

飽和砂の液状化特性に及ぼす応力波形の不規則性の影響

東北大学工学部 学生員 ○小林 亮人  
 同上 正会員 柳沢 栄司  
 同上 学生員 永見 健二

1. はじめに

砂地盤の液状化の可能性を検討する方法として、室内実験で得られる飽和砂の正弦波載荷に対する液状化強度から推定する方法が知られている。この液状化の判定法において地震波のランダム性を評価する方法としては、主にSeed and Idriss(1971)及び石原(1977)による2つの提案があるが、載荷荷重の不規則性が液状化強度に及ぼす影響については、まだよく知られていない点がある。今回、振動三軸試験機で2つの正弦波発生装置による合成波を用いて非排水繰返し試験を行ない、正弦波に対する強度から不規則波に対する強度への変換の問題について検討を行った。

2. 実験方法

実験に使用した砂は豊浦標準砂( $G_s=2.64, e_{max}=0.977, e_{min}=0.605, D_{50}=0.162, U_c=D_{60}/D_{10}=1.46, 74\mu\text{M}$ 以下の細粒分なし)であり、空中振動法によって $D_r=70\%$ 及び $50\%$ の供試体(直径5cm高さ12.5cm)を作製した。供試体作成後、30分程 $\text{CO}_2$ を通し、その後、脱気水を循環させて飽和( $B$ 値 $\geq 96\%$ )し、有効拘束圧 $\sigma'_c=2.0\text{kgf/cm}^2$ 、背圧 $\sigma_{op}=2.0\text{kgf/cm}^2$ で等方圧密後、側圧一定で非排水繰返しせん断を行った。実験に用いたせん断応力波形は、周波数0.5Hzの正弦波Aと周波数0.25Hzの正弦波Bを図1に示すように合成し、波の最大振幅ほぼ一定のもの3種類に対して最小振幅と最大振幅の比を0.79, 0.62, 0.40, 0.20に替えておいた。

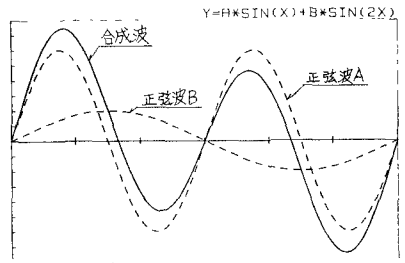


図1 応力波の合成

3. 累積損傷度理論による液状化強度の計算

あらかじめ周波数0.5Hzの正弦波を用いて強度曲線(SR =  $\sigma_{op}/2\sigma_c \sim \log N_f$  (DA=5%)関係)を作製する(図2)。今回用いた波について2つのゼロクロッシングの半波長で定義する半パルスによる振幅を求め、この強度曲線からそれぞれの振幅に対する $N_c$ を求める。全体の波による両振幅軸必ずDA=5%になるまでの繰返し回数 $N_f$ は次式のようになる。

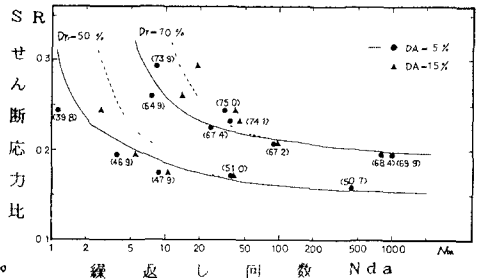


図2 規則波による強度曲線

$$N_f = 2 / (\sum 1/N_c) \quad \dots (1)$$

4. 損傷係数による間隙水圧の近似計算

Endochronic 理論から $F_{im}$ は式(2),(3)により、また飛田は式(4),(5)により間隙水圧が求まることを提案している。

$$\kappa = \xi \cdot \exp(\lambda \gamma) \quad \dots (2) \quad \frac{U}{\sigma'_v} = \frac{\kappa(D\kappa + C)}{A\kappa + B} \quad \dots (3)$$

$$\kappa = \exp(\lambda \cdot \gamma_0) \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad \dots (4) \quad \frac{U}{\sigma'_v} = \frac{\alpha \kappa}{\kappa + \beta} \quad \dots (5)$$

