



# 地震を起因とする盛土ならびに自然斜面の崩壊発生機構とその危険度評価に関する研究

鳥居, 宣之

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2008-03-25

(Date of Publication)

2009-06-26

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4220

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004220>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 鳥居 宣之  
博士の専攻分野の名称 博士（工学）  
学 位 記 番 号 博い第 511 号  
学位授与の 要 件 学位規則第 5 条第 1 項該当  
学位授与の 日 付 平成 20 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

地震を起因とする盛土ならびに自然斜面の崩壊発生機構とその危険度評価に関する研究

審 査 委 員

主 査 教 授 沖村 孝  
教 授 飯塚 敦  
教 授 田中 泰雄

大規模な地震発生時には、山麓部の宅地盛土や道路盛土などの盛土斜面での被害事例が数多く報告されている。一方、山地部でも数多くの斜面崩壊が発生し、さらに地震後には降雨によってさらなる斜面崩壊が発生しており、地震を起因とする斜面崩壊としては地震直後に発生する斜面崩壊のみならず、このようなその後の降雨による斜面崩壊も含まれるであろう。このような地震を起因とする盛土や自然斜面における斜面災害の被害軽減を図るためには、対策工等で崩壊発生そのものを食い止める「ハード」的な対策や、危険が迫れば避難する、あるいは危険な区域に人家を造らないなどといった「ソフト」的な災害回避策などの防災・減災対策が必要となる。兵庫県南部地震以降、我が国では大規模な地震の発生頻度が高くなっており、毎年のように各地で地震による人的・物的被害が生じており、地震を起因とする盛土や自然斜面における崩壊発生機構を明らかにし、それらに基づく危険度評価手法により斜面災害危険度を定量的に評価し、評価結果に基づいた適切な防災・減災対策が講じられることが重要である。このような背景から、本論文では、地震を起因とする盛土や自然斜面における斜面災害軽減を図る上で重要となる斜面崩壊発生機構の究明と危険度評価手法を構築することを目指して以下の検討を行った。

第1章では、地震を起因とする盛土や自然斜面での斜面崩壊に関する研究レビューを行い、本論文の目的と概要を示した。

第2章では、地震時における盛土の安定性評価手法として、残留変位量算定手法に関する検討を行った。まず、残留変位量の簡易算定手法として最もよく用いられているニューマーク法に着目し、この手法に簡易に過剰間隙水圧を算定することのできる方法を組み入れることを検討した。その際、従来用いられてきたニューマーク法では、修正 Fellenius 法により限界水平震度や臨界面を算定していたが、地震時に発生する過剰間隙水圧を考慮する場合、その精度に問題があることを指摘し、Bishop 法を用いたニューマーク法の提案を行った。また、地震時に発生する過剰間隙水圧の簡易手法として、過剰間隙水圧の時刻歴算定モデルを提案し、これらの手法を組み合わせることで、地震時に発生する過剰間隙水圧を考慮した修正ニューマーク法を提案した。本手法の妥当性の検証を兵庫県南部地震時の被災宅地盛土を対象として行った結果、本研究で提案した修正ニューマーク法は実被害を良好に再現している結果となった。また、動的有効応力解析の結果ともほぼ一致しており、簡便に残留変位量を求めることのできる本手法は、残留変位量算定手法としての有用性が確認できた。つぎに、盛土の地震時安定性検討における信頼性解析の有用性についての検討を行った結果、限られた地盤情報しかない場合でも、信頼性解析を行うことにより、確率論的手法であるため、ある程度の幅を持った結果が得られる結果となるが、詳細な地盤情報が得られた場合と同様の結果を得ることができると示し、信頼性解析を行うことにより事前に対象の危険性を把握することが可能であることを示した。また、確率地盤モデルを用いた信頼性解析の実務への適用に関する考察を行い、盛土の地震時安定性評価において信頼性解析を行うことの有用性を示した。

