

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 17 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630202

研究課題名(和文) 廃棄物混じり土砂の特性化と、混入可燃物のDeteriorationの影響

研究課題名(英文) Deterioration of organic matters and its effect on characteristics of waste mixed soil

研究代表者

勝見 武 (Katsumi, Takeshi)

京都大学・地球環境学堂・教授

研究者番号：60233764

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災における災害廃棄物処理で発生した分別土砂を対象とし各種実験を行い、(1)330～350 程度で48時間の燃焼により、概ね木片混入率を定量化しうること、(2)木片混入率の増加に伴い強度は低下するが、木片が骨格を形成するためある程度の強度が残留すること、(3)木片腐朽に伴う間隙の増加により圧縮量が増加するもの、上載荷重が大きくなるほど腐朽前後での間隙変化は小さくなること、等を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on mechanical properties of recovered soil generated through disaster waste treatment after the East Japan earthquake and tsunami. The main achievements obtained in this study are as follows: 1) Combustible ratio of recovered soil can be largely quantified by heating at 330-350 celcius for 48 hours, 2) although strength decreased with increase in wood content, some degree of residual strength can be expected due to skeleton structure by wood matters, 3) although specimen is absolutely compressed by decay of mixed wood matters, change in void ratio become relatively smaller under higher pressure.

研究分野：地盤環境工学

キーワード：災害廃棄物処理 復興資材 再資源化 地盤材料 分別土砂 津波堆積物

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災で発生した大量の災害廃棄物は、土砂と混合された状態で仮置きされ、高度な選別処理を経て再資源化が図られた。特に、発生した災害廃棄物量の約3分の1を占める土砂分の活用は急務の課題であり、処理を経て排出される分別土砂を土工材として利用することが大いに期待されたが、相当量の木くず等の有機物が、処理しきれず混入しているものも存在した。このような有機物が土砂中に存在する場合、長期的にはその腐朽に伴う腐植劣化(Deterioration)が懸念され、積極的な利用が進まなかった。木質系廃棄物由来の可燃物等が混入した土砂は、いわゆる有機質土あるいは廃棄物混じり土砂とは全く性状が異なり、これまで対象として研究がなされた例は無い。積極的な利用が進まなかった原因として、(1)可燃物の混入が土工材としての特性にどのように影響を及ぼすのか、(2)分別土の品質をどのように評価すべきか、といった点についての知見が不足していることが極めて大きく、科学的な解明が強く求められていた。

2. 研究の目的

上記の課題を解決するため、本研究では、(1)廃棄物混じり土砂から分別された土砂分の短長期的な特性評価、(2)木片混入量の定量化、混入可燃物と土砂分の相互作用を科学的に明らかにするとともに、定量的な知見を取得することを目的とする。得られる知見は、東日本大震災のみならず、将来的に発生が予測される巨大災害においても、迅速な復旧復興および積極的な分別土砂の活用、資源循環に貢献することが期待される。具体的には、図-1に示すように混入する木くずが多い場合には、長期的な有機物の腐朽により有機物の体積が減少し、粒子間の接触が解消され、土構造物の安定性が低下することが懸念される。当然ながらこのような現象は木片の腐朽によるため、生分解性の有機物が少ない場合には長期的にも高い安定性を確保しうると考えられるが、現段階では混入する木くず等の有機物組成が明らかにされておらず、また様々な木材由来の有機物が存在しており一意的な特性化が困難であることから、腐朽

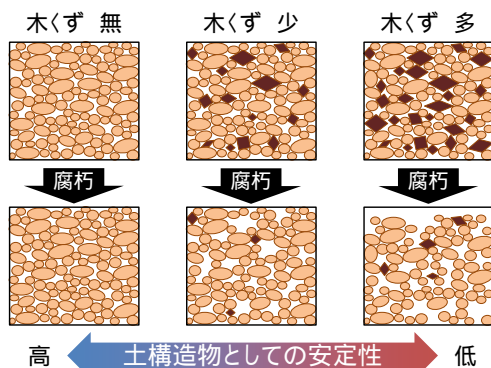


図-1 混入する木くず量と腐朽のイメージ

により木片が徐々に微細化すると仮定して、本研究を行った。

3. 研究の方法

本申請研究で実施する内容は、(1)JIS規格では直接評価できない有機物含有量をどのように定量化するのか、(2)有機物含有量が分別土の材料特性にどのように影響を及ぼすのか、(3)分別土中の有機物の腐朽に伴い、材料特性はどのように変化するのか、という課題について、室内試験を行った。対象試料には、土質材料と所定量の木質材とを室内で混合して作製する模擬分別土と、実際に現地で発生している処理後の分別土の二種類を用いた。また現在、各処理現場で様々な工夫がなされそれぞれ異なる系統、処理工程で高度選別処理がなされていることから、処理工程と処理物の品質との関連を調査した。

