

# 生活環境に対する振動レベルを用いた発破振動の評価基準と発破振動管理手法に関する研究

塩月隆久<sup>1)</sup>・橋爪正博<sup>2)</sup>・古川浩平<sup>3)</sup>・中川浩二<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 正会員 (株)青木建設技術本部研究所 (〒300-26 茨城県つくば市大字要 36-1)

<sup>2)</sup> 学生会員 山口大学大学院 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台)

<sup>3)</sup> 正会員 工博 山口大学 工学部社会建設工学科

市街地近郊での発破工事において、発破に起因する建設公害がしばしば問題となっている。本研究は、実現場の発破振動レベル計測記録と苦情発生調査記録を基に、発破振動が人間の生活環境に及ぼす影響についてランク分けを試み、発破振動レベルによる評価基準を提案している。さらに、発破振動評価基準を用いて発破振動のばらつきを考慮した管理手法の提案を行い、その有効性について論じたものである。

*Key Words* : rock blasting ,blasting vibration control ,vibration complaints ,vibration level

## 1. まえがき

市街地近郊でのトンネル工事または宅地造成工事等、発破工法を用いた建設工事の機会がしばしば見られる。このとき、発破による振動・騒音等によって、住民生活あるいは構造物に与える影響が問題となることがある。特に、近年では構造物に物的被害を与えるかどうかより、人間に与える精神的な不快感等の生活環境への影響が問題となることが多い。

このため、市街地近郊で発破工事を行う場合、これらの環境問題をクリアする必要がある。今日の環境政策は、「環境影響的的確な予測・評価」および「環境影響評価を中心とする事業の評価システムの充実」を方策の一つとしている<sup>1)</sup>。これらを社会的背景として今後、発破工法の市街地近郊での採用にあたり、環境対策への取り組みはますます重要な課題となると考える。

しかし、発破の特殊性から、現在のところ明確な発破振動の評価基準はなく、振動規制法あるいは騒音規制法においても発破はその規制が対象から除外されている。そのため、それぞれの発破施工にあたっては自主管理値を設け、周辺住民の同意の基に発破振動管理を行っているのが現状である。

従来、構造物の被害は変位速度振幅との相関が高

いことから、環境への影響評価単位として発破振動の最大速度振幅が用いられることが多かった。しかし、上述のように最近の発破振動の問題の多くは構造物より住民に与える影響の方がより切実なものとなっており、このような問題では、人体感覚を対象とする振動の評価尺度である振動レベル<sup>2)</sup>が用いられ、現に振動規制法においても振動レベルが適切と考えられ、評価単位となっている。

このように、振動レベルによる規制が多くなっていくにもかかわらず、実際の工事において住民の反応を取り入れて発破振動の管理を振動レベルで行う手法に関する研究はほとんどなされていない。

本研究は、発破振動に対する人体への影響の評価に対して発破振動レベルによる管理手法の確立を目的にしている。そこで、実施工のデータを用いて住民の反応を基に振動レベルを用いた評価基準について整理した上で、その評価基準に基づく発破振動レベルの管理手法について論じている。本文では、まず従来の発破振動評価基準について述べたあと、ある明かり発破工事現場において周辺住民に対して行った発破振動の影響調査と発破振動レベル計測の記録を基に、振動レベルによる影響の分類を試みる。また、発破振動のばらつきを考慮して、これに影響する受振点の地盤条件、発破工法の種別による要因

等を洗い出す。その上で、発破振動のばらつきを変動係数として考慮した確率論に基づく発破振動レベル管理手法を応用し、今回の計測データを用いたシミュレーションの結果から、振動レベルによる発破振動評価基準の妥当性を確認するとともに提案する管理手法の有効性を明らかにする。

