

イラン・タブリーズ市の 歴史的建築物Arg-e Tabrizの耐震安全性評価

Seismic Assessment of Historical Structure, Arg-e Tabriz in Tabriz city, Iran

山道康平¹・宮島昌克²・Abdolhossein Fallahi³

Kohei Yamamichi, Masakatsu Miyajima and Abdolhossein Fallahi

¹金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間)

Graduate Student, Kanazawa University, Graduate School of Science and Engineering

²金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間)

Professor, Kanazawa University, School of Environmental Design

³アゼルバイジャンT. M. 大学、工学部土木工学科

Assistant Professor, Azarbaijan University of Tarbiat Moallen, Dept. of Civil Engineering

This paper is focussing on seismic assessment of Arg-e Tabriz in Tabriz city, Iran through microtremor measurements and FEM analysis. Arg-e Tabriz is a huge masonry structure which has been built in Ilkhanid ear (1336-1360 AD) in Tabriz, while it was the capital of in Iran in that period. Arg-e Tabriz was built in earthquake prone region and has experienced several strong earthquakes. Microtremor measurements were conducted to estimate the vibration modes and damping ratio of the structure. The finite element analysis was performed to compare the result of microtremor measurements and to assess the seismic safety of the structure.

Key Words : *historical masonry structure, microtremor measurements, seismic response analysis*

1. はじめに

イラン、タブリーズ市ではテヘラン市の北部を走っているアナトリア断層帯が北部に延びて北タブリーズ断層となっており、この断層による地震の発生がテヘラン市と共に危惧されている¹⁾。また多数の歴史的建築物が残存し、その中でも Arg-e Tabriz は国家遺産登録されており、地域の象徴的な建物の1つである。今後危惧される地震に対して、歴史的価値を持つ文化財を守ることは急務である。

このような状況を考え、歴史的建築物 Arg-e Tabriz の振動性状を把握することを目的に常時微動計測を実施した。また有限要素法を用いた解析を行い、当該建物の力学的挙動を明らかにする。このような煉瓦組積造の耐震性能に注目して、測定と解析を同時に行って総合的に検討した事例はこれまでに殆どなく、文化遺産の保全に役立つことができると考える。



図1 Arg-e Tabriz の全景

2. 対象建物及び常時微動計測の概要

Arg-e Tabrizは14世紀初頭（イル・ハーン朝時代）に建立された、無補強焼成煉瓦を用いた組積造建築物である。過去の度重なる地震や風化等の影響によって出来た煉瓦の崩落やクラックが現場調査によって確認された。建物はコの字型を形成し、長辺約50m、短辺約20m、地下から地上までの高さ約3.5m、地上から屋上までの高さ約30mである。

観測点は図2に示すように建物内と周辺地盤の計10ヶ所21成分である。以下、屋上階、地盤、地下1階をそれぞれRF、GL、B1Fと記す。建物中央付近の並進成分の他に、端部での振れ特性の把握を目的にした配置となっている。計測はサーボ型速度計を使用し、サンプリング周波数100Hzでそれぞれ10分間収録した。

