

山口大学工学部 正○国松 直 山口大学工学部 正 中川浩二
山口大学工学部 正 古川浩平

1. はじめに

岩盤を対象とした建設工事において、発破による掘削が破碎性、経済性、作業能率等の点から他の工法に比べ非常に優れていることは周知のことである。しかし、発破には振動、騒音の問題が伴う。現在、発破振動の規制は振動レベルまたは最大速度振幅の値で行われている。そのため現場においては、これらの値を規制値以下に保ちながら発破による岩盤掘削を進めて行かなければならないことがしばしば生じる。さらに、岩盤掘削に係る費用をなるべく少なくし、しかも1発破掘削量については予定量だけ産出したいということになる。従来はこのような複雑な問題を試行錯誤的に解決していたといえる。

そこで、本研究はベンチ発破を例にとり、上記の問題を最適化手法を用いて合理的に満たすような最適解を見いだすことを試みる。最適化手法を用いるにあたり、まずコスト、1発破掘削量、振動値に対する定式化を行った後に、種々の制約条件、定数の設定を行い最適化計算を行った。ここで設定した値はあくまで例であり、当該の現場に則して自由に変更することができる。本研究で示したような手法を用いることにより、発破工法をより合理的にできるものと考えられる。

2. 最適発破設計の位置づけ

図1に発破設計のフローチャートを示す。まず、step1では発破計画の立案にあたり対象とする岩盤が硬岩か、軟岩かの判定を行う。岩質によりフローチャートは変わらないが積算基準等が異なる。step2では現場状況等を把握した上で制約条件を設定する。制約条件としては振動規制値（最大速度振幅、振動レベル）、1発破掘削量、タンピング長等が考えられる。step3では1発破掘削量を決定するための単位薬量（KG）を設定する。このKGの値により実作業における岩盤の破碎性は大きく左右され、この結果は作業能率や総費用に多大な影響を与える。そのため、現場においてKGの値の決定は非常に重要であり、step5を経てKGの値を総合的な判断から決定しているようである。また、振動値予測のための定数（ K 、 α 、 β ）を仮定する。step4ではstep2、step3の仮定のもとに振動規制値を満たすように孔間隔（ S ）、最小抵抗線長（ B ）、ベンチ高さ（ H ）、孔数（ N ）の決定を行う。図2はベンチ発破の概略を示した図である。step5では以上の検討結果を用いて実際の発破または試験発破を行う。この結果をもとにstep6では K 、 α 、 β の決定を行う。step7では発破結果から単位薬量KGの設定が妥当であったかの判定を行う。NOであればstep2へ戻り単位薬量の設定の修正を行う。YESであれば実際の発破作業に入ることになる。

今回提案する最適化手法を用いた発破計画はKG、 K 、 α 、 β が決定された後のstep8に位置するものであり、目的関数である掘削に必要なトータルコストを最小とするような最適な孔間隔、発破孔数、秒時差を決定するものである。

近年では発破振動の規制に対して最大速度振幅とともに振動レベルの値がとられることが多くなってきた。振動レベルの指示値は地盤振動波形の時刻歴に対して複雑な応答を示す。図3の3本の線は周波数50Hz、継続時間40msの正弦波形を秒時差

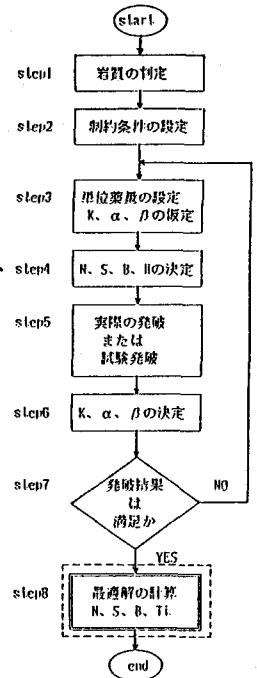


図1 発破設計に対するフローチャート

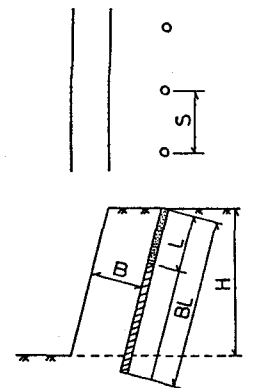


図2 ベンチ発破概略図

(100,200,300ms)をかえて作成した間欠正弦波形入力に対する振動レベルの時間的変動を示したものである。このように間欠正弦波形を段発発破の振動波形と見なせば段発発破の秒時差 T_i の影響が振動レベルの予測には不可欠なものであることがわかる。一般に秒時差が長くなれば振動レベルは小さくなる。そこで、本研究では掘削に必要なトータルコストを最小にし、しかも振動規制値を満足する合理的な発破設計法について秒時差を含めて検討を行った。最適化プログラムとしてはCOPESS¹⁾を用いた。

