

シールドトンネル施工技術安全向上協議会 中間報告

1. 概 要

当協議会は本年 2 月に倉敷市で発生したシールドトンネル工事現場での事故を受けて、シールドトンネルの設計・施工技術について、安全面等の向上を図るため、技術的な検討を行うことを目的に、8 名の専門家からなる委員及び行政委員により本年 4 月 27 日の設立以来これまでに 3 回の協議会を開催し、倉敷市の事故現場の調査、関係者提供資料の分析および聞き取り調査を実施してきた。

まだ、十分な物証が得られていないため、現段階では、倉敷市の事故原因のメカニズム解明には至っていないものの、事故の要因となりうる事項の洗い出しを行い、その事実関係について引き続き調査をしているところである。

一方、シールドトンネル工事については、年間 60 件程度（施工延長 100km 程度）が新たに発注され、平均 3 カ年程度の工期で工事が実施されている状況にある。

当協議会としては、倉敷市の事故に関してこれまでに把握した情報を元に分析・整理した結果に基づき、全国のシールド工法を用いた設計・施工中の現場に対して、設計・施工における注意事項を中間報告として公表するものである。

2. 倉敷市の事故概要

本年 2 月 7 日に岡山県倉敷市にある JX 日鉱日石エネルギーの工場内において、海底パイプラインを通すためのシールドトンネル工事中に発生した事故である。

この事故は直径 4.95m の横坑を、立坑から約 160m 付近の海底下をシールドマシンで施工中に、短時間に海水等が流入し、立坑まで水没したものである。この事故で、坑内で作業中の 6 名の作業員のうち 5 名の作業員が死亡した。

3. 協議会の検討経過

当協議会として、本事故に関し、以下の(1)～(3)について検討を実施している。

- (1) 事故に至る可能性を持った要因
- (2) 水の流入経路
- (3) トンネル坑内の崩壊に至ったメカニズム

そのうち 「(1)事故に至る可能性を持った要因」について、これまでに把握した情報に基づき、内容を取りまとめた。

(2)、(3)については引き続き検討中のところであり、現段階で当協議会としての見解を出すに至っていない。

4. 事故現場の状況

これまでに確認された現場の主な状況は、以下の通りである。

- ① 作業記録等から No. 112R 組み立て作業中に事故が発生したものとみられる
- ② 海底に直径約 20m のすり鉢状の穴が確認された。
- ③ トンネル内を撮影した水中カメラの画像から、No. 109R まではリング形状を保っている。
- ④ トンネル内から回収されたセグメントの残骸は、No. 110R, 111R ののものであると推定される。このことから、No. 110R, 111R が崩落して大出水が生じたものと考えられる。

(参考)

・No. 109R とは横坑のセグメントリングのうち発進立坑から数えて 109 番目のリング。

5. シールドトンネル設計・施工中の現場への注意事項

全国的设计・施工中の現場に対する注意事項として^{別紙}のとおり、取りまとめ公表するものである。

なお、この内容については、これまでに現場等から得られた情報をもとに判断しており、今後新たな情報等が判明した場合には、追加・変更もあり得るものである。

6. 今後の予定

今回、可能性のある要因を幅広く注意事項としてとりまとめた。今後は明らかになっていく物証をもとに漏水の流入経路など把握に努め、トンネル坑内が崩壊に至ったメカニズムを整理していく。

以上

シールドトンネル設計・施工中の現場への注意事項

倉敷市の事故の設計・施工に関して、これまでに協議会として把握した事項をトンネル標準示方書（シールド工法・同解説）等現行の技術基準に照らしてみたところ、基準を明らかに逸脱している事項は確認できていない。

しかし、コスト低減・工期短縮を優先したと考えられる設計と様々な現場条件の中での施工により、設計で想定できていない不確定な要素が事故の誘因となっていると考えられる。

