

パイプライン敷設工事における最大許容道路占用長の決定

名古屋工業大学 学生員 ○福永 剛
 名古屋工業大学 学生員 和田 かおる
 名古屋工業大学 正 員 山本幸司
 住友金属工業 正 員 前田克年

1. はじめに

一般に、都市ガス幹線用パイプライン敷設は、交通量の多い4車線以上の広域幹線道路ではなく、2車線以下の道路を中心にルート選択されることが多い。このことから、必然的に工事対象道路の道路片側（あるいは全面）を占用することになるが、当然道路交通に大きな影響を与えるため、道路状況や交通特性を十分考慮し、施工中の道路の占用区間長を決定しなければならない。

しかし、この問題については、工事発注者、受注者とも科学的に検討することは少なく、従来より経験的に決定され、地元警察の許可を得ることが多かった。道路交通に与える影響をできるだけ小さくすること、とりわけ必然的に発生する交通渋滞を極力緩和することを重視するならば、このような問題には科学的なアプローチを試みる必要がある。そこで、本稿においては、数学的な解析法と汎用シミュレーション言語SLAM II/PCによるシミュレーション解析法を提案し、実証的な考察を行う。

2. 数値解法の定式化

ここでは、座標式工程表の考え方を導入することにより、仮設信号機のサイクルタイムと道路占用長との関係を定式化するとともに、通過車両の待ち行列台数を最小化する最大許容道路占用長決定方法について提案する。

2-1. 工事区間が1区間の場合の定式化¹⁾

いま、図-1のように2車線道路のうち1車線の地点A～B区間を占用する場合を考え、以下のように変数を定義する。

- T：仮設信号機のサイクルタイム（秒）
- a：A地点での青信号現示時間（秒）
- b：B地点での青信号現示時間（秒）
- d：占用区間A～B間の車両走行時間（秒）

t：逆方向交通との安全性を考慮した安全距離に相当する保安時間（秒）

λ_a ：A地点への通過車両到着率（台/秒）

λ_b ：B地点への通過車両到着率（台/秒）

μ ：A，B地点の通過可能台数（台/秒）

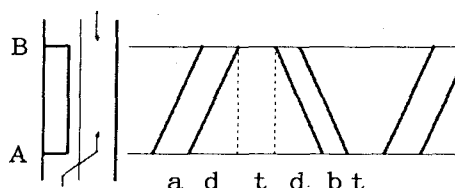


図-1 道路占用区間の略図と交通流パターン

表-1 仮設信号機の現示時間

	青現示時間	赤現示時間
A地点	a	$b + 2d + 2t$
B地点	b	$a + 2d + 2t$

これらの定義により、図-1ならびに表-1を参考にすれば、Tは次のように表すことができる。

$$T = a + d + t + d + b + t \quad \dots \textcircled{1}$$

また、サイクルタイムTの間にA地点へ到着する台数は $\lambda_a \cdot T$ 、青時間aの間に処理できる台数は $\mu \cdot a$ と表すことができる。

いま、 $\lambda_a \cdot T \leq \mu \cdot a$ のときは仮設信号機での繰り越し台数は存在しないことを意味する。すなわち、A地点において2回以上信号待ちする必要はないことになる。以下ではこれを必要条件と仮定して、定式化を行うことにする。ただし、この場合でも信号が青に変わる直前には、

$$L_a = \lambda_a (T - a)$$

台が待ち行列を作ることになる。
まず、クリティカルな状態、すなわち、

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\lambda_a \cdot T}{\mu} = \rho_a \cdot T \\ b &= \frac{\lambda_b \cdot T}{\mu} = \rho_b \cdot T \end{aligned} \right\} \dots \textcircled{2}$$

が成立するとき、式②を①へ代入すると、

$$T = \rho_a \cdot T + \rho_b \cdot T + 2(d + t)$$

となる。これを変形すると、

$$T = \frac{2(d + t)}{1 - \rho_a - \rho_b} \dots \textcircled{3}$$

が得られる。次に、式③を②へ代入すると、

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{2\rho_a(d + t)}{1 - \rho_a - \rho_b} \\ b &= \frac{2\rho_b(d + t)}{1 - \rho_a - \rho_b} \end{aligned} \right\} \dots \textcircled{4}$$

