

遺伝的アルゴリズムによるトンネル実験装置の最適設計

OPTIMUM DESIGN OF TUNNEL MODEL DEVICE BASED ON GENETIC ALGORITHM

久武勝保¹⁾・渋谷 卓²⁾

Masayasu HISATAKE, Taku SHIBUYA

Accuracy of the data obtained by model experiments is affected by such many factors as the frictional stress mobilized between the model ground and the experimental device, mechanical characteristics of the model ground, and the geometry of the experimental device. In order to determine the optimum geometry of the experimental device, a method of genetic algorithm, which takes into account the frictional stress and the mechanical characteristics of the ground, has been shown. Firstly, general solutions of stresses, strains and displacement are theoretically derived by considering the existence of the frictional stress. The experimental results conducted support the appropriateness of the general solutions. Parametric study shows that the optimum geometry of the model device can be determined by the method of genetic algorithm.

Key words: tunnel, model experiment, genetic algorithm, optimum shape

1. 緒論

トンネルを合理的、経済的に建設するためにはトンネルの力学特性を十分把握し、その結果を工事に生かす必要がある。力学特性の解明には、解析的手法、実験的手法、及び現場計測的手法があるが、その中で繰り返し操作が容易な模型実験は、短期間で種々のデータを得ることが出来ることから、従来多く採用されている^{1)~6)}。

2次元トンネル模型実験では通常、まずトンネル掘削前の初期地盤応力を生成し、その後に掘削するという手順が採られる。地盤に初期応力を生成させる過程、及びトンネル掘削過程においては、平面ひずみを保持するためのトンネル軸に垂直な装置と地盤との間には避けることの出来ない摩擦抵抗応力が発生する事になる。模型地盤内の応力、変位の誤差は、上記の摩擦特性、装置の幾何特性、および供試地盤の力学特性が複雑に影響するが、しかし実験誤差に及ぼすこれら諸特性の定量的な影響が検討され始めたのはごく最近のことである^{7)~9)}。

実験結果の精度を高めるためには、供試地盤の力学特性や摩擦特性に対応して装置の幾何特性をあらかじめ合理的に決定しておく必要が認められる。例えば、無限領域の地盤内に掘削したトンネルによる周辺地盤の挙動に着目した場合について、これを有限領域の地盤を用いて行う模型実験で解明する場合には、地盤の広さの大小により以下のような相反する誤差特性が発生することになる。すなわち、地盤外面に作用させる外力によって生成されるトンネル掘削位置での初期地盤応力は、地盤と装置との間に生じる摩擦抵抗応力の存在により、地盤領域が広いほど小さな値となり、誤差を増加させることになるが、一方、トンネル掘削によって発生する地盤の応力、ひずみ、変位に及ぼす地盤端面の影響については、地盤領域が広いほど誤差は小さくなる。したがって、これら両者の特徴を考慮して、装置の幾何特性を合理的に決定する必要が認められる。

本研究は、2次元平面ひずみ条件下のトンネル模型実験装置の幾何特性を遺伝的アルゴリズムの手法により最適に決定することを目的としたものである。まず、実験装置の幾何特性がトンネル掘削後の地盤挙動にいかなる影響を与えるかについて理論解析結果に基づいて明らかにする。次に遺伝的アルゴリズムの手法を説明した後、トンネル掘削に起因して生じる変位および地盤内応力の誤差を最小化する最適な装置の幾何特性を遺伝的アルゴリズムの手法で求め、種々考察を加えることとする。

1) 正会員 近畿大学理工学部土木工学科

2) 正会員 ㈱地崎工業 技術開発部

2. 装置の幾何特性による地盤内力学量の変化

2.1 応力、ひずみ、変位の一般解

2次元平面ひずみ円形トンネル実験装置内に供試地盤を打設・硬化後、図-1に示す様に地盤外面から等方外圧 p_e を作用させて初期地盤応力を生成させる過程、及びその後円形トンネルを掘削する過程で生じる地盤内の応力 σ 、ひずみ ε 、半径方向変位 u は、地盤と装置との間の摩擦抵抗応力の存在を考慮して、下記一般解から導くことが出来る⁹⁾。

