

波浪を受ける軟着堤の変形に及ぼす地盤内の水の流れの影響

村 上 哲*・安原 一哉**・坂本 武志***

1. はじめに

軟弱地盤上に防波堤など沿岸構造物の安定性を確保するために、地盤改良を行い基礎地盤部の強化、若しくは、構造物を軽量化することがある。有明海の中心部に位置する熊本港の防波堤では、堤体を軽量化し底版を広くすることにより大規模な地盤改良を一切行わず、堤体を直接軟弱な粘土地盤に設置する軟弱地盤着定式防波堤（軟着堤）が現在までに開発・実用化されている（写真-1 参照）。一般に防波堤を軟弱地盤上に建設する際、防波堤の自重による沈下と、波浪の繰返し荷重によって生じる付加的な沈下を把握する必要がある。図-1 は熊本港の防波堤観測挙動結果であり、図中の矢印は実際に台風の来襲があった時期を示している。実線は沈下量の経時変化を示したものであるが、台風来襲日の後には沈下量が大きくなっていると予想される。その要因の1つとして防波堤が台風来襲により平時以上の波浪荷重を受けそれを媒介して地盤内に繰返し荷重が作用し、粘性土地盤が変形・沈下したためと考えられる。それは、鉛直方向の荷重作用による深さ方向への地盤内応力伝播とそれに伴う変形・安定問題では、排水あるいは間隙水圧が消散する時間的余裕がない場合は非排水状態として捉えることができる。しかし、波浪のような長期的な水平荷重が粘性土地盤に繰返し作用する際、粘性土地盤内では過剰間隙水圧は発生と同時に表層付近では、消散すると考えられる。このため、透水性の低い粘性土でも地盤内の水の流れを考慮した部分排水条件下で安定性を検討する必要があると思われる（Yasuhara ら, 1997）。

そこで本研究では熊本港の軟着堤下粘性土地盤に着目し、波浪荷重が作用する海底地盤の変形及び安定性を検討するために水の流れ（排水条件）の影響を考慮した有限要素法による数値解析を行った。本研究では、波浪が作用する海底地盤の変形に及ぼす水の流れの影響に着目するために、波浪により軟着堤の水平滑動を低減させるための櫛（短い杭）の効果を考慮しないものとする。

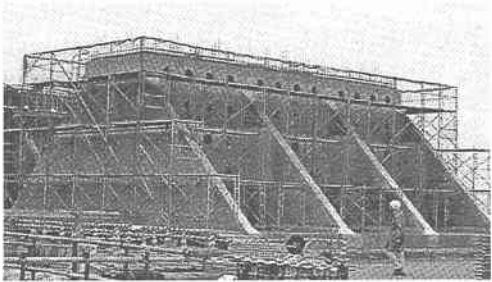


写真-1 軟着堤建設風景

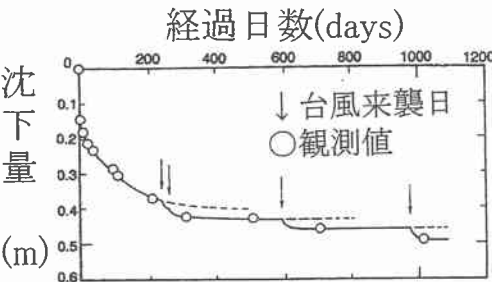


図-1 防波堤構築後の防波堤沈下の経時変化
（村上ら, 1997）

2. 有限要素解析方法

2.1 水-土骨格連成解析

繰返し荷重が作用する粘性土地盤の変形を考えるため、微小変形理論に基づく水-土骨格連成有限要素解析（赤井, 1978）を行った。これは圧密現象の骨格の変形と間隙水圧の消散を同時に考えることが出来るもので、式（1）

$$\begin{bmatrix} \Delta F + L\bar{u}_e|_t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \bar{u}_e|_{t+\Delta t} \end{bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ \sum \alpha_i u_{ei}|_{t+\Delta t} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

