

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

九州大学工学府 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. 序論

不整形地盤では、地震時に大きな軸ひずみが発生することが知られている。トンネルなどの線状構造物の耐震設計では一般に、2次元有限要素法(FEM)による詳細な解析により、最大軸ひずみの推定が行われている。本研究では、基盤面に段差を有する不整形地盤を対象とし、段差部両端の水平地盤の1次元解析とエネルギー保存則を組み合わせることで、有限要素解析を実施することなく、段差部の最大軸ひずみを簡易に推定する手法を提案する。

2. 基盤面段差型不整形地盤に生じる地震時最大軸ひずみの特徴

(1) 有限要素解析の概要

本研究では、図1に示す基盤面段差型不整形地盤に生じる軸ひずみについて分析するため、2次元有限要素解析を実施した。トンネル設置深さは地表からの深さが5mと10mの2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~60m, h=10m,20m, L=20m~100m, VS=50m/s~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 $\rho=19\text{kN/m}^3$, 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、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の軸ひずみ分布・変位分布の特徴

一例として、H=30, h=20, L=20, VS=100の地盤モデルを例にとり、最大軸ひずみ発生時の軸ひずみ分布・変位分布を図3に示す。最大圧縮ひずみおよび最大引張ひずみが発生するときの深さ5m, 10mにおける分布である。基準点(段差中央点)からの水平距離が-100~100mの区間において、軸ひずみ分布は余弦関数の半波長分に、変位分布は正弦関数の半波長分に近い形状をしている。以上より、基盤面段差型不整形地盤の軸ひずみ分布と変位分布はそれぞれ、余弦関数と正弦関数で近似できると考えられる。

(3) 様々な基盤面段差型不整形地盤の最大軸ひずみ

図4にFEMにより算出された深さ5mと10mにおける基盤面段差型モデルの最大軸ひずみを示す。横軸に深い側の地盤の固有周期($T_1=4H/VS$), 凡例にhとVSを取って図化している。深さ5mと10mとでほぼ同じ値を示していることから、最大軸ひずみは深さによる違いがほとんどなく、また、傾斜幅Lを変えた複数のモデルの結果が重なっていることから、傾斜幅の影響はほとんど無いことがわかる。

キーワード 不整形地盤, 最大軸ひずみ, 簡易推定

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 TEL 092-802-3374

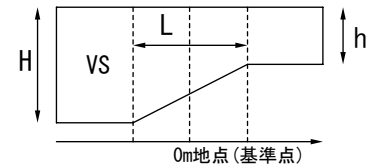


図1 基盤面段差型モデル

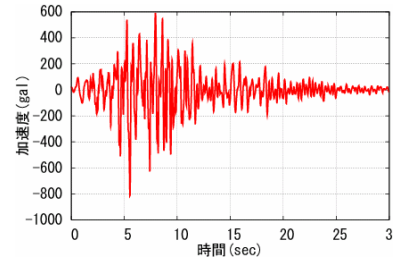


図2 入力地震動(Type211)

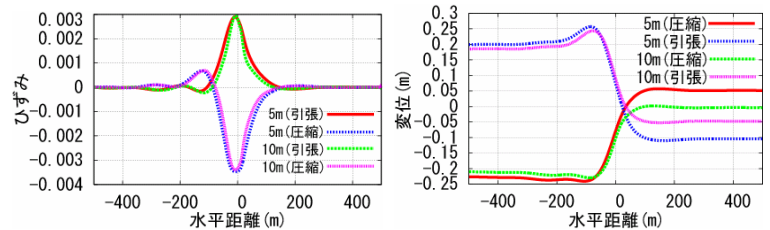


図3 最大軸ひずみ発生時の軸ひずみ分布(左)・変位分布(右)

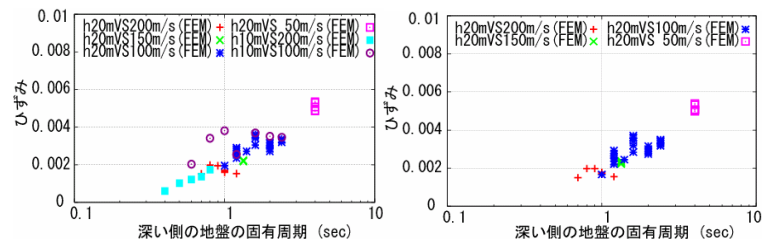


図4 FEMによる最大軸ひずみ(左:出力深さ5m, 右:出力深さ10m)

