

福岡市地下鉄七隈線トンネル陥没事故における地下水の変化と事故後の対応

三谷, 泰浩
九州大学大学院工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/7182240>

出版情報 : Journal of Groundwater Hydrology. 65 (4), pp.333-339, 2023-11-30. Japanese Association of Groundwater Hydrology

バージョン :

権利関係 : © 2023 Japanese Association of Groundwater Hydrology



福岡市地下鉄七隈線トンネル陥没事故における 地下水の変化と事故後の対応

三谷泰浩^{*†}

Groundwater Change on tunnel Collapse Accident and Responses after the Accident in the Fukuoka City Subway Nanakuma Line

Yasuhiro MITANI^{*†}

要 旨

本報告では、福岡市地下鉄七隈線トンネルの陥没事故に伴うトンネル周辺の地下水の変化について七隈線建設技術専門委員会ならびに福岡市交通局技術専門委員会における資料をもとに整理する。その結果、陥没事故により、急激な地下水低下を生じたこと、さらには、陥没孔を埋設した後、地下水がどのように回復したかを明らかにする。さらに、トンネルの再掘削を行うために実施する水抜き工事の方法を地下水回復の過程を考慮して検討し、工事による周辺地盤への影響を最小限に抑えて水抜きを行った結果を示す。最後に、トンネル内の土砂撤去を行った際の地下水変化の状況についても述べ、地下水の状況が陥没事故発生以前の状況に回復したことを示す。

キーワード：陥没事故、地下水変化、都市型 NATM、水抜き施工

1. はじめに

2016年11月8日、福岡市地下鉄七隈線の延伸工事において大規模な陥没事故が発生した。都市の中心部に突如として発生した大規模な陥没の発生状況、道路や道路構造物が地下に引き込まれる様子などが報道され、広く社会に衝撃を与えた。そういった中で、国立研究開発法人土木研究所に「福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会（以下、第三者委員会）」が設置され、その原因究明がなされた。その後、陥没箇所の修復がなされ、トンネルの再掘削が行

われ、トンネル自体は開通し、2023年3月27日、無事開業に至った。

このような都市部での陥没事故としては、埋設インフラ、特に下水の老朽化に伴う道路陥没事故が最も多く発生しており、その主要なメカニズムとしては、下水管などの損傷部から周辺の土砂が流出することにより発生するケースがよく見られる。一方で、地下のトンネル工事に伴う陥没事故も発生した事例も見られるが、いずれも地表面下にある土砂が地下水や掘削などにより徐々に流出し、地下に空洞が形成され陥没に至るケースがほとんどであり、今回のように空洞掘削時に突然の

^{*} 九州大学大学院工学研究院（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

[†] 責任著者（Corresponding Author）E-mail: mitani@doc.kyushu-u.ac.jp

土砂流出が発生し陥没が発生したケースというのは珍しい。

本報告では、七隈線建設技術専門委員会（以下、技術専門委員会）の資料のうち、福岡市交通局がHP上に公開している技術専門委員会資料ならびに第三者委員会資料を参考に、陥没事故発生前から陥没直後、そして再掘削時までの地下水の挙動を中心にどのような考えで再掘削に至ったのかについて報告する。

2. 陥没事故の概要

福岡市市営地下鉄七隈線延伸工事は、2010年度から建設工事の地質調査が実施され、2012年初めまでに概略設計、予備設計が行われた。本工事は、図1（土木研究所、2016a）に示すように福岡市中心部の天神南駅から博多駅区間の約1.4 kmの区間において、中間駅1箇所を含みその間をトンネルにより結ぶ工事である。トンネル部の工事は中間駅の両側がシールド工法、博多駅につながる一部分が都市 NATM 工法により工事が行われた。

陥没事故は、2016年11月8日、博多駅につながるトンネルの掘削工事が行われていたところ、午前4時頃、トンネル切羽の天端部分から肌落ちが発生し、その後、異常出水が生じた。その後、午前5時過ぎに地表の舗装部分に亀裂が発生し、午前5時20分頃から、随時道路陥没が進展し、最終的には午前7時過ぎに幅約27 m、長さ約30 mの陥没孔が発生した。その結果、図2（土木研究

