

報告番号	※ 甲 第 10349 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 鉄道盛土の地震時破壊機構の解明と盛土の変形を抑制する合理的な耐震補強工法に関する研究

氏 名 大木 基裕

論 文 内 容 の 要 旨

東海道新幹線では、これまでに超軟弱地盤上の盛土の対し、シートパイル締切工による補強が行われ概ね完了する段階にある。しかし、2004年（平成16年）における新潟県中越地震では構造物に大きな損傷がない中で列車が脱線した。今回の事象により、耐震補強は復旧性能の向上から使用性能の確保へさらに一段高い要求性能を満足することが目標となった。東海道新幹線では、脱線防止ガードおよび逸脱防止ストッパにより、地震動によるリスクを減らすことが検証されている。この脱線防止ガードの機能が地震中や地震後にも発揮されるよう、地震時左右動による道床肩の崩壊や流出を防止し、道床横抵抗力を保持するジオテキバッグ工法が開発された。そして、以上の車両・軌道で行われる脱線逸脱防止対策が有効に機能するよう、構造物においても大崩壊崩壊を防ぐ従来の耐震補強に加え、新たな補強を実施することとなった。盛土における対策は、地震時あるいは地震後の施工基面における不等沈下を抑制する対策が重要となり、より小さな変形レベルに対する盛土が補強対象として考えられる。

しかし、より小さな変形レベルにおける破壊機構は未解明であり、全線の盛土の中から対策箇所を選定するスクリーニング方法、そして合理的な対策工法について検討し、対策を推進するための方策を定める必要がある。本研究は、盛土における不等沈下防止を実現するため、地震時における盛土の破壊機構の解明、対策箇所選定判断基準の策定、破壊機構に即した効果的で経済性に優れた新たな耐震補強工法の開発を目的とする。以下に得られた結論を、章を追って説明する。

第2章では、本研究の背景となる盛土の耐震の補強に関する重要な知見に関する3つの点について整理した。2.2では、東海道新幹線の諸元をまとめた。これにより、東海道新幹線の地盤特性や盛土材料の特徴を捉え、これを模型実験の条件設定の指針とした。具体的には、模型実験で設定する支持地盤の厚さは、粘性土地盤では6m、液状化地盤層では模型の縮尺の都合上設定できる最大の14mとした。盛土材料は、土質分類SMを基準とした。2.3では、鉄道盛土の実被害事例と実験による無補強時の盛土の破壊形態の再現結果についてまとめた。一般的な盛土高さにおいて、やや軟弱な地盤では変形レベル3の変状が

生じ、さらに支持地盤強度が高く盛土高さが低いと、強震域において変形レベル2の状況が存在することがわかった。また、既往の研究における盛土の破壊形態の検証実験などを踏まえ、後述する5つ新たな盛土の破壊形態を定める際の基礎資料となった。2.4では、盛土の耐震補強に関する既往の知見を整理した。各種の盛土の耐震補強工のうち、対策効果と既設構造物への適用という2つの観点からシートパイル締切り工法が選択され、実験検証によりタイロッド張力の設計の考え方を確立した経緯をまとめた。

第3章では鉄道土構造物の設計標準の変遷をまとめ、想定する地震動に対する設計の考え方、要求性能、性能照査の方法、想定する破壊形態について比較検討した。

第4章では、鉄道盛土の破壊形態として被災事例や文献を調査した結果、盛土の破壊形態をA～E型の5つに分類し直した。すなわち、地盤を含む円弧すべり(A型)、液状化地盤上で生じる盛土の縦割れ破壊(B型)、盛土内部で生じる円弧すべり(C型)、のり尻が拡幅し、盛土が伸長する破壊(D型)、盛土形状が保持され一様に沈下する形態(E型)である。A型、B型は地盤変形が主体、C型、D型は盛土変形が主体の破壊である。新たな破壊形態の分類は、従来の鉄道盛土の破壊形態の分類(I～V型)に対し、盛土が液状化する破壊(旧分類V型)を除き、盛土のり尻が伸長する破壊形態D型を設定した。この新たな破壊形態の分類は、各破壊形態の変形の主体(支持地盤、盛土)を明確化するとともに、変形レベルの大小を定性的に示し、対策箇所選定の判断基準や合理的な耐震補強工法などを示唆するものである。そして、支持地盤の物性や強度、盛土高さをパラメータとした振動台実験や動的遠心力模型実験によりA型～E型の各破壊形態を再現し、盛土天端の変形量に基づく変形レベルと破壊形態に関係性を把握した。変形レベル4となった破壊形態は、粘土地盤上の盛土ではA型破壊、A型とD型の混在型、およびD型が、砂質地盤上の盛土ではB型が、変形レベル3となった破壊形態は、粘土地盤上の盛土および砂質地盤上の盛土ともにC型破壊が、変形レベル2となった破壊形態は、粘土地盤上の盛土および砂質地盤上の盛土ともにE型破壊が、それぞれ該当した。E型破壊は天端の平坦性も確保されていることから、耐震補強後の目標とする変形レベルと考えられる。この関係性は、支持地盤のN値、盛土の高さを基軸とするマトリックス上に整理することができ、これを対策箇所選定判断基準として提案した。また、模型実験の試験過程を動的/静的水～土連成有限変形解析プログラムGEOASIA(All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration)により再現し、従来未解明であった変形レベル3の破壊機構を解明した。粘土地盤上の盛土の動的遠心模型について解析を実施した結果、盛土高さや支持地盤の強度を変化させることにより、模型実験で見られたA型、D型、C型の各破壊形態を再現することができた。C型破壊の場合のり面下2～3mの範囲は、のり肩からのり尻にかけて土塊として挙動することが、土要素の応力経路や応力～ひずみ関係から解明した。D型破壊の場合は、せん断ひずみの分布はC型に類似し盛土が主体の破壊性状を示しているが、盛土底部と地表面の境界でせん断ひずみが卓越して生じる範囲が幅広くみられ、のり尻で盛土が伸長する破壊機構が確認された。A型破壊の場合は、C型破壊やD型破壊とは異なり、のり尻下の支持地盤にせん断ひずみが発現し、盛土と地盤の境界ではせん断ひずみは顕著に表れていない。支持地盤を含む基底円弧すべりが生じる破壊機構が確認された。

