

# 1.5 車線の道路整備における 待避区間の最適配置に向けた評価手法の検討

天野 和洋<sup>1</sup>・前田 宗宏<sup>2</sup>・中村 泰広<sup>3</sup>・清 雄一<sup>4</sup>・大須賀 昭彦<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

E-mail: amano@kajima.com

<sup>2</sup>正会員 鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11 鹿島赤坂別館)

E-mail: maedamu@kajima.com

<sup>3</sup>正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 KI ビル)

E-mail: nakay@kajima.com

<sup>4</sup>非会員 電気通信大学助教 大学院情報システム学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

E-mail: seiuny@uec.ac.jp

<sup>5</sup>非会員 電気通信大学教授 大学院情報システム学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

E-mail: ohsuga@uec.ac.jp

中山間地域における豊かな暮らしを支えるため、近年、1車線改良や2車線改良、局部改良を弾力的に組合せた1.5車線の道路での整備が可能になった。建設工事においても、一時的な大型車の増加に対応する上で1.5車線の道路が有効となるが、交通量の多い区間では、待避所の位置や延長を設定するために労力や時間を要する交通シミュレーション等による検討を繰り返す必要があった。本稿では、繰り返し検証の省力化と待避所の最適配置を視野に、狭隘区間と待避区間の評価指標を定式化して交通シミュレーションとの比較を行った。両者の平均絶対誤差は、平均待ち時間で4.8秒、平均必要待避区間長で3.3mとなり、本指標の妥当性を確認できた。今後、最適化手法と組み合わせることで、待避区間の最適配置と迅速で効果的な整備計画の策定が可能になると考える。

**Key Words:** road improvement for 1.5 lanes, passing and no passing sections, evaluation methods, traffic simulation, optimum arrangement

## 1. 研究の背景と目的

中山間地域においては、豊かな暮らしを支えるための道路整備ニーズとして、安全・安心な移動、医療機関への時間短縮、異常気象時の交通確保等を望む声が高まっている。これに伴い、様々な地域で既存の狭隘道路の改良が求められているが、画一的な計画手法による改良計画では交通量に対する整備コストが過大になりやすく、さらには自然環境への影響も懸念されていた。そのような中、「道路構造令の解説と運用」<sup>1)</sup>が平成16年2月に改定され、地域の状況に応じて道路構造令の規定を弾力的に運用できるようになった。従来であれば、全線2車線道路で整備してきた道路に、1車線改良や2車線改良、待避所などの局部改良を組合せた1.5車線の道路と呼ばれる整備方法が適用できるようになり、短期間に低コストで効果的な道路整備が可能となった。

また、同様な地域でのトンネルやダムなどの建設工事においても、工事で使用する資材の搬入や発生した土砂の搬出に伴って、狭隘な道路へ一時的に大型車の往来が集中する場合がある。それまで主に小型車のみが通行していた道路に想定以上の大型車が通ることになるため、渋滞による周辺環境への影響軽減と効率的な施工サイクルの実現を図る上で、搬送経路上の狭隘部を一部改良しなければならぬケースが発生する。そのようなケースでは、工事期間が限定されていて恒常的な交通量の増加にならないことから、2車線改良では過剰となることが多く、1.5車線の道路整備の考え方を適用することが特に有効となる。

1.5車線の道路の整備にあたっては、地域の実情に合った設計を行うために、各自治体がローカルルールとしてガイドライン等による整備基準を策定している。多くのガイドラインは道路構造令第30条の待避所の基準<sup>2)</sup>を

ベースとしているが、交通量の多い区間等においては、ガイドラインに記された内容だけでは待避所の位置や延長を適切に計画することが困難であり、交通シミュレーション<sup>2)</sup>等を併用して検討を行うことになる。図-1に、待避区間を最適化の際の検討フローを示す。もし初めに仮定した待避区間では計画交通量が処理できない場合には、(f)に該当する拡幅箇所の見直しと評価を繰り返すことになる。必要な待避区間は複数箇所になる場合もあり、その拡幅パターンは際限がなく、拡幅コストを含めてどこまで最適化するかは設計者の手腕に委ねられる上、労力や時間を要する非常に煩雑な作業となっていた。

例えば山内ら<sup>4)</sup>は、参照が容易な整備基準の作成を目的として、簡易シミュレーションを用いて日交通量と大型車混入率から必要な2車線区間の割合を求める選定表を作成し提案している。試行錯誤を軽減する上でも有効な指針となるが、設置間隔は極力均等とすることが望ましいとしており、道路線形など実情に合った具体的な拡幅計画は別途必要となる。また、島根県の1.5車線の道路整備に関するマニュアル<sup>5)</sup>においては、対向車とのすれ違いの影響を考慮した平均旅行速度を計算する推定式が提示されている。多くのケースと詳細な条件を想定しており非常に有用なガイドラインであるが、必要な待避所の延長について特別な設定は行っていない。特に、建設工事に伴う搬送経路の改良においては、大型車混入率が通常よりも高くなることから、狭隘区間のみならず待避区間の評価も重要になる。

こうした背景から筆者らは、交通シミュレーションによる繰り返し検証の省力化を目的に、局部改良における待避所の位置と延長を理論的に決定するための方法を検討した。先の年次学術講演会での報告<sup>6)</sup>においては、まず、図-1の網掛け部分(d)において計画交通量を処理できるか否かを迅速に確認するために、シミュレーションの代替手段として狭隘区間と待避区間のそれぞれに対する評価式を構築した。さらに、狭隘区間が断続的に続くような道路延長全体に対する(f)の繰り返しを効率化するため、評価式による制約条件と地形的な制限を加味した拡幅パターンの組合せを拡幅コストの最小化問題として定式化し、遺伝的アルゴリズムを適用した。最適化した待避区間の配置を交通シミュレーションで検証したところ、計画交通量を問題なく処理できることが確認できた。しかしながら、当初の評価式は大型車のみを想定したものであり、小型車が混在する状況までは考慮することができなかった。また、車両の到着を一定間隔と仮定した限定的なモデルであった。

そこで本稿では、(d)に対応した評価式について、大型車・小型車の混在や車両到着の確率変動も考慮できるように改良し、より一般的な評価指標を構築することとした。最終的には、最適化手法と組合せることで、待避

