

砂質地盤の液状化現象予知への一手法

京都大学工学部 正員 後藤 尚男  
 京都大学大学院 学生員 佐藤 忠信  
 運輸省 正員 小村 利治

1. まえごき；従来まで、砂質地盤の液状化現象については、室内実験を中心に、多くの研究がなされてきており、データが蓄積されている。しかし、これらは主として、周期的応力載荷によるものであり、地震動のようなランダム過程に直接適用することは困難であると考えられる。本研究では、地震時における地盤内応力過程と確率過程と考え、確率論を用いて評価し、室内実験結果を有効に実地盤へ適用できる手法を示した。

2. 液状化破壊基準；柴田博士は、液状化過程と間隙水圧の上昇による有効応力の減少過程としてとらえ、液状化破壊基準を有効応力表示によるモール円が、Mohr-Coulombの破壊包絡線に達したときと考え、地震動により地盤内に励起されるせん断応力 $Z_0$ と、初期液状化に到るまでの繰り返し回数 $N_L$ の関係と次式で与えている。<sup>1)</sup>

$$\eta_L = \frac{\{0.75 - f(Z_0/\sigma_v) \operatorname{cosec} \phi'_i\}}{a \{ (Z_0/\sigma_v) - 0.25 \}^2} \quad \text{--- (1)}$$

$$\text{ここで } f(Z_0/\sigma_v) = \{ (Z_0/\sigma_v)^2 + 1/6 \}^{1/2}$$

$a$ ：実験定数  $\phi'_i$ ：内部摩擦角、 $\sigma_v$ ：有効上載圧

本研究では、式(1)を修正する解析手法に適用させるためFig. 1. に示すように修正して用いた。

区間[AB]： $\eta_L = \{ F / (Z_0/\sigma_v) \}^{1/2}$ 、区間[BC]：(1)式。

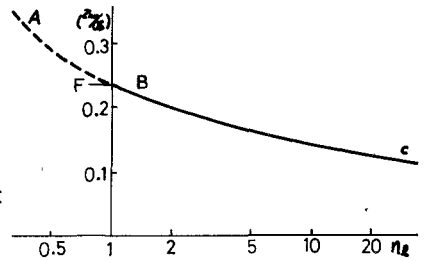


Fig. 1.  $(Z_0/\sigma_v) \sim N_L$  曲線

3. 解析手法；室内実験においては、連続過程としての周期的応力過程と $\sigma$ - $\tau$ の値で評価してはいるので、本研究においても、ランダムな地盤内応力過程を $\sigma$ - $\tau$ の値で評価する。ランダム過程 $X(t) = (Z_0(t)/\sigma_v)$ の任意座標 $(x, t)$ 近傍における単位領域あたりの $\sigma$ - $\tau$ の期待回数は、次式で与えられる。

$$P = - \int_{-\infty}^{\infty} \dot{x} f(x, \dot{x}, t) dx \quad \text{--- (2)}$$

ここで、記号 $\dot{x}$ は時間微分を意味し、 $f(x, \dot{x}, t)$ は同時確率密度関数である。

ランダム過程 $X(t)$ が、ゼロ平均を有する定常ガウス過程であるとすると、式(2)は次のようになる。

$$P_{sta} = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_1 \sigma_2} \left[ (k)^k \exp \left\{ -\frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2 x^2}{2(k)} \right\} + \sigma_2 x \left( \frac{\pi}{2\sigma_1^2 \sigma_2^2} \right)^{1/2} \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\sigma_2 x}{\sqrt{2} (k)^{1/2} \sigma_1} \right) \right) \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\sigma_1^2} \right\} \right] \quad \text{--- (3)}$$

ここで、 $\sigma_1 = E[X^2(t)]^{1/2}$ 、 $\sigma_2 = E[\dot{X}^2(t)]^{1/2}$   
 $\sigma_3 = E[\ddot{X}^2(t)]^{1/2}$ 、 $\operatorname{erf}$ ：誤差関数

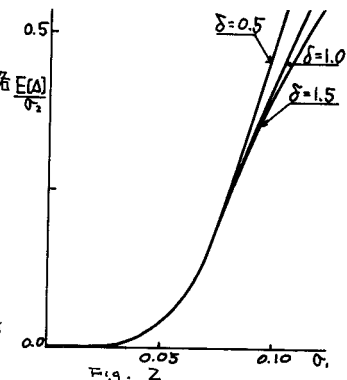
$$[k] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & -\sigma_3^2 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ -\sigma_3^2 & 0 & \sigma_3^2 \end{bmatrix}$$

