

調査と研究 ②

各種施工法に対応した 地質調査項目の検討

Examination of Geological Surveys Dealing
with Different Tunnelling Methods

田中 壬子也*

はじめに

田中ゼミは、1989年5月26日の第1回委員会以来8回に亘る委員会を開催してきた。この委員会の目的は、対馬海峡西水道、東水道の新規堆積層における設計施工に必要となる土質定数の取得と評価であり、特に調査対象が海域にあるため海洋掘削システムや検層システムの再検討を行って、今後の対馬海峡調査の指針となる様に検討してきた。

今回、これらの委員会検討内容を取りまとめて報告する。

1. 計画輸送の目的・規模について

日韓トンネル計画は、道路・鉄道両輸送手段を包括する高次の文明施設として、旅客輸送を始め、1次原料の輸送、2次製品は勿論、3次商品に到るまですべての経済対象物資の輸送を可能ならしめるものであることを目標として進められねばならない。

従って、本トンネルの機能は道路トンネルとして、トラック輸送、乗用車・バスの運行をはじめ、

鉄道輸送としての旅客輸送、貨物輸送などのすべての形態を満足するものである点において、ユーロトンネルにおける計画と同様の条件下にあるものと考えられ、接続両端が2国家に亘っている点も同様である。

ユーロトンネル計画においては、この目的のために鉄道輸送を基幹とするシステムを完備して、まず換気問題の難点を回避するため、トレーラー方式によってすべての道路輸送対象物を搭載輸送し、システム両端に乗せ替え、基地並びに駅を完備する方式を採用している。本研究においても、当面この方式を基礎として進めることが最善の途と考える次第である。

トレーラー方式の主なる難点は、搭載車両の大きさに制約を受けることで、それらが必要とする輸送規模より、トンネル計画の基本的な構想も決定される。即ち、現在海運用として多用されている大型船用コンテナーの寸法規格を援用するとトンネル規模の大型化は避けられず、更にモーター一台車の寸法・ゲージ等も一般道路を基準としているので大きすぎてそのままの利用は適切でなく、新たな規格の立案が必要となろう。従って、それらの検討を進めるにはユーロトンネルにおける搭載ゲージを重要参考数字とすることになる。

また、急速乗せ替えステーションの能力規模に

* 日本シールドエンジニアリング(株)顧問

よってトレーラー方式の輸送能力も決定され、道路・鉄道両輸送システムの単一化が計られよう。

更に、現在世界の話題となっている磁気浮上方式による高速運転システムは、既に独・米・日等諸国で実用化時代に入ろうとしているのに対し、新幹線方式も最高速度を 300km/hr において TGV にせまろうとしている。いずれにしても音速以下の運転において、空気抵抗の問題はひとつの中約条件として登場していることは否めない。空気抵抗問題解決のために、双設単線+空気バイパス方式か複線トンネル方式かの比較検討もまた大きな課題として取り上げねばならない重要な問題である。即ち、バイパストンネル構築は主トンネルの建設と比較して、決して軽視できない繁雑な問題でもあり、建設工法・止水技術と共に維持管理上の3者3点を含めて、計画発足時点で解決してからねばならない問題である。

駆動方式上、新幹線方式の問題点として運転勾配の制限 (12%) が挙げられるが、いずれにしても実際の最大海深度 (-160m) と所要土被り (100~300m?)、即ち約 260~460m を現行の勾配 1.2% で突破するのに、21.7~38.3km の距離を必要とすることより、少なくとも 5% (5.2~9.2km) 程度までの向上は必要最小限と考えられ、機関車駆動より連成駆動方式 (多モーター方式) を必要とするのは明白である (西水道の場合)。しかし、これは磁気浮上方式の高速性 (500km/hr)、加速性 (20%) を要求するものではない。

2. 土木構造物に課せられる課題

以上のような計画上の要請、即ち、鉄道方式を基本とするトレーラー方式道路車輌輸送を実施するための土木構造物を建設する場合の施工可能性と経済性を NATM 工法・沈埋工法・シールド工法について包括的に考察すると、大略次のようになる。

(A) NATM 工法による場合

本工法の特質は、地山条件がトンネル周辺の地

山に発生を予期される応力に充分に耐え、なおかつ遮水性が充分満足されるならば、その総合的建設費は完成空間当たり $5 \sim 8 \times 10^4$ 円/m³ と極めて安価であることが、多数の実績によって示されている。

$$[qu > 3 (\gamma \omega h \omega + \gamma h) fs]^{(1), (2)}$$

《補足説明》…【この考え方は文献 (1)、(2) に詳述しているように、地山の強度 (qu) がそこに発生しているトンネル内の応力より大きくなればならないので、qu の方が大きいことを条件としている。即ち、発生応力の源はトンネルの上にかかる海水の重さと、地山の重さが基礎となっている。即ち

