

# 山岳トンネルの地震時挙動に関する動的計測結果

日下 敦\* 砂金伸治\*\* 真下英人\*\*\*

## 1. はじめに

主として岩盤に掘削される山岳トンネルにおいては、過去の地震ではトンネル構造に大きな損傷を受けるのは非常に限定的な条件であり、一般に地震に強い構造物とされてきた。他方、断層破砕帯等の極端に地山の悪い箇所や不安定な斜面内、トンネル自体が既に変状を生じていた箇所、坑口部等では、比較的地震被害を受けやすいことが知られているものの、その被害発生メカニズムについては不明確な部分が多く、坑口部等において経験的に覆工の補強等の耐震対策を行っているのが現状である(例えば1)。そのような状況のなか、2004年新潟県中越地震では、上述の条件に当てはまらない箇所においても、数は限られるものの比較的規模の大きな覆工の崩落を伴うような被害を受けた山岳トンネルがあった2),3)。これは、地震の規模や地山条件等、トンネルの構造等によっては、山岳トンネルも地震による被害を受ける可能性があることを示唆している。このような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被害発生のメカニズムを明らかにし、耐震対策が必要となるトンネルの条件および効果的な耐震対策の方法とその設計法を確立する必要がある。

山岳トンネルは他の構造物と比べて地震による被害事例が少ないことから、実構造物における地震時の計測事例が比較的少なく、小土かぶり区間での計測事例4)はあるものの、大きな地震動がトンネルに作用した場合の動的挙動はほとんど明らかになっていない。そこで、既設の実トンネルに動的計測機器を設置したところ、トンネル周辺で震度6強～6弱の強い揺れを観測した地震において、トンネル覆工の動的な挙動に関するデータが得られたので、本稿でその結果を報告する。

## 2. 計測の概要

### 2.1 トンネル概要

計測機器を設置したトンネルは、図-1の場所に位置する宮城県石巻市所管のサンファントンネルである。トンネル周辺の地形を図-2に示す。本トンネルはNATMにより建設された延長689mの2車線道路トンネルで、2012年現在で竣工から約16年が経過している。周辺地山は砂岩および頁岩が主体で、明瞭な断層・破砕帯等の不良地山区間は記録されていない。なお、計測機器設置前の目視点検では覆工に目立った変状は確認されていない。

### 2.2 計測位置

本計測では、覆工表面にひずみ計を5箇所、加



図-1 トンネル位置(「電子国土」に加筆)



図-2 トンネル周辺の地形

Dynamic measurement of an actual mountain tunnel during a large earthquake

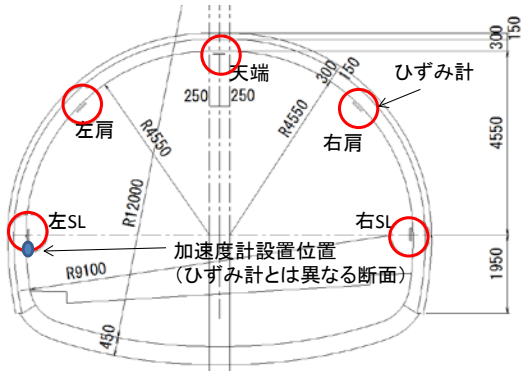


図-3 計測断面図

速度計を1箇所を設置し、動的計測を行った。

ひずみの計測断面は、図-2の公園側の坑口から約100m、土かぶり約40mの地点で、地山等級<sup>1)</sup>はDIであり、トンネル軸はほぼ東西方向を向いている。ひずみ計は図-3に示すように、天端、両肩部、左右SLの計5箇所を設置し、トンネル円周方向の軸ひずみを計測した。なお、左右はトンネル坑内から公園側坑口を向いた場合の方向である。

加速度は、ひずみ計測断面からさらに14mほど坑奥の左側側壁において、トンネル軸方向、横断水平方向、鉛直方向の計3成分について計測した。

### 2.3 観測対象の地震

計測した振動は、2011年4月7日23時32分ごろ宮城県沖で発生したマグニチュード7.1の地震によるものである。サンファントンネルは、この地震の震央から西北西約60kmに位置しており、近隣の宮城県栗原市、仙台市宮城野区で震度6強、石巻市でも震度6弱を観測するなど、トンネル周辺でも非常に強い揺れを観測した。

