

12. 推定される災害発生原因と再発防止対策

12.1 推定される災害発生原因

本災害は、設計・計画上及び施工上の不具合が複合的に重なり、111リングのKセグメントが抜け出すことを契機として、最終的に111、110リングが崩壊したことで発生したと推定される。

災害発生に至った要因、原因及びその背景は、設計・計画から施工までにわたった次の事項が挙げられる。

12.1.1 設計・計画時

(1) シールドマシン

- ① 土被りの浅い海底下のトンネル工事において、テールシールが2段であったこと。

施工途中にテール部から漏水があったことが報告されており、テールシールが2段であったことが、テール部の止水性を低下させる要因の一つとなったと考えられる。

- ② シールドマシンの全長が短く、テール部が短い仕様であったこと。

このため、セグメントが幅広であったことも加わってシールドマシンのテール部に対するセグメントのかかり代が短くなるとともに、KセグメントとBセグメントのテーパ部分の角度も比較的大きくなり、本災害を誘発する要因の一つとなったと考えられる。

(2) セグメント

- ① セグメントの厚さが薄く、リング継手のコンクリートの被りが薄かったこと。

このため、被りが薄い方向へ力が加わった際にリング継手のボルトインサート周囲のコンクリートがはく離することにより容易に継手部が破壊した。また、ボルトインサートが主筋と主筋の間に設置されていなかったこともボルトインサートの変形、ボルトインサート周囲のコンクリート破壊等を助長したものと考えられる。

- ② セグメントが弧長大、幅広であったこと。

このため、セグメント組立て時にジャッキを引き抜かなければならない本数が増え、セグメントの抜け出しや垂れ下がりが発生し、割れ、欠けの要因ともなったこと。

- ③ セグメント継手をボルト等による堅固な構造とせず、樹脂パイプによりガイドさせた突合せ構造としたこと。
- ④ セグメントの寸法が薄肉、弧長大、幅広であり、加えて、セグメント継手も

樹脂パイプによりガイドさせた突合せ構造であるにもかかわらず、**K**セグメントの抜け出しの可能性について十分に検討していなかったこと。なお、**K**セグメントの抜け出しについては、土木学会発行の『2006年制定 トンネル標準示方書 シールド工法・同解説』等の基準類（以下、「基準類」という。）に明確な規定はないが、標準的なセグメントの寸法を逸脱する場合には、『耐久性や施工時荷重への対応等についても慎重に検討する必要がある』と言及している。

12. 1. 2 施工時

(1) シールド掘進

- ① 線形管理上の重要なデータである i) テールクリアランス、ii) 測量データ（セグメント位置）、iii) シールドマシンの位置偏差（掘進管理システムデータ）の値が異なる傾向を示していたにもかかわらず十分な照査を行っていなかったこと。

テールブラシにおいて裏込め注入材等が固着したためテールクリアランスのデータはほとんど変化がなく、掘進管理システムのデータは右に向かっていたが、測量データが左に向かっていたため、設計計画線に戻そうとよりシールドマシンを切羽に向かって右に向けていた。また、シールドマシンよりもセグメントは相対的に上方にずれていたが、シールドマシンを上に向けようとしたため、結果としてシールドマシンテールブラシがセグメント上部と競ったこと。これにより、**K**セグメントが抜け出すことを誘発したこと。

- ② テールグリスを油圧ポンプにより手動で注入していたが、注入量及び注入圧を管理していなかったこと。
- ③ テールグリスに、裏込め注入材と配合が類似した止水材 **B** を用いたことで、裏込め注入材がテールシール内に入り込んできた際、止水材 **B** と裏込め注入材が固結してテールブラシ内で固化した可能性があること。

(2) セグメントの組立て

- ① 計測データに基づいた線形管理を適切に行っていなかった可能性があり、それに加えて、裏込め注入材がテールブラシに固着したことにより、シールドマシンのテール部とセグメントとのクリアランスが減少し、セグメントの組立精度に影響を与えたこと。

このため、85リング以降、セグメントが設計計画線よりも左方向にさらにずれており真円に組めていなかった可能性がある。セグメントの割れ、欠け、垂れ下がり等の1つの要因となった可能性も考えられる。

- ③ 85リング以降、セグメントとシールドマシンの位置偏差の値が異なる傾向を示していたにもかかわらず、テーパーセグメントを挿入しなかったこと。

このため、組み上げられたセグメントが切羽に向かって左方向に向かったま

まとなり、右に向けたシールドマシンのテール部との競りが発生したこと。

なお、予め用意していたテーパセグメントは 20 リングで、製造したリング全数の 557 に占める割合は 3.6% となっており、基準類において示されている「直線区間に使用するリング数の 3% 程度」を上回っていた。しかし、約 87m 掘進時点（62 リング）ですでに 8 リングテーパリングを使用していたことから、テーパセグメントをできるだけ使用しないようにしていた可能性がある（テーパセグメントを挿入したリングは、5、6、24、32、39、53、54、62 リングである。そのうち、5、6 リングの K セグメントはテーパセグメントではなく標準セグメントを挿入していた。）。

- ④ 112 リングの B2 セグメントを挿入するため、上部のジャッキ 9 本（26 本中）を引き抜いたことで、シールドマシンがテール部を下げるように変位したこと。

