

手動式削孔機を用いた硬岩トンネルのスムーズブラスティング孔設計の最適化と実施工への適用

OPTIMUM DESIGN OF SMOOTH BLASTING IN HARD-ROCK TUNNELLING USING MANUAL DRILLING MACHINE AND ITS APPLICATION TO ACTUAL TUNNEL EXCAVATION

吉見憲一*・鈴木雅行**・古川浩平***・中川浩二****

By Ken-ichi YOSHIMI, Masayuki SUZUKI, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

This study presents the formulation of an optimum design of smooth blasting using a manual drilling machine in hard-rock tunnelling and the cost estimation of overbreaking and underbreaking. The proposed design method aims to minimize the total expense of the extra concrete cost in the region of overbreaking and of the labour cost required to remove the unbroken rock in the region of underbreaking. The design variables is the collaring radius ΔR only. The calculated results indicate that the drilling precision of the look-out angle is the most important factor in the optimum design of smooth blasting in tunnelling, in the case of using a manual drilling machine. The results also indicate that 40 % of the total expense can be saved by the improvement of drilling precision and the application of an optimum design.

Keywords : optimum design, smooth blasting, manual drilling machine, actual tunnel excavation, hard rock

1. ま え が き

著者らはすでにスムーズブラスティング（以下SBと略）の考え方を整理し¹⁾、SBを考える場合最適化の概念を適用することにより、より合理的な設計が可能であることを指摘した²⁾。これらの研究は、いずれも削孔ロボットの使用を前提として行われたものである。削孔ロボットを用いた場合、SB効果を検証するのに必要な入出力データの把握が容易であり、かつ、削孔開始位置やさし角を自由に設定することが可能である。しかし、削孔ロボットは通常の現場で用いられている手動式削孔機に比べると非常に高価であり、また機構が複雑なため、耐久性に問題が残されている。

これに対し、現在現場で多く用いられているのは手動式の削孔機であり、これらの多くは削孔位置だけでなくさし角も作業員が自らの経験により決めて削孔する形式を採っている。中には、さし角調整機能のついた手動式削孔機もあるが、この機能を完全に利用できているかど

うか疑問が多い。

SBの必要性が従来より数多く指摘されながら、一般の現場で真の意味でのSBが実行されなかったのは、一般の現場で用いている手動式削孔機の特徴を取り入れて、普通の現場でもできるような形でのSBの研究がほとんどなかったからと考えられる。

以上の観点から、本研究は一般の現場で多く使用されている手動式削孔機を用いた場合のSB孔設計の最適化を、どの現場であっても簡単に取り入れられるようにと考えて定式化を行い、実現場での実験をもとに論じたものである。

2. 手動式削孔機を用いた場合の最適化問題としての定式化

(1) 設計変数の決定と最適化問題の一般的な定式化
トンネルの上半掘削の一般図を図-1に示す。ここでは断面が半円状であるSLより上部のみを考察の対象とする。ここで R_0 は最小限必要な掘削半径で、必要空間に所定のコンクリート巻厚、吹付けコンクリート厚を加えたものである。

SB孔設計の最適化を考える場合、制御できる設計変数が限られる。削孔ロボットを用いた場合は²⁾、図-1に示す切羽において、円の中心から削孔位置までの半径

* 正会員 (株)間組企画部・課長 (〒107 港区北青山2-5-8)

** 正会員 (株)間組土木本部設計部 (同上)

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科
(〒755 宇部市常盤台2557)

**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(同上)

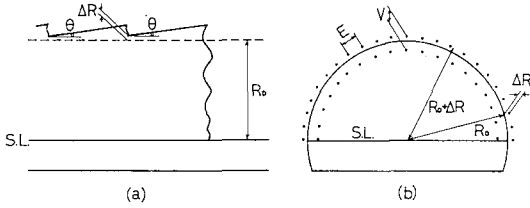


図-1 トンネルの上半掘削一般図

$R = R_0 + \Delta R$ とさし角 θ が設計変数と考えられる。しかし手動式削孔機では、後に述べるように一般的にはさし角 θ が自動設定できず、主として作業員の経験から得られた勘に頼ることとなる。そのため、 θ を任意に制御することは難しいと考えられる。

これに対し、切羽面の中心から削孔位置までの半径はスプレーで切羽面に円周を描くことにより任意に設定でき、かつ、この精度はマーキング装置を改良することによりかなりの程度まで向上させることが可能である。しかも作業員にこのスプレーの位置から削孔することを指示することは容易でその誤差は小さくできる。

これらのことから、手動式削孔機を用いたSB孔設計の最適化は、スプレーで描く円周の半径 R と必要掘削半径 R_0 との差 ΔR を設計変数にし、当り取り費用と余分に必要となるコンクリート費用の和を目的関数とした次のような1変数最適化問題として定式化される。

設計変数 ΔR

$$\text{目的関数 } C_T = (C_A \cdot P_A \cdot A_A + C_B \cdot V) / L \rightarrow \min \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 C_T は掘削長 1 m 当たりの SB に関する総費用、 C_A は 1 m² の当りを除去するに必要な費用、 P_A は 1 サイクル平均の当りになる確率、 A_A は 1 サイクルの壁面の延面積、 C_B はコンクリート 1 m³ の費用、 V は 1 サイクルの余掘り量、 L は 1 サイクルの進行長である。

式 (1) の最適化を行うには C_A 、 P_A 、 V の算定が必要であるが、これらの算定はかなり難しい。特に実際の現場で簡単に測定されるデータから C_A と P_A を算出するには困難が多い。本研究では P_A 、 V の算出法とその検証を以下の (2)、(3) で、 C_A の算定を 4. で試みる。

(2) 当りの確率 P_A の算出

第 1 段階の SB¹⁾ が成功している場合、図-2 に示すように切羽から x (cm) 離れた断面において、最小必要掘削半径 R_0 と実掘削半径との差を $D(x)$ とし、さし角 θ は 5~7 度と小さいとすると $D(x)$ は次式で表わすことができる。

$$D(x) = \Delta R + x \cdot \tan \theta = \Delta R + x \cdot b \cdot \theta \quad \dots \dots \dots (2)$$

