

波作用下の底泥のレオロジー特性と質量輸送について

蔣 勤*・渡 辺 晃**

1. はじめに

波と底泥の相互作用の結果として生ずる底泥の層内質量輸送は、泥浜海岸における主要な底泥輸送形態の1つであり、シルテーション等の諸問題と密接な関係がある。その予測精度の向上のためには、底泥のレオロジー特性をより正確に把握することが最も基本的かつ重要である。これまでも予測モデルがいくつか提案されているが、波作用下における底泥の動力学特性が十分に反映されているとは言い難い。ところで最近の研究によれば、波作用下での底泥のレオロジー特性は波の周期、振幅、底泥の含水率および圧密状態等と深く結びついている。

そこで本研究では、まず、より広範な条件下において底泥の力学挙動に関する実験を行うことにより、底泥のレオロジーモデルならびにモデル中のパラメータの評価式を提案する。また、本レオロジーモデルに基づいて底泥運動の鉛直2次元数値モデルを構築し、波高減衰および底質移動速度の計算と、その実験による検証を行う。さらに、波による底泥の巻き上げを考慮して、波作用下における泥層内含水率の鉛直分布および経時変化を評価するための簡易モデルを開発し、数値実験によって底泥の質量輸送に対する含水率の影響を検討する。

2. 底泥のレオロジー特性

(1) 実験および結果

波作用下での底泥の力学挙動を精度よく評価するために、沈ら(1993)と同様に振動型の回転粘度計とカオリナイト試料を用いて、含水率、回転振動の周期と振幅をそれぞれ120%~300%、0.5~10.0s、0.5~25°の範囲で変化させ、幅広い条件のもとで合計800ケース以上の実験を行った。また、各要素の様々な組み合わせによって、底泥の含水率、振動の周期と振幅の底泥のレオロジー特性に対する影響を調べた。図-1と図-2は、試料の含水率と振動周期を固定して、角振幅を変化させる条件下において得られた泥中のせん断応力とせん断歪みおよび歪み速度との関係の1例である。また、振動周期および含

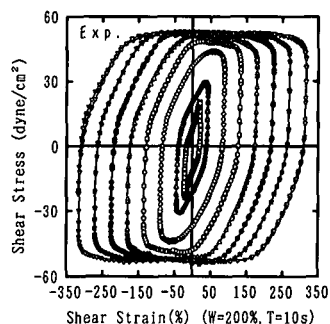


図-1 せん断応力とせん断歪みとの関係

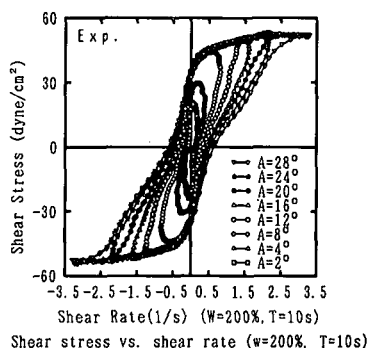


図-2 せん断応力と歪み速度との関係

含水率の変化による底泥のレオロジー特性の変化をそれぞれ図-3及び図-4に示す。

以上の実験結果によると、正弦振動下における泥中のせん断応力はせん断歪みや歪み速度と強非線形なヒステリシス関係をもち、外力によってそのヒステリシス・ループが変化し、底泥は粘弾性、粘弾塑性あるいは粘塑性といった非常に複雑な特性を有することや、振動の周期、振幅、および特に泥の含水率などによって大きく変化することが更に明らかとなった。

(2) 底泥の構成方程式

前述の実験結果に基づいて、波による底泥のレオロジー特性を評価するモデルを新たに提案する。

図-5に示すのは本レオロジーモデルを構成する定義図である。この図から明らかなように、底泥のせん断応力とせん断歪みとのヒステリシス・ループを代表する

* 正会員 工修 (株)五洋建設 技術本部技術研究所

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

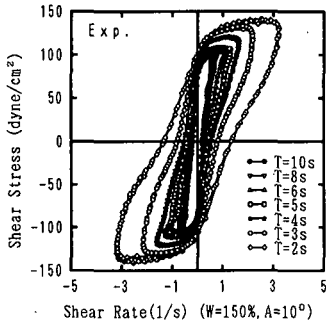


図-3 セン断応力と歪み速度の関係 (周期の影響)

