

地形変動の精密計測から浮かび上がる地震被害 の痕跡と復興への課題

小長井 一男¹

¹正会員 東京大学教授 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)
E-mail:konagai@iis.u-tokyo.ac.jp

昨今の大きな犠牲者を出した海外の地震の被害調査では被災地の地震記録が十分に得られず、地震対応や復興のための教訓を得にくい状況がある。したがってありとあらゆる痕跡を見直し、そこに刻まれた情報を読み解き将来の地震対策、復興にかかわる教訓につなげていくことが地震工学者に求められている。地形変動に刻まれた地震痕跡を読み解き、地震防災・国土保全に必要な情報を抽出することは昨今のリモートセンシング技術の発達で決して不可能ではなくなっている。またこうした痕跡の読み解きから地震後長期にわたり継続する国土保全の課題に対する問題を浮き彫りにすることにも繋がっていく。ここでは2004年中越地震、2005年パキスタン・カシミール地震、そして2008年中国四川地震を取り上げ筆者らが関わった試みを紹介する。

Key Words : *earthquake-induced landform changes, rehabilitations, LiDAR, InSAR, 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake, 2005 Kashmir Earthquake, 2008 Wenchuan Earthquake*

1. はじめに

それは2001年、ペルー南部沖合で発生したAtico地震の被災地視察¹⁾で現地に赴いた時のことである。M8.4の大地震であるから、まずは被災地での地震記録を期待した。しかしこの地震で得られた強震記録は一箇所のみ。揺れの程度は局所的な地形の影響を受け大きく変化したであろう痕跡は随所に見られるものの、徒手空拳で確信的な議論のできぬまま報告書を書き上げなければならない非力さを感じたことは今も忘れない。

2008年の中国汶川地震 (Wenchuan Earthquake)²⁾では地震記録は1年近くも公開されなかった。また中国には外国人の測量行為を禁止する測繪法³⁾が2002年8月に制定されていて、このような縛りのある中で文部科学省の特別研究促進費による公式調査を立ち上げるには、中国のしかるべき公的機関と公式に協定を結びお墨付きを得る段取りから始めなければならなかった。結果中国地震局と3回の交渉を重ねた末の覚書交換、そしてようやくの調査開始となった。

2005年8万人近くに達する死者を出したパキスタン・カシミール地震では外国人の出入りを厳しく制限しているパキスタン実効支配線 (Line of Control) を超えたアサド・ジャム・カシミール州 (AJK : Azad Jammu Kashmir州) が最もひどく被災した。被災直後から数年は外国の支援を積極的に受け入れなければならなかったことから入境制限も緩和され、筆者らも十数回の調査を重ねることになったが、しかし入境の管理は再び強化され、被災後の物理的、経済的、そして社会的ひずみを残したままの地域ではいまだにテント生活をする住民があり (BBCニュース³⁾)、また地震後に断層沿いに露出した脆い斜面は頻繁に土石流を引き起こしている。インド・パキスタンの国境地域であるから地震計は主に軍関係の施設にあって、結局それらは何も開示されないまま今日に至っている。

昨今の大きな犠牲者を出した地震の被害調査では得られる情報が限られているために徒手空拳で苦労を重ねることが絶えない。地震記録のみでは地震対応や復興のための報告書に到底至らない。したがってありとあらゆる痕跡を見直し、そこに刻まれた情報を読み解くノウハウを構築していくことが地震工学者に求められているのではないかと考える。

幸い、最近のリモートセンシング技術の発達は現地踏査だけでは把握しきれない広域の地形変動の情報を与えてくれる。地震は断層のずれによって引き起こされた現象であるから、その痕跡は標高変動などの情報として今も地盤にそのまま残されているはずである。地震記録のみならずこうした入手可能な情報からなにが読み解けるのか、著者らが関わった地震被害調査と研究から3つの地震に焦点を当て、その可能性について述べることにする。

2. 2004年新潟県中越地震で生じた地形変動

(1) 地震と復興の膨大な記録を残す試み

2004年10月23日17時56分頃に新潟県中越地方の深さ約10kmでマグニチュード（以下Mと略記）6.8の地震が発生した。さらに、同日18時12分頃にM6.0(暫定)、18時34分頃にM6.5(暫定)、さらに10月26日にはM6.1の地震が相次いだ。連続する地震は、地域の生活を支える道路、鉄道、上下水道、電気、ガスなど重要な社会基盤施設に深刻な被害をもたらした。東山山地では航空写真判読で確認されただけで3,791箇所（2005年1月11日国土交通省発表⁴⁾）に至る斜面崩壊が発生し、これらのいくつかによって芋川、朝日川など多数の河川がせき止められた。これらの天然ダムの下流部には関越自動車道路、上越線、国道17号線、117号線などが存在し、他のライフラインシステムと併せて、緊急対応が迫られた。顕在化した被害のみならず、一見無被害の地盤や構造物にも多くの損傷が伏在していることが懸念され、これらが相次ぐ余震や、日本海側に特徴的な11月の長雨によって更なる被害として顕在化した事例も報告されている。

震源地域（東山山地）は硬軟の地質が帯状に連なる活褶曲地帯であり、常時から地すべりが多発している。地震後に航空写真判読された3,700を越える斜面崩壊のみならず、隠れた損傷や亀裂はさらに膨大な数に達すると推測された。この地方の斜面災害の30~40%が融雪期に起こっていることから、こうした伏在する損傷箇所が融雪期に一気に顕在化し、せっかく応急復旧したシステムそのものに再び障害が起こる可能性すら懸念されたのである。また活褶曲山地を横切って流下する信濃川、魚野川は必然的に山地に刻み込まれるような蛇行（穿入蛇行）を形づくり、頻繁にその流路を変えてきた。人口の集中する小千谷、川口などは必然的に旧河道に沿って発達し、その結果激甚な被害を受けることになった。またこれらの地域を結ぶ鉄道や道路などの被害箇所を地図に落とせば、これらが段丘崖などに沿っており、地形の影響が浮き上がってくる。

時間的にも空間的にも広い広がりを持つ地震の影響と復興の様子を克明に記録するためのプロジェクト、文部科学省振興調整費「活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案」（代表：著者）が、2005年から2007年まで土木学会を中核機関として実施された⁵⁾。通常、被害の復旧、実態の記録は各事業主体、所管官庁ごとに進められる。しかし本プロジェクトでは、長期にわたる様々な課題に対応し、今後の防災の教訓を共有するため以下の実施体制をとった。

1) 中核機関:土木学会

主にサブテーマ全体で共通して使うデータ収集(ボーリング調査, 物理探査の実施), 研究の統括,

2) 参加機関:京都大学, 中央大学, 早稲田大学, 東京大学, 長岡技術科学大学,

3) 研究運営委員会:地震学など理学面の情報, 地理・地質・地盤情報, 災害・復旧に関連する情報を保有する各種機関, および大学を含む研究機関の学識者から幅広く構成,

このプロジェクトで最も大きな経費を投じた調査項目の一つが地形変動である。それは被災地域が名だたる豪雪地帯で融雪期の地滑りが復興にあたっての障害になることが懸念されたからであるが、結果的に次節で示すように、地震による地形変動から被害の物理的背景を探るうえで重要な情報をもたらすことになった。