### 2.4 想定される地山の変形モードと覆工の挙動

既往の研究<sup>(例えば6)</sup>によると、地質の急変部にトンネルが位置するなどの特殊な場合や、覆工背面に空洞が存在するなどの構造的欠陥を有する場合等を除くと、地震によるトンネルの被害は大まかに図-4の3タイプに大別されると考えられる。これらを再現した簡易な静的数値解析によれば、各タイプの覆工内面のひずみは図-5のようになり、以下のような特徴を示す。

- TYPE-I: 覆工肩部にひずみが集中し、圧ざ(曲げによる圧縮破壊)や曲げ引張ひび割れが発生する。天端部にはほとんどひずみが発生しない。地震による地盤の変形としてもっとも基本的なモードとされている、地山のせん断変形により生じるものと考えられる。

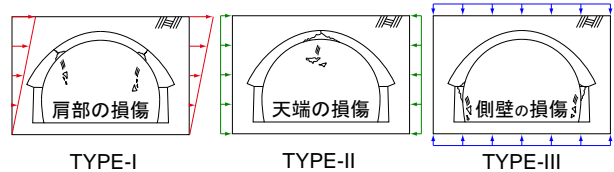


図-4 地震による山岳トンネルの主な被害タイプ

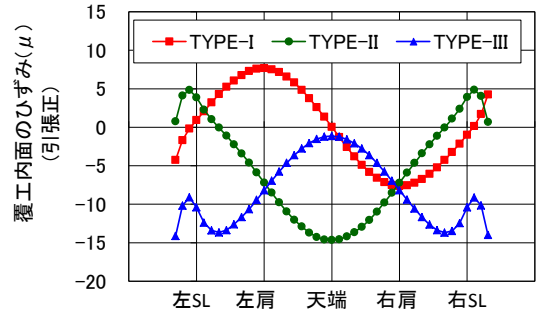


図-5 地山の変形モードに対する覆工内面の縁応力・ひずみモード(文献6)のデータをもとに作成)

- TYPE-II: 覆工天端部に圧縮ひずみが集中し、圧壊(軸力によるせん断破壊)や圧ざが発生する。地山の水平圧縮変形により生じるものと考えられる。
- TYPE-III: 覆工側壁部に圧縮ひずみが集中し、圧壊や圧ざが発生する。とくに矢板工法で施工された側壁とアーチ部の継ぎ目に見られることが多い。地山の鉛直圧縮変形により生じるものと考えられる。

## 3. 計測結果

### 3.1 覆工側壁の加速度およびその積分値

図-6は、サンファントンネルの覆工側壁で計測された加速度の時刻歴波形である。最大加速度は200 gal程度と比較的大きな値で、3成分とも大差はなかった。なお、最寄りのK-net観測点(MYG010石巻)で得られた地表面の最大加速度は300 gal程度であった。トンネルとK-net観測点は約8 km離れており、地盤条件も異なるため、単純に比較はできないが、トンネル内での加速度は地表部と比べてやや小さいものであった。

図-7は、加速度波形を積分(10秒以上の長周期成分は除去)し、速度波形を求めたものである。水平成分(トンネル軸方向および横断水平方向)の最大振動速度は約10 cm/sであった。ここで、覆工側壁で得られた最大水平振動速度から地山のせん断ひずみ $\gamma$ を推定すると<sup>7)</sup>、S波速度 $V_s = 1 \text{ km/s}$ の地山では $\gamma = 100 \mu$ 程度、 $V_s = 300 \text{ m/s}$ の軟質な地山としても $\gamma = 300 \mu$ 程度である。また、

