

(13) 地盤の非線形地震応答解析手法の比較

佐藤工業 (株) 正会員 吉田 望
清水建設 (株) 正会員 田蔵 隆
東京電力 (株) 正会員 鈴木英世

1 はじめに

地盤の非線形地震応答解析は、実務的には重複反射理論に基づく等価線形法が使われることが多い。等価線形法は、あまりひずみが大きくない領域で有効な手法であり、大きなひずみを伴う大地震時の挙動を扱うことは出来ないとされている（例えば文献 1）。理論的には非線形の応力-ひずみ関係を逐次追跡しながら数値積分を行う非線形解析が優れていることは論を待たない。しかし、解析手法の検証に使えるような強震時のデータはほとんどない。

本報では、比較的軟弱な地盤に設置された鉛直アレーによる地震観測で得られた記録のうち、地盤が非線形域に入ったと考えられる記録をシミュレーションすることによって、各種の非線形地震応答解析手法の適用性を検討する。なお、筆者の一人は、以前にも同じ試みを行っている²⁾が、本報では基本的にはこの試みの手順を踏み、これに新しい手法を加えたり、別の考察を行ったりしている。

2 解析地盤と地震波

図-1 に地震観測地点の地盤を示す。地表から GL-7m までが V_s が 130m/s 以下の軟弱な地盤である。地震計は地表と GL-28m の地点に設置されている。図-2 に解析の対象とした地震の地中および地表の記録を示す。この記録は、1983 年 8 月 8 日の神奈川県・山梨県境地震 ($M=6.0$ 、震源深さ 22km) の際のもので、震央距離は 18km である。また、図-1 に示したモデルを用いたときの一次固有周期は 0.31 秒である。

