

現地不攪乱底泥の強度特性

五 明 美 智 男*・三 村 信 男**

1. はじめに

波や流れによる底泥の輸送現象を解明し予測することは、泥浜海岸における港湾・航路の建設、維持管理や閉鎖性水域での水質汚染対策等を進める上で重要な課題である。そのため、底泥輸送のメカニズムや解析モデルに関する既往の研究では、外力に対する底泥の抵抗力を明らかにすることが基本的な問題として取り組まれてきた。外力に対する底泥の流動限界の指標である降伏値については、回転粘度計、ベーン試験、スランプ試験を用いた検討結果が多数報告され、攪乱試料の降伏値特性が明らかにされている（例えば、大坪，1983；鶴谷ら，1989；中野ら，1991）。しかしながら、現地に堆積する底泥の強度特性は、底泥の堆積環境、攪乱の程度などにより大きく異なることが予想され、実際の現象面では底泥の攪乱・不攪乱状態の違いにより巻上げ量などが異なることが報告されている（楠田ら，1989）。そのため、攪乱試料の降伏値が原位置での降伏値特性を正確に反映しているかどうかは不明である。また、種々の強度指標の間の関係も不確定であり、五明ら（1990）は強度指標の違いにより2オーダー程度の強度差があることを示した。

このような背景から、本研究では、不攪乱底泥の強度特性に多面的に検討を加えることを目的とした。具体的には、現地において採取した不攪乱底泥を用い、強度の鉛直分布、攪乱試料との強度の相違、攪乱の度合や堆積状態の異なる底泥の強度の相違などについて検討した。また、降伏値やベーン強度といった異なる強度特性から、底泥強度指標の物理的な意味と強度の発生要因について検討し、現状では測定不可能な不攪乱底泥の降伏値の推定法について提案した。

2. 実験内容

(1) 現地試料の採取

現地に堆積する底泥の強度は、有機物量、塩分濃度、圧密過程における圧密度、外力による擾乱など、堆積環

境に大きく左右される。そこで、本研究では、こうした堆積環境の違いを反映していると考えられる東京湾湾奥、広島湾宇品港港外（ともに海域）、琵琶湖赤野井湾（淡水域）の3種類の底泥を採取した。また、比較検討のため使用例の多いカオリナイト（ASP 600）を用い、計4種類の底泥について実験を行うこととした。現地泥採取では、潜土士により2種類のアクリルパイプ（直径20 cm、長さ1 m、直径10 cm、長さ2 m）を用いた柱状採泥とバケツによる表層泥採取を行った。また、塩分測定および含水比調整用の採水を同一地点にて行った。

(2) 試験内容

表一は、本研究における試験内容を示したものであり、以下の3つのシリーズに大別される。

a) シリーズ1：底泥強度に対する攪乱、不攪乱の影響の検討

3種類の現地柱状試料について、ハンドベーンにより各深度での不攪乱強度を測定した。測定後、試料を層毎に分割攪乱した後、室内ベーン試験器（矢内ら，1988）により攪乱強度を測定し、不攪乱強度と比較した。

b) シリーズ2：底泥強度に対する堆積条件の影響の検討

東京湾で採取した表層泥の圧密試験（載荷による強制圧密、海水および水道水中での沈降自重圧密）後のベ-

表一 試験内容一覧表

試験方法	① ハンド ベーン	② 室内 ベーン	③ 回転 粘度計	④ 円筒 コーン	⑤ モルタル コーン	供試泥
						現地 東京湾湾奥部 広島湾宇品港港外 琵琶湖南湖赤野井湾 カオリン
堆積状況						
(a) 柱状不攪乱	○					現地柱状試料
(b) (a) の攪乱		○				
(c) 含水比調整泥		○	○	○	○	現地表層攪乱泥、カオリン
(d) (b) の強制圧密		○				東京湾柱状試料
(e) 表層泥沈降圧密 (海水)	○	○				東京湾表層攪乱泥
(f) 表層泥沈降圧密 (水道水)	○	○				

