

九州大学工学部 正員 山内豊隆
 " 学生員 〇兵動正幸
 " 正員 後藤忠之輔

1. まえがき

新島地震以来、多くの実験的研究により飽和砂の液状化機構の解明がなされ、今日その成果が設計に供されるに至った。一般に液状化は地震時において、土中要素が非排水状態で繰り返しせん断を受け、間げき水圧が上昇する現象として捉えられるが、既往の実験結果に基づき間げき水圧上昇量を求めるためには、せん断応力の大きさが既知でなければならぬ。しかるに、地震時の液状化過程におけるせん断応力は、間げき水圧上昇に伴い振動減衰が変化するため一義的に決定できない。また、これまでの実験のほとんどが一樣振幅のせん断応力を与えたものであり、その結果をいかにして不規則外力に適用するかということも問題となる。本研究は、このような現状を踏まえてまず不規則せん断応力と処理する方法を考え、さらにその方法を用いて間げき水圧上昇を考慮した液状化過程の振動モデルを作成し、数値解析により液状化過程の把握を行うものである。

2. 不規則外力に対する間げき水圧上昇量の評価

液状化過程の間げき水圧上昇量を定量的に求めるために、振動三軸試験や動的単純せん断試験が行われているが、不規則外力を取り扱った結果は少ない。近年 Sherif らが繰り返しせん断応力振幅における各サイクルの間げき水圧上昇量の定式化を行い、それが不規則外力に対しても適応可能であることを実験的に確認したことが注目される。その式は次のとおりである。

$$(\Delta U_N^*)_p = (1 - U_N^*) \cdot C_1 (N_{eq})^p / \{ (N_{eq})^p - C_2 \} \cdot (T_{ip} / \sigma_v')^\alpha, \quad (1)$$

$$(N_{eq})_p = \sum_{i=1}^N (T_{ip} / T_{Np})^\alpha \quad \dots\dots\dots (1) \quad \text{ここに、} T_{ip}, T_{Np}: \text{それぞれ} i \text{ と } N \text{ サイクルのせん断応力振幅、} N_{eq}: N \text{ サイクルの等価繰返し回数、} U_N^*, \Delta U_N^*: N \text{ サイクル目の間げき水圧上昇率、} C_1, C_2: \text{定数、添字 } p: \text{応力形状の正則領域を意味し、原則として} i \text{ と } N \text{ に等しい。}$$

式(1)の計算を遂行するためには不規則外力の一定率の振幅が必要であり、各波形に位相差を伴う地盤の振動問題においてこの式を用いることは容易ではない。

そこでここでは次のような方法を試みた。まず対象とする不規則せん断応力の時系列過程 $\tau(t)$ を適当な時間間隔 Δt で区切り、この Δt を一周期として各周期の等価せん断応力を次式のように定義する。

$$T_{eq} = C \sqrt{\int_0^{\Delta t} \tau^2(t) dt} / m, \quad t_i \leq t \leq t_i + \Delta t, \quad t_i = j \Delta t \quad (j=0, 1, 2, \dots) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 C : 定数、 m : テタ函数。次に、式(2)の等価せん断応力を以下の方法で実験結果と対応させ間げき水圧を求める。図-1は単純せん断試験による液状化に至るまでの応力比 τ/σ_v' (τ : せん断応力、 σ_v' : 初期有効水圧) と繰り返し回数 N_e の関係²⁾ であり、この関係は次のごとく定式化される。

$$N_e = 0.0033 / (\tau/\sigma_v')^{4.32} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、同試験で間げき水圧 u の上昇過程は図-2のようになり、次式で表わされる³⁾

$$u/\sigma_v' = 1/2 + 1/\pi \cdot \sin^{-1} \{ 2(N/N_e)^{1/2} - 1 \} \quad \dots\dots\dots (4)$$

さてここで、式(2)における第 i 番目の等価せん断応力 $(T_{eq})_i$ を式(3)に代入すると N_{ei} が求められる。この操作を i サイクルから N サイクル

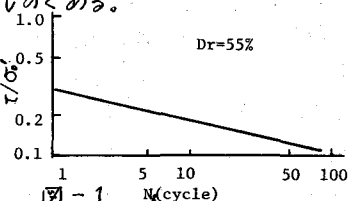


図-1 $N_e(\text{cycle})$

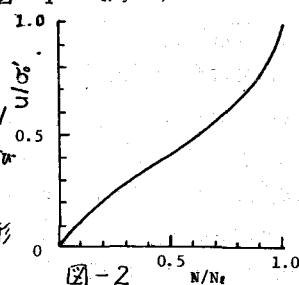


図-2 N/N_e

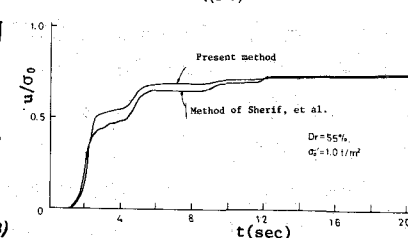
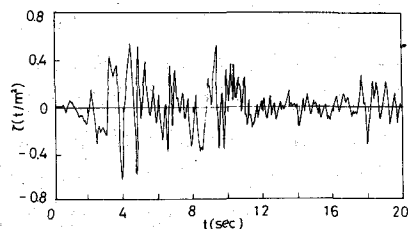


図-3

まで行くと式(4)の N/N_0 は $\sum_{i=1}^N (1/N_{0i})$ で評価され、同式から時刻 t における間げき水圧が求められる。図-3は、不規則せん断応力を受けた場合の間げき水圧上昇過程を Sherif らの方法(式(1))によるものと、本法によるものを比較したものである。本法では式(2)の $C=0.82$ 、 $\Delta t=0.5$ sec とした場合に図の曲線が得られ、この曲線は実験の検証を伴う Sherif らの式による曲線と初期に幾分の違いがあるものの、応力波形の顕著な変化に対して同様の傾向を示している。したがって以下の解析では式(2)の C を 0.82 と定め、本方法を用いることとする。

