

ネパール・カトマンズバレーのパタン地区に実在する 歴史的組積造建造物の詳細モデル化と地震時挙動解析

Detailed Modeling and Seismic Behavior Analysis of Existing Historic
Masonry Building in Patan District, Kathmanzu Valley, Nepal

古川愛子¹・清野純史²・谷口仁士³・土岐憲三³・辰巳雅俊⁴・H. R. Parajuli⁵

Aiko Furukawa, Junji Kiyono, Hitoshi Taniguchi, Kenzo Toki, Masatoshi Tatsumi and H.R. Parajuli

¹京都大学 准教授 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
Associate Professor, Kyoto University, Dept. of Urban Management

²京都大学 教授 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
Professor, Kyoto University, Dept. of Urban Management

³立命館大学 教授 歴史都市防災研究センター (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)
Professor, Ritsumeikan University, Research Center for Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage

⁴京都大学 修士課程 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
Master Course Student, Kyoto University, Dept. of Urban Management

⁵立命館大学 学術研究員 歴史都市防災研究センター (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)
Post Doctoral Fellow, Ritsumeikan University, Research Center for Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage

This study created a detailed numerical model of an existing historic masonry building in Patan district, Kathmanzu Valley, Nepal for the analysis of collapse behavior using the refined distinct element method. The model consists of as many as 63,978 elements, and the material properties obtained from the experiments is used. The validity of the numerical model is confirmed by comparing the analyzed natural frequencies with the natural frequencies obtained by the microtremor measurements. Three input ground motions with different exceedance probabilities, obtained by the seismic hazard analysis from Nepaleese historic earthquake catalog were input to the model. In the simulation, the building experienced total collapse by the ground motion with the exceedance probability of 5% in 50 years.

Key Words : *historic masonry building, detailed modeling, seismic behavior analysis, Patan, Kathmanzu Valley, Nepal*

1. はじめに

ネパールのカトマンズバレーは、ヒマラヤ山脈の中腹に位置し、標高2000m以上の山々に囲まれた標高1300-1400mのなだらかで気候の穏やかな地域である。またカトマンズバレーは、カトマンズ、パタン、バクタプルという主要な3つの地区からなるネパール文化の中心地である。一方で、ヒマラヤ造山帯の一部に位置し、地震多発地帯に位置していることから、何世紀にもわたり歴史的・文化的に貴重な建物の消長が繰り返されている。特に1934年にカトマンズを襲ったマグニチュード8を超える大地震では、盆地内の建造物に壊滅的な被害が発生した¹⁾。

カトマンズバレーは、急激な人口の増加に伴って景観が破壊されつつあるとして、2003年に世界危機遺産に登録された。ここ十数年の都市化とモータリゼーションに伴う保存地区の商業化と環境悪化は、歴史的建造物の保存に大きな負の影響といえる。現在までにネパール政府などにより、文化遺産保護の改善努力がなされており、2007年に世界危機遺産の登録は解除されている。

文化遺産保護の観点からの改善努力はなされているものの、地震災害からの歴史的建造物の保護は十分とはいえない。現存する歴史的な寺院やモニュメント、それを取り囲む周辺地域の建物は100年に1回程度生じる大地震の度に倒壊を含む大きな被害を受けており、その度に形を変えたり、消滅したり、あるいは近年の鉄骨や鉄筋コンクリートを用いた補強工事によって伝統的工法とは異なる姿になるような事例が多数報告されている。また、近年の人口の増大に伴った建物の数の増加や、多くの建物に不合理な増築がなされており、近い将来予測されている地震災害時には、過去の地震の例を大きく上回る規模の被害が懸念される。ネパールのように観光産業が主要産業となっている地域において、地震により観光資源が被害を受けると、経済的にも大きなダメージを受ける可能性がある。特に今回対象とするパタン地区のように多くの人口を支える観光資源を地震災害から守ることは、貴重な文化遺産を継承することと同様に重要な課題といえる。

本研究の目的は、パタン地区にある伝統的な歴史的建造物を詳細にモデル化し、地震時破壊挙動解析を行い、地震災害時の歴史的建造物の挙動を明らかにすることである。現地試験から得られたパラメータ²⁾を基に歴史的建造物をモデル化し、ネパールの歴史地震を用いたハザード解析によって求めた地震動³⁾を入力した。結果を可視化することによって、破壊の程度を明らかにする。

