

非粘着性および粘着性底質の内部応力変動と漂砂形態

中野 晋*・井上 洋**・香川和久***

1. はじめに

漂砂問題において非粘着性の砂と粘着性の底泥はその移動状況が大きく異なるため、別のものとして取り扱われることが多い。ところが波浪による海底地盤の液状化を考える場合には透水係数や弾性係数などが底質によって異なるだけで本質的には同じ問題である。近年、多くの研究者によって底質の液状化と漂砂の関連が活発に検討されている。中でも前野ら(1989)は Shields 数がシートフローの発生限界である 0.5 に近づくとき有効応力変動振幅が 0 に近づくことを報告している。また鶴谷らは波崎海岸で底質の部分的液状化が生じた際に浮遊砂濃度が上がる現象を観測している。一方、著者ら(1991)はカオリナイトを用いた実験から底泥の巻き上げ現象は底泥運動が生じた後に活発になることを明らかにしている。このように底質の種類が異なっても、底質の移動現象は底質の液状化あるいは流動化や底質の内部応力と関係が深いことが分かってきた。

そこで本研究では底質内部の有効応力変動を実測と理論計算から調べ、砂質床ならびに底泥床の移動現象との関係について検討したものである。

2. 底質内部応力の理論解析

(1) 基礎式

Yamamoto の研究(1977, 1978)では Biot の 3 次元圧密理論に基づき、波による底質内部の応力変動の理論解析を行っている。このうち 1977 年の研究は底質厚さが有限の場合に適用できるもので 6 階の微分方程式となり、1978 年の研究は底質厚さを無限大として 4 階の微分方程式として定式化したものである。実験室では波長に対し底質厚さを十分大きくとることは難しいことや底質厚さの影響が漂砂現象に及ぼす影響を知るためには前者のように底質層を有限と取り扱う理論解析が必要である。そこで本稿では前者の研究に準じて解析を行った。

底質表面より下向きに z 、波の進行方向に x をとると、

間隙水圧変動 p_z 、底質変位 u , w は

$$\frac{k_d}{\gamma} \nabla^2 p_z = \frac{n}{K'} \frac{\partial p_z}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$G \nabla^2 u + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial p_z}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$G \nabla^2 w + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial p_z}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される。ここで $\varepsilon = \partial u / \partial x + \partial w / \partial z$ は体積ひずみ、 k_d は透水係数、 γ は間隙水の単位体積重量、 n は間隙率、 K' は見かけの体積弾性係数、 ν はポアソン比、 G はせん断弾性係数で、 K' は飽和度 S_r 、絶対間隙圧を $p_a (=1 \text{ atm})$ 、純水の弾性係数を K とすると

$$\frac{1}{K'} = \frac{1}{K} + \frac{1-S_r}{p_a} \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表される。 u , w , p_z を

$$u = U(z) \exp\{i(kx - \omega t)\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$w = W(z) \exp\{i(kx - \omega t)\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$p_z = P(z) \exp\{i(kx - \omega t)\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表すと、 U , W , P の一般解は

$$U = a_1 \exp(kz) + a_2 \exp(-kz) + a_3 z \exp(kz) + a_4 z \exp(-kz) + a_5 \exp(\lambda z) + a_6 \exp(-\lambda z) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$W = b_1 \exp(kz) + b_2 \exp(-kz) + b_3 z \exp(kz) + b_4 z \exp(-kz) + b_5 \exp(\lambda z) + b_6 \exp(-\lambda z) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$P = c_1 \exp(kz) + c_2 \exp(-kz) + c_3 z \exp(kz) + c_4 z \exp(-kz) + c_5 \exp(\lambda z) + c_6 \exp(-\lambda z) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\lambda^2 = k^2 - i \frac{\gamma \omega}{k_d} \left(\frac{n}{K'} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)G} \right) = k^2 - i \omega' \quad \dots\dots\dots (11)$$

