

日本のシールドトンネル覆工設計法の変遷と課題

A History and Research Objects of Design Method for Shield Tunnel Lining in Japan

小山幸則

Yukinori Koyama

フェロー会員 工博 (財)地域地盤環境研究所 東京事務所長 (〒113-0034 東京都文京区湯島一丁目8-4)

E-mail:koyama@geor.or.jp

Recently, it has often become necessary to construct tunnels under more severe conditions and to develop new techniques in Japan. However, present design techniques cannot appropriately reflect the construction techniques; and thus, traditional methods are still often used. On account of the well-balanced progress between construction and design in shield tunneling method, an innovation of design technique is required. This paper shows a history of the design method for shield tunnel lining in Japan and discusses objects of research for it.

Key Words : shield tunneling, segmental lining, design, history of design method

1. はじめに

イギリスで誕生し欧米で発展したシールド工法は、日本には特殊工法として導入された。その後、日本独自の発展を遂げ、今や日本のシールド技術は海外に逆輸出されるまでになっている。このような技術レベルはどのようにして達成されたのか。黎明期の日本のシールド工法を見てみると、その設計施工のいずれの面においても、日本独自で技術開発を行ったのではないと思われる程、海外技術者の影は見られない。我々の先輩はどのようにしてこの技術として高めていったのであろうか。本論では、シールド工法の中でも特に覆工の設計法に的を絞って文献を中心にその発展の経緯を振り返り、シールドトンネル覆工の設計法が今後目指すべき方向について述べる。

2. 都市トンネル工法以前の設計

(1) 折渡隧道¹⁾

日本で初めてシールド工法が採用されたのは、羽越線折渡隧道で、トンネル外径 7.2mの単線型シールドトンネルであった。このトンネルは、木製支保工と木矢板で支保した後に覆工コンクリートを施工する山岳工法により建設が始められたが、黒色あるいは白色粘土の軟弱な地質で施工に難渋したため、

シールド工法に切り替えられたものである。シールドを用いた掘削は 1920 年 9 月から開始されたが、不良な地質とシールドジャッキ等の機械器具の性能が不十分であったため大きな蛇行を生じた。その後、手動ジャッキから水圧ジャッキへの変更等の改良が行われ、順調な掘進が行われたが、途中から岩盤が切羽に現れ、発破を併用して掘進が進められたものの、切羽前方の導坑調査の結果、普通工法で掘削可能な地質が続くと判断から 1922 年 12 月でシールドによる掘進は終了した。このトンネルは、厚さ 60cm のコンクリートブロックにより巻き立てられたが、この覆工の設計がどのようになされたか、文献 1) には記述がない。シールド機の設計については詳細な設計計算まで示されているにも拘らず記述がないので、恐らくは過去の事例や、山岳工法の覆工厚さを参考にして決められたものと推定される。

(2) 関門隧道²⁾

a) トンネルの概要

関門隧道は、本州と九州を連絡する海底下の鉄道トンネルとして計画された。トンネルは単線型 2 本を並列させている。シールド工法は、下り線では門司方の海底部および陸上部の地質の悪い区間の 726m、上り線では下り線の施工結果から門司方の海底部のみ 405m に採用された。先ず下り線シールド

が、1939年5月に掘進を開始し、41年4月に掘進を完了している。その後、上り線シールドが43年5月から44年1月まで掘進された。トンネルの外径および覆工厚は上下線とも同一で、7.0mと50cmである。下り線は鑄鉄セグメントに場所打ちの二次覆工コンクリートが施工され、上り線では太平洋戦争中の施工となったため同様の覆工に加えて、一部に鉄筋コンクリートセグメントが採用され、鉄材の節約が図られた。

b) セグメントの設計計算

セグメントは、大井上³⁾の示した方法で設計計算されている。その概要は次のとおりである。先ずセグメントは、一様剛性のリングとして取り扱われている。考慮されている荷重は、次のとおりである。

- ①セグメントの自重と水圧
- ②トンネル上にある地山荷重
- ③海底面上から作用する上載荷重
- ④内部荷重
- ⑤活荷重

これらを詳しく紹介する紙数は無いので、①と②について概略を示す。

①セグメントの自重と水圧 (図-1)

