

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

小石 悠介¹, 大塚 悟², 磯部 公一³

- 1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻
- 2 工博 長岡技術科学大学 工学部 環境・建設系
- 3 博士(工) 長岡技術科学大学 工学部 環境・建設系

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たが、盛土材は火山性堆積物であることから粒子破碎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、静的および繰返し载荷試験により強度特性を調査した。三軸圧縮試験より、福島現地採取土は有効応力 $p' = 100\text{kPa}$ までの等方圧密で粒子破碎量が急激に増加すること、粒子破碎量の増加に伴い、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おける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碎によるせん断抵抗角の減少を考慮した妥当な解析結果が得られたことを示した。

キーワード：火山性堆積物、粒子破碎、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其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、粒子破碎が懸念されている。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¹⁾のが実情である。しかし、粒子破碎の施工管理における基準はなく、粒子破碎が地盤へどのような影響を与えているか未解明な部分が多い。

本研究では、土の粒子破碎に着目し、現地採取土にたいして、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、粒度変化を調査するほか、静的及び繰返し载荷試験により強度特性を調査した。当該盛土における粒子破碎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結果について報告する。

2. 福島県会津若松市一其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24km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²⁾が発生し、宮城県で震度7、宮城県、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其中学校周辺の造成地盛土では、大規模な盛土崩壊が発生した。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。この地域の地震時の震度は5強であった。写真1に現地の被災状況を示す。



写真1 一其中学校周辺の被災状況

2.2 被災箇所³⁾

被災箇所は、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の地形解析図に示すように谷埋め盛土である。現地路査により、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2に示した一箕中学校グラウンドを頭部、道路を末端において、液状化が原因と考えられる円弧地すべりが発生した。

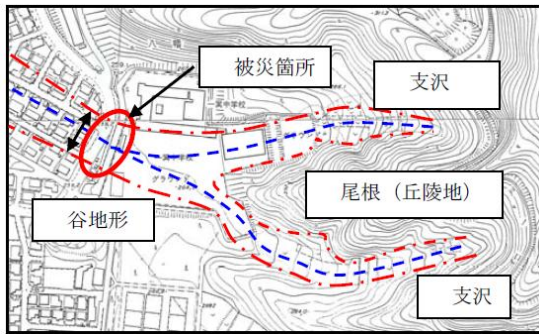


図1 地形解析図

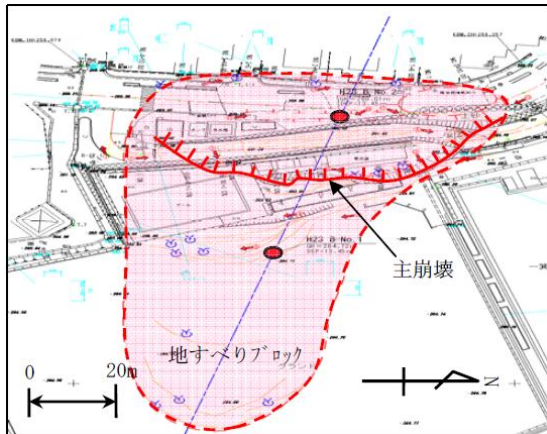


図2 被災状況平面図

2.3 ボーリング調査結果

図3にボーリング調査結果を示す。赤い矢印で示した深さ4~8mの範囲において液状化が原因と考えられる土の流動が確認できた。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、2mから基盤層までは2~5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から多量の湧水が確認されており、積雪が20cm程あったこと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

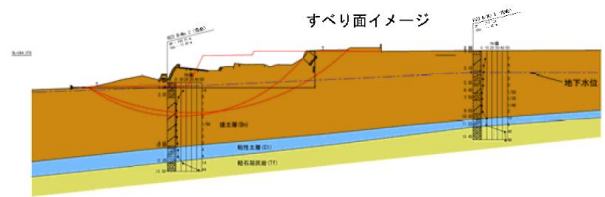


図4 地質想定縦断面図

2.4 盛土材の地質

図5に会津地域の地質概略図⁴⁾を示す。被災地周辺では、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、河川堆積物などが分布している。被災地の火砕流堆積物は、白河火砕流群に属し、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。図6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50cm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るフローユニット境界が観察される。また、溶結部では径1m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20~30mである。盛土材は、山砂としてこの火砕流堆積物が用いられている。

