HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	東北地方太平洋沖地震における火山灰質盛土被害の分析
Author(s)	大塚, 悟; 小石, 悠介; 磯部, 公一 他
Citation	地盤工学ジャーナル, 10(3), 381-390 https://doi.org/10.3208/jgs.10.381
Issue Date	2015
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75099
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	journal article
File Information	10_381.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

東北地方太平洋沖地震における火山灰質盛土被害の分析

大塚　悟[1]，小石　悠介[2]，磯部　公一[3]，遠藤　真哉[4]

1　長岡技術科学大学大学院　環境社会基盤工学専攻
2　東海旅客鉄道株式会社
3　北海道大学大学院工学研究院　環境フィールド工学部門
4　新和設計株式会社

概　　要

東北地方太平洋沖地震では福島県会津若松市にて大規模な盛土崩壊が発生した。崩壊した盛土では液状化の痕跡が確認され，盛土材は火山性堆積物であることから粒子破砕の影響が懸念された。火砕流堆積物は全国各地に幅広く分布しており，人工盛土への適用事例も多い。本研究では現地採取土を用いて，等方圧密やせん断による盛土材の粒度変化を調査するほか，静的および繰返し載荷試験により強度特性を把握した。三軸圧縮試験より，福島現地採取土は有効応力 p'=100 kPa までの等方圧密で粒子破砕率が急激に増加すること，粒子破砕率の増加に伴い，せん断抵抗角が大きく低下することを明らかにした。また，得られた力学特性を用いて盛土崩壊事例に対し地震時変形解析を実施した。その結果，解析値が実変位量を再現し，液状化強度曲線より算出した残留強度と粒子破砕によるせん断抵抗角の減少を考慮することで妥当な解析結果が得られることを示した。

キーワード：火山性堆積物，粒子破砕，三軸圧縮試験，地震時変形解析，液状化

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により，東北地方は大きな被害を受けた。福島県会津若松市の一箕中学校付近の宅地盛土では，液状化が原因とみられる円弧すべりにより，大規模な盛土崩壊が発生した。崩壊した盛土材は火山性堆積物であり，大部分が火山灰質である。火山性堆積物とは，噴火によって地表に放出された破片状の固体物質である火山砕屑物が堆積したものである。一般に，火山性堆積物は軽石などが含まれており，粒子が脆弱なことから，粒子破砕が懸念されている。わが国は，世界有数の火山国であり，日本の総面積の約 16%，平地の約 70%が火山性堆積物で覆われている。このように火山性堆積物は，全国各地に幅広く分布しており，運搬コストの削減などの理由から近場の人工盛土への適用事例が多いのが実情[1)]である。しかし，粒子破砕の施工管理における基準はないため，粒子破砕が地盤物性に与える影響を定量的に把握することは極めて重要である。

粒子破砕が生じやすい破砕性土[2)]である火山灰質粗粒土やしらすに関する研究[3)-10)]では，室内および原位置試験結果に及ぼす粒子破砕の影響を評価するために各種力学試験が行われている。それらによると，排水条件の違いに関係なく，平均有効応力が大きくなるほど粒子破砕により生じた細粒分含有率が増加すること，せん断抵抗角と平均有効応力の関係に明確な相関があること，粒子が脆弱な火山灰質粗粒土であるほど平均有効応力の増加に伴うせん断抵抗角の低下が著しいことなどが明らかにされている。このように，有効応力の大きさに支配される粒子破砕は火山灰質粗粒土のせん断特性に大きな影響を及ぼし，圧密・せん断による圧縮変形や体積収縮の増大は密実化，細粒化および粒子集合体の構造的な変化（構成粒子の再配列）を引き起こすため，粒子破砕前後ではその物性が大きく異なることが指摘されている[11)]。

本研究でも，土の粒子破砕に着目し，現地採取土に対して，三軸圧縮試験機を用いた等方圧密試験やせん断試験を実施し，試験前後の粒度変化を調査するほか，静的および繰返し載荷試験により強度特性を把握した。これらの試験結果を通じて，当該盛土材料の粒子破砕の特性について明らかにするほか，得られた力学特性を用いた盛土崩壊事例の地震時残留変形解析の結果について報告する。

2. 福島県会津若松市一箕中学校周辺の地震被害

2.1　概要

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃，三陸沖の深さ 24 km を震源とするマグニチュード M9.0 の東北地方太平洋沖地震が発生[12)]し，宮城県で震度 7，福島県，茨城県，栃木県，で震度 6 強を観測した。この地震により，東北地方を中心に大きな被害が起こった。福島県会津若松市一箕中学校周辺の造成地盤土では，大規模な盛土崩壊が発生した。この地域の震度は 5 強であり，被災した盛土は液状化による円弧すべりの発生が原因で崩壊したとみられている。写真 1

原稿受理日：2015 年 2 月 9 日，採用決定日：2015 年 8 月 18 日

に現地の被災状況（3 月 16 日撮影）を示す。

写真 1　一箕中学校周辺の被災状況

2.2　被災箇所

被災箇所 [13]は，福島県会津若松市一箕町に位置する同市立一箕中学校通学路から一箕中学校グラウンド西側までである。地震によって，周辺を巻き込む地すべりが発生した。崩壊した盛土は，図 1 に示すように谷埋め盛土である。現地踏査により，馬蹄形滑落崖や噴砂による円形の土砂の陥没，道路盛土の擁壁の転倒，末端部で道路の浮き上がりなどの変状が確認された。図 2 に被災状況平面図を示す。図のように，一箕中学校グラウンド中央部を頭部，道路歩道部を末端部とする，液状化が原因と考えられる円弧すべりが発生し，地すべりブロックは旧谷地形内に生じた。

