

群集シミュレーションを用いたターミナル駅 地下空間における避難安全確保対策の検討

STUDY OF EVACUATION FROM THE UNDERGROUND SPACE AROUND A LARGE-SCALE STATION USING THE CROWD SIMULATION

山田 武志^{1*}・大森 高樹²・廣井 悠³・福井 潔⁴

Takeshi YAMADA^{1*}, Takaki OHMORI², U HIROI³, Kiyoshi FUKUI⁴

In case the great disaster occurs, It is expected that many people in the underground space around the large-scale station throng into an exit, and cause chaos. In order to avoid such chaos, it is important to perform suitable evacuation guidance to people who are in underground space. For that purpose, it is necessary to simulate the evacuation situation in consideration of the characteristic of each underground space, to clarify a problem, and to draw up an evacuation guidance plan. In this study, we simulate the evacuation behavior of those who are in underground space immediately after a large-scale earthquake occurrence using the multi-agent crowd simulator. And we examine the effect of some evacuation control measure through a simulation case study.

Key Words : *large-scale station, underground space, evacuation simulation*

1. はじめに

我が国の大都市中心部では、複数の地下鉄駅や地下街、それらを結ぶ地下通路や地下広場などが多くのネットワークで結ばれている。それはまさに都心の迷宮（ダンジョン）のようであり、都市インフラとして欠かせない施設が無数に存在する。そのなかでも特に3大都市圏には非常に多くの地下空間があり、その面積は再開発の進展とともに年々増加している。特に地下街を含む地下空間は雪、風雨等の気象条件による影響や自動車交通等に対する危険が少なく、ショッピングや歩行において快適に安心して時間が消費できる憩いの空間であることから、積雪地帯や寒冷地の都市を始めとして、全国の主要都市で建設されてきた。

平常時は快適な空間である地下空間ではあるが、過去には1980年の静岡駅前地下街爆発事故、1987年のロンドン・キングスクロス駅エスカレータ火災、1995年の地下鉄サリン事件、2003年の韓国・大邱広域市地下鉄火災など地下空間で発生した災害によって多くの尊い命が失わ

れており、地下空間で災害が発生した場合には被害が拡大し易いという問題が指摘されている¹⁾。また、1999年の福岡豪雨に伴う博多駅周辺地下街浸水以降、近年豪雨水害が多発していることから、水害時の地下空間の浸水避難対策も喫緊の課題である。地震防災の観点では、一般的に地上よりも地下は地震に強いとされているが、1995年の阪神・淡路大震災において地下鉄のトンネルの天井の崩落や神戸高速鉄道大開駅(地下駅)の柱の崩壊などの地下被害が報告されている²⁾。さらに、2012年に公表された南海トラフ巨大地震の津波高および浸水域では、大阪・梅田地下街は津波で浸水する可能性があることが示されている³⁾。また、地下街には可燃物も多く、地震に伴って地下で火災が発生するという可能性は否定できない。つまり、複合災害となりえる大規模地震が発生した場合についても、地下からの緊急避難が必要となる状況は十分に想定される。

多数の利用者が滞在するターミナル駅の大規模地下空間では、災害が発生した場合には、地下空間滞在者が自らの安全確保のために、あるいはより多くの情報を求め

キーワード：ターミナル駅、地下空間、避難シミュレーション

¹正会員 (株)ベクトル総研 副主任研究員, Senior Consultant, Vector Research Institute, Inc. (E-mail:yamada@vri.co.jp)

²正会員 (株)日建設シビル 都市施設計画室長, Nikken Sekkei Civil Engineering Ltd.

³正会員 名古屋大学減災連携研究センター 准教授, Associate Professor, Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University

⁴正会員 (株)日建設 防災計画室長, Architect, General Manager, Life Safety Planning Section, Design Technical Center, Nikken Sekkei Ltd.

て地上出口に殺到することで予期せぬ大きな混乱が発生する危険性がある。このような混乱を低減し、避難を円滑に進め、被害を最小限に留めるためには、事前に避難誘導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。そのためには地上出口の位置や地下空間滞在者の分布など、各地下空間の特性と利用実態を踏まえて、災害発生時の避難状況を予測し、課題を明らかにした上で、避難誘導対策を講ずる必要がある。



写真-1 多くの人が利用している地下空間（その1）
（新宿駅西口付近の平日朝通勤時）



写真-2 多くの人が利用している地下空間（その2）
（横浜駅地下街の休日）

地下空間における災害時の避難安全性に関する既往研究としては、門倉、高橋、関沢ら⁴⁾⁵⁾⁶⁾がシミュレーション技術を用いた地下駅火災時の避難安全性検証を試みており、また、関根ら⁷⁾⁸⁾⁹⁾が地下空間浸水時の避難行動予測の研究を進めている。地震を想定した地下空間からの避難に関する研究は、堀ら¹⁰⁾がシステムのプロトタイプを開発しているものの具体的な対策を検討するまでには至っていない。

