

# 山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性能評価

構造物技術研究部 トンネル  
副主任研究員 野城一栄

## 1.はじめに

山岳トンネルは一般に地震に強い構造物といわれているが、地震によってはひび割れや圧ぎ（曲げ圧縮破壊による剥離）などの被害を生じることがある。一方で、トンネルの地震被害メカニズムは十分に解明されておらず、地震により被害を受ける条件には不明な点が多い。本報告は、山岳トンネルの地震被害に着目し、事例分析や模型実験により、被害メカニズムや耐震性能を解明した結果について示すものである。

表1 山岳トンネルに大きな被害を与えた地震

地震名	M	最大震度	被災地内のトンネル数				合計	備考
			大被害	中被害	小被害	無被害		
関東	7.9	6	25	12	56	55	148	鉄道のみ
伊豆	7.0	5	2	4	3	22	31	鉄道のみ
兵庫	7.3	7	12	-	18	80	110	鉄道以外も含む
中越	6.8	7	11	14	24	89	138	鉄道以外も含む
中越沖	6.8	6強	4	1	1	14	20	鉄道以外も含む
合計			54	31	102	260	447	

## 2.地震被害事例の分析

1923年関東地震以降に山岳トンネルに被害を与えた地震のうち、被害の大きかった5地震について地震被害の内訳をまとめたものが表1である。これらの地震では、被災地内において平均して約20%のトンネルが中被害以上となっ

ており、大きな地震では山岳トンネルも被害を受けることが確認できる。

図1は、地震断層面からの距離、地震の規模と被害レベルとの関係である。地震断層面からの距離が近いほど、地震の規模が大きいほど、被害レベルが大きくなることが確認できる。目安としてM8程度の地震であれば地震断層面からの距離が30km以内の場合、M7程度の地震であれば同じく10km以内の場合に中被害以上の被害が生じる可能性が高くなることわかる。その他、既変状、地質不良などの条件が重なれば、同じ地震動を受けたときでも被害のレベルが高くなることも明らかになった。

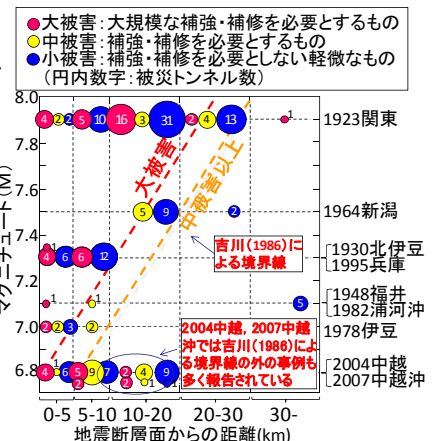


図1 地震断層面からの距離、地震の規模と被害レベルとの関係

その他、事例分析の結果、山岳トンネルの地震被害の形態は図2に示すI~IIIの3タイプに分類できることがわかった。I.小土被り区間の被害は、坑門、坑口部でよく見られ、写真1(a)で示したようなアーチ肩部のひび割れが特徴的である。II.地質不良区間での被害は、断層・破砕帯などの地質不良部でよく見られ、写真1(b)で示したような天端での圧ぎ、剥落の他、写真1(c)のような輪切り方向のひび割れによりブ

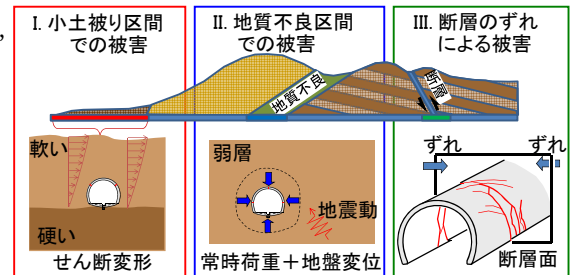


図2 地震被害の形態

ロック化して剥落した事例もある。その他、III.断層のずれによる被害は、断層のずれに伴う局所的な強制変位により覆工が破壊するものである。以下、I, IIの地震被害に対して模型実験によりそのメカニズムの解明と耐震性能



