

膨張性泥岩中のトンネル掘削におけるゆるみ領域について

寺 本 勝 三* 吉 村 和 夫**

要 約

この論文では、北越北線鍋立山ずい道、上越新幹線浦佐ずい道において実施した測定により、ゆるみ領域を推定し、その時の施工法について検討をおこなった。検討の結果、ゆるみ領域の推定をおこなうためには、コンバージェンス測定、ロックボルトの軸力分布測定、坑内弾性波探査、岩盤相対変化測定と、F.E.M解析が必要であり、このゆるみ領域のうち、特に側壁部1.0m～2.0mに極度に劣化されたゾーンが存在することがわかった。

この結果から、有効な支保材はロックボルト、吹付けコンクリートであり、特に側壁部に打設するロックボルトは2.0m位の余裕長をもたせる必要があることがわかった。

目 次

- § 1. 概要
- § 2. ゆるみ領域の発生
- § 3. 支保材に対する考察
- § 4. ロックボルト、吹付けコンクリートを使用したときのゆるみの領域
- § 5. あとがき

§ 1. 概要

膨張性地山におけるトンネル掘削は、最近の道路、鉄道の整備、拡張にともない、その必要性が増大した。これらのニーズに対応するために、膨張性地山の力学的性質を把握することによって最適な支保材と施工法を追求することが肝要である。

本論文は、北越北線鍋立山ずい道、上越新幹線浦佐ずい道において実施した現場計測結果をもとにして、ゆるみ領域の範囲を推定し、若干の考察をおこなうことを目的とする。

§ 2. ゆるみ領域の発生

応力解放により変化したトンネル周辺地盤の応力状態は、岩盤のもっているせん断強度をこえると塑性状態となり、ゆるみ領域を形成する。すなわち、トンネル掘削により、平均主応力の減少が生じ、その結果として塑性化された領域が発生するが、一般にこれをゆるみ領域と

呼んでいる。

このようなゆるみ領域の形成の状況を、F.E.M解析により求めた。地山を等方等質の線形弾性体とみなし、平面ひずみの2次元問題として解析した。又、その要素に生じた引張力を隣接する要素に伝達する“Stress transfer method”によって、引張破壊領域が考慮された。トンネル掘削によって周辺岩盤の平均主応力が減少し、その結果生ずる塑性領域は、図-1に示される破壊基準線を超えるものと定義する。

図-2に示したように地山をモデル化し、トンネル掘削後の応力状態より解析された引張破壊領域、及び平均主応力の減少から解析された破壊領域をまとめたものが図-3である。

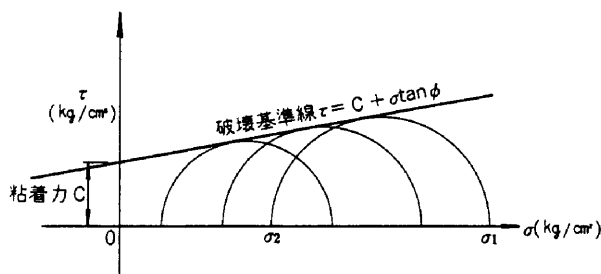


図-1 破壊基準線

これらの塑性化された領域の計算結果より、作用荷重は側方 $W_1=24.2\text{t/m}^2$ 、鉛直 $W_2=10.5\text{t/m}^2$ となる。一方、この地盤で支保工による応力測定をおこなったところ、側方土圧 $W_1=23.6\text{t/m}^2$ 、鉛直土圧 $W_2=15.6\text{t/m}^2$ という結果を得た。このように、F.E.M解析によるゆるみ領域の算定は、トンネル周辺の岩盤のゆるみ領域を推定する

