

2005年パキスタン地震被害の特徴と課題

目黒公郎¹Kimiro MEGURO¹¹ 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

2005年10月8日、朝8時50分(現地時間)に、パキスタン・イスラム共和国北部を震源とするMw7.6の地震が発生した。パキスタンとインドの両国に広がった被災地では、10万人以上とも言われる死者と300万人もの被災者が出た。これだけ多くの死傷者が発生した最大の原因は、ノン・エンジニアード構造物と言われる、耐震基準などとは無関係に、一般の人々が現地で入手可能な材料を使って、自分たちで造って住んでいる耐震性の低い小規模な建物の被害によるものである。本報では、この地震による被害の概要とその主な原因について解説するとともに、被災地の復旧・復興や、同様の建物に多くの人々が住んでいる世界各地の地震防災対策を講じる上でキーとなる考え方と制度や技術について紹介する。

1. はじめに

2005年10月8日、朝8時50分(現地時間)に、パキスタン・イスラム共和国(以下パキスタン)北部を震源とするMw7.6の地震が発生した。図1に示すように、この地震による被災地は、パキスタンとインドの両国に広がり、10万人以上とも言われる死者と300万人もの被災者を生んだ。

パキスタンの首都イスラマバード市内にあった鉄筋コンクリート(RC)11建のマンションビル(マルガラタワー)が倒壊し、そこに住んでいた邦人2名が亡くなったこともあり、わが国ではこれが大きく取り上げられた。しかしイスラマバード市内での被害は局所的で、このマルガラタワーの倒壊被害以外にはほとんど大きなものはない。この地震による被災地は、より震源に近いイスラマバードより北の山間地域である。そして犠牲者の大多数は、この地域に数多く存在していたノン・エンジニアード(以下ではNon-E)構造物と言われる小規模な建物の崩壊被害で発生している。これらは耐震基準とは無関係に、一般の人々が現地で入手できる材料を使い、自分たちで建てて住んでいるものであり、これが15万棟以上崩壊した。その多くは組積造建物と呼ばれるレンガやアドベ(日干しレンガ)、石やブロックなどを積み上げた構造で、地震の揺れに対して最も弱い構造タイプである。現在でも世界の人口の約6割が組積造の建物に住み、地震の建物被害による犠牲者の7割以上がこの建物の被害によって生じている。

組積造建物の地震被害による死傷者率が他の構造タイプに比べて著しく高くなるのは、以下のような理由による。組積造の壁は引っ張り抵抗が極端に低いために、脆性的に崩壊し、避難が難しい。隙間なくつぶれるので生存空間ができていないことに加え、崩壊過程で大量の土ぼこりを発生するために、生存者がいても呼吸ができない。

地震のたびに繰り返される組積造建物の崩壊被害を減らさない限り、世界規模での地震被害の軽減は実現しない。しかし言うまでもないが、これらの問題は、先端技

術と先端材料を駆使した防災対策では解決できない。本報では、世界の地震防災上の最重要課題である組積造建物の耐震性を向上させる環境を整備するために、典型例としてのパキスタン地震による被害の概要と主な原因について解説するとともに、被災地の復旧・復興や今後の地震防災対策を講じる上でキーとなる考え方、そして技術や制度について紹介する。



図1 カシ米尔地震の被災地域
(UN OCHA ReliefWeb)

2. 被災地のNon-E建物の特徴

被災地内の Non-E 建物は、使われている材料や構造タイプから下記のように分類できる。

- a1) 低品質 RC 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組積壁構造
- 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)の組積造

- a3) アドベ(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

また、地震被害を議論するうえで重要になる屋根の形態は、a1) では低品質 RC のスラブ屋根がほとんどであり、a2) ~ a5) では以下の 2 つに分類される。1 つ目は、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 1 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)で葺くものであり、これは組積壁の上端の変位を拘束するし重量も軽いので、地震工学的には有利な屋根といえる。

3. Non-E 建物の被災形態

多くの死傷者を出した Non-E 構造の建物の被災形態は、以下のように分類できる。

- b1) 屋根が平面的に地面につくまで完全に崩壊しているもの(上空から見ると、RC スラブや木製フレーム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(b1の少し程度の軽いもの)
- b3) 組積造の壁と壁のつなぎ目に大亀裂が発生して、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

