

波浪作用下の底泥の挙動に関する解析手法について

土田 孝* ・熊谷隆宏** ・池野勝哉***
渡部要一**** ・五明美智男*****

本研究では、粘性土地盤の堆積・形成過程の中の影響因子である波浪に着目し、波浪による粘土地盤の応答や圧密特性を明らかにすることを目的として、水理模型実験を行った。さらに、実験で得られた結果を用いて、底泥上を進行する波の減衰特性を評価すると同時に、底泥の動的応答、圧密特性を評価する波浪-底泥の相互作用解析手法を構築した。実験結果を用いて、構築した解析手法の適用性の検証を行った結果、波高減衰、底泥内の土圧および間隙水圧変動、含水比およびせん断強度の時間変化を精度良く評価できることが分かった。

1. はじめに

自然干潟の堆積・形成過程では、波浪の作用、潮汐の変動、塩分濃度・水温の変化、生物遺骸の沈殿など各種の複雑な環境の影響を受けている。粘性土地盤の堆積・形成過程を明らかにすることは、干潟の安定性や干潟に生息する生物の生息条件等を考える上で重要である。

粘性土地盤の堆積・形成過程における影響因子のうち、波浪に着目した研究として、土田・五明 (1999) は、波浪作用に対して底泥が安定する条件を地盤の安定解析の手法を用いて誘導するとともに、水理実験を行い、波の作用により底泥層が大きく流動する場合に、底泥層内に局所的に含水比が顕著に低下し、せん断強度が増加する部分が現れることを報告している。また、姜ら (2000) は、水理実験により、波の作用による底泥のせん断強度の変化、および地盤の安定性に対する波作用の履歴効果に関する基本的特性を明らかにしている。

既往の研究の成果により、底泥上を進行する波浪は、粘性を有する底泥に波動運動を生じさせることに伴って減衰する一方、波浪作用により底泥の流動化が発生するような顕著な底泥応答を示す場所では、含水比が大きく低下するとともに、強度が増加することが分かっている。しかしながら、このような波浪-底泥の相互作用現象に関して、定性的な特性が分かっているものの、定量的な評価手法の確立には至っていない。例えば、浚渫土を用いた人工干潟の適切な造成方法等を検討するためには、波浪-底泥の相互作用の問題に対する定量的な評価手法が必要不可欠であると考えられる。

本研究では、波浪-底泥の相互作用として現れる波の減衰特性、および波による粘土地盤の動的応答や圧密特性を明らかにすることを目的として、水理実験を行った。

さらに、実験で得られた結果を用いて、波高減衰、底泥の動的応答、および底泥内の含水比およびせん断強度の時間的変化を定量的に評価する波浪-底泥の相互作用解析手法を提案する。

2. 水理実験

(1) 実験概要

実験装置として、長さ10m、幅0.3m、高さ0.4m(土槽部は0.7m)の断面2次元水槽を用いた。底泥の挙動を把握するために、間隙水圧計および土圧計を土槽内に設置するとともに、底泥上を進行する波浪の減衰特性を調査するために、波高計を沖側部、土槽部にそれぞれ設置した。図-1に実験装置を示すとともに、表-1に作用させる波浪に関する実験条件を示す。波浪条件として、水深を0.15mに設定し、周期1.0sの規則波を作用させた。波高については、2cmと3cmにそれぞれ固定する2ケース、2cmから3cm、および3cmから2cmに途中段階で波高を変化させる2ケースの計4ケースを用い、最大で72時間にわたる波浪作用下の圧密実験を行った。また、波浪を作用させない条件と比較するため、直径0.3mのアクリル円筒を用いた静水圧密実験を同時に実施した。

底泥試料として、宇部港の浚渫粘土を用いた。ただし、実験では、小石や貝殻等を取り除いた後、人工海水を用いて初期含水比を液性限界比1.8倍に相当する190%に調整した試料を用いた。実験に用いた試料の主な物性値を表-2に示すとともに、図-2にハンドベーン試験による含水比-せん断強度特性を示す。