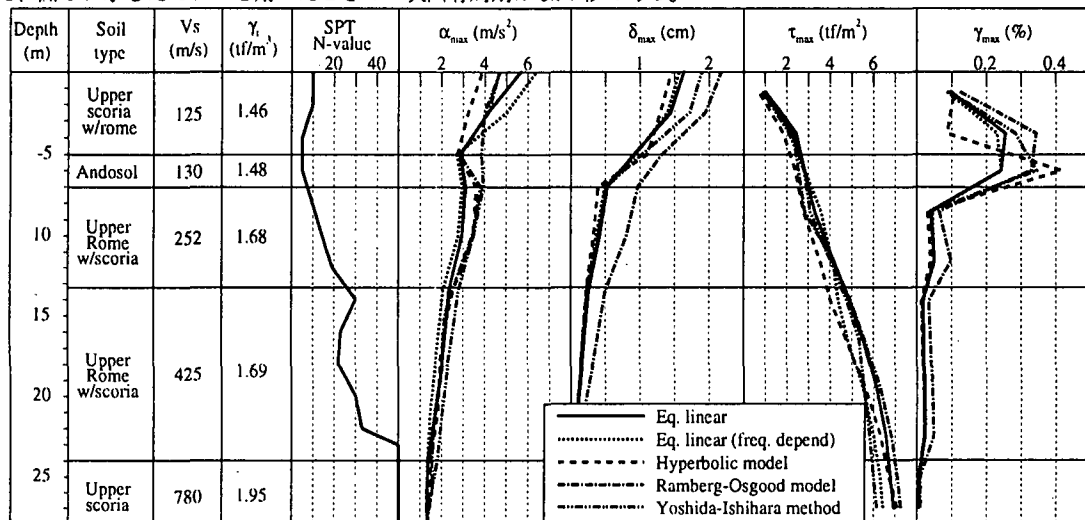


図-1 解析に用いた地盤のモデルと最大応答値

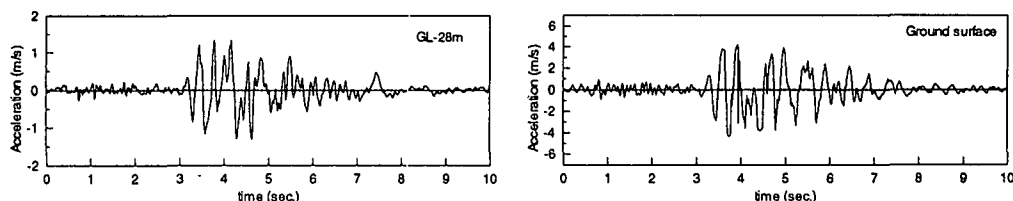


図-2 観測された地震記録

3 解析手法

2つの等価線形手法、3つの非線形手法の計3つの解析を行った。等価線形手法は重複反射理論に基づく周波数領域の解析で、一つはSHAKEと同様の方法（図ではEq. linearと表示。以下、単に等価線形と呼ぶ）、もう一つは、杉浦ら³⁾によるひずみ依存性の周波数依存の考えを取り入れたもの（図ではEq. linear (fq)、以下周波数型等価線形）で、有効ひずみを $\gamma_{eff} = \alpha F(\omega)/F_{max}$ （ α は係数で0.65を用いた。 $F(\omega)$ はせん断ひずみのフーリエ級数、 F_{max} はその最大値）としたものである。非線形手法では、Newmarkの β 法を用いた数値積分を行い、応力-ひずみ関係として双曲線モデル、Ramberg-Osgoodモデル（以下R-Oモデル）、吉田・石原らによるモデル⁴⁾（以下吉田モデル）を用いた。なお、吉田モデルは、材料のせん断定数と減衰定数のひずみ依存性を完全に満たすことが出来る。

4 地盤のモデル化

前報²⁾に習い、材料のひずみ依存性は、岩崎らの提案⁵⁾による G/G_{max} - γ 、 h - γ 関係を用いた。等価線形手法で、および吉田モデルではこの関係を直接データとして用いることが出来る。

双曲線モデルでは $G/G_{max}=0.5$ となるひずみを基準ひずみとしてモデル化した。R-Oモデルでは二つのパラメータがあり、先の基準ひずみとひずみが0.1%程度のところの減衰特性に着目して決めた。結果として、最上層の最大減衰比は17%とし、これ以外の層では最大減衰には20%とした（基準ひずみの大きさは深さによって異なるので、非線形特性は全層で異なる）。図-3に比較の一部を示すが、R-Oモデルでも減衰特性の一致はそれほどよくない。これは採用したひずみ依存減衰の最小値が4%であるのに対し、R-Oモデルの減衰はひずみが小さくなると0に近づくためである。減衰の一致度を上げようとするれば、最大減衰比を大きくするしかないが、それでもひずみの小さいところの一致度を上げることは出来ないため、深いところについては常識的な値を採用している。

5 解析結果と考察

解析は記録のうち最初の10秒について行った。図-1に最大応答値を、図-4に地表の加速度時刻歴（3~9秒）の比較を、図-5に第3層の応力-ひずみ関係（等価線形手法では複素剛性による位相のずれを考慮）の比較を、図-6に解析基盤に対する地表の増幅スペクトルを、図-7に地表の最大加速度による加速度応答スペクトルをそれぞれ示す。

まず、最大応答値を検討する。非線形挙動は第3層で大きく、0.25~0.4%程度のひずみが発生している。これより地表側のせん断ひずみは第3層より小さいが、これは第3層の非線形挙動のため、上部への地震動の伝播が押さえられたためと考えられる。このことは、最大加速度が第3層で減少していること、最大変位が急激に大きくなっていることとも対応している。図-5で第3層の応力-ひずみ関係を示しているのはこのためである。

観測値の地表最大加速度（ 4.35m/s^2 ）と最もよく一致しているのはR-Oモデルと吉田モデルである。二つの等価線形解析はこれより大きい最大加速度を与える。この二つは第3層まではほとんど差のない挙動をするが、地表部では差が現れ、周波数型等価線形の方が大きな加速度となっている。これは、周波数依存型等価線形は高周波数域の応答を大きくするようなモデル化であるため、当然の結果といえる。

全体として、R-Oモデルは他の方法に比べ特殊な応答をしている。これは、図-2に示したように、R-Oモデルでは、ひずみの小さいところで剛性が大きいという特徴があり、小ひずみ域での剛性を大きめに評価しているためと考えられる。小ひずみ域での挙動は、例えば図-5に示したような実数軸で表現すると全く差が分からないが、挙動に大きく影響するようである。また、中ひずみ域では、本計算ではR-Oモデルのみが減衰が小さめに入っているため、これが結果に影響した可能性もある。

