

階層分析法を用いたトンネル安全対策の評価手法と 分析結果について

阪神高速道路(株)保全交通部施設管理課 堀越 廣一

要 旨

階層分析法 (AHP:Analytic Hierarchy Process) を応用し、阪神高速の各道路トンネルに潜在する危険要素と安全対策の効果を一定の区画ごとに安全度として数値化する仕組みを構築した。各区画の安全度を順位付けすることにより、更なる安全対策が必要な箇所を明確に示すことが可能となった。また、複数の安全対策案がある場合、それぞれの程度安全度を上昇させるのか見極めることができ、費用や工事期間と照らし合わせながら、実施する安全対策を決定することが可能となった。本報告では、トンネル安全度評価の仕組みと、阪神高速のトンネルを例にした具体的な分析結果を紹介する。

キーワード:階層分析法, AHP, 安全度, 危険要素 安全対策, 評価要素

はじめに

道路トンネルの安全対策設備は、全国的にある程度統一された非常用設備の基準に基づき、整備する設備が決められている。

ただし、長大都市トンネルでは、交通量の多さやトンネル内の分岐合流など火災発生時のリスク要因が大きいため、更なる安全対策設備の検討、設置が社会的要請による道路管理者の責務となっている。しかしながら、基準や前例の無い安全対策を実施することは、過大な投資と判断される場合もあり、特に既供用路線への展開については、安全対策手法の選択、整備箇所の選定、実施の優先順位等を検討する必要がある。

これらの課題を解決するために、階層分析法 (AHP:Analytic Hierarchy Process 以降 AHP という。) を応用したトンネル安全度評価の新しい仕組みを構築した。この新しい仕組みを用いることで、建設中の大和川線を含む阪神高速全てのトンネル安全度を数値化し、順位付けすることが可

能となった。また、トンネル個別のリスク要因を見極める場合は、トンネル内を一定の区画に分割し、同じ仕組みで各区画の安全度を比較することで、安全対策が必要な箇所をより詳細に判別することができるとともに、安全対策実施後に安全度上昇率を確認することも可能となった。

1. 阪神高速道路内のトンネル安全度評価

1-1 階層構造の策定

AHP を実施するために、「阪神高速道路内のトンネル安全度評価」という課題を基に、トンネル毎の安全度を数値化し、順位付けするという結果までのプロセスを階層化する必要がある。今回策定した階層図の概略図を図-1 に示す。

トンネルの安全度を表す評価要素の項目を複数定め、その評価要素毎に全トンネルの安全度を数値化していく。評価要素毎に算出されたトンネル毎の安全度を集計し、阪神高速道路内におけるトンネル安全度の順位が確定する。

表-1 安全度評価要素と尺度

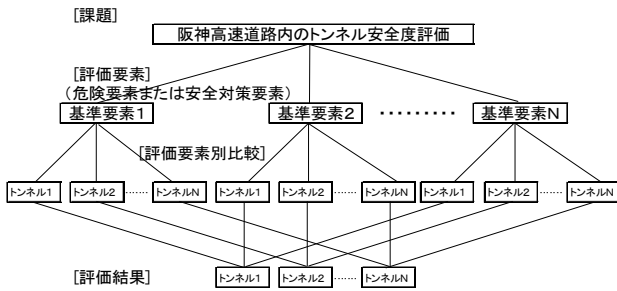


図-1 トンネル安全度評価の階層図

1-2 評価要素の策定

評価要素を策定する前に、安全度の定義を明確化しておく必要がある。今回は、トンネル火災が発生した場合を想定し、「トンネル内で事故等による車両火災が発生し、拡散した煙や熱気流から、お客様が安全な空間まで避難を完了する。」という一連のシナリオを想定し、安全度の評価要素を策定することとした。

上記で定義された安全度はこういった要素に左右されるのか、できる限り多くの項目を見つけ出し、要素毎に安全度の尺度を決定する。今回策定した安全度の評価要素と尺度を表-1に示す。

評価要素は、危険要素と安全対策要素の相反する2つの要素が混在することになるため、尺度の設定に留意が必要となる。

危険要素の尺度は安全度が最も高い状態を1、最も低い状態を9と設定している。安全対策要素の場合、安全対策設備が設置されている場合を安全度が高いと判断し1とし、安全対策設備が設置されていない場合9と設定している。評価項目要素の内容に合わせて、1から9の間の数値を適宜設定することとした。

たとえばトンネル延長は短いと安全度が高く、500m未満で1とし、延長が長くなると安全度は低下し、5km以上で9と設定している。また、前方排煙設備の安全対策が実施されている場合は、安全度が高く1とし、実施されていない場合は9と設定している。

