

周波数領域での地盤の非線形地震応答解析の精度と課題 Accuracy and Subjects for Non-linear Seismic Response Analysis in Frequency Domain

中村 晋¹・吉田 望²

Susumu Nakamura and Nozomu Yoshida

¹ 日本大学工学部土木工学科助教授 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

² 応用地質(株)技術本部地震防災センター (〒330-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5)

Accuracy and applicable limit of the dynamic analysis in frequency domain are examined by comparing the peak ground acceleration with that by truly nonlinear method. Three analytical method, SHAKE, FDEL-M and DYNEQ-M are examined: effective strain and detailed as a function with respect to frequency in the latter two methods whereas it is constant in SHAKE. In order to express a degree of nonlinearity, a new index, named normalized maximum strain, is used, which is a ratio of maximum strain to the reference strain. All three methods showed acceptable response until normalized maximum strain is around 7.

Key Words : Accuracy of Analytical Result, Frequency Domain Analysis Non-linear Index, Reference Strain

1. はじめに

数値解析により地盤の強非線形挙動を評価する手法には、時間領域での逐次積分法と周波数領域での複素剛性法が用いられてきた。後者の手法は、周波数領域での線形の応答解析法を用い、地盤材料の非線形性の影響を複素剛性と等価線形化法により考慮する手法である。この手法は、最大応答の評価を主目的としており、設計・計算の両面で多く用いられてきた。しかし、その適用範囲は応答ひずみが 10^{-3} を少し越える範囲であると指摘され¹⁾、大きなひずみ領域では加速度を過大評価すること²⁾、高周波数成分の減衰を過大に評価すること³⁾、有効ひずみ評価時の係数に起因するせん断強度を過大評価⁴⁾すること等の精度面での課題が指摘されている。しかし、周波数領域での解析法は、データ作成が容易であるとともに解析者による差異が生じ難いという実用面での容易さがあること、逆増幅解析や基盤波を推定することが可能であること等、設計面での利点が多く現在でも利用されている。最近、杉戸ら⁵⁾、吉田ら⁶⁾および中村ら⁶⁾によりそれら課題の改善を目的とし、ひずみの周波数応答に基づき地盤材料の動的変形特性を周波数毎に求める手法が提案されている。

しかし、その適用範囲については、従来の 10^{-3} を少し越える範囲、つまりせん断剛性の低下が 5 割

程度の応答ひずみレベルを概略的な目安としているのみであり、明らかとなっていない。その適用範囲は地盤材料の非線形化の程度と関連していることから、ひずみの絶対量というより非線形化の程度を表す応答ひずみの相対的な指標と関連づけられていることが望ましいと考えられる。

本論では、周波数領域での解析法の精度を明らかにするとともに、その精度と応答ひずみの非線形化の程度と関連づけることにより適用ひずみレベルを明らかにする。周波数領域における解析法の精度比較は、従来法(一般的な解析コードの名称である SHAKE と呼ぶ)、有効ひずみをひずみのフーリエスペクトルの相似形で周波数の関数として表した杉戸らの手法(解析コード DYNEQ⁷⁾、の機能を用いているため FDEL-M と呼ぶ)および中村らの手法(以後、DYNEQ-M)の3つの手法を対象とする。精度の評価は、周波数領域の解析と同様な応力-ひずみ関係を用いた時間領域での逐次非線形地震応答解析との比較に基づいて実施した。また、応答ひずみの非線形化の程度は、基準ひずみに対する最大応答ひずみの比で表される新しい量を基準化最大ひずみ (Normalized maximum strain) と定義し、これを用いた。最後に、各周波数領域での解析法の精度に基づき、それぞれの手法の発展性などを踏まえ、周波数領域での非線

形解析法が有する課題について考察を行う。

2. 周波数領域での非線形解析法の差異

従来法およびFDEL-Mは式(1)に示す複素剛性 G^* を用いた等価線形化法により地盤材料の非線形性を考慮している。その剛性を評価するための有効ひずみは従来法で式(2)、FDEL-Mで式(3)が用いられている。

$$G^* = G \cdot (1 - 2h^2 + 2i\sqrt{1 - h^2}) \quad (1)$$

すなわち、従来法では時間領域の最大ひずみ $\gamma_{\max}$ に換算係数 α を乗じることにより有効ひずみ γ_{eff} が与えられる。一方、FDEL-Mは、周波数領域での解析法が有する高周波数帯域における増幅率の過小評価に対処するため、周波数領域での有効ひずみ $\gamma_{\text{eff}}(\omega)$ を用い、減衰定数やせん断剛性が周波数帯域での応答ひずみの大きさに依存することを考慮している。周波数領域での有効ひずみは、周波数領域での応答ひずみスペクトル $\gamma(\omega)$ をその最大値 $\gamma(\omega)_{\max}$ で基準化し、式(2)に示した有効ひずみ、つまり時間領域の最大ひずみ $\gamma_{\max}$ に換算係数 α_f を乗じたひずみを乗じることにより算出している。これはせん断剛性や減衰定数の周波数依存性という新しい考え方であるものの、その物理的根拠は原論文に示されていない。しかも、これら2つの手法は加速度応答の過大評価の原因と指摘されている換算係数を用いているという点でも課題を内在しているといえる。

$$\gamma_{\text{eff}} = \alpha \cdot \gamma_{\max} \quad (2)$$

$$\gamma_{\text{eff}}(\omega) = \alpha_f \frac{\gamma(\omega)}{\gamma(\omega)_{\max}} \gamma_{\max} \quad (3)$$

