

# ネパール・カトマンズにおける 歴史的組積造建造物群の構造分類と地震リスク評価

Building Classification and Seismic Risk Evaluation for Historic Masonry Buildings  
in Kathmandu, Nepal

古川愛子<sup>1</sup>・清野純史<sup>2</sup>・谷口仁士<sup>3</sup>・鈴木祥之<sup>4</sup>・土岐憲三<sup>3</sup>・辰巳雅俊<sup>5</sup>・H.R.Parajuli<sup>6</sup>  
Aiko Furukawa, Junji Kiyono, Hitoshi Taniguchi, Yoshiyuki Suzuki, Kenzo Toki, Masatoshi Tatsumi  
and H.R. Parajuli

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>立命館大学 教授 歴史都市防災研究所 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Ritsumeikan University, Institute of Disaster Mitigation for Urban Cultural Heritage

<sup>4</sup>立命館大学 教授 衣笠総合研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

<sup>5</sup>奈良県土木部 (〒630-8501 奈良市登大路町30)

Civil Engineering Development, Nara Prefecture

<sup>6</sup>トリブバン大学講師 工学部土木工学科 (Pulchowk, Lalitpur, Nepal)

Lecturer, Tribhuvan University, Institute of Engineering, Dept. of Civil Engineering, Nepal

Kathmandu Valley is a center of culture in Nepal. Unfortunately, a large number of historic buildings have been damaged due to earthquakes in Kathmandu over the centuries since it is located on the earthquake-prone zone. Especially, an earthquake which hit Kathmandu in 1934 had a magnitude over 8 and it destroyed most of the cultural heritage, such as temples, shrines and monuments. Jatapol is an old area in Kathmandu where many historic masonry residential buildings are built without special attention to earthquake. It is very important to leave those buildings for posterity. To take measures to save those buildings from earthquakes, it is necessary to evaluate their seismic risk. However, there exist no sufficient statistical data to evaluate the risk from the past earthquakes. With this background, this study aims to numerically evaluate seismic risk of buildings using the refined version of the DEM.

**Key Words :** *historic masonry building, building classification, seismic risk, Patan, Kathmandu Valley, Nepal*

## 1. はじめに

ネパールの首都カトマンズは、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、地震によって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<sup>1)</sup>。

カトマンズは、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。ここ数十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。このように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<sup>2)</sup>、地震災害からの歴史的建造物の保護は十分とは言えない。歴史的建造物の中には、ユネスコの世界遺産「カトマンズ盆地」の一部として登録されているものもあり、観光名所として世界中から多くの観光客を引きつけている。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。多くの人口を支える観光資源を地震災害から守ることも、貴重な文化遺産を継承することと同様に重要な課題と言える。

これらに対し、日本政府はJICAを通じて様々な形で技術援助を行っており、2002年にはほぼ確立された手法を利用してカトマンズの地震被害想定を行っている<sup>3)</sup>。この中で行われている建物被害推定は、これまで世界で起こった地震による各種建物に関する被害統計から導出された被害関数を利用したものであるため、カトマンズに適した被害関数であるとは言いがたい。また、D'Ayalaらは自らが提案したFaMIVEという手法でカトマンズのバルナラビリティ関数を計算している<sup>4)</sup>が、FaMIVEは壁のスレンダーネス、床と壁の接合状態等の極少数の変数から被害程度を分類するものであり、動的特性を考慮に入れたものでなく、ましてカトマンズの組積造特有の物性値に基づくものでもない。

本研究では、カトマンズ盆地の南西部に位置するネパールの第3の都市パターンにおいて住家として使われている歴史的建造物群を対象とし、悉皆調査に基づく建物分類と個別要素解析により、地震リスクの評価を行うものである。解析では、現地試験から得られたパラメータ<sup>5)</sup>を基にモデル化し、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<sup>6)</sup>を入力した。評価結果をマップとして示すことで被害の程度を明らかにする。また、歴史的価値を損なわず実現可能なリング梁を用いた補強の効果についても検討を行う。

