

シールド工法における諸設備

西 嶋 国 造*

1. 立 坑

シールド工法において、シールドの発進基地をどこに選定するかはルートの選定とともによく研究を要する問題である。地質およびずり出し、材料の投入の便などを考慮のうえ位置を選定すべきである。

立坑の位置は一般に地質が良ければルートの上でなくてもよいが、地質が悪く横坑や切り抜げに困難な場合はルート上に選定するのがよい。また、できるだけ地質のよいところを選ぶべきである。しかし、都市内で今後大型シールド工法が多く用いられるようになると思うが、ずりの搬出、材料の投入の利便と横坑掘削の困難さと比較検討を要する問題であろう。ロンドンのように地質の良好な場合は、将来の換気塔の位置、またはずり出しに便利なところに立坑を下げ、横坑で本線にとりつき、本線上にシールドチャンバーを作り、この中でシールドを組立、発進させて行く方法を取っている。立坑の大きさは、トンネル完成後の使用目的によることはもちろんであるが、工事中シールド部材の投入、ずり出し、セグメントなどの投入に必要な大きさでよいわけである。羽田空港下のモノレール用単線トンネル（シールド外径 6.58 m、長さ 5.87 m）での立坑は、外側寸法 10.2 m × 10.0 m の函型ケーソンを中心線上におろしている。パリ市の地下鉄東西線の複線シールド（外径 10.0 m）において、デファンス方立坑は、内径 13.0 m の円形立坑を中心線上に設けている。

立坑の構造は、鋼矢板工法から圧気ケーソン工法に至るまでその目的、地質によりいろいろであるが、イギリスでは鑄鉄セグメントの使用が非常に多い。シールドチャンバーは、シールド外径より半径において 0.6~1.00

*正会員 帝都高速度交通営団建設部長

**土木学会発行：関門隧道（鉄道編）から転載

m 大きく、長さはシールドの長さより 3.0~5.0 m 大きい程度である。シールドチャンバーのトンネル方向の小口は、コンクリートの仮壁にしておく。わが国におけるシールドチャンバーの施工法としては、注入法による土質改良と、圧気併用の縫地工法、または凍結工法などが考えられる。

2. 坑内設備

シールド工法において、地下水のある場合、または軟弱地質の場合はしばしば圧気工法を用いる。このような場合は、立坑を掘削するときから圧気を用い、立坑の周囲の地盤をゆるめないうち注意すべきである。多少でもゆるめた場合は注入などにより地盤を安定させておかぬと、シールド推進時、地表の沈下を起こしやすい。立坑にシールドを持込むときは一時開口せざるをえないが、初期推進時にはふたたび圧気設備をして推進するのが安全である。立坑より数 10 メートル推進したところ、適当な位置を選んで隔壁を造り、本格的なエアロックの設備をする。

(1) 隔 壁

隔壁は予想される最大気圧に対し、十分安全であるように設計する必要がある。コンクリートまたは鋼板で造られる。アメリカにおいては、示方書により 3.5 kg/cm^2 の気圧に耐えられるよう造らねばならない。また Hewett and Johannesson 氏によれば、コンクリート造りの隔壁の厚さは、おおよそトンネル内径の 0.4~0.5 倍でよいといわれている。アメリカの示方書では、隔壁は切端から 800 ft 以上はなれてはいけないとされ、隔壁の間隔も 800 ft 以内にしようきめられている。なお水陸の境には、上述の距離以内でも必ず設けるように規定されている。切端の気圧が 1.5 kg/cm^2 以上の場合は隔壁を 2 段に設け、中間の気圧は切端の気圧の 1/2 を超過してはいけないとされている。これは、作業員の保健上 2 段に減圧したほうが良いからである。

