

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

村田 雄輝¹・中野 清人²・海瀬 忍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:y.murata.ac@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 中日本高速道路株式会社 敦賀保全・サービスセンター (〒914-0014 福井県敦賀市井川17号字稲荷敷8-1)
E-mail:s.kaise.aa@c-nexco.co.jp

⁴正会員 株式会社片平新日本技研 道路部・保全環境部 (〒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。本稿では、過年度に検討した内装工の代替案「内装工高さ 1.5m+ライン H=2.5m (橙色)」について、現地トンネルで試験施工し、小型車・大型車それぞれの視点における運転者の主観的評価、視点挙動および交通流を現行案（内装工高さ 2.5m）と比較し、評価したものである。検討の結果、代替案は、現行案と比較した場合、走行快適性の向上および経済性等、内装工が持つべき機能において同等以上であると評価できた。

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

1. はじめに

近年、照明設備の技術開発が進み、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の重要度が高くなっているが、これまで、トンネル内における視線誘導に着目し、運転者の視点挙動から定量的に評価した研究は少ない。したがって、筆者らは運転者の視線誘導効果に着目した検討を実施した。過年度の検討¹⁾では、白色照明下における高速道路トンネルの内装工のあり方について、ドライビングシミュレータによる被験者試験を実施した結果、「内装工高さ 1.5m+ライン H=2.5m (橙色)」が代替案として有力であることが確認された。本稿では、現地トンネルで現行案（内装工高さ 2.5m）と代替案を設置し、運転者の主観的評価、視点挙動、走行速度および運転挙動を比較して評価したものである。

2. 過年度の検討成果¹⁾

過年度の検討では、内装工の代替案について、ドライビングシミュレータを用いた小型車・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。

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より、「内装工高さ 1.5m+ライン H=2.5m (橙色)」のケースは、小型車視点では現行案（内装工高さ 2.5m）と同等の評価であり、大型車視点では現行案を上回る結果となった。
- ② 視線誘導効果は視点高さに影響を受けると推測されることから、小型車の視線誘導効果は内装工高さ 1.5mで確保し、大型車の視線誘導効果はライン H=2.5mで確保していると推測される。

以上より、「内装工高さ 1.5m+ライン H=2.5m (橙色)」が代替案として有力であると結論付けられた。

3. 現地試験概要

(1) 被験者属性、試験車両および対象トンネル諸元

被験者は、20～60代前半の男性を基本とし、小型車12名、大型車10名で実施した。被験者属性を図-1、図-2に示す。試験車両は、小型車、大型車それぞれで実施し、視点高さは小型車1.2m程度、大型車2.5m程度であった。対象トンネルの断面図、諸元を図-3、表-1に示す。

(2) アンケート調査

アンケートは、被験者が対象トンネルを通過後に、調査員が口頭で質問を行い、回答を記録する方法で行った。最初に最も良いと感じたケースについて質問を行い、それぞれの仕様について、「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8項目を、評価項目ごとに5段階で評価した。

(3) アイマークテスト

主に不安定な眼球運動が無いか確認を行うため、アイマークテストを実施した。これは、アイマークカメラを装着した被験者が対象トンネルを運転し、運転時の眼球運動を測定するものである。走行前にアイマークカメラを装着し、待機スペースにて、キャリブレーションにより眼球運動の挙動を確認した上で、現行案を走行後に代替案を走行した。

(4) 壁面・路面輝度調査

トンネル内の輝度分布を定量的に把握するため、車内に設置した画像式輝度分析装置を用いて測定を行った。路面から1.0mまでの壁面の輝度、路面全体の輝度を計測し、このデータから、路面・壁面輝度比を算出した。測定は、トンネル内の輝度が最も高い、晴天の昼間に実施した。

