

エネルギー保存を仮定した不整形地盤の 地震時最大軸ひずみの簡易推定に関する検討

古川 愛子¹・大塚 久哲²・内海 寿紀³

¹九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 助教 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: furukawa@doc.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp

³九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

E-mail: utsumi@doc.kyushu-u.ac.jp

本研究では、基盤面および地表面段差型不整形地盤の地震時最大軸ひずみを簡易に推定する手法に関して検討を行った。まず、最大軸ひずみの特徴を調べるために、層厚・傾斜幅・せん断波速度の様々な異なる 53 通りの不整形地盤の有限要素解析を行った。最大軸ひずみの推定式は、不整形性によって生じる速度差が生む運動エネルギーが、地盤がひずむことによるひずみエネルギーで受け持たれるとの仮定の下、段差部両端の水平地盤の最大速度応答差の 1 次式として得られた。推定式に必要な速度応答差を算定する手法として、1 自由度モデルと成層地盤モデルを用いた 1 次元地震応答解析を採用した。有限要素解析結果と推定式による簡易推定結果の比較を行い、簡易推定手法の有用性を検討した。

Key Words: irregularly-shaped ground, maximum axial strain, simple estimating method, earthquake

1. はじめに

地中構造物は、周辺地盤の変形に追従するという基本的な地震応答特性を有しているため、地中線状構造物の縦断方向の耐震設計では、構造物の軸線に沿った地盤変位分布に対して設計が行われる。地盤変位分布の設定は、設計への適用が簡便であることから、応答変位法により行われるのが一般的である¹⁾²⁾³⁾。

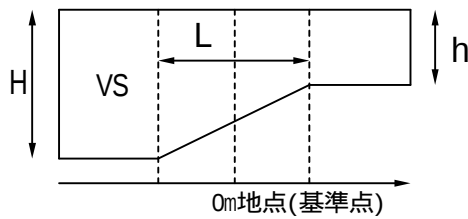
応答変位法は、構造物中心深さ位置での地盤変位分布を定め、これを構造モデルに与えて断面力や継手の目開きを算定するものである。地盤変位分布の設定方法は、簡便さから分布形状を正弦波と仮定して設計している。正弦波変位分布では、振幅と波長がパラメータとなるが、変位振幅は地盤の固有周期と応答スペクトルから求め、変位分布の波長は地層厚や地盤のせん断波速度から設定している。ガス指針⁴⁾では、軸方向にひずみを生じさせるレーリー波の位相速度と表層地盤の固有周期から推定することと規定されている。しかし、これらはいずれも地震動の位相差によって成層地盤に生じる地盤変位分布を想定したものであり、地盤条件の急変する部位の変位分布を直接設計することは出来ない。

地震動の位相差を考慮しない場合、表層地盤が均一・

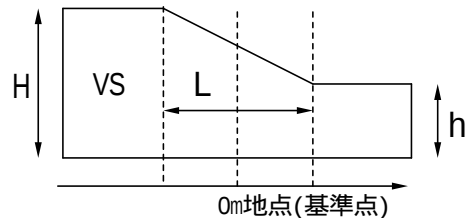
整形であれば、地盤変位はどこも同じになり、地中構造物は全体的に変位するだけでひずみや応力は生じないが、線状地中構造物の軸線方向に層厚や剛性が変化する不整形地盤の場合は、地盤変位も軸線方向で一様でないため、成層地盤よりも大きな地盤ひずみが生じ、線状構造物が受ける断面力も大きくなる。不整形部に生じる断面力を考慮する方法として、共同溝設計指針¹⁾では、地盤の固有周期が最も短い地点と最も長い地点における固有周期差に依存した割増係数を乗ずることとしている。しかし、地盤の固有周期が最も短い地点と最も長い地点の固有周期差が同じであっても、地盤の固有周期の絶対値によって振動特性は異なるので、固有周期差のみに基づく割増係数は万能でないと考えられる。

地盤の不整形性が地盤応答の増幅に及ぼす影響に関する既往の研究としては、地表面加速度や地表面加速度応答スペクトルの増幅率を求めた研究など、加速度を対象とした研究が主である⁵⁾。不整形地盤における地中構造物の地震時挙動について議論する場合は、加速度よりも地盤のひずみについての議論が重要となるが、地盤ひずみに着目した研究は未だ少ない。

軸線方向の地盤変位分布を微分したものが軸ひずみに相当することから、有限要素解析により地盤の変位分布



(a) 基盤面段差型モデル



(b) 地表面段差型モデル

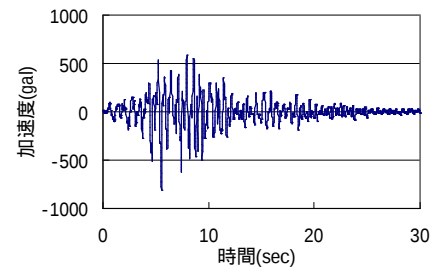
図-1 解析モデル

も算定されている⁶⁾。しかし、有限要素解析を行うには多くの時間と費用が必要とされるため、有限要素解析を実施することなく簡易に地盤変位分布を推定することができれば、実務に有益であると考えられる。有限要素法を用いていない簡易な推定手法に関する研究も行われており、ばね質点モデルを用いたもの⁷⁾や、各固有モードの変位分布の重ね合わせとして表現する方法⁸⁾が提案されている。有限要素法に比べれば労少なくして地盤変位分布が求まるが、1次元の線形地震応答解析に比べれば複雑であり、簡便さという点において不十分である。

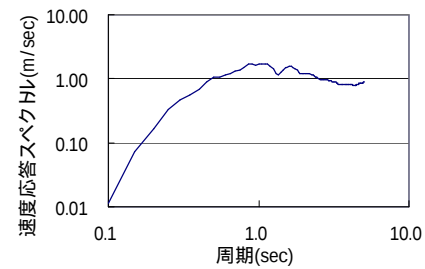
以上を踏まえて、本研究では不整形地盤における地震時最大軸ひずみを簡易に推定する手法を構築し、線状構造物の縦断方向の耐震設計に利用することを目的とした。

筆者らは既に、基盤面に傾斜がありその両端の基盤面が水平な基盤面段差型モデル（図-1(a)）を対象として検討を行ってきた⁹⁾。段差部に生じる最大軸ひずみを、段差部両端の水平地盤の最大速度応答差から推定する推定式を導出し、1自由度モデルを用いた水平地盤の応答解析と推定式を組み合わせた簡易推定手法を提案している。しかし、1自由度モデルは高次モードの影響を考慮できないことや、深さ方向の応答の近似精度が悪いといった欠点を有している。そこで本研究は、高次モードの影響と深さ方向の応答の分布を適切に評価できる1次元成層地盤解析を用いて、より精度よく最大ひずみを推定する手法を提案する。さらに、ひずみの深さ方向の分布特性を考慮に入れた補正係数の決定方法についても提案を行う。

本研究ではさらに、地表面に傾斜がありその両端の地表面が水平な地表面段差型モデル（図-1(b)）も検討の対象とした。従来の1自由度モデルを用いた場合と、1次元成層地盤解析を用いた場合の推定精度について検討を行い、簡易推定手法の適用性について考察を行った。



(a) 加速度波形



(b) 速度応答スペクトル

図-2 入力地震動(Type211)