以上のことを踏まえ、本研究では、大規模地震発生直後にターミナル駅の地下空間滞在者や鉄道駅利用者が地上に一斉に避難する状況を想定し、マルチエージェント

群集シミュレータを用いてその避難性状を予測した。また、この避難性状予測結果から避難上の課題を検討した上で、より円滑な避難を実現するための避難誘導施策を設定し、同シミュレータを用いて施策の効果を検証した。

なお、本検討で用いたマルチエージェント群集シミュレータは駅や高層ビルからの避難安全性検討の多くの実績を有しているものである。なお、シミュレータの概要は火災予防審議会・東京消防庁¹¹⁾で示されている。

2. 解析の概要

(1) 解析対象範囲の概要

大規模ターミナル駅であるA駅に隣接する地下空間のうち、最も歩行者流動が多い約150m四方の範囲を解析対象範囲とした。図-1に解析対象範囲を示す。この領域は地下1階部分であり、赤丸で示した各階段が地上出口となっている。また、①～⑪が対象範囲の境界断面であり、歩行者の流入流出となる。この流入流出の内、①～⑦が駅の改札に通じている。

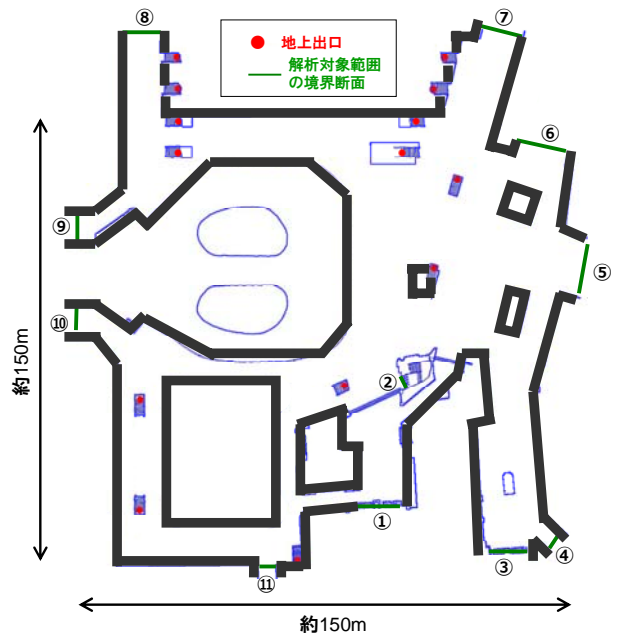


図-1 解析対象範囲

(2) 地震発生時刻の想定

地震発生直後に解析対象範囲が最も混雑すると思われる時間帯を評価対象時間（地震発生時刻）とすべく、時間別のA駅地下街の交通量とA駅の利用者数を調査したところ、A駅の地下街が最も混雑するのは平日の夕方、または休日の午後であり、A駅の利用者が最も多いのは平日の朝8時台であった。本検討では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際に駅員が駅構内の全旅客を改札外に誘導したことを考慮し、A駅の利用者が最も多い平日の朝8時を地震発生時刻とした。

(3) 地震発生時の地下空間滞在者数の設定

地震発生時刻の解析対象範囲の歩行者分布を設定するため、解析対象範囲の境界断面⑧～⑩の朝8時台の歩行者交通量調査結果データと、A駅の乗降客数、パーソントリップ調査データ、各改札口の改札機数等を基に推計した平日8時台の境界断面①～⑦の断面交通量を入力条件とし、マルチエージェント群集流動シミュレータを用いて解析対象範囲の歩行者流動を再現した。なお、各断面から流入した歩行者の各目的地（流出断面）への按分比はウィルソンモデル¹²⁾を用いて設定した。その結果、地震発生時の解析対象範囲内の歩行者数は約1,700人となり、歩行者分布は図-2のようになった。本検討では、この歩行者分布を避難開始時の避難者の初期配置とした。図の各粒子は一人の歩行者を表し、粒子の色は流入口ごとに色分けしている。

