

九州大学工学部 正 員 山内豊聡

" 学生員 兵動正幸

" " 〇長山秀昭

1. まえがき 各種施設構造物を設計施工するに際して、飽和砂の液状化現象の検討ならびに予測は重要な課題である。地震時の液状化は、非排水条件下で砂に不規則な繰返しせん断応力が作用し、荷重サイクルの増加とともに過剰間げき水圧が累積しそれが初期の拘束圧に等しくなって発生すると考えられている。これを室内実験で再現することは非常に困難であるので、液状化の諸要因は地震時応力状態を理想条件で模擬することにより調べられてきた。ところで、これらの多くは一樣振幅荷重を繰返し加えるという方式で行なわれているため、液状化の判定に際して不規則なせん断を受ける実地盤にどのように関連づけ適用していくかということが問題になる。本報では、多質点系解析で求めた地盤せん断応力と室内実験結果をPalmer-Miner<sup>2)</sup>の仮説を導入することによって結合づけ、液状化予測を試みている。

## 2. 不規則外力の評価

2-1. 不規則外力の統計的性質 図-1(a)の不規則波形が平均値0の定常ランダム過程(正準過程)で、そのスペクトルが図-1(b)のような狭帯域過程である場合、その統計的な平均周波数つまり期待周波数 $\omega_0$ は次式で示される。

$$\omega_0^2 = \frac{\int_0^\infty \omega^2 S(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} \quad \text{--- (2.1)}$$

$$\text{また、} \quad \omega_0 = \omega_0 / 2\pi \quad \text{--- (2.2)}$$

$$\sigma^2 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega = R(0) \quad \text{--- (2.3)}$$

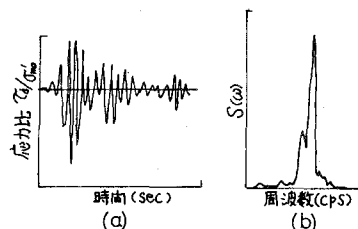


図-1 時系列領域から周波数領域への変換

2-2. 液状化に及ぼす不規則外力の影響 地盤せん断応力がランダム過程である場合に、液状化を一種の疲労破壊と考えることで液状化予測が容易になる。応力比振幅 $\tau_{a/\sigma'_{mo}}$ を $n$ 回受けたとき、土は $1/N$ に等しい液状化寿命を使い果たす。ここで $N$ は応力比振幅 $\tau_{a/\sigma'_{mo}}$ で液状化が起こる繰返し回数である。飽和砂が応力比振幅 $\tau_{a/\sigma'_{mo}}$ を $n_i$ 回( $i=1, 2, \dots$ )受けると、全体の液状化度は次式のようにになる。

$$D = \sum n_i / N_i \quad \text{--- (2.4)}$$

いま、応力比振幅を $a$ とすると、各ピークに対してその高さが $a$ と $a+da$ の間にある確率は $p(a)$ をピークの確率密度として $p(a)da$ で表わされるから、地震継続時間 $T$ においてピークの生じる期待回数 $n(a)$ は、

$$n(a) = \omega_0 T p(a) da \quad \text{--- (2.5)}$$

となる。振幅 $a$ の一つのピークは $1/N(a)$ の液状化度の増加を起す。 $a$ と $a+da$ の間にピークをもったすべてのサイクルによる液状化度の割合は、次式で与えられる。

$$n(a)/N(a) = \omega_0 T \frac{p(a)}{N(a)} da \quad \text{--- (2.6)}$$

全体的な期待液状化度 $E(D(T))$ は、すべての応力比振幅について式(2.6)を積分したものである。すなわち、

$$E(D(T)) = \omega_0 T \int_0^\infty \frac{p(a)}{N(a)} da \quad \text{--- (2.7)}$$

この式を計算するには、ピークの確率分布 $p(a)$ と $N(a)$ を与える実験曲線が必要である。いま、 $\lambda(t) = \tau_{a/\sigma'_{mo}}$ が正規ガウス過程で、図-2の $(\tau_{a/\sigma'_{mo}}) \sim N$ 曲線が図-3のように両対数係数上で次式のように直線近似化できるとすれば、

$$N \cdot (\tau_{a/\sigma'_{mo}})^b = C \quad b, C: \text{定数} \quad \text{--- (2.8)}$$

式(2.7)は容易に計算できる。 $\lambda(t)$ が正規であれば、そのピークは次式のようなRayleigh分布をもつ。

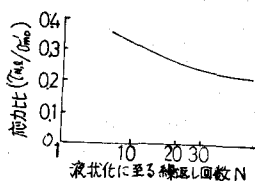


図-2  $(\tau_{a/\sigma'_{mo}}) \sim N$  曲線

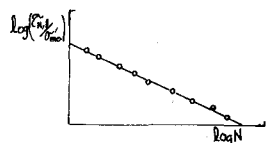


図-3 直線近似化

$$P(\lambda) = \frac{\lambda}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\lambda}{\sigma^2}\right) \quad \text{---(2.9)}$$

式(2.8)と(2.9)を(2.7)に代入すると、次式が得られる。

$$E(D(T)) = \frac{\lambda T}{\sigma^2} \int_0^\infty \lambda^{b+1} \exp\left(-\frac{\lambda}{\sigma^2}\right) d\lambda \quad \text{---(2.10)}$$

$$= \frac{\lambda T}{c} (\sqrt{2\pi})^b \Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right)$$

