

2005年パキスタン地震震源地周辺の被害調査報告

清田¹，東畑郁夫²，カリッド・ファルーク³，オバイド・ハサン・クレシイ⁴Takashi Kiyota¹，Ikuo Towhata²，Khalid Farooq³ and Obaid Hassan Qureshi⁴¹ 東京大学生産技術研究所² 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻³ University of Engineering and Technology, Lahore⁴ 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

2005年10月8日現地時間8時57分、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。筆者らは、10月25日～28日、および11月19日～24日にかけて震源地周辺の被災地を中心に、今回の地震による甚大な被害の調査を実施した。震源から約30 km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、特に丘陵部では地震動だけでなく地盤変位も伴ったと考えられる被害も認められた。また周辺山岳地では多くの地すべりが発生し、チャカールでは1,500万m³を超える巨大地すべりも確認された。本報告は、この地震による主な被害形態をまとめたものである。

1. 地震の概要

2005年10月8日に発生した地震の震源は、北緯34.44°、東経73.58°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）。地震のマグニチュードは7.6であった。本地震は、パキスタン北部地域を中心に非常に多くの構造物や道路の崩壊、および斜面崩壊を引き起こし、公式発表では死者数72,000人以上、負傷者数20万人以上、避難者数280万人とされている。

このうち本報告では、バラコット、ムザファラバードおよびチャカールにおいて発生した、主に地盤災害について概説する。

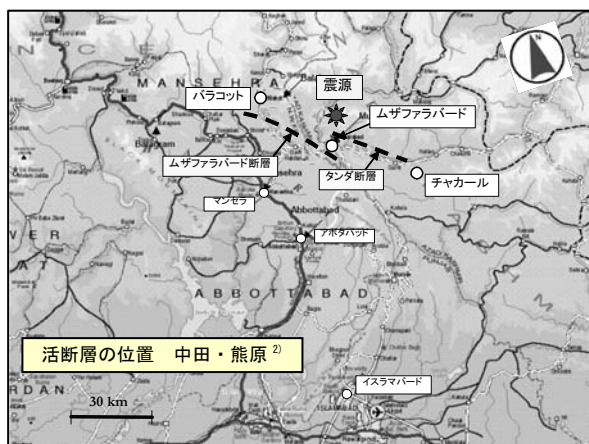
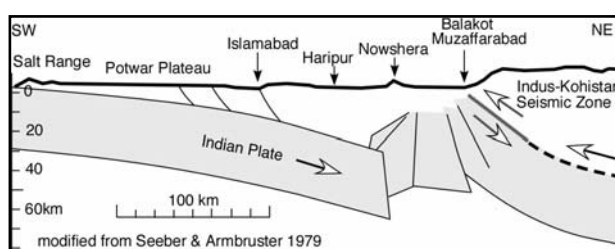


図1 調査位置案内図

震源地付近は、図2の被災地周辺のプレート概念図¹⁾に示すように、インドプレートとユーラシアプレートとの衝突地点の一部であり、従来より地震が起りやすい地域であった。また、図1の平面図に併記したように、震源地周辺には北西-南東方向に分布するムザファラバード断層とタンダ断層の存在が確認されている。本地震の断層形態は横ズレ逆断層であることが知られており、衛星からの計測³⁾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た。

図2 被災地周辺のプレート概念図(コロラド大学による)¹⁾

代表的な加速度記録として、アボタバッド（震源から南西約45km）にて計測されたデータ⁴⁾を図3に示す。アボタバッドの最大水平加速は約0.23Gを示しており、東西方向に若干卓越している。しかし、マンセラ（震源から西約40km、約0.08G）およびイスラマバード（震源から南約100km、約0.03G）での記録では、振動方向に関する有意な差異は認められなかった。なお、これらの記録より、比較的大きな揺れが約30～40秒続いたことが推定できる。その他、GBHP Brotha発電所（地盤上）およびTarbelaダムサイト（構造物上）で計測された最大加速度をもとにした地震動水平加速度距離減衰を図4に示す。なお、図中のバラコットでの水平加速度は、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（後述）である。

