

除荷を受ける都市部山岳工法トンネル覆工の設計法

Designing method of unloaded NATM tunnel lining in urban area

小島 芳之*, 小西 真治*, 吉川 和行*, 野城 一栄*, 松長 剛**, 朝倉 俊弘***

Yoshiyuki Kojima, Shinji Konishi, Kazuyuki Yoshikawa,
Kazuhide Yashiro, Takeshi Matsunaga and Toshihiro Asakura

* (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

** パシフィックコンサルタンツ (株) トンネル部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1)

*** 京都大学大学院工学研究科資源工学専攻 助教授 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

Recently application of NATM to tunnels in urban area where environmental and geological restrictions are strict is increasing because of its economic advantage and development of auxiliary methods. However, NATM tunnels in urban area are being designed case by case when construction near existing tunnels are planned, as the design method has not been established yet. We proposed modeling method of construction near existing tunnels and performed simulation analyses aimed at valuing the strength of the tunnel lining when the load of ground above the tunnel was unloaded and developing the design method. This paper reports results of the simulation analyses.

Key Words: NATM tunnel in urban area, lining, unloading, designing method

キーワード：都市部山岳工法トンネル, 覆工, 除荷, 設計法

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。また, 都市部山岳工法トンネルでは, 都市部に建設される都合上, 一般の山岳トンネルと比較して, トンネルに対する近接施工も増加すると予想されるが, 近接施工を受けるときの設計法も確立されたものがないのが現状である。本研究ではこのような都市部山岳工法トンネルを対象として, 代表的な近接施工としてトンネルの上部地山が掘削され除荷を受けるような場合を想定し, 解析による検討を行った。そして, 除荷を受ける都市部山岳工法トンネルの覆工の設計法の提案と, 可能切土量の目安の提案とを行っている。なお, 本研究は, コンクリート構造物への限界状態設計法の適用の流れに鑑み, 山岳トンネル覆工の設計にも限界状態設計法を適用することを試みている。

2. 解析条件

解析条件は以下の通りである。

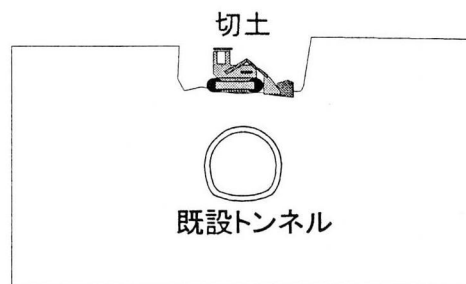


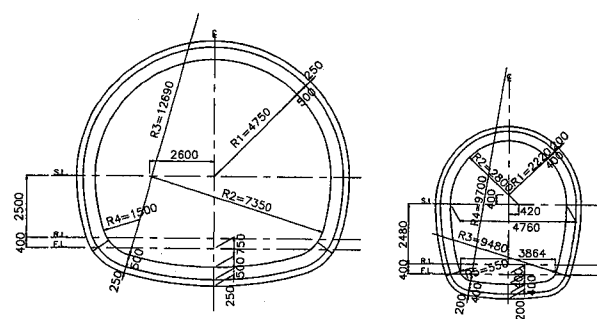
図-1 想定する近接施工

2.1 想定する近接施工

近接施工には色々な種類が考えられるが, 本研究においては簡単のため, トンネル建設後トンネル直上部に矩形に切土がなされることを想定した (図-1)。

2.2 覆工

解析モデルには図-2に示すような RC 構造の新幹線断面を持つ覆工と単線断面を持つ覆工とを使用した。これらの断面は, NATM 設計施工指針¹⁾を参考にして, 施工実績に基づき作成したものである²⁾。鉄筋, コンクリートのヤング係数, 単位体積重量等の物性値には文献³⁾より, 一般的に使用される値を用いた。表-1に解析に用いた物性値を示す。