## 2. 発破振動評価基準の現状と問題点

### (1) 諸外国における発破振動評価基準の現状

諸外国においては、建造物に対する発破振動の評価基準に関して多くの研究がなされている。例えば、Wiss は、構造物に対する安全限界をほぼ最大速度振幅 5 cm/sec としている<sup>3)</sup>。一方、地盤条件によって被害程度は異なり、岩盤上の計測値では安全限界は最大速度振幅 5 cm/sec であるのに対して軟質地盤上のデータでは安全限界は最大速度振幅 1 cm/sec であることが報告されている例もある<sup>4)</sup>。

人体に対する影響の研究においては、連続振動に対して、人間の有感限界を 0.038 cm/sec、あるいは 0.051 cm/sec としたのものもあるが<sup>4)</sup>、発破振動に対しては、Wiss による 0.2 cm/sec としたものがみられる<sup>3)</sup>。表-1 に発破振動の人体に対する影響に関する研究と有感限界値を示す。

### (2) 国内における発破振動評価基準の現状

国内においては、気象庁震度階との比較を参考に評価基準について研究されているものがある。例えば、雑喉<sup>5)</sup> は、地震動の最大速度振幅と震度階の関係式を参考に人間の有感限界を 0.13 cm/sec としている。また、石井他<sup>6)</sup> は、有感限界を 0.03 cm/sec としている。

これらは、最大速度振幅が評価単位であるが、振動レベルを評価単位として用いているものもある。例えば、環境庁による環境振動を対象とした振動の影響と振動レベルの関係を表したのものがある<sup>7)</sup>。また、国松ら<sup>8)</sup> は振動レベルによる発破振動の震度区分を試み、49dB を「振動を感じ始める」有感限界であるとしている。

### (3) 問題点

発破振動の評価基準について、過去多くの研究がなされているが、人体感覚を重視した発破振動の評価基準に関して下記のような問題点を指摘できる。

- ① 諸外国では、発破振動が既存構造物に与える影響が主として問題とされてきたため、構造物の被害を対象にした評価基準が多く採用されており、評価単位に、最大速度振幅が用いられてきている。

表-1 発破振動の人体に対する影響の研究と有感限界値

研究者	評価方法	対象	有感限界値
Wiss, J.F. <sup>3)</sup>	最大速度振幅	発破振動	「感じない」 0.20cm/sec
Reiher及び Meister <sup>4)</sup>	変位振幅μと周波数Hzの等感覚曲線図から変位速度振幅で推定	連続振動	0.038cm/sec
Goldman, D.F. <sup>4)</sup>	変位速度と周波数と人体感覚	正弦波的振動	0.051cm/sec
気象庁震度階	変位加速度	自然地震	震度0(無感)と震度1(微震)の境界
雑喉 謙 <sup>5)</sup>	地震動の最大速度振幅PPVと震度階Sの関係式 $\log_{10}(PPV) = S/2 - 1.4$ を参考に、人体感覚を議論	発破振動	震度0(無感)と震度1(微震)の境界「人体に感じない」 0.13cm/sec
石井他 <sup>6)</sup>	振動速度	発破振動	「発破振動がほぼ感知できない」 0.03kine以下
環境庁 <sup>7)</sup>	振動による影響と振動レベルの関係(石井・河角の式に基づく)	連続振動	(生理的影響等) 「振動を感じ始める(閾値)」 55dB (住民反応) 「住居内振動の認知限界」 50~60dB
国松ら <sup>8)</sup>	石本による地震動の加速度PPAと震度階Sの関係式を修正した河角の式と、不規則振動として考慮した加速度PPAと振動レベルVLの関係式 $VL = 20 \log_{10}(PPA) + 51$	発破振動	震度0(無感)と震度1(微震)の境界、 PPA = 0.794cm/s <sup>2</sup> 49dB

これらは、人体感覚等の生活環境への影響を重視した我が国の実情に合わない部分がある。人体感覚を基準とした発破振動の評価を行う場合、最大速度振幅による評価に加え、振動レベルを評価単位にした基準が必要である。