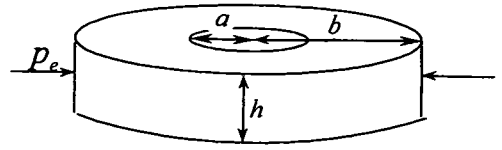


図-1 模型地盤の幾何形状

$$u = c_1 \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k^2 r} \right) e^{kr} + \frac{c_2}{r} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = (A-B)c_1 e^{kr} \left(-\frac{1}{kr} + \frac{1}{k^2 r^2} \right) - (A-B) \frac{c_2}{r^2} + A c_1 e^{kr} \quad (2)$$

$$\sigma_r = (A-B)c_1 e^{kr} \left(\frac{1}{kr} - \frac{1}{k^2 r^2} \right) + (A-B) \frac{c_2}{r^2} + B c_1 e^{kr} \quad (3)$$

$$\sigma_z = (A+B)c_1 e^{kr} \quad (4)$$

$$\varepsilon_r = c_1 e^{kr} \left(1 - \frac{1}{kr} + \frac{1}{k^2 r^2} \right) - \frac{c_2}{r^2} \quad (5)$$

$$\varepsilon_\theta = c_1 e^{kr} \left(\frac{1}{kr} - \frac{1}{k^2 r^2} \right) + \frac{c_2}{r^2} \quad (6)$$

ここに、 $A = E\nu / \{(1+\nu)(1-2\nu)\}$ 、 $B = E(1-\nu) / \{(1+\nu)(1-2\nu)\}$ 、 $k = 2\mu\nu / \{h(1-\nu)\}$ 、 c_1, c_2 は任意の積分定数である。なお、地盤は弾性体と仮定し、 r, θ は半径方向と円周方向の極座標、 h は地盤厚さ、 μ は地盤と装置との間の摩擦係数、 E と ν は地盤の弾性係数とポアソン比である。また、重力の影響は無視する。摩擦係数を0とした場合に上式から導かれる結果は、従来得られている2次元平面ひずみ条件下の無限地山の場合および厚肉円筒地山の場合の結果に一致する。

2.2 初期地盤応力に関する模型実験結果

図-2に示すように幾何特性の異なる2種類の実験装置(Experiment1, と Experiment2)により、地盤外面から等方外圧を作用させた場合のトンネル内圧を測定した。すなわち、実験装置内に地盤を作成後、予め円形トンネルを掘削し、その中に同一形状で水の充満した円形ゴム袋を挿入しておき、ジャッキにより地盤外面に外圧を作用させる。その際トンネル壁面を拘束するために、ゴム袋内の水の体積が変化しないように水圧をかけ、この水圧(=トンネル内圧)と外圧の関係を実測して、摩擦抵抗応力の程度について検討した。地盤のポアソン比は模型地盤と同一配合供試体の3軸Ko圧縮試験結果から求めた。また、以下の実験では地盤の弾性係数の影響は受けながポアソン比の影響を受けるので、両実験でこの値は異にしている。なお、円形地盤の外面に等圧の荷重を作用させるのは容易でないので、行った模型実験では、地盤の外面形状は直線で近似している。

Experiment1での実験概要図を図-3に示す。Experiment1では、トンネル深さ方向地盤厚さ $h = 28$ cm、トンネル半径 $a = 5$ cm、トンネル中央から地盤外面までの最短距離 $b = 25$ cm、地盤のポアソン比 $\nu = 0.380$ 、Experiment2では $h = 10$ cm、 $a = 5$ cm、 $b = 50$ cm、 $\nu = 0.248$ である。なお、圧力によるゴム袋の体積変化については、あらかじめ行った予備実験結果により補正している。また地盤と装置との間には図-4に示すように

テフロンシートを3枚挿入しており、傾斜法による測定摩擦角は 24.6° である。

図一5は地盤外面で作用させた外圧とトンネル内圧の関係を示す。摩擦がない理想的な場合には、応力集中によりトンネル内圧は外圧よりも大きな値になるが、実際には内圧は外圧よりも小さな値が測定される。これは、地盤と装置との間に発生する摩擦抵抗応力に起因するが、これにより外圧がトンネル位置まで十分伝わっていないことが分かる。特に、Experiment2の場合には、外圧はその約1/3程度しかトンネル位置まで伝わっていない、摩擦抵抗応力の存在が初期地盤応力分布にいかにより大きな影響を与えているかが理解できる。

