

寄稿
報告

2005年パキスタン北部地震による一般住宅の被害と簡便で低価格な耐震補強法の提案

目黒 公郎*

Damage to non-engineered structures due to the 2005 Northern Pakistan Earthquake and development of low cost and feasible retrofit method for masonry structures

Kimiro MEGURO *

Abstract

At 8:50 AM (local time) on October 8th, a Mw 7.6 earthquake occurred in the Northern part of Pakistan and induced terrible damage in the Kashmir region, located in border between Pakistan and India. Due to the earthquake, about 100 thousand people were killed and over 3 million people were affected. The major cause of this huge casualty was collapsed and severely damaged non-engineered structures, majority of which were masonry houses. These non-engineered houses were constructed by the local people using local materials without following structural design code. Without strengthening these weak houses, we cannot reduce victims due to future earthquakes. In the paper, major types of damage to non-engineered houses and their failure mechanism are discussed. Also, key issues, for appropriate recovery/reconstruction and implementation of countermeasures from both technological and social viewpoints are introduced.

キーワード：2005年パキスタン北部地震，組積造，ノン・エンジニアード構造物，耐震補強，人的被害

Key words：2005 Northern Pakistan Earthquake, masonry, non-engineered structure, seismic retrofit, human casualty

* 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
International Center for Urban Safety Engineering, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

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焼成レンガやアドベ（日干しレンガ：天日干しただけで焼成し

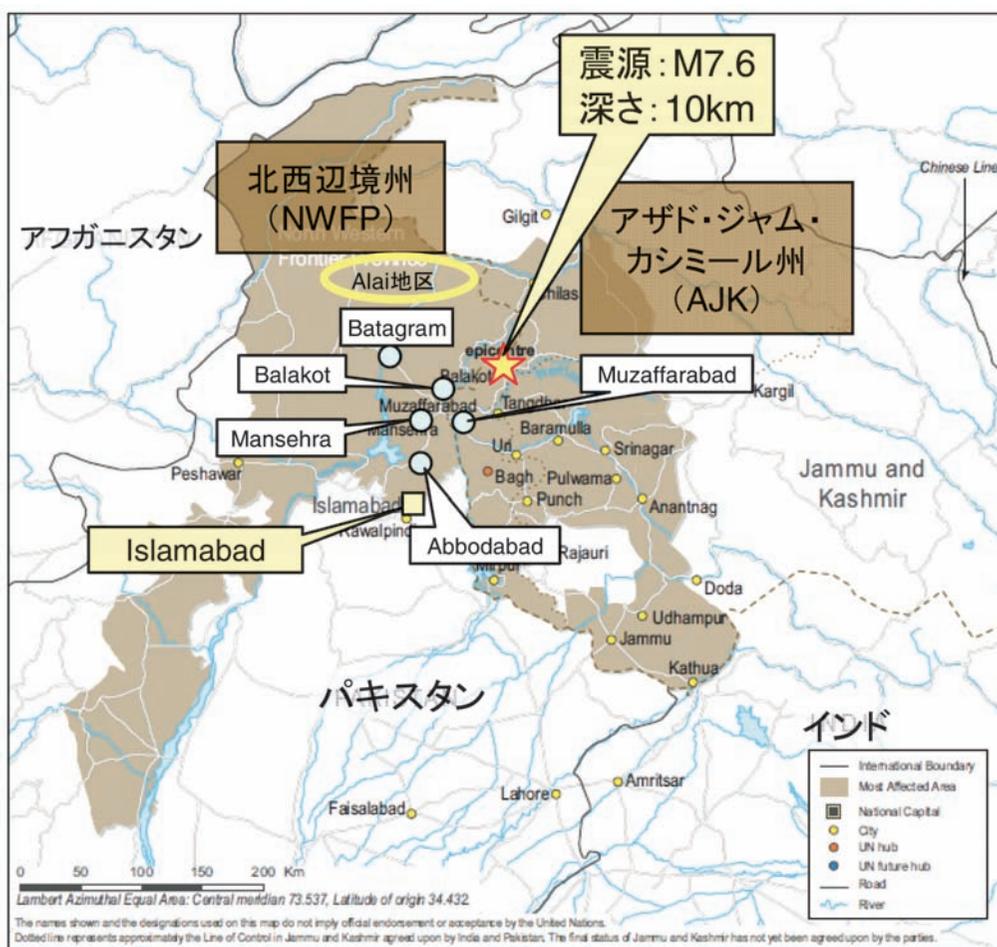


図1 カシ米尔地震の被災地域
(UN OCHA ReliefWeb)

