

地下鉄駅が立体的に接続する地下空間 における浸水過程に関する数値解析

NUMERICAL ANALYSIS OF INUNDATION PROCESS IN UNDERGROUND SPACE OF SUBWAY STATION

関根正人¹・中村 淳²

Masato SEKINE¹ and Jun NAKAMURA²

1 正会員 工博 早稲田大学理工学部社会環境工学科 (〒 169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

2 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

Inundation process in underground space which connecting some platforms of subway stations in urban area was investigated in the present study. Tameike-sanno subway station is the site to be discussed, and actual data sets of road network and underground space and some more were all considered, and simplified numerical model was developed. Based on the results of numerical computation, the pattern of inundation process here was understood quantitatively. It was suggested that if the intensity of rainfall exceeds some critical value, the damage in the underground space is expected more serious than the state under the condition of real rainfall which we experienced.

key word : inundation, underground space, subway station, heavy rainfall.

1. 序論

我が国はこの二年間かなりの規模の水害に見舞われ、国土は甚大な被害を被ることになった。東京をはじめとした都市では、幸い大きな被害が生じることはなかったものの、都市水害の危険性を再認識する機会となった。たとえば、2005年9月の台風14号の影響から、東京杉並など広い範囲で1時間に100 mmを越える豪雨があり、床上浸水に到る被害が発生した。ただし、新宿・渋谷といった大規模地下街を抱える地域や、浸水が懸念されるような地下鉄駅周辺ではそれほどの強度の豪雨にはならなかったため、著者らが近年危険性を指摘してきているような深刻な事態—すなわち大規模地下空間の浸水被害—にまでは到らなかった。しかし、これまで計画上想定してきた時間雨量が50 mmであることを考えると、短時間とはいえその2倍を超える豪雨に見舞われた事実が広く周知されたことは、都市住民が水害の危険性に対する正しい認識を共有するという意味で貴重な経験となったのではないかと考える。

ところで、著者ら^{1), 2)}は、これまで東京を代表する大規模地下街における浸水の可能性と、そのプロセスの解明に取り組んできたが、新宿・渋谷

ともに水害に対する備えのうち、少なくともハードウェアに関しては十分であるように思われる。しかし、止水板や土嚢の設置といった対策は人間が行動を起こして初めて機能するものであるため、やむを得ざる対応の遅れなどによって、不可避免的に浸水が生じてしまう可能性は否定できない。そこで、今後重要なことは、ソフトウェア上の対策、すなわち、利用者に浸水の危険性を周知すること、ならびに、そこに留まっている利用者の避難をいかに効率よく行うか、といった検討であり、これを早急に進めることであろう。このことは、地下鉄構内にも言えることである³⁾。東京では、複数の地下鉄路線が網の目状に延びており、その相互が駅構内（すなわち地下空間）で立体的に接続しているために、連絡通路や階段が立体的にしかも複雑に延びている。このことは、ひとたび浸水に見舞われたときの浸水状況が一樣ではないことを意味し、いくつかの区域が局所的に水没して避難に使えなくなり、通路の連続性が失われることもある。以上のような事情から、今後、浸水が懸念される地下鉄駅を特定し、そのような駅構内では浸水した場合に生じる水の流れを明らかにしておくことが必要であると考えている。

このような状況に鑑み、本研究では、これまでも

浸水被害を経験している溜池山王駅とその周辺地域を対象とし、地下鉄構内における浸水拡大過程に関する検討を行った。この地下空間は地下鉄銀座線、南北線、千代田線ならびに丸ノ内線のプラットホームを相互に結んでおり、2004年度の1日の平均乗降者数が111,792人であるとされる。検討の結果、浸水が懸念されるのは、このうち銀座線と南北線の区域であり、それ以外の区域に被害が拡大することはないものと理解された。そこで、本論文では前者の区域に限って論じるものとする。

2. 解析概要

(1) 解析対象

本研究では、東京都千代田区と港区の間に位置する溜池山王駅構内ならびにその周辺地域を検討の対象として数値解析を行った。地上の対象区域は図-1に描かれた通りであり、約2.9km²の面積を持つ。この区域には地名に表れているように江戸時代に「ため池」が維持されてきたところであり、雨水が集まりやすい地域と言える。なお、図-1中の折れ線は実際の道路ネットワークを描いたものであり、黒丸が解析の際に計算点となる交差点を表す。この

