

3. 防災小委員会報告

3.1. 防災小委員会の活動概要

本小委員会では、当活動期間（平成 29 年度～31（令和元）年度）中において、街づくりにおける地下空間の役割を重視し、地上・地下を含めた都市のあり方を見据えながら、地下空間における防災について総合的かつ実践的な研究を推進することを目的として活動を行った。

検討内容は、「災害に強い街づくりにおける地下空間の防災のあり方」を主テーマとし、以下に示す 4 つのサブテーマ（地下空間実態調査、地下火災の調査・研究、地下浸水に関する研究、地下空間防災教育・啓発）を軸に、調査・研究活動を実施した。なお、サブテーマは個々に調査・研究活動を実施するとともに、小委員会全体の活動としてのとりまとめを行った。

サブテーマに関する調査・研究成果を基に、地下空間での発生が想定される火災、浸水などの災害の避難、被害軽減に資する指標、情報の提供を進め、地下空間における防災対策、安全性の向上を目指した。また、今期も前期に引き続き一般向けセミナーを開催し、本小委員会の活動を通じて得られた知見を広く知ってもらうための試みを積極的に行うとともに、国際交流を目的とした国際ワークショップも開催した。

以下では、今期実施された調査、研究活動の内容について、その概要を項目別に示すこととし、詳細な資料（既発表論文等）については後半にまとめて示すこととした。

3.2. 今期の調査、研究活動の概要

今期は、2017 年度第 1 回の防災小委員会において、小委員会の活動方針についての意見交換が行われた。意見交換の結果は、18 項目に大別され、そのうち以下の 5 項目が今期開始当初における重要な課題として取り上げられていた。

- ・研究、防災に特化せずに広いテーマに取り組む
- ・委員会の成果をうまくまとめ、広く報告する
- ・他分野の人材も取り入れる
- ・小委員会の中で情報を蓄積する場所を用意する
- ・企業の地下施設の現場などを見学する機会を作る

上記 5 項目のうち、小委員会として取り組むテーマや報告の機会については、後述の活動報告に示す通り、前期に引き続き継続的に実行されている。他分野の人材については、関西大学の安室先生を委員に迎えるなどの進展が見られた。情報蓄積の場所は、既存の委員会サーバを利活用することで対応可能ではあるが、今期中の利用は十分とはいかず、現場見学の機会ともども今後課題を残した。

上記 5 項目の他に今期活動中に展開が見られた項目および課題を残した項目は以下の通りである。

【展開が見られた項目】

- ・地下空間のハザードマップ →
既存のハザードマップとの対応が、中部大・武田先生の研究グループで進展した
- ・国際シンポジウムを検討する →
戸田先生、石垣先生、張 先生のご尽力により、国際ワークショップを開催した
- ・可視化・最適化問題としての取り組み →
関西大学の安室先生、檀先生との連携が行われた
- ・将来にむけての運用方法、リニューアルの提言 →
維持管理小委員会とのコラボレーションが始まった
- ・地下管理者の連携 →
2019 年 7 月に福岡での防災・減災セミナーを共同で開催した

【課題を残した項目】

- ・地下火災に関する取り組み →
小委員会委員からの話題提供のみに留まっている

このような小委員会の活動方針に関する議論を踏まえて行われた今期の小委員会活動の概要を以下順に示す。

3.2.1. 地下空間実態調査

地下空間実態調査は、地下空間利用の実態調査、特に防災対策に有効活用されている事例を中心に、規模の大小を問わず現場を対象とした調査研究を行うものであり、小委員会全体での取り組みを行っている。ここでは、洪水被害に関する現地調査として2017年8月のハリケーンハービーによるヒューストンの洪水被害と、大谷採石地下空間の有効活用を空間の構造と人間が受ける期待感や安心感との関係性に関する取り組みについて概説する。

2017年8月、カリブ海上で発生したハリケーン・ハービーは5段階のうち2番目に強い「カテゴリー4」の勢力でテキサス南東沿岸部に上陸して、ヒューストンを始めとする沿岸部の各地に大きな被害をもたらした。ハリケーン・ハービーは8月下旬にテキサス沿岸の中央部付近に4日間近くにわたって停滞し、その間に史上最大規模の降雨イベントを広範囲にもたらし、ヒューストンでは甚大な洪水被害が発生した(図1)。本小委員会メンバーが参加したヒューストンでの調査は、2018年4月19日～21日にかけて実施された。

豪雨に伴う河川からの外水はん濫と、河川水位の上昇に伴う内水はん濫が同時に発生し、ヒューストン都市圏であるハリス郡とガルベストーン郡で甚大な被害が発生した(図2)。ヒューストン市街地では、大規模な浸水に伴う自動車の水没などが多数発生していたが、地下空間に関する目立った被害は報告されていない。ハリケーン・ハービーによる被害額は、2005年のハリケーン・カトリーナに次ぐ規模となり、人的被害は68名(うち、ヒューストン市街地では36名)に達した。

地下空間の有効活用に関しては、栃木県宇都宮市内の大谷採石地下空間を対象にした研究を行っており、地下空間としての構造安定性(安全性)と、空間に対する安心感や期待感といった感覚面の関連についての検討を行っている。

大谷採石地下空間は、大谷石を地下採石場から採掘した後の広大な地下空間であり、その空間資源を様々な施設の設置場所として活用する計画がある。かつて大谷採石地下空間では陥没事故が発生したが、その後の有効活用に向けた動きが活発になっており、一部はすでに観光目的に使用されている。ただし、観光客数が減少傾向にあることから、地下空間利用時の集客効果を検討するために、地下空間への入り口形状と形状の異なる入り口に対する力学的評価を行い、感性と力学を総合した地下空間

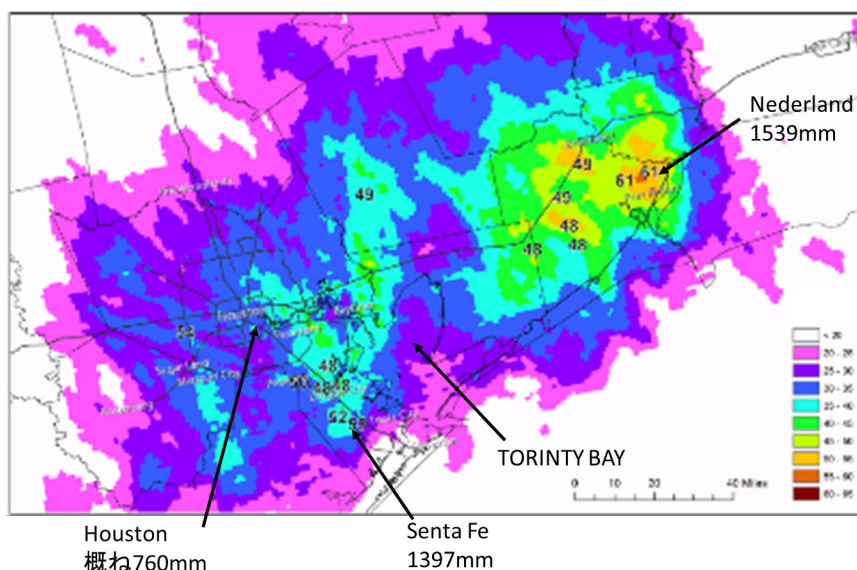


図1 ハリス郡付近における累積降雨量(8月25日～9月1日)



図2 はん濫の様子（ヒューストン北部，左）とヒューストン市街で水没した自動車（右）

への入り口形状のあり方を検討した．また，現在の太谷採石地下空間を支える残柱を対象とした安全性評価と，残柱表面の不連続面（キズ）や支保工などに対する安全・安心感との関係についても検討した．

太谷採石地下空間は，太谷石を地下採石場から採掘した後の広大な地下空間であり，その空間資源を様々な施設の設置場所として活用する計画がある．かつて太谷採石地下空間では陥没事故が発生したが，その後の有効活用に向けた動きが活発になっており，一部はすでに観光目的に使用されている．ただし，観光客数が減少傾向にあることから，地下空間利用時の集客効果を検討するために，地下空間への入り口形状と形状の異なる入り口に対する力学的評価を行い，感性と力学を総合した地下空間への入り口形状のあり方を検討した．また，現在の太谷採石地下空間を支える残柱を対象とした安全性評価と，残柱表面の不連続面（キズ）や支保工などに対する安全・安心感との関係についても検討した．

その結果，地下空間への入り口形状の安全性評価については，立坑丸形が最も安全性が高く，期待感評価の高さは丸型，四角型，三角型の順であることが示された．また，完成と力学を総合的に議論できることの可能性も示している．地下空間を支える残柱については，節理が存在しない場合には上載荷重を十分に支えることができ，節理の存在とその角度に応じて強度が低下すること示された．残柱への対策がある場合には，対策が講じられない場合よりも安心感の評が高く，加えて対策工である鉄筋を隠す対策が高評価であることも示されている．

資料

- ①星野・清木：太谷採石地下空間入口への期待感に基づいた構造安全性に関する検討
- ②BUI・DINTWE・清木：太谷採石地下空間における残柱の安全性と安心感との関連について

3.2.2. 地下浸水に関する研究

防災小委員会では，大阪市中心部の梅田地下街を対象とした外水，内水による地下浸水に関する検討を継続的に実施してきた．今期は福岡，京都の地下空間を対象とした検討，三大都市圏における洪水はん濫に関する浸水解析，津波はん濫に伴う地下鉄線内の浸水に関する検討を行うとともに，ハザードマップを用いた地下街の浸水脆弱性に関する検討を行っている．また，地下浸水時の解決すべき課題として，地下駐車場内での自動車の漂流や流入したはん濫水が人体に作用する流体力に関する実験的研究も重ねている．

ここでは、福岡、京都を対象とした洪水はん濫時の浸水解析と、想定最大降雨による内水はん濫時の地下浸水に関する事例について概説するとともに、地下空間へ流入したはん濫水が人体に作用する際に幅の狭い水路においてリスクがより高まることを示した実験的研究の成果についても示す。

福岡市、京都市の地下空間への浸水を対象とした検討では、いずれも河川からのはん濫（外水はん濫）発生時の地上でのはん濫および地下空間への浸水を取り扱っている。福岡市の例では、平成11年に発生した水害と同じはん濫が発生した場合を取り上げ、地上でのはん濫状況、地下鉄線内への浸水状況を検討するとともに、地下空間入り口への止水板の設置の効果、河川からの越流流量を増加させた場合の影響についても検討している。地下空間入り口への止水板の設置は地下空間への浸水に対して有効であることが示された。また、スーパー台風などによる水害規模の増大を想定した越流流量を増加させた場合の検討では、地上でのはん濫の増大に比べて地下空間への影響の程度が大きくなかったことが示され、地域的な浸水特性とともに止水板の重要性が示された。

京都市の例では、過去に実施された模型実験と同じはん濫条件を設定し、三条大橋から御池大橋間の鴨川からの外水はん濫を対象としている。ここでの解析結果は過去に実施されたシミュレーション結果と同様であることが確認され、解析モデルの妥当性が示された。越流箇所を変えた場合には、はん濫箇所および地域的な特性に応じたはん濫が発生することが示され、地下空間入り口への止水板設置の効果は前出の福岡市の事例と同様その効果が確認された。また、解析を行う際の計算格子のスケールによる解析結果への影響についても検討しており、細かな計算格子（ここでは10m格子）の場合に微地形の影響をより捉えた解析結果が出ることを示された。

内水はん濫を対象とした解析では、想定される最大降雨が生じた際の地下空間への浸水を取り上げ、大阪市内の梅田地下街における浸水危険度について検討している。対象となる大阪・梅田地下街は日本を代表する大規模な地下街であり、地下街周辺には7つの地下鉄駅が存在するエリアである。解析では、時間降雨量141mmの降雨を外力とし、降雨形態の違いによる影響も考慮するため前方集中型、中央集中型、後方集中型の3つの降雨形態を用いて、各降雨形態の地上と地下の解析を行っている。

解析の結果、降雨形態と地域特性（高低差）の兼ね合いにより、浸水開始から収束までの時間がずれることや、地下空間、地下鉄線内での浸水状況の解析、さらには地下鉄線を通じてはん濫水が対象地域外にまで浸水を及ぼすことなどが示されている。地下街と地下鉄の安全避難度評価には単位幅比力が用いられ、高齢女性を対象とした避難困難度の解析によると、降雨形態により危険となるエリアが異なること、加えて避難が困難となる状況は中央集中型の降雨形態であることが示されている。

地下空間は周囲よりも相対的に低い場所に位置するため、はん濫水が最終的に集中することから、甚大な人的被害の発生が懸念される。これまでの研究においては、地下からの避難行動について歩行の安全性に関する検討は行われているが、人体に作用する抗力係数や水深変化を考慮した危険性の指標や危険となる流速や水深までは示されていない。また、これまでの検討は幅の広い流れ場を対象としており、狭い通路内で予想される水深のせき上げの影響は考慮されていない。そこで、1/6スケールの大きな人体模型を用いた水路実験を実施し、水路幅が狭い（通路の幅が狭い）状況下で姿勢が変わった際の人体に作用する抗力や、水深のせき上げを考慮した水難事故発生の危険性に関する検討が行われた。

実験では、転倒を考慮した姿勢の変化による影響を調べるため、座位と立位での抗力の比較検討が行われるとともに、狭い通路内では水深のせき上げに伴う人体に作用する抗力の変化についても考察されている。また、算出された抗力係数に基づいて、幅の狭い通路内で水難事故が想定される実スケールでの水深および流速の条件についても検討された。実験結果から、通路幅の狭い場合には、通路幅の広い場合と比べて人体に作用する抗力が立位で1.7倍、座位で2.1倍となることが示された。また、通路内に人体があることにより水深のせき上げが発生し、そのために水深が増加すること、流水の上流側で水深が大きくなることが抗力の増加要因として挙げられている。また系統だった実験の結果から、水難事故の危険性が大きくなる水深・流速の判読図が示され、通路幅の狭い場合には、成人男性が転倒すると水深0.225mで流速1.22m/s、水深0.18mで流速1.47m/s程度で水流によって押し流される危険性が高いことが示された。

資料

- ③武田・村瀬・三木・中島：福岡市の地下空間を考慮した浸水解析
- ④佐藤・武田・村瀬・藪下：京都市の地下空間を考慮した浸水解析
- ⑤太田・石垣・尾崎・戸田：想定最大降雨による内水はん濫時の地下街の浸水危険度について
- ⑥岡本・戸田・岡・當麻：幅の狭い地下通路における浸水時の危険性の評価に関する実験的研究

3.2.3. 地下空間防災教育・啓発

防災小委員会では、地下空間での防災、特に地下空間における浸水被害に対する防災教育および啓発に関わる活動を経年的に展開している。防災教育の普及は、個人レベルおよび地域全体の防災力向上において重要な意味を持つ。本小委員会では、浸水時の避難に関する模型実験や、地下空間に関わる水害の状況をわかりやすく説明するためのジオラマ模型などを用いた”体験型”の防災教育、防災学習を行っている。また、防災小委員会での活動成果を広く発信するための一般向けのセミナーも定期的に行い、防災対策のソフト面の向上にも力を入れている。ここでは、ジオラマ模型を用いた水害に関する防災教育と、防災教育を実施している小学校での全学年の保護者を対象とした防災意識調査の結果を概説する。また、今期活動期間中に実施された一般向けのセミナーの開催状況も示す。

防災教育に用いているジオラマ模型は、河川と海に接する都市域を模した模型であり、模型内で外水・内水はん濫、津波はん濫を起こすことが可能であり、地上及び地下での浸水の発生を表現させることが可能であることに加え、地下の雨水貯留施設や地下への浸水に対する止水板の効果を確認することができる。

ジオラマ模型を用いた防災教育は、河川からの外水はん濫による浸水が想定されるエリアの小学校、および津波浸水域に指定されているエリア内に位置する小学校において行われた。防災教育の実施においては、事前および事後アンケートを実施することで、防災教育の実施に伴う防災意識や知識の変化を検討した。また、体験型の防災教育と講義型の防災教育の効果についても検討した。

その結果、ジオラマ模型を用いた防災教育の実施により、水災害の種類や発生メカニズム、被害、防災対策を効果的に伝えることができることが確認された。また、講義型と体験型の防災教育の比較から、小学生向けに工夫を凝らした講義方の防災教育（講師が説明するだけではなく、ジグソーパズルのような防災グッズを使用）により体験型と同様の防災教育の効果があることが確認されている。ただし、参加した児童らの感想からは、ジオラマ模型を用いた防災教育の方が参加意欲および内容に対する興味の度合いが高いことも確認された。

小学校の全学年の保護者を対象とした津波防災意識調査は、津波浸水域に指定されているエリア内に位置する小学校での防災教育と並行して実施された。意識調査は、小学校を通じて各家庭向けにアンケートを配布・回収する形で実施された。アンケートは全部で26の設問があり、地震発生時の避難行動や南海・東南海地震に伴う津波に関する設問、および地域の避難場所や情報収集の方法、防災対策に関する設問から構成されている。アンケートの配布総数は269であり、回収した数は221（回収率82.2%）であった。