θ 、 ΔR はおのおの独立な確率変数とすると、 $D(x)$ の平均値 $\bar{D}(x)$ および標準偏差 $\sigma(x)$ は次式となる。

$$\bar{D}(x) = \bar{\Delta R} + x \cdot b \cdot \bar{\theta} \quad \dots \dots \dots (3)$$

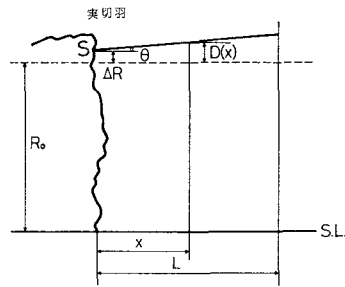


図-2 削孔機による削孔状況

$$\sigma^2(x) = \sigma_R^2 + x^2 b^2 \sigma_\theta^2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\bar{\Delta R}$ 、 $\bar{\theta}$ は ΔR 、 θ の平均値、 σ_R 、 σ_θ は ΔR 、 θ の標準偏差である。もし、 σ_R が σ_θ に比べて十分小さく、ゼロとみなせる場合、 $\sigma(x)$ は次式となる。

$$\sigma(x) = x \cdot b \cdot \sigma_\theta = \sigma_D(x) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $\sigma_D(x)$ は切羽から x (cm) 離れた断面 $D(x)$ での断面計測結果の標準偏差である。

$D(x)$ を正規分布と考え、その標準偏差が式 (5) で表わされるとすると、位置 x における当りの確率は次式で表わされる。

$$P_A(x) = \frac{1}{\sigma_D(x) \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{y - \bar{D}(x)}{\sigma_D(x)} \right)^2 \right\} dy$$

$$= \Phi \left(\frac{-\bar{D}(x)}{\sigma_D(x)} \right) = 1 - \Phi \left(\frac{\bar{D}(x)}{\sigma_D(x)} \right) \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここに $\Phi(\cdot)$ は標準正規確率分布関数を表わす。

(3) 余掘り量 V の算出

節理の少ない硬岩トンネルにおいて、十分注意した発破を行えば側壁面には SB 削孔時のみ跡が明確に残り、全 SB 孔延長に対する側壁面のみ跡総延長の割合であるのみ跡率は高いものが得られる。このことから発破技術である第 1 段階の SB はかなりの程度まで達成でき、そのときのトンネル軸方向の平均的な形状は、式 (2) で表現できることが明らかになっている²⁾。よって 1 サイクル当たりの余掘り量 V は SL より上部のみを対象として考える場合、次式で表現できる。

$$V = \int_0^L \frac{\pi}{2} [(R_0 + \bar{D}(x))^2 - R_0^2] dx$$

$$= \int_0^L \frac{\pi}{2} [2 R_0 + \bar{D}(x)] \bar{D}(x) dx \quad \dots \dots \dots (7)$$

以下で述べるように 1 サイクルの中間断面で断面計測を行い、その断面の D の平均 $\bar{D}(L/2)$ を用いると式 (7) は次式となる。

$$V = \frac{\pi L}{2} [2 R_0 + \bar{D}(L/2)] \bar{D}(L/2) \quad \dots \dots \dots (8)$$

(4) 1 変数最適化問題としての定式化

すでに式 (1) に一般的な最適化問題としての定式化を示したが、これらをまとめると次式となる。ただし、

便宜上ここでは切羽から1サイクルの中間点までの距離 $L/2$ を d で表わす。

設計変数 ΔR

目的関数 $C_T = (C_A \cdot P_A \cdot A_A + C_B \cdot V) / L \rightarrow \min$ (1)

ここに

$$\begin{aligned} \bar{D}(d) &= \bar{D}(L/2) \\ &= \Delta R + (L/2) \cdot \tan \theta \\ P_A &= 1 - \Phi \left(\frac{\bar{D}(d)}{\sigma_D(d)} \right) \\ A_A &= \pi \{ R_0 + \bar{D}(d) \} \cdot L \\ V &= \pi \{ 2 R_0 + \bar{D}(d) \} \bar{D}(d) \cdot L/2 \end{aligned}$$
 (9)

この問題は単純な1変数最適化問題であり、最適化手法を利用しなくても、 ΔR を順に変化させることにより最適解が得られる。しかも、この計算は現場事務所にあるパーソナルコンピュータでも十分に可能である。

3. 現場実験の結果と考察

手動式削孔機を用いた通常の現場でのSB孔設計の最適化の検討を行うため、以下のような現場実験を行った。

(1) 実験環境

本実験を行った現場は、黒雲母花崗斑岩から成るトンネルで、その岩盤分類はAまたはBに属するいわゆる硬岩のNATMトンネルである。実験区間の設計、実績の岩質区分および支保パターンを表-1に示す。この表をみてわかるように実験中、岩質は基本的にAあるいはBであり、ほぼ同程度と解釈された。なお、実験4で一部岩質Cの部分があったが、この部分は実験データから省くこととした。また、削孔機は標準的な手動式2ブーム油圧クローラジャンボを用いたため、削孔間隔、さし角、削孔長の精度は作業員の技術力に負うところが大きい。

次に、図-1に示す周辺孔間隔(E)、最小抵抗線距離(V)、薬量(W)の決定であるが、本実験位置の岩盤が過去の施工データを検討し、さらに数種の追加実験を行いのみ跡率を比較した結果、 $E=50\text{ cm}$ 、 $V=70\text{ cm}$ 、 $W=0.6\text{ kg}$ (1孔当たり)が最ものみ跡が多く残るパターンであることが判明した。のみ跡率の平均を図-3に示す。図-3のSB削孔位置は天端を0とし、両側壁へ順に

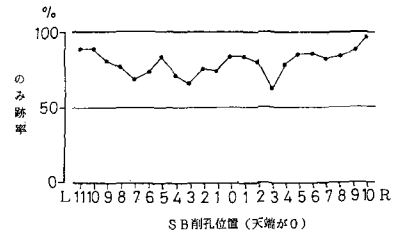


図-3 各孔ののみ跡率の平均

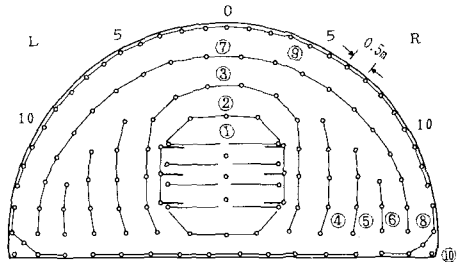


図-4 発破パターン図

番号付けしたものである。またのみ跡率は図中の黒丸であるが、全体を把握しやすいように折れ線で結んだ。図から明らかのように、のみ跡率は70~90%であり、第1段階のSBとしては十分成功していると判断できる。

