

# 山岳トンネルの地震被害を小さくする

野城 一栄  
 構造物技術研究部  
 (トンネル 主任研究員)

小島 芳之  
 同  
 (同 研究室長)



やしろ かずひで こじま よしゆき

## はじめに

山岳トンネルは高架橋などの明かり構造物に比べて一般に地震による被害を受けにくい構造物といえます。その大きな理由は、山岳トンネルは地中の硬い地盤中にあることが多く、地震時の変位が元々小さいことにあります。

ところが、2004年新潟県中越地震や、2007年新潟県中越沖地震では山岳トンネルが相次いで被害を受け、山岳トンネルの耐震性が一躍注目を浴びるようになりました。

トンネル内は狭い空間であり、復旧にあたって大きな機械が使えないことや、長いトンネルで特に問題となりますが、被害箇所へのアクセスに時間がかかることから、復旧までに長期間を要してしまうこともあります。また、最近では、新幹線をはじめとして路線延長に占める山岳トンネルの割合が増加しており、山岳トンネルといえども耐震性の評価を行い、不足している場合には耐震性を向上させる必要があります。このような背景から、鉄道総研では山岳トンネルの被害メカニズムの解明や、地震対策に関する研究を行っています。ここでは研究の成果の一部についてご紹介します。

なお、以下、特に断りのない限り、トンネルといえば山

岳トンネルのことを指すこととします。

## 山岳トンネルの地震被害形態

いままでの山岳トンネルの地震被害事例を分析してみると、地震による被害は、図1に示すような被害タイプⅠ～Ⅳの4種類の形態に分類されることが分かっています。

タイプⅠは、土被りの小さな入口付近においてよく見られる被害で、被害のスタイルとしてはアーチ肩部のひび割れ・圧ざ(大きな曲げモーメントにより生じた圧縮破壊)が特徴的です。タイプⅡは、トンネルが断層・破砕帯のように特に軟質な地質箇所にある場合によく見られる被害です。この被害は、さらに何通りかの被害パターンに分けられますが、図に示したトンネル上端部に圧ざが生じる被害形態(被害タイプⅡ-A)や、輪切り方向のひび割れを伴い場合によっては剥落を伴う被害形態(被害タイプⅡ-B)などでは復旧に長い時間を要する場合があります。トンネルの耐震性を理解し、正しい対策工を設計するためには、トンネルの被害メカニズムを把握する必要がありますが、これらの被害については、断層のずれに起因する被害タイプⅢや、斜面崩壊による「もらい災害」である被害タイプⅣを除き、被害メカ

