

神居ずい道の設計及び施工

正員 伊藤友太郎*

I. 概 要

国鉄第3次長期計画により、北海道のほぼ中央にある函館本線、納内(おさむない)～伊納(いのう)間は複線電化工事が行なわれている。この付近は蛇紋岩が著しく発達した地帯として知られており、現在線もずい道をさけ、石狩川

に沿って急曲線を多数持っており、落石、路盤崩壊等の災害が多い路線である。

神居ずい道は納内～伊納間を現在線とは別線で短絡した区間に計画され、延長4,540m、複線交流電化断面であり、両坑口より40年9月に着手している。

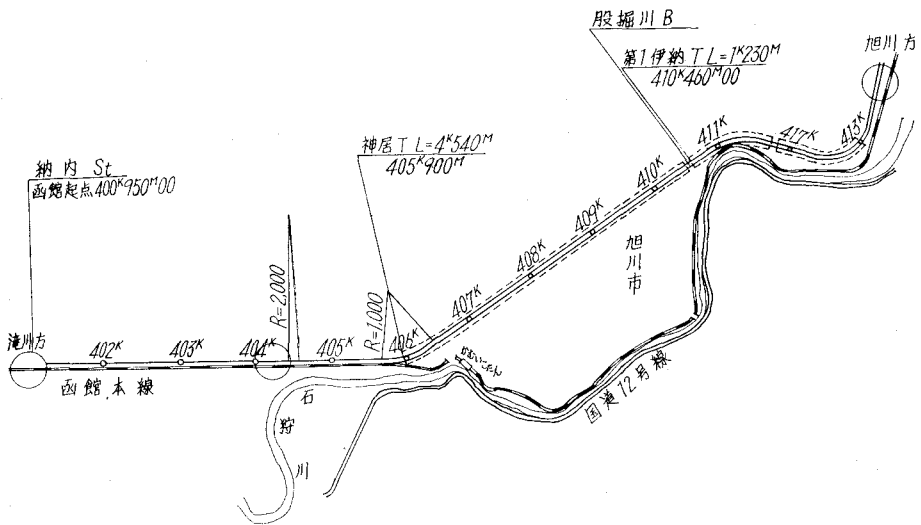


図-1 神居ずい道位置図

II. 地質の概要

神居ずい道付近は神居古潭岩層及びこれに伴う火成岩質である。本岩層は変成作用を受けて生じた結晶片岩類を主体とし、しゅう曲と断層とにより複雑な地質構造を示している。これら結晶片岩中には諸処に蛇紋岩が貫入して、特に蛇紋岩に接する部分は著しい接触変質作用を受け、局部的に特殊の変成岩を生じている。

蛇紋岩の大きさ及び形状は、大体において幅数m～500m、長さ数10m～2km程度でレンズ状を呈し、緑色片岩又は黒色片岩の延長方向とほぼ平行して貫入している。この付近に発達する蛇紋岩類はその岩質により、塊状蛇紋岩、葉片状蛇紋岩及び滑石質蛇紋岩の3種に大別することができる。塊状蛇紋岩は暗緑色から暗黒色で比較的光沢に乏しい緻密堅固な岩石である。葉片状蛇紋岩は無数の割目とそ

の内に発達する滑石とに關係して徐々に押出す現象が見られ、ほとんど弾性的な挙動は示さず粘土の膨脹に似ている。滑石質蛇紋岩は一見白雲母に似た脂感のあるすべすべした白色ないし淡緑色の滑石質を多含する蛇紋岩であって、極めて脆弱な岩石である。

これらいずれも混り合って複雑な膨脹を生じ、極めて脆弱である。特に玉石(直径1m以上の角のない丸みを帯びた石)が入り混っていると玉石だけが押し出され、偏荷重又は集中荷重となり、支保工、覆工コンクリートは大きな変状を起こす原因となっている。導坑ではこの区間は放置しておくとも崩壊はまぬがれない。従って必ず何らかの補強をしなければならない。

