

入力波動場に基づく 3 次元非線形地盤応答解析法 (3)

東京大学地震研究所 正会員 飯田昌弘

1. 序 地盤応答解析や建物応答解析においては、入力地震動は不合理であり、入力波動場を使用する必要がある。波動場というのは、3次元空間を伝播している地震波をいう。入力地震動が不合理な理由は、表面波を適切に表現できないことである。表面波は、軟弱地盤においては、短周期領域（例えば2秒以下）でも多く存在する。

一般に、地盤応答解析では、表層地盤の小領域をモデル化する。表面波は水平方向に伝播するため、その小領域における表面波の挙動は、ずっと深い地下構造の物性に依存する。そのため、入力地震動による地盤応答は、理論的に正しくない。その実際の影響は、軟弱地盤ではかなり大きい(lida and Kawase, 2004; lida et al., 2005; lida,2007)。

そこで、合理的な地盤応答解析法を提案し、その効果を実証し、論文(lida, 2006)にまとめた。本稿では、そのうち特に、非線形応答解析の最も重要な結果を強調したい。

2. 地震動 対象地域は、メキシコ市の Lakebed 区域と、東京湾の埋立区域の両軟弱地盤である。

Lakebed 区域では、表層地盤が高強度粘度のため、地盤は基本的に線形挙動をする。そのため、本稿では、東京湾の埋立区域のみを扱う。

本研究に先立ち、東京湾の埋立区域における地震動を調べた(lida et al., 2005)。その結果、軟弱地盤では、(1)地震動に多くの表面波(ラブ波)が含まれ、(2)地表付近において、S波に比較して、表面波は振幅がきわめて大きくなり、(3)地表付近における軟弱地盤における表面波の挙動は、深い地下構造の物性に強く依存する、ことが明らかになった。参考までに、メキシコ市の Lakebed 区域における地震動では、上記の性質がさらに顕著であった(lida and Kawase, 2004; lida, 2007)。

上記の結果に基づいて、関東地震(図1)による、東京湾の埋立区域の2観測点の地震動を評価した(表1)。地震動に表面波が多く含まれる越中島観測点の地表最大加速度は、そうではない東陽観測点のそれと比較して、いくらか大きくなる。

3. 非線形応答法 提案した3次元非線形応答法の運動方程式は、以下のようになる。

$$[M] \{ \delta^2 \chi_a / \delta t^2 \delta^2 \chi_b / \delta t^2 \delta^2 \chi_c / \delta t^2 \}^T + [C] \{ \delta \chi_a / \delta t \delta \chi_b / \delta t \delta \chi_c / \delta t \}^T + [K] \{ \chi_a \chi_b \chi_c \}^T = \{ F_a F_b F_c \}^T \tag{1}$$

ここで、[M]は質量マトリックス、[C]は減衰マトリックス、[K]は剛性マトリックス、{χ}は変位ベクトル、{F}は外力ベクトル、である。添字 a, b, c は、3次元地盤モデル内の土部分、モデルの側面境界、モデルの底面境界、である。

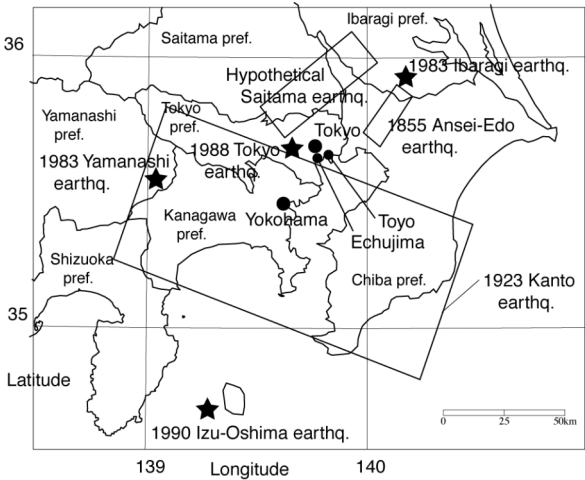


図1 関東地方における3つの大地震の断層モデル。4つの小地震の震央(黒い星印)と2つのボアホール観測点(小さな黒丸)も示されている。

表1 関東地震による、東京湾の埋立区域の2観測点の地表最大加速度(cm/s²)。

	S波	表面波	全体波
越中島	1 0 2 2	7 4 1	1 1 2 6
東陽	8 4 9	3 2 4	9 4 9

(キーワード) 入力波動場、地盤動力学、表面波、軟弱地盤、地下構造。

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

入力地震動の場合、モデルに対する慣性力としての入力加速度波を考えると、右辺の外力ベクトルは次式により表現できる。

$$\{F_a \ F_b \ F_c\}^T = -[M] \{\delta^2 \alpha_c / \delta t^2 \ \delta^2 \alpha_c / \delta t^2 \ \delta^2 \alpha_c / \delta t^2\}^T \quad (2)$$

