

(23) 発破振動計測による発破施工管理の一提案

㈱青木建設横浜支店土木部 田中尚史、 中村公治
㈱青木建設横浜支店土木部 正会員○塩月隆久、 坂本浩之
㈱青木建設技術本部研究所 正会員 永井哲夫

An proposal on the control of blasting vibration

Naofumi TANAKA*、 Kouji NAKAMURA*
Takahisa SIOTSUKI *、 Hiroyuki SAKAMOTO *
Tetuo NAGAI **

Abstract

Blasting is usually used in housing land formation, due to its possibility of large short-term hard rock excavation. In some situation, however, controlled blasting is required, e.g. wide area blasting and blasting near residential area.

In this paper, we propose a rational control method of blasting vibration, which was applied to a housing land formation site with satisfactory result. This method consists of a blasting vibration estimating expression used for controlling blasting vibration. This estimating expression was obtained by applying multivariate analysis to past in-situ vibration measurement results and blasting condition records from various situation.

* Civil Engineering Division of Yokohama Branch, Aoki Corporation Co., Ltd

** Technology Research Headquarters, Aoki Corporation Co., Ltd.

1. はじめに

発破工法は、山岳トンネル、ダム、宅地造成工事等で、硬岩掘削の場合、短期間で大量の掘削が可能であることから有効であり多用されている。しかし、宅地造成工事のように発破範囲が広域におよび一般民家に隣接している場合、発破に伴う振動、騒音のため発破方法に規制を設ける必要がある。

これに対して、従来は、発破の設計・施工に際し、試行錯誤的・経験的に発破振動の予測式を作り施工管理を行っていた。

本研究では、発破箇所が広範囲に位置し発破条件も複雑な宅地造成工事を対象に、発破振動計測による合理的施工管理法について述べる。ここでは、種々の条件下で得られた発破振動計測データを多変量解析を用いて分析し発破振動推定式を作ることによって、施工へフィードバックさせる発破振動管理手法を提案する。従来提案されてきた発破振動管理手法は、主に発破振動レベルの推定に関するものが中心であり、その推定法を実際の施工へ反映させる方法についての提案はほとんどなされていなかった。そこで、本研究では両者に関して検討を加えるが、特に後者に中心をおいた提案を行い、これを実務に供し十分な成果を得たのでここに報告する。

2. 従来の発破振動管理法とその問題点

2.1 発破振動レベルの推定法の現状と問題点

2. 1. 1 現状

一般に振動規制法によって、公害振動と呼ばれる地盤振動は、振動レベル計（JIS C1510）を用いて測定した振動レベルの値で規制されている。そこで発破振動に関しても振動レベルにより取り決めがなされることが多い。

一方、従来の発破振動の推定式は、主として最大速度振幅（PPV）をその対象としており、推定式は一般に次式のように表される。

$$PPV = KW^a D^{-b} \quad (1)$$

ここで K：発破係数（使用する火薬類の種類や性能、発破条件、地盤条件により定まる）

W：雷管の段当たりの総薬量（kg）， D：爆源からの距離（m）

a：0.5～1.0の定数，

b：2.0前後の定数

そこで、単一周波数の連続正弦振動に対する振動レベル（VL）と最大速度振幅（PPV）の対応式（2）に式（1）を代入することにより、一般に発破振動の振動レベルを推定している。

$$VL = 20 \cdot 10 \log_{10} (PPV) + 91 \quad (\text{振動数8Hz以上の場合}) \quad (2)$$

2. 1. 2 問題点

①発破において、発破が同段であっても雷管のばらつきにより、式（1）で推定される最大速度振幅（PPV）の値は大きくばらつくことがある。

②発破振動のように立ち上がりが鋭く多くの周波数を含み、しかも継続時間の短い振動に対して、単一周波数の連続正弦振動に対する式（2）を用いると、得られた振動レベルは過大評価されることになる。

③式（2）では段発破による影響等を加味できない。

2. 2 推定式を用いた振動管理法の現状と問題点

2. 2. 1 現状

従来、発破振動管理は次のような手順で行われている。

①ステップ1（施工計画時）

発破区域周辺の条件等を考慮して、発破振動規則値を設定する。そして、過去の資料を基にK値，aおよびbを選定し、式（1）および（2）より、爆源からの距離（D）に対する総装薬量（W）を決める。

