

## 入力波動場に基づく、3次元非線形建物-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。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)。次に、その解析法に、地盤の材料非線形を導入した (Iida 2017)。

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。

本研究では、上述の解析法に、上部構造と杭の材料非線形を導入し、垂直動も考慮する。解析法の効果を確認するために、メキシコ市の軟弱地盤の中層鉄筋コンクリート(RC)ビルと、東京湾の埋立区域の中層 RC ビルと木造建物、の3ケースの解析を実施する。そして、東京湾の埋立区域の中層 RC ビルのケースを説明する (Iida 2019)。

**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。

地盤、上部構造、杭の材料非線形は、いずれも簡単なモデルを使用する。地盤は、非線形と液状化の2種類を考える。非線形地盤では、3次元のモール・クーロンの破壊基準をもつバイリニアモデルを使用する。液状化地盤では、地盤剛性が低下するモデルを考える。上部構造は、せん断力のバイリニアモデルを使用する。杭は、曲げモーメントが、曲げモーメントと軸力の降伏曲線によって制御されるものとする。

相互作用系における運動方程式は以下である。

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

[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、3成分入力波動場は、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実体波と水平方向に伝播する平面表面波を考える (Iida 2016)。

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

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、短時間で液状化が終了すると仮定し、液状化前後の2段階の波動場を使用する。

**3. 地盤応答** 本研究に先立ち、3成分入力波動場に基づく、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、液状化地盤応答を実施した (Iida 2016)。

非線形地盤では、地震動の振幅はあまり大きくならなかった。液状化地盤では、その剛性低下によって、表面波の振幅がきわめて大きくなった。

**4. 非線形地盤における建物応答** 本研究では、非線形地盤と液状化地盤において、非線形相互作用解析を実施する。まず、非線形地盤において、8階建 RC ビルの相互作用解析を実施する。

(キーワード) 相互作用解析法、入力波動場、材料非線形、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.

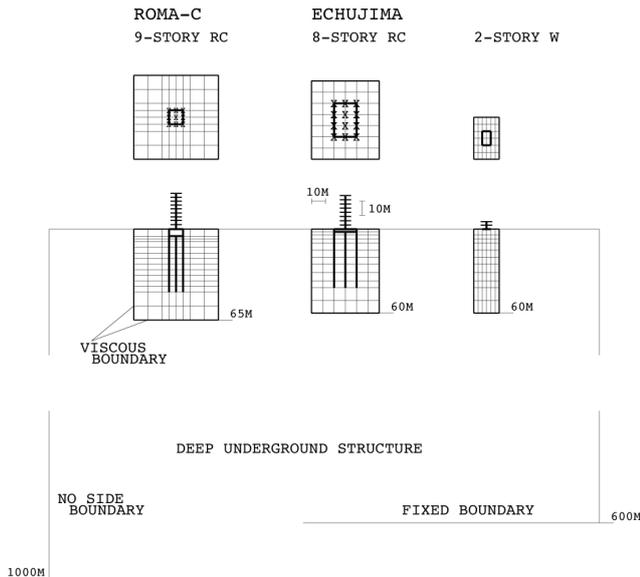


図1 3次元建物一地盤相互作用系と、波動場評価のための深い地下構造。

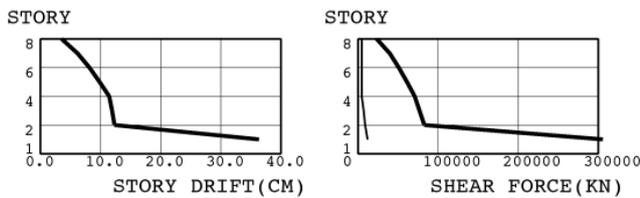


図2 層間変位とせん断力の最大値の垂直分布。細い直線は降伏強度を示す。

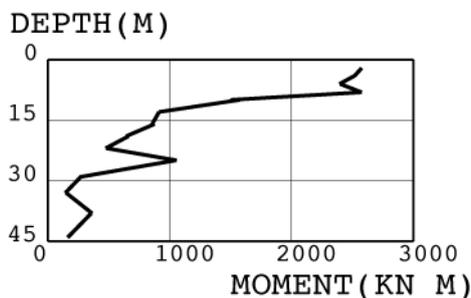


図3 杭の曲げモーメントの最大値の垂直分布。

建物（上部構造と杭）の応答は、いくらか非線形挙動をする程度である。1階や中間階、杭頭において被害が発生する可能性がある。

**5. 液状化地盤における建物応答** 次に、液状化地盤において、8階建 RC ビルの相互作用解析を実施する。地盤剛性が低下するので、図1よりも細かな地盤要素を使用する。

建物の応答は、きわめて大きくなる。図2に、層間変位とせん断力の最大値の垂直分布を、図3に、杭の曲げモーメントの最大値の垂直分布を示す。1階だけが特に大きな応答になる。杭は、4

m から 8 m の液状化層と、2 m に位置する杭頭を含むその上の層において降伏する。

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と考えられる。

**6. 議論と結論** 垂直動が建物の応答に与える影響に関しては、見解が分かれている (Iida 2016)。本研究は、垂直動が大きい通常の条件では、垂直動の影響が見られないことを示した。

他の2つのケースでは、特徴が異なる建物応答が得られた。同じ観測点で実施された2階建木造建物のケースでは、非線形地盤での応答は、8階建 RC ビルの応答に似ていた。液状化地盤では、1階が2階よりもずっと大きな応答になることはなかった。RC ビルと木造建築の応答の違いは、材料の柔らかさと杭の有無によると考えられる。しかしながら、現実には、木造建物の被害は1階に集中する。その理由は、本研究に続く研究で説明する。

メキシコ市の軟弱地盤の9階建 RC ビルのケースでは、高強度の粘土地盤なので線形地盤とし、水平動に比較して相対的に小さい垂直動を考慮しなかった。上部構造の各階と杭頭が大きな応答を示した。けれども、1985年の大地震においては、杭被害がほとんど発生しなかった。

その理由は、メキシコ市の軟弱地盤における独特の建物応答によるものと考えられる。建物全体が軟弱地盤と一体となって振動するので、杭に発生する応力は、ほとんどが地盤振動によるものであり、上部構造の振動によるものではない (Iida 2013)。そのため、大きな杭被害が発生しないと解釈できる。

以上3つのケースの解析を実施することによって、解析法が合理的な非線形応答を提供できることを示した。特に、中層 RC ビルの応答を適切に説明できた。

**参考文献** Iida (2013). *Int. J. Geomechanics, ASCE*, 13(4), 430-440. Iida (2016). *Int. J. Geomechanics, ASCE*, 16(1), 04015026. Iida (2017). *Int. J. Geomechanics, ASCE*, 17(3), 04016081. Iida (2019). *Int. J. Geomechanics, ASCE* (submitted for publication).