

トンネル内装工における新技術適用性の検討

沖原 穂高¹・中野 清人²・山崎 哲也³・加藤 人士⁴・小根山 裕之⁵

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）
E-mail: h.okihara.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）
E-mail: k.nakano.aa@ri-nexco.co.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）
E-mail: t.yamazaki.ac@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 株式会社片平新日本技研 インフラマネジメント部（〒112-0002 東京都文京区小石川2-22-2）
E-mail: h.katoh@katahira.co.jp

⁵正会員 東京都立大学 都市環境学部（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）
E-mail: oneyama@tmu.ac.jp

近年，照明機器の技術開発が進み，高速道路トンネルにおいて，演色性に優れた白色照明が標準化され，視環境の向上が図られてきている．視環境の向上により，トンネル内装工の役割としては視線誘導効果の重要度が高くなっていることから，視線誘導効果に着目した検討を実施した．本検討では，内装工に代わる技術について，各種代替案を作成し，ドライビングシミュレータ等を用いた小型車・大型車それぞれの視点における注視実験やアンケート調査を実施し，内装工代替案を評価した結果について報告する．

Key Words: interior finishing, visual environment, visual guiding effect

1. はじめに

近年，照明機器の技術開発が進み，高速道路トンネルにおいて，演色性に優れた白色照明が標準化され，視環境の向上が図られてきている．視環境の向上により，トンネル内装工の役割としては視線誘導効果の重要度が高くなっていることから，視線誘導効果に着目した検討を実施した．検討にあたっては，現地において内装材料の脱落事象が生じており管理上の課題となっているケースもあり，内装工の役割を十分考慮し，安全走行確保

の一要素としての重要性を十分認識した上で検討した．本検討では，内装工に代わり得る新しい技術について，各種代替案を作成し，ドライビングシミュレータ等を用いた小型車・大型車それぞれの視点における注視実験やアンケート調査を実施し，分析した結果について報告する．

2. 過年度の検討成果¹⁾

過年度の検討では，内装工の代替案（現行基準，図-1）について，現地試験を実施し，小型車・大型車それぞれの視点における注視実験やアンケート調査を実施し，内装工代替案（現行基準）を評価した．

得られた技術的知見は次のとおりである．

- ① アンケート調査の結果，「内装工高さ 1.5m+ライン H=2.5m（橙色）」（現行基準）のケースは，小型車視点では過年度基準（内装工高さ 2.5m）と同等評価であり，大型車視点では過年度基準を上回る結果とな

設置状況		
基準	平成23年7月（旧）	令和2年7月（現行）
仕様	内装高さ2.5m	内装高さ1.5m+ライン2.5mの組み合わせ

図-1 内装工基準（左：旧基準，右：現行基準）

った。これは過年度に実施したドライビングシミュレーターによる被験者試験と同様の結果となった。

- ② アイマークテストによる注視状況分析では、走行中に不安定な眼球運動は見られず、内装工の設置条件を変更しても実走行への影響はないと推察される。
- ③ 大型車では、視点高さに近い視線誘導ラインは視線誘導効果が高いことが確認された。

