

## 第 217 回 神戸大学都市安全研究センター RCUSS オープンゼミナール

2017 年 1 月 21 日（土）神戸市役所 4 号館（危機管理センター）

2015 年ネパール・ゴルカ地震による歴史的市街地の被害と復興、  
ならびに 2016 年熊本地震における木造建築被害の概要

向井洋一 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻准教授  
（レジリエント構造研究センター）

報告書作者：神戸大学地域連携推進室 小川まり子



向井先生より、2015 年ネパール・ゴルカ地震の建築被害と復興状況、2016 年熊本地震の木造建築被害についてご報告頂きました。

### バクタプル市での建築被害調査

2015 年 10 月 1 日～3 日、首都カトマンズの東約 12km に位置する旧都、バクタプル市（死者・行方不明者 333 名、負傷者 2101 名の人的被害、全壊の建物 28513 棟、部分損壊 9105 棟）で建築被害調査を行った。歴史的な街並み全体が世界遺産に指定されている旧王朝のあったバクタプルの伝統的建物群が今回の地震で甚大な被害を受けた。

#### <建物被害と震災瓦礫の撤去>

震災前の市街は煉瓦造 4 階や 5 階建ての建物が隣接し、細長い路地を挟んで密集した街並みであった。地震時には破壊された建物の瓦礫が狭い路地を閉塞した（図 1）。煉瓦造の建物は最上層の一枚壁が面外に大きな変形を起こすことによって、建物上部から崩れていく。これは関東大震災の時に煉瓦造が壊滅的に崩れたのと基本的には変わらない。地震後は資材が不足し、職人にも来てもらえない状況であった。また、家族総出で空いたスペースに手作業で瓦礫を運び、生活道を確保する必要があった。震災から 1 年半が経過した今でもテントや波状のトタンで作られた仮設住宅で生活されている方がおられる。しかしバクタプル市はユネスコの世界遺産に指定されている地域であるということでネパールの中では瓦礫が比較的早急に撤去されたという点では復旧が進んでいるとも言える。

#### <悉皆調査>

被害の大きいエリア（図 2 の赤枠）を中心に悉皆調査を行った。図 2 の黒い実線は世界遺産を含む重要な街道を示す。南側に川があり、小高い丘になっている。川べりの堆積地は砂質土、シルト等で構成される軟弱地盤である。

### 2015 年ネパール・ゴルカ地震の概要

2015 年 4 月 25 日、ネパール・カトマンズの北西約 80km、深さ 15km を震源とするマグニチュード (Mw) 7.8 の地震が発生した。2016 年 3 月現在、ネパール政府災害リスク低減ポータルサイトによると死者・行方不明者が 8959 名、負傷者が 22302 名とされる。



図 1 震災直後のバクタプル市内の様子

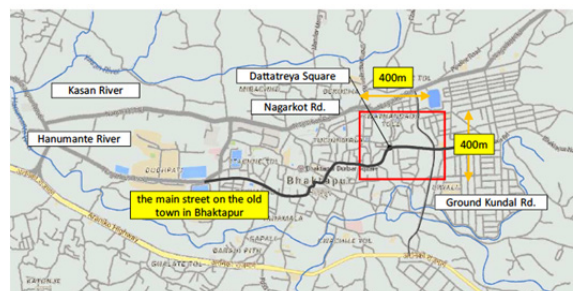


図 2 バクタプル市の旧市街周辺地図

表 1 建物の被害状況の分類

	建物の状態
A	建物の3階以上が崩壊し、残存部分が2階以下の状態（全壊を含む）
B	4階以上の階または屋根が崩壊しているが、建物の3層目までは残存
C	全層が残存しているもの（屋根の破壊も見られない状態）
D	全層が残存しているもの（鉄筋コンクリート補強骨組を持つ建物）

