

個別要素法を用いた トンネル避難シミュレーションの研究

石村 勝伸¹ 水口 尚司²

¹株式会社ニュージェック 道路グループ (〒531-0074大阪府大阪市北区本庄東二丁目3番20号)

²株式会社ニュージェック 道路グループ (〒531-0074大阪府大阪市北区本庄東二丁目3番20号)

道路トンネル内においてひとたび火災が発生すると、道路トンネルの通行が遮断され、道路利用者は車両から降りて、火災によって生じた煙の中を自力で避難しなければならない。このような場合、トンネル内の充満した煙は視界低下や呼吸困難をもたらし、パニック状態となり大惨事となる可能性がある。本研究は、トンネル火災によるパニック時を想定し、避難者が狭小で延長の長い路下避難通路での避難の安全性を群集避難行動の数値シミュレーションにより確認したものである。その群集避難行動の数値シミュレーションとして、個別要素法をベースとした群集避難行動シミュレータを用いた。研究の結果、想定した避難施設は安全に避難できる結果となった。

キーワード トンネル火災、トンネル防災、群集避難行動シミュレーション

1. はじめに

道路トンネル内において火災が発生した場合、火災によって発生した有害な煙から迅速に避難することが生存の鍵となる。道路利用者がパニック状態となり非常口を通じて路下避難通路に殺到した際の避難方法の安全性について検証する必要がある。今回は床板下空間を避難通路として利用するシールドトンネルを研究対象とした。火災時には避難者は本線から非常口を通じて床下の避難通路へ移動し、所定の避難場所へ誘導されることになる(図-1 参照)。

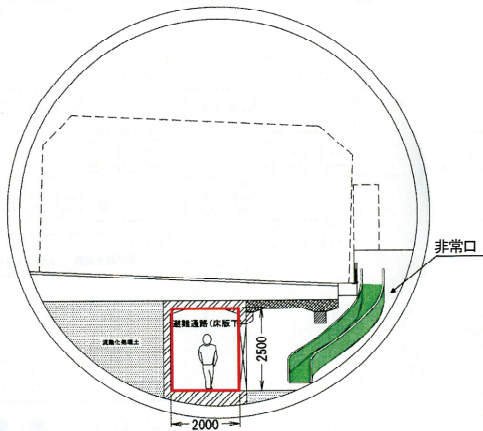


図-1 非常口から路下避難通路への接続のイメージ

都市内における長大トンネルの火災時避難は、混雑が予測されるため避難設備の妥当性検討は不可欠であるが、

これまで非常口から床下の避難通路を通じて避難する方式を採用した事例が少ないこともあり、通路幅や非常口から避難路への接続形状などの避難設備に関する情報は不足している。本研究では、トンネル火災時における避難設備を対象として、延長約1kmのシールドトンネル区間を想定し、狭小で延長の長い路下避難通路での避難過程の数値シミュレーションを実施し、所定の境界条件に対する避難時間や、円滑な避難が可能であるか否かを明らかにする。なお、狭小空間での群集の避難過程では、個々の避難者間の相互作用が避難過程に及ぼす影響が大きいため、本研究では個々の避難者行動の追跡が可能な個別要素法型の群集避難シミュレータ¹⁾を基礎としたモデルを採用した。なお本シミュレーションモデルは、弊社が京都大学工学研究科社会基盤工学専攻 後藤仁志教授と共同研究により開発した手法である。

2. 群集避難行動モデル

(1) 群集避難行動のモデル化

図-2に避難行動イメージ図を示す。群集行動のモデル化では、人間行動を表現する個体モデルが必要となるため、人間の能動的行動を考慮する必要がある。人間行動が心理的作用に影響されてはいるが、災害時等のパニック避難に限定すれば、個々の人間の心理が避難行動に与える影響の個体差は少ないと考えられるため、単一の規則によるモデル化が可能であると考えられる。