* 土木設計部 設計課係長

** 土木設計部 設計課

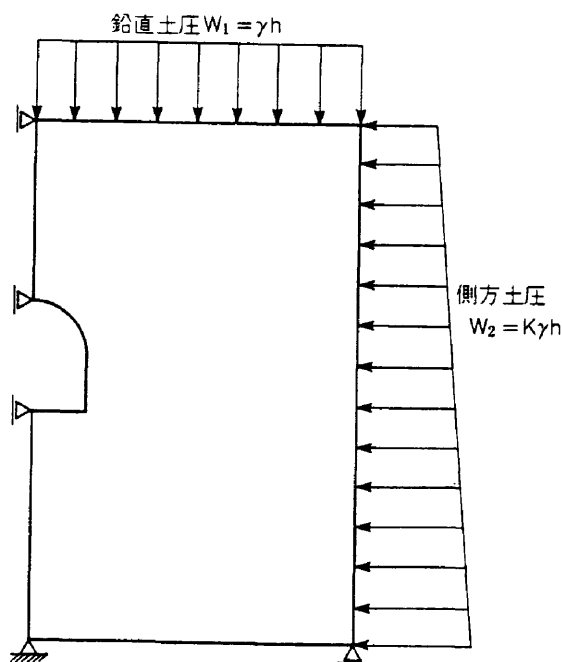


図-2 モデル図

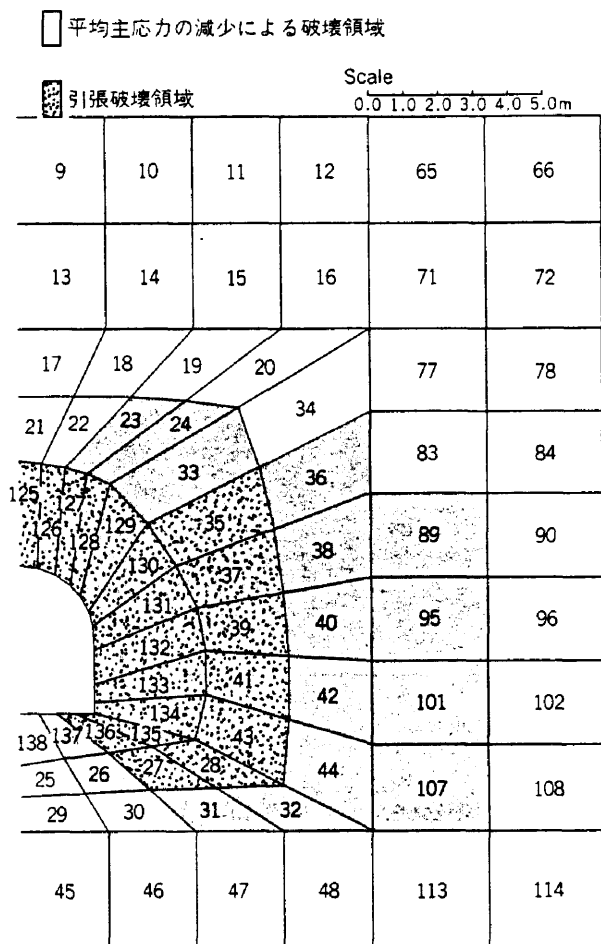


図-3 引張破壊領域および平均主応力の減少による破壊領域

際には有効な手段の一つであると考えられる。

しかし、膨張性地山中に生じるゆるみ領域は、

(1)粘土鉱物に起因するもの¹⁾

(2)周辺岩盤の平均主応力の減少、それに伴うダイレタ
ンシーより生ずるもの²⁾

の2つがあると言われている。特に粘土鉱物に起因するゆるみ領域は、岩の化学的性質に左右され、力学的性質の考察だけでは不十分であり、このような場合には、種類の試験をおこない、作用荷重を推定することが必要であると考えられる。表-1は、北越北線鍋立山トンネル、北越北線赤倉トンネルにおいて実施した岩石試験と、支保工による応力測定により得られた作用荷重を、回帰分析した結果である。又、粘土鉱物の化学的性質をとらえて、ゆるみ範囲(作用荷重)をきめる方法³⁾もあるが、この方法には、まだまだ未知の点も多く、今後の研究の進展が望まれる。周辺岩盤の平均主応力の減少、およびそれに伴うダイレタンスーにより生ずるゆるみ範囲については、今後の各地での実験結果によらなければならない。

