

(77) ひずみ制御による繰返し三軸試験に基づく間隙水圧発生 の検討

建設省 土木研究所 佐々木 康

” 松本 秀應

” ○佐谷 祥一

1. まえがき

砂の液状化試験には、繰返し三軸試験、単純せん断試験、ねじりせん断試験などの各種試験があるが、いずれの試験も一定振幅の応力で繰返し载荷を行うものが主流である。しかし、液状化の機構がせん断変形時のダイラタンシー特性に基因する現象であること、土の応力、ひずみ関係の非線形性を考慮すると、応力制御による試験を行うより、ひずみ制御による試験の方が、より直接的に液状化特性を表現できると考えられる。そこで、ひずみ制御による繰返し三軸試験を実施し、間隙水圧の発生に寄与しないひずみ振幅が存在することを確認するとともに、その時に必要な有効累積ひずみを求め、相対密度 D_r との関係について、整理を行った。

2. 材料と試験方法

試験に用いた砂は、豊浦標準砂 ($G_s=2.640$, $D_{50}=0.212\text{mm}$, $e_{\max}=0.934$, $e_{\min}=0.667$) であり、空中落下法により相対密度 $D_r=50\sim 100\%$ 間になるように、直径50mm、高さ100mmの円柱供試体を作成した。試験は CO_2 を通気した後、脱気水を通水して B 値が0.95以上の供試体のみを用いて有効束圧 0.5Kg/cm^2 、背圧 0.5Kg/cm^2 で1時間圧密したのち、一定の軸ひずみ振幅 ($\varepsilon_a=0.020, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100(\%)$) で周波数 0.1Hz の正弦波を用いて、繰返し非排水三軸試験を実施した。データは、応力、ひずみ、間隙水圧の3つについて、パソコンを使用して収録した。行った試験の一覧を表-1に示す、試験総本数は、38本である。

表-1 試験の供試体本数

		相 対 密 度 (D_r)				
		50	60	70	80	90
ひ ず み 振 幅	0.020	0	1	3	1	0
	0.025	0	3	4	1	1
	0.050	1	4	3	2	2
	0.075	0	1	3	0	1
	0.100	0	3	2	0	2

3. 試験結果

3-1 ひずみ、応力、間隙水圧の時刻歴

図-1にひずみ制御による繰返し非排水三軸試験で得られた代表的な試験例を示す。図に示すようにひずみ振幅は対称であり、振幅の変化も認められず、良好なひずみ制御試験が行われたことがわかる。载荷に伴って発生した間隙水圧のために有効拘束圧が減少する。そのため供試体の剛性が低下することにより、応力振幅も減少する。この関係については、図-2の応力、ひずみ関係の図からもよくわかる。

間隙水圧は振動しながら増加して行くため、载荷時の n 波目の間隙水圧としては、ひずみ振幅が0になった点の間隙水圧、つまり図-3に示したポイント6における点

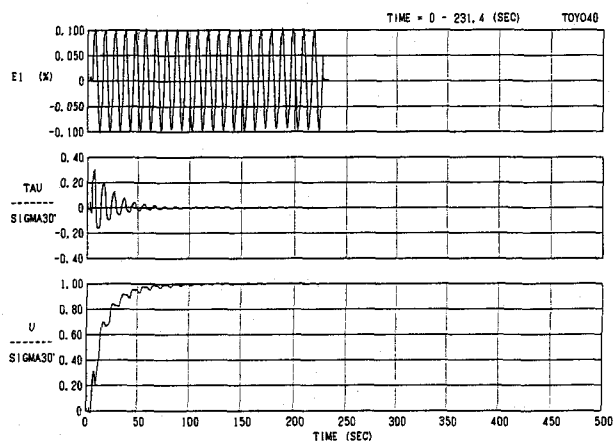


図-1 ひずみ、応力、間隙水圧の時刻歴

を n 波目の間隙水圧 (u_n) とした。また、累積ひずみについては、1 波ごとの圧縮側と引張側の実際の変動分を累積して求めた。以後の整理では、全繰返し回数のデータを使用するのではなく、間隙水圧が $0 \sim 0.95$ まで 0.05 間隔の各それぞれの繰返し回数 n と累積ひずみ $\Sigma (2 \cdot \varepsilon a)$ を用いて、整理を行った。