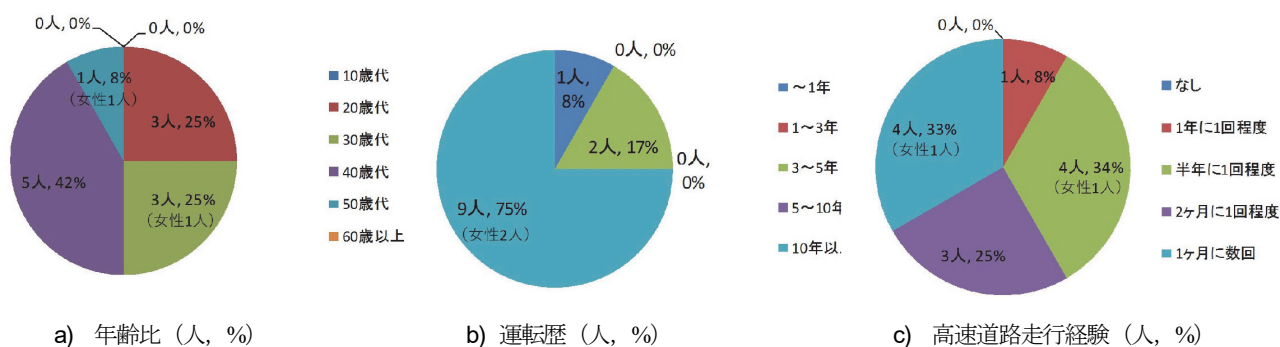


図-1 小型車被験者属性

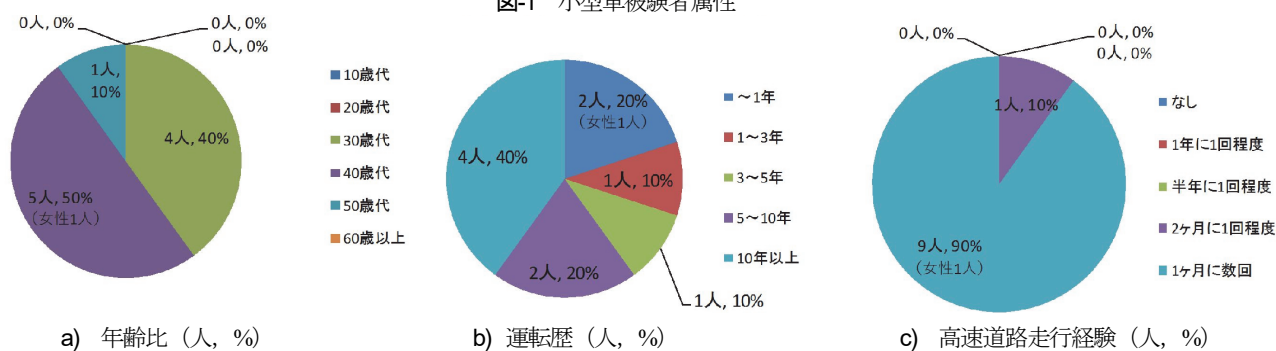


図-2 大型車被験者属性

表-1 対象トンネル諸元

項目	現行案	代替案
道路規格	第1種第2級B規格	第1種第2級B規格
設計速度	100Km/h	100Km/h
照明	蛍光灯	蛍光灯
平面線形	3000m	3200m
縦断勾配	下り2.41%	上り2.43%
断面交通量	39426台/日 (H29平均日交通量)	