新幹線断面 単線断面

図-2 解析断面

表-1 解析に用いた物性値

地山	単位体積重量	20 kN/m ³	NATM 設計施工指針 ¹⁾ より
	地盤反力係数 k	1×10 ⁵ kN/m ³	都市部の山岳トンネルで一般的値
	ヤング係数 E	266.8 MPa (弾性)	$k=1.7\alpha E_0 D_0^{3/4}$ から逆算し、除荷を考慮し 3 倍した
	ポアソン比	0.35	NATM 設計施工指針 ¹⁾ より
	断面形状	新幹線/単線	NATM 設計施工指針 ¹⁾ を参考に施工実績に基づき作成 ²⁾
	アーチ部配筋	水圧によって決まる (表-2 参照)	
	インバート部配筋	水圧によって決まる (表-2 参照)	
	鉄筋のぶり	85mm	
	単位体積重量	25 kN/m ³	コンクリート標準 ³⁾ より
	コンクリートのヤング係数	25 kN/mm ²	コンクリート標準 ³⁾ より
覆工	鉄筋のヤング係数	200 kN/mm ²	コンクリート標準 ³⁾ より
	ポアソン比	0.2	コンクリート標準 ³⁾ より
	巻厚	水圧によって決まる (表-2 参照)	
	法線方向地盤ばね	引張ばね切り	引張力は伝えない
	接線方向地盤ばね	ゼロ化しない	防水シート模擬
	地山～覆工間		

2.3 地山

本研究では骨組解析と FEM 解析とを行っている。標準的な場合を想定して解析を行うことから、骨組解析では地盤反力係数として都市部の山岳トンネルで採用される事例の多い $k=1 \times 10^5$ kN/m³ を使用することとした。FEM 解析では地山は弾性とし、弾性係数については k から逆算し $E=266.8$ MPa を用いている。これは都市部の洪積砂層としては一般的な値に相当する。

2.4 荷重

都市部に建設されるトンネルであることから覆工には防水構造を採用することとし、水圧が作用することとした。また、土圧については、地山と支保との相互作用により覆工施工時には地山の安定が図られていると考え、建設直後には土圧は作用していないものとした。すなわち、建設直後に作用する荷重は自重+水圧となる。一方、近接施工時については、覆工が施工された後に近接施工が実施されることが多いことから、覆工には、上部地山の切土に伴う地山の変位による荷重 (近接荷重) が作用することになる。図-3 に荷重の考え方についてまとめる。

2.5 地山と覆工コンクリートとの接触

地山～覆工間の接触については、覆工の半径方向に法線

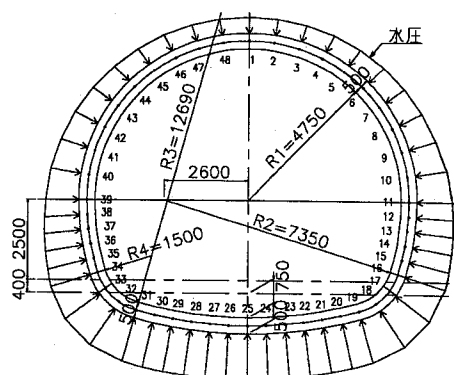


図-3(a) 荷重の考え方 (建設直後)

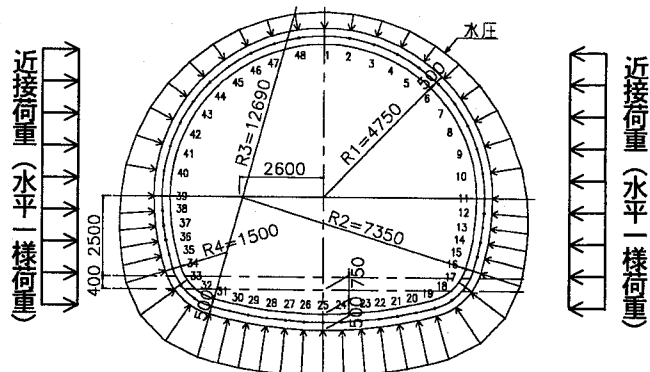


図-3(b) 荷重の考え方 (近接施工時)

方向地盤ばねをモデル化した。ここで、法線方向地盤ばねには引張力は作用しない (引張ばね切り) としている。一方、接線方向については、地山～覆工間に EVA 製の防水シートが施工され地山～覆工間の摩擦は小さいと考えられることから、法線方向地盤ばねはモデル化しないこととした。