図一5には、2.1から算出された内・外圧の理論解析結果も示した。これにより、本理論解析によって地盤応力を精度良く算定できることが確認できる。

2.3 幾何特性の変化による応力、変位の誤差特性

半径 b 、厚さ h を有する地盤に平面ひずみ条件の下で地盤外周から初期応力 p_e を作用させた後、半径 a のトンネルを掘削した場合について、図一6は掘削に起因して発生する地盤変位を表わしたものである。Infinite groundの結果は無限に広い地盤内にトンネルを掘削した場合の理想的な理論解析結果であり摩擦係数 μ の値は0としている。 b/a の値が大であるほど地盤外面から作用する外圧は地盤と装置との間の摩擦抵抗により減じられ、地盤中央に近い位置ほど初期地盤応力の値は小となり、したがってトンネル位置での掘削解放応力の誤差は大きくなる。また、トンネル掘削後においても、摩擦抵抗の存在のため、トンネル掘削に起因して生じる地盤変位は小さくなる。逆に b/a の値が小であれば、上記の摩擦抵抗による掘削解放応力の誤差の程度は小さくなるが、しかし地盤外面がトンネル近くに接近することにより、幾何特性の異なりにより起因する誤差は多く発生することになる。従って、 $b/a=2$ の場合には理論解析結果よりも大なる変位が発生している。このような関係はトンネル軸方向の地盤厚さ h の影響を受ける事がわかる。図一7はトンネル境界の円周方向応力について、上記と同様の関係を示したものであるが、変位と同様応力も装置の幾何特性の影響を顕著に受けることが理解できる。したがって、上記で示した幾何特性に起因する得失を考慮して、合理的にトンネル実験装置を設計すべきであることが理解できる。

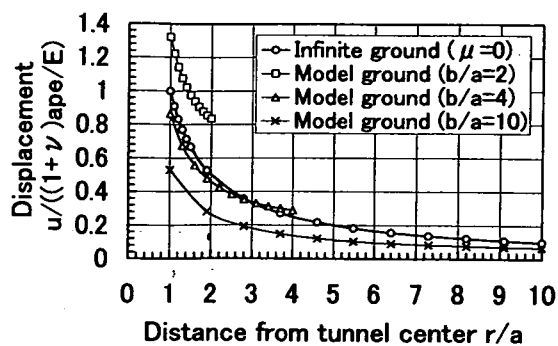
3. 遺伝的アルゴリズムによる装置の最適幾何特性の決定手法

2の結果からして、装置の幾何特性は実験結果に大きく影響するのが理解できる。そこで、以下では発生誤差が最小となるように装置の幾何特性を決定する事を考えることとする。変位誤差が最小である最適な幾何形状は、応力誤差が最小である最適な幾何形状と若干異なるので、両者の誤差の2乗和 E を最小化するように幾何形状を決定するのが合理的であると思われる。即ち、

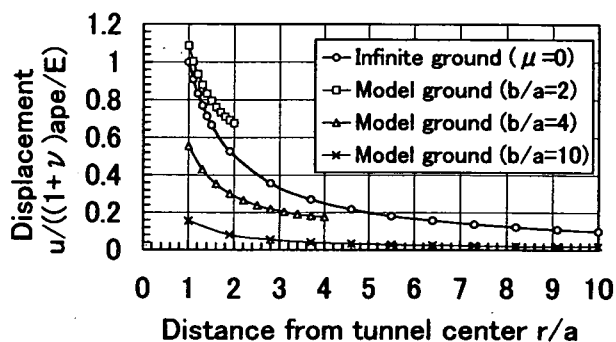
$$E = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{u_t(i) - u_m(i)}{u_t(1)} \right\}^2 + \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\sigma_{\theta,t}(i) - \sigma_{\theta,m}(i)}{\sigma_{\theta,t}(1)} \right\}^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (7)$$

