

Fig. 1 Design of database system

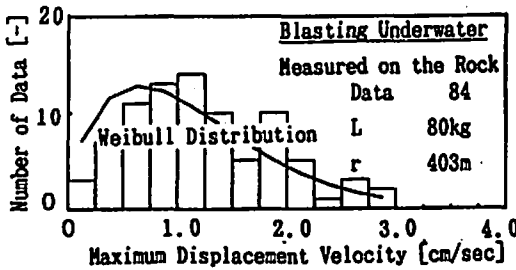


Fig. 2 Distribution of maximum displacement velocity

動データから求められる発破振動予測式を用いて行う。予測式として従来様々な実験式が提案されているが、最も一般的に利用されている次式を利用した⁵⁾。

$$v = K \cdot L^m \cdot r^n \quad (1)$$

v : 最大変位速度 [cm/sec]

L : 薬量, 段発では段毎の薬量 [kg]

r : 爆源からの距離 [m]

K, m, n : 発破条件, 岩盤条件などで決まる定数

また、発破振動データのばらつきを表すパラメータとして比振幅 X を定義し、その統計的性質を考慮した予測値の評価を行なうことにした。従って、 X の期待値は 1 であり、その分散が大きくなるほどデータのばらつきが大きくなり、予測式の信頼性は低いと解釈することが出来る。

$$X \text{ (比振幅)} = \frac{\text{(実測値)}}{\text{(予測値)}} \quad (2)$$

4.3 安全評価指標の選定

発破振動予測値と X が求めれば、Fig. 4 に示すフローに従って予測値と管理目標値の関係を評価する安全評価指標の選定を行ない、使用する薬量を決定する。

安全率 F による評価法は、過去の発破実績をベースとした確固たる手法である反面、安全係数を取り過ぎ

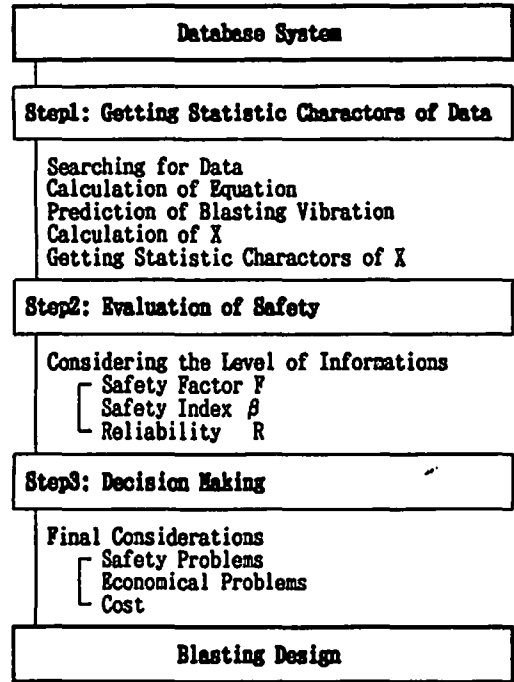


Fig. 3 Flow chart of blasting design

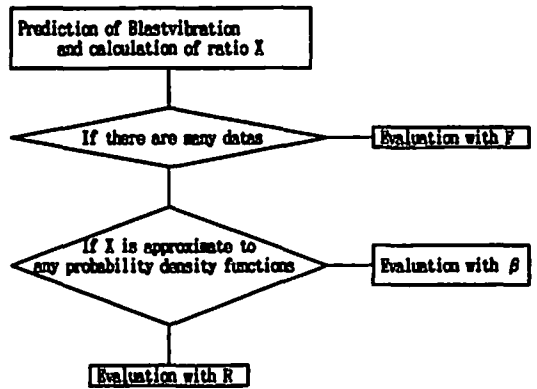


Fig. 4 Flow chart of the selection of the index with the safety parameters

るといった不経済な面もある。一方、データ数が豊富な場合には、 X の分布をその平均値 μ と標準偏差 σ でモデル化し、安全性指標 β で安全評価を行なう手法が妥当と思われる。また、 X が何らかの確率密度関数で表される場合には、信頼度 R を考慮した設計法が有効である。