図-4、表-2に実験に用いた発破パターン図および発破諸元を示す。

削孔開始位置のマーキングについては、マーキング方法が大きく影響を及ぼすことが判明していることから、著者らが開発した改良マーキング装置を用い、精度の向上に努めた。なお、掘削断面形状測定には、自動断面測定機を用いている。

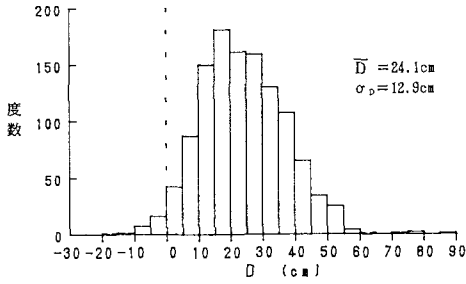
発破後の断面形状を正確に知るには1サイクル中に数断面測定することが望ましい。しかし、本実験は実施工中に行ったためそのような時間的余裕がなく、したがって1サイクルの進行長に対して1断面の計測をすることにし、削孔開始位置から100cm先の断面を評価のデータに用いた。100cm先とした理由は1サイクル進行長(約200cm)の中間であり、余掘り、当り量の平均的な値を示すと考えたためである。

表-1 実験区間の岩質区分と支保パターン

実験区間	実験1	実験2	実験3	実験4
測点	116+0	121+0	127+0	130+2
設計		A		B C B
支保パターン		A		B C1 B
実績	B	A	B	A B C B
支保パターン	B	A	B	A B C B

表-2 発破諸元

1. 使用爆薬	2号硬DY30mm×100g 炸薬付 30mm×100g
2. 使用電気雷管	M.S (D.S) 瞬発
3. 断面積	42.8 m ²
4. 岩質	花崗岩斑岩 (B)
5. 1発破進行長	2.0 m
6. 破砕量	85.6 m ³
7. 穿孔数	130
8. 爆薬使用量	110.6 kg
9. 1m ³ 当り爆薬使用量	1.29 kg



図—5 実験1における掘削断面計測結果

(2) 実験1の結果

本研究での現場実験を行う前に、この現場で実際にやっていたマーキングおよび削孔方法による結果であり、これを実験1とする。このとき、この現場で設定していたさし角 θ は7度であった。これは実施工の結果であり、当然のことながらさし角の測定は行っていない。そのため、本当に7度であったかどうかはわからない。この実験1は本研究でのSB最適化の実験を行う前の施工結果であり、作業員に対してマーキング線上から正確に削孔することやさし角をできる限り7度に設定するように、などの指導は行っていない。

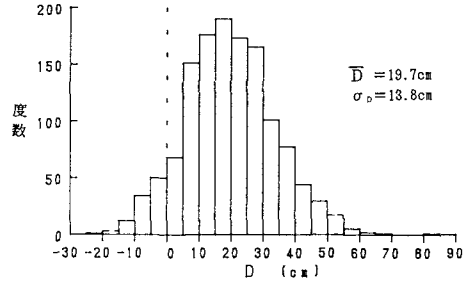
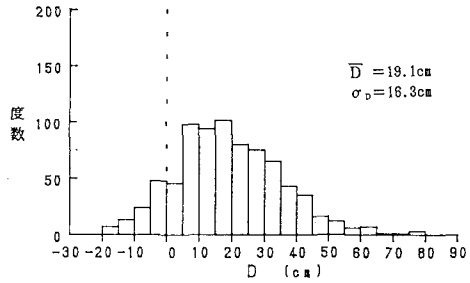
図—5は、実験1で得られた掘削断面計測結果のヒストグラムであり、1断面における測定間隔は3度ピッチ、計47断面の測定結果から得られたものである。 $D < 0$ の部分が当りである。これによると、余掘りの平均値は $\bar{D} = 24.1$ cm、標準偏差は $\sigma_D = 12.9$ cm とともに大きく、この原因としては実削孔位置 $R = R_0 + \Delta R$ がかなり大きかったこと、マーキングの精度に問題があったこと、さし角は作業員の勘による判断に従っていたのでこのばらつきが大きかったことなどが考えられる。

(3) 実験2の結果

実験1の削孔では図—5に示すように当りはほとんどないが余掘りが多く、SBの最適化の観点からは問題があると考えられるところから、実験2では切羽に描くマーキング線を設計線に近づけ、 $\Delta R = 8$ cmに設定した。また、さし角 θ については従来の施工条件と同一にするため7度に設定した。

本実験に使用した削孔機は手動式であり、さし角の調整が作業員の判断によるため、正確を期すため実験前に作業員に対し7度にするように指導し、練習も行った。したがって、作業員はさし角を7度にするよう極力注意を払ったと考えられるが、実施工の工程上の制約がありさし角の測定は行わなかったため、実際に7度になったか否かは明らかでない。

実験2の52断面における掘削断面計測結果のヒストグラムを図—6に示す。図—6より、実験1に比べ $\bar{D} = 19.7$ cmと減少している一方、標準偏差 σ_D は0.9 cm大

図—6 実験2 ($\Delta R = 8$ cm)における掘削断面計測結果図—7 実験3 ($\Delta R = 5$ cm)における掘削断面計測結果

きくなり、 $D < 0$ で表わされる当りが増加していることがわかる。この σ_D の値が実験1より少し大きくなっていることから判断すると、さし角を一定とするための注意を行ったとしても、作業員の勘によるさし角制御では實際上精度向上が難しいものと考えられる。

(4) 実験3の結果

実験2の場合、 ΔR を小さくしたため平均余掘厚は小さくなった。さらにこの実験3では削孔半径を $\Delta R = 5$ cmに変更し実施した。

実験3の31断面における削孔結果のデータDのヒストグラムを図—7に示す。図—7より、 $\bar{D} = 19.1$ cmと減少したものの標準偏差は逆に $\sigma_D = 16.3$ cmと大きく増加している。 \bar{D} が減少した理由は、切羽に描くマーキング線をより設計線に近づけたためと考えられるが、 σ_D の増加はさし角のばらつきが大きかったためと判断されるが、表—1をみるとわかるように、実験3では岩質Bが大部分であったことによる影響も若干はあるものと考えられる。