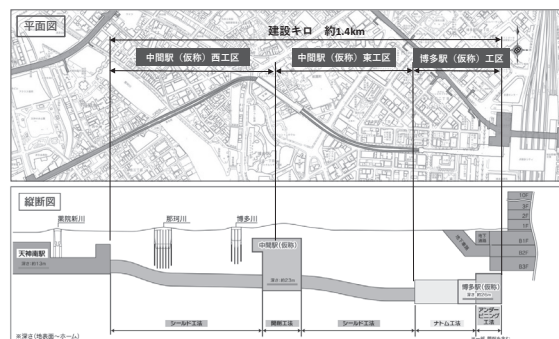


図1 福岡市地下鉄七隈線延伸工事概要（土木研究所、2016a）

所、2016b）に示すように約6200 m³の土砂がトンネル内に流入したと考えられている。その後、ライフラインの復旧を図ると共に流動化処理土による陥没孔の埋戻しを行い、1週間後の11月15日早朝には、路面の復旧が完了した。この事故により近隣のビルおよびライフラインに大きな損害や被害を与えたが、幸いに人身被害は発生しなかった。

3. 陥没事故発生前後の地下水の状況

当該陥没エリアの地質は、古第三紀の福岡層群の上に、砂層である洪積層が堆積した地質である。トンネルは、福岡層群の軟岩層を掘削するように計画されていた。トンネル周辺では、土砂部3か所、岩盤部3か所の計6か所で地下水位を常時モニタリングしており、陥没前では、土砂部でT.P.100.9 mの位置に、岩盤部でT.P.94.5 mの位置に地下水位が存在していた。地表面の標高が陥没箇所T.P.103.2 mであることから、地下水位は、地表から約3 m下と約10 m下の位置にあったと考えられる。