3. 各種代替案への新技術適用の検討

これまでの検討において、視線誘導効果が高い要素の特徴は図-2のとおりであり、代替案の作成にあたり各要

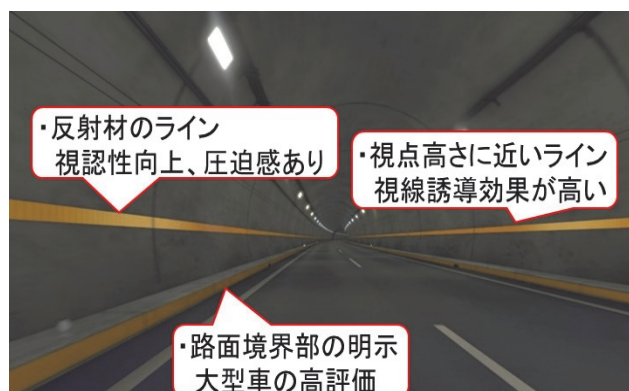


図-2 視線誘導効果が高い要素

素を考慮した案を検討した。そして、これらの要素の適用に際して、以下のとおり具体的に検討を行った。

(1) 路面境界部の明示に関する検討

過年度の試験において路面境界部の明示を実線により行うと路面標示と混同するという意見があり、実線は対象外とした。また、視線誘導施設は設計要領第五集交通管理施設編の視線誘導標設置要領²⁾（以下、視線誘導標設置要領と記す）に規定されているデリニエーターが基本であるが、路面境界をより明確にするため、帯状反射体（以下、斜光デリと記す）を取り上げて検討した。デリニエーターの設置間隔は、視線誘導標設置要領によると本線部は最大 50m とし、トンネル部は本線部設置間隔の 1/2 を基本とすることとなっており、道路構造の変化がある等の注意喚起が必要な箇所は 4m と規定されている。

既往のトンネルに設置されている斜光デリ採用事例について調査を行ったところ、設置間隔は下記の2種類が確認できた（図-3）。

- ① 5m程度の群（道路鋸の設置基準を準用）
- ② 20m程度の群（デリニエーターの設置基準を準用）

また、既往の文献^{3)・4)}によると、メンタルワークロード（ある作業に対する精神的負荷・負担）を指標として、視線誘導ライト（帯状ガイドライト）の「間隔」及び



図-3 斜光デリ採用事例

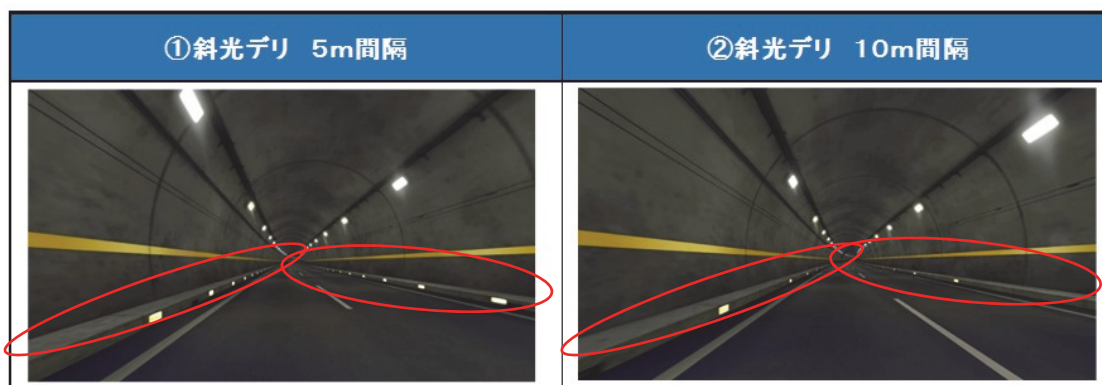


図-4 試験における斜光デリ検討パターン

「照射長さ」について、設置間隔及び長さの組み合わせから設置密度が30%程度を超えると、視線誘導効果が高くなることが示されている。今回のディスプレイ試験では、これまで述べた観点から、下記の2種類のとおりの斜光デリ設置間隔を設置し、優位性を検討することとした。（図-4）

- ① 5m間隔（道路鋸の設置基準）
- ② 10m間隔（デリニエーターの設置基準の半分程度）

(2) 視線誘導ラインの間隔の検討

視線誘導ラインの間隔について検討を行った。過年度の被験者試験において、視線誘導ラインに反射材を用いたケースでは、アンケートの結果「圧迫感の少なさ」や「長時間みれるか」の項目で低評価となっていた。そのため圧迫感の緩和のため破線も検討することとし、その優位性を評価することとした。前述の視線誘導施設に関

する研究においては、概ね 30%程度以上の密度で視線誘導施設を設置することで、視線誘導効果が高まることが示されており、塗装ラインでの試験を行った「ライン 8m, 間隔 12m」の代替案については設置密度が 40%となり、視線誘導効果が期待できる上、車道中央線の破線の標示パターンとのバランスが良好であると考えられることから、反射材の破線間隔は「ライン 8m, 間隔 12m」として設定した。

