

入力波動場に基づく、3次元地盤非線形建物—地盤相互作用解析法

東京大学地震研究所 正会員 飯田昌弘

1. 序 軟弱地盤で重要な短周期（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次元建物—地盤相互作用解析法を提案した (Iida 2013)。その第一歩として、水平地震動を受ける多層地盤において、3次元線形相互作用解析を実施した (Iida 2013, Iida et al. 2015)。

提案法では、相互作用系と、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強く依存するからである。

また、以前に、入力地震波動場に基づく、3次元非線形地盤解析法を提案していた (Iida 2006)。

本研究では、両者を合わせて、入力地震波動場に基づく、3次元地盤非線形建物—地盤相互作用解析法を提案する (Iida 2016)。

東京湾の埋立区域においては、すでに 8 階建 RC ビルと 2 階建木造建物の線形相互作用解析を実施したが (Iida et al. 2015)、本研究では地盤非線形相互作用解析を実施する (Iida 2016)。

2. 方法 図 1 の 3 次元相互作用系において、上部構造は集中質量のせん断モデル、摩擦杭に支えられる基礎は剛体である。杭は円筒要素、土は直方体要素、でモデル化される。その運動方程式は以下である。

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

[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、d、e は、上部構造、基礎、杭又は土、系の側面境界、系の底面境界、である。

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。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。

$$\{ F_a \quad F_b \quad F_c \quad F_d \quad F_e \}^T = [M] \{ 0 \quad \delta^2 p_b / \delta t^2 + \delta^2 q_b / \delta t^2 \quad \delta^2 p_c(z) / \delta t^2 + \delta^2 q_c(x, y, z) / \delta t^2 \quad \delta^2 p_d(z) / \delta t^2 + \delta^2 q_d(x, y, z) / \delta t^2 \quad \delta^2 p_e / \delta t^2 + \delta^2 q_e(x, y) / \delta t^2 \}^T$$

p と q は、S 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ると仮定し、液状化前後の 2 段階の波動場を使用する。

3. 非線形地盤応答 本研究以前に (Iida 2006)、入力地震波動場に基づく、3次元非線形地盤解析法を使用して、東京湾の埋立区域の越中島ポアホール観測点において、1923年関東地震(M=8.1)による線形、非線形、液状化地盤応答を評価していた。なお、それに先立ち、同観測点の地震動は、表面波を多く含むために、振幅が大きくなることを示していた (Iida et al. 2005)。

その地盤応答解析では、深さ 1 km の地下構造を使って（図 1）、同観測点の小地震の記録を基に、関東地震に対する波動場を評価した。

入力波動場に基づく地盤応答は、従来の入力地震動による地盤応答と比較して、波動場をよく復元できた。また、液状化時には、表面波を多く含むために、地盤応答がきわめて大きくなった。

4. 建物応答 以前の線形相互作用解析 (Iida et al. 2015) と同様に、越中島観測点において、関東地震による 8 階建 RC ビルと 2 階建木造建物の地盤非線形相互作用解析を実施する (Iida 2016)。本研究では、非線形地盤と液状化地盤において、相互作用解析を実施する（図 1）。