3-2 有効拘束圧と繰返し回数の関係

有効拘束圧 ($\sigma_{cn}' = \sigma_{co}' - \Delta u$) と繰返し回数 n との関係は、1 回の載荷により発生する間隙水圧 Δu が、 $a \cdot \sigma_{cn}'$ に比例すると仮定すると n 波目の有効拘束圧は式 (1) で表される。

$$\begin{aligned}\sigma_{cn}' &= \sigma_{cn-1}' - \Delta u \\ &= \sigma_{cn-1}' - a \cdot \sigma_{cn-1}' \\ &= (1-a) \cdot \sigma_{cn-1}' \\ &= (1-a)^n \cdot \sigma_{co}' \quad (1)\end{aligned}$$

式 (1) は、公比 $(1-a)$ の等比数列であり、式 (1) の対数を取り整理すると、式 (2) が得られる。

$$\log (\sigma_{cn}' / \sigma_{co}') = \log (1-a) \cdot n \quad (2)$$

式 (2) より、式 (1) の仮定が成り立つならば、繰返し回数 n と $\log (\sigma_{cn}')$ は、傾き $\log (1-a)$ の直線関係となる。そこで、試験結果より得られた有効拘束圧 $\sigma_{cn}' / \sigma_{co}'$ と繰返し回数 n の関係をひずみ振幅 $\varepsilon a = 0.05\%$ の試験について整理したものが、図-4 である。この図から、繰返し回数 n と有効拘束圧 $\sigma_{cn}' / \sigma_{co}'$ の関係は、直線関係であり、式 (1) の関係は満足される。また、累積ひずみ $\Sigma (2 \cdot \varepsilon a)$ はひずみ振幅 εa に繰返し回数 n を掛けたものであるから、図-5 に示すように累積ひずみと間隙水圧についても比例関係が成り立つことが言える。

