

福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没事故の原因究明について

報告書 概要

1. 検討委員会

1.1. 目的

福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する委員会（以下、「本委員会」という。）は、平成28年11月8日、JR博多駅前付近の福岡市交通局七隈線の延伸工事現場において発生した道路陥没事故を受けて、その陥没の発生原因の把握や、再発防止策等について専門的見地から検討することを目的として同年11月29日に設置されたものである。

1.2. 委員名簿

本委員会の委員名簿は以下の通りである。

	氏名	役職名
委員長	西村 和夫	首都大学東京 副学長 都市環境学部教授
副委員長	真下 英人	(一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 所長
委員	小島 芳之	(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 主管研究員
	佐藤 研一	福岡大学 工学部社会デザイン工学科 教授
	野焼 計史	東京地下鉄(株) 取締役
	丸山 修	(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部設計技術部 設計技術第二課長
	三谷 泰浩	九州大学 工学研究院附属アジア防災研究センター 教授
	石原 康弘	国土交通省 大臣官房技術調査課長
	江口 秀二	国土交通省 鉄道局施設課長
	間瀬 利明	国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 構造・基礎研究室長
	佐々木靖人	国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ 上席研究員
	砂金 伸治	国立研究開発法人土木研究所 道路技術研究グループ 上席研究員

1.3. 開催経緯等

本委員会の開催経緯等は以下の通りである。

【現場調査】

日時 平成28年11月29日(火) 9:00~10:00

調査場所

- ・連絡トンネル立坑（地下水位の状況調査）
- ・道路陥没現場（地上から埋め戻し後の状況、沈下計測状況等の調査）
- ・博多駅前開削工区（開削工区の現状、応急復旧後ボーリングコア等の調査）

【第1回検討委員会】

日時 平成28年11月29日(火) 10:00~12:00

場所 TKPカンファレンスシティ博多 TKPホール(福岡市博多区)

主な説明者 福岡市、施工者

議事等

- (1) 七隈線延伸事業概要および設計の経緯
- (2) 施工の経緯
- (3) 事故の概要
- (4) 現在実施している調査の内容等

【第2回検討委員会】

日時 平成29年1月21日(土) 13:00~15:00

場所 TKPガーデンシティ永田町ホール2D(東京都千代田区)

主な説明者 事務局、福岡市、施工者

議事等

- (1) 追加調査結果の報告
- (2) 事故原因の推定に向けた議論
- (3) 設計および施工に関する問題点等の検討
- (4) 今後の設計・施工に対する留意点や再発防止に向けた検討

【第3回検討委員会】

日時 平成29年3月30日(木) 13:00~15:00

場所 TKP市ヶ谷カンファレンスセンター 8F バンケットA(東京都新宿区)

主な説明者 事務局、福岡市、施工者

議事等

- (1) 設計・施工の経緯
- (2) 事故発生要因とメカニズム
- (3) 工事再開に向けた留意点と今後の設計・施工に向けて
- (4) 委員会のとりまとめについて

2. 事故原因の推定

事故原因の究明に際しては、福岡市および施工会社(大成・佐藤・森本・三軌・西光建設工事共同企業体)ならびに設計会社(八千代エンジニアリング株式会社、日本シビックコンサルタント株式会社)より資料を提出して頂き、また、陥没事故発生後に当委員会の依頼に基づく追加ボーリング調査を実施して頂いた。さらに、本委員会では計 3 回の討議を行ったほか、委員相互での討議に多くの時間を費やした。

以下に事故原因の推定を示すが、崩落したトンネル現場に立入ることができないこと、また、委員会設置から 4 ヶ月という短い期間のとりまとめであったことから、関係者から提供頂いた資料に基づいて可能性の高い事故原因について推定したものである。

