

## 5. シールド工事の安全向上に関する提言

### ～ シールドトンネルの設計・施工における留意事項 ～

本協議会において検討した「3. 倉敷市の事故に関する検討」ならびに「4. シールド工事に関する聞き取り調査」に基づいて、シールド工事の安全性を向上させるために必要と判断される事項について「シールドトンネルの設計・施工における留意事項」をとりまとめた。すなわち、ここに示す留意事項は事故によって得られた知見のみにとどまらず、広く国内のシールド工事の実態を踏まえてとりまとめたものである。

留意事項の中には、従来のシールド工事において経験豊富な技術者が現場で判断していた事項や、その施工条件に応じて適宜対応していた事項も含まれると思われるが、将来のシールド工事を担う技術者への技術の継承という観点も考慮して広範に記述している。

以下の留意事項は、今後のシールド工事の安全性向上に向けて、各学協会、事業者等が定めるシールドトンネルの設計・施工に関わる基準類において、その改訂等に合わせて反映されるよう強く望むものである。

## (1) シールドトンネルの調査・計画

### (1)-1 リスクの想定と対応

現場の条件から、万一事故が発生した場合の被害の状況を想定して、リスクを考慮した総合的なシールドトンネルの設計・施工を行うこと。

#### 【解説】

シールドトンネルのセグメントは、施工の影響を受ける構造物であり、地山内で安定するまでの間に受ける様々な影響を考慮して設計する必要がある。しかし、シールドトンネルの施工中には予測できない事態が発生することも排除できない。万一事故が発生した場合の被害の影響は、シールドトンネルを施工する現場の条件によって、大きく異なるものと考えられる。とくに、海底下、河川下、湖沼下あるいは市街地で施工するシールドトンネルで事故が発生した場合には、大量出水、陥没等大きな被害が発生することが想定される。

このため、現場条件に応じたリスクを的確に評価し、適切な安全性を有する設計を実施するとともに、リスクに適切な対応が可能となるように設計の考え方を反映させた施工計画ならびに施工管理を実施する必要がある。

### (1)-2 地質調査

シールドトンネルの地質調査は、既往の調査結果等がある場合を除き、掘進対象地盤の地質状況およびその変化を把握するため、適切な計画のもとにボーリング調査を十分に実施すること。また、地下水の状況およびその変化、可燃性ガスの状況等の必要な調査を実施すること。

#### 【解説】

シールドトンネルの地質調査は、シールド工法の設計全般ならびに施工計画に大きく影響を及ぼすため、その調査を入念に行う必要がある。とくに、周囲の地形変化が激しい地域等では、対象路線の左右で土質等が変化することもあるため、調査・計画時に配慮する必要がある。

このため、既存の調査資料や初回の地質調査において十分に地質の変化を読み取ることができない場合は、地形変化も考慮のうえボーリング調査を追加することなどによつて的確に地質の状態を把握しなければならない。また、シールドの設計・施工で重要となる設計水圧は正確に把握する必要があるため、被圧水の有無を含め、年間の水位変化等、時間的な変化も調査することが重要である。

また、地盤の特性はN値を用いておおよその推定を行うことが一般的であるが、礫分の多い地盤等では実質的な地盤の剛性や強度以上にN値が高く測定されることがあるため、粒度分布等各種情報を踏まえた適切な判断が必要である。

### (1)-3 水底の探査

海／河川／湖沼を小さい土被りで横断して掘進するシールドトンネルを計画する場合は、海底／河床／湖沼底の探査等を十分に実施すること。

#### 【解説】

海底、河床、湖沼底等は、経年変化が生じやすく、かつ、調査が困難であることもあり、その情報を正確に把握し難い場合がある。しかし、シールドトンネルの線形計画、覆工計画および施工計画等において、重要となる土被り設定には海底、河床、湖沼底等の情報は欠くことができない。このため、海、河川、湖沼等を横断して掘進するシールドトンネルの調査・計画・設計にあたっては、当該地域の堆積環境を念頭に置いて、海底、河床、湖沼底等の探査を十分

に実施し、地形、土質、将来の経年変化を十分把握しなければならない。また、将来の浚渫の可能性(計画河床高さ)についても調査する必要がある。ただし、既往の調査結果、過去の施工例等を調査し、十分な土被りが確保できると判断される場合は探査を省略してもよい。

