

トンネル一次覆工の最適設計の一手法

An optimum construction method for primary lining of a tunnel

久武 勝保*・中野 剛**

Masayasu HISATAKE, Tsuyoshi NAKANO

In construction of a tunnel, it is necessary not only to keep the mechanical stability of the tunnel but also to make the construction cost minimum. In order to satisfy the both conditions, a numerical approach has been proposed here. The method searches the minimum construction cost of the primary tunnel lining under keeping the mechanical stability of the lining. Numerical analysis of non-linearity, which takes advance velocity of the tunnel face progress and time dependency of both strength of shotcrete and mechanical characteristics of the ground around the tunnel into account, is coupled with the genetic algorithm, and optimum cost and executive conditions are determined.

Key Words: genetic algorithm, minimum cost, mechanical stability, non-linear analysis

1. 緒論

トンネル建設における設計・施工の規格は、過去の実績で得られた経験をもとにしたものが通常適用される。トンネル一次覆工に関しては、地山の事前調査結果を地山種別に照合し、その種別決定により設計・施工・費用が決定される。しかし、そこでは一次覆工の力学的な安定条件と建設コストの最小化条件を同時に満足するようにして施工条件が決定されているわけではない。建設費用の最小化と一次覆工の安定性について、両者の関係を直接結びつけた最適化に関する研究が十分行われていない点や、地山の力学特性が事前に十分把握できない点等の理由により、トンネル工学におけるこの方面の研究成果は十分とはいえない現状にある。

本研究は、トンネル一次覆工の力学的安定性と建設費用の最小化の関係について、非線形数値解析手法と遺伝的アルゴリズム（以後、GA）を融合させた手法により検討し、トンネル一次覆工を最適に建設するための一手法を提案するものである。提案手法のデモンストレーションとして、モルタル注入された鋼管支保工（以後、鋼製支保工）と普通吹付けコンクリート（以後、吹付けコンクリート）から成る一次覆工により建設される膨張性地山でのトンネルを採り上げる。膨張性地山では、鋼製支保工が降伏しても座屈をしない限りはその地山支持能力は保たれるが、吹付けコンクリートが降伏すると一次覆工の地山支保能力は急激に低下する。そこで、吹付けコンクリートが降伏しないという制約条件を満足しながら建設費用を最小化する施工条件をGAによって求めている。

設計の段階で本手法を適用する際には、地山の力学特性が十分把握できていない場合があるのである程度の誤差の発生はやむを得ないが、しかし施工条件と費用に関するある程度の関係は把握できるという利点はある。また、実施工時において地山の力学特性に関する逆解析結果を利用することが出来れば、本手法の効果は大きいものと思われる。本デモンストレーションでは地山の力学特性はトンネル掘削前の調査坑変位の逆解析結果から得られており、これを用いて最適施工条件と最小建設費用が求められ、種々考察が加えられている。

* 正会員 工博 近畿大学理工学部社会環境工学科

** 学生会員 近畿大学大学院総合理工学研究科

2. 支保部材の力学特性

吹付けコンクリート施工後の任意時間における応力-ひずみ関係について、従来得られた図-1をもとに関数表現を試みる。

吹付けコンクリートのピーク強度までの応力-ひずみ関係は強い非線形性を示すので以下のような双曲線で近似することとする。

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (1)$$

ここで、 σ と ε は軸応力と軸ひずみである。吹付けコンクリート施工後の時間により式(1)で示される曲線は変化するの、従って a , b は時間の関数である。式(1)から接線弾性係数 E_c は

$$E_c = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{(1 - b\sigma)^2}{a} \quad (2)$$

理論ピーク強度 σ_{ult} と初期接線弾性係数 E_i は式(1)から

$$\sigma_{ult} = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} = \frac{1}{b} \quad (3a)$$

$$E_i = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{a} \quad (3b)$$

式(3a, b)の a , b を式(2)に代入すれば、 E_c が次のように応力の関数として表現される。

$$E_c = E_i \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_f} R_f \right)^2 \quad (4)$$