ていない粘土ブロック)、石やコンクリート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物タイプである。組積造には次章で説明するものも含め、用いる組積材料の差や構造形式の違いから様々なタイプのものがあるが、現在でも世界の人口の約6割がこの種の建物に住んでいる。さらに、図2¹⁾に示すように、その分布が地震の多発地域に重なるので、地震の度に多くの組積造建物が壊れ、多くの人々が犠牲になっている(図3²⁾)。

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にくいことに加え、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北部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

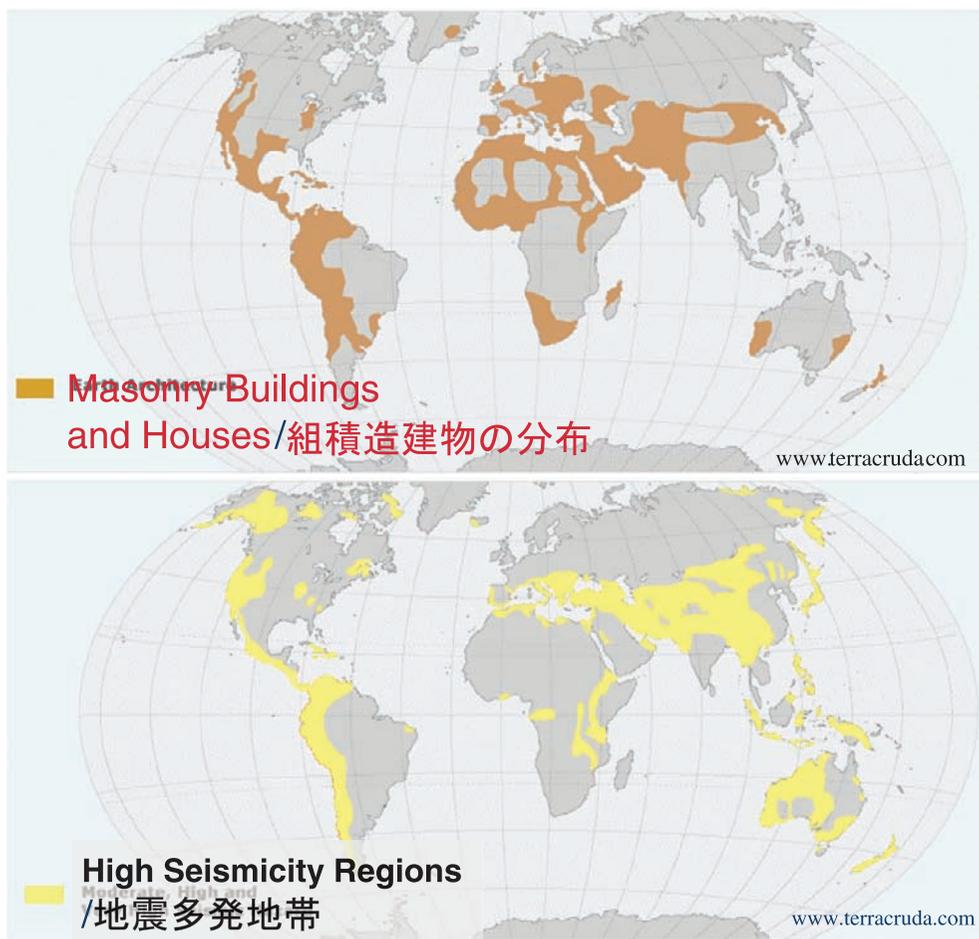


図2 世界における組積造建物(上段)と地震多発地域(下段)の分布

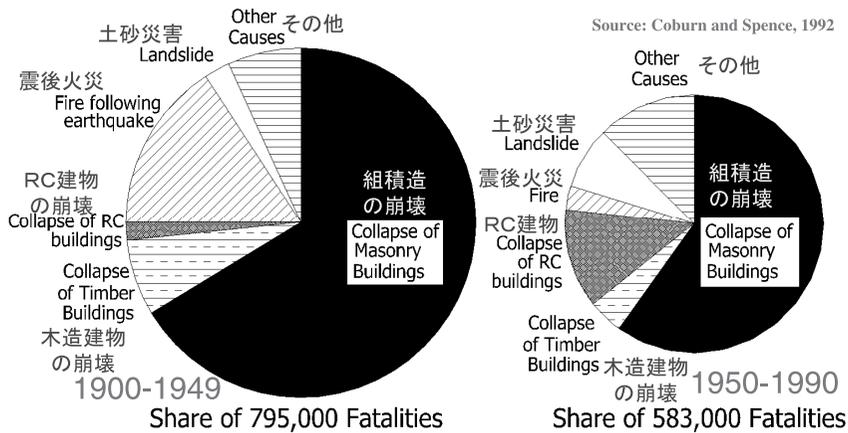


図3 1990年から1990年までの世界の地震による死者の原因²⁾
(左図：1900年～1949年，右図：1950年～1990年)

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。またそのようなキーポイントを踏まえて著者が取り組んできた活動についても紹介する。

2. 被災地の Non-E 建物の特徴

パキスタン北部地震の被災地内の Non-E 建物は，使われている材料や構造タイプから，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，の 6 通り程度に分類できる。

また地震被害を議論する上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る。a2)～a5) の屋根は 2 種類に分類できるが，一方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，最終的に厚さ 20～50cm の屋根とするもの，もう一方は，木製のフレームの上を金属板（波トタン）で葺くものである。後者は組積造の上端の変位を拘束するし軽量なので，地震工学的には前

者に比べて各段に有利である。

3. Non-E 建物の被災形態とメカニズム

多くの死傷者を出した Non-E 建物の被災形態とそのメカニズム（図 4）の概要は以下のとおりである。

- b1) RC フレームそのもの（柱，柱と梁の連結部）の強度不足によるフレームの崩壊が誘発した被害で，屋根が平面的に地面につくまでの完全崩壊に至る例も多い。
- b2) RC フレームと組積壁の連結部の強度不足によって発生した大亀裂が組積壁の面外方向の崩壊挙動を誘発した被害で，片側の壁が壊れて屋根が外れて落下している被害などが多い。
- b3) 組積造の壁と壁の連結力の弱さを原因として発生した組積壁自体の被害。壁と壁の連結部に大きな亀裂が発生し，一方あるいは両方の壁が倒れたり，一部分が欠損しているもの。
- b4) 組積壁と基礎部分の連結力の弱さを原因として発生した壁下端の大破損による全体崩壊。
- b5) 周辺地盤や立地地盤の崩壊や変状を原因として発生した建物被害。

上記のようなメカニズムで被災した主な原因を，b5) のケースとそれ以外に分けて簡単に説明する。b5) のケースを除いた被害の主因は，組積



(a) 山の頂まで広がる住家



