

現場状況に応じた路盤部ロックボルトの仕様変更に関する解析的検討

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○水野光一郎, 浅田 章一, 木村 博憲
 公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 嶋本 敬介, 野城 一栄

1. 研究の背景と目的

矢板工法で建設された複線断面の山岳トンネルのりょう盤構造の区間において、東北地方太平洋沖地震により路盤の隆起や内空断面の縮小といった被害が発生した¹⁾。同種の被害を防止することを目的として、地山や構造などの条件が類似するトンネルに対して地震対策を検討している。対策は、路盤への下向きのロックボルト(路盤部ロックボルト)を主としているが、施工箇所によっては路盤部ロックボルトの仕様が標準的なものでは困難となることが想定される。本稿では現場状況に応じて路盤部ロックボルトの配置や径などの仕様を標準的なものから変更し、代替できる方法を数値解析により解析的に検討する。

2. 数値解析の手法

(1) 対象とするトンネルおよび周辺地山のモデル化

地震のトンネルへの影響を検討するにあたり、トンネルや地山がせん断変形することに着目する場合、動的な解析や応答変位法が広く用いられる。これらの解析手法を用いると、一般に、アーチ両肩部に損傷が発生するような損傷モードとなる^{例え}²⁾。一方で、本稿が対象とするトンネルの損傷モードは、路盤の隆起や内空断面の縮小といったものであり、現象として塑性圧を受ける山岳トンネルに発生する変状の延長線上にあると考えられる。そのため、隆起現象を表現する手法として、地山の塑性圧の作用を直接的に数値解析で表現する地山劣化モデル³⁾を採用した。

図1にトンネルおよび周辺地山の解析メッシュの例を示す。境界条件として、トンネル上部は土被りを上載荷重として作用させ、モデル側面および下面は

面外方向に変位しないローラー支持とした。トンネルは、覆工やりょう盤、路盤鉄筋コンクリート、路盤部ロックボルトをモデル化し、支保工や中央排水管のモデル化は省略した。また、トンネルの覆工と地山のすべりや分離を表現するために、Interface要素⁴⁾を使用し、地山と覆工間で引張応力が伝達されないようにした。路盤部ロックボルトは、Cable要素⁴⁾を使用し、ロックボルト周辺の要素の接点の相互作用や付着切れを考慮できるようにした。なお、路盤部ロックボルトにプレストレスは導入していない。

地山は、Mohr-Coulombの破壊基準に従う弾塑性モデルとして表現し、地山劣化モデルを用いた。低下させる地山の強度はせん断強さとし、内部摩擦角は低下させていない。地山のせん断強さは、トンネル近傍ほど地山の強度が小さく、遠方では強度の低下が発生しないという、現実に近い強度分布となるように、地山の破壊近接度⁵⁾に応じて強度低下を表現した。解析に使用した主な物性値を表1および表2示す。

(2) 解析ケース

本稿では路盤部ロックボルトを打設しないケース(Case1:対策前と同じ)や標準的な路盤部ロックボルトの仕様のケース(Case2)に加えて、地震対策の現場状況として複線のうちの片側の線路において、中央通路側の路盤部ロックボルトを打設しないことなどを想定して仕様を変更したケースを設けた。標準的な仕様(Case2)の代替案として、路盤部ロックボルトを一部に集中的に配置したケース(Case3)や、路盤部ロックボルトの部材長を長くしたケース(Case4)、径およびピッチを変更したケース(Case7)を検討した。本稿の解析ケースの概略を表3に示す。

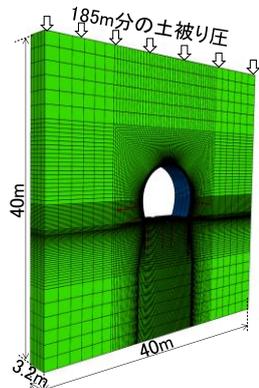


図1 解析メッシュの例

表1 解析で使用した物性値(地山・トンネル)

項目	単位	地山	覆工コンクリート	りょう盤中央通路
一軸圧縮強さ	q_u MPa	2.0	21	—
地山強度比	C_r —	1.0	—	—
単位体積重量	γ kN/m ³	20	23.5	23.5
弾性係数	E MPa	479	22000	22000
ポアソン比	ν —	0.331	0.2	0.2
せん断強さ	c kPa	1155→715	5600	—
内部摩擦角	ϕ °	30	40	—
ダイレイタンシー角	λ °	10	12	—

表2 解析で使用した物性値(ロックボルト)

項目	単位	D32 中空
鋼材弾性係数	E GPa	210
長さ	L m	4
鋼材外径	D mm	32
鋼材断面積	A_s mm ²	407
降伏荷重	P_y kN	199
削孔径	ϕ_d mm	45
単位長さ当たりのせん断ばね剛性	k_g GN/m ²	16.9
単位長さ当たりの付着強度(kN/m)	c_g kN/m	164
定着材のせん断弾性係数	G MPa	9170
摩擦角	ϕ °	0