土圧と水圧は分離して考えられており、自重と水圧の大きさの関係から、トンネルが浮き上がるか否かにより、検討を分けている。水圧は、トンネルの中心に向かって半径方向に作用し、その大きさはその点の静水圧に等しいとしている。トンネルの自重が浮力よりも大きい場合には、トンネルの下半部には半径方向に等分布する地盤反力が生じると仮定している。一方、トンネルの自重が浮力よりも小さい場合には、トンネルの上半部に鉛直方向に等分布する地盤反力が発生すると仮定している。

②トンネル上にある地山荷重 (図-2)

鉛直下向きに作用する土圧であり、全土被り荷重を考えている。現在の方法と異なるのは、トンネル天端からスプリングラインにかけて増加する土被り

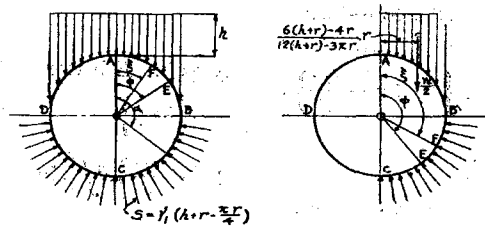


図-2 トンネル上部の地山荷重モデル

を、そのまま土圧の増加分として加算しているところにある。これに対するトンネル下半部の反力は、トンネル半径方向に等分布するものと考えている。

このような仮定を設けると、これらの荷重による覆工の断面力は解析解の形で表すことができる。この設計の考え方は、側方土圧を考えていないなど現在の方法とかなり異なるところがあるが、水圧分布や鉛直方向土圧の設定を見ると合理性が劣っているとは言い難い面もある。具体的な関門隧道の設計計算は、大井上の方法に基づいて次のように行われた。

- ①設計は、セグメントのみの施工段階と二次覆工施工後の2段階について検討されている。
- ②施工段階では、圧気による内圧を荷重として評価し、軸力を低下させて断面検討を行っている。
- ③二次覆工は力学的部材として評価し、コンクリートと鉄のヤング係数比で応力を負担させている。

c) 鑄鉄セグメント

セグメントとしては、2主桁の鑄鉄セグメントが用いられたが、セグメントの桁高は従来の実績を整理した経験式により28cmとした。セグメント幅は、アメリカの実績が80cmであったが、経験の少なさを考慮して下り線では75cmとした。上り線では下り線の経験から80cmで問題ないとして、5cm拡幅している。またリングは、A型セグメント9ピース、B型セグメント2ピース、K型セグメント1ピース

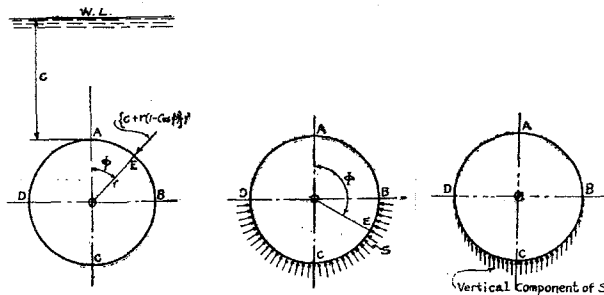


図-1 セグメントの自重と水圧のモデル

の12ピースで形成されている。

スキンプレートの厚さも、従来の例を参考に下り線では35mmとしたが、上り線では材質を検討し、32mmとすることにより、鉄材の節約を図っている。

セグメント間継手については、事例を参考に強度を大きくとれ、漏水や漏気を生じないようにすることとして、**図-3**に示すボルト配置としている。また、リング間継手についても同様な検討から桁高の中央部に配置している。

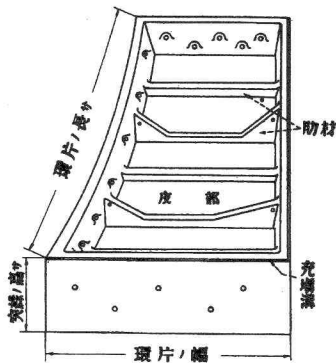


図-3 鋳鉄セグメント

d) 鉄筋コンクリートセグメント

上り線で用いられた鉄筋コンクリートセグメントは、鋳鉄セグメントと同形式で、かつ同等の強度のものの方針で設計された。主な設計要件は次のとおりである。

- ①軸力および曲げモーメントに対して、鋳鉄セグメントと同等の抵抗力を有すること（コンクリートの圧縮強度を600kgf/cm²以上としている）
- ②シールドジャッキの推力に対して十分に耐えること（ジャッキシューにより均等に荷重が作用するようにパッキングの挿入を行う）
- ③テール内で、確実に、容易に、迅速に組立ができ、鉛コーキングができること（重量1t/ピース以下、外径寸法誤差0.2mm以下で接面の凹凸を許さないなどの製作精度の厳密な規定等を行っている）