3. 解析

3.1 解析の流れ

図-4 に解析の流れを示す。まず、表-2 に示した自重+水圧で決定された断面 (巻厚・配筋) を持つ覆工を所与とし、自重+水圧の他に水平一様荷重を与え、水平一様荷重を大きくしながら骨組解析を行い、覆工が耐えられる荷重、その時の内空変位 (許容最大内空変位) を求める。次に、許容最大内空変位が生じる掘削深さを FEM 解析により求め、上部地山の掘削可能深さとする。なお、ここで、掘削幅によっても影響の程度は変わるので、あらかじめ掘削幅を変化させて FEM 解析を行い、影響が最大となる掘削幅を求めておき、この掘削幅で解析する。なお、今回の解析において、建設時、近接施工時で解析方法を変更した理由は、一般に建設時には近接施工の計画に不明な点が多いので、設計時から近接施工を考慮した設計を一貫して行なうことは難しいこと、建設時は簡便な骨組解析、近接施工時は地山の掘削が考慮できる FEM 解析を採用する事例が多いことである。なお、覆工の耐力は限界状態設計法により求めることとし、近接施工については使用限界状態で

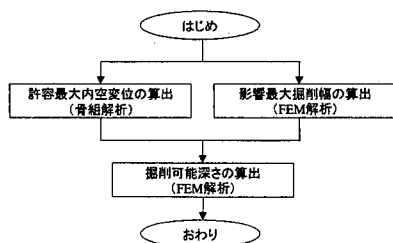


図-4 解析の流れ

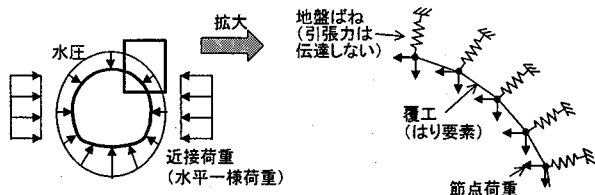


図-5 解析モデル

表-2 解析に用いた覆工の巻厚・配筋

断面	水圧 (水位)	巻厚	配筋	
			アーチ部	インバ-ト部
新幹線	なし	500mm	D19@250mm	D19@250mm
	天端±0m	500mm	D19@250mm	D19@250mm
	天端上+5m	500mm	D19@250mm	D22@125mm
	天端上+10m	600mm	D19@250mm	D25@125mm
単線	なし	400mm	D19@250mm	D19@250mm
	天端±0m	400mm	D19@250mm	D19@250mm
	天端上+5m	400mm	D19@250mm	D19@250mm
	天端上+10m	400mm	D22@250mm	D25@250mm

考慮することにした^{4),5)}。照査の条件は、応力の限界値に加え、アーチ部は許容ひび割れ幅、インバ-ト部は鉄筋降伏である。以下、それぞれについて説明する。

3.2 許容最大内空変位の算出 (骨組解析)

図-2で示した新幹線、単線のそれぞれの断面について、表-2に示した自重+水圧で決定された断面に対し、水平一様荷重を加えてゆきながら骨組解析を行い、許容最大内空変位 (覆工が使用限界状態となるときの内空変位。自重+水圧時からの増分で示す) を水平・鉛直それぞれについてあらかじめ求めておく。図-5に解析モデルを示す。なお、ここで、近接荷重として水平一様荷重を与えるのは、計算の簡便化と、3.3において詳述するが、一般に、トンネルは地表面の掘削幅が広いときは水平内空・鉛直内空ともに拡大し、一方で、掘削幅が狭いときは水平内空が減少、鉛直内空が拡大する挙動を示すが、一般にトンネルにとって危険側となるのがトンネルの水平内空が減少するときであることからである。図-6, 7に解析結果の一例 (軸力図, 曲げモーメント図) を示す。

図-8(a)に断面、水圧ごとの許容最大内空変位を、図-8(b)に許容最大内空変位時の近接荷重を示す。なお、水平一様荷重を受け、側壁部の曲げが大きくなるので、ほとんどの解析ケースで、側壁部のひび割れ幅制限で使用限界となった。新幹線断面では、水位が高くなると荷重が大きくなり、内空変位もそれに応じて大きくなるが、単線断面で

