

第2007-08号

力学・費用連成によるトンネル積算最適化 に関する研究

近畿大学 理工学部 社会環境工学科
教授 久武 勝保

平成20年9月

助成研究者紹介

ひさたまさやす
久武勝保

現職：近畿大学工学部教授

主な著書・論文：

- Three-Dimensional Back-Analysis Method for the Mechanical Parameters of the New Ground Ahead of a Tunnel Face, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.23, pp. 373-380, 2008.
- Effects of Pipe Roof Supports and the Excavation Method on the Displacements above a Tunnel Face, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.23, pp.120-127, 2008.
- トンネル核残し工法の変位抑止・切羽安定効果の遠心模型実験, トンネル工学論文集, 第16巻, pp.1-8, 2007.
- 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, トンネルライブラリー16, 土木学会出版, 2006.
- トンネル切羽前方地盤の力学特性の推定, 材料, 第56巻, 第5号, pp.460-465, 2006.
- トンネル遠心模型実験における掘削ロボットの開発とその先受け工法への適用, トンネル工学論文集, 第15巻, pp.23-30, 2005.
- 膨張トンネルでの高強度鋼繊維補強吹付けの有効性, トンネルと地下, 第35巻2号, pp.41-47, 2004.

目次

1. 緒論	4
2. トンネルの非線形数値解析手法	4
3. 解析条件	7
3-1 地山の力学定数の推定	
3-2 支保パターンと入力パラメータ	
3-3 岩盤パラメータ	
4. トンネル挙動の解析結果と考察	8
4-1 トンネル内面の変位特性	
4-2 吹付けコンクリートに作用する地圧の岩種による変化	
4-3 地圧に及ぼす掘進速度の影響	
4-4 支保工建て込み間隔の支保工挙動に及ぼす影響	
5. 費用積算	15
5-1 NATM積算	
5-2 NATM積算の流れ	
5-3 吹付け工費の積算	
6. 解析手法	17
6-1 遺伝的アルゴリズムの採用	
6-2 遺伝的アルゴリズムを用いた解析の流れ	
7. 解析結果と考察	18
8. 結論及び指針	25
参考文献	

1 結論

現在の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情報や経験をもとにしたものが通常適用されている。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。一次覆工の安定性と建設費用の最小化の関係を結びつける最適化に関する研究が十分行われていないことや、地山の力学特性が事前に十分把握できないこと等の理由によって、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な安定性を確保した上で、一次覆工の建設費用を最小化する種々の施工条件・力学条件の関係について、遺伝的アルゴリズム（以後、GA（Genetic Algorithm）という）と非線形数値解析手法を用いて明らかにすることを目的としている。すなわち、トンネルの安定性を確保すると共に建設費用を最小化する施工条件を最適化手法であるGAにより求めるものである。

提案手法の解析として、鋼製支保工と吹付けコンクリートからなるトンネル一次覆工を採り上げる。鋼製支保工は比較的早期に降伏するがそれが座屈しない限りその地山支持能力は保たれる。しかし次に吹付けコンクリートが降伏すると一次覆工の地山支持能力は急激に低下し、その能力が損なわれることをまず明らかにする。このことから、吹付けコンクリートを降伏させない施工条件の設定の重要性を示す。次に、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、考察を加える。

2 トンネルの非線形数値解析手法

等方初期応力 p の作用する線形粘弾性地山に円形トンネルを速度 V で掘削し、鋼製支保工と吹付けコンクリートからなる一次覆工を施工する場合について、これらに作用する地圧、円周方向軸応力および変位の経時変化を求めることとする。また鋼製支保工の降伏特性および吹付けコンクリートのピーク強度後の強度低下特性を一貫して解析するため、両支保部材の挙動を差分により表現する。鋼製支保工の断面積や吹付けコンクリートの設計厚さはトンネル直径に対して一般的に十分小であり、真円率の大きいトンネル断面形状において施工されるこれら支保部材には地山からの受働土圧が期待できる。これにより支保部材に生じる曲げ応力が小さくなることは解明されている¹⁾ ことから、本解析において使用する支保部材は、軸力のみで地圧に抵抗すると仮定する。またトンネル軸方向の地山変位は無視するものとし、断続的に建て込まれる鋼製支保工はトンネル軸方向の単位奥行き当りの量に換算評価する。添え字 s, c が鋼製支保工と吹付けコンクリートを示すとすれば、 p_s, p_c はそれぞれ鋼製支保工、吹付けコンクリートが分担する地圧である。一次覆工施工後の時間 t_i を m 個に分割することで、地圧により発生するトンネル半径方向変位 u_s, u_c は次式のように表すことができる。

$$u_s(t_{m+1}) = \frac{(d/2)^2 B}{A} \sum_{k=1}^m \frac{p_s(t_{k+1}) - p_s(t_k)}{E_s(t_k)} \quad (2.1a)$$

$$u_c(t_{m+1}) = \frac{(d/2)^2}{x} \sum_{k=1}^m \frac{p_c(t_{k+1}) - p_c(t_k)}{E_c(t_k)} \quad (2.1b)$$

ここに、 d ：トンネル直径、 B ：鋼製支保工の建て込み間隔、 A ：鋼製支保工の断面積、 x ：吹付け設計厚さ、 E_s ：鋼製支保工の接線弾性係数、 E_c ：吹付けコンクリートの接線弾性係数である。鋼製支保工と吹付けコンクリートは一般的にほぼ同時期に施工される。よって地圧によるこれらのトンネル半径方向変位 u_s, u_c は近似的に等しいと考慮できることから、

$$u_s(t_{m+1}) = u_c(t_{m+1}) \quad (2.2)$$

ここで、 $\Delta u_s(t_k) = u_s(t_k) - u_s(t_{k-1})$ 、 $\Delta u_c(t_k) = u_c(t_k) - u_c(t_{k-1})$ とすると、

$$\Delta u_s(t_k) = \Delta u_c(t_k) \quad (2.2)'$$

そこで、式(2.1)、(2.2)より

$$\Delta u_s(t_{m+1}) = \frac{(d/2)^2 B}{A} \left(\frac{p_s(t_{m+1}) - p_s(t_m)}{E_s(t_m)} \right) \quad (2.3a)$$

$$\Delta u_c(t_{m+1}) = \frac{(d/2)^2}{x} \left(\frac{p_c(t_{m+1}) - p_c(t_m)}{E_c(t_m)} \right) \quad (2.3b)$$

ここで、式(2.3a)、(2.3b)を式(2.2)'に代入し、 $p_c(t_{m+1})$ について解くと、

$$p_c(t_{m+1}) = \frac{x B E_c(t_m)}{A E_s(t_m)} (p_s(t_{m+1}) - p_s(t_m)) + p_c(t_m) \quad (2.4)$$

鋼製支保工と吹付けコンクリートから地山に作用する応力はこれらの応力の和であるから

$$p_w(t_{m+1}) = p_s(t_{m+1}) + p_c(t_{m+1}) \quad (2.5)$$

式(2.4)を式(2.5)に代入し、整理すると、

$$\frac{p_s(t_{m+1}) - p_s(t_m)}{E_s(t_m)} = \frac{1}{K} \{p_w(t_{m+1}) - p_w(t_m)\} \quad (2.6)$$

ただし、

$$K = \left(\frac{A E_s(t_m) + x B E_c(t_m)}{A} \right)$$

よって、 $u_s(t_{m+1})$ は、

$$u_s(t_{m+1}) = \frac{(d/2)^2}{A} \times \frac{1}{K} (p_w(t_{m+1}) - p_w(t_m)) + u_s(t_m) \quad (2.7)$$

一方、鋼製支保工の変位に関する境界条件は次のように表現することができる。

$$\begin{aligned} & u_s(t_{m+1}) \\ &= u_0(t_{m+1}) - \frac{(d/2)}{2} \int_{t_1=0}^{t_{m+1}} \phi(t_{m+1} - \tau) \frac{\partial}{\partial \tau} p_w(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.8)$$

ここに、 u_0 は一次覆工閉合時以降において、もし一次覆工を施工しなければ発生する素掘りトンネルの半径方向変位であり、次式で算定できる。

$$\begin{aligned}
u_0(t_{m+1}) &= \alpha_0 \int_0^{t_0+t_{m+1}} \phi(t_0+t_{m+1}-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} f(V\tau) d\tau - \alpha_0 \int_0^{t_0} \phi(t_0-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} f(V\tau) d\tau \quad (2.9)
\end{aligned}$$

ここに $\alpha_0 = a_0 p / 2$ 、 f は 3次元解析から求められる素掘りトンネル境界の半径方向変位に関する特性曲線、 $\phi(t)$ はせん断変形に関するクリープ関数である。また式(2.8)の右辺の積分は時間間隔 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ が十分小なら次式で近似できる。

$$\begin{aligned}
& \int_{t_1=0}^{t_{m+1}} \phi(t_{m+1}-\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} p_w(\tau) d\tau \\
&= \phi(0) p_w(t_{m+1}) - \phi(t_{m+1}) p_w(0) \\
& - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \{p_w(t_{k+1}) + p_w(t_k)\} \{\phi(t_{m+1}-t_{k+1}) - \phi(t_{m+1}-t_k)\}
\end{aligned}$$

以上より、式(2.7)を式(2.8)に代入すると未知数を $p_w(t_{m+1})$ のみとする次式が求められる。

$$p_w(t_{m+1}) = \frac{1}{M_1} \{M_2 p_w(t_m) + M_3 p_w(0) + M_4 + u_0(t_{m+1}) - u_s(t_m)\} \quad (2.10)$$

ただし、

$$M_1 = \frac{(d/2)^2 B}{A} \times \frac{1}{K} + \frac{(d/2)}{4} \{\phi(0) - \phi(t_{m+1}-t_m)\}$$

$$M_2 = \frac{(d/2)^2 B}{A} \times \frac{1}{K} + \frac{(d/2)}{4} \{\phi(0) + \phi(t_{m+1}-t_m)\}$$

$$M_3 = \frac{(d/2)}{2} \phi(t_{m+1})$$

$$M_4 = \frac{(d/2)}{4} \sum_{k=1}^{m-1} \{(p_w(t_{k+1}) + p_w(t_k)) \{\phi(t_{m+1}-t_{k+1}) - \phi(t_{m+1}-t_k)\}\}$$