弾性波速度は3～4km/sec程度で、この値のみでは困難な岩とは思えないが、しかし掘さくすると1km/sec前後まで低下していく。従って地質調査の際、弾性波速度から

* 国鉄札幌工事局 納内工事区

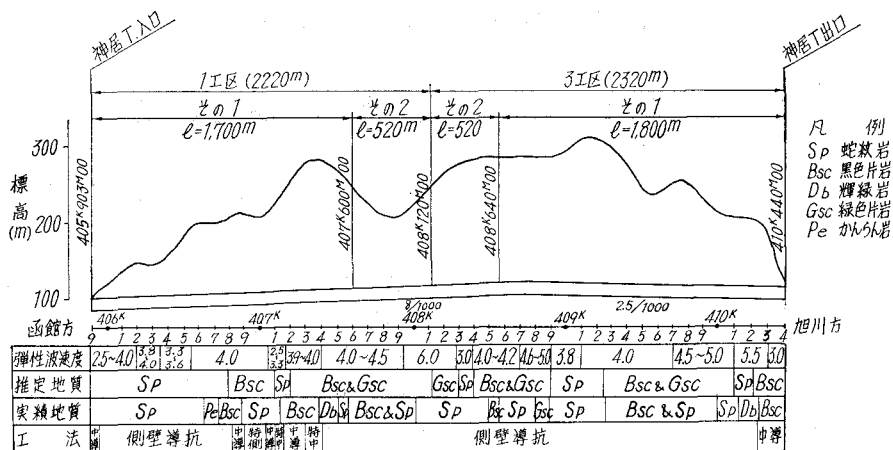


図-2 神居ずい道地質図

岩種推定は十分慎重に行なう必要がある。

図-2は神居ずい道の地質図であるが、推定地質と実績地質はかなり食違っている。蛇紋岩は半分以上であり、他には黒色片岩、緑色片岩及び輝緑岩等が見られる。又湧水は蛇紋岩地帯には見られず、わずかに変岩に見られる程度である。

III. 地圧の原因

一般に蛇紋岩は膨脹性地圧であると考えられている。従って地圧の増加する原因について考えてみる必要がある。一般に地圧増加の原因として次の5項目が挙げられる。

- 吸水による単なる物理的膨脹
- 化学変化による膨脹
- 上載荷重による地山の塑性変形と破壊
- 潜在応力の解放

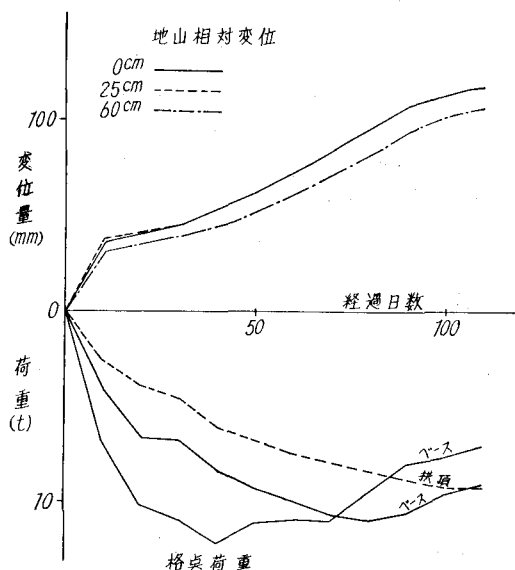


図-3 地山相対変位と格点荷重

(v) ゆるみによる塑性変形

地圧の増加の原因を探究することはずい道施工上極めて大切なことである。この原因を解明することによって設計及び施工方針が決められていく訳である。

(i) の場合、本ずい道の蛇紋岩地帯に湧水はほとんど認められていない。X線分析は吸水性物質のモンモリナイトが無いという結果が出ており、又吸水膨脹試験でも膨脹量はさほど大きくない。これからまず吸水膨脹の恐れはないと思われる。

