

(35)GAによる道路トンネルの5心円型内空断面の最適化に関する基礎的研究

ON THE OPTIMIZATION METHOD OF THE INNER SECTION AREA OF FIVE-CENTERED CIRCLE ROAD TUNNEL USING GA

千々岩浩巳*, 三原徹治**, 兼松建男***, 太田俊昭****

Hiromi CHIJIWA, Tetsuji MIHARA, Takeo KANEMATSU and Toshiaki OHTA

*第一復建係 技術本部技術開発室 (〒812 福岡市博多区博多駅南 3-5-28)

**工博 九州共立大学助教授 工学部土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

***第一復建係 技術本部 (〒812 福岡市博多区博多駅南 3-5-28)

****工博 九州大学教授 工学部建設システム工学科 (〒812-81 福岡市東区箱崎 6-10-1)

The typical form of road tunnel is classified into three types, i.e., one-centered circle, three-centered circle and five-centered circle. And the three-centered circle is usually used on the general road tunnel. However, the three-centered circle would be uneconomic for the large road tunnel inner section area. The five-centered circle which has many design parameters is recently paid attention to the economic form.

This paper presents the rational design method of the inner section area of five-centered road tunnel using the GA with selecting the crossing strings, and shows a characteristic of this method by the numerical experiment.

Key words: road tunnel, inner section area, genetic algorithm

1. まえがき

道路トンネル断面の設計は、道路構造令¹⁾(以下、構造令)に従って行われているが、平成5年11月に構造令の一部改正が行われ、同時に道路橋・道路トンネルなどに係わる最小幅員の縮小規定が廃止された。ため、断面設定の考え方が一部異なってきた。つまり、歩行空間における自転車や歩行者への配慮から、自歩道部の幅員が拡大された。従来までは、橋梁部やトンネル部などの区間では、車道幅など主要な箇所を残して路肩部や自歩道部の幅員を縮小することが可能であったが、この縮小規定の廃止によって、橋梁やトンネル部前後の道路幅員をそのまま確保しなければならなくなった。これらがあいまって、道路トンネル設計時に考慮すべき道路幅員が従来より倍近くに広がるケースもでてきた。

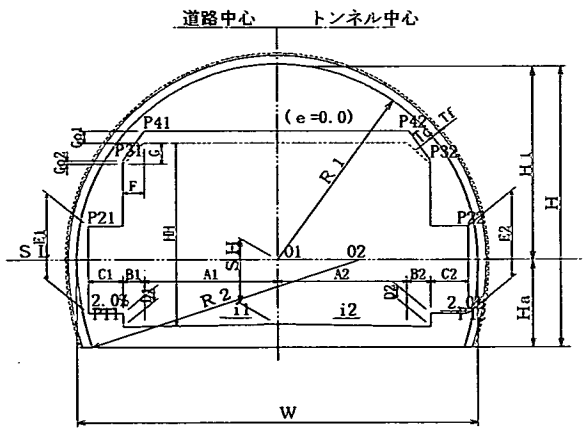
従来までのトンネル断面の設計は、設計パラメータの少ない1心円および3心円が用いられてきた。これらの断面形式は、トンネル規模が比較的小規模のときには、他の断面形式に比べて有利であり、特に NATM 工法における覆工厚や鋼製支保工、吹付けコンクリートなどの施工費や施工性においても十分合理的であることが認められている。しかし、トンネルの内空幅(スプリングライン上の幅)が大きく広がると、これまでの断面決定の方法で設定した断面形式では、合理的とはいえない結果が得られる場合も出現している。その一つの対策として、同じ幅員構成ではより内空断面積を小さくすることがで

きる5心円断面を採用することが考えられるが、この断面形式は決定すべき設計パラメータの数が多く、また設計例も少ないため、合理的な断面設定がかなり困難である状態にある。