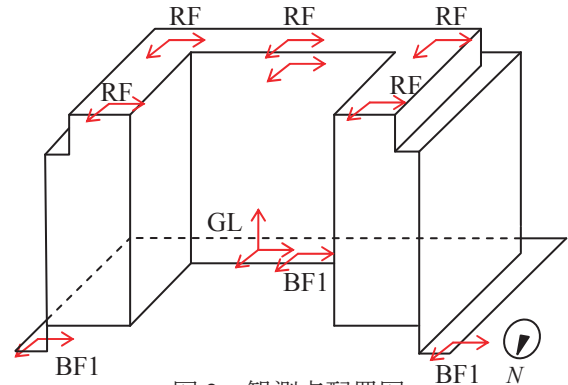


図2 観測点配置図

3. 常時微動計測に基づく建物の動特性

(1) 振動特性及び地盤—建物相互作用

図3にRF/GL、RF/B1Fの伝達関数及び位相差を示す。RF/GLとRF/B1Fの伝達関数を比較すると非常に似た形状であり、1次固有振動数はNS方向で2.8Hz、EW方向で2.6Hz、2次固有振動数はNS方向で3.6Hz、EW方向で3.4Hzと推定される。NS方向の位相差に注目すると、3Hz付近において移送がほぼ180°ずれており、振れの性状を示している。振れ振動について分析するためにRF東西端の水平成分のデータを用いて併進と振れの2成分に分離する³⁾。すなわち、東西端NS方向の変位の和の1/2を併進成分、それらの差の1/2を振れ成分と考えた。図4にNS並進固有モード、振れ固有モードにおけるRFの動きを示す。波形は約1/2周期間の変位挙動を表している。並進固有モードは、中央が東西と比較して振幅が大きくなっている。これは建物形状によって中央が東西端と比較して拘束条件が少ないため変位が大きくなったと考えられる。振れ固有モードは、建物の重心を中心に左右対称に振れることが確かめられた。