(5) 実験4の結果

ここでは、削孔半径を設計線と同じ、すなわち $\Delta R = 0$ cmにして削孔を行った。

実験4の41断面の掘削断面計測結果のヒストグラムを図—8に示す。図—8より、 $\bar{D} = 11.8$ cmと減少したものの $\sigma_D = 13.2$ cmと実験1に比べほとんど改善されていないことがわかる。そのため、さらに当りが増加している。

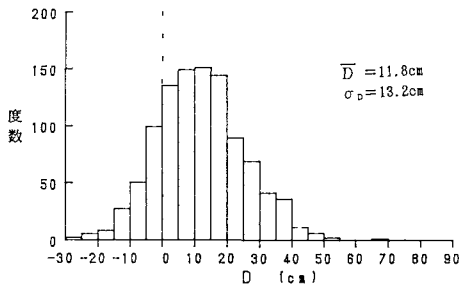


図-8 実験4 ($\Delta R=0$ cm)における掘削断面計測結果

表-3 実験番号ごとの実測結果と計算による当りの確率の比較

	実験1	実験2	実験3	実験4
断面数	47	52	31	41
断面測定箇所数 N	1175	1300	775	1025
ΔR (cm)	—	8.0	5.0	0.0
\bar{D} (cm)	24.1	19.7	19.1	11.8
σ_D (cm)	12.9	13.8	16.3	13.2
当りの個数	25	100	92	191
データからの当りの割合(%)	2.1	7.7	11.9	18.6
式(6)より求めた P_A (%)	3.1	7.6	12.1	18.6

(6) 現場実験結果の考察

以上の現場実験におけるのみ跡率の平均はすでに図-3に示した。図-3をみてわかるように、のみ跡率は70~90%あり、発破技術を示す第1段階のSBは十分に成功していたと考えられる。

第1段階のSBがほぼ成功している場合、 D の値は周辺孔の削孔予定半径およびさし角に依存すると考えられる。設計断面の実現である第2段階のSBの結果の検討は、 σ_D の値をより小さくできたかということにより行うことができる¹⁾。本実験1~4の結果を表-3にまとめて示す。余掘厚の平均値 \bar{D} については削孔半径 ΔR を小さくすることにより、 $\bar{D}=24.1$ cm, 19.7 cm, 19.1 cm, 11.8 cmと順次低減していることから、SB孔削孔半径 $R_0+\Delta R$ を小さくし設計線に近づけることにより、平均余掘厚 \bar{D} は低減することは明らかである。しかし、本実験の σ_D の値は実験1から順に12.9 cm, 13.8 cm, 16.3 cm, 13.2 cmと改善されていない。この理由としては、削孔位置 ΔR はマーキング装置の改良により比較的精度良く設定できるものの、さし角の設定が作業員の勘に依存する方法であり、 σ_D の原因として考えられるそのばらつきを制御できなかったこと、および第1段階のSB結果のばらつきに関して、特に有効な改良がなされていないためであると考えられる。

この実験結果が示すように、手動式削孔機を用いた場合、さし角については前もって練習を行うとか、削孔時に注意を払うといった方法では、有効に制御できないことがわかる。このことは、削孔機の機能上にさし角制御を取り入れる必要性が大きいことを示唆している。

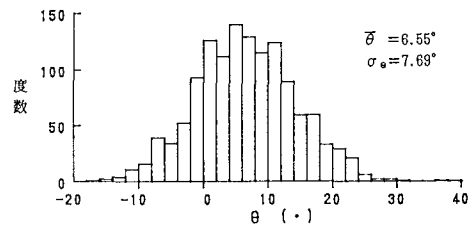


図-9 実験2のデータを用いて計算により求めたさし角分布

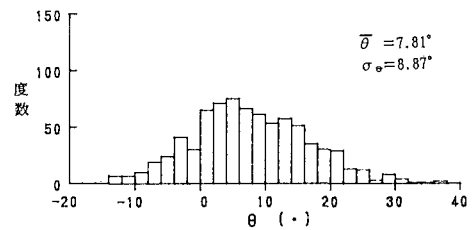


図-10 実験3のデータを用いて計算により求めたさし角分布

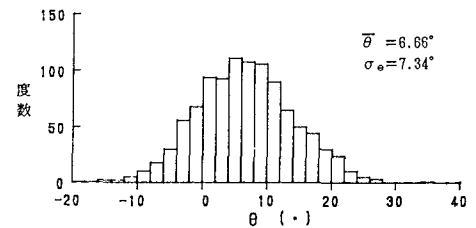


図-11 実験4のデータを用いて計算により求めたさし角分布

また、実験1すなわち著者らがこの現場で計測を行う前の σ_D が最も小さいのは、実験中はマーキング線上からの削孔に気を取られ、さし角に対する注意が十分行き届かなかったのではないかと考えられる。この面からしても、さし角は作業員の経験に頼るのではなく、削孔機の機能上で設定できる方式とすることが望まれる。

すでに述べたように、本実験は実施工中に行ったため、さし角 θ については実験前の実施工と同じ θ を用い、かつ実験前に θ が7度になるよう練習をも試みた。削孔開始位置を指示するマーキングに関しては著者らが開発した改良マーキング装置を用いたこと、および現場実験に著者らが立ち会って作業員がそのマーキング位置から正しく削孔しているかチェックしたため、その精度についてはかなりの程度まで信用できる。そこでマーキング位置から正しく削孔されていたと考え、断面測定を行った $x=100$ cmの断面においては

$$100 \tan \bar{\theta} = \bar{D}(100) - \Delta R \dots\dots\dots(10)$$

となる。ここで表-3を用いて実験2, 3, 4の場合の $\bar{\theta}$ を求めると、それぞれ $6^\circ 40'$, $8^\circ 01'$, $6^\circ 43'$ となり、平均的なさし角 θ は7度前後になっていたと判断できる。

