

シールド工法と長大海底トンネル(3)

Shield Tunnelling and its Application
to Longer Undersea Tunnels, No.3

田中 壬子也*

11. セグメントが担っている数々の桎梏

シールド工法が適当と考えられている地山は、トンネルが開削される時、その切羽が支保工などで支持されても安定を得られないような場合とされている。一般にある地山にトンネルが開削されたとき、その周辺地山に発生する応力は、その地山に作用している体積力 $\sigma_z \cong \gamma h$ の約3倍、即ち $\sigma_0 \cong 3 \sigma_z$ が発生するといわれている。地山の q_u (1軸圧縮強さ kg/cm^2) が、この応力より小さい場合には、シールドなどの支保のもとに、地山荷重に耐えるセグメントをそのテール内で組立て、これを永久構造物として、トンネルを構築し、さらにシールドが前進するとき、発生するテールボイドを裏込注入材によって充填して、地山のゆるみを終止させるために、それまでその周辺地山に生じていた土荷重に対抗できる程度の圧力で注入することが慣行されてきた。泥水機や土圧機の汎用によってこのテールボイドにも泥水が浸出しているため単に加圧力の上昇だけでは解決出来ない事情も認められるようになり、裏込注入によって地盤沈下を皆無にするような効果を期待するまでには至っていない。地盤沈下・変形漏水などを生じている事由には、むしろ現用されているセグメントの設計・施工上に問題のあることが、

*日本シールドエンジニアリング社非常取締役

シールド・トンネルが実用されておおよそ30年を経て、地震・塩害・腐食・圧密等々の洗礼を受けて明らかとなってきた諸事情が山積されるようになった。

以下、セグメントの担っている諸問題点について考えてみよう。

11.1 セグメント分割法の重要性について

我が邦では戦後、都市トンネル即ち地下鉄道・上下水道幹線・電力電々洞道などで、多数のシールド工法が実施された。それに使用されたセグメントは鋼製・コンクリート製・鋳鉄製などである。これらはいずれもテール内で組立てられることから、分割組立方式をとり、キー挿入形式をとっている。挿入の方法はその大部分が内挿式、即ち内側から挿入する形式をとっている。

分割方式についても、またキー挿入形式についても、その現場の諸条件に基づいて設計が進められてきたが、反面で強度試験を繰返し行われた過程で、セグメントの単体剛性と、組立てられたリングの剛性との間にその分割組立法によって甚だしい差異の生ずることが認められるに至っている。

例えば「いも継ぎ」はその最悪の例で絶対に使ってはならないものであり(図11.1)、これなどに関しては筆者は下水道協会・夏季大学(昭和55年)などで指摘した²³⁾。

