

避難行動シミュレーションに基づく 地下街の安全性評価

清野純史¹・土岐憲三²・犬飼信広³・竹内 徹⁴

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³工修 三和銀行横浜支店 (〒231-0016 横浜市中区真砂町4-43)

⁴工修 野村総合研究所 (〒100-0001 東京都千代田区大手町2-2-1)

本研究では、地下街という閉鎖的で特殊な空間を対象に、そこで地震災害や火災が発生した場合の人間の避難行動を個体単位で把握することが可能な個別要素法(DEM)を用いてシミュレーションを行った。本手法を用いると、各個体や全体の避難完了時間や滞留密度、流動係数のみならず、避難の途中で各個体に作用する接触力や接触を避ける行動を定量的に評価することも可能である。ここでは、まず実際の地下街に滞在する人口とその属性別の割合を調査によって明らかにした。この調査結果を基に、地下街の一部を対象とした局所的な避難シミュレーションと、実際の地下街の全領域を対象とした避難シミュレーションを行い、指針手法との比較による安全性の評価、ならびに指針手法の補完的役割としての当手法の可能性を検討した。

Key Words: *distinct element method, evacuation behavior, underground passageway, earthquake disaster*

1. はじめに

近年、多くの大都市で都市機能の集約化や土地の有効利用の必要性から地下鉄、地下駐車場といったジオフロント空間の開発が積極的に進められている。これに伴い、これらとデパート、ビル、駅舎等を接続する空間を地下街として利用するケースが多く見られるようになった。このような空間は通勤客、買い物客等の不特定多数の人々が日常的に利用するため、ひとたび地震や火災等の災害が発生すると、地下空間特有の閉塞感や方向感覚の欠如を引き起こし、大きな混乱を招く恐れがある。

地下街における災害時のこのようなリスクを軽減するためには、設計段階における通路幅や出口までの距離の規制、一時待避のための広場空間の確保、また被災状況をできる限り早く把握し、それに基づいて適切な避難誘導を行うようなハード、ソフト両面での対策が必要となる。これらの対策が円滑かつ効率的に行われるためには、災害時の群集の避難行動を予測する必要がある。

群集避難行動を定量化し、これを設計に反映する方法としては、集団の流出モデルを用いて避難時間、滞留人数を算出する図式解法が広く用いられており、

新・建築防災計画指針においてもこれを用いることが奨められている¹⁾。この手法(以下、指針手法とする)は手計算により簡便かつ迅速な計算が可能であり、どの設計者でも計算できること、計算結果を第三者が容易にチェックできることから非常に実用的なものである。しかし、岡崎・松下²⁾が指摘しているように、この手法は群集を流体とみなしているため多くの仮定の導入が前提となっており、避難者個々の避難特性の違いやそれぞれに加わる力は考慮されていない。また、流動係数を一定に与えていることや避難経路を平面内の区画ごとに特定するため、時として非現実的な人間行動を記述しているような可能性も否めない。特に、本研究で対象とする地下街のような空間における災害時の危険は、方向感覚の欠如や避難の際に発生する滞留、対向流が原因となって起こる心理的なパニックによるものが大きい。そのため、このようなパニックを防止する適切な避難誘導とそれを合理的に決定するための数値シミュレーション、そして避難途中に個々の避難者にどの程度の接触力が作用するかといった定量的な力学的見地からの考察も必要である。

本研究では、地下街という閉鎖的で特殊な空間を対象に、そこで地震火災が発生した場合の人間の群

表-1 解析に用いた諸元

個体要素ばね定数 (法線)	1.26×10^4 (N/m)
個体要素ばね定数 (接線)	6.29×10^3 (N/m)
個体要素減衰定数 (法線)	1.35×10^2 (Nsec/m)
個体要素減衰定数 (接線)	3.02×10^1 (Nsec/m)
仮想ばね定数 (法線)	6.62×10^1 (N/m)
仮想ばね定数 (接線)	3.31 (N/m)
仮想減衰定数 (法線)	9.79×10^1 (Nsec/m)
仮想減衰定数 (接線)	2.19×10^1 (Nsec/m)
個体要素半径	0.26 (m)
個体要素仮想半径	0.72 (m)
単位体積重量	1.69×10^3 (N/m ³)
計算時間間隔	0.01 (sec)
加速度	0.84 (m/sec ²)

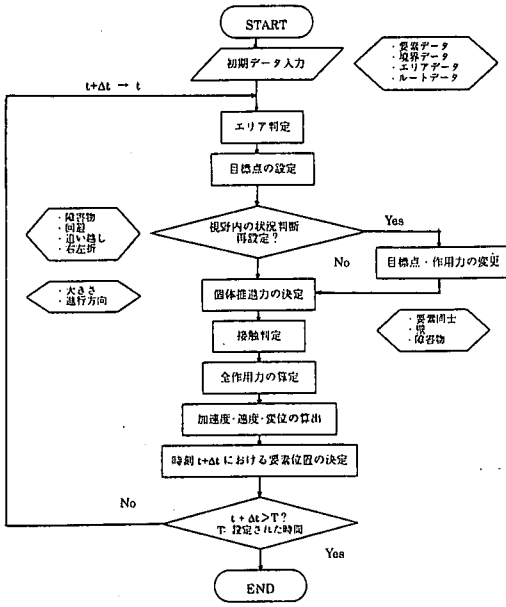


図-1 解析手順

集行動を個体単位で把握することが可能で、各避難者の避難時間や避難の途中で作用する力を定量的に評価することができる個別要素法(以後、DEMとする)を用いたシミュレーションモデル^{3),4)}により実際の地下街の避難行動解析を行う。また、指針手法との避難計算上の比較を行い、指針手法の補完的役割としての当手法の可能性を検討する。

2. 解析手法

(1) DEM の概要

著者らは地盤解析や構造解析などの分野で多く用いられてきた DEM^(例えば5),6)を、地下街を対象とした被災時の人間行動に応用した避難行動シミュレーションモデルを提案した^{3),4)}。そこでは人間を DEM の円形要素としてモデル化し、個体要素間の物理的な接触とは別に、対象とする個体からある距離以内に近づいた個体に対して新たな個体要素バネ(仮想バネ)を生じさせて心理的距離の効果を表すような概念を導入している。

