

極端気象下での地下街浸水時の 安全避難について

EVACUATION FROM INUNDATED UNDERGROUND SHOPPING MALL UNDER EXTREME WEATHER CONDITION

黄 碧蕊¹・石垣泰輔²・尾崎 平³・戸田圭一⁴

Hekizui KHO¹, Taisuke ISHIGAKI², Taira OZAKI³, Keiichi TODA⁴

Recently we have often heavy rainfalls over 100mm per hour, such as 146.5 mm precipitation observed in 2008. In our study area, heavy rainfalls over the design fall were observed in 2011 and 10-minutes precipitation of 27.5mm was observed in 2013, which was up to 165mm if the rainfall would continue for one hour. In this paper, safe evacuation from underground mall is investigated under such extreme weather condition. It is found that the underground mall is inundated before the peak of rainfall and this flood continues for a long time. This means that lead time for safe evacuation is so short and that administrators of underground mall and users have to recognize the danger of inundation and the importance of early evacuation.

Key Words : underground mall, inundation, extreme rainfall, safe evacuation, numerical simulation

1. はじめに

記録的短時間降雨による都市型水害が頻発しており、地下鉄・地下街・ビル地下室などの地下空間が浸水している。著者らは大阪梅田の大規模地下街を含む海老江処理を対象に表-1に示す2種の実績降雨について検討し、表-2に示すように2008年に発生した岡崎豪雨のような短時間に集中する降雨パターンが地下空間浸水への影響が大であることという結論に達した。この結果に基づき、従来、岡崎豪雨を用いた内水氾濫に関する検討を行ってきた^{2) 3)}。しかしながら、2013年8月25日に対象地区で10分間降雨27.5mm（観測史上1位）を記録した。この10分間降雨が1時間続くと165mmとなり岡崎豪雨の記録を上回ることとなる。そこで、このような極端気象下での地下浸水時の地下街の安全避難について検討することが本研究の目的である。以下では、土木学会第72回年次学術講演会にて口頭発表した一部の結果⁴⁾を含めた検討結果を示し、計画を大きく上回る降雨を対象に地下空間浸水時の安全避難について検討した。

表-1 検討対象降雨の概要

	岡崎豪雨	東海豪雨
生起年月日	H20.8.29	H12.9.11~12
観測地点	岡崎市美合町	名古屋
最大1時間 降水量	146.5 mm	97.0 mm
総降雨量	242.0 mm	567.0 mm

(注)岡崎豪雨については、8月28日、30日にも降雨が発生しているが、無降雨時間が6時間以上空いているため、ここでは総降雨量から除外した。
表-2 解析結果に基づく地下街への流入特性

	岡崎豪雨	東海豪雨
流入箇所数 ¹⁾	52箇所	29箇所
ピーク流入量 ²⁾ (1箇所当り)	4.31 m ³ /s	2.83 m ³ /s
総流入量 ³⁾	332千 m ³	276千 m ³

1) 解析対象とした地下への出入り口数の合計は129箇所である。また、地下駐車場への出入り口も含んでいる。
2) 流入箇所のうち、最も大きなピーク流入量となる箇所（1箇所）の値を示す。
3) 地下街への総流入量を示す。

キーワード：地下街、浸水、想定外豪雨、安全避難、数値解析

¹学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 Graduate School of Engineering and Science, Kansai University.

²正会員 関西大学教授 環境都市工学部 Professor, Faculty of Environmental and Urban Eng., Kansai Univ.. (E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp)

³正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 Assoc. Professor, Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University.

⁴フェロー会員 京都大学大学院工学研究科教授 Professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University