4.3.1 安全率 F による評価例

安全率 F は次式で定義され、安全余裕を示す指標と考えられる。

$$F \text{ (安全率)} = \frac{\text{(管理目標値)}}{\text{(予測値)}} \quad (3)$$

安全率法を利用して振動値の評価を行なう場合には、 F 値としてどの程度の値を採用すべきかが問題となる。そこで過去の発破実績から、振動値が管理目標値を越えることが無いことを信頼度10%、5%、1%で保証するために確保すべき F 値を算出した。結果を発破工法ごとにまとめてTable 1に示す。

Table 1から分かるように、1自由面発破、ベンチカット発破、トンネル発破では、90、95、99%の信頼性で発破振動値が振動の管理目標値を上回らないことを保証するためには、 F 値がそれぞれ3~4、4~5、7~10前後の値となるよう、使用薬量を決定すれば良いことが分かる。一方、水中発破における F 値は、それぞれ約2、約3、約5と若干低い値となっている。これは、水中発破の主たる振動媒体が地盤に比較して均一な水であることが影響していると考えられる。

このように、Table 1で示した予測式と F の推奨値は、発破現場で薬量を決定する際の指標の一つと成り得る。また、将来的に発破振動の法的な規制を検討する場合の参考資料として考えることも出来る。

4.3.2 安全性指標、信頼度による評価例

安全性指標 β による評価例をFig. 5に、信頼度 R による評価例をFig. 6に示す。図に示されるように、これらの手法を適用することによって薬量の決定に伴う発破振動予測値の信頼性、発破の安全性の定量的評価が可能となった。

ここで、分布型が求まれば β と R は1対1に対応することから、両者の基本的な考え方は同じであるが、 β は安全性を示す指標としては R より粗く、実際の適用に際しては β 値を大きく設定せざるを得ない。一方、 R による評価法は厳密な議論を行なうことが出来るため、経済的な発破計画を立案することが出来る。例えば、予測値と振動の管理目標値の関係がFig. 6で示されるように薬量 L を決定すれば、95%の信頼性で発破振動値は目標値を上まわることがないと評価出来る。しかし、分布母数の推定の煩わしさ、適用範囲が狭い等の問題点もある。

4.4 安全性評価に基づく意思決定

次にこれらの安全評価指標を基に発破設計の意思決定を行う方法について述べる。意思決定方法としては、次の3つの手法が考えられる⁶⁾⁷⁾。

- 1) 過去の発破の安全水準との比較による決定
- 2) 経験的、工学的判断による決定
- 3) 期待総費用最小化基準による決定

1)の過去の発破で行なった安全評価を直接導入する意思決定法は、現在最も一般的に利用されている手法である。また、この考え方を進めて、実施する発破に類似した発破条件を持つ過去の発破実績と経験、発

Table 1 Equations for prediction and values of F

Method	$v = K \cdot L^m \cdot r^n$			F Value		
	K	m	n	Reliability		
				10%	5%	1%
Surface:1	3.1801	0.67	-1.6	2.9	4.0	7.1
Bench Cut	1.3802	0.69	-1.9	2.9	4.0	9.5
Tunnel	6.6801	0.50	-1.8	3.6	5.1	10
Underwater	1.0805	0.37	-2.2	2.3	2.9	4.6

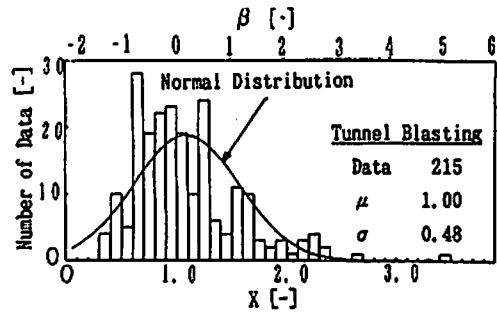


Fig. 5 Example of evaluation with β

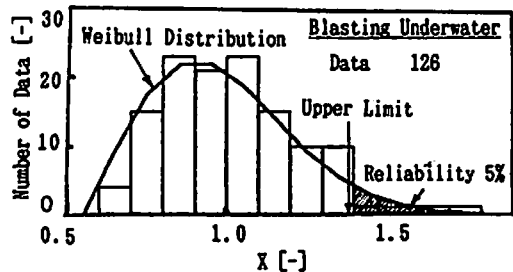


Fig. 6 Example of evaluation with R

破条件、地盤条件等から判断して意思決定を行なう2)の手法もある。さらに、実施する発破のリスク、被害が生じた場合の損失費用等が明確な場合には、3)の手法を採用することが可能となる。この方法は、設計する発破の建設費用 C_C と、もしその発破が管理目標値を上回る振動を発生させた場合の損失費用 C_L の期待値 $C_L(1-Z)$ の和である総費用 C_T を最小化するような設計を行なう手法である。

$$\text{Min } C_T = C_C + C_L(1-Z)$$

C_T : 総費用 (Total Cost)

