

東京都土木技術研究所 正会員 ○草野 郁
同上 正会員 阿部 博

1. まえがき

地盤の液状化強度は通常は振動三軸による液状化試験から求めるが、振動三軸試験の応力条件は、中空ねじり試験とくらべて地震時における地盤の応力条件を満たさない面が多い。ここでは、不攪乱試料を使用し振動三軸と中空ねじりによる液状化試験、中空ねじりによる異方圧密・平面歪条件下の液状化試験を行い、地盤の液状化強度の推定にあたっての拘束応力の補正法について検討する。

2. 試験条件と試料の物理特性

試験条件と試料の物理特性を表-1に示す。異方圧密・平面歪条件下の液状化試験は、通常の中空ねじり試験装置に内セルを設置し、内セル内の水の出入りを遮断することにより側方への変形を拘束する。

3. 中空ねじり試験と振動三軸試験の液状化強度の比較

振動三軸試験と中空ねじり試験において20回のくり返し回数で軸ひずみ両振幅 $DA=5\%$ 、せん断ひずみ両振幅 $\gamma_{DA}=7.5\%$ に至る液状化強度を $\sigma_d/2\sigma_o$ 、 τ_d/σ_o で表し、その関係を図-1に示す。細粒分含有率 F_c が小さい埋立山砂と沖積砂では両試験の強度はほぼ同じか、中空ねじりの方が振動三軸より大きくなり、逆に、 F_c が大きい沖積砂と沖積シルトでは中空ねじりの方が振動三軸より液状化強度は小さくなる。中空ねじりは振動三軸と異なり側方に歪が発生せず側圧変化も無い。両試験の応力状態を正八面体応力で表すと、

振動三軸試験では $\Delta\tau_{oct}=(\sqrt{3}/3)(\sigma_d/2)$

中空ねじり試験では $\Delta\tau_{oct}=(\sqrt{6}/3)\tau_d$

になり、 $\sigma_d/2\sigma_o=\tau_d/\sigma_o$ でも $\Delta\tau_{oct}$ は異なる。N1回で液状化し間隙水圧は u に達するとし、1サイクルのくり返しせん断応力によって累積する間隙水圧の平均を $\Delta\bar{u}$ （ $=u/N1$ ）で表す。両試験にける沖積砂と沖積シルトの試験結果を $\Delta\bar{u}/\Delta\tau_{oct}\sim\Delta\tau_{oct}/\sigma_m$ の関係で図-2に示す。 F_c が小さい沖積砂の $\Delta\bar{u}/\Delta\tau_{oct}\sim\Delta\tau_{oct}/\sigma_m$ の関係は両試験の差が少なく類似した直線で表されるが、 F_c が大きい沖積砂や沖積シルトの場合は、中空ねじり試験の $\Delta\bar{u}/\Delta\tau_{oct}\sim\Delta\tau_{oct}/\sigma_m$ の関係は、振動三軸試験より左側に位置し、間隙水圧は発しやすく、液状強度は小さくなる。このような関係は図-1に示す傾向と符合する。

表-1 試験条件および試料の物理特性

試料名	採取深度 GL (m)	土質名称	N値	試験法 振動三軸 中空ねじり 異方圧密 平面歪	拘束応力 (kgf/cm ²)	D ₅₀ (mm)	F _c (%)	e
A-1	1.6~2.6	沖積細砂	6	○ ○	0.4	0.190~ 0.280	4~12	0.783~ 1.049
	1.6~2.6	"	6	○ ○	1.0	0.240~ 0.280	4~7	0.750~ 0.912
A-2	3.7~5.6	沖積細砂	13~17	○ ○	0.4	0.165~ 0.340	3~11	0.759~ 1.180
	3.7~5.6	"	13~17	○ ○	0.8	0.165~ 0.340	3~11	0.687~ 0.803
	5.7~6.6	"	17~19	○ ○	1.6	0.280~ 0.290	2~4	0.669~ 0.764
	4.9~5.9	"	17		○ 0.6/1.6	0.175	4	0.845~ 1.037
	4.9~5.9	"	17		○ 1.1/1.6	0.175	"	0.996~ 1.078
B	4.5~5.8	沖積細砂 ～中砂	13~17	○ ○	0.6	0.290~ 0.320	6~7	0.785~ 1.019
C-1	4.0~6.0	埋立山砂 細砂	30~31	○ ○	0.8	0.195~ 0.275	7~10	0.576~ 0.815
C-2	10.8~11.8	沖積細砂 シルト質細砂	13~17	○ ○	1.5	0.085~ 0.165	9~41	1.159~ 1.329
C-3	17.0~19.8	沖積 シルト	3~4	○ ○	2.0	—	—	1.159~ 1.925
D-1	0.3	埋立山砂 細砂	—	○ ○	1.0	0.240	9	0.771~ 0.903
D-2	10.5~11.9	沖積細砂	12	○ ○	1.0	0.045~ 0.255	6~65	0.791~ 1.285

