

大規模ターミナル駅の地下空間における防災安全確保対策等の検討

株式会社日建設計シビル	大森高樹
株式会社日建設計シビル	正垣隆祥
株式会社日建設計	福井 潔
株式会社日建設計総合研究所	竹村 登
株式会社ベクトル総研	山田武志
株式会社ベクトル総研	印南潤二

1. 背景と目的

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おり、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。本論文は、大規模ターミナル駅施設を含む地下街や地下通路等の複雑な地下空間をモデルに人の動きをシミュレーションした結果を示すこと、防災力向上を図るためにハードとソフトの面から整備していく内容にICT技術を適用していくことなどの検討を行った結果を示したものである。

2. 都市型災害に対する地下施設の防災対策

(1) 都市・社会の防災

社会を機能させる基盤となる重要社会基盤施設には、道路・橋・鉄道・港湾・病院や情報通信やロジスティクスなど社会活動を支えるシステムが含まれている。これまでは災害により重要社会基盤施設が「壊れない」ことを重点に整備が進められてきたが、「重要社会基盤施設の防御（CIP）」の場合には「機能障害」が発生しないこと、「機能障害」が発生してもできるだけ迅速に機能が復旧すること、が求められる。すなわち「機能障害が発生しない」ことを目指した施設・機能が使われ続ける事業継続（BCP）が、都市部ではきわめて重要かつ最低限求められること（最終目標でもある）となっている。



写真1 多くの人々が利用している地下空間
（新宿駅西口付近の平日朝通勤時）

(2) 都市型災害の特徴

従来から電気・ガス・水道というライフラインは、災害時の機能維持に加えて、機能回復も重要な課題となっていた。平成23年3月11日の東日本大震災では、社会インフラが甚大な被害を受けたことが多くの調査で明らかになっている。一方、震災を受けた東北地方は比較的、公共的な地下空間が少ないという特徴もあり、あまり大きな被害を地下施設が受けた報告はされていない。一方、内閣府の検討会が平成24年3月31日に公表した「南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について」では、想定される津波高さに注目が集まっているが、発生が予想される震度分布図を見ても明らかなように、東京、名古屋、大阪など多くの大都市でいままで経験して来なかった巨大地震に襲われる可能性が極めて高い。そのとき、大都市特有の都市型災害が発生して「三大震災難民」が発生することもすでに明らかなものとなっている。この「三大震災難民」とは、「高層難民」「帰宅難民」「避難所難民」の3つであり、多くの防災関係者が今後対応を迫られるものでもある。

(3) 防災的な観点からの活用

地下の防災的な活用としては、都市部の地方公共団体において退避者の収容を目的とした退避施設、退避者や帰宅困難者等の生命維持のための備蓄倉庫や耐震性雨水貯留施設、非常時の退避者収容のための一次避難場所（公園・緑地・広場等）、トンネル空間の代替避難路や災害応急活動の維持のための非常用発電機を設置する場所等としての活用が望まれている。今後、都市部における地域への貢献に資する防災的な活用を更に進めるためには、新たに必要となる施設に対する支援措置（容積率緩和、優遇税制度、公的負担の充実等）への要請がますます高くなると想定される。なお、地下街の沿道建築物との接続は、防災上の観点から建築物と地下街との民間による接続整備に対する補助が要請されている。最近、震災後に実施した地下街の対応状況確認と今後の防災関連に対する要望を聞いた結果では次のような内容が挙げられた。¹⁾

- ① 電源の確保（これまでの一般的な非常用電源以外）
- ② 国・行政との連携（役割分担、指揮命令系統）
- ③ 警察や消防との連携（犯罪、暴力、火災などの対処）
- ④ 地下街を一時避難場所にするための法的根拠とインフラ整備
- ⑤ 非常時情報伝達システムの構築（交通情報、災害情報、安否情報）