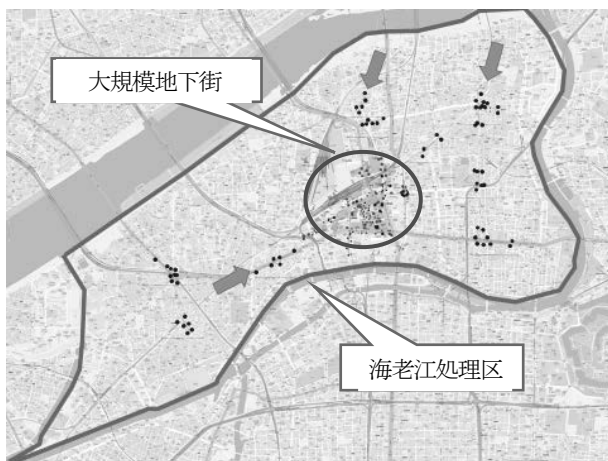


図-1 対象区域と地下空間への出入口

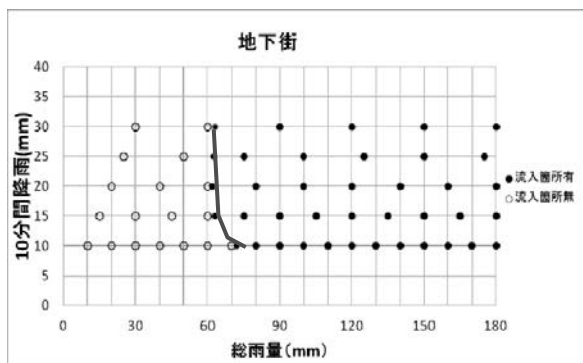


図-2 降雨条件と地下街浸水の有無の関係

2. 対象地区と対象降雨

(1) 対象地区の概要

対象地区は、図-1に示した大阪市の雨水処理区の一つである面積12.15km²で3か所の中継ポンプ場と1ヶ所の終末ポンプ場（雨水排水能力=60m³/s）を有する海老江処理区である。この地区は、JR大阪駅を中心とした密集市街地であり、私鉄および地下鉄の5駅が接続している大規模地下街が存在しており、一日に数十万人が利用している。また、図に●印で示す模地下街への公的な出入口137ヶ所、地下鉄11駅の出入口62ヶ所および鉄道トンネル坑口3ヶ所の位置が示され、これらの出入口からの地下空間への氾濫水流入量を解析対象としているが、地下街や地下鉄駅に接続している民間ビルの出入口は、個々の管理者が浸水対応をすることで対象外とした。なお、この地下街には5駅の地下駅が接続しており、氾濫水が地下街に流入した場合に止水扉等の対策をしなければ、地下駅プラットフォームから地下鉄軌道に流れ込む構造となっている。

(2) 対象降雨

対象地区の雨水排水能力は、1時間降雨60mmで計画

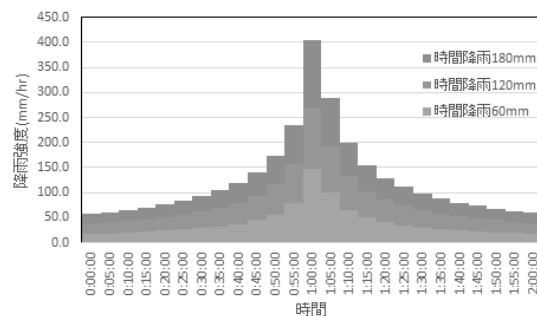


図-3 対象モデル降雨

されている。前述した2013年8月25日の10分間雨量は27.5mmであったが、1時間降雨では49mmと計画雨量を下回っている。しかしながら、独自のシステムを用いて対象地区の地下街周辺で観測した1時間降雨量は66.5mmと計画雨量を上回った⁶⁾。この結果は観測位置によって雨量が異なることを示している。そこで、10分間雨量を10mmから30mmまで5mm毎に変化させ、各強度の降雨が続いて場合に地下街に流入するかどうかを検討した結果を示すと図-2のようになる⁶⁾。なお、この図は地下鉄駅およびトンネル坑口からの流入はなしとし、出入口のマウンドアップは考慮するものの止水板は設置されていないという条件での計算結果である。図をみると、いずれの10分雨量の場合においても累積雨量が60mmに達すると地下街への流入が見られ（図中の黒丸が流入ありを示す）、地下街への流入は雨量強度と累加雨量に関係することが分かる。