第3章では、地震により発生した山腹斜面崩壊地の実態ならびに斜面崩壊発生危険度評価手法の提案を行った。具体的には、まず、兵庫県南部地震時に六甲山系で発生した山腹斜面崩壊を対象として地形立地解析を行い、過去の地震により発生した斜面崩壊地の特徴や豪雨時に発生する斜面崩壊地の特徴と比較することにより、斜面崩壊地の場の条件としての地形的特徴を明らかにした。その結果、兵庫県南部地震による崩壊数としては、小規模なものを含めて747カ所であり、その分布の特徴としては、東六甲山系において五助橋断層、芦屋断層および有馬一高槻構造線などの断層系に平行な分布状態で出現していたことを示した。また、地形立地解析を行った結果、兵庫県南部地震による斜面崩壊地の地形的特徴としては、凸型斜面、直線型斜面、露頭崖の場所で崩壊が発生していたこと、六甲山系における中腹から斜面上方に位置する場所が崩壊しやすい場所であったこと、急傾斜の場所ほど崩壊が発生しやすいこと、地表面の凹凸が激しい場所ほど崩壊が発生しやすかったことなどを明らかにし、これらの地形的特徴は、過去の地震時に発生した崩壊地の特徴と同様の傾向を示していたことを明らかにした。つぎに、岩盤斜面において地震時に発生しやすい崩壊様式であるトップリング型崩壊に着目し、この崩壊様式の斜面崩壊危険度評価手法の提案を行った。本手法を兵庫県南部地震により発生したトップリング型崩壊が発生した斜面に対して適用させた結果、地震時に発生したトップリング型斜面崩壊を再現することができた。以上のことから、本提案手法を適用することにより簡便に地震時のトップリング型崩壊の発生危険度を評価できることから、節理が発達した岩盤斜面における地震時の斜面崩壊危険度評価手法として有用であることを示した。

第4章では、地震後の降雨による斜面崩壊は、崩壊発生の最終的な誘因は降雨であるが、地震動が大きく影響したと考えられるため、地震動が地震後の降雨による斜面崩壊発生に及ぼした影響について検討を行った。具体的には、まず、兵庫県南部地震後の降雨により崩壊した斜面崩壊地の地形立地解析を行い、崩壊発生場所の地形的特徴を明らかにした。その結果、兵庫県南部地震後から平成7年(1995)年10月末まで約10ヶ月の間に、地震による崩壊数を上回る938カ所の山腹斜面崩壊が発生しており、それらは、90%以上が新規崩壊として発生していたこと、縦横断形状の両者を考慮した場合、凸型斜面と尾根型斜面、直線型斜面が合成して形成される斜面での崩壊発生率が高かったこと、従来の降雨時の崩壊地に比してより急傾斜の場所で崩壊が多発していたことを明らかにし、兵庫県南部地震後の降雨により発生した崩壊地の地形分類の特徴としては、最終的な誘因は降雨であるにもかかわらず、むしろ地震を誘因とする崩壊地の特徴に近い結果であったことを明らかにした。このことから、地震動の影響を受けたが崩壊には至らなかった斜面がその後の降雨により崩壊したため、これらの地形形状を示す場所での崩壊率が高くなった可能性を指摘した。つぎに、兵庫県南部地震およびその後の降雨により崩壊した斜面ならびに非崩壊斜面を対象として、地震応答解析を行い、これらの斜面内における地震応答特性を比較検討することにより、地震動がこれらの斜面に及ぼす影響の違いを検討し、さらに、斜面

(氏名： 鳥居宣之 NO.3 )

形状や表土層厚分布が地震応答特性に及ぼす影響についても検討を行った。その結果、兵庫県南部地震により崩壊が発生していた斜面では、斜面内でも特に地震動が大きく作用した場所において崩壊が発生していたこと、地震後の降雨により崩壊が発生した斜面でも、地震によって崩壊した箇所と比較すると小さいが、斜面内において地震動の影響を大きく受けた箇所で崩壊が発生していたことを示した。また、地形形状ならびに表土層厚が山腹斜面における地震動応答特性に及ぼす影響の定量的評価を行った結果、山腹斜面における地震動増幅特性には、地形形状のみならず表土層厚分布が大きな影響を及ぼしていることを明らかにし、このような山腹斜面における地震動の応答特性が、地震時に山腹斜面上部の遷急点付近で崩壊が多発する大きな要因であることを指摘した。また、地震時には崩壊しなかった斜面でも、このような地形条件ならびに表土層厚分布を有する斜面であれば、地震動の影響を受けていたことが考えられることから、そのような斜面が地震後の降雨によって崩壊したとし、さらに、地震後の降雨による斜面崩壊地の地形的特徴が、最終的な誘因が降雨であるにもかかわらず、降雨による斜面崩壊地の特徴よりも地震による斜面崩壊地の特徴と似た傾向を示すのも、このことが原因であることを指摘した。最後に、地震後の降雨により発生した斜面崩壊地に地震動が及ぼす影響として、土の強度特性に及ぼす影響に着目し、一面せん断試験機ならびに繰返し三軸圧縮試験機を用いた実験的検討を行い、地震後の降雨による斜面崩壊発生メカニズムの考察を行った。一面せん断試験結果から、土が乱されることにより、土粒子間の骨格構造が破壊され、その結果、土粒子同士の結合力である粘着力が低下したことを指摘した。つぎに、繰返し三軸試験装置を用いて、加振前後ならびに水浸によりせん断強度がどのように変化するかを検討した。その結果、繰返し荷重載荷ならびに水浸に伴う飽和度上昇により、せん断強度が低下することを示し、繰返し荷重載荷を地震の影響、水浸を降雨による影響とすると、地震による強度低下とその後の降雨による強度低下のため、地震後の降雨時が最も強度が低下した状態となっていたことを明らかにした。以上のことから、地震後の降雨による斜面崩壊発生のメカニズムとしては、地震動によって生じたせん断ひずみによる土粒子間の骨格構造の破壊に伴う粘着力の低下によりせん断強度が低下し、さらに、その後の降雨により飽和度が上昇し、見かけの粘着力の低下に伴うさらなるせん断強度の低下が起こったと考察し、特に、表層崩壊のような斜面崩壊の場合には、粘着力の変動が斜面の安定性に及ぼす影響は大きいことから、このような地震動の影響が兵庫県南部地震後の降雨による斜面崩壊を引き起こした要因の1つであることを述べた。