次に、DYNEQ-Mは、時間領域における応力ひずみ履歴と等価な周波数領域での応力ひずみ履歴を求めるという観点で、地盤材料の非線形性を考慮したモデルである。このため、周波数毎のひずみの大きさに応じてせん断剛性や減衰定数が異なるモデルを用いている。また、周波数毎の剛性は、複素空間で求めた粘弾性モデルに基づく応力-ひずみ関係より得られる複素せん断剛性の厳密な表現形式である式(4)を用いている。式(1)は、複素剛性の近似表現であり、強震時において減衰定数の大きくなる大ひずみレベルでの複素剛性の精度が不十分となることから、式(4)の表現を用いた。また、その周波数毎のせん断剛性や減衰定数を求めるためのひずみ $\gamma_m(\omega)$ は、式(5)、(6)に示す相当ひずみ変換係数 C_{if} 、非定常補正

係数 $C_{in}(\omega)$ を周波数領域での応答ひずみスペクトル $\gamma_f(\omega)$ に乗じることにより与えられる。

$$G^* = \frac{G}{1 - 2hi} \quad (4)$$

$$\gamma_{in}(\omega) = C_{in}(\omega) \cdot C_{if} \cdot \gamma_f(\omega) \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{if} &= \frac{\hat{\gamma}_{\max}}{\gamma(\omega)_{\max}} \\ C_{in}(\omega) &= 1 + \frac{\gamma_f(\omega_{HN})}{\gamma_f(\omega_{LN})} \frac{\omega - \omega_{HN}}{\omega_{HN} - \omega_{LN}} \quad \omega_{LN} \leq \omega \leq \omega_{HN} \\ C_{in}(\omega) &= 1 \quad \omega_{LN} \geq \omega, \omega \geq \omega_{HN} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、時間領域における応力ひずみ履歴と等価な周波数領域での応力ひずみ履歴の表現である式(5)中の応答ひずみスペクトル $\gamma_f(\omega)$ と相当ひずみ変換係数 C_{if} の積はFDEL-Mと類似している。すなわち、このモデルは有効ひずみを周波数依存で表現する物理的な根拠を与えているモデルということができる。また、この根拠に基づく変換係数を一意的に与えており、人為的な要因が無いのが特徴である。

3. 解析モデルおよび条件

解析には、佐藤ら⁸⁾により用いられた関東圏1都4県の地盤性状に基づいて選定された5つの解析用地盤モデルを用いた。表-1に解析に用いたそれら5つの地盤モデルの基本地盤定数を示す。いずれも基盤層の質量密度、せん断波速度は、それぞれ2.1t/m³、400m/sとした。また、地盤材料の非線形モデルは、履歴法則としてMasing則を用いた双曲線モデルを用いた。そのパラメーターであるせん断強度は、表-1に示す各地層の強度定数に基づき設定した。表中の粘土層の強度定数Cは、佐藤らが示した基準ひずみにせん断剛性を乗じることにより得られる値とした。初期減衰定数はSHAKEおよびFDEL-Mが0.5%、DYNEQ-Mについては中村がその手法の提案に際して用いた周波数依存減衰モデルを用いた。ここで、初期減衰定数とは、低ひずみレベルの地震応答を与える地震動の増幅過程で散乱などの要因により生じる減衰作用を表す。また、地盤の地層分割は、1つの地層厚が0.5m程度となるように行った。この2つの地盤モデルの弾性定数より得られる周波数応答関数の比較を図-1に示す。各地盤の1次固有周波数は、TYPE-Aは2.86Hz、TYPE-Bが1.75Hz、TYPE-Cが2.54Hz、TYPE-Dが1.65HzおよびTYPE-Eが0.89Hzであり、高周波数成分の卓越するAとC、またBとD、さらに比較的低周波数の卓越するEと3つのグループに固有周波数という観点で分類することができる。

次に、地震応答解析に用いる入力地震動は、その

表-1 解析地盤モデルの基本地盤定数

TYPE	土質	層厚 (m)	質量密度 (t/m ³)	せん断波 速度(m/s)	強度定数 (C or ϕ)
A	砂	1.00	1.75	166	35
		1.00			
		1.00			
		1.00	1.95	176	
		1.00		163	
		6.30		130	
		0.50	2.00	160	
B	砂	1.00	1.75	228	35.0
		1.15	1.95		
		0.65			
		0.95	2.00		
	粘土	3.40	1.75	60	9.2kPa
		3.70		100	25kPa
		1.20	1.80	183	26kPa
		9.00		161	66kPa
		2.00	1.75	191	93.5kPa
		1.50		267	183kPa
C	砂	1.00	1.75	234	35.0
		0.90	1.95		
	粘土	0.90	1.75	70	12.6kPa
		1.80		135	75.0kPa
	砂	1.20	2.00	261	35.0
		0.70		259	
		1.30		221	
		1.00	1.95	228	
		1.00		234	
		1.00		221	
		1.00		231	
		1.20		221	

周波数特性や継続時間の異なる次の3つの加速度記録を用いた。それらは、1995年兵庫県南部地震において葺合で観測された加速度記録のNS成分(以後、Fukiai)、1983年日本海中部地震において不老不死で観測された記録のEW成分(以後、Furofusi)、および1998年岩手県内陸北部地震において長山で観測された記録のNS成分(以後、Naga)の3つである。図-2、3にそれらの時刻歴波形およびフーリエスペクトルを示す。ここで、図-3は、それぞれの周波数特性の差異を比較するため、それぞれの最大フーリエ振幅で基準化したスペクトル振幅を示している。図-2より、Naga、Fukiai、Furofusiの順に継続時間が長くなっており、特にFurofusiの継続時間は他の2つより長いことが分かる。また、それらの周波数特性として、Fukiaiは1.0Hzより低周波数成分、Furofusiは3.6Hz近傍を含む全周波数帯域、Nagaは3.5Hz近傍の比較的高周波数成分の卓越する地震動であることが分かる。このように周波数特性および継続時間の特性が異なる3つの地震動を振幅調整し、入射波成

