

シールド工法と長大海底トンネル(1)

Shield Tunnelling and its Application to
Longer Undersea Tunnels, No.1

田中壬子也*

1. はじめに

青函トンネルの竣工を目前にし、海峡トンネル着工の話題に花が咲くこの頃、わが国においても長大海底トンネルの計画や構想がとり沙汰されつつあるとき、シールド工法による場合についての計画・施工とその可能性・限界性の検討を行うことは、時宜を得た課題ではなからうか。

この工法も『圧気手掘り』の時代を脱して、泥水機や土圧機が広範な土質条件下で実用に供され、優れた成績を挙げている。きわめて軟弱な海底未圧密シルト層地山に下水道汚泥圧送用幹線トンネル ($L = 3.3\text{km}$, $\phi_i = 8.0\text{m}$) を貫通させ¹⁾たり、また、第三紀砂岩頁岩層の立坑を発進して、名古屋港海底の極軟弱シルト層2,300m を通じて、上水道用海底トンネルを貫通せしめ²⁾、あるいはまた、全地質対応型泥水機によって広島花崗岩帯や神戸層群を征服する^{3) 4)} など、その規模の大小は別として、切削の可能性さえ問題視されていた新鮮花崗岩や玢岩層を、風化軟弱層とともに貫通するなど、極軟弱シルト層から新鮮岩盤に至るまでの広範多彩な地盤条件に対応して、トンネル開削の可能性を証明する実績が、日を追って累積されている。これらの実績で見逃してはならない

ことは、TBM工法と泥水工法との結合が、いろいろの意味で完成されたことである。TBMによって切削可能性が検証された岩盤は、今日では、泥水工法での可能な地盤とみなし得ることもである。

しかし、これから我々の前に立ちほだかろうとしている計画は、高水圧・高土圧・大断面などの物理的条件とともに、さらに経験されたことのない長延長に挑まねばならない。これらに関連する問題点を挙げるならば、

- ①全土質型シールドの可能性
- ②高土圧・高水圧への対応性はどこまで可能か
- ③流体輸送かズリ車輸送か
- ④セグメントの耐荷重性と防水性は
- ⑤進行はどこまで期待できるか
- ⑥耐震性についてどう考えるべきか

など、土木技術的な観点からはもとより、現代科学技術の精髓をつくして臨まねばならない問題ばかりである。以上これらの諸点について、考察を進めよう。

2. 全土質型シールドは可能か

シールド工法の生い立ちは、テムズ河底の軟弱地山にトンネルを開削することに端を発している。また、ハドソン河底では、さらに軟弱シルトのためにブラインド工法の誕生をみている。由来、

*日本シールドエンジニアリング(株)常務取締役

地下にトンネルが開削されて、それが安定を得るか否かの判断は、そのトンネルのスプリング線上に発生する応力が、その位置での自然土圧 γh の約3倍に達することから、地山の強さを、その一軸強さ q_u で代表させるとき、

$$q_u > 3 \gamma h \dots\dots\dots(1)$$

ならばそのトンネルは安定を得られ、

$$q_u \leq 3 \gamma h \dots\dots\dots(2)$$

に近づくに従って、支保工・吹付工・アンカーボルト、あるいはシールドなどの援けによる覆工(セグメント)が必要となるものと考えられている。もちろん現実には、地下水の影響などで、これらの原則は常に歪められているので、単純な判断はできないが、シールド工法が最も有効と考えられているのは、

$$q_u \leq 1/3 \gamma h \dots\dots\dots(3)$$

のような軟弱地山に対してである。(3)の右の条件下では、ブラインド工法が適切と考えられてい

る。⁵⁾

(1)の領域は山岳トンネル工法が適切とされ、発破工法・NATM工法やTBM工法等が実施されているのに対して、(2)の領域では、従来、シールド工法が適性と考えられていたが、現在、NATM工法もこの域で実績を積みつつ共存している。(3)の領域では、シールド工法が専ら利用されている。

