

東海大学工学部

正員 矢野正幸

九州大学工学部

〃 山内豊聡

〃

〃 後藤恵之輔

1. まえがき

近年、地震時の飽和砂地盤の挙動を把握するために、液状化を考慮した数値解析がなされるようになってきた。筆者らも、前報^(1,2)において液状化過程における間げき水圧の上昇と消散、間げき比の変化などの現象を含めた解析モデルを提案し、いくつかのケーススタディを行った。しかし、これまでの数多くの研究が砂地盤そのものを対象としたものであり、入力地震波の選定にはさほどの考慮がなされていないようである。一般に、入力地震波として El Centro 波や Taft 波などのように地表付近で得られた記録が用いられている場合が多い。現実には飽和砂地盤と境をなす基盤の性質は様々であると考えられるので、ここで軟質から硬質まで数種の基盤と想定し、基盤における地震波を作成してみた。すなわち、同一のパワーで周波数帯域の異なるホワイトノイズを作成し、それぞれを入力して表層地盤の液状化傾向を探った。また、実際の地震波である El Centro 波についてもホワイトノイズと同一のパワーに修正し比較を行った。

2. 入力地震波の作成

基盤における地震波は、基盤が軟質なほど長周期成分が多いと考えられる。そこで基盤の硬さにしたがって図-1(1)~(4)に示すバンド幅 2 Hz のホワイトノイズをシミュレートした。また、比較のために(5)の 0~10 Hz のホワイトノイズと(6)の El Centro 波による検討も行った。これらの地震波はすべて同一のパワーを有するものがある。ホワイトノイズのシミュレーションは次式⁽³⁾によった。
$$x(t) = \sum_{k=1}^N a_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad \cdots (1)$$
ここに、 $x(t)$: 定常確率カウス過程、 a_k : 平均値 0 の標準偏差 σ_k ($\sigma_k^2 = 4S_x(\omega_k) \Delta\omega$) のガウス確率過程であり、 $k=1, 2, \dots, N$ に対して独立変数、 ϕ_k : a_k と独立で $0 \sim 2\pi$ まで一様分布変数、 $S_x(\omega)$: $x(t)$ のパワースペクトル密度関数、 ω : 円振動数、 t : 時間。

3. 液状化過程の解析モデル

飽和砂地盤を図-2のような集中質量系に置換し、基盤入力を与えせん断振動を取り扱う。各層の質点はそれぞれ Voigt 系に結合され、バネ定数は地盤の剛性率によって表わされる。地盤の剛性率は初期に相対密度と拘束圧によって各層それぞれに与えられ、加振時の液状化過程においては、土中のひずみと間げき水圧に応じて変化させる。減衰定数についてはひずみ依存性のみを考慮する。次に液状化過程における間げき水圧上昇量のとり方について述べる。通常の非排水繰り返しせん断試験から、液状化に必要な応力比で σ'_v と繰り返し回数 N_d の関係が得られる。この関係は両対数紙上において図-3のように直線的になる。この関係を相対密度の異なる状態まで拡張して定式化すると次のようになる。

$$N_d = 0.0033 \cdot D_r / 50 / (\tau / \sigma'_v)^{4.32} \quad \cdots (2)$$

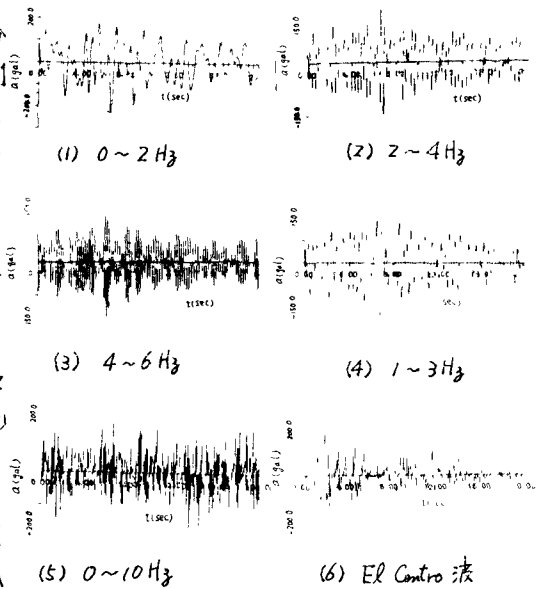


図-1

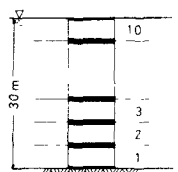


図-2

また、間びき水圧の上昇過程は平均的に図-4のようになり、次式⁴⁾で表わされる。

$$u/\sigma'_0 = 1/2 + 1/\pi \cdot \sin^{-1} \{ 2(N/N_0)^{1/0.7} - 1 \} \cdots (3)$$