## 2. 対象地区の概要と悉皆調査による建物分類

### (1) 対象地区

対象地区は、図1に示すパターンの中のJhatapol地区である。このJhatapol地区には、図2のように90の建物が密集している。図2では、建築様式と階高による分類毎に色分けをしている。図3,4に示すような歴史的な組積造構造物が数多く存在しており、古都のたたずまいを感じさせるものの、大部分は無補強の組積造であり、地震時には大きな被害が予測される。



図1 パタン（□がJhatapolエリア）

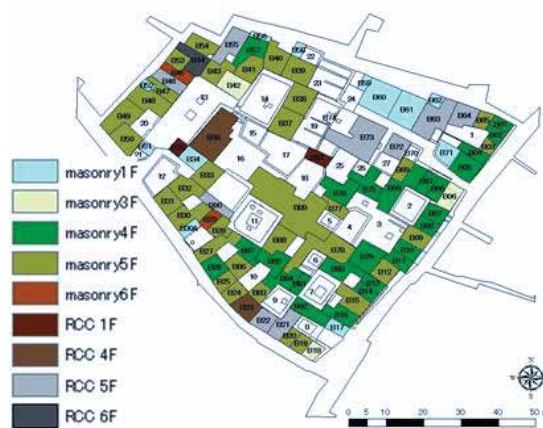


図2 Jhatapol地区の建物分布



図3 Jhatapol地区の住宅専用建物の例



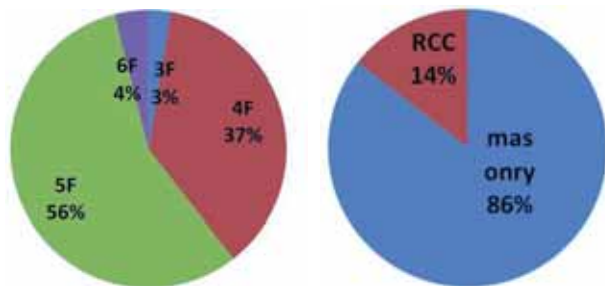
図4 Jhatapol地区の店舗併用住宅の例

## (2) 悉皆調査

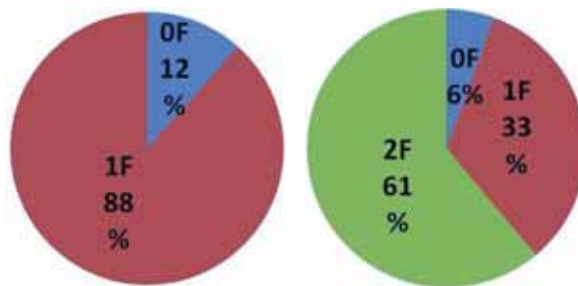
### a)調査概要

対象地区の建物について、①使用目的、②配置形式、③構造形式、④階数（増築階数）の調査を行った。

今回の対象地区では、①使用目的については、図3のように住宅専用か、図4のように店舗を兼ねた住宅の2通りであった。②配置形式については全ての建物が、隣の建物と仕切り壁を共有する様な連続建築であった。③構造形式と④階数については次項で述べる。増築階数等の外観からの目視のみでは判断が難しい項目については、住民への聞き取り調査を通じ必要な情報を得た。



(a)階数による分類 (b)構造形式による分類  
図5 構造による分類



(a)4階建て組積造 (b)5階建て組積造  
図6 増築階数

### b)構造物群の分類

対象地区に現存する建物は1階建てと3階～6階建てである。1階建ては主にモニュメントや、空き屋などとなっており、住宅に使用されているものでないため、1階建てを除く78の建物の分類を行った。その結果を図5に示す。図5(a)は階数による分類であり、最も多く存在していたのは、5階建てで、次に多いのが4階建てであった。4階建てと5階建てで地区全体の93パーセントを占めていることが確認できる。3階建てや6階建ての建物はごく少数存在しているのみであり、3階建ては全て組積造であった。また、2階建ての建物は存在しないことがわかった。図5(b)は構造様式による分類であり、伝統的組積造(masonry)と鉄筋コンクリート(RC)による枠組み組積造(RCC: Reinforced Concrete Confined Masonry)の2種類が存在し、大部分の86%は組積造であった。建物用途の内訳は住居専用建物(図3)が最も多く、次に店舗併用住宅(図4)として使用されている建物が多かった。住宅専用として使用されているものと、店舗併用住宅として使用されているものの構造的な差異は、1階の開口部の大小にあり、住宅専用の建物は1階の開口部が狭く(図3)、店舗併用住宅は1階の開口部が多い(図4)。