キーワード：山岳トンネル, 路盤隆起, ロックボルト, 地震, 鉄道

連絡先 〒163-0231 東京都新宿区西新宿 2-6-1 新宿住友ビル 31 階 JR 東日本 構造技術センター TEL 03-6276-1251

表3 解析ケースとモデルの概略

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case7
ロックボルト仕様 (種類・本数・位置・間隔)	なし	D32 中空 4本 / 断面 1.6m ピッチ	D32 中空 通路右: なし 通路左: 0.8m ピッチ その他: 1.6m ピッチ	D32 中空 通路右: なし その他: 1.6m ピッチ	通路右: D22 1.2m ピッチ その他: D32 中空 1.6m ピッチ
ロックボルト長さ		4m	4m	中央通路左: 8m その他: 4m	4m
模式図					

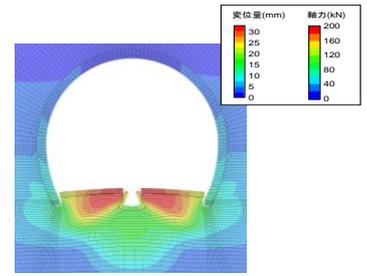


図2 ロックボルトを打設しない場合の解析結果の例 (強度低下率 38%時・変形倍率 20倍)

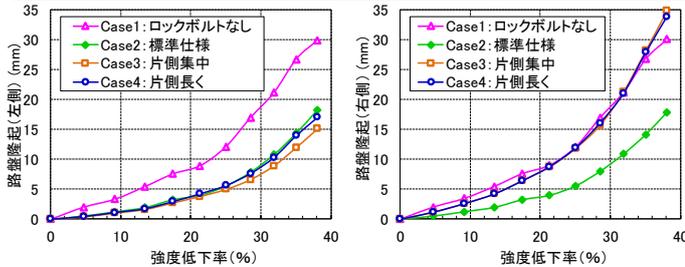


図3 路盤隆起の解析結果 (Case1 から Case4) (左図: 左側線, 右図: 右側線)

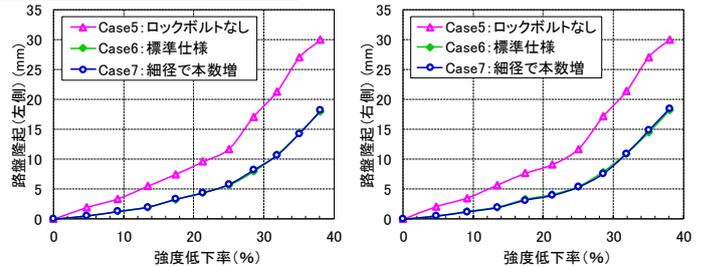


図4 路盤隆起の解析結果 (Case5 から Case7) (左図: 左側線, 右図: 右側線)

なお、これらのほか、Case7 との比較のためにトンネル軸方向の奥行きを 3.2m から 4.8m に変化させた上で、路盤部ロックボルトを打設しないケース (Case5) および標準的な路盤部ロックボルトの仕様のケース (Case6) も解析を行っているが、記載は省略した。

3. 解析結果

図2に Case1 の変形および軸力のコンター図を示す。対策前のようにロックボルトが打設されていないと、路盤の隆起や中央通路の傾斜が発生することがわかる。これより、本稿の解析手法により、東北地方太平洋沖地震による被害の状況について、損傷の特徴を表現できると思われる。

図3に Case1 から Case4 の結果を示す。Case2 の結果より、路盤部ロックボルトの打設により路盤の隆起が抑制されていることがわかる。一方で、路盤部ロックボルトを集中的に配置した Case3 や、路盤部ロックボルトの部材長を長くした Case4 では、右側において標準的な仕様から変更した方が路盤の隆起量が大きくなっていることがわかる。これは、中央通路の左側の片線の隆起を路盤部ロックボルトで抑制することで、相対的に弱部となった右側が隆起したものと考えられる。また、図4に Case5 から Case7 の結果を示す。これより、路盤部ロックボルトの径を細くして、本数を多くすることにより、標準的な仕様と同等の解析結果となることがわかった。

4. まとめ

路盤部ロックボルトの標準的な仕様で施工が困難な場合を想定し、代替案となりうる仕様の変更について解析的な検討を行った。得られた知見を以下に

示す。

- (1) 本稿の解析手法により東北地方太平洋沖地震の損傷である路盤隆起の特徴を表現できると思われる。
- (2) 路盤部ロックボルトによる対策を複線のうち、片線の一部のみに集中させると、対策を行わない箇所が相対的な弱部となり、標準的な仕様の代替とはならない。
- (3) 細径の路盤部ロックボルトを片線の一部に均等に配置する方法は、標準的な仕様と同等の解析結果となった。これより、路盤部ロックボルトは、トンネル横断方向および長手方向バランスよく配置することが肝要であると思われる。

参考文献

- 1) 宮崎真弥, 水野光一郎, 木村博憲, 鈴木尊: 東北地方太平洋地震における鉄道トンネルの路盤隆起被害と今後の耐震対策, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第24巻, C1-3, pp.163-168, 2019.1
- 2) 朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄: 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/III-52, pp.27-38, 2000.9
- 3) 野城一栄, 嶋本敬介, 小島芳之, 高橋幹夫, 松長剛, 朝倉俊弘: 地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用, 土木学会論文集 C, Vol. 65, No.1, pp.107-119, 2009.2
- 4) ITASCA Consulting Group, Inc.: FLAC3D Version 5.01, 2013.
- 5) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 建設時の影響を考慮した山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.69, No.2, pp.105-120, 2013.