となる。そしてこのときの待ち行列台数 L_a は、

$$\left. \begin{aligned} L_a &= \lambda_a(T - a) \\ &= \frac{2\lambda_a(d + t)(1 - \rho_a)}{1 - \rho_a - \rho_b} \end{aligned} \right\} \dots \textcircled{5}$$

と求まり、同様に L_b は、

$$\left. \begin{aligned} L_b &= \lambda_b(T - b) \\ &= \frac{2\lambda_b(d + t)(1 - \rho_b)}{1 - \rho_a - \rho_b} \end{aligned} \right\}$$

によって算出できることになる。

以上より、 λ_a 、 λ_b 、 μ 、 d 、 t の各値が与

えられると、 a 、 b 、 T 、 L_a 、 L_b が式②、③、④、⑤により順次算出できる。逆に、 L_a 、 L_b の最大許容値 $L_a^{\max}$ 、 $L_b^{\max}$ が何らかの基準に基づいて与えられると、式⑤より、 d 値を求めることができ、この値とA～B間の通過車両の平均走行速度 V を用いて、

$$S = V \cdot d \dots \textcircled{6}$$

により、最大占用区間 S を想定できることになる。

2-2. 工事区間を2区間同時に占用する場合の定式化

連続して2区間を占用する場合は、その2区間の間に通過車両を一時滞留させない場合と、滞留させる場合が考えられる。そこで、以下ではそれぞれの場合について定式化を行う。

2-2-1. 通過車両を2つの工事区間の間に滞留させない場合の定式化

いま、図-2のように2車線道路のうち1車線の地点A～B区間と、地点C～D区間を占用する場合を考え、以下のように変数を定義する。なお、その他の変数は前項と同様である。

- t_1 : C地点における保安時間(秒)
- t_2 : B地点における保安時間(秒)
- d' : 区間B～C間の車両走行時間(秒)
- c : 通過車両1台当たりの平均長(m)

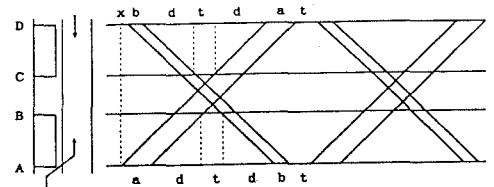


図-2 道路占用区間の略図と交通流パターン

詳細は省略するが、

$$t_1 = d' - \frac{a + b}{2} \dots \textcircled{7}$$

が導かれる。そこで $L_a^{\max}$ 、 $L_b^{\max}$ が何らかの

基準に基づいて与えられると、この場合も式⑤によりd値を求めることができ、この値を式④へ代入することによりa, bが求められる。さらに、このa, b値と $t_1 (=t)$ を式⑦へ代入すれば、d'値が得られる。これらの値と区間B～C間の車両の平均走行速度Vを用いると、最大占用区間長S'は、

$$S' = V \cdot d' = V \left\{ t + \frac{a+b}{2} \right\} \quad (8)$$

と求めることができる。

ここでは、式⑧で求められるS'の値を説明上 S_t としておく。

2-2-2. 通過車面を2つの工事区間の間に滞留させる場合の定式化

いま、図-3のように2車線道路のうち1車線の地点A～B区間と地点C～D区間を占用する場合を考える。各変数の定義は、2-2-1の場合と同様である。

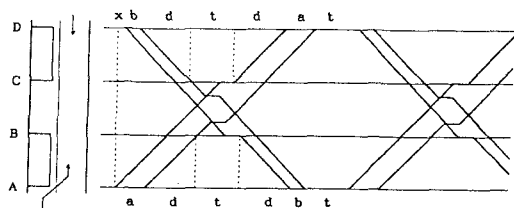


図-3 道路占用区間の略図と交通流パターン

この場合、最大占用区間長S'は、

$$S' > \max \{ \lambda_a \cdot T \cdot c, \lambda_b \cdot T \cdot c \} \quad \dots (9)$$

