



第 1 1 2 話 SHAKE と FDEL の特徴

今回は、人工地震波を創り出す手法として有名な SHAKE と FDEL について、その特徴についてお話しする。等価線形化法 SHAKE はプログラムも簡単で、しかも直接積分法では工学的判断も必要とされるがここでは一定の手順で実行でき、簡便に利用できることから、実務で多用される。ただし SHAKE を使用する際、以下のような注意が必要であり、ここでは両手法の特徴を含めてお話しする。

等価線形化法 SHAKE は基本的には中ひずみ領域に留まるような地震動に対して有効である。大ひずみ、破壊ひずみに至るような激震に対しては、そのような記録に対する応答解析事例は見当たらず、このケースの応答解析結果は信頼性が低い。また仮に烈震、激震レベルの入力地震動に対して応答解析を実行したとしても、対象となる表層地盤が軟弱であると、反復応答解析において有効ひずみが一定値に収束しない場合も起こり得る。

等価線形化法使用時の応答解析結果では、対象層上端面の加速度の時刻歴波形や各層のせん断ひずみの時刻歴波形が得られるが、この手法は加速度の最大値を推定することが前提となっており、精密な波形を過度に期待することは危険である。つまり、得られた時刻歴波形は直接積分法による場合と異なることになる。等価線形化法 SHAKE では、非線形時の加速度の最大値が概略予測できると考えるべきであろう。

等価線形化法 SHAKE では、応答のせん断ひずみ波形の最大値に着目し、材料特性として $\gamma-G/G_{\max}$ 曲線と $\gamma-\beta$ 曲線からその有効ひずみに対応する等価せん断弾性係数と等価材料減衰定数を各層で設定している。このことは、入力地震動の卓越成分によって表層地盤の剛性、減衰を変化させていることに相当する。そのため、卓越成分以外、特に高周波成分に対しても同様な剛性、減衰を用いることになり、その結果、過剰な減衰が設定され、対象層の加速度波形の高周波成分をほとんど消し去る現象が生じる。スペクトル解析の立場からいえば、短周期領域の伝達関数の増幅スペクトルが不当に小さく評価され、一種の高周波フィルタとなってしまふ。観測地震動に対してこの等価線形化法 SHAKE を適用したとき、入力レベルが大きいものほどこの傾向が顕著になり、実際の地表面で観測されたものと大きく異なることが指摘されている。

等価線形化法 SHAKE の大きな欠点である出力地震動の高周波成分の過小評価を改良するために、入力地震動のフーリエスペクトルの大き

さに合わせて有効ひずみの大きさを変化させ、周波数ごとに等価剛性、等価減衰を設定するという方法が杉戸らによって提案された。同手法は、周波数特性を考慮した等価ひずみによる等価線形化法 FDEL (Frequency Dependent Equi-Linearized Technique) と呼ばれる。

等価線形化法 FDEL は SHAKE の改良版であり、基本的な応答解析手順は同じである。重要な相違点は、せん断ひずみの有効ひずみが、SHAKE では一定値としているが、FDEL では入力地震動のフーリエスペクトルと表層地盤の伝達関数に依存した周波数の関数としている。各層のせん断ひずみ時刻歴 $\gamma_k(t)$ をフーリエ変換し、そのフーリエ振幅スペクトル $|\Gamma_k(\omega)|$ を用いて、有効ひずみを次式で修正する。

$$eff \gamma_k(\omega) = C \cdot \max \gamma_k(t) \cdot \frac{|\tilde{\Gamma}_k(\omega)|}{\max |\tilde{\Gamma}_k(\omega)|}$$

ここで、 $|\tilde{\Gamma}_k(\omega)|$ はスペクトルウィンドウを用いて平滑化したスペクトルである。上式において、高周波成分における $|\tilde{\Gamma}_k(\omega)|$ の値は、おおよそ $\max |\tilde{\Gamma}_k(\omega)|$ より 1 オーダー程度小さなものとなっており、有効ひずみ $eff \gamma_k(\omega)$ も小さな値となる。その結果、等価線形化法 FDEL では周波数毎に等価せん断弾性係数、等価材料減衰定数を定めているため、この領域ではせん断弾性係数の低減率は小さく、また材料減衰値も線形時と大差ないものとなる。つまり、等価線形化法 FDEL では入力地震動の卓越成分については従来から良好な結果を得ている SHAKE と同様に非線形性を推定でき、SHAKE の弱点であった高周波成分の過小評価についても改善されることになる。

図 1 は、各種の方法で求めた人工地震波の加速度応答スペクトルを示す。同図には基盤面加速度と線形解析、両等価線形化法の対象層上端面加速度波形の加速度応答スペクトルを示す。伝達関数から読み取れる表層地盤の卓越周期の領域で応答量が増大している。線形解析結果と比較して、等価線形化法では塑性化に伴う卓越周期の長周期化や増幅率の低減もこの加速度応答スペクトルに反映されている。さらに、SHAKE と比較して FDEL では先に述べた高周波成分の過小評価が改善されている。

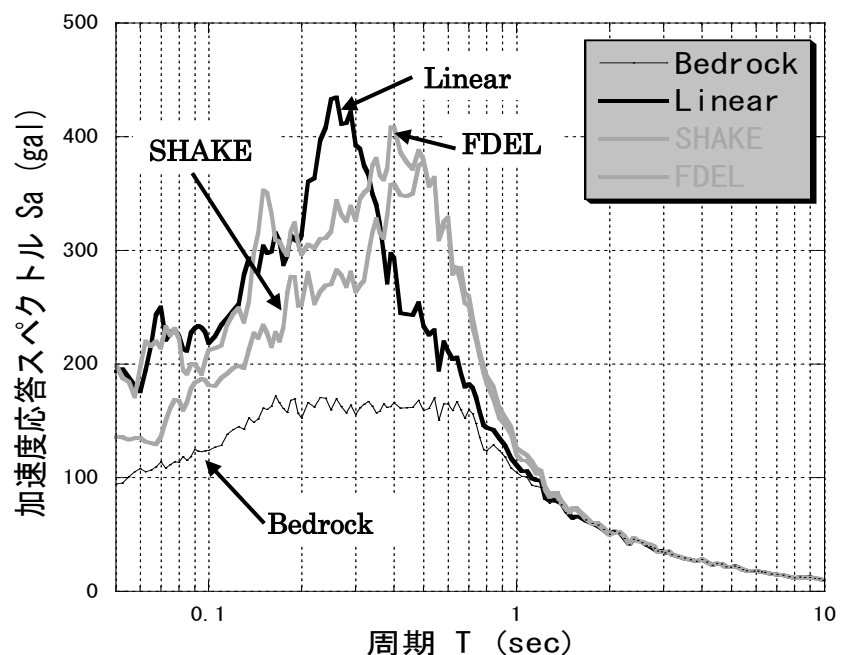


図 1 各応答解析別の加速度応答スペクトルの比較