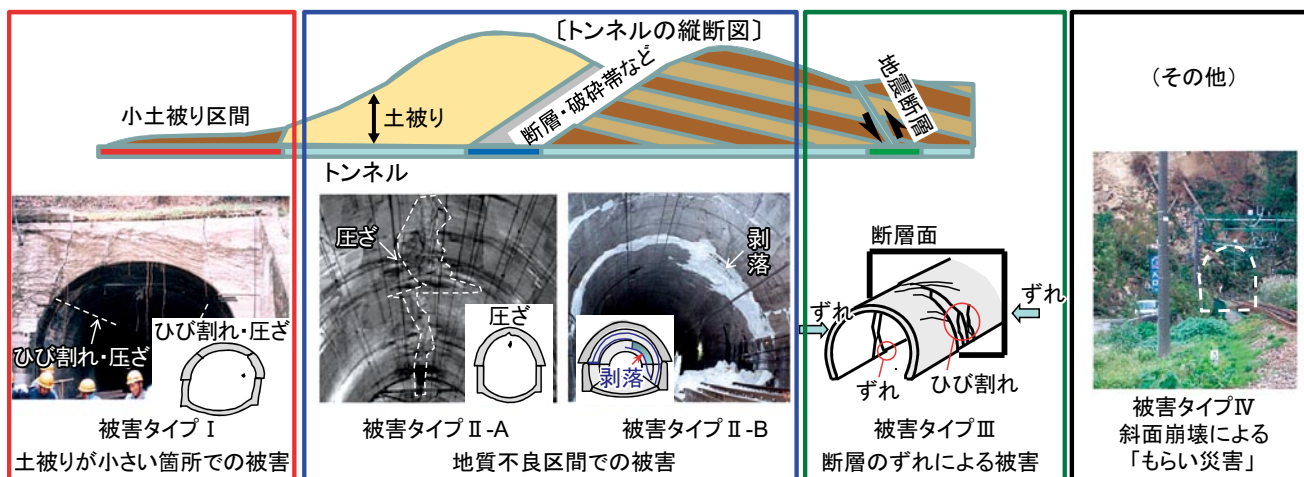


図1 地震による被害形態の分類

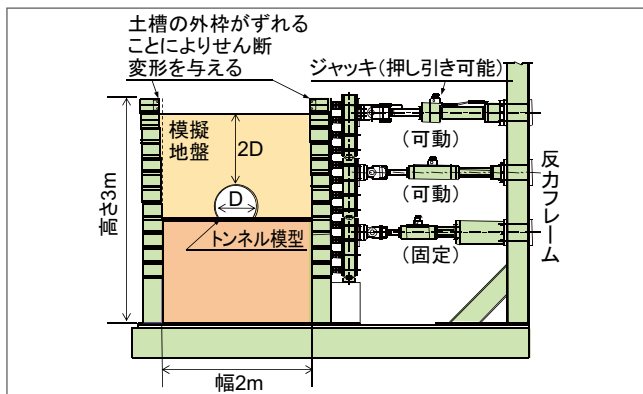


図2 せん断土槽

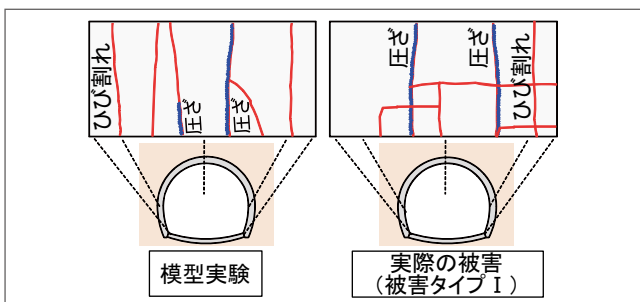


図3 実験と実際の被害との比較

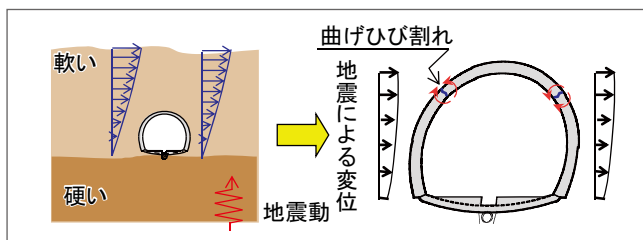


図4 土被りが小さい箇所での被害のメカニズム

ニズムの詳細はよくわかっていませんでした。

まず、被害メカニズムを確認するために、模型実験で地震被害を再現することにしました。

### 土被りが小さい箇所での被害のメカニズム

被害タイプIは、土被りが小さい箇所が生じ、アーチ両肩部に被害が生じていることから、トンネルが地盤からせん断変形を受けて生じるものと考えられます。そこで、再現実験は、せん断土槽(図2)を用い、トンネル模型を模擬地盤中に埋設し、ジャッキにより模擬地盤を介してトンネルにせん断変形を与えることにより行いました。

図3にせん断変形を与えた時の、トンネル模型の内側表面のひび割れや圧さの発生状況を示します。図より、両肩部に引張ひび割れや圧さが入り、図1の被害タイプIとよく似た被害形態となることがわかります。