で表される。また係数 a_n , b_n , c_n ($n=1 \sim 6$) は

$$a_1 = i(b_1 + sb_3), \quad a_2 = i(-b_2 + sb_4)$$

$$a_3 = ib_3, \quad a_4 = -ib_4$$

$$a_5 = i(k/\lambda)b_5, \quad a_6 = -i(k/\lambda)b_6$$

$$c_1 = 2G(1+m)^{-1}b_3, \quad c_2 = 2G(1+m)^{-1}b_4$$

$$c_3 = c_4 = 0, \quad c_5 = 2(\beta G \omega' / \lambda)b_5$$

$$c_6 = -2(\beta G \omega' / \lambda)b_6$$

* 正会員 工修 徳島大学講師 工学部建設工学科

** 正会員 工修 (株)熊谷組 広島支店

*** 正会員 (株)四電技術コンサルタント 松山支店

$$\beta = (1 - \nu) / (1 - 2\nu)$$

$$m = nG / K'(1 - 2\nu)$$

$$s = \frac{1}{k} \left(1 + \frac{2G}{1 + m} \frac{n}{K'} \right)$$

(2) 境界条件

未知数 $b_n (n=1 \sim 6)$ を境界条件から決定する。底質表面 ($z=0$) では鉛直有効応力変動 $p_e=0$ 、せん断応力 τ_{xz} は無視できるとする。また間隙水圧変動は微小振幅波理論による推定波圧変動と等しいとする。

$$p_e = 2G \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \epsilon \right) = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$\tau_{xz} = G \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = 0 \dots\dots\dots (13)$$

$$p_z = \frac{\gamma H_w}{2 \cosh kh_1} \exp[i(kx - \omega t)] \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 H_w は波高、 h_1 は水深である。

また不透水面 ($z=h_2$) で、

$$u = 0 \dots\dots\dots (15)$$

$$w = 0 \dots\dots\dots (16)$$

$$\partial p_z / \partial z = 0 \dots\dots\dots (17)$$

の条件を与える。式 (12) ~ (17) から $b_1 \sim b_6$ に関する連立方程式が得られ、これを解くことにより内部応力変動が求められる。

3. 実験方法

図-1 に示す長さ 16.8 m、幅 49 cm の造波水槽の中央に底質床部 (深さ 7 cm、長さ 3 m) を設けた。底質には非粘着性底質を代表させて塩化ビニル粒子 (PVC、粒径 0.1 mm、比重 1.254、透水係数 4.2×10^{-5} m/s、間隙率 0.658、ヤング率 約 330 kN/cm²)、粘着性底質を代表してカオリナイト泥 (ASP 600、含水比 145 % と 180 %) を用いた。底質床中央の深さ 3 cm と 6 cm に間隙水圧計 (ϕ 12 mm、フィルターメッシュ 70 μ m、三計エンジニアリング P 310 A-01) と土圧計 (ϕ 10 mm、三計エンジニアリング P 310-01) を設置し、鉛直有効応力変動を測定した。

漂砂形態や流動状態を把握することを目的とした実験 A (流動実験) のほか、底質内部の圧力変動と直上の水位、底質表面変位、濁度、流速との関係調べることを目的とした実験 B (同時計測実験) も行った。底質表面変位は超音波砂面計 (正豊工学 EPI-2)、濁度は濁度計 (計測技研, PMT 4-50) を用いて測定した。

実験 A の波浪条件を表-1 に示す。なお、鉛直有効応力変動 p_e は前野ら (1989) と同様、各時刻の土圧変動 p_0 から間隙水圧変動 p_z を引いて求めた。平均波高および土圧、間隙圧、鉛直有効応力の各変動量の全振幅はいずれもそれぞれのエネルギースペクトルのピーク周波数 f_p

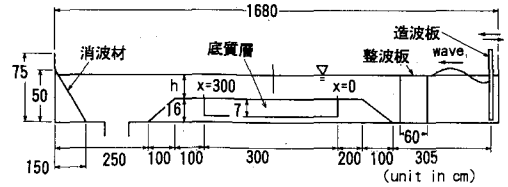


図-1 実験装置

表-1 実験条件 (実験 A)

底質	PVC		カオリナイト	
水深 (cm)	30	40	20, 30	30, 40
周期 (s)	0.8, 0.9 1.0, 1.2	0.8, 0.9, 1.0 1.1, 1.2	1.0, 1.2	1.0, 1.2
波高 (cm)	1.5~7.5	1.7~7.5	1.6~6.4	1.7~6.8
含水比 (%)	—	—	145	180