## (2) セグメントの設計

### (2)-1 セグメントの本体と継手

セグメントの本体と継手は、完成時の安全性の確認はもとより、施工状況を考慮した設計を行い、万一の場合にも重大な事故につながらないよう安全性の確保に配慮すること。

#### 【解説】

シールドトンネルのセグメントは、水圧、土圧等トンネル完成時に作用する荷重に抵抗する主体構造物であると同時に、施工時にはシールド掘進時のジャッキ推力、シールドテール内から地山側へ出る際のテールシールやテールグリス圧による拘束圧、裏込め注入圧のほか、既に組立てたセグメントリングの組立精度や変形状況によって生じる外力等の施工時荷重にも抵抗する構造物である。

セグメントの設計にあたっては、対象トンネルの施工条件を十分考慮したうえで、地盤条件のほかに、トンネルがおかれている諸条件を考慮し、完成時はもちろん施工中における安全性と機能が確保されるように配慮する必要がある。

このため、セグメントの設計は、施工時荷重のほか、裏込めの注入時期や注入位置等を含めて、施工時の状況を十分に考慮して行う必要がある。

とくに、締結力が入らない突合せ継手等のセグメント継手を採用した場合は、継手の構造形式によっては、裏込め注入の状況、リング継手の強度等によって、構造耐力が著しく低下し、急激な崩壊を招く可能性がある。したがって、セグメント継手の選定にあたっては、現場の状況、施工条件等を的確に反映させてリスクを評価し、適切な継手構造を採用する必要がある。

リング継手は、セグメント継手と同様に、種々の施工時荷重に配慮したうえで、継手の構造形式や強度を決定することが重要である。とくに、リング継手の引抜き耐力はシールドの曲線施工や蛇行修正時を想定し、トンネル軸方向の引張力と断面方向のせん断力とが複合して作用することに配慮した設計を行う必要がある。また、リング継手の破壊形態は、コンクリートの破壊による脆性的な破壊形態にならないようにしなければならない。

### (2)-2 セグメントの形状・寸法

セグメントの形状・寸法の決定にあたっては、構造計算のほか、類似工事等の実績も参考に検討すること。

#### 【解説】

セグメントの形状・寸法は、一般に構造設計等で計画するが、施工時荷重の大きさと作用状態、発生応力、施工誤差等に設計では予測できない不明確な点もあることから、類似工事のセグメントの厚さと外径の比率、セグメント幅と厚さの比等の実績も勘案して検討する必要がある。ただし、実績の下限値付近では、事故や損傷を生じた事例があり、そのリスクを評価したセグメント構造の決定や施工上の対策等を行う必要がある。また、継手の種類によっては、継手に求められる引張強度やせん断強度を確保するために、一定以上のセグメントの厚さが必要になることから、セグメント厚さの検討にあたっては継手の構造や配置を考慮して決定することが重要である。

### (2)-3 セグメントの分割

セグメントの分割は、リングとしての構造的な安定性、製作性、施工性のほかに、K セグメントの安定性に配慮して決定すること。

#### 【解説】

セグメントの分割数が少ない場合は、1ピースの弧長と重量が大きくなるため、運搬性やトンネル坑内等での取扱いやすさが低下することがある反面、型枠や継手のコストが軽減できることや組立回数の低減によって組立速度が向上することが期待できるため、運搬性や取扱いに支障がなければ分割数を少なくする傾向にある。また、K セグメントは分割形式を等分割にしてその中心角を大きくすることなどによって、拔出しに対する安定性が高まると考えられるが、Kセグメントの重量が増えるとともに、等分割のKセグメントは挿入時にオペレータが両側のB-K間のセグメント継手の離隔を同時に見られずB・Kセグメントの隅角部の欠け等の不具合が出ることもあるため施工性にも配慮して分割形式を決定する必要がある。

セグメントの分割形式の選定にあたっては、経済性や組立時間の短縮だけでなくセグメント組立のためにジャッキを引抜いたときの影響やKセグメントの安定性、組立時のセグメントの損傷防止についても十分配慮することが重要である。

### (2)-4 Kセグメント

K セグメントの型式、形状・寸法は、漏水等の原因となるリング継手の目開きを生じさせないように配慮するとともに、K セグメントの拔出しの可能性を照査すること。また、必要に応じてKセグメントの滑動を防止する対策を講じること。

#### 【解説】

K セグメントは、最終的にリングを閉合して完成させるセグメントである。すなわち、セグメントの組立誤差が累積された部分に挿入するものであり、最も組立に注意が必要な部分である。このため、Kセグメントの型式、形状（挿入角度、継手角度）・寸法は、完成時はもちろんのこと、施工性についても十分配慮して決定する必要がある。