2. 不整形地盤の地震応答解析

(1) 不整形地盤のモデル

有限要素法を用いて、図-1(a)に示す基盤面に傾斜部がある不整形地盤（基盤面段差モデル）と、図-1(b)に示す地表面に傾斜部がある不整形地盤（地表面段差モデル）の地震応答解析を行い、両端の地盤の層厚、傾斜幅および剛性が、不整形地盤の応答に与える影響について検討を行う。基盤面段差型モデルは、基盤面の一部が傾斜しており、傾斜部両端の基盤面（左側の基盤面は深く、右側の基盤面は浅い）はともに水平である。地表面段差型モデルも同様に、地表面の一部が傾斜しており、傾斜部両端の地表面は水平である。左側の層厚を $H(m)$ 、右側の層厚を $h(m)$ 、傾斜幅を $L(m)$ 、媒質のせん断波速度を $VS(m/sec)$ とする。地盤は線形平面ひずみ要素でモデル化した。地盤の諸元は、土質データや既往の研究を参考に砂質土の標準的な値として、媒質の単位体積重量を $19(kN/m^3)$ 、ポアソン比を 0.45 とした。モデル幅は傾斜部およびその周辺に境界の影響が現われない十分な幅 $1000m$ を用いた。メッシュ幅は、水平方向 $1m$ 、上下方向 $1m$ とした。

(2) 解析概要

解析手法は2次元線形有限要素法を用いた。解析時間間隔は $0.005sec$ 、応答解析時間は $30sec$ とし、計 6000 ステップの解析を行った。解析プログラムは汎用コード DINAS¹⁰⁾を用いた。減衰はレーリー減衰とし、卓越する主要な2つのモードの減衰定数を 10% に設定した。

表-1 解析ケース

ケース名	浅い側の地盤の層厚さ (m) h	深い側の地盤の層厚さ (m) H	傾斜幅 (m) L	せん断波速度 (m/sec) VS	浅い側の地盤の固有周期 (sec) T2	深い側の地盤の固有周期 (sec) T1	両側の地盤の固有周期差 (sec) T1-T2
A	20	30	20	100	0.80	1.20	0.40
		40				1.60	0.80
		50				2.00	1.20
		60				2.40	1.60
B	20	30	40	100	0.80	1.20	0.40
		40				1.60	0.80
		50				2.00	1.20
		60				2.40	1.60
C	20	30	60	100	0.80	1.20	0.40
		40				1.60	0.80
		50				2.00	1.20
		60				2.40	1.60
D	20	30	80	100	0.80	1.20	0.40
		40				1.60	0.80
		50				2.00	1.20
		60				2.40	1.60
E	20	25	100	100	0.80	1.00	0.20
		30				1.20	0.40
		35				1.40	0.60
		40				1.60	0.80
		50				2.00	1.20
		60				2.40	1.60
F	20	50	20	200	0.40	1.00	0.60
			40				
			60				
			80				
			100				
G	20	50	20	150	0.53	1.33	0.80
			40				
			60				
			80				
			100				
H	20	50	20	50	1.60	4.00	2.40
			40				
			60				
			80				
			100				
I	10	15	100	100	0.40	0.60	0.20
		20				0.80	0.40
		25				1.00	0.60
		30				1.20	0.80
		40				1.60	1.20
		50				2.00	1.60
J	20	30	100	200	0.40	2.40	2.00
		40				0.70	0.30
		45				0.80	0.40
		60				0.90	0.50
K	10	20	100	200	0.20	1.20	0.80
		25				0.40	0.20
		30				0.50	0.30
		35				0.60	0.40
		40				0.70	0.50

境界条件は、底面（工学的基盤面）を固定とし、側方境界は鉛直方向固定、水平方向自由とした。底面を固定（基盤のせん断波速度を無限大）と設定しているため、基盤面段差型モデルにおいては、基盤における地震動の増幅や、基盤の段差によって生じる深い側と浅い側の表層下面に入射される波動の位相差は考慮していない。主に、表層の層厚差によって表層の水平方向変形量に差が生じることによる軸ひずみを対象としている。

加振方向は水平方向とした。入力地震動は道路橋示方書耐震設計編¹¹⁾の Type211 とした。加速度波形、速度応答スペクトル（減衰定数 10% で試算）を図-2 に示す。

（3）解析ケース

両側の層厚 H, h ($H > h$)、傾斜幅 L 、せん断波速度 VS の異なる様々な不整形地盤モデルを作成した。解析ケースの一覧を表-1 に示す。表-1 の左からケース名、浅い側の

の地盤の層厚 h 、深い側の地盤の層厚 H 、傾斜幅 L 、せん断波速度 VS 、 $1/4$ 波長則によって h から求めた浅い側の地盤の 1 次固有周期 $T2$ 、 $1/4$ 波長則によって H から求めた深い側の地盤の 1 次固有周期 $T1$ である。解析ケースは全部で 53 ケースある。着目したい項目別に A~K の 11 グループに分けた。

a) 深い側の地盤の固有周期 T の影響

ケース A は、浅い側の層厚 h と傾斜幅 L を 20m、せん断波速度 VS を 100m/sec に固定し、深い側の層厚 H を 10m 間隔で 30~60m まで変化させたものである。深い側の地盤の固有周期 $T1$ の違いによって、応答にどのような影響が現われるかを比較検討することができる。

ケース B~E は、ケース A と傾斜幅 L のみが異なるものであり、それぞれの傾斜幅 L を 40m、60m、80m、100m とした。ケース E に関しては、追加ケースとして深い側の層厚 H が 25、35m のモデルについても解析を実施した。

b) 傾斜幅 L の影響

ケース A~E を、深い側の層厚 H が同じもの同士を比較することによって、傾斜幅 L による影響を調べることができる。ケース F、G、H は、異なるせん断波速度において、傾斜幅 L のみ異なるケースを作成したものである。

c) 浅い側の地盤の層厚 h の影響

ケース E とケース I は、傾斜幅 L が 100m、せん断波速度 VS が 100m/sec と同じ値であるが、浅い側の地盤の層厚が異なり、ケース E が 20m、ケース I が 10m である。

ケース J とケース K は、傾斜幅 L が 100m、せん断波速度 VS が 200m/sec と同じ値であり、浅い側の地盤の層厚はケース J が 20m、ケース K が 10m である。

d) 媒質のせん断波速度 VS の影響

ケース E~H とケース J は、せん断波速度の違いが及ぼす影響を調べるためのものである。

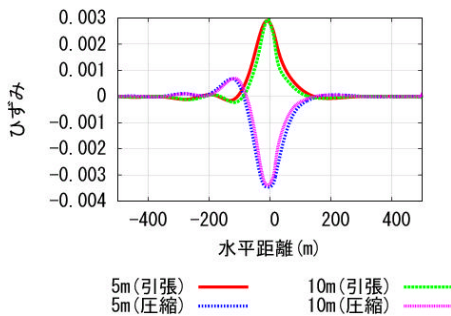
（4）最大軸ひずみ発生時の軸ひずみ・変位の水平方向の分布

表-1 に示した 53 通りの不整形地盤に対して地震応答解析を行った。トンネル等の線状構造物の設置位置における軸方向の変位応答、軸ひずみ応答を算出した。最も大きな軸ひずみが発生した時刻を求め、その時刻における軸ひずみ分布・変位分布を図化した。変位に関しては、右側を正とし、軸ひずみは引張軸ひずみを正としている。横軸は、図-1 に示す基準点からの水平距離である。

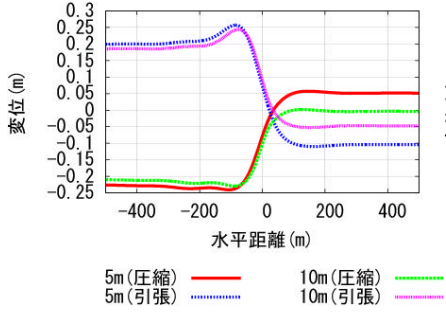
a) 基盤面段差型モデル

応答を出力する深さ（出力深さ）は地表面からの深さが 5m と 10m の 2 地点とした。図-3 に、表-1 に示すケース A1 の最大軸ひずみ発生時ひずみ分布・変位分布を示している。図の凡例は、トンネルの設置深さとひずみの向きを表している。

