

ネパール地震関連
国際緊急共同研究・調査支援プログラム (J-RAPID)
終了報告書 概要

1. 研究課題名：「ネパール大地震による歴史的建造物被害調査に基づく脆弱性再評価と耐震補強法の検討」
2. 研究期間：2015年7月～2016年6月
3. 主な参加研究者名：
 - 日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	清野 純史	教授	京都大学地球環境学堂	歴史的建造物補強法と総括
共同研究者	山崎 文雄	教授	千葉大学工学研究科	衛星画像による被害調査
共同研究者	大窪 健之	教授	立命館大学理工学研究科	脆弱性の悉皆調査
共同研究者	板谷 直子	准教授	立命館大学衣笠総合研究機構	歴史遺産価値の脆弱性評価
共同研究者	古川 愛子	准教授	京都大学地球環境学堂	実験と脆弱性の定量評価
共同研究者	Rohit Jigyasu	教授	立命館大学衣笠総合研究機構	歴史遺産価値の脆弱性評価
研究期間中の全参加研究者数 8 名				

ネパール側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Prem Nath Maskey	Professor	Institute of Engineering Tribhuvan University	歴史的建造物補強法の提案
共同研究者	Hari Ram Parajuli	Lecturer	Institute of Engineering Tribhuvan University	歴史的建造物の要素実験
研究期間中の全参加研究者数 2 名				

4. 研究調査の目的

本研究調査の目的は、世界遺産の一つであるネパール・カトマンズバレーの歴史的価値の高い建造物が、どの程度の地震に対してどのくらい耐えられるのかを定量的に判断するために、2015年のゴルカ地震の前に行った調査と、今回の地震の後に行った調査や実験を通して明らかにすること、そして、もしも今後起こるであろう地震に歴史的建造物が耐えられないのであれば、どのような補強を行えばよいのかを提案することである。人命と同じく、歴史的建造物はかけがえのないものであり、代替のきかない文化遺産の復元と補強は喫緊の課題である。本プログラムでは、そのための地震データの収集、カトマンズの歴史的建物と同じ材料を使った各種実験や建物の個別の調査を行い、またその検証のためのコンピュータを使ったシミュレーションも進めている。

また、地震に対して安全・安心な歴史都市を維持するためには、地震の後でいったいどのような被害が出ているのかをできるだけ早く把握しなければならない。そのための衛星画像を用いた被害の全体像の正確な把握も重要な課題であり、この研究にも取り組んだ。

さらに、文化遺産の中のある対象地域を選定し、その地区の建物と住民の調査および歴史的遺産の価値を考慮した地震リスクを求めることも必要である。そのために、中庭型集

住帯を形成し、カトマンズ谷7つの世界遺産の中でも比較的被害の少なかったにもかかわらず、中庭空間が避難場所として活用されていたことが報告されているカトマンズ・パタン地区を対象に、地区住民に対するヒアリング調査を行い、伝統的中庭空間が地震後にどのように避難場所として利用されたのかを明らかにした。また、現地での調査やセミナーなどを通して、建物のみでなくコミュニティとして地震に耐えるだけの力があるかどうかの評価を行い、歴史的建造物を有するゾーン全体の地震に対する強さについての検討を行うことも不可欠である。ここでは、上述のような課題の解決を目的として、研究を行った。

5. 研究調査の成果

5-1 研究調査の成果、被災地復興や今後の防災・減災への貢献

(1) 衛星画像を用いた地震被害の早期把握

地震前後にカトマンズ盆地の世界遺産地区を撮影した高分解能光学センサ画像を導入し、地震前後の市街地の状況把握を行った。図1は、パダン Durbar 広場の南の地域を撮影した地震前の WorldView-3 画像 (2014年10月14日撮、分解能 31cm) と、地震後の GeoEye-1 画像 (2015年5月15日撮影、分解能 41cm) である。これらの光学衛星は、いずれも Digital Globe 社が保有する最新の高分解能衛星で、世界最高レベルの地上分解能を有している。ここでは、近赤外バンド (NIR) に赤色 (R) を、緑色バンドに青色 (B) を、赤色バンドに緑色 (G) を与えるフォールスカラーという表示を行っている。この表示では、植生が赤く表示されるという特徴を有する。地震後の画像を拡大表示すると、パダン・ダルバール広場に面した歴史的建造物の被災状況を確認することができる。



