

地下空間シンポジウム論文・報告集

—第26巻—

Proceedings of the Symposium on Underground Space VOL.26

2021年 1月

土木学会
地下空間研究委員会

Committee on Underground Space J.S.C.E.

まえがき

地下空間研究委員会では、平成 7 年 12 月に第 1 回地下空間シンポジウムを開催して以来、今回で第 26 回目のシンポジウムを開催する運びとなりました。本シンポジウムのテーマは、「次世代に向けた持続性の高い社会形成」としています。令和 1 年から 2 年に発生した COVID-19 感染は瞬く間に世界中に拡大し、未だ渦中にある状況です。このような未知のハザードは人類の新たな驚異であり、世界中の人々が手探りでこれに立ち向かっております。一方、近年では異常気象による集中豪雨の多発による災害も増加し、自然ハザードの巨大化にも注視する必要があります。このように社会が受けるハザードの質や規模が変化する中、地下空間研究委員会では、早い段階から、様々な都市インフラ機能とハザードの関係に着目し、調査を進めてきました。

本シンポジウムでは、とくに COVID-19 渦中の人々の生活様式や経済活動の変化と都市インフラ機能の確保について、多岐にわたる議論を展開するものであります。とりわけ、令和元年度に土木学会賞(功績賞)を受賞された岸井隆幸先生からは、都市計画とコロナ禍の生活様式などについて基調講演を頂きます。また、ウイルス感染対策に著名な四柳宏先生、都市防災に見識をもたれる廣井悠先生、ならびに、都市交通施設を管理する徳永幸久氏、並川賢治氏をお迎えして、都市地下空間の機能とコロナ対策の現在と今後についてパネルディスカッションを行います。

基調講演・パネルディスカッションに先立ち、委員会報告として維持管理小委員会が調査した海外の鉄道トンネルの維持管理の現状報告会、ならびに地下空間の計画、心理、防災、維持管理、建設のそれぞれの分野ごとに論文発表会を開催いたします。今回は、4 編の査読付き論文が慎重な審査のもと採択され、また 20 編の一般投稿論文の発表がございます。各分野のセッションにおきましても、活発な討議がなされることと存じます。

なお、本シンポジウムは、リモートによる開催となっております。直接対面のシンポジウムとは異なりますが、参加される皆さま方と有意義な意見交換を期待しております。

最後に、土木学会 地下空間研究委員会主催「第 26 回地下空間シンポジウム」を開催するにあたり、ご多忙な中、論文をご投稿いただいた皆様、シンポジウムにご参加いただいた皆様に御礼を申し上げます。また、本シンポジウムの実行・運営に尽力された関係各位ならびに諸先輩方に感謝を申し上げます。

2021 年 1 月

公益社団法人 土木学会 地下空間研究委員会 委員長

金沢工業大学 教授 木村 定雄

目 次

まえがき		木村 定男	
地下空間研究委員会 2020 年活動報告		武田 誠 酒井 喜市郎 安藤 慎一郎 斎藤 優貴 清木 隆文	1
査読付き論文			
A1-1	内水氾濫と避難シミュレーションによる地下空間浸水対策の評価	尾崎 平 河南友也 檀 寛成 石垣泰輔	8
A2-1	大規模地下街での短時間集中豪雨を想定した 浸水時における安全避難に関する検討	中阪友太郎 石垣泰輔	18
B1-1	レーザスキャン点群の 360° パノラマ化による大阪地下空間における浸水予測の AR 可視化	安室喜弘 廣瀬 詢 檀 寛成 窪田 諭 尾崎 平 石垣泰輔	30
B2-1	洪水を対象とした名古屋駅前地下街の浸水解析と避難に関わる検討	武田 誠 鷺山 陸 佐藤大介 村瀬将隆	37
一般投稿論文			
A1-2	エレメント連続施工時の 2 次元解析手法の検討	丸子文之 大塚隆人 仲山貴司	44
A1-3	レーザースキャナを用いたトンネル内空計測における計測時間短縮への取り組み	須佐見朱加 京免継彦 宇野洋志城	52
A1-4	地下鉄銀座線渋谷駅移設事業に伴う 第 3 回線路切替・ホーム移設工事	岩柳智之 小柳朋宏 西川 祐 南立 修	56
A1-5	建設 50 年を迎えたホワイティうめだ地下街の現状とスケルトン化リニューアルの事例	井下泰具 中井亮太郎 蒲地正光	64
A2-2	性能照査型設計法によるシールドトンネルの試設計例	津野 究 滝川 遼 木下果穂 坂田智基	70
A2-3	シールドトンネルの設計における地盤条件と作用に関する感度分析	滝川 遼 津野 究 木下果穂	74
A2-4	小断面鋼管内からの前方探査手法の基礎的研究	板谷創平 仲山 貴司	78
B1-2	横浜横須賀道路の直下におけるトンネル掘削	戸久世昂真 藤澤 元 高橋 敬 佐野裕作	82

B1-3	東京外かく環状道路 三郷南 IC～高谷 JCT 間の整備事業	佐々木裕二 小林 謙二	86
B1-4	MPM による掘削土留め工の変位量と背面土圧に関する解析的検討	石井秀憲 尾崎 匠 牛田貴士 阿部慶太	91
B2-2	大深度地下を利用した東京外かく環状道路（関越～東名）の建設について	山崎洋大 関 信郎 辻 功太 中岡 毅	98
B2-3	線状降水帯を想定した都市域の地下空間浸水について	草野魁叶 石垣泰輔 戸田圭一	104
B2-4	座位姿勢における水圧が作用する自動車ドアからの避難に関する体験実験	馬場康之 石垣泰輔 戸田圭一	110
C1-1	維持管理小委員会 鉄道WG活動報告【別添】	地下空間研究委員会 維持管理小委員会	—
C1-2	トンネル覆工補強工の定量的選定に向けた数値解析的検討の適用性	岡部 正 岸田展明 菅原健太郎 林 久資	116
C1-3	地下コンクリート構造物における 塩害による鋼材腐食の推定法の提案	牛田貴士 木下果穂 仲山貴司 仁平達也	123
C1-4	矢板工法で施工されたトンネルにおける覆工形状計測に関する一考察	土門 剛 菅原健太郎 大窪克己	131
C2-1	非 GPS 環境下でのドローンによるトンネル検査	山口秀明 荻野竹敏 小西真治 石川幸宏	139
C2-2	自動運転ロボットを使った エスカ地下街公共通路の消毒実証実験の取組について	龍健太郎 成澤 守 大森高樹 小野栄子	144
C2-3	大谷採石地下空間の地震応答と避難意識の関連性について	清木隆文 土屋友梨珠 程 伝涛	149
C2-4	最近の都市地下空間整備動向と安全確保のあり方に関する考察～特に防災計画及び COVID-19 への対応について～	岩崎裕直	155

委員会報告

地下空間研究委員会	武田 誠	(1)
計画小委員会	大沢 昌玄	(5)
防災小委員会	馬場 康之	(8)
心理小委員会	岩崎 裕直	(11)
維持管理小委員会	木村 定雄	(13)

【別添】維持管理小委員会 鉄道WG活動報告
奥 付

地下空間研究委員会
2020 年活動報告

地下空間研究委員会 2020年活動報告

武田 誠^{1*}・酒井 喜市郎²・安藤 慎一郎³・清木 隆文⁴・齋藤 優貴⁵

Makoto TAKEDA^{1*}, Kiichiro SAKAI², Shinichiro ANDO³, Takafumi SEIKI⁴, Yuuki SAITO⁵

1. 委員会概要

本委員会は、1994年度に土木学会に常設されて以来、地下空間の建設・利用に関する「地下空間学」の創造をめざす研究活動を行ってきた。その活動領域は土木工学のみならず、建築、法律、医学、心理学、福祉、情報学などの分野にまで及んでいる。本委員会には「計画」「防災」「心理」「維持管理」の4つの小委員会と、例年1月に開催している地下空間シンポジウムの企画運営を行う「地下空間シンポジウム実行委員会」、地下空間シンポジウムに投稿された論文の審査を行う「地下空間シンポジウム表彰委員会」、ならびにこれら全体を調整する「幹事会」を設置している。各小委員会では個別に設定したテーマとともに、委員会全体で議論すべき横断テーマに基づいた研究活動を精力的に行っている。

委員会活動の中心は各小委員会の調査研究活動であり、3年間を一括りとして鋭意活動を行っているが、今年度は第9期活動の最初の年であり、各小委員会ともこれまでの成果を新たに発展させ、鋭意調査研究活動を実施している。

また、得られた成果や課題について、地下空間シンポジウムや土木学会年次講演会の研究討論会、共通セッションなどを通じて、広く委員会内外と意見交換や討論を行うとともに、調査研究で得られた成果を、マスメディアへの協力、市民セミナー、大学と合同の研究集会を通じて広く一般市民に公開している。さらに、一般向け、子供向けなどの種々の地下空間見学会を開催し、幅広い方々に地下空間の理解を深めていただくよう、活発な広報活動を行っている。

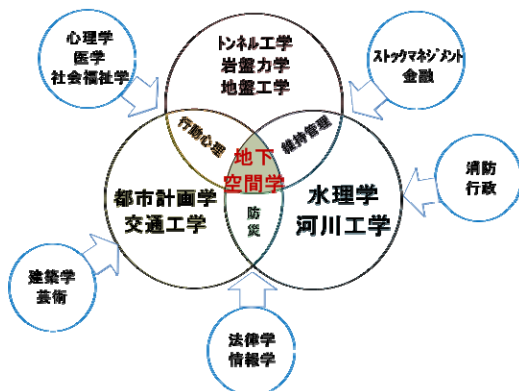


図-1 委員会活動領域のイメージ

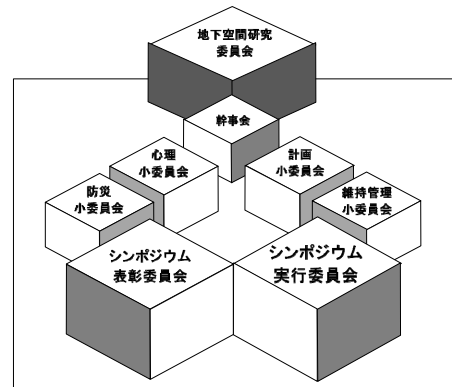


図-2 委員会全体組織

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

²正会員 鉄建建設株式会社 東京鉄道支店 Tokyo Railway Project Branch, Tekken Corporation (E-mail:kiichirou-sakai@tekken.co.jp)

³正会員 株式会社竹中土木 東京本店技術・設計部 Technical Engineering & Design Department, Tokyo Main Office,
Takenaka Civil Engineering & Construction Co., Ltd.

⁴正会員 宇都宮大学 大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Utsunomiya University

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部インフラエンジニアリング部 Transportation Infrastructure
Division, Infrastructure Engineering Department, Pacific Consultants Co., Ltd.

2. 小委員会研究活動の概要

小委員会では親委員会で議論・設定されたテーマに基づき、委員会内外の専門家による話題提供、文献調査、現地調査、討議などの活動を行っている。その活動の成果は毎年小委員会ごとに整理され、アーカイブされるとともに、新たに得られた研究成果について、毎年1月に実施している地下空間シンポジウムで発表するほか、活動で得られた成果を広く社会に発信する事を目的とした市民セミナーを全国各地で数多く開催し、知見の有効活用を図ると共に、広く社会に開かれた委員会を目指している。

今年度は第9期の最初の年であり、小委員会毎に策定した活動方針に従い、諸課題の検討を進めている。

各小委員会の活動内容については、本シンポジウム論文・報告集の「小委員会活動報告」を参照頂くこととし、ここでは各小委員会の活動概要のみを報告する。

(1) 計画小委員会

今後のまちづくりにおける地下空間の果たす役割について、事例調査を行うことにより地下空間ネットワーク形成、リノベーションや防災・減災といった観点と、地下空間の有効利用や地下空間のあり方の観点から、より良い都市の地下空間整備を行うための方策を検討することを目的としている。研究テーマは以下の通りである。

- ① 都市活性化要因・避難場所としての価値創造とその課題および対応
- ② 地下空間の位置づけと法制度体系の再確認
- ③ 地下利用ガイドプランの再考
- ④ 今後新たに構築及び再構築する地下空間整備のあり方
- ⑤ 社会経済状況変化に伴う地下空間の閉じ方

以上の課題解決に向け、セミナーと見学会の実施、地下空間利用ニーズに応じた計画技術の蓄積、地下空間に関する解説書の出版を目指している。

大沢委員長、松谷副委員長以下全19名の委員により調査研究活動を行っている。

(2) 防災小委員会

防災小委員会では、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ている。研究テーマは「災害に強い街づくりにおける地下空間の防災のあり方」を据え、サブテーマとして、

- ① 地下空間の実態調査
- ② 地下火災
- ③ 地下浸水
- ④ 地下空間防災教育、啓発

の4項目を設定している。また、各サブテーマを包括する観点からとりまとめを行い、地下空間における災害からの避難、被害軽減に資する指標、情報の提供を進め、地下空間の防災対策、安全性の向上を目指している。

馬場委員長、尾崎副委員長以下全28名の委員により調査研究活動を行っている。

(3) 心理小委員会

心理小委員会は「公共的地下空間の知覚環境に関する研究」をテーマとし、心理学の観点から、地下空間における人間の行動について研究している。また、公共的地下空間の多様な利用者の知覚環境、災害時行動などに重点を置いた検討を進め、その成果を実際の地下施設への適用に資することを目的としている。以下のサブテーマに基づき活動を行っている。

- ① 地下空間における非常時の行動
- ② 地下空間の案内サイン
- ③ わかりやすい地下空間と人間
- ④ 地下空間の安全性評価

誰にもわかりやすい地下空間を目指し、身体的な特性とシーンを踏まえたデザインのあり方を提案し、気づきに関する基礎研究を実空間へ発展させる。活動は小委員会での話題提供や意見交換、「人に優しい地下空間セミナー」開催を中心に展開している。

岩崎委員長、三田副委員長以下全29名の委員により調査研究活動を行っている。

(4) 維持管理小委員会

国際標準・アセットマネジメントシステムにおける実践マネジメントシステムの構築の必要性を理解した上で、国内外の地下構造物を対象に、実践的なマネジメントを行う上で必要な「維持管理における点検（検査）手法、それらの評価手法の実態」および「管理者責任」について主に調査・分析することを目的とし、以下のテーマについて、検討している。

- ① 国内外の地下構造物における維持管理の実態
 - ② 地下構造物の維持管理における法的な管理者責任
- 各研究テーマについて、「各施設に着目した検討」および「法的視点の検討」を行う目的で、4つのWG（道路トンネルWG、鉄道トンネルWG、インフラ施設WG、法的視点WG）を設置している。また、専門家による話題提供を受けて視野を広めると共に、得られた研究成果や知見などを広く社会に発信するための「維持管理セミナー」を積極的に開催している。さらに、WGの研究成果を毎年土木学会が公表している「インフラ健康診断」に反映させる。

木村委員長、森山副委員長以下全44名の委員により調査研究活動を行っている。

3. 地下空間シンポジウム

1995年に当委員会が土木学会に常設され、その活動成果報告の場として1995年12月6日に第1回地下空間シンポジウムを開催して以来、今回のシンポジウムで26回を重ねている。毎回その時期に最も合致したテーマを選定し、論文発表の他、講演、パネルディスカッション、パネル展示などを実施し、参加者は約200名～300名余を得ている。これまでの実施概要は表-1の通りである。また同時に現場見学会も開催しており、両者を有機的に結びつけることにより、テーマ探求の深度化を図っている。

4. 研究成果報告会の開催

2020年7月9日に研究活動報告会をオンラインで開催した。本会議は、当委員会活動を広く知っていただくために公開とし、ZOOMによる議論参加型として、84名の方に参加いただいた。報告会では、計画、防災、心理、維持管理の各小委員会と、幹事会および地下空間シンポジウム実行委員会からの第8期の活動報告と第9期への課題・申し送り事項を議論した。今年度は、第9期の3年間の初年となり、各委員は気持ちを新たに調査・研究活動を行っている。

土木学会 地下空間研究委員会 研究活動報告会	
	日 時：令和2年7月9日（木）14:00～17:00 場 所：WEB 会議／土木学会 講堂
次 第	
1. 開 会	開会挨拶 14:00～14:05 （木村委員長）
2. 議 事	
1) 地下空間研究委員会 これまでの活動経緯のご紹介（武田幹事長）	14:05～14:15
2) 計画小委員会 第8期（H29-R1 年度）の研究活動報告 および第9期への課題・申し送り事項（大沢委員長）	（報告）14:15～14:40 （質疑応答）14:40～14:45
3) 防災小委員会 第8期（H29-R1 年度）の研究活動報告 および第9期への課題・申し送り事項（馬場委員長）	（報告）14:45～15:10 （質疑応答）15:10～15:15
4) 心理小委員会 第8期（H29-R1 年度）の研究活動報告 および第9期への課題・申し送り事項（須田委員長）	（報告）15:15～15:40 （質疑応答）15:40～15:45
休憩	
5) 維持管理小委員会 第8期（H29-R1 年度）の研究活動報告 および第9期への課題・申し送り事項（森山副委員長）	（報告）15:55～16:20 （質疑応答）16:20～16:25
6) 幹事会 第8期（H29-R1 年度）の研究活動報告 および第9期への課題・申し送り事項（酒井副委員長） （地下空間の普及活動などを中心に）	（報告）16:25～16:35 地下空間シンポジウム実行委員会 第8期（H29-R1 年度）の状況 報告および第9期への課題・申し送り事項（岡本幹事） （報告）16:35～16:40 （質疑応答）16:40～16:45
7) その他 16:45～16:50 （武田幹事長）	・土木学会全国大会のご案内 ・第26回 地下空間シンポジウムのご案内 他
3. 閉 会	開会挨拶 16:50～16:55 （松谷副委員長）

図-3 研究成果報告会のスケジュール

表-1 地下空間シンポジウム一覧表

回数	開催日	テーマ	講演者及び演題	実施企画
第1回	1995年12月6日	調和的国土空間の創造を目指して	＜特別講演＞平井 典 安全な都市地下空間の構築	パネル展示
第2回	1997年1月17日	なし	＜特別講演＞伊藤 滋 地下空間活用の国際的視点－IFHP仙台・宮城会館に基いて－	
第3回	1998年1月14日	なし	＜特別講演＞武澤秀一 大地の胎内空間が意味するもの－インドの石室と階段状井戸－ ＜特別講演＞真鍋友一 大深度地下利用に関する検討について	
第4回	1999年1月13日	よりよい都市の発展に期待できる大深度地下の有効利用	基調講演(1) 今田 徹 大深度地下利用制度の意義と課題 基調講演(2) 本東信・佐藤寿延・森原良隆 臨時大深度地下利用調査会審判について	パネルディスカッション
第5回	2000年1月14日	環境と共生できる地下空間をめざして	＜特別講演1＞西垣 誠 地下空間利用と地下環境保全 ＜特別講演2＞三浦 克 道路における地下空間利用の課題 ＜特別講演3＞面出 薫 地下空間のための光のデザイン	
第6回	2001年1月14日	21世紀の都市の創造と再生に向けて		パネルディスカッション
第7回	2002年1月12日	都市再生と地下利用		パネルディスカッション
第8回	2003年1月18日	ストック&メンテナン時代の地下空間利用		パネルディスカッション
第9回	2004年1月16日	地下空間整備と公民協働 ～夢のある地下空間を目指して～	＜特別報告＞中山学、越後 徳 韓国大邱市地下鉄火災事故調査中間報告	パネルディスカッション
第10回	2005年1月14日	動きはじめた大深度地下利用－この10年を振り返って－	＜特別報告＞（前法務大臣）野沢三三 大深度地下利用の潮流 一議員立法提案者の願いと展望 ＜特別講演＞（国交省）上野 宏 大深度地下利用制度の現状と今後の展望	パネルディスカッション
第11回	2006年1月11日	時代の求める地下空間とは ～パブリックデザインとしての地下利用～	＜基調講演＞（国交省）松平 隆平 本格化しつつある大深度地下利用 一制度の必要性と神戸市大容量送水管事業	パネルディスカッション
第12回	2007年1月17日	歴史に学ぶ地下空間利用	（講演）（国交省技術審議官）竹内 直文 現代の国の施策	パネルディスカッション
第13回	2008年1月16日	都市問題解決のために地下空間が果たしてきた役割	（講演）（国交省技術審議官）竹内 直文 都市行政の視点からの地下空間の利用	パネルディスカッション
第14回	2008年1月23日	低炭素社会と地下空間利用	＜基調講演＞（国交省技術審議官）松谷 幸敏 低炭素型都市づくりの推進に向けて ＜特別講演①＞（東洋大学） 藤田 壮 進行する地球温暖化と低炭素社会への転換シナリオ ＜特別講演②＞（都市計画学会）小澤 一郎 低炭素都市の実現に向けて	
第15回	2010年1月18日	低炭素社会と地下空間利用 ～そのさらなる可能性～	＜基調講演＞（国交省技術審議官）松谷 幸敏 低炭素社会実現に向けた都市行政の取組み	パネルディスカッション
第16回	2011年1月18日	世界に挑む日本の技術 ～成長戦略と地下との関わり～	＜基調講演＞（国交省前事務次官）谷口 博昭 成長戦略 一海外展開とPPP～	パネルディスカッション
第17回	2012年1月20日	安全・安心な社会の形成に向けて ～巨大災害に対する地下空間の役割～	＜基調講演＞（国交省技術審議官）松井 直人 災害時における地下空間の役割	パネルディスカッション
第18回	2013年1月16日	安全・安心な社会の形成に向けて ～大規模水害に対する地下空間の現状と課題～	＜基調講演＞（内閣府参事官）藤山秀章 首都圏大規模水害対策大綱を中心に	パネルディスカッション
第19回	2014年1月22日	安全・安心な社会の形成に向けて ～社会レジリエンス向上に向けた地下空間の可能性～	＜基調講演＞（国交省技術審議官）望月 明彦 都市のレジリエンス確保に向けて	パネルディスカッション
第20回	2015年1月23日	地下空間の未来 ～20年を振り返って より安全により便利のもとと身近に～	＜基調講演＞（国交省技監）藤山 日出男 「日本の国土と地下空間利用」 ＜特別講演①＞（関西大学）大西 有三 「地下空間の“き”のう”きょう”“あす”」 ＜特別講演②＞（土木写真家）西山 芳一 「地下を撮る」	ポスターセッション
第21回	2016年1月22日	安全・安心な社会の形成に向けて ～地下空間における災害時対応と今後の取組～	＜基調講演＞（国交省技術審議官）清水 孝志 新たなステージに対応した防災・減災と地下空間のあり方	パネルディスカッション ポスターセッション
第22回	2017年1月20日	安全・安心な社会の形成に向けて ～地下空間の維持更新と機能向上～	＜基調講演＞（金沢工大）木村定雄 「土木学会インフラ健康診断（道路トンネル）の概要と維持管理の課題」 ＜基調講演＞（国交省技術審議官）廣瀬 隆正 「地下空間活用の新展開」	パネルディスカッション ポスターセッション
第23回	2018年1月24日	安全・安心な社会の形成に向けて ～都市機能の向上を目指した地下空間ネットワークの形成～	＜基調講演＞（国交省技術審議官）廣瀬 隆正 「都市再生と地下空間利用」	パネルディスカッション ポスターセッション
第24回	2019年1月25日	安全・安心な社会の形成に向けて ～利用者の多様化と増加に対応した人にやさしい地下空間～	＜基調講演＞（国交省技術審議官）徳永 幸久 「人にやさしい地下空間のあり方」	パネルディスカッション ポスターセッション
第25回	2020年1月24日	次世代に向けた持続性の高い地下空間の創造 ～みんなで考えるインフラのあり方～	＜基調講演＞（国交省技術審議官）徳永 幸久 「次世代に向けた持続可能な地下空間のあり方」	パネルディスカッション ポスターセッション
第26回	2021年1月20日	次世代に向けた持続性の高い社会形成 ～変化する環境に対応した地下空間のあり方～	＜特別講演＞（日本大学特任教授）岸井 隆幸 「危機と都市と地下空間」	パネルディスカッション ポスターセッション

5. 土木学会全国大会での活動

2020年9月9日～11日にかけて、土木学会全国大会が開催された。本来であれば、名古屋工業大学に集って開催される予定であったが、今年度はコロナ禍の影響を受けてオンラインで実施された。地下空間研究委員会は共通セッション地下空間の多角的利用を主催した。なお、今年は、研究討論会も開催される予定であったが、様々な状況を鑑みて取りやめとなった。来年度の土木学会では研究討論会の実施を目指し調整している。

(1) 共通セッション

「地下空間の多角的利用」をテーマに実施され、表-2に示す9編の発表があった。座長は、福岡大学の橋本彰博氏（防災小委員会委員）である。

セッションでは、投稿論文と発表PDFが準備され、チャット機能を用いた質疑・応答が行われた。津波災害、洪水災害による地下鉄の浸水被害や、避難シミュレーション、実務的な防災・減災の課題、地下街や地下トンネルにおける漏水対策、大谷採石地下空間における地震および避難心理の評価、バーチャルリアリティシステムを用いた火災時避難の検討、地下街の大規模リニューアルの実施報告など、多岐にわたる内容であった。

表-2 共通セッションの状況

番号	題名	発表者
CS17-01	南海トラフ巨大地震に伴う津波による大阪市の地下鉄駅軌道内の浸水解析	関西大学[学] 庄田侑平・石垣泰輔・尾崎 平・安田誠宏
CS17-02	名古屋における地下鉄の浸水の危険度評価と復旧対策に関する検討	テイクコ[正] 野澤智己・村瀬将隆・佐藤大介・武田 誠・松尾直規
CS17-03	避難シミュレーションによる地下空間の浸水対策の検討	関西大学[正] 尾崎 平・河南友也、石垣泰輔・戸田圭一
CS17-04	地下街が取り組んでいる防災・減災とこれからの課題への対応	日建設計シビル[正] 大森高樹・小野栄子・河野正雄
CS17-05	地下空間施設における自己治癒材を用いた漏水対策	CORE技術研究所[正] 小椋紀彦・大森高樹
CS17-06	廃道トンネルを利用したトンネル覆工の漏水量変化と降水量の調査事例	寒地土木研究所[正] 岡崎健治・大日向昭彦・倉橋裕幸
CS17-07	大谷採石地下空間の地震応答と避難意識について	宇都宮大学[正] 清木隆文・土屋友梨珠・呉伝清
CS17-08	直感的に操作できるバーチャルリアリティシステムによる火災時の人の行動特性の解明	日建設計シビル[正] 小野栄子・棚橋重仁・田部田晋・大森高樹
CS17-09	老朽化した地下街のスケルトン化による大規模リニューアルー劣化状況と躯体補修の実施報告ー	大阪地下街[正] 井下泰典・中井亮太郎・蒲地正光

6. 普及活動

委員会では、これまで地下空間に関する様々な活動を通して、地下空間の有用性や利便性だけではなく、地下空間の抱える問題点などについても幅広く外部に発信してきた。今年もこれまで通り様々な媒体を通して地下空間の有効活用に関わる普及啓蒙活動に力を注いでいる。

2020年に実施した主な活動として、以下に、現場見学会、各種マスコミへの協力などを紹介する。

(1) 夏休み親子見学会

今年はコロナ禍の影響を受けて、残念ながら中止となったが、ここでは、2007年度より実施している、小学生を対象とした「夏休み親子見学会」の状況を示す。写真-1は、昨年度、大阪で行われた親子見学会の様子である。単なる地下構造物や箱ものを見学会とにならないよう、地下空間が持つ有用性や利便性、地下空間の改善すべき点、将来どのようなものが地下に設けられたら便利かなどをクイズ形式で答えたり、親子で検討するなど、自ら参加して自ら地下を知る形を取っている。見学会の最後に参加者全員に「地下空間こども博士」の称号を授与し、賞状と記念バッヂを贈呈している。毎年見学会成果を夏休みの自由研究に役立ててもらうことも期待して情報提供を行っている。今後も将来の日本を背負う子供たちを対象に、関東、関西両地区での親子見学会開催を継続する予定である。

昨年度の実施例：

（関東地区）

開催日時：2019年8月3日（土） 13:00～16:30

実施場所：東京駅北通路周辺整備工事 工事現場

参加者：親子12組30名

（関西地区）

開催日時：2019年8月1日（木） 13:00～16:30

実施場所：大阪駅東海道線支線地下化・新駅設置工事 工事現場

参加者：親子13組31名



写真-1 親子見学会（大阪）全体集合写真（2019年実施）

(2) 出版社への協力

地下への関心の増大に伴い、地下を取り上げた各種メディア報道が数多く登場している。相乗効果で地下空間が一般市民にとってさらに身近な存在となり、マスコミの地下に関わる協力依頼がますます多くなっている。当委員会はこれらの依頼に対して積極的に協力することにより、間接的に地下空間の普及に貢献してきた。

a) 小学館の図鑑「もっと大図鑑」監修

小学生向け専門図鑑の「もっと大図鑑」編集に関して、委員会メンバーによりマンホール部分の内容について監修を行った。現在内容編集中につき、発行日程は未定であるが、引き続き委員会で対応予定である。

b) ミネルヴァ書房、日本の地下街執筆協力

人文・社会科学・学術専門書等を手がける「ミネルヴァ書房」が、シリーズとして出版している「シリーズ・ニッポン再発見」の一環として、地下街を題材にした書籍を出版することに対し、土木学会に執筆者紹介依頼があり、当委員会委員である粕谷氏が執筆することとなり、現在執筆活動を行っている。

シリーズとしては、「日本のダム美」「鉄道とトンネル」「日本の橋」「タワー」「マンホール」など、土木を題材にしたものが多い中、今回は地下街に焦点を当て、地下街の歴史や種類、特徴をはじめ、防災面までも網羅した書籍になる予定である。

c) 図鑑『もののしくみ』への協力

学研プラスが発行予定の図鑑「もののしくみ」への協力依頼があり、マンホールの下のしくみ（おもに下水道）と、見開きコラム「見てみよう 地下には何がある？」に関して資料提供および情報提供を行った。当委員会では、土木学会を通じて依頼があった場合、委員で協議して、可能な限り対応している。

7. セミナー等の開催

委員会が調査研究活動の中で得られた知見や成果を広く一般に開示する場として「セミナー、研修会等」の開催を積極的に行っている。セミナーは維持管理、防災、心理の小委員会を中心に実施しており、今後も引き続き全国各地での実施を目指し進めていく予定である。本年度は、新型コロナウイルスの感染拡大防止の観点から、当委員会では対面の講習会を行わず、積極的にオンライン講習会を企画・運営してきた。各小委員会で開催されたセミナーの概要を次に示す。これらのセミナーには多くの皆様に参加いただきました。この場をお借りして、御礼申し上げます。また、セミナー運営にあたり、小委員会の幹事をはじめ多くの方のご尽力を受けましたことをご紹介するとともに、改めて感謝申し上げます。

(1) 維持管理・防災ジョイントセミナー

日時：2020年10月5日(月)13:30～17:10

参加者：議論参加型：60名、聴講型：257名

話題提供者：

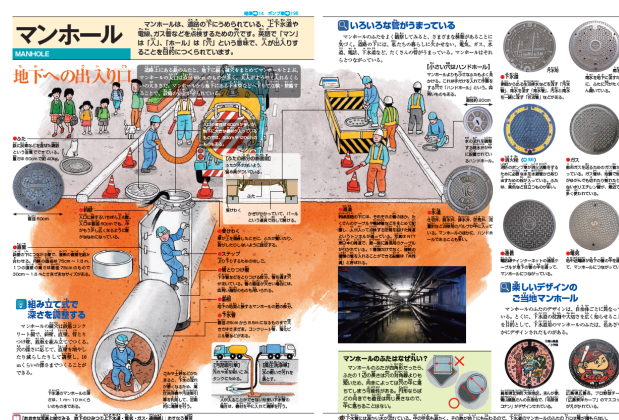


図-4 図鑑「もっと大図鑑」のイメージ

委員会紹介および趣旨説明：木村定雄（金沢工業大学）
都市地下空間管理の現状と課題：栗本太郎（静岡市）
地下インフラ施設の維持管理の現状：

木原晃司（東京ガス）

法的視点からみた土木技術者責任：

松田貞則（日本工営）

地下浸水時の避難に関する実験的検討：

馬場康之（京都大学）

地下空間を有する都市の浸水に関する数値解析的検討

武田 誠（中部大学）

(2) 第11回 維持管理セミナー ―トンネル点検実務の現状と展望―

日時：2020年11月13日(金)13:15～17:00

参加者：議論参加型：75名、聴講型：347名

委員会紹介および趣旨説明：木村定雄（金沢工業大学）
土木学会インフラ健康診断（道路部門：トンネル）の概要 ―5年一巡後のトンネル定期点検結果の分析―

林 久資（山口大学）

定期点検要領改訂に関する解説（トンネル）：

太田裕之（応用地質）

トンネル点検の新技術：

土門 剛(中電技術コンサルタント)

山口県における道路トンネル点検の現状および今後の課題：

蔵重聡志（山口県）

(3) 第8回人にやさしい地下空間セミナー ―地下空間と空気環境―

日時：2020年12月16日(水)17:00～19:00

参加者：議論参加型：29名、聴講型：93名

開催概要：岩崎裕直（仙台市建設公社）

地下空間の空気環境

新型コロナウイルス感染症と空調・換気の現状と課題：

柳宇（工学院大学）

(4) コロナ禍における地下街の状況に係るアンケート調査

新型コロナウイルスに関わる影響により、地下街の運営は困難な状況にあると推察されます。当委員会ではコロナ禍における課題解決のための情報収集を目的に、アンケート調査を行いました。アンケート配信にご協力いただいた国土交通省都市局および地方自治体の関係者の皆様とご回答いただいた地下街管理者の皆様にはこの場をお借りして御礼申し上げます。また、得られた成果は、今後の検討資料として活用させていただき、学会ホームページなどで公開したいと考えています。

8. まとめ

地下空間研究委員会の設置から既に26年が経過したが、その間わが国の地下空間利用を取り巻く環境は大きく変わってきている。大深度法や新バリアフリー法などの法整備等により、地下空間整備自体の方向性も大きく変わった。また近年では、地下開発の枠にとどまらず、地上、周辺ビルを含め、地区全体をエリアとして捉えたまちづ

くりが進められ、従来の地下空間を大きく超えた計画・開発が進められている。その一方で、近年、日本各地で水害に代表される自然災害が頻発しており、防災面の検討は非常に重要となっている。さらに、今年度は、新型コロナウイルスにより社会が一変し、地下空間もその影響を強く受けている。人が集い活動する地下空間において、人の心理的な安全・安心を十分に注意する必要がある。そして、都市インフラが抱える老朽化は顕在化してきており、トンネルや地下空間における維持管理は重要な課題である。本委員会では、これらの多様な課題に対して、各小委員会が精力的に検討を進め、課題解決および提言を目指して、取り組みを深化して行きたいと考えている。

当地下空間研究委員会は、セミナーや見学会を通じて調査研究活動で得られた知見を広く一般に公開すると共に、問題点や解決策などを積極的に関係各所に提案することを通じ、安全安心な社会形成の一助となるべく、今後も調査研究活動を継続していきたい。

地下空間シンポジウム 講演論文表彰

(直近4年分を記す)

第 22 回 2017.1.20	講演優秀賞 (一般投稿論文)	「地下鉄トンネルの検査データに基づいた健全度評価とマルコフ過程を用いた劣化予測手法に関する検討」 三浦 文典 (早稲田大学大学院) 赤木 寛一, 小西 真治, 五十嵐 翔太
	講演奨励賞 (一般投稿論文)	「鉄道地下駅の 3 次元シェル要素解析による側壁開口時挙動の評価」 坂田 智基 (中央復建コンサルタンツ株式会社) 室谷 耕輔, 仲山 貴司, 西山 和宜
第 23 回 2018.1.24	講演奨励賞 (一般投稿論文)	「山手トンネル内における渋滞緩和を目的としたエスコートライトの整備」 野上 拓真 (首都高速道路株式会社) 川野 祥弘, 小山 俊泰, 岩崎 聖
	講演奨励賞 (一般投稿論文)	「地下駐車場内浸水時の車の漂流挙動と流体力に関する実験的研究」 岡本 隆明 (京都大学大学院) 本庄 佑馬, 戸田 圭一, 石垣 泰輔
	講演奨励賞 (一般投稿論文)	「横浜北トンネルにおける火災時の避難環境確保への取り組み」 鈴木 智哉 (首都高速道路株式会社) 柳 寛孝
第 24 回 2019.1.25	講演優秀賞 (一般投稿論文)	「地下浸水時の人体に作用する流体力とその危険性に関する実験的研究」 岡本 隆明 (京都大学大学院) 戸田 圭一, 當麻 泰史, 石垣 泰輔
	講演優秀賞 (一般投稿論文)	「トンネル火災時の水噴霧設備運用による火勢抑制効果に関する検討」 菊本 智樹 (株式会社エコープラン) 坂口 琢磨, 青木 貞憲, 咲間 健一
第 25 回 2020.1.24	論文奨励賞 (査読投稿論文)	「線路下横断トンネル工事に伴う薬液注入の評価」 福井 義弘 (アジア航測株式会社) 仲山 貴司, 澤田 亮, 赤木 寛一
	講演奨励賞 (一般投稿論文)	「八重洲・京橋・日本橋地区における新しい地下鉄道ネットワークと新駅のあり方」 大村 敏 (前株式会社オオバ技術本部) 浅野 均, 横塚 雅実
	講演奨励賞 (一般投稿論文)	「熱中症を考慮した名古屋駅周辺の環境と生体情報の関係に関する基礎的研究」 鷲山 陸 (中部大学工学部) 村瀬将隆, 佐藤大介, 武田 誠
	講演奨励賞 (一般投稿論文)	「供用開始後 30 年以上経過した鉄道用シールドトンネルの経時変動に関する研究」 中島 純也 (東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所) 池本 宏文, 本田 諭
	講演奨励賞 (一般投稿論文)	「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」 岡本 隆明 (京都大学大学院) 戸田 圭一, 岡 宗佑, 當麻 泰史

敬称略

査 読 付 き 論 文

内水氾濫と避難シミュレーションによる 地下空間浸水対策の評価

尾崎 平¹・河南 友也²・檀 寛成³・石垣 泰輔⁴

¹正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)
E-mail: ozaki_t@kansai-u.ac.jp

²非会員 元関西大学学生 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

³正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

⁴正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

IPCC の第 5 次評価報告書では, 大雨などの極端気象が頻度, 強度ともに増加することが報告されている. そのため, 特に水害に対して脆弱な地下空間において浸水対策は重要な課題である. 本研究では, 将来の気候データ (d4PDF) から対象エリアの時間最大雨量の降雨イベントを抽出した. 同降雨による地上と地下の内水氾濫解析ならびに, それに伴う地下空間利用者の避難解析を行い, 地下空間への止水板による流入水対策ならびに, 避難行動対策の効果について考察を行った. その結果, 将来想定される豪雨に対しても, 止水板の設置による流入量の抑制が避難成功率に与える効果は大きいことを示した.

Key Words: flood analysis, evacuation analysis, d4PDF, flood management

1. 結論

近年, 異常気象による集中豪雨が増加している. 時間雨量 50mm 以上の年間発生回数は, 気象庁¹⁾によると, 1976~1985 年で平均 174 回, 2007~2016 年で 232 回と約 1.3 倍, 時間雨量 80mm 以上の年間発生回数は, 1976~1985 年で平均 11 回, 2007~2016 年で 18 回と約 1.7 倍であり, 増加傾向である.

また, 東京, 大阪, 名古屋など, 大都市圏においては, 海拔 0m 地帯が広がっていることに加え, 地下空間の高度利用が進んでおり, 水害に対して脆弱である. 地下空間の特徴として, 地上の状況が把握しづらいことや, 浸水開始後, 避難時間の猶予が少ないことから, 内水氾濫であっても地下空間が浸水すると被害が増大することが懸念される.

そのような脆弱性に対して, 平成 27 年度²⁾, 29 年度³⁾に水防法が改正され, 27 年度では「想定し得る最大規模に対する浸水想定区域の設定」「浸水被害対策区域の指定」「雨水排除に特化した公共下水道の創設」, 29 年度では「要配慮者利用施設における避難確保計画の作成」などが目標として掲げられ, 想定される災害に対して浸水対策などのハード的な対策だけでなく, ソフト的

な対策として避難計画を策定するとともに, 関係機関が連携して, 計画に基づき, 地下空間滞在者への適切な情報提供と適切な避難誘導を行うことが重要である. 本研究で対象とする大阪の梅田地区においても, 大阪地下空間浸水対策協議会が設立され, 地下空間の浸水対策計画が策定されている⁴⁾.

地下空間を対象とした水害からの避難に関する研究は多数見られる. 例えば, 避難シミュレーションの解析技術の高度化, 精緻化を行った岡本ら⁵⁾, 川崎ら⁶⁾の研究や, 中村・小池⁷⁾, 瀧澤ら⁸⁾の地下街利用者の滞留時間などを考慮した避難誘導や垂直避難に関する研究, また, 西尾ら⁹⁾による地下空間の防災情報システムの構築に関する研究などがなされている.