このような状況下において、TBMの利用分生にかなりの変動が起きようとしている。TBMでは、急曲線の施工、風化帯対策(グリッパー型よりシールド型へ)、硬岩切削での切り粉対策、等々の宿題の解決に向かいつつ、なお、超硬岩の切削という難題をかかえて努力が進められていたが、TBM型泥水機による花崗岩および珪岩帯における実績において^{3) 4)}、優れた掘進実績を挙げることができた。

これらはいずれもローラー型ビット搭載の泥水

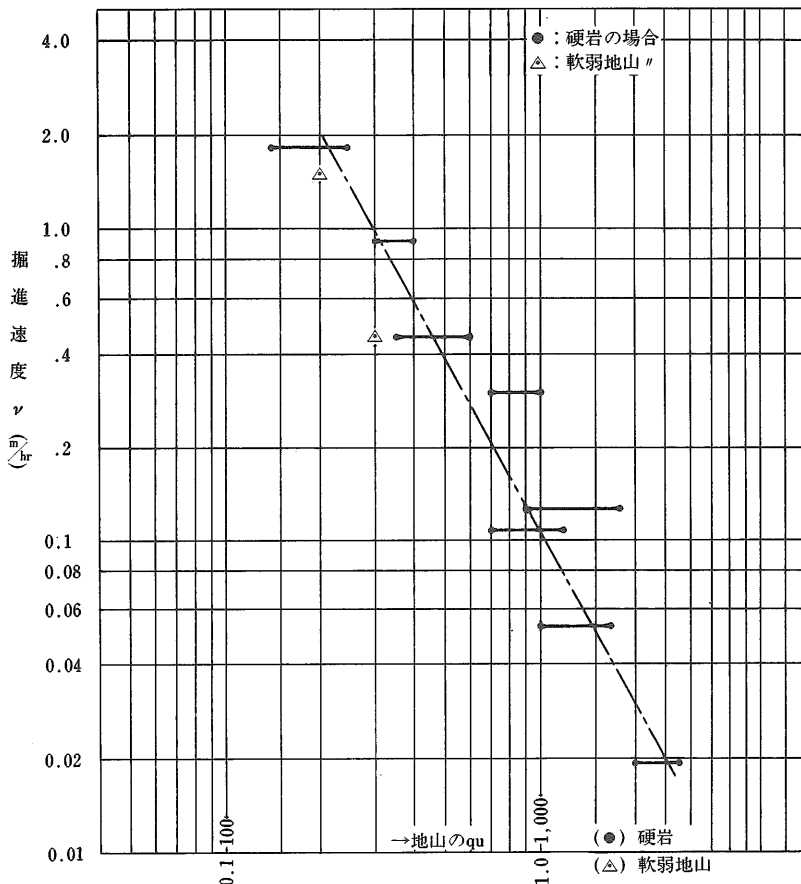


図-1 泥水機による掘進速度

型シールドあるいはTBMで、その実績をみると、純掘進速度 (v m/hr) は、その地山のRQDと密接な関係を示し、RQDの向上とともに v は低下を示すが、ローラービットの径を大きく ($15\frac{1}{2}$) すること、推力を強化すること、回転数を上げることによって、深成花崗岩 (P波速度 $V_p \approx 5.9$ km/s, $q_u \approx 2,900$ kg/cm²) といえども、これを切削貫通に成功している (0.9/47.2hr)。このように、ビットの摩耗と v との関係も、かなり明白に把握されるようになり、ビット素材として、工業ダイヤモンドあるいはタンゲステンカーバイトを使用するまでもなく超合金鋼によっていることは、切削機能として、まだ余裕があるということでもある。最も硬質の地山に対して、ビットの交換までに50mの進行をみていることや、リング当たり3時間以上を要したシフトは35R、そしてその作業平均時間が6.82時間であった。しかし、平均的な作業の進行は1シフト1時間である (図

ー1)。

この実績はまた、地山条件調査の重要性を示すもので、切削可能性を判断する方法の確立がいかに重要であることを示唆している。200mあるいは100m間隔のボーリングでは、20~30mの間で屹立する新鮮岩盤を予見することはきわめて困難である。と同時に海底下・陸上を問わず、弾性波プロファイラー記録と、ボーリングデータの比較照合によることが緊要であることを示すものである。