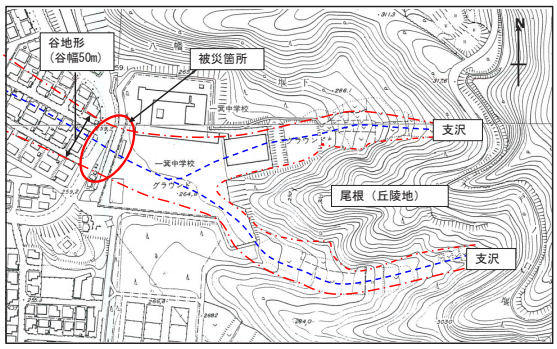

図 1　調査対象地の地形解析図

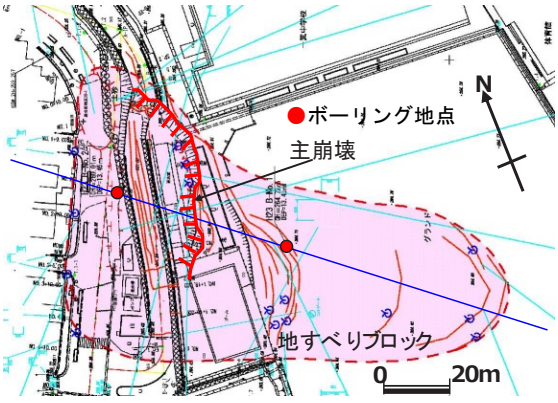

図 2　被災状況平面図

2.3　ボーリング調査結果

図 3 に主崩壊箇所で実施したボーリング調査結果を示す。赤い矢印で示した深さ 3～8 m の範囲は含水量が多く非常に緩い礫混じり砂質土からなり，N 値も 1~2 と低く，液状化が原因と考えられる土の流動を確認できた。次にボーリング調査による断面図を図 4 に示す。地質は火砕流堆積物である軽石凝灰岩を基盤層とし，中層に旧表土である腐植物混じり粘土，盛土に基盤層と同じ火砕流堆積物からなる礫混じり砂質土で構成されている。崩壊箇所の N 値は表層付近で 10~15，2 m から基盤層までは 1~5 と非常に小さな値を示している。また，地下水位線を示したが被災直前に盛土擁壁の排水孔から多量の湧水が確認されており，被災時は融雪期でありグラウンド全面に積雪が 20 cm 程あったことや，後背地から流入した融雪水が埋没谷を満たしていた可能性が高いことなどから盛土内の地下水位は，地表面付近にあったことが予想される。

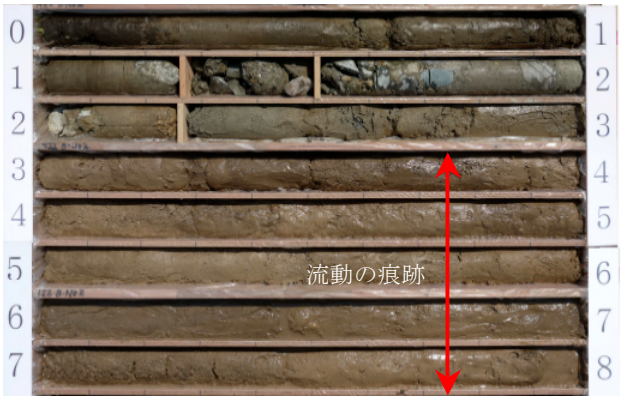

図 3　被災地のボーリング調査結果

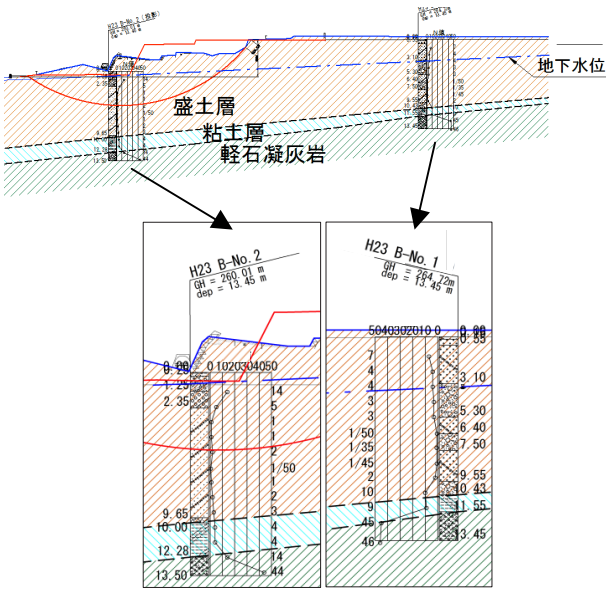

図 4　想定地質断面図[13)]

2.4　盛土材の地質

図 5 に会津地域の地質概略図 [14]を示す。被災地周辺の会津盆地東縁丘陵地では，主に第四紀後期更新世から同紀

中期更新世の火砕流堆積物，河川堆積物からなる七折層の隈戸火砕流堆積物（背中炙山層も含む）が分布している。被災地の隈戸火砕流堆積物は，白河火砕流群に属し，被災地の南方約 20 km に位置する小野カルデラが供給源である。小野カルデラから噴出した火砕流堆積物は，福島県のみならず，栃木県にも分布している。写真 2 に一箕中学校裏山に露頭する火砕流堆積物を示す。岩相は，溶結（一部非溶結）した軽石凝灰角礫岩～火山礫凝灰岩からなる。最大粒径 50 cm 以上の灰色軽石が含まれ，軽石の粒径や含有量の違いによって示される火砕流堆積物単層の境界層が観察され，複数の火砕流堆積物が流下し集積した地層であることが分かる。また，溶結部では径 1 m 以上の粗い柱状節理が発達するが，調査地周辺は非溶結の岩相が局部的にみられる。層厚は調査地周辺で 20~30 m である。被災地の盛土材は，岩相が周辺の露頭と同一であることから，山砂としてこの火砕流堆積物が用いられたものと想定される。