(2) 地形変動の精密な検出

地震による地形変動はInSARなど最新の衛星データから得られるようになったが、中越地震に関して言えば、得られたSAR画像はCバンドの波長によるもので、植生や多発した斜面崩壊の影響で解析不能であった。このため地震前の1975年~1976年に撮影された航空写真から地震前の地形を、また地震翌日、4日後、半年後、1年半後、2年半後、3年半後の6時期に航空レーザー計測（LiDAR）を行ってそれぞれの時期の地形を2m間隔の正方メッシュに標高値を与えたデジタル標高モデル（Digital Elevation Model, 以下DEM）として準備し、これらを比較しながら、自然・人工の地形変動を確認することにした（図-1, 図-2）。図-3(a), (b)の矢印は地震前と地震翌日のDEMの差分(Euler座標上の標高変化)から、土粒子の変位、いわゆるLagrangian成分の抽出を行ったうえで表層の地滑りなどの影響を除去して得られたやや深部の地盤変位の水平、鉛直成分である(Konagai他^{6), 7)}。水平成分についてみると、大きな変位の現れる地域が二つ認められる。一つは梶金向斜軸に沿った幅1km程度の帯状の地域であり、東に向かって最大0.5mほどの移動量が認められる。もう一つはこの向斜軸から4~5kmほど西北西の妙見、浦柄あたりである。そしてこの図に目視や現地調査で確認された地すべり分布⁸⁾を重ねてみると、斜面崩壊がこの水平変位の大きな二地域に集中している様子がわかる。これらの地域は、それぞれ上記の震源過程解析で推定された本震と余震(18:03, Mw=5.9)の震源断層面の延長が地上と交差する辺りに位置している。この余震を引き起こしたとされる断層面に近い妙見や浦柄地区の崩壊が本当に余震によって引き起こされたかどうかは、地震後の通行止めの措置をどう展開していくかという対応への議論と相まって今後より深く検証を重ねていく必要があるように思われる。

一方上下方向の大きな変位は、水平変位の大きかった地域と交差するように、南西側の(1) 信濃川、魚野川合流部あたりと、北西側の山間部に現れている。地滑りとこの高い相関は、水平方向の変動の大きな地域との相関に比べるとあまり高くない。ただ主要河川の合流部辺りで隆起があったことは、地震翌年の魚野川沿いの地域の冠水被害に繋がっていると考えられ、復興の過程の課題の一つを示すものになった(Konagai et al.⁶⁾。



図-1 大日山の斜面崩壊（撮影場所 37.308673,138.888216）：2004 年中越地震で最大規模の崩壊である。降雪時期を挟んで撮影された 2 枚の写真でわずかながら変化が認められる。

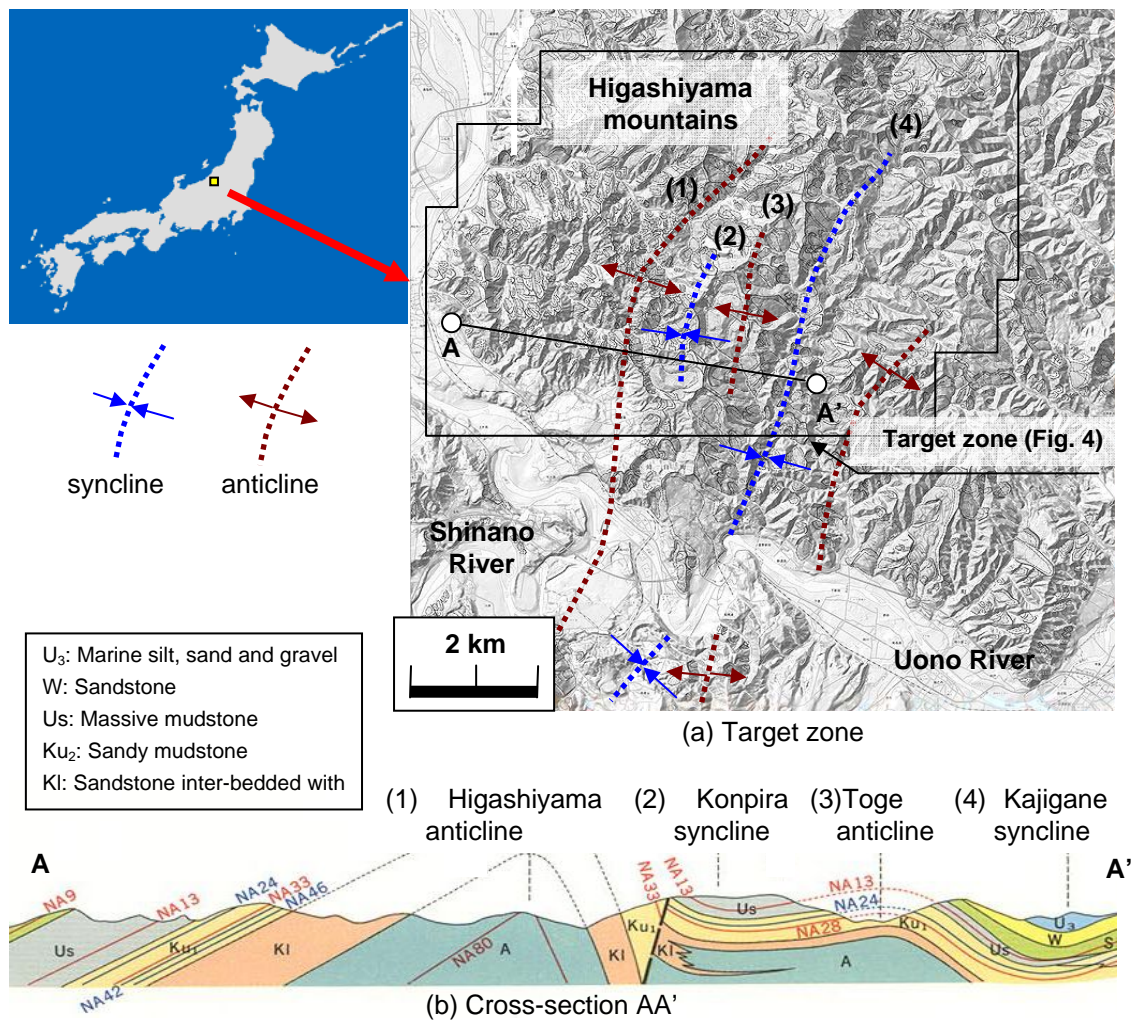
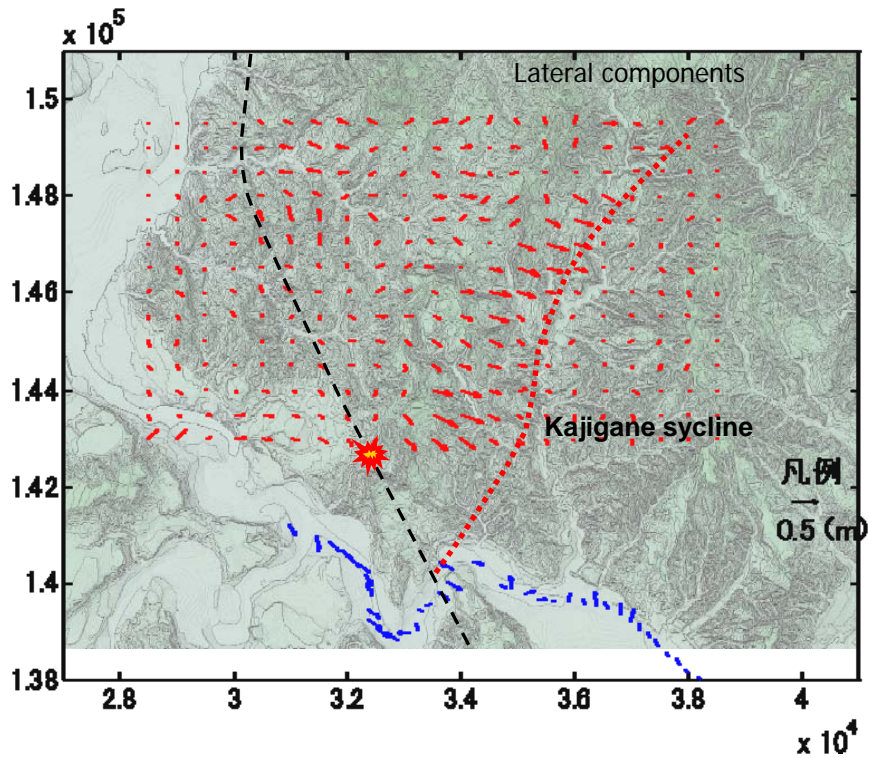
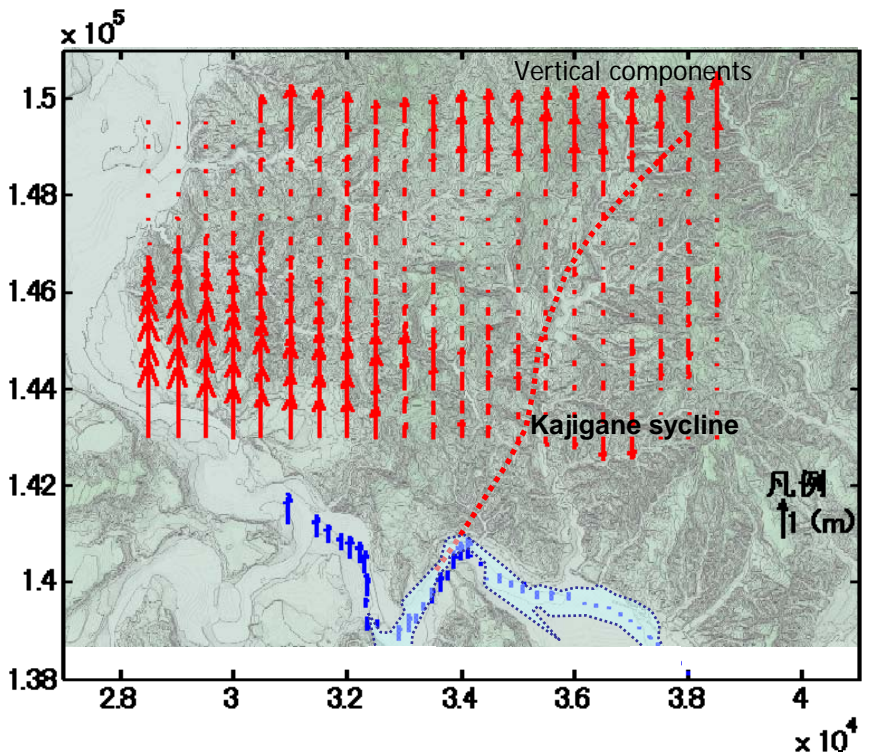


