

(58) 硬岩トンネルにおける周縁孔設計の最適化

株式会社 間 組 正員○吉見憲一 株式会社 間 組 鈴木宏平
山口大学 工学部 中尾絵理子 山口大学 工学部 正員 古川浩平
山口大学 工学部 正員 中川浩二

1. 緒論

筆者らはスミーズプラスティング（以下SBと略）の考え方を整理し、広義にSBと呼ばれるものを3段階に分けて考える必要性を指摘した¹⁾。すなわち、第1段階のSBはいかに孔間をクラックで連結させるかという発破技術の問題、第2段階のSBは削孔技術を含めた発破技術の問題、第3段階はSB孔に関する発破設計の最適化である。従来の研究の大半が第1段階のSBに関するものであり、第2段階のSBも筆者らの研究¹⁾以外には数少ない。本研究で対象とするのは第3段階であるSB孔設計の最適化問題としての取り扱いであり、これに関する過去の研究は筆者らの知るかぎりでは見当たらない。

トンネル掘削は実在の複雑な岩盤を対象としているため、第1、第2段階のSBは100%成功することはあり得ず、結果としてある程度の当りや余掘りが生じる。この当りや余掘りを確率統計量として扱い、これにそれぞれの処理のための費用を掛け合わせて、総費用最小化の観点から、SB孔の設計を行うことが重要と思われる。SB孔の最適化はSBにとっての究極の段階であるため、関係する要因は非常に多いが、結果に直接結びつく要因は限られる。本研究はSB孔設計の最適化の最初の試みであり、その要因としてなるべく影響が大きいと考えられるものだけを用いる。本研究で取り扱ったような考え方を持ち込むことによって、硬岩トンネルのSB孔設計をより合理的に、経済的に行えるのではないかと考えられる。

2. 最適化問題としての定式化

トンネルの上半掘削の一般図を図-1に示す。本研究においては上半部のうち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、本論文で最適化の対象としたトンネルの例では、必要空間510cmにコンクリート巻厚30cm、吹付けコンクリート厚5cmを加えた545cmである。これ以下の掘削が当りになり、これ以上掘削した場合余掘りとなる。

SB孔設計の最適化を考える場合、制御できる設計変数について検討する必要がある。従来のSBの研究においては図-1(b)に示す最外周の孔間隔(E)や抵抗線距離(V)、薬量(W)について検討したものが多く、本研究で対象とするのは、当り、余掘りの確率をも含めたSB孔設計の最適化による総費用の最小化である。SB結果の良否により経費として大きく影響を受けるのは当り取りの費用と余分に必要となるコンクリートの費用と考えられるため、これらの費用の和を目的関数とし、これを本論文では便宜上総費用と称している。

このように考えると、硬岩トンネルのSB結果に最も影響が大きいと考えられるのは図-1(a)に示す切羽において削孔のためにスプレーで描く円周の半径 $R = R_0 + \Delta R$ とさし角 θ である。これらは当り、余掘りと直接関係があり、しかもその費用の見積りも E 、 V 、 W に比べると容易である。本研究においては E 、 V 、 W を固定することにより、その結果得られる当りや余掘りの確率分布を固定し、その上で以下のように最適化問題として定式化する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{設計変数} \quad \Delta R, \theta \\ \text{目的関数} \quad C_T = (C_A \cdot P_A \cdot A_A + C_B \cdot V) / L_c \rightarrow \min \\ \text{制約条件} \quad P_C \leq P_{Ca} \end{array} \right\} (1)$$

ここに、 C_T は掘削長1m当りの総費用、 C_A は1 m^2 の当りを除去するに必要な費用、 P_A は1サイクルにおける平均の当りになる確率、 A_A は1

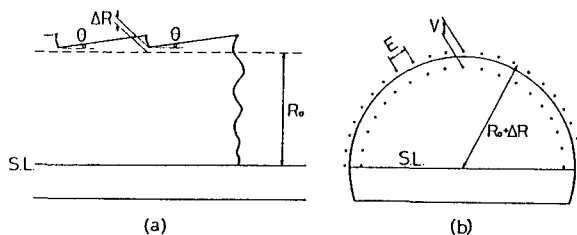


図-1 トンネルの上半掘削一般図

サイクルの壁面の延面積、 C_0 はコンクリート 1m^3 の費用、 V は1サイクルの余掘り量、 L_c は1サイクルの進行長、 P_c はドリフターの作業性に関する当りの確率、 P_{ca} はドリフターの作業性に関する当りの許容確率である。

3. 当りの確率と余掘り量の定式化

以下に用いるデータはすべて日本道路公団山陽自動車道志和トンネルにて実施工中に実験を行い、測定したものである。ここでの実験は実験1、2、3の3種に分けられ、この実験の詳細については前論文¹⁾を参照願いたい。以下実験1、2、3と呼ぶのは、この志和トンネルでの実験1、2、3を指す。