$\gamma \omega$ 海水の比重

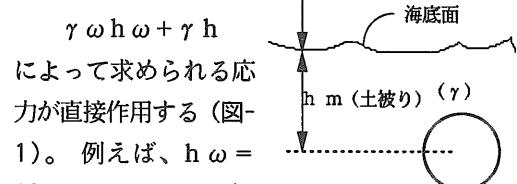
$h \omega$ 海の深さ

γ 地山の比重

h 土被り深さ

fs 工学的に確信のもてる安全係数で本件の場合 1.5~2 が妥当な数字と考えている。

から求められるトンネル中心線上の重力によって発生する応力、即ち



によって求められる応力が直接作用する (図-1)。例えば、 $h \omega = 120m$ $\gamma \omega = 1.03 (T/m^3)$ $h = 100m$ 、 $\gamma = 2.5 (T/m^3)$ とすれば、トンネル中心付近での作用力 (垂直力) は、

$$\sigma_v = 120 \times 1.03 + 100 \times 2.5$$

$$= 123.6 + 250$$

$$= 373.6 T/m^2 (= 37.36 kg/cm^2)$$

となる。これによってトンネルの周辺に発生する応力は約 3 倍となることが理論的に論証されているので

$$\sigma_{\theta=0} = 3 \times 37.36 = 112.08 kg/cm^2$$

なる力がトンネル周辺の側壁 ($\theta = 0^\circ$) に発生す

る。

これに対して地山の強さが
 $q_u = 112.08 \text{ kg/cm}^2$ しかなければトンネルは崩壊するので、幾らかの安全率を見た地山の強さが

要求される訳である。即ち、 $f_s = 2 \sim 1.5$ が必要である。 $f_s = 2$ とすれば $q_u = 224.16 \text{ kg/cm}^2$ が必要な強さの限界とされる。この状態を示したのが図-2である。

このように最終的には、その地山の強さ q_u がどの程度あるかが問題なので、これを正確に調べることが必要である。】

この工法の特長は、地山自身の強さによって、

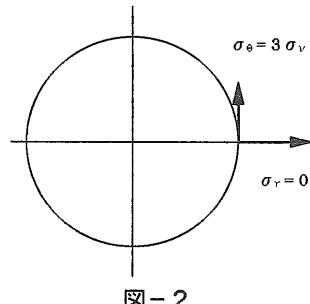


図-2

開削された周辺空間に発生する応力に耐えるようする工法であるから、この条件が満足されるためには、堆積性地山の場合、充分な圧密と粘着力の存在が必要である（図-3参照）。

しかしながら、青函トンネルの実績において示されるように、黒松内層の突破が注入工法によって可能となり、なおかつ二次覆工の完成によって、その脆弱性が完全に克服されたことが示すように、海底部23km中、僅か5kmの黒松内層突破に全知全能が投入されたことは、関係者全員の周知する処である。

この部位の力学的条件は、西水道の場合土被り100mにて計画された場合に酷似することは、図-3の示す通りである。しかし西水道の場合、更新世堆積層が全長の90%を占めているので、NATM手法の援用によって地山の改善を計るか、或はルートを深めて自然条件の向上に期待するか、凝視の的となっている。地山改善の注入工が

この工法の経済的有効性を損なう結果となり、シールド工法ないしTBMに有効性が移ることとなる。

即ち、地質条件がこの問題の決定条件となるため、B,C,D層の物理、ならびに力学性状の解明が、これらの問題を解く鍵となってくる。

《補足説明》・【地山改善の注入工としたが正確には、地山改善のための薬液注入工法の意味である。

P65の補足説明と同じ条件の場合、自然状態での地山の強さが $q_u = 200 \text{ kg/cm}^2$ しかなかったとする。安全率2を確保されるためには、 q_u が約 24.16 kg/cm^2 足らないので、薬注によってこれを 240.16 kg/cm^2 にまで増強する必要がある。これを実現するためは薬液注入工（九州支部・花田氏＜佐藤工業＞の研究）が必要であって、これによって地山強化が実施され必要強さに達したるが検証されれば目的は達せられることになるが、これには費用を必要とするのは勿論である。これがためにNATM工法自体は経済的であるのだが薬液注入工が加わることで全工費増大を来すのである。】