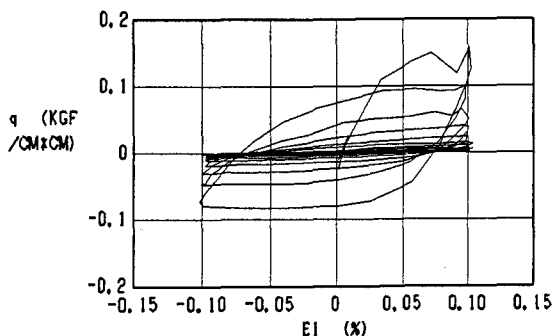


図-2 応力、ひずみの関係

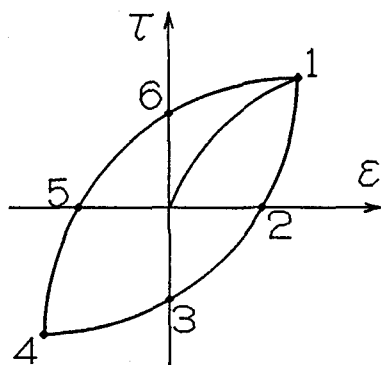


図-3 間隙水圧の位置の説明

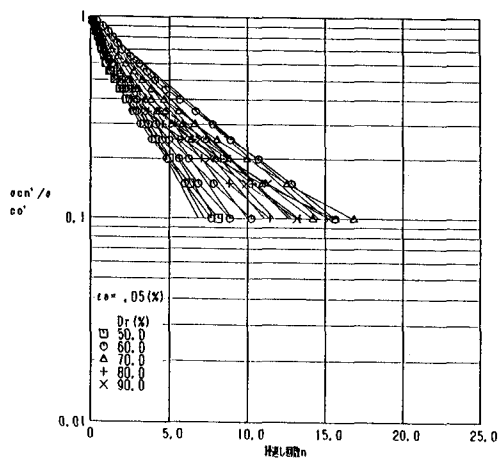


図-4 有効拘束圧と繰返し回数の関係

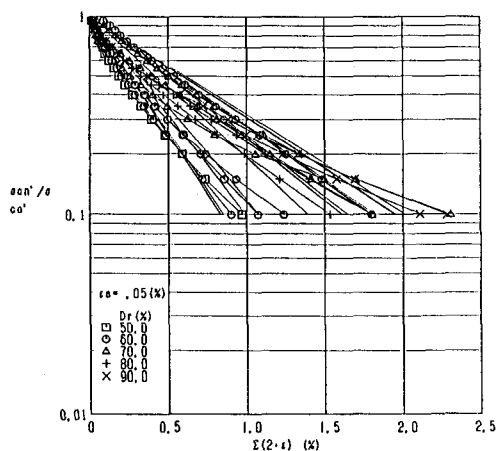


図-5 有効拘束圧と累積ひずみの関係

3-3 累積ひずみ、繰返し回数の関係

一定の間隙水圧を発生するのに必要な累積ひずみ $\Sigma(2 \cdot \varepsilon_a)$ がひずみ振幅 ε_a に関係なく一定であると仮定し、各相対密度ごとの累積ひずみと繰返し回数の関係を図に示したのが図-6である。このy切片がその時の間隙水圧の発生に必要な有効累積ひずみである。もし、間隙水圧の発生に寄与しないひずみ、識閾ひずみ ε_{ai} が累積ひずみに含まれているとしたら、図-6の累積ひずみと繰返し回数の関係の直線に傾きとして現れる。代表的な例として、相対密度 $D_r=70\%$ のときの累積ひずみと繰返し回数を図に示したのが図-7であり、最小自乗法で近似式を求めたのが式(3)である。傾きは0.033程度であるから、識閾ひずみ振幅は半分の $\varepsilon_{ai}=0.017\%$ である。また、このときの有効累積ひずみは、 $\Sigma(2 \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_{ai})) = 0.93$ 程度である。

$$\Sigma(2 \cdot \varepsilon_a) = 0.0332149 \cdot n + 0.93325 \quad (3)$$

3-4 識閾ひずみと相対密度の関係

累積ひずみと繰返し回数の関係を用いて各相対密度ごとに傾きを求め、相対密度と識閾ひずみの関係を示したのが図-8である。この図から、識閾ひずみは、相対密度に関係なくほぼ一定の値を示すことが言える。また、実際の試験でも、ひずみ振幅0.015%で450波以上載荷したが、間隙水圧の上昇は0.3程度しか認められなかった。

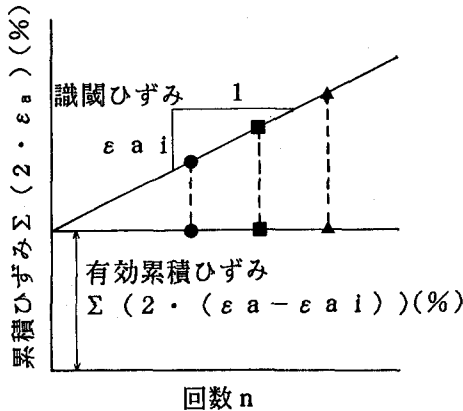


図-6 累積ひずみと繰返し回数のモデル

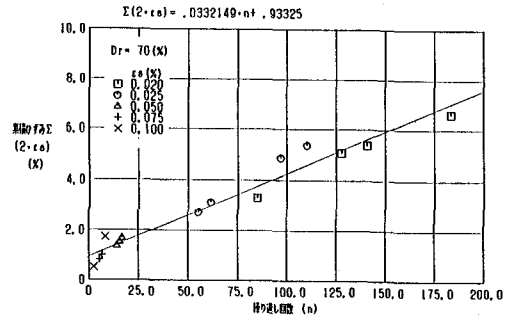


図-7 累積ひずみと繰返し回数の関係

3-5 有効累積ひずみと相対密度の関係

累積ひずみと繰返し回数の関係を用いて各相対密度ごとにy切片を求め（有効累積ひずみ）、相対密度と有効累積ひずみの関係を間隙水圧ごとに示したのが図-9である。また、図-2の傾き $\log(1-a)$ の値と相対密度 D_r の関係を図に示したのが図-10である。図-9, 10から、有効累積ひずみは相対密度に影響されにくいことがわかる。このことから、ひずみ制御試験は、応力制御試験に比べて相対密度の影響は少ないと考えられる。以上の結果を用いて、各間隙水圧に達するまでの有効累積ひずみを図に示したのが図-10である。この図から、相対密度が変化してもほぼ同様な間隙水圧の発生を示すことがわかる。

