

大ひずみ領域を考慮した等価線形地震応答解析手法

吉田 望¹⁾, 小林 悟²⁾, 三浦 均也³⁾

¹⁾正会員 工博 主席研究員 佐藤工業 中央技術研究所 (東京都中央区日本橋本町4-12-20)

²⁾学生員 北海道大学工学部土木工学科 (札幌市北区北13条西8丁目)

³⁾正会員 北海道大学助教授 工学部土木工学科 (札幌市北区北13条西8丁目)

SHAKE に代表される等価線形地震応答解析は、大地震には最大加速度を過大評価し、小地震には最大加速度を過小評価するが、その原因は一つで、最大ひずみから有効ひずみを求める方法にあるので、一方を改良すれば他方が悪くなるという性質がある。本論文では、前者の問題に対して、有効ひずみと最大ひずみを同じとし、後者の問題に対しては有効ひずみの算出に周波数依存性を考慮する解析方法を提案する。1987年千葉県東方沖地震の際、東大生研千葉実験所で観測された鉛直アレー記録をシミュレーションした結果、既往の手法に比べ、格段により結果を得ることが出来た。

Key Words: Earthquake, Nonlinear, Equivalent linear, Frequency region, Complex modulus

1. はじめに

大地震に対する地盤の地震応答解析では、理論的には非線形の応力-ひずみ関係を追いかけてながら逐次積分による数値解析を行う非線形法の方が精度が高いが、実用的には SHAKE に代表される等価線形法も多く用いられる。特に、地表の観測記録を入力として基盤への入射波を求めるという、実務上重要な作業は、非線形法では困難である。また、非線形法では、数値計算の安定性をあげるためなどの目的で Rayleigh 減衰がよく用いられるが、これを用いると高振動数領域の応答が落ちるので、剛な構造物の設計用の地震動の算出に問題があることがある。さらに、散乱の減衰の様な周波数に依存するような特性を考慮することも困難である。この様なケースでは、周波数領域で解析を行える、複素剛性に基づく等価線形法の方が実務的である。等価線形法は、近似法であるので、その精度を上げることは、上記の目的に使うにしろ重要である。本論では、等価線形法の改良方法を提案する。

2. 等価線形法の問題点

筆者の一人は、非線形領域では等価線形法が最大加速度を大きめに評価することを指摘し、原因が等価線形法の手法にあることを指摘した。図-1はこれを模式的に示したものである。図の実線が設定した応力-ひずみ関係とする。等価線形法では、最大ひずみ γ_{max} より有効ひずみ γ_{eff} を次式で求め、これを元に線形の応力-ひずみ関係を仮定して計算を行う。

$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max} \quad (1)$$

ここで、 α は0.65が用いられることが多い。すると、解析に用いられる応力-ひずみ関係は図-1のOACとなり、最大ひずみ時の応力は τ_1 で、設定した応力-ひずみ関係から得られる値 τ_2 より大きい。せん断応力が大きく評価されるので、最大加速度も大きくなる。最大加速度が大きくなる原因として、以前には、等価線形法は線形の計算であるので、共振が起こっているという指摘もあったが、後に実例を示すように、この考えは間違っている。

等価線形法のもう一つの問題は、これとは逆に加速度の過小評価である。図-8では計算例の基盤と地表のフーリエスペクトルの比を示しているが、観測値に対して高周波成分で既往の等価線形法 (SHAKE) は増幅が非常に小さくなっている。入力が小さいと、最大加速度に与える高周波成分の影響が大きくなるので、最大加速度も過小評価されることとなる。

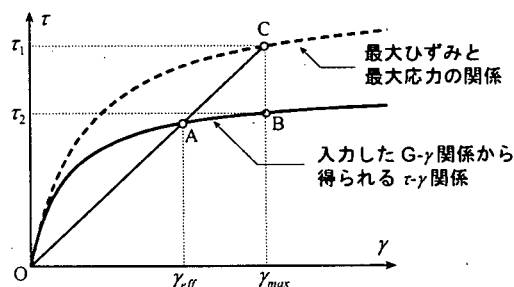


図-1 等価線形解析が最大せん断応力を過大評価するメカニズム

この二つは、相反する性質である。前者の問題を解決するためには、 α の値を大きくする必要があるのに対し、後者の問題を解決するためには、 α の値を小さくする必要がある。前者の実例については、文献2に示した。後者を事例として明確に示した論文を筆者らは知らないが、小さい α の方が観測記録を説明できるという報告はある³⁾。