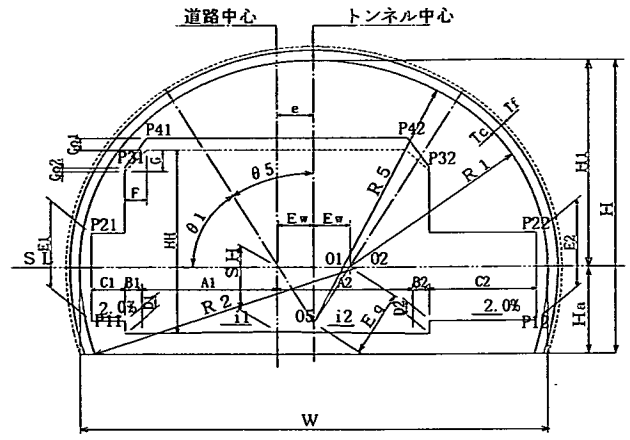
本研究は、このような現状から5心円断面の設計パラメータ値をGAを用いて決定する基本的な手法の提示を目的とするものである。すなわち、建築限界と内空縦横比と呼ばれる条件を制約条件とし、掘削断面積最小化を目的関数とする最適設計問題を設定した後、交配個体選択GA²⁾を用いた具体的な解法を提案するとともに、簡単な数値計算例により提案法の妥当性を検証するものである。

2. トンネル5心円断面の諸元決定法

本研究で対象とするトンネル断面の概要および使用する記号を図-1に示す。図-1(a)は3心円断面であり、(b)は5心円断面である。図より、5心円断面は3心円断面に比べて扁平な形状をしているため、内空幅が比較的広くなるような幅員構成をもつトンネルの断面として合理的な形状であると考えられる。しかし3心円断面に比較して、同時に決定すべき設計パラメータが単純に増加するのみならず、各設計パラメータが相互に依存しているため、設計パラメータに優先順位をつけて断面諸元を設定するような断面設定アルゴリズムでは、必ずしも経済的なトンネル断面が得られるとは限らず、また、



(a) 3心円断面



(b) 5心円断面

図-1 トンネル断面の外形と記号

すべてのパラメータが幾何学的な要素であるため、各パラメータの設定方法にも工夫が必要と考えられる。

2.1 設計基本式

トンネル断面設定時に決定すべき設計パラメータは、各断面形状によって異なるが、次のように整理できる。

○3心円

- ・ e (変心量),
- ・ S_H (スプリングラインの高さ),
- ・ R_1 (上半半径),
- ・ R_2 (下半半径)

○5心円

- ・ 3心円の設計パラメータに加えて,
- ・ R_5 (上半内挿半径),
- ・ θ_1 (上半半径のなす角度)

トンネル断面の設定を行う際には、一般に内空断面をもとに検討を行っているが、実際には、覆工や吹き付けコンクリートの厚さを付加した断面を掘削する必要があるため、本研究の目的関数には、掘削断面を用いた。

制約条件としては、図中 P_{ij} とトンネル内空面との離れ、および内空縦横比 $H/W = (H_a + R_1)/(2 \cdot R_1)$ を用いた。なお、 H/W の諸元は道路トンネル設計基準 (構造編)・同解説³⁾を参考に設定した。

以上をまとめると、次式のように定式化できる。

既知量: HH (高さ), $Go1, Go2$ (オーバーレイ寸法), $Aj \sim Gj$ (幅員構成), Ij (路面横断勾配), DA_{ij} (各建築限界点の許容離れ)

設計変数: $e, S_H, R_1, R_2, R_5, \theta_1$
(ただし、 R_5, θ_1 は5心円のみ)

目的関数: $A_K \rightarrow \min$. (1a)

制約条件:

$$DH_{ij} - DA_{ij} \leq 0.0 \quad (i=1,2, j=1,2,3,4) \quad (1b)$$

$$0.6 - H/W \leq 0.0 \quad (3心円の場合) \quad (1c)$$

$$0.57 - H/W \leq 0.0 \quad (5心円の場合) \quad (1d)$$

ここで、 DH_{ij} は、建築限界点と内空断面各半径線との離れを示す。

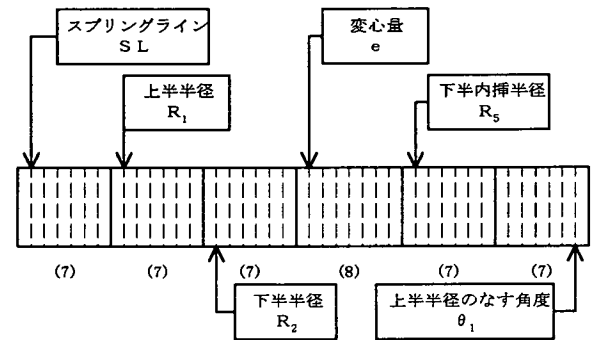


図-2 線列のコーディング

(3心円: 29bit, 5心円: 43bit)