3. 最適発破設計の定式化

最適化手法による計算ではあらかじめ設計変数、目的関数、制約条件を定式化しておく必要がある。以下ではそれぞれの定式化を行う。

3.1 設計変数

最適発破設計における設計変数として次のものを考える。

孔間隔 (S)、発破孔数 (N)、秒時差 (T_i)

本研究の定式化では最小抵抗線長(B)とSのいずれかしか設計変数とすることができないため、Bは一般的によく用いられるベンチ発破における $B=S/1.2$ より求める。また、ベンチ高さ(H)については固定した。

3.2 目的関数

穿孔・火薬類コストの定式化に当たり1発破火薬類コスト (CT1)、1発破穿孔コスト (CT2)の2つに分けて定式化を行い、2つの和としてトータルコスト (CT)を算出した。よって、目的関数としてはトータルコスト最小として次式で示される。

$$CT=CT_1+CT_2 \longrightarrow \min$$

$$CT_1=N \times (C_2+C_d+(W-W_d) \times C_1)$$

$$CT_2=N \times BL \times C_3$$

ここに、 C_1 :kg当りの火薬コスト(円)、 C_2 :雷管コスト(円)、 C_d :親ダイのコスト(円)、 W :1孔当りの装薬量(kg)、 W_d :親ダイの重量(kg)、 C_3 :穿孔m当りの単価(円)、 BL :穿孔深度(m)

3.3 制約条件

(1) 1発破掘削量

$$TV_L \leq TV = N \times S \times B \times H \quad \text{---- (a)}$$

ここに、 TV_L :1発破掘削量の下限値(m^3)、 TV :1発破掘削量(m^3)

(2) 振動値

最大速度振幅 (PPV)

$$PPV \leq PPV_a \quad \text{----- (b)}$$

段発発破の秒時差 T_i を0.1sec以上とすれば1孔の発破により生じる各振動波形の主要部は重畳することなく単発発破の推定式が使用できる。

$$PPV = KW \alpha D^{-\beta}$$

$$W = S \times B \times H \times KG$$

ここに、 K 、 α 、 β :定数、 W :1孔当りの装薬量(kg)、 D :爆源からの距離(m)、 KG :単位装薬量(kg/m^3)、 PPV_a :最大速度振幅の規制値(cm/s)

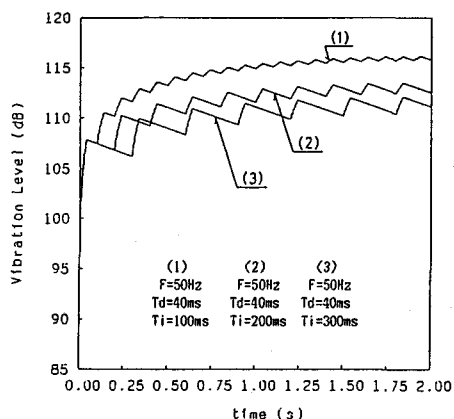


図3 振動レベルに及ぼす秒時差の影響

段発発破の振動レベル (VLd)

振動レベルは振動波形の時間的な入力に対して図3の間欠正弦波形の例に見られるように特異な変動を示す。しかし、ある秒時差 T_i で同一の振動波形が繰り返されるとある一定時間までは N の増加に伴い振動レベルは増加する。その増加量と N との関係は2次曲線で近似できる。また、その最大値は約2秒以上ではほぼ一定値を示す。そこで、これらをもとに振動レベルは次のように定式化される^{2), 3)}。

$$\textcircled{1} \quad 2000\text{ms} \leq (N-1) \times T_i$$

$$VLd1 = 20\alpha \log W - 20\beta \log D + 20 \log k + 85 + 10 \log (1 - \exp(-T_d/630)) + 8 \log (1400/T_i)$$

$$\textcircled{2} \quad 2000\text{ms} > (N-1) \times T_i$$

$$VLd2 = 20\alpha \log W - 20\beta \log D + 20 \log k + 85 + 10 \log (1 - \exp(-T_d/630)) \\ + (10^{-1.48 \log(T_i) + 1.85} \times (N-1) \times T_i)^{1/2}$$