区域には首相官邸をはじめとした国の主要な施設が含まれるほか、その地下には地下鉄銀座線、南北線、千代田線ならびに丸ノ内線が図のような位置を通っている。これらの地下鉄は、図の中央右上の位置で立体交差しており、そこに溜池山王駅がある。この駅構内（地下空間）は図中の赤線で示した「ト」の字形をしており、その詳細は図-2に示されている。この地下空間は、地下鉄の新線の開通に伴い拡大してきた経緯などから複雑な構造をしており、地下1階（B1F）に相当する部分は通路の一部に過ぎず、地下2階（B2F）が主要な階となっている。そして、銀座線の駅施設は地下3階（B3F）に改札口があり、階段を上った地下2階にホームがある。一方、南北線は地下2階に改札口があり、階段を下りた先の地下3階にホームがある。なお、この南北線のホームには転落防止用の隔壁が設けられており、電車到着時にのみゲートが開く構造となっている。そのため、このホームに流入した水は線路のあるトンネル部分に落ちることなくホームに貯まってしまうことになる。

本研究で検討の対象とする降雨は、1999年8月29日に観測された実績の降雨であり、そのハイエトグラフを図-3に示した。降雨継続時間は1時間

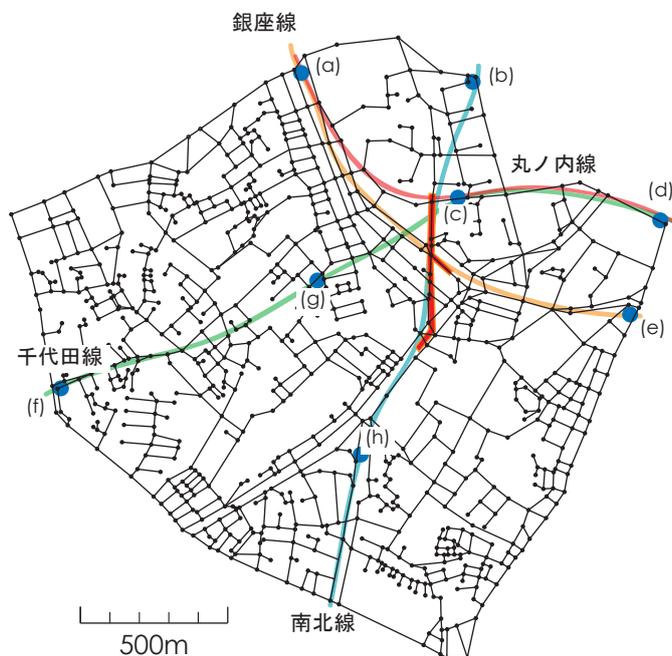


図-1 解析対象区域の概要：

図中の折れ線が道路ネットワークを、点が交差点（計算点）を表す。また、図中央右上の「ト」の字形の部分が溜池山王駅、●印は(a)赤坂見附駅、(b)永田町、(c)国会議事堂前、(d)霞ヶ関駅、(e)赤坂駅、(f)乃木坂駅、(g)虎ノ門駅、(h)六本木一丁目駅、をそれぞれ表す。

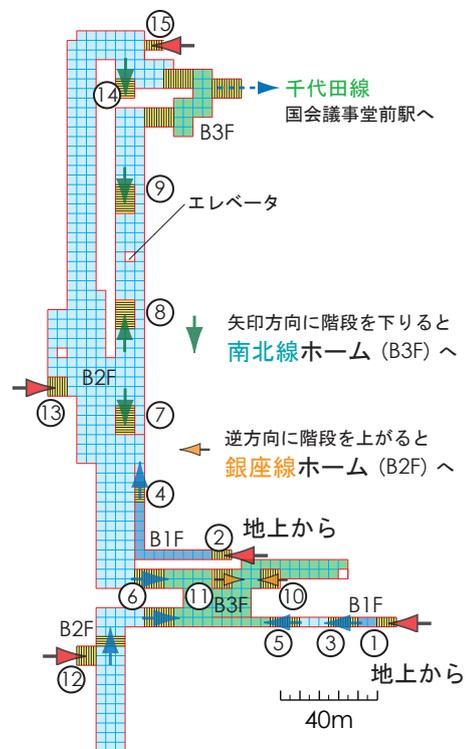


図-2 解析対象となる地下空間の主要区域の概要：

図中の矢印は下り方向に描いた連絡階段を表す。緑の矢印の方向に階段を下ると南北線のホームが、黄色の矢印と逆方向に階段を上ると銀座線ホームに到る。図中の数字は階段の通し番号を表す。