建物の被害状況をA～D（表1）で分類した。伝統的な建物の被害状況はA～Cで分類し、A、Bは3階を境目とした。3階建てはネパールでの伝統的な居住習慣との重要な歴史的関連を持つからである（＜居住空間の階層＞で後述）。鉄筋コンクリート補強骨組を持つ新しい建物はDとした。被害が大きいところ（A）が調査エリア（図2の赤枠）の東から南西にかけて比較的集中して見られた。街の南側は河川に至る傾斜面になっており、被害集中域は、この斜面を登り切った丘上の縁端部に沿って見られる。

＜構造的視点による被害状況＞

伝統的な煉瓦造の建物は、二重構造の壁（図3）になっており、内外いずれかの側の壁が座屈する被害が見られた。2枚の壁の間には破砕煉瓦等を心材とし、石灰を練り混ぜた泥砂が充填されている。また妻壁が破壊した事例が多数見られた。ネパール都市部の煉瓦造住宅は日本の町家のように奥行きが深い建物が桁行方向に壁面を連ねて立ち並んでおり、妻壁が住戸間の戸境に設置されている。この妻壁は床面や直交する桁行壁と一体化されていないケースが多く、1枚壁の状態地震力を受けて、面外に崩落しやすいという脆弱性がある。



図3 二重構造の壁

＜居住空間の階層＞

伝統的な煉瓦造住宅（図4）はマッラ期には3層+ペントハウスを基本構成とする形式に進化し、近世の都市部では上増築や建替えにより、4層や5層となった建物も多く見られる。今回の大地震でこの増築部分が壊れたものも多いと思われる。ネパールでは、相続時に住戸の機能について同じヒエラルキーの部分ごとに完全に等分する習慣がある。例えば、3間間口の建物を兄弟2人が相続する際には、建物のちょうど中央で縦に分割するような妻壁を間に設けて区画する。その後いずれかの所有する部分だけが改築されるなどして、構造的にいびつな狭小間口の住宅が派生する原因ともなっている。



図4 伝統的な煉瓦造の骨組み

＜建物の再建状況＞

現状で建替えの始まった住宅は、主にRCの骨組みを持つRC枠組煉瓦造で再建されている。木材の費用が高騰しており、木造骨組の伝統的な構法による煉瓦造建物の再建数はわずかである。一部の層が残存する部分崩壊の建物の再建では、壊れた上層部を新しく積み直して修繕される場合もある。1934年と1988年にも大地震を経験しており、今回の地震で崩壊した建物の中には、これら過去の被災により耐力が低下していたものも多数含まれると考えられる。今回の地震で倒壊を免れた建物においても、次の地震に対するリスクを認識する必要がある。

表 2 上：復興状況 下：再建率の定義

	震災から1年後の建物状態	棟数（割合）
A'	全壊建物／撤去状態	302棟（49.1%）
B'	1層目まで残った建物	47棟（7.6%）
C'	2層まで残った建物	101棟（16.4%）
D'	3層以上が残った建物	116棟（18.9%）
E'	再建中または再建された建物	49棟（8.0%）
再建率①：14.0% {E' ÷ (A' + E' )}		
再建率②：9.8% {E' ÷ (A' + B' + C' + E' )}		



震災から1年半後の建物の状態を表2のA'～E'で分類した。現状でも最低限の居住空間の機能を維持できると考えられるD'に分類される建物の数を除き、表2の①②の再建率を計算した。今回の調査地域の中

でも、特に建物被害が甚大であったエリアでの再建はまだ1割程度に過ぎず、建物再建による復興は比較的立ち遅れている状況である。

注) RC：鉄筋コンクリート構造



図5 上下：益城町及び西原村周辺の調査エリア

#### <建物の振動特性調査>

加速度計を用いて煉瓦造建物の振動特性調査を行った。調査を行った建物では構造（RC補強の有無）や損傷状況の相違によらず、概ね3～5Hz（ヘルツ）程度の固有振動数であり、固有振動数と構造・破壊状況との関係性はあまり見られなかった。一方、外観上明確に破壊した無補強煉瓦造建物では10～20Hzの高周波の振幅成分が大きく生じており、破壊のない建物の振動特性とは異なっていた。煉瓦造建物の損傷状態を非破壊で調査する手法に利用できる可能性があり、今後さらに詳しく調査したい。

