

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21403002

研究課題名（和文）四川大地震時生じた大規模天然ダムの決壊危険度及び緊急対策の有効性に関する調査研究

研究課題名（英文）Investigation on failure risk of landslide dams formed during the 2008 Wenchuan earthquake and the effectiveness of emergency countermeasures

研究代表者

王 功輝 (WANG GONGHUI)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：50372553

研究成果の概要（和文）：

2008年四川大地震により、800個以上の天然ダムが形成された。これらの天然ダムの形成・決壊過程を解明するために、四川の大規模天然ダムについて現地調査および計測を行い、天然ダムを形成する地すべりの地質・地形背景・運動特徴およびダム堤体の物性について調べた。また、日本国内で地震や降雨により形成された天然ダムに対して、現地調査と計測を実施し、ダム堤体の物性を調べた。また、ダム堤体の物性に基づいた天然ダム堤体の越流決壊危険度評価手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

During the 2008 Sichuan earthquake (M8.0), more than 800 landslide dams formed. To clarify the formation and failure of these landslide dams, we conducted detailed field survey and monitoring on some big landslide dams. The geological, geomorphological and movement features of the original landslides were investigated and the geotechnical properties of the dam sites were surveyed. We also surveyed some landslide dams triggered by earthquake and/or rainfall in Japan. Based on these results, we proposed a new approach for evaluating the collapse failure risk of landslide dam due to overtopping.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：地震，地すべり，天然ダム，危険度評価

1. 研究開始当初の背景

「天然ダム」とは、地すべりや大規模崩壊などの急激な土砂移動が発生して、河道が閉塞されると、背後に河川水が貯留されて湖水が形成される現象である。このような天然ダムは構造的に脆弱であり、自重や越流水によ

り容易に崩壊し、時として蓄えていた水と一緒に一気に流下し、甚大な二次災害を引き起す場合もある。例えば、1786年中国四川省で起きた地震により大渡川で形成された天然ダムは、地震の10日後に決壊された。この時発生した巨大洪水は1400kmも下流にまで

被害をもたらし、約 10 万人の命が奪われた。

近年国内外頻発している内陸直下型地震により多くの天然ダムが形成され、地震災害の復旧に大きな影響を与えかねないことが指摘され、災害直後の限られた時間内でダム決壊の危険度を的確に評価することが重要視されている。これまで、天然ダムに対する研究は地質地形学的アプローチと水理学的アプローチの二側面から、決壊したダムの特徴やダムの決壊過程及び決壊メカニズムなどについて実施されてきた。ダム決壊の評価方法や、決壊に伴う洪水流出の予測方法等は数多く開発された。これらの成果や技術等は今までの天然ダム決壊対策に一定の役割を果たしたことは否定出来ない。しかし、多くの研究成果が得られたにも関わらず、天然ダムによる被害が絶えずに発生している。特に天然ダムに対する知識が未だに不十分であるため、今までに大規模天然ダムに対する応急対策は経験に基づいたものが多いことを認めざるを得ない。また、実天然ダムの地域性や特異性及びダム堤体の異方性を考慮した決壊危険度を評価する手法は開発されていない。従って、天然ダムに対する決壊危険性を十分に認識したものの、応急対策時にダムが決壊するケースが少なくない。例えば、2000 年中国チベットの易貢地区に岩盤崩落により形成された大規模天然ダムにおいて応急対策として排水路を作ったが、放水後ダムが一気に侵食決壊され、発生した巨大洪水により、下流側のインド北部に約 100 人の命が奪われ、5 万人の家屋が失われた。しかし、このような失敗があったにも関わらず、2008 四川大地震時に形成された唐家山巨大天然ダム(湛水量:約 2.5 億立米)に対して、緊急排水路の工事が施工されたが、天端が急激に侵食され、巨大洪水の発生が懸念されていた。幸いには、見守るしかできない状態の中でダムの決壊は堤体の 1/3 までに留まった。また、同じ地震で形成された青川県の石板溝天然ダムに対しては、発破により天然ダムの一部を除去し、ダム湖の水位を下げたが、天然ダムそのものが十分な安定性を持っていたのではないかと指摘もされた。換言すると、大規模天然ダムが決壊するかどうかについての的確な評価が出来なかった。しかし、これまで実際の天然ダムがどのような状態で決壊したか、特に決壊する前のダムの挙動に関する詳しい研究がなかったため、これらの失敗或いは不適切な対策があるのはむしろ当然である。