TYPE	土質	層厚 (m)	質量密度 (t/m ³)	せん断波 速度(m/s)	強度定数 (C or ϕ)
D	粘土	1.0	1.55	60	8.8kPa
		3.2	1.75		9.4kPa
	砂	1.3	2	172	35
		2.0		188	
		2.0		210	
		2.5		193	
	粘土	5.5	1.75	128	43.1kPa
		2.8		222	129kPa
E	粘土	1.00	1.60	131	19.2kPa
		1.10	1.80		21.7kPa
	砂	1.75	1.95	166	35.0
		1.00		188	
		1.00		206	
		2.15		210	
	粘土	1.45	1.75	126	26kPa
		6.50		60	66kPa
		4.90		112	93.5kPa
		1.85		165	183kPa
	砂	1.10	1.80	153	35
		1.05	1.95	210	
		1.00	1.95	224	
		1.00	1.95	217	
	粘土	0.85	1.95	206	107 kPa
		2.00	2.10	219	

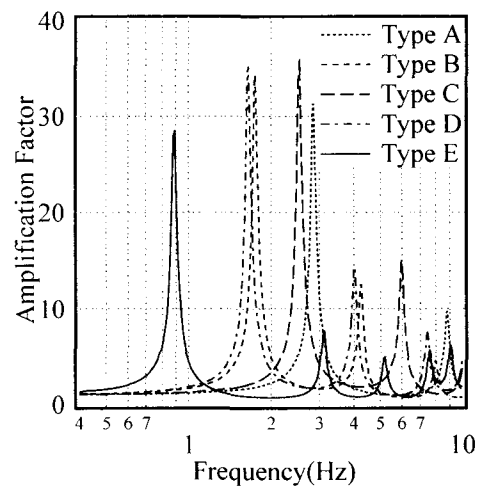


図-1 5つの地盤モデルの周波数応答関数の比較

分として、各地盤モデルへ入力する。

周波数領域での3つの解析法との精度比較には、時間領域で解析コードのうち、周波数領域での解析法と同じ地盤材料の非線形モデルを有するとともに入射波入力が可能で一般的に入手可能なコードである「YUSAYUSA2」⁹⁾を用いた。地盤材料の非線形性は周波数領域での解析法と同様に設定した。また、減衰特性はRayleigh減衰を用い、地盤の1次固有周期にて減衰定数が0.5%となるように剛性比例減衰の係

