

設計地震作用が変化した場合の鉄道開削トンネルの建設コストおよび復旧コストの評価

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 神澤 拓 杉山 佑樹 坂井 公俊

中央復建コンサルタンツ(株) 正会員 安西 綾子 森 大輝 室谷 耕輔

1. はじめに 鉄道や道路などの社会基盤インフラは、地震時安全性を確保することに加えて、地震に対する復旧性を具備することも社会的に求められる。復旧性を具備するとは、すなわちインフラの供用停止に伴う経済的被害が過大にならないように構造物を設計することと捉えることもでき、広義の意味で経済性の照査が求められていると考えられる。具体的な照査の方法としては、構造物の耐用期間内に発生する地震を全て考慮した上で、構造物の初期建設コストに地震被災コストを加えたトータルコストを指標とした設計法が提案されている^{例)1)}。この考え方に基づいて、鉄道高架橋については、トータルコストが最小となる周期・靱性率・降伏震度の組合せを照査可能なノモグラムが提案されている²⁾。ただし、既往の検討では地上構造物を対象としたものが多く、地下構造物について同様の検討が実施された例はほとんど見られない。そこで地下構造物を対象としてトータルコストを指標とした設計方法を提案することを目指し、本稿ではまず、複数レベルの設計地震動で設計された開削トンネルを対象として、初期建設コストと復旧コストの関係について整理した結果を報告する。

2. 開削トンネルの設計条件 複数の設計地震作用を考慮した場合の開削トンネルを設計する際の基本的な条件を以下に示す。

[1] 実在する鉄道トンネルのうち内空幅 $W=3,700\text{mm}$ 、内空高 $H=5,250\text{mm}$ 、土被り厚 $H=5,000\text{mm}$ 、奥行き 30m の 1 層 2 径間トンネルを参考に常時断面を設計する。なお、周辺地盤は地表から基盤面まで約 18.5m の砂質土主体の仮想地盤とした。

[2] [1]の常時断面の諸元を基に耐震性能を向上させた断面を設計する。このとき本検討では高強度コンクリートは使用しないこととした。また鉄道トンネルであることを想定して、①軌道位置を変えないこと、②内空を確保すること、の 2 点に配慮して中柱の直径は拡幅せず、上下床版と側壁厚を拡幅により性能向上を図ることとした。なお、各断面で引張鉄筋は 1 段で配筋し、耐震性能を向上させる設計では断面に対して最大の配筋量とする。

[3] その他設計に必要な材料強度などの諸条件は鉄道構造物の各種設計標準に準拠する^{3)~5)}。

以上[1]~[3]の条件に基づき、鉄道耐震標準の L2 地震動スペクトル II^3 (以降、L2) の 0.8 倍、2.0 倍、5.0 倍の地震力に対して安全性を満足する 3 つの断面を設計し、常時断面を加えた 4 断面について建設コストおよび復旧コストを算定した。建設コストは、トンネルの建設における適切な工事条件を設定するとともに、設計した各断面に対して必要な工種・工事数量と国交省単価等から、建設工事の直接工事費として算出した。

復旧コストは、地震によって想定される損傷を鉄道耐震標準³⁾に従い 4 段階に区分し、それらの被害シナリオに対する復旧工種・工事数量の推定結果と国交省単価等から、復旧工事の直接工事費として算出した。ここでは地震による損傷箇所を中柱のみ、かつ破壊形態は曲げ破壊のみに限定して試算を実施した。なお 4 段階に区分した中柱の損傷に対するそれぞれの復旧方法のイメージは次の通りである。損傷レベル 1：無補修、レベル 2：ひび割れ注入・断面修復、レベル 3：帯鉄筋等の修正、レベル 4：柱部材の取替え

3. 設計断面とコストの算定結果 常時断面と想定地震動毎に設計した断面の概略を図 1 に示す。なお常時断面の耐震性能を評価すると、L2 地震動の 0.4 倍相当であった。この常時断面と耐震性能を向上させた 3 断面の建設コストと、損傷レベル毎の復旧コストを整理した結果を表 1、図 2 に示す。同図の横軸は、トンネル側壁位置に作用する上下床版間の相対地盤変位量としている。縦軸は L2×0.8 倍の建設コストで基準化した形で示した。

