圧が同じ回数では、小さくなっており、防波堤前端部にその発生量が大きくなっていることがわかる。さらに詳細に調べるために波の高さが3mの押し波が作用した場合に防波堤底部（前端部、中央部、後端部）における過剰間隙水圧の発生量と波数の関係を図-14に示す。この図より、防波堤底部の間隙水圧は、波の繰返し回数と共に増加し、その発生量は、防波堤中央部よりも防波堤の前・後部に顕著に現れていることがわかる。次に、この防波堤底部（前端部、中央部、後端部）の発生間隙水圧が海底粘土地盤内にどの様に伝達されているかについて、防波堤に押し波（波数：N=16000(24h)、波高：h=3.0m）が作用する場合の発生間隙水圧と深さの関係を図-15に示す。この図より、発生間隙水圧は深度が深くなるにつれて小さくなり、防波堤中央部よりも前・後端部に顕著な発生がみられるが、防波堤の後端部は前端部よりも、防波堤底部で発生した間隙水圧の深度による低下率が小さいことがわかる。したがって防波堤下の地盤は非排水の繰返しに伴って、特に防波堤直下部の地盤内に過剰な間隙水圧が発生し、この間隙水圧の消散により再圧密が生じて防波堤直下部に沈下が生じると考えられる。そこで、各影響因子が過剰間隙水圧の消散に伴う沈下量に及ぼす影響について、防波堤に押し波および引き波（波数：N=16000(24h)、波高：h=3.0m）が作用する時の結果を以下に述べる。

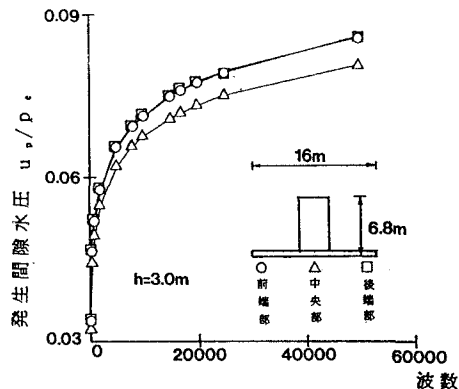


図-14 発生間隙水圧と波数の関係

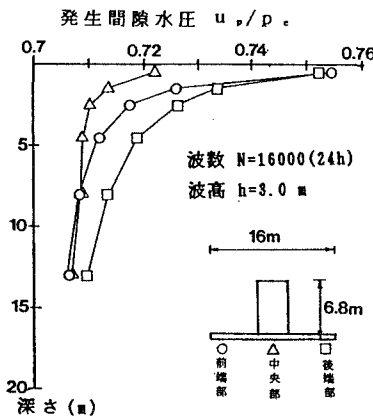


図-15 発生間隙水圧と深さの関係

(a) 波の作用方向による影響 図-16に波の作用方向が過剰間隙水圧の消散にともなう沈下量に及ぼす影響について、沈下量を示す。これから、波の作用方向の影響が沈下量に顕著に現れており引き波では、沈下量に場所による差がほとんどみられないが、押し波では間隙水圧の発生の分布通りに防波堤前・後端部に沈下が起こっていることがわかる。

(b) 防波堤の形状による影響 図-17に逆T型と逆π型の防波堤形状の違いが過剰間隙水圧の消散にともなう沈下量に及ぼす影響について沈下量を示す。この図より、形状の違いによる影響はさほど見られないが、逆T型の方が逆π型より前・後端部で沈下が顕著であるのに対し、逆π型では、防波堤壁部の開口部の影響により防波堤後部に沈下が生じている。

(c) 防波堤の幅の影響 図-18に2種類の防波堤底部の幅(B=13m、16m)の違いが過剰間隙水圧の消散にともなう沈下量に及ぼす影響について沈下量を示す。この結果から幅の広い方がわずかながら、防波堤が地盤に繰返し応力を伝える面積が広いと沈下量が少なくなっていることがわかる。このことは、発生間隙水圧の上昇量と繰返し応力の大きさが表裏一体の関係を示していることから考えると、防波堤の幅を広げるにより、地盤内に均等に波圧による繰返し応力を伝え

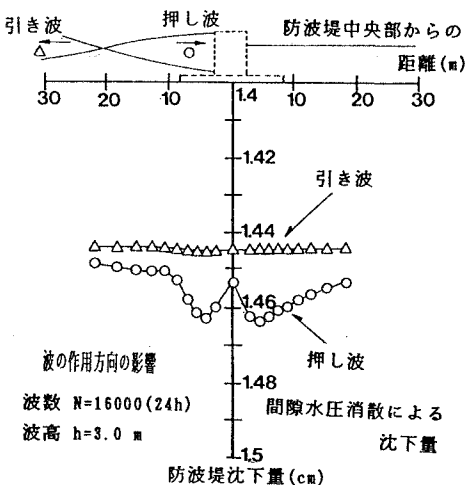


図-16 波の作用方向が沈下量に及ぼす影響

ることが可能となることから、沈下が軽減されたと思われる。今回の解析では、海底粘土地盤内に発生する間隙水圧が小さい為に、間隙水圧の消散に伴う沈下量は非排水の繰返しに伴う沈下量に比べるとかなり小さい値となった。しかし、防波堤の安定性を考える際には重要な要因の一つであると考えて、過剰な間隙水圧の消散にともなう沈下量と非排水繰返しによる沈下量との和を全沈下量であると考えられる。