以上の結果を考慮し、本検討では生起確率年と降雨継続時間を考慮した大阪市の降雨強度式を用いて図-3に示した3種の中央集中型のハイトグラフを用いた計算を行った。なお、降雨継続時間を2時間とし、降雨ピーク前後の1時間降雨量を計画の60mm（20年確率降雨に相当）と、その2倍および3倍の120mmおよび180mm（いずれも100年確率以上）とした。この降雨量は、平成27年7月に国土交通省が公表した「浸水想定（洪水、内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法」⁹⁾に基づいて算定される対象地区の1時間降雨量137mmと、昭和57年7月の長崎豪雨災害にて長与町で観測された時間降雨187mmを考慮した設定である。

(3) 解析モデル

地上の氾濫解析モデルを用いて地下街および地下鉄への流入量を計算し、その結果を流入条件として地下街内の氾濫解析を行った。前者の解析には、図-4に示した管径200mm以上の雨水排水管、4カ所のポンプ場および道路冠水のみを考慮したInfoWorks CSで構築したモデルを用いた⁷⁾。一方、地下街の氾濫解析には図-5に示した地下街全体を2mの正方格子の構造格子モデルを用い、連続式と2次元浅水方程式を基礎式とした計算を行った。

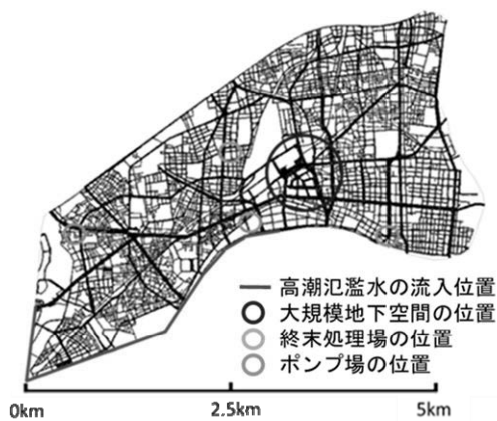


図-4 内水氾濫解析モデル

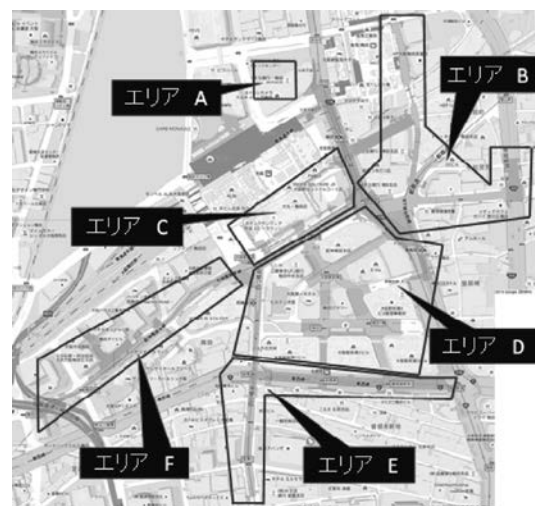


図-6 地下街のエリア分け



図-5 地下街浸水解析モデル

なお、地下街内の600余りの店舗と5つの地下駅を考慮している⁷⁾。

3. 地下街への流入量

地下街への流入量を図-6に示すように地下街をAからFの6つのブロックに分け、それぞれのブロックごとの合計流量を降雨開始から12時間経過後までの時間変化を図-7、図-8、図-9に示している。なお、ここに示した結果は排水ポンプが停止したという条件で、それぞれ、1時間雨量が60mm、120mm、180mmのケースにおける計算結果である。

図-7に示した60mmの結果を見ると、降雨がピークとなる降雨開始後1時間を過ぎた頃に地下街に流入し始め、流入はおおよそ7時間後まで継続している。エリア別にみるとエリアAでは降雨開始から7時間後まで地下への流入が続いている。このケースと同様に図-8に示した120mmの場合も降雨ピークの1時間前後に流入が始まるが、その継続時間は10より流入時間が長くなっている。ピーク流入量を見ると、エリアBが多くエリアAがそれ