② 国内における多くの研究は、自然地震の気象庁震度階と変位速度振幅の関係を基に、発破振動の評価基準を論じている。しかし、実際の発破振動の影響、特に被害実態についての調査データはあまり公表されておらず、これに基づき評価基準について論じられた研究報告が少ない。

③ また、現在参考にされている評価基準は、その基準と実際の住民の反応とに差異が生じるなど実情に合わない場合があり、地盤条件、住民の意識などを考えると、より正確な生活環境への発破振動の影響の実情を知る必要がある。

## 3. 計測調査を行った工事概要及び計測概要

### (1) 工事概要と地質概要

表-2 発破工法諸元

工種	発破高	孔当り薬量	段当り孔数	段当り薬量	段数	総薬量	装薬方法
盤打ち発破	L=3m L=6m	1.6～2.6 kg 8.0～9.5 kg	1～4 1～3	1.6～10.4 kg 8.0～28.5 kg	5～40 6～30	10.5～205.5 kg 50.6～570.0 kg	
ベンチカット	L=6m L=8～10m L=11～14m	8.0～9.5 kg 16.0～28.0 kg 17.0～32.0 kg	1～2 1 1	8.0～19.0 kg 16.0～28.0 kg 17.0～32.0 kg	7～30 8～20 7～27	61.2～318.5 kg 131.8～465.3 kg 118.5～548.0 kg	2列式 テッキ装薬
使用爆薬 使用雷管	3号桐ダイナマイト、AN-FO 6号電気雷管(1～20DS)						

工事は、約75haの大型ニュータウンを山岳地に建設するもので、開発区域内南側が切土エリア、北側が盛土エリアで場内で土量バランスをとるものである。切土量約600万m<sup>3</sup>の約75%を弾性波速度2900m/sec程度の緑色凝灰角礫岩を主とする硬岩(約300万m<sup>3</sup>)と中硬岩(約155万m<sup>3</sup>)が占めており、爆砕工の対象となった。南側切土エリアは山頂から計画切土高までの標高差約100mの切土高があり、さらに計画切土高から約100mの高さの急斜面の麓には工事区域南側外周に沿って民家、国道、鉄道が近接していた。

発破工事は、1987年9月から開始し、1987年12月からは本格的に6m～14mベンチカット工法と3m～6m盤下げ発破工法による掘削を行い、単月切土量約20～40万m<sup>3</sup>の掘削を1989年3月まで続け、その後3m盤下げ発破による細部の掘削を1990年1月まで行った。1回当たりの発破は、5～40段発で総薬量は10.5～570.0kgである。

表-2に発破工法諸元を示す。

(2) 計測概要

発破施工に伴う振動レベル計測を、1987年9月の試験発破時と1988年1月から1989年3月までの期間に行い、振動レベル計(JIS C1510)による測定および振動レベル記録用レベルレコーダ(JIS C1512)による記録を行った。計測を行った発破振動のデータの件数は合計1182件(ベンチカット発破639件、盤打ち発破543件)あり、毎回の発破に対して発破箇所、孔数、孔長、孔間、薬量、爆薬の種類、破砕量、受振点までの水平距離等の施工データを記録した。

これらのデータは、工事の進捗および発破振動の住民への影響の内容に基づいて、3つの地区に分けて考えることができた。図-1に発破施工区域と周辺の住居地区(X地区、Y地区、Z地区)の位置を示すように、X地区は開発区域の南西方向に位置し開発区域境界から約150m～500m離れた範囲に戸数約180軒程の民家がある。Z地区は開発区

