



パキスタン地震被害調査報告

清田隆¹⁾、東畑郁生²⁾、Khalid Farooq³⁾、Obaid Hassan Qureshi⁴⁾

1) 東京大学生産技術研究所、助手

e-mail: kiyota@iis.u-tokyo.ac.jp

2) 東京大学工学部社会基盤学科、教授 工博

e-mail: towhata@geot.t.u-tokyo.ac.jp

3) University of Engineering and Technology, Lahore, Associate Professor

4) 東京大学大学院、修士課程

e-mail: qureshi@iis.u-tokyo.ac.jp

要 約

2005年10月8日現地時間8:28にパキスタン・イスラム共和国（以下パキスタン）北部の山岳地でM7.6の地震が発生した。東京大学土質地盤研究室と東京大学生産技術研究所古関研究室では、パキスタンのUniversity of Engineering and Technology, Lahoreと共に、甚大な被害をもたらした今回の地震の調査を実施するため、10月25日～28日、および11月19日～24日にかけてスタッフを派遣した。主な調査地域は、イスラマバード、アボタバード、バラコット、ムザファラバードである。このうち、震源から約30km以内に位置するバラコットおよびムザファラバード等の都市では、地震動により多くの家屋倒壊が認められ、一部地盤変位に伴う倒壊も認められた。また周辺山岳地では多くの地すべりが発生し、最大約15,000,000m³規模の巨大地すべりも確認された。2006年1月時点において犠牲者は7万5千人を超えている。本報告は、この地震による主な被害形態とその要因をまとめたものである。

キーワード： 地震、被害調査報告、地すべり

1. 地震の概要

2005年10月8日現地時間8:28に発生した地震の震源は、北緯34.493°、東経73.629°に位置し、パキスタン・カシミール地方の首都であるムザファラバードの北東約10kmに位置している（図1）。マグニチュードは7.6と推定されている。本地震による犠牲者の数は、2006年1月時点において7万5,000人とされており、今後も増加する可能性がある。

今回の地震の震源地付近は、図2の断層位置図¹⁾および図3の被災地周辺のプレート概念図³⁾に示すように、インド亜大陸とユーラシア大陸との衝突地点の一部であることが知られている。また、本地震はムザファラバード周辺の北西-南東方向に存在するムザファラバード断層とタンダ断層の活動によるものと考えられている。断層形態は横ズレ逆断層であることが知られており、図2の衛星からの計測によると、ムザファラバード断層の北側上盤において最大約6mの地盤の隆起が確認されている。パキスタンにおける過去の巨大地震は、約35,000人の犠牲者を出した1935年のケッタ地震が知られている。

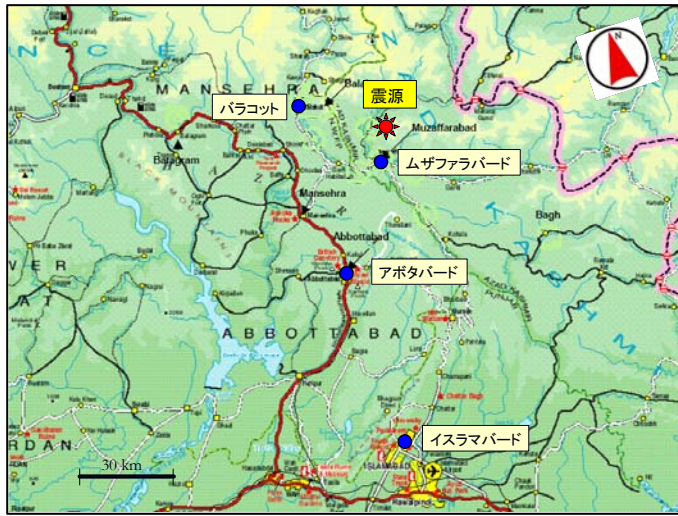


図1 調査位置案内図

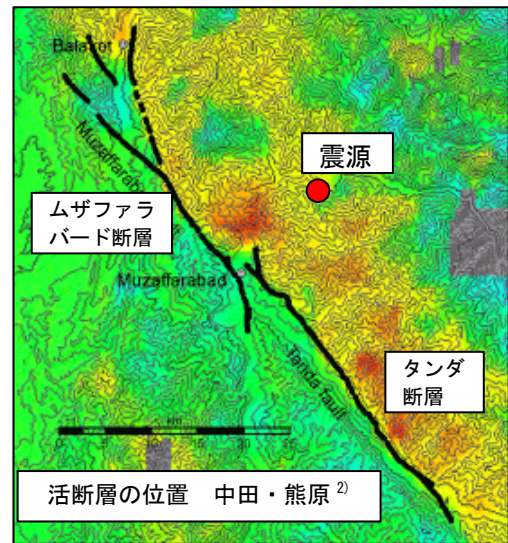


図2 断層位置と地殻変動図(国土地理院¹⁾)に加筆

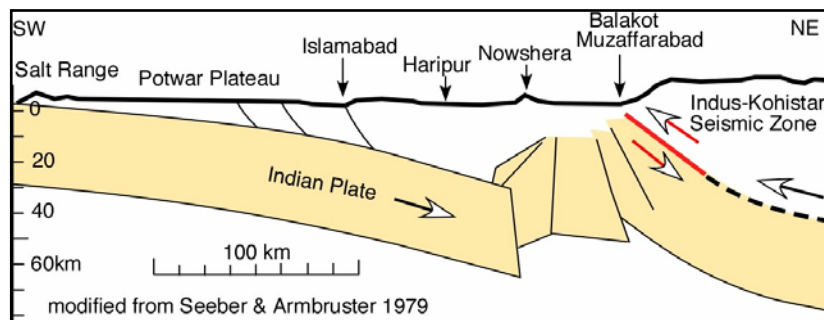


図3 被災地周辺のプレート概念図(コロラド大学による)³⁾

地震動の距離減衰図を図4に示すが、用いた水平加速度データは主にGBHP Brotha発電所(地盤上)およびTarbelaダムサイト(構造体上)で計測された実測値である。バラコットで得られた水平加速度は、今回の地震で転倒した吊橋ケーブルアンカーの断面より算出した推定値である。現時点では詳細な加速度波形は明らかにされていないが、被災した構造物の状態から、南北方向の振動が顕著であったことが伺える。これらの詳細については後述する。