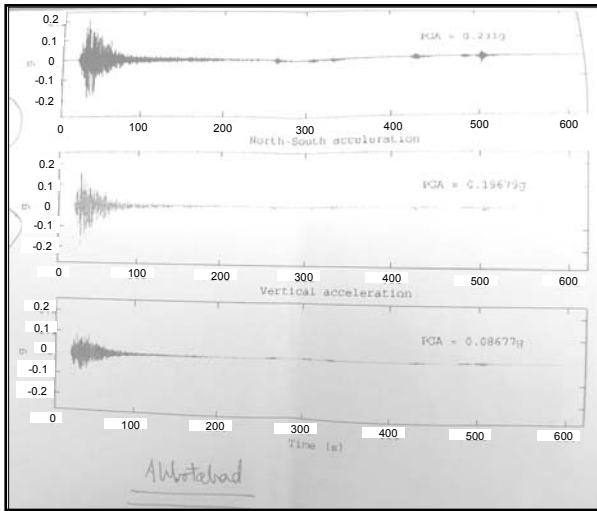


図3 アボタバッドにおける地震動加速度記録⁴⁾

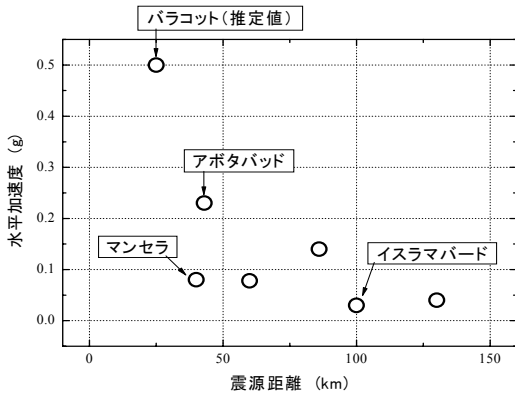


図4 地震動水平加速度距離減衰

2. バラコットの被害

(1) 地形・地質概要

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。風光明媚な観光地としても繁栄していた。しかし、今回の地震により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。

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。また、図 5 に示す地質図より、バラコット〜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。

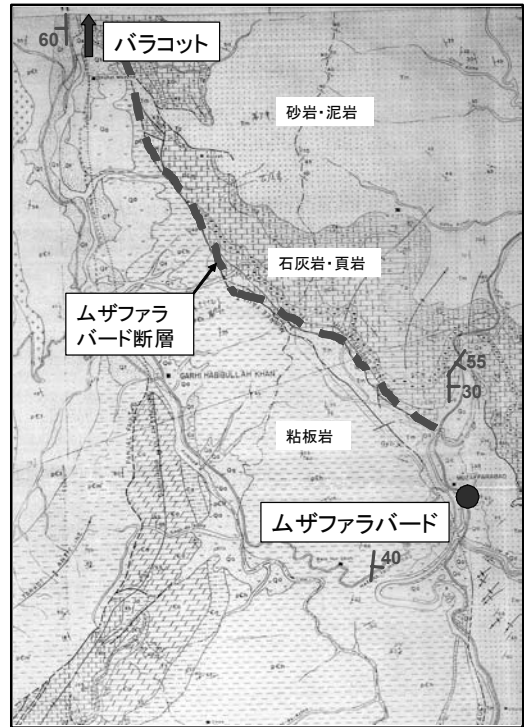


図5 調査地周辺の地質図

(2) 市街地の被害

地震後に撮影されたバラコット市街地の衛星写真⁵⁾を写真 1 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 1 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 2 はバラコット橋の被害状態である。全長約 160 m、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 1 m 南方向に水平移動した。また、左岸の橋脚には大きな亀裂が入っている。しかし、こ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 3 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、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。写真 2 の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。これは、図 3 のアボタバッドで計測された加速度データの傾向と異なるが、Konagai et al. (2005)⁶⁾も、バラコット市内の地震後の街灯の傾きから、水平振動は南北方向に卓越していたという見解を示している。転倒したケーブルアンカーの断面図を図 5 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。