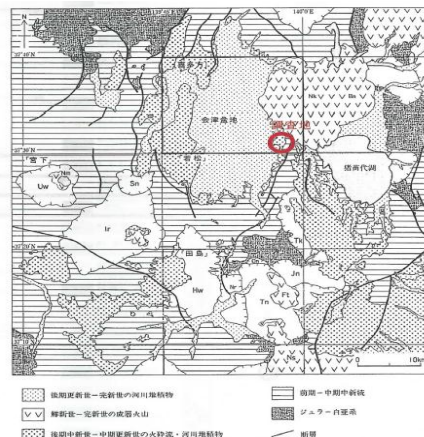


図5 会津地域の地質概略図



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

3.1 粒子破碎の定量化

粒子破碎を議論するには、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碎の大きさを量的に表現しようと試みた多くの研究は、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残留率の各ふるい目で求め、それを合計したもの、④粒子表面積に基づくもの等⁹⁾がある。図6に粒子破碎指標の定義を示す。図に示した Marsal の粒子破碎率 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、試料全体の粒子破碎率として Marsal の粒子破碎率 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つを粒子破碎の定量化として採用する。

$$B_M = \sum \Delta P_i \quad (1)$$

$$\Delta F_c = F_{cf} - F_{ci} \quad (2)$$

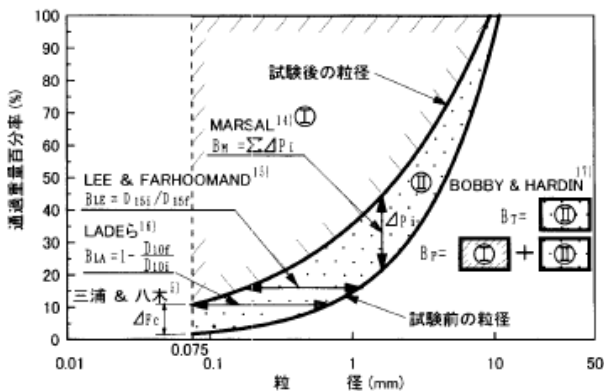


図 6 粒子破碎指標の定義⁹⁾

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 15~20mm 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 2mm 以上の礫分が含まれていたが、三軸圧縮試験では 2mm 以下の試料を用いるので最大粒径を 2mm 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 2.542g/cm³ と小さい値を示した。最大間隙比は、豊浦砂とほぼ同じだが、最小間隙比は、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。

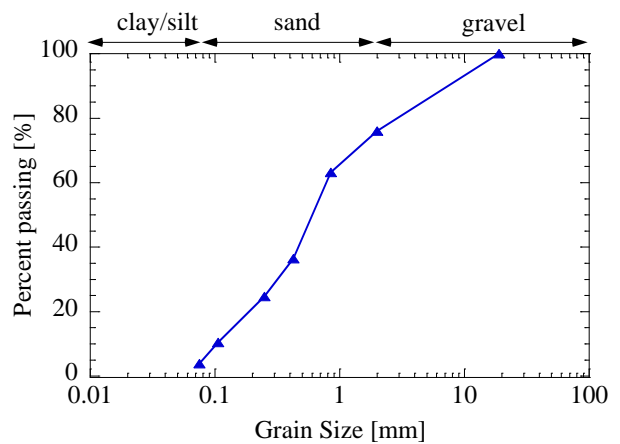


図 7 粒径加積曲線

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
最大間隙比 e_{max}	1.659	1.645
最小間隙比 e_{min}	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 ΔF_c [%]	10.9	0.0
備考	粒度調整 (再構成)	比較対象

3.3 試験条件

三軸圧縮試験に用いた試料は、2mm 以下のものを用いた。供試体の寸法は、直径 5cm, 高さ 10cm である。実施した試験は、等方圧密試験、非排水せん断試験、繰返し三軸圧縮試験の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碎の関連性を調べるため、密詰め $D_r=80\%$ と緩詰め $D_r=30\%$ の試験も実施した。非排水せん断試験では、低有効応力のケースと高有効応力のケースを実施し、有効応力と粒子破