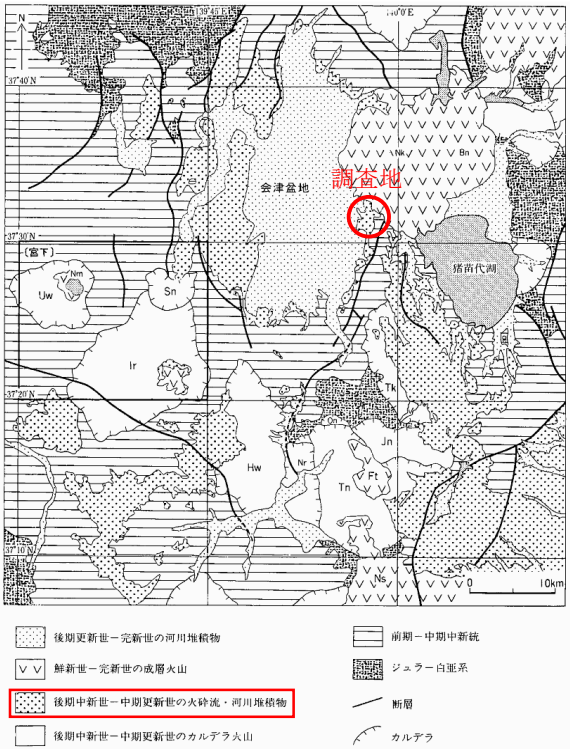

図 5　会津地域の地質概略図 [14)]

写真 2　一箕中学校裏山に露頭する火砕流堆積物

3.　三軸圧縮試験による粒子破砕特性とせん断強度特性の把握

3.1　粒子破砕率の定量化

粒子破砕を議論するには，その程度を定量的に表す指標が必要である。圧密やせん断による粒子破砕の大小を量的に表現しようと試みには，①粒径加積曲線上の点の移動に基づくもの，②粒径加積曲線間の面積に基づくもの，③残留率を各ふるい目で求め，それを合計したもの，④粒子比表面積に基づくもの等 [15)]がある。

図 6 に粒子破砕指標の定義を述べる。図に示した *Marsal* の粒子破砕率 B_M は，(1)式で定義される。これは各ふるいの通過質量百分率を累計した指標であり，物理的意味は薄いが広く用いられている。図中に示された細粒分含有率の変化ΔF_cを式(2)で定義する。これは液状化に関連する指標として用いられる。

本研究では，試料全体の粒子破砕率として *Marsal* の粒子破砕率 B_M と，液状化に関連していることから細粒分含有率の変化ΔF_cの 2 つを粒子破砕の定量的指標として採用する。

$$B_M = \sum \Delta P_i \tag{1}$$

$$\Delta F_c = F_{cf} - F_{ci} \tag{2}$$

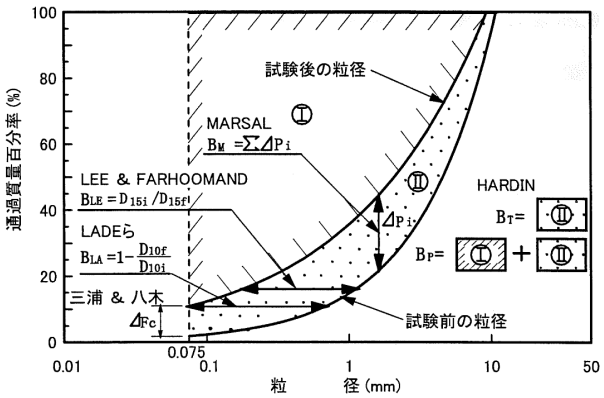

図 6　粒子破砕指標の定義 [16)]

3.2　福島現地採取砂の物理特性

福島現地採取砂の粒径加積曲線を図 7 に示す。試料全体の内訳は礫 21.4%，砂 73.7%，シルト・粘土 4.9%であった。また，礫の最大粒径は 15~20 mm 程度であり，大部分は火山灰質であった。

表 1 に福島現地採取砂の物理試験結果を示す。本試料には 2 mm 以上の礫分が含まれていたが，三軸圧縮試験では 2 mm 以下の試料を用いるため最大粒径を 2 mm とした。また，比較対象として豊浦砂の物理特性を併記した。土粒子の密度は 2.542 g/cm^3 と小さい値を示した。最大乾燥密度は，豊浦砂とほぼ同じであるが，最小乾燥密度は，豊浦砂よりも小さな値を示した。均等係数は 6.57 と豊浦砂と比べて大きな値を示した。また，細粒分含有率は 10.9%と大きな値を示した。総括すると，福島現地採取砂は大部分

が火山灰質であり，粒径が比較的ばらついており，細粒分を多く含んでいる特徴が挙げられる。

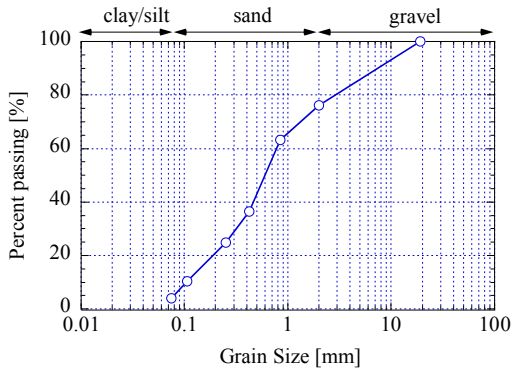

図 7　粒径加積曲線

表 1　福島現地採取砂の物理特性

試料名	福島現地採取砂	豊浦砂
土粒子の密度 ρ_s [g/cm^3]	2.542	2.640
最大乾燥密度 ρ_{dmax} [g/cm^3]	1.659	1.645
最小乾燥密度 ρ_{dmin} [g/cm^3]	0.831	1.335
平均粒径 D_{50} [mm]	0.33	0.18
均等係数 U_c	6.57	1.60
細粒分含有率 F_c [%]	10.9	0.0
備考	粒度調整（再構成）	比較対象

3.3　試験条件

三軸圧縮試験試料には，供試体寸法（直径 5 cm，高さ 10 cm）を考慮し，少量含まれる礫材を取り除くことを目的に最大粒径2 mm以下のものを用いた。実施した試験は，等方圧密試験，非排水せん断試験，繰返し三軸試験の 3 種類である。

表 2~4 に本研究で実施した試験ケースを示す。現地盛土の相対密度がほぼ 60%であったため，相対密度を D_r = 60%に設定した。等方圧密試験では，試料の密度と粒子破砕の関連性を調べるため，密詰めの D_r = 80%と緩詰めの D_r = 30%の試験も実施した。非排水せん断試験では，高い初期平均有効応力のケースと低い初期平均有効応力のケースを実施し，初期平均有効応力と粒子破砕の関連性を調査した。繰返し三軸試験では，有効応力の違いによる液状化強度の比較および粒子破砕との関連性を調査した。