| No | 評価要素 (危険要素) (安全対策要素) | | 安全度の尺度 | |
|--------|----------------------------|--------------------------------|--------------|---|
| | | | | |
| 1 | トンネル延長 | 本線 | 0~500m未満 | 1 |
| | | | 500~1500m未満 | 3 |
| | | | 1500~3000m未満 | 5 |
| | | | 3000~5000m未満 | 7 |
| | | | 5000m以上 | 9 |
| | | ランプ | 0~100m未満 | 1 |
| | | | 100~300m未満 | 5 |
| | | | 300m~500m未満 | 7 |
| 500m以上 | 9 | | | |
| 2 | 分合流 | 無し | 1 | |
| | | 1箇所 | 5 | |
| | | 2箇所以上 | 9 | |
| | | ランプ | 5 | |
| 3 | トンネル縦断勾配 | 0.5%未満 | 1 | |
| | | 0.5%~2%未満 | 3 | |
| | | 2%~4%未満 | 5 | |
| | | 4%~6%未満 | 7 | |
| | | 6%以上 | 9 | |
| 4 | トンネル断面積 | 本線 | シールド馬蹄形 | 1 |
| | | | 開削 | 5 |
| | | ランプ | 上部煙だまり有り | 7 |
| | | | 上部煙だまり無し | 9 |
| 5 | トンネル曲線半径 | R=400m以上 | 1 | |
| | | R=400m未満 | 5 | |
| | | R=300m未満 | 7 | |
| | | 特例値 | 9 | |
| 6 | 避難距離 | 120m未満 | 1 | |
| | | 120m~240m未満 | 2 | |
| | | 240m~360m未満 | 3 | |
| | | 360m~480m未満 | 4 | |
| | | 480m~600m未満 | 5 | |
| | | 600m~720m未満 | 6 | |
| | | 720m~840m未満 | 7 | |
| | | 840m~960m未満 | 8 | |
| | 960m以上 | 9 | | |
| 7 | 通行台数(日当たり) | 1000台未満 | 1 | |
| | | 5000台未満 | 3 | |
| | | 10000台未満 | 5 | |
| | | 15000台未満 | 7 | |
| | | 15000台以上 | 9 | |
| 8 | 大型車通行台数(日当たり) | 500台未満 | 1 | |
| | | 1000台未満 | 3 | |
| | | 3000台未満 | 5 | |
| | | 5000台未満 | 7 | |
| | | 5000台以上 | 9 | |
| 9 | 渋滞発生(先詰まり考慮) | 無し | 1 | |
| | | 有り | 5 | |
| 10 | 危険物等通行状態 | 危険物搭載車両 不可 | 1 | |
| | | 危険物搭載車両 可 | 9 | |
| | | 原動機付自転車の通行有 | 5 | |
| 11 | 前方排煙設備 | 有り | 1 | |
| | | 無し | 9 | |
| 12 | 風速零化制御 | 有り | 1 | |
| | | 無し | 9 | |
| 13 | 早期検知設備 | 有り | 1 | |
| | | 無し | 9 | |
| 14 | 避難誘導補助設備 | 有り | 1 | |
| | | 無し | 9 | |
| 15 | 横流排煙 | 換気量150m ³ /(s・km)以上 | 1 | |
| | | 換気量150m ³ /(s・km)未満 | 5 | |
| | | 無し | 9 | |

1-3 評価要素の重み付け

策定した安全度評価要素について、どの項目がトンネルの安全度に、より強く影響を及ぼすか、各要素の重要度を決定するために、全項目の対比較を行った。

項目毎の重要度を決定するために用いた評価項目のマトリクス表（参考例：評価要素の対比較について抜粋したもの）を表-2 に示す。全ての要素を総当たり方式で比較し、それぞれどちらがどの程度重要かを判断し、全要素で算出された重要度の幾何平均を求める。たとえば、トンネル縦断勾配とトンネル延長を比較した場合、トンネル縦断勾配の方が重要と判断し5と評価し、トンネル延長は1/5と評価している。

この比較評価を阪神高速道路(株)のトンネル換気・防災の設計や現場監督に携わる社員が実施し、その平均を用いて、重要度の数値を決定した。重要度の順位とその百分率を表-3 に示す。

危険要素については、「避難距離」が最も安全度に影響を及ぼす結果となった。これは、今回の評価要素が、トンネル火災時にお客様が安全な空間まで避難するというシナリオを想定しているため、当然の結果といえる。逆に「トンネル曲線半径」や「トンネル延長」は影響が少ないと判断されたことになる。

また、安全対策要素については、「横流排煙設備」が最も有効な設備と判断され、「早期検知設備」については、効果が薄い設備と判断される結果となった。

表-2 マトリクスを用いた評価要素の重み付け

| 対比較の基準 トンネルの危険度を評価する項目として | 1 | 2 | 3 | 14 | 15 | 幾何平均 |
|------------------------------|--------|-----|----------|-----|----------|-------|
| | トンネル延長 | 分合流 | トンネル縦断勾配 | | 避難誘行動助設備 | |
| 1 両方の項目が同じくらい重要 | | | | | | |
| 3 下の項目が右の項目よりやや重要 | | | | | | |
| 5 下の項目が右の項目より重要 | | | | | | |
| 7 下の項目が右の項目よりかなり重要 | | | | | | |
| 9 下の項目が右の項目より絶対に重要 | | | | | | |
| 1 トンネル延長 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 2.97 |
| 2 分合流 | 3 | 1 | 0 | 1/5 | 1/5 | 5.97 |
| 3 トンネル縦断勾配 | 5 | 3 | 1 | 1/5 | 1/5 | 4.92 |
| ... | | | | | | |
| 14 避難行動補助設備 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 6.53 |
| 15 横流排煙設備 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 | 11.86 |