に示すように、微小な時間増分ごとの体積ひずみの推移を連続の式の差分化で表示し、これと釣合い方程式を連立させたものである。式（1）は ΔF , Δu : それぞれ Δt 時間内の節点力及び節点変位増分, K : 剛性マトリクス, L : 要素間隙水圧を節点力に変換するマトリクス, L^T :

* 正 会 員 工 修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科
** フェロー 工 博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科
*** 学生会員 茨城大学大学院 理工学研究科 都市システム工学科専攻

節点変位を要素の体積変化 V に変換するマトリクス,
 α : 要素間の距離, 排水面の幅および透水性に関する係数である。つまり式(1)を時間増分ごとに解くことにより節点変位と要素間隙水圧の時間的推移を求めることが出来るものである。

2.2 構成モデル

式(1)中の土骨格の変形を表す構成モデルとして、橋口ら(1990)によって提案された下負荷面弾塑性構成則を用い、降伏関数には修正 Cam-Clay モデルを用いた。このモデルは正規降伏曲面の内部で塑性変形が生じると考えるものであり、正規降伏面が荷重を受けることにより拡大するため、従来のモデルでは表現できなかった繰返し塑性を下負荷面を導入することにより表現できる特徴を表している。繰返し荷重の載荷・除荷により回復不可能な塑性ひずみの大きさは正規降伏面と下負荷面の比によって決定される。従来の弾塑性モデルと下負荷面モデルの違いを模式的に示すと図-2 のようになる。従来のモデル(図-2(a))は、載荷時には正規降伏面に達するまでは弾塑性変形が生じ(0-A), 超えた場合に塑性変形が生じる(A-B)。次に除荷時には弾性変形が回復し(B-C), 再載荷時には再び同じ経路をたどる(C-B)。そのため、繰返し荷重による塑性ひずみの蓄積を表現できない。一方、下負荷面を取り入れた本解析モデルでは、基本的には荷重を受けると塑性変形が生じ、除荷時には弾性変形のみが回復すると考えるものである。初期荷重においては応力を受けて下負荷面は拡大し、それに伴い正規降伏面も拡大する。除荷時には下負荷面は縮小し、この過程で正規降伏面に大きさの変化はない。そのため、再負荷時には変形量は正規降伏面と下負荷面の大きさの比に依存するため初期荷重時より小さな変形が生じることになる。つまり、繰返し塑性を表現できる本解析モデルは、繰返し荷重を受ける粘性土の挙動を表現できるものである。

3. 解析条件

実際に施工されている現場に近い解析を行うために、熊本港の地盤データと防波堤および波浪特性を解析条件としている。防波堤の形状は、図-3 に示す逆 π 型軟弱地盤着底式防波堤(軟着堤)で、軽い堤体を直接地盤に設

