

鋼構造建物、木造建物および基礎滑り構造の振動台実験分析を包括した応答スペクトル法の適用性検証

名古屋大学 工学部 環境土木・建築学科 建築学コース

長江研究室 鈴木 里佳子

1. 背景と目的

現行耐震設計基準の限界耐力計算法には、等価線形で変形評価する機能があり、応答スペクトル法が背景となっている。研究室の昨年度分析によれば、鉄筋コンクリート造骨組の適応性は良好であった。それに比べ、鋼構造骨組は残留変形に起因する変位の偏りが顕著といわれており、適用性を疑う声をよく耳にする。その意味で、木造建物の履歴特性はどちらかという鉄筋コンクリート造骨組に近く、一方、損傷抑制構造として以前から取り組まれてきた基礎滑り構造は、残留変形が残る履歴形状という意味で、等価線形には最も不利と思われる。こうした問題を議論できる多種類の実験データ分析を実施する機会を得た。本論では、それらすべて、2章に示す振動台実験（一部実験参加）を対象とし、1次モード応答を詳細に分析、考察することから、本質的な問題を理解し、適用条件について検証することとした。

2. 振動台実験概要

2-1. 4層鋼構造骨組（基礎固定、つくば合宿参加）

2021年12月につくばの大型耐震実験施設で実施された実験に計測準備、データ収録、損傷観察の作業から一貫して参加した。試験体（図1）は、実物の3分の1スケールである。しかし、設計では、実周期、実保有水平耐力レベル（ベースシャ係数）のシステムに、実時間地震動を入力する方針がとられた。外構面を自重保持構面とし、内構面のみで水平外力を負担する構造とし、各層に錘を設置することで、実物大と同様の周期（約0.5秒）、保有水平耐力（時ベースシャ係数）を発現する。JMA-Kobe波NS方向を使用し、加振倍率を100%まで段階的に上げていった。

2-2. 3層鋼構造骨組（基礎滑り構造、オンライン参加）

本実験は、2021年10月に台湾國立成功大学で実施された。コロナ禍のためオンライン参加となったが基礎滑り状況をまじかで確認した。試験体（図2）は設備実験用に層間変位が大きくなるように設計されている。基礎には円滑な滑りを発現する鋳鉄支承を用いた。JMA-Kobe波の加振倍率を30%まで変化させた。

2-3. 3階建て木造住宅（基礎固定、基礎滑り構造）

試験体（図3）は耐震等級3で、木造軸組工法・A棟と、枠組壁工法・B棟の2棟である。A棟は基礎固定、B棟では、土槽に深さ1.5mの地盤を再現し、その上に通常のべた基礎を施工した（Phase1）。Phase2では鋳鉄支承を挿入した基礎構造とした。JMA-Kobe波を100%まで上げた。



図1 基礎固定鋼構造 図2 鋳鉄基礎構造 図3 木造住宅

3. 応答スペクトル法への適用性検証

応答スペクトル法的设计手順では1次モード応答の代表加速度 ${}_1S_a$ 代表変位 ${}_1S_d$ スペクトル、等価線形化法に基づきによって応答変位点を求め、各層の層間変形、各部材の応力評価に還元する。そのような評価法を念頭に置き、各実験について1次モードの等価1自由度縮約を実施し等価線形化に必要なパラメータを求め、考察を行う。

多質点系モデルに置換し、一番上の質点の変位が最大となる時刻で1次モード形状を決定し、(1)式、(2)式で等価加速度、変位を求めた。

$${}_1S_d = \frac{\sum_{i=1}^N m_{i1} \beta_{i1} u_{i1} \delta_i(t)}{\sum_{i=1}^N m_{i1} \beta_{i1} u_{i1} \delta_i(t)} \quad (1) \quad {}_1S_a = \frac{\sum_{i=1}^N P_i(t) \beta_{i1} u_{i1} S_d(t)}{\sum_{i=1}^N m_{i1} \beta_{i1} u_{i1} S_d(t)} \quad (2)$$

(3)式により、 ${}_1S_a - {}_1S_d$ 履歴の ${}_1S_d$ の最大値と（最大変位が発生した時刻の） ${}_1S_a$ の傾きから等価周期 T_m を求めた。(4)式の h_s は地動が入力するエネルギーと等しいエネルギーを吸収するダッシュポットの減衰定数を意味する。

$$T_m = \frac{2\pi}{\sqrt{{}_1S_{a_{max}} / {}_1S_{d_{max}}}} \quad (3) \quad h_s = -\frac{\int_0^t \ddot{y}_0 \dot{y} dt}{2\omega_e \int_0^t \dot{y}^2 dt} \quad (4)$$