ここで、 α_c は、モデルの底面境界における外力変位である。この場合、絶対応答加速度は、相対応答加速度 $\delta^2 \chi_a / \delta t^2$ と入力加速度 $\delta^2 \alpha_c / \delta t^2$ の和になる。

入力波動場の場合、3次元(x,y,z)空間において、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表面波を考えると、右辺の外力ベクトルは次式により表現できる。

$$\{F_a \ F_b \ F_c\}^T = [M] \{\delta^2 p_a(z) / \delta t^2 + \delta^2 q_a(x,y,z) / \delta t^2 \ \delta^2 p_b(z) / \delta t^2 + \delta^2 q_b(x,y,z) / \delta t^2 \ \delta^2 p_c / \delta t^2 + \delta^2 q_c(x,y) / \delta t^2\}^T \quad (3)$$

ここで、 p と q は、3次元モデル内におけるS波及び表面波による外力変位である。入力波動場は、これら2種類の波動場の和である。この場合、応答加速度 $\delta^2 \chi_a / \delta t^2$ は絶対応答加速度である。

入力波動場は、深い地下構造を考慮して評価される。非線形解析で使用される入力波動場は、線形解析で使用する入力波動場を修正したものである。そのため、提案した応答法は、深い地下構造の物性に依存する短周期表面波を、適切に表現できる。

なお、提案した応答法による線形地盤応答は、入力した波動場を適切に再現できる。

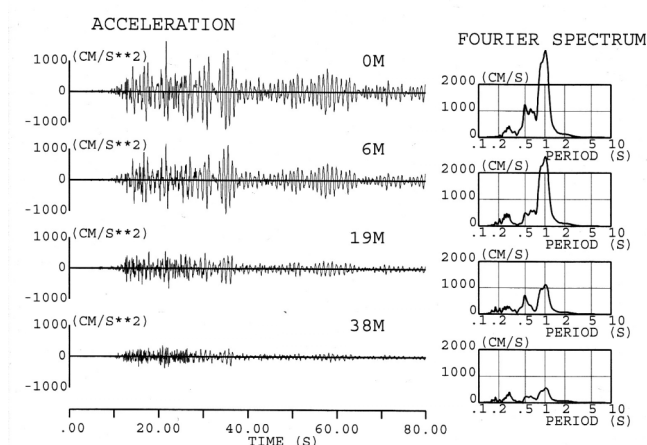


図2 越中島観測点における、関東地震による液状化応答解析の結果。

4. 非線形応答解析 非線形応答解析、液状化応答解析を実施した。

本稿では、その最も重要な結果を示す。図2は、越中島観測点における、関東地震による液状化応答解析結果である。地表に近づくにつれて、地震動の振幅がきわめて大きくなる。

その理由は、液状化によって地盤が柔らかくなると、地盤の減衰は大きくなるが、それでも表面波の振幅は大きくなるからである。他方、S波の振幅は大きくならない。

なお、S波、ラブ波は水中を伝播できない(P波、レーリー波は伝播できる)ので、地盤が水に近い状態になった場合には、こうした結果にはならない。

5. まとめ (1) 地盤応答解析においては、表面波を適切に表現できない入力地震動は不合理であり、入力波動場を使用する必要がある。(2) 非線形応答解析が可能であり、液状化応答解析においては、表面波の存在により、地震動の振幅がきわめて大きくなる。(3) 参考のため、入力波動場に基づく建物応答解析も可能である。

謝辞 東京ソイルリサーチの福元俊一氏から、東京湾の埋立区域の地盤に関するアドバイスをいただきました。東京湾の埋立区域の強震記録は、多くが震災予防協会のアレイ強震記録のデータベースに含まれ(清水建設と竹中工務店が提供されました)、一部は清水建設が提供されました。

参考文献 Iida, and Kawase (2004). A comprehensive interpretation of strong ground motions in the Mexican Volcanic Belt, Bull. Seism. Soc. Am. 94, 598-618.

Iida, Yamanaka, and Yamada (2005). Wave field estimated by borehole recordings in the reclaimed zone of Tokyo Bay, Bull. Seism. Soc. Am. 95, 1101-1119.

Iida (2006). Three-dimensional linear and simplified nonlinear soil response methods based on an input wave field, Int. J. Geomechanics, Am. Soc. Civil Eng. 6, 342-355.

Iida (2007). Estimation of surface waves in the Valley of Mexico, Bull. Seism. Soc. Am. 97, 1458-1474.