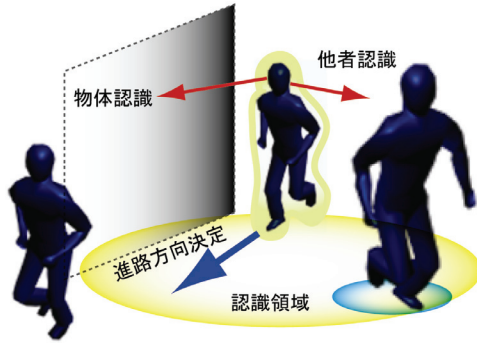


図-2 避難行動のイメージ図

(1) 基礎方程式

人間を円要素として扱い平面2次元場の円要素の相互作用として群集行動を評価した。個人の避難行動は、個別要素法をベースに人間の能動的行動を規定する外力項を加えて拡張した並進および回転の運動方程式は、

$$M_{hi} = \frac{du_i}{dt} = (F_{int x} + F_{aw x})_i \quad (1a)$$

$$M_{hi} = \frac{dv_i}{dt} = (F_{int y} + F_{aw y})_i \quad (1b)$$

$$I_{hi} = \frac{d\omega_i}{dt} = (T_h)_i \quad (1c)$$

を用いた。ここに、 $F_{int x}$ 、 $F_{int y}$ ：人間要素 i に作用する[人-人]あるいは[人-壁]の要素間の作用力ベクトルの x 軸および y 軸方向成分、 $F_{aw x}$ 、 $F_{aw y}$ ：人間要素 i の自律歩行力（推進力）ベクトルの x 軸および y 軸の方向成分、 t ：時間、 u_i 、 v_i ：人間要素 i の x 軸、 y 軸方向の移動速度成分、 T_h ：人間要素 i に作用するトルク、 ω_i ：人間要素 i の回転速度である。また、人間要素 i の質量 M_{hi} および人間要素 i の慣性モーメント I_{hi} については、人間要素を単位高さのシリンダ形状と仮定して、

$$M_{hi} = \epsilon_h \sigma_h \frac{\pi d_h^2}{4}; I_{hi} = \epsilon_h \sigma_h \frac{\pi d_h^4}{32} \quad (1d)$$

と与えた。ここに、 σ_h ：人間要素の密度、 ϵ_h ：シリンダの体積と人間の実質体積の差を表す係数、 d_h ：人間要素径である。なお、日本人人体寸法データベース²⁾より、平均身長 164.7 cm、平均体重 56.5 kg を決定して、これと等価なシリンダとして $\sigma_h=1.0$ 、 $\epsilon_h=0.304$ 、 $d_h=0.379$ m に設定した。

(2) 要素間作用力

図-3 に物理的接触および心理的接触の発現領域の概念図を示す。

要素間の相互作用力としては、[人-人]および[人-壁]の物理的接触はもちろん、物理的接触を回避しようとする非物理接触（心理的接触）に関する作用力がある。人

間要素 i の外側に示す破線内に他の人間要素の中心が進入すると物理的接触が発現する。また、扇形領域に、他の人間要素や壁線分が重なると、心理的接触による作用力が発現する。この心理的接触が発現する領域は、人の視野範囲を考慮して、人間要素 i の進行方向から $\pm 60^\circ$ の範囲に設定し、視野半径 r_m は、清野ら³⁾の心理的平衡距離（周辺の間要素との間で斥力が作用しない最短限界距離）に関する観測結果（赤信号で停止した人間相互距離の平均値）を参考にして 0.976 m と設定した。上記を定式化すると、物理的接触領域での人間要素間の接触判定は、人間要素 i と人間要素あるいは仮想壁要素 j 間の距離を R_{ij} として、

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1e)$$

を用いて、物理接触領域と心理的接触領域における接触判定は、

$$R_{ij} \leq \frac{d_{hi} + d_j}{2} \quad (1f)$$

$$R_{ij} \leq r_m \quad (1g)$$

と設定した。ここに、 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) ：人間要素 i と人間要素あるいは仮想壁要素 j の中心座標、 d_{hi} 、 d_j ：人間要素 i と人間要素あるいは仮想壁要素 j の直径である。なお、 d_j は壁要素であっても d_h と同一であるとした。

図-4 に物理接触および心理接触の発現領域を示す。壁要素から人間要素への反力については、人間要素が壁線分と接する場合、人間要素の中心から壁要素に対して対象な位置に仮想要素 j を配置し、壁要素と人間要素 i の間の斥力が発現するようにした。また、心理的接触領域に壁要素が存在する場合は、人間要素 i から最も近い壁要素上の位置から斥力を作用させる取扱いとした。さらには、物理的接触領域においては、接線方向に一定の限界を超える力が作用すると滑動するジョイントを配置した。

