

3 成分入力波動場に基づく、3次元非線形地盤応答解析法

東京大学地震研究所 正会員 飯田昌弘

1. 序 短周期（周期数秒以下）表面波を適切に取り扱うために、入力地震波動場（波動が伝播している状態）に基づく、3次元非線形地盤応答解析法を提案した (Iida 2006)。そこでは、水平動を受ける多層地盤において、3次元線形、非線形、液状化地盤応答解析を実施した。その後、提案法は、3次元線形建物-地盤相互作用解析法 (Iida 2013) へと発展した。

提案法では、3次元地盤モデルと、波動場評価のための（数十 m の浅い地下構造を含む）数百 m 以上の深い地下構造を使用する（図1）。短周期表面波が、浅い構造と深い構造の両方の物性に依存するからである。

本研究では、垂直動を加えた3成分入力波動場に基づく、3次元非線形地盤応答解析法を提案する。その内容は、すでに論文 (Iida 2016) にまとめられているので、本梗概では、その概要を紹介する。

垂直動は、あまり重要でないと考えられてきた。その理由は、重力が作用していることと、垂直動は表層地盤であり増幅しないので、大きな歪や応力が発生しないと考えられるためである。

最近の研究（例えば、Button et al. 2002; Byrne and Housby 2002）でも、垂直動の影響は大きくないと報告されている。けれども、波動に基づく垂直動の影響の合理的な評価は、なされていない。

垂直動の取り扱い、水平動よりもずっと難しい。波動の種類の識別がきわめて困難であり、重力の考慮が必要であり、適切な境界処理が存在しないからである。波動場の評価も困難である。

そうした困難さを踏まえた上で、東京の3地質（山手、下町、埋立）区域において、3成分入力波動場に基づく、3次元非線形地盤応答解析を実施する。

2. 方法 図1の3次元地盤モデルにおいて、土は直方体要素で表現される。

地盤モデルにおける運動方程式は以下である。

$$[M] \{ \delta^2 \chi_a / \delta t^2 \delta^2 \chi_b / \delta t^2 \delta^2 \chi_c / \delta t^2 \}^T + [C] \{ \delta \chi_a / \delta t \delta \chi_b / \delta t \delta \chi_c / \delta t \}^T + [K] \{ \chi_a \chi_b \chi_c \}^T = \{ F_a F_b F_c \}^T$$

ここで、[M]は質量マトリクス、[C]は減衰マトリクス、[K]は剛性マトリクス、 $\{\chi\}$ は変位ベクトル、 $\{F\}$ は外力ベクトル、である。添字 a、b、c は、土、モデルの側面境界、モデルの底面境界、である。

既往の粘性境界を使用し、主計算に先立って、重力による初期応力解析を実施する。

他方、入力波動場は、3次元 (x, y, z) の深い地下構造を使用して、波動方程式に基づいて評価される。地震動の研究 (Iida 2007) から、水平成分は、垂直方向に伝播する平面 S 波と水平方向に伝播する平面ラブ波を、垂直成分は、垂直方向に伝播する平面 P 波と水平方向に伝播する平面レーリー波を、それぞれ仮定する。

$$\{ F_a F_b F_c \}^T = [M] \{ \delta^2 p_a(z) / \delta t^2 + \delta^2 q_a(x, y, z) / \delta t^2 \delta^2 p_b(z) / \delta t^2 + \delta^2 q_b(x, y, z) / \delta t^2 \delta^2 p_c(z) / \delta t^2 + \delta^2 q_c(x, y, z) / \delta t^2 \}^T$$

なお、p と q は、実体波及び表面波による外力変位である。

波動場は、地盤状態の変化に対応して変化するものとする。液状化によって地盤剛性が低下する場合には、大振幅の地震動により、短時間で液状化現象が起これと仮定し、液状化前後の2段階の波動場を使用する。

3. 地盤応答 東京の3地質（山手、下町、埋立）区域の3観測点において、1855年安政江戸地震 (M=7.4) と1923年関東地震 (M=8.1) による、3次元線形、非線形、液状化地盤応答解析を実施する。

線形地盤応答解析では、底面における入力地震動（水平成分の慣性力）、水平成分波動場、3成分波動場の3種類の入力を使用する。非線形及び液状化地盤応答解析では、3成分波動場の入力のみを使用する。

入力波動場による線形地盤応答は、入力地震動による応答に比較して、波動場をよく復元できる。3成分入力波動場による線形地盤応答は、垂直成分波動場を相応に復元できる。1例として、埋立区域の越中島観

（キーワード） 地盤応答解析法、入力波動場、3成分、線形地盤、非線形地盤、液状化地盤。

（連絡先） 113-0032 文京区弥生 1-1-1, Phone: 03-5841-5779, Fax: 03-5689-7265.

