

道路トンネルの変状に対する各種補強工効果の解析的検討

ANALYTICAL EXAMINATION IN EFFECT OF REINFORCEMENT METHOD TO DISPLACEMENT OF ROAD TUNNEL

蔣 宇静¹・東 幸宏²・李 博³・杉本 知史⁴・棚橋 由彦⁵

Yujing JIANG, Yukihiro HIGASHI, Bo LI, Satoshi SUGIMOTO, Yoshihiko TANABASHI

In lining-reinforced road tunnels, when the extent of plastic zones around tunnel constructed in soft ground expanded with time progress, the plastic pressure acted on lining will cause the damage of lining structures. Therefore, predicting the deformation development and clarifying reinforcement effect of different types of reinforcement methods with the sufficient accuracy is important for preventive maintenance and rational control of deformational behavior. In this paper, the time-dependend displacement predictions are carried out by applying the proposed Burger-MC deterioration model. Based on the numerical simulation results, effect of several reinforcement methods on controlling deformation development has also been analytically examined.

Key Words : Displacement, Reinforcement method, Deterioration of strength, Time dependence model, Displacement, Controlling effect

1. はじめに

軟岩の力学的特徴としては、ひずみ軟化やダイレーションのみならず、クリープや時間経過に伴う強度低下の性質が挙げられる。日本の国土は広く軟岩で覆われており、道路トンネルや鉄道トンネルの大半がこのような軟岩の地山中に施工されている。これらのトンネルにおいて二次覆工が施工された後、時間の経過と共に周辺地山に塑性領域が拡大してトンネル内空側に地山が押し出されて地圧が覆工に作用するケースが見られる。この地圧は塑性圧と呼ばれ、覆工に対して変形・ひび割れ・剥落などのダメージを与えることがある。この塑性圧は、トンネル掘削によって周辺地山に塑性領域が形成されたあと拡大するものであり、塑性領域における地山の力学的特性が変化するなど時間経過に伴う力学挙動に起因すると考えられる。また、覆工にダメージを及ぼすもう1つの要因としては、覆工自体の経年劣化が挙げられる。このような状況においては、内空変位の進行を抑制したり、必要な内空断面（建築限界等）を確保したりするなどのトンネル変状に対する補強対策が必要になる。このため、設計段階より変状発生の程度やこれによる補修の必要性、その部位、最適な対策工の選定、またはその効果を精度よく予測することが求められる。また、補強工を施工した場合は、内空変位の経時変化を実測することによって補強効果を評価することが望まれる。

上述のようにトンネルは後期変状を起こすため、予測や評価には変状現象の発生メカニズムが的確に反映された事前の力学的検討が有効であると考えられる。これには地山および覆工の適切な力学モデルを準備し、かつその力学モデルに基づく力学挙動を良好に再現できる数値解析手法の適用が必要になってくる。しかし、設計当初より地質情報の不足などの事情により、これまでは変状に対しての事前評価がなされることは少なかった。

キーワード：変状，補強工，強度低下，時間依存性モデル，経時的変状，抑制効果

¹正会員 長崎大学工学部 教授

²学生会員 長崎大学大学院 生産科学研究科

³正会員 長崎大学工学部 客員研究員

⁴正会員 長崎大学工学部 助教

⁵正会員 長崎大学大学院生産科学研究科 教授

本研究では、供用後におけるトンネルの変状要因として塑性圧に着目し、地山強度低下の時間依存性を考慮した変状解析を有限差分法によって行い、得られた結果に基づいて補強効果を解析的に評価することを目的とする。

2. 強度低下時間依存性モデルの概要

トンネル変状は、周辺地山の経年劣化が原因の1つであると考えられるため、時間の経過に伴い岩盤強度が低下するモデルを本研究では用いる。

図-1に示すレオロジーモデルの各部分はKelvinモデル、Maxwellモデル、Mohr-Coulombモデル（MCモデル）から成り、これらを組み合わせることで様々なモデルを作成することができ、Kelvin-MCモデルやMaxwell-MCモデルといったモデルが挙げられる。また、KelvinモデルとMaxwellモデルを直列につないだものをBurgerモデルと呼ぶ。ここですべてのモデルを組み合わせたBurger-MCモデル中のMCモデルの粘着力 c と摩擦角 ϕ を時間と共に低下させ、岩盤の強度劣化を考慮することができるように修正したモデルを、Burger-MC劣化モデル¹⁾と呼ぶ。