(1) 木片混入量をどのように定量化するか

分別土砂の地盤材料としての品質を評価する上で、木片混入量の評価は極めて重要である。しかし、例えば手作業により木片を選別する場合には、微細片の評価が不可能であり、密度差を利用した水中分級では、木片に付着した土砂分の影響により沈降する画分が相当量存在するため、精度が乏しいという課題がある。一方で、試料の燃焼により揮発分を評価する強熱減量試験は、表-1¹⁾に示すとおり分野によってその定義や分析目的が異なっている。津波堆積物の有機物の混入目安として、一般社団法人廃棄物資源循環学会は「津波堆積物処理指針(案)」の中で熱しゃく減量が5%以下であることを一つの目安として示したが、この熱しゃく5%基準は、平成10年環境庁告示第34号「工作物の新築、改築又は除去に伴って生じた安定型産業廃棄物の埋立処分を行う場合における安定型産業廃棄物以外の廃棄物が混入し、又は付着することを防止する方法」における安定型処分場への埋立基準であり、建設系混合廃棄物の処理物のみ適用されるので土砂成分には適さない。また地盤工学分野の燃焼温度750°Cの強熱減量は、結晶水や結合水等の土壌中の揮発成分を測定することが目的であり、長期的な腐食等が懸念される試料中の有機物量の判断には不適である。同様に様々な分野で強熱(熱しゃく)減量が定義されているものの、いずれも木くず等の有機物量を評価することには適していない。木質の各組成成分の熱分解温度が表-2のとおりであり²⁾、さらに燃焼温度を徐々に変化させる示差熱分析を行った結果では、750°Cあるいは600°Cの強熱では明らかに可燃物量を高くなり、330~350°C前後で有機物と見られる成分の燃焼が確認されていること²⁾から、本研究では燃焼温度を330°Cとし、燃焼時間を11、24、48時間として木片混入量の定量化手法の確立を試みた。

試料には、市販のまさ土の4.75mmふるい

通過試料に所定量の木片を添加し、異なる木片混入率に調整したものをを用いた。木片混入率は、乾燥質量で 2, 4, 6, 8, 10, 15% となるよう設定した。過去に実施した調査結果で、現場分別土の可燃物混入率が概ね 15% 以内であったことから、木片混入率は最大で 15% とした。添加する木片は、写真-1 に示すように岩手県沿岸部で 2012 年に採取した現場分別土より木片を分取し、土砂分を水洗いして落とした後、ハンマー等で粉碎したものを、2 mm 以下及び 2~4.75 mm サイズに分級し使用した。実際の処理では、比較的粗大な木片や破碎に伴う微細な木片など、様々な大きさの木くずが混入したと考えられることから、同じ木片混入率でも木片サイズの比率を変

表-1 各強熱減量の考え方¹⁾

分野と規格	分析方法と目的
地盤工学 (JIS A 1226)	750 ± 50°C で 1 時間強熱。主に土壌中の揮発成分（有機物と結晶水、結合水が対象）を測定することが目的。
セメント	975 ± 25°C で強熱。高炉セメントの場合は 700 ± 25°C。不純物含有量（クリンカーや水和物等からの脱水、石灰石の脱炭酸、石こう結晶水の脱水が主な要因で最大 4.78% の減量値）を測定することが目的。
廃棄物 (環整 95 号)	600 ± 25°C で 3 時間強熱。名称は「熱しゃく減量」。焼却残さの燃え残りを評価することが目的。埋立基準は熱しゃく減量 15%。平成 10 年の環境庁告示第 34 号にて工作物の新築、解体由来の安定型産業廃棄物の埋立基準 5% の方法としても利用。
工業廃水 (JIS K 0102)	600 ± 25°C で 30 分間強熱。名称は「強熱残留物」。工業排水中の強熱による非揮発性残留物量（無機物）の測定が目的。
Volatile Solid	550°C で 15 ~ 30 分強熱。諸外国における一例。