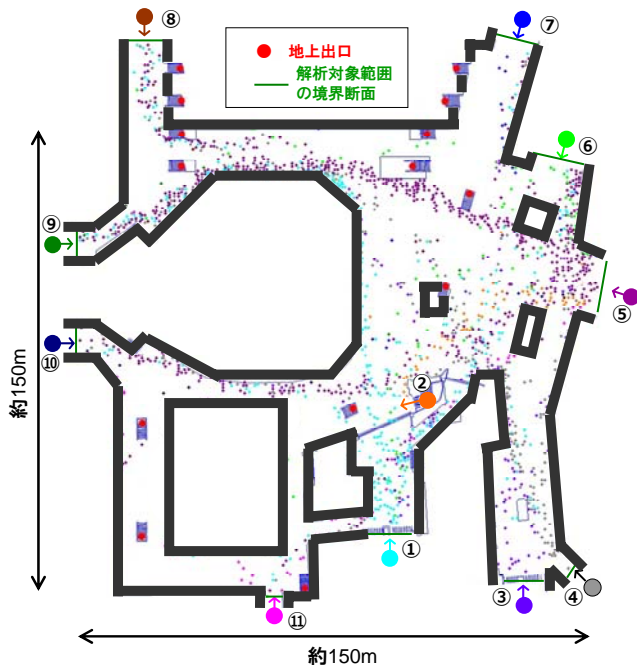


図-2 地震発生時の歩行者 (1,700人) の分布

(4) 地震発生直後の駅構内から解析対象範囲への避難者の流入の想定

大規模地震が発生した場合、鉄道駅舎も損壊する可能性があり、この場合、鉄道利用客は改札外に退避するよう駅従業員に指示されることが想定される。本検討では、地震発生時にA駅に乗り入れる各路線の改札内に滞在していた駅利用客が、地震発生直後に改札外に退避することとし、その人数を以下の手続きで算出した。

- ① 朝の通勤時間帯においてA駅利用客がA駅構内に滞在する時間を平均10分間と想定した。
- ② 10分間に各路線のA駅構内に滞在している駅利用者数を、都市交近年報、パーソントリップ調査データ、朝8時台のピーク率を用いて算出した。

③ ②の人数を各路線のA駅の各改札口の改札機数で按分して、流入流出口①～⑦から解析対象範囲に流入する人数を算出した。

④ 改札機の処理能力を1台あたり1人/秒とし、この処理能力に退出方向の改札機の数に乗じて各改札口から解析対象範囲への流入速度を設定した。

以下に①～⑦の各流入口からの流入人数と流入速度を示す。なお、地震発生後に流入口①～⑦から流入する人数の合計は33,400人である。

表-1 地震発生後の駅改札からの流入設定

流入口	流入人数[人]	流入速度[人/秒]
①	3,500	17.0
②	800	4.0
③	2,800	12.0
④	3,500	5.0
⑤	16,000	23.0
⑥	5,500	13.0
⑦	1,300	3.0

(5) 避難シナリオの設定

a) 避難方向と避難開始条件の設定

災害発生時において、人は身の危険や不安を感じたときには、今いる場所より安全と思われる場所に向かって自発的に避難するものと考えられる。地下空間滞時に地震に遭遇した場合には、天井や壁、柱などの構造物の破損や非構造部材の落下の目撃、大きな揺れの体感による津波襲来予感、停電による照明の消灯、火災発生や津波襲来といった情報の伝聞などが自発的な避難開始のきっかけとなり得る。この場合、一般的には地下滞在者は地上（津波の場合は高い建物）を目指して避難するものと思われる。避難開始のタイミングには様々な状況が想定されるが、誰かの避難行動や避難の呼びかけが周囲の人の避難行動を誘発し、地下滞在者が一斉に地上出口に殺到することも十分考えられる。これらのことを考慮し、本検討では、地震発生直後に全地下空間滞在者が一斉に地上出口に避難を開始することとした。また、駅構内からの解析対象範囲への流入も地震発生直後から開始されることとし、これらの避難者も地上出口に向かうこととした。

b) 避難者の目的地選択率の設定

解析対象範囲には14箇所の上出口が設けられているが、緊急時には一刻も早く安全な場所に退避できるよう、避難者は現在地からより近い地上出口を選択するものと考えられる。また、本検討の解析対象範囲は地下空間の形状が複雑で見通しが悪く、各地点から視認できる地上出口は限られている。これらのことを考慮し、地震発生時に解析対象範囲に初期配置されている避難者は最寄り

の地上出口を目的地として選択することとした。また、地震発生後に断面*i*から流入する避難者が地上出口*j*を選択する確率 P_{ij} は、断面*i*から地上出口*j*までの距離 d_{ij} に対し、距離抵抗パラメータ $\lambda (=2)$ を用いて下式で与えた。

$$p_{ij} = \frac{a}{d_{ij}^\lambda} \quad (a \text{ は } p_{i*} = \sum_j p_{ij} = 1 \text{ を満たす定数}) \quad (1a)$$

(6) 歩行速度の設定

山本ら¹³⁾の実験結果を参考として、歩行者の水平路の自由歩行速度 V_f を 1.5m/s、階段の自由歩行速度 V_s を 0.75m/s とした。水平路の歩行速度 v_f と密度 ρ (人/m²)、階段の歩行速度 v_s と密度 ρ (人/m²) との関係をそれぞれ (1b)、(1c) とし、密度に応じて歩行速度が低減することとした。

$$v_f = \min(V_f, 1.8 \cdot \rho^{-1} - 0.3) \quad (1b)$$

$$v_s = \min(V_s, 1.3 \cdot \rho^{-1}) \quad (1c)$$

3. 解析結果

避難開始時を0分とする解析対象範囲内の滞留者数の推移を図-3に示す。地震発生時に地下空間に滞在していた避難者1,700人と地震発生後に駅構内から解析対象範囲に流入した避難者33,400人の計35,100人が全員地上に避難完了するまでに約25分を要した。避難開始からしばらくは、地下空間から地上出口に流出する人数より、駅構内から退出して流入口①～⑦から解析対象範囲内に流入してくる人数が多いため、解析対象範囲内の滞留者数が増え続ける。避難開始から約5分後には滞留者数が11,000人を越え、混雑がピークとなる。5分後から8分後までの約3分間は流入人数と流出人数がほぼ同じ状態が続き、その後、駅構内からの流入人数が減少して、流出人数が流入人数を上回ると徐々に解析対象範囲内の滞留者数が減少する。