本研究の特徴は, 地上と地下の浸水解析を一体的に行い, その結果を用いて地下空間からの避難に関する解析を実施し, 地下空間への流入水対策と地下空間からの避難行動対策を一体的に評価することである. 一体的に評価することで, 流入水量の変化などの状況に応じた避難行動の評価が可能となる. また, 本研究では, 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース: d4PDF (database for Policy Decision making for Future climate change) (5km, SI-CAT) より, 将来の時間最大雨量が

ワーストケースとなる降雨を抽出し、対象降雨とすることで、将来の豪雨に対する現状の浸水対策の有用性と限界について考察する。なお、本研究で対象とする水害は、内水氾濫である。本来、河川との一体的な解析により、外水氾濫と内水氾濫を一体的に取り扱うことが望ましいと考えるが、現時点では、そこまでは至っていない。

2. 解析方法

本章では、地上・地下の内水氾濫解析手法ならびに避難解析手法について説明する。また、合わせて、対象地域の概要も示す。

(1) 対象地域

対象地域は大阪府大阪市の海老江処理区であり、面積は約 1,215ha である（図-1）。梅田地区の地下空間への出入口は約 140 箇所存在し、複数のビルが隣接しており、管理者の異なる複数の地下空間で形成されている（図-2）。そこには JR・私鉄・市営地下鉄駅が地上・地下を合わせて 7 駅あり、また、梅田以外にも地下駅が 11 駅存在している。なお、地下空間、地下鉄ともに対象エリア内全域をモデル化しているが、本研究では地下空間への流入量、地下空間からの避難の評価は、北東部に位置する Whity うめだ（図-2 右上部）を対象とした。

(2) 地上・地下の内水氾濫解析の概要

本研究では、地下空間への流入量と地下空間内の浸水深を計算するために InfoWorks ICM を用いた。このソフトは「有効降雨モデル」「地表面流出モデル」「管内水理モデル」「地表面氾濫計算モデル」から構成される¹¹⁾。有効降雨モデルにより算出された有効降雨が地表面を流れ、地表面流出モデルによりマンホールへの流入量を算定する。これが管内水理モデルの入力データとなる。管内水理は、サンブナン式で計算され、管きよの流れを解析している。地表面氾濫計算モデルでは、浅水方程式を用いて、下水道から地表面へ溢れた水の流れを解析しており、管内水理計算と地表面氾濫計算は連動して行われる¹²⁾。また、地上の氾濫水は住区内には流入せず、道路面のみを流れるとした¹³⁾。モデルの妥当性について、地下出入口口に仮想の堰を設けることで、止水板の効果を検討した。本モデルは、2011 年 8 月末の豪雨（時間雨量 77.5mm）を用いて検証を行っており、現地調査を実施した 5 地点における浸水深はおおむね妥当な結果を得ている¹⁴⁾。

次に、対象地域における地下空間への浸水量、浸水箇所を評価するために、道路と階段の境界を堰によりモデル化し、道路における浸水深が堰の高さを超えた時、地

下空間へ流入するとした。また、地下空間の通路を管渠に見立てて解析することで、地下空間の浸水深を求めた。この際、通路の幅、高さは現地でのレーザー距離計を用いた簡易計測に基づき設定した。また、地下空間の標高については地上の出入口部部の標高を基準に階段の段数（高さ）より推定した。

(3) 避難解析

a) 概要

本研究では、地下空間からの避難行動を再現するにあたり、株式会社構造計画研究所が開発した解析ソフト artisoc3.0 を用いた。本研究で用いた artisoc3.0 とは、artificial societies の略称であり、人間の相互作用や個人の特性などが影響する社会現象などをコンピュータ上に再現することで、社会現象をより現実的に分析する「マルチエージェント・シミュレーション」を構築することが可能なシミュレーションプラットフォームである。プログラムを加えることで避難者ごとに特性が設定可能であり、避難経路や避難開始のタイミングを設定し、避難誘導等の検討を行うことができる。



図-1 対象地域

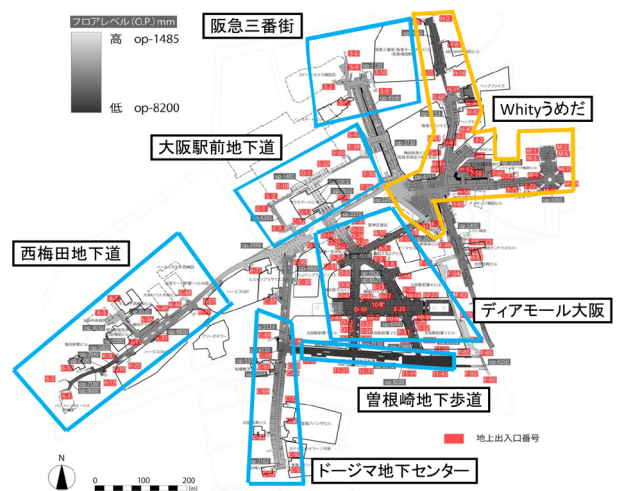


図-2 対象エリア内の地下空間の概要（文献⁴⁾に筆者ら加筆）

b) 地下空間（構造物）のモデル化

Whity うめだは、近年工事などの影響により、形状に一部変化があるため、本研究では現地調査を行い、森兼ら¹⁹⁾が過去に構築したモデルを最新（現状、2019年）の形状に改善して用いた。メッシュのサイズは、解析範囲、通路幅、店舗の大きさ等を考慮し2mの正方格子としており、モデルの通路部総面積が8,520 m²、店舗総面積は10,720 m²、その他の面積は168 m²、全体面積が19,408 m²となっている。また、各店舗間などの壁は、厚さ0.25mとし、避難者は通路部のみを歩行する設定としている。

c) 地下空間利用者の行動ルール

初期配置：地下空間利用者は、モデル内の通路部にランダムに配置され、シミュレーション実行ごとに初期配置箇所は変わる設定とした。次に、地下空間利用者の共通条件や、配置後の行動ルールについて述べる。

避難目的地：Whity うめだには地上に繋がる地上出入口が39箇所、接続ビルに繋がるビル接続口が11箇所ある。本研究の避難シミュレーションでは、この地上出入口とビル接続口を目的地とする。

移動速度：避難時の移動速度は、artisoで始める歩行者エージェントシミュレーション¹⁶⁾を参考に、65歳未満を4.7km/h、65歳以上を3.6km/hとし、階段部分での歩行速度を1/2と定義する。また、浸水時の歩行速度は、既往研究¹⁷⁾を参考に、最大歩行速度に流れや水深による影響と歩行者の密集度による影響を考慮した(1)式で表すものとする。

$$v = S_p D_e v_0 \quad (1)$$

ここで、 $v(\text{m/s})$ は避難者の歩行速度、 $S_p(\text{m}^2)$ は水深や流速などの影響による歩行速度の減少率、 $D_e(1/\text{m}^2)$ は歩行密集度による歩行速度の減少率、 $v_0(\text{m/s})$ は通常歩行速度を示している。

水流による影響による歩行速度の減少率については、水深と流速を自分の存在する計算格子から取得し、単位幅比力を用いて(2)式で表現した。

$$S_p = 0.22 \exp(-125.3 M_0) - 0.71 M_0 + 0.78 \quad (2)$$

$$M_0 = (u^2 h / g + h^2 / 2) \quad (3)$$

ここで、 $M_0(\text{m}^3/\text{m})$ ：単位幅比力、 $h(\text{m})$ ：水深、 $u(\text{m/s})$ ：断面平均流速、 $g(\text{m/s}^2)$ ：重力加速度を示している。歩行密集度による歩行速度の減少率については最も近い人との距離を考慮すること(4)式で評価した。

$$D_e = \exp(L^{4.37} / 2.55) - 0.48 \quad (4)$$

ここで、 $L(\text{m})$ は避難者が進む方向の前方1m内で最も近くに存在する人との距離を示している。

出入口における避難限界：石垣ら¹⁸⁾によると、地上水深

が0.3m以上の水深となると階段からの避難が困難になるため、地上水深が0.3m以上となった出入口は、その時点から避難ができないものとする。

3. 地下空間における浸水対策の検討

(1) 本研究で対象とする浸水対策の概要

緒論に示したように本研究の目的は、今後、想定される最大規模降雨を想定した対策の評価である。そのため、対策として、大きく次の2種類について評価する。①地下空間への浸水を抑制、あるいは避難のための時間を確保するための流入水対策、②地下空間が大規模浸水する恐れがある場合の地下空間利用者の避難を促すための避難行動対策である。

大規模降雨による地下空間の浸水は、人命への影響を与える。地下空間は閉鎖された空間であることから、氾濫水の流入により、氾濫の規模によっては、流入開始後、急激に水位が上昇し、地下空間利用者の避難困難・限界を招く。そのため、地下空間への流入水対策を講じることが第一の対策となる。そのため、本研究では、現状、既に導入されている止水板を用いた地下空間への流入対策について検討する。止水板設置については、その設置開始の基準ならびに設置方法が課題となるため、ここでは開始基準（時間）ならびに設置方法の違いが、浸水量や浸水開始時間に与える影響について評価する。

一般的に、地下空間に居ると地上の様子はわからない。そのため、地上部で浸水被害が発生している様子に気づかないこともある¹³⁾。そのため、豪雨による浸水対策として、地下空間への流入水対策だけではなく、地下空間利用者の避難行動対策も必要である。ここでは、避難行動指示のタイミング違いや、避難経路を判別するためのフロアマップの増加、避難を円滑に行うための避難誘導の有無が避難成功率に与える影響について評価する。

(2) 流入水対策

止水板の設置による浸水対策においては、特に、①設置開始基準、②止水板を設置するチーム数と止水板の設置順序が重要である。ここでは、止水板設置の行動ルールについて定義する。

a) 止水板設置基準

止水板設置の目安について、現在、対象地域では、雨量のモニタリングや地上カメラによる道路面の浸水状況を観察し、判断している⁹⁾。そのため、本研究では、第一に、カメラによるモニタリングを行い、地上部での浸水を確認した時点の一つの判断基準とする（ケース名：カメラ）。カメラのモニタリング位置は、事前シミュレーションにより¹⁹⁾、対象地下空間周辺で最も早く浸水が

発生するマンホールとする。

その他の方法として、平成 27 年 5 月の水防法の一部改正に伴い、主に政令市、中核市等で、地下空間として利用されている区域を含む排水区において内水氾濫危険水位の情報を水防管理者・地下空間の管理者に通知し、緊急速報メール等を活用して、管理者が地下空間利用者等に情報周知を行う仕組みが導入可能となった。このため、下水道管きょ内に水位計を設置し、浸水の危険水位を超えた時点を見断基準とした（ケース名：水位計）。なお、当該地区の浸水の危険水位に関しては、先行研究¹⁹⁾に詳述しているが、複数の降雨ケースによる浸水解析を行い、降雨強度と管きょ内水位の関係から設定し、7 割水深を上回る時（概ね時間雨量 32mm/hr を上回る時）を見断基準とした。なお、水位計の設置位置は、事前シミュレーションにより¹⁹⁾、対象地下空間周辺で最も早く浸水が発生するマンホールの上流側管きょとする。

また、比較対象ケースとして、止水板を設置しない場合（ケース名：止水板なし）ならびに、情報が適切に伝達されず、地下空間の出入口に流入が確認された後に設置を開始する場合（ケース名：流入後）とした。

b) 止水板の設置チーム数と順序

Whity うめだは地上出入口が 39 箇所あり、地下空間への浸水を防止するために、止水板を設置する優先順位を把握し、効率的に浸水対策を実行可能なように準備しておく必要がある。

止水板設置の方法としては、地下空間の管理者が 2 人 1 組となり、地下空間への流入可能性のある出入口を回り、設置していくものとする。また、止水板設置可能チームは、日中の十分な人員がいる場合を想定して(i) 6 チームに分かれて止水板設置を行う時（ケース名：6 チーム）、夜間などの十分な人員がいない場合を想定して(ii) 2 チームに分かれて行う時（ケース名：2 チーム）の 2 種類とする。

止水板設置順序は、事前の浸水解析により、目的変数を「各出入口からの地下空間への流入時間の総和が最小」となるように、制約条件として「1 つのチームで止水板設置開始から設置完了するまでの時間が、30 分以内」を与えて、数理モデルによる最適計算を行い、設置順序を決定した。なお、設置開始場所は、防災センター、歩行速度は 4km/h、止水板の設置にかかる時間は 5 分とした。なお、止水板の高さは 50cm とする。

(3) 避難行動対策

対象とした地下空間には、物販や飲食店などの各店舗も豊富にあり、かつ、JR、私鉄（阪急、阪神）、大阪メトロの複数の鉄道駅が存在する。そのため、非常に多くの利用者が存在している。避難行動を促す方法として、

ここでは、①アナウンスによる方法と、地下空間利用者の全員が避難経路を認知しているわけではないので、②フロアマップの増設、ならびに、円滑に避難誘導を促すための③避難誘導員の配置の、3 種類を検討する。

a) 避難アナウンス

避難開始の合図は、避難勧告に関するガイドライン²⁰⁾に定められた警戒レベルを判断基準とする。現状においても、警戒レベル 5（大雨特別警戒発表）において、利用者への避難準備情報などの周知、地下からの退出の呼びかけ、地下階店舗の閉店などの警戒活動が開始される計画となっている²¹⁾。そのため、ここでは 2 ケースを想定し、現状の警戒レベル 5（3 時間降雨 150mm 以上）を用いた場合と、より安全側で、高齢者等の避難が必要とされる警戒レベル 3（降雨量 60mm/h 以上）を用いた場合とした。

また、避難に関するアナウンスを行っても、必ずしも全員が避難行動をすぐにとるわけではない。そのため、本来であれば、アンケート調査などにに基づき、避難開始時間の行動割合などを調査し、設定することが望ましい。今回は、東日本大震災の避難行動²²⁾を参考に、人々の避難開始に関する時間差を用いた場合（行動 m と呼ぶ）と、比較として、より早期に避難を開始するケースとして、10 分早く行動を開始する場合（行動 n と呼ぶ）を設定した（図-3）。

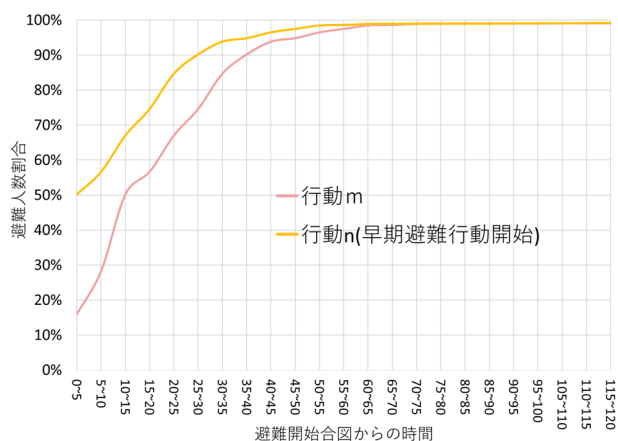


図-3 避難行動開始時間差

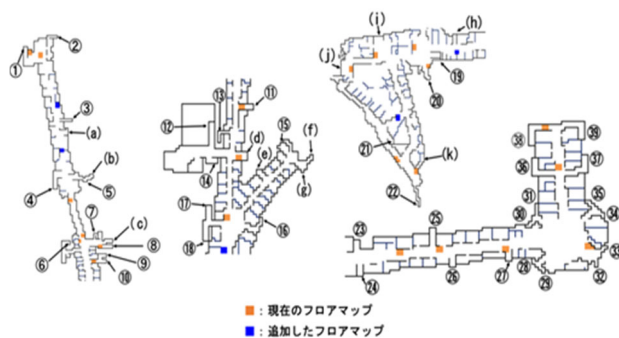


図-4 フロアマップ位置

b) フロアマップと避難誘導

避難をする際、避難者全員が避難経路を認知しているわけではない。現在、対象地下空間内にはフロアマップが22個あるが、フロアマップが周辺にないエリアもあるため、図-4のように仮想的にフロアマップ数を5つ増加させ、27個にしたものを比較対象とする。

c) 避難誘導

避難者が1つの出入口に集中することにより出入口付近で混雑する可能性がある。そこで、混雑する場所に避難誘導員を配置し、周辺の出入口に誘導し、混雑緩和による効果を評価する。また、地下空間の出入口から氾濫水が流入すると、避難が困難あるいはできないため、止水板を越流して水が流入している出入口を利用しないよう知らせ、他の出入口から避難するように誘導することの効果を評価する。

(4) 評価ケースと評価指標

a) 評価ケース

上記に流入水対策と避難行動対策について説明した。地上・地下の内水氾濫解析は、止水板を設置しない場合と、流入水対策を行った場合（設置基準：流入後、カメラ、水位計と設置チーム数：2、6チームの組み合わせ）について、すべて実施する。それに対して避難解析は、すべての組み合わせ実施すると評価ケースが非常に多くなるため、表-1に示すように、各対策の効果が評価できるケースを設定した。

具体的には、ケース①は、比較対象ケースとして、無対策、ケース②～④は止水板設置による効果、⑤は止水板設置のチーム数が与える影響、⑥～⑨は、止水板はなく、各避難行動対策について、よりよい方策を採用した場合の効果、⑩～⑬は、止水板を設置し、各避難行動対策について、よりよい方策を採用した場合の組み合わせ効果、⑭はすべてにおいてより良い方策を採用した場合の効果を評価することを意図して、ケース設定を行った。

b) 評価指標

本研究における評価指標は、地下空間の浸水対策に対する評価のため、第一に地下空間への流入量、第二に地下空間からの避難成功率を評価指標とする。

4. 結果および考察

(1) 解析条件

a) 対象降雨の設定

緒論で示したように本研究では、内水氾濫ではあるが、想定最大規模の降雨を用いた解析により、地下からの避難を必要とする程度の豪雨を対象降雨とする。ここでは、

想定最大規模の降雨として d4PDF (5km, SI-CAT) より、将来の時間最大雨量が、ワーストケースとなる降雨を抽出し、対象降雨とする。

本研究では、文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) において d4PDF (20km) の領域モデルの50アンサンブルから過去および将来それぞれについて、無作為に12及び2アンサンブルを抽出しダウンスケリングを行った d4PDF (5km, SI-CAT) ²³⁾ のうち4℃上昇実験（実験名:HFB4K）のデータを用いた。4℃上昇実験は、1850年の産業革命以前に比べて全球平均温度が4℃上昇すると仮定して、2080年9月～2111年8月の31年間の気候を予測する12メンバ（6SST×2アンサンブルメンバ）、合計372年分の実験である。

HFB4Kより抽出した時間最大雨量のワースト1の降雨を図-5に示す。最大の降雨強度は117.0mm/hr、総降雨量は404.5mm、降雨継続時間は8時間である。

b) 避難人数と避難者の分類

避難人数ならびに配置は避難成功率に影響を及ぼす。ここでは、既往研究¹⁰⁾を参考に、最も混雑している状態（混雑度1.0人/m²）を想定した。具体的には、本研究のモデルでは、通路部総面積が8520m²であることから、8500人とした。また、初期配置は、2章に示したように解析毎にランダムに配置される方式とした。

表-1 避難解析の評価ケース

ケース	流入水対策	避難行動対策			
	止水板	避難情報発令	行動開始時間	フロアマップ数	避難誘導(場所)
①	止水板なし	警戒レベル5	行動m	22	なし
②	流入後6チーム	警戒レベル5	行動m	22	なし
③	カメラ6チーム	警戒レベル5	行動m	22	なし
④	水位計6チーム	警戒レベル5	行動m	22	なし
⑤	水位計2チーム	警戒レベル5	行動m	22	なし
⑥	止水板なし	警戒レベル3	行動m	22	なし
⑦	止水板なし	警戒レベル5	行動n	22	なし
⑧	止水板なし	警戒レベル5	行動m	27	なし
⑨-a	止水板なし	警戒レベル5	行動m	22	8人(混雑場所)
⑨-b	止水板なし	警戒レベル5	行動m	22	8人(浸水危険箇所)
⑩	水位計2チーム	警戒レベル3	行動m	22	なし
⑪	水位計2チーム	警戒レベル5	行動n	22	なし
⑫	水位計2チーム	警戒レベル5	行動m	27	なし
⑬-a	水位計2チーム	警戒レベル5	行動m	22	8人(混雑場所)
⑬-b	水位計2チーム	警戒レベル5	行動m	22	8人(浸水危険箇所)
⑭	水位計6チーム	警戒レベル3	行動n	27	8人(混雑場所)

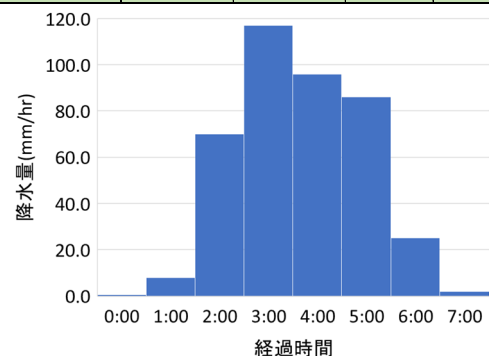


図-5 本研究の対象降雨

次に避難者の属性について、65歳未満と65歳以上で歩行速度に差を与えていることから、利用者割合を設定する必要がある。ここでは、明確に地下空間の利用者属性の年齢割合を定義することが困難であることから、大阪市における2015年の国勢調査結果、65歳未満：81%、65歳以上：19%を用いた。

また、地下空間利用者の全員が避難経路を認知しているわけではない。大阪地下空間浸水対策協議会の資料⁴⁾によれば、平日夕方18時の地下街・地下駅など利用者数のうち、近隣従業員の利用者割合が26%とのことより、経路を理解している避難者を26%とする。なお、経路を理解していない避難者は、ランダムに一定方向に向かって進むとし、フロアマップ前にて、20秒間立ち止まり、避難経路を理解するものとする。避難経路は各地点から最も距離が近い出入口、接続口に避難するものとする。

次に、避難誘導員について、その配置に関する明確な根拠はないが、マップを見ながら、概ね通路部面積1000㎡に対して1人の割合で配置するとし、図-6のようにエリア全体で8人の避難誘導員を配置した。なお、図-6には、混雑を緩和するケース（凡例名：混雑場所）と、浸水の危険を通知するケース（凡例名：浸水危険場所）の両ケースを併記している。

(2) 地上・地下の内水氾濫解析による流入水対策の評価

a) 地上の内水氾濫解析結果

内水氾濫解析に基づく地上の最大浸水深図を図-7に示す。結果からわかるように、将来の想定最大規模降雨による氾濫解析により多くの地点で、浸水が生じている。地上の最大湛水量を浸水面積で除した平均浸水深は0.32mであり、平均的に見ても浸水深が深いことがわかる。また、対象地下空間周辺は、0.5～1.25mの浸水が生じており、地点により1mを超える箇所もあり、特に脆弱であることがわかる。

b) 地下空間への流入量の比較

流入水対策毎の地下空間への流入量の違いを図-8に示す。なお、図-8中の「越流」は地下空間の出入口に止水板を設置したが、止水板の高さを超えて水が流入したもの、「回り込み」は地下空間の出入口に止水板を設置したことで、せき止められた水が、ほかの出入口口に回り込んで流入したもの、「設置前」は止水板の設置が間に合わずに、設置する以前に地下空間へ流入したものを示す。

止水板の有無の比較より、止水板を設置することで、概ね7割程度の地下空間への流入量を削減できる。そのため、止水板設置による流入水対策は極めて有効である。

次に、止水板を設置するケースとして水位計、カメラ、流入後のそれぞれで2チームと6チームで設置する場合の流入量の比較より、2チームに比べ6チームでは、約

1.4ポイントほど削減効果はみられるが、モニタリング手法の違いによる削減効果に差はほとんど見られなかった。

また、流入水の種類を見ても、止水板を設置するケースではいずれも越流による流入量が支配的である。すなわち、6チームで止水板の設置を行うと、地下空間への流入前に止水板を設置することはできている。それでも浸水している要因は、止水板の設置高さが50cmと低いためである。地上部の浸水深が止水板の高さよりも高くなり、地下への浸水が発生している。2チームの場合は、一部、止水板の設置前に地下への流入が見られるが、割合で見ると、設置前の流入よりも、設置後に止水板を越流して流入する割合の方が多い。

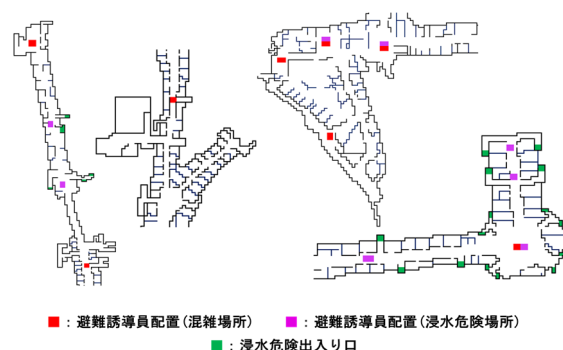


図-6 避難誘導員配置位置

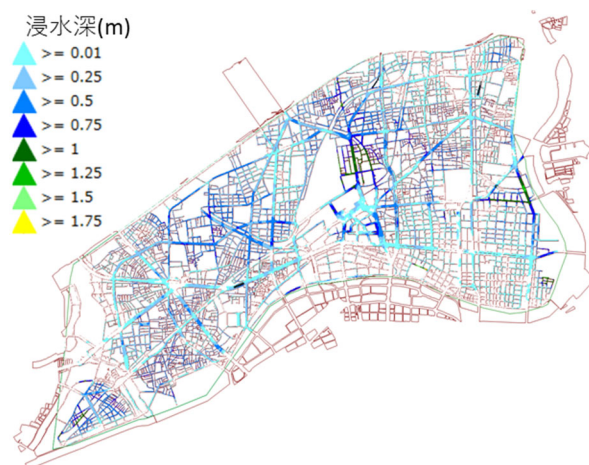


図-7 地上の内水氾濫解析結果（最大浸水深図）

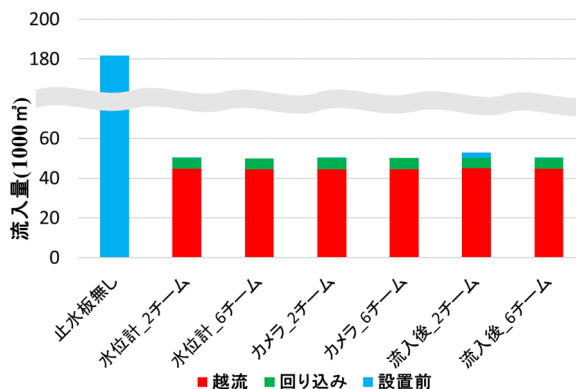


図-8 地下空間への流入量の比較

c) 地下空間の浸水結果

地下空間の浸水深を比較するため、止水板なしと流入量が最も少ない水位計 6 チームでの、降雨開始から 240 分後(4 時間後)の浸水深ならびに最大浸水深を図-9 に示す。

まず、240 分経過後を比較すると、止水板が未設置の場合は、降雨開始から 175 分で流入が始まり、240 分経過すると北側のエリアの浸水深が 1.25m を越えている。それに対して、止水板を設置するケースでは、降雨開始から 210 分で流入が始まり、240 分経過した場合の浸水深は 0.2~0.5m 程度である。そのため、止水板未設置であると、避難(移動)限界を超える比力となるが、止水板を設置することで、避難することが可能な時間(リードタイム)が確保される。

次に、最大浸水深を比較すると、北部および東部の箇所は、袋小路となっているため水位が上昇し、いずれのケースも危険な状態である。そのため、止水板を設置したから安全というわけではなく、避難のための時間を確保することはできるが、避難を行わない場合、人命に影響を与えることが示唆された。

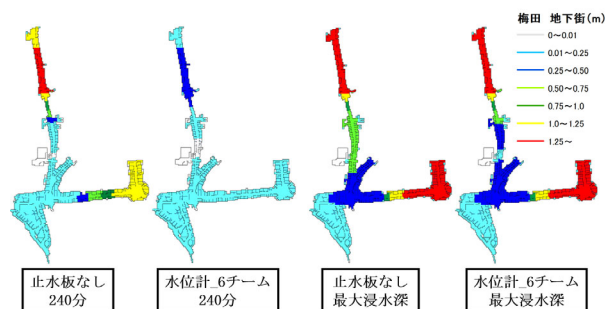


図-9 地下空間の浸水深の比較

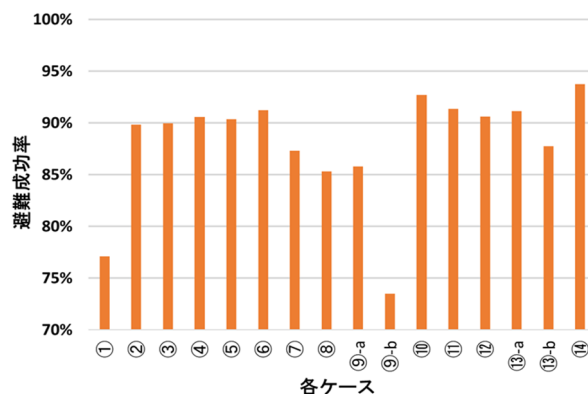


図-10 各ケースにおける避難成功率

(3) 避難解析による避難行動対策の評価

避難解析は地下空間利用者の初期の配置や属性が結果に影響を与えるため、表-1の各ケースに対して100回の解析を行い、得られた解析結果の平均を求め分析を行う。

各対策における避難成功率と時間変化について比較する。各ケースにおける避難成功率を比較したものを図-10 に示し、避難成功率と避難成功人数の平均値、標準偏差、最大値、最小値の比較したものを表-2 に示す。

a) 止水板設置の効果

流入水対策(ケース②~⑤)の違いによる避難への影響について、止水板がない場合と止水板の設置ルールの違いによる避難成功率の時間変化の比較を図-11 に示す。最も流入量が少なかった水位計 6 チームで止水板を設置するケースが 91%で最も高い結果であり、止水板なしと比べ、約 13.5 ポイント、避難成功人数は約 1100 人の差であった。

経過時間と避難成功率の関係を見ると、避難開始当初より、やや止水板なしのケース①の避難成功率は低いが、40 分を過ぎた辺りから、避難成功率には差が大きく開き始めている。この差が、止水板による地下空間への流入量を抑制した効果と見なせる。

止水板設置の行動を早める対策内では、最も流入量が多い流入後 6 チームで設置するケースでも避難成功率は 90%であり、水位計 6 チームのケースと差は約 0.8 ポイントである。今回検討した止水板の設置開始基準の違いによる避難成功率へ与える影響は少ないと考える。

表-2 各ケースの避難成功率(避難成功人数)

各ケース	平均	標準偏差	最大	最少
①	77.1%(6555人)	166.4	82.1%(6982人)	72.5%(6161人)
②	89.8%(7635人)	57.6	90.8%(7718人)	87.9%(7471人)
③	90.0%(7647人)	50.7	91.1%(7742人)	88.5%(7525人)
④	90.6%(7698人)	34.4	91.3%(7762人)	89.7%(7624人)
⑤	90.4%(7681人)	41.7	91.3%(7760人)	88.8%(7546人)
⑥	91.2%(7753人)	18.6	91.6%(7787人)	90.2%(7669人)
⑦	87.3%(7418人)	79.4	90.4%(7681人)	85.0%(7226人)
⑧	85.3%(7253人)	130.5	88.5%(7523人)	82.4%(7006人)
⑨-a	85.8%(7294人)	76.6	87.9%(7468人)	82.7%(7032人)
⑨-b	73.5%(6246人)	91.4	75.6%(6424人)	69.4%(5900人)
⑩	92.7%(7878人)	29.4	93.6%(7956人)	92.0%(7820人)
⑪	91.3%(7764人)	35.0	92.5%(7860人)	90.6%(7697人)
⑫	90.6%(7816人)	194.3	97.6%(8299人)	89.2%(7579人)
⑬-a	91.1%(7747人)	31.7	91.8%(7802人)	89.9%(7642人)
⑬-b	87.7%(7458人)	84.1	89.5%(7607人)	86.1%(7318人)
⑭	93.7%(7968人)	18.5	95.7%(8134人)	93.2%(7920人)

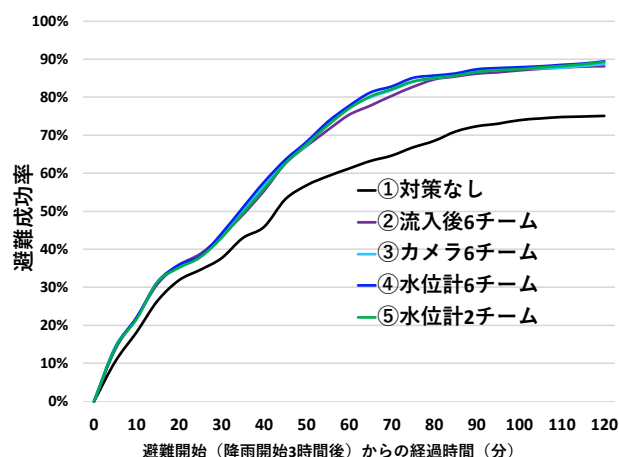


図-11 止水板の有無による避難成功率の時間変化

b) 避難行動対策の効果

次に、流入水対策（止水板）がなく、避難行動対策のみの効果について（ケース⑥～⑨）、止水板のないケース①との比較では、ケース⑥、⑨-bを除き、7～10ポイント高い避難成功率となっており、一定の効果が見られる。ケース⑥は早期に避難情報発令するケースであり、早期避難の有用性は確認できた。一方で、現実的には、大雨特別警戒が発令されるほど大雨にならなかった、いわゆる空振りの可能性もあり、店舗の営業損失などのリスクを伴う。ケース⑨-bは、地下空間の出入り口での浸水が発生している場合に、避難限界を迎える前から、同出入り口を利用しないように避難誘導した場合の結果であり、避難の比較的早い段階で、利用できなくなる出入り口数が増えるために、避難成功率が低下している。また、ケース②～⑤の止水板のあるケースと、ケース⑥～⑨の避難行動対策のみの場合の比較では、早期避難のケース⑥を除き、いずれも止水板のあるケースの方が避難成功率は高く、止水板の設置による流入量の抑制が避難成功率に与える効果は大きいことがわかる。

c) 早期避難情報の発令の効果

避難開始目安を早めることによる影響について、ケース①と水位計2チームで止水板を設置するケース⑤、避難アナウンス開始目安を警戒レベル3としたケース⑥との比較を図-12に示す。ケース⑥は止水板を設置していないが、避難成功率が91%と避難行動対策のみの対策の中で最も効果が高く、止水板なしと比べ、約14ポイント、避難成功人数は約1200人の差であった。また、ケース⑩の止水板との併用により、早期に安全避難が可能となっている。一方で、早期避難については上述したような営業損失を伴うリスクもあるため、現実的には実施が困難と思われる。早期避難は、防災上、極めて重要であることは間違いないが、今回の結果では、早期避難を行わなくても、流入水対策により、同等の避難成功率が得られる結果となった。

d) 避難行動の早期化による効果

ここでは、避難の発令は、警戒レベル5であるが、図-3で示した早期に避難行動を取る人の割合が増えた場合の効果について考察する。比較対象として、対策のないケース①、現状のケース③との比較を図-13に示す。アナウンスや緊急メールなどを工夫し、避難行動に改善が見られ、早期に避難行動を取る人の割合が増えた場合、出入口付近での混雑度も上がり、避難開始合図から10分～25分での避難者数の増加率は低い。しかし、図-14のように、各出入口付近に避難している避難者が多く、逃げ遅れによる避難の失敗が少ないため、避難成功率は10ポイント（約850人）増加した。現状の状態と比べると、序盤の避難成功率は高いが最終的な成功率にあまり差はなかった。

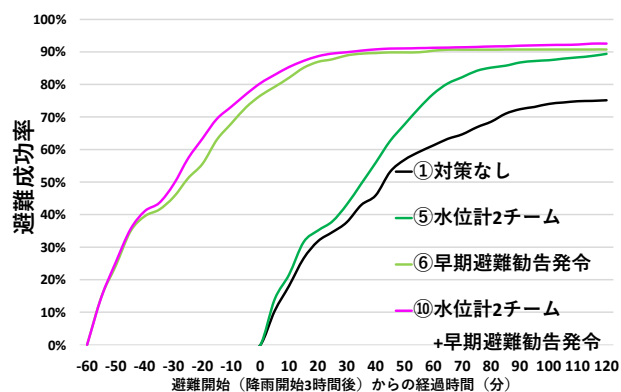


図-12 早期避難情報の発令による避難成功率の時間変化

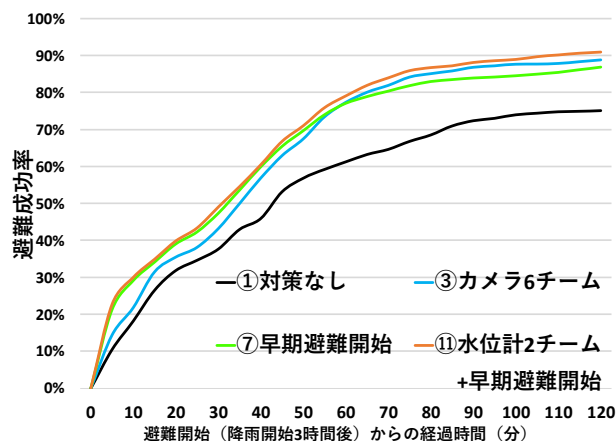


図-13 避難行動の早期化による避難成功率の時間変化

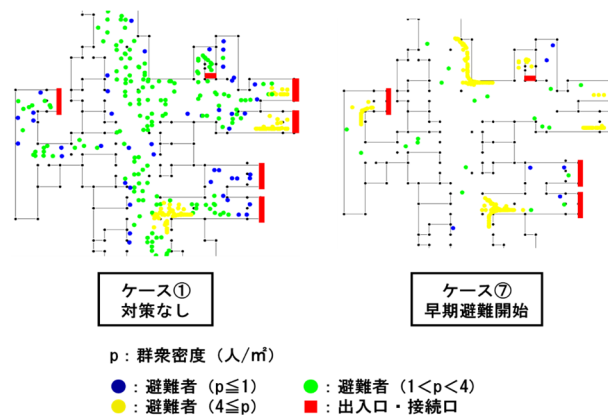


図-14 避難開始20分後の避難状況比較

e) フロアマップ数の増加による効果

フロアマップを増加させた場合と対策のないケース①、ケース③を比較したものを図-15に示す。フロアマップを設置することで、右往左往せずマップを見て、最も近い出入口やビル接続口へ最短経路で出口に向かう人が増加するため避難成功率は増加する。また、最も距離が近い出入口が浸水や流入の影響を与える箇所だった場合、速度低下や避難失敗となるため止水板の有無の違いによる避難成功率にも大きな差が出た。止水板とフロアマップの組み合わせによって現状に比べ、約0.6ポイント（約150人）の効果が見られた。

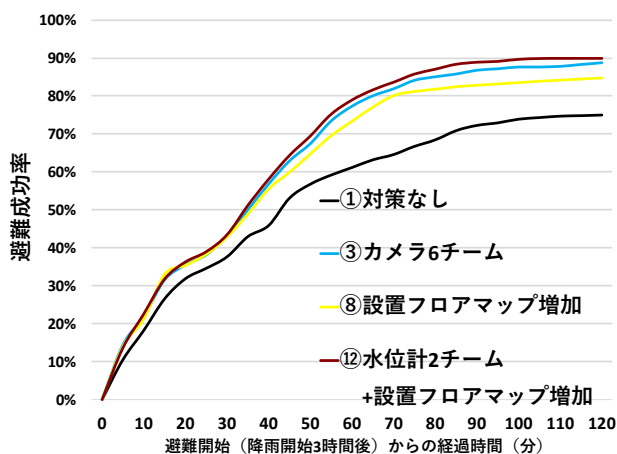


図-15 フロアマップ増加による避難成功率の時間変化

ここでフロアマップ数の増加対策のケース⑧と⑫の標準偏差をみると(表-2), 対策のないケース①と同様あるいは、それ以上に標準偏差が大きいという特徴が見られる。標準偏差が大きくなる要因は、地下空間利用者の初期配置によるものと考えられる。ケース①の場合は、地下浸水の被害が、他のケースよりも相対的に早く、かつ大きくなるために初期配置の影響を受ける。一方、ケース⑧、⑫の場合は、フロアマップが増加されたことにより、初期配置によっては、早期に避難経路を見つける人の割合が増えるために標準偏差が大きくなったと考えられる。

5. 結論

本研究では、将来の想定最大降雨を用いて、地上と地下の内水氾濫解析ならびにそれに伴う地下空間利用者の避難解析を行い、地下空間への止水板による流入水対策ならびに、避難行動対策の効果について考察を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 地下への流入水対策としての止水板設置は、想定最大規模の降雨に対しても有用であることを確認した。ただし、現状の止水板高さ 50cm では不十分な箇所がある。現状の止水板高さは、人が乗り越えられる高さとして設定されていることから、このトレードオフの関係を今後、評価する必要がある。
- 2) 止水板の有無による避難解析結果より、今回の検討条件においては、止水板の有無により避難成功率に 13 ポイント以上の差が見られた。止水板を設置した場合、避難成功率は約 90% と高い効果が得られ、止水板の設置による流入量の抑制が避難成功率に与える効果は大きいことを示した。
- 3) 避難行動対策として、早期避難のアナウンスは効果的であるが、営業損失なども招くリスクもある。一

方で、避難アナウンスを早期に実施しない場合でも、止水板による流入水量を抑制し、一人一人が早期に避難行動を開始したり、避難混雑を緩和するような避難誘導を行ったりすることにより、同等の避難成功率を得ることが示唆された。

最後に、本研究の課題点について示す。本研究では地下空間の出入り口の階段を上がった、あるいは接続ビルに到達した時点で避難完了と定義し、評価を行っているため、地上への到達後の避難を想定していない。地上部も浸水しており、避難困難になっている箇所もあるが、本研究ではその点を考慮できていない。次に、今回はマルチエージェントモデルによる避難解析を実施したが、非常に簡単な行動ルールに基づく解析である。現在、解析技術が非常に向上し、3次元シミュレーションなどによる避難解析なども実施されているため、避難解析については、その高度化が必要である。ただし、今回のように複数の対策案の代替案比較という点においては、本研究で用いた避難解析手法であっても有用であると考えられる。

謝辞: 本研究は日本学術振興会の科研費(19K04966, 研究代表者:戸田圭一)の助成を得て行った研究の成果の一部である。

参考文献

- 1) 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化, 最終更新 2019 年 3 月, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html, 2019 年 8 月閲覧
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局長: 水防法等の一部を改正する法律の一部施行等について, 最終更新 2015 年 6 月, https://www.mlit.go.jp/river/shin-ngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/bunkakai/dai52kai/siryou3-2_01.pdf, 2019 年 8 月閲覧
- 3) 国土交通省: 水防法等の一部を改正する法律の施行について, 最終更新 2017 年 7 月, <http://www.mlit.go.jp/common/001189346.pdf>, 2019 年 8 月閲覧
- 4) 大阪地下空間浸水対策協議会: 大阪駅周辺地区 地下空間浸水対策計画, <https://www.city.osaka.lg.jp/kikikan-rishitsu/cmsfiles/contents/0000259/259323/osakaekitiku-shinsuitaisakukeikaku2.pdf>, 2019 年 12 月閲覧
- 5) 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, Vol.25 pp.196-201, 2020.
- 6) 川崎順二, 原田英治, 後藤仁志, 水口尚司, 春名慧: DEM-MPS カップリングモデルを用いた浸水時の登陸避難過程シミュレーション, 土木学会論文集 F2(地下空間研究), Vol.75, No.1, pp.1-16, 2019.
- 7) 中村栄治, 小池則満: 地下街での来街者調査に基づいた避難シミュレーションからの滞留者予測と避難誘導の提案 ~名古屋・セントラルパークを例として~, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.74, No.2 pp.1_93-1_100, 2018.