そこで ΔR の値は正しいとして、実測結果を用いてさし角のばらつきを計算した結果を図-9~図-11に示

す。これらの図より、実験2, 3, 4のさし角 θ の平均値は6.55, 7.81, 6.66度、標準偏差は7.69, 8.87, 7.34度である。図をみてもわかるようにばらつきはかなり大きく、また正負ともに現実的ではないと考えられる大きさのさし角がみられる。これは1つには ΔR を指定した値どおりと考え、切羽面の凹凸によるマーキングの誤差および切羽面の凹凸によるのみがすべり、さし角が変化することを考慮していないのと、2つには第1段階のSBが完全に成功し削孔どおり掘削されたと考えて、第1段階のSBの不完全さによる断面の凹凸をもさし角のばらつきの結果として評価しているためであろう。しかし平均値的にはほぼ7度前後のさし角となっており、これは本実験に携わった削孔作業員の経験が豊富であり、ほぼ7度のさし角を過去の経験から割り出していたものと考えられる。

本実験に使用した削孔機は実際はさし角調整機能の付いた機種であり、その機能を利用しようとしたが、その機能を生かして施工できなかった。この原因は以下のとおりである。

① さし角調整機能は1ブームごとにトンネル軸に対し上下方向および水平方向とも平行に合わせなければならず、通常のサイクルの上では時間がかかるため困難である。

② 本実験に用いたクローラタイプの削孔機はロックボルト削孔も制御できるような機能としているために、さし角設定範囲が0~90°と大きく、7°の正確な設定が難しい。

③ 本体が切羽面のズリを均した程度の路盤上にセットされるため、機械を水平にセットできず、ブームの水平保持機能の誤差が大きくなり、ブーム移動場所によるさし角の誤差が大きくなる。

以上のような削孔機の機能上の問題点のため、第2段階の重要な要因の1つであるさし角 θ の制御については、削孔機のさし角調整機能が使用できずに作業員の勘に頼る作業となった。後で述べるように、さし角の制御がSB結果ひいてはトンネル掘削の経済性に及ぼす影響は大きく、さし角調整が容易な削孔機の開発が望まれる。

(7) 実験結果による当りの確率に関する検討

削孔ロボットを用いたスムーズブラスティングに関しては、すでに当りの確率とその検証がなされている²⁾。しかしこれは2変数問題としての定式化であり、ここでは測定した項目も多く、その精度も高いと考えられる。これに対して本研究においては大多数の現場での適用を考え、最も簡単な1サイクルの中間での断面計測しか行っていないが、その結果を用いて式(6)の当りの確率の検証を試みる。

表—3に実験1~4の測定データから求めた当りの割

合と式(6)より求めた当りの確率を示す。 D の値が実験1~4によりかなり異なるにもかかわらず両者の結果はほとんど同じである。このことは、 $D(x)$ を正規分布と考え、その断面での $D(x)$ の標準偏差を用いた式(6)で1サイクルの平均的な当りの確率が求められるものと考えられる。すなわち、1サイクルの中間断面を計測することにより、ほぼ問題のない程度に当りの確率が求められることになる。このような1サイクル1断面の計測は現場で十分可能であり、SBを通常の現場へ適用するにあたって問題となる断面計測の煩わしさを避ける一助となるものと考えられる。

4. 当り除去費用の算出

式(1)で示した最適化問題を解くにあたり、次に問題となるのが当り除去費用である C_d の見積りである。 C_d の見積りに際し、直接工費は比較的簡単に求めることができるが、当り部が多く、当り取りのために工期が遅れる場合、あるいは当り取りにかなり時間をとられたが工期内に工事は終わった場合などその効果を積算することは非常に難しい。しかし、この費用の見積りを正確に行わないと、全体としての経済性向上を目的とした式(1)の最適化問題を解くことができない。そのためここでは、発破を用いた当り取りに要する直接工費に加え、工期に影響する場合、しない場合の間接工費の算出を試みる。さらに、ブレーカーを用いた当り取り費用の算出をも試みる。

(1) 発破を用いた場合の直接工費の算出

発破を用いた当り取りに要した直接工費を表—4に示す。このときの区間延長は85m、当り部の面積は241.6m²であった。当り取りは断面測定結果に基づき、吹付けコンクリート面にマーキングを行った後に削孔・発破にて当り取りを行い、その後再吹付けを行った。この当り取りには3方を要し、表—4に示すように1439805円の費用がかかった。

当りを取る場合当りの厚みだけを除去するのが理想で

表—4 発破を用いた当り取りに要した直接工費

費用 分類	内 訳	単 価	数 量	費 用(円)
労 務 費	—	90,000円/方	3方	270,000
材 料 費	雷管・爆薬	200円/個	500個	100,000
	ビット・ロッド	500円/m ³	31.41m ³	15,705
	吹付けコンクリート	3,500円/m ²	241.60m ²	845,600
機 械 使 用 料	ブレーカ使用料	20,000円/方	3方	60,000
	油圧ジャンボ	38,000円/方	3方	114,000
	パワーショベル	7,000円/方	3方	21,000
	ずり出しダンプ	4,500円/方	3方	13,500
合 計				1,439,805

あるが、発破を用いる場合それは事実上不可能であり、実際には当り部以上に岩盤を除去することになる。この当り部以上に除去した量を断面測定機で測定した結果、31.4 m³となった。これにコンクリート単価 14 000 円/m³を掛け合わせると、当り取りにより余分に必要となるコンクリートの費用は 439 600 円となる。

以上から、1 m²の当りを除去するのに要する費用は、1 439 805 円と 439 600 円の合計を 241.6 m²で割った 7 779 円/m²となる。また 1 方当たりの工費にすれば 626 468 円/方となる。

この発破による当り取りの直接工費の算出は実際行ってみると非常に面倒である。そのうえ、現場により当り取りに使用する機械が異なる。そのため現場ごとに当り取り費用を求める必要があるが、そのようなことは実際上不可能である。そこでより簡便に当り取り費用を求める手法を検討する。

