

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に関する研究

STUDY ON THE APPLICATION OF LIMIT STATE DESIGN METHOD TO LINING OF NATM TUNNELS IN URBAN AREAS

小島芳之¹⁾・野城一栄¹⁾・齋藤貴²⁾・益田彰久³⁾・松長剛⁴⁾

Yoshiyuki KOJIMA, Kazuhide YASHIRO, Takashi SAITO, Akihisa MASUDA and Takeshi MATSUNAGA

Recently application of NATM to urban areas where environmental and geological restrictions are strict is increasing because of its economic advantage and development of auxiliary methods. However, NATM tunnels in urban areas are being designed case by case, as the design method has not been established yet.

The Railway Technical Research Institute has reviewed past designs and performed model tests and simulation analyses aimed at developing the design method.

This paper reports the study results by the limit state design method for this purpose and compares this method and allowable stress design method.

Key words: mountain tunnel, design, lining, limit state design method

1. はじめに

近年、環境条件や地質条件の厳しい都市部において、経済性や断面選定の自由度、補助工法に関する技術開発の進展等の要因から、山岳工法を適用した事例が増加している。一方で、この都市部山岳工法トンネルにおいては、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。

鉄道総研では、都市部山岳工法トンネルの設計法を確立することを目的として、設計実績調査、実験、数値解析等を行ってきた。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に関する検討、ならびに、本設計法と従来の設計法（許容応力度設計法）との比較検討を行った結果を示す。

2. トンネル覆工における限界状態の考え方

一般に鉄筋コンクリート部材の挙動は、図-1に示すように、曲げ引張りひ割れの発生（A点）、鉄筋の降伏（B点）とどった後、同じ箇所の変位線のコンクリートが終局ひずみに達した（C点）のち、荷重が減少するものと考えられている。しかし、トンネル覆工のような地盤による反力を受けるアーチ構造物では、曲げ引張りひ割れの発生や鉄筋の降伏にともない、部材の剛性が低下した場合でも、モーメントの再分配により、一箇所の部材で破壊

1) 正会員（財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

2) 正会員 東日本旅客鉄道（株）上信越工事事務所（前 鉄道総合技術研究所）

3) 正会員 鉄建建設（株）技術研究所

4) 正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）トンネル部

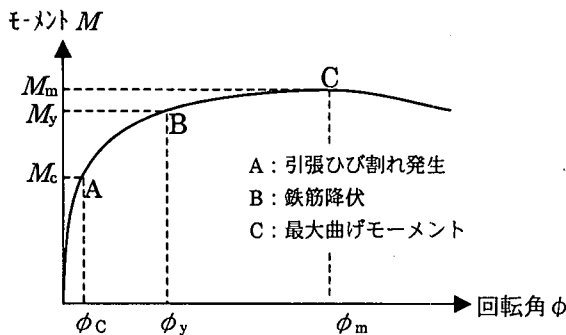


図-1 部材の曲げモーメントと回転角との関係

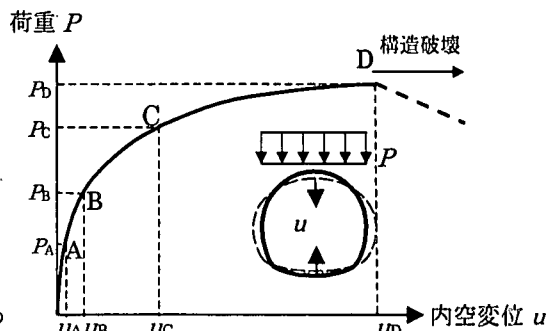


図-2 トンネル覆工の荷重～変位関係（模式図）

が進むということはないと考えられる。すなわち、トンネル覆工に荷重が作用したときの荷重 P と内空変位 u の関係は、図-2 に示すように、荷重 P により一部箇所では引張りひび割れが発生（A 点）して鉄