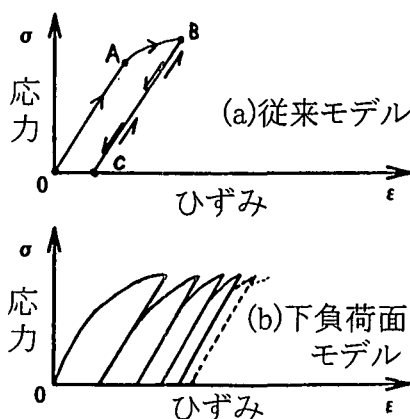


図-2 モデルの比較

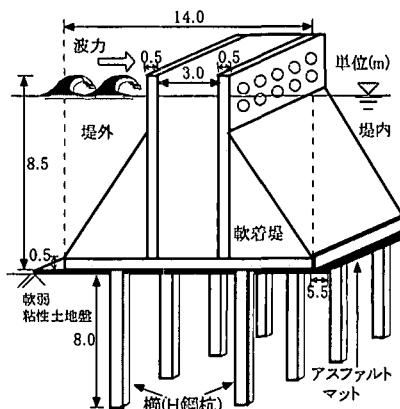


図-3 解析対象防波堤形状

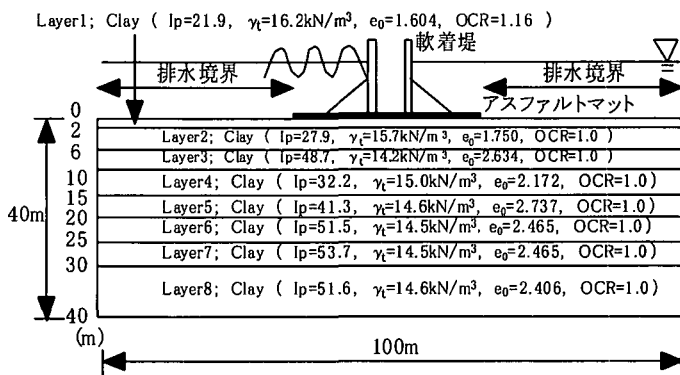


図-4 解析対象モデル (村上, 1997)

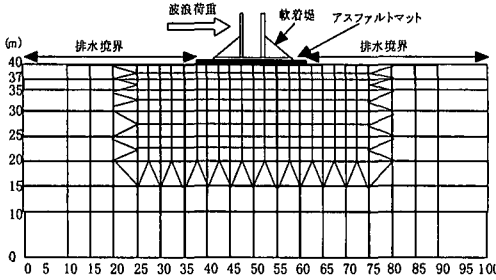


図-5 解析に用いた地盤のFEメッシュ

置し底面と粘土層表面の付着力、摩擦力および軟着堤下に施工された長さ8m程度のH鋼杭によって波浪に抵抗しようとするものである。この杭は櫛と呼ばれるが、本研究における解析では考慮しないものとする。図-4に解析の対象とした構造物-地盤系を示す。解析に用いた地盤のメッシュを図-5に示す。層厚40m、幅100mとし、要素数356、節点数356の有限要素に分割し解析を行った。解析対象モデル境界条件として、側方は水平方向を拘束した。排水境界は、底部および側方は非排水面とした。また上部においては軟着堤の両側に敷設されたアスファルトマットの部分は非排水面とし、それ以外は排水面とした。地盤に繰返し荷重を与える波浪特性は、熊本港における台風来襲時の有義波データより算出(波高1.9m、周期6s、波長41.9m)した。また、軟着堤に作用する外力(波圧)は、実際に熊本港の軟着堤の設計に用いられた合田の方法(財)沿岸開発技術センター、1994)より波の入射角を 0° として求めた。軟着堤に作用する押し波時および引き波時の波圧分布を図-6に示す。

i) 押し波時

$$\textcircled{1} \text{前壁} \quad \text{合田波圧} \times (1 - \varepsilon_F) \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\textcircled{2} \text{後壁} \quad \text{合田波圧} \times \alpha_0 \times (1 - \varepsilon_B) \quad \cdots \cdots (3)$$

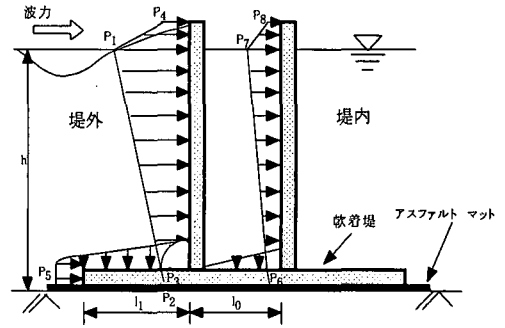
$$P_5 = P_3 \times \cos\left(\frac{2\pi l_0}{L}\right) \quad \cdots \cdots (4)$$

$$P_6 = \alpha_0 \times P_3 \quad \cdots \cdots (5)$$

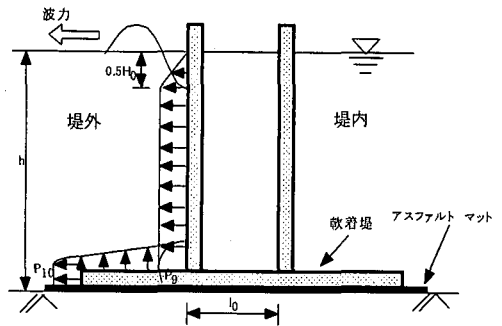
ii) 引き波時

$$P_9 = 0.5 u_0 H_0 \quad \cdots \cdots (6)$$

$$P_{10} = P_9 \times \cos\left(\frac{2\pi l_0}{L}\right) \quad \cdots \cdots (7)$$