すでに著者らは別の現場で今回と同様にして発破による当り取り費用を算出した²⁾。そこでの当り取り費用は 7 240 円/m²となっており、そのときのコンクリート単価は 12 700 円/m³であった。m²当たりの当り取り費用÷コンクリート単価は 0.57 となる。同様の計算を当現場で行えば 7 779/14 000≒0.56 となりほぼ同じ比となる。その現場と当現場では当り取り費用を算定した時期に 2 年程度の差があり、かつ労務費の計算方法やその他の各項目の計算方法にも差がある。それにもかかわらず、両方でコンクリート単価との比がほぼ同じであるということは、コンクリート単価をもとに当り取りの直接工費が簡単に算定できることを意味する。

また年月が経つに従って、物価の変動があるが、コンクリート単価もそれに伴って変動し、かつコンクリート単価は各現場で最も簡単に積算できる。そのうえ、以下に述べるように間接工費も直接工費との比で表現できるため、コンクリート単価がわかれば、直接・間接工費を問わず当り取り費用を算出できることになる。

(2) 間接工費の算出(工期に影響する場合)

以上の計算結果は当り除去に要した直接的経費のみであり、工事の進行や能率性は全く考慮していない。当り取りが工期面に影響を与える場合の金額を算出するために、この現場において 1 か月当たりに要する間接工費を算出した。この現場は 2 車線断面の NATM トンネルであり、トンネル延長は 1 000 m 以上あることから標準的な経費を示すと考えられたからである。間接工費の算定結果を表一5に示す。各費用の項目は、現場の機械・仮設備・仮設建物費およびその他の現場経費を示している。表一5より 1 か月当たり 30 149 524 円となり、1 方当たりの費用としては 1 か月当たりの稼働日数 22 日、1 日 2 方とすると、工期に影響する場合は 685 216 円/方

表一5 工期に影響する場合の 1 か月当たりの間接工費

項目	金額	項目	金額
仮設建物費	401,000	安全対策費	290,000
仮設備費	1,853,000	現場経費	8,666,667
機械等経費	413,000		
機械工具費	1,386,000	現場経費計	8,956,667
機械損料	4,700,000		
技能員給与	735,000	総経費	21,104,667
動力光熱費	2,590,000		
運搬費	49,000	技術経費	
物品保管費	21,000	一般管理費	9,044,857
間接費計	12,148,000	総計	30,149,524

となる。この 685 216 円/方は直接工費である 626 468 円/方の 109.4%にあたり、当り取りのために工期が延びる場合、直接工費の約 2 倍を見積っておけばよいことになる。

著者らは別の現場において、間接工費の見積りは行わず、工期面での影響を工費として換算する際に熟練技術者の判断により当りの費用として直接工費の 1.6 倍と 2.0 倍を考慮し、実際的には 2.0 倍程度になると考えた²⁾。これに対し、現場での厳密な費用の算定結果からは、直接工費に対し工期に影響する場合は 2.0 倍程度となり、熟練技術者の判断がほぼ正しかったことが明らかになった。

したがって、当り取り費用の算出を行う場合は、工期に影響すると考えた場合は、直接工費を求めたものの 2.0 倍程度と考え、コスト最小化の検討をすれば良いことになると考えられる。

ただしここで述べた考え方には工事が遅れたことに對する種々の不利益、たとえば工事が遅れたことによる評価の下落等の目に見えないペナルティーの算出とかは考えていない。なぜなら評価の下落といったコストに換算しにくいものの定量化は現状では困難であり、したがって本研究ではこのような無形の波及効果はすべて無視した。これらを考慮すれば工期に影響のある場合の実際の間接費用は本研究で示したものより大きいと考えられる。

(3) 間接工費の算出(工期に影響しない場合)

実現場では、当りがあれば当り取りを行い、それに時間、人手、経費がかかるが、一般には工期には影響しない場合が多い。これは作業手順を考え、切羽を止めないで当り取りを行ったり、時には休日当り取りを行ったりするためである。そのため、表一5に示す当り取りを行つたために工期が遅れた場合の間接工費の見積りはかなり実状より過大なものになると考えられる。このような考えで、当り取りが工期に影響しない場合の工費を算出した結果を表一6に示す。表一6の作成にあたっては、トンネルの熟練技術者、現場責任者および著者のうち 2 人が所属する会社の積算担当者らの考えを聞いて表一5

表—6 工期に影響しない場合の1か月当たりの間接工費

項目	金額	項目	金額
仮設建物費	0	安全対策費	100,000
仮設備費	926,500	現場経費	6,000,000
機械等経費	413,000		
機械工具費	970,200	現場経費計	6,100,000
機械損料	4,230,000		
技能員給与	0	総経費	13,416,700
動力光熱費	777,000		
運搬費	0	技術経費	
物品保管費	0	一般管理費	0
間接費計	7,316,700	総計	13,416,700

より工期に影響しない場合の費用を除去したものである。

これによれば、1か月当たりの間接工費は13416700円となり、1方当たりの費用としては1か月当たりの稼働日数22日、1日2方とすると、304925円/方となる。これは直接工費である626468円/方の48.7%になり、当り取りを行ったが工期には影響しなかった場合、ほぼ直接工費の1.5倍を見積っておけばよいことがわかる。

(4) ブレーカーを用いた場合の直接工費の算出

(1)で述べたのは当り取りに主として発破を用いた場合であった。一般に当り部の岩盤に割れ目が少なくても当りの厚さが厚くかつ多い場合は当り取りに発破を用いるが、その他の場合はブレーカーのみで当り取りが可能である場合が多い。実際、本実験現場でも実験1~3は当りが少なく、ブレーカーのみで当り取りを行った。ブレーカーのみで当り取りを行う場合、直接工費の材料費や機械使用料が異なるのみならず、当り取りに伴う当り部以上に岩盤を除去する量が、発破の場合より少なくなり、そのため余分に必要となるコンクリート費用も減少し、発破の場合に比べて直接工費が大きく異なることが考えられる。

実験1~3について、ブレーカーを用いて当り取りを行った結果を表—7に示す。表に示すように実験1については0.5方、実験2,3についてはおのおの1方を要

し、その費用は260700円、557450円、545900円合計1364050円であった。また、当り部以上に除去した量を断面測定機を用いて求めたが、その合計は13.5m³となり、これにコンクリート単価14000円/m³を掛け合わせると、189000円となる。結局合計1553050円であり、1方当たり621220円、1m²当たり5631円となる。発破に比べ、1方当たりの工費はほぼ同じであるが、1m²当たりでは3/4程度となる。1方当たりの工費が比較的高くなったのは、実験ごとに詳細に工費を算出するため、別々に当り取りを行ったためであると考えられる。実験1~3の分の当り取りをまとめて行えば、より安価になったものと思われる。また、当り部以上に除去した量は発破による当り取りで平均深さ13.0cm、ブレーカーによる当り取りで平均深さ4.9cmとブレーカーによる方がかなり小さくなっている。これがm²当たり単価が安くなった理由であろう。