4. 内装工の各種代替案の検討

内装工代替案の検討を実施するに当たり、内装工代替案のCGを作成し、走行環境の比較検討を実施する。内装工代替案の検討方法及び条件について、下記に述べる。



図-5 ディスプレイ視聴式の試験

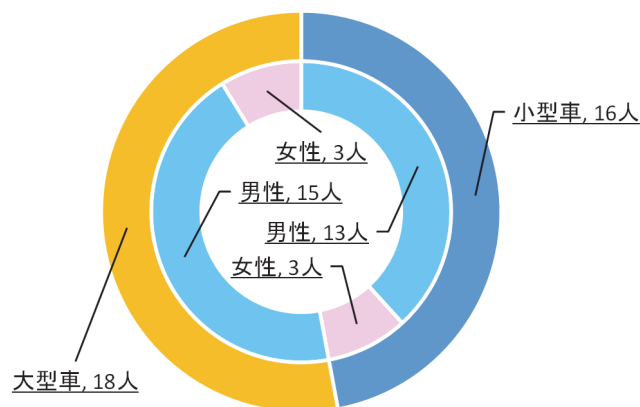


図-6 ディスプレイ試験における被験者属性

現行基準(内装材1.5m+ライン2.5m)	内装材なし+反射材実線1.5m	内装材なし+反射材実線1.5m
路面境界部 明示なし	路面境界部 斜光デリ10m間隔	路面境界部 斜光デリ5m間隔
ケース①	ケース②	ケース③
内装材なし+ラインなし	内装材なし+反射材破線1.5m	内装材なし+反射材破線1.5m
路面境界部 斜光デリ10m間隔	路面境界部 斜光デリ20m間隔	路面境界部 斜光デリ10m間隔
ケース④	ケース⑤	ケース⑥

図-7 ディスプレイ視聴試験における検討ケース

(1) ディスプレイ試験による有効な要素の絞り込み

ディスプレイによる試験は、検討対象ケースのうち視環境向上に有効な要素を持つケースを絞り込む目的で実施した。試験は、図-5に示すとおり照明を落とした個室で、ディスプレイにCGによる試験動画（以下CGと記す）を投影し、被験者が視聴する。本試験では、各ケース同士を比較することよりも、内装工がないトンネル内と比較するだけでなく、各ケースの効果を検証するという観点から試験を行うために、各種代替案のCGの間に内装工なしのトンネルを走行する動画を視聴し、比較した。ただし、デリニエーターについては、視線誘導標設置要領の記述から、路面境界部（道路端）の明示が他の施設等により代替可能な場合は省略できることとなっていることからCG上考慮しないこととした。

試験は小型車・大型車それぞれで実施し、被験者は図-6に示すとおりの計34名について実施した。試験ケースは図-7のとおりとした。試験ではCGを1ケース流すごとに、係員が聞き取り形式でアンケートを行った。

(2) ディスプレイ試験の結果

最も良いと感じたケース（図-8）については、現行基準の評価が高く、全体で44%を占めていた。車種別では、小型車では56%、大型車では33%が現行基準を良いと感じており、小型車の評価が高い結果となった。各アンケート項目（「明るさ」、「走行のしやすさ」、「見えやすさ」、「美観」、「安心感」、「壁面を確認できるか」、「長時間見ることができるか」、「圧迫感の少なさ」）の5段階評価の平均結果を（図-9）に示す。小型車については現行基準の評価が最も高かったが、大型車は現行基準が最も評価が高いものの、ケース⑤が次であった。他、確認できた点について以下に記す。

