

氏名	野田 翔平 <small>のだ しょうへい</small>		
授与学位	博士(工学)		
学位記番号	理工博甲第633号		
学位授与年月日	平成26年3月17日		
学位授与の要件	学位規則第4条1項		
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程)環境共生系専攻		
学位論文題目	地震により崩壊した凝灰質砂からなる谷埋め宅地盛土の崩壊メカニズムと安定性の検討		
論文審査委員	主査	山口大学 教授	兵動 正幸
		山口大学 教授	松田 博
		山口大学 教授	中田 幸男
		山口大学 准教授	鈴木 素之
		山口大学 准教授	吉本 憲政

## 【学位論文内容の要旨】

2011年東日本大震災によって、広範囲にわたり液状化や造成盛土の崩壊により戸建住宅に大きな被害が生じた。東京湾周辺や利根川流域の埋立て地では液状化により、多くの家屋が不等沈下などの被害を受けた。一方、仙台市内を始め、宮城県、福島県などの丘陵地帯における造成宅地においては、谷埋め盛土や腹付盛土の崩壊、切盛り境界部における地盤の不等沈下などにより住宅に甚大な被害を与えた。筆者らは、特に仙台市および宮城県南部における宅地造成盛土の被害の調査を行ったが、その中でも崩壊規模が大きかった宮城県山元町太陽ニュータウンの盛土の崩壊について重点的に調べた。現地の盛土材料は、凝灰質砂岩の風化した砂から成るものであるが、現地から採取した試料を用いて、物性、締固め試験および一連の排水、非排水単調および非排水繰返し三軸試験を行った。これまで沖積砂やシルト、あるいは埋立て地を対象とした研究が活発に行われてきた結果、これらの繰返しせん断強度特性は明らかとなってきたが、締固めた盛土材料を対象とした動的挙動に関する研究はまだ十分に行われていないのが現状である。盛土地盤の特徴としては、盛土に使われる材料が細粒分を含む風化土や火山灰土が多いことや、埋立て地盤等と比べると、締固めによりある程度高密度の状態で存在していることが挙げられる。

本論文は、山元町太陽ニュータウンにおける盛土崩壊の特徴および採取した盛土材の物性および締固め特性、排水・非排水単調せん断特性、非排水繰返しせん断特性、単粒子破碎特性について調べ、地震時崩壊の原因について考察するものである。

第1章では、近年の地震による盛土地盤の崩壊状況を述べ、宅地耐震化推進事業について説明を行った。また、初期せん断応力作用下の動的強度に関する既往の研究および火山灰土に関する既往の研究についてまとめた。

第 2 章では、本研究に用いた試料の物理的性質について述べ、本研究で行った実験の方法や試験機についての詳細を述べる。本研究では東北地方太平洋沖地震で崩壊した太陽ニュータウンより採取した盛土材に加え、鳥取県に現存する宅地盛土より採取した盛土材料も比較として示している。

第 3 章では、単調および繰返しせん断試験結果の考察を行った。太陽ニュータウン試料は締固めて作製しているにもかかわらず、単調せん断結果のいずれの拘束圧下においても終始収縮傾向を示すことが明らかとなった。非排水繰返しせん断試験結果から、太陽ニュータウン試料は他のシリカ系の砂と挙動が違い、初期せん断応力の増加により繰返しせん断強度が増加する傾向が認められた。

第 4 章では単粒子の形状や破碎強度特性について述べている。太陽ニュータウン試料の粒子を撮影し、粒子形状の評価を行ったが、豊浦砂との大きな差異は認められなかった。単粒子破碎試験から、太陽ニュータウン採取試料には非常に強度の低い白色粒子が存在することが分かり、この白色粒子はハロイサイトの団粒化したものであると推察した。また、単調せん断試験時のコントラクティブな挙動は、ハロイサイトが団粒化した白色粒子の破碎が要因と考えた。

第 5 章では中空ねじりせん断試験機による動的変形試験の結果を示している。ここでは細粒分の含有量による検討を行っており、原粒度である細粒分 30%程度の場合、それ以下の細粒分含有率と比べ初期剛性が非常に低くなることが分かった。また、間隙比は細粒分含有率が 30%程度になるとエネルギーによらずほぼ一定となり、これまでの中間土の結果とおおむね一致する結果が得られた。この試験結果を用いて、SHAKE によって太陽ニュータウンにおける推定地震動を求め、盛土地盤に作用したと考えられる水平震度の推定を行った。

第 6 章では初期せん断応力を考慮した動的強度を用いた盛土の地震時安定解析結果を示している。これまでは静的強度で評価されることが多かったため、繰返し時に発生する間隙水圧の影響を考慮できていなかった。本研究では、従来の安定計算方法と同様な方法で動的強度を用いることができる安定計算方法により、間隙水圧の発生によって低下する土の強度を考慮した安定解析結果を示した。安定解析では  $F_s=1.0$  となる限界震度  $k_y$  を算出し、SHAKE より求めた推定水平震度  $k_h$  との比較を行った。実験により求めた動的強度を用いて地震時の円弧すべり解析を行うことで、従来の静的強度を用いる方法よりも低い限界震度が得られた。これにより、従来の方法より実現象に近い条件で安定解析ができるようになり、本ケースにおいても地震時の崩壊を説明できる結果を示すことができた。