#### 2016年熊本地震における木造建築被害

2016年5月、図5の青い点線内で木造家屋の被害調査を行った。これらの調査エリアはいずれも概ね断層線上に沿って点在する地域である。

秋津川の南側の益城町福原地区では表層に生じた地割れ付近の建物でも外観上はそれほど損傷は見られなかった。川の北側の益城町木山地区では、比較的建築年が新しいと思われる木造住宅にも大破・倒壊したものが見られた。甚大な被害を受けた建物には、在来／伝統いずれの構法のものも含まれる。鉄骨造のアパートでも、サッシ窓が枠外に大きく突出しており、構造的な大被害は免れたが、地震時には非常に大きな変形が生じていたことがわかる。大破した建物の多くが隣地との間に高低差がある敷地に建ち、低地側法面の擁壁の崩れや敷地のずり下がりが見られた。無補強のコンクリートブロック基礎や布基礎の破壊に起因して上部構造に大きな被害を生じたケースが多く見られた（図6）。

桁行方向に倒壊した建物の壁材に、ほとんど損傷が見られない事例があった。通常、振動の繰り返しで耐震壁にはクラック<sup>注</sup>などを



図6 小谷地区の建物被害

生じるが、最初の揺れで建物が大きく変形してしまい、そのまま倒壊した可能性がある。また、2階部分が崩壊した事例が見られた。2階の開口部が大きい建物や、上増築がなされた建物など特殊なケースに起こりうるが、こうした事例の要因も検証していくことが重要である。

また、下陣（しもじん）では、地表面に大きな地割れが連続して発生していたが、その延長線上にあった建物には甚大な被害が見られた。地割れの発生を想定することも建物設計の一つのポイントになるかもしれない。

悉皆調査を行った小谷（おやつ）地区では、計 287 棟の建物の破壊状況（大破・中破・小破）を調査した（図 6）。小破までであれば修復は十分可能であるが、中破では構造体に損傷が生じており修理費用が過大となり解体せざるを得ない場合もある。敷地内に専用住居と納屋を備えた住宅が多く、専用住居は築年数 30 年以上で 2 階建て、屋根の形式には入母屋（いりもや）のものが多い。約 5 割の建物が中破以上で、瓦や基礎部の被害も多く見られた。布田地区では比較的古い建物が多く、8～9 割の建物が大破・倒壊していた。降雨の繰返しにより表層土内に含まれる火山灰が流れて蜂の巣状となり、建物の基礎がスカスカの地盤上に載った状態になってしまっていた可能性（図 7）も考えられる。



図 7 西原村布田地区の建物被害

以上の被害事例には、基礎部分や敷地地盤の破壊が原因の 1 つとなり大破に至った建物が多く見られた。街道沿い（県道 28 号線）には昔からの集落があり、その周辺にベッドタウンが広がっていった。甚大な建物被害は専ら昔からある集落に多く見られた。ベッドタウンでは宅地造成の際に地盤改良がなされている可能性が高いが、昔からある建物は、建て替えの際、昔の地盤をそのまま使用し（その際に地盤改良がなされたかが定かではなく）、その元々の土地が脆弱だった可能性もある。建物のみならず敷地やその周辺の地盤性状も含めた、多角的な視点から今回の地震被害の調査・検証を行っていくことが重要である。さらに、震度 5 とか 6 の地震で（煉瓦造や木造に関わらず）倒壊する建物もあれば、震度 7 の大地震で倒壊せずに残った建物も実際にある。破壊を免れた原因を専門的な視点から徹底的に分析・解明していくことが重要である。

注) クラック：建物の外壁、内壁、基礎等に生じる亀裂やひび割れ

-----質疑応答 1（2015 年ネパール・ゴルカ地震）-----

（質問）昨年 6 月バクタプルで調査した。貧しい国で、余裕ができた人が自分らで煉瓦を積み直していた。国の補助金は約 30 万円。再建に対する制度や考え方を整理していかないと建築物の構造の話だけをしたところで国民は動いてくれないのではと調査時に感じた。