当協議会で着目した事故につながる可能性のある要因などに基づき、全国の設計・施工中の現場に対する注意事項として以下に列記する。

1. 計画

a. 現場の条件から、万一事故が発生した場合に想定される被害の状況を考慮して、リスク管理に配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の全てを設計で考慮することは困難である。また、シールドトンネルを施工する現場の条件によって、万一事故が発生した場合の被害の度合いが大きく異なると考えられる。とくに、海底下で施工するシールドトンネルに事故が発生した場合には、大量出水など大きな被害が発生することが考えられる。

そこで、現場条件に応じたリスクを想定し、適切な安全性を有する設計を実施するとともに、許容したリスクに適切な対応が可能となるよう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ことで、万一の事態に対するリスク管理を行う必要がある。

2. セグメント

a. セグメント本体と継手は、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、土圧など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、既に組み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。

覆工の設計にあたっては、対象トンネルの施工状況を十分考慮したうえで、地盤条件の他に、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途中における安全性と機能が確保されるように配慮すること。

1) セグメント

セグメントの設計は、施工時荷重のほか、裏込め材の注入時期、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こと。

2) セグメント継手

セグメント継手は、締結力が入らない継ぎ手など、継手の構造形式によってはシールドジャッキによる軸方向の拘束力の程度とともに、テールシールやテールグリス圧による拘束圧、シールドテール部におけるセグメントかかり代の大小による作用水圧の程度によって、K セグメントの抜け出しや脱落が生じる可能性があるため、これらを十分考慮したうえで継手の構造形式・強度を決定することが重要である。特にテールボイドへの裏込め材の充填条件等に配慮した設計を行うこと。

3) リング継手

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対して配慮したうえで、継手の構造形式や強度を決定することが重要である。特に、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、トンネル軸方向以外に引張られることに配慮した設計を行うこと。

b. 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して検討すること。

【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、施工誤差等に不明確な点（設計では予測できないこと）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、十分検討したうえで決定すること。

c. 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、施工性の他に、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などでの取り扱いやすさが低下することがあるが、型枠費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。このため、運搬性や取り扱いに支障がなければ分割数を少なくする傾向にある。

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のみを優先せずに K セグメントの安定性に配慮して決定すること。

d. 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こと。

【解説】

K セグメントは、フープ圧縮力等によりリング継手の目開きが生じることがあり、この目開きが漏水等の原因となるため、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、施工途中においてもリング継手の締結力、シール材による摩擦力の低減等を十分考慮し、リング継手に目開きが生じないように十分配慮すること。

また、軸方向挿入型 K セグメントにあつては、K セグメントの挿入が困難になると、セグメントに損傷を与え漏水の原因となる可能性があるため、形状（挿入角度、継手角度）・寸法は、施工性を含めて質量、および継手の種類等に十分配慮すること。

e. 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のセグメントの設計結果等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、一般に構造設計等で求めるが、施工時においては、施工時荷重の大きさと作用状態、発生応力、施工誤差等に不明確な点（設計では予測できないこと）もあるため、設計荷重に対する許容応力度の照査のみによらず、曲げひび割れ発生時に引張鉄筋が降伏点を超えないこと、曲げモーメントのみが作用した場合やせん断力が作用した場合のセグメントの破壊形態が脆性破壊とならないことを確認するとともに、類似工事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。

f. RC セグメントのシール溝は、適切な位置と寸法・形状を検討すること

【解説】

RC セグメントのシール溝は、シール材の接面応力により、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。特に水膨張性シール材を採用する際は、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・種類は、セグメントが損傷しない、かつ、十分な止水効果が得られるように配慮すること。

g. RC セグメントのシールドジャッキ偏心量に対する検討を行うこと。

【解説】

セグメントの厚さが薄い場合には、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を加味して、セグメント軸方向の座屈に対する安定を検討する必要がある。特に、セグメントの厚さが薄く、かつ、セグメント幅が広い場合には、注意すること。

3. シールド機

a. 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、間隙水圧などを総合的に検討し、十分な止水性が確保できるよう配慮すること。

【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などのトンネル内への流入を防止するための性能を有していなければならない。