杭を持たない木造建物の基礎は、地盤に固定する。RC ビルと木造建物の固有周期は、0.68 秒と 0.74 秒で

(キーワード) 相互作用解析法、入力波動場、非線形地盤、鉄筋コンクリートビル、木造建物、軟弱地盤。

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

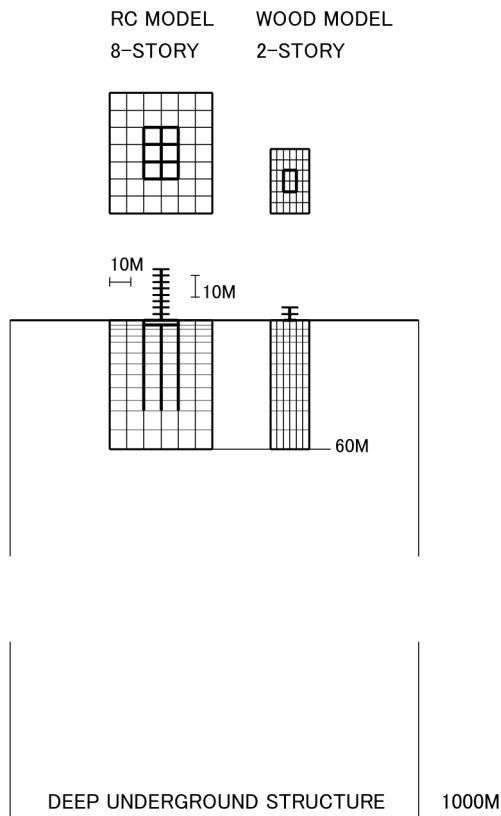


図1 3次元建物-地盤相互作用系と、波動場評価のための深い地下構造。

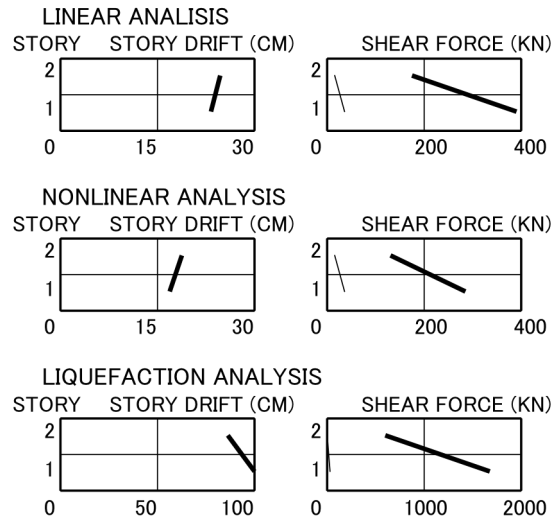


図3 木造建物の、層間変位とせん断力の最大値の垂直分布の比較。細い直線は降伏強度を示す。

あり、地盤の卓越周期（約1秒）に近い。

ここでは、3種類の地盤における、2つの建物の、層間変位とせん断力の最大値の垂直分布を比較する（図2、図3）。液状化地盤では、きわめて大きな建物応答になる。杭を有するRCビルでは、建物全体が液状化地盤の大きな応答に抵抗するので、1階で大きな層間変位やせん断力が発生する（図2）。他方、木造建物では、液状化地盤上の建物全体が大きな応答になる（図3）。

5. 議論と結論 東京湾の埋立区域において提案法を使用し、定性的に建物被害の特徴をとらえた。液状化のような大きな地盤被害が発生すれば、杭を有する建物の被害は、1階に集中し、杭でも発生しえる。他方、地盤被害が小さな場合には、1階や中間階、杭において被害が発生する。

謝辞 強震記録は、震災予防協会と清水建設が提供されたものです。福元俊一氏には、非線形地盤に関するアドバイスをいただきました。

参考文献 Iida, Yamanaka, and Yamada (2005). BSSA, 95(3), 1101-1119. Iida (2006). Int. J. Geomechanics, ASCE, 6(5), 342-355. Iida (2013). Int. J. Geomechanics, ASCE, 13(4), 430-440. Iida, Iiba, Kusunoki, Miyamoto, and Isoda (2015). Int. J. Geomechanics, ASCE (in print). Iida (2016). Int. J. Geomechanics, ASCE (in preparation).

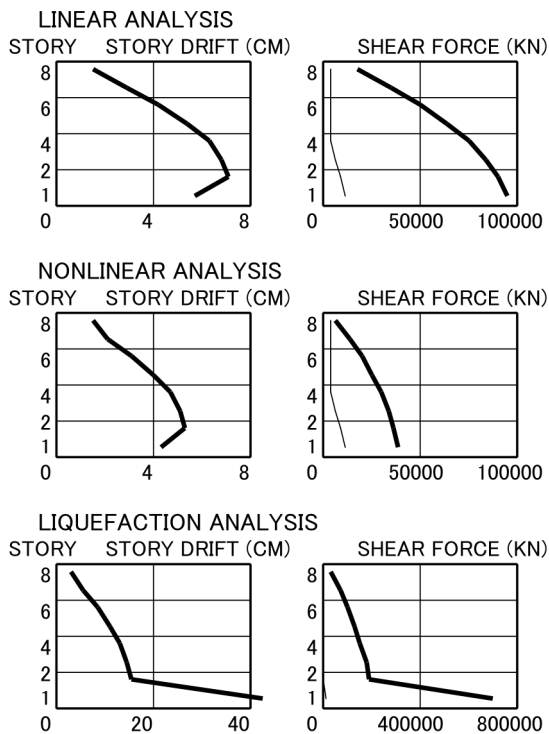


図2 RCビルの、層間変位とせん断力の最大値の垂直分布の比較。細い直線は降伏強度を示す。