* 水修 東亜建設工業株式会社技術研究所

** 工博 英城大学工学部都市システム工学科

ンせん断強度を測定し、柱状試料による原位置不攪乱強度と比較した。

c) シリーズ3：強度指標および試験方法の違いによる強度の相違の検討

表一1の①～⑤の方法によって、表層泥を含水比調整した攪乱試料の強度を測定し比較した。試験に用いた機器は、ベーンせん断強度についてはシリーズ1と同様のベーン試験器、降伏値については東京計器製B8H型回転粘度計、上径10cm、下径10cm、高さ10cmの円筒コーン、上径7cm、下径10cm、高さ6cmのモルタルコーンである。なお、スランプ試験結果による降伏値の推定には、鶴谷ら(1989)の提案式を用いた。

3. 現地泥の物理・強度特性

(1) 表層泥・カオリンの物理特性

表一2は、各現地にて採取した表層攪乱泥およびカオリンの物理特性を示したものである。市販粘土であるカオリンは、広島泥と類似したコンシステンシー特性を持ち、他の現地泥よりも多い80%強の粘土分を含有する。

(2) 不攪乱試料の物理・強度特性

図一1は、現地泥の採取地点および柱状採泥試料の粒度分布、コンシステンシー指数、土粒子比重、強熱減量、ベーンせん断強度 τ_{vund} の鉛直分布を示したものである。粒度特性により分類した場合、各底泥は全て有機質粘土に分類される。特に、東京湾湾奥部の底泥については、粘土分が多く各層とも約50%以上含まれると

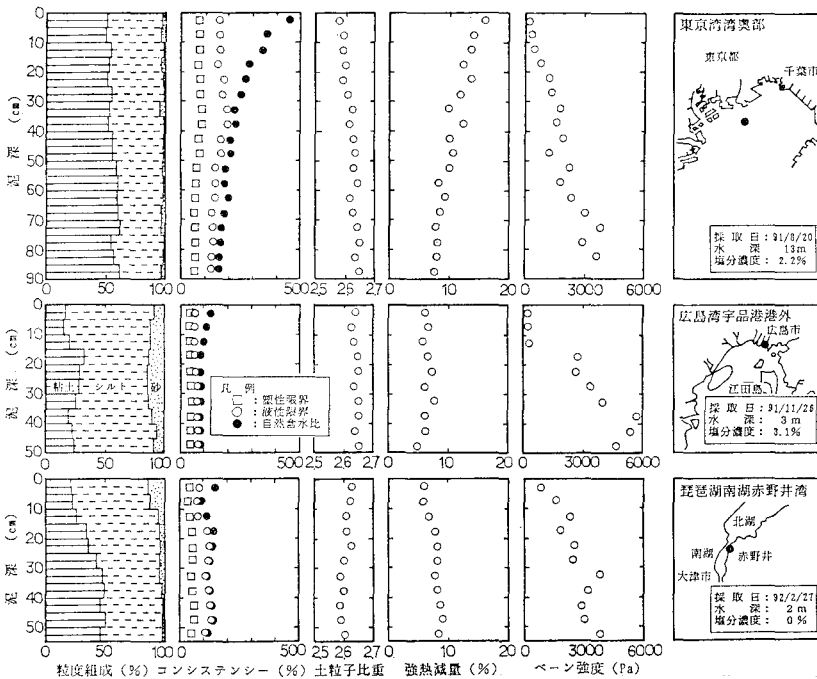
表一2 表層泥の物理特性

	東京湾	広島	琵琶湖	カオリン
土粒子比重	2.656	2.586	2.603	2.590
液性限界(%)	165.3	73.7	116.9	63.2
塑性限界(%)	69.9	36.3	51.8	25.8
塑性指数(%)	95.4	37.4	65.1	37.4
中央粒径(μm)	4.3	7.4	15.8	—
礫分(%)	0	0	0	0
砂分(%)	3	9	8	1
シルト(%)	44	48	59	16
粘土(%)	53	43	33	83
強熱減量(%)	10.2	6.1	7.5	—

ともに砂分の含有量が少ない点が特徴的である。また、各泥ともに、自然含水比は液性限界よりも大きく、強度は泥深の増大に伴い増加する傾向にある。広島湾においては、表層に強度の小さい層が見られるが、これは採泥地点の水深が-3mと浅く船舶の通行などによりある程度乱されているためと考えられる。