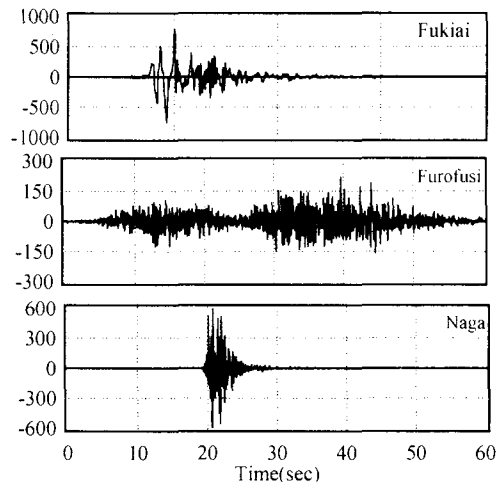


図-2 検討に用いた入力地震動の加速度波形

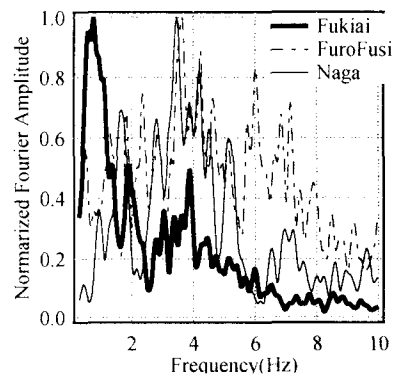


図-3 検討に用いる入力地震動の基準化フーリエスペクトルの比較

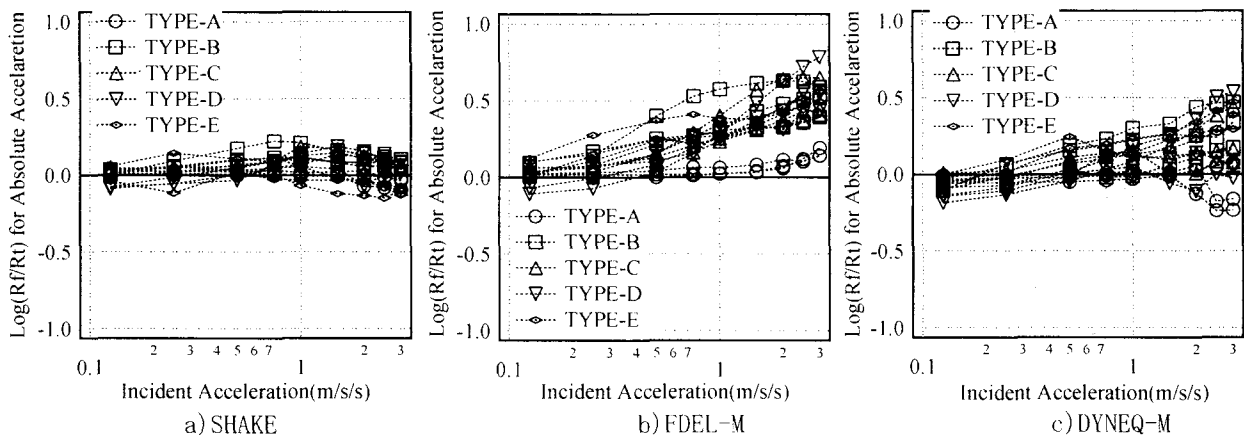


図-4 解析法に応じて得られる地表面最大応答加速度の精度比較

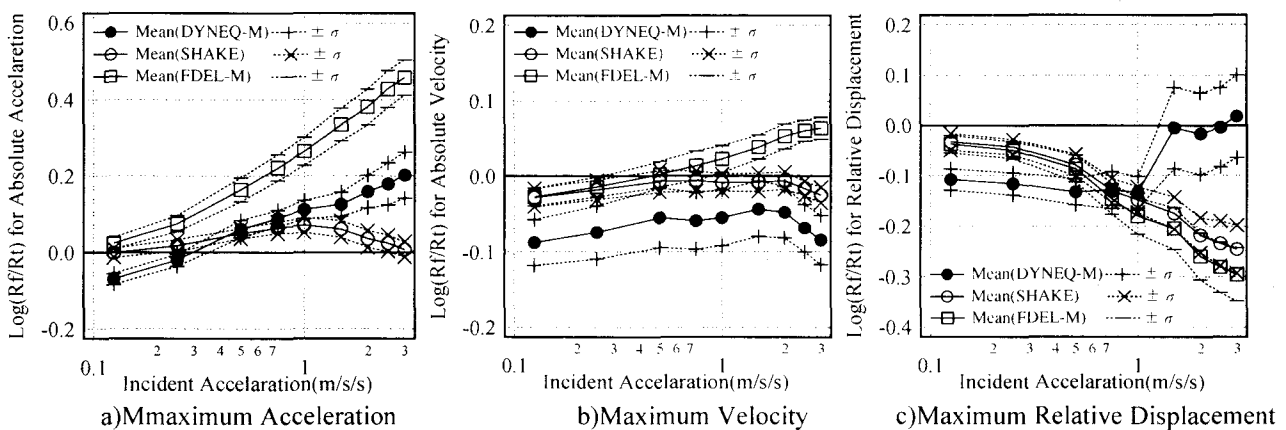


図-5 最大加速度・速度および最大相対変位に関する手法ごとの入力振幅レベルに応じた精度の統計的性質(平均および $\pm\sigma$)の比較

数 β を設定した(質量比例減衰は考慮しない $\alpha=0$)。

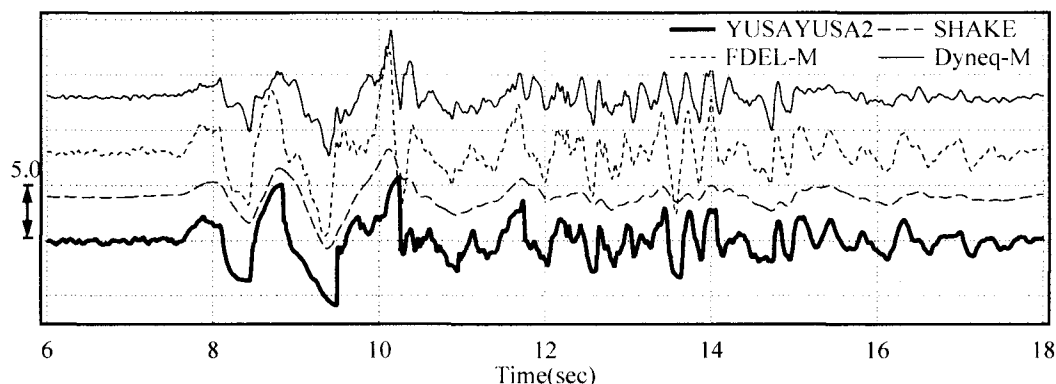
4. 解析法に応じた精度の比較

4.1 地表面最大応答値

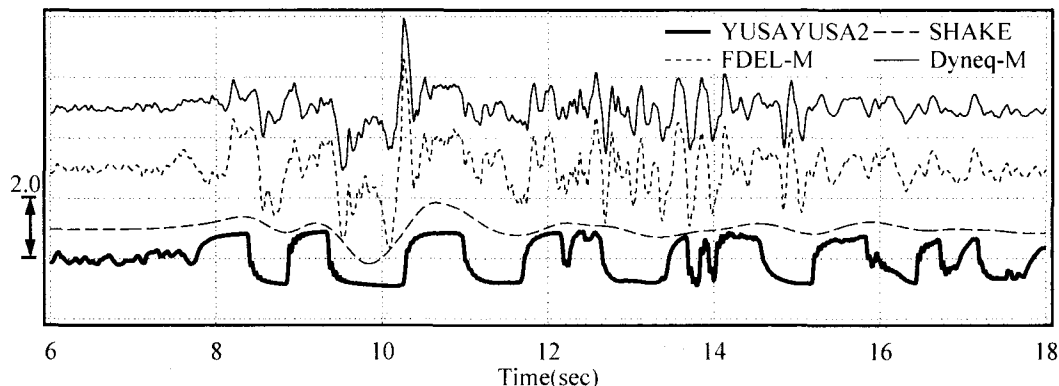
まず、地表面の最大加速度の精度に着目する。ここで、精度とは各周波数領域での解析法により得られた地表面最大加速度を時間領域での地表面最大加