軸方向挿入型Kセグメントでは、挿入角度を大きくすると施工上は有利なことが多いが、継手面がトンネル軸と斜交するため、継手面の力の伝達がより複雑となるので適切な角度とする必要がある。軸方向挿入型のKセグメントが拔出そうとする力は、セグメントのリング方向の軸圧縮力によって生じ、挿入角度が大きくなると大きくなる。セグメントを組立てるため、Kセグメントを押さえているジャッキを抜いた場合、この力は、KセグメントとBセグメントとの間の摩擦、リング継手、セグメント継手の抵抗によって保持される。ボルト形式のセグメント継手が用いられている場合は、ボルトのせん断力によって拔出し力が保持力を超えることは少ないと考えられる。しかしながら、近年、多く用いられるようになってきているワンパス式の継手では、セグメント継手のせん断抵抗が期待できる場合を除いて、KセグメントとBセグメントとの摩擦、リング継手の強度で拔出し力を保持する必要がある。KセグメントとBセグメントとの摩擦力は摩擦係数に依存するが、要素実験の結果、条件によって摩擦係数が0.1を下回ることが明らかとなった。Kセグメントの拔出しは、漏水の原因になるとともに、状況によっては、重大災害につながる可能性があるため、Kセグメントの拔出しについて十分な照査を行う必要がある。拔出しの検討にあたっては、Kセグメント挿入時におけるシール材への滑剤の塗布等の影響についても考慮する必要がある。

照査の結果、抜出し力が保持する力を上回る場合は、施工時に仮の保持力を付加するなど適切な対策を講じる必要がある。保持力を付加する方法としては把持金具を用いて、隣接する既設のセグメントにKセグメントを固定する方法等が用いられている。

また、半径方向挿入型Kセグメントでは、半径方向への抜出し力に対して、セグメント継手やリング継手のせん断強度を十分に確保するなどの摩擦に頼らない構造上の防止対策を講じなければならない。

#### (2)-5 Kセグメントの挿入代

軸方向挿入型Kセグメントを使用する場合のKセグメント挿入代（セットバック量）は、施工性が確保できる長さとなるよう配慮すること。

##### 【解説】

軸方向挿入型Kセグメントは、トンネル軸方向にテーパをつけてトンネル縦断方向の切羽側から挿入する構造であるため、テール内でのスペース確保が必要である。

シールドテールでのKセグメントの挿入代を短くするとセグメント組立時におけるセグメントの損傷、組立精度の低下等、覆工の品質に支障をあたえる可能性がある。さらに、継手の挿入角度を大きくすることや継手角度を設ける必要が生じ、Kセグメントの安定性を低下させる要因となる。このため、適切な施工性とKセグメントの安定性が確保できる挿入代となるよう十分配慮する必要がある。

#### (2)-6 RCセグメントの鉄筋量

RCセグメントの鉄筋量は、構造計算による許容応力度の照査のほか、セグメントの破壊形態や類似工事等のセグメントの設計実績も参考にして検討すること。

##### 【解説】

RCセグメントの鉄筋量は、一般にトンネル完成時における作用荷重に対する構造設計等で求めるが、施工時の影響も考慮する必要がある。しかし、施工時の影響は施工時荷重の大きさと作用状態、施工誤差等に影響され、設計では予測できない不明確な点もあるため、RCセグメントの鉄筋量および構造細目の決定にあたっては設計荷重に対する許容応力度の照査のみによらず、単純曲げの破壊形態が鉄筋の降伏よりもコンクリートの圧縮破壊が先行して発生する鉄筋量とならないことや、曲げひび割れ発生時に中立軸が極端に上がり背面コンクリートが急激に圧縮破壊する鉄筋量にならないことを確認するとともに、類似工事等のセグメントの最小鉄筋量、最大鉄筋量、主鉄筋最小径、鉄筋間隔等の実績も勘案して決定することが重要である。

#### (2)-7 RCセグメントのシール溝

RCセグメントのシール溝は、適切な位置、寸法・形状とすること。

##### 【解説】

RCセグメントのシール溝は、シール材の界面応力により、セグメント端部に欠けやひび割れが生じる可能性がある。とくに、水膨張性シール材を採用する場合には、セグメント組立後の膨張圧の影響等によりセグメント端部に損傷を与える可能性がある。

このため、シール溝の位置や寸法・形状およびシール材の形状・種類を検討し、セグメントが損傷せず、十分な止水効果が得られる仕様にしなければならない。

## (2)-8 シールドジャッキ偏心量の影響

セグメントの設計にあたっては、テールクリアランスの影響を考慮してシールドジャッキ偏心量の影響に対する安全性の検討を行うこと。

### 【解説】

セグメントの設計にあたっては、シールドテール内でのセグメントリングの偏りを考慮し、シールドジャッキの偏心量にテールクリアランス分の誤差を加味して、RCセグメントでのひび割れの発生、鋼製セグメントにおけるトンネル軸方向の座屈に対する安定を検討する必要がある。とくに、セグメントの厚さが薄い場合には重要である。また、セグメント幅が広い場合には、セグメント厚さが薄いことの影響が顕在化することが考えられるため十分注意して設計する必要がある。