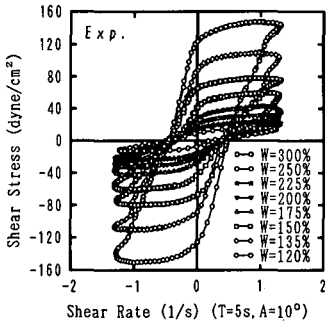


図-4 セン断応力と歪み速度の関係 (含水率の影響)

図-5(a) は更に図-5(b) と図-5(c) に分けることができる。ここで図-5(b) はそのヒステリシス・ループのバックボーン・カーブで、図-5(c) は補助曲線である。また、せん断歪みと歪み速度との間に 90° の位相差があるので、せん断応力と歪み速度との座標においては、図-5(b) と図-5(c) がそれぞれ図-5(e) 及び図-5(f) に対応する。また、図-5(e) と図-5(f) を足すことにより、せん断応力と歪み速度とのヒステリシス・ループ関係を表す図-5(d) が得られる。更に、図-5(f) はちょうど図-5(d) のバックボーン・カーブと見られる。そこで、図-5(b) と図-5(f) に示すせん断応力とせん断歪み、また歪み速度とのバックボーン・カーブを定式化できれば、波作用下における底泥のレオロジー特性を定量的に

表すことが可能となる。

この考えをもとに、図-5(b) と図-5(f) の曲線をそれぞれせん断応力 τ とせん断歪み ϵ 、せん断応力 τ と歪み速度 $\dot{\gamma}$ との有理式関数と定式化することにより、正弦振動の作用下での底泥のレオロジーモデルは次のように構成した。

$$\tau = \frac{G_0 \epsilon}{1 - \alpha |\epsilon|} + \frac{\mu_0 \dot{\gamma}}{1 + \beta |\dot{\gamma}|} \quad (1)$$

式中の係数 $G_0, \mu_0, \alpha, \beta$ はそれぞれ初期弾性係数 ($\epsilon=0$)、初期粘性係数 ($\dot{\gamma}=0$) およびバックボーン・カーブ図-5(b) と図-5(f) の形状係数である。

(3) パラメーターの評価とモデルの検証

係数 $G_0, \mu_0, \alpha, \beta$ は提案された底泥の構成方程式の重要なパラメーターとして、モデルの再現性に対して支配的な役割を果たすことが予想される。このことから、実験データに基づいて多変数非線形最小二乗法により、これらのパラメーターの値を求めた。整理した結果によれば、初期弾性係数 G_0 および初期粘性係数 μ_0 は泥の含水率、振動の周期および泥中のせん断歪み振幅のいずれとも明確な相関が見られる。また、係数 α と β は含水率による変化が小さいので、振動の周期およびせん断歪み振幅のみの関数として取り扱うことができる。