(b) Non-E建物の被災例(a1,b1タイプ)



(c) Non-E建物の被災例(a2,b1タイプ)

図4 ノン・エンジニアード(Non-E)構造の被害例

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。すなわち壁の構成部材(ブロックやレンガ、アドベや石)が簡単に面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ポイントである。

一方 b5) のケースでは、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。このような立地条件では、地震動自体が地形効果で増幅されている場合が多い。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、建物の建設制限による対処である。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。

4. 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³⁾

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、著者はこれを実現するには4つのポイントがあると考えている。

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)の災害イメージネーション能力を高めること。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。災害イメージネーション能力が低いと、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。ここでの「適切」とは、「先端的」とか「洗練された」などの意味ではなく、現地で実際に対応しなくてはならない人々が「問題なく使うことのできる、守ることのできる」レベルの基準という意味である。

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つ目は主に新築建物に対して大きな効果を持つが、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る。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、一般の人々に耐震補強の重要性やその効果をわかりやすく説明し、理解してもらう環境の整備である。特に4番目の課題に関しては、問題の大

きい Non-E 建物に関する配慮が重要である。

上で説明した4つのポイントを解決していく上で、技術者の役割は大きい。しかし技術者が技術的な問題だけに取り組み、それが解決されれば、最終的な目的が達成されると思うのは間違いだ。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で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え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。

5. 著者提案の耐震補強法と推進制度⁴⁻⁶⁾

(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で非常に安価な材料と簡単な技術で、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5）。