各試験とも，粒子破砕を定量化するため，試験前後で粒度試験を実施し，粒子破砕率を算出した。

3.4　等方圧密試験結果

圧密により生じる粒子破砕率を把握するため，等方圧密試験を実施した。圧密終了は 3t 法 [17]を用いて判断した。

図 8 に等方圧密試験結果から得られた粒子破砕率 B_M と有効応力の関係を示す。図よりいずれの相対密度でも，有効応力 p' = 100 kPa までの範囲で粒子破砕率 B_M が急激に増加していることがわかる。また，p' = 100 kPa よりも大きな応力域では粒子破砕率 B_M がほとんど増加していないことがわかる。また，プロット数が少なく，やや不明瞭な点もあるが，各相対密度で比較すると密度が低いほど粒子破砕が増加する傾向があり，緩い試料ほど粒子破砕しやすい特徴が見られる。

図 9 に細粒分含有率の変化ΔF_cと有効応力の関係を示す。こちらも図 8 と同様に有効応力 p' = 100 kPa までの範囲で細粒分含有率の変化ΔF_cが急激に増加し，それ以上大きな応力ではほとんど増加していないことがわかる。このことから有効応力 p' = 100 kPa までの圧密で，ある程度粒子破砕が終了したといえる。また，相対密度が低いほど粒子破砕率が増加する傾向も同様に確認できる。

表 2　試験ケース（等方圧密試験）

相対密度 D_r [%]	有効応力 p' [kPa]	背圧 [kPa]
30	20	100
	100	
	600	
60	50	
	200	
80	100	
	600	

表 3　試験ケース（非排水せん断試験）

相対密度 D_r [%]	初期平均有効応力 p_0' [kPa]	背圧 [kPa]	載荷速度 [%/min]
60	20	100	0.1
	35		
	50		
	100		
	200		
	300		

表 4　試験ケース（繰返し三軸試験）

相対密度 D_r [%]	初期平均有効応力 p_0' [kPa]	背圧 [kPa]	繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$
60	50	100	0.12
			0.16
			0.18
	200		0.11
			0.14
			0.17

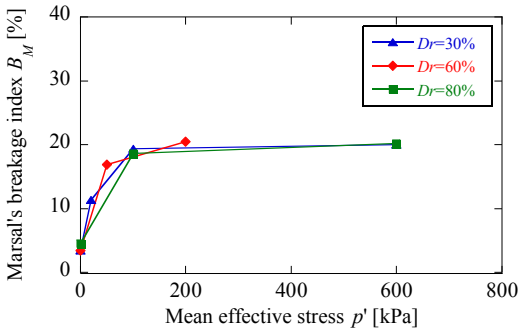

図 8　粒子破砕率 B_M と有効応力の関係

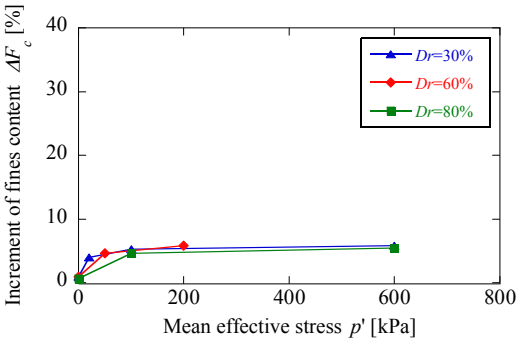

図 9　細粒分含有率の変化ΔF_cと有効応力の関係

3.5　非排水せん断試験結果

粒子破砕が非排水せん断特性に与える影響の把握と得られた物性値から地震時変形解析を実施する目的で，非排水せん断試験を行った。

図 10 に非排水せん断試験結果から得られた粒子破砕率とせん断抵抗角の関係を示す。図より初期有効拘束圧 p_0’の増加に伴い，粒子破砕率 B_Mおよび細粒分含有率の変化ΔF_cが増加し，せん断抵抗角が減少していることがわかる。また，等方圧密試験と同様に p_0’ = 100 kPa までの応力域で，非排水せん断による粒子破砕率 B_Mおよび細粒分含有率の変化ΔF_cが急増し，せん断抵抗角が急激に減少していることがわかる。それぞれの曲線を比較すると，せん断抵抗角と細粒分含有率の変化ΔF_cは傾きが似た傾向になっており，粒子破砕率 B_Mよりも高い相関があると考えられる。同様の傾向は，乱した火山灰質粗粒土に対する排水・非排水三軸圧縮試験結果でも確認されている[3)]。

図 11 に初期の有効応力で正規化された軸差応力 q/p_0’と有効応力 p’/p_0’の関係を示す。図より p_0’の増加に伴い，q/p_0’が小さくなる結果となった。これは有効応力の増加に伴って粒子破砕率が増加し，その影響により，せん断による圧縮性が増した結果と考えられる。

図 12 に軸ひずみ 15%での軸差応力で正規化された q-ε_a曲線を示す。図より低い初期平均有効応力の試験ケースでは，軸差応力は単調に増加し続けるのに対し，高い初期平均有効応力の試験ケースでは軸差応力の変化が小さいにもかかわらず，ひずみが急増する区間（図中枠内）が発生しており，せん断挙動に差異が見られる。

