

エネルギー論によるトンネル周辺地山の安定性について

STABILITY OF CIRCUMFERENTIAL GROUND AROUND NATM TUNNEL BY ENERGETICS

齋藤 貴*・西岡 隆**

Takashi SAITOU, Takashi NISHIOKA

The purpose of this study is to discuss the stability of circumferential ground around NATM tunnels by using the finite element method and taking into account of the variation of several parameters of tunnels. The effect of excavation (shotcrete or rock-bolts), the modulus of ground deformation, the tunnel section form (horseshoe or circle), geological features (sandy or clayey soil) and underground water level (deep or shallow) was studied by distortional strain energy stored in the ground.

Keywords: NATM, finite element method, distortional strain energy

1. まえがき

わが国では、国土が限られているため、経済や社会の発展に伴う国土の有効利用を考えて、残された地下空間を効果的に利用しなければならない。特に近年、ジオ・フロントと呼ばれるような、大深度の地下空間を積極的に利用しようとする声をよく耳にするようになった。それに伴い、ライフライン等の地下への建設は、ますます増加の一途をたどっている。その様な背景から、トンネル掘削技術も著しく進歩し、厳しい施工条件下においてもトンネル掘削が可能となっている。しかし、その技術の多くは、現場でのトンネル掘削に伴う経験をもとにしているため、トンネルを設計するための理論については、まだ十分な研究がなされているとは言えない。そこで、本研究では、NATMトンネルの周辺地山の安定性をFEMによりパラメトリック・スタディを行い、エネルギー論によって地山の变形係数、断面形状(馬蹄形、円形)及び地質(砂質土、粘性土)等の違いが周辺地山の安定性に及ぼす影響、また、地下水の有無による支保工(吹付けコンクリート、ロックボルト)の効果を検討した。

2. 解析に用いた手法

従来の研究では、地山の安定限界を地山に発生する応力、またはひずみの限界に置き、それらから安全性を判断してきた。しかし、応力やひずみは大きさだけでなく、作用する面やその方向に関する情報も含んでいる。

* 学生会員 筑波大学大学院理工学研究科

** 正会員 工博 筑波大学教授

一方、地山は地層や割れ目などの存在により複雑で必ずしも均質ではなく、局所的には不連続な性質を持っているため、応力やひずみは実際には利用し難い面がある。

そこで本研究ではグローバルな視点から、ひずみエネルギーに注目した。ひずみエネルギーは体積変化に要する体積弾性弾性ひずみエネルギーと形状変化に要する形状弾性ひずみエネルギーとの和で表される。この2つのエネルギーの内、破壊に関係するのは形状弾性ひずみエネルギーであり、地山に発生する形状弾性ひずみエネルギーが、地山が蓄えることが出来る形状弾性ひずみエネルギーの最大値を越えると地山は破壊すると考えられる。また、エネルギー量はスカラー量であるため、エネルギーを用いる限り、割れ目や地層等の影響を受けない。そこでトンネルの掘削によって生じる形状弾性ひずみエネルギーの変化を求めてトンネル周辺地山の安定性を判断することにした。

- $\bar{U}_{s0}$: 地山に蓄えられ得る
弾性ひずみエネルギーの最大値
- U_{s1} : 掘削前に地山に発生する
弾性ひずみエネルギー・・・(1)
- U_{s2} : 掘削後に地山に発生する
弾性ひずみエネルギー・・・(2)
- U_{s3} : 支保後に地山に発生する
弾性ひずみエネルギー・・・(3)
- $\bar{U}_{s0} > U_{sn}$ ・・・弾性領域
- $\bar{U}_{s0} \leq U_{sn}$ ・・・塑性領域 (n=1, 2, 3)