第 7 章では、各章で得られた知見をまとめ結論としている。

## 【論文審査結果の要旨】

2011年東日本大震災によって、広範囲にわたり造成盛土の崩壊により戸建住宅に大きな被害が生じた。特に、仙台市内を始め、宮城県、福島県などの丘陵地帯における造成宅地においては、谷埋め盛土や腹付盛土の崩壊、切盛り境界部における地盤の不等沈下などにより住宅に甚大な被害を与えた。申請者は、特に仙台市および宮城県南部における宅地造成盛土の被害の調査を行い、その中でも崩壊規模が大きかった宮城県山元町太陽ニュータウンの盛土の崩壊について重点的に調べた。現地の盛土材料は、凝灰質砂岩の風化した砂から成るものであり、申請者は現地から採取した試料を用いて、物性、締固め試験および一連の排水、非排水単調および非排水繰返し三軸試験を行った。これまで沖積砂やシルト、あるいは埋立地を対象とした研究が活発に行われてきた結果、これらの繰返しせん断強度特性は明らかとなってきたが、締固めた盛土材料を対象とした動的挙動に関する研究はまだ十分に行われていないのが現状である。盛土地盤の特徴としては、盛土に使われる材料が細粒分を含む風化土や火山灰土が多いことや、埋立て地盤等と比べると、締固めによりある程度高密度の状態が存在していることが挙げられる。

本論文は、山元町太陽ニュータウンの崩壊盛土を対象とし、構成する盛土材の物性および締固め特性、単粒子破碎特性を調べ、排水および非排水単調せん断、初期せん断応力を付加した非排水繰返しせん断試験を行って当該盛土材料の脆弱性を明らかにし、得られた結果と地震加速度記録を総合して地震による盛土の崩壊要因とメカニズムについて考察したものである。本論文は以下の7章で構成されている。

第1章では、近年の地震による盛土の崩壊のケースヒストリーを述べ、宅地耐震化推進事業における盛土の設計法について解説した。また、盛土の地震による安定性評価のために行われた初期せん断応力作用下の動的強度に関する既往の研究と、火山灰土の動的挙動を対象とした既往の研究についてまとめている。

第2章では、本研究で用いた試料の物理的性質について述べ、用いた試験機と実験方法について詳細を述べている。ここでは東北地方太平洋沖地震で崩壊した太陽ニュータウンより採取した盛土材と他の地域の宅地盛土より採取した盛土材料との比較を行い、その特異性を強調している。

第3章では、単調および繰返し三軸試験結果をとりまとめ、その考察を行っている。対象とした凝灰質砂試料は締固め度90%においても、排水せん断において、終始ひずみ硬化および体積収縮傾向を示し、ゆる詰め砂のような強度を示すことを述べている。さらに、非排水繰返しせん断試験結果からも極めて低い液状化強度となること、初期せん断応力の作用によりさらに繰返しせん断強度が低下する傾向があることを述べている。

第4章では、第3章の結果の原因を調べるために、構成する粒子の形状や破碎強度特性を調べた結果について述べている。試料の粒子形状の評価においては、豊浦砂との大きな差異は認められなかったが、単粒子破碎試験からこの試料には非常に粒子強度の低い白色粒子が存在することが分かり、X線回折の結果から、この白色粒子はハロイサイトの団粒化したものと推察している。また、単調せん断試験時のコントラクティブな挙動は、団粒化した白色粒子の破碎が原因としている。

第5章では、地震応答解析に資するために、中空ねじりせん断試験機による動的変形試験を行った結果をまとめている。その結果、この試料が一般の砂に比べ、非常に低いせん断弾性係数を示すことを明らかにした。また、細粒分含有率による影響を検討しており、細粒分含有率が高いほど剛性が低くなることを明らかにした。この実験結果を用いて、SHAKEによって盛土の次元応答解析を行い、盛土の応答加速度を求め、盛土の破壊状態から、妥当な限界水平震度について考察を行った。

第6章では、第3章で得られた初期せん断応力下の動的強度を適用した震度法による盛土の安定解析を行っている。ここでは、繰返しせん断試験から得られる動的強度を $c$ と $\phi$ に換算し、従来の円弧

すべり解析と同様な方法で行うことが可能な安定解析方法を示した。実験により求めた動的強度を用いて地震時の円弧すべり解析を行うことで、従来の静的強度を用いる方法よりも低い現実的な限界震度が得られた。これにより、従来の方法より実現象に近い条件で安定解析が可能であることを述べている。

第7章では、各章で得られた知見をまとめ本論文の結論としている。

公聴会における主な質問内容は、(1)繰返し強度を円弧すべり解析に用いる場合にも粘着力を考慮しているが、動的の場合でも粘着力が必要か。(2)動的強度の安定計算への適用において、繰返し三軸試験結果をどのように用いるのかを詳しく説明して欲しい。(3)粒子強度の低いハロイサイトとはどのようなもので、一般的な性質はどのようなものか。(4)問題視している強度の低い粒子は、試料内にどの程度含まれているのか。またどの程度含まれると動的強度に問題が起きるのか。(5)等価水平震度の推定にはまだ検討の余地があるのではないか。円弧すべり解析により求めた限界震度の大きさにはどのようなことが影響しているのか。などであった。これらいずれに対しても、発表者からの的確な回答がなされた。

以上より、本研究は、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。