修正した式(1)を $\eta^*(x)$ とすれば、 $\eta^*(0)$ と式(3)を用い、疲労破壊の概念を導入して、定常状態における累積損傷度 $\Delta$ の期待値を求めると、次のように表わされる。

$$E[\Delta] = \sigma_2 \int_0^{\infty} \frac{1}{\eta^*(x)} \left[ \frac{(1-d^2)^k}{(2\pi)^{1/2} d \sigma_1} \exp \left\{ \frac{-x^2}{2(1-d^2) \sigma_1^2} \right\} + \frac{x}{4\pi \sigma_1^2} \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{dx}{\sqrt{2} (1-d^2) \sigma_1} \right) \right) \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\sigma_1^2} \right\} \right] dx \quad \text{--- (4)}$$

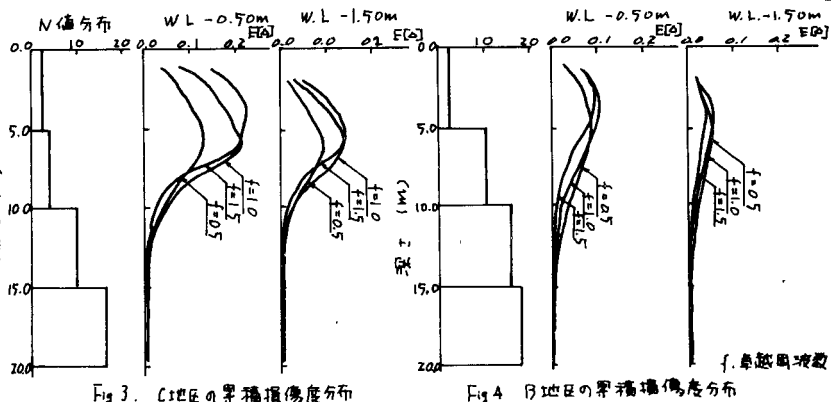
ここで、 $\alpha = \sigma_v^2 / \sigma_h^2$  と表わされ、 $\alpha$  はピークの分布状態を示す指標である。地盤内応力過程の特性を考慮すれば、式(4)は簡略化され、式(5)になり、修正  $\eta_0 \sim 2\%$  曲線における  $\delta$  値をパラメータとして数値計算を行えば、Fig. 2 が得られる。

$$E[\Delta] = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_h} \int_0^{\infty} \left( \frac{1}{\eta_0(x)} \right) \cdot x \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_h^2}\right] dx \quad (5)$$



4. 新潟地盤を対象とした解析結果：地盤の液状化現象により、大きな被害を被った新潟では、震災前後に地盤調査が行われており、集積されている<sup>2)</sup>。本項では、これらの資料より、被害激甚区（C地区）、被害軽微地区（B地区）の地盤条件を引用し、式(5)によって、累積損傷度を求めた。ここで、地盤内応力の推定については、地盤と層分割し、土岐博士<sup>3)</sup>の方法により、地表記録より、地盤内応力の分散値を求めた。また強震記録としては、液状化を生じた川岸町県管アレーナ群に設置されていたSMA Cによる記録を用いた。

Fig. 3, Fig. 4 はそれぞれ C地区, B地区における地盤状態と累積損傷度の分布を示したものである。ここで地盤の相対密度については Seed<sup>4)</sup>より引用した。これらによれば、新潟地区における液状化破壊の累積損傷度の分布は、深さ 6 ~ 7 m にピークを有していることが知られる。このことは、観測された現象とはほぼ一致している。また、液状化現象において、地下水位、地盤の卓越周期、相対密度が大きな影響を及ぼすことも示された。次に地盤動の非定常性を考慮するため、地震加速度記録  $\ddot{x}(t) = P f(t) g(t)$  と擬定常過程で近似し<sup>5)</sup>、逐別定常性を仮定して、累積損傷度の時間的変化を求めた。それによれば、新潟地区では、本手法による累積損傷度の期待値が 0.7 程度で液状化現象が生じたこと became 明らかになった。



それによれば、新潟地区では、本手法による累積損傷度の期待値が 0.7 程度で液状化現象が生じたこと became 明らかになった。

5. おわりに：本稿では、資料の都合上、新潟地盤における解析にとどめたが、現在他の地盤における解析を進めており、液状化現象と生じた地区の調査記録と照らし合わせて本手法の検証を行ない、有効性を高めるつもりである。

- 1) 柴田徹：飽和砂の液状化現象，第16回工機工学シンポジウム論文集，昭和46年 pp.55~62.
- 2) 新潟地震震害報告編集委員会：General Report on the NIIGATA Earthquake, 1964. pp.335~401.
- 3) 土岐憲三：地震記録による地盤内震度分布の推定，昭和47年11月，土木学会論文集 pp.25~32.
- 4) K. I. Seed and H. B. Seed: Cyclic Stress Condition causing Liquefaction Sand, Proc of A.S.C.E. 54.1, 1967 pp. 47~70.
- 5) 扇田弘行：地震時における最大地動の確率論的研究，昭和43.11 土木学会論文集 pp.1~4.