の 0.5~3.5 倍の範囲で積分してエネルギーを求めてから次式から波高あるいは全振幅に換算した。

$$H = 2 \sqrt{2 \int_{0.5f_p}^{3.5f_p} E(f) df} \dots\dots\dots (18)$$

4. 実験結果と考察

(1) 鉛直有効応力変動の時間波形

漂砂の移動状態を PVC の場合、移動なし、掃流移動、浮遊移動、シートフローの 4 段階に、カオリナイトの場合、非流動、一部流動、全層流動の 3 段階に分類した。なお PVC の漂砂形態の遷移は Shibayama・Horikawa (1982) の移動形態分類とほぼ一致している。水深 30 cm、周期 1.0 s の条件で実施した同時測定の時間波形を示す。

a. PVC

図-2 に ripple が発生し、浮遊移動している場合 (左側) とシートフローに移行した場合 (右側) の時間波形を示す。有効応力変動 p_e は $z=3$ cm、濁度は $z=-1$ cm の測定値である。ripple 状態の p_e は水面波に π 近くの位相遅れがあり、谷で大きく、峰で小さくなっている。シートフローに移行すると波の峰と谷の通過時に p_e が低下し、波形の分裂が生じている。ripple 状態で波高 5 mm の底質表面変位が現れているが、これは浮遊底質に反応したためで、概ね浮遊高さを表している。底質上 1 cm の濁度波形からはシートフロー状態で峰の通過直後に高濃度の底質浮遊が生じていることがわかる。

b. カオリナイト

図-3 に非流動状況 (左側)、全層が流動し底泥運動が観測されている状況 (右側) の波形を示す。非流動状況では p_e は $\pi/2$ 程度位相が遅れた正弦波的な変化をするが、底泥運動が生じると波形が崩れ、峰と谷部で振幅が

小さくなり、位相遅れはほぼ0に近づく、こうした波形のひずみは底泥が運動することに起因しており、底泥粒子が上昇する過程で p_e が低下し、下降する過程で増加することがわかる。

(2) 液状化限界とシートフロー

波浪による海底の液状化条件は善ら (1987) によれば、

$$\sigma_0 + (p_b - p_z) \leq 0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで σ_0 は有効土かぶり圧($=\gamma'z$)、 p_b は海底面に作用する波圧変動、 p_z は底質内の間隙水圧変動である。またOkusa (1985) によれば

$$\sigma_0 + p_e \leq 0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

である。 $p_b - p_z$ と p_e は厳密には異なるものであるが、現地観測の結果 (善ら, 1989) でもほぼ一致する。そこで、ここでは式 (20) の表示を用いて底質の液状化について調べる。 p_e の振幅を P_e とすると式 (20) の条件は $p_e = -P_e$ の時にまず成立する。したがって底質が液状化する条件として

$$P_e/\sigma_0 = P_e/\gamma'z \geq 1 \quad \dots\dots\dots (21)$$

が得られる。

図-4は $z=3\text{ cm}$ での $P_e/\gamma'z$ とShields数 $\phi(=U_*^2/(\rho_s/\rho_w-1)gd)$ の関係である。ここで U_* は摩擦速度、 ρ_s 、 ρ_w は底質と水の密度、 d は粒径である。また摩擦速度は $U_*=(f_w/2)^{1/2}U_m$ であり、 f_w は摩擦係数、 U_m は海底面での最大水粒子速度である。 f_w はSwart (1976)の式を用いた。図に示した曲線は水深30 cm、底質厚7 cm、周期1.2 sの時の計算値で、Poisson比は1/3 (この時 $G=1.2 \times 10^9 \text{ Pa}$)、 10°C の純水の弾性係数を $2.05 \times 10^{10} \text{ Pa}$ とし、飽和度 S_r を変化させた。 $\phi > 0.3$ 以上でシートフローに移行すること、 $S_r=99\%$ の計算値で測定値を概ね説明できることがわかる。図-5は $S_r=99\%$ の場合の深度の違いによる $P_e/\gamma'z$ の変化を計算したもので、 $z \leq 1\text{ cm}$ では $\phi \geq 0.5$ で式 (21) を満たす状況となり、液状化が発生し易くなっていることがわかる、このことから液状化の発生とシートフローへの移行はほぼ同時に生じることがわかる。