を満たさなければならない。詳細は省略するが、B, C地点における車両の待ち時間 t_w は、

$$\left. \begin{aligned} t_w &= t - t_1 = t - t_2 \\ &= t - d' + \frac{a+b}{2} \end{aligned} \right\} \quad \dots (10)$$

と導かれる。したがって、 $L_a^{\max}$, $L_b^{\max}$ が何らかの基準に基づいて与えられると、先の式⑤

よりd値を求めることができ、この値を式③へ代入することによってTが得られる。これを式⑨へ代入すれば、S'を想定することができる。そして、S'が想定できれば、

$$S' = V \cdot d'$$

より、d'値が得られる。最後に、この値を式⑩へ代入することにより、B, C地点における待ち時間 t_w が算出できることになる。

3. 数値解法の適用事例とその考察

ここでは、兵庫県下で実施された、あるパイプライン敷設工事に対して数値解法を適用し、実証的考察を行う。当工事は2車線道路のガス供給用パイプラインを敷設するもので、時間当たり通過交通の測定結果をまとめたものを表-2に示す。なお、紙面の都合上計算手順は省略し、計算結果のみを示す。

表-2 時間当たり交通量

時間帯	A→B (D)	B (D)→A
	交通量(台)	交通量(台)
朝ピーク	631	474
夕方ピーク	549	569

3-1. 工事区間が1区間の場合の適用事例とその考察

いま、許容し得る最大占用区間長Sを求めようとすれば、ピーク時間帯の通過交通量に着目しなければならないことは言うまでもない。そこで、ここではまず、朝ピーク時間帯を対象として事例計算を行った。事例計算に当たって、 μ , t , $L_a^{\max}$, $L_b^{\max}$, V の各値に関しては参考資料が入手できなかったため、ここではとりあえず標準的な値として以下の数値を仮定し、事例計算を進めた。

$$\begin{aligned} \mu &= 1.0 \text{ (台/秒)} \\ t &= 10 \text{ (秒)} \\ L_a^{\max} &= L_b^{\max} = 10 \text{ (台)} \\ V &= 30 \text{ (km/時)} = 8.3 \text{ (m/秒)} \end{aligned}$$

これらの数値を用いて計算を行った結果、

$$S = 116.03 \text{ (m)}$$

$$a = 12.11 \text{ (秒)}$$

$$b = 9.14 \text{ (秒)}$$

が得られた。次に、 $L_a^{\max}$ の値を15(台)に増加すると、

$$S = 215.56 \text{ (m)}$$

となり、占用区間長は約100m延長できることになる。

次に、夕方ピーク時を対象とし、 $L_a^{\max} = 10$ (台)として占用長 S を求めると、

$$S = 133.13 \text{ (m)}$$

が得られた。夕方ピーク時を対象とすることは、より交通量の多い朝ピーク時間帯において仮設信号機を2回以上待つ車が発生することを容認することになるが、道路占用長は約17m延長できることになる。

3-2. 工事区間が2区間の場合の適用事例と

その考察

3-2-1. 通過車両を2つの工事区間の間に滞留させない場合

μ , t , $L_a^{\max}$, $L_b^{\max}$, V の各値は、3-1の場合と同様に仮定して事例計算を行った結果、

$$S_t = 171.19 \text{ (m)}$$

という値が得られた。また、 $L_a^{\max} = 15$ (台)と増加した場合は、

$$a = 18.17 \text{ (秒)}$$

$$b = 13.70 \text{ (秒)}$$

$$S_t = 215.26 \text{ (m)}$$

となり、2つの工事区間の距離を約44m引き離すことができることが明らかとなった。また、夕方ピーク時を対象とすることは、2つの工事区間の間に車を滞留させなければならないことを意味するので、この場合は3-2-2として扱う問題となる。