(a) 押し波時



(b) 引き波時

図-6 波圧分布

表-1 算出した波圧

単位 (N/m ²)					
P_1	1.4328×10^8	P_6	1.7844×10^7		
P_2	1.1576×10^8	P_7	2.4014×10^7		
P_3	1.1894×10^8	P_8	—		
P_4	—	P_9	9.6461×10^7		
P_5	1.1893×10^8	P_{10}	9.6452×10^7		

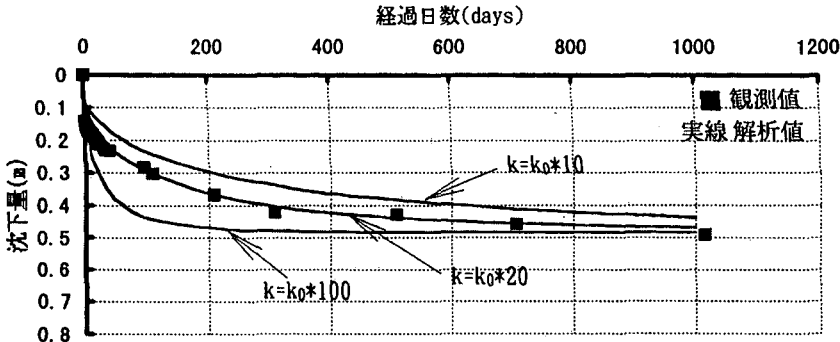


図-7 観測値と解析結果の沈下量-時間関係

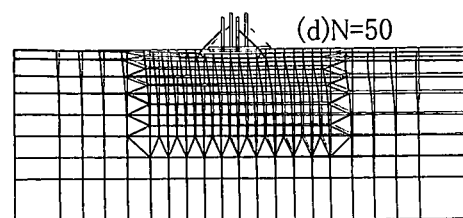
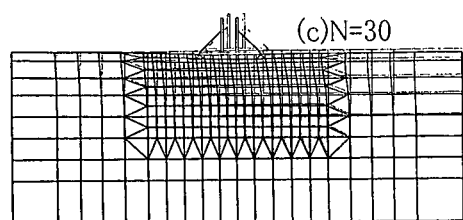
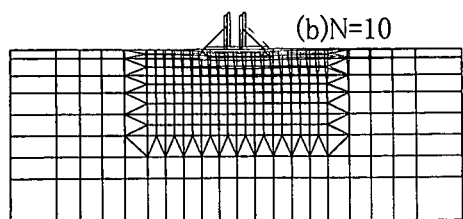
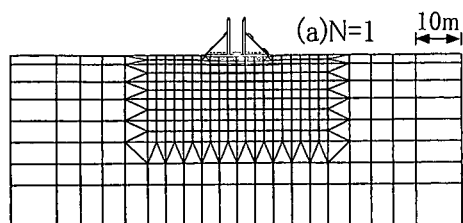


図-8 非排水状態での変形形態

ここで、 ϵ_F : 前壁の開孔率, ϵ_B : 後壁の開孔率, w_0 : 海水の単位体積重量, L : 底版上水深における波長, α_0 : 実験定数($=0.15$), H_0 : 沖波波高である。なお上記以外の波圧は、合田(1990)の波圧公式と同様にして求める。算出した波圧を表-1にまとめている。

