

報告番号	乙 第 7139 号
------	------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 締固め特性の異なる各種盛土の地震時変形・破壊挙動とその抑止メカニズムに関する骨格構造概念に基づく解釈

氏 名 酒井 崇之

論 文 内 容 の 要 旨

近年、地震による盛土の崩壊事例が数多く報告されている。盛土は地震等災害によって崩壊したとしても早期に復旧することが可能であることから、他の土木構造物と比較して耐震性が重要視されなかった。しかし、災害の世紀と言われる現在において、高速道路は災害時の緊急輸送路としての機能が重要となっており、盛土の地震時の挙動や崩壊メカニズム、それに基づく耐震機能メカニズムを明確に把握し、地震を受けても道路機能に支障を及ぼさないようにすることが重要となってきた。

阪神淡路大震災を受け、道路土工の盛土工指針が改訂され、設計原理が仕様規定から性能規定に移行してきている。しかし、依然として締固め度 D_c を用いた設計・施工管理方法が多く用いられているのが現状である。盛土に要求される性能とは、地震などの外力を受けても道路機能に支障を及ぼさないことであり、それを果たすために盛土に要求される項目とは、密度ではなく、強度、変形特性、支持力、遮水性といった工学特性に関する項目である。このため、これらの工学特性と密度の関係を把握した上で、 D_c 値を材料ごとに設定し、設計・施工管理をすべきであるが、現在は慣例的に D_c 値 90%や 95%などの値のみが用いられることが多い。

性能照査型の設計では、道路盛土が地震などの外力に対してどの程度の損傷となるのか、どの盛土が危険なのかを予測することが重要であり、有限要素法に代表される数値解析手法が必須である。そのためには、締固めた後の盛土の力学挙動を把握し、それを構成式で表現する必要がある。しかし、締固めた土に関する既往の研究は、締固めた不飽和土の強度特性に特化しているものが多い。つまり、盛土の変形特性まで把握していないため、外力による盛土の変形を予測することは難しい。

以上の背景より、本研究の第 1 の目的は、種々の異なる現地発生土からなる盛土材料の締固め特性や D_c 値に応じた締固め後の土の力学挙動を把握することにある。ここでは道路盛土を想定し、盛土の最も危険な状態となる、盛土内に水が入り、盛土全体が飽和化された時の力学挙動に注目する。そして目的の 2 番目は、得られた力学挙動に対し、骨格構造概念を取り入れた弾塑性構成モデル SYS Cam-clay model で再現し、材料による締固め特性の違い、それに基づく締固めた土の力学特性を骨格構造概念により解釈することにある。そして 3 番目の目的は、弾塑性構成モデルによる締固めた土の力学挙動の再現から、土それぞれの材料定数を同定し、さらに水～土骨格連成有限変形解析 GEOASIA により道路土工構造物、つまり道路盛土を対象に、地震中／後の変形破壊挙動の数値シミュレーションを行うことである。そしてその解析結果から締固め特性と盛土の耐震性の関係性を把握する。また、盛土の崩壊メカニズムや補強工法の耐震メカニズムも把握する。

以下に各章ごとに内容を要約していく。

第 2 章では、様々な室内試験を 5 種類の異なる盛土材に対して実施し、その力学挙動を弾塑性構成モデル SYS Cam-clay model で再現した。そして、その再現により、締固めた土の力学挙動を骨格構造に基づき考察し、また、締固めが骨格構造に及ぼす影響について調べた。また 3 種類の試料を異なる密度で造成した盛土に対し、数値シミュレーションを行い、盛土の締固め特性と耐震性の関係を把握した。締固めた試料の三軸試験から、締固めることにより、せん断中に平均有効応力の上昇に伴う軸差応力の上昇が見られるようになり、軸差応力の最大値が大きくなることを示した。また、同じ D_c 値でも力学挙動は異なるため、 D_c 値のみで、力学挙動を予想するのは難しいことが明らかになった。さらに、SYS Cam-clay model により、各試料に対応した 1 組の材料定数群で、これらの力学挙動を再現できることを確かめ、 D_c 値の違いは、構造、過圧密の初期値の違いによって表現可能であることを示し、 D_c 値の増加は、構造の喪失と過圧密の蓄積として解釈することができた。このように締固めた供試体が有している骨格構造や、骨格構造の進展の仕方が、締固めた土の力学挙動に影響を与えること、さらに、数値シミュレーションより、 D_c 値を上昇させることで盛土の耐震性が向上することを示した。締固めやすい材料は、低い D_c 値でも十分な耐震性を有しているが、締固めにくい材料は、 D_c 値を大きくしても地震によって変形してしまう。つまり、同じ D_c 値であっても、材料ごとに盛土の耐震性は異なる。したがって今回の解析のように締固め後の力学挙動を把握し、それを反映させることが重要である。

第 3 章では、2007 年能登半島地震による傾斜地盤上道路盛土の地震後遅れ破壊のメカニズムを明らかにするために、室内試験による盛土材料の特性を把握し、数値シミュレーションにより傾斜地盤上盛土の地震中から地震後にかけての変形挙動の特徴を表現した。また、石灰改良土を用いて造成された能越自動車道が、能登半島地震によって崩壊しなかったことに着目し、石灰改良土で造成された盛土の耐震性や地震中の挙動を数値シミュレーションによって調べた。室内試験によって得られた力学特性を反映させ、数値シミュレーションを行うと、傾斜地盤上の盛土における地震後の円弧すべり状の大崩壊については、

