

名古屋工業大学

正員 ○ 竹田 一夫

"

正員 松岡 元

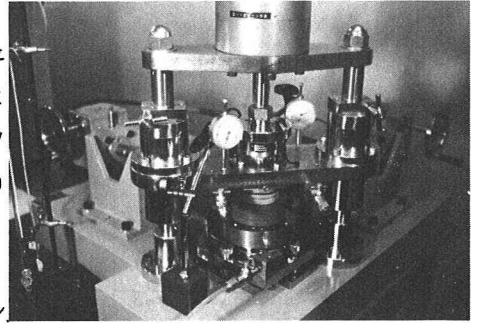
"

大学院生 学生員 福武 毅芳

地震時の地表面の変位軌跡は、長軸方向が変動する楕円状の径路を描くことが多いといわれている。¹⁾そこで、このような実際の挙動を再現するため、水平面内の直交する2方向にせん断力を独立に載荷できる単純せん断試験機を用いて、第1載荷時と第2載荷時でせん断方向が異なる繰返しせん断試験を実施した。そしてせん断に伴なう粒子構造の変化を考慮することにより、任意方向への繰返しせん断挙動の解析を試みた。解析に必要なパラメータは第1載荷時の応力・ひずみ関係だけから決定することができるが、解析値は実測値をほぼ妥当に説明した。

1. 水平面内全方向単純せん断試験

写真-1に試験機の全景を示す。せん断応力 τ_{xy} 、 τ_{zy} は水平面内の直交するX、Y2方向に独立に載荷され、垂直応力 σ_z はシリンダーを介して鉛直下向きに載荷される。供試体は直径約7cm、高さ約3cmであり、試料は飽和状態の豊浦砂(せん断直前の間隙比 $e_0 = 0.65 \sim 0.72$)を用いた。



実験を行なったせん断応力径路を図-1に示す。実験手順は、試料をまず垂直応力 $\sigma_z = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ の下で圧密する。次にせん

断応力 τ_{zy} のみを作用させ所定の応力比 τ_{zy}/σ_z までせん断した後、写真-1 水平面内全方向単純せん断試験機 $\tau_{zy} = 0$ になるまで変位を回復させる(第1載荷)。次に τ_{zx} 、 τ_{zy} を同時に載荷し第1載荷方向から角度 α をなす直線径路上を第1載荷時と等しい応力比 τ/σ_z (ここに $\tau = \sqrt{\tau_{zx}^2 + \tau_{zy}^2}$)までせん断した後、 $\tau = 0$ まで除荷する(第2載荷)。 $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ の繰返しせん断試験の応力・ひずみ関係を図-3(a)~(e)に示す。ここで、 $\alpha = 0^\circ, 180^\circ$ 以外の場合は第1載荷の履歴により第2載荷時においてせん断応力増分方向とせん断ひずみ増分方向にズレが生じるため、これらの図は次式で表わされる累加せん断ひずみ G を用いて表わしている。

$$G = \sum \Delta G = \sum \sqrt{\Delta \gamma_{zx}^2 + \Delta \gamma_{zy}^2} \quad (1)$$

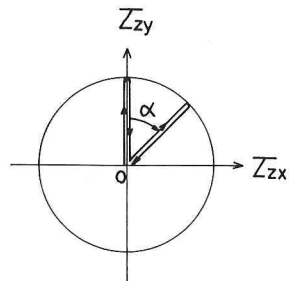


図-1 せん断応力径路

2. 滑動面に基づいた繰返しせん断挙動の解析

粒状体のせん断機構の微視的考察より得られた滑動面上の関係式が単純せん断面上でも成り立つと仮定すると、せん断・垂直応力比 τ/σ_z 、累加せん断ひずみ G 、垂直ひずみ ϵ_z の間に次の関係式が得られる。

$$\tau/\sigma_z = \lambda \cdot (-d\epsilon_z/dG) + \mu \quad (2), \quad \tau/\sigma_z = \lambda \cdot (-\epsilon_z/G) + \mu' \quad (3)$$

$\tau/\sigma_z \equiv X$ として、式(2)、(3)より次式が得られる。

$$dG = \frac{G_0}{\mu' - \mu} \cdot \exp\left(\frac{X - \mu}{\mu' - \mu}\right) \cdot dX \quad (4), \quad d\epsilon_z = \frac{\mu - X}{\lambda} \cdot dG \quad (5)$$

上式中の土質パラメータ λ, μ, μ', G_0 のうち、 λ, μ は試料が決まれば

ほぼ一定値をとるが、 μ', G_0 は粒子構造を反映して変化する。図-

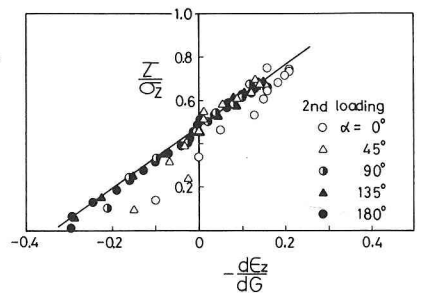


図-2 $\tau/\sigma_z \sim -d\epsilon_z/dG$ 関係(第2載荷時)
 2は第2載荷時のすべての試験結果を式(2)の関係で整理したものである。図中の実線は第1載荷時の同じ関係を表わしているが、同図より累加せん断ひずみ G に着目すれば、応力比 $\sim$ ひずみ増分比関係は載荷方向および載