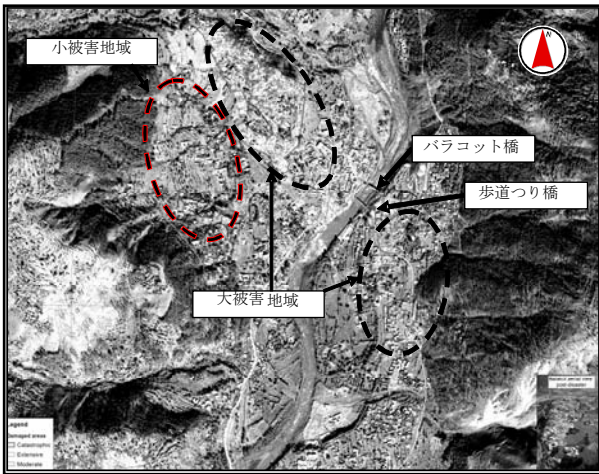


写真1 地震後のバラコット市街 (Ikonos satellite images of Balakot area⁵⁾ に加筆)

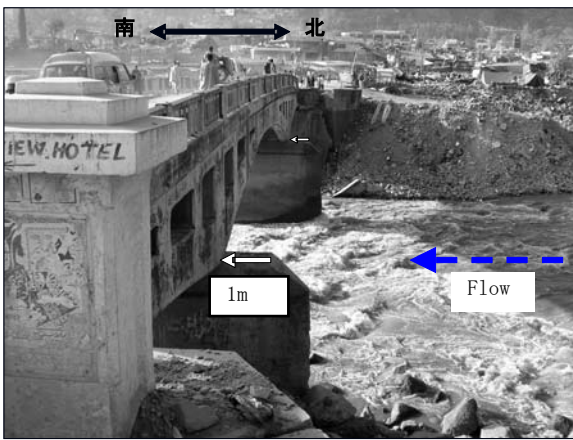


写真2 バラコット橋の被害

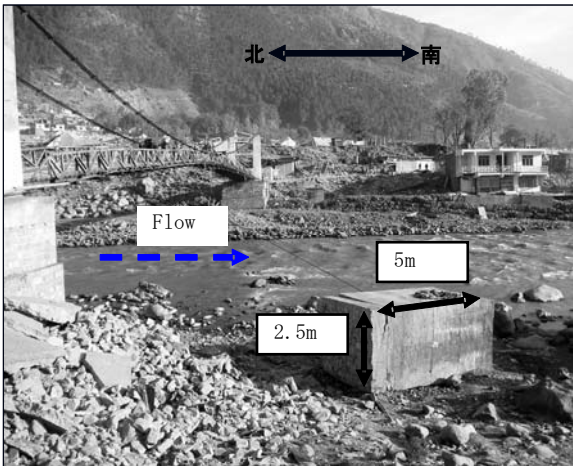


写真3 転倒した歩道吊橋アンカー

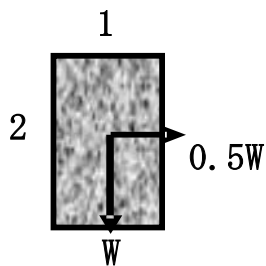


図5 アンカーの転倒モーメント

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 4, 5 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 4, 5 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 6 は、この丘の上から南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。



写真4 壊滅した市街北西部の丘



写真5 市街北西部の丘頂上部の様子



写真6 丘からの展望 (南方向)

基盤から丘の頂上部に振動が伝播する場合、図 6 (左上) に示す様に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。断面方向の実体波を想定し、図 6 (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 6 (右上) のように地形の断面が頂上部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。丘陵部の南斜面下では、斜面側の畑が約 1m 程度盛り上がっていた。現地住民によると、地震前は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。

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

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

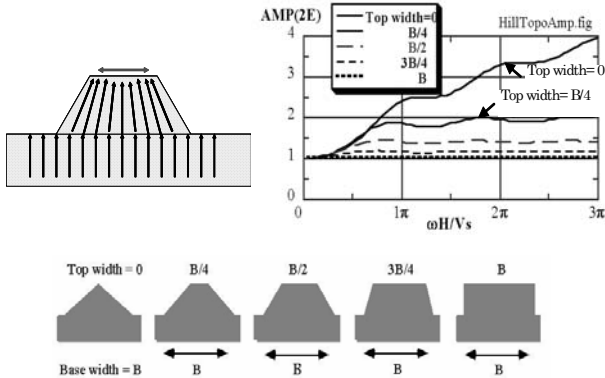


図 6 様々な地形形状と地震動の関係

(3) 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 7 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 7 Kunhar 川左岸の斜面崩壊

