

粒子群最適化を用いたトンネル掘削問題の逆解析

西松建設(株) 正会員 ○岡井 崇彦
西松建設(株) 亀谷 英樹

1. はじめに

本研究は、粒子群最適化(Particle Swarm Optimization : PSO)¹⁾による最適化手法と有限差分法²⁾を組み合わせ、トンネル掘削問題における地山の非線形構成則や初期応力などの複数の特性値を同時に推定することを試みたものである。本稿は、研究の初期段階として、数値シミュレーションによる本解析手法の妥当性確認と問題点について報告するものである。なお、粒子群最適化と本解析手法の詳細に関しては、本論文の紙面上の問題から参考文献3)にて別途報告する。

2. 数値シミュレーションによる逆解析手法の検証

2-1 解析条件と解析ケース

解析モデルは、順解析と逆解析で共通とし、2次元平面ひずみ問題とした(図-1参照)。本研究では、問題の簡略化のために、トンネル形状を直径6mの真円モデルとした(図-2参照)。地山の初期応力は、解析領域内で一様な応力状態を初期応力として導入した。地山は、単一土層として、破壊基準をMohr-Coulomb則とした完全弾塑性モデルとし、支保部材である吹付けコンクリートを弾性体としてモデル化した。

解析ケースは全部で5ケースとした。CASE0は順解析によって、逆解析の入力条件となる内空変位(仮想計測変位)を算出する基本ケースである。内空変位は図-2の8測線の相対変位とした。地山特性値などの解析条件を表-1,2に示す。同表中の括弧内数値は、逆解析における同定パラメータの制約範囲を示している。CASE1~4は、CASE0で算出した内空変位を入力値とした逆解析ケースである。各解析ケースの同定パラメータの組合せを表-3に示す。収束の判定は、仮想計測変位と逆解析による内空変位の誤差の二乗和(以下、評価関数 E_f と呼ぶ)で判定することとし、 $E_f=8.0\times10^{-6}$ と設定した。この基準を満足すれば、1測線当りの平均誤差は $1.0\text{mm}(=(8.0\times10^{-6}/8)^{0.5})$ 以下となる。

2-2 解析結果

逆解析したパラメータと内空変位の結果を表-4、図-3に示す。図-3より、内空変位の誤差は、全ケースの各測線で概ね1mm以下であり、逆解析結果はトンネルの変形を良好に再現できたと評価できる。表-4より、地山変形係数と吹付けコンクリートの弾性係数はパラメータ数が少ないCASE1~3では真値に対する誤差が数%と小さい。これらの変数は、トンネル法線方向への壁面変位に与える感度が高いため、再現性が良好であると考えられる。しかし、パラメータ数が多いCASE4では評価関数が小さいにもかかわらず誤差は15%以上に拡大している。一方、両者のポアソン比は、評価関数が小さいにもかかわらず真値からの誤差を45%も有するケースがある。また、評価関数の大小関係とポアソン比の再現性ととの相関性は低いと評価できる。これはポアソ

表-3 各解析ケースの同定パラメータの設定

	地山物性				地山の初期応力			吹付け物性	
	D	ν	c	ϕ	σ_x	σ_z	τ_{xz}	E_c	ν_c
CASE1	○	○	—	—	—	—	—	○	○
CASE2	○	○	○	○	—	—	—	○	○
CASE3	○	○	—	—	○	○	○	○	○
CASE4	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※ ○ : 同定パラメータ, — : 固定パラメータ

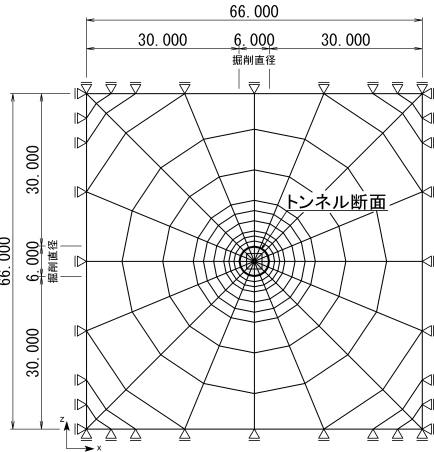


図-1 解析モデル(全体図,単位 : m)

