

## 基礎と地盤の接続モデルに基づく、木造住宅被害の解釈

東京大学地震研究所 正会員 飯田昌弘

**1. 序** 過去の地震において、木造住宅の被害は1階に集中した。その原因は、実際の木造住宅の1階の壁量の不足にあるとされてきた。しかしながら、標準的なモデル住宅の地震応答解析では、1階の応答が相対的に大きくなる。壁量の不足が唯一の原因なのか、疑問が残る。

相互作用解析は、主に鉄筋コンクリート構造物で実施されてきたが、軟弱地盤では有用である。ただし、これまでの解析は、地震外力の取り扱いが不十分であった。そこで、表面波を取り扱うことができる、入力波動場に基づく相互作用解析法を提案し (Iida 2013)、発展させた (Iida 2020)。本研究では、この方法に基づいて、木造住宅の基礎と地盤の接続が、地震被害に与える影響を調べる (Iida 2021)。

**2. 方法** 入力波動場に基づく、3次元非線形相互作用解析法 (Iida 2020) を使用する。そして、短い仮想の土杭を使用する。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、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。

地盤は、剛性が低下する液状化地盤を考える。上部構造は、せん断力のバイリニアモデルを使用する。仮想の土杭は、線形挙動と仮定する。

相互作用系における運動方程式は以下である。

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

[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、杭または土、系の側面境界、底面境界、である。

他方、3成分入力波動場は、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。

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

p と q は、実体波と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ので、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. 建物応答** 東京湾の埋立区域の越中島地点において、1923年関東地震(M=8.1)による2階建の木造住宅の応答解析を実施する。表1に、木造住宅の上部構造と基礎のパラメータを示す。

木造住宅の基礎と地盤の相対的な動きを、考慮したモデルはない。本研究では、短い仮想の土杭を使用し、杭と地盤の結合バネ要素の剛性を変化させる。表2に、仮想の土杭のパラメータを示す。

相互作用解析は、0.2秒以上の周期で有効で、80秒間実施される。地盤応答は、Iida (2020) と同じである。地盤剛性が低下するので、表面波の振幅がきわめて大きくなる。

木造住宅は、第2剛性が小さい(表1)ので、応答がきわめて大きくなって崩壊する。図2に、5つの接続ケースにおける層間変位とせん断力の最大値を示す。基礎固定では、むしろ2階の応答が大きい。基礎が可動なケース1、2では、両方の階の応答が小さくなる。ゆるい接続のケース3、4では、1階の応答が相対的に大きくなり、木造住宅の1階の被害を説明できる。

**4. 結論** 本研究では、剛性が低下する液状化地盤を使用した。地震動が大きくなるさまざまな地盤でも、

(キーワード) 相互作用解析法、入力波動場、材料非線形、木造建物、基礎地盤接続、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.