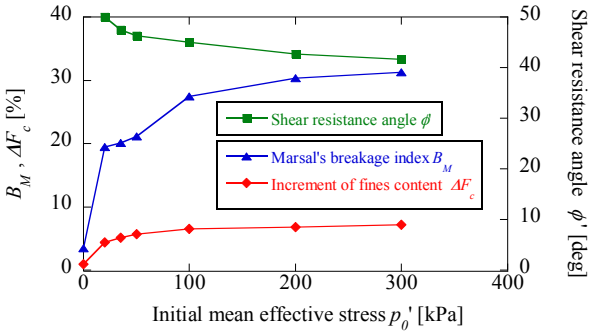

図 10　せん断抵抗角と粒子破砕率，初期平均有効応力の関係

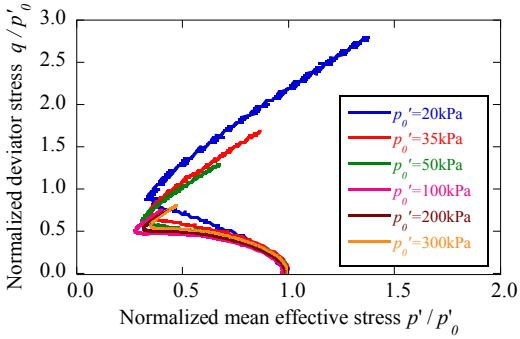

図 11　初期平均有効応力で正規化された有効応力経路

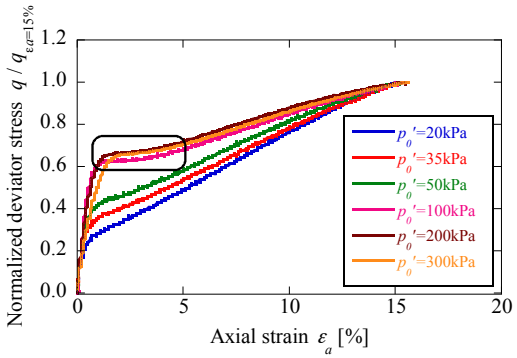

図 12　軸ひずみ15%での軸差応力で正規化された q-ε_a曲線

3.6　繰返し三軸試験結果

図 13 に繰返し三軸試験結果より得られた福島現地砂の液状化強度曲線を示す。同図では，円弧すべり最深部と同じ有効土被り圧の p’ = 87 kPa の液状化強度曲線も併記する。本研究では，DA = 5%時の繰返し回数 20 回における繰返し応力振幅比を液状化強度と定義した。図より液状化強度を算出すると，初期平均有効応力 p_0’ が 50 kPa の場合で 0.168，200 kPa の場合で 0.151 と，p_0’ = 200 kPa の方が液状化強度が小さくなった。

図 14 に粒子破砕率と初期平均有効応力の関係を示す。図より粒子破砕率 B_Mは p_0’ = 200 kPa の方が p_0’ = 50 kPa よりも 5%程度大きいことがわかる。また，細粒分含有率の変化ΔF_cは，p_0’ = 200 kPa の方が p_0’ = 50 kPa よりも 1%程度大きいことがわかる。これらから，初期平均有効応力の増加に伴い粒子破砕率が増加した結果，液状化強度が減少したものと推察できる。

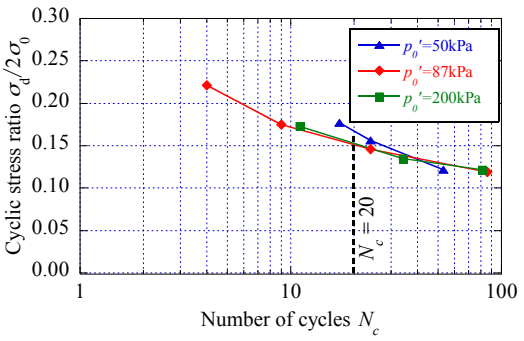

図 13　液状化強度曲線（DA = 5%）

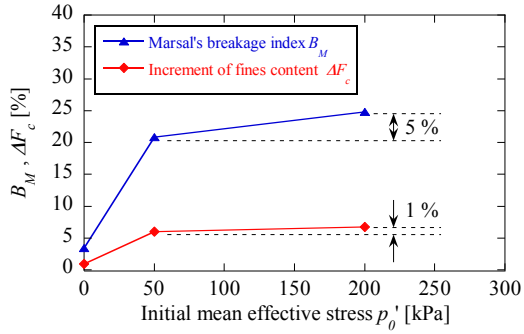

図 14　粒子破砕率と初期平均有効応力の関係（繰返し三軸試験）

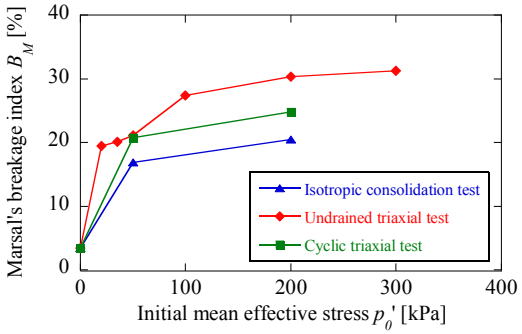

図 15　試験方法の違いによる粒子破砕率 B_M の比較

3.7　試験の違いによる粒子破砕の比較

これまで等方圧密試験，非排水せん断試験，繰返し三軸試験の結果を述べてきたが，本節では試験方法の違いによる粒子破砕率の比較を行う。ここでは，Dr = 60%の試験結果を比較する。

図 15 に試験方法の違いによる粒子破砕率 B_M の比較を示す。図よりいずれの試験でも，p_0' = 100 kPa までは粒子破砕率 B_M が急激に増加し，それ以上大きな応力になるとゆるやかな増加を示していることがわかる。3 つの試験では，非排水せん断試験において最も粒子破砕率が増加した。これは，せん断時に大きな軸差応力が加わるためだと考えられる。また，等方圧密試験と繰返し三軸試験では，繰返し三軸試験の粒子破砕率 B_M の方が 2~3%程度大きい。このことから，非排水せん断試験と比べて比較的小さなせん断応力となる繰返し載荷でも粒子破砕が生じることが明らかとなった。

図 16 に試験の違いによる細粒分含有率の変化ΔF_c の比較を示す。こちらも粒子破砕率 B_M と同様に p_0' = 100 kPa までの間で細粒分含有率の変化ΔF_c が急激に増加していることがわかる。しかし，非排水せん断試験と繰返し三軸試験の細粒分含有率の変化ΔF_c はほぼ同じ値となり，粒子破砕率 B_M とは異なる結果を示した。

図 17 に非排水せん断試験によって生じた粒子破砕率 B_M および細粒分含有率の変化ΔF_c を示す。図より軸差応力 q の増加に伴い，粒子破砕率 B_M および細粒分含有率の変化ΔF_c が増加していることがわかる。特に粒子破砕率 B_M は，直線的に増加しており，等方圧密試験結果とは異なった挙動を示している。

