

トンネルの耐震性能に関する検討 - 被災トンネルの再現解析による要因分析 -

(株)高速道路総合技術研究所 正会員 ○小川 澄
" 中野 清人
" 正会員 清水 雅之

1. はじめに

山岳工法で施工されるトンネルは、地中構造物であることから特別な場合を除いて耐震設計の必要性は少ないものと考えられてきた。しかし、阪神・淡路大震災、新潟県中越地震および新潟県中越沖地震ではトンネルの被害が発生しており、高速道路のトンネルにおいても耐震性能について再検討、評価が必要となってきた。これらを受け、別途地山の変形解析と覆工の損傷解析を行い、トンネル諸条件と耐震性能の関係を整理した。

本検討では、標準設計にもとづく山岳工法トンネルの地震被災に結びつく要因を検討することを目的に、被災トンネルの再現解析を行い、解析結果および被災後のトンネル内の現場計測結果より考察を行った。

2. 被災概要

再現解析の対象は、新潟県中越沖地震で被災を受けた北陸道の米山トンネル(在来工法)とした。上り線では、主な損傷は延長 40m 程度の範囲に集中しており、圧さによる天端部の覆工コンクリートの剥落が発生した。

一方、下り線では、損傷範囲は延長 130m 程度であり、側壁部の覆工コンクリートの剥落が見られた。また、上下線ともに、被災を受けた区間で円形水路(側溝)の開口部が収縮しており、最大収縮量は 100mm(内空幅の 1%)程度であった。

3. 再現解析の概要

(1) 検討の着目点

米山トンネルは、周辺地山のせん断波速度 V_s が 800 m/s 程度と比較的地山条件が良く、別途整理したトンネル諸条件と耐震性能の関係からも被災の危険性が特に高いとは考えにくい。しかし、損傷状況(天端の剥落、側溝開口部の収縮)から、内空断面が収縮する方向に残留変形が生じたと予想される。そこで、地山の変形特性として、内空断面収縮の原因として考えられるトンネル掘削時の解放応力、上下動に着目した。また、覆工の変形特性として、覆工の非線形性、覆工背面空洞の有無、覆工厚の不均一(実測値)、覆工の初期応力に着目した。

(2) 解析方法

検討断面は、損傷規模が大きかった上り線に着目し、上り線被災区間の中央とした。図 1 に検討横断面図を示す。解析方法は動的解析とし、トンネル覆工を梁要素またはファイバー要素で、地山を平面ひずみ要素でモデル化し、地震時増分の断面力を算出した。入力地震動は、米山トンネル近傍で観測された実波形を解析モデル上の基盤面まで引き戻して用いた(図 2)。なお、解析プログラムは「TDAP」を用いた。また、周辺地山が泥岩であり、かつ被災箇所は米山トンネルの中で最も土被りが厚い箇所(200m 程度)であるため、覆工に初期応力が作用している状態を想定し、覆工のみを取り出したモデルに鉛直荷重、水平荷重を与えて覆工の初期応力解析を行った。膨張性地山やしゅう曲の影響を考慮し、側圧係数は 0.5~1.5 の 4 パターンに設定した。

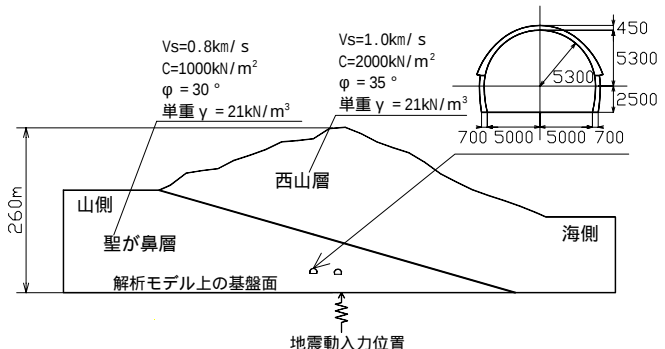


図 1 解析検討横断面図

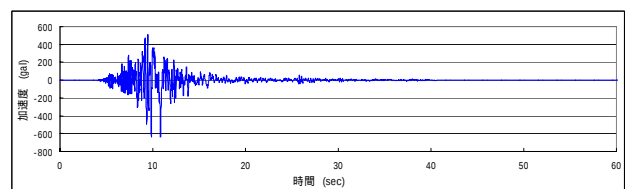


図 2 入力地震動

要素でモデル化し、地震時増分の断面力を算出した。入力地震動は、米山トンネル近傍で観測された実波形を解析モデル上の基盤面まで引き戻して用いた(図 2)。なお、解析プログラムは「TDAP」を用いた。また、周辺地山が泥岩であり、かつ被災箇所は米山トンネルの中で最も土被りが厚い箇所(200m 程度)であるため、覆工に初期応力が作用している状態を想定し、覆工のみを取り出したモデルに鉛直荷重、水平荷重を与えて覆工の初期応力解析を行った。膨張性地山やしゅう曲の影響を考慮し、側圧係数は 0.5~1.5 の 4 パターンに設定した。

キーワード：トンネル 耐震 再現解析 高速道路

連絡先 〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1 株式会社 高速道路総合技術研究所 TEL042-791-1629

4. 再現解析の結果

(1) 動的解析の結果

表1に各検討ケースで考慮した条件および上り線覆工内側の地震時増分の圧縮応力を示す。表1より、天端より45度方向の圧縮応力が大きく、天端に背面空洞があると圧縮応力が大きくなる結果となった。また、全ケースにおいて、地震時増分の圧縮応力だけでは圧壊が生じるレベルに達しておらず、地震だけでは損傷を説明することができない。

