

土木学会調査団先遣隊報告(土木学会誌原稿より)

小長井 一男

2005年10月8日現地時間8:28にパキスタン・インドの国境近くの山岳地(北緯34.493°, 東経73.629°)でM7.6の地震が発生した。未だに孤立した山村が多く、被害の全貌は未だに不明であるが、11月2日時点で発表された死者数は73,246人(パキスタン実効支配地側のみ)、被災者は250万人に達すると見られている。この地域の地震被害を大きくしているのはKucha とよばれる石積、日干レンガ積の家屋であるが、今回はKucha ばかりでなくPuccaと呼ばれる鉄筋コンクリートの建造物も所によって壊滅的な被害を受けている。険しい山岳地の地震は随所で斜面崩壊を引き起こし、このため谷筋に沿った幹線道路が寸断され孤立した地域の救援は遅々として捗らない。

土木学会では建築学会と共同でパキスタン復興支援団(11月21日～28日)を派遣するが、これに先立ちneeds assessmentを目的とした以下の先遣隊(10月24日～31日)が派遣された。

先遣隊メンバー:

団長 小長井一男(東京大学 生産技術研究所)

団員 小国 健二(東京大学 地震研究所)

児玉 裕之(飛鳥建設 土木本部)

池田 隆明(飛鳥建設 防災R&Dセンター)

Aziz AKBAR (University of Engineering and Technology, Lahore)

ここに先遣隊が調査した地域の写真を掲載する。なお先遣隊の調査速報は土木学会のウェブサイトの災害速報(<http://www.jsce.or.jp/report/frameset.htm>)に掲載されている。



北西から南東方向に向かってバラコート(Balakot)の街を望む。丘陵上の家屋がほぼ全滅しているのに対し丘陵を離れた家屋は倒壊を免れているのが目立つ。

(Yahoo News Photo (Reuters),

http://news.yahoo.com/news?tmpl=story&u=/051009/ids_photos_w/r2506774501.jpg)



Balakot の丘陵斜面の家屋被害。鉄筋コンクリートの屋根の四隅を支える柱とその基礎が互いに独立していて、やわらかい砂地盤の動きに引きずられるように倒壊した家屋が見られ、揺ればかりではなく基礎・地盤の構造も悲惨な被害に結びついた可能性がある。地震後2週間以上を経ても家族、親類を捜して人々は屋根に穴を穿ち続けている。



国道15号線バラコート(Balakot)橋:バラコートの中心を流れる Kunhar 川に架かる3径間連続 RC アーチ橋である。桁全体が南側(下流側)に 105cm ほどずれている。救援物資を積んだトラックが行き交い、通行制限はかけられていない。



バラコート橋の南 100mにある吊橋の主塔基礎:この基礎も1m程度南にずれている。バラコート市内を通る国道15号の街灯も南北方向に強くゆすられた痕跡を残していて、この街が南北に強い揺れを受けたことが推定される。



バラコート北 15km の国道 15 号線:褶曲の激しい千枚岩(粘板岩)の崩落が随所に見られ、これらが山岳地帯の唯一の動脈を寸断している。他に迂回路がなく、標高の低い箇所から順次道路のクリアリングが行われているが、積雪期を目前にその作業は捗らない。工事現場が同時に救援物資の車で届く最後の場所になっていて、こより先はロバや人力による物資の輸送に頼っている。



ムザファラバード(Muzaffarabad)北郊の段丘:段丘崖に沿った家屋が壊滅している一方、低地にある家屋は被害を受けながらもその形を保っている。段丘の縁に沿って連続した亀裂が走り、斜面が幾分動いた様子が伺える。背面に見える白い斜面は砂礫を含む石灰岩の斜面崩壊であり今も白煙が絶えない。地震前は植生に覆われていた様子が QuickBird からの衛星画像で確認できる。崩壊地に堆積した崖錐は白い細粒分の多い上部で 38°程度、粒径の大きい下部で 27°程度の傾斜角を有している。