図-3(a)に示す最大軸ひずみ発生時の軸ひずみ分布は、

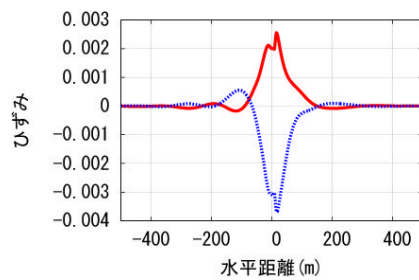


(a)最大軸ひずみ発生時軸ひずみ分布

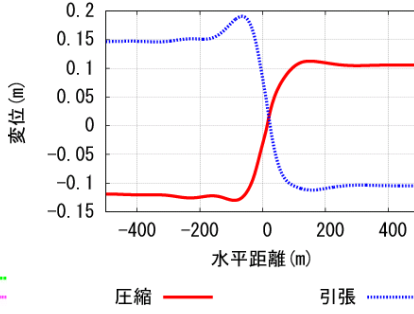


(b)最大軸ひずみ発生時変位分布

図-3 水平方向の軸ひずみ・変位分布
(基盤面段差型モデル, ケース A1)

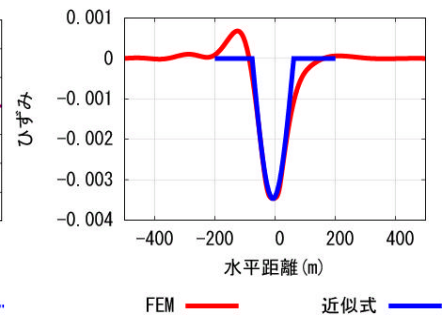


(a)最大軸ひずみ発生時軸ひずみ分布

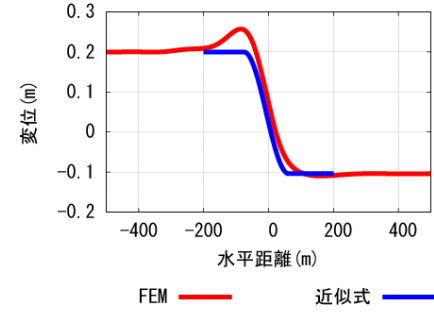


(b)最大軸ひずみ発生時変位分布

図-4 水平方向の軸ひずみ・変位分布
(地表面段差型モデル, ケース A1)



(a)軸ひずみ分布の余弦関数近似



(b)変位分布の正弦関数近似

図-5 最大軸ひずみ・変位分布の近似

約 0m 地点において軸ひずみが最小値をとっており 左側では約-200m, 右側では約 200m 地点において軸ひずみが 0 になっているモデルが多い。また, 深い側の傾斜端付近に正負が逆の軸ひずみが発生しているが, この軸ひずみの大きさは最大絶対値ひずみである値よりも絶対値が小さく, 設計上の影響はないと考えられる。深さ 5m と 10m の軸ひずみ分布はほぼ重なり合っており, 深さによる違いがほとんどないことがわかる。また, 全体を通して, 基盤面段差型の軸ひずみ分布の形状は, 余弦関数の半波長に近い形状を示しているように見える。

図-3(b)に示す最大ひずみ発生時変位分布は, 地盤ひずみが生じている約 0m 地点あたりで変位分布の勾配が急になっている。軸ひずみ分布の形状は余弦関数の半波長に近い形状であったが, ひずみの 1 階積分である変位分布の形状は正弦関数の半波長に近い形状を示している。

段差部両端の成層部分の変位はほぼ一定値であり, 地盤深さによって変位の値が異なる。両端で変位分布がほぼ一定になっていることから, その値は一次元の増幅特性を用いて容易に推定できると考えられる。

b) 地表面段差型モデル

出力深さは, 浅い方の地盤の地表面からの深さが 5m 地点とした。図-4 に, 表-1 に示すケース A1 の最大軸ひずみ発生時の軸ひずみ分布・変位分布を示している。軸ひずみ分布と変位分布ともに, 基盤面段差型モデルと同じグラフの傾向を示し, 軸ひずみ分布は余弦関数の半波長, 変位分布は正弦関数の半波長に近い形状を示している。

しかし, 軸ひずみ分布は図-4 (a)に示す通り, 約 0m 地

点でグラフに凹凸が見られ滑らかな曲線ではないケースが多く見られた。軸ひずみ分布に滑らかでない部分がある理由は, 図-1(b)から明らかとなっており, 地表面段差型の出力深さ 5m は段差部に近いため 段差部の形状の影響が表れたものと考えられる。

c) 軸ひずみ分布の余弦関数近似と変位・速度分布の正弦関数近似

有限要素解析で得られた軸ひずみ分布 $e(x)$ を余弦関数を用いて図-5(a)のように近似, 変位分布 $z(x)$ を正弦関数を用いて図-5(b)のように近似する。基準点を含む両側の半波長分を近似する。関数を用いて表現すると式(1), (2)のようになる。

$$e(x) = \frac{dy(x)}{dx} = \frac{A}{2} \frac{2p}{l} \cos\left(\frac{2p}{l}x\right) = e_{\max} \cos\left(\frac{2p}{l}x\right) \quad (1)$$

$$z(x) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2p}{l}x\right) + A_0 \quad (2)$$

