

学 位 論 文 題 名

トンネル空間における火災安全に関わる実験的研究

学位論文内容の要旨

本論文は、トンネルを始めとする地下構造物・施設の重要性や用途等から、安全の目標を定め、そこに予想される火災の規模を想定した対策が十分であるか、否かを評価して設計する性能設計の考え方（火災安全設計法）の確立を目的として、トンネル空間（半閉鎖空間）における火災の挙動を把握・定式化する解析の手法を検討している。

本論文は 15 章で構成されている。第 1 章では、本研究の背景、目的および研究の特色を述べた。第 2 章では既往の研究に触れながら、本論文の各章の内容と得られた成果の概略を述べた。第 3 章では、本研究で行った火災実験装置および実験条件等を述べている。トンネル断面形状が火源近傍の火災性状に与える影響を実験的に明らかにするために、火源形状を一定とし断面アスペクト比（以下 Ap =縦/横）を $1/1 \sim 1/3$ の 3 種類に変化させた。また、火源形状がトンネル空間内の火災性状に及ぼす影響を把握するために、トンネル断面形状を $Ap=1/2$ とし、火源形状はその縦横比を $3:1 \sim 1:3$ の範囲として、火源の大きさや換気風速を変化させた実験を行った。実験はフルードモデルを採用し、模型実験の諸条件を決定した。

火災初期における避難・救助活動時の人体や躯体への熱負荷を検討するために、熱負荷の主要因となりうるトンネル空間内の火災の傾斜角度やその長さ等の火災形状に注目し、第 4 章では、自由空間において横風を受けた火災傾斜に対し、発熱速度 (Q) を鉛直上昇速度に置換し、また、横風速度 (V) を火源近傍の代表速度に置換して、火災の有効高さを変数とした火災傾斜の角度の工学的予測式を導出した。有風時の有効火災高さについて代表長さ D を用いてフルード数 ($Fr_D=V^2/gD$) および無次元発熱速度 ($Q^*_D=Q/\rho_a C_p T_{ag}^{1/2} D^{5/2}$) の組み合わせ関数を用い、床なしと床あり条件で簡易計算式を提案した。

第 5 章では、自由空間において採用した手法が、トンネル内の火災形状予測へ向けて適用可能か、否かを検討した。トンネル内の火災の傾斜角度を定義するために 2 種類の角度を導入し、天井への接炎の有無に関わらず、火炎軸に沿った接線を火源表面高さレベルとの交点で定義する角度の関数とした方が、汎用性に富むことを明らかにした。トンネル天井に接炎しない状況の有効火災高さは、自由空間における性状に、空間の拘束条件を考慮した形状表現が可能であることを示し、その予測式を提案した。

第 6 章では、火災プリューム性状の簡易的なモデル化を行い、トンネル空間内における仮想点源の長さは、トンネル長さ方向の場合、トンネル断面方向の火源長さ (D_y) の関数とした Q^*_{Dy} との相関性が高く、トンネル短手方向の場合、トンネル長手方向の火源長さ (D_l) の関数とした Q^*_{Dl} との相関性が高いことを明らかにした。火災プリュームの主軸温度は、自然換気時は McCaffrey の提案式とほぼ同等の温度性状を示し、強制換気時は火源からの中心軸上の距離 (L) と発熱速度によって火炎片領域で ($L/Q^{2/5}$) の -1 乗、プリューム領域で -5/3 乗の関数となった。火災プリュームの半径方向の温度分布は Ap と無関係であり、自然換気時は自由空間の 2~3 倍に拡大し、強制換気時は火災プリューム軸の距離に対する横方向の距離の比の対数に比例していた。トンネル内の火災性状は、自然換気と強制換気および接炎の有無によって異なっていた。自然換気時及び強制換気・接炎時の場合、空間高さ (H) を用いた無次元数と火炎特性の相関性が最も高いことを明らかにした。強制換気・非接炎時の場合は、

火源径 ($D_0 = [D_1 + D_2]^{1/2}$) を用いた無次元数と火災特性の相関性が最も高いことが分かった。自然換気時の火災長さは、 Q_H^* の $2/5$ 乗の関数、最大火炎幅は Q_H^* の $2/3$ 乗の関数となり、最大火炎幅提示位置は、発熱速度と明瞭な相関性が存在せず、最大火炎幅提示位置と仮想点源の和が空間高さとも一致することを明らかにした。強制換気・非接炎時の火災長さは Q_H^* の $3/4$ 乗、最大火炎幅は Q_H^* の $1/2$ 乗、最大火炎幅提示位置は組み合わせ関数 ($Q_{D_0}^* Fr_{D_0}^{-1/6}$) の $1/3$ 乗に比例していた。強制換気・接炎時の火災長さは組み合わせ関数 ($Q_H^* Fr_H^{-1/6}$) の $3/5$ 乗、最大火炎幅は組み合わせ関数 ($Q_H^* Fr_H^{-1/6}$) の $1/3$ 乗、最大火炎幅提示位置は組み合わせ関数 ($Q_H^* Fr_H^{1/2}$) の $1/3$ 乗に比例することを明らかにした。