速度で除した値の常用対数により評価する。また、その精度を地盤材料の非線形化の程度との関係で把握するため、入力波の入射波振幅レベルは 0.125m/s^2 から 3.0m/s^2 までの9段階とした。

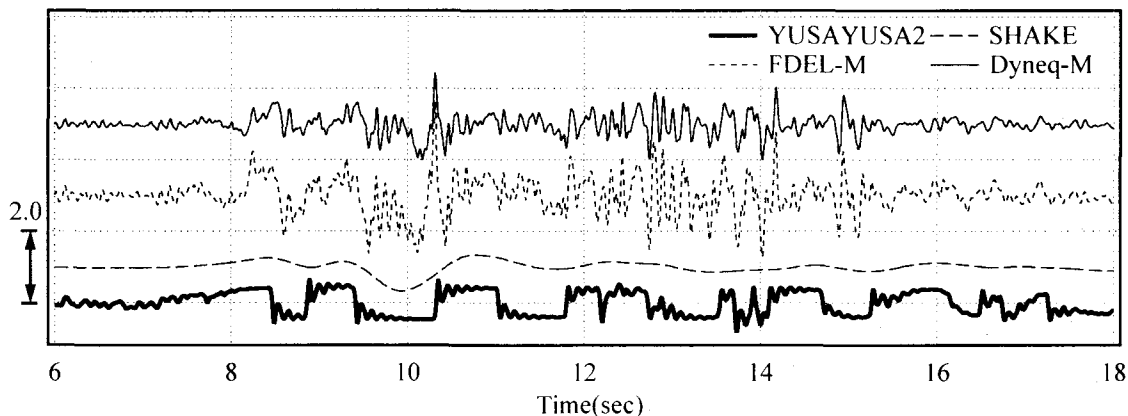
各解析法ごとに、5つの地盤モデルについて3つの入力波により得られた最大加速度の精度と入力波の振幅レベルとの関係を図-4に示す。これより、地表面最大応答加速度についてみると、SHAKE, DYNEQ-M



a) Fukiai 波に対する TYPE-A 地盤における地表面応答加速度時刻歴の比較



b) Fukiai 波に対する TYPE-B 地盤における地表面応答加速度時刻歴の比較



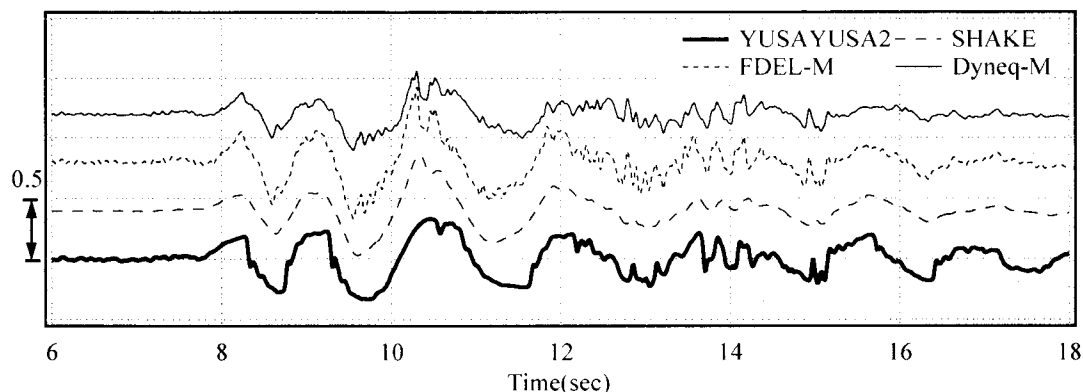
c) Fukiai 波に対する TYPE-E 地盤における地表面応答加速度時刻歴の比較

図-6 解析法に応じた Fukiai 波に対する TYPE-A, B および E 地盤における地表面応答加速度時刻歴の比較

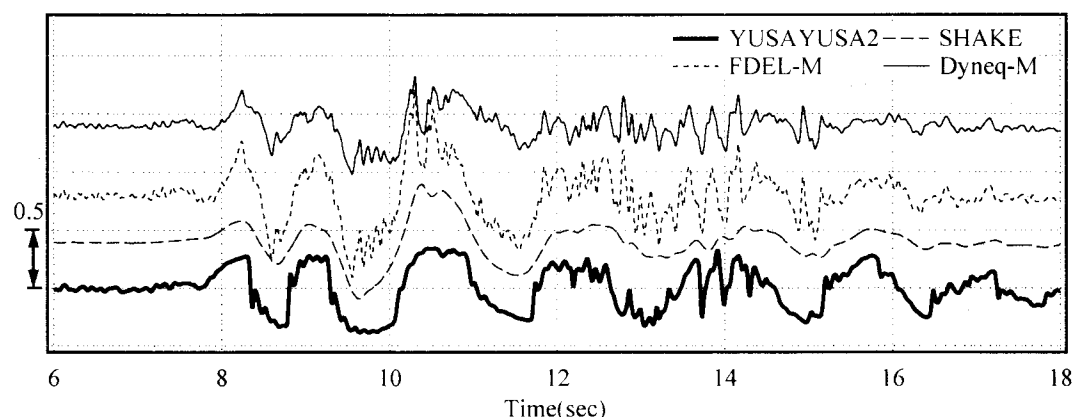
およびFDEL-Mの順に時間領域での最大値より大きな解析結果が得られ、地盤に応じた精度のばらつきが大きくなっていることが分かる。