筋が降伏（B 点）し、さらに、コンクリートの終局ひずみに達した（C 点）場合でも、構造としては安定な状態が保たれていることが多く、最大荷重（D 点）までは変位、耐力ともに十分な余裕を有する。このため、設計においては、このようなトンネル覆工の変形挙動の特徴を考慮し、トンネル覆工における限界状態を表-1 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。以下、それぞれの限界状態について説明する。

表-1 都市部山岳トンネルにおける限界状態の考え方

使用限界状態	ひび割れ幅の制限値または鉄筋の降伏
終局限界状態	断面破壊（コンクリートの圧縮限界）

(1) 使用限界状態

都市部山岳工法トンネルでは、防水シートを覆工背面に全周施工するので、漏水が生じることはほとんどない。そのため、ひび割れによる鉄筋の腐食に対する環境は厳しくなく、レールや架線などの坑内設備の寿命を低下させる要因は少ない。したがって、覆工やインバートにひび割れが生じて、鉄筋が降伏しない限り、コンクリートの剥離などの使用性や耐久性が問題になることは少ないので、引張鉄筋の降伏点を使用限界状態に設定できるものと考えられる（図-2 の B 点）。

(2) 終局限界状態

トンネル覆工は地山に囲まれたアーチ構造なので、一部の断面で鉄筋が降伏しても、また、コンクリートの終局ひずみ（3500 μ ）を超えた場合でさえも、ヒンジをもった構造系に変化するのみであり、直ちにトンネル構造としての安定性が低下することはない（図-2 の B-C-D 間）。しかし、一部断面がコンクリートの終局ひずみを超えて D 点に近づく、以下のような現象が生じトンネルの機能を満たさなくなる場合があり得る。

- ① 覆工内面側がコンクリートの終局ひずみを超えれば、覆工片が剥落し列車運行に支障することがある。
- ② 内空変位が進行し、建築限界支障に至ることがある。
- ③ インバート部の変形が進み、走行安定性に影響を及ぼすことがある。

トンネルの安定性や機能を保証するためにはこれらの状態は避ける必要があるため、コンクリートの終局ひずみに達した状態を終局限界状態とした（図-2 の C 点）。

3. 使用限界状態に対する検討

次に、今までの設計法である許容応力度設計法と、今回提案した限界状態設計法の感度比較を実施した。ここでは、使用限界状態に着目し、許容応力度設計法から限界状態設計法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を行っている。なお、終局限界状態についても検討を実施する必要があるが、これは今後の検討課題とした。

(1)設計条件

(a)解析に用いた断面

解析条件を表-2に、解析に用いた断面を図-3に示す。形状の違いによる影響を調べるため、新幹線断面と単線断面の2断面について検討した。ここで、新幹線断面は文献1)を用い、また、単線断面については、側壁～アーチ部にかけては文献1)より、また、インバートについては、既存の設計事例における平均的なRを用いて作成している。

表-2 解析条件

覆工	設計基準強度： $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$
覆工厚	新幹線 $t=50\text{cm}$ ／単線 $t=35\text{cm}$
鉄筋	覆工厚は全周等厚、複鉄筋
地盤反力係数	$K=0.05\text{N/mm}^3$
土圧	なし
水圧	設計水位を天端+5mとし等偏分布として作用させる
近接荷重	無・等分布荷重・偏荷重