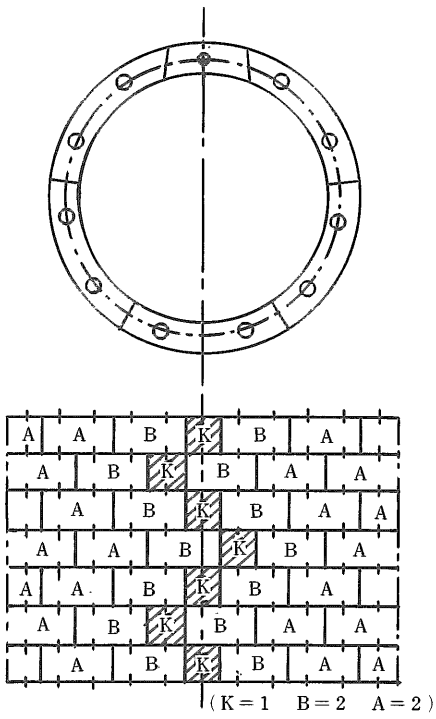


図11.1 いもつぎの例

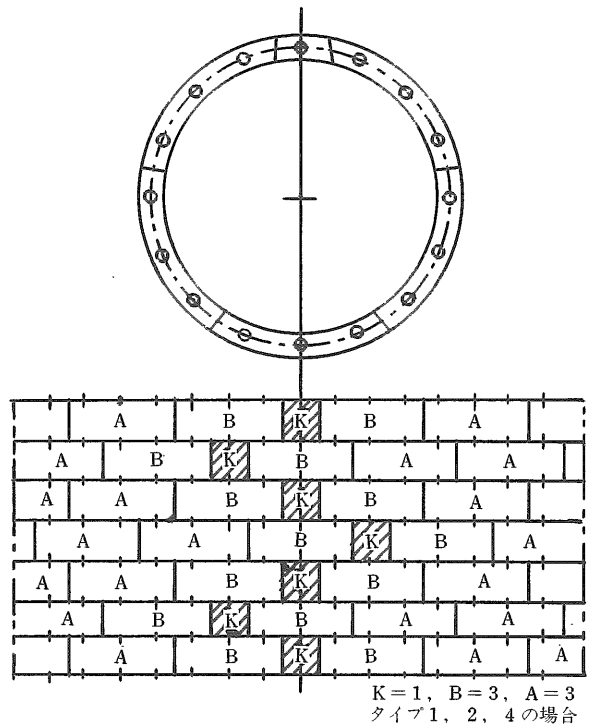


図11.2 one-pin 接合の例

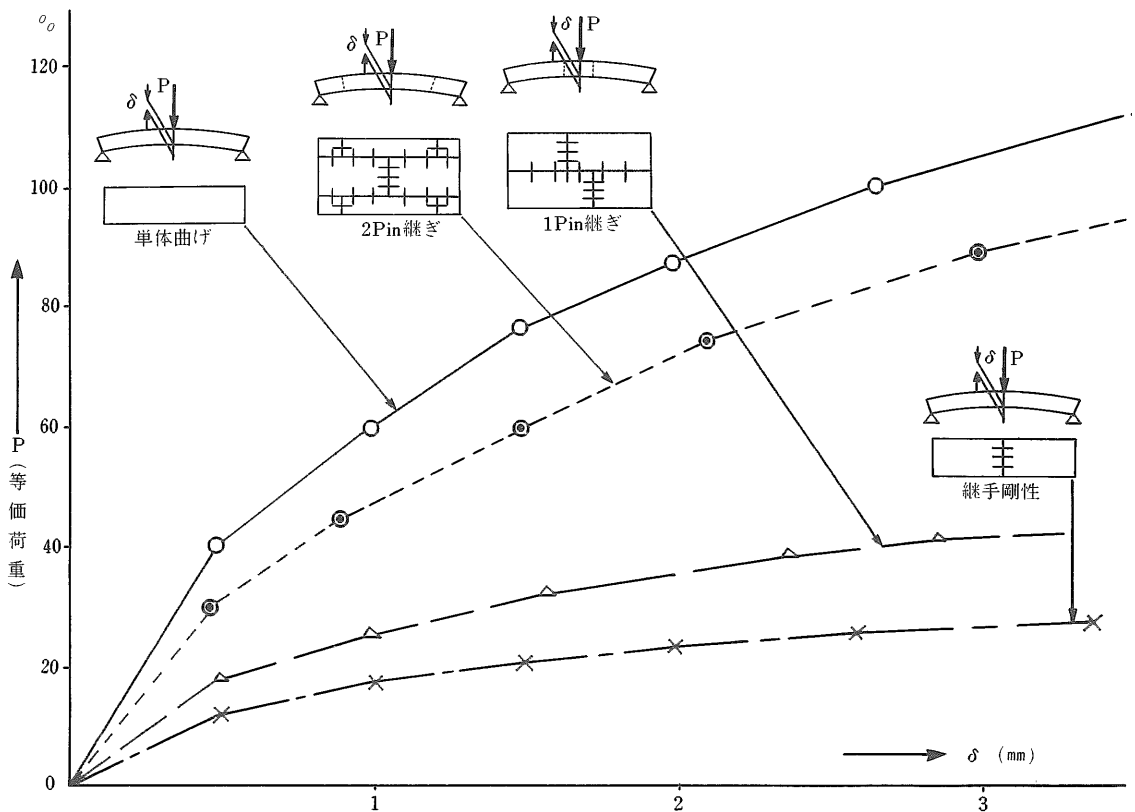


図11.3 継手強さの比較

同様に「いも継ぎ」は避けたものの、リング間ボルト1本を挟んで、ピース間継手が続く場合(これを one-pin joint と呼ぶ)も同様に η - ζ 法(8章参照)における η の低下が甚だしい値($\eta \approx 0.2$ など)となってしまう(図11.2)。ところがリング間ボルト2本を挟んでピース間継手を配する(two-pin joint)と、全体剛性は単体の剛性の70~80%にも向上されることが既応の各種実験結果にあらわれていることが確認されるに到り、図11.3はその1例を示したものである。これらの結果はリング実験によって得られたものではないが、実際のトンネルにおける変形量の実測値からも one-pin joint で構成された場合は two-pin joint の場合の2倍もの変形を生ずることが実測され、今後の設計には必ず one-pin joint は避けるべしとの原則を実行に移さざるを得ない状況に立至っている。

