トンネルの耐震対策工法に関する解析的検討

東海旅客鉄道㈱	正会員	山本	哲也	正会員	永尾	拓洋
東海旅客鉄道㈱	正会員	大木	基裕			
ジェイアール東海コンサルタンツ(株)	フェロー会員	村田	清満			
㈱日建設計シビル	正会員	西山	誠治			

1.目的

過去の地震によって山岳トンネルが被災する事例が報告されている¹⁾.トンネルの耐震対策工はこれまでに実施 されているものの,その効果に対する定量的な評価は難しい.本検討では,耐震対策工として考えられるロックボ ルトやインバートを想定して,耐震補強したトンネルの耐震性を評価することを目的に FEM 解析による検討を行っ たので報告する.

2.解析方法

本検討では初期応力解析の実施に引き続き,応答震度法によ り地震時解析を行った.

図1に地盤モデルと入力地震動の算定条件の概略を示す.対 象地盤は土被りが深く,地表面までモデル化することは不経済 なため,トンネル付近を取り出してモデル化し,地盤中にあっ たのと同じ状態が再現できるような境界力を与えて,地表面ま でモデル化した場合と同じ結果になるようにした.

初期応力解析では初期応力を K₀=1.0 として,モデルの上下左右に,鉛直および水平土圧を載荷した解析を行った.トンネルが常時状態下で覆工にどの程度土圧を負担しているのか明らかでないが,今回は、トンネル部材が存在し内部

地震時の解析段階で対策工の部材を設置し,静的非線 形解析を実施した.応答震度法では事前に等価加速度の

算定が必要であることから,SHAKE による岩盤の動的解析を行った。山岳トンネルでは,地表面を工学的基盤面 と考えることができるため,地表面(工学的基盤)での地震動(G1)を,仮想基盤面まで引き戻して入力地震動を 算定した.算定した入力地震動を用いて,岩盤の動的解析を実施し,トンネル部分の加速度分布や解析モデル境界 部の周面せん断力を算定した.

表1に示す地盤の物性値は変状トンネル対策エマニュアル²⁾を参考に決定した なお本検討で想定した地震動は, 鉄道構造物等設計標準に基づくL2 地震動スペクトル としている.

3.解析結果

3.1岩盤動的解析

応答震度法は地震時のある時刻の状態を再現する静的解析方法であるため,再現する時間を決定する必要がある. 一般に,地中構造物は構造物と同じ深さの相対変位が大きいときに,厳しい状態になる.そこでトンネル上下端の

トンネル上

下端相対変

位の発生時

刻(sec)

2.14

トンネル上下

端相対変位の

最大値(m)

0.025

に着目する.本解析モデルの上 下端のせん断応力から算定した 等価加速度の算定結果を表 2 に 示す.

相対変位が最も大きくなる時間

キーワード トンネル 耐震 インバート

連絡先 〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545 番 33 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 TEL 0568-47-5375



図1 地盤モデルと入力地震動の算定条件の概略

表1 地山の物性値

単位体積重量	=19.3kN/m ³			
ポアソン比	=0.3			
・ せん断弾性係数	G=192300kN/m ² (トンネル深度の拘束圧)			
せん断弾性波速度	Vs=312m/s			
強度	C=0.5MPa =40°(初期変形)			

表2 等価加速度の算定

上端(kN/m²)

108.8

トンネル上下端相対変位最大

となる時刻の解析モデルせん

断応力

下端(kN/m²)

336.2

解析モデ

ルの高さ

(m)

131.201

等価加速

度(m/sec²)

0.88

3.2 応答震度法による解析

岩盤動的解析の結果を用いて、応答震度法による解析を行った、地 震動の入射条件と対策工をパラメータとし,対策工の条件を表3に示 す.ロックボルトは側壁には片側あたり3本,床部には4本としてモ デル化した.なお地震動の入射条件は,水平入射と45度入射の2条件 とした.

120

80

-40 .

-80 - ロケース

-120

Δ

3

2

1

着力(kN) 0

3.2.1 ロックボルトの軸力

ロックボルトの軸力の一例と して,スプリングライン付近に配 置されたロックボルトの軸力を 図2に示した.水平入射に比べて 45 度入射の条件で,軸力の最大値 は大きくなった.これは他の箇所 のロックボルトでもほぼ同様の

傾向である.45度入射では覆工から離れるほど軸力が減少す る傾向であるが,水平入射では覆工から離れるほど軸力が増 加する傾向がみてとれる.

3.2.2 内空変位量

図3に水平入射時のトンネルの内空変位量を示す.水平入 射ではトンネルの水平方向にせん断変形が卓越するため,斜 め方向の変位量に着目する.斜め方向の変位量は,無対策に 比べていずれのケースでも増加した.トンネルの下端が拘束 された結果,トンネルのせん断変形が大きくなったものと考 えられる.

図 4 に 45 度入射時のトンネルの内空変位量を示す.45 度 入射ではトンネルが水平方向に伸び,鉛直方向は圧縮される ように変形するため,鉛直と水平の変位量に着目する.イン バートを設置したケース Case2 と Case4 では, 無対策に比べ て鉛直変位量が小さくなるが,水平変位量は45度入射に比 べて大きくなる.Case4 では鉛直変位量と水平変位量がとも に小さくなり,インバートとロックボルトの効果が併せて発 揮されたと考えられる.

表3 解析ケース

Case	対策工					
Case1	無対策					
Case2	インバートエ					
Case3	ロックボルト工(側壁)					
Case4	インバート+ロックボルト工(側壁)					
Case5	ロックボルトエ(床部)					
Case6	ロックボルトエ(床部+側壁)					







図 4 内空変位量(45 度入射)

4.まとめ

以上の結果から、耐震対策工としてのインバートの効果は概ね有効であると思われる.一方でロックボルトの効 果は明瞭には現れなかったが、Case4 で Case2 に比べて鉛直・水平変位量ともに減少するなど、条件によってはそ の効果がみてとれる、モデル化した山岳トンネルは硬質な地盤内に存在することから、地震時の変形が小さくなり、 対策工の効果は明瞭には現れにくかった可能性がある.また初期応力状態や地質モデルの設定などに原因がある可 能性も考えられ,今後はこれらの点を考慮した検討が必要である.

参考文献

1) 例えば,朝倉ら:山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム,土木学会論文集 No.659/ -52, pp. 27-38, 2000. 2)トンネルの変状対策工設計マニュアル,財団法人鉄道総合技術研究所,pp.215-216,1998.