

入力地震波動場に基づく、3次元建物―地盤相互作用解析法(3)

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する(Iida, 2012)。本稿では、その概要を説明する。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する。入力地震動を使用する、従来の相互作用解析と比較する。表面波が卓越するメキシコ市の Lakebed 区域において、大地震時の低層から高層の鉄筋コンクリート(RC)ビルの応答を計算する。

2. 背景 Lakebed 区域では、現実には、中層ビルの上部構造の被害が最も大きい。他方、その超軟弱地盤で、杭の大きな被害が発生しないことが、たいへん不思議である。表面波を適切に取り扱うことにより、その理由を説明する。なお、入力地震波動場に基づく、3次元地盤応答解析法をすでに提案し、有効性を確認した(Iida, 2006)。本研究では、その延長として、入力地震波動場に基づく、3次元建物―地盤相互作用解析法を提案し、有効性を実証する(Iida, 2012)。

3. 方法 図1の3次元相互作用系を使用する。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。運動方程式は以下である。

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

[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。入力地震動の場合、相互作用系に対する慣性力として、入力加速度波を取り扱う。

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

α_c は、系の底面における外力変位である。

入力波動場の場合、3次元(x,y,z)地盤内において、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。

$$\{ F_a F_b F_c F_d F_e \}^T = [M] \{ 0 \delta^2 p_b / \delta t^2 + \delta^2 q_b / \delta t^2 \delta^2 p_c(z) / \delta t^2 + \delta^2 q_c(x,y,z) / \delta t^2 \delta^2 p_d(z) / \delta t^2 + \delta^2 q_d(x,y,z) / \delta t^2 \delta^2 p_e / \delta t^2 + \delta^2 q_e(x,y) / \delta t^2 \}^T \quad (3)$$

p と q は、S 波及び表面波による外力変位である。入力波動場は、深い地下構造を使用して評価されるので、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。

4. 波動場 本研究は、1985年のメキシコ地震に匹敵する、仮想ゲレロ地震(M=8.1)を対象にする。Lakebed 区域の Roma-C 観測点において、ビルの応答を計算する。以前の研究(Iida and Kawase, 2004)では、Lakebed 区域の地震動は、表面波がかなり卓越することが明らかになった。これを基に、同観測点で、3次元波動場を評価する。表面波の振幅の垂直方向の増幅は、きわめて大きくなる。使用した同観測点での地下構造は、上記の地震動の研究の表2に示されている。その超軟弱地盤では、大地震時に異常に大きな歪や応力が発生することが予想される。

5. 地盤応答 Lakebed 区域の超軟弱地盤は、水を含む高強度粘度であるため、大地震時でも基本的に線形挙動をする。そのため、入力波動場に基づく、3次元線形地盤応答解析を実施する。得られた地盤応答は、入力波動場をよく再現する。他方、系の底面に作用する入力地震動による地盤応答は、地震動をかなり過小評価する。