- 8) 瀧澤重志, 高木尚哉, 谷口与史也: 浸水被害を想定した梅田地下街の垂直避難シミュレーション, 都市防災研究論文集, Vol.2, pp.35-38, 2015.
- 9) 西尾信彦, 井下泰具, 伊藤博幸, 森兼政行: 地下空間防災システムの高度化に関する検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.22, pp.115-122, 2017.
- 10) 川中龍児, 吉川雅志, 石垣泰輔: 大規模地下空間における浸水時の避難成功率向上に関する検討, 土木学会論文集(地下空間研究), 70 巻 1 号 pp.13-19, 2014
- 11) 寺田光宏, 岡部良治, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 密集市街地における内水氾濫時の地下鉄浸水に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No. 4, pp. 1357-1362, 2016.
- 12) 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 低平地住宅密集地域における内水氾濫の危険度評価に関する研究, 水工学論文集, Vol.53, pp.823-828, 2009.
- 13) 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 高密度商業地域における内水氾濫の脆弱要因に関する考察—2011 年 8 月 27 日大阪の豪雨を対象として—, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, NO.4, I_1009-I_1014, 2012.
- 14) 浅野統弘, 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 密集市街地における内水氾濫時の歩行避難および車両移動の危険度評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_1561-I_1566, 2013
- 15) 森兼政行, 井上知美, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 地下駅を考慮した大規模地下空間での浸水特性と浸水対応策の効果に関する検討, 土木学会論文集 68 巻 4 号, pp.I_1003-I_1008, 2012
- 16) 兼田敏之 artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション, pp 61 62, 構造計画研究所, 2010
- 17) 川中龍児, 吉川雅志, 石垣泰輔: 大規模地下空間における浸水時の避難成功率向上に関する検討, 土木学会論文集(地下空間研究), 70 巻 1 号 p.13-19, 2014
- 18) 石垣泰輔, 戸田圭一, 馬場康之, 井上和也, 中川一: 実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討, 水工学論文集, 50 巻, pp.583-588, 2006
- 19) 尾崎平, 川口徹矢, 盛岡 通: 大規模地下空間の浸水対策としての管内水位情報の有用性に関する一考察, 第 54 回下水道研究発表会講演集, pp.345-347, 2017.07
- 20) 内閣府: 避難勧告に関するガイドライン, 最終更新日 2019 年 3 月, http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinan-kankoku/pdf/hinan_guideline_01.pdf, 2019 年 12 月閲覧
- 21) 大阪地下街株式会社: 梅田地下空間避難確保・浸水防止計画(東梅田地区), 2017.7
- 22) 国土交通省・都市局街路交通施設課都市計画課: 東日本大震災の津波被災現況調査結果(第 3 次報告), <http://www.mlit.go.jp/common/000186474.pdf>, 2019 年 12 月 16 日閲覧
- 23) 佐々井崇博. (2019). 大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ(東北から九州) by SI-CAT [Data set]. データ統合・解析システム (DIAS). <https://doi.org/10.20783/DIAS.562>

EVALUATION OF FLOOD MANAGEMENT FOR UNDERGROUND BASED ON FLOOD ANALYSIS AND EVACUATION ANALYSIS

Taira OZAKI, Tomoya KAWANAMI, Hiroshige DAN and Taisuke ISHIGAKI

According to the IPCC Fifth Assessment Report, extreme weather events such as heavy rainfall being reported with increasing frequency and intensity worldwide. The underground space is vulnerable to flood damage, and preparation for flood damage is important. We used a large scale ensemble climate prediction database d4PDF composed of numerous ensemble experiment data, and extracted hourly maximum rainfall events from the database. In this study, we evaluated both countermeasures for inflowing underground and evacuation behavior from underground based on the results of flood analysis and evacuation analysis. As a result, it was indicate that the reduction of inflow water by installing a water stop board at the entrance is effective for evacuation behavior for the expected maximum rainfall event.

大規模地下街での短時間集中豪雨を想定した 浸水時における安全避難に関する検討

中阪 友太郎¹・石垣 泰輔²

¹学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)
E-mail: k192114@kansai-u.ac.jp

²正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)
E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp

近年, 気候変動の影響により局所的かつ短時間の集中豪雨の発生回数が増加している。都市部で集中豪雨が発生した場合, 地上だけでなく地下街等の地下空間への浸水の危険性が考えられる。よって, 浸水時を想定した地下空間における安全避難を計画することが防災上の重要な課題といえる。本研究では, 都市部の密集市街地に存在する大規模地下街を対象とし, 短時間集中豪雨に伴う地上の氾濫解析・地下の浸水解析を行うことで, 地下街の浸水リスクについて検討を行った。また, 地下街における浸水時の避難行動シミュレーションを行うことにより, 避難成功率の向上について検討を行った。解析結果として, 降雨量の増加により地下街の浸水リスクが高まり, 避難の早期開始や地下街と接続しているビルへの避難等により, 避難成功率が向上することが示された。

Key Words: underground mall, pluvial flood, inundation, evacuation, multi-agent simulation

1. はじめに

近年, 都市化の進展や気候変動の影響等により, 集中豪雨の発生回数や降雨量の増加が確認されている。昨今の集中豪雨の特徴として, 10~20分間といった短時間かつ局地的に発生することが挙げられる。そのため, 発生の予測と対策が困難であり, 深刻な被害を与える可能性がある。都市部では, 一般的に時間雨量 40~50mm 程度の雨水が排水できるように設計されているが, 短時間に下水道の処理能力を超える豪雨が発生した場合には, 内水氾濫が生じるリスクがある。例えば, 2013年8月に大阪で発生した集中豪雨では, 大阪の梅田地区で内水氾濫が発生し, 駅や商店が浸水の被害を受けた。これは, 10分間雨量で約 23.5mm の降雨が観測され, 約 20 分間で計画降雨量を上回る規模の猛烈な豪雨であった。

東京, 大阪, 名古屋等の都市域では, 地下鉄や地下街等の地下空間の高度利用が発達しているが, 海拔 0m 地帯が広がっている。よって, 水害が発生した場合は, 地上の浸水のみでなく, 地下空間への浸水が危惧されている。そのため, 大規模な集中豪雨に伴う地下浸水を想定し, 地下空間における安全かつ迅速な避難計画を作成することが防災上の重要な課題といえる。

都市部の内水氾濫に伴う地下空間の浸水や地下空間からの避難に関する研究は, これまでに多数なされている。例えば, 森兼ら¹⁾, 尾崎ら²⁾は, 内水氾濫では総降雨量よりも降雨強度が地下街の流入に影響を与えることを示している。関根ら^{3,4)}は, 地下街浸水時には避難誘導により効率的に避難が可能であることを示している。川中ら⁵⁾は, 地下街利用者の密集度の増加によって, 避難成功率が低下することを示している。瀧澤ら⁶⁾は, 地下街の接続ビルへの垂直避難や避難場所の容量を考慮した研究を行っている。このように, 地下空間の浸水や避難に関する研究が行われている一方で, 将来的な降雨量の増加を含めて検討している研究はあまり見られない。

本研究では, 都市部の密集市街地に存在する大規模地下街を対象とし, 短時間集中豪雨による内水氾濫の発生に伴う地下街の浸水解析により, 地下街の浸水状況の把握と浸水危険度の評価を行った。このとき, 下水道の計画降雨を基準とし, 降雨量の増加が地下街浸水に与える影響について検討した。また, 地下街浸水時の避難行動シミュレーションを行い, 降雨量の増加, 排水ポンプの有無, 避難経路の変更, 避難開始のタイミングといった様々な条件を考慮することにより, 避難成功率の向上に関する検討も行った。

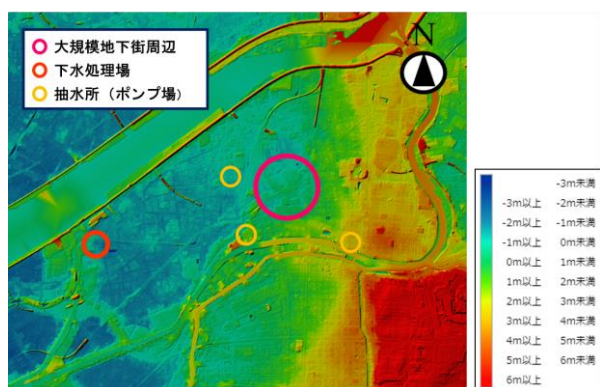


図-1 海老江処理区内の位置関係（国土地理院に加筆）

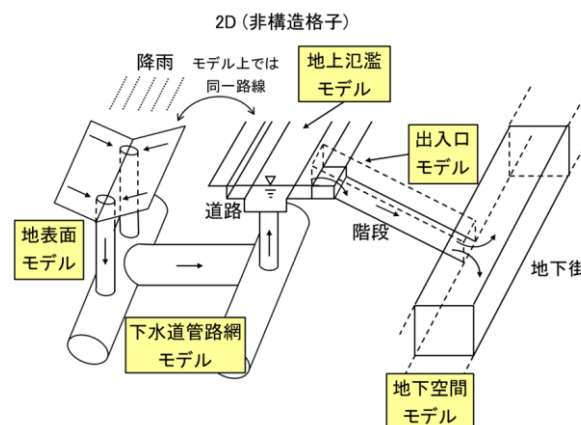


図-3 地上・地下統合氾濫解析モデル

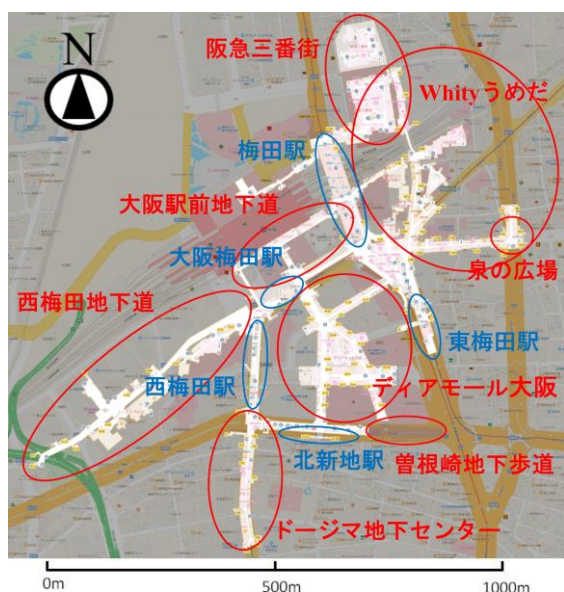


図-2 大規模地下街内の位置関係（Yahoo!地図に加筆）

2. 対象地域の概要

対象地域は、大阪市にある下水道処理区の1つである海老江処理区である（図-1）。この処理区内は、東の地盤高は比較的高く、西に向かって地盤高が低くなっている。特に中央部に位置する梅田は周辺部に比べて1～2mほど低くなっている。よって、地上で氾濫が発生した場合、地盤高の高い場所から低い場所に向かって氾濫水が流れるため、梅田は非常に危険な場所であるといえる。

また、対象地域には排水ポンプ場が存在するが、処理能力を上回る規模の豪雨が短時間に集中すると、ポンプが機能を停止する可能性がある。そこで、ポンプ稼働時とポンプ停止時の両方で検討を行った。なお、ポンプは解析の間は継続的に稼働または停止すると設定した。

海老江処理区に存在する大規模地下空間は、約1km四方に広がる日本有数の地下街である（図-2）。公共の出入口（接続ビルからの出入口除く）は約140ヶ所存在し、多数のビルや5つの地下駅が接続し、管理者の異なる複数の地下空間で形成されている。

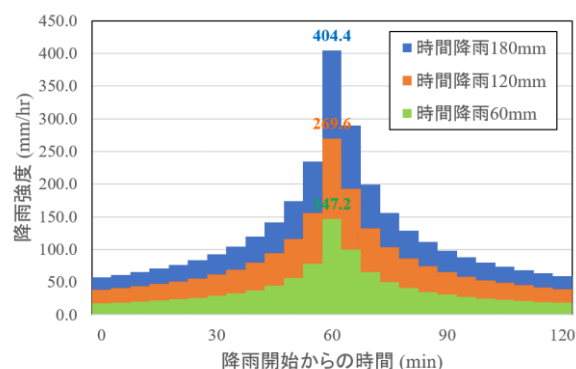


図-4 モデル降雨のハイトグラフ

3. 大規模地下街を含む地上部の氾濫解析

(1) 氾濫解析モデルの概要

地上部の内水氾濫解析を行い、地下街への氾濫水の流入量を計算するために、地表面と下水道管路網の統合解析が可能な InfoWorks CS（現：ICM）を用いた。本モデルは、地表面モデルと下水道管路網モデルから構成されている（図-3）。地表面モデルは、降雨を入力データとし、降雨損失考慮後の有効降雨が単一貯留池モデルによって地表面を流れ、マンホールへの流入量を算定するモデルである。下水道管路網モデルは、算出された各マンホールでのハイドログラフを用いて Saint Venant 方程式を適用して管内の水の流れを解析するモデルである。

また、地下街のモデル化の際には、地下街を巨大な管渠とし、出入口をマンホールで再現し、地表面と階段部の境界に仮想の堰を設けることで、地表面における浸水深が堰高を越えると地下街に水が流入するように設定している。出入口のモデル化には、現地調査の結果より得られた各出入口の幅とマウンドアップ高を適用した。

なお、本モデルは、2011年8月末の豪雨（時間雨量77.5mm）を用いて内水氾濫の再現性の検証及びキャリブレーションが行われたものを用いている⁷⁾。

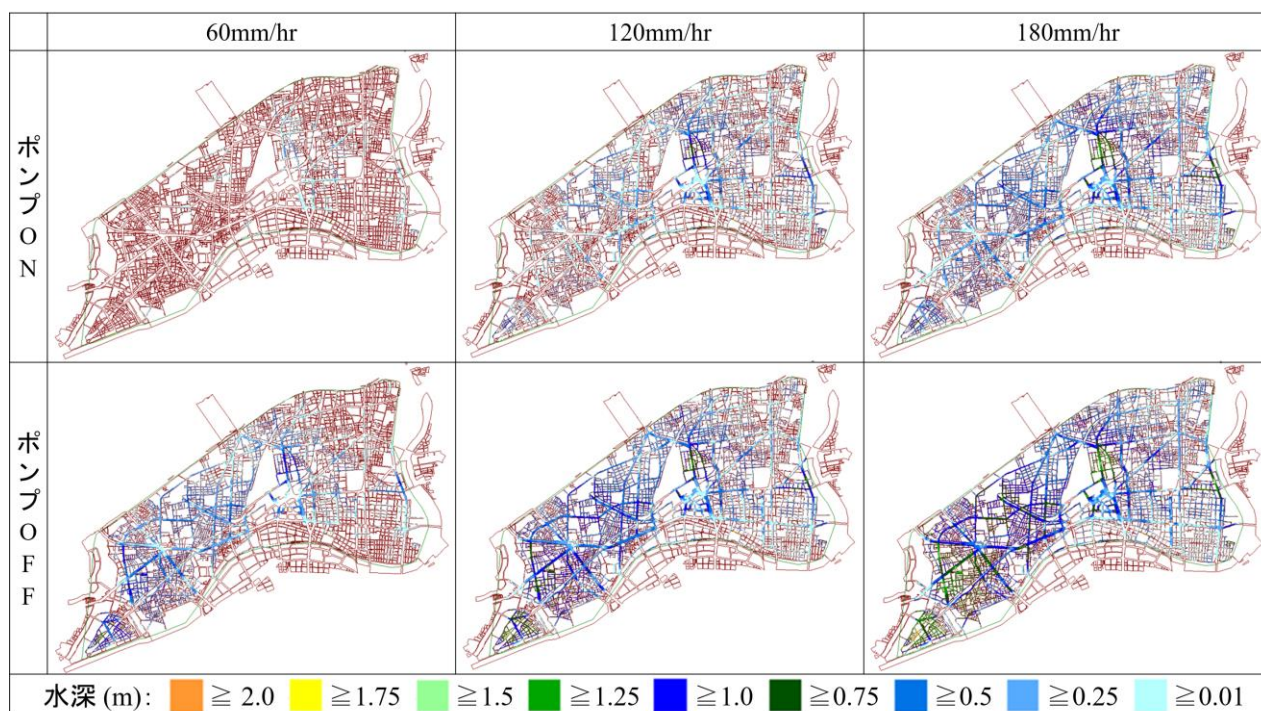


図-5 各降雨条件における地上部の最大浸水深（浸水深の高さで色分け）

(2) 氾濫解析条件

海老江処理区では、既に森兼ら³⁾の研究をベースとし、尾崎ら²⁾、黄ら⁴⁾によって、様々な外力条件による内水氾濫解析が検討されている。ここでは、短時間の降雨強度が大きな降雨に伴う内水氾濫時の地下街への流入及び浸水特性を明らかにするため、黄らが作成した計画降雨を考慮したモデル降雨を用いる。対象地域の雨水排水能力は、1時間降雨 60mm（20年確率降雨に相当）で計画されている。よって、時間降雨 60mm を基準とし、その2倍、3倍の規模に相当する時間降雨 120mm、180mm のモデル降雨を作成した。図-4に示すように、モデル降雨はそれぞれ時間間隔 5 分、降雨継続時間 2 時間の中央集中型のハイエトグラフである。なお、モデル降雨は対象地域（集水区）に一樣に発生させるものとし、面的な分布の偏りなどは考慮しないものとする。また、氾濫解析に関する主なモデルパラメータとして、流出モデル（固定係数法）の流出係数を 0.85（中心市街地）と 0.65（周辺住宅地）とし、初期損失係数を 0.28mm とし、氾濫解析の粗度係数を 0.043 とした。

(3) 氾濫解析結果・分析

決定した解析条件をもとにして、対象地域での内水氾濫解析を行った。図-5に、各降雨条件における地上部の道路面の最大浸水深の結果を示す。なお、浸水深の凡例は、各地点における浸水深を 0.01m から 2m 以上で示し、2m までは 0.25m ずつの色分けを行っている。また、図-6に、氾濫解析結果から得られた各モデル降雨における地下街への氾濫水の流入量を示す。

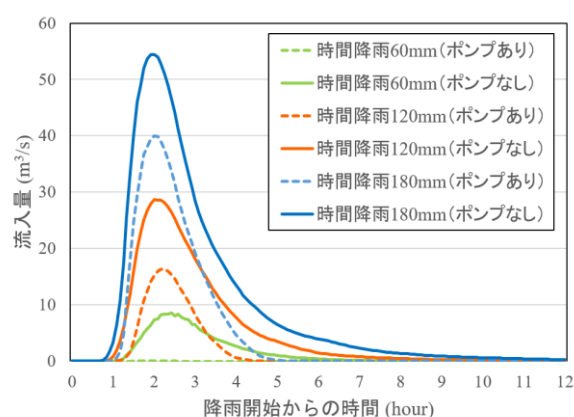


図-6 各降雨条件における地下街への流入量

図-5より、降雨量が増加するにつれて、地上部における浸水域が広がっている。ポンプ停止時は、主に対象地域の西側と地下街周辺で浸水が発生し、降雨量が増加するにつれて、全体に浸水が広がっている。これは図-1の通り、周辺よりも地盤高が低いためである。ポンプ稼働時は、停止時よりも内水氾濫の規模が小さくなり、西側の浸水深は抑制されているものの、地下街周辺を中心に浸水が発生していることがわかる。

図-6より、降雨量が大きくなるにつれて、地下街への流入量が増加していることがわかる。排水ポンプの稼働により、流入量が抑制され、特に下水道の設定基準である 60mm/hr ではほぼゼロに抑えられている。また、いずれの場合も地下街では約 2 時間後に流入がピークを迎えることから、流入のピークが到達するまでの時間に大きな差はないことが示された。

4. 大規模地下街における浸水解析

(1) 浸水解析モデルの概要

地上部の氾濫解析結果より得られた地下街の各出入口の流入量を外力とし、地下街における浸水解析を行った。解析モデルは、森兼ら⁹⁾の構造格子モデル(図-7)を用いた。メッシュのサイズは、解析範囲、通路幅、店舗の大きさ等を考慮し2mの正方格子とする。また、フロアレベルの高低差は現地実測によるもので、地下駅が存在する場所のメッシュは地盤高を低く設定し、氾濫水が地下駅のメッシュに溜まるような設定を行った。浸水計算は、以下の2次元浅水方程式(運動方程式と連続式)を基礎式としている。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (3)$$

ここで、 h : 水深(m)、 t : 時間(s)、 u : x 方向の流速(m/s)、 v : y 方向の流速(m/s)、 M : x 方向の流量フラックス($M = uh$)、 N : y 方向の流量フラックス($N = vh$)、 H ($H = h + z$, z は地盤高): 水位(m)、 τ_{bx} : 水底面での x 方向のせん断応力成分(kg/m^2)、 τ_{by} : y 方向のせん断応力成分(kg/m^2)、 ρ_w : 水の密度(g/cm^3)、 g : 重力加速度(m/s^2)である。

また、底面のせん断応力は、マンシングの粗度係数 n を用いて、以下の式で表される。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

また、地下街の浸水解析に関するパラメータとして、粗度係数は0.020(粗いコンクリート程度)と設定した。

浸水解析の方法について説明する。まず、計算の最初のステップとして、初期条件から運動量方程式を計算する。次に、流入出による境界条件を計算し、格子間を移動する流量フラックスを求める。その後、タイムステップ Δt を1つ進める。次に、移動した流量フラックスにより格子内に入り出した水の量を計算し、格子内の水深を計算する。その水深の値から、境界上の流量フラックスより流速を求める。その後、時間ステップ Δt を1つ進め、計算終了時間まで同様のことを繰り返す。

なお、これらの基礎式の差分化については、時間項には前進差分、移流項にはDoner Cellスキーム、底面摩擦項には中央差分、それ以外の項には中央差分をそれぞれ適用した。また、未知量(h , M , N)については千鳥格子状に配置し(staggered grid)、運動量方程式と連続式を交互に計算するLeap-Frog法を用いて時間ステップを

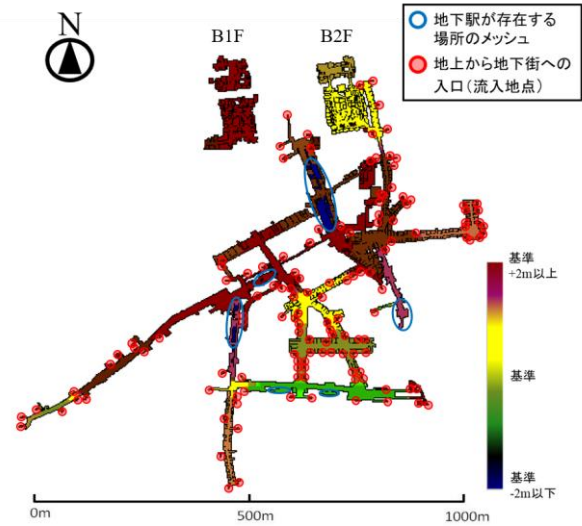


図-7 梅田地下街モデル・フロアマップ

表-1 歩行速度・避難困難度指標(単位幅比力)

	非浸水深時の歩行速度 (m/s)	避難困難指標 (単位幅比力)	
		安全避難 限界 (m^3/m)	自力避難 困難 (m^3/m)
成人男性	1.40	0.125	0.250
成人女性	1.10	0.100	0.200
高齢男性	1.10	0.100	0.200
高齢女性	0.80	0.080	0.160

進めることで、計算終了時間まで解析を行った。なお、計算差分時間は、0.005秒と設定した

(2) 単位幅比力を用いた浸水時の避難困難度指標

地下空間は階段部分では流速が速く、通路部分では水深が高くなることから、流速と水深を同時に評価できる指標が必要である。そこで、大西ら¹⁰⁾、¹¹⁾や浅井ら¹²⁾の実験結果より、運動量だけでなく水圧も考慮できる単位幅比力が検討され、地下空間で安全に避難できるかどうかの判断に用いるための指標として示されている。以下に、単位幅比力の算定式を示す。

$$M_0 = \frac{u^2 h}{g} + \frac{h^2}{2} \quad (6)$$

なお、 M_0 : 単位幅比力(m^3/m)、 u : 流速(m/s)、 h : 水深(m)、 g : 重力加速度(m/s^2)である。また、浅井ら¹²⁾の実験結果から得られた、単位幅比力に基づく避難困難度指標をまとめたものを表-1に示す。

地下街の浸水解析により、各格子のメッシュにおける時間ごとの流速と水深を求めることで、単位幅比力を算出した。本研究では、最も早期に避難が困難となる高齢女性を対象とし、安全に避難できる限界である単位幅比力0.08(m^3/m)を用いて評価を行った。

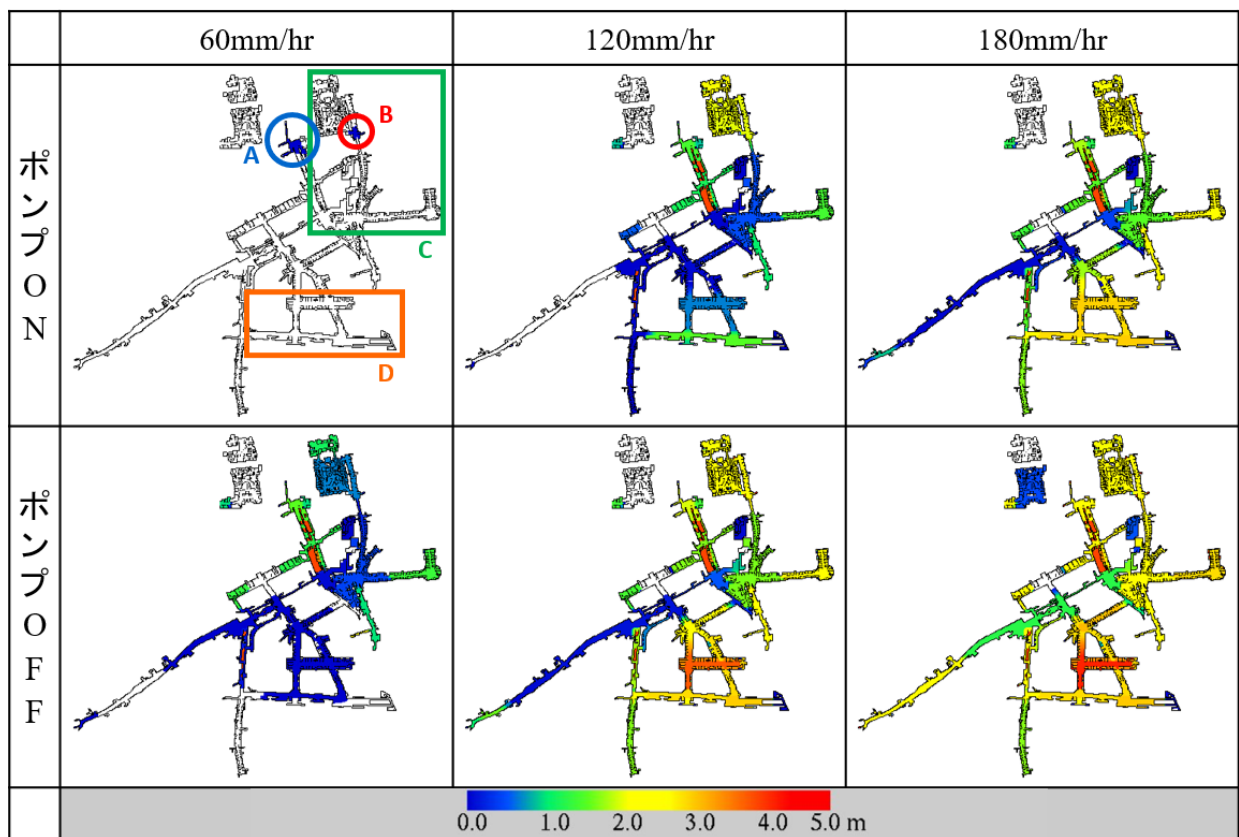


図-8 降雨条件別の地下街における最大浸水範囲・最大浸水深（浸水深の高さで色分け）

(3) 浸水解析結果・分析

地下街内部の浸水解析は、降雨開始時を解析開始のタイミングとし、6時間経過するまで解析を行った。図-8に、地下街の最大浸水深（ほぼ定常状態となる降雨開始6時間後の様子）を示す。ここでは、浸水深が0mを上回る格子を浸水箇所と判定し、浸水深の高さで色分けを行っている。また、図-9に、各降雨条件での地下街全体における浸水面積の割合の時間変化を示す。

地下街の浸水状況は、図-2で示した地下街の位置関係と、図-8で示したエリアA～Dを用いて説明する。まず、地下街への流入は、エリアA（梅田駅北側周辺）とエリアB（Whity うめだ）の出入口が最も早く開始する。エリアAは、地下駅と接続しているため、流入した水が滞留することなく、地下駅構内へ流れる。エリアBとCは、図-7より地盤高が低いため、流入した水が溜まりやすく、浸水深が増加しやすい場所である。また、降雨量が増加した場合（120mm/hr、180mm/hr）では、エリアD（北新地駅周辺・ディアモール）の浸水深が高くなる。これは、降雨量の増加により、地上部の内水氾濫が広範囲において発生し、地下街南部からも水が流入するためである。

流入開始1時間後では、ポンプ稼働時には、60mm/hrでは浸水面積は2.2%、120mm/hrでは60.2%、180mm/hrでは70.5%となった。また、ポンプ停止時には、60mm/hrでは31.2%であり、120mm/hrでは64.0%、180mm/hrでは57.1%となった。

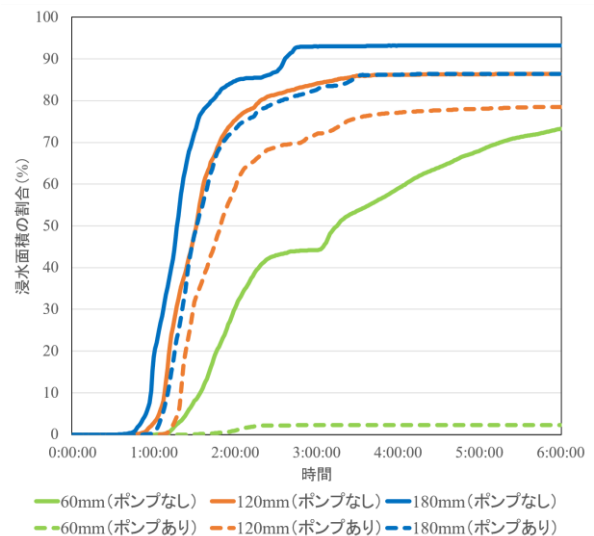


図-9 浸水面積の割合の時間変化

また、降雨開始から6時間後（定常状態）では、ポンプ稼働時には、60mm/hrでは浸水面積は2.2%、120mm/hrでは78.5%、180mm/hrでは86.4%となった。また、ポンプ停止時には、60mm/hrでは73.3%であり、120mm/hrでは86.4%、180mm/hrでは93.2%となった。

以上より、降雨量の増加により、地下街の浸水範囲が広がり、浸水深が増加することが示された。また、排水ポンプの稼働により、浸水範囲が抑制され、地下駅を除く全域で浸水深が減少することが示された。

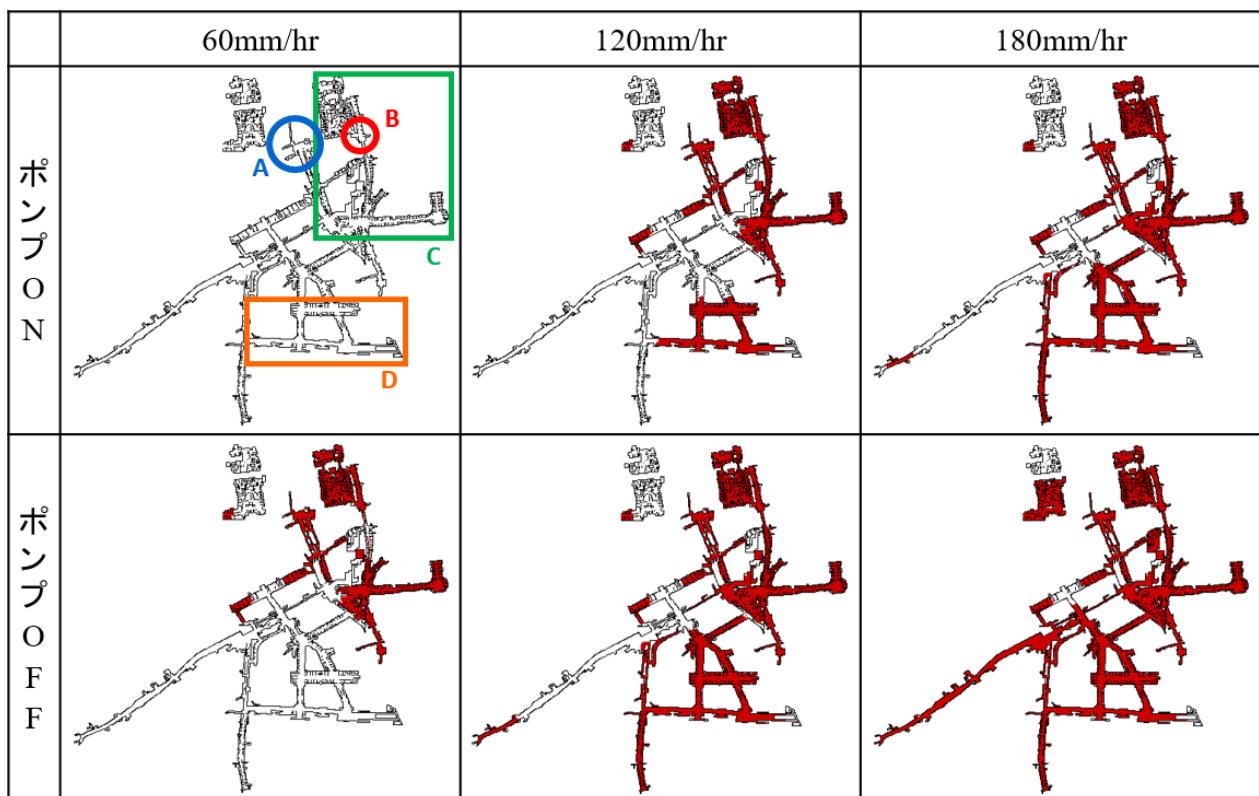


図-10 降雨条件別の地下街における避難困難の状況（降雨開始6時間後）

(4) 浸水時の避難困難度評価

地下街浸水時の避難困難度評価は、浸水解析と同様に降雨開始時を解析開始のタイミングとし、6 時間経過するまで解析を行った。前述の通り、高齢女性の安全避難限界である $0.08\text{m}^3/\text{m}$ を基準とし、それを上回る格子を危険、下回る格子を安全として評価を行った。ここで、安全避難可能面積を白色、安全避難困難面積が赤色となるように設定した。降雨開始6時間後の地下街における避難困難の状況を、図-10 に示す。また、地下街全体に対する安全避難可能面積割合の時間変化を、図-11 に示す。

浸水状況と同様に、図-2 の位置関係と、図-10 のエリア A～D を用いて説明する。まず、60mm/hr（ポンプ稼働時）を除くすべての条件で、エリア A（梅田駅北側周辺）とエリア B（Whity うめだの一部）は、流入が早いいため、早期に避難が困難となる。エリア C（Whity うめだ）も、エリア B から水が流入するため、避難困難箇所が徐々に増加する。降雨量が増加した場合（120mm/hr、180mm/hr）では、地上部の内水氾濫結果より、地下街の南側周辺からも水が流入するため、エリア D（北新地駅周辺・ディアモール）でも避難困難箇所が増加している。

図-11 より、流入開始1時間後では、ポンプ稼働時には、60mm/hr では安全避難可能面積は100%（地下街全域）であるが、120mm/hr では78.5%、180mm/hr では64.4%となり、降雨量の増加に伴い減少した。また、ポンプ停止時には、60mm/hr では97.3%であり、120mm/hr では76.2%、180mm/hr では57.1%となった。

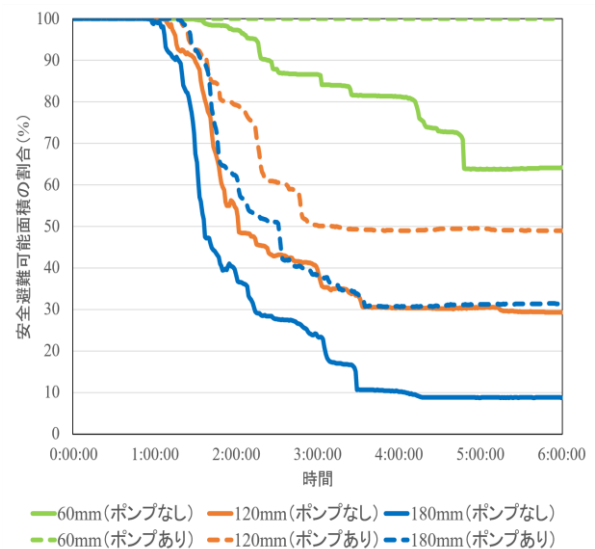


図-11 安全避難可能面積の割合の時間変化

また、降雨開始から6時間後では、ポンプ稼働時には、60mm/hr では安全避難可能面積は100%で、120mm/hr では49.0%、180mm/hr では30.6%となった。また、ポンプ停止時には、60mm/hr では64.2%であり、120mm/hr では29.3%、180mm/hr では8.8%となった。

以上より、降雨量の増加により、地下街の安全避難可能面積が減少し、ポンプの稼働により、面積の減少が抑制されることが示された。また、60mm/hr（ポンプ稼働時）を除くすべての条件で、主に北東部（Whity うめだ）のほぼ全域で避難が困難になることが示された。

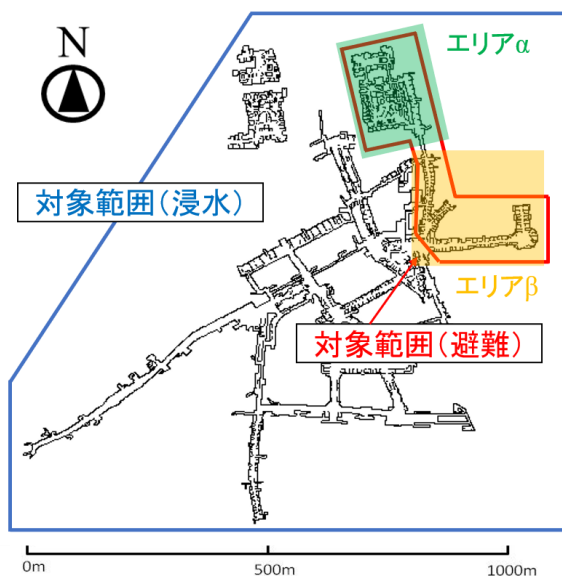


図-12 浸水・避難解析の対象領域

5. 大規模地下街における浸水・避難統合解析

(1) マルチエージェントモデルの概要

マルチエージェントモデルとは、仮想空間に複数（マルチ）の人間や生物（エージェント）を配置し、各々に独自のルールを持たせ、それらの干渉（相互作用）を考慮しつつ、人間の自律的な意思決定をモデル化することができるものである。地下空間浸水時の避難行動は、戸田ら¹³⁾や石垣ら¹⁴⁾の研究より、それぞれの利用者の性別、年齢、歩行密集度などが大きく関係することが指摘されている。そこで、避難行動者を個々に取り扱うことが可能なマルチエージェントモデルを地下街モデルに組み込みことで、浸水・避難の統合解析を行った。

(2) 対象地域・避難経路の設定

地下街の浸水状況から、いずれの降雨条件でも、主に北東部（Whity うめだ・阪急三番街 B2）で避難が困難になることが示された。そこで、このエリアを避難解析の対象領域とし、重点的に検討を行った。浸水及び避難の解析対象領域について、図-12 に示す。また、避難場所の設定のため、対象領域を2つのエリアに分割した。エリアαは、商業ビルの内部（阪急三番街 B2）も考慮するため、地上への出口と商業ビルの上の階の2種類を避難場所と設定した。エリアβは、図-13 のように地階で隣接するビルが多数存在するため、地上への出口と接続ビル入口の2種類を避難場所と設定した。現地調査で確認した接続ビルの例を、図-14 に示す。なお、接続ビルの防水対策は万全であるものとし、ビル内は浸水しない広い空間であると仮定した。よって、解析に反映させるのは入口部までとし、エージェントは接続ビルの入口部を通過し、接続ビル内に入った瞬間に避難完了とした。

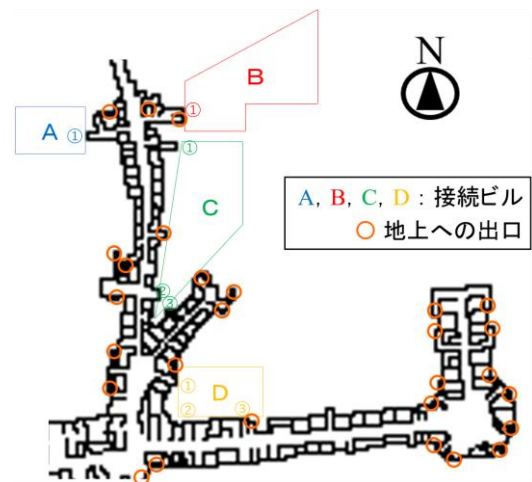


図-13 エリアβにおける地上への出口・接続ビル入口

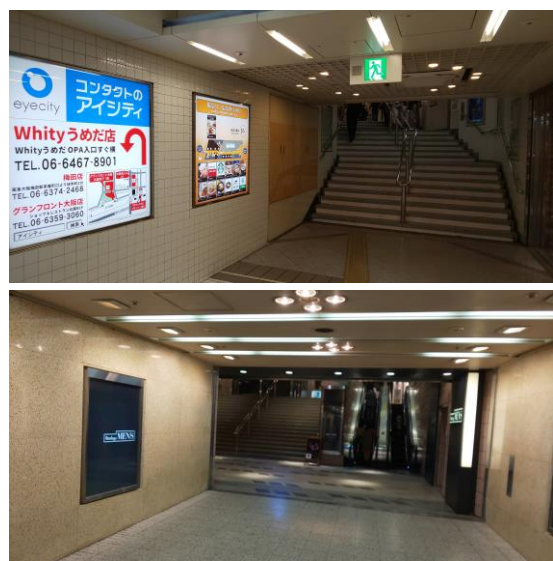


図-14 接続ビル入口の例（上：ビルA，下：ビルC）

(3) エージェントのモデル化

本研究では、エージェントの体型や視野について全員を同じ条件としてモデル化を行った。

a) 人体のモデル化・初期条件の設定

実際の人の形状は、上方から見ると前後に短く左右に長い楕円形をしている。本研究では、図-15 に示すように長径が 0.5m、短径が 0.3m の楕円とした。また、それぞれのエージェントには、性別、年齢層、非浸水時の歩行速度、視距距離、避難開始条件（時間と水深）を設定することで、個別の属性を与えられるようにした。

b) 可視範囲の決定

人間の視野範囲は、歩行時において左右に 60° 程度で、標識等の認識距離は 40m としたため、図-15 に示すような視野範囲を設定した。正面を基準に 1° ごとに視野線を伸ばし、それぞれの視野線と最も近い壁や障害物との交点までを可視距離とする。この距離を、人がそのまま移動した場合の移動予測範囲と仮定して、その範囲内で次の移動目標の決定を行うこととする。