第5章では、第2章から第4章で得られた結論をまとめ、本論文の結論とした。

氏名	鳥居宣之		
論文題目	地震を起因とする盛土ならびに自然斜面の崩壊発生機構とその危険度評価手法に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	沖村 孝
	副査	教授	田中泰雄
	副査	教授	飯塚 敦
	副査		

## 要 旨

本論文では、地震を起因とする盛土や自然斜面における斜面災害軽減を図る上で重要となる斜面崩壊発生機構の究明と危険度評価手法を構築することを目指して以下のような研究としてまとめている。

第1章では、地震を起因とする盛土や自然斜面での斜面崩壊に関する研究レビューを行い、本論文の目的と概要を示した。

第2章では、地震時における盛土の安定性評価手法として、残留変位量算定手法に関する検討を行っている。まず、残留変位量の簡易算定手法として最もよく用いられているニューマーク法に着目し、この手法に簡易に過剰間隙水圧を算定することのできる方法を組み入れることを検討した。その際、従来用いられてきたニューマーク法では、修正 Fellenius 法により限界水平震度や臨界円を算定していたが、地震時に発生する過剰間隙水圧を考慮する場合、その精度に問題があることを指摘し、Bishop 法を用いたニューマーク法の提案を行った。また、地震時に発生する過剰間隙水圧の簡易手法として、過剰間隙水圧の時刻歴算定モデルを提案し、これらの手法を組み合わせることで、地震時に発生する過剰間隙水圧を考慮した修正ニューマーク法を提案した。本手法の妥当性の検証を兵庫県南部地震時の被災宅地盛土を対象として行った結果、本研究で提案した修正ニューマーク法は実被害を良好に再現している結果となったことを示した。また、動的有効応力解析の結果ともほぼ一致しており、簡便に残留変位量を求めることのできる本手法は、残留変位量算定手法としての有用性が確認できたこととした。つぎに、盛土の地震時安定性検討における信頼性解析の有用性についての検討を行った結果、限られた地盤情報しかない場合でも、信頼性解析を行うことにより、確率論的手法であるため、ある程度の幅を持った結果が得られる結果となるが、詳細な地盤情報が得られた場合と同様の結果を得ることができると示し、信頼性解析を行うことにより事前に対象の危険性を把握することが可能であることを示した。また、確率地盤モデルを用いた信頼性解析の実務への適用に関する考察を行い、盛土の地震時安定性評価において信頼性解析を行うことの有用性を示した。

第3章では、地震により発生した山腹斜面崩壊地の実態ならびに斜面崩壊発生危険度評価手法の提案を行っている。具体的には、まず、兵庫県南部地震時に六甲山系で発生した山腹斜面崩壊を対象として地形立地解析を行い、過去の地震により発生した斜面崩壊地の特徴や豪雨時に発生する斜面崩壊地の特徴と比較することにより、斜面崩壊地の場の条件としての地形的特徴を明らかにした。その結果、兵庫県南部地震による崩壊数としては、小規模なものを含めて747カ所であり、その分布の特徴としては、東六甲山系において五助橋断層、芦屋断層および有馬一高槻構造線などの断層系に平行な分布状態で出現していたことを示した。また、地形立地解析を行った結果、兵庫県南部地震による斜面崩壊地の地形的特徴としては、凸型斜面、直線型斜面、露頭崖の場所で崩壊が発生していたこと、六甲山系における中腹から斜面上方に位置する場所が崩壊しやすい場所であったこと、急傾斜の場所ほど崩壊が発生しやすいこと、地表面の凹凸が激しい場所ほど崩壊が発生しやすいことなどを明らかにし、これらの地形的特徴は、過去の地震時に発生した崩壊地の特徴と同様の傾向を示していたことを明らかにした。つぎに、岩盤斜面において地震時に発生しやすい崩壊様式であるトップリング型崩壊に着目し、この崩壊様式の斜面崩壊危険度評価手法の提案を行った。本手法を兵庫県南部地震により発生したトップリング型崩壊が発生した斜面に対して適用させた結果、地震時に発生したトップリング型斜面崩壊を再現することができたことを明らかにした。以上のことから、本提案手法を適用することにより簡便に地震時のトップリング型崩壊の発生危険