このようにして求められた $p_w(t_{m+1})$ を用いれば $p_s(t_{m+1})$ 、 $p_c(t_{m+1})$ が得られ、さらに任意時間におけるトンネル半径方向変位 $u_s(t_{m+1})$ も得ることができる。

鋼製支保工、吹付けコンクリートの軸応力 σ_{ns} 、 σ_{nc} は地圧と軸力のつりあい関係を考慮して、先で求められた $p_s(t_{m+1})$ 、 $p_c(t_{m+1})$ から式(2.11a)、(2.11b)のように求められる。

$$\sigma_{ns}(t_{m+1}) = \frac{(d/2)B}{A} p_s(t_{m+1}) \quad (2.11a)$$

$$\sigma_{nc}(t_{m+1}) = \frac{(d/2)}{x} p_c(t_{m+1}) \quad (2.11b)$$

ここで、吹付けコンクリートのピーク強度 σ_f に対し、式(2.11b)から求められる吹付けコンクリートのトンネル円周方向軸応力がこれに達するような以下の場合、

$$\sigma_f = \sigma_{nc} \quad (2.12)$$

これを吹付けコンクリートの降伏としている。また、鋼製支保工の降伏判定については、式(2.11a)から求まる円周方向軸応力と鋼製支保工の応力-ひずみ関係から次式が求められるので、

$$\varepsilon_s(t_{m+1}) = \frac{\sigma_{ns}(t_{m+1})}{E_s(t_{m+1})} \quad (2.13)$$

この ε_s が鋼製支保工の降伏ひずみ ε_y より大きくなった場合に鋼製支保工の降伏としている。

3 解析条件

3-1 地山の力学定数の推定

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参考にして用いることとする。粘弾性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次式で示す対数関数で表現できる場合が多い²⁾。

$$\phi(t) = \alpha + \beta \ln(1+t) \quad (3.1)$$

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弾性係数であり、 t は時間 (日) である。これらを用いて、等方初期応力の作用する粘弾性地山内に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る。

3-2 支保パターンと入力パラメータ

図 1 にトンネル断面形状及び支保パターンを示す。図 1 中の $N(m)$ 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算出する際の掘削半径は R と N 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。

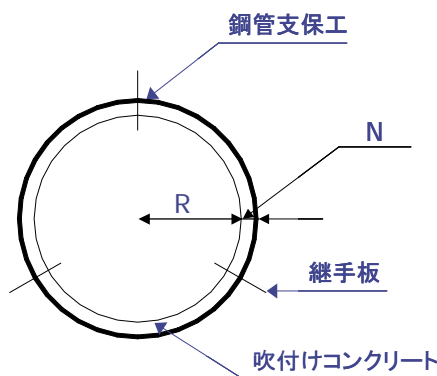


図 1 断面形状と支保パターン

図 2 に鋼製支保工の応力-ひずみ関係を示す。本研究における鋼製支保工の力学特性はバイリニア型の応力-ひずみ関係を有している。これは、鋼製支保工は降伏後も靱性を有しており、座屈しない限りは急激な強度低下は引き起こさないことを考慮してのことである。

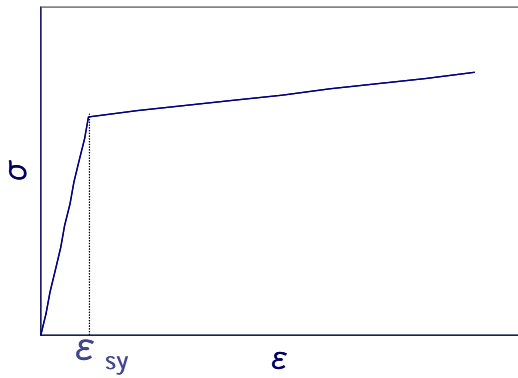


図2 鋼製支保工の応力 σ －ひずみ ε 関係

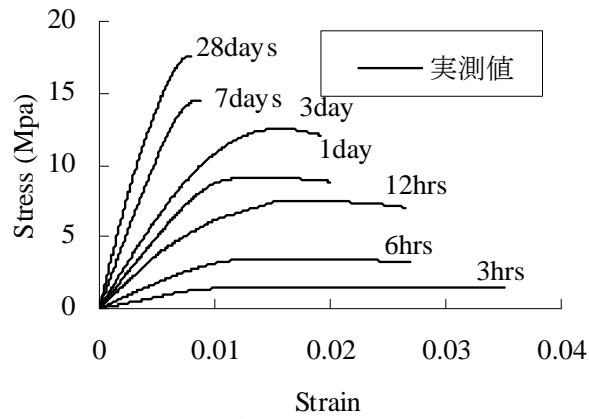


図3 吹付けコンクリートの応力－ひずみ関係

これに対し、吹付けコンクリートは、図3に示す応力－ひずみ関係からわかるように、施工後の時間とともに接線弾性係数やピーク強度は変化する。すなわち、施工直後には靱性が見られるがその後ピーク強度に達した後、その強度は著しく低下し、覆工全体の機能を大きく損なう恐れがあるので、本解析ではこの現象を考慮している。

なお、本研究に用いた非線形解析手法は支保部材の施工後任意時間における応力、ひずみを把握できることから、最適化解析では、吹付けコンクリート施工後任意時間（今回の解析では100日間）までは降伏しないという制約条件を適用している。

3-3 岩盤パラメータ

表2に、解析で用いた種々の岩盤に対する入力パラメータを示す。

表1 各種岩盤の入力パラメータ

		CH岩盤	CM岩盤	CL岩盤	D岩盤
等方初期応力(MPa)	土被り深さ				
	100m	2.6	2.5	2.4	2.2
クリープ係数(1/MPa)		0.00051	0.00265	0.00551	0.0114
支保工の断面積(cm ²)		30.31	40.14	40.14	63.53
円形トンネルの直径(cm)		D=762.0			
トンネルの掘進速度(cm/day)		V=100.0、200.0、300.0、500.0			
支保工の建て込み間隔(cm)		DD=70.0			
支保工と切羽の距離(cm)		XL=35.0			
支保工の降伏時の軸ひずみ		EMAX=0.0013			
降伏前の支保工弾性係数(MPa)		EE=210000.0			
降伏後の支保工弾性係数(MPa)		EP=3100.0			
吹付けコンクリートの厚さ(cm)		DB=10.0			

※ 支保工は、CH岩盤にH-125、CM、CL岩盤にH-150、D岩盤にH-200を用いた。

4 トンネル挙動の解析結果と考察

4-1 トンネル内面の変位特性

図4は、CH岩盤において、掘進速度Vのみを変化させた場合について素掘りトンネル内面の経時

変位を示したものである。ただし、時間（日）は切羽通過後の時間である。これから、掘進速度が早いほど同時刻でのトンネル内面変位は多く生じ、また、これは時間（日）の初期において著しいことがわかる。したがって、掘進速度の変化に伴ってトンネル内面変位が変化するので、一次覆工に作用する地圧も掘進速度の影響を受けることになる。すなわち、掘進速度は一次覆工の最適な建設条件に影響を与えることが理解できる。

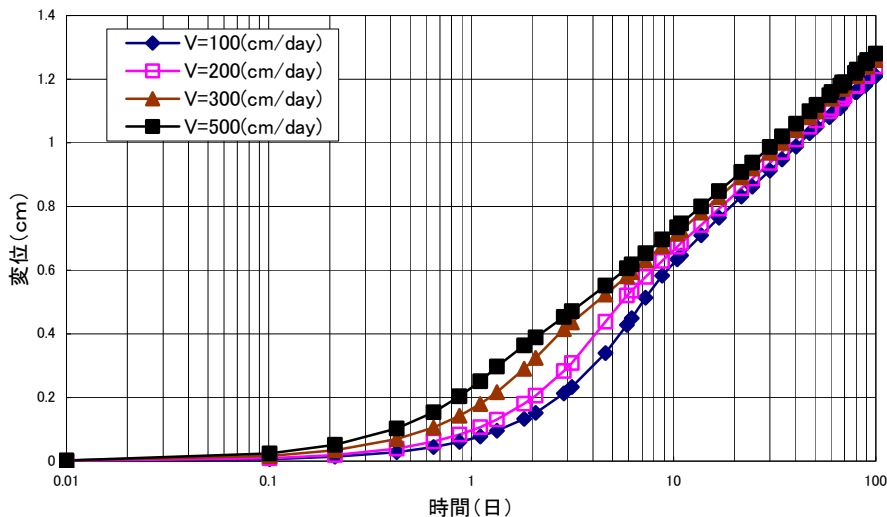


図 4 素掘りトンネルの変位に及ぼす掘進速度の影響

4-2 吹付けコンクリートに作用する地圧の岩種による変化

岩盤内にトンネルを安全かつ経済的に施工するには、対象となる岩盤の一次覆工挙動を知っておく必要がある。岩盤の性状を表す方法として岩盤等級区分があり、これを岩盤分類という。図 5 は掘進速度 $V=100$ (cm/day) での吹付けコンクリートに作用する地圧と時間の関係について岩種別に示したものである。岩種の違い、すなわち地盤の力学特性の違いに起因して吹付けコンクリートに作用する地圧が大きく異なり、その結果 C L 岩盤と D 岩盤において吹付けコンクリートが降伏・破壊する現象が確認できる。したがって、地質条件や土被りの影響を十分考慮して、吹付けコンクリートが降伏しない施工条件を適切に決定する必要が認められる。