従来、コンクリートセグメントでは使われていなかったボルト継手が採用され、その後、我が国で長く使用されてきた中子型セグメントの原形がここで開発された。

3. 初期の都市トンネル工法での設計

(1) 名古屋市営地下鉄覚王山隧道⁴⁾

都市内トンネル工法として、本格的にシールド工法が用いられたのは、名古屋地下鉄の覚王山隧道である。このトンネルは、外径6.4mの単線トンネルを並列させたもので、下り線387.5mの掘進は1961年4月から62年4月までを要したが、上り線356.5mは62年1月に発進し7月に掘進を完了した。

このトンネルのセグメントは、関門隧道で試行された鉄筋コンクリート製の中子形セグメントで、セグメント厚さは35cmであった。設計は、大井上の方法とは異なり、現在使われている慣用計算法の荷重体系（**図-4**）で行われている。ただし、土圧と水圧は一体で考えられており、また側方の地盤反力は考慮されていない。鉛直方向土圧には、緩み土圧が採用されたが、小野・眞井の提案式⁵⁾とTerzaghiの緩み土圧式⁶⁾の両方で計算されている。結果的には双方の値に大きな違いは無かったとしている。側方土圧係数は1.0である⁷⁾。また、ジャッキ推力に対しては、載荷試験を行い、ジャッキシューの工夫により対処している。

継手の設計については、計算で求められた断面力に基づいてボルト径を決定したと記述されているが

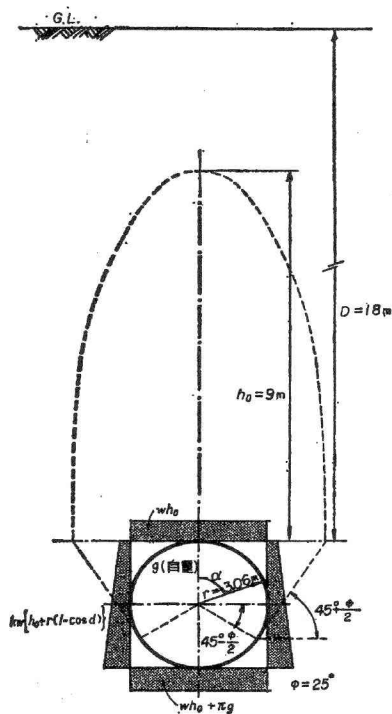


図-4 設計荷重体系（覚王山隧道）

詳細は不明である。しかし、この工事の直後に、この工事を行った施工会社の技術研究所で行われた添接効果を見るリング載荷試験結果の解析⁸⁾において、ボルト長に相当する範囲のコンクリートの圧縮変位量がパラメータとして用いられており、現在、慣用的に行われているボルトを同径の鉄筋と見做してRC理論を適用するという便法⁹⁾（理論的根拠はない）は用いられていないのではないかと想像される。

(2) 慣用計算法への発展

覚王山隧道以降、シールド工法は都市トンネル工法として次第に施工実績を積み重ねていったが、当初、セグメントの設計は、覚王山隧道の手法に準じて行われていたようである。しかし、側方の土圧係数を土圧理論に従って設定すると、地盤が軟弱であるほど土圧係数が大きくなるので鉛直方向土圧と水平方向土圧の比率が1に近くなる、すなわち等方的な荷重に近くなり、計算される断面力のうち軸力は大きくなるものの曲げモーメントは小さくなるためセグメント厚さが小さくなる。これは軟弱地盤の方がトンネルの変形が大きくなるという施工経験に反している。そこで、導入されたのが側方の地盤反力である¹⁰⁾。これの導入を以って、いわゆる慣用計算法の形が整ったのである。