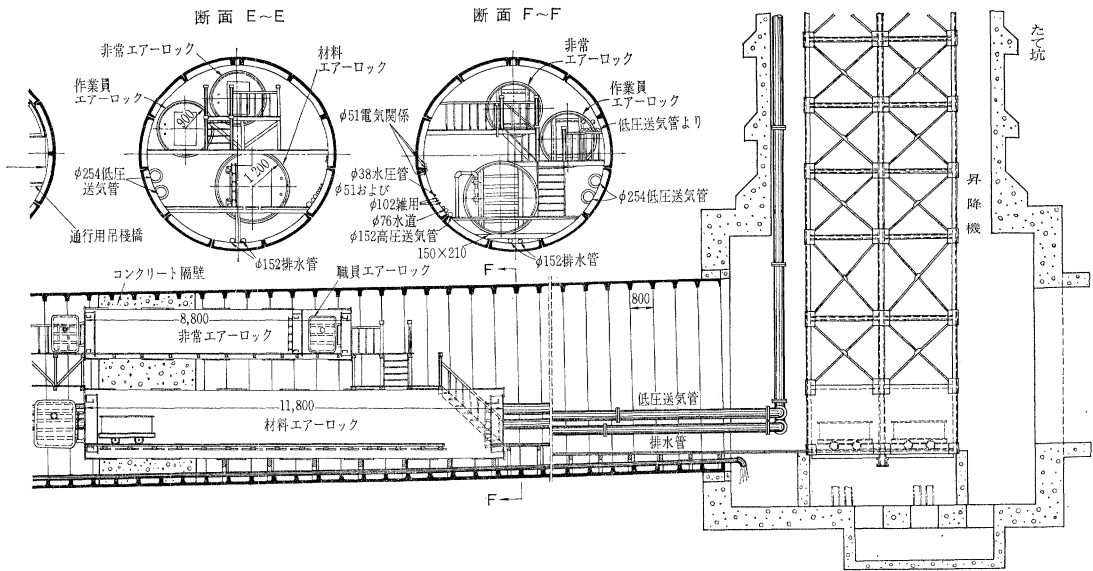
(2) エアー ロック

隔壁には、エアロックが取り付けられる。エアロックは、通常鉄板で作られた円筒形の筒で、両端に圧気側のみに開く扉がついている。ロックの中は照明を十分にし、空気パイプを取付け、ロックの内外より扱えるバルブを有している。エアロックには、一般に人間用、材料用、非常用とある。

a) マン ロック

マンロックはおおむね 1.8 m の径で、作業員が一度に出入しうる大きさがよい。扉は $0.75 \times 1.3 \text{ m}$ くらい

坑内設備図*



どこでもよいが、坑内の通路の高さに設けるのがよい。

(3) 配管

隔壁を設けるとき、坑内に必要な各種配管はすべて配管しておかなければならない。もし1本でも入れ忘れた場合の追加そう入には、大変な支障がある。配管の種類はつぎのとおりである。

- 低圧送気パイプ
- 高圧送気パイプ
- 排気パイプ
- 排水パイプ
- 水道パイプ
- 水圧または油圧パイプ
- 電力ケーブル用パイプ
- 電話ケーブル用パイプ
- 予備パイプ

低圧送気パイプは必要な送気容量、送気距離によるロスを考慮し、6 in, 8 in または 10 in のパイプが用いられる。1本の 10 in パイプより2本の 8 in パイプのほうがよい。1本の管がいたんだとき補修するのに便利である。送気パイプは、隔壁のところまでしか配管してないが、吐出口にはフラップバルブをつけておく。

これは、もし配管に事故があっても坑内の空気が放出するのを防いでくれる。送気管の途中には、坑内気圧の変動により自動的に開閉するバルブを設け、坑内気圧を一定に保つようにする場合もある。坑内気圧が 1 kg/cm^2 のとき 7 kg/cm^2 の空気圧を必要とする機械を使うためには、高圧空気の圧力は 8 kg/cm^2 以上も必要とする。

排気パイプ（ブローパイプ）は、4 in 管を使い切端

までのばしておき、先端にストップバルブとゴムのサクションホースをつけておく。坑内空気がにごってきたときは排気に使い、または、テイル部にたまった水を排水するのに使われる。ブローパイプの外側の端は、釜場に導き、下方をむけておく。ときには石ころが飛び出すからである。ブローパイプの呑口は、ボロなどを吸込めよう注意が必要である。