2008 年の四川大地震においては、家屋の倒壊や土砂災害などによる死者と行方不明者

が 9 万人以上と推定されている。この時に大規模天然ダムが多数形成され、地震災害の復旧・復興に大きな影響をもたらしている。これらの天然ダムの殆どは自然に或いは応急対策工事によりなくなったが、唐家山などをはじめ、幾つかの大規模天然ダムが現在もなお残っており、決壊による大洪水の発生が懸念される。

以上の背景より、2008 年四川大地震時生じた天然ダムに対する調査研究は、大規模天然ダムの決壊機構を解明すると共に、その決壊危険度を的確に評価する手法の開発に対して極めて稀かつ絶好の機会と考えられる。申請者らは別経費及び私費で地震後数回に渡って、現地調査・計測を行った。この時日本から高精度表面波探査装置と地震計を持ち込んで、二つの大規模天然ダムに対して、堤体の S 波速度構造を調べた。また、青川県の東河口天然ダムに対して、堤体内外二箇所において地震観測を行い、貴重な地震波データも入手できた。しかしながら、数多くの大規模天然ダムに対する詳しい調査と計測まで至らなかった。この調査研究を発展的に継続し、総合的かつ本格的な観測・調査に着手することは、災害直後の緊急事態に備えた天然ダム危険度予測法の開発・実用化を大きく前進させることを期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、大規模天然ダムの形成・決壊機構を解明するため、四川大地震時形成された数多くの天然ダムを調査し、物理探査、現地計測、実験分析及び数値解析を通じて、下記の点を明らかにする。

(1) 異なる地質条件のもと地すべりの形成・運動特徴を整理し、崩壊土砂の堆積特性を検討し、天然ダムの土層構造と地質背景及び地形の関係を解明する。また決壊したダムに対して、決壊時の水文調査及びダム堤体の残骸に対する土質調査を行い、ダムの決壊メカニズムを解明する。

(2) 決壊していない天然ダムに対して、高精度表面波及び微動アレー調査方法を用い、堤体の土層構造を調べる。また、唐家山天然ダムに対して、地震計を設置し、地震動による堤体安定・変形に与える影響を解明する。

(3) 日本国内で、地震や降雨に形成された天然ダムに対して、現地調査、物理探査を行い、四川大地震時に形成された天然ダムの堤体の物性と比較し、異なる地質・地形および地すべり運動特徴を持った天然ダムの安定性について分析する。

(4) 以上のことより、天然ダムの決壊機構

を解明し、その災害の学理を究明する。また、災害直後の緊急事態に応じて、限られた時間内で科学的に信頼されうる定量的かつ実証的データと地域特徴に基づいた効果的な天然ダムの決壊危険度評価方法の提案に貢献する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、下記のように研究を行った。

(1) 大規模天然ダムに関する調査研究

四川大地震時形成された大規模天然ダムが30箇所以上となり、殆どのものが自然に決壊した或いは堤体開削などの応急対策工事により堤体が掘削された。これらの天然ダムを調査し、地すべりのタイプとダムの性質の関連性、ダムの決壊機構、決壊時ダムの上流および下流側で発生した洪水の特徴などについて調べた。具体的には、

①大規模天然ダムを形成する地すべりの地質地形特性と崩土の運動・堆積特徴を調べ、地すべりタイプとダムの性質の関連性を解析した。ダムの堤体が決壊或いは掘削されたため、堤体の土層構造が残留堤体の断面から調べた。残留堤体の土層構造については非破壊物理探査法（高精度表面波探査・微動アレー探査）により調査および直接現地計測（密度計測、粒度分析、写真測量による堤体内における岩塊・土粒子の配向分析など）を行った。これらの手法の有効性が確認されたため、災害直後の緊急事態に応じた迅速かつ有効な非破壊物理探査法による天然ダムの土質特性を解明した上での決壊危険度評価方法の構築を期待できる。