3-1. 4層鋼構造骨組（基礎固定）

図4に ${}_1S_d - {}_1S_a$ 履歴を示す。25%、50%加振について、正負対称の履歴を概ね再現できている。多層フレームではヒンジ数が徐々に増加し、小さな変位領域で減衰が見られた。代表変形角1/50程度（50%加振）までは、骨格が上り勾配を維持することで偏りがほとんど見られず、応答スペクトル法の適用性は良好である。100%加振では、実験値では正側に変形の偏りが生じたが、最大変形については概ね等価線形解析と対応した。

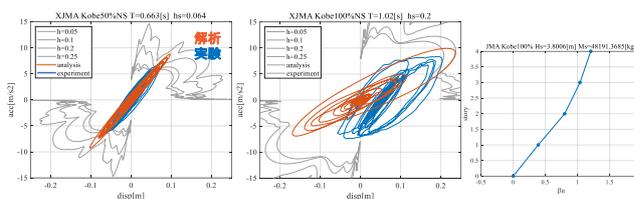


図4 多層鋼構造骨組・基礎固定のSa-Sd履歴、1次モード形状

さらに、逆算減衰定数を求める。逆算減衰定数は等価周期を求め、その周期に対して減衰定数を変数として最大変位応答スペクトルを求め、最大変位が一致するような減衰定数を決定した。解析結果を図5に示す。

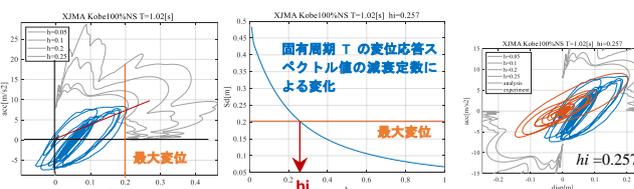


図5 逆算減衰定数算定方法と等価線形解析

3-2. 3層鋼構造骨組（鑄鉄基礎滑り構造）

鑄鉄基礎滑りでは、黒鉛析出の潤滑作用が摩擦係数 0.15 を実現した。そこに JMA-Kobe 波 30% を入力したところ、上部骨組の周期は約 0.7 秒で弾性範囲のまま滑りが生じた。この条件では、1 次モード形状からわかるように、基礎の滑り変位と上部の代表変位の最大変位比率は 1:1 程度であった。実験 $1S_d - 1S_d$ 履歴と等価線形解析 (T_m と h_s) を重ねて図 6 に示す。加振倍率に関わらず、時刻歴波形や履歴形状を再現するには至らない。最大変位については解析値が、概ね実験値と近い値となっている。逆算減衰定数 h_i を用いた考察は図 7 のとおりで、下段中央の 20%EW ケースで 0.035 と小さな値となった。

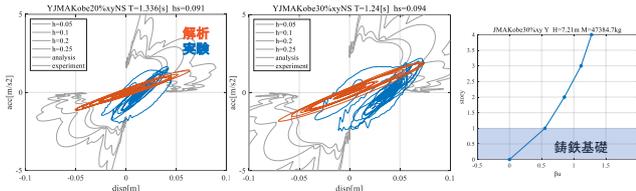


図 6 鑄鉄基礎構造の Sa-Sd 履歴, 1 次モード

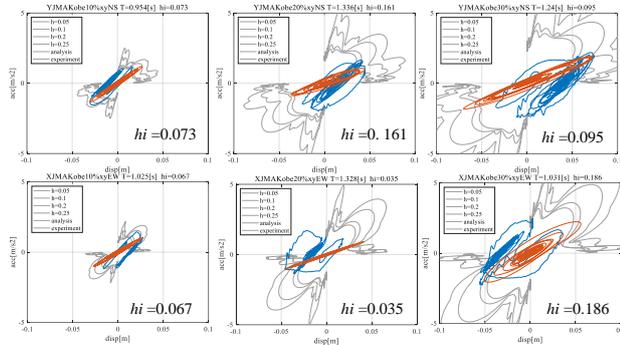


図 7 鑄鉄基礎構造の逆算等価粘性減衰定数考察

3-2. 3階建て木造住宅（基礎固定、基礎滑り構造）

(1) 木造建物・基礎固定について

実験 $1S_d - 1S_d$ 履歴と等価線形解析 (T_m と h_s) を重ねて図 8 に示す。基礎固定の木造住宅の上部応答については、時刻歴波形も含めて応答性状を再現できていた。今回の検討で、応答スペクトル法への適用性が最も高かった。