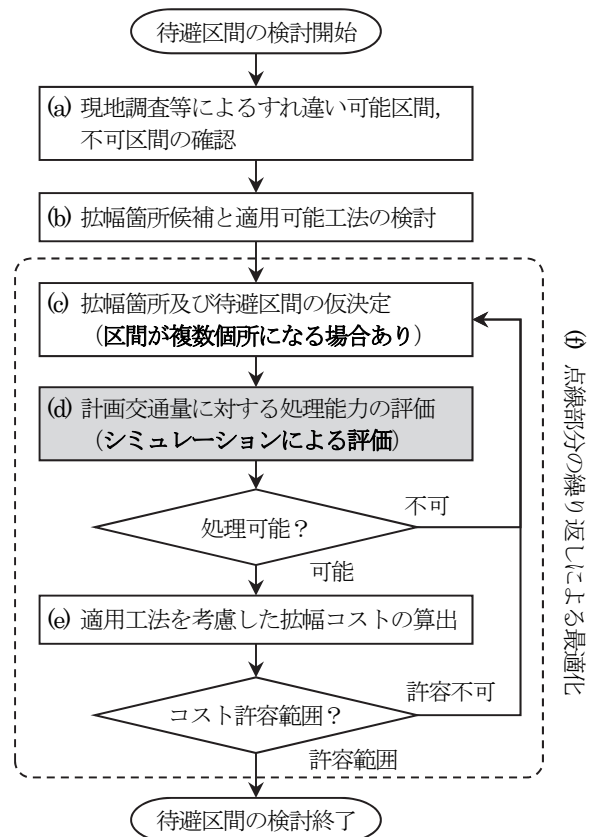


図-1 待避区間の最適化における検討フロー

区間の最適配置と迅速で効果的な整備計画のための手法確立を目指す。まずは繰り返し検討の内側にある各区間評価の負荷軽減と汎用化に焦点を当てた。なお、繰り返し検討後の拡幅計画に対しても、最後にあらためて交通シミュレーションによる検証は行うものの、拡幅パターンが多岐にわたるケースでは、評価式による区間評価の高速化の効果はより大きくなる。例えば、既存待避区間の前後50mまでを広げる組合せの総数は、5m単位で考えて $(50/5)^2 = 10^2$ 通りとなるが、同様の待避区間が3箇所あった場合、さらにその3乗 $(10^2)^3 = 10^6$ 通りと指数的に増えていくためである。

## 2. 区間評価方法の定式化

### (1) すれ違い可能な車種の組合せと区間制約

道路が持つ車両同士のすれ違いに関する制約(以下、区間制約)を、道路形態(直線/曲線)と道路幅員に応じて分類すると、表-1のように整理することができる。

図-1の(a)と(b)における検討の判断基準となるものである。ここで車両幅員は、「道路構造令の解説と運用」<sup>7)</sup>に準拠して、以下のとおりとした(カッコ内は曲線区間内の必要幅員)。

- ・ 小型車 (普通乗用車等) : 1.7m (1.9m)
- ・ 大型車 (ダンプカー, 観光バス等) : 2.5m (3.3m)

さらに, 停止や後退を伴うようなすれ違いの発生を極力除外するため, すれ違い時は最低限, 対向車との離隔を 0.5m, 路肩側の側方余裕を 0.25m 確保することですれ違いの可否を判断することとした. ただし, 見通しが悪く目視やミラーによって反対車両の確認が不可能な狭隘 (すれ違い不可) 区間に対しては, 効率的な車両運行を優先して, 出来る限り待避 (すれ違い可能) 区間に改良することを前提条件とした. つまり, 狭隘区間の両端においては, 原則ドライバーは反対方向の車両を確認できるものとする. また, 道路幅員が表-1の境界値に近い比較的狭い待避区間で, すれ違い時の速度低下が懸念される場合には, 区間評価で使用する平均速度の値を周辺よりも低く設定することによって対応する.

ここで, 区間制約は常に対面通行が可能な「無」の他に「低」「中」「高」を加えた4段階となるが, 区間制約が異なると考慮すべき小型車の交通量も変化する. 例えば, 大型車同士だけがすれ違いできない区間制約「低」においては, 対向車列内の小型車は進行方向の車両が狭隘区間に進入することを阻害しないので, その分の交通量は考慮する必要がない. 一方, 小型車同士でもすれ違いが不可となる区間制約「高」では, 小型車・大型車すべての交通量を考慮しなくてはならない. 大型車と小型車のすれ違いができない (小型車同士のみがすれ違いできる) 区間制約「中」に関しては, 考慮すべき小型車の交通量を一部軽減補正して扱うことができる. 以下の評価式の構成では, 補正前と補正後の2種類の小型車交通量を取り扱うので, 留意が必要である. 具体的な補正量は(5)で後述する.

(2) 車両の到着分布

車両交通の到着分布は, 一般的にアーラン分布に従うとされる<sup>7)</sup>が, より適用性を拡大するために以下の4種類の確率分布を想定する.

- ・ アーラン分布
- ・ 指数分布 (アーラン分布における位相 $k = 1$ )
- ・ 一定間隔 (アーラン分布における位相 $k \rightarrow \infty$ )
- ・ 正規分布

また, 図-2のように確率密度関数 $f(x)$ に加え, 1時間あたりの想定交通量 $N$ や到着間隔 (秒) の期待値 $IE = 3600/N$ ,  $f(x)$ の累積分布関数 $F(x)$ , またその逆関数 $F^{-1}(p)$ から算出したパーセント点を用いて, 車両の到着間隔に関する確率算定を行うこととする.

表-1 すれ違い可能な車種の組合せと区間制約

道路幅員 <sup>※1</sup>	車種の組合せ <sup>※2</sup>			区間制約
	大型車 同士	大型車と 小型車	小型車 同士	
6.0m以上 ----- 7.6m以上	○	○	○	無
5.2~6.0m ----- 6.2~7.6m	×	○	○	低
4.4~5.2m ----- 4.8~6.2m	×	×	○	中
4.4m未満 ----- 4.8m未満	×	×	×	高

※1 上段: 直線区間, 下段: 曲線区間

※2 ○: すれ違い可能, ×: すれ違い不可

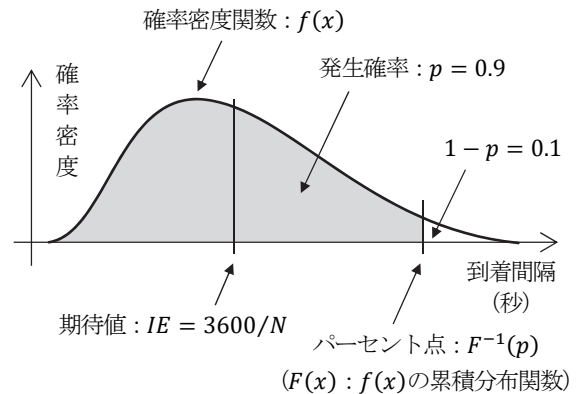
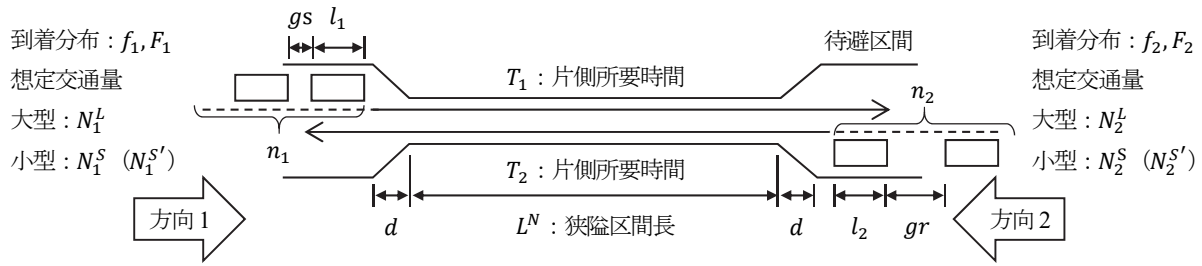


図-2 車両到着間隔に関する確率算定イメージ

(3) 狭隘区間の評価式 (待ち時間)

狭隘区間を評価する指標として, 旅行速度や旅行時間, 待ち時間が考えられる. 対象区間における旅行速度や旅行時間は走行時の平均速度を一定とすれば待ち時間から算出可能であり, 値の大きさが日常的な感覚として想像しやすく許容範囲も設定しやすいことから, 本稿では待ち時間を評価指標として扱うこととした. また, 到着分布の確率変動から待ち時間も確率的に変化するため, 平均値と最大値の2種類の値を求めることとした. 図-3には, 狭隘区間の主なパラメータを整理しておく. ここで, 方向別の1台あたりの片側所要時間 $T_i (i = 1, 2)$ は, 式(1)で算出することができる (加速度を除く). また, 平均車両全長 $l_i$ については, 式(2)のように大型車の車両全長 $l^L$ と小型車の車両全長 $l^S$ を想定交通量で加重平均した値を用いる.