群集を構成する i 番目 ($i=1, 2, 3, \dots, N$; N は総人数)の個体要素の質量を m_i 、この個体要素の x, y 方向の変位をそれぞれ x_i, y_i とすると、運動方程式は以下のようなになる。ただし、人間を対象としているため、回転運動は拘束されているものとみなしているため、モーメントに関する運動方程式は考慮しない。

$$m_i \ddot{x}_i(t) = f_i^x(\dot{i}) \quad (1)$$

$$m_i \ddot{y}_i(t) = f_i^y(\dot{i}) \quad (2)$$

$f_i^x(t), f_i^y(t)$ は以下に示すように、それぞれ時刻 t における個体要素 i に作用する x 方向および y 方向の合力である。

$$f_i^j(t) = f_k + f_c + f'_k + f'_c + f_{wk} + f_{wc} + f_f + f_a \quad (j=x, y) \quad (3)$$

ここに、 f_k, f_c, f'_k, f'_c は個体要素 i に接触する全ての要素の個体要素バネ・ダッシュポットおよび個体要素仮想バネ・ダッシュポットからの作用力と、接触する壁などの境界からの反力である f_{wk} と f_{wc} 、個体要素が目標点に向かおうとする個体推進力 f_f 、および個体がコーナーを曲がる際に働く遠心力に対する抗力 f_a が作用する。個体推進力に関しては、本研究では過去の実験結果から得られた値⁴⁾を用いた。ただし、この個体推進力は、個体毎に定められた歩行速度に達した時点で作用しなくなることになる。

時刻 $t \sim t + \Delta t$ なる区間内で加速度が一定と仮定し、式(1)、(2)を積分することにより時刻 t における速度、変位を逐次求める。

現実の地下街には男女別、年齢別といった避難行動特性に差異のあるさまざまな属性が存在する。これ

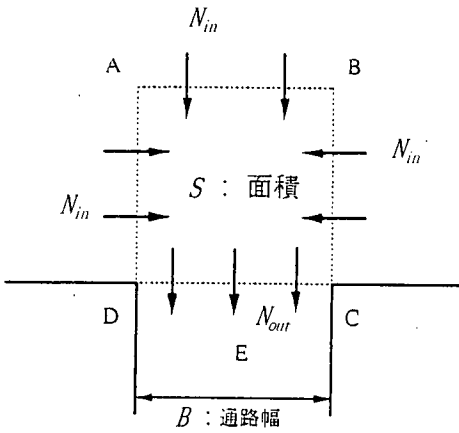


図-2 滞留密度の評価

らの異なる属性が群集として避難行動をとる際には歩行速度の違いや脱出ルートの違い、或いは空間内の障害物により、複雑な状況が生じる可能性がある。本研究では各時間ステップにおける各個体要素の目標点を、空間構成や他の個体との関係から決定し、障害物を滑らかに回避したり、他の個体を追い越したり回避したりすることにより、対象空間内における複雑な状況を再現できるモデルを用いている⁴⁾。本研究における計算手順の概略を示したものが図-1である。これにより、群集避難を行う際に発生する危険な状況が、いつ、どこで、どのように発生するかの視覚的・定量的な把握が可能になる。

式(1)、(2)を解く際には DEM 要素の諸元を決めなければならないが、本研究では既往の研究で用いた値と同じものを使用した。これらの値は、実験や観測を通して得られた値である。本研究で用いたパラメータをまとめたものが表-1である。

(2) 滞留密度の算定

避難群集流における、集結、流出、滞留の3つの状態に着目すると、ある断面において有効幅員が減少し、断面に集結する人数が流出人数を上回る際に生じる群集速度の停滞と密度の増加により生じる集結量と流出量の差として滞留量が定義できる⁷⁾。滞留は密度の増加と避難時間の遅れを招き、災害の原因となる。一般に出口付近の密度が3人/m²以上となったときをもって滞留の発生が定義される⁷⁾。本研究では各出口における滞留密度を以下のようにして算出する。

図-2はある地下空間内の通路と出口となる階段を接続する部分を表したものである。各個体は図中矢印方向に向かって避難行動をとるものとする。ここで、

出口の幅員を一辺とする正方形 ABCD(面積 S)を定義して一定時間間隔 T における線分 AB, BC, AD を通過する人数をカウントし、この量を $N_{in}(t)$ とする。同時に線分 DC を通過する人数をカウントし、この量を $N_{out}(t)$ とする。このとき、次式によって出口付近の滞留密度 $P(t)$ を評価する。

$$P(t) = \frac{1}{T} \sum_t \frac{N_{in}(t) - N_{out}(t)}{S} dt \quad (4)$$

この滞留密度が高い程、出口付近の混雑の度合いが大きくなり、避難時間や避難者に作用する力への影響も大きくなる。

(3) 流動係数の算定

流動係数は、出口の幅員当たり毎秒何人流出するかをもって定義できる。一般的には1.5人/m/secを流動係数の標準値として用いる事が多く、指針手法においてもこの値が採用されている。しかし、本来流動係数は出口の幅員や形状により規定されるものであり、シミュレーションを援用して与えられるべきであるとの指摘²⁾もある。本研究では図-2の線分 DC を横切る個体数を5秒間隔でカウントし、幅員当たりの流動係数 $F(t)$ を次式で求めた。

$$F(t) = \frac{\sum_t^{t+5} N_{out}(t)}{B \times 5.0} \quad (5)$$

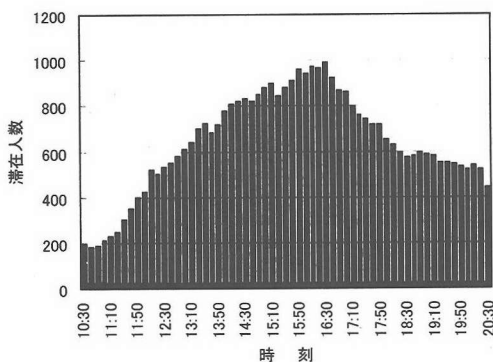
ここに B は出口の幅員、 N_{out} はタイムステップ t における図-2の断面 CD の通過人数である。

3. 属性別人口調査

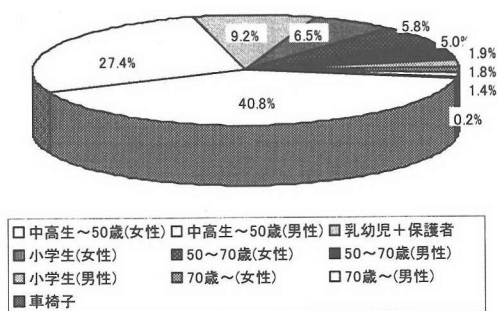
本手法の特徴は、避難者一人一人を独立した一つの要素としてモデル化することにより、年齢や性別による避難速度の違いによって発生する追い越し行動や、避難方法が限定される車椅子の障害者等の避難によって発生するすれ違い行動を、対象空間において再現できる点である。したがって実際の地下街を対象にしたケーススタディを行う際には、これら避難特性の異なる利用者別に属性分類し、この属性が対象空間において通常どの程度の割合で存在するのを知る必要がある。本研究では京都市において1997年に新設された地下街「ゼスト御池」を対象に、