6 結論

波浪荷重を受ける海底粘土地盤上の防波堤の沈下解析を行なった結果、次のようなことが明らかとなった。

(1)地盤内に発生する最大主応力は防波堤底部の前端部と後端部に応力の集中が起こり、またその大きさとその方向は押し波時と引き波時では全く異なり、従って、非排水繰返し荷重によるせん断沈下量と発生間隙水圧の消散による沈下量が異なる結果となった。また、それに伴い防波堤の沈下現象も異り、前端部及び後端部にこのことが顕著に現れた。従って、押し波、引き波が連続して当たる実際の防波堤下の海底地盤では繰返し応力の大きさと方向が連続的に変化するために地盤はかなり不安定になると考えられる。また、最大主応力の大きさと方向が地盤の沈下量、発生間隙水圧に大きな影響を与えることも明らかとなった。

(2)防波堤の沈下量は、防波堤の幅、形状などにさまざまな影響を受け、沈下の様子も変化する。これは、防波堤形状の変化が地盤内に発生する最大主応力の大きさと方向を変化させるために生じると考えられ、今回の解析結果では逆 π 型で底部の広い防波堤の安定性が最もよいと思われる。

(3)防波堤底部の発生間隙水圧は、深度が深くなるにつれて小さくなるが、後端部の方が地中深くまで発生している。それにもかかわらず、防波堤前端部の方が大きい沈下量を示したのは、防波堤前端部直下の最大主応力及び発生間隙水圧の大きさが後端部に比べると大きいためである。また、防波堤の沈下量及び発生間隙水圧の量は波の波数に影響されるため、波浪荷重を受ける地盤の沈下解析を行う際に波の周期により波数を決定するときは慎重を期する必要がある。また、発生間隙水圧の消散に伴う沈下量は非排水の繰返しせん断による沈下量に比べると小さい結果となったが、防波堤の安定性を考える際に重要な要因であることに変わりはない。

参考文献

- (1)Yasuhara, K., et al.(1991):Wave-induced pore pressure and deformation in seabed clay,Proc., GEO-COAST'91,Yokohama, Vol. 1, pp. 667-672.
- (2)安原ら(1991):波浪荷重をうける軟弱地盤上防波堤の沈下解析、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集,第3部門, pp. 240-241.
- (3)Hyodo, M., et al. (1988): Analytical procedure for evaluating pore-water pressure and deformation of saturated clay ground subjected to traffic loads,Proc. 6th Int. Conf. Num. Meth. in Geomech., Innsbruck, pp. 653-658.
- (4)兵動ら(1990):繰返し荷重を受ける初期せん断応力下の飽和砂の間隙水圧及び残留変形の予測、第8回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 739-744.
- (5)兵動ら(1992):繰返しせん断を受ける粘土の間隙水圧および変形の評価、第26回土質工学研究発表会概要集, pp. 787-790.
- (6)Yasuhara, K., et al. (1991):Cyclic-induced settlement in soft clays,Proc. 10th ECSMFE Conf., Florence, Vol. 1, pp. 887-890.
- (7)兵動ら(1990):繰返し荷重をうける粘土の変形特性、第42回平成2年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp. 310-311.
- (8)安原ら(1990):繰返し荷重をうける異方圧密粘土の変形特性、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集,第3部門, pp. 710-711.
- (9)合田(1973):防波堤の設計波圧に関する研究、「港湾技術研究所報告」, vol. 12, No. 3, pp. 31-38.
- (10)Yasuhara, K., et al. (1991):Post-cyclic recompression settlement in clay, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 1, pp. 83-94.
- (11)門司ら(1989):軟弱地盤着定式防波堤の開発について、「海洋開発論文集」, vol. 5, pp. 103-107.
- (12)A. M. Britto, M. J. Gunn(1987): Critical State Soil Mechanics via Finite Elements, Ellis Horwood Limited.

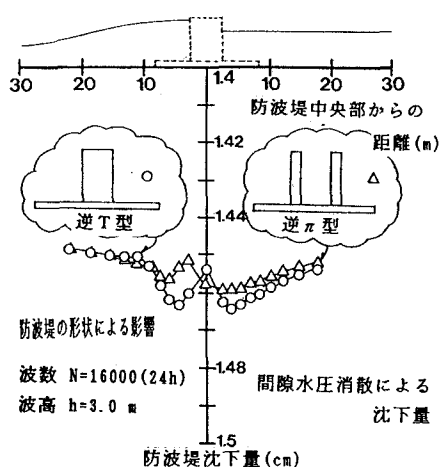


図-17 防波堤の形状が沈下量に及ぼす影響

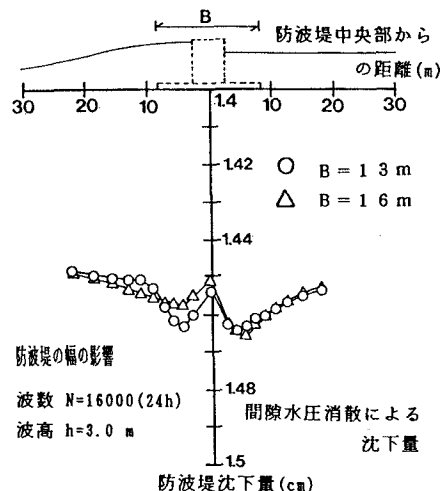


図-18 防波堤の幅(B)が沈下量に及ぼす影響