すべて配管は管路の損傷による事故の影響をできるだけ小さくくい止めるように、適当な位置にバルブを取付けておくことが必要である。

(4) セーフティスクリーン

海底または水底トンネルで、地質が悪いとか土かぶり小さい場合、噴発事故にそなえて、坑内作業員の安全のためセーフティスクリーンを設ける必要がある。セーフティスクリーンは、トンネルの天井よりほぼスプリングくらいまで下っていけばよい。9 mm 厚さぐらいの鋼鉄でよく、取付けは気密にしておくことが必要である。避難用の通路はスクリーンの下端より高くしておき、スクリーンのところだけ下ってぐりぬけるようにしておく。この通路は、そのまま非常用ロックに通じていなければならない。セーフティスクリーンの位置は、常に切端より 50 m 以内に保っておく必要がある。

(5) 掘削機械

シールド工法は軟弱地盤に応用される工法であるから、掘削に当たっても切端を一度に掘るのは危険な場合が多いので、一部分ずつ切端の山留めをゆるめ、部分的に掘削を進めてゆく必要がある。そのため手掘りによるこ

写真-1 ドラム ディッカー掘削機

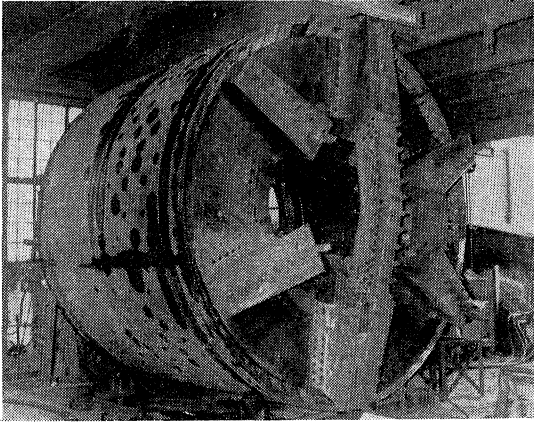


写真-2 キエフ型掘削機 (φ5.5m)

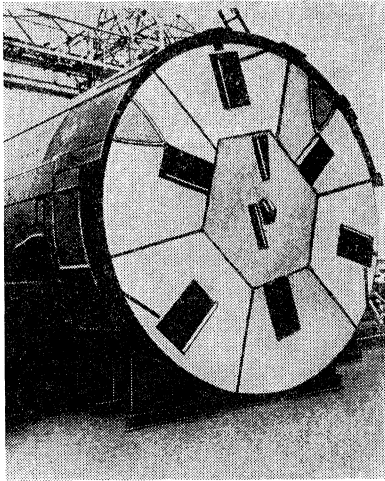
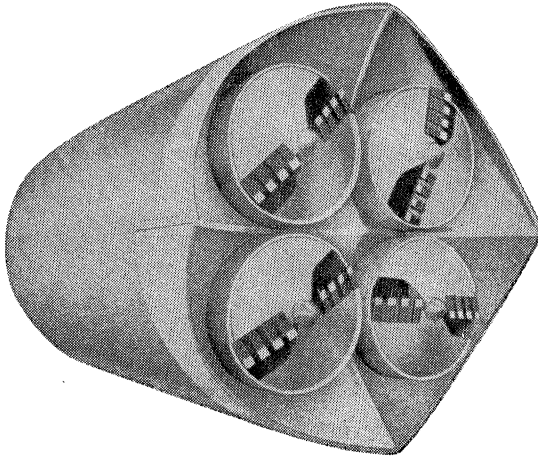


写真-3 国産 M 社機械化シールド



とが多かった。しかし、全断面あるいは半断面の切端が自立しうる地山の場合は、小型ショベル、またはずり積機なども使用された例がある。

軟岩、または硬質粘土などに対しては、全断面を一度

に掘削できる回転式掘削機をシールド前部に装備し、掘削の能率化を計った例も多い。すなわち、ロンドンクレーに対するドラム ディッカー掘削機、ソ連製のモスコ型、レニングラード型、キエフ型など、シカゴ付近の良質粘土用につくられたスコット型、など種々の掘削機がある。キエフ型を除いては、いずれも切端が自立できる程度の均質な地質に適している。最近では、軟弱シルト層に対しても適した機械化掘削機が開発され、切端を完全におさえながら掘削して行く掘削機もできてきた。