- |                      |                          |            |                                    |
|----------------------|--------------------------|------------|------------------------------------|
| $L^N$                | : 狭隘区間長 (m)              | $f_1, f_2$ | : 到着確率密度関数                         |
| $T_1, T_2$           | : 片側所要時間 (sec)           | $F_1, F_2$ | : 到着累積分布関数                         |
| $N_1^L, N_2^L$       | : 大型車想定交通量 (台/h)         | $l_1, l_2$ | : 平均車両全長 (m)                       |
| $N_1^S, N_2^S$       | : 小型車想定交通量 (台/h)         | $gs$       | : 停止時車両間隔 (m) (例: 2m)              |
| $N_1^{S'}, N_2^{S'}$ | : 区間制約に応じた小型車補正交通量 (台/h) | $gr$       | : 走行時車両間隔 (m) (例: 15m)             |
| $n_1$                | : 方向1滞留台数 (台)            | $d$        | : 車線変更区間距離 (m) (例: 5m)             |
| $n_2$                | : 方向2通過台数 (台)            | $v$        | : 平均速度 (m/sec) (例: 42m/sec=15km/h) |

図-3 狭隘区間の関連パラメータ

$$T_i = \frac{L^N + d \times 2 + l_i}{v} \quad (1)$$

$$l_i = \frac{N_i^L \times l^L + N_i^S \times l^S}{N_i^L + N_i^S} \quad (2)$$

まず、方向1から狭隘区間に到着した先頭車両が、方向2から来る対向車の通過を待つ時間を考える。方向1の車両が狭隘区間に進入するためには、方向2から来る対向車の狭隘区間への到着間隔が、方向2の片側所要時間 $T_2$ を超えなければならない。そこで、対向車の到着間隔 $IE_2 = 3600/(N_2^L + N_2^{S'})$ を期待値とした累積分布関数 $F_2$ から、到着間隔が $T_2$ 以下となる確率 $p_2 = F_2(T_2)$ を求める。ここで、対向車の小型車交通量には、区間制約に応じた補正交通量 $N_2^{S'}$ を用いることに注意する。このとき、対向車 $n_2$ 台が通過して $n_2 + 1$ 台目の到着間隔が $T_2$ を超える場合の確率は $p_2^{n_2} \times (1 - p_2)$ となる。また、その際の所要時間は $n_2 \times \min(T_2, IE_2)$ であるので、方向1の先頭車両の待ち時間は式(3)で表すことができる。

$$W_1^H = \sum_{n_2=0}^{\infty} p_2^{n_2} \times (1 - p_2) \times n_2 \times \min(T_2, IE_2) \\ = \frac{p_2}{1 - p_2} \times \min(T_2, IE_2) \quad (3)$$

次に、この $W_1^H$ を用いて平均待ち時間を算出する。 $W_1^H$ の間に方向1の車両が $n_1$ 台溜まるとした場合、平均到着間隔は $W_1^H/n_1$ であり、各車両の待ち時間は後から到着する車両であるほど $W_1^H/n_1$ ずつ少なくなると考えられるので、待ち時間の累計は $W_1^H/n_1 \times n_1 \times$

$(n_1 + 1)/2$ となる。また、先頭車両が動き出してから、2台目の車両が動き出すまでのタイムラグは、停止時間隔が走行時間隔に広がるまでの時間であるため、その累計も考慮して足し合わせると、待ち時間の合計は $W_1^T(n_1) = W_1^H/n_1 \times n_1 \times (n_1 + 1)/2 + (gr - gs)/v \times (n_1 - 1) \times n_1/2$ となる。一方、次に方向2の車両が狭隘区間に進入するまでの方向1の到着台数は、対向車の計算時と同様に、 $IE_1 = 3600/(N_1^L + N_1^S)$ を期待値とした累積分布関数 $F_1$ 、到着間隔が $T_1$ 以下となる確率 $p_1 = F_1(T_1)$ から、 $C_1^P = p_1/(1 - p_1)$ と表すことができる。ここで、 $IE_1$ の計算に用いる小型車交通量は補正前の交通量 $N_1^S$ である。既に、 $n_1$ 台が到着していることを考慮すれば、到着台数は $n_1$ 以上となる $C_1^P$ の倍数になる。なお、先頭車両が動き出してから最後尾車両が動き出すまでのタイムラグも考慮して、その間に到着する追加台数 $\Delta n_1 = (gr - gs)/v \times (n_1 - 1)/IE_1$ を加味する。また、区間制約に応じて軽減した小型車 $\Delta C_1^P = (N_1^S - N_1^{S'})/N_1^{S'}$ 台は、方向2が狭隘区間への進入を開始しても通行可能である。以上から、平均化における分母となる総対象台数 $C_1^T(n_1)$ と平均待ち時間 $W_1^A(n_1)$ は、式(4)と式(5)で表すことができる。ここでceilingは、少数以下を整数に切り上げる関数である。

$$C_1^T(n_1) = j_1 \times C_1^P + \Delta C_1^P \\ s.t. j_1 = \text{ceiling}((n_1 + \Delta n_1)/C_1^P) \quad (4)$$

$$W_1^A(n_1) = W_1^T(n_1)/C_1^T(n_1) \quad (5)$$

一方、 $n_1$ 台が滞留する確率は、到着分布 $f_1$ を $n_1$ 台分足し合わせた量み込み分布 $g_{1,n_1}$ の累積分布関数 $G_{1,n_1}$ を用いて、 $p_1^A(n_1) = G_{1,n_1}(W_1^H) - G_{1,n_1+1}(W_1^H)$ と考えることができる。ここで、 $n_1 + 1$ 台の合計到着時間が $W_1^H$