2.2 解法

式(1)の設計変数はすべて連続変数であり、連続的最適化問題である。しかし、一般には、各設計パラメータはラウンドナンバーとして取り扱われているため、離散的最適化問題として取扱うことが实际的である。その解法としてGAの適用を考慮して、次のように各変数に離散値データを定義した。

- ①変心量 e は、符号 (トンネル中心を基準に左(-)右(+)) と量として取り扱う方法が容易に考えられるが、ここでは、符号はトンネル中心と道路中心との位置関係から符号を判断し、変心量 (符号無) のみを離散値データとして定義した。離散値データは、0 から 0.01m 間隔で計 256 個 (8bit, 最大 2.55m) とした。
- ②スプリングラインの高さ HH は、0 から 0.05m 間隔で計 128 個 (7bit, 最大 6.35m) とした。
- ③上半半径 R_1 は、3.0m から 0.05m 間隔で計 128 個 (7bit, 最大 9.35m) とした。
- ④下半半径 R_2 は、 R_1 より小さくなることは幾何学上あり得ないため、ここでは、 R_1 との長さの差を設計変数として定義する。変数との差は、0 から 0.05m 間隔で計 128 個 (7bit, 最大 6.35m) とした。

⑤上半内挿半径 R_5 は、下半半径 R_2 と同様に 0 から 0.05m 間隔で計 128 個 (7bit, 最大 6.35m) とした。

⑥上半半径のなす角度 θ_1 は、スプリングラインとトンネル中心との間の角度であるため、 0° から 90° の間を 1° 間隔とし、計 91 個 (7bit) とした。

実際の断面設定時には、各設計変数間にあらかじめ何らかの規則を設定し、このように細かく離散化した数値を用いない場合もあるが、ここでは、最適設計の観点から、トンネル設計に対する何らかの示唆を得ることも考えて、必要と考え得るより多くの離散値データを定義した。また、各種パラメータに対して別々のデータ間隔を定義することにより、実際の設計条件に対応した変更も容易である。以上の設計変数について、GA に用いる線列のコーディングを図-2に示す。

なお、参考までに 3 心円断面および 5 心円断面の一般的な設計パラメータの設定手順を図-3に示す。

3. 設計計算例

提案法の妥当性の検討および 3 心円断面と 5 心円断面との断面形状の比較を行うため、3 種 3 級片側自歩道 (総幅員 11.25m, 図-4 参照, このような場合には通常 3

心円断面が採用されている) を対象としたトンネル断面の設定を試みる。

解法には交配個体選択 GA²⁾を用い、数値計算に用いた GA パラメータは、人口数 $N_p=1000$, 交配個体数 N_s は N_p の 1~2 割程度 (100~200), 計算世代数 $N_G=200$ とした。なお、トンネル断面設定時に用いた諸値は表-1のとおりである。

表-2 および表-3 にそれぞれ 3 心円断面および 5 心円断面の計算結果を示す。

交配個体選択 GA を含めて、GA による解法は設計問題の全域的な最適解を確実に求めることができるほど強力な手法ではない。このため GA 的パラメータを変化させて数値計算を行い、それらに出現する良好な解をこの問題の解として評価せざるを得ない。そこで、表中の計算結果には、交配個体数 N_s を N_p の 1~2 割の範囲で変化させ、各 N_s 値ごとに得られた最良解を示す。

まず、単純に 3 心円断面と 5 心円断面の内空断面積 A_N と掘削断面積 A_K を比較する。3 心円断面の内空断面積は $70.852\text{m}^2 \sim 70.956\text{m}^2$ であるのに対して、5 心円断面の内空断面積は $67.736\text{m}^2 \sim 68.637\text{m}^2$ と、単純に 3.3~4.4% 程度 5 心円断面の方が断面積が減少していることがわかる。同様に、掘削断面積 A_K を比較すると、3 心円断面が 80.739m^2 であるのに対して、5 心円断面では $77.143\text{m}^2 \sim 78.731\text{m}^2$ となり、 A_N と同様に 2.5~4.5% 5 心円断面の方が断面積が減少していることがわかる。5 心円断面の場合、構造上の観点から、吹き付けコンクリートの厚さや覆工厚が厚くなるにもかかわらず、内空断面積と掘削断面積がともに減少することから、単純に

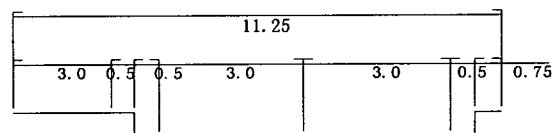


図-4 幅員構成 (3 種 3 級片側自歩道)

