

低土被り山岳トンネルの地震時の挙動の予測法

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

近年、施工技術の進歩により、未固結な地山からなる低土被り地山でも山岳トンネルが採用される事例が増えている。このような低土被り山岳トンネルは岩盤にある山岳トンネルと比較して地震被害を受けやすいといえる。しかし、山岳トンネルが地震により被災する条件は経験的に整理されているものの、地震時挙動や被害メカニズムを定量的に説明できる手法はなく、耐震検討法が確立されていないのが現状である。本研究では、低土被りトンネルの地震被害に着目し、計測によるトンネルの地震時挙動の解明、模型実験によるトンネルの耐震性能の把握、数値解析による実トンネルの耐震性能の確認と被害の予測を行い、成果を挙動予測法としてとりまとめた。

2. 低土被り土砂地山トンネルの地震時挙動

①事例

低土被り土砂地山トンネルの縦断面図の例を図1に示す¹⁾。このトンネルは全長 2.2km の全てが固結度の低い洪積地盤中に位置している。図2に同トンネルにおけるボーリング調査の結果を示す。トンネルはN値で40未滿、せん断弾性波速度 V_s で200m/sec程度場所に位置しており、地震時に地盤の変位がかなり大きくなることが予想される。

②地震時挙動の計測

上記トンネルにおいて、地震時に覆工に発生するひずみの計測が行われている¹⁾。土被りは1D程度(D:トンネル掘削外径)である。図3にひずみ計取り付け位置を示す。図4にアーチ左右両肩部の横断方向のひずみ計の計測結果の例を示す。この図は、同時刻におけるアーチ左右両肩部のひずみ計 (No.1, No.3) の値をプロットしたものである。図より、

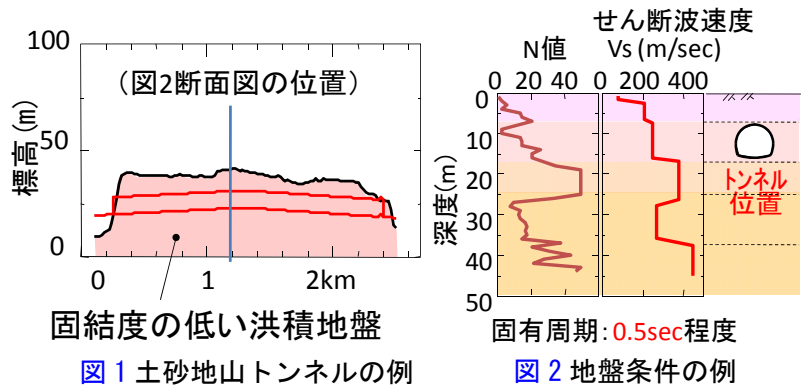


図1 土砂地山トンネルの例

図2 地盤条件の例

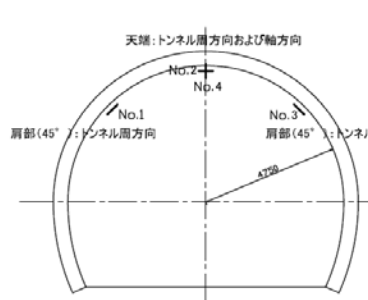


図3 ひずみ計取付位置

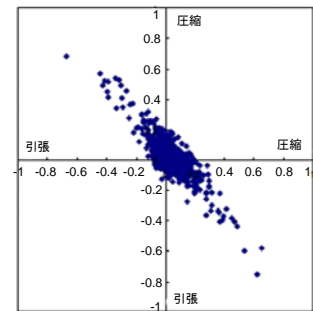


図4 ひずみの計測結果

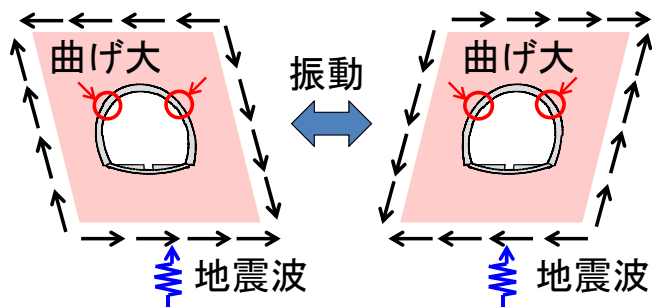


図5 計測結果から予想される振動モード

トンネルの右肩・左肩で、絶対値がほぼ等しく、正負が反対のひずみが生じており、トンネルは、**図5**に示すように、地震波が鉛直に入射して地盤がせん断変形を生じ、トンネルもそれに伴いせん断変形して、両肩部で曲げが大きくなっているものと予想される。