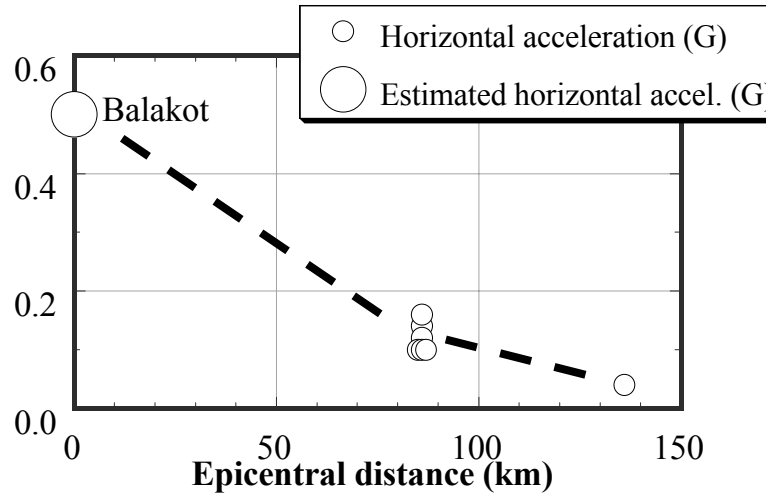


図4 地震動水平加速度距離減衰

以下、主な地域毎に被害の詳細を述べる。

2. イスラマバード

イスラマバードは人口約 80 万人のパキスタンの首都であり、升目状の街路を持つ比較的近代的な都市である。震源からは南に約 100 km 程度離れており、新しい構造物が多いことから被害はほとんど生じていない。また、図 4 における震源地からの距離 (100 km) を考慮しても加速度は 0.1G 程度となっており、比較的小さい。

しかし、ここで述べるマルガラタワーは、イスラマバードで唯一大きな被害を受けた建物であり、また邦人被害者が確認されたことからわが国でも大きく報道された。

マルガラタワーは、1995 年に完成した 12 階建のアパートである。第 1 棟～第 5 棟により構成され、10 月 8 日の地震により第 4 棟が完全に倒壊した。住民は地震後全員退去している。

写真 1 は倒壊した第 4 棟部分を撮影したものである。地震発生直後、第 4 棟は写真 1 の手前方向に倒壊したと報告されている。倒壊した瓦礫は既に撤去されている。

マルガラタワーの被害調査は、主に外観について、および第 1 棟～第 3 棟の地上一階部分にて実施した。写真 2 は第 3 棟部分を、崩壊した第 4 棟側から撮影したものである。完全に倒壊した建物と同一の設計であるにもかかわらず、残った棟は比較的外壁の被害も少なく、窓ガラスの損傷も少ない。写真 3 は第 2 棟内部の壁の損傷である。このような無補強壁の損傷は比較的多く確認された。写真 4 は第 3 棟北西端部基礎 (50 cm×90 cm) の損傷状況であり、せん断亀裂が認められる。

マルガラタワー倒壊の原因はまだ究明されていないが、可能性のある要因として、低品質なコンクリート、鉄筋の施工不良、設計時における荷重の過小評価等が考えられる。また、同程度の高さを有する周辺構造物に被害がほとんど生じていないことから、地層構造等の地盤条件が周辺と異なっていた可能性も考えられる。

更にパキスタン英字紙「The Nation」によると、マルガラタワーについては、地震の 10 ヶ月前に上階への建て増しについて危険性が指摘されながら、対策が取られていなかったと報告されている⁴⁾。タワーの最上階とその下の階が違法に増築されていたほか、建築基準に適合しない建材が使われた部分もあったと報道された。



写真1 崩壊したマルガラタワー第4棟部



写真2 マルガラタワー第3棟部



写真3 無補強壁の崩壊状況



写真4 基礎の損傷

2. アボタバード

震源から南西約 45 km に位置するアボタバードは、人口約 30 万人の中堅都市である。イスラマバードよりも震源に近いため、被災の跡が比較的多く認められる。しかし、倒壊まで至った構造物は多くない。

写真 5 に示すホテルはこの地域によくある構造の建物であり、RC 二階建て、柱径約 30 cm、支間約 3 m である。南北に街を縦貫する幹線道路に面して建てられたこのホテルの北側の地下部分が、地震により層崩壊した。その様子を写真 6 に示す。また、比較的厚いスラブ床版であるにもかかわらず、全体的に壁の少ない構造であり、水平方向の変形に対する抵抗力が低かったものと考えられる。写真 7 はダメージを受けた柱とスラブ接合部の状況であり、大きな曲げモーメントが接合部に生じたといえる。この建物は南北の構造はほとんど同じであったにもかかわらず、北側だけがダメージを受けた。後述のように南北方向に地震動が卓越していたと仮定すると、建物が北側に振れたときに構造物南側との間に境界ができ、そのまま北側地下部のみ層崩壊した可能性も考えられるが、その詳細は明確ではない。

建設途中と思われる写真 8 の構造物は、前述の倒壊したホテルから 1 km 程度北に位置している。地震により、構造物全体が東西方向に歪んでおり、特に 2 階部分において柱の傾きが大きくなっている。また、いずれの柱も中間断面には損傷は認められず、上端および下端部にひずみが集中している。この構造物は 1 階部分のみ壁が設けられていたため、水平方向の変位は 2 階部分に集中したものと考えられる。また、柱のサイズは約 46 cm×約 22 cm で、長手方向は南北となっていた。そのため、柱とスラブの

結合部において曲げ耐力の小さい方向（東西方向）に傾いたものと考えられる。南北方向に地震動が卓越していたと仮定すると、長手方向が逆であった場合、この建物は倒壊していた可能性もある。



写真5 ダメージを受けたホテルの南側(無被害)



写真6 写真5のホテルの北側(地下部崩壊)



写真7 柱と床版接合部の損傷

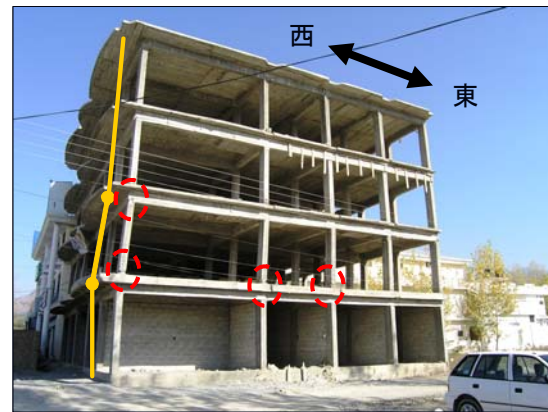


写真8 構造が歪んだ建物

3. バラコット

バラコットは震源から北西約 25 km に位置する、人口 4 万人程度の小さな町である。南方の都市からヒマラヤ方面へ向かう観光客にとって、バラコットはその玄関口に当たり、観光都市としても繁栄していた。しかし、市街地付近を中心にほとんどの住宅は倒壊し、土砂災害も多く発生した。バラコットは今回の地震で最も被害の大きかった街として知られている。

低地部および比較的広範な台地上に位置していたこれまでの都市（イスラマバード・アボタバード）と異なり、バラコット、および後述のムザファラバードは、非常に古い時代の地層により構成される山地と、新旧河川により開析された谷地形、およびそれらを埋める比較的新しい時代の地層など、非常に変化に富んだ地形・地質構成を有している。

