

入力波動場に基づく、さまざまな建物の相対的地震危険度評価

東京大学 正会員○飯田昌弘 建築研究所 飯場正紀
 横浜国立大学 楠 浩一 大阪大学 宮本裕司
 京都大学 五十田博 名古屋大学 勅使川原正臣

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。また、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、表面波が卓越するメキシコ市の Lakebed 区域と東京湾の埋立区域において、その有効性を確認した (Iida 2013; Iida et al. 2014)。

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、提案法を使用して、東京湾の埋立区域において、3地震による2地点での中層鉄筋コンクリート (RC) ビルの応答と、関東地震による1地点でのさまざまな建物の応答を評価する (Iida et al. 2015)。

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。

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

[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。

入力波動場は、3次元(x, y, z)の深い地下構造（図1）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。

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

p と q は、S 波及び表面波による外力変位である。

3. 3地震による2地点での建物の応答 1855年の安政江戸地震 (M=7.4)、1923年の関東地震 (M=8.1)、仮想埼玉地震 (M=7.7)、の3地震による、越中島及び東陽ボアホール観測点（図2）における、8階建 RC ビル（図1右）の応答を評価する。なお、東京湾の埋立区域においては、入力波動場に基づく地盤応答計算をすでに実施しており、入力波動場の効果が確認されている (Iida 2006)。

越中島観測点の建物応答は、東陽観測点よりもかなり大きくなる。越中島観測点の地震動が、東陽観測点に比較して、表面波を多く含むので、振幅が大きくなるからである (Iida et al. 2005)。

4. さまざまな建物の応答 関東地震による、越中島ボアホール観測点における、12の建物の応答を評価する。12の建物は、2階建、5階建、8階建、15階建、30階建て RC ビル、2階建、5階建、8階建、15階建、30階建て鉄骨ビル、2階建、3階建木造建物、である。

深さ1kmの地下構造を使用して、ボアホール観測点の小地震の記録を基に、3地震に対する波動場を評価する。杭のない建物の基礎は、地盤に固定する（図1左）。

図3に、2階建（図1左）、8階建、15階建 RC ビルと、2階建木造建物の、最上階加速度応答を示す。この4つの建物は、低層の RC と鉄骨ビル、中層の RC と鉄骨ビル、高層の RC と鉄骨ビル、木造建物、を代表する。越中島観測点の地盤の卓越周期は、約1秒である。

(キーワード) 相互作用解析法、入力波動場、鉄筋コンクリートビル、鉄骨ビル、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: 03-5689-4467.

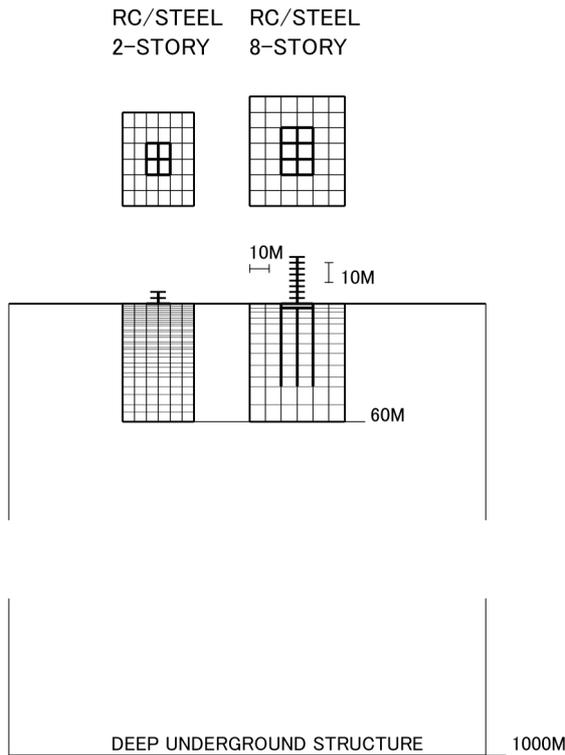


図1 3次元建物一地盤相互作用系(2例)と、波動場評価のための深い地下構造。

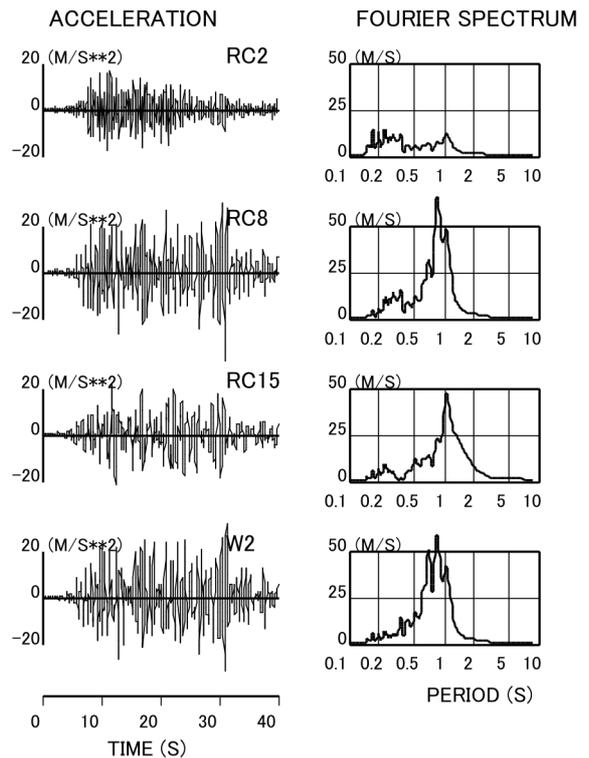


図3 2階建、8階建、15階建RCビルと、2階建木造建物の、最上階加速度応答。

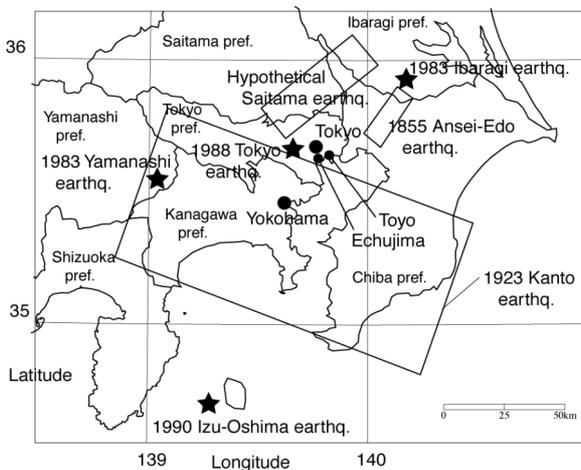


図2 関東地方の地図。3地震の断層、小地震の震源、ボアホール観測点が表示されている。

8階建RCビルと2階建木造建物の応答は、たいへん大きくなり、互いによく似ている。他方、2階建RCビルは、特定の周期で揺れず、あまり大きな応答にならない。

杭をもつ建物では、上部構造の応答が大きい場合に、杭の応答も大きくなる。杭の振動が、主に上部構造の振動によるからである。

5. 結論 入力波動場による建物応答法を使用して、東京湾の埋立区域において、さまざまな建物の応答を評価し、妥当な結果が得られた。応答法は、現段階では線形解析であり、今後は非線形解析を実施したい。

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。日本国土開発の石原哲哉氏には、相互作用系に関する多くの助けをいただきました。

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 (2014). Int. J. Geomechanics, ASCE (submitted). Iida, Iiba, Kusunoki, Miyamoto, Isoda, and Teshigawara (2015). J. Struct. Eng., ASCE (in preparation).