

砂質土のせん断波速度と液状化強度の関連について

地盤研究室 田崎 健祐
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

低コストかつ非破壊で地盤内の V_s 分布を容易に求めることができる表面波探査試験が近年注目を集めている。この試験から得られるせん断波速度 V_s は N 値や土の物性値と関係性が高いパラメータ¹⁾であるため、その関係を活用した健全性評価システムの開発が進められている。ここで、砂地盤において原位置の液状化強度を求めるためには不攪乱試料を凍結サンプリングする必要があり、その調査費用が高いことが問題となっている。本研究では、液状化を起こす固結していない地盤を対象として乱した試料を採取し、せん断波速度と液状化強度の関係を求め、原位置の液状化強度を推定可能か、実験的検討を行った。なお、ここでは地盤が受けるあらゆる履歴のうち、過圧密履歴に着目した検討を行った。

2. 試験概要

本研究では、実地盤の K_0 圧密状態を想定した土のせん断波速度 V_s を測定するために、ベンダーエレメント（以下、BE という）内蔵型定ひずみ圧密試験機で BE 試験を、液状化強度 R_L を求めるために、飽和非排水繰返し三軸試験を行った。本研究では、主に豊浦砂と、中越沖地震において液状化被害のあった刈羽村稲場地区より採取した砂（以下、刈羽砂という）を使用した。また、これらの砂試料と比較するために、細粒分を含んだ土として小名浜砂に HA カオリン粘土を重量比 7:3 で混合したもの（以下、混合中間土という）を、礫分を含んだ土として広川土を参考試料として用いた。これらの粒径加積曲線を砂試料は Fig. 1 に、参考試料は Fig. 2 に示す。

3. 試験および試験ケース

3.1 BE 試験

本研究では、砂質土のせん断波速度 V_s を求めるため BE 試験を行った。以下に試験概要を、また今回行った試験ケースについて砂試料は Table. 1, 参考試

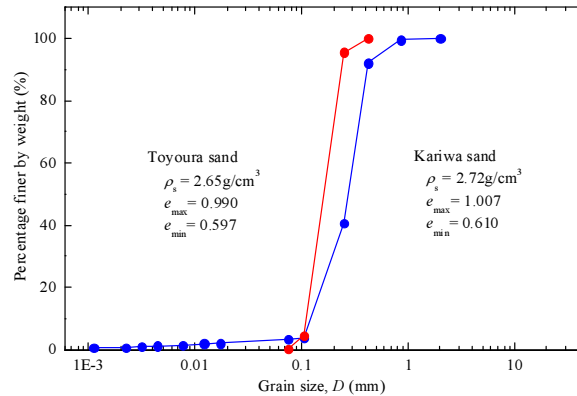


Fig. 1 砂試料の粒径加積曲線

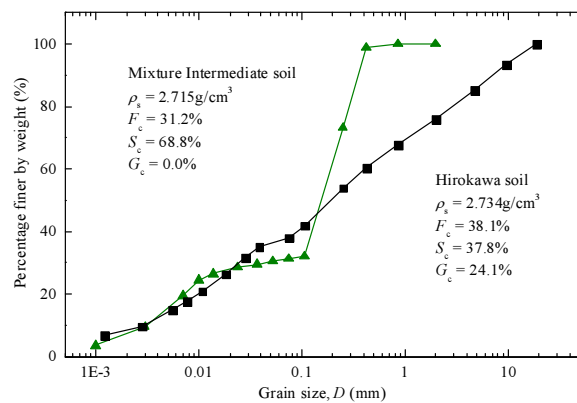


Fig. 2 参考試料の粒径加積曲線

料は Table. 2 に示す。

(1) 供試体作製方法

試験に用いた供試体（供試体寸法：高さ 60mm, 直径 100mm）はステンレス製の圧密容器 $\phi 100 \times 120$ mm の中に含水比を 5%程度に調整した後、突き棒を用いた動的締固め法（5層突き固め）によって、所定の空隙比となるように作製した。

(2) 試験手順

試験は供試体を作製後、圧力室内で -100kPa の負圧を与えて供試体内の残存空気を脱気（1.5時間）した後、供試体下端から水頭差を利用して通水飽和化を行う。通水の完了を確認後、各鉛直応力で圧密排