アンケート結果より、津波および津波による災害に対する意識は総じて高く、避難のタイミングも早い時期を選択する回答が多いことが確認された。また、設問に対するコメントからは、アンケートへの回答に際しても実際の災害発生時を想定しながら真剣にご回答いただいていることがうかがえる結果となった。

資料

- ⑦戸田・石垣・安田・馬場・中島：ジオラマタイプのミニチュア模型を用いた水防災教育の実践
- ⑧馬場・小田・石垣・戸田：小学校児童保護者を対象とした津波防災意識調査—白浜町西富田小学校での調査—

今期活動期間においては、以下の一般向けのセミナーが開催された。各セミナーの概要は以下に示す通りである。

2017年12月9日、地下空間の防災・減災セミナー2017（大阪）

2018年12月22日、地下空間の防災・減災セミナー2018（大阪）

2019年7月20日、地下空間の防災・減災セミナー 地下空間の防災に関わる取り組み
—名古屋・大阪・福岡を事例として—

2019年12月14日、研究集会「都市域での水難事故発生の危険性の解明とその対応策」

(1) 地下空間の防災・減災セミナー2017（大阪）

【主催】 公益社団法人 土木学会地下空間研究委員会（担当：防災小委員会）

【開催日時】 2017年12月9日（土）14:00～17:00

【開催場所】 関西大学梅田キャンパス 7階 701ルーム

【参加者】 60名

【開催報告】

- ・ 大きな問題はなく、予定通り開催できた。
- ・ 今回は、大阪地区での開催であり、大阪府寝屋川流域の大深度地下河川による治水対策を題材とし、辻内 元博 氏（大阪府寝屋川水系改修工営所）より「寝屋川北部地下河川における大深度地下使用に向けた水理模型実験について」と題して講演いただいた。
- ・ 地下浸水を引起こす要因である高潮を題材とし、安田 誠宏 氏（関西大学）より、「三大湾における高潮の将来変化予測と集積被災リスク評価」と題して講演いただいた。
- ・ 小委員会からは、武田委員長（中部大学）、川池委員（京都大学）より、都市部の地下浸水を題材として、講演を行った。



地下空間の防災・減災セミナー2017（大阪）開催状況

(2) 地下空間の防災・減災セミナー2018（大阪）

【主催】 公益社団法人 土木学会（担当：土木学会地下空間研究委員会）

【開催日時】 2018年12月22日（土）13:30～17:00

【開催場所】 関西大学梅田キャンパス

【参加者】 72名

【開催報告】

- ・ 関西大学、土木学会地下空間研究委員会（防災小委員会）の共催にて、地下空間の防災・減災セミナー2018を開催し、大きな問題もなく、予定通り開催できた。
- ・ 防災小委員会からは、酒井幹事長・委員（鉄建建設）より「地下空間研究委員会活動概要ならびに活動成果の一般社会への発信」、岡本委員より「流水によって生じる水難事故の危険性に関する実験的研究」の話題提供を行った。

- ・ 関西大学からは、石垣教授より「水災害時における早期対応・早期避難支援について」、安室教授より「拡張現実感による地下空間での水害予測情報の可視化」、檀准教授より「地下街出入口への最適な止水板設置順序の算出」の各題にて講演をいただいた。
- ・ 各話題提供を通じて、地下空間の水害に関して、①地下空間の防災ハザードマップの必要性や、その情報提供のあり方、運営（マネジメント）手法の必要性、②最先端の技術であるARの活用方策、③地下浸水を防ぐための止水板設置の最適化技術の援用による浸水被害の軽減効果、④水難事故時の危険性評価などについて意見交換を行った。
- ・ また、委員会としての活動内容、成果の社会への還元、発信について、今後も積極的に展開していくことを確認した。



地下空間の防災・減災セミナー2018（大阪）開催状況

(3) 地下空間の防災・減災セミナー 地下空間の防災に関わる取り組み —名古屋・大阪・福岡を事例として—

【主催】 公益社団法人 土木学会（担当：土木学会地下空間研究委員会）

【開催日時】 2019年7月20日（土）13：30～17：00

【開催場所】 福岡大学図書館1階 多目的ホール1

【参加者】 72名

【開催報告】

本セミナーでは、全5件の話題提供があった。小委員会からは、武田委員より名古屋市域における洪水による地下空間の災害の危険性、そのシミュレーションの様子、福岡市への適応事例、尾崎委員より、うめだ地下街を中心としたシミュレーションによる地下空間の内水はん濫の危険性および止水版設置に対する対策の検討事例が紹介され、大森委員からは老朽化が進行する地下街の整備・改修の重要性や、国の補助の在り方などが示された。続いて地元の福岡に関連して、福岡市の藤井様より福岡市の浸水対策に関する話題提供、福岡地下街開発の下野様からは天神地下街の浸水対策の様子が紹介された。



地下空間の防災・減災セミナー 地下空間の防災に関わる取り組み
—名古屋・大阪・福岡を事例として— 開催状況

(4) 研究集会「都市域での水難事故発生の危険性の解明とその対応策」

【主催】 京都大学防災研究所，土木学会地下空間研究委員会防災小委員会（共催）

【開催日時】 2019年12月14日（水） 13：15～16：30

【開催場所】 宇治おうばくプラザ（京都大学宇治キャンパス）セミナー室4，5

【参加者】 49名

【開催報告】

研究集会冒頭に，本研究集会代表の戸田圭一先生からご挨拶ならびに研究集会の趣旨説明が行われた．その後，5名の話題提供者から，「地上および地下の浸水と課題」，「地上および地下の浸水と課題」，「地下街での群集避難，流水中の歩行のシミュレーション」，「河川・側溝・用水路での水難事故の危険性に関する実験的研究」，「都市域への河川水はん濫による大規模災害の危険性の解明とその対策」の話題提供が行われた．各話題提供ならびに話題提供後の総合討論では，出席者間での多くの，かつ有意義な意見交換が行われた．



研究集会「都市域での水難事故発生の危険性の解明とその対応策」開催状況

3.2.4. 国際交流事業

今期活動期間中には，防災小委員会として初めての国際交流事業（国際ワークショップ）を実施した．初めての試みでもあり，手探りでの実施ではあったが，関係各位のご協力を得て，無事開催にこぎ着け，以下の内容で実施することができた．

The 2nd International Workshop on Urban Flood Management (UFM2019)

【主催】 土木学会地下空間研究委員会防災小委員会，高知大学「革新的な水・バイオマス循環システムの構築」プロジェクト（共催）

【開催日時】 2019年9月11日（水） 9：00～17：45

【開催場所】 高知大学学術情報基盤図書館 6階メディアホール

【参加者】 60名

【開催報告】

ワークショップ冒頭に，高知大学学長・桜井克年先生のご挨拶，共催の地下空間研究委員会防災小委員会から委員長・馬場の趣旨説明，地下空間研究委員会の紹介につづき，高知大学「革新的な水・バイオマス循環システムの構築」プロジェクト代表の藤原拓教授からご挨拶ならびにプロジェクトの概要説明があった．その後，中国国家減災委員会専門家委員会・程曉陶教授からの基調講演が行われ，引き続き都市域のはん濫災害およびその対応策，はん濫災害に関連する内容の計12件の話題提供が行われた（1件の話題提供が事情によりキャンセル）．各話題提供に続いての質疑応答では，出席者間での多くの，かつ有意義な意見交換が行われた．また，昼食後の時間を使って，高知大学の張准教授（地下空間研究委員会防災小委員会委員）からはん濫災害に関する防災教育で使用するジオラマ模型のデモンストレーションも行われた．

資料

⑨The 2nd International Workshop on Urban Flood Management (UFM2019) プログラム



The 2nd International Workshop on Urban Flood Management (UFM2019)開催状況

3.3. 今期の活動内容に関するまとめ

今期の防災小委員会の活動では、冒頭に示した4つのサブテーマに沿った調査、研究活動を展開した。また、小委員会開催時には委員会内外の方をお招きして話題提供をいただくことにより、“防災”に関わる広範な事例の情報の収集および共有を図った。小委員会の開催と並行して、一般向けのセミナーの開催、委員有志による現場見学なども実施するとともに、2019年度には高知大学の協力を得て、国際ワークショップも実施した。今期の主な活動内容を、以下にまとめる。

- 地下空間実態調査
海外での水害事例において、ハリケーンによる大規模な水害に対する防災対策の調査を実施した。また、大谷採石地下空間の有効活用を空間の構造と人間が受ける期待感や安心感との関係性に関する取り組みも行った。
また、ICTを活用した地下街周辺の滞留者数の調査分析や、地下街防災事業の一環として行われた地下街全体の3次元モデルの作成と検証、および改修計画などへの3次元モデルの利活用への取り組みに関する情報収集、情報共有が図られた。
- 地下火災の調査・研究
地下空間で発生した火災の事例調査、および調査結果からの問題点の抽出を通じて、地下火災の特性を踏まえた防災対策、被害軽減策等について研究を実施する予定であったが、今期はトンネル防災に関する話題提供のみとなり、有効な活動はできなかった。
- 地下浸水に関する研究
福岡、京都の地下空間を対象とした検討、三大都市圏における洪水はん濫に関する浸水解析、津波はん濫に伴う地下鉄線内の浸水に関する検討のほか、最大規模の降雨を想定した浸水解析などを行うとともに、ハザードマップを用いた地下街の浸水脆弱性に関する検討を行った。加えて、

地下空間へ流入したはん濫水が人体に作用する際に幅の狭い水路においてリスクがより高まることに関する実験的研究が実施され、幅の狭い通路内で水難事故が想定される実スケールでの水深および流速の条件についての検討が行われた。

- 地下空間防災教育・啓発

地下空間での防災，特に地下空間における浸水被害に対する防災教育および啓発に関わる活動として，ジオラマ模型を用いた水害に関する防災教育を小学校で実施するとともに，一般向けのセミナーも活動期間中に4回開催した。

最後に，今後も引き続きこれらの調査，研究活動を継続するとともに，他小委員会と協同した形での展開，従来の想定を上回る規模の災害外力に対する被害の予測および避難に関する検討を行う。また，地下空間における火災についても浸水との両面への備えを視野にいれた被害軽減，避難行動に関する検討を目指す。

参考資料一覧

- ①星野 天海・清木 隆文：大谷採石地下空間入口への期待感に基づいた構造安全性に関する検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 24 巻，2019.
- ②Huy Thanh BUI・Tumelo DINTWE・清木 隆文：大谷採石地下空間における残柱の安全性と安心感との関連について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 25 巻，2020.
- ③武田 誠・村瀬 将隆・三木 研弥・中島 勇介：福岡市の地下空間を考慮した浸水解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 24 巻，2019.
- ④佐藤 大介・武田 誠・村瀬 将隆・薮下 大貴：京都市の地下空間を考慮した浸水解析，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 25 巻，2020.
- ⑤太田 和樹・石垣 泰輔・尾崎 平・戸田 圭一：想定最大降雨による内水氾濫時の地下街の浸水危険度について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 24 巻，2019.
- ⑥岡本 隆明・戸田 圭一・岡 宗佑・當麻 泰史：幅の狭い地下通路における浸水時の危険性の評価に関する実験的研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 25 巻，2020.
- ⑦戸田 圭一・石垣 泰輔・安田 誠宏・馬場 康之・中島隆介：ジオラマタイプのミニチュア模型を用いた水防災教育の実践，京都大学防災研究所年報，第 60 号 B，pp.692-700，2017.
- ⑧馬場 康之・小田 裕矢・石垣 泰輔・戸田 圭一：小学校児童保護者を対象とした津波防災意識調査—白浜町西富田小学校での調査—，京都大学防災研究所年報，第 61 号 B，pp.602-614，2018.
- ⑨The 2nd International Workshop on Urban Flood Management (UFM2019) プログラム

大谷採石地下空間入口への期待感に基づいた構造安全性に関する検討

STUDY OF STRUCTURAL STABILITY FOR OYA UNDERGROUND QUARRIES BASED ON ITS EXPECTATION FOR THE ENTRANCE STRUCTURE

星野 天海¹・清木 隆文²

Amami HOSHINO¹, Takafumi SEIKI²

Many underground quarries for Oya tuff are ruined in Oya, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, Japan. And only a few of them are utilized unfortunately. Additionally Number of visitors decreased recently. Effective Attraction is needed to make the visitors increase there. To do that, it is important for us to use the advantage of the undergrounds. This study focuses to spread questionnaire to measure the expectation to entrance structure for the underground. And the authors measure the factor of the structural stability by numerical analysis. Finally we propose a way for evaluation method combing the expectation and the stability.

Key Words : Oya underground quarry, entrance structure, expectation, structural stability, safety

1. はじめに

栃木県宇都宮市大谷町では採石跡地下空間が多数放置されており、現在、再利用されている地下空間は、ごく一部である。また、観光客数は減少傾向にあり、この現状を改善するため、地下空間を有効利用し、集客効果を図ることが求められている。このために、ポジティブな側面を生かすことが大谷採石地下空間への来客数を増やすための1つの手段だと考えられる¹⁾。よって、本研究ではこの先に「何かありそうな」「行ってみたい」というような地下空間入り口に対する期待感²⁾を既往の研究³⁾を参考にして、アンケート調査により分析する。また基礎的なアプローチとして、単純な地下空間入口形状を6種類示し、それぞれの安全性を力学的に解析することで、各形状の力学的評価と感性的評価の関係を考察することを目的とする。これらの結果に基づいて、感性と力学を総合した地下空間への入り口形状のあり方を検討する。

2. 大谷採石地下空間の入り口構造

大谷採石地下空間の入り口構造は、横坑あるいは立坑であるが、立坑の方が多い。一方でその断面の形状は、その断面には、矩形がほとんどである(図-1)が、場所によっては、円形(あるいは半円形)、三角形断面が見られ



図-1 大谷採石場の入口の例(左：矩形断面の横坑，右：矩形断面の立坑)

る。そこで本研究では、入り口構造として、立坑、横坑、断面形状として矩形、円形、三角形断面を検討対象とする。

3. 構造解析による安全性評価

本研究では、まず、地下空間入り口のひずみによる安全性評価をするために、立坑3つ、横坑3つの単純な構

キーワード：大谷採石地下空間、入口、期待感、構造安定性、安全性

¹(株)ビジュアル(元宇都宮大学学生) Visual Co., Ltd., Post student of Utsunomiya University

²正会員 宇都宮大学准教授 大学院工学研究羽化 Assoc. Prof. Graduate school of Engineering, Utsunomiya University. (E-mail:tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp)

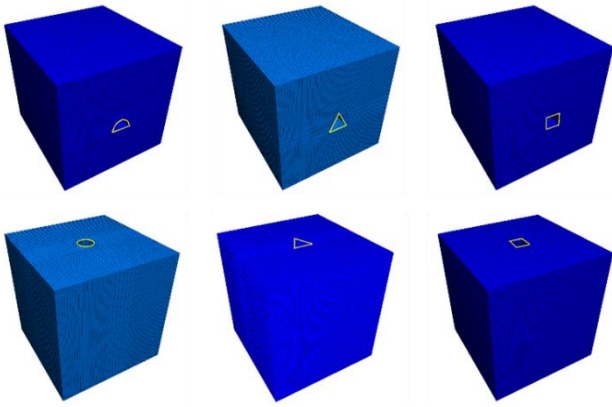


図-2 解析モデル(左：半円型断面，中央：三角形断面，右：四角形断面，上段：横坑，下段：立坑)

表-1 入り口解析に用いた大谷石の物性値

岩盤（大谷石）		
物性	値	単位
体積弾性係数	1.38×10^9	Pa
せん断弾性係数	0.91×10^9	Pa
粘着力	2.1×10^6	Pa
内部摩擦角	30	°
引張強度	1.08×10^6	Pa
密度	1730	kg/m ³

造形状のモデルを対象に解析(図-2，表-1)を行う。

(2) 解析モデルについて

本研究で用いた解析モデルを図-2 に，解析に用いた物性値を既往の研究をもとにより表-1 に示す。解析モデルは，50m×50m×53m の岩盤領域内の中心に断面積32m²で，奥行き50m(以下32m²×50m)の入口と，その先に10m×10m×2mの地下空間を仮定する(なお，本研究では，この32m²×50mの空間を入口部と呼ぶこととする。奥に設定した10m×10m×2mの地下空間は入口部に含めないものとする)。ただし，地下空間地面を地上から同じ深さとするため，横坑と立坑のそれぞれの地上からの深さを50mと仮定する。また，本来は，これらの物性として扱う弾性係数や密度等は，温度依存性や時間経過に伴う劣化による強度低下などを考慮すべきであるが，本研究では単純化のために考慮せず，一定値とした。なお，重力加速度は $g=9.81 \text{ m/s}^2$ とし，鉛直下向きに作用するとした。本解析では有限差分法による解析ソフトFLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, ITASCA 社製, Ver.5.0)によって地下空間入り口のひずみによる安全性評価を行う。