以上、総合して言えることは、軟弱地山に対する稼働性には、ほとんど問題となることはなく、 $0.1 < q_u < 1$ で $v = 0.5 \sim 1.2$ m/hr が実施されている (≈ 12 m/日 ≈ 300 m/月)。また、硬質地山に対しては、1 m/hr が平均的に稼働されているから、エレクションを含めて、実質進行は輸送問題を除いて月進300mが可能である。

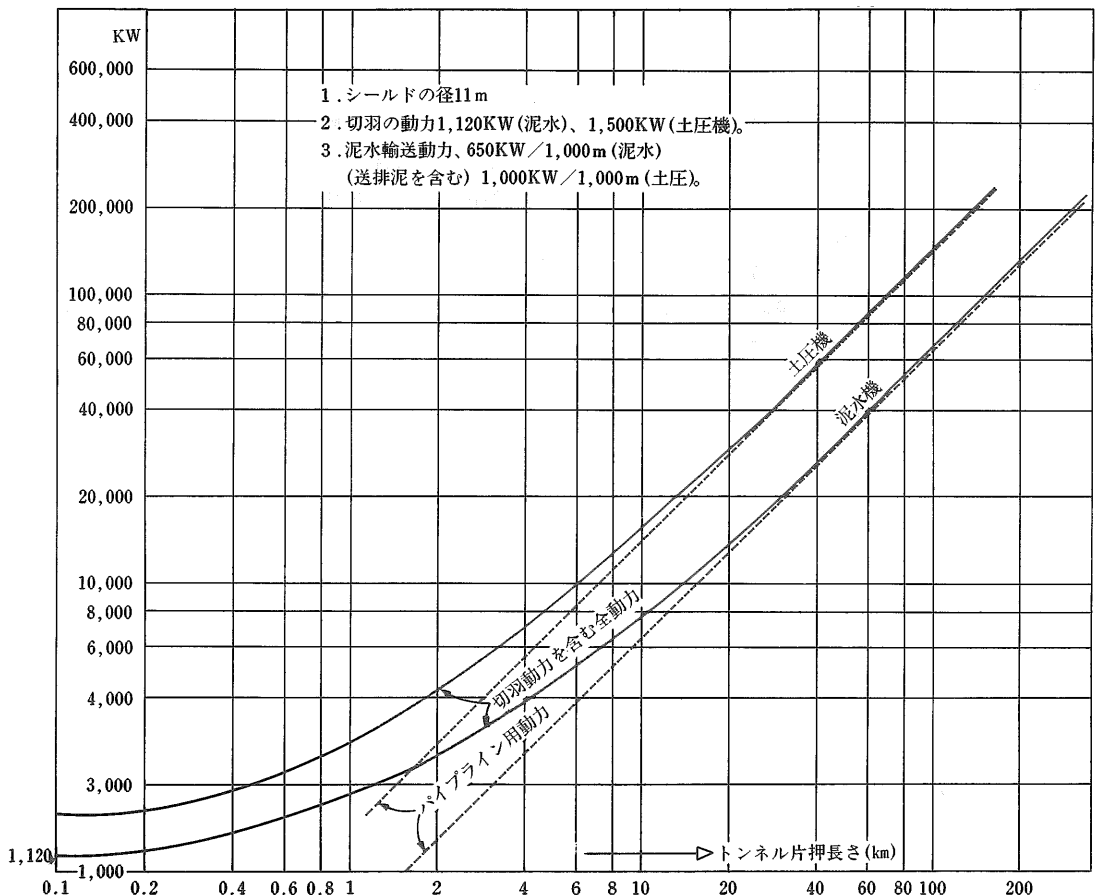


図-2 泥水機による長大トンネル運転に必要な動力 (KW)

3. 長大トンネルにおけるズリ輸送

泥水方式は泥水を坑外から切羽に送り、その安定に適当な圧力を保持せしめ、切削によって派生するズリとともに、排泥管によって再び坑外に返送される。坑外と坑内との揚程差は、実質的に有効落差とはならない。また、往路は泥水のみで、復路は比重の大きいズリを含むため、全体系としては、トンネル長と流体重量に比例した動力が最終的に必要となる。図-2はトンネル長(片押し)に対する所要動力を示したもので、たとえば全長60km(径11m)のトンネルでは、片押し30kmの両口で約40,000KWが必要となる。これに停電時予備電源を考えると、これの2倍にもなる。これらの設備費・電力基本料金・電力量費を概算しただけでシールド本体価格の2.5倍にもなり、システムの不経済性があらわになる。この方式の経済限界として、片押し5km程度であろうことが了解される。⁹⁾