その後、これは文献11)で整理して示され、ほとんどのシールドトンネルがこの方法あるいは一部修正を施した修正慣用計算法により設計されてきた。

4. セグメント設計法の進展

(1) セグメントリングの構造モデル

さて、ここからはセグメント設計法の変遷を、セグメントリングの構造モデルとトンネルと地盤の相互作用モデルに分けて整理することとし、先ず前者の進展の経緯を述べる。

慣用計算法では、千鳥組をすることによりセグメント間の継手部の剛性低下を補うことで、セグメントリングの剛性を一様として取り扱っているが、これに対する問題点の指摘は極早い時点から行われ、実験等を通じて構造モデルの改良を図ろうとされてきた。改善は三つの方向に分けて考えることができる(図-5)。一つは、継手の存在を極力実際に近い形でモデル化しようとするもので、現在、梁ばねモデルと呼ばれているものであるが、電算機等の計算ツールを必要とする。もう一つは、当時の計算ツールの状況から、簡便な計算でも継手の存在を考慮できるようにするもので、いわゆる修正慣用計算法と呼ばれるものである。その中間的なものとして、

継手構造をヒンジと仮定できるものに限定し、極力実際に近いモデルでありながら簡便な計算で断面力が求められるようにしたもので、多ヒンジ系リングモデルと呼ばれるものである。これらの継手の存在を考慮した構造モデルに関する最初の研究は1963年の文献8)に見られ、平均剛性の概念が示された。次に梁ばねモデル¹²⁾と多ヒンジ系リングモデル¹³⁾がほぼ同時(68年)に提案されている。その後、71年に修正慣用計算法¹⁴⁾が提案された。

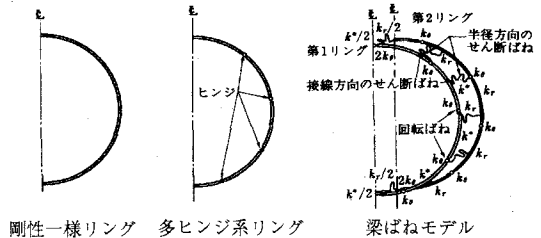


図-5 セグメントリングの構造モデル

梁ばねモデルの概念を初めて提案したのは、久保・結城¹²⁾である。久保らの研究はセグメント間継手部の剛性低下と、千鳥組による補剛効果により、セグメントの撓みと応力が、剛性一様リングと比べて、どのように変化するかを解析と実験により求めている。しかし、梁ばねモデルは、解析解が得られている慣用計算法とは異なり、電算機を利用した数値解析が前提となるため、実際のセグメントの設計に使われることはなかった。その後、電算機の普及と、新しいセグメント形式の開発を背景に、次第に用いられるようになり、またモデルの改良が進められた。河田・長崎・澤¹⁵⁾は、久保らのモデルと同様に、セグメント間継手は回転ばねでモデル化しているが、リング間継手については、相隣リングに相対変位が生じ、その相対変位量に応じてリング間継手部でせん断力が発生するとしたモデルを提案した。一方、梁ばねモデルでは継手のばね定数を求める必要があり、一般にはセグメントの継手試験から求めることが多い。これに対して、村上・小泉¹⁶⁾は、セグメント継手部の力学的挙動を詳細に解析し、回転ばね定数について、ボルトとナットを用いて組み立てる鋼製セグメントおよび金具継手を有する平板形鉄筋コンクリートセグメントを対象にして、構造計算により求める方法を示した。最近では、ほぞ付きセグメントの回転ばね定数の計算法¹⁷⁾や、一般的な継手構造のものについてセグメント間継手の引張部材のばね定数と設計軸力を考慮した算定法¹⁸⁾が提案されている。