4. 不攪乱・攪乱強度比と攪乱度

図一2は、柱状試料各層の攪乱ベーン強度 τ_{vd} と不攪乱ベーン強度 τ_{vund} の比の鉛直分布を示したものである。各現地泥ともに、強度比の大きい表層0~15cmの層と、一定強度比を持つ10~15cm以下の層に分けられる。不攪乱泥の表層付近は、3.で述べたような外



図一1 柱状試料の物理・強度特性と採泥位置

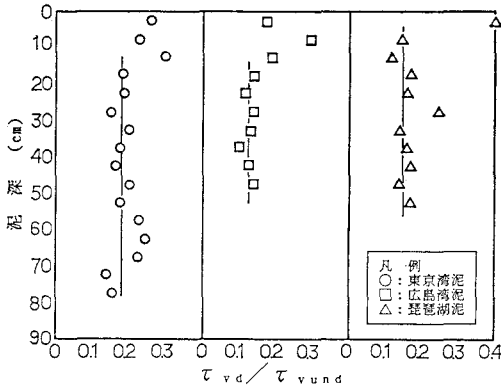


図-2 攪乱、不攪乱強度比の鉛直分布

力による攪乱の影響により多少攪乱状態にあるため、 τ_{vd}/τ_{vund} が大きくなるものと考えられる。また、泥深 15 cm 以深の τ_{vd}/τ_{vund} は、各現地泥それぞれ

$$\left. \begin{aligned} (\tau_{vd}/\tau_{vund})_{\text{東京湾泥}} &= 0.180 \\ (\tau_{vd}/\tau_{vund})_{\text{広島湾泥}} &= 0.125 \\ (\tau_{vd}/\tau_{vund})_{\text{琵琶湖泥}} &= 0.151 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

となることがわかる。このように、今回調べた現地堆積泥の τ_{vd}/τ_{vund} は、0.12~0.18 程度の値となり、外力などにより乱されたような場合には、その度合により 0.2~1.0 の値を示すものと考えられる。なお、ここで、用いた τ_{vd}/τ_{vund} は、従来土質工学分野で用いられている鋭敏比の逆数に相当するものである。

以上示した攪乱の程度についての考え方により、各現地泥表層部の攪乱度を次式により定義する。

$$\text{攪乱度} = \frac{(\tau_{vd}/\tau_{vund})_{\text{表層}} - (\tau_{vd}/\tau_{vund})_{\text{const}}}{1 - (\tau_{vd}/\tau_{vund})_{\text{const}}} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $(\tau_{vd}/\tau_{vund})_{\text{const}}$ は式 (1) により与えられる。この指標によれば、攪乱の度合いは、完全攪乱で 100%，完全不攪乱で 0% と計算される。これにより、各現地泥の表層 0~5 cm の攪乱度は、東京湾泥 10.9%，広島湾泥 6.3%，琵琶湖泥 29.3% と推定される。

5. 不攪乱・攪乱底泥の圧密特性

(1) 不攪乱強度と土被り圧との関係

図-3(a) は、不攪乱強度 τ_{vund} と土被り圧 p の比を示したものである。ここで、土被り圧は、土の飽和状態を仮定し式 (3) により算定した。

$$p = \Sigma \left\{ \left[\left(1 + \frac{W}{100} \right) \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{W}{100\rho_w} \right) - \rho_w \right] \cdot d \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 W ：含水比（%）， ρ_w ：水の密度， ρ_s ：土粒子密度， d ：泥深， Σ ：底泥表層から強度測定点までの各層の総和を示す。五明ら（1990）と同様、現地泥の

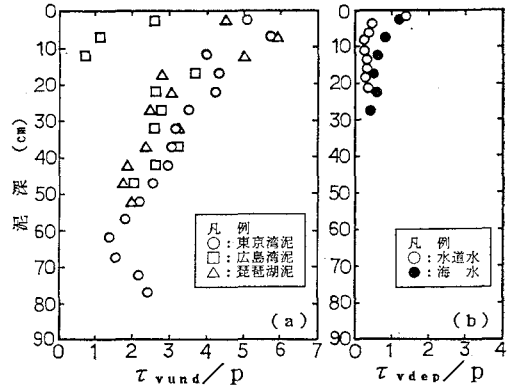


図-3 ベーン強度、有効土被り圧比の鉛直分布

τ_{vund}/p は 1~6 程度の値となり、 $\tau_{vund}/p = 0.27 \sim 0.30$ で与えられる正規圧密粘土（Hanzawa, 1992）より 1 オーダー大きい値を示した。このように、海域の底泥のみならず淡水域の底泥についても底泥表層が過圧密状態にあることは、現地底泥の重要な特徴である。