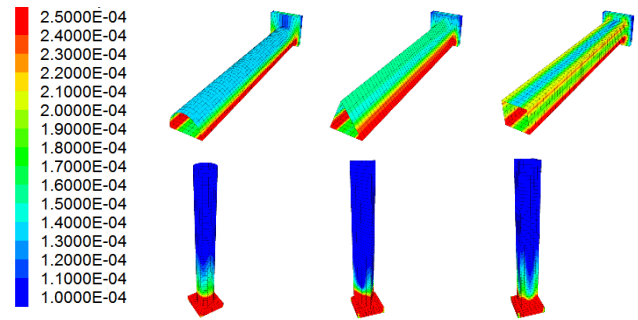


図-3 最大せん断ひずみのコンター(左：半円形断面，中央：三角形断面，右：四角形断面，上段：横坑，下段：立坑)

表-2 安全性評価結果

	立坑		
	丸	三角	四角
$M_d (\times 10^{-4})$	1.284	1.331	1.304
M_s	7.0	6.6	6.9
	横坑		
	丸	三角	四角
$M_d (\times 10^{-4})$	1.866	1.972	1.966
M_s	2.0	1.0	1.1

(3) 構造の安全性評価について

本研究では，安全性の評価は，最大せん断ひずみ分布の広がりに基づき，式(1)を危険指標 M_d として定める。

$$\text{危険指標 } M_d = \frac{\sum(\text{ひずみ}\varepsilon_i \times \text{面積}A_i)}{\text{入口部側面表面積}} \quad (1)$$

ただし，ひずみ ε_i はひずみの大きさによって分けられた各色の値，面積 A_i はその各色部分の面積である。 M_d は，入口部の側面表面積で除して基準化した指標である。この値が小さいほど安全性が高いことを示す。なお，解析範囲は，奥行き10mの入口部であり，その先の地下空間部(10m×10m×2m)は解析に含めないものとする。最終的に本研究では，危険指標 M_d から地下空間入口部の安全性評価値 M_s は，式(1)で得られた危険指標 M_d の最大値に対して安全性の評価値を7とし，その間の M_d に対しては M_s の値を比例させて与え，安全性の評価値 M_s を定める。なお， M_s として数値1～7を与えるのは，快適性の評価値を1～7としたことと合わせるためである。

(3) 解析結果

解析結果を図-2 に示す。横坑は，側面部と底面の接続部の最大せん断ひずみの増分が大きくなる傾向を示す。また立坑と横坑で比較すると，横坑は入口部分(奥行き50m)全域に立坑より大きい土被り圧が作用するので，

表-3 本研究で使した形容詞対

	尺度
a	適当な大きさ — 不十分な大きさ
b	引きつける — 引きつけない
c	清潔な — 汚い
d	刺激的な — 刺激的でない
e	快適な — 不快な
f	完全な — 不完全な
g	管理された — 管理されない
h	もろい — がっしりした
i	広がりのある空間 — 限られた空間
j	装飾的な — こざっぱりとした
k	居心地の良い — 堅苦しい
l	その気にさせる — やめさせる
m	おもしろい — おもしろくない
n	気をそそる — ぞっとする
o	開放的 — 閉鎖的
p	楽しい — いらいらさせる
q	安全な — 危険な
r	安らぎを与える — 平穩を乱す
s	人気のある — 人気のない
t	愉快的な — 不愉快的な
u	爽快にする — 疲れさせる
v	バランスの取れた — バランスの取れない
w	広い — 狭い



図-4 アンケートに用いた写真の原画
(ポストイナ鍾乳洞^a入口部, スロベニア)

造全体が変形している。表-2 に解析結果から得られた危険指標および、安全性評価値を示す。今回の条件では、横坑は入口部分(奥行き 10 m)全域に立坑より大きい土圧がかかり、全体的に変形するので、立坑の安全性評価値が横坑よりも高い結果となった。

4. アンケート調査による期待感評価

(1) 期待感評価尺度の構成

地下空間への入口部(入口構造の表面)を感性的に評価するための尺度(形容詞)を選ぶためのアンケートを行っ

不快な	非常に	かなり	少し	どちらでもない	少し	かなり	非常に	快適な
汚い	1	2	3	4	5	6	7	清潔な
疲れさせる	1	2	3	4	5	6	7	爽快にする
危険な	1	2	3	4	5	6	7	安全な
平穩を乱す	1	2	3	4	5	6	7	安らぎを与える
やめさせる	1	2	3	4	5	6	7	その気にさせる
狭い	1	2	3	4	5	6	7	広い
刺激的でない	1	2	3	4	5	6	7	刺激的な
★総合的に★ 行きたくない	1	2	3	4	5	6	7	行ってみたい

図-5 期待感アンケート回答用紙

た。これは、実際に行うアンケートの予備調査である。この調査では、地下空間入口部の画像のサンプルを被験者に見せて、アンケート用紙に示された形容詞(尺度)に基づき、感じたままに回答してもらった。本研究では、表-3 に示す 23 種の形容詞対を用いた。ここに示した形容詞対は、過去に地下街のアンケートに用いられた Kasmer の環境評価尺度³と呼ばれる形容詞対の中から、筆者らが適切と考えて選んだものである。それぞれ、後に示す図-5 のように、「非常に」「かなり」「少し」「どちらでもない」で表現される 7 段階のスケールを与えている。被験者は、画像を見て、心に感じたまま、各形容詞対のスケールに印をつける。アンケートに使用した画像は、図-4 を基準に、色相を変化させたもの 7 種類、コントラストを変化させたもの 7 種類の計 14 枚である。なお、アンケートの被験者は、大学教員、学生から構成される 7 名である。

(1) 期待感評価アンケートの実施

期待感アンケートは、前節で選んだ 8 種類の尺度(形容詞)と、地下空間入口の総合的な期待感の評価を行うための「行ってみたいー行きたくない」の尺度を加えて行った(図-5)。評価に用いる画像は、図-1 など示す大谷地区の空洞入口の写真をもとに画像ソフト(Adobe Photoshop)を用いて作成した、図-6 に示す 6 種類の画像であ

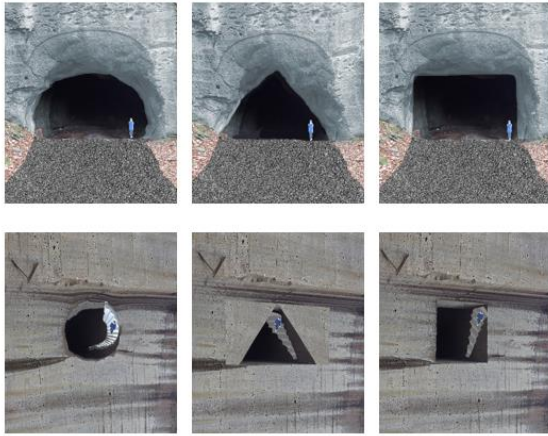


図-6 アンケートに用いた写真の原画
(ポストイナ鍾乳洞⁴⁾入口部, スロベニア)

表-3 本研究で使った形容詞対

	(min.rate)1 ←→ 7(max.rate)	横坑			立坑		
		丸	三角	四角	丸	三角	四角
X ₁	不快な - 快適な	4.13	3.31	4.40	3.57	3.36	3.51
X ₂	汚い - 清潔な	4.05	3.73	4.32	4.07	3.79	3.89
X ₃	疲れさせる - 爽快にする	4.21	3.41	4.23	3.24	3.11	3.31
X ₄	危険な - 安全な	3.65	2.95	4.57	2.93	2.64	3.24
X ₅	平穩を乱す - 安らぎを与える	4.13	3.25	4.17	3.31	3.09	3.31
X ₆	やめさせる - その気にさせる	4.35	3.63	4.13	3.80	3.47	3.49
X ₇	狭い - 広い	4.91	3.04	5.23	2.71	2.63	3.76
X ₈	刺激的でない - 刺激的な	4.12	4.44	3.63	4.99	4.43	4.16
Y	行きたくない - 行ってみたい	4.51	3.64	4.16	4.15	3.41	3.65

る。なお、各空間のイメージがつかみやすいように、人物(身長 165 cm)の写真を埋め込んだ。被験者に画像を見せ、深く考え込まず、感じたままに回答用紙(図-4)に当てはまる尺度に回答してもらう。なお、回答所要時間は7分程とした。宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科の学部1年生を含む75名の被験者に対し、アンケート調査を実施した。

(2) アンケート評価結果

本研究では、得られたアンケート結果から、各尺度上で良いイメージを捉えられる点側を7、悪いイメージで捉えられる点側を1(例えば、「非常に快適な」を7、「非常に不快な」は1とする)とし、被験者の回答の平均値を求めた(表-3)。アンケート結果から得られた期待感(行ってみたいか)に対する値の最大値に対して期待感評価値 M_e を7、また、最小値に対して期待感評価値を1とし、その間の値に対しては M_e の値を比例的に与え、期待感評価値 M_e を定める。なお、回答者の男女比は凡そ3:2である。アンケート作成時は、立坑の方が内部の様子がわからず、探究心をくすぐられ、期待感が高いと予想していた。しかし、結果は、各形状に比較すると、横坑の方が期待感が高い。理由として、横坑は自身の着地点が明確に把握できていることに対し、立坑は足を踏み外すと落ちてしまうかもしれない、といった恐怖や不安感を抱くからではないか、と考えることができる。

5. 総合評価

感性的評価結果として期待感評価値を用い、また、力学解析結果から求めた安全性評価値を用いて、総合的に地下空間入口形状の評価を行うために、本研究では、次に示す評価式(2)を与える。

$$M = \alpha_s M_s + \alpha_e M_e \quad (2)$$

ここに、 α_s および α_e ($\alpha_s + \alpha_e = 1$)は、それぞれ、力学的安全性評価、および、期待感評価に対する重みであり、これらは対象構造物の用途や目的などによって決定されるものである。たとえば、その構造物がシェルターや避難施設など安全性だけに特化したものであれば、 α_s に1を、 α_e に0を代入し求める。

図-7(a)に前節のアンケート結果から得られた期待感評価値 M_e (表-3の「行ってみたいー行きたくない」の定量値)、および、第2章で解析に基づいて得られた安全性評価値 M_s をプロットする。同図には、期待感評価と安全性評価の重みを同じとした場合($\alpha_s = \alpha_e = 0.5$)の総合評価式(2)を実線で図示している。この図から、感性、および、力学によって総合評価した地下空間入口形状の順位を M の値の大小によって示すことができる(表-4.8)。立坑丸型が総合的に最も良い形で、横行三角型が最も順位が低い。同様に、期待感評価の重みを大きくした場合($\alpha_s = 0.3$, $\alpha_e = 0.7$)の総合評価式(2)と M_e と M_s の関係を図-7(b)に、安全性評価の重みを大きくした場合($\alpha_s = 0.7$, $\alpha_e = 0.3$)の総合評価式(2)と M_e と M_s の関係を図-7(c)に示す。図-8に期待感評価と安全性評価の組み合わせに対する、地下空間入口形状の総合評価結果(順位)を示す。重み α_s 、および、 α_e の値が変化すると、各坑の順位が著しく変動すると予想していたが、結果は、 α_e (期待感評価値の重み)がおおよそ0.5以上でない限り、順位の変動は見られなかった。各構造の順序があまり変わらない理由は、安全性評価において立坑と横坑の評価値の差の開きが大きいことが挙げられる。また、この差が大きいことにより、立坑間、および、横坑間の各形状の安全性評価値に差があまりつかなかった。この総合評価の具体的な利用方法について、例えば、対象とする地下空間がアドベンチャー施設など観光客向けの集客効果を測るような空間としたいとき、 α_s に0.3を α_e に0.7を代入し評価する。結果は、各坑の丸型が比較的高い評価値となり、この条件では最も適している形状であると評価される。一方で、シェルターのような安全性だけを求めているような場合は、 α_s に1を、 α_e に0を代入指標化する。結果は、今回の条件では立坑が安全性に優れ、その中でも丸型が最も適している形状であると評価できる。このように、総合評価を行うことで、目的や用途に応じた地下空間入口形状を提案することが可能になる。

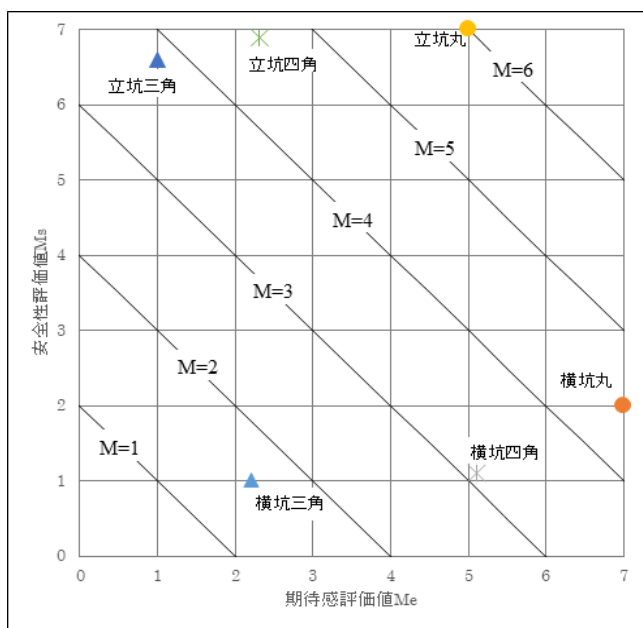


図-7 (a) 総合評価(期待感評価と安全性評価の重みが等しい場合($\alpha_s = \alpha_e = 0.5$ の場合))

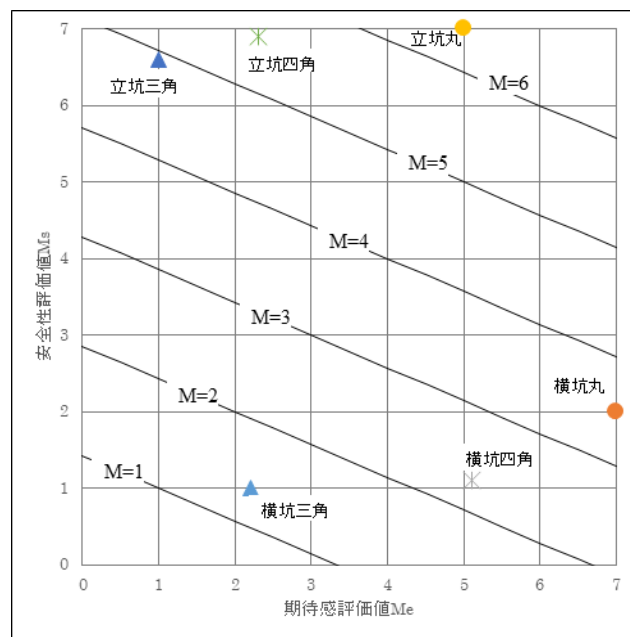


図-7(c) 総合評価(安全性評価の重みが大きい場合($\alpha_s = 0.7$, $\alpha_e = 0.3$ の場合))

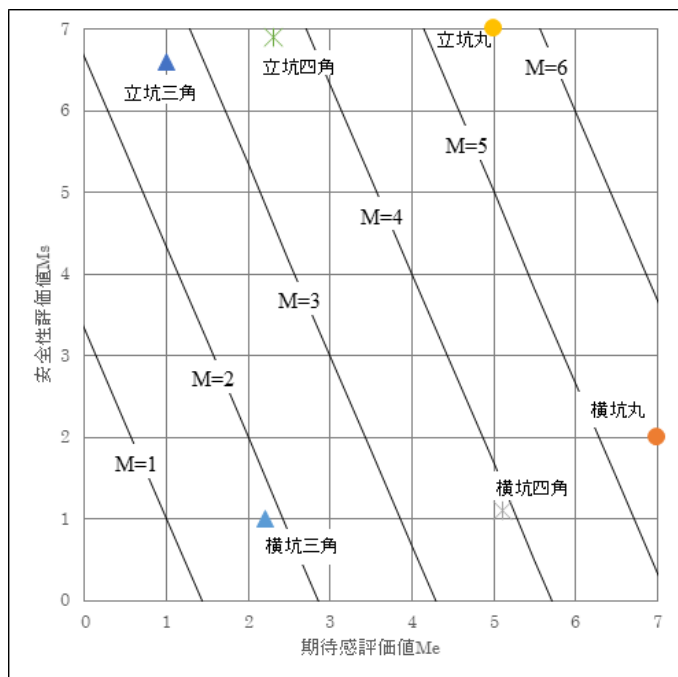


図-7(b) 総合評価(期待感評価の重みが大きい場合($\alpha_s = 0.3$, $\alpha_e = 0.7$ の場合))