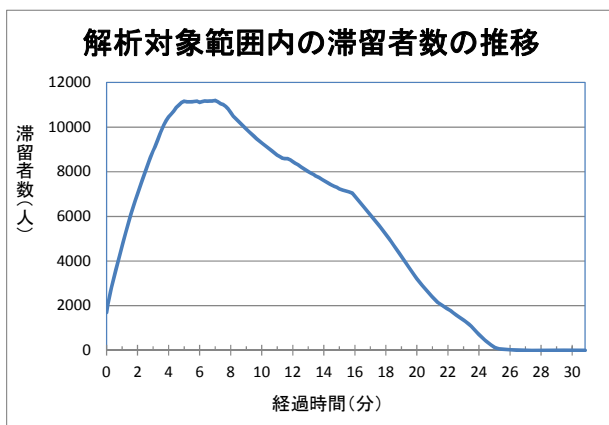


図-3 シミュレーション結果：解析対象領域の滞留者数

図-4に避難開始から約5分後の状況を示す。階段の処理能力を大幅に超える避難者が地上出口①と地上出口②に集中したことにより、地上出口①と地上出口②の周辺に大きな滞留が発生している。また、地上出口①と地上出口②の周辺に形成された滞留が他の地上出口に向かう避難者の動線を閉塞している。

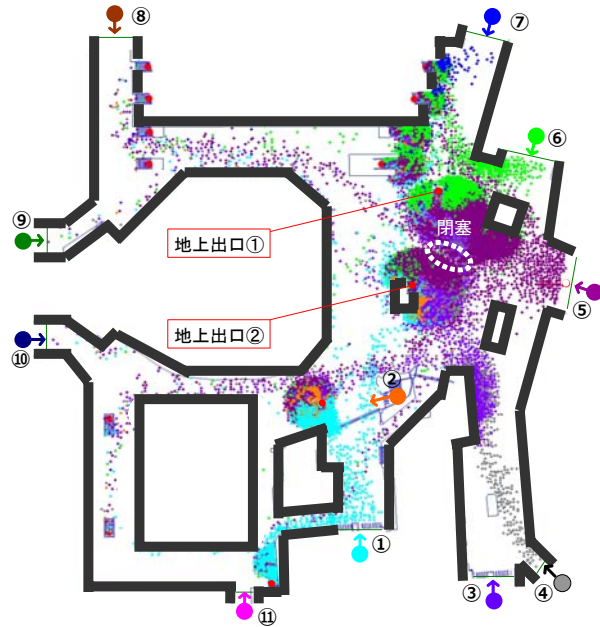


図-4 避難開始から5分後の状況

4. 避難安全確保対策の検討

(1) 対策ケースの設定

避難時に混雑状態が長時間続くと、避難者の精神的ストレスが増大し、焦りによって避難者同士が押し合い、将棋倒し等の二次災害を生む危険性がある。このような問題を避け、より円滑かつ効率的に避難が行われるためには、特定の地上出口に避難者が集中しないように避難誘導することが重要である。

そこで、対策ケース1として次の対策が実施されたことを想定した避難解析を実施した。

- 避難誘導を実施することにより各地上出口が均等に利用されることを想定。

この想定を解析に反映するために、地震発生後に駅構内から解析対象範囲に流入する避難者33,400人の目的地(地上出口)選択率を、14箇所の各地上出口の利用者がそれぞれ約2,400人ずつになるように設定した。

また、対策ケース2として、対策ケース1と同様の避難誘導を実施することに加え、以下の2つの対策が実施されたことを想定した避難解析を実施した。

- 駅の耐震安全性を向上することにより駅利用者の半数が駅構内に留まるものと想定。

- 改札口での退出規制を実施することにより、駅構内からの流入速度が半減するものと想定。
この想定を解析に反映するために、地震発生後に各流入入口から流入する避難者数と流入速度を半分を設定した。
なお、前述のシミュレーションは避難誘導等の対策を実施しなかった場合の避難状況を予測したものであり、これを無策ケースと呼ぶこととする。

表-2 ケース設定

ケース	対策の内容と対策効果の想定
無策ケース	● 対策なし。
対策ケース1	● 避難誘導を実施することにより各地上出口が均等に利用されることを想定。
対策ケース2	● 避難誘導を実施することにより各地上出口が均等に利用されることを想定。 ● 駅の耐震安全性を向上することにより駅利用者の半数が駅構内に留まるものと想定。 ● 改札口での退出規制を実施することにより、駅構内からの流入速度が半減するものと想定。