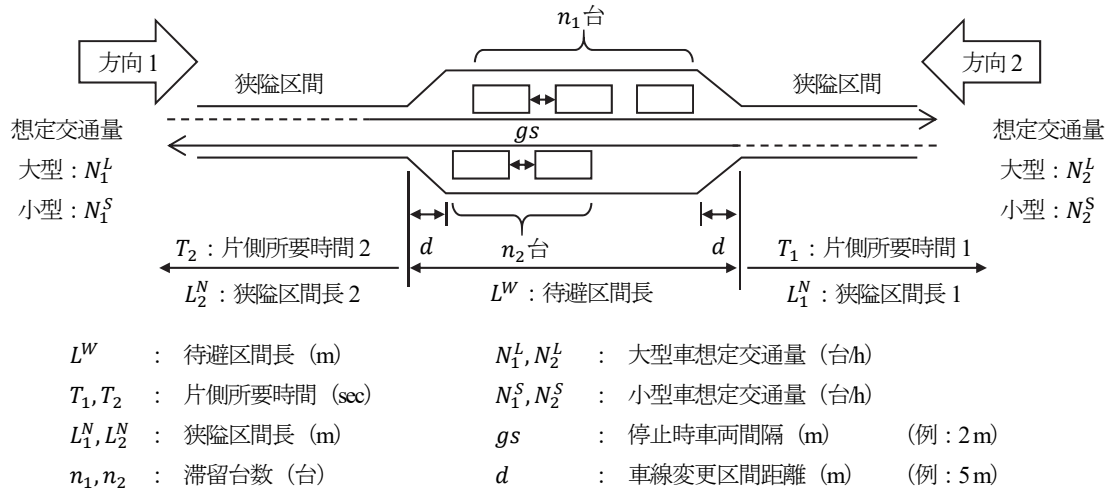


図4 待避区間の関連パラメータ

以下となれば、そのうちの $n_1$ 台の合計到着時間も $W_1^H$ 以下であるので、 $p_1^A(n_1)$ は0以上である。また、到着間隔は車両全長分の移動時間である $(l_1 + gr)/v$ よりも小さくなることはないので、 $n_1$ の最大値は $C_1^X = W_1^H \times v / (l_1 + gr)$ となる。よって、全体の平均待ち時間 $W_1^A$ は、 $p_1^A(n_1)$ を正規化した上で $W_1^A(n_1)$ との積の和を取った式(6)で与えられる。

$$W_1^A = \sum_{n_1=1}^{C_1^X} p_1^A(n_1) \times W_1^A(n_1) / \sum_{n_1=1}^{C_1^X} p_1^A(n_1) \quad (6)$$

続いて、最大待ち時間を考える。対向車が $T_2$ 以上の到着間隔を空けずに連続 $k_2$ 台到着する確率は、最初の1台を除いて $(1 - p_2)^{k_2-1}$ となる。この確率が $T_2$ 以上の間隔を空けて到着する確率 $p_2$ 以下になったときの $k_2$ が、対向車の最大通過台数と考えられる。よって、 $(1 - p_2)^{k_2-1} = p_2$ を $k_2$ で解き、 $k_2 = \log p_2 / \log(1 - p_2) + 1$ を得る。方向1の待ち時間は $k_2$ 台の車列の合計到着間隔に対応するが、その合計到着間隔が $T_2$ 以下になる確率が0でない場合には、観測時間が長くなればなるほど最大待ち時間も無限に長くなる。そこで、方向2の到着分布 $f_2$ を $k_2$ 台分足し合わせた畳み込み分布 $g_{2,k_2}$ を考え、さらに観測時間を交通量のピーク時間 $T^P$ に限定して、その時間内での最大値分布を考える。 $k_2$ 台の車列が $T^P$ 時間内に到着する回数は $m_2 = (N_2^L + N_2^S) / k_2 \times T^P / 3600$ であり、 $g_{2,k_2}$ の累積分布関数を $G_{2,k_2}$ とすると、 $m_2$ 回試行時の最大値分布の最頻値は、 $m_2$ が大きくなると特性最大値である $G_{2,k_2}^{-1}(1 - 1/m_2)$ に収斂する<sup>8)</sup>。最大値分布の特性最大値は平均値と異なるが、本稿では評価指標としての実用性を重視する観点から、特性最大値を最大待ち時間の評価値として代用する。従って、最大待ち時間 $W_1^M$ は式(7)にて算出することができる。

$$W_1^M = \min(G_{2,k_2}^{-1}(1 - 1/m_2), k_2 \times T_2) \quad (7)$$

方向2に対しても、1と2の添え字を反転して同様に計算できる。よって、平均待ち時間 $W^A$ については交通量に応じた加重平均(式(8))を、最大待ち時間 $W^M$ についてはどちらか大きい方の値(式(9))を採用することで、狭隘区間に対する評価式を定義する。

$$W^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times W_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times W_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (8)$$

$$W^M = \max(W_1^M, W_2^M) \quad (9)$$

#### (4) 待避区間の評価式(待避区間長)

狭隘区間では待ち時間を評価指標としたが、待避区間に関しては、待ち時間の中に滞留する車両の台数と必要な待避区間長が問題となる。そこで、はじめに平均的に必要な待避区間長を算出する方法について考える。図4には、待避区間の関連パラメータを掲載する。まず、(3)と同様に、 $W_1^H$ の間に方向1の車両が $n_1$ 台溜まった場合を考える。各車両から見た前方の待ち台数は、後から到着する車両ほど増えていくことから、累積的に加算される。また、 $n_1$ 台の最後尾車両が動き出すまでのタイムラグの間に到着する追加台数は $\Delta n_1$ であったので、 $n_1$ 台滞留時の平均待ち台数 $C_1^A(n_1)$ と平均必要待避区間長 $L_1^A(n_1)$ は、式(10)及び式(11)にて算出することができる。

$$C_1^A(n_1) = \frac{(n_1 + \Delta n_1) \times (n_1 + \Delta n_1 + 1)}{2 \times C_1^T(n_1)} \quad (10)$$

$$L_1^A(n_1) = l_1 \times C_1^A(n_1) + gs \times (C_1^A(n_1) - 1) \quad (11)$$

以上から、平均待ち時間と同様、 $n_1$ 台が滞留する確率と掛け合わせて和を取ることで、全体の平均待ち台数

$C_1^A$ と平均必要待避区間長 $L_1^A$ を, 式(12)及び式(13)で定義する.

$$C_1^A = \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \times C_1^A(n_1) / \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \quad (12)$$

$$L_1^A = \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \times L_1^A(n_1) / \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \quad (13)$$

続いて, 最大待ち台数であるが, まずは最大待ち時間の間に方向1に到着する台数 $k_1$ を算出する. 対向車の通過時間 $W_1^M$ は最大値分布を用いて算定したが, 進行方向に関してはより詰まって到着する可能性を考慮して, 最小値分布を扱うこととする. 最大値分布と同様に, 方向1の到着分布 $f_1$ を $k_1$ 台分足し合わせた畳み込み分布 $g_{1,k_1}$ を考え, さらに観測時間を交通量のピーク時間 $T^P$ に限定してその時間内での最小値分布を考える.  $k_1$ 台の車列が $T^P$ 時間内に到着する回数は $m_1 = (N_1^L + N_1^S)/k_1 \times T^P/3600$ であり,  $g_{1,k_1}$ の累積分布関数を $G_{1,k_1}$ とすると,  $m_1$ 回試行時の最小値分布の最頻値は, 特性最小値である $G_{1,k_1}^{-1}(1/m_1)$ に収束する<sup>8)</sup>. ただし,  $k_1$ はこの時点で未定台数であるが,  $G_{1,k_1}^{-1}(1/m_1)$ は $k_1$ に対して単調増加であるため, 最大先頭待ち台数 $C_1^W$ は式(14)で決定することが可能である.