②ステップ2（試験発破時）

ある決められた場所で試験発破を行い、振動レベル（VL），総装薬量（W）および爆源からの距離（D）を測定し、式（1），式（2）よりK値の最大値およびその時のa，bを求める。そして施工計画時に定めたK値，aおよびbと比較し、必要があれば補正を行う。

③ステップ3（施工時）

試験発破時に補正を加えて定めたK値，aおよびbと式（1）および（2）より、爆源からの距離（D）に対する総装薬量（W）を求め、これに基づいて発破施工を実施する。そして振動レベル値が規制

値を越える場合は、施工担当者の経験に基づいて順次対応を行う。

2. 2. 2 問題点

①試験発破により得られるK値の最大値は、一般に大きくばらつくことが多い。それを用いて発破箇所が広範囲にわたる現場に対して発破振動管理を行うには無理がある。

②施工時に、計測される発破振動計測データを施工にフィードバックさせ施工管理を行う手法がほとんどない。

3. 多変量解析を基にした発破振動管理手法

3. 1 本手法の概要

従来の発破振動管理法の問題点については前章で述べた通りであるが、これに対して今回次のようなアプローチによる発破振動管理を提案し実施した。

3. 1. 1 発破振動レベルの推定

まず、式(1)により最大速度振幅(PPV)を求めるに際し、Wとして総装薬量による値と、孔当たり薬量による値の両ケースの値を用いて推定を行い、振動レベルの推定に関し精度の良い方を逐次採用することにした。

次に、式(2)に発破振動の影響を考慮した推定式は、桜井・北村らや、国松・中川らの研究により次のように得られている。

$$\text{桜井・北村ら：} \quad VL = 20 \cdot 10 \log_{10}(PPV) + (82 \sim 84) \quad (3)$$

$$\text{国松・中川ら：} \quad VL = 20 \cdot 10 \log_{10}(PPV) + 10 \cdot 10 \log_{10}(1 - e^{-\frac{Td}{0.63}}) + 85 \quad (4)$$

ここでは、施工管理という点から、現場で適用容易な式(3)を用いることにした。

3. 1. 2 推定式を用いた振動管理法

試験発破時に得られる推定式を用いた振動管理では、ばらつきの多発破振動を計測しても次の発破施工に反映させることもできないので、ここでは図-1のように発破振動計測データを用いた情報化発破施工システムを構築した。

3. 2 多変量解析

3. 2. 1 基本モデル

式(1)および(3)より、今回用いた振動レベルの推定式は次のように表される。

$$VL = 20 \cdot 10 \log_{10}(K \cdot W^a \cdot D^{-b}) + 83 \quad (5)$$

式(5)は、次のようにも表すことができる。

$$VL = 20 \cdot 10 \log_{10} K + 20a \cdot 10 \log_{10} W - 20b \cdot 10 \log_{10} D + 83 \quad (6)$$

そこで、上式に対応する重回帰モデルを考えると以下ようになる。

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (7)$$

$$\text{ここで、} \begin{cases} \beta_0 : 20 \cdot 10 \log_{10} K + 83 \\ \beta_1 : 20a \\ \beta_2 : -20b \end{cases} \quad \begin{cases} y : VL \\ X_1 : 10 \log_{10} W^a \\ X_2 : 10 \log_{10} D^{-b} \end{cases} \quad \varepsilon : \text{残差}$$

上式では、振動レベル(VL)は、K、W、Dという量的変数の関数になっているが(VL=f(K, W, D))、今回はこれに、月(Month)、発破工法(Method)、発破箇所(Site)という質的変数をも加味して、次式のように“層別因子を含む重回帰モデル”を基本モデルとした。

$$y_i = \beta_0(l, m, n) + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \varepsilon_i \quad (8)$$

ここで、 $\beta_0(l, m, n) : 20 \cdot 10 \log_{10} K + 83 + \beta^*$ ($\beta^* : l, m, n$ の組み合わせを考慮した定数)

$$\beta_1 : 20a, \quad \beta_2 : -20b$$

$$y_i : (VL)_i \quad X_{i1} : (10 \log_{10} W^a)_i \quad X_{i2} : (10 \log_{10} D^{-b})_i \quad \varepsilon_i : \text{残差}$$

l : 月(Month)に対応(l=1(1月), 2(2月), 3(4月), 4(5月))

m : 発破工法(Method)に対応(m=1(ベンチカット工法), 2(盤打ち工法))

n : 発破箇所(Site)に対応(n=1(Site=1), 2(Site=2), -----, 5(Site=5))