この地域は、インドプレートとユーラシアプレートの境界付近に位置し、非常に複雑な地質であることが知られている。また、図5に示す地質図より、バラコットームザファラバード間に分布するムザファラバード断層を境界に南北で異なった地質構成であることが判明しており、更に南から北方向へプレートが移動することに起因する褶曲作用が、地表付近の地層構造に大きな影響を与えている。被災地周辺に分布する地表面付近の地質は、主に石灰岩、頁岩、粘板岩等によって構成され、全体的に走行は北西-南東方向に卓越する傾向にある。なお図5には、今回の調査によって計測した断層周辺地盤の走行と傾斜角も追記してある。赤線の長手方向が地層の走行であり、それに直交する短い線が下りの傾斜方向である。また数字は傾斜角を表している。

なお、バラコットおよび後述のムザファラバードについては、被災対象毎（構造物と斜面崩壊）に詳細を述べる。

3-1 構造物の被害

地震後に撮影されたバラコット市街地の衛星写真を写真9に示す。中央部にはKunhar川が北から南に向かって流れている。写真9の中央部付近の二つの橋は、北側が車用のコンクリート桁橋（バラコット橋）、南側が歩行者用のつり橋であり、いずれも地震によりダメージを受けている。

写真10はバラコット橋の被害状態である。全長約160m、二車線の幅を有するこの橋は、地震動により橋脚の上で橋桁が約1m南方向に水平移動した。また、左岸の橋台には大きな亀裂が入っている。しかし、バラコットより車で北方に向かうためにはこの橋を通過せねばならず、上述のような損傷を受けていても特に補修することもなく、地域住民および救助活動の人々は車両を片側交互通行にして使用していた。

写真11はバラコット橋の下流側に架かる、歩行者を対象としたつり橋である。右岸の橋台に若干の損傷が認められ、橋台の南北に配置されたケーブルアンカーに変位が生じている。特に写真11に示すように、下流側のケーブルアンカーは下流側（南側）に完全に転倒している。上述したバラコット橋の橋桁の変位と、このアンカーの転倒を観察する限り、この地震の水平振動は南北方向に卓越していたものと推測される。また、Konagai et al. (2005)⁹⁾は、バラコット市内の地震後の街灯の傾きからも同様の見解を示している。転倒したケーブルアンカーの断面図を図6に示すが、その転倒前断面の縦横比は概ね2:1であった。ここで、下流側のつま先を支点として、極単純にモーメントの釣り合いを考慮すると、アンカー転倒に必要な水平慣性力は、少なくとも0.5G以上であったことが推定できる。図4に示したバラコットでの推定水平加速度は、これを根拠に設定した。

なお、上記の写真に収められているKunhar川の水面の色は赤茶色に濁っている。これは上流に大きな斜面崩壊が生じていることを示唆するものである。



図5 調査地周辺の地質図

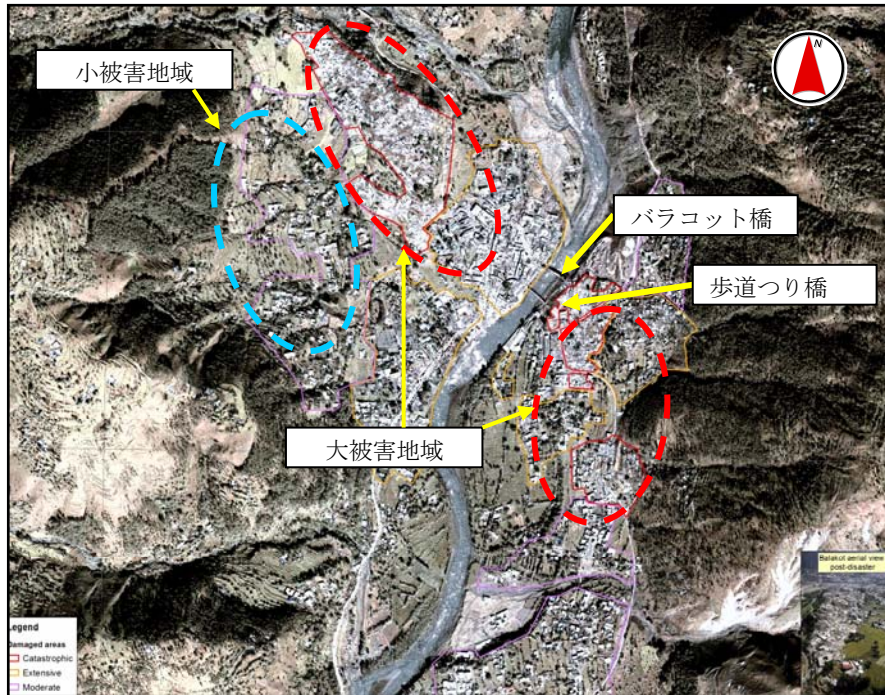


写真9 地震後のバラコット市街 (Ikonos satellite images of Balakot area⁶⁾ に加筆)

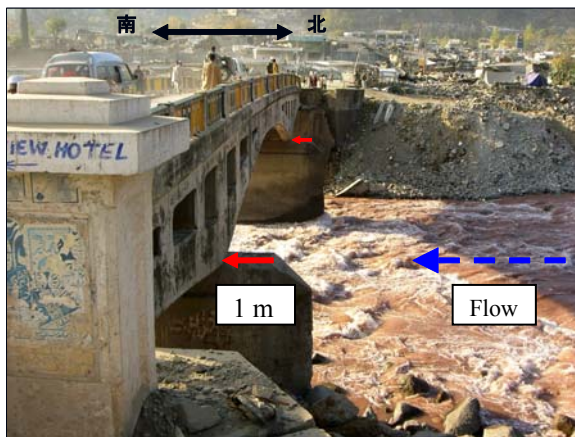


写真10 バラコット橋の被害



写真11 歩道つり橋の被害

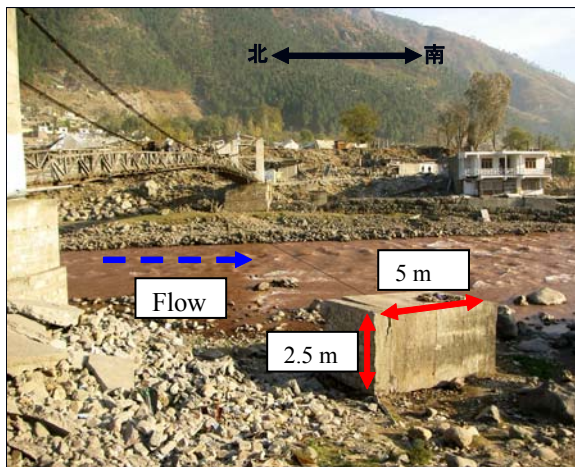


写真12 転倒した歩道吊橋アンカー

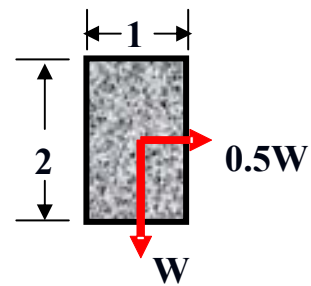


図6 アンカーの転倒モーメント

写真9のバラコットの衛星写真によると、被害の著しい地域と比較的軽微な地域のコントラストが認められる。このうち、比較的被害の大きかった地域の建物の様子を写真13, 14に示す。アボタバードでの被害形態と同様、柱自体には損傷がないものの、床版との接合部にダメージを受けている。それに対し、比較的丈夫な壁体を持つ家はダメージが少なかった。さらに、バラコットではほとんどの建物が倒壊したといえるが、その中でダメージの少ない建物は平屋であるケースが多かった(写真15)。このことから、倒壊した複数階の構造物は地震動に対し慣性力が大きくなり、ダメージを受けた柱や接合部が建物の重量を支えられなかったことを示している。