図3に、ケース2における内空変位の時刻歴波形を示す。加振と共に内空が収縮し、2mm(内空ひずみ0.02%)程度の残留変形が発生する結果となった。別途実施した検討では、内空の平均ひずみ0.5%~1.0%程度を覆工が圧壊する目安としてきており、ケース2の残留変形量は圧壊が生じるレベルに至っていないことがわかる。

(2) 覆工の初期応力解析の結果

図4および図5に覆工内面圧縮応力～鉛直荷重関係を示す。図4および図5より、初期状態で鉛直荷重が作用していた場合、45度方向よりも天端の方が厳しく、地震時増分の覆工内面圧縮応力よりも影響が大きい。また、天端に背面空洞があると、天端の圧縮応力が厳しくなる。これらより、米山トンネルの覆工に作用していた初期土圧が、地震時の覆工天端の圧縮破壊に対して影響していた可能性が考えられる。

5. 現場計測結果

図6は、中越沖地震発生の半月後にSLでの内空幅、舗装路面高さや天端高さをトンネル全線に渡って計測し、内空幅と内空高の設計値との差を上り線について整理したものである。設計値との比較であるため、地震動による内空断面の収縮量を単純に評価することはできないが、損傷範囲周辺では内空幅、内空高さともに収縮している傾向が確認できる。また、同様に当区間では地震以前より盤膨れの現象が確認されていることから、被災との何らかの関係が想定される。

6. まとめ

今回の再現解析の結果と現場計測の結果を総合的に考えると、覆工に作用する初期土圧が被災に影響する可能性が想定される。トンネルが被災する条件は、色々な条件が複合的に関連し発生していると想定されるが、引き続きトンネルが被災する要因分析について検討を進め、今後検討が必要となるトンネルの耐震対策の優先順位や対策工決定のための参考とする予定である。

以上

表1 動的解析結果

	覆工の変形特性	地山の初期応力算出における開放応力の考慮	緩みの考慮	天端背面空洞	上下動	覆工厚	覆工内側の最大圧縮応力(N/mm ²)	
							天端	45度方向
ケース1	線形	-	-	-	-	設計値	1.88	7.08
ケース2	線形	H-Dモデル	-	-	-	設計値	3.76	10.68
ケース3	線形	H-Dモデル	H-Dモデル	-	-	設計値	3.70	8.19
ケース4	線形	H-Dモデル	モールクロ	-	-	設計値	4.65	9.42
ケース5	線形	H-Dモデル	-	○	-	設計値	6.27	10.75
ケース6	線形	H-Dモデル	-	-	○	設計値	4.71	10.59
ケース7	上り線	線形	H-Dモデル	-	-	実測値	3.67	12.68
	下り線						2.84	11.15
ケース8	非線形(ファイバーモデル)	H-Dモデル	-	-	-	設計値	1.92	10.26
ケース9	非線形(ファイバーモデル)	H-Dモデル	H-Dモデル	-	-	設計値	1.69	5.77
ケース10	非線形(ファイバーモデル)	H-Dモデル	-	○	-	設計値	3.40	9.67

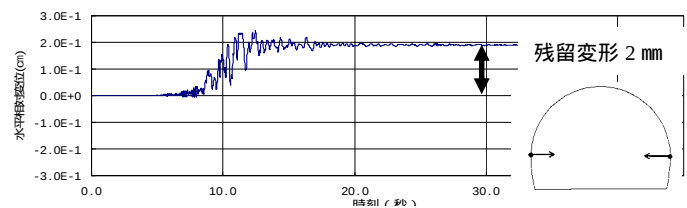


図3 内空変位時刻歴波形(ケース2)

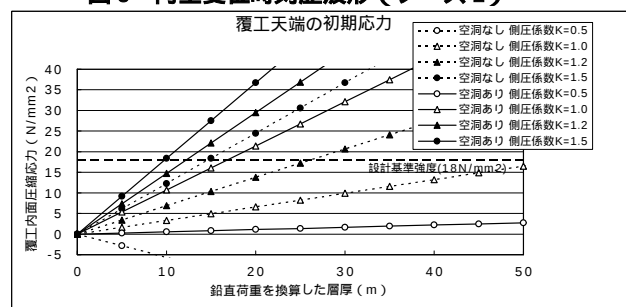


図4 覆工の初期応力解析結果(天端)

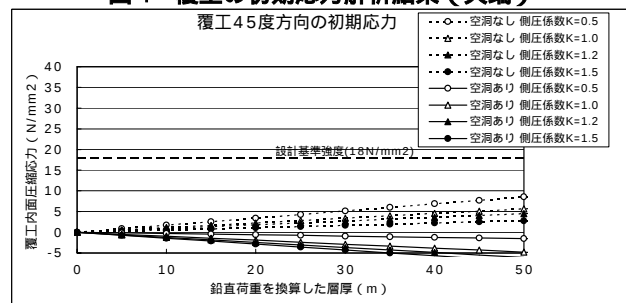


図5 覆工の初期応力解析結果(45度方向)

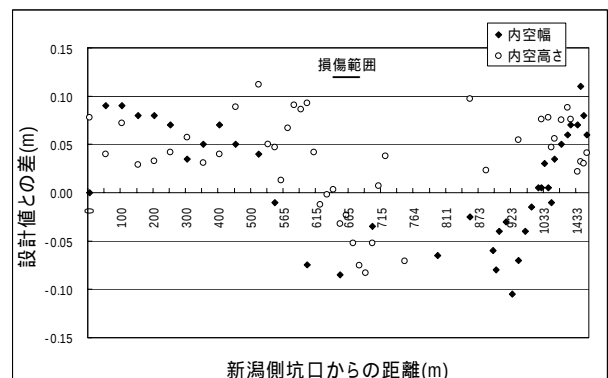


図6 米山トンネル上り線の内空幅・内空高さ