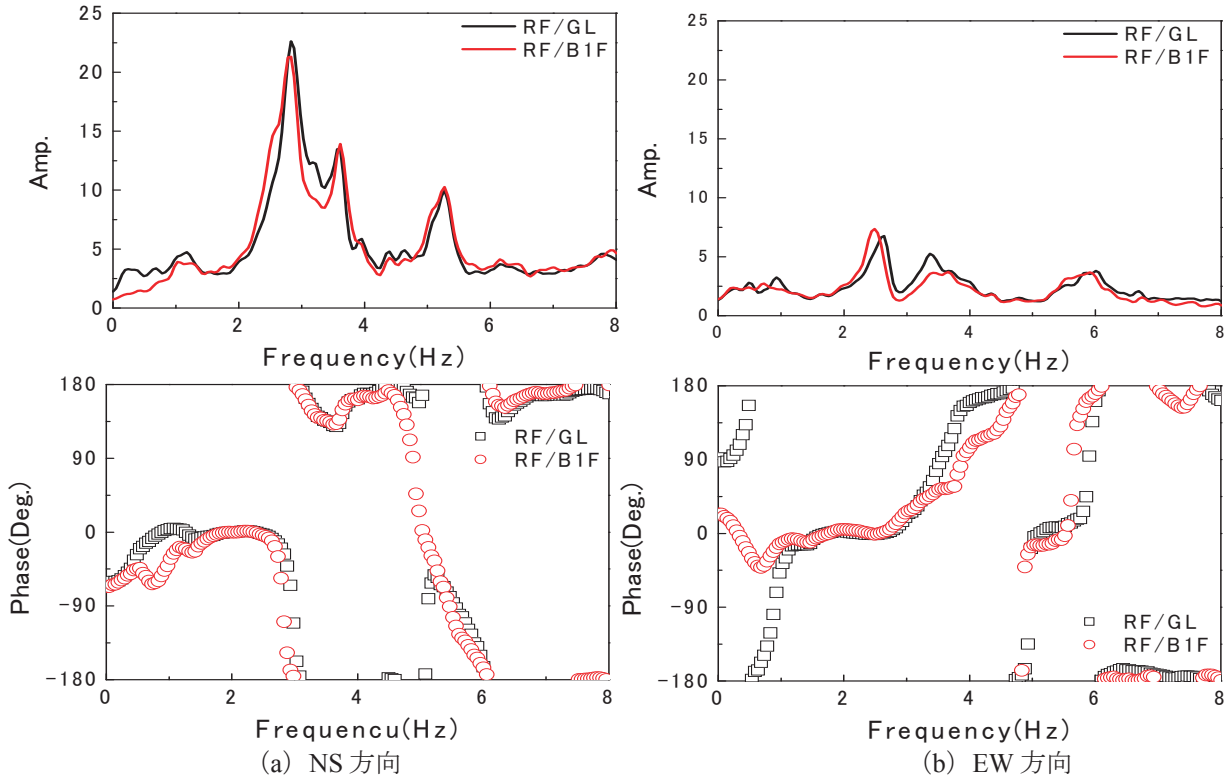


図3 伝達関数（上段から振幅、位相差）

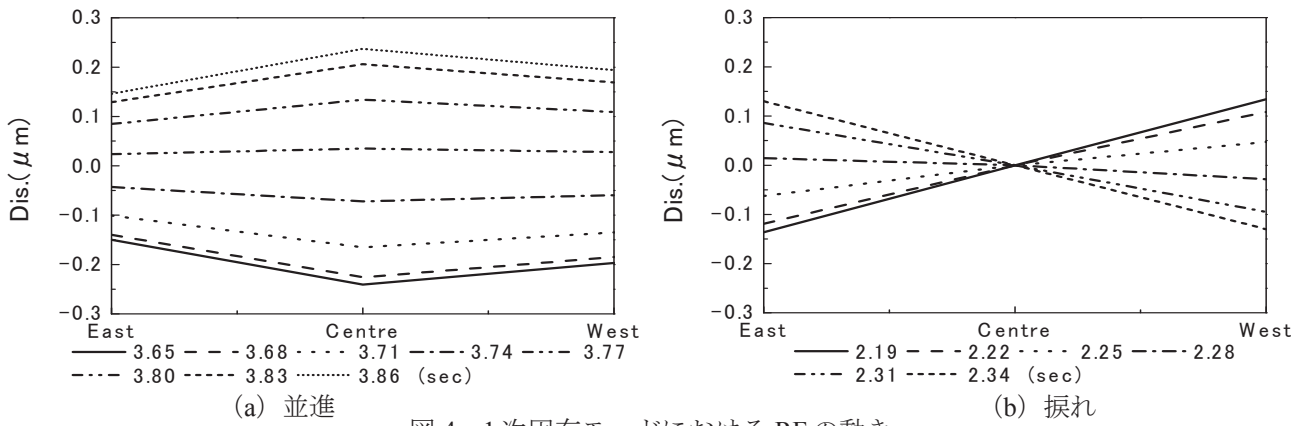


図4 1次固有モードにおけるRFの動き

(2) 減衰定数の検討

RD法⁴⁾を用いて自由振動波形を生成し、式(2)の2自由度系の自由振動をフィッティング関数として非線形最小2乗法を用い減衰定数を推定する⁵⁾。ここでRD法とは、常時微動により得られた各成分の加速度データのパワースペクトル密度を求め、卓越振動数のピークが十分に落ち切った幅でバンドパスフィルターを施し、減衰波形を生成させる手法である⁴⁾。

$$x_k(t) = \frac{x_{0k}}{\sqrt{1-h_k^2}} e^{-h_k \omega_k t} \cos(\sqrt{1-h_k^2} \omega_k t - \phi_k) \quad (1)$$

$$x(t) = \sum_{k=1}^2 x_k \quad (2)$$

ここに x : フィッティング関数、 x_k : k 次の自由振動波形、 x_{0k} : k 次の自由振動波形初期値、 h_k : k 次の減衰定数、 ω_k : k 次の固有円振動数、 ϕ_k : k 次の初期位相、 t : 時間

図5にRD波形を示す。減衰定数、固有振動数は対数減衰率及びゼロクロッシング法より算出した。推定された減衰定数はNS方向6.4%、EW方向6.0%である。また固有振動数は2.5Hzであり、伝達関数より得られた値と概ね対応している。RD波形と理論波形がほぼ一致しており、減衰定数の推定は妥当と判断した。組積造は大略、減衰定数が大きく算出されるため今回の解析結果と対応している。しかし、煉瓦の崩落を伴うほどの建物内の亀裂によるエネルギー損失や内部減衰が大きくなり、減衰定数が大きく評価されたことも考えられる。