波浪作用下において巻き上がりが発生する底泥の限界

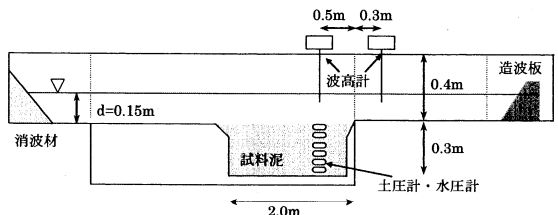


図-1 実験装置概要

* 正会員 工博 広島大学大学院工学研究科
** 正会員 Ph.D. 五洋建設(株)技術研究所
*** 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所
**** 正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所
***** 正会員 博(工) 東亜建設工業(株)技術研究開発センター

表-1 実験条件

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.59
自然含水比 W_0	122.1
砂分 (%)	7.5
シルト分 (%)	41.2
粘土分 (%)	51.3
液性限界 (%)	111.6
コンシステンシー	
塑性限界 (%)	45.4
塑性指数 I_p	66.2
強熱減量 L_i (%)	10.3

表-2 底泥物性値

ケース名	波高	作期間	備考
Case1	2.0 cm	48 h	
Case2	3.0 cm	72 h	
Case3	2.0 cm → 3.0 cm	72 h	H=2 cm 36 h / H=3 cm 36 h
Case4	3.0 cm → 2.0 cm	72 h	H=3 cm 36 h / H=2 cm 36 h

せん断強度 c_{sia}^* を、土田・五明(1999)の手法に基づいて評価すると、本実験条件では、 $c_{sia}^* = 4.3 \times 10^2$ Pa となる。一方、実験に用いた試料の初期せん断強度は 9.2×10^1 Pa であり、限界せん断強度に比べて十分に小さく、底泥の巻き上がりが顕著に発生する条件で実験を行った。

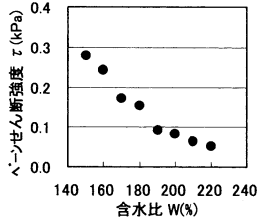


図-2 含水比-せん断強度特性

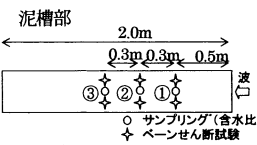


図-3 含水比およびせん断強度測定地点

波浪作用による底泥の含水比およびせん断強度の変化を調査するために、実験の前後で、図-3 に示す計測地点において、せん断強度および含水比の深度分布をそれぞれ 3 cm, 5 cm ごとに計測した。

(2) 実験結果

a) 波高減衰

波が、柔らかい底泥上を進行するとき、地盤面作用圧が底泥運動を引き起こすため、波のエネルギー減衰が生じる。沖波波高に対する対象地点の波高の比で定義した波高伝達率を図-4 に示す。Case1, Case2では、土槽沖側端より0.5mの位置で波高を計測し、Case1'では、4m長の土槽を用いて、土槽端より2mの位置で波高を計測した。波高伝達率は波の周期に依存し、周期が1sで同一のCase1とCase2で明瞭な違いが現れないことが分かる。

b) 底泥の含水比およびせん断強度の変化

図-5 に各計測地点における実験前後のせん断強度および含水比の深度分布を示す。土田・五明(1999)と同様に、波の作用により地盤面で巻き上がりが生じる等の顕著な地盤応答を示す領域では、含水比が明瞭に低下するとともに、せん断強度が増