(3) 底泥の流動限界

著者ら (1991) は底泥層厚を4段階、含水比119~136%のカオリナイト泥を用いた実験から底泥内部の最大せん断応力 $\tau_{\max}$ が底泥の降伏値 τ_y を越えると底泥層が流動化し、底泥運動が生じることを示した。この際 $\tau_{\max}$ はYamamoto et al. (1978) の完全飽和土についての解

$$\tau_{\max} = P_b k h_2 \exp(-k h_2) \quad (h_2 \leq 1/k) \quad \dots\dots\dots (22)$$

から評価し、 τ_y は回転粘度計による測定値 (鶴谷ら、

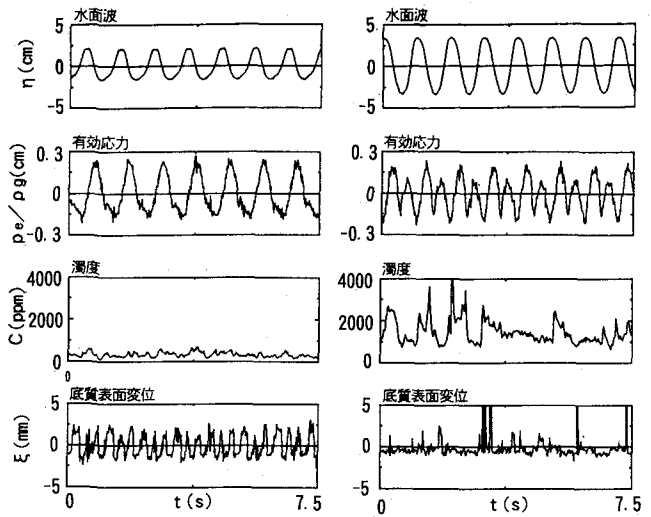


図-2 鉛直有効応力変動等の時間波形 (PVC)

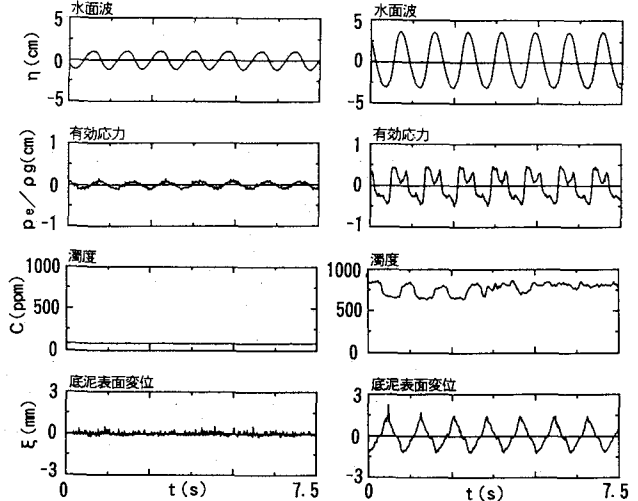


図-3 鉛直有効応力変動等の時間波形 (カオリナイト)

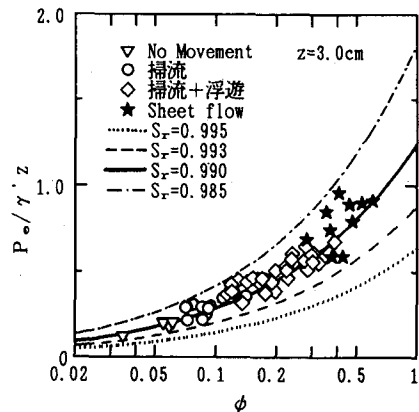


図-4 有効応力振幅比と漂砂形態 (PVC)

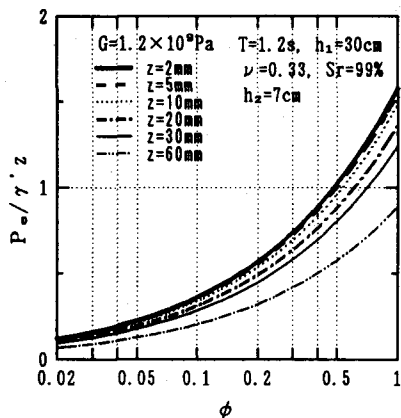


図-5 有効応力振幅比の深度による変化

1986) を用いている。そこで今回の測定値について τ_{max}/τ_y と kh_2 の関係を調べたものが図-6である。図から $\tau_{max}/\tau_y=3.5$ が流動限界と考えられるが、1991年の実験ではこれが約1.0であり異なっている。この原因は図-4からもわかるように底質内部の応力には不飽和の影響1%程度であっても重大であり、式(22)では内部応力を代表できないと考えられる。つまり両者の相違は今回と前回の実験でわずかに飽和度が異なったためと考えられる。