さらに、また近年になって都市トンネルは色々の意味で深層化が促進されてきたが、それは公道の路面下が公共的な施設の利用空間として、道路・鉄道・地下鉄・上下水道・電力電々洞道・各種共同溝などが設けられて、およそ深さ20m以内の空間はこれらの施設で充満しているというのが実態である。さらに、ここに何らかの設備を設けようとするれば、それは、より深い地下空間に及ばざるを得ない結果となる。従って、ある施設は地表面下-30m~-50mにシールド工法により管路あるいは、トンネルを建設せざるを得ないケースが多発するに至っている。

このような場合、そのセグメントに発生する軸力は近似的にその深さ h により決定され²⁴⁾、

$$N = \sigma_t \cdot A = p \cdot r \cdot A / t = \gamma \cdot h \cdot r \cdot A / t$$

但し、

- N : 発生軸力 (ton)
- σ_t : セグメントの圧縮応力度
- p : 作用土圧 = γh
($\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$, h : 土被り高さ m)
- r : トンネル半径 (m)
- A : 覆工断面積
(m^2/m , トンネル単位長当たり)
- t : 覆工厚さ (m)

によって示される。その1例として深さ50mの沖積地山に3.15 ϕ のシールドトンネルを設けた場合、そのセグメントに作用する土圧は

$$p = 1.6 \text{ t/m}^3 \times 50 \text{ m} = 80 \text{ t/m}^2$$

で、その発生軸応力度は $\sigma_t = 960 \text{ t/m}^2$ 、軸力は $N \approx 120 \text{ t}$ にもなる。もしこれに対して内挿型キーセグメントを使用するならば、これに作用するせん断力 Q_0 は(図11.4参照)、

$$Q_0 = N (\sin \alpha - f \cos \alpha) - Q (\cos \alpha + f \sin \alpha)$$

但し、

- N : セグメントに作用する軸力
- Q : 〃 〃 するせん断力
- α : キーセグメント継手角
- f : 継手面の摩擦係数

となる

ここでQは発生モーメント自体の軸力に対する割合が小さくなるので、実質的に省略できる程度となるため、

$$Q_0 \approx N (\sin \alpha - f \cos \alpha)$$

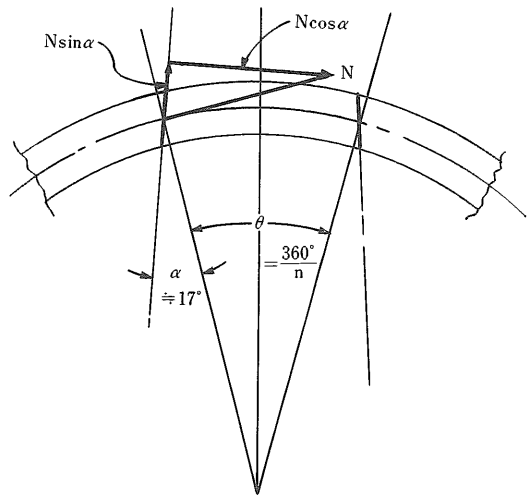


図11.4 キーセグメントに作用するせん断力

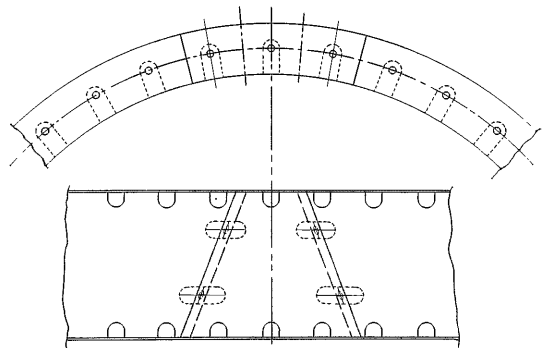


図11.5 水平挿入Kセグメント

となり、また $\alpha \approx 17^\circ$ が実用上使用され、 $f=0.1 \sim 0.3$ とその面の状態により変化が見られている。しかし Q_0 に対抗する要素はピース間ボルトで、リング間ボルトは有効と考えるわけにはいかない。