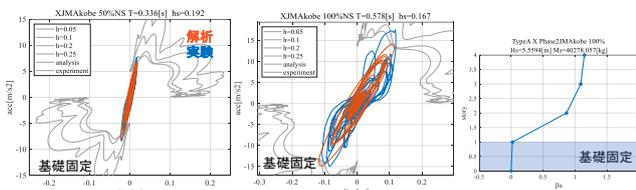


図 8 木造建物・基礎固定の Sa-Sd 履歴, 1 次モード形状

(2) 木造住宅・地盤上べた基礎、鑄鉄基礎について

ここでは、とくに滑りが卓越していたケースを用いて滑り基礎構造について応答スペクトル法への適用性を検証する。この実験では滑りが卓越している（1 次モード形状参照）。実験 $1S_d - 1S_d$ 履歴と等価線形解析 (T_m と h_s) を重ねて図 11 に示す。等価減衰定数 h_s は大きな値で、滑り応答変位に偏りがある場合には最大応答変位を小さく評価してしまう。基礎滑りが卓越しているケースについて、逆算減衰定数を用いて等価線形解析を行った結果は図 10 となる。

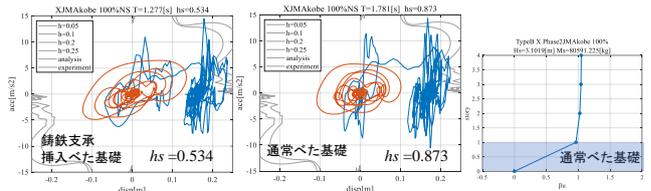


図 9 地盤上べた基礎・木造住宅の Sa-Sd 履歴, 1 次モード形状

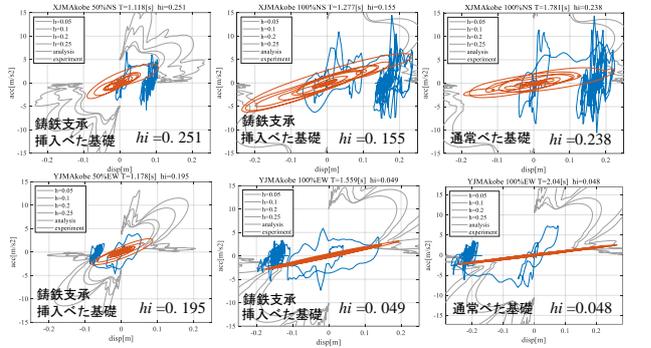


図 10 木造住宅の地盤上基礎滑り実験での逆算減衰定数考察

4. 総括の考察

設計では式(5)を用いて塑性率から減衰を決定する（振動台実験の通例として最後の項は 0.01）。応答に偏りが生じることを反映して、 $\gamma = 0.2$ である。塑性率 D_f を 10 とした場合、 $h=0.15$ となる。ここをひとつの基準と考える。

$$h = \gamma \left(1 - \frac{1}{\sqrt{D_f}} \right) + 0.01 \quad \gamma = 0.2 \quad (5)$$

- (1) 基礎固定の鋼構造骨組（上部応答）は実験では変形角 1/50 まで上り勾配を維持し、等価線形で応答を良好に追えた。その後 1/50-1/25 領域では、勾配がフラットになり、偏りが生じた。偏りは設計範囲を超えるとき注意が必要であるが、減衰定数は式(5)で安全側に対応可能であった。
- (2) 台湾実験の、滑り変位と上部変位が同等の条件での基礎構造では、概ね、式(5)の評価で対応可能であった。
- (3) 基礎固定木造住宅（上部応答）は履歴形状がピーク指向であり、昨年度分析の鉄筋コンクリート造骨組同様、1/30 まで等価線形との対応は良好であった。
- (4) 木造住宅で基礎滑りが卓越する条件については、偏りが著しいが、逆算減衰定数 h_i は概ね 0.15 程度であった。
- (5) オーバーラン現象について述べる。 $S_a - S_d$ スペクトルにおいて、大きなふくらの周期帯から、周期が伸びて形がしばむとき、 h_i は非常に小さく評価される（図 7 の下段中央と図 10 の下段中央・右）。JMA-Kobe 波 EW の特徴的な現象で、勾配がフラットになる履歴において特に影響を受けやすい。予備分析の鷹取波では逆の失速現象がみられた。これらは上記の塑性率の程度やフラット勾配といった応答側の条件とはまた別の、応答スペクトル形状すなわち地震動側の性格が特に誘起する誤差要因である。応答側の骨格形状、履歴性状のみならず、設定地震動が応答スペクトル法の適用性に大きな影響を及ぼす。

5. 今後の展望

本研究で得た知見を後続実験の分析にも活かしたい。特に、制振構造の損傷制御骨組の応答スペクトル法による評価検証を行いたい。