C_C : 建設費用 (Cost of Construction)

C_L : 損失費用 (Cost of Loss)

Z : β, R

これを概念的に示したものがFig. 7である。 R あるいは β といった安全評価指標が増すにつれて建設費用も増すが、反対に期待損失費用は減少する。従って、両者の和である総費用を最小とする設計代替案を選択

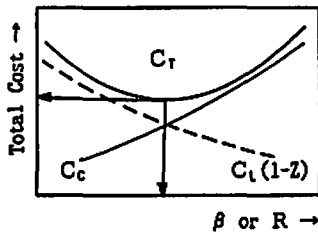


Fig. 7 Decision with the probabilistic method

するわけであり、この評価基準を期待総費用最小化基準という。

従来発破振動値の予測、評価は、過去の発破実績を直接参考にする1)の手法で行われてきたが、本稿で提示した手法を採用することにより、2)、3)のようにより経済的で定量的な安全性評価を行なうことが可能となった。

5. 結 言

本研究では、発破設計の中でも振動値の予測、評価に主眼をおいて、過去の発破実績とその統計確率的性質から合理的な予測値評価を行なう手法を検討し、いくつかの発破データを解析した。その成果をまとめると次のように整理することが出来る。

- 1) 大量の発破振動データを管理するデータベースを構築した。また、これを活用して発破振動予測式の変数を整理し、様々な発破条件に対応出来るようにした。
- 2) 従来の確定論的な発破振動予測法に加えて、新たに確率的な手法を導入する方法を提示した。
- 3) 発破振動予測値の信頼性と作業の安全性を確率

密度関数を用いて定量的に評価出来ることを明らかにした。

以上により、従来難しいとされてきた発破振動予測値の定量的な評価を、データベースを活用して効率的に行なうこと、安全かつ経済的な発破設計を行なう手法の提示を行なうことが出来た。

謝 辞

本研究の一部は 助火薬工業技術奨励会の助成により行ないました。また、データ収集に際しては、助火薬工業協会発破専門部会に御協力して頂きました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 本州四国連絡橋公団, 南北備讃瀬戸大橋下部工北工区(その1)工事発破影響計測結果報告書, (1981)
- 2) 腐食防食学会編, 「装置材料の寿命予測入門」, (1985), 丸善
- 3) 日科技連編, 「信頼性データの解析」, (1990), 文祥堂
- 4) 土質工学会編, 「土質データのばらつきと設計」, p.42(1986), 土質工学会
- 5) 工業火薬協会編, 「新・発破ハンドブック」, (1989), 山海堂
- 6) 菅野文友, 「信頼性工学の基礎」, (1978), 日刊工業新聞社
- 7) 松尾稔, 「地盤工学(信頼性設計の理論と実際)」, (1984), 技報堂出版

Prediction and evaluation of blasting vibration with the probabilistic method

by Akihiro ANAYAMA*, Yasuhiko OHTA*, Atsumi MIYAKE*
Terushige OGAWA*, Yasuhiro KUSAKA** and Masashi NAKANO**

In order to make a quantitative index for a better blasting design, the prediction and evaluation of blasting vibration with the probabilistic method was investigated.

At first, a database system of field data of blasting vibration was designed, and the data were analyzed and classified to inspect statistic characters of the vibration records.

Next a new index with the safety parameters was proposed with the help of the probabilistic method to evaluate blasting vibration. Applying these proposal to a blasting design, it was found that the distributions of the data could be described by some probability density functions and it became able to discuss the reliability of the values of blasting vibration quantitatively.

Now decision making process became convenient with the use of the database system and the probabilistic method. It should be determined under consideration of these safety informations as well as the cost of construction.

(*Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Yokohama National University,

156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240, Japan

**Bibai Factory, Nippon Oil & Fats Co. Ltd.,

549 Koshunai, Bibai, Hokkaido 079-01, Japan)
