

工事用感應式信号制御機の試作と適用試験結果について

Production of Vehicle Actuated Traffic Signal Controller for Road Work and Results of Field-Testing

日本大学理工学部○安井 一彦*

日本大学理工学部 池之上 慶一郎*

日本サミコン(株) 野村 利充**

日本サミコン(株) 石崎 実**

武田電子 武田 薫***

By Kazuhiko YASUI, Keiichiro IKENOUE, Toshimitsu NOMURA, Minoru ISHIZAKI and Kaoru TAKEDA

片側交互通行を伴う道路工事においては、交通誘導員や工事用信号機によって交通制御が行なわれている。交通誘導員による制御においては、交通誘導員の受傷事故の発生、また、工事用信号機による制御においては、定周期制御のため不必要な待ち時間や渋滞の発生が大きな問題となっている。そこで交通誘導員の負担軽減と安全の確保や、より円滑な交通制御を可能とするために、交通需要に応じた信号制御が可能な制御機を試作し、現場での実験を行ない、遅れ時間の低減効果を中心に分析を行なった。その結果、今回開発を行なった工事用感應式信号制御機は、十分効果があることが確認された。

「キーワード」工事用信号機、交通運用、感應制御

1. はじめに

道路上で片側交互通行を伴う工事を行なう場合には、交通誘導員や、工事用信号機を用いて交通整理を行なうことが一般的である。本来、交通誘導員を配置して交通需要に応じた安全かつ適切な誘導を行なうことが望ましいが、交通需要の少ない箇所や、夜間においては依然として工事用信号機に頼らざるを得ないのが現状である。

一方、交通誘導員が誘導を行なう場合には、工事用信号機の作動を停止させ、交通誘導員のみによる誘導となることが一般的である。これは、工事用信号機を用いる場合、機械の性能上、あらかじめ設定したサイクル長、青時間、赤及び全赤時間を用いた定周期（これらの定数は固定）で運用されるため、誘導員との連携がうまくいかないためである。

工事用信号機で誘導を行なう場合、夕方のピーク

時から深夜の閑散時間帯、さらには朝ピーク時にわたり交通需要が大きく変動するにもかかわらず、サイクル長、上下方向の青時間、赤及び全赤時間は固定の値で運用されている。その結果、交通需要と信号定数の不適合から、渋滞や必要以上の遅れ時間が発生し、経済的・精神的に大きな負担をドライバーに与えており、社会全体を考えれば、これによる時間損失費用は莫大なものになると考えられる。

一般の交通信号に関しては、近年高度化が進み、交通需要に応じて様々な感應制御が実施されており、都市部では大きな制御効果をあげている。しかし、我が国においては、工事用信号機が道路交通法上の正式な信号機として認められていないため、誕生以来高度化の波から取り残されて、今日まで使用されているのが現状である。

イギリスでは既に工事用の感應式信号機¹⁾が開発され現場で使用されているが、その原理は両方向に全赤を常に表示し、需要を感知した方向に固定の青時間を与えるような簡易的な制御にすぎない。

また、我が国においても、笹岡ら^{2) 3)}や中辻ら⁴⁾によって片側交互通行の交通運用について研究がな

* 交通土木工学科 0474-69-5507

** 技術部研究開発課 025-286-5211

***システム開発室 025-261-2014

されており、一定時間内の交通需要に応じた青時間、サイクル長の算出方法が提案されているが、サイクル毎に変動する交通需要量を現場で捉えて、信号を制御するには至っていない。また、感応式制御の構想については、和田ら⁵⁾によって示されているが、我が国において実際の現場での適用例は、まだ報告されていない。

そこで、交通需要量に応じた適切な青時間をサイクル毎に自動的に与えることが可能な、工事用感応式信号制御機の開発を目的とし、そのアルゴリズムを開発するとともに、実際に制御機本体、センサー等を試作し、これを用いて実際の工事現場において適用試験を行い、車両の遅れ時間の低減効果を中心に分析を行なった。

2. 工事用感応式信号制御機の開発

開発にあたっては、以下の2点を目標とした。

- ① 車両を感知し、交通需要に応じた現示運用がサイクル毎に可能であること。
- ② 従来使用している信号灯器が、そのまま使用可能であること。

(1) 機器構成

今回試作した工事用感応式信号制御機を実際に現場で使用する際には、本制御機と信号灯器、および車両センサーを用いて信号制御を行なう。信号灯器については従来使用しているものがそのまま流用できることとし、車両センサーについては、圧力式ゴムセンサーおよび超音波式センサーに対応できるように設計した。

