

道路トンネル内の火災時における足下灯の避難誘導効果

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○石村利明, 砂金伸治, 森本 智

1. はじめに

道路トンネルは閉鎖された空間であり、火災が発生した場合には利用者の安全面への影響が大きい。また、2004年に出された欧州指令<sup>1)</sup>によれば、既設トンネルの安全対策について非常用施設等の有効性を検証するため、トンネルの安全度をリスクアナリシスによって実証されるべきとしている。トンネルの安全度を定量的な評価手法に基づいて検討していくうえでは利用者の避難行動に関する諸数値等が必要となる。本報文では道路トンネルを対象に、トンネル内において火災によって煙が発生した際の利用者の避難速度とともに、煙により視界が悪い状況下においても利用者の避難を支援策の一つとして考えられる足下灯の効果についての実験結果を報告する。

2. 火災時の利用者の避難速度に関する実験

火災時における避難速度に関する実験は、写真-1に示す実大トンネル実験施設（2車線道路トンネル（延長700m、断面積57m<sup>2</sup>））の約400mの区間を用いて実施した。

実験は、図-1に示すようにトンネル内を閉鎖した状態で、火災時の発煙状態を模擬するためにスモークマシンを使用してトンネル内に煙を充満させた状態で、被験者にスタート地点からゴール地点までの予め設定した経路に従って避難してもらい、その際の歩行速度を計測した。被験者の年齢は23～62歳、各煙濃度における被験者の平均年齢は35～45歳、女性比率は9%～30%である。また、トンネル内の煙の状態は、50～100m程度の間隔で設置した煙濃度計によりCs濃度として評価した。実験時の状況の例を写真-2に示す。

実験条件は、トンネル内の煙の状態としてCs濃度を概ね0.3、0.6、1.0程度の3条件を目標値として定め、それぞれの条件下でトンネル内の明るさ（照明条件）を3条件（全点灯、1/2点灯、消灯）設定した。なお、照明条件の全点灯は平均路面輝度4.5cd/m<sup>2</sup>相当である。また、足下灯の実験については、市販のLEDライトチューブ（緑または赤）を用いて、設置位置を路肩部の足下、側壁の高さ0.75mの2条件、点灯パターンを点灯、点滅の2条件として避難速度を計測した。写真-3に色が緑の足下灯を足下に設置した状況を示す。また、実験終了後に被験者に対してアンケート調査を実施した。表-1に実験条件一覧を示す。なお、実験条件の設定は、避難実験に使用した400mの区間内を分割して、1条件での被験者の避難距離が50m～100m程度となるようにした。

3. 実験結果

(1) 煙の状態と避難速度の関係

図-2に照明条件毎のトンネル内の煙の状態（Cs濃度）と避難速度の関係を示す。これより、全点灯・1/2点灯の場合は、ばらつきはあるものの煙の濃度が濃くなる（Cs濃度が大きい）と避難速度が低下している傾向にある。Cs濃度が小さい（比較的煙が薄い）状態では最大3m/sから最小で1m/sを下回る結果もあり、被験者によるばらつきが大きい結果が得られた。一方、Cs濃度が大きい（煙が濃い）状態では概ね1.5m/s～1m/s程度の範囲となった。一方、消灯時の場合は、煙の状態に関係なく極端に速度が低下し避難速度が1m/s以下がほとんどであり、避難不能（0m/s）な被験者も存在する。これより、避難する際の明るさは重要であり、トンネル内で避難するためにはある程度の明るさを確保することが必要であることが再確認された。既往の文献<sup>2)</sup>等により従来からCs濃度が0.4