(ii) は各種試料採取による実験からほとんど認められていない。

(iii) は地山が軟弱な場合、上載荷重によって塑性変形が生じ、拘束力がなければ果しく持続する。

(iv) は最初大きく現われても時間の経過と共に減少していくので、持続して膨脹するという現象は現われないであろう。

(v) はゆるみによる塑性変形がある時点で内部摩擦角によってグラウンドアーチが形成され、それからはアーチアクションによって地山は支えられ、トンネルにかかる地圧の増加はなくなると思われる。

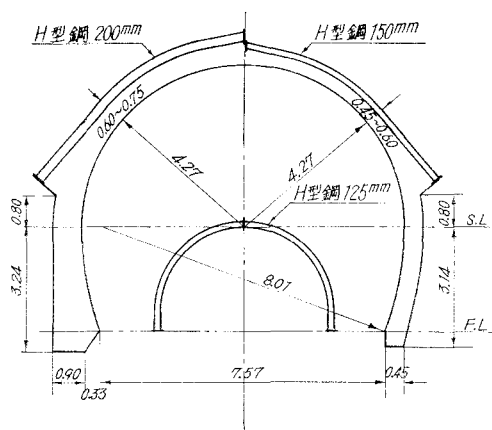
図-3は試験坑の測定結果であるが、明らかに (v) の要素の占める割合が大きいと思われる。しかし初期の20日頃までの急激な膨脹のうちには (iv) の要素が幾分入っている事が考えられる。ただし110日を過ぎてから格点荷重が漸減の傾向にあるのに、地山変位はわずかの増加の傾向があるのは、グラウンドアーチが確立した中で軟弱な蛇紋岩が押し出されているものと考えている。

よって本ずい道の蛇紋岩地帯の地圧は一応ゆるみによる地山の塑性変形が主たる原因であると考えた。

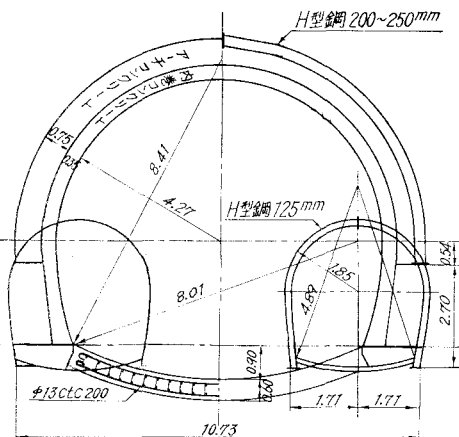
IV. 設計及び施工

1. 施工概要

本ずい道の当初計画は全て中央底設導坑上半逆巻工法で



図—4 中央底設導坑先進逆巻工法



図—5 側壁導坑先進掘さく工法

あった。しかしながら函館方坑口より 45 m で遭遇した蛇紋岩は、載荷試験の結果から地山強度は 30 t/m^2 前後しか期待できなかった。従ってこの地耐力で逆巻工法を実施するには、アーチコンクリートの沈下、変状を阻止する何らかの工法を考えねばならず、かなり困難が予想された。そこで直ちに側壁導坑先進掘さく工法に変更した。この時点より蛇紋岩は全て側壁導坑先進掘さく工法を採用することにした。坑口より 920 m まで蛇紋岩が続き、よおやく待望の輝緑岩、黒色片岩に変わった。地質図、弾性波速度、ボーリング等から、本来の工法、中央底設導坑に戻した。しかしながら堅岩はわずかに続いただけで、ここに神居ずい道で最悪の蛇紋岩に遭遇した。導坑の変状は著しく、増枠、縫返し、補強コンクリート等を実施し、遂に 1500 m に到って先の地質状況等を考え、再び側壁導坑に踏切って貫通点まで到達した。特に 920~1500 m 間の普通の逆巻工法はほとんど不可能と考えられ、アーチ部を大きくしてアーチ部の脚部をできる限り広くした特殊逆巻工法、さらに中央底