工事用感応式信号制御機では、それぞれの方向の青時間について、最小、最大、単位延長それぞれを設定できるようになっていることが特徴である。実際に現場で運用する場合の機器配置を図-1に示す。

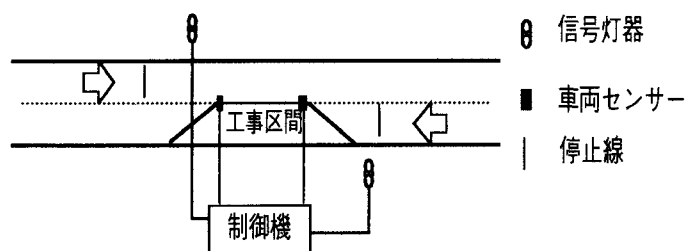


図-1 現場での機器配置例

(2) 制御のモードとアルゴリズム

現場での安全でかつ円滑な運用を可能とするため、下記に示す4種類の制御モードを設定・内蔵した。

a) 赤色閃光制御モード

両方向に赤点滅を表示する。このモードは通常使用しないが、制御機内部に異常が生じ検出された場合に、自動的に選択・実行される。

b) 手動制御モード

現示の切り替えを手動で行なう。このモードは、交通誘導員が手動で現示切替えを必要とする場合に選択・実行することができる。

c) 定周期制御モード

あらかじめ設定した信号サイクル長、青時間、全赤時間を用いて定周期制御を行う。このモードは、感応制御モードにて運用している場合に、車両センサーの異常が検出されると、検出された方向のみ自動的に選択される。また、センサー異常が自然復旧した場合には、自動的に再度感応制御モードに移行する設計となっている。

d) 感応制御モード

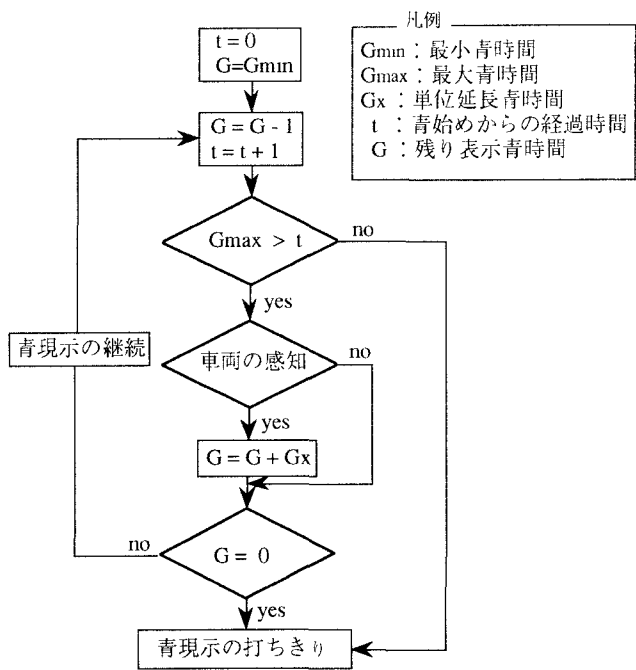
車両センサーにより車両を感知し、それに見合う青時間を与える感応制御を実行する。このモードを選択することにより、交通需要に応じた青時間与えられ、その結果として不必要な遅れを減らすことが可能となる。

車両を感知した場合の感応制御のアルゴリズムは、待ち行列から飽和流で発進した車両のギャップ時間（車間時間）を捉えるために、ギャップ感応方式とした。これは、現在右折感応制御に使用されている概念とほぼ等しく、最小・最大青時間、単位延長青時間を設定し、最小青時間内に車両の感知があれば、単位延長青時間分だけ青現示を延長し、感知がなければ最小青時間を保証して、青現示を打ち切るものである。また、感知が連続して続いた場合には、最大青時間をもって青現示を打ち切る。この結果として、交通需要（待ち行列の長さ）に応じた青時間を与える事が可能になる。

