

山岳トンネルにおけるリスク管理と低減対策に関する提言

芥川 真一¹・山本 雅広²・木梨 秀雄³・寺戸 秀和⁴・山田 浩幸⁵

¹正会員 神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: cadax@kobe-u.ac.jp

²正会員 中央復建コンサルタンツ (株) 総合技術本部 道路系部門 (〒533-0033 大阪府大阪市東淀川区東中島 4-11-10)
E-mail: yamamoto_m@cfk.co.jp

³正会員 (株) 大林組 生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟)
E-mail: kinashi.hideo@obayashi.co.jp

⁴正会員 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大渕 3154 番地)
E-mail: terato@cmi.or.jp

⁵正会員 (株) 鴻池組 大阪本店 寺山トンネル工事 (〒788-0784 高知県宿毛市山奈町山田 1325-1)
E-mail: yamada_hy@konoike.co.jp

山岳トンネルの建設にあたり、計画・設計・施工・維持管理の各段階においては様々な形態のリスクが内在しており、近年の山岳トンネルを取り巻く環境の変化から、都市部での施工やトンネル断面の大断面化、特殊条件下での施工など、一旦事故が発生するとその影響はより多大なものとなることが懸念される。土木学会山岳トンネルのリスク低減に関する検討部会（部会長：神戸大学大学院 芥川教授）では、計画・設計・施工・維持管理といった山岳トンネルのライフサイクルにおける種々のリスクに関して、これまでの施工実績（既発表文献）をもとに、「押出し・崩壊リスク」、「地質環境リスク」、「維持管理リスク」について、リスク低減に向けた対策について検討を実施し、ライブラリーにまとめる予定である。

Key Words: mountain tunnel, squeezing and collapse risk, geological environment risk, maintenance risk, risk lowering

1. はじめに

山岳トンネルの建設にあたり、計画・設計・施工・維持管理の各段階においては様々な形態のリスクが内在しており、近年の山岳トンネルを取り巻く環境の変化から、都市部での施工やトンネル断面の大断面化、特殊条件下での施工など、一旦事故が発生するとその影響はより多大なものとなることが懸念される。

このような背景を踏まえ、土木学会トンネル工学委員会 技術小委員会内に「山岳トンネルのリスク低減に関する検討部会（部会長 神戸大学 芥川教授）」を設置し、トンネルライブラリーの発刊に向け活動を行っている。

以下に部会における検討内容の一部を紹介する。

2. リスクの分類と対応策

(1) リスクの分類

現在検討中のトンネルライブラリーでは、これまでの施工実績（文献）の調査結果を参考にして、リスクの分類とその対応方法を分析・評価し、そこから学べるべき教訓を抽出するとともに、今後の山岳トンネルの建設、維持管理におけるリスク相関、リスク低減に向けた対応策をまとめ、事業者、実務者の役に立つ提言を行っている。

(2) リスクへの対応策

リスクに対する対応としては、図-1に示す4つの対応が考えられる。

- ① リスク回避: リスクを抱えた状態を避けるもので発生確率が高く対策が困難な場合に対応
- ② リスク低減: リスクの発生確率を下げる、もしくはリスク発生時の影響度を小さくする対応
- ③ リスク移転: リスクを他に転嫁するもので例えば

工事保険による対応

- ④ リスク保有: リスクを甘受し発生した場合に対応する。発生確率、影響が小さい場合の対応

山岳トンネルにおける想定リスクのうち、計画・設計・施工・維持管理といった山岳トンネルのライフサイクルにおける種々のリスクに関して、これまでの施工実績（既発表文献）をもとに、リスク低減の効果が期待できる検討項目として、具体的には、「押し出し・崩壊リスク」、「地質環境リスク」、「維持管理時のリスク」の3つの大項目を抽出した。

以下にそれぞれのリスク関するリスク管理について示す。

3. 山岳トンネルにおけるリスク管理

(1) 押し出し・崩壊に関するリスク管理

押し出し・崩壊のリスク要因と対策への提言について表-1に示す。

トンネル掘削時に押し出し・大変形挙動が発生するような膨張性地山は、押し出し性地山(squeezing ground)と膨潤性地山(swelling ground)に大別される