表-3 評価要素の重要度

| 順位 | 評価要素 | 重要度(%) |
|----|----------|--------|
| 1 | 避難距離 | 17.63 |
| 2 | 横流排煙設備 | 11.88 |
| 3 | 渋滞発生 | 9.95 |
| 4 | 前方排煙設備 | 9.06 |
| 5 | 風速雾化制御 | 8.92 |
| 6 | 避難行動補助灯 | 6.47 |
| 7 | 分合流 | 5.81 |
| 8 | トンネル縦断勾配 | 4.82 |
| 9 | トンネル断面積 | 4.63 |
| 10 | 危険物等通行状態 | 4.58 |
| 11 | 早期検知設備 | 4.36 |
| 12 | 通行台数 | 3.63 |
| 13 | 大型車通行台数 | 3.03 |
| 14 | トンネル延長 | 2.89 |
| 15 | トンネル曲線半径 | 2.34 |
| | 合計 | 100.00 |

1-4 評価区画について

トンネル内を細かく分割する方が、より詳細に安全対策が必要な箇所を把握することが可能となるが、比較対象項目が多くなりすぎると、検証の負担が大きくなることから、あくまで安全対策を実施するという観点で評価区画を決定することとした。

評価要素のうち、重要度が高い避難距離に着目し、トンネル内の非常口を区画境としてトンネル内を細分し評価区画とした。この細分方法にすると、区画の最大避難距離は非常口間の距離となり、避難距離に関するリスクは十分に網羅することができる。

1-5 評価要素毎のトンネル評価区画対比較

表-1 に示した、評価要素と安全度の尺度に基づき、阪神高速道路の AA 級トンネルのみ抽出し、評価区画を対比較することとした。

すべてのトンネルを評価することも可能であり、すでに実施済みであるが、非常に膨大な情報量となるため、今回は説明のしやすさ等を考慮し、最上位の防災等級である AA 級トンネル同士の評価を紹介することとした。

建設中の大和川トンネルまで含めると、阪神高速内にある AA 級トンネルの評価区画は、165 区画に細分される。

トンネル別危険要素と安全対策要素の評価につ

いて、代表的なものを表-4 に示す。この評価値を基にして、全トンネルの評価区画を一对比較（総当たり形式で見比べて評価）していく。トンネル延長とトンネル縦断勾配のトンネル区画一对比較（抜粋）を表-5 及び表-6 に示す。

このトンネル区画一对比較を 15 項目全ての評価要素について実施し、表-3 に示す重要度を考慮しながらトンネル毎に評価値を集計（幾何平均）したものが、トンネルの安全度を表す数字となる。

表-4 トンネル評価区画別の評価要素(抜粋)

| トンネル名称 | トンネル延長 (m) | 評価 | 分合流 | 評価 | トンネル縦断勾配 (%) | 評価 | トンネル断面積 | 評価 |
|---------------------|------------|----|-----|----|--------------|----|---------|----|
| 大和川第1トンネル 1区画 東行本線 | 1,164 | 3 | 1箇所 | 5 | -5.0 | 7 | 開削 | 5 |
| 大和川第1トンネル 2区画 東行本線 | 1,164 | 3 | 1箇所 | 5 | -1.5 | 3 | 開削 | 5 |
| 大和川第1トンネル 3区画 東行本線 | 1,164 | 3 | 1箇所 | 5 | 1.6 | 3 | 開削 | 5 |
| 大和川第1トンネル 4区画 東行本線 | 1,164 | 3 | 1箇所 | 5 | 1.6 | 3 | 開削 | 5 |
| 大和川第1トンネル 5区画 東行本線 | 1,164 | 3 | 1箇所 | 5 | 1.6 | 3 | 開削 | 5 |
| 大和川第1トンネル 鞍馬西出路 | 89 | 1 | 1箇所 | 5 | 6.3 | 9 | ランプ | 9 |
| 大和川第2トンネル 1区画 東行本線 | 680 | 3 | 無し | 1 | -0.6 | 3 | 開削 | 5 |
| 大和川第2トンネル 2区画 東行本線 | 680 | 3 | 無し | 1 | -0.8 | 3 | 開削 | 5 |
| 大和川第2トンネル 3区画 東行本線 | 680 | 3 | 無し | 1 | 1.4 | 3 | 開削 | 5 |
| 大和川第2トンネル 4区画 東行本線 | 680 | 3 | 無し | 1 | -3.0 | 5 | 開削 | 5 |
| 大和川第3トンネル 1区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | -3.0 | 5 | シールド | 1 |
| 大和川第3トンネル 2区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | -3.0 | 5 | シールド | 1 |
| 大和川第3トンネル 3区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | -0.3 | 1 | シールド | 1 |
| 大和川第3トンネル 4区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | -0.3 | 1 | シールド | 1 |
| 大和川第3トンネル 5区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | -0.3 | 1 | シールド | 1 |
| 大和川第3トンネル 6区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | -3.0 | 5 | シールド | 1 |
| 大和川第3トンネル 7区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | -3.0 | 5 | シールド | 1 |
| 大和川第3トンネル 8区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | -3.0 | 5 | シールド | 1 |
| 大和川第3トンネル 9区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | 2.0 | 5 | シールド | 1 |
| 大和川第3トンネル 10区画 東行本線 | 4,922 | 7 | 2箇所 | 9 | 2.0 | 5 | シールド | 1 |