氏名 鳥居宣之

度を評価できることから、節理が発達した岩盤斜面における地震時の斜面崩壊危険度評価手法として有用であることを示した。

第4章では、地震後の降雨による斜面崩壊は、崩壊発生の最終的な誘因は降雨であるが、地震動が大きく影響したと考えられるため、地震動が地震後の降雨による斜面崩壊発生に及ぼした影響について検討を行っている。具体的には、まず、兵庫県南部地震後の降雨により崩壊した斜面崩壊地の地形立地解析を行い、崩壊発生場所の地形的特徴を明らかにした。その結果、兵庫県南部地震後から平成7年(1995)年10月末まで約10ヶ月の間に、地震による崩壊数を上回る938ヵ所の山腹斜面崩壊が発生しており、それらは、90%以上が新規崩壊として発生していたこと、縦横断形状の両者を考慮した場合、凸型斜面と尾根型斜面、直線型斜面が合成して形成される斜面での崩壊発生率が高かったこと、従来の降雨時の崩壊地に比してより急傾斜の場所で崩壊が多発していたことを明らかにし、兵庫県南部地震後の降雨により発生した崩壊地の地形分類の特徴としては、最終的な誘因は降雨であるにもかかわらず、むしろ地震を誘因とする崩壊地の特徴に近い結果であったことを明らかにした。このことから、地震動の影響を受けたが崩壊には至らなかった斜面がその後の降雨により崩壊したため、これらの地形形状を示す場所での崩壊率が高くなった可能性を指摘した。つぎに、兵庫県南部地震およびその後の降雨により崩壊した斜面ならびに非崩壊斜面を対象として、地震応答解析を行い、これらの斜面内における地震応答特性を比較検討することにより、地震動がこれらの斜面に及ぼす影響の違いを検討し、さらに、斜面形状や表土層厚分布が地震応答特性に及ぼす影響についても検討を行った。その結果、兵庫県南部地震により崩壊が発生していた斜面では、500gal以上の応答加速度や $10^3$ レベルのせん断ひずみが生ずる場所での崩壊が発生していたこと、地震後の降雨により崩壊が発生した斜面でも、地震によって崩壊した箇所と比較すると小さいが、斜面内において450gal以上の応答加速度や $10^4 \sim 10^3$ レベルのせん断ひずみが生ずる場所での崩壊が発生していたことを明らかにしている。また、地形形状ならびに表土層厚が山腹斜面における地震動応答特性に及ぼす影響の定量的評価を行った結果、表土層が2m以上と厚くかつ地表面形状が遷急点を示すような地点では、表土層内において加速度が大きく増幅され、せん断ひずみも大きな値を示すことを明らかにした。最後に、地震後の降雨により発生した斜面崩壊地に地震動が及ぼす影響として、土の強度特性に及ぼす影響に着目し、一面せん断試験機ならびに繰返し三軸圧縮試験機を用いた実験的検討を行い、地震後の降雨による斜面崩壊発生メカニズムの考察を行った。一面せん断試験結果から、土が乱されることにより、土粒子間の骨格構造が破壊され、その結果、土粒子同士の結合力である粘着力が低下したことを指摘した。つぎに、繰返し三軸試験装置を用いて、加振前後ならびに水浸によりせん断強度がどのように変化するかを検討した。その結果、繰返し荷重載荷ならびに水浸に伴う飽和度上昇により、せん断強度が44%低下することを示し、繰返し荷重載荷を地震の影響、水浸を降雨による影響とすると、地震による強度低下とその後の降雨による強度低下のため、地震後の降雨時が最も強度が低下した状態となっていたことを示した。以上のことから、地震動によって生じたせん断ひずみによる土粒子間の骨格構造の破壊に伴う粘着力の低下によりせん断強度が低下し、さらに、その後の降雨により飽和度が上昇し、見かけの粘着力の低下に伴うさらなるせん断強度の低下が起こったことが地震後の降雨による斜面崩壊発生の要因であることを指摘した。

第5章では、第2章から第4章で得られた結論をまとめ、本論文の結論とした。

本研究は、盛土や自然斜面における地震を起因とする斜面崩壊について、その発生機構の究明と危険度評価手法の構築の研究をしたものであり、地震を起因とする盛土や自然斜面における斜面災害軽減について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の鳥居宣之は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。