砕の関連性を調査した。繰返し三軸圧縮試験では、有効応力の違いによる液状化強度の比較及び粒子破碎との関連性を調査した。

各試験とも、粒子破碎を定量化するため、試験前後で粒度試験を実施し、粒子破碎率を算出した。

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 [%]	有効応力 p' [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（繰返し三軸圧縮試験）

相対密度 D_r [%]	有効応力 p' [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
			0.11
	200		0.14
			0.17

3.4 等方圧密試験結果

圧密によって生じる粒子破碎量を把握するため、等方圧密試験を実施した。なお、圧密は 3t 法⁷⁾を用いて試験を終了した。

図 8 に等方圧密試験結果から得られた粒子破碎率 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 $p'=100\text{kPa}$ までの範囲で粒子破碎率 B_M が急激に増加していることがわかる。また、 $p'=100\text{kPa}$ よりも大きな応力域では粒子破碎率 B_M が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 $p'=100\text{kPa}$ までの圧密で、ある程度粒子破碎が終了したといえる。

各相対密度でみると、 $D_r=60\%$ を除いて密度が低くなると粒子破碎が増加する傾向がみられた。このことから緩い試料の方が粒子破碎しやすいといえる。

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 $p'=100\text{kPa}$ 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。

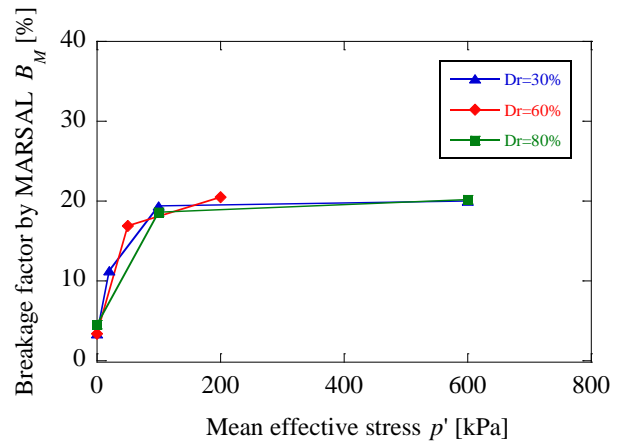


図 8 粒子破碎率 B_M と有効応力の関係

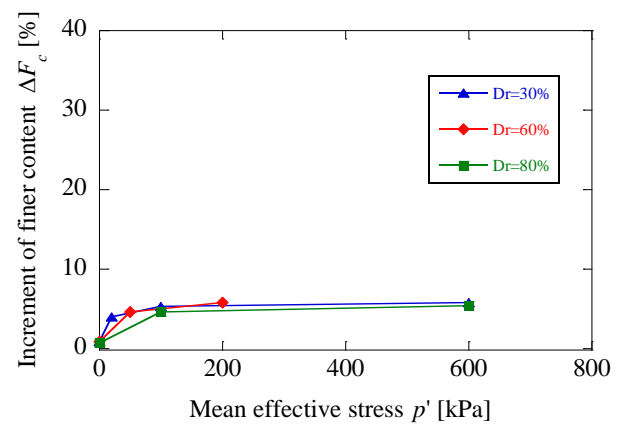


図 9 細粒分含有率の変化 ΔF_c と有効応力の関係

3.5 非排水せん断試験結果

粒子破碎が非排水せん断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碎率とせん断抵抗角の関係を示す。図より有効応力の増加に伴い、粒子破碎率 B_M 及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 $p'=100\text{kPa}$ までの応力域で、粒子破碎率 B_M 及び細粒分含有率の変化 ΔF_c が急増し、せん断抵抗角が急減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、粒子破碎率 B_M よりも高い相関があるといえる。

図 11 に規準化された q_0-p_0 曲線を示す。図より有効応力の増加に伴い、 q_0-p_0 曲線がねてくる傾向が明らかとなった。これは有効応力の増加に伴って、粒子破碎が増加し、粒子破碎の影響により、圧縮性がしたと考えられる。

図 12 に規準化された $q_0-\varepsilon$ 曲線を示す。図より低拘束圧の試験ケースでは、軸差応力は上がり続けているのに対し、高拘束圧の試験ケースでは軸差応力が変わらないが、ひずみが増加している区間が発生している。