表-3 月毎の発破振動レベル計測件数

年月	単月切土量( )	発破振動計測発破件数			計測点		発破箇所
		盤打ち発破	ベンチ発破	計(件)	地区名	受振点名	
1987年							
9月	137,910						
10月	111,130						
11月	123,590						
12月	182,958						
1988年							
1月	179,986	18	24	42	X地区	X-1	C-5,6,7
2月	375,924	45	63	108	X地区	X-4他	C-5,6,7,8
3月	261,724						
4月	220,861	18	9	27	X,Z地区	X-2,Z-1	C-5,7,9
5月	197,956	110	52	162	X,Z地区	X-2,Z-1他	C-5,7,9,11
6月	239,329	35	48	83	Z地区	Z-2	C-5,9
7月	273,848	111	149	260	Z地区	Z-3他	C-5,7,9,11
8月	254,478	34	123	157	Z地区	Z-4他	C-5,8,9
9月	323,279						
10月	224,929	100	110	210	X,Y地区	Y-1,2,X-3	C-9,11
11月	370,620	5	3	8	Z地区	Z-1	C-9,11
12月	369,136	12	22	34	X,Z地区	X-3,Z-1	C-7,9
1989年							
1月	214,220	13	28	41	X地区	X-3	C-8,9,11
2月	293,514						
3月	242,004	42	8	50	Z地区	Z-1	C-7,9,11
計		543	639	1,182			

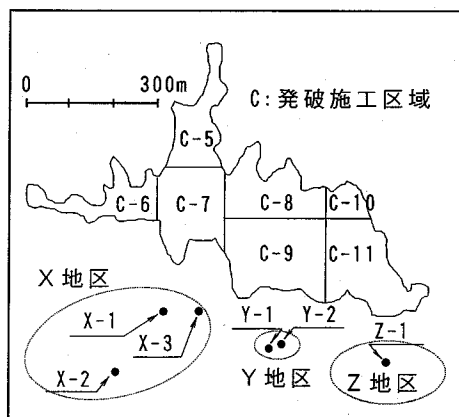


図-1 発破施工区域と住居地区

域の南東方向に位置し開発区域境界から約150m～300m離れた範囲に戸数27軒の民家がある。また、Y地区は開発区域南側に位置し開発区域境界から約130m～150m離れた範囲に戸数4軒の民家がある。

表-3に月毎の発破振動レベル計測件数、計測箇所、発破箇所および単月の切土出来高を示す。

#### 4. 発破振動の評価基準

##### (1) 発破振動レベル計測及び環境への影響調査結果

住宅地近傍で発破施工を行うにあたっては、発破振動レベルに対する管理値の設定と、施工時における振動レベルの計測がしばしば必要とされている。当工事においても、施工計画時、試験発破時および施工時に管理値の検討を行っている。また、発破区域周辺住民から発生した発破振動に関する苦情に対して、住宅地内で振動レベル調査を行っている。

以下、発破振動レベル管理値を施工計画の段階から順に示す。また、発破区域が住宅地に近づくにつれて苦情が発生した周辺3地区別に、発破振動が住民に与える影響の状況と振動レベルの計測値の分布について示す。その上で、発破振動レベルに基づく評価基準について考察を行う。

尚、本来、住居内の振動値を計測すべきであるが、毎回の計測を住居内で行うことの困難さに加え、家屋構造の違い、また、家屋内の計測点の違いによる計測値のばらつきが、そのデータ解析および管理上の困難さを生じさせることから、今回の計測は各住居の玄関口の土間コンクリート上で行っており、この計測値を用いて発破振動レベル管理を行った。

##### a) 施工計画時の発破振動レベル管理値の設定

施工計画時に、振動の参考値<sup>9)</sup> 0.03 ~ 0.1 cm/sec (「発破振動は感知できるが、苦情は少ない」) を基に、周波数 8Hz 以上の単一正弦波動を対象にした理論的な振動レベル (VL) と最大速度振幅 (PPV) の関係式<sup>9)</sup>

$$VL = 20 \cdot \log_{10} (PPV) + 91 \quad (1)$$

と上記参考値の上限値 0.1 cm/sec から、発破振動レベル管理値を 70dB と設定して、発破施工計画を立てた。

##### b) 試験発破時の発破振動レベル管理値の変更

1987年9月4日から5日間、計8回の試験発破を行った。その結果、発破振動が周辺住民に大きく影響を及ぼすことが予想されたため、発破振動レベル管理値 70dB を 65dB に変更し、本施工の発破設計を行った。