$\xi$ : 繰返し載荷中のひずみ経路の長さ

$\gamma$ : せん断ひずみ,  $\lambda = 5.0$ , A, B, C, D: 定数

$\alpha = 1.0$ ,  $\beta = 0.2$

表1 破壊繰返し回数の計算と実測値

No.	Ur	SRemax	Nc	SRemin	Nr	SRTmax	Nc	SRTmin	Nc	Nfc	Nfr
10	69.9	0.225	31.0	0.065	--	0.253	9.0	0.124	--	13.8	16
26	70.3	0.256	11.1	0.086	--	0.262	7.8	0.134	--	9.2	17
28	68.0	0.249	10.8	0.133	--	0.264	6.4	0.186	--	8.0	8.18
29	74.2	0.243	24.5	0.171	--	0.267	10.5	0.219	40	9.12.5	14
9	64.9	0.281	4.75	---	---	0.224	16.7	---	---	7.40	7.64
24	70.0	0.189	---	0.072	---	0.239	12.3	0.020	---	24.6	40
36	69.8	0.202	500	0.061	---	0.251	9.3	0.127	---	18.3	21
34	71.8	0.248	04.0	0.121	---	0.233	18.0	0.157	---	28.1	38
35	72.1	0.242	143	0.145	---	0.239	15.2	0.200	170	25.4	22
37	69.7	0.239	17.5	---	---	0.209	40.0	---	---	24.3	23
22	48.5	0.189	28.0	0.077	---	0.166	16.2	0.065	---	20.5	8.87
33	53.4	0.156	700	0.075	---	0.170	14.8	0.131	---	29.0	32
30	49.8	0.145	---	0.099	---	0.161	30.0	0.138	---	60.0	24
18	47.9	0.190	7.4	---	---	0.165	18.0	---	---	10.5	8.64

今回の実験で求めたデータを用い、著者は次式を提案する。すなわち、

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_s / \sum_{i=1}^n \gamma_s}{\dots} \quad (6)$$

$$U/\sigma'_{vo} = \frac{(1+\beta)K}{K+\beta} \quad (7)$$

ここでは、損傷係数 $K$ に規準化した値を用いているので、初期で0、完全液状化状態で1になるように定義し、 $K=1$ で間隙水圧比が1になるような形式を用いることにした。

### 5. 実験結果

表1は、今回用いた応力波形の片振幅せん断応力比 $SR$ と、それによる破壊繰返し回数 $N_c$ 及び全体の波に対する計算で求めた破壊繰返し回数 $N_{fc}$ 、実際の破壊繰返し回数 $N_{fr}$ と比較したものである。この表より、応力波の最小振幅と最大振幅の比( $SR_{min}/SR_{max}$ ) $\leq 0.62$ では、全体として計算値が実測値より小さくなるようである。これは、有効応力経路(図3)を比較してみると、経路の載荷初期から変相線に触れるまでの領域において、( $SR_{min}/SR_{max}$ ) $\geq 0.70$ では小さい方のパルスによって間隙水圧の上昇が見られるが、( $SR_{min}/SR_{max}$ ) $\leq 0.62$ では小さい方のパルスによって逆に間隙水圧の減少(有効応力経路の逆戻り)が見られ、マイナスの損傷が生じるためだろうと考えられる。

### 6. 提案式による間隙水圧の計算結果

図4は実際の間隙水圧比 $U/\sigma'_{vo}$ 、及び累積ひずみ比(提案した損傷係数) $\sum \gamma_s / \sum \gamma_s$ を式(6)、(7)による $U/\sigma'_{vo}$ と比較したものである。式(7)の $\beta$ は $D_r$ と $N_f$ の関数であり、 $D_r$ が小さいほど $\beta$ を大きく、 $N_f$ が小さいほど $\beta$ を小さくすると実測値とほぼ一致することがわかった。例えば、図4-1は $D_r=69.7\%$ 、 $N_f=23$ で $\beta=0.08$ 。図4-2は $D_r=47.1\%$ 、 $N_f=14$ で $\beta=0.2$ である。