第5章では、のり面より施工する地山補強土工法に着目し、動的遠心力模型実験と有限変形解析GEOASIAにより、C型、D型破壊が生じる盛土に対する合理的な対策工を検討

した。動的遠心力模型実験では、N 値 6 相当の粘土地盤上の盛土に対し、C 型が再現された盛土高さ 6m、および D 型が再現された盛土高さ 9m の各々に対し、改良径 100mm 長さ 4m（実物換算値）のネイリングを打設間隔 2m で敷設したモデルを加振した。地山補強土工により高さ 6m の盛土で生じた C 型破壊は E 型破壊へ移行し、変形レベルはレベル 3 からレベル 2 に抑制した。一方、高さ 9m の盛土で生じた D 型破壊は盛土のり尻の伸張を低減することができず、変形レベルは無補強の場合と大きな違いはなく、補強効果がなかった。数値解析では盛土に挿入した地山補強土工を、補強材両端に位置する 2 有限要素節点間の距離が変化しないという制約条件で表現した。C 型破壊に対する地山補強土工法の解析では、盛土内部や盛土と地盤の境界に発生していた高いせん断ひずみを低減し、天端沈下量を抑制した。一方、D 型破壊に対する地山補強土工法は、盛土内部のせん断ひずみを低減するものの、盛土と地盤の境界に発生していた高いせん断ひずみを低減することができず、天端沈下量の低減効果は小さい。すなわち、地山補強土工法は破壊形態を変化させる働き、より具体的には、円弧すべり面を盛土のより奥深くに形成させる働きを有し、C 型破壊には効果的であったが、D 型破壊に対しては対策仕様が十分でなかったといえる。C 型破壊に対する地山補強土工の挿入本数、挿入位置、挿入長、のり面工の有無が天端沈下抑制に及ぼす影響を数値解析で調べた結果、地山補強土工の挿入本数が多いほど、挿入長が長いほど、挿入位置がのり面中腹からのり尻の範囲にあり、のり面被覆工を伴う場合に、沈下抑制に有効であることがわかった。ただし、挿入本数や挿入長はある一定以上増加しても効果は頭打ちとなる。本研究での最適な挿入本数や配置は当初のモデルに対し 1/6 にまで低減した。この解析結果は、従来の地山補強土工法よりも細く、軽微な仕様の適用性を示唆している。D 型破壊に対する沈下抑止効果の向上を図る地山補強土工の仕様について、数値解析を行ったところ、通常仕様と比較し、挿入本数は 3 倍、挿入長は 1.5 倍、補強材強度は 3 倍の対策仕様が必要となり、より合理的な補強工法が考えられる。

第 6 章では、各種地山補強土工法を比較し、地山補強土工法に共通する特徴を踏まえ、より効率的で施工性の良い新たな地山補強土工法を開発し、その性能を評価した。開発した地山補強土工法は有孔鋼管を打撃挿入し、鋼管口元よりセメントミルクを注入し、頭部処理としてのり面工を実施するものである。従来の排水パイプ工と、のり面張りコンクリート工を組み合わせた工法といえる。セメントミルクを圧力 0.3MPa 以下の条件で加圧注入すると、芯材である鋼管と地山が十分に定着し、地山の物性によらず安定した引抜強度特性を発揮することを引抜試験により検証した。また、引抜抵抗力は 91.6kN であり、数値解析により得られた軸力より算定した目標全長引抜抵抗力 55.7kN を上回る。開発した地山補強土工法は従来のネイリング工法に比較し、1 本あたりの施工費を約 1/20 にコストダウンした。一方、打設本数は 4 倍の本数が必要であるため、補強土工に関するコストは全体で 1/5 となった。また、頭部処理費用は従来のキャッピングから、のり面張りコンクリート工に変更したため 25 % のコストアップとなった。補強土工の信頼性を向上し、副次効果としてのり面遮水効果を有し、施工性や適用範囲を拡大し、トータルとして約 70 % のコストダウンを図ることができた。