- ・小型車・大型車ともに「長時間見ることができるか」の項目が低いケースが多かった。

- ・小型車では、現行基準が最も評価が高く、反射材ラインによる視認性向上効果は内装工（内装材等）には及ばないケースが確認された。

- ・斜光デリと視線誘導ラインを組み合わせたケースは、斜光デリ単独のケースよりも評価が高く、視線誘導効果

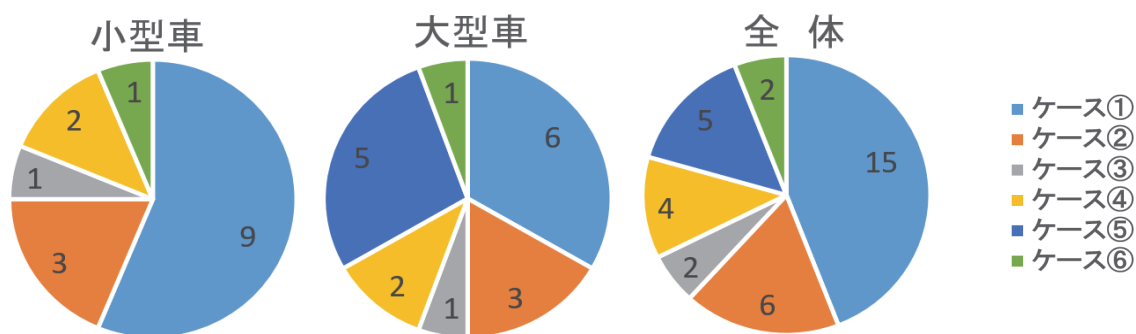


図-8 ディスプレイ視聴試験における最も良いと感じたケース

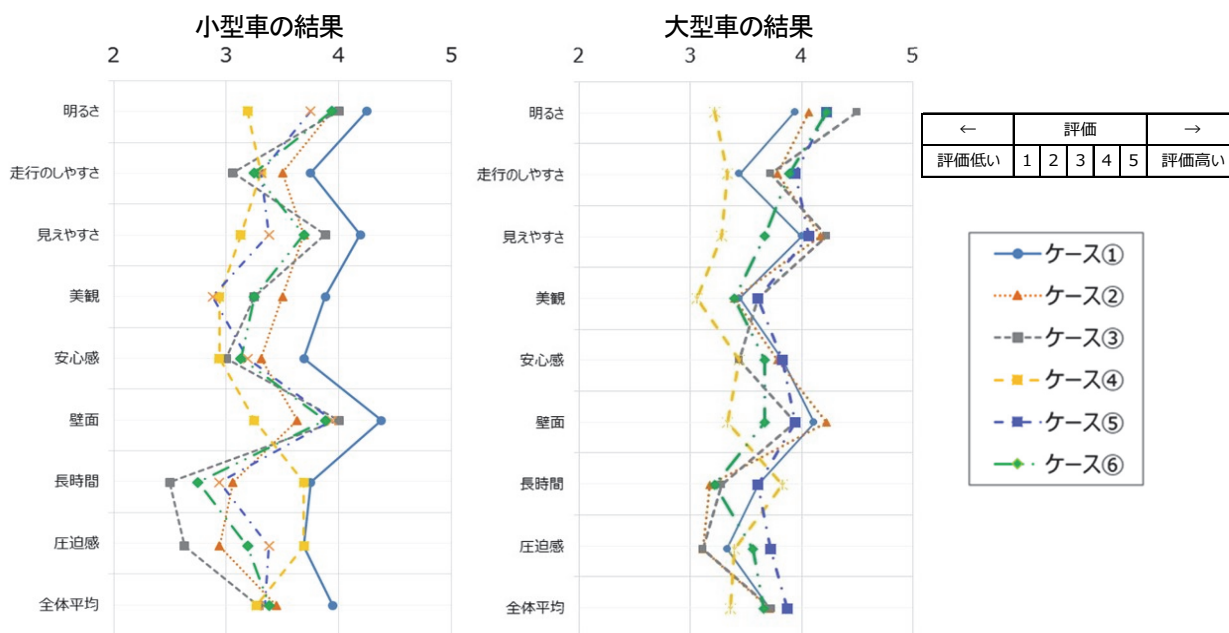


図-9 ディスプレイ視聴試験におけるアンケート結果

が高まると考えられる。

- ・反射材による視線誘導ラインは「圧迫感の少なさ」「長時間見られるか」の項目で評価が低い傾向が確認されたため、改良が必要であることが確認された。
- ・斜光デリの間隔は、5mの場合では「圧迫感」で評価が低く、10mまたは20mの場合では「圧迫感」や「長時間見られるか」の評価が高かった。
- ・視線誘導ラインが破線の場合は、斜光デリとの配置間隔により評価が異なった。破線と斜光デリを同一間隔とする組み合わせはバランスが良く評価が高かった。
- ・視線誘導ラインのタイプは、大型・小型両視点について、「見えやすさ」は実線のケースが破線のケースを上回る傾向があり、大型車の「壁面が確認できるか」についても、実線のケースが破線のケースを上回る傾向があった。ラインを破線にすることで「圧迫感」の改善が確認されたが、小型車の「長時間見られるか」には改善が見られなかった。