2.1. 福岡市地下鉄七隈線延伸工事との因果関係

一般的に、道路陥没の原因としては、地下埋設物によるもの、年月をかけて形成された地下空洞によるものなどが想定されるが、今回の道路陥没については、施工会社の社員がトンネル天端からの崩落を目撃し、トンネル坑内に流入した土砂の写真が存在すること、また、福岡市地下鉄七隈線延伸工事以外に原因となる地下埋設物関連工事を行っていなかったため、当該工事が道路陥没の原因となったと推定される。

2.2. 道路陥没事故発生のメカニズム

事故発生のメカニズムについては、以下のように推定される。

- ① 元来、堆積環境やその後の風化度合いにより強度や厚さにバラツキがある難透水性風化岩層の下部にトンネルが掘削された。トンネル天端から、当該地層とその上部の未固結帯水砂層との境界までは、約 2m となっていた。
- ② トンネルを掘削、又は断面を拡幅するにつれて、未固結帯水砂層からの高い水圧の影響も加わり、難透水性風化岩に緩みや亀裂が発生し、徐々に破壊し始めた、或いは、難透水性風化岩に潜在的弱部が存在して、いわゆる「水みち」が形成された。
- ③ 上記②によって、トンネル天端部が連続的に剥落、或いは漏水を伴いながら、破壊が進行し、遂に、未固結帯水砂層と地下水がトンネル内に流入し、またこれによって破壊が加速度的に進行し、最終的には大規模な道路陥没を発生させるに至った。

2.3. 事故の原因

本委員会では、事故の原因について考えられる 10 の項目を抽出し、それらが要因となるか否かの可能性について評価を行った。要因は必ずしも 1 つではなく、様々な要因が複合的に作用し陥没に至ったと考えられるが、その中でも以下の 2 つの要因 (A-①、②) については、可能性が高いものと推定した。

しかしながら、これらの要因を推定するに至った当該地層の状況等については、事故後の調査等により明らかになったものであり、当該工事の設計時点における地質調査の頻度等は通常の都市 NATM 工事と比較して少ないとまでは言えないことから、事故前に正確に把握することは困難であったものとする。

また、事故後の調査は、陥没後における地層の状況を調べたものであり、事故前の状況とは必ずしも同じではない可能性もあるが、事故前の調査資料が少ないことから、当該調査等の結果も含めて推定したものである。

A-① 難透水性風化岩層の強度や厚さ

難透水性風化岩層の強度や厚さについては、過去に当該岩盤層が地上にあった影響等により強風化の弱部が各所に存在し、また、地層の上部に凹凸があるなど、不規則で複雑な地質構造となっており、上部に強度の低い層が存在していたことが事故後に実施した追加の地質調査等により明らかとなった。例えば大断面トンネル部において、当該地層の厚さを約 2.79～3.67m 確保できると見込んでいたが、その後の調査の結果、厚さは約 1.90～2.28m しか確保できず、強風化が進んだ強度の低い上部の層が支配的になっていた可能性があることが分かった。

局所的に強度や厚さが不足する難透水性風化岩層について、当該工事の設計及び施工にあたっては強度や厚さを均質であると捉え、例えば安定解析に用いた変形係数（力を加えたときの変形しにくさを表す指標。変形係数が高い方が変形しにくい）については、（約 14,000kN/m² から約 700,000kN/m² のバラツキがあるところを）最終的には代表値として 87,000kN/m² の値を用いるなど、バラツキの考慮が不十分なまま設計及び施工が行われ、結果的に地山の強度を実際よりも高く評価した設計となっていた。

A-② 地下水圧の影響

未固結帯水砂層の地下水位は地表から約 2.5m の位置にあり、未固結帯水砂層から難透水性風化岩層の境界部に、水頭にして約 10m（約 1 気圧に相当）以上の高い水圧が作用していた。上述のようにトンネル上部の難透水性風化岩層は不規則で複雑な構造であったが、設計及び施工にあたっては、その遮水性や水圧に対する耐力を十分であるとしていた。しかしながら事故後に追加した地質調査等によると、難透水性風化岩層の内部には、小断層や剥離面、多くの節理や亀裂が存在していたと考えられ、結果的に地下水圧に対する安全性が十分ではなかった。