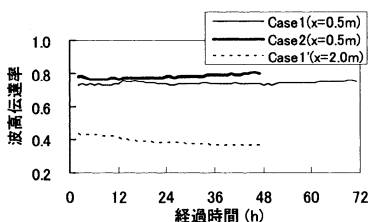


図-4 波高伝達率実測値

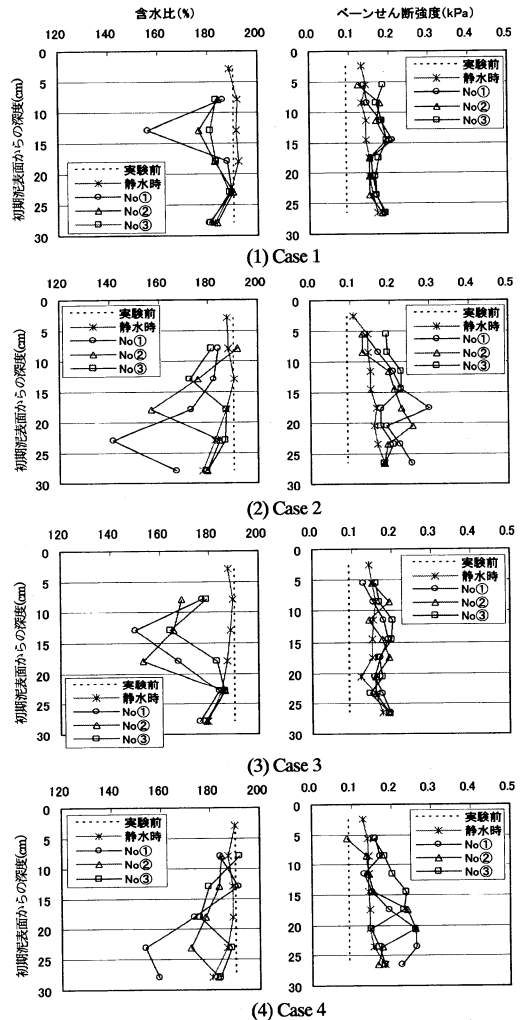


図-5 含水比とせん断強度の深度分布

加することが確認された。

入射波高の異なるCase1とCase2を比較すると、波高の大きなCase2において、含水比の低下およびせん断強度の増加の極値を示す位置が、より深くなっている。さらに、各ケースにおいて、沖 (No ①) から岸 (No ③) に波が進行する際、そのような極値を示す位置が浅くなる傾向となることから、含水比および強度の変化は、底泥上で減衰していく波浪に深く関係があると考えられる。

底泥が流動化するとともに、底泥の巻き上がりが生じる沖側地点では、表層部にひび割れが生じることが観察された。写真-1に、Case1の実験終了後における表層のひび割れ状況を示す。また、Case2について、深度ごとの細粒分含有率を調査した結果(表-3)、沖側地点において大きく含水比が低下する位置の近傍で、細粒分含有率が低下していることがわかった。

以上のことから、顕著な底泥応答を示す沖側地点では、

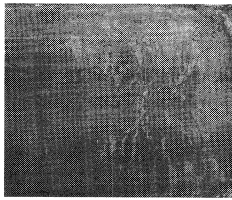


表-3 実験後の細粒分含有率測定結果

初期泥表面からの深度	地点	
	St.①	St.③
8cm	95.7%	99.5%
13cm	91.1%	91.1%
23cm	87.0%	91.2%

(*) 実験前の平均細粒分含有率: 90.9%

写真-1 実験後のひび割れ状況

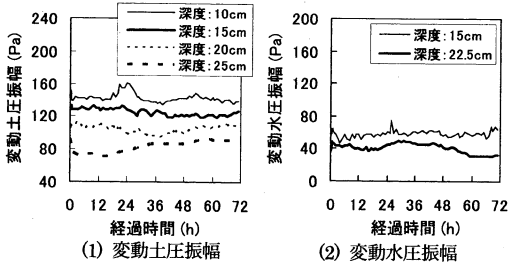


図-6 Case 2 における変動土圧および水圧の振幅

波の作用によって、周期的に引っ張りクラック（ひび割れ）が発生し、ひび割れが水みちとなってドレーン効果を生じ、細粒分が流出していることが考えられる。後に述べるようにクラック発生部分の透水係数を30倍に設定することで含水比の低下をほぼ説明することができた。

せん断強度を増加させる要因として、含水比の低下と、間隙比の変化に無関係なセメンテーションが考えられる。Case3の波高が発達する過程では、含水比の低下は他のケースと同様に顕著に見られるものの、実験終了時に強度は顕著に増加していない。これは、波高増大時に底泥が練返しを受けるため、セメンテーションによる強度増加が発現しにくいとめと考えられる。一方、波高が一定、または減衰する過程では、そうした再流動化現象は発生しないため、時間の経過とともにセメンテーションが進行し、強度増加が顕著に現れる傾向がある。