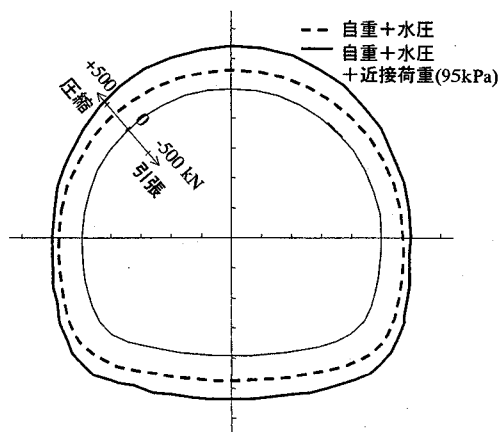


図-6(a) 解析結果 (軸力図)
(新幹線, 水位天端±0m, 近接荷重 95kPa の場合の例)

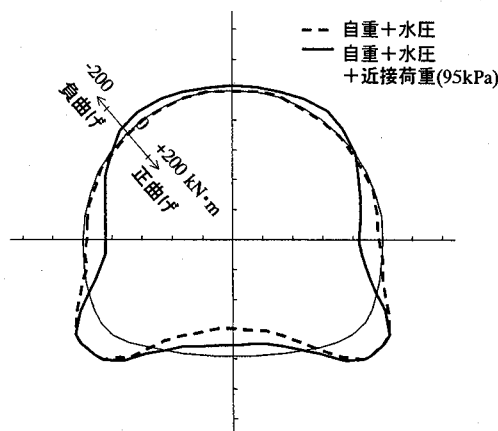


図-6(b) 解析結果 (曲げモーメント図)
(新幹線, 水位天端±0m, 近接荷重 95kPa の場合の例)

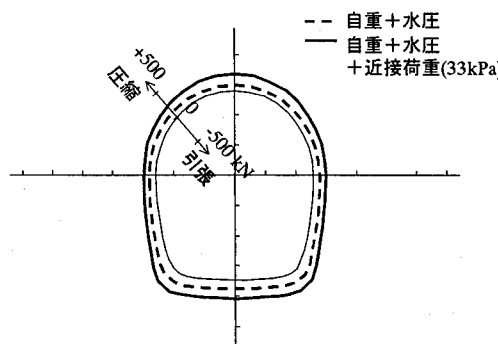


図-7(a) 解析結果 (軸力図)
(単線, 水位天端±0m, 近接荷重 33kPa の場合の例)

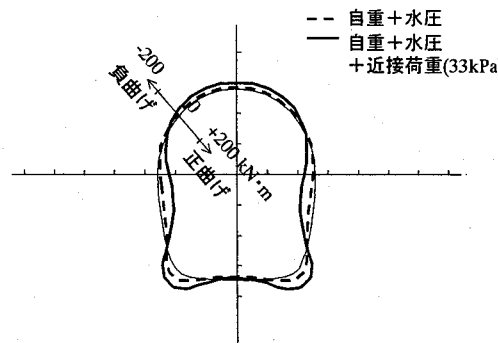


図-7(b) 解析結果 (曲げモーメント図)
(単線, 水位天端±0m, 近接荷重 33kPa の場合の例)

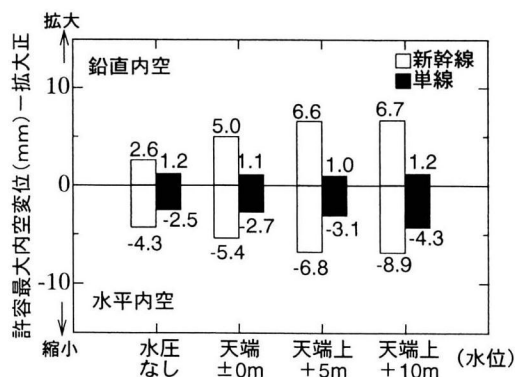


図-8(a) 解析結果まとめ (許容最大内空変位)