後者の問題に対する解決は、杉戸ら⁴⁾、清田ら⁵⁾によって行われた。杉戸らは、ひずみのフーリエスペクトル $F(f)$ とその最大値 $F_{\max}$ を用いて、有効ひずみを周波数の関数として次式のように表した。

$$\gamma_{\text{eff}}(f) = \alpha \gamma_{\max} \frac{F(f)}{F_{\max}} \quad (2)$$

高振動数成分に小さい有効ひずみを用いることによって、高周波成分の増幅を大きくしたわけである。清田らは、固有値解析を行い各固有モードについて異なる特性を用いることにより同じ様な効果を得ようとしている。この方法は、SHAKE に代表される等価線形法とは異なる方法であることから、以後本論文では論じないが、本質的に杉戸らの方法と同じ特徴を持っている。

杉戸らの方法（以後、FDEL と呼ぶ）は、ケースによっては等価線形法の精度を飛躍的に向上させた⁴⁾。しかし、式(2)の物理的な意味は明瞭ではない。また、この方法は、必ず SHAKE より大きい加速度を与える。先に論じたように、大地震時には SHAKE は加速度を過大評価するので、後に例題で見るように、FDEL の大地震に対する適用性は非常に悪くなる。

式(1)の α の最適値がケースによって変わることは以前から知られていた（例えば文献7）が、これは、このような相反する要因があることが原因の一つと考えられる。

3. 提案する方法の考え方

FDEL で用いられる式(2)に対する疑問の一つは、有効ひずみに周波数依存性をもうけると、せん断波速度に周波数依存性があることになり、物理的におかしいということである。そこで、実現象における周波数依存性を考えてみる。図-2は応力-ひずみ関係を模式的に書いたものである。ここで、大きい振幅に対する履歴曲線 A と途中で小さな除荷が起こった履歴曲線 B を考えると、A の履歴が発生するときには見かけの剛性は小さく、周期は長いのに対し、B の履歴が発生するときには見かけの剛性が大きく周期は短い。なお、剛性が大きいときには履歴減衰は小さく、剛性が小さいときには履歴減衰が小さいので、ここでは、剛性だけで議論を進めるが、減衰についても同時に議論をしていると考えていただきたい。

このメカニズムから分かるように、時間領域で見ると、履歴曲線の振幅とそれが発生する周期（または周波数）には相関関係がありそうである。そこで、図-3に示すゼロクロス法で、次に示す計算例で得られたせん断ひずみの時刻歴から振幅 A とそのときの周期 T の関係を求め、

周波数との関係として書き直したのが、図-4である。ばらつきは大きいがこの傾向は伺える。図には、ひずみのフーリエスペクトルも示しているが、これとも、相関がありそうである。

この様に、周波数領域の現象であるフーリエスペクトルと時間領域の現象であるゼロクロス法に基づく振幅-周波数関係にはある程度の相関があるので、この性質を利用すれば、等価線形法の改良が図れる可能性がある。その意味で、FDEL の考え方には意味があることになる。しかし、次の様な問題もある。図のフーリエスペクトルはウインドウ処理をしてスムーズにしているが、そのスムーズ化の程度に一貫性がない。次に、図-4に見られるように、フーリエスペクトルがピークとなる周波数は必ずしも一致していない。さらに、本来異なる現象である時間領域の現象と周波数領域の間に、常に式(2)の関係が成立するという保証はない。そして、すでに示したように、FDEL で勧めている $\alpha=0.65$ を用いることは SHAKE 以上の加速度の過大評価につながるため、大地震には適用できない。