写真13 被災した建物内部の様子



写真14 下端部で曲がった柱



写真15 倒壊を免れた平屋家屋

次に、バラコットにおいて特に被害が大きかった、橋の北西に位置する丘陵部の様子を写真16, 17に示す。この区画は段丘面の一つと考えられ、一階もしくは二階建てを主体とする一般住宅が丘全体を覆っていたが、地震によりそのほとんどすべてが崩壊した。調査した11月末時点でも、写真16, 17に示すように、下の地面が全く見えないほど倒壊した瓦礫に覆われている。

写真18, 19は、この被害が集中した段丘面から南方向および北西方向に撮影したものである。これによると、手前の完全に倒壊した瓦礫と、低地部の無被害の住宅の対比が明確である。そのため、段丘面上の壊滅的な被害の要因は、その地形と地盤構造にあるものと考えられる。

例えば、丘という地形を考慮した場合、基盤で生じた地震動は図7(左上)に示す様に、丘の頂上部に向かって振動エネルギーは集中し、同時に加速度振幅も増幅されることが知られている。断面方向の実体波(SH波)を想定し、図7(下)に示すような様々な形状の地形に対し、基盤加速度(露頭波)と

地表面加速度の比を式(1)で求めることができる。これによると、図7(右上)のように地形の断面が頂上に向かってシャープになるほど頂上部の振幅が増幅されている傾向が認められる。また、栗田ら(2005)⁷⁾は、これらの解析結果と整合する実測値を発表している。

このように増幅された加速度振幅は、バラコットの丘陵部に密集した住宅に大きな慣性力を与えたと同時に、すべりなどの地盤変位も引き起こした可能性が高い。写真20は被害の集中した丘陵部の南斜面下で撮影されたものであるが、斜面側(左側)の畑の形状が約1m程度盛り上がっているのが認められる。現地住民によると、地震前まではこのような段差はなく、水平であったと言う。したがって、丘陵地形によって増幅された加速度振幅は斜面に大きなすべり変位を与え、大きな慣性力とともに、基礎に特別な対策も施されていなかったと思われる丘陵部の住宅群を崩壊に導いたと考えられる。

$$Amp(2E) = \left| \frac{U(z_0)}{2E} \right| = \frac{2V_s / \pi \omega z_0}{\sqrt{\left[J_0 \left\{ \frac{\omega(z_0 + H)}{V_s} \right\} Y_1 \left(\frac{\omega z_0}{V_s} \right) - J_1 \left(\frac{\omega z_0}{V_s} \right) Y_0 \left\{ \frac{\omega(z_0 + H)}{V_s} \right\} \right]^2 + \left[J_1 \left\{ \frac{\omega(z_0 + H)}{V_s} \right\} Y_1 \left(\frac{\omega z_0}{V_s} \right) - J_1 \left(\frac{\omega z_0}{V_s} \right) Y_1 \left\{ \frac{\omega(z_0 + H)}{V_s} \right\} \right]^2}} \quad (1)$$

ここに、

Amp(2E) : 振動増幅率、U(z₀) : 地表面 (z = z₀) における振動、E : 基盤面振動、J_{0,1}, Y_{0,1} : 第一種及び第二種のベッセル関数、V_s : せん断波速度、H : 丘の高さ、ω : 円振動数



写真16 壊滅した市街北西部の丘



写真17 市街北西部の丘頂上部の様子



写真18 丘からの展望(南方向)



写真19 丘からの展望(北西方向)

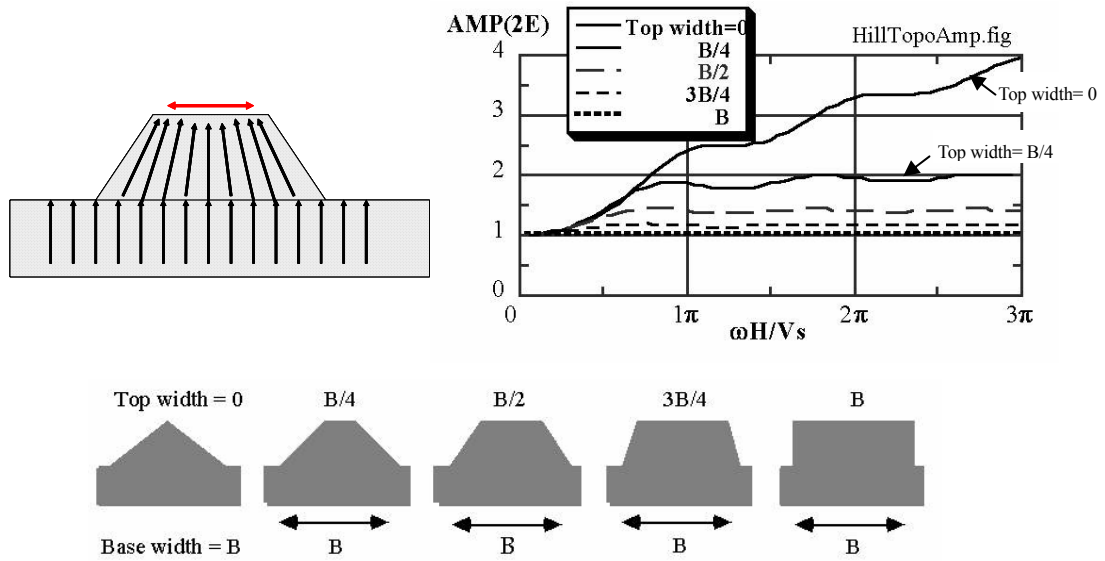


図7 様々な地形形状と地震動の関係

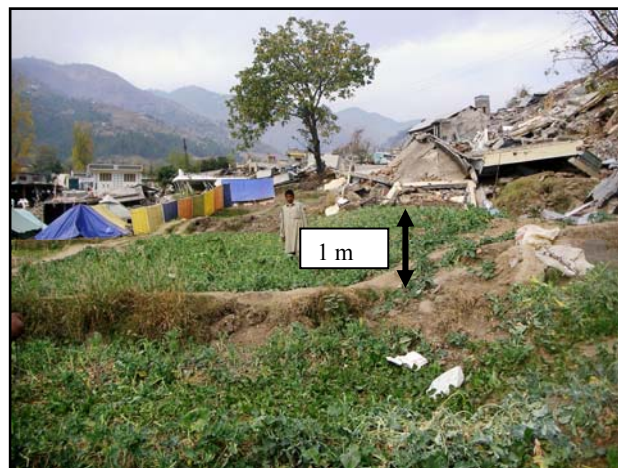


写真20 南側斜面下の地盤変状

上述のように、ほとんど壊滅的となったバラコット市街であるが、崩壊を免れた構造物もある。写真21, 22は、Kunhar川の右岸と左岸に位置する携帯電話の鉄塔である。これらの鉄塔は明らかに他の構造物と異なり、エンジニアによる設計を経たと思われる堅固な基礎を有している。鉄塔自体に目視で確認できるような歪みは認められず、基礎においても有意な被害は認められなかった。詳細な基礎形式、施工時期等は不明であるが、比較的新しいものであり、適切な設計・施工を施せば今回の地震でも被害を食い止めることができたという例の一つであろう。