②自然に決壊した天然ダムに対して、ダム決壊前の余震状況、決壊時の湛水量及び洪水特性に関する情報を収集し、ダムの決壊と湛水量および余震の関係について調べた。また、ダムの残留堤体に対して、土層の物性を詳しく計測し、ダムの崩壊機構について検討した。

③爆破による堤体開削などの応急対策が実施されたダムに対して、施工時の爆薬使用量、排水路造成後の侵食過程および河川流量の変化などに関する情報を収集した。また、ダム堤体の物性を調査し、ダムの安定性を評価し、応急対策の有効性及び適切さについて検討した。

(2) 大規模天然ダムに関する計測研究

殆どの天然ダムが形成された直後に決壊したため、余震により堤体の不安定化に関する計測が皆無に等しい。従って、余震がど

のようにダムの安定性を影響したのかについての検討が少ない。特に今回の四川大地震においてマグニチュード5以上の余震が40回にも及び、こういった環境の中でダム堤体の動的挙動を解明した上でダム決壊の危険度を評価しなければならない。従って、本研究においては、唐家山天然ダムに対して、下記のように計測研究を行った。

①唐家山天然ダムの堤体内および堤体外において、京都大学防災研究所により開発した「満点計画」地震計を設置し、地震観測を行った。

②ダム堤体において、微動アレー探査および高精度表面波探査を実施し、堤体のS波速度構造を調査した。

③1933年に今回の四川大地震と同じ地震断層帯で発生した茂文地震(M7.2)により形成され、現在まで安定な状態にある豊溪天然ダムに対して、現地調査を行い、天然ダムを形成する地すべりの地質・地形背景について調べた。

(3) 日本国内の天然ダムとの比較研究

①H16年中越地震時に形成された東竹沢天然ダムの堤体に対して、高精度表面波探査および微動アレー調査を実施し、天然ダムのS波速度構造を調べた。得られた結果と四川大地震により形成された天然ダムでのS波速度構造を比較し、越流侵食に弱い土層を評価した。

②豪雨時に発生した地すべりにより形成された天然ダムの安定性と比較し、地震時に形成された天然ダムの特徴や安定性をよりの確に評価するため、平成23年の台風12号に伴う豪雨により、紀伊半島で形成された幾つかの大規模天然ダムに対して、現地調査と物理探査を実施した。

4. 研究成果

四川大地震時形成された大規模天然ダムの形成・決壊機構を解明するため、幾つかの大規模天然ダムを対象に、その地質背景を調査すると共に、高精度表面波探査と微動アレー調査を実施し、ダム堤体の物性を調べた。また、ダム堤体において地震観測を行い、その地震動特性も調べた。その結果は、下記の通りである。

(1) 災害直後の衛星写真より、800余りの天然ダムが形成されたことが分かった。その内ダム高さが10m以上、堰止め湖総貯水量が10000m³以上、かつ集水面積が20km²以上の堰止め湖が104箇所形成された。その多くは川の右岸側の斜面に於いて発生した地すべ

りにより形成されたもので、地震断層に沿って分布している(写真 1)。その原因としては、地震断層の破壊進行方向(NEN)と河川の流下方向(多くはESE方向)が直交していることが考えられる。また、四川大地震時に形成された天然ダムの内、45%が一週間、60%が一ヶ月、90%が一年以内で決壊したことを判明した(図 1)。



写真 1. 綿遠河に沿った発生した天然ダム

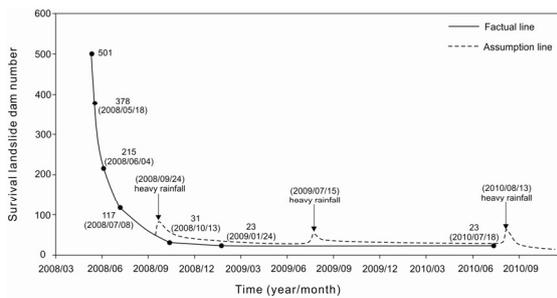


図 1. 2008 年四川大地震により形成された天然ダムと寿命

(2) 形成された天然ダムの堤体は地すべり源頭部の地質によって異なる。白雲岩や石灰岩地層からの地すべり土砂に大きな岩塊があり、堤体は比較的安定であるが、玄武岩と千枚岩および砂岩泥岩互層に起源した地すべり土砂には細粒物が多く、堤体の安定性が低い。