(a)東山トンネル (b)妙見トンネル (c)魚沼トンネル

写真1 地震被害の例

の評価を行った。

### 3. 小土被り区間での地震被害

小土被り区間での被害は地盤のせん断変形により生じると考えられるため、トンネル模型をせん断土槽（図3）中に埋設しジャッキによりせん断変位（三角形分布）を与えることにより実験を行った。 载荷は、地盤のせん断ひずみ  $1/H$ （図4）の最大値を大きくしながら、 $1/H$ が6%に達するまで、交番载荷により静的に行った。 実験ケースは、健全覆工のケース1と背面空洞・巻厚不足を有するケース2の2ケースである。

図5にトンネル模型の変状展開図を示す。 どちらのケースも、 $1/H=0.5\%$ 程度でアーチ肩部にひび割れが生じ、 $1/H$ が大きくなると、ひび割れは本数・幅とも増加した。 ケース1においては、ひび割れや圧ぎは主にアーチ肩部に生じ、写真1(a)とよく似た変状となった。 ケース2においては、 $1/H=3\%$ 時に天端に圧ぎが生じ、 $1/H=6\%$ 時には、天端の圧ぎ箇所で剥離が生じた他、斜め方向に複数のひび割れも生じた。 同じ

$1/H=3\%$ で比較すると、ケース1では、天端部でのひび割れはみられず、ひび割れはアーチ両肩部にあるのみである。

変形は、トンネルのせん断変形率  $\delta_s/h$ 、トンネルの水平変形率  $\delta_h/b$ に着目して整理した。 図6左に  $1/H$ と  $\delta_s/h$ の関係を示す。 図より、いずれのケースも  $\delta_s/h$ は

$1/H$ にほぼ比例して増加しており、せん断変形をしていることがわかる。 図6右に  $1/H$ と  $\delta_h/b$ の関係を示す。  $1/H$ が大きくなるにつれ水平内空が縮小するように変形することがわかる。 なお、水平内空の縮小はケース1で  $1/H=2\%$ 程度から、ケース2で  $1/H=0.5\%$ 程度から顕著になった。

図7に実験から想定される小土被り区間での被害のメカニズムを示す。 まず、右にせん断変形させると、トンネルもせん断変形して、肩部で曲げひび割れが発生する。 左にせん断変形させると今度は反対側に曲げひび割れが入る。 さらにせん断ひずみを大きくすると、地盤が破壊してトンネル周辺地盤が水平方向に押し出して内空が縮小する。 ここで、特に天端背面に空洞があるケース2では、水平

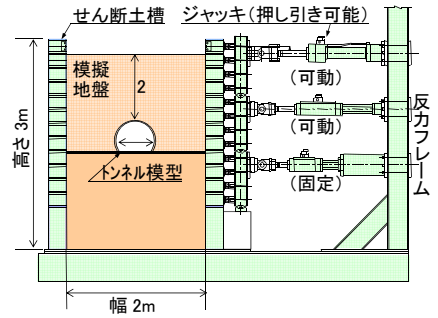
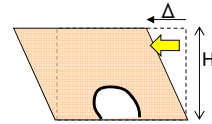


