

CS4-9〔Ⅲ〕

エネルギーによる液状化安全率

大成建設（株） 正会員 五十嵐 俊一

1 はじめに

液状化は地震動によって土の間隙水圧が上昇した結果発生する自然現象であるが、土の供試体に繰り返しせん断力をかけることによって観測することが出来る。これまでは、例えば、20回の繰り返しで標準供試体が液状化する正弦応力の振幅によって土の液状化強度を表わし、地震の作用による地盤のせん断力の代表値との比で液状化安全率（FI値）が表わされてきた（Seed, Idriss 1967）。両者を有効拘束圧等で正規化した液状化応力比及び地盤のせん断力比は、土の強度と地震の作用を表す指標に近いものとして土や地震の工学的性質と関係づけられている。しかし、物理的には、あくまでも力、即ち運動量の変化率として瞬間で定義されたものに過ぎない。液状化のように動的で系の状態の大きく変化する現象に対する総合的な判断指標に用いることには、多かれ少なかれ、イベントの結果を途中の瞬間写真から推定する不確かさがある。

現在の設計理論は、構造物の状態の変化を考慮して、各種の限界状態に対して設計が行われる迄に進展している。これにともない安全率の考え方も、従来の応力比に基づくものから構造物の状態の変化を直接計るものに変更する必要があると考える。液状化は、地盤の限界状態の一つであると考えられる。これに対する安全率は、物理的な状態変化の一般的な尺度であるエネルギーを用いるのが最も自然であると考えられる。

2 エネルギーによる液状化安全率

地盤の液状化は、地震の作用によって土の間隙を満たす水の圧力が上昇し、これが蓄積して土粒子間の結合力の低下を招き土が全体として液体ようになる現象である。間隙水圧の蓄積は、土の塑性変形の結果間隙水が土粒子により弾性的に圧縮された状態で保持されることによって生ずると考えられる。間隙水の、弾性歪みエネルギーを E_p とすれば、外力が、間隙水圧を P_0 から P_a に上昇させる為の仕事は単位体積当たり、

$$W_{a0} = \Delta E_p = \frac{1}{2} n C (p_a^2 - p_0^2), \quad E_p = \frac{1}{2} n C p^2 \quad (1)$$

ここに、 n 、 C は、間隙率及び水の圧縮率である。土粒子間の結合力は有効拘束圧（平均応力－間隙水圧）がゼロのときにゼロになるならば、液状化は、間隙水圧が初期状態 P_0 から初期有効拘束圧 σ_{m0}' だけ上昇した状態であると定義することができる。以上の物性を持った地盤を液状化させるために必要な仕事は、式（1）で $a=1$ とし、 $P_1=P_0+\sigma_{m0}'$ と置いて、

$$W_{l0} = \frac{1}{2} n (1+2\beta) C \sigma_{m0}'^2, \quad \beta = \frac{P_0}{\sigma_{m0}'} \quad (2)$$

液状化安全率 F_{lc} は、土が地震時に間隙水にする仕事 W_{a0} と液状化に必要な仕事 W_{l0} の比によって表すことが出来る。

$$F_{lc} = \frac{W_{l0}}{W_{a0}} \quad (3)$$

以上の関係式よりエネルギーによる液状化安全率と過剰間隙水圧比の間には、次のような一対一関係があることがわかる。

$$\frac{\Delta p}{\sigma_{m0}'} = \sqrt{F_{lc}^{-1} (1+2\beta) + \beta^2} - \beta \quad (4)$$

地震は、土の運動であるので、地震の作用は、土の単位体積当たりの運動エネルギー K によって表すことが出来る。

$$K = \frac{1}{2} \rho n \sigma_1^2, \quad n = \frac{s_0 \omega_1}{\pi} \quad (5)$$