このことから、小土被り部の地震被害メカニズムを図4の様に想定しました。すなわち、小土被り区間は軟弱な地盤に存在することが多く、鉛直方向に入射するせん断波に

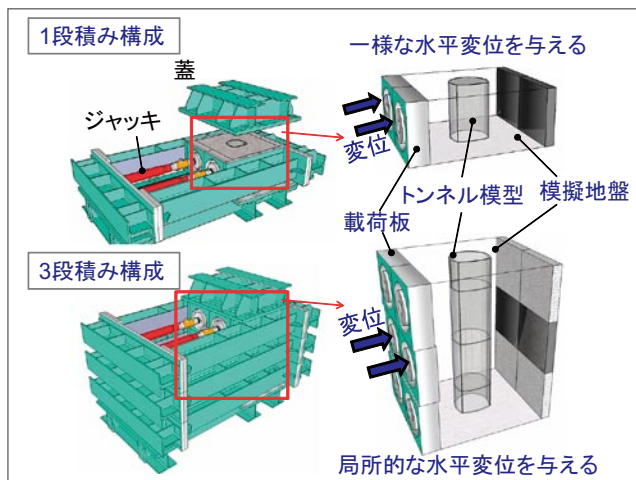


図5 土槽載荷実験装置

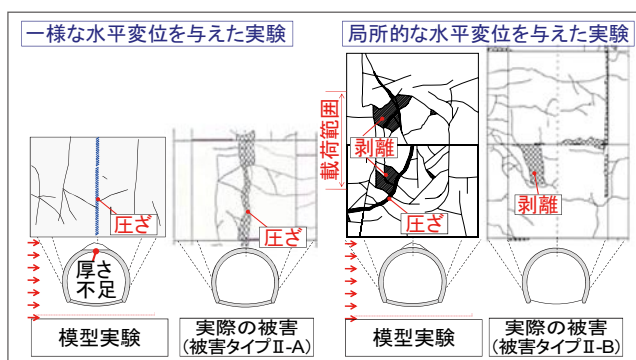


図6 実験と実際の被害との比較

よって引き起こされる地盤のせん断変形に伴ってトンネルもせん断変形をして被害を生じるというものです。

### 地質不良区間での被害のメカニズム

被害タイプIIのうち、トンネル上部で圧さが生じる被害タイプII-Aは被害例が多く報告されており、また、被害の程度が大きく復旧に時間を要するものです。上部に被害を生じていることから、トンネルが地盤から水平変形を受けて生じるものと考えられます。よって、再現実験は、土槽載荷実験装置(図5)を用い、トンネル模型を模擬地盤中に埋設しジャッキにより模擬地盤を介してトンネルに水平変形を与えることにより行いました。この実験装置は、土槽の高さを変化させることができ、トンネルの一部範囲に変位が作用するような条件も再現することができます。

図6に一樣な水平変位を与えたときの、トンネル模型の内側表面のひび割れや圧さの発生状況を示します。ここで、山岳トンネルの覆工(壁面のコンクリート)においては、覆工背面に空洞があったり、厚さ不足を生じていることがよくあります。そこで、背面空洞と厚さ不足を模型においてモデル化して実験を行ってみました。その結果を図6に示しますが、トンネル上部で大きな圧さが起こり、図1の被害タイプII-Aとよく似た被害形態となりました。

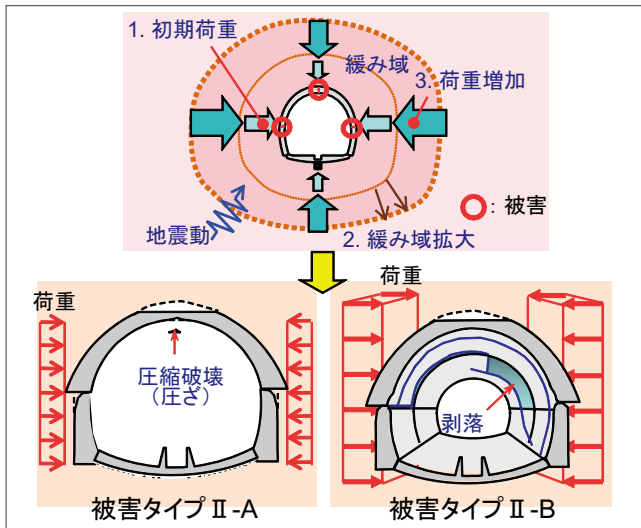


図7 地質不良区間での被害メカニズム

被害タイプIIには、輪切り状のひび割れと剥落を生じる被害タイプII-Bもみられます。このような被害は、トンネルの線路方向に荷重条件を変えさせないと表現できないと考えられます。これを再現するために、土槽を3段構成とし中段のみに荷重を行う実験を行ってみました。図6にひび割れや剥離の発生状況を示します。今回はそれに加えて輪切り方向のひび割れが数多く生じ、線路方向のひび割れと輪切り方向のひび割れとで囲まれた部分が剥離しました。これは図1の被害タイプII-Bとよく似た被害形態であることがわかります。

このことから、地質不良区間での地震被害メカニズムを図7の様に想定しました。すなわち、トンネルが、断層・破碎帯のような地質不良区間にある場合、トンネルの周辺の地盤は緩んでいると考えられます。強い地震動により荷重がトンネル周辺の地盤に作用した時、トンネル周囲の緩み域が広がり、トンネルに作用する荷重が増加し、トンネルが被害を受けると考えられます。このとき、地震により作用する荷重の作用範囲が水平方向一様であれば被害タイプII-Aが、局所的であれば被害タイプII-Bが生じる可能性があります。なお、被害タイプII-BはII-Aよりも小さな変位で生じることがわかっています。