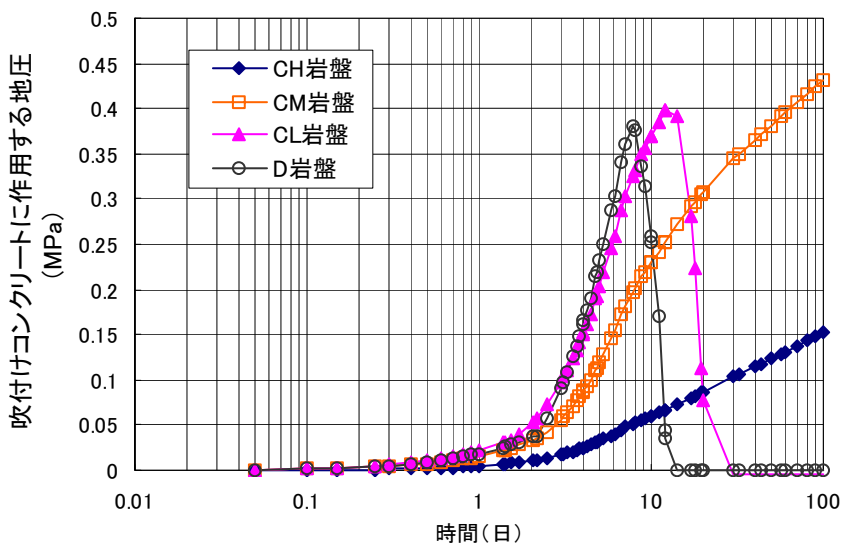


図 5 掘進速度 $V=100$ (cm/day) での吹付けコンクリートに作用する地圧と時間の関係

4-3 地圧に及ぼす掘進速度の影響

掘進速度の違いによる地圧の変化を明らかにするために、各種岩盤に対する地圧解析を行った。図 6 から図 9 は掘進速度を変化させた場合について、吹付けコンクリートに作用する地圧と時間の関係を示している。図 6 の CH 岩盤のような良い岩盤では、掘進速度を変化させても同時刻での吹付けコンクリートに作用する地圧の大きさはほとんど変わらない。図 7 の CM 岩盤では、岩盤の性質上 CH 岩盤に劣るため、吹付けコンクリートに作用する地圧は CH 岩盤より 3 倍程大きくなるが、吹付けコンクリートは降伏はしなかった。図 8、図 9 ではどちらも吹付けコンクリートは降伏し、その後地圧を解放して破壊した。CL 岩盤、D 岩盤ともにハンマーで容易に砕ける軟らかい岩盤なためである。CL 岩盤は D 岩盤より硬いため、D 岩盤と比べると吹付けコンクリートの降伏日は遅くなり、その降伏時の強度も大きい。したがって、CL 岩盤での吹付けコンクリートの降伏時地圧は D 岩盤時に比べて大きいことがわかる。CL 岩盤、D 岩盤とも掘進速度が変化すると、吹付けコンクリートに作用する地圧は変化するが、これが降伏する時間と地圧は掘進速度の影響をあまり受けていない。

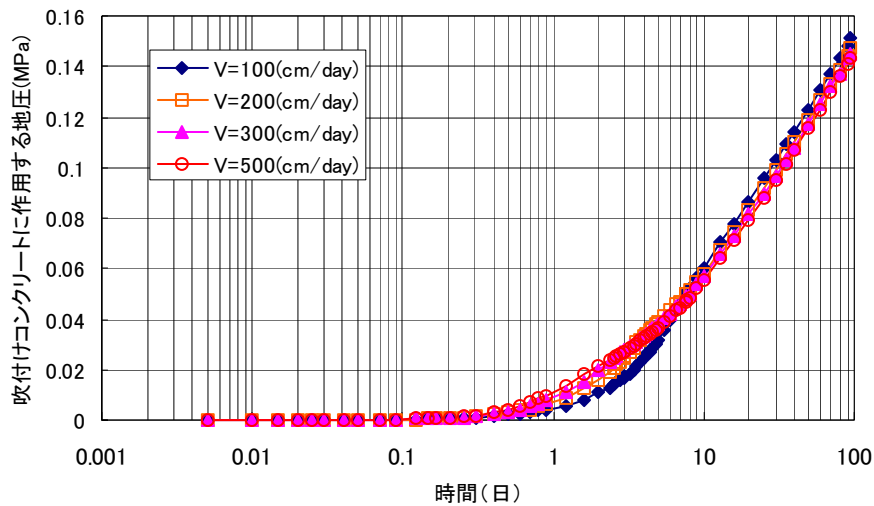


図 6 CH 岩盤での吹付けコンクリートに作用する地圧と時間の関係

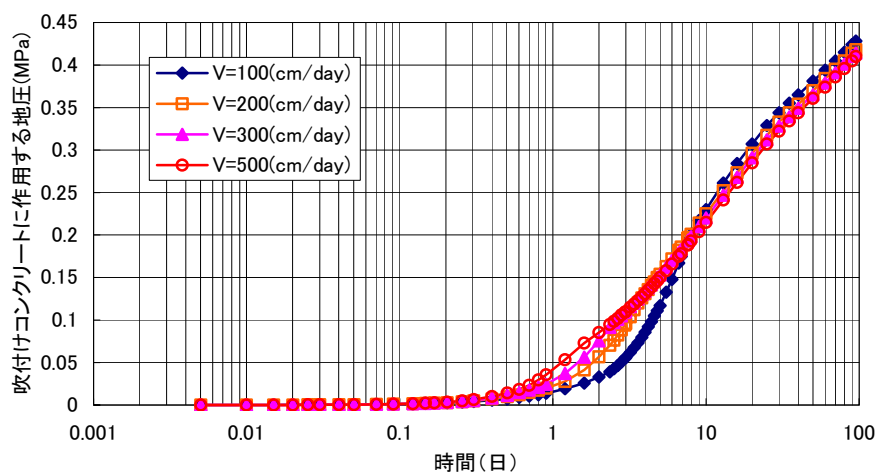


図 7 CM 岩盤での吹付けコンクリートに作用する地圧と時間の関係

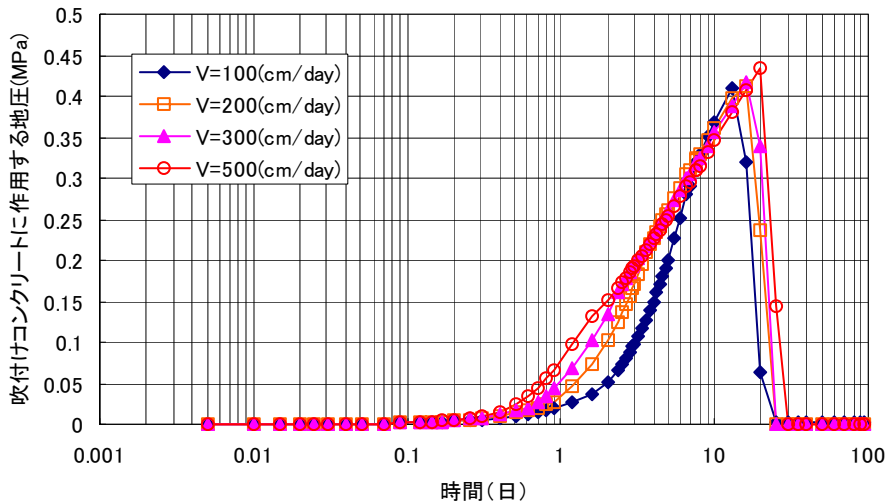


図 8 CL 岩盤での吹付けコンクリートに作用する地圧と時間の関係

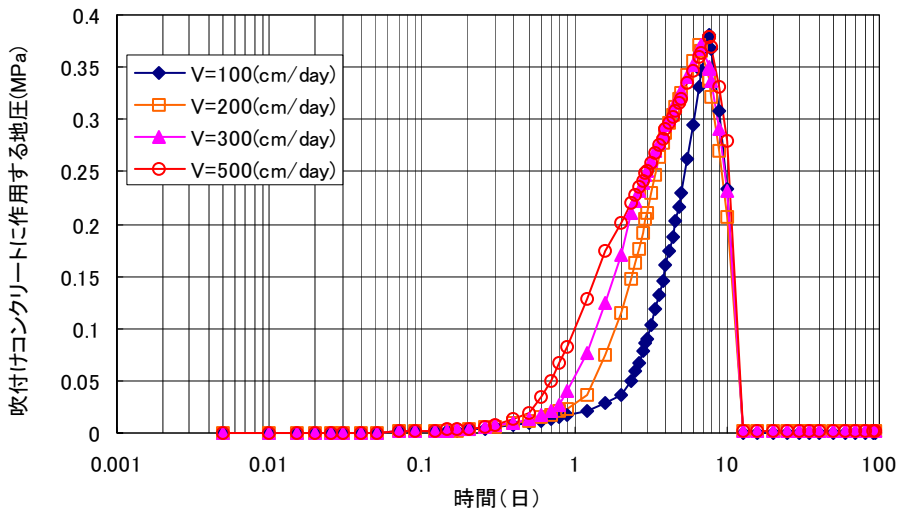


図 9 D 岩盤での吹付けコンクリートに作用する地圧と時間の関係

図 10 から図 13 は掘進速度を変化させた場合の各種岩盤でのトンネル壁面変位の経時変化を表したものである。

図 10 は CH 岩盤について示したものであり、掘進速度が早くなるに従って支保工の変位は早く発生している。これは掘進速度の上昇に伴って素掘りトンネルの壁面変位が早期に発生すること、および吹付けコンクリートが十分固まる以前に地圧を受けるので、その抵抗力が十分でないことに起因している。CM 岩盤について表した

図 11 についてもほぼ同様の結果が得られている。ただし、CM 岩盤は CH 岩盤より軟らかいため、支保工の変位は、どの時間でも CH 岩盤より 3~4 倍程大きくなっている。

図 12 は CL 岩盤の支保工変位の経時変化である。これより、一次覆工施工後 15 日前後で壁面変位が急増しているのが分る。これは吹付けコンクリートがほぼ 15 日でに破壊され、その支保効果がなくなったことが理由として挙げられる。図 13 に示す D 岩盤についてもほぼ同様の結果が認められる。D 岩盤は CL 岩盤より軟らかいため、支保工の変位は、どの時間でも CL 岩盤より 1.5 倍程大きくなっている。