表-2 対象とした地下街の概要

開業	平成9年10月
店舗数	50店
営業時間(物販)	10:30~20:30
床面積	約12,900m ²
店舗面積	約4,500m ²



(a) 滞在人口の時間的変動



(b) 滞在人口に占める各属性の比率

図-3 滞在人口の時間変動と属性別の比率

1998年11月にこの地下街における属性別の滞在人口調査を行った。地下街の概要を表-2に示す。

調査では、まず計測開始時の地下街における初期人口 P_0 をカウントした。その後、地下街の外部との境界となるすべての断面(階段口、地下鉄駅、地下駐車場、ホテルとの連絡口)を見渡すことのできる13のポイントに計測員(32名)を配置し、その場所から各出入口への流入量 N_{in} および流出量 N_{out} を10分ごとに測定した。調査時間は10:30~20:30の10

時間である。各時刻の属性別の滞在人口は、これらの値を用いて次式のように算出した。

$$P(t) = P_0 + \sum_i (N_{in}(t) - N_{out}(t)) \quad (6)$$

ここで言う属性とは、避難速度を基準に分類した表-3に示す項目のことである。解析に必要なこの属性別の速度としては、仙田ら⁸⁾が年齢層別の歩行速度を知るために1569人の被験者を対象として行った調査(年齢別、性別に分類した50m当たりの平均歩行所要時間)を援用した。それぞれの速度も表中に示してある。ただし、4歳以下の幼児については同伴者となる保護者が抱えて避難行動をとるものとし、このような属性に関する吉岡⁹⁾の研究から得られた0.88m/secを用いることにした。また、障害者、特に車椅子の利用者は介助者なしには階段を使用できないため、特別な避難経路を想定する必要がある。このため、三浦¹⁰⁾らは車椅子による避難シミュレーションモデルの開発に際し、実験による移動速度の測定を行っており、これより代表的な移動速度として0.75(m/s)という値を用いることにした。ただし、歩行速度は遅い人の速度に規定されることも考えられるが、ここでは平均値をもって代表値とした。

調査の結果得られた滞在人口の時間的変動を図-3(a)に、総人口中に占める各属性の比率を図-3(b)に示す。ただし、総人口における各属性の比率は各時刻における人口比率の平均値をもって代表値とした。全人口のピークは16時30分において990人であった。これより、全体解析のケーススタディにおける総人口の基本量としては、全体のピーク値である990人という値を採用した。また、990人の滞在人口を考える場合には、2名程度の車椅子使用者を考慮する必要があることがわかった。ただし、特定の日・施設で行われた調査の結果による割合であることには注意を要する。

4. 局所的な避難行動解析

地下街の設計に際しては新・建築防災計画指針¹⁾に定められた避難計算手法(指針手法)を用いて安全性の評価が行われている。ここでは指針手法の概略と地下街に対する指針手法の適用結果を示し、DEMモデルによる計算結果との対比を行う。ただし、対象空間は地下街の一部である。

指針手法では全体を図-4に示すようなゾーンに分

表-3 属性の分類とその歩行速度

属性	速度(男性) m/sec	速度(女性) m/sec
乳幼児(+保護者)	0.88	
小学生以下	1.02	1.09
中高生~50歳	1.45	1.23
50~70歳	1.19	1.04
70歳~	0.99	0.89
車椅子使用者	0.75	

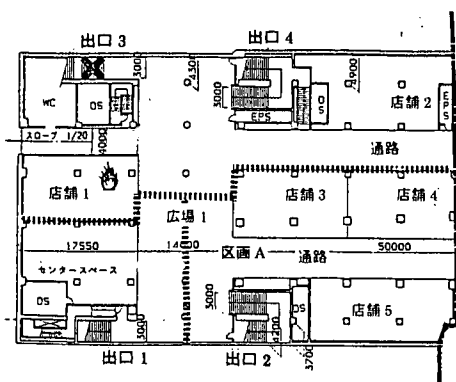


図-4 ゾーン分割された対象領域

割し(図中左上のゾーンにおいては火災の発生を想定し, 使用不能としている), 各ゾーン毎に一つの階段を割り当てて各ゾーンごとに避難計算を行う。分割したゾーンにおける避難者の密度は以下の通りである。

- (a) 通路 人口密度 0.5人/m²
- (b) 広場 人口密度 0.25人/m²
- (c) 店舗 人口密度 0.7人/m²

それぞれの人口を流体塊とみなし, それらが定められた避難口へ一定速度(通常は 1.0m/sec, 階段部は 0.5m/sec)で避難を行うものとして避難に必要な時間を算出する。この指針手法による避難所要時間は 201sec となった。

本研究ではこの値との比較を行うため, 指針手法を用いたものと同様の平面モデルを用いて以下に示す条件の下で DEM シミュレーションを行った。上記密度に従った場合の避難者総数は 846 人である。店舗部分については, 指針に示されている出口の幅が 3.3m の形状に統一した。出火室と非出火室の避難開始時間の違いも記述するため, 出火室の人口のみに

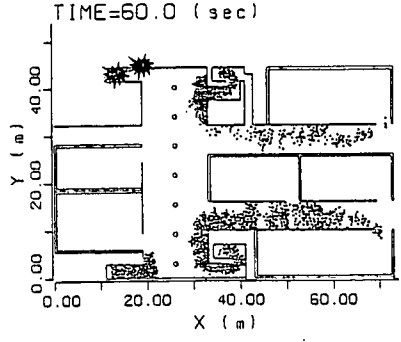
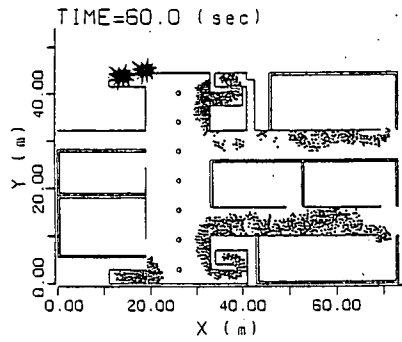
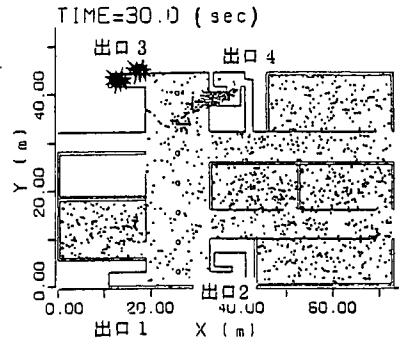
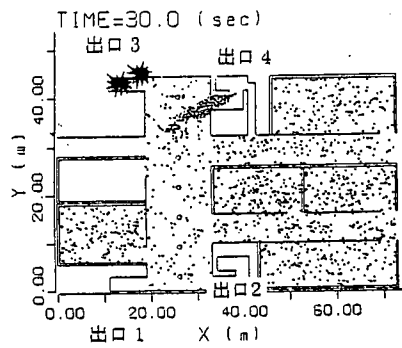
よるシミュレーションを別途行い, その 30sec 後の位置を非出火室の初期位置と重ねあわせて, それ以後のシミュレーションを行った。個体は図-4 に示される各ゾーンにおける避難誘導に従ってそれぞれの出口へ避難する。なお, 出口 3 は火災の発生を想定しているため使用不能とする。このような指針手法の条件に整合する条件のもとで, 歩行速度の差異の有無(すなわち, 群集歩行における追い越しの有無)が避難時間に与える影響を検討した。追い越しを考慮しない場合の各個体の歩行速度は指針に示された 1.0m/sec (階段部は 1/2; 0.5m/sec) であり, 速度の差異を考慮する場合の歩行速度は表-3 において示す属性別の歩行速度(階段部は速度が半減)で, 各属性の人口の比率は図-3(b)に従うものとする。