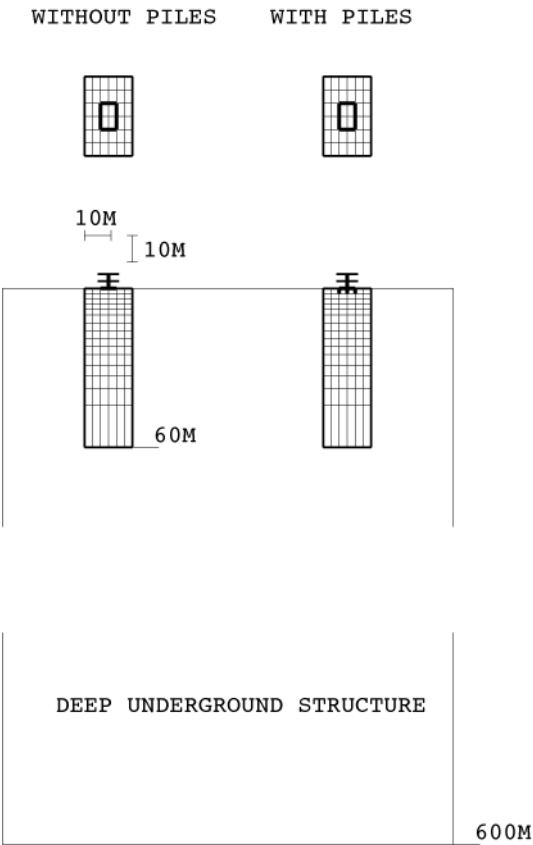


図 1 仮想の土杭がなしとありの場合の、3次元建物ー地盤相互作用系（南北方向）と、波動場評価のための深い地下構造。

表 1 上部構造と基礎のパラメータ

| Parameter                                   | Value   |
|---------------------------------------------|---------|
| Superstructure                              |         |
| (1) Height of each story (m)                | 2.7     |
| (2) Mass of each story (t)                  | 5.6(2)  |
|                                             | 10.2(1) |
| (3) Stiffness of each story (kN/m)          | 706(2)  |
|                                             | 1663(1) |
| (4) Yield shear strength of each story (kN) | 16.1(2) |
|                                             | 37.8(1) |
| (5) Second stiffness of each story (kN/m)   | 141(2)  |
|                                             | 333(1)  |
| (6) Fundamental period (s)                  | 0.74    |
| Foundation                                  |         |
| (1) Mass (t)                                | 37      |
| (2) Embedment (m)                           | 0.0     |
| (3) Length (m)                              | 10      |
| (4) Width (m)                               | 6       |

( ) 内の数値は階数を示す。

表 2 仮想の土杭のパラメータ

| Parameter                                |        | Value               |
|------------------------------------------|--------|---------------------|
| Number                                   |        | 9                   |
| Length (m)                               |        | 2.0                 |
| Radius (m)                               |        | 0.5                 |
| Elastic modulus (kN/m <sup>2</sup> )     |        | 2.1x10 <sup>4</sup> |
| Density (t/m <sup>3</sup> )              |        | 1.7                 |
| Stiffness of joint spring element (kN/m) | Case 1 | 1.0x10 <sup>5</sup> |
|                                          | Case 2 | 1.0x10 <sup>4</sup> |
|                                          | Case 3 | 1.0x10 <sup>3</sup> |
|                                          | Case 4 | 1.0x10 <sup>2</sup> |

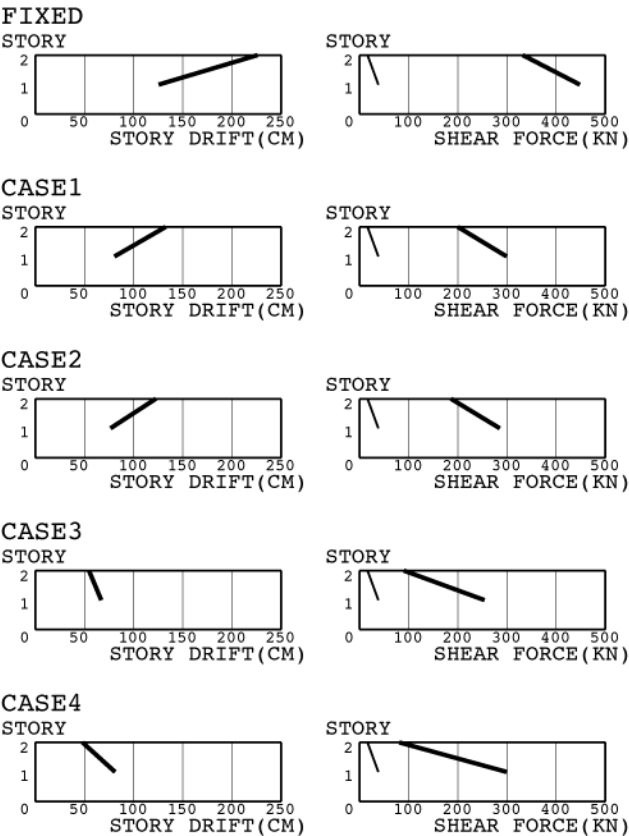


図 2 5つの接続ケースの層間変位とせん断力（南北方向）の最大値。細い直線は降伏強度を示す。結合バネ要素の剛性は、表 2 に示されている。

同様の結果が得られると考える。

基礎と地盤のゆるい接続は、実際の木造住宅の1階の壁量の不足とともに、木造住宅の1階の被害を説明できる。

参考文献 Iida (2013). Int. J. Geomechanics, ASCE, 13(4), 430-440. Iida (2020). Int. J. Geomechanics, ASCE, 20(3), 04020005. Iida (2021). Int. J. Geomechanics, ASCE (submitted for publication).