

山岳トンネルの地震被害調査結果に基づく耐震性評価

深田地質研究所 フェロー会員 ○亀村 勝美

1. はじめに

これまで山岳トンネルは地震に対し、①岩盤中の地震動が表層の軟弱地盤での増幅がないため小さい、②岩盤内の構造物は地表構造物のように固有の振動をするのではなく、周辺岩盤と同一の動きをする、などから強いとされ、一般的な岩盤トンネルでは耐震性の検討が行われることはなかった。しかし、近年の大規模な被害地震では山岳トンネルにおいても多くの地震被害が生じており、山岳トンネルについても地震時にどのような挙動をし、どこまでその構造的安定性を保つことが出来るのか、あるいはどのような補強対策を講じることが出来るのか、など具体的な耐震性の検討が求められている。

しかし模型実験や数値解析による山岳トンネルの耐震性の検討は設定条件に限りがあり、地震時挙動に関する十分なデータがない中、一般論としての耐震性を評価するまでには至っていないのが現状である。ここではこれまでに得られている山岳トンネルの地震被害データを分析することによって山岳トンネルの耐震性を評価することを試みる。

2. 山岳トンネルの地震被害

土木学会トンネル工学委員会は、数多くの山岳トンネルが被災した新潟県中越地震（マグニチュード6.8）について「新潟県中越地震特別小委員会」を設け、地震被害の全容をまとめた¹⁾。そこには道路トンネル、鉄道トンネル、導水路トンネルなど138のトンネルについて被害状況が示されている。

138のトンネルの被害程度をトンネル工法で分類すると表-1のようになる。ここに被害程度大は、大規模な補強・補修を必要とした被害。被害程度中は、補修・補強を必要とした被害。被害程度小は、補修・補強を必要としなかった軽微な被害。被害程度無は、被害報告なしである。

表-1 新潟県中越地震による山岳トンネル被害状況

被害程度	トンネル数				割合		
	全体	矢板	NATM	開削	全体	矢板	NATM
大	11	10	1	0	8.0%	9.6%	3.0%
中	14	13	1	0	10.1%	12.5%	3.0%
小	24	17	6	1	17.4%	16.3%	18.2%
無	89	64	25	0	64.5%	61.5%	75.8%
計	138	104	33	1			

全体の18%、25本のトンネルに補修・補強を必要とする被害が生じている。トンネルの工法別で見ると被害程度大と中を合わせた割合は、矢板工法では22%もの割合になっているのに対し、NATMではわずか6%であり工法による被害率の差は明らかである。これはトンネルの建設年代による経年劣化の影響もあるが、何よりも工法の違いによりNATMでは覆工の本来持っている耐荷力が発揮されるようになったためと考えられる。

表-2 関東地震によるトンネル被害状況

詳細なトンネルの地震被害調査は関東地震（マグニチュード7.9）の際にも行われており、その結果は吉川らによってまとめられている²⁾。その結果を特殊条件の有無に分類して表-2に示す。ここに特殊条件とは、①不安定地形、地質、②工事中の事故、災害、③震災前の変状、④施工中である。このように

被害程度	トンネル数			割合		
	全体	特殊条件なし	特殊条件あり	全体	特殊条件なし	特殊条件あり
大	25	5	20	16.3%	4.1%	62.5%
中	11	5	6	7.2%	4.1%	18.8%
小	57	51	6	37.3%	42.1%	18.8%
無	60	60	0	39.2%	49.6%	0.0%
計	153	121	32			

何らかの特殊条件を有するトンネルの被害率は大きくなっている。また、関東地震における最大震度7の領域は中越地震と比較すると格段に広く、被害程度大の割合はおよそ倍になっている。

これまでこうした地震被害と地震の関係を震源からの距離で論じてきた³⁾が、より具体的に耐震性について議論するために地震動との関係で評価する。

キーワード 山岳トンネル, 地震被害, 耐震性

連絡先 〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12 (公財) 深田地質研究所 TEL03-3944-8010

3. 地震動と山岳トンネル被害の関係

中越地震における被害トンネルの分布図¹⁾と気象庁発表の震度分布図を重ね合わせ震度ごとの被害状況をまとめると表-3および図-1のようになる。

震度5強(5+)まではほとんど被害は生じないが、6弱(6-)になると軽微な被害(被害程度小)が生じ始め、矢板トンネルでは一部被害程度中の被害が生じている。そして震度6強(6+)では、およそ70%のトンネルで何らかの被害が生じ、大規模な補強・補修を必要とするような被害(被害程度大)が生じ始める。被害程度大は矢板トンネルでNATMトンネルのおよそ倍になっている。