ここに, A は両端の地盤の変位応答差, A_0 は変位分布の基線からのずれ, l は地盤変位分布の波長, $e_{\max}$ は最大軸ひずみである。

軸方向の速度分布 $v(x)$ も変位分布と同様に正弦関数の半波長に近い形状を示していることを確認したので, 式(3)のように正弦関数で近似する。

$$v(x) = \frac{\Delta V}{2} \sin\left(\frac{2p}{l}x\right) + v_0 \quad (3)$$

ここに, V は両端の地盤の速度応答差, v_0 は速度分布の基線からのずれである。後の最大ひずみの推定式は, これらの近似式をもとに作成することとした。

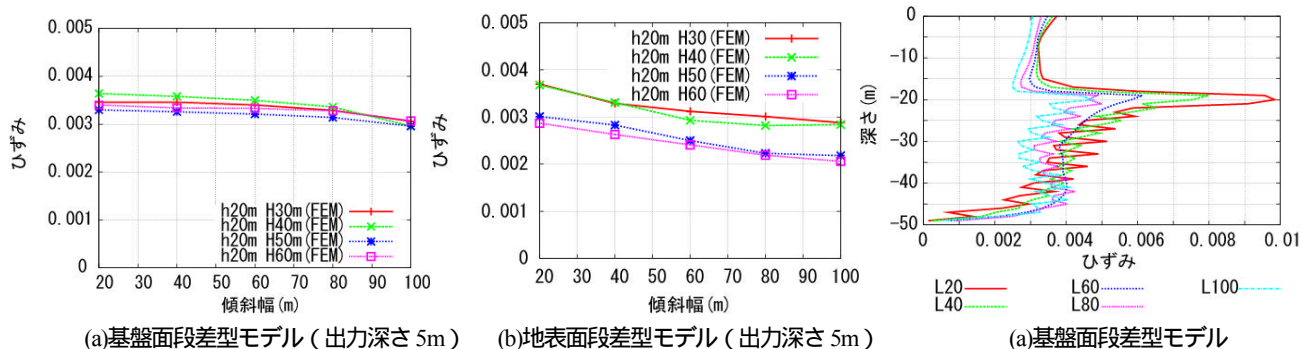


図-6 深い側の地盤の層厚 H を変化させたときの傾斜幅 L と最大軸ひずみの関係（ケース A～E）

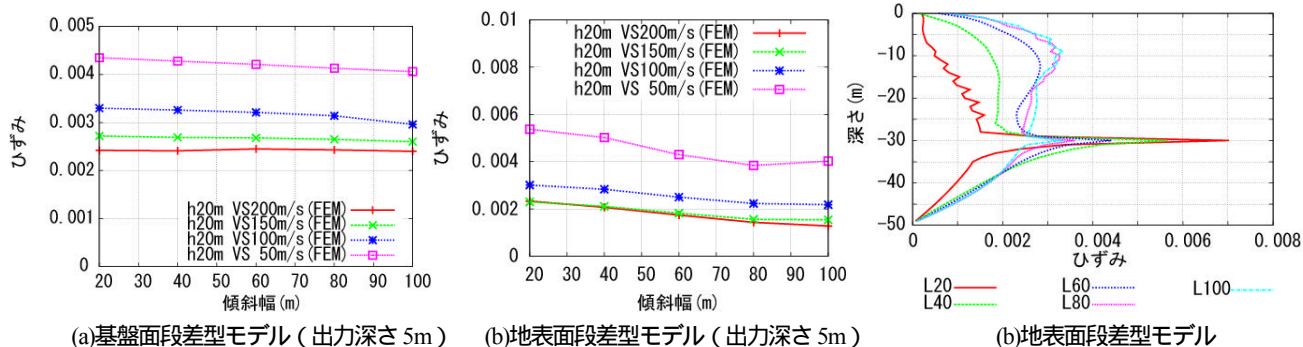


図-7 セン断波速度 VS を変化させたときの傾斜幅 L と最大ひずみの関係
（ケース A3, B7, C11, D15, E21, ケース F～H）

図-8 傾斜幅毎の深さ方向のひずみ分布
（ケース A3, B7, C11, D15, E21）

（ 5 ） 傾斜幅の影響

a) 基盤面段差型モデル

図-6, 7(a)に、基盤面段差型モデルの傾斜幅 L と最大軸ひずみの関係を示す。凡例として、浅い側の地盤の層厚 h と深い側の地盤の層厚 H をとる。傾斜幅 L の違いに関わらず最大軸ひずみはほぼ同程度の値となった。以上より、後の最大ひずみの推定式作成において、傾斜幅 L の影響を排除することとした。

b) 地表面段差型モデル

基盤面段差型と同様に、図-6, 7(b)に地表面段差型モデルの傾斜幅 L と最大軸ひずみの関係を示している。傾斜幅の増加に伴い最大軸ひずみが小さくなっている。地表面段差型の軸ひずみは、基盤面段差型よりも傾斜幅による影響が大きいことがわかる。しかし、傾斜幅 80m～100m にかけて傾斜幅の増加に対する最大軸ひずみの減少割合が小さくなっていることから、後の最大ひずみの推定式作成において、傾斜幅 L の影響を排除した。

基盤面段差型モデルでは段差部が固定基盤に接しているために傾斜幅の影響が小さく、地表面段差型モデルでは段差部が自由表面に接しているために傾斜幅の影響が表れたものと考えられる。

（ 6 ） セン断波速度の影響

a) 基盤面段差型モデル

図-7(a)は、せん断波速度 VS を変化させたときの傾斜幅 L と最大軸ひずみの関係である。せん断波速度 VS が大き

いほど軸ひずみが小さい。せん断波速度の増加に伴い軸ひずみの減少幅が小さくなっていることから、せん断波速度と軸ひずみには反比例のような関係があることがわかる。

b) 地表面段差型モデル

図-7(b)の地表面段差型モデルでも、せん断波速度と軸ひずみには反比例のような関係が見られる。

（ 7 ） 最大軸ひずみの深さ方向の分布

a) 基盤面段差型モデル

図-8(a)に基盤面段差型モデルの深さ方向の最大軸ひずみ分布を示す。例として傾斜幅の異なる 5 ケースの分布を示す。傾斜のない地表面から約 20m 地点までの最大軸ひずみはほぼ一定であり、傾斜幅の違いによらない。これは(4)a)でも述べた基盤面段差型モデルの水平方向軸ひずみ分布が出力深さに依存しないことに一致している。

b) 地表面段差型モデル

図-8 (b)に地表面段差型モデルの深さ方向の最大軸ひずみ分布を示す。グラフの深さ 0m 地点は、深い側の地盤の地表面に相当する。傾斜部のない 30m 地点から 50m 地点までの軸ひずみ分布は深さ方向に変化している。

（ 8 ） 最大軸ひずみの設計スペクトル

最大軸ひずみを、加速度・速度・変位応答スペクトルのような設計に有用な形で図化することを考え、「ひずみ応答スペクトル」と名づける。傾斜幅の影響が小さいに

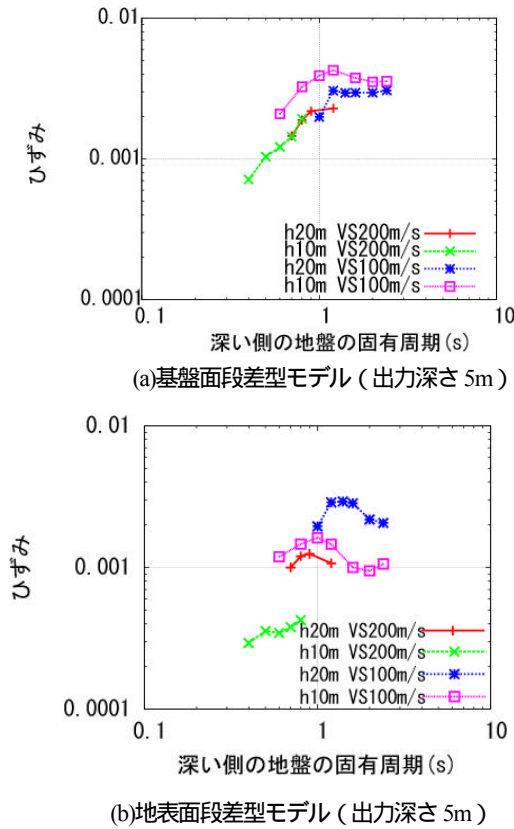


図-9 ひずみ応答スペクトル（ケース A3, B7, C11, D15）

とから、これを除いた残りのパラメータ（深い側の地盤厚、浅い側の地盤厚、せん断波速度）を用いて図化する。加速度・速度・変位応答スペクトルの横軸は構造物の固有周期であることから、横軸を「深い側の地盤の固有周期」とする。そして、残りのパラメータである浅い側の層厚とせん断波速度を凡例に用いることとする。

例として、図-9 にケース A3, B7, C11, D15 のひずみ応答スペクトルを示す。不整形地盤のパラメータが分かれば、図-9 より最大軸ひずみを読み取ることができる。このようなグラフを様々な設計地震動に対して作成しておけば、設計に有用であると考えられる。

ここで、図-9 のひずみ応答スペクトルと、図-2 の速度応答スペクトルを比較すると、形状が似ていることがわかる。特に基盤面段差型モデルのひずみ応答スペクトルにおいて、周期 0.1～1.0 秒で右肩上がり、周期約 1.0 秒で最大値を示し、それ以降は緩やかに減少している傾向が一致している。

3. エネルギー保存を仮定した最大軸ひずみの推定式

（1）最大軸ひずみの簡易推定

有限要素解析を実施することなく簡易に最大軸ひずみを推定するための推定式について検討する。

前節における有限要素解析結果の分析より、傾斜幅 L が最大軸ひずみに与える影響が小さかったことから、最大軸ひずみは段差部の傾斜幅によって決まるのではなく、段差部両端の水平部分の 1 次元構造によって決定されたと考えた。