2. 解析概要

(1) 解析対象建造物

カトマンズバレーのパタン地区に存在し、現在は周辺住民の集会所として利用されている建物について、詳細な解析を行った。解析対象建造物は、写真1(a)(b)に示す組積造と木造との歴史的複合建造物である。この建物は、地震時に、一時的に周辺住民が避難する場所としての役割を期待されている。建物は17世紀中ごろに建てられたものであるが、地震や老朽化によってさまざまな個所に補修が行われ現在に至っている。建物は2階建てで、長辺方向と短辺方向の幅は16.5m、5.6mである。1階と2階の高さは2.4m、2.1mである。屋根の地上からの高さは6.5mである。いずれの壁にも開口部があるが、開口部の割合は西側の壁（写真1(a)）が最も大きい。壁を構成する煉瓦はセメントモルタルにより接着されている。建物内部は写真1(c)のように幅2-3mの細長い空間が2列である。

(2) 解析モデル

改良版個別要素法⁴⁾を用いて解析を行った。改良版個別要素法では、建物を剛体要素の集合体としてモデル化する。要素間には、要素の剛性に基づくばねを与える。要素自身は剛体であり変形しないが、要素が重なりあうことで建物全体の変形を表現することができる。ばねに作用する引張・せん断・圧縮応力が、それぞれの強度を上回った場合、ばねを切断し、破壊現象を表現した。

北西、北東、上方から図化した解析モデルを図1(a)(b)(c)に、煉瓦以外の柱とリング梁の配置を図1(d)に、座標軸を図1(b)に示す。長辺方向をX方向、短辺方向をY方向とする。モデル化に当たり、煉瓦の大きさは10cm×10cm×20cmの直方体とした。実際の煉瓦の大きさは約5cm×5cm×10cmであるが、解析容量の制約より要素サイズを決定した。屋根はトタンでできており、軽いために解析に影響を及ぼしにくいと考え、モデル化を省略した。開口部の多い西側の壁には、木製の柱や梁が多く配置されている。1階と2階の壁の上を這うようにリング梁が配置されている。壁の厚さは40cmとした。柱・梁の要素サイズは実物の平均的な値として幅20cmを基本として、煉瓦と同様に直方体の集合としてモデル化した。総要素数は63,978となった。