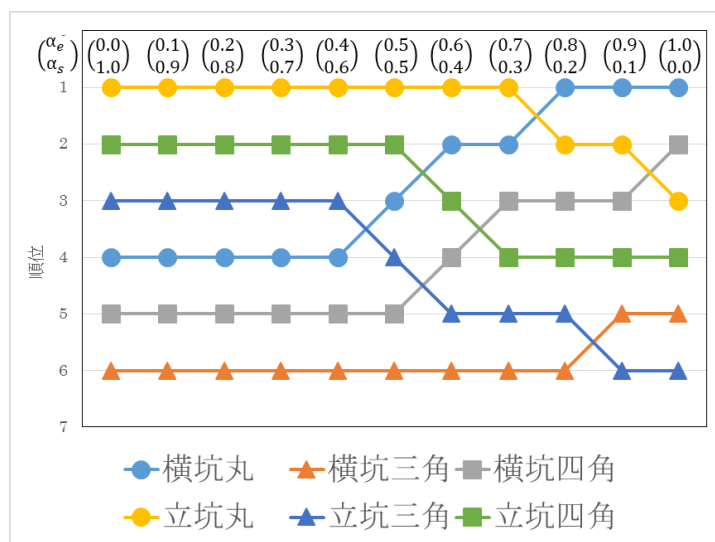


図-8 総合評価結果

6. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

本研究では、感性と力学を総合して地下空間入口形状のあり方を検討するという考えに基づき、安全性評価と期待感評価を総合する1つの評価方法を示した。

安全性評価においては、最大せん断ひずみの広がり具合に基づき、評価する指標を与えた。その結果、今回の条件では立坑丸型が最も安全性が高い(表-2)。

期待感評価においては、形容詞対による尺度を用いて

アンケートを行い、地下空間入口形状への期待感について分析した。その結果、期待感の高い形状は丸型、四角型、三角型の順である(表-3)。

総合評価では、安全性評価値と期待感評価値を総合評価する評価式を示した。今回の条件では、期待感の重みが大きくなるにつれ、横坑の順位が上がっていくという事、順位が著しく変わる中で横坑三角型は常に評価が低い事がわかり、感性と力学による評価結果を個々に論じるのではなく、総合して議論することが可能となることを示した。

(2) 今後の課題

本研究では、地下空間入口部のデザインの方法を新し

く構築して、その適用の可能性を検討することに主眼をおいたため、研究としては基礎的な段階にあり、今後さらに検討すべき課題がある。

本研究では、期待感評価と安全性評価に用いた架空の地下空間入口部について、期待感評価では入口構造の表面に着目しアンケート調査を行い分析したが、安全性評価では境界条件の影響を小さくするために入口の奥行きを伸ばしたことによりモデル全域の評価となってしまう、期待感評価と安全性評価で入口部の着眼点が少々異なっている。そこで対象とする地下空間入口をどのように設定するのか検討することは今後の課題である。

また、期待感評価におけるアンケート被験者は学生が中心であったが、年齢層、職種、性別、地域、国籍などの差異が、評価結果にどの程度影響を及ぼすかについても調査、検討することは重要である。また、アンケート回答項目を7段階評価にしたため、3や4、5など中間評価値にチェックを入れる人が多かった。そのため、形状ごとの差が出にくかった。質問は答えにくいものであったのか、7段階評価は適切なものであったか、見直す必要がある。

また、安全性評価においても、本研究では、入口部表面に生じるせん断ひずみを用いた⁹⁾が、単純に安全率で

評価する方法とどちらが有効であるのか、また、より複雑な形状を持つ入口に対しての取り扱いについても検討することが必要である。

参考文献

- 1) 宇都宮市経済部 都市魅力創造課 大谷振興室主任 佐藤大地：大谷石採取場跡地内の冷熱エネルギーを軸とした取組について～事業と雇用の創出による地域振興へ～，第4回地域プロジェクト推進会議，2017.
- 2) 今泉暁音：感性と力学を融合した地下空間形状のデザイン手法に関する基礎的研究，平成22年度 山口大学大学院理工学研究科 博士論文，2010.
- 3) 松本直司・近久博志・加藤毅・勝崎香奈：地下空間における期待感～空間拡大時の期待感位置とその強さ～，土木学会論文集 No.777/VI-65, pp139-147, 土木学会，2004.12.
- 4) ポストイナ鍾乳洞：https://www.postojnska-jama.eu/en/?setLocale=en_US, (2018年9月 確認).
- 5) 櫻井春輔，川嶋幾夫，大谷達彦，松村真一郎：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集No.493, III-27, pp.185-188, 1994.

大谷採石地下空間における残柱の 安全性と安心感との関連について

Huy Thanh BUI¹・Tumelo DINTWE²・清木 隆文³

¹前田道路株式会社 研修センター (〒300-4111 茨城県土浦市大畑 208)

²学生会員 九州大学大学院 地球資源システム工学部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

³正会員 宇都宮大学 大学院 地域創生科学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

栃木県宇都宮市大谷町には大谷石を地下採石場から採掘した結果, 広大な地下空間が多数現れた。大谷採石地下空間を空間資源として有効利用するために, 地下採石空洞で様々な施設を実施する計画が考えられている。特に平成元年に発生した陥没事故以来, 大谷採石地下空間を有効利用を動きは活発になって来て入る。本研究では, 大谷採石地下空間の安全性を確認することを第一の目的として, 残柱式の大谷採石地下空間を構造的に支える残柱をモデル化して行われた室内試験を数値解析で再現を試み, 残柱の安全性を考察した。さらにアンケート調査を通して, 残柱のキズの支保を利用者が安心できる対策案について考察する。

Key Words: Oya tuff, underground quarry, pillar model, structural stability, sense of safety

1. はじめに

大谷石とは栃木県宇都宮市の西北方向に約 8 km 離れている大谷町の中心で集まって, 大谷町付近の東西約 4 km, 南北約 6 km の範囲に分布している凝灰岩のことである。軽く軟らかいため加工しやすく, さらに防音性と耐火性に優れているので防音と防火のため建築用石材によく使用されている。最近では, 内装材・オブジェ等にも広く用いられている。最近では, 平成 25 年(2013 年)2 月に, 南北 55 m, 東西 85 m, 深さ 6 m の浅所陥没事故が発生している。陥没は大谷石採石跡地下空間を有効利用する際に大きな課題で, 地下空間の安全性が理解を得られない大きな要因である。この陥没事故を予防する対策として, 大谷石地下採石空間の安全性を評価する研究が近年促進されている^{1)~3)}。本研究では大谷石の掘削により形成された無数の地下採石空洞に残っている残柱を対象として, 実験とモデル再現によって地下構造の安全性と有効利用を図る研究である。FLAC3D による数値解析によって, 残柱の静的及び動的な実験を再現し, この結果をもとにして室内試験で測ったデータと比べて大谷地下採石現場の安定性評価を検討する。通常大谷採石地下空間で使われているキズなどが見られる部分を補強する支保工の補強効果について数値解析で検証する。一方

で不特定多数の訪れる採石地下空間の残柱にキズ(不連続面)が見える場合, 支保工が見える場合の安心についての感覚をアンケートで確認した。

2. 残柱に注目した大谷石地下採石空間の安定解析

(1) 地下空間内残柱モデル化について

本研究では, 柱房式の地下採石場を支える残柱を対象にして, 3次元有限差分法解析ソフトFLAC3Dを用いて大谷地下採石空間の残柱モデルを再現する。具体的には, 残柱に存在するキズ(節理)の角度を変えて, 残柱の構造安定性に対する節理の影響を検討した。これを琉球大学工学部で実施した室内試験の結果²⁾と比較し, モデル化の整合性及び残柱の安全性について確認する。

a) 解析概要

本研究で実施した解析は残柱モデルを作成して, 境界条件, 材料定数を設定した。大谷石の採石によって生れる地下空間の残柱とその上にある土被りをFLAC3Dで再現する。この構造の天部頂上に荷重を載荷することによる残柱の応力-ひずみ関係を確認する。なお, 本研究では, 節理を設定するために成層構造を再現するユビキ

表-1 解析で用いた大谷石と琉球石灰岩の物性値²⁾

物性値	大谷石	琉球石灰岩
体積弾性係数(MPa)	1.38×10^3	10.87×10^3
せん断弾性係数(MPa)	0.91×10^3	7.33×10^3
粘着力(MPa)	2.1	21
内部摩擦角(°)	30	30
引張強度(MPa)	1.08	1.08
密度(kg/m ³)	1.73×10^3	2.4×10^3

表-2 節理の物性値²⁾

物性値	節理
体積弾性係数(MPa)	1.38×10^3
せん断弾性係数(MPa)	0.91×10^3
粘着力(MPa)	30×10^{-2}
内部摩擦角(°)	30
引張強度(MPa)	1.0×10^{-2}
密度(kg/m ³)	1.73×10^3

表-3 琉球石灰岩物性値²⁾

琉球石灰岩	物性値	物性値の平均値
$\rho_d(\text{kN/m}^3)$	19.6 - 23.4	21.5
$V_p(\text{km/s})$	4.5 - 6.3	5.4
$E(\text{GPa})$	8.1 - 27.8	17.95
ν	0.15 - 0.3	0.225
$\sigma_c(\text{MPa})$	20.0 - 33.9	26.95

タスジョイントモデルを採用した。解析で用いた物性値を表-1と表-2に示す。また、参考にした琉球石灰岩の物性値を表-3に示す。これらの値をもとに体積弾性係数、せん断弾性係数を算出する。境界条件は実験条件を再現するものとする。なおFLAC3Dのグローバル座標系(x, y, z)はそのままとした。残柱の鉛直方向の中心で切って1/4の残柱モデルを再現するのでx方向とy方向の変位を0に設定した。z方向の下向きに重力加速度を 9.81 m/s^2 と設定した。 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ の速度でモデルの上部に定速で載荷される。

b) 解析再現モデル

本研究で参照した室内試験の一軸圧縮試験は、試験供試体の幅/高さの比は0.5で、供試体の高さは100mmである(図-1)。この試験では、残柱に節理が入っている場合の実験も実施した。その傾斜角は、残柱試料の水平面から見下げる傾き(傾斜角)で整理し、その角度を0°, 45°, 60°, 75°, 90°と変化させた。解析モデルは、計算時間を短縮するために、1/4モデル(図-2)として室内試験の残柱をモデル化した。なお、寸法は、実験供試体

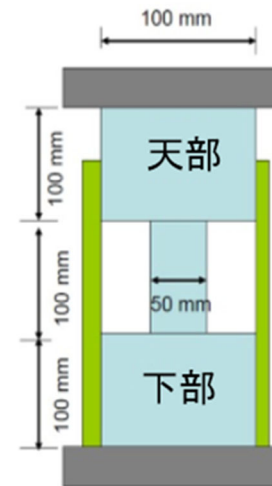


図-1 室内試験の残柱モデルの概要図



図-2 残柱モデルの3D差分メッシュ

(図-1)に準じており、柱部分の中心部を周囲よりも細かいゾーンとなる様に工夫した(図-2)。

(2) 地下空間内残柱モデルの解析結果

a) 結果の概要

節理が存在しない場合の残柱の最大応力を確認するために、モルクーロンの破壊基準に従うひずみ軟化モデルを適用した。図-3は節理のない場合の幅(W)と高さ(H)の比がW/H=1/2である柱の応力分布を示す。解析結果は残柱の最大強度が7.3 MPaとなった。図-4は柱上の節理の角度がそれぞれ45°, 60°, 75°の応力-ひずみ曲線を示している。節理の傾斜角別の最大応力は、45°の場合3.4 MPa, 60°の場合、0.7 MPa, 75°の場合、2.7 MPaとなった。図-5は、節理の角度を0°と90°に加えて整理すると最大荷重とせん断応力の関係として、良く知られたU字型曲線の一部を示した⁴⁾。

b) 考察

室内試験では、節理のない無傷な残柱モデルの供試体は、最大強度が8.8 MPaであった。一方、数値解析では

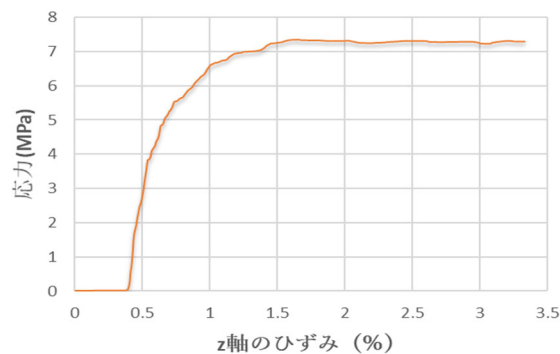


図-3 節理は存在しない柱モデルの応力－ひずみ関係

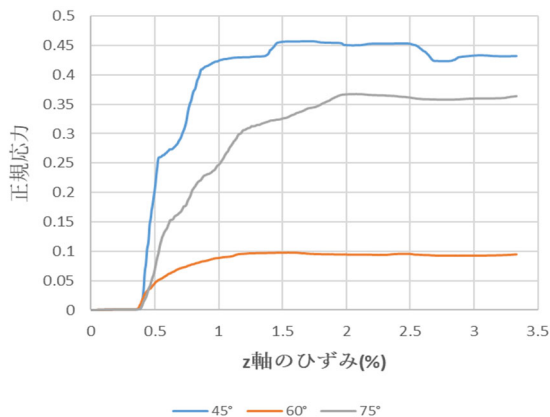


図-4 異なる傾斜角を持つ節理の残柱モデルの応力－ひずみ関係

最大強度は7.3 MPaであった。数値解析の方が約1.5 MPa低く安全側の傾向を示す。節理の傾斜角が60°の時には室内試験の結果と同様に数値解析の最大強度がもっとも低く、無傷な場合に比べて90%ほど低下した。また、節理の傾斜角が60°の残柱モデルの強度は、傾斜角が45°の場合の約1/4となった。一方で、実験の結果は、ほぼ1/2であり、数値解析の結果の方が、かなり極端な変化を示した。節理の傾斜角度が異なる残柱モデルの強度を無傷な残柱モデルの強度で正規化した残柱モデルの強度比と節理傾斜角との関係(図-5)は、実験の結果と同様にU字型曲線を示している。

3. 残柱の節理補強鉄筋の補強効果の確認

(1) 節理補強鉄筋の残柱補強効果の確認

本研究では、実際の鉄筋で補強されている残柱をFLAC3Dで残柱の強度を解析した。残柱はモールクーロンの破壊基準に従うひずみ軟化モデルを適用した。節理はコビキタスジョイントモデルを再現し、節理の傾斜角を変化させるものとした。解析に用いた材料定数は前章と同様である。残柱を補強する鉄筋は、現場の調査結果をもとに、異形鉄筋D38とした(表-4)。境界条件は実験を再現する。モデル化に際して、FLAC3Dのグローバル

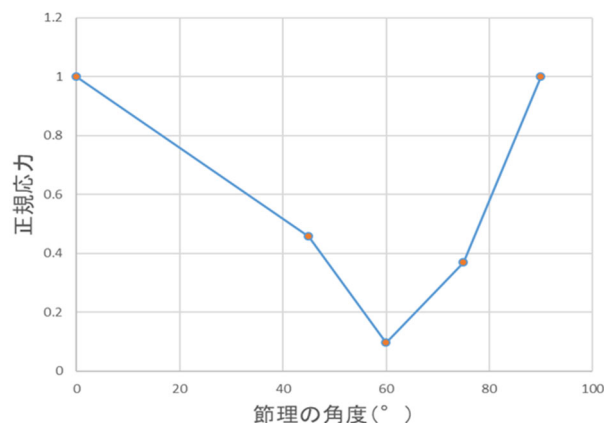


図-5 節理の角度と正規化した応力の関係

表-4 鉄筋(D38)の材料定数

ヤング係数 (N/m ²)	2.05×10^{11}
ポアソン比	0.3
断面積 (m ²)	11.4×10^{-4}
y軸に関する断面2次モーメント (m ⁴)	1.034×10^{-7}
Z軸に関する断面2次モーメント (m ⁴)	1.034×10^{-7}

座標系 (x, y, z) にはそのまま従うとした。したがって、鉛直方向z, 互いに直交する水平の2方向をxとyとした。自重解析の後、 1.0×10^{-4} m/sの変位速度で、モデルの上部を強制的に変位させる。

(2) 残柱の鉄筋による補強の再現モデル

モデルは3つの部分に分けられて、天部と下部では高さ40 mで幅の18 m、柱の部分では高さ30 mで幅の10 mである。対象とした採石地下空間を支える残柱の平均高さは約30 mであるので高さが約10 mのところで鉄筋が差し込まれるとした。残柱の底面から高さ10 mのところに、残柱の両端から2 mの奥行き一本ずつ、さらに1.5 mの間隔を置いて2本、真ん中に1本、合計5本差し込むことを想定した。本章では、実際の節理の角度が60°の残柱が5本の鉄筋で支えられている場合(支保あり)と支えられていない場合(無支保)で残柱の強度の一軸圧縮試験がどの程度異なるか比較した(図-6)。

