

1. まえがき

飽和砂地盤の地震応答解析には、間隙水圧を考慮した有効応力法があり、地震時の土の非線形モデルとして弾塑性論等の数多くの構成式が用いられてきた。しかし、これらの構成式は多くの材料定数を有し、任意の応力経路に対する間隙水圧の算定法も一般に複雑である。筆者らは、すでにせん断仕事を用いた地震時の簡潔な間隙水圧モデルを提案しているが¹⁾、本研究では、この間隙水圧モデルを土の応力・ひずみ関係として双曲線型モデルに適用し、水平地盤の液状化解析を行った。本解析では、各半サイクルごとに間隙水圧を評価する非線形モデルを提案して簡易的な有効応力解析(W_s 法)を行うとともに、等せん断仕事線を用いて各時間ステップごとに間隙水圧を算出していく非線形解析(等せん断仕事線法)を行い、両者の解析結果を比較した。

2. せん断仕事に基づく間隙水圧の評価¹⁾

液状化過程において累積していくせん断仕事 W_s は、そのときの間隙水圧 u と繰返しせん断応力 τ を用いて次式で表わされる。

$$W_s/G_0 = \beta \left\{ \exp(\alpha' \cdot u/G_0) - 1 \right\} + \Gamma \left\{ \exp(\lambda \cdot \tau/G_0) - 1 \right\} \quad (\alpha', \beta, \Gamma \text{ は材料定数}) \quad (1)$$

$$\text{すなわち、} \lambda = C_1 \left\{ \exp(C_2 \cdot u/G_0) - 1 \right\} \quad (C_1, C_2 \text{ は材料定数}) \quad (2)$$

定数 β , Γ , C_1 は拘束圧の関数、定数 α' , C_2 は相対密度の関数である。式(1)は、各時間ステップごとに間隙水圧を算出するときに用いられる関係式であるが、その中の右辺第一項は繰返しせん断応力がゼロになるとき間隙水圧を算定する簡易的な有効応力解析に用いられる。

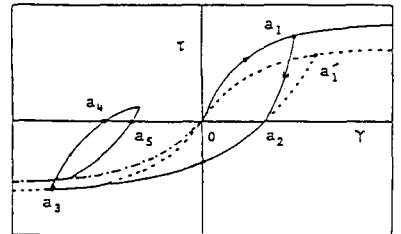


図-1 応力・ひずみ曲線

3. 飽和砂地盤の液状化解析

3.1 双曲線型モデルを用いた非線形解析および解析手法

本解析は、双曲線型で骨格曲線を表示するHardin-DrnevichモデルとMasingの規則による履歴曲線を組み合わせた応力・ひずみ曲線を基本とした。初期せん断剛性 G_0 はRichart'sの式、 $G_0 = 6930(2.17 - e)^2 / (1 + e) \sqrt{\sigma_v}$ を使用し、土の破壊規準としてモール・クーロンの破壊規準を用いた。また、 G_0 および規準ひずみ γ_r は、液状化過程における有効応力の値によって逐次変化させた。

各半サイクルごとに間隙水圧を評価する非線形モデルが兵動らによって提案されているが²⁾、本提案による解析法(W_s 法)は以下に示す通りである。図-1の最初の半サイクル終了点 a_2 において間隙水圧が算出(式(1)の右辺第一項)され、次の半サイクルの G_0 , γ_r が決定される。また、除荷曲線 a_2a_3 は、 G_0 , γ_r によって定まる骨格曲線上の点でかつMasingの規則に従う履歴曲線が点 a_2 を通過するような仮定の折返し点 a_4 を求めることによって与えられる。さらに、点 a_5 のように除荷曲線がせん断ひずみ軸と負のせん断ひずみ領域で交わる場合、点 a_5 以降の除荷曲線は、新たに求められた骨格曲線に到達するまで前の半サイクルの降荷曲線をたどるものとする。

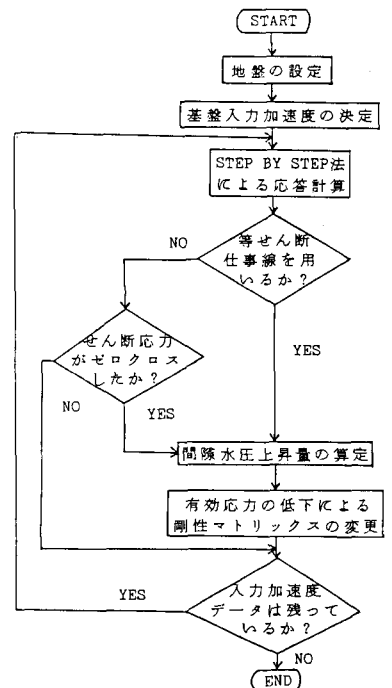


図-2 解析手順のフローチャート

一方、等せん断仕事線に基づく非線形解析(等せん断仕事線法)では、双曲線型のひずみ依存性を考慮するとともに、式(1)を用いて各時間ステップごとに間隙水圧を算出した。図-2は、以上の解析手順をまとめてフローチャートに示したものである。

