

既設山岳トンネルの地震対策工の効果とその選定手法

構造物技術研究部 トンネル研究室

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ざ、路盤隆起などの被害が生じることがある。昨今、既設山岳トンネルの地震対策工（図1）が進められているが、これらの対策工の定量的な効果については不明な点が多い。ここでは、これらの対策工について効果を検証し、地質不良区間における既設山岳トンネルの地震対策工の選定法を示すことを目的として行った、模型実験と数値解析の結果を紹介する。

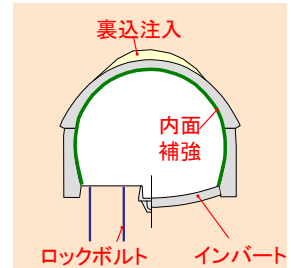


図1 既設山岳トンネルの地震対策工

2. 対象とする被害形態

山岳トンネルの地震被害形態は形態I. 小土被り区間での被害，形態II. 地質不良区間での被害，形態III. 断層のずれによる被害（図2）に大別できることがわかっているが、これらのうち形態II.は、近年被害事例が多く、被害メカニズムに不明な点が残っているほか、被害の程度が大きくなりやすいという傾向もある。このため、今回は形態II.を対象とすることにした。

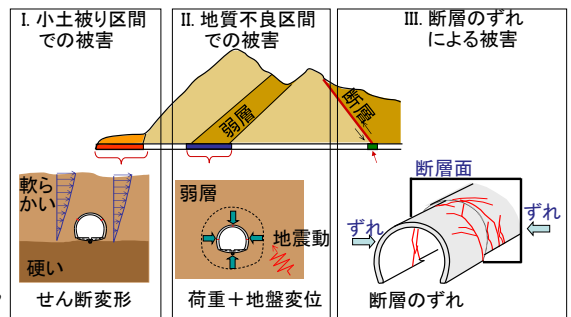


図2 山岳トンネルの地震被害形態

3. 模型実験

まず、模型実験により評価を行った。載荷模型実験装置（図3）を用い、トンネル模型（図4）を模擬地山中に埋設しジャッキにより載荷板変位量 $D=18\text{mm}$ （図4，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。対策工は、裏込注入（以下，裏注），路盤ロックボルト（以下，路盤RB），内面補強，インバートである（図5）。路盤RBはアルミ棒（ $\phi=3\text{mm}$ ， $L=100\text{mm}$ ）によりモデル化することとし、内面補強は目付 40g/m^2 のアラミドシートをエポキシ樹脂にてトンネル覆工の内面に1層貼り付けてある。

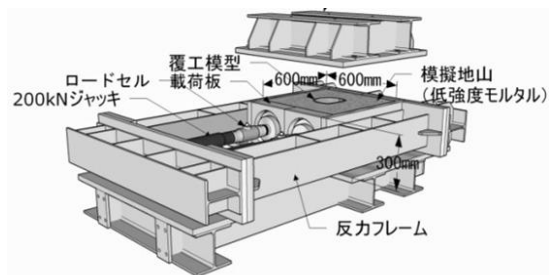


図3 実験装置

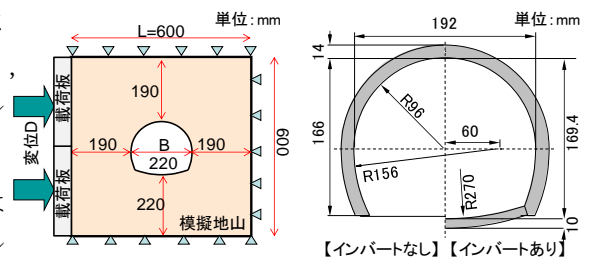


図4 土槽とトンネル模型の寸法

ケース1 空洞あり	ケース2 裏注	ケース3 裏注+路盤RB	ケース4 裏注+内面補強	ケース5 裏注+インバート
		線路方向40mm間隔		

図5 実験ケースの模式図

図6は、地山のひずみ D/L とトンネルの水平変形率 δ/B 、路盤鉛直変位 u との関係である。なお、ケース4（裏注+内面補強）はケース2（裏注）とほぼ同様の傾向であった。