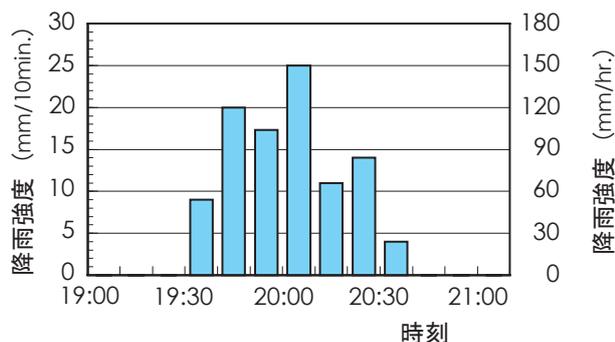


図-3 解析の対象とした実績降雨 (1999年8月29日)

程度と短い、時間雨量が約 100 mm/hr という典型的な集中豪雨であった。本研究では、図-3のデータを 1.10 倍ならびに 1.20 倍に引き伸ばした降雨を対象とした解析も参考のため行っており、今後万一突発的に現状より高い強度の降雨に見舞われた場合に、浸水状況がどのように変わっていく可能性があるかについても検討した。

(2) 数値解析モデル

数値解析モデルの概要について簡単に説明する。基本的な考え方は前報^{1),2)}で説明したものと同様であり、数値解析の骨格は、道路上の雨水の流動の解析と地下空間内の氾濫水の伝搬過程の解析とからなる。地上の氾濫水の挙動と地形データならびに駅関連施設の構造から判断して、溜池山王駅構内への氾濫水の流入は、地上から地下への2箇所の連絡階段を通じて生じる。しかも、各々の連絡階段入り口近傍の地上の計算点における水深が 0.4 m (これは、車道と歩道との標高差に、連絡階段入り口のステップ高を加えた高さに相当する) を超える場合に、この地下空間への浸水が始まることになる。そこで、この条件が満足される限り「段落ちの考え方」に従って流入流量を算定し、これを境界条件として地下空間内の水流の解析を行った。道路上の解析は図-1に示した道路ネットワークを対象に行い、黒丸で表される計算点における水深と、その中点に当たる位置での流速をそれぞれ求めている。地下空間に関しては、図-2に示した空間内の計算格子を対象とし、スタッガード格子の考え方に従って基礎式を離散化して解いており、いわゆる平面二次元解析となっている。運動方程式の解法に当たっては、これまで Diffusion wave 近似を適用してきたが、本解析ではこれに代わって、運動方程式における移流項以外のすべての項を考慮して解析を行うことにした。今後は利用者の地下空間からの避難について考えていく必要があるが、そのためには、たとえば氾濫水

フロントの伝搬過程などをできるだけ精度よく予測することが望まれる。上記の修正はこのようなことを念頭において行ったものである。なお、この解析の際に必要な道路上ならびに地下空間の床面上の Manning の粗度係数に関しては、これまでに做ってそれぞれ 0.03 ならびに 0.02 とした。この値が真に妥当であるかについては、検証に用いることのできる観測データが十分でないことなどから、今後の課題と位置づけている。ただし、本研究では、対象とする地下空間の浸水パターンを明らかにすること、ならびに降雨規模のわずかな違いによって被害状況が大きく異なることを示すこと、を主たる目的としており、その意味ではこれらの値の如何によってここでの結論まで損なわれることはないと考えている。