ここに σ_f は実測ピーク強度、 E_i は初期接線弾性係数、 R_f は非線形パラメータであり $R_f = \sigma_f / \sigma_{ult}$ で表され 0 と 1 の間の値をとり 1 に近いほど非線形性を強く示す。

表-1 E_i と σ_f の任意時間での関数表現

Days	E_i (MPa)	σ_f (MPa)
$0 < t \leq 0.5$	$1792.6t + 0.0001$	$14.624t$
$0.5 < t \leq 3.0$	$310.79 \ln(t) + 1130.4$	$2.828 \ln(t) + 9.326$
$3.0 < t$	$975.64 \ln(t) + 419.13$	$2.274 \ln(t) + 10.046$

図-2 のプロットは E_i および σ_f の経時変化の実測結果を各経過時間別に表現しており、これら図中の実線は表-1 で表される関数式で近似したものである。ここで、28 日以降 100 日までの E_i および σ_f の値は、28 日以前の結果を外挿して決定している。この結果を用いることにより、吹付けコンクリートがその施工 100 日まで降伏しないという制約条件を考慮することができる。

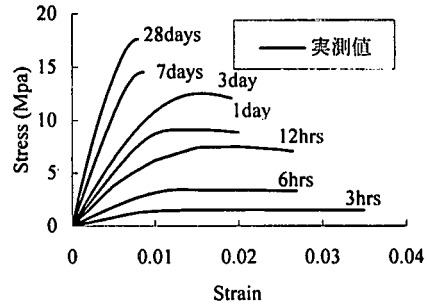
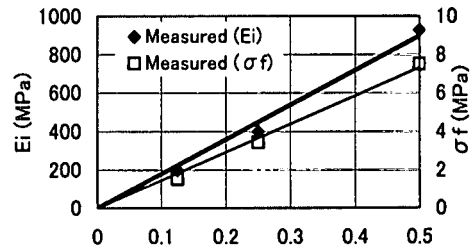
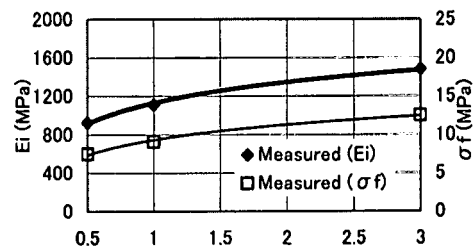


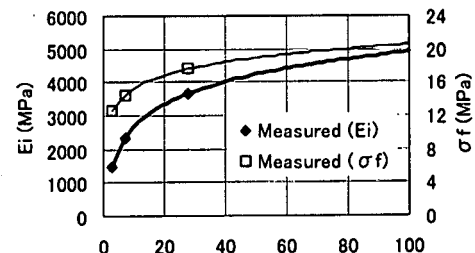
図-1 吹付けコンクリートの
応力-ひずみ関係



(a) 経過時間 0~0.5 日



(b) 経過時間 0.5~3.0 日



(c) 経過時間 3.0 日以降

図-2 E_i と σ_f の経時変化

3. 線形粘弾性地山における掘進速度を考慮した
支保挙動の非線形解析¹⁾

本解析では実測変位を逆解析することによって求められる地山の力学特性を用いることとする。本地山の変位発生特性は時間依存性を有しているが、このような場合の地山のクリープ関数は対数関数で表現できる場合が多い。実際、本トンネルの施工に先立って本坑上部に掘削された円形調査坑の実測変位は対数関数で表現できたとし、またこの結果を逆解析することによって地山のクリープ関数は以下のように決定することができた。

$$\phi(t) = \alpha + \beta \ln(1+t) \quad (5)$$

ここに、 $\alpha=1/G$ 、 $\beta=1/Gr$ で、 G と Gr はそれぞれ地山のせん断弾性係数と遅延せん断係数であり、 t は時間(日)である。また、 α 、 β の具体的な値は0.01225 (1/MPa)と等しい。これらを用いて、図-3に示す等方初期応力の作用する線形粘弾性地山内に次節で示す断面形状のトンネルを掘進速度 V で建設する解析を行う。そして吹付けコンクリートと鋼製支保工からなる一次覆工の地圧、応力および変位の経時変化を求め、制約条件を満足する吹付けコンクリート厚さと建設費用を求める。

