

基盤面および地表面段差型不整形地盤に生じる地震時最大軸ひずみの簡易推定

九州大学工学部 学生会員 内海寿紀 九州大学工学研究院 正会員 古川愛子
九州大学工学研究院 フェロー 大塚久哲

1. はじめに

応答変位法とは、地震動の位相差によって生じる地中線状構造物の軸方向の地盤変位分布を正弦関数、軸ひずみ分布を余弦関数と仮定し、構造物が受ける断面力を算定する設計法であり、主に整形地盤に適用されている。本研究では、応答変位法を基盤面と地表面に段差を有する不整形地盤に適用することを想定し、不整形地盤における最大軸ひずみの簡易な設定手法について検討を行った。まず、53通りの地盤モデルに対する有限要素解析を実施し、最大軸ひずみの傾向を分析した。次に、有限要素法を用いない簡易な最大軸ひずみの推定方法について述べ、適用可能性を検討した。尚、本研究では不整形性によって生じる軸ひずみに着目しており、入力地震動の位相差は考慮していない。

2. 有限要素解析による軸ひずみの算出

(1) 解析概要

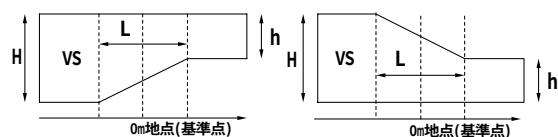
図1に示す2つの不整形地盤モデルの2次元有限要素解析を実施し、トンネル設置深さにおける軸ひずみを出力した。トンネル設置深さは、基盤面段差型モデルでは地表からの深さが5mと10mの2地点、地表面段差型モデルでは浅い側（右側）の地表からの深さが5mの地点とした。左右の層厚を $H, h(m)$ ($H > h$)、傾斜幅を $L(m)$ 、媒質のせん断波速度を $VS(m/sec)$ とした。それぞれ、 $H=30m \sim 60m$, $h=10m, 20m$, $L=20m \sim 100m$, $VS=50m/s \sim 200m/s$ の範囲で値を設定し、53通りの不整形地盤モデルを作成した。地盤の単位体積重量は $\rho=19kN/m^3$ 、ポアソン比は $\nu=0.45$ とし、減衰は有効質量比の卓越する2つのモードの減衰定数を10%とするレーリー減衰を採用した。境界条件は、底面を固定、側方は鉛直方向固定、水平方向自由とした。メッシュ幅は上下・水平方向ともに1m、積分時間間隔は0.005秒とした。入力地震動は図2に示す道路橋示方書V編¹⁾のType211を用いた。

(2) 最大軸ひずみ発生時ひずみ分布

図3に基盤面および地表面段差型の地盤モデル($H=30m$, $h=20m$, $L=20m$, $VS=100m/sec$)の最大軸ひずみ発生時のひずみ分布を示す。出力深さはともに5mである。53通りの地盤モデルについて検討を行ったが、図3のように、約0m地点において引張、圧縮ひずみが最大となり、モデル中央から約300m離れたあたりから軸ひずみが0となっているモデルが多い。また、ひずみ分布の形状は、余弦波の半波長に近い形状をしている。

(3) 最大ひずみ

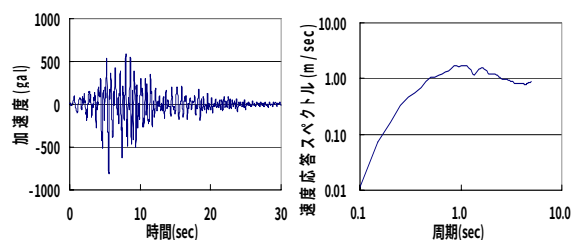
図4に、有限要素法(FEM)により算出された53通りの地盤モデルの最大引張ひずみをモデル毎、出力深さ毎に示す。横軸に深い側の地盤の固有周期($T=4H/VS$)、凡例に h と VS を取っている。傾斜幅 L の違いが最大軸ひずみに与える影響は小さかったため、 L は横軸にも凡例にも含まれていない。図4(a)(b)の基盤面段差型モデルの最大軸ひずみが出力深さ5mと10mとではほぼ同じ値を示していることから分かります。深さ方向のひずみ分布は、ほぼ一定であった。