表-5 トンネル延長における一对比較(抜粋)

| 比較項目における評価点 | 幾何平均 | | | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 「トンネル延長」における一对比較の基準 評価点の差 (下項目評価点-右項目評価点) 1. 点差0-1 2. 点差2-3 点差-2-1/3 3. 点差4-5 点差-4-1/5 4. 点差6-7 点差-6-1/7 5. 点差8-9 点差-8-1/9 | 大和川第1トンネル 1区画 | 大和川第1トンネル 2区画 | 大和川第1トンネル 3区画 | 大和川第1トンネル 4区画 | 大和川第1トンネル 5区画 | 大和川第1トンネル 鞍馬西出路 | 大和川第2トンネル 1区画 | 大和川第2トンネル 2区画 |
| 比較項目における評価点 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 |
| 1 大和川第1トンネル 1区画 東行本線 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| 2 大和川第1トンネル 2区画 東行本線 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| 3 大和川第1トンネル 3区画 東行本線 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| 4 大和川第1トンネル 4区画 東行本線 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| 5 大和川第1トンネル 5区画 東行本線 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| 6 大和川第1トンネル 鞍馬西出路 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1/3 |
| 7 大和川第2トンネル 1区画 東行本線 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| 8 大和川第2トンネル 2区画 東行本線 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |

表-6 トンネル縦断勾配における一对比較(抜粋)

| 比較項目における評価点 | 幾何平均 | | | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 「トンネル縦断勾配」における一对比較の基準 評価点の差 (下項目評価点-右項目評価点) 1. 点差0-1 2. 点差2-3 点差-2-1/3 3. 点差4-5 点差-4-1/5 4. 点差6-7 点差-6-1/7 5. 点差8-9 点差-8-1/9 | 大和川第1トンネル 1区画 | 大和川第1トンネル 2区画 | 大和川第1トンネル 3区画 | 大和川第1トンネル 4区画 | 大和川第1トンネル 5区画 | 大和川第1トンネル 鞍馬西出路 | 大和川第2トンネル 1区画 | 大和川第2トンネル 2区画 |
| 比較項目における評価点 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1 |
| 1 大和川第1トンネル 1区画 東行本線 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| 2 大和川第1トンネル 2区画 東行本線 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| 3 大和川第1トンネル 3区画 東行本線 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| 4 大和川第1トンネル 4区画 東行本線 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| 5 大和川第1トンネル 5区画 東行本線 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| 6 大和川第1トンネル 鞍馬西出路 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 5 |
| 7 大和川第2トンネル 1区画 東行本線 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 |
| 8 大和川第2トンネル 2区画 東行本線 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/5 |

1-6 評価結果

(1) AA 級トンネル別の安全度評価

全 AA 級トンネルの評価区画ごとに、安全度を示す数値を y 算出し、1 番数値の小さいものを 100 点として換算し、安全度順位 1 位として取りまとめを実施した。

165 区画の点数を AA 級の 7 トンネル別に集計し、各トンネルの区画数で割り戻した平均点数を表-7 に示す。現在建設中である大和川第 2 トンネルの平均点が最も高く、阪神高速の中では 1 番安全度が高いトンネルであることが確認できる。

また、最も平均点が低いトンネルが新神戸トンネルという結果となった。全体的に見た場合、阪神高速内のトンネルで更なる安全対策を優先して検討する必要があるのは、新神戸トンネルであると、数値をもって示すことが可能となった。

この順位と評価値については、あくまで阪神高速内のトンネルのみを相対的に評価したものであり、点数によって不適格という判断がされるわけではない。

表-7 阪神高速 AA 級トンネル安全度評価平均

| 順位 | トンネル名称 | 合計点数 | 区画数 | 平均 |
|----|-----------|-------|-----|------|
| 1 | 大和川第2トンネル | 619 | 7 | 88.4 |
| 2 | 正蓮寺川トンネル | 2,536 | 29 | 87.4 |
| 3 | 大和川第1トンネル | 929 | 11 | 84.4 |
| 4 | 大和川第3トンネル | 5,176 | 64 | 80.8 |
| 4 | 伊丹トンネル | 970 | 12 | 80.8 |
| 6 | 神戸長田トンネル | 1,526 | 21 | 72.6 |
| 7 | 新神戸トンネル | 1,091 | 21 | 51.9 |

(2) 全評価区画の安全度評価(抜粋)

安全度の平均が 2 番目（供用している中では 1 番目）に高い正蓮寺川トンネルと最も低い新神戸トンネルの安全度を個別に確認するために、7 トンネルの全 165 区画から、正蓮寺川トンネルと新神戸トンネルの全評価区画をそれぞれ抜き出し、表-8 および表-9 に示す。なお、それぞれの評価区画区分を図-2、図-3 に示す。

正蓮寺川トンネルについては、殆どの区画が安全度上位となっているが、東行、西行共に 1 区画の安全度が低く、トンネル全体の順位を下げる要因となっている。トンネル評価区画別の評価要素