4. 解析モデルと諸条件

(1) 断面形状と支保パターン

表-2に以降の解析を行うための解析モデルの入力パラメータを示す。また図-4にトンネル断面形状及び支保パターン図を示す。図-4中の $D(m)$ は余掘り分を含めた吹付け厚さであり解析において未知数 x で定義される。次に R は一次覆工における内空断面の半径である。よって掘削断面積を計上する際の半径は R と D の合計であり、解析によって求められる吹付け厚さが大きくなるに従い、掘削断面積が増加するように定義している。

表-2 解析モデルのパラメータ

掘削工	掘削延長(m)	500
	掘削断面積(m ²)	$\pi(3.56+x)^2$
吹付け工	設計吹付厚(m)	x
鋼製支保工	建て込み間隔(m)	B
	断面積(m ²)	0.0076
	ヤング率(MPa)	214000
	降伏後のヤング率(MPa)	1940
	降伏ひずみ	0.0013

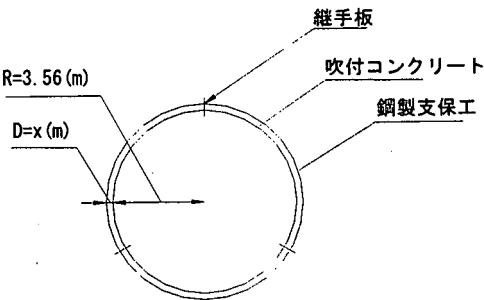


図-4 断面形状と支保パターン図

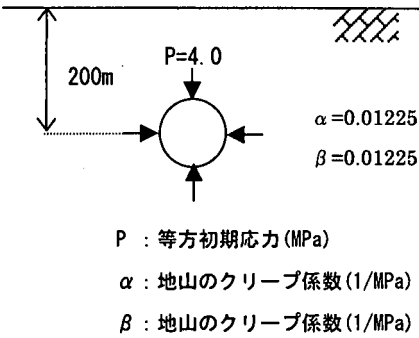


図-3 地山の力学パラメータ

(2) GAを用いた目的条件の最適化

以下では建設費用の最小化を目的条件とし、その条件を満足させるためにGA²⁾を採用する。

本手法では設計パターンにより決定される建設費の合計費用 c を以下の式 (6) 及び図-5 に示すシグモイド関数に代入し、これにより求められる $f(c)$ を目的条件に対する適応度とする。

$$f(c) = \frac{1}{1 + e^c} \quad (6)$$

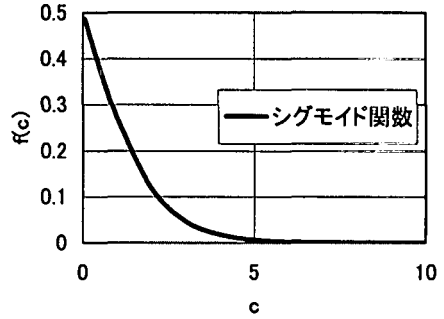


図-5 シグモイド関数

図-5 から確認できるように、 c が 0 に近づくほど適応度である f の値は 0.5 に近くなる。すなわち適応度が 0.5 に近いほど費用が安くなることを意味する。ここで制約条件が満たされないような解が発生した場合、 c には大きな値を代入し適応度が低くなるようにしている。これにより、制約条件を満たしつつ費用合計が最も安くなる解をGAによって探索していく。

