

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

(独)土木研究所	正会員	○日下敦
同	正会員	砂金伸治
同	正会員	真下英人
同		角湯克典

1. はじめに

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、近年の大地震で被害を受けたトンネルもあり、耐震対策技術に関する研究が進められてきている。しかし、地震時のトンネル周辺地山の挙動についてはほとんど解明されておらず、トンネル覆工の被害状況から類推するにとどまっている。本稿では、地震時における地中の加速度計測結果から、トンネル周辺地山に発生し得る変形量を試算したので報告する。

2. 地震動によるトンネル周辺地山の変形

図-1のように、地震によるせん断波(S波)が鉛直上向きに伝播している場合を考える。この地震波による地山の水平変位を u (ここでは鉛直変位 $v = 0$) とすると、地山のせん断ひずみ γ は次式により表される。

$$\gamma = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \quad (1)$$

ここで、 $\partial u / \partial t$ が地山の振動速度 u' であること、 $\partial y / \partial t$ が波の伝播速度(S波速度) V_s であることを考慮すると、 γ は次式で表される。

$$\gamma = \frac{\partial u}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{u'}{V_s} \quad (2)$$

3. 計測地震動による地山のひずみの推定

(1) 地山のひずみの推定方法

式(2)において、地山の弾性波速度である V_s は地質調査や施工時計測等により推定できる。一方で、地震時の地山の振動速度である u' を正確に予測するのは困難である。そこで本稿では、基盤強震観測網(KiK-net)により計測された地震時における地中の加速度記録から、速度応答スペクトルを算定し、その値を地山の振動速度 u' とみなすことで、地山のひずみ γ を算定することとした。

なお、応答スペクトルは、1質点1自由度減衰系の構造物における地震時応答を示したものであるため、必ずしも直ちに地山に適用できるものではない。しかし、本稿では簡単のため、トンネル周辺の地山が、ある固有周期と減衰定数を有する1質点1自由度系相当の物性として挙動するものと仮定し、検討を行った。

(2) 実測地震波の速度応答スペクトルによる地山のひずみ

図-2, 3は、山岳トンネルの被害が確認された地震である2004年新潟県中越地震および2008年岩手・宮城内陸地震について、震災近傍のKiK-net観測点で計測された地中加速度から、地山の減

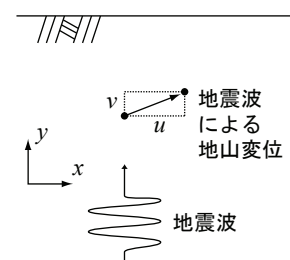


図-1 地震波の概要

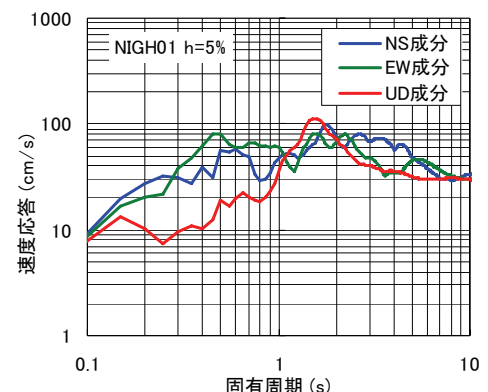


図-2 新潟県中越地震における長岡観測点(深さ100 m)の速度応答スペクトル

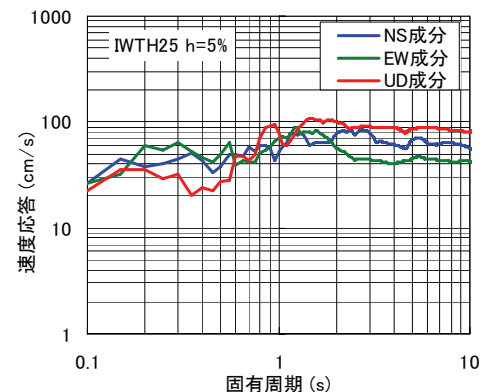


図-3 宮城・岩手内陸地震における一関西観測点(深さ260 m)の速度応答スペクトル

キーワード トンネル, 地震, 応答スペクトル

連絡先 〒305-8516 つくば市南原1-6 (独)土木研究所 道路技術研究グループ(トンネル) TEL 029-879-6791

衰定数 $h = 5\%$ と仮定したときの速度応答スペクトルを求めたものである。この水平成分 (NS 成分および EW 成分) から、地山の固有周期によっては最大で $u' = 100 \text{ cm/s}$ の応答速度となることが分かる。この値を式(2)に適用すると、地山のひずみは、 $V_S = 200 \text{ m/s}$ の場合で $\gamma = 0.5\%$ 程度となることが分かる。