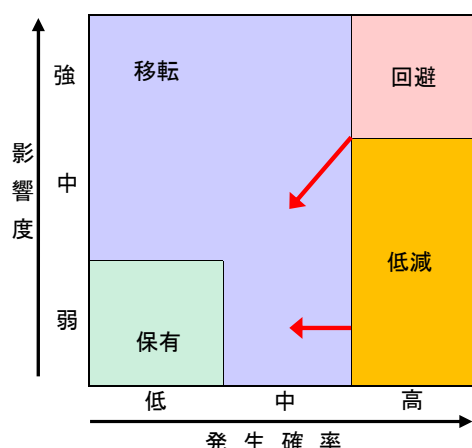


図-1 リスク低減のポジション¹⁾

表-1 押し出し・崩壊のリスク要因と対策への提言²⁾

段階	リスク要因	対策への提言
計画・設計段階	- 不適切な地山評価 - 設計時に想定していない押し出し・大変形挙動	- ルート選定段階で極度な膨張性地質を避ける - 地山特性を考慮し適切な手法により設計する
施工段階	- 褶曲などによる低強度地山の介在 - 地山に適した支保パターンや補助工法が選定できていない - 押し出し・大変形による支保部材の変状 - 長期的に変形が継続して収束しない	- 坑内からの水平ボーリングや前方探査により地質情報の把握に努める - 地山挙動を早期に把握して対策にフィードバックする - 支保工の高耐力化や多重化を検討する - 早期閉合が効果的であるが、支保工の予期せぬ不具合にも注意が必要
維持管理段階	- 盤ぶくれによるトンネル路盤部の変状 - 地山の吸水軟化	- 長期安定性評価に基づく適切なインバート形状の設定 - 地山特性に留意した横断排水・中央排水工の水処理

が、実際の現象は両者を明確に区別して原因を特定することは難しく、両者の複合的な挙動であると考えられる。調査・設計段階で予測する手法は各研究者や事業者にて提案されており、地山強度比、自然含水比、液性限界、塑性指数、 $2\mu\text{m}$ 以下粒子含有率、モンモリロナイト含有量などが主な判定指標であるが、1指標のみで精度よく予測することは困難であること、山岳トンネルではトンネル線形に沿う連続した地質情報が掘削前には得られていないことが多いことから、施工時に対処療法的に対応するケースが多いようである。

押し出し・大変形が発生したトンネルで実施された対策工の分析結果を図-2に示す。これによれば、かつては押し出し・大変形地山に遭遇した場合、加背を小さくしたり、いなし効果を期待したりする施工を採用するのが一般的とされていたが、近年は、補助ベンチ付き全断面工法により切羽直近で早期閉合を採用する事例が多くなっている傾向がうかがえる。

また、長尺フォアパイリングおよび長尺鏡ボルトの採用も多くなっている。

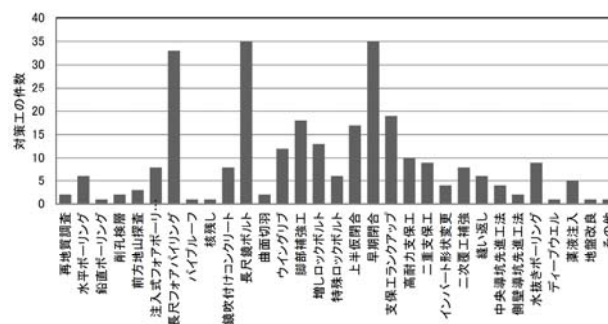


図-2 押し出し・大変形地山における施工段階の対策工²⁾

切羽崩壊・地表面陥没の事例について、施工実績調査結果を踏まえて表-2に整理した。小土被りから比較的大きな土被り部の未固結および脆弱な地山において、崩壊・陥没の事例が報告されている。