また、多くの建物で増築・補修が施されており、特に増築に関しては4階建て以上のほぼ全ての建物が増築による建て増しにより現在の階高となっている。組積造4階建て及び5階建て建物の増築階数の分布を図6に示す。4階建ての増築階数は1階が88%で、5階建ての増築階数は2階が61%であった。これより、増築前の階高は3階建てのものが最も多いと考えられる。そのため、本研究では4階建て以上の解析モデルについて、3階より上の部分は増築されたものであると考えた。

以上の結果を踏まえ、本研究では、対象地区に存在する建物を、構造様式と階高で7つのモデルに分類した(図7)。分類において代表となる建物の解析モデルを作成し、その分類における代表モデルとする。本研究では、地震時におけるリスク評価を目的としているため、主にモニュメントや、空き屋などとなっており、地震による被害が比較的少ないと考えられる1階建ての建物(12棟)については除外して考えた。

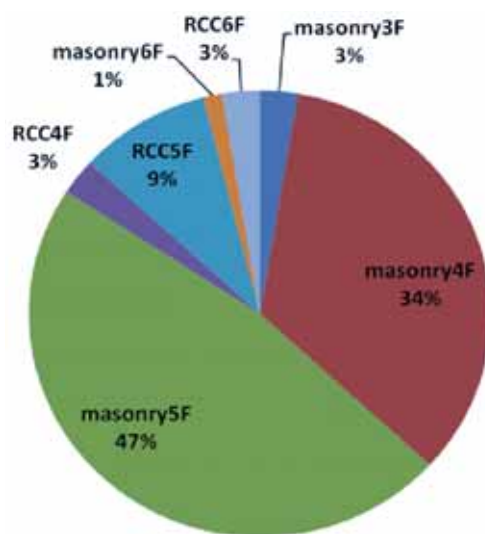


図7 建物の分類

### 3. 個別要素解析による対象地区のリスク評価

#### (1) リスク評価手法

現在、ネパール・カトマンズバレーに適した被害関数は存在していない。被害関数とは、地震動強度と建物被害率の関係を表したものである。本研究では個別要素法を用いた数値計算によって被害関数を推定する。また、建物の損傷度の推定には Okada ら<sup>7)</sup>の指標を用いた。

また、今回のような連続建築の建物群のリスク評価手法として、D'Ayala らの過去の研究<sup>4)</sup>では、過去の被害例を基にして、建物の前面の壁の破壊のみを想定してリスク評価を行っている。本研究でも、D'Ayala らの研究と同様に仕切り壁を共有する建物群であるため、地震による被害は、前面の壁の破壊が支配的であると考え、解析対象を全面の壁のみとしてモデル化した。

#### a) Damage Index

本研究では、建物の損傷度の判定に Okada らの提案した指標である Damage Index<sup>7)</sup>を用いる。これは Coburn が組積造の被害程度を damage grade としてまとめたもの<sup>8)</sup>を、Okada らが damage grade の分解能を上げるべく damage index の 0(No damage)から 1.0(Total Collapse)の指標を、damage grade に等間隔に重ねたものである。被災建物の修復不可能な破壊は damage index 0.6(damage grade 4)以上で発生し、建物のある階層が消失するほどの破壊は、damage index 0.8(damage grade 5)以上となっている。

#### b) 被害関数

本研究では、建物別の被害程度を評価する関数を損傷度関数(Damage index function)と定義し、横軸に地震動強度(最大加速度)、縦軸に Damage Index をとったグラフで表した。また、対象地区全体における被害率を与える関数として被害率関数を定義する。被害率関数は、対象地区の全建物数に占める各 Damage Index を超過する建物の割合を被害率として、横軸に地震動強度、縦軸に被害率をとったグラフで表した。