これらは一様振幅荷重載荷による実験結果であるが、以下の方法によりランダムな外力に対応させる。ランダムな応答せん断応力 $\tau_i(t)$ を適当な時間間隔 Δt で区分し、この Δt を1周期として各周期の等価せん断応力と次式で求める。

$$\tau_{eq} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i(t)^2} / m, \quad t_1 \leq t \leq t_1 + \Delta t, \quad \tau_i = j \Delta t \quad (j=1, 2, \dots) \cdots (4)$$

こゝで式(4)における各項目の等価せん断応力 τ_{eq} を式(2)の τ に代入すると N/N_0 が求められる。この操作を1サイクルから8サイクルまで行くと、式(3)の N/N_0 は $N/N_0 = \sum_{i=1}^8 (1/N_{eq,i})$ と評価され、同式から時刻 $t = 8\Delta t$ における間びき水圧上昇量を得ることが出来る。

4. 数値計算

解析の対象地盤は、厚さ30mの均質な飽和砂地盤であり、物性値は比重 $G_s = 2.63$ 、初期相対密度 $D_r = 50\%$ 、静止土圧係数 $K_0 = 0.5$ である。まず固有値解析により1次固有周期 $T_1 = 0.5 \text{ sec}$ (2Hz) が得られたので、1周期を $\Delta t = 0.5 \text{ sec}$ とした。この地盤に図-1に示されるそれぞれの地震波を入力するのであるが、その意味づけは次の通りである。(1)の地震波は、地盤の固有振動数より低い周波数成分のみを含み、(2)、(3)の地震波は逆に高い周波数成分から成る。(3)の方が(2)よりも地盤の固有振動数から離れた周波数成分から成っている。また、(4)の波は固有振動数より高低両側の成分と同等に含み、(5)は高周波成分の方が多い波である。(6)のEl Centro波は、そのパワー・スペクトルが図-5に示されるように、比較的低周波成分の多い波である。

これらの地震波を用いて解析を行った結果を図-6に示す。図は、地震継続時間中に上昇した間びき水圧の地盤内での分布を示したものである。 $u/\sigma'_0 = 1.0$ で液状化が定義されるが、こゝでは解の安定上 $u/\sigma'_0 = 0.95$ を上限とし、この値を示すときを液状化としている。図-6において、0~2Hz、2~4Hz、4~6Hzの波が入力されたそれぞれの結果と比較すると、0~2Hzの場合に最も液状化が進んでおり、次いで2~4Hz、4~6Hzの順になっていることが認められる。亦即ち、このことは、液状化過程に地盤が軟化し固有振動数が低下していくため、低周波成分を多く含む入力波の方が応答量を大きくしていることを意味している。現実には液状化が軟らかい沖積層上の砂地盤に多く発生していることもこの結果と関連あるものと思われる。また、0~10HzのホワイトノイズとEl Centro波を入力した結果も図-6に示している。両者の液状化傾向をみると、前者が1~3Hzと2~4Hzの結果のほぼ中間にあるのに対し、後者は液状化の度合いさらに著しく、0~2Hzと1~3Hzの結果の中間付近に位置しているようである。

参考文献

- 1) 山内、豊勲、後藤：昭和53年度土木系西部支部研究発表講演集，pp.125-126，1979。
- 2) 山内、豊勲、後藤：第4回土木工学研究発表会発表講演集，pp.1309-1312，1979。
- 3) 星谷勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版，pp.45-66，1974。
- 4) Seed et al.; Proc. ASCE, Vol.102, No. GT4, pp.323-346, 1976。

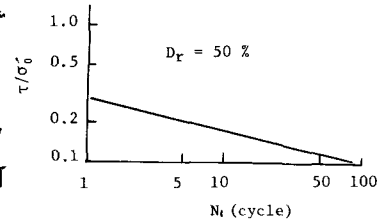


図-3

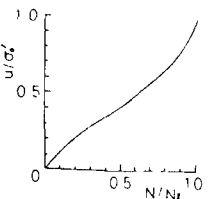


図-4

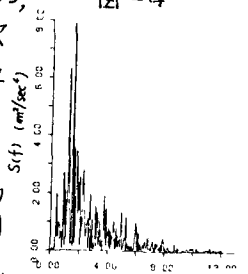


図-5

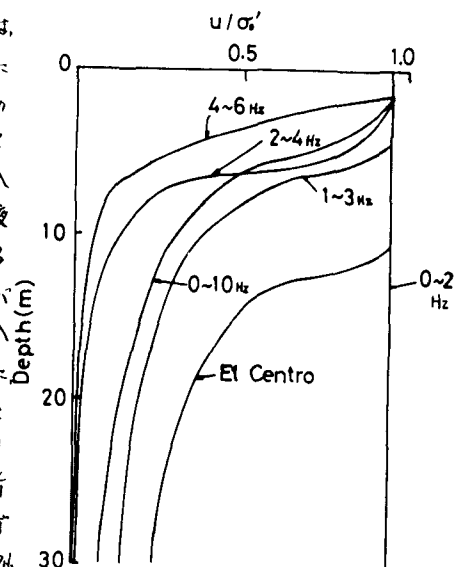


図-6