3-2-2. 通過車両を2つの工事区間の間に滞留させる場合

μ , t , $L_a^{\max}$, $L_b^{\max}$, V の各値は、3-1の場合と同様に、また通過車両1台の平均長は $c = 5.5$ (m)と仮定して事例計算を行った結果、

$$S' > 66.61 \text{ (m)}$$

3-2-1より、

$$S_t = 171.19 \text{ (m)}$$

が得られた。いま、何らかの理由により S' は S_t よりも大きくできないとすると、 S' は、

$$66.61 < S' < 171.19$$

の範囲内で選択されることになる。以上の結果より、

$$S' = 150.0 \text{ (m)}$$

と想定すると、その結果、

$$t_w = 2.56 \text{ (秒)}$$

という値が得られることになる。

4. シミュレーション分析の必要性

パイプライン敷設工事における最大許容道路占用長決定問題は、上述のように簡便的に数値解法を用いて定式化し、解析することが可能である。しかし、この数値解法には、通過車両到着のランダム性を考慮できないという大きな問題点が残される。このことは分析対象を危険側に評価することになるため、何らかの対応が必要となることを意味する。そこで、通過車両の到着時間間隔分布が与えられたときに最大許容道路占用長を決定するためには、数値解法ではなく、シミュレーションモデルの開発が必要と考えた。なお、今回は、現場サイドでの身軽な分析を前提とし、シミュレーション言語として適用範囲が広いと言われるSLAMIIのパソコン版であるSLAMII/PCを用いて、モデル

化を行った。

5. シミュレーションシステムのモデル化^{2), 3)}

分析対象としては、片側車線を完全に占有し、工事区間の両方向の入口に設置された仮設信号機によって片側通行の制御を行う2車線道路上でのパイプライン敷設工事を考える。その際信号が青になると、信号待ちしていた車両は占有区間を通過するが、仮設信号機を通り抜けるのに1秒かかるものと仮定する。しかし、青現示の最中に到着した車両のうち、前に待っている車両がないときは仮設信号機を通り抜けるのに時間はかからないとする。また車両の到着分布は、実績資料をもとに位相 $k=2\sim 6$ 程度のアーラン分布と仮定し、信号のサイクルは、両方向とも赤、 $A\rightarrow B$ 方向の信号が青、両方向とも赤、 $B\rightarrow A$ 方向の信号が青というサイクルを繰り返すものとする。

SLAM IIによるシミュレーションモデルのネットワーク図を図-4に示す。このシステムでは、 $A\rightarrow B$ 方向の通過車両の流れ、 $B\rightarrow A$ 方向の通過車両の流れ、および仮設信号機のサイクルという3つの異なる制御が行われているが、各々をサブネットワークとしてモデル化することとした。

このモデルにおいては、仮設信号をLIGHT 1とLIGHT 2という2つのゲイトで表し、開状態を青信号、閉状態を赤信号とする。また、車は1台ずつ順番に信号を通過させるため、方向ごとに各々START 1、START 2という1単位ずつのリソースを用い、LIGHT 1、LIGHT 2という信号の前をそれぞれスタート位置と定めた。これによって、車が信号を通過するためにはスタート位置というリソースを占有する必要がある、信号を通過すると直ちにリソースが解放されることになる。

車は、2つの方向ごとにそれぞれCREATEノードで生成されるが、1番目の属性値(ATTRIB (1))にその車が発生した時刻を格納している。ところで、 $A\rightarrow B$ 方向の車の流れと $B\rightarrow A$ 方向の車の流れでは、ゲイトやリソースといった制御対象は異なるものの、メカニズムは全く同じであるため、制御対象となるゲイトおよびリソースを要素の属性値によって指定することにより、2つの流れを1つのサブネッ

トワークでモデル化することができる。そこで、2番目の属性値(ATTRIB (2))の値を信号前のスタート位置のリソース番号、および待機するファイル番号(リソース番号と待機するファイルの番号は同じ番号とする)として与えることにした。これによって、ATTRIB (2)=1であれば、その車はSTART 1リソースを占有しようとすることを表し、また、ATTRIB (2)=2であれば、START 2リソースを占有しようとしていることを表すことになる。

ゲイトの番号もリソース番号と同様にして決定することができる。もし、ATTRIB (2)=1であればLIGHT 1の信号により流れが制御されるが、ATTRIB (2)=2であればLIGHT 2の信号により車の流れが制御されることになる。ただし、各ゲイトで待機すべきファイル番号は、LIGHT 1が3番ファイル、LIGHT 2が4番ファイルとしているので、ゲイトのファイル番号は3番目の属性値(ATTRIB (3))に代入することにする。つまり、ASSIGNノードでは $A\rightarrow B$ 方向の車には2番目の属性値に1、3番目の属性値に3を代入(ATTRIB (2)=1、ATTRIB (3)=3)し、 $B\rightarrow A$ 方向の車にはそれぞれ2、4を代入(ATTRIB (2)=2、ATTRIB (3)=4)するようになっている。