(a) WorldView-3 (2014/10/25)



(b) GeoEye-1 2015/5/3

図-1 高分解能光学センサによるパタン地区の地震前後の市街地の状況

一方、大地震を始めとする災害発生時においては迅速に状況を把握する必要があるが、UAV は即時性に優れ、対象物に接近して撮影できるため高解像度の画像を得やすいといった利点がある。ここではカトマンズ谷の世界遺産の一つであるスワヤンブナートの被災した仏塔を、複視点の画像を利用しながらカメラ姿勢変化と対象物の3次元幾何形状を同時に算出する SfM という手法を用いて3次元のモデル化を行った。UAV 空撮と SfM 技術の融合に

よって、災害時に倒壊の危険性がある建物などを安全、簡便、迅速に観測及びモデリングすることが可能となる。また、得られた情報をデジタルアーカイブとして保存し、今後の災害対応に役立てることができる。



(a) 3次元モデル

(b) UAVによる元画像

図-2 UAV画像を基にしたスワヤンブナートの3次元モデルの構築

(2) 観測された地震動の特徴

ネパールは地震観測ネットワークが整備されておらず、今回観測された地震波形は USGS のカトマンズ観測点 (KATNAP : N27. 7120, E85. 3155) で記録されたものである。ここでは、この観測点で採れた9つの本震・余震記録について検討した。

解析に用いた地震記録を表-1に示す。地震の発生時間順に、そのマグニチュード、震央、震央距離とともに列挙している。EQ1が本震であり、EQ8が最大余震である。モーメントマグニチュードは5.2から7.8まで、また最短の震央距離は18.5kmとなっている。

図-3は本震と余震の震央を示したものである。震央の空間分布はカトマンズ観測点の東から西までカバーしており、地震発生位置と観測点の空間的な関係が地震動に与える影響を判断しやすい形となっている。観測記録のデータ時間間隔は0.005秒であり、約82秒間の記録を用いて解析を行った。図-4にこれらの加速度時刻歴波形 (EW成分) とそのフーリエスペクトル、および絶対加速度応答スペクトルを示す。EQ1からEQ9までの時刻歴波形の基線は、それぞれ0, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1,000 cm/sec^2 となっている。フーリエスペクトルと絶対加速度応答スペクトルも、横軸の基線をずらしているが同じスケールで描かれている。ゴルカ地震の本震の震央距離は、KATNP観測点の北西約77kmで、東西・南北・上下方向の最大加速度は、それぞれ155, 162, 184 cm/sec^2 であった。これらの卓越振動数は低振動数成分が卓越している。

また、図-4からマグニチュードの大きな余震 (EQ2, EQ6, EQ8) の卓越振動数は低振動数側に現れている。一方、建物に作用する力という観点から加速度応答スペクトルを見ると、高周波数側にそのピークが現れている。

3重応答スペクトルを示したものが図-5である。本震といくつかの余震は周期2-5秒で50 cm/sec を超えており、特に本震は周期5秒で400 cm/sec という驚異的な値を記録している。本震の加速度応答は0.1-3秒付近までフラットな形となっているが、最大応答変位は300 cm にも及んでいることがわかる。

表-1 地震データ

SN	Description	Time (UTC)	Magnitude (M_w)	Location		Epicentral Distance (km)
				Latitude	Longitude	
1	EQ1	25-04-015 06:11	7.8	28.1473	84.7079	76.86
2	EQ2	25-04-015 06:45	6.6	28.1927	84.8645	69.30
3	EQ3	25-04-015 06:56	5.5	27.9100	85.6501	33.00
4	EQ4	25-04-015 08:55	5.3	27.6364	85.5029	18.50
5	EQ5	25-04-015 23:16	5.2	27.8052	84.8744	43.60
6	EQ6	26-04-015 07:09	6.7	27.7945	85.9739	67.20
7	EQ7	26-04-015 16:26	5.3	27.7612	85.7704	44.80
8	EQ8	12-05-015 07:05	7.3	27.8368	86.0772	75.10
9	EQ9	12-05-015 07:36	6.3	27.6180	86.1659	83.90