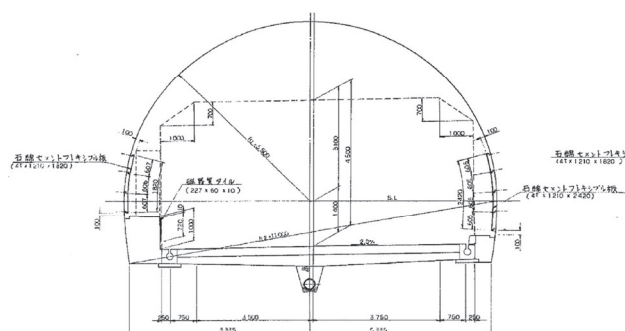
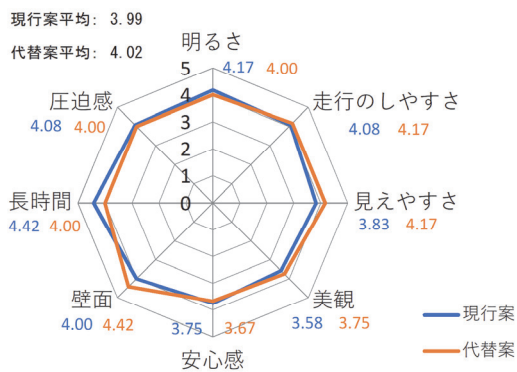
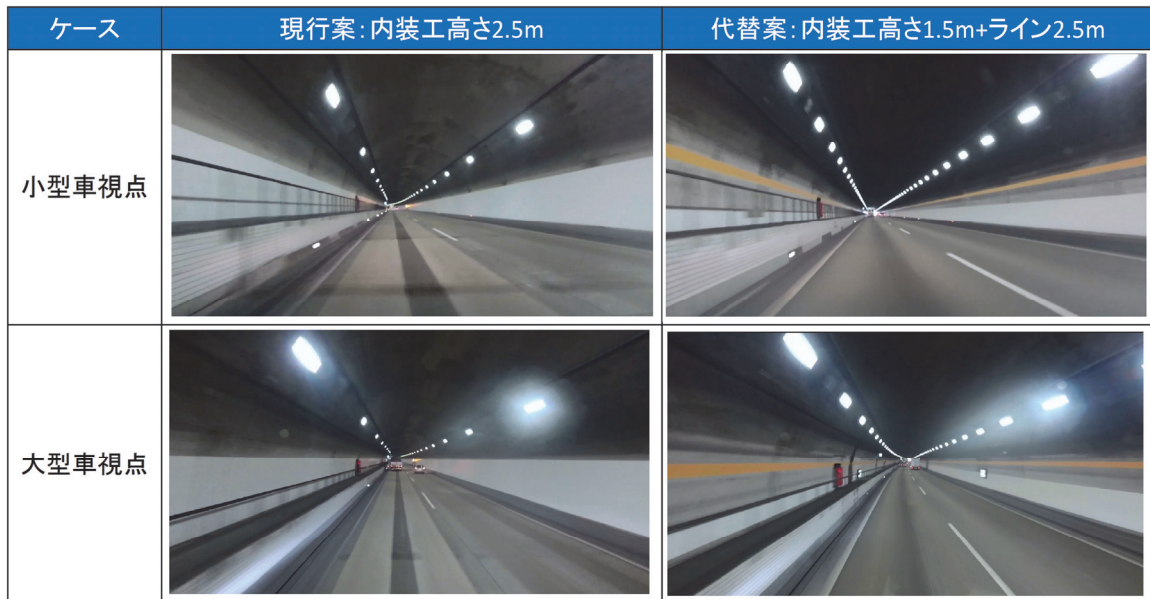
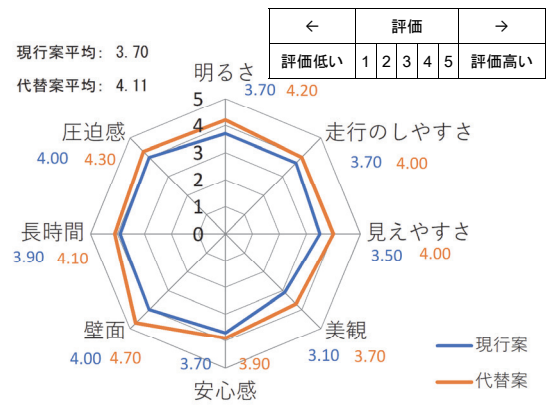


図-3 試験対象トンネル断面図

表-2 各視点高さにおける走行画像



a) 小型車アンケート結果



b) 大型車アンケート結果

図-4 車種別のアンケート結果

(5) 走行速度調査・走行状況調査

走行速度・走行状況調査は、代替案および現行案で施工されたそれぞれのトンネルにおいて非常駐車帯の監視員通路からビデオ撮影し、計測区間の通過速度、車両走行位置、ブレーキ操作状況を確認した。

(6) ETC2.0における交通データ分析

代替案の試験対象トンネルは、既存トンネル内装工高さ2.5mを撤去し、内装工代替案にて更新を行った。これらの内装工の違いによる走行速度への影響を把握するため、既存のトンネル内装工撤去前（現行案）、内装工未設置期間、代替案施工後の走行速度について、ETC2.0の交通データにおける平均走行速度および速度分布を用いて比較検討を行った。