表-2 各組成成分の熱分解温度²⁾

リグニン	250 ~ 500°C
セルロース	300 ~ 370°C
ヘミセルロース	190 ~ 480°C



写真-1 分別土砂から選別した木くず

化させ模擬分別土を用意した。具体的には、2 mm 以下の木片または 2 ~ 4.75 mm の木片のみを用いて試料を作製したものと、2 mm 以下の木片と 2 ~ 4.75 mm の木片を等量ずつ混合したものの計 3 通りであり、混入する木片の大きさが諸特性に及ぼす影響を評価した。

(2) 木片混入量が分別土の材料特性にどのように影響を及ぼすのか

対象試料として、岩手県山田町で 2012 年に採取した土砂混合くずと、大槌町で同時期に採取したふるい下くずを用いた。土砂混合くず、ふるい下くずとはそれぞれ、混合廃棄物の一次ふるい通過分ならびに高度選別処理の最終ふるい通過分である。基礎物性は表-3 に示すとおりであり、破碎・分級過程を経て排出されるため、ふるい下くずの方が細かい木くずが多く混入している特徴が、高い強熱減量からもわかる。模擬分別土は、まさ土に木片を混合して作製した。

表-3 使用した材料の基礎物性

項目	単位	土砂混 合くず	ふるい 下くず	まさ土 単体
土粒子密度	g/cm ³	2.63	2.57	2.71
330°C 強熱減量 %		6.0	15.3	0.1
750°C 強熱減量 %		9.6	21.8	2.0
最適含水比	%	22.2	29.5	9.5
最大乾燥密度	g/cm ³	1.46	1.01	2.01

(3) 分別土中の有機物の腐朽に伴い、材料特性はどのように変化するのか

樹木等に由来する木質系材料の主な構成物質はリグニン、セルロース、ヘミセルロースであり、それぞれの組成率は概ね 20 ~ 40%、40 ~ 50%、10 ~ 30% である¹⁾。これらはいずれも難分解性とされているが、分解性微生物が存在し、活発な活動のための水および空気が供給される条件下であれば分解され、分別土砂の腐植劣化が生じることとなる。そのため、水および空気の供給を遮断することによって十分に分解の影響は軽減しうると考えられるものの、安全側での評価を行うこととし、本研究では木片の腐朽に伴う地盤特性の影響を評価した。具体的には、分別土砂を地盤材料として利用した場合を想定し、土構造物中での経時的な木片の腐朽に伴う間隙構造の変化が、強度変化に及ぼす影響を評価した。試料の作製手順は(1)と同様であるが、腐朽に伴い木片が液化・ガス化し間隙が大きくなると仮定し、締固め度を調整して供試体作製を行った。

3. 研究の成果

(1) 木片混入量をどのように定量化するか

図-2 は、330°C の燃焼温度で 11 時間燃焼を行った場合の模擬分別土の強熱減量を示した結果である。この図からわかるとおり、混入する木片が小さい場合には、11 時間の燃焼時間であっても木片混入率と 330°C 強熱減量

の間に極めて良い相関が見られるものの、木片が大きくなるほど相対的に 330°C 強熱減量が小さくなることからわかる。これは、同じ木片混入率であれば木片が大きくなるほど比表面積が小さくなり、燃え残りが生じるためであると考えられる。図-3 は同じ燃焼温度で 48 時間燃焼した結果であるが、図-2 と比較し木片サイズによる差異は小さくなっていることがわかる。これらの結果から、燃焼温度 330°C、燃焼時間 48 時間で木片混入率を定量化しうることが示唆される。今後異なる母材に対しても同様の精度が担保されるか検討し、試験法の確立を目指す予定である。