表-1 断面設定に用いた諸値

		3 心円	5 心円
建築限界との余裕 (m)	P_{11}	0.05	
	P_{12}	0.05	
	P_{13}	0.05	
	P_{14}	0.05	
	P_{21}	0.05	
	P_{22}	0.05	
	P_{23}	0.05	
	P_{24}	0.05	
車道高 (m)		4.50	
オーバーレイ寸法 (m)	G_{01}	0.20	
	G_{02}	0.05	
横断勾配	種類	おがみ	
	勾配	± 1.5	
吹き付けコンクリート厚 (m)		0.15	0.30
覆工厚 (m)		0.20	0.40

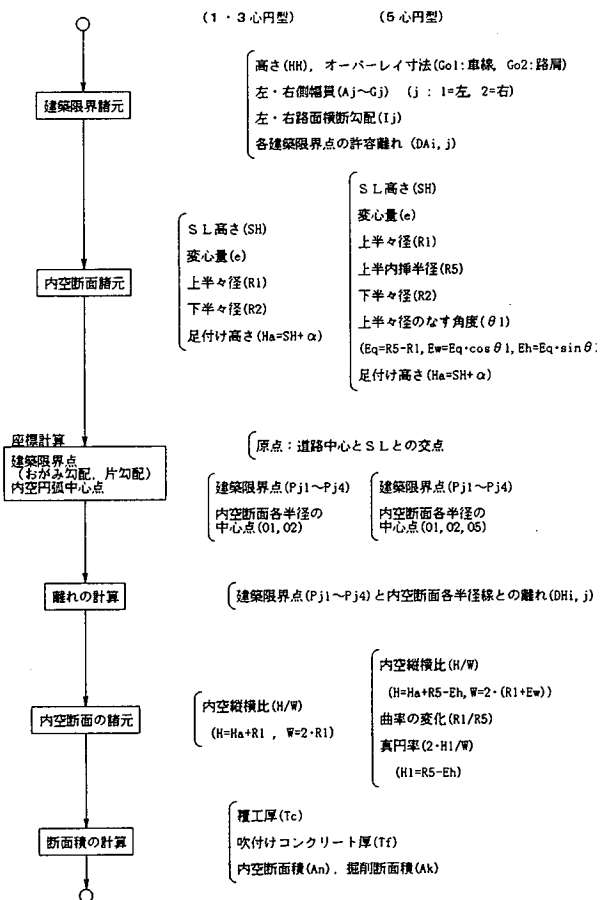


図-3 設計パラメータの設定手順

断面積の比較を行った場合には、5心円断面の方がかなり有利であることがわかる。

次に各断面形状ごとの結果に着目する。3心円断面の場合、得られた解のほとんど全てが同じ傾向を示している。すなわち、スプリングラインの高さ $S_H=0.7m$ であり、 $R_1=R_2$ となっている。これは、断面設定が、 S_H を高くして R_1 と R_2 に差を付ける断面よりも、 S_H を低くして $R_1=R_2$ とした方が断面積が有利になることを示している。特別の理由が無い場合には、 S_H を低くした方が効率的な断面となることがわかる。

5心円断面の場合、各設計パラメータ値は N_s を変化させると、様々な組合せが出現することがわかる。これは、5心円断面では最適解近傍に目的関数値（掘削断面積）がわずかに異なる設計パラメータの組合せが多数存在すること、合理的な設計パラメータの設定が非常に困難であることを意味し、自動的に合理的な設計パラメータを提示できる本提案法の有効性が確認できる。

目的関数値と各設計パラメータの関係に着目すると、規則性が比較的認められるのは、スプリングラインの高さ S_H 、上半半径 R_1 、上半内挿半径 R_5 、変心量 e であり、下半半径 R_2 および上半半径のなす角度 θ_1 には規則性が認められなかった。 R_1 と R_5 とを比較すると、 $R_5 \approx 2 \cdot R_1$ の関係が認められ、また、 S_H が $1.6m$ 前後と高く、3心円断面の S_H は比較的低い値に設定されていたのとは傾向が異なることがわかる。 R_2 と θ_1 の間には特別な関係は認められないが、 R_2 が大きくなると θ_1 も大きくなる傾向があるように思われる。