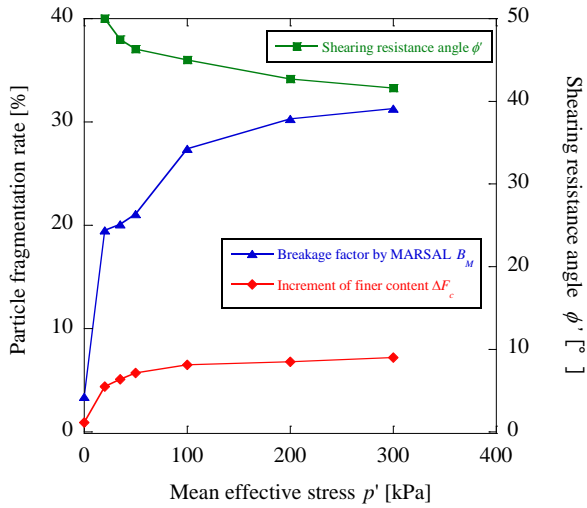


図 10 せん断抵抗角と粒子破碎率の関係

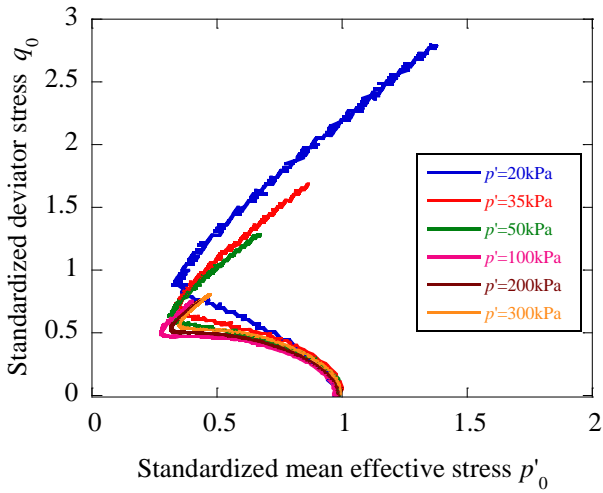


図 11 規準化された q_0 - p'_0 曲線

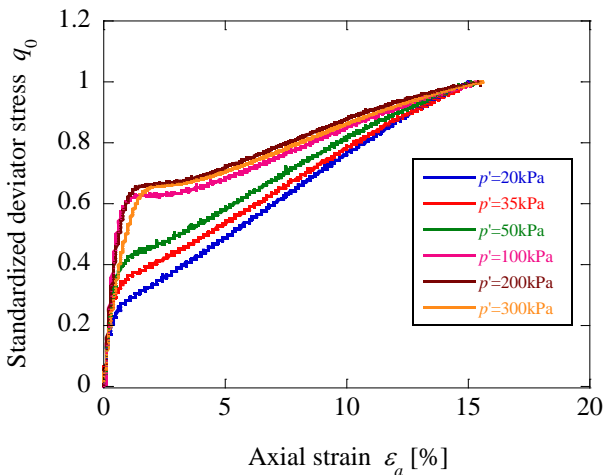


図 12 規準化された q_0 - ε_a 曲線

3.6 繰返し三軸圧縮試験結果

図 13 に繰返し三軸圧縮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。また、参考値として円弧すべ

り最深部と同じ土被り圧の $p'=87\text{kPa}$ の液状化強度曲線を併記する。本研究では、地盤工学会が定める $DA=5\%$ 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⁸⁾した。図より液状化強度を算出すると、 $p'=50\text{kPa}$ で 0.168、 $p'=200\text{kPa}$ で 0.151 と $p'=200\text{kPa}$ の方が液状化強度が小さくなった。

図 14 に粒子破碎率と有効応力の関係を示す。図より粒子破碎率 B_M は $p'=200\text{kPa}$ の方が $p'=50\text{kPa}$ 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、 $p'=200\text{kPa}$ の方が $p'=50\text{kPa}$ よりも 1% 程度大きいことがわかる。これらのことから、有効応力の増加に伴い粒子破碎率が増加し、その結果液状化強度が減少したといえる。

