

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 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：12102
研究種目：基盤研究（A）
研究期間：2009～2012
課題番号：21246075
研究課題名（和文） 豪雨・地震による斜面災害の高精度予測システムの開発
研究課題名（英文） Development of a high-precision prediction system for slope failures due to torrential rains and earthquakes
研究代表者
山田 恭央（YAMADA YASUO）
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号：90111476

研究成果の概要（和文）：本研究では、大規模斜面災害に対する予測精度向上を目指して、(1)最新の国土基盤情報データベースを導入した解析支援システムの構築、(2)高精度な強震動予測手法の開発、(3)地盤の飽和度が斜面流動に及ぼす影響の検討と、(4)降雨による集水地形評価・危険斜面の簡易抽出・斜面崩壊危険度および流動範囲予測を組み合わせた多段階斜面崩壊・流動シミュレータの開発、(5)斜面崩壊危険度を地震動特性から予測する被害関数の構築、および(6)斜面崩壊に伴う道路インフラ等の被害の類型化と被害関数の構築を行った。

研究成果の概要（英文）：We developed the following new technologies to improve the total risk evaluation involved in the slope failure due to torrential rain and earthquake: (1) slope failure analysis support system containing latest geospatial information databases, (2) advanced prediction scheme for strong earthquake motion, (3) field survey for the effect of soil water contents on slope failure and debris flow run-out area, (4) slope failure and debris flow simulator using particle method, (5) fragility function of slope failure, and (5) risk analysis scheme of road damage due to slope failure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	19,600,000	5,880,000	25,480,000
2010年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
総計	35,900,000	10,770,000	46,670,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤防災、斜面崩壊、土石流、強震動予測、道路被害、被害関数

1. 研究開始当初の背景

近年の新潟県中越地震や岩手・宮城内陸地震による山間部での大規模斜面災害、また豪雨に起因する急傾斜地斜面災害等の頻発を受けて、トータルな斜面災害予測システムの開発に対する国内の社会的要請が高まって

いる。我が国では平成13年施行の土砂災害防止法を受けて、全国で30万に及ぶ土砂災害警戒区域が指定されてきているが、豪雨や地震などの外乱条件の違いによる影響、土質や水分量の影響等が詳細に考慮されておらず、その精度は高いとは言えない。また、斜

面崩壊が発生したときの流動範囲の予測手法に関しては確たる方法論がなく、それに伴う家屋の被害や、道路インフラ等の被害の評価も含めた全体の被害推定に対する精度のボトルネックとなっている。

地盤材料は自然の材料であり、上述の通り土質や水分量などによって材料特性が大きく変化する。また三次元的な材料特性のばらつきも大きく、その調査も容易でない。これが建築物などと比較して、地盤災害研究が大きく立ち後れている原因であり、その高度化は急務である。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、現在整備の進みつつある最新の全国地盤情報データベース、強震動予測またはインバージョン地震動を入力情報とし、集水地形評価に基づく土中水分量を考慮した斜面崩壊・流動シミュレータを開発し、流動範囲の予測、およびそれに伴う道路インフラ等の被害の評価も含めた、高精度な斜面災害予測システムの開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、国の災害対策立案に直接関わる多くの研究者・研究機関から以下のように構成される。

- ・研究の統括(山田：筑波大)
- ・大地震による破壊伝播過程の解明および震源モデルからの予測地震動計算(八木：筑波大)
- ・国土基盤情報を用いた斜面崩壊および流動範囲予測手法の開発(松島：筑波大、山越：土木研究所)
- ・地震被害推定を目的とした斜面崩壊と相関を持つ地震動強さ指標の検討(境：筑波大)
- ・斜面災害による道路インフラ等ライフラインの物理的・機能的損傷評価(庄司：筑波大、間淵：国土技術政策総合研究所)

また、衛星観測データによる詳細地形および斜面被害抽出に関して、JAXA 衛星利用推進センター・防災利用システム室主催の土砂WG から、ALOS 衛星データの供与等の情報提供を受ける。

4. 研究成果

(1) 大地震による破壊伝播過程の解明および震源モデルからの予測地震動計算

地震は、地殻もしくはマントルに蓄積された歪みを瞬時に解放する現象である。瞬時に膨大な歪みが解放されるが故に、歪みの解放に伴う強震動が発生して周辺の人間活動に多大な影響をもたらす。地震に伴う斜面崩壊は、住民の命を奪うだけでなく、道路等の社会インフラに多大な被害をもたらす。このような斜面崩壊を予測して、あらかじめ対策