式(2.10)を計算することにより液状化度が求まる<sup>4)</sup>。この結果は、累積した液状化度がサイクルの期待値 $\lambda T$ に直線的に比例することを示している。また、液状化度は応力の時間変化の偏差のならびに実験定数 $b$ と $c$ に依存することも明らかである。図-4は、以上を考慮して液状化度を判定するフローチャートを示すものである。

### 3. 解析方法

3-1. 解析条件 解析の対象として図-5に示すような地盤モデルを設定した。厚さ30mの均質な地盤で、地表面と地下水面が一致し、地震時に表層全体は非排水で完全飽和状態が保たれるものとしている。表-1に物性値を示す。入力地震波としては、図-6に示すEl Centro地震波(N-S成分)を使用している。

3-2. 応答解析 表層を10層に分けせん断型多質点系振動を考え、剛性率、減衰定数<sup>5)</sup>についてはひずみ依存性をもたせている。0.5sec間隔で一定値ひずみに収束するまで19レシジョン操作を行なう等価線形解析を用いている。

4. 結果および考察 図-7に層2, 5, 9の応力比, ひずみおよびパワースペクトルを示す。各層の応力比波形より、液状化は上層から進行するのが容易に推察される。また、図-6の地震波形では2sec付近で最大加速度を示しているが、応力比およびひずみは下層部(層2)では4sec付近で最大、中層部(層5)では応力比とひずみの最大値の生ずる時間にずれが生じ、上層部(層9)では2sec付近で両者とも最大値を示している。これは、剛性率と減衰定数がひずみ依存性を持つことに起因すると考えられる。次に、各2の1/2パワースペクトルより期待周波数を算出したところ、1.2cps~2.2cpsの範囲であった。これは、上層部に行くにつれ応力比波形に高周波成分が含まれていくことによる。次に室内実験曲線を直線近似して式(2.8)の定数 $b, c$ を計算した結果 $b=5.845$ ,  $c=0.052$ であった。先の $\lambda, \sigma$ とこの $b, c$ を式(2.10)に代入して液状化度を求めた結果が、図-8である。 $E(D(T))=1$ のとき完全液状化であるから、このゆりい飽和砂層では上層部10m位までが液状化層と考えられる。

### 参考文献

- 1) A. Palmgren: Die Lebensdauer von Kugellager, ZVDI, Bd. 69, Hett. 14, Apr., 1924, PR 339-341.
- 2) M.A. Miner: Cumulative Damage in Fatigue, Trans. ASME, Vol. 67, 1945, PP. A159-A164.
- 3) S.O. Rice: Mathematical Analysis of Random Noise, Bell System Tech., Vol. 23, 1944, PP. 282-332.
- 4) S.H. Crandall & W.D. Mark: Random Vibration in Mechanical Systems, M.I.T. Academic Press, 1963, PP. 117-118.
- 5) 工機工学会編: 土と構造物の動的相互作用, 1973, PP. 37-39.

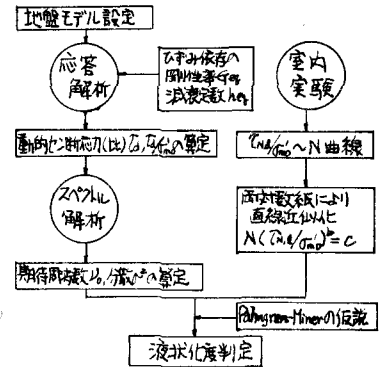


図-4 液状化度判定のフローチャート

表-1 物性値(新築砂)

| $e_{max}$ | $e_{min}$ | $G_s$ | $D_r$ | $k_0$ |
|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| 1.01      | 0.53      | 2.63  | 55%   | 0.5   |

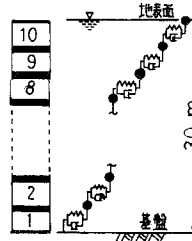


図-5 地盤モデル

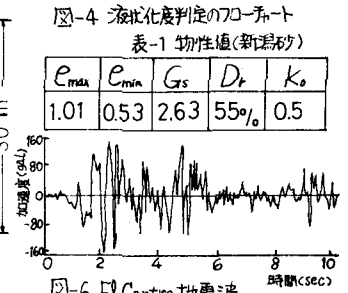


図-6 El Centro地震波

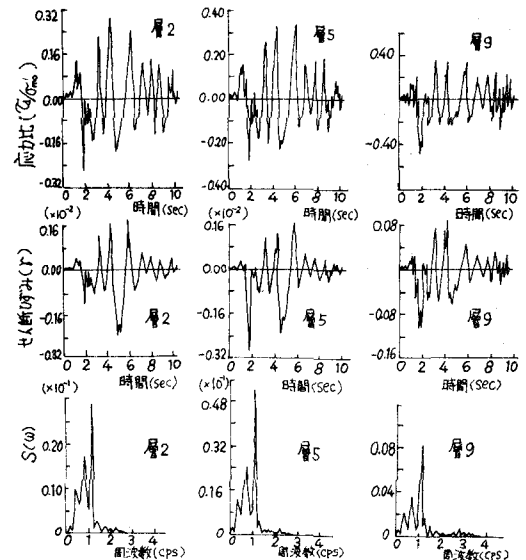


図-7 各層の応力比, ひずみ, パワースペクトル

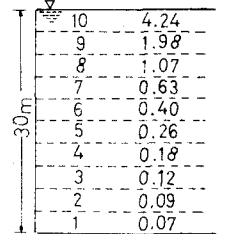


図-8 液状化度