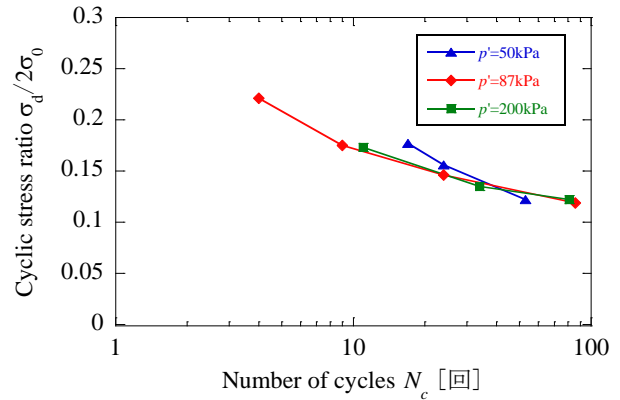


図 13 液状化強度曲線 ($DA=5\%$)

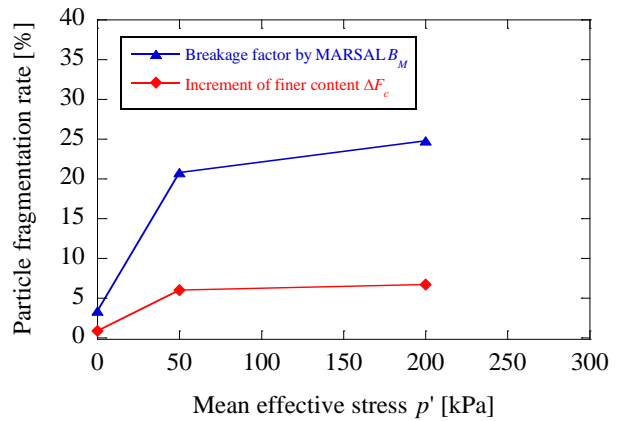


図 14 粒子破碎率と有効応力の関係 (繰返し三軸圧縮試験)

3.7 試験の違いによる粒子破碎の比較

さて、これまで等方圧密試験、非排水せん断試験、繰返し三軸圧縮試験の結果を述べてきたが、本節では試験の違いによる粒子破碎率の比較を行う。ここでは、 $Dr=60\%$ の試験結果を比較する。

図 15 に試験の違いによる粒子破碎率 B_M の比較を示す。図よりいずれの試験でも、 $p'=100\text{kPa}$ までは粒子破碎率 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碎率が増加した。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圧縮試験では、繰返し三軸圧縮試験の粒子破碎率 B_M の方が 2~3%程度大きい。このことから、繰返し载荷でも粒子破碎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。こちらも粒子破碎率 B_M と同様に $p'=100\text{kPa}$ 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圧縮試験の細粒分含有率の変化 ΔF_c はほぼ同じ値となり、粒子破碎率 B_M とは異なった挙動を示した。

図 17 に非排水せん断試験によって生じた粒子破碎を示す。図より軸差応力 q の増加に伴い、粒子破碎率 B_M 及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。特に粒子破碎率 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 に繰返し三軸圧縮試験によって生じた粒子破碎を示す。図より繰返し軸差応力の片振幅 σ_d 発生により、粒子破碎率 B_M 及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 20~60kPa の間では、粒子破碎率 B_M 及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 が粒子破碎に与える影響を小さいといえる。