(3) 積算条件の仮定

本手法における積算はトンネル工 (NATM) の積算基準³⁾ に準じるものとし、掘削工法を発破による全断面工法と仮定して積算している。また、一次覆工に掛かる純工費のみ積算するものとし、排水工、仮設工及び覆土工などの費用はこれに含めない。ここで、図-6 に使用機械の台数を決定する際に必要な総運搬距離の仮定を示す。

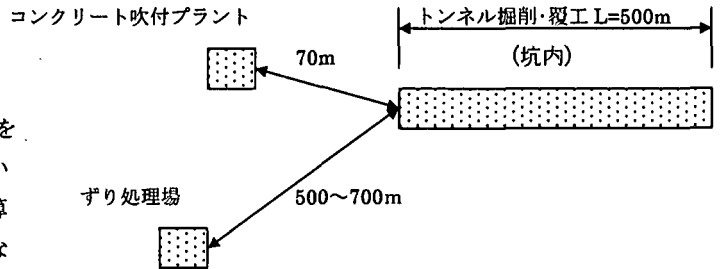


図-6 使用機械の総運搬距離の仮定

(4) 実施工を考慮した掘進速度の決定

実施工において、吹付けコンクリートの設計厚さの違いによって吹付け作業時間に差が生じ、1 サイクル当りの所要時間に大きな影響を与える。そして、この1 サイクル当りの所要時間は、建設費用の積算を行う際に重要な掘進速度に深く関係する。よって、これら一連の関係を考慮に入れて掘進速度は独立変数ではなく、設計吹付け厚さの従属変数として考えなければならない。

そこで、図-7 に示す時間帯に従い、1 日 2 方 (2 交替) と仮定し、1 サイクル当りの所要時間を Q 、鋼製支保工建て込み間隔 (=1 サイクル掘進長) を B とした場合に、掘進速度 V は式 (7) で求められ、本手法における掘進速度として用いるものとする。

$$V = \frac{9 \times 60 \times B}{Q} \times 2 \quad (7)$$

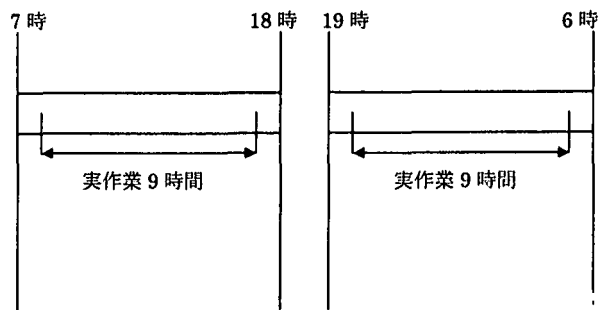


図-7 作業時間の時間帯

5. 解析結果と考察

表-3 解析パターンと解析結果

解析パターン	解析結果			
	B	N_{opt}	Q	V
Case.1	0.7	0.1611	356	212.5
Case.2	0.8	0.1919	366	235.8
Case.3	0.9	0.2260	380	256.1
Case.4	1.0	0.2498	391	276.4
Case.5	1.1	0.2501	453	262.0
Case.6	1.2	0.2617	470	275.7

B : 鋼製支保工建込み間隔(m)
 N_{opt} : 最適解〔吹付け厚さ(m)〕
Q : 1 サイクル所要時間(min)
V : 掘進速度(cm/day)

表-3 は鋼製支保工建て込み間隔を 0.1m 間隔で変更した場合について、それぞれのパターン別にまとめた解析結果である。図-8 は鋼製支保工建て込み間隔と吹付けコンクリート厚さの最適解との関係について示したものである。当然のことながら建て込み間隔を広くとれば、吹付けコンクリート施工 100 日以内に吹付けコンクリートを降伏させないためには、この厚さを増加しなければならない事が理解できる。