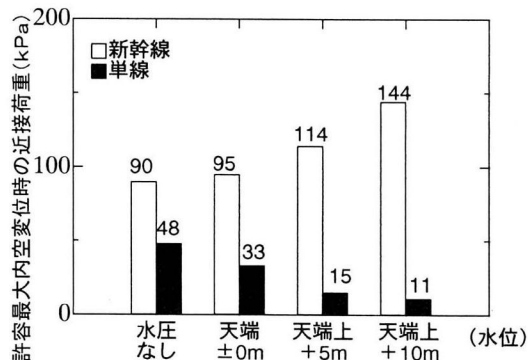


図-8(b) 解析結果まとめ (許容最大内空変位時の近接荷重)

は水位による許容最大内空変位の差は小さく、近接荷重については逆に水位が高くなるほど小さくなっていることがわかる。表-2にあるように、水圧により巻厚、配筋が異なっているので単純な比較はできないが、これは形状の差にあると考えられる。すなわち、新幹線の場合は、自重+水圧作用時には隅角部で曲げが最も大きくなり、ここで断面(配筋、巻厚)が決定され、この隅角部では曲げに対する余裕が小さくなっていたが、近接施工時には隅角部ではあまり曲げモーメントは増加せず、一方で、元々曲げモーメントに対して余裕のあった側壁部で曲げモーメントが増加するためと考えられる。一方で、単線においては、自重+水圧作用時のモーメントの形状は新幹線と同様であるが、近接荷重により側壁部だけでなく隅角部でも曲げモーメントが増加するためと考えられる。

3.3 影響最大掘削幅の算出 (FEM 解析)

次に2次元FEM解析を行い、掘削可能深さを求めた。ここで、近接施工がトンネルに与える影響は土被りと掘削幅に大きく依存すると考えられるため、それに先立ち、まず、掘削幅を1D~7D (D:トンネル幅)と変化させパラメータ解析を行い、最もトンネルに与える影響が大きくなるような掘削幅を求めることとした(図-9)。用いたFEM解析モデルを図-10に示す。

図-11に新幹線断面、水圧なし、土被り2Dの場合の、掘削深さ、掘削幅と内空変位との関係を示す。掘削幅によらず、掘削深さが深くなるに従い覆工は鉛直方向に拡大、水平方向に縮小することがわかる。掘削幅による変形挙動

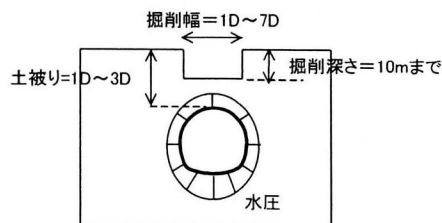


図-9 解析モデル

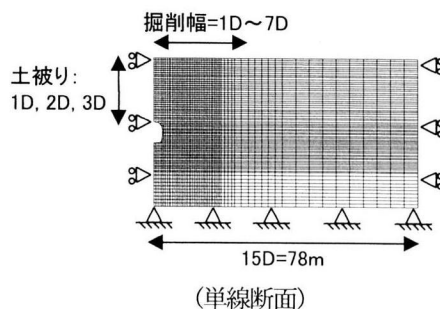
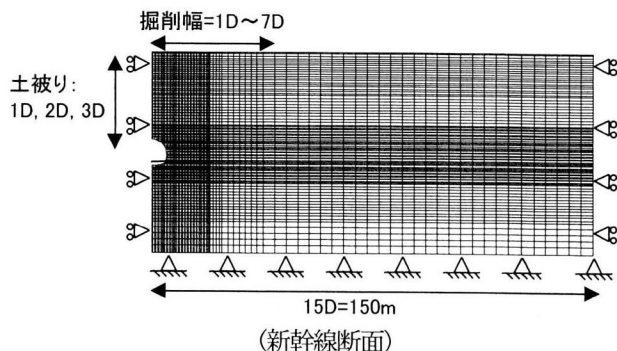


図-10 FEM 解析モデル

の違いに着目すると、掘削幅が狭い場合には掘削深さが深くなるにつれ内空変位の傾きが大きくなる傾向を呈し、一方で掘削幅が広い場合には内空変位は掘削深さとほぼ比例関係を呈することがわかる。