以上から「路面境界部の明示と視線誘導ラインを組み



図-10 青色の視線誘導施設の事例

合わせた案」及び「路面境界部の明示に内装工（内装材等）を使用する案」を以降の試験における検討対象とした。

5. 色彩、輝度、設置高さの検討について

ディスプレイ試験の結果から課題となった「長時間見られるか」や「圧迫感の少なさ」の項目について、改善するための検討を行った。圧迫感を和らげる方策として視線誘導ラインを破線にすることが考えられるが、一方で大型車が視環境のバランスを評価していることと視認性のさらなる低下が懸念されることから破線間隔の調整以外の方法を検討した。ディスプレイ試験の結果から実線の方が破線と比較すると視線誘導効果が高いことから、実線のまま色彩を変える検討を行った。

(1) 色彩の選定と輝度

現行基準はラインの色彩を橙色としてきたが、過年度の試験の際、輝度が十分でなかったことが他色の低評価につながった可能性もあるため、反射材での評価がどうかを再度検討した。比視感度については、国際照明委員会(CIE)によって標準比視感度が定められており、これによれば、人間の眼は、明所においては555nmの波長の光(緑)を最も明るく感じ、暗所においてはそのピークが短波長側に移動し、505nm(緑色～水色)となることから、青色の採用を検討した。既往の文献⁵⁾によると、青色は心理的にも生理的にもポジティブな効果があるこ

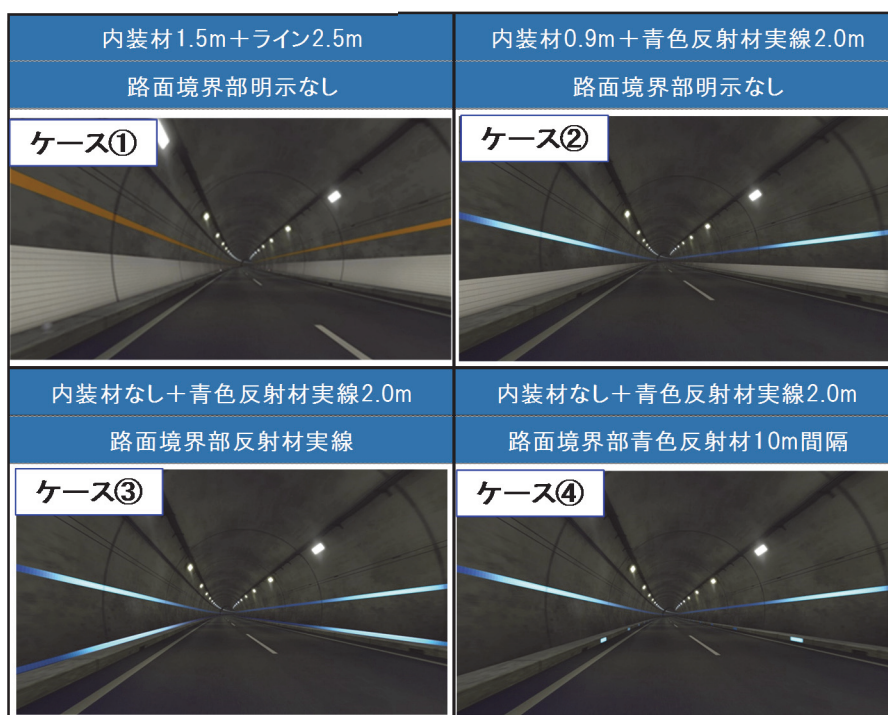


図-11 DS試験における検討ケース

とが示されている。また、視線誘導効果を狙った青色の視線誘導設備の事例も増えている(図-10)。以上の調査から、青色の反射材を使用することで、視認性を高めながら、圧迫感や長時間見続けた場合の刺激や疲労感等を低減することできる可能性が高いと判断した。