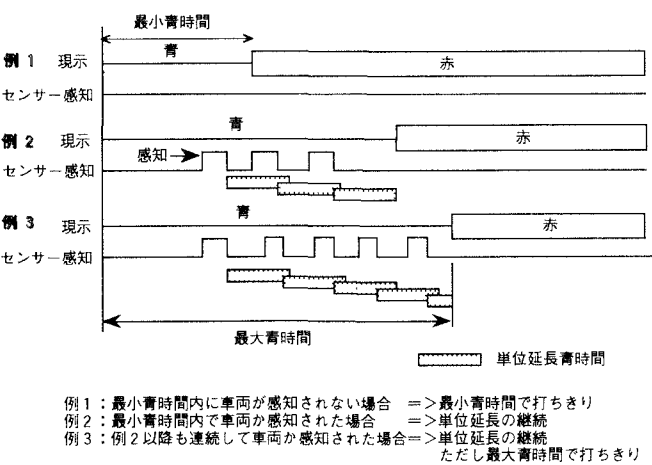
また、センサーに不良が発生した場合には、不必要な遅れ時間を招く結果になりかねないため、センサー不良を感知して、障害の発生した方向を自動的に定周期制御に移行させる機能、およびその障害が

自然復旧した場合には、再度感応制御を実行させる自己診断機能を付加した。

感応制御に関するアルゴリズムを図－２に、車両の感知にともなう感応動作例を図－３に示す。



図－２ 感応制御のアルゴリズム



図－３ 車両感知に伴う感応動作例

また、各モードを運用中に動作モードを手動にて切替えた場合、切り替えと同時にモード変更を実行すると、青時間が僅か数秒で打ち切られたり、青からいきなり赤点滅に移行するなど、走行中の車両に与える影響が懸念されるため、安全性を確保する目的から、表－１のような移行動作を保証するように設計した。

表－１ モード切り替え時の安全確保のための動作保証

動作モード	移行後の動作			
	赤点滅	手動	感応	定周期
移行前の動作	赤閃光	全赤を実行後 手動動作へ	全赤を実行後 感応動作へ	全赤を実行後 定周期動作へ
	手動	全赤を実行後 赤点滅動作へ	全赤を実行後 感応動作へ	全赤を実行後 定周期動作へ
	感応	最小青時間を実行の後、全赤をへて赤点滅動作へ すでに最小青時間を超えていれば、即全赤へ	最小青時間を実行の後、全赤をへて手動動作へ すでに最小青時間を超えていれば、即全赤へ	最小青時間を実行の後、全赤をへて定周期動作へ すでに最小青時間を超えていれば、即全赤へ
	定周期	設定青時間を実行の後、全赤をへて赤点滅動作へ	設定青時間を実行の後、全赤をへて感応動作へ	

(３) 車両センサーの設置位置について

感応制御を円滑かつ効率的に行なうためには、車両センサーの設置位置が重要なポイントになる。車両センサーの位置と感応制御の関係について整理すると下記のように示される。

a) センサーを停止線から上流に設置

利点としては、車両の停止線への到着時刻の予測が可能となる。しかしその反面、車両通過によって表示される単位延長青時間内で、その車両が停止線を通過できる保証が必要なため、単位延長青時間の秒数が長く必要となり、その結果制御の効率が低下することになる。

b) センサーを停止線付近に設置

利点としては、単位延長青時間および最小青時間を短くでき、制御の効率が上がる。しかしその反面、車両の停止線への到着時刻の予測が難しいため、打ち切りの際、最後の車両によって表示される単位延長青時間が無駄となり、制御の効率が低下することになる。

以上のことから、今回は感応制御の効率を上げ、車両の遅れ時間を最大限に低下させる目的と、いずれかのセンサーが故障した場合に、これを自動診断するために、車両センサーを停止線より下流側で、1車線に絞られた位置に設置することとし、これに

よるb)の欠点を工事用信号機としては日本で初めて、全赤時間を可変制御(延長・短縮)することにより克服することとした。

(4) 安全・円滑性のための全赤時間の可変制御

工事用信号機における全赤時間は、従来工事区間の長さ、車両の通過速度を基に現場においてその値を決めて運用を行ってきた。またこの全赤時間は全サイクル一定の値で運用されてきた。さらに、工事用信号機には青と赤の2つの表示しか認められないため(黄色を使用すると正規の公安委員会設置信号に類似するため、信号類似物となり違法)、信号が急に赤になっても走行車両はすぐに停止できず、その結果信号無視せざるを得ないケースが発生し、交通事故を引き起こす可能性も存在している。