また、上記のような不規則で複雑な地質や高い地下水圧の条件下で施工する際には、施工時の地山の安定性を含めトンネル構造の安定性を極力損なわないよう慎重な設計、施工を行う必要があったが、施工中における以下の 2 つの変更（B-①、②）は通常の地質状況では要因となる可能性は低いものの、上記の A-①、②のような厳しい地質条件下においては、その影響度合いを強めることとなり、結果的に事故発生 of 副次的な要因となった可能性が高いものと推定した。

B-① トンネル断面形状の変更

難透水性風化岩のトンネル上部の層厚を確保するためにトンネル天端を約 1.2m 下げたことで、扁平率（内空高さ÷内空幅）が 0.625 から 0.532 となった。それに対し、安全性は確保されるものとの解析結果を得ていたが、アーチアクションによる効果（※）が減少することとなり、結果的にトンネル構造の安定性を低下させることとなった。

※ 石のブロックをアーチ状に組むとブロック相互に圧縮力が働き、ブロック同士を接着していなくても梁の構造を保つことができる。アーチ形状が寝てくると圧縮力が弱まり、やがて梁の構造を保てなくなる。トンネルは石のブロックを組んで作るわけではないが、掘削による場合も同様の効果が期待できる。

B-② すりつけ区間における補助工法の施工方法の変更

当該工事区間は、標準断面トンネル（I 型）の 13K413M700（No.115 付近）地点から大断面トンネルの 13K407M700（No.108）地点へのすりつけ区間（延長 6m）であり、断面を

拡幅(高さ約 2.5m、幅約 5m)する区間であった。補助工法としては注入式長尺鋼管先受工法 (AGF 工法) が採用されていたが、すりつけ区間においては、鋼管の打設位置の制約と難透水性風化岩層を突き抜けないように挿入角を小さくする必要から、長尺鋼管の完全二重化が困難となる部分が存在することとなり、さらに支保工を設置するため、鋼管の根本部を切断しなければならなかった。その結果、鋼管の縦断的なラップ長 (重なり合う長さ) が短く、或いはラップしていない状態となり、当該補助工法に期待する効果が十分発揮されなかった。また、鋼管からの注入は岩盤の亀裂への注入であり、十分な地山改良効果が発揮されなかった可能性がある。

3. 工事再開に関する主な留意点

本委員会での事故原因の推定を踏まえ、福岡市が地下鉄工事を再開するにあたっては、主に以下の項目について留意し、必要な調査等を行う必要がある。

● 地質、地下水の状況把握

難透水性風化岩層の強度や厚さについては、過去の風化の影響等により強風化の弱部が各所に存在し、また、地層の境界面に凹凸があるなど、不規則で複雑な地質構造となっていたことが事故後の調査等で明らかとなった。このため、事故後に実施されたボーリング調査の結果や、過去において周辺部で実施された地質調査の結果等も踏まえるとともに、陥没箇所について埋め戻した流動化処理土、薬液注入された周辺地盤等、事故後の措置も考慮しつつ、再度、地質、地下水の状況を把握する必要がある。

● トンネル坑内の水抜き及び土砂撤去に関するもの

現存するトンネル坑内の水抜きや土砂撤去にあたっては、現在は安定していると推定される力学的な均衡が再び変化し、トンネル部や周辺地盤の崩壊に至る恐れがあるため、地下水位等の計測を行うことによって力学的安定性について観測、評価しつつ、周辺へ影響が生じないように慎重に行う必要がある。

● 再掘削工法の選定に関するもの

工法選定については都市 NATM の他に、シールド工法等の他の工法や新技術の活用も含め、安全面を重視して行う必要がある。

再掘削を開削工法にて行う場合には、埋設物の存在を考慮しつつ、土留め支保工が設置できない箇所への対策を含めた土留め支保工の安全性の確認を行う必要がある。また、周辺建築物へ影響を与える恐れがあることから、土留め支保工の剛性を高める等の事前の対策や地表面の変位計測など、安全面を考慮した対策を講じる必要がある。

