

薄肉柔支保構造（吹付けコンクリート，ロックボルト）の 支保機構に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THIN FLEXIBLE TUNNEL SUPPORT SYSTEM

足立紀尚*・田村 武**・八嶋 厚***

By Toshihisa ADACHI, Takeshi TAMURA and Atsushi YASHIMA

The mechanical efficiency of a thin flexible tunnel support system such as shotcrete lining and rock bolts is investigated on the basis of experimental works. At first, model tests of tunnel excavation in which shotcrete lining and rock bolts were simulated by thin papers were carried out in a dry sand ground. As the results, it is found out that even if so flexible thin paper closed ring lining has a remarkable effect on the tunnel stability and that the effect of rock bolts appears only when they are placed to get into the outside of a plastic zone developed in the surrounding ground. Secondary, a circular tunnel excavation was simulated by shrinking a metal ring in an aluminium rod mass and the development of a loosened zone in the ground due to tunneling was discussed.

1. 序 論

Rabcewicz¹⁾ により提唱された NATM (New Austrian Tunneling Method) はわが国においても適用例が増加している。NATM の特色は以下の3点にまとめられる²⁾。

a) “トンネルはできる限り地山でもたせる”というトンネル掘削の基本理念に基づき、

b) 地山の強度維持と本覆工への土圧を均等に分布させ、かつ軽減させるべく、“地山は緩めず、最大強度発揮時のひずみまでに変形をとどめる”との考えに立脚し、それを達成するため薄肉柔支保構造として、吹付けコンクリートやロックボルトによるリング構造を素早く構築し、

c) 現場計測によって上記機能の確認と本覆工の施工時期の指示などを行う。

“トンネルはできる限り地山でもたせる”とか“地山は緩めず、最大強度発揮時のひずみまでに変形をとどめる”というトンネル掘削の基本理念は決して NATM の

みの専売特許ではない。これはトンネル工学における長年の経験によって培われてきたものであり、NATM の独創性は薄肉柔支保構造として、吹付けコンクリートやロックボルトを用い、上に述べたトンネル掘削の基本理念の具現化という工学的意義にあるといえる。

柔な吹付けコンクリート覆工によって反力を与えながら平衡状態に至るまで地山の変形を許すのは“地山は緩めず、最大強度発揮時のひずみまでに変形をとどめる”ことである。これにより、吹付けコンクリート覆工内に過度の曲げモーメントは発生せず、地山への反力が一様に分布する。柔なたわみ性覆工では反力が一様に分布し、覆工内に曲げモーメントが生じないことを Peck³⁾ は異方応力場に円形トンネルを掘削する場合を想定し、Fig. 1 を用いて以下のように説明している。

a) たわみ性をもち、圧縮のリング応力には耐える円形リングを周辺地山を乱すことなく押し込む。

b) リング内部には土が残っているから、リングへの作用土圧分布は Fig. 1(b) の左側半分に示すように一様ではない。

c) 次いで、内部の土を取り去ると、たわみ性リングが平衡を保つためには作用土圧が一様とならねばならない。したがって、図の右側半分に示すように鉛直土圧が減少する一方、水平土圧は増加して一様分布となる。

* 正会員 Ph. D. 京都大学教授 工学部交通土木工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所
(〒612 宇治市五ヶ庄)

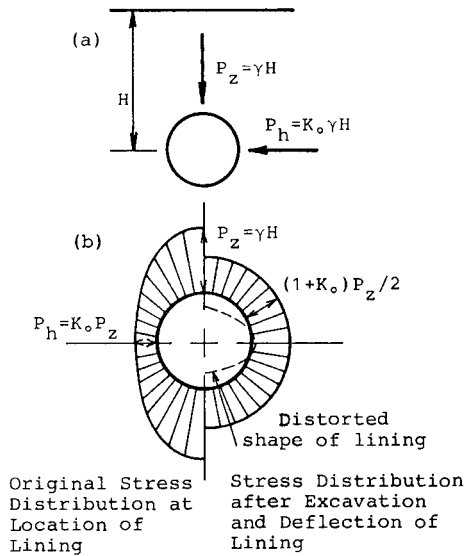


Fig.1 Peck's imaginary experiment, (a) Anisotropic stress condition in ground and (b) Pressure against and deflections of hypothetical lining³⁾.