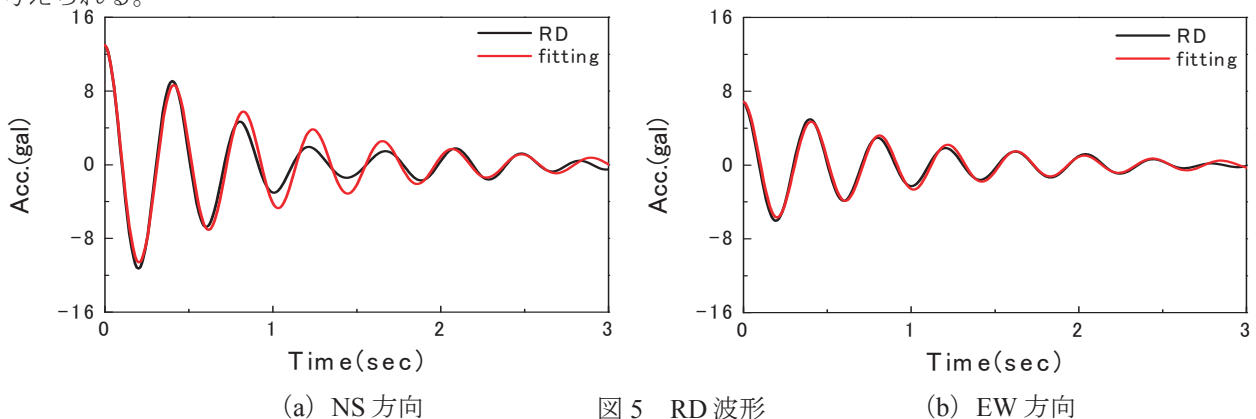


図5 RD波形

4. 対象建物の解析モデル

(1) 解析モデルの概要

本研究で対象としている組積造建築物においては個別要素法などを用いてせん断変形型のモデル化を行う

のが適当であるが、まず 1 次診断として、簡易に耐震安全性を照査することを目的として、骨組の動的弾塑性モデルを用いた、汎用プログラムによる解析を行った。直接積分の Newmark β 法 ($\beta=1/4$) より数値解析を行なう。固有値解析については Householder 法を用いた。地震応答解析では、積分時間間隔 Δt を 0.005 秒とした。本解析は骨組解析であり、せん断剛性はサブナン振りのみで考慮し、その代わりに軸剛性が考慮される。壁式構造を骨組に置換するために壁部材を柱部材に置換して再現した。3次元で表現した解析モデルを図 6 に示す。ここでは、地階を無視し、基礎を完全固定としてモデル化した。同様のモデル化を行っている既存の文献 (6) を参考にして、モデルの諸元を表 1 に示すように、ヤング係数 $4,200,000\text{kN/m}^2$ 、ポアソン比 0.20、質量密度 1.84g/cm^3 とした。また、減衰定数は常時微動計測で得られた 0.06 を用いた。

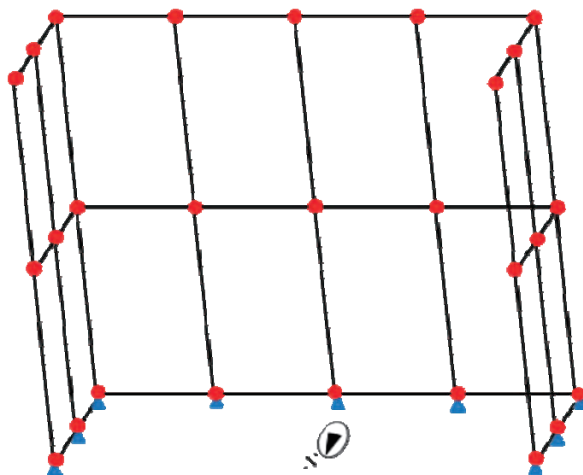


図 6 解析モデル

表 1 モデルの諸元

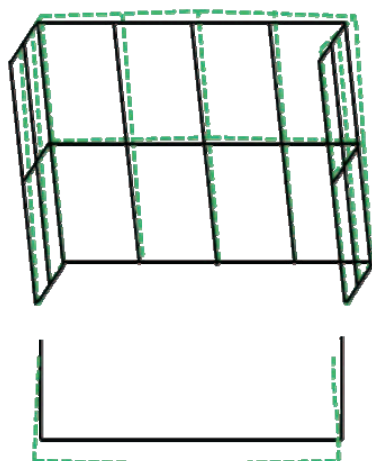
ヤング係数	$4.2 \times 10^6 \text{kN/m}^2$
ポアソン比	0.20
質量密度	1.84g/cm^3
減衰定数	0.06