設導坑の他に 2 本の側壁導坑、総計 3 心導坑の特殊側壁導坑先進掘さく工法を実施することになった。

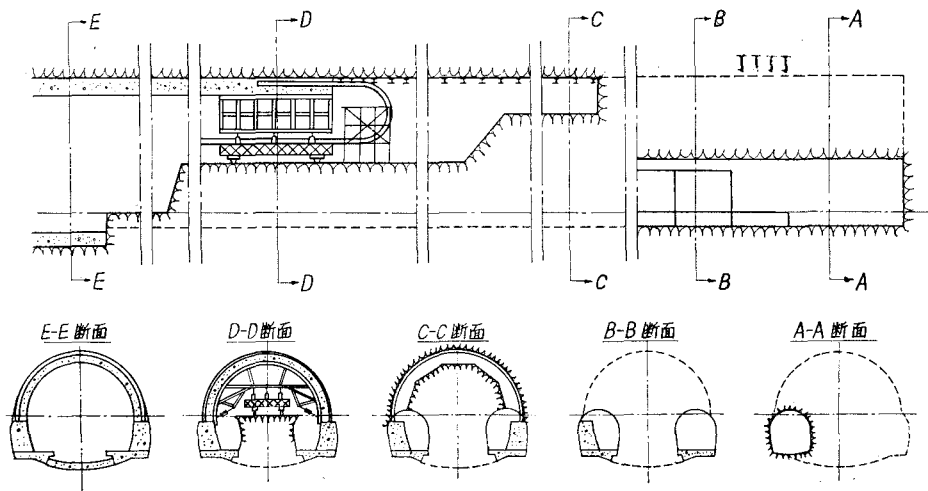
さて旭川方坑口からは 165 m まで中央底設導坑先進逆巻工法で掘進し、それより顕出による側壁導坑先進掘さく工法で 1176 m まで掘進する。この間はほとんど堅岩で問題なく進捗した。しかしながらここに蛇紋岩が出没して途中わずかに堅岩がかんでいるだけで、ほとんど連続して貫通点まで蛇紋岩であった。最悪の蛇紋岩地帯は 1176 m より約 100 m 間、1800 m 付近、1900 m 付近、2000 m 付近の 4 カ所でいずれも玉石がかんでおり、全て補強対策が実施されている (図-2 参照)。

2. 中央底設導坑先進逆巻工法

逆巻工法は従来の設計、施工法と何ら異なる点はない。設計断面は図-4 の通りである。逆巻区間では変状、変位等はほとんど認められていない。

3. 側壁導坑先進掘さく工法 (当初)

函館方坑口より 45 m で蛇紋岩に遭遇した時、まだ蛇紋



図—6 側壁導坑先進掘さく工法施工順序図

岩の地圧に対する試験，測定は開始されてなく，従って解明されないまま側壁導坑先進掘さく工法に切替えた。断面は国鉄新幹線の新丹那ずい道の設計断面を参考にして設計した。側壁コンクリート及びアーチコンクリートは内巻コンクリートとして巻厚 35 cm の余裕を取っているが，これは予想以上の地圧が生じた場合，覆工に変状，変位等が発生しても内巻余裕があるため，再覆工によって補強できるようにしたのである。

4. 側壁導坑先進掘さく工法（解析後）

試験坑及び本坑試験区間の地圧を解析した結果，図-7 に示す標準設計断面が蛇紋岩地帯に採用されている。

この設計及び施工方針をここに述べてみよう。

(1) 導坑掘さく

導坑断面は施工許容範囲内でできる限り小さくして円形に近づけ，変状，変位を最少限に食止めている。支保工は 125 H を 90 cm 間隔に建込みストラットを挿入している。掘さく後蛇紋岩区間は直ちにピンを打込み地山変位測定を開始する。又必要とあれば載荷試験，支保工ベース反力測定等を実施する。以上の測定値から上半支保工，巻厚等を決定する。

(2) 側壁コンクリート

側圧の大きい地質では側壁コンクリートは極めて不安定な構造物である。従ってここでは側壁下部をできる限り広くするために，FL より下部を分離して幅を広くし，先行打設をしている。C 断面に対しては補強インバートを打設している。当初断面は内巻余裕を取っていたが，アーチ部は設計されたのでなくし，側壁部に関しては地山強度が小さく，又その値が一定でないため，強大な外圧に対して不等沈下による変状はまぬがれない。又側壁打設後かなりの水平移動が予想されるため，変状，変位に対して内巻余裕を取った。