δ/B に着目すると、载荷に伴い水平内空はいずれも縮小する傾向である。ケース1（空洞あり）と比較し、ケース2（裏注）、は水平内空の縮小量は多少減少するものの抜本的でなく、ケース3（裏注+路盤RB）

で多少減少し、ケース5（裏注+インバート）において大きく減少することがわかる。ケース5ではインバートによりトンネルをリング状に閉合することにより、ケース3ではインバート部分を補強することによりトンネル周りの地盤がリング状に補強され、トンネル全体として剛性が増加したためと考えられる。

u に着目すると、ケース1~3では u は正で、 D/L の増加に伴い隆起を生じている。これらのうち、ケース1, 2では、 $D/L=1\%$ 程度で u が急増し、盤膨れを生じているが、ケース3, 5ではそのような盤膨れは抑制されている。水平内空の縮小や盤膨れなどのトンネルの変形については、裏注だけでは抑制効果が小さく、路盤RBやインバートにより抑制効果が現れる傾向である。

覆工の変状展開図を図7に示す。水平方向の载荷であるため、主に側壁部に引張ひび割れが入る形態の変状となった。ケース2, 4を除き天端に圧が発生した。特に、ケース1では载荷初期に天端に圧が発生し、最終的に、

線路方向に続く大きな圧が発生した。裏注により天端の大きな圧の発生を抑制することができ、また、内面補強により内面側のひび割れを抑制することができた。

図8は、覆工の変状（ひび割れ、圧）と盤膨れの観点から、それぞれの変状が初めて生じる D/L をまとめたものである。ひび割れは、裏注+内面補強のケース4を除き、他の変状に先駆けて発生し、発生時のひずみは $D/L=0.2\sim 0.5\%$ 程度である。盤膨れは、路盤RBがない、あるいはインバートがないケース1, 2, 4で発生し、ひずみは $D/L=0.5\sim 1\%$ 程度である。圧は、背面空洞を有するケース1では $D/L=1.5\%$ 程度で発生したが、ケース3, 5では $D/L=2\sim 2.5\%$ 程度まで発生しないようになり、ケース2, 4では $D/L=3\%$ においても発生しなかった。以上のことから、裏注により圧が、路盤RBにより盤膨れが、内面補強によりひび割れが、インバートにより、水平内空の縮小や盤膨れなどのトンネルの変形がそれぞれ抑制されることがわかった。