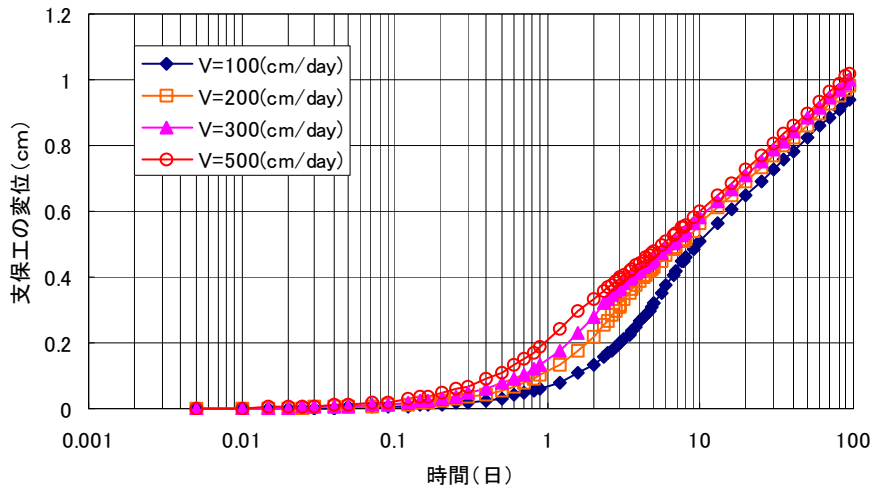


図 10 CH 岩盤での支保工の変位と時間の関係

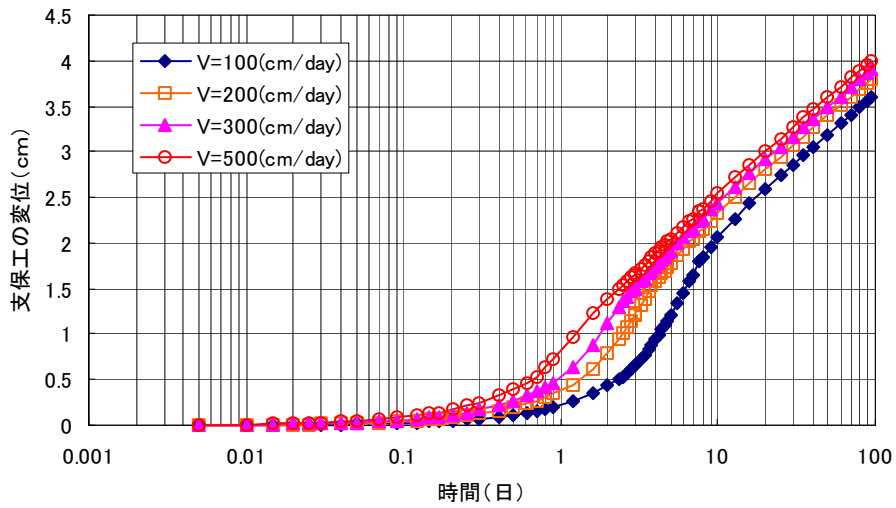


図 11 CM 岩盤での支保工の変位と時間の関係

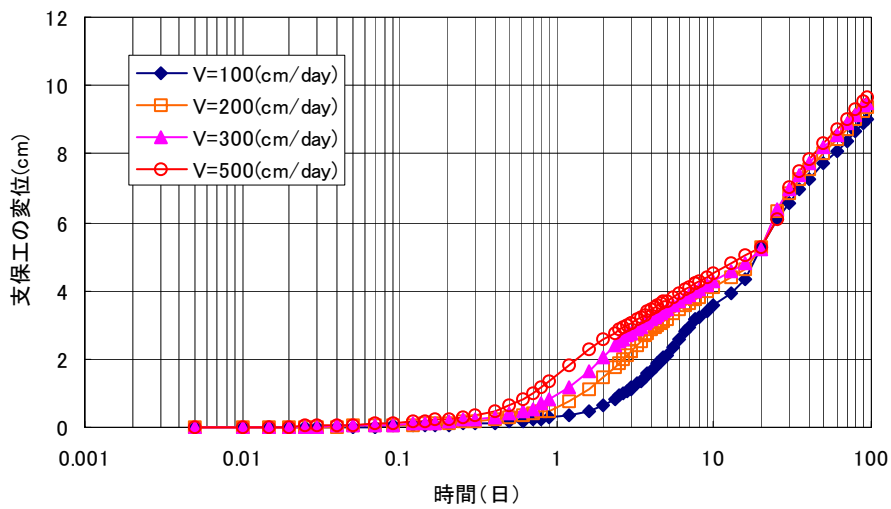


図 12 CL 岩盤での支保工の変位と時間の関係

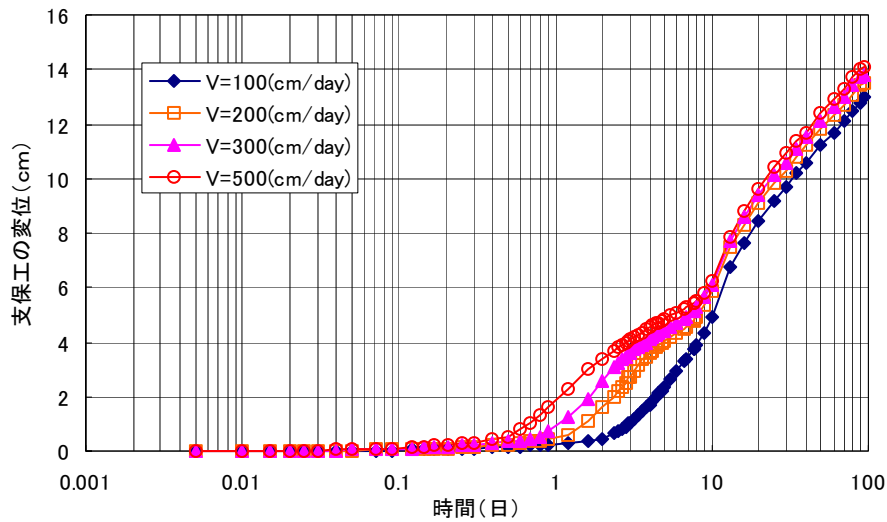


図 13 D 岩盤での支保工の変位と時間の関係

4-4 支保工建て込み間隔の支保工挙動に及ぼす影響

支保工建て込み間隔を変化させることにより、吹付けコンクリートと鋼製支保工の地圧、およびトンネル壁面変位がどの程度変化するかを明らかにするために解析を行った。なお、地質は C_H 岩盤、C_L 岩盤を使用し、掘進速度は V=300(cm/day)で固定した。

図 14 は C_H 岩盤において、吹付けコンクリートに作用する地圧を表したものであり、支保工建て込み間隔を変化させても地圧はほとんど変化しないといえる。一方、図 15 は C_L 岩盤について同様の結果を表したものである。この範囲の支保工建て込み間隔の変化であれば、いずれの場合においても吹付けコンクリートは降伏しているのが分る。また、支保工建て込み間隔が広いほど吹付けコンクリートの降伏時期が早まっているのが理解できる。

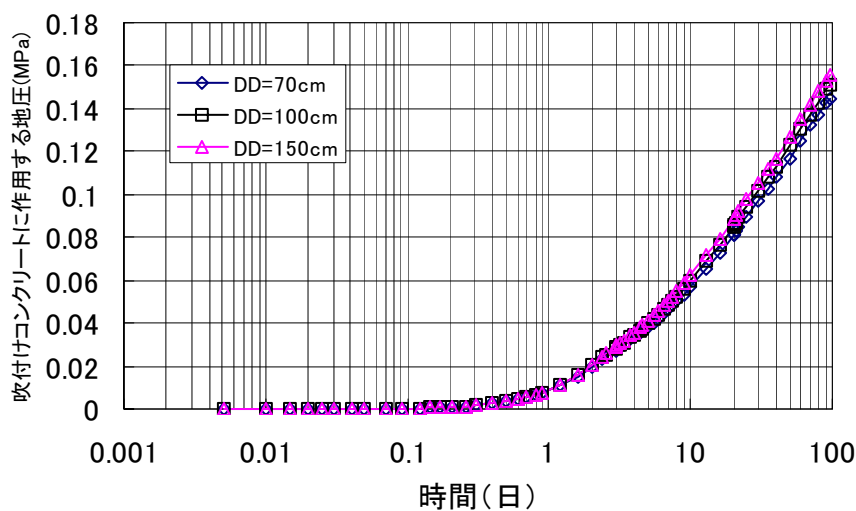


図 14 C_H 岩盤での吹付けコンクリートに作用する地圧と時間の関係

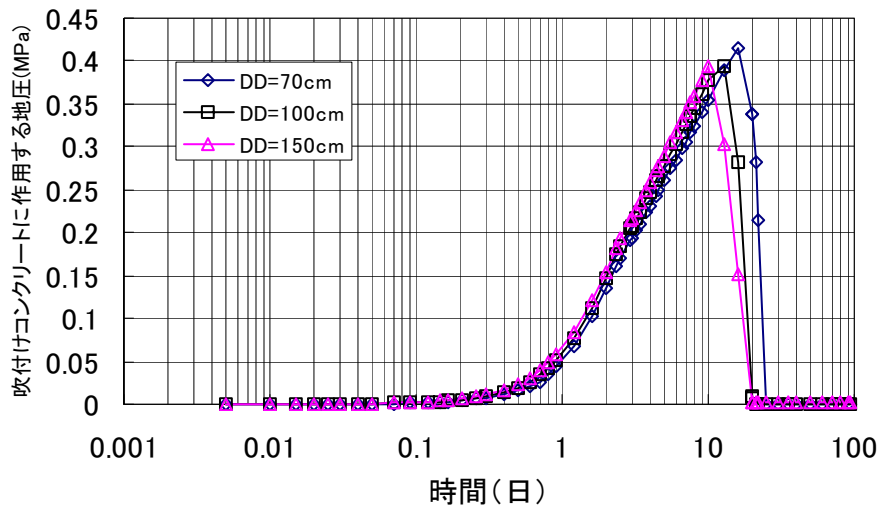


図 15 CL 岩盤での吹付けコンクリートに作用する地圧と時間の関係

図 16 と図 17 は鋼製支保工に作用する地圧を表している。CH 岩盤、CL 岩盤いずれにおいても鋼製支保工は早期に降伏するのが分る。CH 岩盤、CL 岩盤とも支保工建て込み間隔が広いと、鋼製支保工の耐力は減少するので、小さい地圧で降伏することになる。図 14 で示したように CH 岩盤での吹付けコンクリートは降伏していないので、たとえ鋼製支保工が降伏しても地山をしっかりと支持している。一方、CL 岩盤では図 17 で示す鋼製支保工が降伏した後に図 15 で示したように吹付けコンクリートは降伏しているので、一次覆工の地山支持能力は急速に低下することになる。なお、吹付けコンクリートと鋼製支保工の降伏日を表 2、表 3 に示す。