写真 21 鉄塔基礎の様子 (Kunhar 川右岸)



写真 22 鉄塔基礎の様子 (Kunhar 川左岸)

3-2 道路・斜面崩壊

バラコット橋をわたり、Kunhar 川左岸を上流に向かって北上すると、道路の損傷が多く確認された。また、周辺の地質構造はスレーキングによる風化が著しい粘板岩・頁岩を主体としており、斜面崩壊も多数確認された。

写真 23 は、バラコット橋から数百 m 北で確認された斜面崩壊である。地盤は段丘堆積物と思われ、比較的大きな円礫を混入した粘土質砂礫を主体とする。崩壊後の斜面勾配は約 30~40°程度であった。崩壊土砂の上部には、約 1~2 m の滑落崖が確認された。湧水は確認されていない。下流まで土砂が流下することはなく、全体的な地盤変位は比較的小さいと思われるが、斜面全体に大きなクラックが生じており、地盤は相当乱されている。

写真 24 はバラコット橋から約 1 km 北で確認された道路の損傷である。地震前は同レベルにあった道路面が、切土部にあるにもかかわらず地震により約 1m の段差が生じたものである。写真 24 では、手前側 (北側) が沈下したものと推定される。この変位が、活断層によるものなのか単なる表面地盤変位かは不明であり、周辺には多数のクラックが認められるものの、斜面崩壊等は確認できなかった。



写真 23 Kunhar 川左岸の斜面崩壊



写真 24 道路に生じた段差

この地域では斜面崩壊防止を目的とした擁壁はほとんど見られず、斜面は地山の岩盤を晒しているが、写真 25 はその数少ない擁壁の崩壊の様子である。擁壁の一部は完全に崩壊し、残ったものも大きく谷川にはらみ出している。地山は粘板岩もしくは頁岩を主体とし、著しく褶曲されており、ハンマー打撃で層理面に沿って容易に割ることができる。

写真 26 はバラコット市街北部で確認された比較的大きな斜面崩壊である。Kunhar 川右岸に位置するこの斜面崩壊は、勾配約 40°、斜面長約 800 m である。比較的浅い表層すべりであり、すべり下部は崩落土砂が円錐状に溜まっている。全体の崩壊は 10 月 8 日の本震により生じたと考えられるが、小さな崩落は 11 月末時点でも生じており、細かな土砂が浮遊して周辺を覆っている。なお、バラコット橋の際に述べた写真 10~12 の Kunhar 川の赤茶色に変色した川面は、この崩壊が要因であることを確認した。



写真 25 擁壁の崩壊



写真 26 Kunhar 川右岸の斜面崩壊

4. ムザファラバード

ムザファラバードはアザド・カシミール州の州都であり、人口 10 万人程度の都市である。震源から南西約 10 km に位置し、震源にもっとも近接している都市である。ムザファラバード市街地の平面図を図 8 に示す。北から南に蛇行して流れる Nilam 川が中心部を流れ、市街地南部において本流の Jhelum 川と合流している。

ムザファラバードの地震による主な被害は、Nilam 川左岸の市街中心部における構造物の倒壊と、北部の斜面崩壊が代表的である。

ムザファラバードは、図 2 で示したように北西-南東方向に存在するムザファラバード断層とタンダ断層の境界付近に位置し、前章図 5 に示すように、西部および北部の山地は頁岩・石灰岩により構成され、河川沿いの都市部・住宅地区は砂礫を主体とする段丘堆積物が分布している。

訪れた印象として、バラコットと比較すると被害は少なく感じられる。しかし、ムザファラバードは比較的大きな都市であるため、犠牲者・被害構造物の規模を考慮すると、バラコットと同程度の被災を受けたといえる。

4-1 構造物の被害

ムザファラバードの地震動の詳細は不明であるが、震源からの距離（約 10 km）を考慮すると、前述のバラコットと同程度の地震動であったといえよう。

市街地の構造物に対する主な被害は、地震動によるものと、それに伴う斜面崩壊などの地盤変位によるものが挙げられる。

写真 27 は、図 8 にマークされた付近の被害の様子である。大きな地震動による斜面崩壊により土砂が Nilam 川に向かって崩れている。その影響で、道路脇にあったホテルが倒壊した。当該地の地盤は段丘堆積物であり、比較的大きな礫を含む砂礫を主体としている。崩壊した斜面の勾配は、約 30~40°であった。



写真 27 Nilam 川左岸の斜面崩壊

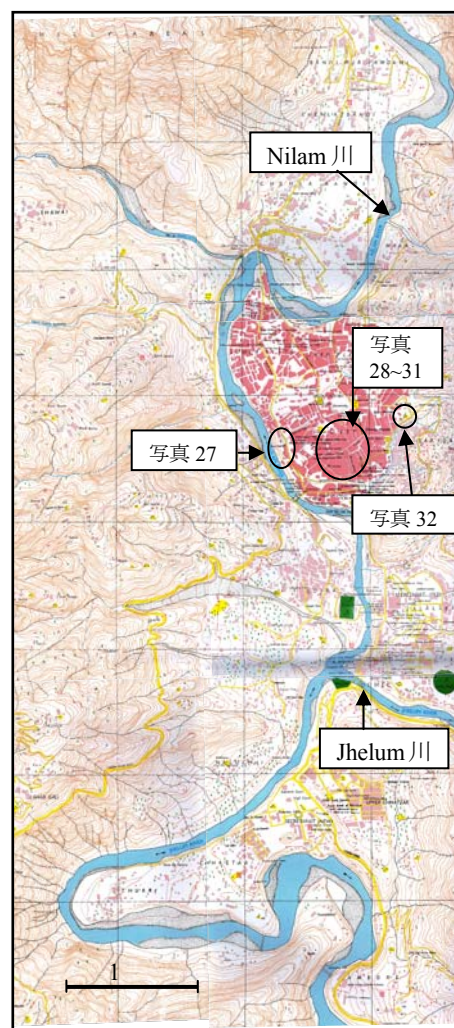


図 8 ムザファラバード平面図
(Muzaffarabad guide map⁸⁾ に加筆)

写真 28~31 は図 8 にマークされた地域に位置するメインバザールの街区である。道路は狭く、商店や住宅が密集し、地震前は非常に活気のあった街区であったと思われる。また、全体的に 2 階~3 階建て程度の建物がひしめき合っている地区である。この地区は比較的被害が多く、ほとんどの建物が何らかのダメージを受け、そのうち倒壊した建物は 10~20%程度であった。