を練る必要性は高い。地震時の斜面崩壊を予測するためには、地下水位や地形等と様々な事柄を考慮する必要があるが、斜面崩壊を引き起こす直接的な原因である地震動を予測する必要性は高い。

地震動を計算するためには、震源での破壊伝播過程である震源過程を定め、震源と地上の任意の点を関係付けるグリーン関数を計算する必要がある。残念なことに、私たちは事前にどのような地震が発生するのか正確に予測することはできない。よって、可能性がある範囲で、できるだけ多くの震源過程のモデルを設定して地震動を計算する必要がある。このように複数の震源過程のモデルを仮定して地震の揺れを計算するには、不均質構造での波動場を計算できるが莫大な計算量を必要とするような差分法等を用いることは困難である。ここでは、多くのケースで計算できるように、任意の断層上でのすべり量分布と一次元地下構造を入力したときに、簡便に理論地震動が計算できるようなプロトタイププログラムを作成した。

理論波形を計算するために、まず、断層の形状と位置、理論地震動を計算する点の位置、地下の一次元構造を入力し、断層面上の点におけるグリーン関数を計算する。その後、各小断層のすべり分布と破壊伝播速度を定義して理論地震動を得る。

地震は、地下の断層面が瞬時にずれる現象である。作成するプログラムでは、断層面上での任意のすべり分布に対応するために、震源過程解析で良く用いられる有限断層モデルを用いる。設定した断層面は小断層に分割して、その小断層でのすべり速度関数と破壊伝播関数を与える。便宜的かつ現実的な震源モデルを仮定するために、断層面の各点でのすべり速度関数については近似式を用いて計算し、各小断層内での破壊伝播関数は乱数で近似することとする。

これらの震源モデルで、重要なのは、断層モデルの設定である。特に破壊伝播速度の設定によって、地震波形は大きく変化する。そこで、巨大地震の断層破壊伝播速度を正確に推定するために、グリーン関数を利用したバックプロジェクション等の新たな地震解析手法の開発を行った。また、破壊伝播速度が地震の深さによってどのように変化するかについても研究を行い、破壊伝播速度の深さ依存の性質を明らかにした。

(2) 国土基盤情報を用いた斜面崩壊および流動範囲予測手法の開発

斜面崩壊は、崩壊地の地形、地質(地盤力学物性を含む)、植生、降雨、地震動など、様々な要因が複雑に絡み合って発生する。更に、崩壊後の土砂流動の流動範囲の算定には、下流部の、より広範囲の情報を必要とする。

これらの情報データベースなしには、斜面崩壊および流動の危険度評価を精度良く行うことは不可能である。そこで、本研究では、web 経由でアクセスでき、日本の任意の地域を切り出して、測地系を合わせた国土基盤情報メッシュデータを表示し、解析用の数値データを出力することのできる斜面崩壊・流動危険度評価支援システムを構築した(図 1)。現在のところ、以下のデータベースを導入済みである。

- ・国土地理院 10m メッシュ標高データ
- ・JAXA 衛星 ALOS データ (一部)
- ・産総研 20 万分の 1 シームレス地質図
- ・Vs30 及び表層地質データ(若松・松岡)
- ・防災科研地滑り地形分布図デジタルデータ
- ・全国主要道路データ