図-9 は解析より得られた吹付けコンクリート厚さと、これによって決定される 1 サイクル所要時間との関係を示したものである。施工性を考慮して吹付け厚さが 0.25m を超過した場合については、1 次吹付、2 次吹付に分けて施工すると仮定しており、吹付けコンクリートに関する一連の作業時間を 1.5 倍に設定している。このため、Case.5 及び Case.6 において、所要時間の増大が認められる。

図-10 は、建て込み間隔と掘進速度の関係である。Case.1～Case.4 までは建て込み間隔の増加にともなって掘進速度は単調に増加している。図-9 で述べたように、吹付け厚さが 25cm 以上の場合には吹付け作業時間を 1.5 倍にしている影響が Case.5 及び Case.6 の結果に現れている。

図-11 は吹付け厚さと掘進速度の関係を示している。図-8 と比較すると最適な吹付け厚さに与える掘進速度の影響は、建て込み間隔の違いによる影響よりも小さ

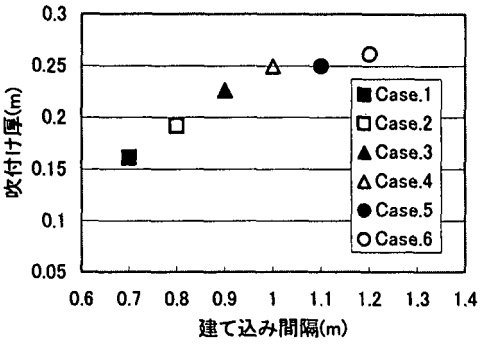


図-8 建て込み間隔と吹付け厚さの関係

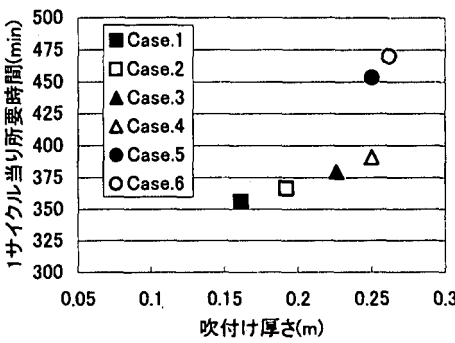


図-9 サイクル所要時間と吹付け厚さの関係

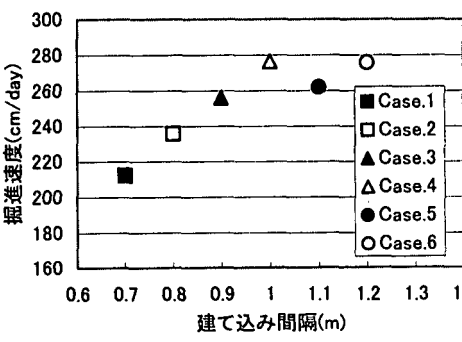


図-10 掘進速度と建て込み間隔の関係

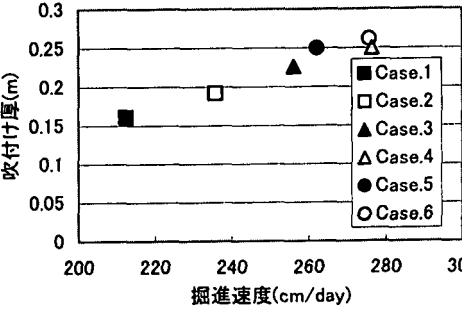


図-11 吹付け厚さと掘進速度の関係

いといえる。

図-12 は、それぞれの解析パターンの力学的安定性及び経済性に対する適応度を建て込み間隔との関係で示したものである。建て込み間隔の増加にともない適応度も増加傾向を示すことが確認できる。Case.4 と Case.5 を比較すると、Case.5 の場合において、適応度が若干低くなっている。これは図-10 から確認できるように掘進速度が Case.4 に比べ Case.5 の方が低いいため、工期延長にともない、掘削工費が増加したことが原因である。