ここではPVCと同様、液状化限界との関連について調べる。底泥の場合には代表粒径が不明でShields数が定義できないため、次のKeulegan Parameter K_* と $P_e/\gamma'z$ の関係を図-7に示す。

$$K_* = U_*^3 / (\rho_s/\rho_w - 1) g \nu_w \dots\dots\dots (23)$$

ここに ν_w は水の動粘性係数である。カオリナイトのPoisson比を0.49、透水係数を 10^{-7} m/s、飽和度を99%と仮定して、含水比180%、水深30cm、周期1.2sに対する計算値も示したが、 K_* の増加に伴い、 $P_e/\gamma'z$ が増加し、流動状態で有効応力変動振幅が著しく大きくなることからわかる。条件によってばらつきが大きい、PVCの場合と同様に底泥の流動は液状化によって生じる現象で

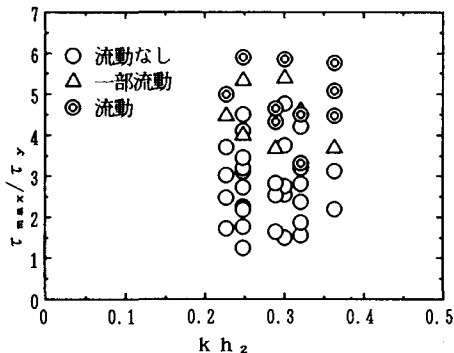
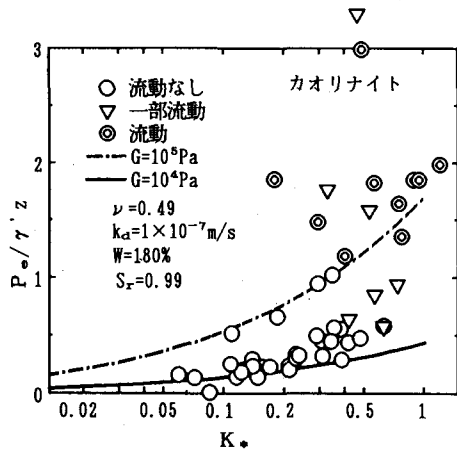
図-6 底泥の流動限界と τ_{max}/τ_y 

図-7 有効応力振幅比と流動形態 (カオリナイト)

あることが示唆される。

(4) 有効応力変動振幅と波浪パラメータ

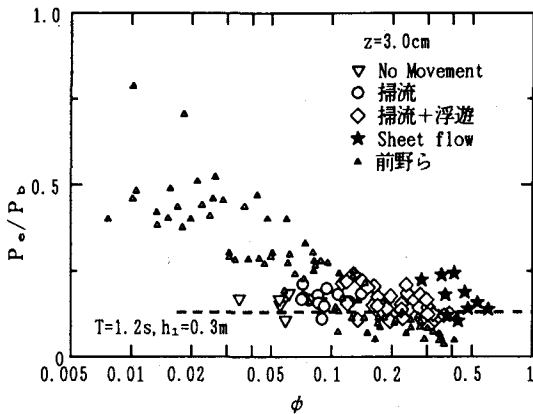
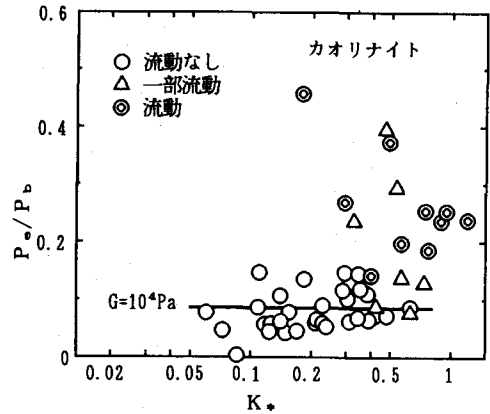
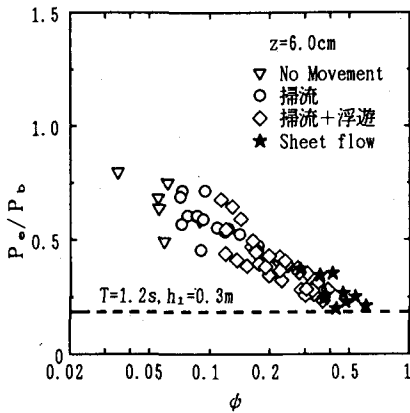
図-8と9に海底面での推定波圧振幅 P_b を用いて無次元化したPVCについての有効応力変動振幅 P_e とShields数の関係を示す。図中には飽和度99%についての計算値を示しているが、Yamamotoの基礎式を用いる限り、波高が変化しても P_e/P_b は変化しない。 $z=3$ cmの場合にはほぼこの計算結果と一致し、シートフロー状態で少し大きくなる傾向がある。これに対し、底質厚さ40cmの砂床で実施した前野ら(1989)の実験や $z=6$ cmの結果では ϕ の増加に伴い、 P_e/P_b が減少する状況が見られる。前野らはこの傾向はシートフローに近づくにつれ、乱れによるエネルギー損失が大きくなり砂層内の間隙圧の発達に制御され有効応力変動が生じなくなるためであると説明している。有効応力変動には飽和度、透水係数、空隙率などが影響する。仮に飽和度が実験中に98.5%から99%へ変化する場合、 $z=6$ cmの場合、 P_e/P_b は0.276から0.187へ減少する。これに対し、シートフロー状態になると浸透層内が乱流状態となり、透水係数が2割低下すると仮定すると、0.187から0.223へ増加する。したがって ϕ による P_e/P_b の減少は飽和度が上昇する過程で生じ、シートフロー時の上昇は透水係数の変化が一因ではないかと考えられる。

