

九州大学工学部 学生員 兵動正章
 “ 正員 山内豊聡

1. まえがき

地震時における飽和砂地盤の液状化を推定するために、これまで室内実験結果と応答解析結果を直接対比する方法がとられてきた。しかしながら、この方法によれば液状化過程における地盤の振動性状の変化に基づく応力状態を的確にとらえることは不可能である。筆者らは以前、間げき水圧上昇に伴う振動過程の変化を把握するための解析を行なった¹⁾。さらに Finn, et al.²⁾ により、定数の応力・ひずみ依存性を考慮した有効応力法が開発され、液状化過程のより正確な解析が可能となった。本文は、この有効応力法を解析の基礎とし、従来広く行われてきた非排水の試験結果を解析に組み込むことにより液状化過程の追跡を行ない、その結果得られた応答波形の特性、stress path、地表加速度と地中せん断応力の関係などについて述べるものである。

2. 解析方法

2.1 解析条件 砂地盤のせん断振動を対象とし、以下の事項を解析に取り込む。

(i) 砂の相対密度 D_r と剛性率 G の関係³⁾

(ii) 剛性率の応力、ひずみ依存性および減衰定数 H のひずみ依存性³⁾ (図-1, 2 参照)

$G(\text{t/m}^2) = 69.27 K_2 \sqrt{\sigma'_m}$ (1) ここに、 K_2 はひずみに依存するパラメータ、 σ'_m : 平均有効応力。

(iii) 応力比 τ/σ'_0 と液状化に至るまでの繰返し回数 N_e の関係。

$N_e = 0.015 Z (\tau/\sigma'_0)^{5.84}$ (2) ここに、 Z : せん断応力、 σ'_0 : 初期有効拘束圧。

式(2)は、繰返しねじり三軸試験により $D_r = 55\%$ の新潟砂について得た実験値⁴⁾ を両対数紙上において図-3のように直線近似したものである。

(iv) 液状化過程における間げき水圧比 u/σ'_0 ($\equiv v_u$) と繰返し回数比 N/N_e ($\equiv v_N$) の関係。 $v_u = 1/2 + 1/\pi \cdot \sin^{-1}(2\sqrt{N} - 1)$ (3) ここに、 u : 過剰間げき水圧、 N : 地震開始から所定時間までの繰返し回数。式(3)は非排水試験における間げき水圧上昇傾向を Seed et al.⁵⁾ が定式化したものである。

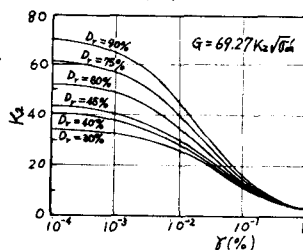


図-1

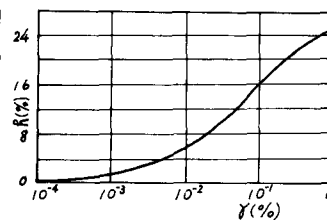


図-2

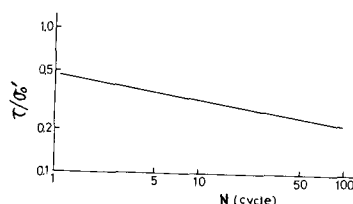


図-3

2.2 解析手順

(i) 対象地盤を図-4のようにモデル化し、振動方程式をたてる。

(ii) 綿形の固有値解析から系の基本周期 T_1 (sec) を求め、これを1サイクルの所要時間とし、時間とサイクル数との関係にこの値を用いる。

(iii) せん断ひずみの時系列応答結果の実効値 (root mean square) を各サイクル毎にとり、各サイクルでこの実効値と剛性率、減衰定数との対応関係が満足されるまで計算を繰返す (非線形性の考慮)。

(iv) (iii) で求められた各サイクルにおけるひずみの実効値と剛性率の種からせん断応力を計算し、これを初期有効拘束圧で除して応力比 τ/σ'_0 を求める。各層、各サイクルにおける τ/σ'_0 を式(2)に代入し N_e を決定する。この操作は1サイクル毎に行なうので $N = 1$ であり、その結果 $\Delta N = 1/N_e$ と仮して式(3)から各サイクルの発生間げき水圧を求めることができる。なお、間げき水圧発生は各サイクル終了時点と仮定²⁾

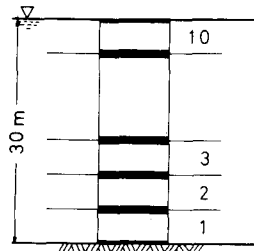


図-4

3. 計算結果および考察

厚さ 30m の飽和砂地盤を図-5 に示すように 10 層に等分割した集中質量系に置換した。地盤は均質で $D_r = 55\%$ とし、側方に $K_0 = 0.5$ で拘束されているものと仮定した。基礎加速度として white noise (0.1~20Hz, 最大加速度 380 gal) を入力した。図-5 (a), (b) は、間げき水圧の時間の上昇量と最終的な深さ方向分布を示すものである。地震開始後約 1 sec で最上層が完全液状化状態になっていることが認められる。