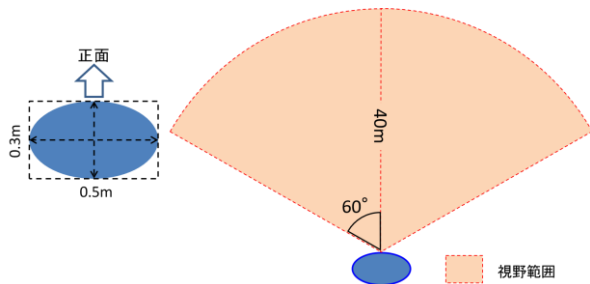


図-15 人体のモデル・初期の視野範囲

(4) 避難行動のモデル化

基本的な考え方は、関根らの研究^{3)・4)}を参考にし、川中らの研究⁵⁾をベースとして用いた。図-16に、避難行動シミュレーションの手順を示す。

a) 避難行動開始の意思決定

避難行動を開始する意思決定の基準として、浸水等の周囲の状況変化による自主的な判断（個別避難）と管理者からの避難アナウンスのような他者からの指示による判断（一斉避難）の2種類が考えられる。自主的な避難開始条件は、大西ら¹⁰⁾の調査結果（図-17）より、自身が存在する格子の水深が2cm以上、10cm以上、20cm以上と場合分けして「避難開始水深」とした。また、避難アナウンスによる避難開始条件は、地下街のどこかで浸水が開始した直後に利用者に情報を与えて避難開始を促すと仮定し、浸水開始時間を「避難開始時間」とした。

b) 移動目標の決定

避難を行う際には、何らかの目標に向かって移動するため、計算格子を階段、通路、店舗、交差点のような属性を持った幾つかの領域に分割し、人はその領域と領域の境界を目指すようにした。また、境界に様々な選択の条件を設けることで細かな移動先の選択が行えるようにした。まず、領域の属性ごとに優先度を設け、優先度の高い領域と接続する境界を移動目標とした。地上への出口に向かう場合は、出口が最も優先度が高く、上に向かう階段、通路、店舗の順となる。同じ優先度の境界が複数存在する場合は、最も近い境界を移動目標と設定した。なお、実物大の階段実験の際に実施したアンケート調査結果¹⁰⁾により、階段の上部の水深が0.1m～0.2m程度で恐怖を感じる事が示されたため、階段の上部の水深が0.1m以上の場合にはその階段を選択しないようにした。

c) 状況変化に基づく歩行速度の決定

避難行動時の歩行速度の変化は、表-1に示した非浸水時の歩行速度に、流速や水深による影響と歩行者の密集度による影響を乗じることで求められる¹⁵⁾。

$$v = S_p \cdot D_e \cdot v_{normal} \quad (7)$$

ここで、 v は歩行速度(m/s)、 S_p は水深や流速などの影響による歩行速度の減少率、 D_e は歩行密集度による歩行速度の減少率、 v_{normal} は非浸水時の歩行速度(m/s)である。

水流の影響による減少率は、避難者の存在する計算格

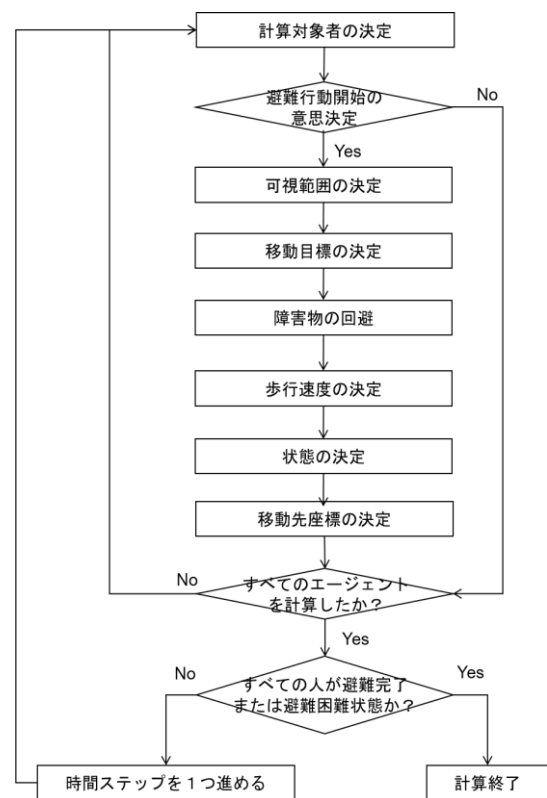


図-16 避難行動シミュレーションの計算フロー

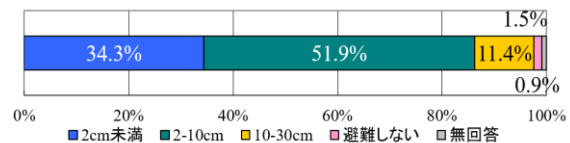


図-17 避難開始水深に関する調査結果（大西ら¹⁰⁾より）

子における流速と水深を基に、次式を用いて評価した。

$$S_p = 0.22 \cdot \exp(-125.3 \cdot M_0) - 0.71 \cdot M_0 + 0.78 \quad (8)$$

ここで、 M_0 は単位幅比力であり、運動量と水圧を同時に考慮して歩行速度を変化させることができる。

歩行密集度の影響による減少率は、川中ら¹⁵⁾により最も近い人の影響を大きく受けることが考えられることから、次式を用いて評価した。

$$D_e = \exp(L^{4.37}/2.55) - 0.48 \quad (9)$$

ここで、 L は避難者の進行方向にいる最も近い他者との距離(m)である。

階段部における歩行速度は、石垣ら¹⁴⁾により通路部の約半分となるため、浸水の影響や避難時の密集度による変化の後に、1/2を乗じた歩行速度とした。

d) 避難困難度指標に基づく状態の決定

避難者は、表-1における安全避難状態、安全避難困難状態、自力避難困難状態のいずれかの状態となり、自身が存在する浸水解析の格子内の単位幅比力によって決定されるとした¹⁵⁾。なお、自力避難困難状態では手すりや他人の補助がないと歩行できない状態であるため、歩行速度を $v=0.0\text{m/s}$ としてその場に滞留するようにした。

表-2 浸水・避難統合シミュレーション条件 (全48ケース)

Case	時間降雨 (mm/hr)	排水 ポンプ	避難経路(目的地の設定)	避難開始 時間(分)	避難開始 水深(m)	Case	時間降雨 (mm/hr)	排水 ポンプ	避難経路(目的地の設定)	避難開始 時間(分)	避難開始 水深(m)
A-1	60	ON	地上への出口	86	—	D-1	120	OFF	地上への出口	41	—
A-2	60	ON	地上への出口	—	0.02	D-2	120	OFF	地上への出口	—	0.02
A-3	60	ON	地上への出口	—	0.1	D-3	120	OFF	地上への出口	—	0.1
A-4	60	ON	地上への出口	—	0.2	D-4	120	OFF	地上への出口	—	0.2
A-5	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	86	—	D-5	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	41	—
A-6	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02	D-6	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02
A-7	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1	D-7	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1
A-8	60	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2	D-8	120	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2
B-1	60	OFF	地上への出口	61	—	E-1	180	ON	地上への出口	52	—
B-2	60	OFF	地上への出口	—	0.02	E-2	180	ON	地上への出口	—	0.02
B-3	60	OFF	地上への出口	—	0.1	E-3	180	ON	地上への出口	—	0.1
B-4	60	OFF	地上への出口	—	0.2	E-4	180	ON	地上への出口	—	0.2
B-5	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	61	—	E-5	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	52	—
B-6	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02	E-6	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02
B-7	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1	E-7	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1
B-8	60	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2	E-8	180	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2
C-1	120	ON	地上への出口	64	—	F-1	180	OFF	地上への出口	33	—
C-2	120	ON	地上への出口	—	0.02	F-2	180	OFF	地上への出口	—	0.02
C-3	120	ON	地上への出口	—	0.1	F-3	180	OFF	地上への出口	—	0.1
C-4	120	ON	地上への出口	—	0.2	F-4	180	OFF	地上への出口	—	0.2
C-5	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	64	—	F-5	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	33	—
C-6	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02	F-6	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.02
C-7	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1	F-7	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.1
C-8	120	ON	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2	F-8	180	OFF	地上への出口+接続ビル入口	—	0.2

(5) 浸水・避難統合解析条件

表-2のように、降雨量、排水ポンプ、避難場所、避難開始のタイミングといった条件の変更により、解析のケース分けを行った。

a) エージェントの人数・配置

本研究では、エージェントはすべて最も早く自力での避難が困難になる高齢女性とした。対象領域に配置するエージェントの人数を求めるため、現地調査から実際の混雑率（密度）を計算した。図-18に、現地調査で撮影した平日の混雑時の様子を示す。橙色で囲んだ箇所の面積は約320m²であり、その中にいる人数が105人であることから、混雑率は約0.33人/m²と算定できる。対象領域にこの混雑率を適用するため、本解析ではエージェントの配置人数を4450人と設定した。初期の配置条件については、乱数を用いることで、X座標、Y座標、向きを与え、各々が接触しないように密集度を考慮して偏りが出ないように一様にエージェントを配置した。

b) 降雨・ポンプの条件

降雨量の違いが避難成功率に与える影響について検討するため、地上部の氾濫解析で用いた3種類のモデル降雨（60mm/hr、120mm/hr、180mm/hr）でケース分けを行った。また、排水ポンプについては、稼働時と停止時という2通りの条件でケース分けを行った。

c) 避難経路（目的地）の条件

本研究では、地上への出口と接続ビル入口の2種類を避難の目的地とし、地上への出口のみへ避難する場合と地上への出口と接続ビル入口を併用する場合という2通りの条件でケース分けを行った。ただし、接続ビル入口



図-18 現地調査で撮影した平日の混雑時の様子
(橙色で囲んだ箇所に105人、混雑率0.33人/m²)

はエリアβのみに設定し、エリアαは商業ビル内（阪急三番街 B2）の上の階も地上への出口と同様に避難場所として設定した。

d) 避難開始のタイミング

避難行動を開始する意思検定の基準として、エージェント自身の格子水深が上昇することによって自主的に避難を開始する場合と、管理者からの避難アナウンスを想定して、地下街のどこかが浸水した直後に一斉に避難を開始する場合の2通りでケース分けを行った。自主的な避難については、図-17で示した調査結果に基づき、自身の格子水深が0.02m、0.1m、0.2mの3種類でケース分けを行った。避難アナウンスを想定した一斉避難の場合は、降雨開始時間を0分とし、地下街の浸水開始時間を避難開始時間として設定した。

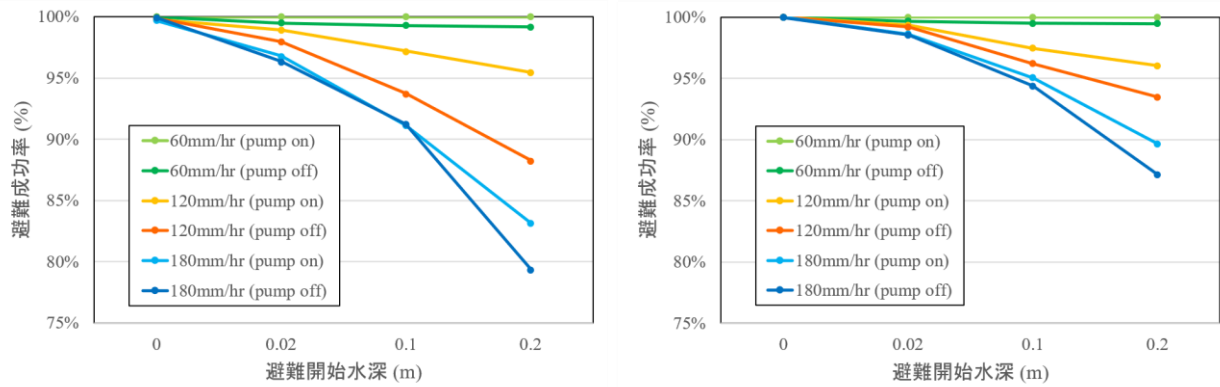


図-19 避難成功率のまとめ（左：地上への出口のみの場合，右：地上への出口と接続ビル入口を併用する場合）

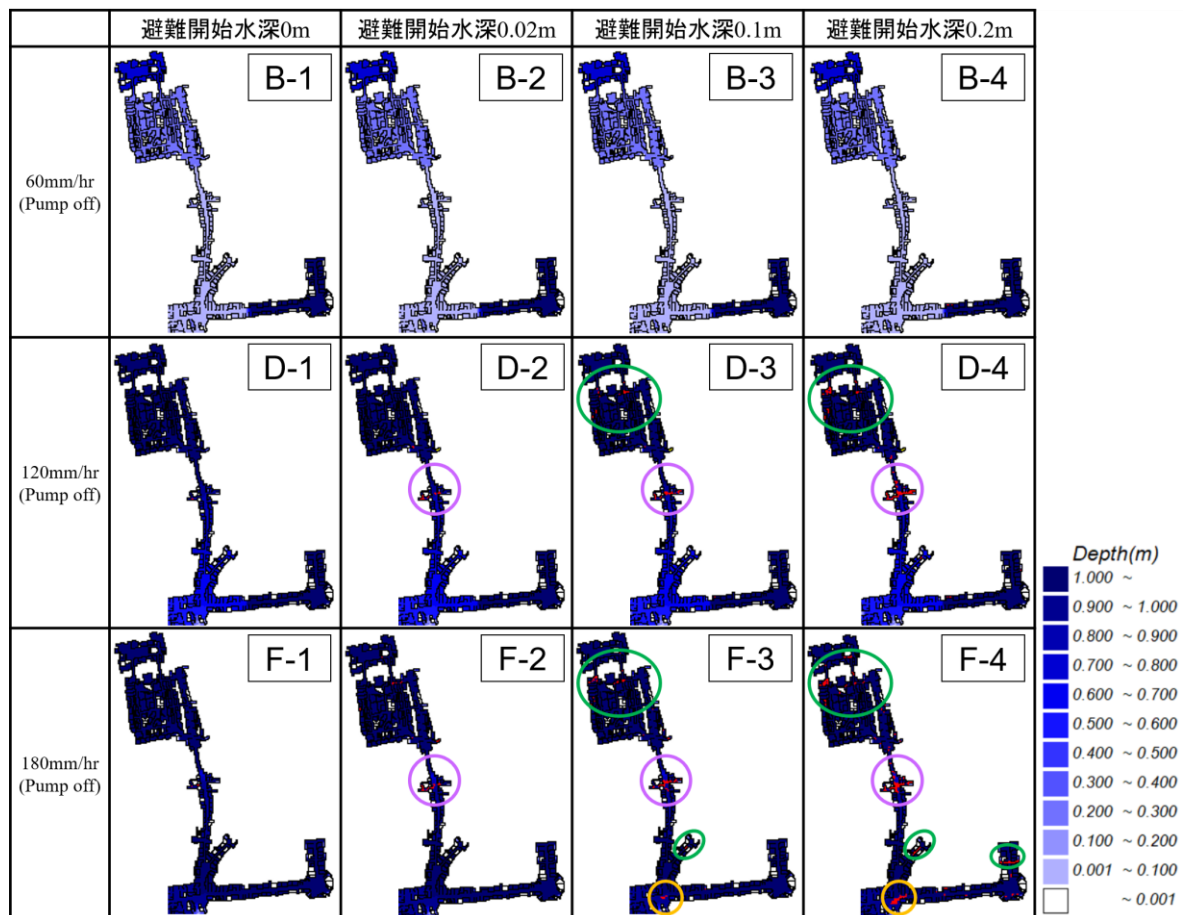


図-20 避難開始水深に着目した避難経路の安全性評価（自力避難困難状態のエージェントを赤で示し，密集箇所を丸で囲む）

(6) 解析結果・分析

解析結果（避難成功率）を，図-19 に示す．ここでの避難開始水深 0m は，避難アナウンスで地下街の浸水開始時間に一齐に避難を開始した場合である．また，避難者エージェント全員が避難完了状態または自力避難困難状態となった時点での状況を，図-20 及び図-21 に示す．これらの図では，浸水深を青色で示し，グラデーションで深さを表現している．ただし，時間降雨 60mm（ポンプ稼働時）では，図-8 より格子水深が 0.02m 以上となる箇所が少なく，図-10 より避難困難状態になる箇所が発生しないことが示されている．よって，A シリーズ（A-

1～A-8）では，避難を開始しないエージェントが多数存在し，かつ対象領域全体が安全な状態のままであるため，解析を行わずに避難成功率をすべて 100%と仮定し，他の B～F ケースの結果との比較に用いることとした．

a) 避難開始の遅れが避難成功率に与える影響

図-19 より，避難開始水深が同じ場合，降雨量の増加により，避難成功率は低下している．また，降雨量が同じ場合，避難開始水深の増加により，避難成功率は低下している．また，図-20 より，B, D, F シリーズの結果で比較を行ったところ，丸で囲まれた箇所避難できないエージェントが滞留している．これらの箇所は，出口

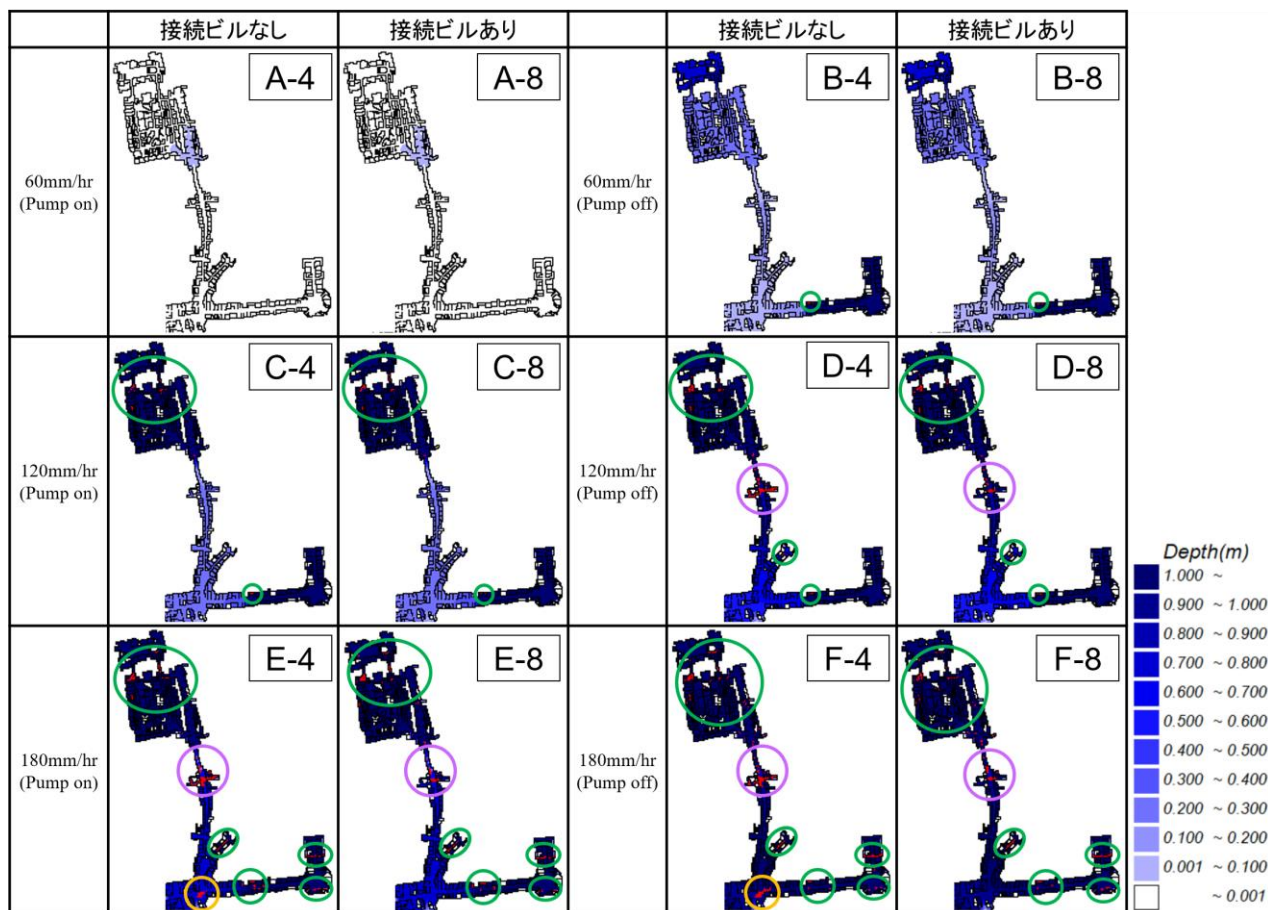


図-21 接続ビルの有無による避難経路の安全性評価（自力避難困難状態のエージェントを赤で示し、密集箇所を丸で囲む）

付近であり、多くのエージェントが密集していることが避難成功率を低下させていると考えられる。また、地下街への氾濫水の流入が一定量を超えた場合、浸水を発見した時にはすでに大量の水が広範囲に流れ込んでいるため、避難を開始しても間に合わないということが考えられる。以上のことから、避難の早期開始が避難成功率を向上させる要因であると考えられる。

b) 接続ビルとの併用が避難成功率に与える影響

図-19 より、接続ビル入口を避難経路として併用することにより、地上への出口のみへ避難する場合と比較して、いずれの解析ケースでも避難成功率は向上することが示された。このことから、水が流入する地上への出口だけでなく、接続しているビルの内部から上の階を目指すような避難も行うことで、より安全な避難が可能と考えられる。また、図-21 より、D～Fシリーズの接続ビルなしの場合では、紫色と黄色の丸で囲んだ箇所エージェントが滞留していて、近くの出口から水が流入しているため、避難が一層困難となっている。一方で、接続ビル入口との併用により、これらの箇所にいる赤色エージェントの数が減少していることから、出口に増加による滞留の解消によって避難成功率が向上していると考えられる。以上のことから、複数の避難経路の確保が避難成功率を向上させる要因であると考えられる。

7. おわりに

本研究では、大阪市の海老江処理区内にある大規模地下街を対象地域として、短時間集中豪雨に伴う地上部の内水氾濫解析を行い、地下街への流入量をもとに地下街内部の浸水解析及び避難解析を行った。

地上部の氾濫解析結果より、降雨量の増加により、浸水面積・浸水深は増加した。また、排水ポンプの停止により、地下街の浸水リスクが高まることが示された。

地下街の浸水解析結果より、降雨量の増加により、地下街の浸水面積は大きく、浸水深も高くなった。単位幅比力を用いた地下街の避難困難度評価結果より、降雨量の増加により、避難可能面積の減少が著しく、早期に避難を行う必要があることがわかった。排水ポンプが停止した場合には、地下街への流入量が増加するため、安全に避難できる時間がさらに短くなることが示された。

地下街の避難解析結果より、降雨量や避難開始水深の増加に従い、避難成功率は減少することが示された。とりわけ、避難開始水深が 0.2m を超えると、避難成功率は急激に減少した。また、接続ビルを避難場所として考慮することで、地上への出口のみを避難場所とした場合と比較して、避難者をより多くの避難先に分散させることができるため、避難成功率が向上すると考えられる。

なお、本研究では、地下街の出入口に浸水対策を行わない場合での検討を行った。しかし、実際には地下街やビルの管理者による止水板の設置等の対策が考えられる。今後は、降雨条件に応じた最適な止水板の設置箇所や順番を考慮した検討を行う予定である。また、降雨量が増加した場合の地下街の浸水リスクが示されたが、それらの氾濫水は地下駅へと流れていくため、地下駅のホーム等から避難する場合の検討も行う予定である。

参考文献

- 1) 森兼政行, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 大規模地下空間を有する都市域における地下空間への内水氾濫水の流入特性とその対策, 水工学論文集, 第 55 巻, I_967-I_972, 2011.
- 2) 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.
- 3) 関根正人: 複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水過程と避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.907-912, 2010.
- 4) 関根正人, 大野龍馬: 複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水時避難行動解析と避難誘導, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.961-966, 2011.
- 5) 川中龍児, 吉川雅志, 石垣泰輔: 大規模地下空間における浸水時の避難成功率に関する検討, 土木学会論文集 F2 (地下空間研究), Vol.70, No.1, I_13-I_19, 2014.
- 6) 瀧澤重志, 高木尚哉, 谷口与史也: 浸水被害を想定した梅田地下街の垂直避難シミュレーション, 大阪市立大学都市防災研究プロジェクト, 都市防災研究論文集, 第 2 巻, pp.35-38, 2015.
- 7) 浅野統弘, 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一: 密集市街地における内水氾濫時の歩行避難および車両移動の危険度評価, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, I_1561-I_1566, 2013.
- 8) 黄碧蕊, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 極端気象下での地下街浸水時の安全避難について, 地下空間シンポジウム, 第 23 巻, pp.103-108, 2017.
- 9) 森兼政行, 井上知美, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一: 地下駅を考慮した大規模地下空間での浸水特性と浸水対応策の効果に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, I_1003-I_1008, 2012.
- 10) 大西良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 地下空間浸水時の避難困難度と利用者の水防意識について, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.559-564, 2007.
- 11) 大西良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.841-846, 2008.
- 12) 浅井良純, 石垣泰輔, 馬場康之, 戸田圭一: 高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に関する検討, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.859-864, 2009.
- 13) 戸田圭一, 井上和也, 大八木亮, 中井勉, 竹村典久: 複雑な地下空間の浸水実験, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.583-588, 2004.
- 14) 石垣泰輔, 戸田圭一, 馬場康之, 井上和也, 中川一: 実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.583-588, 2006.
- 15) 川中龍児, 石垣泰輔: 地下空間浸水時のアナウンスが安全避難成功率に及ぼす影響について, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, pp.163-168, 2012.

STUDY ON SAFE EVACUATION IN FLOODED LARGE UNDERGROUND MALL CONSIDERING SHORT-TIME TORRENTIAL RAIN

Yutaro NAKASAKA and Taisuke ISHIGAKI

In recent years, the frequency of localized and short-time heavy rainfall has increased because of climate change. In urban areas, underground spaces such as underground shopping malls have been used. For this reason, when pluvial flood occurs in urban areas with underground space, there is an inundation risk not only above the ground but also underground. In this study, pluvial flood analysis was performed by using the short-term torrential rainfall data, and the inundation risk of an underground mall was evaluated. In addition, the improvement of the evacuation success rate was examined by simulating the evacuation behavior when underground inundation occurred. The results of these analyses have shown that the inflow of flood water to underground increases with rainfall increasing and that the safe evacuation rate depends on the timing of evacuation, and evacuation into a connecting building is very important to improve the rate of safe evacuation.

レーザスキャン点群の 360°パノラマ化による 大阪地下空間における浸水予測の AR 可視化

安室 喜弘¹・廣瀬 詢²・檀 寛成³・窪田 諭¹・尾崎 平⁴・石垣 泰輔¹

¹正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3 番 35 号)

²非会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3 番 35 号)

³非会員 ⁴会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3 丁目 3 番 35 号)

E-mail: {yasumuro, dan, skubota, ozaki_t, ishigaki}@kansai-u.ac.jp

頻発する短時間集中豪雨により、都市部の地下空間では局所的な内水氾濫のリスクが増加している。降雨状況から予測される地下浸水被害の解析は進んでいるものの、地下空間の滞在者に対する浸水リスクの伝達手段は未解決である。本研究では、予測浸水深の分布に基づいて、地下空間での局所的な浸水リスクを AR (拡張現実) 表示する技術を提案する。計測効率を最適化したレーザスキャンを実施し、得られる高密度スキャン点群から 3 次元浸水シーンの全周パノラマ画像を直接生成して Web 配信することにより、端末での計算や通信の負荷を必要とせず、予測される浸水状況を 1 人称視点で表現できるだけでなく、周囲を見回して対話的に状況を確認することが可能となる。本稿では、本手法を大阪梅田の地下街にて適用した事例についてその有効性を報告する。

Key Words: underground inundation, panoramic image, laser scanning, augmented reality

1. はじめに

近年、局地的豪雨の頻度の高まりに伴い、非都市部での河川の氾濫だけでなく、都市部での内水氾濫による浸水被害が増加している。平成 30 年は台風 7 号などの影響により、西日本を中心として全国的に広い範囲で集中豪雨が発生し、内水氾濫や土砂災害など様々な水害を引き起こし 200 人超の死者が出るなど、気象変動が顕著となっている現在においても、豪雨による危険性が再認識されることになった。また、集中豪雨における時間当たりの降雨量も増加傾向にあるため、都市部でも下水道等の雨水排除能力を時間降雨が上回り、溢れた雨水が地上や地下に流出し、冠水するケースが散見される。水害への対策として、国や自治体による河川整備や治水施設の整備などハード面で様々な取り組みがなされているが、ソフト面での自助努力や共助努力も必要となっている。国土交通省は洪水時の浸水予測範囲を公表しており、各市町村では洪水ハザードマップの普及促進が図られている。しかし、このハザードマップは平面図上で予測浸水深が程度によって色分けされているのみであるため、実際に各地の現場で起こり得る浸水状況は容易に理解し難いことが多く、記載情報も複雑なものとならざるを得ない傾向がある。

地下空間での防災情報は、所有者や管理者による避難確保計画や浸水防止計画等の対策に委ねられるため、規模の大きな地下街であっても、地方自治体が作成するハザードマップとは区別して扱われている²⁾。地下空間では、ひとたび浸水が発生すれば、殊更迅速な対応が求められるため、浸水リスクの程度や進行の分布を伝達できる仕組みが必要である。

本研究では、地下空間内で予測される浸水の程度を、ユーザ視点で提示する手法の実現を目的とする。具体的には、既往の水害シミュレーションで予測される浸水深から、浸水面と物体との隠蔽関係を AR (Augmented Reality; 拡張現実) で速やかに表示し、モバイル端末で見回せるように提示することで、浸水対策や避難準備に資することを目指す。

2. 関連技術

(1) 地下空間の内水氾濫予測

尾崎らは短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水について、総降雨量 180mm で時間雨量 (降雨強度) を 60, 120, 180mm/hr と仮定した 3 種類の降雨モデルを用いて、地上の内水氾濫解析と地下街への浸水解析を

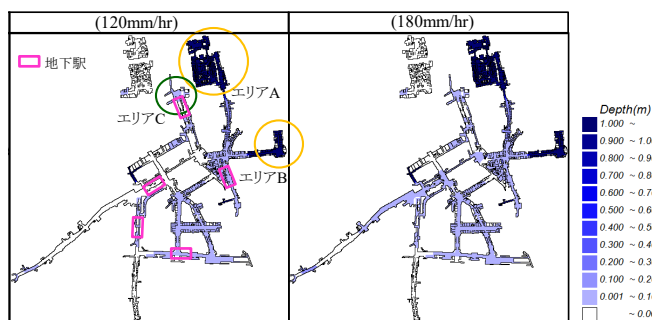


図-1 降雨終了後の地上時の浸水状況の例⁴⁾

行い、地下街の構造を考慮した浸水状況の時系列情報を2次元の地図に表示している³⁾。精度の高い浸水解析により、豪雨規模ごとの地下街への内水氾濫水の流入特性を明らかにし、都市の浸水に対する危険エリアとして、地下空間における浸水対策の計画策定に寄与している。また、地下鉄網を考慮した複合的な地下構造としての浸水解析も進められている⁴⁾。ただし、いずれも解析結果は、予測される浸水深を時間別で地図上に色分けした簡易表示であるため、施設管理者をはじめ、就労者や訪問者を含む地下空間の一般利用者にとって、発災時に適切な初期行動をとれるように、予測される浸水状況を分かり易く表示する手段が必要である。

(2) 地下空間における位置推定技術

閉塞的な地下空間において災害が発生すると、その進行の速さや、行動判断が空間内の場所によって異なることが多い。規範屋内や地下空間のようにGNSSの衛星信号が使えない場所でのロケーション技術については、各種方式が提案されている。ビーコンを用いた位置推定では、iBeaconのように複数のビーコンを用いたサービスがあり⁵⁾、その電波伝達によりビーコン端末と携帯端末の距離を識別し、ユーザの現在位置を推定する。iBeaconではBLE (Bluetooth Low Energy) の通信規格が確立されているBLE搭載の機器でないと使えないほか、ビーコン等の機器を新たに整備する必要がある。無線LANを用いた位置推定手法では、基地局の情報があれば、屋内や地下を問わず様々な場所で利用が可能になる⁶⁾。無線LANを用いた既存の推定手法には近接性方式、三転測量方式、環境分析方式などがあるが、事前に対象領域でFinger pint と呼ばれる電波強度のマップを作成する必要がある。

端末カメラで撮影される画像の特徴点を利用する方法ではPnP (Perspective-n-Point) 問題⁷⁾を解くことでカメラの撮影位置の情報を推定できる。これは、画像の2次元座標と被写体の3次元座標との対応から、カメラの位置・姿勢を求めるものである。一般的に、この手法では、画像に含まれる自然特徴点が多いほど得られる位置情報は頑健であるが、計算コストが多くなる。また、被写体

の3次元座標を参照できる情報を用意する必要がある。

画像中の自然特徴点ではなく、文字情報を使った撮影位置の推定方法も提案されている⁸⁾。ユーザの端末で撮影された画像に含まれる複数の文字列情報を抽出し、それらの見える方向を再現する立ち位置を算出することで、ユーザの撮影視点を推定する。この方法では、ビーコンやWi-Fiなどの機器整備を必要とせず、ユーザはサーバ側に写真を送信するだけで利用できることから、地下空間のような既存空間への適応が期待できる。また、災害時の利用を考えた時、電気が止まり停電した際にも、携帯端末のフラッシュを使うことで文字情報さえ取得できれば対応できる。ただし、対象空間で観測される文字列情報に対して、その3次元位置を割り当てて登録しておくという事前準備が必要である。

(3) 浸水情報の可視化技術

株式会社キャドセンターは、ハザードマップの内容を実写映像に合成表示できるアプリケーションを提供している⁹⁾。GNSSによりユーザの位置に合わせて各種ハザードマップの情報を視覚的に知ることができ、防災教育や日々の防災への備えとなることが期待される。しかし、実写に重ねて表示浸水情報は、奥行き感が無く、空間的な状況を理解し難い表現である。また、GNSSが機能しない地下空間では同様には利用できない。

筆者らは浸水情報を視覚的に分かり易く表現するため、水面と物体との隠蔽関係を考慮したARによる可視化手法の開発を進めてきた¹⁰⁾。端末カメラ画像の自然特徴点を使って実像と仮想像の精緻な位置合わせを行う方法では、端末への計算負荷のため実時間動作が難しい。そこで、地下空間内でのフロアや区画を特定できる粒度での位置情報であれば、前節で述べた屋内定位方式による位置情報が利用可能であり、浸水リスクの理解や避難行動に繋がると考えた。代表的な地点で周囲を見渡した360°パノラマ画像として、浸水予測リスクをAR表現しWebサーバから、端末が閲覧できるようにすることにより、この画像情報をユーザは軽微なオーバーヘッドで閲覧できる手法を提案している¹¹⁾。ただし、360°パノラマ画像

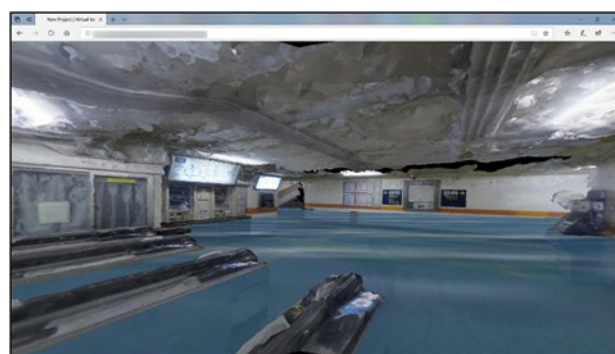


図-2 地下空間（駅構内）での予測浸水のAR表示⁷⁾

を生成するための現地での形状計測や写真撮影によるデータ収集にかかる労力や、3次元モデル作成の計算コストが課題として残されている。

3. 提案手法

(1) 概要

レーザスキャナの普及により、実物体を3次元計測した形状データは、デジタルツインとも呼ばれ、活用が広がっている。3次元データの取得操作は容易になったものの、網羅的かつ効率的なスキャンのノウハウや、点群データからCAD等の3Dモデル化の煩わしさがネックとなっている。

本研究では、3次元モデルを周到に用意する代わりに、レーザスキャンで得られるカラー3次元点群だけで環境をCG化することを考える。そのために、現地でのスキャンにおいて網羅的かつ点群密度を見積もった最適な計測計画を導入する。そして、既往の浸水解析の研究⁴⁾で予測された浸水深を反映させた仮想的な浸水CGで対象空間の360°パノラマを表示する。図-3に概略を示す。まず点群データ中に浸水面を設定し、ユーザ視点を決めて全方位レンダリング画像を生成する。この視点としては、地下空間の通路上で、歩行者の代表的な頭部位置を離散的に設定しておく。地下空間の現場で利用可能なロケーション技術により、最寄りの代表視点が選択されるものと想定する。同一の空間で地物を表現する点群と浸水面をレンダリングすることで、水面と地物との隠蔽関係が保たれ、浸水深が直感的に表現されることが期待できる。

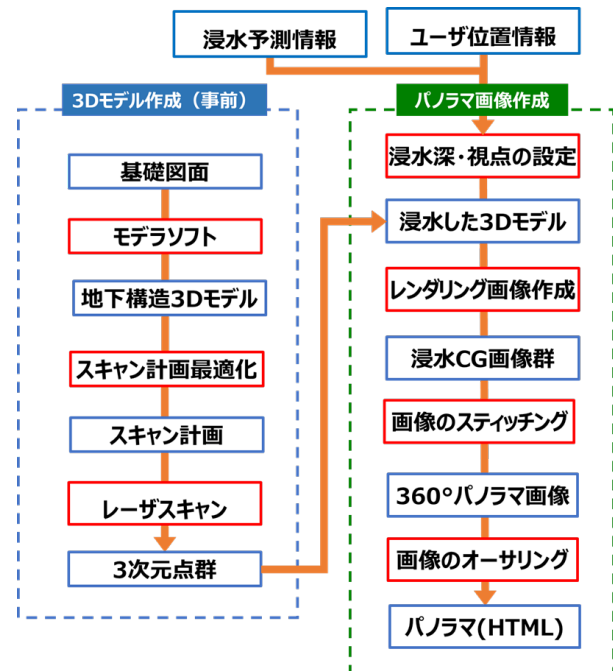


図-3 提案手法の手順構成

ここでは天球を分割してレンダリングした画像を繋ぎ合わせる処理により360°パノラマ化する。その後、生成したパノラマ画像を、HTML形式に変換する。HTMLファイルと各種データファイルをサーバにアップロードすることでPC端末や携帯端末でも閲覧が可能となり、浸水状況の可視化が実現できる。

(2) 数理計画法によるスキャン計画の最適化

事前にスキャナの効率的な計測計画を行う方法として、筆者らは、現場を簡易的に3次元ポリゴンメッシュ化した形状モデルを用いる方法を提案している¹²⁾。具体的には、簡易的な現場の3次元モデルでスキャナの設置場所と被写体との可視性をチェックしながら、数理計画法により最も効率よく計測できるレーザスキャナの設置回数と配置を求める。以下ではこの手法における数理計画問題としての定式化について概説する。ここで用いる数理計画問題は2つの0-1整数最適化問題で構成される。以下の記号を用い、(1)、(2)のように定式化される。

【添字と集合】

$i \in I$: スキャナ設置候補点とその集合

$j \in J$: 計測する物体表面を構成する三角形メッシュとその集合

【変数】

$x_i := \begin{cases} 0, & \text{候補点}i \text{ を設置点として採り入れない} \\ 1, & \text{候補点}i \text{ を設置点として採り入れる} \end{cases}$

【パラメータ】

$d_{ij} := \begin{cases} 0, & \text{三角形}j \text{ は候補点}i \text{ から計測不可能} \\ 1, & \text{三角形}j \text{ は候補点}i \text{ から計測可能} \end{cases}$

$a_{ij} := \begin{cases} 0, & d_{ij} = 0 \\ i \text{ から計測できる}j \text{ 上の点の数}, & d_{ij} = 1 \end{cases}$

r : 測定回数の上限

【問題1】

$$\text{minimize } \sum_{i \in I} x_i \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{i \in I} d_{ij} x_i \geq 1 (\forall j \in J)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad (\forall i \in I)$$

【問題2】

$$\text{maximize } \sum_{i \in I, j \in J} a_{ij} x_i \quad (2)$$

$$\text{subject to } \sum_{i \in I} d_{ij} x_i \geq 1 (\forall j \in J)$$

$$\sum_{i \in I} x_i \geq r,$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad (\forall i \in I)$$

ここで、問題1で対象を網羅するための最低計測回数を求め、問題2では与えられた計測回数で対象のスキャン

量を最大化する計測位置を求める．計測視点 i から対象表面 j について可視性の判定 d_{ij} とスキャン数 a_{ij} の値を計算するためには，計測対象および周辺の 3D 形状モデルを用意して，各計測候補地点から対象表面の可視性を調べる．先行文献では事前踏査により撮影した写真から写真測量ソフトなどにより 3D メッシュモデルを作成し，前述の可視性の判定 d_{ij} とスキャン数 a_{ij} の値を計算していたが，本稿の対象となる地下構造物では，図面が利用できるため，図面を基にモデリングソフトにて概形を起こして 3 次元モデルを用意できる．

(3) パノラマ作成のための 3 次元 CG レンダリング

本研究では，予測される浸水シーンを 3 次元空間で構成しているため，CG として任意の視点・画角でレンダリングが可能である．しかし，画角 360°の投影は特殊であるため，通常の CG 描画用 API が対応していないことから，本稿では，全地球を分割してレンダリングした複数の CG 画像を，画像の欠損や歪みなどがないように，パノラマ画像として繋げる方法を使う．