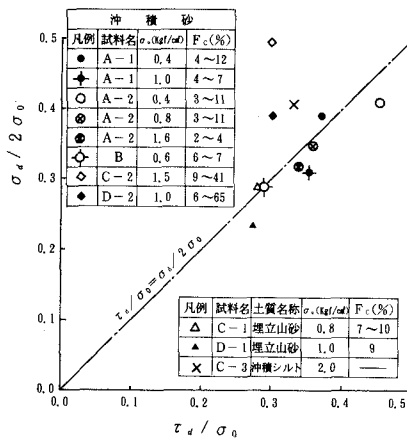


図-1 τ_d / σ_o と $\sigma_d / 2 \sigma_o$ の関係

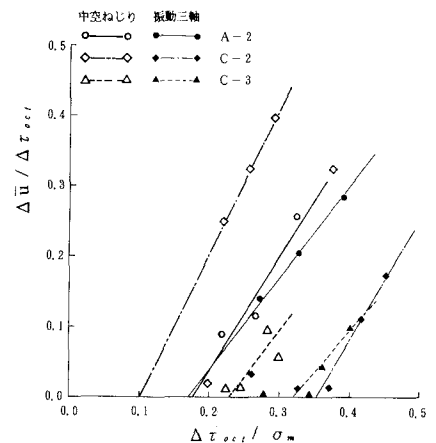


図-2 $\Delta \bar{u} / \Delta \tau_{oct} \sim \Delta \tau_{oct} / \sigma_m$ の関係

4. 異方圧密・平面歪条件下の液状化試験結果

軸方向圧力 $\sigma_a=1.6 \text{ kgf/cm}^2$ 、側方拘束圧 $\sigma_r=1.1, 0.6 \text{ kgf/cm}^2$ とし、試験の1例を図-3に示す。くり返し回数 N の増加に伴い、ひずみ γ と間隙水圧 u 、内セルの圧力増分 $\Delta\sigma_r$ は上昇し、 σ_r と $\Delta\sigma_r$ の和は u および σ_a とほぼ同じ値に近づく。

図-3の例で、試験中の有効応力比 σ_r'/σ_a' とくり返しせん断応力によって生じる間隙水圧比 u/σ_a' の挙動を図-4に示す。試験中の側圧は初期の σ_r に $\Delta\sigma_r$ が付加され σ_r'/σ_a' は一定の値を示し、平面歪条件が満たされていることがわかる。 $\Delta\sigma_r$ の付加により間隙水圧が発生し、 u は測定される間隙水圧 u から $(2/3) \cdot \Delta\sigma_r$ を差引いた値で表される¹⁾。

$\sigma_r/\sigma_a (=1/K_c) = 0.688$ と 0.375 の試験から、1サイクルのくり返しせん断応力で生じる間隙水圧の平均値を $\Delta\bar{u}$ ($=u_d/N_1$)とすると、 $\Delta\bar{u}/\Delta\tau_{oct} \sim \Delta\tau_{oct}/\sigma_m$ の関係は図-5に示すように狭い範囲に分布する。 $N_1=20$ 回の τ_d/σ_a 、 τ_d/σ_m と γ_{DA} 、 u/σ_a の関係を図-6に示す。 τ_d/σ_a と γ_{DA} 、 u/σ_a の関係は、 $1/K_c$ が小さいほど τ_d/σ_a は下位に位置し、液状化強度は小さくなる。一方、 τ_d/σ_m と γ_{DA} 、 u/σ_a の関係は、 $1/K_c=0.375$ の場合だけ τ_d/σ_m は大きくなるが、 $1/K_c=1.000$ と 0.688 では差は小さい。 $1/K_c=0.375$ のデータ以外の場合は、試験応力を正八面体で表すと、 u と $\Delta\tau_{oct}$ 、 σ_m の関係、 τ_d/σ_m と γ_{DA} 、 u/σ_a の関係は $1/K_c$ の値によらず一意的な関係を示す傾向が見られる。