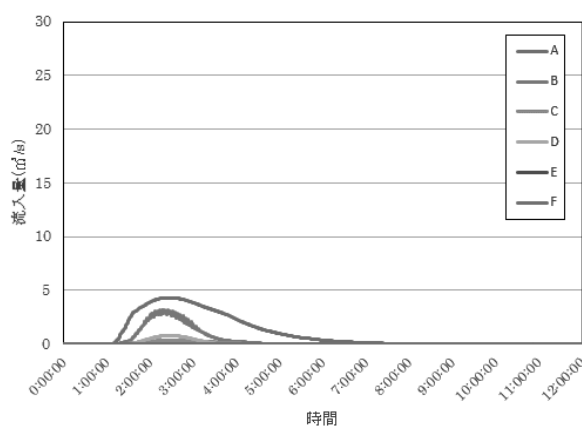


図-7 60mm 降雨による地下街流入量の変化

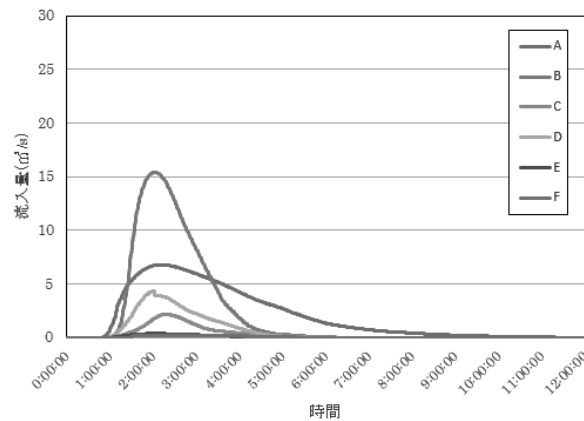


図-8 120mm 降雨による地下街流入量の変化

に続いているが、継続時間ではエリアAが最も長い。さらに、180mmの場合（図-9）、他の2ケースより少し早く降雨ピークの1時間より少し早い約50分後に流入が始まり、降雨ピークの1時間後に流入もピークとなっている。ピーク流量を見ると、エリアB、エリアD、エリアAの順に大きいですが、継続時間では他の2ケースと同様にエリアAが最も長く、12時間経過した時点でも多少流入がある。どの降雨量であってもエリアAとBは非常に流入量

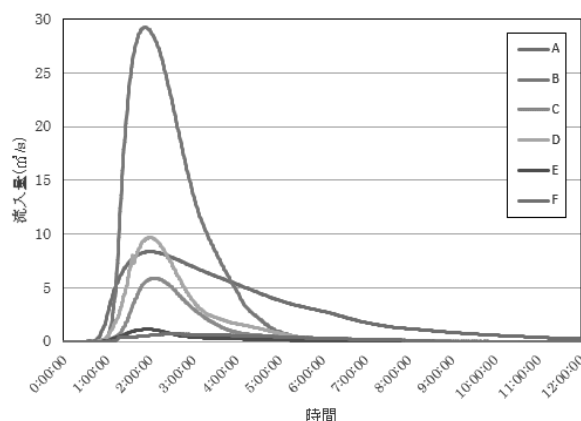


図-9 180mm降雨による地下街流入量の変化

が多くなっている。これは、道路冠水した後に道路が水路となって地盤高の低い方向に流れ、周辺良いより地盤の低いエリアAとBの浸水が続くことで説明できる。なお、総雨量に対する地下街への総流入量の比率は、時間降雨60mmのケースで6.0%に相当する6.1万m³、120mmで11.0%に相当する22.3万m³、180mmで14.0%に相当する43.1万m³となっている。なお、この量は、止水板が設置されていない出入口のマウンドアップ高さを超える道路冠水が発生して地下街に流入するという条件での結果である、このように大量の氾濫水が地下街に流入することから、地下街での安全避難に及ぼす影響が大きいことが容易に推定できる。次章では、地下街での氾濫解析結果を用いた安全避難に関する検討結果について述べる。

