

## 入力波動場に基づく3次元非線形地盤応答解析法(2)

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(Iida and Kawase, 2004; Iida et al., 2005; Iida, 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(Iida, 2006)(以下論文A)にまとめた。本稿では、そのうちの線形応答を説明する。現実には、大きな地震動によって地盤が破壊するので、応答の多くは、線形応答ほど大きな加速度にはならない。他方、線形応答は重要な目安になる。

2. 地震動 メキシコ市の Lakebed 区域と、東京湾の埋立区域の両軟弱地盤を対象地域とする。Lakebed 区域では、表層地盤が高強度粘度であるため、地盤が基本的に線形挙動をする。

まず、表面波が卓越する、メキシコ市における地震動を調べた。地震動の基本的性質(Iida and Kawase, 2004)、その後、ボアホール観測点における地震動の詳細な解析(Iida, 2007)、をまとめた。

その結果、(1)軟弱地盤の地震動には、多くの表面波(ラブ波)が含まれ、(2)地表付近において、表面波は、S波に比較して振幅がきわめて大きくなり、(3)地表付近の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。

次に、東京湾の埋立区域における地震動を調べた(Iida et al., 2005)。地震動の基本的性質は、メキシコ市の Lakebed 区域のそれに、とてもよく似ていることが明らかになった。

それを基に、東京湾の埋立区域において、3つの大地震(図1)の地震動を評価した(論文A)。表1に、2観測点における地表最大加速度を示す。地震動に表面波が多く含まれる越中島観測点の最大加速度は、そうではない東陽観測点のそれと比較して、かなり大きくなることわかる。

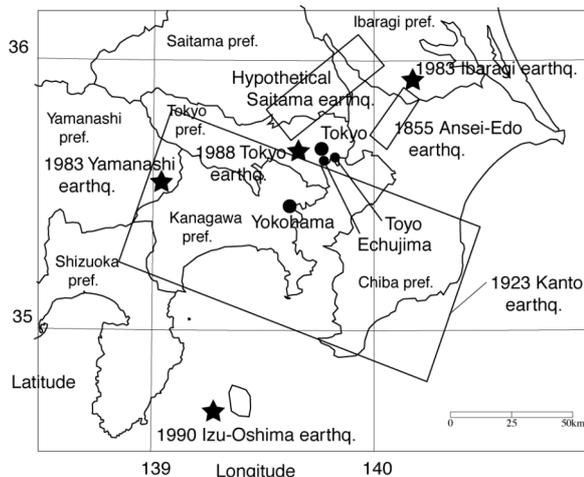


図1 関東地方。3つの大地震の断層モデル、4つの小地震の震央(黒い星印)、及び2つのボアホール観測点(小さな黒丸)が示されている。

表1 東京湾の埋立区域の2観測点における、3つの大地震の地表最大加速度(cm/s<sup>2</sup>)。

		安政江戸	関東	仮想埼玉
越中島	S波	506	1022	2406
	表面波	368	741	1833
	全体波	494	1126	3458
東陽	S波	347	849	1462
	表面波	165	324	876
	全体波	351	949	1600

(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.

3. 線形応答法 提案した3次元応答法は、論文 A に記述されている。運動方程式を以下に示す。

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

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。

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<sub>c</sub>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 δ<sup>2</sup>χ<sub>a</sub>/δt<sup>2</sup> と入力加速度 δ<sup>2</sup>α<sub>c</sub>/δt<sup>2</sup> 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。

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

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 δ<sup>2</sup>χ<sub>a</sub>/δt<sup>2</sup> は絶対応答加速度である。

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、適切に表現することができる。

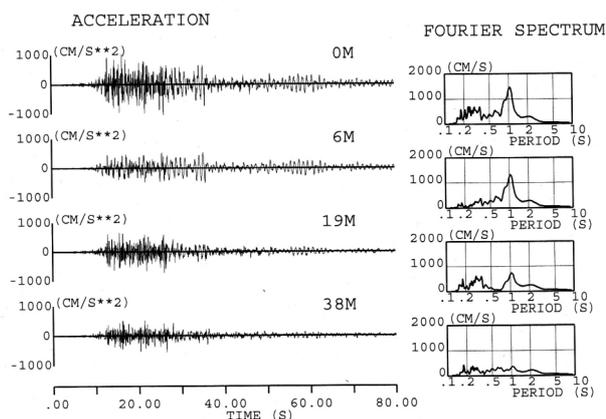


図2 越中島観測点における、関東地震の波動場。

4. 地盤応答 上記2種類の応答法を使用して、地盤応答を計算した。応答結果は、論文 A にまとめられている。

まず、メキシコ市の Lakebed 区域において、提案した応答法による地盤応答は、入力した波動場を適切に再現できた。他方、入力地震動による地盤応答は、波動場とは全く異なるものになった。表面波を適切に表現できない影響が顕著であった。

次に、東京湾の埋立区域においても、同様の結果が得られた。図2は、越中島観測点における関東地震の波動場（理論地震動）を示す。表面波が多く含まれるため、地表に近づくにつれて、地震動の振幅が

大きくなることわかる。入力地震動による地盤応答は、この波動場とはかなり異なるものになった。

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) 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。メキシコ市の強震記録は、メキシコ国立防災センターが提供されました。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.