水を行い、鉛直変位が落ち着いたら、発信周波数を3回以上変化させ、BEを発信させて供試体内を伝播する送受信波の電圧を測定した。なお、試験では発信周波数 $f_0=20\text{kHz}$ のsin波1波を用いて V_s の測定を行った。 V_s は式(1)のように計算している。

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (1)$$

ここでL:ベンダー間距離(mm), Δt :到達時間(msec)である。せん断波到達時間の同定法はT.D法を採用しており、ベンダー間距離LはBE先端間距離をとる”tip-to-tip”法, せん断波到達時間 Δt は”start-to-start”法を採用して整理している。

Table. 1およびTable. 2において σ_v' の値は, K_0 圧密試験によって得られた K_0 値より、三軸試験において $p'=100\text{kPa}$ 相当の鉛直応力を載荷する試験ケースとして設定した。

3.2 飽和非排水繰返し三軸試験

本研究では、砂質土の液化強度 R_L を求めるため飽和非排水繰返し三軸試験を行った。以下に試験概要を、また今回行った試験ケースについて砂試料はTable. 3, 参考試料はTable. 4に示す。

(1) 供試体作製方法

砂試料供試体は、初期含水比 $w=5\%$ に調整した後、負圧法を用いて $\phi 5 \times 12.5\text{cm}$ のモールド内で締固める(10層突き固め)方法によって所定の間隙比となるように作製した。

また、参考試料供試体は、配合や粒度を調整した試料を $\phi 5 \times 12.5\text{cm}$ の鋼製モールド内に投入し、所定の間隙比になるように突き固める(10層突き固め)湿潤締固め法で作製した。ここで、広川土の $G_c=17.5\%$ のケースでは、礫が混入することによるメンブレンペネトレーションの影響²⁾を低減させる目的で、 $\phi 4.8 \times 12.5\text{cm}$ に成形した供試体に対して、加水した $425\mu\text{m}$ 通過試料を1mm厚で薄く全体的に塗布してトリマーで平滑に処理する方法で作製した。なお、通水、圧密過程を経た供試体の表面はメンブレンが貫入することなく滑らかな状態を保っていることを確認している。

Table. 1 砂試料のBE試験ケース

供試体	D_r	e	K_0	OCR / σ_v'
豊浦砂	40	0.833	0.473	$OCR=1.0$ $\sigma_v'=0 \rightarrow 154$
				$OCR=1.5$ $\sigma_v'=0 \rightarrow 231 \rightarrow 154$
				$OCR=2.0$ $\sigma_v'=0 \rightarrow 308 \rightarrow 154$
				OCR は $D_r=40\%$ と同じ
	60	0.754	0.440	OCR は $D_r=40\%$ と同じ
	75	0.695	0.404	OCR は $D_r=40\%$ と同じ
刈羽砂	44	0.832	0.406	OCR は豊浦砂と同じ
	70	0.729		OCR は豊浦砂と同じ

Table. 2 参考試料のBE試験ケース

供試体	G_c / G_{\max}	e	K_0	OCR / σ_v'
広川土	0.0 / 2.0	0.978	0.485	$OCR=1.0$ $\sigma_v'=0 \rightarrow 152$
				$OCR=1.5$ $\sigma_v'=0 \rightarrow 228 \rightarrow 152$
				$OCR=2.0$ $\sigma_v'=0 \rightarrow 305 \rightarrow 152$
				OCR は $G_c=0.0\%$ と同じ
混合 中間土	- / 0.85	0.603	0.450	OCR は広川土と同じ

Table. 3 砂試料の飽和非排水繰返し三軸試験ケース

供試体	D_r	e	OCR
豊浦砂	40	0.833	1.0, 2.0
	60	0.754	1.0
	75	0.695	1.0
刈羽砂	44	0.832	1.0, 2.0

Table. 4 参考試料の飽和非排水繰返し三軸試験ケース

供試体	G_c / G_{\max}	e	OCR
広川土	0.0 / 2.0	0.978	1.0, 1.5, 2.0
	17.5 / 9.5	0.808	1.0, 1.5, 2.0
混合 中間土	- / 0.85	0.603	1.0, 2.0