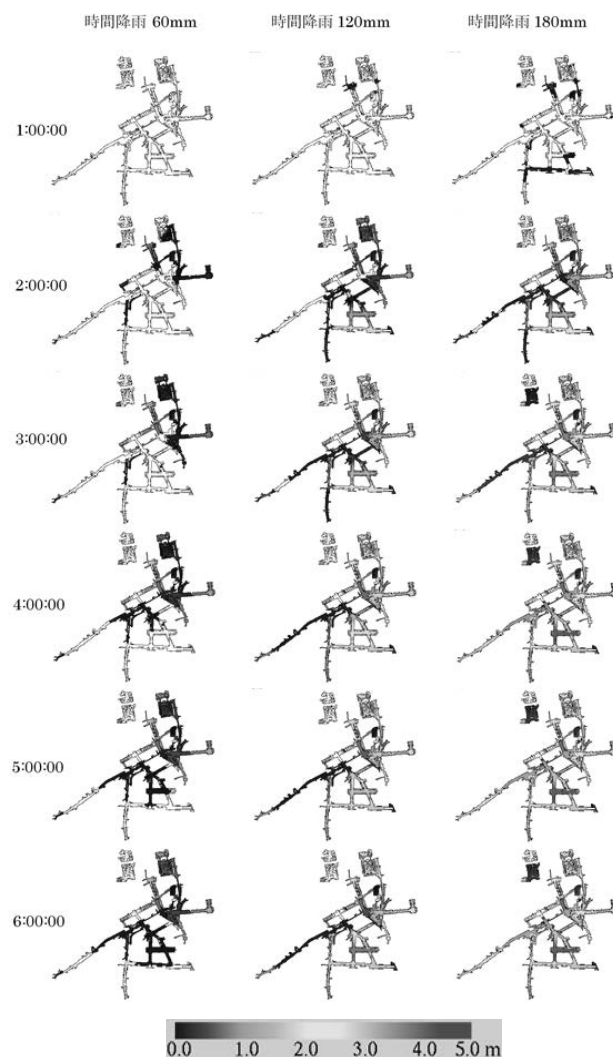


図-10 地下街浸水の刑事変化

4. 地下街浸水と安全避難に関する検討

(1) 地下街浸水

前章で示した地下街への流入量の時間変化データを用い、図-1に示した大規模地下街の出入口に相当する図-5の格子からの流入量として与えると、図-10に示す地下街の浸水計算ができる。図は3種の降雨条件における地下街浸水の経時変化をまとめたものである。

時間降雨60mmのケースに注目すると、降雨開始から1時間後までに浸水箇所は見られなかった。開始から2時間後には、エリアE以外で浸水が見られ、エリアAにおいては水深3mを超える箇所もあった。その後浸水が広がり、水深が1mを超える箇所も増え、6時間後までに地下街の約7割が浸水することが分かった。時間降雨120mmの場合、開始から1時間後までに、すでにエリアAとBの一部において浸水箇所がある。2時間後までに全エリアで浸水が起きている。エリアF以外では、水深1mを超えている箇所が見られた。特にエリアAでは、2～4m浸水している場所もある。3時間後以降、浸水は広がり水深2mを超える場所が大半を占めている。6時間後に

は、エリアDでも3m以上の浸水箇所が見られた。時間降雨180mmの場合、開始から1時間後までにエリアF以外で流入し、浸水が起きていることが分かる。2時間後までに全てのエリアで浸水が起これ、浸水している部分の約半分は水深が1m以上となっている。4時間後まで浸水は広がり、水深が上昇していることが分かるが、その後はあまり変化が見られなかった。どの解析結果においても、開始から3時間経過するとあまり変化が見られなかったのは、梅田地下街に隣接している地下鉄駅に氾濫水が流れていくため、それ以上地下街で広がらない。これは、地下街で広がった氾濫水がより低い地下鉄に向かって流れることに起因している。このことから、地下空間の中でもより低い地下鉄駅等の危険性が高まっていることが伺える。脚注や注はできるだけ避けて下さい。本文中で説明するか、もしくは本文の流れと関係ない場合には付録として本文末尾に置いて下さい。