ここに、添え字 t と m はそれぞれ理論と模型を表わし、 n は応力と変位を算出する地盤内の位置（以下、節点という）の数である。応力と変位の誤差を同一レベルで評価するために、摩擦がない理想的な無限地山に対して求められる理論的なトンネル壁面の半径方向変位 $u_r(1)$ と円周方向応力 $\sigma_{\theta,r}(1)$ により、変位と応力の誤差をそれぞれ無次元化している。なお、トンネル周辺地盤の応力および変位は、下記境界条件を一般解に与えて積分定数を決定することにより容易に求められる。

$$r = b \text{にて} \sigma_r = p_e$$

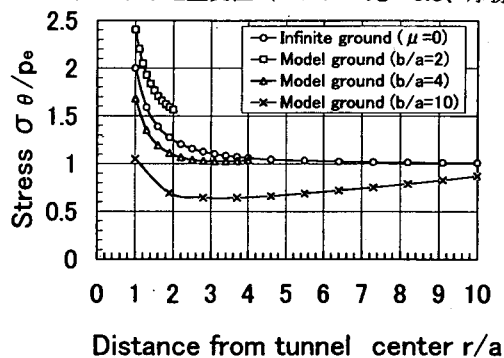


(A) $h/a=6$ の場合

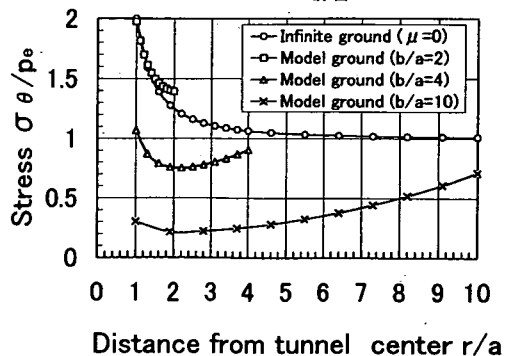


(B) $h/a=2$ の場合

図一六 掘削に起因して発生する地盤変位 (ポアソン比=0.3、摩擦係数=0.45)



(A) $h/a=6$ の場合



(B) $h/a=2$ の場合

図一七 トンネル周辺地盤の円周方向応力 (ポアソン比=0.3、摩擦係数=0.45)

$$r=a \text{ にて } \sigma_r = 0$$

なお、掘削に起因して生じる変位は、上記で求められた変位から、トンネル掘削前の初期地盤応力生成時に生じる変位を差し引いて求められる。

ここでは式 (7) の E を最小化する手法として、遺伝的アルゴリズムを採用することとする。遺伝的アルゴリズム¹⁰⁾とは、進化論の考え方に基づいて数値を操作して、最適化問題を取り扱う手法のことをいう。この手法では微分など数学的演算を行う必要がない。またシンプレックス法などの数値計画法で指摘されるように、初期値の与え方により最小値ではなく極小値が求められるということはなく、あくまでも最小値を追跡できるという長所がある。

手順は以下の通りである。

本最適幾何形状決定問題では地盤半径 b のみを未知、他のパラメータを既知とし、式 (7) の誤差 E を最小とする b の値を以下の手順で決定する。

1. 個体数を 30、各個体の染色体のビット数を 24 とする。乱数発生により各個体 b の染色体を 2 進法文字列で表現し、これを実数値に変換する。即ち、30 個の b_j の実数値が決定される。

2. 各 b_j の値を、境界条件を与えて決定した理論式 (1)、(2) の b に代入して地盤内の応力と変位を節点の数 (ここではトンネル半径領域に等間隔に 5 点) だけ計算して求め、その結果を目的関数である式 (7) に入れ、各 b_j に対する誤差 E_j の値を算出する。

3. 下記シグモイド関数

$$f(E) = 1/(1 + \exp(E)) \quad (8)$$

を適応度関数 f とし、上式の E に E_j を代入してそれぞれの適応度 f_j を計算する。誤差 E の値が小さいほど適応度関数 f の値は大きくなり、したがって適応度は高くなる。

4. 適応度の高い値を与える b_j ほど選択されやすいというルーレットルールに基づき、乱数を発生させることに
より、子孫を残すにふさわしい親 b_j を新たに選択・決定する。すなわち、全ての個体数 (30) の回数だけこれを
行って、30 個の親を新たに選択・決定する。