トンネル施工による切羽の崩壊や地表面の陥没などは、地山条件に関する要因から設計・施工に関するものまで広範囲にわたり、しかも各々の要因が複雑に絡み合った結果として生じるため、要因を特定することは困難であり、地質の急変、地下水の滞水など、崩壊等の予兆がない場合も多い。ただし、崩壊要因は特定できなくても、崩壊現象はいくつかのパターンに分類することは可能である。

崩壊要因としては、以下の事項が考えられる。

- ①切羽周辺の不良地山や鏡面などの弱層で囲まれたブロックの存在
- ②天端部の弱層：鉛直に近い傾斜を持った亀裂、井戸などの人口構造物
- ③帯水層下位にある難透水性薄層
- ④小土被り

①場合の崩壊現象としては、天端崩落、全断面切羽崩壊、上半切羽崩壊、ベンチ崩壊が考えられ、②の場合には切羽近傍の崩壊・陥没が発生し、③、④の場合には、切羽上部の広範囲の崩壊・陥没が考えられる。

表-2 押出し・崩壊のリスク要因と対策への提言 ³⁾に追記

トンネル名	断面	土被り	地質	陥没発生位置	発生時期	陥没形状	記事
牛鍵	新幹線	約 5 ～ 6m	黒ボク、ローム、粘性土、砂質土	トンネル直上田畑	2005 年 5 月 31 日	幅約 7 ～ 17 m、長さ約 60 m、深さ約 8 m	ディーブウェル施工後、水田水張りによる地下水上昇
北山	道路	約 12 ～ 13m	泥質メランジュ	トンネル直上梨の木畑	2005 年 4 月 12 日	幅約 15m、長さ約 18m、深さ約 1.5m	脚部沈下、上半ベンチ終点部がせん断破壊
ヒースロー	不明	約 20m	不明	トンネル直上空港プラットフォーム	1994 年 10 月 22 日午前 1 時頃	地表陥没によるビルの傾き	インバート構造の不備 基盤の不備
オーストラリア有料道路	道路	17m	頁岩	ランプ坑門から 120m	2005 年 11 月 2 日	径 6 m の穴	・低強度の頁岩中の節理 ・低強度の貫入粗粒玄武岩
飯山	新幹線	190m	洪積世砂礫	山林	2003 年 9 月 11 日午前 3 時頃	直径約 70m、深さ 30m	トンネル内に土砂流出
日暮山	2 車線道路	130m	泥岩部(膨張性)	トンネル直上	1999 年 12 月 9 日	クレータ形状(直径 30m、深さ 18m) 土 石 流 (8000m ³)	突発湧水
生駒	鉄道	約 80m	断層破碎帯	側壁導坑切羽付近直上	1984 年 3 月 28 日	不明	湧水による地盤の緩み
サンパウロ地下鉄 4 号線	地下鉄	不明	不明	不明	2007 年 1 月 12 日	直径 60m、深さ 30m	多量の降雨による地盤の軟化と地下水の上昇
笠森(圏央道)	道路	約 22 ～ 24m	堆積物砂岩	トンネル直上と隣地の林地と周辺耕作地	2010 年 10 月 19 日	直径約 5 ～ 7 m、深さ約 5 m の陥没穴(2 つ)	切羽からの湧水による土砂

また、切羽崩壊・地表面陥没において支配的要因である地山状況を過去の事例などから以下の5種類に分類し、それぞれの地山状況を対象として計画・調査・設計段階、施工段階におけるリスク要因とリスク低減に向けた対策について未固結、土砂地山の場合を図-3に、軟岩地山の場合を図-4に示す。

① 未固結・土砂地山

施工時に問題となる現象は、切羽の崩壊、湧水に伴う地山の流出、地山流出に伴う地表陥没、トンネル底盤の脆弱化(支保工の支持力低下)、地表部湧水、地表面沈下などである。

② 強風化・崖錐地山

現象は、斜面崩壊、地すべり誘発、切羽の崩壊、地山流出に伴う地表陥没、トンネル底盤の脆弱化(支保工の支持力低下)、地表面沈下などである。

③ 軟岩地山

切羽前方に不透水層を挟んで帯水層が存在する地質構成、泥岩等不透水層の前方に未固結砂礫層が存在する地質構成、泥岩等不透水層の上部に帯水軟弱層が存在する地質構成において切羽崩壊の可能性がある。