## (2)-9 シールドの施工計画を考慮したセグメントの設計

セグメントの設計にあたっては、シールドの施工計画を考慮して設計条件や照査項目を定めること。

### 【解説】

セグメントは施工中にジャッキ推力や裏込め注入圧等の荷重を受けるとともに、完成後の土圧、水圧等の永久荷重に抵抗するトンネルの主体となる構造物である。このため、施工時にセグメントに損傷を与えると長期的に主体構造物に求められる機能や性能の低下を招く要因となる可能性がある。また、シールドの施工においては変化する地質条件に適宜対応しながら、大きな土水圧、切削抵抗に対抗するためのジャッキ推力を取扱う必要がある。ジャッキ推力のセグメントに与える影響は大きく、シールドの推進にあたっては、シールドとセグメントの位置を適正な範囲に保つ必要がある。しかし、地盤状況の変化、シールド推進の制御方法等の影響を受けて適正範囲を超えることが少なからず生ずる。また、裏込め注入の実施時期を状況によって遅延せざるを得ない場合が生ずることもある。このため、シールドの施工時の地盤条件や施工の計画、施工時の状況を反映させたセグメントの構造設計とすることが施工時における不具合を避け、セグメントの損傷を防止するうえで、また、重大な事故を防ぐために重要である。

一方、工事实施にあたって施工計画を立てる場合は、設計条件に適合した計画にすることが必要である。このためには、下記に配慮することが重要である。

- ① 施工計画を立案する際、設計結果を反映した施工計画が行えるよう、想定した施工条件を明示すること。
- ② 施工時には、セグメント設計時に想定した施工条件を反映した施工計画を立案するとともに、施工上の留意点を周知すること。
- ③ セグメントの構造設計条件が、施工計画において設計時に想定した施工条件と異なる場合には、施工計画に合わせて適切に構造設計を見直すこと。
- ④ 施工中に不具合や施工計画と異なる状況が生じた場合は、原因の究明と設計に及ぼす影響を検討すること。

## (2) - 10 急曲線施工に対する対策

急曲線施工ではセグメントに局所的な施工時荷重が作用することがある。このため、セグメント本体や継手の損傷を防止するため、十分な対策を講ずること。

### 【解説】

急曲線施工におけるセグメントには、シールドジャッキの片押しや場合によってシールドテールでの競り等により、セグメントリングに大きな偏圧が作用するなど、局所的な施工時荷重が一時的に作用することがある。とくに、シールドテールとの競りやテールブラシへの裏込め注入材の侵入、固着によって、局所的な荷重や過度なセグメントの拘束力が発生する場合は、セグメント本体や継手部に損傷が生じている施工事例が多い。

このため、急曲線部では以下に留意することが必要である。

- ① セグメントは急曲線区間だけでなくその前後の区間においても大きな施工時荷重を受けることがあるため、急曲線区間を含む前後の一定区間においても適切なセグメントの構造・形式、幅・厚さ等の形状、および継手構造とする。
- ② 急曲線施工にあたって、シールドは高い操作性ならびに適切なテールクリアランスを確保し、シールド掘進時のシールドジャッキによるセグメントへの偏圧を防止するため、中折れ装置の採用とともにシールドジャッキのシリンダーの小型化や配置についても検討する。
- ③ 急曲線区間はシールドとセグメントリングとのずれやセグメントリングの変形により、テールブラシ内に裏込め注入材が侵入して固結しないように対策を検討する。
- ④ 急曲線区間で外径を縮小した鋼製セグメントを用いる場合は、テールシール内へ裏込め注入材が侵入しやすくなり、急曲線区間通過後のRCセグメントに対して局所的な施工時荷重が作用することによって損傷が生じることが考えられるため、その対策を十分に検討する。

## (3) シールドの設計

### (3) - 1 テールシール

テールシールは、トンネル通過地盤の土質条件や地下水位、間隙水圧等を総合的に検討し、十分な止水性が確保できるよう配慮すること。また、テール部のセグメントかかり代の設定にあたっては、地盤条件、セグメント幅、テールシールの取付け長さ、施工性および実績等を総合的に勘案して検討すること。