図3 せん断土槽



地盤のせん断ひずみ  $\Delta/H$

図4 地盤のせん断ひずみ

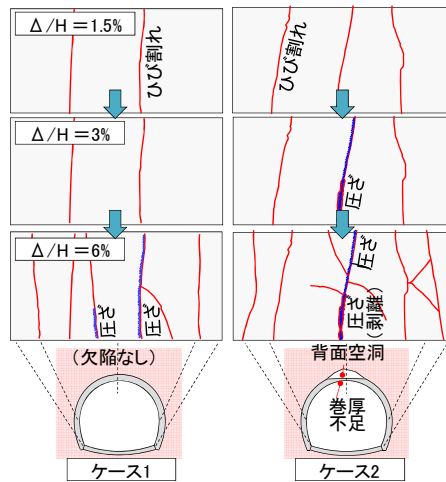


図5 トンネル模型の変状展開図

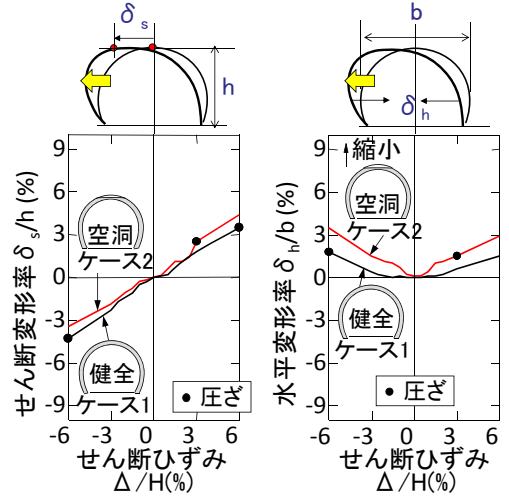


図6 トンネル模型の変状展開図

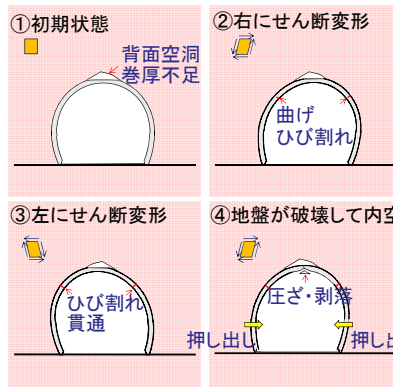


図7 被害メカニズムの模式図

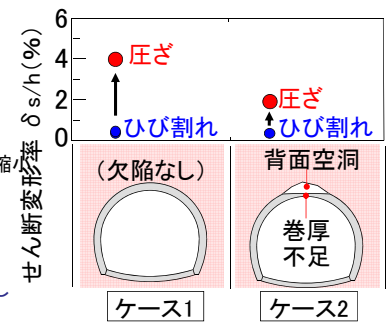


図8 圧ぎ発生時の  $\delta_s/h$

方向の剛性，耐力が不足しているため，内空の縮小量が大きくなり，また，天端に大きな被害が生じたものと考えられる。

図8に，安全性に関わる圧ぎが発生する時の  $\delta/h$  を示す．ケース1で4%程度，ケース2で2%程度となった．洪積地盤中のトンネルを想定した場合，一般的な地盤条件であればL2地震動が作用した場合でも地盤のせん断ひずみはせいぜい2%程度と考えられるので，健全なトンネルであれば覆工に圧ぎ等の大きな変状が生じる可能性は小さいと考えられる．ただし，実験より，覆工に欠陥がある場合は，健全な場合より小さなひずみでトンネルに圧ぎが生じることがわかった．基盤層直上や偏圧条件下などの大きなひずみが発生する条件下にある場合は，大きな被害を生じるおそれがあるので裏込注入などの対策を検討する必要があると考えられる．

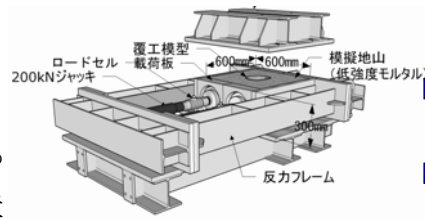


図9 実験装置 (1段構成時)

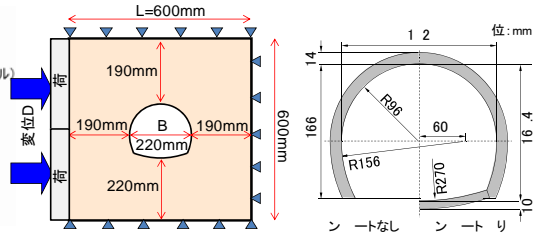


図10 土槽とトンネル模型の寸法

#### 4. 地質不良区間での地震被害

地質不良区間での被害については，載荷模型実験装置

(図9) 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図10における載荷板変位量  $D=18\text{mm}$  (地山のひずみ  $D/L=3\%$ ) まで水平変位を与えることにより実験を行った．