##### c) X地区での計測

###### ① X地区 X-1 受振点 1988年1月

発破施工が、X地区側に近い発破箇所 C-5, C-6, C-7 から始まったことにより、まず 1988年1月に X地区で発破振動に対する苦情が発生している。図

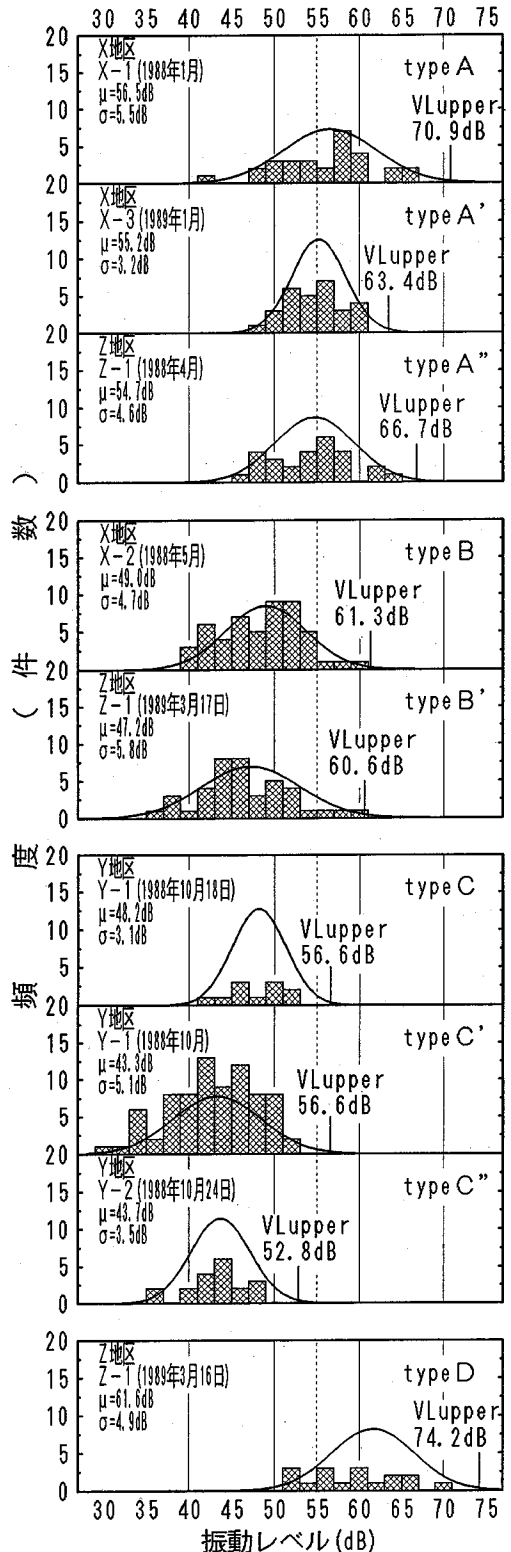


図-2 各測点の振動レベル計測値の分布

—2に各測点の計測データの分布を示す。X-1受振点の苦情発生当時の振動レベル計測値の分布が図—2の中のtype Aである。これは、発破箇所(C-6, C-7)から最も近いX地区の民家(X-1)で計測したものである。60dB以上の計測値が目立ち、住民の立ち会いの下での発破振動調査の結果、管理値65dBでは振動を人体に感じ不快感が生じ易いとの意見がでて、発破振動レベル管理値を60dBに変更し直した。

ここに、図—2中には、各受振点での計測値をサンプリングデータとしてその統計量(推定母平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ )を求め、出現する発破振動レベル値の母集団を正規分布と仮定して、正規母集団N( $\mu, \sigma^2$ )の分布形状と両側確率1%の上限値( $VL_{UPPER}$ )を示してある。両側確率1%の値を上限値として示したのは、これらの実測データから見て出現する可能性のある最大値がほぼこの程度の値になると考えたからである。これによると、上限値は、 $VL_{UPPER}=71dB$ となる。