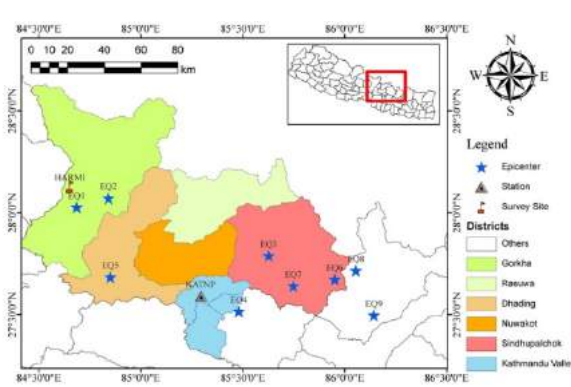


図-3 本震と余震の震央

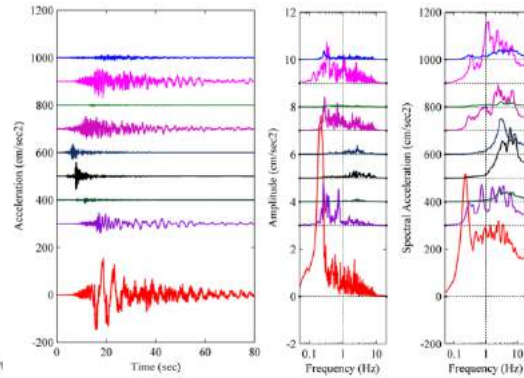


図-4 本震・余震記録とそのスペクトル

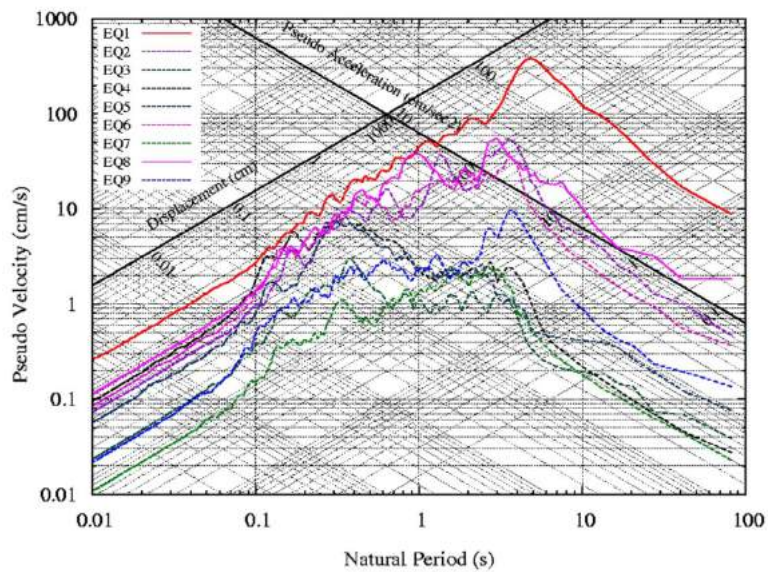


図-5 本震・余震記録の三重応答スペクトル図

(3) 歴史的なレンガ造建物の強度試験と被災前後の建物の動特性

ゴルカ地震では、カトマンズの数多くの伝統的組積造建物が大きな被害を受けた。世界遺産に指定されているカトマンズのラリトプルやバクタプルの多くのモニュメントも崩壊した。それゆえ、組積造建物の地震耐力を正しく評価し、可能な補修・補強法を提案することは重要である。ここでは、ネパールの組積造建物によく用いられているシュルキーモルタルの強度の検討を行った。図-6、図-7 にそれぞれモルタル作成過程と、実際の建物に使われていたレンガを用いて復元したレンガ供試体を示す。これらを用いて、圧縮、せん断、引張試験を行い、その力学特性を求めた。図-8 は引張強度を求めるための実験、図-9 はモルタルのせん断強度を求めるための試験法を表したものである。



図-6 シュルキーモルタルの配合・作成
(lime, surkhi, sand and water)



