

山岳トンネルの地震時挙動に関する計測

日下 敦¹・砂金 伸治¹・真下 英人¹・角湯 克典²

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)
E-mail: kusaka@pwri.go.jp

²独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

山岳トンネルは一般に地震に強い構造物とされているが、新潟県中越地震ではこれまで耐震対策が不要とされてきた一般部においても比較的規模の大きい覆工の崩落を伴うような被害が発生した。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、地震時のトンネルの挙動を明らかにし、山岳トンネルの地震時における被害発生メカニズムを解明する必要がある。一方で、実トンネルの挙動に関する地震時の計測事例はほとんどなく、その特性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。

Key Words : mountain tunnel, seismic damage, seismic measurement

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、断層破碎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

(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、トンネルの概要を表-1 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、2011 年現在で竣工から約 15 年が経

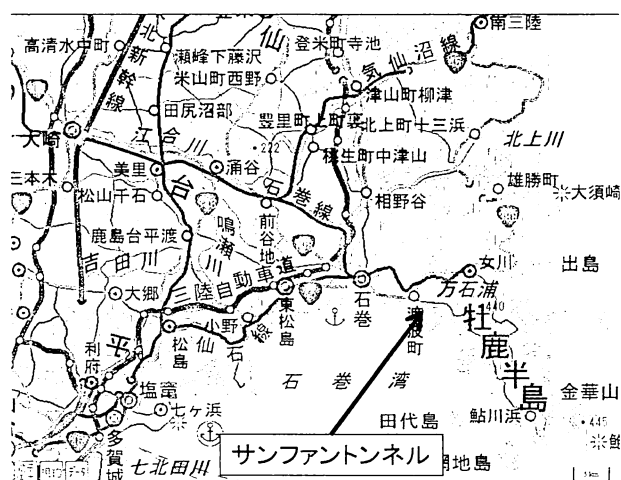


図-1 トンネル位置(「電子国土」に加筆)

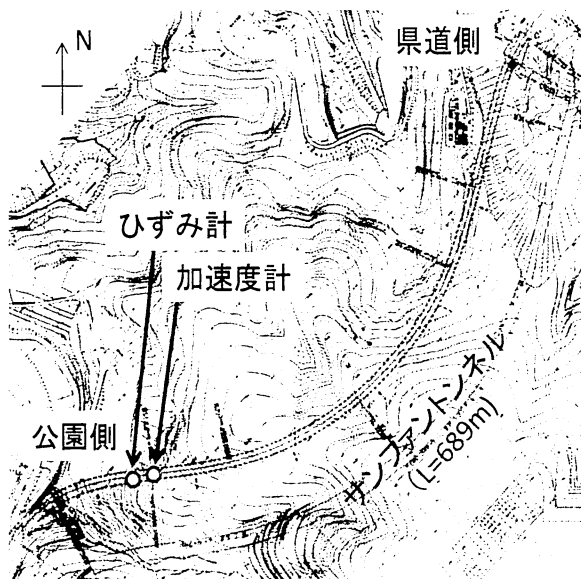


図-2 トンネル周辺の地形

表-1 トンネルの概要

名称	サンファントンネル
管理者	石巻市
用途	2車線道路トンネル
延長	689m
竣工年	1996年
工法	NATM
地質	砂岩・頁岩主体

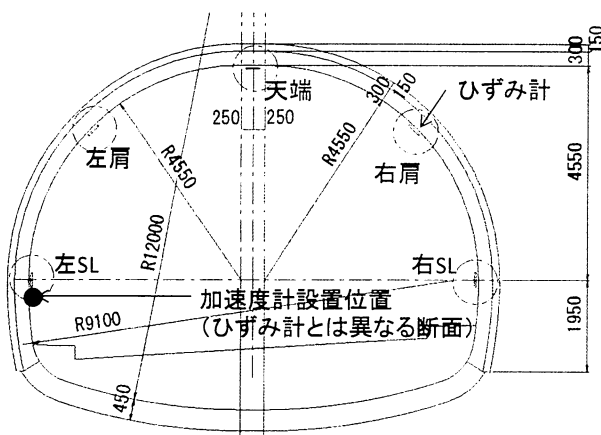


図-3 計測断面図

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・破碎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) 計測位置

