

九州大学工学部 正員 山内豊聡  
 東海大学工学部 正員 兵動正幸  
 九州大学工学部 学生員 〇佐々木伸也

### 1. まえがき

軟弱な表層地盤が大きな地震外力を受ける時、非線形挙動を示すことが知られているが、過去の大地震の際にその量的なものを見出しうる有効なデータがまだ得られていない。地盤の非線形挙動とは、現象的には入力波の振幅の増大に対する応答倍率の低下と位相の遅れをいうのであるが、応答解析においては、地盤のひずみに応じた剛性および減衰を的確に評価することによりその現象を表わしうると考えられる。土の動的な応力・ひずみ関係ならびに、土のひずみレベルに対する剛性率、減衰比の変化を明らかにするために、これまでに多くの研究がなされいくつかのモデルが提案されてきた。しかしながら、これらのモデルはそれぞれに特徴を有しているにもかかわらず、未だに統一的理解のないまま実用に供されている現状にある。本論では、現在示されている代表的な材料非線形性のモデルおよび実験データを用いて応答解析を行い、それぞれの違いを把握するとともに、地盤の初期条件との関連において各種モデルの適否を考察する。また応答の非線形性に大きな影響を及ぼす入力波についても、その種類・入力条件について検討を行う。

### 2. 集中質量法(多質点系法)による応答解析

非線形応答計算を簡易に行うために、せん断形集中質量力学モデルを用いる。応答計算はNewmark- $\beta$ 法を用いた直接積分法により行う。ここでは、線形、等価線形、非線形の解析を行うが、非線形解析では、各時間ステップにおいて剛性率 $G$ と減衰比 $h$ がひずみレベルに応じて変更されるのに対して、等価線形解析では、全応答過程における最大せん断ひずみから決定される有効ひずみに応じた定数 $G$ 、 $h$ が一定値として用いられ線形解析では初期定数がそのまま一定の値として扱われる。また粘性減衰については内部粘性項のみを評価し、減衰マトリックスを剛性比例型の次式で表わしている。  $C = rK$ ,  $r = hT/\pi$  -----① ( $C$ : 減衰マトリックス,  $K$ : 剛性マトリックス,  $T$ : 1次固有周期) さらに、このような多質点系の解析法では、波動の基盤への逸散を考慮することができないので、波動方程式による結果より過大な応答値を示すことが知られている。栗原<sup>1)</sup>らは2層地盤の波動方程式による固有波伝達関係から、逸散減衰比を次のように表わして

$$h = \frac{1}{\pi} \cdot 2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \lambda' \right), \quad \sin^2 \lambda' = \frac{\left[ \frac{2\alpha^2}{(\sqrt{2-1}\alpha+1)^2} - 1 \right]}{(\alpha^2-1)} \quad \text{---②} \quad \left( \alpha: 2層地盤のインピーダンス比 \right)$$

式②より、種々のインピーダンス比に対する逸散減衰比は図-1のように、与えられる。この逸散減衰比も式①の粘性減衰比に加え、全減衰比として評価する。

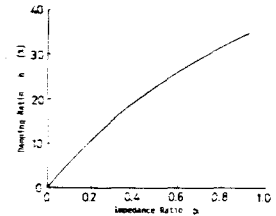


図-1

### 3. 線形、等価線形、非線形法による応答結果の比較

図-2に示す地盤を対象として線形、等価線形、非線形法により解析を行った。その結果を図-3に示している。等価線形、非線形の解析結果は線形解析の結果に比べ加速度、せん断応力が小さく、変位、ひずみでは逆に大きくなる傾向がみられる。しかし、等価線形解析と非線形解析の結果にはさほどの違いはなく、材料非線形性を考慮する解析には、計算がより簡単な等価線形解析でも差し支えないと思われる。したがって、以下の計算は、全て等価線形法にて行なうことにした。

### 4. 各種材料非線形モデルによる応答結果の比較

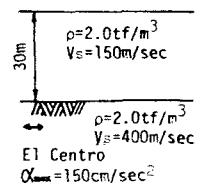


図-2

解析には、図-4に示される最も代表的なモデルを使用した。いずれもせん断ひずみの増加に対して剛性の低下と減衰の増大を示すものであるが、それぞれのモデルは土の物性、拘束圧等の評価の面で異なっている。Seed-Idrissのモデルは多くの実験値を平均化したもので、非線形性に対しては1本の曲線で与えているだけである。これに対し、Hardin-

