

多層鉄筋コンクリート造骨組の地震応答実験を通じた等価1自由度系縮約の考察と減衰の評価

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 TEP Mesa

1. 背景と目的

2000年に、建築物の地震時の応答加速度と共に、応答変位も評価する限界耐力計算法が建築基準法に定められた。この評価法は建物全体の構造特性を示す1自由度系の性能曲線とその減衰特性に応じる地震応答スペクトルとの対比によって応答値を推定するものである。したがって、建物全体の減衰特性を適切に評価することもこの方法の重要なポイントである。

本研究では、実大骨組を試験体としての E-Defense から得られた地震応答データより、等価1自由度系縮約し、減衰定数を算定し、構造形式や層数、接合部条件、固有モード等の観点から考察・定量評価を行うことを目的としている。

2. 実験と試験体概要

本研究では、現行の耐震基準に従い、同じ方針で設計された4層と10層と特別な接合部の10層RC造骨組(図1)を試験体とし、JMA-Kobe原波(図2)の25%,50%,100%の振幅倍率を入力波とした2010/12,2015/12,2019/01に行われたE-Defense実験を対象にした。図3は2019-10RCの1階加速度と層間変位時刻歴を示す。

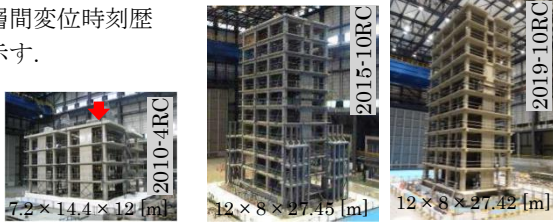


図1 骨組み試験体

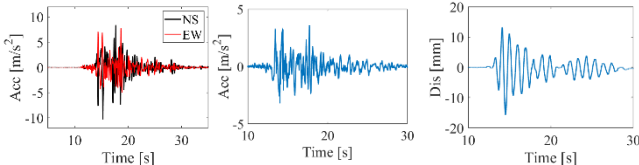


図2 Kobe波形 図3 2019-10RC 1階 Acc と Dis 時刻歴

3. モードの特定

実験値から固有振動モードの特定には、3つの手法を用い比較した。顕著な違いがなかった。ただし、節4の手法は合理的な説明・証明がある上、動的データより1自由度系への縮約における代表変位及び代表加速度の算出式もあるため、本研究ではこの手法を選択し実験分析を行った。

4. 滝澤が提案し壁谷澤が展開した手法

この手法は、多質点系の地震応答時の複雑な振動モード $\{\delta(t)\}$ に変形分布が最も近い平均的な一定振動モード $\{X\}\varepsilon(t)$ (式1) を、両者の差の2乗累積和 E (式2) を最小にする問題解決によって、定める手法である。

$$\{\delta(t)\} \sim \{X\} \cdot \varepsilon(t) \quad (1)$$

$$E = \int_{t_0}^{t_1} \{[\delta(t)] - \{X\}\varepsilon(t)\}^T [m] \{[\delta(t)] - \{X\}\varepsilon(t)\} dt \quad (2)$$

式2を展開し上記の条件を適用すると、 $\varepsilon(t)$ が

$$\varepsilon(t) = \frac{\{X\}^T [m] \{\delta(t)\}}{\{X\}^T [m] \{X\}} \quad (3)$$

$\{X\}$ が

$$[R] = \int_{t_0}^{t_1} \{\delta(t)\} \{\delta(t)\}^T dt; \quad ([m] [R] [m]) \{u\} = \lambda [m] \{u\} \quad (4)$$

の一般固有値問題の最大固有値に対する固有ベクトル $\{u_1\}$ という最適解が得られた。それらの解により、

$$\{\delta(t)\} \sim \frac{\{u_1\}^T [m] \{\delta(t)\}}{\{u_1\}^T [m] \{u_1\}} \{u_1\} \quad (5)$$

となる。応答時刻歴から求めたモードを除いた残余分(式6)に同じ、最小2乗条件を適用することで、高次モード(式7)が抽出できる。

$$\{\delta_s(t)\} = \{\delta(t)\} - \sum_{i=1}^s \frac{\{u_i\}^T [m] \{\delta(t)\}}{\{u_i\}^T [m] \{u_i\}} \{u_i\} \quad (6)$$

$$\{\delta_s(t)\} \sim \frac{\{u_s\}^T [m] \{\delta(t)\}}{\{u_s\}^T [m] \{u_s\}} \{u_s\} \quad (7)$$