写真2 多くの人で混雑する地下街
（横浜駅地下街の休日時）

以上のことから、今後の防災対応の一環として、地下街や地下通路等の地下空間は、帰宅困難者の一時避難場所として機能できる空間も備えていく必要があると判断される。ただし、現在の施設や設備状況では安全・安心な一時避難場所としては不十分であると想定され、施設の耐震化等のハード面だけではなく、情報提供等のソフト面にも対応するシステムや情報受発信設備等の整備が必要であると考えられる。特に、地下空間施設の存続（耐震化）と非常時の自主電源確保が地下街や地下通路等の機能を維持する重要なファクターの1つであると考えられる。加えて閉塞された地下空間のなかで、非常に多くの人々がパニックを起こさないように行動できる安心性の向上に寄与するようなサイン表示等の普及も必要であると考えられる。²⁾

(4) 避難安全上の課題

地震に対しては安全にみえる、安全であった地下空間は様々な災害に対して、避難を行ううえでは想定外もありという内容で安全性を見直す時期であると考えられる。特に、津波や高潮等の水害に対しては非常に脆弱であり、地上と比較して閉鎖的空間であることから甚大な被害が生じるため、今まで以上に防災対策について万全の準備をとるための計画・設計に取り込んでいくことが重要と考える。梶塚越らは地下空間が抱える危険性を4つの側面で整理している。³⁾

- ① 物理的な有効避難口の少なさ
- ② 火災発生時の火炎・煙などによる避難路確保の困難さ
- ③ 平常時の人口密集度の高さ
- ④ 方向覚知困難および精神的圧迫感による避難行動の緊迫化

地下空間と地上を結ぶ出入口は、被災時に障害や火災により遮断された場合には避難に有効なものとはならず、避難できる出入口に多くの人々が殺到する危険性を多くはらんでいる。また、地下空間は閉鎖された空間である特徴が、火災時には煙等により視界が遮られるため、身近な避難口の発見にも時間を要してしまうこと、屋内空間の照明等電気系統が万が一にも故障した場合、非常電源が作動している時間を過ぎると暗闇になり、避難等がかなり困難なものとなる可能性は高い。

3. 大規模地震発生直後を想定した地下空間滞在者の避難誘導施策の検討

前述の通り、多数の歩行者が流動する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て一斉に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するためには、地下空間滞在者に適切な情報を提供し、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、各地下空間の特性を考慮した避難誘導施策が求められる。そこで、我々は大規模地震発生直後の状況を想定し、ターミナル駅周辺の地下空間滞在者の避難を円滑に行うための避難誘導施策を、コンピュータシミュレーションを用いて検討した。

(1) 解析対象範囲と地震発生時の設定

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。また、解析対象範囲が最も混乱すると思われる状況として、解析対象範囲およびA駅の利用者が最も多い平日8時を地震発生時刻とした。地震発生時刻の解析対象範囲の歩行者分布を把握するため、解析対象範囲の境界断面付近の歩行者交通量調査結果データ、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、解析対象範囲の境界部における平日8時の断面交通量を算出し、後述のメッシュ型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。その結果、地震発生時刻の解析対象範囲の滞在者数は約1,700人となった(図1)。

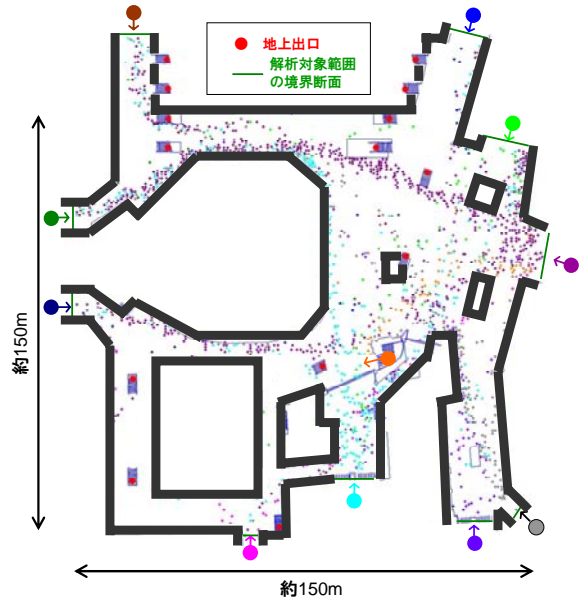


図1 解析対象範囲と地震発生時の滞留者分布
(※流入口別に各粒子の色を設定)