図-12に10m掘削時(土被り1Dの場合は5m掘削時)の掘削幅、土被りと内空変位との関係を示す。土被り1Dの時は掘削幅2Dの時、土被り2Dの時は掘削幅3Dの時、土被り3Dの時は掘削幅5Dの時最も大きな変形が生じることがわかる。すなわち、経験的に言われているように、トンネル上部90°範囲程度の掘削(図-13)がなされたとき、トンネルに最も大きな変形が生じることが確認できる。トンネル上部90°程度以上に掘削範囲が広がると内空変位は90°範囲程度の時に比べ小さくなる。これは掘削範囲が広範囲になることに伴ってトンネル周囲の地山が全体的に除荷されるようになり、地山中の応力が鉛直

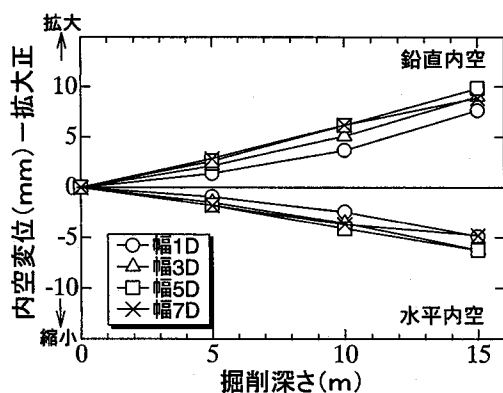


図-11 掘削深さ、掘削幅と内空変位との関係
(新幹線断面、水圧なし、土被り 2D の場合)

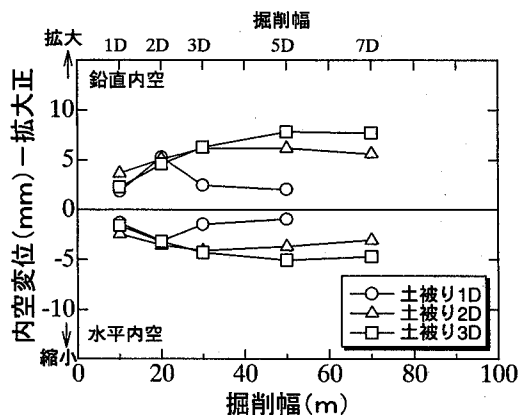


図-12 掘削幅、土被りと内空変位との関係
(新幹線断面、土被り 1D:5m 掘削時、土被り 2,3D:10m 掘削時)

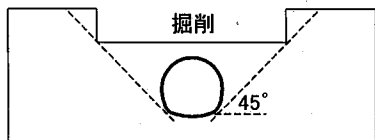


図-13 トンネルに最も大きな変形が生じる掘削幅

方向だけでなく水平方向についても減少するようになるためである。

3.4 掘削可能深さの算出

図-12 に示したように掘削可能深さは掘削幅により変化する。また、実際のトンネルの近接施工においては、掘削の形状が今回仮定した矩形のように明快なものは少ないこともあり、掘削可能深さを正確に求めるためにはトンネル毎に骨組解析、FEM 解析を実施する必要がある。しかし、本研究においては、近接施工が計画されるに当たって最初の大まかな判断を行うために十分な精度での掘削可能深さを提示することを目的としているので、それぞれの土被りに対して、最も大きな変形が生じる掘削幅、すなわち最も安全側の判断ができるような掘削幅を用い、土被り毎に掘削可能深さを提示することを目指し、トンネル断面、土被り、水圧をパラメータとして、計 24 ケースの解析を実施することとした。