$$C_1^W = \max(k_1) \text{ s.t. } G_{1,k_1}^{-1}(1/m_1) \leq W_1^M \quad (14)$$

さらに, 最後の車両が動き出すまでのタイムラグを考慮して,  $\Delta C_1^W = (C_1^W - 1) \times (gr - gs)/(v \times IE_1)$ を加えれば, 最大待ち台数 $C_1^M$ と最大必要待避区間長 $L_1^M$ を, 式(15)及び式(16)で算出することができる.

$$C_1^M = C_1^W + \Delta C_1^W \quad (15)$$

$$L_1^M = l_1 \times C_1^M + gs \times (C_1^M - 1) \quad (16)$$

最後に, 方向2に対しても1と2の添え字を反転して同様に計算し, 平均待ち台数 $C^A$ と平均待避区間長 $L^A$ については交通量に応じた加重平均(式(17), (18)), 最大待ち台数 $C^M$ と最大待避区間長 $L^M$ についてはどちらか大きい方の値を採用(式(19), (20))することで, 待避区間の評価式を定義する.

$$C^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times C_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times C_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (17)$$

$$L^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times L_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times L_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (18)$$

表-2 考慮すべき小型車交通量

区間制約	考慮すべき小型車交通量
「低」 大型車同士のみ すれ違い不可	$N_1^{S'} = 0$
「中」 小型車同士のみ すれ違い可	$N_1^{S'} = N_1^S \times \min\left(1, N_1^S \times \frac{T_1}{3600} \times N_2^L \times \frac{T_2}{3600}\right)$
「高」 小型車同士も すれ違い不可	$N_1^{S'} = N_1^S$

$$C^M = \max(C_1^M, C_2^M) \quad (19)$$

$$L^M = \max(L_1^M, L_2^M) \quad (20)$$

### (5) 区間制約に応じて考慮すべき小型車交通量

(1)で触れたとおり, 区間制約に応じて考慮すべき小型車の交通量は変化する. 特に, 小型車同士のみがすれ違いできる区間制約「中」については, 大型車の交通量によっても影響が異なる. 方向1から来る小型車が方向2から来る大型車と出会う確率は, 1を上限にそれぞれが狭隘区間を通り抜けるのに要する時間に到着する台数を掛け合わせた値, つまり,  $\min(1, N_1^S \times T_1/3600 \times N_2^L \times T_2/3600)$ で与えられる. よって, この確率に小型車の交通量を掛けた値が, 区間制約が「中」の場合に考慮すべき小型車交通量となる. 表-2に区間制約に対応した小型車の補正交通量を整理する.

## 3. 交通シミュレーションとの比較

3種類の区間制約に応じて構成した狭隘区間と待避区間の評価式を検証するため, 2kmの直線道路の中央付近に狭隘区間を1カ所だけ設けた簡易モデルを用意して, 交通シミュレーションとの結果比較を行った. シミュレーションシステムには, すれ違いロジックの組込みが比較的容易であり, 文献7)における標準検証を実施済みであるREST<sup>23,9)</sup>を用いることとした. すれ違いロジックの基本フローを図-5に, 計算に用いたパラメータを表-3に示す. ここで, 想定交通量は大型車と小型車の合計を片側60台/hとして, 大型車の混在数を10台刻みで変動させた. ここで, 建設工事も想定して60台すべてが大型車であるケースも想定した. また, 狭隘区間長については, 200mから600mの間を50m単位で変化させた.

到着分布には指数分布を想定し、畳み込み分布には、滞留台数もしくは到着台数を位相とするアーラン分布を用いて計算した。なお、交通シミュレーションでは加速度を考慮していることから、評価式内での所要時間の算定においても、加速度を考慮した補正を行った。シミュレーション回数は、車両の発生間隔を設定する際に利用する疑似乱数系列を各ケース 100 回ずつ変えて実施し、待ち時間と必要待避区間長の平均値と各回の最大値の平均値を集計した。また、交通量のピーク時間を 1 時間とするため、1 回のシミュレーションで計算する走行時間を 1 時間 15 分として、そのうち始めの 15 分間は非定常状態と考えて集計から除外した。

(1) 狭隘区間に関する結果比較

図-6～図-11 は、狭隘区間の評価指標である待ち時間について本稿による評価式とシミュレーション結果を比較したものである。なお、図中の平均絶対誤差は式(21)及び式(22)で算出した値であり、このうち $W_{sim}^A$ と $W_{sim}^M$ は各ケース 100 回分のシミュレーション結果の平均値と最大値を集計したものである。

平均待ち時間の平均絶対誤差

$$= \sum_{\text{対象ケース}} |W^A - W_{sim}^A| / \text{対象ケース数} \quad (21)$$

最大待ち時間の平均絶対誤差

$$= \sum_{\text{対象ケース}} |W^M - W_{sim}^M| / \text{対象ケース数} \quad (22)$$

平均待ち時間を比較した図-6～図-8 のうち、区間制約が「低」の大型車同士のみがすれ違いできないケースについては、大型車の数が多くなるほど待ち時間が増えており、評価式とシミュレーションの結果はほぼ同じ傾向を示している。両者の平均絶対誤差は 3.6 秒であり、シミュレーションの結果を十分に追従できている。区間制約が「中」のケースでは、大型車の数が少ない場合において若干かい離があるものの、平均絶対誤差は 7.5 秒とおおよそ合致している。区間制約が「高」のケースは大型車数に依らず同じ結果となるが、評価式の結果もその上に重なっており、一致した傾向を示している（平均絶対誤差は 3.2 秒）。なお、全ケースでの平均絶対誤差も 4.8 秒であり、非常に小さな値に収まっている。

一方、最大待ち時間を比較した図-9～図-11 では、特に狭隘区間長が長いグラフ右側のケースにおいて、評価式がシミュレーション結果よりも大きな値を示している。多少過大評価にはなるものの、安全側での判定が可能であると考えられる。区間制約が「中」では、評価式がシ

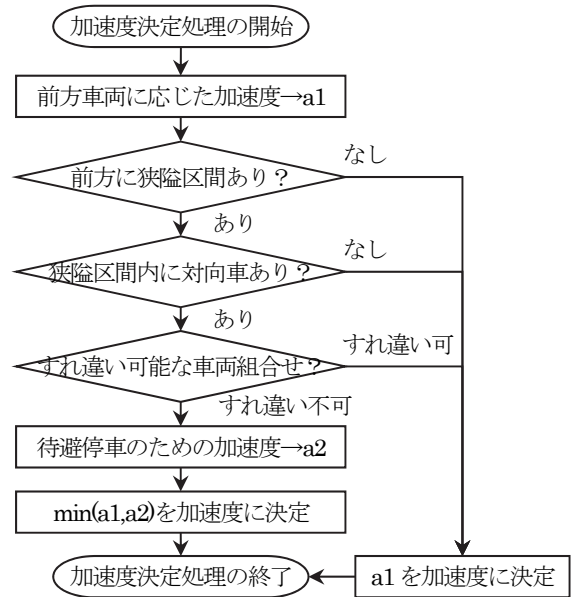


図-5 すれ違いロジックの基本フロー

表-3 シミュレーションに用いたパラメーター一覧

パラメータ名	設定値
$l^L$	大型車車両全長 8.0 m
$l^S$	小型車車両全長 5.0 m
$N_i^L$	大型車想定交通量 0~60 台/h
$N_i^S$	小型車想定交通量 60 - $N_i^L$ 台/h
$v$	平均速度 15.0 km/h
—	発進時加速度 3.0 km/h/s
$gs$	停止時車両間隔 2.0 m
$gr$	走行時車両間隔 15.0 m
$L^N$	狭隘区間長 200.0~600.0 m
$d$	車線変更区間距離 5.0 m