4. 解析に用いたパラメータ

数値解析に用いる軟着堤下粘性土地盤の力学パラメータは、熊本港の地盤データの塑性指数 I_p から、飯塚・太田(Iizuka, 1987)の塑性指数による推定方法(I_p 法)によって算出した。なお、 I_p 法を採用するに際し、他の地点から得られた力学パラメータとその塑性指数との関係において、 I_p 法による推定値と良好な相関関係があることは既に確認している(家上, 1987)。透水係数については、より実地盤に近いものに設定するために、図-7に示すように熊本港の軟着堤が台風による波浪の影響を受ける前までの静的荷重による防波堤沈下挙動観測値にフィットするように、 I_p 法より求めた透水係数 k_0 の 20

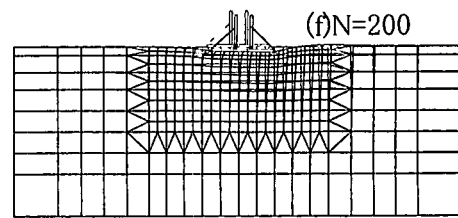
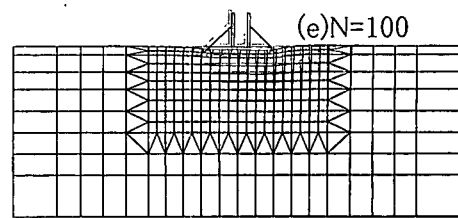
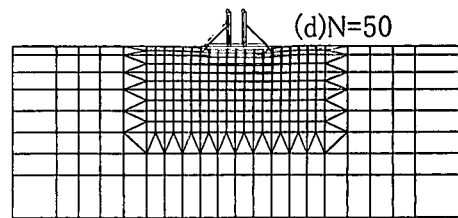
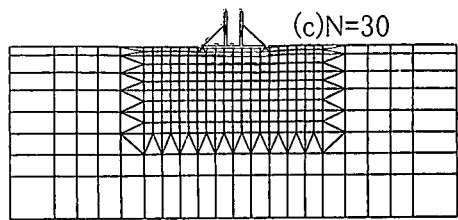
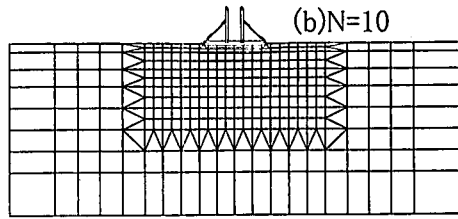
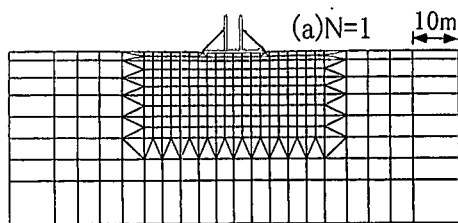
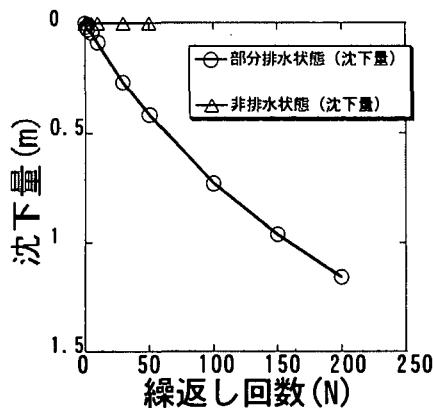
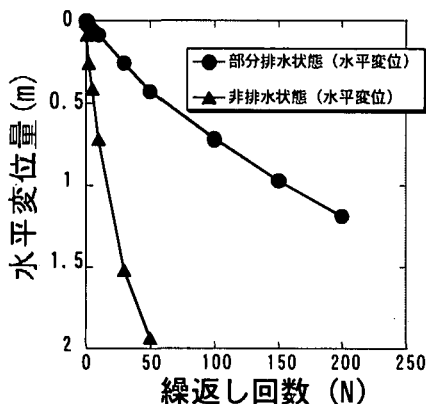


図-9 部分排水状態での変形形態

倍とした。なお、防波堤の材料定数は、変形係数 $E=2.81 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, ポアソン比 $\nu=0.2$ とした。図-4に本解析で用いた土質パラメータを示している。