(a) 西側の壁

(b) 東側の壁

(c) 2階東側の部屋

写真1 解析対象建造物

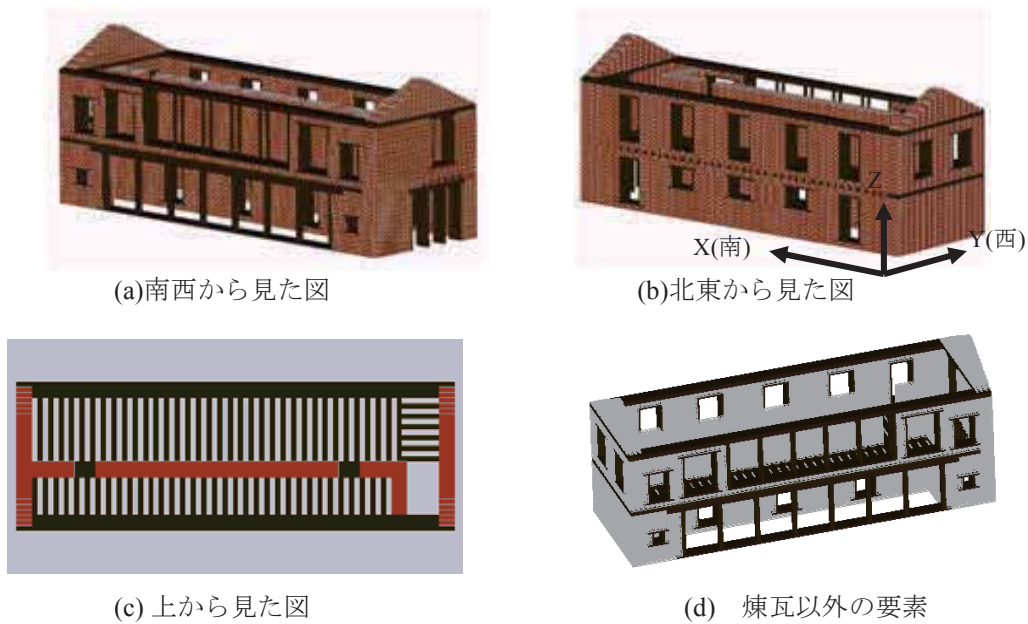


図1 集会所モデル

(3) 物性値

煉瓦およびモルタルの物性値については、現地での破壊実験の結果から求めたが、木材の物性値については測定されていないため、広葉樹ぶなの一般的な値を用いた。表1に各値を示す²⁾。煉瓦の破壊は想定しておらず、モルタルでの破壊を想定している。解析では、接触する2つの煉瓦の重心間を結ぶばねを想定し、ばね定数は煉瓦とモルタルの平均的な弾性係数から決定した。表1の煉瓦とモルタルの弾性係数の欄には、両者の平均的な弾性係数の値を示している。木製の柱・梁は複数の要素の集合体で表し、木材の要素間の破壊判定には木材の強度を、木材と煉瓦の要素間の破壊判定にはモルタル強度を用いた。

(4) 解析モデルの検証

この建物については、微動観測により固有振動数が表2の通り明らかにされている⁵⁾ので、解析モデルの妥当性を検証する際は、解析モデルの固有振動数が計測結果に一致するかどうか確認を行った。

作成したモデルに100galの衝撃波を地動加速度として入力し、自由振動させた。この際、モルタルは破壊しないものと仮定した。2階の北側の床付近の点でのX、Y各方向の変位時刻歴応答と、そのフーリエスペクトルを図2に示す。解析結果では、Y方向の1つ目の卓越振動数は4Hz付近で、2つ目が5Hz付近である。X方向については1つ目が5Hz付近で2つ目が6.5Hz付近である。Y方向の1つ目の卓越振動数は、建物のY方向への並進振動が卓越する1次固有振動数である。Y方向の2つ目とX方向の1つ目の卓越振動数はほぼ一致しており、建物のねじり振動が卓越する2次固有振動数である。X方向の2つ目のモードは、建物のX方向の並進振動が卓越する3次固有振動数である。それぞれ、表2の常時微動の観測結果と比べて7.5%、16%、13%の誤差であり、概ね振動特性を再現できている。以上より、解析パラメータや作成したモデルが妥当であると考えた。

(5) 既往論文との違い

過去にも、同じ建物を対象とした数値解析を行っている⁶⁾。既往研究では、解析プログラムの制約上、建物を大きい要素で分割し、総要素数は1190であったのに対し、本論文は総要素数63,978とより現実に近いモデル化となっている。また既往研究では、対象とするネパールの歴史的組積造建造物の物性値が不明であったため、イランの建造物の物性値を代用していたのに対し、本論文ではネパールの歴史的組積造建造物の実験から得た物性値を使用している。さらに、本論文で使用した詳細なモデルは、常時微動計測によって得られた1~3次までの固有振動数およびモードを上手く再現できている。

(6) 入力地震動

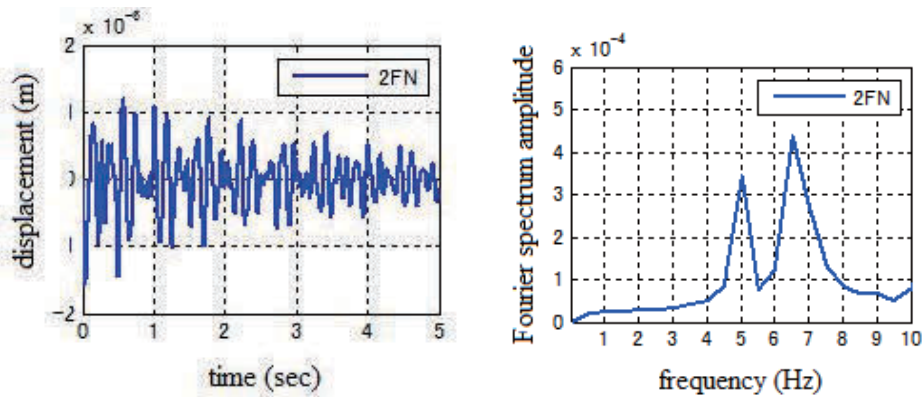
ネパールの歴史地震データと活断層データから地震危険度解析によって推定された加速度波形を図2に示す³⁾。再現期間の異なる3通りの地震動を用いた。1方向入力とし、X、Y方向それぞれ別々に入力した。