一方、修正慣用計算法で用いられている平均剛性という概念が示されたのは前述したように文献8)においてである。セグメント間継手における曲げ剛性の低下の影響と、隣接するリングによる添接効果を、総合的に評価するもので、セグメント本体部の曲げ剛性を曲げ剛性の有効率(η)を乗じて割引いている。しかし、これだけでは剛性低下のみの評価であり、設計計算には用いられなかった。これに山本¹⁴⁾は、さらに曲げモーメントの割増率という概念を導入することにより、修正慣用計算法(図-6)を提案した。千鳥組されたセグメントのセグメント間継手部に隣接したセグメントには、本来、セグメント間継手部を通じて伝達される曲げモーメントの一部が付加されると考え、曲げモーメントの割増しを行う。この割増し率が曲げモーメントの割増し率(ξ)である。これらの値は、セグメント間のボルトの締め付け度合いや継手部に作用する軸力の有無などに複雑な要因に支配されるから、これを正確に推定することは困難であるが、設計計算に用いることができる程度の推定は可能であるとして、実験的に求める方法が示された。

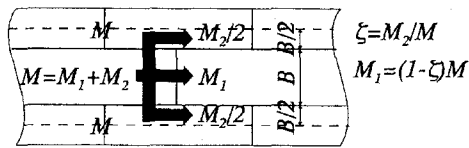


図-6 修正慣用計算法の概念

多ヒンジ系リングモデルは旧ソ連等で突き合わせるだけで、ボルト結合をしないセグメントの設計に用いられていた。しかし、荷重と構造の対称性を利用した簡略化、安定性の吟味を危険側で行うことになるなどの問題があった。これに対して、山本・遠藤・福井¹⁵⁾は、新たに多ヒンジ系セグメントの計算法を提案した。このモデルは、多ヒンジ系セグメントが組立時に裏込め注入で支持される以前に大きく変形するなどの理由で使われることがほとんど無く、実際の設計には使われてこなかった。

(2) 地盤との相互作用モデルの進展

慣用計算法におけるトンネルと地盤の相互作用モデルは、覚王山隧道の設計で用いられた荷重体系に側方の三角形分布する地盤反力を組み合わせたもの

が用いられるようになった。この体系は、現在に至るも主要な相互作用モデルとして用いられている。一方、1960年代半ばまで上下水道などの水路トンネルでは、トンネルを弾性床上のリングと考えるモデル(図-7¹⁷⁾)が一部使用されたが、慣用計算法が主流になるにつれて、ほとんど使用されなくなった。地盤ばねモデルは、多ヒンジ系リングモデルと

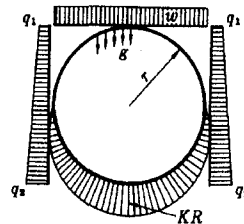
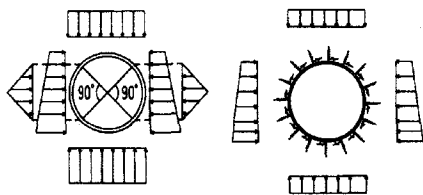


図-7 弾性床上的のリングモデル

組み合わせで提案されたが、最近になり、特殊な断面形状のシールドトンネルが建設されるようになり、その設計に用いられるようになってきている。ここでは、慣用計算法における相互作用モデルと地盤ばねモデルの進展について概観してみる。

慣用計算法の初期には、相互作用モデルで用いられる側方土圧係数と地盤反力係数の決め方には必ずしも確定されたものがなく、地盤条件に応じた一定の考え方では設定されていなかった。1977年に至り「トンネル標準示方書(シールド編)・同解説」¹⁹⁾において記述が見られる。そこでは、側方土圧係数について、側方の地盤反力を考慮する場合には主働土圧係数を用いるか、または静止土圧係数を割引いた値を用いているのが実情であり、側方の地盤反力を期待しない場合には静止土圧係数まで選定できるとしているものの、地盤反力係数については分布形状についてのみ言及し大きさをどのように決定するかは記述されていない。その後、施工実績を積み重ねるに従い、これらの係数は地盤条件に応じて決定されるようになり、実績を整理して1986年版「トンネル標準示方書(シールド編)・同解説」²⁰⁾では、地盤条件に応じて側方土圧係数と地盤反力係数の値の組合せを具体的に示すに至った。すなわち、側方土圧係数と地盤反力係数は、設計実績を整理することにより定められたもので、これは、現行の示方書に受け継がれている。



最近用いられるようになった地盤ばねモデルは、2円形シールドの設計にあたり、二つの円が中央で重なり合う形状であるため、左右のリングに異なる大きさの土圧が作用する可能性があること、また地盤反力もトンネル中央底部などで地盤反力係数が小さくなる恐れのあることなどから、採用されたものである(図-9)²¹⁾。