3. 模型実験

シールドトンネルや開削トンネルについてはその耐震性能について明らかになってきているが、山岳トンネルについては不明な点が多い。よって、実際に模型実験により耐震性能の確認を行った。2.で示したように、低土盛りトンネルの地震被害は地盤のせん断変形に起因して生じるものと考えられるため、実験はせん断土槽(**図6**)を用いて行った。本装置は、せん断土槽、ジャッキ、ロードセル、模擬地盤、トンネル模型等からなっている。ジャッキは油圧により制御され、ジャッキの载荷によるせん断土槽の変位が、模擬地盤を通じてトンネルの周囲の地盤のせん断変形としてトンネル模型に伝わる構造になっている。トンネル模型は在来工法により建設された新幹線標準断面のトンネルを想定した1/20スケール(巻厚25mm)のモルタル製の模型である。载荷は変位制御とし、交番载荷により静的に行った。実験ケースを**表1**に示す。

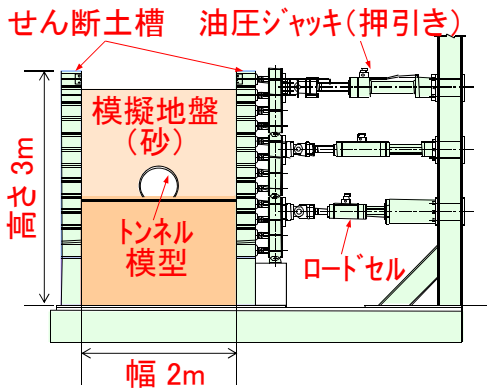


図6 せん断土槽の概要

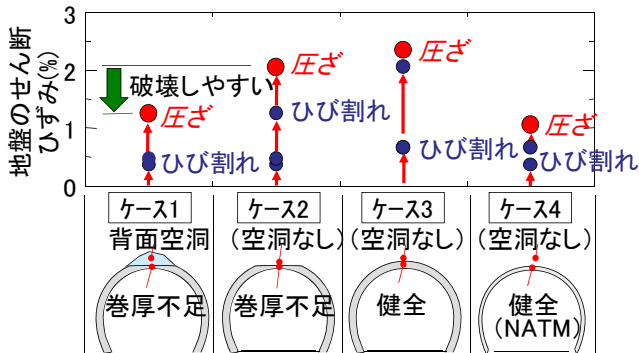
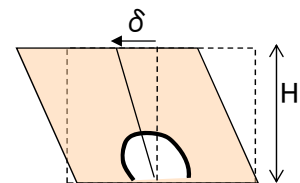


図7 ひび割れや圧ざが生じたときの地盤のひずみ

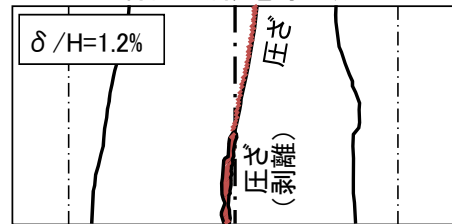
表1 実験ケース

ケース1	ケース2
背面空洞 巻厚不足 (正規の1/2)	(背面空洞なし) 巻厚不足 (正規の1/2)
ケース3 (背面空洞なし) 巻厚正規 (t=25mm)	ケース4 (背面空洞なし) NATM想定 (t=15mm)