これらの機械化掘削機の場合、ずりは多くベルトコンベヤーでシールドの後方に運ばれ、土運車に積み込まれて坑外に搬出される。なお、最近圧気内の作業能力の低下とコストダウンのため、パリー地下鉄東西線の建設工事で使用中の直径 10 m の機械化掘削機は、切端部とベルトコンベヤールートのみを圧気した、いわゆる部分圧気方式で実用に成功しているといわれている。わが国でも二、三の機械化シールドが試作され、逐次実用に供せられる機運にある。機械化掘削機の回転動力源としては、多く場合油圧モーター、または油圧ジャッキが用いられている。

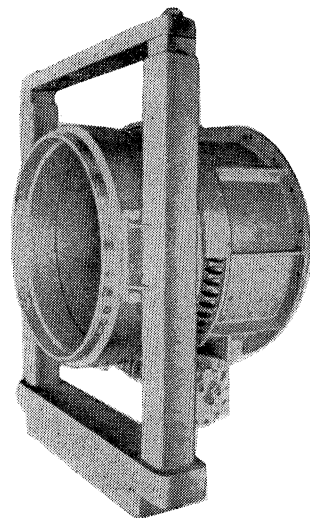
(6) セグメント エレクター

セグメントを組立てるためには、セグメントエレクターを使う。エレクターはシールドに装置したものと、後続のジャンボーに取付けたものと2つの形式がある。また、構造上からおおよそ3つのタイプがある。

a) ソ連式

中心に 80~100 cm の穴を有するウォームホイールを、ウォームギヤーで回転させるもの。ブームの伸縮はスクリュー、または油圧ジャッキによる。このタイプ

写真-4 ソ連式エレクター

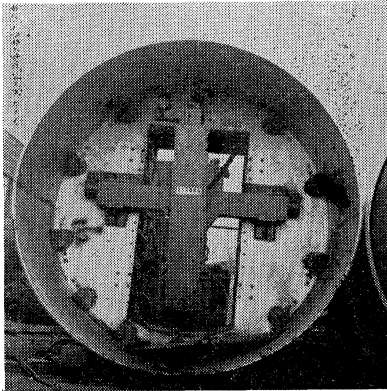


は、セグメント組立中でも穴を通してずり出しが同時にできる特徴を有する。

b) アメリカ式

ラック アンド ピニオンによりブームを回転させるもので、最も古くから使われたタイプ。ブームの伸縮は、

写真-5 アメリカ式エレクター



ーム中の油圧シリンダーによる。

c) リング ギア タイプ

シールド本体のリング ガーダーの後方に、ほとんどリング ガーダーの内径に等しい円形のリングを備え、これをブラケットとローラーより支持し、このリングの一部に、腕および油圧シリンダーを備えたようなもの。これはシールドの後方が広くあき、ずり出しにも大変便利である。エレクターの吊上げ力、回転力、押し上げ力は、使用するセグメントにより設計する必要がある。RC セグメントを用いる場合には、推進時破損したセグメントを取り替えるようにエレクターをシールドに取付けたものは、1リングの幅ぐらい前後に移動できると便利である。

(7) セグメント組立用具

セグメント組立に当っては、できるだけ正確に組立て、ボルトを十分締めつけ、リングが変形しないようにしなければならない。しかし、いくらしっかり締めつけておいても、ジャッキで押すと必ずゆるむので、さらに締めなおしをしなければならない。

セグメントの組立には、ラチェット レンチ、およびアングル レンチが使われる。アングル レンチはボルト

写真-6 アングル レンチ*

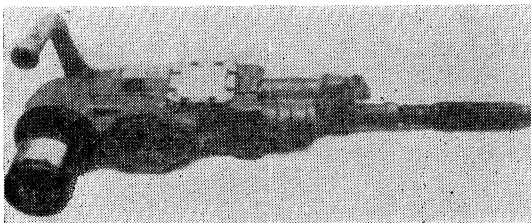


写真-7 インパクト レンチ*

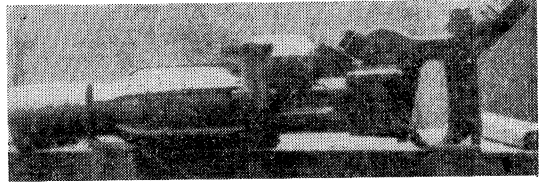
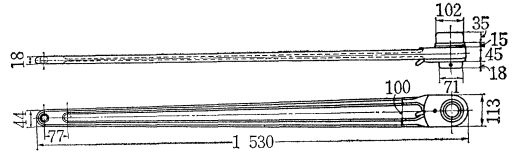