第 7 章では、強制換気時における火源近傍性状として、天井直下に出現する最高上昇温度、その呈示位置に注目し、これら諸因子に対する簡易予測式を導出するとともに、 Ap が空間天井近傍の温度性状に与える影響を検討し、火源から天井までの高さ (H) とトンネル断面幅 (b) の組合関数 (H^3/b)^{1/2} を関数とする空間代表長さの関係式を導出した。次に、火源の代表長さを表記するために、トンネル断面幅と強制換気流に面する火源長さ (D_0) により定義される無次元長さ (b/D_0)^{1/2} の関数となる補正項を求め、空間断面形状と火源形状の異なる場合に適用しうるトンネル火災時天井近傍最高上昇温度、その呈示位置並びに火炎傾斜角度の簡易予測式を導出した。

第 8 章では、矩形断面の Ap (側壁効果) に配慮した自然換気時の天井近傍を流動する熱気流の温度減衰性状を予測する実験式を導出した。天井ジェットの温度は、その減衰が殆ど生じない領域と r/H (r : 火源からのトンネル長手方向水平距離 [m]) のべき乗数に比例して減衰する領域とに大別できる。ほぼ一定の温度上昇を示す領域は、 Ap に依存し、 $Ap=1/1$ の場合、 $r/H < 0.5$ 、 $Ap=1/2$ あるいは $1/3$ の場合 $r/H < 0.2$ であった。天井ジェットの温度上昇の減衰性状を r/H の関数として、また、この簡易式中の比例定数およびべき乗数を各々 Ap の関数として表現した近似式を提案した。

第 9 章では、強制換気時に天井近傍に形成される最高温度とその呈示位置に着目し、遡上熱気流先端近傍の給気側の温度上昇と遡上側の温度減衰の性状が異なる境界点を、遡上先端位置と仮定して解析を進め、発熱速度と換気風速および遡上位置における関係式の定式化を試みた。従前の遡上阻止風速と発熱速度の関係は、遡上した煙層の天井近傍の温度特性と換気流の関係を示しており、既報告の遡上阻止に関する複数の模型実験結果の統一的な整理方法を提示した。

第 10 章では、縦流式換気方式を採用したトンネル空間を対象とし、極端な煙層の遡上が生じていない状況下における排煙側のトンネル長手方向への煙層の温度減衰および垂直温度分布、さらに煙層温度減衰に対するトンネル空間断面形状の影響について検討した。強制換気時の排気側の温度分布が、正規型分布をしていると仮定し、強制換気時の排気側天井近傍煙層の温度減衰勾配を Ap の関数とした実験式を提案するとともに、実規模における実験結果との比較からその妥当性を確認した。

第 11 章では、トンネル火災時の避難・消防活動における安全性の向上に資するため、求められた火災形状およびブリューム性状の実験式を利用した放射受熱の予測手法について検討を行った。自由空間、トンネル空間における放射受熱量は、火炎の表面温度に配慮する方法よりも中心軸温度を考慮する方法の方が、実測値により近い値を示すことを明らかにした。火炎領域を 1 枚の平板に置き換える簡易法では、放射体温度として 600°C を用い、強制換気時には垂直な平板を床面仮想火災出発点 (給気側観測点では火源の給気側境界) と火炎先端 (接炎時は天井近傍最高温度呈示位置) の中間点に設置する方法が、実測値の再現性に優れていることを明らかにした。

第 12 章では、 $Ap=1/2$ の空間を用いた模型火災実験を対象として、LES 乱流モデルを用いた CFD の数値実験を行い、実験結果と比較し、数値実験上の問題点ならびに火災実験から得られた簡易モデルの有効性を確認した。シミュレーションによる火災ブリュームの傾きは、実験結果とほぼ一致したが、火源近傍の火災ブリュームの温度分布は、実験結果よりも幅が狭くなる傾向を示した。 Ap が小さくなると、高温度呈示位置は減少し、火源直上に近づくけれども、遡上側の温度は低くなる。 Ap が大きくなるほど、火源から遠ざかった位置で温度上昇が低くなるとともに、天井近傍長手方向における短手中央の値と短手平均の値の差異は少なくなる傾向を示すことを明らかにした。シミュレーション結果の天井近傍温度分布は、衝突時の火災ブリュームがブリューム領域と火炎片領域の場合、簡易予測式

と概ね一致した。

第 13 章では、災害発生時に予測される危険性の抽出を行い、道路トンネルの既往の事故調査データ等をもとに、事故の発生確率を求め、潜在的な危険性を確認した。次いで、対策を考える上で最も重要な要素となる火源設定の考え方と火災事故時の発熱速度に関するケーススタディを行った。

第 14 章では、既存の法令等に基づいた仕様書的な設備設置の対策から離れて、道路トンネル空間の現状の設備的な防災対策の概要を述べるとともに、本来的なトンネル火災時の安全確保に必要な要件の整理を行い、技術的な安全の確認方法における「出火および火災拡大の防止」の項目に対し、既存の方法をベースにして 13 章までの新知見を加えて例示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 繪 内 正 道