(B) シールド工法による場合

シールドを使用して施工する場合、トンネル周辺に発現する外力に対して、シールド本体が対抗し、またシールド掘進後は組み立てられたセグメントがこれに代わって永久構造物となるもので、山岳工法成立の条件が満足されない $q_u \leq 3(\gamma \omega h \omega + \gamma h) fs$ の場合でも、単独あるいは、ブラインド工法や、泥水工法で対応可能となる。しかし、土被りの少ない場合では、切羽は安定し、周辺土圧にも充分対応出来ても、かえってそれらが小さいため、地山連行現象なる特殊状態を発現して、必要な土被り厚さが要求されることがある。

シールド工法は、NATMに比して、シールドそのものの製作費、セグメント費が必要で、 $15 \sim 20 \times 10^4 \text{ 円/m}^3$ (NATMの3~4倍) と経済性は悪い

のが通例である。

即ち、本件の場合、軟弱地山ではなく新期堆積層であることから、上記諸条件を検討するため、深さに対する、 γ 、 q_u 、 ϕ 、 E_o 、 C_v 、 e 、 ω 、 $k\omega$ 等の調査が望まれる。然して、これらの確認に総合検層システムの活用が有効である。

施工法上の問題点としては、テールシールの耐圧性・面盤回転軸シールの耐圧性等に対しては 30 kg/cm^2 程度までの対応は既応の技術で対応出来、ズリ出しサイクル、セグメント輸送サイクルについても本線なみの信号・車輛・軌道システムの採用により、急速ズリ出しを可能ならしめるとの可能性について既に見通しを得ている。

一番問題視されているセグメントの耐圧性については、寸法精度の向上、プラスティックコーティングによる遮水性能の改善、目地止水性の完全を期する技術も充分な見通しを得ているとはいうものの、敢えて高圧を好むわけではない。 $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ の範囲内で止まるものなら、この程度で対応したいというのが本音である。

(C) 沈埋工法の場合

この工法は今世紀の初めより、欧洲・米州で実施され、ハンブルグのE3ルート・エルベトンネルや、サン・フランシスコのBART、に代表されるもので、プレハブ函体を予めヤードなどで製作し、これを曳航・沈設・接続する工法である。函体の製作にも問題なしといが、この工法は静穏海域・河川横断等で試みられ、安定海域での実績が大部分で荒海・深海での実績はない。最も深い実績は、シアトル市下水放流管で-73mであるが、これもただ海中での管接続作業程度であった。

本件のような巨大プロジェクトでは、長さ200mのチューブを使用したとしても400本余を必要とし、製作サイクルも20本×20回などと超大型作業となり、20年に及ぶ工期が予想される。問題はむしろ海峡潮流の中で、深さ160mの海底掘削は超大型バケットを使用しても時間あたり作業サイクルは、数回に落ち⁽³⁾、更に沈設埋め戻しなど、工事の困難さに加えて環境・漁業・航行へ与

える影響については計り知れないものがある。更に作業海域での稼働率は、冬期の荒天、春の霧、台風期の風に加うるに、各漁期での制約で年間120日程度に落ち込むことも予想される（鳴門橋及び瀬戸大橋では145日程度）。

深海底作業の困難さを解決するための方策として考えられる方法は、水中トンネル工法である。この工法は、荒天時波浪の影響のない水域—即ち最大波浪（12m）の影響圏（ $10 \times 12 / 2m$ ）以下に水中トンネルを設置し、浮体構造としてアンカー固定する案である。通過車輛の重量の5倍程度の浮力が浮体に要求され、更に接続時のスラスト（断面積×水圧）に対応するための軸力対応アンカーが必要となり、チューブ構造は、スラスト接続・スラストアンカー等の複雑な課題の解決が要求される。しかし、この工法は沈設工法より更に安定した工法で、海底作業はアンカー設置のみで実施の可能性は高い。

然しながら、国際自由航路である西水道の水中に浮体が宙づり状態で存在することは、深さが仮に-50mであって大型艦船に影響はなくとも、潜水艇にとっては極めて邪魔物であることは否定出来ない。そればかりか、50m～100m毎のアンカーの存在は、海峡全域に亘るものであるから、これを避けて航行するには特殊な警報システムに依らなければならない。国内水路の通過なら、法的にも技術的にも安全が保証されようが、公海上で他国の艦船の航行に対して、今日の国際条件下で航行制限を求ることは極めて困難と言わざるを得ない。西水道で巨濟島に揚陸するルートは、殆ど全域が-50mより深いことからも、水中トンネル案には難問が待ち構えていると言わざるを得ない。