このように、ブレーカーを用いた場合は当り取りの直接工費が発破の場合の3/4程度、間接工費は発破の場合と同じと考えればよい。

5. 最適化結果および考察

トンネルのSB孔の最適化を行う場合、削孔に用いる削孔機の性能が設計変数の決定に大きく関係する。従来の手動式削孔機の場合、さし角 θ は自動設定できず作業員の経験に任されることになる。さし角を指示することは可能であるが、作業員がその指示を守るかどうかは明らかでない。また、作業員は指示を守る意思があったとしても、すでに計測結果で示したように、実際上さし角を制御することは難しいと考えられる。

このように、さし角 θ を手動式削孔機では設計者の意図したとおりに制御することができないため、最適化では θ を設計変数から除いている。これに対し、 ΔR はマーキング装置により任意に設定することが可能で、かつ、施工でもスプレーによるマーキング線上から削孔

表—7 ブレーカーを用いた当り取りに要した直接工費

分類	内 訳	単 価	実 験 1		実 験 2		実 験 3	
			数 量	費用(円)	数 量	費用(円)	数 量	費用(円)
労 務 費	—	90,000円/方	0.5方	45,000	1方	90,000	1方	90,000
材 料 費	雷管・爆薬	200円/個	0個	0	0個	0	0個	0
	ビット・ロッド	500円/m ³	0m ³	0	0m ³	0	0m ³	0
	吹付けコンクリート	3,500円/m ²	51.7m ²	180,950	113.7m ²	397,950	110.4m ²	386,400
機 械 使 用 料	ブレーカ使用料	20,000円/方	0.5方	10,000	1方	20,000	1方	20,000
	油圧ジャンボ	38,000円/方	0.5方	19,000	1方	38,000	1方	38,000
	パワーショベル	7,000円/方	0.5方	3,500	1方	7,000	1方	7,000
	ざり出しダンプ	4,500円/方	0.5方	2,250	1方	4,500	1方	4,500
合 計				260,700		557,450		545,900

表—8 最適設計結果

当り取り 方法	ケース	当り取り 費用 (円/㎡)	実施工 * 費用 (円)	$\sigma_D=12.9\text{cm}$			$\sigma_D=10.0\text{cm}$			$\sigma_D=8.0\text{cm}$		
				ΔR_{opt} (cm)	最小コスト (円)	比率 (%)	ΔR_{opt} (cm)	最小コスト (円)	比率 (%)	ΔR_{opt} (cm)	最小コスト (円)	比率 (%)
発	1	7,780	56,524	0.9	47,183	83	0.2	39,855	71	-0.9	33,955	60
	2	11,670	58,445	5.3	54,114	93	3.2	44,706	76	1.2	37,560	64
破	3	15,560	60,366	7.9	58,480	97	4.9	47,827	79	2.5	39,909	66
ブ レ ー カ ー	4	5,630	55,463	-4.2	40,538	73	-2.7	35,424	64	-2.9	30,739	55
	5	9,520	57,383	3.3	50,771	88	1.8	42,847	74	0.2	35,799	62
	6	13,410	59,304	6.6	56,269	95	4.0	46,242	78	1.8	38,713	65

* 実施工費用 $\bar{D}=24.1\text{cm}$, $\sigma_D=12.9\text{cm}$ として求めたもの

を始めればよいため制御は可能である。そのため、最適化の定式化にあたってはすでに式(1)に示したようにこの ΔR を設計変数としている。

最適化にあたっては、 $\bar{\theta}=7$ 度を用い、 σ_R は σ_D に比べ十分小さいとして $\sigma_R=0$ とし ΔR のばらつきは無視する。これに対してさし角のばらつきは考慮する必要があるがさし角はすでに何度も述べたように測定していない。そのため、さし角のばらつきと第1段階のSBのばらつきを合わせもっていると考えられる実験時の断面計測結果である $D(x)$ の標準偏差 σ_D をもってばらつきを表現する。この σ_D として実験1での計測結果である $\sigma_D=12.9\text{cm}$ を用いた。表—8に ΔR を設計変数と考えて1変数最適化を行った結果得られた ΔR_{opt} および最小コストを示す。

表—8中の実施工費用というのは、実験1の \bar{D} , σ_D を用いて費用を計算した結果である。実験1は著者らが最適化の実験を行う前にこの現場で行っていた施工結果であり、最適化を考えなかった場合の例として用いる。また比率はこの実施工費用に対する最適化による最小コストの比をパーセントで示す。

ケース1~ケース3は発破を用いて当り取りを行った場合、ケース4~ケース6はブレーカーを用いて当り取りを行った場合の計算結果である。

ケース1は、 C_A として直接工費のみを考えた場合、ケース2は工期に影響しない場合の間接工費を考慮した場合、ケース3は工期に影響する場合の間接工費を考慮した場合である。ケース1から3に順次当り取り費用が大きくなる。

最適化の結果をみると、ケース1の $\sigma_D=12.9\text{cm}$ の場合、 ΔR_{opt} の値は 0.9cm とほぼゼロとなる。これは当り取りの費用として直接工費のみを考えており、その費用が小さいため、当りが少々多くなっても、余掘りを小さくした方が、コストを小さくできることを意味する。

これに対し、当り取りコストが高くなれば当りが小さくなる方が有利であり、 ΔR を大きくすることによって総コストは小さくなると考えられる。最適化の結果もこれと同じく、ケース2, 3と順に ΔR_{opt} が 5.3cm , 7.9cm と大きくなっている。

実施工費用との比率をみると、ケース1, 2, 3でおおの17, 7, 3% 小さくなっている。このように最適化の考えを取り入れるだけで、平均的に10% 弱コストを低減できることがわかる。