図-2. 2004 年中越地震でデジタル標高モデルを作成したターゲットゾーン (Konagai 他⁶⁾)



(a) 水平成分：崩壊地分布を重ねたもの。破線は後述する上越新幹線と魚沼トンネルの被災箇所



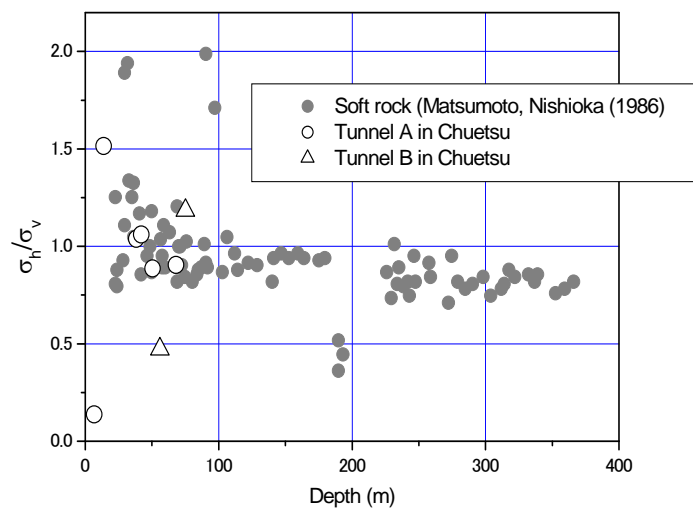
(b) 鉛直成分：魚野川の基準点変位も併記。梶金向斜軸より上流側の魚野川に沿って破線で示した区域は地震翌年の2005年6月の大雨で冠水した。

図-3 ターゲットゾーン内のやや深い部分の地盤変位 (Konagai et al. ⁶⁾に加筆) : 縦軸, 横軸の距離 (単位: m) は日本測地系第 VIII 系の南西端 (138°30'00" E, 36°00'00" N.) を原点とする. 梶金向斜軸を境に東西で大きく変位のパターンが変化している.