キーワード 道路トンネル, 火災, 避難, 避難速度, 足下灯



写真-1 実大トンネル実験施設

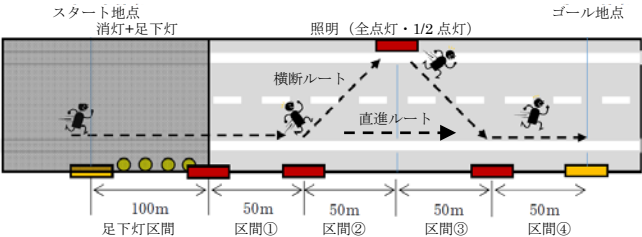


図-1 避難速度の実験概要図



写真-2 トンネル内状況      写真-3 足下灯の状況

表-1 実験条件一覧表

| No. | トンネル内の照明 | 足下灯の条件 |   |             |        |
|-----|----------|--------|---|-------------|--------|
|     |          | 有無     | 色 | 設置位置        | 点灯パターン |
| 1   | 全点灯      | 無      | - | -           | -      |
| 2   | 1/2点灯    | 無      | - | -           | -      |
| 3   | 消灯       | 無      | - | -           | -      |
| 4   | 全点灯      | ○      | 赤 | 路肩（足下）      | 点灯     |
| 5   |          |        | 緑 |             |        |
| 6   |          |        | 赤 | 壁面（高さ0.75m） | 点灯     |
| 7   |          |        | 緑 |             |        |
| 8   | 消灯       | ○      | 赤 | 路肩（足下）      | 点灯     |
| 9   |          |        | 緑 |             |        |
| 10  |          |        | 緑 | 壁面（高さ0.75m） | 点滅     |
| 11  |          |        | 赤 |             |        |
| 12  |          |        | 緑 |             |        |
| 13  |          |        | 緑 |             | 点滅     |

程度になると避難が困難になると考えられてきたが、今回の実験では、トンネルの明るさが確保されている場合は、Cs 濃度が 0.4 を超えた状態でも約 1m/s の速度でも避難することができた。しかし、本実験ではスモークを使用した、実際には発生するガスやトンネル内の温度の影響やトンネルの線形・勾配等も関連すると考えられ、さらなる検討が必要である。

(2) 足下灯を設置した場合の避難速度と足下灯による避難誘導効果

図-3 に足下灯を設置した各実験条件下でのトンネル内の煙の状態 (Cs 濃度) と避難速度の関係を示す。これらの図より、ほぼ全ての条件で概ね 1m/s 程度以上の避難速度が確保されている結果となった。足下灯を設置することにより消灯時の場合でも避難不能となる被験者もなく、照明がある状態と同程度の避難速度で避難が継続できたことより、足下灯による避難誘導効果があることが分かった。なお、足下灯がある条件下での、足下灯の色、設置位置、点灯パターンによる避難速度の顕著な差は認められない。

図-4 に足下灯の各条件等による効果について、トンネル内の煙が最も濃い Cs 濃度が 1.0 でのアンケート結果を示す。これより、足下灯の効果は 90% で「はい」と回答しており、「どちらかと言えばいい」を含めると 100% で効果があるとしている。足下灯の色による効果は、「赤」25% に対して「緑」67% であり「緑」のほうが高い。足下灯の設置高さによる効果は、「腰の高さ」33% に対して「足下」53% であり「足下」のほうが高い。点灯パターンによる効果は、「点灯」が 100% となった。足下灯の色、設置位置、点灯パターンによる避難速度は顕著な差は見られなかったが、被験者が避難時に感じた足下灯の効果は異なることが分かった。今回の被験者によるアンケートでは、被験者からは、色:「緑」、設置位置:「足下」、点灯パターン:「点灯」の条件が最も避難時に有効である結果となった。

4. まとめ

限られた条件下であるが、本避難実験により、道路トンネル内の避難速度は、比較的煙が濃い状態でも明るさの度合いによっては避難できる可能性があることがわかった。また、足下灯は避難誘導に非常に有効であり、消灯時においても照明がある条件と同程度の避難速度まで向上させる効果があることがわかった。今後、発生ガスや温度、トンネルの線形・勾配、さらに実験の対象延長等による影響について検討する必要がある。