### 【解説】

テールシールは、シールドトンネルの施工期間にわたって地下水等のトンネル内への流入を防止するための性能を有し続けなければならない。

このため、テールシールは、トンネルの規模、延長、土被り、土質条件、地下水位、間隙水圧、トンネル線形等を考慮して設計し、とくに河川、海底横断の場合は十分な止水性が確保できる構造、機構、段数としなければならない。また、テールシールそのものの耐久性を考慮するとともに、テールシールの性能低下を防ぐために、適切なテールグリス材の選定とテールグリス圧の確保方法（給脂方法、管理方法等）についても検討する必要がある。

セグメントはテールを抜ける過程において、テール内部に位置するセグメントにはテールシールとテールグリスを介して荷重が作用し、テールから抜出したセグメントには裏込め注入圧、水圧等が複雑に作用する。これらの荷重が作用する状況によっては、トンネル全体の構造安定性に影響を与えることがある。このため、テール内のセグメントのかかり代の設定はセグメント設計における施工時荷重の考え方と整合を図り、セグメントに対して過大な荷重が作用する

ことのないよう、セグメントの幅とテールスキンプレート長、テールシールの取付け長さ（シール段数）等のバランスに配慮するとともに、施工性や実績を総合的に勘案して設計しなければならない。

また、セグメントの注入孔から注入を行う場合は、テールシールとセグメント裏込め注入孔との位置関係を考慮し、テール部セグメントのかかり代をテール部まで確実に裏込め注入が行えるように設計する必要がある。

### **（３）-２ スクリューコンベヤからの噴発防止**

**スクリューコンベヤからの噴発防止対策について十分検討すること。**

#### **【解説】**

土圧式シールドの排土機構であるスクリューコンベヤは、地下水がシールド内へ噴発しないようにチャンバー内の土圧を保持するための重要な設備である。

このため、地下水圧、掘削地盤の透水性、土質性状等に基づき二次スクリューコンベヤの必要性等も考慮し適切なスクリューコンベヤを選定する。また、止水性等の圧力保持能力の確保に課題が残る地盤条件や、トンネルがおかれている諸条件によっては、排土口への緊急遮断装置等の緊急時対策や掘進中の停電時に備えた噴発防止対策を検討する必要がある。

### **（３）-３ 形状保持装置**

**形状保持装置の検討にあたっては、覆工の規模だけでなく、セグメント継手の締結力の有無等に配慮すること。**

#### **【解説】**

セグメントは正確に組立てなければ、次のセグメントの組立が困難になるばかりか、テールを抜出した後に地盤によってはリングの変形を助長する恐れもある。この傾向はとくにセグメント継手に締結力を有さない場合に顕著となる。

新規に組立てるセグメントリングは、既設のセグメントリングに倣って組まれるため、既設のセグメントリングの組立精度の影響を受ける。一方、既設のセグメントは、新規のセグメントの組立のためにシールドジャッキを解放することによって変形することがある。このため、裏込め注入によりセグメントの形状が固定されるまで、形状保持装置を設け組立精度を確保することがある。

形状保持装置の検討にあたっては、セグメント継手に締結力を持たない自立性の低いセグメントを使用する場合には、トンネルの規模、地盤条件、施工方法等に配慮して、その設置の要否の判定を慎重に行う必要がある。

### **（３）-４ 電気設備、油圧設備**

**シールドトンネル内の電気設備、油圧設備は、緊急時にも問題が生じないように計画すること。**

#### **【解説】**

出水やセグメントの大規模な損傷等の緊急事態が生じた場合にも、電気設備、油圧設備は正常に機能することが求められる。しかし、緊急事態においてはその影響を受けることが避けられない場合もある。したがって、通信機能、制御機能の途絶やジャッキ圧力の低下等緊急事態の対応に大きな影響を与える設備については、バックアップ機能や油圧回路の独立性を高めるなど影響を最低限に留めるようにする必要がある。



### (3)-5 シールドジャッキ

シールドジャッキとスプレッダーの偏心量によるジャッキロッドの変形に対する安全性を確認すること。

#### 【解説】

一般的に、セグメントへの偏心作用荷重を小さくするため、スプレッダー中心とジャッキの中心を偏心させ、セグメント中心にスプレッダーをあわせる場合が多い。この時、ジャッキロッドには、その偏心分の曲げ荷重が作用して変形しやすくなるため、シールドジャッキとスプレッダーの偏心量によるジャッキロッドの変形に対する安全性を確認する必要がある。

とくに、セグメント幅が広い場合にはジャッキロッドもそれに伴って長くなり、また、セグメント厚さが薄い場合にはジャッキのロッドを細くすることがあることから、ジャッキロッドの変形に対して十分に注意しなければならない。

