

内水氾濫時における大規模地下空間浸水と避難

石垣泰輔*・戸田圭一・尾崎 平*・馬場康之・井上和美**

* 関西大学環境都市工学部

** 関西大学大学院理工学研究科

要 旨

近年、記録的短時間降雨の発生頻度が増加しており、下水道による雨水排水能力を超えた内水氾濫や中小河川の疎通能力を超えた外水氾濫が発生している。本研究は、大規模地下街を含む都市域を対象にし、内水氾濫時における地下空間の浸水に対する脆弱性と避難困難度についての検討を行ったものである。地表部での内水氾濫を下水道網を考慮したモデル (InfoWorsk CS) を用い、地下街への流入量を算定して地下空間の脆弱性を検討した。さらに、2 次元構造格子モデルを用いて大規模地下街における浸水過程を計算し、実物大模型を用いた避難体験実験結果に基づく避難困難度指標を用いて地下空間浸水時の避難困難度を評価した。その結果、安全な避難計画の策定に資する避難困難度マップが得られた。

キーワード：都市型水害、内水氾濫、地下空間浸水、大規模地下街、避難

1. はじめに

都市域では、雨水を排水するために下水道が整備されているが、その排水能力は、1 時間に 30mm～50mm の雨を対象として設計されている。しかしながら、記録的短時間降雨が都市域で発生した場合、雨水の排水能力を上回り、内水氾濫が発生する。そのため、都市部では、内水氾濫による被害額が外水氾濫による被害額を超えているのが現状である。路上に溢れた水は、地盤の低い区域に溜まるとともに、より低い位置にある地下街や地下鉄などの大規模地下空間やビル等の小規模地下空間へと浸水し、甚大

な人的・物的被害が生ずる。

これまで、地下空間浸水時の避難について、実物大模型を用いた避難体験実験結果に基づく避難困難度指標の提示、その適用として地下空間の浸水解析と組み合わせた避難困難度の検討を行ってきた（石垣ら、2005、2006；大西ら、2007、2008；浅井ら、2009；Ishigaki et al, 2005, 2006, 2008a, 2008b, 2009, 2010; Onishi et al., 2009; Asai et al, 2010）。その結果、**Table 1** に示す単位幅比力を用いた避難困難度指標を得た。この指標は、流速 u と水深 h を用いて、 $Mo=u^2h/g+h^2/2$ と表され、**Fig.1** に示すように浸水時

Table 1. Criteria of safe evacuation presented by the specific force per unit width, M_0 (m^3/m)

	Limit of safe evacuation	Difficult without any help
Male	0.125	0.250
Elderly male	0.100	0.200
Female	0.100	0.200
Elderly female	0.080	0.160