を確認すると、この区画は避難距離が長く、トンネル縦断勾配も大きいため、他の部分より評価が下がる結果となった。

一方、新神戸トンネルの評価順位を見ると、安全度が上位の区画であっても、正蓮寺川トンネルの最も低い安全度順位よりも低い結果となっている。区画別評価要素で確認すると、全区画において避難距離が長く、安全度が著しく低下していることがわかる。特に、1区画南行本線は縦断勾配も大きく、安全度順位は全165区画中、最下位となっている。

表-9 新神戸トンネル区画別安全度評価

| 順位 | トンネル名称 | 評価区画 | 100点換算 |
|-----|---------|---------|--------|
| 139 | 新神戸トンネル | 二宮入路 | 67.9 |
| 144 | 新神戸トンネル | 1区画北行本線 | 64.8 |
| 146 | 新神戸トンネル | 2区画北行本線 | 61.6 |
| 147 | 新神戸トンネル | 神若出路 | 60.6 |
| 149 | 新神戸トンネル | 5区画南行本線 | 57.5 |
| 149 | 新神戸トンネル | 3区画南行本線 | 57.5 |
| 151 | 新神戸トンネル | 2区画南行本線 | 57.3 |
| 152 | 新神戸トンネル | 4区画北行本線 | 56.3 |
| 153 | 新神戸トンネル | 新神戸駅出路 | 55.7 |
| 154 | 新神戸トンネル | 9区画南行本線 | 52.9 |
| 155 | 新神戸トンネル | 7区画北行本線 | 51.6 |
| 156 | 新神戸トンネル | 3区画北行本線 | 47.2 |
| 156 | 新神戸トンネル | 5区画北行本線 | 47.2 |
| 156 | 新神戸トンネル | 6区画南行本線 | 47.2 |
| 156 | 新神戸トンネル | 8区画北行本線 | 47.2 |
| 160 | 新神戸トンネル | 8区画南行本線 | 44.7 |
| 160 | 新神戸トンネル | 7区画南行本線 | 44.7 |
| 160 | 新神戸トンネル | 6区画南行本線 | 44.7 |
| 160 | 新神戸トンネル | 4区画南行本線 | 44.7 |
| 164 | 新神戸トンネル | 北行Ⅱ期線本線 | 43.5 |
| 165 | 新神戸トンネル | 1区画南行本線 | 37.0 |

表-8 正蓮寺川トンネル区画別安全度評価

| 順位 | トンネル名称 | 評価区画 | 100点換算 |
|-----|---------|-----------|--------|
| 1 | 正蓮寺トンネル | 7区画 東行本線 | 100.0 |
| 2 | 正蓮寺トンネル | 9区画 西行本線 | 95.5 |
| 2 | 正蓮寺トンネル | 10区画 西行本線 | 95.5 |
| 2 | 正蓮寺トンネル | 12区画 西行本線 | 95.5 |
| 5 | 正蓮寺トンネル | 正蓮寺川入路 | 94.8 |
| 6 | 正蓮寺トンネル | 4区画 西行本線 | 94.6 |
| 6 | 正蓮寺トンネル | 5区画 西行本線 | 94.6 |
| 15 | 正蓮寺トンネル | 11区画 西行本線 | 88.7 |
| 16 | 正蓮寺トンネル | 8区画 東行本線 | 88.7 |
| 16 | 正蓮寺トンネル | 9区画 東行本線 | 88.7 |
| 16 | 正蓮寺トンネル | 10区画 東行本線 | 88.7 |
| 16 | 正蓮寺トンネル | 7区画 西行本線 | 88.7 |
| 16 | 正蓮寺トンネル | 8区画 西行本線 | 88.7 |
| 22 | 正蓮寺トンネル | 大開出路 | 87.9 |
| 23 | 正蓮寺トンネル | 4区画 東行本線 | 87.8 |
| 23 | 正蓮寺トンネル | 5区画 東行本線 | 87.8 |
| 23 | 正蓮寺トンネル | 6区画 東行本線 | 87.8 |
| 23 | 正蓮寺トンネル | 6区画 西行本線 | 87.8 |
| 32 | 正蓮寺トンネル | 12区画 東行本線 | 86.6 |
| 36 | 正蓮寺トンネル | 2区画 東行本線 | 85.2 |
| 36 | 正蓮寺トンネル | 2区画 西行本線 | 85.2 |
| 36 | 正蓮寺トンネル | 3区画 西行本線 | 85.2 |
| 67 | 正蓮寺トンネル | 正蓮寺川出路 | 82.3 |
| 67 | 正蓮寺トンネル | 大開入路 | 82.3 |
| 74 | 正蓮寺トンネル | 11区画 東行本線 | 80.9 |
| 75 | 正蓮寺トンネル | 13区画 西行本線 | 80.7 |
| 103 | 正蓮寺トンネル | 3区画 東行本線 | 79.7 |
| 126 | 正蓮寺トンネル | 1区画 東行本線 | 73.4 |
| 126 | 正蓮寺トンネル | 1区画 西行本線 | 73.4 |