ミュレーションの結果を下回っているケースも見受けられるが、区間制約「低」～「高」全体での平均絶対誤差は 147.7 秒 (2 分半程度) であり、最大待ち時間のレベルをおおよそ把握するには十分な結果といえる。ただし、最大待ち時間は平均待ち時間の 7~8 倍の大きさがあり、発生頻度の少ない最大待ち時間に基づいた設計は過剰設計となる可能性があることから、通常は平均値を評価基準とし、最大値は参考値とすることが現実的であると考えられる。実際、シミュレーション結果を集計したところ、最大待ち時間は平均待ち時間に標準偏差の 3.3 倍を加えたあたりに位置しており、発生頻度はそれほど高くないことが予想できる。

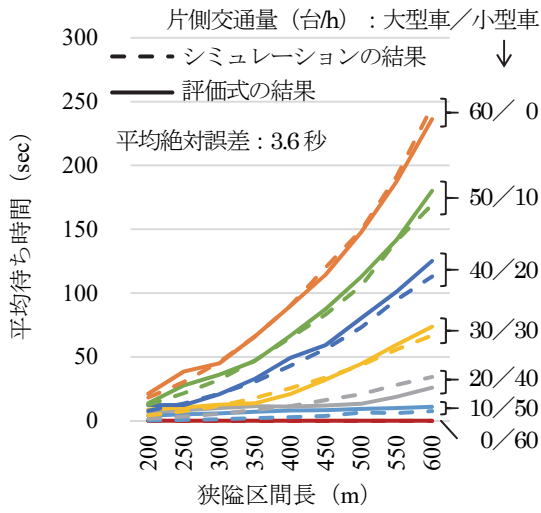


図-6 狭隘区間の平均待ち時間：区間制約「低」

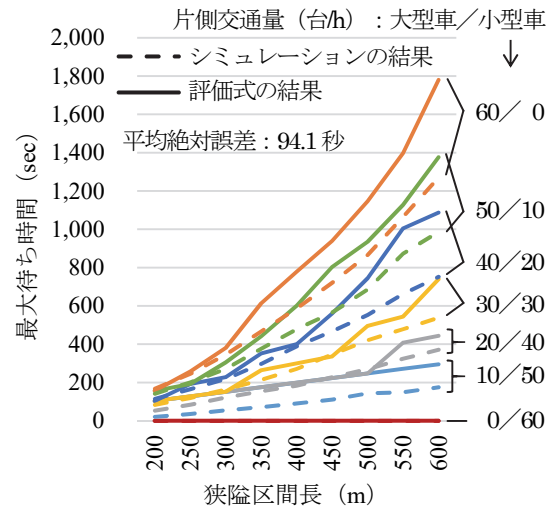


図-9 狭隘区間の最大待ち時間：区間制約「低」

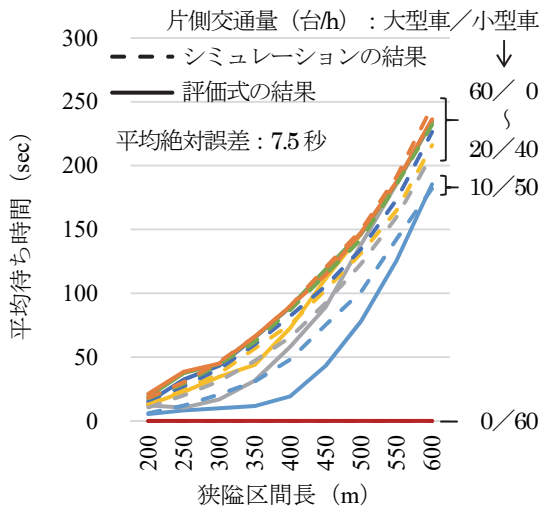


図-7 狭隘区間の平均待ち時間：区間制約「中」

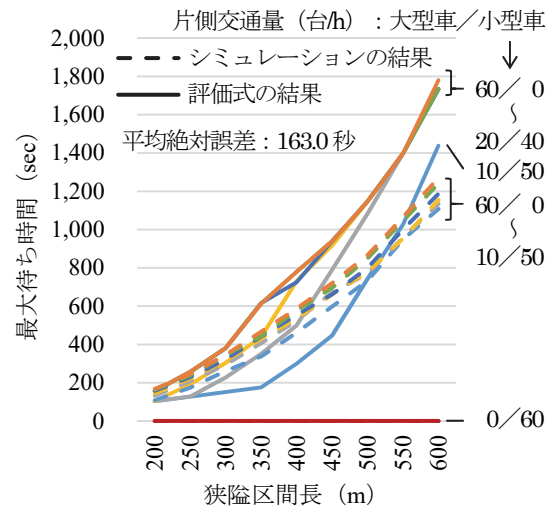


図-10 狭隘区間の最大待ち時間：区間制約「中」

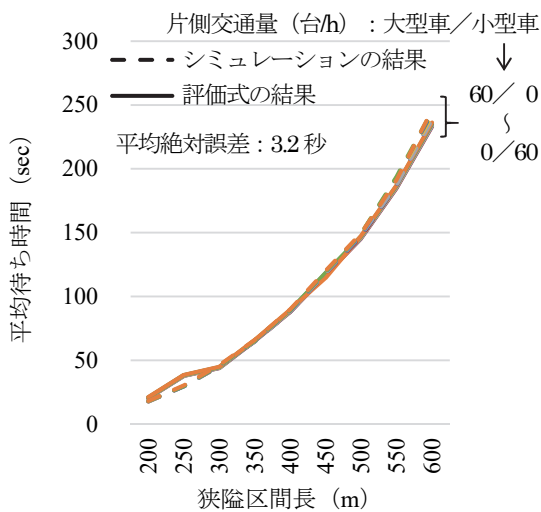


図-8 狭隘区間の平均待ち時間：区間制約「高」

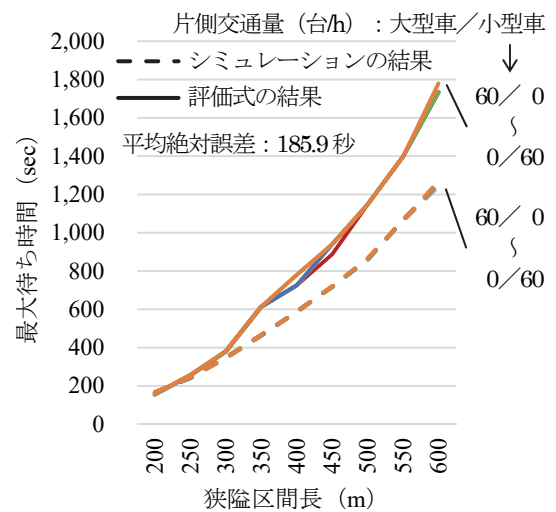


図-11 狭隘区間の最大待ち時間：区間制約「高」



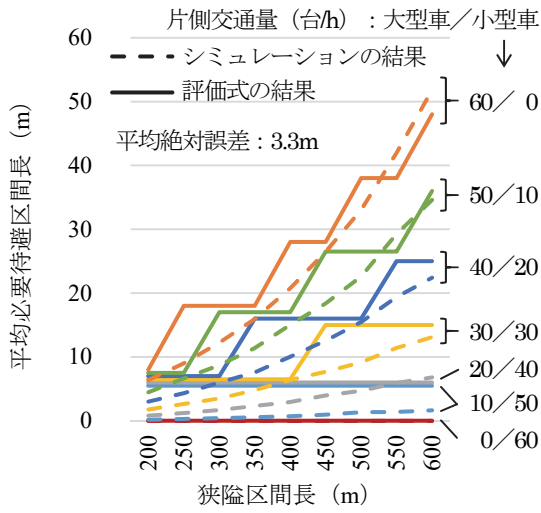


図-12 待避区間の平均必要待避区間長 : 区間制約「低」