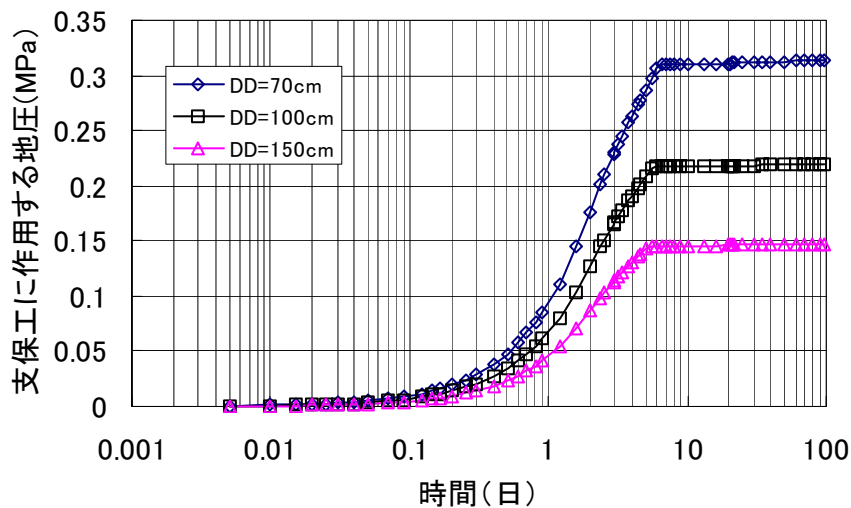


図 16 CH 岩盤での鋼製支保工に作用する地圧と時間の関係

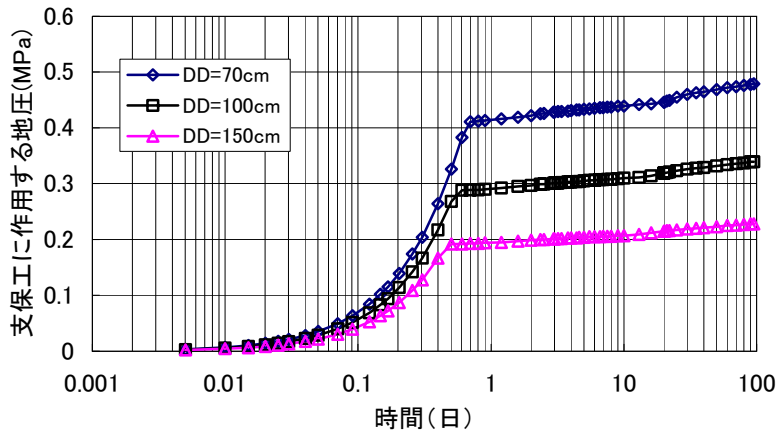


図 17 CL 岩盤での鋼製支保工に作用する地圧と時間の関係

表 2 CH 岩盤での支保部材の降伏日

	支保工建て込み間隔 DD=70(cm)	DD=100(cm)	DD=150(cm)
吹付けコンクリートの降伏日 (日)	降伏しない	降伏しない	降伏しない
鋼製支保工の降伏日 (日)	6.29	5.62	5.17

表 3 CL 岩盤での支保部材の降伏日

	支保工建て込み間隔 DD=70(cm)	DD=100(cm)	DD=150(cm)
吹付けコンクリートの降伏日 (日)	17.45	12.42	10.11
鋼製支保工の降伏日 (日)	0.66	0.55	0.47

5 費用積算

以上の結果から、トンネル及び一次覆工の力学挙動が種々の施工条件の変化に大きく影響を受けることが認められた。その際、吹付けコンクリートが降伏するとこれと鋼製支保工からなる一次覆工の地山支持効果は認められないことが明らかになった。そこで以降では、以上の力学解析に費用積算を組み込み、吹付けコンクリートが降伏しない施工条件を満足させながら、費用積算が最小となら施工条件をGAにより探索することとする。

5-1 NATM積算

NATMはロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工などを適切に組み合わせ、ある程度の変形を許す「柔な支保構造」で地山を支保することにより、地山自体のもっている支保機能を最大限に活用し、地山と一体となった支保構造を形成するものである。また、施工時の計測結果を有効に活用することにより、安定性の高いトンネルを経済的かつ安全に建設する上で有効な工法であり、現在のトンネル工法の最も標準的な工法である。本研究では建設費用の積算に実際の施工性を考慮して、NATM積算を適用した。

5-2 NATM積算の流れ

図 18 に本研究に使用した NATM 積算の手順を示し、この手順に従い積算している。

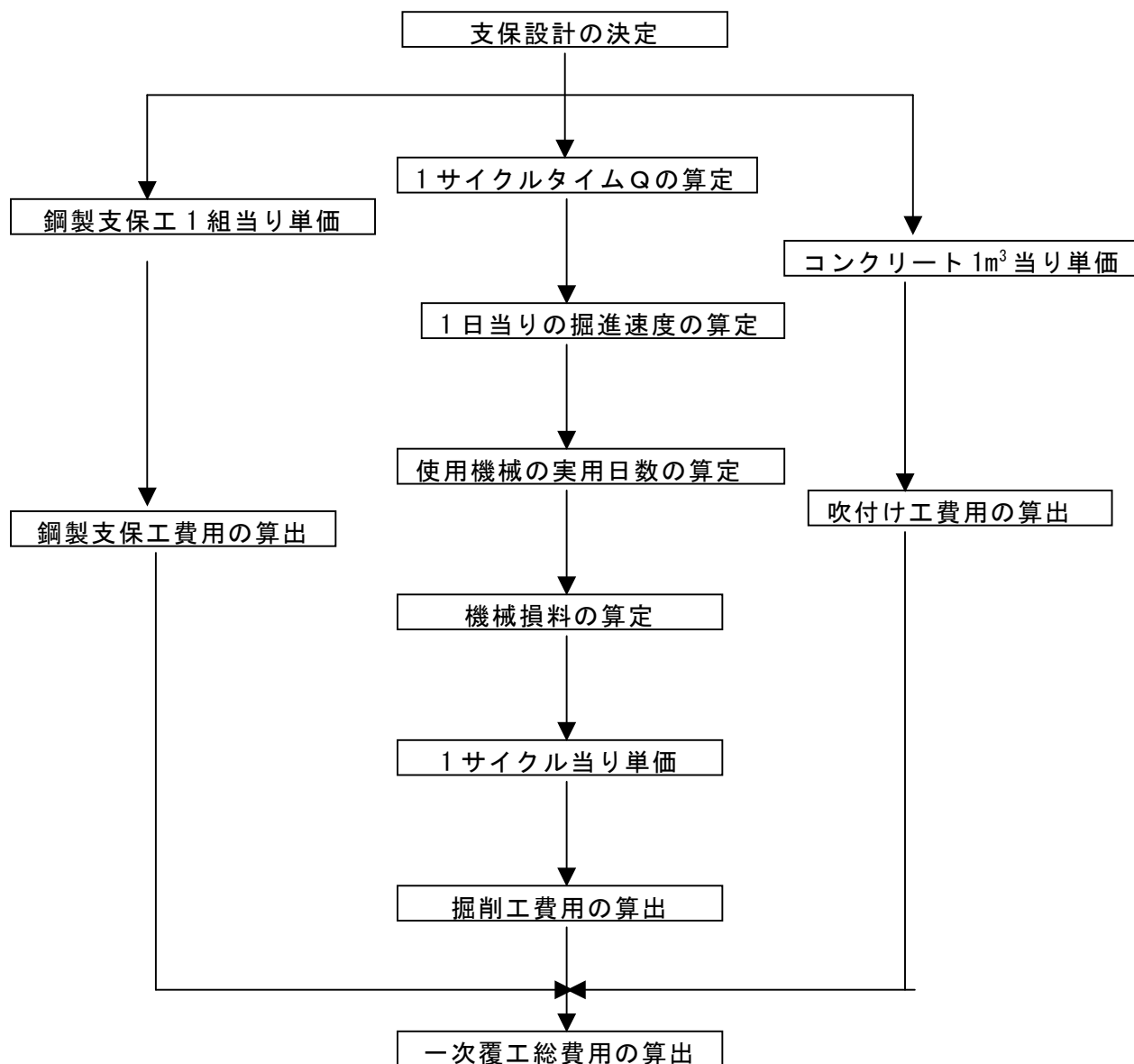


図 18 積算手順

表 4 普通吹付けコンクリート 100m³当たりの単価

吹付けコンクリート(設計基準強度 $\sigma_{28}=18\text{N}/\text{mm}^2$)						
名称	規格	単位	数量	単価	金額	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	kg	36,000	8	288,000	$360 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 100\text{m}^3 = 36,000 \text{ kg}$
砂	砂	m ³	80	4,000	320,000	$1,086 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 100\text{m}^3 \div 1,350 \text{ kg}/\text{m}^3 \doteq 80\text{m}^3$
碎石	15 mm以下	"	47	4,050	190,350	$675 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 100\text{m}^3 \div 1,430 \text{ kg}/\text{m}^3 \doteq 47\text{m}^3$
急結剤	デンカ Type5	"	2,520	200	504,000	$36,000 \times 7\% = 2,520 \text{ kg}$
粉じん低減剤		"	36	320	11,520	$36,000 \times 0.1\% = 36 \text{ kg}$
諸雑費		式	1		130	
計					1,314,000	
1m ³ 当たり					13,140	