次に、両方向の車はスタート位置リソースを占有するために、QUEUEというラベルのついたAWAITノードへ流れる。このとき、スタート位置リソースがSTART 1であるかSTART 2であるかは、先のASSIGNノードにおいてATTRIB (2)に代入された値によって判断される。そして、スタート位置を占有すると次のAWAITノードへ進み、LIGHT 1またはLIGHT 2のゲイトが開状態であるかどうかを調べることになる。信号が赤の場合は、ASSIGNノードにおいてATTRIB (3)に代入された値により判断し、 $A\rightarrow B$ 方向の車であれば3番、 $B\rightarrow A$ 方向の車であれば4番のファイルで待機することになる。

次のCOLLECTノードに流れると、車が仮設信号において信号待ちした時間の統計値をWAIT TIMEとして計測するようになっている。このCOLLECTノードからは2本のアクテ

ィビティが連結されているが、もし車の1番目の属性値の値 (A T R I B (1) = 車の発生時刻) が現時刻 (T N O W) よりも小さいときは、車が仮設信号において信号待ちしたことを意味する。したがってこの場合は、車が仮設信号を通り抜けるのに時間がかかるため、1秒間の時間経過のある上のアクティビティへ流れることになる。A T R I B (1) と T N O W が等しい場合は、車が仮設信号が青の最中に到着し、前に待っている車がないため、仮設信号において信号待ちをしなかったことを意味する。この場合は車が仮設信号を通り抜けるのに時間はかからないので、下の時間遅延のないアクティビティへ流れることになる。

そして最後に、車は T E R M I N A T E ノードにおいて信号前のスタート位置を解放して立ち去り、このシステムから消滅することになる。

次に、信号制御のサブネットワークについて説明する。なお、以下の説明において、いくつかの変数が登場するが、これらは、シミュレーションモデルにおけるパラメータである。これらを以下のように定義する。

XX (1) : 道路占用区間長 (m)

XX (2) : A → B 方向の車に対する仮設信号機の青現示時間 (秒)

XX (3) : B → A 方向の車に対する仮設信号機の青現示時間 (秒)

さてゲイトは、はじめ信号が赤という状態を表すため、L I G H T 1、L I G H T 2 ともに閉の状態になっている。まず信号という要素が C R E A T E ノードから1つ生成され、このとき A S S I G N ノードで、

$$XX (4) = XX (1) / V + t$$

V : 車両の平均走行速度 (m / 秒)

t : 逆方向交通との安全性を考慮した安全距離に相当する保安時間 (秒)

という両方向の車に対する仮設信号が赤である時間を代入している。両方向の信号とも赤の状態では XX (4) 秒の時間を経過させた後、ゲイト L I G H T 1 を開とする。これにより A → B 方向の車に対する仮設信号は青となる。そして

XX (2) 秒経過すると、今度は L I G H T 1 は閉 (赤) となる。

次に、両方向の信号を再び XX (4) 秒間赤として、続いて L I G H T 2 を開とする。これにより今度は B → A 方向の車に対する仮設信号が青となる。そして、XX (3) 秒経過させた後 L I G H T 2 を閉 (赤) とする。そして、XX (4) 秒間の時間遅延の後、再び信号は L O O P ラベルのノードに戻り、以上の信号のサイクルを繰り返すことになる。

なお、このシミュレーションモデルに必要なインプットデータと、シミュレーションにより得られるアウトプットデータの主なものをまとめて表-3に示す。なお、表中の仮設信号の青現示時間と工事区間長は、シミュレーションモデルにおいてパラメータとして与えられる。