図 18 に繰返し三軸試験によって生じた粒子破砕率 B_M および細粒分含有率の変化ΔF_c を示す。図より繰返し軸差応力の片振幅σ_d の増加により，粒子破砕率 B_M および細粒分含有率の変化ΔF_c が増加していることがわかる。しかし，繰返し軸差応力の片振幅σ_d が 20~60 kPa の間では，粒子破砕率 B_M および細粒分含有率の変化ΔF_c に増加がみられなかった。このことから，繰返し軸差応力の片振幅σ_d が粒子破砕に与える影響は小さいと判断できる。

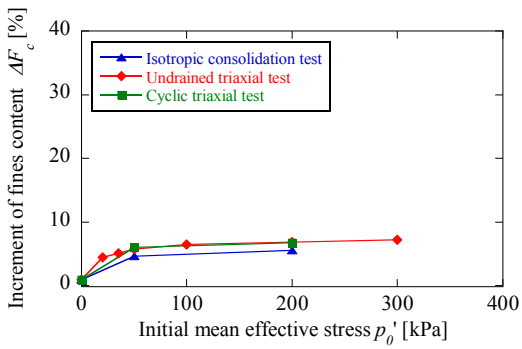

図 16　試験方法の違いによる細粒分含有率の変化ΔF_c の比較

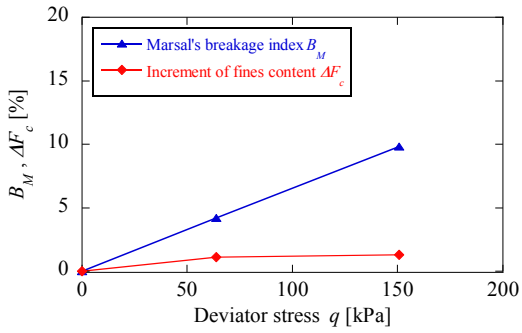

図 17　非排水せん断試験によって生じた粒子破砕率

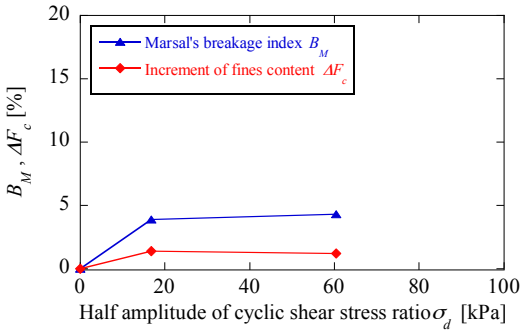

図 18　繰返し三軸試験によって生じた粒子破砕率

4. 地震時変形解析による検討

4.1 概説

本研究では，東北地方太平洋沖地震によって崩壊した福島県会津若松市一箕中学校付近の造成盛土において，土の粒子破砕に着目し，三軸圧縮試験機を用いて土の粒度分布の変化および力学特性を調査した。その結果，粒子破砕の増加に伴い，せん断抵抗角が減少することが明らかとなった。本章では，各試験によって得られた物性値を用いて，被災盛土の地震時変形解析を実施する。変位予測手法は *Newmark* 法[18]を用い，解析ソフトには *Power SSA* を用いる。*Newmark* 法は，すべり面上で発揮されるせん断抵抗力を上回る地震慣性力が作用した瞬間に変位が発生する特徴があり，すべり面を仮定してから変位計算を行うため，すべり面を決定する必要がある。本研究では，次節に示す現地調査結果に基づきすべり面を決定した。

4.2 被害断面図

図 19 に一箕中学校周辺盛土の被害断面図を示す。赤い線が崩壊前の断面図で，青い線が崩壊後を示している。図 20 に解析断面図を示す。地下水位は一番低い盛土地表面から 1.3 m 下に設定した。現地調査より図 20 に示すように点①と点②を決定し，ボーリング調査結果と *N* 値から点③を決定し，すべり面を仮定した。円弧すべり面最深部の土被り圧は有効応力 p' = 87 kPa である。

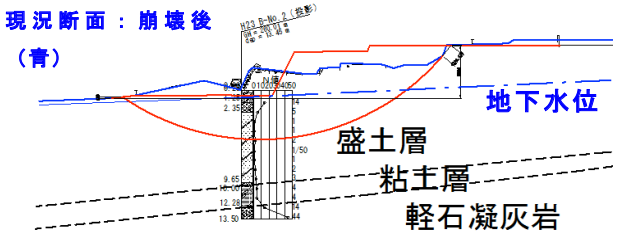

図 19 被害断面図

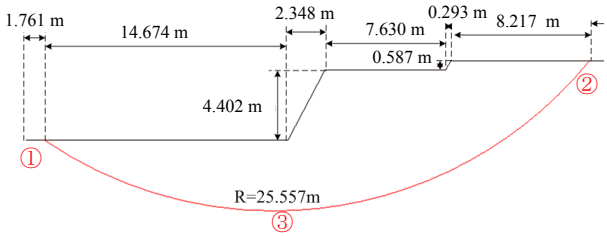

図 20 解析断面図

4.3 繰返し三軸試験結果を用いた残留強度の算出

地震時変形解析を実施するにあたって，解析条件に残留強度 c'，ϕ'を設定する必要がある。しかし，残留強度が把握できていない。そこで，本研究では繰返し回数 20 回で DA = 5%に到達するせん断応力比を液状化強度とみなし，その状態が最も強度が低下した状態，すなわち残留状態であると考え，残留強度を液状化時の強度と仮定し，繰返し三軸試験結果より残留強度を算出する。繰返し回数の設定によっては DA = 5%に到達するせん断応力比も異なり，回数を多く設定すればせん断応力比も低下することが予想されるが，本解析では一般的によく用いられる液状化強度である繰返し回数 20 回で DA = 5%に到達するせん断応力比を採用することにした。その手順を以下に示す。

まず，初めに図 13 に示した液状化強度曲線より p_0' = 50, 87, 200 kPa それぞれの液状化強度を算出する。次に，液状化強度より繰返し軸差応力の片振幅σ_d を算出する。そして，図のようなモールの応力円を作成し，液状化時の粘着力 c'とせん断抵抗角ϕ'を求める。図 21 より残留粘着力 c' = 0 kPa，残留せん断抵抗角ϕ' = 18.0° が得られた。本研究では，この値を解析条件として用いる。