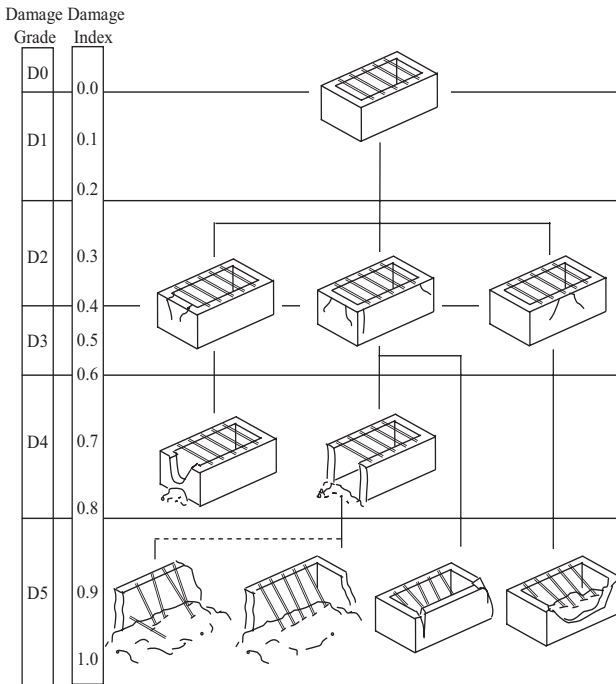


図8 Damage index (Coburn<sup>8)</sup>, Okada and Takai<sup>7)</sup>

表1 Damage Index の説明

Damage Grade	被災名称	被害状況	Damage Index
D0	No damage	被害なし	0
D1	Negligible to Slight damage	壁面に毛髪亀裂。まれに漆喰壁の小片落下。	0.0-0.2
D2	Moderate damage	多くの壁に亀裂。漆喰壁の落下が目立つ。	0.2-0.4
D3	Substantial to heavy damage	ほとんどの壁に深くて大きな亀裂。構造要素の一部が破壊。	0.4-0.6
D4	Very heavy damage	壁面は重度の破壊。スラブの一部が破壊。構造要素はお互いの連続性を失う。	0.6-0.8
D5	Destruction	完全またはほとんど完全に破壊。	0.8-1.0

#### (2) 解析手法

改良版個別要素法<sup>9)</sup>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。

### (3) 物性値

煉瓦およびモルタルの物性値については、対象地区の周辺に存在し、建築時期や建築様式がそれほど変わらない実在の建物から取得した煉瓦の実験によって求めた。木材の物性値については測定されていないため、同じ広葉樹であるぶなの一般的な値を用いた。表2に各値を示す<sup>5)</sup>。煉瓦自身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。

なお、本研究で採用した物性値を使用して、対象地区に近接し、建築時期や建築様式がそれほど変わらない2階建ての組積造建物の解析モデルを構築したところ、固有振動数を良好な精度で再現できたことから、妥当な値であると判断して採用した。

表2 解析パラメータ

物性	煉瓦	モルタル	木	RC
単位体積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	$1.8 \times 10^3$	-	$7.0 \times 10^2$	$2.3 \times 10^3$
弾性係数 (N/m <sup>2</sup> )	$2.7 \times 10^8$	$2.7 \times 10^8$	$6.3 \times 10^8$	$2.5 \times 10^{10}$
ポアソン比	0.11	0.25	0.3	0.2
引張強度 (N/m <sup>2</sup> )	-	0.0	$1.1 \times 10^8$	$1.91 \times 10^6$
粘着力 (N/m <sup>2</sup> )	-	$9.0 \times 10^4$	$9.0 \times 10^6$	$2.2 \times 10^6$
内部摩擦角	-	42.5°	0°	32°
圧縮強度 (N/m <sup>2</sup> )	-	$1.58 \times 10^6$	$4.5 \times 10^7$	$2.4 \times 10^7$