(7) 比較検討ケースの走行画像

小型車視点、大型車視点それぞれの高さにおける現行案および代替案の走行画像を表-2に示す。

4. 現地試験結果

(1) アンケート調査

最初に最も良いと感じたケースについて質問を行った結果、代替案の評価が高く、全体で64%（14人/22人）を占めていた。車種別では、小型車では50%（6人/12人）、大型車では80%（8人/10人）が代替案を良いと感じており、大型車の評価が高い結果となった。

各アンケートの車種別の被験者試験の結果を図-4に示す。小型車における8項目の5段階評価の平均値は現行案3.99、代替案4.02であり、小型車は、代替案の評価が高いが、その差は小さい結果となった。大型車における平均値は現行案3.70、代替案4.11という結果となり、代替案の評価が高く、すべての評価項目で高い評価点となった。統計分析として、対応のある2標本の代表値の差を調べる符号付順位と検定を、有意水準0.05として実施した²⁾。その結果、代替案と現行案の個別比較では有意差がない結果となった。

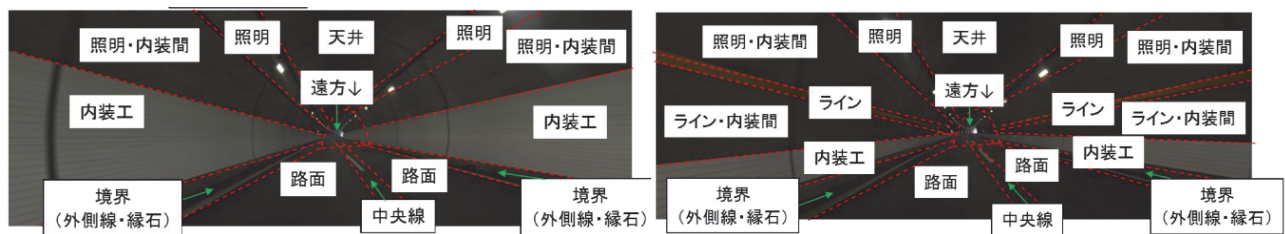


図-5 施設区分 (左: 現行案, 右: 代替案)