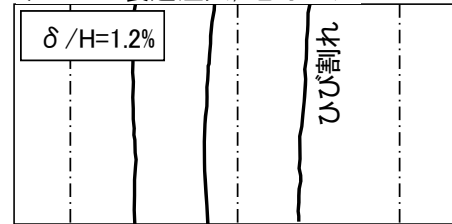


地盤のせん断ひずみ δ / H

ケース1: 背面空洞, 巻厚不足



ケース2: 裏込注入, 巻厚不足



ケース3: 健全

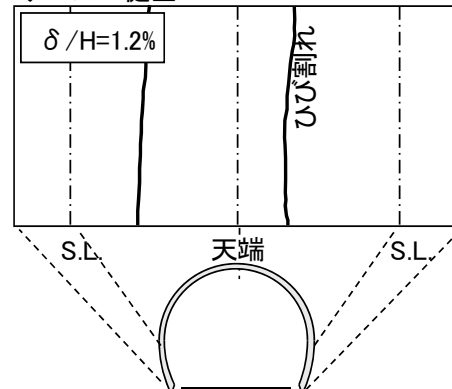


図8 変状展開図

実験結果として、ひび割れや圧ざ（天端部の曲げ圧縮破壊による剥離）が発生した時の地盤のひずみを図7に、地盤のせん断ひずみ $\delta/H=1.2\%$ の時の覆工の変状展開図を図8に示す。なお、 δ/H の定義は図8にあわせて示している。図8より、いずれのケースも地盤のせん断変形に伴いアーチ両肩部にひび割れが入っており、実際のトンネルの地震被害（図9）を再現できていることがわかる。また、図7、図8より、欠陥のあるケース、また健全でも巻厚が小さいケースにおいては、健全のケースと比べて小さな地盤のせん断ひずみでも変状が発生することがわかった。

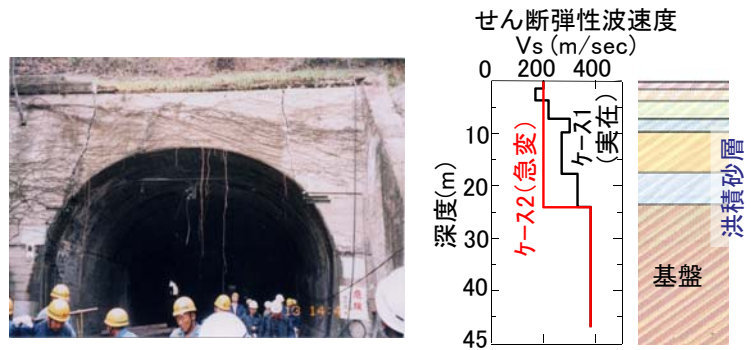
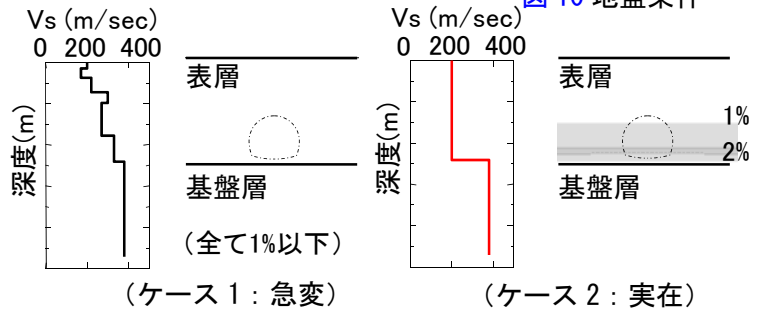


図9 被害事例

図10 地盤条件



(ケース1：急変)

(ケース2：実在)

図11 地盤応答解析の結果（地盤のせん断ひずみ）

4. 数値解析

次に、実際のトンネルの耐震性能の確認、被害を生じる条件の把握のために、数値解析を行うことにした。解析手法には地下構造物の耐震検討手法として用いられる応答震度法を用いることにした。解析の手順は①地盤応答解析による地盤のひずみや加速度の算出、②トンネルの構造解析によるトンネルの応答の算出の順である。