また、Case2において計測された変動土圧および変動間隙水圧の振幅の経時変化を図-6に示す。実験後の含水比が明瞭に低下した深度22.5cmの変動水圧振幅は、時間が経過すると、含水比の低下に伴って地盤骨格が形成されていく影響を受けて、若干、低下する傾向が見られる。

3. 波浪—底泥相互作用解析モデル

本節では、底泥上を進行する波の波高減衰と同時に、底泥の動的応答、および底泥内の含水比およびせん断強度の時間的変化を定量的に評価する波浪—底泥の相互作用解析手法を提案する。図-7にフローチャートを示す。

(1) 波浪減衰特性および地盤動的応答の評価

初期含水比を液性限界以上の値に調整した本実験の底泥は、大坪(1983)が示す粒径と含水比を基準にした底泥の流動形態の分類によれば、粘弾性体に分類されると考

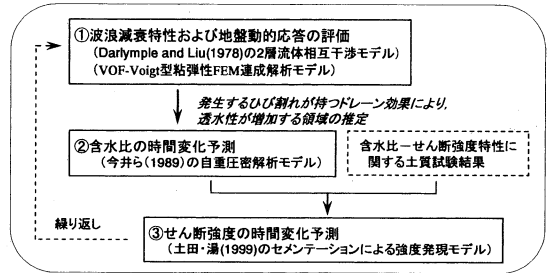


図-7 波浪-底泥相互作用解析モデルのフローチャート

えられる。また、土圧および間隙水圧変動の計測結果を前節に示したように、底泥は、土骨格と間隙水の2相混合体としての挙動を示す。底泥の挙動を精度良く評価するには、底泥を多孔質粘弾性体として扱うモデルが適切であると考えられるが、ニュートン粘性流体として簡便的に扱うモデルについても、あわせて適用性を検証する。

a) 底泥をニュートン粘性流体としてモデル化する手法

Darlymple・Liu(1978)は、粘性流体領域に対して境界層近似を行い、水領域との相互干渉を理論的に解析する方法を提案している。ここで、底泥上を進行する波の波高減衰は、式(1)、(2)に基づいて評価することができる。

$$a = a_0 \exp(-\lambda_i x) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 a : 進行波の波高、 a_0 : 入射波高、 x : 波の進行距離、 λ_i : 減衰パラメーターである。

$$\lambda_i = \frac{(\omega v_1)^{1/2} (D_1^2 + (\rho_2/\rho_1)(v_2/v_1)^{1/2} D_2^2)}{2gC_g \left[1 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \cosh^2 \lambda h \left(\frac{g\lambda}{\omega^2} \right)^2 \left(\frac{\omega^2}{g\lambda} - \tanh \lambda h \right)^2 \right]} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 ω は角周波数、 λ は波数、 h は水深、 ρ_1 、 ρ_2 、および v_1 、 v_2 は、それぞれ、水および粘性流体領域の密度と動粘性係数、また、

$$D_1 = -\frac{\omega \cosh \lambda h (g\lambda/\omega^2 - 1)(1 + \tanh \lambda h)}{1 + (\rho_1/\rho_2)(v_1/v_2)^{1/2}} \dots \dots (3)$$

$$D_2 = -\rho_1/\rho_2 \sqrt{v_1/v_2} D_1 \text{である。}$$

図-8に、今回の実験条件に対して、底泥の動粘性係数を変化させ、波高伝達率を評価した結果を示す。図-4に示す実測値と比較すると、本実験ケースでは、動粘性係数を0.25 m²/sに設定することにより、底泥上の波高減衰を精度よく評価できることがわかった。

また、Case1とCase2の実験条件に対して、式(4)を用いて底泥内動圧力を評価する。

$$p = (A \cosh \lambda h / \lambda) \{ A \cosh \lambda z + B \sinh \lambda z \} e^{i(\alpha x - \omega t)} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $A = \rho_1(g\lambda - \omega^2 \tanh \lambda h) + (\rho_2 - \rho_1)(g\lambda/\omega^2)B$ 、 $B = \rho_2(\omega^2 - g\lambda \tanh \lambda h)$ である。