(a) 煉瓦造4階建て (b) RCC4階建て  
図9 解析モデル例

### (4) 解析モデル

建物のモデル化について詳細に示す。まず、対象地区における建物を、図7に示すように、構造形式と階数で7モデルに分類した。解析モデルは分類ごとに作成し、組積造、RCCの作成した解析モデルの例を、図9にそれぞれ示す。組積造、RCC共に煉瓦要素の大きさは10cm×10cm×20cmとした。前面の壁と横の壁を1mのみモデル化し、それ以外の横の壁は固定要素とした。

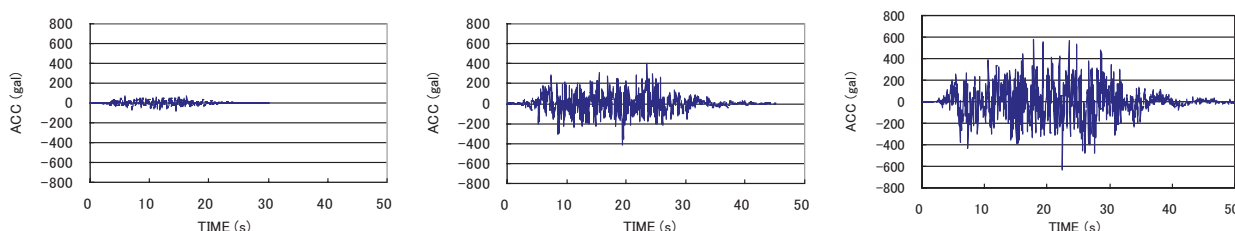
組積造建物については、対象地区の平均的な値として、各階の高さを2.0m、横幅を4.2mとした。各階の床は、木製の梁で構成されている。組積造建物において、3階よりも高い部分については増築されたものであると考え、壁厚を1～3階では60cm、4階以上では40cmに変更した。これは聞き取り調査により、増築部分は増築前よりも壁厚が減少している情報があったためである。

RCCは、対象地区の平均的な値として各階の高さを3.0mとし、壁の幅は4.1m、RCフレームを0.3m×0.3mとした。横の壁は組積造と同様に1mだけモデル化した。壁厚は組積造よりも薄く、増築の影響を考慮するため、1～3階では20cm、4階以上では10cmとした。

計算時間間隔は、解の安定条件<sup>9)</sup>から、組積造のモデルが $4.0 \times 10^{-5}$ secで、RCCモデルは $1.0 \times 10^{-5}$ secとした。

### (5) 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10に示す<sup>6)</sup>。再現期間の異なる3通りの地震動を用いた。建物の面外方向に入力した。



(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10 入力地震動 (カトマンズにおける推定地震動)

#### 4. 解析結果

作成した 7 つの解析モデルに、発生確率の異なる 3 種類の地震動を入力した。ここでは組積造 4 階建て、6 階建てモデルと、RCC4 階建てモデルの結果を図 11 から図 13 に示す。7 モデルの最終的な被害の程度から、**damage index** を評価した。

50 年発生確率 40%の地震動(PGA=72gal, PGA:最大地動加速度)を入力したところ、組積造の 4 つのモデル (3,4,5,6 階建ての 4 つ) はごく少量の煉瓦が落下するという、どのモデルもよく似た被害程度となった。そのため、全てのモデルで **damage index** を 0.2 と判定した。RCC については、全てのモデルで被害が確認できなかったため、全て **damage index** を 0.0 とした。

50 年発生確率 10%地震動(PGA=403gal)を入力したところ、組積造の 3,4,5 階建てモデルでは、最上階が崩壊する被害となった。Okada らの指標では、建物のある階層が消失する程の破壊は **damage index** を 0.8 以上としているため、共に **damage index** を 0.8 とした。組積造 6 階建てモデルは、崩壊に近い結果となったため、**damage index** を 1.0 とした。RCC では、4 階建てモデルは、ほとんど損傷が確認できなかった。RCC5 階建てモデルは、各階にクラックが発生していることが確認できた。RCC6 階建てモデルは、壁のほとんどの場所でクラックが確認できた。以上の結果から、RCC では 4 階建てが、**damage index** を 0.0 とし、5 階建ての **damage index** は 0.1、6 階建ての **damage index** は 0.2 とした。