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（図6と図7）⁴⁾や、振動台を用いた縮小モデル（表1）⁵⁾と実大モデル⁶⁾の実験結果から、提案手

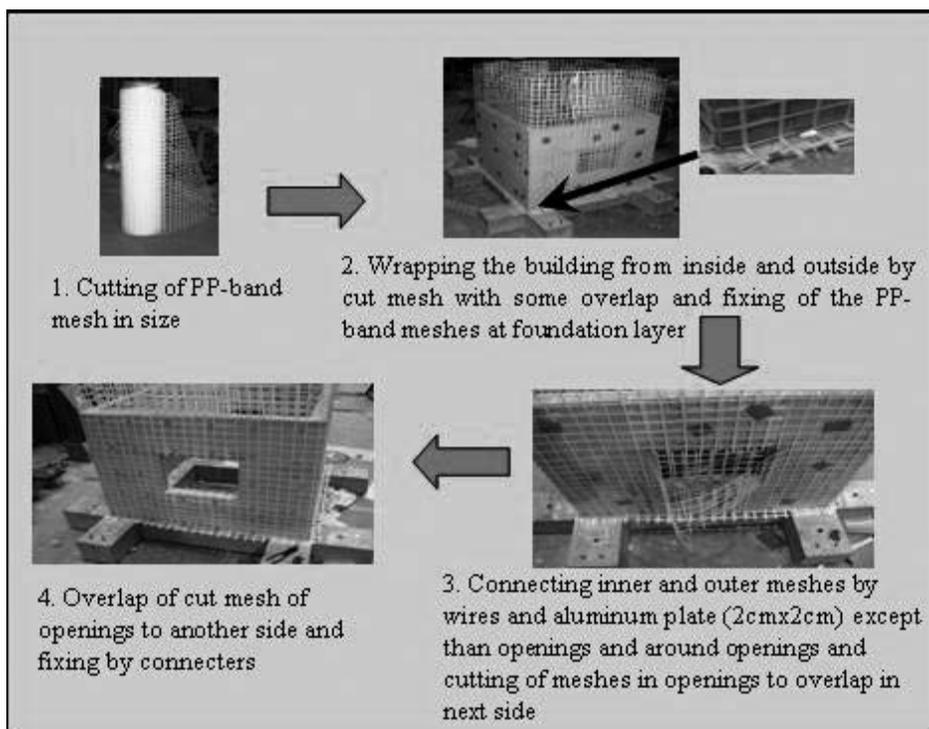


図5 PPバンド補強法の手順

法の驚くべき効果が証明された。表1に示すように、1/4スケールの縮小モデルを用いた振動台実験では、補強済供試体には重力加速度を超える12回の振動外力を含め、60回を超える振動外力を載荷しての破壊実験を行ったが、表2に示すように崩壊することはなかった⁴⁾。

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、家の住人が怪我をしたり亡くなったりする状況を防ぐこと、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、ほとんど引っ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ったためである。簡単な壁モデルを用いた面内・面外方向の載荷試験(図6)の結果からは、補強によって、強度は数倍、変形能は40~50倍以上向上することがわかった(図7)⁵⁾。

実際の施工時には、生活スタイルを変化させない意味と、PPバンドの欠点である紫外線による材料特性の劣化を防ぐ意味から、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。しかし耐震性能を評価する実験では、クラックの発生や進展を追跡する必要性から被覆はしないので、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。

紫外線防止の被覆の効果に関しては、著者らの紫外線暴露実験から、泥でもセメントでも被覆厚さ3mm以上で透過率が0%になる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最大15%程度あるが、強度が最小になる温度帯であっても、実際にPPバンドに作用する最大応力の3倍以上の強度を有している。

提案手法は、組積造を対象とした従来のほとんどの補強法が、新築時にのみ適用可能なものであるのに対し、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、グ

ロック、泥をそのまま再利用して住家をつくれれば、瓦礫処理が進むとともに、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。ちなみに次章で紹介するパキスタンの被災地の典型的な住家(図8)では、1棟の補強に必要な材料費は30USドル程度で、人件費を含めたトータルの経費の増額分は、指導を受けながら初めて実施した今回のケースでも全体の5%程度であった。