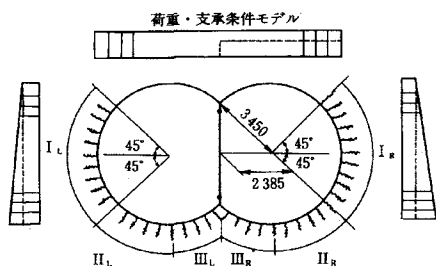


図-9 2円形トンネルの地盤ばねモデル

地盤反力は、トンネルの変形が地山側に向かう場合にのみ発生するとしている。この時の地盤反力係数や側方土圧係数は、慣用計算法のもの為準用された。その後、このモデルは、特殊形状のシールドトンネルだけでなく、単円形のものにも適用されるようになってきている。また、文献22)では、地盤と裏込め注入材とを複合地盤として取扱い、それらの変形係数を考慮した地盤反力係数が示されている。

5. セグメント設計法の課題

(1) セグメント設計法を見直す視点

ここまで、セグメントの設計法の変遷について見てきた。その結果、現在のセグメントの設計法の基本部分は、1970年代までに確立されたものであると結論付けることができよう。この時期までのシールド工法は、開放型シールドによるものであった。また、当時のシールド工法への期待は、開削工法の適用が周辺環境条件によって制約を受けるか避けたい区間での代替工法というイメージが強かった。

現在のシールド工法の技術を見ると、設計法成立時点とは大きく異なっており、以下の視点で設計法についても見直す必要があるものと思われる。

a) 施工法の進展

現時点のシールド工法は密閉型シールドで施工されており、開放型シールドとは種々の点でトンネルに生じる現象が異なっている。

例えば、周辺地山の緩みは密閉型になり著しく小さくなった。また泥水圧や泥土圧に対する反力をとるために基本的にはシールドジャッキを張り続けることになり、テール内あるいは裏込め注入が固まらない区間におけるセグメントリングは、トンネル周方向よりもトンネル軸方向に支持される傾向になるし、テールシールドもワイヤブラシとパテグリスの組合せになり、この部分を通過する時点では締め付けられるような荷重を受けることになる。

裏込め注入についても、瞬結の可塑性グラウトの開発により同時注入や即時注入が行われ、地盤変位を裏込め注入により抑制する方法が一般的になり、裏込め注入がセグメントに作用する荷重に大きな影響を及ぼすようになってきている。また、掘削による緩みが小さくなったこと、裏込め注入が確実に実行され裏込め注入材そのものにより強度の大きいリングが形成されるようになったことから、セグメントリングに作用する土圧にも少なからぬ影響があるものと想定される状況にある。

b) 要求性能の高度化

シールド工法が安定したものとなり技術も高度化するにつれて、出来上がるトンネルに要求される性能も高度化してきている。また、地震の影響のように、従来の知見からは考えられない大きさのものを考慮する必要が生じたものもある。

例えば、耐久性については、完成時の荷重によるクラック幅の制限がなされるだけでなく、旧来のシールド工法では止むを得ないものとされていた施工時荷重による損傷等についても、影響が小さくないとして厳しく抑制することを求められてきている。また、地震の影響については従来、シールドトンネルが経験してこなかったレベル2地震に対しても対応を求められるようになり、トンネルは地震の影響を受けにくいという定性的な判断のみでは、照査を省略できない状況に至っている。

c) 設計施工条件の高難度化

施工技術の進展に伴い、シールド工法が適用される条件も厳しいものとなりつつある。例えば、大断面化が進み、大深度化も進んでいる。さらには、双設シールドの離隔距離の僅少な区間が長く連続する施工を余儀なくされる場合も増加しつつある。