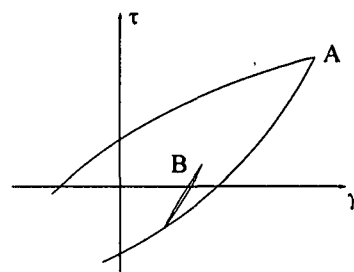


図-2 応力-ひずみ関係

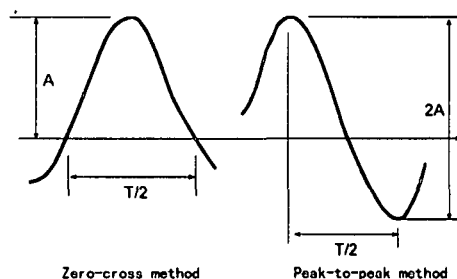


図-3 ゼロクロス法とピーク法

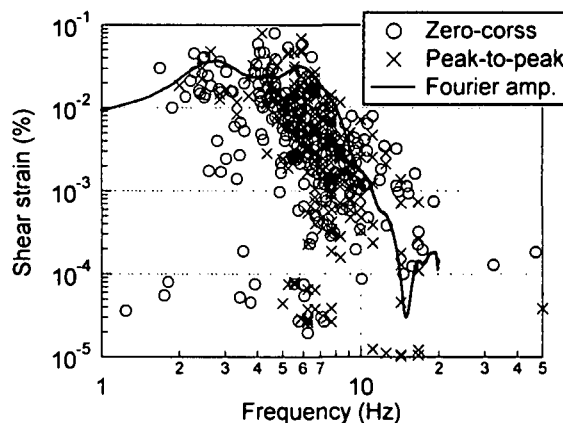


図-4 周波数-ひずみ振幅関係

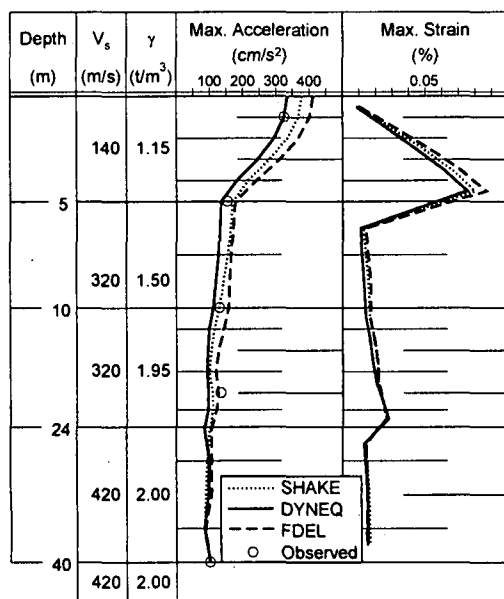


図-5 地盤と最大応答値

これまでの議論から、大ひずみもターゲットにするには、 $\alpha=1.0$ は必須である。では、式(2)で $\alpha=1.0$ でよいかというと、そうではないことは、文献3の検証で $\alpha=0.65$ がよい結果を示していることから、明らかである。ここでは、次の方針で周波数の関数として有効ひずみを算出する。

これまででは、ひずみ時刻歴からゼロクロス法で周波数とひずみ振幅の関係を求めた。しかし、ひずみを剛性に対応させようとする、ゼロクロス法は好ましくない。これは、処女載荷時と履歴時ではひずみと剛性の対応関係が異なっているためである。また、ひずみが一方方向にドリフトするようなケースでは高周波数成分の応答が拾えない可能性もある。そこで、図-3に示すピーク法に基づき周期 T とひずみ振幅 A の関係を求める。ただし、処女載荷時には、片振幅を振幅として用いる。

この様にして求めた周波数と振幅の関係も図-4に示されている。全体的な傾向は、ゼロクロス法と大きな差はない。これを基に、次の関数を設定する。

$$\log \gamma_{eff} = A(\log f - \log f_p)^m + \log \gamma_{max} \quad f \geq f_p \quad (3)$$

$$\gamma_{eff} = \gamma_{max} \quad f < f_p$$

ここで、 f_p はゼロクロス法でひずみが最大ひずみとなるときの周波数である。この式は、両対数軸上で有効ひずみを周波数の関数として m 次式においたことを意味している。 $m=2$ とし、係数 A を最小自乗法で計算する。

4. 計算例と考察

1987年千葉県東方沖地震($M=6.7$)の際、東京大学生産研究所千葉実験所で得られた鉛直アレー記録(NS成分)の解析を行う。材料定数等は、文献8に従う。解析プログラムは筆者らの開発したDYNEQ⁹を改良して用いる。以下の計算は全てDYNEQを用いているが、手法の区別をするために、SHAKE, FDEL, DYNEQの名称を用いる。