4.4 入力地震動の設定

入力地震動は，防災科学技術研究所強震ネットワーク K-net[19]より 2011 年 3 月 11 日 14 時 47 分 14 秒に，会津若松観測所で観測された地震動を用いる。一箕中学校までの距離は約 5 km の位置にある。図 22 に観測地震動を示す。NS 波と EW 波があるが，本研究では最大加速度が大きい NS 波を用いた。NS 波は最大加速度 4.51 m/s^2，継続時間 300 秒の長地震動である特徴を有する。

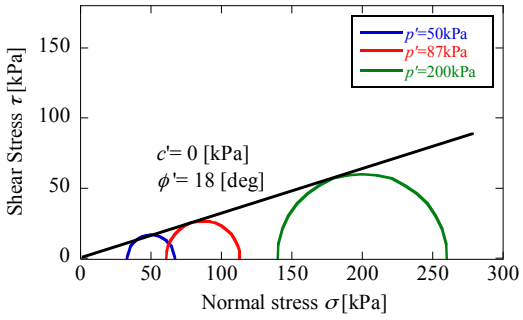

図 21 モールの応力円（液状化時）

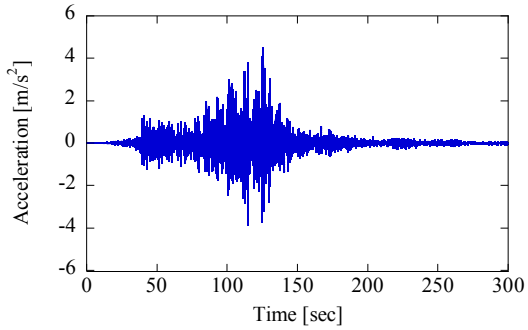

図 22 入力地震動（NS 波）

4.5 解析条件

表 5 に解析パラメータ[20]を示す。残留せん断抵抗角は，4.3 節で求めた値を用いる。ピークせん断抵抗角は現地採取土の室内試験に示すように，盛土の施工方法や地盤応力によって変化する。崩壊以前の現地の初期状況を確定的に

推測できないことから，表 6 に示す Dr = 60%の非排水せん断試験から得られた，粒子破砕の影響によるピークせん断抵抗角の減少を考慮して，ピークせん断抵抗角を変化させる試行解析を実施した。これにより，粒子破砕によるピーク強度の低下による盛土変位量への影響評価を行った。なお，本解析では，変位が発生した際に，ピーク強度から残留強度へと瞬時に移り変わると仮定し，すべり面の強度定数は場所に依らず一様と仮定した。また，湿潤単位体積重量および飽和単位体積重量は，現地試料の含水比より算出した。

4.6 解析結果

図 23 に解析結果を示す。図より粒子破砕によるピークせん断抵抗角の減少に伴い，地震時累計変位量が増加していることがわかる。また，せん断抵抗角が小さくなるほど，変位が早く生じることがわかる。

次に実変位と解析値の比較を行う。現地調査より，地震時に発生した実変位量は 1.38 m であった。この値に最も近い解析値は，表 6 に示す p_0' = 100 kPa 時のピークせん断抵抗角（45.3°）で 1.45 m である。現地の円弧すべり面最深部の有効土被り圧は 87 kPa であり，解析値（p_0' = 100 kPa）と近く，このことから粒子破砕に伴うせん断抵抗角の減少を考慮することで実測値に近い妥当な解析結果が得られたといえる。

図 24 に試験結果から得られた粒子破砕率とピークせん断抵抗角および解析結果から得られたピークせん断強度と累計変位量の関係を併せて示す。図より粒子破砕率 B_M および細粒分含有率の変化ΔF_cの増加に伴い，ピークせん断抵抗角は減少し，地震時累計変位量が増加していることがわかる。特に粒子破砕率 B_M および細粒分含有率の変化 ΔF_c が急増する領域で，累計変位量も急増することが明らかとなった。

5. 結論

本研究では，東北地方太平洋沖地震により，福島県会津若松市一箕中学校付近の造成盛土が崩壊した要因について，粒子破砕に着目し，三軸圧縮試験機を用いて等方圧密試験，非排水せん断試験，繰返し三軸試験を実施して，粒子破砕と力学特性の関係について調査した。また，得られた物性値を用いて地震時変形解析を実施し，粒子破砕が盛土崩壊に与えた影響について検討を行った。以下に本研究で得られた結論を示す。

(1) 福島現地採取砂は，有効応力 p' = 100 kPa までの圧密で，粒子破砕率が急激に増加する。

(2) 円弧すべり面最深部の土被り圧が p' = 87 kPa の本被災盛土では，粒子破砕の影響を強く受けていた。

(3) 粒子破砕の増加に伴い，せん断抵抗角および液状化強度が減少し，これが地震時の盛土変位量に大きな影響を与えた。

(4) 繰返し三軸試験から得られた液状化強度より算出した残留強度と，粒子破砕に伴うせん断抵抗角の減少を考慮した地震時変形解析で，実変位を再現する妥当な解析結果が得られることを示した。

表 5 解析パラメータ

ピークせん断抵抗角 ϕ' [°]	41.6 ～ 50.0
ピーク粘着力 c' [kPa]	0.0
残留せん断抵抗角 ϕ' [°]	18.0
残留粘着力 c' [kPa]	0.0
湿潤単位体積重量 γ_t [kN/m^3]	15.8
飽和単位体積重量 γ_{sat} [kN/m^3]	17.9

表 6 粒子破砕の影響によるピークせん断抵抗角の減少

非排水せん断試験の初期平均有効応力 p_0' [kPa]	ピークせん断抵抗角 ϕ' [°]
20	50.0
35	47.5
50	46.3
100	45.3
200	42.7
300	41.6