このような条件では、土圧、地盤反力、自重などの評価は、従来のシールドトンネルでは大きな影響を持たなかったとしても、結果に極めて大きな影響を及ぼすことになる。

(2) 設計法改善の方向

次に、前節で述べた視点から、セグメント設計法を具体的に見直していく方向について述べる。

土圧や水圧などの主荷重に対するセグメントリングの構造モデルについては、梁ばねモデルを用いることにより、各種の継手形式のセグメントについて対応可能となっている。しかし、継手試験から得られた継手ばね定数を用いる場合には、継手部の断面力から継手部材の応力を求めるモデルが不明確であるため、前述したように似て非なる構造モデルが用いられるなど、細部における改善が必要である。また、後述する施工時荷重による影響を評価する場合には、セグメントの局部応力を取り扱う必要があり、セグメントを梁として取り扱う方法では限界があり、シェルあるいはソリッドとして評価していく方法を確立していく必要がある。

また、耐震設計を行う際には、セグメントの限界状態が問題になるが、部材の終局状態がリング全体の終局状態に合致するか否かなど、トンネルの限界状態について見極める必要がある。

次に設計荷重について述べる。一般に、橋梁などの構造物は、最適な構造設計を行い、施工では忠実に設計どおりのものを作るのに対して、トンネルでは必ずしも机上で考えるような理想的な施工が行え

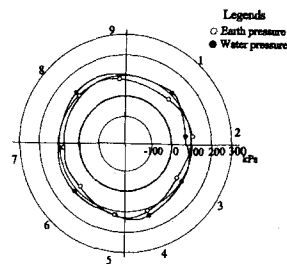
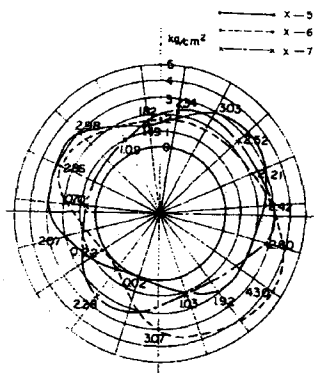


図-11 密閉型シールドに作用する土圧計測例

ないため、施工状況に応じた設計を行い、要求品質を満足させる必要がある。従ってシールドトンネルの設計にあたっては、実際に作用する土圧、水圧などを見極めることが重要になる。トンネルの作用荷重の現場計測結果(図-10²⁴⁾、図-11²³⁾)を見ると、開放型シールドにおけるものと密閉型シールドにおけるものでは、その大きさや分布に大きな差がある。前者では分布は大きな不連続性を示し、また大きさも緩み土圧相当あるいは軟弱地盤では全土被り土圧に近いものまでである、後者では水圧は設定水圧に近いものが作用するものの、土圧については、滑らかな分布形状を示すとともに、その大きさは裏込め注入圧に大きく依存し、一般には極めて小さく、場合によっては作用しない場合もある²³⁾。これは地山の緩みがほとんど生じない場合は、地盤とトンネルを含めた系を考えると、裏込め注入圧は内力であり、その大きさの如何によりトンネルの作用荷重が大きく変化すること、裏込め注入材が形成するリングの存在はトンネルの安定に無視できない効果を持っていることなどの理由によるものと考えられる。

施工の影響は最終的なトンネルの状況に大きく影響するばかりでなく、一時的な影響として損傷を生じさせる原因にもなりうる。特に、ジャッキ推力、裏込め注入圧、テールシールド圧、セグメントの組立精度、トンネルとシールドの姿勢の関係などを、その動的な変化を含めて考慮する必要がある。これらについては、従来の施工経験からモデルを構築し、現場計測と解析により、具体的な検討手法を確立していくのが望ましい。

最後に、双設トンネルの近接施工について考える。この影響については種々の影響検討法が提案されているが、いずれも2次元FEMを基本としている。最終的な評価は、セグメントの部材応力が許容値内に在るか否かをチェックしているが、FEM解析の結果を直接評価することは少なく、フレーム解析に用いる影響作用を評価するのに用いられている。2次元FEMでは、掘削の主たる影響を応力解放として取り扱うため、変形モードが実態と合わないこと



- ①開放型シールドにおける実測値
- ②計測時期：組立2カ月後
- ③X-1～3, X-5～6は計測セグメントリングの番号

図-10 開放型シールドに作用する土圧計測値の例

も多い。施工過程を考慮して、実際に現場で生じている現象をモデル化できるようにする必要がある。さらには、双設トンネルに限らず、地盤と覆工を総合した解析と評価を行う手法を確立することが望まれる。また、直接、セグメントの設計とは関係ないが、トンネル間の地盤の安定性の評価に、地盤をモデル化した要素の塑性化の程度を指標と用いているが、必ずしも妥当ではなく、シミュレーションの結果を評価する基準が欠けているように思われる。このように、FEM解析等をシールドトンネルの設計に用いる場合には、解明すべき課題が多いと言わざるをえない状況にある。