制約条件としては

$$(VLd1 \text{ or } VLd2) \leq VLd_a \quad \text{---- (c)}$$

ここに、 T_i :秒時差(ms)、 T_d :波形の継続時間(ms)、 VLd_a :振動レベルの規制値(dB)

(4)発破の継続時間

段発電気雷管の製造限界などから有限な発破時間を設定する。

$$(N-1) \times T_i \leq T_{ij} \quad \text{---- (d)}$$

ここに、 T_{ij} :発破の継続時間の上限値(ms)

(5)タンピング長

発破においては最小抵抗線長よりタンピング長を長くとることが望ましい。タンピング長は1孔当りの葉量から装葉長を計算し次式により求める。

$$L = BL - (1000 \times W / UW / (\pi \times DA^2 / 4)) / 100$$

$$B \leq L \quad \text{---- (e)}$$

ここに、 UW :火薬の単位体積重量(g/cm³)、 DA :孔の直径(cm)、 L :タンピング長(m)

(6)ベンチ長

$$S \times N \leq LB_{ij} \quad \text{---- (f)}$$

ここに、 LB_{ij} :ベンチ長の上限値(m)

上記のような種々の制約条件のもとで目的変数である穿孔・火薬類コストを最小とし、1発破掘削量を最大、振動値を規制値以下とするような最適な設計変数(孔間隔、最小抵抗線長、ベンチ高さ、孔数、秒時差)を求めることになる。

4. 計算結果および考察

計算に先立ち実施工を考慮しながら諸定数の設定を行った。コスト類の単価については建設省積算基準等を参考に次のように決定した。 $C1=320$ 円/kg、 $C2=240$ 円/本、 $Cd=100$ 円/本、 $Wd=0.1$ kg、 $BL=3.0$ m、 $C3=1000$ 円/mである。ベンチ高さは一般によく使用されている穿孔深度3m(ボーリングロッド1本分の長さ)を基準に硬岩の場合を想定し、 $H=2.5$ mに固定した。単位葉量については硬岩を仮定し $KG=0.27$ kg/m³とした。その他の定数については次の値を用いた。 $k=200$ 、 $\alpha=.75$ 、 $\beta=2$ 、 $T_d=100$ (ms)、 $DA=6.5$ (cm)、 $UW=0.9$ 。また、 N については実際は整数であり、混合整数計画法を用い、整数として扱うべきであるが、収束性等に問題があり本研究では実数とした。本研究の解をもとに、例えば枝払い法などにより N を整数化することは十分に可能である。制約条件については表1、2に示している。

表1、2に計算結果を示す。最適解の右肩に*をつけたものがアクティブな制約を示す。表1は規制対象地点が発破位置から100m、70m、60mの距離での結果である。 $D=100$ mの最適解では1発破掘削量、発破継続時

間、タンピング長制約がアクティブとなり、振動規制値は十分に満足している。距離70mにおいても同じ制約がアクティブである最適解が得られトータルコストは変わらない。この結果より1孔当りの薬量はタンピング長が最小抵抗線長と等しくなるまで最大限に挿入し、1発破掘削量が必要限度ぎりぎり、かつTiは発破継続時間の範囲内で最大になるようにしたものが最適解であることがわかる。

しかし、距離60mにおいては最適解は70mの値とは大きく異なる。この最適解は1発破掘削量と振動値により制約をうけ、これらの制約を満足させるために1孔当りの薬量を少なくし、逆に発破孔数を大きくとる必要があることを示している。そのためトータルコストはD=70mよりかなり高くなっている。秒時差は孔数が増加したことによりD=70mの結果に比べ小さくなっている。タンピング長は最小抵抗線長よりも長くなり、振動規制値を満足するように薬量をコントロールしていることがわかる。

次に、D=50mでは振動値が大きくなるため上と同じ制約条件では許容領域が存在しない。このような場合自由に変更できる制約条件は1発破掘削量のみであり、これを下げることによって、他の制約が規制値以下になるようにしなければならない。D=50mの計算では1発破掘削量の下限値を100m³まで下げている。この場合でも1孔当りの薬量はD=60mのそれよりかなり少ない。またm³当りのコストは大きくなっている。