### (4) シールド工事の施工計画

#### (4)-1 突合せ継手の使用

セグメントに締結力のない継手を採用する場合は、形状の保持に努め、とくに漏水等の原因となるリング継手の目開きや目違いが生じないように配慮すること。

#### 【解説】

セグメントの組立に際しては目開きや目違いを原因とした漏水が発生しないように努めることが重要である。

とくに、セグメントに締結力のない継手を採用する場合は、形状の保持に努めて漏水等の原因となる有害な目開きや目違いが生じないように配慮することが重要である。また、Kセグメントの挿入時に滑剤を使用する場合は、セグメント継手面の摩擦力が低下し、セグメントの拔出しに対する抵抗力が低下することに注意する必要がある。セグメント継手面の摩擦係数については、シールド材の貼付、滑剤の塗布等、実際の施工に応じた状態での既往の試験結果に基づいて設定するか、実際の施工に応じた状態での摩擦試験を行い、設計結果の確認をすることが重要である。

#### (4)-2 セグメントの組立とシールドジャッキ操作

セグメントの組立は、“たれ”ができるだけ生じないようにすること。Kセグメントを押さえていたジャッキの引抜き操作は特に慎重に行うこと。また、セグメント組立時のシールドジャッキの解放パターンは組立中のセグメントリングの安定性を十分検討したうえで選定すること。

#### 【解説】

セグメントに“たれ”等施工誤差による変形を要因とした損傷が生じないように、組立には高精度で慎重な作業が要求される。とくに、Kセグメントに隣接するBセグメントは寸法も大きく、リング上部にあるため、“たれ”を生じやすいので注意が必要である。Kセグメントの挿入時にBセグメントを拘束しているジャッキを解放する場合は、ジャッキの解放の影響を検討し、慎重な作業に努める必要がある。

セグメントの組立効率を向上させる目的で、セグメントを軸方向に固定しているシールドジャッキの解放範囲を必要以上に大きくすると、シールドの後退やリング継手の目開き、セグメントの“たれ”が生じる可能性があるほかシールドの姿勢が大きく変化する可能性があり、注

意が必要である。

#### (4) - 3 裏込め注入工

裏込め注入はセグメントが早期に安定するように、テールボイドへの確実な充填をすみやかに実施すること。また、裏込め注入工の施工管理は、注入圧と注入量で行うこと。

##### 【解説】

裏込め注入工は、セグメントを固定し、地山の緩みと沈下を防ぐとともに、セグメントからの漏水防止、セグメントリングの早期安定やトンネルの蛇行防止等を図るために、すみやかに行わなければならない。

裏込め注入はシールドの掘進と合わせて実施する同時注入、または、掘進後すみやかに実施する即時注入を採用することが一般的である。セグメントの設計においては、裏込め注入材がテールボイドに速やかに充填され、セグメントを早期に安定させることを前提としている。このため、実施工においては設計の前提条件を踏まえテールボイドへの確実な充填を早期に実施することが求められる。

一般に裏込め注入工の施工管理方法は、注入圧管理によるものと注入量管理によるものがあるが、どちらか一方だけでは正確な充填状況を確認するのが難しい。このため、両方法を併用することで総合的に管理することが望ましく、実施工においては初期段階に注入量、注入圧の設定値を試行し、注入効果および地上、近接構造物等への影響を確認のうえ、裏込め注入工の施工管理値を決定する必要がある。また、地盤条件の変化、余掘りの状況等を考慮して、一定の区間ごとに確実に充填されていることを施工管理データ等で確認し、その結果を施工に反映させることが望ましく、注入量、注入圧が施工前の想定と大きく異なる場合は、直ちに原因を究明し、必要な対策を検討・実施することが重要である。

#### (4) - 4 シールドトンネルの浮上り

施工時には、テールボイド内におけるセグメントリングの浮上りに対して、セグメントの継手や裏込め注入方法を適切に選定し、施工時の安全性を確保するとともに、トンネルの浮上りについての確認を常に怠らないこと。

##### 【解説】

施工時に裏込めの注入時期が遅れると、テール脱出後のセグメントリングがテールボイド内で浮上り、セグメント本体および継手部に過大な力が作用する可能性がある。このため、シールドの掘進と同時あるいは直後の裏込め注入の実施に努めるとともに、テールクリアランスの計測や坑内測量の結果等からトンネルの浮上りが生じていないかを確認し、浮上りによるリング間のずれ等のトンネルの安全性に関わる問題が生じないように留意することが重要である。