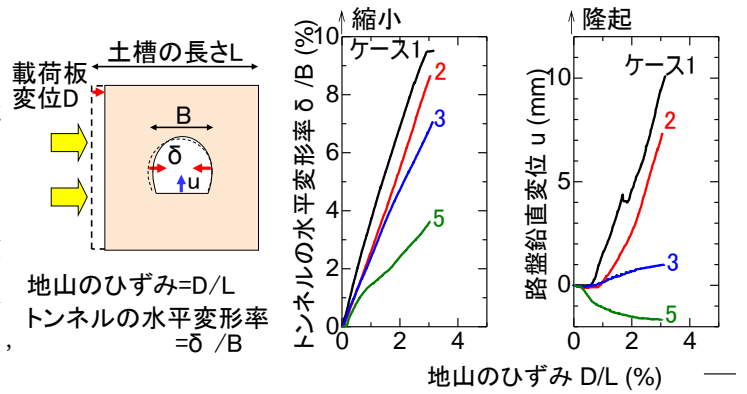


図6 トンネルの変形

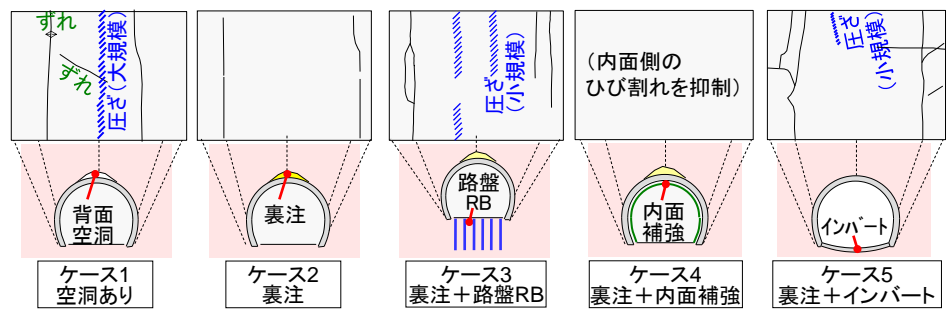


図7 覆工の変状展開図（载荷終了時）

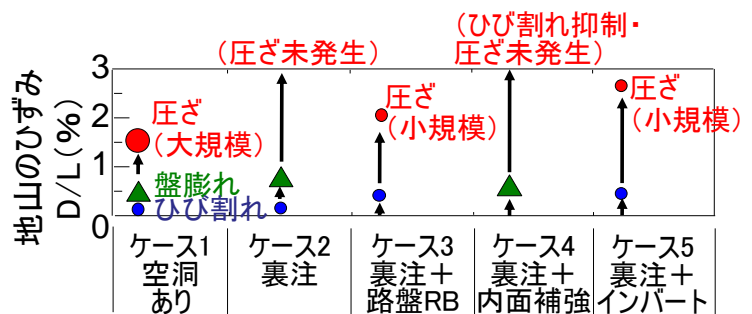


図8 対策工の効果まとめ

4. 数値解析

次に、実トンネルを想定し、数値解析による評価を行った。図9(a)に解析モデルを示す。実験と同様に左側方境界に右方水平変位を与え、最大 $D/L=1.2\%$ 相当のひずみを与えた。図9(b)に解析に用いたトンネルの断面と対策工の模式図を示す。地山は強度がかなり小さい軟岩とし弾完全塑性体としてモデル化した。解析ケースは、ケース1（背面空洞）、ケース2（裏注）、ケース3（裏注＋路盤RB）、ケース4（裏注＋内面補強）、ケース5（裏注＋インバート）の5ケースとしたが、ケース4については、模型実験で用いた補強シート接着工法に比べて補強効果が大きい、カーボンファイバプレート接着工法を採用した。覆工及びインバートはコンクリートの引張破壊後の軟化および圧縮強度到達後の軟化挙動を考慮したモデルを用い、解析においては、相当塑性ひずみ ε_{eq} （式1）が1%を超えた箇所について圧ぎ相当と判定することにした。

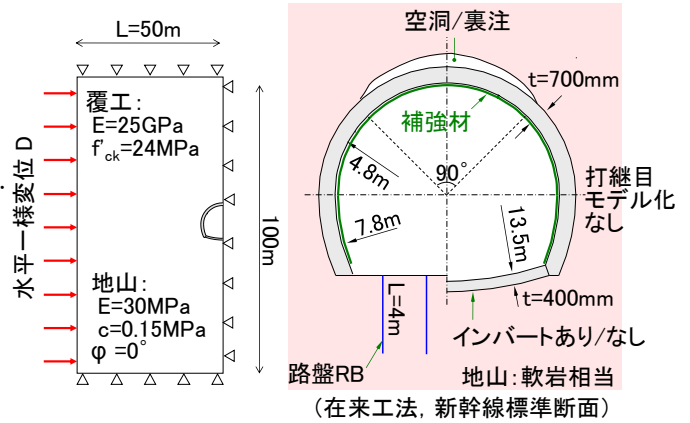
$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p)^2 + (\varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p)^2 + (\varepsilon_3^p - \varepsilon_1^p)^2} \quad (1)$$

($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: 最大, 中間, 最小主ひずみ, p : 塑性成分, のび正)

