

(65) 1.5 車線の道路における 確率的な車両到着を考慮した待避区間の 最適配置に関する検討

天野 和洋¹・前田 宗宏²・中村 泰広³・清 雄一⁴・大須賀 昭彦⁵

¹ 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

² 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

³ 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

⁴ 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

⁵ 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

近年、道路整備において局部改良等を弾力的に組合せた 1.5 車線の道路の適用が可能になった。一時的な大型車の増加を伴う建設工事においても、計画交通量を既存道路で処理できない場合には 1.5 車線の道路が有効となるが、待避区間を適切かつ安価に配置するためには、交通シミュレーション等による試行錯誤が必要であった。筆者らは、シミュレーションによる評価の代替手段として、先に確率的な車両到着を考慮できる高速な評価手法を構築した。本論文では、待避区間の配置計画を拡幅コストの最小化問題と考え、構築した手法と最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズムを組合せて最適配置を検討した。その結果、試行錯誤による従来方法に比べ、作業時間を 8 時間から 4 分に大幅短縮した上、拡幅コスト及び平均待ち時間ともに削減する有効な解を得た。

Key Words: road improvement for 1.5 lanes, passing and no passing sections, traffic simulation, optimization methods, genetic algorithm

1. はじめに

近年、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になった。トンネルやダムなどの山間部における建設工事においては、工事のための資材搬入や土砂搬出に伴って、狭隘な道路に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が、工事期間が限定されていて恒常的な交通量の増加ではないことから、2 車線改良では過剰投資となる場合が多く、1.5 車線の道路の考え方を適用することが有効となる。

1.5 車線の道路の整備にあたっては、各自治体がガイドライン等による整備基準を策定しており、地域の実情に合った設計を行っているが、交通量の多い区間においては、交通シミュレーション²⁾等を併用して待避区間の検討を行うことになる。図-1 に、待避区間の最適配置を検討する際の従来のフローを示す。はじめに、現地調査の結果等から必要と思われる拡幅箇所と待避区間を仮決定した上で、シミュレーションを用いて計画交通量に対する処理能力を評価する。もし最初に設定した待避区間で計画交通量を処理できない場合には、点線範囲 (f) における拡幅箇所の見直しと交通シミュレーションによる評価を繰り返すことになる。必要な待避区間が複数になる場合もあるため、その拡幅パターンには際限がなく、労力や時間を要する煩雑な作業となっていた。

そこで筆者らは文献3)において、まず図-1の網掛け部分(d)に対応した計画交通量を処理できるか否かを迅速に確認するための手段として、狭隘区間と待避区間のそれぞれを高速に計算できる評価手法を構築した。評価手法は、狭隘区間に対して待ち時間を算出する評価式と、待避区間に対して隣接狭隘区間での待ち時間の間に到着する車両台数に必要な区間長を計算する評価式から構成される。さらに、大型車と小型車の混在や、確率的な車両到着も考慮できる一般的な手法として整備した。単一の狭隘区間について交通シミュレーションとの比較を行ったところ、両者の平均絶対誤差は非常に小さく、十分に交通シミュレーションを代替できることが確認できた。

本論文では、これをさらに進め、狭隘区間が断続的に続く道路延長全体に対する(f)の繰り返しを効率化するため、評価手法に基づく制約条件と地形的な制限を加味した拡張パターンの組合せを拡張コストの最小化問題として考えた上で、最適手法の一つである遺伝的アルゴリズム(以下、GA)^{4,5,6)}を適用し、その有効性を確認した。遺伝子のモデル化に際しては、工事に必要な設備や材料の設置場所を確保するため、既存の待避区間からの連続的な拡張を表現できる構造とした。なお、文献7)においても、大型車のみを対象に、かつ車両到着を等間隔に仮定した限定的な評価手法を用いて待避区間の最適化にGAを適用したが、本論文は、文献3)において小型車の混在と確率的な車両到着に対応して一般化した手法に適用したものである。

2. 遺伝的アルゴリズムの適用方法

(1) 拡張パターンの遺伝子表現

拡張においては、既存の待避区間を起点として、左右にどの程度拡張できるかを考える。その際、拡張する長さの単位を5mなどと離散化することによって、探索対象の組合せ数を抑えることとする。これにより各区間の拡張パターンは、拡張距離をその単位で割った拡張ブロック数で表現できる。また、谷側と山側では拡張できる距離や適用可能工法が異なることから、山側を正数、谷側を負数、拡張なしを0で表現した。よって、対象の道路延長全体に対する一連の拡張パターンの組合せは、既存待避区間の始点側と終点側に対応した値を順番に並べた整数値型の遺伝子として表現できる。また、それぞれの遺伝子座には拡張できる距離に応じて個別の下限と上限が設定される。遺伝子表現のイメージを図-2に示す。