ムザファラバード北の吊橋の崩壊:このような中小の吊橋の多くは歩行者、ロバなどのためのものであるが、山村の生活を支える重要な施設である。

一般住宅 (Non-Engineered Houses) を対象とした調査報告 (被害状況と支援策)

東京大学生産技術研究所

都市基盤安全工学国際研究センター

教授 目黒 公郎

1) 被害状況

被災地域の一般住宅 (Non-Engineered Houses) に使われている主な建物は、以下のよう
に分類される。

- a1) 低品質 RC(鉄筋コンクリート)フレームにコンクリートブロックやレンガ、石などを積み上げた壁構造
- a2) 石積み(用いる石のサイズや形、積み方、目地の材料によってバリエーションがあるが)の組積造
- a3) アドベ(日干しレンガ、サイズにはバリエーションがある)の組積造
- a4) レンガの組積造
- a5) コンクリートブロックの組積造
- a6) 上記の a2)から a5)を組み合わせた組積造

屋根の形態は、a1)では低品質 RC のスラブ屋根が多いが、a2)~ a5)では次の 2 種類のタイプが支配的である。ひとつは組積造の壁に木製の梁を渡してその上に柴や小枝を置いて、その上に石やアドベを載せ、さらにその上に土を盛って表面を平らにして、最終的に暑さ 20~ 50cm の屋根とするもの。もうひとつは、木製の屋根のフレームを組んで、その上を金属板 (波トタン) で葺くもの、である。

死傷者を発生させるような甚大な被害について、その被害状況を被災形態とメカニズムに分けて分析すると以下のようなようになる。

被災形態：

- b1) 屋根が平面的に地面につくまで完全に崩壊している事例。(ヘリコプターで上空から見ると、RC スラブや木製フレーム(波トタン葺き)の屋根がそのまま真下に落下し、壁が四方に散らばっているものもある。)
- b2) 片側の壁が壊れて屋根が外れて落下しているもの
- b3) 組積造の壁と壁のつなぎ目に大きな亀裂が発生して、壁が倒れたり、一部が欠損したりしているもの
- b4) 組積造の壁と基礎部分の連結箇所が大きく破損し、その影響が壁の上部に及んで全体の被害に至っているもの
- b5) 周辺地盤や立地地盤の崩壊に伴って建物が地盤と一緒に崩壊したもの

被災メカニズム：

- c1) RC フレームのジョイント（柱と梁の連結部）の強度不足によるフレーム自体の崩壊が誘発した被害
- c2) RC フレームと組積壁とのつながりが弱くて、この部分に大きなクラックが入り、それが全体の崩壊を誘発した被害
- c3) 組積造の壁と壁の連結力の弱さを原因として、壁と壁の連結部に大きな亀裂が発生することで一方、あるいは両方の壁が倒れたり、一部分が欠損したりしているもの
- c4) 組積造の壁と基礎部分の連結力の弱さを原因として、まずこの部分に大きな亀裂が発生し、その影響が壁の上部に及んで破壊しているもの
- c5) 周辺地盤や立地地盤の崩壊・変状を原因とした建物被害

被災地域の一般住宅（Non-Engineered Houses）の被災状況は上記のとおりであるが、b5)と c5)のケースを除いて被害の発生する主たる原因は組積造壁（RC フレームを含む）の極端な耐震性不足による。具体的には、組積壁がほとんど引っ張り強度を有していないことに起因している。ゆえに、壁の構成部材（壁を構成しているブロックやレンガ、アドベや石）が簡単に面外（壁の内部から壁の外に）に落下し、急激に支持力を失う。何らかの方法で組積造壁を一体化し、壁内の構成部材の面外への落下を阻止することが耐震性を向上させる上でのポイントである。余談だが、組積造でもアーチ構造が比較的地震に強い理由は以下のとおりである。地震外力を受けた際に通常の組積造壁では発生する構成部材間の引っ張り力がアーチ構造では作用せず、全て圧縮力となる。ゆえに反力を十分確保できる場合は、基本的に構成部材が圧縮で破壊する強度まで抵抗することができる。