表1 解析パラメータ

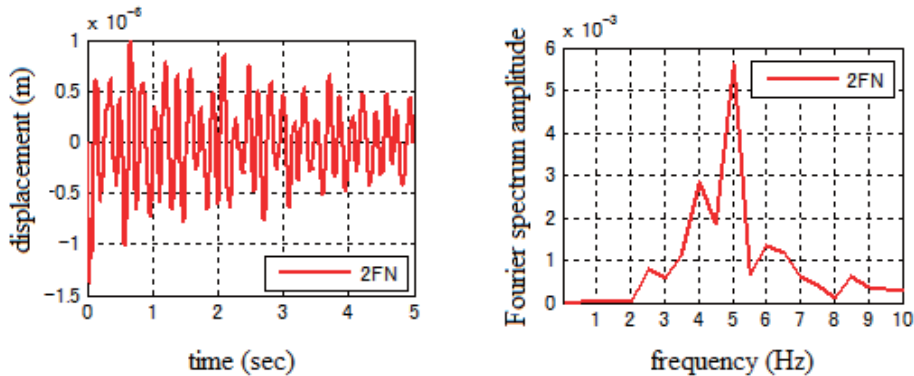
Variable	Adobe Brick	Mortar	Wood
Mass density (kg/m ³)	1.8 × 10 ³	-	7.0 × 10 ²
Young's modulus (N/m ²)	2.7 × 10 ⁸	2.7 × 10 ⁸	6.3 × 10 ⁸
Poisson's ratio	0.11	0.25	0.3
Tensile strength f_t (N/m ²)	-	0.0	1.1 × 10 ⁸
Shear strength c (N/m ²)	-	9.0 × 10 ⁴	9.0 × 10 ⁶
Friction angle ϕ	-	42.5°	0°
Compressive strength (N/m ²)	-	1.58 × 10 ⁶	4.5 × 10 ⁷

表2 微動観測から得られた建物の固有震度数

Mode number	1 st mode	2 nd mode	3 rd mode
Frequency	4.3Hz	5.8Hz	6.8Hz
Mode	Translational mode in Y direction	Torsional mode	Translational mode in X direction

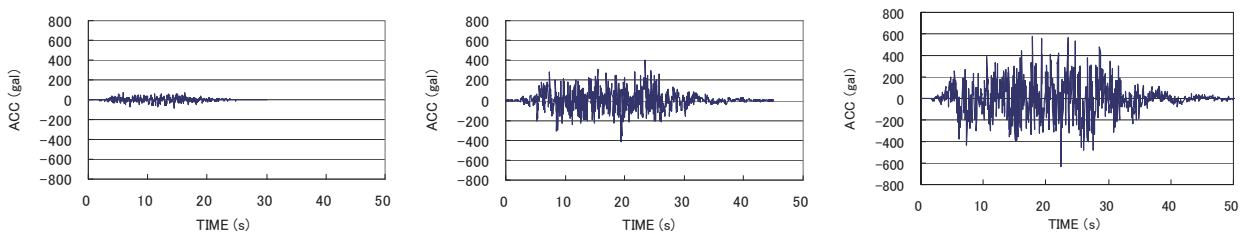


(a) X方向衝撃波入力後の時刻歴波形と、フーリエスペクトル



(b) Y方向衝撃波入力後の時刻歴波形と、そのフーリエスペクトル

図2 衝撃波入力時の応答



(a) 50年発生確率 40%

(b) 50年発生確率 10%

(c) 50年発生確率 5%

図3 入力地震動 (カトマンズにおける推定地震動)

3. 解析結果

(1) 破壊パターン

まず、作成したモデルに発生確率の異なる3つの地震動を入力し、地震動入力から10秒以降の解析結果を5秒ごとに図4から図9に示す。これまでに、被害調査を基に煉瓦造建造物の典型的な破壊パターンが議論されているので、今回の解析結果と比較する。Mahmoud⁷⁾らにより、アドベ造の家において、壁の面外破壊が主な破壊モードであることが報告されている。直交する壁の結合が不十分なために、壁がそれぞれ分離し破壊することで、屋根の崩壊につながるとしている。図4を見ると、南側の幅の狭い壁が面外方向に変形し、崩壊している事が確認できる。ZahraiやHeidarzadeh⁸⁾は、煉瓦造建造物の破壊が一般的に壁の一番上の分離から始まることを指摘している。図6の15.0secの結果を見ると、南側の幅の狭い壁の上側から壁同士の分離が始まっていることが分かる。

(2) 50年発生確率40%の地震動を入力した場合

解析結果を図4および図5に示す。両ケースとも、建物の完全崩壊は免れることができた。短辺方向の壁上部の三角形の部分を見ると、入力方向による被害程度の差は見られず、図4,5ともに北側の壁の三角形の部分が完全に落下しているのに対し、南側の壁では一部が落下したのみである。これは振動しやすい2階部分の開口部がより大きい北側の壁が、より大きく振動したためであると考えられる。