(a)基盤面段差型モデル

(b)地表面段差型モデル

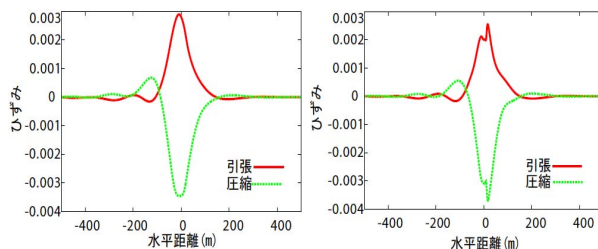
図1 解析モデル



(a)加速度波形

(b)速度応答スペクトル

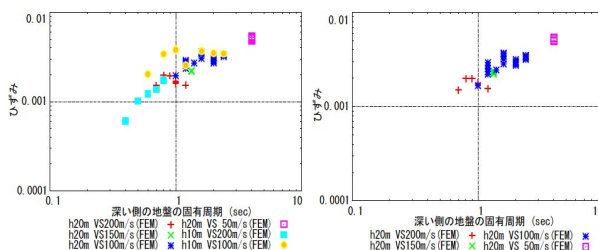
図2 入力地震動



(a)基盤面段差型（深さ5m）

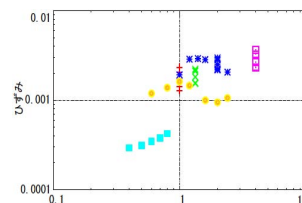
(b)地表面段差型（深さ5m）

図3 最大軸ひずみ発生時ひずみ分布（引張を正）



(a)基盤面段差型（深さ5m）

(b)基盤面段差型（深さ10m）



(c)地表面段差型（深さ5m）

図4 最大軸ひずみ（引張側）

3. 最大軸ひずみの簡易推定に関する検討

(1) エネルギー保存に基づく最大軸ひずみの推定²⁾

「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」というエネルギー保存を仮定し、モデル両端の速度応答差を不整形部に生じる軸ひずみに変換する。速度差によって地盤に与えられる単位面積あたりの運動エネルギーを K 、ひずみエネルギーを S とする。 K と S は、応答変位法に基づき、軸方向の速度分布を正弦関数で、ひずみ分布を余弦関数で近似することによって深さ毎に求める。これらが等しい ($K=S$) ことから、最大ひずみ $\epsilon_{\max}$ は最大速度応答差 ΔV と以下のように関係づけられる。

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sqrt{3\pi-8}}{2\sqrt{2\pi(1+\nu)}} \frac{\Delta V}{Vs}$$

$$\therefore K = \frac{\rho \Delta V^2 \lambda}{32} \left(3 - \frac{8}{\pi}\right) \quad S = \frac{(1+\nu) \rho V s^2 \epsilon_{\max}^2 \lambda}{4}$$

(2) 1 自由度モデルを用いた簡易推定 (従来法)

図 5(a) に 1 自由度モデルを用いた簡易推定の概念図を示す。両端の水平地盤を、固有周期が等価な 2 つの 1 自由度モデルとし、両端の地表面の速度応答をそれぞれ算出する。深さ方向の速度分布を余弦関数と仮定し、任意の深さの速度応答差の最大値を求め、最大軸ひずみに変換する。1 自由度モデルと FEM による推定値を比較したところ、基盤面段差型 (深さ 10m) と地表面段差型 (深さ 5m) については一致の精度が悪かった (図 6)。深さ方向の速度分布を余弦関数で近似していること、1 自由度モデルでは高次モードを表すことができないことが、精度の悪い原因と考えられる。

(3) 重複反射理論を用いた簡易推定 (新提案)