(2) 堆積過程の影響

河川からの流入土砂あるいは水域の植物プランクトンの死骸などが沈降して形成される底泥の強度は、沈降堆積過程における周辺環境の影響を受けるものと考えられる。過圧密状態の再現性を検討するため、東京湾表層攪乱泥を含水比調整（ $w_0 = 1000\%$ ）し沈降圧密試験を行い、一次圧密終了後にベーン強度 τ_{vdep} を測定した。

図-3(b) は、水洗い後の調整試料を水道水中で沈降させた場合（五明ら（1990））および有機物成分を含む表層泥を調整して海水中で沈降させた場合について、 τ_{vdep}/p の鉛直分布を示したものである。水道水中での実験では、塩分および有機物の影響がほとんど無視できるものと考えられ、こうした状況下で堆積してできる底泥が正規圧密状態となることがわかる。一方、塩水中で沈降堆積した底泥では、正規圧密泥より若干大きい τ_{vdep}/p を示すが高々 0.5~1 程度の値であり、2つの沈降圧密泥においては (1) で示したような過圧密状態は形成されない。

以上のように、1次圧密終了時といった非常に短い圧密履歴の状態で見ると、塩分、有機物の存在は、正規圧密粘土に比べ 1 オーダーも大きい τ_v/p 比を発生させる主要因とは成り得ないものと考えられる。

(3) 載荷条件の影響

上載荷重の影響を検討するため、強制載荷を受けた底泥の強度特性を調べた。用いた試料は不攪乱底泥の表層 0~5 cm 層、25~30 cm 層の攪乱泥であり、荷重（9.8, 49.1, 98.1 N/m²）をかけ強制圧密し、一次圧密終了後にベーン強度 τ_{vwei} を測定した。

表-3 は、各載荷条件における τ_{vwei}/p を示したも

表-3 強制圧密による τ_{vcl}/p

	$P=9.8\text{N/m}^2$	$P=49.1\text{N/m}^2$	$P=98.1\text{N/m}^2$
柱状試料0~5cm層	0.15	0.25	0.27
25~30cm層	—	0.33	0.25

のであり、強制圧密した攪乱泥が正規圧密状態にあることが確認された。このように強制圧密した底泥は、大きな土被り圧を受けたにもかかわらず正規圧密となり、過圧密状態とは成り得ないことが確認された。

(1)~(3)の結果から、一次圧密終了程度の短い圧密履歴や現地堆積状態以上の大きい土被り圧作用では、不攪乱底泥の持つ過圧密特性を説明することが難しいことがわかる。長期間の圧密作用を受けた粘土では、長期(2次)圧密効果および長時間の圧密履歴の間に生じる土粒子間の化学的結合作用(セメンテーション効果)による強度発生が生じることから(安原, 1991)、現地に堆積する底泥にも同様のメカニズムでの強度増加が生じているものと考えられる。東京湾泥の場合、長期履歴に伴う強度増加率は、過圧密状態、正規圧密状態の不攪乱強度比 τ_{vund}/τ_{vdep} として 図-3 より 2.5~4.0 程度と推定される。しかしながら、不攪乱底泥に及ぼす長期圧密、履歴の影響については、波の作用による構造の変化(楠田ら(1989))や締め固め等の効果も含め、さらに検討する必要がある。