### 山岳トンネルの地震対策工

現在、既設山岳トンネルの地震対策工として考えられている各種工法を図8に示します。地盤反力の回復を目的とした覆工背面の裏込注入、覆工の剥落防止を目的としたアーチロックボルト、覆工内面のひび割れ発生を目的とした内面補強、路盤隆起防止を目的とした路盤ロックボルトが良く用いられます。また、インバートは、路盤部にもコンクリートを敷きトンネルを補強する工法です。既設トンネルの補強用に用いられる場合はまれですが、トン

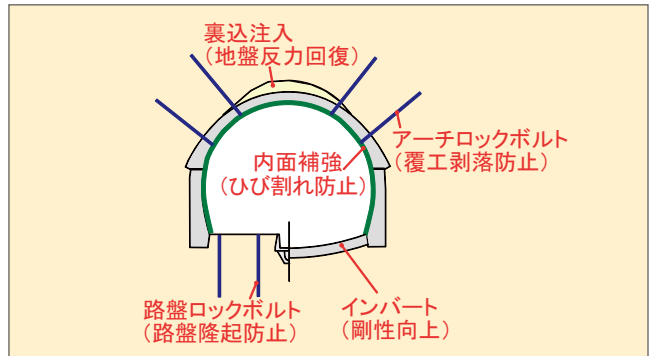


図8 既設トンネルの地震対策工

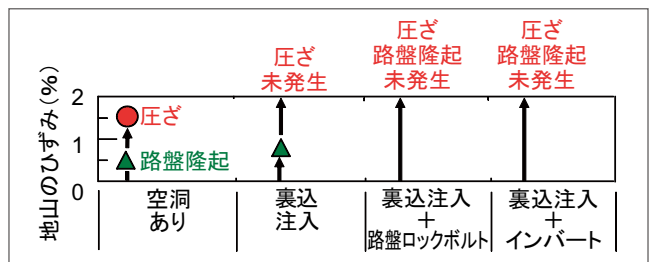


図9 対策工の効果

ネルの剛性を向上させ強固なものにする必要がある場合には採用される場合があります。

なお、これらの工法は、従来からトンネルの補強に経験的によく用いられているものの、これらの効果については、一元的に定量的な検討は行われてきていませんでした。そこで、先程の模型実験により、これらの効果を比較することにしました。なお、アーチロックボルトと内面補強についてはコンクリート片の剥落対策としての効果を目的として用いられていることから、実験は、裏込注入、路盤ロックボルト、インバートに着目して実施しました。

図9に各種対策工の効果と比較します。この図は、覆工の圧縮と路盤隆起の観点から、それぞれの変状が初めて生じる地山のひずみを示したものです。なお、実験ではひずみ2%まで作用させましたがこれは相当大的な変形量に相当します。裏込注入を実施することにより圧縮が発生しないようになります。また、それに加えて、路盤ロックボルトやインバートを施工することにより路盤隆起を防止することができます。なお、インバートは、圧縮と路盤隆起を防止することのほか、内空の縮小も低減できることがわかっています。トンネルの地震被害としては圧縮がよく見られます。このため、圧縮を抑制することができる裏込注入工は最も優先して実施すべき対策工といえます。

### 「既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル(案)」

これまで鉄道総研で実施してきた各研究成果を実務に反映させるため、学識経験者、鉄道事業者、鉄道総研から構

成される「既設山岳トンネル地震対策マニュアルに関する検討会」（委員長 朝倉俊弘 京都大学大学院教授）を設け、「既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル（案）」の作成を行いました。本マニュアルは、「事前対策工」と、「震災復旧工」の2編からなっています。以下、このマニュアルについて簡単にご紹介します。

「事前対策工」は既設山岳トンネルの耐震性を向上させるためのものです。図10に事前対策工の選定の流れを示します。まず、地震動の大きさや線区の重要度に基づき、地震被害のリスクを考慮した上で検討対象線区の決定を行います。検討対象線区が決定された後は、例えば、想定する活断層の位置、确实度、活動度、活断層とトンネルとの距離を基に、耐震性の検討を行う区間を決定します。

耐震性の検討を行う区間においては、地形・地質的特殊条件（例えば、小土被り区間、地質不良区間）にあてはまる場合には、トンネルの健全度に基づき、耐震ランク（地震対策工の優先度を示す指標で、AA, A, Bの順に優先度が高い）を判定します。また、構造的な特殊条件（例えば、インバートなし、厚さ不足）にあてはまる場合には耐震ランクを補正します。耐震ランクがAA, A, Bとなった場合には対策工の選定・設計・施工に移ります。