図-10はカオリナイトについて $z=3$ cmの P_e/P_b と K_* との関係を調べたものである。流動状態のデータは計算値よりかなり大きくなっているが、これを除くと、 $G=10^4$ Paに対する計算値とほぼ一致している。

5. おわりに

本研究で得られた主要な結果を以下にまとめる。

1) シートフローや底泥の流動化が生じると表層部の運動に伴い、有効応力変動波形の分裂が見られ、直上の

図-8 無次元有効応力振幅と Shields 数 ($z=3$ cm)図-10 無次元有効応力振幅と K_* 図-9 無次元有効応力振幅と Shields 数 ($z=6$ cm)

濁度は著しく増大した。

2) 非粘性・粘性に関わらず、波高の増加にともない有効応力振幅比の増加の傾向は計算でもよく表現され、液状化がシートフローの発生、底泥の流動化とほぼ同じであることがわかった。

3) 底質の有効応力変動振幅には飽和度や透水係数が影響するが、特に飽和度のわずかな変化も重要であることがわかった。

謝辞：本研究は文部省科学研究費奨励研究 A（中野

晋）の補助のもとに実施された。また三島豊秋氏（徳島大学工学部助手）からは貴重なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 港研報告, 26 巻, 4 号, pp. 125-180.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1989): 海底地盤の波浪による液状化一現地観測および解析一, 港研報告, 28 巻, 3 号, pp. 29-57.
- 鶴谷広一・中野 晋・鷹濱 潤 (1986): 回転粘度計による底泥の流動特性の検討, 港研資料, No. 556, pp. 1-24.
- 中野 晋・伊東信幸・井上 洋 (1991): 波による底泥の流動限界と巻き上げ限界, 海岸論文集, 38 巻, pp. 461-465.
- 前野賢彦・松岡裕二・林田洋明・間瀬 肇 (1989): 砂澱形状と間隙圧発達特性との関係, 第 36 回海講論文集, pp. 789-793.
- Okusa, S. (1985): Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol. 32 (3), pp. 235-247.
- Shibayama, T. and K. Horikawa (1982): Sediment transport and beach transformation, Proc. 18th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1439-1458.
- Swart, D. H. (1976): Coastal sediment transport. Computation of longshore transport, Delft Hydraulic Lab. Report, R968, Part 1.
- Yamamoto, T. (1977): Wave induced instability in sea beds, ASCE Symp. on Coastal Sediments '77, pp. 898-913.
- Yamamoto, T., H. L. Koning, H. Sellmeijer (1978): On the response of a poro-elastic bed to water waves, J. Fluid Mech., Vol. 87, No. 1, pp. 193-206.