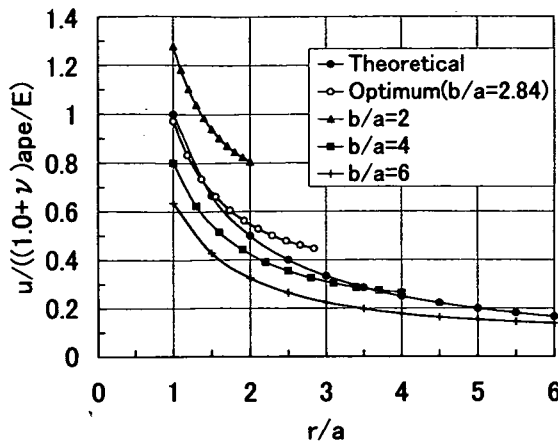
5. 選択された親同士で染色体の交叉を行う (交叉確率は 0.25 とした)。即ち、乱数に基づいて両親を選択・決定し、また乱数によりその染色体の一部を入れ替えて、二つの子孫を残す。これにより、両親は消滅し、二つの子孫が新たに集団に加わる。したがって全個体数 30 は不変である。

6. 突然変異を起こさせる。即ち、全ての染色体一つ一つについて (2 進文字一つ一つについて) 乱数を発生させ、その値が突然変異確率 (本解析では 0.01 とした) より小さい場合に遺伝子座のビットを反転さす。すなわち 1 の値は 0 に、0 の値は 1 に反転さす。これにより、この個体の実数値がランダムに変わることになる。

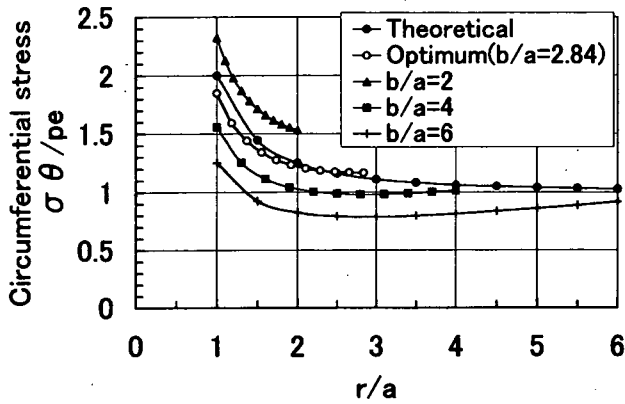
7. 2.にもどって上記を 500 世代にわたり繰り返して、最終の b 値を採用する。

4. 解析結果と考察

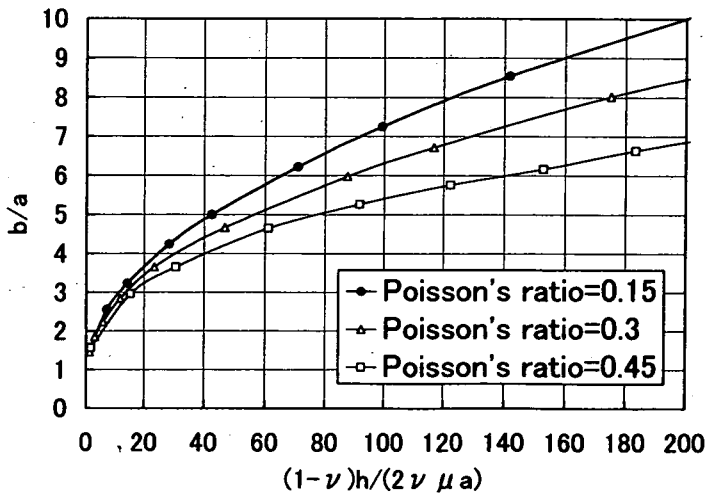
図-8 は 3.の手法で求められた最適な b/a 値 (=2.84) を用いて算出した変位、任意の b/a 値 (=2、4、6) を与えた場合の変位、および摩擦のない無限地山における理論変位 (=Theoretical) を比較して示したものである。また、図-9 は円周方向応力について、図-8 と同様の関係を示している。これらの図から、最適解の結果は、理論解にかなり近い値を与えており、本手法により幾何形状が妥当に決定されていることが確認できる。地盤を