(2) ラインの幅と設置高さ

現行基準の視線誘導ライン幅(200mm)は、ライン状の視線誘導施設として代表的である「路面標示」のうち、「外側線」の基準を準用し、設定した値である。路面標示は塗装を基本としており、視線誘導ラインも同様に塗装を適用し、これまでの試験では良好な評価を得ている。しかし、今回の検討においては内装工(内装材等)の代わりとなるものとして反射材による代替を検討しているため、再帰性反射による視線誘導施設の事例について調査した。現在検討している反射材と同様に再帰性反射を基本とした視線誘導施設としては、「視線誘導標(デリニエーター)」が挙げられる。視線誘導標設置基準・同解説(日本道路協会)では、デリニエーターの有効反射面積は $\phi 70\text{mm}$ 以上 $\phi 100\text{mm}$ 以下とされており、自動車の走行速度が高い場所は大い反射体を設置することが望ましいとされており、視線誘導標設置基準においても、反射性能については国土交通省基準の反射性能($\phi 70\text{mm}$ で定義)を $\phi 100\text{mm}$ に換算した値を基準値として採用していることから高速道路では $\phi 100\text{mm}$ のデリニエーターが基本的な仕様となっている。

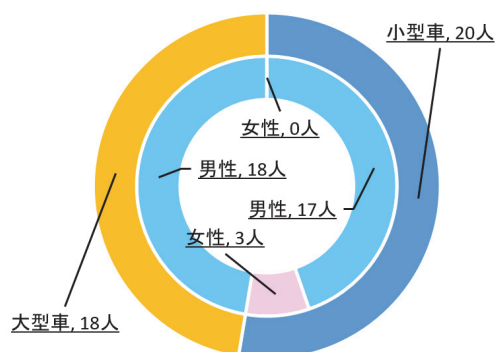


図-12 DS試験における被験者属性

また、現地調査等を行った結果、帯状反射材の設置事例として幅 100mm の製品を防護柵や縁石等に連続的に設置し、道路幅員が変化する箇所の明示を行うなど、視線誘導効果を高めるために用いられることが確認された。また、夜間照明があり反射効果を高める必要がある場合にも幅 100mm 程度の反射材が適用される事例が多いことが分かった。これらの知見を勘案し、反射材の幅は 100mm 程度が適当であると判断した。

設置高さについては、過年度の試験結果から大型車の視点は視点高さ $h=2.5\text{m}$ からほぼ水平方向と俯瞰方向に広がるためことが分かっていたため $h=2.0\text{m}$ 程度が視線誘導に有効と判断した。

以上の観点から DS 試験の代替案(図-11)を決定した。

6. 試験施工案の検討

内装工の試験施工案の検討を実施するに当たり、その試験施工案を施したCGを作成し、走行環境の比較検討を実施する。試験施工案の検討方法及び条件について、下記に述べる。

(1) DSによる試験

DSを用いた走行試験およびアンケート調査、監視員通路断面の静止画CGを用いたアンケート調査を行い、各種試験施工案の優位性を評価した。被験者は図-12に示すとおり計38名について実施した。試験ケースとしては、図-11のとおり現行基準と他に3ケースを行った(試験状況:図-13)。試験ではCGを1ケース流すごとに、係員が聞き取り形式でアンケートを行った。

(2) DS試験の結果

最も良いと感じたケース(図-14)については、現行基準の評価がやや高く、全体で42%を占めていたものの、ケース④についても37%となり、現行基準との差は小さい結果が得られた。各アンケート項目の5段階評価の結