また、速度応答スペクトルとひずみ応答スペクトルの形状が似ていたこと、そして運動エネルギーは速度の関数でありひずみエネルギーはひずみの関数であることを考慮して、段差部両端の速度差から段差部のひずみを推定できないかと考えた。水平方向のひずみ分布が余弦関数で、速度分布が正弦関数で近似できることを元に、推定式を導出した。

（2）最大軸ひずみの簡易推定式の導出

まず、深さ d (m)における浅い側の地盤の水平方向の速度応答を $v(d)=DV(d)/2+v_0(d)$ 、深い側の地盤の水平方向の速度を $V(d)=DV(d)/2+v_0$ とする。このとき、両端の地盤の水平方向の速度差の最大値は $DV(d)=v(d)-V(d)$ となる。この速度応答差 $DV(d)$ を用いて、速度応答差が最大値をとる時点における、基準点 ($x=0$) を基準とした速度分布を次のとおり正弦関数と仮定する。

$$v(x, d) = \frac{\Delta V(d)}{2} \sin\left(\frac{2p}{l}x\right) + v_0(d) \quad (4)$$

1 次元的な増幅特性による地盤の相対速度は次のとおりと仮定する。

$$v(x, d) = \begin{cases} \Delta V(d)/2 + v_0(d) & (x > 0) \\ -\Delta V(d)/2 + v_0(d) & (x < 0) \end{cases} \quad (5)$$

不整形性がないときの速度分布と、不整形性があることによる速度分布は、式(4)、(5)のように異なったものとなる。この差を不整形性による速度差と呼ぶこととする。本研究では、不整形性によって生じる速度差が生む運動エネルギーが、地盤が軸方向にひずむことによるひずみエネルギーで受け持たれると仮定する。

この速度差によって地盤に与えられる深さ d における単位面積あたりの運動エネルギーを $EK(d)$ とする。地盤変位分布の波長 l を用いて、単位長さ dx あたりの運動エネルギーの差を $x \in [-l/4, l/4]$ で積分することによって、運動エネルギーは式(6)のように表されたとする。 r 、 n はそれぞれ、媒質の密度、ポアソン比である。

$$\begin{aligned} EK(d) &= \int_{-l/4}^0 \frac{r}{2} \left\{ -\frac{\Delta V(d)}{2} - v(x, d) \right\}^2 dx \\ &\quad + \int_0^{l/4} \frac{r}{2} \left\{ \frac{\Delta V(d)}{2} - v(x, d) \right\}^2 dx \\ &= r \left(\frac{\Delta V(d)}{2} \right)^2 \int_0^{l/4} \left\{ 1 - \sin\left(\frac{2p}{l}x\right) \right\}^2 dx \\ &= \frac{r \Delta V(d)^2 l}{32} \left(3 - \frac{8}{p} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

速度差による運動エネルギーを、地盤が軸方向にひずむことによるひずみエネルギーによって受け持つと仮定する．式(1)で表されるひずみ分布を用いてひずみエネルギーを積分した場合、深さ d におけるひずみエネルギー $ES(d)$ は以下のとおりとなる．

$$\begin{aligned} ES(d) &= \int_{-l/4}^{l/4} \frac{1}{2} e(x, d)^2 E dx \\ &= \frac{E}{2} \int_{-l/4}^{l/4} \left\{ e_{\max}(d) \cos\left(\frac{2p}{l} x\right) \right\}^2 dx \\ &= \frac{2(1+n) r V_s^2 e_{\max}^2(d) l}{8} \end{aligned} \quad (7)$$

不整形性によって生じる速度差が生む運動エネルギーとひずみエネルギーが等しいと仮定することで、以下の式が成立する．

$$\frac{r \Delta V^2(d) l}{32} \left(3 - \frac{8}{p}\right) = \frac{2(1+n) r V_s^2 e_{\max}^2(d) l}{8} \quad (8)$$

上式を解いて、最大軸ひずみ $e_{\max}(d)$ は最大速度応答差 $\Delta V(d)$ と以下のように関係づけられる．式(8)の両辺の波長が相殺され、推定式は波長に依存しないことがわかる．

$$e_{\max}(d) = -\frac{\sqrt{3p-8}}{2\sqrt{2p(1+n)}} \frac{\Delta V(d)}{V_s} \quad (9)$$

式(9)による最大ひずみは、せん断波速度に反比例の式であり、2(7)で述べた特徴を表現できている．

以上より、段差部両端の水平部分の速度差 $\Delta V(d)$ が分かれば、式(9)によって最大ひずみを推定できることになる．本研究では、速度差 $\Delta V(d)$ を簡易に算出する手法として、水平地盤を1自由度モデルに置換する方法と、1次元成層モデルに置換して求める方法を検討した．

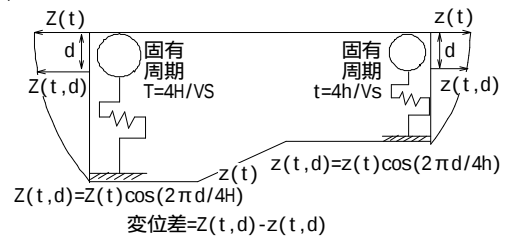
簡易推定手法をまとめると、段差部両端の簡易な地震応答解析により速度差の最大値を求め、推定式を用いて最大速度差を最大軸ひずみに変換するというものである．

4. 1自由度モデルを用いた最大軸ひずみの簡易推定手法

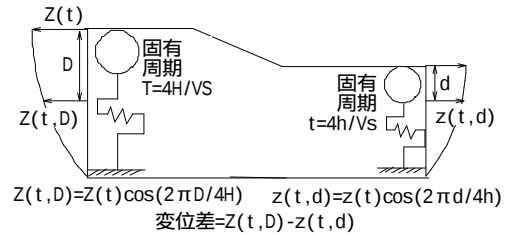
(1) 1自由度モデルを用いた簡易手法

段差部両端の水平地盤の速度応答差を、2つの1自由度モデルを用いた地震応答解析によって求め、推定式(9)によって最大軸ひずみに変換する簡易推定手法の適用可能性について検討を行う．

図-10に示すような両側の地盤の固有周期に等価な1自由度のモデルを2つ用意し、両質点の速度応答をそれぞれ算出する．地表面深さ $d(m)$ の速度差を求めたい場合は、1次モードのモード形状を仮定して余弦関数により補正する．次に、補正された速度応答の差の最大値 $\Delta V(d)$ を求める．そして、式(9)により最大速度差 $\Delta V(d)$ を、最大軸ひずみ $e_{\max}(d)$ に変換する．



(a) 基盤面段差型モデル



(b) 地表面段差型モデル

図-10 1自由度モデルを用いた速度応答差導出の概念図

(2) 1自由度モデルを用いた推定手法の有用性検証

a) 基盤面段差型モデル

基盤面段差型モデルについて、図-11に1自由度モデルを用いた簡易手法により試算したひずみ応答スペクトルと、有限要素解析によって得られたひずみ応答スペクトルの比較を示す．6通りの h と V_s の組み合わせについて、1自由度モデル(線)と有限要素解析結果(点)を比較している．傾斜幅のみ異なる有限要素解析結果は、横軸と凡例が同じで縦軸のみ異なる点として表示されている．

解析ケースとして用いた深い側の地盤の固有周期が0.4秒～4.0秒の範囲では、出力深さ5mの軸ひずみが精度よく一致した．特に一致の精度が高いケースは、軸ひずみ分布が余弦波に近いという特徴を有するケースであった．出力深さ10mの推定精度は、出力深さ5mより精度が悪かった．有限要素解析による最大軸ひずみの推定値は、出力深さによらずほぼ一定の値をとっているのに対して、簡易手法の推定結果は深さによって異なる．