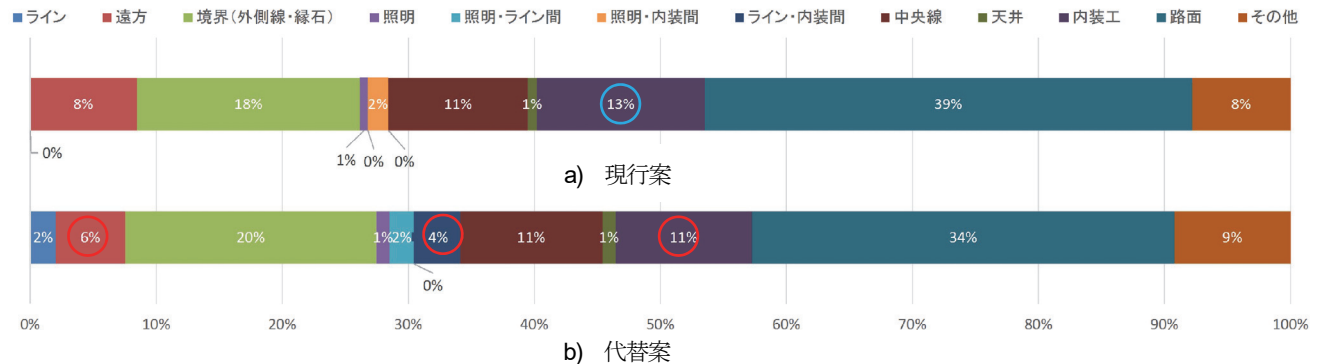


図-6 小型車視点における総注視時間の構成比率

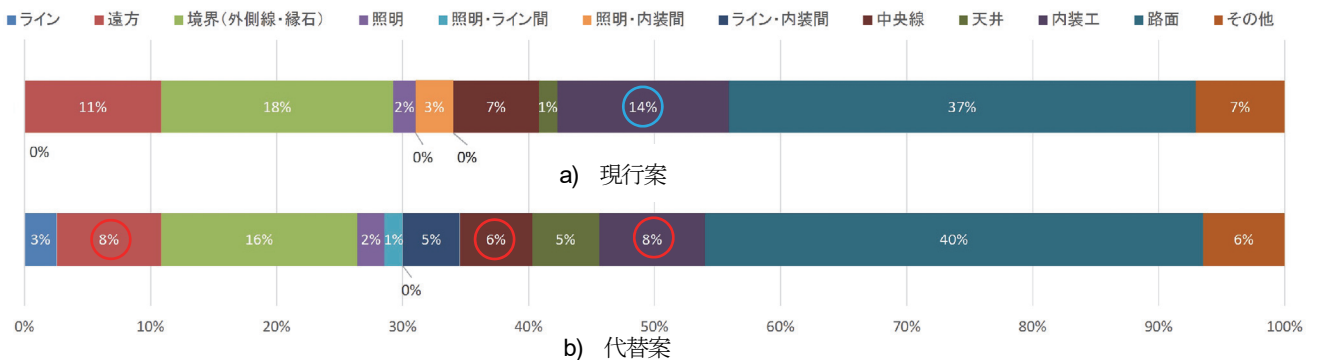


図-7 大型車視点における総注視時間の構成比率

(2) アイマークテストによる注視状況分析結果

現行案および代替案それぞれのトンネルを走行中の被験者のアイマークテスト結果を下記に述べる。

a) 注視点分布

注視点分布の分析において、実走行ではスピードメータ等を視認するため、全データの中からこれらを除外して分析した。現行案と代替案では、過年度のドライビングシミュレータの結果と同様に、いずれのケースも不安定な眼球運動は確認されず、実走行への影響はないと判断される。

b) 施設ごとの総注視時間および平均注視時間

トンネル内の施設を図-5の施設区分による総注視時間、平均注視時間を整理した。各施設の小型車、大型車の総注視時間の構成比率を図-6、図-7に示す。現行案、代替案ともに注視時間で最も多いのは路面であった。また、側壁部に着目すると、代替案のライン、ライン～内装工、内装工の合計(図-6、図-7赤丸部)は、現行案の内装工(図-6、図-7青丸部)よりもやや多く、代替案の方が路面から2.5mの範囲を見ている割合が大きいといえる。

施設ごとの平均注視時間については、過年度のドライビングシミュレータによる試験¹⁾では0.3～0.5秒程度であったが、今回実施した現地試験では0.2～0.4秒程度とやや短い傾向であった。実走行では安全確保のために側方確認等、視点が移動しやすい傾向にあり、短時間で視点が移動したのと考えられる。

c) 視線誘導効果が高い施設の中注視比率

既往の研究³⁾では、「視線誘導における目の動きについては、一つの対象を注視する間にちらつきを生じることなく、注視した後、ただちに次の対象へ注視点が飛び移る」とされており、視線誘導効果は中注視行動に近い動きに現れると考えられる。したがって、対象施設を視認している全データから、中注視時間の割合を中注視率と定義し、各ケースの視線誘導効果を確認した。中注視時間の範囲としては、「ちら見」や「漫然見」を除外するため、各ケースの平均注視時間から $\pm 1\sigma$ 以内の範囲について集計するものとした。その結果、中注視時間の範囲を小型車0.11～0.57秒、大型車0.09～0.33秒として集計した。

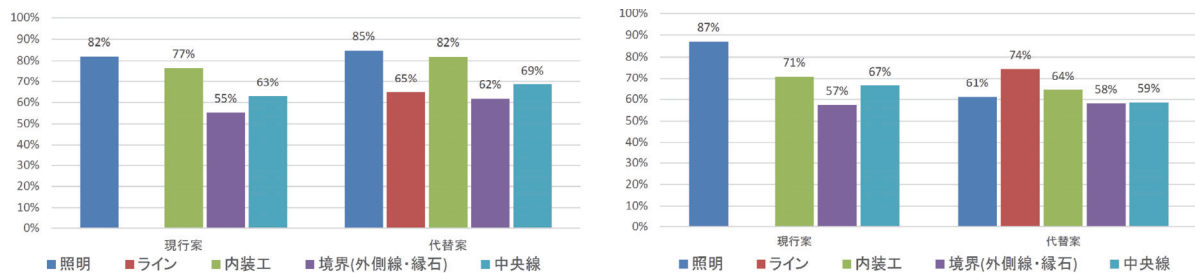


図-8 各施設における視点別中注視率 (左：小型車，右：大型車)