(2) 試験手順

飽和非排水繰返し三軸試験は、二重負圧のもと供試体下部から脱気水を通水し、平均有効主応力 $p'=50\text{kPa}$ の状態では背圧 200kPa を約1.5時間載荷する方法で供試体の飽和化を促進させ、間隙圧係数 $B>0.96$ を確認した後、所定の圧密応力で等方圧密を行い、ひずみ制御のもと軸ひずみ速度 $0.1\%/min$ 、初期平均主応力 $p'=100\text{kPa}$ で繰返しせん断する方法で行った。なお、圧密過程では3t法で打切り時間を決

定することとした。全ケースを通じて排水量が完全に落ち着いていることを確認している。また、繰返し载荷過程では軸ひずみ $DA=5\%$ に達した段階を液状化したものとみなし試験を終了することとした。さらに、過圧密比 OCR が 1 以上の試験については、所定の圧密応力で先行圧密を行った後、排水除荷を行い排水量が定常状態に達した段階で繰返しせん断に移行することとした。

4. 試験結果

4.1 $V_s - \sigma_v'$ および $V_s - e$ 関係について

飽和状態の豊浦砂を用いた BE 試験の V_s と σ_v' の関係を Fig. 3 に示す。図より BE 試験で求めた V_s は σ_v' が増加するのに伴い増加していることがわかる。各鉛直応力 σ_v' での V_s の上昇量はほぼ一定であり、この傾向は Dr によらず等しいことがわかった。また、Fig. 4 は Fig. 3 の横軸を間隙比 e に置き換えてプロットしたものである。図より、間隙比が小さくなるほど V_s が線形的に大きくなっており、間隙比との相関性が強いことが示された。一般的に V_s は、土の拘束圧や間隙比の大小に依存する³⁾とされているが、この試験結果からも V_s は鉛直応力および間隙比の大小に支配されていることが確認できた。

4.2 せん断波速度 V_s と液状化強度 R_L の関係

$p'=100\text{kPa}$ で行った BE 試験および繰返し三軸試験結果より求めた、せん断波速度 V_s と液状化強度 R_L の関係を Fig. 5 に示す。なお、本研究において液状化強度 R_L は、軸方向ひずみ $DA=5\%$ における繰返し载荷回数 $N_c=20$ 回で定義している。図より、 V_s が大きくなるほど R_L も大きくなる傾向は見えるものの、試料の種類や OCR の違いによるばらつきが大きく、 V_s から一義的に R_L を推定してしまうと、かなり精度の悪い予測となることが分かる。

$OCR=1.0$ の砂試料で行った BE 試験より得られた V_s と e の関係を Fig. 6 に、繰返し三軸試験より得られた液状化強度曲線を Fig. 7 に示す。Fig. 1 に示すように砂試料の粒径分布は似ているが、 $V_s - e$ 関係では豊浦砂が上、刈羽砂が下であるのに対し、液状化強度曲線はその上下関係が逆転している。よって、砂