(2) 遺伝子の評価方法

目的変数は拡張コストであり、遺伝子の適応評価においては、各拡張ブロック数に適用工法の単価を掛けて足

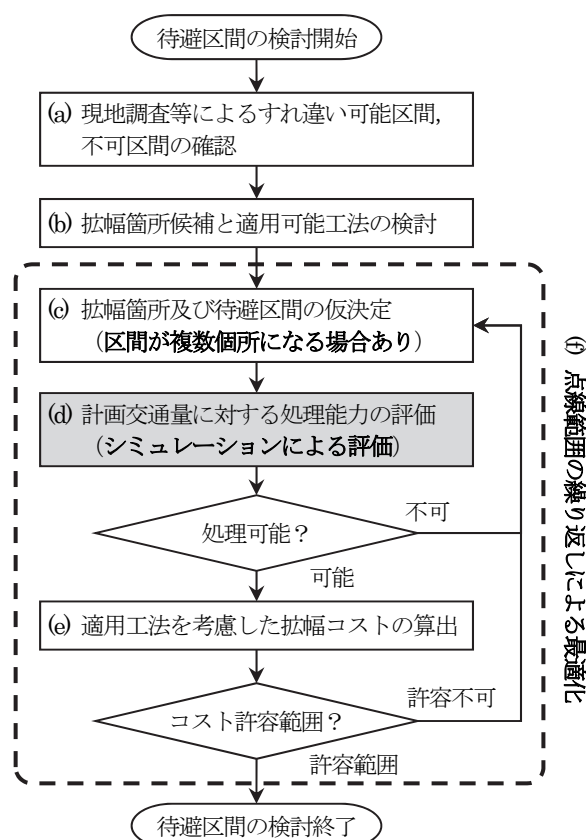


図-1 待避区間の最適配置に関する従来の検討フロー

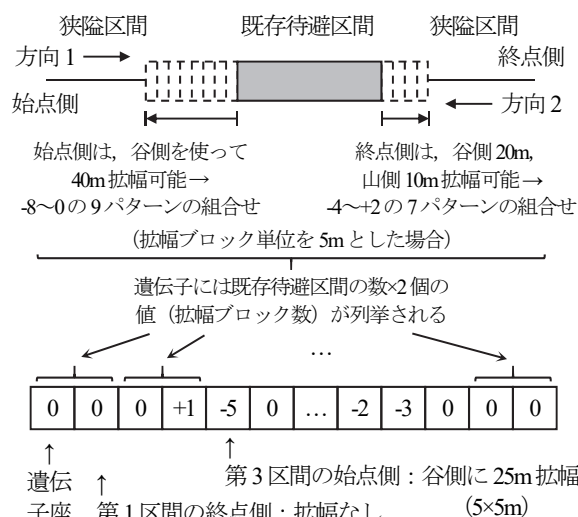


図-2 拡張パターンの遺伝子表現

し合わせることで拡張コストの総額を算出して判断する。ただし、狭隘区間については待ち時間の総計が指定した時間内に収まっていること、待避区間については隣接狭隘区間での待ち時間の間に到着する車両台数に必要な区間長以上であることを制約条件として加味する。制約を満たしているか否かの評価には、文献3)で構成した評

価式を用いる。具体的には、まず各遺伝子座に設定された拡張ブロック数から、狭隘区間と待避区間を交互に展開してそれぞれの区間長を計算する。なお、展開に際しては、最小施工距離（これより短い拡張は行わない）や最小待避区間距離（これより短い区間は待避区間と扱わない）も考慮した。狭隘区間については、確率的な車両到着を考慮した式(1)及び式(2)により平均待ち時間を算出する。ここで、 W_1^A は方向1のみに着目した平均待ち時間、 $W_1^A(n_1)$ は方向1の車両が狭隘区間手前で n_1 台溜まった場合の平均待ち時間、 C_1^A は n_1 が取り得る理論上の最大値である。なお、 $p_1^A(n_1)$ は滞留台数が n_1 となる確率であり、方向1の到着確率分布 f_1 を n_1 台分足し合わせた畳み込み分布 g_{1,n_1} の累積分布関数 G_{1,n_1} と、滞留台数の先頭車両の平均待ち時間 W_1^H （対向車の到着確率分布から決定）を用いて、 $p_1^A(n_1) = G_{1,n_1}(W_1^H) - G_{1,n_1+1}(W_1^H)$ として計算することができる。最終的には、方向2の車両の平均待ち時間とそれぞれの想定交通量で加重平均を取った W^A を、全体の平均待ち時間とする。

$$W_1^A = \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \times W_1^A(n_1) / \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \quad (1)$$

$$W^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times W_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times W_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (2)$$