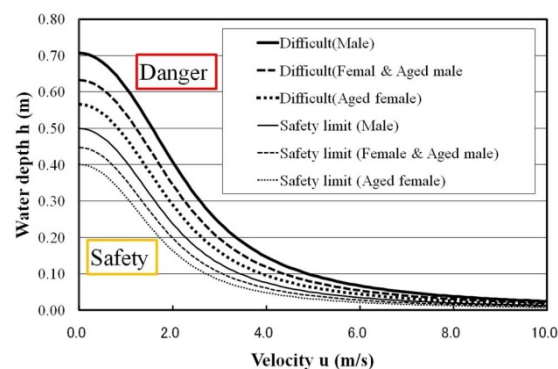


Fig. 1 Criteria of safe evacuation described by water depth and velocity

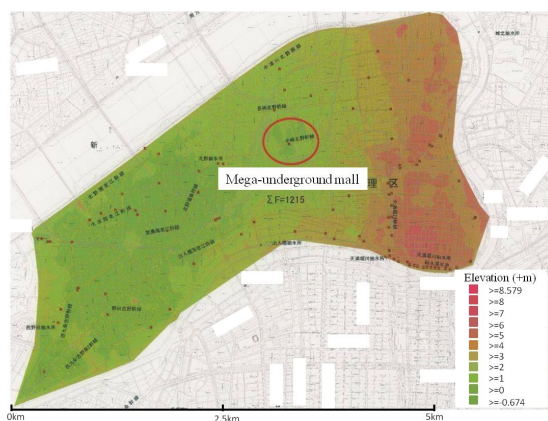


Fig. 2 Study area and elevation map



Fig. 3 Drainage system (D>200mm) in the study area

の歩行安全度を流速と水深で領域分割して評価できる。したがって、この指標は、浸水時の避難のみならず水難事故等の流水中を歩行する場合にも適用が可能である。さらには、可搬式浸水ドア模型を用いた避難体験実験を行い、地下浸水の危険性を啓蒙してきた（中畑ら，2010）。ここでは、わが国でも有数の大規模地下空間である大阪梅田地下街を対象に浸水リスクと脆弱性を検討し、避難対策で考慮すべき課題を探った（森兼ら，2011；井上ら，2011）。

2. 対象地区の概要

本研究で対象としたのは、北を淀川、東と南を大川に囲まれた地区であり、**Fig.2** の地盤高分布が示すように東高西低の地形を有する。図中の○で囲った地区に一日約60万人と言われる日本でも有数の大規模地下街がある。この地区は、大阪市の洪水ハザードマップによると、外水氾濫（淀川の氾濫）では浸水深が3m以上、東海豪雨規模の降雨による内水氾濫では0.5～1.0mの浸水深が想定されている。この地区の雨水排水は、**Fig.3** に示す海老江処理区（排水面積

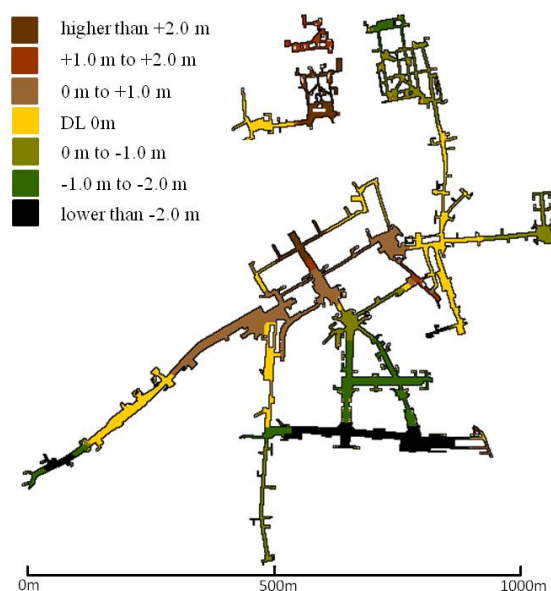


Fig. 4 Surveyed floor level of passages in the mega-underground mall

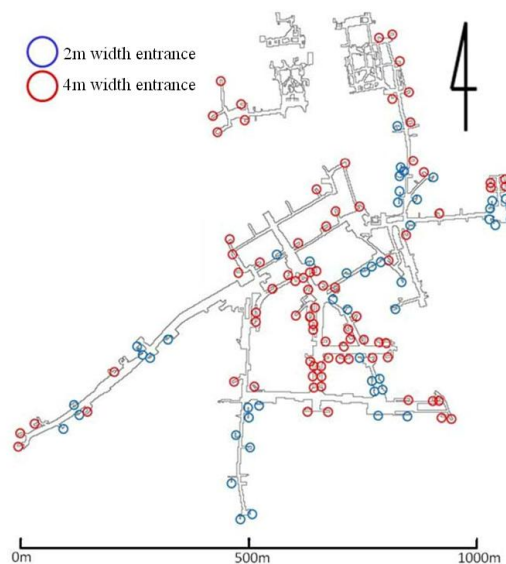


Fig. 5 129 considered entrances of underground mall for calculations of inundation

1215ha) の下水道網が担っており、4か所の抽水場から正蓮寺川および堂島川に放流されている。

ここでは、雨水排水能力を上回る集中豪雨による内水氾濫時の地下街浸水について検討した結果を示す。検討に先立ち、地下街の構造について現地調査を行った。**Fig.4** は、地下街の店舗を含まない通路のみで構成したモデル図であり、フロアレベルの高低差を併示している。図より、地下街は1km四方の範囲に及んでおり、フロアレベルは最大4mにも達していることが分かる。また、**Fig.5** は地上より地下に通ずる出入口の位置を示しており、これらの出入口から浸水する可能性がある。なお、これらの出入口は、

