

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

中村 晋¹・吉田 望²

¹正会員 工博 日本大学工学部土木工学科 助教授(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原10
Email:s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp

²正会員 工博 応用地質(株)技術本部 技師長(〒330-8632 埼玉県さいたま市土呂町2-61-5)

時間領域での非線形地震応答解析より得られた応力-ひずみ関係のフーリエ変換により定常不規則過程下での周波数領域における応力-ひずみ関係を求めた。次に、周波数領域でのひずみより換算された時間領域に相当するひずみに基づく周波数領域でのせん断剛性と減衰定数のひずみ依存性をモデル化した。最後に、このモデルを用いた周波数領域での非線形解析手法を提案した。提案手法と従来の周波数領域での二つの解析法を時間領域での解析結果と比較したところ、基盤波入力に対する順解析、地表面入力に対する逆増幅解析のいずれでも提案手法は時間領域の非線形解析と同程度の推定精度があり、他の二つの手法より優れていることが明らかとなった。

Key Words: earthquake response analysis, nonlinear, equivalent linear, frequency dependent characteristics, frequency domain

1.はじめに

地盤の強非線形挙動の数値解析による評価手法には、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。前者は、数理モデル等の土の構成式を用い、地盤材料の非線形挙動の経時的变化を逐次評価する手法である。一方、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が、等価線形化法の適用範囲は応答ひずみが 10^{-3} を少し越える範囲であり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、解析に際して、前者の手法では、用いる物性モデルによるものの、ほとんどのモデルに必要なパラメーターの設定に解析者による差異が生じる。それに対し、後者の手法では動的変形特性試験の結果などをそのまま利用でき、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、つまり地表面で規定された設計地震動による構造物位置での入力地震動の再評価、さらに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い。

周波数領域での非線形解析法の課題は、地盤の塑性化に伴う震動特性の時間的变化、つまり強い非定常な挙動を適切に評価できないことに原因があると考えられる。その課題は、時間領域における非定常不規則な応力-ひずみ履歴を、周波数領域、つまり定常不規則過程の枠組みの中での適切にモデル化することにより改善が可能であると考えられる。これに対して、杉戸ら³⁾、吉田ら⁵⁾はひずみの周波数応答に着目し、周波数ごとの有効ひずみより地盤材料の動的変形特性を求める手法を提案している。これら動的変形特性の周波数依存性の提案は、高周波数成分の応答ひずみは一般に小さいことから、減衰を小さく評価でき、高周波数成分における減衰の過大評価という周波数領域での解析法の課題への対応が可能となっている。しかし、周波数領域での応力-ひずみ関係の評価に関する先駆的研究である前者の手法および後者の手法は、周波数毎の応答ひずみに応じた有効ひずみに対する動的変形特性が時間領域でのひずみと動的変形特性の関係と等価であることを暗黙の前提とし、その物理的根拠が希薄となっている。このことから、時間領域と周波数領域における土の応力-ひずみ関係を適切に評価し、モデル化することが地盤材料の非線形性を考慮した周波数領域での地震応答解析法を確立する上で必要であると考えられる。

表-1 解析地盤モデル

地点	No.	土質	層厚 (m)	質量 密度 (U/m^3)	せん断 剛性 (GPa)	せん断 強度 (kPa)	R-Oパラ メーター	
							α	β
千葉 実験 所	1	ローム	5	1.17	0.225	68.6	0.16	2.47
	2	砂質 粘土	5	1.53	1.536	460.6	0.02	2.29
	3	細砂	30	1.99	1.996	1078	0.12	2.29
					3.528	2940	0.03	2.47
関電 技研	1	表土	1.4	2.04	0.237	62.1	2.17	2.25
	2	粘土	1.2	2.04	0.331	61.3	1.61	1.52
	3	細砂	1.75	1.99	0.375	191.1	2.29	2.20
			2.2	2.04	0.331	177.4	2.39	2.61
	5	砂礫	1.55	2.09	0.651	355.7	2.27	2.41
	6	粘土	2.5	1.84	0.346	640.0	1.61	1.52
	7	砂礫	5.3	2.14	1.500	1120.1	2.28	2.43
	8	粘土	2.9	1.68	0.584	1080.0	1.61	1.53
			4.3	2.04	1.429	2643.1	1.61	1.53
	10	砂礫	3.8	2.04	4.515	-	-	-

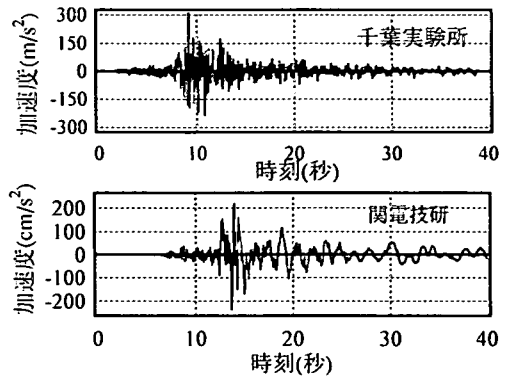


図-1 解析に用いた入力地震動の加速度時刻歴

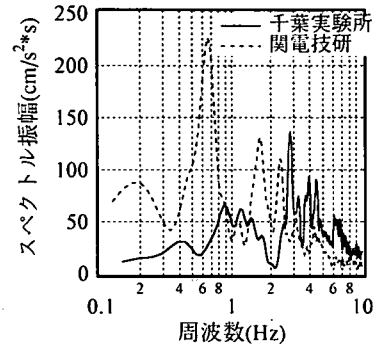


図-2 入力地震動のフーリエスペクトル

本論では、時間領域と周波数領域での土の応力-ひずみ関係を明らかにし、周波数領域での非線形地震応答解析法を提案するため、まず、時間領域での土の応力-ひずみ関係の周波数空間への座標変換に基づいた周波数領域での土の応力-ひずみ関係および動的変形特性の評価手法を提案する。次に、その手法を用い、時間領域での土の応力-ひずみ関係に基づいて算出した周波数領域での土の応力-ひずみ関係より、周波数領域でのその特性のモデル化、さらにそれを考慮した非線形地震応答解析法の提案を行う。ここで、時間領域での土の応力-ひずみ関係は、実地盤の鉛直アレー地震観測記録から推定する手法⁹⁾もあるが、既往の記録では地震計間の距離が長く、平均的な挙動を論じることは出来ても詳細な地盤の応力-ひずみ関係を論じるには不足である。ここでは、両領域における応力-ひずみ関係を比較することが重要であることから、時間領域でその関係が既知である時間領域での逐次非線形地震応答解析を用いた推定を行う。検討対象として、地震応答解析による推定の有意性を確認できる強震記録が得られている、東京大学生産技術研究所の千葉実験所および関西電力技術研究所の2つの地盤を対象とした。

2. 検討地盤モデルと地震応答性状の概要

時間領域での土の応力-ひずみ関係は、東京大学生産技術研究所の千葉実験所および関西電力技術研究所(以後、関電技研と呼ぶ)の2地点を対象とし、逐次積分非線形解析コード「YUSAYUSA2」⁷⁾を用いた地震応答解析により評価した。2地点の解析地盤モデルを表-1に示す。また、解析に用いた土の応力-ひずみ関係は両地点ともMasing則を履歴則としたRamberg-Osgoodモデル(R-Oモデル)であり、その解析パラメーターも表に合わせて示した。ここで千葉実験所における解析地盤モデルおよびパラメーターは鹿らが解析と観測値との比較に基づいて設定した値⁹⁾を用いた。また、関電技研では、剛性低下率5割時のひずみを基準ひずみとし、吉田らの解析モデル⁷⁾で用いられた動的変形特性と低ひずみ時からひずみ1.0%程度までのR-Oモデルの骨格曲線が適合するようにパラメーターを設定した。千葉実験所における入力地震動は、1987年千葉県東方沖地震(Mj=6.7)で観測された地中の記録(GL-40m, NS成分)を表層地盤における最大せん断ひずみが基準ひずみ(3.0×10^{-3})程度となる様に振幅調整(原記録を3倍)して用いた。関電技研では、兵庫県南部地震で

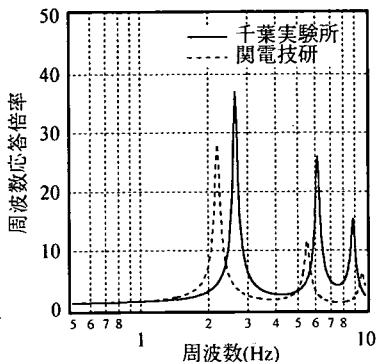


図-3 周波数応答関数の比較

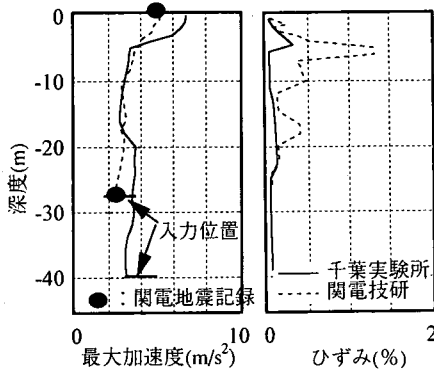
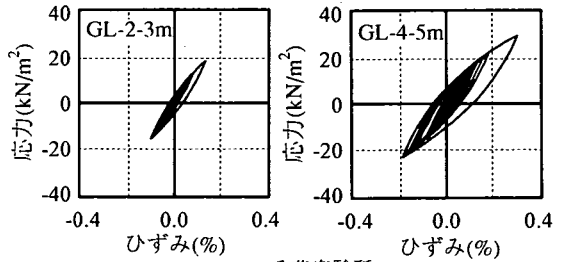
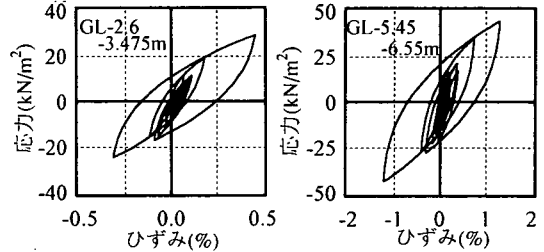


図-4 最大加速度・ひずみの深度分布の比較



a)千葉実験所



b)関電技研

図-5 検討に用いた時間領域における応力-ひずみ履歴

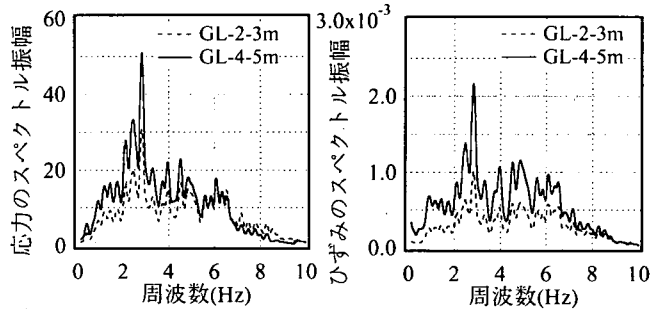


図-6(a) 検討層における応力、ひずみのフーリエスペクトル(千葉実験所)

観測された地中の記録 (GL-24.9m, EW成分) を用いた。解析には、これら入力地震動を複合波として入力した。また、初期減衰特性には、Rayleigh減衰のうち質量に関する係数 α をゼロとし、両地盤の1次固有周期における減衰定数が1%程度となるように係数 β (=0.001)を設定した、剛性比例型減衰を考慮した。各入力地震動の加速度時刻歴を図-1に、そのフーリエスペクトルを図-2に示す。また、両地点における初期地盤モデルに対する周波数応答関数を、各層の減衰定数を2%としたS波重複反射理論に基づいて算出し、図-3に示す。千葉実験所における各次の固有周波数は1次より2.7、6.2、8.8Hzとなっており、1次から高次モードに順次、応答倍率が低下している。一方、関電技研における各次の固有周波数は1次より2.2、5.5、9.7Hzとなっており、1次モードの応答倍率が高次モードに比べ大きな値となっている。