5. おわりに

以上に述べたように、シールドトンネルの覆工設計法は初期のシールド工法の施工技術や周辺技術の状況を背景に確立され、広く用いられてきた。しかし、現在のシールド工法の施工技術は、初期のものとは全く異なる工法であると言っても過言ではないほどに大いに進展している。実際のシールド工事の現場を見ると、設計法が施工法に追従できていないという感が強い。我が国のシールド工法の初期には、設計法も施工法も共に試行錯誤の揺籃期にあり、その後、施工法が大いに進展した時期を経験して現在に至っている。これからの時代は、進展した施工法に追いつき、施工技術に応じた合理的な設計法への革新期になることを期待するものである。

参考文献

- 1) 鉄道省秋田建設事務所：羽越線折渡隧道工事概要、1926
- 2) 土木学会：関門隧道、1949
- 3) Oinoue, C.: STRESS IN SUBAQUEOUS TUNNELS BUILT IN THE WATER-BEARING SOIL, 土木学会誌, 第15巻第1号, pp.41-107, 1929
- 4) 高見敬一, 近藤茂, 中道拓, 渡辺晴朗: 名古屋市高速鉄道シールド工法について, 第1回トンネル工学シンポジウム, 土木学会, pp.65-85, 1962
- 5) 小野諒兄, 眞井耕象: 乾燥砂層に於ける垂直土圧, 土木学会誌, 第24巻第5号, pp.437-459, 1938
- 6) Terzaghi, K: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., pp. 66-76., 1943
- 7) 土木学会編：わが国シールド工法の実施例・第1集, 1966
- 8) 熊谷組技術研究所：鉄筋コンクリートセグメントおよびスチールセグメント強度試験について, 技術研究所

- 報文第1号, 1963
- 9) 土木学会編：トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説, pp.84-85, 1996
- 10) 土木学会編：都市NATMとシールド工法との境界領域-設計法の現状と課題-, p.145, 1996
- 11) 山本稔：セグメントの設計について, 第3回トンネル工学シンポジウム, 土木学会, pp.47-65, 1964
- 12) 久保慶三郎, 結城皓暁：シールドセグメントの応力に対する継手剛性の影響, 土木学会論文集, 第150号, pp.27-34, 1968
- 13) 山本稔, 遠藤浩三, 福井正憲：多ベンジ系セグメントリングの設計計算法, 土木学会論文集, 第150号, pp.9-26, 1968
- 14) 山本稔：セグメントに関する2, 3の提言, コンストラクション, 第9巻1号, pp.1-10, 1971
- 15) 河田博之, 長崎光男, 澤健：セグメントの継手剛性に関する実験とその考察(4) (東北新幹線土野トンネルセグメント継手試験), 構造物設計資料, No.68, pp.25-30, 1981
- 16) 村上博智, 小泉淳：シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について, 土木学会論文報告集, 第296号, pp73-86, 1980
- 17) 財) 先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明報告書「ほぞ付きセグメント工法」, p153, 1997
- 18) 財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（シールドトンネル）, pp.157-160, 1997
- 19) 土木学会編：トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説, pp.39-43, 1977
- 20) 土木学会編：トンネル標準示方書（シールド工法編）・同解説, pp.34-38, 1986
- 21) 小山幸則, 加藤政喜, 清水満：複円形特殊断面シールドの設計-京葉線京橋トンネル-, 第41回年次学術講演会講演概要集第3部, 土木学会, pp.801-802, 1986
- 22) 前掲18), p.142
- 23) Koyama, Y.: Present status and technology of shield tunneling method in Japan, Tunneling and Underground Space Technology 18, pp.145-159, 2003
- 24) 横山浩雄：鉄道シールドトンネルにおけるコンクリートセグメントの設計施工に関する研究, 鉄道技術研究報告, No.934, 国鉄鉄道技術研究所, p.353, 1974