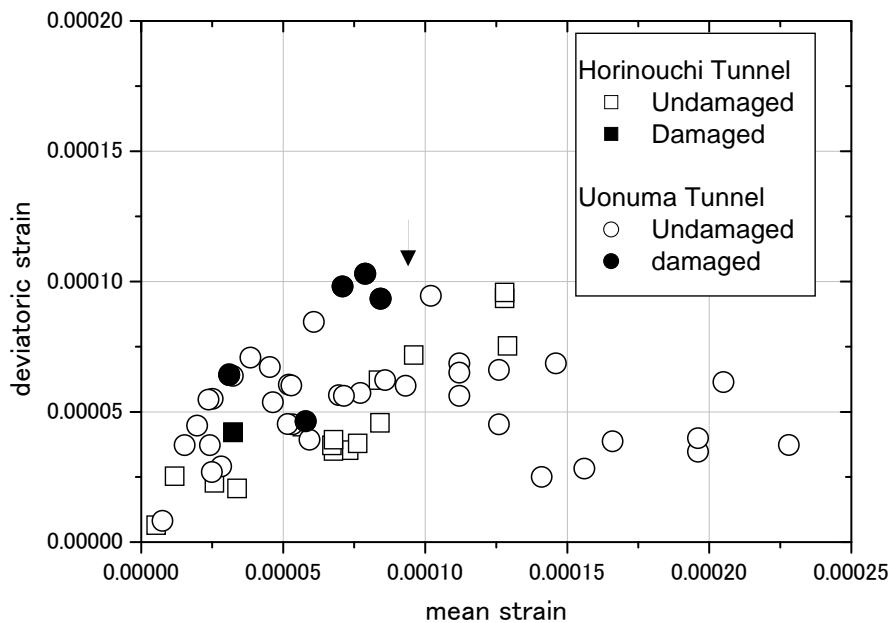
上記のやや深部の地盤変位の水平、鉛直成分は本震のみならずDEMの差分をとった時期に含まれるすべての余震の影響も含んでいる。余震も含めた断層面の位置を仮定すればそれらの面内でのすべり分布を逆解析できる。Honda⁹⁾が提示した地盤内構造（1次元速度構造モデル）を仮定し、Hikima, Koketsu¹⁰⁾の想定した断層面上でのすべり分布を算出し（藤田¹¹⁾）、このすべり分布から逆に、地盤内の応力状態を推定することができる。地震によって生じた応力状態を把握できればトンネルなど深部の地下構造物の被害（図-4(a)）との関連を議論できると考えたからである。ただしこの試みは生じた応力変化を加算すべき地震前の応力状態を知らなければならない。松本、西岡¹²⁾は全国規模で集約されたNATMトンネルの内空計測管理データから地山の側圧係数を求める作業を行っている。堆積軟岩の側圧係数を見るとおおむね1.0前後になっていて、松本・西岡はこれがレオロジ的な軟岩の長期挙動に起因する可能性を示唆している（図-4(b)）。著者らも中越地域で、地震前後に進行していたNATMトンネル工事の記録を集約し、ある程度土被り圧のあるトンネルでの地震前の側圧係数が1.0あたりに分布していることを確認している。これらの結果を受け藤田¹¹⁾は深部の地盤変位が顕著に変化する梶金向斜軸を挟む2つの鉄道トンネルである魚沼トンネル、堀之内トンネルのトンネル軸に沿って地震で生じた岩盤のひずみ状態を試算している（図-4(c)）。白抜きの記号（○、□）が被害の報告されなかった地点であり、黒塗りの記号（●、■）は修復の必要な被害の生じた個所である。応力からひずみを算定するに当たってはトンネル掘削時の各断面での弾性係数の計測値を用いた。



(a) トンネル被害箇所状況
（図-4(c)矢印）撮影：著者



(b) NATM トンネルの内空変位計測から推定した側圧係数



(c) トンネル沿いに生じた歪の分布

図-4. ターゲットゾーンの地形変動から逆解析された鉄道トンネル位置での地盤内歪（藤田¹¹⁾）

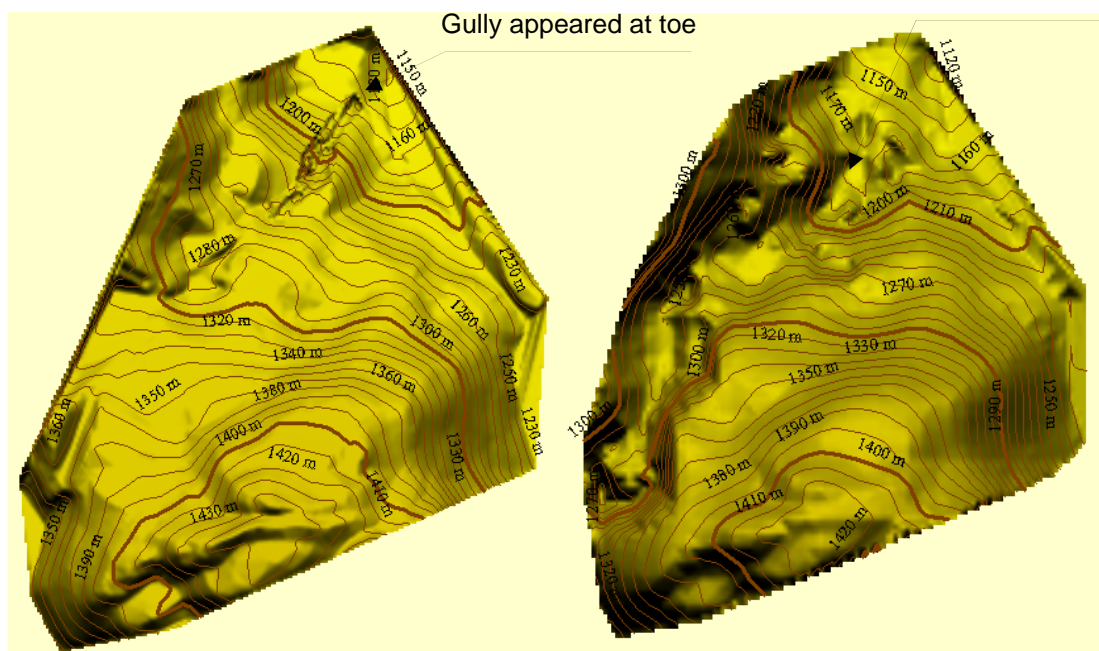
応力ではなくひずみで結果を整理したのは、軟岩の場合、一軸圧縮試験での破壊ひずみは大きくばらつくもののおおむね1%¹³⁾ (キャップエラーを除外した実際のひずみで0.2%¹⁴⁾) 程度で破壊強度に比べれば変動が小さいことを考慮したためである。偏差ひずみが平均主ひずみ値を超える領域で被害の発生が確認でき、かなり粗いアプローチではあるが今後このようなデータを集約することでトンネル被害と、軟岩内のひずみの関連をよりの確に議論できるものと考えられる。

3. 2005年パキスタン・カシミール地震後日譚

2005年10月8日午前8時50分(現地時間(UTC+5)、日本時間午後0時50分)にパキスタン北東部カシミール地方・インド国境近くでM7.6の地震が発生した。この地震では8万6千人以上の死者が報告されている。この地震では活動した断層に沿って多くの不安定な斜面が露出した。震災直後、被災地復興のためのドナー会議がイスラマバードで開催され、この決定に基づき、国際協力機構(JICA)が被災地の橋梁復旧や病院の建設、ムザファラバードの復興計画策定に尽力し、日本の復興への貢献は現地で高く評価された。



Soil mass outburst here



2009/06/12: Backward erosion found developed (see arrows)

2010/04/13: deeply eroded due to breaching in Feb. 9th 2010.