表-1 岩石試験結果と作用地圧の関係

	キ口数	比重	自然含水比 %	塩基性置換容量 meg/mol	2μ以下 粒子の%	作用地圧 t/m ²	P ₁ t/m ²	P ₂ t/m ²
赤倉トンネル	6 K 761	2.7	18.85	24.19	12.10	32.9	28.1	32.3
	7 K 060	2.7	22.05	28.00	22.00	46.8	41.5	39.9
	7 K 104	2.7	22.65	29.20	26.00	31.3	44.7	40.4
鍋立山トンネル	33 K 710	2.7	21.70	37.60	30.00	55.3	56.3	56.7
	33 K 577	2.7	21.90	45.04	35.00	75.2	68.8	71.8
	33 K 566	2.7	22.50	42.37	34.10	146.2	65.9	67.2
	33 K 556	2.7	22.20	42.82	34.00	72.1	65.9	67.7

$$P_1 = -54.2 + 2.29w + 1.62a$$

$$P_2 = -61.57 + 2.23w + 2.62a - 0.95b$$

P: 作用荷重(t/m²) w: 含水率(%)

a: 塩基性置換容量(meg/mol)

b: 2μ以下の粒子の含有率(%)

(注) 赤倉トンネルの測定値は「北越北線赤倉ずい道膨張性地質の総合解析」(日本鉄道建設公団)による

§ 3. 支保材に対する考察

従来、膨張性地山において施工された工法としては、鋼製枠のピッチをせまくしたり、剛性を大きくしたり、又クッション材を鋼製枠の裏へ入れることにより膨張圧を吸収しようとする方法が用いられてきた。しかしながら、このような工法では、鋼製枠の座屈、あるいは縫い返し作業を余儀なくされるので、これらの欠点を補う方法として、ロックボルト、吹付けコンクリートを使用する方法が最近注目をあびており、その効果も大きいことが知られている。図-2と同じ地山モデルにロックボルトを打設した場合の応力状態から、引張破壊を生ずる領域、平均主応力の減少による破壊領域を、FEMにより解析したものが、図-4である。その際、ロックボルトは以下の形式でインプットをおこなった。すなわち、ロックボルトに作用する引張力（地中においては圧縮力）は、ロックボルトの先端および壁面に圧縮力として作用させ、又ロックボルトは線材と仮定した。図-4に示した引張破壊領域は、図-3に示したそれより小さくなっており、その結果として平均主応力の減少による破壊領域も小さくなっていることがわかる。

一般に、トンネル周辺地盤は応力解放により引張応力が発生し、岩のもっている特性によりこの領域が引張破壊をおこす。その結果、この領域で分担していた応力が周辺の地山に伝達され、この分担された応力により、周辺地山の新たな破壊（せん断破壊）を誘発し、ゆるみ領域が増大してゆくことがわかっている。したがって、引張破壊を発生させないことが、トンネルの安定にとって極めて重要であると言える。

このようなことから、ロックボルト、吹付けコンクリートを支保材として採用する工法は、かなり有効であると判断できる。

§ 4. ロックボルト、吹付けコンクリートを使用したときのゆるみ領域

ロックボルト、吹付けコンクリートが膨張性地山に有効であることは、§3で述べたが、ここではこれらの支保材を使用したときのゆるみ領域について言及する。

ロックボルト、吹付けコンクリートを支保材として使用する際に、ロックボルトの打設パターン、長さ、吹付けコンクリートの厚さをいくらにするか、これらの支保材の打設時期を何時にするかをあらかじめ決めておかねばならない。このため、前述のFEM解析をおこなうと同時に、現場実験によりゆるみ領域をまえて推定し

ておくことが必要となってくる。以下に、これらの現場実験について記述する。

4-1 コンバージェンス測定

トンネル掘削によって乱された周辺地山応力がどのような過程で平衡状態へ移行してゆくか、および支保材の打設時期、支保方法が妥当であるか等の判断をする上で、コンバージェンス測定（内空断面相対変位測定）は有効な方法である。又、本測定法は後述する各種試験により推定をおこなったゆるみ領域を、実際の施工に適用して