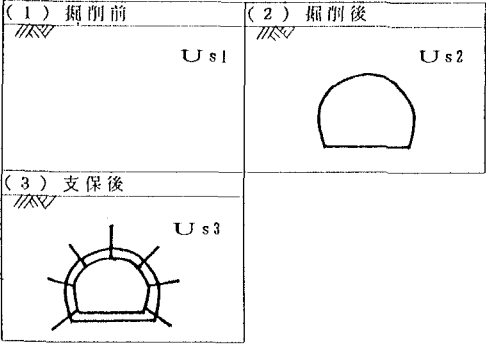


図-1

形状弾性ひずみエネルギーは、応力成分からあらかじめ体積変化を生じさせる平均応力を差し引いたひずみエネルギーである。このエネルギー判定基準を導入することにより、今まで経験でしか論ずることのできなかった事柄の多くを、理論的に説明することが可能となった¹⁾。

また、地山に含まれる地下水は静水圧として考える。したがって、地山の破壊条件におよぼす地下水の影響は、全応力を静水圧分だけ下げのに等しい。そこで、地下水位以下と以上で地山の単位体積重量(表-1)を変えて、地下水位の影響を解析した。

3. 安全率および安全性改善率²⁾

本研究では、FEMにより解析を行うので、任意の要素における任意の状態でのエネルギーを求めることができ、それによって、より正確で、より実際に即した尺度としての安全率を定義することができる。

本論文では、安全率(f)を以下のように定義する。

$$f = \sqrt{\bar{U}_{s0} / U_{sn}}$$

ここで、 $\bar{U}_{s0}$ 、 U_{sn} は、それぞれ最大形状弾性ひずみエネルギー、形状弾性ひずみエネルギーを表している。

また、支保効果をトンネル周辺全域にわたって大まかに把握するだけでなく、局所的に観察、検討を行うため先述の安全率を用いて、安全性改善率(F)を以下のように定義する。

$$F = \frac{f_2}{f_1}$$

ここで、無支保状態での安全率を f_1 、支保後の安全率を f_2 とし、安全性改善率は、支保工を施工することによってどの程度安全性が改善されるかを表している。

3. 解析に用いた物性値

トンネルは、馬蹄形、円形の複線鉄道トンネルとし、土被りは35mに固定した。その他、解析に用いた物性値を表-1に示す。

表-1 物性値

	砂質土	粘性土
変形係数 (E_R)	0.01, 0.1, 1 (GN/m^2)	
単位体積重量 (γ_E)	16, 20 (kN/m^3)	
側圧係数 (k)	0.5, 1.0, 1.5	
内部摩擦角 (ϕ)	20°, 30°, 40°	0°
地山粘着力比 ($2C/S$)	0	1.0, 1.5, 2.0
ポアソン比 (ν_R)	0.2	0.2
吹付けコンクリートのヤング率 (E_c)	1.88 (GN/m^2)	
単位体積重量 (γ_c)	24 (kN/m^3)	
ポアソン比 (ν_c)	0.2	
吹き付け厚 (t)	0~30 (cm), 5cm幅	
ロックボルト	$\sigma_y=372$ (MN/m^2), $L=4$ (m), $\phi=2.4$ (cm)	

4. メッシュモデル及び各領域

図-2に解析に用いたメッシュモデルの対象とする範囲、着目する5つの領域を示す。本研究では、トンネル断面形状を馬蹄形、円形とし、FEMによりトンネル周辺地山の安定性を解析した。ここで、用いる仮定やトンネル断面形状から、トンネル周辺地山および支保工は、力学的・構造的に左右対称であるため、半断面で解析を行った。また、境界条件は、対称軸の境界線上および右端では水平方向固定・鉛直方向自由、上端では水平・鉛直方向とも自由、下端では水平方向自由・鉛直方向固定とした。また、鉛直土圧、側方圧の作用する地山からトンネル境界上の応力に相当する外力を作用させて、トンネル内および周辺地山に生じるひずみエネルギーを求めた。