図-2 ラチェット レンチ*



トの仮締め用とし、ラチェット レンチは本締め用に用いる。アングル レンチの代りにインパクト レンチを用いることもある。しかし、インパクト レンチのみでは十分ボルトが締まらないので、ラチェット レンチで本締めをする必要がある。使用するボルトによっては、本締め用のラチェット レンチは長さ 1.5m ぐらいのもので、2人で締めつける必要がある。

(8) 裏込用機械

シールド工法は、軟弱地盤におけるトンネル工法として最も安全な工法とされているが、都市内の工事においては、わずかの地表の沈下もときには重要な地下埋設物を損傷し大事故となることがあるので、絶対に沈下は許せない。このためには、テイル ボイドの裏込が最も大切である。一般には、シールドが一推進するとただちに 3~6 mm 径の豆砂利をセグメント背面に吹込み、10~20 リング遅れてモルタルの注入をなし、さらにていねいに行なう場合は、高圧でセメント ペーストなどの注入を行なうのである。しかし、地山が砂質土のような場合は、シールドが推進するとただちに地山が小崩壊を起こし豆砂利がよく入らず、モルタルも十分に入らない場合がある。このような場合は、しばしば地表面の沈下をおこしやすい。この沈下を防ぐには、ベントナイト モルタルのようなもので常に一定の圧力をかけておき、推進と同時に注入をすることによって、テイル ボイドの完

写真-8 モルタル注入ポンプ

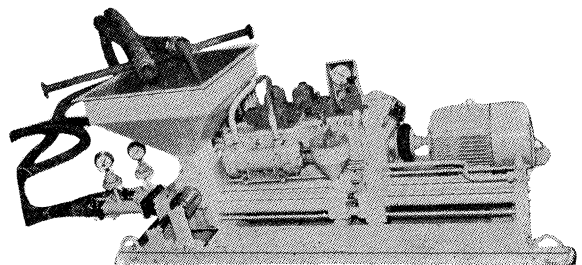
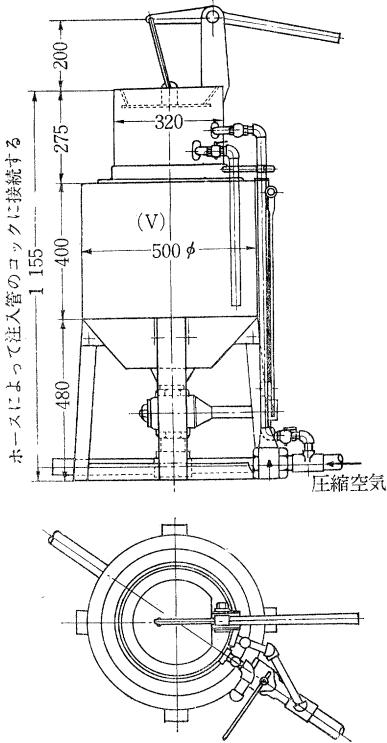


図-3 玉砂利注入機



る。モルタル注入も、同じく圧縮空気を用いたカニフミキサー、または注入ポンプが用いられる。最近ではモルタル用 AE 剤、ならびに分散剤ができたのでグラウトポンプによる施工が多くなった。常圧注入にはコンクリートポンプに似たグラウトポンプが用いられ、注入圧も 3 kg/cm^2 以上にして使用する。

(9) 運搬設備

坑内における運搬路の配線、土運車などは、一般トンネル工法の場合と全く同じである。掘削時間、セグメント組立時間などを勘案のうえ、バランスのとれた運搬設備を考えなければならない。圧気併用の場合は、運搬車のエアロック通過の時間も考慮に入れる必要がある。土運車の大きさ、1列車の台数、坑内配線、使用レールの大きさ、機関車のけん引力など、すべてが相互に関連を持っている。