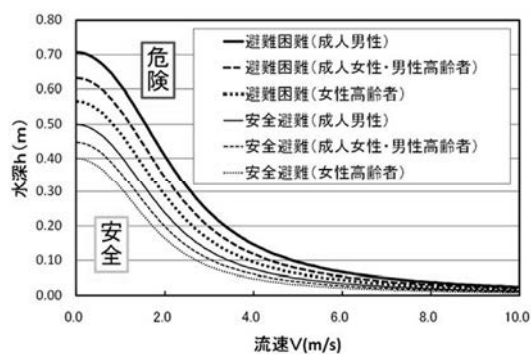


図-11 避難困難度指標

(2) 安全避難に関する検討

図-10は浸水を示したものであるが、計算結果では流速値も得られる。この水深 h と流速値 u を用いると、既報で示した単位幅比力 M_0 による避難困難度指標を用いて安全避難について検討することができる⁹⁾。なお、単位幅比力は、 $M_0 = \rho u^2 h / g + \rho h^2 / 2$ の式で計算できる。なお、 g は重力加速度(9.8m/s²)である。この避難困難度指標を水深と流速の関係で示すと図-11のようになる⁹⁾が、ここでは、高齢女性の安全避難限界である $M_0 = 0.08 \text{ m}^2/\text{m}$ の値(図中の最下部の破線で)を用い、単位幅比力がこの値を超えた計算格子を安全避難が困難になるとした。安全避難が困難となる箇所を着色して示し、3種の降雨条件における時間変化をまとめると図-12のようになる。

図-12をみると、時間降雨60mmであっても降雨開始から2時間後には、エリアAにおいて避難困難箇所が見られる。その後、エリアBとエリアCに危険箇所が広がり、6時間後までにエリアEとエリアF以外で困難箇所が発生する結果となっている。時間降雨120mmの場合、開始から2時間後まででエリアF以外の全てのエリアにおいて困難箇所が見られ、地下街のおよそ半分の場所で避難できない状態となっている。3時間後には全てのエリアで危険箇所が見られ、その後はあまり変化が見られない。時間降雨180mmの場合、2時間後までは120mmとほぼ変わらない結果となった。3時間後からエリアFでの危険箇所が広がっていき、解析終了時には地下街のほとんどの場所で避難が困難となる。開始から約3時間以降はあまり変化が見られず、徐々に危険箇所が広がっている。

図-13の安全避難可能域の面積割合の時間変化をみると、1時間経過した時点ではどの降雨量においてもほぼ安全に避難できるという結果となっている。時間が経過するにつれて、180mm、120mm、60mmの順に安全避難可能域は減少を始め、60mmの場合、5時間後まで徐々に減少するが、安全避難可能域が約6割になってから一定値を示す。120mmの場合、2時間後までに安全箇所はおよそ半分となり、その後は徐々に減少して3時間半経過したところで3割ほどになり、以後は一定となる。