b5)と c5)のケースは、建物が斜面や崖（河岸段丘など）の上やそれらのすぐ下などに存在し、建物の上の斜面崩壊や建物が建っている地盤そのものの崩壊によって建物被害が発生しているものである。このような立地条件の建物は、そもそも地震動の強度自体が地形効果で増幅されている場合が多い。この種のタイプの災害に関しては、事前のアセスメントに基づいた土地利用規制が重要であり、具体的には、建物の建設を制限することで対処することが基本である。

2) 耐震住宅再建支援

最初に被災地の耐震住宅再建支援を行う上での注意点をまとめ、その次に具体的な支援策について述べる。

耐震住宅再建支援を行う上での注意点：

一般に総合的な防災対策は、「被害抑止力の向上」、「災害対応力/被害軽減力の強化」、「復旧・復興計画/戦略の立案」の3つの対策をバランスよく講ずることで成り立つが、この中

で最も重要なのは「被害抑止力の向上」である。社会インフラを含めた構造物の強度をあるレベル以上にしないと、如何に優れた事後対応システムや復旧・復興戦略を持とうが、地震直後に発生する膨大な建物被害とそれを原因とする死傷者の数を減らすことはできない。地震の後に対応しなくてはいけない仕事の量が、被害抑止力の高低で全く変わってしまう事実からも、適切なレベルの被害抑止力確保の重要性は明らかである。

上記のような認識の上で被災地域の構造物を見ると、最も大きな問題は耐震基準の有無にかかわらず、地域の住民が自分で勝手に造って住家としているおびただしい数の一般住宅(Non-Engineered Houses)にある。すなわち、これらの建物の耐震性向上(確保)の問題である。被災地では迅速な復旧・復興が望まれているが、その際に被災建物の建て替えや被災建物の補修・補強を適切に実施しないと、将来の地震時にまた同様な被害を受けることは自明である。

ではどのようにして、被災地の耐震住宅再建支援を行えばいいのだろうか？

この問題を考える際には、相手国や対象地域の置かれている条件や状況に配慮することが不可欠である。先端技術を用いた対象地域の危険性評価は意味があるが、具体的な対策法として先端材料や先進技術を持ち出すのは解決策にならない場合が多い。実効性のある効果的な対策法は、「local availability/applicability」や「local acceptability」を有していなくてはならない。

前者は、対象地域への適用性や現地での対応可能性を指し、技術的な側面と社会的な側面から評価しなくてはならない。技術的な側面は、「材料」と「工法」の視点から議論する必要がある。具体的には、提案する対策法で用いる材料が現地で簡単に(物理的に、経済的に)入手できるものかどうか、また工法としては、特殊な技術を使うのではなく、現地の技術力で問題なく対応できるものであるかがポイントとなる。社会的側面としては、宗教や文化、歴史や伝統を踏まえた上で、現地の人々の生活習慣上、それが許容してもらえるものであるかどうか、また同様に価格として、現地でも許容できる程度のものであるかがポイントになる。さらには、対策を実際に普及させる環境を整備する必要があり、デモンストレーションプログラムやドライビングフォースとなる適切な制度を作ることも重要である。

上のような点を踏まえて、具体的な支援策としては以下のようなものを提案する。

具体的な耐震住宅再建支援策：

提案する支援策は、被災地の一般の人々が住宅としている組積造建物を中心とした耐震性の低い Non-Engineered Houses の耐震化を実現するハード(補強法)とソフト(推進する仕組み)の両面からの支援策である。