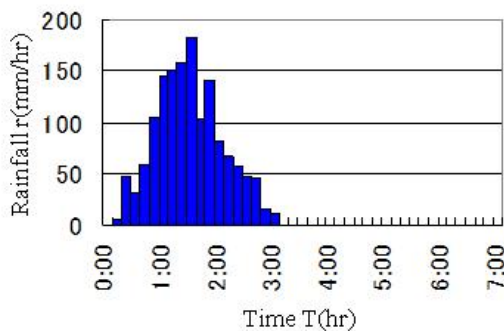


Fig. 6 Heavy rainfall observed on 29, August, 2008 in Okazaki, Aichi, Japan

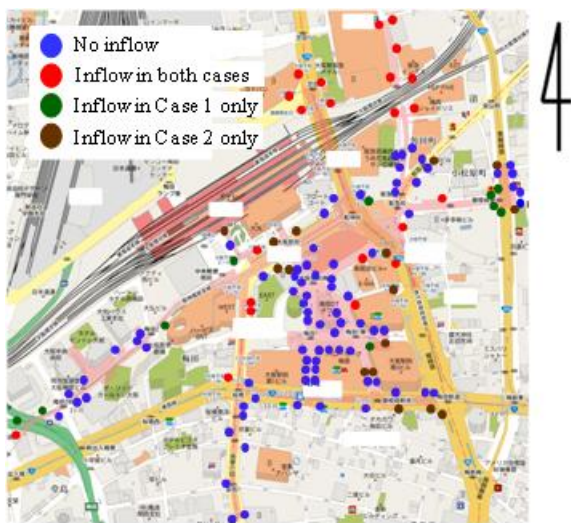


Fig. 7 Location of the entrances from where rainwater intrudes

道路面に直結している公共のものであり、隣接ビル等の私有地から地下街に連絡している出入口は含んでいない。また、地下街には地下鉄駅が存在するため、氾濫水は改札口を通して地下鉄構内にも流入する可能性があるが、ここでは、地下鉄への流入は止水板等で遮断されるとして考慮していない。

3. 大規模地下街の浸水脆弱性

地下街の浸水状況は、内水氾濫時の道路上の浸水深により決まる流入条件により異なる。この流入条件（流入量の時間変化）を設定する方法として最も簡便な方法は、内水氾濫の浸水深の時間変化を浸水対策ガイドライン等を参考にし、出入口での越流水深から流入条件を設定する方法である。一方、現状に近い流入条件を設定するには、雨水排水施設を考慮し、マンホールからの溢水や道路上を流れる雨水の挙動を考慮した計算を行い、出入口付近の浸水深の時間変化から流入量を算定する方法である。本研

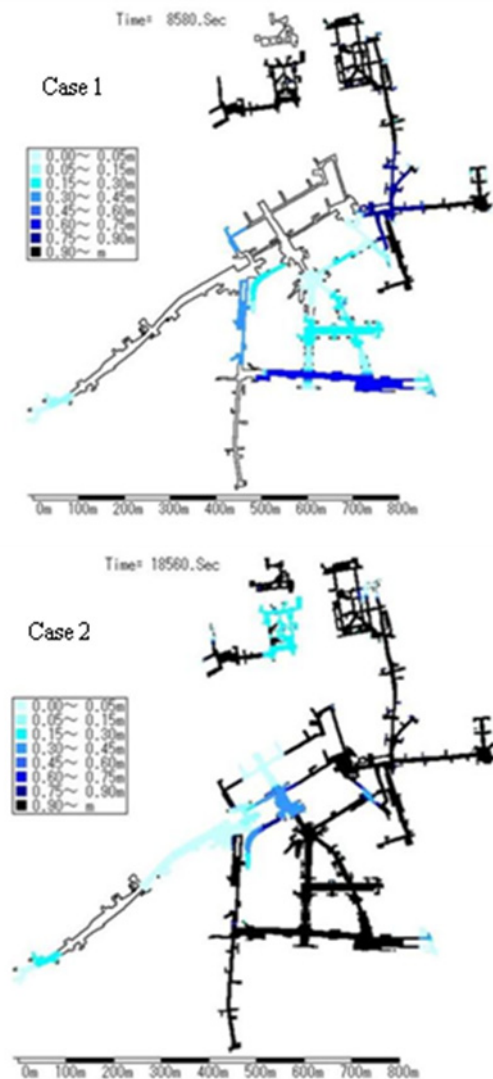


Fig. 8 Distributions of inundation depth when the total volume is 50,000 m³ in Case 1 (upper figure; considering only ground level of entrances) and Case 2 (lower figure; considering drainage system)