図-7 レンガ供試体の作成

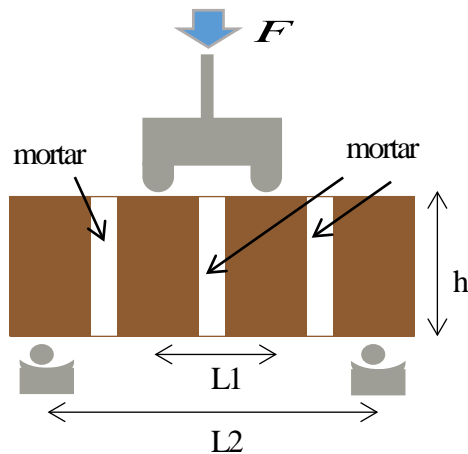


図-8 モルタルの引張強度を求める試験

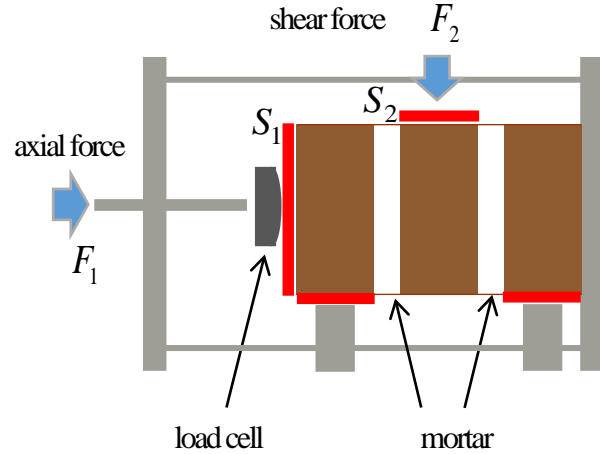


図-9 せん断強度と摩擦角を求める試験

カトマンズ谷の7つの世界遺産地区の一つであるパタンにおいて、約300年前に作られた集会所の歴史的建造物を対象に微動調査を行った。この建物の形状を示したものが図-10である。また、図-11、図-12は微動計測の様子を示したものである。この微動調査は、2015年の地震の前にも行っている。この歴史的建物は地震後に目視で被害調査が行われたが、クラックなどの新たな被害は見られなかった。微動調査は、目視ではわからないダメージが生じていたかを、建物の振動特性の変化から推定しようという試みである。

この建物は2階建てで、その幅と奥行きは16.5 x 5.6 m、1階と2階の高さはそれぞれ2.4 and 2.1 mである。壁には開口部があり、特に西側に大きな開口部がある。壁はモルタ

ルレンガであり、レンガの大きさは長年の補修などを経て、均一な大きさとは限らない。屋根はトタン屋根で、垂木と母屋の上に張られている。このため屋根の重量は壁に比べて軽い。