感応制御を実施するにあたって、その安全と円滑性の確保のため、図-4に示す全赤時間の延長・短縮を行なうアルゴリズムを導入した。

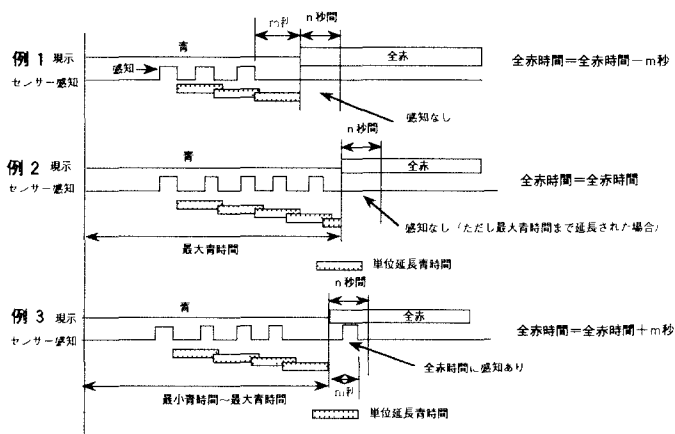


図-4 安全・円滑のための全赤時間延長・短縮動作

図中の例1では、最後の車両が通過した後、m秒単位延長青時間が表示され、その間に車両の感知がなく、青表示が終了した場合である。制御機により全赤表示の開始後n秒間センサーを監視し、全赤時間内に車両の感知(信号無視)がなければ、最後の通過車両に対して全赤時間を与えれば良いことになるので、全赤時間を指定秒数からm秒減じた値で終了させる。これによって、反対方向の信号待ち車両の青開始時間が早められ、遅れ時間を減少させることになる。

例2は感応動作が続いて、最大延長限度で青時間が打ち切られた場合を示している。この場合には、安全性を考慮して指定の全赤時間を表示させる。

例3は全赤時間中に車両の感知(信号無視)があった場合を示している。この場合、信号無視車両に対して全赤時間を確保するために、感知された時点から指定の全赤時間を与えることとし、その結果全赤時間はm秒間延長される。

3. 適用試験の概要

(1) 適用試験場所

実際に現場で行なわれている道路工事に、従来型の工事用信号制御機(定周期制御)と、今回試作を行なった工事用感応式信号制御機(感応制御)の2種類を用いて片側交互通行を実施し、感応制御の効果測定を実施した。

- ① 山形県内一般国道(片側1車線)区間(区間長約290m:長いケース)
- ② 長野県内一般国道(片側1車線)区間(区間長約50m:短いケース)
- ③ 長野県内一般国道(片側1車線)区間(区間長約350m:長いケース)
- ④ 新潟県内県道(片側1車線)区間(区間長約160m:中間のケース)

(2) 適用試験の条件

感応制御の効果測定するために、4地点とも定周期制御および感応制御を、それぞれ約1時間実施した。制御パラメータは、上り、下りとも共通とし運用を行なった。制御パラメータ例(①山形実験)を表-2に示す。

表-2 制御パラメータの設定値

制御	設定項目	設定値(秒)
定周期	青時間	60
	全赤時間	30
	サイクル長	180
感応	最小青時間	10
	最大青時間	60
	単位延長青時間	5
	全赤時間	30
	サイクル長	最小80 最大180

(設定値は上り、下りとも共通)

(3) 測定項目

効果測定にあたっては、両方向とも流入部にVTRカメラを設置し、撮影された画像から、交通量、停止台数、停止時間を計測し車両の遅れ時間を算出した。また、車両センサーおよび制御の履歴を制御機にパソコンを接続して収集した。

4. 適用試験の結果

(1) 定周期式と感應式制御の比較

解析結果については、4箇所の地点ともほぼ同様な結果が得られたため、紙面の都合上、ここでは①山形での実験を中心に結果を示す。①山形の実験ではVTR画像の一部欠測のため、撮影された50分間について解析を行なった。

a) 50分間交通量(①山形実験)