4. Non-E 建物の被災メカニズムと主な原因

ここでは、前章で説明した各種の被災形態が、どのようなメカニズムで生じているかをまず簡単に解説し、次にその主な理由について述べる(図 2)。

以下の c1) ~ c5) は、b1) ~ b5) の被災形態に対応する被災メカニズムの概要である。

- c1) RC フレームの柱と梁の連結部の強度不足によるフレーム自体の崩壊や、組積壁の面外方向へ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(c1の少し程度の軽いもの)
- 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

上記のようなメカニズムで被災した主な原因を、b5) と c5) のケースとそれ以外に分けて説明する。

b5) と c5) のケースを除いた場合の被害の発生する主因

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。

一方、b5) と c5) のケースでは、建物が斜面や崖(河岸段丘)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。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と考えられる。対処法としては、事前のアセスメントに基づいた土地利用規制が重要で、具体的には、建物の建設制限で対処することである。ただし今回の被災地では、建物の強度自体は十分高く、地盤の問題だけが被害の主因と考えられるものは非常に少なかった。



(a) 山の頂まで広がる住家



(b) ノン・エンジニアード建物の被災例(a1,b1,c1タイプ)



(c) ノン・エンジニアード建物の被災例(a2,b1,c1タイプ)

図 2 ノン・エンジニアード(Non-E)構造の被害例



図3 PPバンド補強法の手順

表1 縮小モデルを用いた振動台実験の結果(補強モデル)

Acceleration (g)	Frequency (Hz)							
	2	5	10	15	20	25	30	35
1.4	-	LS	LS	LS	-	-	-	-
1.2	-	LS	LS	LS	LS	-	-	-
1.0	CP	LS	LS	LS	LS	-	-	-
0.8	LS	LS	LS	IO	IO	IO	IO	IO
0.6	LS	LS	IO	IO	IO	IO	IO	IO
0.4	LS	LS	IO	IO	IO	IO	IO	IO
0.2	IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO
0.1	IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO
0.05	IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO	IO

Index:	JMA-4	JMA-5-	JMA-5+	JMA-6-	JMA-6+	JMA-7
--------	-------	--------	--------	--------	--------	-------

IO: Immediate Occupancy.	PC: Partial Collapse.
LS: Life Safety.	TC: Total Collapse.
CP: Collapse Prevention.	

5. 繰り返される途上国の組積造建物の地震被害を軽減するために¹⁾

地震防災上の最も効果的な対策は建物の耐震性を向上させることであるが、これを実現するには4つのポイントがある。

1つ目は社会を構成するそれぞれの立場の人々(政治家、行政、エンジニア、専門家、マスコミ、一般市民)の災害イメージング能力を高めること。人間はイメージできない状況に対しての適切な準備や対策は絶対にできない。災害イメージング能力が低いと、耐震化の推進がいかに重要であるかが真に理解できない。

2つ目は適切な耐震基準を持つこと。ここで言う「適切な」とは「先進的な」とか「洗練された」などの意味ではなく、現地に対応しなくてはいけない人々が「実際に問題なく使うことのできる、守ることのできるレベル」の基準であるという意味だ。

3つ目は2つ目で指摘した「適切な」基準を準拠してもらうための環境整備、すなわち設計・施工管理の体制や制度、エンジニアの教育・再教育、質のいい労働力の確保といった問題である。2つ目と3つ目は主に新築物件に対して大きな影響があるが、これだけでは十分ではない。既存の建物に対しての配慮が足りない。

最後の4つ目は、既存の建物の耐震性を向上させる環境整備であり、具体的には適切な診断法と補強法の提案、耐震補強を推進する制度の制定である。

技術者は技術的な問題だけに取り組み、それが解決さ

れば、最終的な目的が達成されると思いがちだが、技術的な課題の解決だけでは最終目的が達成されない場合も多い。またその技術も対象国や地域の特性を十分踏まえたものでないと機能しない。ローカルアベイラビリティ、アプリカビリティ、アクセプタビリティの視点が不可欠である。

以上のような点を踏まえて、耐震補強の推進策を考えると、「技術的な側面」と「社会的な側面」からのアプローチや議論が重要であることがわかる。「技術的な側面」としては、まず耐震補強工法が現地の技術レベルで対応できるものであること、そして用いる材料が現地入手可能なことが挙げられる。「社会的な側面」からは、現地の経済状況を考慮して価格的に問題がないこと、宗教や文化、歴史や伝統などを踏まえた上で、現地の人々に許容してもらえるものであること、そして対象国や地域で受け入れ可能な耐震補強を奨励する制度やシステムの整備が必要である。