3.1 トンネル軸方向の断面形状

図-2に削孔ロボットによる削孔状況を示す。削孔ロボットを用いた削孔は、仮想切羽でさし角 θ が自動設定され、全自動又は半自動により削孔開始位置(図-2のS点)にブームを移動後、自動的に削孔される。削孔される長さは、仮想切羽から有効ロッド長分である。

この時、仮想切羽から $x\text{cm}$ 離れた断面において、最小掘削半径 R_0 と実掘削半径との差 $D(x)$ は次式で表される。

$$D(x) = \Delta R + \{x - (L' - l') \cos \theta\} \tan \theta \quad (2)$$

ここに、 L' および l' はロッド長および実際の削孔長である。本研究における θ は後に示すように7度前後でありこの領域で $\tan \theta$ は線形とみなせ、 $\tan \theta = 0.01754 \theta = b \theta$ とし、また、 $\cos 7^\circ = 0.993 \div 1$ と考えると、 $L \div L'$ 、 $l \div l'$ より式(2)は式(3)となる。

$$D(x) = \Delta R + (x - L) b \theta + b l \theta \quad (3)$$

3.2 当りの確率 P_A および余掘り量 V の定式化

l 、 θ 、 ΔR は各々独立な確率変量とすると $D(x)$ の平均値 $\bar{D}(x)$ および標準偏差 $\sigma(x)$ は次式となる。

$$\bar{D}(x) = \Delta \bar{R} + (x - L) b \bar{\theta} + b \bar{l} \bar{\theta} \quad (4)$$

$$\sigma^2(x) = \sigma_R^2 + (x - L)^2 b^2 \sigma_\theta^2 + b^2 \{(\sigma_l^2 + \bar{l}^2)(\sigma_\theta^2 + \bar{\theta}^2) - \bar{l}^2 \bar{\theta}^2\} \quad (5)$$

ここに、 $\Delta \bar{R}$ 、 $\bar{\theta}$ 、 $\bar{l}$ はおのおの ΔR 、 θ 、 l の平均値、

σ_R 、 σ_θ 、 σ_l は ΔR 、 θ 、 l の標準偏差である。実験1、2、3における各要因の平均値、標準偏差を表-1に示す。

$D(x)$ を正規分布と考え、その平均値、標準偏差は式(4)、(5)で評価できるとすると、 x の位置において $D(x)$ が y となる確率密度関数 $f_D(x, y)$ は次式で表される。

$$f_D(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(x)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{y - \bar{D}(x)}{\sigma(x)} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

当りを $y < 0$ と考えれば、1サイクルでの当りの確率の平均値 P_A は次式で求められる。

$$P_A = \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^0 f_D(x, y) dx dy / l \quad (7)$$

実験1における実際の当りの確率は約18%である。それに対し同じく実験1のデータを用いて式(7)で求めた当りの確率は18.1%となり、ほぼ等しい。よって式(7)で当りの確率が表現できるものと考えられる。

1サイクル当りの余掘り量 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される。

$$V = \int_{-L}^L \frac{\pi}{2} [\{R_0 + \bar{D}(x)\}^2 - R_0^2] dx \quad (8)$$

3.3 ドリフターの作業性を考慮した当りの確率 P_c の定式化

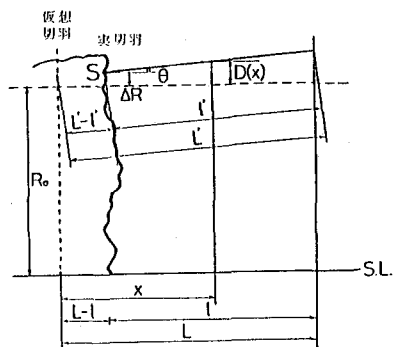


図-2 削孔ロボットによる削孔状況

表-1 3要因の平均値と標準偏差

実験番号	1	2	3
$\bar{l}$	253.5 cm	257.4 cm	269.5 cm
σ_l	22.3 cm	18.2 cm	18.5 cm
$\bar{\theta}$	7.64 °	7.37 °	6.74 °
σ_θ	1.23 °	0.85 °	0.87 °
$\Delta \bar{R}$	(-0.376cm)	12.60cm	0.27cm
σ_R	(11.04cm)	10.22cm	8.30cm