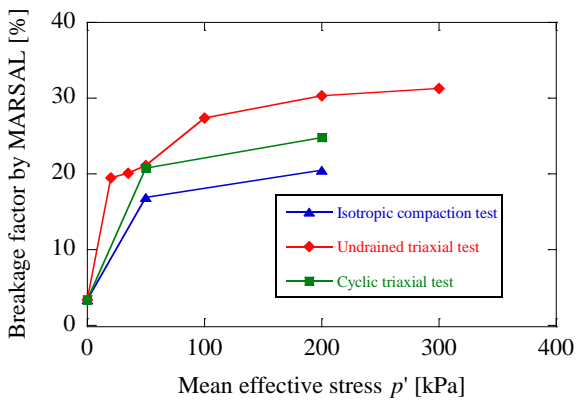


図 15 試験の違いによる粒子破碎率 B_M の比較

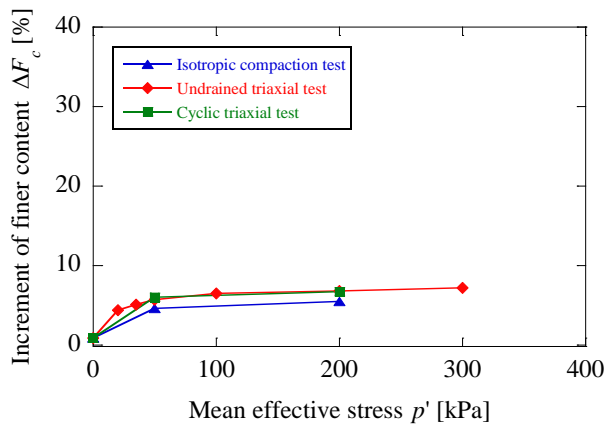


図 16 試験の違いによる細粒分含有率の変化 ΔF_c の比較

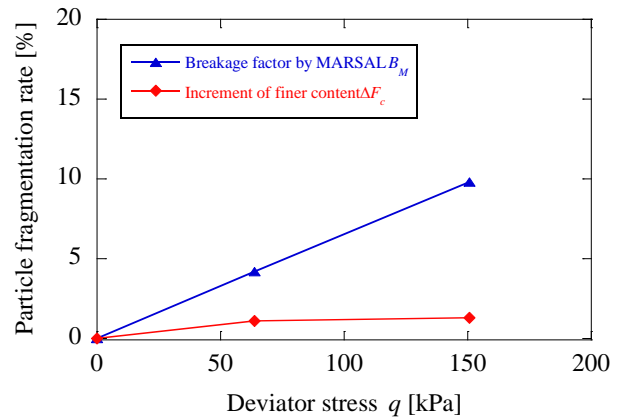


図 17 非排水せん断試験によって生じた粒子破碎

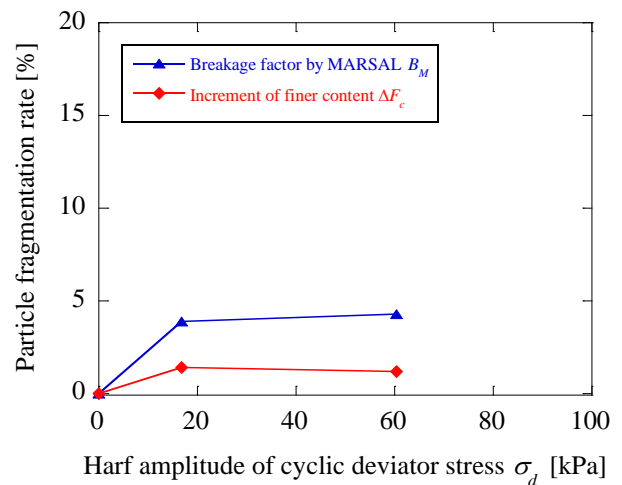


図 18 繰返し三軸圧縮試験によって生じた粒子破碎

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、土の粒子破碎に着目し、三軸圧縮試験機を用いて土の粒度分布の変化及び力学特性を調査した。その結果、粒子破碎の増加に伴い、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。解析ソフトは、株式会社五大開発が開発した *Power SSA* を用いる。変位予測手法は *Newmark* 法¹⁰⁾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る。また、*Newmark* 法は、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、修正 *Fellenius* 法を用いて繰返し円弧計算を実施し、すべり面を仮定してから地震時変形解析を実施する。

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⁹⁾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 1.3m 下に設定した。現地調査より点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、すべり面を過程した。円弧すべり面最深部の土被り圧は有効応力 $p'=87\text{kPa}$ である。

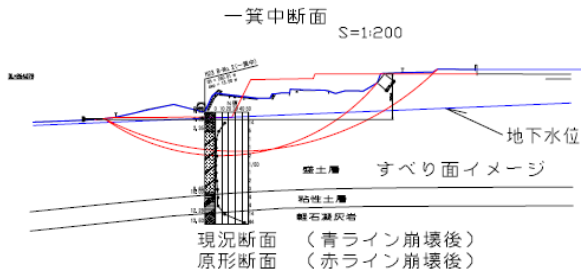


図 19 被害断面図

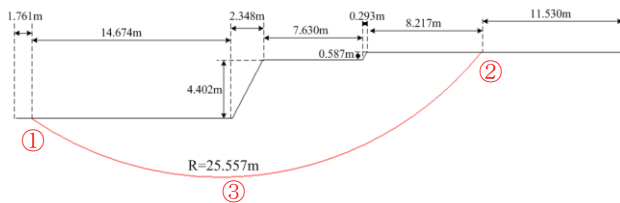


図 20 解析断面図

4.3 繰返し三軸圧縮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、本研究では残留強度を液状化時の強度と仮定し、繰返し三軸圧縮試験結果より残留強度を算出する。