(D) 深海人工島案について

検討が進められた各工法には、何等かの目的のために人工島の設置を一つの柱として、その工法が検討されて来た。また、実績としても現在東京湾横断道路人工島が施工の途次にある。北海油田採掘人工島は現在深海200mに建設され、稼行中

に火災事故を見ている。

本計画案中でも、道路トンネル計画案としては、換気を目的とした換気縫坑としての人工島計画が不可決のものとして検討が進められて来た。

その工法として推奨されているものは、北海油田で完成稼働しているジャケット工法である。一万屯に及ぶジャケットはスリップバージで設置海域に曳航投下され、アンカー固定された後、ロータリーボーリング機により足付けを行ない固定されて、作業基地とし、本ボーリング機（Φ7～10m）の搭載作業を行なうもので、我が国でも既に鳴門橋主塔基礎でΦ7mのロータリーボーリングが実施済である。ただ、現場条件の相違（深さ100m、気象条件等）はあるものの、実施の可能性は充分あるものとの観点については、各方面とも一致した見解が示されている。

しかしながら、人工島の使用状態における作用荷重の想定については必ずしも確定的な条件が認識されているわけではなく、繫留アンカーの有効性、波と風との重複条件など、不確定要素の存在を認めざるを得ない。

また、実績においても原油貯蔵設備（白島など）でこれらの重複条件の見方の甘さから破壊を見た実績もあることから、人工島の設置は避けられるものならば、これを避けたいとする見解を必ずしも~~桂香~~とする訳にはいかない。回避出来るものなら、回避した計画であることが望ましい。

即ち、トレーラー輸送がユーロトンネルでも現実のものとして進行中で、また縫坑設置の構想が現実に着工されない事情についても不明瞭な点が多いが、走体による誘導空気被圧とバイパストンネルのバイパス効果との間で極めて微妙な換気量の検討が行われていると聞き及んでいるが、結論的な見解については詳らかでない。

ユーロトンネルの運転が開始されて40kmのトンネルが中間換気塔なしに運転出来ることが証明されれば、本件の場合、中間（40km付近）の人工島一つあるいは、これなしでも運転の可能性が認められるようになろう。

3. より真実な計画案を進めるために

地質調査は、既に第一期の500mに及ぶボーリングをはじめとして、殆ど全海域に亘って音波探査が進められてきた。今後は、既に触れたような各工法の利点を最大限に發揮せしめる条件を求めるため、より精緻な調査が進められることが必要と考えられる。

即ち、音波探査及び陸上調査の結果、明確となった地質構造より新期堆積各層の力学的性状ならびに物理性状についての詳細情報を得るため、基本及び精密調査を進めるに当たって、NATM工法についてはC,D,E層について、シールド工法についてはB,C層について、沈埋工法についてはA,B,C層について特に関連することが予想される。

本調査の実施に当たっては、海洋作業船・投錨船等による作業基地の確保とボーリング・サンプリングの実施ならびにボーリング孔内利用による

各種試験の実施、PS検層・採取されたサンプルについての各種試験によって必要と考えられるデータの総てが入手されるが、ボーリング実施の地点の数及び位置の選定については、韓国側の実情を考慮し（巨濟島臥峴里）対馬側は特に牛崎線上案が環境的にもまた阿連沖海溝通過の条件としても最も有効と判断される。

第2期ボーリング調査の実施に当たっては、旧第2部会による「海域部試錐調査計画書」によることが望ましい。

参考文献

- (1) 土を測る－現場計測と施工管理の実施例（土と基礎）
- (2) シールド工法選択のポイント（建設大学講義、S59）
- (3) 海底地盤掘削（橋梁と基礎、Vol.6、No.10）



ICSEI CREATE
CO., LTD.

—社会の美化に奉仕する—

株式会社 一成クリエイト

■トータルクリーニング
【主な業務内容】

■養生工事

■ガラスコーティング

■イシノール施工

(長期撥水防汚剤)

〈本 社〉 〒168 東京都杉並区宮前1-7-7 松木ビル4F
TEL 03(5370) 3171 (代) FAX 03(5370) 3175
〈大阪営業所〉 〒563 大阪府池田市莊園2-6-7 TAハウス102
TEL 0727(63) 1367 (代) FAX 0727(63) 1368