基本的な破壊性状を把握するため，2次元平面ひずみ条件を想定し1段構成とした実験 (一様変位実験) をまず実施したが，写真1(c)のような輪切り方向のひび割れも加わって発生した複雑な被害は，一様変位実験では再現することができないため，土槽を3段構成としてトンネル線路方向の一部の範囲に対して変位を作用させた実験 (局所変位実験) も行った．実験ケースを図11に示す．

一様変位実験について  $D/L=約3\%$  時の変状展開図を図12に示す．ケース2ではアーチ天端から少しはずれたところに小さい圧ぎが見られた程度であったのに対し，ケース3では天端部に大きく圧ぎが入った．このうち，ケース3が妙見トンネルの被害の状況と類似していることがわかる．

次に，局所変位実験において， $D/L=約3\%$  時の変状展開図を図13に示す．線路方向のひび割れに加えて輪切り方向のひび割れが数多く生じた． $D/L$  を大きくしていくと，載荷側の肩部で圧ぎが生じ，また，線路方向のひび割れと輪切り方向のひび割れとでブロック化が生じた．ひび割れの発生形態は背面空洞の有無によらずほぼ同様であるが，ケース5の方がケース4と比較してひび割れの幅が大きく，大きくブロック化して剥離している．このうち，ケース5が魚沼トンネルの被害の状況と類似してい

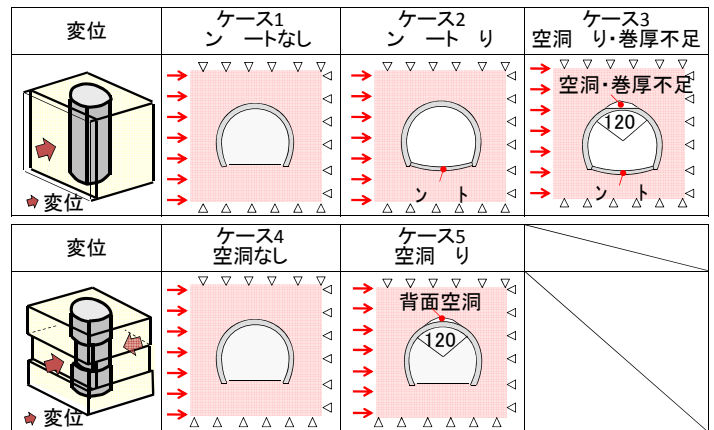


図11 実験ケースの横式図

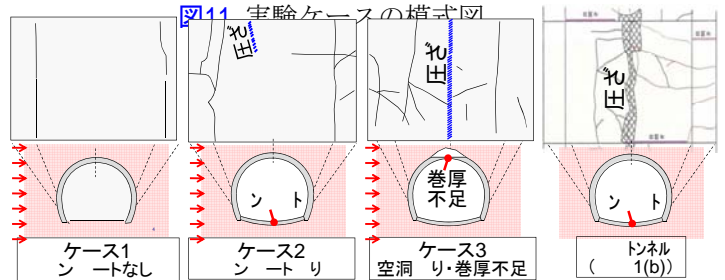


図12 変状展開図 (一様変位実験)

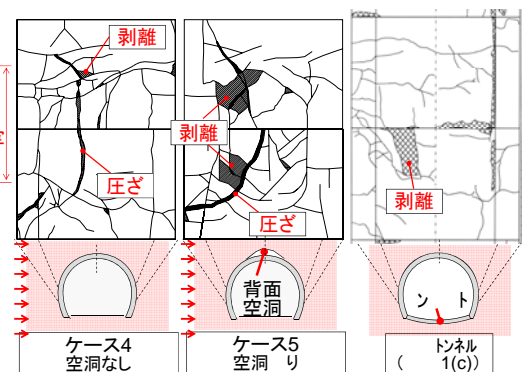


図13 変状展開図 (局所変位実験)

ることがわかる。

図14に実験から想定される地質不良区間での被害メカニズムを示す。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、地質が良くないことから地震前からすでに地圧が作用しやすい状態にあると考えられる。強い地震が起これば、地震波による荷重に加え、地震動による緩み範囲の拡大によって地圧が増加してトンネルに被害が生じると考えられる。この際、縦断方向に一樣な荷重がトンネルに地圧が作用した場合は妙見トンネルで見られたような被害が生じ、局所的な地圧がトンネルに作用した場合は魚沼トンネルで見られたような被害が発生するというものである。また、覆工背面空洞や巻厚不足がある場合、地震被害が生じやすくなるものと考えらる。