5-3 吹付け工費の積算

表 4 に吹付けコンクリート 100m³ 当たりの配合設計の単価を示す。

6 解析手法

6-1 遺伝的アルゴリズムの採用

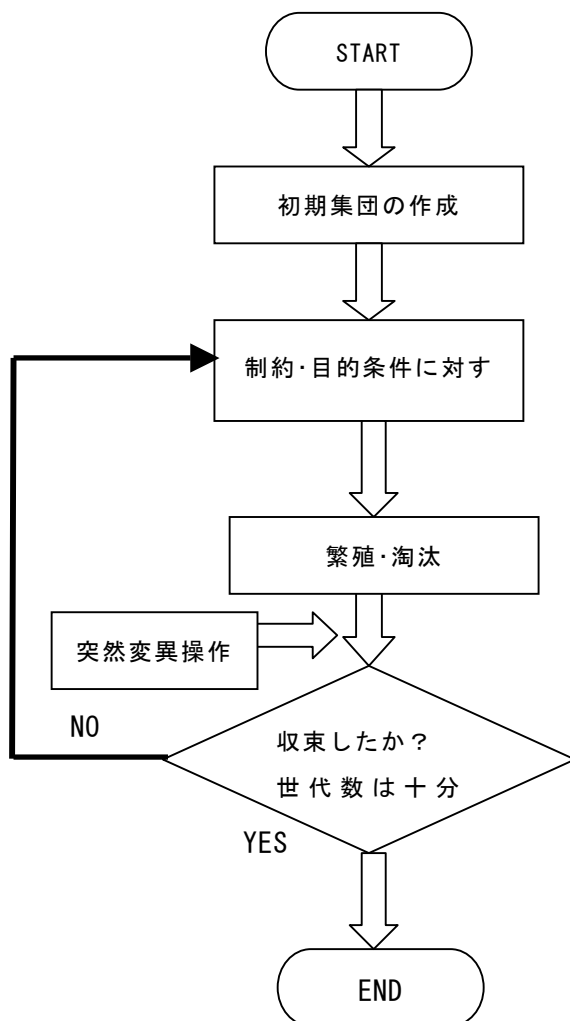
最適化問題を考える際には、どのような最適化手法が適切であるかを考えなければならない。多々ある数理的最適化手法を応用して解くことが可能である問題もあれば、数理的最適化手法では不可能な問題もある。このような問題に対して、突然変異と自然淘汰が最適解を実現すると仮定し、自然淘汰のメカニズムを人為的に模倣して最適解を導き出すことが可能ではないかという考えから生まれたのが GA である。GA による最適化問題へのアプローチは様々な分野で行われており、特に広域探索を必要とする多峰性問題での解の信頼性は高い。そこで本研究では構造物の力学的安定性、建設コストの両面を考慮した施工条件の最適化に GA を採用する。

6-2 遺伝的アルゴリズムを用いた解析の流れ

本研究は図 19 に示すフローチャートに従って解析される。

解析条件を表 5 に示す。

表 5 解析条件



初期応力 p (MPa)	3.0
トンネル半径 tr (cm)	356
トンネル延長 (m)	500
地山のクリープ係数 $\alpha = \beta$ (1/MPa)	0.01225
鋼製支保工の断面積 (cm ²) H-200 モルタル入り 鋼管	63.53 105.94
鋼製支保工の降伏時の軸ひずみ EMAX	0.0013
降伏前の支保工弾性係数 EE (MPa)	210000
降伏後の支保工弾性係数 EP (MPa)	1900
支保工建て込み間隔 DD (cm)	50,75,100,125,150
支保工と切羽の距離 XL (cm)	50,75,100,125,150

図 19 GA 解析のフローチャート

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 y を以下の式に示すシグモイド関数に代入し、これにより求められる $g(y)$ を目的条件に対する適応度とする。

$$g(y) = \frac{1}{1 + e^y}$$

費用 y が 0 に近づくほど適応度は高くなり、 $g(y)$ 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。

第 7 章 解析結果と考察

鋼製支保工としてモルタル入り鋼管支保工（断面積 105.94cm²）と H-200 型鋼製支保工（断面積 63.53 cm²）を用いた場合について、1 サイクル進行長（支保工建て込み間隔）をピッチ 50 c m から 25 c m 間隔でピッチ 150 c m まで変化させた解析を行った。

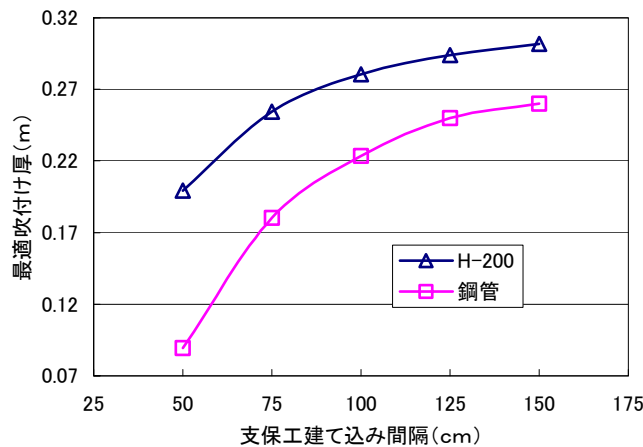


図 20 支保工建て込み間隔と吹付けコンクリートの最適吹付け厚さの関係

図 20 は、支保工建て込み間隔と吹付けコンクリートの最適吹付け厚さの関係を示している。最適吹付け厚とは、吹付けコンクリートが降伏しない最低の厚さのことを意味する。鋼管、H-200 とともに支保工建て込み間隔が大きくなると求められる吹付け厚も大きくなる。断面積の広い鋼管を用いれば吹付け厚さは少なくすむことがわかる。支保工建て込み間隔が 50 c m の場合には、鋼管を用いれば吹付け厚は H-200 の半分以下の厚さですむことがわかり、工費削減につながると思われる。

図 21 は、支保工建て込み間隔とサイクルタイムの関係を示している。支保工建て込み間隔が広くなるにつれて、1 サイクル掘削量、吹付け厚が増えるのでサイクルタイムも増加していることがわかる。鋼管を用いれば、多少サイクルタイムの削減ができる。

図 22 は、支保工建て込み間隔と掘進速度の関係を示している。支保工建て込み間隔が広くなるにつれて掘進速度は、速くなっている。鋼管、H-200 であまり差はないが鋼管を用いれば若干速度は速くなる。

図 23 は、支保工建て込み間隔と適応度（fitness）の関係を示している。支保工建て込み間隔が広くなるにつれて適応度は大きくなっている。H-200 の方が適応度は小さな値となった。

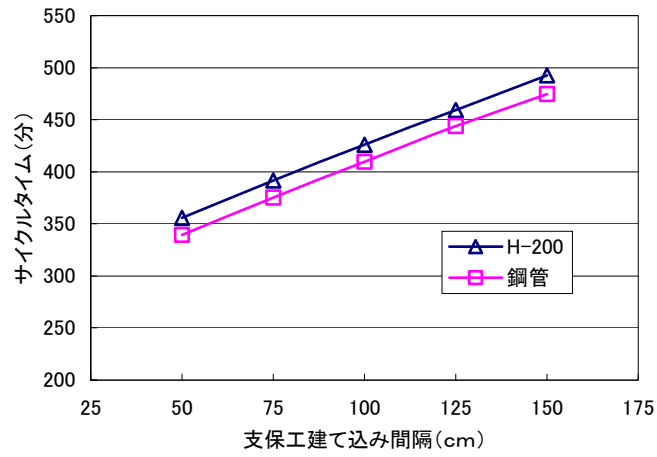


図 21 支保工建て込み間隔とサイクルタイムの関係

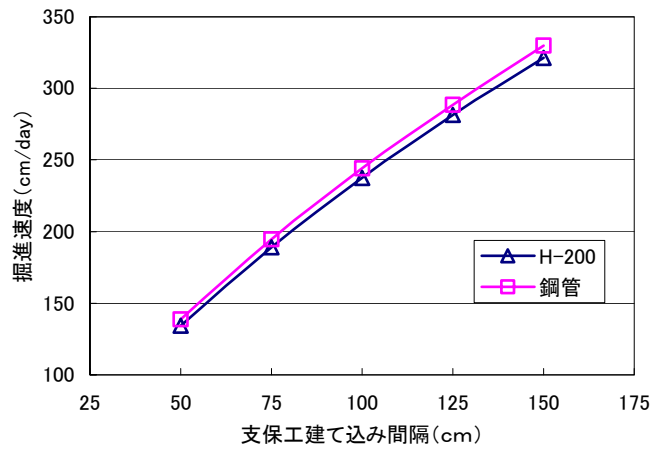


図 22 支保工建て込み間隔と掘進速度の関係

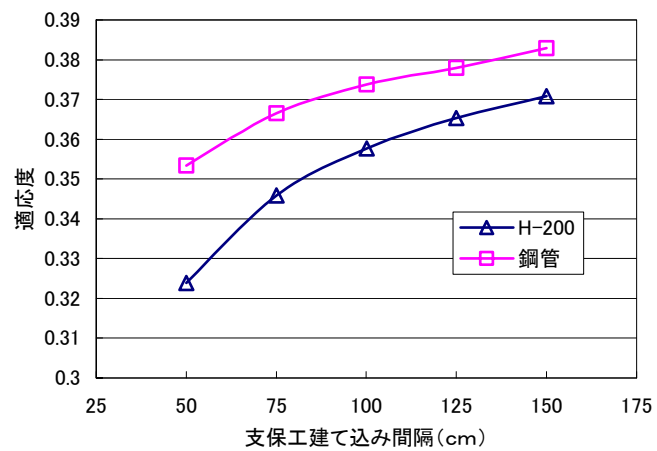


図 23 支保工建て込み間隔と適応度の関係

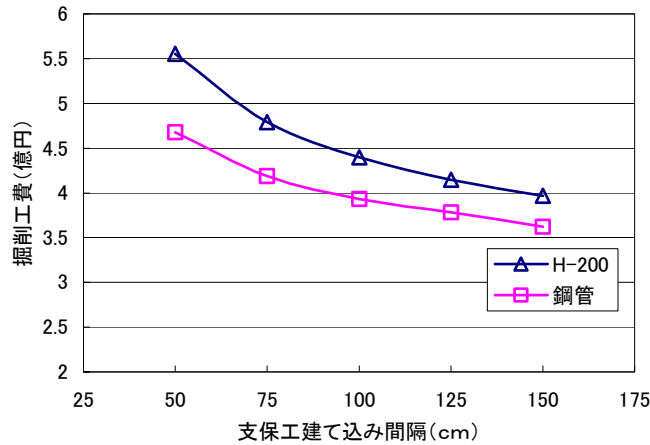


図 24 支保工建て込み間隔と掘削工費の関係

図 24 は、支保工建て込み間隔と掘削工費の関係を示している。支保工建て込み間隔が広くなるにつれて掘削工費は安くなっている。これは、支保工建て込み間隔が広くなると単位掘削距離あたりの機械や作業員の準備の時間や、測量、後始末などの時間が短縮されるために工費が安くなったといえる。H-200 に比べて剛性の大きい鋼管を用いると吹付けコンクリートの厚さを薄く出来るので、その分だけ地盤掘削量が減少することから H-200 の場合に比べて掘削工費は安くなる。