図-14 に示すように、FEM 解析を行い、骨組解析結果

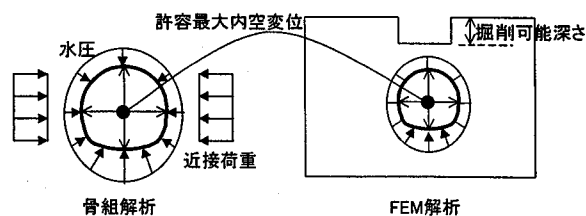


図-14 掘削可能深さの算出

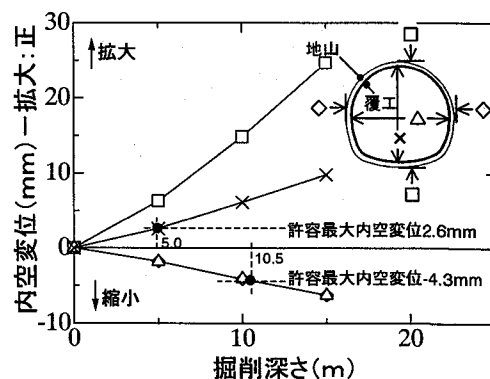


図-15 掘削可能深さの求め方の例
(新幹線断面、水圧なし、土被り 2D、掘削幅 3D の場合)

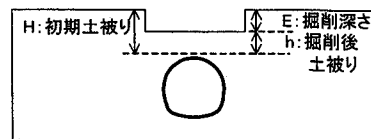


図-16 残存土被り比

(図-8(a))より許容最大内空変位を参照し、それと等しい水平あるいは鉛直内空変位が出るような掘削段階を掘削可能深さとする。図-15 に、新幹線断面、水圧なし、土被り 2D、掘削幅 3D の例を示すが、骨組解析より得られた使用限界時の内空変位は水平方向：-4.3mm、鉛直方向：+2.6mm、であった。これと FEM 解析の結果から、安全側として先に制限値にかかる鉛直方向の値より掘削可能深さを 5.0m と求める。なお、ケースによっては掘削により地下水位より掘削底面が低くなることがあるが、計算の簡便化と、水位を低下させない方が安全側の判定となることから水位は解析中は一定とした。

図-17 に、トンネル断面、各水位毎に、最大掘削時の残存土被り比をまとめる。ここで、残存土被り比とは、図-16 に示すように、 h (掘削後土被り) / H (初期土被り) のことで、小さいほど深い掘削が可能であることを示す。図-17 によれば、傾向は図-8 と同様であり、許容最大内空変位が大きくなれば残存土被り比が小さくなる(=深く掘削できる)ことがわかる。文献⁹⁾では、実績に基づき軟岩地山が切土を受ける場合の残存土被り比の目安は 0.6 程度とされている。水圧なしの場合と比較すれば、文献⁹⁾は少し危険側の値を提示していると考えられる。また、土被りの違いに着目すると、土被りが大きくなるほど残存土被りが大きくなる傾向が現れているが、これは、今回はトンネル上方 90° 範囲を掘削すると仮定したためで、土被

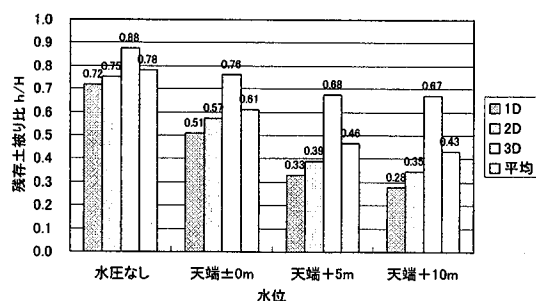


図-17(a) 水位、土被りと残存土被り比との関係(新幹線断面)

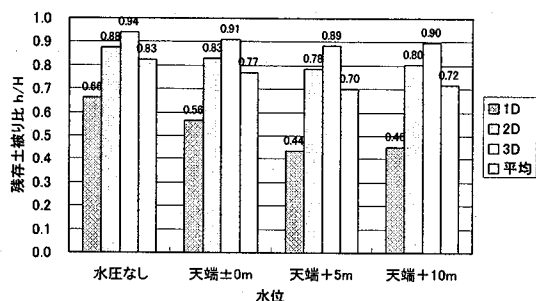


図-17(b) 水位、土被りと残存土被り比との関係(単線断面)

表-3 解析に用いた覆工の巻厚・配筋 (E=74.4MPa)