④ 断層・破碎帯を含む地山

現象は、断層・破碎帯で湧水をともなった破碎岩片や土砂等の流出、流砂現象が発生する場合があります、湧水をともなうためにその規模は大規模になることも多い。

⑤ 層理・節理の発達した地山

不連続面の発達に起因する崩壊は、不連続面に沿った岩塊の滑落や岩片の剥離・剥落、さらに地層境界等の大きな不連続面に沿った層すべり等がある。

切羽安定に対しては不連続面の状況と湧水状況の影響が大きい。

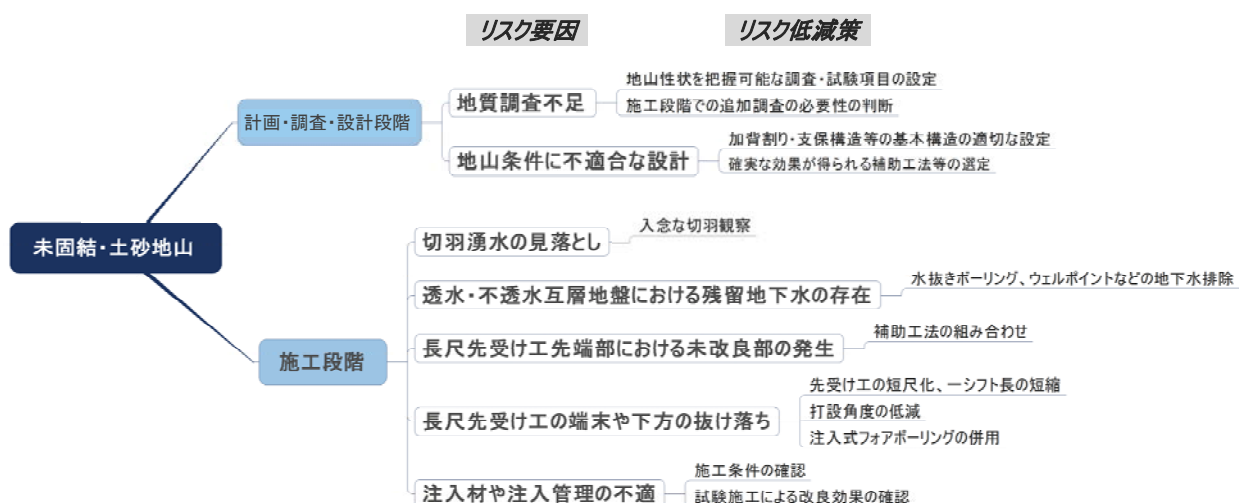


図-3 未固結・土砂地山の崩壊リスクと対策⁴⁾

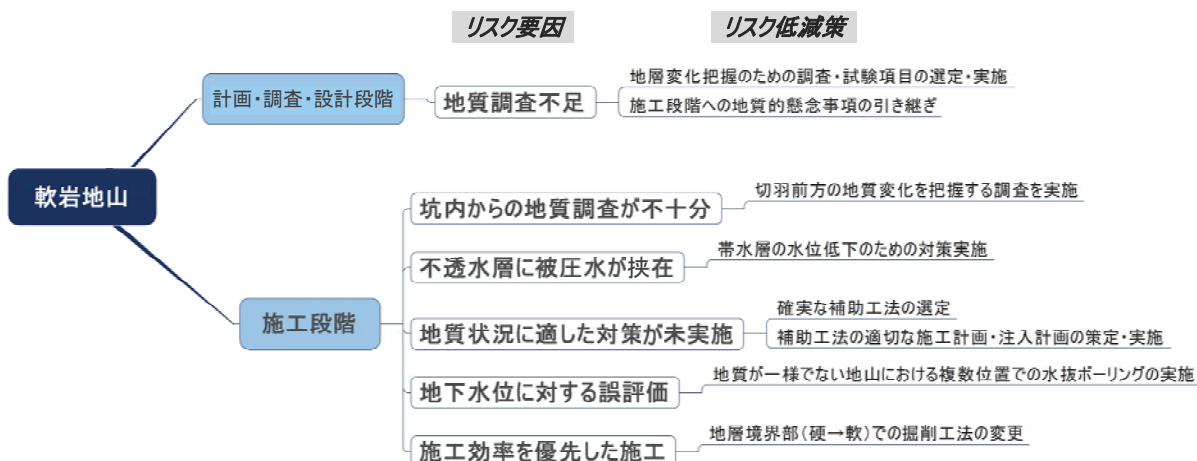


図-4 軟岩地山の崩壊リスクと対策⁴⁾

(2) 地質環境に関するリスク管理

地質環境に関するリスクとして、既往文献調査を調査した結果、地下水による周辺環境へのリスク、地山から発生するガスによるリスクおよび、ずりに含まれる自然由来重金属等によるリスクを抽出した。

地下水による周辺環境へのリスクとしては、地下水に関するリスクが潜在する地質としては60%が堆積岩であり、地質構造等では断層破碎帯や風化・未固結層、地層境界、鍾乳洞など、地山の脆弱部となる構造が関与することが分かった。なお、検討では、計画・設計段階、施工段階、維持管理段階ごとに各々のリスク要因とその対策を分析し、提言としてまとめた。このうち、表-3に地下水低下と水質変化に関する計画・設計段階におけるリスク要因と対策の提言内容を示す。

トンネル工事で考慮すべきガスに関するリスクとしては、可燃性ガスによる爆発、有害ガスによる中毒、および酸欠空気による酸素欠乏症を抽出した。

可燃性ガスは、主に古・新第三紀、第四紀層の地域にある油田・炭田のガスや水溶性ガスで、爆発はほとんどのケースでメタンが起こしており、メタンガス突出のおそれがある地質構造として、断層破碎帯や褶曲地帯における背斜構造などが指摘されている。