図 2(a)より、当然ではあるが耐震性能が高くなるほど側壁や上下床版の部材厚が増し、これに伴い掘削数量や使用材料が増えるため、建設コストも高騰していく。ただしその増分は緩やかになっていることも確認できる。その理由としては、例えば L2×2.0 倍断面と L2×5.0 倍断面を比較すると、5.0 倍断面の方が全体的な工事数量は多いものの、上下床版が厚いため「埋戻し」数量は 2.0 倍断面と比較して少なくなるといったこと等であった。

続いて、図 2(b)の復旧コストをみると、損傷レベルによるコストの変化はあるものの、付与する耐震性能の違いによるコストの変化は小さい。その結果、損傷レベル毎の復旧コストはほぼ一定となっていることが確認できる。これは、今回の試算ではトンネルの損傷箇所を中柱に限定しているため、各断面で中柱形状に大きな違いがないためである。また損傷レベル 3 に比べて損傷レベル 4 の方が復旧コストが小さくなっている。これは損傷レベル 4 では部材を全て撤去して新設する一方で、損傷レベル 3 では残存躯体を活用して再構築するため、工事費が逆に高くなることに起因している。この傾向は、高架橋などの柱部材を対象として復旧コストを検討した事例⁶⁾と同様の傾向である。

本試算のように直接工事費だけでみると損傷レベル 3 と 4 の復旧性は小さい結果となっているが、ここでは考慮できていない復旧コスト (例えば、輸送損失コストや環境要因による施工費の増額) については精査する必要がある。今後の検討課題としている。なお鉄道耐震標準³⁾では、トンネル中柱は、復旧性の観点からは損傷レベルを 2 以

キーワード 復旧性、鉄道構造物、開削トンネル

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7394

内に収めること、安全性の観点からは損傷レベル3以内に収めることが推奨されている。

4. まとめ 本検討では、各設計断面の建設コスト、復旧コストを算定した。今後は、中柱のせん断破壊や他部材が損傷した状況に対しても復旧コストを評価する。その後、各断面に対してトータルコストを算定し、経済性の観点から復旧性に優れた断面の評価を実施する予定である。

参考文献：1)土木学会・地震工学委員会・耐震設計基準小委員会：土木構造物の耐震設計における新しいレベル1の考え方(案)，委員会活動報告書，2003。2)坂井公俊，室野剛隆，佐藤勉，澤田純男：トータルコストを照査指標とした土木構造物の合理的な耐震設計法の提案，土木学会論文集 A1 (構造・地盤工学)，Vol.68, No.2, 248-264, 2012。3) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012。4) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004。4) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物，2012。5) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，2001。6)神澤拓，田中浩平，西村隆義，西村明彦：復旧性評価データベースを活用した鉄道構造物の復旧性評価法の提案，第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp. 73-80, 2019。