(3) ダム堤体に対して表面波探査および微動アレイ調査を行った結果、ダム堤体の非均一性及び特異性が地質・地形背景或いは地すべりタイプによって異なることが分かった(図 2)。泥岩、砂岩、頁岩地域において、長距離運動した地すべり土塊により形成されたダム堤体が、その S-波速度が低く、安定性が低く、河床のすぐ横の斜面において発生した地すべりにより形成した天然ダムの堤体がその S-波速度が大きく、全体の安定性が高いと推測できる。また、白雲岩や石灰岩地層に起源し、長距離移動した地すべり土塊により形成された天然ダム(例えば、天池および老

鷹岩)の堤体において、岩塊の破碎や偏析が激しく発生し、形成された堤体の表層が大きな岩塊 (~m)で覆われているが、堤体の内部および底部に行くほど、粒径が小さくなったことが分かった(図 3)。これらの粒径分布特性を考慮したダム堤体の安定性評価手法の開発が必要である。

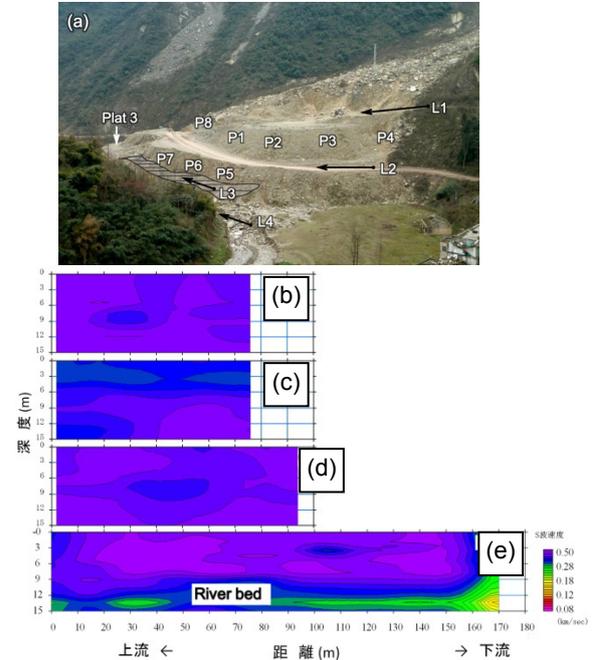


図 2. (a) 対策工事後の天池の天然ダム；(b)～(e) 測線 L1～L4 の S 波速度構造。

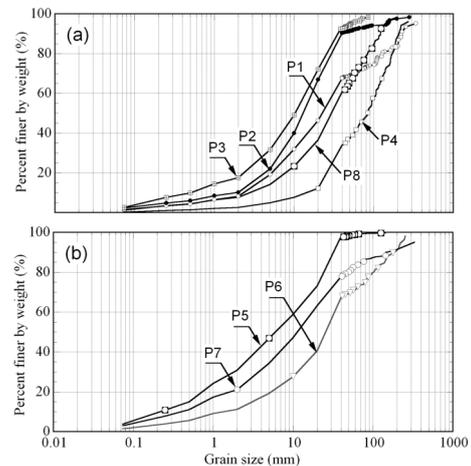


図 3. 天池の天然ダム堤体における粒径分布。点 P1～P8 が図 2a に示される。

(4) 唐家山天然ダムに対して、地震動観測を行った結果、ダム堤体の固有周波数は約 5Hz であること、すなわち、ダム堤体を構成する土層が全体として固いことが分かった。また、ダム堤体の上下流方向に沿った地震動が卓越していることも分かった。

(5) H16 年中越地震時に形成された東竹沢天然ダムの堤体に対して、高精度表面波探査および微動アレイ調査を実施した結果、天然ダムを形成する地すべり移動土塊が殆どその形が崩れていないままで斜面と平行して移動していたことが分かった。また、ダム堤体の S 波速度が、四川大地震の時に白雲岩や石灰岩地層に起源した天然ダムに対して、全体として低いことがわかった。東竹沢天然ダムが堰止め湖の水位の上昇やパイピングにより決壊する可能性が低いことが、地震直後の調査およびその後の種々の数値解析などにより判明されているため、仮にダムの Dimensionless Blockage Index が同じである場合には、S 波速度の高いダム堤体がより安全であろうと判断できる。