(1) 歩行速度の差異が避難時間に与える影響

歩行速度の違いを考慮しない場合のシミュレーション(ケース 1)と, 属性別に歩行速度に差のある場合のシミュレーション(ケース 2)の 30 秒後と 60 秒後の様子を図-5(a), (b)に示す。図中, 左がケース 1, 右がケース 2 である。それぞれの避難所要時間は, 190sec と 176sec であった。また, 出口ごとの流動係数, 滞留密度の変化の比較を図-6(a), (b)に示す。

ケース 1 の避難時間は 190sec であり, 指針手法の値に比べて 11sec 早い値である。指針手法の流動係数が 1.5 人/m/sec であるのに対し, 図-6(a)に見られるように本シミュレーションによるものは, 出口によってばらつきはあるものの, ほぼ 1.5 人/m/sec の値をとっており, 指針で設定している値とほぼ同じ値である。指針手法では, 居室からの避難時間の計算に際し, 室内歩行距離として出口から最も遠い場所からの直角歩行距離を基本的に用いることとしている。しかし, 本研究では出口への直線状の距離として避難時間計算に反映されるため, この違いが双方の避難時間の差に最も大きく影響しているものと考えられる。

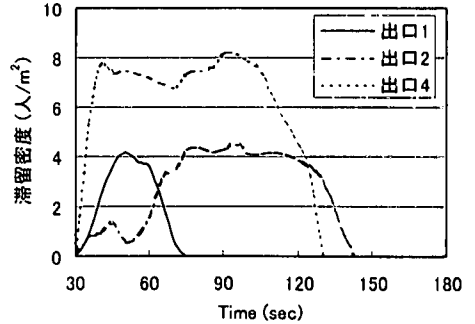
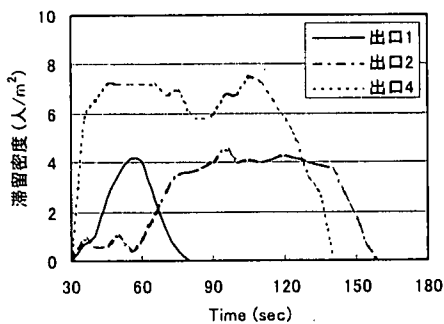
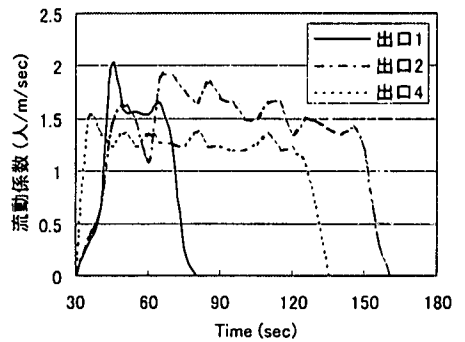
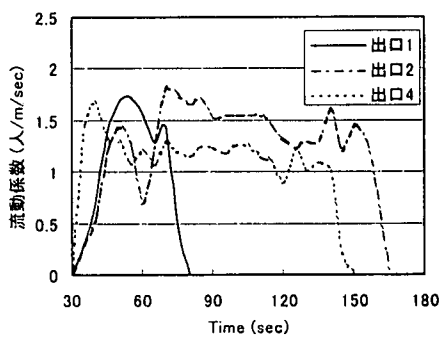
ケース 2 の避難所要時間は 176sec であり, ケース 1 に比べて更に 14sec 短くなっている。これは, この例においては歩行速度の属性による違いが階段口への到着時刻を分散させ, 出口付近での人口の集結が緩和されたためである。このため, 図-6(b)に見られるように流動係数の値もケース 1 に比して大きくなっている。ただし, 滞留密度は特に出口 4 でケース 2 の方が幾分大きな値をとっており, また両ケースとも 8 人/m² を超える非常に高い値となっている。これは, 1m 四方の領域に 2 人, 3 人, 2 人あるいは 3 人, 2 人, 3 人のように円が配列されたような, いわば満員電車のような状態である。しかし, ケース 2 の滞