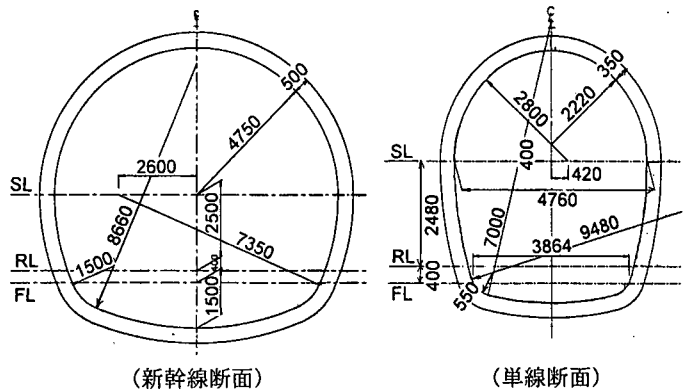


図-3 解析に用いた断面

巻厚・鉄筋量については、鉄道トンネルの都市部山岳工法トンネルの覆工の設計に関する事例調査を行い、その結果を参考として決めることとした。図-4に掘削断面積と覆工厚との関係を示す。複線トンネルでは山岳部の標準巻厚(30cm)に対して厚くとり巻厚40~50cmとしている事例が多い。単線トンネルでは複線トンネルと異なり、地質条件的、立地条件的に見て、やや特殊な事例が多かったため、覆工厚は30~45cmとばらつきが大きくな

っているが、山岳部の標準巻厚(25cm)よりも厚い傾向がある。また、図-5に掘削断面積とインバート巻厚の関係、図-6に覆工巻厚とインバート巻厚との関係を示すが、アーチ部とインバート部で巻厚を同一としている事例が多かった。これらの調査結果より、複線トンネルでは巻厚50cm、単線トンネルでは巻厚35cmとし、アーチ部とインバート部で巻厚を同じとして解析に使用することとした。一方、鉄筋量については、図-7に覆工の構造の事例調査の結果を示すが、70%以上の事例で、構造体としてのRC構造が採用されていることがわかる。また、全周防水型の設計事例が約半数を占めている。このことから、断面はRC

構造とし、鉄筋量についてはパラメータとして設計実績として標準的なD19@125mmとD19@250mmを選定することとした。

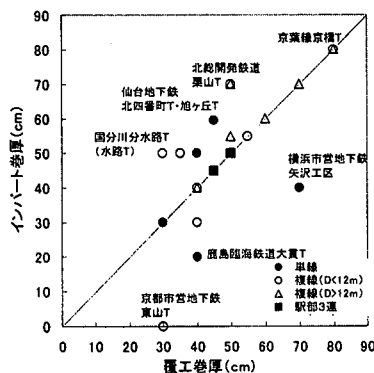


図-6 覆工巻厚とインバート巻厚との関係

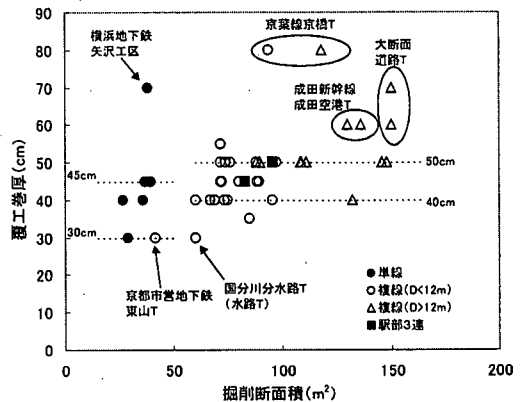


図-4 掘削断面積と覆工巻厚との関係

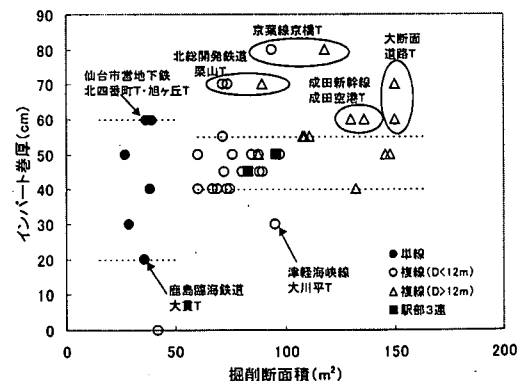
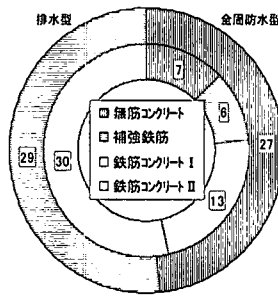