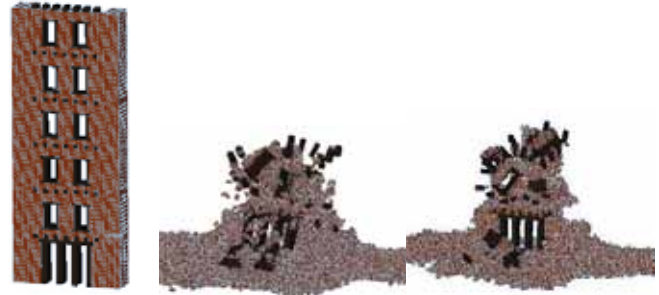
50 年発生確率 5% (PGA=577gal) の地震動を入力すると、組積造 3 階建てモデルでは、被害の程度は PGA=403gal の地震動入力結果とそれほど変わらない程度であったため、**damage index** を 0.8 とした。組積造 4,5 階建てモデルは 1 階部分が残っているため、**damage index** を 0.9 とし、組積造 6 階建てモデルは、ほぼ完全に崩壊していると判断できるので、**damage index** を 1.0 とした。RCC については、4,5 階建てモデルは **damage index** が 0.3、6 階建てモデルは **damage index** が 0.4 となった。

以上から、評価した **damage index** をまとめたものを表 3 に示す。また、3 種類の地震動に対する各建物の **damage index** の値を地図上に示したものを図 14 に示す。(a)から(c)までの各図において、斜線をつけた建物は、1 階建ての建物でリスク評価を行うに当たり除外した建物である。50 年発生確率 40%の地震動では **damage index** の最高値は 0.2 であり、対象地区のすべての建物で無視できる程度の被害しか発生しない事が確認できる。従って、対象地区に存在する建物は、50 年発生確率 40%の地震動に対する耐力を有していると考えられる。強度の弱い組積造が大部分を占めるため、50 年発生確率 10%の地震動では約半数の建物が **damage index** が 0.8 以上、50 年発生確率 5%の地震動では大部分の建物の **damage index** が 0.8 以上となった。



(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 11 煉瓦造 4 階建てモデルの地震後の様子



(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 12 煉瓦造 6 階建てモデルの地震後の様子



(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 13 RCC4 階建てモデルの地震後の様子

表 3 各モデルの **damage index**

Damage index	地震動の50年発生確率		
	40%	10%	5%
masonry 3F	0.2	0.8	0.8
masonry 4F	0.2	0.8	0.9
masonry 5F	0.2	0.8	0.9
masonry 6F	0.2	1.0	1.0
RCC 4F	0.0	0.0	0.3
RCC 5F	0.0	0.1	0.3
RCC 6F	0.0	0.2	0.4

## 5. リング梁を用いた補強効果の検証

### (1) リング梁を用いた補強法

解析より、組積造に比べて鉄筋コンクリートによる枠組み組積造の被害程度が小さいことが確認できた。組積造を枠組み組積造に建て替えることができれば、対象地区の被害の程度は大幅に減少することが期待できる。しかし、大部分を占める組積造を建て替えることは現実的に困難であるし、歴史的な価値を下げてしまう恐れのあることから、建て替えをせず補強によって歴史的な価値を保ったまま組積造の耐震性を向上させる方法について検討する。