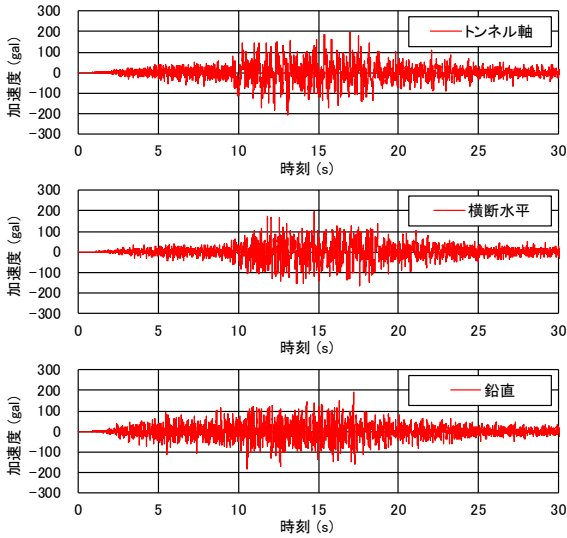


図-6 サンファントンネル側壁の加速度波形

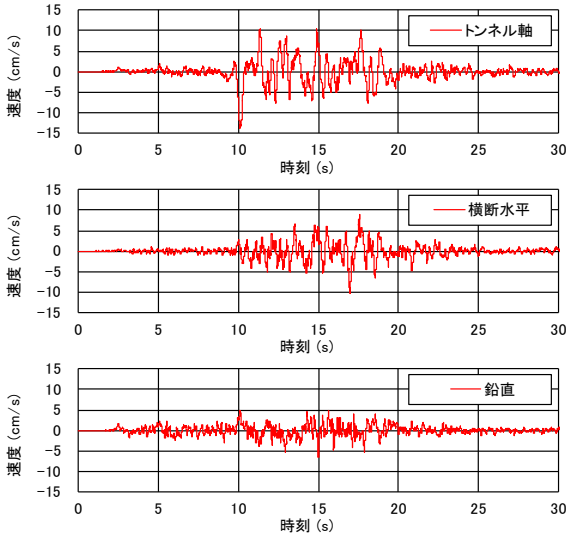


図-7 サンファントンネル側壁の速度波形

最大鉛直振動速度の約5 cm/sをもとに地山の鉛直圧縮ひずみ  $\epsilon$  を同様に推定すると、P波速度  $V_P = 1$  km/sの軟質な地山でも  $\epsilon = 50 \mu$  とやはり小さい値であることが分かる。

### 3.2 覆工のひずみ

図-8は、覆工のひずみの時刻歴波形を示したものである。ひずみは引張が正となるよう示してある。比較的大きなひずみが発生した箇所は天端と右肩であるが、いずれの箇所においても、発生したひずみは圧縮側、引張側ともに高々20  $\mu$  程度であり、一般的な覆工コンクリートの弾性挙動範囲内と言える小さな値であった。実際に、地震後に行ったトンネル目視点検では、監査歩廊に軽微な浮き上がり等は見られたものの、覆工には目立った変状が確認されていない。ただし、部位によっては5  $\mu$  程度の残留ひずみが生じており、地震動が繰り返し作用した場合の影響は今後検討す

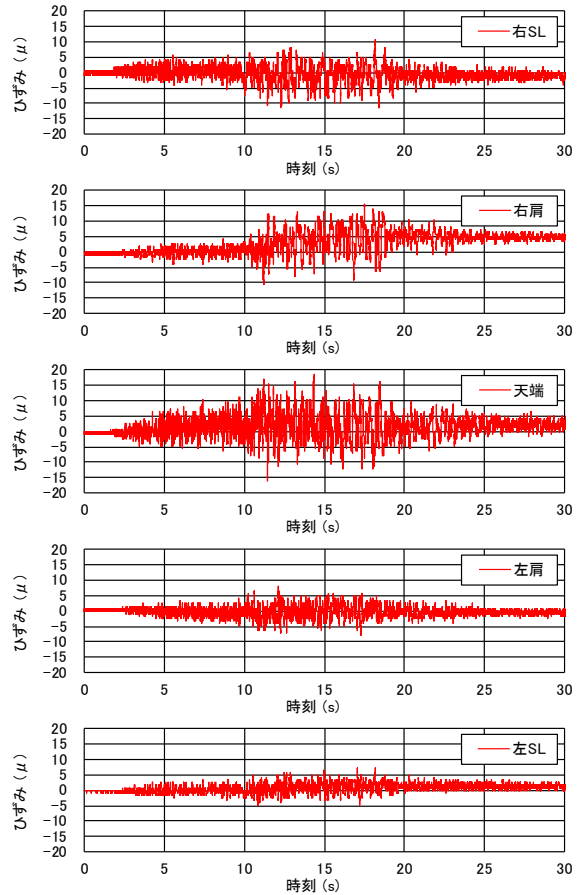


図-8 サンファントンネル覆工ひずみ時刻歴

る必要があるものと思われる。

図-9は、最大圧縮ひずみが発生した、時刻11～12秒付近のひずみ値を示したものである。この時刻の範囲で圧縮ひずみが極大となった着目時刻①～⑦におけるひずみの分布を示すと図-10のようになった。この分布を見ると、図-5に示したひずみのモードと完全に一致するものではないが、地山がせん断変形したというよりは、むしろ水平圧縮変形あるいは鉛直圧縮変形した場合の、TYPE-IIあるいはIIIのモードに近いと思われる。