手法間の精度の比較を、地表面における最大加速度応答のみならず最大速度および最大相対変位についても行うため、入力振幅レベルに応じた精度の平均およびその $\pm \sigma$ と精度の関係を図-5に示す。SHAKEは最大加速度、最大速度とも他の手法に比べ、精度が高いことが分かる。DYNEQ-Mは、最大加速度についてみると、小さな入力振幅レベルに対して時間領域での応答に比べ多少小さな応答値が得られるものの、入力振幅レベルが 1.0m/s^2 まではSHAKEと同程度の精度となっている。また、最大速度について

は、時間領域での応答値に比べ、1から2割程度小さな評価となっている。FDEL-Mは、最大加速度について、入力振幅レベルが 1.0m/s^2 で精度が0.3程度、つまり時間領域での応答値の2倍程度の値を与え、さらに入力振幅レベルが大きくなるにつれ、より過大な評価となっている。また、最大速度は、入力振幅レベルが 1.0m/s^2 まではSHAKEと同程度のよい評価となっているが、入力振幅レベルが大きくなるにつれ1割程度大きな評価となっている。最大相対変位は、SHAKEおよびFDEL-Mとも、入力振幅レベルが大きくなるにつれ、小さな評価となってる。DYNEQ-Mは、入力振幅レベルが 1.0m/s^2 程度まではSHAKEやFDEL-Mより小さな評価となっている。しかし、入力振幅レ



a) 入力振幅レベル 0.25m/s²



b) 入力振幅レベル 0.50m/s²

図-7 解析法に応じた TYPE-E 地盤における Fukiai 波の入力振幅レベルに応じた地表面応答加速度時刻歴の比較

ベルがそれより大きくなるにつれ、ばらつきは大きいものの、精度は比較的よいといえる。

4.2 地表面応答加速度時刻歴

TYPE-A, TYPE-BおよびTYPE-E地盤において、各解析法より得られたFukiai波に対する入力振幅レベル3.0m/s²に対する地表面応答加速度の時刻歴の比較を図-6に示す。ここで、TYPE-AはTYPE-C, TYPE-BはTYPE-Dと地盤の1次固有周期が同程度であることから、2つの地盤タイプの事例として抽出している。また、非線形化の程度の大きな応答加速度の時刻歴波形は入力地震波によらず図-6に示した波形と類似していることから、非線形化による手法間の差異が顕著な事例としてFukiai波に対する応答を事例として抽出している。これより、著しい非線形応答を示しているTYPE-B, TYPE-Eの波形形状は、いずれも時間領域での解析結果との対応は良くない。一方、TYPE-Aの波形形状は、いずれも全体的傾向として時間領域での解析結果と良く対応している。しかし、SHAKEは、主要動部分とそれ以降に認められる高周波数成分の影響が評価されていないことが分かる。

次に、TYPE-Eについて、非線形化の程度と波形形状との関係を把握するため、後述する地盤の非線形化の程度を表す基準化最大ひずみが3程度となる入力振幅レベル0.25m/s²と10程度となる入力振幅レベル0.50m/s²に対する各解析法により得られた地表面応答加速度時刻歴の比較を図-7に示す。ここで、図-6で示した入力振幅レベル3.0m/s²に対するTYPE-Aの基準化最大ひずみは3程度である。これより、非線形化の程度の比較的小さな入力振幅レベル0.25m/s²の場合、波形全体の傾向はいずれの解析法による結果とも時間領域での解析法と比較的良く対応している。非線形化の影響が顕在化している入力振幅レベル0.50m/s²の場合、加速度応答の頭打ちを伴う加速度振幅の正負の変化という観点ではいずれの解析法も時間領域での解析法の結果とある程度対応している。しかし、良い対応とはいえず、時間領域との対応を波形形状で評価するのは限界であろうと考えられる。また、SHAKEは、加速度応答の頭打ち傾向をある程度表しているものの、高周波数成分の影響が、いずれの入力レベルに対しても、図-6のTYPE-Aと同様に評価されていない。

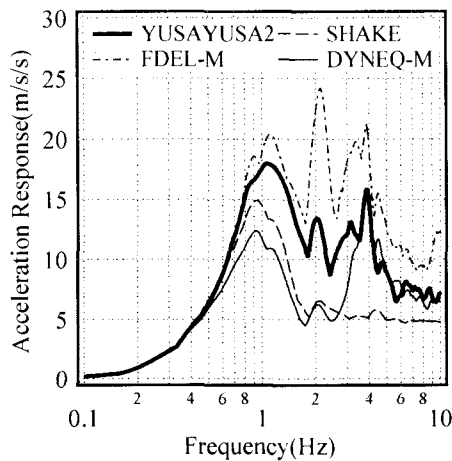
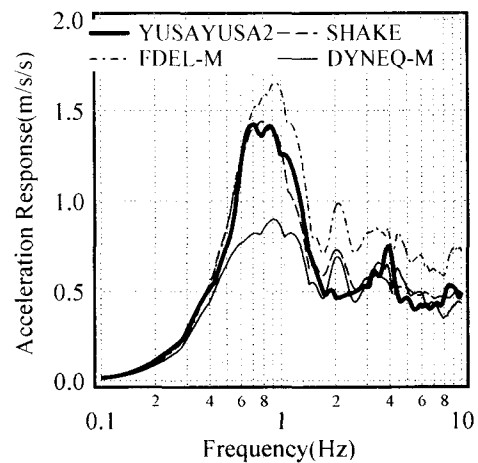


