

報告番号	甲 第 13635 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 共振現象に着目した 1g 場振動台実験による飽和／不飽和盛土造成斜面の地震時変形・破壊メカニズムの解明
(Experimental elucidation of seismic deformation-failure mechanism of saturated/unsaturated fill slopes based on 1g shaking-table tests in terms of resonance phenomena)

氏 名 村尾 英彦

論 文 内 容 の 要 旨

日本国の国土は約 73%が山地に占められており、平坦地に限りがある。そのため、丘陵地の丘部分を切土し、その際に発生した土砂を盛土材に転用して、周辺の谷部や窪地を盛土して斜面を造成する手法が、効率的かつ経済的な手法として多用されてきた。この手法で造成された盛土造成斜面は、都市域で働く人達のベッドタウンとしての住宅地開発や、道路、鉄道等の線状構造物に供用されることで、都市部周辺の発展に寄与してきた。一方で、近年発生した 1978 年宮城県沖地震、1995 年兵庫県南部地震、2004 年中越地震、2007 年能登半島地震、2011 年東北地方太平洋沖地震、および 2018 年北海道胆振東部地震などの大地震においては、盛土造成斜面の変状に伴う被害が多数報告されている。各地震の被害は、第 1 章に詳しいが、プレート間地震、もしくは内陸地殻内地震のうち、震源が比較的浅くマグニチュードの大きい地震の場合に発生することが経験的にわかっている。また、日本国内の盛土造成斜面の大半において、耐震性に関する検討はほとんど行われておらず、地震時に変動した盛土土塊周辺の住宅などは全壊～半壊の被害を被ることが多い。加えて、被災箇所周辺の社会インフラ等にも被害が生じることで、経済的な損失や地域住民の生活に長期的な影響を及ぼすことになる。このように大地震に対して脆弱なことが明らかとなっている盛土造成斜面は、地盤工学的な危険因子であり、主に全国の都市部周辺に存在し、

その数は把握することが困難なほどの数量となっている。

これまでも、様々な被害報告や被災現場の調査結果に加えて、盛土造成斜面の地震時の変状に関する研究は存在するものの、依然としてその変形・破壊メカニズムには不明なことが多い。また、耐震設計法としては、地震時の破壊が地震動の加速度によって生じる慣性力が原因と考える震度法が一般的であり、最近では Newmark 法の導入等も試みられているものの、これらの手法には地震動によって剛性低下が生じた結果のすべりや、周波数特性、継続時間、および地形効果などを考慮することができないといった課題が存在する。また、地震時に変状しにくい盛土造成斜面の造成手法としては高品質な盛土の締固め管理が、また対策工としては地すべり対策工法の適用が提案されており、これらの手法は経験的に有効であると考えられている。一方で、2007 年能登半島地震においては、高品質で十分に締固められていたと想定される有料道路内の盛土造成斜面において、大規模な地すべりが発生し、2011 年東北地方太平洋沖地震においては、地すべり対策工（杭工、地下水排除工）が施工された盛土造成斜面において地すべりが発生している。そこで本研究では、盛土造成斜面の地震時の変形・破壊メカニズムを解明することを目的とし、その一環として、周波数特性と浸潤面位置に着目した 1g 場振動台実験による実験的研究を行った。なお、1g 場振動台実験は平面ひずみ条件下にある。

本論文は序論・結論を含めて 5 章からなり、以下に各章の概要を示す。

第 1 章では、研究の背景として、過去の盛土造成斜面の被害状況と既往の研究のレビューを行った。また、現行の設計法や対策工の問題点について述べた。

第 2 章では、1g 場振動台実験に用いる、試料および模型の作成方法、加振条件、模型斜面の固有周波数探索、および加速度増幅率について示す。試料の特徴としては、盛土部は、砂、シルト、および粘土分を混合し、細粒分質砂に分類される試料を用いている。これは、地震時に変状した盛土造成斜面の盛土材料には、周辺地山を切土した際に発生した土砂が転用され、細粒分を含む中間土であることが多いためである。盛土部材料の三軸圧縮試験 (CU-) 結果において、最初に負のダイレイタンスーを示した後に、正のダイレイタンスーに転じていることから、拘束圧がより小さい模型斜面では、ひずみが大きく進展すれば正のダイレイタンスー傾向がより顕著となる材料特性を把握した。また、有効応力経路は、限界状態線下側での軟化（塑性圧縮を伴う軟化）を示すが、これは構造を有する土に特徴的なせん断挙動である。これらのことから、盛土部の材料は、非排水条件下での繰返し载荷によって、強度が繰返し前よりも低下する材料であることを確認している。また、基盤部の材料は砂にセメント系固化材を添加して作成した。基盤部の弾性係数は $E_{50} = 450\text{Mpa}$ である。模型斜面は所定の方法で作成し、側方のタンクから通水することによって浸潤面を形成させる。加振条件としては、周波数一定の正弦波を入力し、段階的に 0.5 m/s^2 刻みで加速度を大きくする加振を行った。各段階の加振時間は 60 秒であり、各段階間で、次の加振準備のために 240 秒のインターバルを設けたが、インターバル中に間隙水圧の変動はほぼ見られないため、連続的な加振とみなしている。模型斜面の固有周波数は掃引試験に