実用に供されているボルトは 22ϕ SS 材によって、そのせん断強さを 12kg/mm^2 と仮定すると、学会標準セグメント I 型 6 番 3.15ϕ の場合、 $n=10$ 本でピース間ボルト 2 本で対応しているの、

$$2 \times \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_q = 108,000 (\sin 17^\circ - f \cos 17^\circ)$$

より f を求めると、

$$f = 0.217$$

また、ピース間ボルトの締付力によるせん断抵抗も考慮して必要とする f を求めると、

$$2 \times \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_q + 2f\sigma_t \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 = N (\sin \alpha - f \cos \alpha)$$

で、期待できる σ_t は $\approx 15\text{kg/cm}^2$ 程度であるから、

$$f = 0.195$$

となり、キー・B セグメント間の摩擦のみに期待する場合には、その係数は 0.217 以上であることを必要とし、また B・K 間の締結力にも期待する場合には、 0.195 以上が必要であるとの結論となる。

金属間の f は条件によっては $0.1 \sim 0.3$ 程度を示すのが通例であるが山破壊に至ることもあり得る。

従ってそれらの対策として、次のような案を得た次第である。即ちセグメントは A・B を通じて各ピース共 6 本、あるいはそれ以上のボルトを使用すること。さらに、いも継ぎ、あるいは 1 本ピン接合は行わないこと、キーセグメントは 2 本ボルトによって軸力破壊を生じないように計画し、もし高土被りなどで、そのおそれがある場合には、内挿入型を避けて、平行挿入型とするのも優れた方法である。この方式で問題となる点は、その挿入角で、挿入を容易にするため大き目にとると内挿式と同様、セグメントの軸力によって、トンネル軸方向へ働く反力を生ずる。この力は隣りのリングにより対応できるよう、ピース間継目で調整する必要があるが内挿入型におけるような軸力破壊に直接結び付くことはない。

内挿入型も平行挿入型もいづれも K セグメントの内包角 θ の $\frac{1}{2}$ より小さくすることはできない

ので $\theta / 2 + 1^\circ$ 程度と従来 3° 位としていたものを 1° 程度に減少して対応すればかなり破壊力を低減できる。しかし、施工性の低下はまぬがれない。

12. 漏水しないシールドトンネルは可能か

この問題には色々な要因が関連している。即ち一次覆工であるセグメントが分割構造体であるため、その継手面にいかに精巧な機械加工を施しても、その接面の間隙が存在する限り、また外部に圧力水源があればその間隙を通して漏水が発生する (日韓トンネル研究 No. 6, p.104 参照)。

この漏水を避けるために継手目地のすべてにシール材を貼付することを規定し (学会トンネル示方書シールド編第 55 条)、あるいは裏込め注入材に地山安定性と遮水性のある材料を注入することを規定し、トンネル外周に止水性を与え、この両者によってトンネルの遮水機能を実現しようとする方法がとられてきた。また諸外国においても同様の傾向にあることが報告されている²⁷⁾。