Burger-MC劣化モデルの構成式は以下の式(1)～(3)のように表される。ここに、 R_{thr} は岩盤の応力状態限界係数であり、応力状態係数 R が R_{thr} 値を超えると劣化を始める。 ω_c 、 ω_ϕ は粘着力と内部摩擦角の劣化率であり、両者の経時的変化は R に比例する²⁾。

$$\frac{dc}{dt} = -\omega_c R \quad (1) \quad \frac{d\phi}{dt} = -\omega_\phi R \quad (R \geq R_{thr}) \quad (2) \quad R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi} \quad (3)$$

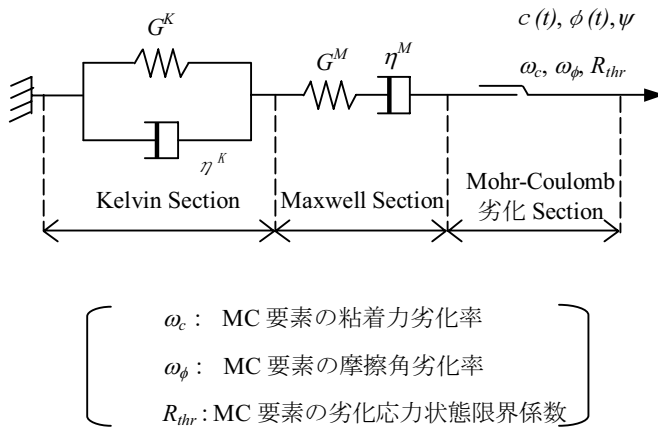


図-1 Burger-MC劣化モデルの構成

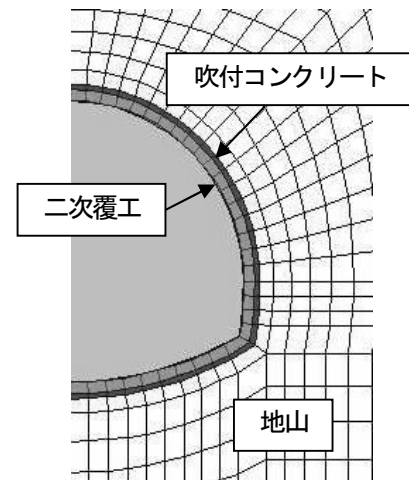


図-2 解析モデルの概略

3. 解析モデルと解析ケース

本研究では一例として、長崎自動車道うれしのトンネルI期線（土被り 375m、地山強度比 $Sp=0.24$ ）を解析の対象とした。図-2に解析モデルを示す。本研究で解析の対象とした補強工法は、塑性圧に対して有効であるとされる補強対策工（内巻工、炭素繊維シート接着工、鋼板接着工、ロックボルト補強工、覆工背面に空洞が存在すると仮定した裏込め注入工）を採用した³⁾。以下に各工法の基本的性質と解析における補強工のモデル化について示す。表-1に各補強工の入力物性値を、表-2に解析ケースを示す。

(1) 内巻工

内巻工は、トンネルの変状対策として多くの実績があり、覆工が著しく劣化している場合等に、覆工コンクリートの補強代替を目的として採用される。また、漏水・凍害対策としても採用されることもある。

内巻工の工種には吹付けコンクリート工法がある。従来薄い吹付けが多用されてきたが、覆工との付着性や部材としての一体性に対する配慮が不十分であったため、吹付け材料の劣化が甚だしく、剥離による事故もしばしば発生している。現在は鋼繊維補強コンクリートを用いたものが主流となっている。