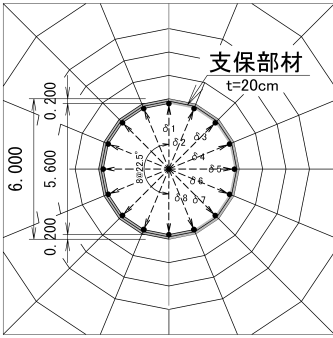


図-2 トンネル内空変位の計測線

表-1 数値解析に用いた地山物性値

地山の初期応力			
水平方向 $\sigma_x(\text{N/mm}^2)$	鉛直方向 $\sigma_z(\text{N/mm}^2)$	せん断方向 $\tau_{xz}(\text{N/mm}^2)$	面外方向 $\sigma_y(\text{N/mm}^2)$
-3.96 [-5.00~0]	-2.64 [-5.00~0]	-0.70 [-5.00~0]	-1.98 ($=\nu(\sigma_x+\sigma_z)$)
地山変形係数 D (N/mm ²)	ポアソン比 ν	粘着力 c (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)
500 [100~1000]	0.30 [0.20~0.40]	0.50 [0.0~1.00]	20.0 [15.0~35.0]

※表中の括弧内数値は、逆解析における各パラメータの制約範囲を示す。

表-2 吹付けコンクリートの物性値

弾性係数 $E_c(\text{N/mm}^2)$	ポアソン比 ν_c	厚さ t (cm)
4000 [1000~8000]	0.20 [0.15~0.35]	20

キーワード 粒子群最適化(Particle Swarm Optimization : PSO), 有限差分法, トンネル逆解析
連絡先 〒105-8401 東京都港区虎ノ門1丁目20番10号 西松建設(株)土木設計部 tel:03-3502-7637

表-4 順解析・逆解析の結果一覧

	評価関数	地山物性				地山の初期応力			吹付け物性	
		D N/mm ²	ν	c N/mm ²	ϕ deg	σ_x N/mm ²	σ_z N/mm ²	τ_{xz} N/mm ²	E_c N/mm ²	ν_c
CASE0	真値	500	0.30	0.50	20.0	-3.96	-2.64	-0.70	4000	0.20
CASE1	0.09	497	0.31	---	---	---	---	---	3895	0.29
CASE2	0.26	492	0.31	0.43	21.8	---	---	---	4027	0.20
CASE3	1.45	512	0.30	---	---	-4.03	-2.70	-0.73	3932	0.25
CASE4	0.28	584	0.24	0.25	25.5	-4.62	-3.20	-0.87	4613	0.25

※ 評価関数は表中の値に 10^{-6} を乗じたものである。

ン比が、主にトンネル周方向の変形に影響を与える変数であることから、トンネル内空変位に与える感度が低くなっているためと考えられる。

表-4より、地山の粘着力と内部摩擦角に関してはややばらつきが大きい傾向がある。この原因としては、完全弾塑性モデルが、降伏点の前後で変形係数の変化が極端に大きいことや、後述する塑性領域と要素の大きさに起因していることなどが考えられる。地山の初期応力は、CASE3では再現性が良好であるが、パラメータ数が多くなるCASE4では評価関数が小さいにもかかわらず誤差が大きくなっている。この原因として、パラメータが多いケースでは、内空変位を真値に合致させるために、複数のパラメータが調整しあうことで、複数の解が存在していると考えられる。例えば、内空変位を真値に合致させるために、変形を大きくする場合には、地山変形係数を小さくすることと、初期応力を大きくする方法があり、両者の比率がバランスしていれば、個々の同定パラメータが真値と異なる場合でもCASE0の内空変位を再現することができる。さらに、塑性領域の大きさに強い影響力を持つ地山粘着力と内部摩擦角が加わることで、そのバランスはより複雑化する。このため、パラメータの数が増えると、真値に近い解を再現する組合せが多くなり解析精度が低下すると考えられる。