泥水輸送方式は、確かに坑内の簡素化には有効であるが、システム経済は許し難いものがある。同様に、土圧機のズリ処理体制については、ポンプ圧送システムが開発され成績を挙げつつあるが、⁷⁾管内流速は泥水機の場合より低く1.5m/s程度で、動力は泥水方式の約2倍程度である。含水量の低い状態で輸送される優れた点が認められるが、泥水方式と同様、輸送距離の限界は略々同様である。

これに対してズリ車輸送は、山岳トンネルの実績等に照らして、転動摩擦係数の低いことから低動力である点、優れた手段であることが再認識される。これも距離の増大に伴う充電所の設置が必要となるが、全所要電力は前2者のおよそ1/5程度ですむ。ズリ車輸送有利性はコスト面の比較でも明らかである。しかしながら、掘進システムとしての泥水方式・土圧方式の優れた点は、これを活用すべからざる機能にあり、ズリ輸送方式としては、ズリ車方式によるとすれば、切羽掘進システムに泥水機をとり、その直後部で泥水処理装置を設けて泥ズリ分離を行い、泥水は直ちに切羽に循環せしめ、脱水ズリはズリ車輸送とする方式も考えられよう。この場合、濃縮泥水の処理は別に考えることとする。

切羽を土圧機とした場合では、このような問題は全く解消され、消泡されたズリ⁷⁾はそのままズリ車輸送に向けられる。

掘進機を泥水式とするか土圧式とするかの選択には、きわめて複雑な問題が介在して、単純な選択はできないが、長大トンネルのズリ輸送は、ズリ車輸送に限定されよう。しかしその形態は、従来方式程度の速度では矛盾が発生する。すなわち、掘進速度を向上させるためには、ズリ出し速度もセグメントの搬入も、トンネルの長さに応じたスピードアップが必要である。従来の坑内ズリ車速度(5 km/hr)は、少なくとも50km/hr程度まで増速されることが必要となろう。

このような要請に対して考慮しなければならない問題は、

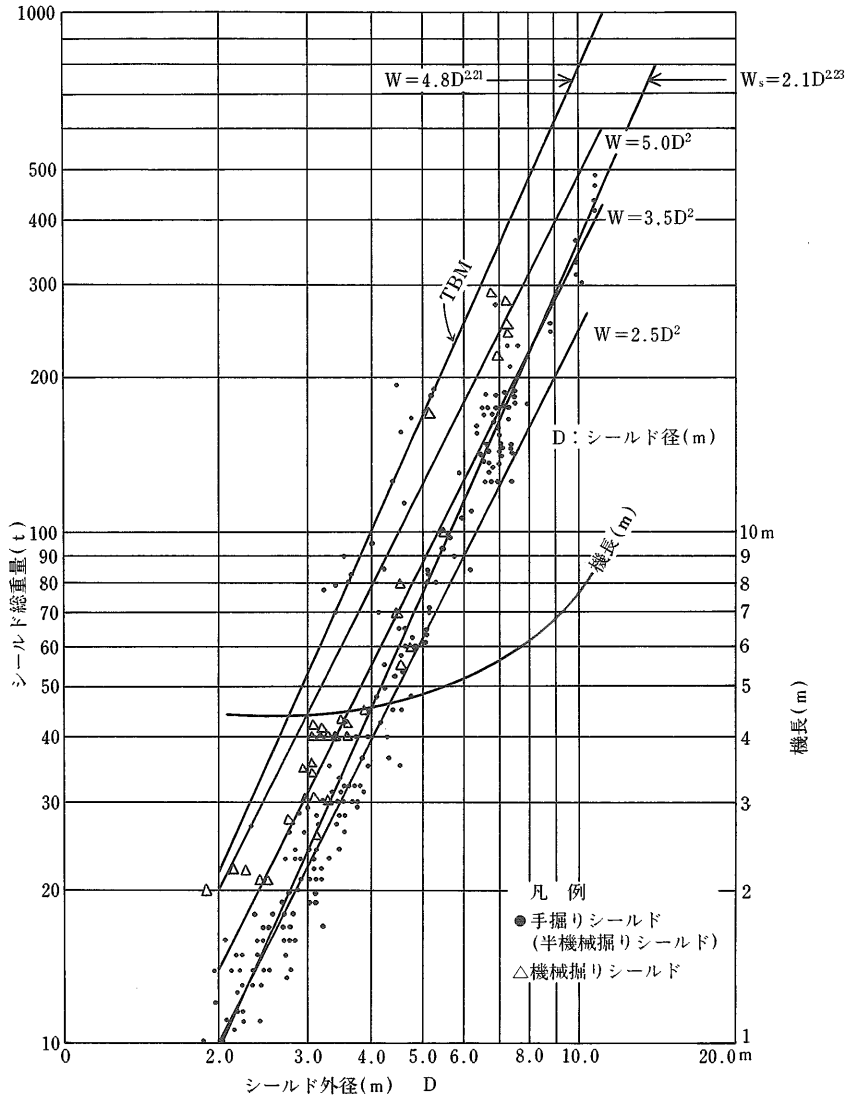
- (a) 軌条方式の本線並拡充(3'6"ゲージの採用)
- (b) ズリ車の大型化(10m³, 18t車)
- (c) 信号方式の採用