地盤応答解析においては、洪積地盤を想定し2種類の地盤条件を設定した。図10に地盤条件を示す。図11に地盤応答解析の結果として、地盤のせん断ひずみの分布を示す。図より、ケース1（実在）では地盤のせん断ひずみは1%以下であるが、ケース2（急変）では、基盤層と表層の境界付近において1~2%のせん断ひずみが生じることがわかる。図7によれば、ケース2については、地震によりトンネルに被害が生じる可能性がある。

次に、新幹線 NATM トンネルを想定し地盤応答解析で得られた加速度を作用させて、トンネルの構造解析を行い、応答（被害）を調べた。ここで、トンネルは被害が大きくなると予想される基盤直上にあるものとした。

図12にトンネル条件を示す。なお、覆工コンクリートについては、ひび割れの発生の考慮、圧ざの発生の判定ができるモデルを用いた。図13にトンネルの構造解析のモデルの概要を、図14にコンクリートのモデルの概要を示す。図15に、トンネルの構造解析の結果として、変形を示す。トンネルはせん断変形をしており、インバート~天端間の相対変位から求めた層間ひずみは、ケース1で0.7%、ケー

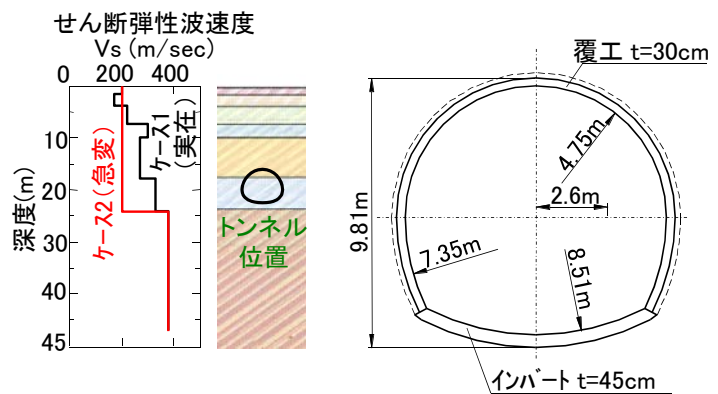


図12 トンネル条件

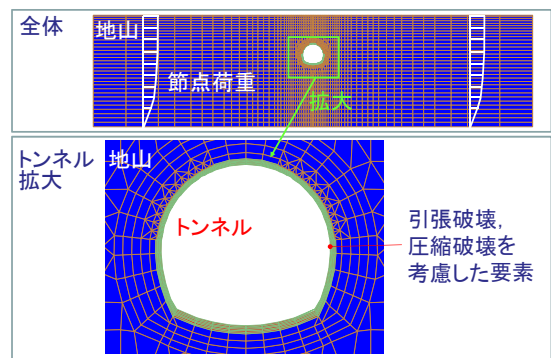


図13 トンネルの構造解析のモデル

ス2で1.9%となっている。図16に、トンネルに発生する塑性ひずみを示す。地震時にトンネルはせん断変形するため、両肩部にひずみが大きい部分が発生しており、例えば右側では地山側で引張、内空側で圧縮となっている。塑性ひずみによれば、ケース1においてはひび割れが、ケース2においてはそれに加えて圧縮が生じていることが確認された。

5. 地震時挙動の予測法

以上の成果を反映させ、低土被り山岳トンネルの地震時挙動予測法を提案した。図17に地震時挙動予測の流れを示す。まず、地盤応答解析により、地盤のひずみや加速度を算出する。ここでひずみが小さい場合は以降の検討は省略可能である。ひずみが大きい場合など詳細検討が必要な場合には、トンネルの構造解析を行う。構造解析においては、地盤応答解析で得られた加速度を作用させて、トンネルの応答（被害）を把握する。ここでは引張破壊や圧縮破壊の考慮が可能な解析手法を合わせて用いる必要があるが、地震、地質、地形、構造に応じた被害予測が可能となる。

6. まとめ

本研究では、低土被りトンネルの地震被害に着目し、計測によるトンネルの地震時挙動の解明、模型実験によるトンネルの耐震性能の把握、数値解析による実トンネルの耐震性能の確認と被害の予測を行い、成果を挙動予測法としてとりまとめた。本報告の成果は「耐震設計標準」等に反映し、山岳トンネルの地震時挙動の予測の実務に活用することを考えている。