図-5 2005年カシミール地震で形成された Hattian Bala の土砂ダム：左は土砂ダム形成後4年後(2009年6月12日)に現れた侵食谷の地形をレーザーで計測したもの。右は決壊後(2010年4月13日)の状況である。写真はそれぞれ下流側から土砂ダムを撮影したものである。

一方でこのような復興の進むジェラム (Jehlum)川沿いの地域よりおよそ40km上流のハティアン・バラ (Hattian Bala)の山中では地震で山腹が崩壊し8000万 m^3 にも及ぶ土砂がJehlum川の2つの支流をふさぎ大小2つの湖が出現した¹⁵⁾。そしてこの決壊の可能性が復興事業や地域住民にとっての潜在的な脅威として議論されていた。このHattian Balaの土砂ダムは当初あまりにも大きく、決壊しないという見通しもあった。Ermini and Casagli¹⁶⁾はblockage index (DBI)なる以下の指標を提示している。

$$DBI = \log_{10} A \times H / V \quad (1)$$

ただし、A=集水域の面積、H=土砂ダム高さ、V=土砂ダムの体積である。

そしてこのDBIが2.75以下だとめったに決壊しないとしている。Hattian Balaの土砂ダムの場合、 $V = 8$ 千万 m^3 、 $A = 4.4$ 千万 m^2 、 $H = 130$ mであるのでDBIは2.75を下回る1.85となる。それでも潜在的な脅威に対応すべく地震直後に軍によって簡易な放水路が造られた。これで最大貯水量は8.6千万 m^3 から6.4千万 m^3 に減った。地震後の1年間はWater Power Development Authority (WAPDA)によって2つの天然貯水湖に流れ込む水量、漏水量などが計測されたが、土砂ダムに喫緊の危機がないと判断され、管理はWPDAの手を離れAJK州政府に移管され、結局計測は打ち切りになってしまう。しかし土砂ダムは2010年の2月9日に突如決壊してしまう(図-5右写真)。

この決壊で引き起こされた洪水は4km下流のHattian Balaの町で20m近くの高さに達したが、多くの家屋が段丘の高台にあったこと、早期の避難がなされたことで30戸近い家屋が崩壊し、犠牲者が男の子1名にとどまったことは不幸中の幸いであった。

著者らはJehlum流域の地震後の地形変化を懸念。州政府の地震復興局 (State Earthquake Reconstruction and Rehabilitation Agency: 以下SERRA) やMuzaffarabad市の関係者の要請や支援を受けて流域の状況を調査してきた (Konagai et al¹⁵⁾)。ハティアンバラの土砂ダムについては学術振興会の科学研究費 (2008年~2010年) を得て継続的に調査を進めてきた。2009年の調査では、2009年6月 (モンスーン前) と2009年11月 (モンスーン後) で土砂ダムの一番厚く堆積した部分が10cmを超えて沈下している一方で、2009年の6月の段階でその出現が確認された下流部斜面のえぐれ (図-5左写真矢印) 近くで数cmの隆起があることを確認し、また流れ出す水の性質 (重水比率) が突然変化していることを確認した (Ahsan, Konagai, et al.¹⁷⁾)。これらの変化は計測が行われるたびにSERRAとMuzaffarabad市、GSPなどに報告された。ただこのような事前の変化を今回の2月9日の決壊の予兆として関連付けることは困難で、このため監視を怠れないことのみを伝えていた。もう少し継続的な調査を行い、踏み込んだ警告を出すべきであったかと悔やまれる。現地にはまだ大量の不安定な土塊が残っているため、さらに踏み込んだ調査と対応が必要である。この決壊の直接的な原因は調査中であるが、赤道地域降雨観測衛星 (TRMM) のデータを解析したところこの決壊あたりに集中降雨のピークが生じている。

4. 2008年中国・汶川地震

2008年5月12日に中国四川省汶川県付近を震源とするマグニチュード (M) 7.9あるいは8.0 (前者は米国地質調査所、後者は中国地震局) の内陸巨大地震が発生し、中国政府、民政部によれば5月21日正午時点で死者69,197名、行方不明者18,222名と報告される甚大な被害をもたらされた。この巨大地震 (以下、汶川 (Wenchuan)地震) は、四川盆地とチベット高原の境界部に位置し、北西-南東方向の圧縮力による逆断層運動によって生じたと考えられている。断層の長さは280km以上と推定され、内陸部で発生した地震としては最大級の地震である³⁾。

この汶川地震は、活動した断層の大きさが稀有な規模をもつということだけではなく、断層沿いの山地に大量の不安定な土石が残されていて、下流域にとって土石流などの深刻な不安材料となっている。強烈な揺れへの対応とあわせ、長期に及ぶ復興の課題に資する測量をベースにした科学的調査もまた重要である。一方中国では2002年8月に発布された中華人民共和国測絵法 (Surveying and Mapping Law of the People's Republic of China)¹⁸⁾なる法律があって、外国人の測量行為を大きく制約している。新華社通信¹⁹⁾は2007年7月9日の報道でそれまでに3件の違反案件があったことを報じているがこれらはいずれも日本人が関わったものとされる。この測絵法はほとんどの政府関係機関のウェブサイトが中国語でのみ記載されている中、数少ない英文訳が確認できるものである。地震記録の開示もなかなかされない中で46名の専門家からなる文部科学省特別研究促進費「2008年中国四川省の巨大地震と地震災害に関する総合的調査研究」(研究代表者; 筆者)の調査グループが組織された²⁰⁾。この組織が正式に文部科学省の支援を受ける学術調査団としてスタートするためには、どうしても上記の制約をクリアする必要があった。このため筆者は研究代表者として3回事前に北京を訪問し、カウンターパートである中国地震局と綿密な調整を行うことになった。

この組織は以下の7つをそれぞれミッションとする班から構成される。

[1] 斜面災害調査, [2] 社会基盤施設被害調査, [3] 建築・家屋被害調査, [4] 地震学的調査, [5] 地殻変動調

査, [6] 活断層調査, [7] 救援・復旧支援活動および経済的影響調査.
 1年間に及ぶ調査の結果は314ページに及ぶ英文報告書冊子としてまとめられ, また著作権の所在, 引用の条件を明示して, 以下のウェブサイト²⁾に掲載している.

<http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/wenchuan/>

四川省の汶川(Wenchuan)地震ではその地震断層が250 kmにわたり滑動したため, 被災地域はわが国がこれまで経験し得なかったほどの広範囲に及ぶことになった. その復旧戦略の経費は2008年度に限っても200億ドル相当が必要との試算がある. 中越地震が高々長さ20kmほどの断層規模であれだけの土砂災害につながったのである. ましてや今後砂防を中心とする国土保全に深刻な課題が浮き出てくる可能性が懸念され, そしてそれが現実のものとなりつつある.

測量による調査の縛りのある中できわめて有効に活用できた情報ソースは宇宙航空研究開発機構(JAXA)によって開発された陸域観測技術衛星(Advanced Land Observing Satellite: ALOS)²⁰⁾である. 上記[1]の斜面災害調査班(Chigira 他²²⁾)はこのALOSの衛星画像からほぼ5万㎡以上の面積の崩壊分布を調査した. 調査した. その中で断層沿いの帯状の分布域に加え, 震源近く(映秀付近)を横切るMinjiang川沿いの急斜面にも多くの崩壊箇所が認められることが明らかになった. 図-6は北川(Beichuan)から平通(Pingdong)付近の断層沿いの崩壊地の判読結果を示している. 断層からの横断方向の距離に対しての崩壊発生の度数を同じ図の右に示している. 多くの崩壊が断層上盤側の幅5km程度の帯の中に入っていることが明瞭に認められる. 地質的には上盤側も下盤側も千枚岩(phyllite)の葉状構造の卓越する地域である. 家屋などの被害も上盤側に集中する傾向と符合する. さらにこの帯は断層がわずかに屈曲(left-stepping)する部分で少し厚くなるが, この部分は右横ずれ断層で圧縮が生じる部分でもある.