画像の照合が頑健に行える優れた自然特徴量が提案されて以来，画像を繋ぎ合わせるステッチング技術が急速に普及している．パノラマ画像の作成法は D. Gledhill¹³⁾ や M. Brown¹⁴⁾ により確立され，限定された画角で撮影された写真であっても，オーバーラップが確保されていれば，ステッチング処理により 360°の広角画像を生成することが可能である．

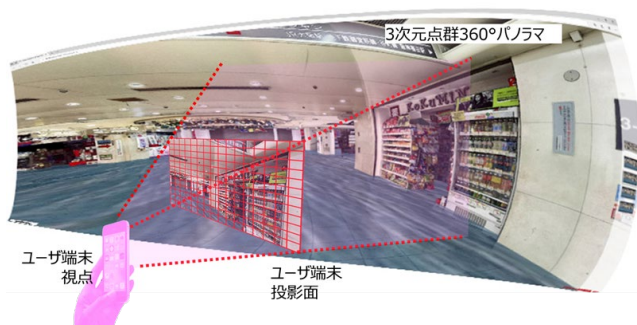


図-4 パノラマ画像とユーザー端末視野との関係

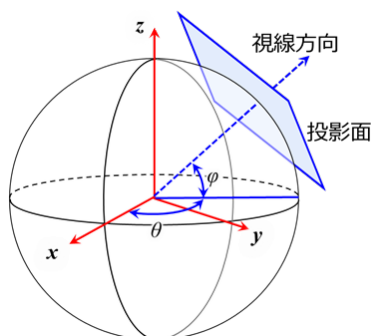


図-5 レンダリングのための視線方向

本研究では，図-4 に示すように，実環境を計測して得た 3 次元点群と浸水情報と融合し，CG により 360°画像として写實的にレンダリングし，ネットワークを介して配布することで，ユーザ端末の視線方向に応じて浸水深を観察できるように表示する．任意の視点で 3 次元点群を CG として描画するために，図-5 に示すように，カメラを原点とする極座標を使って視線の方向を指定する． x 軸方向からの傾きを θ ， x - y 平面からの傾きを φ とすることで，視線方向が一意に定まる．この視線方向をレンダリング画像の中心としてレンダリング画像を作成する．パノラマ画像の作成に必要な画像の重なりは，視線方向の間隔と画角の設定によって決定できる．

4. 実測と実装

大規模地下街である大阪市北区の Whity 梅田内（図-6）にて，プチシャン通りに対して本手法の適用を図った．対象区域は約 170m あまりの長さで，既往の浸水解析では Whity 梅田内でも早く浸水が始まると予測されている．レーザスキャナ Focus3D (FARO 製)での計測に先立って，スキャナ配置を最適化した計測を計画した．事前に図-7（上）に示す対象空間の平面図面から取得したフロアの外形に，SketchUp (Trimble 社)を使って天井の高さを付与する形で 3D モデルを作成した（図-7（下））．このモデルを MeshLab¹⁵⁾を用いて，約 4000 程度のメッシュに細分化し，床面の頂点 333 箇所をスキャナ設置候補とした（図-8 参照）．各候補位置から各メッシュの可視性の判断と，目的関数であるスキャン密度の最大化計算をソルバソフト IBM ILOG CPLEX (IBM) を用いて，図-9 に示す 15 か所を最適解として得た．尚，この最適解は，1000 から 5000 前後のメッシュ数のモデルとその床面の頂点をスキャナ設置候補とした複数の条件を試した結果である．図-9 に示すように，約 1cm 平方当たり 1 点以上



図-6 対象エリア（赤枠内の Whity 梅田プチシャン通り）
(<https://whity.osaka-chikagai.jp> を一部改編して引用)

のデータ密度が予測され、これは数m離れた携帯電話画面（HD 解像度）上で数ドット間隔に相当することから、十分な計測密度と判断し、この計画を採用した。また、スキャナ設置が 20 箇所を超えるような解は、現場での時間の制約から、採用しなかった。スキャナによる実測では、分解能 1/5、品質 4x とした設定で行い、得られた点群データはスキャナ付属のソフトウェア SCENE (FARO 社) により 1 つのデータに統合し、対象区域全体の点群データを取得した（図-10）。この点群に対して、浸水面を描画し視点を設定し、任意の地点からの全方位レンダリング画像を作成した。開発環境として Microsoft VisualStudio2010 を用い、浸水面描画とレンダリング画像作成には OpenGL と OpenCV を利用した。レンダリングする際に、オーバーラップを確保するため、カメラの水平画角を 80°, 画像のアスペクト比を 4:3 に設定した。これにより水平方向、垂直方向で約 30°ずつ、画像の約半分程度がオーバーラップする。図-11 に示すように、最終的に各地点毎に 25 枚のレンダリング画像を使用した。得られたレンダリング画像群をスティッチングソフトウェア PTGui Pro (New House Internet Services BV 社製)¹⁶を用いて図-12 のように繋ぎ合わせた。作成されたパノラマ画像は正距円筒図法で表現されており、この画像をオーサリングソフト Panotour Pro 2.5 (Kolor 社製)¹⁷により、HTML 形式に変換した。図-13 に示すように、このファイルを Web サーバにアップロードすることで、ウェブブラウザさえあれば 360°パノラマ画像の任意の方向を開

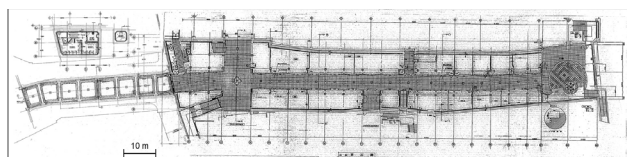


図-7 現地構造の図面（上）と作成した3次元モデル（下）

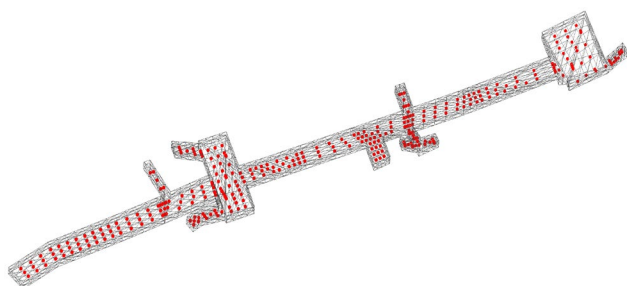


図-8 現地内壁形状メッシュとスキャン設置候補位置（赤点）

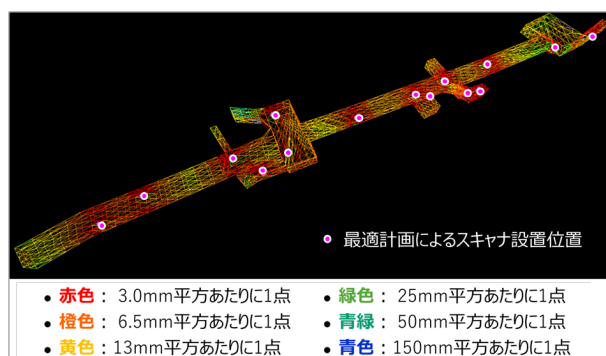


図-9 得られたスキャン計画と予測されるスキャン密度の分布



図-10 スキャン結果：全体（上）と矢印から見た内部（下）

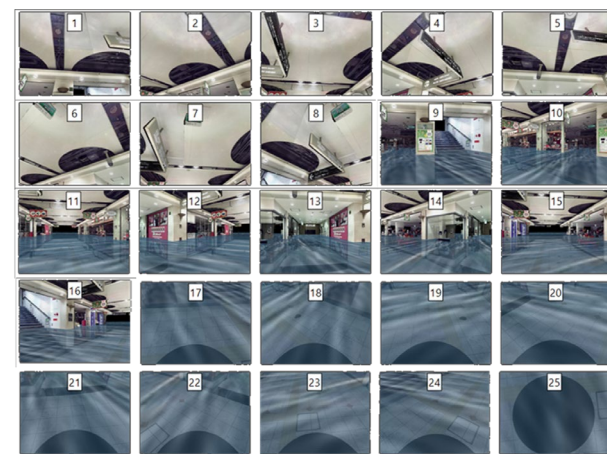


図-11 天球を 25 分割して点群をレンダリングした画像例

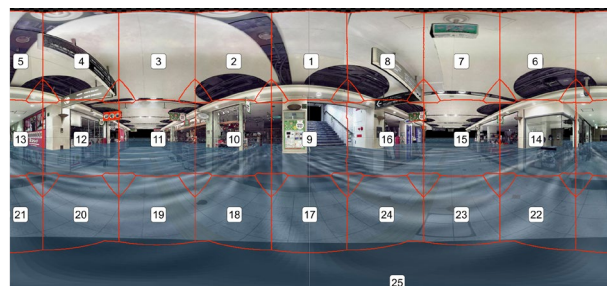


図-12 図-11 のレンダリング画像をスティッチングした例

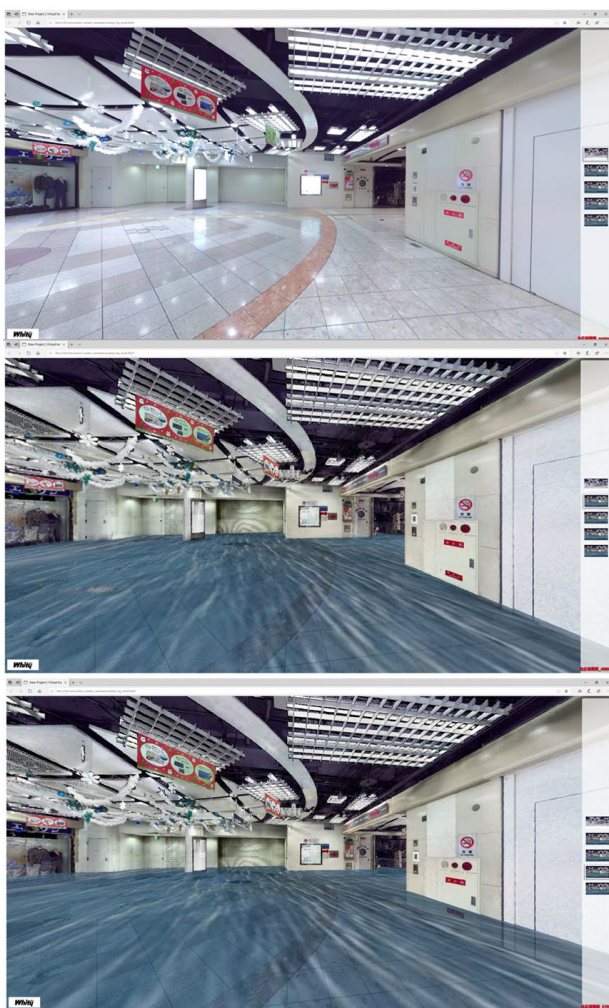


図-13 尾崎らの解析結果³⁾のパノラマ画像例（北の広場）：
降雨開始後0秒（上），4500秒（中），5100秒（下）



図-14 フロアマップと連動する画面：拡大図中のカメラアイコンをクリック（タップ）すると視点移動が可能である。

覧できる。この図では、平成20年8月末豪雨での岡崎市における降雨パターンを想定した結果を示している。携帯端末では、指先でのピンチ動作による拡大・縮小表

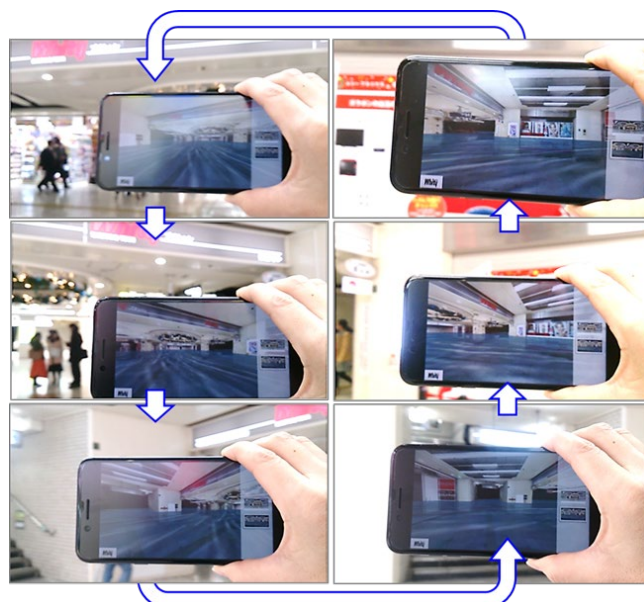


図-15 現地で端末で向きを変えながら表示した例

示や、図-14のように、フロアマップ上の16か所の代表地点をタップして視点を選択することも可能である。また、JavaScriptとFlashの機能により、携帯端末のジャイロセンサと同期させ、図-15のように、現地で端末をかざした方向に合わせて、遅延なくスムーズにパノラマを見渡すことができる。

5. 考察

本研究では、サーバ処理によって各視点について浸水リスクを示すパノラマ画像の作成しWebコンテンツとすることで、携帯端末クライアントからは軽微な処理で浸水予測情報を参照が可能であることを示した。事前に対象空間のレーザスキャン計画を最適化しておくことにより、均一に高密度のカラー3次元点群を取得することができるため、点群のままサンプリングしてCG化すればパノラマが生成でき、仮想的な水面との奥行関係も正確に表現されるため、浸水深による被害の程度が明確になることが分かった。実測時にスキャンデータが正確な実スケールを持っているため、画像測量のように対地評定の必要もない。浸水深もレンダリングする際に定量的に変更可能であり、雨量と場所によって変化する予測浸水深に合わせて適切に表現することができる。

浸水の表現としては、水や漂流物の動きが重要となる動的なシーンの表現や、AR表示を有効に活用した避難誘導表示などが、今後の課題である。また、現場が賑やかな地下街であることから、店舗と来訪者とのコミュニケーションやストリートビューのようなナビゲーションのツールとしての普段の活用手段と、非常時の情報共有手段とを共存させる取り組みの検討も必要である。

6. おわりに

本研究では、3次元レーザスキャンにより得られるカラー点群データを直接利用することにより、予測される浸水状況をパノラマ画像により写實的に可視化する技術を提案し、スキャン作業の効率化と直結させた運用方法を示した。携帯端末クライアントからは、Webコンテンツとして画像にアクセスだけで、パノラマのAR表現で各場所での浸水状況を確認することが可能となった。既往研究で解析された浸水情報を一般に還元する方法の一助になるものと考えられる。

今後は、大規模地下街を対象として、既往の位置推定技術と本システムと連携させ、ユーザの現在位置に合わせた水害リスク情報を動的に表示するWebアプリケーションの実装を予定している。

謝辞

本研究の実施に際し、現場での計測に多大なご協力をいただいた大阪地下街株式会社に謝意を表する。

参考文献

- 1) 気象庁: 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html>, (2020/06/30 参照)
- 2) 朝日向猛ほか: 地下街等における避難確保・浸水防止対策の取り組み, 国土技術研究センター JICE report (33), pp. 2-9, 2018.
- 3) 尾崎 平ほか: 短期間集中豪雨の伴う内水氾濫による地下街浸水特製の考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, pp. I.1417-I.1422, 2014.
- 4) 寺田 光宏ほか: 密集市街地における内水氾濫時の地下鉄浸水に関する検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No. 4, pp. I.1357-I.1362, 2016.
- 5) 岩見泰周ほか: 複数 iBeacon を利用した位置精度向上の検討, 情報科学技術フォーラム講演論文集 14(4), pp.309-310, 2015.
- 6) 藤田迪 ほか: 地下鉄構内の制約条件を利用した無線 LAN 位置推定手法, 情報報告(UBI)66, pp.153-157, 2008.
- 7) Richard Hartley and Andrew Zisserman : *Multiple View Geometry in Computer Vision (2 ed.)*, Cambridge University Press, New York, SA, 2003.
- 8) 安室喜弘 ほか: 文字認識と SFM による携帯端末ユーザの自己位置推定, 2017 年度土木情報学シンポジウム講演集, vol.42, pp.243-244, 2017.
- 9) 株式会社キャドセンター: AR ハザードスコープ, <<http://www.gsi.go.jp/common/000096315.pdf>>, (2020/06/30 参照)
- 10) 廣瀬 詢ほか: レーザスキャンデータを用いたマーカレス AR による地下空間浸水予測の可視化, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.73, No.2, pp. I.365-I.371, 2017.
- 11) 廣瀬 詢ほか: 360° パノラマ画像を用いた地下空間浸水予測の携帯端末での可視化, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 74, No.2, pp. I.153-I.158, 2018.
- 12) 北田 祐平 ほか: SFM と MVS に基づいた現場のモデル化によるレーザスキャン計画の最適化とその運用, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.71, No.2, pp. I.169-I.175, 2015.
- 13) Duke Gledhill, Gui Y. Tian, Dave Taylor, David Clarke: Panoramic Imaging a Review, *Computers & Graphics*, Vol. 27, Issue 3, pp.435-445, 2003.
- 14) Matthew Brown and David G. Lowe : Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 74, Issue 1, pp. 59-73.
- 15) Meshlab: <<http://www.meshlab.net/>>, (2020/06/30 参照)
- 16) 2006 PTGui Pro : <<https://www.ptgui.com/>> (2020/06/30 参照)
- 17) Panotour: Kolor, <<http://www.kolor.com/panoyour>> (2020/06/30 参照)

AR VISUALIZATION OF UNDERGROUND SPACE INUNDATION PREDICTION USING 360° PANORAMIC IMAGES WITH SCANNED POINT CLOUD

Yoshihiro YASUMURO, Hiroshige DAN, Satoshi KUBOTA, Taira OZAKI, and Taisuke ISHIGAKI

Recently, due to the inundation damages in urban areas caused by frequent torrential rainfalls in the short-time, the risk of flooding in the underground malls in urban areas is also increasing. Analysis of groundwater flooding damage predicted from the rainfall situation has been progressing. However, communicating the expected risk of inundation to the general public in the target underground space is unresolved. This paper proposes a method to display the predicted depth of flooding with graphical 3D CG (Computer Graphics). Distribution of 3D data and rendering of CG increase the load on calculation and communication at the terminal, so the server generates an all-around panoramic image matched with the user's position and distributes it as HTML (Hyper-Text Markup Language) for regular web access in the proposed method. This method makes it easier to understand the predicted inundation situation. It can be expressed from the first-person perspective, and it is possible to check the status interactively by looking around the surroundings. This paper shows our method's effectivity by experimental implementation at an actual railway station facility in underground and inundation simulation results based on assumed heavy rainfalls of past data in Osaka city.

洪水を対象とした名古屋駅前地下街の 浸水解析と避難に関わる検討

武田 誠¹・鷺山 陸²・佐藤大介³・村瀬将隆⁴

¹正会員 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)
E-mail: mtakeda@isc.chubu.ac.jp

²正会員 静岡県 (〒420-8601 静岡県静岡市葵区追手町 9 番 6 号)

³学生会員 中部大学大学院建設工学専攻 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

⁴正会員 株式会社パスコ (〒153-0043 東京都目黒区東山 1-1-2 東山ビル 5F)

本研究では、庄内川の洪水破堤による名古屋の浸水を対象とし、地上と階段、地下街の氾濫水の流動を表現する解析モデルを構築した。このモデルを用い、破堤箇所の違いによる地上の浸水の様子と、名古屋駅周辺の階段および地下街の浸水の様子を示し、地下街の避難対策について考察した。本研究により、庄内川左岸の JR 盛土上流部の破堤による浸水が、名古屋駅前の地下街の地下浸水にとって大きな被害を生じさせることを改めて示した。また、避難困難度指標を用いて地下街の避難について検討し、地下街よりも階段が先に避難困難になることを示した。さらに、浸水前の避難完了が非常に重要であることを示し、避難対策の在り方を考察した。

Key Words: *underground spaces, flood, dike break, inundation, Nagoya, numerical simulation*

1. はじめに

近年、日本では豪雨による洪水災害が頻繁に発生している。特に、平成 30 年 7 月豪雨および令和元年台風 19 号による豪雨では多くの河川において決壊・越水が発生し、周辺住民は甚大な被害を被った。これらの災害が大都市で発生した場合、甚大な被害をもたらすことは容易に予想される。特に大都市にある地下街は浸水に対して非常に脆弱である。したがって、地下街を対象とした、大規模浸水と避難に関する研究は重要と考える。

地下空間の浸水と避難に関しては、石垣、尾崎、戸田ら¹⁾、川中、石垣ら²⁾、関根ら^{3),4)}の研究がある。それぞれ大阪、東京を対象に浸水と避難に関する数値解析モデルを構築し、地下街などの地下空間の浸水の様子と避難シミュレーションまたは避難困難度指標を用いて浸水時の避難対策を検討している。本研究では、庄内川が破堤した場合の地上の浸水の様子および地下の浸水の様子を明らかにし、避難困難度指標を用いて避難対策に関する考察を行う。

これまで、著者らは、名古屋を対象に、庄内川の洪水破堤に伴う地下空間（特に地下鉄）を含めた都市浸水の特性を検討してきた。ハザードマップの浸水情報と地下

空間の入口情報の比較から、洪水氾濫が生じた場合の地下浸水の危険性を示した⁵⁾。また、河口から 14km 地点左岸の JR 盛土より上流域で破堤が生じた場合、地下浸水が大きくなることを示した⁶⁾。さらに仮想的な浸水を対象に名古屋駅前地下街の詳細な解析モデルを構築した⁷⁾。名古屋駅前地下街を対象とした解析では、現実的な浸水を対象にした計算および避難に関する考察が課題として残っていた。避難対策における重要な情報は、決壊から浸水までの時間、浸水する入り口の順番、階段を利用できなくなるまでの時間ならびに地下街の浸水の様子である。本研究では名古屋駅前を対象に庄内川が破堤した場合の、地上の浸水解析および駅前東側地下街の浸水の数値解析を実施し、上記の情報を示すことを目的とする。

2. 数値計算の概要

2.1 数値解析モデル

本研究では 2 ステップの計算を行う。

ステップ 1⁸⁾：洪水流を 1 次元不定流モデル、地表面の氾濫流をデカルト座標の平面 2 次元不定流モデルで解析し、互いを越流公式で接続する。また、地下街および地下鉄駅を一つのボックスとしてとらえ、水の連続式を

用い、さらに地下鉄線を伝う流れはスロットモデルを用いた1次元不定流モデルで解析した。

ステップ2⁷：ステップ1の計算の地下街の入口の水理情報を出力し、その情報を受けて、名古屋駅前地下街の詳細な計算を行う。階段の流れは1次元不定流モデルで、地下街の流れはデカルト座標の平面2次元不定流モデルで解析した。満水を考慮するため仮想的に天井の面積の1/10が開いているとするスロットモデルを導入した。

2.2 計算領域と計算条件

ステップ1では庄内川の想定破堤氾濫を対象とし、地上を50m格子で表現し、地盤高は5mメッシュ標高値を平均して設定した。ステップ2では名古屋駅の東側の地下街を計算対象とし、形状の表現と計算負荷を考慮して3.2m格子を用いた。地下空間の床高は地表面の最低地盤高から3m低いところに位置し、水平であると仮定した。また、蹴上高0.25m、踏み面0.5mの階段とした。図-1に地上における計算領域を、図-2と図-3に庄内川と名古屋駅の位置関係および地下街における計算領域と入口番号を示す。本研究では、庄内川の計画高水流量4,400m³/sをピークに持つ図-4の流量ハイドログラフを河川の上流端に与え、下流は大潮の満潮時を考慮した潮汐変動を与えた。庄内川の左岸堤防（河口から14kmから17kmまで1km毎）がピーク時（19時）に100mの幅で破堤する（堤防天端高が地盤高に置き換わる）とした。

2.3 単位幅比力を用いた避難困難度指標

地下街の解析にあたり、避難困難度指標として式(1)の単位幅比力(M)を用いた。

$$M = \frac{u^2 h}{g} + \frac{h^2}{2} \quad (1)$$

ここで、 u ：流速(m/s)、 h ：水深(m)、 g ：重力加速度(m/s²)である。なお、浅井ら⁸⁾によれば、安全に避難できる目安は、高齢女性が0.08m³/m、成人女性および高齢男性が0.1m³/m、成人男性が0.125m³/mである。同様に、避難が困難となる目安は、高齢女性が0.16m³/m、成人女性および高齢男性が0.2m³/m、成人男性が0.25m³/mである。

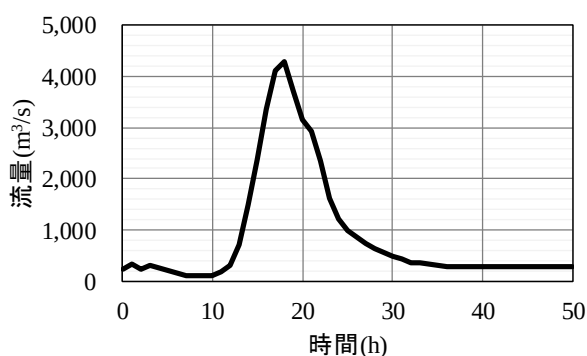


図-4 流量ハイドログラフ

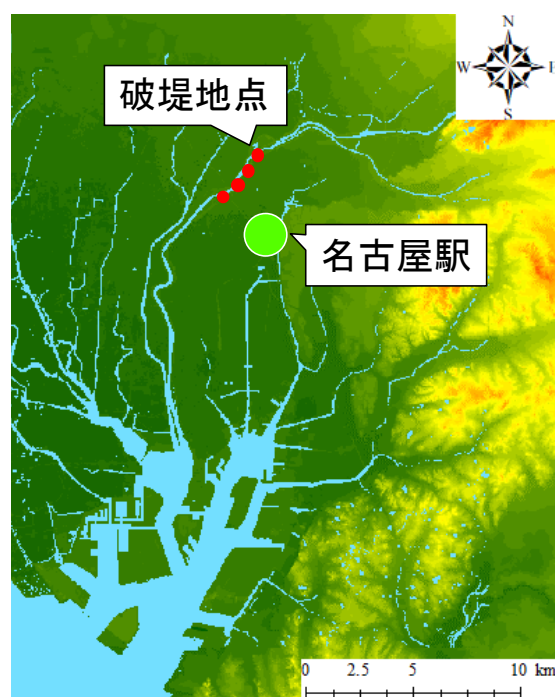


図-1 計算領域（ステップ1）



図-2 地上における計算領域の一部

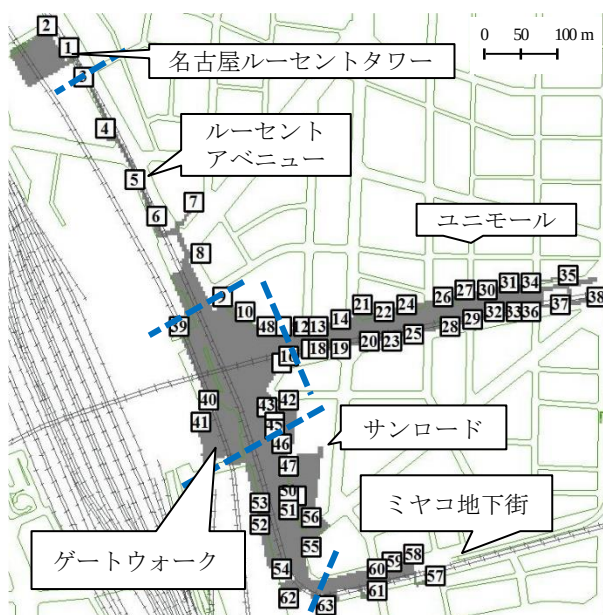


図-3 地下街の計算領域と入口番号（ステップ2）

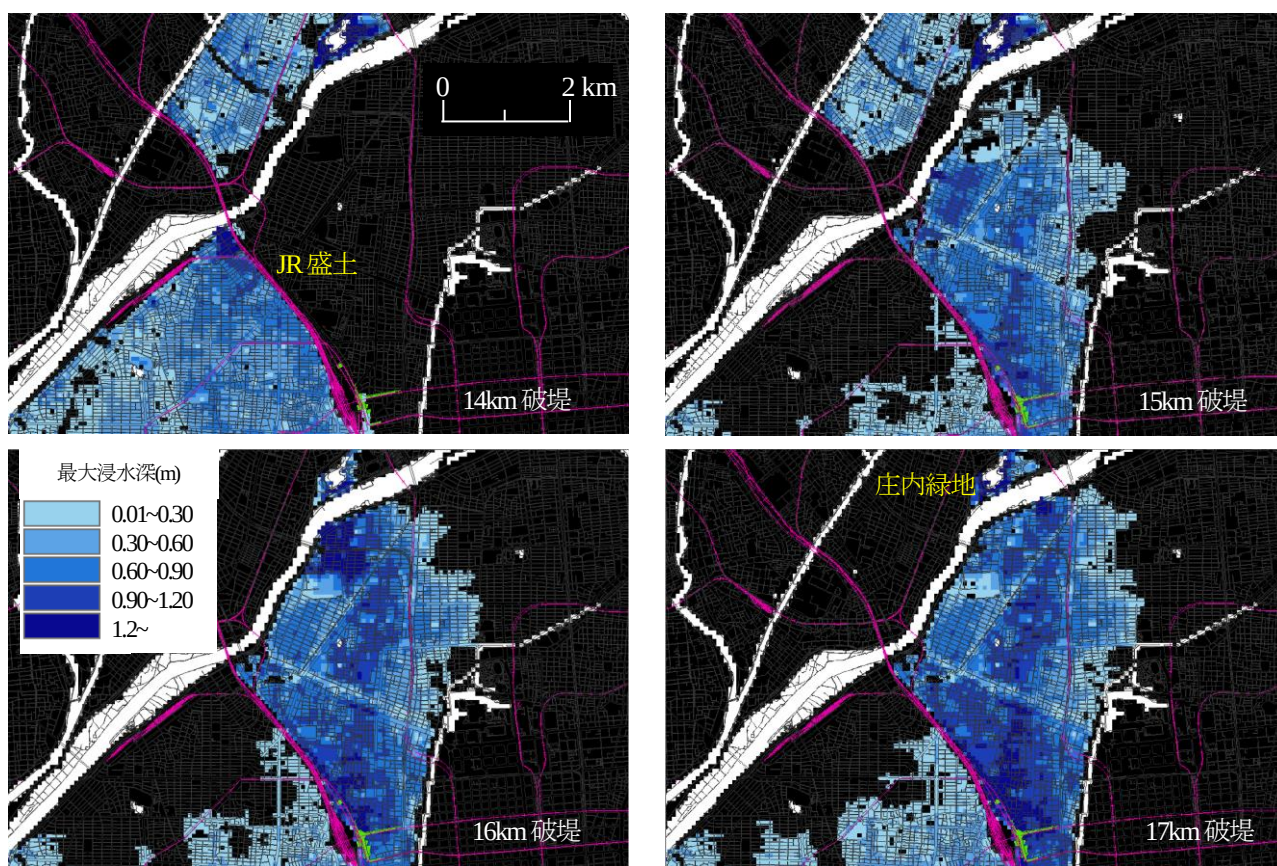


図-5 最大浸水深の分布

3. 計算結果および考察

図-5 に最大浸水深の分布を示す。14km 破堤では、破堤箇所が JR 盛土の下流に位置することから、15km～17km 破堤の場合と大きく異なる結果が得られている。14km 破堤の場合、名古屋駅前地下街（図中の緑色の箇所）にも浸水は広がっているが、その浸水深は小さい。14km 破堤と 15km 破堤の場合、庄内川右岸側にも浸水が広がっている。これは庄内緑地からの越水により浸水が広がっていた。16km 破堤および 17km 破堤では、流量がピークとなる 19 時に庄内緑地の近くで破堤が生じるので、その影響により庄内川の水位が低下し、右岸側の氾濫が生じなかったと考えられる。50m 格子では庄内緑地の堤防高が十分に表現できていないことも考えられるので、再度検証したい。また、16km 破堤による最大浸水深の分布の名古屋駅前の様子を図-6 に示す。本図から、1.2m を超える浸水深が生じる場所（周囲と比べて地盤高の低い場所）に地下街の入口が存在することが分かる。したがって、庄内川破堤による大規模な浸水が生じる場合、地下空間への流入が生じることが予想される。

図-7 に階段部分の浸水計算の様子を示す。定量的な妥当性評価は十分では無いが、本図に示すように、階段で適切に水理計算が行われていると考える。また、この計算から各階段ステップにおける比力を求めることがで

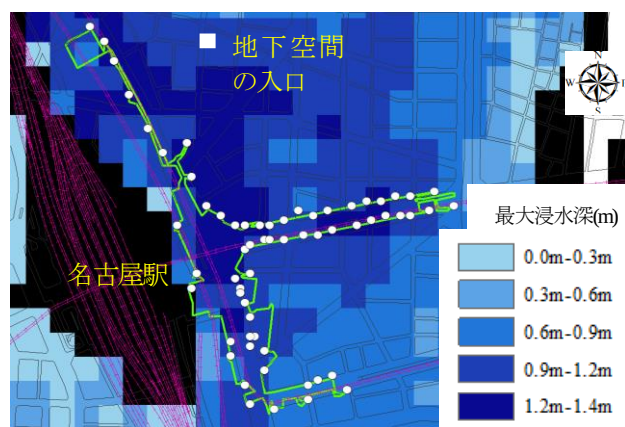


図-6 16km 破堤による名古屋駅前の最大浸水深

きる。表-1 に、地下街の入口の浸水開始時間と、高齢女性の避難困難時間を示す。なお、この浸水開始時間はいずれかの入口に浸水が発生した時間である。避難困難(最短)はいずれかの入口における単位幅比力が高齢女性避難困難指数に達した時間であり、すなわち、この時間に達した場合、高齢女性は、該当する階段を用いて避難することが困難となる。避難困難(全階段)は全ての階段において、単位幅比力が高齢女性避難困難指数に達した時間である。要するに、高齢女性は地下街の外に避難することが困難になる。本研究では、避難困難の目安として高齢女性避難困難指数を用いた。表-1 より、14km の

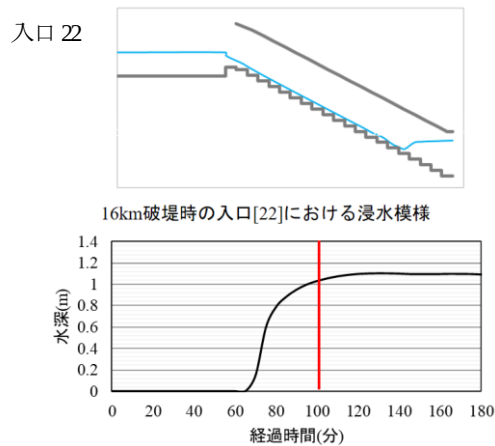
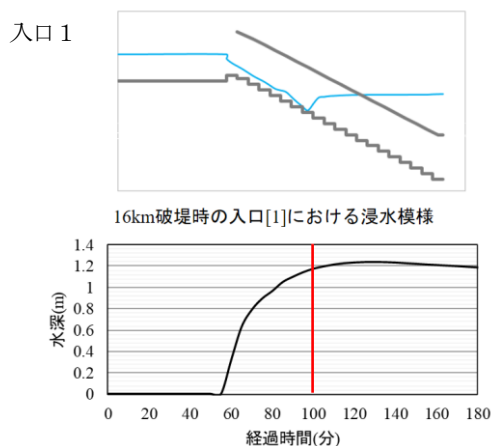


図-7 階段の浸水の様子と階段上部の地面における水深の時間変化

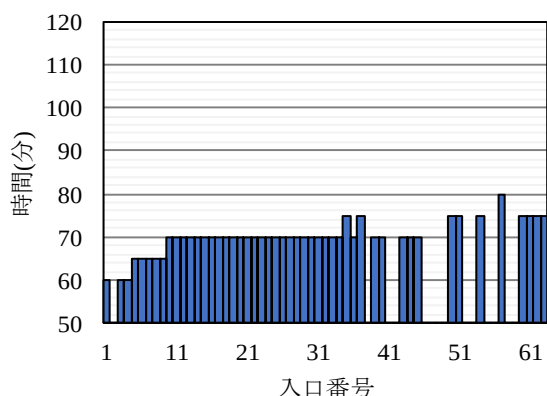


図-8 16km破堤の場合の入口の浸水開始時間

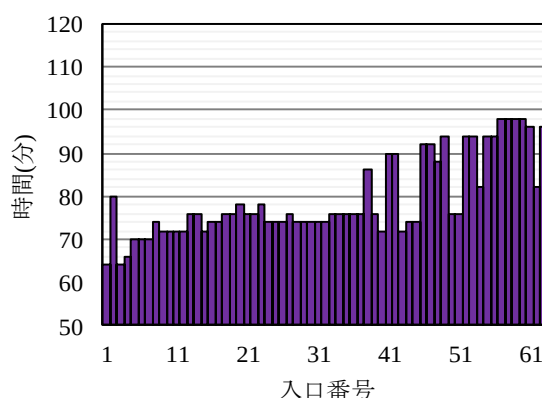


図-9 16km破堤の場合の入口の高齢者が避難困難になるまでの時間

表-1 破堤から各項目までの時間

破堤箇所	浸水開始時間	避難困難(最短)	避難困難(全階段)
14km	90分	無し	無し
15km	55分	60分	100分
16km	60分	64分	98分
17km	60分	68分	102分

破堤箇所以外においては、値はほぼ変わらなかった。また、表-1より、浸水開始から全ての入口が高齢女性避難困難指数に達するまでの時間は15km地点で45分、16km地点で38分、17km地点で42分であった。これは、破堤箇所が16kmのとき、浸水と同時に避難を開始した場合、38分後には、高齢女性は階段を用いての避難することが困難になることを示す。また、破堤から浸水までの時間が最も短い破堤点は15km地点であった。しかし、最も早く高齢女性が避難困難になる破堤点は16km地点である。図-8に破堤箇所を河口から16km地点に設定した場合の各入口における破堤から浸水開始までの時間、図-9に各入口における破堤から高齢女性が階段を用いて避難不能になるまでの時間を示す。これらの図から、60分から70分の間に、多くの入口において浸水が発生するといえる。また、高齢女性が避難できる入口は70分から80分の間に著しく減少する。なお、図-8で地上の浸水が生じていないのに、図-9で避難困難となっている入口があるが、これは、入口の地下街につながっている階段部で浸水深が大きくなり、避難困難と判別されたためである。図-10に、15km～17km破堤による階段の地上部における浸水の有無と地下街の浸水深の分布

の時間変化を、図-11に16km破堤による地下街の流速分布の時間変化を示す。浸水の様子は、時間や流入する水量において変化はあるが、本計算条件の場合、破堤箇所が異なっても概ね同様の浸水の様子であった。この点は、降雨の状況により流入する入口が異なる内水氾濫との違いともいえる。地下街の浸水過程に関して、まず、地下街北側に位置するルーセントアベニュー(地下通路)ならびに名古屋ルーセントタワーから浸水し、次いでユニモールに浸水する。その後、サンロードに浸水し、最後にミヤコ地下街に浸水が生じていた。また、図-11から、入口付近や狭い箇所から広い箇所への接続部で流速が大きくなることも示された。さらに、浸水の進行に伴い、速い流速箇所は遠方へ移動していることも示された。こ

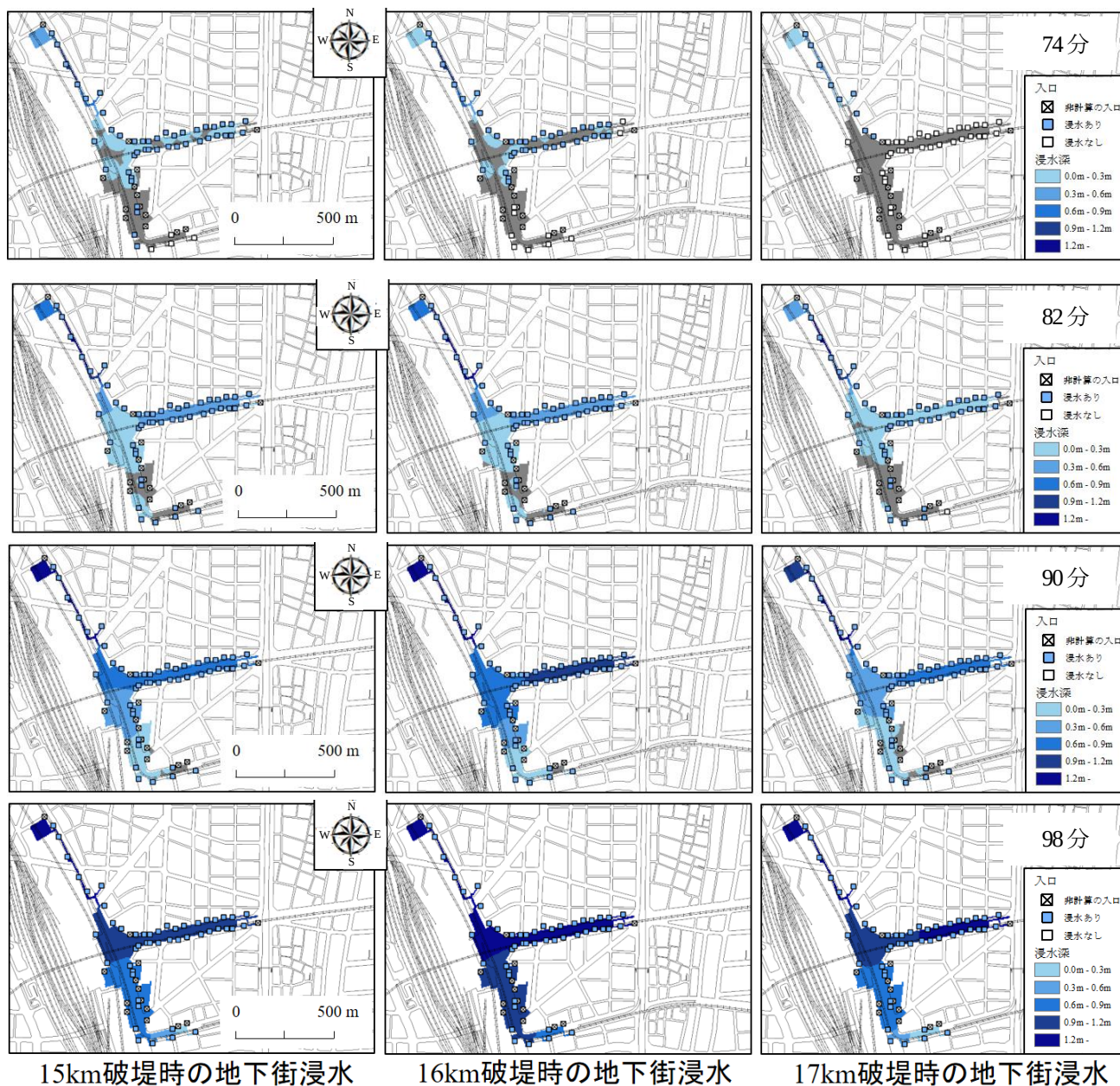


図-10 破堤箇所の違いによる地下の浸水深の様子

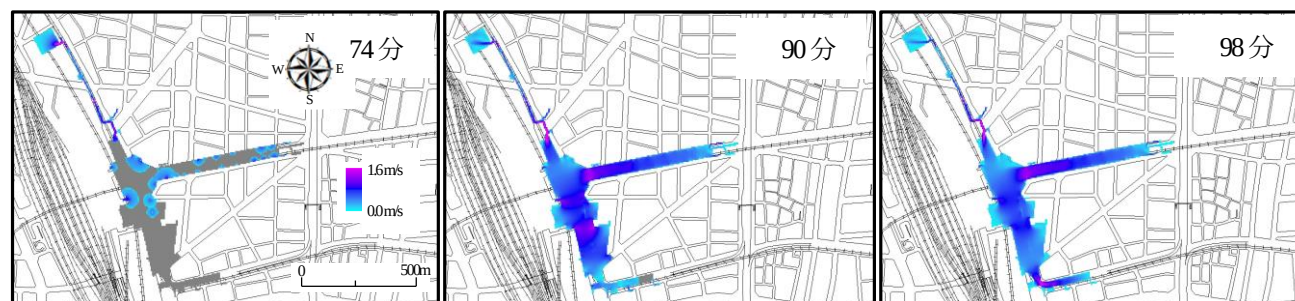
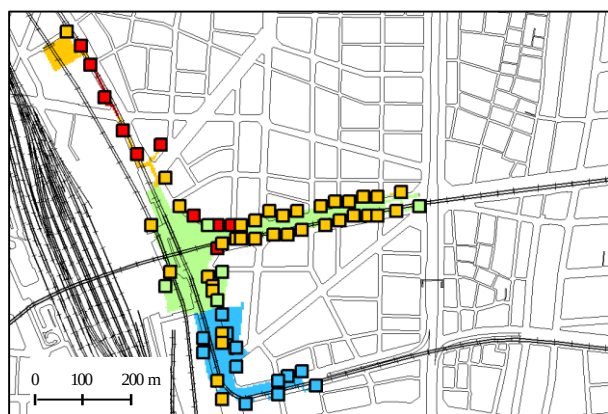


