

## 1. 研究目的

兵庫県南部地震以降、大きな地震力に対して構造物がどこまで変形して耐えられるかを照査する設計法が主流になってきている。また同地震では地盤の非線型性の影響も指摘されており、各方面で精力的に研究が進められている。表層地盤による揺れの増幅は周知のことであるが、本研究では簡単な2層地盤を考えてその弾性応答の特徴と、大きな揺れのときに起こりうる層境のすべりの影響について考察する。特に中間層が軟弱で変形しやすく、せん断強度も小さい場合には、弾性応答（等価線形応答）と異なってくる点に注意する必要がある。

## 2. 弾性応答

図1(a)に示すような2層地盤を考える。ここでは単位質量の変化は小さいとして無視した計算を行う。運動方程式を変数分離してモード解析を行うと振動数方程式は以下となる。

$$\tan \frac{\omega H_1}{V_1} \tan \frac{\omega H_2}{V_2} = \frac{\rho_2 V_2}{\rho_1 V_1}$$

1次固有振動数の近似解を求める。 $\omega$ が十分小さく単位質量は大きく変化しないと仮定すると

$$\frac{V_1}{V_2} \tan \frac{\omega H_1}{V_1} \cong \tan \frac{\omega H_1}{V_2}$$

振動数方程式に代入して整理すると

$$\cos \frac{\omega(H_1 + H_2)}{V_2} = 0; \quad \omega = \frac{\pi(2n-1)}{2} \frac{V_2}{(H_1 + H_2)}$$

ただし  $n$  は正の整数である。固有振動数に関して近似的には第1層のせん断波速度は無関係となり、介在軟弱層が1層、2層にわたって存在する条件で決まってくる。固有振動数をもとに2層地盤のモード関数を計算した一例を図1(b)、(c)に示す。(b)は1次モードのモード関数であるが、中間層が軟弱な場合、表層の変形のほとんどは中間層のものであり、第1層は剛体のように挙動する。また2次モードを(c)に示しているが、軟弱層内に腹をもち、地表の振幅よりも大きな変形が発生する形状である。

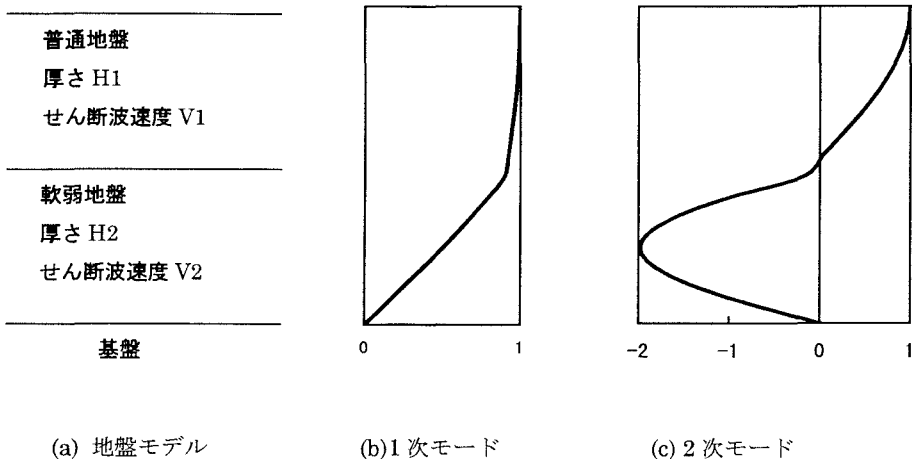


図1 2層地盤モデルと振動モード

### 3. すべりによる非線型応答

次にせん断ひずみ分布を考える。1 次モードのせん断ひずみは基盤面で最大となり、2 次モードのせん断ひずみは基盤面に加えて中間層の層境でもピークとなる（図 2 参照）。せん断応力のピークが地盤のせん断強度を上回れば、層境は破壊された状態となり、応力伝達はなくなり、各層は剛体的な運動状態に入ることになる。このときの変形モードを図 3 に示す。1 次モードは基盤面だけですべる場合と中間面でもすべる場合の 2 とおりがあり、また 2 次モードは 2 層が逆の方向に運動する。すべり運動の影響で層境は変位の不連続点となり、杭のような鉛直方向に伸びる地下構造物には大きな地震力が加わることになる。

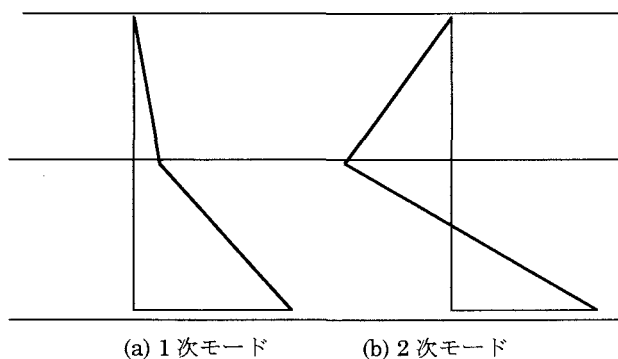


図 2 せん断ひずみのモード形

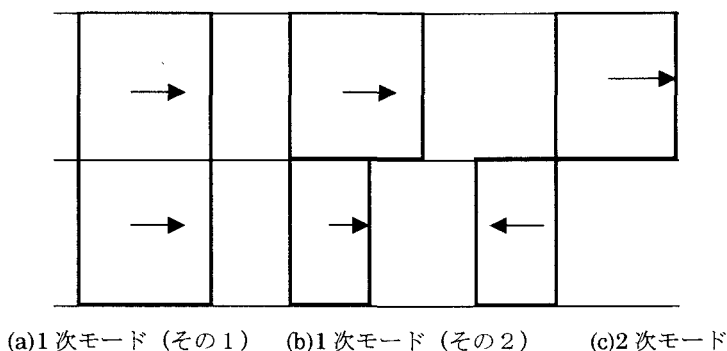


図 3 すべり状態の運動モードの概念図

### 4. 考察

地盤の非線型状態としてせん断破壊によるすべり運動を考えるならば、剛性低下、減衰増大という等価線形による地盤応答解析では十分な結果が得られない。振幅と振動周期に注目すれば等価線形の非線型パラメータを工夫することによりある程度あわせることはできようが、地盤内の振動モードは異なったものになる。レベル 2 地震動に対する構造物の設計法の検討は各所で行われているが、地盤の限界状態とそのときの運動もあわせて検討をしないと片手落ちになる可能性がある。特に今回扱ったような介在軟弱層がある地盤では、特定の境界部で大きな相対変位が生じ、構造物への影響も大きい。

今後揺れの大きさと振動モードの定式化を行っていく予定でいる。