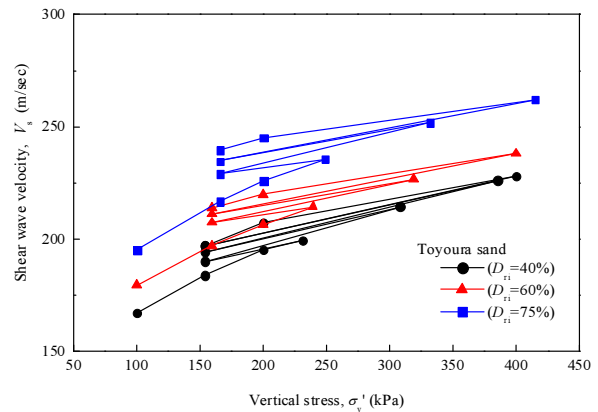


Fig. 3 BE 試験より得られた豊浦砂の V_s と σ_v' の関係

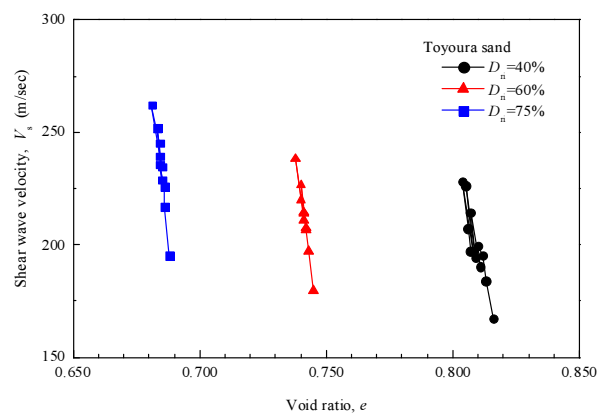


Fig. 4 BE 試験より得られた豊浦砂の V_s と e の関係

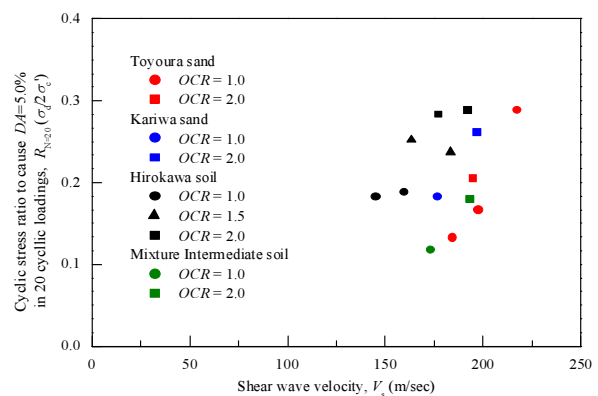


Fig. 5 砂質土の V_s と R_L の関係

試料という同じ種類の土であっても傾向が全く違うことから 5 で提案する手法のように、試料のサンプリングと所定の試験の実施が必須であると考えられる。

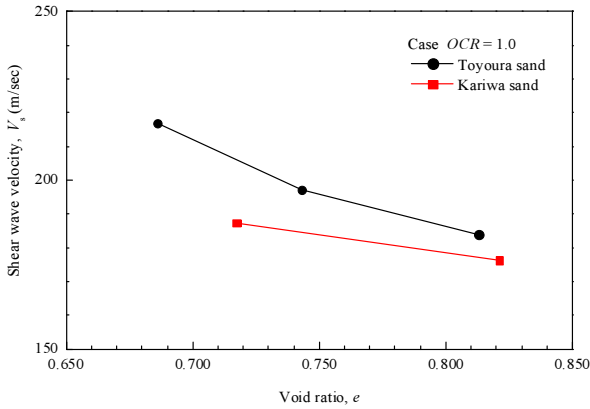


Fig. 6 砂試料の V_s - e 関係の比較

4.3 過圧密履歴が V_s や R_L に及ぼす影響

4.2 の結果より、 V_s から一義的に R_L を推定すると、低精度の予測となることが分かった。そこで本研究では、原位置より乱した試料を採取して、表面波探査試験より得られた V_s と同じ値となる間隙比の供試体を室内にて作製して液状化試験を行うことで予測精度を高めることを考える。しかしながら、原位置の V_s の情報だけでは、応力履歴（特に過圧密履歴）の有無を推定することは不可能である。ここでは、過圧密履歴があることによって、試料の V_s や R_L にどのように影響を及ぼすか調べ、提案する予測手法の信頼性について検討する。

豊浦砂の BE 試験結果より得られた V_s と間隙比 e の関係を Fig. 8 に示す。図より、OCR が増加することで直線が上側にスライドし、同じ間隙比でも OCR が異なると違った V_s が求められることが分かった。Iwasaki & Tatsuoka⁴⁾ は細粒分を含まない粒径の揃った砂の共振法試験で求めた（せん断ひずみ $\gamma=10^{-6}$ ）せん断剛性率 G_0 を式(2)のように示している。

$$G_0 = 900F(e)\sigma_v'^{0.2}\sigma_h'^{0.2} \quad (2)$$

ここに、 G_0 ：せん断剛性率(kgf/cm²)、 σ_v' ：有効軸方向応力(kgf/cm²)、 σ_h' ：有効側方向応力(kgf/cm²)、 $F(e)$ ：間隙比関数である。