(a) ケース 1

(b) ケース 2

図-5 歩行速度一定の場合(ケース 1)と属性別歩行速度を与えた場合(ケース 2)の避難行動の比較



(a) ケース 1

(b) ケース 2

図-6 出口 1, 2, 4 における流動係数と滞留密度の比較

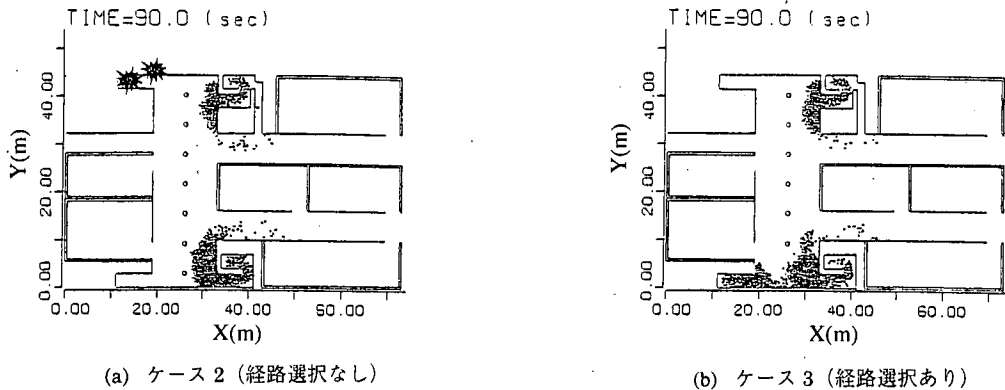


図-7 経路選択を与えない場合(ケース 2)と与えた場合(ケース 3)の避難行動の比較

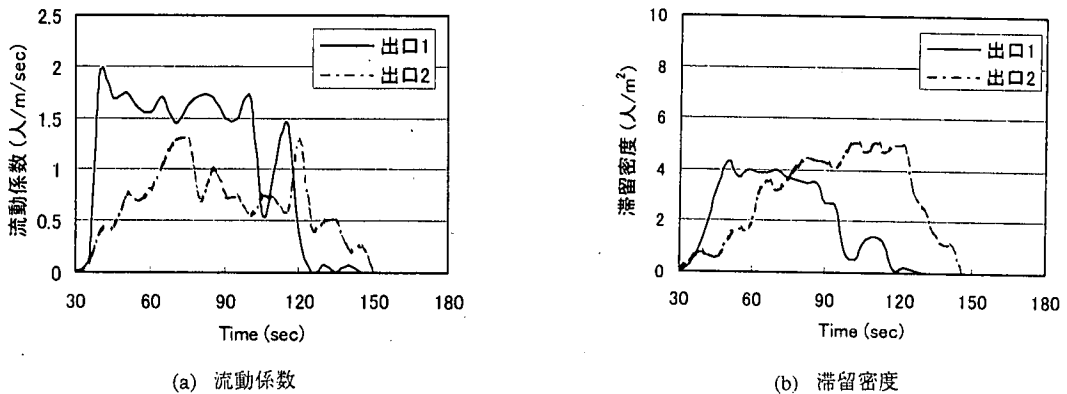


図-8 ケース 3 における出口 1, 2 での流動係数と滞留密度

留のピークが相対的に早い時刻に現れるため避難時間が短縮されている。

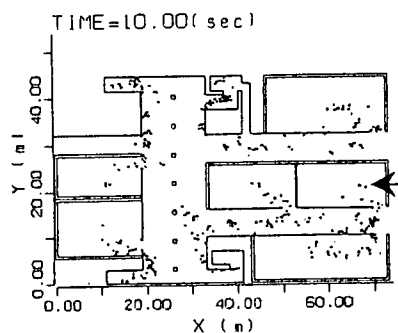
ただし、この例は属性別避難者をランダムに配置したサンプルシミュレーションであり、例えば速度の遅い属性に分類される避難者がある特定の出口付近に多数存在する場合など、避難者の初期配置によっては所要時間が大きく変動する可能性もある。

(2) 経路選択が避難時間に与える影響

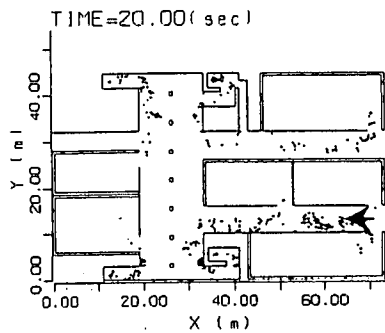
(1)のケース 1, 2 の双方において、出火室にいた人が居室から避難をする時間として指針手法に従った 30 秒を考えている。図-5 上段の図からもわかるように、出口 4 付近には出火室から避難を始めた個体が集合し始めていることがわかる。実際は非出火室の群集との接触や情報の伝達により、他の個体も避難を開始するはずであり、指針手法の計算に内在する非現実的な要因についても視覚的に把握する事ができる。また、出口 1 では早い時刻に避難が終了しているにもかかわらず、隣接する出口 2 において滞留が発生するという不自然な状態が見られた。しか

し、このような状況で最適な避難誘導を行うことは現実には困難であり、この場合の避難経路(出口)の選択は実際には各個体において行われることになる。このため、個々の個体に避難経路(出口)の選択に自由度を与えた場合のシミュレーションを行った。

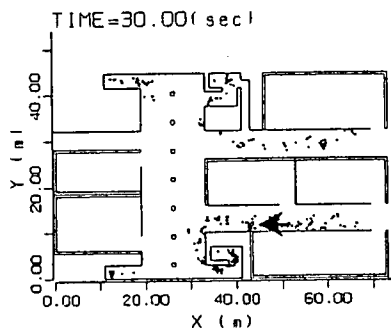
(1)の両ケースにおいて、避難の遅れの原因となっている出口 2 (図-4 参照)に誘導される区画(これを区画 A とする)の人口のうち半数がランダムに出口 1 を選択するものと仮定し、これをケース 3 とする。その他の仮定はすべてケース 2 (属性別に固有速度を与えた場合)と同様である。このケース 3 の 90 秒後の結果をケース 2 とともに示したものが図-7(a), (b) である。避難所要時間はケース 2 を 20sec も下回る 156sec である。図-8(a), (b) はそれぞれケース 3 の出口 1, 2 における流動係数、滞留密度の時刻歴を表したものである。図-7(b) と比べて出口 1 の滞留密度の継続時間が伸張してはいるものの、出口 2 の滞留密度が大幅に減少するため、トータルとして滞留の解消時間が早まっている。また、流動係



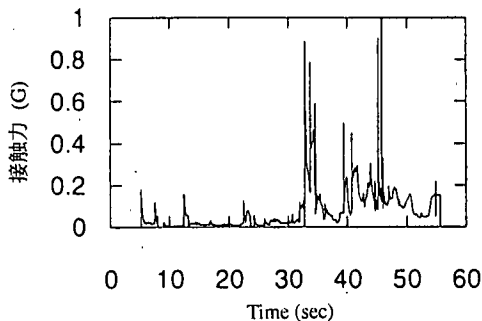
(a) 10秒後



(b) 20秒後



(c) 30秒後



(d) 接触力の時刻歴

図-9 対象とした避難者の動きの軌跡と外部から与えられる接触力の時間的変化

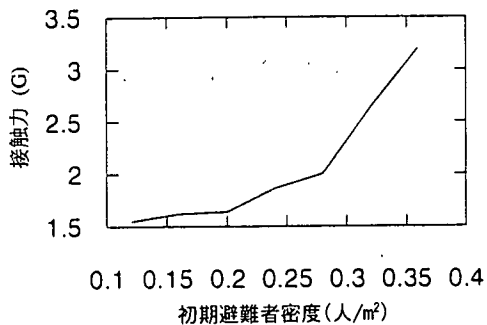


図-10 初期避難者密度とピーク接触力の関係

数も大きくなっているため、出口2で発生していた滞留が出口1、2と分散されており、これが避難時間の減少の裏付けとなっていることがわかる。

(3) 要素にかかる接触力の評価

避難行動中に要素がどの程度の接触力を受けることになるのかを知っておくことは、避難の安全性を考える上で重要な問題であるが、これまでそのような議論はほとんど行われていなかったのが現状である。本研究で用いたDEM手法では、各要素の位置は、