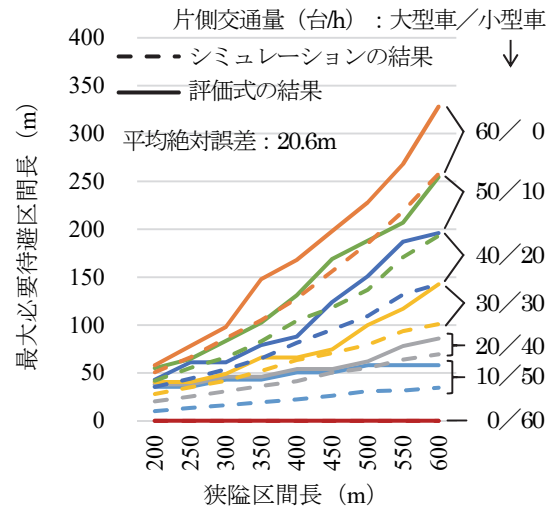


図-15 待避区間の最大必要待避区間長 : 区間制約「低」

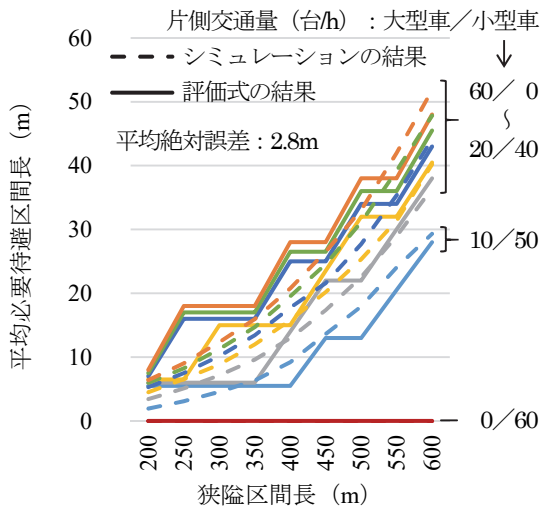


図-13 待避区間の平均必要待避区間長 : 区間制約「中」

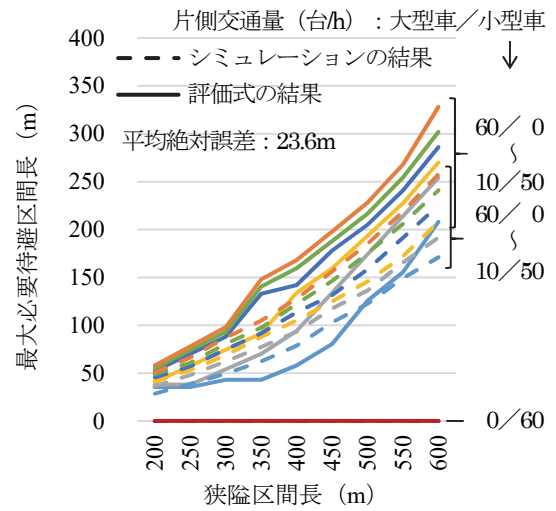


図-16 待避区間の最大必要待避区間長 : 区間制約「中」

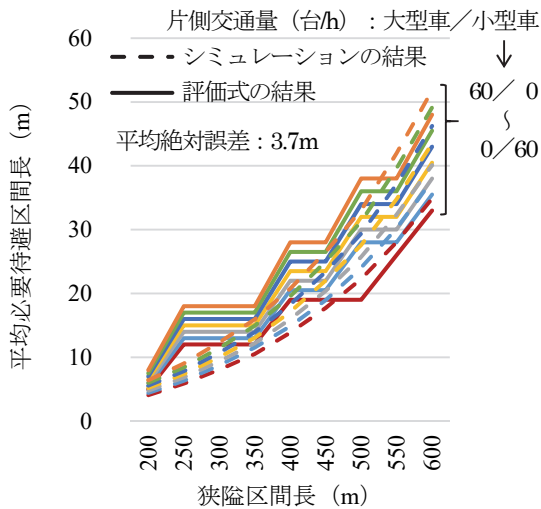


図-14 待避区間の平均必要待避区間長 : 区間制約「高」

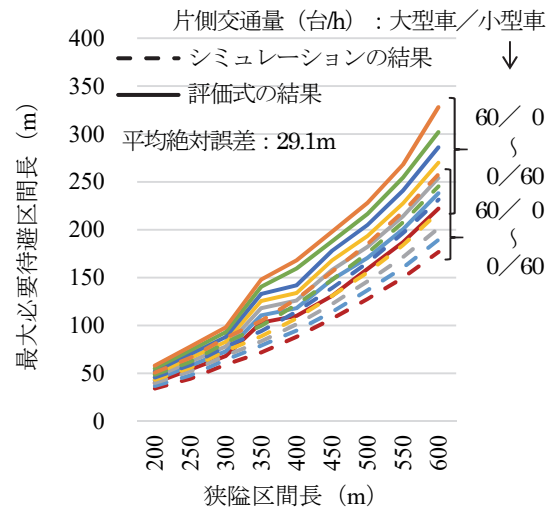


図-17 待避区間の最大必要待避区間長 : 区間制約「高」

(2) 待避区間に関する結果比較

図-12~図-17は、評価式とシミュレーションの必要待避区間長の結果を比較したものである。図中の平均絶対誤差は、式(23)及び式(24)により算出した。また、 $L_{sim}^A$ と $L_{sim}^M$ については、待ち時間と同様に計算した。

$$\begin{aligned} & \text{平均必要待避区間長の平均絶対誤差} \\ & = \sum_{\text{対象ケース}} |L^A - L_{sim}^A| / \text{対象ケース数} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \text{最大必要待避区間長の平均絶対誤差} \\ & = \sum_{\text{対象ケース}} |L^M - L_{sim}^M| / \text{対象ケース数} \end{aligned} \quad (24)$$