待避区間については、式(3)及び式(4)から隣接する狭隘区間に対する滞留台数を算出し、その上で必要な区間長以上であるか否かを判定する。 C_1^A は方向1のみに着目した滞留台数、 C^A は方向2とともに加重平均を取った全体の滞留台数である。平均待ち時間の合計があらかじめ設定した許容待ち時間を超えるか、いずれかの待避区間が必要な区間長に達していない場合には、その遺伝子は致死遺伝子となる。

$$C_1^A = \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \times C_1^A(n_1) / \sum_{n_1=1}^{c_1^X} p_1^A(n_1) \quad (3)$$

$$C^A = \frac{(N_1^L + N_1^S) \times C_1^A + (N_2^L + N_2^S) \times C_2^A}{N_1^L + N_1^S + N_2^L + N_2^S} \quad (4)$$

3. 実問題への試行適用と評価

(1) 適用問題の概要

本手法の有効性を確認するため、実際に現地調査を行

表-1 既存待避区間と拡張可能ブロック数

区間番号	始点(m)	終点(m)	始点側※		終点側※	
			下限	上限	下限	上限
1	40.0	50.0	-8	+8	-2	+4
2	220.0	250.0	-22	+16	-6	+6
3	280.0	290.0	-6	+6	0	+12
4	360.0	380.0	0	0	-18	0
5	470.0	480.0	-18	0	-4	0
6	500.0	520.0	-4	0	-14	0
7	590.0	620.0	-14	0	-16	0
8	700.0	710.0	-16	0	-4	0
9	770.0	800.0	0	0	-14	0
10	870.0	900.0	-14	0	-20	0
11	1,000.0	1,010.0	-20	+4	-14	+4
12	1,080.0	1,090.0	-14	0	-8	0
13	1,130.0	1,160.0	-8	0	-8	0
14	1,200.0	1,210.0	-8	0	-28	0
15	1,350.0	1,380.0	-28	0	-22	0
16	1,490.0	1,500.0	-22	0	-10	0
17	1,620.0	1,650.0	0	0	-26	0
18	1,780.0	1,790.0	-26	0	0	+24
19	1,910.0	1,920.0	0	+24	-16	0

※ 上限と下限は既存待避区間からの拡張可能なブロック数（正数：山側，負数：谷側，0：拡張不可）

表-2 区間別の適用可能工法と区間制約

始点(m)	適用可能工法※1		区間制約※2	始点(m)	適用可能工法※1		区間制約※2
	山側	谷側			山側	谷側	
0.0	A	B	低	1,130.0	A	C	高
470.0	A	C	低	1,250.0	A	B	高
570.0	A	B	低	1,310.0	A	C	高
620.0	A	C	低	1,410.0	A	B	高
640.0	A	B	低	1,500.0	A	C	高
800.0	A	C	低	1,710.0	A	B	高
840.0	A	B	低	1,730.0	A	C	高
880.0	A	C	中	1,960.0	A	B	高
1,030.0	A	B	中	1,980.0	A	C	高
1,090.0	A	B	高				

※1 各工法の単価は、工法A：150万円/5m、工法B：80万円/5m、工法C：120万円/5mと設定
 ※2 低：大型車同士でなければすれ違い可能、
 中：小型車同士のみがすれ違い可能、
 高：小型車同士でもすれ違い不可

表-3 その他のパラメーター一覧

パラメータ名	設定値	パラメータ名	設定値
大型車車両全長	8.0 m	拡張ブロック単位	5.0 m
小型車車両全長	5.0 m	最小施工距離	5.0 m
大型車想定交通量	40 台/h	最小待避区間長	25.0 m
小型車想定交通量	20 台/h	許容待ち時間	120.0 秒
平均速度	15.0 km/h	個体数	1,000
発進時加速度	3.0 km/h/s	世代ギャップ	80.0 %
停止時車両間隔	2.0 m	交叉確率	80.0 %
走行時車両間隔	15.0 m	交叉点数	5
車両到着間隔の確率分布	指数分布	突然変異確率	1.0 %
		計算世代数	200