(2) 避難シナリオの設定

地震発生直後に地下空間が最も混乱する状況として、地下空間滞在者が一斉に地上出口に殺到するものとした。また、地震によって鉄道駅舎も損壊したことで鉄道利用客が改札外に退避し、その内約33,000人が地下空間(解析対象範囲)を経由して地上出口に向かうものとした。このとき、改札外への流出は改札機1台あたり1人/秒とした。

本検討では、対策の有無と対策の内容によって表1の3ケースについてシミュレーションを実施した。無策のケースでは、各避難者は近くの地上出口を目的地として選択しやすいものと想定されるため、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 $\lambda(=2)$ を用いて上式で定めた。対策ケース1、対策ケース2では、各地

表1 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	● 対策無し。
対策ケース1	● 各地上出口の階段が均等に利用されるように避難誘導を実施することにより、避難者が各流出口に均等に分散することを想定。
対策ケース2	● 各地上出口の階段が均等に利用されるように避難誘導を実施することにより、避難者が各流出口に均等に分散するものと想定。 ● 各駅の耐震安全性を向上することにより、駅から地下広場に流入する旅客の半数が駅構内にとどまるものと想定。 ● 改札口での出口規制を実施することにより、改札口からの時間当たりの流出人数(地下広場への流入人数)が半減するものと想定。

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

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を想定し、地上出口利用者数が均等になるように地上出口選択確率を設定した。また、対策ケース2では、駅舎の耐震安全性向上によって半数の旅客が駅構内に留まることができたことを想定し、改札外に退避する人数を約 16,500 人とした。また、改札口での出口規制を実施することを想定し、改札外への流出速度を改札機 1 台あたり 0.5 人/秒とした。なお、鉄道利用客の内訳 33,000 人が地下空間を經由して避難するケースは「無策ケース」と「対策ケース1」である。

(3) 検討に用いたシミュレータの概要

本検討に用いたメッシュ型マルチエージェント群集流動シミュレータは、歩行者の挙動特性と歩行者同士の相互作用をエージェントの行動ルールとして記述し、空間内の歩行者流動を解析するコンピュータシミュレーションシステムである。本シミュレータは火災予防審議会・東京消防庁⁴⁾など駅や高層ビルからの避難シミュレーションに用いられている。

本シミュレータでは、1 辺 0.5m の正方形を 1 単位 (セル) とする格子空間で実空間を近似して表現する。各セルには通路、障害物、階段などの属性値を設定する。また、歩行空間の境界部には歩行者流動の起点 (発生地点) と終点 (目的地点) を設定する、更に、格子空間の各セルには、各目的地点までの移動距離の相対値を設定する。

歩行者は目的地までの最短経路を基本的な移動経路とし、他の歩行者や障害物を避けながら移動する。山本ら⁵⁾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 は 1.5m/s、階段の自由歩行速度 V_s は 0.75m/s とした。水平路の歩行速度 v_f と階段の歩行速度 v_s は密度 ρ (人/m²) を用いて下式で与えた。

$$v_f = \min(V_f, 1.8 \cdot \rho^{-1} - 0.3) \quad v_s = \min(V_s, 1.3 \cdot \rho^{-1})$$

(4) シミュレーション結果

地上出口への避難完了時間は無策ケースが約 25 分、対策ケース 1、対策ケース 2 がともに約 15 分であった。以下に、各ケースの避難開始から 5 分後の状況を可視化した画像を示す。