図—8 求められた最適幾何形状の場合と他の場合における変位の比較 ($h/a=4$, $\nu=0.4$, $\mu=0.4$)



図—9 求められた最適幾何形状の場合と他の場合における円周方向応力の比較 ($h/a=4$, $\nu=0.4$, $\mu=0.4$)



図—10 最適幾何形状とポアソン比、摩擦係数の関係

広くすることにより増加する誤差と、地盤を狭くすることにより増加する誤差はそれぞれ発生原因が異なるので、ここで求められた最適幾何形状は、両者による誤差のバランスを評価して決定されたといえよう。すなわち、ここで求められた最適な b 値よりも地盤を広く、あるいは狭くして実験をすればより多くの誤差が生じることになる。

図-10 は種々のポアソン比 ν および摩擦係数 μ を有する模型実験について、遺伝的アルゴリズムの手法により最適な幾何形状を求めたものである。なお、横軸は地盤厚さ h 、トンネル半径 a 、 ν, μ で無次元化して表している。この図によれば、地盤のポアソン比および摩擦係数が小であるほど、また無次元地盤厚さ h/a の値が大であるほど、最適な b/a 値は大となる事が理解できる。使用地盤の ν, μ をあらかじめ求めておけば、この図を用いることにより最適な幾何形状を決定することが可能である。

5. 結論

1. トンネル掘削前の初期地盤応力および掘削後の地盤の応力、変位が、装置の幾何特性、使用供試地盤の力学特性、および地盤と装置との間の摩擦特性の影響を受けることを、模型実験と理論解析の結果により示した。
 2. 上記の諸特性を考慮して、遺伝的アルゴリズムの手法により最適な実験装置の幾何特性を決定できる事を示した。
 3. 地盤のポアソン比、地盤と装置との間の摩擦係数、トンネル軸方向の地盤厚さが与えられた場合について、地盤広さとトンネル半径の比の最適値を遺伝的アルゴリズムにより求めて図表化した。この結果は、等方初期応力作用下の円形トンネルについて求めたものであるが、非円形トンネルや非等方初期応力作用下の場合等についても、この結果を利用する事により、ある程度の最適な幾何形状の決定に利用できると思われる。
- 従来、実験装置の幾何特性については、誤差評価を定性的に行って設計していたことを考えれば、本論文による定量的な評価手法は、有効な設計アプローチになり得るものと思われる。地盤の非線形力学特性が卓越する場合の最適幾何形状の決定などについては本論文では取り扱っていないが、同様のアプローチが適用できるものと思われる。

参考文献

- 1) 川上義輝・朝倉俊弘：トンネル掘削に伴う周辺地山の挙動に関する模型実験（その2）、鉄道技術研究所速報、No.A-87-209, pp.1-29, 1987.
- 2) 土屋敬：ロックボルトのトンネル補強効果と最適設計パターンに関する実験的研究、土木学会論文集、第436号, pp.17-26, 1991.9.
- 3) 梨本裕・高橋貞彦・今田徹：孔内除荷模型実験による地山特性曲線とトンネル最適設計、土木学会論文集、第444号、pp.41-48, 1992.3.
- 4) 小山幸則・米島賢二・新井泰・井原俊一・大原英史：2円形シールドトンネル模型載荷実験、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第3巻、pp.287-292, 1993.11.
- 5) 伊藤富男・久武勝保：新設トンネルがそれに平行な既設トンネルの覆工応力に与える影響、土木学会論文報告集、第308号、pp.77-84, 1981.
- 6) 伊藤富男・久武勝保：粘弾性地山内の任意形状トンネル覆工に作用する地圧、土木学会論文報告集、第307号、pp.51-57, 1981.
- 7) 久武勝保・渋谷卓：トンネル模型実験装置の設計と初期応力生成における考察、第32回地盤工学研究発表会講演集、pp.1259-1260, 1997.
- 8) 久武勝保・渋谷卓：2次元トンネル模型実験における誤差特性について、土木学会第54回年次学術講演概要集、第三部、pp.30-31, 1999.
- 9) 久武勝保・渋谷卓：トンネル模型実験における誤差特性、トンネルと地下、363号、2000.
- 10) 萩原将文：ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム、産業図書、1999.