削孔ロボットを用いて削孔する場合、ドリフターが後方から順に前方に移動し削孔する。この時、削孔時の作業性を確保するためロッドセンターから岩盤までの高さ8cmを考慮しなければ、ドリフターと岩盤とが接触し、削孔は不可能となる。実際には削孔時の振動等があり、ロッドセンターと岩盤との距離は15cm程度は必要である。実際の削孔では、上記の作業性に問題があると、削孔ロボットを半自動にして作業性に問題がない位置で削孔を行うことが多い。しかし作業性が問題となる頻度が多くなると削孔ロボットを用いた自動削孔そのものに意味がなくなり、かつ作業も煩雑となって設計パターンを変更することになる。従ってドリフターの作業性を考慮した当りの確率 P_c はある許容確率 P_{ca} の制約を受け

$$P_c < P_{ca} \quad (9)$$

となる。また、このドリフターの作業性を考慮した当りの確率 P_c は次式で表される。

$$P_c = \int_{-\infty}^{\infty} f_0(L, y) dy \quad (10)$$

4. 当り除去の費用の算出

すでに前論文¹⁾で示したように、実験1ではかなりの当りが生じていた。この区間で断面測定機により精密な測定を行い、当りの実態とその除去に要する費用を算出した。断面測定を行った結果、12スパン 126mの区間でSLより上部の壁面面積の約16%である348m²に当りが生じていた。そこでまず当り部の吹付け面にマーキングを行った後、削孔、発破、再吹付けの順で当り取りを行った。この当り取りに要した費用の内訳を表-2に示す。当り取りに10日を要し、計1,416,400円の費用がかかった。

次に当りを取る場合、当りの厚みだけを除去するのが理想であるがそれは事実上困難であり、実際上は当り部以上に岩盤を除去することになる。この当りを除去することにより余掘りとなった量を求めると88.8m³であり、これにコンクリートの単価12,700円/m³を掛け合わせると、当りを除去することにより余掘りとなり、その結果余分に必要となるコンクリートの費用は1,102,360円となる。結局、壁面1m²の当りを取ることに要する費用は上記の1,416,400円と1,102,360円を加えた2,518,760円を当り部面積である348m²で除した7,238円/m²すなわち約7,240円/m²となる。

以上は当り除去に要した直接的な経費のみであり、工事の進行や能率性は全く考えていない。すでに述べたようにこの作業に10日間、延人数にして32人を必要としたことから考えても、工期面からして、かなり悪影響を及ぼしていると思われる。それが考慮されていないため上記の7,240円/m²の費用は下限値であると考えられる。実験1、2の結果を見て、多くのトンネル工事に従事した熟練技術者は、現場にとっては実験2の方がはるかに良いという判断を下している。すなわち、工期面をも考慮し総合的な観点から見た当り取り費用は実験1、2のコンクリート費の差（およそ2.5m³×12,700円/m³=31,750円）よりも大きいと考えられる。これから1m²の当り除去の費用の1つの規準を求めると、 $C_A=11,590$ 円/m²となる。つまり直接的経費7,240円/m²に対し、約1.6倍の費用となる。これでもなお熟練技術者は実験2の方がはるかに良いと答えているため、総合的な観点から見た当り取りの費用は更に大きいと言える。これらを考慮して本研究においては、当り取りの費用 C_A として $C_{A1}=7,240$ 円/m²、 $C_{A2}=1.6 \times C_{A1}$ 、 $C_{A3}=2.0 \times C_{A1}$ の3種を考えるが、工期面をも考慮した総合的な観点から見た当り取り費用は C_{A3} 程度が妥当なものと考えられる。

5. 最適設計例及び考察

ΔR および θ を設計変数とし、最適化サブルーチンCOPES²⁾を用いて最適設計を行った結果を表-3に示す。なお、 P_{ca} としては0.35を用いた。これは現場において削孔予定位の $\frac{1}{6}$ 程度で削孔が難しくなれば、作業性から見て設計変更を行うことから定めたものである。設計変数以外の変数は実験番号毎に表-1に示した値を用いた。ただし、実際の1サイクルの掘進長は削孔長より短かったため、 $\bar{x}$ は実際の掘進長の平均を用いた。

表-2 当り取りに要した費用

費用 分類	内 訳	単 価	数 量	費 用
労 務 費	—	17,000円/人	32人	544,000
材 料 費	爆薬	800円/kg	23kg	18,400
	雷管	200円/本	230本	46,000
	吹付コンクリート	14,000円/m ³	52m ³	728,000
	消耗品	10,000円	1式	10,000
機械使用料	コンプレッサー	6,000円/日	10日	60,000
	レッグドリル	1,000円	1式	10,000
合 計				1,416,400

表-3の最適コストは最適化の結果求めた ΔR_{opt} 、 θ_{opt} の値を用いて計算されたコストであり、実績計算コストは表-1に示す ΔR 、 θ の値を用いて計算したコストである。差は最適コストと実績計算コストの差を%で示している。

表-3から次のような考察が行える。
 C_A の値のいかんにかかわらず実験1、2、3の順に最適コストが小さくなっている。
 実験1、2、3では ΔR の値およびビット