特定結果を図4に示す。

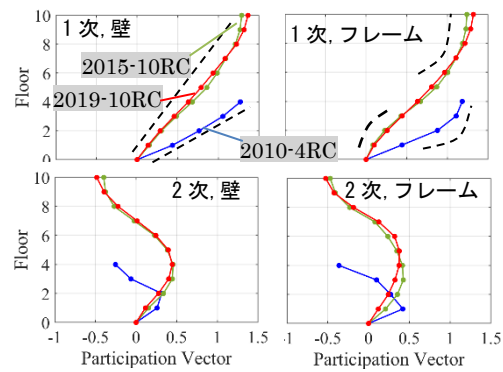


図4 モード形状

5. 1自由度系の等価質量と等価高さ

多質点系の地震応答時のベースシアや転倒モーメントを表現し得る1自由度系を考える時、等価質量 ${}_s\bar{M}$ (図5) と等価高さ ${}_s\bar{H}$ (図5) は以下のように定義される。

$${}_s\bar{M} = \sum_{i=1}^N m_i {}_s\beta_i {}_s u_i \quad (8)$$

$${}_s\bar{H} = \frac{1}{{}_s\bar{M}} \sum_{i=1}^N m_i H_i {}_s\beta_i {}_s u_i \quad (9)$$

図5 1自由度系縮約

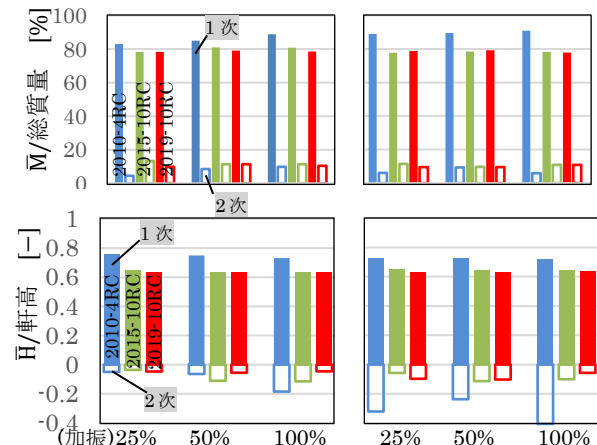


図6 等価質量と等価高さ(左:壁,右:フレーム)

6. 1自由度系の応答履歴

また式7をさらに書き換えると、

$$\{\delta_s(t)\} \sim \frac{\{s_u\}^T[m]\{1\}}{\{s_u\}^T[m]\{s_u\}} \{s_u\} \frac{\{s_u\}^T[m]\{\delta(t)\}}{\{s_u\}^T[m]\{1\}} = {}_s\beta\{s_u\} {}_sSd(t) \quad (10)$$

$${}_s\beta\{s_u\} = \frac{\{s_u\}^T[m]\{1\}}{\{s_u\}^T[m]\{s_u\}} \{s_u\} \text{ と } {}_sSd(t) = \frac{\{s_u\}^T[m]\{\delta(t)\}}{\{s_u\}^T[m]\{1\}} \quad (11)$$

はそれぞれ、刺激関数と1自由度系の代表変位に相当する。 $\{\alpha(t)\}$ を各層の層水平力時刻歴とすると、1質点系の代表加速度は式12となる。

$${}_sSa(t) = \frac{\{s_u\}^T[m]\{\alpha(t)\}}{\{s_u\}^T[m]\{1\}} \quad (12)$$

地震動応答スペクトルと共に、1次と2次代表変位 ${}_{1,2}Sd$ と代表加速度 ${}_{1,2}Sa$ の応答履歴を図8に示す。

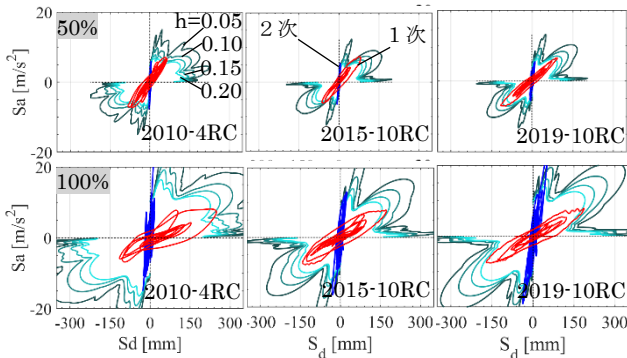


図7 壁方向応答履歴

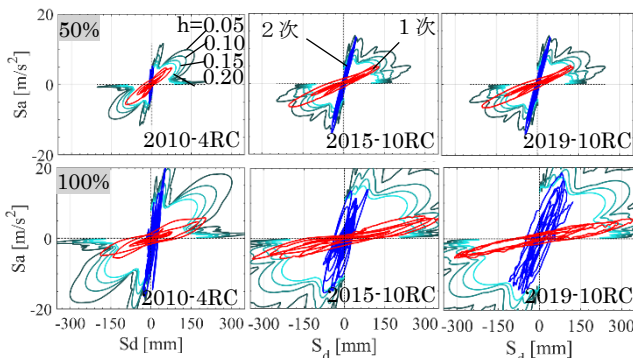


図8 フレーム方向応答履歴

7. 履歴減衰の評価

(1) 各サイクルの履歴減衰 h_c : 各応答履歴サイクルの減衰性能を表す値で、式13により求める。また、本研究では、最大応答変位が生じる時の骨組の減衰能力を見るため、最大応答変位が生じるサイクルを対象にした。