図-10 対象とした歴史的建造物の外観（地震前）



図-11 建物の2階の内部の様子



図-12 2階の床で観測中の微動計

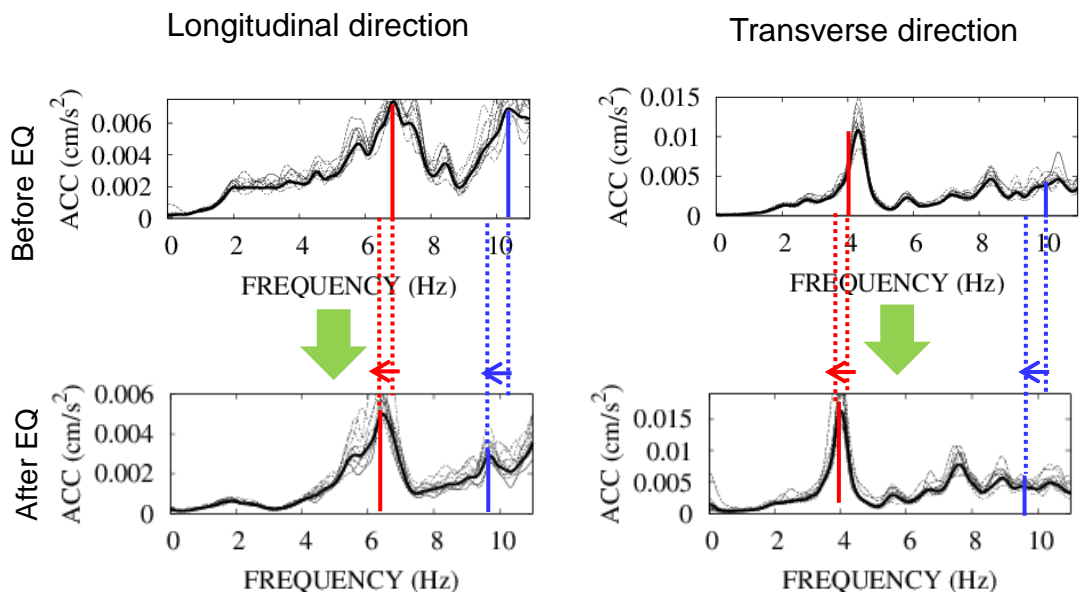


図-13 2階床上で観測された微動のフーリエ振幅の卓越振動数の比較

図-13 は地震前後の 2 階フロアの常時微動時刻歴のフーリエ振幅を、その長辺方向(x, NS)と短辺方向(y, EW)に対して比較したものである。図より、長辺方向では地震前には 6.86 と 10.20 Hz、地震後には 6.43 と 9.74 Hz 付近に、また短辺方向では地震前には 4.33 と 8.38 Hz、地震後には 4.02 と 7.64 Hz に明瞭なピークが現れている。この卓越振動数の低下は、剛性の低下、すなわち目視ではわからないようなモルタルの剥離やクラックが生じていることを示唆しており、今後の補強のための調査点検の際の有用な情報になり得る。

(4) 歴史的建造物の地震時挙動の予備解析

今回の実験で得られた各種構造パラメータは、現在、分析・照査中であるため、地震前に得られている泥モルタルの各種強度定数を用いて、予備解析を行った。解析対象建物は、上記(3)で述べた組積造と木造との歴史的複合建造物である。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。解析の要素間には、要素の剛性に基づくばねを与えている。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・圧縮応力は、地震前の実験値を用い、それぞれの強度を上回った場合にばねを切断し、破壊現象を表現した。入力地震動は、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記録を用いた。