図-8 入力振幅レベル 3.0m/s^2 に対する TYPE-A 地盤の地表面応答加速度の加速度応答スペクトルの比較

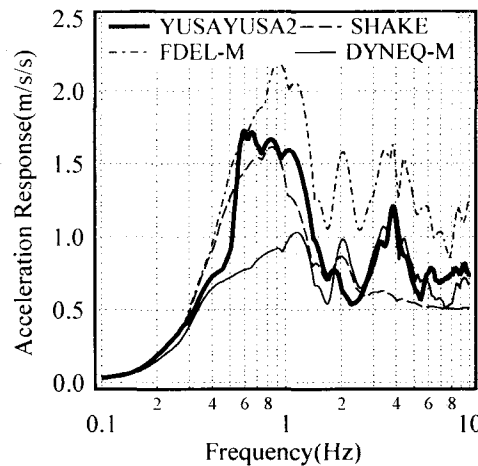
最後に、DYNEQ-MおよびFDEL-Mは、高周波数成分の影響は考慮しているものの、SHAKEのように加速度応答の頭打ちを十分に評価できていない。このことは、DYNEQ-MおよびFDEL-Mが図-5に示したように入力振幅レベルが大きくなるにつれ、時間領域での解析結果に比べ加速度応答を大きく評価していることの原因の一つであると考えられる。

4.3 周波数応答特性

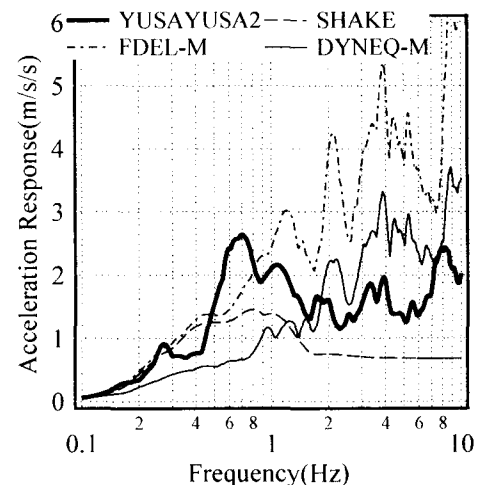
前節で用いた地表面応答加速度時刻歴のうち、TYPE-AおよびTYPE-Eにおける入力振幅レベル 3.0m/s^2 に対する加速度応答スペクトル ($h=5\%$)、さらにTYPE-Eについて地盤材料の非線形化の程度が波形形状に及ぼす影響を把握するために用いた図-6に示した入力振幅レベルに対する加速度応答スペクトル ($h=5\%$) の比較を図-8, 9に示す。SHAKEは、地盤タイプ、また入力振幅レベルによらず2から3Hzより高周波数帯域の振幅を小さく評価している。さらに、FDEL-Mは、地盤タイプ、また入力振幅レベルによらず、スペクトル振幅がいずれの周波数でも時間領域での解析結果に比べ大きな値となっている。また、非線形化の程度の顕著なTYPE-E地盤において、入力振幅レベルが 3.0m/s^2 に対する加速度応答スペクトルは、FDEL-M、DYNEQ-M、特にFDEL-Mが時間領域での解析結果と大きく異なり、周波数が高くなるにつれ大きな応答を示す結果となっている。一方、DYNEQ-Mはほぼ周波数2.0Hzより高周波数のスペクトル振幅は時間領域での解析結果と比較的よく対応しているものの、低周波数側でのスペクトル振幅が小さな評価となっている。



a) 入力振幅レベル 0.25m/s^2



b) 入力振幅レベル 0.50m/s^2



c) 入力振幅レベルが 3.0m/s^2

図-9 入力振幅レベルに応じた TYPE-E 地盤の地表面応答加速度の加速度応答スペクトルの比較

5. 基準化最大ひずみに基づく各解析法の適用範囲

各解析法の適用範囲について考察する。その際、地盤材料の非線形化の程度を表す指標として、各解

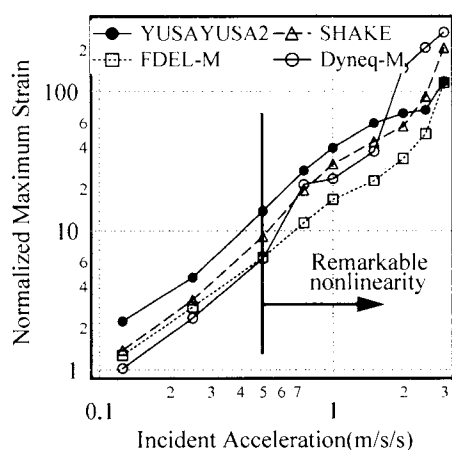


図-10 TYPE-E 地盤における解析手法に応じた入力振幅レベルと基準化最大ひずみの比較

析法により得られた各層の最大応答ひずみを基準ひずみ（剛性低下率50%時のひずみ）で基準化された基準化最大ひずみを用いる。この指標は、土質や拘束圧などにより地盤材料の非線形化の程度（例えば剛性低下率が0.1程度となるひずみレベル）が異なり、それらの差異の影響を排除し、より一般性を有する適用範囲としてのひずみレベルを評価するために用いた。図-10にTYPE-E地盤にFukiai波を入力した際の解析手法に応じた入力振幅レベルと基準化最大ひずみの関係を示す。ここで、前章で示した入力振幅レベルに応じた加速度応答時刻歴の精度より、入力振幅レベルが 0.5m/s^2 以下を適用範囲とすることができ、その時の基準化ひずみは周波数領域での手法に応じ6か8程度であることが分かる。TYPE-E地盤における最大ひずみ発生層の剛性低下率のひずみ依存特性を図-11に示す。図には基準ひずみ、さらに基準化最大ひずみが10のときのひずみレベルとそのひずみレベルに対する剛性低下率の関係を示している。これより、基準化最大ひずみが10程度となる際の地盤材料の非線形化の程度は、概ね剛性低下率で10%程度であることが分かる。図-6で示したTYPE-A地盤では、入力振幅レベルが 3.0m/s^2 でも基準化最大ひずみが3程度と適用範囲にあり、頭打ちを伴うような顕著な地盤材料の非線形性の影響が加速度時刻歴にみとめられないこととも調和している。さらに、TYPE-B地盤では入力振幅レベルが 1.0m/s^2 より大きくなるにつれ、加速度時刻歴に図-6に示したような顕著な非線形性の影響が認められる。ここで、入力振幅レベルが 1.0m/s^2 の際の基準化最大ひずみは時間領域での解析結果が10程度であり、これまでの結果と調和している。