図 5(b) に、本研究で提案する重複反射理論 (SHAKE) に基づく簡易推定の概略図を示す。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、任意の深さの速度応答差の最大値 ΔV を求め、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 SHAKE を用いることで、精度向上を試みた。図 7 に、SHAKE による最大ひずみの推定値を示す。図 4, 6, 7 の比較から明らかなように、1 自由度モデルより推定精度が上がった。また、SHAKE による推定値は FEM による推定値のグラフの傾向を捉えることが出来ている (図 4, 7)。

(4) 補正係数の導入

簡易手法では、深さ毎に最大速度差から最大軸ひずみを推定している点に改善の余地があると思われる。FEM で推定された最大ひずみは深さによらずほぼ一定 (図 4(a)(b)) であるのに対し、簡易手法の最大軸ひずみの推定値は深さ方向に小さくなるため (最大速度差が深さ方向に小さくなるため) である。推定精度を調べてみると、地盤のせん断波速度 (VS) 毎に推定精度が異なることがわかった。これは、VS 毎に深さ方向の速度分布が異なるためであると考えられる。そこで、FEM による最大軸ひずみを SHAKE による地表面最大軸ひずみの推定値で割った値を VS 毎に平均をとって補正係数とし、深さ方向の分布の影響を補正係数に持たせることとした。基盤面段差型への補正係数適用例を図 8 に示す。最大軸ひずみを精度よく推定できている (図 4, 8)。

4. 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して検討を行った。SHAKE により両端の地盤の速度応答を算出することで、有限要素解析を実施することなく不整形部に生じる最大軸ひずみを良好な精度で推定することができる。今後、補正係数の決定方法について、検討を進める予定である。

参考文献 1) (社)日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002. 2) 古川愛子, 大塚久哲, 橋義規, 青木克憲, 基盤面段差型不整形地盤における地震時地盤変位分布と最大ひずみ推定のための新スペクトルの提案, 構造工学論文集, Vol.54A, 2008

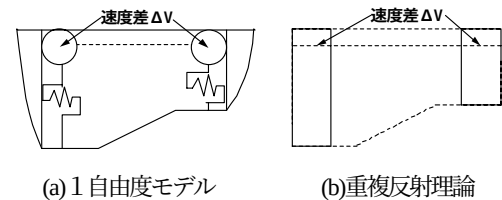


図 5 簡易ひずみ算定の概略図 (例: 基盤面段差型モデル)

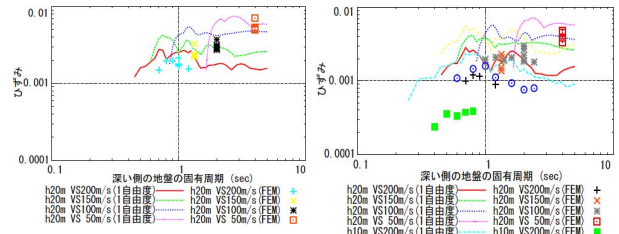


図 6 1 自由度モデルと FEM による最大軸ひずみの比較

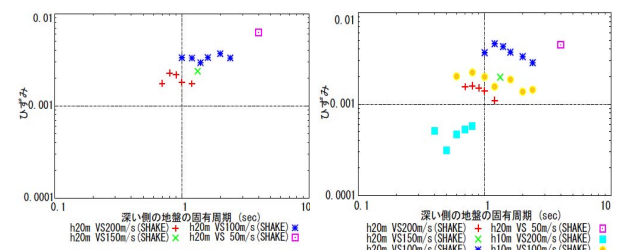


図 7 SHAKE による最大軸ひずみの比較

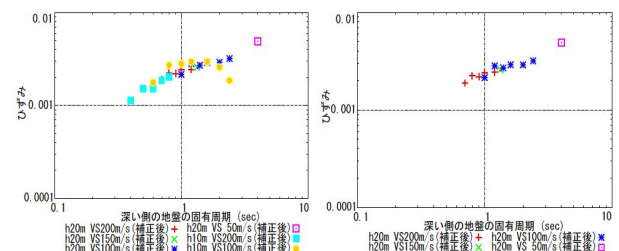


図 8 補正係数を用いて推定された SHAKE による最大軸ひずみ