

(57) 不整形地盤における液状化ポテンシャル

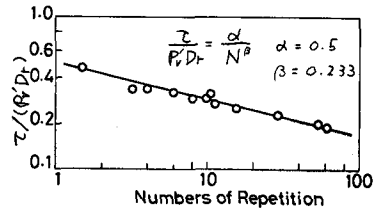
京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信

1. まえがき

地震時における液状化に関するこれまでの震害調査によれば、地盤の液状化ポテンシャルは局所的な地盤構成や土質に大きく依存することが明らかにされている。対象とする地点の地盤定数ならびに地表面の最大加速度が与えられれば、地震時における地盤の液状化ポテンシャルはかなりの精度で推定できるようになっている。しかし、地震動の周波数特性や地盤構造の液状化に及ぼす影響については考察が加えられていないようである。本研究では、液状化ポテンシャルを判定するために限界震央距離なる概念を提案することにより、地盤の不整形性が液状化現象にどのような影響を及ぼしているかを調べた。結果として、地盤の液状化は、地盤構成が急激に変化する領域で顕著になることを明らかにした。ここでは、疲労破壊の概念を用いて液状化解析を行うので、地盤内に発生するせん断応力ならびにその時間微分の分散の期待値が必要となる。そのため、応答スペクトルを用いて、地盤内震動分布を推定する手法を示し、これを震央距離、マグニチュードならびに当該地点の地盤定数の関数として表現する。

2. 液状化ポテンシャルと限界震央距離

ここでは、砂の振動三軸あるいはせん断試験結果から得られる図・1に示すようなせん断応力振幅～繰り返し回数の関係を、全属の疲労破壊におけるS-N曲線とみなし、疲労破壊の概念に基づいて液状化ポテンシャルを求める。いま、単位時間あたりの累積損傷度の期待値をE(D)とし定常応力過程を仮定すれば、E(D)は地盤内に発生しているせん断応力τならびにその時間微分τ'の標準偏差σ_τならびにσ_{τ'}の関数として表現される。



τ: せん断応力振幅, D_r: 相対密度
 P_v: 有効拘束圧

図-1 せん断応力一繰り返し回数

$$E(D) = y(\sigma_\tau, \sigma_{\tau'}, k_j) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

ここに、k_jは対象とする地点の地盤定数を表すパラメータであり、地盤の層厚、単位体積重量、弾性定数、相対密度、実験的に与えられるその他の地盤定数を総合的に示したものである。いま、地震動の継続時間をTとすれば、次式を満すような点が当該地盤内に発生すれば、その地盤は液状化すると見なすことができる。

$$TE(D) \geq 1 \quad \text{or} \quad Ty(\sigma_\tau, \sigma_{\tau'}, k_j) \geq 1 \quad (2)$$

一方、σ_τ、σ_{τ'}ならびにTは震央距離Δ、マグニチュードMと当該地点の地盤定数k_jの関数で表現できると考えられるから、一般に次式のような式になる。

$$\sigma_\tau = \sigma_\tau(\Delta, M, k_j), \quad \sigma_{\tau'} = \sigma_{\tau'}(\Delta, M, k_j), \quad T = T(\Delta, M, k_j) \quad (3)$$

式(3)を式(2)に代入し、整理することにより、地盤の液状化の条件は次式のように書きなおせる。

$$Y(\Delta, M, k_j) \geq 1 \quad ; \quad Y = T \cdot y \quad (4)$$

対象としている地盤内で、式(4)の等号が成立する場所が一つ所であれば、地盤は液状化するわけであるから、液状化の判定は等号の成立するΔ、M、k_jの組合せを見い出すことにより可能となる。いま、等号条件を満す震央距離Δ_Lに注目し、これを式(4)の条件から求めると次式となる。

$$\Delta_L = Y^{-1}(1, M, k_j) \quad (\text{限界震央距離}) \quad (5)$$

ここに、Δ_Lは定められたマグニチュードと地盤条件の下で地盤が液状化するための最小の震央距離を表わしている。当該地点を中心に半径Δ_Lの円を描くと、この円内にマグニチュードMの地震が発生すると地盤は液状化するわけであるから、Δ_Lは液状化ポテンシャルの指標と考えることができる。ここでは、これを限界震央距離

離と名付け、これを用いて考察を加えることにする。

2. 地盤の震動解析

前節で定義した限界震央距離を求めるためには、地盤内せん断応力とその時間微分の標準偏差の期待値を震央距離とマグニチュードの関数として表現してやらなければならない。応答スワフトル法を用いることにより、この解析を行う。このためには、一般的な地盤の不均質性ならびに土の非