このような土圧の再配分によって覆工は図中の点線のように楕円に変形するが、作用土圧は一樣となるから、覆工内に曲げモーメントは生じない。

実際、完全なたわみ性覆工はあり得ないし、また単に力のつり合いのみでは問題は解決しないが、たわみ性覆工の機構をよく説明していると考える。

そこで、このような薄肉柔支保構造の効果が実際どのようなものであるかを、地山材料に乾燥した珪砂を用い、吹付けコンクリート覆工とロックボルトを紙でモデル化した実験によって定性的解明を行った。さらに、砂質地山にトンネルを掘削したとき、どのように緩み域が発達するかをアルミ棒積層体を地山に用いて調べた。

2. 実験装置および実験方法

実験の目的は、リング状の覆工をあらかじめ地中に設ける場合、それが薄い紙であっても効果のあることを示すとともに、“トンネルは地山でもたせる”，すなわち“支保工や覆工は地山の強度維持のための補助工法である”との考え方を明らかに示すことにある。また、特に浅いトンネルで地山を緩めることがいかに危険であるかもアルミ棒積層体による実験で調べた。

(1) 土槽実験

実験には高さ 80 cm、幅 90 cm、奥行 30 cm の土槽と直径 8 cm の金属円筒を準備し、地山材料として標準ふるい 420 μm を未通過分の珪砂を用いた。地山材料に乾燥砂を用いた理由は粘着力がなく、いわば摩擦性流体ともいえる材料であり、悪い地山条件を表わすためである。

吹付けコンクリートとして用いた紙を Table 1 に示すが、ロックボルトには No.1 のケント紙のみを用いた。行った実験の種類は Table 2 に示す、A、B、C、D の 4 種類である。実験 A は覆工の厚さの違いが地山の安定性にいかに影響するかを調べるもので、紙の厚さを変えて実施した。実験 B は“地山は緩めず弾性変形させる”というトンネル掘削の基本理念を検討するためのもので、トンネル周辺地山にあらかじめ所定の緩みを与えて実施した。実験 C は覆工とロックボルトの相乗効果を調べるもので、覆工にロックボルトをのり付けして行った。実験 D はロックボルトの打設位置の違いによる地山の安定性の相違を調べるもので、実験 C ではすべて Table 3 の「基本型」を用いたのに対し、その他に 4 つのタイプについて検討した。なお実験 D ではロックボルトの長さをすべて 8 cm とした。実験の手順は以下のようである。

- Photo 1(a) のように金属円筒を土槽に挿入する。
- 実験 A では Fig. 2(a) の、また実験 C、D では Fig. 2(b) の紙を金属円筒の外側に巻き、紙円筒と前面のガラスとの接触面のすき間から砂が漏れるのを防止するためグリースを一様の厚さに塗る。Photo 1(b) はこの段階の状態を示している。

Table 1 Papers for lining and rock bolts.

	Paper type	Weight (g/m ²)	thickness (mm)
No.1	Kent paper	154.3	0.180
No.2	tracing paper	60.0	0.058
No.3	tracing paper	50.0	0.050
No.4	tracing paper	40.0	0.045

Table 2 Testing conditions.

Test	Supporting Condition	Parameter
A	lining only	lining thickness, overburden
B	lining only + looseness (δ)	looseness, overburden
C	lining + rock bolt	rock bolt length, paste, overburden
D	lining + rock bolt	Configuration of rock bolt, overburden

Table 3 Configuration of rock bolts.

Basic Type	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4

c) 砂を土槽に入れ、所定のかぶりまで10 cm厚さごとに様に突き固める。トンネル中心軸からの高さとしての土かぶりは、10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cmと変化させた。Photo 1(c)はこの状態を示している。

d) 各土かぶりに対して、金属円筒を引き抜き、トンネルが破壊したときの引抜き量を記録する。なお実験BではFig. 2(c)のように厚紙で作製した半円筒を覆工上面にのせておき、金属円筒を引き抜く前に半円筒を引き抜くことでトンネル周辺を緩め、実験した。金属円筒の引き抜き量を以下トンネル掘進長とよぶことにする。

(2) アルミ棒積層体実験

村山・松岡⁴⁾はアルミ棒を用いて、降下床による実験を行い、Fig. 3のように降下床と同一の移動を示す領域Iと、領域Iに追従してゆっくり移動する領域II、さらに領域IIの外側にあって降下床を降下させても土粒子の移動しない静止領域IIIに分けられることを明らかにした。