それぞれが受ける接触力を含む全作用力から運動方程式を介して算出されるので、要素の受ける接触力の時間的変化を逐次追跡することが可能である。

ここでは、避難者数が増加したときに避難者が受ける接触力がどの程度変化するかについて検討を行った。図-9は(2)と同じ平面モデルの中に300人配置し、この中のある要素(図中矢印、属性:中高生~50歳の女性)に着目してその接触力を見たものである。接触力の大きなピークは、主に出口付近の混雑時に生じている。ただし、要素は壁や他の要素など多方向から接触力を受けるが、これらの絶対値の和として力の評価を行っている。また、力の評価としては重力加速度(G)を基準としている。人体を単位高さを持つ円柱とし、そこから求められる体積と密度から質量を算出し、接触力をこの質量で除した値を用いている。

図-10は、初期の避難者数を変化させ、横軸に初期避難者密度(初期避難者数/面積)をとり、縦軸に各要素が受ける接触力のピーク値の平均値をプロットしたものである。初期避難者密度が増えるにつれて、接触力の一人当たりのピーク値の平均は指数関

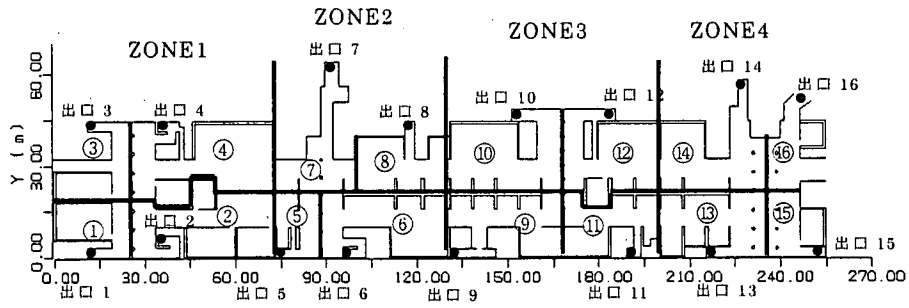


図-11 地下街の出口位置と区画

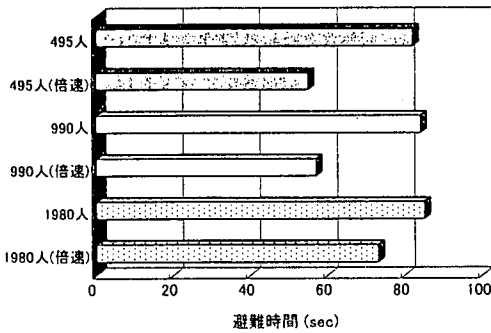


図-12 滞在人口と避難速度の違いによる避難所要時間の変化

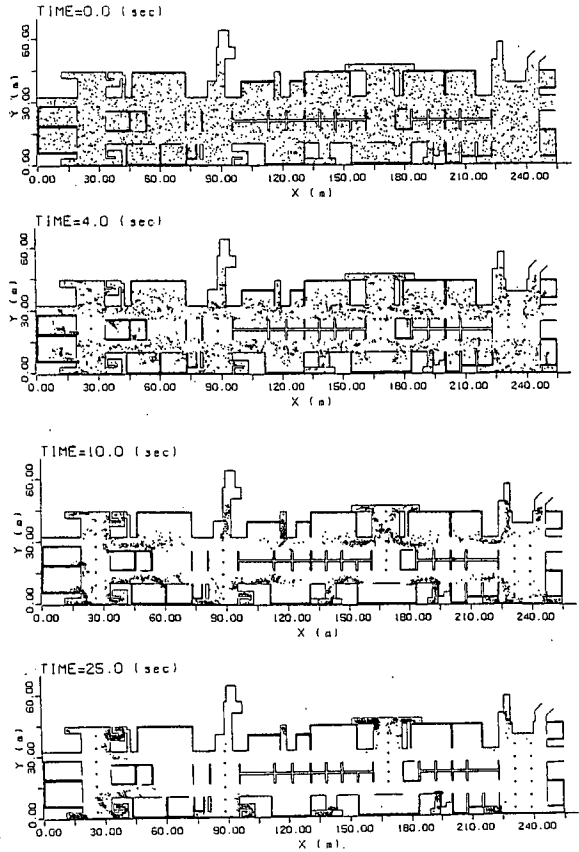


図-13 避難シミュレーション例(1980人, 緊急避難)

数的に増加している。最大で約3Gもの力を受けており、接触の起こる出口付近での転倒現象が多数起こることが考えられるだけでなく、年少者や高齢者にとっては非常に大きな負荷であると思われる。初期避難者密度が $0.3 \text{人}/\text{m}^2$ を超すと、急激に変化していることから、対象としたエリアにおいて避難行動を行う際には初期の人口密度が $0.3 \text{人}/\text{m}^2$ が1つの目安になり、それ以上では、特に避難者が接触を繰り返すような出口付近で $2G$ を超す接触力が作用する可能性があることを示唆している。この意味では、指針手法が設定している密度は、避難者が出口に殺到した場合には、個々の避難者に瞬間的に数Gの接触力が作用する可能性がある数値であることがわかる。

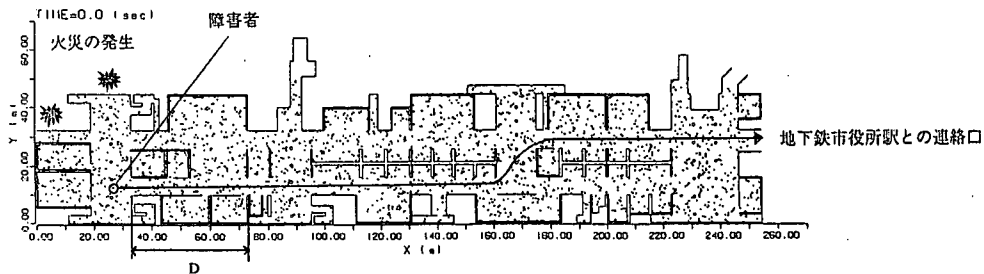
5. 全体的な避難行動解析

(1) 歩行速度と滞在人口の影響

ここでは、DEMモデルに基づく避難行動解析手法を実際の地下街に適用し、提案手法の有効利用の一例を挙げる。対象空間はゼスト御池地下街の全エリアである。まず、避難開始時の初期人口を地下街