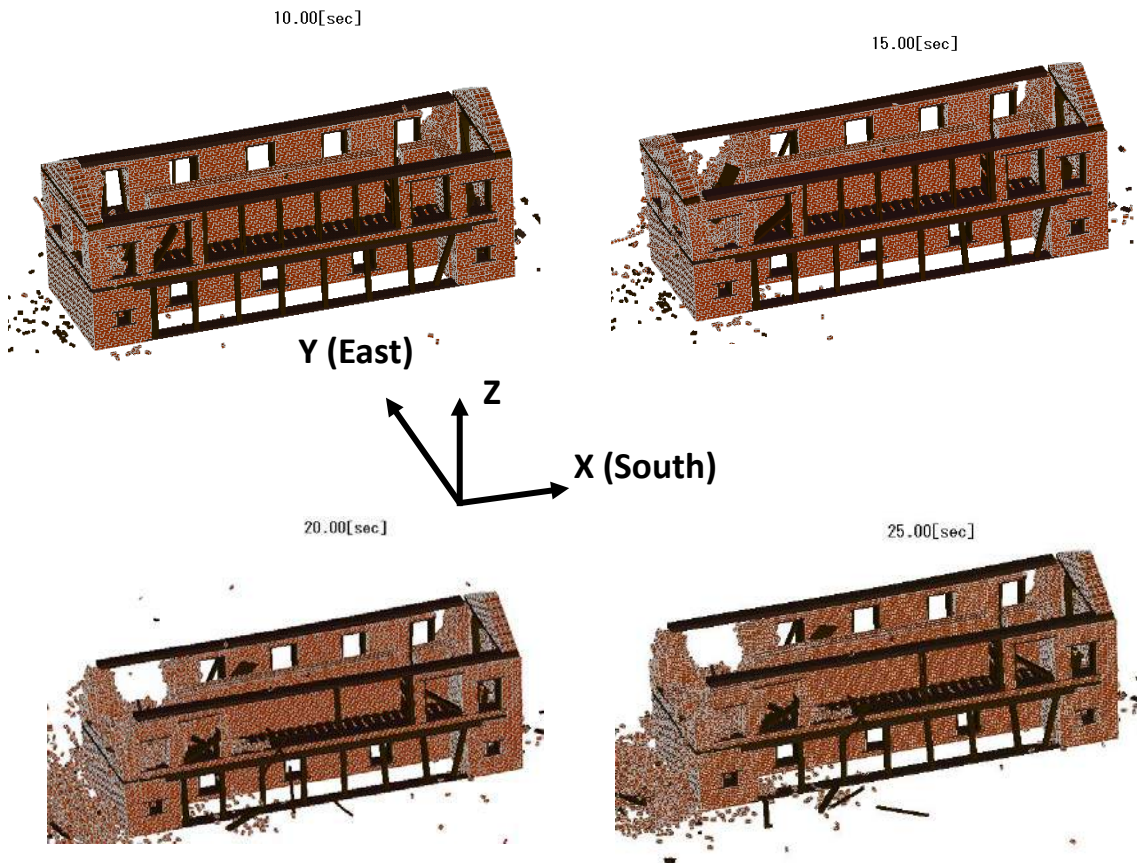


図-14 50年40%の超過確率に対する歴史的建造物の地震時挙動の予備解析

ネパールに実在する歴史的組積造建造物の地震被害をシミュレーションにより評価した結果、仮定したモデルでは引張破壊により特に北側の要素が落下する結果となった(図-14)。柱の挿入された西側の壁の被害は小さく、柱の補強効果が現れている。また、壁が一体となって振動できる程度に強度が確保できれば壁が一体となってしなやかに変形できるため、落下する要素数が少くなる。建物の地震被害を適切に予測するには、要素間の強度やリング梁の剛性などを適切に評価する必要があることがわかった。現在、今回の実験結果を踏まえた本解析を進めている。

(5) 歴史的建造物の補強法の提案

カトマンズ谷の世界遺産地区では、30以上のモニュメントが崩壊し、120以上の歴史的建造物が大被害を受けた。一般に、世界遺産地区の地震被害は空前の大被害であり、全くの想定外であった。コアゾーンのモニュメントの多くは16~18世紀に建てられたものであり、中には14世紀に建てられたものもある。それゆえの文化遺産であった。

大きな被害を受けた建造物の主な被災理由は以下のとおりである。

- ✓ 建物の維持管理の不足
- ✓ 構造部材の耐力低下
- ✓ 材料の経年劣化
- ✓ 構造要素や接合部の部分的改変

無補強の歴史的建造物の補強法の一つは、木製の梁を含む床の面内剛性の向上や床と柱の接合の強化、水平・鉛直材による壁の固定等が挙げられる。特に、水平・鉛直材による壁の固定は効果的であり、応力や変形のクリティカルな部分を特定し、これらの有効な補強法として提案している。この方法は比較的簡便であり、歴史的建造物の補修・補強への適用が期待される(図-15)。今後、補強前後の耐力の定量的評価も数値計算で行う予定である。

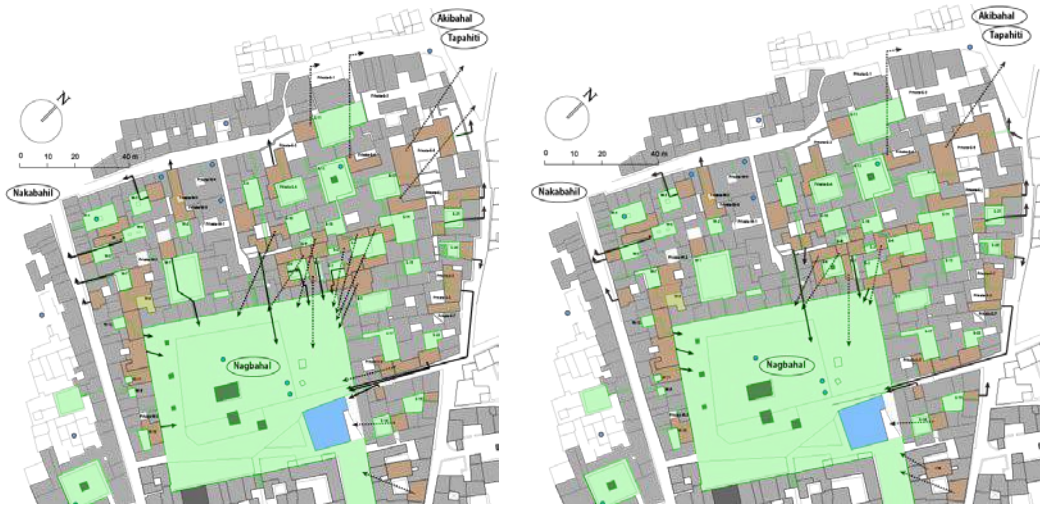


図-15 補強方法の一例(水平・鉛直材の挿入やその水平材との接合)