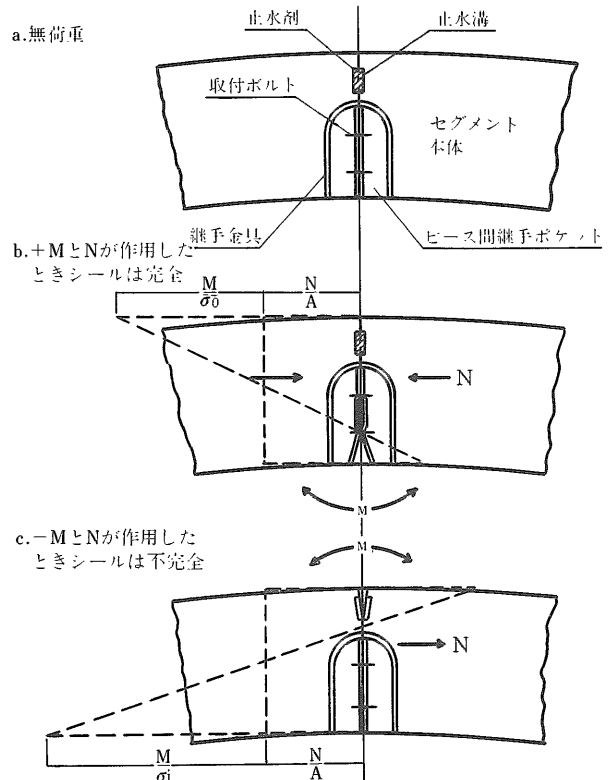


図12.1 止水構造

しかしながら、前章までに詳述したように、セグメントにより構成されたトンネルは、それに作用する土水荷重によって変形を生じ、地震の影響もトンネルの偏平化を促進する傾向を示し、このような断面の変形が止水機能に致命的な影響を与えていることも、おおよそ明白となってきた。

シール材による止水構造は図12.1に示すように、セグメントの外周側に配置されているため、Nと+Mとが作用する環境では外縁側に圧縮圏が形成されるので充分に機能するが、-Mの作用するスプリング付近では外縁側が引張圏となり、ピース間継手では軸力Nの存在にもかかわらず開口するため止水シールは有名無実となってしまふ。

この現象は、ピース間継手に起きるものであるが、これとともにリング間継手にも断面力の影響が及ぶことは当然であって、原理的には一体構造として考えたときの断面力(σ_t)が第3軸としてのトンネル軸方向力($\sigma_2 = \frac{1}{2}\sigma_t$)を示すのは当然のことで、ピース間継手で生起する目開きはリング間継手にも何らかの形で伝達される。いいかえると、ピース間目開きの起きる部位では、リング継手でも目開きが起き得る。

このようにセグメントの外縁部に止水シールを配する構造には、外荷重によるトンネルの変形の発生に応じて止水シールにも変形が誘発されるため、完全遮水を実現することは困難である。

同様の現象は、内縁側でも起きていることは勿論であるから、内縁側に止水シールを配しても同様に遮水は不可能であろう。完全遮水が可能なシールの位置は断面の中立軸線上、あるいはその付近のみということになる。

このように考えると、セグメントにおける漏水防止法がいかに困難であるかが了解される。

しかし、長大深層トンネルにおいては、軸力(N)に対する発生Mの割合はかなり低い値となり、セグメント外縁の発生応力も圧縮圏に留まる(第3部会、道路トンネル小委員会62年度報告:シールド工法検討報告参照)結果となっているのでこの点は杞憂に近い。またシール材を中立軸付近に配するという考え方は、既に新幹線用セグメントの設計で実施されているので、同トンネルが未だ大きな地震に遭遇していないことや、また作用荷重も未だ3年程度経過したに過ぎないため全荷重

に達していない点、将来の観察が必要であるとともに、その止水性には多大な関心が寄せられている。

13. 止水剤などについて

一次覆工を完了したセグメントがその受ける外荷重のために生ずる変形に伴ない、その組立接面の間隙は、それがいかに微小なものであっても止水剤による遮水機能を保持しなければならないことは、流体力学的にも極めて明白であって、既に筆者も指摘した通りであり²⁵⁾、欧州諸国においても専らネオプレーンなどによる成形品が広く実用に供され実績を挙げている²⁶⁾。それらのなかにはセグメントの組立面に溝加工を施すことによって止水剤に加圧、安定をはかったものも見られて、目開きなどの影響にもかかわらず、圧力保存効果による止水性が優れていることを実証しているものもある。

日本の市場ではこれらの他に膨潤性シール材と称して、地下水に接触すると水分を吸着膨潤し、漏水路を遮断することによって止水能を発揮するという膨潤型止水剤が流布しているが、地下水圧と膨潤圧との関係が明白でないこと、膨潤剤の膨張比が大きくなると止水剤そのものが水に溶出したりする結果が見られたりしている。

止水剤の選定に当たっては物理性・化学性の明確な材質を選ぶことによって機能の経年的劣化のないことを旨とする必要がある。長大トンネルは一度供用されると、半永久的に機能しなければならない。1897年に完工されたロンドンのBlackwall道路トンネル(2車線、内径24'3", 延長3,116フィート)は今年で供用90年を迎えたが、1964年の複線化完了によってさらに引続き供用は延伸されている事実を考えれば²⁷⁾、公共施設の社会的任務は長くかつ重大である。その機能を損なうものが漏水であるとすれば、構造的な完璧をはかるのは勿論のことながら、止水機能の完璧こそ追及しなければならない重大事と言わねばならない。