解析では鋼繊維補強コンクリートの性能に着目して、シェル要素で弾性体としてモデル化を行う。入力物性値は鋼繊維補強コンクリートの物性値を参考に決定する。

(2) 炭素繊維シート接着工

炭素繊維シート接着工は、非常に厚みの薄い繊維シートを接着する工法であるので、覆工劣化対策のうちもっとも内空断面の減少が少ない工法である。重機などが不要な簡単な工法であり、少人数かつ短工期ですむ。また、軽量で可搬性に優れており、搬入・施工が容易であるという利点を持つ。曲げひび割れの開口を抑制する効果が高く、繊維の持つ強度特性が最大限に発揮され、高い補強効果が得られる。また、樹脂と繊維のみ用いるため、錆びの発生がない。ただし、圧縮力を受ける箇所では補強効果は期待できない、可燃性であるなどの留意点がある。

解析では、引張抵抗に優れており、曲げひび割れの開口を抑制する効果があるため、実際の繊維シートの厚さを反映したシェル要素でモデル化を行う。

(3) 鋼板接着工

鋼板接着工は、覆工表面に鋼板を接着する工法である。鋼板は覆工との間に数 mm の樹脂厚を確保する必要があり、取り付けの際にはアンカーボルトで固定する。そのため、炭素繊維シート工と比較すると内空断面は損なわれるが、ほかの補強工と比較して内空断面の減少は十分少ない工法である。

解析では、炭素繊維シート工と同様な効果を有していると考え、シェル要素でモデル化し、実際の鋼板に基づいたパラメータを決定する。

(4) ロックボルト補強工

ロックボルト補強工は、周辺地山に対し確実にロックボルトを定着させることで覆工の補強効果を得ることが可能になる。トンネル変状対策としてロックボルト補強工を用いる目的は、ロックボルトと地山が一体となって地山強度の低下を防ぐことで変状の進行性を抑制するものである。

解析では、ロックボルトは軸剛性を有することからケーブル要素にてモデル化を行い、必要な入力物性値はねじり棒鋼の物性値を参考に決定する。

表 - 1 入力物性値

	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
内巻工	3.10×10^4	0.2
炭素繊維シート接着工	2.30×10^5	0.3
鋼板接着工	2.10×10^5	0.3
ロックボルト補強工	2.06×10^5	-
裏込め注工	5.00×10^3	0.4

(5) 裏込め注工

トンネル覆工は、覆工コンクリートと地山を密着させ、均等な荷重が働くようにするとともに、地盤反力を十分に期待できるものとすることが重要である。しかしながら、NATM 工法が取り入れられる以前に建設された矢板工法によるトンネルでは、覆工背面と地山との間に空隙が残ることが多く、とくにアーチ天端部では相当の空隙が生じる場合がある。この空隙により、覆工に局部的に不均等な荷重が作用し、十分な地盤反力が期待できないため、変状対策の基本として裏込め注入を実施する必要がある。

解析モデルでは、スプリングライン部の覆工の裏に空メッシュ（空洞）を設けることにより、背面空洞を表現する。裏込め注工は Mohr-Coulomb の降伏条件を満たす注入材を施すことで表現する。

補強工の効果を比較するために、施工時期は供用後 2 年、3 年、4 年のいずれかとし、供用後 5 年間の変状シミュレーションを行った。なお、実際トンネルへの適

表 - 2 解析ケース

背面空洞	補強工	供用後施工時期
なし	内巻工	なし
		2年後
		3年後
		4年後
	炭素繊維シート工	なし
		2年後
		3年後
		4年後
	鋼板接着工	なし
		2年後
		3年後
		4年後
10°	ロックボルト補強工	なし
		2年後
		3年後
		4年後
	なし	なし
		2年後
		3年後
		4年後