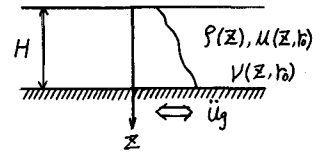


図-2 地盤構成

線形性を考慮できるようなモード解析法を開発する必要がある。まず、地盤内を伝播する非線形波動の表現形式に若干の考察を加えることにより、波動伝達マトリックスの簡単な表現形式を求めた。これを用いて、地盤の固有振動数ならびに固有モードを求めるためのプログラムを開発した。これは、土の非線形性を考慮したものであり、閉じた形で解を求めることはできないので繰り返し計算を行っている。

図-2に示すように、深さ方向に密度 ρ 、せん断弾性係数 μ ならびにせん断粘性係数 ν が任意の分布を示す地盤を考慮する。基礎層における水平加速度 \ddot{u}_g が与えられれば、系を支配する運動方程式は次式となる。

$$\rho(z) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \rho(z) \ddot{u}_g = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu(z, t_0) \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu(z, t_0) \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial z} \right\} \quad (6)$$

ここに、 u は地盤の水平方向の相対変位、 z は深さ方向を正とした座標軸、 t_0 は地盤内に発生しているせん断ひずみの大きさを表わす指標である。開発したプログラムを用いることにより、式(1)に対する系 n 次の固有円振動数 ω_n ならびに正規モード $\phi_n(z, \omega_n)$ が求められるので、規準座標 $S_n(t)$ で表わした運動方程式は次式のように与えられる。

$$\ddot{S}_n + 2\zeta_n \dot{S}_n + \omega_n^2 S_n = f_n \quad (7)$$

ここに、

$$e_n = \int_0^H \phi_n^2(z, \omega_n) dz, \quad f_n = \frac{1}{e_n} \int_0^H \phi_n(z, \omega_n) dz$$

式(7)を誘導するに当り、非比例減衰に基づくモード減衰マトリックスの対角化を行わなければならないが、これは、着者が提案した手法に基づいている。²⁾ 一旦、モードごとの減衰定数ならびに固有振動数が与えられれば、モード重ね合せ原理に基づいて地盤内の震動分布を推定することができる。ここでは、応答スワフトルを用いた解析を行う。³⁾ McGuire による次式の速度応答スワフトル⁴⁾を用いる。

$$S_V(\omega) = a(\omega) 10^{b(\omega)M} (\Delta + 25)^{-c(\omega)} \quad (8)$$

ここに、 $a(\omega)$ 、 $b(\omega)$ 、 $c(\omega)$ は固有円振動数 ω の関数であり実地震動を用いた解析により与えられている。

土の応力-ひずみ関係としては種々のものが考えられるが、取り扱いの簡単な Hardin の提案している双曲線形のものを用いた。

$$\frac{\mu}{\mu_1} = \frac{1}{1 + a\delta}, \quad \frac{\zeta}{\zeta_m} = \frac{a\tau_0}{1 + a\delta}, \quad a = \frac{\mu_1}{\tau_f}, \quad \frac{\nu}{\mu} = \frac{2\zeta}{\omega} \quad (9)$$

ここに、 μ_1 は初期せん断弾性係数、 ζ_m はせん断ひずみ振幅が無限大になったときの材料減衰定数、 a は土の非線形パラメータ、 τ_f はせん断強度、 ω は平均周期である。地盤が調和振動をしている場合には τ_0 として地盤内に発生しているせん断ひずみ振幅を用いて μ ならびに ζ を推定できるが、地盤が不規則振動をする場合には τ_0 を一義的に決定することはできない。しかしながら、ひずみの極値分布 $p(\sigma_r, \tau)$ が与えられたとすれば、等価なせん断弾性係数ならびに材料減衰定数をひずみの標準偏差 σ_r の関数として表現できる。

$$\mu(\sigma_r) = \int_0^{\infty} \mu(\tau) p(\sigma_r, \tau) d\tau, \quad \zeta(\sigma_r) = \int_0^{\infty} \zeta(\tau) p(\sigma_r, \tau) d\tau \quad (10)$$

$p(\sigma_r, \tau)$ としてはゼロ平均値のガウス過程のものを用いた。

なお、ここでは簡単のために、地盤モデルとして図-2に示したような1層系で解析法の説明を加えたが、開発したプログラムを用いれば、任意の多層系地盤に対して同様の解析が可能である。