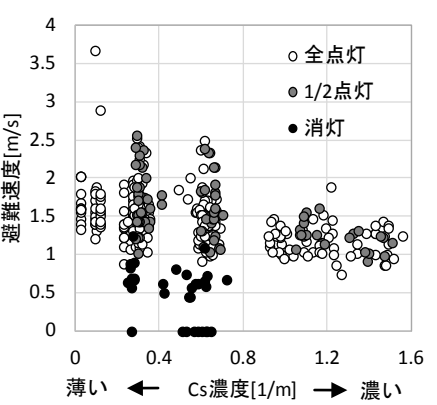


図-2 Cs 濃度と避難速度の関係

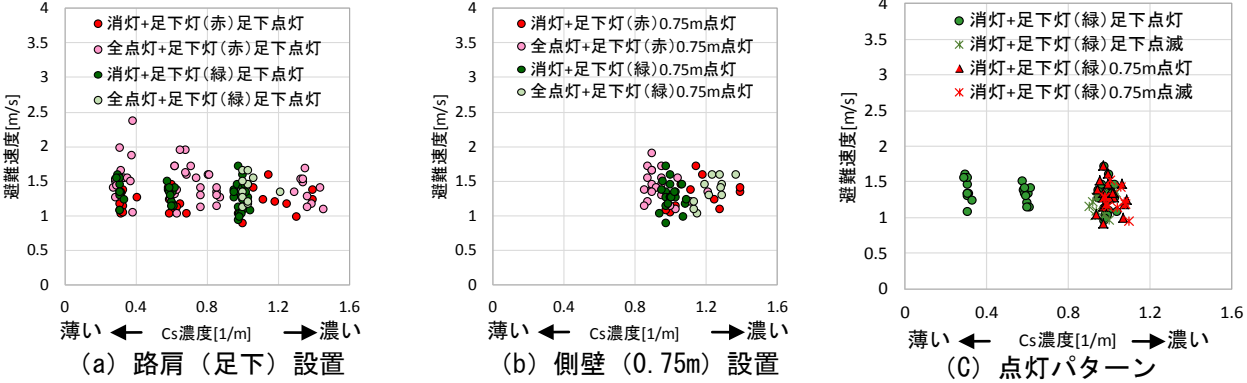


図-3 足下灯を設置した場合の Cs 濃度と避難速度の関係

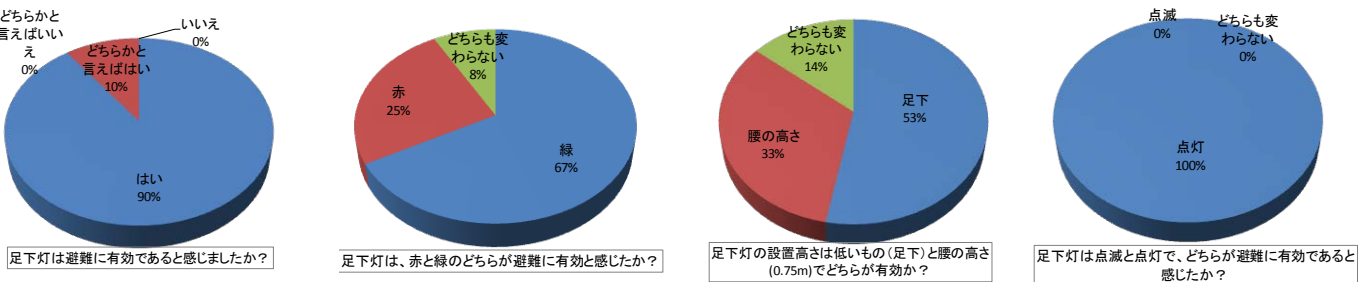


図-4 足下灯に関するアンケート結果 (Cs 濃度 1.0)

【参考文献】

1) DIRECTIVE 2004/54/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network  
2) 神忠久：煙の中での歩行速度について，火災 第25巻2号，1975.