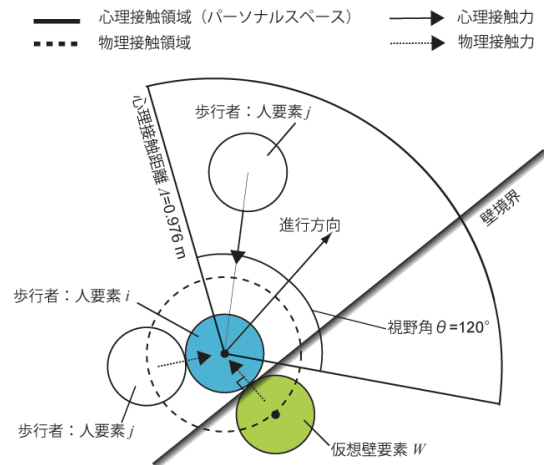


図-3 物理接触および心理接触の発現領域

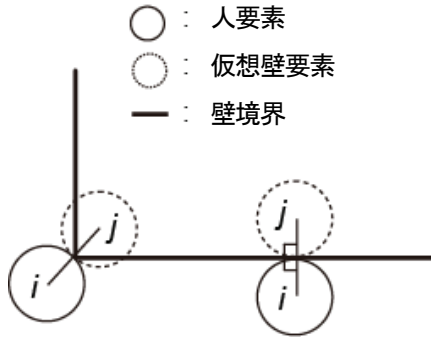


図-4 壁境界における仮想粒子の配置

(3) 自律歩行力

人間要素は、周囲からの影響を受けない状態では、固有の平衡速度で移動すると考えられる。ここでは、人間要素が平衡速度に到達するための加速過程を等加速度運動と仮定して、自律歩行力を

$$\left. \begin{aligned} F_{awx} &= M_{hi} a_h \cos\theta \\ F_{awy} &= M_{hi} a_h \sin\theta \end{aligned} \right\} \quad (1h)$$

と設定した。ここに、 a_h ：加速度の大きさ（清野ら⁴⁾の実験観測データを用いて $a_h=1.84 \text{ m/s}^2$ ）， θ ：人間要素の移動方向であり、周囲壁の状況に応じて図-5 のように設定する。

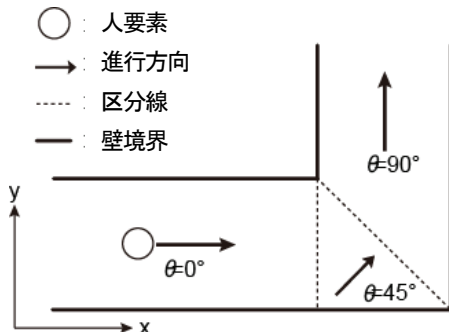


図-5 計算領域と計算方向の例

平衡速度に関しては、視野範囲に存在する他の人間要素の数密度 c_h (人/m²) に依存する表式

$$\left. \begin{aligned} u_{max} &= u_{limit} && \text{when } c_h \leq 0.3 \\ u_{max} &= u_{limit} - r_{dv}(c_h - 0.3) && \text{when } c_h > 0.3 \end{aligned} \right\} \quad (1i)$$

を用いた。ここに、 u_{max} ：平衡速度、 u_{limit} ：自律歩行速度、 r_{dv} ：視野範囲の混雑状況によって生じる減速効果に関する逓減パラメータである。これらの値は、計算対象の条件（対象者の年齢や性別とそれらの分布、また、通勤時や平時などの状態等）によって設定する。自律歩行速度については、群集歩行に関する毛利・塚口⁵⁾の実験結果より、下限値 (=0.25 m/s) を設定し、さらに、数密

度が 0.3 以下では単独歩行を仮定して、図-6 のように設定した。また、計算領域に階段部などの傾斜領域が存在する場合、傾斜の程度によって歩行状態が変化したが、ここでは、傾斜部では一律に平衡速度の値を半減して計算した（建設省告示 1442 号・全館避難計算によれば、屋内階段昇段時の歩行速度を平坦部の約半分に設定する歩行速度指標が示されている）。