6. 底泥の各強度指標の相関と物理的な意味

(1) 各強度指標の相関

図-4 は、各強度試験により得られたベーン強度、降

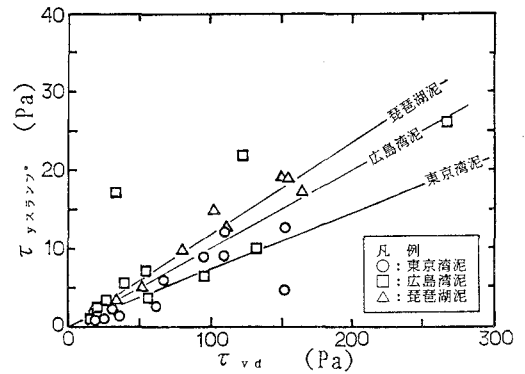


図-5 攪乱ベーン強度とスランプ試験による降伏値の相関

伏値と含水比の関係を示したものである。本研究におけるカオリンの結果は、比較のために示した鶴谷ら(1989)の結果と良く一致している。また、表層泥を用いた降伏値測定の結果、円筒式コーンとモルタルコーンではほぼ同様の降伏値特性が得られるが、簡易式回転粘度計では測定誤差によるバラツキが大きいことが確認された。

図-5 は、降伏値としてモルタルコーンによる値を用い、ベーン攪乱強度との相関を示したものである。両者の間には比較的良好な相関が見られ、各現地泥の強度比は、

$$\left. \begin{aligned} (\tau_{\text{スランプ}}/\tau_{\text{vd}})_{\text{東京湾泥}} &= 7.2 \times 10^{-2} \\ (\tau_{\text{スランプ}}/\tau_{\text{vd}})_{\text{広島湾泥}} &= 1.0 \times 10^{-1} \\ (\tau_{\text{スランプ}}/\tau_{\text{vd}})_{\text{ Sagami湾泥}} &= 1.2 \times 10^{-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

と推定される。

(2) 各強度指標の物理的な意味

上述の各強度試験の結果および考察から、各強度指標

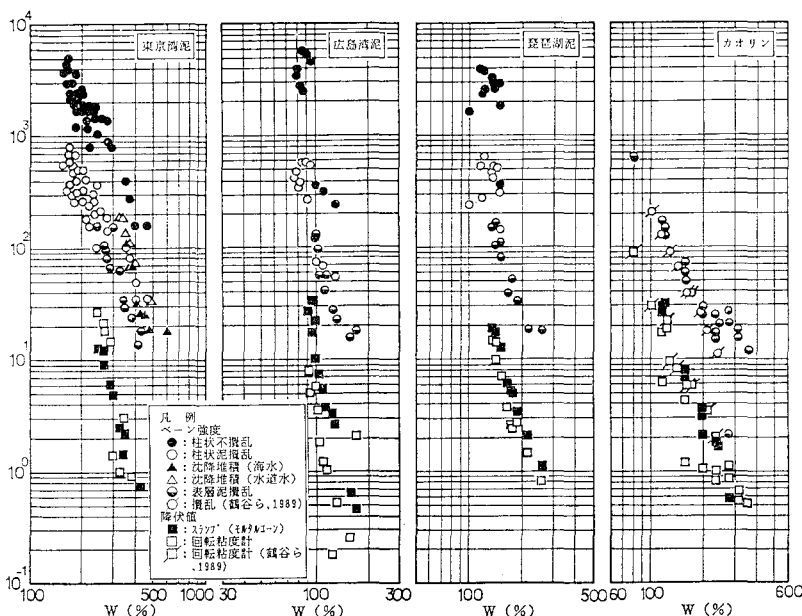


図-4 含水比と各強度指標の関係

の意味と強度の発生要因について、図-6 の模式図を用いて検討する。

ある特定の含水比において、底泥の圧密特性から考察した場合、図中の a の部分は一次圧密による強度発現領域を、b の部分は二次圧密、セメンテーション効果による強度発現領域を示す。また、攪乱・不攪乱の違いにより考察した場合には、c の部分は正規圧密状態の不攪乱底泥の強度のうち攪乱により失われる強度分を、b+c の部分は現地の過圧密状態の不攪乱底泥のうち攪乱により失われる強度分を示す。