図-13 は工費と適応度の関係について、また図-14 はそれぞれの解析パターンにおける各工費の推移を示したものである。図-12 では Case.6 が最も適応度が高く工費が安くなっている。ここで、図-14 において Case.4 と Case.6 とを比較すると、掘削工費で見れば Case.4 の方が Case.6 よりも若干安くなっている。ただし鋼製支保工費で見れば建て込み間隔が広く、鋼製支保工の総基数が少ない Case.6 が安いので、結局工費全体では Case.6 の場合において総工費が最も安くなっている。このことから多少の吹付け厚さの増加を考慮し、鋼製支保工建て込み間隔 (=1 サイクル掘進長) を大きくした方が経済的に施工できるという結果が認められる。

6. 結論

本研究はトンネル一次覆工の建設において、覆工の力学的安定性と経済性を同時に考慮した最適設計手法について検討したものである。すなわち、普通吹付けコンクリートの強度・接線弾性係数の時間増加特性、地山の時間依存力学特性、掘進速度等を考慮して一次覆工挙動を非線形解析すると共に、これに最適化手法として遺伝的アルゴリズムを適用して、施工パターンごとの最適吹付けコンクリート厚さと工事費用について比較・考察した。

工法や断面形状により、本設計手法は、現時点での汎用性には限界があるが、力学的安定性と経済性の両者の関係を把握し、どのような施工パターンによる設計が最適であるかについてある程度明らかにすることが出来た。

参考文献

- 1) 久武勝保：膨張性トンネルにおける鋼繊維補強高強度吹付けコンクリートの支保効果，土木学会論文集，No.701/Ⅲ-58,2002.
- 2) 石田良平・村瀬治比古・小山修平 著：パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用，森北出版株式会社，p.101 1997.
- 3) 建設物価調査会：トンネルの施工と積算（トンネル施工積算研究会 編） 1999.

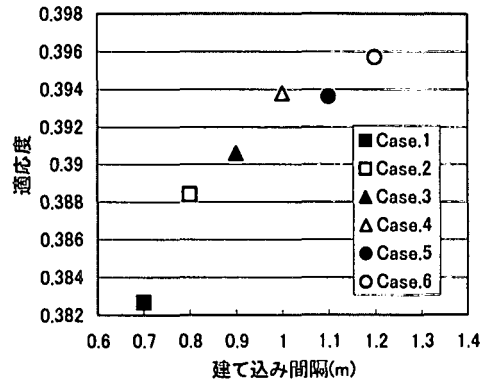


図-12 適応度と建て込み間隔の関

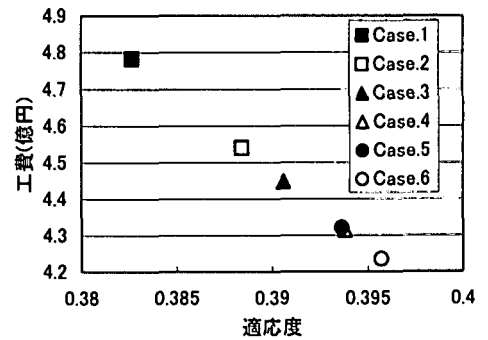


図-13 工費と適応度の関係

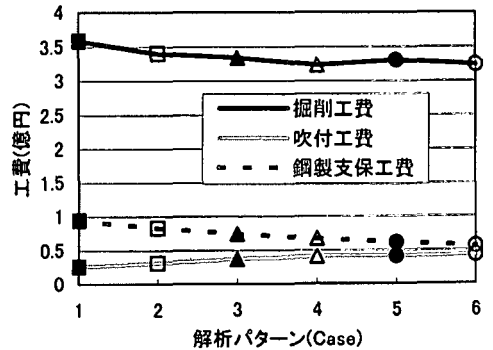


図-14 解析パターン別の各工費の推移