6. 著者提案の耐震補強法と制度^{2),3)}

(1) PP-バンドメッシュを用いた耐震補強法

前章で説明したような視点に立ち、著者らのグループでは、世界中どこでも入手可能な非常に安価な材料と、簡単で難しくない技術で、新築と既存の組積造建物の耐震性を大幅に高める補強法を対案している。この工法は、組積造壁の両側をポリプロピレン製の荷造り紐(通常、PPバンドと呼ぶ)を用いたメッシュで挟み込み、目地に空けた穴から両側のメッシュを連結する方法である(図3)。

この提案手法を用いて耐震補強すると、組積壁は強度と変形能の両方で大幅に性能が向上する。簡単な壁モデルを用いた面内・面外方向の載荷試験や、振動台を用いた縮小モデル(表1)と実大モデルの実験結果から、提案手法の驚くべき効果が証明された。本手法は、クラックの発生自体を防ぐものではなく、クラックが発生しても持ちこたえ、家の住人が怪我したり亡くなったりする状況を無くすこと、最悪でも、住人に避難するだけの時間を提供することを目的にしている。

大幅に耐震性が向上した大きな理由は、ほとんど引張り抵抗がなく脆性的に破壊する組積壁が、提案手法によって大きな変形能を持つためである。簡単な壁モデルを用いた面内・面外方向の載荷試験の結果からは、補強によって、変形能が40~50倍以上向上することがわかった。実験では、クラックの発生や進展を追跡する必要性から、PPバンドメッシュを施工した後は、壁の両面には何も塗っていないので、構造物サイドから見れば実験条件はより厳しいものになっている。しかし実際の現地での施工時には、生活スタイルを変化させない意味でも、壁の表面に泥やセメントモルタルを用いてPPバンド付の組積壁を被覆する。この被覆が、PPバンドの欠点であるが紫外線による材料特性の劣化を完全に防いでくれる(被覆厚さ3mm以上で紫外線の透過率は0%)ことを確認している。また温度変化による強度変化に関する実験も行い、設計上全く問題ないことも確認している。ちなみに、-20~50の範囲での強度の変化はせいぜい15%程度であるが、強度が最小になる温度帯であっても、実際にPPバンドに作用する応力の3倍以上の強度は有している。

組積造を対象とした補強法のほとんどが、新築時のみ適用可能な方法であるのに対し、提案手法は既存にも新築にも問題なく適用できる。また被災地で大きな問題となっている瓦礫処理の問題も解決できる。すなわち、提案手法を用いて、被災家屋から排出されたレンガや石、ブロック、泥をそのまま再利用して、住家をつくれば、瓦礫処理が進み、また材料のコストが大幅に安くなる。

(2) 耐震補強を推進する制度の提案

上で説明した PP バンド耐震補強法のモットーは「100ドル耐震補強」であり、家 1 軒の耐震補強を 100 ドル程度の価格で実現するものである。ちなみに 7 章で紹介するパキスタンの被災地の典型的な住家(図 4 の右側)では、1 棟の補強に必要な材料費は 30US ドル程度であった。将来的に家の持ち主が自分で施工できるようになれば、耐震補強に必要な費用はこれだけになるわけだが、それでも地域によっては個人負担が難しい人々は少なくない。そこで著者は、提案工法のパンフレットやガイドラインの作成に加えて、技術指導のコースの設立や、家の所有者にインセンティブを与え耐震補強を促進する制度を技術とセットで提案している。その制度は、提案手法による耐震補強の実施者に、必要な材料費の補填や将来の地震時に被災した場合の支援保障を行う制度である。

7. 被災地でのデモンストレーション活動

今回の地震で最も甚大な被害を受けた被災地ムザファラバードで、著者らは提案する耐震補強法を用いた実大構造物の耐震補強工事のデモンストレーションと、縮小モデルによる公開実験を行った(図 4)。地域のディスジョンメイカー、エンジニア、マスコミ、国内外からの NPO や NGO 関係者、一般市民を招いて、まず著者がわが国の内外の地震被害の特徴を解説するとともに、提案手法の特徴やその効果を過去の実験やコンピュータシミュレーションの結果を示しながら説明した。説明に際しては、最近では国際的にも有名になってきたネパールの地震防災の NPO である NSET (National Society for Earthquake Technology- Nepal, ちなみに著者はこの組織の立ち上げに世界地震安全推進機構 WSSI のメンバーとして、片山恒雄博士と共に関わった)の事務局長である Amad Dixit 氏に私の英語のプレゼンテーションを現地語に訳して伝えてもらい、理解に努めた。