トータルコストを最小とするような目的関数のもとでの計算においては1発破掘削量の下限値に敏感に影響を受けると言える。これらの計算結果は常識的に考えても妥当な結果を与えており、雷管秒時の任意の設定が可能になるなどの条件が整えば今後の発破設計に十分使用できるのではないかと考えられる。

本研究を行うにあたり、鹿島建設(株)技術研究所第一研究部第四研究所の諸兄に実施工面での有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) Madsen, L.E. and Vanderplaats, G.N.: COPEX - A FORTRAN CONTROL PROGRAM FOR ENGINEERING SYSTEM, Users Manual, Naval Postgraduate School, Monterey, March, 1982.
2) 国松、中川、三浦、今村：発破振動レベルにおける振動レベルの推定、土木学会論文集、第367号/VI-4、pp.45-51、1986。
3) 国松、中川、三浦、坂本：段発発破における発破回数と秒時差を考慮した振動レベルの推定、土木学会年講、第6部、pp.77-78、1986。

表 1 最適解 (TV≥250m³、D=100m、70m、60m)

		最適解 (D=100m)	最適解 (D=70m)	最適解 (D=60m)
設計変数	孔間隔 (S)	2.35	2.35	2.00
	発破孔数 (N)	21.78	21.78	29.92
	秒時差 (Ti)	192.00	192.00	138.00
目的関数	トータルコスト (CT)	93696.94	93729.06	120576.63
制約条件	250≤TV (m ³)	250.72*	250.81*	250.00*
	PPV≤0.2 (kine)	0.047	0.096	0.102
	Vld≤65 (dB)	56.98	63.18	64.91*
	0.1≤(N-1)*Ti≤4 (s)	3.99*	3.99*	3.99*
	(S*N)≤150 (m)	51.20	51.21	59.93
	B-L≤0 (m)	0.00*	0.00*	-0.58
	1発破火薬類費 (CT1)	28369.39	28379.11	30815.47
	1発破穿孔費 (CT2)	65327.59	65349.97	89761.19
	1孔当りの薬量 (W)	3.11	3.11	2.26
	トータル薬量 (TW)	67.70	67.72	67.57
	m ³ 当りのコスト (円/m ³)	373.71	373.71	482.31

表 2 最適解 (TV≥100m³、D=50m)

		最適解 (D=50m)
設計変数	孔間隔 (S)	1.62
	発破孔数 (N)	18.39
	秒時差 (Ti)	230.00
目的関数	トータルコスト (CT)	69474.50
制約条件	100≤TV (m ³)	100.00*
	PPV≤0.2 (kine)	0.107
	Vld≤65 (dB)	63.51
	0.1≤(N-1)*Ti≤4 (s)	4.00*
	(S*N)≤150 (m)	29.72
	B-L≤0 (m)	-1.16
	1発破火薬類費 (CT1)	14304.15
	1発破穿孔費 (CT2)	55170.36
	1孔当りの薬量 (W)	1.47
	トータル薬量 (TW)	27.00
	m ³ 当りのコスト (円/m ³)	694.75

OPTIMUM BLASTING DESIGN
(90) WITH VIBRATION LEVEL AND PEAK PARTICLE VELOCITY CONSTRAINTS

Sunao KUNIMATSU *
Koji NAKAGAWA *
Kohei FURUKAWA *

Abstract

In the rock excavation by blasting in urban area, one must take into consideration the blasting vibration, i.e. peak particle velocity (PPV) or vibration level (VL). This study aims to derive a optimum blasting design method subjected to the blasting vibrations value by introducing the optimization technique.

In this paper, the bench cut blasting was studied. We assumed that the bench height was fixed and the ratio of distance between boreholes to burden was 1.2. The distance between boreholes, the number of boreholes and time delay were selected to be the design variables. The objective function was taken to be the total cost, and the constraints included the followings: excavation volume of one blasting cycle, ground vibration values (VL,PPV), total blasting time, tamping length.

Several design examples were presented to demonstrate the efficiency and applicability of the proposed method. The results obtained in this study were very reasonable and it means this method may be applicable to actual blasting design in urban area.

* Faculty of engineering, Yamaguchi university