図10に地山のひずみ $D/L=1\%$ 時のトンネルの変形状況をそれぞれ示す。いずれもトンネルの水平内空が縮小、鉛直内空が拡大するモードとなっている。ケース1では、天端部覆工が背面の空洞に向かって変位する挙動と、盤膨れが生じている。ケース2では、裏注により、天端部覆工の上記挙動を抑制できているが、水平内空の縮小を抑制する効果はあまり見られない。また、路盤鉛直変位については、当然ながら全く抑制効果がみられない。ケース3では、路盤RBにより、盤膨れが抑制されていることがわかる。一方で、水平内空の縮小の抑制効果はあまり見られない。ケース5では、水平内空の縮小と、盤膨れがいずれも抑制されていることがわかる。

図11に覆工のひずみ (ε_{eq}) の分布を示す。なお、ケース3（路盤RB）については、ケース2とほぼ同様のひずみ発生状態となった。ケース1は、アーチ肩部と天端部でひずみの大きな箇所が見られ、ここで圧ぎが発生するモードとなっている。天端部では空洞の存在により地盤反力

がないため曲げが大きくなったこと、肩部では地山接触部と空洞部との境界で曲げが大きくなったことがその理由と考えられる。ケース2は、ケース1と比較して、全体的なひずみのレベルはかなり小さくなっている。また、肩部の圧ぎ箇所については消滅しており、最終的に天端部のみで圧ぎが



(a) 解析モデル (b) トンネルの断面と対策工

図9 解析モデル

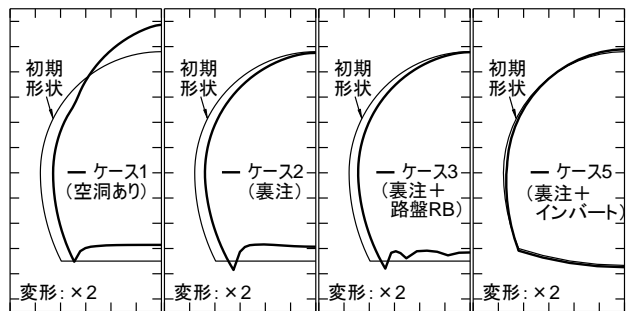


図10 トンネルの変形状況 ($D/L=1\%$)

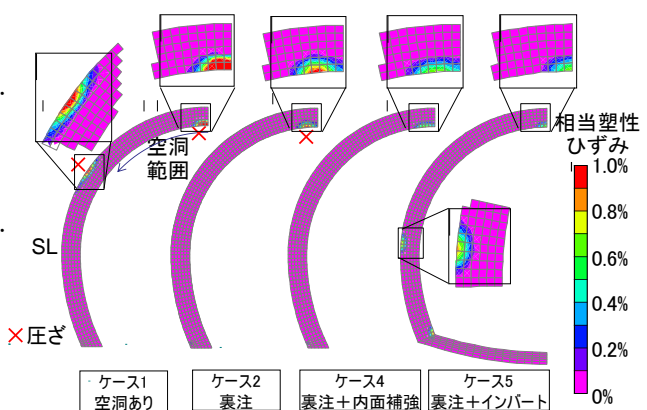


図11 覆工のひずみの分布の比較 ($D/L=1\%$ 時, 圧縮側のひずみのみ表)

発生するモードとなっている。ケース4は、ひずみ分布はケース2とほぼ同様であるが、ひずみレベルが少し小さくなっており、ケース2では $D/L=1\%$ 時に天端で圧ぎが確認できるが、ケース4では $D/L=1\%$ 時には天端では圧ぎが確認できなくなっている。ケース5は、天端部の他にSL部でもひずみの大きな箇所がみられる。