3. 2. 2 解析方法

式(8)の基本モデルを基に、層別因子を含む重回帰分析を行う。その際、目的変数となるのは振動レベル(VL)で、説明変数はK値(K)、薬量(W)および爆源からの距離(D)という量的変数と、

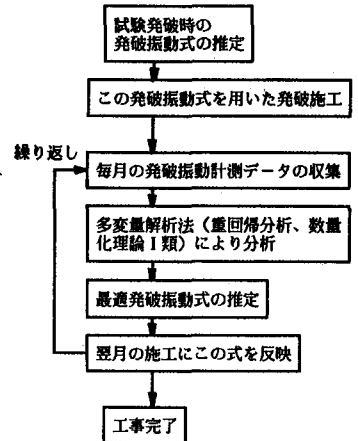


図-1 情報化施工フロー

月 (l)、発破工法 (m) および発破箇所 (n) という質的変数が混合したものとなっている。

多変量解析に際しては、図-3 のようにまず変数を1つずつ解析し、次いで2つの変数の関係を詳しく調べ、最後に多変量の解析を行う。この多変量の解析では、目的が情報化施工への解析結果の反映であることから、多くの説明変数の候補の中より、予測に役立つ変数を選択し、式 (8) をより簡単なモデルに要約するという必要がある (変数選択)。

ここで実施した変数選択には、次のような特徴がある。

- a) 予測式の良さを評価する尺度として、自由度2重調整済寄与率 (R^{*2}) を用いた。
- b) 現場で施工担当者が固有技術的判断も加えて容易に即座に、良い予測式を発見できるように、マイクロコンピュータとの対話による逐次選択法 (micro-CDA (芳賀による)) を用いた。

3. 3 解析結果

3. 3. 1 解析データの概要

本研究で用いたデータは、図-2 に示したように平面的広がりを有する宅地造成工事において、4ヶ月間計測し収集したものである (図-4)。工事区域付近の地質は、小仏層群と呼ばれる先第三紀頁岩、砂岩、チャートを主体とする岩を基盤とし、この上に新第三紀新統都留群大月層群と呼ばれる火山礫凝灰岩や、同じく中新統の西桂層群と呼ばれる泥岩、礫岩が分布している。

3. 3. 2 結果

a) 薬量 (W) として用いる値

通常、式 (1) を用いる場合は W として段当たり総装薬量を用いているが、今回のデータ分析結果から、孔当たり薬量を用いた方がより精度良くかつ簡単な推定式を得られることがわかる (表-1)。