この理由は、深さ方向に軸ひずみが変化する特徴を、簡易手法では表現できていないためであると考えられる．また、1自由度モデルを用いた地震応答解析は、1次モードの影響しか考慮できず、かつ深さ方向の近似精度が良くないことも原因であると考えられる．

b) 地表面段差型モデル

地表面段差型モデルについて、図-12に1自由度モデルを用いた簡易手法により試算したひずみ応答スペクトルと、有限要素解析によって得られたひずみ応答スペクトルの比較を示す．いずれのケースも一致の精度が悪く、有限要素解析の結果に比べて、1自由度モデルの推定値のほうがかなり大きくなった．深い側の地盤の固有周期が大きいほど差が大きい．

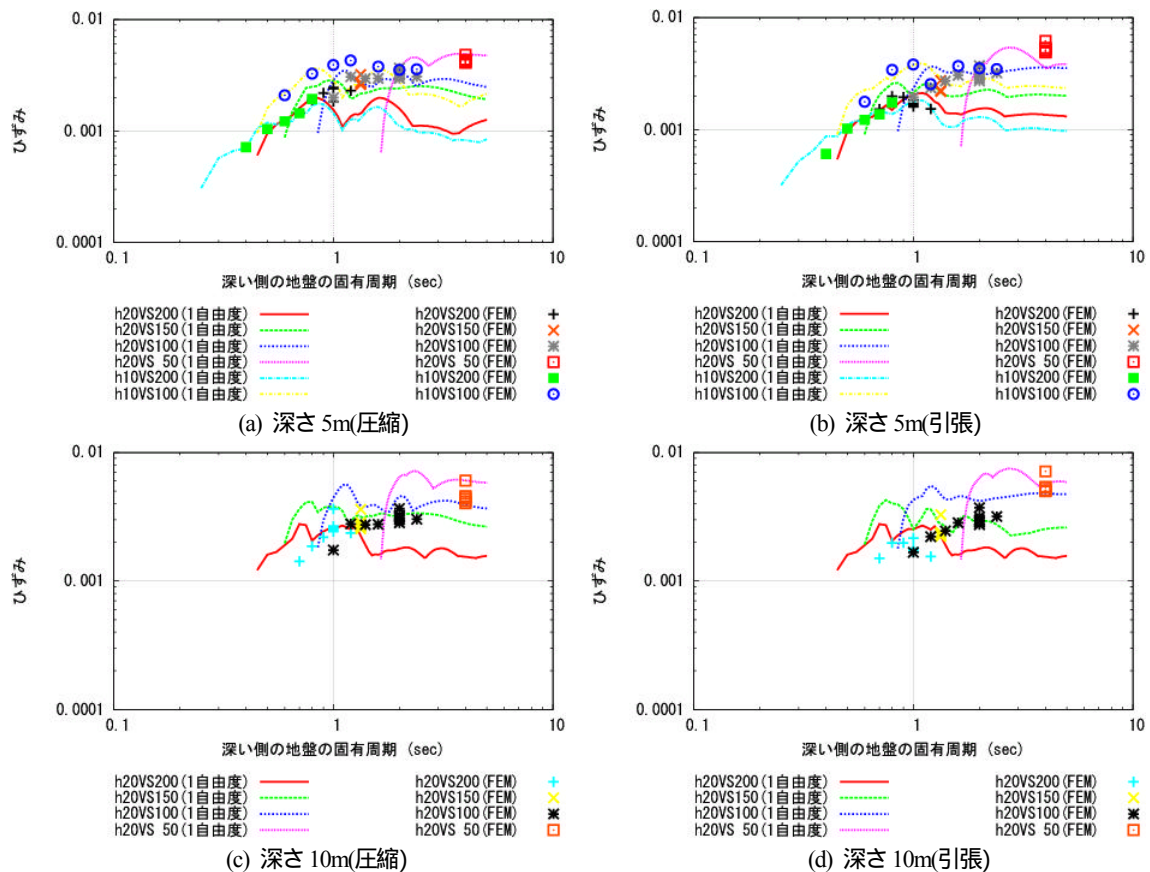


図-11 基盤面段差型モデルのひずみ応答スペクトル(1自由度モデルと有限要素法の結果の比較)

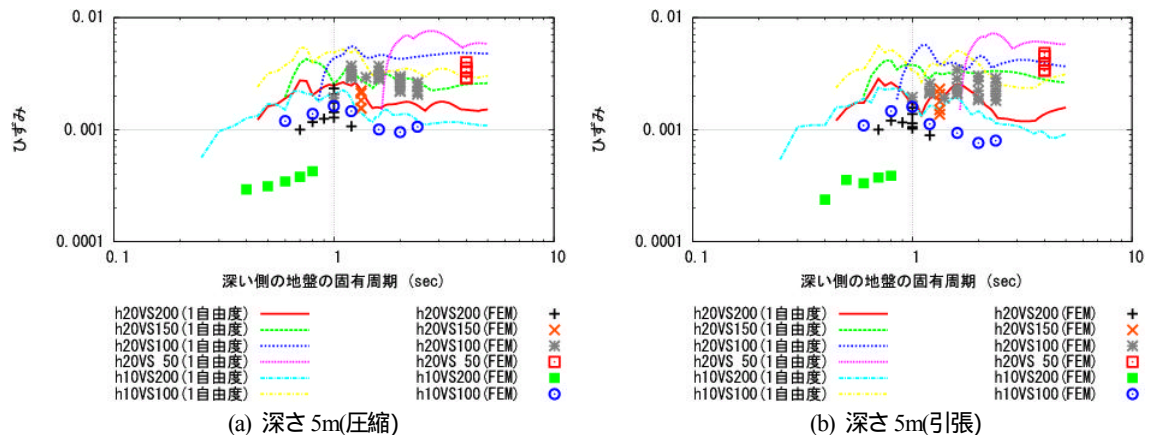


図-12 地表面段差型モデルのひずみ応答スペクトル(1自由度モデルと有限要素法の結果の比較)

地表面段差型モデルの推定精度が悪い原因としては、深い側の地盤においてトンネル設置点の地表面からの深さが深くなるため、余弦関数を用いた近似では深い位置のひずみ応答が正確に表せないことが考えられる。

5. 成層地盤モデルを用いた最大軸ひずみの簡易推定手法

(1) 成層地盤モデルを用いた簡易手法

前節における検討結果から、1自由度モデルを用いた速度応答の推定は、高次モードの影響を考慮できず、また

余弦関数を用いた深さ方向の近似が推定精度を悪化させることがわかった。

そこで本節では、段差部両端の水平地盤の速度応答差を、2つの成層地盤モデルにモデル化し、重複反射理論を用いた地震応答解析(SHAKE)によって求めることとし、簡易推定手法の適用可能性について検討を行う。

図-13に示すように、両端の水平地盤を2つの1次元成層地盤としてモデル化し、任意の深さ d の速度応答差の最大値を求め、速度応答差の最大値 $DI(d)$ は式(9)より最大軸ひずみに変換する。高次モードの影響と、深さ方向の速度分布を適切に表現できる重複反射理論を用いることで、精度向上を試みる。