3. 実績降雨に対する解析結果

(1) 地表の内水氾濫

図-4は、図-3に示した降雨データに対して得られた地表氾濫水の水深コンター図の計算結果である。ここには、降雨開始から 60 分後ならびに 120 分後の結果が示されている。図よりわかる通り、対象区域内にはいくつかの低地が形作られており、この限られた区域で過大な浸水深となる一方で、それ以外のほとんどの区域ではさほど問題となるような水深にはならない。このうち、水防災上問題となるのが、溜池山王駅の真上に位置する区域であり、かつてここに「ため池」がつけられていたことは既に述べた通りである。次に、この区域の水深の時間変化を表したのが図-5である。図より降雨開始から 84 分後にこの区域の水深が 0.4 m を越えるため、その直後から地下への浸水が始まることになる。なお、降雨開始から 3 時間までの時間帯におけるこの地点の最大水深は 0.47 m であった。この区域に存在する地下鉄駅構内への連絡階段は図-2の No.1 および 2 であり、これらの階段から地下への氾濫水の流入が生じるようになった。

(2) 地下空間の浸水

地下空間における浸水状況については、その浸水深のコンター図を図-6に示した。この地下鉄駅構内は、新宿や渋谷の地下街のように複層構造にはなっておらず、連絡階段を通じて地上から地下3階まで連続的につながっている。ただし、いったん地下3階まで降りたあと地下2階へと上がることで銀座線ホームに到るなど、その構造は単純なものではない。図-6には浸水開始から 30, 60, 90 分後のコ