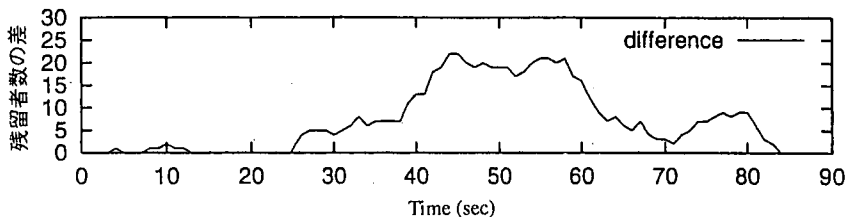
全体に一様に分布させ、災害時に行われる避難誘導によって各々が一斉に避難を開始するとの仮定の下で、地下街全体にわたる解析を行った。

ここで、店舗部における飲食店に対しては一律に 2.0m の出口を持つスペースを設定し、その他の店舗はオープンスペースとした。避難開始時の滞在人口は3.の人口調査で得られた990人を基準に、その倍数(1,980人)および半数(495人)を仮定する。各々の



対向の発生が予想される区間

(a) 車椅子使用者を想定した場合のシミュレーション (初期状態)

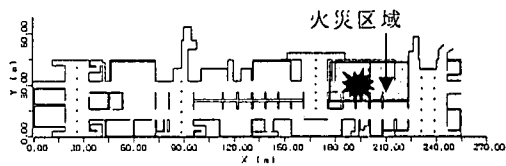


(b) 対向の有無による残留者数の差

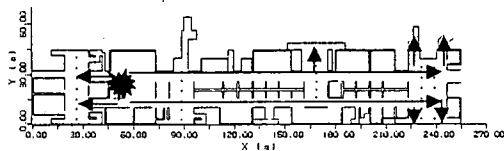
図-14 対向流が発生する場合の避難残留者数の差異



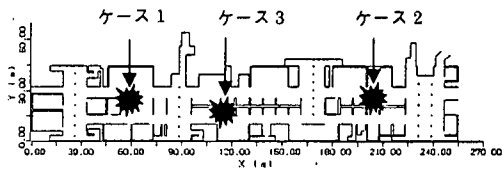
(a) 経路(C)での地下街の分割



(b) 火災区域の例



(c) 光走行システムによる避難経路の例



(d) 想定した火災発生位置

図-15 光走行システムの評価

避難者の属性別速度は表-3にて示した値を用いる場合、そして、被災時にはすべての属性が緊急行動をとることを考慮して2倍の速度を与えた場合についてケーススタディを行った。ただし、前述のように、遅い人の速度に規定されることも十分考えられるので、実際は2倍の速度をとれない人もいることには注意を要する。

また、各避難者の初期位置は一様乱数を用いて均等に配分し、全避難者が一斉に避難行動をとるものとした。その後各避難者は図-11に示す区画ごとに、それぞれの出口へ向かうことになる。

図-12は各ケースの避難所要時間をまとめたものである。初期人口が多い条件下では、歩行速度が増加しても避難時間は大きく減少していない。これは、

歩行速度が減少する階段部、及び通行幅員の減少する階段入り口における滞留の発生が主な原因である。人口 1,980 人の条件における緊急速度の場合を想定したシミュレーションを図-13 に示す。図-13 の 25 秒の図を見ると、出口 4、出口 11 等の階段口付近において円弧状の滞留が発生し、通行が妨げられている状況がわかる。これらの出口においては 4~5 人/m² という高いピークが現れており、特に出口 11 においてはこの高密度状態が持続するため、これが避難時間の遅れの原因となっている。

(2) 対向者の影響

群集避難行動における対向流の発生は通路の有効幅員の減少や回避行動のため、避難速度の低下と避難時間の遅れの原因となる。このため、適切な避難誘導により、このような対向の可能性を極力避けることが必要である。地下街内における車椅子使用者は、平時はエレベータを利用した昇降を行っており、特に介助者のいない場合は階段での避難は困難である。このような避難者は緊急時には階段を用いずに、水平方向の安全区画への避難を行うことになる。本シミュレーションでは、このように典型的な避難路を設定したが、実際は様々な行動様式をとることも考えられる。しかし、現状ではあらゆる避難行動を想定し、それぞれのサンプル全てに対して対応することは困難である。したがって、以降では 1 サンプルではあるが、想定できるうちの典型的な例としてのシミュレーションとその結果についての考察を行った。

この地下街における安全区画とは、地下鉄、地下駐車場およびホテルとの連絡口を指す。このような避難経路の違いは、時としては群集との対向流動の原因となる。本研究ではこのような属性の避難行動に着目し、対向者が他の避難者に与える影響を考察する。初期人数は 1,980 人、通常の歩行速度による避難を想定するが、車椅子使用者の速度は緊急時の避難速度として 3. で与えた平常時速度の倍の 1.5m/sec を与えた。他の条件は(1)において行ったものと同様とする。車椅子使用者は、火災の発生場所を考慮して図中の避難経路を選択するため、図-14 (a)の D で示された区間において対向が発生する。車椅子使用者のいる場合の避難残留者数とない場合の残留者数の差を示したものを図-14 (b)に示す。車椅子使用者の避難時間は 160sec 程度であり、これは他の属性のそれに比べて極めて大きい値であることがわかる。また、車椅子使用者と他の避難者の対向は最初の 30sec 程度であり、図-14 (b)より対向による残留者数の違いが 40sec 以後の 20sec 間に生じて

いるが、ここにこの影響があるものと思われる。

(3) 光走向システムの評価

この種の避難解析では、避難者は最寄りの出口へ向かうこと（この経路を最短経路と呼ぶ）を前提として解析を行うことが多い。しかし、被災時には、火災の発生や地震による什器類の転倒、構造物の崩壊などにより通行できない通路が生じ、最短経路を選択することが不可能となることも予想される。さらには、パニック状態に陥り、正常な判断力を失った避難者の出現も考えられる。

ここで対象とした地下街は 24 時間体制の防災センターを集中管理室として、通路床の光走行避難誘導システムによって災害に即した誘導を行っている。

以下では、最短経路による場合と光走行避難誘導システムによって経路が与えられた場合とではどのように避難行動が変化するかについて、主に避難時間の面からの検討を行った。

想定した避難経路は以下の通りである。

- (A) 全避難者が最短経路を選択した場合
- (B) 全避難者が光走行避難誘導システムに従う経路を選択した場合
- (C) 図-15(a)に示すように地下街を北側と南側に分割し、火災が起った側にいる避難者は光走行避難誘導システムに従う経路を選択し、反対側にいる避難者は最短経路を選択した場合
- (D) 火災発生位置から最寄りの公共広場まで（この区域を火災区域と呼び、例を図-15(b)に示す）に位置する避難者は光走行避難誘導システムに従う経路を、それ以外の区域にいる避難者は最短経路による経路を選択した場合