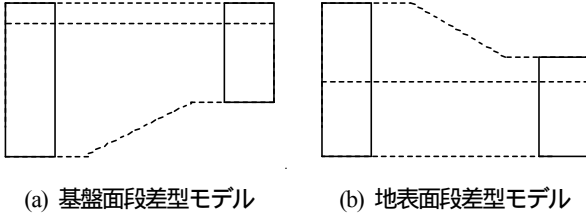


図-13 成層地盤モデル

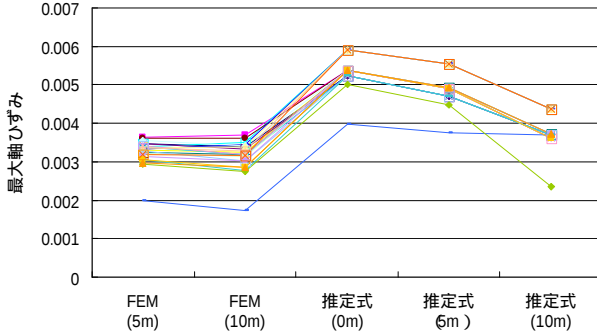


図-14 有限要素法 (FEM) と水平地盤モデルを用いた簡易手法 (推定式) による最大ひずみの比較 (基盤面段差型モデル, ケース A~E)

(2) 最大速度差と最大軸ひずみの深さ方向の分布の違いを考慮に入れた補正係数

a) 基盤面段差型モデル

図-14 に基盤面段差型モデルの有限要素解析による出力深さ 5m および 10m の最大軸ひずみと、水平地盤モデルを用いた簡易手法により推定した出力深さ 0m, 5m, 10m の最大軸ひずみを示す。有限要素解析によるひずみは深さによらずほぼ一定であるが、簡易手法による軸ひずみは深さ方向に小さくなっている。この理由は、簡易手法では最大速度応答差から最大軸ひずみを推定しているためである。即ち、最大軸ひずみは深さ方向にほぼ一定 (図-8(a)) であるのに対し、最大速度差は深くなるほど小さくなるためである。以上を踏まえて、深さ方向の速度分布に基づく補正係数を導入することで、推定精度を向上できないか検討を行った。

従来の最大軸ひずみ推定式は式(9)に示す通り、深さ毎のエネルギーの釣り合いを考えていたが、この仮定を見直す。浅い側の層厚を h とし、深さ $0 \sim h$ の総ひずみエネルギーを TES とする。これに対し、深さ $0 \sim Y$ の総運動エネルギー TEK が釣り合うと仮定する。

$$TES = \int_0^h ES(y)dy = \int_0^h \frac{2(1+n)rVs^2l}{8} e_{\max}^2(y) dy \quad (10)$$

$$TEK = \int_0^Y EK(y)dy = \int_0^Y \frac{rI}{32} \left(3 - \frac{8}{p}\right) \Delta V(y)^2 dy \quad (11)$$

ここで、最大軸ひずみは $0 \sim h$ の範囲で一定であることから、 $e_{\max} = e_{\max}(y)$ を代入すると、式(10)は次のようになる。

$$TES = \frac{2(1+n)rVs^2l}{8} e_{\max}^2 h \quad (12)$$

深さ毎でなく、深さ $0 \sim Y$ の総ひずみエネルギー TES と総運動エネルギー TEK が釣り合うと仮定すると、式(11)と式(12)より、

$$e_{\max}^2 = \frac{3p-8}{8p(1+n)Vs^2h} \int_0^Y \Delta V(y)^2 dy \quad (13)$$

となる。式(13)の右辺を地表面の速度差 $DV(y=0)$ と a を用いて以下のように書き換えるとする。

$$e_{\max} = -\frac{\sqrt{3p-8}}{2\sqrt{2p(1+n)}} \frac{a \Delta V(y=0)}{Vs} \quad (14)$$

ここに、 a は、

$$a = \frac{\sqrt{\int_0^Y \Delta V(y)^2 dy / h}}{\Delta V(y=0)} \quad (15)$$

である。 $aDV(y=0)$ は、深さ $0 \sim Y$ の総運動エネルギーを求める際の速度差の代表値であり、 a は地表面速度差との比である。 a は、深さ方向に一定の最大ひずみと、深さ方向に変化する速度分布の違いを補正するための補正係数の役割を持つ。本研究では、地表面速度差とこの補正係数 a を用いて最大ひずみを推定することとする。

b) 地表面段差型モデル

地表面段差型モデルの最大軸ひずみは図-8 に示した通り、深さ方向に一定でなく深いほど小さくなっている。これは速度分布と傾向が似ている為、深さ方向の補正係数は用いず、推定式(9)を直接用いることとする。

(3) 水平地盤モデルを用いた推定手法の有用性検証

a) 基盤面段差型モデル

図-15 に補正係数を用いた簡易推定手法による最大軸ひずみの推定値と有限要素解析による最大軸ひずみの比較を示す。圧縮側の最大軸ひずみの比較のみ示すが、引張側の最大ひずみについても同様に良い一致が得られた。補正係数を用いない場合の最小二乗誤差は、出力深さ 5m で 41%、出力深さ 10m で 24% であったのに対し、補正係数導入後は 5m, 10m とともに約 7% となった。簡易推定手法と補正係数の有用性が示された。

b) 地表面段差型モデル

図-16 に簡易推定手法による最大軸ひずみの推定値と有限要素解析による最大軸ひずみの比較を示す。基盤面段差モデルほど推定精度は高くないが、1 自由度モデルを用いた推定手法よりは精度が向上しており、有限要素解析のグラフの傾向を捉えることが出来ている。

今後の課題として、更なる精度向上のために補正係数の開発が必要であると考えられる。地表面段差型モデルでは、最大軸ひずみも最大速度差も深くなるほど減少するという共通の傾向を有してはいるが、減少度合いは必