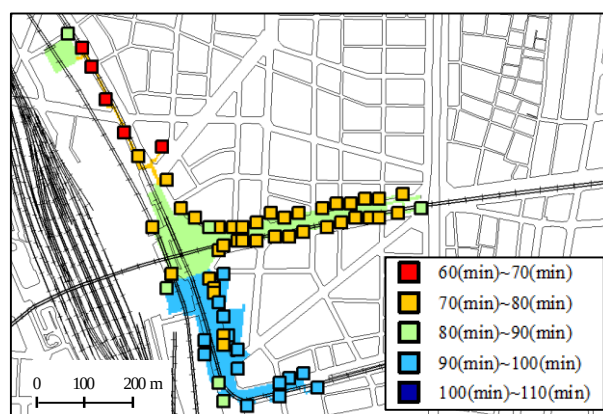
図-11 破堤箇所の違いによる地下の流速の様子(16km破堤の場合)

これらのことから、浸水が生じてからの避難を余儀なくされた場合、ミヤコ地下街方面へ利用者を誘導させることが得策である。しかし、利用者全員をミヤコ地下街方面に避難させると、人の密度が高くなり、避難速度が著し

く低下する恐れがあるため、その途中にある階段を使用し、利用者を適切に分散させることが重要である。これらの検討のためにも、川中・石垣ら²⁾や関根ら⁴⁾のような避難シミュレーションに関する研究は重要である。



高齢女性避難困難になる時間



成人男性避難困難になる時間

図-12 避難困難になる時間（16km破堤の場合）

図-12に庄内川河口から16km地点を破堤させた場合の地下街における高齢女性、成人男性の避難困難になる時間を示す。本図から、避難困難度に関しては、高齢女性、成人男性で大きな差はないといえ、階段部分で避難困難になる時間が早いことと、氾濫水が流入するエリアが早く避難困難になることが分かる。なお、本研究の場合、地下街の床面が平坦として取り扱っていることを注意する必要がある。

4. おわりに

本研究では、庄内川の破堤を考慮した地上と名古屋駅前地下街の浸水解析を実施し、その水理を考察した。さらに、避難困難度指標を用いて、避難対策についても考察した。浸水に関わる時間やそれによる避難状況は対象とする外力条件や計算の設定条件によって異なるが、本計算条件の場合、破堤から60分程度で地下街の入口が浸水し、高齢者が避難困難となるのは概ね5分後となること、さらに、地下街北側に位置する箇所から浸水が生じるなどの浸水の様子が明らかとなった。

浸水時の避難行動は多数の人が同時に行う。岡本ら⁹⁾が指摘しているように、人が密な状況では流水の疎通が悪くなり、体による堰上げが生じて作用する力が大きくなることも考えられる。したがって、浸水が無い状況下で避難が終了することが非常に重要と考える。

洪水破堤に伴う大規模浸水における地下街の避難を適切に実施するためには、まず、地下街に居る人が避難するまでの時間（避難時間）を求めることが大事である。対象となる地下街に影響を与える破堤箇所を求めて、そこから地下街までの氾濫の時間（氾濫時間）を求め、地下街の浸水の様子を明らかにすることで非常時の対策を検討することができる。そして、避難時間を考慮した破堤箇所の水位予測を行うことで、越流破堤や浸透破堤の観点からの避難情報を発信し、活用することが重要と考

える。現在は、危機管理型水位計も多く設置されることから、地下街避難対策の観点から、重要な河川箇所を設定しその水位情報を蓄積することで、効率的な避難対策が実装できると考える。

参考文献

- 1) 例えば、井上知美、川中龍児、石垣泰輔、尾崎平、戸田圭一：内水氾濫による大規模地下街の浸水過程と避難の安全性に関する検討、水工学論文集、第55巻、pp.973-978, 2011.
- 2) 川中龍児、吉川雅志、石垣泰輔：大規模地下空間における浸水時の避難成功率向上に関する検討、土木学会論文集 F2（地下空間研究）、Vol.70, No.1, 13-19, 2014.
- 3) 関根正人、小林香野：荒川決壊を想定した東京東部低平地を対象とした浸水・氾濫の数値予測、土木学会 B1（水工学）、Vol.73, No.4, I_1453-I_1458, 2017.
- 4) 関根正人、大野龍馬：複雑な構造をもつ地下鉄駅構内の浸水時避難行動解析と避難誘導、水工学論文集、Vol.55, pp.961-966, 2011.
- 5) 村瀬将隆、野澤智己、佐藤大介、武田 誠：洪水浸水想定区域図を用いた地下空間の浸水被害に関する基礎的検討、地下空間シンポジウム論文・報告集、第25巻、C2-6, pp.220-225, 土木学会、2020.
- 6) 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.
- 7) 武田 誠、久野智弘、中村正司、松尾直規：名古屋駅前地下街の入口調査と地下空間の浸水解析、地下空間シンポジウム論文・報告集、第21巻、pp.161-166, 2016.
- 8) 浅井良純、石垣泰輔、馬場康之、戸田圭一：高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に関する検討、水工学論文集、第53巻、pp.859-864, 2009.
- 9) 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、pp.196-201, 地下空間シンポジウム論文・報告集、第25巻、土木学会、2020.

STUDY ON INUNDATION ANALYSIS AND EVACUATION OF UNDERGROUND SPACE OF NAGOYA STATION DUE TO DIKE BREAK IN FLOOD

Makoto TAKEDA, Riku WASHIYAMA, Daisuke SATO and Masataka MURASE

In this study, the analysis model for the water behavior in land, stairs, and underground spaces due to the dike break in flood was developed. The study region was the underground shopping mall near Nagoya station. From analysis results, the features of the temporal change and the spreading of the inundation water depth in land, stairs and underground spaces were shown obviously by each dike break point. Moreover, the evacuation situation was examined by using the evacuation difficulty index. As the results, it was shown that the stair became more difficult to evacuate than the underground shopping mall. Furthermore, it was shown that the completion of evacuation before flooding was very important.

一般投稿論文

エレメント連続施工時の 2次元解析手法の検討

丸子 文之¹・大塚 隆人²・仲山 貴司³

¹ 正会員 JR 東日本 東北工事事務所 (〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町一丁目 3-1)
E-mail: f-maruko@jreast.co.jp

² 正会員 JR 東日本 東北工事事務所 (〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町一丁目 3-1)
E-mail: taka-ootsuka@jreast.co.jp

³ 正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8-38)
E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

線路下横断構造物を新設する場合に適用される非開削工法の一つである HEP&JES 工法は、通常、到達立坑側から 1 つのエレメントを PC 鋼より線を用いてけん引し、けん引設備を盛替えながら順次施工していく。これに対して、エレメントの施工速度を向上させ、工期短縮とコストダウンを図ることを目的に、刃口を連結するけん引設備を追加配置し、エレメントを連続的に施工する工法を開発した。本稿では、土槽実験と施工試験を通して検討した、エレメントを連続施工した際の地盤変形解析手法について報告する。

Key Words: *underpass, continuous construction of elements, Ground deformation analysis*

1. はじめに

(1) 背景と目的

踏切解消や河川改修などのため、線路下を横断する函体新設工事が数多く実施されており、この工事では、地上への影響を最小限にするため、分割した小断面のエレメントを掘進していく非開削工法が採用されている¹⁾。本研究では、その中の一つである HEP&JES 工法を対象として、エレメントの施工速度を向上させ、工期短縮とコストダウンを図ることができる施工法を開発した。

HEP&JES 工法とは、図-1 のように、力の伝達が可能な特殊な継手 (JES 継手) を有する鋼製エレメントを連続的に掘進、嵌合することで函体構造を構築する「JES 工法 (Jointed Element Structure method)」と、エレメント先端の刃口に定着した PC 鋼より線を到達側からけん引して、エレメントを土中に挿入する「HEP 工法 (High speed Element Pull method)」を組み合わせた工法である。

(2) 技術開発概要

通常、エレメントのけん引は到達側に設置したけん引設備を盛替えながら 1 本ずつ行うのに対して、本開発では、図-2 のように、刃口を連結するけん引設備を追加配置することで、刃口をずらした状態で複数本同時にけん

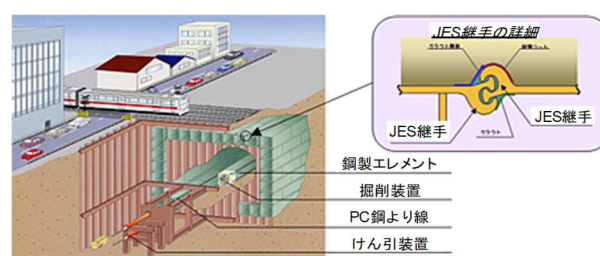


図-1 HEP&JES 工法の概念図²⁾

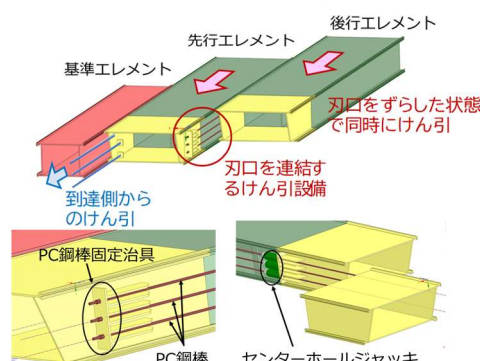
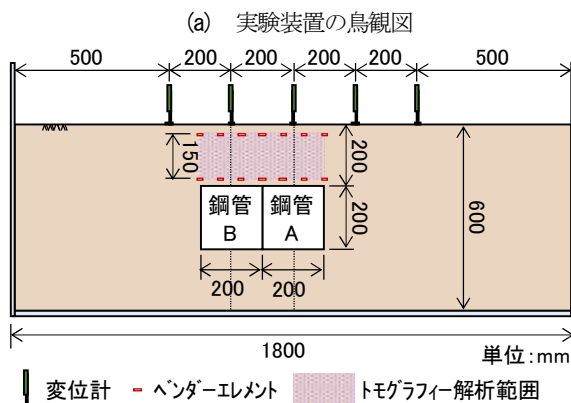
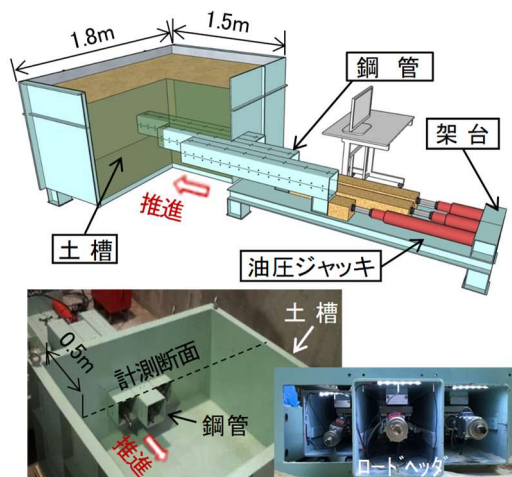


図-2 開発工法におけるけん引方法、刃口構造

ん引することを可能とした (以下、開発工法という.)。

開発工法の実用化にあたっては、刃口位置で通常のけん引方法と同等の地盤の安定性を確保することが重要であり、地表面の最終変位量の事前予測手法も求められる。そこで本研究では、土槽実験と実寸大の施工試験を通してこれらの検討を行った。



(b) 計測断面における計測器の配置

図-3 使用した実験装置

2. エレメントの掘進を模擬した土槽実験

(1) 実験方法

a) 使用した実験装置

従来、刃口位置での地盤の安定性や地表面の最終変位量を検証する場合、降下床実験や引戸実験³⁾が行われてきた。ただし、これらの方法では開発工法の複数本同時掘進の再現が難しいことから、本研究では、1/4 スケールの鋼管を実際に掘進する土槽実験を実施した。

実験装置を図-3(a)に示す。人力による掘進を模擬するため、刃口先端にロードヘッドを配置しており、これにより掘削したのち、油圧ジャッキで鋼管を推進する工程を繰り返すことで鋼管を土中に挿入した。

b) 模型地盤の挙動計測

降下床実験や引戸実験では、観察および移動床に作用する土圧を計測して地盤の安定性を評価するが、本実験では実際に掘削を行うため、同様の測定ができない。そこで、鋼管発進側の土槽壁面から 500mm 離れた位置に設けた計測断面において、図-3(b)のように、地表面変位を計測するとともに、地盤の複数のベンダーエレメント⁴⁾を土中に設置して弾性波トモグラフィーを実施した。

表-1 実験ケース

ケース	掘進パターン	一掘進長
Case1	先行鋼管 A を 850mm 掘進後、 後行鋼管 B を 550mm 掘進	0.5D
Case2	鋼管 2 本の刃口を揃えた状態で同 時に 550mm 掘進	
Case3	先行鋼管 A を 550mm 掘進後、 後行鋼管 B を 550mm 掘進	
Case4	鋼管 2 本の刃口を 1D ずらした 状態で 800mm 掘進	

D : 鋼管高さ

(2) 実験条件

a) 模型地盤の作成条件

実施工では、工法に関わらず経験的に 2m (約 2D, D : エレメント高さ) 以上の土被りを確保することが推奨されてきた⁵⁾。ただし、近年ではアプローチ部も含めた工事全体の最適化のため、更に小さい土被りが要望されることもあり、施工法の改良や地盤改良の追加などを検討している現状もある¹⁾。

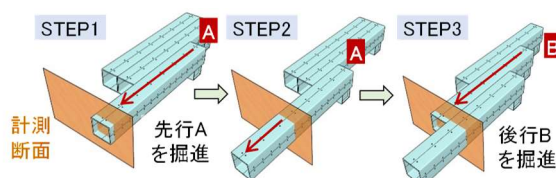
そこで、本実験では、後者の低土被りの原地盤を模した模型地盤を作成した。含水比 1% に調整した珪砂 7 号を使用し、掘進時の土被りが 200mm (1D) となるように相対密度 80% で締め固めた。地表面付近は軟弱である場合も多いことから、含水比はこれを再現できるように設定した値である。この条件下での変形係数 E_{50} と拘束圧 σ には $E_{50}=5500 \sigma^{1/2}$ (kN/m²) の関係が得られており、例えば、この関係式に土被り中心深さでの静止土圧状態を仮定した拘束圧を代入し、さらに、得られた変形係数を E_{50} と N 値の関係式 ($E_{50}=2000N$ (kN/m²)⁶⁾) に代入すると、 N 値は 2~3 相当になる。

b) 実験ケース

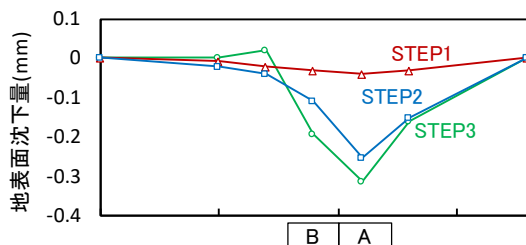
実験ケースを表-1 に示す。Case1~Case3 は、刃口位置での地盤の安定性を確保する観点から、開発工法で確保すべき刃口の離隔を把握するため実施したものである。比較対象として、まず、通常通り 1 本ずつ分割掘進する Case1、鋼管 2 本の刃口位置を揃えて同時掘進する Case2 を実施した。開発工法は、刃口の離隔次第で Case1 と Case2 の中間的な挙動を示すと想定し、計測断面直下で刃口を近づける Case3 を実施して、Case1 に近い挙動を示す刃口の離隔を確認した。

Case4 は、Case3 の結果を踏まえ、実際に刃口をずらして 2 本同時に掘進したものである。刃口位置での地盤の安定性を確保したうえで、地表面の最終変位量を把握することを目的とした。

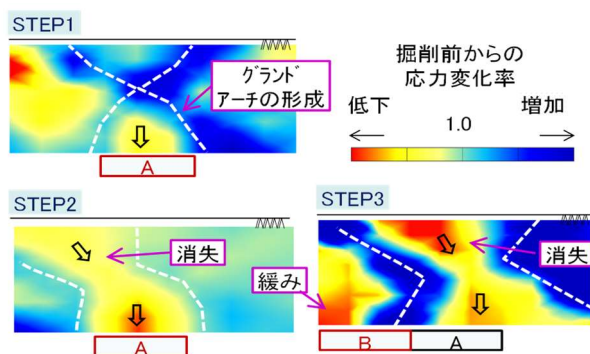
なお、1 掘進長は、掘進長と地表面陥没の関係を把握した既往の実験⁷⁾で、刃口直上での地表面沈下の増加傾向が顕著になりはじめる 0.5D とした。



(a) 掘進ステップ

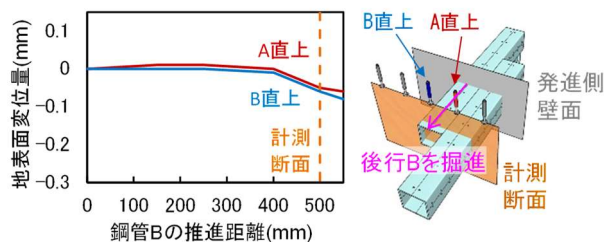


(b) 掘進ステップと横断方向の地表面変位分布

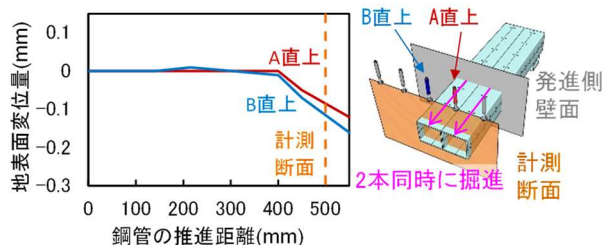


(c) 掘進ステップと土中応力の関係

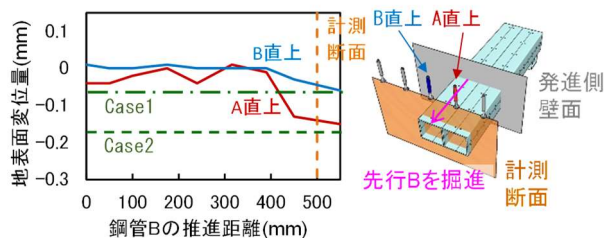
図-4 実験結果 (Case1)



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

図-5 推進距離と地表面変位量の関係

(3) 実験結果

a) 通常の分割掘進 (Case1) における地盤挙動

Case1の掘進ステップと横断方向の地表面変位分布の関係を図-4(a), (b)に示す。掘進が進むにつれて先行した鋼管A直上を最大として沈下していく傾向が見られ、特に鋼管AのSTEP2に大きな沈下が生じた。一方、図-4(c)には弾性波トモグラフィー結果から換算⁹⁾した土中の応力分布を示す。STEP1では土中にグラウンドアーチが形成されているが、STEP2に一部が消失し、STEP3では完全に消失した。

一般に、グラウンドアーチの高さは掘削断面から1～2D程度であり、これが形成されている状態のほうが地盤の安定性が高まり、地表面沈下が小さい⁹⁾。実験結果は、このグラウンドアーチの形成と地表面沈下との関係と一致しており、グラウンドアーチが刃口通過後に消失して沈下が進行していることから、前述したような無対策の厳しい低土被り条件を再現していることがわかる。

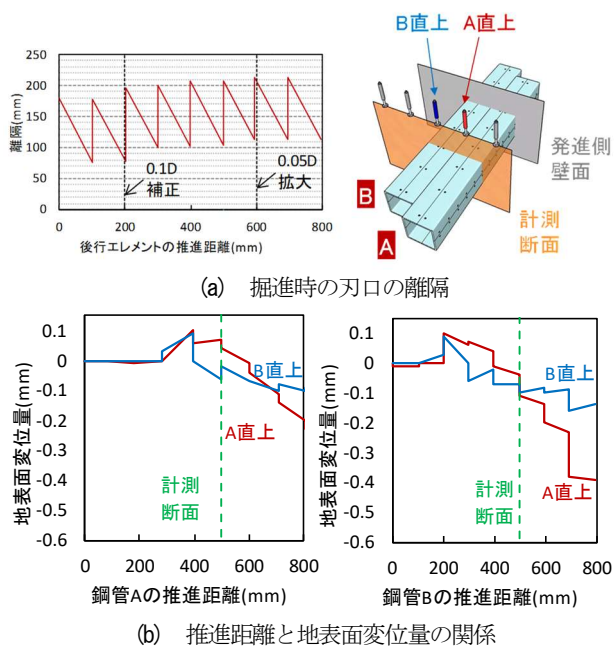
なお、他のケースにおいても同様の傾向が見られたことから、以降では刃口位置における周辺地盤の安定性を地表面沈下量を指標として相对比较することとした。

b) 同時掘進における刃口離隔の効果

Case1とCase2における鋼管の掘進距離と計測断面鋼管直上の地表面変位の関係を図-5(a), (b)に示す。なお、Case1はCase2, Case3との比較のため、鋼管Bの掘進開始時点を鋼管Aの沈下量の初期値とした。

両ケースとも、刃口が計測断面よりも200mm (0.5～1D)程度手前の位置から沈下を生じはじめ、刃口が計測断面を通過する時点の沈下量はCase2のほうが大きい結果となった。この先行沈下の傾向は切羽を開放して掘削する山岳工法と同様であり、切羽前方1Dから沈下は顕著になる傾向¹⁰⁾、トンネル断面が大きくなるに伴い周辺地盤への影響も大きくなる傾向が一致する。

図-5(c)は、刃口離隔の検証ケースであるCase3の後行した鋼管Bの掘進距離と計測断面鋼管直上の地表面変位の関係である。同図にはCase1, Case2において刃口が計測断面を通過した時点の沈下量も合わせて示した。鋼管Bの掘進距離が大きくなる(鋼管ABの刃口が近づく)につれて沈下が増加し、刃口位置が一致した最終状態では鋼管AB直上の沈下に偏りが生じた。後行した鋼管B



(a) 掘進時の刃口の離隔

(b) 推進距離と地表面変位量の関係

図-6 実験結果 (Case4)

は Case1 と同程度であるのに対し、先行した鋼管 A は Case2 と同程度になっており、この偏りが生じ始める鋼管 AB の刃口の離れは $0.5 \sim 1D$ の範囲であった。

c) 刃口離隔を設けた同時掘進における地表面変位の発生傾向

Case4 では、Case1～3 の結果から刃口離隔の閾値が $0.5 \sim 1D$ と想定されたため、 $1D$ 離れた状態で実際に掘進を行った。

図-6 に、刃口離隔の実績、鋼管の掘進距離と計測断面直上の地表面変位の関係を示す。両刃口が計測断面を通過する時点の地表面変位に着目すると、変動は 0.1mm 以内と 1 本ずつ掘進した Case1 に近い値となっていることがわかる。また、刃口が計測断面を通過した後に着目すると、Case1 と同様に後続沈下がみられた。ただし、特徴として Case1 (図-4(b)のステップ 3) と比べて先行した鋼管 A 直上の沈下量が大きく、鋼管 B 直上の沈下量が小さいという偏りが生じた。

以上の結果から、土槽実験では、開発工法において通常の分割掘削と同等の安定性を得るため、刃口を $1D$ 以上離すことが有効と考えられた。また、地表面の沈下量を事前予測するにあたっては、鋼管 A への偏りを捉えられる方法が必要と考えられた。

(4) 開発工法を対象とした掘削解析方法の検討

a) 従来のトンネルの掘削解析

トンネルでは、一般に掘削断面を 2 次元の平面ひずみ要素でモデル化し、掘削相当外力を作用させる解析手法が用いられている。この掘削相当外力は、掘削前の地盤内応力等に「応力解放率」を乗じて求められる¹⁾。

精緻にシミュレーションする場合には、断面形状を考

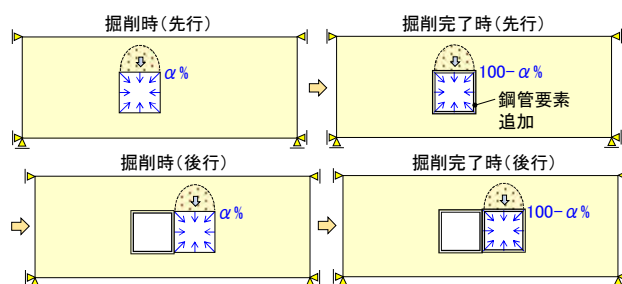


図-7 分割掘削する場合の一般的な解析手順 (2 エLEMENT の場合の例)

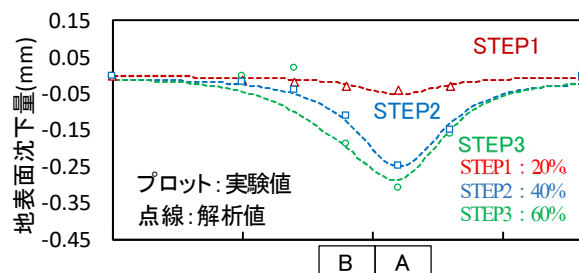
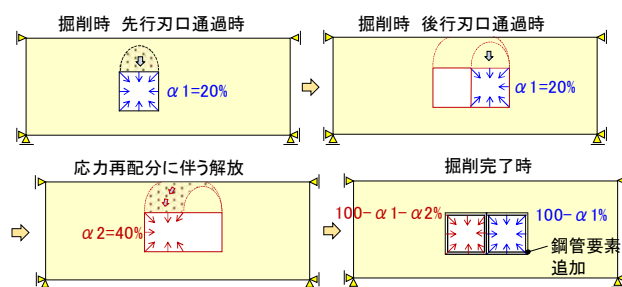
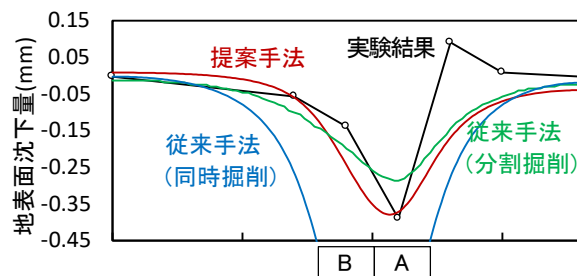


図-8 実験結果と掘削解析の比較 (Case1)
(ステップは図-4(a)と同様)



(a) 解析ステップ



(b) 解析結果 (地表面変位)

図-9 実験結果と掘削解析の比較 (Case4)

慮して断面内で異方性を持たせた応力解放率を与える方法¹²⁾や、変形係数に非線形性を与えること¹³⁾なども提案されているが、一般には、最終沈下量の最大値を捉える精度があれば十分な場合も多く、簡易に応力解放率を断面内一様で設定し、等価線形弾性係数が用いられる。

分割掘削の場合、通常は図-7 のように、掘削相当外力を作用させるステップと、鋼管要素を追加して残りの残留応力を作用させるステップを繰り返す方法が用いられ、応力解放率には通常 $30 \sim 40\%$ が多用される。

b) 開発工法を対象とした解析方法

まず、Case1 の結果を用いて、応力解放率のキャリブ

レーションを実施した。この結果、図-8 に示すように、鋼管 A、B ともに刃口通過時の応力解放率を 20%に設定し、後続沈下に対して付加的な解放を行うことで沈下分布を捉えることが可能であった。

次に、開発工法の Case4 は最終沈下が鋼管 A に偏る傾向を加味した解析方法を検討した(図-9)。具体的には、それぞれの刃口通過時の応力解放率には前述した値を用いるが、先行エレメントの刃口通過後に後行エレメント掘進時の影響があるものと仮定し、鋼管 AB の掘削面積を解放した状態で、鋼管 A 側に応力再配分に伴う付加的な解放を足し合わせることにした。最後に梁要素で鋼管 AB を挿入し、残りの応力を解放した。土槽実験とキャリブレーションした結果、鋼管 A 側にのみ 40%を付加することで実験の最大値を捉えられることができた。また、同図には、Case1 の方法で分割掘削した場合、刃口位置を一致させて同時掘進する場合について解析した結果も示した。この結果から、後続する沈下を考慮した場合にも分割掘削に近い沈下量となることがわかる。

これらの結果から、開発工法においても、鋼管 AB 間の応力解放率について、後行エレメント掘進時の影響を加味することで、従来のトンネル掘削解析法が利用できるものと考えられる。

3. 施工試験

(1) 試験概要

施工試験は、鋼材で模擬した基準エレメントをあらかじめ埋設したうえで、これをガイドにして 2 本分の幅(約 2.0m)がある広幅エレメントを 2 本同時にけん引した(図-10)。

掘進手順を図-11 に、試験条件を表-2 に示す。両刃口で同時に人力掘削したのち、先行エレメントをけん引(到達立坑のけん引設備を使用)し、次に後行エレメントのけん引(刃口内けん引設備を使用)を行う工程を 1 サイクルとした。これを繰り返すことで、発進・到達立坑間 24.6m のうち、先行エレメントは 20m、後行エレメントは 18m まで掘進した。

先行エレメントと後行エレメントの刃口の離隔は、前述した土槽実験より 1D 以上を確保することとし、まくら木の下に両方の刃口が同時に入らないことを考慮して約 2.0~4.0m とした。

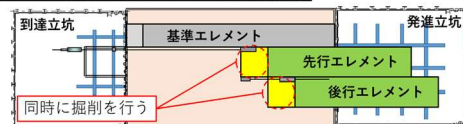
(2) 確認項目および計測方法

開発工法の施工精度や地表面への影響を確認するため、表-3 に示す確認項目に対して計測を実施した。本稿では、これらのうち、エレメント出来形および地表面変位の計測結果を報告する。



図-10 施工試験状況

① 先行・後行エレメントの同時掘削



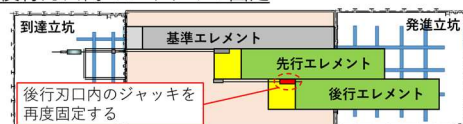
② 後行刃口内のジャッキの固定解除



③ 先行エレメントの掘進



④ 後行刃口内のジャッキの固定



⑤ 後行エレメントの掘進



図-11 掘進手順

表-2 試験条件

先行エレメント	断面	高さ0.85m 幅2.07m
	延長	延長20.0m
後行エレメント	断面	高さ0.85m 幅1.99m
	延長	延長18.0m
地盤条件	エレメント 上面	セメント改良埋戻し土：路盤を想定 (K ₃₀ 値：平均303MN/m ³)
	エレメント 下面	埋戻し土：緩い砂質土を想定 (K ₃₀ 値：平均77MN/m ³)
土被り		1.0m
掘進延長		1サイクル0.30m

表-3 確認項目および計測方法

項 目	計測項目	計測方法
エレメント 出来形	移動距離	ロータリーエンコーダ
	刃口姿勢	ローテティングレーザー 電子レベルメジャー
	敷設精度	測量
地表面変位	鉛直変位	地表面変位計測 (5点/断面×10断面=50測点)
けん引力	ジャッキ圧	圧力計
地盤強度	地盤反力係数	小型FWD試験機
サイクルタイム	掘削・けん引	
	エレメント接続	

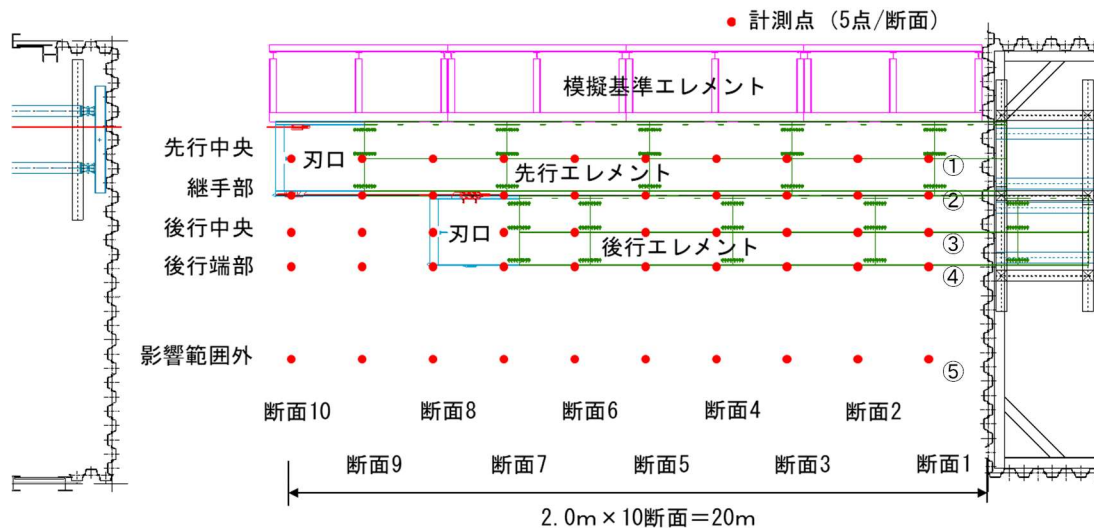


図-13 地表面変位計測位置図

a) エレメント出来形の計測

掘進中は、エレメントのけん引距離、到達立坑と刃口内部のジャッキのけん引力とともに、レーザー測量器を使用して刃口姿勢を計測した。また、掘進完了後には、レベル測量によりエレメント出来形を確認した。

b) 地表面変位の計測

地表面の鉛直変位を軌道スコープと地表面ターゲットを用いて1分間隔で計測した。図-12、図-13に示すように、計測断面を発進立坑から2.0m離れた位置を始点として2.0m間隔で10断面設け、各断面に測定点を5点設けた。



図-12 地表面変位計測状況

(3) 試験結果

a) エレメント出来形

図-14に、刃口およびエレメント出来形の計測結果を示す。横軸はけん引距離、縦軸は初めに刃口を水平に設置した時点からの変位量で、先行、後行エレメントともに、許容値(L/500, L:掘進延長)に十分に収まる精度であった。

b) 地表面変位

図-15に、掘進完了後の全測点の地表面鉛直変位量を示す。全体的に沈下傾向があり、先行、後行エレメント間の継手部の沈下が最も大きい結果となった。

図-16に刃口通過時の位置とエレメント出来形の差を表した略図を示す。この要因は、フリクション対策を実施しなかったため、エレメントけん引時に摩擦が生じた影響や裏込め注入を実施しなかった影響などが推測される。これらの沈下は2次元FEM解析で再現することは困難である。

図-17は、継手部直上における後行エレメント掘進完了後の各断面の沈下量と、刃口通過位置とエレメント出来形の差分(縦線)を重ね合わせたものである。掘削に

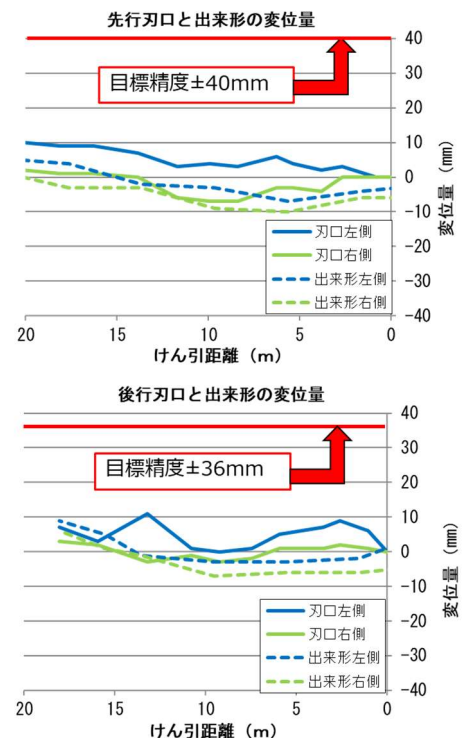


図-14 刃口・エレメント出来形の計測結果

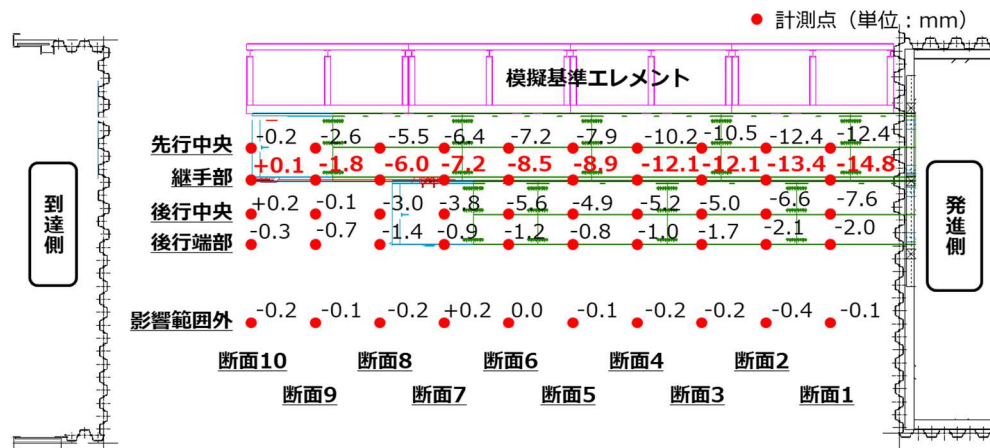


図-15 試験終了時点の地表面変位計測結果

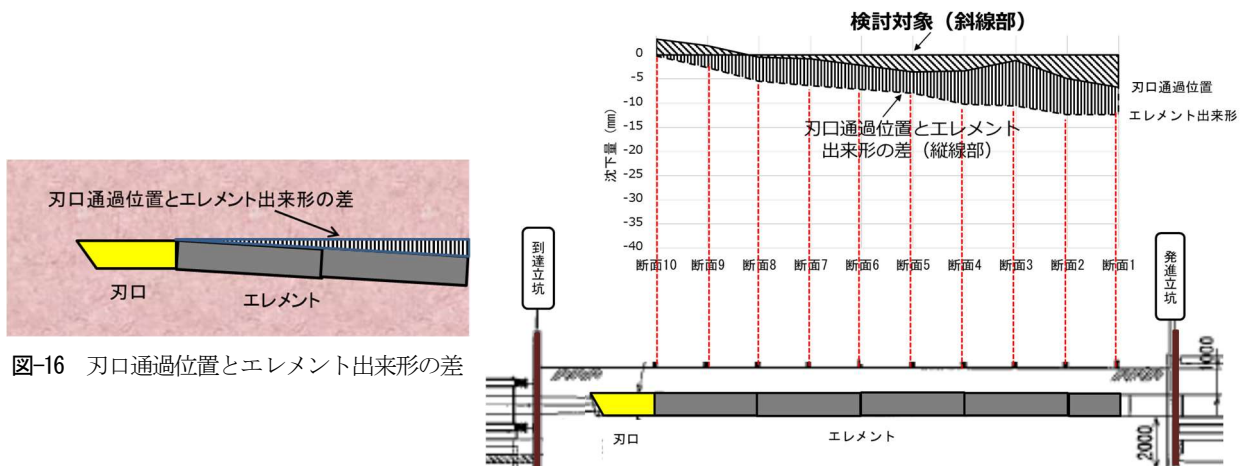


図-16 刃口通過位置とエレメント出来形の差

図-17 総沈下量と検討対象の沈下量の関係

伴う応力解放による沈下量は斜線部に近いと推測される。また、実際の施工ではフリクション対策や裏込め注入を実施するため、今回の解析手法を検討するにあたっては、斜線部分の沈下量を検討対象とした。

(4) 掘削解析手法の検証

図-18 に解析ステップ、表-4 に解析条件を示す。解析モデルは地盤を線形弾性要素、エレメントを梁要素とし、モデル化領域は深度方向をエレメント下から $2D$ (D :エレメント高さ)、モデル化幅をエレメント両端から $2W$ (W :エレメント幅) で設定した。地盤については、施工試験時に小型 FWD で計測した K_{30} 値の計測結果から、変形係数を設定し、それに近い砂質土を想定して単位体積重量とポアソン比を設定した。解析方法は、模擬エレメントが埋設された状態を STEP0 として初期化し、土槽実験で検討した方法を汎用ソフトに対応させて実施した。

施工試験の計測結果と解析結果を図-19 に示す。計測結果と比較すると、解析結果は、計測結果と同様に先行エレメント側の沈下量が大きくなる傾向を示し、最も沈下量の大きい断面①の計測結果も含めて、安全側に包含していることがわかる。

なお、提案する解析手法は、厳しい施工条件下を想定したものであり、実施工における検証も必要であること

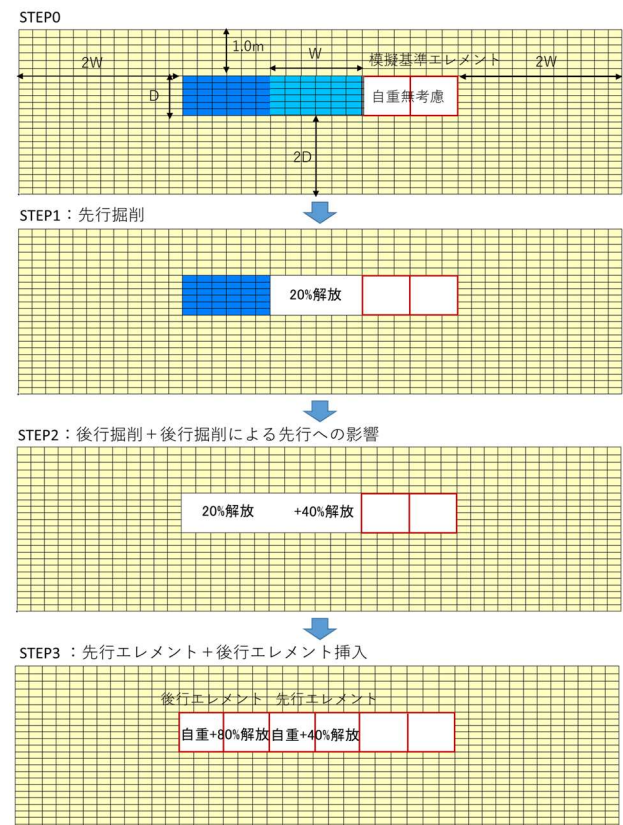


図-18 施工試験の解析ステップ

が課題として残されるが、開発工法の沈下量もトンネル掘削時に用いられる一般的な掘削解析手法を改良することで予測可能なことを確認できた。

4. まとめ

HEP&JES 工法の施工速度向上を目的として、刃口をずらした状態で複数本のエレメントを同時にけん引する工法を開発した。本研究では、前段で実施した土槽実験と施工試験を通して、地表面変位を予測する解析手法を検討し、この結果、以下の知見が得られた。

- ・エレメントの掘進を模擬した土槽実験から、先行、後行エレメントの刃口離隔が 1D 以上確保されれば、従来のけん引方法と同程度の地表面変位量となることが明らかになった。
- ・刃口位置をずらして掘進した場合、先行と後行エレメント掘進時の地表面変化を比較すると、先行エレメントが大きく沈下する傾向が確認され、後行エレメント掘進によるグラウンドアーチの消失が影響している。
- ・開発工法においても、従来のトンネルの解析手法を応用して、応力解放率の設定に後行エレメントの影響を加味することで、地表面変位量を予測する方法を構築し、土槽実験および施工試験でその妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：トンネル・ライブラリー31 特殊トンネル工法―道路や鉄道との立体交差トンネル、2019.
- 2) 東日本旅客鉄道株式会社：建設プロジェクトを支える新技術 HEP&JES 工法 (https://www.jreast.co.jp/newtech/tech04_main.html)
- 3) 小西真治, 朝倉俊弘, 田村武, 辻鉄也：粘性土層が介在する砂地盤の切羽安定評価について, 土木学会論文集, Vol.659, pp.51-62, 2000.
- 4) 公益社団法人地盤工学会：ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法 (JGS0544), 2011.
- 5) 日本国有鉄道 構造物設計事務所：線路下横断構造物の計画及び施工法の選定の手引き, pp.51-52, 1986.

