地盤の非線形解析における減衰の扱いに関する二三の問題

正会員 〇吉田 望*

地震応答	非線形	履歴減衰
Rayleigh 減衰	増幅	

1. はじめに

地盤の地震応答解析では非線形性の考慮は必須である。 非線形性を考慮する解析法には等価線形法と非線形の応力 ーひずみ関係を追跡しながら逐次積分により運動方程式を 解く非線形法がある。等価線形法は扱いが容易なことから これまで多く用いられてきたが,理論的には非線形解析の 方が厳密と考えられており,最近ではその使用も増えてい る。しかし,非線形解析が理論的に厳密ということと,精 度良い結果が得られるということは別であり,精度良い結 果を得るためには正しい使い方をする必要がある。しかし, 現状を見ると意識されずに使われている問題もあるように 考えられる。本論ではいくつかの問題を紹介する。

2. Rayleigh 減衰

Rayleigh減衰はほとんどの地震応答解析で用いられる減 衰で、減衰係数を質量マトリックスと剛性マトリックスの 線形和で表すものである。非線形解析ではこのうち剛性比 例項が重要で、本来の減衰としての効果以外に数値計算を 安定させたり、パルス状の加速度波形の出現を抑える等の 効果がある。地盤の解析コードでは減衰としてRayleigh減 衰しか備えていないものが多いため、上記のある意味では 必要悪としての効果以外にはその影響は知られていない。

筆者は、地盤の非線形解析コードDYNES3D¹に、より減 衰の決定の自由度が多いモード比例減衰を導入した²⁾。こ こではその事例解析を通してRayleigh減衰の影響を調べる。

解析の対象としたのは東京都心部の地盤(図-1)で、こ れに模擬地震動(Δt=0.04秒, T= 127秒)を作用させた²⁾。 ここで、減衰はRayleigh減衰では地盤の1次モード (T=0.418秒)に対して2%、モード比例減衰では全モード に2%の減衰を適用した。なお、最初に述べた加速度のパ ルス波を抑えるために時間増分は地震動の設定値の1/50と している。

図-1に地盤モデルと最大応答値分布を示す。地表の最大 加速度がRayleigh減衰のケースで少し大きいこと,第3層の

Some notes on treatment of damping in nonlinear dynamic analysis of ground

モード比例減衰のひずみが大きいことが差として見られる がそれ以外では非常によく似ている。比較のために SHAKEの結果も示しているが,SHAKEがせん断応力と加 速度を過大に評価している。

図-2に地表の加速度時刻歴(最大値付近を拡大),図-3 にひずみの大きい第3層の応力-ひずみ関係を示す。加速 度時刻歴はほとんど一致しているが,例えば33.5~34秒の



Nozomu YOSHIDA



間のピーク付近でモード比例減 衰のケースは加速度がほぼ一定 であるのに対し, Rayleigh減衰 のケースでは増加しており,こ れが最大値の差となっている。

一方、図-3ではひずみの大きさは非常に違い、モード比例 減衰のケースではせん断強度付近で大きなひずみが発生し ている。両者をあわせると、強度付近でRayleigh減衰によ りせん断応力を受け持ったことが図-2、図-3の差を発生さ せたと推測できる。

3. 履歴減衰の影響

非線形解析では応力-ひずみ関係が結果に大きく影響を 与える。多くのモデルでは履歴曲線にMasing則を用いてい るが、実材料はMasing則を満たしていないことは著者が以 前から指摘していることであり、改良のためのモデルも提 案してきた。ここでは、事例を通して一つの問題点を示す。

解析対象は文献3)に示される東京の地盤の一つで,1987 年千葉県東方沖地震で得られた地表加速度を工学的基盤に 引き戻して³⁾,更に最大値を調整した波形を入力した。

図-4は動的変形特性の例でHyperbolicとして示したのが Masing則を用いた例,H-DはHardin–Drnevichの提案に基 づき設定した減衰特性に文献4)の方法で履歴曲線を作っ たものである。入力の最大値を調整したのは,図-4減衰 の差が大きく現れる応答を狙ったためである。なお,入力 波形は振動型に分類されるものである。

図-5に最大応答値,図-6に地表の加速度時刻歴,図-7に ひずみが大きかった層の応力-ひずみ関係を比較して示す。 地表の加速度には大きな差はないが,これは図-6,図-7か ら分かるように加速度が飽和しているからである。地表の 加速度時刻歴を見ると,双曲線モデルの方に高振動数成分 が大きい。このためか図-8に示すように応答スペクトルで











ことが原因と考えられる。履歴曲線についても剛性の評価 が必要と考えられる。

4. まとめ

地盤の地震応答解析に関し, Rayleigh減衰と履歴減衰の 両方について計算上問題となると考えられる点を指摘した。

参考文献

1) 吉田望(1995): DYNES3D, A computer program for dynamic response analysis of level ground by effective stressnonlinear method; 2) 吉田望,澤田純男,中村晋(2002):地 盤の地震応答解析の精度に対する手法の影響,第11回日本地 震工学シンポジウム, pp. 763-768; 3) 佐藤正行,安田進,吉 田望,増田民夫:地盤の地震時せん断応力の簡易推定法,土 木学会論文集 No.610/III-45, pp.83-96, 1998.12.; 4) Ishihara, K., Yoshida, N. and Tsujino, S. (1985): Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, Proc. 5th International Conference for Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, Vol. 1, pp. 373-380, 1985

*応用地質地震防災センター

*Earthquake Engineering Center, Oyo Corporation

-246-