図-9に、解析結果と変動水圧の実測値との比較を示すように、解析モデルにより、地盤応答として変動水圧

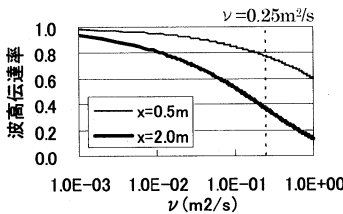


図-8 波高伝達率解析結果

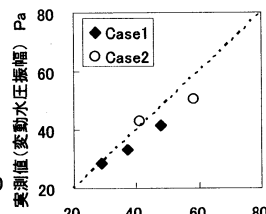


図-9 動圧力解析結果と実測値との比較

表-4 解析で与える地盤物性パラメーター

n	ν	$E(N/m^2)$	$\beta(m^2/N)$	$k(cm/s)$	β'
0.80	0.33	3.0 E+03	1.0 E-08	1.0 E-07	0.1

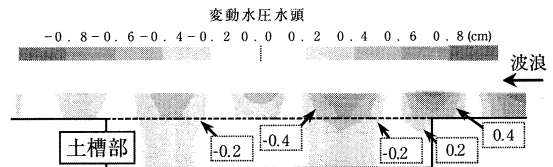


図-10 VOF粘弾性 FEM 連成解析モデルによる変動圧力解析結果例 (Case 1)

を評価できると考えられる。以上の結果、底泥をニュートン流体として扱うモデルは、波高減衰および変動水圧を簡便的に評価する点で、適用性があると考えられる。

b) 底泥を粘弾性体としてモデル化する手法

底泥をニュートン流体としてモデル化する手法は、土粒子骨格と水粒子の各相の挙動を分けて表現することができない。特に、含水比が低下して流動的挙動が小さくなった場合には、評価誤差が大きくなる問題が生じる。

底泥の挙動を精度良く評価するには、底泥を多孔質粘弾性体として扱うモデルが適切であると考えられる。本研究では、蔣ら (2000) にならない、地盤を Voigt 型粘弾性体としてモデル化する。このとき、有効応力に対する構成式は、次式で表される。

$$\sigma'_{ij} = E_{ijkl}\epsilon_{kl} + \eta_{ijkl}\dot{\epsilon}_{kl} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 σ'_{ij} は地盤の有効応力、 ϵ_{ij} はひずみ、 E_{ijkl} は弾性係数テンソル、 $\eta_{ijkl} (= \beta E_{ijkl})$ は粘性係数テンソルである。このとき、Biot(1941)の多孔質弾性体理論を拡張した形で、地盤の運動方程式と連続式を式 (6) および (7) でそれぞれ表現することができる。

$$G \left\{ \nabla^2 (\bar{u} + \beta' \bar{u}') + \frac{1}{1-2\nu} \nabla \nabla \cdot (\bar{u} + \beta' \bar{u}') \right\} - \nabla p = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{k}{\rho_w g} \nabla^2 p = \frac{n}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \bar{u} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 n : 空隙率、 ν : ポアソン比、 G : せん断弾性係数、 β : 水の体積弾性率、 k : 透水係数、 \bar{u} : 土粒子の変位ベクトル、 p : 空隙水圧である。

本研究では、上式に基づく粘弾性 FEM 解析モデルと数値波動水路を連成する解析モデルにより、波浪-底泥の動的挙動を解析する。波動場と地盤を連成する手法としては、蔣ら (2000) の手法にならない、水と地盤の接続境界における速度および圧力の連続性を用いた。

表-4 に示す地盤物性パラメーターを与え、Case1, Case2の条件に対して、波浪-底泥の動的挙動の評価に関する本数値解析モデルの適用性の検証を行う。図-10 に、Case1の条件における波動場および底泥内の変動水圧水頭分布の解析結果例を示す。波の進行方向に、波高が減衰し、変動水圧が減少していく現象が表現されてい

表-5 波高伝達率に関する実測値と解析結果の比較

	Case1(x=0.5 m)	Case2(x=0.5 m)	Case1'(x=2.0 m)
実測値	0.785	0.738	0.386
解析結果	0.786	0.812	0.442

