入力地震波動場に基づく、中層鉄筋コンクリートビルと木造建物の地震応答

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
信州大学　　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（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次元建物ー地盤相互作用解析法を提案した。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。表面波が卓越するメキシコ市の Lakebed 区域において、大きな曲げモーメントが発生する杭が、あまり被害を受けない理由を解釈した (Iida 2013)。

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、提案法を修正後、東京湾の埋立区域において、建物記録の復元と、提案法と２つの建物応答法の比較を実施する (Iida et al. 2013) 。なお、東京湾の埋立区域においては、地震動の評価 (Iida et al. 2005) と、入力波動場に基づく地盤応答計算 (Iida 2006) を、すでに実施している。

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、{χ}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。

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

p と q は、S 波及び表面波による外力変位である。

なお、比較のために、（入力波動場を使用しない）従来の相互作用解析法と基礎固定応答法による応答解析を実施する。前者では、上述の相互作用系を使用して、その底面境界において、地震動を慣性力として作用させる。後者では、上述の上部構造を使用して、地表面において、地震動を慣性力として作用させる。

３.記録復元　　地表、地下、建物同時観測がされている、東陽観測点（図２）の２階建 RC ビル（図１左）で得られた、２つの小地震による建物記録を、応答として復元する。内容 (Iida et al. 2013) は省略する。

４.建物応答　　３つの応答法による応答を比較する。越中島観測点において、標準的な８階建 RC ビルと２階建木造建物の、１９２３年関東地震(M=8.1)に対する応答を計算する（図１、図２）。

深さ１km の地下構造を使用し、同ボアホール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する。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 秒であり、越中島観測点の地盤の卓越周期（約１秒）に近い。

同観測点の記録は、東陽観測点の記録に比較して、表面波を多く含むために、地表地震動の振幅が大きくなった (Iida et al. 2005)。また、提案法による地盤応答は、従来の相互作用解析法に比較して、波動場をよく復元できた (Iida 2006)。

（キーワード）　相互作用解析法、入力波動場、表面波、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.

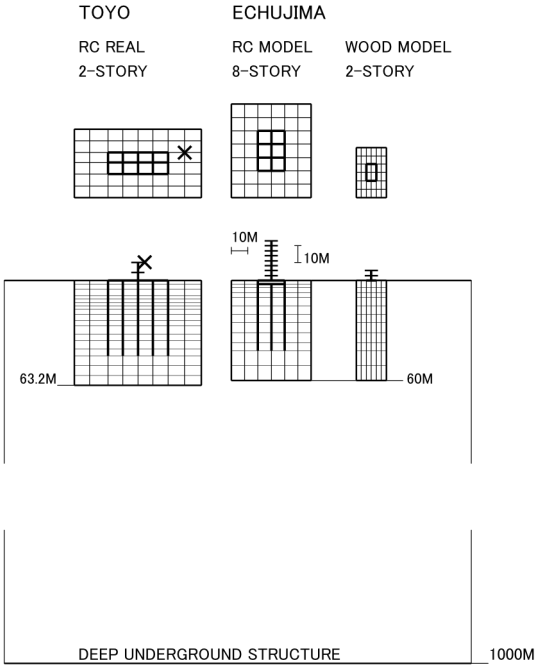

図１　３次元建物ー地盤相互作用系と、波動場評価のための深い地下構造。

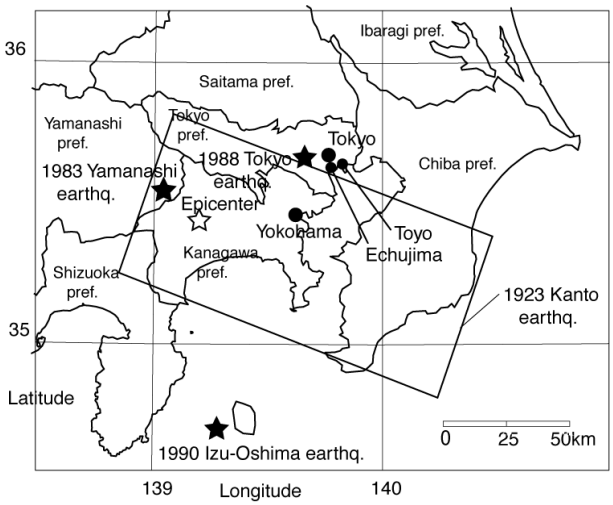

図２　関東地方の地図。関東地震の断層、小地震の震源、ボアホール観測点が表示されている。

ここでは、２つの建物の、最上階と基礎の加速度応答のフーリエ振幅比を示す。RC ビルでは、相互作用効果による約 0.1 秒の振動周期の伸びが認識できる（図３）。他方、木造建物では、それが認められない（図４）。

３つの応答法による結果の違いは、主に地震動の取り扱いの違いによると考えられる。提案法では、振幅比のピークがとても鋭くなるが、波動場を適切に評価して、相互作用系内において作用させた効果だと解釈できそうである。

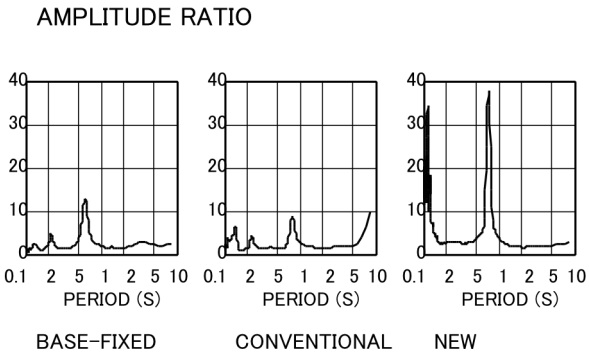

図３　RC ビルの、最上階と基礎の加速度応答（ロッキングを含まず）のフーリエ振幅比の比較。

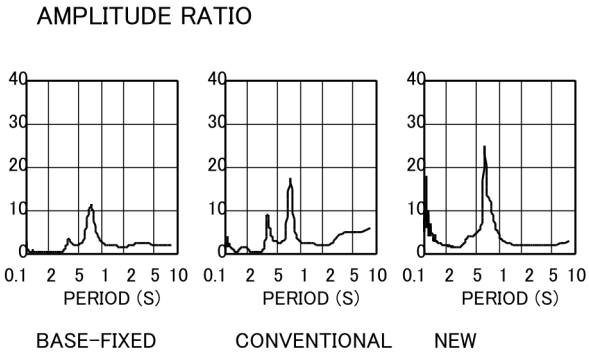

図４　木造建物の、最上階と基礎の加速度応答（ロッキングを含まず）のフーリエ振幅比の比較。

５. 結論　最近提案した入力波動場による建物応答法を修正後、東京湾の埋立区域において、建物記録の復元と、提案法と２つの建物応答法の比較を実施した。それによって、提案法の有効性を確認した。提案法は、現段階では線形応答であり、今後は非線形応答を実施したい。

謝辞　強震記録は、震災予防協会、清水建設、竹中工務店が提供されたものです。竹中工務店は、東陽観測点の RC ビルの建物情報を提供されました。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 (in print). Iida, Iiba, Kusunoki, Miyamoto, and Isoda (2013). Int. J. Geomechanics, ASCE (submitted).