究では、これら二通りの流入条件を設定して得られる浸水過程や避難困難度評価の差異を明らかにし、適切な避難計画策定時に考慮すべき事項について検討することを目的とした。ここで用いた簡便な条件設定として、浸水深が地下空間の浸水対策ガイドラインを参考に内水氾濫時には毎分2cmで上昇するとし、出入口の地盤高とマウンドアップ高を考慮した場合、つまり、地盤高の低い出入口から順番に流入するCase 1と、現状に近い条件設定として、**Fig.3**に示した雨水排水網の流れをプライスマンスロットモデル、道路上の流れを非構造格子を用いた2次元浅水流として取り扱う汎用モデルであるInfoWorks CSを用いて出入口からの流入量を算定したCase 2の2ケースを対象にした。ここに、Case 2を計算する際の降雨としては、平成20年8月の岡崎豪雨（**Fig.6**）

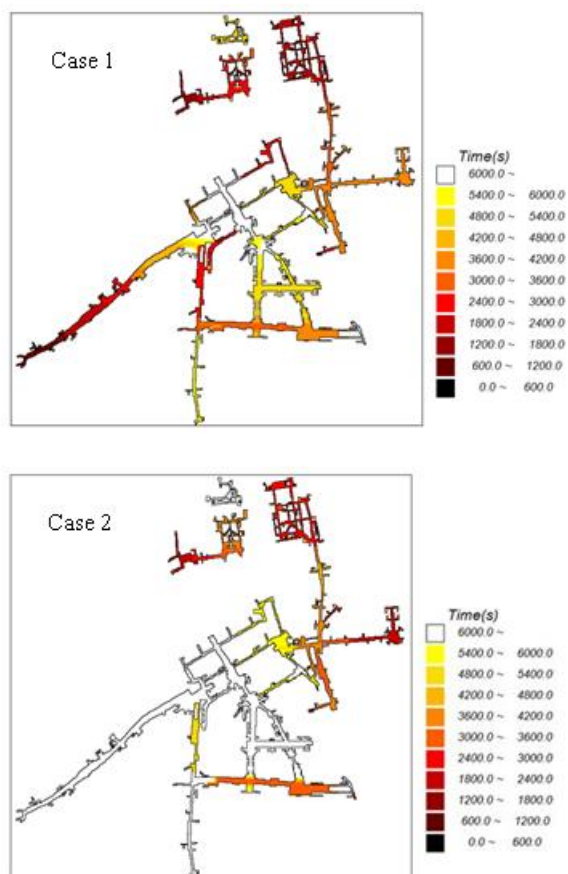


Fig. 9 Difficulty of evacuation for elderly female obtained on the basis of criteria of safe evacuation by using the specific force per unit width, $M_0=0.08 \text{ m}^3/\text{m}$ in Case 1 (upper) and Case 2 (lower)

を用いた。これらの2ケースで得られた流入条件を用い、Fig.4 に示した構造格子モデル (2m正方形格子) を用いて浸水状況を計算した。なお、Manningの粗度係数は0.02、計算差分時間は0.01秒とした。

Fig.7 は、検討した2ケースにおいて氾濫水が流入する出入口を示したものであり、ケースにより流入する出入口が異なる結果となっている。これは、Case 2 においてはマンホールより溢れだした雨水が道路上を流れて局所的に低い場所に集まることによって浸水深が増加し出入口高さを超えることがあることを示している。Case 1 とCase 2 の差異は、Fig.8 に示した地下街の浸水状況で明確に見られる。この図は、積算した流入量が $50,000\text{m}^3$ となった時点での浸水域の広がりや浸水深の分布を示したものである。図より、Case 1 の場合は地下街の南西と北東ブロックより浸水が始まるのに対し、Case 2 では北東・東・南西ブロックよりほぼ同時に浸水が始まり浸水域が広がって行く。このように、地上の氾濫状態が地下浸水過程に影響するため、内水氾濫による地下街の