図-7にはANVIR-2画像から読み取った崩壊および堆積体(Lobe)の方位角分布である. 崩壊の方向については断層直交方向が卓越する様子(指向性)が認められる. 歴史上最大級の崩壊が発生したことも特筆すべきことである(図-8). この崩壊は大光包(Daguangbao: 31.63686812147388, 104.10009384155273)の山頂を源頭部として長さ4.5km, 幅1~2km, その総面積は700万㎡に及ぶ. 総体積は10億m³にも及ぶと推定される. Huang²³⁾によれば崩壊した斜面は炭酸塩岩が卓越しておりN35-38° E方向に傾斜した滑り面に沿って崩壊したものとされる.

現地調査からは, 崩壊にいくつかのタイプがあること, また, 白雲岩などの炭酸塩岩に最も多くの崩壊が発生し, それに特有の原因があることが明らかにされた. また高精度表面波探査装置と地震計を用い安県にある肖家橋(Xiaojiaqiao)地すべりと青川県東河口(Donghekou)地すべりにおいて地すべり堆積土塊の土層構造を調査した(Kamai, Wang G.²⁴⁾, Wang F. et al.²⁵⁾).

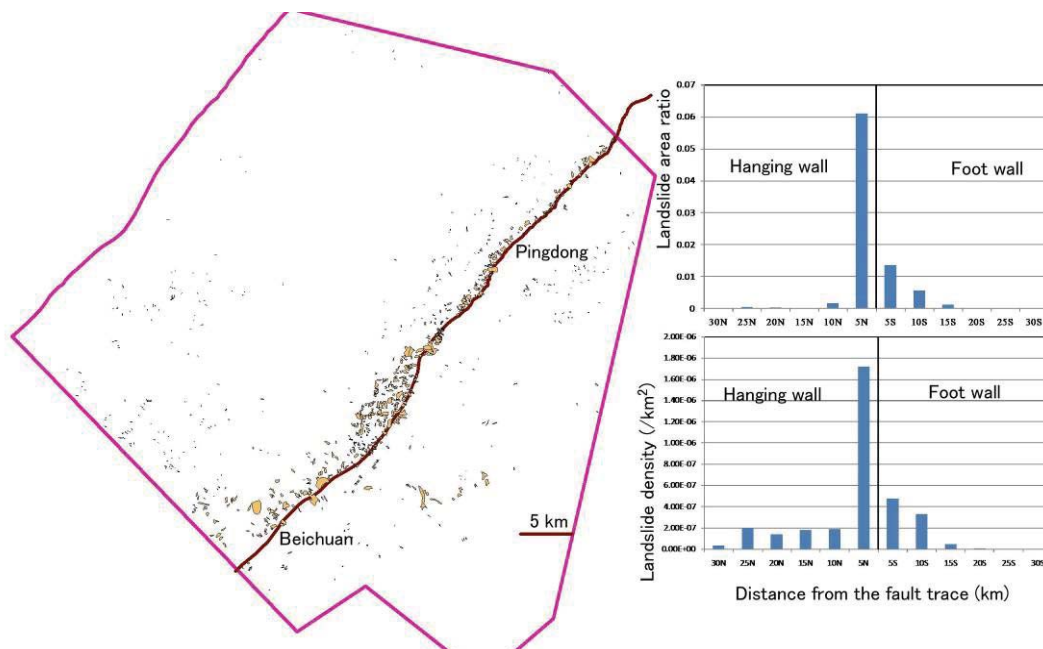


図-6 北川(Beichuan)から平通(Pingdong)にいたる断層沿いの斜面崩壊箇所分布の判読, および断層面からの距離による斜面崩壊数(Chigira, et al.²²⁾)

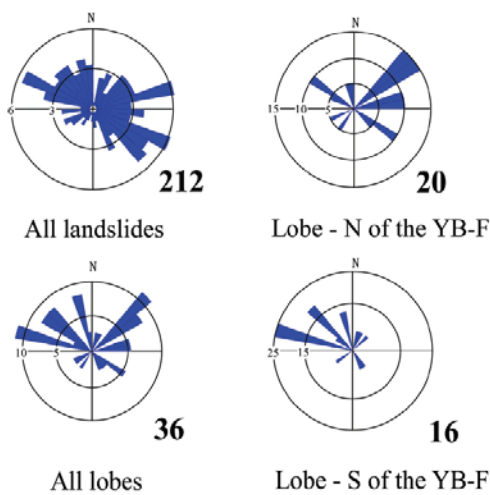


図-7 (上) ANVIR-2画像から読み取った崩壊および堆積体 (Lobe) の方位角分布 (Chigira, et al. 22)

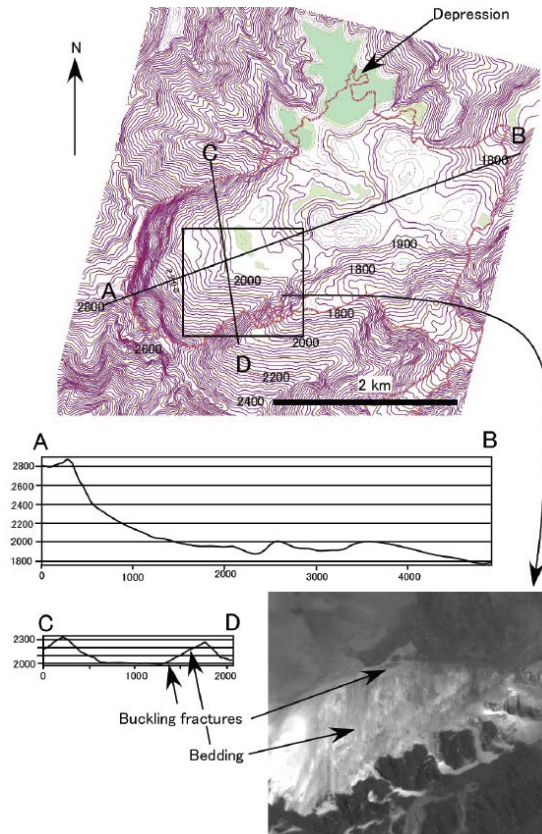


図-8 (右) 大光包 (Daguangbao) : 31.63686812147388, 104.10009384155273) の山頂を源頭部で発生した歴史上最大級の崩壊 (Chigira, et al. 22)

東河口地すべり地では、地すべり堆積体および源頭部において地震観測を行い、尾根で地震動が増幅されている貴重な地震波データを得た。また彭州市小魚洞橋近傍に現れた地震断層の地下構造も調べている。リングせん断試験によるすべり面液状化挙動についても調査を行い、東河口地すべりからのサンプルについては滑り面の粒子破碎による間隙水圧上昇で見掛けの摩擦角が 5.4° 程度まで下がる可能性があることを示している(Wang, F. et al. 25)。