用においては、供用後の実経過年数を解析モデルに反映させる必要がある。

4. Burger-MC 劣化モデルを用いたトンネル変状解析

(1) 補強工施工による塑性領域の変化

図-3 (a) に補強工を施工しない場合と供用後2年で各種補強工を施工した場合の5年経過時点における塑性領域の進展状態を示す。塑性領域全体で大きな違いは見られないが、ロックボルトを増設した場合の塑性領域と補強なしの場合を比較してみると、側壁側の塑性領域が進展している。これは $S_p=0.24$ と地山強度比が極端に低く、ボルトに作用する軸力によってボルトと地山の境界に生じるせん断応力が圧縮方向に大きく生じたため、塑性領域を促進させたと考えられる⁴⁾。鋼板接着工と内巻工に関しては、側壁側の塑性領域を抑制している。これは、上部の覆工面に対して補強を行っているため、覆工背面の塑性域を抑制したと考えられる。一方、炭素繊維シート接着工に関しては、補強なしの場合と同様な塑性領域の進展を示している。これは、炭素繊維モデルの性質が鋼板・内巻工の各モデルと異なり、面に作用する荷重に対する抵抗を有しないため、地山の塑性領域の抑制には至らなかったものと考えられる。

図-3 (b) に奥行き深さ5cm、空洞範囲 10° の背面空洞が存在すると仮定した場合における裏込め注入工の施工タイミング毎の5年時点での塑性領域の進展状態を示す。空洞がない場合と同様に、塑性領域全体として大きな変化は見られなかったが、2年後施工のケースでの塑性領域が最も小さく、早期施工での抑制効果があると考えられる。

(2) 補強工施工による内空変位比較

図-4 に2年後に各補強工を施工した場合の補強工種による内空変位の比較を示す。変位抑制の度合いを比較すると、最も補強効果が現れているのは内巻工であることがわかる。鋼板接着工と炭素繊維シートの内面補強工法においても施工しない場合に比べて変位を抑制しているが、これは内巻工と鋼板及び炭素繊維シートの基本的性質の違いから内巻工ほどの補強効果が得られなかったものと考えられる。しかし、ロックボルト補強工に関しては、塑性領域がより進展していたことから伺えられるように、補強のない場合と比較して変位の度合いが逆に大きくなっている。

図-5 (a) ~ (d) に各補強工を施工した場合の施工タイミングによる内空変位の相違を示す。図-5 (a) の内巻工において最も変位を抑制したのは2年後に施工した場合で、無補強の場合の変位を27.7%低減させることになり、より早期の補強効果が期待できると考えられる。

(b), (c) の内面補強工においても内巻工ほどではないものの、早期に施工した場合がより補強効果が得られていることが分かる。しかし、(d) のロックボルトに関しては、施工した場合のほうが補強をしない場合よりも変位が大きくなっていることが分かる。

この理由として、前述したように地山強度比が0.24と極端に小さい地山にボルトを打設したことで地山とロックボルトとの境界に生じるせん断応力が圧縮方向に大きく作用したために、無補強時と比較して変位が大きくなったためと考えられる。