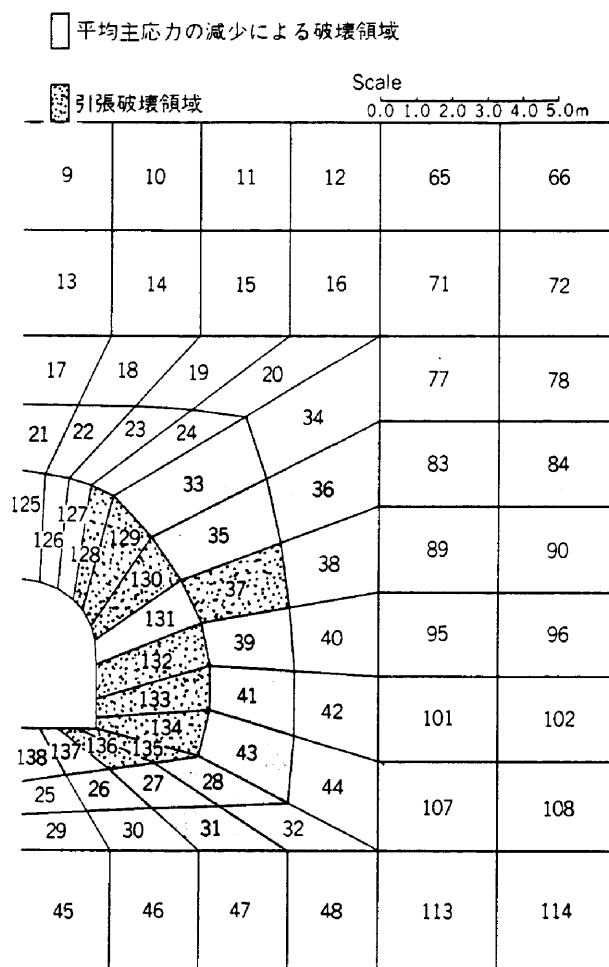


図-4 ロックボルト打設時の引張破壊領域および平均主応力の減少による破壊領域

ゆく際にも有効である。

図-5は、北越北線鍋立山ずい道において実施したコンバージェンス測定結果を示している。この時のロックボルト打設時期はトンネル掘削直後であり、吹付けコンクリートの打設時期はトンネル掘削後2日であり、更に下半掘削はトンネル掘削後9日であった。

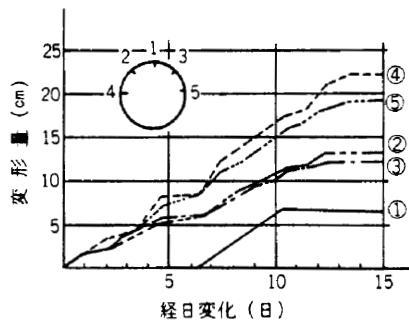


図-5 コンバージェンス測定結果

図-5から、側壁部における変形が一番大きく、天端における変形が一番小さいことがわかる。又、変形は掘削後4日ではほぼ一定になっているが、下半掘削の1～2日前より再び増加の傾向を示し、上・下半閉合後3～4日たつて平衡状態に達している。

4-2 ロックボルトの軸力分布測定

ロックボルトの軸力分布測定は、ロックボルトに溝を切り、ここにワイヤーストレインゲージをとりつけたうえでおこなう。又、この分布測定は、ロックボルトに働く引張力を測定することにより、ロックボルトの長さ、地盤との付着抵抗が有効に働いているかどうかのチェックができるので、非常に重要な実験である。

図-6は、北越北線鍋立山ずい道単線部側壁において実施した、ロックボルト軸力分布測定を示す。この図において、壁面から1.0m～1.5m区間において軸力が激減していることがわかる。これは、トンネル周辺の地山が塑性化され、1.0m～1.5m区間が数多くクラックが生じ、その結果軸力のピークがこの地点に生じたためである。