更に、システムは Google map と連動しており、Google map で領域を選定したり、位置を確認することも可能である。

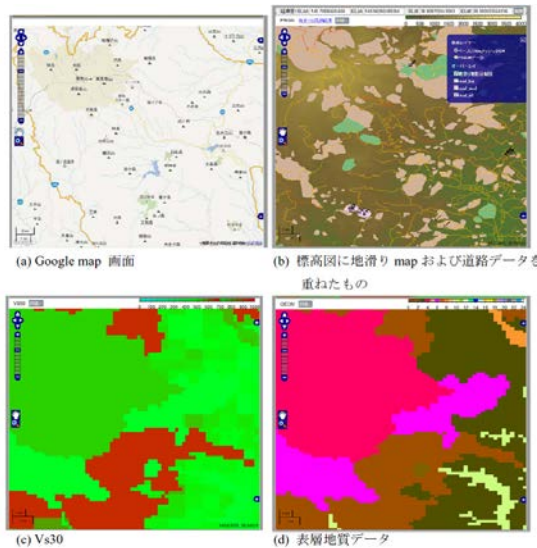


図 1 斜面崩壊流動危険度評価支援システム

このシステムにより、全国土の斜面崩壊・流動危険度評価を効率よく行うことができるが、それでも国土全ての対象斜面に対して詳細な安定・崩壊解析を行うことは現実的ではない。そこで、土中水分量を考慮した古典的なフェレニウス法および 1 次元斜面安定解析法を用いて、危険斜面の一次抽出を自動で行うプログラムを作成した。岩手・宮城内陸地震において崩壊が発生したドノウ沢および産女川の斜面についての安定解析を行った結果、土中水分量や地盤物性に適切な値を決められれば、危険斜面の一次抽出は妥当に行うことが可能であると確認した。

危険斜面の詳細解析(二次解析)として、本研究では SPH 法による詳細崩壊解析の適用性を検討した。SPH 法は粒子法の一つであり、斜面崩壊のみならず、崩壊後の土砂流動や、下流にある構造物に及ぼす衝撃力の評価も

可能となる手法である。新潟中越沖地震において発生した JR 青海川駅付近の崩壊解析に本手法を適用し、その妥当性を検討した。物性値は、災害後に行われたボーリング調査の結果を用いた。安定限界および、振動に対する崩壊発生に対してある程度妥当な結果が得られ、崩壊した土砂の流動圧によって下流の鉄道盛土が破壊する様子がシミュレートできた。

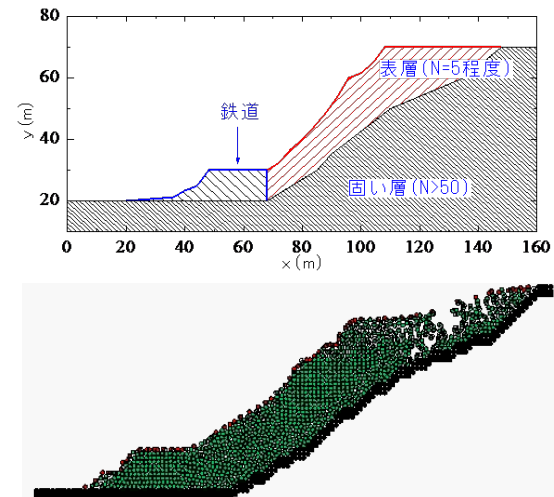


図 2 JR 青海川駅脇の斜面崩壊の SPH シミュレーション(粘性土を仮定し N 値より c を決定(豊田他 2010))

最後に、斜面崩壊後に土砂が流体化し、土石流として長距離流動する現象の解析に適した浅水法ベースの粒子法解析手法を開発した。本手法によれば、ドノウ沢で発生した 10km にわたる土石流の流動を PC で数十秒程度で計算可能である。また、入力するパラメータも、底面せん断応力および限界斜面安定角の 2 つであり、簡易に計算が可能であるが、このパラメータは流動に伴って変化することが考えられるため、これらの物性値についての詳細な検討が今後必要である。

(3) 地震被害推定を目的とした斜面崩壊と相関を持つ地震動強さ指標の検討

大地震発生直後に斜面崩壊を迅速かつ正確に推定することを目的とし、斜面崩壊と高い相関を持つ地震動強さ指標について、地震による斜面崩壊が多数発生した 2008 年岩手・宮城内陸地震を対象として検討した。まず、斜面崩壊の発生した地域(図 3)を 2km メッシュで分割し、分割した地域に対して被害率を算出した。被害率算出の対象は、斜面崩壊の発生件数が多くなる傾斜角が 15 度以上の面積としたが、傾斜角が 15 度以上の面積がメッシュ内にある程度存在しないと被害率を算出するのに十分な面積がなく、被害率が統計的信頼性に欠ける。そのため、メッ

シユ内の、15度以上の面積の割合（以下、斜面面積割合）をパラメータとし、65%以上から5%ずつ変化させ、85%以上までとした。また、斜面崩壊の発生には、地質の違いや斜度の大小が大きく関係しているため、被害率の補正を行った。