図-5 (e) に側壁部分の覆工背面に空洞（深さ5cm、空洞範囲 10° ）が存在すると仮定したトンネルにおける裏込め注入工の施工タイミング毎の内空変位の比較

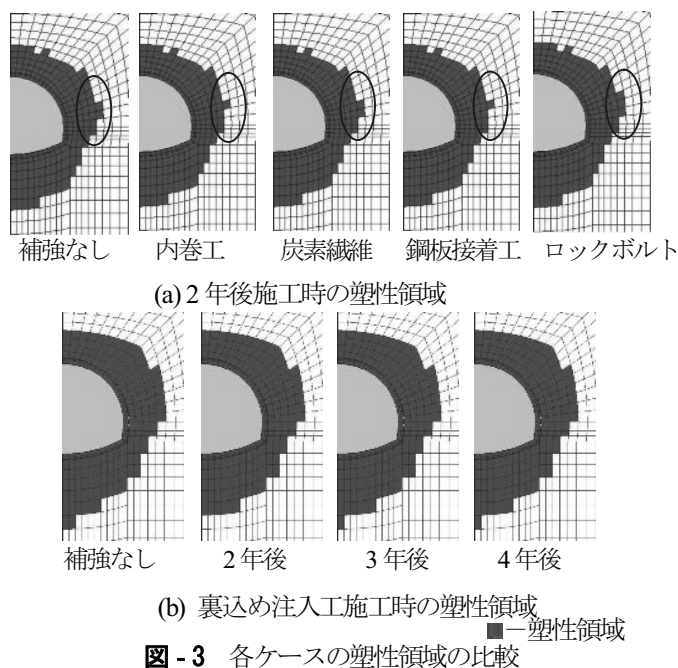


図-3 各ケースの塑性領域の比較

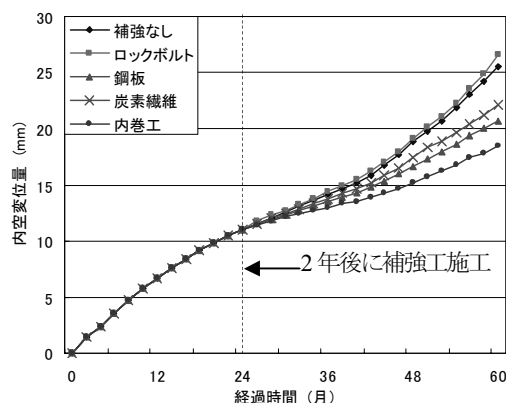


図-4 各補強工による内空変位比較

を示す。裏込め注入工においても、2年後施工で無補強時に比べて変位を54.6%低減させている。これは、裏込め注入を行うことで周辺地山と覆工が一体化し、覆工背面に生じる地圧を均等に覆工に伝えることができたようになったことが考えられる。また、施工タイミングで比較して分かるように、早期に補強を行うほどより大きく変位が抑制されていることから、内巻工や炭素繊維シート工などと同様に早期の補強効果が期待できると考えられる。

図-6 に補強工施工時期別の内空変位低減率の比較を示す。内巻工、炭素繊維シート接着工、鋼板接着工については2年後施工時での内空変位低減率が最も高く、3年後施工、4年後施工の順に低減率が低くなっている。これよりも、これらの補強工法は早期に施工することで高い変位抑制効果が得られることが分かる。また、背面空洞が存在すると仮定した場合での裏込め注入工による補強においても内巻工などと同様に2年後施工での内空変位低減率がもっとも高く早期施工での変位抑制効果が大いに期待できる。