浸水脆弱性を検討する際には雨水排水施設を考慮し

Table 2 Inflow discharge into the mega-underground mall which calculated for the three heavy rainfalls

Order of inflow	Inflow discharge (m ³)			
	Area	Okazaki rain (2008.8)	Toyonaka rain (2006.8)	Fukui rain (2004.7)
3rd	A	109,925	18,458	60,629
2nd	B	137,662	25,236	68,255
6th	C	3,446	0	0
4th	D	19,121	1,547	537
1st	E	5,358	1,466	1,978
5th	F	216	1	0
	Total	275,727	46,799	131,399

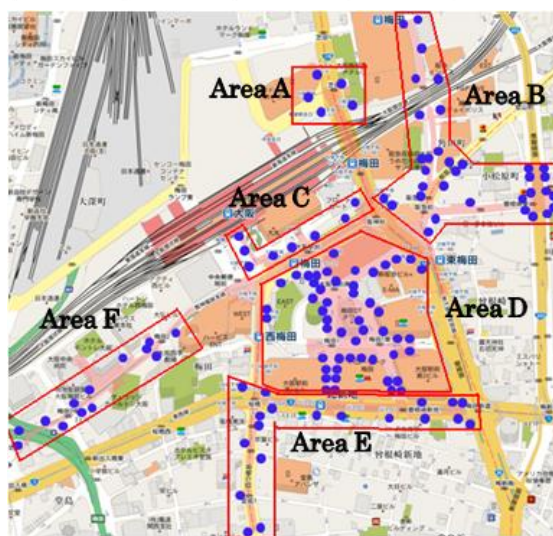


Fig. 10 Six blocks of entrances for calculating inflow discharge into the mega-underground mall

た地上氾濫計算が必要である。なお、この結果は、雨水排水系統、雨水排水ポンプ容量、道路網とその諸元等の影響が大きいことを考慮しておく必要がある。

4. 内水氾濫による地下浸水時の避難困難度

これまで、浸水状態での避難困難度について、実物大模型装置を用いた避難体験実験結果に基づいて検討してきた。その結果、性別・年齢別に、流れによる力と水圧による力を考慮した単位幅比力による避難困難度指標を示した。ここに、避難困難状態とは、避難時の危険を感じる状態であり、避難限界状態とは手すりや命綱等の補助なしでの避難が困難な状態を示している。以下では、ほぼ全員が避難することが必要なことから、もっとも低い指標である高齢女性の避難困難状態にあたる $0.08\text{m}^3/\text{m}$ を用い、上記した2ケースの浸水状態での避難困難度評価結果を示

す。**Fig.9** は、地下街に流入が始まってから、避難困難状態になるまでの時間、すなわち、各地点での流速と水深から計算される単位幅比力の値が $0.08\text{m}^3/\text{m}$ に達する時間の分布を図示したものである。図より、いずれのケースでも地下街の多くの部分が避難困難状態に達していることが分かり、地下浸水の危険性が再確認される。また、ケースにより、同じ地点でも避難困難状態に達する時間が異なることが知れるとともに、フロアレベルの低いブロックに湛水するなど流入条件により避難誘導を重点的に行うブロックがことなることから、避難計画策定時には条件設定が重要であることが示唆される。

5. おわりに

以上、内水氾濫時の大規模地下空間の浸水脆弱性と避難困難度について検討した結果を示した。ここでは、大規模地下空間のみを対象としたが、地下浸水に対してより脆弱なのは中小規模の地下空間、すなわち、民間ビル等の地階や地下室であるため、同様の方法で、その脆弱性と避難困難度について検討する必要がある。以上の結果は、避難計画策定の基本情報となるものであり、**Table 2**（ブロック分けは**Fig.10** 参照）に示すように他の規模の降雨でも地下空間への浸水が予測されるため、今後さらなる検討を加え、より有益な結果を示して行く予定である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、防災研究所宇治川オープンラボラトリーの方々、ならびに関西大学環境都市工学部都市システム工学科の島田広昭先生、学部生、大学院生に実験等でお世話になりました。ここに心からの謝意を表します。