一般的に現地では、住民が親戚や近所の協力を得て、自分で家をつくることが多い。ゆえに将来的に補強法が普及すれば、耐震補強に必要な費用はほぼ材料費だけになる。しかしそれでも地域によっては個人負担が困難な場合も少なくない。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(2段階インセンティブ制度)を技術とセットで提案している。こ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+ a の支援(第1インセンティブ)を、将来の地震時に被災した場合の支援保障(第2インセンティブ)を行うものである。こうすることで、将来の被害が大幅に減るとともに、政府のトータルとしての経費の大幅な軽減が実現する。

6. 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、地域のディビジョンメイカー、エンジニア、マスコミ、国内外からのNPOやNGO関係者、一般市民を招いて行った(図9)。これは災害イメージネーション能力の向上と耐震補強の重要性を伝える目的で行ったものだ。

まず著者が世界各地の地震被害の特徴の解説と提

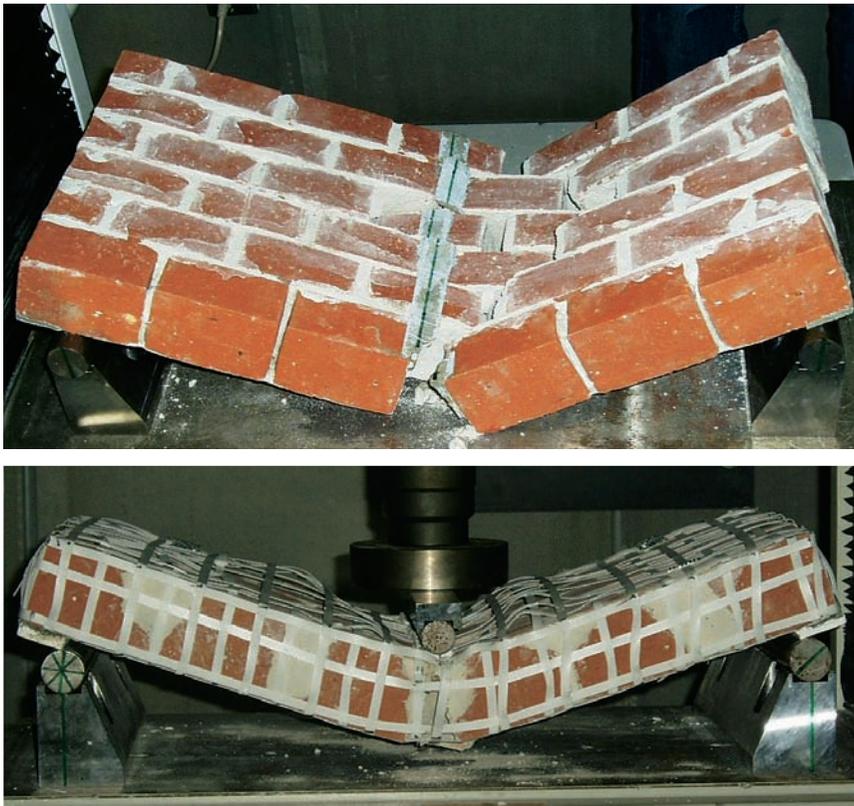


図6 提案手法による補強壁（下段）と非補強壁（上段）の面外曲げ試験の様子

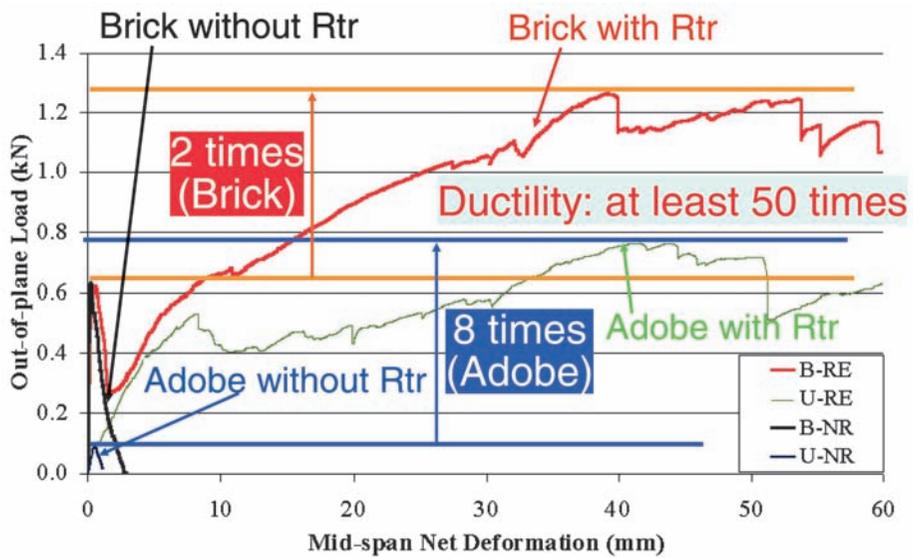


図7 提案手法による補強壁と非補強壁の面外曲げ試験の結果

表1 1/4 縮小モデルを用いた組積造の振動台実験に用いた振動外力

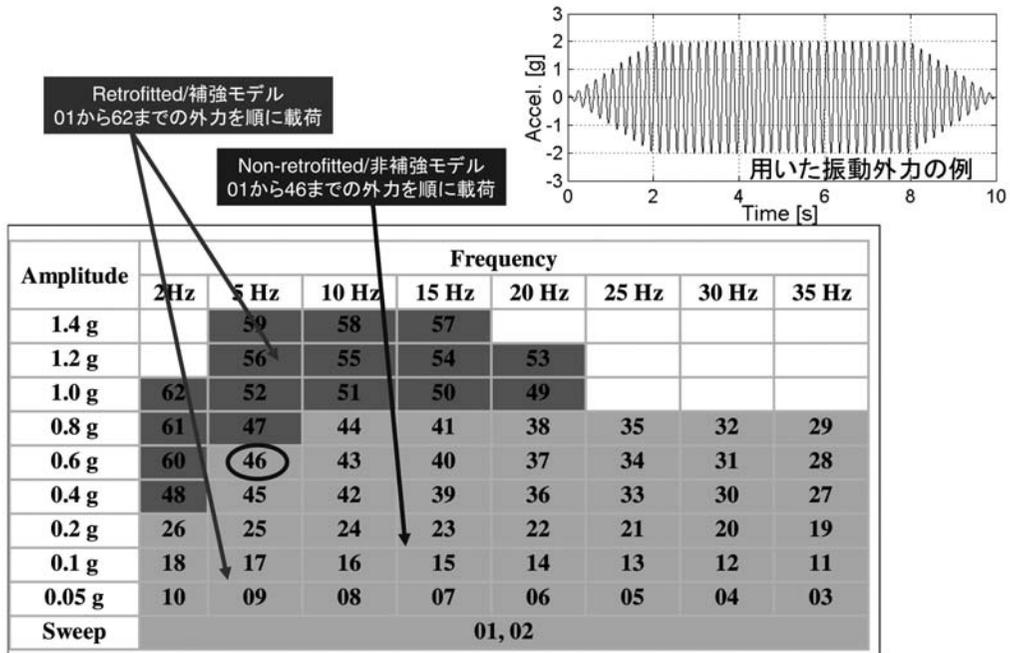


表2 1/4 縮小モデルを用いた組積造の振動台実験の結果 (EMS-98に従った被災度, 左上:耐震補強前, 右下:耐震補強後)