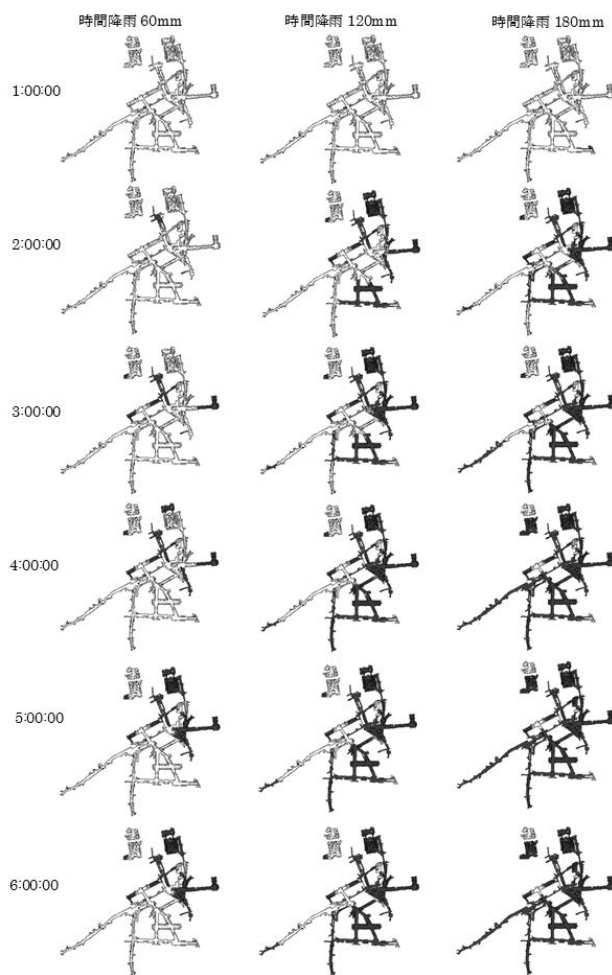


図-12 安全避難困難箇所の時間変化

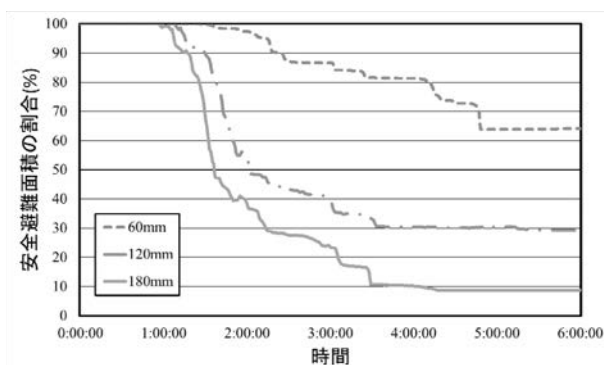


図-13 安全避難可能面積割合の時間変化

180mmの場合、2時間後までに安全避難の面積は約4割となる。3時間半経過した時点で、約1割となりその後はほぼ一定となる。特に減少が見られたのは次のとおりである。時間降雨120mmでは、開始から1時間半から45分の15分間で安全避難面積が約2割減少し、180mmでは、1時間20分から35分にかけての15分間で約3割減少する。これらの結果より、降雨量の増加は地下空間からの避難に影響を与え、安全避難のためのリードタイムの減少を招くのは明らかである。

5. おわりに

以上、本報では1時間降雨量を60mm, 120mm, 180mmとした極端気象下における大規模地下街における浸水時の安全避難について検討した。その結果、出入口のマウンドアップのみでは地下街への流入を軽減することは困難であり、降雨ピーク前後から流入が始まり、その一時間後に流入のピークを迎え、降雨が終了した後も流入が長時間続くことが予測された。このような地下街浸水が始まると、利用者の安全避難が困難となる地下街ブロックが発生し始め、1時間降雨が雨水排水計画規模の2倍あるいは3倍の場合は急激に危険区が拡大するという結果となった。利用全員の安全避難が可能となるのは降雨開始1時間となる降雨ピーク時までであることから、リードタイムが非常に短いことが明確となった。以上の結果より、10分間雨量と累雨量をモニタリングすることにより地下街浸水の発生するおそれのある場合には、止水板の順当の早期対応と利用者への避難情報の発信による早期避難を促すことが重要であることが示唆される。今後は、地下街管理者への情報発信と地下街利用者の地下街浸水に対する防災意識の向上に努める予定である。

謝辞：最後に本研究を進めるにあたり、解析等で協力いただいた関西大学の齋藤千夏さんおよび研究室諸氏に謝意を表します。また、本研究は日本学術振興会の科学研究費（15H02979, 研究代表者、戸田圭一、15K01266, 研究代表者、尾崎平）の助成を持って行った研究の成果の一部であることを記す。

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, pp.967-972, 2011.
- 2) 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, 土木学会水工学論文集, 第55巻, pp.973-978, 2011.
- 3) Ishigaki, T., Ozaki, T., Inoue, T., Shimada, H. and Toda, K., Drainage system, rainwater flooding and underground inundation in urban area, Proc. of 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, PAP005466, 2011.9. (on CD-ROM)
- 4) 黄碧蕊, 齋藤千夏, 尾崎平, 石垣泰輔, 戸田圭一：降雨量の違いが地下空間浸水時の安全避難に与える影響について, 土木学会平成29年度全国大会第72回年次学術講演会講演概要集, CS4-009, 九州大学, pp.17-18, 2017.
- 5) http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/pdf/shinsuisoutei_honnbun_1507.pdf
- 6) 石垣泰輔, 扇野大輔, 家保雅：記録的短時間降雨発生時の早期対応・避難支援システム, 第18回関西大学先端科学技術シンポジウム講演集, 46-49, 2014.
- 7) 濱口瞬, 石垣泰輔, 尾崎平, 戸田圭一：記録的水災害に対する大規模地下空間の浸水脆弱性に関する検討, 土木学会論文 B1(水工学), Vol.72, No.4, pp. I-1363- I-1368, 2016.
- 8) 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.
- 9) 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, 土木学会水工学論文集, 第53巻, pp.859-864, 2009.