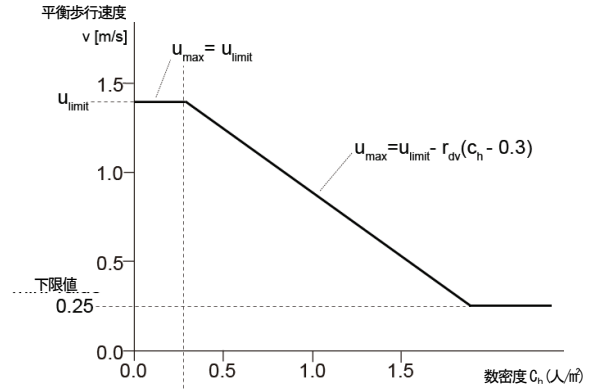


図-6 数密度と平衡歩行速度の関係

3. 路下避難通路における群集避難過程

(1) 計算領域および計算条件

計算領域は、シールドトンネル区間の立坑①から立坑②のおよそ 1.1km を想定した。実際には曲率を有したトンネル線形区間であるが、曲率が避難者の運動に与える影響は小さいことを考慮し、ここでは、図-7 に示すように 5 つの非常口を含む直線区間として計算領域を設定した。

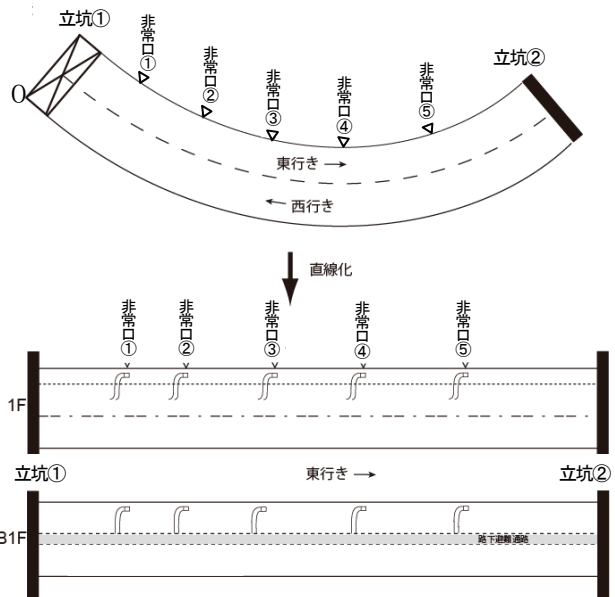


図-7 計算領域

また群集避難過程は、非常口から流入した時点から、床下の避難通路を通して立坑①および立坑②の避難場所に到達するまでを追跡した。また、立坑①では地上へ、立坑②では反対車線へ到達した時点で避難完了とし、非常口番号1, 2, 3からの流入避難者は立坑①へ、非常口番号4, 5からの流入避難者は立坑②へ避難するとした。すなわち、非常口番号3からの流入避難者の避難場所

(立坑①)までの動線距離が最も長く避難に不利な条件となる。なお、本シミュレーションで想定した立坑①および立坑②の避難通路寸法は、幅員2.0m×高さ2.5m、5つの非常口の間隔は、約130mから240mであり、避難延長は1.1kmである。また、避難人員は非常口一ヶ所あたり50人/分であり6分間の連続流入条件(延べ流入者数1500人)とした。なお、避難通路部における避難者の歩行速度は1.0m/sとして与え数値シミュレーションを実施した。

(2) 非常口付近における避難過程

図-8に累積避難完了者数の時系列を示すが、立坑①および立坑②へのそれぞれの避難過程と全体の避難過程の時系列を併示した。立坑①への避難完了時間は1148秒、立坑②へのそれは956秒を要しており、避難動線距離の影響が確認される。また、1500人の避難完了が1148秒であることから、平均的には、1.3人/秒の避難完了率となった。

図-9に立坑①および立坑②における流動係数の時系列を示す。立坑①での瞬間的な流動係数は、本計画の基準である90人/(m・分)を最大値として示すが、最大値を示す時間は断続的であり継続的に90人/(m・分)の流動係数を示すことはない。また、平均流動係数は40.8人/(m・分)と十分に基準を満たしていると考えられる。立坑②では、瞬間最大流動係数は90人/(m・分)を下回っており、平均流動係数は37.8人/(m・分)となる。以上より、瞬間的な流動係数の観点から避難計画を満足していることが理解される。