施工設備等の関係で早期の裏込め注入ができない場合には前述した現象を十分に考慮したうえで、セグメント本体および継手構造の設計を行う必要がある。

#### (4) - 5 切羽圧力の管理

切羽圧力が急激な変動があった場合は、直ちにその原因を究明し、適切に対応すること。

##### 【解説】

シールド工法は、土砂の取込み過多やシールド前面の圧力変化によって切羽のバランスを失うと、地盤変位（地表面沈下・隆起等）を引き起こす可能性があるため、切羽圧力の管理は適

切に行わなければならない。

切羽における掘削土の状態を直接見ることのできない密閉型シールドでは、切羽圧力、排土量、シールド負荷（シールドジャッキ推力、カッタートルク等）を計測することで、施工中の切羽の状態を間接的に確認している。とくに、切羽圧力に大きな変化が確認された場合は、シールド施工になんらかの異常があった可能性を示すものと考えることができる。

このため、切羽圧力の常時計測管理を行い、急激な変動があった場合は、重大な事故につながらないように、ただちに原因を究明し、適切な対応を迅速に行う必要がある。

また、土圧式シールドにおいては、切羽圧力はシールド機停止状態の圧力を最低値として、掘進による変動を考慮して安定した状態を保っていることが切羽圧力の管理において重要であり、排土量が多すぎると掘進中に停止時の切羽圧力を下回ることがあるため、切羽の安定を確保するうえでも切羽圧力の変動に十分に留意する必要がある。

#### （４）-６ 線形管理

線形管理は、要求される線形の誤差の範囲に収まるよう的確に実施する必要があるとともに、線形管理に問題が生じた場合は、急激なシールドの姿勢の変化や過大な余掘りを避け、計画的かつ緩やかに行うこと。

##### 【解説】

シールドの線形管理は、トンネルの使用目的や用地条件等によって求められる精度が異なるのが一般的である。一方、シールドは極めて大きな質量を持つ機械であり、地盤条件の変化やシールドの‘くせ’等によって、計画通りのトンネル線形からずれることがあり、適宜、蛇行修正を行うこととなる。

このとき、急激な蛇行修正を行うと、過大な余掘りやシールドジャッキの片押しを行うことによって、セグメントに損傷を与える原因となる。さらに、シールドのテールとセグメントとのクリアランス（テールクリアランス）が不足し、セグメントリングに偏荷重が作用することも考えられる。

また、急曲線施工においては、シールドが計画線形に沿って円滑に掘進することができるようにコピーカッター等を用いて適切な余掘りを行うことが重要である。余掘りが過大な場合には周辺地盤に変状を生じさせる原因となり、過小な場合にはシールドの姿勢制御が困難になることやジャッキ推力が増大すること等によってセグメントに損傷を与える原因となる。

近年、硬質地盤での工事が増加しているが、硬質地盤ではあらかじめシールドが通過する形状に合わせて、コピーカッター等を用いて地盤を掘削しておく必要があり、線形形状と掘削軌跡を３次元で把握し、精度の高いシールドの推進を行う必要がある。このためには、可視化やシールド推進の自動化等より高度な手法が必要である。また、シールドの高速化が進んでいるが、高速化されたシールドでは、より速やかな対応が必要であり、各種の機械データを含めて迅速に総合的な判断、運用ができるシステムを構築することが望ましい。

#### （４）-７ テールグリスの管理

テールからの漏水や裏込め注入材の侵入を防止するため、テールグリスは、適切な材料を使用して、掘進前にテールブラシに確実に充填するとともに、掘進中はその量と圧力を適切に管理すること。

##### 【解説】

テールシールの止水性を確保するためには、適切なテールグリス材を使用し、掘進前に十分な量を確実にテールブラシに練り込むように充填するとともに、掘進中はテールグリスをテールシール内に封入し、その圧力を適切に管理することによって地下水や裏込め注入材の侵入を防止することが重要である。このとき、テールグリスの圧力は地下水圧や裏込め注入圧より高く保たれることが必要である。

小断面シールドで一般的に行われている、セグメント注入孔から断続的にテールグリスを補充する方法では、テールグリス圧力を常時モニターし管理することが難しい。したがって、自動給脂装置等の確実に圧力が保持できる装置を設けることが望ましい。

また、テールグリスの材質によっては裏込め注入材と反応して硬化する性質をもつものもあることから、テールグリスの材料選定にあたっては、裏込め注入材と混合した場合の反応を確認する必要がある。

#### (4)-8 排土量管理

掘削土砂の過取り込みは、周辺地盤を緩めてシールドの掘進制御を困難にすることにつながる。一方、取込み不足はジャッキ推力が上昇してセグメントに作用する施工時荷重が増大する。このため、掘進時の土砂の取込み量の管理を適切に行い、過取込みや取込み不足を防止すること。