しかし、ロックボルト補強工に関しては、本論文の解析条件では内空変位低減率が逆に負の値を示していることから、

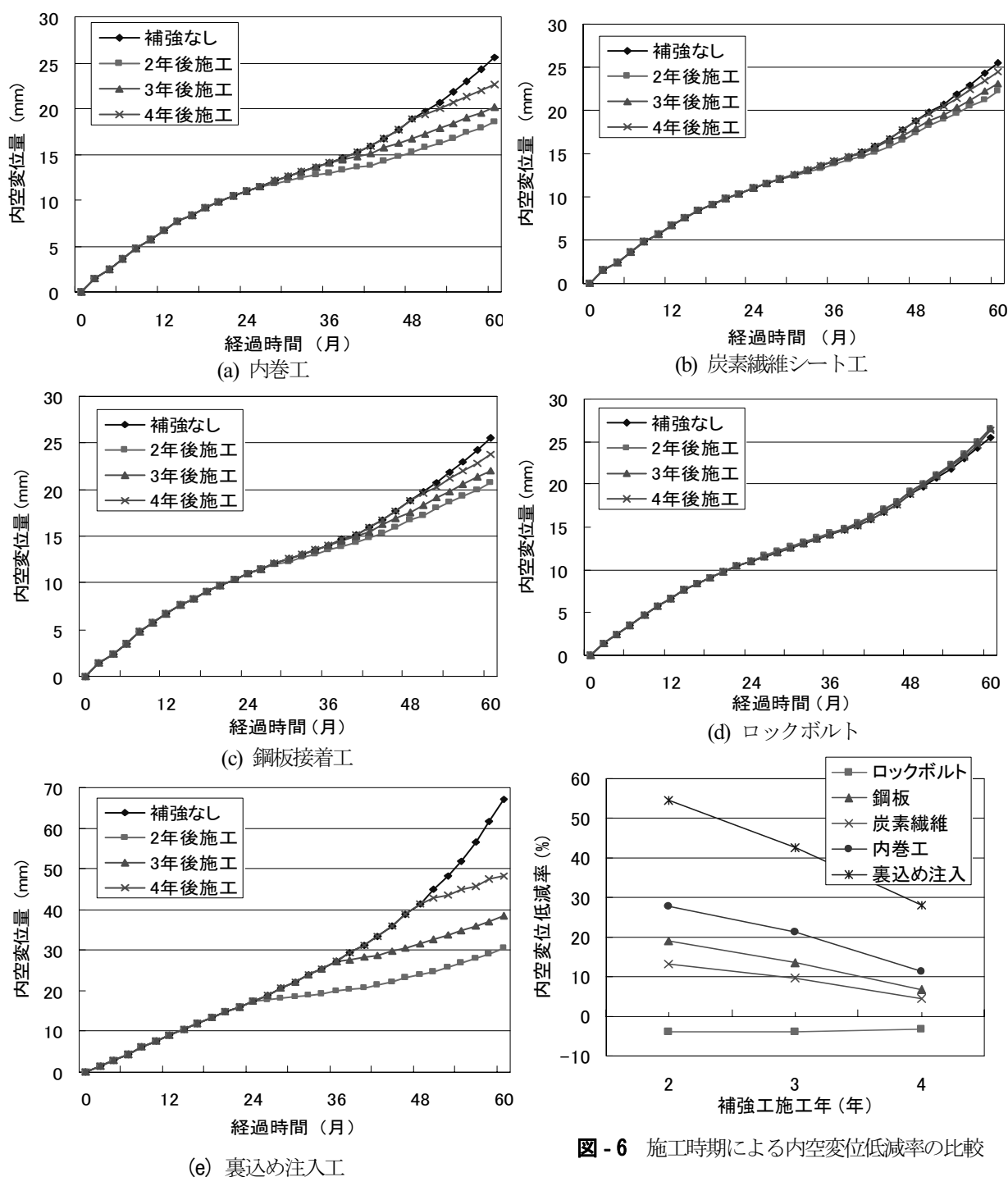


図-6 施工時期による内空変位低減率の比較

図-5 施工タイミングによる内空変位比較

地山強度比などを確認した上で、比較検討により、ロックボルトの変状トンネルへの適用条件を明らかにすべきと考える。

5. まとめ

本研究では、内面補強工（内巻工、炭素繊維シート、鋼板接着工）、裏込め注工の比較検討により、塑性領域の進展に対する抑制効果に大きな差が見受けられないものの、補強工施工後に生じる変位の進行について補強工施工のタイミングが早いほど抑制効果が現れることを確認することができた。しかしながら、ロックボルト補強工に関しては、塑性領域の進展抑制効果・変位の抑制効果は見受けられず、補強材として施工することでかえって変位を促進させるという結果も得られた。つまり、補強材としてのロックボルトの適用条件について今後はさらに解明していく。

また、地山強度比を変化させた変状予測と各補強工の変状シミュレーションの結果、地山分類に応じた補強効果の評価が可能になることも明らかにした。

参考文献

- 1) Guan Z, Jiang Y, Tanabashi Y, and Huang H : A new rheological model and its application in Mountain Tunneling, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.23, No.3, pp.292-299, 2008
- 2) 里優ほか：強度の時間依存性に着目した岩盤の解析，第18回土質工学研究発表会論文概要集，pp.817-820，1983
- 3) (財)鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，pp.89-96, 1988
- 4) 蔣 宇静ほか：軟岩地山の安定におけるロックボルトの力学的作用効果，土木学会論文集，No.561/III-38，pp.19-31，1997