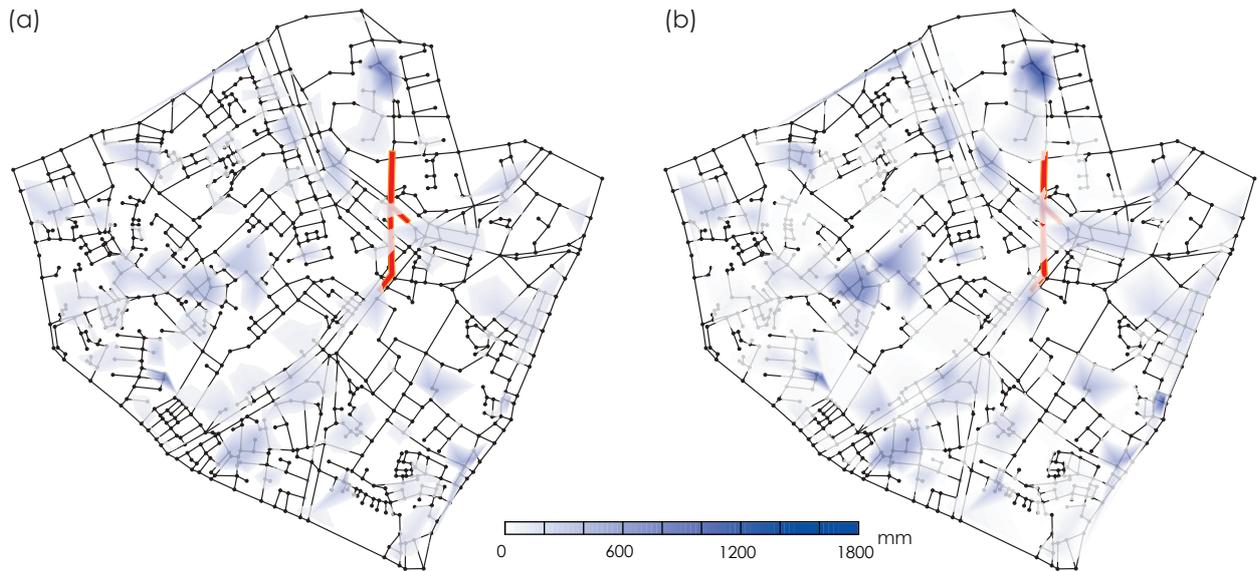


図-4 対象区域内の地上の氾濫水の水深コンター図：降雨開始から (a)60分後, (b)120分後

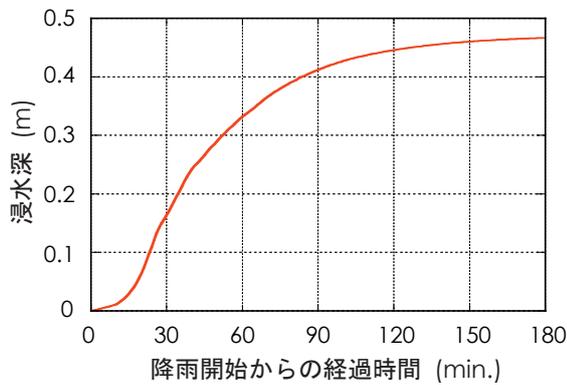


図-5 地上からの連絡口付近の水深の時間変化：降雨開始時刻は 19:30

ンター図が示されている。この図より、この地下空間内の浸水に関して次のようなパターンを見ることが出来る。すなわち、(1) 浸水深が大きくなるのは、地下3階の銀座線改札口付近と、地下2階の南北線改札口付近ならびにそのホームに限られること、(2) 地下鉄ホームとしては南北線のみが浸水被害に遭う可能性があること、などである。銀座線改札口付近の地下3階部分での浸水深は最大で0.35 mとなった。なお、図-7には図-6(b)に対応する時刻における氾濫流の速度ベクトル図が示されている。この図より、下り階段の接続部で流速が大きく、最大で概ね0.4 m/s程度と予測された。さらに、図-8には、この地下空間内の各々の連絡階段を通じて流入する水の体積の累積値の時間変化を表している。この図より、主要な氾濫水の経路が次のようになることが理解される。すなわち、連絡階段1から流入した氾濫水は最終的に連絡階段3および5を流

下して銀座線改札口付近に、また、連絡階段2から流入した氾濫水は連絡階段4および6を流下し同じく銀座線改札口付近に、さらに連絡階段4および7を流下した水が南北線ホームに、それぞれ流下することが懸念される。また、図-9には、南北線の地下ホームにおける氾濫水の水深の時間変化を示している。このホームには転落防止のためホームと線路とを隔てる壁が設けられていることは既に述べた。このため、ひとたびホームに流入した水が線路に落ちてなくなることはなく、時間の経過とともに貯留されていく。ここでの解析条件下では、この水深は最大で0.09 m程度であったが、後述する降雨条件によってはさらに深刻な値となることもあり得る。

4. 想定降雨規模の違いが結果に与える影響

本研究では、図-3に示した降雨データを基本とした解析に加えて、これを一律に1.1倍(110%)あるいは1.2倍(120%)となるように引き伸ばした降雨を対象とした解析も行っている。図-3は対象区域に近い東京渋谷で観測された実績降雨であるが、近年の傾向から推察すると、この程度引き伸ばしたような豪雨に見舞われないとも限らない。解析結果のうち重要な意味を持つ数値のみ比較した結果を表-1ならびに図-9にまとめて示す。連絡口付近の地上水深の値を見ると、図-3の実績降雨データの場合には、この地下空間に水が入り込む限界の値0.4 mをわずかに越えた程度に留まるため、軽度の被害ですむことを意味している。一方、実績降雨より10%だけ降雨強度が増大しただけで、地下空