(10) 水圧、油圧設備

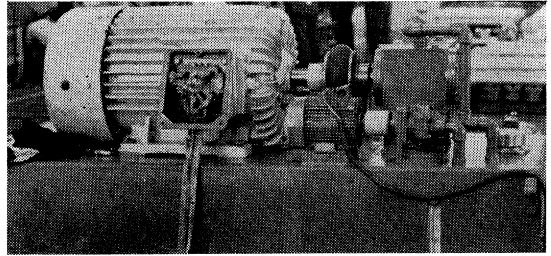
関門鉄道トンネル工事、営団永田町付近シールド工事においては、シールドジャッキ、およびフェースジャッキはすべて水圧を用いた。関門の場合は水圧ポンプ所を地上におき、配管で坑内に送ったが、永田町付近のシールド工事では、水圧ポンプを坑内のシールド本体上、および後続のトレーラー上に置いた。ポンプも横型のプ

全充填ができる。このためには、セグメントの外側とテイル内側との間げきを、丈夫な人造ゴムなどで完全にシールする必要がある。

豆砂利の吹込みには、圧縮空気を用いた豆砂利注入機が使われる。注入圧は普通 $5 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ を必要とする。

ランジャーポンプでかなり場所を取るが、最近ではほとんどのジャッキが油圧を使用しており、動力としてもオイルモーターが使われることが多くなった。最高油圧は $350 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ ぐらいの圧力を用いている。

写真-9 電動モーターに直結した 30 IP オイルポンプ



油圧ポンプは、電動モーターに直結した非常に小型のものが使われ、シールド内、または後続のジャンボーの上に設備されている場合が多い。油圧ポンプの容量(吐出量)は、使用する油圧の時間当たり同時最大量で決まる。

バルブ類も 1カ所にきちんと配列し、扱いかいやすくしてあるが、特にエレクトーのようにこまかい動きを必要とする場合は、ボタン一つで操作できる便利な電磁バルブが使われるようになった。

3. 坑外設備

(1) 受電設備

大都市の送電網は完備しているものの、ある地区においては送電線の弱体な箇所もあるので、最も安定した電源より導入する必要がある。できれば 2 系統の電源を入れるのが望ましい。河底トンネルの圧気設備などで電源の故障が致命傷を与える恐れある場合は、電力の他にディーゼルエンジンなどの非常用動力源を設備する必要がある。

(2) コンプレッサー室

シールド工事において圧気工法をとる場合は、低圧 (3.5 kg/cm^2 以下) コンプレッサーが必要であり、また圧縮空気を用いた裏込注入機などを使用するときは、高圧コンプレッサーを用意する。

切端よりの漏気に対するコンプレッサーの容量を大きく決めるには、アメリカでよく使われている実験式がある。すなわち、

$$V = C \cdot D^2$$

V : 常圧の空気量 (m^3/min)

C : 土質により変わる定数で普通土では $C=3.65$ 砂、砂利層では $C=7.3$ 、国鉄関門トンネル

では海底の貝殻まじり層で $C=9.2$ であった。

D : シールドの掘削外径 (m)

このほか空気の消費は、ロックの開閉によるものと、トンネル周辺からの漏気がある。通気性の地層ではエアロックから切端までの距離が長くなると、セグメントの継手からの漏気が多くなり（铸铁セグメント使用の場合は少ない）、坑内気圧が低下することもあり危険であるから、十分な目地詰めをなすとともに裏込注入を完全にし、場合によっては二次巻きをできるだけ追いかけて施工する。コンプレッサーの容量は、これらの消費量を見込んで決める必要がある。

コンプレッサーは、横型と立型とある。横型は立型に比して大型で場所を取り振動も多いので、基礎をしっかり造る必要がある。コンプレッサー室にはレシーバーが必要で、空気の冷却装置、空気清浄装置などを設ける。レシーバーの容量は、ロックの開閉により坑内気圧の変動をきたさないよう考慮する必要がある。