そこで、回帰分析により、係数 G_0, μ_0, α および β に対する実験式が式-(2) のように得られる。

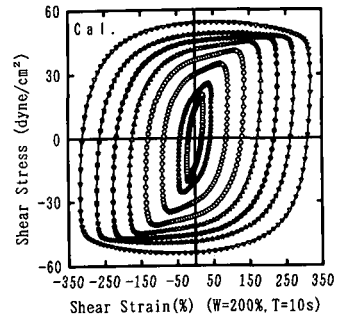


図-6 セン断応力とせん断歪みとの関係の計算結果

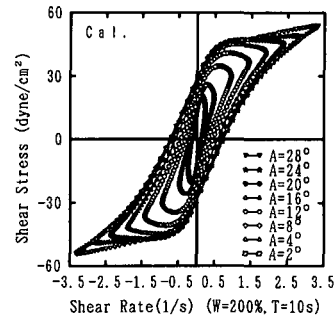


図-7 セン断応力と歪み速度との関係の計算結果

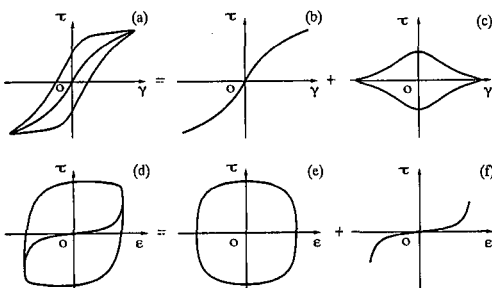


図-5 底泥構成方程式の定義図

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \{1.0 - (0.8 - 5.0 \times 10^{-3} \cdot T) \\
 &\quad \cdot \exp[-(0.75 \cdot \tanh(T/4)) \cdot \varepsilon_{\max}]\} / \varepsilon_{\max} \\
 \beta &= (0.45 + 0.11 \cdot T + 0.015 \cdot T^2) \\
 &\quad \cdot \varepsilon_{\max}^{(1.05 - 1.42 \cdot T^{0.2})} \\
 G_0 &= (5.6 \times 10^5 \cdot W^{-2.8}) \\
 &\quad \cdot \{[-7.26 - 560 \cdot (1.0 + \tanh(-0.58 \cdot T))]\} \\
 &\quad + [81.70 + 707 \cdot (1.0 + \tanh(-0.47 \cdot T))]\} \\
 &\quad \cdot \alpha^{1.71 / (1 + 9.87 \exp(-0.87 \cdot T))} \\
 \mu_0 &= (5.6 \times 10^5 \cdot W^{-2.8}) \cdot \{37.5 \cdot (1.31^T) \\
 &\quad \cdot \ln[24.7 \beta \exp(-0.31 \cdot T) + 1.0]\} \quad \dots (2)
 \end{aligned}$$

ここで、 T は振動周期(s)、 $\varepsilon_{\max}$ はせん断歪みの振幅、 W は泥の含水率(%)である。

以上より、実験データに基づいた波作用下での底泥のレオロジーモデルが構築された。その適当性を検証するために、図-1、図-2に示した実験データと対応して本モデルを用いて求めた底泥のヒステリシス・ループを図-6と図-7に示す。この例に示すように、計算結果と実験データとの一致度は良好である。

3. 底泥層内含水率の経時変化

底泥のレオロジー特性はその含水率と密接に関わっている。従って、波による底泥の運動を正確に予測するためには、波作用下での底泥層内の含水率の鉛直分布およびその経時変化を評価するモデルが不可欠である。

底泥の含水率の鉛直変化に関する波の影響については、沈ら(1993)のカオリナイトを用いた静水状態と波作用状態の2種類の室内実験により、静水状態では底泥は圧密されるだけであるのに対して、波作用下では底泥の表層が含水率を増加され、あるいは“液状化”し、下層では圧密されるといった複雑な現象が明かとなっている。

そこで、本研究においては、沈らの研究に基づいて、波作用下での底泥層内含水率の鉛直分布およびその経時変化を算定するための簡易なモデル化を新たに試みた。

(1) 含水率変化における波の役割

波作用下における底泥表層の“液状化”ならびに下層の圧密が発生する基本的なメカニズムについて次のように考える。

図-8に示すように、底泥層に進行する波は“pumping”および“shaking”という2つの作用を底泥に与える。ここに、“pumping”は底面変動水圧による底泥の伸張また圧縮のことで、“shaking”は泥面せん断応力および動水圧勾配による底泥のせん断である。また、“pumping”および“shaking”はそれぞれ泥中の圧縮応力とせん断応力と結び付いている。実際には、底泥層内の含水率の変化は波の“pumping”および“shaking”の総合作用によるものであるが、ここでは、波の“pumping”および