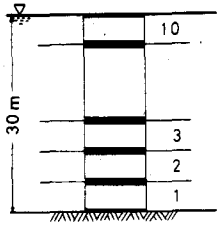


図-4

3. 液状化過程の振数モデル

飽和砂地盤を図-4のような集中質量系に置換し、基盤に white noise を入力する。各層の質点はそれぞれ Voigt 系によって結合されている。バネ定数 K は地盤の剛性率 G によって次のように表わされる。 $K=G/\Delta H$ (5) 式中 ΔH は分割された層厚であり、 G は相対密度、せん断ひずみ、有効応力の関数形として次式(6)で与えられる。 $G(\text{kg/cm}^2)=67.27 K_0 \sqrt{(1+2K_0) \sqrt{3} \cdot \sigma_v}$ (6) ここに、 K_0 : 相対密度とせん断ひずみに依存するパラメータ、 K_0 : 静止土圧係数、 σ_v : 鉛直有効応力。また、減衰定数はひずみ依存性のみを考慮する。初めに系の傳形固有値解析を行い、固有周期を求める。1次の固有周期を式(2)の Δt としこの固有周期毎に間げき水圧上昇量を求め、さらに G と減衰定数のひずみ依存性もこの時間間隔の中で等価線形法を用いて評価する。間げき水圧は各サイクルの終了時に上昇すると仮定し、その時点で剛性率の値が新たに変更されるものとする。その際、有効応力は解の安定上初期値の 0.1% と下回らないとする。

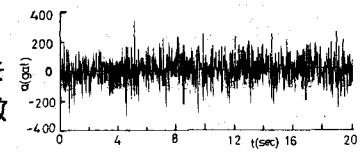
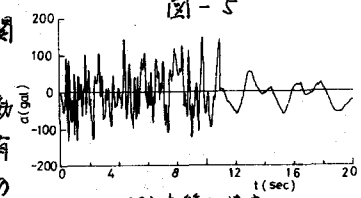
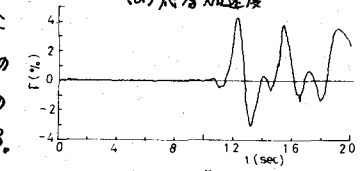


図-5



(a) 応答加速度



(b) せん断ひずみ

4. 数値計算

計算対象の地盤条件は、砂の比重 $G_s=2.65$ 、間げき比 $e=0.81$ 、相対密度 $D_r=55\%$ 、 $K_0=0.5$ である。図-6 (a), (b) は、図-5の入力に対する最上層(層10、図-4参照)の応答加速度ならびにせん断ひずみである。応答加速度は次第に長周期化しある時点より急減するが、逆にせん断ひずみはその時点より急増する現象が認められる。一方、間げき水圧の上昇量は図-7 (a) のように深さ方向に分布し、最上層が完全液状化に至っている。同図(b)に最上層が液状化に至るまでの u/σ_v' の上昇過程を示している。これを先の応答波形と対比すると、 u/σ_v' の値が 1.0 になった時点で応答波形が急変していること、また間げき水圧上昇過程の途上においては応答波形にさほどの変化がないことが認められる。しかしながら、地中せん断応力の最大値 τ_{max} を次式の応力低減係数で評価すると、間げき水圧上昇を考慮した場合としない場合とで図-8のように明らかな差異が現われる。 $\tau_{max}=82/9 \cdot \Delta \sigma_{max} \cdot K_0$ (7) ここに、 γ : 土の単位重量、 z : 深さ、 g : 重力加速度、 $\Delta \sigma_{max}$: 地盤最大加速度。図-9は各サイクルで記録されたせん断応力と内部まさつ角 $\phi=30^\circ$ ($K_0=1-\sin \phi=0.5$ より算定) における抵抗せん断応力の関係を示している。プロットが K_0 line を越えた時点で液状化に至っている。

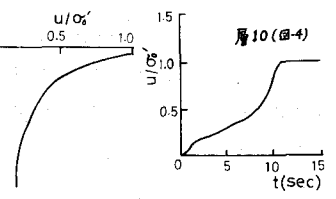
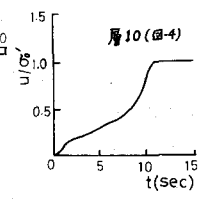


図-7 (a)



(b)

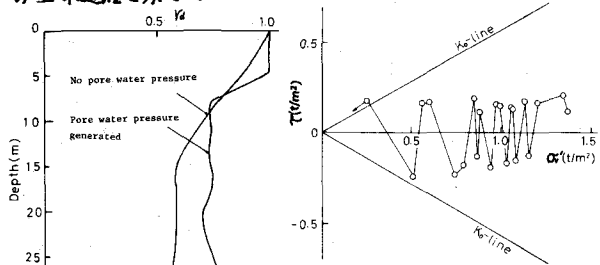


図-8

図-9

図-9は各サイクルで記録されたせん断応力と内部まさつ角 $\phi=30^\circ$ ($K_0=1-\sin \phi=0.5$ より算定) における抵抗せん断応力の関係を示している。プロットが K_0 line を越えた時点で液状化に至っている。

参考文献 1) Sherif, et al.: Soils and Foundations, 18-4, (1978), 19/30. 2) Lee, et al.: Proc. ASCE, 100-GT4, (1974), 387/406. 3) Seed, et al.: Proc. ASCE, 102-GT4, (1976), 323/346. 4) 土質工学会編; 土と構造物の動的相互作用, (1973), 37/39.