50分間交通量を図-5に示す。上下交通量とも約180台～約240台の範囲であり、いずれの方向においても感應制御時が若干低い交通量であった。

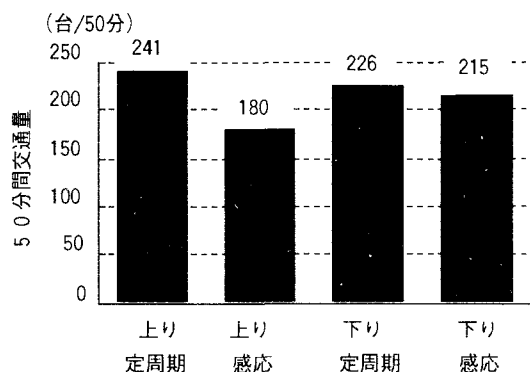


図-5 50分間交通量(工事区間:長いケース)

b) 50分間停止率(①山形実験)

停止台数を交通量で除した値を停止率とし、50分間の停止率を図-6に示す。定周期、感應いずれの場合においても約65%から約75%の停止率を示している。停止率が高い理由は、工事区間長が長いことから、全赤時間が30秒と比較的長く設定されており、クリアランスのためのスプリットの割合が高いためである。

感應制御において、交通量が少ない場合に青現示を定周期に比べて短い時間で打ち切るために、サイ

クル数が増加して、クリアランス時間の割合が高くなるために、停止率が高くなることを懸念したが、今回の停止率からはそのような状況はみられなかった。

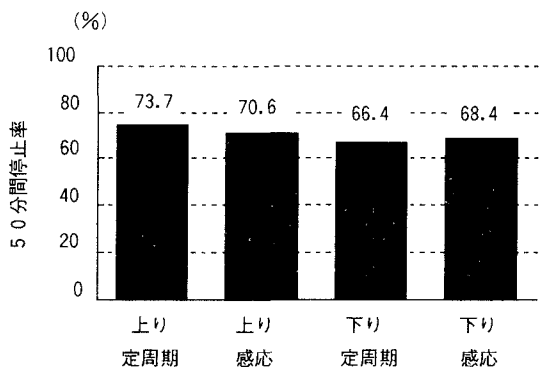


図-6 50分間停止率(工事区間:長いケース)

c) 50分間総遅れ時間(①山形実験)

50分間総遅れ時間を図-7に示す。総遅れ時間は感應式の場合定周期に比べ、大幅に減少する結果となった。特に上り方向では感應により、遅れ時間が半分以下に低減される結果となった。

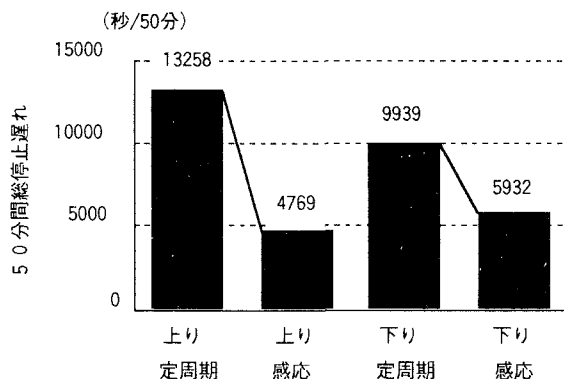


図-7 50分間総遅れ時間(工事区間:長いケース)

d) 停止車両1台あたり遅れ時間(①、②)

総遅れ時間では交通量の違いが影響していると考えられるので、停止車両1台あたりの遅れ時間を算出し、図-8に示す。その結果、感應制御を行なった場合には、定周期制御に比べ、1台あたりの遅れ時間を約半分程度に減少させる結果となった。また工事区間の短いケース(②長野実験)においても、ほぼ同様の結果が得られたので、停止車両1台あたりの遅れ時間について、図-9に示す。

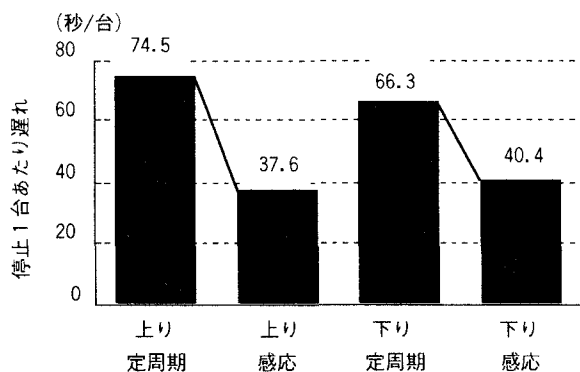


図-8 停止1台あたりの遅れ時間
(工事区間：長いケース)