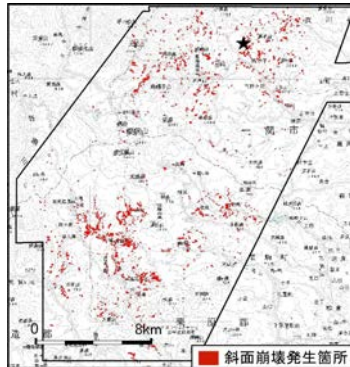


図3 斜面崩壊の発生した地域

次に、斜面崩壊が発生した地域において、加速度波形が得られた強震観測点(K-NET, KiK-net, JMA, 震度計)の弾性加速度応答スペクトル(3方向合成, 減衰定数5%)から、三角形線形補間法を用いて面的補間し、メッシュ単位で弾性加速度応答を推定した。

そして、算出した被害率と推定した弾性加速度応答スペクトルから、斜面崩壊と高い相関を持つ地震動の周期帯について検討した。その結果、被害率は、地震動の1秒以下の弾性加速度応答と相関をもつことがわかった(図4)。

そこで、1秒以下の弾性加速度応答と強い相関をもつ計測震度分布を求め(図5)、最も相関が高くなった斜面面積割合85%の場合を採用して、斜面崩壊被害率を対象とした被害関数を計測震度を説明変数として式(1)のように構築した(図6)。

$$D = \Phi(0.873I_j - 7.47) \quad (1)$$

ただし、 D :被害率、 Φ :標準正規分布の累積確率、 I_j :計測震度である。

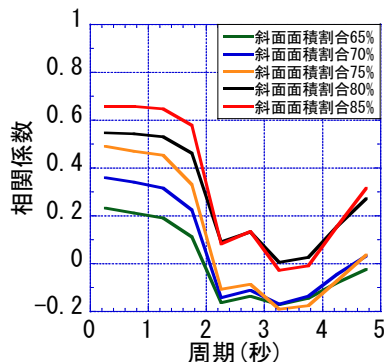


図4 各斜面面積割合における相関係数と弾性加速度応答スペクトルの周期の関係

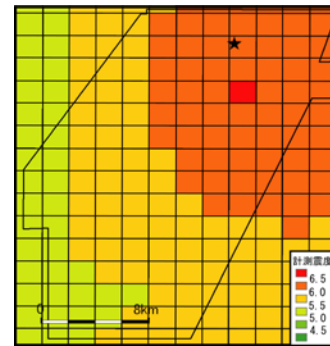


図5 Simple Kriging法で推定した計測震度分布

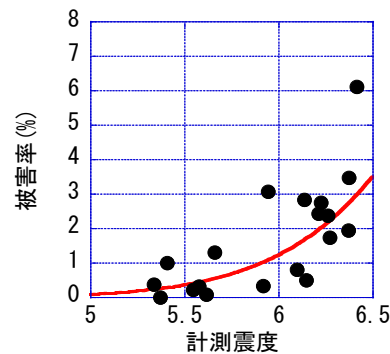


図6 斜面面積割合85%以上における被害関数

(4) 斜面損傷に伴う道路構造物の損傷モードの類型化と被害関数の構築

2008年に発生した四川大地震 ($M_w=7.9$) や岩手・宮城内陸地震 ($M_{JMA}=7.2$) の際には、道路構造物において地すべりや落石などの地山の変状・震動に伴う路盤の損傷や斜面の崩壊土砂の作用による損傷、すなわち、斜面の損傷に随伴した道路構造物の物理的被害(損傷モード)が多数生じ、道路閉塞による甚大な機能不全が発生した。

斜面崩壊に関しては、斜面の安定やすべり破壊に関する検討とともに既往の斜面災害の要因分析が数多くなされている。斜面災害そのものに着目した検討に関しては、国内外のいずれも膨大な研究知見が得られているが、斜面の損傷に随伴した道路構造物の損傷モードについては必ずしも類型化されているとは言えない。また、一定レベル以上の地震動強さが作用した場合における斜面の損傷に随伴した道路構造物の被害に関してそれを表現する被害関数は明らかとなっていない。

そこで本研究では、第1に、平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震災害調査報告書のデータを基に、斜面の損傷に関わる道路構造物の損傷モードを類型化し、地形、地質の観点から被災の特徴を詳細に分析するとともに、地震動強さから被害率を予測する被害関数の構築を試みた(庄司, 櫻井, 2012)。第2に、

2011年東北地方太平洋沖地震における道路構造物の被災情報を基に、斜面に関わる道路構造物の被災データを抽出し、それらと地震動強さとの関係について明らかにした。併せて、岩手・宮城内陸地震における斜面に関わる道路構造物の被害関数と比較し、両者の相違について論じた(櫻井他, 2012)。