(2) 固有値解析

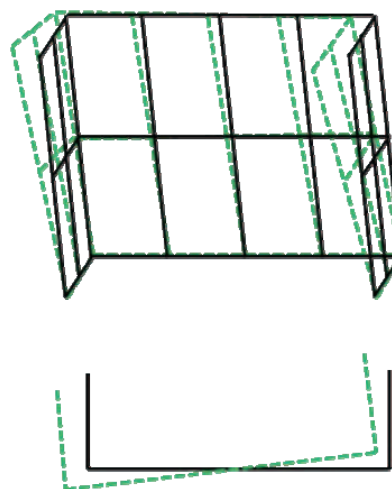
固有振動数について、FEM 解析による固有値解析結果と常時微動計測の分析結果の比較を表 2 に示す。微動計測結果の平均値が 1 次 2.7Hz、振れ 3.1Hz、2 次 3.5Hz であるのに対して、固有値解析では 1 次 2.4Hz、振れ 1 次 2.7Hz、振れ 2 次 3.9Hz、2 次 4.0Hz となった。微動計測と固有値解析の結果が概ね一致していることがわかる。また、固有値解析より得られたモード形状を図 7 に示す。微動のモード形状を示した図 4 と比較しても解析と測定の整合性が見て取れる。これより、解析モデルは実際の構造物を概ね表現できていると判断した。

表 2 固有振動数における測定と解析の比較

	固有振動数 (Hz)	
	微動 (平均値)	固有値解析
1 次	2.7	2.4
振れ 1 次	3.1	2.7
振れ 2 次		3.9
2 次	3.5	4.0



(a) 並進 1 次



(b) 振れ 1 次

図 7 固有値解析によるモード形状

5. 地震応答解析

(1) 入力地震動の概要

鶴来ら⁶⁾は統計的グリーン関数法を用いて想定タブリーズ地震動波形を作成している。この波形を入力地震動として歴史的建築物 Arg-e Tabriz の地震応答解析を実行し、耐震安全性を照査する。図 8 に想定タブリーズ地震の地表面における地震動加速度波形（最大加速度 NS : 1117gal、EW : 1406gal）⁶⁾を、図 9 に加速度応答スペクトルを示す。