写真 28 は一階部分が押しつぶされた住宅であるが、このような倒壊例は比較的多く確認された。これらはこれまでの地域と同様、柱と床版との接合部に過大な応力が作用し柱の下端もしくは上端部で折れ、倒壊したと推定される。写真 29 はこの地区で多数確認された構造の建物である。一階部分よりも上層に行くに従い床面積が広がっており、狭い住居面積を広げる手段であると考えられる。しかし、このような構造は地震に対してバランスを欠くことに加え、構造物の重量にも影響を与える。写真 29 の住宅も一階の柱が重量を支えられず、部分的に倒壊している。

写真 30, 31 はメインバザールでも多く認められた無補強壁による構造の倒壊の様子である。このような古いタイプの構造物は被害の数もその程度も大きい。

写真 32 はメインバザール東の丘の上で実施されていた水道管工事の様子である。地震災害の後、水道・電気の早期供給は非常に重要であるが、今回の地震では水道供給は一時的に停止したものの、比較的早期に復旧された。メインバザールでも地震後の水道供給に問題はなかった。これより、この周辺では大きな地盤変位は生じなかったと推定され、構造物の崩壊の要因は主に地震動にあったといえよう。



写真 28 一階が押しつぶされた建物



写真 29 不適切な構造の建物



写真 30 無補強壁構造のダメージ 1



写真 31 無補強壁構造のダメージ 2



写真 32 修復中の水道管

一方、市街地北部の Nilam 川右岸では、小さな段丘面にいくつかの構造物が建っていたが、写真 33 に示すように地震動による地盤変位で倒壊した。この小さな段丘の上には写真 34 に示すようにブランコが据えられていたが、地盤変位によりポール下端が開いて移動している。更に、写真 33 の低地部の住宅は無被害のように見えることから、この小さな段丘においてもバラコットの被害が集中した丘と同じようなメカニズムですべり変位が起きた可能性が考えられる。写真 35 は丘の斜面上に生じた亀裂である。



写真 33 倒壊した丘陵部の建物

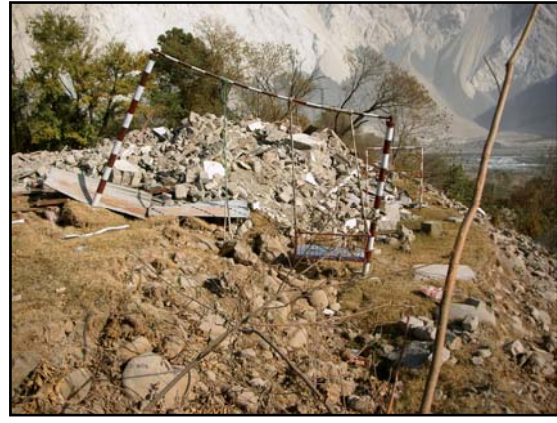


写真 34 丘陵部地盤変位の様子



写真 35 斜面上に生じた亀裂

前章のバラコットではコンクリート橋やつり橋がダメージを受けていた。ムザファラバード市街地周辺においても、Nilam 川および Jhelum 川にいくつかのコンクリート橋が架かっているが、いずれも有意な変状は認められなかった。これは、ムザファラバード市街地周辺の橋梁が写真 36 に代表されるように比較的新しいものであったこと、およびいずれもバラコット橋より規模が大きく、設計もある程度適切に実施されたためではないかと考えられる。

しかし、ムザファラバード市街地を離れ、Jhelum 川を上流（南東方向）に向かうと、Jhelum 川に架かる橋は歩行者用のつり橋のみになり、その多くが被害を受けていた。写真 37, 38 はその代表的なものであり、いずれも橋台に大きなダメージを受け、一部は落橋している。また、規模は小さいが、地震当時はまだ建設中であったコンクリート橋（写真 39）が落橋していた。これは橋台背後地盤の崩落によるものと考えられる。



写真 36 無被害のコンクリート橋



写真 37 橋台基礎に損傷を受けた吊橋



写真 38 落橋した吊橋



写真 39 落橋した建設途中の橋

4-2 道路・斜面崩壊

ムザファラバード市街の北部では、斜面崩壊が非常に多く認められた。このうち、特に著しい崩壊は、市街地から北へ数 km、Nilam 川左岸に位置している。写真 40, 41 に示すこの斜面崩壊は、幅約 1 km にも及ぶものであり、表層 10 m 以上のすべりを呈している。地質は礫を交えた石灰岩が主体であるが、当該地域は夏冬の温度差が大きいことから風化の進行も早いと推定され、その岩片は非常に脆い。崩壊部分は新鮮な白い地山を見せており、地震前はこの一面は背の低い樹木が植わっていた。また、崩壊と同時に樹木と幾十かの民家が消えたと伝えられている。また、10 月 8 日の本震後、崩壊した土砂が Nilam 川を塞ぎ止め、川の氾濫が懸念されたが、発破により速やかに河道を通したと伝えられている。11 月時点においては、写真 41 に示すように崩落した石灰岩は完全に流下することなく斜面下部で円錐状に溜まっており、小さな崩落が続いていた。

この大崩壊の対岸にもいくつかの小さな斜面崩壊が認められた。写真 42 はその一部分であり、石灰岩の地山はハンマー打撃で容易にボロボロに砕けたことから、周辺斜面は相当脆弱であると推定される。

更に Nilam 川の上流へ数 km 進むと、写真 43 に示すように、非常に多数の斜面崩壊が見られた。主な地質は石灰岩および頁岩であり、いずれも非常に脆い。11 月末時点では、道路に溜まった土砂は除去されていたものの、写真 44 に示すように、無数の亀裂を配し斜面上に非常に不安定な状態で静止している岩塊が多く認められ、再度崩壊が生じる可能性は非常に高い状況であった。

しかし、本震後の道路復旧は比較的迅速であった。これは、山岳地の道路は既存の地形に沿うように建設されており、地震時等に崩壊しやすい盛土構造が少なかったことが原因の一つである。



写真 40 幅約 1 km の大斜面崩壊



写真 41 円錐状に堆積する土砂



写真 42 崩壊土砂近景



写真 43 多数の斜面崩壊



写真 44 非常に不安定な岩

市街地においても斜面崩壊による被害がいくつか確認された。写真 45 は斜面崩壊により倒壊した建物の様子である。崩壊した崖は比較的大きな礫を主体としている。この崖は非常に交通量の多い道路に面し、かつ上部・下部には一般住宅が建っているにもかかわらず、全く対策が施されていない状態であった。

丘陵部の道路が斜面崩壊によって寸断されている様子を写真 46 に示す。この斜面にも崩壊防止対策の跡は認められない。斜面の下には多くの住宅が建っていたが、幸いにも土砂の流動に巻き込まれることはなかったようである。これは、他の地域にも当てはまるが、地震時は乾季であり降雨が少なく、地盤が乾いていたため、崩壊土砂の流動距離が短かったためと考えられる。