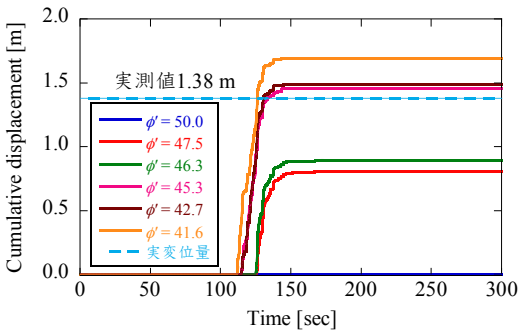

図 23 累計変位量と実変位量の比較

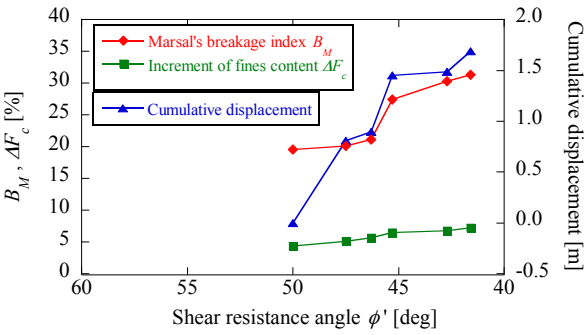

図 24 粒子破砕率と累計変位の関係

参 考 文 献

1) 山中稔，後藤恵之輔：雲仙普賢岳火山性堆積物の建設素材としての特性と有効利用，応用地質，第 42 巻，第 5 号，pp.286-293，2001.

2) 北村良介：破砕性土の力学特性と破砕性地盤の工学的諸問題，土と基礎，Vol.48，No.10，pp.3-6，2000.

3) 八木一善，三浦清一：破砕性火山灰地盤の力学特性の評価，土木学会論文集，No.757/Ⅲ-66，pp.221-234，2002.

4) 三浦清一，八木一善：火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破砕とその評価，土木学会論文集，No.561/Ⅲ-38，

pp.257-269，1997.
5) 三浦清一，八木一善，川村志麻：北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破砕, 土木学会論文集, No.547/Ⅲ-36，pp.159-170，1996.
6) 兵頭正幸，荒牧憲隆，岡林巧，中田幸男，村田秀一：破砕性土の定常状態と液状化強度，土木学会論文集，No.554/Ⅲ-37，pp.197-209，1996.
7) 八木一善，三浦清一：火山性粗粒土の繰返し非排水せん断特性に及ぼす破砕細粒分の影響，土木学会論文集，No.694/Ⅲ-57，pp.305-317，2001.
8) 兵頭正幸，三浦清一，八木一善，荒牧憲隆，高田誠，北村良介：火山灰質土－その性質と設計施工－ 3.火山灰質粗粒土の工学的性質，土と基礎，Vol.53，No.11，pp.37-44，2005.
9) 三浦清一，八木一善，川村志麻：破砕性粗粒火山灰土の繰返し非排水変形－強度特性に及ぼす応力履歴の影響，土木学会論文集，No.547/Ⅲ-36，pp.221-229，1996.
10) 松本和正，八木一善，池田晃一：北海道の火山灰質粗粒土の締固め特性と粒子破砕，第 44 回地盤工学研究発表会論文集，pp.701-702，2009.
11) 公益社団法人 地盤工学会北海道支部：実務家のための火山灰質土～特徴と設計・施工，被災事例～，pp.27-64，2010.
12) 気象庁：気象庁技術報告，第 133 号 2012.
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/gizyutu/133/gizyutu_133.html
13) 我妻忠浩，遠藤真哉，大塚悟：東日本大震災における谷埋め盛土被害（会津若松市），第 47 回地盤工学研究発表会，pp.1641-1642，2012.
14) 山元孝広，駒澤正夫：カルデラ火山の地質：5 万分の 1 地質図幅「宮下」地域の紹介，地質ニュース 606 号，地質調査総合センター，pp.50-56，2004.
15) 福本武明：粒子破砕が盛土斜面の安定性に及ぼす影響について, 地盤工学会論文報告集, 第 35 巻, 第 3 号, pp.139-142，1995.
16) 八木一善：破砕性を有する火山灰土の力学特性とその評価法～北海道の火山灰地盤における検討～，応用地質，第 44 巻，第 3 号，pp.139-142，2003.
17) 社団法人 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説, p.665，2009.
18) 堀井克己，舘山勝，内田吉彦，古関潤一，龍岡文夫：ニューマーク法による鉄道盛土の地震時滑動変位予測，第 32 回地盤工学研究発表会，pp.1895-1896，1997.
19) 防災科学技術研究所強震ネットワーク K-net，http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/
20) 西山洋輔，小石悠介，大塚悟，磯部公一，遠藤真哉：東北地方太平洋沖地震における火山灰質盛土被害の実験・解析的考察，第 48 回地盤工学研究発表会，pp.473-474，2013.

（2015.2.9 受付）

Damage analysis of volcanic ash embankment collapse in The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

Satoru OHTSUKA[1], Yusuke KOISHI[2], Koichi ISOBE[3] and Shinya ENDO[4]

1 Department of Civil and Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology
2 Central Japan Railway Company
3 Graduate School of Engineering, Hokkaido University
4 Shinwasekkei Co. Ltd.

Abstract

A large-scale slope failure of embankment, which consists of volcanic sediment, at Aizu-Wakamatsu City in Fukushima Prefecture occurred due to The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Some signatures of liquefaction have been observed in the collapsed embankment. When investigating the embankment slope failure mechanism, it is necessary to study the effects of particle breakage. In this study, some static and repeated triaxial tests were conducted for the soil material sampled from the site in order to investigate the change of the particle size distribution with isotropic consolidation stress and shear stress and the effect on the shear strength characteristics due to the particle breakage. From the test results, it was revealed that the sampled soil, subjected to the effective isotropic consolidation stress of 100kPa or less, increases the particle breakage amount rapidly and the shear resistance angle is significantly reduced with the increase of the particle breakage amount. Subsequently, seismic deformation analysis was carried out for the slope failure of the embankment based on the mechanical properties obtained in the test. As a result, a reasonable analysis result was obtained by considering the calculated residual strength based on the liquefaction strength curve and the reduction characteristics of shear resistance angle due to particle breakage.

Key words: volcanic sediment, particle breakage, liquefaction, triaxial compression test, Newmark's method