X方向に地震動を入力した場合の方が、Y方向に地震動を入力した場合よりも、特に長手方向の壁で被害が大きかった。X方向に入力した場合、東側の壁北側で、顕著な被害が発生している事が確認できる。X方向に地震動を入力したことにより、短辺方向の壁が面外振動を起こしやすくなるためである。このうち北側の壁は2階の開口部が大きく、南側の壁よりも面外振動を起こしやすいためと考えられる。そのため、北側の壁の上部が他の壁と分離して破壊したために、東側の壁の破壊も引き起こされたと考えられる。また、北側の壁は面外破壊を起こしているのに対して、南側の壁はそれほど破壊していない。この事からも北側の壁に比べて2階の開口部の少ない南側の壁の方が耐力が備わっていると考えられる。

Y方向に入力した場合、西側の壁はそれほど被害が発生していない。東西の壁は幅が広く開口部も大きいために、面外振動を起こしやすいが、引張強度のある木製の柱の存在により、破壊が起きにくくなっていると考えられる。

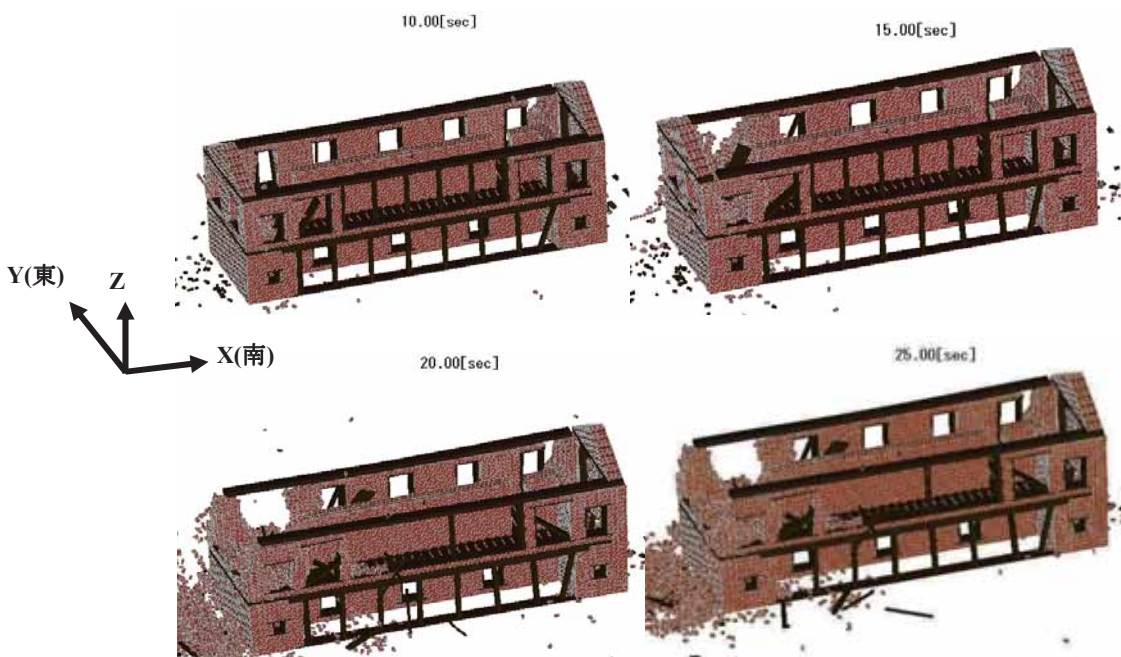


図4 50年発生確率40%の地震動をX方向に入力した結果

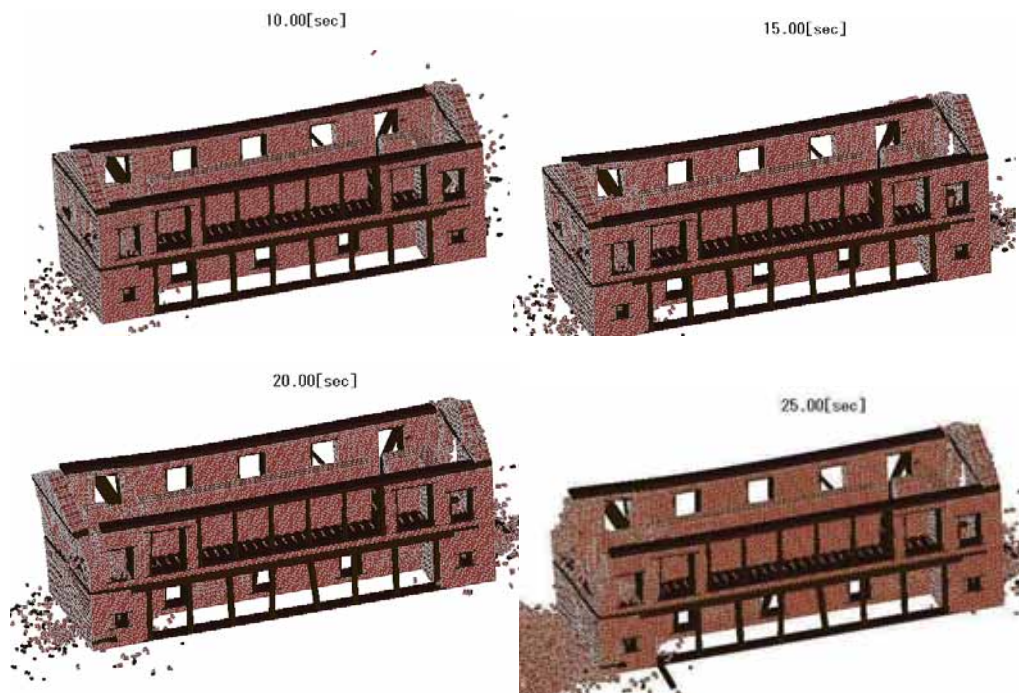


図 5 50年発生確率40%の地震動をY方向に入力した結果

(3) 50年発生確率10%の地震動を入力した場合

解析結果を図6および図7に示す。X方向に入力した場合、建物の完全崩壊は免れることができたが、Y方向に入力した場合、建物は完全に崩壊した。50年発生確率40%の地震動を入力した場合とは異なり、最初に東側の壁が分離し、崩壊している。次に短辺方向の壁が崩壊し、最後に西側の壁が崩壊している。開口の最も多い西側の壁が最後に崩壊した理由は、柱が最も多い西側の壁では木製の柱が引張破壊に抵抗するためであると考えられる。これにより柱による被害低減効果を確認することができた。X方向に入力した場合、短辺方向の壁は、両方とも2階部分が崩壊した後、南側の壁1階部分が崩壊している。これにより東西の壁の南側の被害が発生していると考えられる。