(2) 対策ケースの解析結果

各ケースの解析対象範囲内の避難者数の推移を図-5に示す。対策ケース1、対策ケース2ともに避難者全員が地上に避難完了するまでの所要時間は約15分であり、無策ケースよりも避難時間が10分程度短縮された。対策ケース1と対策ケース2の避難時間がほぼ同じであることは、駅構内からの流入人数と流入速度の積が対策ケース1と対策ケース2とで同じであることに起因している。

対策ケース1の滞留者数のピークは約4分後であり、このときの滞留人数は約8,500人であった。対策ケース2の滞留者数のピークは約3分後であり、このときの滞留人数は約3,000人であった。

図-5のグラフ中の破線は各ケースについて滞留者数のピーク時と避難完了時とを直線で結んだものであり、この傾きが大きいほど避難効率がよく、地上出口の階段を有効に利用していることになる。3ケースの中では対策ケース1の避難効率が最も良いことになる。

図-6に対策ケース1の避難開始から約5分後の状況を示す。対策ケース1では各地上出口付近に滞留が発生しているものの、無策ケースの場合のように滞留によって避難動線が閉塞するような状況にはなっていない。ただし、流入口⑧付近の地上出口に向かう避難者の流動が途中の通路で滞る様子が確認された。各地上出口の滞留は避難開始から約10分後にはいずれも解消する。

図-7に対策ケース2の避難開始から約5分後の状況を示す。本ケースでは、解析対象範囲内では滞留は発生せず、円滑に避難が行われる。

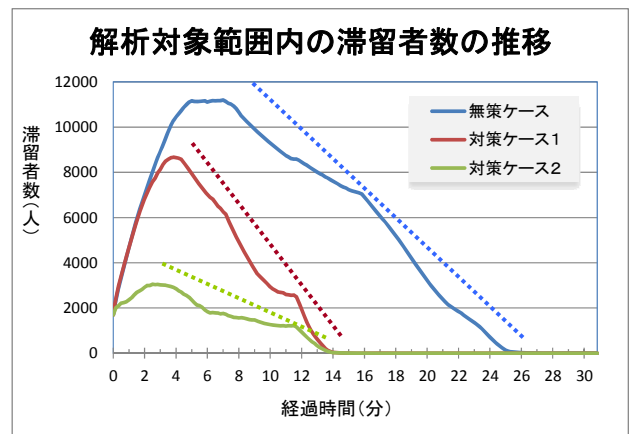


図-5 解析対象領域内の避難者数の推移

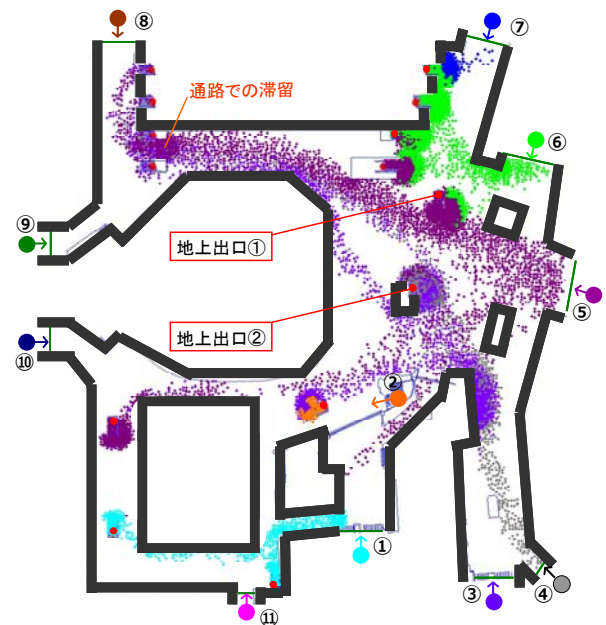


図-6 避難開始から5分後の状況 (対策ケース1)

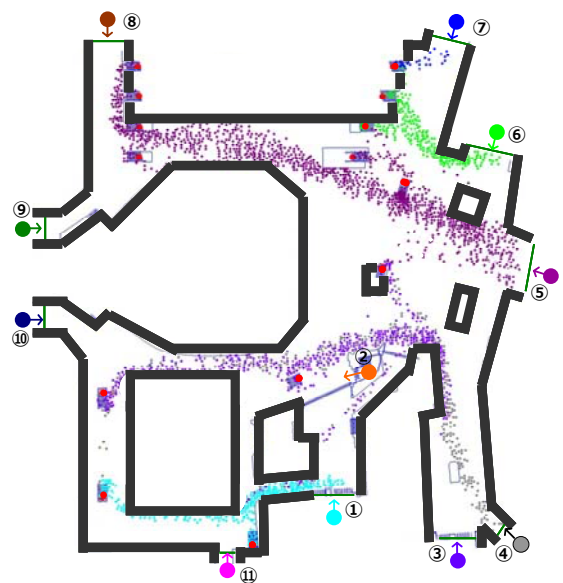


図-7 避難開始から5分後の状況 (対策ケース2)