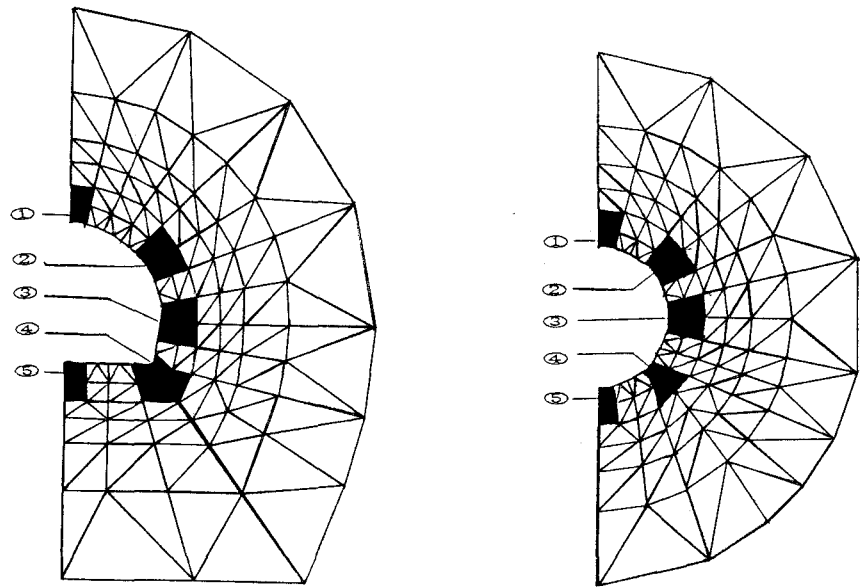


図-2 メッシュモデル及び各領域

5. 解析結果

5・1 安全性改善率と吹付け厚の関係

図-3は、図-2に示す馬蹄形トンネルにおける各領域での安全性改善率を示している。○、◇は、それぞれ側圧係数(k)の値を0.5、1.0にとっている。また、実線は地下水を含まず、一点鎖線は地下水を含む場合を表している。

$k=1.0$ の時は、5つの領域全てにおいて吹付け厚が厚くなるにつれてその安全性が改善されていることがわかる。しかし、天端①、側壁上部②、側壁中央部③では吹付け厚が20cmを越えると安全性改善率は横ばい状態となり改善は見られない。

一方、 $k=0.5$ の時は、天端、底盤⑤では、吹付け厚の増加によってかえって、安全性改善率が小さくなっていることがわかる。これらのことから、過剰な吹付けは、場合によって安定性を損なう恐れがあると考えられる。

地山に含まれる地下水の影響は、底盤を除く全ての領域で k の値によらず、地下水を含まない方がより安全性改善率が大きくなっている。また、底盤部分の領域④、⑤は、①、②、③の領域に比べて安全性改善率は低下している。

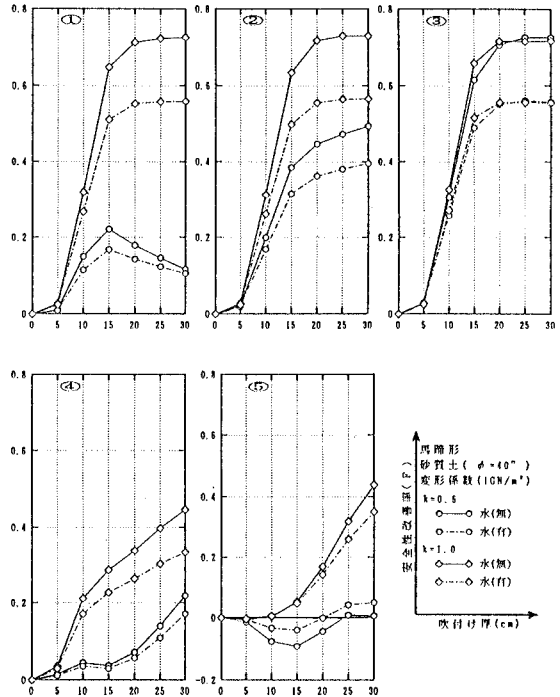


図-3 安全率と吹付け厚の関係

5・2 断面形状の違いによるトンネル周辺地山の安定性

図-4-1は、無支保での馬蹄形、円形それぞれの安全率の分布を表し、図中トンネル中心に近づくにつれ安全率が低くなり、黒い部分は塑性化したことを示している。

馬蹄形では天端～側壁中央部の上半分、および底盤で安全率が低く塑性化している。円形では、トンネル壁面に沿った円周部分、特に、中心から上下45°方向で塑性化した部分が目立っている。支保工を施すと、図-4-1のトンネルは馬蹄形、円形共に安全率が1以上になる。