ただし、 ρ 、 s_0 、 σ_1 、 ω_1 は、それぞれ、地盤の密度、強震継続時間、速度の2乗平均値及び中央振動数であり、地震動のパワースペクトルから計算される。 n は、等価繰返し回数とも呼ぶべきものである。また、 $s_0 \sigma_1^2$ は、速度の全パワーである。液状化の原因は、地震動と重力による物体力の作用であるので土が地震時に間隙水にする仕事は、 h をパラメーターとして、次の様に書ける。

$$W_{e0} = hK \quad (6)$$

h は、地震のエネルギーが、どれだけ間隙水の歪みエネルギーに変わるかを示すもので、地震動の液状化に対するエネルギー効率と呼べる量である。これは、土の構造と地震動の性質によって決まると考えられる。

3 計算例

エネルギーに基づく液状化安全率は模型実験やコンピューターを用いた数値解析によって外力の作用による間隙水圧の上昇量を測定し式(4)によって逆に計算することが出来る。式(4)は、単位体積について書かれているが、これを積分することによってある有限の領域についての安全率を計算することが出来る。また、力学的なモデルを仮定して、エネルギー効率と地震及び土の性質との関係を具体的に求めることも出来る。これまでの検討では、滑べりを基本とした力学系のエネルギー収支が、液状化現象によく合うと考えられ、 h は、地震動と地盤の物性で解析的に表される(Igarashi, 1991)。

$$h = 2\eta \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{A_c}{\sigma_2}\right)^2\right) \left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2} \sqrt{1-\alpha_1^2}\right) \quad (7)$$

ここに、 σ_2, α_1 は、それぞれ地震動の2乗平均加速度、速度のバンド巾指数である。 2η は、式(7)の大きさを示すもので、正弦波($\alpha_1=1.0$)に対する $A_c=0$ の値である。 A_c は、地盤の液状化限界加速度と呼べるもので、一様な加速度を受ける深さ H の地盤では、摩擦角 ϕ_c を用いて、

$$A_c = \frac{\sigma_{m0}'}{\rho H} \tan \phi_c \quad (8)$$

新潟地震川岸町記録のNS成分のパワースペクトルから強震パラメーターを求めると $\sigma_2=0.46 \text{ m/sec}^2$ 、 $\sigma_1=0.156 \text{ m/sec}$ 、 $s_0=6.85 \text{ sec}$ 、 $\omega_1=3.0 \text{ rad/sec}$ 、 $\alpha_1=0.161$ 、 $n=6.54$ となる。式(5)より、地震動のエネルギーは、 $K=151 \text{ J/m}^3$ となる。また、土質工学会(1989)の一斉解析のデータから式(7)で、新潟地震の川岸町周辺の地盤の深さ8mの点についてエネルギー効率 h を計算すると、 $h=3.03\%$ となる。ただし、 η 及び ϕ_c は、繰返しせん断試験の結果から $\eta=1.82\%$ 、 $\phi_c=11.9\text{deg}$ と計算した。従って、地震動による間隙水への仕事は、 $W_{e0}=151 \times 3.03 \times 10^{-2} = 4.58 \text{ J/m}^3$ である。液状化に必要なエネルギーは、式(2)に、 $C=4.9 \times 10^{-10} (\text{Pa}^{-1})$ 、 $n=0.47$ 、 $\sigma_{m0}'=40.4 \text{ KPa}$ 、 $\beta=3.96$ を代入して、 $W_{l0}=1.68 \text{ J/m}^3$ となり、液状化安全率は、 $F_{le}=1.68/4.58=0.36$ となる。

4 結論

地震動の間隙水に対する仕事と、液状化に必要なエネルギーを計算し両者の比によって液状化安全率を定義することができる。これは、過剰間隙水圧比と1対1に対応するものであり、実験や実測、理論解析、統計解析、数値解析等多様な方法で求められる。エネルギーによる液状化安全率は、物理的な意味が明確であり実用性もあるものである。

参考文献

- Seed, B. H. and Idriss, I. M. 1967. "Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake", ASCE, SM3
 土質工学会, 1989 "地盤と土構造物の地震時の挙動に関する発表論文集
 Igarashi, S. 1991. "Dislocation Energy of Liquefaction", submitted to JSCE for possible publication.