(3) 対策効果の考察

無策ケースと対策ケース1との結果を比較すると、対策ケース1のピーク時の滞留人数は無策ケースに対して約23%減少し、避難所要時間については40%短縮されている。無策ケースと対策ケース1の避難性状を可視化した図4と図6を比較しても、図6の方が流動性が良く、滞留も小規模であるため二次災害の危険性が低いものと予想される。従って、各地上出口が均等に利用されるように避難誘導を実施することは避難安全性の向上に大きく寄与すると考えられる。

対策ケース1と対策ケース2とを比較すると、対策ケース2のピーク時の滞留人数は対策ケース1に対して約65%も減少しているが、避難所要時間は同等である。対策ケース2では解析対象範囲内では滞留が発生していないが、改札口で退出規制をしていることから、改札口に滞留ができる可能性がある。図5の破線で示した避難効率性と図7で示した対策ケース2の避難性状を考えると、対策ケース2では地上出口階段の処理にはまだ余裕があり、避難動線上にボトルネックもないことから、改札口での退出規制は緩和しても良いと思われる。

5. 地下空間の水に対する脆弱さ

(1) 想定される複合災害

以上の検討は、大規模地震発生直後において地下空間滞在者や鉄道駅利用者が地上に一斉に避難する状況を想定した内容である。震災時における駅の帰宅困難者対応とともに、9月6日に中央防災会議が公表した大綱は、首都圏での大規模な水害による甚大な人的・物的被害の発生に警鐘を鳴らした。被害予測では、200年に1度の発生確率の豪雨で東京都北区志茂の荒川堤防が決壊すると、都内における地下鉄を含む17路線の97駅、約147kmが浸水すると想定された。実際、地下鉄に氾濫した河川水が防水板を超えて流れ込むと、防潮扉がない箇所やトンネルを伝わって広範囲に水害が広がる。



写真3 地下鉄内の浸水イメージ (その1)

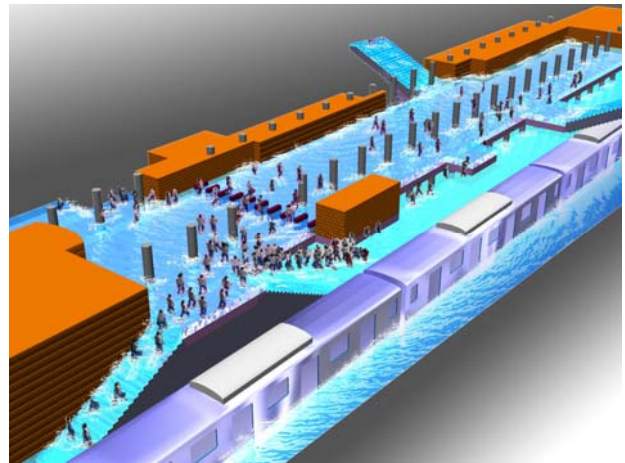


図8 地下鉄内の浸水イメージ (その2)

地震時における耐震性が安全に見える地下空間（特に地下駅）は浸水に対して脆弱であることはもちろんのこと、揺れやすさを示す指標「表層地盤増幅率」の観点でも、都内の主要駅が広範囲にわたって危険であることが最近公表されており¹⁴、その地点に多くの人々が利用する駅がある。特に、東京都東部は通称ゼロメートル地帯と呼ばれ、常に水没と隣り合わせの状態となっており、関連する自治体も洪水ハザードマップの周知・徹底を今まで以上に行うようになっている。阪神・淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震により、淀川河口付近の堤防も一部倒壊した事実もあることから、国土交通省整備局を中心に東京湾高潮や河川洪水対策のなかで堤防や水門も耐震強化を急いでいるが、すべてが完了するにはまだまだ時間を要する¹⁵。

更に、駅と直結する地下空間は地上と比較して多くの人々が集まるため、「閉鎖的な空間を形成しており、避難経路が限定される」「情報を得にくく、避難開始などの状況判断が難しい」「避難猶予時間が短い」「浸水とともに照明などの設備機能が停止する可能性が高い」といった特有の災害特性をもっていることを、我々は十分に理解しておくべきであり、施設管理者とともに水害対策を今まで以上に実践していくことが重要である¹⁶。