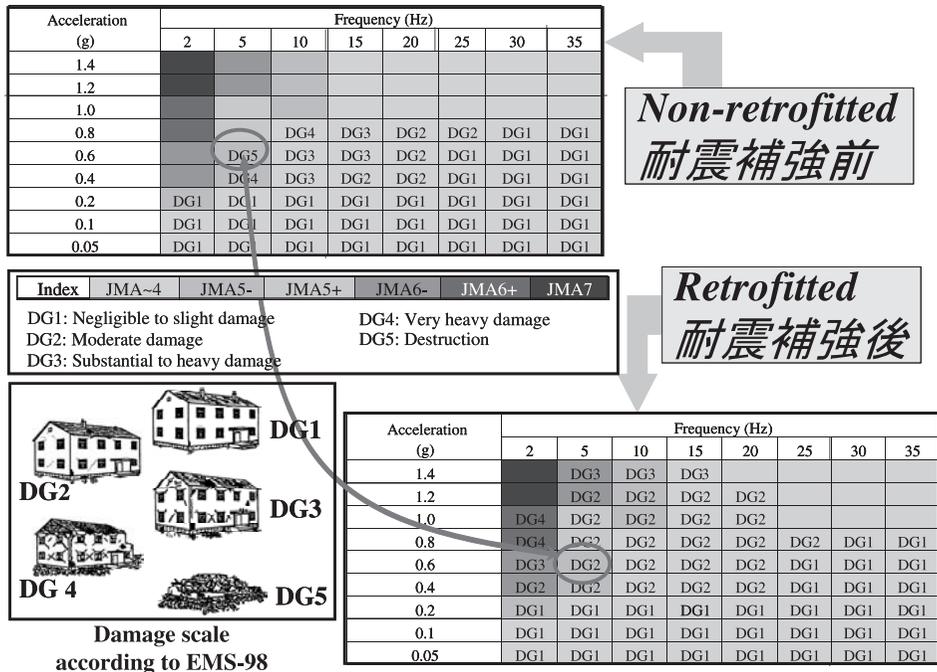




図8 提案手法で補強した実構造物
(上段：建設途中，下段：竣工時の外観)

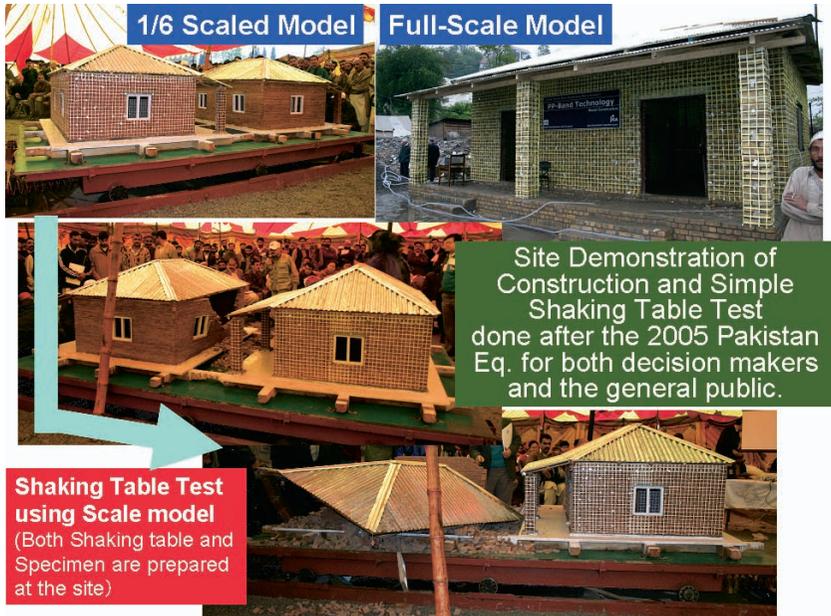


図9 現地での公開振動台実験の様子

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 (当時東大教授) らと共に関わった) の事務局長である Amad Dixit 氏に著者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。

JICA の支援を受けて、被災地の典型的な住宅 1 棟 (壁はレンガ、屋根は木製フレームに波トタン葺き、床面積約 60m²) を建設し、それに提案手法による耐震補強を行った。またこの建物と全く同じ形状の 1/6 スケールの建物模型を 2 棟作成し、一方を相似比を考慮して決めた断面の PP バンドメッシュを用いて補強した。バネの力を起振力として、レール上を振動する簡易振動台 (水平 1 方向振動台) を現地で作成し、この上に耐震補強

済みと非補強の 2 棟の縮小モデルを設置して、振幅を徐々に大きくしていきながら、両者の挙動を比較し、耐震補強の効果を説明した。この振動台実験の実施に当たっては、NSET の協力を得た。提案手法に関する説明や実験は、参加した多くの人々の心を捉えたようで、非常に盛会であった。

7. おわりに

本報では、2005年10月8日の朝8時50分 (現地時間) に、パキスタン北部を震源とする Mw7.6 の地震によって甚大な被害を受けた Non-E 建物被害の概要とその主な原因について解説した。また被災地の復旧・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述べた。さらにパキスタン北部地震の被災地で実施した著者らの提案する耐震補強法を用いた耐震補強工事と、簡易振動台を用いた公開実験について紹介した。