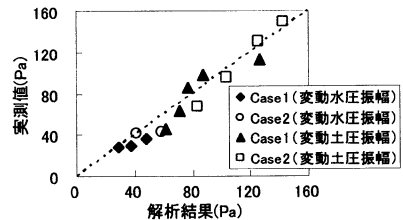


図-11 変動水圧および土圧の振幅に関する実測値と解析結果の比較

ることがわかる。また、波高伝達率、変動土圧および変動水圧に関して実測値と比較した結果を表-5と図-11にそれぞれ示す。実測値を用いた検証により、本数値解析モデルは、波高減衰、および空隙水と土骨格より構成される地盤の動的挙動の評価に関して適用性が高いことがわかった。

(2) 含水比の時間変化予測

実験の結果、波の作用により地盤面で巻上りが生じるなどの顕著な地盤応答を示す領域では、含水比が明瞭に低下することが確認された。波浪によって地盤上面に発生するひび割れがドレーン効果を持つと仮定し、上層部の透水係数を増加させて (高透水性の上層部と原泥状態の下層部の 2 層モデルにより)、地盤をモデル化し、自重圧密解析を行うことにより、波浪作用下における含水比の時間的変化の評価を試みた。解析は、式 (8)~(10) に基づく今井ら (1989) の手法を用いた。

質量保存則 構成式

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial z_r} \dots\dots (8) \quad e = f(e, \sigma') \dots\dots (9)$$

透水則および力の釣り合い式

$$v = \frac{k}{(1+e)\gamma_w} [\partial \sigma' / \partial z_r + (\gamma_s - \gamma_w)] \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 z_r : 縮小座標、 e : 空隙比、 v : 浸透流速、 σ' : 有効応力である。式 (10) の $e \sim \log \sigma'$ の関係式、また、透

水係数と間隙比の関係式として、式 (11), (12) を用いる。

$$e = -C_d \log \sigma' + a_1 \dots (11) \quad e = C_{k1} \log k + c_1 \dots (12)$$

ここに、 C_d : 圧縮指数, a_1, C_{k1}, c_1 は定数である。

土質試験結果に基づき、 $C_d = 0.73, e = 4.9, a_1 = 2.6, C_{k1} = 1.9, c_1 = 1.53$ の解析条件を与え、Case1, Case2 の条件に対して解析を行った。

変動土圧振幅が初期せん断強度を超える深度までひび割れが進行し、ドレーン効果が現れて実質的に透水性を増加させると考え、高透水性層の厚さ d_1 を設定した。 d_1 は、前節の波浪-底泥の動的挙動解析モデルにより評価できる。また、高透水性領域の透水係数は原泥の透水係数の30倍に設定した。図-12 に解析結果を示すように、波浪作用下における含水比低下を再現しているといえる。

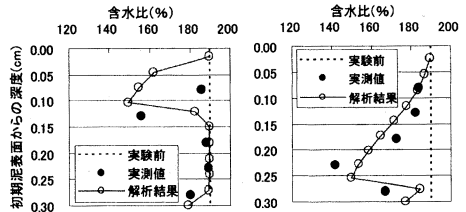
(3) せん断強度の時間変化予測

せん断強度を増加させる要因として、含水比の低下と、間隙比の変化に無関係なセメンテーションが考えられる。本研究では、式 (13), (14) に示す土田・湯 (1999) の強度発現モデルを用いて、せん断強度の時間変化を評価する。

$$\tau = \tau_0 + \Delta\tau_w + \Delta\tau_c \dots (13) \quad \Delta\tau_c = k \sqrt{p_0} \Delta \log t \dots (14)$$

ここに、 τ_0 は初期せん断強度、 $\Delta\tau_w$ は含水比の変化から評価される強度増加 (図-2 参照)、 $\Delta\tau_c$ はセメンテーションによる強度増加、 P_0 は有効土被り圧 (kN/m^2)、 t は堆積時間、 k は強度増加係数で、土田・湯 (1999) では、 $0.3 \sim 0.4 (\text{m/kN}^{0.5})$ の範囲で提案されている。