図-13 DS試験の試験状況

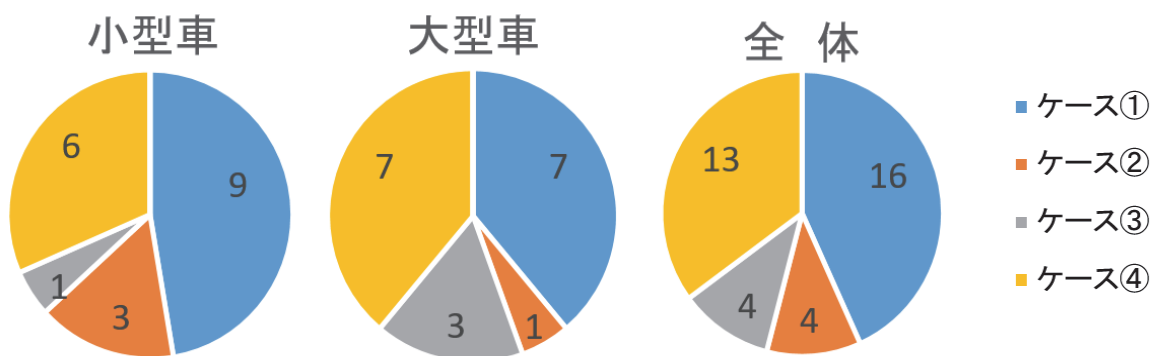


図-14 DS試験における最も良いと感じたケース

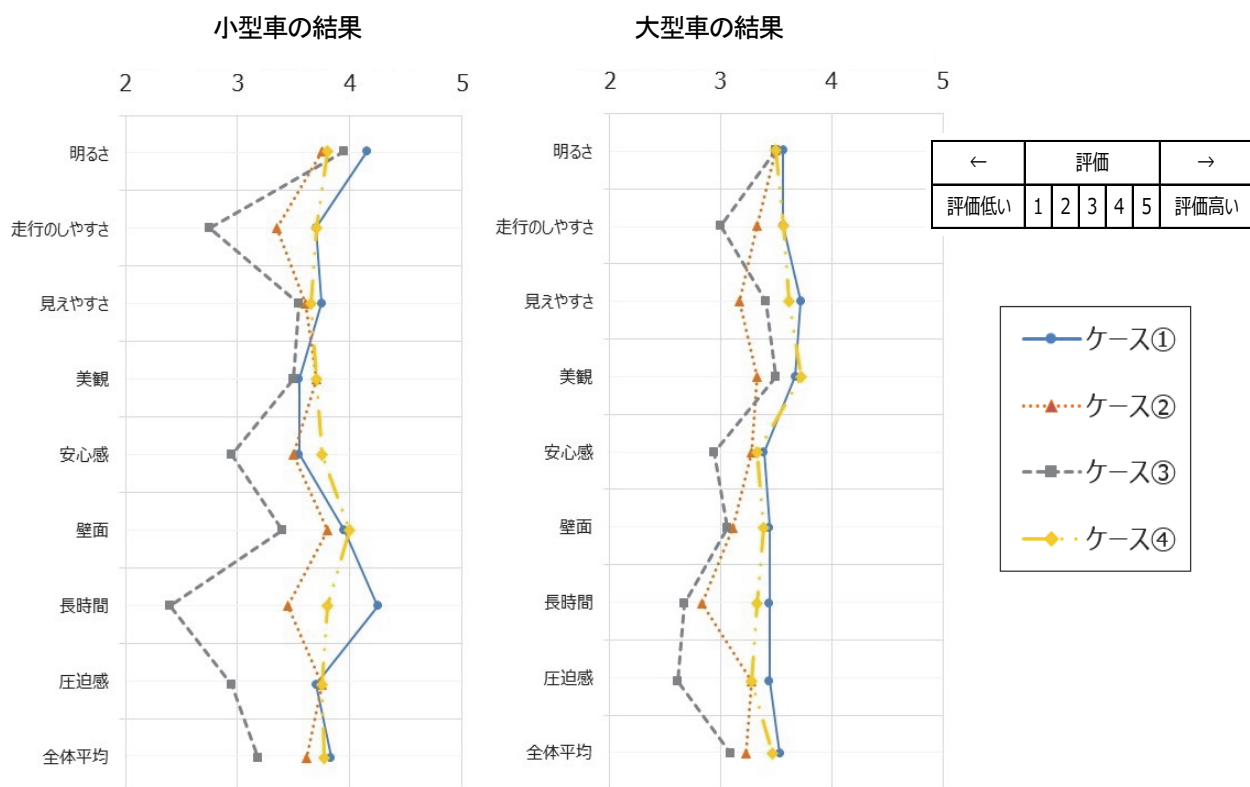


図-15 DS試験におけるアンケート結果

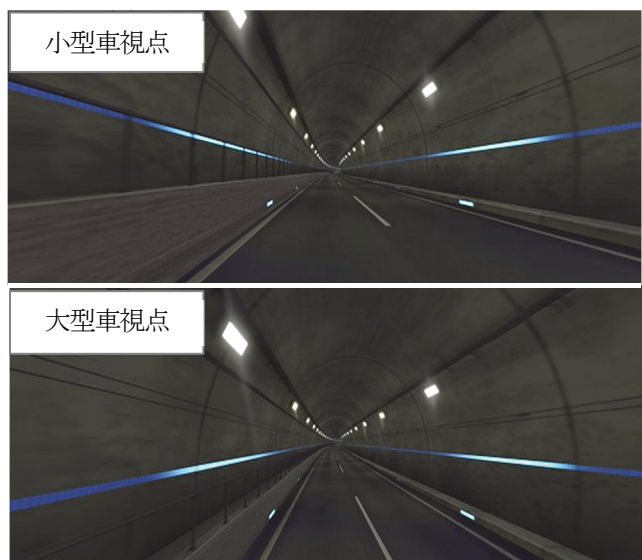


図-16 監視員通路断面における見え方

果について、現行基準及び各種案の結果を図-15に示す。

す小型車、大型車ともに現行基準の評価が高いものの、ケース④については、類似ケースとなるディスプレイ試験のケース②と比較すると色彩を変更したことで「圧迫感の少なさ」や「長時間見られるか」の項目の改善が見られた。また、ケース①とケース④を比較すると、ケース④は白い内装がないことで明るさの項目はやや劣るものの、走行のしやすさの項目については同等の結果となっていることから、明るさが下がった分を視線誘導効果が補っているとも考えられ、総合的に評価したとき、現行の基準と遜色ない視環境となっていると考えられる。また、監視員通路を有するトンネル内においても、図-16のとおりCGを作成し、ラインの視認性が走行上問題がない程度になっていることが確かめられた。

7. 得られた技術的知見と今後の展望

各被験者試験により得られた知見を以下に述べる。
各種代替案のうち評価の高かったケースは、DS試験でのケース④の青色反射材ライン2.0m+路面境界部青色反射材10mピッチであり、小型車・大型車ともに現行基準と比較して優位な差はなく、「遜色ない」結果であった。

今後、評価が高かったケース「青色反射材ライン2.0m+路面境界部青色反射材10mピッチ」について既設トンネルへの試験施工を行い、被験者を設定して走行試験等により、この代替案の適用性を評価するとともに、設置後の耐久性を継続して調査していく予定である。タイル等の内装材料の落下リスクを無くすることが当面の課題であり、基準化を目途に検討を進めていく。

謝辞：本稿は、「内装工のあり方に関する検討会」の結果を取りまとめたものです。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 村田雄輝, 中野清人, 海瀬忍, 加藤人士, 小根山裕之: 高速道路トンネルにおける内装工の新たな基準化に関する検討, トンネル工学報告集第30巻, 1-36, 2020.11.
- 2) 設計要領第五集 交通管理施設 視線誘導標編 平成26年7月
- 3) 萩原 亨ら: 帯状ガイドライトの設置がドライバのメンタルワークロードに与える効果について 交通工学論文集 第1巻第2号(特集号B)pp.B_10-B_17,2015.2
- 4) 萩原 亨ら: 帯状ガイドライトの設置条件がドライバのワークロードと線形誘導性に与える影響について 交通工学論文集 第3巻第4号(特集号B)pp.B_11-B_18,2017.4
- 5) 野村 収作: 青色のストレス抑制反応～唾液コルチゾールによる検証～映像メディア学会誌 Vol.68, No.12, pp.J537～J539 (2014)

(2021.8.6 受付)

STUDY ON NEW STANDARDIZATION OF INTERIOR FINISHING IN EXPRESSWAY TUNNEL

Hotaka OKIHARA, Kiyoto NAKANO, Tetsuya YAMAZAKI, Hitoshi KATO and Hiroyuki ONEYAMA

In the conventional examination, it is standardized that the combination of interior finishing (INF) and delineating line of the expressway tunnel in the white lighting. A study focused on the visual guiding effect was made because importance of that becomes high among functions of INF due to that lighting. However, risk reduction is demanded more because there is concern about the influence on traffic vehicle when the interior finishing part fell off. Therefore we examined INF with an equal function and the lesser of the risk. To select the above alternative arrangement of INF, we evaluated the data of questionnaire survey. As a method of it, we produced a picture and movie of the computer graphics of a current standard and various substitute INF arrangements. Result of that survey, it was to be effective that the combination of border line into the road surface and delineating line. In addition, it turned out that it was the result that did not have inferiority than a current standard about "Blue reflector line 2.0m and combination at the road surface border region blue reflector 10m interval". Based upon the foregoing, there is a possibility that it will exceed INF by improving the visual guiding effect. About the future plan, we will undertake construction experimental-ly in the real expressway and intend to evaluate it.