まず提案するハードとしての補強・補修法は、世界で広く入手できる安価な材料(ここでは荷造り紐：ポリプロピレンバンド、PP - バンド)とごく簡単な技術(技術者でなくとも対応可能)で、大幅に耐震性を高め、地震による建物崩壊で死傷する被害を激減させる耐震

補強工法である。地域住民の現在の生活形態を変化させる必要もない。モットーは「100ドル耐震補強」。現地での材料入手価格、施工を家の持ち主が自分でやるか、業者に頼むかなどの条件でトータルの価格は変化するが、途上国の耐震性の低い組積造建物1軒を100米ドル程度の価格で耐震補強することを目標とした工法である。

これまでの著者らによるこれまでの研究成果から、PP - バンドのメッシュで組積造壁を内部と外部から覆い、内外のメッシュを適当な間隔で連結する工法である。詳しい説明は添付資料に譲るが、壁と壁、壁と柱、壁と基礎、壁と屋根などをPP - バンドのメッシュで一体化することで、壁内部の構成要素が面外に飛び出ることによって発生する急激な支持力低下を阻止できる。建物の壁全体を一体化することで、屋根の落下も阻止できるし、基礎部にクラックが生じた場合もそれが上部まで進展することを阻止できる。結果として、将来の地震による死傷者を大幅に軽減できる。本提案手法は、既存の建物にも、新築の建物にも適用可能である。また今回の被災地に適用する場合には、被災建物から得られる材料(石、レンガ、アドベ、目地につかっている泥など)の再利用が可能であるので、被災地の復旧と復興を考える上で大きな問題である被災建物から発生した瓦礫の処理の問題も大幅に軽減できる。

なお、「被害状況」でも述べていることだが、本提案手法は周辺地盤や立地地盤の崩壊・変状を原因とした建物被害の軽減を目的とした手法ではない。このような被害に関しては、事前のアセスメントに基づいた土地利用規制を行い、建物の建設を制限するなどの対処が重要である。

次に、上で提案したような耐震改修法を広く一般に普及させるための周辺環境を整える支援も重要である。たとえば、著者が日本やトルコを対称に提案しているような耐震改修促進制度のようなシステムの設立である。安くて効果的な工法が実現したことによって初めて成立するような、行政による被災時の事後保障制度や、提案補強法のデモンストレーションプログラム(わかりやすいパンフレットの準備と配布を含めて)もぜひ検討すべきである。

生研記者会見資料

1. 表題: パキスタン地震でも大勢の犠牲者を出した世界で最も地震に弱い組積造建物を
経済的に耐震補強する簡便な工法の公開実証実験

- 9万人もの犠牲者を生んだ原因は何か? またそれを解決する方法は? -
コロンプスの卵: 世界を救う「荷造り組耐震補強法」

2. 内容:

2005年10月の8日に発生したパキスタン地震による犠牲者は9万人に及んでいる。主たる原因は、「組積造: そせきぞう」と呼ばれる建物の崩壊であり、救命・救助活動の問題で亡くなっているのではない。レンガや日干しレンガ(焼成していないレンガで、一般的にはアドベと呼ばれる)石やコンクリートブロックを積み上げてつくられる組積造建物は、地震に対して最も弱い建物の代表であるにもかかわらず、現在も世界の人口の6割以上の人々がこれに住んでいる。またその分布が地震の頻発する地域と重複するために、地震の度に多数の死傷者を出し続けている。

世界規模で地震被害を軽減するには、組積造の問題解決(耐震性向上)は不可欠である。またこの種の建物(non-engineered structureと呼ばれる)は、住民が現地で購入できる材料を用いて自分で建てる場合も多いので、「耐震基準を整備すれば問題は解決する」という類のものではない。これまでに数多くの途上国の地震被害調査を行い、組積造建物の耐震性を向上させることの重要性を痛感している目黒は、対象地域で実際に普及可能な工法の開発を、「local availability(対象地域での対応可能性)」、「local availability(対象地域での適用可能性)」、「local acceptability(対象地域での許容性)」をキーワードに進めてきた。今回公開する実証実験は、地震被害を受け続けている途上国の組積造建物を対象として、目黒らが開発を進めてきた新しい耐震補強法(耐震性の著しく低い組積造建物の耐震性を簡便な方法で経済的に向上させる技術)の効果を確認する実験である。