斜面災害は今回の地震被害を大きく特徴付けるものとなったが、断層に沿って残された不安定な土砂が土石流などの形で長期に亘る深刻な課題として顕在化してくるであろう。この地震で最も深刻な地震被害を受けた北川の街は、地震から4ヶ月ほど経過した9月23日、24日の豪雨で発生した大量の土砂に埋まってしまう(図-9)。この2日間の累積降雨量は熱帯降雨観測衛星(トリム: Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)によれば300mmを越えている(Fukuoka, et al. 26)。

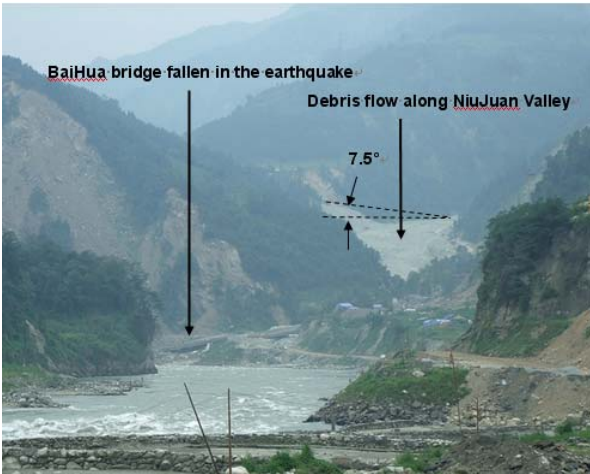
震央位置とされる汶川県映秀下流に位置する百花郷牛圈沟で土石流が発生し、20人以上が犠牲となった(図-10)。牛圈沟の左岸支流の上流山腹で発生した大規模な崩壊は、支川合流で対岸の約40m高に乗り上げた後、約1500mを土石流となって流下し、岷江(Ming Jiang River)に流れ込んだ。現在、溪床に堆積する土砂量は約500万 m^3 と推定される。溪床に堆積する岩塊の多くは、径20cm以下の花崗岩類であるがメートルオーダーのものも散見される。この土石流が岷江に至る500mほど前の地点で谷筋は大きく左にカーブし、土石の這い上がり痕跡が右岸に残されている。こうした痕跡から土石流速度の大まかな推定を行うには、マンシングの式から推定する方法、ダイラタント流体を仮定する方法などがあるが、土石流が蛇行水路を通過する時、遠心力がかかって水面が傾く(傾斜 θ)状況などから土石流の流下速度を7~22mと推定している(Konagai, Ishikawa, Tsuchiya 27)。

前述のように、この地震で最も壊滅的な被害を受けた北川(Beichuan)は2008年9月23日、24日と降り続いた大雨による土石流でその様相を一変させた(図-9)。地震のときに南部の市街地西側で発生した斜面崩壊によって谷幅が狭められていた状況で土石流が押し寄せたため、堆積土石の厚さは最大で10m~15mに達している(図-11)。この北川を20km南の安昌鎮に移転させる決定をしていたのは幸いであった。

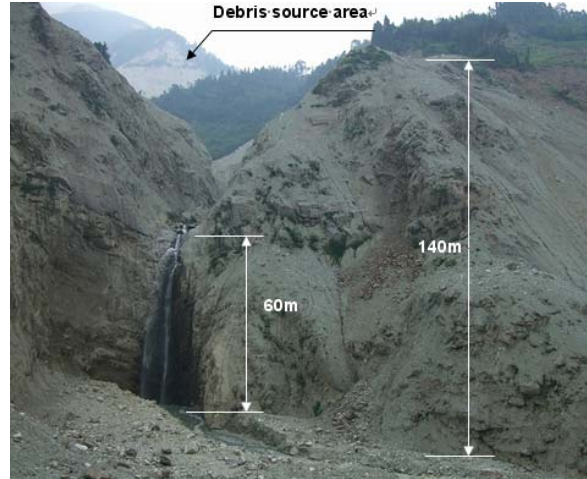
本調査の年度を過ぎて生じた事例であるが、壊滅的な被害を受けた映秀から岷江の河谷沿いに汶川に至る国道213号線では地震の1周年に竣工した徹底関大橋(43km地点)が2009年7月25日に西側斜面からの大規模な落石で100mにわたり落橋。通行していた7台のトラックが巻き込まれ6人が死亡、12人が重軽傷を負った(図-12)。このやや上流から沙牌(Shapai)ダムに至る支川谷筋の旧道も10mを越す土石に埋まってしまう。土石の問題は今後長期に及び、災害復旧や社会基盤の整備に深刻な影響を与え続けるものと懸念される。地形変動の監視と科学的な調査が継続的に長期に行われることが必須である。問題はなおも続いている。



図-9 土石に埋もれた北川 (Beichuan) の街
(写真提供: 安田進, 撮影日 2009年4月20日)



(a) 土石流末端部
撮影日 2008年7月29日,
撮影場所 31° 03'09.1"N, 103° 28'43.2"E



(b) 土石流の痕跡
撮影日 2008年7月29日,
撮影場所 31°02'27.4"N, 103°27'48.5"E

図-10 岷江(Ming Jiang River)に到達した土石流 (Konagai, et al. 27)

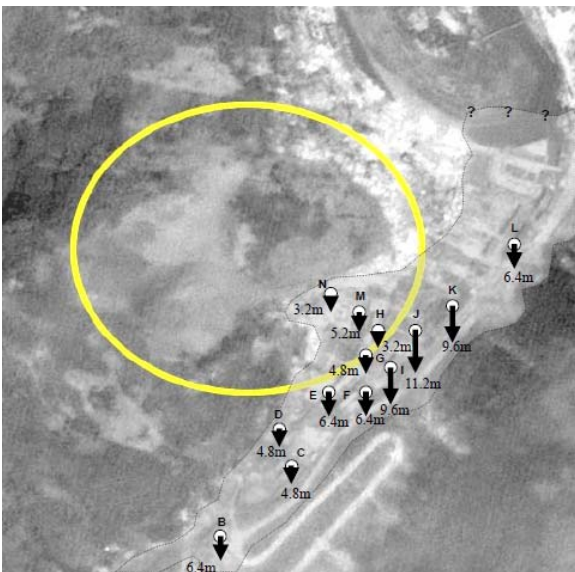


図-11 北川 (Beichuan) の街に堆積した土石の厚さ (Konagai 27)



図-12 国道 213 号徹底関橋(Chediguan Bridge)と後背斜面
(撮影: 小長井一男)

徹底関橋の位置:
N31.22006842923375,
E103.48696231842041
写真: Record China より

5. まとめ

昨今の大きな犠牲者を出した海外の地震の被害調査では被災地の地震記録が十分に得られず、地震対応や復興のための教訓を得にくい状況がある。したがってありとあらゆる痕跡を見直し、そこに刻まれた情報を読み解き将来の地震対策、復興にかかわる教訓につなげていくことが地震工学者に求められている。