同様にして吉川による関東地震におけるトンネル被害の分布図²⁾を諸井らが住宅被害データに基づき推定した震度分布図⁴⁾を重ね合わせ、震度と被害率の関係をまとめた結果を表-4に示す。

関東地震において調査対象となったトンネルの多くは覆工材料として石材やレンガを用いており、中越地震における調査対象のトンネルとは地震時挙動は異なると考えられる。以下では土被り厚や地質など個々のトンネルの耐震性に影響すると考えられる因子については無視し、覆工構造の違いだけに着目して耐震性を考える。

6強(6+)での被害率を比べると被害程度大と中を合わせた割合は、関東地震・特殊条件なし:15%<中越地震・NATM:33%<中越地震・矢板:61%となっており、石材やレンガで構築された覆工の耐震性が高いことが推定される。一方で6弱、5強での被害程度小の割合が関東地震・特殊条件なしのトンネルで多いことと合わせて考えると、石材やレンガで構築された覆工は変形性に富み、トンネル周辺地山の地震時変形にある程度追従することが出来ていたと考えられる。

4. おわりに

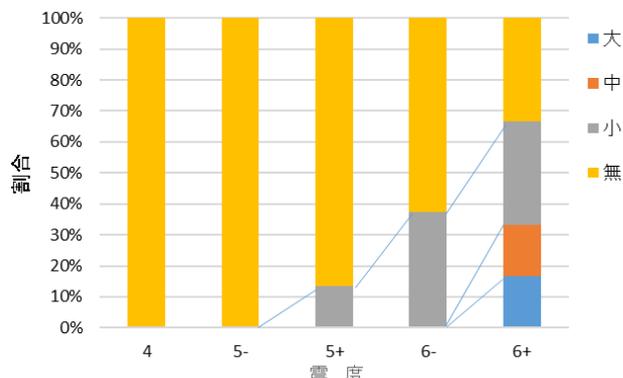
既往の地震被害調査結果に基づいて山岳トンネルの耐震性を評価し、震度6強以上の地震により補修・補強を必要とする被害が発生し始めることを示した。図-1に示した地震動の大きさと損傷の割合の関係は、地震リスク評価における脆弱性曲線に他ならず、これを用いて山岳トンネルの地震リスクの評価を行うことができる。今後は山岳トンネルの地震被害リスクの定量的な評価を試み、耐震補強の優先度評価などにおける有用な情報として提供したい。

参考文献

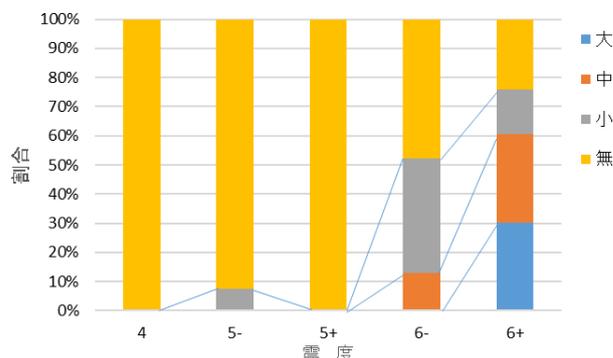
- 1) 土木学会トンネル工学委員会：新潟県中越地震特別小委員会報告書，2005.
- 2) 吉川恵也：鉄道トンネルの震災事例調査，鉄道技術研究報告，No.1123，1979.9.
- 3) 亀村勝美，藍檀オメル：山岳トンネルの地震被害と対策について，土木学会第73回年次学術講演会，2018.9.
- 4) 諸井孝文，武村雅之：関東地震(1923年9月1日)による木造住宅被害の整理と震度分布の推定，日本地震工学会論文集，2，3，35-71

表-3 中越地震における震度と地震被害程度(%)

震度	NATMトンネル				矢板トンネル			
	大	中	小	無	大	中	小	無
6+	16.7	16.7	33.3	33.3	30.3	30.3	15.2	24.2
6-			37.5	62.5		13.0	39.1	47.8
5+			13.3	86.7				100.0
5-				100.0			7.4	92.6
4				100.0				100.0



a) NATMトンネル



b) 矢板トンネル

図-1 中越地震における震度とトンネル被害の関係

表-4 関東地震における震度と地震被害程度(%)

震度	特殊条件なしトンネル				特殊条件ありトンネル			
	大	中	小	無	大	中	小	無
7	13.0	13.0	56.5	17.4	66.7	14.3	19.0	
6+	5.0	10.0	75.0	10.0	80.0		20.0	
6-			47.4	52.6	50.0	50.0		
5+	3.0		42.4	54.5		66.7	33.3	
5-				100.0	100.0			