写真 8 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。同レベルにあった道路面が、地震により約 1m の段差が生じたものである。写真 8 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。

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、多くの斜面は地山の岩盤を晒しているが、写真 9 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側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、非常に脆い。



写真 8 道路に生じた段差



写真 9 擁壁の崩壊

3. ムザファラバードの被害

(1) 地形・地質概要

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、震源にもっとも近い都市の一つである。ムザファラバード市街地の平面図を図 7 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。

ムザファラバードは、図 1 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、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。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。

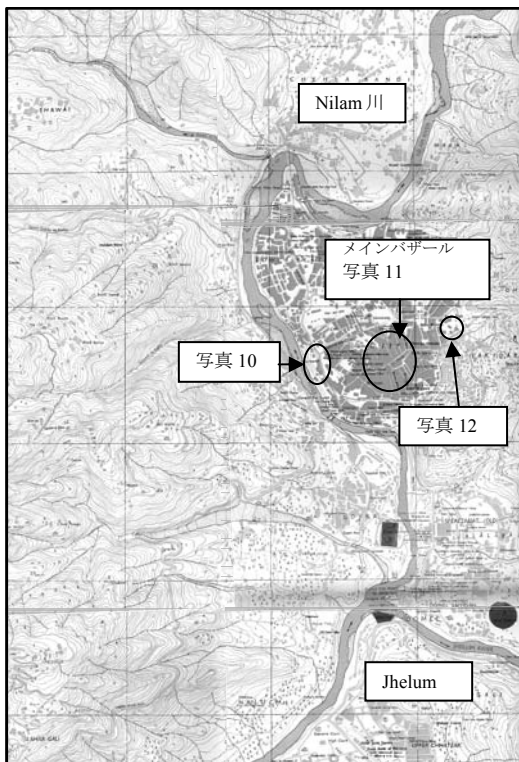


図 7 ムザファラバード平面図 (Muzaffarabad guide map⁹⁾ に加筆)

(2) 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、前述のバロ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 10 は、図 7 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

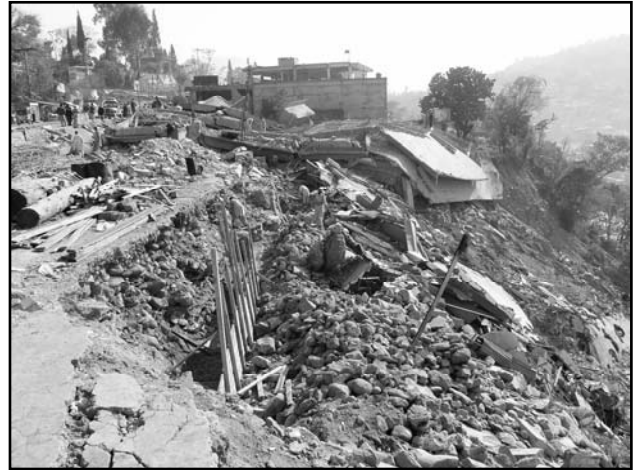


写真 10 Nilam 川左岸の斜面崩壊

図 7 に示したメインバザールの街区は、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 11 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 12 はメインバザール東の丘の上で実施されていた水道工事の様子である。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 11 一階が押しつぶされた建物