(3) 上半掘さく

側壁コンクリートが打設され十分硬化してから上半が掘さくされる。掘さく方法は縫地，リング掘りで，発破を最

表一1 設計断面（側壁導坑先進掘さく工法）

断 面	A	B	C
巻 厚	75 cm	90	90
内 巻	35 cm	側壁のみ	測壁のみ
鉄 筋	な し	165.5 kg/m	266.7 kg/m
支保工 { 種類	200 H, 250 H	200 H	250 H
間 隔	90 cm	90	90
インバート { 巻 厚	60 cm	60	60
鉄 筋	145.2 kg/m	233.1 kg/m	309.6 kg/m
工 法	A	B	C ₁ , C ₂
地 質	葉 片 状	葉 片 状	滑石質（玉石強り）
地山変位量	150～200 mm	200 mm	400 mm
推 定 地 圧	30～40 t/m ²		測 定 中

少にしてピック掘りを多用し，余掘りを少なくしている。

支保工は建込後 20 日過ぎるまで十分耐えている。玉石の多い区間は 250 H を 90 cm ピッチに挿入しているが，支保工に玉石が接触している所は座屈，変位が目立つ。この玉石は直径 1～2 m 位で強大な集中荷重となっているようである。

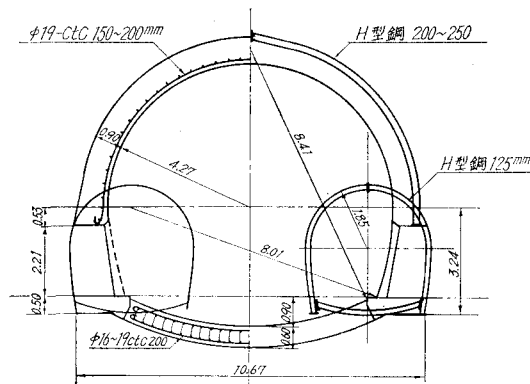
(4) アーチコンクリート

覆工は支保工建込後できる限り早期に実施するようにしている。これは，本ずい道の膨脹はほとんどゆるみによって生じることから，ゆるみの範囲をなるべく小さくするため，掘さく後できるだけ早く覆工すれば地山変位を少なくし，グランドアーチの形成を助け，覆工にかかる地圧を少なくすることができる。現在の所施工能力上掘さく後 3 週間，接近距離 40 m 位である。一応本ずい道ではこれを適正覆工時期としている。

巻厚は解析した結果 90 cm で内側に単鉄筋を挿入している。この設計は掘さく断面が大きい程地圧が大きいことから，できる限り掘さく断面を小さくしている。従って鉄筋を挿入して巻厚を減らしているが，鉄筋挿入した場合は施工上及び工程上巻厚は 90 cm 位が限度と思われる。

(5) インバートコンクリート

側壁コンクリート基礎の変位は上半支保工建込みする頃から生じ，大小の差はあるが長期にわたって続いている。従って覆工の安全及び建築限界確保のためにも，インバート又はりょう盤で側壁基礎を結ばなければならない。試験の結果蛇紋岩区間ではインバートを実施することにした。巻厚は 60 cm で複鉄筋を挿入している。さて施工方法であるが，FL より下部を掘さくする時，側壁が大きく移動する。測定の結果アーチ部の内部応力の変化も認められている。従って変状，変位を最少にするためにはインバートの一連作業期間を最少にすればよい。図-8 は地圧に応じて実施している施工方法である。