陥没直前から陥没後約半年間の地下水位の変化を図3（福岡市交通局、2017）に示す。陥没直後、急激に地下水位は土砂部および岩盤部で低下した

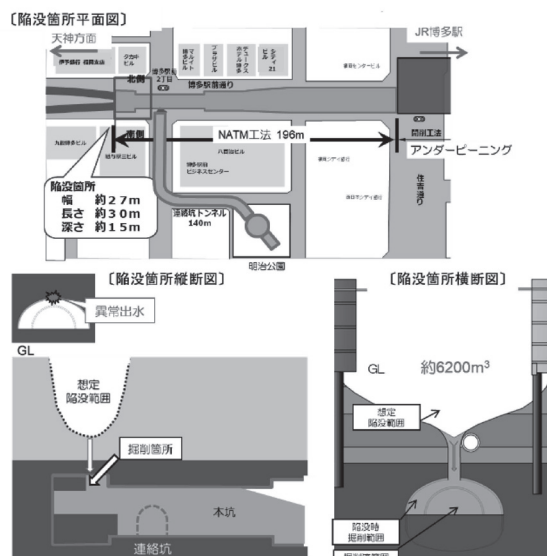


図2 陥没状況イメージ図（土木研究所、2016b）

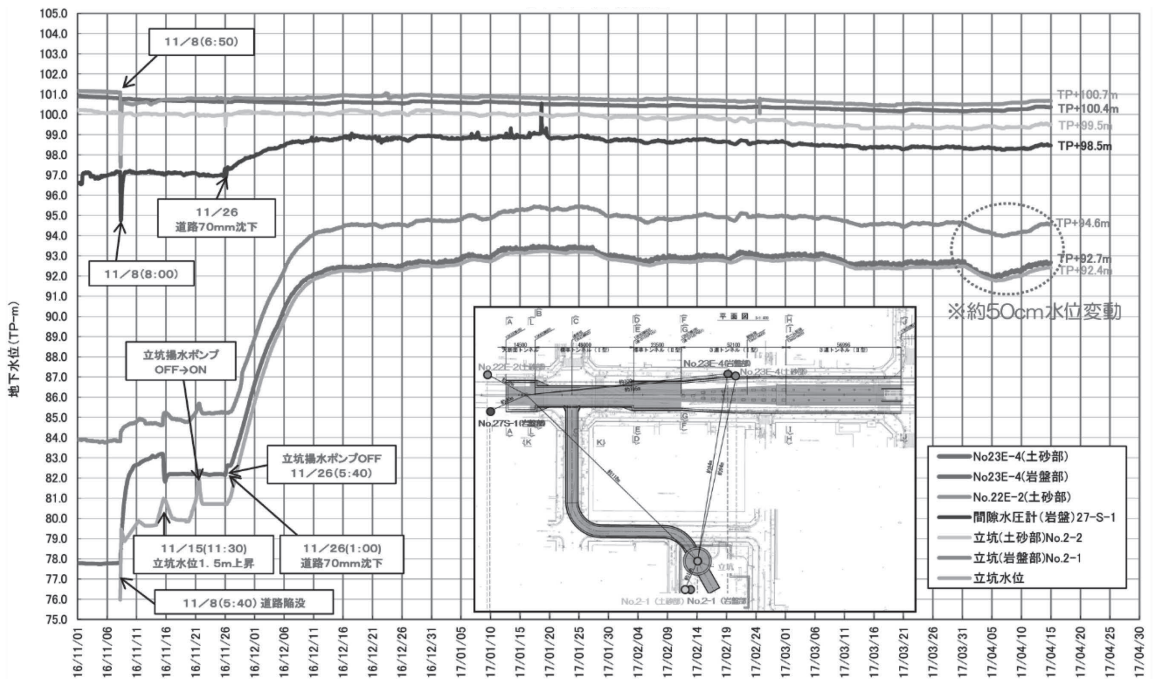


図3 陥没直前からの地下水の経時変化（福岡市交通局，2017）

が、流動化処理土による埋め戻しを急速に行ったことから、地下水位は急激に回復した。その際、まずは、陥没前の地下水位と同程度になるよう立坑においてポンプを稼働させ、排水を行っていた。しかしながら、2016年11月26日に陥没部において更なる沈下が生じたことから、地下水の汲み上げがさらなる沈下を助長する恐れがあるとして11月26日に立坑の排水ポンプを停止した。その結果、土砂部での地下水位はほとんど変化がないものの、岩盤部の水位は徐々に上昇し、陥没発生から約1か月後には定常状態を示した。

この結果からわかるように、地表部の土砂部の地下水と岩盤部の地下水は連結しているとは考えにくく、両者の地下水の起源は別物であると考えられる。さらに、陥没翌年の2017年4月、陥没箇所から離れた駅部でのアンダーピーニング工事の際に約50 cmの水変動が生じた際にも岩盤部での水位低下が確認されたが、土砂部での地下水位の低下はほとんど見られなかった。

4. トンネル内の水抜き工事

陥没発生後、トンネル内は、流入した土砂と地下水で満たされていると考えられた。トンネルの掘削が完了し、支保が建て込まれている箇所（陥没箇所から博多駅側の箇所）については、土砂や地下水がトンネルを支えている可能性は少ないと考えられたが、支保などの覆工を損傷している可能性も考えられた。また、陥没箇所においては、トンネルがどの程度損傷しているかわからない状況下において、流れ込んだ土砂と地下水による水圧が陥没箇所からの土砂を支えて力学的にバランスをとっていることが想定された。いずれにせよ、トンネルを再掘削するにあたっては、まずは、トンネル内に滞水している地下水の水抜きを実施することが必要であった。この水抜きの行為は、トンネルを掘削する場合と同様にトンネル内空の支えを取り除くことに他ならないため、慎重に実施しないと更なる沈下や陥没などを生じさせる可能性があった。

そこで、水抜きによるトンネル周辺部への影響の監視を強化するために、陥没箇所を含めたトン

ネル周辺の地質調査、沈下等のモニタリング計測箇所を増設を行うとともに、陥没箇所の状況把握と陥没土砂のトンネル内への更なる流入を防ぐことを目的として、陥没箇所周辺の地盤改良を実施した。これにより、水抜きによるリスクの軽減を図った。