などであるが、給電方式としては蓄電池機関車によることが安全上も必要で、また、スピードアップのためには設備の改善のみでなく、安全体系(労働法)の改善さえ必要となろう。その他、客車の連結・別空間歩道等、考えねばならない問題も山積みされている。

4. 高水圧・高土圧対応性はどこまで可能か

シールド本体の構造は、テール部を含め基本的な耐圧構造として、その計画の海底下の土水圧に耐え得る鋼円筒として設計されねばならない。⁶⁾リング部は、スキン部だけでなく内筒によって補強されるので十分な強さを得られるが、テール部は片持構造なので、その基部は苛酷な条件下に置かれ、片持円筒殻としての外圧座屈を考えねばならない。

その一例として、深さ150m、岩盤の被り200mの垂直土圧は約70kg/cm²で、これに対し、径10m、長さ2m、厚さt=10cmのテールRの片持円筒殻の外圧座屈耐圧力は72kg/cm²と、きわめて接近した数字である。⁸⁾この耐圧力は厚さの3乗に比例するので、厚さを増加することで解決し得るが、テールRへの機械加工などで強度低下が予想されるので、慎重な計画を行わねばならない。



シールド外径と総重量との関係(土木学会：トンネル標準示方書(シールド編より))

図-3 シールドの重量

また、既に挙げたシールド本体の重量平衡が、泥水方式で話題になっている軟弱地山を掘進する本体部の等価比重は一般に ~ 0.9 程度で、また、TBM型機では、強大な推力対応のため1.2程度にも上がっている。これらはいずれも1.0に制限し、機能・強度も充足するよう設計されなければならない。

次に問題と思われるのは、カッターのシールおよびテール・シールである。外部環境の圧力が $70\text{kg}/\text{cm}^2$ ならば、これに対応可能な設計が必要である。カッターの支持型式にセンター・シャフト型と周辺支持型が実用化されているが、前者の

シールは容易であるが、高泥水圧化に伴い軸径も大きくなるので、重量軽減のため中空軸の採用を余儀なくされている。後者では、シール延長の長いことや寸法誤差の解決を予期した対応が必要で、構造および材質ともに問題が多い。しかし、時はまさにトライボロジー時代(Tribology age)である。油圧機器のシールは、既に20年来 $400\text{kg}/\text{cm}^2$ を常圧とし、さらに高まる可能性さえあることを思えば、周辺支持の可能性も十分あると思われる。いずれを選ぶかは、そのシールド設計の峠を暗示している重要問題である。