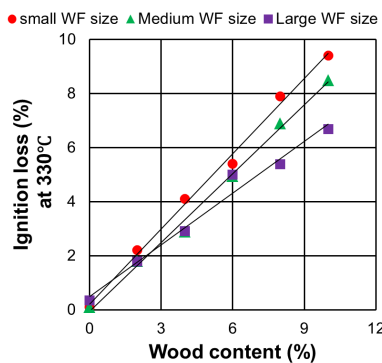


図-2 強熱減量試験結果（燃焼温度：330°C，燃焼時間：11 時間）

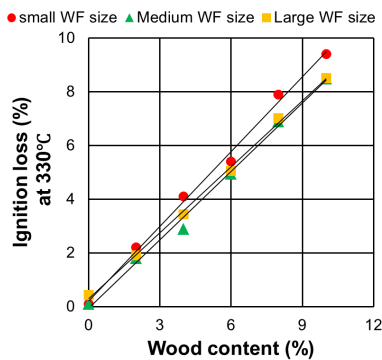


図-3 強熱減量試験結果（燃焼温度：330°C，燃焼時間：48 時間）

(2) 木片混入率が地盤材料特性に及ぼす影響

図-4 は一軸圧縮試験結果の一例であるが、まさ土単体の試料に比べ、木片混入率が高くなるほどピーク強度は低くなるものの、靱性が高くなることからわかる。330°C 強熱減量と一軸圧縮強さの関係を示したものである。ここで 330°C 強熱減量とは、燃焼温度 330°C、燃焼時間 11 時間で得られた強熱減量の値である。模擬分別土では、木片混入率が高くなり 330°C 強熱減量が大きくなるほど、一軸圧縮強さは減少している。ただし木片サイズに関わらず、木片混入率 10% と 15% の試料では顕著な強度低下は確認されないことから、木片混入率が増加しても、木片が骨格を形成しある程度の強度が発揮されることがわかる。一方、現場分別土は大きい強熱減量を示すも

の、まさ土よりも大きな強度を発現している。これは分別土の骨格構造を形成する母材の土質の違いによる影響も考えられるが、海洋起源の有機物の影響で強熱減量が高くなったことに加え、海水由来の膠着性により土粒子や木片が固着し大きな強度が発現したと考えられる。木片サイズに着目すれば、2 mm 以下の木片のみを含む試料の方が、等量ずつ含む試料に比べ大きな一軸圧縮強さを示している。これは、同じ木片混入率であっても小さな木片を多く含む土砂の方が土粒子と木片の接触面積が増加するため、せん断強度が増加したと考えられる。

高さ 7.0 cm の圧密セルを用い、段階荷荷による圧縮試験を行った。得られた圧縮指数 C_c と 330°C 強熱減量との関係を図-5 に示す。なお、圧縮指数は最終荷荷段階（628 kPa 荷荷時）から求めており、図中の塗りつぶしシンボルは、水浸条件下での結果を示している。この結果から、現場分別土を含め 330°C 強熱減量が高くなるほど圧縮指数も高くなっており、木片混入率の増加に伴い分別土の圧縮性が大きくなることを確認できる。同じ試料で水浸の有無による影響を見ると、水浸させた供試体が高い圧縮指数を示す傾向にあることがわかる。これは木片が吸水し軟化したことにより、水浸させなかった供試体に比べて大きな圧縮性を示したと考えられる。

分別土砂は砂分主体の材料であることから、地耐力を評価するため CBR 試験を行い、図-6 に示すとおり修正 CBR を求めた。その結果、木片混入率が相対的に高い場合であっても、分別土は路盤材として十分な強度を有していることが明らかとなった。ただし木片混入率の増加とともに強度の低下が懸念されることから、コンクリート等他材料との混合やセメント安定処理等の改良により改質することも考えられる。水浸の有無に関わらず、6~8% 程度の木片混入率で強度が大きく低下しているが、これは木片量が相対的に多くなることで骨格構造を形成し、木片同士が荷重を伝達したためと考えられる。本研究では模擬分別土のみを対象として CBR 試験を行ったが、上述のとおり現場分別土には海水由来の膠着性が考えられることから、長期的な化学的相互作用も含め、強度発現メカニズムを今後評価する必要がある。