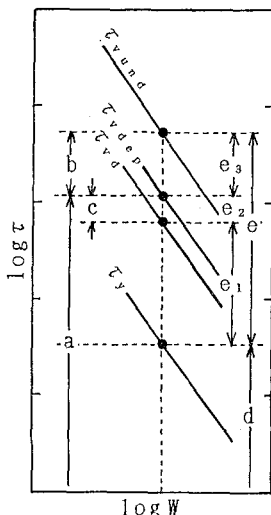


図-6 強度発生要因の模式図

さらに、鶴谷ら (1989) が指摘しているように、降伏値、ベーン強度はそれぞれずり速度 0, 1 sec⁻¹ での抵抗力を示すことから、強度試験のメカニズムから考察した場合、d の部分は泥の内部構造による強度領域を、e (e1~e3) の部分はずり速度発生に伴う粘性抵抗力による強度領域を示すものと考えられる。特に、e3 の部分は、化学的な履歴作用や長期圧密による抵抗力を示している。しかしながら、この化学的な作用による抵抗力が底泥の攪乱により失われる点が大変重要であり、原位置不攪乱底泥の降伏値を攪乱泥と等しいとした場合には降伏値を過小評価することになる。

7. 不攪乱底泥の降伏値

現地不攪乱底泥の強度については、現在のところベーン試験以外に測定方法がない。そこで、前述の式 (4) が不攪乱底泥においても成立するものと仮定し、次式により現地不攪乱泥表層の降伏値 τ_{yund} を推定する。

$$\tau_{yund} = \frac{1}{\alpha} \times (\tau_{yランプ})_{表層} \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha = \frac{\text{攪乱度}}{100} \times \left(1 - \frac{\tau_{vd}}{\tau_{vund}}\right) + \frac{\tau_{vd}}{\tau_{vund}} \dots\dots\dots (6)$$

具体的には、図-1 に示した各現地泥表層の含水比に対する降伏値を図-4 より求め式 (5) に、表層の攪乱度を式 (6) にそれぞれ代入し、式 (1) の関係を用い

る。こうして、各現地泥の原位置における不攪乱状態の降伏値 τ_{yund} は、それぞれ

$$(\tau_{yund})_{東京湾泥} = 2.8 \text{ Pa}$$

$$(\tau_{yund})_{広島湾泥} = 17.8 \text{ Pa}$$

$$(\tau_{yund})_{琵琶湖泥} = 30.0 \text{ Pa}$$

程度と推定される。

8. おわりに

不攪乱試料および攪乱試料を用いた各種強度試験結果より、下記の点を明らかにした。

①現地柱状試料の攪乱／不攪乱強度比が 0.12~0.18 程度であることを示すとともに、現地底泥の攪乱度を定義し表層泥の攪乱状態の度合いを推定した。

②種々の圧密試験の結果から、原位置の底泥が過圧密状態にあることを示し、その原因について検討した。

③各強度指標間の相関、および各強度指標の物理的意味と発生要因について検討した。

④柱状試料の不攪乱ベーン強度、攪乱ベーン強度、スランプ試験による降伏値および①で定義した攪乱度から、不攪乱試料の降伏値の推定法を示した。

最後に、実験およびデータ処理は、91年度茨城大学工部卒業研究の学生であった松田君 (現日本テトラポッド株式会社) が精力的に実施してくれたものである。また、本研究の実施に当り、茨城大学安原一哉教授に有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 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, 国立公害研究所研究報告, 42 巻。
- 楠田哲也・山西博幸・川添正寿・二渡 了 (1989): 攪乱・不攪乱底泥の巻上げに関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 314-318.
- 五明美智男・矢内栄二・大槻 忠 (1990): 東京湾底泥の堆積特性について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 848-852.
- 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤 (1989): ベーン試験とスランプ試験による軟らかい粘土の流動限界の検討——回転粘土計との比較——, 港湾技研資料, 655 号, pp. 1-21.
- 中野 晋・小野幹夫 (1991): スランプ試験による底泥の流動特性解析法, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 456-460.
- 矢内栄二・五明美智男 (1988): 軟らかい底泥のせん断強度特性について, 第 43 回年講演概要集, pp. 768-769.
- 安原一哉 (1991): 過圧密比, 技術手帳 2, 実務に役立つ土質工学用語の解説, 土質工学会, pp. 50-54.
- Hanzawa, H. and Tanaka, H. (1992): Normalized undrained strength of clay in the normally consolidated state and in the field, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, pp. 132-138.