図 6 50年発生確率10%の地震動をX方向に入力した結果

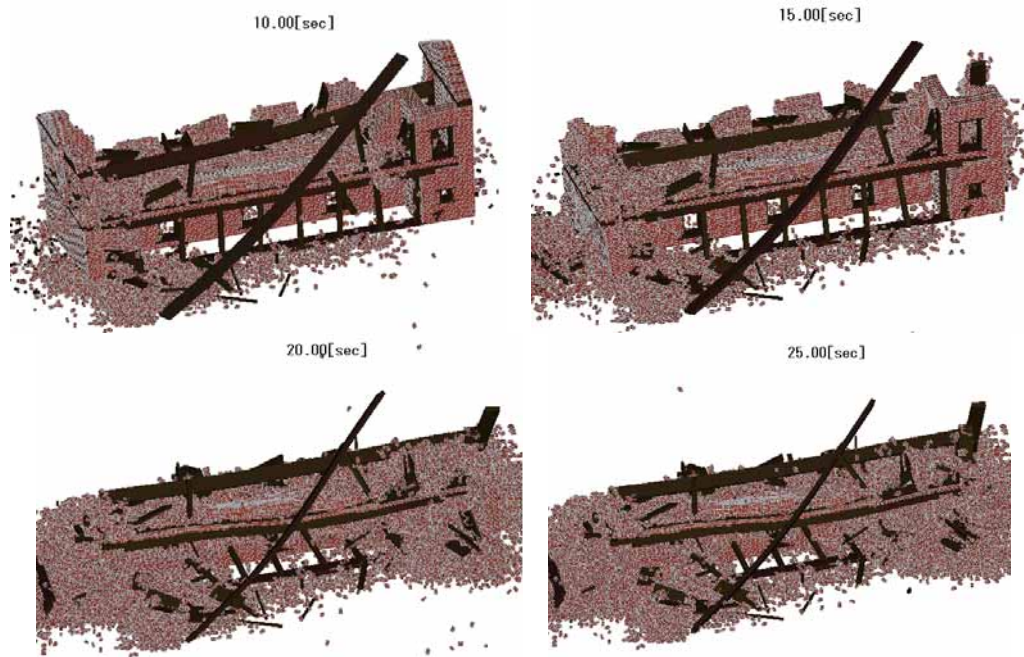


図 7 50年発生確率 10%の地震動を Y 方向に入力した結果

(4) 50年発生確率5%の地震動を入力した場合

解析結果を図 8 および図 9 に示す. 50年発生確率 10%の地震動の場合と同じように, Y 方向に入力した場合に建物は崩壊した. X 方向に入力した場合は, 2 階部分が崩壊したが, 1 階部分は崩壊に至っていない.

4. まとめ

本研究では, ネパール・カトマンズバレーのパタン地区に実在し, 地震時に一時的に周辺住民が避難する場所としての役割を期待されている集会所を対象として, 改良版個別要素法を用いて詳細なモデル化を行った. 本研究の特徴は, 解析プログラムの改良により多数の要素を扱うことが可能となり, 既往の研究よりも小さな要素サイズで構造物を詳細にモデル化することに成功し, 詳細モデルを用いた解析を実施したことにある. 現地実験で得られた物性値を用いて解析モデルを作成し, 固有振動数およびモードを求めたところ,