ちなみにBlackwallの場合、覆工は機械仕上げによる鑄鉄セグメントを使用し、組立接面はすべて紅明丹塗装を施し、コーキング溝を内空側に設け、鉛コーキングあるいは酸化鉄粉セメント混合

材によるコーキングを施している。またボルト孔に対しては亜麻仁油で練った紅明丹と麻糸とでクルメットを作り漏水が止るまで締込んでいる。このような構造による遮水実績は $3 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ でおおよそ完璧な実績を得ているが、長大トンネルの作用圧は1桁高い圧力 ($30 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$) が対象で、これらの延長線上の問題とすることはできない。

14. その他の遮水工法について

以上はセグメントを一次覆工として考えた場合の長大トンネルにおける遮水法について検討を進めたが、近頃セグメントにおける各種の問題や経済的な問題から ECL (Extruded Concrete Lining) によるシールド工法の実績も増加しつつあるし、さらに近年アイソレーションによる遮水法がシールド工法においても考慮されつつあるので、両者についての特長と実用可能性について考えてみよう。

(1) ECL 工法による遮水

この工法はシールドを使用して掘削を行うが、テール内でセグメントの組立は行わず、その代りに伸縮移動型枠を拾数组準備して、これを組立て(鉄筋を必要とする場合はそれ以前に鉄筋籠の組立を行い)、推進(掘削工と共に)を行い、テールプレートの脱出に伴う空間を生コンクリートで充填し、地山に直接打設生コンクリートを接触加圧せしめる工法である。

この工法の歴史は極めて古く、我国でも関門国

道シールド(ルーフ型)、営団地下鉄丸の内線国会議事堂前駅で施工されている。この2例は推進反力はプッシュロッドにもたせ、コンクリートには直接推力を作用させない方法をとった。従って地盤沈下などの問題が起きる可能性があるのが現代の工法とはいえないが、漏水などの問題が全く起きていない点、傾聴に値する工法といえよう。最近の ECL 工法では前述の移動式の内型枠のほかに、バルクヘッド型枠を設けてコンクリートにプレス加圧して地山に密着させる点と、打設目地もほとんど寿命の同じコンクリートで、リング間の密着がよい点に特長が認められる(図14.1)。

しかし、生コンクリートは、テールプレート脱出時にせん断変形を受けるので、施工管理上十分な注意をもって施工されなければならない。ただ、地下水の多い地山での実績で遮水効果が発揮されたという例が多くあるわけではない。また、テールプレートの長さを短くすると(図14.1)バルクヘッド形枠を移動するとき地山荷重がコンクリートを通じて、テール内に作用する時期が発生するので、テールプレートの長さ・コンクリートの品質について十分安全性を確認して決定する必要がある。

(2) アイソレーションによる遮水

この工法は、NATM による場合に多数の実績があり、実効が認められている。アイソレーションとは、一次覆工(セグメントあるいは NATM の場合では一連の一次吹付作業-支保工ボルディングなどを含む)と二次覆工コンクリートとの