4. 地盤の液状化解析例

図-3に示すような2層地盤モデルを考え、液状化解析を行った。O点より右側では基礎が露出し、左側に行くに従って地盤の層厚が厚くなっている。地盤定数としては、図中に示したように、単位体積重量は両層とも 1.8 t/m^3 とし、せん断波速度は上層が 160 m/sec 、下層が 320 m/sec の場合を考えている。地下水位は 0.5 m 、相対密度は 0.6 、土の応力 σ とひずみ ϵ の関係を規定する内部摩擦角は 35° 、粘着力は 0.01 t/m^2 とした。また、式(9)に現われる ζ_m は 0.35 とした。液状化の解析には図-7に示したようなせん断応力振幅 \sim 繰り返し回数 \sim の関係から求まる実験定数 α, β が必要になる。計算には図-1に与えられている値を用いた。実際の地盤では、こうした土の動特性は、深さの関数になっているはずであるが、ここでは簡単のために深さ方向には一様であると仮定した。なお比較の対象として、上の非線形性を無視した場合の解析と同時にを行った。この場合には、すべてのモードに対し、モードの減衰定数を 0.2 とした。また、地震動の継続時間は簡単のため一定値とし 10 秒とした。

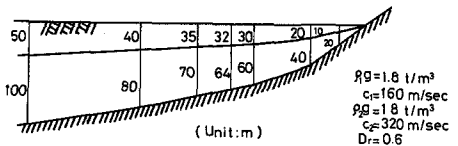


図-3 地盤構造モデル

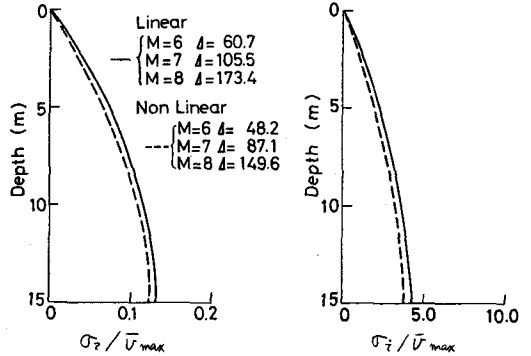


図-4 せん断応力とその時間微分の深さ方向分布 ($H=15\text{m}$)

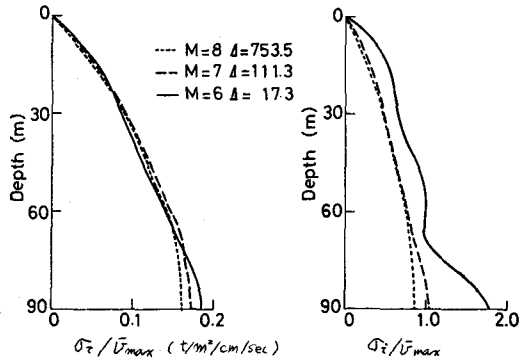


図-5 せん断応力とその時間微分の深さ方向分布 ($H=90\text{m}$ 線形解析結果)

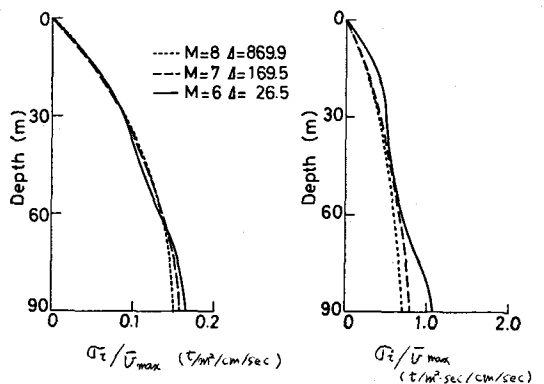


図-6 せん断応力とその時間微分の深さ方向分布 ($H=90\text{m}$ 非線形解析結果)

液状化の解析を式(2)に基づいて行う場合には、 σ_z と σ_z の値が与えられていなければならない。これが、マグニチュード、震央距離、地盤構成によってどのように変化するかを示したのが図-4~6である。この分布図は、式(5)の条件を満す場合に対して計算してある。したがって、図中の震央距離はいずれも限界震央距離になっている。また、いずれも、地表面における平均最大相対速度の期待値 \bar{U}_{max} で正規化してある。図-4は地盤の深さが 15m について線形と非線形解析の結果が同時に示してある。図から、マグニチュード、震央距離によらず、分布形はほぼ同様な形状を示していることがわかる。図5,6は地盤の深さが 90m の場合について示してある。前者は線形解析、後者は非線形解析の結果である。非線形解析の場合、応答値が若干小さめに出ているが、いずれの分布形もマグニチュード、震央距離によらずほぼ同様な形状を示している。

次に、式(5)の条件が満される場合、単位時間当りの損傷度の期待値 $E[D]$ の深さ方向分布を示したのが図-7~9である。図-7は地盤の深さが 15m の場合には、線形、非線形解析によらず、 $E[D]$ の分布形はマグニチュードの影響を受けないことが判明する。図-8,9より、地盤が深くなると、マグニチュードの大きい地震の方が、深い所ま