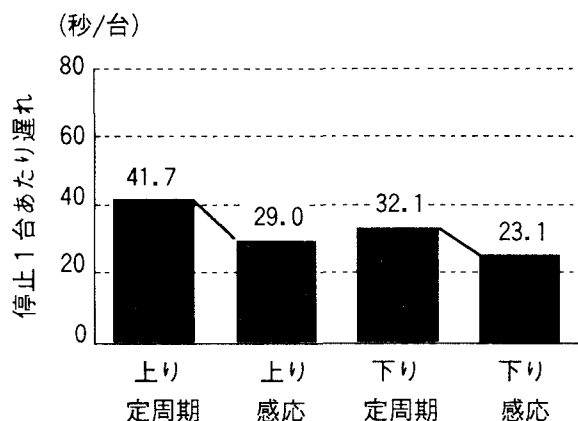


図-9 停止1台あたりの遅れ時間
(工事区間：短いケース)

(2) 交通誘導員へのヒアリング結果

実験においては、現場に配置されている交通誘導員の方々にあわせてヒアリングを行なった。その主な結果をまとめると、以下ようになる。

a) 誘導員の負担について

感应式で信号機と誘導員のペアで誘導を行なう場合は、誘導員のみの場合に比べ負担が大幅に軽減する。その結果余裕が生まれ、歩行者や自転車等により注意を払うことができる。

b) 誘導員の安全について

誘導員のみの場合には、車を確実に停止させるため、車道上で停止・誘導を行なっている。特に停止合図をする場合には、体を張って車を止めることになるが、大型車など停止合図を無視して進行する場合には、かなり危険な状況も存在する。感应式信号制御機を使った場合には、信号が赤を表示してくれるため、上記のような状況からは解放され安全である。

c) その他

現場では、交通誘導員よりも信号機を用いた方が

信号無視が少ない。これは、誘導員の場合には信号無視をして通過しても反対側に誘導員が連絡して、待たせておいてくれるとドライバーは感じている。信号の場合には、自己の責任で信号無視をすることになるため、誘導員の場合より信号無視が少なくなる。

(3) 車両センサーについて

今回の実験では、圧力式ゴムセンサーと超音波式センサーの2種類について使用実験を行なった。基本的な性能としては、両者ともほぼ同じであるが、下記のような理由から、超音波センサーが優れていることが判明した。

a) 環境面からの問題

圧力式ゴムセンサーの場合、車両の通過によってセンサーを踏むため、振動と騒音が発生し、住宅地等では環境問題が発生する。その点、超音波センサーは非接触式であるため、このような問題は生じない。

b) 耐久性の問題

圧力式ゴムセンサーの場合、接触式であることからセンサー自体の寿命が予想外に短いことが判明した。圧力式ゴムセンサーの寿命は交通量と、大型車混入率に依存するが、今回の調査では3～4日程度でセンサーが断線する結果となった。これに対して超音波センサーは、非接触式であるため、耐久性に関して全く問題がない。

c) 運用上の問題

積雪地域では冬期間除雪作業が行なわれるため、路面上に直接張る形の圧力式ゴムセンサーは、除雪車に切断されたり、巻き込まれることが予想される。

以上の点から、超音波式センサーを使用することが好ましいという結論となった。

また、超音波式センサーは圧力式ゴムセンサーの約2～3倍程度のコスト高となるが、耐久性を考えれば、長期的にはむしろ低コストであるといえる。

5. 交通需要と遅れ時間のシミュレーション

交通需要が変化した場合、定周期式と感应式での遅れ時間の特性を調べるため、車両をポアソン到着で発生させ、停止線で赤の場合は停止し、青になった場合には、飽和流率（最大流率（設定値））で発