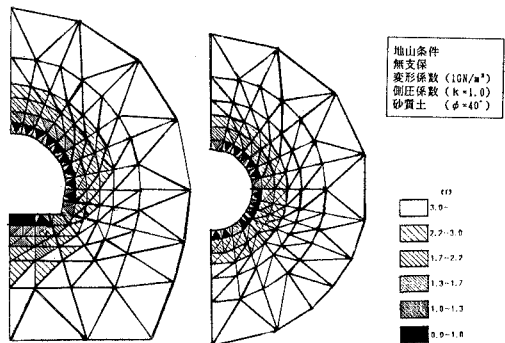


図-4-1 無支保の安全率の分布

図-4-2は、図-4-1と同じ条件での支保後の安全性改善率の分布を表している。先述の安全率の分布とは異なり、トンネル中心に近づくほど安全性が改善されていることを表している。

先に馬蹄形、円形共に安全率の低かった部分や塑性化した部分は、吹付けコンクリート、ロックボルト等の支保工を施すことによりその安全性が大幅に改善されていることがわかる。また、支保工によって安全性が改善される領域は、トンネル半径のおよそ2倍程度であることがわかる。

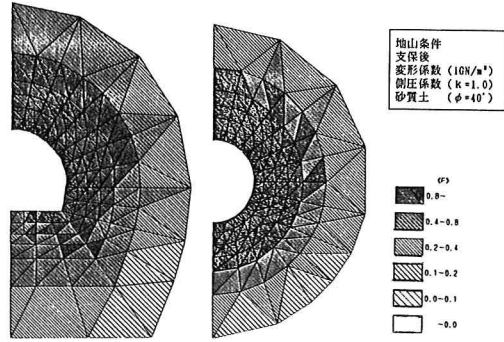


図-4-2 支保後の安全性改善率の分布

5・3 地質の違いによる地下水の影響

図-5は地質の違いによる地下水の影響を無支保での安全率で示している。図中、○、◇はそれぞれ砂質土、粘性土を表し、点線は地下水を含まず、実線は地下水を含んでいること表している。

砂質土では、①～⑤の全ての領域で地山に地下水が含まれない方が安全側に作用し、側圧係数の違いもそれほど現れていない。ところが、粘性土では地山に含まれる地下水の影響は、砂質土とは逆の結果となっており、側圧係数が1の時、①～④の領域で安全率が大きくなっていることがわかる。

これを安全性改善率でみると、砂質土、粘性土共に地山に地下水が無い場合の方が支保の効果は大きい。

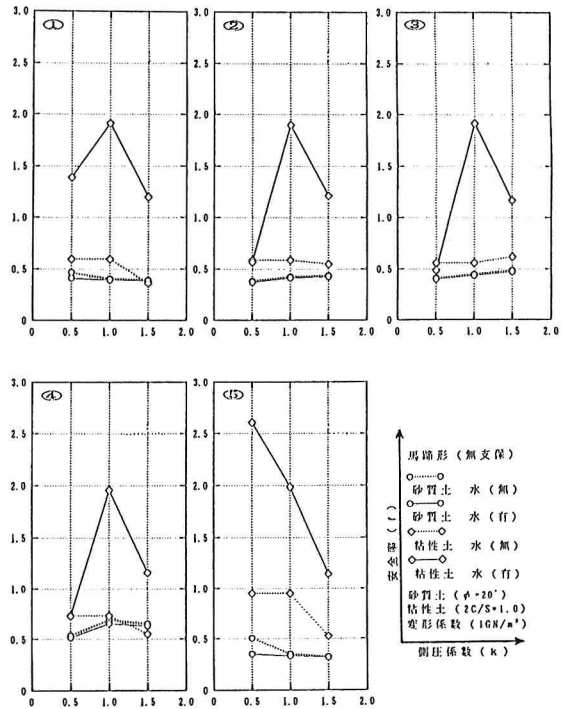


図-5 地質の違いによる安全率と側圧係数の関係

5・4 変形係数の違いと安全性改善率

図-6は変形係数と安全性改善率の関係を表している。図中実線は砂質土、一点鎖線は粘性土を表し、△、○、▽はそれぞれ側圧係数(k)が1.5, 1.0, 0.5を表している。地質の違いから、k=1.5の時は、①、④の領域で、k=1.0では、③、④の領域で、また、k=0.5では、②、④の領域でそれぞれ砂質土に比べて粘性土の方が安全性改善率が大きくなっている。