高圧コンプレッサーは、ピックなどを特別に必要としない地質でも、豆砂利吹込み用とか、エアレンチとか、目地詰め用のエアハンマーとか種々の便利な工具の動力になるので 100 HP 1 台程度は必要であろう。

コンプレッサー室は爆音と振動を発するので、都市内ではしばしば隣地の苦情の種となる。これに対しては、基礎をしっかり造ることと、防音設備を施し機械室を密

閉することで、かなり効果を上げることができる。

(8) ずり処理設備

立坑よりずりを搬出する設備としては、エレベーターでトロごと引上げ立坑上で横移動をなし、チップラーにかけてホッパーにダンプする方法と、立坑の深さがあまり深くない場合は、台車と分離できるずりトロを使用し、トロ箱のみをクレーンを引上げ、ホッパー上にダンプさせる方法とが多く採用されている。

(4) 材料のストックヤード

立坑付近にはセグメント、裏込用材料、軌道材料などを仮置きできるだけの最少限度の用地が必要である。都市内においては、これらの用地の確保が非常に困難であるが、少なくとも3日分ぐらいの材料はストックして置きたいものである。その他諸材料の倉庫、労務者の休憩所も立坑の近くに必要であり、特に圧気工法を用いる場合は、休憩所の近くにホスピタルロックを設け、潜函病にかかった者の治療ができるようにする必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会発行：関門隧道，昭 24-8
- 2) B.H.M. Hewett and S. Johannesson : Shied and Compressed air Tunneling, 1922
- 3) Richardson and Mayo : Practical Tunnel Driving. 1941
- 4) 土木学会関東支部：シールド工法の現状と問題点，昭 40-7

Dr. T. IWINSKI : Theory of Beams

梁の理論

前北海道開発庁事務次官
日本建設コンサルタント
株式会社顧問・工学博士

猪瀬寧雄

北海道開発庁
開発専門官

竹下 淳 訳編

・簡明で直截な入門書！

—ラプラス変換の技術問題への応用—

本書は、構造力学において取り扱う最も基本的なものの1つである梁をとりあげ、この解析に対して演算子法の一部をなすラプラス変換の応用方法を説明したものである。

2つの支点上の梁について種々の端部支持条件（自由端、固定端等）を与えてその解を求め、さらにまた固定した支点および弾性支点上の連続梁の解を示し、想定されるすべての形の荷重を考慮して詳しく論じた。

一般に線形微分方程式（とくに定数係数の）を境界条件に合わせて解く問題では、ラプラス変換は有力な武器であり、ラプラス変換表を利用することによって他の計算方法に比較して計算手間の省ける場合が多い。この意味でラプラス変換法を会得することは、土木建築の技術者にとって極めて有意義であると信ずる。

訳編者は、本書を一層わかり易く読めるように、補遺としてラプラス変換に関する初歩的な事項、梁についての基本的なことから簡潔に纏め、そのほか参考として構造の異なるいろいろの梁に各種の荷重が作用した場合の構造力学的諸元、実際の計算に必要な断面2次モーメント表などを付加して読者の便を図った。また、実際上の目的から幾つかの例題について数値計算をも含めて、本書の解法を用いて解いた「計算例」を配置した。

【主要目次】 I. 序論 1. 階段関数および多階段関数 2. ラプラス変換に関する予備知識 II. 梁の理論 1. 仮定、弾性曲線の微分方程式、荷重関数 2. 単一径間の梁の弾性曲線 3. 単一径間の梁の静力学的な量の決定 4. 三支点上の梁 5. 連続梁の弾性曲線 6. 三連モーメントの定理 7. 弾性支点上の単径間梁 8. 弾性支点上の連続梁 9. 五連モーメントの定理 10. 曲げ剛性の変化する梁の弾性曲線 <補遺> 1. 梁について 2. ラプラス変換について 3. 計算例 4. 付表

・A5判上製函入クロス装
定価 650 円 予 100
好評発売中

鉄道工学

工学博士 森島宗太郎著 [A5判 224頁 定価 900円]

最新の技術をもれなく懇切に解明した新進技術者向けの好著

森北出版株式会社

東京・神田・小川町3の10
振替東京34757 電(292)2601(代)