まず、解析より得られた最大加速度および最大ひずみの分布を図-4に示す。関電技研では、地表面最

大加速度の解析値が 5.12m/s^2 であり、観測値(5.07m/s^2)と同程度の値となっている。この応答解析結果を踏まえ、周波数領域での応力-ひずみ関係および動的変形特性の評価に用いる時間領域での応力-ひずみ履歴を抽出する。千葉実験所では、最大せん断ひずみ(0.3%)が生じているGL-4~5mおよびその30%程度のひずみが生じているGL-2~3mにおける応力-ひずみ履歴、関電技研では最大ひずみ(1.3%)が生じているGL-5.45~6.55mおよび千葉実験所における最大ひずみと同程度のひずみ(0.43%)が生じているGL-2.6~3.475mにおける応力-ひずみ履歴を抽出の対象とし、それら応力-ひずみ履歴を図-5に示す。

次に、各層の応力とひずみのフーリエスペクトルを図-6に示す。これらは、Parzen Windowによりフィルター処理(バンド幅=0.2Hz)を行ったものである。千葉実験所における応力とひずみのスペクトル振幅はいずれも周波数1~6.5Hz、特に地盤の1次固有周

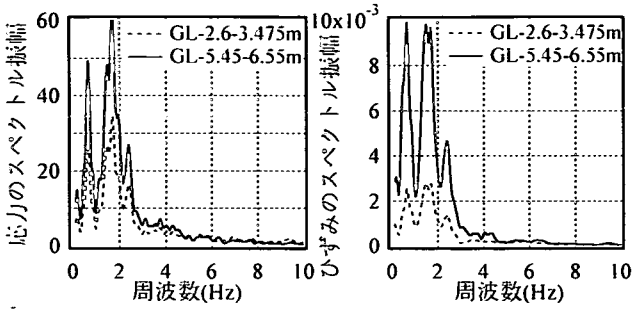


図-6(b) 検討層における応力、ひずみのフーリエスペクトル(関電技研)

波数に対応する2~3Hzにて最も卓越し、地盤の1および2次固有周波数の間にも比較的大きな振幅が認められる。それより低・高周波数側の振幅は、それら周波数帯の振幅に比べかなり小さな値となっている。関電技研における応力とひずみのスペクトル振幅は、いずれも図-2に示した入力地震動の最も卓越する周波数帯である0.6~0.8Hz、さらに地盤材料の非線形化に伴う1次モードの低周波数化の影響と推定される1.5~1.8Hzにて卓越している。それより低・高周波数側の振幅は、それら周波数帯の振幅に比べかなり小さな値となっている。両地点における周波数に応じた応力振幅の変化は、時間領域と同様にひずみの振幅の変化に対応していることが分る。

3. 周波数領域での地盤材料の動的変形特性の評価手法とその特性

(1) 周波数領域での応力-ひずみ関係

時間領域でのせん断応力 $\tau(t)$ -せん断ひずみ $\gamma(t)$ の履歴は直交する応力軸とひずみ軸上で構成される空間に表される。その直交座標系上の任意時刻 t における履歴の座標を原点からの履歴ベクトル $f_s(t)$ として定義すると、その履歴ベクトルは式(1)の様に複素空間で表すことができる。ここで、その非定常不規則な履歴ベクトルを、継続時間 T を基本周期とする定常不規則過程と仮定すると、ベクトルスペクトルの手法¹⁰⁾を用いフーリエ変換すれば、円振動数 ω 毎の履歴ベクトルの軌跡は、せん断応力(以後、応力と呼ぶ)とせん断ひずみ(以後、ひずみと呼ぶ)軸上で図-7に示す楕円となる。さらに、その手法¹⁰⁾で示された円振動数 ω 毎の履歴ベクトルの形状である楕円を規定する長軸と短軸のスペクトル振幅の評価手法を用いることにより、円振動数 ω 毎の応力、ひずみ空間上での楕円軌跡の長軸、短軸のスペクトル振幅 $a(\omega)$ 、 $b(\omega)$ はそれぞれ式(2)の様に表される。こ

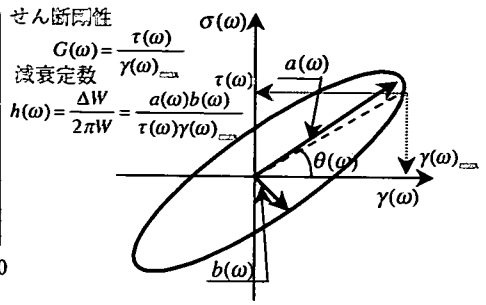


図-7 フーリエ変換された応力-ひずみ関係

こで、 $P_\tau(\omega)$ 、 $P_\gamma(\omega)$ は応力、ひずみのパワースペクトル、 $k_{\tau\gamma}(\omega)$ はコスペクトルを表す。

$$f_s(t) = \gamma(t) + \tau(t)j \quad (1)$$

$$a(\omega) = 2\sqrt{\frac{2\pi A(\omega)}{T}}, \quad b(\omega) = 2\sqrt{\frac{2\pi B(\omega)}{T}}$$

$$A(\omega) = \frac{P_\tau(\omega) + P_\gamma(\omega) + \sqrt{\{P_\tau(\omega) - P_\gamma(\omega)\}^2 + 4K_{\tau\gamma}(\omega)^2}}{2}$$

$$B(\omega) = \frac{P_\tau(\omega) + P_\gamma(\omega) - \sqrt{\{P_\tau(\omega) - P_\gamma(\omega)\}^2 + 4K_{\tau\gamma}(\omega)^2}}{2} \quad (2)$$

ここでは、図-7に示した円振動数毎の応力-ひずみ関係を、周波数領域での応力-ひずみ関係と定義する。その円振動数 ω に対する応力-ひずみ履歴は、調和応力波とそれが地盤要素に作用した際に位相遅れを伴って生じる調和ひずみ波との関係と見なすことができる。すると、その応力とひずみの関係は線形粘弾性理論²³⁾に基づき複素剛性によって関係づけられる。その複素剛性の定義に従えば円振動数 ω に対するせん断剛性および減衰定数は、図-7に示した様に、応力-ひずみ軌跡を規定する長軸、短軸のスペクトル振幅と長軸とひずみ軸とのなす角 $\theta(\omega)$ より、式(3)のように表すことができる。ここで得られた円振動数 ω に対するせん断剛性および減衰定数とひずみの関係を周波数毎に列ねると、時間領域での動的変形特性と同様にひずみ依存特性を得ることができる。ここでは、それを周波数領域での動的変形特性のひずみ依存特性と呼ぶ。

$$G(\omega) = \frac{\{a(\omega)^2 - b(\omega)^2\} \sin 2\theta(\omega)}{2\{a(\omega)^2 \cos^2 \theta(\omega) + b(\omega)^2 \sin^2 \theta(\omega)\}}$$

$$h(\omega) = \frac{a(\omega)b(\omega)}{\sin 2\theta(\omega)\{a(\omega)^2 - b(\omega)^2\}} \quad (3)$$

前述の二地点のひずみ振幅の大きな層の応力とひずみの時刻歴より得られた応力-ひずみ関係のうち、

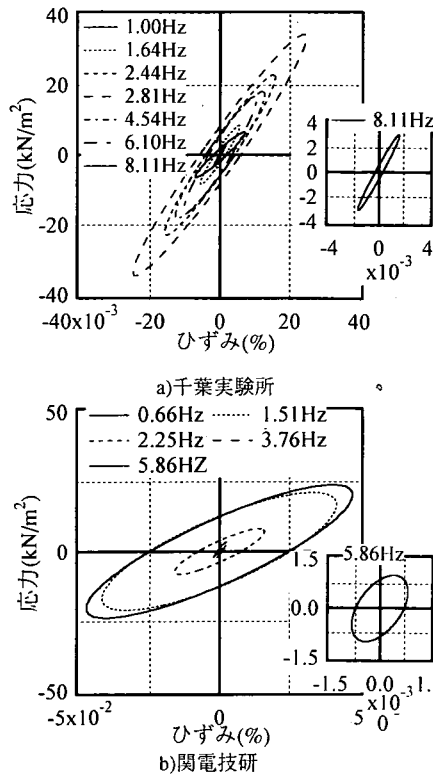


図-8 両地点における検討対象層の周波数領域での応力-ひずみ関係

比較的振幅レベルの大きな周波数を含む幾つかの周波数（千葉実験所；7，関電技研；5）での関係を図-8に示す。その際、応力とひずみのスペクトルはParzen Window処理（バンド幅=0.2Hz）より求めた。

千葉実験所では周波数が1.64から6.1Hz、関電技研では周波数0.66から2.25Hzの間、履歴を表す楕円の長軸方向はほぼ同じである。しかし、千葉実験所におけるひずみ振幅の小さい8.1Hz、関電技研における3.76Hzおよび5.86Hz、特に3.76Hzでは履歴を表す楕円の長軸方向の傾き、言い換えれば剛性が前述の周波数の傾きより大きな値となっている。このことは、周波数領域においても、剛性は概ねそのひずみ振幅に依存していることを示している。さらに、楕円の長軸と短軸の比も、ひずみ振幅の小さな周波数では比較的大きな周波数に比べ小さく、減衰特性もひずみ振幅に依存していることを示している。

一方、千葉実験所における周波数1.0Hzでは、ひずみ振幅が小さいにも関わらず傾きが他の周波数に比べ小さい。また、関電技研におけるひずみ振幅が小さい周波数5.86Hzでは、長軸の傾きはひずみレベルの大きな周波数に比べ大きいものの、長軸と短軸の比は他の周波数に比べかなり大きな値となっている。一般に、強震時におけるひずみ時刻歴には残留

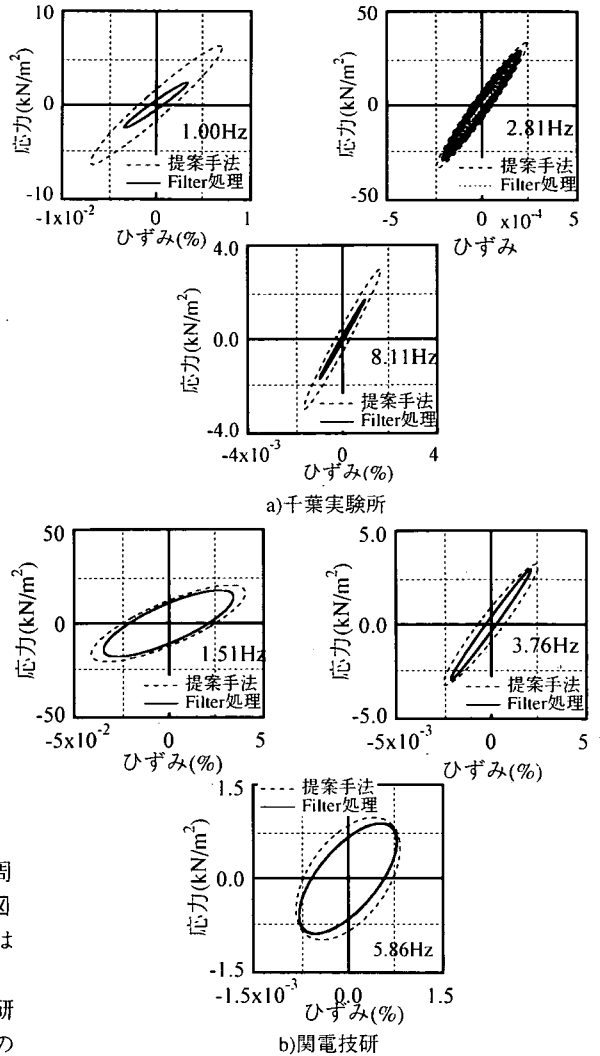


図-9 フーリエ変換およびバンドパスフィルター処理による応力-ひずみ関係の比較

ひずみを伴うことになるが、フーリエ変換により求めた応力-ひずみ関係は時間領域における応力、ひずみ軸の原点に固定された履歴ベクトルのフーリエ変換より求めており、残留ひずみの発生に伴う原点の移動を考慮していない。残留ひずみの発生、言い換えればひずみ時刻歴の基準線（0線）のステップ関数状の変化は、低周波数帯域のひずみ振幅に表れる。応力・ひずみ振幅の小さな低周波数帯、例えば、千葉実験所における周波数0.5-1.0Hz以下では、応力振幅の低下しているにも関わらずひずみ振幅が低下せず、また増加している。このような応力振幅の小さな低周波数帯にみられるひずみ振幅の増加傾向は、残留ひずみが影響しているものと考えられる。そのことは、ひずみ振幅が過大評価となり、剛性の過小評価をもたらすことになる。また、関電技研にお