(3) 補強効果の確認結果

本研究では、節理が存在しない無傷な残柱の強度を調べるためにモールクーロンの破壊基準に従うひずみ軟化モデルを採用して解析した。図-7は節理のない残柱モデルの応力分布を示す。また、この解析の応力－ひずみ関係(図-7)より、この残柱モデルの強度が11.3 MPaとなった。図-8は節理が入った無支保の場合と節理を鉄筋で

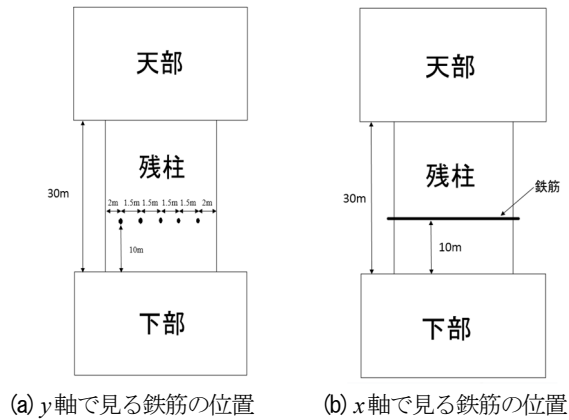


図-6 残柱モデルに鉄筋を差し込む位置

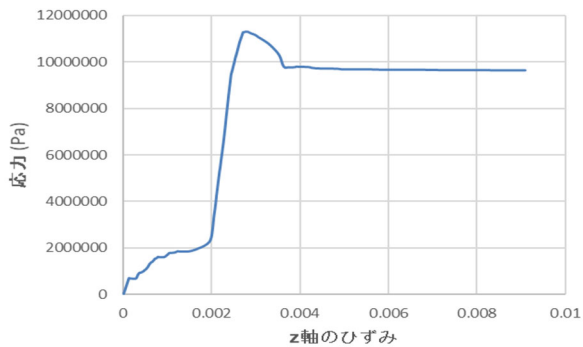


図-7 無傷な残柱モデルの応力 — ひずみ関係

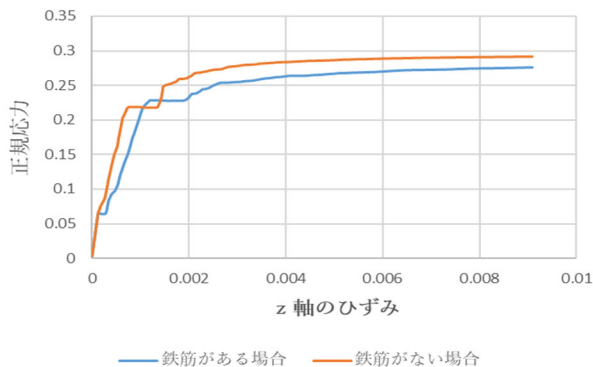
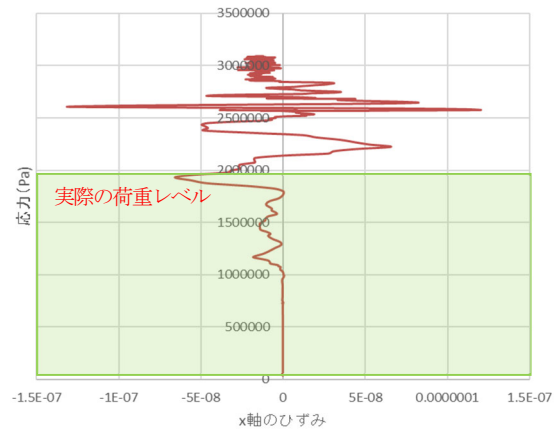


図-8 節理が入った残柱の鉄筋による支保がある場合と無支保の場合の応力 — ひずみ関係

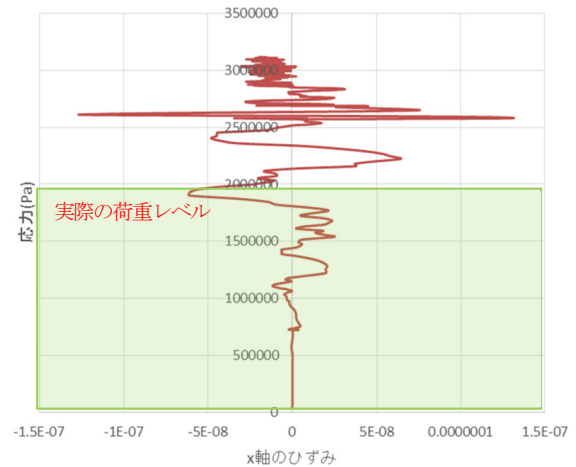
支保した場合の応力 — ひずみ曲線を示している。節理を異形鉄筋D38で支保した場合の残柱モデルの強度は3.11 MPa、無支保の場合の残柱モデルの強度は3.31 MPaであった。図-9は節理が入った残柱に、鉄筋による支保がある場合と無支保の場合の鉄筋の頭がある平面のひずみを示している。

(4) 考察

効果確認の結果によると角度60°の節理をD38鉄筋で支保した残柱の強度が無支保の残柱と比べて、0.2 MPaを低下した。この値は無支保の残柱の強度の6%に相当する。一方、既往の研究¹⁾の結果を参考すると実際に残



(a) 鉄筋による支保がある場合



(b) 無支保の場合

図-9 鉄筋による残柱の水平方向拘束の確認

柱に作用している上載荷重は約2 MPaであることがわかっている²⁾。この時、鉄筋による支保がある場合には鉄筋がある平面のひずみが 1.7×10^{-8} であって、無支保の場合にはひずみが 2.6×10^{-8} であった。節理を鉄筋で支保する場合、残柱の鉄筋がある周辺のひずみが 0.9×10^{-8} 小さくなっている(図-9)。この値は 9×10^{-5} mの変位量に相当する。僅かではあるが、鉄筋に残柱を水平方向に膨らもうとする変位の拘束効果が期待できる。

4. 残柱の構造安全性改善効果に関する検討

(1) アンケート調査概要

栃木県宇都宮市大谷町には大谷石の掘削により広大な地下空間が多く形成されている。その中では採石が終了した後、放置されている空間が多くを占めている。この大谷採石地下空間を貴重な空間資源として有効利用することが期待されている。現在、観光客が多く来訪する大谷石資料館の他に、観光客が回遊する施設やイベントなどを行う計画の立案が期待されている。そこで、アンケ

ートの対象者に採石地下空間(図-10)を訪れる観光客の立場を想定して頂き、大谷石地下空間残柱にキズがある場合、その安心に対する感覚と、改善の手法について確



図-10 アンケートの説明に用いた採石地下空間

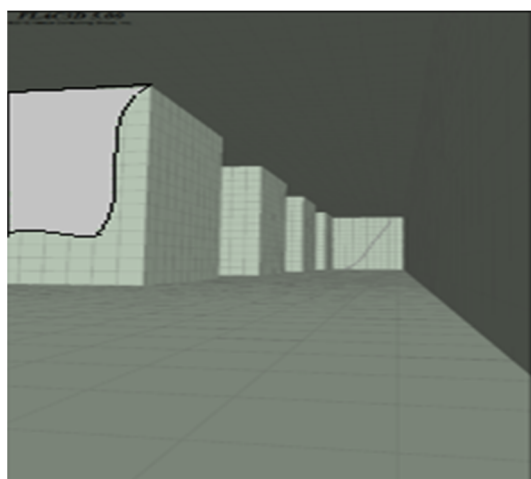


図-11 場合1の例：(対策1.1)残柱の節理を黒い布や大谷石の色合いを持った安全及び安心感に対する比較

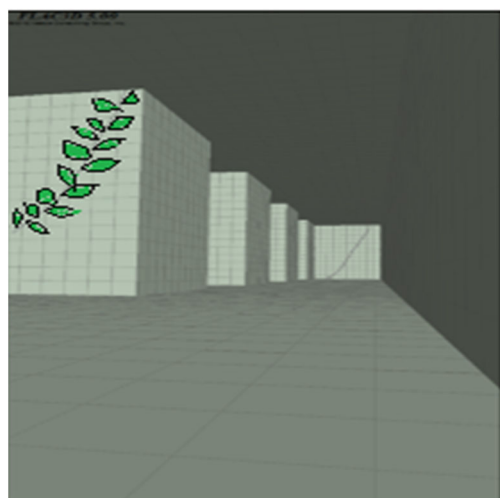


図-12 場合1の例：(対策1.3)節理に沿ってビニール製の葉っぱなどで装飾

認した。

本研究では対策についての安全・安心感を確認するために、安全—危険と安心—不安を5段階に分けて分析し、状況に対する安心感をアンケートの採点結果で表現してもらった、本研究で設定した各対策は

(a) 鉄筋だけで補強する場合(場合1)：

(対策1.1) 残柱の節理を黒い布や大谷石の色合いを持った布などで完全にカバー(図-11)，

(対策1.2) 周りの環境と同化する様にペンキなどで着色，

(対策1.3) 節理に沿ってビニール製の葉っぱなどで装飾(図-12)，

(対策1.4) 節理がある周辺の明度を落とす，

(対策1.5) そのままで何もしない(無対策)ことを候補した。

(b) 節理に鉄筋を差し込んで支保する場合(場合2)：

(対策2.1) キズを補強する鉄筋をコンクリートでカバー，

(対策2.2) 大谷石や大谷石採掘の歴史など紹介するポスターや写真などで鉄筋の頭を隠す(図-13)，

(対策2.3) 鉄筋の頭をきれいな形に装飾して、灯りをつける(図-14)，

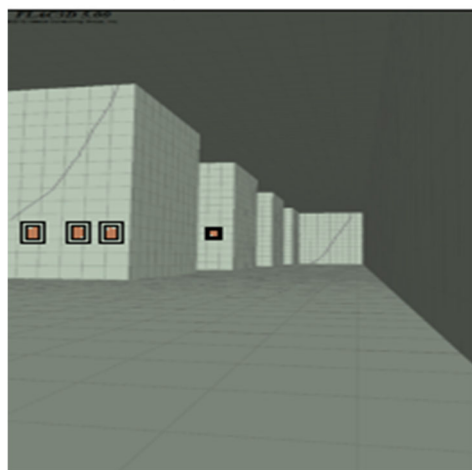


図-13 場合2の例：(対策2.2)大谷石や大谷石採掘の歴史など紹介するポスターや写真などで鉄筋の頭を隠す



図-14 場合2の例：(対策2.3)鉄筋の頭をきれいな形に装飾して、灯りをつける

(対策2.4)鉄筋の頭が出たまま(無対策)である. とした.

(2) アンケート調査内容

アンケート調査の対象は、宇都宮大学地域デザイン学部社会基盤デザイン学科1年生37名、2年生2名、3年生3名及び土木技術者8名であった。紙面の関係でアンケートの説明の詳細を掲載する事は割愛するが、大谷採石地下空間跡において、地下空間を利用して観光に入る観光客の立場で、節理がある場合と節理を鉄筋で支える場合を例に取り、安全及び安心に対する感覚を確認するために、構造的あるいは心理的な観点から安全及び安心と思われる対策案を図示した。この他に、回答者の属性、

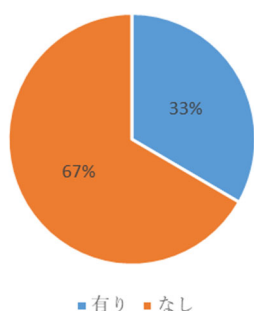
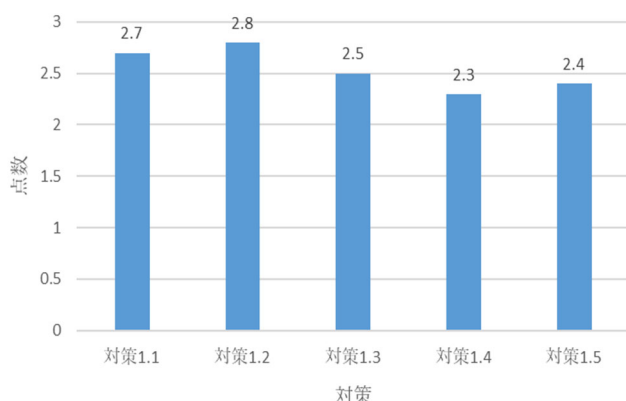
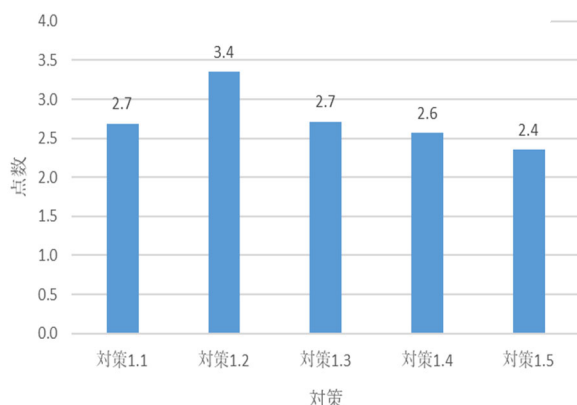


図-15 地下空間に入った経験有無の集計結果



(a) 安全に対する平均点



(b) 安心感に対する平均点

図-16 場合1の安全及び安心感に対する比較

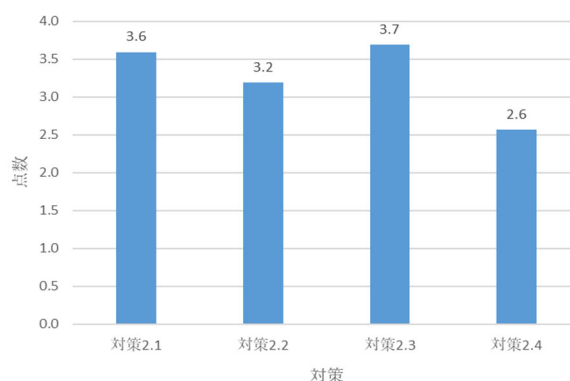
大谷採石地下空間を訪問した経験の有無を確認した.

(3) アンケート調査結果

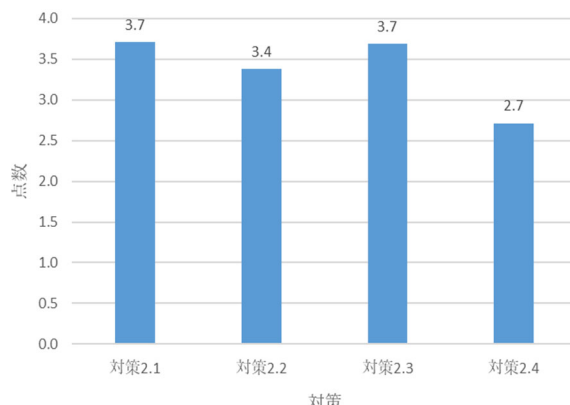
回答人数は宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科学学生42人を土木の知識の少ない地下空間の訪問者として見なした場合のアンケートに付いて、地下空間に入った経験の有無を集約した(図-15). 節理だけが存在している(場合1)の安全-安心感に対する学生の点数を図-16に示す. これは、節理無支保の場合、節理を隠すだけでも安全-安心に効果が見られるので、観光客は節理の存在を意識する傾向を示している. 節理を鉄筋で支保している(場合2)の安全及び安心感に対する点数を図-17に示す. なお、これらのアンケート結果を分散分析した結果、節理無支保の場合(場合1)の安全性についての検討を除き、各平均値の定性的な比較が可能である. 本研究では特に安心感について注目する.