まず、初めに図 13 に示した液状化強度曲線より $p'=50$, 87, 200kPa それぞれの液状化強度を算出する。次に液状化強度 $=\sigma_d/2\sigma'_o$ 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 $c'=0\text{kPa}$, 残留せん断抵抗角 $\phi'=18.0^\circ$ 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-net¹¹⁾より 2011 年 3 月 11 日 14 時 47 分 14 秒に、県立会津高等学校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 5km 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を大きい NS 波を用いた。最大加速度 450.8m/s^2 , 300 秒の長地震動といった特徴が挙げられる。

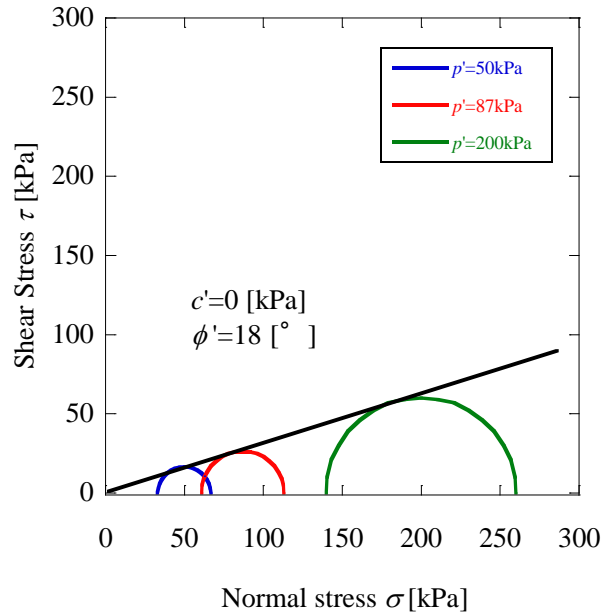


図 21 モールの応力円 (液状化時)

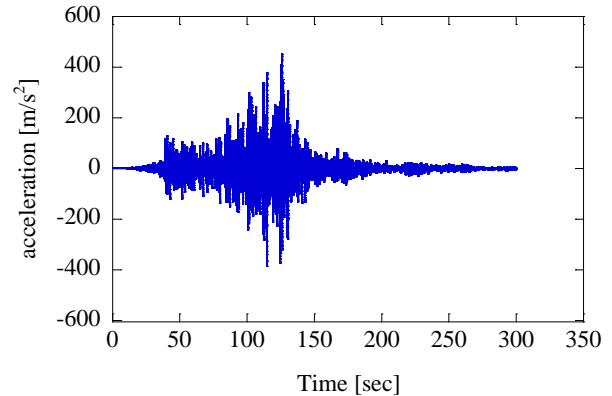


図 22 入力地震動

4.5 解析条件

表 5 に解析パラメータを示す。ピークせん断抵抗角は、 $p'=100\text{kPa}$ 時の圧密非排水せん断試験結果を用いる。残留せん断抵抗角は、4.3 節で求めた値を用いる。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移り変わる。また、湿潤重量及び飽和重量は、現地試料の含水比より算出した。

表 6 に粒子破碎の影響によるピークせん断抵抗角の減少を示す。本研究では、粒子破碎によるせん断抵抗角の影響を考慮するため、 $Dr=60\%$ の非排水せん断試験から得られたピークせん断強度を用いる。表のようにピークせん断抵抗角を変えて、それぞれ解析を実施した。

表 5 解析条件

ピークせん断抵抗角 ϕ' [°]	45.3
ピーク粘着力 c' [kPa]	0
残留せん断抵抗角 ϕ' [°]	18.0
残留粘着力 c' [kPa]	0
湿潤重量 γ_{sub} [kN/m^3]	15.8
飽和重量 γ_{sat} [kN/m^3]	17.9

表 6 粒子破碎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有効応力 p' [kPa]	ピークせん断抵抗角 ϕ' [$^{\circ}$]
20	50.0
35	47.5
50	46.3
100	45.3
200	42.7
300	41.6