このため、シールドマシンのテール部と組み上げられた上部のセグメントとの競りが発生したこと。これにより、K セグメントが抜け出すことを誘発したこと。

- ⑤ K セグメントの挿入を容易にするため、セグメントに水をかけ、また潤滑剤をシールド材に塗布していたこと。

これによりセグメント同士の摩擦力が減少し、セグメント間が樹脂パイプのガイドだけだったため、K セグメントが抜け出したこと。これが本災害の契機となったものである。

- ⑥ セグメントの組立時又は組立後に頻繁にセグメントの割れ、欠け等が発生していたが、逐次の補修に留まり、その原因を検討・究明した上で、対応していなかったこと。

（3）裏込め注入

3 リング後方（109 リング）又は 4 リング後方（108 リング）から裏込め注入材を充填していた。そのため、1～2 リング又は 1～3 リング後方（111～110 又は 111～109 リング）のリングは、水圧のみが作用する状態となり、地盤反力が得られず周囲から拘束されていない不安定な状態となっていたこと。

また、浮力により、シールドマシンのテール部と組み上げられた上部のセグメントとの競りも発生していたこと。

（4）避難訓練及び退避

- ① 避難訓練を適切な時期に実施していなかったこと。
② 12:06 以降、出水が始まった時点で、作業員を直ちに退避させなかったこと。

12.1.3 その他

- (1) 線形管理が適切に行われていない場合等にかかる外力（基準類では検討されていない外力）に耐える余裕代がなかったこと。

- (2) 設計・施工の安全性について、発注者が請負者以外の第3者のシールドトンネルの専門機関に客観的な確認を求めていなかったこと。

12.2 同種災害の再発防止対策

同種災害の再発防止対策として、以下の事項が挙げられる。

12.2.1 設計・計画時

設計者は、設計・計画に当たっては現場の諸条件を的確に判断するとともに施工体制等を十分考慮して設計を行う必要があること。

(1) シールドマシン

- ① 土被りの浅い河川下、海底下等を掘削する場合、裏込め注入材や地下水のシールドマシン内への流入を防止するため、テールシールを3段以上設ける等十分な止水性を確保するとともに、それを維持できる構造すること。
- ② 土被りの浅い河川下、海底下等を掘削する場合、テールグリスの注入を自動注入方式にする等、テールグリスが十分に充填されるよう注入圧力、注入量を管理できる方法とすること。
- ③ 土被りの浅い河川下、海底下等を掘削するトンネル工事において、シールドマシンの直径が十分大きく、セグメント間を締結しない場合、セグメントの組立時にリング構造を保持できるような設備対策（形状保持装置等）も検討すること。

(2) セグメント

- ① 完成した後の安全だけでなく、施工中の安全を考慮の上、セグメントを設計すること。
- ② セグメントの形状・寸法の決定にあたっては、適切な構造計算のほか、類似工事等の実績も参考にして検討すること。類似工事等の実績を逸脱する場合には、その影響を十分に検討すること。
- ③ リング継手、セグメント継手を含むセグメント覆工は施工時を含め安定性を確保できる構造とすること。
- ④ **K**セグメントの抜け出しの可能性を十分に検討すること。

12.2.2 施工時

施工者は、設計の条件を十分理解して施工に携わる必要のあること。

(1) シールド掘進

- ① シールドマシン及びセグメントの位置座標を的確に把握するため、適宜測量を実施すること。
- ② 掘進管理のための各種データを常時計測することにより、セグメント及び継手に対して過度の荷重がかからないよう適切に線形管理を行うこと。また、適切なテールクリアランスの維持に留意すること。
具体的には、シールドマシン及びセグメントの設計計画線からの鉛直偏差、左右偏差を常時モニタリングし、鉛直・左右偏差に上下限値を設け、上下限値内にシールドマシン及びセグメントの鉛直・左右偏差が維持されるようにすること。
- ③ 計測データに異常があった場合には直ちに施工を中止して原因を究明し、対応策を講じること。
- ④ テールグリスの材料を適切に選定し、注入量及び注入圧力を適切に管理すること。

(2) セグメントの組立て

- ① 上記(1)②のセグメントの線形管理において上下限値を超過する前に、テーパーセグメントを適宜挿入すること。
- ② セグメントの組立誤差を最小にし、真円になるよう組み立て、引き抜くジャッキの本数を最小限にとどめること。
- ③ セグメント継手の締結力がない場合、潤滑剤等を用いたセグメントの挿入を行うと、セグメント継手面の摩擦低減により、セグメントリングの形状保持が困難になる可能性があることを認識の上、潤滑剤等の使用を最小限にとどめること。
- ④ Kセグメントの抜け出しが懸念される場合には、必要に応じて物理的な抜け出し防止措置を講じること。
- ⑤ セグメントの組立時に割れ、欠け等が頻発する場合は、その原因を究明し、対応策を講じること。

(3) 裏込め注入

裏込め注入は、同時注入又は即時注入により実施し、遅れて注入することのないようにすること。また、裏込め注入は、注入圧力と注入量の双方を管理しつつ、実施すること。

(4) 避難訓練及び退避

- ① 避難訓練を適切な時期に実施すること。
- ② 出水等による労働災害発生の急迫した危険があるときは、直ちに作業を中止

し、人命確保を最優先として速やかに労働者を安全な場所まで退避させること。

12.2.3 その他

- (1) 線形管理が不十分な場合等にかかる可能性のある施工時荷重に対して、トンネルが脆性的に破壊することがないように、冗長性（リダンダンシー）を考慮した設計・計画とすること。
- (2) 発注者にシールドトンネルの専門家がない等、十分な知見がない場合には、発注者は、第3者のシールドトンネルの専門機関から設計・施工方法の安全性について、あらかじめ確認を受けることが望ましいこと。