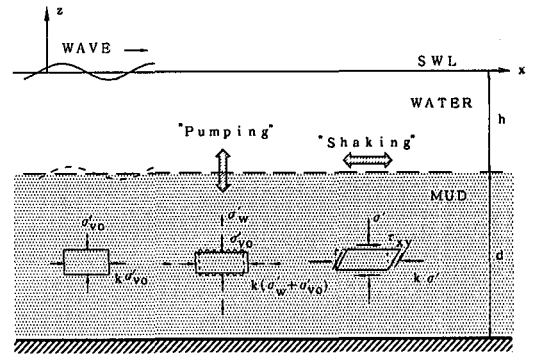


図-8 波による泥中の応力状態

“shaking”の主な役割についてそれぞれ考慮する。

a) 波の“pumping”による底泥の圧密：水面の変動が比較的速い波浪場においては、地盤中の有効応力は波浪の進行に伴って変動することが善ら(1991)の研究によって明らかにされた。それに基づけば、波の“pumping”あるいは底面変動水圧が泥層の圧密の主な原因と思われる。具体的にいえば、波の1周期の間に底泥は正の動水圧と負の動水圧を交互に受けることにより、底泥層内に引き起こされた過剰間隙水圧あるいは有効応力も交互的に変化し、底泥は圧縮されたり膨張されたりする。また、底泥の体積圧縮係数はその膨張係数より大きいので、波作用下の1周期の後で泥中に残留体積圧縮変形が残される。このように波の繰り返し作用の結果により底泥の含水率が減少する。

b) 波の“shaking”による底泥の“膨張”：波による底泥の膨張は、土質力学における地盤の“液状化”の発生と同じように、せん断応力による底泥の“dilatancy”の結果であるとも見られる。ここでは、底泥の膨張は、波の“shaking”による底泥の巻き上げ現象と密接な関わりがあると考えた。従来の研究により、波作用下における底泥内部の最大せん断応力値が底泥のせん断強度を超えると、底泥粒子が底泥表面に発生したクラックから底泥波の決まった位相で巻き上げられることが明らかとなっている。これは波の“shaking”によって底泥表層に“dilatancy”が発生し、泥層の構造を破壊されるものとも見られる。この発生と同時に、水粒子と泥粒子の交換も行われている。従って、泥粒子の巻き上げに伴って泥粒子の元の居場所に間隙水が侵入し、含水率の増加による底泥の膨張あるいは“液状化”が発生すると考えられる。

このように、波作用下での底泥の含水率の変化は底泥の自重に加えて波の“pumping”による圧密および波の“shaking”による膨張の総合的な効果である。

(2) 含水率鉛直変化の簡易モデル

ここでは、理論解析の簡単化のために次の仮定を設け

る。1) 波の“pumping”による底泥の圧密は一般の外力による圧密と同様にみなされる。2) 波の“shaking”による底泥の膨張は圧密の逆過程として取り扱え、また泥中の間隙水体积の増加量は底泥表面からの巻き上げ体積と同じとする。3) 泥層は不透水床の上にあり、水と底泥の界面は透水境界とする。これらの仮定のもとで、Gibsonら(1967)による一般的な1次元圧密方程式を用いることができる。

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \frac{\partial e}{\partial z} \left[\frac{k}{\rho_f(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + (\rho_s - \rho_f) \cdot \frac{d}{de} \left[\frac{k}{\rho_f(1+e)} \right] \frac{\partial e}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

また、Lee・Sills (1981) に倣い、間隙率と有効応力および透水係数と間隙率の関係がそれぞれ次式のように
 $\sigma' = A - \lambda e, \quad k = \rho_f k_0 (1+e) \dots\dots\dots (4)$
 線形であると仮定すると、圧密方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial e}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \quad \text{for} \quad \begin{cases} 0 \leq z \leq z_0 \\ t \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 e は間隙率、 k は透水係数、 σ' は有効応力、 ρ_s と ρ_f はそれぞれ底泥と水の密度、 $C_v = (k/\rho_f(1+e))(d\sigma'/de)$ は体積圧縮係数である。

適当な初期条件および境界条件を与えることにより、重力および波の“pumping”による底泥の圧密に対しては次のような解析式が得られる。

$$e(z, t) = e_i - \frac{\beta}{z_0} \left[1 - \frac{z}{z_0} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{n\pi z}{z_0}}{m^2 \pi^2} \cdot \exp \left(-m^2 \pi^2 \frac{C_0 t}{z_0^2} \right) \right] \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $m = (2n+1)/2$, $\beta = (\rho_s - \rho_f)/\lambda + (P_0/z_0\lambda)$, P_0 は底面の変動水圧振幅、 e_i は初期間隙率、 S は底泥の飽和度、 γ_s は底泥の単位体積にあたる重量、 z_0 は泥厚である。