また、非開削工法にて行う場合には、地下水の影響や周辺地山、残置支保工の状況の把握、汚水流入による有毒ガス発生の可能性、再掘削の加背割 (断面を区分して掘削する区画割のこと)、支保工、補助工法等について、安全面を考慮した対策を講じる必要がある。

4. 類似する条件下での都市 NATM 及び地下空間での工事における留意事項

今回の事故は、トンネルを施工する地盤の強度や厚さが局所的に不足する難透水性風化岩であることに加えて、高い地下水圧が作用する厳しい条件においてトンネル施工の安全性が実際より高く評価されたことが要因であると推定した。また、こうした厳しい条件下におけ

る設計変更が結果的にトンネル構造の安定性を低下させる副次的な要因となったものと推定した。これらのことから、都市 NATM の工法選定そのものが誤っていたということではなく、また、直接的に都市 NATM そのものの信頼性が損なわれるものではない。さらに、これまでの技術的な基準等の見直しに直接的に繋がる事項はない。

しかしながら、今回の事故の教訓を生かし、二度とこのような事故を発生させないよう、類似した条件下において都市 NATM によるトンネルを計画・施工する場合など地下空間での工事について、留意すべき点は以下の通りである。

- ボーリング等の地質に関するデータは地下空間の限定的な情報であり、たとえ多くの調査を実施しても地下空間を詳らかに把握することには限界があることから、施工の安全性を事前に完璧に確保することには自ずと限界がある。しかしながら、今回の事故の規模や影響を鑑みると、地下空間の安全な利活用を図るためには、地下空間に関する情報を出来るだけ収集するとともに、その時々最新の技術を用いて、リスクを可能な限り低減させた、より安全性を確保した設計・施工に努めるべきである。そのため、地下空間に関する調査については効果的・効率的に行うとともに、その目的に照らして必要かつ十分なものでなければならない。加えて、過去において周辺部で実施された地質調査等を官民間問わず情報収集し、利活用できるようにすること
- 地下工事の安全性を確保するためには、地質の持つ不均質性を適切に捉え、危険側とならないような物性値の採用や、物性値を変化させた複数の計算を行って結果を評価するパラメトリックスタディの採用を検討するなどの取り組みを設計及び施工に反映させるとともに、今回のような不規則で複雑な地質構造や高い地下水位などの安全性に対するリスクを可能な限り把握し低減するよう努める必要があること。また、数値解析によって得られる結果は必ずしも万能ではないとの認識に立ち、十分な知見・経験等も加えて総合的な工学的判断を行うこと
- 地下水位が高い場合には、水圧による影響をあらかじめ最小化できるよう、工法の選定、水位の低下や地盤改良等の必要な措置について十分に検討すること
- 特に、トンネル工事においては、地下空間の情報が限定的であるなど不確定要素が多いことから、発注者、設計者、施工者等の関係者が協力し、互いに知恵を出し合いながら困難を乗り越えていくべきであり、調査、設計、施工の各段階で得られた情報や知見については関係者間で十分共有するとともに、適切に調査から設計、設計から施工といった次の段階に引き継ぐこと
- 変状の発生を敏感に捉え、非常時を想定した詳細なモニタリング計画を作成するなど、体制を充実させること
- 難易度が高くリスクを多く包含する工事においては総合的な判断も求められることから、日頃の関係する技術者の技術力向上はもとより、工事中においても然るべき場を設け、関係者間における現場状況の共有と真摯な技術的議論、その結果のフィードバックにより、高度な技術的知見を設計・施工に反映させるとともに、地質・地盤条件が複雑な我が国においては、関連する知見等を全国的に収集・活用できるしくみが必要であること