市街地南部から Jhelum 川の上流（南東方向）に向かうと、川沿いの段丘面に設けられた道路が斜面崩壊によりダメージを受けている箇所が多数確認された。写真 47 は本震時に道路を通行もしくは駐車してあったトラックが落下したものである。



写真 45 無補強の地山

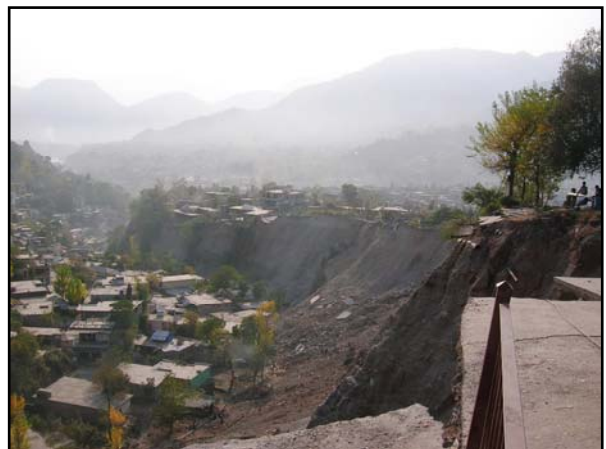


写真 46 斜面崩壊により寸断した道路



写真 47 斜面崩壊により転落したトラック

5. チャカール

チャカールは、ムザファラバードから Jhelum 川を上流（南東方向）に向かって約 30 km、左岸側の山地に点在する小さな町のひとつである。この一帯はタンダ断層の延長上に近接しており、非常に強い振動が作用した可能性がある。そのため、斜面崩壊や構造物の倒壊が多数確認された。そのうち、チャカール周辺で確認された、本調査における最大の斜面崩壊を写真 48 に示す。

この巨大な斜面崩壊には、11 月時点では道路が寸断されているため近傍まで近付くことはできなかった。写真 48 は、対面する山の中腹から撮影したものである。崩壊斜面の大きさについては、計測不可能であった。おおよその目測では幅約 200 m、長さ約 1500 m、深さ約 50 m 程度、即ち約 15,000,000 m³ の土砂が滑り落ちたと推定される。また、崩壊斜面上に湧水などの存在は認められず、崩壊時も斜面地盤は乾いていたものと推定される。なお、地元住民の証言では、崩壊した斜面上には約 100~200 軒程度の民家が建っていた。斜面頂部には非常に大きな滑落崖が認められ、崩壊面の周辺にも大きな亀裂が多数生じている。また二つのピークの間で崩壊していることから、谷部を埋めた地層が崩壊した可能性も考えられる。また、斜面中部～下部にかけて、崩壊した土砂が溜まっている様子が認められる。

写真 49 はこの巨大斜面崩壊を真横から撮影したものである。崩壊により大量の土砂が河川を埋めたため、河道が閉塞されてダム湖を形成している。一般的に、崩壊土砂の体積と流動距離には相関関係があることが知られている（Kenneth, J., 1975）⁹⁾。ここでは、写真 49 の斜面勾配より計測した土砂の流出距離より、図 9 に示す既往の関係と比較した。結果より、本斜面崩壊はその設定サイズが目測ではあるものの従来の関係と良い相関がとれているといえよう。

参考までに、この巨大斜面崩壊を衛星から地表面変位を解析することで得られた結果を図 10 に示す。この解析は産業技術総合研究所により実施されたもので、解析画像と実際の斜面崩壊の形態は概ね一致している。また、解析による斜面崩壊のスケールは、幅約 500 m、長さ約 1200 m、深さ約 200 m とされ、同報告によると、崩壊地盤は第三紀もしくは第四紀の比較的新しい地層とされている。



写真 48 チャカールの巨大地すべり



写真 49 巨大地すべりの側面とダム湖

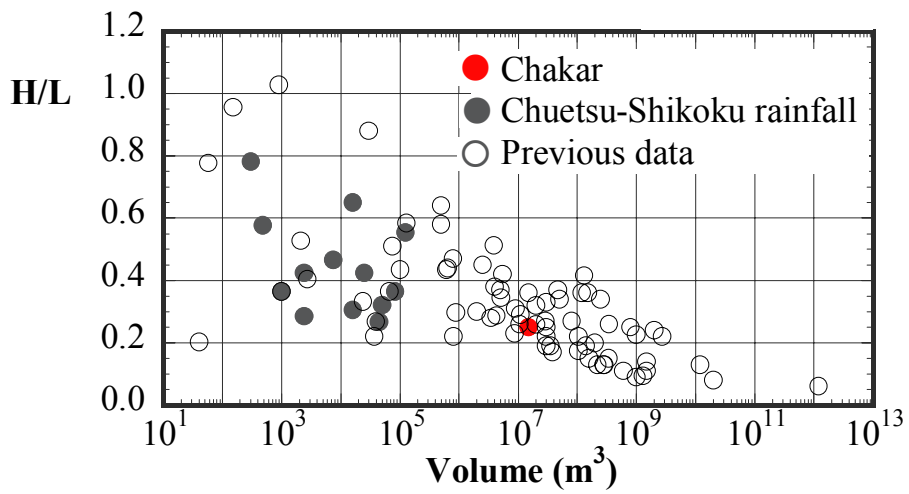
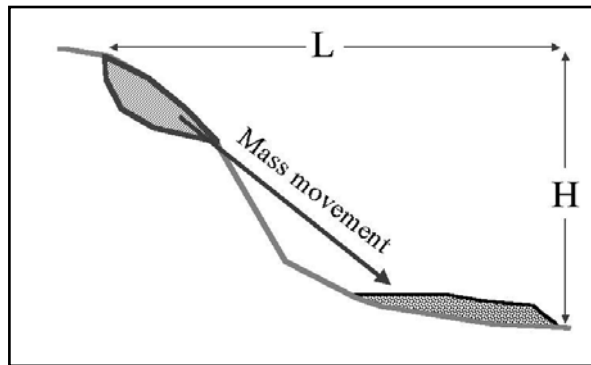