地下鉄だけでなく駅と直結する地下街でも、水害の被害を幾度となく受けてきた。地上に比べて床面積が狭い地下通路やコンコースでは、流れ込んできた水によりすぐに水位が上昇する危険性がかなり高いことが分かっている¹⁷⁾¹⁸⁾。また、地上への避難経路である階段から濁流が流れ込んでくる箇所では、浸水深が約30cmを超えると成人男性でも階段を上ることが難しくなることが、実験で明らかになっている。また、同様に避難経路に該当する階段においては、地上階部分の階段上端の部分で浸水深が20cmに達すると地下空間への流入水が激流となり、当該階段を人が昇ることは不可能になるため、階段上端部分での浸水深20cmを避難の限界と設定している¹⁹⁾。

合わせて通路や階段部の外開き扉の場合、扉前面の水深が約40cmを超えると開けることが困難となることも実験で明らかになっていることから、地上の水害とは別な要因で人の行動が短時間のうちに制約を受けることを強く認識しておかなければならない²⁰⁾。

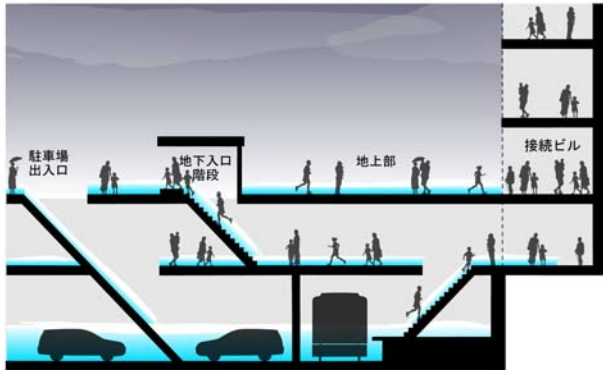


図-9 地下街や地下鉄駅を含む地下空間水没のイメージ



写真-4 北京駅水害時の地下階段状況
(出典：中国版インターネット水害記事より)

(2) 周辺地域と一体となった水害対策

(1)で記載した水災害には、外水氾濫、内水氾濫、高潮氾濫、津波氾濫などがあるが、最悪な条件はこれらの災害が被害を受けた地区の復旧が完璧でない状態で複合的に繰り返して起こることである。東日本大震災でも海岸に近い地区が地盤沈下により常に高潮時に海水にかかるなど復旧が追い付かない状態が報告されたことは記憶に新しい。特にゼロメートル地帯が多く存在する都市部では広範囲にわたって地盤沈下が発生する可能性は極めて高いため、道路を含む地盤の復旧が追い付かない状況においては、地下空間への水害(浸水)リスクは継続的なものとならざるを得ない。

水害対策の一環として東京都では、大規模地下街等に

おける集中豪雨時の浸水防止及び滞在者を迅速に避難させるため、浸水対策計画を策定する協議会又は地下街管理者(以下「協議会等」という)に対して、都がその計画策定に要する経費の一部を補助することを決めている。一方で、石垣²¹⁾も喫緊の課題として挙げているように、都市部の地下空間は地下街等の大規模な空間だけでなく、地下駐車場やビルの地階や地下室、地下改札を有する駅、鉄道を横断する地下道など、短時間に避難限界状態になる小規模地下空間の浸水と避難についても検討対策を早急に進める必要がある。

地下空間には多くの人が集まり、震災時には多くの帰宅困難者を受け入れた事例もあり、人々は安全で安心な空間であることを経験したこと、多くの人が帰宅困難者となり道路を歩いたり、短時間休むために屋内に待機したりするような行動をとった²²⁾。その結果、突発的な浸水に対する避難対策は今後とも継続的に実施し、その都度、生じた課題等について対策を講じていくことが大切である。例えば神戸の中心部三宮に位置する「さんちか」では、「三ノ宮駅南地区安全対策協議会」として地下街の水防対策を中心として、防火・防犯・防災などの災害予防を15社が情報共有し、かつ各社の役割分担を確認するための定例会を年2回行っている。災害時の情報伝達は、神戸市からの情報連絡は防災行政無線を通じて「さんちか防災センター」へ、そこから協議会メンバーへFAXで伝達されるシステムとなっている。最近では津波に対する検討結果(津波被害警戒区域図)から浸水の可能性があることが判明したため、地下街を3つのブロックに区切り、各ブロックの最も地上に近い地上への出入口を避難経路とし、隣接する建物の2階部分を避難場所とした避難訓練も実施している。このように積極的に水害対策を実行している協議会が多くなってきたことは評価すべきことである²³⁾。

6. まとめ

本研究では、大規模地震の発生直後を想定し、ターミナル駅で想定される地下空間滞在者の避難性状の予測、および地下空間滞在者の避難安全性確保を目的とした対策案の効果の検討を群集流動シミュレーションを活用して実施した。その結果、各地上出口が均等に利用されるように避難誘導を実施することが有効であることを定量的、定性的に明らかにし、改札口で退出規制をすることが必ずしも有効ではないことを示した。

このように、群集流動シミュレーション技術を活用することで、各地下空間の特性を考慮して火災やテロ、豪雨水害や津波による地下浸水など他の災害を想定した避難安全確保対策の検討を行うことも可能である。