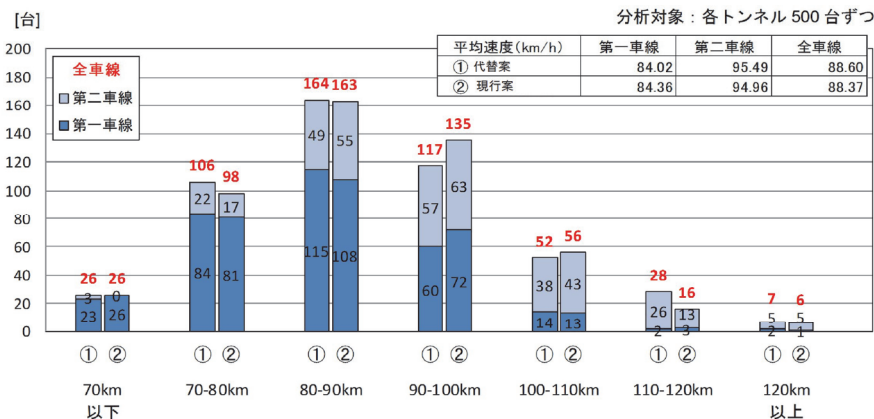


図-9 各調査地点の走行速度

各施設の中注視率の結果を図-8に示す。小型車では、現行案、代替案ともに、内装工の中注視率が照明とともに高いことがわかる。代替案は、ラインよりも内装工の中注視率が高く、視点位置に近い、内装工が視線誘導施設として機能していると考えられる。大型車では、現行案は内装工の中注視率が高いが、代替案の中注視率は、視線高さに近いラインが最も高く、内装工は次点となる。したがって、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できた。このことは前述の図-4と合わせて考えると、代替案におけるラインの中注視率の高さと大型車のアンケート評価の高さが符合しており、関係性があると考えられる。

(3) 路面・壁面輝度調査

トンネル内の基本照明区間の平均路面輝度は、現行案が5.4cd/m²、代替案が6.6cd/m²であり、基準を満足しており、路面と壁面の輝度比は、現行案が1.49、代替案が1.33であった。測定結果には若干の差が生じているが、既往の文献⁴⁾では、トンネル空間に対する「運転の快適さ」などの心理的評価は、路面輝度が2cd/m²以上になると路面輝度による評価値の変化が少なくなることが示されていることから、アンケート結果に影響を及ぼすものではないと考えられる。

(4) 走行速度調査・走行状況調査

代替案および現行案が施工されたトンネルの非常駐車帯の監視員通路上からビデオ撮影し、対象台数 500 台における分析を実施した。

表-3 ETC2.0 分析の対象台数

	期間① (2018/9/11～9/14)	期間② (2019/4/8～4/12)	期間③ (2019/9/9～9/13)
Ａトンネル	内装工あり(現行案) 12,961台	内装工撤去後(未設置) 15,661台	内装工あり(代替案) 17,040台
Ｂトンネル	内装工あり(現行案) 12,998台	内装工あり(現行案) 16,216台	内装工あり(現行案) 18,392台

a) 走行速度調査

代替案および現行案それぞれの各調査地点の走行速度調査結果を図-9に示す。代替案(図-9：①)の全車線の平均走行速度は88.60km/h、現行案(図-9：②)の全車線の平均走行速度は88.37km/hと同程度であり、速度分布の状況に大きな違いはなかった。