(参考文献)

- 1) 朝倉俊弘, 小島芳之, 野々村政一, 宮林秀次, 磯谷篤実: 小土被りトンネルにおける地震時挙動に関する研究, トンネル工学報告集, vol.17, pp.209-213, 2007.11

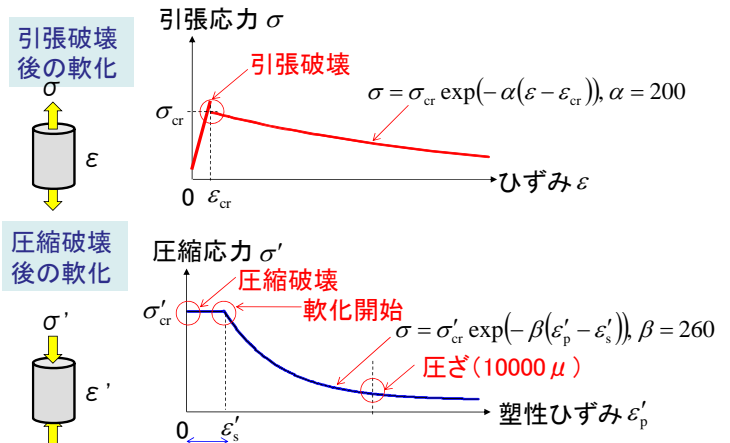


図14 コンクリートのモデルの概要

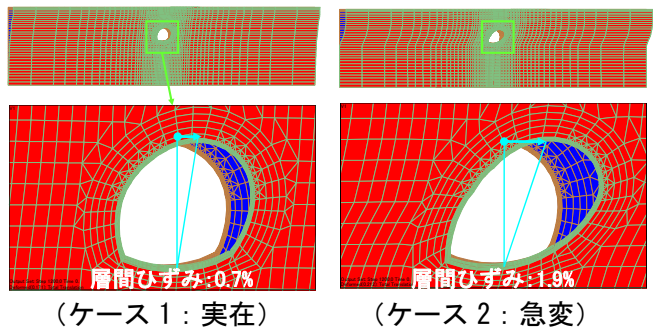


図15 トンネルの構造解析の結果(変形)(変形: ×20)

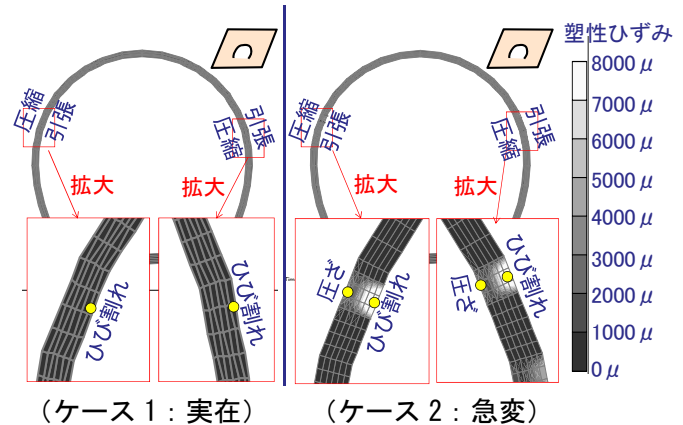


図16 トンネルの構造解析の結果(塑性ひずみ)

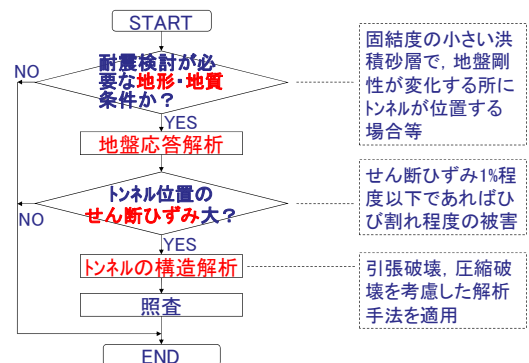


図17 地震時挙動予測の流れ