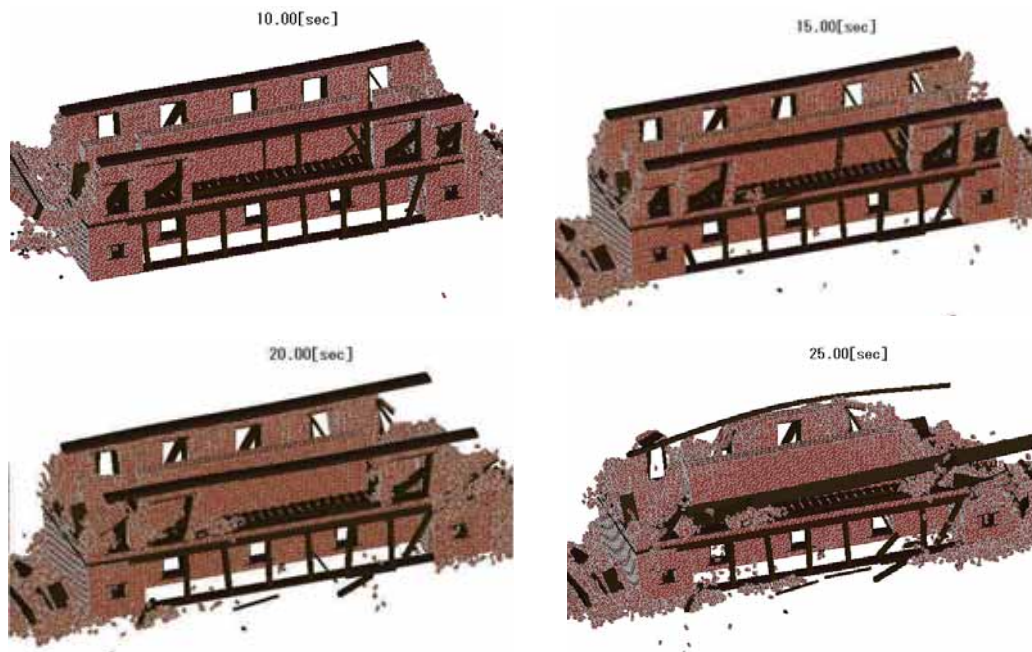


図 8 50年発生確率 5%の地震動を X 方向に入力した結果

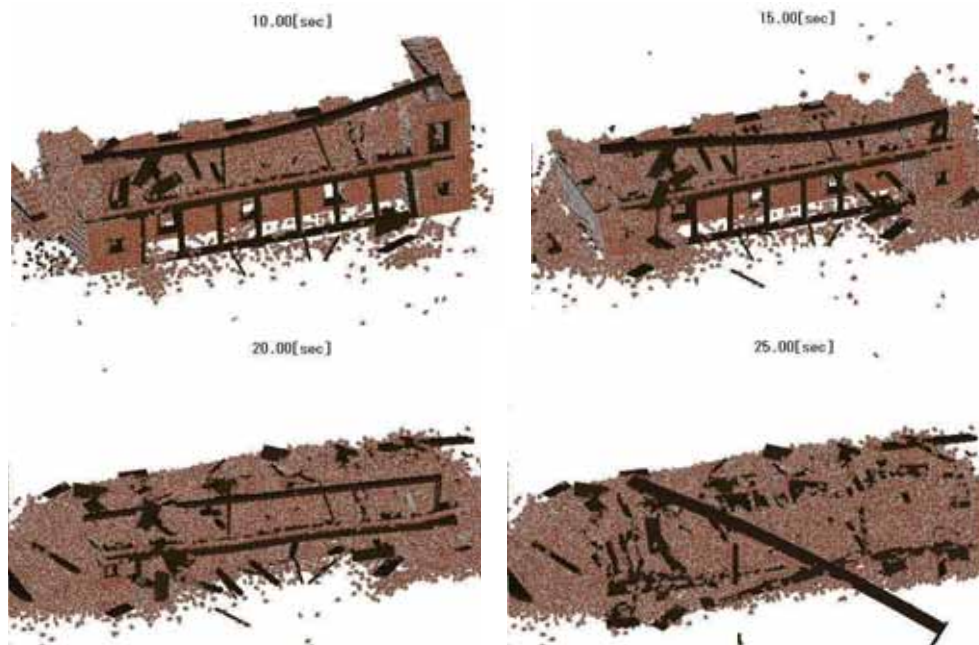


図9 50年発生確率5%の地震動をY方向に入力した結果

微動計測結果と整合する結果となった。解析モデルに対し、ネパールの歴史地震を用いたハザード解析により合成した3通りの地震動を入力し、地震時破壊挙動を再現し、結果を可視化した。50年発生確率40%の地震動に対しては、煉瓦の剥離・落下が発生するが、完全崩壊は免れる結果となった。50年発生確率10%の地震動では、X方向に入力した場合、X方向に面する壁は面外振動により落下したが、Y方向に面する長手方向の壁は残り、建物全体としての完全崩壊は免れることができた。Y方向に入力した場合、建物は完全に崩壊した。50年発生確率5%の地震動では、Y方向に入力した場合に建物は崩壊したが、X方向に入力した場合は、2階部分が崩壊したものの1階部分は崩壊に至っていない。また、木製柱との複合構造となっている西側の壁の被害が小さく、結果として木製の柱の存在が補強の役割を果たしていることが確認された。

謝辞：本研究は、立命館大学グローバルCOEプログラム（研究課題名：歴史都市を守る「文化遺産防災学」推進拠点）の研究成果の一部である。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Amatya, S.: Monument conservation in Nepal, Vajra Publications, 2008.
- 2) Parajuli, H.R., Kiyono, Maskey, P.M., Taniguchi, H.: Investigations of material properties on old brick masonry buildings of Kathmandu, Disaster Mitigation of Cultural Heritage and Historic Cities, Vol. 5, pp.163-170, July 2011.
- 3) Parajuli, H.R., Kiyono, J., Ono, Y., and Tsutsumiuchi, T.: Design earthquake ground motions from probabilistic response spectra: Case study of Nepal, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.8, No.4, pp.16-28, 2008.