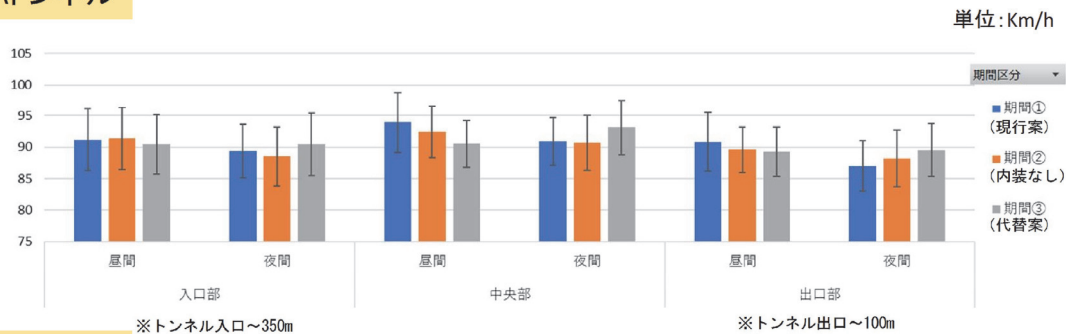
b) 走行状況調査

現行案、代替案ともに95%以上が車線内中央部を車両が走行しており、片寄った走行位置等の特異な挙動はなかった。また、現行案、代替案ともに97%以上の車両がブレーキ操作を行っておらず、走行状況において危険事象は確認されなかった。

(5) ETC2.0における交通データ分析

代替案を設置した A トンネルは、既存の内装工高さ 2.5m (現行案) を撤去し、代替案を新たに施工したことから、それぞれの設置状態における ETC2.0 の交通データ分析を実施した。取得データの妥当性の検証のため、内装工に変化がなかった B トンネルについても同様に分析し、比較を行った。対象台数を表-3に示す。

Aトンネル



Bトンネル

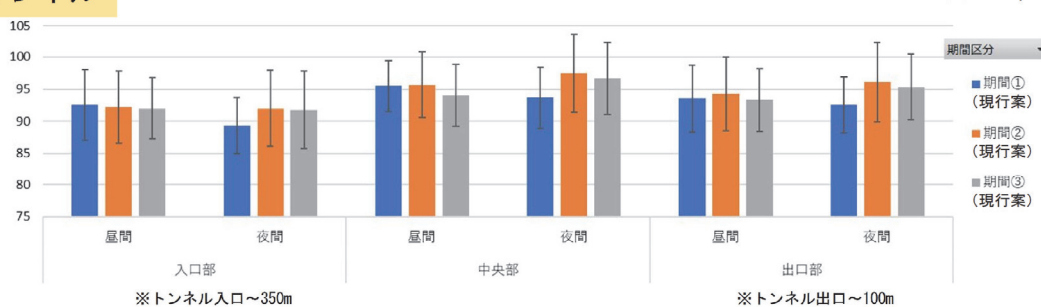


図-10 各トンネルにおける平均走行速度

表4 Aトンネルにおける各期間の速度分布

●小型車の速度分布(規制速度100km/h)

単位: 台

速度	内装工あり(現行案)	内装工なし	内装工あり(代替案)
40km/h台	0	4	2
50km/h台	5	12	29
60km/h台	85	174	244
70km/h台	518	699	920
80km/h台	1,040	1,301	1,698
90km/h台	1,210	1,529	1,757
100km/h台	1,200	1,434	1,612
110km/h台	413	499	562
120km/h台	89	169	222
130km/h台	29	30	51
計	4,589	5,851	7,097

●大型車の速度分布(規制速度80km/h)

単位: 台

速度	内装工あり(現行案)	内装工なし	内装工あり(代替案)
40km/h台	3	3	1
50km/h台	19	31	21
60km/h台	467	575	551
70km/h台	3,030	3,599	3,508
80km/h台	3,926	4,414	4,584
90km/h台	682	832	823
100km/h台	109	129	164
110km/h台	29	28	27
120km/h台	4	5	4
130km/h台	0	0	0
計	8,269	9,616	9,683

a) 平均走行速度結果

各トンネルにおける平均走行速度結果を図-10に示す。Aトンネルにおける平均走行速度について、現行案と代替案を比較すると、昼間は期間①(現行案)、夜間は期間③(代替案)の速度が速い傾向があるが、その差はいずれのケースにおいても3.5km/h以下であった。また、内装工の状態に変化がなかったBトンネルにおいても、同様の傾向、速度差(最大3.8km/h)であったことから、内装工の違いが及ぼした影響ではないと推察される。

b) 速度分布結果

Aトンネルにおける各期間の速度分布結果を表4に示す。いずれの期間でも、小型車は90km/h台、大型車は80km/h台にピークを示す分布であり、内装工の状態が変化、つまり「現行案」、「内装工なし」、「代替案」の各々の段階において、速度分布の傾向に差異がないことを確認した。