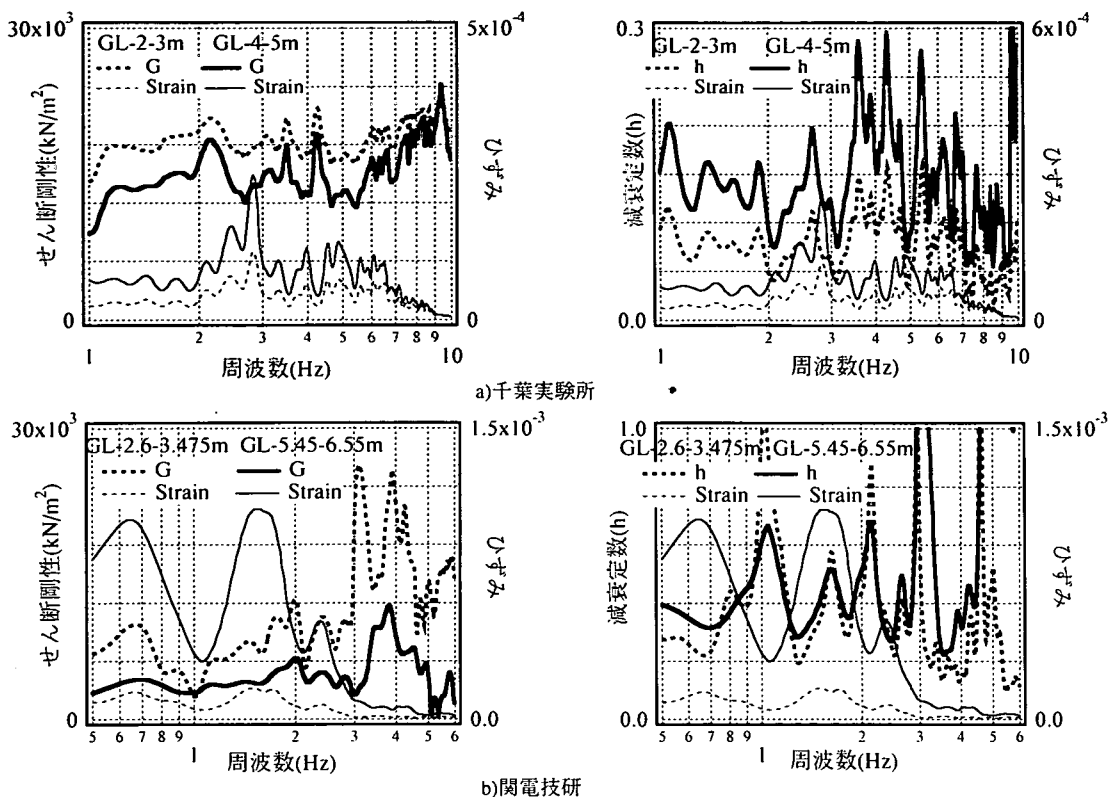


図-10 せん断剛性および減衰定数の周波数特性

るひずみレベルが 10^{-5} 程度以下の周波数5.86Hz以上の成分に対しては、ひずみレベルが小さいにもかかわらず長軸と短軸の比率が大きい、つまり減衰定数が大きく、周波数領域の動的変形特性のうち減衰特性については抽出可能な分解能を有していないものと考えられる。このことから、周波数領域における動的変形特性の推定では、低・高周波数帯域の低ひずみ振幅の評価には注意が必要であることが分かる。

次に、式(2)による応力-ひずみ関係評価の妥当性を把握するため、千葉実験所では1.00, 2.81および8.11Hz近傍、関電技研では1.51, 3.76および5.86Hz近傍を対象として、応力、ひずみ時刻歴をバンドパスフィルター（バンド幅；対象周波数 $f_0 \pm 0.01f_0$ ）処理することにより得られた応力、ひずみ時刻歴による応力-ひずみ関係（以後、フィルター処理履歴曲線と呼ぶ）との比較を図-9に示す。千葉実験所の周波数2.81および8.11Hz、関電技研の1.51から5.86Hzでは、フーリエ変換による応力-ひずみ関係の長軸の傾きはフィルター処理履歴曲線と同程度、応力・ひずみ振幅の差異はフィルター処理による値と同程度また1.3倍程度とほぼ一致している。しかし、千葉実験所における1.00Hzでは、前述の理由により提案手法による応力-ひずみ関係とフィルター

処理履歴曲線とは、長軸方向の傾きが若干異なり、各振幅も2倍程度の差異となっている。

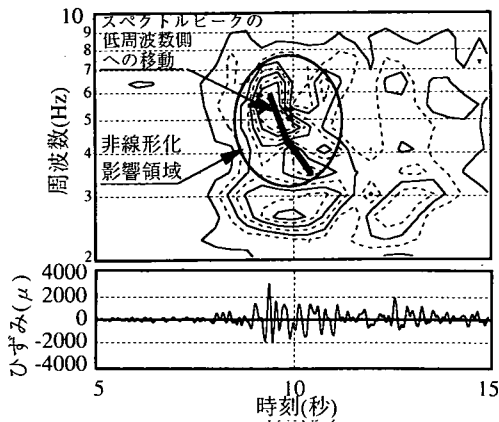
このように、フーリエ変換で求めた応力-ひずみ関係の特性は、フィルター処理履歴曲線ともほぼ一致する結果を与えていることから、周波数領域における応力-ひずみ関係を評価する手法として妥当であると考えられる。

(2)動的変形特性の周波数特性

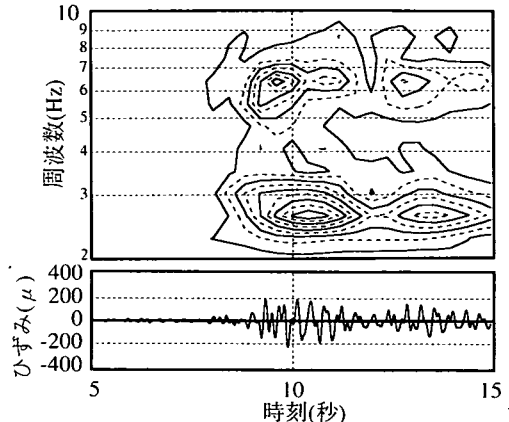
a)せん断剛性および減衰定数の周波数特性

両地点における2つの検討対象層で得られた応力・ひずみ時刻歴に基づき、式(3)より算出したせん断剛性および減衰定数の周波数特性を図-10に示す。図には、せん断ひずみの周波数特性も合わせて示す。ここで、検討周波数帯域は、前項で示したことを踏まえ千葉実験所で1.5から10Hz、関電技研で0.5から6.0Hzとした。

千葉実験所では、概ねせん断剛性や減衰定数がひずみ振幅の大きさに依存しているが、両者の関係は線形的な帯域と必ずしも線形的でない帯域に分けられる傾向が認められる。後者の周波数帯域である3.0から6.0Hzの間では、ひずみ振幅のピークが周波数2.81Hzにおけるひずみ振幅より小さいにも拘わら

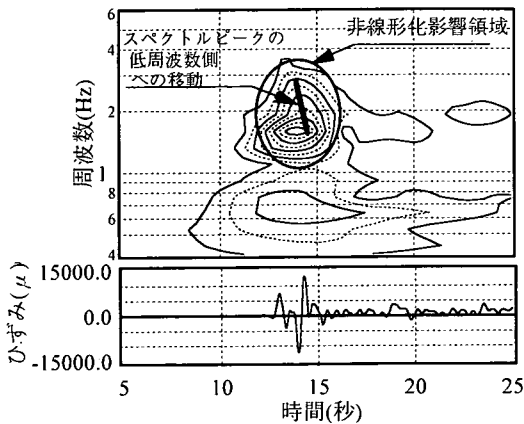


a) 原地震記録に対する応答

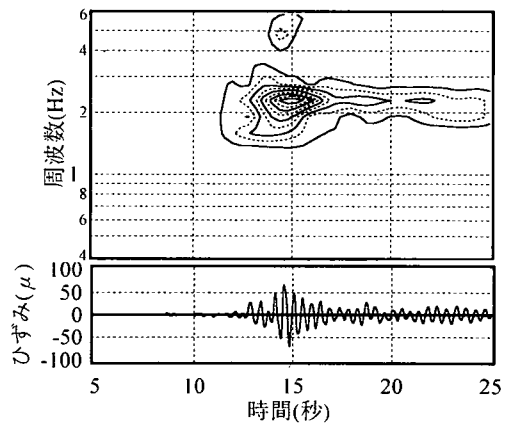


b) 低ひずみレベルの応答

図-11 千葉実験所における応答ひずみの非定常スペクトル(GL-4.5m)



a) 原地震記録に対する応答



b) 低ひずみレベルの応答

図-12 関電技研における応答ひずみの非定常スペクトル(GL-5.45-6.55m)

ず、ひずみ振幅ピーク時のせん断剛性がひずみ振幅の最も大きな周波数2.81Hzと同程度の値となっている。減衰定数も同周波数帯にて、周波数2.81Hzにおける値より大きな値となっている。関電技研においては、千葉実験所ほどせん断剛性とひずみ振幅の大きさに明確な関係は認められないものの、周波数3.0Hzより低周波数側において1.0Hzおよび3.0Hz近傍を除けば、ひずみ振幅ピーク時(0.66Hz, 1.51Hz)近傍にてせん断剛性はほぼ最小値を与えている。また、千葉実験所と同様に、比較的ひずみ振幅の大きな2.25Hz近傍においても、ひずみ振幅ピークと同程度のせん断剛性を与え、千葉実験所と同様にひずみとせん断剛性に線形でない関係が認められる。さらに、3.0Hzより高周波数側のひずみ振幅の小さな周波数帯のうち、5.0Hzから6.0Hzでは剛性が低下している。一方、減衰定数はひずみ振幅によらず減衰定数が1.0以上と極端に大きな値を与える周波数がみられる。その周波数近傍を除いても、減衰定数は0.1から0.9程度と時間領域の減衰特性に比べかなり

大きな値を与えている。

b) 動的変形特性の周波数特性に及ぼすせん断ひずみの非定常応答の影響

両地点におけるせん断剛性とひずみ振幅の周波数特性の関係が線形的ではない周波数帯に着目し、せん断ひずみの非定常応答、言い換えれば地盤の非線形化との関連を、両地点のひずみ振幅の大きな層で得られたひずみの時刻歴の非定常性を対象とし、把握する。図-11, 12に、神山の手法¹¹⁾を用いて算出したせん断ひずみの非定常スペクトルを示す。図中の実線と波線は、スペクトル強度の最大値を100とし、10の奇数、偶数倍に対するスペクトル強度の等高線を示し、その値は外周より内側に向けて増加している。さらに、地盤材料の非線形化の有無がひずみの非定常性におよぼす影響を把握するため、地盤の応答がほぼ線形応答となるように入力波の振幅を調整(原記録の0.2倍)することにより得られたひずみの非定常スペクトルも図に合わせて示す。

