

(49) トンネルのスムーズブラスティングにおける 最適化手法の実施工への応用

株式会社 間組	正会員	吉見憲一
株式会社 間組	正会員	鈴木雅行
山口大学工学部	正会員	古川浩平
山口大学工学部	正会員	中川浩二

OPTIMUM DESIGN OF SMOOTH BLASTING IN TUNNELLING AND ITS APPLICATION TO ACTUAL TUNNEL EXCAVATION

Ken-ichi YOSHIMI, Hazama-Gumi Ltd.
Masayuki SUZUKI, Hazama-Gumi Ltd.
Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

This study presents the formulation of an optimum design of smooth blasting using ordinary drilling machine in 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 drilling precision is the most important factor in the optimum design of smooth blasting in tunnelling in the case of using an ordinary drilling machine.

1. まえがき

近年、建設業においてはあらゆる面で合理化が進行している。特に好況による人手不足とも関係して、人員面での合理化が必須となりつつある。トンネル掘削に関しても多方面にわたり合理化が行われ、設計もその例外ではない。設計を合理化する上で、最適化の概念を取り入れることは非常に有用であるが、トンネルをはじめとした岩盤工学の諸問題に、最適化手法が適用された例は少ない。その理由として、岩盤自体の諸特性が不明確で、設計時に各種の定数が明らかでない場合が多い上、施工に伴う各種のデータが得られ難かった点が挙げられる。しかし、最近岩盤工学の分野においても実施工に各種のロボットや計測機器が導入され、データの入手が容易になりつつある。

本研究は岩盤工学の一分野であるトンネルの発破におけるスムーズブラスティング（以下SBと呼ぶ）孔の設計に最適化の考えを適用し、その設計の合理化、実施工における応用に関して実測データを基に論じたものである。SBの最適化に関しては、削孔機器との関連が非常に大きいが、ここでは最もよく用いられている手動式ジャンボを用いた場合について検討を行った。

2. トンネルのスムーズブラスティングの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_a 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。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、これらは主として発破技術としてのSBに大きな影響を及ぼす要因と考えられる。それに対しここで対象と

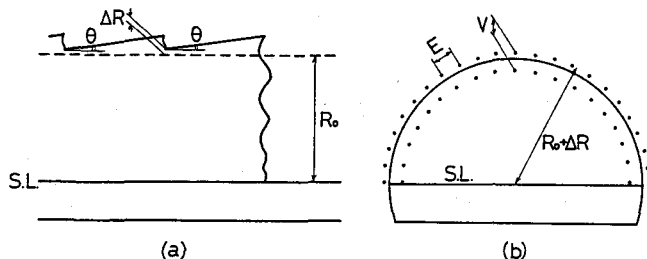


図-1 トンネルの上半掘削一般図

するのは、当り、余掘りの確率をも含めたS B孔設計の最適化による総費用の最小化である。S B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掘りを埋めるための余分に必要となるコンクリートの費用と考えられる。これらのことより、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 を設計変数とし、上記の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最適化問題として以下のように定式化する¹⁾。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{設計変数} & \Delta R, \theta \\ \text{目的関数} & C_T = (C_A \cdot P_A \cdot A_A + C_B \cdot V) / L_c \rightarrow \min \\ \text{制約条件} & P_c \leq P_{c_0} \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここに、 C_T は掘削長1m当りの総費用、 C_A は 1m^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 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_{c_0} はドリフターの作業性に関する当りの許容確率である。ここで最も問題となるのは、 P_A と C_A をいかにして求めるかということである。これらに関しては以下の3.、4.で述べる。また、 C_B, V, P_c の算出法に関してはすでに発表している¹⁾ので、それを参照願いたい。

3. 当りの確率 P_A の算出

既に述べたように、S B孔の最適化を考える場合、削孔機との関連性が非常に大きい。本研究で用いた削孔機は通常の現場でよく用いられている手動式ジャンボであり、さし角 θ の制御が非常に難しい。後に述べるように実験前に作業員にさし角を7度にするよう指示し、練習も行ったが、発破後の断面測定結果からするとかなりばらついており、手動式ジャンボを用いる場合、さし角 θ は設計変数にすることは不可能と考えられる。

この時、 R_0 と実掘削半径との差を D とし、その平均を $\bar{D}$ 、標準偏差を σ とすると、ある位置 x における当りの確率 P_A は $D < 0$ を当りと考えて次式で表現される¹⁾。

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

いま1サイクルの進行長を 2m とした場合、その中間点である $x=1\text{m}$ の断面は余掘り、当りなどに関してはそのサイクルの平均的な値を示すと考えられる。そこでこの $x=1\text{m}$ の断面を断面測定機で測定した結果から求まる当りの確率と、式(2)で求めた P_A との比較を表-1に示す。表-1の実験1~4は、 ΔR を4種類に変化させ、各々48, 52, 31, 41断面で実験を行い、それを断面測定機により測定した結果である。表-1を見れば分かるように、実測結果による当りの確率と式(2)で求めた値とはよく一致しており、式(2)で当りの確率が求められることが分かる。

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_a の見積りである。 C_a 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、その効果を積算することは非常に難しい。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の間接工費の算出を試みる。

(1) 直接工費の算出

当り取りに要した直接工費を表-2に示す。この時の区間延長は85m、当り部の面積は241.6 m^2 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-2に示すように1,439,805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、実際上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測定した結果、31.4 m^3 となった。これにコンクリート単価14,000円/ m^3 を掛け合わせると、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 m^2 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 m^2 で割った7,779円/ m^2 となる。また1方当りの工費にすれば626,468円/方となる。