これからは、地下空間特有の防災に関して、安全・安

心の内容を高めていくためには、想定される災害の特性を考慮したシミュレーションに基づいて、避難安全性の判断と避難安全確保対策のあり方を検討し、その検討内容をいかに実際に適用し、適用した場合の課題に対処していくか、ということがますます重要となってくる。

非常に多くの人々が利用している駅自体の利用方法も変わってきており、ターミナル駅とその地下空間に展開される商業施設は都市部の核として多くの人を引き付ける場所となっている。このような状況を踏まえながら、大規模ターミナル駅を中心とした防災に着目し、安全・安心な都市施設となるように対策を検討していくことが、都市としての安全性を高めるものと考えられる。

今後、洪水被害を受ける危険性のあるアジアの沿岸部や内陸部では、日本以上に経済成長による急速な都市への人口集中が生じて都市基盤（主に下水道処理網）の整備が追い付かないため、頻繁に都市内部で水害が発生することが想定される。我が国が防災面、とくに水害対策でリーダーシップをとっていくためにも、日本の都市内で培った技術を総合的なパッケージとして展開していくことが求められる。

参考文献

- 1) 長谷見 雄二：都心地下空間 防災から考えるその将来、予防時報 241, pp.6-7, 2010.
- 2) (社)建設コンサルタンツ協会：阪神・淡路大震災被害調査報告書, pp.75-80, 1995.
- 3) 南海トラフの巨大地震モデル検討会, http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/nankai_trough_top.html.
- 4) 門倉博之 他：避難シミュレーションを用いた地下駅構内の避難性状の分析：地下駅空間における火災時の避難安全性の検証:その 1：日本建築学会 学術講演梗概集. A-2, 防火,海洋,情報システム技術 2005, pp.225-226, 2005
- 5) 高橋 濟 他：二層ゾーンモデルを用いた地下駅空間における煙拡散性状予測：地下駅空間における火災時の避難安全性の検証:その 2：日本建築学会 学術講演梗概集. A-2, 防火,海洋,情報システム技術 2005, pp.227-228, 2005
- 6) 関沢 愛 他：地下駅における煙の拡散影響を考慮した火災時避難安全性の検討：地下駅空間における火災時の避難安全性の検証:その 3：日本建築学会 学術講演梗概集. A-2, 防火,海洋,情報システム技術 2005, pp.229-230, 2005
- 7) 関根 正人, 本山 量啓：地下空間浸水時の避難誘導に関する数値解析, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.847-852, 2008.
- 8) 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 56 巻, pp.961-966, 2011.
- 9) 関根 正人, 大野 龍馬：地下空間浸水時の避難行動解析とその実空間への適用, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, pp.181-186, 2012.
- 10) 堀 宗朗 他：地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究, 社会技術研究論文集, Vol.3, pp.138-145, 2005.
- 11) 火災予防審議会, 東京消防庁：複合化するターミナル施設の防火安全対策のあり方—火災予防審議会答申一, pp.103-155, 2011.
- 12) 青木 義次：建築計画・都市計画の数学 規模と安全の数理, 数理工学社, pp.39-44
- 13) 山本 昌和 他：鉄道駅における混雑時の歩行安全性に関する研究 その 3 階段における通過実験, 日本建築学会学術講演梗概集, 建築計画 I, pp.639-640, 2011
- 14) AERA 臨時増刊, No. 18 「震度 7 を生き残る」, 2012.4.25 号
- 15) Newton 10 月号臨時増刊 首都直下型震度 7 大震災予測, pp.52-55, 2012.10
- 16) 建築と都市 (a+u) 臨時増刊, 自然と向き合う都市・建築・人, pp.26-27, 2012.8
- 17) 井上 知美, 尾崎 平, 石垣 泰輔, 戸田 恵一：内水氾濫時における小規模地下空間の浸水危険度について, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, pp.169-174, 2012.
- 18) 粕谷 太郎, 大森 高樹, 澤田 基弘, 斎藤 貴裕：東京駅周辺地区における地下歩行空間浸水予測の検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, pp.175-180, 2012.
- 19) 国土技術政策総合研究所「歩行実験結果」, 財団法人日本建築防災協会「浸水時の地下室の危険性について」パンフレット
- 20) 馬場 康之：地下浸水時の避難に関する実物大模型実験, 土木学会平成 24 年度全国大会研究討論会, 研-09 資料, pp.2-4, 2012
- 21) 石垣 泰輔：水災害時の地下空間浸水と避難, 土木学会平成 24 年度全国大会研究討論会, 研-09 資料, pp.5-7, 2012
- 22) 廣井 悠, 関谷 直也, 中島 良太, 藁谷 俊太郎, 花原 英徳：東日本大震災における首都圏の帰宅困難者に関する社会調査, 地域安全学会論文集, No. 15, pp.343-353, 2011
- 23) 中道 和行：「地下街」周辺地域と一体となった防災対策, 土木学会誌, Vol.97, No.6, pp.16-17, 2012.