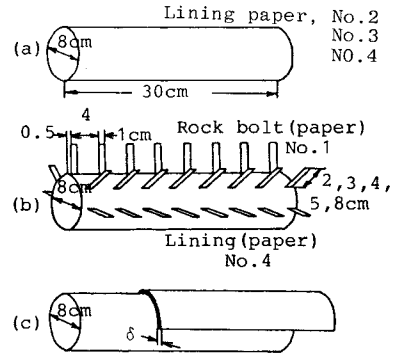
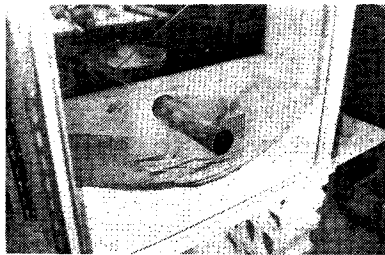


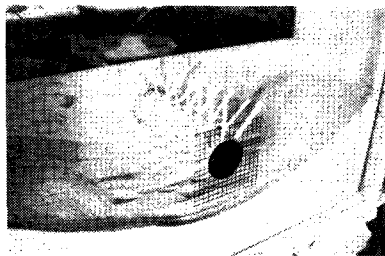
Fig. 2 Size and arrangement of lining and rock bolts, (a) for Test A, (b) for Test C and (c) for Test B.

そこで、降下床が半円形状（トンネルの上部半断面）の場合、領域Iと領域IIの緩み域がどのように発達するかを調べるため、アルミ棒積層体で半円形の降下床で実験した⁵⁾。しかし、この種の降下床実験ではトンネル下部半断面の掘削による周辺地山への影響を解明できないこと、またトンネル壁面のスプリングライン部が変位0の特異点となるなどの欠点をもつため、今回はアルミ棒積層体地山内に直径可変の金属円筒を埋設しておき、その直径を徐々に収縮させることにより、トンネル掘削をシミュレートした⁶⁾。地山は長さ5 cmのアルミ棒を水平に積み上げ形成するが、積層体は直径1.6および3.0 mmのアルミ棒を重量比3:2で混合して準備した。これは標準砂の粒径加積曲線にほぼ平行になる割合である。Photo 2はアルミ棒積層体による実験装置である。

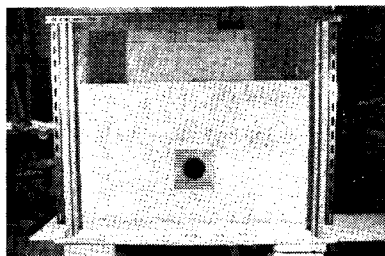
トンネルの掘削は金属円筒を収縮させることでシミュレートするが、収縮はFig. 4に示すような円筒の内壁に添え木を配し、ヒンジで支持した装置によって行った。金属円筒の収縮に伴われる地山の動きは地上に固定されたカメラで、金属円筒を直径5 mmずつ収縮させる間の変化を同じフィルムに重ね撮りすることによって記録した。すなわち、地山の移動域は不鮮明な画像として写るから、移動域を調べることができる。



(a)



(b)



(c)

Photo 1 Test procedure, (a) Inserting a brass pipe, (b) Rolling lining and (c) Preparation completed.

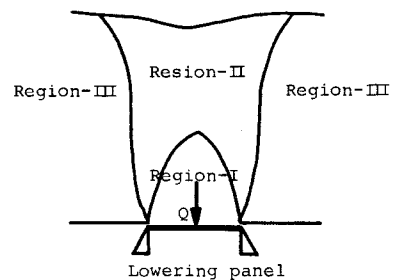


Fig. 3 Various regions developed in ground.

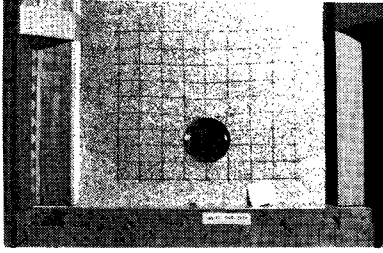


Photo 2 Apparatus used in model test of tunnel excavation.

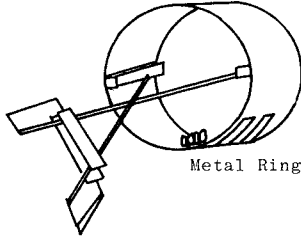


Fig. 4 Device for the shrinkable metal ring.