各ケースの代表測点 No ① と No ③ において、せん断強度を評価した結果を図-13 に示す。ここで、土田・湯 (1999) のモデル自体の適用性を検証するため、 $\Delta\tau_w$ を評価する際、含水比の変化を数値モデルによる解析結果でなく、実測値で与えた。また、有効土被り圧としては、



(1) Case1 ($d_1=10\text{cm}$) (2) Case2 ($d_1=25\text{cm}$)

図-12 含水比低下に関する数値解析モデルの検証

底泥の初期繰り返し時のせん断強度 0.09 kPa と等しいとして与えた。また、強度増加係数については、パラメトリックスタディの結果、 $0.15 (\text{m/kN}^{0.5})$ に設定した。せん断強度の変化は、解析によって概ね再現されており、特に岸側の地点 (No ③) ではよく一致した。ただし、地盤応答の顕著な沖側部でせん断強度が極大値を示す位置の近傍では実測値の方が小さく、さらに検討が必要である。

4. おわりに

波浪-底泥の相互作用として現れる波の減衰特性、波による粘土地盤の動的応答、圧密特性を明らかにするため水理実験を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 波の作用により底泥層が大きく流動すると、底泥層内に局所的に含水比が顕著に低下し、せん断強度が増加する部分が現れる。この現象は、マクロ的には、底泥上の波高と底泥の強度に深く関係があるものと推定できる。
- 2) 引張クラックが波によって周期的に発生し、それがドレーンとなっていることを仮定して解析することにより、含水比の低下を概ね説明することができた。ただし、底泥内のひび割れがドレーン効果を有することは実験的に検証されておらず、今後の課題である。
- 3) 本研究で提案した波浪-底泥の相互作用解析手法により、波高減衰、底泥の動的応答、含水比およびせん断強度の変化に関する実験結果を概ね精度良く評価できた。

参考文献

今井五郎・藤森賢・小久保裕・林裕三 (1989) : 粘性が一次元圧密挙動に及ぼす影響, 土質工学研究発表会, pp 399-402.
 大坪国順 (1983) : 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究, 国立公害研究所報告, 第42号, pp. 1-177.
 姜閔求・高橋重雄・野々村治・高野忠志・黒田豊和 (2000) : 人工干潟地盤の耐波安定性に関する基礎実験, 海工論文集, 47巻, pp. 526-530.
 蔣勳・高橋重雄・村西佳美・磯部雅彦 (2000) : 波・地盤・構造物の相互作用に関する VOF-FEM 予測モデルの開発, 海工論文集, 47巻, pp. 51-55.
 土田孝・五明美智男 (1999) : 波による水圧変動に対する底泥層の安定について, 海工論文集, 46巻, pp. 596-600.
 土田孝・湯怡新 (1999) : 粘土のセメンテーションによる強度発現メカニズム, 港研報告, 38巻, 第2号, pp. 99-129.
 Biot, M. A. (1941) : General theory of three dimensional consolidation, J. Appl. Phys., 12, pp. 155-164.
 Darlymple, A. R. and P. L.-F. Liu (1978) : Wave over soft muds, A two-layer fluid model, J. Phys. Ocean., 8, pp. 1121-1131.

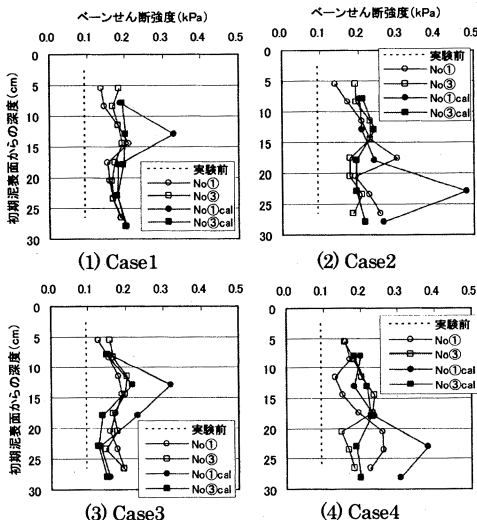


図-13 せん断強度変化に関する評価手法の検証