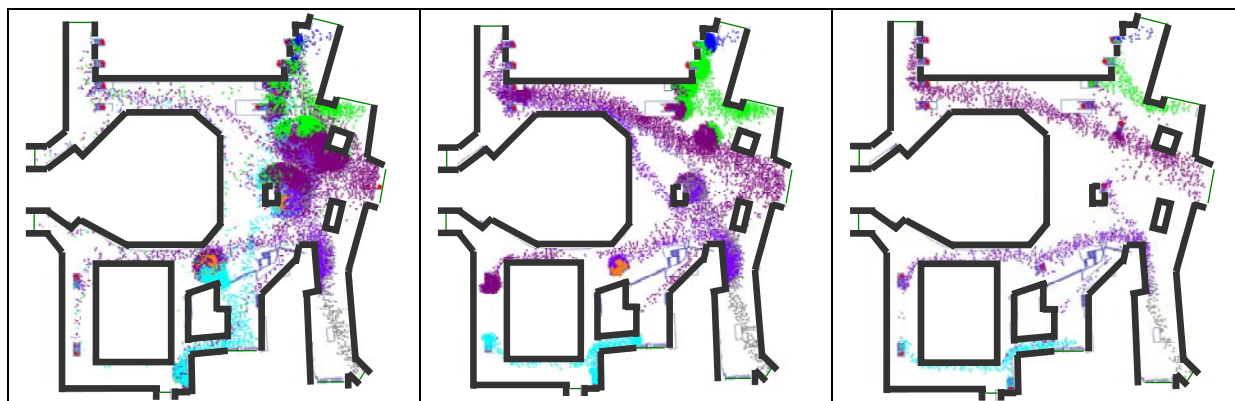


図3 避難開始から5分後の状況 (左: 無策ケース 中央: 対策ケース1 右: 対策ケース2)

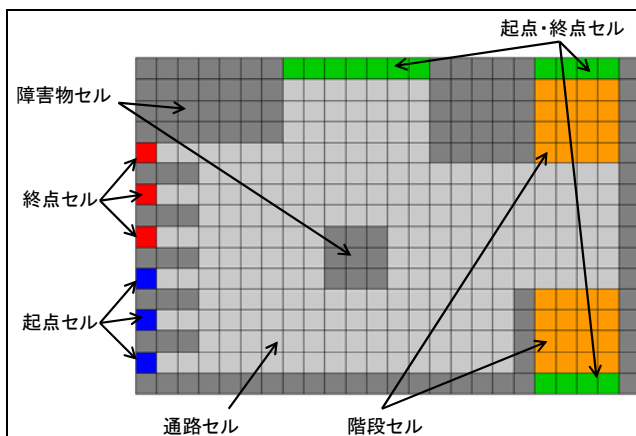


図2 空間設定イメージ

無策ケースでは、改札口付近の地上出口階段に避難者が集中するため、階段周辺に大きな滞留が発生した。この滞留が他の地上出口に向かおうとする旅客の動線を閉塞する状況が発生した。対策ケース 1 では各地上出口階段前に小規模の滞留が発生したが、避難開始から 10 分後にはこの滞留は解消した。対策ケース 2 では滞留は発生しなかった。

以上の通り、災害時に地下空間から一斉避難が行われる場合、各地上出口が有効に利用されるように避難誘導することは、円滑に避難を行うために大きな効果があることを示した。このように、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災害時の避難誘導施策を検討することが可能ではあるが、この結果を災害対応に活用するためには、シミュレーション結果を考慮して各避難者の位置に応じた避難誘導情報を提供する仕組みを構築することが必要である。

