

九州大学工学部 学生員 〇 兵動正章
 " 正員 山内豊聡
 " 学生員 長山秀昭

1. 手まえき

今日までの飽和砂における多くの動的実験結果から、液状化に関する種々の要因が明らかにされてきた。しかしながら、地震時に実際地盤で起こる液状化現象の全容を室内実験で把握することは不可能なことであり、その目的のためには実験により求められた個別の要因を総合的に結合した解析を行うことが必要と考えられる。本報告は、過去に振動三軸試験、単断せん断試験などから得られた成果を地震応答解析に取り入れ、水平な飽和砂層地盤を対象に、液状化発生時の地盤の挙動を推定したものである。

2. 解析方法

2.1 解析条件 ここでは砂地盤のせん断振動を対象とし、実験で得られた以下のよう砂の動的諸性質と解析に取り入れている。

(i) 砂の相対密度 D_r と剛性率 G との関係。

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

$$G(\text{t/m}^2) = 69.27 K_z \sqrt{\sigma'_m} \quad \text{----- (1)}$$

K_z : γ に依存するパラメータ, σ'_m : 平均有効応力

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

$$N_e = 0.0033 / (\tau/\sigma'_m)^{0.52} \quad \text{----- (2)}$$

式(2)は、Seed らが単断せん断試験によって $D_r = 50\%$ の砂について得た図-3の実験曲線²⁾を、両対数紙上において直線近似したものである。

(iv) 液状化過程における間隙水圧比 u/σ'_m ($\equiv r_u$) と繰返し回数比 N/N_e ($\equiv r_N$) の関係²⁾

$$r_u = 1/2 + 1/\pi \cdot \sin^{-1}(2 r_N^{1/3} - 1) \quad \text{----- (3)}$$

u : 過剰間隙水圧, N : 地震開始から所定時間までの繰返し回数

2.2 解析手順

以下、手順を簡潔書きで示す。

(i) 対象地盤をモデル化し、振動方程式を立てる。ここでは図-4のような集中質量モデルを採用し、次のような振動方程式を立てた。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\ddot{u}_g \quad \text{----- (4)}$$

$\{x\}, \{\dot{x}\}, \{\ddot{x}\}$: 応答加速度, 速度, 変位, $\ddot{u}_g$: 基盤加速度

(ii) 線形の固有値解析から系の基本周期 T_b (sec) を求め、これを1サイクルの時間とする。

(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、これを有効せん断ひずみと名付け、各サイクルで有効せん断ひずみと剛性率 G 、減衰定数 γ との対応が満足されるまで計算を繰返す。(定数の非線形性の考慮)

(iv) (iii) で求められた各サイクルにおける有効せん断ひずみと剛性率の積からせん断応力を計算し、これを初期平均有効応力 σ'_{m0} で除して応力比 τ/σ'_m を求める。各層、各サイクルにおける τ/σ'_m を式(2)に代入し N_e を決定する。この操作は1サイクル毎に行はうので $N = 1$ であり、その結果 $r_N = 1/N_e$ となって式(3)から各サイクルにおける発生間隙水圧 u を求めることができる。

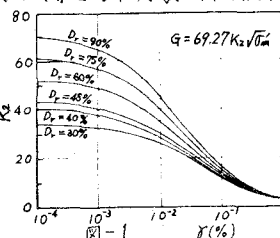


図-1

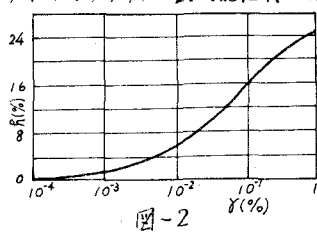


図-2

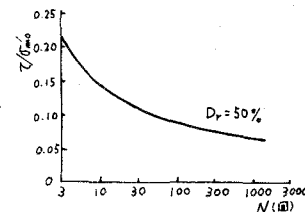


図-3

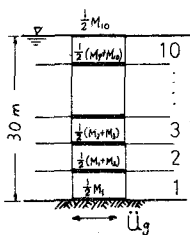


図-4

(V) 過剰間隙水圧は、各サイクル終了時点で発生するものと
し、水圧発生前後に次の関係式が成立つと仮定する。

$$[M]_1 \ddot{x}_1 + [C]_1 \dot{x}_1 + [K]_1 x_1 = [M]_2 \ddot{x}_2 + [C]_2 \dot{x}_2 + [K]_2 x_2, \dots \quad (5)$$

式中、添字 1, 2 はそれぞれ水圧発生前、発生後の状態を示し、式
(5) の関係は水圧発生による $[K]$, $[C]$ の変化に対して加速度の
みは変化し、速度、変位はそのまゝの状態を保つことを意味して
いる。

