

都市部山岳工法トンネルの覆工設計における限界状態設計法の適用

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 小島芳之 野城一栄 齋藤 貴*)

ハシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 ○松長 剛**)

鉄 建 建 設 (株) 正会員 益田彰久***)

1. はじめに

環境条件や地質条件の厳しい都市部においても、経済性や断面選定の自由度、近年の補助工法に関する技術開発の進展等の要因から、山岳工法（いわゆる都市 NATM）を適用した事例が増加している。この都市部山岳工法トンネルについては、まだ設計法が確立されておらず、事例ごとに設計が行われているのが現状である。筆者らは、都市部山岳工法トンネルに関する設計・施工実績調査、実験、数値解析等¹⁾を行い、その設計法の確立を目指している。そのうち覆工については、コンクリート構造物における設計法の現状を鑑み、限界状態設計法を適用するための検討を進めている。本報告では、限界状態設計法によるトンネル覆工の設計手法の検討および本手法と従来の設計法（許容応力度設計法）との比較結果について述べる。

2. 覆工設計における限界状態設計法の適用

(1) トンネル覆工における限界状態の考え方

一般に、山岳トンネルの覆工は地山の相互作用として挙動するアーチ構造なので、部材の一部にひび割れが発生し、更に圧縮限界が生じても急激な耐力低下とはならない。そこで、トンネル覆工における限界状態を以下のように考え、設計手法および設計断面に関する検討を進めることとした。

使用限界：ひび割れ幅の制限値または鉄筋の降伏

終局限界：断面破壊（コンクリートの圧縮限界）

(2) 限界状態設計法によるトンネル覆工の設計手法の概要

本報告では、限界状態設計法によるトンネル覆工の設計手法として、以下のような手法を提案する。

まず、覆工厚・鉄筋量等の設計断面を仮定し、断面内の力の釣り合いから、図-1 (OABC) のような M-φ 図を算定する。使用限界については、N を変化させて逐次 M-φ 図を作成し、A 点・B 点の断面力に着目することで図-3 の A 線・B 線のような M-N 図が得られる。

一方、終局限界については、線形解析により得られた断面力による照査が可能となるように、等価エネルギーの考え方をを用いて M を割増しすることとした。すなわち、図-1、図-2 において、OABC と OBC' のエネルギーが等しくなるように、終局限界における断面力 C' 点を求めることにした。ここで、使用限界と同様にして、N を変化させることにより図-3 の C' 線で示した M-N 図を作成することができる。断面の照査は、線形骨組解析により得られた断面力を図-3 上にプロットすることにより行うこととなる。

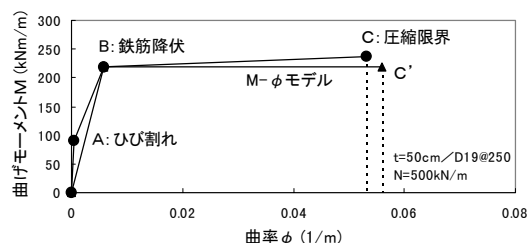


図 - 1 M - φ モデル

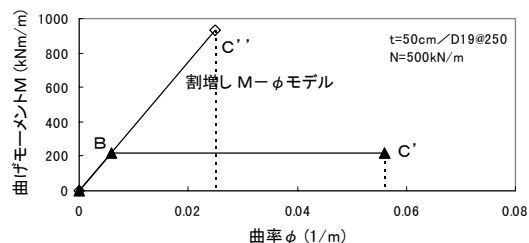


図 - 2 割増し M - φ モデル

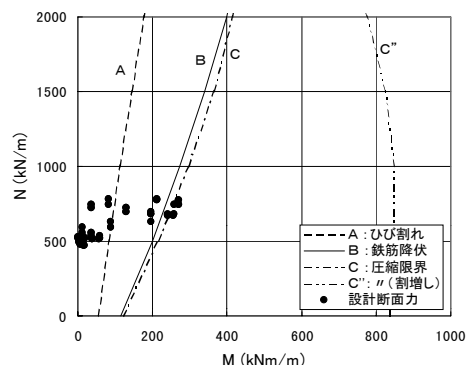


図 - 3 断面照査 M - N 図

キーワード：都市部山岳工法トンネル，トンネル覆工，構造設計，限界状態設計法，等価エネルギー

連絡先：*) 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 TEL 042-573-7266 FAX 042-573-7248

**) 〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1 TEL 03-3344-1903 FAX 03-3344-1906

***) 〒286-0825 千葉県成田市新泉 9-1 TEL 0476-36-2355 FAX 0476-36-2380

3. 設計法の変更による設計断面への影響

(1) 検討の目的および設計条件

前述の計算手法を用いて、許容応力度設計法から限界状態設計法（使用限界を想定）に設計法が変更された場合の設計断面への影響について検討した。設計条件を表-1、解析モデル図を図-4 に示す。設計条件としては水圧を変化させた2ケースを設定し、断面照査は表-2 に示す3通りの手法により行う。また、鉄筋降伏後の構造安定性についても評価を行った。