4. ICTを活用した屋内外の防災システム構築検討

(1) 情報の空白

3月11日の東日本大震災当日の大きな地震発生後は、地震の規模や余震に関する情報、交通機関の運行情報提供や家族や親戚・知人などの安否確認へのニーズが非常に高くなり、地下空間においても地上の状況を把握しようとする人が急増した。しかし、地震発生後は、首都圏においても固定電話及び携帯電話の音声通信が各通信会社による通信規制実施により、音声通信が繋がりにくい状況となり、震災当日は相当数の人々が帰れなく帰宅困難者となったことは記憶に新しい。更に災害時の情報対応に関しては、ここ数年の風水害において死者の大半が65歳以上の高齢者となっていることから要援護者への配慮が人的被災を少なくしていくための重要課題となっていること、地震発生直後における「情報の空白」を無くすことなどは非常に重要である。特に、多くのビル屋内や地下空間（地下通路や地下街）において、正確な位置情報と防災対応情報などを多くの人に伝えることが、人命及び資産を守り、企業の事業継続を実現に結びつけていくことに繋がるものと考えられる。このような背景を捉えて政府は、情報を「ライフライン」（生命線）ととらえ、最新のICT（情報通信技術）を活用していくことを決定した。2007年4月に携帯電話からの緊急通報位置を把握する「緊急通報位置通知システム」の運用が開始され、第3世代携帯電話機にGPS受信機が搭載されるようになり、位置情報サービスの新たな流れが「車から人・物」へと変化しつつある。このような背景を受けて、2010年9月に打ち上げられた準天頂衛星初号機「みちびき」の利用実証実験が進むなか、同一の受信機で屋内外を精度よくシームレスに位置情報を取得・利用できるシステム（IMES: Indoor Messaging System, アイメス）の普及を図っており、地理空間情報活用推進基本計画（案）のなかでも適用可能な基盤整備を積極的に位置づけている。

(2) IMESの特徴

IMESの最大の特徴は、位置情報の送信にGPSと同じ周波数帯やデータ形式を使うことであるため、既存のGPS搭載端末とハードウェアを共通化できる。すなわちこのIMES信号が受信可能なスマートフォンなどの「情報端末」が実現できれば、屋外ではGPSと測位衛星「みちびき」からの測位信号を利用することや、屋内ではそのままIMES信号を利用することが可能となる。更に準天頂衛星の4基体制が実現すれば24時間運用が可能となり、GPSの精度が向上により多くの人に対する災害時の避難誘導や公共交通機関の運行管理といった社会基盤インフラでの活用も期待される。特に、地下空間で平常時に災害が起きた場合、多くの帰宅困難者や甚大な人災が発生することは明らかであるため、いかに災害に対して防災対応可能なICTを有効に活用した減災対応を具体的に図っていくかが重要なためこのGPS利用がある。そして今、IMESの最新バージョンのLSIチップは約12mm角、基盤も30mm角程度にかなり小型化されたため、照明機器や火災探知機器など既存設備に組み込むことも可能となり、位置情報以外のコンテンツとして場所情報コード（国土地理院で管理）と連携させて位置の正確さを担保したり、施設案内やショッピング情報を流して、移動している人にその位置の情報を的確にサービスしていくことが可能となる。



図4 IMES活用のイメージ

5. まとめ

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、避難行動や設備対応等のシミュレーションに基づいた安全性の判断と地下空間内での効果的な避難誘導手法の検討が必要である。今後は、これらの検討内容をいかに地下空間において実際に適用していくか、適用した場合の課題に対処していくか、がますます重要となってくる。いま多くの人が所有している携帯電話等に緊急地震速報が流れる状況と同じように、これからは1人1人の安否情報が容易に確認でき、屋内において正確な位置情報が取れるような災害時に対応できる屋内・屋外で整備されることが必要であると考えられる。一方、日本の防災技術は、海外でも強力な「売り物」になるという考えで防災インフラ技術の海外展開が今後、ますます増えてくる。特に最近のアジア諸国で自然災害が多く発生しており、それらを事前に察知することや災害時の避難誘導をGPSで行うことなど、多くの利用が防災の観点で発揮されることを期待する。

参考文献

- 1) 門前, 金田一, 大森, 粕谷: 東日本大震災における東京圏地下街等帰宅困難者対応アンケート調査報告及び考察, 土木学会, 2012
- 2) 高橋, 大森, 澤田, 坂本, 門前: 防災の観点からみた大規模ターミナル駅周辺の地下空間の現状把握, 土木計画学会, 2012
- 3) 梶秀樹, 塚越功: 改訂版都市防災学, 学芸出版社, 2012, p141~p143
- 4) 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—, 火災予防審議会東京消防庁, 2011
- 5) 山本, 吉村, 石突: 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, 2011