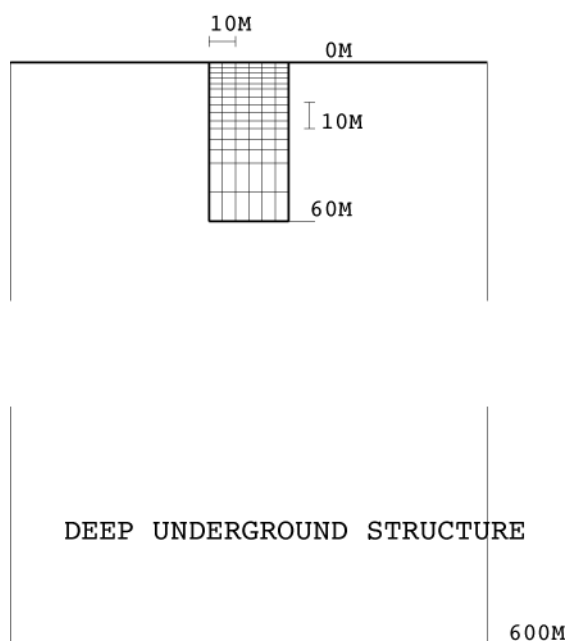


図1 越中島観測点における、3次元地盤モデルと、波動場評価のための深い地下構造。

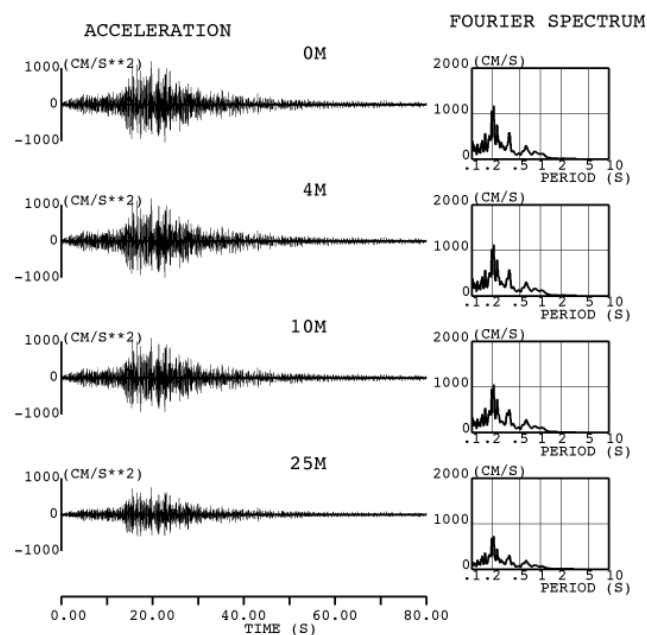


図3 3成分入力波動場による線形地盤応答の垂直成分。

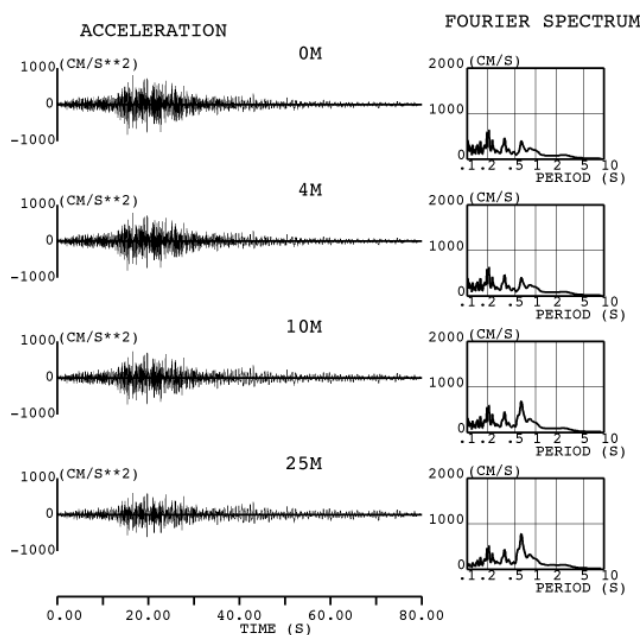


図2 理論加速度波形(波動場)の垂直成分。

測点における、関東地震の波動場の垂直成分(図2)と、3成分入力波動場による線形地盤応答の垂直成分(図3)を示す。

また、水平成分波動場と3成分波動場による線形地盤応答において、歪と応力の垂直分布を評価すると、両者にはほとんど差がない。従って、垂直動の影響は無視できることがわかる。

非線形及び液状化地盤応答解析においても、概ね満足できる応答が得られる。波動場が表面波を多く含む場合には、液状化時には地盤応答がきわめて大きくなる。

4. 結論 3成分入力地震波動場に基づく、3次元非線形地盤応答解析法を提案した。また、東京の3地質(山手、下町、埋立)区域の3観測点において、安政江戸地震と関東地震による、3次元線形、非線形、液状化地盤応答解析を実施した。通常の条件下においては、垂直成分の影響は無視できることがわかった。

謝辞 強震記録は、震災予防協会と、清水建設、鹿島、間組、及びフジタが提供されたものです。

参考文献 Button, Cronin, and Mayes (2002). J. Struct. Eng., ASCE, 128(12), 1551-1564. Byrne, and Houslyby (2002). J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 128(11), 926-939. Iida (2006). Int. J. Geomechanics, ASCE, 6(5), 342-355. Iida (2007). BSSA, 97(2), 575-590. Iida (2013). Int. J. Geomechanics, ASCE, 13(4), 430-440. Iida (2016). Int. J. Geomechanics, ASCE, 16(1), 04015026.