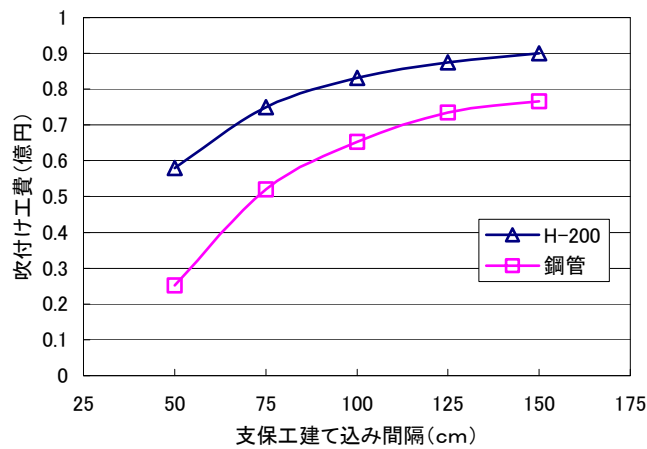


図 25 支保工建て込み間隔と吹付け工費の関係

図 25 は、支保工建て込み間隔と吹付け工費の関係を示している。支保工建て込み間隔が広くなると、図 20 で示したように求められる吹付け厚が大きくなるので吹付け工費は高くなっている。鋼管を用いると吹付け厚が H-200 を用いた場合より少なく済むため工費も安くなる。

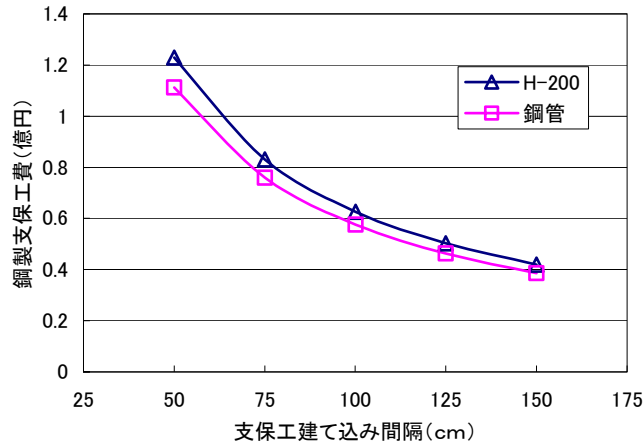


図 26 支保工建て込み間隔と鋼製支保工費の関係

図 26 は、支保工建て込み間隔と鋼製支保工費の関係を示している。支保工建て込み間隔が広くなると鋼製支保工の総基数が少なくなるので工費は当然安くなる。

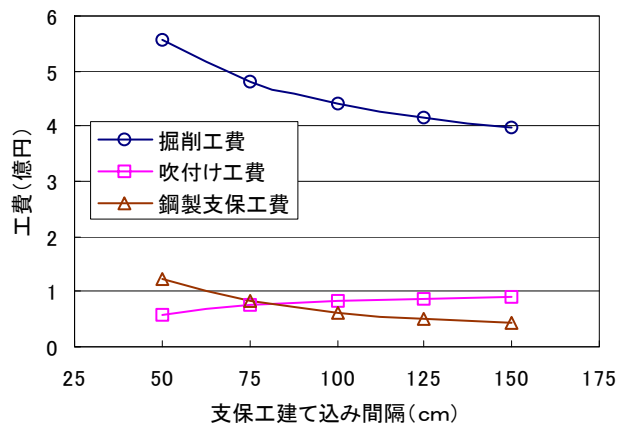


図 27 支保工建て込み間隔と各工費の関係（支保工は H-200 を用いた）

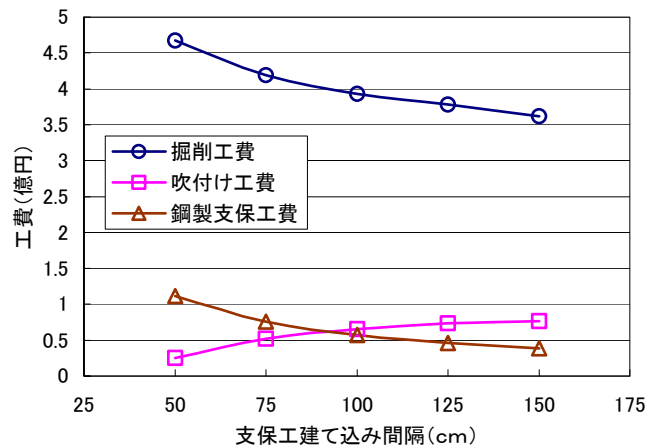


図 28 支保工建て込み間隔と各工費の関係（支保工は鋼管を用いた）

図 27、図 28 は支保工建て込み間隔と各工費の関係を示している。各工費とは掘削工費、吹付け工費、鋼製支保工費を示している。これらの図から一次覆工総工費は、掘削工費の値で大きく変わるように考えられる。

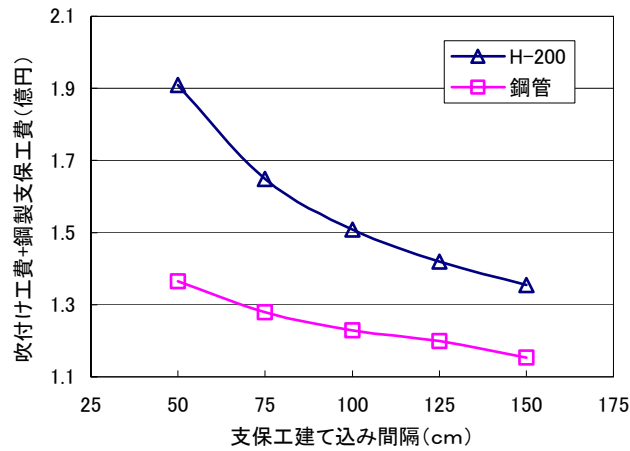


図 29 支保工建て込み間隔と工費の関係

図 29 は、支保工建て込み間隔と工費の関係を示している。これは建て込み間隔ごとの吹付け工費と鋼製支保工費を足し合わせたものである。図 25 で支保工建て込み間隔が広くなると吹付け工費は高くなったが、図 29 のように鋼製支保工費との和で表せば工費は安くなり一次覆工総工費も安くなると考えられる。

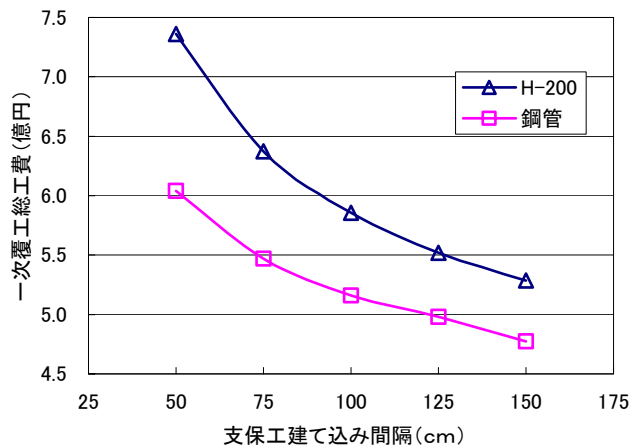


図 30 支保工建て込み間隔と一次覆工総工費の関係

図 30 は、支保工建て込み間隔と一次覆工総工費の関係を示している。支保工建て込み間隔が広くなると総工費は安くなっている。鋼管を用いれば、工期短縮につながるため総工費は H-200 を採用する場合に比べて安くなる。

次に鋼製支保工 H-200 を使用し、支保工建て込み間隔が 50 c m の場合の費用を基準として各工費の比率を出して考察を加える。

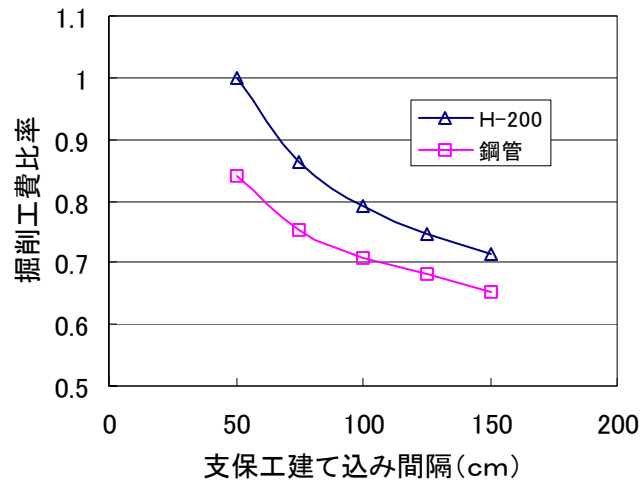


図 31 支保工建て込み間隔と掘削工費比率の関係

図 31 は、支保工建て込み間隔と掘削工費比率の関係を示している。H-200 では支保工建て込み間隔が広くなると大幅に値が下がっている。これは、鋼管よりも工費の安くなる幅が大きいことを示している。