ここで、標準的な対策工も図10中に示しますが、前述した模型実験や数値解析の結果を反映させ、対策工は裏込注入工を基本とし、耐震ランクがAの場合には、剥落防止のためにロックボルト（内面補強工でも可）を追加する事になっています。また、その他、路盤隆起を生じやすい地盤、過去あるいは現在に路盤隆起が問題となった箇所などでは別途路盤ロックボルトを追加する事になっています。さて、山岳トンネルの地震被害メカニズムは未だ不明な点が多く残っています。また、地震被害の特徴として、復旧工を実施するための時間的余裕が少ない中で一度に多くの要対策箇所が発生することがあります。このため、万一被災した場合に備え、迅速に機能を回復することができるように「震災復旧編」も作成しました。

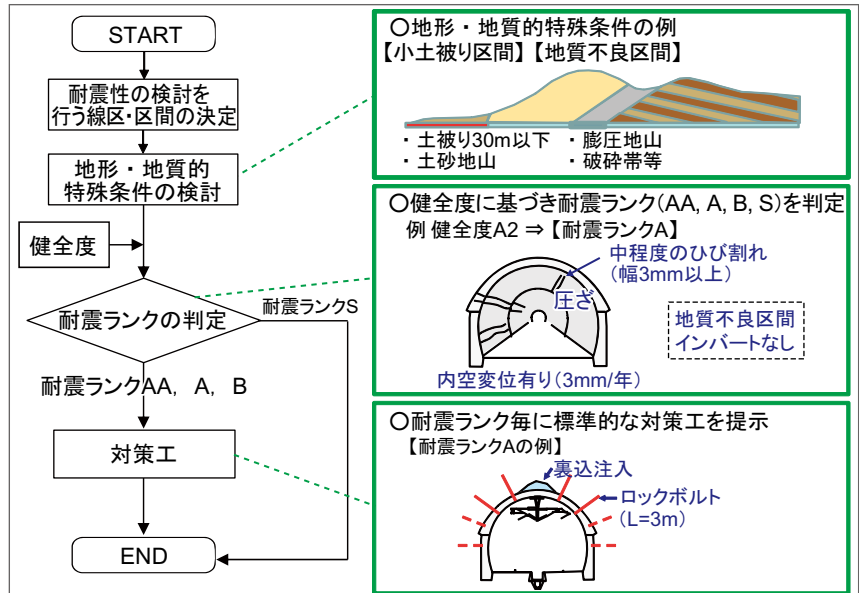


図10 事前対策工の検討の大まかな流れ

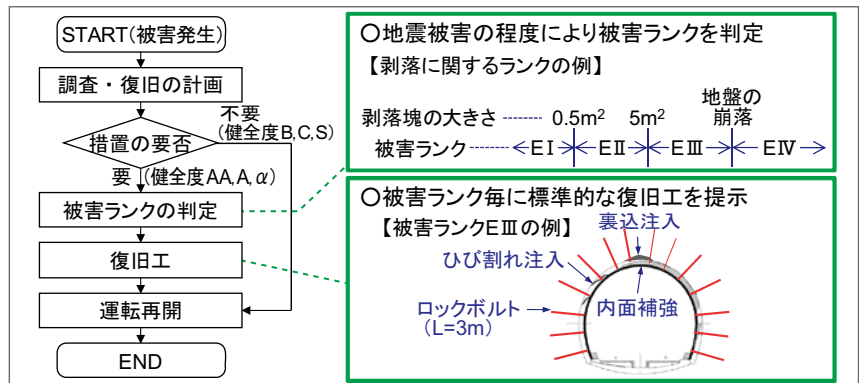


図11 震災復旧工の検討の大まかな流れ

図11に震災復旧工の検討の流れを示します。地震被害は、大きな力・変位が限られた時間で作用することから、ひび割れ、剥落が主な被害となります。「震災復旧編」は、ひび割れ、剥落・崩落の有無や程度に対応した被害程度の判定基準や対応する標準的な対策工を提示し、迅速な復旧に資するような構成としてあります。

### まとめ

山岳トンネルの被害メカニズムの解明や、地震対策に関する研究の成果の一部についてご紹介しました。山岳トンネルの耐震性は、研究が進んだとはいえ十分に解明できているとは言い難い部分も残っており、今後も引き続き研究を深めていきたいと考えています。

なお、今回ご紹介した研究の成果には、鉄道・運輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」により、京都大学、鉄道総研、鉄道・運輸機構で共同で研究した「山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究」により実施した研究の成果の一部を含んでいます。RRR