まず、千葉実験所の時間領域でのひずみ振幅レベ

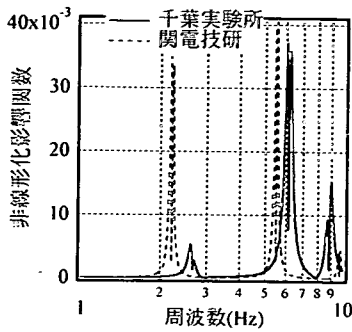


図-13 非線形化影響関数の比較

ルの大きな7から12秒におけるスペクトル特性に着目すると、低ひずみ応答の周波数2.5Hz, 6.0Hz近傍にて高い卓越が認められる。これらは、初期地盤の1次, 2次固有周波数に対応している。一方、高いひずみ応答では図中○内の実線（周波数毎のスペクトルピークの変化）で示した様に初期地盤モデルの2次固有周波数に相当する周波数6.0Hz近傍より時間の経過とともにスペクトルのピークが低周波数側の3-4Hzへ移動している傾向が認められる。次に、関電技研の時間領域でのひずみ振幅レベルの大きな12から16秒におけるスペクトル特性に着目すると、低ひずみ応答では初期地盤の1次固有周波数に相当する周波数2.2Hz近傍にて卓越が認められる。一方、高ひずみ応答では高いひずみ応答では図中○内の実線（周波数毎のスペクトルピークの変化）で示した様に周波数3.0Hz近傍のスペクトルピークが低周波数側の1.5Hz近傍へ移動し、その強度が大きくなる傾向が認められる。その1.5Hz近傍では、その様なスペクトルピークの移動に先立ち、図-2に示した入力地震動のスペクトル強度の大きな周波数に対する応答により、スペクトルが大きくなる傾向も認められる。

この様な非定常スペクトル特性の変化は、表層地盤の塑性化に伴う卓越周波数の低周波数への移動の影響によることが、ひずみレベルの異なる非定常スペクトルの比較より明らかである。さらに、高ひずみ応答の非定常スペクトルにおいて、スペクトル特性の変化は最大ひずみ振幅が発生している時刻（千葉実験所；9-10秒，関電技研；13-15秒）の間に生じている。これらより、千葉実験所における周波数が3.0から6.0Hzの間に見られるひずみのスペクトル振幅によらずせん断剛性が同程度の値を示している傾向は、地盤の塑性化の影響を受けている周波数帯域の地盤材料特性が時間領域における最大応答時の地盤材料特性の影響を受けているためと考えられる。

検討対象層の非線形化が地盤全体の周波数応答関数に影響を、式(4)に示すS波重複反射理論に基づく

地盤の周波数応答関数 $U(\omega, V_1, \dots, V_i, \dots, V_n)$ を対象層のせん断波速度 V_i で偏微分することにより得られた非線形化影響関数 $DU_i(\omega)$ により評価することにする。

$$DU_i(\omega) = \left| \frac{\partial U(\omega, V_1, \dots, V_i, \dots, V_n)}{\partial V_i} \right| = \left| \frac{\partial}{\partial V_i} \left(\frac{1}{|R(1.1)|} \right) \right| \quad (4)$$

$$[R] = [S]_n \cdots [S]_i \cdots [S]_1 \quad (5)$$

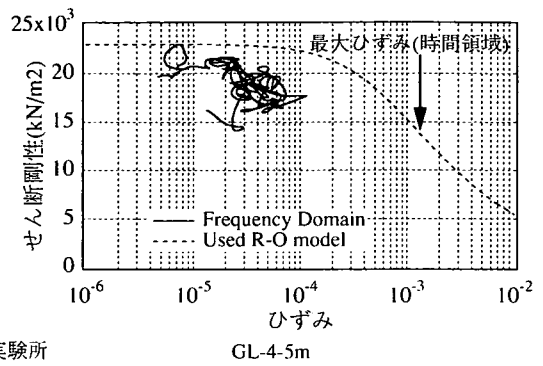
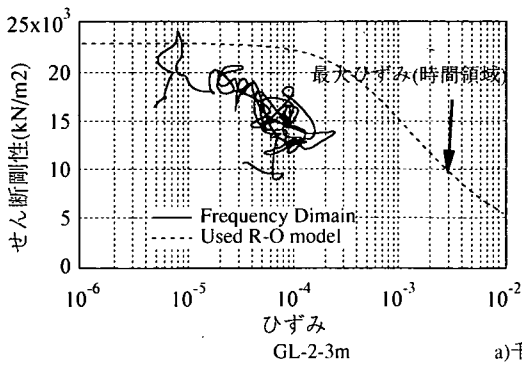
$$\left. \begin{aligned} S(1.1)_i &= 0.5 \{ \exp(ik_i h_i) + \exp(-ik_i h_i) \} \\ S(1.2)_i &= 0.5 \left\{ \frac{i(-\exp(ik_i h_i) + \exp(-ik_i h_i))}{G_i k_i} \right\} \\ S(2.1)_i &= 0.5 i G_i k_i \{ \exp(ik_i h_i) + \exp(-ik_i h_i) \} \\ S(2.2)_i &= 0.5 \{ \exp(ik_i h_i) + \exp(-ik_i h_i) \} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、式(5)中の $[R]$ は式(6)に示す様に層マトリックス $[S]_i$ の積である。また、 k_i は i 層の波数 ($= \omega / V_i$)、 G_i は i 層のせん断弾性、 h_i は i 層の層厚、 ω は円振動数を表す。

非線形化影響関数は、ある層のせん断波速度の変化をその層の非線形化と見なし、それによる地表と基盤間の地盤の周波数応答関数の変化率を示している。その値の大きな周波数帯は、その周波数帯における振動モードおよび入力地震動がその層の非線形化に影響を及ぼすことを示している。両地点における検討対象層のうちにひずみレベルの大きい層に関する非線形化影響関数を図-13に示す。これより、各地点における検討対象層の非線形化は、千葉実験所で周波数6.0近傍、関電技研では2.2および5.5Hz近傍に影響を及ぼすことが分かる。これら非線形化の影響周波数は非定常スペクトルに見られる非線形化の開始周波数と良く対応しており、前述の非定常スペクトルに認められるスペクトル特性の解釈の妥当性を示している。

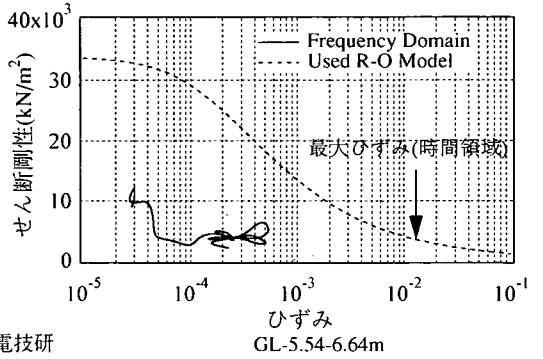
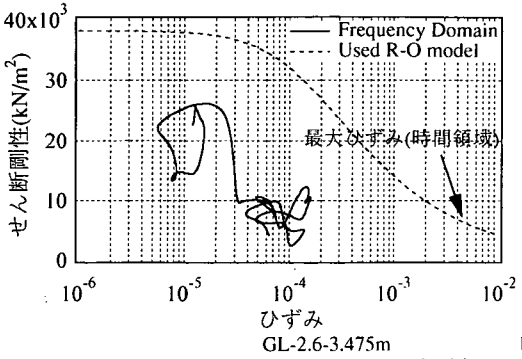
(3) 時間領域と周波数領域における動的変形特性のひずみ依存性の比較

周波数および時間領域における動的変形特性つまりせん断剛性と減衰定数のひずみ依存性の比較を行う。ここで、周波数領域の動的変形特性のひずみ依存性とは、図-10に示した周波数毎のひずみ振幅 $\gamma_f(\omega)$ とせん断剛性および減衰定数の関係を示す。両領域における動的変形特性のひずみ依存性の関係を図-14, 15に示す。ただし、関電技研における減衰定数の周波数特性は、図-10に示した様にひずみ振幅との相関が見られないことから、検討の対象とはしない。比較に先立ち、両地点における時間領域の動的変形特性のうち基準ひずみに着目すると、千葉実験所では両層 3.0×10^{-3} 、関電技研では $6 \sim 7 \times 10^{-4}$ であり、同じ応答ひずみでも関電技研の方が非線形化し易いことに留意する必要がある。



a)千葉実験所

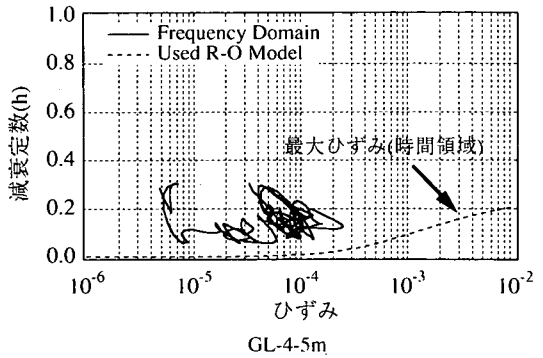
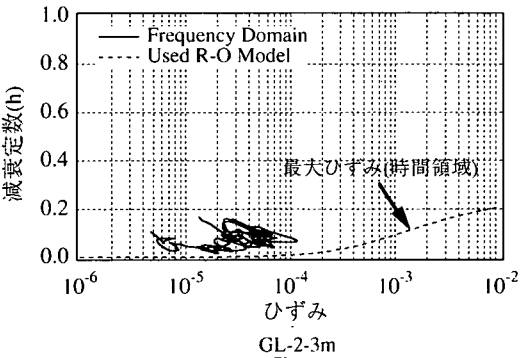
GL-4-5m



b)関電技研

GL-5.54-6.64m

図-14 周波数領域におけるせん断剛性のひずみ依存性



GL-2-3m

GL-4-5m

図-15 千葉実験所における周波数領域の減衰定数のひずみ依存性

まず、全体的傾向として、両領域におけるせん断剛性が同程度の値を与えるひずみ振幅の大きさが異なるものの、周波数領域におけるひずみ振幅とせん断剛性の関係にはひずみ振幅の増大とともに低下する傾向が認められる。また、減衰定数についても、両領域における値が同程度となる際にひずみが異なるものの、それはひずみ振幅の増大とともに増加する傾向が認められる。つまり、周波数領域における動的変形特性の周波数依存性は、時間領域における特性と相似な傾向が認められる。

次に、両領域における最大ひずみ時のせん断剛性に着目すると、千葉実験所の第2層(GL-4~5m)において、周波数領域の最大ひずみ (2.5×10^{-4}) に対するせん断剛性はほぼ初期剛性の5割程度であり、時

間領域における最大ひずみ (3×10^{-3}) 時のせん断剛性低下率と同程度である。また、関電技研の第2層(GL-5.45-6.55m)においても、周波数領域の最大ひずみ (5×10^{-4}) 時のせん断剛性は初期剛性の1割程度であり、時間領域における最大ひずみ (1.3×10^{-2}) におけるせん断剛性低下率と同程度となっている。この傾向は両地点における検討対象の第1層においても同様である。この様に両領域における最大ひずみ時におけるせん断剛性の低下率はほぼ同程度であることが分かる。減衰特性についても、両領域における最大せん断ひずみ時の減衰定数の値が同程度の値となっており、せん断剛性と同様の傾向がみられる。

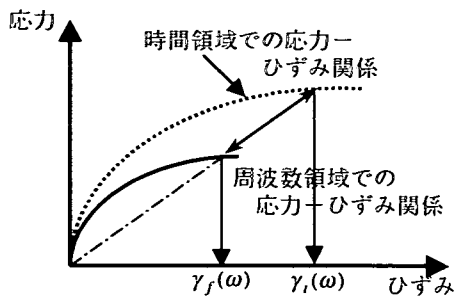


図-16 両領域における応力-ひずみ関係の相似性

4. 周波数領域での地盤材料の動的変形特性のモデル化

(1) 地盤材料の動的変形特性のモデル化

両領域における応力-ひずみ関係の比較により、周波数領域における地盤材料の応力-ひずみ関係は以下の特徴を有することが明らかとなった。

- ①時間領域における動的変形特性のひずみ依存性と相似している。
- ②地盤材料の塑性化に伴う影響周波数帯域は最大ひずみに依存している。

これら2つの特徴をふまえ、周波数領域での地盤材料の動的変形特性であるせん断剛性および減衰定数のひずみ依存特性のモデル化を行う。その際、両領域における動的変形特性を人為的また経験的なパラメーターを導入せずに厳密に関連づけることは困難である。よって、前述の2つの特徴を物理的関係別とした、第一近似的なモデル化を行う。そのことは、得られたモデルが時間領域の座標変換としての周波数領域における非線形応力-ひずみ関係のモデルであることを損なうものではない。

a) せん断剛性のひずみ依存特性のモデル化

①で示したせん断剛性のひずみ依存特性の相似性に着目したモデル化を行う。地震応答として得られる時間領域の応力、ひずみ時刻歴は、一般に種々の周波数成分の重ね合わせとして得られることから、応答が単一の周波数で構成される場合を除き、周波数毎の応力、ひずみ成分の振幅は時間領域での最大振幅などの振幅レベルより小さな値となる。そのような周波数空間への座標変換により得られた周波数領域での応力-ひずみ関係が時間領域で応力-ひずみ関係を規定するモデルに関連するとの推測は、前章で示した周波数毎のせん断剛性とひずみ振幅の関係が時間領域におけるその関係をひずみ軸方向に平行移動した関係に類似、つまり相似な関係にあるということにより支持される結果となっている。このことは、両領域における応力-ひずみ関係が図-16に