岩手・宮城内陸地震の被災データに対する分析を通じて、斜面の損傷に関わる道路構造物の損傷モードを類型化すると図7のようになる。図に示す路面損傷と斜面損傷の中で、データ数の多い路面亀裂と地すべりに関して、損傷と地形、地質や震央距離との関係などについて明らかにした(庄司, 櫻井, 2012)。

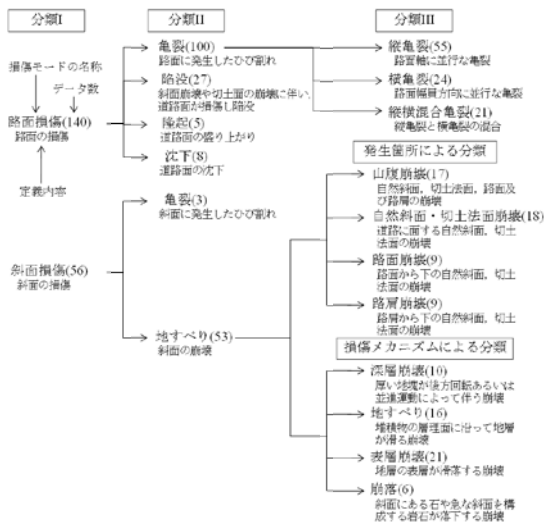
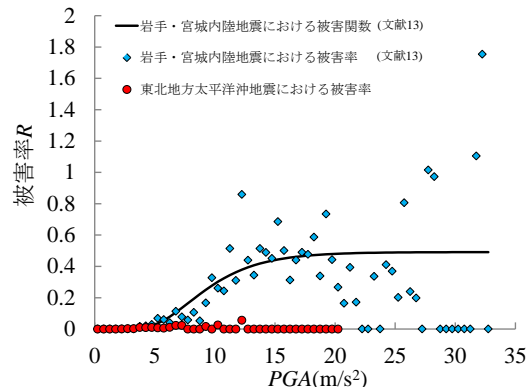


図7 損傷モードの類型化

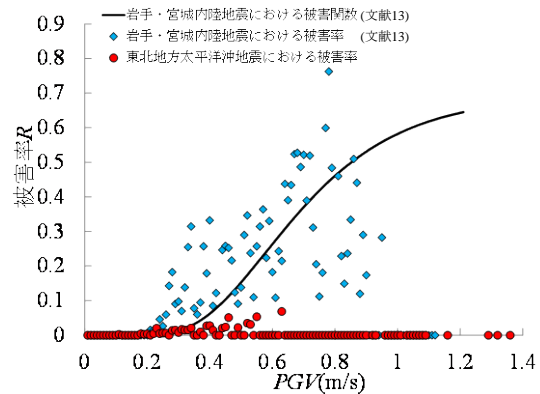
次に、斜面の損傷に関わる道路構造物の被害関数を図8及び表1のように構築した。

なお図8では東北地方太平洋沖地震の被災データから得られた被害率とPGA及びPGVの関係も示している。両者が大きく異なる結果を示した要因としては以下の3つが考えられる。第1には、PGA及びPGVの地震動強さの指標は時系列波形のピーク値に基づいて求められたものであるため、東北地方太平洋沖地震のような継続時間の長い地震動による道路構造物の被害を適切に表現していない場合がある。第2には、本研究において東北地方太平洋沖地震の被災データとしては国道及び県道を対象としているのに対して、岩手・宮城内陸地震の被災データは国道、県道、及び市道を対象としており、道路の種別による耐性の違いが被害率の相違を生んだ原因と考えられる。第3には、東北地方太平洋沖地震と岩手・宮城内陸地震のそれぞれにおける当該道路構造物の位置での地質の違いが考えられる。特に岩質においては、岩手・宮城内陸地震ではデイサイト質火砕流堆積物、凝灰岩、及び苦鉄質溶岩及び火山砕屑物にお

いて最も多く分布しているのに対して、東北地方太平洋沖地震では堆積岩類において最も多く分布しており、相対的に硬い岩類上に分布していることがわかった。



(a) PGAを指標とした場合



(b) PGVを指標とした場合

図8 岩手・宮城内陸地震と東北地方太平洋沖地震の被災データに基づいた、PGA及びPGVに対する被害率の比較

表1 岩手・宮城内陸地震のデータを基にした被害関数のパラメータ

(a) PGAを指標とした場合

C	μ	σ	λ	ζ	制約条件
	0.518	72.2	30.1	1050	559 $\lambda \geq 4.20$ $\zeta \geq 0.5$

(b) PGVを指標とした場合

C	μ	σ	λ	ζ	制約条件
	0.694	72.2	30.1	4.20	0.400 $\lambda \geq 4.20$ $0.3 \leq \zeta \leq 0.4$