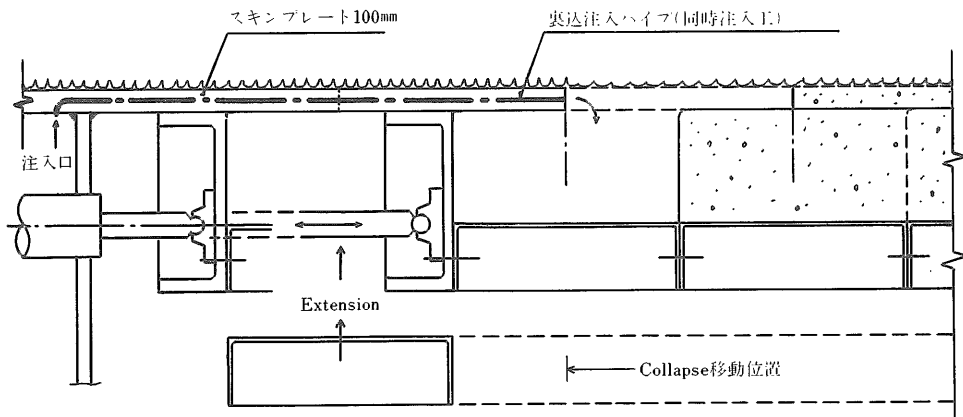


図14.1 ECL 作業手順

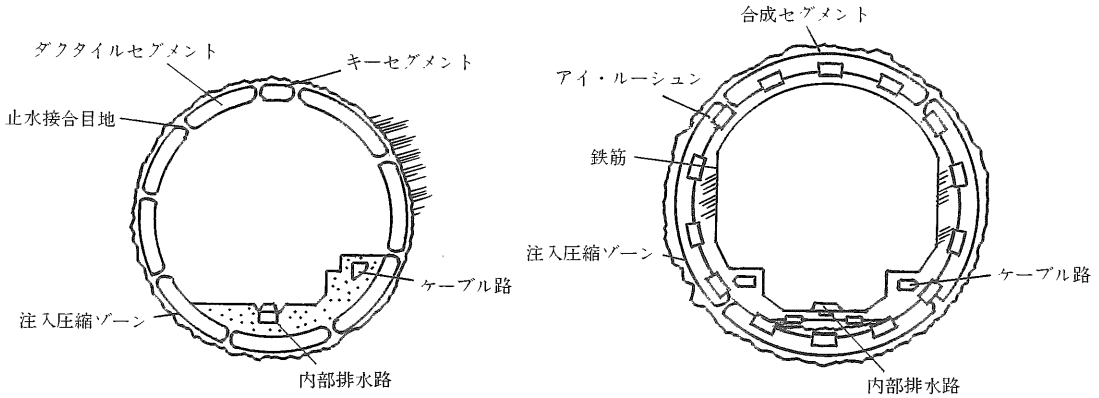


図14.2 L.Müllerによるシールド・トンネルの遮水法
(Der Felsbau 3巻 Tunnelbau より)