3. 実験結果と考察

(1) 土槽実験

Fig. 5 は実験 A, すなわち覆工の厚さの違いによる効果を No. 2, No. 3, No. 4 覆工に関して示している. 図より求まる知見は

a) 最も薄い No. 4 覆工の場合, トンネル掘進長が 5~7 cm でかぶりによらずすべて破壊に至っている. これは村山・松岡⁴⁾による降下床の実験事実と一致している. すなわち, 村山・松岡の実験によると降下床に作用する土圧合力 Q は降下床幅 B によって変化するが, 土かぶり D には影響を受けず, さらに土圧合力 Q は Fig. 3 の領域 I の土の自重にほぼ等しいことが明らかにされた.

b) 覆工 No. 3 では破壊時のトンネル掘進長は増加しており, 厚い No. 2 となると掘進長は 30 cm に達し, トンネルは破壊しない. このように, 薄肉柔覆工の効果は明らかで, 乾燥砂から成る地山であっても, 薄紙覆工のわずかな反力によって地山の安定性を確保できることを示している.

上述の実験 A ではトンネル掘削時にはすでに覆工が地山内にある, 実際のトンネル掘削の過程と異なっている. そこで実験 B は実際のトンネル掘削により近いものとする, さらに“地山は緩めず弾性変形させる”というトンネル掘削の基本理念を検討するため, 金属円筒を引き抜く前に所定の緩みを地山に与えて行った. 本実験には No. 3 覆工を用い, 与える緩み量 δ と土かぶりをパラメーターにして, 緩みがトンネルの安定性に及び

す影響を調べたが, 結果は Fig. 6 のようである. 図において, ばらつきはあるものの緩み量が多いほど, 掘進長は減少してトンネルが不安定となる傾向が現われている. この理由は地山を緩めることで覆工反力が一様ならず覆工内部に曲げモーメントが生じることによると定性的には考えられるが, さらなる解明が必要な課題である.

さて, 実験 C はロックボルトの長さの違いによる支保効果の差を検討する実験であるが, ロックボルトと地山間の付着力の有無による効果の相違についても考察した.

実験に先立ち, Fig. 7(a) の装置を用いて, ロックボ

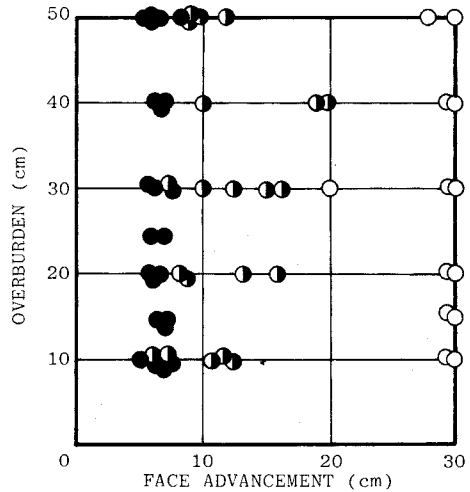


Fig. 5 Relation of tunnel advancement at tunnel collapse vs. overburden for Test A, ○ No. 2 ● No. 3 ● No. 4.

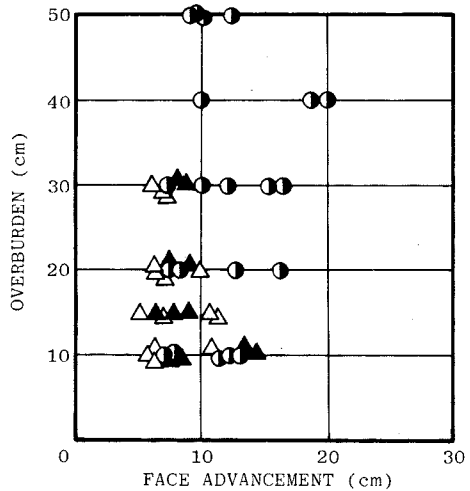


Fig. 6 Relation of tunnel advancement at tunnel collapse vs. overburden for Test B, $\triangle \delta = 3$ mm, $\blacktriangle \delta = 1$ mm, $\bullet \delta = 0$ mm.