表-3 シミュレーションのインプットデータとアウトプットデータ

インプットデータ
・ 交通量および到着時間間隔分布
・ 仮設信号をクリアする時間
・ 平均走行速度
・ 逆方向交通との安全性を考慮した安全距離に相当する保安時間
・ 仮設信号の青現示時間
・ 工事区間長
アウトプットデータ
・ 待ち台数に関連するもの (最大、最小、平均、標準偏差等)
・ 待ち時間に関連するもの (最大、最小、平均、標準偏差等)

6. シミュレーション結果とその考察

シミュレーション解析は、当然ピーク時間帯を対象に行われなければならないが、ピーク時間帯の時間当たり通過交通として、表-4のように4通りを仮定した。

また、シミュレーションは、交通に及ぼす影響を小さくする意図から、最大待ち台数が15台以内となること、通過車両は2回以上信号待ちをしない (最大待ち時間がサイクルタイムを越えない) ことを目安として行った。なお、シミュレーションモデルにおいては、通過車両の平均走行速度 V は以下のような標準的な値を仮

定した。

$$V = 30 \text{ (km/時)} = 8.3 \text{ (m/秒)}$$

表-4 時間当たり交通量

	交通量 (台)	
	A→B	B→A
①	650	500
②	750	600
③	550	400
④	450	300

4通りの交通量パターンに対するシミュレーションの結果と一定到着の場合の解析結果をまとめて表-5に示す。これより、交通量によっては道路占用長を100m以上に延長できることがわかる。(現行では、ほぼ80~100mに規制されている。)

なお、工事区間を2区間連続して占用する場合のシミュレーション解析は、基本的には1区間を占用する場合のシミュレーションモデルと同じモデルを用いて解析することができるが、今回は紙面の都合上、工事区間を2区間連続して占用する場合のシミュレーション結果は省略することにする。

ところで、簡便的な数値解法(一定到着)により得られる道路占用長とシミュレーションにより得られる道路占用長との間に何らかの関連関係が存在し、前者の結果に対して換算係数を乗じることによって後者の状態が想定できれば、現場においてその都度シミュレーションを行う手間が省ける。

そこで、将来的には交通量をパラメータとする換算係数を求めることを目標とし、今回はその第一段階として、通過車両の到着分布ごとの換算係数について調べることにした。べき乗回帰を行った結果を示した表-6、図-5によれば、換算係数の存在が期待できる。すなわち、交通量、到着時間間隔分布によって多少の前後はみられるが、およそ0.6~0.8の間に集中していることがわかる。

なお、SLAMII/PCは2DDで提供されているシミュレーション用ソフトウェアであるため、2ドライブ用フロッピーディスクユニッ

トの1ドライブは2DD用、他方を2HD用として使うことになり、シミュレーション実行中にフロッピーディスクを何度も入れ換えなければならないこと、また、乱数の初期値によってシミュレーションの結果に多少のばらつきがみられることなど、使用するのに不便な点がいくつか残されている。

7. おわりに

本研究では、2車線道路におけるパイプライン敷設工事の道路占用区間長決定問題に対して、数学的なアプローチおよび汎用シミュレーション言語SLAMII/PCによるシミュレーション解析を行った。数値解法の事例計算やシミュレーション解析の適用事例においては、施工情報の一部が不十分であったため、いくつかの数値を仮定せざるを得なかったが、パイプライン敷設工事における最大許容区間長や工事用仮設信号機のサイクルタイムの決定に関する有効な計画情報が得られることが明らかになった。

しかし、既に述べたように、本研究では、将来的には数値解法により得られる道路占用長とシミュレーションにより得られる道路占用長との間の換算係数を求めることを目標の一つとしている。そのため今後は、様々な交通条件のもとでシミュレーションを行い、その結果を一目でわかるような出力方法を考案することが挙げられる。

また、道路交通の最適な動的制御を前提とした仮設信号機制御システムの開発も今後の課題である。

【参考文献】

- 1) K.Yamamoto, K.Maeda, S.Ohsumi;
Proc. of 4th Yugoslav Symposium on
Organization and Management in Con-
struction, pp.117~122, 1991.
- 2) 構造計画研究所;
SLAMIIによるシステム・シミュレ-
ーション入門
昭和61年
- 3) K.Yamamoto, K.maeda, S.Ohsumi;
Proc. of IV-ICCCBE, 1991(in Printing).