テール・シールについては、従来のリップ構造

は、たかだか15～20kg/cm²に対応するために設計されたものである。上述の70kg/cm²に対応せしめるためには、テール・クリアランスの寸法制限内では、ほとんどシールド材で空間が埋まってしまうのではないと思われる。リップ1段の耐圧力を7～10kg/cm²と考えると10～7段のリップが必要となり、各段の圧力自動制御の必要性が生ずるのではなからうか。さらにリップの材料については、耐摩耗性と耐圧性から、高剛性の線材と耐摩耗性・密封性材の複合構造のLまたはJ型リップを、各段ともバックアップ・リングによる補強を行うものとなろう。テールそのものの強度に制約を受けないよう、取付加工による強度低下を見込んだ設計でなくてはならない。

5. セグメントの耐荷重性と防水性について

長大海底トンネルは、150mもの海深と、200mあるいはそれ以上にもおよぶ土被り条件下の地底を通過するトンネルである。その周辺地山は、高水圧・高土圧条件下にある。しかし、従来、長大海底トンネルの耐荷重に対する考え方は、発現するであろう高岩盤圧に対して、地山自体で対応できるようなモデレートな自然圧力圏を構成するよう、地山強度を補正（薬注）し、同時に遮水性を付与して、漏水のない地山環境を完成した上で、支保工とともに覆工を完成しようとするものであった。たとえば、水深140m、土被り100mの環境は、地圧約40kg/cm²であるが、ここにトンネルを開削すると、トンネル周辺に発現する2次応力は約 $\sigma_r = 120\text{kg/cm}^2$ となる。しかし、その地山の軸強さがわずか40～50kg/cm²しか期待できないものであるとすると、薬注工法などで、これを120kg/cm²が期待できる程度にあらかじめ地山の改善を施した上で掘削を行い、安全環境下において支保工あるいは吹付け・ボルト工をし、その上、覆工コンクリートの強度を240kg/cm²以上とすれば、略々安全率2のトンネル覆工が完成されたことになろう。

しかし、シールド工法は山岳工法といささか異なった手法と過程によっている。

前章で検討されたように、トンネルを開削することによって発現する荷重は、シールド本体で支持し、地山の崩壊に対抗し、なおかつ切羽の安定

にも対応して掘進することができる点に特長を有している。また、永久構造物としてのトンネル本体は、テール内で組み立てられるセグメント・リングによって構成される。セグメントの耐荷重性は、その地山の性質によって、全荷重あるいはゆるみ荷重による場合もある。したがって、その周辺に発生する応力より低い強さの地山であれば、セグメントがこれを取るように、また地山が2次応力状態に耐えられることが保証されるならば、セグメントは一部荷重を取るような設計法もとられている。しかし、河底トンネルなどの実績では、英米ともに機械仕上げを施した鑄鉄セグメントを使用することが、伝統的な原則として墨守されている。¹⁰⁾

しかしながら、わが国の現状技術では、セグメントの製作精度に対しても、製缶加工程度の精度¹¹⁾に甘んじているため、完成されたトンネル・セグメントの組み上がり精度も必ずしも良好とはいえず、目違いや目開きが多く、ために止水も不完全となりがちである。¹²⁾これを解決することは、長大海底トンネルの場合、基本的な要求である。

たとえば、BART¹³⁾における陸上部単線トンネルのセグメント製作仕様書では、鋼製の場合、製缶仕上げの仕様と機械仕上げ仕様とを併記し、受注者にその選択を委ねたが、受注者は施工時の製品精度の低下を慮って、機械仕様を選んだ経緯もある。また、大ロンドン市の道路トンネル（テムズ川横断）に使用されたセグメント（鑄鉄）は、全て機械仕上げ（machined）されたセグメントを使用している。地下鉄トンネルについても同様である。Megaw氏もその著¹⁴⁾の中（8.6.1 p.219～）で、セグメントの組み立て接合面については、正確な組み立て、止水のためにも精度の高い機械仕上げを行うべきであることを力説している。（ただ経済的理由から加工費を節約するため、リング間加工に一部足皮を残すような例を示しているが）本件のような苛酷な条件下では、原則を貫くべきであるとともに、検査規準・方法の確立が望まれる。

セグメントの止水構造と材料については、わが市場では雨後のたけのこのように新しい製品がはんらんしているが、まずその母体の構造が確立されてから、止水剤の効用も明白になるはずである。