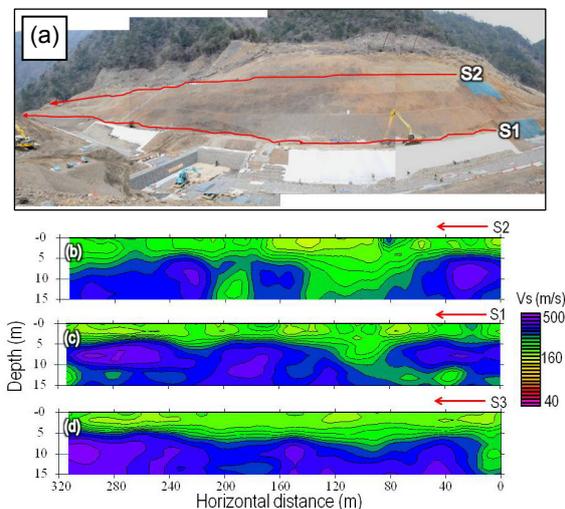


図 4. (a): 2011 年台風 12 号により形成された赤谷天然ダムの堤体, (b)~(d): 測線 S1 と S2 およびダム堤体下流域の堆積物で (測線 S3) の S 波速度構造

(6) 平成 23 年台風 12 号によって発生した伏菟野、熊野及び赤谷の斜面崩壊及び天然ダムに対して現地調査と表面波探査を実施し、その内部構造と越流侵食安定性を調べた。熊野の天然ダム堤体の表層に約 5m の厚さで疎な土層 ($V_s \leq 250\text{m/s}$) があることと、赤谷 (図 4) のダム堤体の表層が約 4~6m の厚さで疎な土層 ($V_s < 200\text{m/s}$) からなっていることが、分かった。赤谷のダム堤体が越流の発生に伴い、急激に約 4m 低くなったことより、これらの粗な土層は越流侵食に弱いと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① G. Wang, R.Q. Huang, M. Chigira, X.Y. Wu, S.D.N. Lourenço (2012): Landslide

amplification by liquefaction of runout path material after the 2008 Wenchuan (M8.0) earthquake, China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 印刷中, 査読有

- ② X.M. Fan, C.J. van Westen, O. Korup, T. Gorum, Q. Xu, F.C. Dai, R.Q. Huang, G. Wang (2012): Transient water and sediment storage of the decaying landslide dams induced by the 2008 Wenchuan Earthquake, China. *Geomorphology*, 印刷中, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.05.003, 査読有
- ③ 王功輝・黄潤秋・釜井俊孝・張帆宇 (2012): 長距離運動地すべりにより形成された地すべりダムの内部構造と安定性について—2008 年四川大地震時に発生した天池地すべりダムを例として—. *地すべり学会誌*, 印刷中, 査読有
- ④ 秦吉弥・王功輝・釜井俊孝・末峯章・野津厚 (2012): サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震における葉ノ木平地すべりでの地震動の推定. *地すべり学会誌*, 印刷中, 査読有
- ⑤ T. Gorum, X.M. Fan, C.J. van Westen, R.Q. Huang, Q. Xu, C. Tang, G. Wang (2011): Distribution Pattern of Earthquake-induced Landslides Triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake. *Geomorphology* 133(3-4):152-167. 査読有
- ⑥ S.D.N. Lourenço, G. Wang, J. Chu (2011): Aspects of sand behaviour by modified constant shear drained tests. *Environmental Earth Science*, 62:865-870. 査読有
- ⑦ J. Liu, G. Wang, T. Kamai, F.Y. Zhang, B. Shi (2011): Liquefaction Behaviour of Saturated Fiber- Reinforced Sand in Undrained Ring- shear Tests. *Geotextiles & Geomembranes*, 29: 98-107 査読有
- ⑧ 秦吉弥・大角恒雄・野津厚・釜井俊孝 (2011): 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく 2008 年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢地すべり地での地震動の推定. *日本地すべり学会誌*, 47(5): 1-8. 査読有
- ⑨ J. Liu, B. Shi, H.T. Jiang, H. Huang, G. Wang, T. Kamai (2011): Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. *Engineering Geology*, 117:114-120. 査読有
- ⑩ G. Wang, A. Suemine, W.H. Schulz (2010): Shear-rate-dependent control on the dynamics of rainfall-triggered landslides, Tokushima Prefecture, Japan. *Earth*