表-4 施工試験の解析条件

地盤	変形係数 (MN/m ²)	15
	ポアソン比	0.33
	単位体積重量 (MN/m ³)	14.9
エレメント	変形係数 (MN/m ²)	200000
	ポアソン比	0.33
	単位体積重量 (kN/m ³)	77
	厚さ (mm)	16

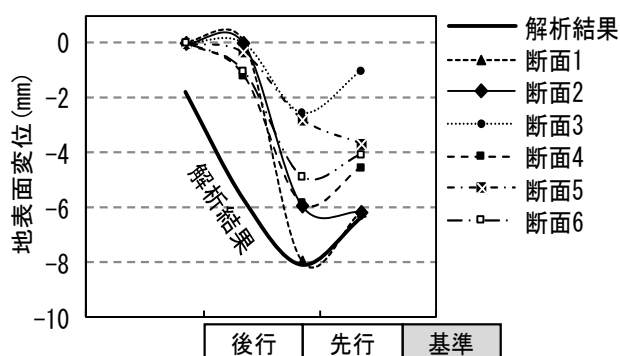


図-19 施工試験と解析の比較

- 6) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物），p.99, 2012.
- 7) 中島卓哉, 仲山貴司, 西岡英俊, 岡野法之, 板谷創平：トンネル掘削における角型鋼管試験機を用いた基礎的研究, 2018.
- 8) 福王翔, 桑野玲子：ベンダーエレメント法を用いた弾性波測定による模型地盤内応力の推定, 生産研究, Vol.64, No.4, 2012.
- 9) 公益社団法人土木学会：トンネル標準示方書「共通編」・同解説／「シールド工法編」・同解説（2016年制定），pp.52-53, 2016.
- 10) 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説, p.430, 2008.
- 11) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル, pp.159-160, 2008.
- 12) 西山和宣, 仲山貴司, 富樫陽太, 岡野法之：矩形断面掘削時の地表面変位応答の予測, 地下空間シンポジウム論文集, Vol.22, pp.151-154, 2017.
- 13) 土屋敬：NATM の設計プログラムの開発, 土木学会論文集, Vol.346/III-1（報告），1984.

TWO-DIMENTIONAL ANALYSIS METHOD FOR CONTINUOUS CONSTRUCTION OF ELEMENTS

Fumiyuki MARUKO, Takahito OOTSUKA and Takashi NAKAYAMA

HEP&JES method is one of the tunneling methods applied to construction of box culvert under railway track. In this method, pulling mechanical juck system is installed in arrival shaft, rectangular steel pipes with JES joints are inserted into ground for reduction of ground displacement and these pipes, connected using JES joint each other, are used as a tunnel lining. In this study, New pulling system is developed. It is possible to pull some steel pipes together because these digging faces of pipe are shifted. In this paper, we propose the ground deformation analysis method of HEP&JES method using this system.

レーザースキャナを用いたトンネル内空計測における計測時間短縮への取り組み

須佐見 朱加¹・京免 継彦²・宇野 洋志城³

¹正会員 佐藤工業株式会社 技術センター ICT 推進部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4 丁目 12-19)
E-mail: a.susami@satokogyo.co.jp

²正会員 佐藤工業株式会社 技術センター ICT 推進部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4 丁目 12-19)
E-mail: kyoumen@satokogyo.co.jp

³正会員 佐藤工業株式会社 技術センター 技術研究所 (〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山 14-10)
E-mail: Uno@satokogyo.co.jp

近年, 山岳トンネルでは出来形管理手法のひとつとしてレーザースキャナの活用が盛んである. 当社においてもレーザースキャナを用いた施工管理を行っているが, 器械据付～計測完了まで 20 分程度の時間を要するため, 掘削直後の坑内計測は安全上の観点から困難であった.

そこで, 本報では, 施工中のトンネル現場においてリアルタイム計測を試行したので, その結果について述べる. 試行技術では, レーザースキャナの水平を取る必要がなく, ターゲットの視準も不要であることから, 現行の計測方法に比べ計測時間を 1/4 に短縮可能であることを確認した. これにより, 非接触で掘削範囲全体の形状を取得できるだけでなく, 余掘りの把握や吹付けコンクリートの厚さ評価も可能であることから施工の効率化に寄与する技術であると期待できる.

Key Words: tunnel, lase scanner, point cloud, sprayed concrete thickness

1. はじめに

国土交通省は, 建設現場の生産性向上を目的とした取り組みとして「i-Construction」を推進しており, 山岳トンネル工事では, 作業の効率化と安全性向上を目的としてレーザースキャナ (以下, LS) の活用^{1,2)}が盛んである. これは LS がトンネルのように明るさが十分でない場所においても, 短時間で高精度かつ高密度な形状データを取得できるためである.

当社においても新幹線トンネル工事を中心に LS を導入しており, 計測点群を積極的に施工管理へ活用している. 計測点群を処理する際には, 自社開発のトンネル 3 次元出来形管理システム「出来形マイスター・トンネル PKG (以下, システム)」を使用し, 出来形評価等で良好な結果を得ている³⁾.

しかしながら, 現行の LS を用いた坑内計測は, 器械据付～基準点の視準～計測完了まで 20 分程度要するため, 掘削直後に計測を実施することは安全上の観点から困難であった. また, 計測データも一度事務所に持ち帰ってから処理を行う必要があるため, その場で確認を行うことができない.

国土交通省では, 「ICT 等を活用したトンネル (NATM) の出来形計測の効率化手法³⁾」として, レーザ計測等を活用したリアルタイム可視化技術の提案を求めている. このような背景から, 「計測の高速化とリアルタイムでの評価」を目指し, まずは「計測の高速化」に取り組むこととした. 新たな計測方法として, LS の水平設置と後方交会が不要な計測方法を試行することで計測時間の短縮を試みた結果, 従来の計測時間に比べ 1/4 に短縮でき, 掘削直後の計測が可能となった.

本報では, LS の新たな坑内計測方法を紹介するとともに, 従来は困難であった, ① アタリ判定, ② 吹付けコンクリートの厚さ評価の結果についても報告する.

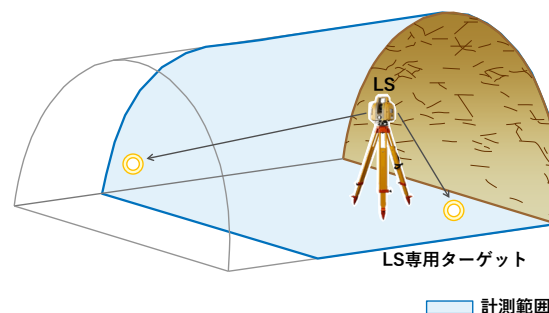


図-1 坑内計測の概略図 (現行)

2. LS を用いた坑内計測

(1) 現行の坑内計測方法と課題

図-1 に従来の LS 計測の概略図を示す。まず、LS をトンネルの中心付近に、LS 専用のターゲット（以下、ターゲット）を坑内基準点にそれぞれ設置する。計測は見通しがきく範囲のみ有効であるため、レーザー照射の障害となる資機材は事前に撤去を行う。その後、ターゲットを視準し、後方交会により器械設置位置を算出する。この作業は、計測した点群を座標変換したり、合成する際に必要となる。最後にトンネル壁面の形状を取得し、計測は完了となる。

表-1 は、現行の LS 計測の課題をまとめたものである。

LS は水平に据え付ける必要があり、職員の経験値によって据付時間にバラツキが生じる。また、使用する LS によっては、掘削時に使用するアンカープリズムを LS のターゲットとして利用可能なものもあるが、基本的には LS 計測専用に 2~3 点の基準点を新設する必要がある、手間が増える。計測時間については、計測密度との兼ね合いもあるが、一般的に詳細に計測（計測密度を小さく）するほど時間がかかる。そのため器械据付～計測終了までの時間を考慮すると、おのずと測定対象物が限られる。特に発破直後の素掘り状態だと浮石の落下等の危険性があることから、短時間で計測する必要がある、現行の計測では 20 分程度かかるため計測を実施することは困難である。

以上のことから、現行の計測方法では、計測の作業性や安全性において解決すべき課題が残っている。

(2) 新たな坑内計測方法

新たな計測方法（以下、リアルタイム計測）では、表-2 に示す Leica 社製の LS (P40) と Fieldworks を使用する。

計測の概略は図-1 と同じであるが、ターゲットが 3 個必要となる。Fieldworks では、3 個のターゲット位置とそれらの測量成果との相関関係により、現場の座標系への変換パラメータを算出するので、LS を正確に水平設置する必要はない。ターゲットを含んで計測を行うことでターゲット形状を自動認識し、その中心座標を自動で算出する。それに事前測量しておいたターゲットの中心座標 (X, Y, Z) を付与することで、現場の座標系に自動変換し、点群を出力する。ただし、ターゲットを自動認識するには、ターゲット上での点群密度が縦・横ともに 15 点以上必要であることから、4.5 インチのターゲットを使用する場合は、LS 設置位置から 10m 以内に、6 インチのそれを使用する場合には 20m 以内に設置する。

また、計測の際、LS と PC を専用ケーブルで接続することでリアルタイムに計測点群を確認できるだけでなく、計測データを直接 PC に保存することができる。

3. 実施工現場でのリアルタイム計測

(1) 計測概要

今回、施工中の新幹線トンネル現場にてリアルタイム計測の試行をした。LS は切羽から 5m 程度離れたトンネルの中心付近に設置し、4.5 インチのターゲットを使用した（図-2）。ターゲットの背面にはプリズムをつけており、基準点計測の際にターゲットを取り外し、プリズムに取りかえる必要はない。なお、計測は、① 掘削完了後、② 吹付けコンクリート施工後の 2 回、計測密度 6mm@10m で実施した。

表-1 現行の LS 計測の課題

項目	課題
器械据付	水平に据え付ける必要があり、職員によって作業時間にバラツキが生じる。
ターゲット	LS 計測専用の基準点を新設する必要があり、手間が増える。
計測時間	時間的制約により測定対象が限られる。

表-2 P40 の性能

項目	仕様
計測スピード	最大 1,000,000 点/秒
計測範囲	水平 360°/鉛直 270°
距離精度	1.2mm+10ppm
測角精度	水平 8"/鉛直 8"
座標精度	3mm@50m, 6mm@100m

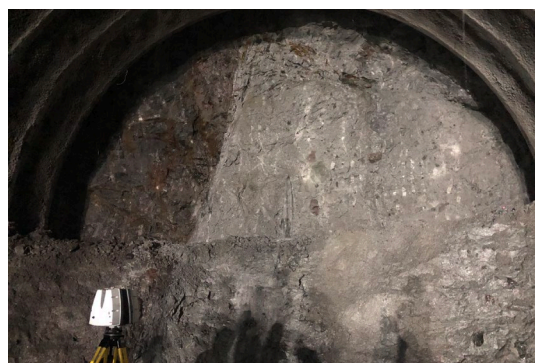


図-2 リアルタイム計測状況（掘削直後）

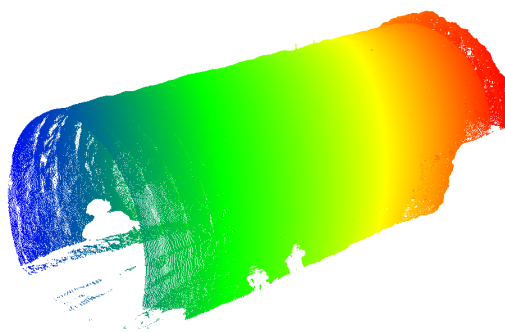


図-3 計測データの一例（掘削直後）

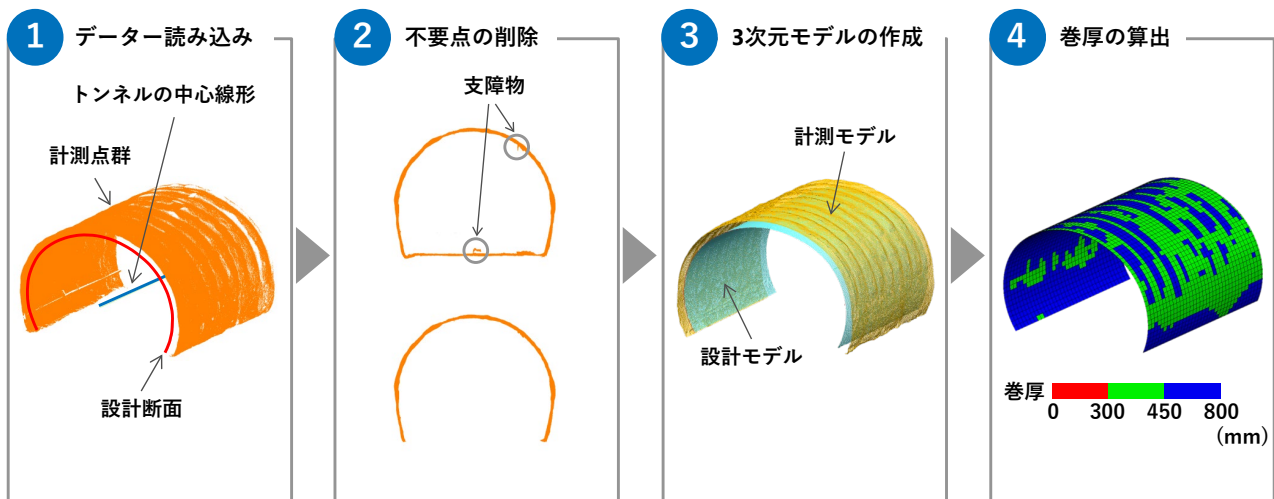


図-4 計測データの処理フロー（巻厚）

計測データの一例を図-3に示す。連続した3Dの面形状取得により、施工箇所を視覚的に把握することができる。

(2) 処理方法

図-4は、システムを用いた計測データの処理フローであり、ここでは基本的な巻厚（厚さ）算出を示す。

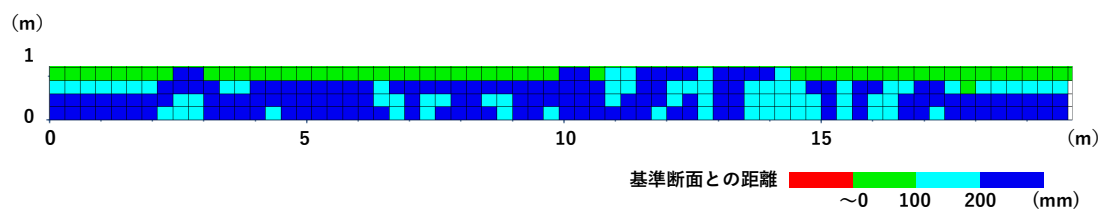
処理フローは4ステップに分かれており、ステップ1では、①トンネルの設計断面、②トンネルの中心線形、③内空計測点群の3種類のデータを読み込む。計測点群には、出来形評価に必要なない支障物等も含まれているため、ステップ2では、設計データを参照し、点群を残す範囲を指定することでトンネル壁面のみの点群を抽出する。ステップ3は、トンネルの設計断面と中心線形によって定義される理論的なトンネル形状のメッシュ（以下、設計モデル）を作成し、それをメッシュ化対象

の計測点群に押し付けるように変形し、3次元モデル（以下、計測モデル）を作成する。そのため、不要点除去により、点群に欠損が生じた場合でも、計測モデルの押し付け効果により自然なトンネル形状を得ることができる。最後のステップでは、計測モデルを設計モデルと比較することで、その差分から厚さを算出する。その値は、数十cm四方の区画ごとに色分けしたヒートマップにし、設計モデルに沿って表示する。

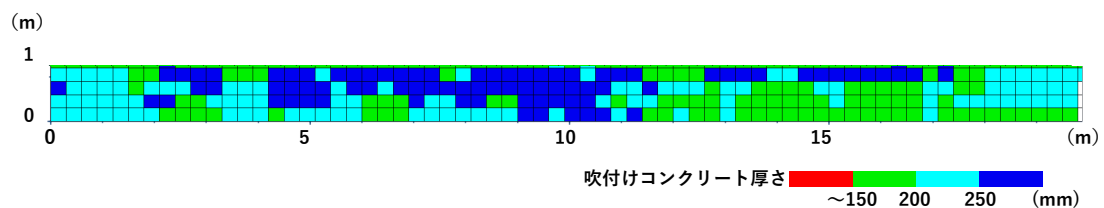
(3) 処理結果

今回、アタリ（地山の掘り残し）判定と吹付けコンクリートの厚さについて評価した。その結果を図-5に示す。この図は、縦軸が延長方向、横軸が周方向であり、中心がトンネル天端である。

図-5(a)のアタリ判定は、掘削完了後の計測モデルと基準モデルを比較したものである。掘削断面が基準断



(a) 余掘り



(b) 吹付けコンクリートの厚さ

図-5 処理結果（掘削長分=1.2m）

面を侵している場合は赤色で表示されるため、アタリ箇所を一目で把握することができる。また、一般的にはアタリを回避するため、より安全側に掘削する（余掘りが大きくなる）傾向がある。過度な余掘りを防ぐためにもこのように掘削面を評価し、次の掘削に生かすことができれば、余掘りの低減につながると考えられる。

図-5 (b) は、吹付けコンクリートの厚さを評価したものであり、掘削完了後の計測モデルと吹付け施工後の計測モデルを比較することで算出した。規定値である 150mm を下回ると赤色で表示される。継続的に面評価を行うことで、どの部分の吹付け厚が大きくなりやすいのか、施工のクセを把握することが容易となる。

以上のことから、施工箇所をヒートマップ表示することは、視覚的な把握や施工品質の向上だけでなく、次工程をスムーズに進める上で重要であるといえる。

計測時間に着目すると、現行の計測方法では、器械据付～ターゲット視準～計測完了まで約 20 分程度かかる。一方、リアルタイム計測では、ターゲットを 3 個設置する必要があるものの、LS の水平設置が不要であるため 5 分以内で計測が完了し、計測時間を大幅に短縮可能であることを確認した。また、作業員の経験値によらず容易に LS を設置できることも利点である。

4. まとめ

本報では、施工中のトンネル現場において、LS の水平設置と後方交会が不要なリアルタイム計測を試行し、その計測データをもとに、① アタリ判定、② 吹付けコンクリートの厚さについて評価を行った。

現行の計測方法では、掘削直後の壁面形状を取得することが困難であったが、試行したリアルタイム計測では、

掘削直後や吹付けコンクリート施工後も 5 分以内に計測可能であることを確認した。これは、現行の計測方法に比べ、計測時間を 1/4 に削減することが可能である。また、各工程においてヒートマップで評価することは、それ以降の工程をスムーズに進める上で重要である。

今回、計測時間の短縮を目的としてリアルタイム計測を実施したが、現状、各種結果を確認するには、計測したデータを現場事務所に持ち帰ってから処理を行う必要がある。不具合があった場合でもその場で対処することができない。試行した計測方法では、現場の座標系に変換された計測点群が出力されることから、クラウド等で管理・連携してリアルタイムにそのデータを評価できるよう、システムの改良を行う予定である。

今後も引き続き LS の計測データを施工へ活用するとともに、現場職員にヒアリングを行いながら、さらなる施工の効率化を図っていく。

謝辞：現場計測では現場職員の皆様に、計測データを評価するにあたってはユニアデックス株式会社と日本ユニシス・エクセリュージョンズ株式会社の皆様にご協力を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本悟，三井善孝：車載式トンネル 3D スキャニングシステムの開発，平成 30 年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，VI-052，2018.
- 2) 須佐見朱加，京免継彦，石井誠，辻本剛士：レーザースキャナを用いたトンネル出来形管理による生産性向上の効果，平成 30 年度土木学会全国大会 74 回年次学術講演会，VI-053，2018.
- 3) 国土交通省：新技術導入促進型 (<https://www.mlit.go.jp/tec/shingijyutudounyu.html>)

AN APPROACH TO SHORTEN THE MEASUREMENT TIME FOR TUNNEL CONVERGENCE USING LASER SCANNERS

Ayaka SUSAMI, Tsuguhiko KYOMEN and Yoshiki UNO

In recent years, laser scanners have been widely used in mountain tunnels as one of the methods for managing work progress. At our company, we also use laser scanners for construction management, however, it takes about 20 minutes from installation to the completion of measurement, so it is difficult to take measurements in the pit immediately after excavation from a safety point of view.

This paper describes the results of a trial of real-time measurement at a tunnel site during construction. It was confirmed that the measurement time could be reduced to a quarter of the time of the conventional measurement method because it was not necessary to level the laser scanner and to sight the target. It is expected that this technology will contribute to improve the efficiency of construction since it can not only obtain the shape of the entire excavation area without contact, but also ascertain the outbreak and evaluate the thickness of the shotcrete.

地下鉄銀座線渋谷駅移設事業に伴う 第 3 回線路切替・ホーム移設工事

岩柳 智之¹・小柳 朋宏²・西川 祐³・南立 修⁴

¹正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号)
E-mail: s.iwayanagi.t4t@tokyometro.jp

²正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号)
E-mail: t.koyanagi@tokyometro.jp

³正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号)
E-mail: t.nishikawa@tokyometro.jp

⁴非会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目 19 番 6 号)
E-mail: o.nandate@tokyometro.jp

東京地下鉄株式会社では渋谷駅周辺地区基盤整備事業の一環として、銀座線渋谷駅を東側へ 130m 移設し、ホーム形式を相対式から島式に変更する工事を実施しており、駅移設までに 3 回の線路切替を計画した。当該工事箇所周辺には、JR 線やオフィスビルが隣接しており、かつ、渋谷駅前東口広場における基盤整備工事などが同時に進行しているため、作業スペースは狭隘で、資材搬入では時間的制約を受けている。これらの施工条件の下、2019 年 12 月 28 日から 6 日間にわたって銀座線の一部区間を運休して 3 回目の線路切替工事を施工し、ホームの移設及び島式化を完了した。

本稿では、当該工事の施工結果について報告するとともに、複数工事の円滑化及び施工トラブルの未然防止を目的として CIM を活用した施工計画の策定、運用結果について報告する。

Key Words: Ginza Line Shibuya Station, Switching work of railway, Moving platform, Working under operated line, CIM

1. はじめに

東京地下鉄株式会社（以下、東京メトロ）では、渋谷駅周辺地区基盤整備事業の一環として、銀座線渋谷駅移設事業（以下、移設事業）を実施している。

当該移設事業は、現在、東急百貨店内の 3 階に位置している銀座線渋谷駅を、約 130m 東側へ移設すると同時に、ホーム形状を相対式ホームから島式ホームに変更するものであり、東京メトロにおける地上工事においては、最大規模の工事である。

移設事業にあたっては、狭隘な作業スペース及びお客様への影響を最小限に抑えることを考慮し、延べ 3 回の線路切替を行う計画とした。本稿では、2019 年 12 月 27 日～2020 年 1 月 3 日に実施した第 3 回線路切替・ホーム移設工事の施工結果について報告する。

2. 銀座線渋谷駅の概要

(1) 駅の特徴

銀座線渋谷駅は、東洋で最も古い地下鉄である銀座線において、もっとも西側に位置する終端駅である¹⁾。また、同駅は銀座線において唯一地上部に設置されている駅として、1938 年 12 月に開業している。

渋谷駅は銀座線に加えて、半蔵門線・副都心線や JR 東日本、東京急行電鉄、京王電鉄との乗換駅である。他路線が集中する渋谷駅において、銀座線渋谷駅単体では 1 日およそ 22 万人が利用しており、都心交通の一翼を担っている。

また渋谷駅周辺は、主要な観光地でもあることから、通勤・通学の旅客に加えて国内・海外からの観光客も多い。今後も重要な役割を果たしていくことが予想される渋谷駅周辺にあって、この渋谷駅の機能を充実させることは、喫緊の課題となっていた。

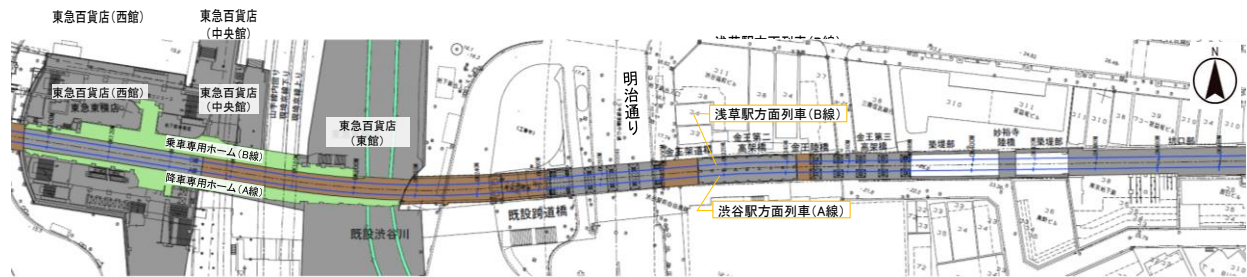


図-1 現況平面図

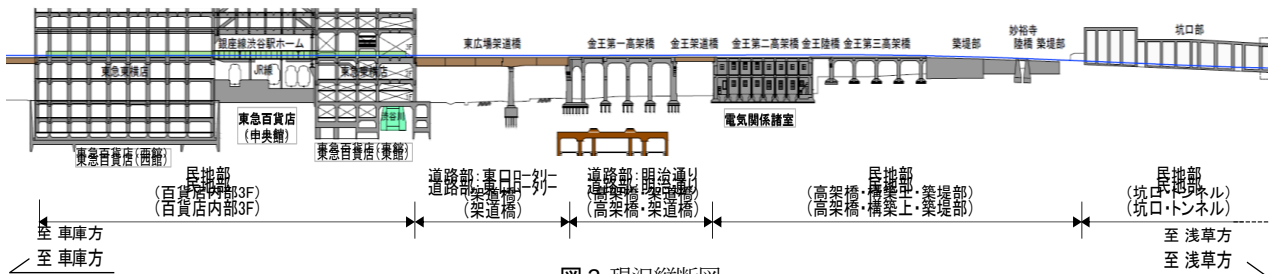


図-2 現況縦断面図

表-1 銀座線渋谷駅の構造諸元（移設前）

ホーム形式	ホーム幅	ホームドア	EV	トイレ
相対式	片側約3.5m	未整備	未整備	未整備

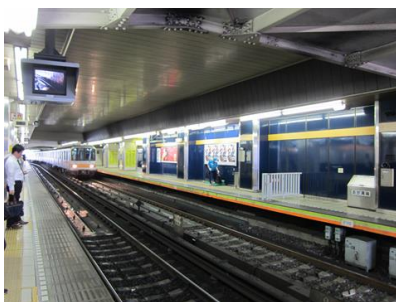


写真-1 銀座線渋谷駅の現況ホーム



写真-2 駅周辺の状況

(2) 駅周辺の現況

図-1、図-2 に示すとおり、渋谷駅～表参道駅間は、地上区間および地下区間の2つに区分される。渋谷駅周辺は地形上「谷」となっており、東側に位置する表参道駅方面へ向かうに伴って地盤面のレベルが上がっていく特徴を有している。そのため、銀座線は谷となる渋谷駅側から地上区間を高架橋・架道橋・築堤部として走行し、地盤面のレベルの上昇に伴って地下に潜っていくという、高架区間と坑口・トンネル区間の両方が存在している。

地上区間については、図-2 に示すとおり、東急百貨店内の3階に位置する渋谷駅を表参道方面に進むと、東口駅前広場および明治通りの上空に位置する架道橋・高架橋を通過する(写真-2)。同区間には架道橋・高架橋で7基の橋脚が存在しており、これらの橋脚は、既存道路交通を障害していた。道路部からさらに東側については、電気関係諸室直上や築堤を通過する構造となっている。

坑口・トンネル区間については、築堤をさらに東側に進んだエリアとなる。地盤面のレベルが上がっていくにつれて、築堤から坑口構造となり、その後、地下トンネルとして隣接する表参道駅に向かう構造となっている。

銀座線渋谷駅における、移設事業前の平面図を図-1、断面図を図-2 に示す。

同図に示すとおり、銀座線渋谷駅は東急百貨店内の3階に位置しており、同駅直下にはJR東日本の各線が運行されている。そのため、銀座線渋谷駅の改良工事にあたっては、東京メトロ単独での実施は不可能であり、関係各社との綿密な調整が必要となる。

また移設前の銀座線渋谷駅の構造諸元を表-1、ホーム状況を写真-1 に示す。ホームは地上3階に位置しており、乗車・降車を分離した相対式ホームとなっていた。乗降ホームについては、上述の通り東京メトロ単独での整備・移設事業が困難であったことから、ホーム上の幅員が開業当初から変わっておらず、ホーム幅員は片側約3.5mと狭隘になっている。また、銀座線以外の各路線からの乗換動線が長いことに加え、段差も数多く存在する。

駅関連設備としては、トイレ施設が東京メトロ全駅の中で唯一未設置であった。その他にも、老朽化や改札口の狭隘さ、不十分なバリアフリー設備が課題であった。

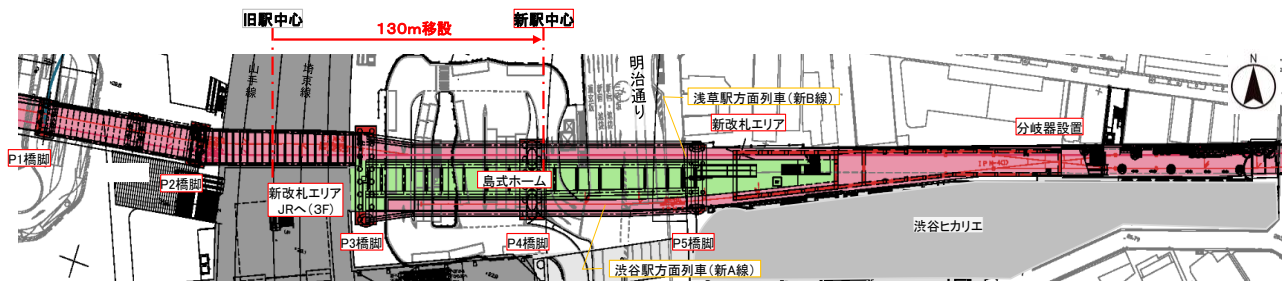


図-3 計画平面図

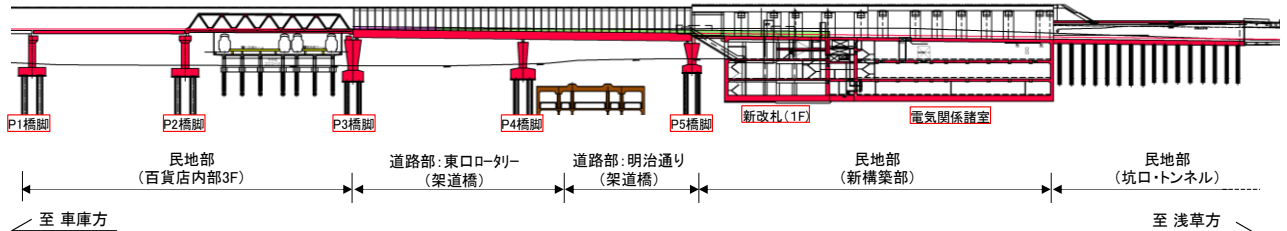


図-4 計画縦断面図

表-2 銀座線渋谷駅の改良構造

ホーム形式	ホーム幅	ホームドア	EV	トイレ
島式	約12m	整備	整備 (面改札2ルート)	整備 (多機能含む)

3. 銀座線渋谷駅の改良計画概要

銀座線渋谷駅における改良計画についての平面図を図-3、縦断面図を図-4に示す。ここでは改良計画概要について、ホームの移設および機能の充実化の2つの観点から記述する。

(1) 銀座線渋谷駅ホームの移設

本事業では、銀座線渋谷駅は東急百貨店に複合して位置している現在の銀座線ホームを130m東側の東口駅前広場および明治通り上に移設させる。また、ホーム移設に併せて、ホーム形式を相対式ホームから島式ホームに変更することとしている。島式ホームの幅員は最大12mとし、同一ホームでの降車・乗車を可能としている。

銀座線の列車運行については、渋谷駅方面列車（以下、A線）は車止めを設けて渋谷駅止まりとし、浅草方面列車（以下、B線）は、車庫線に続く線形とした。それに併せて、渋谷駅西側で行っていた銀座線の折返し作業を渋谷駅東側に新設する分岐により行う計画とした。

橋脚については、ホーム移設に併せて、東口駅前広場、明治通り上に7基ある橋脚を合計3基（東急百貨店東館部、東口駅前広場、明治通り部）に集約する。それにより、東口駅前広場および明治通り上の安全で快適な広場空間の形成への寄与、道路交通の整序化による渋滞緩和・安全性向上を図る。なお、デザインについては外部有識者を含めた検討・設計を行い、渋谷の街並みに相応しい形状とした²⁾。

(2) 駅機能の充実化

移設後の銀座線渋谷駅の構造諸元を表-2に示す。従来、降車・乗車ホームに別々に行っていた改札については、島式ホームとすることで降車・乗車を同一改札で行うこととした。また、改札設置位置については、銀座線ホームの両端部に設けることとした。移設後の渋谷駅ホームの西側は、JR線等への乗換えを同一フロアで可能とする改札（現スクランブルスクエア方面改札）を設置し、東側は地上を介して副都心線等との乗換えを可能とする改札（現明治通り方面改札）を設置する。それにより、東口広場及び明治通りの東西にまたがる動線を確保するとともに、改札を出てからの目的地への動線の選択肢を増やし、利便性の向上を図る。また、ホーム上にはホームドアを設置し、安全性の向上を図る。

旅客の垂直移動設備については、東側の改札部にエレベーター、エスカレーターを設置することで、バリアフリー機能および旅客の移動円滑化を図る。また、これまで未設置であった多機能を含むトイレ施設を設置することにより、バリアフリーおよび利便性の向上を図る。

4. 線路切替工事の経緯

線路切替は、既存営業線の近接箇所に用地確保し、その空間に仮線を設けて営業線とし、その間に計画線の線路切替工事を完了させ、その後仮線から計画線に切り替えるという仮線方式が一般的である。しかしながら、渋谷駅周辺は2章で記載の通り、銀座線に近接した建造物が林立していることに加え、複数事業者による工事が同時に進行していることから、作業スペースが極めて狭隘

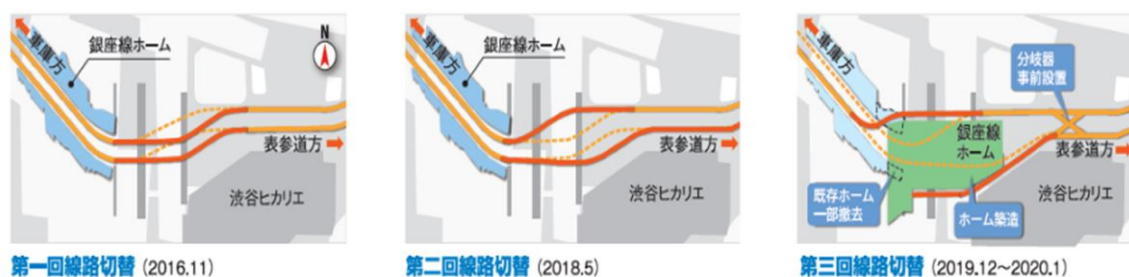


図-5 線路切替工事概要図

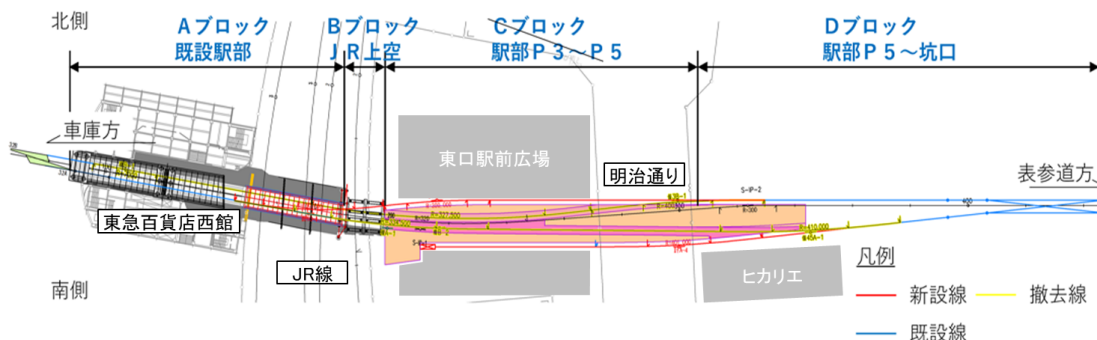


図-6 線路切替ブロック割図

である。そのため、仮線方式を採用することが不可能であった。

本移設事業においては、長期間の営業線運休を避け、お客様への影響を最小限にすることを前提条件とし、駅移設までに延べ3回の線路切替工事を計画した(図-5)。以下に各回の切替概要について述べる。

(1) 第1回線路切替工事

銀座線A線の南側に新A線を支持するための南側本設桁を新設した。また銀座線B線の北側に新B線を支持するための北側本設桁を架設する空間の創出のため、A線及びB線を南側に移設する線路切替工事を実施した³⁴⁾。

(2) 第2回線路切替工事

銀座線B線の南側に新B線を支持するための北側本設桁を新設した。また新しい島式ホームの設置する空間の創出と線路勾配の変更のため、A線を南側、B線を北側の本設桁の上に移設した⁵⁾。

(3) 第3回線路切替・工事

作業開始直前の終列車時まで使用していた軌道位置に新設ホームを構築するため、軌道の撤去と線形の変更を行い、続いてホームの構築と新駅舎の設備の整備を行った。詳細は次章で述べる。