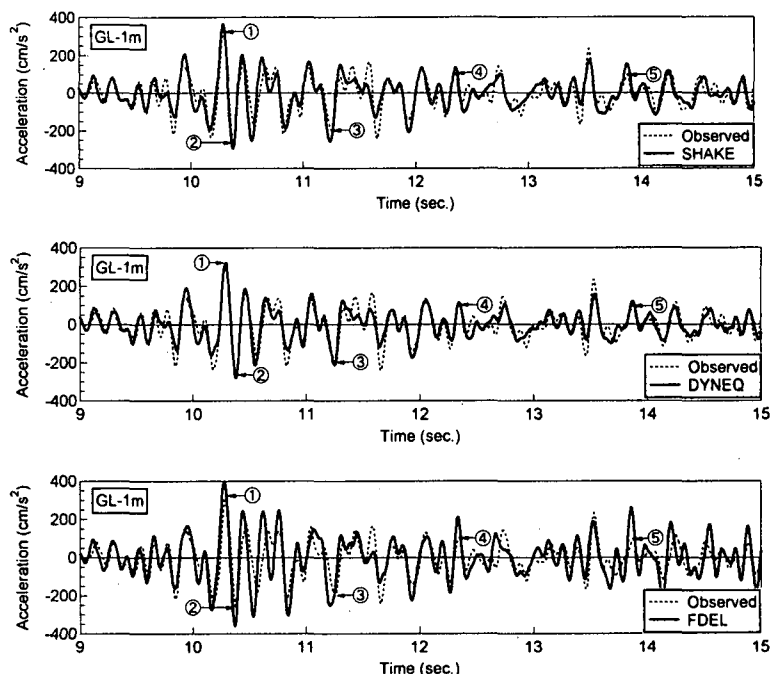


図-6 GL-1mの加速度時刻歴の比較

図-5に最大応答値、図-6に地表(GL-1m)の加速度時刻歴をそれぞれ観測値と比較して示す。

最大加速度では、特に非線形の影響を受けていると考えられる地表(GL-1m)では、FDEL, SHAKE, DYNEQの順で最大加速度は小さくなっており、DYNEQが一番観測値に近い。加速度応答がこの順に並ぶのは、これまでの説明から明らかである。そして、DYNEQが観測値とほぼ一致しているのは、ここで設定した方法が妥当であったことを示している。

図-6では二つの時刻歴を比較している、詳細な差が見づらい。そこで、着目すべき点を①～⑤で示した。ここで、矢印は観測値のピークの位置につけられている。①は最大加速度に対応する点であるが、SHAKE, FDELではピークの近傍で観測値より大きくなる現象が目立つ。このような差は、図-1のメカニズムを考えると理解できる。逆に共振とすれば、このような現象は説明しにくい。

①～⑤のいずれのピークでも、提案手法は観測値とほぼ同じであるのに対し、SHAKEはこれより大きめ、FDELはさらに大きい応答を示している。また、例えば、①→②の過程を見ると、提案法では位相もほぼ一致しているのに対し、SHAKEとFDELでは解析値の位相が早くなっている。その他の場所でも、全体に提案手法の方が位相の一致はよい。一方、提案手法でも観測値と一致していない部分もある。しかし、これらの場所でも、他の方法の方が明らかによいというところはない。すなわち、全体としてみても、提案手法の方が他の方法に比べて観測値をよく説明しているといえる。

図-7には最もひずみが多い、第5層(GL-4～5m)の複素剛性を考慮した応力-ひずみ関係が比較されている。図で点線で示したのは入力した応力-ひずみ関係であるが、図-1で示した様に、SHAKEでは最大ひずみ付近では入力値より大きなせん断応力となっているのに対し、本