5. 液状化試験結果の地盤への適用

液状化試験から求められる $\Delta\bar{u}/\Delta\tau_{oct} \sim \Delta\tau_{oct}/\sigma_m$ の直線関係を使用し、地盤の液状化強度 $R (= \tau_{hv}/\sigma_v)$ と液状化試験値の関係を求めると、次式で表される¹⁾。

$$\text{振動三軸試験: } R = 2(1+2K_0)(\sigma_d/2\sigma_o)/3\sqrt{3} \quad (1)$$

$$\text{中空ねじり試験: } R = (1+2K_0)(\tau_d/\sigma_o)/3 \quad (2)$$

振動三軸試験の $\sigma_d/2\sigma_o$ から R を推定する場合(1)式が成立つが、一般には(2)式が採用されている。土に等方的な性質があれば、中空ねじり試験による τ_d/σ_o の方が $\sigma_d/2\sigma_o$ より大きくなるが、両試験から得られる $\Delta\bar{u}/\tau_{oct} \sim \Delta\tau_{oct}/\sigma_m$ の関係は同一直線上に乗り、(1)式と(2)式に違いがあっても、(1)式によって求められる R は同じ値になる。一方、図-1に示すように、 $\sigma_d/2\sigma_o < \tau_d/\sigma_o$ は F_c の小さい砂に限られ、 F_c の大きい砂質土では $\sigma_d/2\sigma_o > \tau_d/\sigma_o$ になる。中空ねじり試験の方が振動三軸試験より地盤の応力状態の再現性が良いことを考慮すると、振動三軸試験から(1)式により R を推定すると、 R は過大評価になる危険性がある。細粒分を含む砂質土の異方性に起因すると思われる液状化試験値についての適切な補正法が考えられていない現状では、(2)式を使用して振動三軸試験から R を推定しても大きな矛盾は生じないと考えられる。

〈参考文献〉1) 草野郁、阿部博：中空ねじり装置による平面歪条件下の液状化試験、東京都土木技術年報、1988

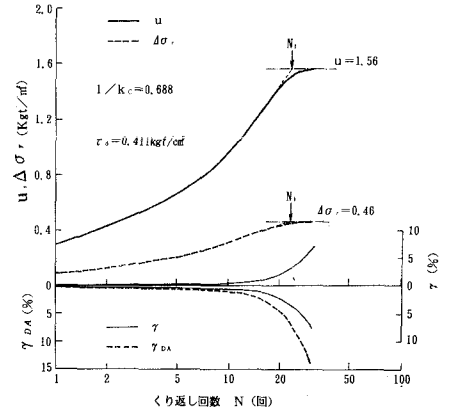


図-3 異方圧密・平面歪条件下の液状化試験例

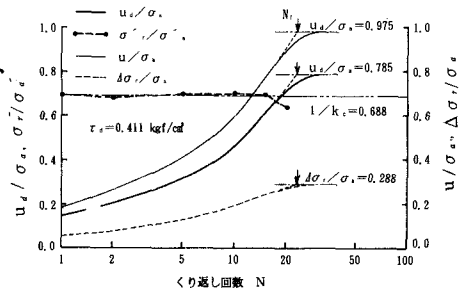


図-4 液状化過程における σ_r'/σ_a' 、 u_d/σ_a の動き

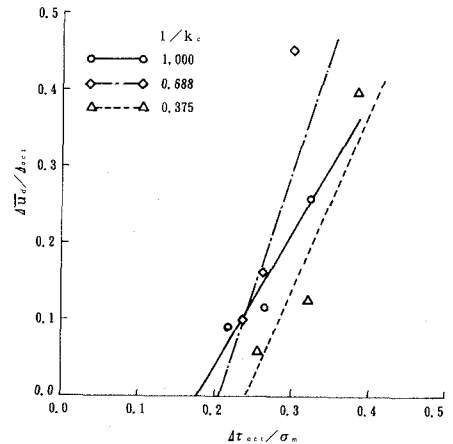


図-5 $\Delta\bar{u}_d/\Delta\tau_{oct} \sim \Delta\tau_{oct}/\sigma_m$ の関係

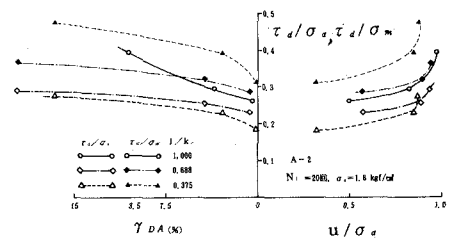


図-6 $\tau_d/\sigma_a, \tau_d/\sigma_m$ と $\gamma_{DA}, u_d/\sigma_a$ の関係