

**Special Lecture**

# **Underground Construction, Tunnel, Underground Transportation**

藤田圭一 (ふじた けいいち)

東京理科大学教授 理工学部土木工学科

**1. まえがき**

タイトルは組織委員会から与えられた広範囲のものであったが，“Underground”には地下鉄という意味があるので、土砂地盤中の都市トンネル掘削を取り上げ、世界の95%を占める日本のシールド工法を主な話題とした。

過去の国際会議でも同様なテーマが取り上げられており、メキシコ会議(1969)ではPeck(ペック)がState-of-the-art report “Deep excavations and tunneling in soft ground”でトンネル掘削に伴う地表面沈下の形状・範囲と地盤のタイプの関係などについて、ストックホルム会議(1981)では、WardとPenderがGeneral report “Tunnelling in soft ground”でシールドトンネルの切羽の安定などについて興味ある報告を行っている。また地域会議では、京都会議(1987)において、今田がTheme lecture “Tunneling and excavation in soils”でシールド機械の分類、最新のシールド工法関連技術などを紹介している。

**2. 開削トンネル施工に伴う地盤と近接構造物の変位**

ある開削トンネルは、掘削深さ15~20m、掘削幅10~20mであるが、10~20m離れた地点に鉄道高架橋があって、その許容変位量が25mmと制限されていた。掘削底面付近の粘土のせん断強さは4.5~6tf/m<sup>2</sup>で、Peckによる底面破壊の安定数が5.3以上となるため、生石灰パイルによる地盤改良を掘削に先立って実施した。

$\phi 1200\text{ mm} \times L\text{ 約 }50\text{ m}$  の鋼管矢板土留め壁が、生石灰パイルの打込みによって20~264mmの水平変位を生じ、橋脚の水平変位量は6~23mmであつ

た。掘削時には土留め壁の水平変位量は43~47mmで、橋脚もまた変位した。この間、橋脚の周囲に500~1000lのグラウトを行うと、橋脚は容易に変位することを見いだして、変位量を最小限に留どめることができた。

都市内の開削トンネル工事においては、このような問題や環境問題のためにアンダーピニングなどの対策工事が必要で、コスト高になることから、日本では次第にシールドトンネル工事が多くなった。

**3. シールド機と切羽および地山の安定**

シールドトンネル工事に用いるシールド機は切羽の安定に寄与する機能によって、開放型、半開放型、閉鎖型の3種に分類することができる。開放型には、手掘り式、バックホウ式(通常、半機械式という)など、半開放型には、ブラインド式、切削式(通常、機械式という)、閉鎖型には、泥水式、土圧バランス式などがある。

切羽が自立する場合には開放型の適用が可能である。半開放型は、面板で切羽を押さえているが、土砂は面板を通過すると同時に圧力から開放されるので、開放型と同様に切羽周辺から地表面にかけて地山が緩む。閉鎖型は、チャンバー内の泥水圧あるいは土圧を地圧とバランスさせることによって、切羽と地山の安定を保つことができるので、地表面沈下量や地盤の変位量が小さい。

**4. シールドトンネル工事による地盤変位**

土圧バランス式シールド機による双設トンネル工事(1983)で各種の計測が行われた。シールド機の通過時には切羽頂部と地表面はそれぞれ40mm、3mm上昇したが、双設トンネル施工後には地表面が27mm沈下した。また13mmの最大水平変位量と

約  $1 \text{ kgf/cm}^2$  の過剰間隙水圧が発生した。この時代においては、シールド工法によっても地盤変位が避けられなかった。なお、森によれば、シールドトンネル工事により発生する地表面沈下量のおよそ  $1/2$  は圧密沈下によるとしている。

## 5. 地表面沈下に関する研究について

Peck (1969) はメキシコ会議において、在来工法と開放型シールド機によるトンネル工事に伴う地表面沈下の断面形状は、正規確率曲線に近似していること、地盤のタイプによって特徴づけられると述べている。その後多くの人々によって最大地表面沈下量の予測方法が提案された。

藤田 (1981) はストックホルム会議のパネルディスカッションで、日本における地表面沈下は Peck の提案に近いことを多くのデータで示したが、泥水式、土圧バランス式による沈下量が小さいようであると報告した。同会議で Ward は Davis らの遠心模型実験に基づいてトンネル切羽の安定問題が十分に検討できると報告した。

Mair (1987) は京都会議において、粘土のせん断強度、土かぶり圧、トンネル径との関係において、地表面の沈下と噴発はトンネル切羽に加える圧力によって定まることを示し、切羽に加える圧力が土かぶり圧に近いほど地表面沈下量は小さいと述べた。泥水式、土圧バランス式のチャンバー圧力を決める上で、この方法は有効である。

地表面沈下量の予測は、現場においてはアンダーピニングなどの対策を決めるために必要であり、土質工学上も興味深い研究課題である。しかし、最近の泥水式と土圧バランス式シールド工法の発達と、同時に瞬時裏込め注入工法の開発によって、地表面沈下量はわずかに  $3 \text{ mm}$  程度に激減してこの問題が消滅した。この結果、1986年以来、この関係の論文や報告は日本ではほとんど見られなくなった。

## 6. 補助工法と対策工について

シールドトンネル工事に伴う近接構造物と地盤の変位に対処するため、着工前および工事中に、地盤改良、アンダーピニング、薬液注入、地下水位低下、凍結、圧気などの対策工や補助工法が実施される。その区域あるいは各種の観測と計測管理を行う

項目と範囲について、日本ではいくつかの機関が指針や規準を定めている。

## 7. 土圧バランス式シールド工法の有用性について

シールドトンネル工事に伴う地盤変位を最小限に抑え、安全かつ経済的にトンネルを建設するためには、適切なシールド機を選定し、適當な対策工、補助工法を適用しなければならない。日本にはいくつかのシールド機選定図表があるが、経済性も考慮した検討が含まれている。

日本トンネル技術協会は、国際トンネル技術協会の求めに応じて、世界各国におけるシールド機の適用性に関するアンケート調査を行っているが、その 95% が日本における事例であった。日本では土圧バランス式の利用が、1980年の21%から1985年には63%，泥水式を含めると60%から86%，すなわち閉鎖型が圧倒的多数を占めるようになった。補助・対策工では同じ年代に、薬液注入が60%から40%に、水位低下その他が47%から21%と減少する一方、全く実施しないケースが28%から48%に増加しているが、それでも半開放型と開放型では実施しないケースは10%以下であった。また、閉鎖型シールド機を用いたトンネル工事は、その75%がノートラブルで施工された結果、良好な地盤に適用される安価な開放型シールド機を用いたトンネルとほとんど同じコストであることが統計的に判明した。

## 8. む す び

閉鎖型シールド機、新しい裏込め注入工法、自動化・情報化施工などの技術開発によって、20年前に Peck が取り上げた地表面沈下に関する問題は、コスト増加を伴うことなく解決するに至った。日本には、超大型シールド機、双設シールド機、新しい補助工法など新技術が多数開発されており、今後の地下空間開発に大きく寄与するものと信ずる。

なお、セグメントの各種の設計法を比較した河田の研究を紹介し、施工を考慮した設計手法が必要であるとの見解を述べたが、紙数の関係で本稿では割愛する。

最後に、このような大役を与えて下さった先輩各位に謝意を表する。  
(原稿受理 1989.11.1)