3. エネルギー保存を仮定した最大軸ひずみの簡易推定手法

(1) 最大軸ひずみの推定式の導出

軸ひずみは、両端の地盤の振動特性の違いによって生じると仮定し、図1に示す段差部両端の2つ水平地盤モデルの1次元解析により、段差部の軸ひずみの推定を行う。深さyにおける最大軸ひずみを $\epsilon(y)$ 、両端の速度応答差の最大値を $\Delta V(y)$ とする。「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」と仮定し、深さyにおける単位深さあたりの運動エネルギーを $K(y)$ 、ひずみエネルギーを $S(y)$ とする。水平方向の速度分布を正弦関数で、軸ひずみ分布を余弦関数でモデル化することにより、 $K(y), S(y)$ は以下のように表される。

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

ここに、 λ は地盤変位分布の波長である。

エネルギー保存($K(y)=S(y)$)から最大軸ひずみ $\epsilon(y)$ の推定式は以下となる。

$$\epsilon(y) = -\frac{\sqrt{3\pi-8}}{2\sqrt{2\pi(1+\nu)}} \frac{\Delta V(y)}{V_s} \quad (2)$$

1次元解析手法としては、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成層地盤地震応答解析(SHAKE)を採用した。軸ひずみを推定したい深さyにおける両端の地盤の速度応答差の最大値 $\Delta V(y)$ を求め、式(2)より最大ひずみ $\epsilon(y)$ を推定することができる。

(2) 深さ方向の速度分布に基づく補正係数の提案と有用性の検証

図5に簡易手法による結果を示す。図4と比べ全体的に過大評価となっている。また、FEMでは深さによらずほぼ一定の値であるが、簡易手法では深さによって値が異なる。簡易手法では深さ毎のエネルギー保存を仮定している点に改善点があると考え、ひずみと速度の深さ方向の分布の違いを考慮した補正係数を検討する。深さ0~Yの運動エネルギーTKと深さ0~hのひずみエネルギーTSが釣り合うと仮定し、推定式を再導出する。最大軸ひずみは深さ方向に一定で $\epsilon(y)=\epsilon_{max}$ と仮定すると、TKとTS、および推定式は以下ようになる。

$$TK = \int_0^Y K(y)dy = \int_0^Y \frac{\rho\lambda}{32} \left(3 - \frac{8}{\pi}\right) \Delta V(y)^2 dy \quad TS = \int_0^h S(y)dy = \frac{2(1+\nu)\rho V_s^2 \lambda h}{8} \epsilon_{max}^2 \quad (3)$$

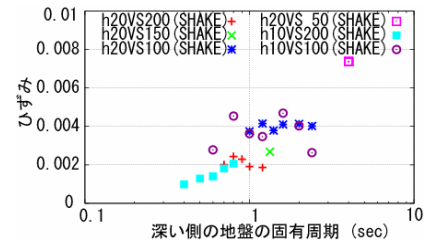
$$\epsilon_{max} = -\frac{\sqrt{3\pi-8}}{2\sqrt{2\pi(1+\nu)}} \frac{\alpha \Delta V(y=0)}{V_s} \quad \left(\alpha = \sqrt{\left(\int_0^Y \Delta V(y)^2 dy / h\right) / \Delta V(y=0)} \right) \quad (4)$$

ここに、 α は平均的な速度差を地表面の速度差 $\Delta V(y=0)$ で除したものであり、深さ方向の分布の違いを補正するものである。式(4)により推定された最大軸ひずみを図6に示す。深さ方向に一定と仮定しているため、深さによる違いはない。これは図4のFEMの結果と精度よく一致し、適用の可能性が示された。表1に平均二乗誤差を示しているが、補正係数の導入により推定精度が格段に向上しているのがわかる。

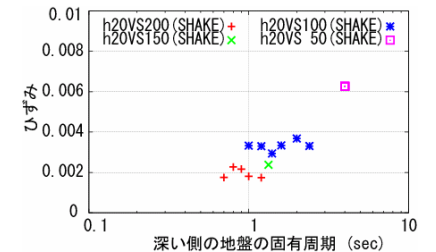
4. 結論

本研究では、基盤面段差型不整形地盤の最大軸ひずみの簡易推定手法を提案した。提案手法は、段差両端の水平地盤の速度差を簡易な1次元解析により算出し、エネルギー保存則を適用して段差部の最大軸ひずみに変換するものである。精度向上のための補正係数の決定方法についても提案を行った。提案手法による軸ひずみの推定値は、FEMの結果と良好な精度で一致し、有用性が確かめられた。

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



(a)出力深さ 5m



(b)出力深さ 10m

図5 最大軸ひずみの簡易推定結果

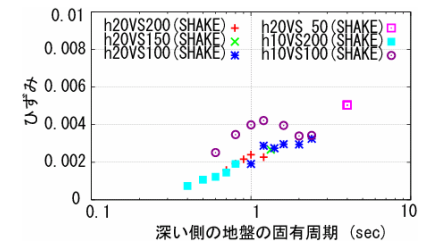


図6 補正係数導入後の推定値

表1 平均二乗誤差(%)

	RMS(5m)	RMS(10m)
補正なし	41.2	24.0
補正あり	7.7	7.5