ルト用のケント紙と地山材料の珪砂との摩擦係数を幅 1 cm、長さ 8 cm のケント紙の両面にのりを塗布した場合と無処理の場合双方に対して引抜抵抗を求める要領で調べた。Fig. 7(b) に $\tau \sim \sigma_n$ 関係で結果を示しており、図中の「—」は τ の値のばらつきを範囲を、●, ○印は平均値を表わしている。図より、のりを塗布することで摩擦抵抗は約 2 倍となることがわかる。Fig. 8 に実験 C の結果を示すが、これより得られる知見を列挙すると、

a) 無処理のロックボルトはボルト長 $L=2 \sim 5$ cm いずれの場合にも、土かぶりがない場合を除いて、支保効果は期待できない。

b) のり付のロックボルトは $L=2, 3$ cm の短い場合効果がみられないが、 $L=4, 5$ cm の場合に局部的に覆工は変状するものの、円筒を 30 cm 引き抜いてもトンネルは安定に保たれる。このことはロックボルトの付着力が効果のあることを示している。

c) 無処理であっても、 $L=8$ cm と長い場合には支保効果は明らかである。すなわち、砂質地山の場合、村山・松岡のいう領域 I（緩み領域）外に達するロックボルトの打設が有効に作用するものと考えられる。

上述の実験 C は Table 3 の基本型でロックボルトの長さを変えて支保効果を検討した。そこで、実験 D ではロックボルトの打設方向の違いが支保効果にいかに関与するかを調べるため、Table 3 の 4 つの打設パターンについて、 $L=8$ cm を用いて検討した。実験結果は Fig. 9 に示すとおりであり、以下の知見が求まる。

a) ロックボルトの打設方向の違いによる支保効果は、本実験における条件に限るとスプリングライン上方 45° のものが最も有効であり、天端直上方向とスプリ

ングライン上水平方向のものには顕著な効果がみられない。

b) ロックボルトを天端直上方向に打設しても効果がみられないのは、ロックボルトが緩み域に完全に含まれているためであり、他方スプリングライン上方 45° の打設に効果があるのは緩み領域外にロックボルトが到達していたからであると考えられる。

(2) アルミ棒積層体実験

Fig. 10 は重ね撮り写真をとくに、金属円筒の収縮に

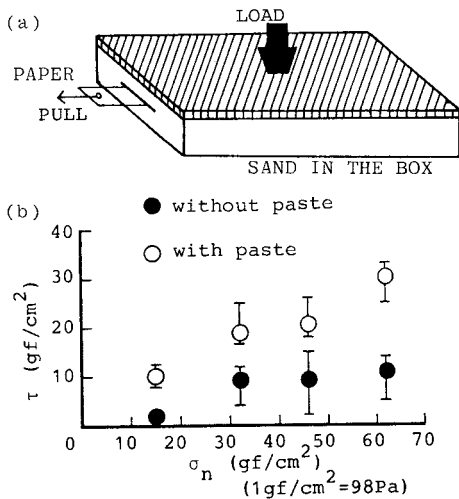


Fig. 7 (a) Apparatus for measuring friction between paper (rock bolt) and sand, (b) Friction between paper and sand.

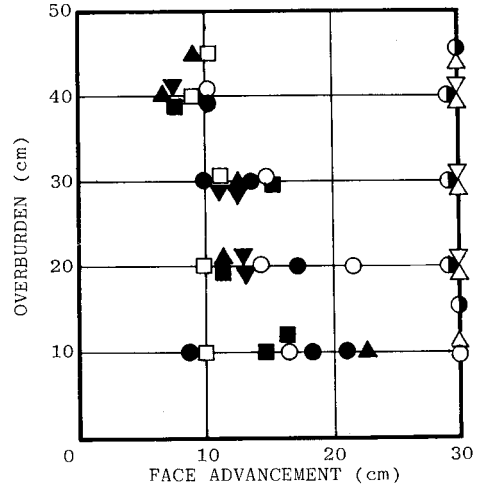


Fig. 8 Relation of tunnel advancement at tunnel collapse vs. overburden for Test C (without paste), ● $L=2$ cm, ■ $L=3$ cm, ▲ $L=4$ cm, ▼ $L=5$ cm, ○ $L=2$ cm, and (with paste) ○ $L=2$ cm, □ $L=3$ cm, △ $L=4$ cm and ▽ $L=5$ cm.

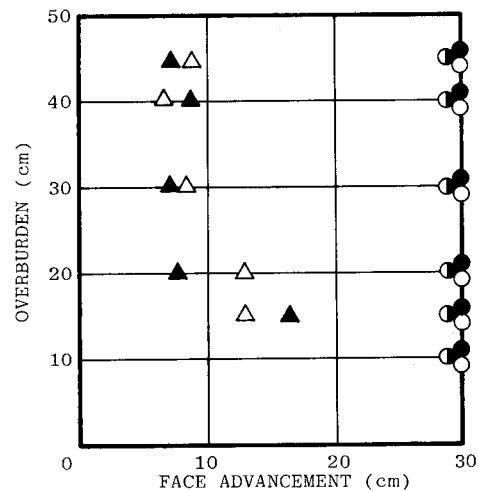


Fig. 9 Relation of tunnel advancement at tunnel collapse vs. overburden for Test D, ● Basic Type, ○ Type 1, △ Type 2, ▲ Type 3, ○ Type 4.