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、トンネル線形などを考慮して、特に河川、海底横断の時は十分な止水性が確保できる構造、機構、段数となるよう配慮すること。また、テールシールは施工途中において交換が困難であるため、耐久性を考慮するとともに、ワイヤーブラシとテールシール内に裏込め材が入らないように、適切なテールグリス材の選定と給脂方法（注入圧の確保等）についても検討すること。

b. スクリ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】

泥土圧シールドの排土機構であるスクリーコンベヤは、地下水がシールド内へ噴発しないように排土圧力を保持するための重要な設備である。

このため、地下水位、掘削地盤の透水性、土質等から適切なスクリーコンベヤを選定するとともに、止水性等の圧力保持能力の確保が必要であり地盤条件、その他トンネルがおかれている諸条件を考慮し、緊急時や掘進中の停電時に備えた噴発防止対策として、排土口に緊急遮断装置等の設置を検討すること。

c. 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、実績等に配慮して総合的に検討すること。

【解説】

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、テール外部に位置するセグメントには裏込め注入圧、水圧等が複雑に作用するため、この荷重状況によっては、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）、実績や施工のバランス等に配慮すること。

d. 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てが困難になるばかりか、テールを抜け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。この傾向は特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。

新規に組み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形状が新規に組み立てるセグメントリングの組立精度に影響を与える。このため、セグメント組立時にシールドジャッキを解放することによって既設のセグメントリングが変形することがないように形状保持装置を設けることがある。

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有さない自立性の低いセグメントを使用する場合は、トンネル規模、地盤条件、施工方法などに配慮して、その設置の可否の判定を慎重に行うこと。

e. シールドトンネル内の電気設備は、漏水等を想定して防水性等に十分配慮すること。

【解説】

シールドトンネル内の電気設備は、シールド動力用だけでなく、緊急時の非常用設備、防災設備等の正常な動作が求められる。

このため、シールドトンネル内の電気設備は、施工中における漏水や万一の出水の際にも問題が生じないように防水性等に十分配慮すること。

f. シールドテールやスクリーコンベヤは、動力電源が停止した場合も、十分な止水性が確保できるよう配慮すること。

【解説】

シールドテールやスクリーコンベヤから漏水や出水があると、種々のトラブル・事故を誘発する要因となる可能性があるため、当該部位はシールドトンネルの施工中の止水対策として重要である。

このため、動力電源が停止した場合を含めて、シールドジャッキの後退、スクリーコンベヤの噴発など、漏水や出水の起こりうるあらゆる条件を想定し、これに対応できる方策を事前に検討すること。

g. 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ーをつけてトンネル縦断の切羽側から挿入するため、テール内でのスペース確保が必要である。

K セグメントの挿入代が短くなるとセグメント組立時におけるセグメントの損傷、組立精度の低下など、覆工の品質に支障をあたえることが考えられるため、適切な施工性が確保できる長さとなるよう十分配慮すること。

h. 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座屈に対する安定性を確認すること。

【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。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座屈しやすくなることから、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座屈に対する安定性を確認すること。

特に、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い長くなることから、十分注意すること。

4. 施工

a. 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、特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。また、リング継手の目違いは、セグメントがジャッキ推力を受けたときにひび割れ発生要因となるため、セグメントの組立にあたっては注意が必要である。特に軸方向挿入型 K セグメントは、フープ圧縮力やシール材反発力等によって切羽側へ押し出されることがあるため、目開きが生じないように努めることが必要である。

このため、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。また、K セグメントの挿入時に滑材を使用する場合は、セグメント継手面の摩擦力が低下し、セグメントの押し出しに対する抵抗力が低下することに配慮すること。

b. セグメントの組立ては、“たれ”ができるだけ生じないように、形状・寸法、質量、継手の種類、形状保持装置の有無等に配慮すること。また、K セグメントの挿入時のジャッキ操作についても十分配慮すること。

【解説】

セグメントは変形を要因とした損傷が生じないように、高精度で慎重な組立が要求される。特に、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。