4.6 解析結果

図 23 に解析結果を示す。図より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った。

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 1.38m であった。この値に最も近い解析値は、 $p'=100\text{kPa}$ 時のせん断抵抗角で 1.45m である。現地の円弧すべり面最深部の土被り圧は $p'=87\text{kPa}$ であり、解析値 ($p'=100\text{kPa}$) と近く、このことから粒子破碎に伴うせん断抵抗角の減少を考慮した妥当な解析結果が得られたといえる。

図 24 に粒子破碎率と累計変位量の関係を示す。図より粒子破碎率 B_M 及び細粒含有率の変化 ΔF_c の増加に伴い、地震時累計変位量も増加していることがわかる。特に粒子破碎率 B_M 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。

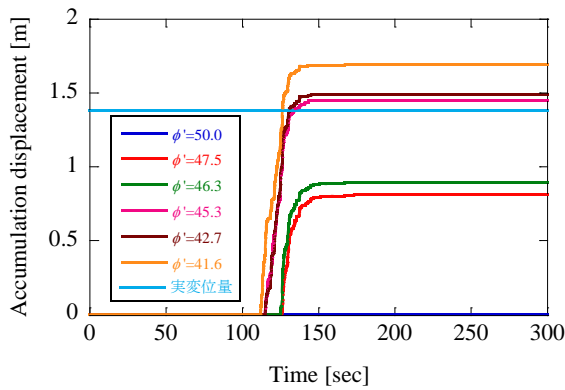


図 23 累計変位量と実変位量の比較

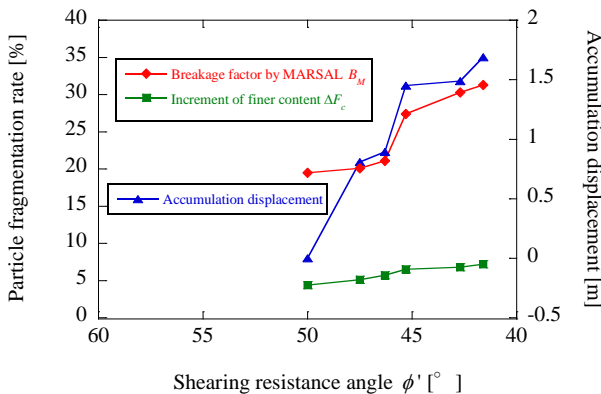


図 24 粒子破碎と累計変位の関係

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、粒子破碎に着目し、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、繰返し三軸圧縮試験を実施して、粒子破碎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、粒子破碎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 $p'=100\text{kPa}$ までの圧密で、粒子破碎量が急激に増加する。
- (2) 円弧すべり面最深部の土被り圧が $p'=87\text{kPa}$ の本被災盛土では、粒子破碎の影響を強く受けていた。
- (3) 粒子破碎の増加に伴い、せん断抵抗角及び液状化強度が減少し、これが地震時の盛土変位量の大きな影響を与えた。
- (4) 繰返し三軸圧縮試験から得られた液状化強度より算出した残留強度と、粒子破碎に伴うせん断抵抗角の減少を用い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たことを示した。

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) 気象庁：気象庁技術報告，第 133 号 2012.
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/gizyutu/ABSTJ.pdf>.
- 3) 我妻忠浩：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，2012.
- 4) 会津若松市役所・株式会社ダイエツ：市道幹Ⅱ-6 号線外被災状況調査業務委託報告書，2012.
- 5) 福本武明：粒子破碎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.
- 6) 八木一善：破碎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.
- 7) 地盤工学会基準：
http://www.jiban.or.jp/organi/bu/kijyunbu/kouji/200807/JGS_056_0_080411.pdf.
- 8) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，pp.348-389，2000.
- 9) 木村泰之：分割法による土構造物の地震時簡易残留変位量算定法の開発，長岡技術科学大学大学院工学研究科建設工学修士論文，2012.
- 10) 斜面の安定解析：
<http://www.jisuberi-kyokai.or.jp/gijyoho/gakekuzure/kaiseki/syamenantei/anteil.html>.
- 11) 防災科学技術研究所強震ネットワーク K-net,
<http://www.k-net.bousai.go.jp/k-net/>.