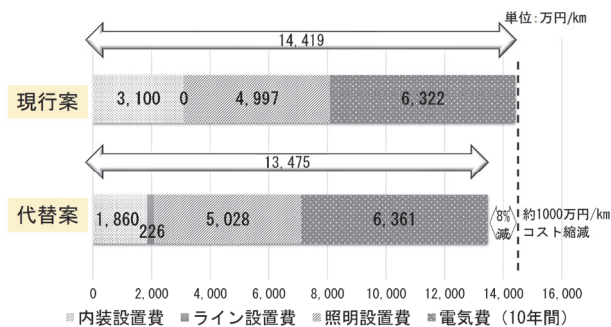


図-11 内装工設置費の経済比較

5. 経済比較

現行案と代替案の建設時における内装工の設置費用の検討を実施した。メーカーからヒアリングした単価をもとに試算した結果を図-11に示す。試算の結果、現行案と代替案を比較した場合、代替案にすることで内装工高さが低減される分の内装工設置費が削減となり、全体コストは約8%程度低減することが確認された。

6. 得られた技術的知見と今後の展望

内装工の現行案と代替案について、現地試験により得られた知見を以下に述べる。

- 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)」(代替案)のケースは、小型車視点では現行案(内装工高さ 2.5m)と同等評価であり、大型車視点では現行基準を上回る結果となった。これは過年度に実施したドライビングシミュレータによる被験者試験¹⁾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。また、走行速度・状況調査および ETC2.0 の交通データ分析結果では、現行案と代替案で速度分布に大きな差はなく、運転時の危険事象も確認されなかった。
- ③ 現行案と代替案で建設時の内装工の施工費を比較した結果、代替案で施工すると全体コストが 8%程度低減される結果となった。

上記より、代替案は、現行案と比較した場合、走行快適性が向上し、また、経済的にも有利となることが確認されたことから、内装工が持つべき機能において同等以上であると評価することができた。

また、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きている。このことから、視線誘導効果が得られる技術について情報収集を行い、適用性を検討することで、内装工の代替となる新技術についても今後検討を進めていく予定である。

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, 伊藤哲男, 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あり方に関する検討, 第28回トンネル工学研究発表会報告集論文番号I-50, CD-ROM, 2018.
- 2) 上田拓治: 44の例題で学ぶ統計学 検定と推定の解き方, pp137-139, (株)オーム社, 2009.
- 3) 村田隆裕: 注視行動の統計的性質, 土木学会論文集213号, pp.55-63, 1973.
- 4) 小野隆, 石川恒, 武田正典, 李浄, 佐々木嘉雄, 石井弘充, 松本泰幸, 穂積順一, 小平恭宏: 高速道路トンネルの照明環境と心理的評価(II), 照明学会誌80 Appndix, pp191, 1996.

(2020. 8. 7 受付)

STUDY ON NEW STANDADIZATION OF INTERIOR FINISHING IN EXPRESSWAY TUNNEL

Yuki MURATA, Kiyoto NAKANO, Shinobu KAISE, Hitoshi KATO and Hiroyuki ONEYAMA

It is essential to provide visual environment where drivers can get correct visual information for driving tunnels safely and smoothly. A study focused on the visual guiding effect was made because importance of that becomes high among functions of interior finishing (INF) due to technical development of tunnel lighting system. An alternative arrangement with INF, H=1.5m and an orange delineating line, H=2.5m was considered as effective by results of the last year's study employing a driving simulator and human examiners. A further comparison study was conducted using an existing tunnel with INF, H=2.5m and providing the above alternative arrangement. Evaluations were made by a questionnaire survey and eye fixation examination of drivers through eye mark test with respect to feeling and eye movement. Results showed that the alternative arrangement gave nearly the same effects as those of existing arrangement for passenger cars and gave even better results for trucks. No unstable eye movements were observed. It is assumed that arrangements of INF can be changed without any undesirable effects to drivers. It is expected the above alternative arrangement can improve visual environment of tunnels because that is evaluated as acceptable in functions performed by INF, i.e. improvement of traffic comfort.