この最上層における応答波形を図-6 (b)~(d) に示す。いずれも完全液状化時点付近から急激な変化が現われ、以後著しく長周期化している。本解析では解の安定上有効応力に下限値(初期値の 0.1%)を設けているが、間げき水圧が上昇し有効応力がこの値に等しくなると同時に地盤は自由振動の挙動となるようである。さらに、液状化過程における振動性状の変化をみるために、図-6 (b) の応答加速度波形を 5 sec 毎に 4 分割し、それぞれのパワースペクトルを求めて図-7 に示した。時間の経過とともに次第に長周期成分の卓越が顕著になり、完全液状化状態においてはほぼ 2 つの周波数成分のみで繰返していることが認められる。次に、液状化層(最上層)の液状化に至るまでの stress path を図-8 に描いた。ただし、線形の固有値解析における基本周期が約 0.5 sec であったので、ここでは 1 周期を 0.5 sec としている。せん断応力の大きさは 1 サイクル中の全データの root mean square で表わし、符号はその加算値による。図の経路は 2 サイクル目に K_0 -line を越え、液状化に至ったことを示している。従来、地表最大加速度 a_{max} と地中最大せん断応力 τ_{max} を関係付けるものとして次式⁷⁾が用いられてきた。

$\tau_{max} = 8Z/g \cdot a_{max} \cdot \gamma_d \cdots (4)$ ここに Z : 土の単位体積重量、 Z : 深さ、 g : 重力加速度、 γ_d : 応力減衰係数

式(4)の γ_d は、これまで多くの解析結果に基づき種々の値として求められてきたが、本解析でも求めたので図-9 に示す。図中には、間げき水圧上昇を考えた場合と考えない場合についてそれぞれ示されている。

式(4)の γ_d は、これまで多くの解析結果に基づき種々の値として求められてきたが、本解析でも求めたので図-9 に示す。図中には、間げき水圧上昇を考えた場合と考えない場合についてそれぞれ示されている。

参考文献: 1) 山内地: 第 3 回土質学会年次学術講演会講演集, Ⅲ, 1976, 249/250. 2) Finn, et al.: Proc. ASCE, Vol. 102, No. GT 8, 1976, 841/844. 3) 土質学会編: 土と構造物の動的相互作用, 1973, 37/39. 4) 山内地: 第 1 回土質工学研究発表会講演集, 1976, 327/330. 5) Lee, et al.: Proc. ASCE, Vol. 100, No. GT 4, 1974, 387/406. 6) Seed, et al.: Proc. ASCE, Vol. 102, No. GT 4, 1976, 323/346. 7) Seed, et al.: Proc. ASCE, Vol. 97, No. SM 9, 1971, 1249/1274.

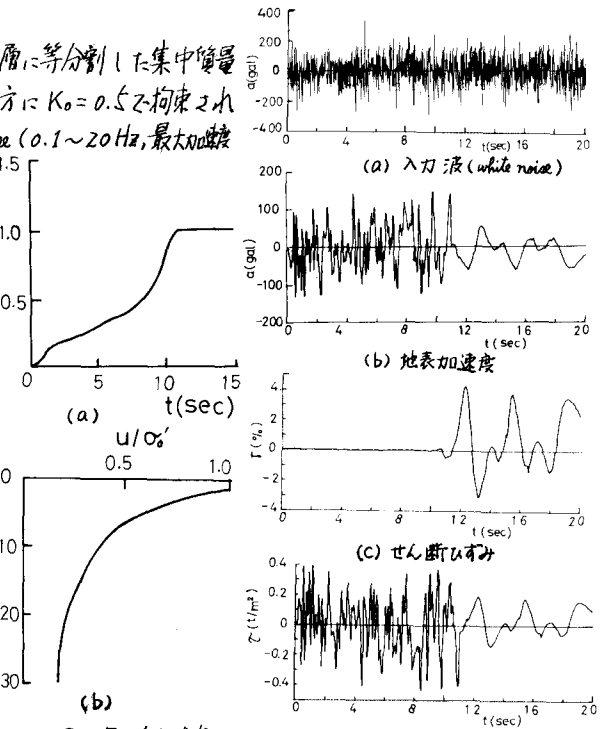


図-5 46%の分布

図-6 (d) せん断応力

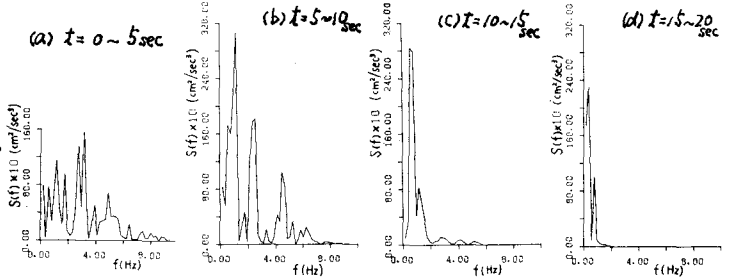


図-7 パワースペクトル

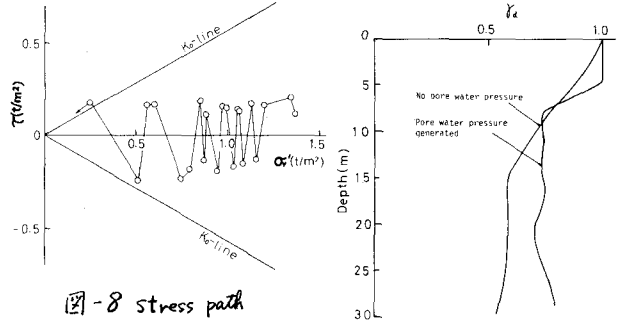


図-8 stress path

図-9 γ_d の分布