(キーワード) 相互作用解析法、入力波動場、表面波、杭の応答、軟弱地盤、メキシコ市。

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

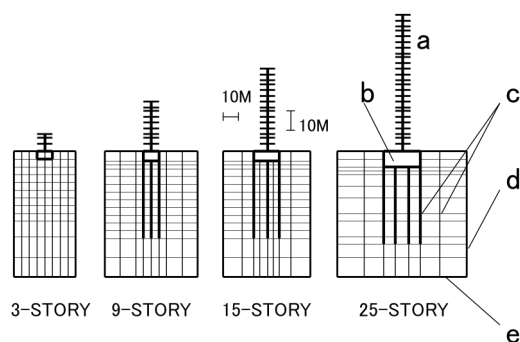


図1 3次元建物一地盤相互作用系。

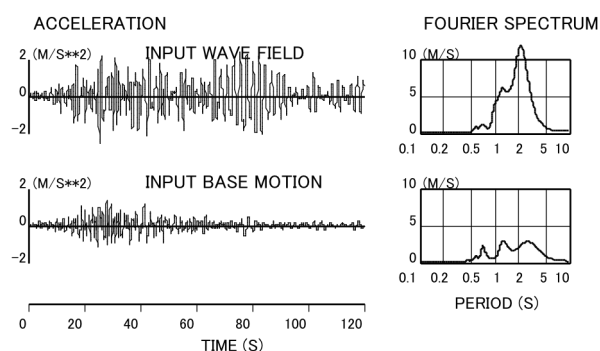


図2 9階建のビルの最上階の加速度応答。

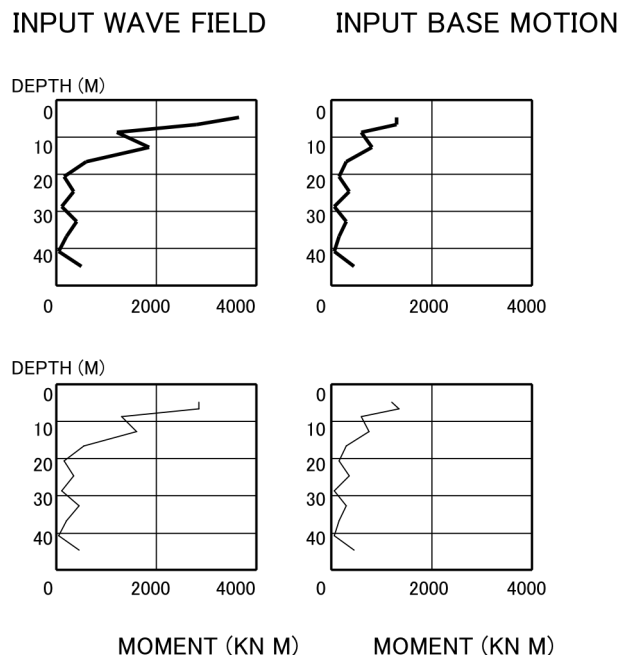


図3 9階建のビルの角杭の、最大曲げモーメントの垂直分布。細い線は、上部構造を除去した場合の分布を示す。

6. 建物応答 1985年以前の、標準的な4種類(3、9、15、25階建)のRCビルを使用する。3階建のビルは、杭を持たない。

まず、2種類の入力による、4種類のビルの上部構造の、最大せん断力の垂直分布を計算する。入力波動場の場合は、5階建から15階建の中層ビルが大きな被害を受けた、メキシコ地震の建物被害をよく説明できる。入力地震動の場合は、建物被害とはいくらか合わない。

次に、図2に、2種類の入力による、9階建のビルの最上階の加速度応答の比較を示す。入力波動場による場合は、ビルの固有周期(1.3秒)ではなく、地盤の卓越周期(2.5秒)で震動している。入力地震動による場合は、表面波を考慮できないので、かなり異なる応答になっている。同様にして、入力波動場による場合は、すべてのビルが、地盤の卓越周期で震動する。つまり、地盤と一体となって震動するのである。

他方、杭を有するビルでは、その超軟弱地盤のために、杭頭で発生する曲げモーメントは、降伏曲げモーメントをはるかに超える。この結果は、上部構造よりも、杭が大きな被害を受けることを示唆するものである。ところが、現実の被害は、主に上部構造で発生する。

そこで、図3に、2種類の入力による、9階建のビルの角杭の最大曲げモーメントの垂直分布の比較を示す。上部構造を除去した場合の分布も示す。一般には、杭の曲げモーメントは、主に上部構造の震動によって発生する。ところが、ここで得られた杭の曲げモーメントは、ほぼ地盤の震動だけによって発生している。つまり、ビルが地盤と一体となって振動するために、杭が上部構造からの力をほとんど受けないのである。そのため、杭が大きな被害を受けないと解釈できる。

7. 結論 入力波動場による建物応答は、現実の被害をよく説明できる。入力地震動による建物応答は、表面波を考慮できないので、適切な応答にはならない。

参考文献 Iida and Kawase (2004). BSSA, 94(2), 598-618. Iida (2006). Int. J. Geomechanics, ASCE, 6(5), 342-355. Iida (2012). Int. J. Geomechanics, ASCE (submitted).