図-5 掘削断面積とインバート巻厚との関係

(b) 荷重条件

図-8 に事例調査による設計荷重の考え方について示す。設計荷重としては、

①荷重を覆工のみで支持
②荷重を支保と覆工とで分担
③完成後に加わる荷重のみを覆工が支持の3種類の考え方があり、①の荷重を覆工のみで支持するという考え方が最も多かったが、今回の解析では、掘削後地山の変位が収まった後で覆工が打設され、完成後は覆工には土圧は作用しないという考え方をとり、③の考え方をとることとし、水圧と近接荷重のみ作用させることとした。まず、水圧については、図-9 に実績調査から得られた土被り比（土被り/掘削幅）の分布を示すが、実績では $H/D \leq 1$ の事例が約半数あることを考慮し、土被りを 10m と想定して、水圧はその半分の 5m と仮定することとし、周圧として作用させることとした（荷重条件 A）。一方、近接荷重については、水圧に加え 50kPa の鉛直方向一様荷重を作用させる（荷重条件 B）ものと、水圧に加え最大 50kPa として等変分布荷重として鉛直方向に作用させる（荷重条件 C）もの 2 通りを考えることとした。図-10 に荷重条件についてまとめる。



凡例：

補強鉄筋：D13@200mm 程度の単鉄筋、
 $f_{ck}=18\text{MPa}$ 、構造計算なし
鉄筋コンクリートⅠ：D16@200mm 程度の複鉄筋、
 $f_{ck}=21\text{MPa}$ 、構造計算実施
鉄筋コンクリートⅡ：D19@200mm 程度以上の複鉄筋、
 $f_{ck}=21\text{MPa}$ 以上、構造計算実施

図-7 覆工構造の実績

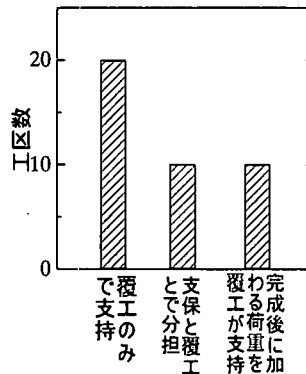


図-8 設計荷重の考え方

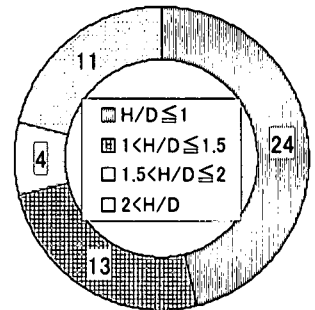


図-9 土被り比の分布

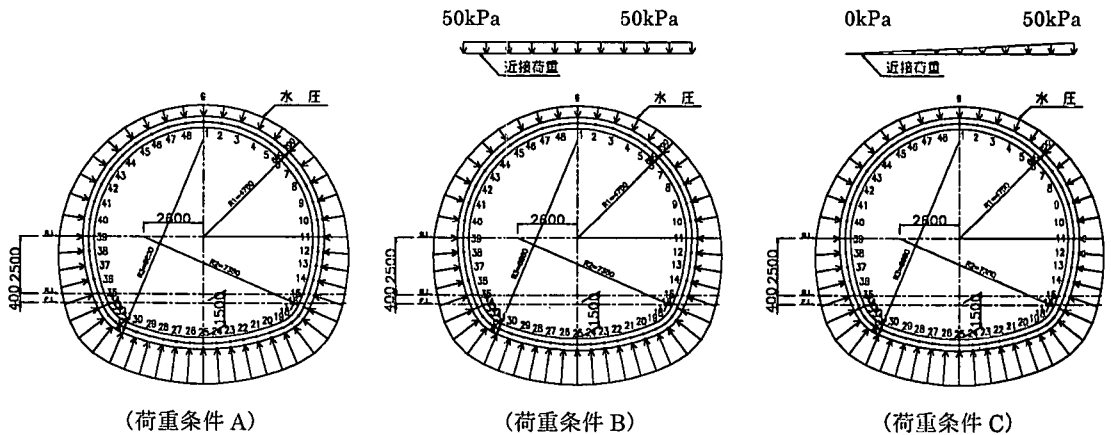


図-10 荷重条件

(c) 照査方法

照査方法としては、表-3 に示したように、設計法の変更による影響を検討するために、許容応力度設計法の他に、使用限界状態（ひび割れ幅による制限および鉄筋降伏）を想定して、計3手法による断面照査を行った。