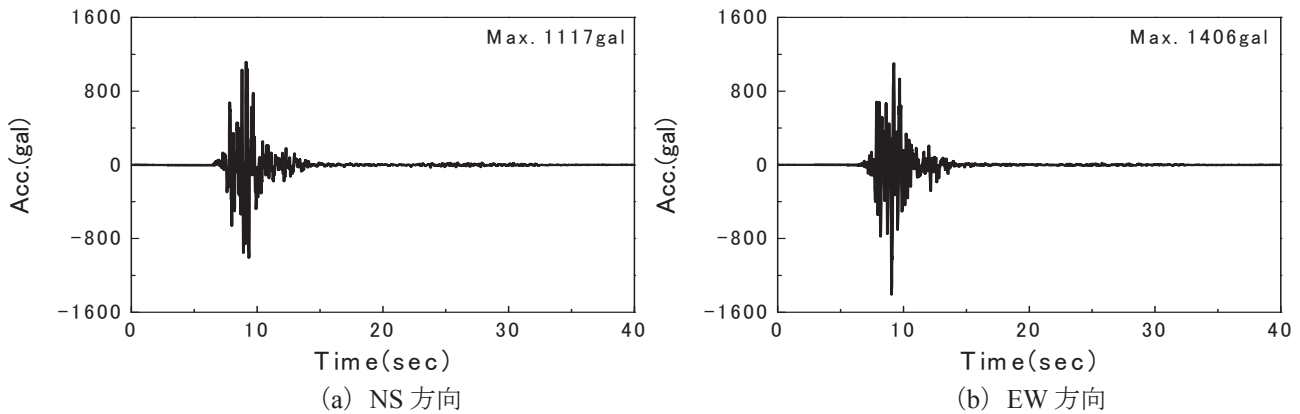


図 8 想定地動加速度⁶⁾

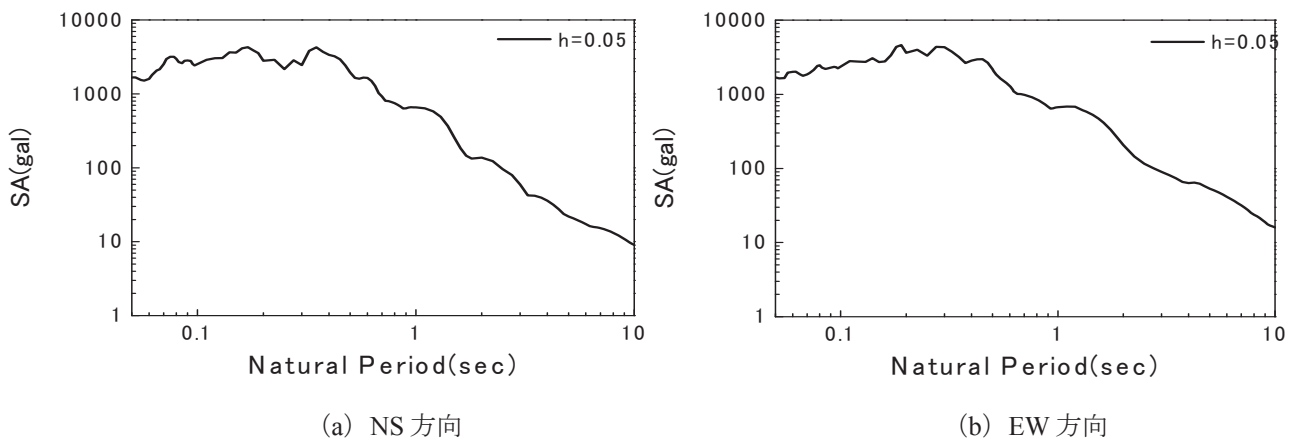


図 9 加速度応答スペクトル

(2) 地震応答解析の結果

地震応答解析より屋上階の最大応答変位を算出して、その値を建物高さで除し最大応答変形角を求めた。変形角は建築基準法（限界耐力計算法）⁷⁾に準拠して損傷限界変形角を 1/200 (0.005) に設定した。本来、煉瓦構組積造はせん断変形の方が建物の損傷に大きく影響を与えると考えられるが、今回の解析モデルにおいては、曲げが損傷限界まで達していれば破壊に至ると仮定している。したがって変位角の指標で破壊を判断した。なお、屋上階の節点を図 10 に示すように 1 から 9 までの番号を設定して、その点における最大応答変形角を算出した。

図 11 に NS、EW 方向の最大応答変形角を示す。図 3 の伝達関数の応答倍率より明らかなように NS 方向の応答が大きくなっている。NS 方向は、ほぼ全ての節点で損傷限界変形角を上回っており、地震が発生した場合は建物が損傷する可能性が高いことが示唆された。しかし、本研究では曲げだけの検討に終始しているので、今後はせん断変形についての検討を行う必要がある。さらに、要素試験などから解析に用いる諸定数を推定し、定量的な解析を進めるとともに、具体的な補強方法を検討する予定である。

6. おわりに

本研究では、歴史的建築物 Arg-e Tabriz を対象として、常時微動結果と解析モデルの動特性を同定させ、想定タブリーズ地震時の地震応答解析を実施し、耐震安全性を評価した。得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 常時微動において、地盤と建物との相互作用が建物の振動特性に与える影響は少ない。
- 2) 並進、振れの固有振動数を伝達関数やモード形を用いて明確に表現した。またRD法を適用して、減衰定数を算出した。
- 3) 常時微動の分析結果と固有値解析の結果より、固有振動数及びモード形状が概ね調和的であると判断した。
- 4) 北タブリーズ断層を震源とする想定地震が発生した場合、当該建物の最大応答変形角は損傷限界変化角を上回り損傷の可能性があることが示唆された。