3. 数値計算

厚さ 30 m の飽和砂地盤を対象とし、これを図-4 に示すよう
に 10 層に分割したモデルに置換してせん断振動を取り扱った。地
盤は均質で相対密度を 50% とし、土中要素は側方に $K_0 = 0.5$ の
状態を拘束されているものと仮定した。基礎入力に white noise
(0~20 Hz, 最大加速度 250 gal), El Centro 地震波 (全振幅を
1/2 に低下), 正弦波 (2 Hz, 50 gal) の 3 種を取り、それぞれにつ
いて液状化過程における振動性状の変化を追跡した。図-5 は、
white noise 入力の場合における応答結果である。この場合、図
-6 (a), (b) に見られるように、最上層が 9.0 秒において液状化に
至っているが、図-5 (b), (d) のように加速度、せん断応力はこの
時点以後ほぼ消失している。この特徴は新潟地震の際に液状化
地点で得られた加速度波形 (図-7) にも現われており、液体が
せん断波を伝播しないという事実を裏付けている。また、図-5
(c) のようにひびき量は液状化時点

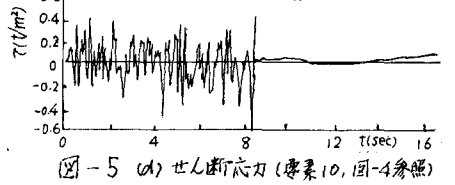
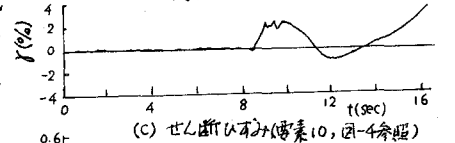
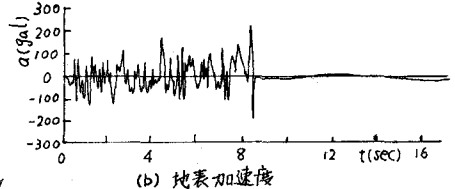
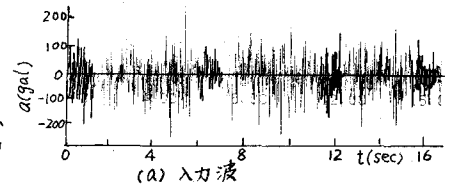


図-5 (d) せん断応力 (要素10, 図-4参照)

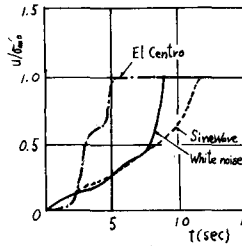
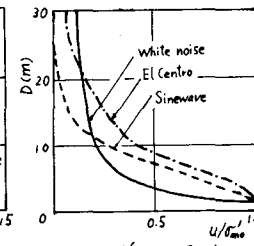
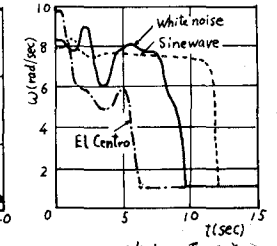


図-6 (a) $a/g_{max}-t$



(b) a/g_{max} の深さ分布



(c) 固有値の時間変化

付近から急増しているが、この傾向は応力制御のせん断試験結果
と類似している。次に液状化過程において地震波は播の振幅が変
化していく様子は、図-6 (c) の固有値 (1 次) の変化から見るこ
とができる。最後に、3 種の入力波に対する液状化層の Stress path
を図-8 に描いた。それぞれ

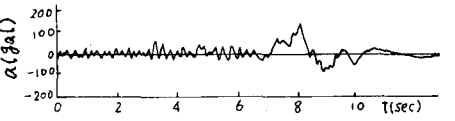
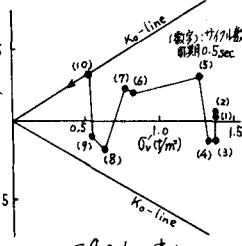
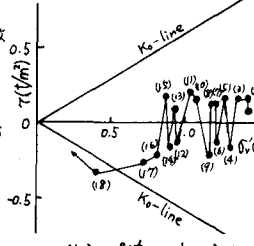


図-7 新潟地震波 (1964, 川崎町 Pt. E-W)

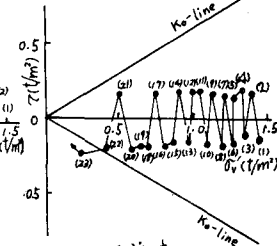
が独特な経路をたどることが
示されているが、いずれも K_0 -
line を越えた時点において
液状化が起っていることは、
図-6 との対応により明らか
である。



(a) El Centro 波入力



(b) white noise 入力



(c) 正弦波入力

図-8 stress path

<参考文献>

- 1) 土質工学会編; 土と構造物の動的相互作用, 1973, PP. 37~39.
- 2) Seed, et al.; Pore water pressure changes during soil liquefaction, Proc. ASCE, Vol. 102, No. GT4, 1976, PP. 323~346.
- 3) Finn, et al.; Seismic response and liquefaction of sands, Proc. ASCE, Vol. 102, No. GT8, 1976, PP. 841~856.