#### ② X地区X-2受振点 1988年5月

およびX地区X-3受振点 1989年1月

発破施工が、主にC-9, C-11(Z地区側)区域で行われるようになるに従い、1988年5月頃にはX地区での発破振動の影響が少なくなってきた。この時期計測したX-2受振点の計測値の分布が図—2のtype Bである。type Aに比べて60dBを越える発破の件数がほとんどない( $VL_{UPPER}=61dB$ )。後日X-2地点の住民に発破振動の影響について尋ねたところ、「計測した頃(1988年5月)は、体に感じる振動が以前の頃(1988年1月)と比べると随分少なくなっていた」と感想を述べている。

しかし、この時期においても発破の苦情がX-2地点を含めたX地区で散発的に発生しており、その後、X-3地点でも計測を行っている。1989年1月にX-3地点で計測された6mベンチカットに対する振動レベルの分布を図—2のtype A'に示す。実測値の最大値が60dB( $VL_{UPPER}=63.4dB$ )である。このことから、実際は60dB以下の値でも苦情が発生するのではないかと考えられる。

#### d) Y地区での計測

この地区では、受振点Y-1とY-2の2箇所での1988年10月18日～1988年10月29日に発破振動の影響があるという住民の訴えから計測を行っている。しかし、両測点での計測値の分布は図—2のtype C～C'に示すように、type A, type A', type Bに比べかなり小さい値を示している。

Y-1地点(計測開始日, type C)  $VL_{UPPER}=57dB$

Y-1地点(全データ, type C')  $VL_{UPPER}=57dB$

Y-2地点(計測開始日, type C)  $VL_{UPPER}=53dB$   
事実、計測時にY-1地点の住民から「今日は振動があまり感じられない」と言われており、数日後には発破振動に対する苦情がなくなったことから、発破振動レベルの計測を住民の了解のもとに終了している。この地区での、振動レベル計測値はいずれも57dB以下であり大きな値を示していない。しかし、住民の発破に対する不快感は多少とも残っており、振動が非常に小さいY-2地点でも住民の納得が得られるまで計6日間計測を続けている。

発破振動は、交通振動とは違った非日常的な振動であり、それがわずかであっても頻度が高くなれば発破音あるいは低周波空気振動による家具等家屋内の振動等と複合されて発破に対する不快感として人間に影響すると考えられる。

#### e) Z地区での計測

##### ① Z地区Z-1受振点 1988年4月

Z地区では1988年4月頃から発破振動の影響が発生し始めたため、受振点Z-1で計測を行った。この時の振動レベルの分布が図—2のtype A'である( $VL_{UPPER}=67dB$ )。type A(X-1受振点1988年1月)同様60dBを越える発破振動が目立ち、このことから60dBを越える発破振動が住民の苦情を誘引していると考えられる。

##### ② Z地区受振点Z-1 1989年3月16日～17日

発破箇所がC-9, C-11に移り、ベンチの標高も低くなり、Z地区に近くなってきている。それに伴い発破振動が周囲民家に与える影響も大きくなってきており、この時期軽度な家屋への物的被害(8軒の家屋で、主に浴室タイル目地、外壁、土間コンクリート等の微細なクラック)が生じている。

この時期に測点Z-1で計測された3m盤打ち発破の振動レベルの分布(図—2のtype B',  $VL_{UPPER}=61dB$ )と、6mベンチカット・6m盤打ち発破のもの(type D,  $VL_{UPPER}=74dB$ )を示す。明らかに、6mベンチカット・6m盤打ち発破の方が、高い値を示しており、上限値は70dBを越えている。これ以降住民からの苦情を勘案して6mベンチカットおよび6m盤打ち発破を行っていないことから、計測値の70dBに近い値で軽度ながらも家屋の物的被害が発生したものと推測できる。