表-3 最適化結果

ケース	C_A (円/㎡)	実験 NO	ΔR_{opt} (cm)	θ_{opt} (度)	最適コスト (円/m)	実績計算 コスト (円/m)	差 (%)
1	7240	1	3.07	5.15	113371	116855	2.9
		2	3.53	4.60	109950	128735	15.7
		3	3.58	4.58	106478	110711	4.0
2	11590	1	9.11	5.14	122745	130022	5.9
		2	8.40	4.54	117643	130700	11.1
		3	7.60	4.52	112996	120817	6.9
3	14480	1	11.15	5.21	126790	138933	9.6
		2	10.23	4.55	120970	132009	9.1
		3	9.21	4.52	115816	127555	10.1

の口切り位置の精度の向上を順に企っているが、結果としてその順にコストが下がっている。このことは削孔精度を上げるだけで、6.5～9.5%ものSBに関するコスト低減が可能であることを示している。

当たり取り費用として、最も実際的と考えられるケース3の $C_A = 14,480$ 円/㎡の場合、実験番号にかかわらず最適コストと実績コストには約10%程度差がある。すなわち、本研究で示した最適化により、平均10%程度のコスト削減が可能であることを示している。

ケース1の ΔR_{opt} 、 θ_{opt} の値を見ると、いずれも ΔR_{opt} の値が実施工より大きく、 θ_{opt} の値は小さい。すなわち、切羽に描く円の半径をより大きくし、かつさし角 θ は小さい方が最適であることがわかる。これは次のケース2、3の場合により明らかとなる。これらの最適解では、 θ_{opt} はケース1より少し小さくなるが、 ΔR はかなり大きくした解となっている。すなわち、当たり取り費用が大きくなると、さし角 θ を大きくするのではなく、 ΔR を大きくすることによって当りになる確率を小さくする方が有利であることを示している。このことは可能ならば平行削孔が有利であることを意味する。しかし、実際上はPcで表現されるドリフターの作業性面からの制約があり、これを避けるため5度前後のさし角をとるのが最適解と考えられる。以上の結果から、さし角は次サイクルの削孔に関する作業性が確保できる必要最小限の角度とし、 ΔR の値をうまく制御する方がコスト削減に結びつくことを示している。

6. 結論

本研究は硬岩のスムーズプラスティングの第3段階である当りや余掘りの確率を考慮した上でSB設計の最適化を定式化し、削孔パターンの最適化を試みたものである。本研究の結果は次のようにまとめられる。

- (1) 硬岩のSB設計の最適化で最も重要な要因はさし角と実切羽上に描く削孔半径の大きさであることを指摘し、これを設計変数として最適化問題を定式化できた。
- (2) 実施工における実験から当り除去の費用を算出した。この費用には直接経費しか含まれていないため、工期面での影響も考慮した当たり取り費用を算出した。
- (3) これらを用いて最適化を行った結果、さし角は次サイクルの削孔に必要なクリアランスが得られる最小の値でよいこと、切羽に描く円の半径は削孔精度に応じて選べばよいことが明らかになった。
- (4) SBの最適化により直接影響を受ける当たり取りと余分に必要となるコンクリート打設に要する費用の和を問題にした場合、削孔精度を上げることにより7%～10%程度の削減が可能で、また最適化により更に6%～11%程度の削減が可能であり、総合的には20%近く費用削減が可能であることが明らかになった。

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/VI-4、pp. 30-39、1986年3月。
- 2) Madsen, L. E., and Vanderplaats, G. N. : COPES - A FORTRAN CONTROL PROGRAM FOR ENGINEERING SYNTHESIS, Users Manual, Naval Postgraduate School, Monterey, March, 1982.

(58) OPTIMUM DESIGN OF SMOOTH BLASTING IN TUNNELLING HARD ROCK

Kenichi Yoshimi *
Kohei Suzuki *
Eriko Nakao **
Kohei Furukawa **
Koji Nakagawa **

Abstract

This study provides the result obtained by an optimum design method of smooth blasting in tunnelling hard rock. The proposed design method aims at minimize the total expense of the extra concrete cost in the region of overbreak and the labour cost required to remove the unbroken rock in the region of underbreak.

The design variables are the look out angle and the collaring radius R. The constraint of look out angle is set in order to provide the workability of the drilling. The overbreak and underbreak distributions used in the present study are the testing results obtained from Shiwa tunnel in Sanyo Highway.

The calculated results indicate that the look out angle needs only the minimum values which satisfy the workability of the drilling and that the optimum collaring radius depends on the drilling precision. The results also indicate that the improvement of drilling precision can save 7-10% of the total expense and the optimization of the design can save 6-11% of the expense.

* Hazamagumi, Ltd.

** Faculty of Engineering, Yamaguchi University