Surface Processes and Landforms 35(4): 407-416. 査読有

- ⑪ M. Chigira, X.Y. Wu, T. Inokuchi, G. Wang (2010): Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Geomorphology*. 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① 王功輝・新井場公德・繆海波, William H. Schulz (2012): 平成 23 年台風 12 号により紀伊半島で発生した天然ダムの内部構造と安定性評価について. 平成 24 年度砂防学会研究発表会論文集 (T1-05), 2012/5/23, 高知, 印刷中.
- ② 王功輝 (2012): 2008 年四川大地震時に発生した大規模地すべりダムの内部構造と安定性について. 京都大学防災研究所特定研究集会論文集「深層崩壊の実態・予測・対応」: 91-99, 2012/2/18, 宇治
- ③ 王功輝 (2011): 大規模地すべりダムの形成と崩壊の予測. 平成 23 年度 (社) 日本地すべり学会関西支部シンポジウム論文集「深層崩壊/高速地すべりとその発生場の評価」, 55-88, 2011/6/1, 大阪
- ④ G. Wang, T. Kamai, 他 4 人 (2010): A large landslide triggering by the 2008 Wenchuan (M8.0) earthquake : insights of seismic motion. Proc.11st IAEG, Auckland.
- ⑤ G. Wang, R. Huang, M. Chigira, X.Y. Wu, D.X. Zhang (2010): A flow-type landslide triggered on the valley deposits by the may 12, 2008 Sichuan. Proc. INTERPRAEVENT, 2010, Taipei.
- ⑥ S.D.N. Lourenco, T.C. Hales, G. Wang, O. Korup, J. Weidinger (2010): Characteristics of a sample of large landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. Proc.11st IAEG, Auckland.
- ⑦ 王功輝・釜井俊孝・千木良雅弘・他 3 人 (2009): Investigation on some catastrophic landslides and landslide dams triggered by the 2008 Wenchuan earthquake. 第 48 回日本地すべり学会研究発表会, 2009/8/26, 新潟
- ⑧ 千木良雅弘・巫錫勇・井口隆・王功輝 (2009): 2008 年四川大地震により発生した地すべりの特徴と地表地震断層との関係. 第 48 回日本地すべり学会研究発表会, 2009/8/26, 新潟
- ⑨ 釜井俊孝・王功輝・佐藤信宏 (2009): 地すべりにおける地震応答-これまでの観

測事例から-第 48 回日本地すべり学会研究発表会, 2009/8/26, 新潟

- ⑩ 福岡浩・宮城豊彦・王功輝 (2009): 平成 20 年岩手・宮城内陸地震による荒砥沢地すべりとすべり面液状化. 第 48 回日本地すべり学会研究発表会, 2009/8/26, 新潟
- ⑪ 王功輝 (2010): 四川大地震により発生した大規模地すべり及び天然ダムに関する調査研究. Expert workshop on Assessing the state of art of landslide hazard and risk assessment in China. 2010/4/14, 中国成都理工大学
- ⑫ 王功輝 (2010): 四川大地震時に発生した大規模天然ダムの形成過程及び堤体安定性について. 甘肅省における地震後災害防止と地質災害应急管理に関する中日国際. 2010/4/16, 中国蘭州市

[図書] (計 2 件)

- ① 山田正雄・蔡飛・王功輝 (2010): 四川大地震と山地災害. 理工図書. 198p
- ② M. Chigira, G. Wang, X.Y. Wu (2012): Landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake. In Book: Landslides: Types, Mechanisms, and Modeling. Cambridge University Press, 出版中, 査読有

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

王功輝 (WANG GONGHUI)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号: 50372553

(2) 研究分担者

釜井 俊孝 (KAMAI TOSHITAKA)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 10277379
千木良 雅弘 (CHIGIRA MASAHIRO)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 00293960

(3) 連携研究者

なし