2. 更なる安全対策の効果検証手法と結果

全トンネルの安全度評価順位から安全対策の実施を優先すべきトンネルとその区画および原因を把握することが可能となり、次に安全度の上昇を目的とする更なる安全対策の実施検討の段階へ移行することとなる。検討を行った複数の安全対策が、それぞれの程度効果があるものかを見極めるために、AHP を応用した安全度上昇率を求める仕組みを構築した。安全対策の効果が数値で確認できることが可能となれば、対策案を決定する際の有力な指標となるものと考えられる。

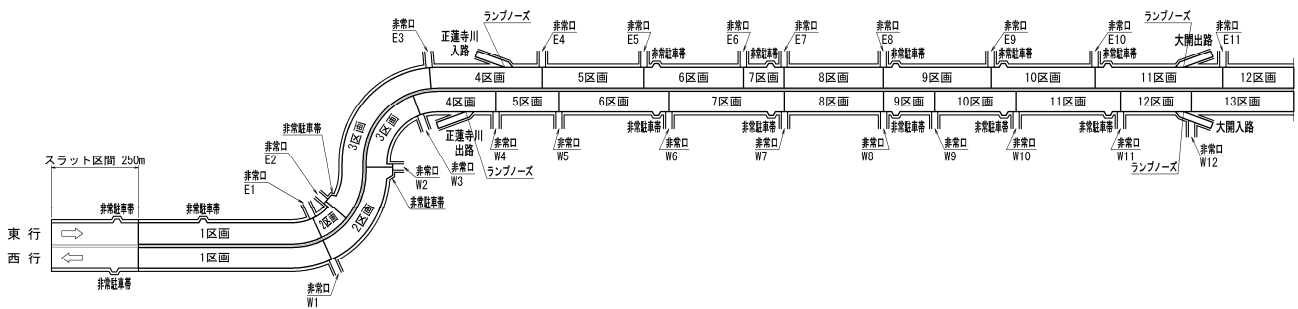


図-2 正蓮寺川トンネル評価区画図

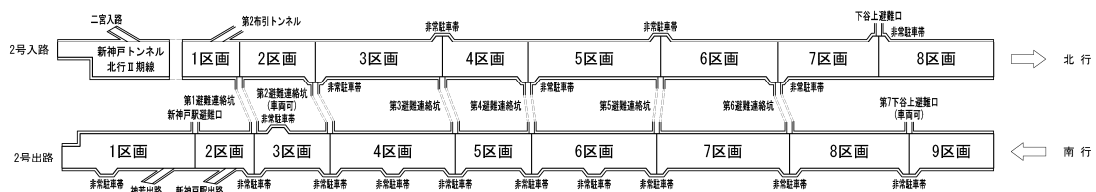


図-3 新神戸トンネル評価区画図

本報告では、平成 28 年に天井板を撤去し、トンネル火災発生時の排煙方法が横流から縦流に変更となった神戸長田トンネルを例にし、複数検討した安全対策案を AHP にて比較検証した結果を紹介する。

2-1 神戸長田トンネルの評価区画について

更なる安全対策として避難連絡坑の増設が含まれており、評価要素である避難距離が変わってしまうため、避難連絡坑増設予定箇所では評価区画を案分し、現状を含めて避難連絡坑を増設しない場合は、両方の区画を同一の区画とし評価するものとした。神戸長田トンネルの安全度評価区画を図-4 に示す。

2-2 現状の神戸長田トンネル安全度評価結果

神戸長田トンネルだけで現状の区画別安全度評価順位を算出した結果を表-10 に示す。

先に述べた通り、この順位付けは神戸長田トンネル内の区画を一対比較して相対的に算出したものであり、点数が低い箇所が不適合、また、点数が高いので、安全対策が必要ないというわけではない。

天井板を撤去し横流排煙から縦流排煙に変更となった北行、南行の 1 区画から 4 区画の安全度順位が低くなっている。原因としては、他の区画と比べて避難距離が長く、縦断勾配が 3%あることと、南行線に関しては渋滞が発生することが、更に安全度を低下させる要因となっている。

そのほかに、ランプ部分や連絡路の安全度が低いことがわかる。断面が小さいことで火災の煙が早く降下してしまうことや、縦断勾配が 8%ある

ことも、安全度低下要因となっている。

表-10 神戸長田トンネル区画別安全度評価順位

| 順位 | 長田トンネル安全度評価区画 | 100点換算 |
|----|----------------|--------|
| 1 | 9区画 北行本線 | 100.0 |
| 2 | 8区画 北行本線 | 96.7 |
| 3 | 6区画 北行本線 | 92.5 |
| 4 | 7区画 北行本線 | 85.9 |
| 5 | 6区画 南行本線 | 85.7 |
| 6 | 長田入路 | 82.7 |
| 7 | 4区画 北行本線(1)(2) | 82.4 |
| 8 | 7区画 南行本線 | 80.0 |
| 9 | 5区画 北行本線 | 79.0 |
| 10 | 4区画 南行本線(1)(2) | 78.9 |
| 11 | 北行湊川連絡路1 | 75.8 |
| 12 | 長田出路 | 73.1 |
| 13 | 3区画 北行本線(1)(2) | 73.0 |
| 13 | 2区画 北行本線(1)(2) | 73.0 |
| 13 | 1区画 北行本線(1)(2) | 73.0 |
| 16 | 5区画 南行本線 | 71.2 |
| 17 | 北行湊川連絡路2 | 70.7 |
| 18 | 南行湊川連絡路 | 70.6 |
| 19 | 1区画 南行本線(1)(2) | 70.2 |
| 19 | 2区画 南行本線(1)(2) | 70.2 |
| 19 | 3区画 南行本線(1)(2) | 70.2 |