副 査 教 授 窪 田 英 樹

副 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 助 教 授 早 坂 洋 史

副 査 上 席 研 究 官 山 田 常 主 (独立行政法人 消防研究所)

学 位 論 文 題 名

トンネル空間における火災安全に関わる実験的研究

本論文は、15 章で構成されており、トンネルを始めとする地下構造物・施設の重要性や用途等から、安全の目標を定め、そこに予想される火災の規模を想定した対策が十分であるか、否かを評価・設計する性能設計の確立を目的として、トンネル空間における火災の挙動を把握・定式化する解析の手法を実験的に検討を加えている。

第 1 章では、本研究の背景や目的、第 2 章では、各章の内容紹介と得られた成果の概略を述べている。トンネル断面形状が火源近傍の火災性状に与える影響を実験的に明らかにするために、第 3 章では、本研究で行った火災実験装置および実験条件等を明らかにすると共に、火災にフルードモデルを採用し、火源の大きさや換気風速を変化させ、模型実験の諸条件を決定している。

火災初期における避難・救助活動時の人体や躯体への熱負荷を検討するために、熱負荷の主要因となりうるトンネル空間内の火災の傾斜角度やその長さ等の火災形状に注目し、第 4 章では、自由空間において横風を受けた火災傾斜に対し、発熱速度を鉛直上昇速度に、また、横風速度を火源近傍の代表速度に置換して、火災の有効高さを変数とした火災傾斜の角度の工学的予測式を導出し、簡易計算式を提案している。

自由空間において採用した手法が、トンネル内の火災形状予測へ向けて適用可能を検討するために、第 5 章では、天井への接炎の有無に関わらず、火災軸に沿った接線を火源表面高さレベルとの交点で定義する角度の関数とした方が、汎用性に富むことを明らかにしている。トンネル天井に接炎しない状況の有効火災高さは、自由空間における性状に、空間の拘束条件を考慮した形状表現が可能であることを示し、その予測式を提案している。

第 6 章では、火災ブリューム性状の簡易的なモデル化を行い、自然換気はトンネル長手方向の火源長さを考慮した代表長さ、強制換気・接炎時は空間高さ、を用いた無次元数と火災特性の相関性が最も高いことを明らかにしている。

第 7 章では、強制換気時における火源近傍性状として、天井直下に出現する最高上昇温度、その呈示位置に注目し、これら諸因子に対する簡易予測式を導出するとともに、空間断面形状と火源形状の異なる場合に適用しうるトンネル火災時天井近傍最高上昇温度、その呈示位置並びに火災傾斜角度の簡易予測式を導出している。

第 8 章では、矩形断面の側壁効果に配慮した自然換気時の天井近傍を流動する熱気流の温度減衰性状を予測する実験式を導出し、簡易式中の比例定数および「べき乗数」を各々側壁効果の関数として表現した近似式を提案している。

第 9 章では、強制換気時に天井近傍に形成される最高温度とその呈示位置に着目し、遡上熱気流先端近傍の給気側の温度上昇と遡上側の温度減衰の性状が異なる境界点を、遡上先端位置と仮定して解析を進め、発熱速度と換気風速および遡上位置における関係式の定式化を試み、複数の模型実験結果の統一的な整理方法を提示している。

第 10 章では、縦流式換気方式を採用したトンネル空間を対象とし、極端な煙層の遡上が生じていない状況下における排煙側のトンネル長手方向への煙層の温度減衰および垂直温度分布、さらに煙層温度減衰に対するトンネル空間断面形状の影響について検討し、強制換気時の排気側天井近傍煙層の温度減衰勾配を側壁効果の関数とした実験式を提案すると共に、実規模における実験結果との比較からその妥当性を確認している。

第 11 章では、トンネル火災時の避難・消防活動における安全性の向上に資するため、求められた火災形状およびブ

リユーム性状の実験式を利用した放射受熱の予測手法について検討を行い、自由空間、トンネル空間における放射受熱量は、火炎の表面温度に配慮する方法よりも中心軸温度を考慮する方法の方が、実測値により近い値を示すことを明らかにしている。

第12章では、LES乱流モデルを用いたCFDの数値実験を行い、数値実験上の問題点ならびに火災実験から得られた簡易モデルの有効性を確認している。

第13章では、災害発生時に予測される危険性の抽出を行い、道路トンネルの既往の事故調査データ等をもとに、事故の発生確率を求め、潜在的な危険性を確認し、対策を考える上で、最も重要な要素となる火源設定の考え方と火災事故時の発熱速度に関するケーススタディを行った。

第14章では、仕様書的な設備設置対策を離れ、新知見を加えて道路トンネル空間の現状の設備的な防災対策を例示し、第15章は、本論のまとめとしている。

これを要するに、著者は、トンネル空間の火災について精緻な模型実験を中心に検討を加え、安全性に関わる新知見を得たものであり、防災工学、建築環境工学、火災工学に貢献するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。