図 9 地すべりの規模と流動距離の関係

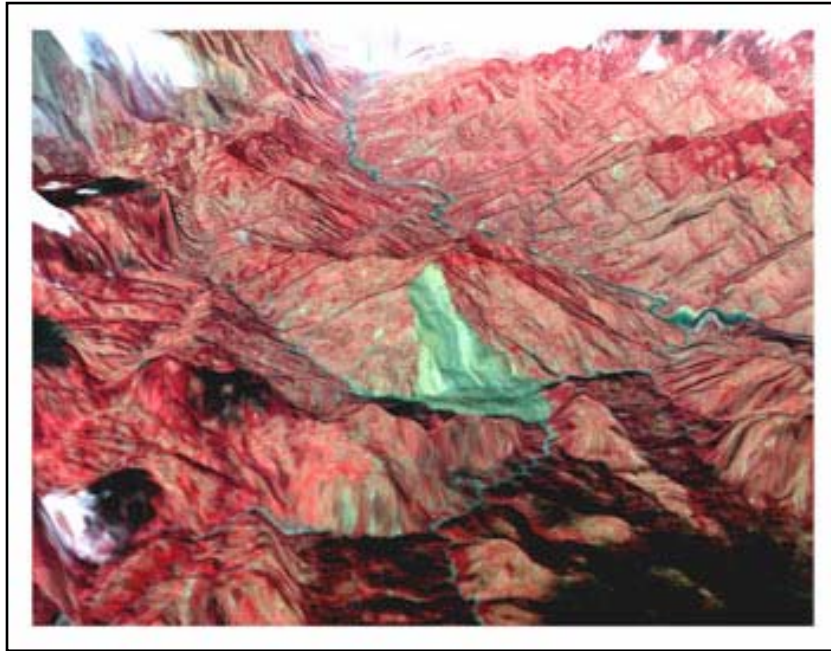


図 10 衛星画像処理によるチャカールの地すべり(産業技術総合研究所による¹⁰⁾)

6. まとめ

2005年10月8日にパキスタンにおいて発生したマグニチュード7.6の地震は、震源付近の都市、ムザファラバードおよびバラコットを中心に甚大な被害をもたらした。今回は時間的、交通上の制約のため限られた地域のみ調査であったが、被災地域の構造物および斜面崩壊の基本的な要因を把握できた。

一般住宅については、ほとんどがRC構造ではあったものの、その多くは柱と床版のみの構造で梁が設けられておらず、地震動のような水平変位に対する抵抗力を設計段階で考慮されていなかったと思われる倒壊事例が多数確認された。また、無補強壁に起因する倒壊も多く確認された。地盤や地形の影響によるものと考えられる被災地区は、バラコットやムザファラバードで確認されたように大きな地盤変位を伴うことで、地域一帯がほぼ壊滅状態であるケースが目立っていた。一方、バラコットの鉄塔や、ムザファラバードの橋梁に代表されるように、エンジニアによる適切な設計を経て構築されたと考えられる構造物の被害は非常に少なかった。また、被災地においてはテントの配給が不完全であることもあり、崩壊寸前の非常に危険な家屋を利用している人々も少なくない。構造物の応急的な耐震診断が必要と考える。

震源地周辺はスレーキングによる風化が著しい粘板岩・頁岩、および非常に脆い石灰岩を主体としていることから、斜面崩壊は非常に多く確認された。更に、地震発生時は乾季に相当し、降雨がほとんどなく、湧水も非常に少なかった。そのため崩壊土砂の流動距離は比較的短く、その量も少なかったといえる。しかし、現状のまま次の雨季まで放置しておくと、二次的な災害は免れないと考えられる。被災地周辺では、斜面を保護する擁壁等の対策はほとんど成されていない。地震時は当然であるが、常時においても非常に不安定な状態で生活を営む人々も少なくなく、危険箇所や保護すべき重要道路への早期対策が求められる。

最後に、このたびの震災で犠牲となったすべての方に哀悼の意を捧げます。

謝 辞

University of Engineering and Technology Lahore の Aziz Akbar 教授には、現地調査に関する適切な助言とご協力をいただきました。また、パキスタン内での諸手続きに御尽力いただいた飛島建設株式会社の児玉裕之様、池田隆明様をはじめスタッフの方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 飛田幹男, 藤原智, 加藤敏, 仲井博之, 藤原みどり, 矢来博司, 林文: 合成開口レーダー画像マッチングによるパキスタン北部地震の地殻変動図, 国土地理院「パキスタン北部地震関連ページ」, 2005.11, <http://cais.gsi.go.jp/Research/space/pakistan/images/paksarma.pdf>
- 2) 中田高, 熊原康博: パキスタン北部地震震源地域の活断層 (予察), 日本地理学会「災害対応のページ」, 2005, http://www.fal.co.jp/geog_disaster/20051018_pakistan.html
- 3) Roger Bilham: Kashmir earthquake October 2005, CIRES & department of geological sciences, University of Colorado, 2005.11., <http://cires.colorado.edu/~bilham/Kashmir%202005.htm>
- 4) The Nation: Local news, 2005.10.9., <http://nation.com.pk/daily/oct-2005/9/nationalnews1.php>
- 5) Konagai, K., Akbar, A., Oguni, K., Kodama, H. and Ikeda, T.: Provisional report of the damage caused by Muzaffarabad earthquake of October 8, 2005, Pakistan, 土木学会「災害速報」, 2005.11, <http://www.jsce.or.jp/report/36/index.html>
- 6) European Commission, JRC: Ikonos satellite images of Balakot area - before and after earthquake, Unosat, 2005.10, http://unosat.web.cern.ch/unosat/freeproducts/pakistan/EQ-2005-000174-PAK/Post-Earthquake/JRC_BALAKOT_post_A1_100dpi.jpg
- 7) 栗田哲史, 安中正, 高橋聡, 嶋田昌義, 末広俊夫: 山地形における地震動の増幅特性, 日本地震工学会論文集, 第5巻, 第3号, 2005.
- 8) Government of Pakistan: Muzaffarabad guide map second edition, The survey of Pakistan offices, 2000.
- 9) Kenneth, J. HSU: Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rockfalls, Geological society of America Bulletin, v.86, pp.129-140, 8 figs., 1975.1.
- 10) 産業技術総合研究所 地質情報研究部門 地質リモートセンシング研究グループ: 衛星画像 (ASTER) を用いてパキスタン地震による大規模地すべりを観測, 産業技術総合研究所地質情報研究部門「パキスタン地震情報」, 2005.10, <http://www.gsj.jp/Gtop/topics/ASTER/pakistan051008.html>

(受理: 2月21日)

(掲載決定: 4月25日)

Damage survey report of Pakistan earthquake

KIYOTA Takashi¹⁾, TOWHATA Ikuo²⁾, Khalid Farooq³⁾, Obaid Hassan Qureshi⁴⁾

1) Research Associate, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

2) Member, Professor, University of Tokyo, Dr. Eng.

3) Associate Professor, University of Engineering and Technology, Lahore, Pakistan, Dr. Eng.

4) Graduate student, University of Tokyo

ABSTRACT

An intense earthquake occurred in Pakistan at 8:28 local time, October 8, 2005. The epicenter was in North Eastern Frontier Area that is northern mountainous area of Pakistan and the magnitude was 7.6. Geotechnical engineering laboratory and Koseki laboratory of the University of Tokyo organized a field examination team to investigate the damage of this earthquake in collaboration with University of Engineering and Technology, Lahore, Pakistan. This report outlines the findings obtained during October 25 to 28 and November 19 to 24 in devastated areas; Islamabad, Abbottabad, Balakot and Muzaffarabad. Many collapsed buildings due to an earthquake motion and ground movement were confirmed in Balakot and Muzaffarabad which are located within about 30 km of the epicenter. In addition, there were a large number of landslides in mountainous area. The number of victims of the earthquake amounts to more than 75,000 as of January, 2006.

Key Words: Earthquake, Damage survey report, Landslide