(4) 考察

本研究では、土木工学に関して知見の低い被験者として、宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科1年生を主体とした対象者にして、アンケート調査を実施した. 回答者42人の中では地下空間に入った経験がある人は14人で約1/3(33.3%)であった. 節理を無支保



(a) 安全に対する平均点



(b) 安心感に対する平均点

図-17 場合2の安全及び安心感に対する比較

とした場合、観光客は節理の存在を意識しないようにペンキで節理の色を周りの環境と同化して隠す(対策1.2)ことが一番効果であることを示す。節理を鉄筋で支保した場合、安心感及び安全の対応で評価が高いのは、(対策2.1)と(対策2.3)であった。鉄筋の頭をコンクリートで隠すか、飾って灯りで隠すなどの対策が効果的である。

5. まとめ

本研究では柱房式の大谷採石地下空間を支える残柱の強度を検討する室内試験の結果をもとにして、数値解析によって残柱モデルによる安定性評価を実施した。また大谷採石地下空間の残柱にあるキズを補強する支保工の補強効果について数値解析で検証した。一方で不特定多数の訪れる採石地下空間の残柱にキズ(不連続面)が見える場合、支保工が見える場合の安心についての感覚をアンケートで確認した。

節理の存在しない時に残柱の強度は7.3 MPaであって、実際に残柱にかかっている上載荷重を十分支えることができる。節理の傾斜角度が60°の場合には節理が存在しない残柱と比べると、強度がもっとも低く、約90%低下した。数値解析は実験値に比べて安全側にある。

節理の傾斜角度が60°の節理をD38鉄筋で支保する残

柱は支保が行われない残柱と比較すると残柱の強度が約60%下がった。節理を鉄筋で支える対策は残柱の強度を高める事を期待する事は難しいが、実際に残柱に作用している上載荷重の程度では、柱が膨れる方向の水平方向のひずみの発生を僅かに拘束する効果が期待される。

アンケートによって節理を鉄筋で支保する残柱の場合は無支保の場合と比較した結果、安全性とともに安心感の評価がより高かった。そして、鉄筋で支保する場合には鉄筋をコンクリートでカバーする対策と灯りで飾って隠す対策は評価がもっとも高かった。

今後、アンケートにより印象で評価された残柱の安心・安全の感性を具体的残柱モデルで確認することが期待される。

参考文献

- 1) 例えば、清木隆文、鮎澤淳一：採石跡地下空間の現状と有効利用に関する研究、地下空間シンポジウム論文・報告集、第7巻、土木学会[一般投稿論文]、pp.287-294,2002.
- 2) Tumelo Dintwe : *A Fundamental study on the Static and Dynamic Stability of A Room and Pillar underground quarry in Oya*, 宇都宮大学地球環境デザイン学専攻博士前期課程論文, 2018.
- 3) 清木隆文：大谷石の紹介, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 66巻11号 pp. 793-798,2017.
- 4) Jaeger, J. C. : *Shear failure of anisotropic rocks*, *Geol Mag* 97, pp. 65-72, 1960.

RELATION BETWEEN STRUCTURAL STABILITY FOR PILLARS OF OYA UNDERGROUND QUARREY AND ITS SENSE OF SECURITY

Huy Thanh BUI, Tumelo DINTWE and Takafumi SEIKI

Recently, a lot of huge underground spaced for Oya tuff have been excavated in Oya area, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, Japan. Those are regarded as plenty of space resources for re-using infrastructure to stimulate the area development after occurrence of huge collapse at the underground ruined quarry. Although the authors have tried to evaluate structural stability of the quarries, the sense of security is more important for ordinary visitors. This study focused on the influence of discontinuities to the stability of pillars and the effect of applied reinforcement in room and pillar type underground quarry by numerical analysis. And the authors considered the sense of safety in the quarry by questionnaire to the students regarded as visitors. It was clear that skew and high angle of discontinuities affects to decrease the pillar strength, and the sense of safety might be good in case of hiding the discontinuities and heads of reinforcement.

福岡市の地下空間を考慮した浸水解析

INUNDATION ANALYSIS CONSIDERING THE WATER BEHAVIOUR OF UNDERGROUND SPACE IN FUKUOKA CITY

武田 誠^{1*}・村瀬将隆²・三木研弥³・中島勇介⁴

Makoto TAKEDA^{1*}, Masataka MURASE², Kenya MIKI³
and Yusuke NAKAJIMA⁴

Recently, the risk and the countermeasures of the water disaster has been examined for the underground space in urban areas. In metropolitan areas subways and underground shopping centers are highly constructed. If large scale inundation occurs there, flood damage becomes serious in the underground space. In Fukuoka city the flood damage occurred in 1999 due to the flooding of the Mikasa River, then the subway line was inundated. Moreover, in our study group, the urban inundation analysis model was developed with consideration of the analysis on the water behavior in the underground space and subway lines. In this study, the developed analysis model was applied to the inundation situations on the water disaster of Fukuoka city in 1999. From this study, the inundation analysis results are good agreement with the observed inundated area and inundation situation in the subway line. In addition, the necessity of urban inundation analysis with high accuracy for evaluation of inflow discharge to underground space and the importance of the improvement of the analysis model of the underground shopping center and subway stations are shown.

Key Words : *Underground space, Subway, Inundation, Fukuoka City, Numerical analysis*

1. はじめに

近年、大規模洪水・豪雨による浸水被害が多発しており、2015年の鬼怒川における破堤氾濫災害や2017年の九州北部豪雨など、甚大な被害が生じている。地球温暖化に伴う気候変動を考慮すれば、さらに大きな外力による洪水災害の発生も懸念されることから、大規模浸水に対する備えは十分に検討する必要がある。

また、地下鉄・地下街などの地下空間が高度に発展している都市域で大規模浸水が生じれば、非常に深刻な被害となることは容易に想像できる。氾濫水は低い個所へと流れていくことから、ひとたび大規模浸水が生じ、その水が地下空間へ流れ込むことで、人的被害、経済被害、地下鉄などの交通被害を生じさせるだけでなく、地下鉄を伝って氾濫水が伝播し、新たな浸水被害が生じる危険性もある。このような被害を想定し、対策を講じるためには、まず、大規模浸水における地下空間の浸水状況を

明らかにすることが重要である。

現在、各市町や県、国土交通省のホームページ上で、洪水破堤によるハザードマップ、浸水予想図や、東海・東南海・南海地震による津波の浸水被害想定、あるいは、スーパー台風による高潮の浸水被害想定が公開されている。これらによれば、都市の中に1m以上の浸水が示されているが、それらと関連付けて地下空間の危険性が議論されていない。すなわち、大規模浸水の地下空間に与える影響という非常に重要な情報が公開されていないといえる。

戸田・石垣・尾崎¹⁾、関根²⁾など、近年、地下空間の浸水被害を扱った研究は盛んに行われている。これらの研究では、大阪や東京に位置する地下街を対象に、豪雨に伴う内水氾濫や避難シミュレーションを実施しており、地下空間の浸水特性や現実的な浸水対策、避難対策を報告している。さらに、津波による地下浸水特性の評価³⁾、内水氾濫モデルによる広域の洪水氾濫解析⁴⁾など、

キーワード：地下空間，地下鉄，浸水，福岡市，数値解析

¹正会員 中部大学教授 工学部都市建設工学科 Professor, Faculty of Engineering, Chubu University, (E-mail:mtakeda@isc.chubu.ac.jp)

²学生会員 中部大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Chubu University.

³非会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 Central Nippon Highway Engineering Nagoya Ltd.

⁴正会員 若鈴コンサルタンツ株式会社 Wakasuzu Consultants Co., Ltd.

広域浸水およびそれによる地下空間の浸水特性が議論されている。

また、内閣府では地下鉄を考慮した浸水解析が実施されており⁹⁾。さらに、地下鉄を考慮した都市浸水に関する戸田・辻本⁹⁾、関根ら⁷⁾、石垣ら⁸⁾の研究も報告されている。

本研究の先行研究として、武田・島田ら⁹⁾、西田・武田ら¹⁰⁾、村瀬・武田ら¹¹⁾の研究がある。武田・島田ら⁹⁾は、庄内川を対象に、破堤箇所を想定した氾濫解析により、地表面の浸水特性を明らかにした。さらに、地下空間への流入水量を見積もり、破堤箇所による流入水量の違いと、その観点からの破堤箇所の重要性を明らかにした。その結果、河口から17km地点の庄内川左岸を破堤させた場合、氾濫水が地下空間の入口が多数存在する名古屋駅前に集まり流下するので、多くの水が地下空間へ流入することが示された。さらに、氾濫水量が多いため、その水は一つの駅に留まらずに、地下鉄線路を伝って広域に拡がることと予想された。そこで、西田・武田ら¹⁰⁾は、武田・島田ら⁹⁾の解析モデルに地下空間および地下鉄線路内の水の挙動の解析モデルを加えて、大規模浸水時の地下鉄線路内の浸水の様子を検討した。その結果、地下鉄内を氾濫水が流れ拡がり、満水になる様子と、名古屋市の東側は丘陵地であるので地下鉄内の浸水が拡がらないことなどが示された。村瀬・武田ら¹¹⁾は、開発された解析モデルを大阪（淀川）と東京（荒川）に適用し、都市浸水および地下浸水の様子を示し、異なる地域における浸水の危険性を示した。これらの比較から、特に、大阪において淀川が破堤した場合には、大きな浸水状況となり、低平地を通る地下鉄に流入し広域に拡がると共に、地上に噴出して他地域へ拡がる危険性も示された。

福岡市では、平成11年と平成15年に市内を流れる御笠川が氾濫し、博多駅周辺に浸水被害が生じ、氾濫水が地下空間へ流入し、地下鉄線路が浸水した。平成11年の浸水の様子は橋本ら¹²⁾により報告されている。本研究では、橋本らの成果を活用して、平成11年の福岡市における浸水を対象に、地下鉄を考慮した都市浸水解析を実施し、地下空間を有する都市域の浸水の特徴と、解析モデルの精度について検討した。なお、本研究は、下水道などの排水やビルの地下部における貯留などが考慮されておらず、第一段階的な位置づけである。

2. 地下空間への流入を考慮した氾濫解析

(1) 解析モデルの概要

村瀬・武田ら¹¹⁾の研究では、河川の洪水流には1次元不定流モデルを、都市域の氾濫域にはデカルト座標の平面2次元不定流モデルを、地下鉄線路の流れにはスロッ

トモデルによる1次元不定流モデルを適用し、地下街・地下鉄駅を1つのボックスとして連続式を考慮した水理計算を行っている。また、河川と氾濫格子の間の堤防では越流現象を考慮し、水位が堤防高よりも高い状況下では自動的に越流流量を求めた。本研究では、橋本ら¹²⁾による越水流量を境界条件として用いたことから、河川流は解かないものとした。解析モデルを以下に示す。

(2) 浸水解析

陸域における浸水解析には、以下に示す平面二次元の運動量方程式および連続式を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = -q_o \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = & -gh \frac{\partial(z_G + h)}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = & -gh \frac{\partial(z_G + h)}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速(m/s)、 h は水深(m)、 M, N はそれぞれ x, y 方向のフラックス($M = uh, N = vh$)(m²/s)、 q_o は単位面積当たりの流出流量(m²/s)であり、 $q_o = \sum q_n l_n / \Delta x \Delta y$ (q_n : 単位幅あたりの横流入流量(m²/s)、 l_n : 格子にある河川区分の長さ(m)、 $\Delta x \Delta y$: 格子の面積(m²))、 z_G は地盤高(m)、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面のせん断応力(Pa)、 ρ は水の密度(kg/m³)、 g は重力加速度(m/s²)、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ はそれぞれ x, y 方向の渦動粘性係数(m²/s)であり、本研究では0とした。 x, y は平面の座標、 t は時間である。

底面のせん断応力は、マニングの粗度係数を用いて、以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 M \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 N \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3} \quad (5)$$

また、堤防箇所の単位幅横流入流量は以下のように求めた。橋本ら¹²⁾により、後述する越流流量と越流箇所が示されている。そこで、計算格子上での越流箇所を設定し、その格子に隣接する陸域格子に氾濫水が幅一様に流入するとした。また、それぞれの越流箇所からの流入流量は同じと仮定して、越流箇所からの総越流流量が、橋本らの算出値¹²⁾と同じになるように該当箇所の単位幅流入流量(M, N)を求めた。

本研究では、大規模浸水を対象にするので、50mの幅を持つ計算格子で都市空間（地盤高）を表現しており、数m程度の地下空間（地下街・地下鉄駅）の入口の浸水

過程を詳細に表現することは難しい．ここでは，つぎの方法で地下空間の入口の流入流量を求めた．地下空間の入口の情報（道路から歩道の段差($d2$)，歩道から地下空間の入口の段差($d3$)，止水板の高さ($d4$)，横幅 (B) は，後述するように現地調査により求めた．予め5mメッシュ標高値より地下鉄の入口付近の地盤高($z1$)を求め，これを道路面とした．数値計算において氾濫水位(H)を求めた後で，入口の水深を以下の方法で求める．

$$h_{in} = H - (z1 + d2 + d3 + d4) \quad (6)$$

ただし， h_{in} が計算された水深よりも大きい場合には， h_{in} を水深に置き換えた．その後，次式を用いて，流入流量を求めた．

$$Q_{in} = h_{in} B \sqrt{g h_{in}} \quad (7)$$

(3) 地下空間のモデル化の概要

本研究では，地下街・地下鉄駅を一つのボックスとしてとらえ，線路を約50mの長さで分割して地下鉄線路の計算格子を設定した．氾濫水は複数ある地上の入口から地下街・地下鉄駅へ流入・流出し，地下街・地下鉄駅では地上からの流入・流出流量と鉄道線路への流入・流出流量を考慮して連続式により水の収支が計算される．また，地下街・地下鉄駅に繋がっている線路では流入・流出流量が考慮され，その他の線路では考慮されずに，スロットモデルを用いた一次元不定流解析で水の流れを表現した．さらに，乗換駅のように一つの駅に複数ある線路間の水の輸送も考慮している．解析に用いた地下鉄・地下鉄駅と地下鉄線路のイメージを図-1に示す．

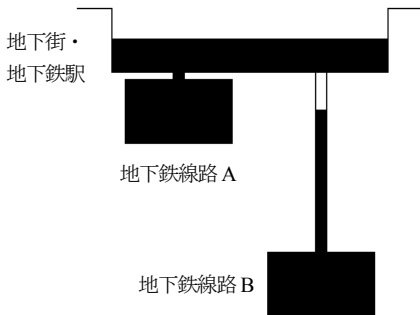


図-1 地下街・地下鉄のモデル

a) 地下街と地下鉄駅の水輸送

地下街・地下鉄駅の連続式には以下の式を用いた．

$$A_u \frac{\partial h_u}{\partial t} = \sum Q_e - \sum Q_o \quad (8)$$

ここで， A_u は地下街・地下鉄駅の平面面積， h_u は地下街・地下鉄駅の水深， Q_e は地下空間への流入流量， Q_o は線路への流入流量である．

地下空間の入口のステップにおける地下街・地下鉄駅の水深を $h_{in_u} = h_u + z_{bu} - (z1 + d2 + d3 + d4)$ （ここに， h_u ：地下街・地下鉄駅の水深， z_{bu} ：地下街・地下鉄駅の底面高）から求め，式(6)の h_{in} と h_{in_u} の大きい方を h_1 ，小さい方を h_2 として以下の越流公式から流入流量 Q_e を求めている．なお， μ を 0.35， μ' を 0.91 とし， B は入口の幅である．

$$\begin{aligned} h_2/h_1 \leq 2/3 & \quad Q_e = \mu B h_1 \sqrt{2g h_1} \\ h_2/h_1 > 2/3 & \quad Q_e = \mu' B h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (9)$$

また，地下街・地下鉄駅と線路においても地下空間の入口と同様に，地下街・地下鉄駅の底面からの水深を求め，以下の式で Q_o を求める．

$$\begin{aligned} h_2/h_1 \leq 2/3 & \quad Q_o = \mu L h_1 \sqrt{2g h_1} \\ h_2/h_1 > 2/3 & \quad Q_o = \mu' L h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで，地下街・地下鉄駅の水深 h_u ，地下街・地下鉄駅の底面高からみた線路の水深 $h_{s_u} = h_s + z_{bs} - z_u$ （ h_s は線路の水深， z_{bs} は地下鉄線路の底面高）の大きい方を h_1 ，小さい方を h_2 とし，入口の周長を L ， μ を 0.35， μ' を 0.91 とした．

b) 地下鉄線路

地下鉄トンネルではスロットモデルを導入し，次式を考慮している．

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = q_o \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s Q_s}{\partial x} = -g A_s \frac{\partial (h_s + z_{bs})}{\partial x} - \frac{g n_s^2 Q_s |U_s|}{R_s^{4/3}} \quad (12)$$

ここで， A_s は流水断面積， Q_s は流量， q_o は単位幅横流入流量であり $q_o = Q_o / \Delta x_s$ ， h_s は線路の水深， U_s は流速， n_s はマンニングの粗度計数， R_s は径深である．なお，スロット幅は $g A_{ss} / C^2$ から求め， A_{ss} は地下鉄の断面積， C は満管時の波速(20m/s と仮定)である．

地下鉄の断面は，図-2に示すように，幅 7.75m，高さ 4.35m の矩形断面を想定している．本研究では乗換駅の水輸送も考慮している．乗換駅では，関連するすべての線路で式(10)の流量が計算される．また，地下鉄線路に