2-3 AHP による安全対策の実施効果検証

(1) 安全対策案の想定

現状の神戸長田トンネルにおける更なる安全対策として検討されている、山岳部分に避難連絡坑を 4 箇所増設する案を 1 つ目とする。この案は避難距離が短くなるため、危険要素を低下させることで安全度を上昇させる案である。

2 つ目の案として、もともと天井板があった山岳部分の南行線 1 から 4 区画に排気横流排煙 (150m³/s・km 未満) の対策を実施し、かつ、神戸長田トンネル全線に避難行動補助灯を設置する組み合わせの安全対策を想定した。この案は、安全対策要素を新たに付加することで安全度を上昇させる案である。

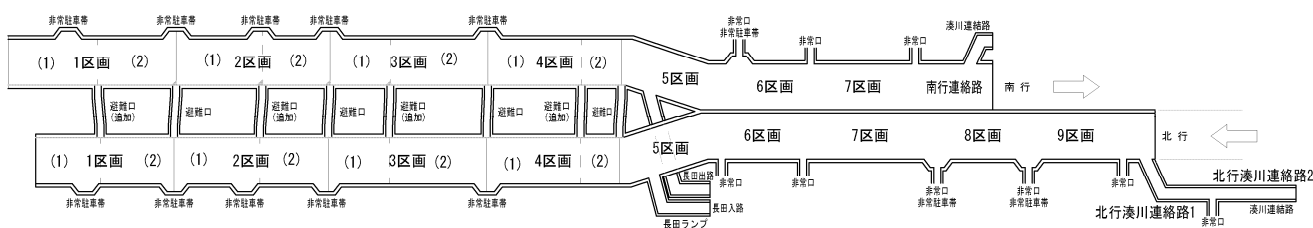


図-4 神戸長田トンネルの安全度評価区画

(2) AHP を応用した安全対策効果の確認方法

AHP は評価項目の一对比較であるため、比較項目の相対的な評価しかできない。これでは、安全対策設備を設置した区画の安全度が、どの程度上昇したのか確認することが難しい。例えば、安全対策を実施しても、他の区画よりも評価が低い状態のままであれば、評価順位に変化が無く、設置効果を確認することができない。

そこで今回考案した手法は、安全対策を実施する前のトンネルを現状のトンネルとして残しておき、安全対策を実施した後のトンネルを別のトンネルとして評価するものである。

今回評価を実施した神戸長田トンネルは、「現状の風速抑制制御を実施している神戸長田トンネル」、「天井板を撤去する以前の横流排煙方式の神戸長田トンネル」、「避難連絡坑を4箇所追加した神戸長田トンネル」、「南行 1～4 区画に排気半横流排煙 (150m3/s・km 未満) を追加と全線に避難行動補助灯を設置した神戸長田トンネル」、以上4つのトンネルが存在すると仮定して、それぞれのトンネル全区画を一对比較し、安全度評価を実施した。

(3) 評価結果

神戸長田トンネルの安全度評価検証結果を表-11 に示す。表-10 に示す神戸長田トンネル区画別安全度と表-11 の現状は同じ評価要素であるが、より安全な区画との相対評価となる表-11 に示す現状のほうが安全度の数値が下がる結果となっている。

南行線の1から4区画を見ると、避難連絡坑を追加する対策案が最も安全度を上昇させる効果的な対策であるということがわかる。ただし、天井板撤去前の横流排煙も含め、対策箇所が限定されているため、その他の区画の安全度は上昇していない。1から4区画に排気半横流を設置と全線に避難行動補助灯を設置する組み合わせ対策案は、1から4区画以外の安全度も上昇させることにより、南行線全体の安全度としては、最も上昇する結果となっている。

北行線については、1から4区画の排気半横

流による対策は想定していないため、南行と異なり、北行線全体の安全度は避難連絡坑の追加が最も上昇する結果となった。

南行線、北行線全線の安全度について、現状の神戸長田トンネルを100点と換算した場合、避難連絡坑を追加する対策が約10.6%の安全度上昇、排気半横流と避難行動補助灯の組み合わせ対策が10.8%の安全度上昇となり、ほぼ同じ程度の安全度上昇率となった。