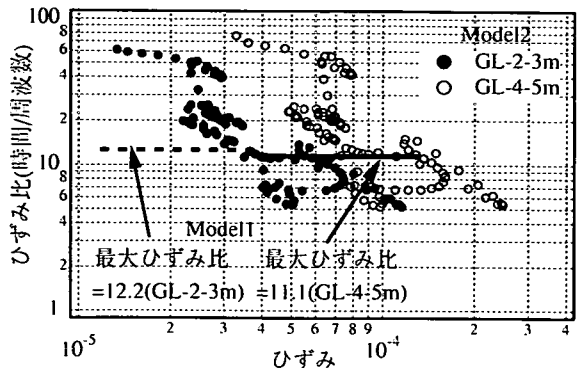


図-17 同一割線剛性に対する両領域のひずみ比率と周波数領域のひずみの関係

示したように相似な関係にあるという仮定の妥当性を示している。一般に、R-Oモデルのような時間領域における応力-ひずみ関係は入手可能な情報に基づいて推定したモデル、言い換えれば既知情報である。すると、両領域における応力、ひずみの相似比率が明らかとなれば、周波数領域のせん断剛性のひずみ依存特性から、時間領域との相似比率に基づき変換された時間領域のひずみよりせん断剛性を評価することが可能となる。つまり、周波数領域におけるせん断剛性のひずみ依存性は、式(7)に示す様に周波数領域におけるひずみ $r_f(\omega)$ と時間領域のひずみ $r_t(\omega)$ (以後、時間相当ひずみと呼ぶ) の関係を規定することにより時間領域におけるせん断剛性のひずみ依存性として評価可能となる。

$$r_t(\omega) = C_{yf} \cdot r_f(\omega) \quad (7)$$

ここで、 C_{yf} は周波数領域から時間領域へのひずみの変換係数を表しており、以後相当ひずみ変換係数と呼ぶ。

まず、その相似性を検討する。そのため、影響が顕著に現れている千葉実験所の解析結果を用いる。相当ひずみ変換係数を評価するため、時間領域と周波数領域の最大ひずみの比 (以後、そのひずみ比率算出法をModel1と呼ぶ：図中の波線と実線) を図-17に示す。さらに、周波数領域でのひずみに対する割線せん断剛性と同一剛性を有する時間領域でのひずみと周波数領域のひずみとの比率 (以後、このひずみ比率算出法をModel2と呼ぶ：図中黒丸、白丸) と周波数領域におけるひずみの関係も図中に合わせて示す。Model1における最大ひずみ比を求める際、周波数領域での最大ひずみ振幅の値はスペクトル解析におけるフィルター処理に依存する。その様な処理の影響を回避するため、時間領域における最大ひずみは、フィルター処理されたひずみのパワースペ

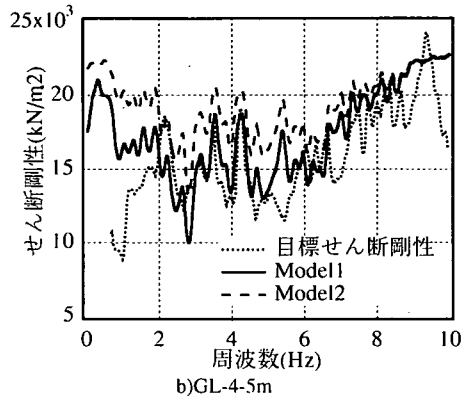
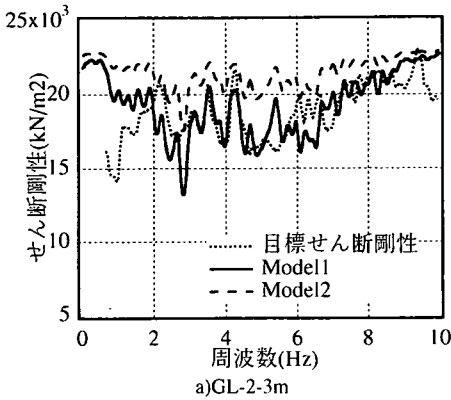


図-18 2つの手法により推定した時間相当ひずみに基づくせん断剛性の周波数特性と
応力-ひずみ履歴のフーリエ変換により得られたせん断剛性の周波数特性の比較

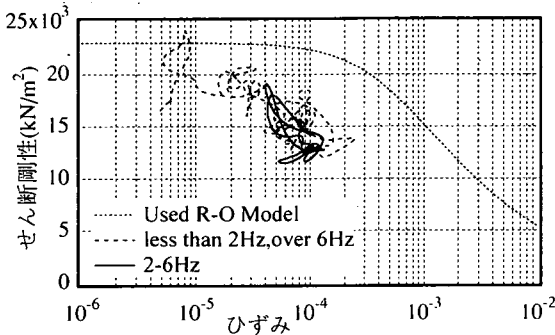


図-19 最大ひずみの影響周波数帯と他の周波数帯における
周波数領域のひずみとせん断剛性の関係
(千葉実験所)

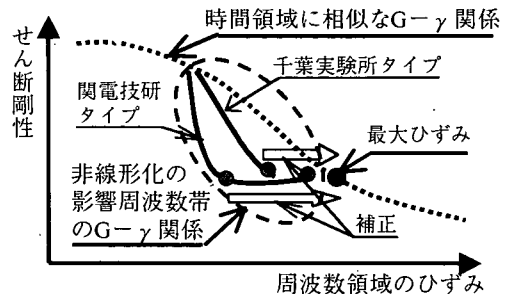


図-20 最大ひずみの影響周波数のひずみとせん断剛性の関係の特徴とその補正のイメージ

クトルよりKiuregian¹²⁾による手法を用いて推定した最大ひずみの期待値を用いた。図より割線剛性が等価となるひずみの比率は5程度から70程度とひずみ振幅の大きさに応じて値が大きく異なっている。ただし、そのひずみの比率の絶対値は前述の様に大きく異なっているものの、平均値で14~15、標準偏差は両層とも常用対数で0.3程度、実数で2.0程度とばらつきは小さいことが分かる。各層の最大ひずみの比率の値は、最大ひずみ時における割線剛性が等価となるひずみの比率の2倍程度の値となっている。

次に、前述の2つ方法に基づくひずみ比率を相当ひずみ変換係数とし、周波数領域のひずみより推定した時間相当ひずみを解析で用いたR-Oモデルへ代入することにより求めたせん断剛性の周波数特性を図-18に示す。図中には図-10に示した時間領域の応力-ひずみ関係より求めたせん断剛性(以後、目標せん断剛性と呼ぶ)の周波数特性も合わせて示す。ここで、Model2におけるひずみの比率に基づく相当ひずみ変換係数には、周波数領域の最大ひずみ近傍の割線剛性が等価となる際の比率である5.0を用いた。Model1に基づく相当ひずみ変換係数には図-17

中の値を用いた。Model1およびModel2とも、せん断ひずみ振幅の最も大きい3.0Hz近傍で最も剛性が低下しているものの、他の周波数帯では3.0Hzより大きな剛性値を示しており、定性的な傾向は類似している。また、3.0Hz近傍では、割線剛性が等価となる際のひずみ比率を用いたModel2の推定剛性が目標せん断剛性と同程度の値となり、目標せん断剛性の最小せん断剛性との対応という観点では、相当ひずみ変換係数としてModel1より優っている。しかし、Model2におけるひずみ比率の考え方は、周波数領域でのひずみと応力、つまりせん断剛性が既知であることが前提となる。しかし、それを推定する過程では解析的に両領域でのひずみ比率を設定することができないことから、経験値として設定すると、従来の等価線形化法に用いる有効ひずみの換算係数の評価と同様に物理的根拠の欠如という問題点が生じる。この様な解析上の課題も踏まえ、相当ひずみ変換係数はModel1つまり両領域における最大せん断ひずみ比に基づいて設定する。ただし、この方法では最小せん断剛性を小さめに評価することを、結果の評価に際して念頭におく必要がある。

次に、②で示した地盤材料の非線形化に伴う最大

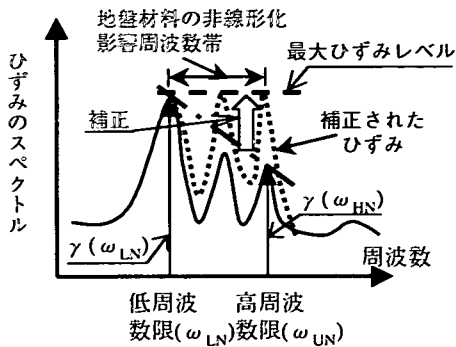


図-21 最大ひずみの影響周波数帯の補正の概念

ひずみの影響周波数帯におけるモデル化を行う。まず、図-19に示す千葉実験所で得られた周波数領域におけるひずみとせん断剛性の関係（千葉実験所タイプ）でみると、図に実線で示す周波数2Hzから6Hzの間ひずみは、破線で示した両領域に相似性が見られる周波数帯において同一の剛性を与えるひずみより小さい。図-14に示した関電技研における周波数領域におけるひずみとせん断剛性の関係（関電技研タイプ）は、最大ひずみからあるひずみレベルまで同程度のせん断剛性を示し、より顕著な最大ひずみの依存性が認められる。その周波数帯のひずみとせん断剛性の関係のイメージは図-20に示した通りであり、その領域における時間相当ひずみを前述の周波数領域のひずみとせん断剛性の関係をひずみ軸方向に平行移動する両領域における相似性に着目したモデルでは評価出来ないことを示している。しかし、その周波数帯の局所最大ひずみのせん断剛性は、最大ひずみに対する値とほぼ同程度の値となっている。このことから、その周波数帯での局所最大ひずみを最大ひずみと等しくなるように補正することにより、その周波数帯のひずみ $\gamma_{IN}(\omega)$ は時間領域との相似性を有することができる。その補正は、ひずみの周波数特性でみれば、図-21に示すとおり、補正の対象となる影響周波数帯域の局所最大ひずみを最大ひずみに補正することに相当する。その影響周波数帯の低周波数限 ω_{LN} は最大ひずみを与える周波数であり、概ね地盤材料の非線形化の影響を考慮した地盤の1次固有周波数に対応している。一方、高周波数限 ω_{HN} は、3章2節b項で示したひずみの非定常スペクトル特性に見られる様に非線形化に伴う卓越成分の低周波数側への変化を開始する周波数と非線形化影響関数により対象層の非線形化に影響を及ぼす周波数との対応より、後者の周波数として物理的に有意な設定が可能である。よって、高周波数限は式(4)より得られる各層の非線形化影響関数の最も大きい周波数として評価し、千葉実験所の場合、

ひずみレベルの大きい検討対象層では図-13より6.0Hzと設定することができる。

これらのことから、最大ひずみの影響周波数帯域における時間相当ひずみ $\gamma_{IN}(\omega)$ （以後、非線形化時間相当ひずみと呼ぶ）は、先に得られた時間相当ひずみ $\gamma_I(\omega)$ に補正係数 $C_{IN}(\omega)$ （以後非定常補正係数と呼ぶ）を乗じることにより求める。その補正係数は、式(8)に示す様に高周波数限における時間相当ひずみが低周波数限と同じ値となるよう低周波数限より円振動数とともに線形的に変化する関数表現としている。さらに、その補正係数により得られたせん断剛性は最大ひずみ時のせん断剛性を越えないという条件を設ける。また、高周波数限は非線形化の生じる前の状態つまり初期地盤モデルに基づいて設定するものとする。