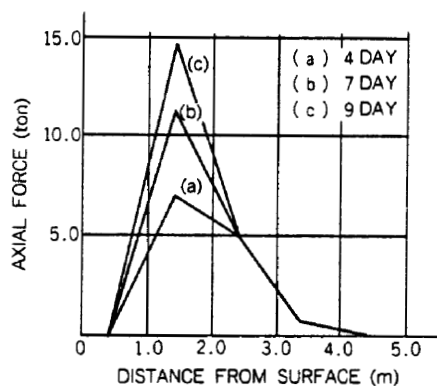


図-6 軸力分布測定結果

4-3 ロックボルトの荷重測定

ロックボルトの荷重測定は、ロックボルト頭部にセンサーホールロードセルをとりつけたうえでおこなうもの

であり、ロックボルト頭部における荷重を測定することにより、頭部において軸力が最大となるような軸力分布をするかどうか、すなわち、ロックボルト全体にわたって付着応力が有効に働いているかのチェックをするために有効な方法である。

図-7は、北越北線鍋立山ずい道においておこなった、ロックボルトの荷重測定結果を示す。この結果と、図-5、6に示した結果から、膨張性地山におけるゆるみ範囲は、図-8に示したような範囲にあるとの結論を得た。

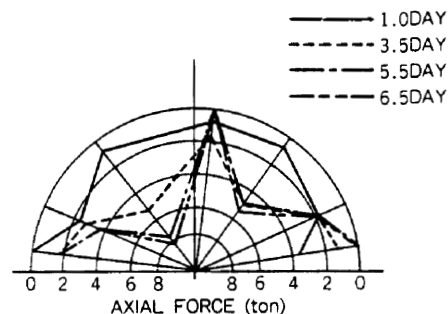


図-7 荷重測定結果

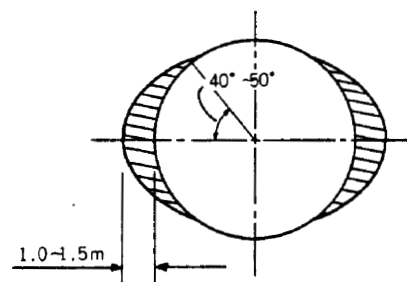


図-8 ゆるみ範囲

4-4 坑内弾性波探査

坑内弾性波探査は、トンネル壁面にピックアップを取り付け、発破による振動波を記録し、その結果から弾性波速度を求め、ゆるみ領域を推定する方法である。

図-9は、北越北線鍋立山ずい道において実施した坑内弾性波探査測定結果から推定したゆるみ領域を示す。この結果から次のことが推定された。すなわち、側壁部より1.0～1.5mには、弾性波速度0.7km/secの層があり、その外側2～10mの範囲に、0.7km/sec～1.5km/secの層が存在し、これより外側が本来地山のもっている弾性波速1.5km/secの領域である。この結果と、図-8に示したゆるみゾーン結果と比較すると、図-8に示したゆるみ領域は、弾性波速度0.7km/secの領域であることがわかる。又、その外側に存在する0.7km/sec～1.5km/secの領域は、ゆるみ領域ではあるが、ロックボルトがこの

ゾーンに打ち込まれた場合でも有効に働くことがわかった。

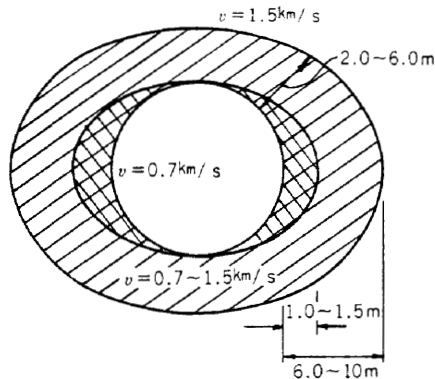


図-9 坑内弾性波探査結果より推定したゆるみ範囲

4-5 岩盤相対変位測定

岩盤相対変位測定は、図-10のようにトンネル壁面よりφ42mmの孔を削孔し、それぞれ長さの違った鉄筋の先端と壁面との距離の変化を測定するもので、この結果より岩盤内の各地点の変形状態を知り、ゆるみ範囲を測定するものである。