参考文献

浅井良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一（2009）：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。
石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川 一・吉田義則・多河英雄（2005）：実物大階段およびドア模型を用いた地下空間からの避難に関する水理実験，京都大学防災研究所年報，第48号B，pp.639-646。
石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川 一（2006）：実物大模型を用いた地下空間から避難に関する実験的検討，水工学論文集，第50巻，（98），

（on CD-ROM）。

井上知美・川中龍児・石垣泰輔・尾崎 平・戸田圭一（2011）：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。
大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一（2007）：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，土木学会水工学論文集，第51巻，pp.559-564。
大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一（2008）：地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用，土木学会水工学論文集，第52巻，pp.841-846。
中畑佳城・石垣泰輔・島田広昭・戸田圭一（2009）：可搬式ドア模型による浸水時避難体験実験と参加者の水防意識について，土木学会水工学論文集，第54巻，pp.913-918。
森兼政行・石垣泰輔・尾崎 平・戸田圭一（2011）：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，土木学会水工学論文集，第55巻，pp.967-972。
Asai, Y., Ishigaki, T., Baba, Y. and Toda, K. (2010): Safety analysis of evacuation routes considering elderly persons during underground flooding, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.28, No.2, pp.15-21。
Ishigaki, T., Baba, Y., Toda, K. and Inoue, K. (2005): Experimental study on evacuation from underground space in urban flood, Proc. of XXXI IAHR Congress, Seoul, (on CD-ROM).
Ishigaki, T., Toda, K., Baba, Y., Nakagawa, H. and Shimada, H. (2006): Difficulty of evacuation from underground space in urban flood, 7th International Conference on Hydroinformatics, HIC2006, Nice France, pp.614-620。
Ishigaki, T., Onishi, Y., Asai, Y., Toda, K. and Shimada, H. (2008a): Evacuation Criteria during Urban Flooding in Underground Space, Proc. of 11th International Conference on Urban Drainage, Scotland, UK, (on CD-ROM).
Ishigaki, T., Kawanaka, R., Onishi, Y., Shimada, H., Toda, K. and Baba, Y. (2008b): Assessment of safety on evacuating route during underground flooding, Proc. of 16th IAHR-APD Congress, Nanjing, pp.141-146。
Ishigaki, T., Asai, Y., Nakahata, H., Shimada, H., Baba, Y. and Toda, K. (2009): Evacuation of aged persons from inundated underground space, Proc. of 8th International Conference on Urban Drainage Modelling, Tokyo, (on CD-ROM).
Ishigaki, T., Asai, Y., Nakahata, Y., Shimada, H., Baba,

- Y. and Toda, K. (2010): Evacuation of aged persons from inundated underground space, Water Science and Technology, IWA Publishing, 62.8, pp.1807-1812.
- Onishi, Y., Ishigaki, T., Baba, Y. and Toda, K. (2009): Criterion and its application for safety evacuation during underground flooding, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.27, No.1, pp.83-88.

Rainwater Flooding into Mega-Underground Space and Evacuation

Taisuke ISHIGAKI*, Keiichi TODA, Taira OZAKI*, Yasuyuki BABA and Tomomi INOUE**

* Faculty of Environment and Urban Engineering, Kansai University, Japan

** Graduate School of Science and Engineering, Kansai University

Synopsis

Torrential rains have been observed frequently in recent years in Japan and these rainfalls caused inundations in urban areas. Intensity of such rainfalls were sometimes excess over the capacity of drainage systems and rainwater was running over the road. In these floods, some portion of rainwater intruded into underground spaces and people there faced the danger of underground flooding. In this paper, underground flooding in a mega-underground mall were investigated by using 2D shallow flow model with structural mesh and evacuation from there was also studied with the criteria of safety evacuation obtained by evacuation tests. The results show that flooding processes and safety of evacuation depend on the inflow conditions into underground space.

Keywords: urban flood, rainwater flooding, underground inundation, mega-underground space, evacuation