表-3 断面照査方法

許容応力度設計法	コンクリートの曲げ圧縮応力度および鉄筋の引張・圧縮応力度による照査
限界状態設計法①	鉄筋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②	鉄筋の降伏に対する照査

(d) 解析ケース

解析モデルと断面照査方法の組み合わせをまとめると、表-4 に示すようになる。

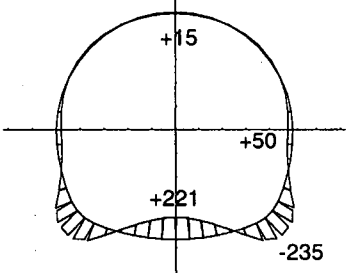
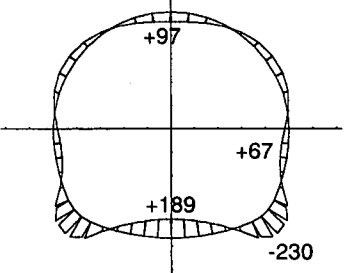
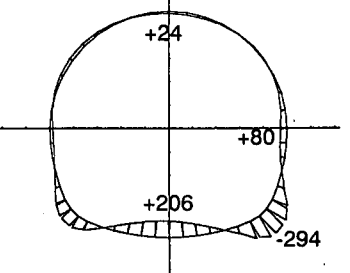
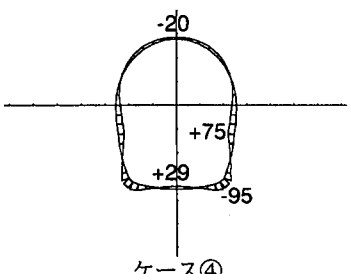
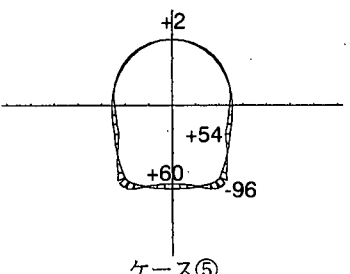
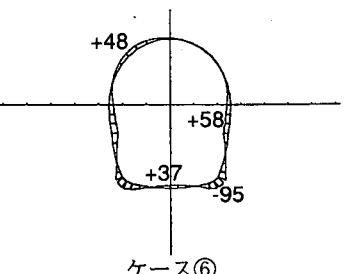
表-4 解析ケース

解析ケース	断面	荷重条件	覆工構造		照査方法
			巻厚	配筋	
ケース①	新幹線	A：水圧のみ	50cm	D19@250mm /D19@125mm	許容/限界①/限界②
ケース②		B：水圧＋近接荷重（等分布）			
ケース③		C：水圧＋近接荷重（等偏分布）			
ケース④	単線	A：水圧のみ	35cm		
ケース⑤		B：水圧＋近接荷重（等分布）			
ケース⑥		C：水圧＋近接荷重（等偏分布）			

(2) 解析結果

表-5 に曲げモーメント図を示す。土圧を作用させていないため、いずれの解析ケースもインバート部と隅角部で曲げが大きく働く一方で、アーチ部での曲げは小さくなっている。断面の違いに着目すると、単線断面においては新幹線断面と異なり、側壁部でも曲げが大きくなっている。荷重条件の違いに着目すると、荷重条件 B（水圧＋等分布近接荷重）では、アーチ部でモーメントが変化していることがわかる。一方、荷重条件 C（水圧＋等変分布近接荷重）では、新幹線断面では側壁～インバートの隅角部でモーメントが変化し、単線断面ではインバート中央部のモーメントが変化していることがわかる。