同様に、波の“shaking”による底泥の膨張は次式で求める。

$$\Delta e(z, t) = \Delta e_s \left\{ -\frac{z}{z_0} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin \frac{n\pi z}{z_0}}{z_0} \cdot \exp \left(\left(\frac{n\pi z_0}{z_0} \right)^2 C_0 t \right) \right] \right\} \dots\dots\dots (7)$$

また、泥中の間隙率と含水率の関係は式-(8)で表す。

$$\omega(z, t) = e(z, t) \frac{\gamma_s}{S} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $C_e = (k_i/(\rho_f(1+e)))(d\sigma'/de)$ は体積膨張係数、 Δe_s は巻き上げによる底泥表層の間隙率の変化である。

式-(6)と式-(7)とを加えることにより、波作用下での含水率の鉛直分布および経時変化を計算することが

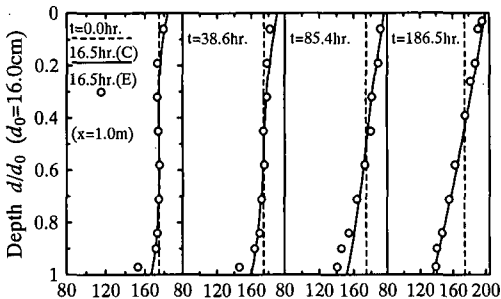


図-9 含水率鉛直変化の計算結果と実験結果との比較

表-1 計算条件

w_i	$\frac{k(e)}{[\rho_f(1+e)]}$	$\frac{k(e)_i}{[\rho_f(1+e)]}$	$\lambda = \frac{d\sigma'}{de}$	T	H_0
174 %	3.6×10^{-11} (m ² /kgs)	2.4×10^{-11} (m ² /kgs)	35.0 (kg/m ²)	1.02 s	4.5 cm

できる。図-9 は表-1 の条件において波作用下における含水率の変動を計算した結果と沈らの実験データとを比較したもの1例である。不透水床近くで多少の差が見られるものの、鉛直分布の経時変化はよく再現できるといえよう。

4. 底泥波動運動の数値解析

(1) 数値解析モデル

波による底泥運動、波高減衰および底泥層内の質量輸送速度の予測にに関して現在までにいくつかのモデルが提案されている。しかし、その中の多くは底泥を粘性、粘弾性、または粘塑性流体等と仮定しており、波作用下での底泥の動力学特性を十分に反映していないと思われる。これに対して、本論文では、新たに提案したレオロジーモデルを用いて底泥運動の鉛直2次元数値モデルを次のように構築した。

泥層内の移流は無視できると考えると、底泥の連続式および線形化された運動方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

$$\rho_m \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \dots\dots\dots (10)$$

$$\rho_m \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここに、 p は動圧力、 u と w はそれぞれ水平および鉛直方向の流速、 ρ_m は底泥の密度である。

また、せん断歪み $\epsilon = (\partial \xi / \partial z) + (\partial \zeta / \partial x)$ と歪み速度 $\gamma = (\partial u / \partial z) + (\partial v / \partial x)$ を底泥のレオロジーモデルの式(1)に代入することにより式中のせん断応力 τ_{xz} と τ_{zx} が決められる。

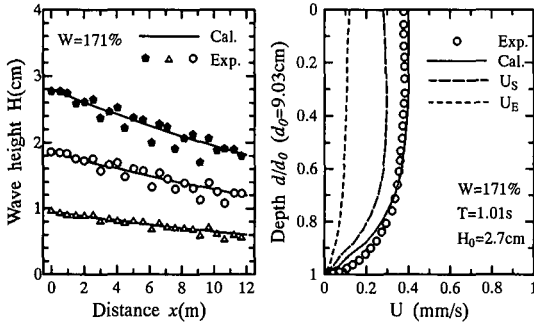


図-10 波高分布および質量輸送速度

そこで、固定床上での non-slip 条件、泥層表面での zero セン断応力条件、泥波の周期条件といった境界条件および適当な初期条件を与えて、数値解析法により泥中の流速、圧力またせん断応力を解くことができる。