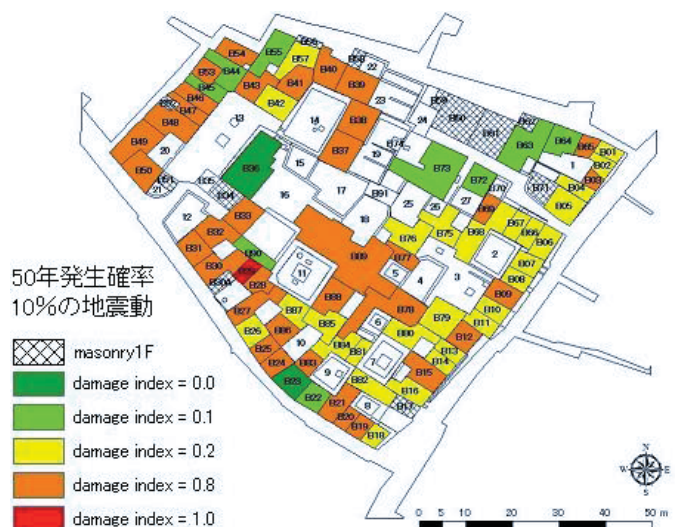
ここでは、リング梁による補強方法の採用を検討する。カトマンズの組積造は木造との複合建築になっていることが多く馴染みがよい。ため、現存する歴史的・文化的に貴重な建物の価値を落とすことなく、地震災害に強い建物にできると考えた。補強案は、図 15(a)(b)の右図に示すとおり、各階の天井部分の煉瓦を木製の梁で置き換えるものである。梁と煉瓦の間はモルタルで接着すると仮定した。引張強度の高い木製の梁が壁を一周するため、梁上下の煉瓦同士の一体化と、直交する壁同士の一体化が向上する効果が期待できる。ネパールの伝統的な建物の外観を損なうことなく、耐力を向上することが期待できる。

### (2) リング梁を用いた補強効果の検証

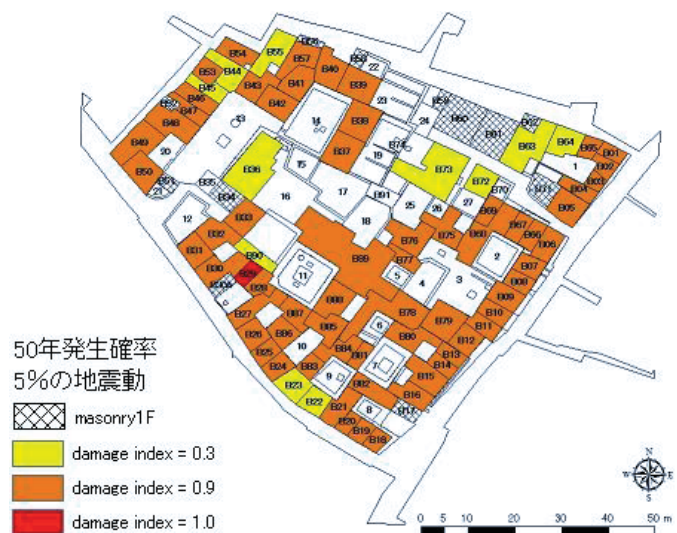
リング梁による補強効果を個別要素解析により検証した。リング梁の物性値は表 2 の木材の値を使用した。例として、図 15 に組積造 5 階建てと 6 階建てモデルに、50 年発生確率 10%の地震動を入力したときの地震後の様子と、リング梁による補強を施した場合の地震後の様子を示す。どちらのモデルでも、補強による被害の軽減効果は明らかである。壁に亀裂は発生したが、煉瓦の落下は起こらなかった。なお、補強を施したモデルの結果では、最上階頂上のリング梁が浮かび上がったような状態になっているが、これは最上階のリング梁の上には何も載っていないため、リング梁と直下の煉瓦の間に十分な摩擦力が発生せず、リング梁が動いて後ろから落下してしまったためである。この部分については結合を強くする必要があると考えられる。無補強モデルは、**damage index** が 0.8 以上の被害を受けたが、補強を施したモデルは **damage index** が 0.4 の被害となり、リング梁による補強は効果的であると考えられる。



(a) 50 年発生確率 40%の地震動入力結果



(b) 50 年発生確率 10%地震動入力結果



(c) 50 年発生確率 5%地震動入力結果

図 14 対象地区におけるリスク評価結果

図 14 対象地区におけるリスク評価結果  
無補強モデルは、**damage index** が 0.8 以上の被害を受けたが、補強を施したモデルは **damage index** が 0.4 の被害となり、リング梁による補強は効果的であると考えられる。