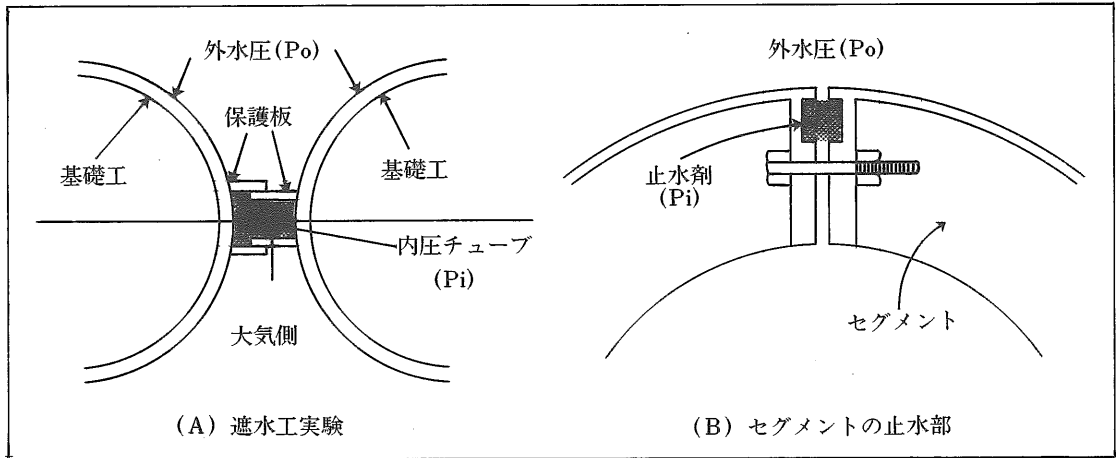


図-4 止水の機構

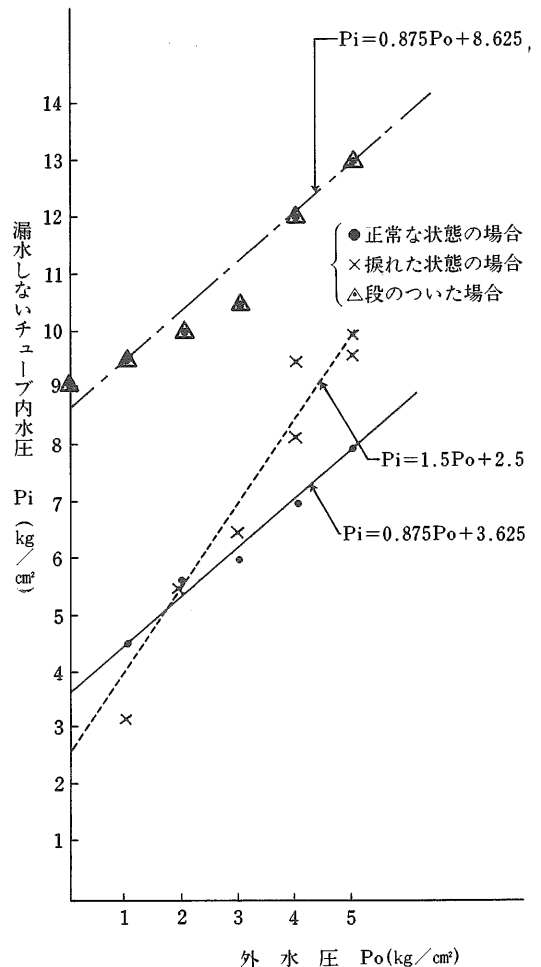
筆者らは、かつて本四橋公団の要請によって、きわめて接近した柱列基礎間の遮水についての実験研究を行ったことがある。¹⁵⁾それは図-4(A)のようなもので、止水が可能であるための条件として、外部水圧 P_o に対して、内圧チューブ圧 P_i は、

$$P_i = P + \alpha P_o$$

であることが必要とされた。P, α は遮水部の構造によって変動はあったが、P は $2.5 \sim 8.5 \text{ kg/cm}^2$, α は略々 1.00 であった。これをセグメントの止水構造と比較してみると、止水剤が P_i なる加圧状態にあれば、外水圧 P_o に対して遮水が可能であることを示している。止水とは、かかる機能のものであることを認識したわけである。止水機能は、止水機がある圧縮状態に維持されてはじめて有効であるので、このためには、セグメントの対荷重設計・止水構造の設計・止水剤の選定を一体としたシステム設計の必要性を物語っている。