次に水抜きの具体的な計画については、急激に水を抜くことは避けるべきであることは自明なことであるが、どの程度の速度（排水量）で水抜きを行うべきかという点については、立坑の排水ポンプ停止後の岩盤部の地下水回復のデータおよび同サイトでのトンネル掘削時の過去の地下水挙動を活用した。図4（福岡市交通局，2017）に排水ポンプ停止後の水位の変化と水位上昇速度のグラフを示す。図に示すようにポンプ停止後、水位上昇速度は急激に上昇し最大1.2 m／日を最大として2日目以降は徐々に水位上昇速度は低下する傾向がわかる。トンネルは場所によって断面の大きさが異なることから、この水位変化曲線を利用して地下水位を低下させることを考えた。図5（福岡市交通局，2017）に立坑水位と換算排水量のグ

ラフを示す。これは、図4をもとに、ある地下水位に維持するために必要な排水量（＝換算排水量）を求めたものである。この換算排水量は、排水により空洞内の水位が徐々に低下するが、掘削エリアにおける空洞の形状が異なるため、水面面積が異なり、水位の低下量つまり排水量が異なってくることとなる。そのため、水位低下に伴う空洞部分の体積を考慮することで、地下水位と換算排水量との関係を算定した。

排水ポンプ停止後の水位回復挙動は連絡坑道以浅のデータしかないため、連絡坑道以深の換算排水量は掘削時の最大湧水量（550 m³／日）へ線形補間した。すなわち、水位低下に必要な排水量＝換算排水量＋水面面積×1日の水位低下量となる。

トンネル内の水抜き計画の前提条件としては、過去の標準Ⅱ型トンネル掘削時に経験した岩盤部水頭低下速度0.35 m／日以下とすることとした。また、水抜き途中の工程にトンネルおよび地盤の安定を確認する水位保持期間（1週間程度）を設けた。この計画に沿って水抜きを行った結果を図6（福岡市交通局，2019a）に示す。結果として