図一7 側壁導坑先進掘さく工法

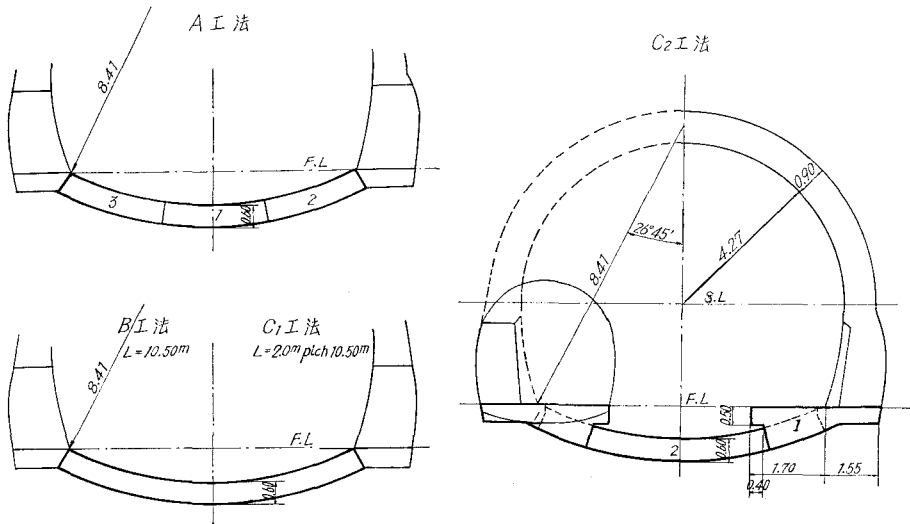


図-8 インバート施工図

A工法；インバートを3等分して打設する工法で，比較的覆工変位の少ない区間であり，インバート作業中の覆工変位は垂直，水平共に3cm前後である。

B工法；延長10.50mを1打設とする工法である。従ってこの区間を一度に掘さくして直ちに打設する。施工時間は平均して2.5日である。軌道は工事桁を使って1線のみ確保しているが，坑奥の作業の支障はまぬがれない。

C工法；いずれも覆工変位が大きい区間である。この工法はアーチコンクリート打設後，できる限り早期に打設して覆工変位を阻止しようと考えている。覆工変位が大きいということは，インバート施工時間が可能である限り短縮するような工法でなければならない。

C₁工法は導坑内で地山変位量が小さい場合でも時として覆工後の変位量が大きくなる場合がある。この時は早期に間隔10.50mで幅2mのインバートコンクリートを打設して支柱のような役割をさせ，その間をさらにインバートコンクリートを打設する。この工法は施工中の変位は阻止できるが支柱の役割をしているインバートが破壊する場合がある。

C₂工法は導坑内で地山変位量が大きく覆工変位が大きいと予想される時，その区間は側壁コンクリートのベースを含むインバートコンクリートの1ピースが，導坑内で支保工の補強もかねて打設される。中央部はアーチコンクリート打設後早急に打設される。

さてここにC₂工法の特色を列記してみよう。

長所

- (i) 導坑内の盤ぶくれを阻止できる。
- (ii) 導坑内の断面縮小が少ない。
- (iii) 側壁コンクリートのベースがインバートコンクリートと一体となったため覆工変位量が少ない。

(iv) 側壁コンクリートのベースに鉄筋を入れたためベースが強化されている。

短所

- (i) 導坑内で施工中軌道が閉鎖されるので，それによる支障が実に大きい。

5. その他工法

特殊逆巻工法は現在掘さくしてアーチコンクリートの一部が打設された。又特殊側壁導坑先進掘さく工法は現在未施工であって最後に施工する予定であり，現在最終検討をしている。

いずれも掘さくするにつれて，種々の問題が生じてくるものと思われる。従ってこの区間に関しては，工事がある程度進捗してから述べてみたいと思う。

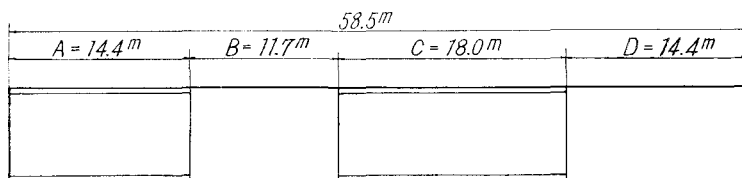
6. モルタル注入

覆工背面と地山との間には空隙が生じる。又玉石の多い区間は集中荷重，偏荷重となって覆工に及ぼす影響は大きい。従って膨脹性地圧の特性を持っている蛇紋岩に対しては，早期に覆工背面にエアモルタルを注入して空隙を充填している。現在ずい道延長1m当り4.5～5.5m³注入されている。