6. 期待しうる計画進行について

最近における大型泥水工法の実績をみると、いろいろの点で過去のシールド工法上見られなかった優れた点が浮きぼりにされている。それはまず切羽の安定が非常に良くなったこと、掘削作業およびズリ輸送は、ともに人力依存から完全に解放され、機械施工となったことである。ただ、セグメントの組み立て中のボルト結合作業は人力に依存しているが、これもロボット化の研究が進めら

図-5 P_o と P_i の関係図

れ、既に完成の域に達している。方向制御も測量の自動化とともに、操縦の自動化により、推進作業も自動制御されるようになった。ただ、ズリ処理の段階で、砂礫の分級は容易に行われるが、シルト粘土の脱水作業にはかなりの時間を要し、実質的な進行は、この作業能力によって決定されていると言っても過言ではない。10mφ級の実績におけるサイクルタイムの代表値を示すと、

測 量	20'(△)
掘 進	30'(△)
エレクション	1°00'(△)
泥水処理 1次	30'

この作業は実質的に掘進と同時に終る。

泥水処理 2次	2°10'(△)
---------	----------

貯溜されてプラントの能力で平均化される。

計	4°00'
---	-------

のように重複が許されない作業(△)時間からは、1日6シフトしか進行できない結果となっている。機械は1日3hrしか働いていないので、あとの時間は汚泥の脱水に費やされている。したがって汚泥の脱水を掘進とエレクション中に完了するような能力を泥水処理(2次)設備にもたせるとか(あるいは天日乾燥が可能と)すれば、前記サイクルタイムにチェック測量を加えて、

測 量	5'
(1日1回のチェック測量5'×12=1hr)	
掘 進	} 45'
裏込注入	
自動測量	
エレクション	45'
真円保持工	30'
計	125'

となり、1日3交替、各々8hrの有効作業時間(1hr残業)とすれば、1日10~12シフトが期待される。これは日進10m(月進250m—25日操業)あるいは3km/年に相当する。

このように泥水工法における問題点は、泥水処理における汚泥固化(脱水)の能力と、既に挙げた泥水輸送の問題に集約される。

7. むすび

以上の諸考察は、地盤条件や地域を特定するこ

となく進めたため、概説的となったが、沖積海底軟弱地盤に対しては、一般的に成立すると考えられるものである。第三紀あるいはそれ以前の海底岩盤の場合については、耐震問題とともに次回に譲ることとした。

(つづく)

参 考 文 献

- 1) 仲内他：南部汚泥連絡幹線工事報告，トンネルと地下
- 2) 名港導水路，海底シールド工事実績，建設の機械化，1980.3
- 3) 入沢他：礫泥水シールドで岩盤を掘る(東広島西条幹線)，トンネルと地下，1986.1
- 4) 村山他：全地質対応型TBMによる小口径トンネルの建設，土木施工，1985.7
- 5) シールド工法の最近の技術動向，月刊下水道，Vol.8，4号
- 6) 藤本徹：シールド本体テール部の応力変形解析，建設の機械化，1979.2
- 7) 土木学会：高濃度砂礫泥土の搬送装置の実用化について，最新の施工技术，S60.4
- 8) 機械学会：機械実用便覧，改訂5版
- 9) (別稿)
- 10) マーシーキングトンネルの計画と設計(日本シールド編，道路シールド文献集③)，ICE No.7480，1972，p.492
- 11) 土木学会：シールド指針，第80条参照
- 12) シールドトンネルの止水に関する調査報告，シールドエンジニアリング社内資料，S58.9
- 13) BARTセグメント製作仕様書，BART
- 14) T.M. Megaw & J.V. Bartlett: Tunnels, Ellis Horwood Limited, Chichester
- 15) 本四公団・土木工業協会：本四公団基礎工法検討報告書，S44.3

