

## 硬岩トンネルのSB結果の 統計解析および最適化に関する研究

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

### 1. はじめに

近年、構造設計の分野において、信頼性の考え方を取り入れて補修や再建設の費用をも含んだ総費用最小化の観点にたった設計の必要性が言われている。本研究はこのような考えを、硬岩トンネルのスムーズブラスティング(SB)に適用し、その最適化を試みたものである。

### 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。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。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 $\theta$ である。本研究においては $\Delta R$ と $\theta$ を用いて以下のように最適化問題として定式化する。

設計変数  $\Delta R, \theta$

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

制約条件  $P_C \leq P_{Ca}$

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サイクルの壁面の延面積、 $C_B$ はコンクリート1 $m^3$ 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。

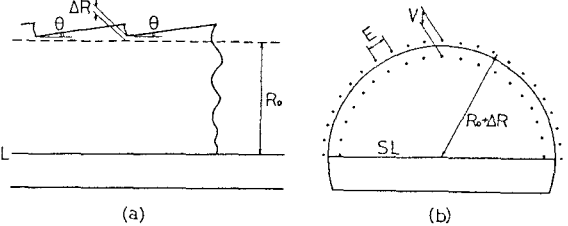


図-1 トンネルの上半掘削一般図

### 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筆者らの研究<sup>1)</sup>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。仮想切羽から $x$ cm離れた断面において、 $R_0$ 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 $\theta$ 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 $\cos 7^\circ = 0.993 \approx 1$ と考えると、 $L \approx L'$ 、 $l \approx l'$ 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

$l$ 、 $\theta$ 、 $\Delta R$ は各々独立な確率変数とし、 $D(x)$ を正規分布と考え、 $x$ の位置において $D(x)$ が $y$ となる確率密度関数 $f_D(x, y)$ は周知の式で求められる。ここで、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。

$$P_A = \int \int f_D(x, y) dx dy / l \quad (4)$$

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。

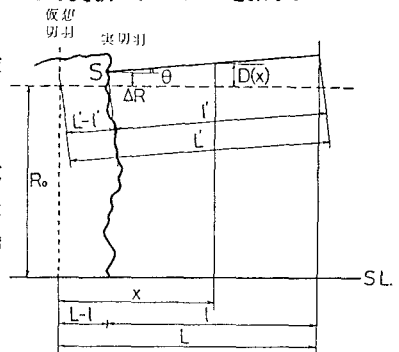


図-2 削孔ロボットによる削孔状況

$$V = \int \frac{\pi}{2} [(R_0 + \bar{D}(x))^2 - R_0^2] dx \quad (5)$$

### 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

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。この削孔においてロッドセンターと岩盤との距離は15cm程度は必要である。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  $P_{Ca}$  の制約を受け次式で表される。

$$P_C = \int f_D(L, y) dy$$

(6)

### 4. 当り除去の費用の算出

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 348m<sup>2</sup>に当りが生じていた。この当り取りに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1m<sup>2</sup> 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348m<sup>2</sup> で除した7,238 円/m<sup>2</sup> すなわち約7,240 円/m<sup>2</sup> 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。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/m<sup>2</sup>、 $C_{A2} = 1.6 \times C_{A1}$ 、 $C_{A3} = 2.0 \times C_{A1}$  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

$\Delta R$  および  $\theta$  を設計変数とし、最適設計を行った結果を表-1に示す。設計変数以外の変数は実際の志和トンネルで計測された値を用いた。

表-1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 $\Delta R$ の値およびビットの口切り位置の精度の向上を順に企てているが、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/m<sup>2</sup> 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1～3の $\Delta R_{opt}$ 、 $\theta_{opt}$ の値を見ると、いずれも $\Delta R_{opt}$ の値が実施工より大きく、 $\theta_{opt}$ 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 $\theta$ は小さい方が最適であることがわかる。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、 $\Delta R$ 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

- (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) 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。
- (3) 当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、古川、鈴木、吉見：土木学会論文集、第367号/VI-4、pp.30-39、1986年3月。

表-1 最適化結果

| ケース | $C_A$<br>(円/m <sup>2</sup> ) | 実験<br>NO | $\Delta R_{opt}$<br>(cm) | $\theta_{opt}$<br>(度) | 最適コスト<br>(円/m) | 実績計算<br>コスト<br>(円/m) | 差<br>(%) |
|-----|------------------------------|----------|--------------------------|-----------------------|----------------|----------------------|----------|
| 1   | 7240                         | 1        | 3.07                     | 5.15                  | 113371         | 116855               | 2.8      |
|     |                              | 2        | 3.53                     | 4.80                  | 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                  | 112986         | 120817               | 6.9      |
| 3   | 14480                        | 1        | 11.15                    | 5.21                  | 126790         | 138933               | 9.6      |
|     |                              | 2        | 10.23                    | 4.55                  | 120870         | 132009               | 8.1      |
|     |                              | 3        | 9.21                     | 4.52                  | 115816         | 127555               | 10.1     |