表-4に施工段階における可燃性ガスのリスク要因と対策への提言の内容を示す。

トンネルのずりに含まれる自然由来の重金属等について、定量的な分析を行った結果、処理が必要となった場合は、不溶化や封じ込め等の最終的な処理費に加え、運搬時やずり仮置き場での飛散・流出対策により大きな費用がかかり、事業リスクとなる。

重金属等の定量分析には通常数日間を要することから、仮置き場からずりが効率的に出せなくなり、掘削の停滞による工期遅延のリスクが懸念される。

表-5に施工段階における自然由来重金属等のリスク要因と対策への提言を示す。

表-3 地下水低下、水質変化のリスク要因（計画・設計段階）と対策への提言⁵⁾

	リスク要因	対策への提言
地下水低下	① 計画路線上に帯水層が分布する。 ② 湧泉等の水源や希少動植物が路線計画域に分布している。 ③ 路線計画域における水文調査が不足している。 ④ トンネル掘削に伴う周辺水環境への影響を過小または過大に評価している。 ⑤ 地下水低下対策の検討が不十分である。 ⑥ リスクに対する地元住民を含めた利害関係者との合意形成ができていない。	① 水文調査や数値解析等を過不足なく行い、地下水位低下によるリスクを把握すること。 ② リスクがあれば、ルート変更を検討すること。 ③ リスクが不可避であれば、代替水源や防水型トンネル構造等の対策を検討すること。 ④ 必要に応じて、有識者に助言を求めること。 ⑤ リスクについて地元住民を含めた利害関係者との合意形成を図ること。
水質変化	① 計画路線下流域で井戸水や生活用水として地下水を利用、または農業、漁業を営んでいる。 ② 計画路線周辺流域に希少種の生息が確認されている。 ③ 計画路線の地山に自然由来重金属等が含まれている。	① 利水実態調査や地下水流動解析を実施し、地下水の水質変化によるリスクを網羅すること。 ② 周辺環境に配慮した線形計画を実施すること。 ③ 施工技術検討会等の設置により、有識者に助言を求めること。