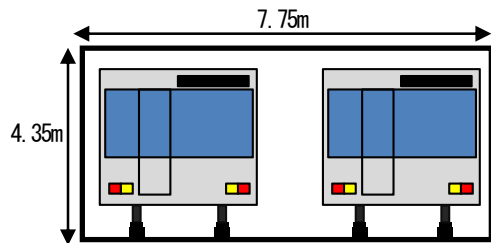


図-2 地下鉄断面

侵入した氾濫水が、乗換駅で吹き出し地下街・地下鉄駅格子に氾濫水が浸入して別の路線へ浸水が生じることもモデル化している。

(4) 計算領域の設定

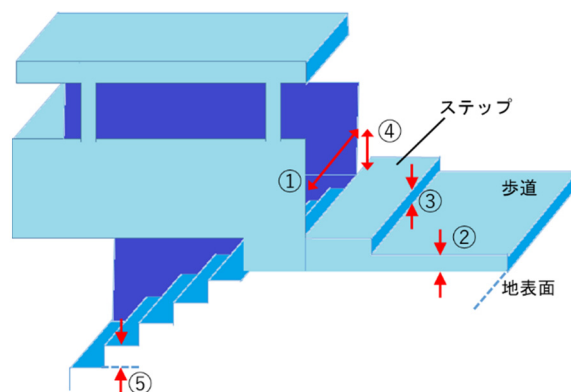
本研究において、地下街・地下鉄駅の面積および底面高と各駅の線路高を整備した。地下街・地下鉄駅の面積は Web にある数値地図より入手した。また、駅における地下鉄線路高を基礎として、縦 4.35m×横 7.75m の地下鉄断面があり、駅間の線路の平面線形は web と GIS を活用して求め、駅間の線路高は直線的に変化するとした。また、線路断面の天井の上 0.5m に地下街・地下鉄の底面高があると仮定した。なお、乗換駅では複数の底面高が現れるので、一番高い値を地下街・地下鉄駅の底面高とし、地下鉄線路とは周長 20m の入口で接続されているとみなしている。なお、このように、地下街・地下鉄駅を一つのボックスでモデル化していることから、今後、この点の詳細化が必要と考える。

3. 福岡市の地下空間の入口調査

福岡市における地下空間を考慮した都市浸水解析を実施するために、平成29年7月10日に、福岡市にある地下鉄および地下街の入口の情報を調査した。表-1に対象とした駅を、図-3に入口で測定した諸量を示す。表-1から、対象とした地下鉄には入口の数が極端に多い駅は少なく、地下街も含めた入口の多い地下空間は、博多駅と天神駅であった。また、図-4に、得られた測量結果から求めた入口のステップ高を示す。図-4から、博多駅の場合、駅を中心部の入口のステップ高が低く、離れるほど高くなっている様子が分かる。後に示す浸水解析の結果からも、博多駅を中心として浸水している様子があり、平成11年の浸水実績の様子からも同じことがいえる。したがって、博多駅を中心として低くなっているという地盤高の分布特性は、博多駅周辺の浸水特性に大きな影響を与えている。さらに、空港線と箱崎線は中洲川端駅で連結しており、両者の水の輸送は中洲川端駅を通じて行われる。また、空港線と七隈線は天神地下街を通じて連結しているが、5.の検討では、七隈線が開通していない平成11年当時を考慮して、天神地下街を通じた七隈線への水輸送は無いものとした。したがって、七隈線には浸水が生じない計算となる。なお、想定浸水解析である6.の検討では、天神地下街の七隈線との接続を考慮した。また、本調査から得られた止水板の高さは、場所による違いもあるが、1m程度のものが多かった。

表-1 測定した駅と出入口の個数

空港線	入口数	七隈線	入口数	箱崎線	入口数
福岡空港駅	3	天神南駅	4	貝塚駅	2
東比恵駅	6	渡辺通駅	2	箱崎九大前駅	3
博多駅	30	薬院駅	2	箱崎宮前駅	3
祇園駅	5	薬院大通駅	2	馬出九大病院前駅	7
天神駅	41	桜坂駅	2	千代県庁口駅	7
赤坂駅	5	六本松駅	2	呉服町駅	4
大濠公園駅	5	別府駅	3		
唐人町駅	6	茶山駅	2		
西新駅	6	金山駅	2		
藤崎駅	4	七隈駅	2		
室見駅	5	福大前駅	2		
姪浜	2	梅林駅	2		
中洲川端駅	5	野芥駅	2		
		賀茂駅	2		
		次郎丸駅	2		
		橋本駅	2		
		合計	35駅		184箇所



調査項目	
地下入口の場所確認	地上～駅構内の階段1段の高さ：⑤
入口の幅：①	地上～駅構内の階段の段数
地表面から歩道までの高さ：②	駅構内～ホームの階段1段の高さ
歩道からステップまでの高さ：③	駅構内～ホームの階段の段数
止水板の高さ：④	

図-3 入口の計測の諸量

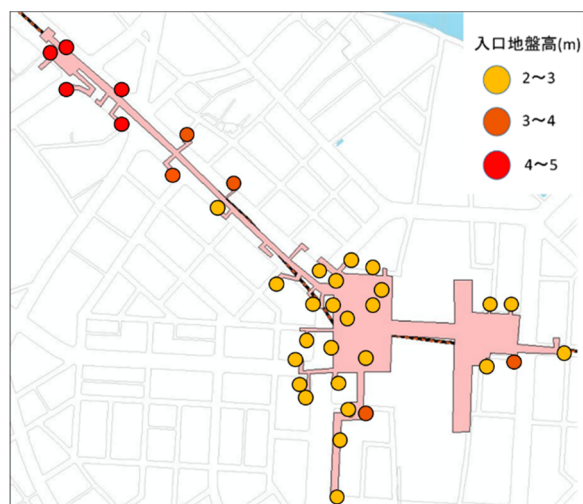


図-4 地下空間入口の標高の分布

4. 平成11年の福岡水害の様子

平成11年6月28日夜から29日にかけて、九州北部に豪雨が生じ、各地で土砂崩れや浸水などの被害が発生した。特に福岡市では、29日午前8時から9時にかけて77mmの降水量を観測し、御笠川や山王放水路が氾濫し、博多駅周辺が浸水すると共に、地下空間に氾濫水が流入した。当時の水理を示す情報として、橋本ら¹²⁾により、図-6の浸水域および図-7の越流流量が示されている。本研究では、これらの情報を活用した。

5. 計算条件および計算結果

(1) 計算条件

本研究では、橋本ら¹²⁾による平成11年の水害の調査情報を活用し、図-8の越水箇所からの越流流量の総量が図-7と等しくなるように設定して、10時間の計算を行った。なお、越水箇所の越流流量は同一河川において同じと仮定した。ここでは、止水板は無いものとした。

(2) 計算結果

計算結果として、最大浸水深の分布を図-8に示す。ここでは、図-5の赤枠の博多駅周辺の様子を拡大して示している。図-8では、博多駅の西側の浸水の様子が示されていない。これは、鉄道をくぐる道路を表現できていないためである。そこで、アンダーパスのある計算格子に周辺の道路高を与えて計算を進めた。図-9にアンダーパスを考慮した場合の浸水の様子を示す。本図から、氾濫水が博多駅を越えて那珂川まで広がっていることが分かる。図-6と図-9とを比べると、明らかに計算結果は拡がり過ぎている。これは、用いた計算格子が50m×50mの大きさのものであり、実際の微地形が表現できていないこと、解析に建物が考慮されておらず、実際には建物が氾濫水の拡がりを防ぐように機能した可能性があること、水防活動により水の拡がりが制御されたこと、などが考えられるが、現時点では、その理由を確定することはできない。ここで用いた地盤高分布からは氾濫水が広域に拡がることも理解できるので、氾濫域が図-6となるように、図-10で示された箇所地盤高を80cm上げて計算を行った。この値の妥当性には不明な点が残る。この点については今後の課題とし、ここでは、氾濫域を図-6に合わせたときの地下浸水の様子を検討した。まず、最大浸水深の分布を図-11に示す。本図と図-6との比較を行うと、両者が類似した浸水域を示していることが分かる。また、実測値の浸水深の最大値は約100cmであり、本解析の浸水深の最大値は約80cmであ

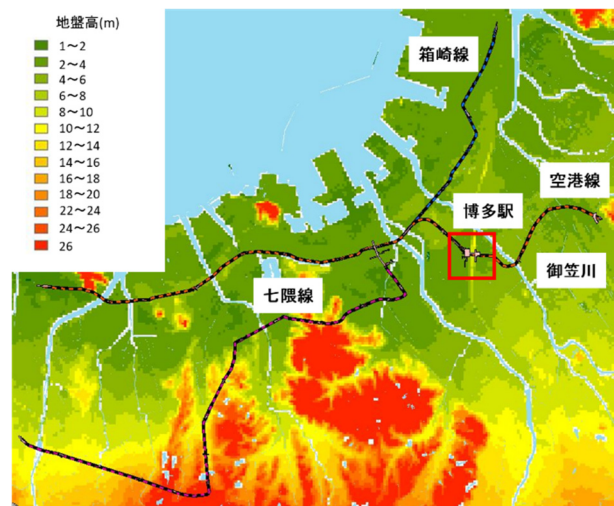


図-5 計算領域および地下鉄路線

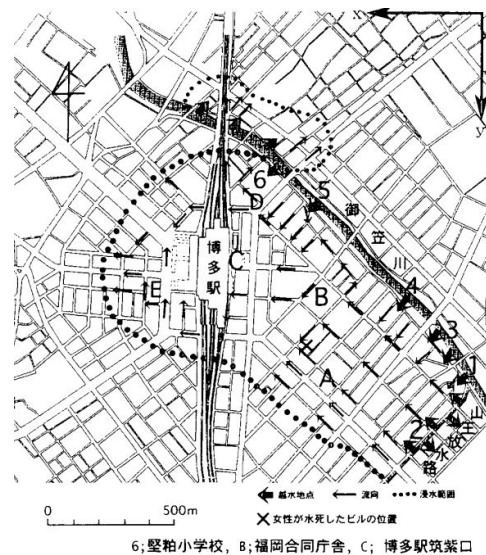


図-6 博多駅周辺の浸水の様子(橋本ら¹²⁾)

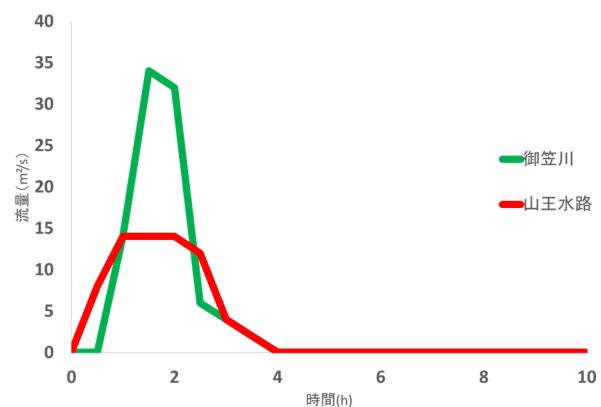


図-7 越流流量(橋本ら¹²⁾の情報を加工)

った。このことから、地表面の浸水計算は概ね平成11年当時の浸水を表現している。つぎに、地下鉄の浸水の様子を図-12に示す。本図から地下鉄の浸水が生じていることが分かる。これらのことから、本研究により、地

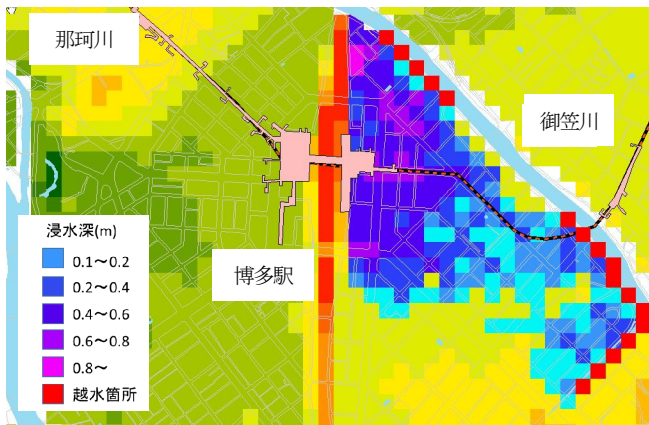


図-8 最大浸水深

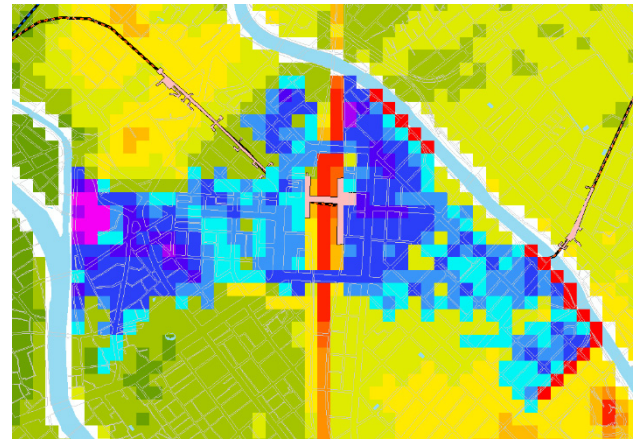


図-9 最大浸水深(道路の高架を考慮した場合)

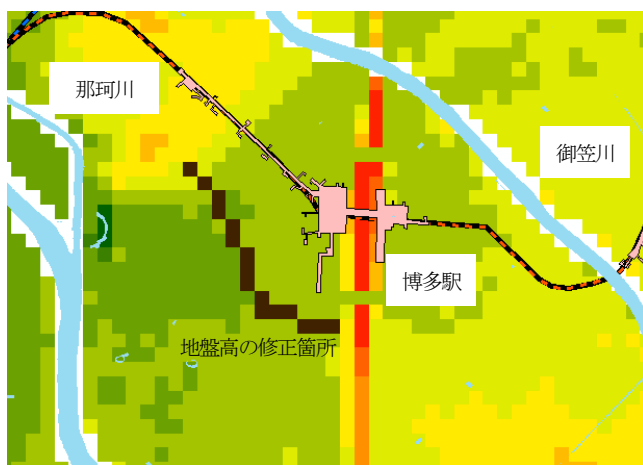


図-10 地盤高の修正箇所

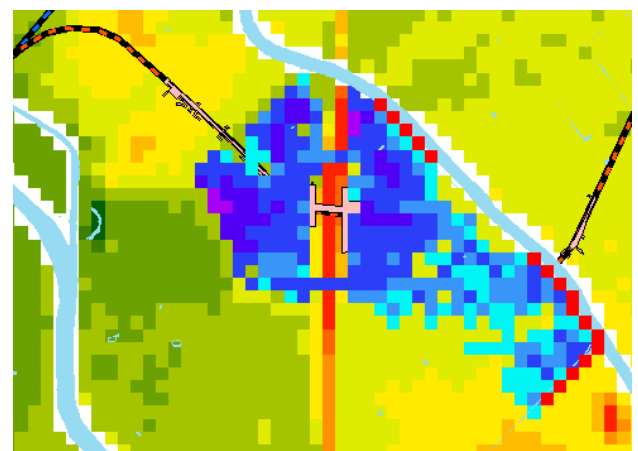


図-11 最大浸水深(地盤高の修正を考慮した場合)

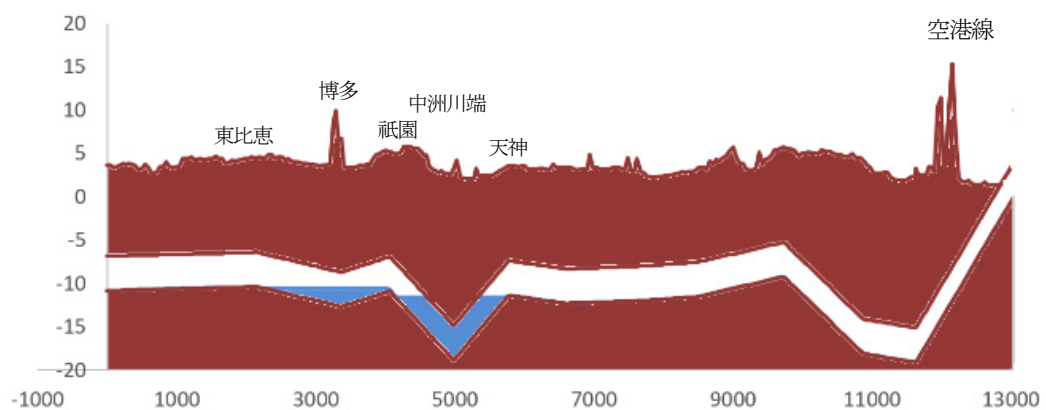


図-12 地下鉄線路の浸水の様子(計算終了時)

上の浸水，地下空間への氾濫水の流入，地下鉄駅の浸水と地下鉄内の氾濫水の拡がりが計算できた．平成 11 年の福岡水害では，博多駅から東比恵駅方面に約 1km 冠水し，博多駅では線路部において 1.3m の浸水があった．本計算では博多駅の地下鉄の浸水深は 2m 近くあり，中

洲川端駅では鉄道線路が水没しており，本計算では実際よりも多くの水が地下鉄線路に流入している．これらの課題の解決のためには，地上の氾濫計算における格子の詳細化，下水道などの排水システムやビルの地下部，地下鉄駅および地下街の貯留効果の考慮などが挙げられる．

6. 止水板と越流流量増加を考慮した数値実験

(1) 地下空間の入口の止水板設置の効果

5.で得られた浸水水量に対する地下空間の浸水水量の割合（計算終了時の地下の浸水水量／（計算終了時の地上の浸水水量＋地下空間の浸水水量））をみれば、その値は約47%であった。このことから本計算では相当の水量が地下空間へ流入している。ここでは、地下空間の入口にある止水板（(6)式のd4）を考慮し、5. (1)と同様の計算条件を用いて、浸水解析を行った。その結果を図-13に示す。なお、ここでは次に示す流量変化の検討を考慮し、図-11と最大浸水深の表示の区分けを変えている。