CASE0,3,4の地山の塑性領域の分布を図-4～6に示す。図-4,5より、CASE0の塑性領域はトンネル壁面からおおむね1mの範囲に分布し、CASE3の結果はCASE0をほぼ正確に再現している。同様に、CASE1とCASE2についても良好な再現性を確認できた。一方、同定パラメータの数が多いCASE4の再現性は他に比較するとやや低いものであった(図-6参照)。しかし、その差は1要素分(1m分)の差違であり、実務上では大きな問題になる範囲ではないと考えられる。CASE4の再現性が低い原因の一つとして、解析モデルの離散化の問題が考えられる。すなわち、本解析では、真値(CASE0)の粘着力を $c=0.5\text{N/mm}^2$ と設定したが、離散化の影響で1つの要素を塑性化する粘着力には、例えば、 $c=0.3\sim 0.7\text{N/mm}^2$ などの幅があると考えられる。この影響は、1要素の大きさが大きくなるほど顕著になると考えられる。ただし、この問題はメッシュ形状の調整や他の連続性の高い構成則を採用することにより改善されることが考えられる。また変位測線の閉合など測線・測点の選定を検討することや地中変位を入力変位に加えることで解析精度の向上を図ることができると考えられる。

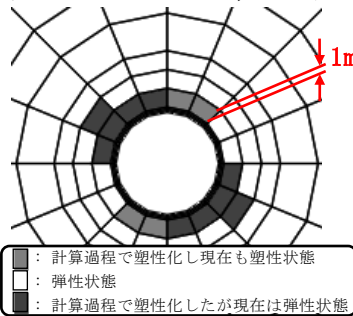


図-4 CASE0の塑性領域

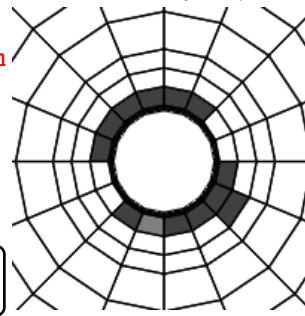


図-5 CASE3の塑性領域

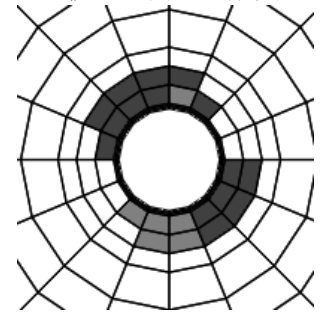


図-6 CASE4の塑性領域

3. まとめ

本研究では、数値シミュレーションによって、トンネル掘削問題における複数のパラメータを同時に同定することを試みた。その結果、本解析手法が、おおむね妥当な再現性を有することを確認したと同時に、ばらつきや収束性についていくつかの問題が存在することも確認できた。今回の試計算では、やや誤差の大きいパラメータも存在したが、トンネル工事の実務において有効な設計ツールとして活用できると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、山口大学大学院の中村秀明教授には最適化手法に関するご指導とご協力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 中村秀明, 王 桂萱, 江本久雄, 宮本文穂: Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析, 土木学会論文集, Vol.62, No.1, pp.107-118, 2006.2
- 2) Cundall, P.A. and Board M. : A Microcomputer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Programs, Proc. of the 6th International Conference on Numerical Methods in Geo-mechanics, 1988
- 3) 亀谷英樹: 粒子群最適化を用いたトンネル掘削問題の逆解析(仮), 土木工学社, トンネルと地下(論文投稿中)

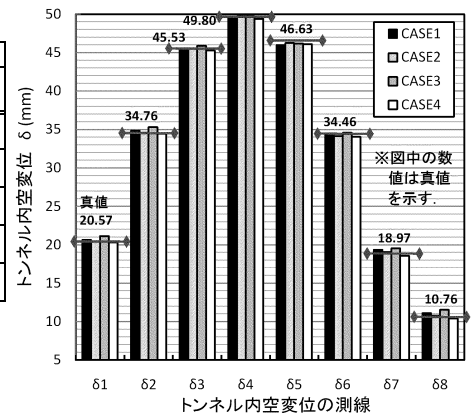


図-3 トンネル内空変位の解析結果