これより関係式(2)は、 G_0 を間隙比と拘束圧の関数としているが、 G_0 に影響を及ぼす V_s がこれら以外に

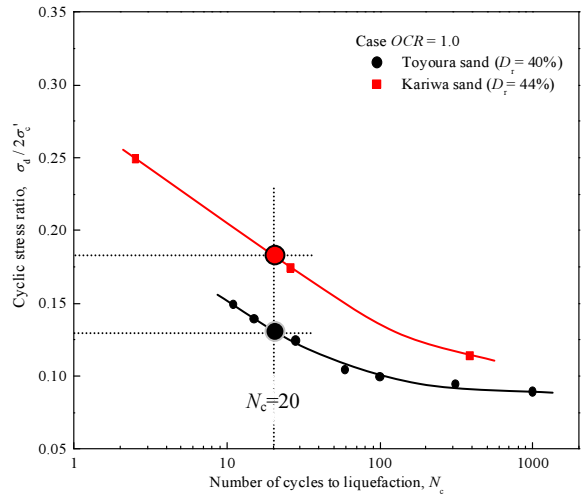


Fig. 7 砂試料の液状化強度曲線の比較

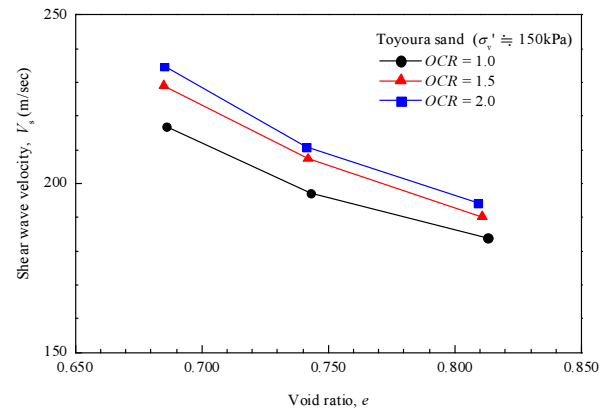


Fig. 8 過圧密履歴の有無による V_s と e の関係

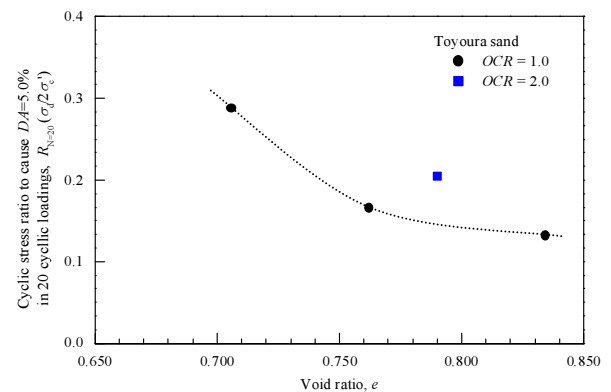


Fig. 9 過圧密履歴の有無による R_L と e の関係

OCR にも影響を受けていることが分かった。

次に、豊浦砂の繰返し三軸試験結果より得られた R_L と e の関係を Fig. 9 に示す。図より、OCR=2.0 は

1 点しかデータがないが、OCR の効果により

過圧密履歴を受けた供試体の液状化強度をプロット

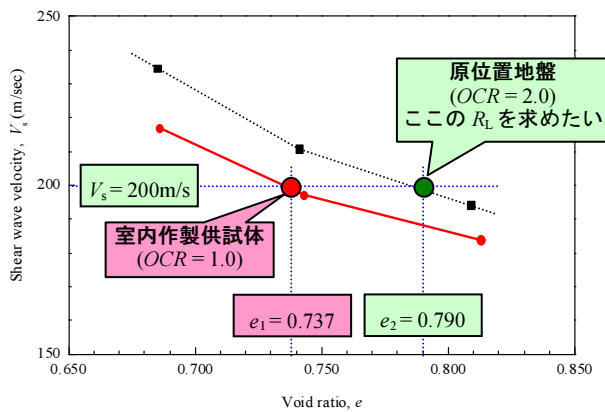


Fig. 10 擬似的間隙比を用いた R_L の推定方法
(豊浦砂の V_s - e 関係)

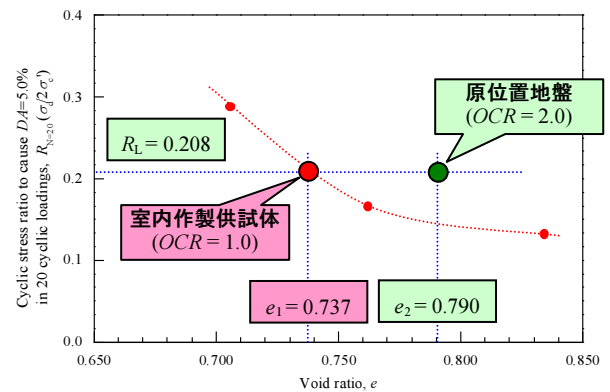


Fig. 11 擬似的間隙比を用いた R_L の推定方法
(豊浦砂の R_L - e 関係)