計算結果からは地下浸水が生じておらず、図-13の地下浸水の平面図からも地下鉄線路内に浸水が無いことが分かる。これは、博多駅周辺の最大浸水深は1m以下であり、地下空間の入口も道路面から高く、さらに止水板が在るので、地下浸水が生じなかったことが考えられる。このことから、博多駅周辺における止水板設置の効果と重要性が改めて示された。

(2) 越流流量増加を考慮した数値実験

近年、気候変動に伴う大規模出水について多くの場所で検討が行われている。ここでは、仮に、越流流量を2倍、5倍、10倍とした場合の計算結果について検討する。

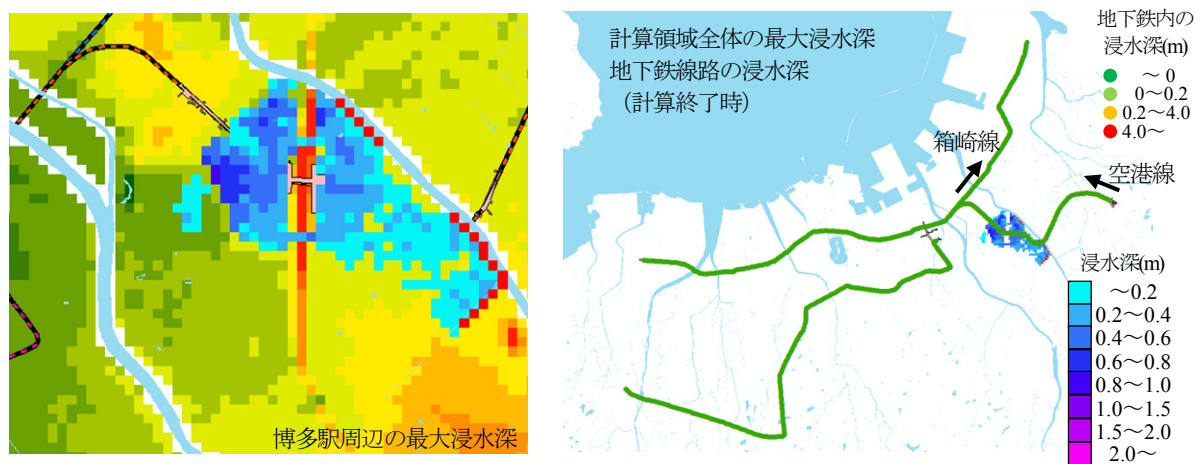


図-13 止水板を考慮した計算結果

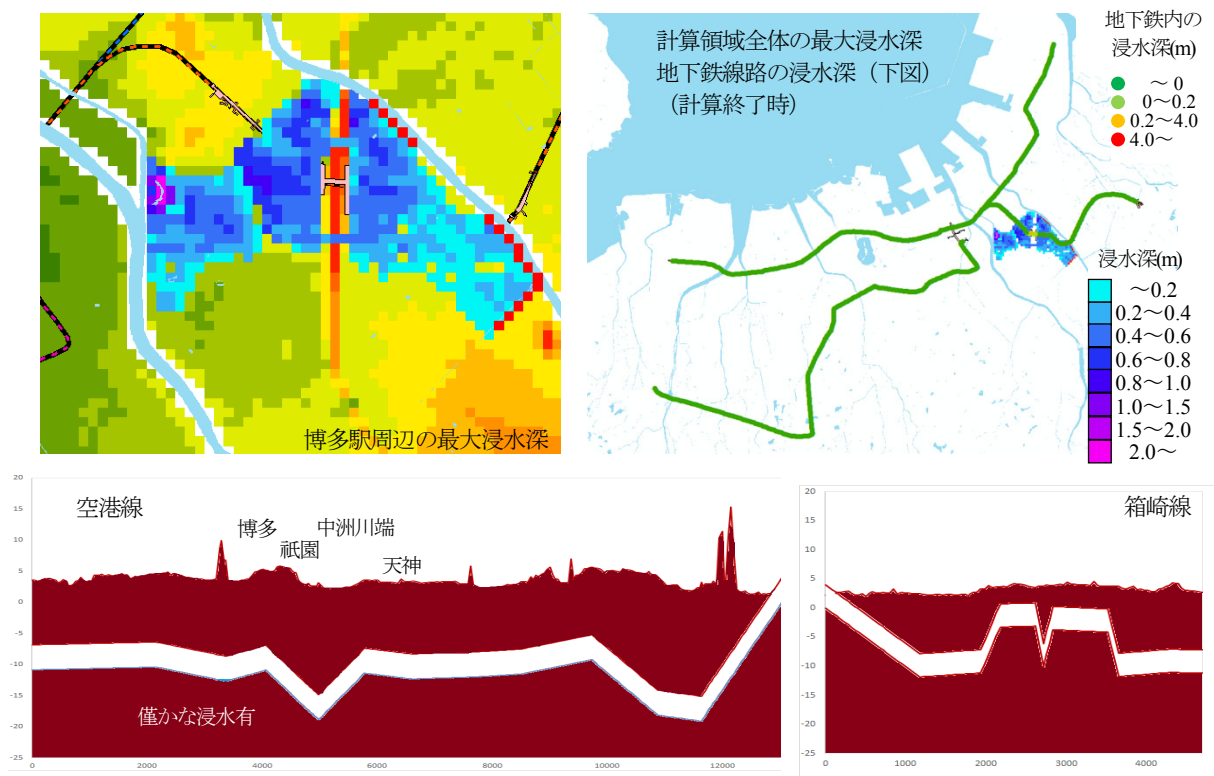


図-14 止水板を考慮し越流流量を2倍とした計算結果

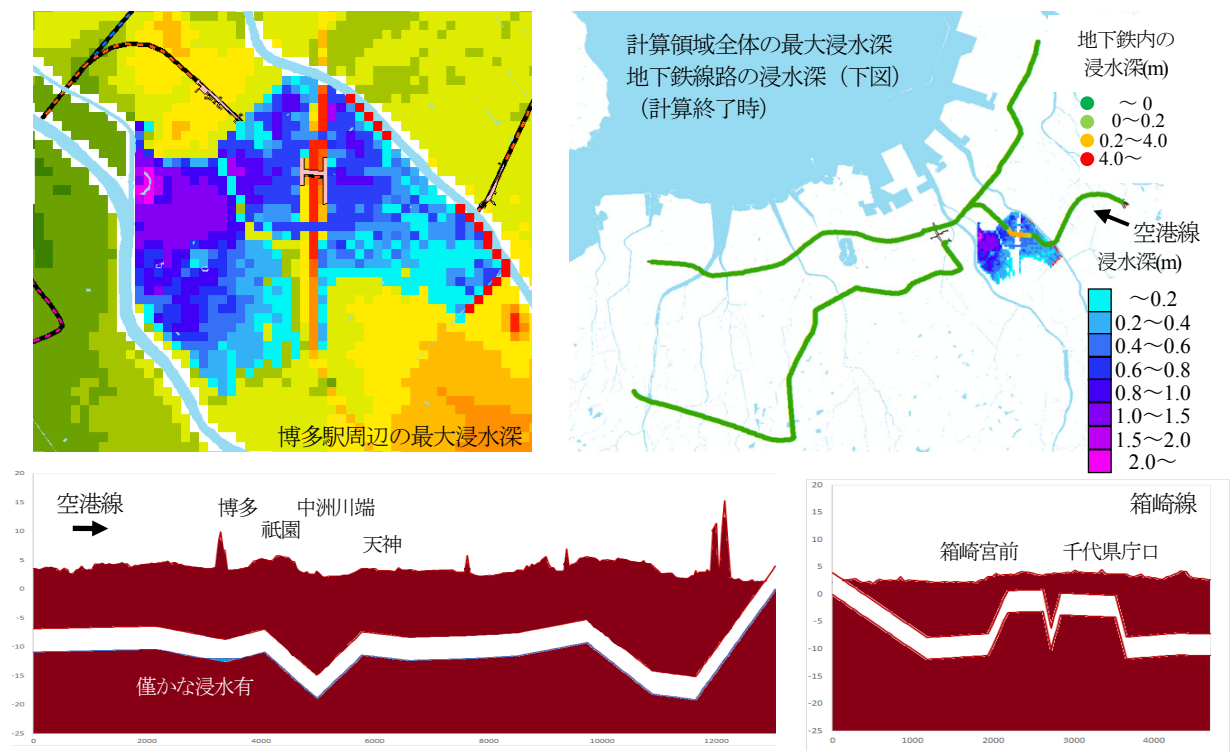


図-15 止水板を考慮し越流流量を5倍とした計算結果

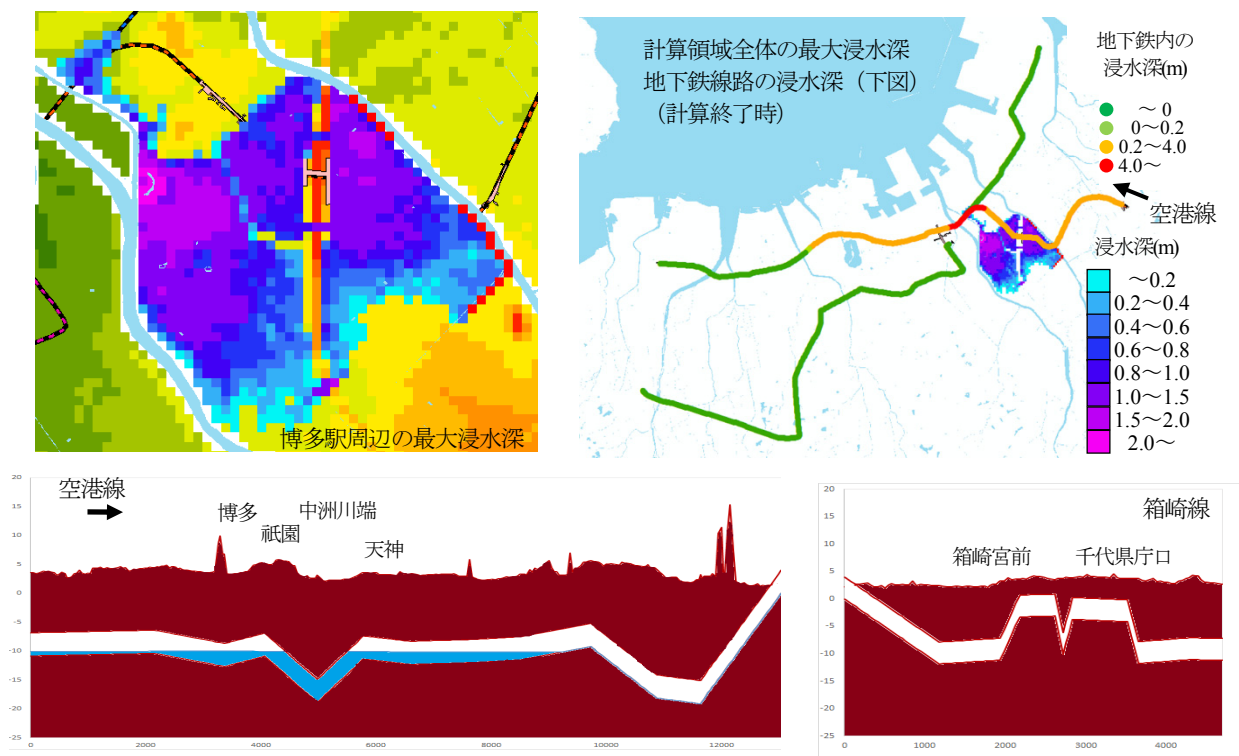


図-16 止水板を考慮し越流流量を10倍とした計算結果

なお、それぞれの条件設定に明確な根拠はないが、越流流量が増大した場合の浸水被害の想定参考資料になると考えた。図-14～図-16にそれぞれの条件における地上と地下の浸水の様子を示す。越流流量を2倍、5倍とした場合の計算結果では、地上の浸水の拡がりが大きくな

るが、地下空間の浸水は僅かであった。これは越流流量が多い場合でも地形の影響により氾濫水が西側へ流下し、地下鉄入口の浸水が止水板を超えるほどには大きくならず、地下空間への流入が少ないことが考えられる。また、越流流量を10倍とした場合は、博多駅周辺の浸水

深も大きくなり、地下への流入流量も増えて、氾濫水が地下鉄線路内を拡がっていることが分かる。しかし、この場合においても、乗換駅を介して他の地下鉄線路へ氾濫水が拡がる様子は見られなかった。これらの結果から、大規模浸水時における博多駅周辺の氾濫水の様子と、地下浸水に対する止水板設置の効果は大きいことが示された。

7. おわりに

本研究では、福岡市を対象に、大規模浸水における地下空間を有する都市の浸水について数値解析的な検討を行った。特に地下鉄の浸水による水の拡がりを定量的に明らかにした。本研究で得られた成果を以下に記す。

1) 洪水越流による都市浸水、地下への流入と地下鉄による浸水の拡がりを求める数値解析モデルを平成11年の福岡市の水害に適用した。地盤高の修正を考慮して、当時の浸水域を再現することができた。さらに、地下鉄内の浸水も表現することができた。しかし、計算結果と実績における地下鉄内の水量の不一致もみられたことから、今後、精度に関する検討を行う必要がある。

2) 入口の止水板を設置した数値実験を行ったところ、地下流入を防ぐことができていた。このことから、適切な止水板の設置は、平成11年の福岡水害における地下浸水にとって非常に効果的であることが改めて示された。

3) 越流流量を2倍、5倍、10倍と変化させ、止水板を設置した場合の数値実験を行った。その結果、越流流量の増加に伴って、地上の浸水範囲が大きくなっていることが示されたが、越流流量が2倍と5倍の場合は氾濫水が博多駅を越えて西側へ流下し、地下浸水は僅かであった。このことから、博多駅周辺の浸水特性が示されたと共に、止水板の重要性も改めて示された。

本研究では、公開されている情報を活用して、地下街・地下鉄駅を有する都市の大規模浸水の様子を求めた。本研究により、地下空間の浸水を検討するためには、まず、適切に地上の浸水を表現する必要があること、地下鉄駅・地下街の水の貯留を適切に見積もることなど、課題も明らかとなった。

謝辞：本研究は、文部科学省委託事業統合的気候モデル高度化研究プログラムの支援を受けて実施されました。また、図面の作成に当たっては、中部大学4年生の藪下大貴君の支援を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 尾崎平, 浅野統弘, 石垣泰輔, 戸田圭一, 短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1417-I_1422, 2014.
- 2) 関根正人, 河上展久, 都市における内水氾濫と地下街浸水の被害予測に関わる数値解析, 水工学論文集, 第47巻, pp889-894, 2003.
- 3) 浅野統弘, 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一, 南海トラフ巨大地震による津波来襲時の大規模地下空間の浸水予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1435-I_1440, 2014.
- 4) 関根正人, 池田遼, 東京東部低平地を対象とした浸水・氾濫の数値解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_1429-I_1434, 2014.
- 5) 池内幸司, 越智繁雄, 安田吾郎, 岡村次郎, 青野正志, 大規模浸水時における地下鉄等の浸水想定と被害軽減方策の効果分析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.3, pp136-147, 2012.
- 6) 朝日一堯, 戸田祐嗣, 辻本哲郎, 地上一地下鉄トンネルの統合氾濫解析による地下鉄路線およびその周辺地域の水害脆弱性に関する基礎的検討, 河川技術論文集, 第20巻, 2014.
- 7) 関根正人, 関根貴広, 東京都心部の地下空間への氾濫水の流入危険度とトンネル内の浸水域拡大過程に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, I_1369-I_1374, 2016.
- 8) 岡部良治, 寺田光宏, 土井峻平, 石垣泰輔, 外水氾濫における地下鉄軌道を伝播する氾濫水の挙動予測に関する検討, 土木学会第71回年次学術講演会, II-116, 2016.
- 9) 武田誠, 島田嘉樹, 川池健司, 松尾直規, 庄内川の想定破堤氾濫による地下空間への流入水量の検討, 第20回地下空間シンポジウム論文・報告集, pp155-164, 2015.
- 10) 武田 誠, 西田貢士郎, 村瀬将隆, 川池健司, 地下鉄を考慮した都市の浸水解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第21巻, pp.153-160, 2016.
- 11) 村瀬将隆, 中島勇介, 武田 誠, 川池健司, 洪水破堤による三大都市圏の浸水解析, 地下空間シンポジウム論文・報告集, pp.97-102, 第23巻, 2018.
- 12) 橋本晴行, 朴埼瑛, 渡辺政広, 1999年6月福岡水害時に発生した博多駅周辺の洪水および氾濫流の再現計算, 自然災害科学 JJSNDS 21-4 369-384, 2003.