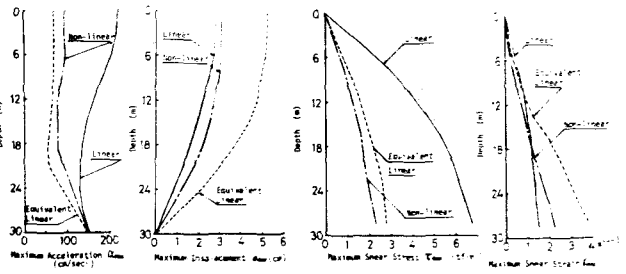


図-3

Drnevich, Ramberg-Osgoodモデル, それぞれ規準ひずみ, 降伏ひずみを導入し非線形性に対する物性の評価ができるようになっている。しかし、Hardin-Drnevichモデルには面枝曲線が定義されていないので減衰比を求めることができず、これに枝曲線を与えてその欠点を補充したのがModified-

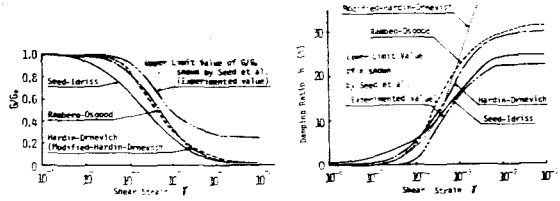


図-4

Hardin-Drnevichモデル<sup>2)</sup>である。これらのモデルとSeed<sup>3)</sup>が示した実験値のうち最も非線形性の弱い曲線を用いて解析を行った。解析対象の地盤は厚さ30mの砂地盤であり、地盤の初期剛性率は図-5に示すように深さ方向に一定の場合(Case 1とする)と変化する場合の2通りを設定した。図-6は深さ方向に剛性率一定の場合の各モデルによる結果を示すものである。図のように各モデルによる結果に、

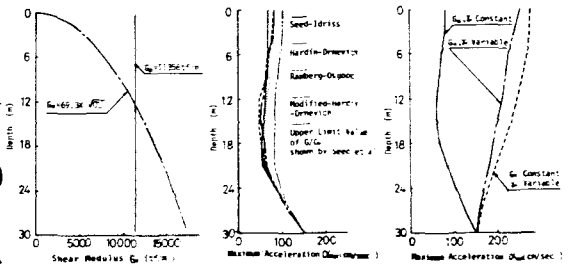


図-5

図-6

図-7

さほどの相違は見られない。次に、Hardin-Drnevichモデルを使って両者のケースを比較すると図-7のようになる。初期剛性率の深さ方向の変化は単一地層においては、拘束圧の変化によるものであるが、Hardin-Drnevichモデルは規準ひずみの項で拘束圧の影響を考慮した場合と考慮しない場合とで大きな違いが出てくることが認められる。したがって、拘束圧にかなり違いがあるような地盤では、材料非線形性に拘束圧の影響を考慮できるHardin-Drnevichモデルが適しているものと考えられる。

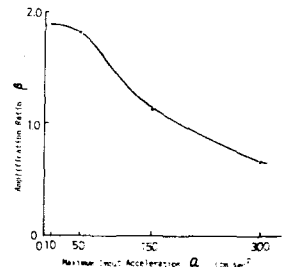


図-8

### 5. 入力波の影響

図-5のCase 1の物性を持つ地盤にEl Centro波の入カレベルを数段階変えて入力した。図-8に示すように、入力レベルが大きい程増幅率が小さくなり、すなわち、非線形性が顕著になる傾向が見られる。次にEl Centro波, Taft波, 八戸波(1972)を最大値150 cm/sec<sup>2</sup>にそろえて入力した結果を図-9に示す。それぞれの地表面における加速度応答スペクトルは図-10のようになるが、八戸波が最も卓越成分が大きく、また図-9から八戸波が最も顕著に非線形性を生じさせていることが認められる。

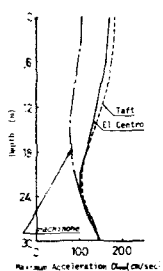


図-9

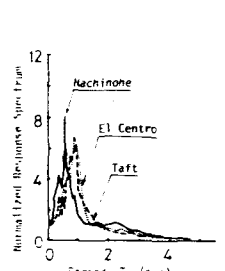


図-10

参考文献 1) 栗原忠; 電力中央研究所報告, 研究報告378017, 1978. 2) 国生化; 土木学会第33回年次学術講演会講演概要集Ⅲ, 冊14~17, 1978 3) Seed et al.; Report No. EERC 70-10, University of California, 1970.