表-4 可燃性ガスのリスク要因（施工段階）と対策への提言⁵⁾

リスク要因	対策への提言
① 可燃性ガスの地中での存在状況を的確に把握できていない。 ② ガスの希釈、排除等の適切な措置がなされていない。 ③ 火源対策が十分になされていない。 ④ 安全教育を含めた安全管理体制の確立による全作業員への周知徹底不足。	① 可燃性ガスの存在形態を理解し、濃度測定を行うこと。 ② 希釈の風速は少なくとも0.5m/s以上とし、メタンが定常的に湧出する場合は風速1m/sとする。 ③ 火源対策を厳重に行い、日常的に換気設備および電気設備を点検すること。 ④ 定期的な爆発災害防止教育に努めること。

表-5 自然由来重金属等のリスク要因（施工段階）と対策への提言⁵⁾

	リスク要因	対策への提言
仮設備計画	① ずり仮置き場から重金属等を含有する水の流出や含有する粉じんの飛散が発生する。 ② ずり運搬時に重金属等を含有する水の流出や粉じんの飛散が発生する。 ③ トンネル湧水や工事用排水から重金属等を含有する水が流出する。	① 遮水性、排水管理、拡散防止対策および対策要否判断期間のずり保管量、切羽毎の分別等を考慮したずり仮置き場を計画する。 ② ずり運搬時の粉じん飛散防止対策を計画する。 ③ 重金属等に対応した濁水処理設備を計画する。
ずり処分	① 処分場から地下水等を経由して重金属等含有水が移動拡散する。 ② 処分場において人が直接採取する。 ③ 場外処分場の能力超過、運搬経路近隣住民の苦情により工事がストップする。	① 利用箇所周辺の動植物、周辺住民に対して溶出する地下水のリスク対策を検討する。 ② 直接採取によるリスク対策を検討する。 ③ 周辺の処分場処理能力、運搬距離を考慮した計画とする。 ④ 周辺住民に配慮した運搬経路を検討する。

(3) 維持管理に関するリスク管理

維持管理に関するリスクについては、外力性の変形、はく落、漏水、付属物落下、作業中の事故等の項目が抽出される。

本報告においては特に「はく落」、「漏水」をとりあげ、調査・設計時、施工時を含む各段階におけるリスク要因とその相関関係を示すとともにリスク低減対策について述べる。

維持管理段階におけるリスクとして、はく落は直接的に利用者被害に影響を及ぼす懸念があることから特に重要である。想定されるはく落には、目地部周辺の種々の要因によるはく落、補修材のはく落、コールドジョイント、背面空洞、鋼材腐食に起因したはく落、閉合ひび割れに起因するブロック状のはく落、表層劣化に伴う表層剥離などがある。これらのリスク要因を、計画・設計段階、施工段階、維持管理段階に分類し、それらのリスク要因の相関関係を図-5に示す。

目地部周辺のはく落に着目すると、維持管理段階に目地部周辺にはく落が集中する傾向があるというリスクに対し、その要因が例えば施工段階の目地部形状の特性や施工法に起因するという関係にあり、さらに設計段階での目地部構造や目地位置選定が要因として関連しあうという相関関係がある。すなわち設計・計画および施工段階でリスク要因を排除することにより、相関を考慮したトータルリスクを低減することが可能となる。

表-6は、はく落に対するリスク低減対策を各段階のリスク要因に対応させてまとめたものである。

目地部周辺のはく落を例としてとりあげ、要因に対するリスク低減対策を提言として示した。はく落に限らず、リスクには様々な要因が複雑に絡み合っていることを意識し、各段階で適切な対策を講じることが重要である。