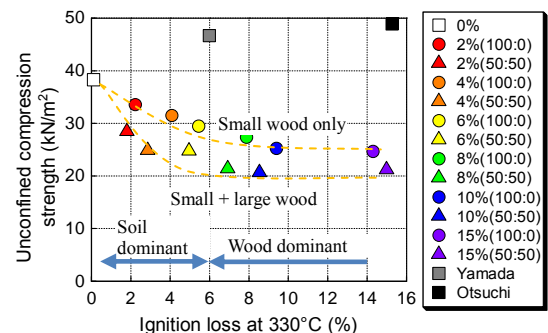


図-4 330°C 強熱減量と一軸圧縮強さの関係

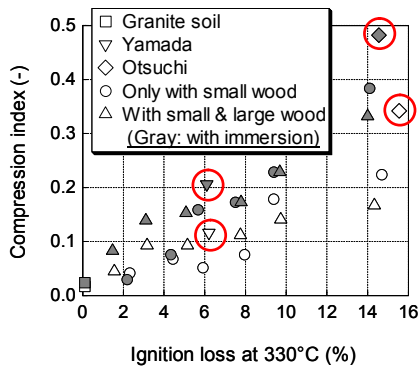


図-5 330°C 強熱減量と圧縮指数の関係

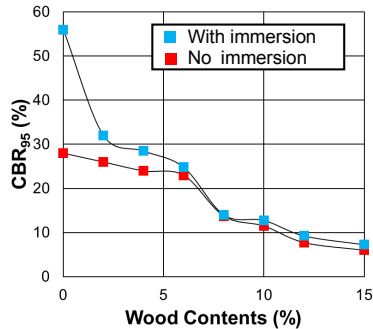


図-6 木片混入率と修正 CBR の関係

(3) 木片の腐朽が材料特性に及ぼす影響

木片の腐朽を想定し、木片量と締固め度を調整して供試体を作製した。(2)と同様に、圧密試験装置を用いて段階載荷による圧縮試験を行い、変形特性を評価した。図-7は、腐朽前の木片混入率が6%の分別土を対象に、質量換算で木片の20, 50, 80%が腐朽により消失した場合の、供試体高さの変化を示したものであるが、腐朽が進行するほど空隙が増加するため、沈下量が大きくなっていることがわかる。図-8は同様に空隙比の変化をプロットしたものであるが、木片の腐朽が進むほど荷重増分に対する空隙比変化も大きくなっている。しかし上載荷重が大きくなるほど、腐朽前の供試体との空隙比の差は小さくなっており、上載荷重の大きい条件下あるいはプレロード等で先行して十分に圧縮させることで、供用後の沈降が軽減できる可能性が示唆される。

一方で、分別土砂中の木片の生分解のためには、木材腐朽菌の存在と活発な活動が必要となる。木材腐朽菌の活動のためには水と酸素の供給が不可欠であることから、道路下部のように地表面からの雨水浸透が抑制される環境下であれば、供用後も木片の腐朽は生じにくいと考えられる。別途実施した吸水膨張試験の結果から、木片の吸水により供試体の膨張が比較的長期間継続して起こりうることを踏まえると、変形を抑制するためには地下水以浅での利用が望ましい。多少の変形が許容される場合であれば、地下水以深で利用することにより酸素の供給を遮断することも、有効な手段と考えられる。

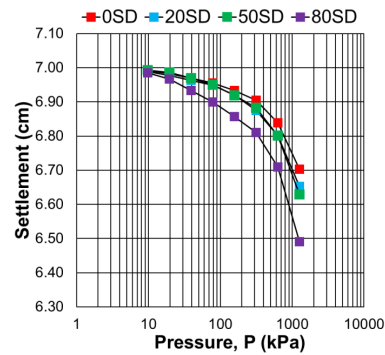


図-6 木片の腐植分解による圧縮沈下量の変化 (木片混入率: 6%)

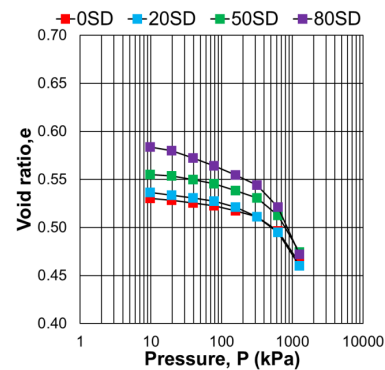


図-7 木片の腐植分解による e -log p 曲線の変化 (木片混入率: 6%)

*SD: 腐植分解率

< 参考文献 >

- 1) 遠藤和人・鈴木弘明・勝見 武 (2014): 災害廃棄物処理残さにおける木くず含有量の判定に関する一考察, 都市清掃, Vol.67, No.317, pp.120-122.
- 2) 加藤貴史・大原聖美 (2007): 木質系バイオマス組成成分の熱分解特性, 福岡大学工学集報 Vol.78, pp.9-13.
- 3) 社団法人日本エネルギー学会編 (2002): バイオマスハンドブック, オーム社.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- Katsumi, T., Endo, K., Imanishi, H., Inui, T., Kazama, M., Nakashima, M., Okawara, M., Otsuka, Y., Sakamoto, H., Sakanakura, H., Suzuki, H., Takai, A., and Yasutaka, T. (2014): Environmental geotechnics for the recovery from 2011 East Japan earthquake and tsunami, Proceedings of the Seventh International Congress on Environmental Geotechnics, A. Bouazza, S.T.S. Yuen, and B. Brown (eds.), Engineers Australia (EA), pp.170-189, 査読有
- Takai, A., Uddin, M.N., Inui, T., and Katsumi, T. (2014): Mechanical properties of geomaterial recovered from disaster debris after the 2011 earthquake, Proceedings of the