図12に、各ケースの $D/L=1\%$ 時のトンネルの水平変形率 δ_h/B 、路盤鉛直変位 u をケース1を1として比較する。裏注については、 δ_h/B 、 u ともにケース2はケース1とほぼ同じであり、変形抑制効果は確認できない。次に路盤RBについては、ケース3は u をケース1の50%程度に抑制する効果が見られる。ただし、図10で示したように u の絶対値が大きく、必要に応じてロックボルトによる補強量を増加させる必要があるといえる。次に内面補強に着目すると、ケース4は δ_h/B 、 u ともにケース2と同じであり、変形抑制効果は確認できない。インバートについては、ケース5はケース1に比べて δ_h/B 、 u ともに小さく、変形抑制に効果的であることが確認できる。

図13に、トンネルや覆工に変状（盤膨れ、圧ぎ）が生じるときの D/L をまとめる。裏注により、圧ぎが生じにくくなることがわかる。また、路盤RB、内面補強によっても若干の効果が期待できる。さらに、路盤RBにより盤膨れしにくくなり、またインバートにより盤膨れを防止できることがわかる。

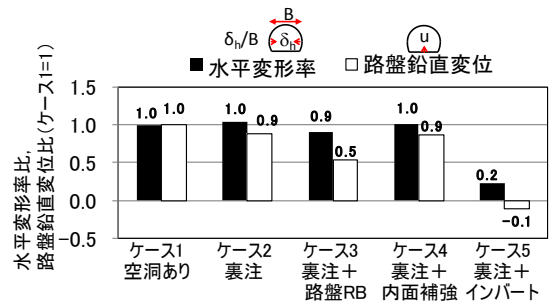


図12 水平変形率と路盤鉛直変位の比較

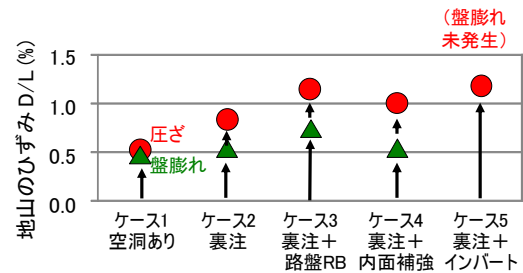


図13 変状が生じるときの地山のひずみ

5. 耐震補強の考え方

以上の成果を反映させ、地質不良区間でのトンネルの地震対策工を表1のように評価した。

裏込注入は、変形性能を向上させ、トンネルの安全性に大きな問題を与える天端の圧ぎを防止できるため、基本的な対策工と位置づける。

地震時にトンネルに外力が作用する可能性がある条件下、例えば、断層・破碎帯、過去に崩落を生じた箇所、土砂地山などの不良地山区間に該当する場合で天端背面に空洞がある場合に適用を検討する。これ以降の対策工は裏込注入に付加する形で実施する。内面補強は、トンネルの変形抑制効果は小さいが、ひび割れの発生抑制効果があるので、ひび割れ、剥落対策として適用する。路盤ロックボルトは、変形の抑制効果は小さいが、盤膨れの抑制には効果的である。地山強度比が小さく盤膨れが生じやすい地山や、過去に盤膨れの問題が生じた、あるいは現在そのような問題が生じている箇所などに適用を検討すればよい。インバートは既設トンネルで施工するには制約が多いが、変形の抑制には効果的で、また、盤膨れの抑止効果がある。

6. おわりに

地質不良区間における既設山岳トンネルの地震対策工を対象に、模型実験と数値解析の結果を示し、その結果として地震対策工の選定法を示した。なお、地震対策・震災復旧の手引きとして「既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル」（2010.11）を策定したので参考にして頂きたい。（本研究の一部は鉄道・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ました。）

表1 目的別の地震対策工の評価表

目的 対策工	変形性能の向上 (圧ぎ抑制)	ひび割れの抑制	変形の抑制	盤膨れの抑制
【基本】裏込注入	○	-	-	-
+内面補強	△	○	-	-
+路盤RB	-	-	-	-
+インバート	-	-	○	○

○：効果的，△：一部効果有り，-：目的外