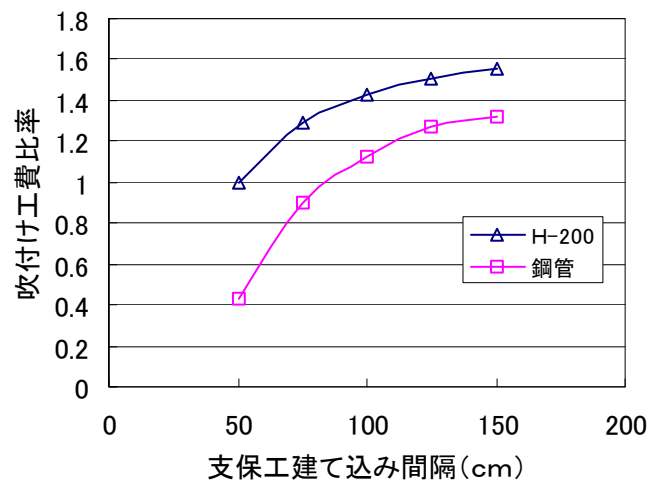


図 32 支保工建て込み間隔と吹付け工費比率の関係

図 32 は、支保工建て込み間隔と吹付け工費比率の関係を示している。支保工建て込み間隔が広くなると、鋼管の方が求められる吹付け工費が大きいことがわかる。

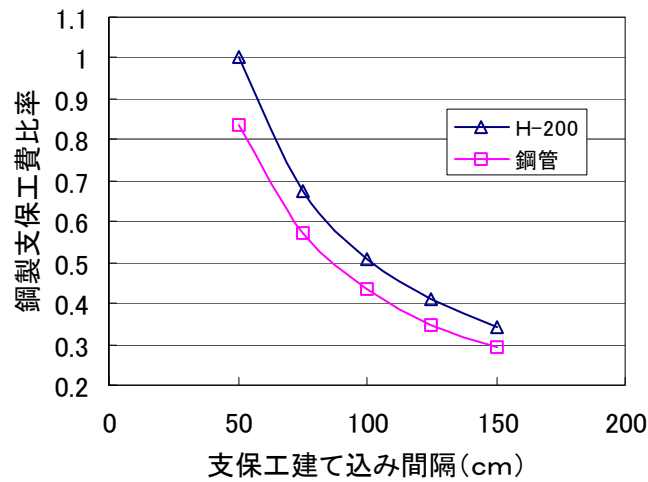


図 33 支保工建て込み間隔と鋼製支保工費比率の関係

図 33 は、支保工建て込み間隔と鋼製支保工費比率の関係を示している。支保工建て込み間隔の増大とともに、両者の差は少なくなっている。

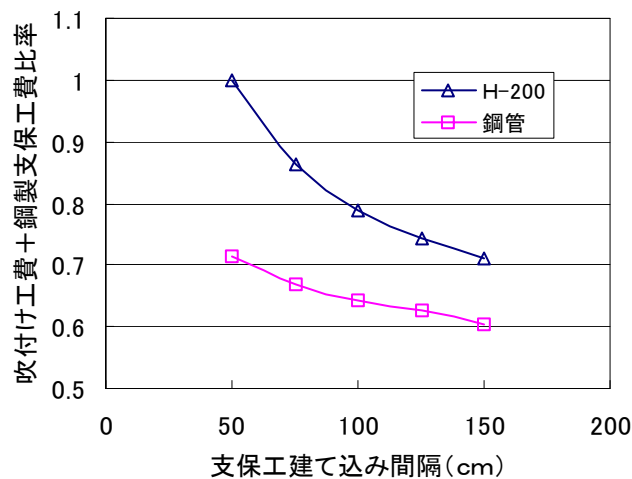


図 34 支保工建て込み間隔と各工費比率の関係

図 34 は、吹付け工費と鋼製支保工費の和の比率と、支保工建て込み間隔の関係を示している。H-200の方が鋼管の場合に比べて支保工建て込み間隔が広がるにつれて比率が下がる幅が大きい。

図 35 は、支保工建て込み間隔と総工費比率の関係を示している。支保工建て込み間隔が広がるにつれて鋼管よりも H-200 の方で安くなる幅が大きいことが分る。

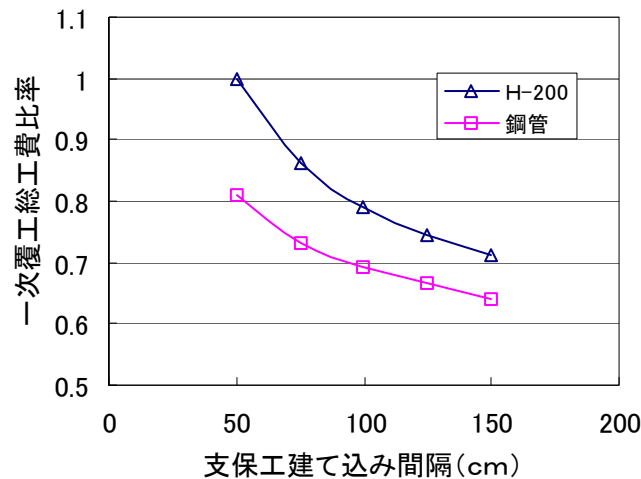


図 35 支保工建て込み間隔と総工費比率の関係

第 8 章 結論及び指針

- ① 種々の力学特性を有する岩盤を対象にして、普通吹付けコンクリートと鋼製支保工から成る一次覆工の挙動について、非線形数値解析により明らかにした。
- ② 鋼製支保工は比較的早期に降伏するが、その降伏により鋼製支保工の剛性が低下することから、その後吹付けコンクリートの地圧が急増する現象を明らかにした。
- ③ 吹付けコンクリートが降伏するまでは、一次覆工の地山支持能力は健全に発揮されるが、吹付けコンクリートの降伏・破壊により一次覆工の地山支持能力は大きく低下することを示した。
- ④ 支保工建て込み間隔が広がると吹付け厚さ・工費は増加するが掘進速度は上昇するので、工期短縮がはかれて経済性の向上につながるということが明らかになった。
- ⑤ 剛性の大きい鋼製支保工を使用することで吹付け厚さを減じることが出来、ひいては掘削土量の減少、掘進速度の増加、サイクルタイムの減少、適応度の増加がはかれることから、コスト削減につながるということが定量的に明らかになった。
- ⑥ 得られた成果より設計・施工上の指針を示せば以下の通りである。
 - (1) 一間掘削長を可能な限り大きくとれば、より経済的な施工が可能となる。
 - (2) 鋼製支保工の降伏はトンネルの安定性に大きく影響しないが、吹付けコンクリートの降伏はトンネルの安定性と経済性を大きく損なうので、これが降伏しない施工条件を決めなければならない。
 - (3) 鋼管支保工に代表されるように、剛性の大きい鋼製支保工の採用は経済的な施工につなげることができる。
 - (4) 時間依存性を示す地山においては、その特性及び掘進速度を考慮してこそ経済的な設計・施工が可能であるので、それらを考慮しなければならない。

参考文献

- 1) 久武勝保、伊藤富雄、桜井春輔：時間依存性を示す膨張性軟岩トンネルの一次覆工挙動、土木学

会論文集、第 412 号/Ⅲ - 12、pp.153-160、1989 年 12 月

- 2) 伊藤富雄、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、No.307、pp.51-57、1981.

STUDY ON OPTIMUM TUNNEL DESIGN CONSIDERING CONSTRUCTION COST AND MECHANICAL STABILITY

Hisatake, M., Ohno, S.
Kinki University

The objective of this research is to present a new method of performance based design, in order to search and determine the executive conditions which assure the stability of a tunnel and the minimum construction cost. The method employs both the genetic algorithm as an optimization technique for construction cost and the limit state design for performance warranty of tunnel supports. The method has been applied to a tunnel constructed in the several types of rocks with time dependency, and the optimum relationship between the cost and the executive conditions has been made clear.

Key Words : *minimum cost, optimization, stability of tunnel, genetic algorithm, limit state*

研 究 成 果 の 要 約

助成番号	助 成 研 究 名	研 究 者 ・ 所 属
第2007-8号	力学・費用連成によるトンネル積算最適化に関する研究	久武勝保・近畿大学
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>現在の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情報や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。一次覆工の安定性と建設費用の最小化の関係を結びつける最適化に関する研究が十分行われていないことや、地山の力学特性が事前に十分把握できないこと等の理由によって、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。</p> <p>本研究は、トンネル一次覆工の力学的な安定性を確保した上で、一次覆工の建設費用を最小化する種々の施工条件・力学条件の関係について、最適化手法と数値解析手法を連成させて明らかにすることを目的としている。すなわち、トンネルの力学的な安定性を確保すると共に建設費用を最小化する施工条件を最適化手法で求めるものである。トンネル設計を合理的に行うには、一次覆工の挙動、特にその安定および破壊条件を力学的に表現し、また安定性を確保できる場合について、最も経済的な施工条件と建設コストを決定する必要がある。そこで、本研究では鋼製支保工と吹付けコンクリートからなるトンネル一次覆工を採り上げ、以下に示す種々の条件を考慮した非線形数値解析を行った。すなわち、</p> </div> <div style="width: 48%;"> <ol style="list-style-type: none"> ① 時間と共にトンネル内面がはらみ出す地山の時間依存力学特性 ② トンネル切羽の進行速度 ③ 吹付けコンクリートの時間に依存した強度、変形特性 ④ 鋼製支保工の弾塑性力学特性 ⑤ トンネル切羽周辺の3次元変形特性 <p>コスト最適化の手法については従来トンネル工学の分野ではシンプレックス法や勾配法が適用されてきた。しかし、コストは種々の施工条件、支保の力学特性、地山の初期応力、力学特性の影響を受けるので、コスト最適化問題は多くの極小値が存在する多峰性問題である。ところが上記の手法では必ずしもコスト最小値が求められるという保証はなく、極小値が得られる可能性がある。そこで、本研究では最小値を求めることの出来る広域探索法である遺伝的アルゴリズムを採用している。</p> <p>得られた成果から指針の一例を示せば以下の通りである。鋼製支保工の降伏はトンネルの安定性に大きく影響しないが、吹付けコンクリートの降伏はトンネルの安定性と経済性を損なうので、これが降伏しない施工条件を決める必要がある。</p> <p>本研究によりトンネル工学で初めて力学・費用連成解析が研究されたという新規性が認められる。また積算最適解を探索する本提案手法は今後のトンネル積算の実務に活用することが可能である。</p> </div> </div>		