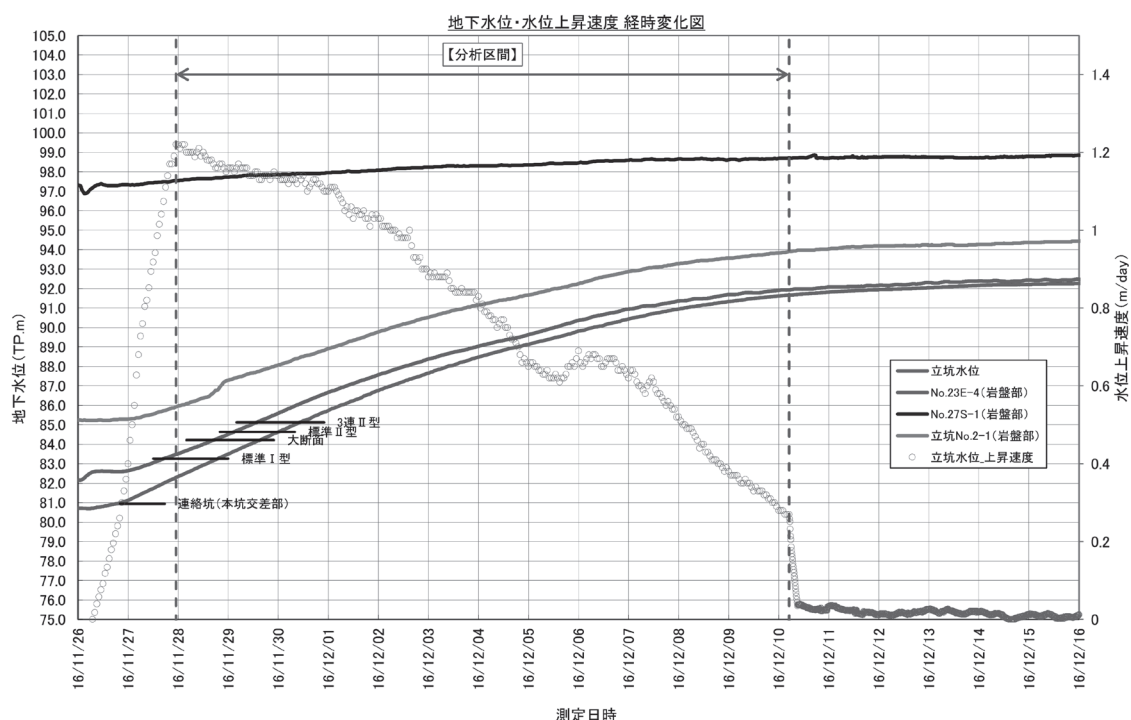


図4 排水ポンプ停止後の地下水変化と水位上昇速度（福岡市交通局，2017）

77日間で水抜きを完了することができ、水抜き時において、地表沈下、岩盤層の層別沈下では変位がほとんど発生しなかった。また、土砂部地下水

位は、想定外の低下など異常な挙動は見られず、安定していた。岩盤部水頭は立坑水位・トンネル坑内水位に追従して変化した。なお、43日以降、

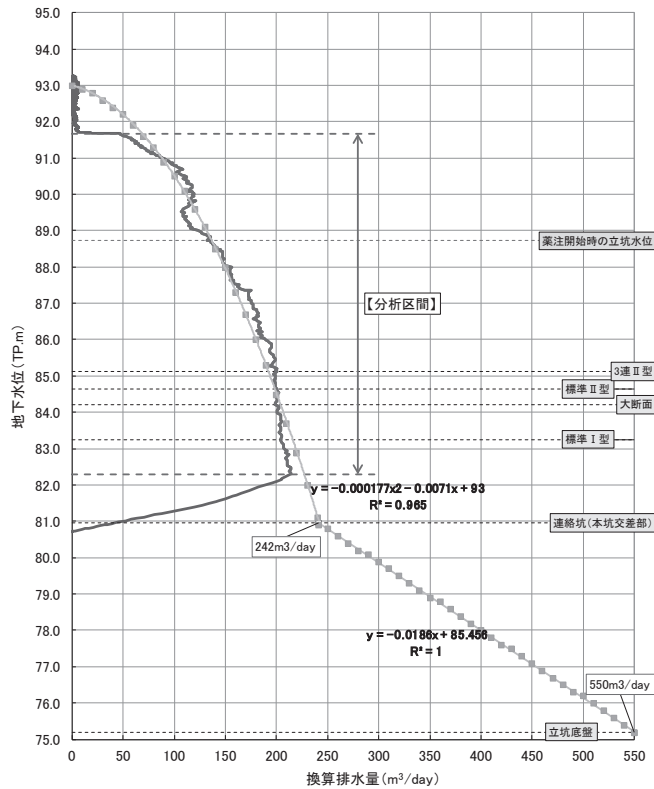


図5 立坑水位と換算水量（福岡市交通局，2017）

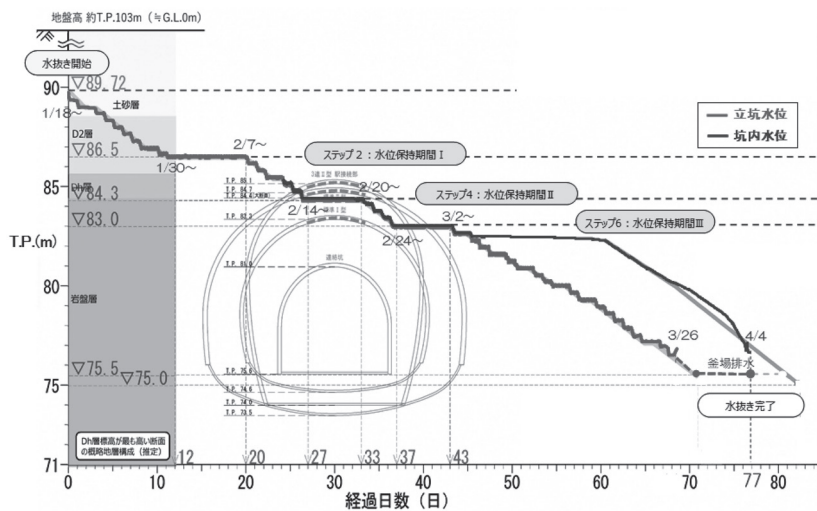


図6 水抜き工事による岩盤部水位変化（福岡市交通局，2019a）

立坑水位とトンネル坑内水位に差が生じているが、これは、トンネル内に堆積している土砂が堤防のような状態となり、坑内水位の低下を遅らせたものと考えられる。このようなことから、この水抜き工事においてトンネル周辺の地下水環境に顕著な影響は与えていないと判断できる。