また、図-5に示した解析によると、覆工内面に20  $\mu$  程度の圧縮ひずみが発生させるための地山の圧縮ひずみは50  $\mu$  程度であり、前節で推定した地山のひずみ値と概ね整合しているものと考えられる。これらのことは、従来最も基本的な地震時の地山の変形モードと考えられている地山のせん断変形だけでは説明しがたい挙動が観測されたことを示しており、今後、山岳トンネルの地震対策を考える上では、せん断変形以外の地山の変形モードも考慮に入れる必要があることを示唆しているものと考えられる。



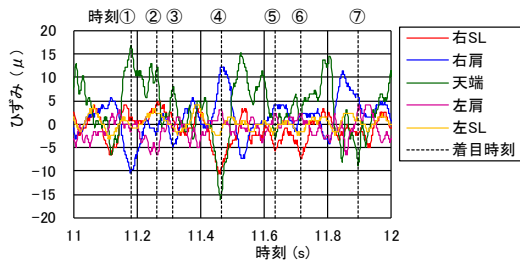


図-9 覆工内面のひずみ時刻歴 (11～12秒)

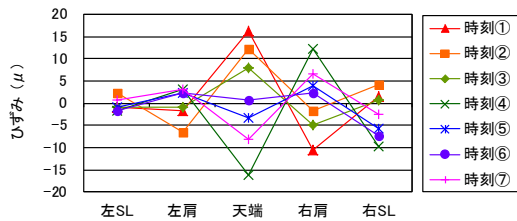


図-10 着目時刻における覆工内面のひずみ分布

ネルでも顕著な被害が発生した新潟県中越地震のような直下型地震の地震動特性の差異や、不良地山区間や小土かぶり区間等で大きな地震動が作用した場合のトンネルの挙動等、山岳トンネルの耐震対策を考えていく上で解明すべき課題は多く残されている。今後は、これらの課題や事象についても検討を続けていきたいと考えている。

謝 辞

本計測データは、石巻市の全面的な協力のもと、東北地方太平洋沖地震発生以前から計測機器を設置して得られたものである。石巻市の関係各位に深甚なる謝意を表すとともに、順調に復興が進むことを心より祈念する。

4. おわりに

本稿では、トンネル周辺で震度6強～6弱の強い揺れを観測した地震において、トンネル一般部の覆工の動的挙動を計測した結果を示した。覆工側壁部の表面に設置した加速度計で計測した加速度は、周辺の地表面で観測されたK-netの加速度記録と比較すると若干小さいものの、最大で約200 galという比較的大きな値を記録した。一方で、天端・肩部・側部の内空側覆工表面のひずみは、圧縮側・引張側とも高々20μ程度であった。これらの結果は、数百galを観測する大きな地震動が作用した場合でも、トンネル一般部の覆工は変状が発生するほどの影響を受けないことがあることを示唆しており、従来から他の構造物と比較して地震に強いと経験的に言われてきたトンネルの特徴を裏付けるものと考えられる。

ただし、本計測は、ある特定の地震での、トンネル一般部におけるただ1地点の計測結果ではない。また、今回観測された海洋型地震と、トン

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル技術基準(構造編)・同解説、丸善、2003。
- 2) 真下英人：新潟県中越地震における道路トンネルの被害、トンネルと地下、第36巻、第11号、pp.55～63、2005。
- 3) 清水満、齋藤貴、鈴木尊、朝倉俊弘：新潟県中越地震による鉄道トンネル被害調査結果、トンネルと地下、第38巻、第4号、pp.49～57、2007。
- 4) 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、トンネル工学研究報告集、Vol.17、pp.209～213、2007。
- 5) 気象庁ウェブサイト：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第34報)、<http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/08b/201104080115.html>、2011年8月5日閲覧。
- 6) 日下敦、真下英人、砂金伸治、角湯克典：山岳トンネルにおける覆工構造と地震時挙動の関係に関する一考察、トンネル工学報告集、Vol.20、pp.1～8、2010。
- 7) 日下敦、砂金伸治、真下英人、角湯克典：トンネルにおける地震時の地山のひずみに関する一考察、土木学会次学術講演会概要集、第65回、No.3-415、pp.829～830、2010。

日下 敦\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所道路技術研究グループ  
トンネルチーム 研究員  
Atsushi KUSAKA

砂金伸治\*\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所道路技術研究グループ  
トンネルチーム 上席研究員、博(工)  
Dr. Nobuharu ISAGO

真下英人\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所道路技術研究グループ  
長、博(工)  
Dr. Hideto MASHIMO