(3) 地山ひずみ量の評価

ここで、地山に上述のせん断ひずみが発生した場合のトンネル覆工への影響を検討するため、簡易な静的線形弾性解析を行った。解析条件は、2車線山岳道路トンネルを想定し、図-4 および表-1 に示すとおりとした。なお、覆工と地山は剛結であり、インバートおよび支保工はモデル化していない。

覆工の変形モードは図-5 に示すようなり、覆工の天端と脚部の相対水平変位は 53 mm となった。このときに覆工に発生している縁応力（曲げモーメントおよび軸力によるもの）は、図-6 に示すようになり、一般的な覆工コンクリートの基準強度 $f_{ck} = 18 \text{ N/mm}^2$ を超える圧縮応力が右肩部で、引張強度 $1.6 \text{ N/mm}^2 (= 0.23f_{ck}^{2/3})$ を超える引張応力が左肩部で発生した。すなわち、(2) で試算した地山のひずみ量は、トンネル覆工に何らかの変状を発生させるのに十分な値であると考えられる。

4. おわりに

本稿では、地中で観測された地震波の応答スペクトルを利用して、地震時における地山のひずみを推定した。本検討では、地山の固有周期や減衰定数等が不明確であるにも関わらず、地山が1質点1自由度減衰系に相当するものとして計算していることや、トンネルの影響（空洞および覆工の剛性）を考慮せず地山のひずみを算定していること等、多くの仮定を含んだ結果ではあるが、地山条件等によっては、地震時に発生する地山のひずみ量がトンネル覆工に変状を発生させるに足る値となる可能性があることを示した。

今後は、上述の仮定の妥当性を検証するとともに、地震動がトンネルに及ぼす影響を簡易に推定する方法について検討していきたいと考えている。また、本稿で示した式(2)は、鉛直方向の振動に応用することで鉛直地震動（P 波）にも適用できると考えられ、この影響についても検討していきたいと考えている。

謝辭

本稿では、(独)防災科学技術研究所が運用している基盤強震観測網 (KiK-net) の観測データを使用するとともに、同研究所で開発されたプログラム **SMDA** を使用してスペクトル解析を行った。ここに記して謝意を表す。

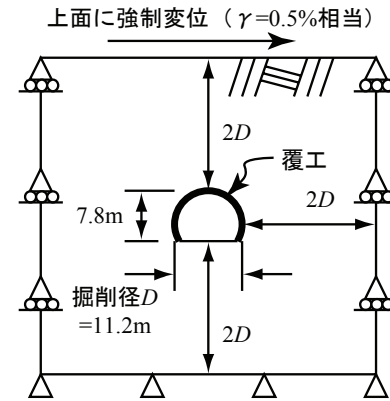


図-4 解析モデル

表-1 解析条件

想定する変形モード		せん断変形
拘束条件	底面	固定
	側面	鉛直固定
荷重条件 (強制変位)	変位を与える箇所	上面
	変位の方向	水平右方向
	変位量(mm)	263 (地山ひずみ $\gamma=0.5\%$ に相当)
覆工 物性値	要素	はり
	弾性係数(MPa)	22,000
	ポアソン比	0.20
	厚さ(cm)	30
地山 物性値	要素	平面ひずみ
	弾性係数(MPa)	250
	ポアソン比	0.33

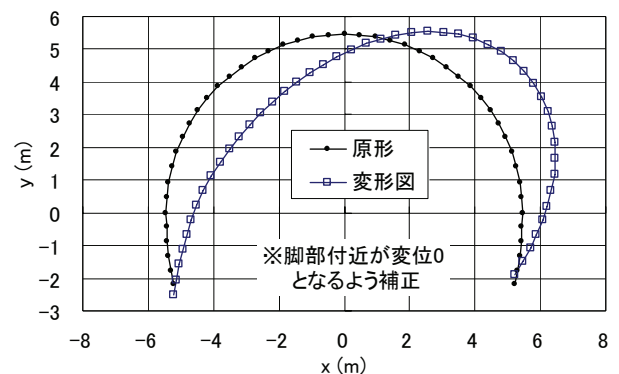


図-5 覆工の変形図 (変位 30 倍)

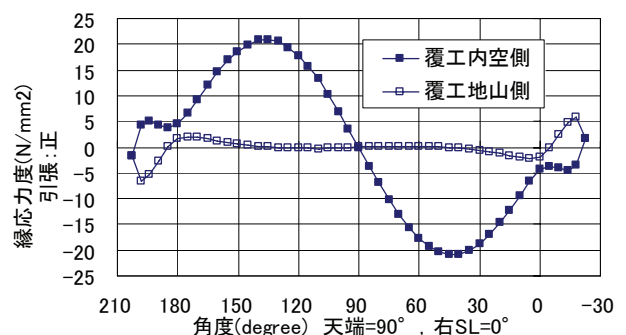


図-6 覆工の縁応力