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{IN}(\omega) &= C_{IN}(\omega) \gamma_I(\omega) \leq \gamma_{IN}(\omega_{LN}) \\ C_{IN}(\omega) &= 1 + \frac{\gamma_I(\omega_{HN})}{\gamma_I(\omega_{LN})} \frac{\omega - \omega_{HN}}{\omega_{HN} - \omega_{LN}} \quad \omega_{LN} \leq \omega \leq \omega_{HN} \\ C_{IN}(\omega) &= 1 \quad \omega_{LN} \geq \omega, \omega \geq \omega_{HN} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

以上の様に周波数領域におけるせん断剛性のひずみ依存性は、周波数領域における2つの特徴を考慮した補正により得られる式(9)の非線形化時間相当ひずみ $\gamma_{IN}(\omega)$ を用い、時間領域での応力-ひずみ関係に基づくせん断剛性のひずみ依存性より評価することが可能となる。

$$\gamma_{IN}(\omega) = C_{IN}(\omega) \cdot C_{if} \cdot \gamma_f(\omega) \quad (9)$$

ここで用いる補正係数の評価には、従来の周波数領域の非線形解析法に含まれる有効ひずみを設定する際の物理的な根拠の欠如という課題を回避できるという特徴も有している。

b)減衰定数のひずみ依存特性のモデル化

減衰特性は、図-10における千葉実験所の結果よりひずみの周波数特性との関連性が認められ、前項のせん断剛性の評価に用いた周波数領域のひずみの補正による時間領域に相当するひずみに基づく評価の可能性を暗示している。しかし、関電技研の結果では必ずしも明確な対応は認められない。この原因として、せん断剛性の周波数依存性が波動伝播時の分散性をもたらすことによる空間的な減衰をもたらすことなどが考えられるが、十分に明らかとなっていない。ここでは、周波数領域での応力-ひずみ関係を時間領域に相当するひずみに基づき表現するという観点で、前項で提案した時間領域に相当する

ひずみにより周波数ごとの応力-ひずみ関係を規定する減衰定数をせん断剛性と同様に評価することとする。さらに、波動伝播時の散乱に起因すると考えられている周波数依存減衰 h_{50} の影響も加味するため、Dainty¹⁴⁾やRevell¹⁵⁾らにより提案され、著者の一人¹⁶⁾が弱震動に基づく地盤の減衰特性やせん断剛性の同定に用いた式(10)に示す地盤材料の履歴減衰との和として表現する減衰モデルを用いる。ここで、周波数依存減衰 h_{50} は木下¹⁷⁾、佐藤ら¹⁸⁾などによる小地震の記録に基づく地盤の減衰特性の分析により示された周波数の指数関数としてのモデルを用いれば、式(11)となる。この表現は、低ひずみレベルの応答に対しては第2項の周波数依存減衰特性、高ひずみレベルに応答に対しては第1項および第2項の減衰特性を考慮するというモデルであり、末富、中村¹⁹⁾による地盤材料の非線形化により周波数依存性が小さくなる、言い換えれば地盤材料の履歴減衰の影響が大きくなることを考慮できるモデルとなっている。このモデルは、地震応答解析や減衰特性の推定に適用^{20),21)}されている。

$$h(\omega) = h(\gamma_{IN}(\omega)) + h_{50} \quad (10)$$

$$h_{50} = h_s \cdot f^{-a} \quad (11)$$

また、式(10)右辺の第1項の減衰特性は履歴減衰は周波数領域でのひずみより変換された時間領域のひずみ $\gamma_{IN}(\omega)$ に基づき時間領域での応力-ひずみ関係より得られる減衰定数 $h(\gamma_{IN}(\omega))$ として評価する。

この周波数領域での減衰特性は、前述の様にせん断剛性の周波数依存性との関係、周波数依存減衰の定量的な表現形式の評価などの課題がある。その適切な表現形式の評価については今後の研究課題であるといえる。

5. 動的変形特性の周波数依存を考慮した非線形地震応答解析法の提案とその適用

(1) 周波数領域での非線形地震応答解析法の提案

ここでは、時間領域での非定常な応力-ひずみ関係を周波数領域で表現するため、周波数領域でのせん断剛性のひずみ依存性および減衰特性のひずみ・周波数依存性の提案モデルを用いた地震応答解析法の流れを図-22に示す。

まず、図に示す様に初期条件を設定した後に、初期地盤モデルに対する各層の高周波数限を求める。次に、入力地震波に対する各層の応答ひずみを算出し、最大ひずみ振幅を与える周波数である低周波数

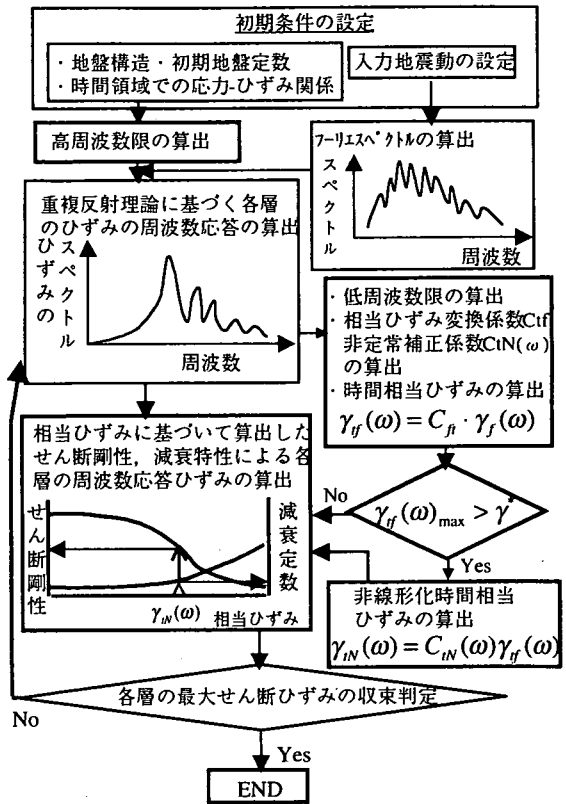


図-22 提案する解析手法の流れ

限を各層について求める。ただし、地盤の応答に非線形化の影響が顕在化しない場合、つまり時間相当ひずみの最大値が所定のせん断剛性低下率を与えるひずみ γ^* より小さい場合には、式(12)の様に時間相当ひずみに基づいて動的変形特性の評価を行う。

$$\gamma_f(\omega) = C_{if}\gamma_f(\omega) \quad \gamma_f(\omega)_{\max} \leq \gamma^* \quad (12)$$

最後に、周波数領域でのひずみの補正により得られた時間相当ひずみに対するせん断剛性、減衰特性を求め、それに対する各層の応答ひずみを求める。この過程を繰り返し、各層の時間領域における最大ひずみが収束した段階で計算の終了となり、加速度、速度、変位また応力などの所定の応答量を算出する。

ここで、周波数領域での非線形化影響周波数帯を考慮した提案モデルは3章2節で示したひずみの非定常スペクトル特性から分かる様に時間領域の最大ひずみ近傍の非定常応答の表現となっている。このことから、この提案手法は最大ひずみなどの最大応答値近傍の応答特性の評価が主対象となっている。また、提案手法は、定常不規則過程下で時間領域の座

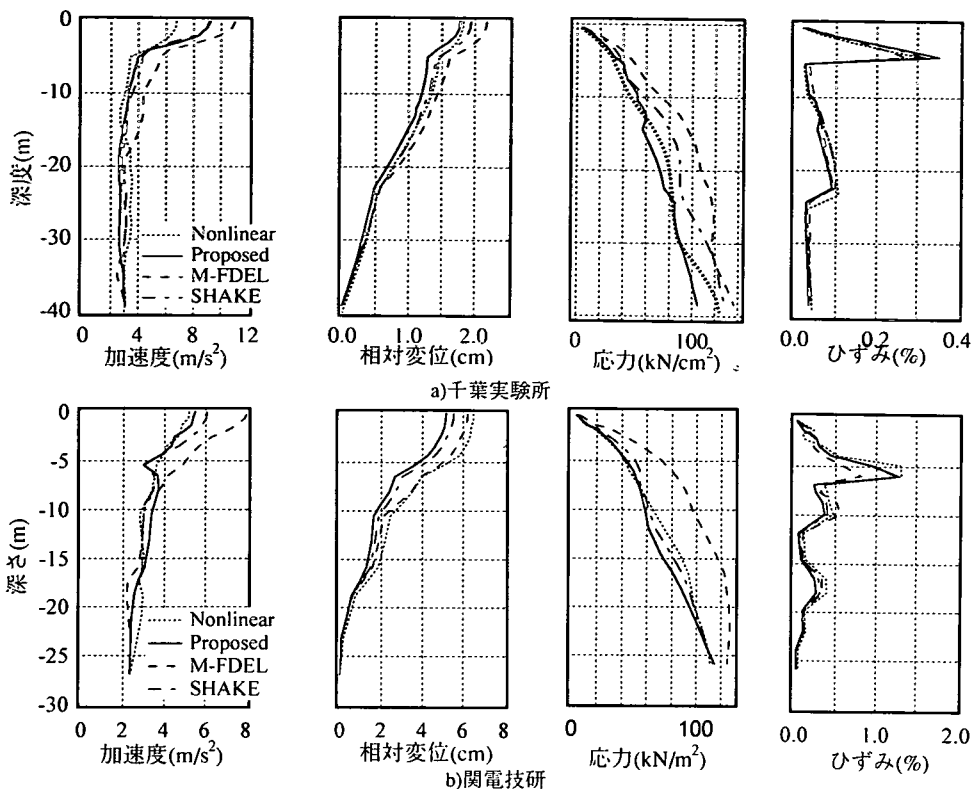


図-23 提案手法と他の手法による最大値分布の比較(各地点の各最大応答量の凡例は最大加速度と同じ)

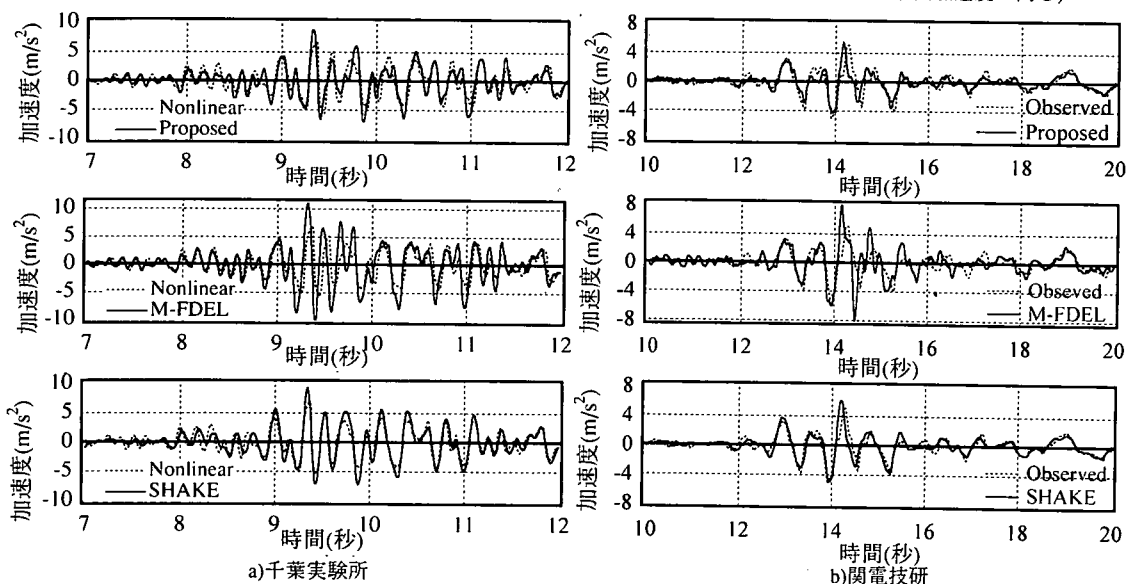


図-24 時間領域の解析と提案手法と他の手法による地表加速度時刻歴の比較

標変換としての非線形応力-ひずみ関係の第一近似モデルの逆変換として時間領域の非線形応答を求める手法であり、従来の等価線形解析法とは異なり、周波数領域の非線形解析手法であると言える。