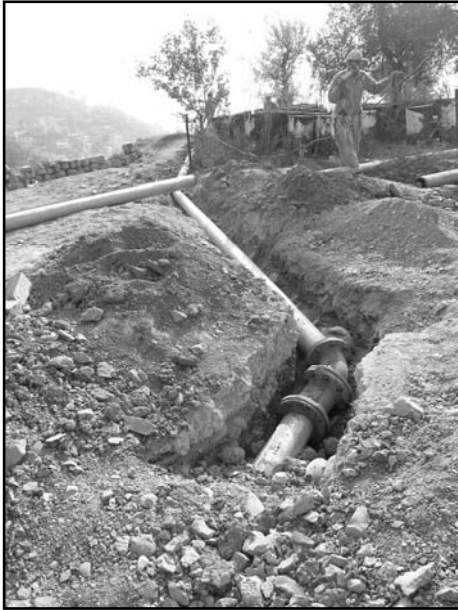


写真 12 修復中の水道管

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 13 に示すように地震動による地盤変位で倒壊した。写真 13 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 14 は丘の斜面上に生じた亀裂である。

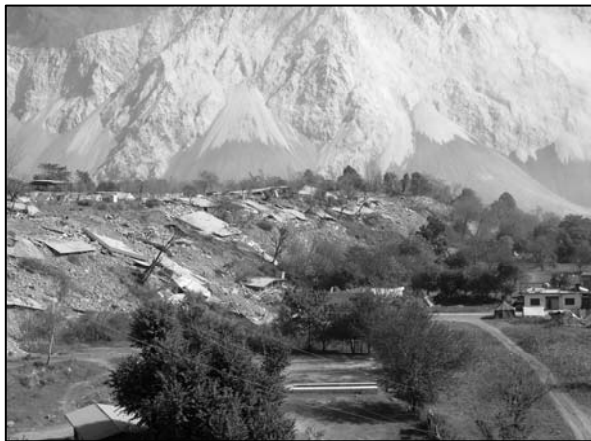


写真 13 倒壊した丘陵部の建物



写真 14 斜面上に生じた亀裂

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 15 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。11 月時点においては、写真 15 に示すように崩壊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。



写真 15 幅約 1 km の大斜面崩壊

更に Nilam 川の上流へ数 km 進むと、写真 16 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、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 16 多数の斜面崩壊

ムザファラバード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 17 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 18 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。しかし、現在地震後最初の本格的な雨季が始まっている。地震によりダメージを受けた地盤と降雨の影響に伴う二次的な土砂災害の懸念が生じている。



写真 17 市街地における無補強の地山

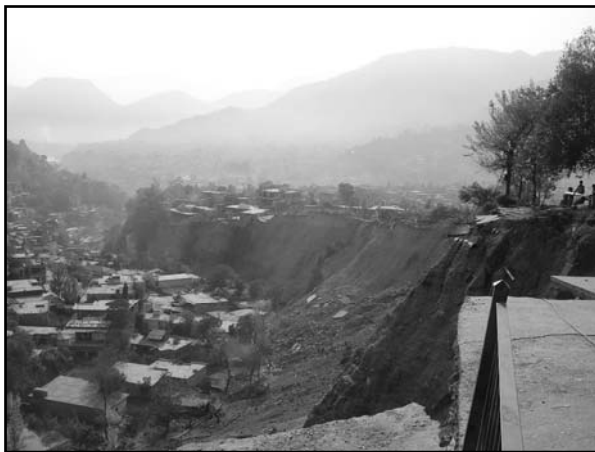


写真 18 斜面崩壊により寸断された道路

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（図 1）。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 19 に示す。



写真 19 チャカールの巨大地すべり

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 19 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 も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 20 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 20 の斜面勾配より計測した土砂の流出距離より、図 8 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。