図15は、安全に関わる圧ざ、はく離、盤膨れが初めて生じた時のD/Lを示したものである。一樣変位実験の場合、インバートのないケース1は0.5%程度で盤膨れを生じたが、インバートのあるケース2、3では盤膨れは生じなくなった。D/Lを大きくしていくと、ケース1、2では3%程度で軽微な圧ざが生じたが、背面空洞や巻厚不足を設けたケース3では0.5%程度で圧ざを生じた。インバートの効果については、盤膨れは生じなくなるものの、圧ざ発生時のD/Lはインバートなしと大きな差はない。これは、インバートを付加して閉合することにより盤膨れ等のトンネルの変形を抑制できる一方で、トンネルの剛性が大きくなり断面力が大きくなったためと考えられる。局所変位実験の場合、空洞のないケース4では2%程度で圧ざ、3%で剥離を生じたが、空洞のあるケース5ではD/L=1%程度で圧ざ、1.8%で剥離を生じた。

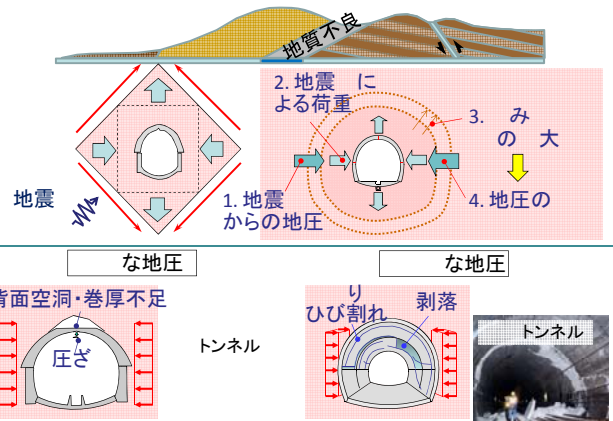


図14 被害メカニズムの模式図

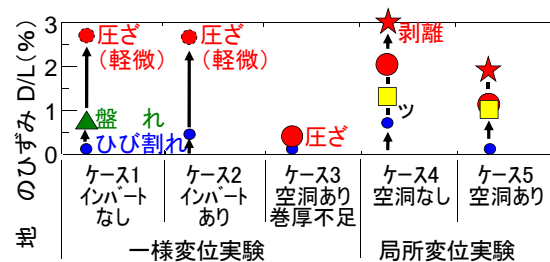


図15 変状発生時のD/L

実験によれば、インバートありの欠陥のないトンネルについては、2%程度の相当大的なひずみが作用したとしても大きな被害は生じないことがわかった。このことから、不良地山にあるトンネルでも健全なトンネルであれば被害を受ける確率は小さく考えられる。ただし、インバートがない場合や、背面空洞や巻厚不足がある場合、局所変位が作用する場合は、それよりも小さなひずみで圧ざやはく離が生じることが確認された。地質不良区間での被害は、小土被り区間での被害の場合と異なり、地震時に生じる地山のひずみ量をあらかじめ予測することは難しいが、このような条件下にトンネルがある場合には優先的に対策工（裏込注入やロックボルト等）を検討する必要があると考えられる。

## 5.まとめ

山岳トンネルの地震被害に着目し、事例分析により山岳トンネルが被害を受けやすい条件を明らかにした。また、小土被り区間および地質不良区間における山岳トンネルの地震被害に着目して模型実験を行い、地震被害を再現し、被害メカニズムを明らかにした。実験により覆工の耐震性能を把握し、背面空洞や巻厚不足がない健全な覆工を有し、インバートがあるトンネルにおいては被害を生じにくいこと、インバートがないトンネルや、欠陥を有するトンネル、また、局所的な変位が作用するような条件下では、被害を生じやすくなることがわかった。なお、本研究は、鉄道・運輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」の補助を受けて実施したものである。