で液状化の危険度の高くなることがわかる。しかし、線形解析、非線形解析にかかわらず、20m以深では液状化の発生危険度は小さくなることも明らかである。図・10は線形解析結果から求めた限界震央距離を地盤の構造変化に対して示したものである。図・11は非線形解析結果から求めたものである。いずれの場合も、限界震央距離はマグニチュード、地盤の構造によってかなり変化することがわかる。マグニチュードが小さい地震では地盤の浅い所で、マグニチュードが大きくなるにつれて地盤の深い所で限界震央距離の変化が顕著になっている。この結果は、地盤が深くなるほど液状化の危険度が高くなるわけではなく、堅い地盤から柔らかい地盤へ変化する、いわゆる地盤構造の遷移領域で液状化の危険度が高くなることを示しており、液状化の解析にもこうした点を考慮しておかねばならないことを示唆している。

図・12は本解析で求めた限界震央距離とマグニチュードの関係が、既往の液状化事例とどのように対応しているかを示したものである。図中の実線は液状化ポテンシャルの下限値を示すものであり、●印は既往の液状化事例である⁵⁾。図・11の結果が×印で示されている。これは、実線の右側にも分布しているから、かなり液状化しやすい地盤条件を仮定したことになるが、破線の勾配は実線のそれとほぼ同じであり、既往の液状化事例との対応もよいことがわかる。また、既往の事例が実線の右側に分布することは、地盤構造の情報がデータ分布の中に埋没している可能性を示唆している。

- 参考文献
- 1) 佐藤忠信：京大防災研究所年報 18号B-2, pp.349~365, 1975,
 - 2) 佐藤忠信, A. D. Kiureghian：第36回国土学会年次学術講演会要集 I-229, 1981,
 - 3) A. D. Kiureghian：Report No. UBC/EERC-80/15, Univ. of California, June, 1980
 - 4) R. K. McGuire：Report No. R74-51, Massachusetts Institute of Tech. Aug. 1974
 - 5) E. Kuribayashi, F. Tatsuoka：Soils and Foundations, Vol. 15, No. 4, pp.81-92 1975

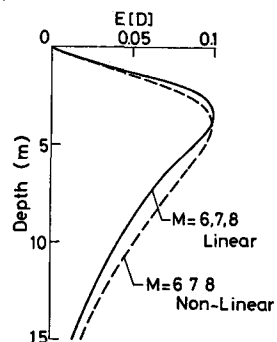


図7 液状化危険度の分布図 (H=15m)

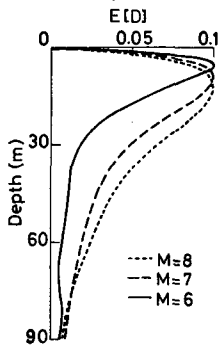


図8 液状化危険度の分布図 (H=90m, 線形解析結果)

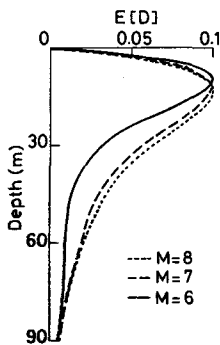


図9 液状化危険度の分布図 (H=90m, 非線形解析結果)

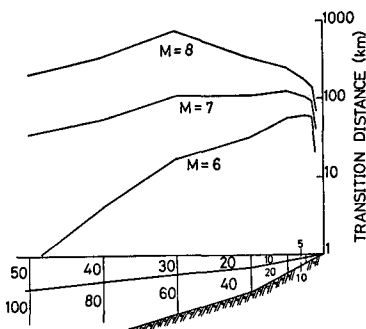


図10 限界震央距離と地盤構造の関係 (線形解析結果)

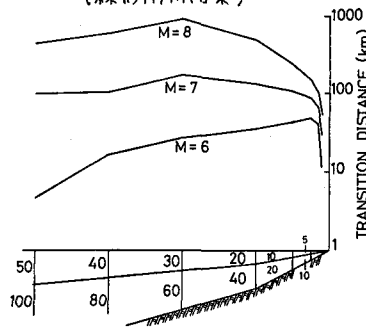


図11 限界震央距離と地盤構造の関係 (非線形解析結果)

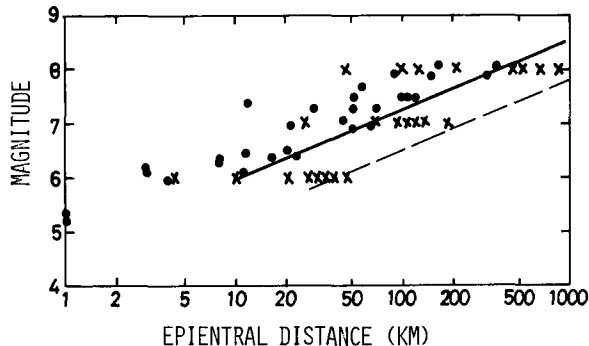


図12 既往の液状化事例との比較 (●既往の事例, ×本解析結果)