表-6 はく落に関する各段階のリスク要因と対策への提言⁶⁾

	段階	リスク要因	対策への提言
目地部周辺のはく落	計画・設計段階	・目地構造の選定不具合によるはく落 ・目地設置位置の選定不良によるひび割れ発生やはく落	・はく落防止を意識した目地選定に言及しておく ・有筋・無筋の構造境界部や覆工厚変化部には適正な目地を設置するよう留意する。
	施工段階	・目地形状特性によるはく落 ・横断目地部の（型枠の過度な押し上げ、打ち込み不足）施工不良によるはく落 ・目地部の打ち込み不足による豆板の発生 ・矢板工法せめ部の施工に起因したはく落要因	・将来的な目地周辺のうき、はく落が発生しにくい目地構造を選定する。 ・目地周辺は施工時にはく落が生じる原因を作ること認識し、入念な施工を心がける。 ・均質な打ち込みを心がけ、目地欠損を防止する。 ・せめ部の施工は特に入念に行う。
	維持管理段階	・目地形状、目地部施工法に起因した変状が目地部周辺に集中する傾向がある	・目地周辺の適切な点検計画立案、実施を行う必要がある。

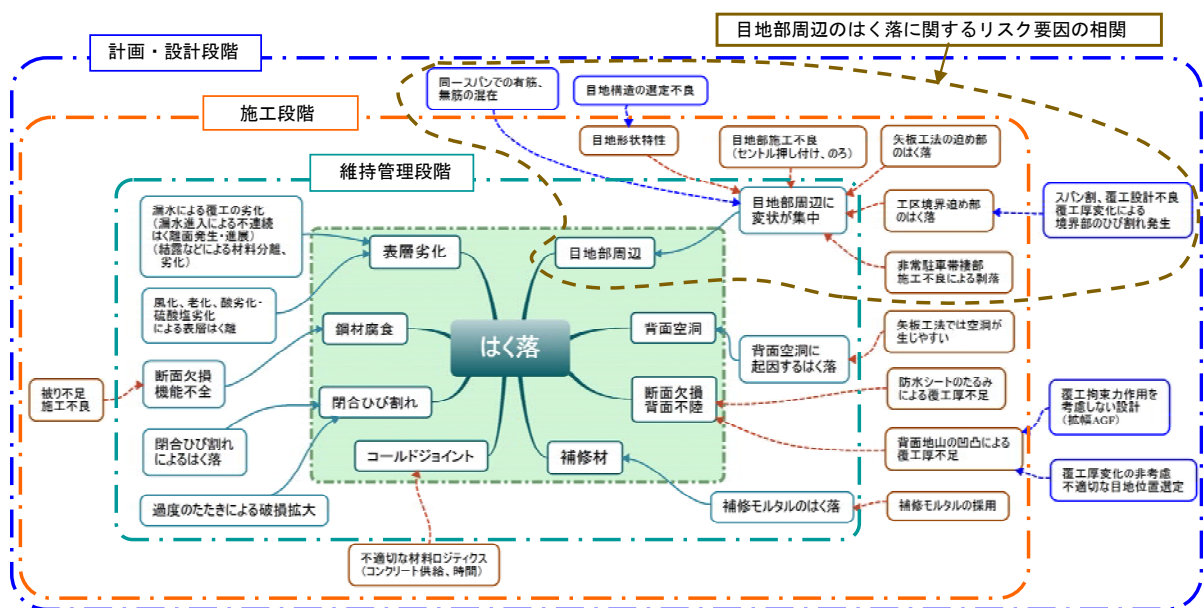
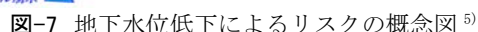


図-5 各段階におけるリスク要因の相関関係⁶⁾

ライブラリーでは他に外力性の変形、付属物落下および点検作業時に関するリスク管理も加えてまとめている。供用中のトンネルにおいて、適切な点検、維持補修が構造物の延命化に対して重要な位置づけであるとともに、計画・設計・施工時の各段階で対策を効果的に実施することが、リスク低減に大きく貢献するものと考えられる。

今回のライブラリーにおいては、リスク要因と計画・設計・施工・維持管理段階における対応策についてイラストを用いてわかりやすくまとめた。



「押出し・大変形」,「切羽崩壊・地表面陥没」,「近接施工」,「地すべり」,「山はね」といった項目について、トンネルの土被りや施工の制約条件と関連づけて押出し・崩壊リスクについて示している。