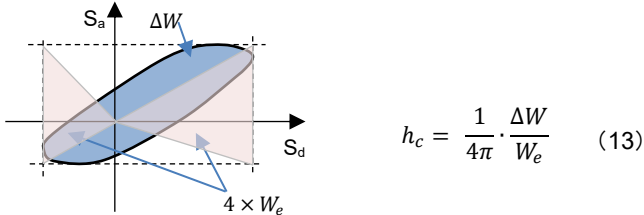


図9 ΔW と W_e の算定

(2) 平均等価減衰 h_s : 応答終了までの入力地震動と等価な仕事をなす弾塑性系より置き換えた等価な弾性系の減衰で、式14より求める。

ここで、

$$h_s = \frac{\int_0^t (-m\ddot{y}_0)\dot{y} dt}{2\omega_e \int_0^t \dot{y}^2 dt} \quad (14) \quad \begin{array}{l} \ddot{y}_0 : \text{地震動加速度 [m/s}^2\text{]} \\ \dot{y} : \text{1質点系速度 [m/s]} \\ \omega_e : \text{等価円振動数 [rad/s]} \end{array}$$

RC構造骨組の最大塑性率と h_s の関係式については以前より下式が評価式として示されている。

$$h = \gamma_1 \{1 - 1/\sqrt{\mu}\} + h_0 \quad (15) \quad \text{ここで } \gamma_1 = 0.20, h_0 = 0.02$$

また現行基準及び性能評価指針によると、 $\gamma_1 = 0.25, h_0 = 0.05$ と設定される。

また、等価高さの1/100と1/200の変位に基づき、バイリニアを仮定し、塑性率を算出した。評価式と共に、算出結果の h_s を図10、 h_c を図11に示す。図中のプロットは表1のようになっています。

表1 図10,図11におけるプロット

小: 2010_4RC	加振	25%	50%	100%
中: 2015_10RC	壁方向	△	□	○
大: 2019_10RC	フレーム方向	▲	■	●

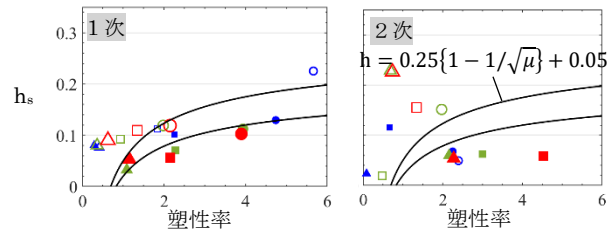


図10 平均等価減衰 h_s

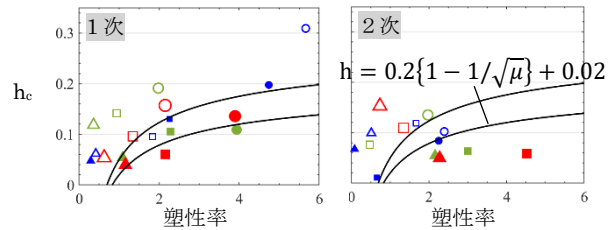


図11 履歴減衰 h_c

8. まとめ

過去に実施された、3棟の多層鉄筋コンクリート造骨組の振動台実験の共同研究として、地震波を受けて弾塑性応答する実験結果を分析した。構造形式や層数、固有モード等の観点から考察・定量評価を行った。

参考文献

- 1) T. Nagae, W. M. Ghannoum, J. Kwon, K. Tahara, K. Fukuyama, T. Matsumori, H. Shiohara, T. Kabeyasawa, S. Kono, M. Nishiyama, R. Sause, J. W. Wallace, and J. P. Moehle: DESIGN IMPLICATIONS OF A LARGE-SCALE SHAKING TABLE TEST ON A FOUR-STORY REINFORCED CONCRETE BUILDING, American Concrete Institute, Structural Journal, 112 巻 2号, pp135-146, 2015
- 2) Y. Tosauchi, K. Kajiwara, E. Sato, K. Fukuyama, T. Inoue, H. Shiohara, T. Kabeyasawa, T. Nagae, H. Fukuyama, T. Kabeyasawa, T. Mukai: 2015 Three-dimensional Shaking Table Test of a 10-story Reinforced Concrete Building on the E-Defense (Part 1 - Part 3), 16th WCEE, January 2017, Chile
- 3) 姜在道, 梶原浩一, 福山國夫, 佐藤栄児, 井上貴仁, 壁谷澤寿海, 塩原等, 長江拓也, 壁谷澤寿一, 福山洋, 向井智久, 土佐内優介: 実大10階建て鉄筋コンクリート造建物を有したE-ディフェンス実験/2018年度(その1-その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) 2019年9月