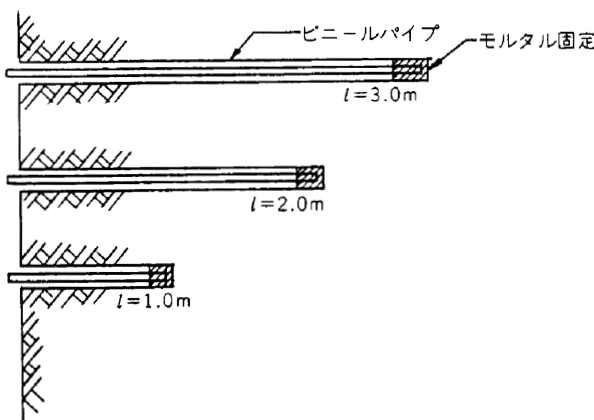


図-10 岩盤相対変位測定

図-11(a)(b)は、上越新幹線浦佐うい道サイロット導坑において実施された、側壁部および天端の岩盤相対変位測定結果を示す。この結果から、側壁部においては、1.0m、2.0m、3.0mの地点は壁面と比較して変形が小さい。一方、天端における1.0m、2.0m、3.0m地点の変形は、壁面とほぼ同じである。又、この地点で実施したコンバージェンス測定において、天端付近の変形が少ないことを考慮すると、天端付近においては、ほとんどゆるみ領域は発生していないと思える。

したがって、上越新幹線浦佐うい道においても図-8に示した極度に強度劣化したゆるみ領域が存在し、その範囲は1.0m程度であると推定できる。

このように、4-1～4-5で示した現場測定により、

膨張性地山にトンネルを掘削すると、側壁部1.0～2.0mの範囲に極度に強度劣化をおこすゾーンが存在することがわかった。

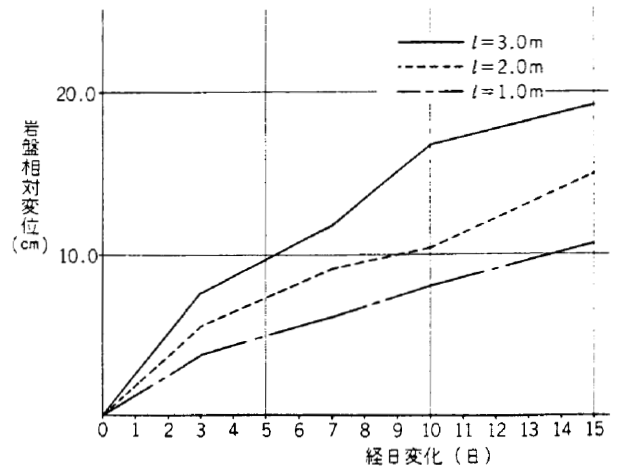


図-11(a) 岩盤相対変位測定結果(側壁部)

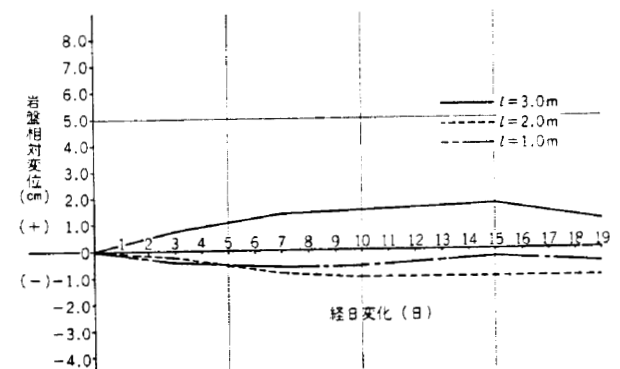


図-11(b) 岩盤相対変位測定結果(天端)

§ 5. あとがき

膨張性地山にトンネルを掘削したときに生ずるゆるみ領域は、FEM解析、各種の現場測定によりかなりの精度で推定され、このゆるみ領域のうち、特に側壁部1.0m～2.0mに極度に劣化されたゾーンがあり、したがってロックボルトは2.0m位の余裕長をもたせる必要がある。