地山の変形係数と側圧係数の関係から、k=1.0の時は変形係数が大きくなるにつれて5つの領域で安全性改

善率が小さくなっていることがわかる。また、吹付けコンクリートの弾性係数に対する地山の変形係数の比が1に近づくにつれて、底盤⑤では安全性改善率が著しく低下する。

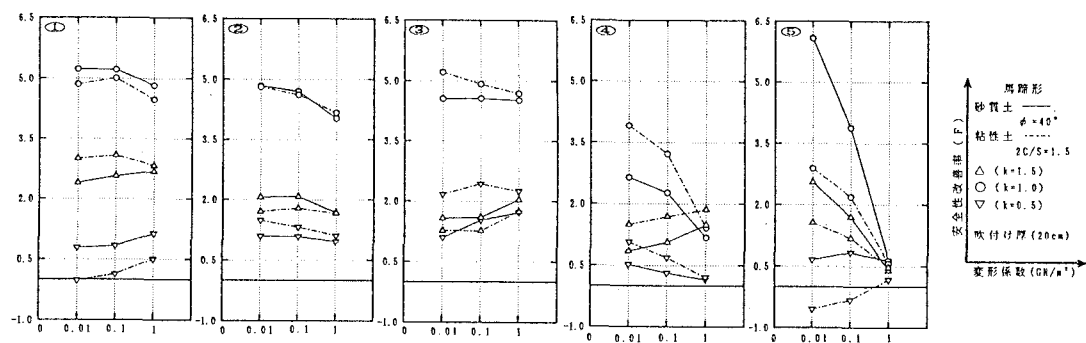


図-7 安全性改善率と変形係数の関係

6. 結論

今回用いた地山条件の範囲内では、馬蹄形では天端～側壁中央部(①～③)にかけての上半分、底盤⑤で、円形では円周に沿った部分、特にトンネル中心から上下45°方向でそれぞれ危険となることがわかった。これに対して吹付けコンクリート、ロックボルト等の支保工を併用することによって、素堀の状態での安全率の低い部分の安全性を大幅に改善できることが同様にわかった。この場合、安全性が改善される部分は、トンネル内径のおよそ2倍程度の領域であり、この領域は、従来から言われている緩み領域とほぼ同じである。しかし、吹付けコンクリートを支保工として用いる場合、過剰な吹付けはかえって安全性を損なう恐れがある。そこで安全性、経済性の点から20cm程度が適当な吹付け厚であると考えられる。

また、地質の違いによる地山に含まれる地下水の影響は(研究で用いた砂質土、粘性土共に両極端な例ではあるが)、砂質土と粘性土では地下水に対する傾向が異なり、粘性土では地下水は安全側に作用するが、砂質土では危険側に作用することがわかった。また、吹付けコンクリートとロックボルトによるトンネル施工は、地山の変形係数によって大きく左右され、硬岩のように変形係数の大きな地山では、効率が低いことがわかった。

以上のことから、形状弾性ひずみエネルギーの変化を用いることは、トンネルの安定性を判断する上で極めて有効な指標となることがわかった。

7. 参考文献

- 1) 松本 嘉司・西岡 隆: トンネルの設計理論, 共立出版, 1992.
- 2) 箱石 安彦・西岡 隆: 吹付けコンクリートとロックボルトの支保効果について, 第41回土木学会年次学術講演会, 1986.11.
- 3) J. C. JAEGER: 弾性・破壊・流動論, 共立全書, 1964
- 4) 戸川 隼人: マイコンによる有限要素解析(バージョン・アップ), 培風館, 1987.
- 5) 吉川 恵也・朝倉 俊宏: NATMのための設計パターン化の研究, 鉄道技術研究報告, No1235.1983.