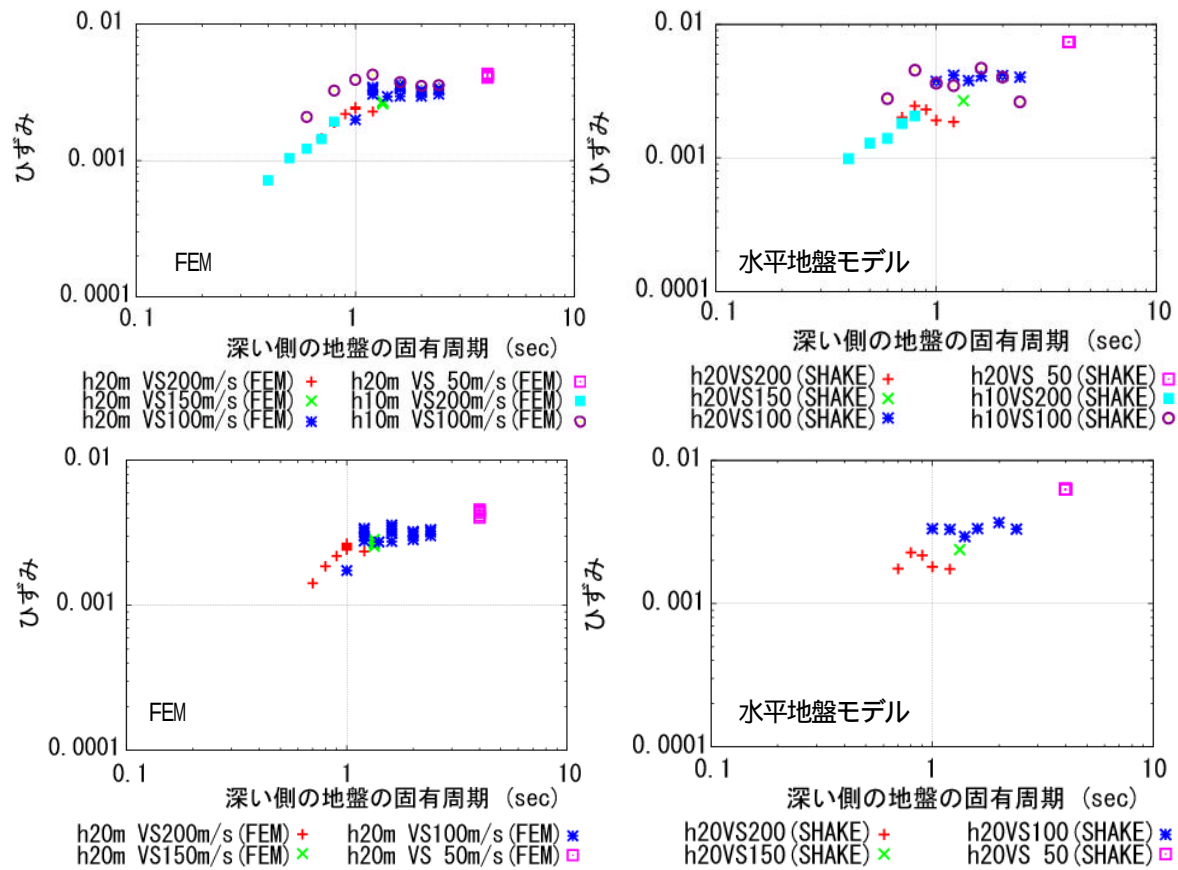


図-15 基盤面段差型モデルのひずみ応答スペクトル (左:有限要素解析結果, 右: 水平地盤モデルを用いた簡易推定)

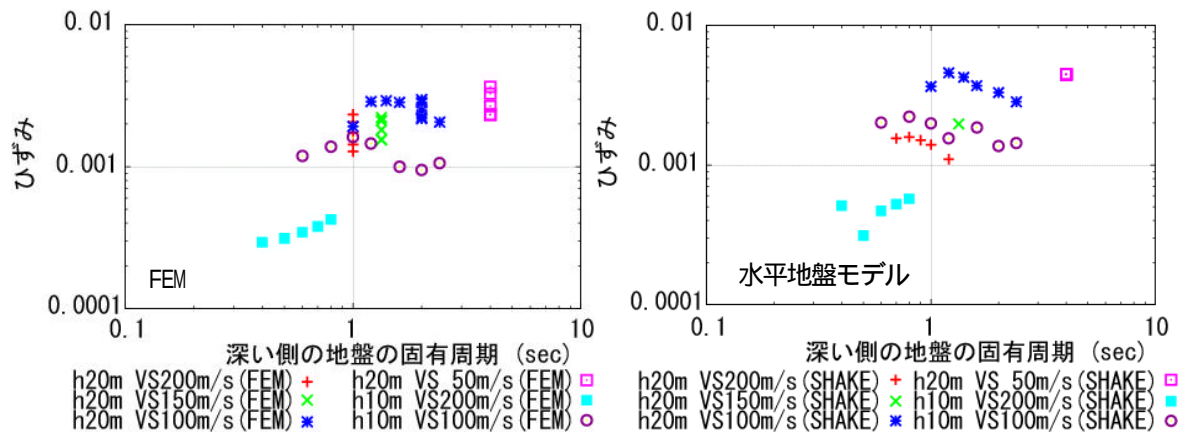


図-16 地表面段差型モデルのひずみ応答スペクトル (左:有限要素解析結果, 右: 水平地盤モデルを用いた簡易推定)

ずしも同じではないため、両者の深さ方向分布の違いを考慮に入れた補正係数の導入が必要であると考えられる。さらに、地表面段差型モデルは、傾斜幅の影響を考慮に入れた方が望ましいと考えられる。本研究では傾斜幅 $L=100\text{m}$ までのモデルしか解析を行っていないが、傾斜幅の異なるモデルの解析を実施し、傾斜幅の影響をより詳細に検討する必要があると考える。

6. まとめ

本研究では、基盤面および地表面段差型不整形地盤の最大軸ひずみの簡易推定に関する研究を行った。

まず、層厚・傾斜幅・せん断波速度の異なる53通りの基盤面および地表面段差型不整形地盤の有限要素解析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 最大軸ひずみ発生時の水平方向の軸ひずみ分布は余弦関数で、変位・速度分布は正弦関数で近似できる。
- 2) 基盤面段差型モデルでは傾斜幅が最大軸ひずみに与える影響は小さいため、推定式作成において傾斜幅の影響を無視できる。
- 3) 基盤面段差型モデルの最大軸ひずみは深さ方向にほぼ一定である。一方、地表面段差型モデルでは深くなるほど減少する。

最大軸ひずみは有限要素法により算出可能であるが、

簡易手法により算出可能となれば、非常に有用である。エネルギーのつりあいを仮定した最大軸ひずみの簡易推定手法について検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 段差部に生じる最大軸ひずみの推定式は、段差部両端の水平地盤の最大速度差の1次式として表される。
- 2) 1自由度モデルを用いて最大速度差を算出し、最大軸ひずみを推定する手法は、推定精度に問題がある。1自由度モデルでは高次モードと深さ方向の分布を適切に表現できないためであると考えられる。
- 3) 高次モードと深さ方向の応答を正確に表現できる成層地盤解析を用いることで、1自由度モデルよりも推定精度が向上する。
- 4) 基盤面段差型モデルでは、最大軸ひずみと最大速度差の深さ方向の分布の違いを補正するための補正係数を提案した。補正係数によって推定精度を7%に向上することができた。

今後、地表面段差型モデルを対象に、更なる精度向上のための補正係数の検討が必要である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：共同溝設計指針，1986
- 2) 建設省土木研究所地震防災部耐震研究室：土木研究所資料，第2488号，応答変位法による地盤条件変化部における共同溝の耐震計算法，1987
- 3) 大塚久哲：最新地中・基礎構造の耐震設計，2001
- 4) (社)日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，2000
- 5) 田村敬一，千葉光，本田利器，中尾吉宏：不整形地盤における地震動増幅特性の簡易評価法，第10回地震工学シンポジウム論文集論文集，pp.869-874，1998
- 6) 橘義規：線状地中構造物の長手方向の耐震設計における支配的要因に関する研究，九州大学博士論文，2006
- 7) 大塚久哲，橘義規，河野亮：FEM地震応答解析による不整形地盤の地盤ひずみ分布特性とばね質点モデルについての考察，構造工学論文集，Vol.47A，pp.539-546，2001
- 8) 竹内幹雄，高橋忠，元山宏，渡辺啓行：地盤剛性急変部の線状地中構造物の地震時応力評価法，土木学会論文集，No.422/I-14，1990
- 9) 青木克憲：基盤面段差型不整形地盤の地震時地盤変位分布の推定に関する研究，九州大学卒業論文，2008
- 10) 3次元地盤・構造物連成地震応答解析システム DINAS，株式会社CRC総合研究所
- 11) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002

SIMPLE ESTIMATING METHOD OF MAXIMUM AXIAL STRAIN OF IRREGULARLY-SHAPED GROUND DURING EARTHQUAKE ASSUMING CONSERVATION OF ENERGY

Aiko FURUKAWA, Hisanori OTSUKA and Toshiki UTSUMI

This study proposes a simple estimating method of maximum axial strain of irregularly-shaped grounds during earthquake. Two types of irregular-ground models; a ground with stepped bedrock and a ground with stepped surface, are considered. The maximum axial strain is estimated from the difference in velocity responses at the horizontal both ends assuming the conservation of energy. The difference in velocity responses is calculated by two SDOF model and two horizontally layered models. A modification factor is also proposed for the ground with stepped bedrock. It is found that estimated maximum strain using the horizontally layered models has higher accuracy, and the validity of modification factor is confirmed.