b) 選択変数の F 値とその推定式の良さ

情報化施工のフローに従い各月ごとに解析を行って、得られた最適推定式の良さとその時の選択変数の F 値をまとめて表-2 に示す。

c) 振動レベルの推定値と実測値の適合度

本研究では、振動レベルの推定値 ($\hat{V}L$) と実測値 (VL) の比 (R) を両者の適合度と定義し、R

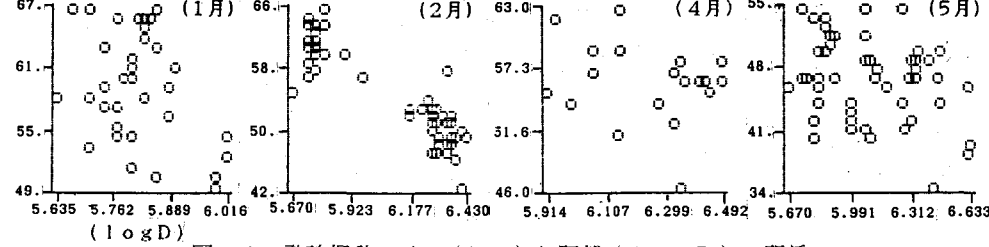


図-4 発破振動レベル (VL) と距離 (log D) の関係

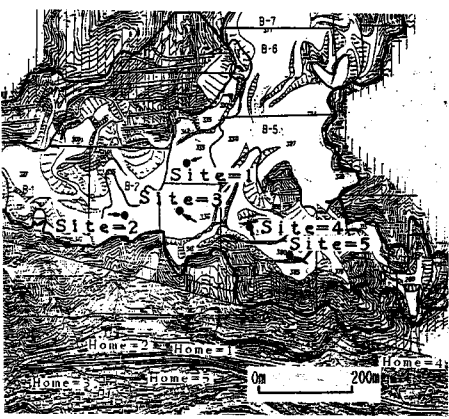


図-2 発破箇所位置図

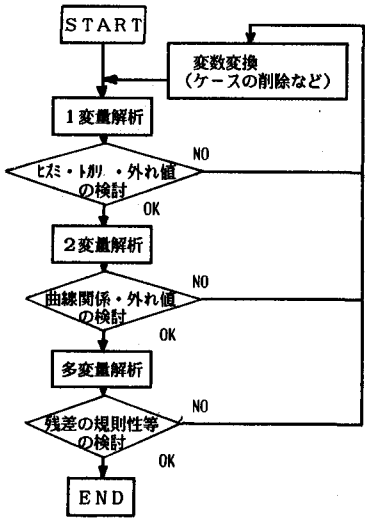


図-3 多変量解析フロー

≦1が望ましいと考えることにする。ここで推定値($\hat{V}_L$)は、前月までの収集データの解析により得られた推定式を用いて、推定された翌月の振動レベル値を意味する。そして、この適合度の平均値、標準偏差および変動係数をまとめると表-3のようになる。

4. まとめ

以上、発破箇所が平面的に広範囲に分布し、発破条件も複雑な宅地造成工事を対象に、発破振動計測データを基にした発破施工管理手法を提案し、これを実施工に適用した結果をまとめた。そして、その結果に考察を加えて以下のような知見を得た。

(1) 推定式

①式(2)に補正を加えた式(5)は十分実用に値する。
 ②推定式(5)において、Wとしては孔当たりの薬量(kg/孔)を用いた方が従来のように段当たり総装薬量(kg/段)を用いた場合に比べより少ない変数でより良い推定式が得られる。

③今回のように平面的に広がりを持つ宅地造成工事においても、Wとして孔当たりの薬量(kg/孔)を用いると、地盤条件によるバラツキの影響は小さくなり、Wと発破箇所と計測測点の距離(D)とで、実用に値する推定式が得られる。これは設計への反映も可能であることを示唆している。

(2) 推定式を用いた振動管理法

①今回提案した”マイクロコンピュータとの対話システムを導入した現場施工担当者による逐次変数選択法”は、情報化施工の中で非常に主要な役割を演じ実務に十分適用できるものである。
 ②当振動管理法により、毎月の出来高を下げることなく、発破振動自主規制値を下げ、より質の高い施工が可能となった(図-5)。

最後に、ここで提案した手法は今後共多くの現場への適用の繰り返しにより、発破施工管理手法として確立されるものであると思われるので、積極的に適用して行きたい。本研究において、大阪ロック開発㈱および本社技術本部の伊藤、国村らの助力を得たので、ここに謝意を表す。

参考文献

たとえば 1)清水・北村・桜井：トンネル発破による地表面および家屋の振動測定，建設工学研究所研究報告，第25号，pp139-153,1984。 2)北村：発破振動における振動速度と振動レベルの対応について，土木学会論文集，第362号，PP481-484,1985。 3)国松・中川・三浦・今村：発破振動における振動レベルの推定，土木学会論文集，第367号，PP45-51,1986。 4)国松・三浦・今村・中川：速度波形を用いた振動レベルの推定，土木学会論文集，第391号，PP134-141,1988。 5)芳賀敏朗：多変量解析入門，日本科学技術連盟，1986。

表-1 薬量(W)に用いる値の検討

項目	月	1	1,2	1,2,4	1,2,4,5
段 当 り kg /D	F値	5.7	11.4	20.4	7.4
	R ² 2	0.44	0.67	0.66	0.70
	選択変数	4(D)	4	5	4
孔 当 り kg /H	F値	24.8	27.8	118.6	215.6
	R ² 2	0.51	0.66	0.63	0.71
	選択変数	3(D)	3	3	3

表-2 選択変数のF値とその推定式の良さ

指標	月	1	1,2	1,2,4	1,2,4,5
F 値	W	24.8	27.8	118.6	215.6
	D	1.4	159.3	139.0	176.2
	Month	—	—	16.8	23.5
	Site	4.0	4.4	—	—
	R ² 2	0.51	0.66	0.63	0.71
	残差標準偏差	3.58	3.55	3.73	3.95

表-3 推定値と実測値の適合度

推定された月	2	4	5
推定に用いたデータの月	1	1,2	1,2,4
平均値	0.973	1.104	0.960
標準偏差	0.083	0.069	0.073
変動係数	0.086	0.063	0.076