なお、 $N_s=200$ の場合は、他の場合の解と設計パラメータの傾向が大きく異なることがら、局所解に収束していることが考えられ、比較対象から除外した。

4. 結言

本研究は、トンネル断面の各種パラメータの合理的な決定法の検討を目指し、3心円断面および5心円断面に関して掘削断面を最小化する最適設計問題として定式化し、本法の妥当性を検証するとともに、5心円断面の設計パラメータに関する考察を行ったものであり、得られた知見は次のとおりである。

(1) トンネル断面を、スプリングラインの高さ、上半半径、下半半

径、上半内挿半径、上半半径のなす角度および変心量を設計変数として、掘削断面を連続変数による最小設計最適設計問題として定式化することができた。また、設計変数にラウンドナンバーを用いることにより、離散型最適設計問題に変換した。

(2) 数値計算結果から、次の知見が得られた。

- ① 設定した道路幅員（3種3級片側自歩道、11.25m）では、3心円断面と5心円断面を比較した結果、後者の方が断面積が小さく、合理的な設計となった。
- ② 3心円断面の結果から、スプリングラインの高さを低くし、1心円断面とした方が合理的となることがわかった。
- ③ 5心円断面の結果から、最適解近傍には、目的関数値はほとんど変わらない範囲に多数の解の組合せが存在し、合理的な設計を困難にしていることがわかった。
- ④ また、3心円断面の設計パラメータと比較すると、5心円断面ではスプリングラインの高さを高くして、断面を扁平にした方が合理的な断面であるなど、解の傾向が異なることが明らかとなった。

表-2 3心円断面の計算結果

N_s	S_H (m)	R_1 (m)	R_2 (m)	e (m)	Q_{NH}	A_N (m^2)	A_K (m^2)
100	0.70	6.00	6.00	-1.43	0.6000	70.852	80.739
110	0.80	5.95	5.95	-1.45	0.6092	70.956	80.865
120	0.70	6.00	6.00	-1.44	0.6000	70.852	80.739
130	0.70	6.00	6.00	-1.44	0.6000	70.852	80.739
140	0.70	6.00	6.00	-1.44	0.6000	70.852	80.739
150	0.70	6.00	6.00	-1.44	0.6000	70.852	80.739
160	0.70	6.00	6.00	-1.44	0.6000	70.852	80.739
170	0.70	6.00	6.00	-1.43	0.6000	70.852	80.739
180	0.70	6.00	6.00	-1.43	0.6000	70.852	80.739
190	0.70	6.00	6.00	-1.43	0.6000	70.852	80.739
200	0.70	6.00	6.00	-1.43	0.6000	70.852	80.739

$N_p=1000$, $P_m=0.3$

表-3 5心円断面の計算結果

N_s	S_H (m)	R_1 (m)	R_5 (m)	R_2 (m)	e (m)	θ_1 (度)	Q_{NH}	A_N (m^2)	A_K (m^2)
100	1.60	3.10	6.35	3.90	-1.32	28	0.5800	68.193	77.143
110	1.60	3.85	6.55	5.50	-1.35	41	0.5842	67.841	77.498
120	1.60	3.50	6.25	4.30	-1.37	29	0.5941	68.637	77.746
130	1.65	3.60	6.50	4.40	-1.36	37	0.5836	68.065	77.541
140	1.50	3.55	6.30	3.55	-1.34	29	0.5849	68.456	77.534
150	1.40	3.95	6.35	3.95	-1.34	33	0.5822	68.527	77.797
160	1.60	3.80	6.70	5.40	-1.34	43	0.5761	67.748	77.466
170	1.65	3.05	6.25	4.40	-1.35	26	0.5904	68.519	77.413
180	1.45	3.85	6.40	3.85	-1.34	34	0.5805	68.405	77.725
190	1.70	4.00	6.90	8.35	-1.38	51	0.5877	67.736	77.938
200	0.85	5.00	6.05	5.00	-1.41	14	0.5936	70.485	78.731

$N_p=1000$, $P_m=0.3$

なお、本研究では、単純に掘削断面のみの最小化を目的としているため、このような解が得られたと考えられる。今後は、施工性を考慮した制約条件や、トンネルの長さ方向、施工費等を考慮した目的関数を設定していくことが必要と思われる。

参考文献

1) (社) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，1983.2.

2) 千々岩浩巳，三原徹治，太田俊昭：離散的最適構造設計への交配個体選択GAの適用に関する一考察，構造工学論文集，Vol.42A，pp.381-388，1996.3.

3) (社) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説，1985.12.