(2) 適用性の検討

検討地盤である千葉実験所および関電技研を対象

とし、時間領域での解析「YUSAYUSA2」で得られた解析結果（以後、目標値と呼ぶ）と提案手法および従来の周波数領域の解法として、等価線形化法に基づく解析法（SHAKE）、さらに杉戸らによる提案手法（ここではM-FDELと呼ぶ）の3つの解析法より得られた結果の比較を行う。その際、入力地震

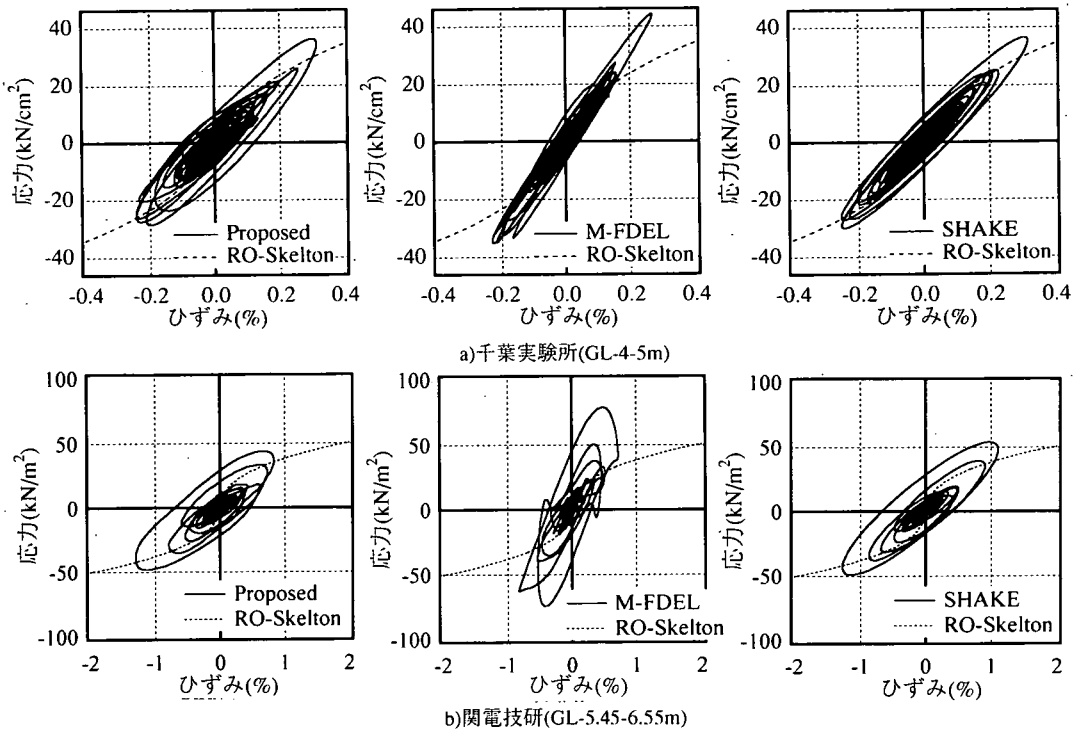


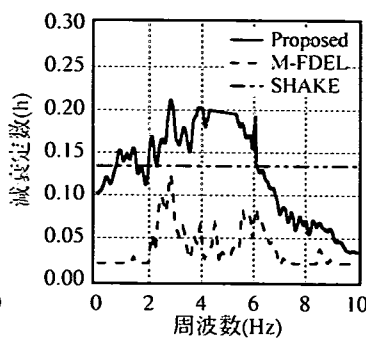
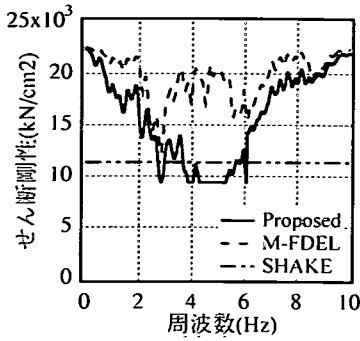
図-25 提案手法と他の手法による最大ひずみ発生層における応力-ひずみ関係の比較

動は図-1に示した両地点における時間領域の解析で用いた地震記録，地盤構造は表-1に示したモデル，さらに地盤物性のうち動的変形特性はいずれの解析においても表-1に示したパラメーターにより規定されるR-Oモデルを用いた。SHAKEおよびM-FDELによる解析は，それらと同等の機能を保有する解析コード「DYNEQ」²²⁾による解析である。また，本提案手法による最大せん断ひずみの収束判定は，SHAKEと同様に時間領域での最大ひずみによるせん断剛性および減衰定数の収束による判定とした。M-FDELでは，杉戸らは地震応答解析による収束の判定を3つの周波数帯における周波数毎のひずみの差により評価しているが，ここでは本提案手法やSHAKEと同様の収束判定法を用いた。ここで，その収束の判定値は0.05とした。さらに，M-FDELでは，最小減衰定数をその手法の提案時に示された0.02と設定した。提案手法の減衰特性のうち散乱減衰に相当する周波数依存減衰のパラメーターは，中村ら¹⁶⁾が示したパラメーターを10Hzにおける減衰定数が0.01となる様に h_s を4.7%と修正し， β は-0.57を用いる。M-FDEL，SHAKEでは有効ひずみの換算係数として0.65を用いた。

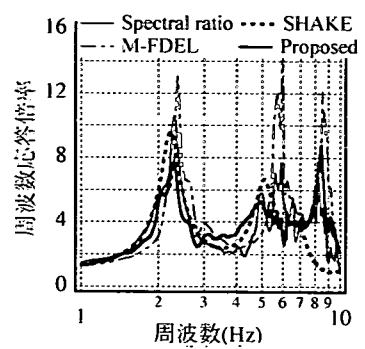
まず，解析により得られた加速度，相対変位，応力およびひずみの最大値の深度分布の比較を図-23に示す。千葉実験所における最大ひずみ分布は，い

ずれの手法も目標値と同程度の値となっている。最大加速度は，いずれも目標値より大きな値となっているが，表層部分では提案手法がSHAKEと同程度であり，目標値と最も近い値となっている。最大応力は，提案手法が目標値とほぼ同程度の値を与えるが，他の2つの手法は目標値より大きな値となっている。また，最大相対変位についてみると，提案手法がSHAKEと同様に目標値とよく対応し，M-FDELは過大評価となっている。関電技研における最大加速度は，提案手法が目標値とよく対応し，他の手法は目標値より大きな値となっている。最大変位分布は提案手法はSHAKEと同程度であるが，目標値より小さな値となっている。一方，M-FDELは目標値とよく対応しているものの，最大加速度分布の過大評価の影響によると考えられる。表層部分のGL-8mに対する地表との相対変位という関係では提案手法が目標値とほぼ同程度の値となっている。また，最大応力，ひずみ分布については提案手法が目標値とよく対応し，M-FDELは最大応力を過大，最大ひずみを過小評価する結果となっている。

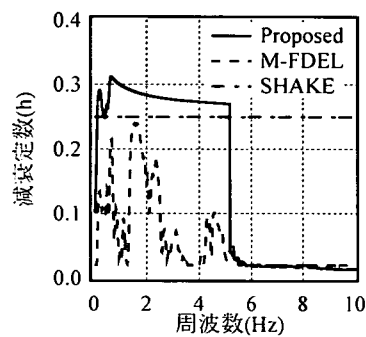
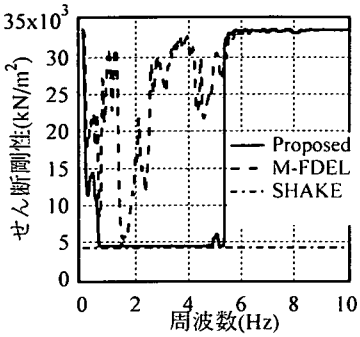
地表面における応答加速度時刻歴について，時間領域での解析結果と提案手法を含む3つの解析結果との比較を図-24に示す。ただし，関電技研については，3つの解析結果との比較に観測記録を用いた。まず，千葉実験所について最大値発生時刻近傍につ



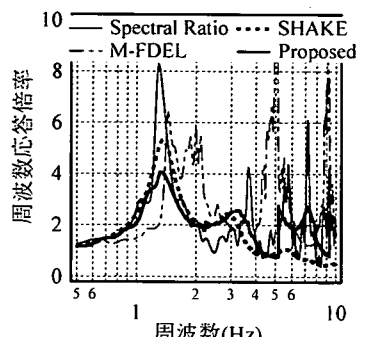
a) 千葉実験所



a) 千葉実験所



b) 関電技研



b) 関電技研

図-26 提案手法および他の手法によるせん断剛性、減衰定数の比較

図-27 提案手法および他の手法による周波数応答関数の比較

いてみると、提案手法およびSHAKEでは目標値との位相がよく対応しているが、M-FDELではその波形と時間領域解析波形の位相がずれている。また、時刻9秒以前の振幅の小さい時間帯では、M-FDELが最も両者の位相の対応がよく、提案手法、SHAKEの順に位相の対応が悪くなっていることが認められる。関電技研における最大値発生時刻近傍では、提案手法が観測値と位相および値ともほぼ一致しており、SHAKEも最大値は観測値より大きな値となっているものの位相は観測値と同程度となっている。M-FDELは位相、値とも観測値と乖離していることがわかる。最大値以前、以降の位相においても提案手法は観測値とよく対応している。

最大ひずみ発生層における応力-ひずみ関係の比較を図-25に示す。図中には、時間領域での応力-ひずみ関係に用いたR-Oモデルの骨格曲線も合わせて示した。両地点とも、時間領域での骨格曲線との対応という観点で提案手法が最も優れており、他の手法、特にM-FDELは有効ひずみの換算係数の影響により最大ひずみ時のせん断応力を過大に評価していることが分かる。ただし、関電技研におけるひずみレベルの小さい部分ではM-FDELはR-Oモデルの骨格曲線とよく対応している。

提案手法および他の2つの手法について、周波数

領域での解析終了時におけるせん断剛性および減衰特性の周波数特性を図-26、それらに基づく周波数応答関数の比較を図-27に示す。ここで、図-27には、千葉実験所における時間領域の解析で用いた入力波と地表面応答、関電技研における入力位置および地表における地震観測記録間のフーリエスペクトル比も目標とする周波数応答関数として合わせて示した。そのスペクトル解析に際して、バンド幅0.2HzのParzen Window処理を行った。千葉実験所のスペクトル比は解析による地表面応答と入力地震動(観測記録の最大振幅を3倍に調整)との比である。両地点とも、最小せん断剛性の差異は1割程度であるが、周波数特性は大きく異なっている。特に、提案手法における非線形化に伴う最大ひずみの影響周波数帯域における3手法の差異は、最大加速度を含む諸応答量の差異に明確に表れている。いずれにしても、ここで、SHAKEと提案手法における非線形化影響周波数帯域におけるせん断剛性および減衰定数の類似性は、SHAKEが結果として地盤材料の非線形化に伴う非定常性の影響を考慮しているということを示している。ただし、提案手法による非線形化影響周波数帯域の補正により、図-25の関電技研の応力-ひずみ履歴は最大ひずみ近傍において設定したR-Oモデルの骨格曲線と対応しているものの、比較的小