5. 土砂撤去後の地下水の状況

水抜き完了後、2019年4月25日より土砂撤去を開始し、2019年9月30日に土砂撤去は完了した。土砂はトンネルの博多駅側まで到達していたが、満砂状態ではなく、土砂がトンネルをすべて埋め尽くしていた箇所は陥没箇所周辺のみであり、土砂が堆積した箇所のトンネル上部には空洞があり、その上は地下水で満たされていたものと考えられる。陥没事故直前から土砂撤去が完了するまでの土砂部および岩盤部の地下水位の変化を図7（福岡市交通局、2019b）に示す。図に示す通り、土砂部の地下水位は、降雨量に敏感に反応してお

り、水抜き時にもほとんど変化がないことがわかる。一方で、岩盤部の地下水位は水抜き完了後は、陥没発生前の水位よりわずかに高いものの、土砂撤去完了後には、ほぼ陥没前の状況に戻ったことが確認される。

6. おわりに

福岡市七隈線陥没事故から、今年で7年が経過することになる。事故後、土砂撤去が完了した後のトンネル内の陥没現場の状況を図8、写真1（福岡市交通局、2019b）に示す。地表での大規模な陥没跡を見る限り、トンネル内ではかなり大きな損傷が生じていたのではないかと想像する人が多いと思われるが、実際には、図に示すように、トンネル内から確認された損傷部は横方向4.5 m、縦方向0.9 m（鋼製支保工1区間分）の小さなものであり、吹付コンクリートと鋼製支保工には欠損や変形は認められず、漏水もほとんど確認されなかった。