本計測では、覆工表面にひずみ計を5箇所、加速度計を1箇所を設置し、動的計測を行った。

ひずみの計測断面は、公園側坑口から約100m、土かぶり約40mの地点で、地山等級¹⁾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

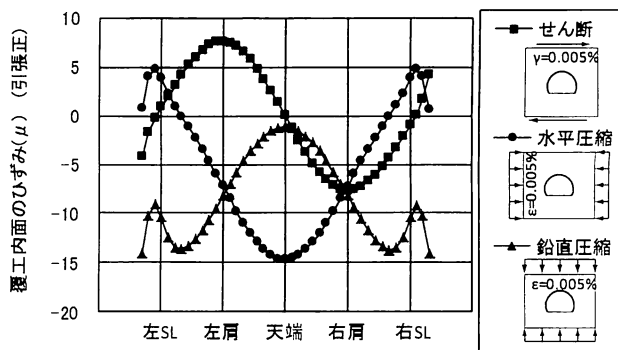


図-4 地山の変形モードに対する覆工内面の縁応力・ひずみモード (文献⁹⁾のデータをもとに作成)

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。

(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7.4(気象庁暫定値)の地震によるものである。この地震では、宮城県栗原市、仙台市宮城野区で震度6強を観測するなど、トンネル近隣でも非常に強い揺れを観測した⁵⁾。サンファントンネルは、この地震の震央から西北西約60kmに位置している。

(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^{例えは6)}によると、地震による肩部や天端、側壁部の変状は、主として地山がせん断変形、水平圧縮変形、鉛直圧縮変形することにより説明できる可能性が高い。D等級¹⁾の地山を対象とした簡易な線形解析⁹⁾によると、直径約11m、覆工厚30cmのインバートを有するトンネルにおいて、それぞれの変形モードで地山に0.005%のひずみが発生した場合の覆工内面のひずみ分布は図-4のようになり、以下のような力学的挙動を示すことが分かっている。

- ① 地山がせん断変形した場合：肩部にひずみが集中し、天端にはほとんどひずみが発生しない。両肩部でひずみの正負は逆転する。地山のせん断ひずみが0.5%を超えると肩部に圧縮破壊を生じる可能性がある。
- ② 地山が水平圧縮変形した場合：天端付近に大きな圧縮ひずみが発生する。地山の水平圧縮ひずみが0.25%を超えると天端に圧縮破壊を生じる可能性がある。
- ③ 地山が鉛直圧縮変形した場合：側壁に大きな圧縮ひずみが発生する。地山の鉛直圧縮ひずみが0.3%を超えると側壁に圧縮破壊を生じる可能性がある。