(2) 設計法の移行による設計断面の比較

試設計の結果（覆工厚、鉄筋量）を表-3 に示す。この結果から、以下のことが分かる。

- ・照査（許容応力度法）と照査（ひび割れ幅の制限値）では同等の設計断面となる。
- ・照査（鉄筋降伏）では、照査より覆工厚が軽減される。
- ・水圧が大きくなると、照査では覆工厚が増加する。

このように、覆工の設計法を限界状態設計法へ移行することで断面の部材耐力がより適切に評価され、結果として覆工設計の合理化を図れることが確認された。

(3) 破壊の進展に関する検討

鉄筋の降伏に対する構造安定性を調べるため、覆工厚50cm、水圧天端+10mの条件で、鉄筋降伏後の破壊の進展に関する検討を行った。ここでは、逐次荷重を増加させるステップ解析を行い、降伏箇所（要素）の曲げ剛性を非常に小さくすることで降伏をモデル化している。解析結果を図-5、図-6 に示す。破壊の進展として、まず隅角部が降伏し、次にインバート中央部が降伏した。このことから、今回のような設計条件では、鉄筋の降伏後に曲げモーメントが再分配され、破壊が一箇所では進展することはないことが確認された。

4. まとめ

今回、都市部山岳工法トンネルの覆工設計への限界状態設計法の適用を検討し、以下の成果を得た。

- (1) 等価エネルギーの考え方を適用し、線形解析のみによる簡略化した限界状態設計法による覆工設計法を提案した。
- (2) 限界状態設計法への移行により、断面の部材耐力をより適切に評価することが可能となり、結果として覆工設計の合理化を図れることが確認された。
- (3) 破壊の進展に関する検討の結果、曲げモーメントの再分配により、破壊が一箇所では進展することはないことがわかった。これにより、今回のような設計条件では覆工の終局限界状態に圧縮限界を用いても問題がないことが確認された。

今後は、以上の結果を踏まえ、水圧以外の設計荷重（近接荷重）や、特殊断面（扁平断面、大断面等）に対する検討も実施し、都市部山岳工法トンネルの覆工の設計手法を提案する予定である。

【参考文献】1) 都市部山岳工法トンネルの覆工設計における荷重に関する考察 齋藤、小島、新井、野城、松長 土木学会年講 1999.9

表 - 1 設計条件

解析断面	新幹線標準断面
覆工構造	設計基準強度 $f'_{ck} = 24\text{N/mm}^2$ 複鉄筋 SD295
地盤反力係数	0.05 N/mm^3
水圧	天端上 5m・10m に水位を設定

表 - 2 断面の照査方法

照査	許容応力度設計法
照査	限界状態設計法（鋼材の腐食に対するひび割れ幅の制限値による）
照査	限界状態設計法（鉄筋の降伏による）

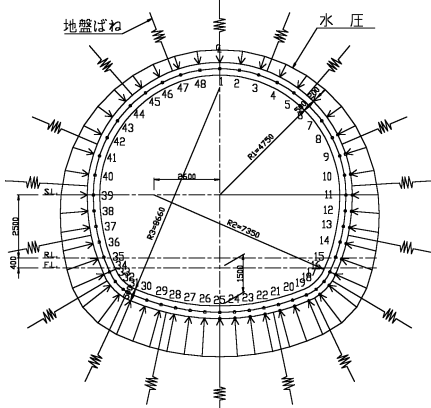
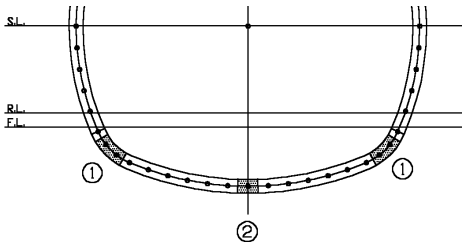


図 - 4 解析モデル図

表 - 3 解析結果（覆工厚、鉄筋量の比較）

荷重条件	照査① 許容応力度	照査② ひび割れ幅	照査③ 鉄筋の降伏
水圧 天端+5m	50cm D19@125	50cm D19@125	40cm(-10cm) D19@125
水圧 天端+10m	60cm D19@125	60cm D19@125	40cm(-20cm) D19@125

上段が覆工厚、下段が鉄筋量を示す



アーチ部については全断面有効

図 - 5 水圧 天端+10m における降伏領域

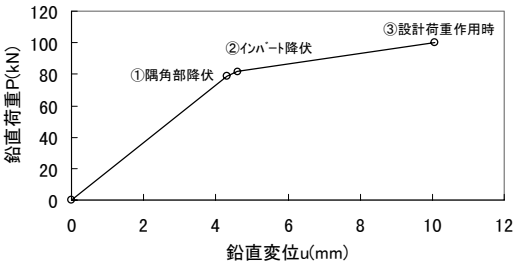


図 - 6 破壊の進展状況（荷重 P - 変位 u 関係）