（回答）今回の地震後は、RC 枠組工法による建物の再建が進んでいる。とはいえ実際には、補助金のみならず様々な事情があり、住宅再建は遅れている。この工法は倒れないから住民にこうなさいというのは必ずしも適切とは思えない。現地の現状で可能な再建工法について構造的に再評価して、より有意な方法が見つかれば、それをガイドライン等で示唆していくことが重要であると思う。

(質問) 煉瓦造の中に木造を入れた伝統的な補強工法はいつ頃から行われ、なぜ、そのような形になっているのか。

(回答) 木材が入った歴史的な経緯までは把握できていないが、構造的な役割については力学的に説明できるものもある。実際に伝統的寺院や宮殿建築において、木造を利用して新たに補強する取り組みも行われている。

(質問) 衝撃的な鉛直地震動について、阪神・淡路大震災時は多くの方が突き上げるような揺れを感じた方がおられたが、ネパールでも同様な体験の話があれば教えて頂きたい。

(回答) 昼間の地震だったので、地震時には店に出ており慌てて帰宅して家族の無事を確認しに行ったというような状況的な話は聞いている。しかしながら、衝撃的な鉛直動に起因する揺れを人々がどのように感じたかとか、建物被害との関係があったのかとかまでは、不明なので今後勉強させて頂きたい。

(質問) 発災後 2、3 回現地に入った。カトマンズ盆地は比較的やわらかい層の印象がある。固有周期は約 4 秒と長いので 2、3 階の建物はあまり気にしなくていいのか。

(回答) 力学的には固有周期の問題も大事だが、煉瓦造の破壊メカニズムの視点からみれば、階数の相違より最上階の破壊の有無(壁が面外に倒れにくい屋根や床の仕様になっているか)がまず重要である。

-----質疑応答 2 (2016 年熊本地震) -----

(質問) 建物の強度を調査する際、地盤状態を把握した上での構造計算が必要と思っている。地盤と建物を一体化して建築物の構造的な状況を把握できる方法があればお伺いしたい。

(質問) 以前の都市安全研究センターの長尾先生の講演では地盤状況をフーリエ解析する取り組みがあったが、フーリエ解析は地盤状況とどのように結びついているのか。

(回答) 地盤の相違による局地的な地震動の増幅状況については、表層地盤の地盤増幅率分布地図が(防災科学技術研究所の J-SHIS により)公開されているのでそれを参考に設計に活かすことができる。振動計測に基づくフーリエ解析は表層地盤性状を振動観測から推定する点で有意な手法である。ただし振動計を設置して自分の敷地が軟弱かどうかという局所的な状況を調べたいとして、振動計測だけで敷地の表層の地盤構成やその状態まで厳密に判定するのは難しいのではないかと思う。掘削による地盤調査が基本的には必要であると思う。

(補足) 長尾先生の講演では約 1 秒の振動特性で建物が倒壊しやすいとのこと。地盤状態を宅地ごとに測定する機器があり、それによって地盤特性を調べるといいのではと思う。

(質問) 2000 年の建築基準法の改正では木造の地耐力に併せて基礎部分もしっかり作り、地質的な事前地盤調査が必要とされた。今回調査された建物の中で、そのようなことで効果があったものがあれば教えて頂きたい。

(回答) 小谷地区では、2000 年以降の新しい耐震基準で建てられた建物について、ほぼ無損傷で内装の被害もほとんど生じていなかったものもあった。基礎からきちんと建設されたものは一定の耐震性が確保されていたという印象がある。

(質問) 益城町は建築制限がないが今の建築制度で安全に再建可能かご助言を頂きたい。

(回答) 同じものを同じ場所に建てると、同じ地震が生じたとすれば、再び同じことが起こると思うが、今回のように地面や擁壁等が壊れたケースについて、基準に沿って地盤の改良や擁壁の補強も行った上で、再建すれば耐震性としては良い状態に行くだろうと思われる。

\*図は講演資料より抜粋