したがって、底泥層におけるエネルギー逸散による波高の減衰は次式で評価できる。

$$D_H = -\frac{1}{H} \frac{dH}{dx} = -\frac{4}{\rho g L H^2} \int_x^{x+L} \int_0^d \tau \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) dz dx \quad \dots\dots\dots (12)$$

また、底泥の質量輸送速度 U は、オイラー的質量輸送速度 U_E とストークス・ドリフト U_S との和として、

$$U_S = \frac{\partial u}{\partial x} \int_0^t u dt' + \frac{\partial w}{\partial z} \int_0^t w dt' \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\mu' \frac{\partial^2 U_E}{\partial z^2} = \frac{\partial \rho_m u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_m u w}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (14)$$

で表される。ここに、 ρ は水の密度、 d は泥厚、 H と L はそれぞれ波の波高および波長である。また、相当粘性係数の時間平均値である μ' は

$$\mu' = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{\partial \tau}{\partial z} dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{\mu_0}{(1 + \beta |\gamma|)^2} dt \quad \dots\dots (15)$$

によって求められる。

(2) 計算結果と実験結果の比較

底泥運動の解析モデルの妥当性を確かめるために、波高減衰および底泥層内の質量輸送速度の鉛直分布に対する実験結果による検証を行った。図-10 に示すのは波高分布および質量輸送速度の計算値と Sakakiyama・Bijker (1989) の行った実験値を比較したものの 1 例である。例に示したように、本モデルにより波高分布および質量輸送速度の実験結果が再現できることが分かった。また、底泥の波動運動に対する含水率の鉛直分布の経時変化による影響を把握するため、底泥の質量輸送速度について調べた。図-11 は予測された底泥の質量輸送

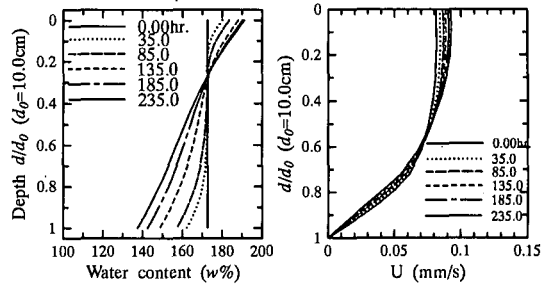


図-11 含水率変化による質量輸送速度分布

速度の鉛直分布の変化の例である。

5. おわりに

本研究においては、波作用下での底泥の力学的特性に関して幅広い条件を含めた室内実験を行い、波による底泥のせん断応力はその含水率、波動の周期と振幅および泥中の歪み状態と密接な関係を有することを把握した。さらに、実験データに基づいて、より実現象に近い波作用下での底泥のレオロジー特性を算定するためのモデルを構築し、本レオロジーモデルを鉛直 2 次元の運動方程式に組み込むことで、波による底泥の波動運動、波高減衰および質量輸送速度の数値計算を行い、実験結果を良好に再現できることが明らかとなった。また、波による底泥の巻き上げが底泥表層の“液状化”と密接な関連があると考えた上で、底泥の巻き上げと圧密方程式の組み合わせによって波作用下における底泥層内含水率の鉛直分布およびその経時変化を予測するモデルを開発し、底泥の質量輸送に対する含水率の影響を考察した。

参 考 文 献

沈 道顕・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 波による底泥の質量輸送および泥浜の地形変化について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 356-360.
善 功企 (1993): 海底地盤の波浪による液状化に関する研究, 港湾技研資料, No. 755.
Gibson, R. K., G. L. England, and M. J. L. Hussey (1969), The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays, (i) Finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers, Geotechnique, Vol. 17, No. 26, pp. 251-273.
Lee, K. and G. C. Sills (1981): The consolidation of a soil stratum, including self-weight effects and large strains. Int. J. of Numerical Analysis Methods in Geotech., Vol. 5, pp. 405-428.
Sakakiyama, T. and E. W. Bijker (1989): Mass transport velocity in mud layer due to progressive waves, J. of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 115, No. 5, pp. 614-633.