荷回数によらず定まるようである。このことは、せん断経路に沿って考えれば3次元的な粒子の挙動を2次元的に解析できることを示唆しており興味深い。

3. 繰返しせん断履歴の評価

せん断面上の粒子接点角 θ の度数分布を3角形で近似すると、その平均値 $\bar{\theta}$ と τ/σ_z の間には次式が成立する。⁴⁾

$$\tau/\sigma_z = \lambda \cdot \bar{\theta} + \mu \quad (6)$$

せん断開始時の $\bar{\theta}$ を $\bar{\theta}_0$ とすると、逆方向せん断開始時の $\bar{\theta}_f$ の値は、式(6)より定まる前載荷終了時の $\bar{\theta}$ の符号を変えたものとして評価される。したがって、 $\alpha = 0^\circ$ および 180° の除荷時、第2載荷時のパラメータ μ' 、 G_0 は、応力経路が同一直線上の繰返しせん断であるので、著者の一人がすでに提案しているように、 $\bar{\theta}_0$ と $\bar{\theta}_f$ (破壊時の $\bar{\theta}$)を用いて次式から推定される。⁴⁾

$$\mu' - \mu = K \cdot (\bar{\theta}_f - \bar{\theta}_0) \quad (7), \quad G_0 = G_{01st} \cdot \exp \left[\frac{\lambda \cdot (\bar{\theta}_0)}{K \cdot (\bar{\theta}_f - \bar{\theta}_0)} \right] \quad (8)$$

ここに、 G_{01st} は第1載荷時の G_0 (ϵ_z の最大圧縮点での G)であり、 K は次式で与えられる係数である。

$$K = (\mu'_{1st} - \mu) / \bar{\theta}_f \quad (9)$$

また、 $\alpha = 90^\circ$ の第2載荷時の μ' 、 G_0 は、第2載荷が第1載荷の履歴の影響を受けないと仮定し、第1載荷時と同じ値を用いる。さて、任意の α における第2載荷時の μ' 、 G_0 は、その実測値がそれぞれ α に対して単調に増加するので、上述の方法で算定された $\alpha = 0^\circ$ 、 180° および 90° の μ' 、 G_0 の値を直線的に内挿することによって予測される。以上より、通常の単調載荷試験からパラメータ λ 、 μ 、 μ'_{1st} 、 G_{01st} および強度を得れば、それに続く任意方向への第2載荷時の応力・ひずみ関係を予測できる。解析結果を図-3(a)~(e)中に実線で示した。解析に用いたパラメータは $\lambda = 1.4$ 、 $\mu = 0.48$ 、 $\mu'_{1st} = 0.65$ 、 $(\tau/\sigma_z)_f = 0.81$ であり、 G_{01st} は試料にバラツキがあるので、それぞれの第1載荷時の値を用いた。

謝辞 御指導いただいている本学山内利彦教授、京都大学柴田徹教授、試験機の製作について御教示を得た東京大学石原研而教授、実験に協力いただいた研究留学生陳越講師に謝意を表します。

参考文献 1) 軽部・福岡(1974): 土木学会関西支部講演会, III-3. 2) 石原・山崎(1980): S & F, Vol. 20, No. 1. 3) 軽部・下村・鈴木(1975): 第10回土質工学研究発表会, 45. 4) 松岡・外賀・安井(1982): 第17回土質工学研究発表会, 419.

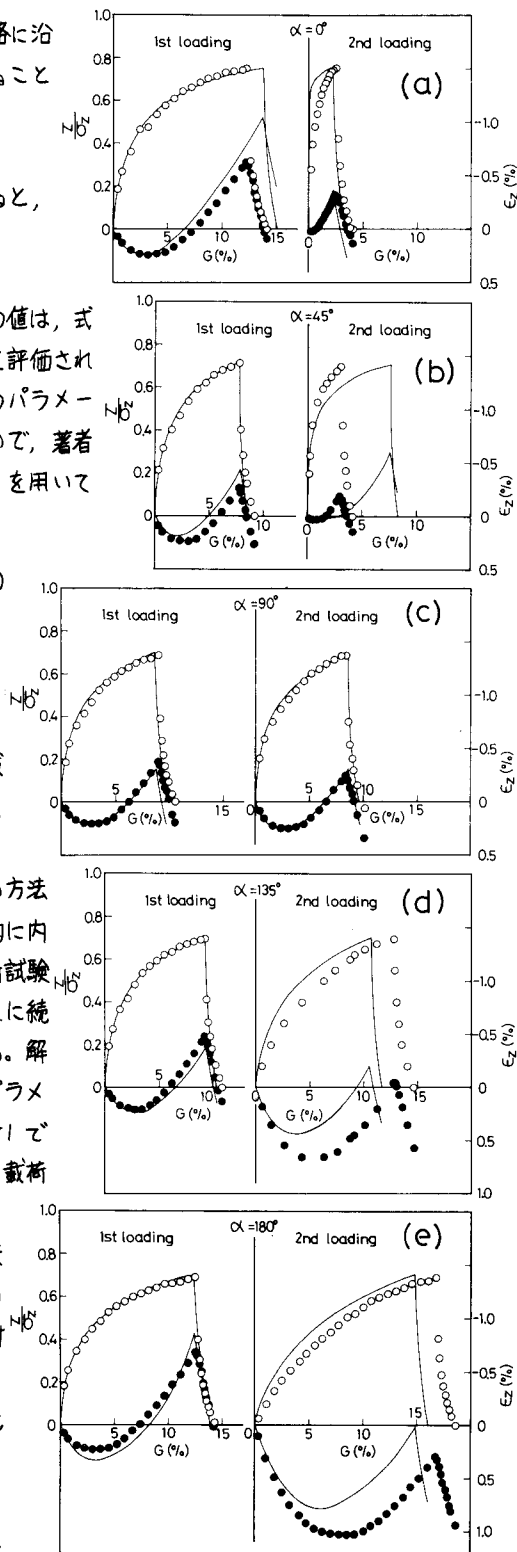


図-3 繰返し単純せん断試験の $\tau/\sigma_z \sim G \sim \epsilon_z$ 関係と解析値