現在北越北線鍋立山うい道、上越新幹線浦佐うい道においては、§4で示した項目のほかに作用荷重測定を加えた測定を実施しているが、これらの計測により地山の性質が把握でき、軟岩中を掘削する際に、周辺地山を安定させ、地山の強度劣化がおこらないようにするために地山を拘束し、同時に作用荷重を小さくするために地山を変形させることが知られた。このようなことから、最近注目をされているNATM(新オーストリアトンネル工法)の適用が、このような膨張性地山中のトンネル掘削に際して有効であると思われる。現在、北越北線鍋立山うい道においては、試験工事としてNATMによる

施工をしているが、かなりの好結果を得ている。(写真1～3参照)、同時に § 4 で記述した現場実験も実施しているので、今後これらのデータがでそろった段階で報告をしたいと思っている。

最後に、今回のデータを得るに大変お世話になった松代出張所、浦佐出張所並びに鉄道建設公団の皆様に感謝の辞を表すものである。

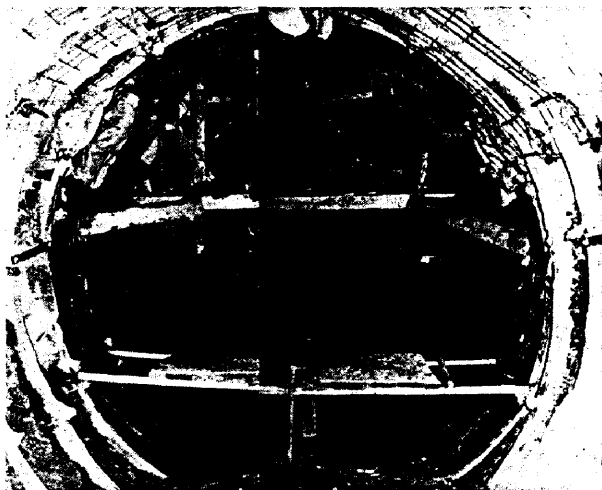


写真-1 NATM施工断面



写真-2 U型可縮支保工 (MU29)

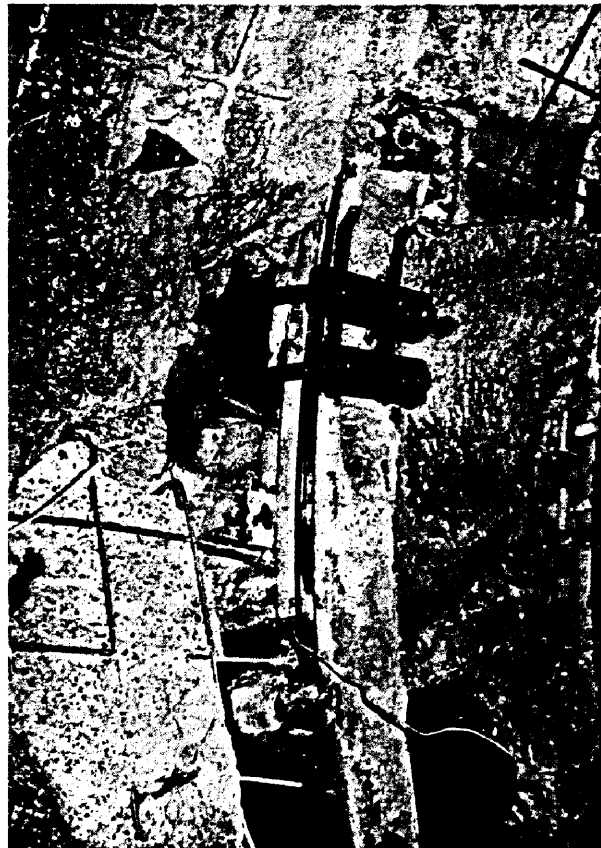


写真-3(1) 可縮ジョイント



写真-3(2) 可縮ジョイント

参考文献

- 1) 仲野「膨張性地山の実体」トンネルと地下構造の地質調査
- 2) 領家、青砥、飯星「膨張性トンネル土圧発生機構について」土木学会第32回年次学術講演
- 3) 金子、飯星、青砥「膨張性トンネルにおける第3紀泥岩の粘土鉱物」土木学会第32回年次学術講演会
- 4) 吉村、井上、川並「膨張性トンネル(鍋立山トンネル)におけるロックボルトの耐荷機構」土木学会第32回年次学術講演会