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 35 件)

- ① 境有紀: 2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性ー建

物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標一，日本建築学会構造系論文集，第 683 号，pp.35-40，2013，(査読有)

- ② Yagi Y., Nakao A. and Kasahara, A.: Smooth and rapid slip near the Japan Trench during the 2011 Tohoku-oki earthquake revealed by a hybrid back-projection method, Earth and Planetary Science Letters, 355-356, pp.94-101, 2012, (査読有)
- ③ 櫻井俊彰, 庄司学, 高橋和慎, 中村友治: 2011 年東北地方太平洋沖地震における斜面に関わる道路構造物の被害分析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4 (地震工学論文集第 31-b 巻), pp.I_1315-I_1325, 2012, (査読有)
- ④ 庄司学, 櫻井俊彰: 2008 年岩手・宮城内陸地震における道路構造物の損傷モード分析とそれを踏まえた被害関数の構築, 日本地震工学会論文集, 第 11 巻, 第 5 号(特集号), pp. 94-106, 2011, (査読有)
- ⑤ 八木勇治: 東北地方太平洋沖地震の諸モデル, 地震ジャーナル, 第 11 巻, 第 4 号, pp. 73-84, 2011, (査読有)
- ⑥ 豊田衛, 岩本孟士, 松島亘志, 山田恭央: SPH 法を用いた地震時斜面崩壊解析, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, DVD-ROM, 2010, (査読有)

[学会発表] (計 46 件)

- ① Yagi, Y., Nakao A. and Kasahara A.: Seismic energy releases of great earthquakes revealed by a hybrid back-projection method (Invited), American Geophysical Union, Fall Meeting, December 6, 2012, San Francisco (USA)
- ② 山越隆雄, 一色弘充, 石塚忠範ほか: 2008 年岩手・宮城内陸地震による栗駒山崩壊斜面の三次元比抵抗パターン, 日本火山学会, 2012.10.15, 横浜
- ③ Sakurai, T., Shoji, G., Takahashi, K. and Nakamura, T.: Damage Assessment on Road Structures due to Slope Failures in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo
- ④ 櫻井俊彰, 庄司学, 高橋和慎, 中村友治: 2011 年東北地方太平洋沖地震における斜面に関わる道路構造物の被害分析, 第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集 (USB), 土木学会, 2011.11.17-19
- ⑤ Matsushima, T.: 3D particle characterization of geomaterials and its application to DEM simulation (Invited), Particulate Materials in Extreme Environments, September 20, 2010, Lawrence Livermore National Laboratory,

CA (USA)

- ⑥ 櫻井俊彰, 庄司学: 2008 年岩手・宮城内陸地震時の斜面崩壊に関わる道路構造物の損傷モード, 第 3 回近年の国内外で発生した大地震の記録と課題に関するシンポジウム発表講演集, 土木学会, pp.99-105, 2010.11.4
- ⑦ Hoang Gia Quyen, 松島亘志, 山田恭央: 衛星画像から得られる広域地形勾配データを用いた集水地形評価と土砂流動解析, 第 7 回地盤工学会関東支部発表会, pp.365-367, 2010.11.4-5, 大宮ソニックシティビル
- ⑧ 神田和紘, 境有紀: 地震被害推定を目的とした斜面崩壊と相関を持つ地震動の周期帯の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.837-838, 2010.9.9-11, 富山大学

[その他]

ホームページ等

http://granular.kz.tsukuba.ac.jp/kaken_a/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 恭央 (YAMADA YASUO)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 90111476

(2) 研究分担者

間瀬 利明 (MABUCHI TOSHIAKI)
国土技術政策総合研究所・
危機管理技術研究センター
地震防災研究室・主任研究官
研究者番号: 00549321
境 有紀 (SAKAI YUUKI)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 10235129
山越 隆雄 (YAMAKOSHI TAKAO)
独立行政法人土木研究所・土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム・主任研究員
研究者番号: 10355860
八木 勇治 (YAGI YUUIJI)
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号: 50370713
松島 亘志 (MATSUSHIMA TAKASHI)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号: 60251625
庄司 学 (SHOUJI GAKU)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号: 60282836