4. 結論

(1)間隙水圧の発生に寄与しないひずみ振幅 ε_{ai} が存在することが確かめられた。また、相対密度 D_r による影響は少ない。(2)間隙水圧の発生に必要な有効累積ひずみ $\Sigma(2 \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_{ai}))$ は、相対密度に影響されにくい。(3)応力制御試験を行うよりも、ひずみ制御試験の方がより直接的かつ精度良く液

状化特性を表現できると考えられる。

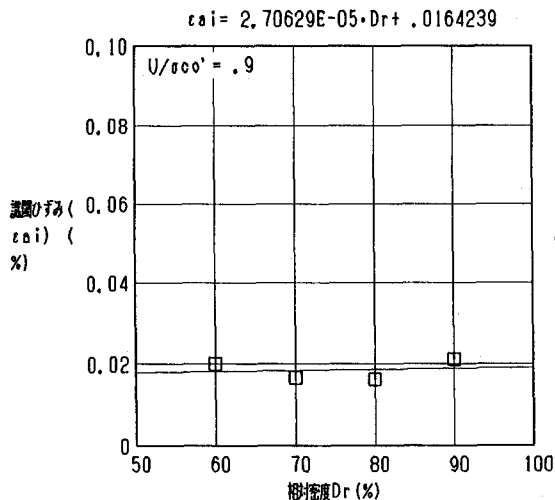


図-8 繰返しひずみと相対密度の関係

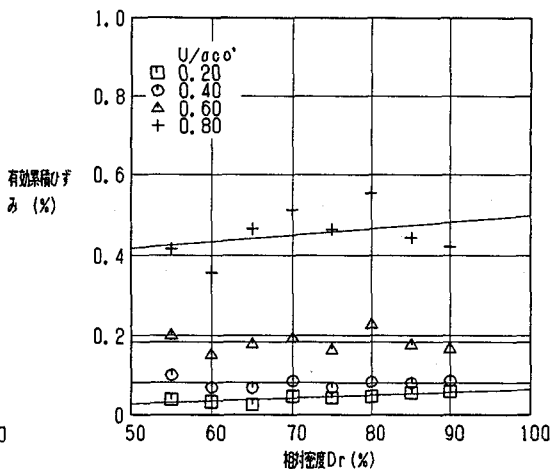


図-9 有効累積ひずみと相対密度の関係

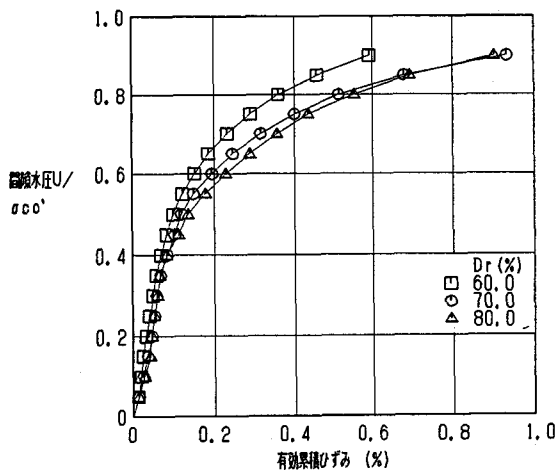


図-10 傾きと相対密度の関係

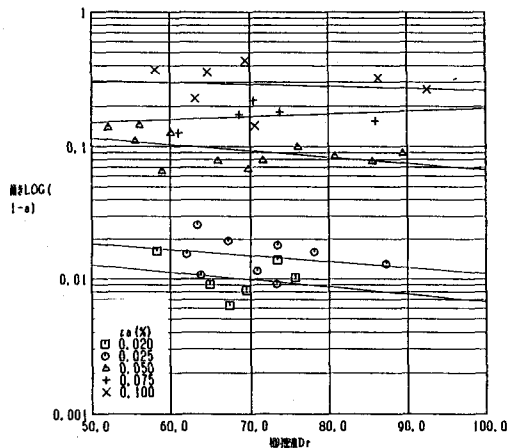


図-11 間隙水圧と有効累積ひずみの関係

参考文献

- 1) 佐々木, 松本, 佐谷: ひずみ制御による液状化試験, 第23回土質工学研究発表会, 1989.6
- 2) 佐々木, 松本, 佐谷: 累積ひずみと間隙水圧発生量の関係の応力制御による繰り返し三軸試験結果に基づく検討, 第20回地震工学研究発表会, 1989.7