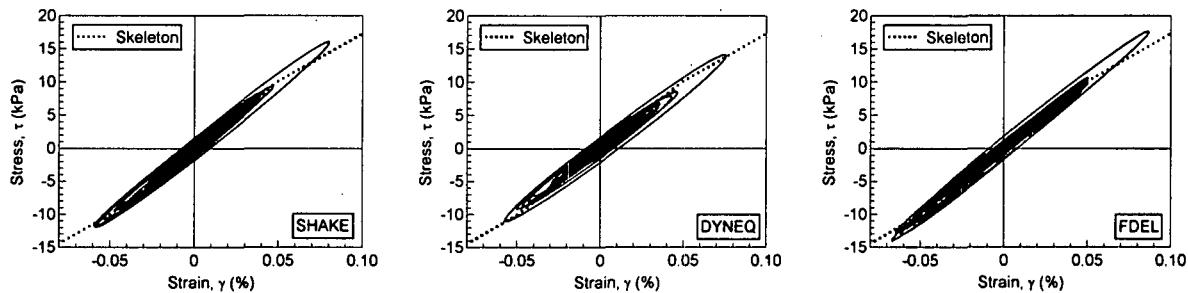


図-7 第5層 (GL-4~5m) の応力-ひずみ関係の比較

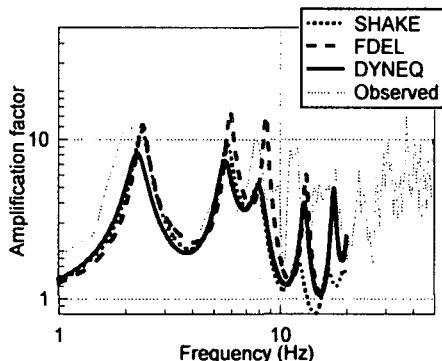


図-8 スペクトル比の比較

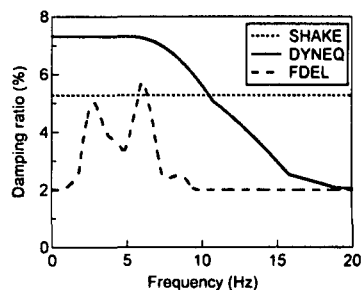
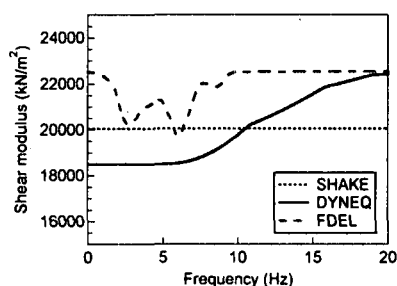


図-9 第5層の剛性と減衰

手法では最大応答はほぼ一致している。このことが、最大加速度のよい評価に結びついている。

図-8には基盤に対するGL-1mの加速度応答のスペクトル比を示している。ここで、観測値は図を見やすくするために平滑化している。まず、数Hz以上の高周波数領域でSHAKEが過小評価していることが明瞭であるが、FDELと提案手法はこの点が改良されていることが分かる。なお、解析では20Hz以上の周波数成分の計算は行っていない。一方、これより低周波数側では、本提案手法が全体に小さめの値となっているが、これは、応力が一番小さいことに起因している。図には示していないが、1Hzより低周波側では各解析の差はほとんどない。

図-9には、第5層の材料特性の周波数依存性を示している。この層では、せん断弾性定数は22540kN/m²であるので、FDELでは1Hz以下、10Hz以上ではほとんど弾性挙動を用いているので、中間部の比較的小さい周波数領域のみで非線形性が考慮されている。これに対して、提案手法では、低周波数領域では最大応答にあわせての剛性が小さく、減衰が大きくなっている。この領域でのSHAKEと提案手法の違いは、有効ひずみを最大ひずみから計算する際の係数の差と考えてよい。高周波数領域では、提案手法は次第に剛性が大きく、減衰が小さくなり、約20Hzで弾性挙動に至る。

5. まとめ

小ひずみから大ひずみまで適用が可能な等価線形手法を提案した。検証に用いた計算例は最大ひずみが0.08%で等価線形範囲の適用範囲⁹⁾であるが、それでも最大加速度の誤差は大きかった。提案手法は既往の等価線形法よりよい応答を与えている。なお、本手法は小さいひずみ領域での改良も行っているが、小さいひずみ領域では散乱

の減衰の問題もある。DYNEQではこれも考慮することが出来るが、本報ではページの関係で議論していない。

高周波領域のキーは図-9で数Hzからの挙動で、これにどのような関数を考えるかによって挙動が変わるので、提案式よりもっとよい式がある可能性もある。今後、ケーススタディの数を増やすとともに、この点の検討もしていきたい。

参考文献

- 1) 吉田望 (1994) : 実用プログラムSHAKEの適用性, 軟弱地盤における地震動増幅のシンポジウム発表論文集, pp.14-31
- 2) 日本建築学会 (1996) : 入門・建物と地盤との動的相互作用
- 3) 田蔵隆, 佐藤正義, 清水勝美, 小山和夫, 渡辺修 (1987) : 地層分割数および有効ひずみ換算係数が地盤の非線形地震応答解析結果に及ぼす影響に関する基礎的検討, 第22回土質工学研究発表会, pp.64-67
- 4) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫 (1994) : 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493, pp.49-58
- 5) 萩原庸嘉, 清田芳治 (1992) : 地盤の歪依存性を考慮したモード別等価線形地震応答解析手法, その1 理論的背景と逆応答の計算, 日本建築学会学術講演概要集 (北陸), 構造I, pp.487-490
- 6) 上島昭幸, 中園直秀 (1996年) : 「歪の周波数特性を考慮した等価線形化手法」の羅東地点地震データへの適用, 土木学会第51回年次学術講演会, 第I部門, pp.408-409
- 7) Ohsaki, Y. (1982): Dynamic nonlinear model and one-dimensional nonlinear response of soil deposits, Research Report 82-02, Dept. of Architectural Faculty of Engineering, University of Tokyo
- 8) 鹿林, 山崎文雄, 片山恒雄 (1989) : 千葉実験所における地震動観測-その5 自由地盤の伝達特性について-, 第20回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会耐震工学委員会, pp.93-96
- 9) 吉田望, 末富岩雄 (1996) : DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業 (株) 技術研究所報, pp.61-70
- 10) Ishihara, K. (1982): Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis, Proc., Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Zurich, pp.237-259