その特徴を表現し、崩壊メカニズムを解明した。盛土内のせん断面の発生する土要素において、地震後に、構造の高位化や過圧密の解消が起こり、土は塑性膨張をする。さらに、応力状態が限界状態線よりも上側に位置しているため、土は軟化挙動を示し、有効応力パスは原点の方に向かっていく。この塑性膨張を伴う軟化挙動に伴い、急激にひずみが進展していく。改良土で造成された能越自動車道の盛土が、地震によって崩壊しなかった理由は、改良によって、比体積が大きくても、超過圧密状態になっており地震中に弾性的な挙動を示したためである。締固めにくい土は、石灰等の固化作用を持つ材料で改良することによって、過圧密比が大きい状態を作ることができ、耐震性の高い盛土を造成することが可能となる。

第4章では、能登半島地震によって崩壊し、崩壊後にジオテキスタイル補強盛土工法により強化復旧された盛土を対象とし、使用された盛土材を締固めた土に行われた力学試験をSYS Cam-clay modelによって再現し、その結果を数値シミュレーションに反映させた上で、地震中・地震後の挙動を把握し、耐震メカニズムを考察した。解析結果から、ジオテキスタイル補強土の地震時の挙動を詳細に観察すると、土が除荷されている時ジオテキスタイルに発生する張力が大きくなり、その逆にジオテキスタイルが除荷されている時は、補強土に大きい軸差応力が発生している。このようにそれぞれが交互に張力や軸差応力が大きくなるのが大きな特徴となり、これにより耐震性が向上する。また補強土も改良土も高い密度にすると、地震によってほとんど変形しない。したがって、補強土も通常の土と同じように、より良く締固めることによって、耐震性が向上する。

第5章では、泥岩のスレーキング現象の骨格構造に基づく解釈と2009年駿河湾地震における東名高速道路の道路盛土崩壊の再現解析を行っている。泥岩は碎石集合体として締め固められても、水の浸入や乾燥や湿潤の繰返しによって粘土化が進行する（スレーキング現象）。近年、道路盛土の崩壊は、この泥岩で造成された盛土に多く発生している。そこで、室内試験により、スレーキング進行が泥岩碎石集合体の力学挙動に及ぼす影響を調べ、骨格構造概念に基づき解釈した上で、スレーキングを考慮した東名高速道路の道路盛土に対し数値シミュレーションを実施し、2009年に駿河湾地震によって起きた盛土崩壊の再現を行い、崩壊メカニズムを調べた。締固めた泥岩は同じ密度で締固めてもスレーキングが進行するに伴い、密詰め砂に類似した挙動から正規圧密粘土に類似した挙動へと変化していく。また、泥岩碎石集合体の力学挙動の再現解析により、スレーキング進行は、構造の程度や過圧密比の減少をもたらし、スレーキング進行の程度が大きいほど、これらの値の変化量も大きくなる。数値解析においては、泥岩のスレーキングを考慮すると、盛土が崩壊し、その崩壊形状や地震後に遅れて崩壊した点を表現した。また、地震後に発生したすべり面の要素を見ると、吸水膨張の時、塑性膨張を伴う正規圧密土化が起きている。この時、応力状態が限界状態線よりも上側にあるため、土は軟化挙動を示し、有効応力経路が原点に向かい、せん断ひずみが進展していく。この崩壊メカニズムは、第2章における盛土の遅れ崩壊とよく似ている。

第6章では、災害廃棄物の復興資材としての有効利活用に向けて、各種室内試験を通じて分別土の性状の把握し、地盤材料としての品質を検討した。回転式工法による選別効果については、復興資材の閾値となる20mm以下の選別率が上昇した。一軸圧縮試験の結果から、コンクリートダスト改良土は、改良しなかった材料（有姿材料）と比較して、より高強度な材料になり、7日養生の時点で一軸圧縮強さが100kPaを上回った。加えて、コンクリートダスト改良土は、セメント改良土と同様に養生による強度発現が確認できた。また、 D_c 値、含水状態を調整した一軸圧縮試験の結果から、 D_c 値が大きいと一軸圧縮強さが大きくなった。試料ごとでは、3ケースともコンクリートダスト改良土、回転式工法のみ、有姿材料の順に強度が高くなった。三軸圧縮試験の結果から、湿潤側では、有姿材料コンクリートダスト改良土はほぼ同じ強度特性を示し、一方、最適含水比のケースでは、コンクリートダスト改良土の強度の方がはるかに高くなった。今回の実験のケースでは、両試料の変形特性ともに、過圧密土の変形特性と類似している。また第2章で得られた結果と比較すると、締固めやすい材料（材料C）の結果に良く似ている。ただし、分別土、改良土ともに材料Cよりも初期剛性が小さいが、材料Cよりも最大軸差応力は大きい。特に改良土は、締固め度に依らず、最大軸差応力が試料Cの2倍程度であり、盛土材など復興資材として十分利用可能であることを示した。

第7章では、各章の研究成果をまとめ、本論文の結論としている。