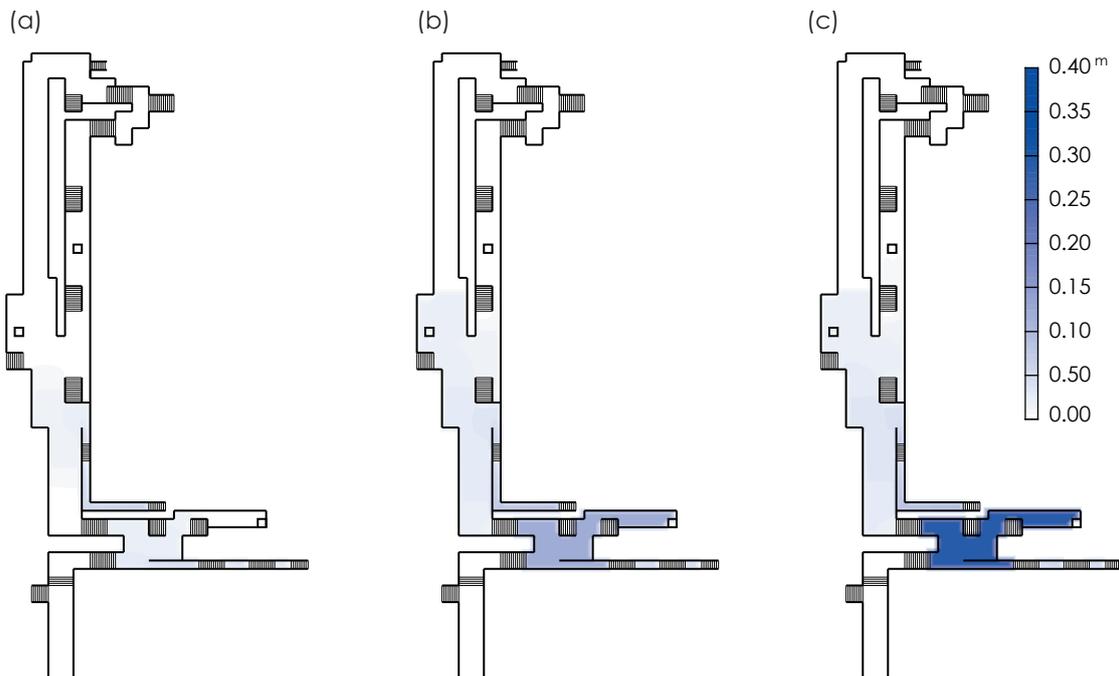


図-6 地下空間内の浸水深のコンター図：
降雨開始から (a)114 分後（浸水開始から 30 分後）、(b)144 分後（同 60 分後）、(c)174 分後（同 90 分後）

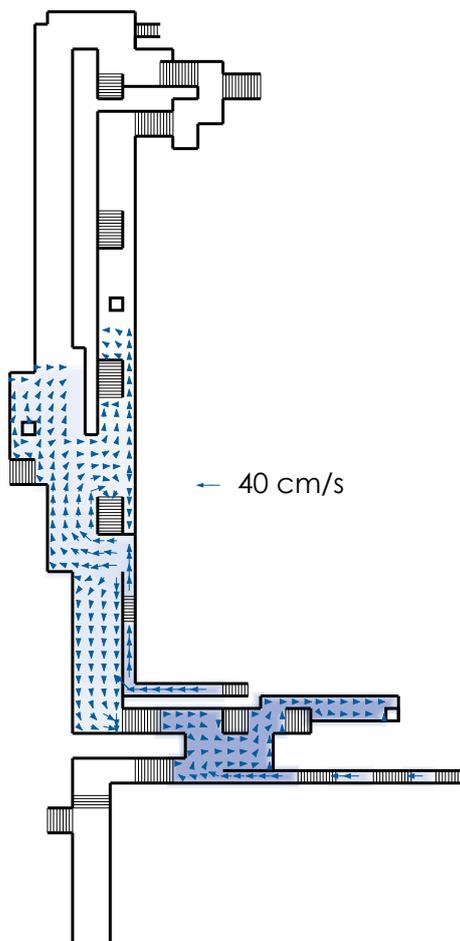


図-7 地下空間内の浸水深のコンター図と流速ベクトル：
降雨開始から 144 分後（浸水開始から 60 分後）

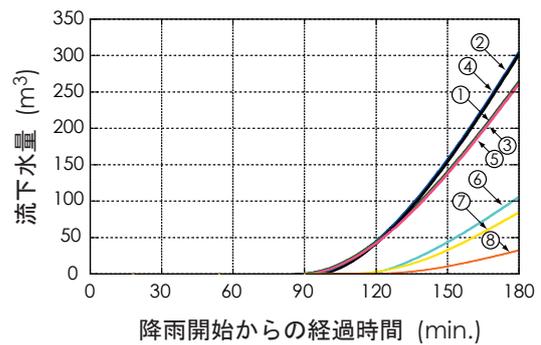


図-8 連絡階段毎の通過水量の累積値：
浸水開始は降雨開始から 84 分後

間の浸水被害状況は急変し、被害が拡大してしまうことがわかる。すなわち、降雨強度を 110% に引き伸ばしただけで、浸水が始まる時刻が 15 分も早まり、地下 3 階の銀座線改札口付近の水深ならびに地下空間に流入した全水量は 2 倍以上にも及ぶことがわかる。同じく南北線ホームにおける水深に関しては実績降雨に対して得られた値の 3 倍にあたる 0.27 cm にまで増大しており、このプラットホームに取り残された人の避難が極端に困難になることを意味する。また、下り階段への接続部での流速が最大で 0.6 m/s 程度にまでなることに注意を要する。ただし、降雨データの規模を引き伸ばしたことに伴う地上の連絡口付近の水深の増加は 0.03 m 程度に過ぎない。このことは、見方を変えれば止水板や土嚢を

表 - 1 降雨データの規模の違いによる浸水状況の変化：
浸水開始時刻は降雨開始時刻を 0 として表示.