以上のことは、各解析法の適用範囲は地盤や入力振幅に依存するのではなく、地盤材料の非線形化の程度に依存していることを示唆している。また、適

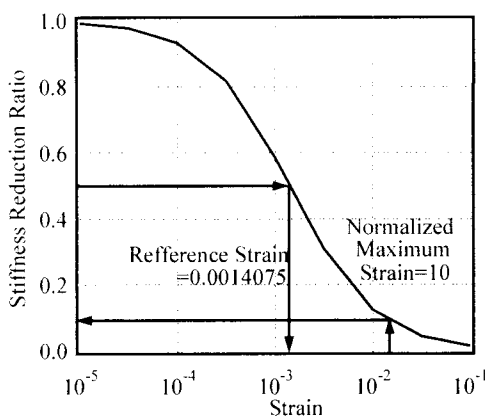


図-11 TYPE-E 地盤における最大ひずみ発生層の剛性低下率のひずみ依存特性

用範囲の目安を、基準化最大ひずみ6から7程度に設定出来る可能性があることが分かった。

6. 各解析法の課題

ここでは、時間領域での解析法との比較により周波数領域での3つの解析法の精度を評価するとともに、各周波数領域での解析法の適用ひずみレベルを示した。また、その過程で最近提案された周波数領域での解析法の課題も以下のように明らかとなった。

- (1) FDEL-Mは地表面における最大加速度、その加速度応答スペクトルとも、時間領域での解析法より大きな値を与える。
- (1) DYNEQ-Mは、高周波数帯域での加速度応答スペクトルを良い精度で評価するものの、低周波数帯域での加速度応答スペクトルが過小に評価される。また、最大加速度は入力振幅レベルが小さい場合には時間領域での解析法より、若干小さく、最大加速度は入力振幅レベルが大きい場合には10から20%ほど大きな評価となっている。

ここで、DYNEQ-Mの周波数応答に関する課題は初期減衰定数の周波数特性として、低周波数帯域、特に1.0Hz以下にて10%程度を考慮していることが影響していると考えられる。地盤の初期減衰特性に関する精度の高いモデルの構築が待たれるところではあるが、時間領域での応答との対応を配慮した修正を行う必要がある。また、地盤材料の非線形性の影響が顕著に現れる加速度応答時刻歴の頭打ち現象を評価する上で、応力-ひずみ空間で原点を中心とする周波数に応じて剛性や減衰定数の異なる楕円形状の応力-ひずみ履歴の重ね合わせとして評価することの有効性について、今後明らかにすることが必要である。このことは、周波数領域での解析法

の適用範囲を広げるという意味でも有用である。

さらに、本論では、高ひずみ時の減衰定数を大きく評価する双曲線モデルを地盤材料の非線形性モデルとして用いている。時間領域での解析法を用い高ひずみ時の応答評価を現実的に行うという観点で、R0モデルなどの高ひずみ時に材料自体の履歴減衰を比較的現実的に評価できるモデルについても同様な精度の評価を行い、地盤モデル、地盤材料の非線形モデルおよび入力地震波の特性に応じた総合的な精度評価も行うことが必要である。

最後に、これらの課題は対処の実現性が高く、今後、周波数領域での解析法の簡易性を損なわない改善が実施され、適用範囲が広がることが期待される。また、本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業：課題「中山間地および地方都市における環境共生とそれを支える情報通信技術に関する研究(代表：小野沢元久)」の一貫として実施したものである。

参考文献

1) Ishihara, K : Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis , *Proc. Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics*, pp.237-259, 1982.

- 2) 吉田望：2.2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特性シンポジウム発表論文集，(社)地盤工学会-軟弱地盤における地震動増幅と被害に関する研究委員会，pp. 14-31, 1994.
- 3) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：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考察，土木学会論文集，No. 493/III-27， pp. 49-58, 1994. 6.
- 4) 吉田望：地震応答解析における地盤物性をどう評価するか，液状化地盤における基礎設計の考え方-建築基礎の設計施工に関する研究資料4-，日本建築学会-基礎構造運営委員会編，pp. 29-45, 1998.
- 5) 吉田望，小林悟，三浦均也：大ひずみ領域を考慮した等価線形地震応答解析手法，第25回地震工学研究発表会，pp. 297-300, 1999.
- 6) 中村晋，吉田望：周波数領域での地盤材料の動的変形特性に基づく地盤の非線形地震応答解析法の提案，土木学会論文集，No. 722/III-61， pp. 169-187, 2002.
- 7) 吉田望，末富岩雄：DYNEQ-等価線形化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, 1996.
- 8) 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.
- 9) 吉田望，東畑郁生：「YUSAYUSA2 理論と解説」，1991

(2004. 4. 16 受付)