(a) 沈下量



(b) 水平変位量

図-10 波浪回数毎の水平変位, 沈下量

5. 解析結果および考察

まず、初期応力を与えた水平堆積地盤に軟着堤の自重を与えた解析を行った。次に、波浪時の波圧を繰返し作用させる。この手順に従い、図-4 示した粘性土地盤上の軟着堤に波高 1.9 m の波浪が繰返し作用する場合の水の流れを考慮した部分排水状態の解析と、土要素での体積ひずみが生じないようにした非排水状態での解析を行った。非排水状態の解析より得られた波の作用回数 $N=1, 10, 30, 50$ 回における軟着堤下粘性土地盤の変形形態を図-8 に示す。また図-9 は部分排水状態における波浪回数 1, 10, 30, 50, 100, 200 回の解析結果を示している。図-10 は解析による波の繰返し回数毎の防波堤天端の水平変位量及び沈下量を示している。これらの解析結果によれば、水平変位量においては部分排水状態に比べ非排水状態での値が大きくなっている。これは防波堤に作用する水平外力により地盤上層部に応力増分が生じるため、非排水状態では正のダイレイタンスによる有効応力の低下を引き起こすが、部分排水では上層部で発生し

た過剰間隙水圧が表層付近で消散が起こるため有効応力の低下が起きにくいためと考えられる。一方、沈下量では部分排水状態の方が大きくなっている。これは過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下によるものと考えられる。しかし静穏時には非排水状態で残留した過剰間隙水圧の消散が起こり、沈下が生じる可能性があるため、最終的な沈下量では非排水状態の方が大きくなると予測される。また、透水係数が非常に小さな粘土地盤であるにも拘わらず非排水状態での解析と部分排水状態の解析で大きな違いが認められることから、実際問題の現象の追跡には、水の流れを考慮した部分排水状態の解析を行う必要があると考えられる。

6. おわりに

本研究では、軟着堤下粘性土地盤に異なる排水条件で波浪荷重が作用する場合を想定して軟弱地盤の変形解析を行った。本研究における数値解析結果より部分排水状態に比べて非排水状態では変形量が過大評価されることが解った。そして、このことから波浪のような水平外力が長期的に作用する際の地盤内の水の流れは、地盤の変形形態に大きく影響を与える重要な要因であることが明らかとなった。今後は、波浪による軟着堤の水平変位を抑制させる櫛の効果を評価するための検討を進める予定である。

謝辞：本研究におけるデータの一部は、国土交通省第四港湾建設局熊本港湾建設局熊本工事事務所 鈴木弘之所長と熊本大学工学部大谷順助教授のご配慮を頂いた。また、本研究の一部は、佐田建設 家上幹雄氏（元、茨城大学工学部学生）のご協力によるものが大きい。付記して、ともに謝意を表す次第である。

参考文献

- 赤井浩一・田村 武 (1978): 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, 土木学会論文報告集, 第 269 号, pp. 95-104.
- 家上幹雄 (1997): 波浪を受ける粘性土地盤の沈下・変形に及ぼす地盤内の水の流れの影響, 平成 8 年度茨城大学工学部都市システム工学科卒業論文.
- 合田良實 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 85-92.
- (財) 沿岸開発技術センター (1994): 新形式防波堤技術マニュアル, pp. 63-87.
- 橋口公一 (1990): 最新弾塑性力学, 朝倉書店.
- 村上 哲・安原一哉・家上幹雄 (1997): 有明粘土地盤上の軟着床防波堤の沈下と安定性, 地盤工学会, 第 32 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1341-1342.
- Iizuka, A. and H. Ohta (1987): A determination procedure of input parameter in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol. 127, No. 3, pp. 71-87.
- Yasuhara, K., S. Murakami and N. Toyota (1997): Wave-induced Residual Settlement in Soft Seabed Soils, BOSS '97 8th International Conference on the Behaviour of Offshore Structures, Vol. 1, pp. 211-224.