表—8の $\sigma_D=10.0\text{cm}$ の欄はさし角 θ をうまく制御でき、削孔精度が上がったと考えた場合の結果である。すでに述べたように本実験では手動式削孔機を用いたため、さし角 θ の制御は非常に難しく、結果的に θ が大きくばらついたと考えられる。しかし、手動式削孔機の中にもさし角調整機能が改良された機種もあり、これらの調整が簡単にできれば、このさし角調整機能をうまく利用して削孔精度を大きく向上させることは可能と考えられる。この $\sigma_D=10.0\text{cm}$ の場合は $\sigma_D=12.9\text{cm}$ の場合に比べて全ケースとも ΔR_{opt} がかなり小さくなり、最適コストは $\sigma_D=12.9\text{cm}$ の場合の82~84% となり、また実施工費用の70~80% となっている。すなわち、削孔精度 σ_D を $\sigma_D=12.9\text{cm}$ から $\sigma_D=10.0\text{cm}$ へ上げ、最適化の考えを取り入れることで、施工費用を平均的に25% 程度下げられる可能性があることがわかる。

さらに削孔精度が上がった場合として、 $\sigma_D=8.0\text{cm}$ の計算結果を次の欄に示す。 $\sigma_D=8\text{cm}$ というのは、著者らが別の現場で削孔ロボットを用いてSBを行ったときに得た数値¹⁾であり、十分実現可能な値である。実施工費用と比べると、35~40% ものコストを減少させることがわかる。また、 ΔR_{opt} は $\sigma_D=12.9\text{cm}$ の場合よりかなり小さく、ケース3の場合でもわずか 2.5cm 程度となっている。削孔精度(この場合さし角制御)が上がれば、ほぼ削孔予定半径どおりに削孔すればコスト

が最も少なくなることがわかる。

表—8のケース4~ケース6はブレーカーを用いて当り取りを行った場合である。ケース4は C_A として直接工費のみを考えた場合、ケース5は工期に影響しない場合としてブレーカーでの直接工費と発破の場合の間接工費3890円/m²を加えた9520円/m²を C_A とした場合、ケース6は工期に影響する場合としてブレーカーでの直接工費と発破の場合の間接工費7780円/m²を加えた13410円/m²を C_A と考えた場合である。表をみてわかるように最適化の結果に対しては、発破の場合と全く同じ考察が行える。ただし異なるのは、当り取り費用が発破の場合に比べて小さいので、発破の場合より ΔR_{opt} と最小コストが少し小さいことであるが、定性的には全く同じ傾向の解である。

これらの結果をみてもわかるように、コストを大きく減少させるには削孔精度を上げること、すなわち第2段階のSB³⁾が非常に重要であることがわかる。すでに何度か述べたように、 ΔR はマーキング装置の改良により精度を大きく向上させることが可能であるが、現在の手動式削孔機ではさし角 θ の精度は作業員個々人の技術に任されている。トンネルのSBにおいてはさし角をいかに制御するかが現状では最も重要であり、簡単にさし角制御ができる削孔機の開発が何より望まれるといえる。

6. あとがき

本研究において従来ほとんど試みられなかった岩盤工学の一分野であるトンネルのSB孔設計における最適化手法の応用を試みた。本研究の結果は次のようにまとめられる。

(1) 通常の現場で多く用いられている手動式削孔機を用いたスムーズプラスティングの考え方と定式化を示し、通常の現場でもSBを行い得ること、またそれにより、より合理的な施工を行うことができることを示した。

(2) SBのコストを大きく減少させるためには削孔精度を上げることが最も重要であることを明らかにした。そのためにはさし角の制御が必要で、手動式削孔機であっても簡単にさし角制御ができることが必須条件と考えられる。

(3) 現在市販されている手動式削孔機にはさし角制御のついている機種もあるが、削孔機の機能上の問題のため、さし角調整機能が容易に使用できず、実施工では使用されていないのが現状である。しかし、さし角の制御を精度良く行うことにより余掘り修復に係る経費を大きく軽減できるため、さし角調整が精度良くかつ容

易に設定できる機能を有した削孔機の開発が急務であることを指摘した。

(4) さし角をうまく制御し、破断面のばらつきを実現可能な $\sigma_0=8$ cmにまで低下できれば、この現場での当り、余掘り修復に係る経費は40%近く低減できることを示した。

(5) SBにかかる費用として、発破を用いた直接工費のみならず、工期に影響しない場合、する場合の間接工費をも算定した。発破を用いた直接工費を1とすると工期に影響しない場合、場合の間接工費は約1.5、2.0となる。また、これらの工費の算定を単純化し、コンクリート単価を1とすると、これらの工費は0.56、0.84、1.12程度となることを明らかにした。これらを用いれば、どの現場においてもSBの最適化が可能である。またブレーカーを用いた当り取りの直接工費は発破のその3/4程度、間接工費は同じであり、コンクリート単価を1とし、それらの間接工費をも考えると、それぞれ0.40、0.68、0.96程度となることを示した。

このようにトンネルのSB孔設計のようなばらつきが大きく従来経験的にしか行われてこなかった問題に対しても最適化の考え方を適用することにより、大幅なコスト改善が可能であることを明らかにした。トンネルの実施工を考えた場合、利用できる削孔機の性能の差や作業員の能力および協力度により結果が大きく左右される。作業員の能力に関係なく、かつさし角調整機能が精度良くしかも容易に設定できる安価な削孔機の開発が、SB孔設計の最適化では最も重要な鍵になると考えられる。このような削孔機が開発され、各現場に導入されれば、本研究で試みたような最適化を各現場で簡単に行うことが可能になると考えられる。それにより、経済的な施工が行えるとともに、建設業の合理化に大きく寄与できると考えられる。

本研究を行うにあたり、実験に協力していただいた現場の方々には深い感謝の意を表します。また論文作成にあたり、山口大学工学部建設工学科教務員 中尾絵理子さんの多大なる助力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中川浩二・古川浩平・鈴木宏平・吉見憲一：削孔ロボットを用いた硬岩トンネルのスムーズプラスティングに関する研究，土木学会論文集，第367号，pp.52~61，1986年。
- 2) 古川浩平・吉見憲一・瀬戸口博昭・中川浩二：硬岩トンネルのスムーズプラスティング孔設計の最適化に関する研究，土木学会論文集，第379号，pp.107~115，1987年。(1990.5.22・受付)