今後は、より詳細なモデルを構築して対策工法を模索していく必要があると考えている。

謝辞：常時微動計測の実施に関して、清野純史教授（京都大学）、山口謙太郎准教授（九州大学）、吉田雅穂准教授（福井工業高等専門学校）に協力を得た。また地震応答解析を行うにあたり、財団法人地域地盤環境研究所 鶴来雅人氏に地震波形を提供して頂いた。ここで厚く御礼申し上げます。最後に、本研究が科学研究費補助金（基盤研究（A）海外学術調査、課題番号：21254001、研究代表者：宮島昌克）の助成を受けて実施されたことを記して深謝いたします。

参考文献

- 1) K. Yamaguchi, A. Sadeghi, A. Fallahi and M. Miyajima: Material element tests as the first step of seismic retrofit of Tabriz Bazaar, Protection of Historical Buildings PROHITECH 09, Vol.2, pp.1711-1716, 2009.
- 2) 理論地震研究会：地震動～その合成と波形処理、鹿島出版会、1994.
- 3) 平田悠貴、飛田潤、福和伸夫、護雅史、大河内靖雄、佐々木哲郎：高密度常時微動計測に基づく大規模SRC造事務所建物の振動特性、日本建築学会学術講演梗概集、pp.153-154、2008.9.
- 4) 田村幸雄、佐々木淳、塚越治夫：RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価、日本建築学会構造系論文報告書第454号、1993.12.
- 5) 吉田昭仁、田村幸雄、舛田健次、伊藤隆文：超高鋼製煙突の動特性評価その2 2自由度RD法とFDDによる動特性評価、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、pp.887-888、2006.9.
- 6) A. Sadeghi and M. Pouraminian: Assessing vulnerability of Arge Tabriz (Tabriz Citadel), Proceedings of 1st International Conference on Seismic Retrofitting, pp. 1-14, 2008.
- 7) M. Tsurugi, A. Fallahi and M. Miyajima: Strong ground motion prediction of future large earthquake to preserve historic building, Bazaar, in Tabriz, Islamic Republic of Iran, Protection of Historical Buildings PROHITECH 09, Vol.2, pp.1553-1557, 2009.
- 8) 建設省住宅局建築指導課監修：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、財団法人日本建築防災協会、2007.

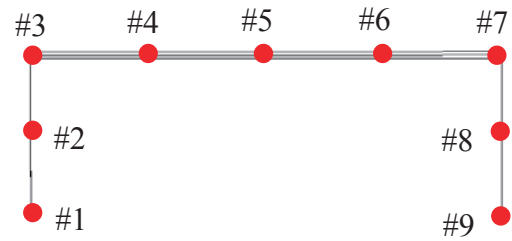


図 10 解析モデル平面図

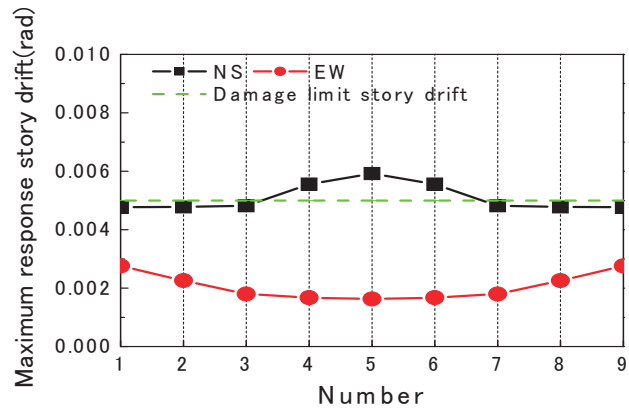


図 11 最大応答変形角