光走行避難誘導システムによる経路の一例を図-15(c)に示す。これらの避難経路(A)~(D)について、避難時間、出口付近の滞留密度、要素にかかる負荷等について避難シミュレーション結果を比較することにより、避難経路の違いによる避難行動特性の違いを把握し、光走行避難誘導システムの問題点を抽出して、その改善を図るための有用な情報を得ることができる。

解析の対象とした地下街は東西約 250m にも及ぶため、火災発生位置により避難行動は大きく変化する。そこで、本研究では、火災発生位置を 3 箇所(ケース 1, ケース 2, ケース 3)選び、それぞれについて解析を行った。これらの検討を行うことにより、危険性の高い火災発生位置を把握することができる。選定した火災発生位置を図-15(d)に示す。

(A)~(D)について避難シミュレーションを行うこ

表-4 避難時間の比較

(単位:秒)

	避難経路			
	(A)	(B)	(C)	(D)
ケース1	83	101	101	89
ケース2		107	105	83
ケース3		100	91	84

とによって得られた避難時間を示したものが表-4である。

まず、(B)と(D)の避難時間の差を求めると、ケース1では12秒、ケース2では24秒、ケース3では16秒であり、顕著な違いが認められる。しかしながら、(B)と(D)とでは、火災区域内にいた避難者は、光走行避難誘導システムによる経路を選択しており、両者における避難時間の差は、火災区域の避難者によってもたらされたものではない。したがって、(B)において、火災区域以外の避難者の中に、安全に最短距離で避難できたにも関わらず、光走行避難誘導システムに誘導されることで時間をロスした者が存在すると考えられる。この結果は、火災の延焼程度と現在位置との関係から、リアルタイムに各避難者の危険度を把握でき、適切な避難誘導が行われれば、避難時間が大幅に短縮できる可能性があることを示唆するものである。

次に、(B)、(C)、(D)の間の避難時間の差に注目してみる。ケース1, 2では(B)と(C)の差は僅かであるのに対し、(C)と(D)の差は10秒以上とかなり大きくなっている。また、(D)で急激に避難時間が短縮する傾向が見られる。一方、ケース3では、(B)と(C)の差は9秒、(C)と(D)の差は7秒であり、ケース1, 2に見られたような傾向は見られない。これは最大避難距離の差に原因があると考えられる。ケース1, 2では、最大避難距離は約90mであるのに対し、ケース3では約70mとなっている。避難距離の長大化は避難行動の危険度を増加させる要因となり得ることから、避難距離が長くなる火災発生位置を事前に十分把握し、避難計画の際に考慮する必要がある。

6. 結論

本研究で提案しているDEMモデルを用いれば、地下街全体における避難状況の巨視的な把握ができるのと同時に、発生しうる滞留の位置やその状況、流動係数や避難中に各個体に作用する接触力の定量化が可能である。本研究で行ったこと、及び得られた

成果を以下に示す。

- (1) 対象領域の全体シミュレーションによる避難状況の巨視的把握のみならず、出口付近の局所的な群衆流の評価のために流動係数や滞留密度を導入し、よりミクロな視点での解析を行った。
- (2) 実際の地下街において属性別人口調査を行い、地下街における属性別の人口の時間的な変動とその構成割合を調査した。この結果を構成人口の割合に反映させるとともに、それぞれの個体に属性別の速度を与えることにより、より現実的なシミュレーションが可能となった。
- (3) 滞人口調査に基づく現実的な滞人口の下でのシミュレーションを行い、流動係数や滞留密度、地下街の人口密度の変化による避難中の最大作用力の変化などを定量的に検討した。
- (4) 車椅子使用者の水平避難を例に避難中発生しうる対向流をシミュレートし、この対向流が主に避難時間に与える影響を検討した。
- (5) 現行の指針で推奨されている避難計算による結果との比較を行った。本サンプルシミュレーションでは、属性別に異なる歩行速度を与えることで出口における人口の集結時刻が分散され、避難がスムーズになるという結果を得たが、今後は属性の構成や初期配置を変化させた多数のシミュレーションを行い、その平均的な傾向を検討する必要がある。
- (6) 本手法による避難計算を行えば、どの出入口でどのような状況が生じているのかを定量的・視覚的に把握することが可能であるので、図式計算などの簡便法による避難計算の安全性照査に有効である。

参考文献

- 1) 建設省監修：新・建築防災計画指針1985年度版、日本建築センター、1985。
- 2) 岡崎甚幸、松下聡：避難計算のための群衆歩行シミュレーションモデルの研究とそれによる避難安全性の評価、日本建築学会計画系論文報告集、第436号、pp.49-58、1992。
- 3) 清野純史、三浦房紀、瀧本浩一：被災時の群衆避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について、土木学会論文報告集、No.537/I-35、pp.233-244、1996。
- 4) 清野純史、三浦房紀、八木宏晃：個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション、土木学会論文報告集、No.591/I-43、pp.365-378、1998。
- 5) Cundall, P. A.: A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movement in Blocky Rock

- System, Symp. ISRM, Proc. 2, pp.129-136, 1972.
- 6) 目黒公郎, 伯野元彦: 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造破壊解析, 地震研究所彙報, Vol. 63, pp. 409-468, 1988.
 - 7) 戸川喜久二: 避難群集流の計算について, 建築雑誌, No. 4, pp. 15-19, 1954.
 - 8) 仙田 満, 矢田 努, 富田昌志, 原 博: 歩行線形による通路空間の形状に関する研究 小学校廊下の実態調査および実物大模型による歩行実験にもとづく曲がり角隅切処理の提案, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 455, pp. 109-118, 1994.
 - 9) 吉岡昭雄: 歩行者交通と歩行空間(II), 交通工学 Vol. 13, No. 5, 1978.
 - 10) 三浦房紀: 車椅子による避難行動シミュレーションモデルの開発, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp3559-3564, 1998.
- (2000.06.12 受付)

EVALUATION OF SAFETY ON EVACUATION BEHAVIOR FROM AN UNDERGROUND SPACE DURING AN EARTHQUAKE

Junji KIYONO, Kenzo TOKI, Nobuhiro INUKAI and Toru TAKEUCHI

The Distinct Element Method (DEM) was used to simulate evacuation behavior during a disaster. This is a numerical analysis method that can compute the position of each element by solving the equation of motion step by step. We propose a calculation algorithm in which elements can avoid and pass each other naturally. The DEM parameters were determined from the results of these experiments. Observation in an underground passageway was done to estimate a total number of evacuees and a rate of age-groups. We simulated an emergency evacuation from a confined space representing an underground shopping center and paths. Evacuation behavior, time needed to evacuate, and forces applying to an element were estimated quantitatively.