地下水位が低下すると、図-7に示すようなリスクがトンネル周辺において顕在化することがある。

電気設備の故障

遊離石灰による景観悪化

歩行者への漏水落下

補修材の落下

車両・路盤への漏水落下

地山湧出による空洞の発生

表-7 各段階における漏水に関するリスク要因と対策への提言⁶⁾

- 7 -

4. おわりに

土木学会として産・官・学のトンネル技術者が集まり、山岳トンネルにおけるリスクについて議論し、発生する確率の高いリスクや一旦発生すると影響度の大きいリスクとして「押出し・崩壊リスク」、「地質環境リスク」、「維持管理リスク」といった3つの大項目に関しての検討を実施した。

ライブラリーでは、山岳トンネルに関連するすべてのリスクを取り上げることはできなかったが、山岳トンネルの建設、維持管理といった場面で、計画・設計、施工、維持管理といった各段階におけるリスク対応策として過去の事故事例に基づくリスクとその対応について分析・評価するとともに、同種条件のトンネル建設にあたり、配慮すべき教訓を少なからず提言できたものと考えている。

山岳トンネルの建設技術については、NATMの導入や補助工法における技術開発、計測技術の進歩といった要因により、施工時の安全性に関してはかなり改善されたと言える。しかしながら、ライブラリーで取り上げた押出し・崩壊リスク、地質環境リスク、維持管理リスクに関しては、今後も同種の施工条件であれば顕在化する懸念がある。

これまで経験した事故と同種の事態を未然に防止するために、提言が役立つことを期待する。

参考文献

- 1) 山田浩幸，芥川真一：山岳トンネルのリスク低減に関する検討（その1）－リスク分類と対応策について－第72回土木学会年次学術講演会，2017.9.
- 2) 小原伸高，大谷達彦，奥井裕三，藤井宏和，若月和人：山岳トンネルのリスク低減に関する検討（その2）－大変形・地すべり・山はねに関連するリスクの管理－第72回土木学会年次学術講演会，2017.9.
- 3) （社）土木学会：トンネルライブラリー第24号 実務者のための山岳トンネルにおける地表面沈下の予測評価と合理的な対策工の選定，pp21-22，2012.
- 4) 市川晃央，山本雅広，小川淳，吉川直孝，林久資：山岳トンネルのリスク低減に関する検討（その3）－切羽崩壊・地表面陥没に関連するリスクの管理－第72回土木学会年次学術講演会，2017.9.
- 5) 木梨秀雄，土田淳也，福田毅，白鷺卓：山岳トンネルのリスク低減に関する検討（その4）－地質環境に関するリスク管理－第72回土木学会年次学術講演会，2017.9.
- 6) 安田亨，寺戸秀和，岡部正：山岳トンネルのリスク低減に関する検討（その5）－維持管理に関するリスク管理－第72回土木学会年次学術講演会，2017.9.

(2017.8.11 受付)

RISK MANAGEMENT IN MOUNTAIN TUNNEL AND PROPOSAL ABOUT A REDUCATION MEASURE

Shinichi AKUTAGAWA, Masahiro YAMAMOTO, Hideo KINASHI, Hidekazu TERATO, and Hiroyuki YAMADA

Risk of the various forms is inhering by each stage of planning, design, constructing and maintenance in construction of mountain tunnel. Recently, more and more tunnels will be constructed under critical and severe conditions, such as construction beneath urban area with thin overburden, large cross section and unsymmetrical in-situ stresses. Therefore, when an accident occurs once, there is fear that the influence becomes something great.

Then a consideration section about risk lowering of Japan Society of Civil Engineers mountain tunnel (sectional meeting chair: Prof. Kobe University Akutagawa) investigated experience of construction about various risk in a life cycle of mountain tunnel such as planning, design and constructing and maintenance.

A measure for risk lowering was considered about "squeezing and collapse risk", "geological environment risk" and "maintenance risk" based on the former experience of construction.