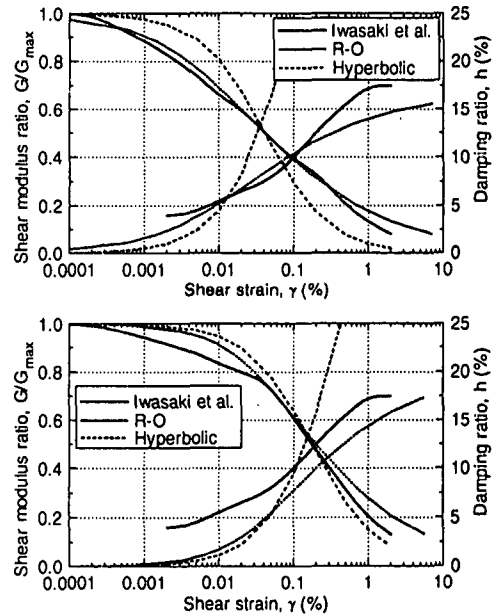


図-3 材料のひずみ依存性（1層と5層）

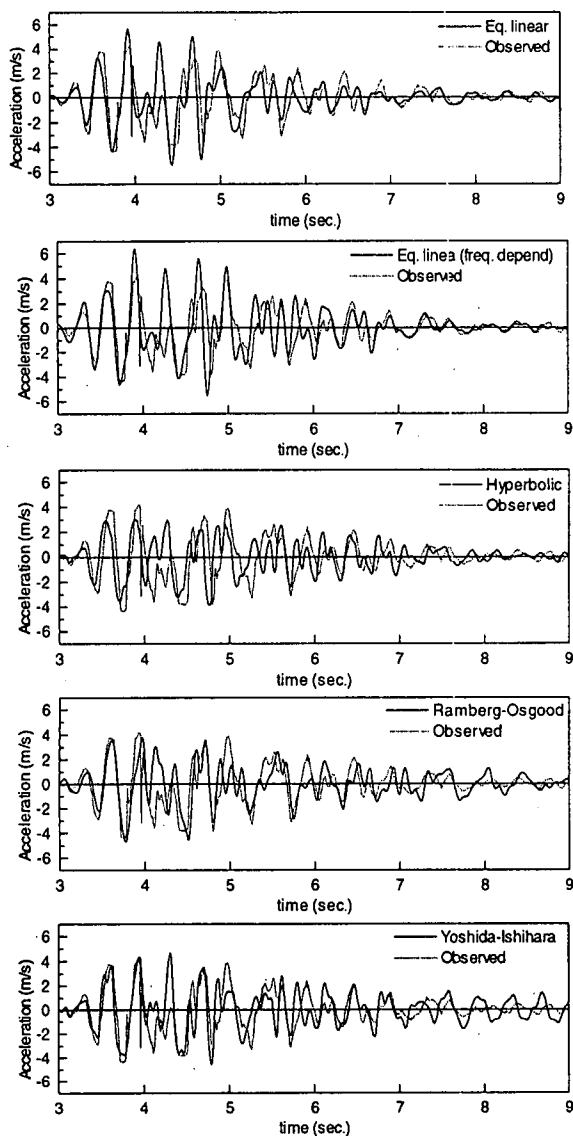


図-4 地表の加速度時刻歴

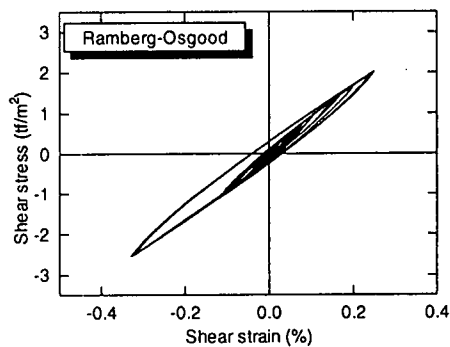
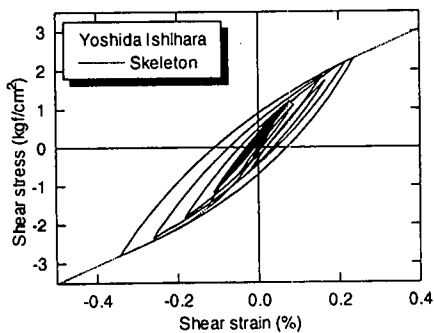
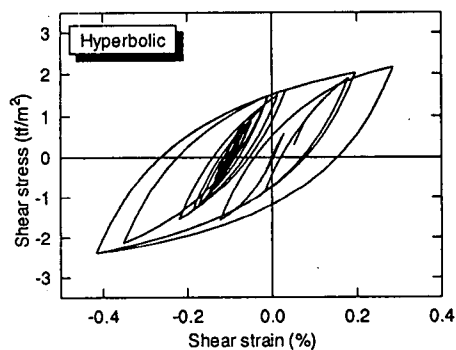
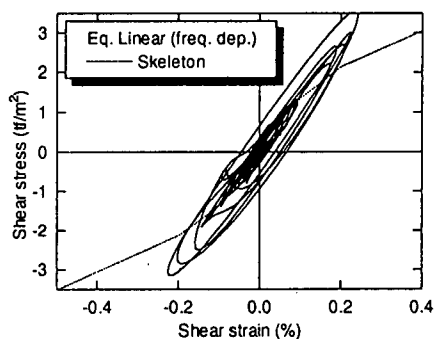
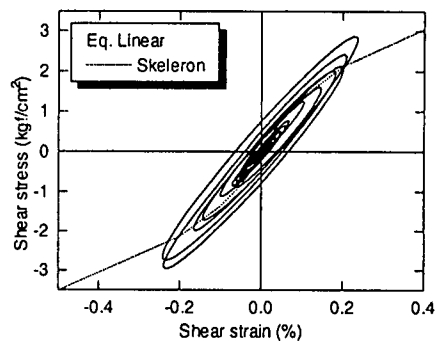