5. 第3回線路切替・ホーム移設工事の工事概要

(1) 線路切替・ホーム移設工事の詳細計画

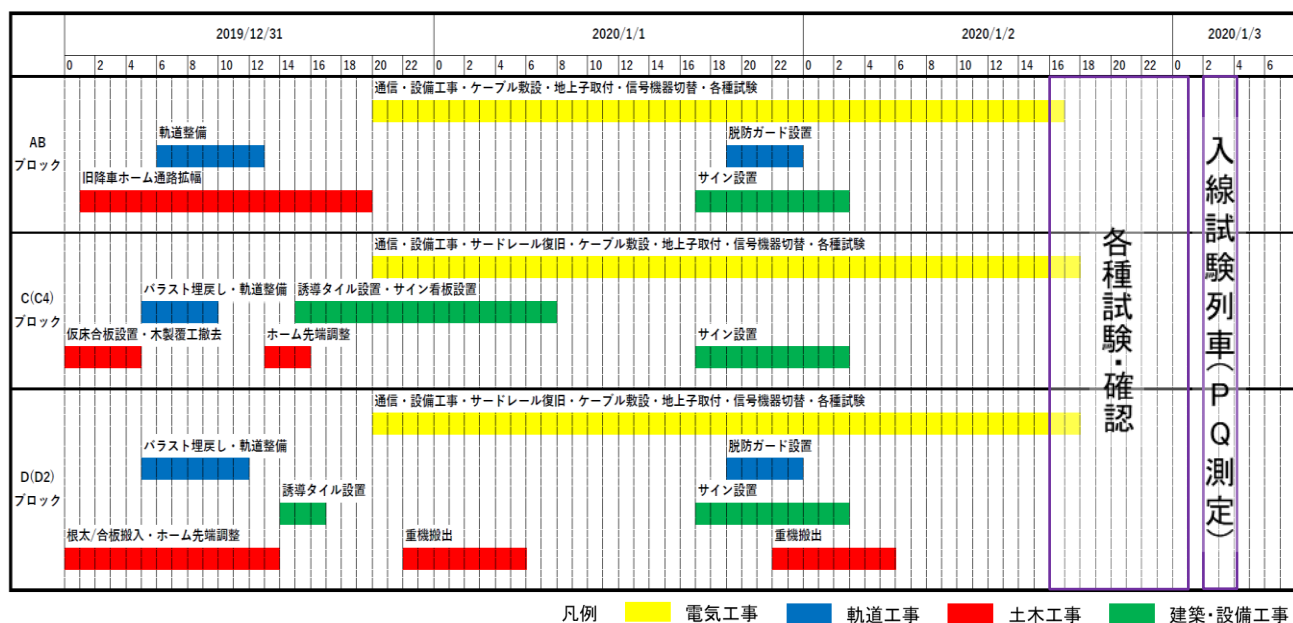
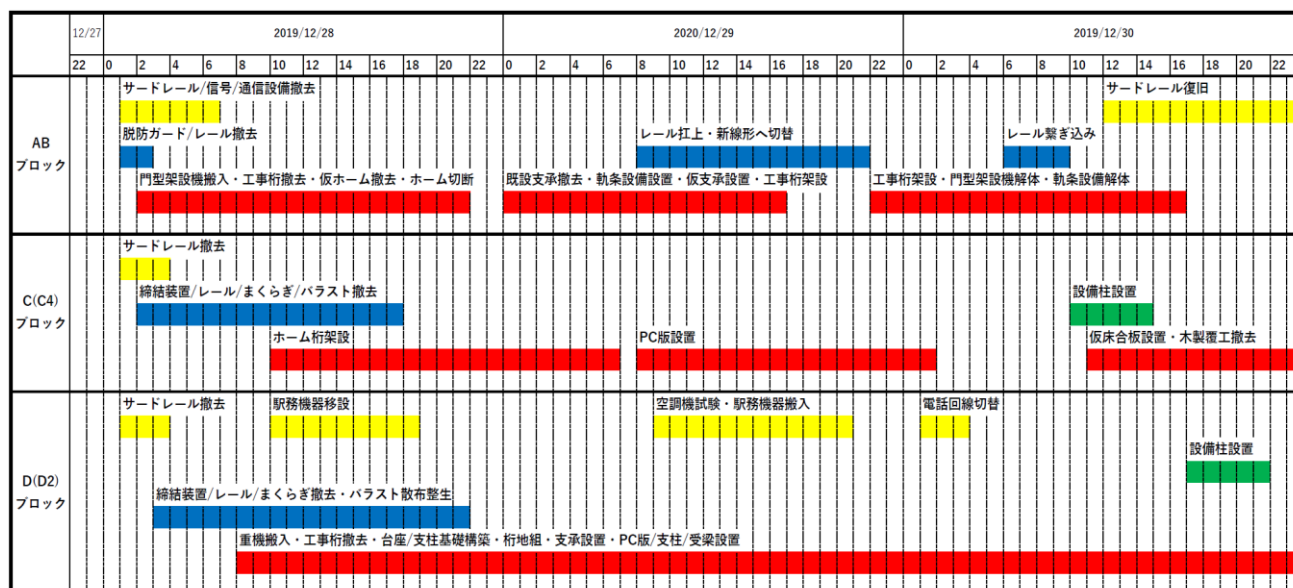
本工事は、銀座線渋谷駅・表参道駅間の約345mの区間において実施された。具体的にはA線を南側に、B線を北側に移設することで空いたスペースに新設ホームを構築する。ホームの構造は基礎を鉄骨構造、床版をPC版とし、ホーム移設工事完了後、速やかにホームタイル敷設及びホームドア設置工事が可能となるよう計画した。

4章(3)で記載したように本工事は作業開始直前の終列車時まで使用していた軌道位置に新設ホームを構築するため、事前にホームを構築することは困難であった。そのため限られた期間の中で軌道の撤去、新ホームの構築を経て、必要な駅設備を整備する必要がある。これら、ホーム移設工事の工程を検討すると、6日間の銀座線の一部運休が必要となり、利用者に最も影響が少ない年末年始にホーム移設工事を実施することとした。

本工事は図-6に示すとおり、A、B、C1~5、D1~2の9ブロックに分割して計画し、施工は工事桁の撤去、ホーム桁・床版の設置を行う土木工事、バラスト・レールの撤去・敷設を行う軌道工事、サードレール・ケーブルの撤去・敷設を行う電気工事、駅設備の設置を行う建築・設備工事の大きく4工種に分かれる。各ブロックにおける施工の予定工程表として、上述の4工種で集約したものを表-3に示す。

また工事期間中は、現場状況の常時把握のために設置したライブカメラの映像を新渋谷駅出入口付近に設置し

表-3 第3回線路切替・ホ一ム移設工事 予定工程表



たモニターで即時配信し、多くのお客様に情報提供を行った。

(2) 各ブロックでの施工内容

a) A ブロック

Aブロックは、東急百貨店西館内の旧ホームが中心となるエリアで、線形変更に伴いB線の撤去と旧A線ホームの建築限界支障範囲の撤去を行った。また後述する、Bブロックで使用する資機材を渋谷駅西口の作業帯から搬入出するための作業を行った。

b) B ブロック

Bブロックは、JR線上空での施工となることから、事前に調整を行い、埼京線の線路閉鎖時間内での施工とした。工事内容としては、線形の変更に伴う既設工事桁撤去と新線形を受ける工事桁の架設が主となる。作業時間

の制約を受ける中、重機を使用することができないため、門型の架設機を西口の作業帯から投入し、設置した軌条桁上をスライドさせ、撤去・架設を行った。

c) Cブロック

Cブロックは、東口駅前広場及び明治通りの上空が中心となるエリアで、本工事の開始前に屋根が既に設置されている。そのため、軌道内での新ホームの構築が主な作業であるが、写真-3に示すように低空頭での作業となった。

また既に設置されている屋根のため、東口広場からクレーンを用いて軌道内への資機材搬入出が不可能であった。そのため、事前の設置が可能なレールやホームの基礎は設置し、搬出するレールは事前に破線した。また材料については細分化し、軌道内への事前搬入、ないしは屋根上に準備し、屋根に設けた開口から搬入出すること



写真-3 新ホーム構築状況



写真-4 バラスト撤去作業（開口投入）



写真-5 バラスト撤去作業（本設桁下）

とした。さらに撤去量が約 400m³に及ぶバラストについては、写真-4.5 に示すように本設桁下に開口とシュートを設置し、バラストを開口に落とすことで、本設桁下に搬出した。

d) Dブロック

Dブロックは、両脇にオフィスビルが隣接する区間と坑口区間が中心となるエリアで、新ホーム端部の構築と表参道方に設けた作業構台からの重機およびホーム床版の搬入出が主な作業となる。Cブロックへ搬入出する場合、Dブロックの作業と搬入出動線が輻輳してしまうため、搬入出を要する各部門との事前の調整が重要であった。

表-4 主な撤去および新設材料

撤去材料	レール、まくら木、工事桁、バラスト
新設材料	ホーム桁、PC版、設備中、駅設備

表-5 ホーム桁・PC版架設数量

	事前設置	切替当日	合計
ホーム桁	58500kg(25%)	171200kg(75%)	229700kg(100%)
PC版	205枚(28%)	517枚(72%)	722枚(100%)

6. 施工上の課題と解決策

本工事では計画・実施の際に生じた以下の課題については、解決するにあたり本工事に関わる各部門が所有する二次元の CAD 図面を統合し、ソフト(SketchUp Pro)を用いて作成された 3D モデルを活用することで、CIM を実現し、対応した。以下にその詳細を示す。

(1) 施工上の課題

a) 施工部門間での設計・施工調整

本工事では表-4.5 に示すように事前に撤去及び設置できる範囲が限られているため、本工事中に撤去・新設する材料の搬入出および構築する部材数量が膨大となった。加えて本工事では様々な作業が並行して行われるため、クレーン配置や搬入出の作業順序の調整が必須であった。また、今回は線路切替だけでなく、ホーム新設を含むため土木・軌道・信号・通信・電力工事だけでなく、建築・駅設備工事の担当部署及び施工会社も携わる工事となった。については、関係者間での取合い部の設計状況の確認や工事の輻輳を回避のための精度の高い施工計画・工程管理が必要であった。

b) 営業・運転部門へのイメージ共有

本工事では、駅移設が短期間で一挙に実施され、また工事完了後すぐに新ホームを供用開始するが、工事完了まで新ホームやホーム上設備がほとんどできないことから、移設後の鉄道営業を担当する駅係員・乗務員の事前の教育・訓練を行うことができなかった。そのため、新ホームで列車の運行を開始するイメージを関係者間でいかに共有し、各種調整を実施するかが課題となった。

(2) CIM を利用した課題解決

a) 設計・施工調整への CIM の活用

施工部門間での調整にあたっては、作成した CIM 上で重機等を配置し、動きや時間軸を持たせ、全体の施工の流れを動画で確認できるようにした。これによりまず、作成の段階で各部門が所有する図面の不整合が直ちに確認され工事当日の施工トラブルを未然に防ぐことができ



写真-6 かんざし桁撤去状況

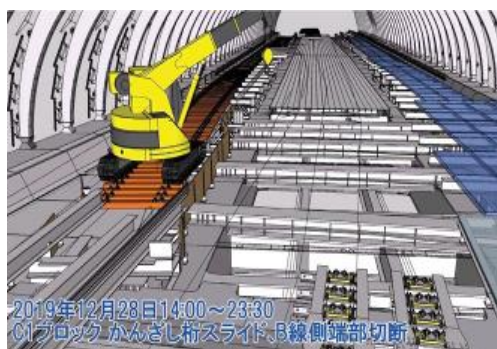


図-7 かんざし桁撤去状況 (3D イメージ)



図-8 旅客目線 3D イメージ



図-9 運転士目線 3D イメージ

る。実際にエスカレーターの着床レベルとコンコース階のフロアレベルに差があることが発覚し、調整を行った。さらに、新ホーム完成時のイメージを確認することにより、お客様動線を阻害する柱の位置を変更したり、通路幅を当初予定より拡張したりするなど、ホームの設計を



写真-7 駅設備設置完了後

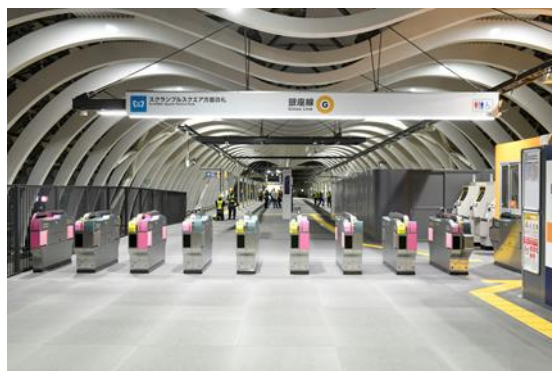


写真-8 スクランプルスクエア方面改札

深度化することができた。

また各部門の関係者が揃って、動画を施工計画と照らし合わせながら確認することで、施工における課題の洗い出しが行えた。結果、施工の途中段階を事前に把握することで、工程との進捗の比較も容易になり、施工管理がしやすくなった(写真-6、図-7)。

b) 営業・運転部門への CIM の活用

駅係員・乗務員に対しては、新ホーム上を歩いた際の動画や走行する列車からの展望イメージ動画を提供することで、ホーム移設工事後の新しい渋谷駅の姿をイメージできるようにするとともに、視認性等の確認を実施した。その結果、乗務員からの信号機の視認性に問題があることが発覚し、事前に視認性を改善する工事を実施した。また事前教育にも活用し、新ホームでの習熟研修が事実上できない状況の中でも、トラブルなく供用を開始することができた(図-8、図-9)。

7. 線路切替・ホーム移設工事の結果

本工事の工事後の状況を写真-7,8 に示す。年末年始に延べ約 5,000 人もの工事関係者が結集する規模の工事であったが、前項に示したような各種施策の結果、バラスト撤去・搬出やホーム設置が前倒しで実施できるなど、工事は前倒しで進捗した。結果、2020 年 1 月 3 日に新ホ

ームの供用開始をすることができた。同写真に示すとおり、島式ホームとなることで、旧来のホームに対し幅広となり、また降車/乗車専用の区別がなくなったことから、お客様にも分かりやすいホーム構造となった。

本工事後の2020年6月には明治通り方面改札に銀座線渋谷駅の2ルート目となるエレベーター、スクランブルスクエア方面改札側に仮設トイレ、2020年7月にはホームドアを供用開始した。今後はホーム上のベンチや床タイルを本設化していき、銀座線渋谷駅の利便性を向上させるよう取り組んでいく。

8. おわりに

本工事は2009年から着手し関係者の皆様に多大なるご支援、ご協力をいただきながら、10年以上の歳月を経て駅の移設を実現できた。今後は80年以上の歴史を誇る旧渋谷駅と同様に新しい渋谷駅が皆様に愛される駅となるよう尽力していきたい。

本事例が各種計画、工事の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 東京地下鐵株式會社：東京地下鐵道史，1934.6.
- 2) 西川祐，下野順也，北村太：銀座線渋谷駅改良工事における第2回線路切替工事，土木学会第68回年次講演会，2018.
- 3) 白子慎介，坂田聡，藤内邦彦，長田茄歩：銀座線渋谷駅改良工事に伴う第一回線路切替え工事，日本鉄道施設協会協会誌，Vol.55，pp.58-61，2017.1.
- 4) 伊藤聡，上田直人，西川祐：東京メトロ銀座線渋谷駅東口広場P4橋脚について，土木学会第68回年次講演会，2013.
- 5) 小柳朋宏，馬籠航生，西川祐，下野順也：地下鉄銀座線渋谷駅移設事業における第2回線路切替工事，地下空間シンポジウム論文・報告集，第24巻，pp.142-149，2019.1.

THE THIRD SWITCHING WORK AND PLATFORM RELOCATION FOR SHIBUYA STATION ON THE TOKYO METRO GINZA LINE

Satoshi IWAYANAGI, Tomohiro KOYANAGI, Tasuku NISHIKAWA and Osamu NANDATE

At Tokyo Metro company, as part of the area infrastructure development project around Shibuya station, we will relocate Shibuya station of Ginza Line located on the 3rd floor of the Tokyu department store about 130m and change the platform shape. In this construction site, since Shibuya Hikarie and the office building are located near, construction work by multiple companies, such as infrastructure improvement work at the east entrance square in front of Shibuya Station, is in progress at the same time. Therefore the work space is narrow, it is difficult to construct the improvement work without shutting off the railway service. Under such conditions, this construction will assume as far as possible the operation of the Ginza Line on the premise of minimizing the influence on the customer, and we are planning three times switching before the station relocation. In this paper, we report on the construction result 3rd switching work and platform relocation which was carried out by taking a part of Ginza Line is canceled from December 2019 to January 2020.

建設 50 年を迎えたホワイティうめだ地下街の 現状とスケルトン化リニューアルの事例

井下 泰具¹・中井 亮太朗²・蒲地 正光³

¹正会員 大阪地下街株式会社 常務取締役 (〒530-0018 大阪市北区小松原町2番4号)

E-mail: inoshita.yasutomo@osaka-chikagai.co.jp

²非会員 大阪地下街株式会社 計画課長

³非会員 大阪地下街株式会社 計画課担当課長

大阪駅周辺地区は1日駅利用者数約240万人が利用する西日本最大のターミナルであり、ホワイティうめだはJR大阪駅南側の地下歩行者ネットワークの一部を構成する公共性の高い地下街である。

ホワイティうめだ2期エリアは、開業以来一度もリニューアルを行ったことがなく、事前の調査や検討において躯体の劣化や既存不適格、耐震補強の必要性などが確認されていた。これらの課題を全て解決する手法としてスケルトン化による全面リニューアルを地下街単独事業として全国で初めて行った。

本論文では、建設以来50年経過した躯体の劣化状況や補修対策、遵法化事例、最新のICT技術の導入事例、地下街の営業休止期間への影響を最小限にするための工事期間中の工夫や地上交通への影響など今後の地下街リニューアルに有益な情報について報告する。

Key Words: Underground Mall, Interior Demolition, Improvement of Safety, Whity Umeda, concrete carbonation

1. はじめに

ホワイティうめだは、1日240万人が利用する大阪駅周辺地区の南側の地下歩行者ネットワークの重要なインフラの一部を担っており、今回リニューアルを行ったホワイティうめだ2期エリアは1970年開業である。このリニューアルの実施にあたっては、地下街リニューアルの事業性を踏まえた機能更新の在り方について研究¹⁾し、第24回の本シンポジウムではスケルトン化を前提とした遵法化計画と設備更新計画、特殊な制約条件の多い中での施工計画について報告²⁾した。

本論文では、実際に建設後50年が経過した地下街施設のスケルトン化による全面リニューアルを実施した中での新たに得られた知見や施工上の工夫等について報告する。

2. リニューアルの概要

今回実施したリニューアルは、施設の安全性の向上と遵法化を最優先課題とし、併せて利便性の向上と収益性の向上を目指した。本リニューアル工事は、2018年9月より先行工事に着手し、2019年5月から2期エリアの全面閉鎖による約半年間の工事を経て、2019年12月5日にリニューアルオープンした。リニューアル工事の概要を表-1に示す。

(1) 各種基準等への適合化

リニューアル前後の建築基準法と地下街基本方針の適合状況は表-2の通りであり、リニューアルを実施するにあたって、地下街という物理的な条件により遵法化を図ることが困難であった公共地下道天井高さと地下広場については代替措置²⁾により遵法化と同等の安全性を確保した。

表-1 リニューアルの概要

防災機能の向上
・柱の耐震補強や老朽化が進んだ壁面の補強 ・防火区画の再構築 ・排煙設備の抜本的改修 ・円滑に地上へ避難するための防災上有効な広場の整備 ・設備室の狭隘解消 ・非常用発電機を地上へ設置
快適性の向上
・エスカレーターの設置 ・トイレのリノベーション ・空調設備の更新 ・換気設備の増強 ・分煙化の推進 ・照明による演出 ・従業員休憩室の拡充
セキュリティの強化
・防犯カメラを増設すると共に、防災センターの機能充実など更なるセキュリティ強化を図る

表-2 ホワイティうめだの基準等への適合状況

主な遵法化項目	概要	適合状況	
		リニューアル前	リニューアル後
【建築基準法】			
公共地下歩道幅員	5m以上	○	○
公共地下歩道天井高さ	3m以上	×	代替措置
防火区画	店舗等は床面積500㎡ごと	×	○
排煙区画	地下道：300㎡以内	×	○
排煙設備	排煙口は閉鎖状態を常時保持 地下道：5㎡/秒等 (現状は換気設備と兼用)	×	○
開口部の防火区画処理	地下街の各構えは防火区画	×	○
【地下街基本方針】			
公共地下歩道幅員	6m以上	×	○
地下広場	防災上有効な吹抜を有する広場	×	代替措置
地下街の階層	店舗は1層に限る	×	○
消防用設備	全ての部分に消防用設備配置	○	○
防火区画	店舗等は床面積200㎡ごと	×	○



リニューアル前 (B2階)



リニューアル後 (地上)

写真-1 リニューアル前後の非常用発電設備

(2) 更なる防災・防犯機能の強化

浸水対策や避難誘導機能を強化するため、

- ・非常用発電機の増強及び地上設置 (写真-1)
- ・止水板の軽量化
- ・地下街防災拠点と警備員の連携強化
- ・広告用サイネージに防災機能を追加 (写真-2)

などの取り組みを実施した。具体的には、非常用発電設備は、リニューアル前は開業当初から延命化させて運用してきた発電機であり容量が 300kVA で、地下 2 階の設備室に設置していた。今回、浸水対策の観点から地上部に設置することとし、更には 500kVA に容量をアップさせ、稼働時間も約 16 時間運転可能な容量とし、今回新たに設定した安全区画の空調にも対応できる容量とした。

また、10 分間降雨量 8mm 以上が 20 分以上続く場合には、出入口部において止水板を防災センターの判断で浸水リスクの最も高い出入口から設置していくこととしており、今回リニューアルにより出入口上屋を新設したが、併せて止水板もカーボン樹脂製に更新し、軽量化したことで、迅速な対応ができることとなった。

災害やトラブル発生時には、地下街での防災拠点と現場警備員との連携はとりわけ重要である。今回のリニューアルでは地下構内に専用光ファイバー網による独自の Wi-Fi アクセスポイントをホワイティうめだ公共通路、主要設備室に新設し、従来よりも広いエリアで通信が可能な独自の通信設備を配備し



写真-2 非常時のサイネージ表示

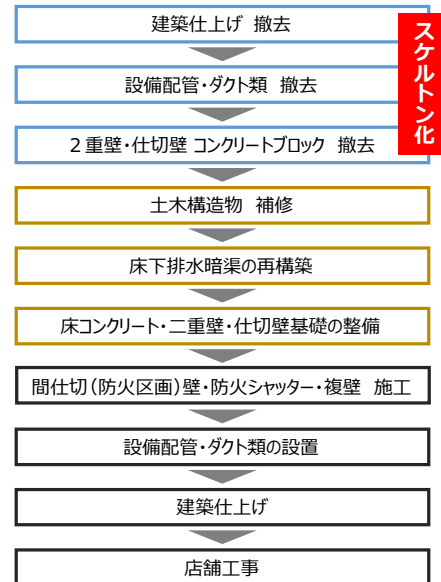


図-1 スケルトン化の工事ステップ

た。端末は、無線アプリがインストールされたスマートフォンとなり、警備員の位置を防災センターで検知したり、多言語音声翻訳アプリによるお客さまサービスを充実させたりする機能も付加したシステムを構築した。さらには、今回のリニューアルの時期に併せてホワイティうめだ 1 期エリアにデジタルサイネージを新設し、災害時は防災センターからの操作で、火災情報や地震速報、NHK 緊急放送などの災害情報を表示できるようにして避難支援機能として強化した (写真-2)。

(3) リニューアルの工程管理

地下街のリニューアルにとって、店舗休業期間をいかに短くするかが採算性の面からも重要であり、当初より公共通路も含めた全面閉鎖を半年とする目標を持って工事計画を立案した。

工程作成にあたっては、

- ・地上交通への影響を可能な限り少なくし、また、全面閉鎖工事期間を可能な限り最短化する
- ・店舗への影響が少ない工事は先行工事として行う
- ・2 期エリア内に位置するホワイティうめだ防災センターは継続して機能させる必要があるため、新防災センターを 2 期エリア内に新設し、全面閉鎖までに機能移転する
- ・エスカレーター新設工事は躯体改造が必要で工期が長くなるので全面閉鎖前から着工する

といったことに留意し、全面閉鎖工事と先行工事に区分した。先行工事のうち、一部店舗閉鎖が必要となる防災センターの移設、エスカレーター新設工事は閉鎖期間が短くなるよう2019年2月着工とした。

2019年5月、2期エリアを全面閉鎖し、スケルトン化工事に着手した。スケルトン化及び設備・建築仕上げの再築工事のステップは、図-1の通りである。また、スケルトン化した状況を写真-3に示す。スケルトン化により計画時に想定した以上の劣化や対応工事の必要性が生じたため、工程管理に特段の工夫が必要となった。

具体的には、躯体を直接確認した結果、RC構造である床版や桁の下面のうち、漏水が発生している部位には断面欠損や鉄筋腐食がみられた。一方、漏水の見られない部分では特に変状は見られず、ひび割れも発生していない状況であった。また、地下街内の排水暗渠においても劣化が進んでいたため、全面的な修繕が必要となった。また、店舗区画の天井内にアスベストの存在が明らかとなり、行政手続き並びに専門業者によるアスベスト除去のために1.5ヶ月も他区画よりスケルトン化工事に時間を要した区画もあった。



写真-3 スケルトン化完了時の状況

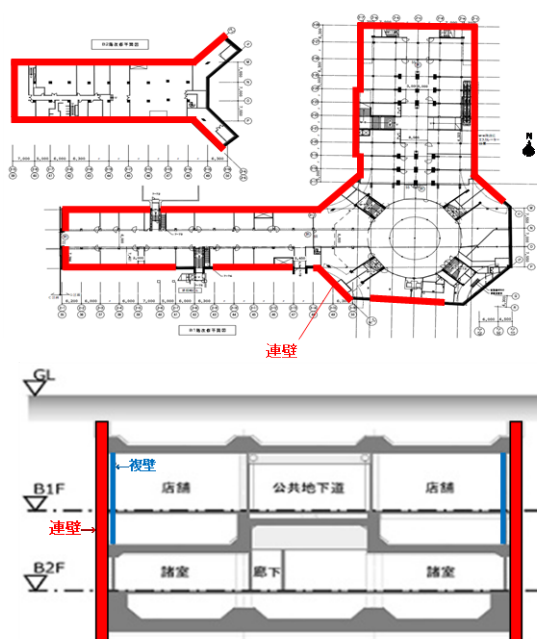


図-2 躯体概要

そのような中、施工計画を見直し、撤去搬出や搬入用立坑に風洞部を改造することで確保したり、地下街内に全面棚足場を設置して上下作業を同時に安全かつ迅速に施工できるようにしたりするなどの工夫を行って工程短縮に取り組み、予定通り2020年12月5日に無事開業した。

3. 建設後50年経過した躯体の劣化状況

2期エリアの躯体は、図-2に示すとおり、側壁は地中連続壁で施工された壁（以降「連壁」と記載）と現場打ち鉄筋コンクリートで施工された壁（以降「RC壁」と記載）で構築されている。

中央の通路を挟み両側に店舗が存在し、側壁の内側にはコンクリートブロック等で複壁があり、点検口部を除き、殆どが直接点検することができない状況であった。点検口部等からの事前調査では、コンクリートの剥離、鉄筋の露出や漏水が見受けられた。また、コンクリートの中性化も進行していることを確認していた。今回、スケルトン化により複壁をすべて撤去し側壁の点検を行ったところ、地下1階と地下2階の外壁総面積2133m²に対して、露筋の総延長は4067mであった。単純計算で1m²当たり1.9mの露筋があったことになる。連壁での露筋が98%を占めていた。

(1) コンクリート圧縮強度と中性化深さの関係

連壁6か所とRC壁7か所でコア採取を行い、圧縮強度試験と中性化深さの確認を行った。採取したコアの圧縮強度と中性化深さの関係を図-3に示す。

通常、連壁は水セメント比を低くして打設されるため圧縮強度が高いコンクリートが生成される。本エリアの建設時の打設コンクリートの水セメント比については記録が残っていないが、圧縮強度試験結果からRC壁に比べ強度が高い結果が得られている。また、連壁とRC壁の圧縮強度と中性化深さの分布並びに平均値を確認すると、圧縮強度が高い方が中性化深さは小さくなっており、密実なコンクリートの方が中性化速度は遅いという一般的な見解と同様の傾向を示していることが確認できた。

また、中性化深さについては側壁約15m毎を基本

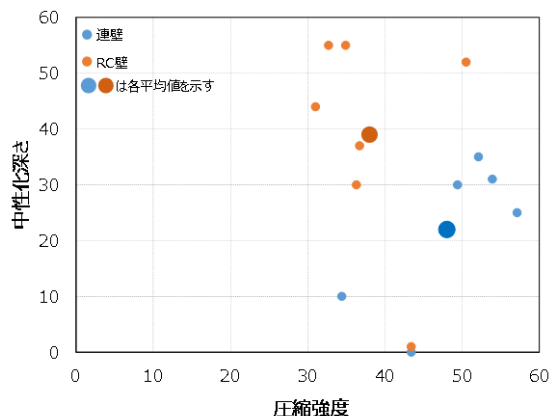


図-3 中性化深さと圧縮強度の関係

に測定した。図-4 に壁種別による中性化深さの傾向をグラフ化した。連壁での中性化深さピークは 20～40mm の範囲内にあるのに対し、RC 壁でのピークは 40～60mm の範囲にある。コンクリート強度は連壁の方が RC 壁よりも大きい傾向があり、強度が大きいほど中性化速度が小さくなるという同様の傾向を示していた。

(2) 漏水の状況と中性化深さの関係

漏水はほぼ全域で確認されているが、連壁の方が RC 壁に比べて多く発生している。連壁ジョイント部の目違いあるいは一体化不足、および先行打設したエレメントの拘束により打ち継ぎ目に発生する温度ひび割れが、主な原因であると考えられる。

地下1階と地下2階の外壁総延長560mに対して、118 か所で漏水を確認した。単純計算で壁長さ 4.7m につき 1 か所の漏水があったことになる。漏水の有無と中性化深さとの関係を、図-5 に整理した。中性化深さのピークは、漏水無し部では 40～60mm 区間であるのに対し、漏水有り部は 20～40mm 区間にある。

漏水がある場所は、湿度が高い環境でありコンクリート中の水分の逸散が起こりにくいため、セメントの水和が継続されコンクリート組織が緻密になり中性化の進行速度が遅くなったものと考えている。

(3) その他の変状

連壁部分では点検口からの事前調査においても劣化が確認されていたため補修を計画していた。一方で、RC構造部分については劣化が確認されてい

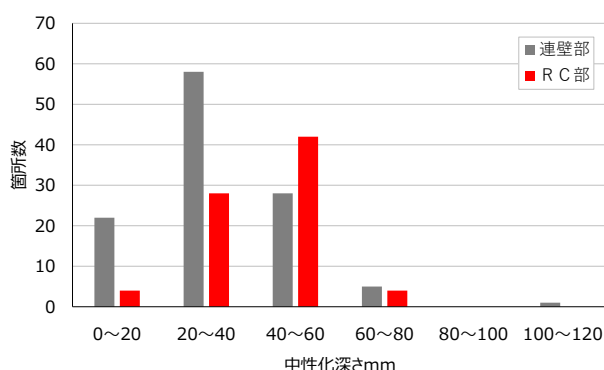


図-4 側壁構造種別による中性化深さの傾向

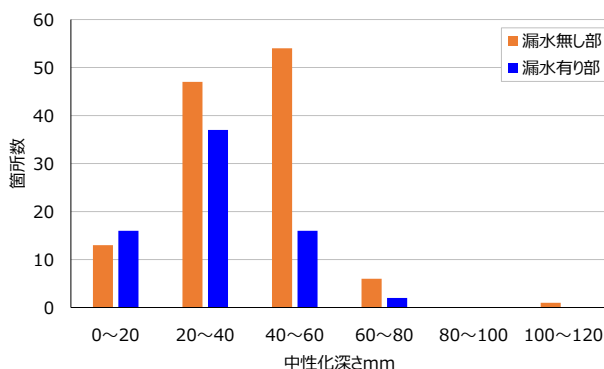


図-5 漏水の有無による中性化深さの傾向

かったため補修を計画していなかった。

実際にスケルトン化を行い直接確認した結果、梁などのRC構造部分においても劣化が見られた。その一例を写真-4に示す。

この写真は上床版の桁部分を撮影したもので、多量の漏水が発生しており、既にコンクリート断面は欠損し、鉄筋も腐食により欠損していた。一方、漏水の見られない部分では特に変状は見られず、ひび割れも発生していない状況であることから、漏水を原因とする鉄筋腐食によるコンクリート断面及び鉄筋の欠損と判断し、浮きコンクリートの除去、導水の設置、溶接による鉄筋の復元、鉄筋の防錆処理を行い、ポリマーセメントモルタルによる断面修復を行った。

4. 躯体の補修方法

(1) 補修方針

躯体としては露筋や漏水が確認されたが、壁の圧縮領域では露筋を確認できず、コンクリート断面が有効に働いていること、壁に有害な曲げひび割れの存在を確認していないこと、また採取した供試体のコンクリート圧縮強度はすべて設計基準強度以上を確保していたことから構造的な補強ではなく必要箇所の補修を行うこととした。

(2) 地下外壁の中性化対策

側壁を約 15m 毎に中性化深さを測定し、現状で中性化が鉄筋に到達しているか、または 50 年後に中性化が鉄筋に到達するか $\sqrt{t}$ 則を用いて予測し、補修方法を決定した。図-6 に補修フローを示す。

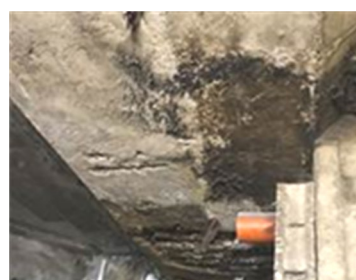


写真-4 躯体の劣化事例

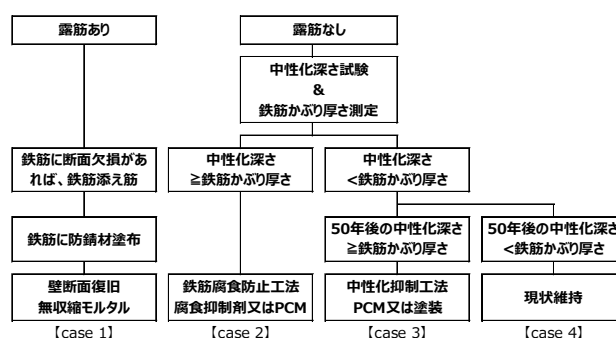


図-6 壁面補修のフロー

表-3 壁補修・対策実施状況

対策	面積	割合
【case 1】 断面復旧	528m ²	24.7%
【case 2】 腐食抑制材	197m ²	9.2%
【case 2】 PCM	187m ²	8.8%
【case 3】 PCM他	125m ²	5.9%
【case 4】 現状維持	1,096m ²	51.4%

現状で中性化が鉄筋に到達している範囲では、鉄筋腐食の進行速度を抑えることを目的として case 2 の鉄筋腐食防止工法を実施した。使用する含浸材が有効に働く表面含水率が 8%以下の範囲においては、腐食抑制材を塗布しコンクリート表層には水分等の劣化因子の侵入を阻止する層を形成させ、鉄筋近傍では不動態皮膜に替わる保護層を形成させて鉄筋腐食の進行を抑制させた。一方、本材料が適用できない表面含水率 8%以上の範囲においてはポリマーセメントモルタル（以下、PCMと表記）を 10mm 以上コテ塗り、コンクリート表面からの鉄筋腐食因子の侵入を低減させて、前者と同様に鉄筋腐食の進行速度を抑制する対策を実施した。

現状で中性化が鉄筋に到達していないが、50 年以内に中性化が鉄筋に到達すると予想される範囲においては case 3 の中性化抑制工法である PCM10mm 以上のコテ塗りの対策を実施し、中性化の鉄筋到達を抑制した。

50 年経過後も中性化が鉄筋に到達しないと予想される範囲は、露筋や漏水が無い限り、対策不要とした。

補修フローの各ケースに対する対策の実施状況を表-3 に示す。対象壁面 2,133m²のうち、約 49%の 1,037m²で、壁断面復旧又は中性化対策の施工を実施した。

(3) 今後の維持管理

これらの対策により、今後 50 年間は鉄筋深さまで中性化が進行しないこととなったため、基本的には将来にわたって健全性が保たれると想定している。一方で、今後 50 年間、メンテナンスフリーで点検なしに安全性が担保できていると言い切れるものでもないため、今回のリニューアルでは、B1 階の店舗区画の複壁の再構築は、コンクリートブロック壁とせず成形セメント板を用いた乾式による工法とすることで、例えば店舗退店時のスケルトン化時に、側壁の点検や部分的な側壁の補修等のための複壁の撤去復旧を容易にできるようにした（写真-5）。

一方で、B2 階の設備室は、写真-6 のように複壁を設置せず、側壁をむき出しとし、更に可能なところは側壁から離隔を確保して設備を配置するなど、今後の側壁の点検や補修等の維持管理が可能な状態とした。

これらの対策により、B2 階の側壁を直視することが可能なので、経年劣化による躯体の大きな変化は捉えることが可能となり、店舗部分の躯体を常時



写真-5 複壁施工状況

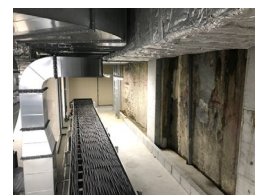


写真-6 設備室の状況

点検できなくても躯体の健全性については一定の確認が可能となる。加えて、店舗退店時に定期的に上床版や側壁コンクリートの点検や圧縮強度試験や中性化深さ試験等の各種物理試験を実施して、地下街全体の健全性を推定するという手法を用いて安全性の確保を図っていく予定である。

5. 全面閉鎖に伴う通行量の変化

全面閉鎖工事实施においては、周辺交通への影響も最小限とする必要があるため、全面閉鎖期間を約半年間で計画しているが、全面閉鎖に伴い前述のとおり 1 日約 5 万人もの通行者が地上へ迂回することになる。

全面閉鎖前における朝ラッシュピーク時の交通量は、地下街内東行きが約 50 人/分であり、そのうち地上南側への通行は約 30 人/分となっていたが、全面閉鎖後では扇町通歩道部南側が約 30 人/分となっており、南側地上へ向かう人のほとんどが扇町通歩道部の南側を利用していた（図-7）。

また、交通量がピークとなる夕方の時間帯では、全面閉鎖前の地下街内交通量が約 100 人/分であり、そのうち地上南側の交通量は約 15 人/分となっていたが、全面閉鎖後では扇町通歩道部南側が約 45 人/分と大きく増加していた（図-8）。

当該交差点は新御堂筋を東側へ渡るルートが交差点南側の横断歩道しかないため、全面閉鎖時には扇町通歩道部南側の交通量が増加し、横断歩道において混雑の発生を想定していた。当初、赤信号で約 52 人が滞留すると想定し、1 回の青信号で全員が横断歩道を渡れる程度の人数であることから、安全は担保されていると考えていた。全面閉鎖後においては、交通量は増加したが赤信号での滞留は約 50 人であり、予測と同程度で大きな混雑は見られなかった（写真-7）。地上では全面閉鎖に伴う交通集中による大きな混雑を招くことはなかったが、地下通路に配置した交通誘導員には道を尋ねる方が非常に多く見られた。このことは、通行者が地下街と地上の位置関係を把握していないため、普段使用している出入口が閉鎖となった際に、地上の目的地へ移動するために他のどの出入口を利用すれば良いかが判らないためである。そのため、地下街の案内誘導では、出入口の位置だけではなく出入口と周辺の地上施設の位置関係を分かりやすく案内することが重要であることが分かった。

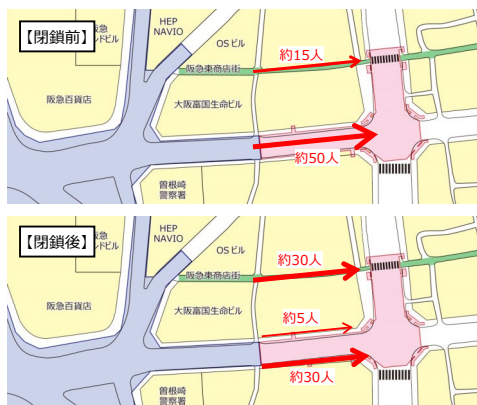


図-7 朝ラッシュピーク時(8:30-9:00)歩行者数

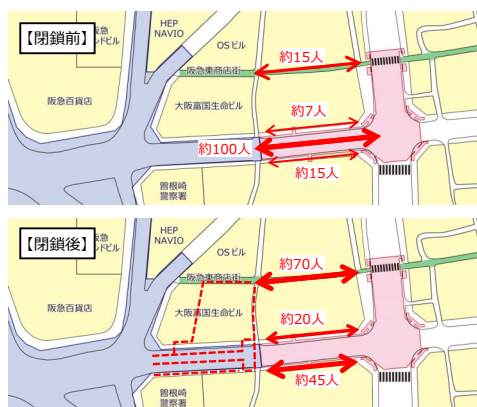


図-8 タラッシュピーク時(18:00-18:30)歩行者数

6. おわりに

ホワイティ梅田 2 期エリアは、2019 年 12 月 5 日にリニューアルオープンを迎え、開業月の 12 月の売り上げが目標値の約 30%アップ、1 月で目標値の約 10%アップ、また、通行者は 2 期エリアの入り口部で、12 月～1 月の通行量が前年同月比で約 40%ア



写真-7 全面閉鎖時の横断歩道の状況

ップと、たくさんのお客様にお越しいただき活況を呈した。

1950 年代から 1970 年代にかけて建設された地下街は、従来から懸案とされてきた安全面での課題に加えて防災面や老朽化への対応が必要となっている。また、商業施設として環境変化に応じた店舗展開が設備上の制約から難しく、収益性の向上も課題となっている。今回のスケルトン化によるリニューアルで、これらの課題を抜本的に解決し、最新の商業施設に生まれ変わることが出来た。また、維持管理の方針を具体化することで、地下街の構造体としての今後の健全性の確保についても目途を付けることができた。本報告が同種の課題をもつ事業者の一助となることを願うものである。

参考文献

- 1) 八木弘毅,西田康隆,阿部浩和,井下泰具:「地下機能更新の検討手法に関する研究 ホワイティうめだのケーススタディ」,地下空間シンポジウム論文・報告集,第 20 巻,pp51-56,2015
- 2) 井下泰具,豆谷美津二,松原知三:「スケルトン化による地下街の大規模リニューアル計画ホワイティうめだ 2 期リニューアルの事例」,地下空間シンポジウム論文・報告集,第 24 巻,pp77-81,2019

THE CURRENT STATE OF WHITY UMEDA, WHICH HAS REACHED 50 YEARS OF CONSTRUCTION, AND THE CASE OF RENOVATION BY INTERIOR DEMOLITION

Yasutomo INOSHITA, Ryotaro NAKAI and Masamitsu KAMACHI

The area around Osaka Station is the largest terminal in western Japan, which is used by about 2.4 million station users a day. And the underground is an important network of pedestrians on the south side of JR Osaka Station. The Whity Umeda is a part of it and plays a central role in the public space.

The Whity Umeda Phase 2 area has never been renewed since the business started in 1970, and Preliminary investigations and examinations have confirmed the deterioration of structures, existing disqualified systems for the current legal requirements and insufficient seismic strength. As a method to solve all of these problems, a renewal by facilities and interior demolition was carried out for the first time in Japan as an independent business of an underground shopping mall operator.

In this paper, we will report on useful information for future underground shopping mall renewal, such as the state of structures 50 years after construction, repair implementation cases, legal compliance, introduction cases of the latest ICT technology, measures to minimize the business suspension period of underground malls, impact on ground traffic due to total closure.