## 6. まとめ

本研究ではネパール・カトマンズのパタンを対象とし、歴史的組積造群の地震リスク評価を行った。まず、悉皆調査により建物の構造種別と階数を調べた。構造種別については86%が強度の弱い組積造で、14%がRCで枠組みをした組積造（RCC）であることがわかった。階数については5階建てが56%と最も多く、次に多いのが4階建ての37%であった。また、大多数の建物は元々は3階建て程度だったのが増築されて現在の階数に至ったことがわかった。悉皆調査の結果をもとに、建物を構造種別と階数により7つに分類し、地区を代表する7つの平均的なモデルを作成した。次に、個別要素解析により地震被害を評価した。7つのモデルに対して、カトマンズにおける推定地震動を入力し、地震後の被害状況を可視化し、被害のレベルをDamage Indexを用いて判定した。その結果、50年発生確率40%の地震動に対しては大きな被害は発生しないが、50年発生確率10%の地震動に対しては半数近い構造物がDamage Indexが0.8を超える大被害を受け、50年発生確率5%の地震動に対しては大部分の構造物がDamage Indexが0.8を超える大被害を受ける結果となった。被害率の高さは86%を占める強度の弱い組積造に起因しており、今後RCCに建て替えることが可能であれば被害率は軽減できることがわかった。最後に、全ての建物を

RCCへの建て替えることは現実的でないこと、また歴史的組積造の価値を損なってしまう可能性があるため、建て替えでなく補強により歴史的価値を残しつつ被害を軽減することを考えた。伝統建築で多く用いられる木材を用いて補強することを考え、木製の梁を各階の天井にリング状にはわすことで煉瓦と煉瓦の一体化を図る効果を期待した。解析により、50年発生確率10%の地震動に対しても、ひび割れ発生したものの倒壊は起こらず、耐震性の向上効果が期待できることがわかった。

**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) Rohit K.R.: Heritage homeowner's preservation handbook, UNESCO, 2007.
- 3) JICA: ネパール国カトマンズ盆地地震防災対策計画調査最終報告書, 2002.
- 4) D'Ayala, D.: Correlation of fragility curves for vernacular building types: houses in Lalitpur, Nepal and in Istanbul, Turkey, Proceedings of the 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.485, 2004.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 岡田成幸, 高井伸雄: 地震時建物破壊に伴う死者発生記述モデルの構築フレームワーク(1) 建物分類と破壊パターンおよび建物単体の被害尺度関数, 東濃地震科学研究所報告, No.2, 1999.
- 8) Coburn, A.W.: Seismic vulnerability and risk reduction strategies for housing in eastern Turkey. Ph. D. Thesis, The Martin Centre for Architectural and Urban Studies, University of Cambridge, United Kingdom, 1987.
- 9) 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.

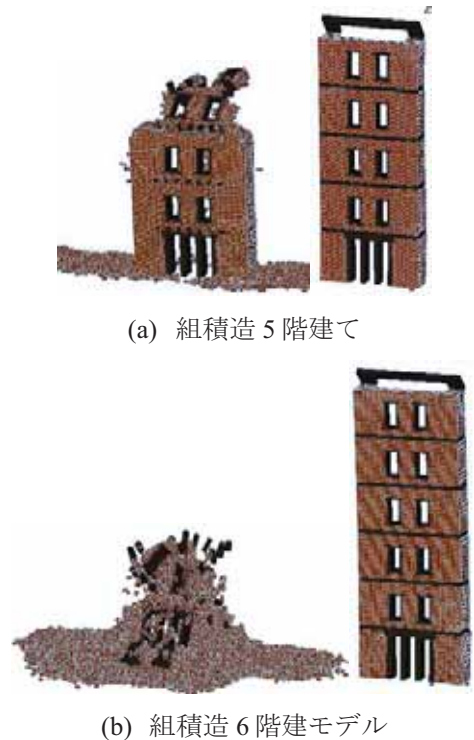


図15 50年発生確率10%の地震動に対するリング梁による補強効果の検証(左:補強無,右:補強有)