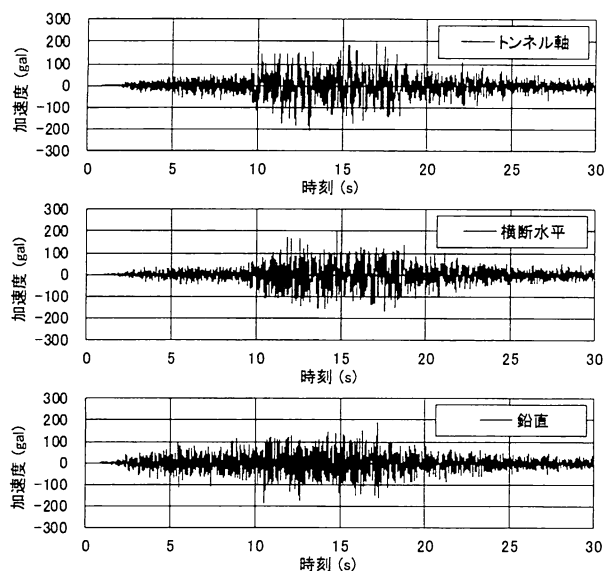


図-5 サンファントネル側壁の加速度波形

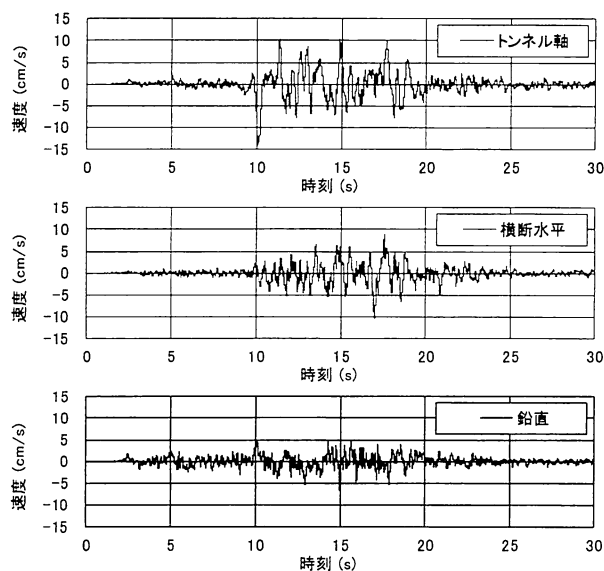


図-6 サンファントネル側壁の速度波形

なお、上述の事象は、背面空洞が存在しない前提で、地山の弾性係数 150 MPa、ポアソン比 0.3 という限られた条件にて得られた結果であり、直ちにサンファントネルに適用できるものではないが、目安として示したものである。

3. 計測結果

(1) 覆工側壁の加速度およびその積分値

図-5 は、サンファント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 200gal 程度と比較的大きな値であったが、3 成分とも大差はなかった。