V. 吹付コンクリート

1. 吹付コンクリートの目的

神居ずい道は掘さく後早期覆工を打出している。しかしながら現実には上半支保工建込後，3週間前後にアーチコンクリートを打設している。これは施工上の能力から決められていることはいうまでもない。従って極端な言方をすれば掘さく直後(t=0)に覆工することが理想といえる。しかしながら従来の型枠を使ってポンプによる打設では全く不可能と思われる。



工法	吹付区 間 (左)	普通掘さく区 間	吹付区 間 (左, 右)	普通掘さく区 間
試 験 測 定	支保工・覆工歪測定 覆工変位測定 コンクリート試験	支保工・ス反力測定 地山変位測定	支保工・覆工歪測定 覆工変位測定 コンクリート試験	支保工歪測定 地山変位測定
巻 厚	26.2cm		左 24.6cm 右 28.3cm	
付着量	82%		左 76.6% 右 76.9%	

図-9 吹付試験全体図

コンクリート吹付工法は従来の施工方法ではできなかった掘さく直後の覆工が可能であると考えられる。早期覆工は地山変位を少なくして、グラウンドアーチを助け、覆工にかかる最終地圧を少なくすることができる。ここに考えられる特性を列記しよう。

長 所

- (i) 地山変位を少なくすることができる。
- (ii) 最終地圧を減少できる。
- (iii) 偏荷重, 集中荷重が少ない。
- (iv) 巻厚, 支保工が減らせる。
- (v) 矢板を必要としない。
- (vi) 裏込注入の必要がない。

短 所

- (i) 熟達した技術が必要とする。
- (ii) 地質, 工法が限定される。

以上のような特性からいえることは、本ずい道の蛇紋岩地帯は全て側壁導坑先進掘さく工法である。従って上半で吹付コンクリートを実施する場合、すでにその付近は側壁導坑の掘さくによってある程度ゆるんでいるものと考えねばならないであろう。そこで上半よりむしろ導坑で実施することに踏切った。位置は旭川方坑口より 1800 m の導坑切羽, 玉石の多い最悪の蛇紋岩である。吹付機械はトルクレットを使用し, 支保工建込み後, 矢木, 矢板を使用せず直ちに全面に吹付けた。ただ切羽の自立時間の短い地質に対しては頂部にわずかに矢板を挿入したが, それによる影響は認められていない。

2. 試験, 測定結果

吹付コンクリート施工に関して幾つかの試験, 測定を実施した。その内容は図-9 の如くである。当初この吹付実施区間は地質調査の結果, 全区間蛇紋岩と推定していた。しかし川手導坑の C, D 区間は黒色片岩が出没して, 比較的地山変位の少ない区間になってしまった。それ以外は玉石の多い滑石質の蛇紋岩に遭遇した。