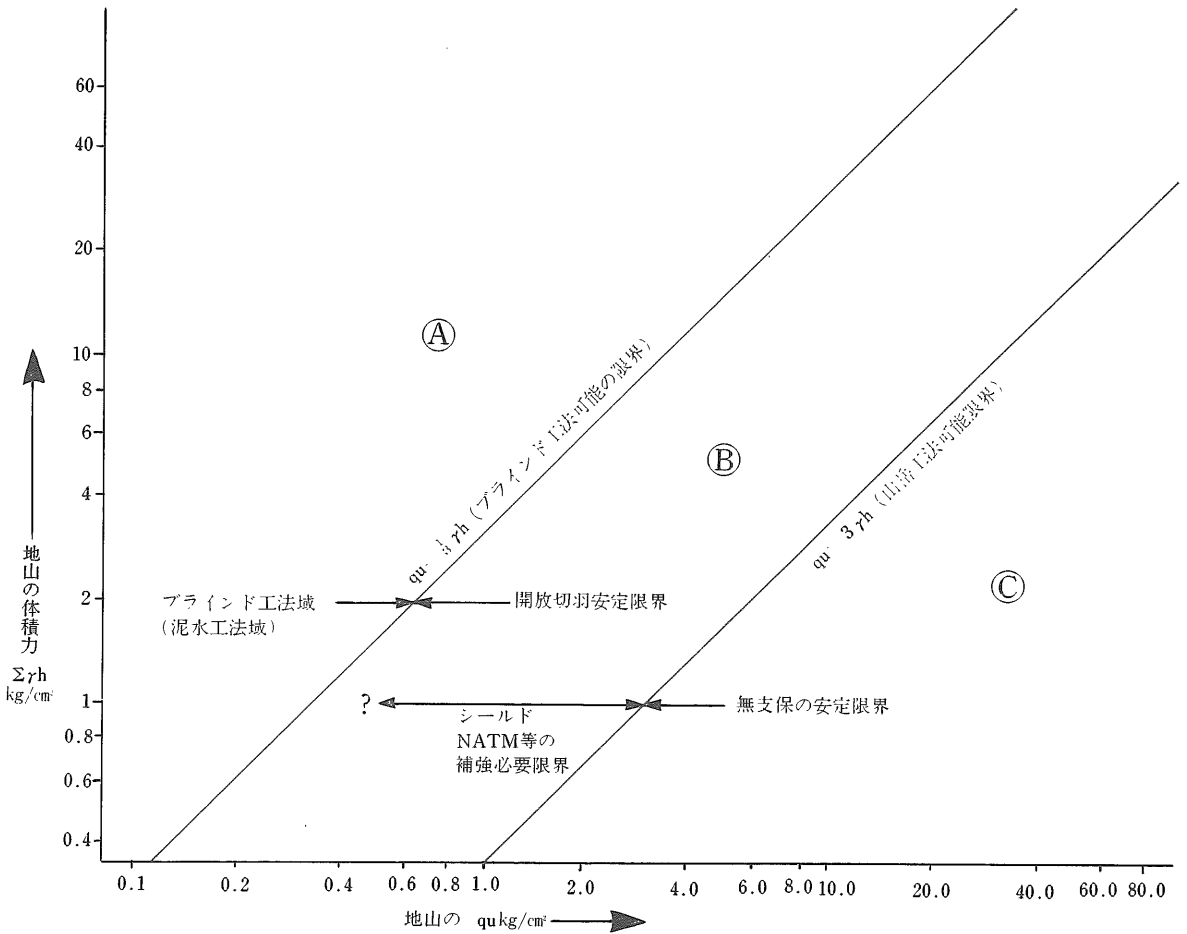


図15.1 地山の qu と体積力の関係

間に絶縁材 (アイソレーション) を挿入することによって、もし一次覆工が漏水に対して不完全であったとき漏出する地下水の影響を全周に亘って遮断する絶縁材によって二次巻コンクリートに接触させることなく大気圧中に設けられた放流路に放出せしめることによって、二次巻コンクリートに全く漏水の影響を与えないようにする工法である (図14.2)。

従って、この方法を採用するときは基本となるシールド・トンネルは二次巻巻厚だけ大きいトンネルを開削することとなり、さらにアイソレーションと二次巻工費が余分にかかることとなるので実質工費の増大は30%程度となろう。

さらに、漏水中に塩分を含む場合にはアイソレーションの外側は塩分及び酸素の供給があるものと考えねばならないので、一次覆工の劣化が進行する可能性大であるといわざるを得ない。従って、感潮域での本法の利用は深長な調査を必要としよう。

15. むすび

以上で長大深層トンネルを計画・実施するについての問題点について、概略ではあるが重要と思われる点についての考察を終った。そして、現状技術で未解決と思われる問題の指摘も2,3あった。それはカッター・グラウンド及びテールのシールドの耐圧構造の問題、セグメントの遮水構造の問題など、いずれも将来の研究開発によって解決可能な問題と考えられる。ただ、従来の山岳工法でもとられた周辺地山の改善 (遮水性及び地山強さの) 法を併用するか否かの問題はシールド工法においても最大のかなめ (要) として、その経済性を占う鍵となるように思われる。

即ち、山トンネルが無支保でも安定を保持できる地山の強さは図15.1の◎域であって、これより弱い地山ではシールドや支保工を用いた NATM の諸手法によるなど、周辺地山の補強によって安定域を広げることができる。弱点がさらに切羽の安定に及ぶと、ⓑ域の限界に達し、ブラインド工法や密閉型シールドに依存せざるを得ないようになる。即ちⒶ域では周辺地山の支保のみでなく、切羽自体の安定が必要となるので、ブラインド工法や密閉型シールドで対応することが必要となる

が、薬注工法や NATM の諸法でも対応可能な領域が高体積力の分野で実績が現われるようになった。いずれを採るかは地山諸条件・トンネルの規模を中心に深長審議されるべきであろう。

終わりにのぞみ、3回に亘る拙文に叱正を賜わった諸賢に感謝の意を表すとともに、耐震問題にふれる事のできなかった点については、将来その責を果したいと考える次第である。

参考文献

- 23) 下水道協会：第11回夏季大学テキスト，施工コース昭55.
- 24) 機械学会機械実用便覧 p.105
- 25) 日韓トンネル研究 (6) p.101
- 26) Lining and Waterproofing technique in Germany : G. Girna.
- 27) 日本シールドエンジニアリング編「道路トンネルシールド文献集」(1)。(2)