図-6 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

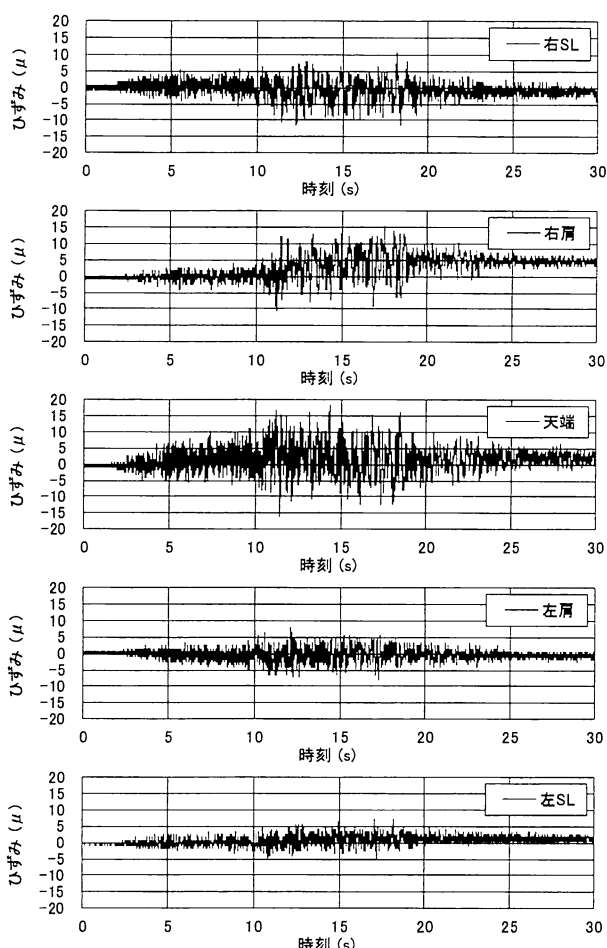


図-7 サンファントネル覆工ひずみ時刻歴

10 cm/s であった。ここで、覆工側壁で得られた波形が地山のものと同一定し、せん断波が鉛直下方方向から入射した場合の地山のせん断ひずみ γ が水平振動速度 u' と S 波の伝播速度 V_s の比 u'/V_s で表されること (例えば) を考慮すると、 $V_s = 1 \text{ km/s}$ の地山では $\gamma = 0.01\%$ 程度、 $V_s = 300 \text{ m/s}$ の軟質な地山としても $\gamma = 0.03\%$ 程度であり、2. (4) の①で示した覆工に圧縮破壊が生じる可能性のある $\gamma = 0.5\%$ と比較すると小さな値であることが分かる。また、鉛直成分の最大振動速度は約 5 cm/s であり、鉛直振動速度 v' と P 波の伝播速度 V_p の比 v'/V_p で求められる地山の鉛直圧縮ひずみ ε を同様に求めると、 $V_p = 1 \text{ km/s}$ の軟質な地山でも $\varepsilon = 0.005\%$ とやはり小さい値であることが分かる。

(2) 覆工のひずみ

図-7 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 μ 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。ただし、部位によっては 5 μ 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る必要があるものと思われる。

図-8 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-9 のようになった。この分布を見ると、図-4 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モードに近いと思われる。また、覆工内面に 15 μ 程度の圧縮ひずみを生じさせるための地山のひずみは、図-4 に示した解析結果によると 0.005% 程度であり、前節で示した、側壁で計測された加速度から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变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变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。

4. おわりに

本計測では、近隣の自治体で震度 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。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 200gal 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 20 μ 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場合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 地点の計測結果でしかなく、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

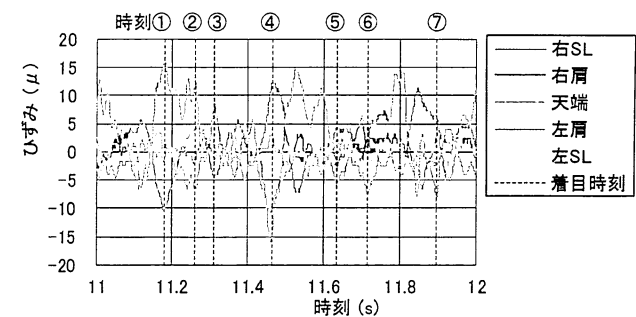


図-8 サンファントンネル覆工内面のひずみ時刻歴 (11～12 秒)

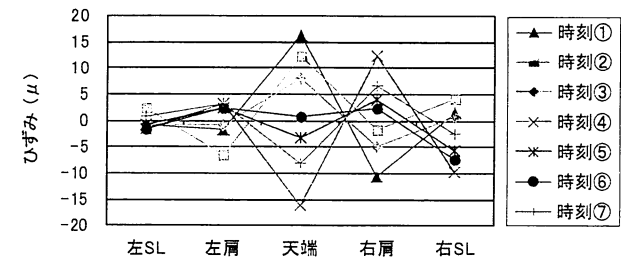


図-9 着目時刻における覆工内面のひずみ分布

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。

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 年.
- 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.

DYNAMIC MEASUREMENT ON ACTUAL MOUNTAIN TUNNEL

Atsushi KUSAKA, Nobuharu ISAGO, Hideto MASHIMO and Katsunori KADOYU

A few mountain tunnels suffered severe damage such as collapse of lining from large earthquake in Japan in 2004, though mountain tunnel has been empirically supposed to be a strong structure against earthquake rather than other structures. Thus, rational countermeasures should be established in order to minimize such damages under budget constraint. However, dynamic behavior of actual tunnel is as yet not well known, since there is no precedent for dynamic measurement during large earthquake. Therefore dynamic measurement instrument was attached in an actual mountain tunnel, so that large earthquake occurred in 2011 and dynamic data was obtained. The paper describes the results.