評価式における必要待避区間長は、離散値である待ち台数に車両全長を掛けて算出していることから、階段状のグラフとなっている。特に、必要区間長の値が小さい平均値グラフ(図-12~図-14)の方が視覚的にその傾向は強いが、平均絶対誤差は3.3m(区間制約「低」で3.3m, 区間制約「中」で2.8m, 区間制約「高」で3.7m)と車両全長一台分以下の値になっており、かなりの精度で整合している。

図-15~図-17の最大必要待避区間長については、最大待ち時間と同様、総じて評価式の方がシミュレーション結果よりも大きな値を示している。とはいえ、全体としての平均絶対誤差は24.4m, 大型車3台分程度となっており、最大値の水準を掴む上では十分に実用的なレベルといえよう。

(3) 計算時間の比較

今回実施した狭隘区間1カ所のモデルについて、計算時間を比較した。交通シミュレーションによる1ケース(1時間15分間分×疑似乱数100系列)あたりの計算時間は約12分であったが、評価式による計算時間は100ミリ秒未満であった(計算環境: Intel Core i7 2.6GHz, メモリ16GB)。評価式の方が、同じ時間で交通シミュレーションの7千倍以上の試行を実施できる計算になる。狭隘区間が複数個所になれば評価したいケース数は飛躍的に増えていくため、全体の検討時間の短縮という観点からも評価式を用いるメリットはさらに大きくなる。

(4) 確率変動の有無による平均待ち時間の違い

最後に、車両の到着間隔に関して確率変動を考慮するか否かでシミュレーション結果がどのように違うかを確認しておく。表-4は、区間制約「低」における結果の比較である。シミュレーションの実施条件は、3章のはじめに記載した方法と同じに設定した。上段が確率変動あり

表-4 確率変動の有無による平均待ち時間の比較  
(区間制約「低」)

大型車台数	狭隘区間長 (m) に対する平均待ち時間 (秒)				
	200	300	400	500	600
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.4	1.3	2.9	6.5	7.7
	0.6	2.2	3.5	6.4	8.8
20	1.8	5.6	11.5	21.0	34.4
	2.8	10.1	15.3	35.7	44.2
30	4.4	11.8	25.6	43.6	67.0
	6.9	26.1	37.0	99.6	113.4
40	7.9	21.4	43.1	73.2	113.1
	12.9	58.4	74.3	224.6	238.2
50	12.6	32.3	65.1	105.8	169.4
	20.3	131.0	143.8	572.7	578.7
60	18.3	46.1	90.2	149.5	246.3
	27.6	985.7	985.3	983.2	984.9

上段: 確率変動あり, 下段: 確率変動なし

網掛け: 通過所要時間が平均到着間隔を超えるケース

り、下段が変動なしの平均待ち時間であるが、大型車の混在台数が多いほど、または対象の狭隘区間長が長いほど待ち時間の差が大きくなっていることがわかる。特に、通過所要時間が平均到着間隔を超える網掛けのケースにおいては、その差が顕著である。確率変動を考慮しない場合には車両の到着間隔は一定になるが、網掛けのケースでは狭隘区間を通過中の車両が通過し終える前に後続車両が到着してしまい、反対方向の車両がいつまでも狭隘区間に進入できないという非常に極端な現象が発生してしまうためである。実際には到着間隔が長い間一定であることは稀であり、対向車が進入できるタイミングは交通量に応じて少なからず存在するはずである。より現実に近い現象を考慮するためには、車両の到着分布において確率変動を考慮することは重要といえる。

4. まとめ

本稿では、1.5車線の道路整備における待避区間の最適配置を最終目標として、まずは交通シミュレーションの繰り返し検証による試行錯誤を軽減するために、狭隘区間と待避区間のそれぞれに関する評価指標の簡便な定式化を試みた。定式化においては、先の文献6)における試行では考慮できていなかった、大型車・小型車の混在や車両の到着分布における確率的変動も扱うことで、より一般的な評価式として構成した。さらに、定式化した評価指標と交通シミュレーションの結果を比較したと

ころ, 平均絶対誤差が平均待ち時間で 4.8 秒, 平均必要待避区間長で 3.3m と多くのケースで合致した結果となり, その妥当性を確認することができた。

今後は, 建設工事での利用も多い信号制御や誘導員による台数制御にも対応した評価式の拡張を検討するとともに, 遺伝的アルゴリズムをはじめとする最適化手法と組み合わせることで, 狭隘区間が漸続的に続く道路延長全体に対する待避区間の最適配置を可能にして, 迅速で効果的な整備計画の策定を実現する手法として発展させていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用, pp.32-103, 2004.
- 2) 交通工学研究会：交通シミュレーション適用のススメ, pp.30-175, 丸善出版, 2004.
- 3) 交通工学研究会：交通シミュレーションクリアリングハウス, <http://www.jste.or.jp/sim/index.html> (参照 2017-2-1)
- 4) 山内康弘, 小路昭文, 鈴木啓之：ローカルルール (1.5 車線の道路) の整備手法の検討, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 2005.
- 5) 島根県：1.5 車線の改良調査・設計マニュアル 参考資料, pp.20-45, 2005.
- 6) 前田宗宏, 野呂好幸, 天野和洋, 青柳滋彦：1.5 車線の道路の拡幅計画における最適化手法としての遺伝的アルゴリズムの適用, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013.
- 7) 交通工学研究会：交通流シミュレーションモデルの標準検証プロセス～Verification マニュアル (案)～, p.5, 2002.
- 8) E. J. Gumbel, 河田竜夫, 岩井重久, 加瀬滋男 監訳：極値統計学—極値の理論とその工学的応用—, 生産技術センター新社, pp.80-166, 1978.
- 9) 鹿島建設：交通シミュレーションシステム「REST」, [http://www.kajima.co.jp/tech/c\\_urban\\_infra/analysis/index.html#body\\_02](http://www.kajima.co.jp/tech/c_urban_infra/analysis/index.html#body_02) (参照 2017-2-1)

(2016. 10. 17 受付)

## A STUDY OF AN EVALUATION METHOD FOR PASSING AND NO PASSING SECTIONS IN ROAD IMPROVEMENT FOR 1.5 LANES

Kazuhiro AMANO, Munehiro MAEDA, Yasuhiro NAKAMURA,  
Yuichi SEI and Akihiko OHSUGA

In hilly and mountainous areas, it is available to construct roads of 1.5 lanes which are flexible combinations of single-lane, 2-lane and local road improvements in recent years. In construction works, 1.5 lanes are effective for temporary traffic of large-size vehicles. However, if traffic is heavy, it is complicated to decide appropriate passing places with using traffic simulations repeatedly. Therefore, we developed a new evaluation method for passing and no passing sections, and compared it to the results of a traffic simulator. The mean absolute errors of both results are 4.8 seconds for average waiting time and 3.3m for average passing space, which are very small values. To combine the method with optimization techniques, it will be possible to design for optimum arrangement of passing sections and effective maintenance plans.