組積造建物が地震に対して脆弱な理由は、粘土や低品質のモルタルなどを目地材とする組積壁の引っ張り抵抗力が著しく低いために、壁が一体として挙動して地震の揺れに抵抗できず、すぐにばらばらになってしまうためである。壁が一体となって挙動できるようにすれば、組積造建物の耐震性は大幅に高まると考えられる。今回実証実験を行う工法は、まさにこれを実現することを目指したものであり、世界中で広く入手できる安い材料で、特別の技術がなくとも実施できるものとして開発した。

3. 担当: 目黒 公郎 教授 (東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター)

4. 場所: 東急建設・技術研究所(〒229-1124 相模原市田名字曾根下3062-1)

電話 0427(63)9511(代表) FAX 0427(63)9502、地図は<http://const.tokyu.com/lab/>

5. 時間: 平成17年12月15日

13:00~13:30: これまでの研究と実験の解説(終了後移動)

14:00~ : 公開実証実験

実験終了後(30分程度): 実証実験の解説

(実験は午前10時より開始するが、小さな地震動から始めるので、午前中の実験では破壊しない見込み)

経済的で簡便な組積造構造物の効果的耐震補強法の実証実験 実大建物モデルを用いた振動台破壊実験

東京大学生産技術研究所 教授 目黒 公郎

はじめに

世界には、「組積造：そせきぞう」と呼ばれるレンガや日干しレンガ（焼成していないレンガで、一般的にはアドベと呼ばれる）石やコンクリートブロックを積み上げて作られた建物に住んでいる人が多く、その比率は全人口の6割を超える。特に途上国でこの比率が高い。粘土や低品質のモルタルなどを目地材とする組積壁は引っ張り抵抗が著しく低く、地震に対して最も弱い建物の代表である。しかも、この手の建物の分布（中東・中近東、中央アジアや中南米など）と地震の頻発する地域の分布が重複するために、地震の度に多数の犠牲者を生んでいる。

これまでの世界各地での地震被害調査から、組積造による建物は地震動に対して短時間（～数秒）のうちに崩壊し、多数の人的被害の主要因となってきたことがわかっている。近年に発生したパキスタン北部地震（2005年、M7.7、死者・行方不明者数9万人超）、イラン・バム地震（2003年、M6.5、死者・行方不明者数5万人超）、インド・グジャラート地震（2001年、M8.0、死者・行方不明者数2万人超）などの地震被害も例外ではない。強い地震動による壁の崩壊と、それによる屋根や天井の崩落、並びに崩落時に巻き上がった粉塵による窒息が多数の人命を奪う主要因となった。

同様な建築様式を有する世界各地の将来の地震による建物被害を軽減するためには、既存の組積造の耐震性を如何に改善、向上させるかを早期に検討し具体的な対策法を提案することが重要である。またパキスタン北部地震の被災地を考えれば、耐震性に配慮した建物による早期の復旧・復興を考えなくてはいけない。組積造を対象とした耐震技術の提案に際しては、そこに住んでいる人々の多くが貧困層である点も考慮する必要がある。これまでも多種多様な耐震技術の開発が行われてきたが、これらは基本的には先進国受けの技術であり、途上国の貧困層を対象としたものではない。ゆえに途上国にとってローカル・アベイラブルな対策になっていない。対象地域で安価に入手できる材料を用いた、対応可能な技術による対策になっているか、また文化や宗教などを含めて、生活スタイル上受け入れてもらえるものであるかどうかの視点が重要である。