Seventh International Congress on Environmental Geotechnics, A. Bouazza, S.T.S. Yuen, and B. Brown (eds.), Engineers Australia (EA), pp.1602-1609, 査読有
Katsumi, T., Inui, T., Takai, A., Endo, K., Sakanakura, H., Imanishi, H., Kazama, M., Nakashima, M., Okawara, M., Otsuka, Y., Sakamoto, H., Suzuki, H., and Yasutaka, T. (2014): Geoenvironmental issues for the recovery from the 2011 East Japan earthquake and tsunami, Geotechnics for Catastrophic Flooding Events, S. Iai (ed.), Taylor & Francis Group, London, pp.69-78. 査読有
森田康平・勝見 武・Mohammed Nasir Uddin・高井敦史・山根華織・乾 徹 (2014): 災害廃棄物分別土の材料特性に及ぼす木片混入量・木片寸法の影響, 第11回地盤改良シンポジウム論文集, 日本材料学会, pp.67-70, 査読有
勝見 武・遠藤和人・乾 徹・大河原正文・肴倉宏史・保高徹生 (2014): 東日本大震災における地盤環境課題への取り組み 地盤工学会誌, Vol.62, No.10, pp.20-23., 査読有
高井敦史・保高徹生・遠藤和人・勝見 武・東日本大震災対応調査研究委員会地盤環境研究委員会 (2013): 東日本大震災における津波堆積物の分布特性と物理化学特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.3, pp.391-402., 査読有
Katsumi, T., Endo, K., Imanishi, H., Inui, T., Okawara, M., Otsuka, Y., Sakamoto, H., Sakanakura, H., Suzuki, H., Takai, A., and Yasutaka, T. (2013): Geoenvironmental challenges –Beyond the 2011 East Japan earthquake and tsunami, IGS 2013 Indian Geotechnical Conference– Geotechnical Advances and Novel Geomechanical Applications, Indian Geotechnical Society Roorkee Chapter (on CD)., 査読有

[学会発表](計19件)

勝見 武, 復興資材としての「土」に求められるもの, 国連防災会議・再度イベント『「あの日」から, 土木技術者がしたこと』, 2015年3月16日, 宮城県庁講堂(宮城県仙台市), 招待講演

勝見 武, 災害廃棄物等への対応と復興における調和, 災害化学研究所平成26年度特別講演会, 2015年2月16日, 大阪大学中之島センター(大阪府大阪市), 招待講演

高井敦史, 災害廃棄物から分別した土砂の特性に及ぼす木片の影響, 第49回地盤工学研究発表会, 2014年7月14日, 北九州国際会議場(福岡県北九州市)

勝見 武, 東日本大震災における災害廃棄物の処理と復興資材への活用について, 関西ライフライン研究会第102回定例勉強会, 2014年7月8日, (大阪市), 招待講

演

勝見 武, Geoenvironmental Challenges –Beyond the 2011 East Japan earthquake and tsunami, IGS 2013 Indian Geotechnical Conference, 2013年12月22~24日, Roorkee (インド), 招待講演

勝見 武, 2011 East Japan earthquake and tsunami –Geoenvironmental challenges, Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, 2013年7月1日, Torino (イタリア), 講演

6. 研究組織

(1) 研究代表者

勝見 武 (KATSUMI, Takeshi)
京都大学・地球環境学堂・教授
研究者番号: 60233764

(2) 研究分担者

乾 徹 (INUI, Toru)
京都大学・地球環境学堂・准教授
研究者番号: 90324706

高井敦史 (TAKAI, Atsushi)
京都大学・地球環境学堂・助教
研究者番号: 30598347

(3) 研究協力者

UDDIN, Mohammed Nasir
京都大学・地球環境学堂・博士課程学生

森田康平 (MORITA, Kohei)
元京都大学・工学研究科・修士課程学生