OCR=1.0 の曲線よりも上方にプロットされている。以上からわかるように、OCRが上がることで e は減少するが、 V_s 、 R_L ともそれだけでは説明できない増加が過圧密履歴により発生していることがわかる。そこで、過圧密履歴が V_s 、 R_L に与える影響の程度を定量的に評価する必要があると考えられる。

5. 擬似的間隙比を用いた液状化強度の推定

ここで、4で述べた内容を踏まえて Fig. 10 と Fig. 11 を利用して過圧密履歴を受けた原位置地盤の液状化強度が、本提案手法によりどのように予測できるかを下記の手順によって説明する。

①表面波探査試験より得られた地盤内の V_s 分布より、液状化強度を予測したい V_s をピックアップし、対象となる地点の乱した試料を採取する。ここでは、Fig. 10 において、OCR=2.0 の履歴を受けた $V_s=200\text{m/s}$ の豊浦砂地盤を仮定する。なお、本来は原位置地盤の過圧密履歴は分からない。

②室内で所定の V_s となる間隙比の供試体を作製し (Fig. 10 の $e_1=0.737$)、繰返し三軸試験を行う。室内で作製した供試体の間隙比 $e_1=0.737$ は、応力履歴を無視しているため、実地盤の間隙比 $e_2=0.790$ とは違ったものとなっている。

③Fig. 11 より、 $e_1=0.737$ の繰返し三軸試験の結果、 $R_L=0.208$ であることが分かる。一方、実地盤と同じ

すると、Fig. 11 の緑色の点となる。この点は、 $e_1=0.737$ の液状化強度 (OCR=1.0) とほぼ等しくなっていることがわかる。つまり、過圧密履歴を考えずに、 V_s から推定した間隙比 (以下、擬似的間隙比という) において、繰返し三軸試験を実施しても、過圧密履歴の影響を考慮した液状化強度の推定が可能であるということである。

広川土や混合中間土のように細粒分が30%以上含まれてくると、供試体作製時の突き固めにより間隙比を調整することは難しく、このような土で密な試料を作製するには、圧密応力を調整するしかないようである。実際の地盤でも密な状態であれば、過圧密履歴が作用したとしか考えられず、室内で作製する供試体は、ほぼ同等の実地盤を再現できていると考えられる。

しかしながら、これらを導き出すためには、少量の細粒分 (10%~20%程度) を含んだ試料でのデータがないため、更なるデータの蓄積が重要不可欠となる。液状化予測手法の適用性に関する検討は、大規模な地震に対して急務であるが、本手法によれば、高価な不攪乱試料の採取を行うことなく、 R_L が高い精度で推定できるため、非常に有益である。

6. 結論

本研究では、原位置から得られた V_s を用いて、液

状化強度 R_L を推定する手法の提案を行った。精度よい推定を行うために問題となる過圧密履歴の影響について検討を行い、以下のことが分かった。

1. V_s と e の関係より、同じ間隙比でも OCR が上がることで V_s も増加することが分かった。
2. R_L と e の関係より、同じ間隙比でも OCR が上がることで R_L も増加することが分かった。
3. 過圧密履歴を受けた、ゆるい豊浦砂の V_s から擬似的間隙比を介して、液状化強度 R_L を推定できる可能性を示した。
4. 他の土質に対して、また過圧密履歴だけでなく地震履歴などの履歴に対しても同様の実験を行い、この手法が適用できるか検討する必要がある。

参考文献

- 1) 今井常雄, 殿内啓司, 田中達吉: 地震応答解析のための土の動的性質講座, 2.土の動的性質, 土と基礎, 土質工学会, Vol.33, No.8, pp. 65-77, 1985.
- 2) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, pp.36-37, 1991
- 3) International Parallel Test on the Measurement of G_{max} Using Bender Elements Organized by TC-29
- 4) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y.: Shear Moduli of Sands Under Cyclic Torsional Shear Loading, , Soils and Foundations, Vol.18, No.1, pp. 39-56, 1978.