

表層地盤の力学的非線形性および複雑な幾何形状を考慮した工学的基盤への入射波の推定法の提案 A Method of Estimating Incident Wave Considering Nonlinear Response of the Non-uniform Surface Ground

*山田 正太郎¹、野田 利弘²、浅岡 顕³、澤田 義博³

*Shotaro Yamada¹, Toshihiro Noda², Akira Asaoka³, Yoshihiro Sawada³

1.名古屋大学大学院工学研究科、2.名古屋大学減災連携研究センター、3.地震予知総合研究振興会

1.Civil Engineering, Nagoya University, 2.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University,

3.Association for the Development of Earthquake Prediction

地表にせよ地中にせよ、設置場所の如何に依らず地震計で計測されたデータは地盤の非線形挙動の影響を含んでいる。したがって、地震計の記録からどのような情報を読み取るにせよ、表層地盤の非線形挙動を表現する地盤力学無くして解析できないはずのものである。一方、液状化現象を含む表層地盤の地震時応答の予測・再現手法として、土骨格を弾塑性体として取り扱う水～土連成解析¹⁾の有用性がよく知られている。本研究ではその応用例として、いわゆる工学的基盤に置かれた地震計の記録から表層地盤の力学的非線形性や複雑な幾何形状を考慮して工学的基盤に入射された地震動を推定する手法を提案する。

提案する手法では、工学的基盤以深の地層を均質な半無限弾性体と仮定した上で、表層地盤を含む計算領域下端に粘性境界^{2), 3)}を課す。通常、表層地盤の非線形地震応答解析において、粘性境界を使用する場合は、その点に対する上昇波(E)を計算に用いる入力波とし、解析領域全体の運動が求められる。結果として、解析領域下端でも上昇波(E)と下降波(F)からなる運動が求められる。したがって、一般にはEを与えてE+Fを求める計算が行われる。このような解析では、当然のことながら真のEを如何にして与えるかという点が問題となる。この課題に対し、一般には、地表面の観測記録から一次元重複反射理論に基づいて基盤まで波を引き戻す方法などが取られているが、先に述べた通り、例えば工学的基盤で計測された波形であっても、表層地盤の非線形性が含まれている上に、多次元効果も絡んでくるため、Eの推定手法として、これでは全く不十分である。工学的基盤における観測波についても、純粋なEではなく、表層地盤を介して反射されてきたFを含むという点において直接的な使用はできない。これに対し、我々は工学的基盤において観測された波形が表層地盤の非線形挙動の影響を含むE+Fであることを素直に認めた上で、多次元の水～土連成弾塑性解析によりEを推定することを目指す。具体的には、粘性境界に対する入力として工学的基盤で観測されたE+Fを使用し、表層地盤の非線形応答と共に解析領域下端に入射されてくるEを解として求める方法を提案する。

多次元問題における工学的基盤への入射波、すなわち上記の方法で解析領域下端の各点で計算されてくるEは同様である必要がある。本研究ではこれを満足させる制約を、ラグランジュの未定乗数法を導入することで課す。拘束力を与えるラグランジュ乗数とともに刻々の解Eを求める方法を述べることになる。

本研究の方法により、表層地盤の力学的非線形性、表層地盤の複雑な幾何形状を加味して入射波を推定することが可能となるが、その推定結果の精度は表層地盤の非線形応答のモデル化ならびに境界条件に強く依存することになるが、これらモデル化や境界条件の妥当性の検証は地表付近や近傍の工学的基盤での地震動の計測結果との照合によって可能となる。本研究では鉛直方向および水平方向に対し多点で観測することの意義も強調する。

キーワード：入射波、観測波、工学的基盤、表層地盤、非線形解析、粘性境界

参考文献

- 1) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, *Soils and Foundations*, 45(6), 771-790.
- 2) Lysmer, J. and R., L., Kuhleemeyer (1969): Finite dynamic model for infinite media, *ASCE, EM4*, 859-877.
- 3) Noda, T., Takeuchi, H., Nakai, K. and Asaoka, A.(2009):Co-seismic and post-seismic behavior of an alternately layered sand-clay ground and embankment system accompanied by soil disturbance, *Soils and Foundations*, 49(5), 739-756.

キーワード：入射波、観測波、工学的基盤、表層地盤、非線形解析、粘性境界

Keywords: incident wave, observed wave, engineering base surface, surface ground, nonlinear analysis, viscous boundary

A Method of Estimating Incident Wave Considering Nonlinear Response of the Non-uniform Surface Ground

*Shotaro Yamada¹, Toshihiro Noda², Akira Asaoka³, Yoshihiro Sawada³

1.Civil Engineering, Nagoya University, 2.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University,
3.Association for the Development of Earthquake Prediction

When a strong earthquake motion is the case, whether a seismometer is installed underground or on a ground surface, any information recorded through the seismometer should naturally reflect the influence of highly nonlinear mechanical behavior of a surface ground that usually exhibits non-uniform multi-layered system. In other words, every strong ground motion analysis cannot be performed without the use of soil mechanics that describes nonlinear mechanical behavior of a non-uniform surface ground system.

In recent years, the elasto-plastic finite deformation computation of a soil water coupled system¹⁾ is utilized for the analysis of surface ground behavior from deformation to failure including soil liquefaction that occurs during/after a strong 'quake. In this research, a method of estimating input earthquake motion at an engineering base surface is newly presented from the records of seismometer at the basement that should reflect nonlinear mechanical behavior of a non-uniform multi-layered surface ground.

In the presented method, the existence of a semi-infinite purely elastic ground is assumed below the so-called "horizontal engineering base surface" along which viscous boundary^{2), 3)} is introduced at the bottom of a surface ground system. The earthquake motion is input at the bottom of surface ground through the viscous boundary. Let E be the upward transmitting wave, while F , the downward wave. In the usual "viscous boundary analysis", the E is assumed at the viscous boundary as an input data and the whole surface ground motion is solved. As the results, the $E+F$ is obtained at viscous boundary. Therefore, in usual computation, by giving E , at a viscous boundary, $E+F$ is calculated at any point on the boundary. This $E+F$ will be recorded if a seismometer is installed at the engineering base surface. However, the input data E is always to be assumed. The recorded and then observed $E+F$ cannot be the $2E$, because F includes every influence of both nonlinear mechanical behavior of ground motion and non-uniform geometrical shape of a multi-layered surface ground system. In this research, a method is newly proposed of calculating E by the use of observed $E+F$ as an input data.

It is naturally considered that incident wave E should be uniformly distributed on an engineering base surface. This constrained motion at the bottom of surface ground is introduced through a "method of Lagrange multiplier", in which Lagrange multiplier is to give the constrained force. Therefore, E is solved, from time to time, by calculating Lagrange multipliers.

For the verification of the method, the need of measurement of $E+F$ at many locations on/in the surface ground is particularly emphasized in this research.

References

- 1) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, *Soils and Foundations*, 45(6), 771-790.
- 2) Lysmer, J. and R., L., Kuhlemeyer (1969): Finite dynamic model for infinite media, *ASCE, EM4*, 859-877.
- 3) Noda, T., Takeuchi, H., Nakai, K. and Asaoka, A.(2009):Co-seismic and post-seismic behavior of an alternately layered sand-clay ground and embankment system accompanied by soil disturbance, *Soils and Foundations*, 49(5), 739-756.

Keywords: incident wave, observed wave, engineering base surface, surface ground, nonlinear analysis, viscous boundary