- 4) Furukawa, A., Kiyono, J., Toki, T.: Proposal of a Numerical Simulation Method for Elastic, Failure and Collapse Behaviors of Structures and its Application to Masonry Walls, *Journal of Disaster Research*, Vol.6, No.1, Paper: Dr6-1-4524, 2011.
- 5) Hari Ram Parajuli, Junji Kiyono, Masatoshi Tatsumi, Yoshiyuki Suzuki, Hisashi Umemura, Hitoshi Taniguchi, Kenzo Toki, Aiko Furukawa, Prem Nath Maskey, Dynamic Characteristic Investigation of a Historical Masonry Building and Surrounding Ground in Kathmandu, *Journal of Disaster Research*, Vol.6, No.1, Dr6-1-4522, 2011.1.
- 6) 古川愛子, 清野純史, 土岐憲三, 谷口仁士, H.R. Parajuli, P.N. Maskey, ネパールの歴史的組積造建造物の地震時挙動について, *歴史都市防災論文集*, Vol. 4, pp.141-148, 2010年7月.
- 7) Mahmoud, R.M., Farzad, N., Michael, M.: Performance of adobe residential buildings in the 2003 Bam, Iran, Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.21 No.S1, pp.S337-S344, 2005.
- 8) Zahrai, S.M., Heidarzadeh, M.: Destructive effects of the 2003 Bam earthquake on structures, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, Vol.8, No.3, pp.329-342, 2007.