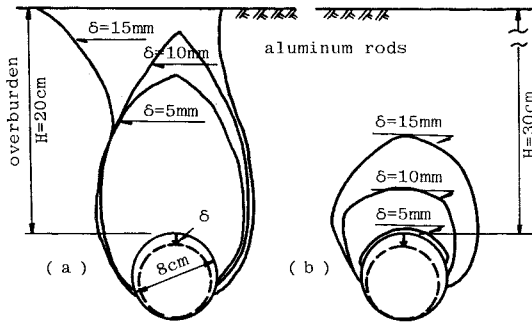


Fig. 10 Development of loosened zone in the model test ground.

伴って緩み領域がどのように発達するかを図示したものである。Fig. 10(a) は土かぶり 20 cm, Fig. 10(b) は土かぶり 30 cm の場合であり、図中の点線は金属円筒の収縮の様子を表わしている。図より得られる知見は

a) 緩み領域はまず天端よりトンネル壁面をおおるように生じ、急速に上達するとともにスプリングラインの下方にまで及ぶ。

b) Fig. 10(a) で明らかなように、土かぶりが小さい場合には緩み領域は地表面にまで達するが、Fig. 10(b) のように土かぶりが増加すると緩み領域は逆に縮小するという興味ある事実を示している。

4. 結 論

本研究では、地山材料に乾燥した珪砂を用い、吹付けコンクリートとロックボルトを薄紙でモデル化した実験を行うことによって、それら柔支保構造の効果とトンネル土圧の作用機構の定性的な解明を試みた。この実験を通して得られた結論は以下のものである。

- a) 本実験のような比較的浅いトンネルの場合、トンネルの安定した掘進長はかぶりによらない。
- b) 覆工が厚いほど掘進長は増加する。
- c) 地山を緩めると掘進長は減少する。
- d) ロックボルトは長いほど有効である。
- e) ロックボルトと地山との付着力はトンネルの安定に対して有効である。
- f) 本実験における条件下では、ロックボルトは斜

め上方に打設するのが効果大きい。

g) f) との関連において、ロックボルトは緩み域外にまで達すると支保効果を発揮するが、緩み域内にとどまる場合には効果が顕著でないと考えられる。

次いで、トンネル掘削に伴う緩み域の発達の様子を明らかにするため、アルミ棒積層体を用いてトンネル掘削シミュレーション実験を行った。それによる結論は、

a) 緩み域は天端上方に急速に発達し、ついにはスプリングラインの下方にまで及ぶ。

b) 土かぶりが浅いと緩み領域は地表面にまで達するが、土かぶりが増すと緩み領域は逆に縮小する。

本研究はトンネル掘削による定性的な地山の变形挙動のみを考慮しており、定量的な地山の変位量とか地山内の応力については論及していない。したがって、吹付けコンクリートやロックボルトの設計指針を確立するためには、本研究で得られた結果に基づいて、覆工と地山の相互作用を含めた力学挙動を正しく説明できる解析手法を開発する必要がある。

本研究は京都大学防災研究所で実施したものであって、卒業研究の一部として実験に協力していただいた新川正典(大阪ガス)、木村 亮(大学院学生)、上野 洋(大学院学生)の三君に深く謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Rabcewicz, L. V. : Stability of tunnels under rock load, Water Power, June, July and August, 1969.
- 2) 足立紀尚：トンネルにおける実施例、動態観測の活用—情報と施工—, 土木学会関西支部, pp. 83~104, 昭 52.
- 3) Peck, R. B. : Deep excavation and tunneling in soft ground, 7th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., State of the arts volume, Mexico, pp. 225~290, 1969.
- 4) 村山朝郎・松岡 元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 187 号, pp. 95~108, 昭 49.
- 5) 足立紀尚・田村 武・八嶋 厚・木村 亮：トンネルの支保効果に関する基礎研究, 京都大学防災研究所年報, 第 25 号 B, pp. 85~99, 昭 57.
- 6) 足立紀尚・八嶋 厚・上野 洋：トンネルの支保効果に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第 26 号 B, pp. 45~50, 昭 58.

(1984. 5. 10・受付)