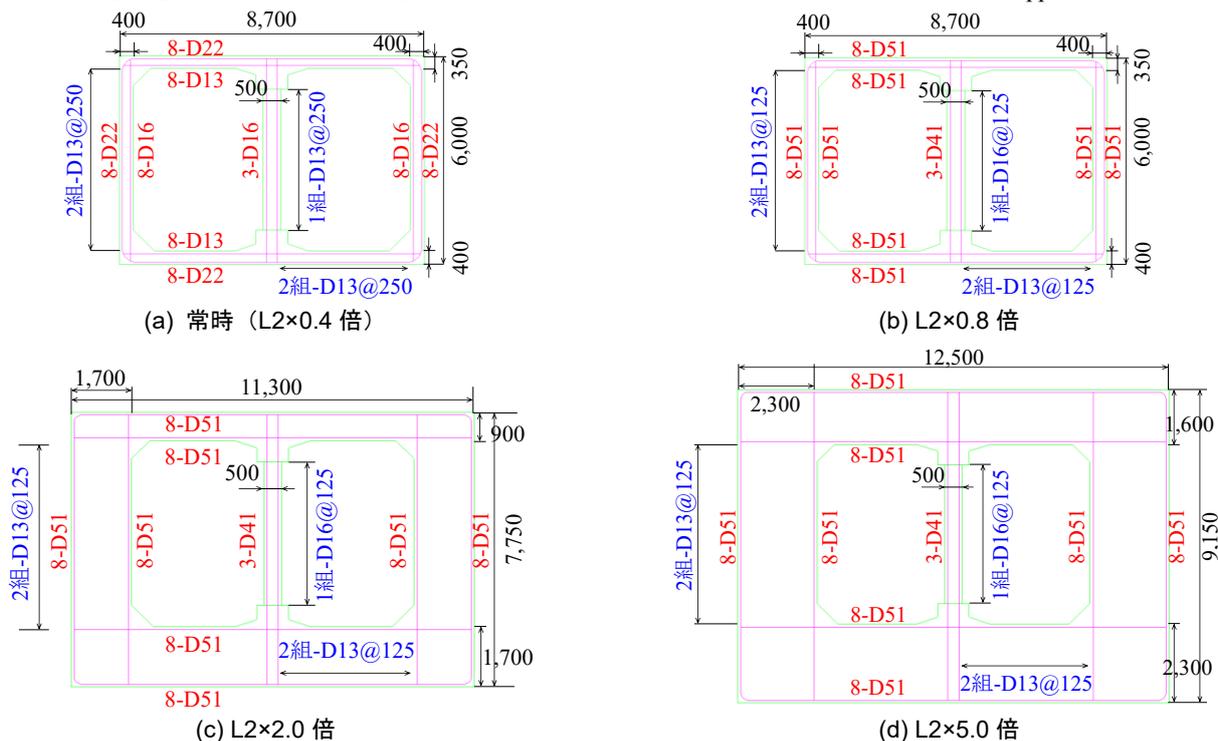
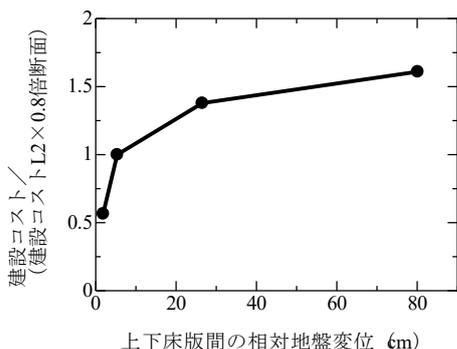


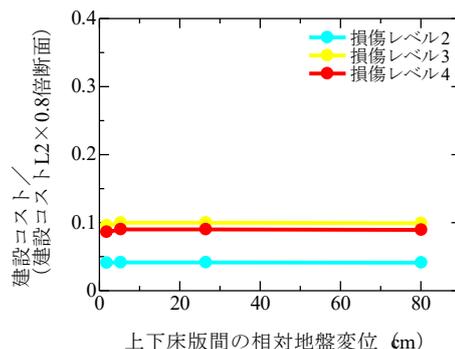
図1 異なる耐震性能を有する4つの開削トンネル断面 (赤字：主鉄筋，青字：せん断補強筋)

表1 付与する耐震性能と初期建設コスト・復旧コストの関係

耐震性能	地盤変位 (cm)	建設コスト (千円)	復旧コスト (千円)		
			損傷レベル2	損傷レベル3	損傷レベル4
L2×0.4倍(常時)	1.9	79,798	5,769	13,522	12,177
L2×0.8倍	5.4	141,057	5,864	14,091	12,708
L2×2.0倍	26.5	194,479	5,864	14,091	12,708
L2×5.0倍	80.1	227,059	5,813	13,996	12,607



(a) 初期建設コスト



(b) 復旧コスト

図2 付与する耐震性能と初期建設コスト・復旧コストの関係性