地震で壊滅的に被害を繰り返し受けてきた途上国を対象に、「今後、同様な被害を阻止するには、日本で使っている建設材料と技術でまちを再建すればよい」と言ったところで何ら問題解決にはならない。本提案手法は、地震防災の先進国である日本がこれまでに蓄積してきた膨大な地震被害調査結果に基づき、現在の世界各地の人々の住居環境や構造物特性を考慮した上で、人的被害と建物被害を短期間で効果的に軽減することが期待できる研究である。

研究概要

本研究は、上で述べたような地震被害の現状と「local availability」、「local availability」、「local acceptability」を踏まえ、私がこれまでに開発を進めてきた簡便で経済的にもかわらず、非常に高性能な耐震補強法の効果を実証するために、実大スケールの組積造建物を用いた振動台破壊実験を行うものである。私が開発を進めてきた組積造建物を対象とした耐震補強法とは、世界中で容易に入手できる安価な材料「荷造りひも：ポリプロピレン高分子樹脂繊維(PPバンド)」を用いて、新築と既存の組積造の耐震補強を簡単に実施できる工法

である。具体的にはPPバンドのメッシュで、組積造建物の壁を両側から挟みこみ、壁を通した連結材で両面のメッシュを結び、組積壁が一体として挙動する工夫を施すことで倒壊を防ぐ。本手法は、地震によって発生する壁のクラックを防ぐことを目的としているのではなく、壁内のレンガやアドベが面外に崩落する現象を阻止することで建物の変形能とエネルギー吸収能を高め、建物の崩壊を防ぎ、住民が亡くなったり怪我したりする状況を阻止するものである。

途上国から輸入した低品質のレンガと、国内で製造したアドベを用いた4軒の実大の組積造建物（レンガとアドベ各2軒、それぞれ非補強と補強、下の写真参照）を用いた振動台実験により、提案手法の効果を実証する。振動台への入力地震動としては、1990年6月に発生したイラン・マンジル地震（M7.7、死者3.5万人）の際に被災地中心にほど近い観測地で記録された地震動（3次元、最大加速度約560Gal）を用いる。



実大スケール組積造建物モデル

なお、本研究で扱うような低層の組積造構造物の耐震補強の研究は非常に珍しい。世界的に見て組積造建物の耐震性の問題が、犠牲者の軽減の観点からは最重要課題であることが地震工学の専門家の間では共通の認識であるにもかかわらず、従来ほとんど手をつけられてこなかった。さらに本研究のように、地震工学の先進国の研究者が途上国の組積造構造物の耐震補強対策の研究に本格的に取り組む例はほとんどない。

これらの構造物が存在しない国ではある意味当然としても、耐震性の低い数多くの組積造建物を有している国や地域の研究者においても全く同様である。例えば、トルコやイラン、インドなどは地震工学の世界ではかなり高い学問レベルを有する国であるが、これらの国の研究者の多くは、日本や米国の研究者と同じような研究スタイルと研究テーマの研究を進めている。彼らの研究対象は、超高層ビルや長大橋梁の地震挙動や複雑な地震動解析などであるが、その足下では多数の組積造構造物の地震被害によって多くの犠牲者が繰り返し発生している（日本でも既存不適格木造建物の問題は同様であるが）。この背景には、大学の研究者が組積造の耐震性の研究をしても、一般的に研究論文になりにくいし、研究業績として評価されないためである。また企業の研究者においては、組積造構造物の研究が営利に結びつかないからである。

その意味では、本研究がこれまでに、文部省科学技術研究補助費、国際建設技術協会他の支援を受け、今回JBICの支援で実大振動台実験が実現したことは大変すばらしく、感謝の意を表したい。またこの実験の実現に向けてご努力いただいた東急建設(株)、ナイス株式会社、積水樹脂(株)、共同実施体であるOYOインターナショナル(株)の各社にも深く感謝するしだいである。