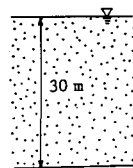


図-3 解析地盤

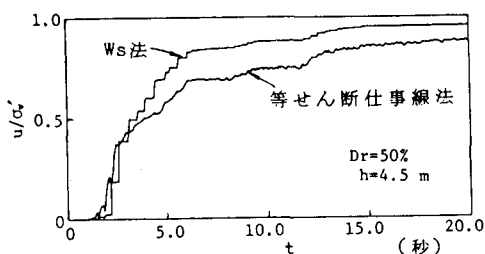


図-4 間隙水圧上昇の時系列

本解析に用いたプログラムはMASH³⁾であり、図-3に示される厚さ30mの均一な水平飽和砂地盤を10層に分割し、多質点系置換法によって動的応答解析を行った。ただし、粘性減衰マトリックスは省略した。地盤の種々の土質定数は、それぞれ比重 $G_s=2.65$ 、静止土圧係数 $K_0=0.5$ 、内部摩擦角 $\phi=35^\circ$ である。地盤の相対密度 D_r は、30%、50%、70%の3種類を用いた。また、入力波としては、El Centro波を最大値0.1gに縮小した加速度波形を使用した。式(1)の定数は次式で与えられる。 $\alpha'=0.06 D_r+1.6$ 、 $\beta'=3.57 \times 10^{-7} \sigma'_0+9.0 \times 10^{-5}$ 、 $\Gamma=1.02 \times 10^{-6} \sigma'_0+1.0 \times 10^{-4}$ 、 $C_1=9.8 \times 10^{-4} \sigma'_0$ 、 $C_2=0.032 D_r+5.52$

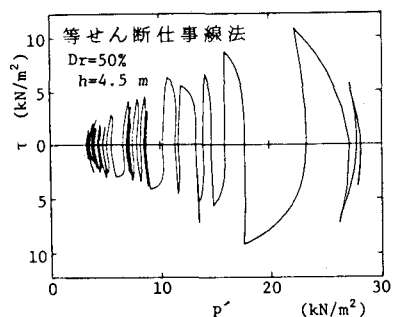


図-5 有効応力経路

3.2 解析結果

図-4は、地表面から4.5mの深さにおける間隙水圧の時系列を示したものである。

W_s 法における間隙水圧は、地震動開始後2秒あたりから急上昇し、等せん断仕事線法と同様の急上昇傾向を示している。また、図-5は等せん断仕事線法における有効応力経路であり、載荷初期に顕著な有効応力の減少がみられる。図-6には、最終的な間隙水圧比 u/σ'_v の深さ方向分布が示されている。 W_s 法と等せん断仕事線法による間隙水圧比はほぼ同一の値を示しており、 W_s 法の簡易化された非線形解析においても各時間ステップごとに間隙水圧を評価する非線形解析と大きな差異は認められない。なお、図-7は応力・ひずみ曲線を示したものであり、 W_s 法においては、常に骨格曲線を基に履歴曲線を決定しているために、原点を中心にした応力・ひずみ曲線が描かれる特徴がある。

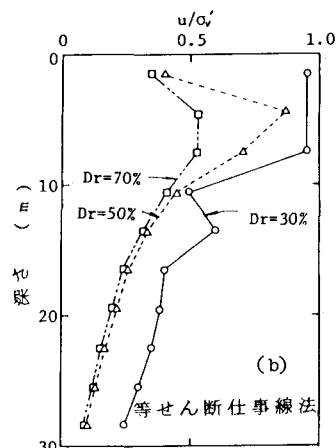
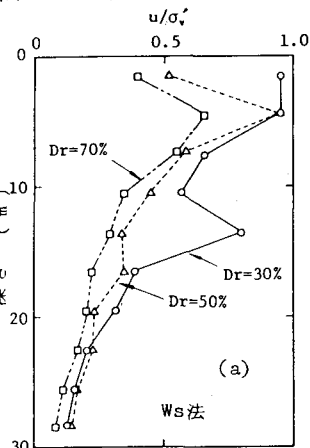


図-6 最大間隙水圧比の深さ方向分布

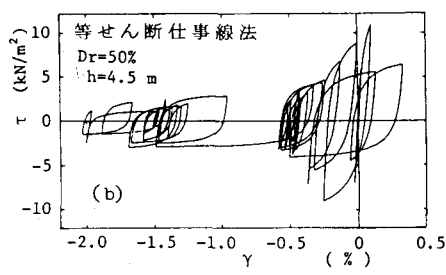
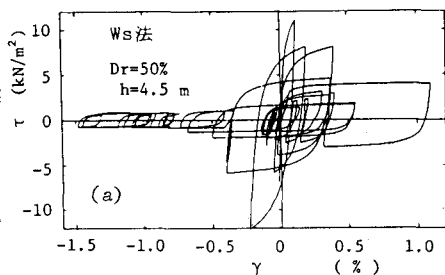


図-7 応力・ひずみ曲線

参考文献 1) 坂井英治・杉本久保: せん断仕事を用いた飽和砂の間隙水圧モデル, 第20回土工学会研究発表会, 1985. 2) 兵動・山内・橋詰: 飽和砂地盤の動的有効応力解析の簡易手法, 工学会論文集, 第346号, pp. 57-66, 1984. 3) Martin, P.P. and Seed, H.B.: "MASH: A computer program for the nonlinear analysis of vertically propagating shear waves in horizontally layered deposits," Report No. EERC-78-23, University of California, Berkeley, Calif., 1978.