実際に実施する安全対策については、費用や工事期間など、お客様影響を考慮したうえで採用の判断を行うこととなる。

表-11 神戸長田トンネル安全度評価検証結果

| 評価区画 | 現状 [風速抑制] | 天井板撤去前 [横流排煙] | 避難連絡坑 1から4区画 4箇所追加 | 排気半横流 (南行線のみ) + 避難行動補助灯 (全線) | |
|--------------------------------|-----------------|------------------|--------------------------|--|-------------|
| 南行線 | 1区画-1 | 64.2 | 72.2 | 77.8 | 76.3 |
| | 1区画-2 | 64.2 | 72.2 | 77.8 | 76.3 |
| | 2区画-1 | 64.2 | 72.2 | 77.8 | 76.3 |
| | 2区画-2 | 64.2 | 72.2 | 81.2 | 76.3 |
| | 3区画-1 | 64.2 | 72.2 | 81.2 | 76.3 |
| | 3区画-2 | 64.2 | 72.2 | 77.8 | 76.3 |
| | 4区画-1 | 72.0 | 82.3 | 77.8 | 87.6 |
| | 4区画-2 | 72.0 | 82.3 | 81.2 | 87.6 |
| | 5区画 | 65.5 | 65.5 | 65.5 | 70.0 |
| | 6区画 | 78.9 | 78.9 | 78.9 | 85.5 |
| | 7区画 | 72.9 | 72.9 | 72.9 | 78.6 |
| | 湊川連絡路 | 65.7 | 65.7 | 65.7 | 70.3 |
| | 長田出路 | 68.5 | 68.5 | 68.5 | 73.4 |
| | 南行全体の安全度 | 67.8 | 73.0 | 75.7 | 77.7 |
| 北行線 | 湊川連絡路2 | 65.8 | 65.8 | 65.8 | 70.3 |
| | 湊川連絡路1 | 70.3 | 70.3 | 70.3 | 75.5 |
| | 9区画 | 91.1 | 91.1 | 91.1 | 100.0 |
| | 8区画 | 88.3 | 88.3 | 88.3 | 96.7 |
| | 7区画 | 77.9 | 77.9 | 77.9 | 84.4 |
| | 6区画 | 84.7 | 84.7 | 84.7 | 92.4 |
| | 5区画 | 73.1 | 73.1 | 73.1 | 78.7 |
| | 4区画-2 | 75.0 | 86.3 | 85.0 | 81.0 |
| | 4区画-1 | 75.0 | 86.3 | 81.3 | 81.0 |
| | 3区画-2 | 66.6 | 75.2 | 81.3 | 71.2 |
| | 3区画-1 | 66.6 | 75.2 | 85.0 | 71.2 |
| | 2区画-2 | 66.6 | 75.2 | 85.0 | 71.2 |
| | 2区画-1 | 66.6 | 75.2 | 81.3 | 71.2 |
| | 1区画-2 | 66.6 | 75.2 | 81.3 | 71.2 |
| 1区画-1 | 66.6 | 75.2 | 85.0 | 71.2 | |
| 長田入路 | 77.2 | 89.2 | 77.2 | 83.6 | |
| 北行全体の安全度 | 73.6 | 79.0 | 80.8 | 79.4 | |
| TN全体の安全度 | 71.0 | 76.3 | 78.5 | 78.7 | |
| TN全体の安全度 [現状100点換算] | 100.0 | 107.5 | 110.6 | 110.8 | |

3. 今後の方針

現在、AHP を応用したトンネルの安全度評価は、阪神高速内の全トンネルを区画別に比較し、安全度の順位を見極めるところまで完了してい

る。建設中の大和川線で採用が決まった避難行動補助灯など、個別に安全対策上設置が決まった箇所や設備などがあるため、今後、この AHP による安全度順位をもとに、設置すべき箇所を明確化した基準を策定したいと考えている。

また、評価要素の重要度を該当する業務の従事者による平均としているが、新しい対策設備については、その効果について十分に認識されていない面がある。今回更なる安全対策としている避難行動補助灯は、今後現場への展開が増え、認知度と有効度が確認できれば、もう少し重要度が上昇し、安全度の評価順位にも影響が及ぶものと考えられるため、定期的に重要度の確認作業を実施し、常に最新の知見による阪神高速のトンネル安全度順位を更新していくよう考えている。

おわりに

トンネルの安全度を数値化し順位付けすることは、全国的にあまり例のない試みである。順位付けするということは、自ら危険な箇所を見つけ出し、公表することであり、阪神高速のマイナスイメージとなる可能性もある。

しかしながら、お客様の安全・安心を真に考え、実践していくためには、現状の中で、危険な箇所、安全対策が必要な箇所を見極めることが必要不可欠であり、そういった取り組みを公表していくことが、阪神高速グループの信頼を向上させるものであると考えている。

参考文献

- 1) 堀越廣一，石津穰，内田伸一：AHP（Analytic Hierarchy Process：階層分析法）を用いたトンネルの危険度に関する評価手法について，阪神高速道路第 49 回技術研究発表会論文集，2017

ANALYTICAL METHOD AND RESULTS OF ROAD TUNNEL SAFETY MEASURE EVALUATION USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

Koichi HORIKOSHI

A method was developed to quantify risk factors and the effect of safety measures for each road tunnel of the Hanshin Expressway as a degree of safety by applying the analytic hierarchy process (AHP). By dividing each tunnel into sections and sorting the sections by the degree of safety, sections with more need of safety measures can be found. This method also allows to compare different safety measures based on cost-effectiveness and construction period, which is useful in determining the most effective measure. This report introduces the method of tunnel safety assessment and provides a practical example of analysis for a tunnel on the Hanshin Expressway.

堀越 廣一



阪神高速道路株式会社
保全交通部 施設管理課
Koichi Horikoshi