表-5 解析結果（曲げモーメント）（単位：kN・m）

	荷重条件 A	荷重条件 B	荷重条件 C
新幹線	 ケース①	 ケース②	 ケース③
単線	 ケース④	 ケース⑤	 ケース⑥

(3) 断面照査

(a) 照査条件

照査条件を表-6 の様に設定した。ここで、許容応力度は文献 2) に基づき、また、限界状態設計法における照査条件については、文献

3) に基づき設定している。なお、ここでは、使用限界状態を対象としているため、安全係数には 1 を使用している。

表-6 照査条件

許容応力度	コンクリート	$\sigma_{ca} = 9\text{N/mm}^2$ ($f_{ck} = 24\text{N/mm}^2$)
	鉄筋 (SD295)	$\sigma_{sa} = 180\text{N/mm}^2$
限界状態①	許容ひび割れ幅	0.005C (C: 被り=100mm)
限界状態②	鉄筋降伏	$f_{cd} = 24\text{N/mm}^2$ $f_{yd} = 295\text{N/mm}^2$

(b) 設計断面の比較

この断面照査結果を受け、新幹線・単線断面へ 3 種類の荷重条件を適用した場合の試設計結果を表-7 に示す。

表-7 試設計結果 (決定断面)

解析ケース	断面	荷重条件	設計断面			
			覆工厚	鉄筋量		
				許容応力度	限界状態①	限界状態②
ケース①	新幹線	A: 水圧のみ	50cm	D19@125mm	D19@125mm	D19@250mm
ケース②		B: 水圧+近接荷重 (等分布)		D19@125mm	D19@125mm	D19@250mm
ケース③		C: 水圧+近接荷重 (等偏分布)		NG*)	NG*)	D19@125mm
ケース④	単線	A: 水圧のみ	35cm	D19@125mm	D19@125mm	D19@250mm
ケース⑤		B: 水圧+近接荷重 (等分布)		D19@125mm	D19@125mm	D19@250mm
ケース⑥		C: 水圧+近接荷重 (等偏分布)		D19@125mm	D19@125mm	D19@250mm

*) NG: D19@125mm 以上の配筋あるいは巻厚増が必要

(c) まとめ

表-7 から、設計法の変更に伴う影響に着目すると、設計法として限界状態設計法① (ひび割れ幅制限) を適用しても、従来の許容応力度設計法と同様の設計断面が得られ、また、設計法として限界状態設計法② (鉄筋降伏) を適用すると、許容応力度設計法に対して鉄筋量が軽減されやや経済的な設計となることが予想される。また、荷重条件の変化に着目すると、許容応力度設計法で新幹線断面に近接荷重 (偏荷重) を考慮すると、インバート巻厚を増加させる必要があるが、限界状態設計法 (鉄筋降伏) を適用すると鉄筋量増による対応が可能となる。

4. まとめ

都市部山岳工法の覆工設計に限界状態設計法を導入するため次の検討を行った。

- ① 都市部山岳工法トンネルの限界状態について検討した。
- ② 過去の設計事例を調査し、標準的な設計断面を提案した。
- ③ ①②に基づき使用限界状態に対する照査を行い、限界状態設計法による設計結果と比較した。その結果、限界状態設計法を適用することにより、許容応力度設計法と同等かあるいはやや経済的な設計が可能となることがわかった。

今後、限界状態設計法における荷重 (水圧、近接施工の影響など) の設定方法や、終局限界状態、標準設計についても検討を加え、都市部山岳工法トンネルの覆工の設計法を確立して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) NATM 設計施工指針、日本鉄道建設公団、1996.2
- 2) 建造物設計標準解説 鉄筋コンクリート建造物及び無筋コンクリート建造物、日本国有鉄道、1983.2
- 3) 建造物等設計標準・同解説 コンクリート建造物、鉄道総合技術研究所、1992.10