降雨強度 引き伸ばし率 (%)	浸水開始時刻 (min.)	溜池山王駅前 最大浸水深 (m)	流入総体積 (m ³)	降雨開始 180 分後 銀座線改札口浸水深 (m)
100	84	0.47	580	0.35
110	69	0.50	1397	0.89
120	61	0.53	2452	1.56

適切な時刻に設置し、これらを有効に機能させるならば、被害を最小化することも可能であることを意味する。一方、想定規模を大きく越えた豪雨に見舞われると、ほんのわずかな地上水深の違いであっても地下空間の浸水状況が極端に深刻なものとなると言える。

最後に、この地下空間に氾濫水が進入した場合の避難経路に関してふれると、前述したように氾濫水の通り道がわかっているため、そこを避けるように次のようなルートをとることができる。すなわち、南北線の改札口付近にいる人は連絡階段 13 もしくは 15 を経て地上へ、南北線のホームにいる人は連絡階段 14 を経て地下 2 階へ出た後に階段 15 を経て地上へ、さらに銀座線改札口付近にいた人は連絡階段 10 あるいは 11 を上って銀座線ホームへ、それぞれ避難すればよいことになる。

4. 結論

本研究では、地下鉄駅が立体的に交差連絡する溜池山王駅を検討の対象として、この地下空間の氾濫水の挙動について検討した。地下鉄構内の場合には、多くの商業用地下空間のように幾何学的に単純な複層構造にはなっておらず、通路が複雑に延びている。そのため、ひとたび浸水被害に見舞われると、利用者がどの経路をたどって避難すべきかを判断することは容易でないのが現状である。そこで、浸水が懸念されるような地下鉄駅では、本研究で行ったような浸水シミュレーションを行い、避難誘導に役立てることが有効ではないかと考えている。また、本研究では、実績降雨を最大 20 % まで引き伸ばした解析を行った。その結果、地下空間の場合には、降雨量がある限界を越えると、浸水被害の規模が急増す

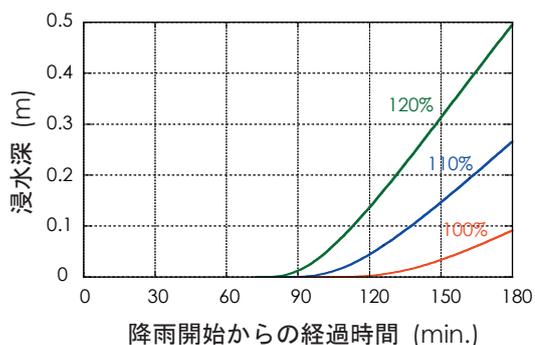


図 - 9 南北線ホームにおける浸水深の時間変化：
図中の数値は表 -1 中の降雨強度の引き伸ばし率

ることが理解され、ここで対象とした駅の場合には 10 % 程度の降雨強度の増大が浸水の規模を大きく変えてしまう結果となった。ただし、今後に残された課題も多い。たとえば、本解析では連絡階段を通じての水の移動を次のように取り扱っている。すなわち、階段上の水の流れを解く代わりに、階段直上の計算格子における水深から段落ちの考えに基づいて算定された流量の水が、直ちに階段直下の計算格子に入るものとしている。これは、階段上の流れがかなり複雑であり、現時点でこれを合理的に再現する方法が見つからないこと等の理由による。このような点の解消に向けて今後さらに検討を続けていく予定である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、東京地下鉄（株）工務部 武藤義彦氏のご協力・ご助言を賜った。ここに記して謝意を表します。また、データベースの作成に当たり当大学学生の本山量啓君、中村康朋君の協力を得た。

参考文献

- 1) 関根正人, 河上展久: 地下街を抱える高度に都市化された地域の内水氾濫に関する数値解析, 土木学会論文集, No. 789/II-71, 47-58, 2005.
- 2) 関根正人, 河上展久: 都市域における内水氾濫と地下鉄に接続する地下空間の浸水に関する数値解析, 水工学論文集, 第 49 巻, 595-600, 2005.
- 3) 間島真嗣, 戸田圭一, 大八木亮, 井上和也: 都市域の地上・地下空間を統合した浸水解析, 水工学論文集, 第 49 巻, 601-606, 2005.

(2005. 9. 30 受付)