(6) 地域コミュニティの脆弱性調査

これまでの研究で、震災時に中庭をはじめとする共用空間が避難場所として利用されたことが明らかにされている。しかし、近年ネパールは都市化によって、空間の構成・利用、人々の生活習慣が変化しつつある。中庭空間を取り巻く背景も変化している中で、今回の地震時に中庭空間がどのように利用されたのかを地域住民の記憶を基に記録し、地震災害時における利用実態や課題点を整理することで防災面での中庭空間の有用性を明らかにできれば、歴史的空間の保全とそれを活かした防災計画を検討する上での知見を得られる可能性がある。ここでは、中庭型集住帯を形成し、カトマンズ渓谷7つの世界遺産の中でも比較的被害の少なかったにもかかわらず、中庭空間が避難場所として活用されていたことが報告されているカトマンズ・パタン地区を対象に、地区住民に対するヒアリング調査を

行い、伝統的中庭空間が地震後にどのように避難場所として利用されたのかを明らかにした。



(a) 本震時

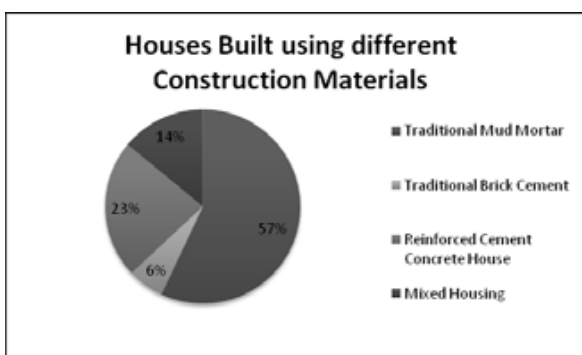
(b) 余震時

図-16 避難場所の選択と避難方向

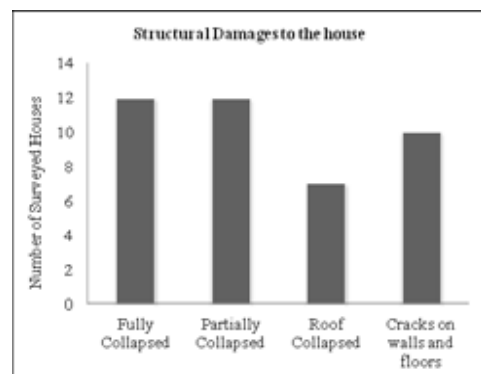
図-16 からわかるように、人々は自分の住居に隣接している比較的小さな中庭ではなく、ナグバハルやその他の比較的大きな中庭まで避難し、生活する傾向が見られた。街区の西側でナグバハルから比較的遠い場所に住む住民は Nakabahil へ、街区の北側でナグバハルから比較的遠い場所に住む住民は Akibahal や Tapahiti へ避難する傾向が見られ、住居からアクセスしやすい場所に避難する傾向にあると考えられる。住居に戻るタイミングや避難生活の期間などと住居の位置の関係性は見られなかった。ヒティに面した集会所（旧学校）がシェルターとして使われていたことも明らかになった。また、アンケートから都市化や人口流入による人間関係の希薄化が進もうとしている現代においても、伝統的な中庭空間を中心としたコミュニティの活動によって避難生活が支えられていることもわかった。

(7) 人々の暮らしや被災地復興、今後の防災・減災への貢献

カトマンズ谷には52の歴史的・伝統的な居住区があり、これらの居住区は、長年の都市の変遷の中で時間をかけて築かれた豊かな建築物とその歴史的・文化的価値を有するものとして認識されている。



(a) 構造種別



(b) 被害程度

図-17 対象地区での被害調査

これらの居住区は生きた遺産であり、近隣に住む人々のアイデンティティと暮らしはその土地と強く結びついている。ここでは、カトマンズ谷の伝統的地区の一つであるブンガマティを対象として、その脆弱性の原因を明らかにするとともに、今回の地震が、建物や伝統、暮らしに与えた影響をアンケートや聞き取り、評価し、復旧・復興への足掛かりについて検討した。

750,000 棟を超える建物被害により仮設住宅の建設が急務となった。ブンガマティでは、泥モルタルでできた伝統的な古い建物の多くが大きな被害を受けた。図-17 は建物の種別とその被害の内訳を示したものである。簡単な 4 つの区分、すなわち崩壊、一部崩壊、屋根の破壊、壁や床のクラックの中では、41 棟のうちの 12 棟が崩壊の被害を受けていた。