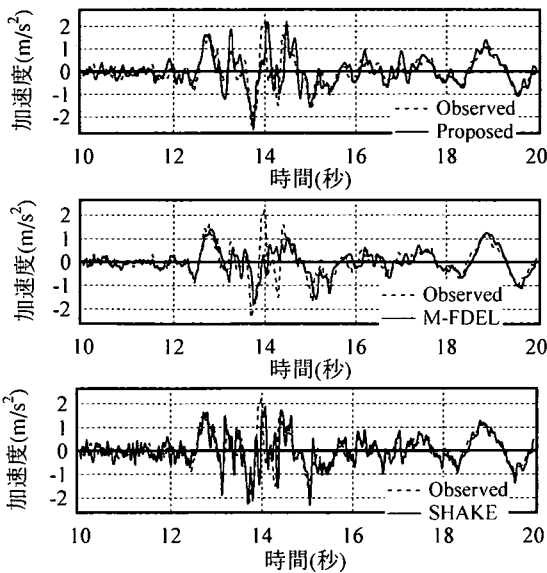


図-28 逆増幅解析により得られた入力位置
加速度度波形の比較

さなひずみレベルでSHAKE同様にせん断剛性を小さく評価している。しかし、このことは、本提案手法が目指す最大応答値近傍の応答を適切に評価するという観点で、本提案手法の有用性を損なうものではないと言える。また、減衰特性については、提案手法が影響周波数帯域にて周波数依存減衰も考慮していることから、他の手法に比べ大きな減衰特性を示している。M-FDELは他の2つの手法に比べかなり小さな値を示している。この減衰特性およびせん断剛性の周波数特性に関するM-FDELと他の手法との差異は、最大応答加速度などの差異に顕著に表れている。さらに、これらのせん断剛性、減衰特性の周波数特性の差異は顕著に周波数応答関数の差異にも表れている。提案手法について目標とする周波数応答関数と比べると、各卓越周波数はよく一致しているが、その周波数における増幅率はいずれの地点、特に最大ひずみレベルの大きな関電技研にて小さな評価となっている。M-FDELについてみると、二地点のうち最大ひずみレベルの小さい千葉実験所にて、地盤の1次および3次固有周波数は他の2つの手法と対応しているものの、2次固有周波数は他の2つの手法、また目標とする周波数応答関数にみられる5.0Hz近傍の卓越との対応がみられない。関電技研の結果についてみると、その固有周波数はいずれも他の2つの手法および目標とする周波数応答関数より高周波数側の値となっている。さらに、いずれの地点においても周波数5.0Hz以上の固有周波数における増幅率は目標値とする周波数応答関数および他の2つの手法に比べ過大評価となっている。SHAKE

は非線形化影響周波数より高周波数側の6から7Hz以上に著しく増幅率を過小評価しているものの、それより低周波数域の増幅率は減衰特性の差異に起因し提案手法より若干目標とする周波数応答関数に近い評価となっている。

最後に、応答ひずみレベルの大きな関電技研を対象とし、提案手法および他の2つの手法を用い地表面で観測された加速度時刻歴に基づく逆増幅解析を実施し、得られた基盤複合波の加速度時刻歴と観測記録の比較を図-28に示す。提案手法は波形形状および最大振幅とも観測値とよい対応がみられる。一方、SHAKEは全体的な傾向は観測記録と対応しているものの、高周波数成分の混入が著しい。これは、図-26、27に示した減衰定数の周波数特性および周波数応答関数からも分かるように、SHAKEは全周波数帯域で一定の減衰特性を有していることから、高周波数成分の増幅を過小評価、言い換えれば減衰を過大評価している。このため、逆増幅解析の結果、基盤波に高周波数成分が過大に含まれるというSHAKEを用いた逆増幅解析における致命的欠点が現れる結果となっている。また、M-FDELは最大値近傍の位相が観測値と全く対応せず、基盤波の最大振幅レベルを過小評価する結果となっている。

以上に示したように、提案手法と他の周波数領域での2つの解析法を対象とし、基盤入力波に対する順解析に基づく各種応答量の比較、さらに逆増幅解析による推定基盤波と観測波の比較を実施した。いずれも、提案手法は、他の2つの解析手法に比べ目標値と良い対応を示し、非線形応答の高い推定精度を有していることが明らかとなった。また、SHAKEは図-25に示した様に発生応力が設定したR-Oモデルの骨格曲線による最大ひずみ時の応力より大きく評価しているものの、図-23に示した最大応答値、さらに図-24、特に千葉実験所の地表面応答加速度時刻歴などの応答量において、提案手法との差異が必ずしも大きいとはいえない。このことは、地盤の非線形地震応答を評価する上で重要な応力ひずみ履歴やその評価にかかわる諸特性の課題を明確に含んだ結果としての差異の程度であり、決してSHAKEの有用性を示したものではない。ただし、SHAKEの適用範囲に関するひずみレベルとも関連するので、まず、本章で解析の対象とした2つの地盤に生じた最大ひずみに着目すると、千葉実験所で基準ひずみと同程度、関電技研では千葉実験所の3倍程度であるが基準ひずみの14倍程度であり、非線形化の程度が異なっている。その様な地盤材料の非線形化の程度では、R-Oモデルが基準ひずみ以降も応力が増加するモデルであることから、SHAKEに

よる最大応答量に提案手法との差異が大きく表れないと考えられる。これは地盤材料の動的変形特性としてR-Oモデルを用いたこと自体が原因ではなく、SHAKEの課題である有効ひずみ係数に伴う設定した動的変形特性と解析上の動的変形特性の乖離による応力評価の差異が応答に及ぼす影響は、ひずみそのものの絶対値ではなく、非線形化の程度に依存していることを示している。いずれにしても、最大応答などの応答諸量を対象とする地盤材料の動的変形特性に応じて適切に評価するためには、応力-ひずみ履歴を適切に評価することが重要であり、提案手法は、非線形化の程度がより大きな場合にも最大応答ひずみ近傍の応力-ひずみ履歴を適切に評価する可能性を有するという観点で有用であることは明らかである。

6. あとがき

本論では、まず時間領域での地震応答解析より得られた応力-ひずみ履歴の周波数領域への座標変換により得られた周波数領域における応力-ひずみ履歴の特性を表す動的変形特性のひずみ依存特性のモデル化を行った。このモデルは、次の2つの時間領域との関係を規定する特徴に基づき、周波数領域でのひずみより換算された時間領域に相当するひずみに基づく時間領域での応力-ひずみ関係を基本としている。

- ①時間および周波数領域における動的変形特性のひずみ依存性の相似性
- ②地盤材料の塑性化に伴う影響周波数帯域の最大ひずみ依存性

このモデルを用い、地盤材料の非線形化を考慮した周波数領域での地震応答解析法を提案した。この提案手法は、非線形応答過程を定常不規則過程とし、時間領域での非線形応力-ひずみ履歴の写像変換として周波数領域における応力-ひずみ履歴を表現するせん断剛性と減衰定数のひずみ依存性の近似モデルを用い、周波数領域での非線形応力-ひずみ履歴の逆変換として時間領域の非線形応答を評価する手法である。従来の等価線形法に基づく周波数領域での解法は線形応答解析と位置づけることができるが、ここで提案した手法は定常不規則過程下での周波数領域での非線形解析と呼ぶことができる。従来の周波数領域での解析法の課題である有効ひずみの換算係数に係わる課題、高周波数領域での過減衰評価等は、自動的に回避している。その提案手法と従来の周波数領域での2つの解析法と時間領域での解析結

果とを基盤波入力に対する順解析について諸応答量を、発生するひずみによるせん断剛性の低下率が最大で5割程度となる千葉実験所、2割程度となる関電技研の2つの地盤モデルについて比較した結果、以下のことが明らかとなった。

- i)提案手法は他2つの手法に比べ、時間領域の非線形解析の推定精度が最も高い。
- ii)先の結果より、時間領域における非線形応力-ひずみ関係と等価性を有する周波数領域での動的変形特性の評価モデルは有意である。
- iii)ひずみレベル大きな関電技研における地表面地震動に基づく逆増幅解析の結果より、提案手法は基盤波の推定精度が他の手法に比べ優れている。
- iv)提案手法は、ひずみレベルの大きな関電技研においても時間領域の解析とよく一致しており、従来の周波数領域での解析法の適用範囲であるひずみのオーダー 10^{-3} より大きな数%オーダーまで適用性を有している。

以上より、提案した周波数領域での非線形地震応答解析法は、レベル2地震動の様な強震動に対する非線形地盤応答の評価に手法に要求されるせん断剛性の低下が大きい強非線形域でのひずみレベル、少なくとも数%レベルへの適用性が明らかとなった。ただし、提案手法は定常不規則過程を前提としていることから、液状化の様に時間とともに強度低下を伴う、つまり応力-ひずみ関係の骨格曲線自体が時間とともに変化する非定常不規則過程のもとでの非線形地盤応答の評価へは適用できないことに留意する必要がある。さらに、減衰特性については、定量的な周波数依存減衰の評価などの課題を有しているが、それは今後の課題としたい。

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) 風間基樹, 柳沢栄司, 稲富隆昌, 菅野高弘, 稲垣紘史: アレー観測記録から推定した神戸ポートアイランドの地盤の応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.547/III-36, pp.171-182, 1996.
- 7) 吉田望, 東畑郁生: 「YUSAYUSA2 理論と解説」, 1991
- 8) 鹿林, 山崎文雄, 片山恒雄: 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, pp.93-97, 1989.
- 9) 吉田望, 中村晋, 末富岩雄: 1995 年兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動とその予測, 第 23 回地盤震動シンポジウム, pp.39-52, 1995.
- 10) 中村晋: ヘルムホルツによる地震動の増幅特性評価とその適用, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp.161-173, 1995.
- 11) 神山真: 強震地震動の非定常スペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第 245 号, pp.55-62, 1976.12) Kiuregian, A. D. : A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.9, pp.419-435, 1981.
- 13) Aki, K. and Richards, P. G. : *Quantitative Seismology Theory and Method*, Vol.1, pp.172-185, 1980.
- 14) Dainty, A. M. : A Scattering Model to Explain Seismic Q Observation in Lithosphere between 1 and 30 Hz, *G. R. L.*, Vol.8, No.11, pp.1126-1128, 1981.
- 15) Rovell, A. : On the Frequency Dependency of Q in FRULLI from Short Period Digital Records, *B. S. S. A.*, Vol.72, No.6, pp.2369-2372, 1982.
- 16) 中村 晋: 地震観測記録に基づく表層地盤のせん断剛性と減衰定数について, 「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性-試験法・調査法および結果の適用-」に関する国内シンポジウム発表論文集, (社)土質工学会, pp.295-300, 1994.
- 17) 木下繁夫: 表層地盤の減衰特性に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 330 号, pp.15-20,1983.
- 18) 佐藤智美, 川瀬博: 観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の非線形性を考慮した強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 463 号, pp.27-37, 1994.
- 19) 末富岩雄, 中村晋: 強震時における表層地盤の Q 値について, 第 8 回日本地震工学シンポジウム, pp.589-594,1990.
- 20) Suetomi, I. and Yoshida, N. : Damping Characteristics of Soil Deposits during Strong Ground Motions, *Proc. Second Int.Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, pp.765-772,1998.
- 21) 小林喜久二, 久家英夫, 植竹富一, 真下貢, 小林啓美: 伝達関数の多点同時逆解析による地盤減衰の推定-その 3-, 日本建築学会大会学術講演梗概集-構造 II-, pp.253-254, 1999.
- 22) 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.
- 23) 例えば石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp.7-11, 1978.

(2002.1.25 受付)

PROPOSAL OF NONLINEAR EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS IN FREQUENCY DOMAIN CONSIDERING APPARENT FREQUENCY DEPENDENCY OF SOIL PROPERTY

Susumu NAKAMURA and Nozomu YOSHIDA

Proposed is a nonlinear earthquake response analysis in frequency domain. Stress-strain relations in frequency domain are defined by the vector spectrum method. i.e., Fourier transforms of stress and strain in a complex plane, and relationships between stress-strain behavior in frequency domain and actual stress-strain curve are investigated. Frequency range where response of subsoil is affected strongly by the nonlinear behavior is evaluated by comparing the unsteady spectrum with a nonlinear effective function that is defined as the first derivative of an amplification factor with respect to a shear wave velocity. A method to evaluate effective strains in frequency domain from the maximum shear strain in time domain is proposed by combining above two findings. The proposed method is compared with conventional equivalent linear methods at two sites where strong motion vertical array records were obtained. The proposed method always shows better agreement with other methods.