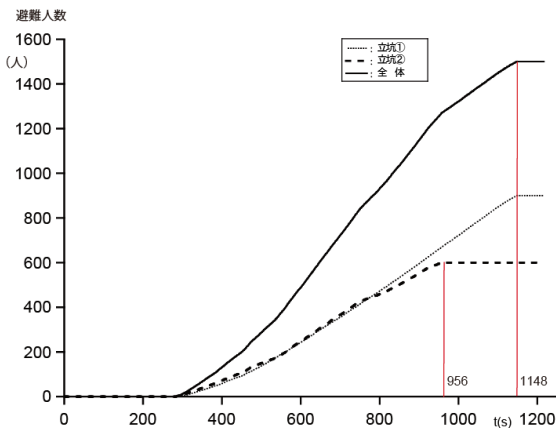


図-8 累積避難完了者数の時系列

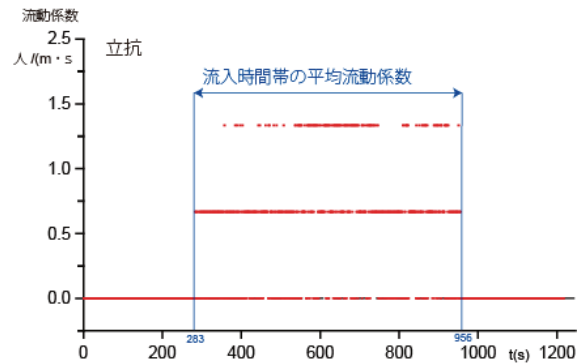
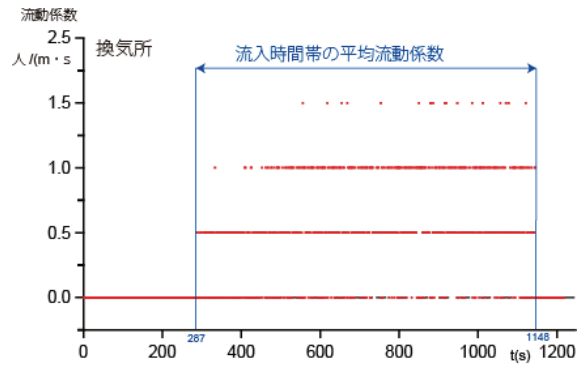


図-9 流動係数の時系列

図-10に避難者で最も混雑が予測される非常口番号1付近のスナップショットを示す。なお、どの非常口から流入した避難者であるか区別するために非常口番号1からの流入者は赤色、非常口番号2からの流入者は緑色、そして非常口番号3からの流入者は青色で避難者を着色した。非常口番号1からの流入者と非常口番号番号2および非常口番号3からの流入者が合流する時刻は、それぞれ時刻t=130sおよび時刻t=354sである。シミュレーションからは合流箇所での僅かな混雑が確認されるものの、先の累積避難完了者数の時系列のグラフに確認されるように避難効率に顕著な低下が見られないことや、流動係数が基準を満たしていることから、本研究の数値シミュレーション結果からは、設定した避難シナリオおよび避難設備構造に対して円滑な避難が可能であることが言える。

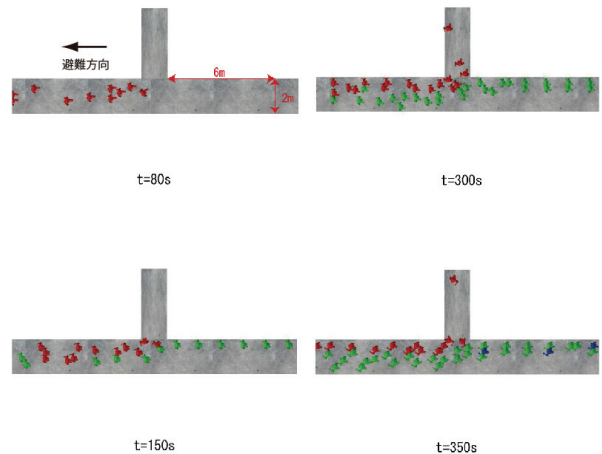


図-10 非常口番号1付近の避難過程のスナップショット

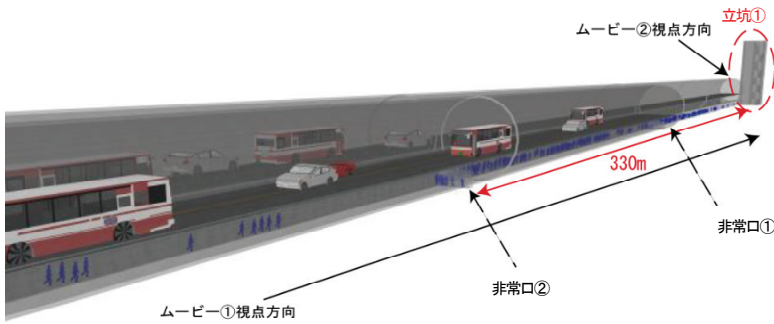
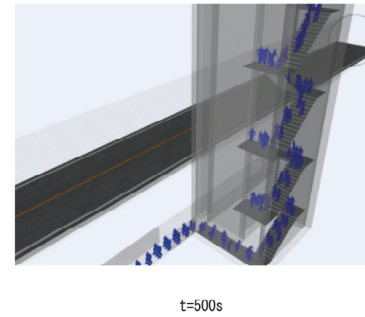