図10に示すように、今回の被災地域は過去に M8.0 の地震に襲われている。今回の M7.6 の地震

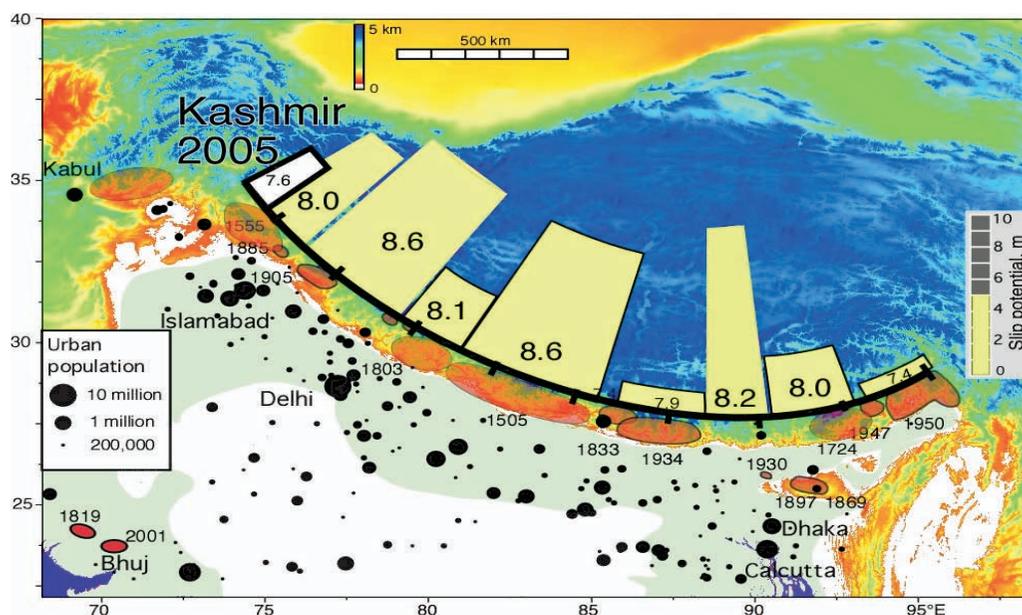


図10 チベット地域の過去の地震履歴と今回の地震の関係 (今回の被災地域では過去に M8.0 の地震が発生している。M7.6 の地震はその 1/4 のエネルギーを解放しただけである。)

はその1/4のエネルギーを解放したに過ぎない。残りのエネルギーはM7.9の地震に相当する。今後このクラスの地震の発生を想定すれば、地域の復旧や復興は、将来の巨大地震を考えたものでなくてはいけない。しかし現地では従来と同様な構造物や施設による復旧・復興活動が展開されている。パキスタン政府による住宅再建支援による住宅も、地震の前と同様な耐震性の低い住宅の再建になっている。すなわち、わが国を含め、諸外国からの支援が、パキスタン政府を介して地震前と同様な構造物の再建に使われている。これはせっかくの支援が将来の地震防災に貢献せず、むしろ将来に今回同様の地震被害を引き起こす原因を作っていることを意味する。本報で紹介したような工法や制度によって、被災地域の建物、特にNon-E建物の耐震性が向上していくことを切に望む次第である。

Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, 10 pages, Thailand, 2006.11.

(投稿受理日：平成18年11月24日)

参考文献

- 1) www.terracruda.com
- 2) Coburn, A. and Spence R., Earthquake Protection, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 1992.
- 3) 目黒公郎：防災研究の国際協力, 学術月報, Vol.56, No.7, pp.61-66, 2003.7.
- 4) Sathiparan, N., Mayorca, P., Nesheli, N., Guragain, R., and Meguro, K.: In-plane and Out-of-plane Behavior of PP-band Retrofitted Masonry Wallettes," Proceedings of the Third International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, pp.231-240, Singapore, 2005.10.
- 5) Meguro, K., Mayorca, P., Sathiparan, N., Guragain, R., and Nesheli, N.: Shaking Table Tests of 1/4 Scaled Masonry Models Retrofitted with PP-band Meshes," Proceedings of the Third International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, pp.9-18, Singapore, 2005.10.
- 6) Nesheli, N., Sathiparan, N., Guragain, R., Mayorca, P., Ito, E., Kagawa, H., Tsugawa, T. and Meguro, K.: Full-Scale Shaking Table Tests on Masonry Buildings Retrofitted by PP-Band Meshes, Proc. of the 5th International