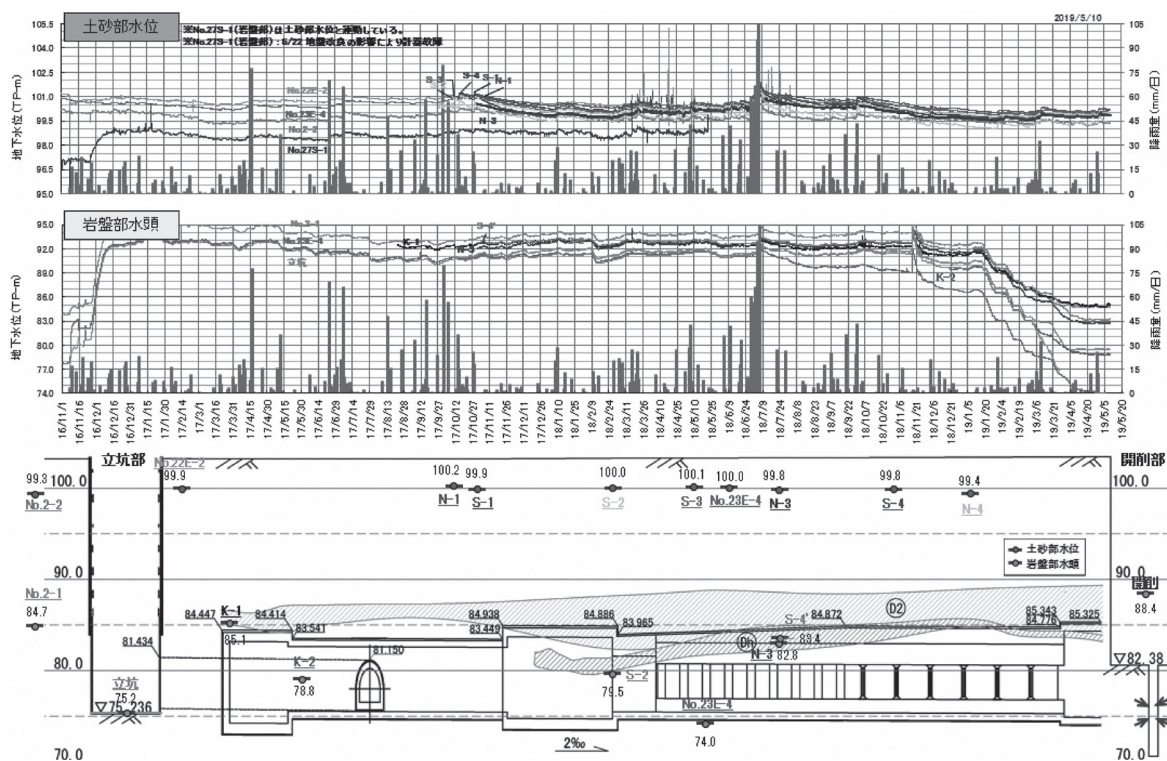


図7 陥没事故直前から土砂撤去完了時までの地下水変化（福岡市交通局、2019b）

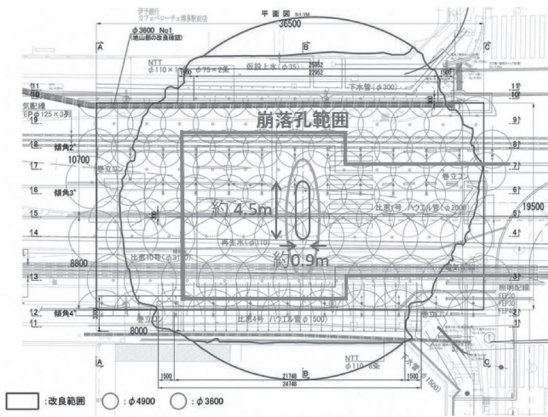


図8 陥没孔の形状寸法 (福岡市交通局, 2019b)



写真1 陥没孔の現場写真 (福岡市交通局, 2019b)

現場の地質の性質にもよるが、ほんの小さな損傷が、これだけ大きな事故につながったことを我々技術者はよく考える必要がある。また、水没したトンネルから水を抜くという工事は、先行する事例はほとんどなく、これに対して、事業者、施工者らは、考えられうる知識・技術を用いて無事に成功させ、トンネルを再び掘削し完成にたどりついた点は、彼らの大きな努力の賜物であると考えられる。

最後に、現時点では、事故後の第三者委員会(筆者もその委員の一人であったが)による報告書(土木研究所, 2017)が作成されたことで、今回の陥没の原因究明が完了したようになっているが、報告書作成段階では、崩壊箇所をトンネル内部から確認できない状況下にあった。そのため、個人的な意見であるが、水抜き、土砂撤去を行った後に再度この報告書についても内容の確認、再検討を行う必要があるのではないかと思う。そのような観点から、今回、本報告を通して、実際に発生した現場の状況を記録として残すことができたことは大変貴重なことと考えられる。

謝 辞

本報作成にあたり、福岡市交通局ならびに大成建設(株)より貴重な資料をご提供いただいたことに関して、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 土木研究所 (2016a) : 福岡市地下鉄七隈線延伸建設工事における道路陥没事故に関する検討委員会, 第1回検討委員会, 資料3. https://www.pwri.go.jp/jpn/kentou-iinkai/pdf/161129_shiryuu_003.pdf. (2023.4.9閲覧)
 - 土木研究所 (2016b) : 福岡市地下鉄七隈線延伸建設工事における道路陥没事故に関する検討委員会, 第1回検討委員会, 資料5. https://www.pwri.go.jp/jpn/kentou-iinkai/pdf/161129_shiryuu_005.pdf. (2023.4.9閲覧)
 - 土木研究所 (2017) : 福岡市地下鉄七隈線延伸建設工事における道路陥没事故に関する検討委員会, 報告書. <https://www.pwri.go.jp/jpn/kentou-iinkai/pdf/houkokusyo.pdf>. (2023.4.9閲覧)
 - 福岡市交通局 (2017) : 第7回福岡市地下鉄七隈線建設技術専門委員会, 委員会資料. <https://subway.city.fukuoka.lg.jp/topics/detail.php?id=858>. (2022.8.24閲覧)
 - 福岡市交通局 (2019a) : 第13回福岡市地下鉄七隈線建設技術専門委員会, 委員会資料. <https://subway.city.fukuoka.lg.jp/topics/detail.php?id=852>. (2022.8.24閲覧)
 - 福岡市交通局 (2019b) : 第14回福岡市地下鉄七隈線建設技術専門委員会, 委員会資料. <https://subway.city.fukuoka.lg.jp/topics/page.php?id=933>. (2022.8.24閲覧)
- (受付 : 2023年4月8日, 受理 : 2023年9月5日)