(2) 間接工費の算出

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ヶ月当りに要する間接工費を算出した。結果を表-3に示す。各費用の項目は、現場の

表-1 実験番号毎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
断面測定箇所数 N	1175	1225	775	1025
ΔR (cm)	—	8.0	5.0	0.0
$\bar{D}$ (cm)	23.9	20.8	19.1	11.8
σ (cm)	13.1	14.0	16.3	13.2
当りの個数	23	94	91	187
データからの当りの割合(%)	2.0	7.7	11.7	18.2
式(2)より求めた P_a (%)	3.4	6.8	12.1	18.7

表-2 当り取りに要した直接工費

分類 費用	内 訳	単 価	数 量	費 用
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	31.41 m^3	15,705
	吹付けコンクリート	3,500円/ m^2	241.60 m^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

表-3 1ヶ月当りの間接工費

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	現場経費計	8,956,667
機械工具費	1,386,000		
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	技術経費 一般管理費	9,044,857
運搬費	49,000		
物品保管費	21,000		
間接費計	12,148,000	総 計	30,149,524

機械・仮設備・仮建設物費およびその他の現場経費を示している。表-3より1ヶ月当り30,149,524円となり、1方当りの費用としては1ヶ月当りの稼働日数22日、1日2方とすると、全て工期に影響する場合は685,216円/方となる。

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倍を見積ってあげばよいということになる。

筆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¹⁾。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。

従って、当り取り費用の算出を行う場合は、工期に大きく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。

5. 最適化結果及び考察

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、現場で指示された通りのさし角になっていたかどうか不明である。

本研究で実験を行った現場では、手動式ジャンボを用いており、実験前からさし角 θ として7度を用いてきた。実験を始めるに当たって、再び θ として7度を指定し、実験前に練習をも試みたが、すでに表-1に示したように発破後の計測結果を見ると、削孔結果のばらつきは大きく、この主原因として θ がばらついていたと考えられる。何故なら、 ΔR は筆者らがいくつかの現場でSBの実験を行った際開発したマーキング装置を用いて削孔開始位置を指定しており、これのばらつきは非常に小さいと考えられるからである。このようにさし角 θ のばらつきは大きいものの θ の平均的な値に関しては以下のように考えることができる。表-1に示す実験1～4中、実験2、3、4は筆者らが開発した改良マーキング装置を用いて $\Delta R=8.0, 5.0, 0.0$ cmとして削孔した時の結果である。この時断面測定を行った $x=100$ cmの断面においてはさし角によるDの大きさは、 $x \tan \theta \approx 12.3$ cmとなり、これに ΔR を加えた値はほぼ $\bar{D}$ と等しい。この結果より、ばらつきはあるものの、平均的にはさし角 θ が7度前後になっていたことが推定できる。

このように、平均値的には可能であるが、さし角 θ を手動式ジャンボでは設計者の意図した通りに制御することができないため、この検討では θ を設計変数から除いて $\bar{D}$ を計算し、式(2)を用いて P_n を求めている。また、 θ がばらつくことにより結果としての削孔結果がばらつくが、このばらつきを示す σ として、実測値の平均値である $\sigma=14.2$ cmを用いた。

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、実施工でもスプレーマーキング上から削孔をはじめればよいと制御は可能である。表-4に ΔR を設計変数と考えて1変数最適化を行った結果の ΔR_{opt} および最適コストを示す。

ケース1は、 C_n として直接工費のみを考えた

表-4 最適化結果

ケース番号		ケース1	ケース2
当り取り費用 (円/㎡)		7,800	15,600
$\sigma=14.2$ cm	ΔR_{opt} (cm)	1.00	9.50
	最適コスト(円)	48,885	61,040
$\sigma=10.0$ cm	ΔR_{opt} (cm)	0.30	5.00
	最適コスト(円)	39,123	46,730
$\sigma=8.0$ cm	ΔR_{opt} (cm)	-0.90	2.70
	最適コスト(円)	33,312	39,046

場合、ケース2は間接工費をも考慮した場合である。 $\sigma=14.2\text{cm}$ の場合、 ΔR_{opt} の値は1.0cmとほぼゼロとなる。これは当り取り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では ΔR_{opt} が9.5cmと大きくなっている。

表-4の $\sigma=10.0\text{cm}$ 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。既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を有した機種もあり、このような手動式削孔機を用いた場合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 $\sigma=10.0\text{cm}$ の場合は $\sigma=14.2\text{cm}$ の場合に比べてケース1、2とも ΔR_{opt} が少し小さくなり、最適コストは $\sigma=14.2\text{cm}$ の場合の80%程度となっている。すなわち、削孔精度 σ を $\sigma=14.2\text{cm}$ から $\sigma=10.0\text{cm}$ へ上げるだけで、平均的に20%以上コストを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、 $\sigma=8.0\text{cm}$ の計算結果を次の欄に示す。 $\sigma=14.2\text{cm}$ の場合と比べると、32%ものコストを減少させられることがわかる。また、 ΔR_{opt} は $\sigma=14.2\text{cm}$ の場合よりかなり小さく、ケース2の場合でもわずか3cm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。

これらの結果を見てもわかるように、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SB²⁾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。

5. 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、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手法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。しかし、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を有した安価な削孔機の開発が、SB孔設計の最適化では重要な鍵となると考えられる。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共に、建設業の合理化に大きく寄与できると考えられる。

参考文献

- 1) 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ブ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。
- 2) 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ブ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。