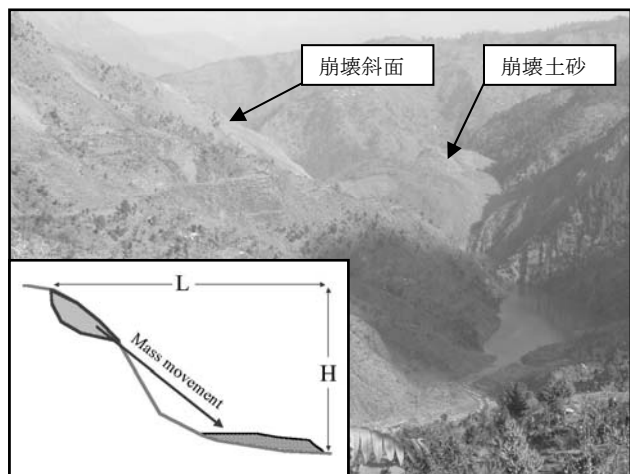


写真 20 巨大地すべりの側面とダム湖

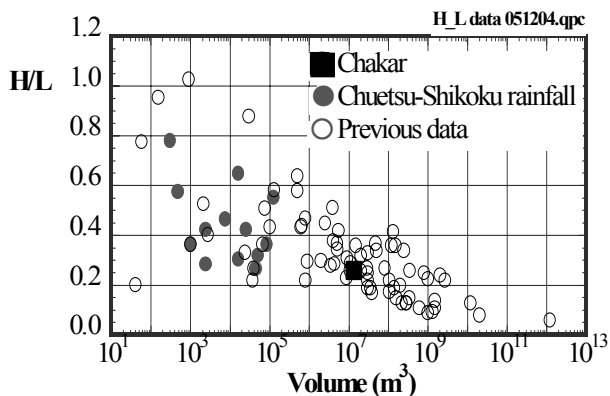


図8 地すべりの規模と流動距離の関係

参考までに、チャカールの巨大斜面崩壊は衛星からの画像解析からもその規模を知ることができる。図9に示した画像解析は産業技術総合研究所¹⁰⁾により実施されたもので、斜面崩壊のスケールは、幅約500m、長さ約1200m、深さ約200m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。

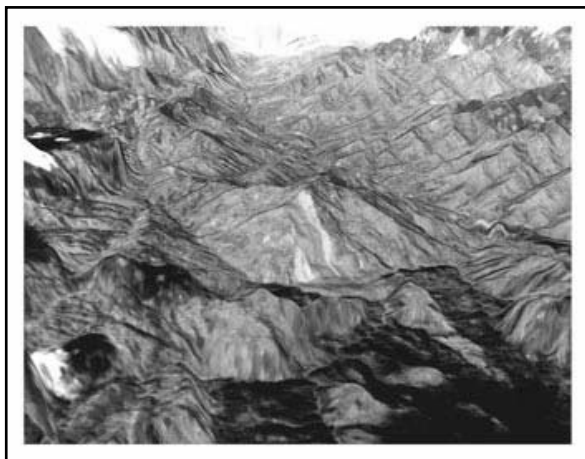


図9 衛星画像処理によるチャカールの地すべり (産業技術総合研究所による¹⁰⁾)

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。

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。このような被災地区は比較的小規模な丘陵地に該当し、基盤で生じた地震動が丘陵地形により地盤振動が増幅したことによると考えられる。

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。被災地周辺では、

地震後、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といわれている。地震後初めての本格的な雨季を迎えている現在、二次的な斜面災害発生の懸念が生じている。

また、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鳥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) Roger Bilham: Kashmir earthquake October 2005, CIRES & department of geological sciences, University of Colorado, <http://cires.colorado.edu/~bilham/Kashmir%202005.htm>, 2005.
- 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」, http://www.fal.co.jp/geog_disaster/20051018_pakistan.html, 2005.
- 3) 飛田幹男他: 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」, <http://cais.gsi.go.jp/Research/space/pakistan/images/paksarma.pdf>, 2005.
- 4) Muhammad Rizwan: A Study of Damage to Reinforced Concrete Structures due to Kashmir-Hazara Earthquake 8th October 2005, Proceedings of 7th ICCE, Iran, Reference Code AE1190, 2006.
- 5) European Commission, JRC: Ikonos satellite images of Balakot area - before and after earthquake, Unosat, http://unosat.web.cern.ch/unosat/freeproducts/pakistan/EQ-2005-000174-PAK/Post-Earthquake/JRC_BALAKOT_post_A1_100dpi.jpg, 2005.
- 6) 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」, <http://www.jsce.or.jp/report/36/index.html>, 2005.
- 7) 栗田哲史他: 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, pp.1-11, 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, 1975.
- 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」, <http://www.gsj.jp/Gtop/topics/ASTER/pakistan051008.html>, 2005.