このため、セグメントの組立は“たれ”ができるだけ生じないように、形状・寸法、質量、継手の種類、形状保持装置の有無等に配慮すること。特に、K セグメントの挿入時に B セグメントを軸方向に拘束しているジャッキを解放する場合は、慎重な作業に努めること。

c. 裏込め注入はセグメントの設計時に想定した注入時期・位置を考慮して実施すること。

【解説】

裏込め注入工は、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。

このため、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、いずれの注入方式においても裏込め注入材がテールボイドに充填されていることが前提となっている場合が多いため、裏込め注入は、セグメント設計時の注入時期と注入位置を確認のうえ、適切かつ確実に実施すること。

d. 裏込め注入工の施工管理方法は、注入圧と注入量との併用管理とすること。

【解説】

裏込め注入工は、覆工の設計に影響を与えることもあり、テールボイドへの確実な充填が求められる。一般に裏込め注入工の施工管理方法は、圧力管理によるものと量管理によるもの

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、実施工において注入量、注入圧ともにある程度の試行により、注入効果、他への影響を確認のうえ、裏込め注入の施工管理方法を決定すること。また、一定の区間ごとに確実に充填されていることの確認を行い、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、直ちに施工を中止して原因を究明すること。

e. 切羽圧力に急激な変動があった場合は、直ちにその原因を究明すること。

【解説】

シールド工法は、切羽バランスを失うと、土砂の取込み過多やマシン前面の圧力上昇により、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はできない密閉型シールドでは、土圧、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。また、切羽圧力を管理する中で変化があった場合は、シールド施工になんらかの異常があったことを知ることでもある。

このため、常時計測管理を行い、切羽圧力に急激な変動があった場合は、切羽の崩壊、土砂の取り込み過多、漏水等が考えられ、重大な事故につながる恐れもあることから、直ちに施工を中止して、原因を究明すること。

f. 線形管理は、急激な姿勢制御や過大な余掘りを防ぐために、トンネル全体の線形を総合的に考慮して計画的に行うこと。

【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など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、シールド機は極めて大きな質量を持つ機械であり、不均質な地中を掘削することから、計画通りの線形を求められる精度でトンネル線形を管理するために、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おうとすると、過大な余掘りを行ったり、シールドジャッキの片押しを行うこととなり、セグメントの安定性に影響を与えることになる。さらに、シールド機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想定される。

このため、トンネルの線形管理は、急激な姿勢制御や過大な余掘りを防ぐために、トンネル全体の線形を考慮して計画的に徐々に行うこと。

g. 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】

セグメントの組立時にシールドジャッキを解放する場合、シールド機が後退しないようにするとともに、シールド機内のセグメントを安定させるため、組立対象以外のセグメントピースは、原則としてシールドジャッキにより軸方向に固定させる必要がある。

このため、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、シールド機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ため、シールドジャッキの操作パターンおよび手順は、これらの影響を十分検討したうえで選定すること。

h. テールからの漏水や裏込め注入材の浸入を防止するため、テールシール内のテールグリスは、適切なテールグリス材を使用し、その量、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、テールグリスをテールシール内に封入し、その圧力によって地下水や裏込め注入材の浸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。

一般的には、定期的にテールグリスを補充して量と圧力を維持するが、地下水圧が高い場合には自動給脂装置を採用することによって、常時テールグリス圧を管理することが望ましい。自動給脂装置を採用しない場合にも、テールグリスの圧力を常時監視し、圧力を維持すること。

5. 調査

a. 海／河川／湖沼を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い、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。ただし、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、湖沼等を掘進するシールドトンネル設計・調査には、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すること。

b. シールドトンネルの地質調査は、掘進対象地盤の地質変化を把握するため、ボーリング調査を十分に実施すること。また、設計水圧を正確に把握するため、被圧水および間隙水圧の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の難易度を大きく左右するため、その調査を入念に行う必要がある。特に、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、配慮する必要がある。

このため、既存の土質調査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、ボーリング調査を追加するなどして、正確な地質の状態を把握すること。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、被圧水の有無の確認と水圧、および間隙水圧の調査を実施すること。

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、礫分の多い地盤など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、十分な注意が必要である。このような土質条件の場合には土の粒度分布などに基づいて崩壊性の地盤であるか否かについて慎重な判断をし、崩壊性の地盤であると判断される場合には覆工の設計や施工計画に反映すること。

以上