さてここでは蛇紋岩地帯を主体とした試験, 測定結果の

概要を述べてみよう。

(1) 変位測定結果

山手導坑の A, B, C 区間は地山変位と覆工変位の差がはっきりと現われている。しかし C 区間の垂直変位は大き

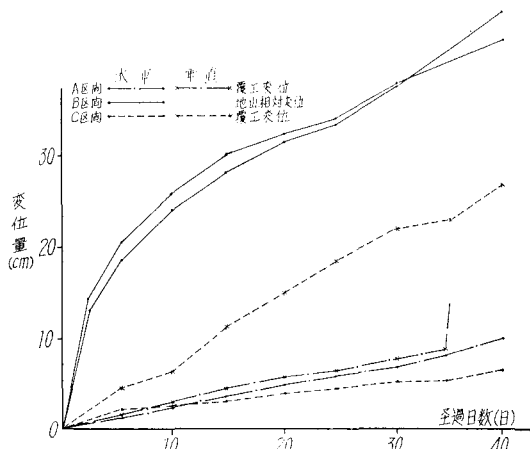


図-10 変位 図

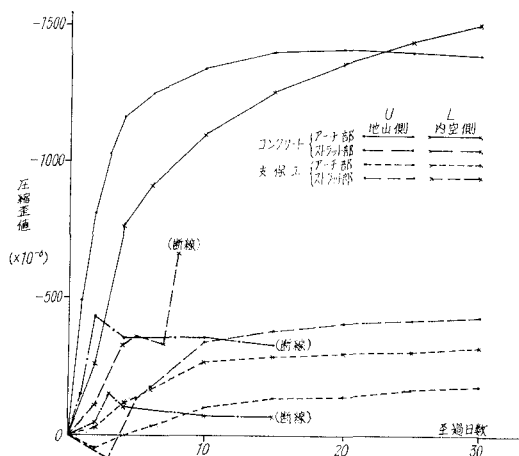


図-11 カールソン歪計による歪度測定値

な値がでており、その曲線も不規則であるので、ストラット部の吹付コンクリートは初期に破壊して盤ぶくれしているようである。それ以外の覆工変位は直線的にわずかに増加している。変状度合を調べると、A、C 区間は共に 20 日位で側壁部、ストラット部の破壊が著しい。特に A 区間は側壁部のはくりが目立ち、地山が露出しており、支保工は圧縮破壊している。又ストラット部は C 区間と比較すれば、それ程盤ぶくれはしていないが、コンクリートは破壊している。この A 区間は川手導坑がすでに 2 カ月前に掘さく終了していることから、川手導坑の影響を受けていると思われる。又川手導坑も山手導坑の吹付作業によって、山手側壁からアーチ部にかけて大きく地山の岩石が破壊して、細かい岩片となってくずれ落ち堆積した。このため支保工は変状、座屈し、縫返しを必要とした。これから中心間隔 7 m の側壁導坑は相互に影響を受けたものと思われる。又他区間の同地質でも似た傾向がでている。

一方変状、変位はアーチ部がほとんど影響していないことから、本ずい道の蛇紋岩地帯では馬てい形の弱さを如実に現している。従って円形断面が理想といえるであろう。

(2) 歪度測定結果

A 区間は初期に測定不能となっている。

C 区間のストラット部は初期に破壊しているため測定不能となっている。アーチ部のコンクリート歪度は 10 日頃まで急上昇して地山側は平衡状態になり、内空側はそのまま増加している。一方アーチ部の支保工歪度は 10 日頃ま

で上昇し、それより緩やかに増加している。これから平衡状態になっているのは何らかの理由によりゆるんだものと思われる。全般に圧縮歪度であるが、コンクリート歪度が大きく支保工歪度は小さい。これから支保工の荷重分担量はごくわずかといえる。これに反して普通掘さく区間の支保工歪度は圧縮側、引張側とばらつきが目立ち、10 日位で許容応力を越している。

3. 考 察

いずれも変状、変位が生じたため、完全拘束状態の場合の断面力を測定することができなかった。従って蛇紋岩地帯の最終地圧は求められなかったが、予想以上の強大な地圧であることは確かなようだ。この導坑吹付の結果限りでは、ある程度変状、変位を許して吹付コンクリートを第 1 次覆工として早期に第 2 次覆工すれば、側壁導坑の上半で吹付コンクリートの実施はかなり可能性がある。この吹付コンクリートの結果を十分検討して今後上半で実施したいと考えている。

あ と が き

神居ずい道の大半は蛇紋岩である。この蛇紋岩を究明するために数多くの試験を行ない、その解析結果に基づいて工事を進めている。現在もお継続して種々の測定が行なわれているが、今後新たな資料と共に、一層膨脹性地圧に対する設計及び施工方法を研究して、工事を進めて行きたいと考えている。