った実問題を基に、待避区間の最適配置を試行した。対象の区間は 2,000m, 途中 19 か所の既存待避区間が点在する。なお、道路線形等の状況から視認性の確保が必要な個所については、あらかじめ必須拡幅区間として既存拡幅区間に含めることとした。また、拡幅ブロック単位を 5m としたときの、各既存待避区間からの拡幅可能ブロック数は表-1 のとおりである。

道路の周辺状況から適用可能な工法 (A~C) を区間別に整理したものを表-2 に示す。各行には、始点から次の始点までに適用できる工法を記載した。一部に拡幅が不可能な区間も含まれるが、拡幅の可否は表-1 の上限と下限から判断する。また、各区間の幅員に応じたすれ違い可能な車種の組合せについても、区間制約として併記した。その他のパラメータは表-3 のとおりである。

(2) 適用結果と従来方法との比較

本手法の適用結果を表-4 のケース 1 に記載する。評価式に GA を組合せた計算結果であり、拡幅総延長は 70m, 拡幅コストは 1,310 万円, 平均待ち時間 (1 台あたりの道路延長全体に対する合計待ち時間の平均) は 119.4 秒であった。得られた拡幅パターンの組合せをシミュレーションモデルに反映して動作確認したところ、車両運行に問題は見られず、平均待ち時間は 116.0 秒となった。この値は、許容待ち時間として仮定した 120.0 秒を下回っており、さらに評価式で計算した値との差異も 3.4 秒と小さく、両者はほぼ整合した結果となった。

続いて、従来の方法である交通シミュレーションと人による試行錯誤を実施した。ケース 2 には、試行錯誤の初期段階の結果を記載する。初期段階では、通過時間が対向車両の平均到着間隔を下回る最長の狭隘区間長を算出し、その長さを基準に待避区間を設定した。具体的には、区間制約が「低」の範囲では 350.0m, 「高」では 230.0m となり、この距離を超えないように、なるべく等間隔に待避区間を配置した。結果は、拡幅総延長が 15.0m, 拡幅コストも 450 万円と少ないが、平均待ち時間が 231.2 秒と許容待ち時間を大きく超えることとなった。そこで、狭隘区間長の長いところを中心に拡幅を行いながら、さらに 9 回の試行を行った結果がケース 3 である。平均待ち時間が 130.4 秒まで小さくなったものの、拡幅コストが 1,320 万円とケース 1 の金額を超えてしまった。拡幅コストや待ち時間をさらに低減するためには、平均待ち時間の変動に注意しながら拡幅箇所の足し引きによる煩雑な試行錯誤を継続することになる。

計算時間に関しては、交通シミュレーションでは 1 時間 15 分間分の車両運行について車両到着間隔を設定する際の疑似乱数系列を 100 回変更して実施しており、1 ケースあたりで約 36 分であった (計算環境: Intel Core i7 2.6GHz, メモリ 16GB)。拡幅箇所を検討する時間等を

表-4 適用結果と作業時間の比較

ケース名	計算方法	拡幅 総延長 (m)	拡幅 コスト (万円)	平均 待ち時間 (秒)	作業 時間
ケース 1	評価式+GA	70.0	1,310	119.4	4 分
ケース 2	交通シミュレーション+人	15.0	450	231.2	50 分
ケース 3		60.0	1,320	130.4	8 時間

含めると、1 回の試行に 50 分程度、ケース 3 までで約 8 時間の作業時間を要した。一方、評価式+GA の計算時間は 200 世代までの計算で約 4 分であり、非常に短い時間でより良い結果を得た。

4. まとめ

本論文では、先に構築した確率的な車両到着を考慮でき、かつ交通処理能力を高速に計算できる評価手法に遺伝的アルゴリズムを組合せることで、1.5 車線の道路整備における待避区間の最適配置を検討した。実問題をベースとした事例に適用し、その結果を交通シミュレーションで動作確認したところ、車両運行に問題がない上、平均待ち時間の評価式との差異も 3.4 秒と小さく、両者は整合した結果となった。さらに、従来方法との比較においては、作業時間を 8 時間から 4 分に大幅短縮した上、拡幅コスト及び平均待ち時間ともに削減する有効な解を得ることができた。

今後は、信号制御や誘導員による台数制御にも対応した評価手法の拡張を検討し、より現実的で効果的な整備計画の策定を実現する手法に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) 天野和洋，前田宗宏，中村泰広，清雄一，大須賀昭彦：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，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.73, No.2, pp.124-134, 2017.
- 4) Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- 5) 北野宏明 編：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993.
- 6) 有村幹治，田村亨，井田直人：土木計画分野における遺伝的アルゴリズム：最適化と適応学習，土木学会論文集 D, Vol.62, No.4, pp.505-518, 2006.
- 7) 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.