進を行なうという簡単なマイクロシミュレータを作成し、定周期式制御と今回開発した感應式制御について、交通量と遅れ時間の分析を行なった。なお、今回使用したシミュレータの基本仕様は、現在まで再現性の検討が行なわれているM I C S T R A Nモデル⁶⁾に準じている。この結果を図一10に示す。理論的には定周期式であっても、最適青時間を与えた場合には、感應式と同じ遅れ時間になるが、交通需要はサイクル毎に変動するため、これに対応することは不可能である。それに対して、交通需要が変化した場合でも、感應式制御は定周期式制御に比べて、遅れ時間が全ての場合において、短くなることが示された。

感應制御の特徴としては、交通量がサイクル毎に変動する状態で、最も制御効果が大きくなる。また、交通量が増加し、交通容量に近付くと、最大青時間での定周期動作に近くなる。

適用区間長としては、特に上限はないが、工事区間長が長くなるに連れて全赤時間が長く必要なことより、感應制御の効果が減少するため、概ね300m以下（全赤秒数で30秒程度以下）が望ましい。しかし、300m以上についても、従来の定周期に比した場合、遅れ時間を減少させることが可能である。

6. 工事用感應式信号制御機がもたらす経済効果の試算

今回開発を行なった工事用感應式信号制御機がもたらす遅れ時間の低減量について、山形での実験の例（工事区間が長い場合）を基に、時間費用に換算して簡単な経済効果の試算を行なった。

交通条件を、山形での実験で得られた交通状況が、仮に1日8時間続くとする、遅れ時間の低減量は

$$\begin{aligned} & ((13,258-4,769) \text{ 秒} + (9,939-5,932) \text{ 秒}) / 50 \text{ 分} \\ & \times 60 \text{ 分} \times 8 \text{ 時間} \\ & = 119,962 \text{ 秒} = 33.3 \text{ 時間/日} \end{aligned}$$

これを年間365日使用したとすると

$$33.3 \times 365 = 12,154 \text{ 時間/年}$$

延べ遅れ時間を低減させることになる。

1時間当たりの時間単価について、便宜的に表一3に示す時間評価値⁷⁾と仮定し、当該路線での車種混入割合を道路交通センサスデータから、普通貨物15%、小型貨物15%、バス2%、乗用車68%とし時間単価を算出すると3,610円/時となる。

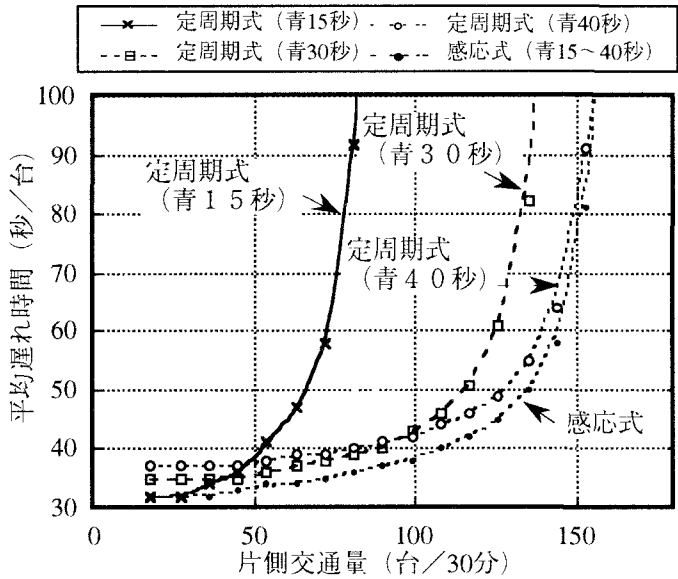
この価を用いて1年間の時間費用を算出すると、

$$12,154 \times 3,610 = 43,875,940 \text{ 円/年}$$

すなわち、1基あたり年間約4千4百万円もの時間費用が節約できることになる。片側交互通行を伴う道路工事は、全国で年間かなりの数実施されていることを考えれば、今回開発を行なった工事用感應式信号制御機による遅れ時間の低減が、日本社会全体にもたらす経済効果は想像を絶する金額になることは計算するまでもない。また、感應信号制御機一式にかかる設備投資費用は、1年あたりの節約される時間費用の1%～2%程度のオーダーにすぎない。

表一3 車種別時間単価⁷⁾

車 種	単価 (円/台・分)	備考
小型貨物	58.89	車両留置料金
小型貨物	41.00	車両留置料金
バ ス	283.02	1人当り国民所得
乗用車	53.12	労働者1人当り賃金