### 7. あとがき

今回の実験では合成波の( $SR_{min}/SR_{max}$ )で比較してみたが、有効応力経路の逆戻り現象は液状化強度の下限値を境にして起こるとも考えられる。また、新しく提案した損傷係数による間隙水圧近似式は、今回の実験データとはほぼ一致するようであるが、実際に適用する場合、関数 $\beta$ の定式化及び破壊までの累積ひずみ比 $\sum \gamma_s$ についての検討が今後必要であろう。

### 8. 参考文献

- 1) 越智 岡本 龍風(1985)“地震動のランダム性と砂の液状化強度の関係” 第20回土質工学会
- 2) Finn, W.D.L., Bhatia(1980)“Endochronic theory of sand liquefaction”, Proc. 7th World Conf. on Earthquake Eng.
- 3) Y. Tobita, E. Yanagisawa(1982)“Prediction of seismic pore pressure based on internal change of sand in shear deformation” 第6回地震工学シンポジウム
- 4) 土質工学会(S.59)“地盤の液状化”

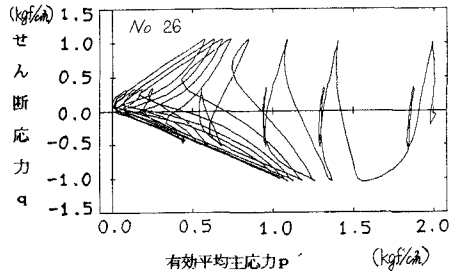
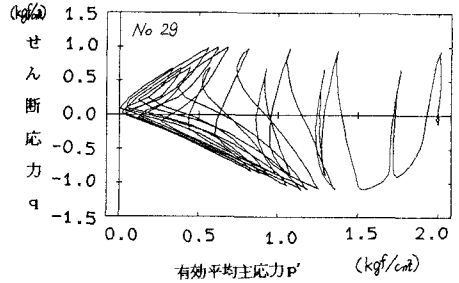
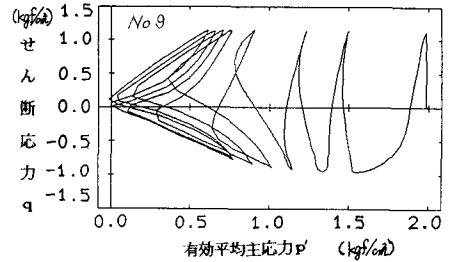


図3 有効応力経路の比較

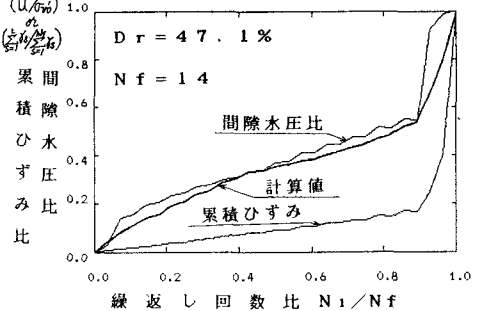
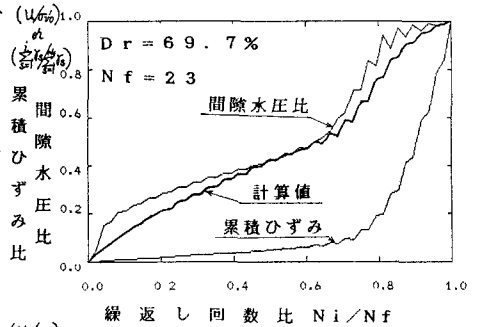


図4 損傷係数による間隙水圧の計算