図-5 第3層の応力-ひずみ関係

時刻歴応答を見ると、主要動部分では双曲線モデルを除き、位相特性も含め、観測値との一致はよい。しかし、ピーク時の高さに差があり、これが最大応答加速度の違いとなっている。図-5

から、この付近では非線形挙動が現れていると考えられる。この際、非線形解析では耐力の低下があり、加速度の低下が期待できる。一方、等価線形解析では図でSkeletonとして示したG- γ 関係より求めた応力-ひずみ関係より高い剛性を示し（等価ひずみ位置で両者が一致する）、そのため加速度の低下が大きくは見込めないことが原因と考えられる。また、双曲線モデルがやや異なる挙動をするのは、図-5 から、このひずみ域ではすでにせん断強度に近い応力が發揮されており、上層へのせん断応力の伝播が小さくなっているための考えられる。

一方、主要動以降については、等価線形法の方がよい結果を与えている。これは、非線形解析では小さい応答に対しては減衰が小さくなるのに対し、等価線形法ではここでも大きい減衰が作用しているからと考えられる。実地盤では散乱の減衰などがあり、小さい地震でもこの程度の減衰があることがふつうであるが、非線形法ではこの効果が考慮されていないためと考えられる。

図-6の周波数増幅関数を見ると、観測波では急激なピークがあるのに対し、等価線形法ではピーク時周期はかなり対応するものの、全体に応答はなめらかである。一方、非線形法ではこのようなピークも含め再現できているものもあり、非線形法の優位さがうかがえる。最後に、図-7の応答スペクトルで見ると、一次の卓越周期付近では等価線形法が大きめ、非線形法が小さめの値となっているが、二次以降では解析値は全体に大きめである。

6 まとめ

本解析で検討した地震では、最大せん断ひずみはもっとも大きい層で0.2~0.4%と、かなり多いとはいえ既往の研究から知られている等価線形法の適用範囲の限界近くにある。そのためか、等価線形法でもシミュレーション結果は比較的よかった。しかし、いくつかの点で非線形法の方がより観測値を説明できる可能性があることが示された。また、非線形法では応力-ひずみモデルにより大きく影響され、よいモデルを使えばよい結果が得られるが、モデル化の選定が悪いとよくない結果になるので、より解析者の判断が必要とされることが分かった。また、散乱の減衰の考慮など残された問題もあることが分かった。

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シンポジウム、土質工学会、pp.14-31 2) 田蔵隆、佐藤正義、畠山昭 (1987) : 強震記録に基づく地盤の非線形地震応答解析、第19回地震工学研究発表会、土木学会、pp.101-104 3) 杉戸真太、会田尚義、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/III-27、pp.49-58 4) 吉田望、辻野修一、石原研而 (1990) : 一次元非線形解析における土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化、日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国)、pp.1639-1640 5) 岩崎敏男、常田賢一、吉田清一 (1980) : 沖積粘性土の動的変形・強度特性について、第15回土質工学研究発表会、pp.625-628

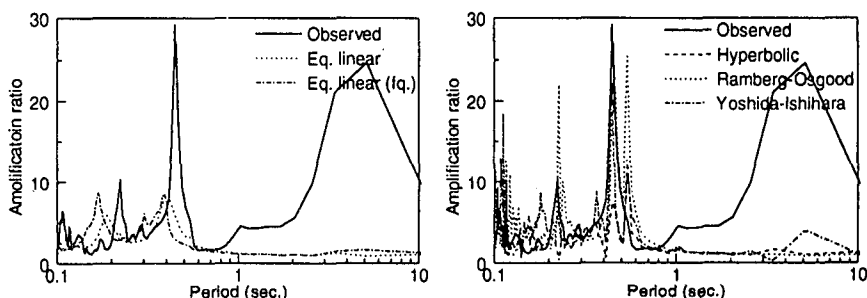


図-6 周波数増幅関数

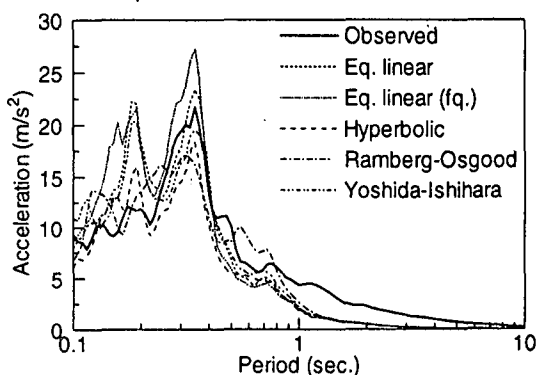


図-7 応答スペクトル