図-11 立坑①付近のスナップショット



t=500s

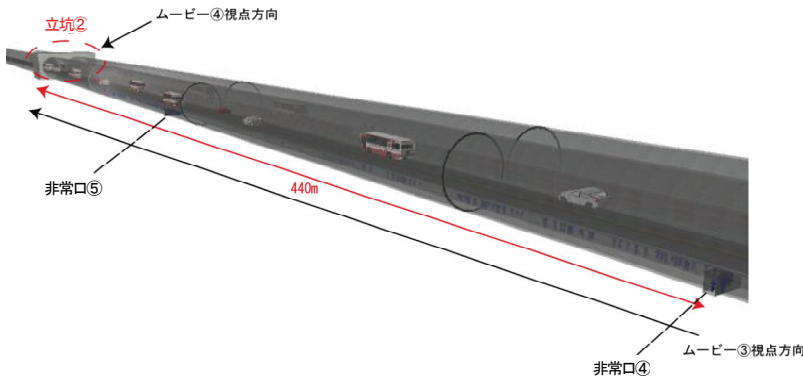
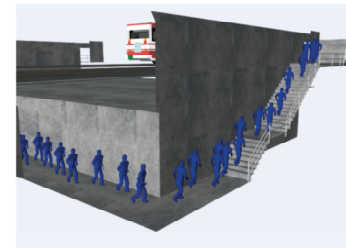


図-12 立坑②付近のスナップショット



t=400s

(3) 立坑①および立坑②における群集避難過程

図-11 および図-12 にそれぞれ、立坑①および立坑②へ向かう群集避難過程の代表的な CG 画像を示す。これらのスナップショットは、各図の最初にした矢印の方向へカメラワークしたムービーデータから抽出した画像である。床下の避難通路へ流入し、各避難所に向けて避難する過程が視覚的に理解し易く、避難過程の状況把握に対してこの種の CG 画像の有効性がうかがえる。また、シミュレーション結果の CG アニメーションを確認したところ、立坑①および立坑②へ向かう避難過程の双方に円滑な群集避難過程が確認されたことから、避難設備構造には問題は無いと考えられる。

の避難過程に対する一定の妥当性が確認された。

今後は、火災時の煙による影響、複雑に連なる避難通路等に注目した研究によりさらに適用性を広げていきたい。

謝辞: 本研究にあたり、シミュレーションの条件設定、数値解析、計算結果の取りまとめ、避難設備の妥当性検証等において多大なるご指導・ご助言をいただいた京都大学工学研究科社会基盤工学専攻 後藤仁志教授並びに原田英治准教授に深く感謝いたします。

5. おわりに

本研究では、これまで採用事例の少ない路下避難通路へつながる非常口における避難過程の数値シミュレーションを個別要素法を基礎とした群集避難シミュレータを用いて実施した。複数の非常口から流入する避難者と路下避難通路を避難している群集との混雑の様子に注目し、避難設備構造の妥当性について研究したが、非常口と路下避難通路が直角に接続され、進行方向を90度変更しなければならない速度変化のある厳しい条件であっても、概ね円滑な避難過程が得られた。また、本研究で基準とした流動係数 (90人/(m・分)) を平均的な流動係数では、十分に下回る結果も得られ、設定した避難設備構造

参考文献

- 1) 後藤仁志, 原田英治, 久保有希, 酒井哲郎: 個別要素法型群集行動モデルによる津波時の避難シミュレーション, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1261-1265, 2004.
- 2) 河野まき子, 持丸正明, 岩澤 洋, 三谷誠二: 日本人人体寸法データベース 1997-1998, 通商産業省工業技術院くらしとJISセンター, 2000.
- 3) 清野純史, 三浦房紀, 瀧本浩一: 被災時の群集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, 土木学会論文集, No. 357/I-35, pp. 235-244, 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, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 365- 378, 1998.
- 5) 毛利正光, 塚口博司: 歩行路における歩行者挙動に関する研究, 土木学会論文報告集, 268号, pp. 99-108, 1977.