よって取得し、飽和模型斜面、不飽和模型斜面ともに、約 50Hz であり、浸潤面位置の影響を受けないことを確認している。加速度増幅率は、本研究において導入した指標である。増幅率の変化から模型斜面の固有周波数の変化や破壊の発生等の盛土内部の状態の推定、および考察が可能となる。

第 3 章では、周波数特性に着目した実験を行った結果を示す。周波数特性の中でも特に共振現象に着目して、CASE 1 (入力周波数 50Hz)、CASE 2 (入力周波数 20Hz)、CASE 3 (入力周波数 80Hz) と入力周波数を変えた場合の検討を行った。その結果、入力周波数が盛土斜面の初期固有周波数とほぼ等しい場合 (CASE 1) は、加振初期段階から共振が生じて盛土斜面の加速度が増幅し、慣性力が増加する。同時に、塑性変形の蓄積とともに平均有効応力は減少し、やがて拘束圧の小さい盛土浅部において局所的に剛性が低下し (過剰間隙水圧比が 1.0 を超える)、浅部のすべりが発生する。平均有効応力の減少は、表面付近からの水の湧き出しからも裏付けられる。入力加速度がさらに大きくなると、深部でもすべりが発生する。このことから、盛土造成斜面の変形・破壊は、1つのすべり面だけによって引き起こされるものではないことが明らかとなった。また、入力周波数が模型斜面の初期固有周波数より小さい場合 (CASE 2) は、加振の初期段階では共振が生じず、大きく揺れないために斜面は安定を保つ。しかし、入力加速度が大きくなるにつれ、塑性変形の蓄積によって模型斜面の固有周波数が徐々に減少し、やがて入力周波数に近づくことで共振が生じ始め、盛土部分の揺れ、すなわち慣性力は急激に大きくなる。不連続面が形成される局所的な破壊メカニズムは、周波数特性の影響を受けず CASE 1 と同じだが、慣性力の増大と盛土浅部から中央部における平均有効応力が減少して、剛性が低下して、盛土中央部を貫くすべりが一気に発生する。入力周波数が盛土斜面の初期固有周波数より大きい場合 (CASE 3) では、塑性変形の蓄積によって模型斜面の固有周波数が減少しても、入力周波数から遠ざかる一方であるため、共振せずに安定を保つ。これらの結果から、盛土造成斜面の地震時安定性評価は、単に入力地震波の加速度の大きさのみでは決まらず、盛土造成斜面の固有周波数と入力周波数の関係にも強く依存する。耐震設計は、盛土造成斜面の振動特性を把握し、現地で想定される地震動の卓越周波数を考慮に入れた設計、および対策工の考案を行うことが重要であることがわかった。

第 4 章では、浸潤面位置に着目した実験を行った結果を示す。飽和状態とみなせる場合 (CASE 1) から、浸潤面位置のみを変えた、不飽和とみなせる場合 (CASE 4) の比較、検討を行った。不飽和状態 (CASE 4) では浸潤面付近を末端部とした、法面に沿うようなすべり面が形成された後、さらなる加振によって後退的なすべりが発生した。飽和模型斜面 (CASE 1) と不飽和模型斜面 (CASE 4) の全体破壊に至るすべり発生時の入力加速度を比較すると、不飽和模型斜面 (CASE 4) の方が、大きな入力加速度を要することがわかった。このことから、地下水条件以外のすべてが同じである盛土造成斜面では、地下水位が低いほど相対的に地震時の安定性が高くなると考えられ、経験的に知られている地下水排除工の有効性の裏付けを得ることができた。また、すべり発生後の変形は、飽和度の高

い盛土造成斜面の方が大きくなる傾向があると考えられる。また、増幅率の変化から、盛土内部の塑性変形の進行状況やすべり面の形成過程を推定し、不飽和状態にある盛土造成斜面においては、局所的な不連続面が連続することで形成されるすべり面が進行的であることを示した。また、増幅率の変化や、計測された加速度の位相差から、飽和模型斜面(CASE 1)と不飽和模型斜面(CASE 4)を比較すると、破壊モード、盛土部の塑性変形の蓄積、および剛性低下の進行形態が異なることから、浸潤面の位置がこれらに影響を与えていることを確認した。

第5章では、第3章、第4章に示した実験結果を総括的に考察して、周波数特性と地下水位面が盛土造成斜面の地震時挙動におよぼす影響について考察した。また、既往研究の定性的な分類と実験結果から地下水条件の影響を加味した新たな分類図を作成した。さらに、実験結果から得られた知見を、被災後の点検などに活用できるように、防災の観点からの注意点としてまとめた。

今後は、本研究によって得られた知見を活かし、振動数特性、および地下水位面の位置条件が盛土造成斜面の変状に与える影響を総括的に把握した上で、最適な耐震設計、および耐震対策工の考案に繋げていく必要がある。そのためには、水～土連成、および空気～水～土連成の数値解析によって、様々なケーススタディを行い、盛土造成斜面の変形・破壊に関してより詳細に理解した上で設計法、および対策工法を考案することが望まれる。これらの研究にあたっては、名古屋大学地盤力学研究グループで開発された有限変形解析コードである *GEOASIA* を用いて検討を行っていく予定である。