##### 【解説】

排土量管理はシールドの形式や掘削土の運搬方法によって適用可能な手法が異なるため、それぞれの施工設備に応じて適切に実施する必要がある。

掘削土の過取込みが発生した場合、地表面沈下等の周辺への影響が大きくなるばかりでなく、シールドの切羽周辺の地盤を緩め、シールドの姿勢制御を困難にすることが想定される。一方、取込み不足が発生した場合には、ジャッキ推力が上昇しセグメントに作用する施工時荷重が増大することが想定され、セグメントの損傷要因となる。

このため、海底シールド等において周辺地盤の沈下が問題とされない場合においても適切な排土量管理を行うように努めなければならない。

とくに土圧式シールドでは、スクリーコンベヤの回転数によって排土量を管理する方法がとられることが多い。チャンバー内の掘削土の塑性流動化が適切に管理されて、安定した掘削が行われている場合には一定の精度を確保した排土量管理が可能である。しかし、地山条件は常に変化し、流動化の状態は変わるので、地山条件等に応じた補正が必要である。

このため、排土量の管理は、スクリーコンベヤの回転数のみに頼らず、他の方法と併用して、精度の維持に努めることが必要である。

#### (4)-9 シールドの姿勢制御

セグメントの線形とシールドの姿勢を常に監視し、セグメントとシールドのテールとの間に適切なクリアランスが確保できるように管理すること。

##### 【解説】

シールドの向きがセグメントの線形とずれることにより、テールクリアランスが均等でなくなりテールクリアランスに大小が発生する。テールクリアランスが極端に小さくなった側では、テール部でセグメントとの競りが生じ、セグメントリングに偏荷重が作用することとなる。この偏荷重は、一般的にセグメントの設計においては考慮されていない荷重であるため、セグメ

ントリングに過大な影響を与えないように施工管理しなければならない。

テール部に偏荷重が発生したことを想定した三次元の構造解析では、K セグメント周辺に大きな断面力が発生し、セグメントリングが不安定になる可能性が確認されている。このことから、セグメントリングに過大な偏荷重が作用しないようにシールドの姿勢を制御し、適切なテールクリアランスを確保できるよう管理する必要がある。

一方、掘削土の過取込み等によって周辺地盤を大きく乱した場合には、シールド周辺の地盤が不安定となり、シールドの姿勢制御に大きな影響を与えることが予想される。このような姿勢の変化に対して、シールドジャッキの操作（下方のジャッキを偏って使用することによってノーズアップを図る）によって姿勢を修正しようとした場合、トンネル下部のセグメントに、シールドジャッキの片押し推力が作用するとともに、トンネル上部のテールクリアランスが急激に減少して偏荷重が発生する可能性がある。したがって、急激な姿勢の修正を行わずに、掘進線形に合わせてセグメントリングを組立てながら徐々にシールドの姿勢と線形を修正することが重要である。

シールドの姿勢の管理に用いるピッチング計やローリング計等の計測機器の値は、誤差を含むことがあるため、データのキャリブレーションを行いその精度を維持する必要がある。そのため、測量と計測機器のデータの差に留意することが必要である。

#### (4) -10 施工管理全般

シールド工事の施工においては、常にシールドとセグメントの挙動や出来形に留意し、異常な現象が確認された場合には、その原因究明に努め、必要な対策を講じること。

##### 【解説】

シールド工事において、設計時に設定したシールドとセグメントの性能を適切に発揮させることが施工の安全性を保つために必要である。

シールドには多くの計測機器が設置され、逐次データが得られるのが一般的である。これらのデータを迅速に評価し、シールドのパフォーマンスを常時確認しながら施工することが重要である。セグメントについては真円度の測定結果のほかに継手の目開きや目違いの程度、コンクリートのひび割れや鋼材の過大な変形、漏水等が生じていないかを目視で確認することが重要である。

シールドやセグメントに異常が確認された場合には、ただちに施工を中断するなどの安全上の措置をとったうえで、その原因を究明することに努め、必要な対策を講じて施工を行う必要がある。

#### (4) -11 避難

漏水、出水等の工事上の不具合や異常事態が発生した場合における避難基準を定め、遅滞なく適切な避難が行えるようにすること。

##### 【解説】

地盤を対象とするシールドトンネル工事では、調査や条件の把握に限界があり、不測の事態が生ずることを避けられない場合がある。不具合や異常事態が生じた場合、修復、復旧に努める必要があるが、場合によっては、避難の機会を失うことになる可能性がある。したがって、あらかじめ避難すべき状況を定め、迅速な避難ができるように計画しておく必要がある。