断面	水圧 (水位)	巻厚	配筋	
			アーチ部	インバート部
新幹線	なし	500mm	D19@250mm	D19@250mm
	天端±0m	500mm	D19@250mm	D22@250mm
	天端上+5m	500mm	D19@250mm	D25@125mm
	天端上+10m	650mm	D19@250mm	D22@125mm
単線	なし	400mm	D19@250mm	D19@250mm
	天端±0m	400mm	D19@250mm	D19@250mm
	天端上+5m	400mm	D25@250mm	D19@250mm
	天端上+10m	400mm	D19@125mm	D19@125mm

りが大きいほど掘削幅が大きくなっているためである。同じ掘削幅であると仮定すれば土被りが大きいほど残存土被り比は小さくなると考えられる。

3.5 地山の弾性係数の影響

3.3 においては $E=266.8\text{MPa}$ で解析を行ったが、都市部の地山においてはこれよりも軟らかい地山も存在する。ここでは $E=74.4\text{MPa}$ (地盤反力係数 $k=0.3 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ 相当) の場合についても残存土被り比の検討を行った。この場合もまず、自重+水圧で断面(巻厚・配筋)を決定した後に、同様の方法で残存土被り比を求めた。表-3に解析に用いた覆工の巻厚・配筋を示す。

弾性係数の違いに着目すると、建設時の配筋・巻厚が大きくなっているため直接の比較はできないが、弾性係数が小さい場合は掘削に伴う変形が大きくなるため、配筋・巻厚が大きくなっているのにも関わらず全体的に残存土被り比が大きく(=掘削深さが小さく)なった。

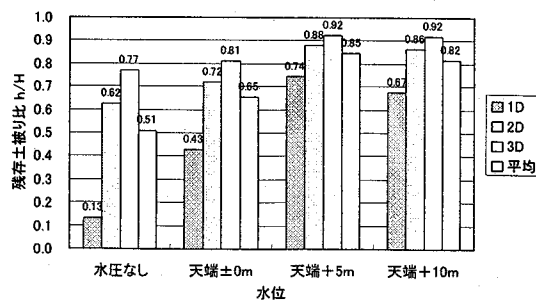


図-18(a) 水位、土被りと残存土被り比との関係(地山のヤング率 $E=74.4\text{MPa}$, 新幹線断面)

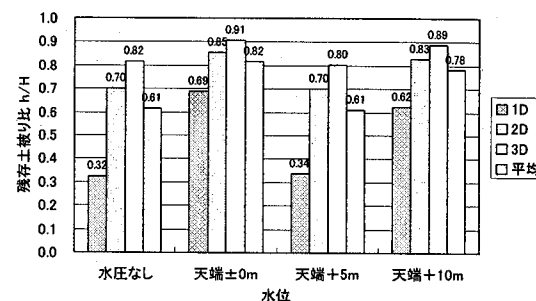


図-18(b) 水位、土被りと残存土被り比との関係(地山のヤング率 $E=74.4\text{MPa}$, 単線断面)

4. まとめ

本研究では、除荷を受ける都市部山岳工法トンネルの覆工の設計法の提案と、可能切土量の目安の提案を目的として数値解析を行った。その結果、残存土被り比は文献⁹⁾で示された目安よりも大きくなること、また、水圧、トンネル断面の形状により変化することがわかった。本研究の成果は、解析結果の安全側の値をとり、文献²⁾におおよその目安として提示されている。今後は近接事例、計測結果の収集を行い、今回提示した目安の妥当性の検討、また、各種形状への適用性の検討を進めていくこととしたい。

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団, NATM 設計施工指針, 1996.2
- 2) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法トンネル, 2002.3
- 3) 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, 1999.10
- 4) 小島芳之, 野城一栄, 齋藤貴, 益田彰久, 松長剛, 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, 第11回トンネル工学研究発表会論文・報告集, 2001.10
- 5) 朝倉俊弘, 小島芳之, 野城一栄, 益田彰久, 松長剛, 都市部山岳工法トンネル覆工の終局限界状態および設計法に関する検討, 岩の力学研究発表会, 2002.1
- 6) 鉄道総合技術研究所, 既設トンネル近接施工対策マニュアル, 1995.1

(2002年9月13日受付)