地震断層沿いに大きな被害が集中するのは、強い揺れと相俟って、大きな変形（歪）が発生するからである。また断層が伏在する場合にも帯状の被害域がその存在を示すことも少なくない。こうした断層沿いの社会基盤施設の被害は、逆に断層沿いの歪の分布を明確に示す証拠であり、これらの被災事例を丁寧に解析し、貴重なデータとして後世に残すことが大事である。

被害地震は稀にしか起こらない。そして一旦起こると時に行政の処理能力を大きく越える深刻な被害に至る。しかし地震の後に続く地盤の変形が、地震が社会に与える影響をさらに大きく増幅しているように思われる。世界の被害地震の1割強が発生し、年間降雨量1800mmと世界平均の730mmを越えるわが国にあって、時間軸を意識した“地震工学・防災工学”の戦略構築が今後より一層求められていくように思われる。

参考文献

- 1) The June 23, 2001, Atico Earthquake, Peru(2002.3.22), Report of the JSCE Reconnaissance Team, <http://www.jsce.or.jp/report/14/02/contents.htm>, March, 2002.
- 2) Investigation report of the May 12th 2008, Wenchuan earthquake, China, Grant-in-Aid for Special Purposes of 2008, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). No. 20900002, <http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/wenchuan/>
- 3) Muzaffarabad earthquake survivors left out in the cold, BBC News on line, http://news.bbc.co.uk/2/hi/south_asia/8494009.stm
- 4) 国土交通省：平成16年新潟県中越地震に伴う斜面崩壊の発生状況について（続報）
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/05/050113_.html, 2005年1月13日.
- 5) 活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案，平成20年度科学技術振興調整費，<http://active-folding.iis.u-tokyo.ac.jp/>.
- 6) Konagai, K., Fujita, T., Ikeda, T. and Takatsu, S.: Tectonic deformation buildup in folded mountain terrains in the October 23, 2004, Mid-Niigata earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(2), 261-267, 2009.
- 7) Konagai, K., Takatsu, S., Kanai, T., Fujita, T., Ikeda, T. and Johansson, J.: Kizawa tunnel cracked on 23 October 2004 Mid-Niigata earthquake: An example of earthquake-induced damage to tunnels in active-folding zones, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(2), 394-403, 2009.
- 8) 八木浩司ほか：2004年新潟県中越地震にともなう地すべり崩壊分布図，<http://japan.landslide-soc.org/>, 2004.
- 9) Honda, R., Aoi, S., Morikawa, N., Sekiguchi, H., Kunigi, T., and Fujiwara, H., Ground motion and rupture process of the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net *Earth Planets Space*, **57**, 527-532, 2005.
- 10) Hikima K. and Koketsu K.: Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A series of events in a complex fault system, *GRL*, Vol.32, L18303, p.1-5, 2005.
- 11) 藤田智弘：博士論文草稿，2010.
- 12) 松本嘉司，西岡隆，鹿野正人：吹きつけコンクリートとロックボルトを用いたトンネル特性と事前設計方法，*土木学会論文集 No.376/III-6*, 151-160, 1986.
- 13) 例えば，櫻井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法，*土木学会論文集*，No. 317, 93-100, 1982.
- 14) 例えば，福元俊一，吉田望，佐原守：堆積軟岩の動的変形特性，*日本地震工学会論文集 第9巻*，第1号，46-64, 2009.
- 15) Konagai, K., Johansson, J., Takatsu, S. and Ikeda, T. (2009c): Huge landslides caused by massive earthquakes and long-lasting geotechnical risks, *Landslides – Disaster Risk Reduction --*, ISBN: 978-3-540-69966-8, 159-176.
- 16) Ermini L. and Casagli N (2003): Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 31-47.
- 17) Sattar, A., Konagai, K., Kiyono, T., Ikeda, T. and Johansson, J. Measurement of debris mass changes and assessment of the dam-break flood potential of earthquake-triggered Hattian landslide dam, *Landslides*, DOI 10.1007/s10346-010-0241-9, 2010.
- 18) Surveying and Mapping Law of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources, China, http://www.mlr.gov.cn/mlrenglish/laws/200710/t20071012_656324.htm, 2002.
- 19) 国家測絵局が涉外測絵違法案件の処理状況を公表，*新華社通信*，2007年7月9日付（中国語）。
- 20) 「2008年中国四川省の巨大地震と地震災害に関する総合的調査研究」への科学研究費補助金（特別研究促進費）の交付について，*文部科学省*，http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/06/08062707.htm, 2008.
- 21) 陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS），宇宙航空研究開発機構（JAXA），http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_j.html.
- 22) Chigira, M., Wu, X., Inokuchi, T. and Wang, G. (2009): Landslides and the fault surface ruptures during the 2008 Wenchuan Earthquake, Sichuan, China, Investigation report of the May 12th 2008, Wenchuan earthquake, China, Grant-in-Aid for Special Purposes of 2008, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). No. 20900002, pp. 5-20.
- 23) Huang, R., Pei, X., Li, T. : Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale, landslide at Daguangbao oc-

curred during the Wenchuan earthquake, *Journal of Engineering Geology*, Vol. 16, 730-741, 2008.

- 24) Kamaï, T. and Wang, G. (2009): The landslides on the west part of Shichuan and south part of Gansu triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake, Investigation report of the May 12th 2008, Wenchuan earthquake, China, Grant-in-Aid for Special Purposes of 2008, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). No. 20900002, pp. 21-30.
- 25) Wang F., Sun, P., Konagai, K., Yin, Y. and Fukuoka, H. (2009): The mechanism of initiation and motion of the rapid and long runout landslides triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake, Investigation report of the May 12th 2008, Wenchuan earthquake, China, Grant-in-Aid for Special Purposes of 2008, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). No. 20900002, pp. 47-56.
- 26) Fukuoka, H., Cui, P. and Hong, Y. (2009): Mechanisms of landslides triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake and subsequent rainstorm-induced debris flow, Investigation report of the May 12th 2008, Wenchuan earthquake, China, Grant-in-Aid for Special Purposes of 2008, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). No. 20900002, pp. 75-84.
- 27) Konagai, K., Ishikawa, Y., Tsuchiya, S. and Wang, F. (2009): Debris flows and geotechnical problems, Investigation report of the May 12th 2008, Wenchuan earthquake, China, Grant-in-Aid for Special Purposes of 2008, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). No. 20900002, pp. 85-94.

KEYS TO INTERPRATION OF EARTHQUAKE-INDUCED LANDFORM CHANGES FOR RATIONAL REHABILITATIONS

Kazuo KONAGAI

Seismic records are not always available in areas seriously devastated by large earthquakes, and therefore it is very difficult to duce real causes of devastations, which would be certainly good lessons for future preparedness and rehabilitation strategies. Knowing that soil deformativens have been no less responsible for devastations than intense shakes, experts of earthquake engineering need to devote much of their energies to eliciting important information hidden beneath visible landform changes in response to the current development of remote-sensing technologies. Here are some case histories of this challenge from recent three major earthquakes; 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake, Japan, 2005 Kashmir Earthquake, Pakistan and 2008 Wenchuan Earthquake, China.