図一10 制御方式と遅れ時間の関係
(全赤時間25秒、飽和流率1200台/青1時間)

7. おわりに

適用試験を通じて、工事用感応式信号制御機の基本的な有効性が確認された。これにより、従来は信号機が交通需要に対応できない理由から、交通誘導員を配置する場合には、信号機を止めて交通誘導を行っていたが、本感応式制御機を使用した場合には、交通誘導員と工事用信号機が共存でき、車両の誘導をある程度信号機に任せることにより、交通誘導員の負担が飛躍的に軽減する。その結果、歩行者や自転車等の安全確保が可能となり、より安全な交通運用が図れることが示された。

さらに、道路工事により車両が受ける遅れ時間による経済損失は莫大なものがあり、工事を行なう場合には、工法選択による工期の短縮が重要⁸⁾であるとともに、同一の工期であっても感応式信号制御機を使うことにより、経済損失を極力減らすことが可能となる。

現在、全国3箇所の現場において、今回開発した感応式信号制御機の終日運用試験使用を行っており、実用化に向けての最終試験を行なっている。

今後の課題として、感応アルゴリズムの高度化（全赤時間の学習による自動生成や、近接信号との連動化）改良等が挙げられ、実用化に向けてさらなる努力を続けてゆきたい。

今後、工事用感応式制御機が工事現場で使用され、ドライバー、ひいては社会のために、より快適な道路交通の運用が図られることを、望んでやまない。最後に、我々の趣旨を理解していただき、実験現場を快く提供していただいた建設省関東地方建設局長野国道工事事務所笹平出張所の方々、新潟県土木部および新潟県警察本部交通規制課の方々、また、最大の難関で、一度は断念しかけた超音波セン

サーについて、献身的に協力を頂いた日本信号（株）商品開発室の桐生典男氏、多くの技術的指導を頂きました東京都建設局土木技術研究所笹岡弘治氏に厚く感謝致します。

今回の提案・開発・実験の過程で実際に計画から試作品の作成、実験まで行ない、実際に新しい物を作ることの難しさと楽しさ、理論と現場の大きな違いや、その融合の必要性等について、開発メンバー共々痛切に感じたことを記しておわりとします。

参考文献

- 1) Department of Transport : An Introduction to The Use of Vehicle Actuated Portable Traffic Signals、HMSO、1986
- 2) 笹岡弘治、高田邦道：工事区間での片側交互通行信号の運用法の考察、交通工学、Vol.27、No.1、pp25-32、1992.1
- 3) 笹岡弘治：2車線道路での工事中の交通処理に関する考察、交通工学、Vol.28、No2、pp31-38、1993.3
- 4) 中辻隆他：2車線道路の工事区間における遅れ時間と青時間について、土木計画学研究講演集17、pp173-176、1995
- 5) 和田かおる他：道路工事における仮設信号の動的制御支援用シミュレーションモデルの開発、建設マネジメント研究論文集、Vol.2、pp77-84、1994
- 6) 交通信号の手引、（社）交通工学研究会、pp131-132、1994
- 7) 全国道路利用者会議、道路行政、p687、1993
- 8) 野村利充：工事中の道路の交通制限による経済損失算出についての一考察、道路交通経済、No.68、pp114-120、1994

Production of Vehicle Actuated Traffic Signal Controller for Road Work and Results of Field-Testing

In a road construction site where pedestrians and vehicles have to use either of the inbound or the outbound lane each other on the spot, traffic control is made in accordance with flagman's instructions or indications transmitted from the fixed-time signals on the site. As to the control provided by such traffic guides, serious problems are often pointed out with the danger of collision with cars and vehicles to which the flagmans are always exposed. As to the control by means of traffic signals on the spot, seriousness is likewise brought about with the production of undesired waiting time or traffic congestion owing to the fixed-time signal control. Keeping such a situation in mind, a controller with which signal control complying with traffic demand is possible has been built up as a prototype in order to allow the burden imposed upon the flagmans to be alleviated or the safety of such injury-prone guides to be secured together with the purpose of accomplishing smoother traffic control. With the aid of the prototype, experiments on the site were conducted accompanied with the analysis taking up principally the lowering effect of the delay time. As a result, it is confirmed that the vehicle-actuated traffic signal controller developed for road work has sufficient utility and abundant usefulness.