(a) 地震前

(b) 地震後

図-18 暮らしと社会への影響

地震は、この地区に住む人びとの暮らしと生活に様々な負のインパクトを与えた(図-18)。資産や働き場所の損失、仕事場へのアクセスの困難さ、観光客の減少、農地の仮設住宅への転用などである。また、ネパールは種々の公共的な建造物や宗教建築等が伝統的住居建築と混在しているが、このような公共スペースの減少も負のインパクトの一つとなっている。このように、現地での調査やセミナーなどを通して、建物のみでなくコミュニティとしての脆弱性の評価を行い、歴史的建造物を有するゾーン全体の脆弱性について検討を行った。

5-2 国際連携の成果

J-RAPIDプログラム遂行のために、以下の2つの外部資金を獲得し、研究交流を推進した。

研究期間中、本研究の詳細な打ち合わせと遂行のため、カウンターパートのトリブバン大学ハリ講師を、研究代表者が所属する京都大学地球環境学堂の特定研究員として、2015年10月から3か月間雇用し、人材育成と技術移転に努めた。

さらに研究期間中、世界遺産にも指定されているカトマンズ谷の歴史的建造物保存のためのハザード解析や脆弱性評価、リスク解析の分野ではネパールの第一人者であるカウンターパートのトリブバン大学マスキー教授を、グローバル生存学大学院連携ユニットの平成27年度招へい外国人学者として2016年1月から1か月間招へいし、共同研究を推進するとともに、歴史遺産保護や災害に対して強靱かつ持続的な社会を構築するためのオンゴーイングな研究を大学院生に提供した。さらに、研究代表者の研究室に所属するネパール人博士課程学生(Rishi Ram Parajuli)を本研究プロジェクトに参加させることにより、研究の守備範囲と知見を広めさせるとともに、共同調査・実験を通して、本学とネパールの学生・若手研究者との交流のきっかけを作ることができた。

京都大学・地球環境学堂の岡崎教授が代表を務める文科省の「地球規模課題解決に資する国際協力プログラム」のネパール・カトマンズとミャンマー・ヤンゴンを対象とした「参加型プラットフォームの活動による都市の災害レジリエンスの向上」のプロジェクトに、本年度(H28)から清野と古川が本格的に参加した。このミッションは都市の地震リスク評価で、ネパールの首都カトマンズのステークホルダーが自ら都市の脆弱性を把握して、災害リスクの同定を行い、それに基づいた意志・政策決定、行動計画の作成、各種活動の実施を行い、J-RAPID で得た知識の持続的発展と実装を図っている。

6. 本研究調査に関連したワークショップ等の開催、主な口頭発表・論文発表・その他成果物（例：提言書、マニュアル、プログラム、特許）、受賞等

発表/ 論文/ 成果 物等	<ul style="list-style-type: none"> ・主催したワークショップ、セミナーなど：名称、開催日 ・口頭発表：発表者名、タイトル、会議名 ・論文： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・その他成果物（例：提言書、マニュアル、プログラム、特許）、メディア
論文	Parajuli, R.R. and Kiyono, J.: Ground motion characteristics of the 2015 Gorkha earthquake, survey of damage to structure and structural field test, <i>Front. Built Environ.</i> 1:23, 2015. doi:10.3389/fbuil.2015.00023
論文	F. Yamazaki, R. Bahri, W. Liu, T. Sasagawa: Damage extraction of buildings in the 2015 Gorkha, Nepal earthquake from high-resolution SAR data, <i>Proc. of SPIE Vol. 9877, 98772K-1-11</i> , 2016. doi: 10.1117/12.2223306
論文	高杉三四郎・大窪健之・サキヤ ラタ・金 度源・林 倫子：2015年ゴルカ地震における伝統的中庭空間の避難時の利用実態 -世界遺産カトマンズ・パタン地区を対象に-、歴史都市防災論文集、Vol.10、pp.195-202、2016. ISSN: 1882-1766
口頭 発表	Rendy Bahri・リュウ ウェン・山崎文雄：TerraSAR-X画像を用いた2015年ネパール地震における市街地の被害評価、第60回学術講演会論文集、日本リモートセンシング学会、pp. 15-18、2016.
メデ ィア	清野純史：2015年ネパール・ゴルカ地震～その時、バクタプルでは～、HATコラム、ひょうご震災記念21世紀研究機構、2015. http://www.hemri21.jp/columns/columns067.html