#### (2) 振動レベルによる発破振動影響の分類

先に示したそれぞれの計測時期の発破振動レベル計測データから、振動レベル計測値の分布の形状と発破振動に対する住民の影響の内容をまとめ、発破振動の影響の度合いを分類すると、表—4のようになる。これによると、定性的に以下のように分類で

表-4 振動レベルによる発破振動影響の分類

計測箇所	計測日	分布形状	両側確率1%の 上限値 VL <sub>UPPER</sub>	住民への影響	許容限界区分 の分類分け
Y-2	1988年 10月24日	Type C" $\mu=43.7\text{dB}$ $\sigma=3.5\text{dB}$	52.8dB	計測時は苦情なし 振動の体感なし	分類Ⅰ
Y-1	1988年 10月	Type C' $\mu=43.3\text{dB}$ $\sigma=5.1\text{dB}$	56.6dB	計測時は苦情なし 振動の体感ほとんどなし	
Y-1	1988年 10月18日	Type C $\mu=48.2\text{dB}$ $\sigma=3.1\text{dB}$	56.6dB	計測時は苦情なし 振動の体感ほとんどなし	
Z-1	1989年 3月17日	Type B' $\mu=47.2\text{dB}$ $\sigma=5.8\text{dB}$	60.6dB	苦情あり 振動の体感少しあり	分類Ⅱ
X-2	1988年 5月	Type B $\mu=49.0\text{dB}$ $\sigma=4.7\text{dB}$	61.3dB	苦情あり 振動の体感少しあり	
X-3	1989年 1月	Type A' $\mu=55.2\text{dB}$ $\sigma=3.2\text{dB}$	63.4dB	苦情多くあり 振動の体感多くあり	分類Ⅲ
Z-1	1988年 4月	Type A" $\mu=54.7\text{dB}$ $\sigma=4.6\text{dB}$	66.7dB	苦情多くあり 振動の体感多くあり	
X-1	1988年 1月	Type A $\mu=56.5\text{dB}$ $\sigma=5.5\text{dB}$	70.9dB	苦情多くあり 振動の体感多くあり	
Z-1	1989年 3月16日	Type D $\mu=61.6\text{dB}$ $\sigma=4.9\text{dB}$	74.2dB	苦情多くあり 軽度な物的被害あり	分類Ⅳ

きる。

分類Ⅰ：苦情なし，振動の体感ほとんどなし

Y地区 Y-1, Y-2(1988.10)の分布 type C～C''

分類Ⅱ：苦情あり，振動の体感少しあり

X地区 X-2(1988.5)の分布 type B

Z地区 Z-1(1989.3)の分布 type B'

分類Ⅲ：苦情多くあり，振動の体感多くあり

X地区 X-1(1988.1)の分布 type A

X地区 X-3(1989.1)の分布 type A'

Z地区 Z-1(1988.4)の分布 type A''

分類Ⅳ：苦情多くあり，軽度な物的被害あり

Z地区 Z-1(1989.3)の分布 type D

さらに，それぞれの分類の範囲を，正規分布の両側確率1%の上限値を参考に，また，分類Ⅲと分類Ⅳの境界は，type Dと同じ測点で計測されたtype A''の上限値を参考に，振動レベルを用いて以下のように推定した。

分類Ⅰ 57dB 以下

分類Ⅱ 57dB～61dB

分類Ⅲ 61dB～67dB

分類Ⅳ 67dB 以上

また，Y地区 Y-1あるいはY-2地点の住民の「振動はあまり感じられない」という話から，わずかには振動を感じているが苦情を訴える程度ではな

かったことがわかり，住居内振動の認知限界と苦情限界とは，多少ずれがあることが分かる。このことから，今回の調査結果では，分類Ⅰの57dB付近が発破振動による苦情の発生限界値であると考えられ，さらに，Y-1の実測値（最大値53dB，平均値48dB，標準偏差3.1dB）から50dB～53dB付近に振動の認知限界値があると推定できる。

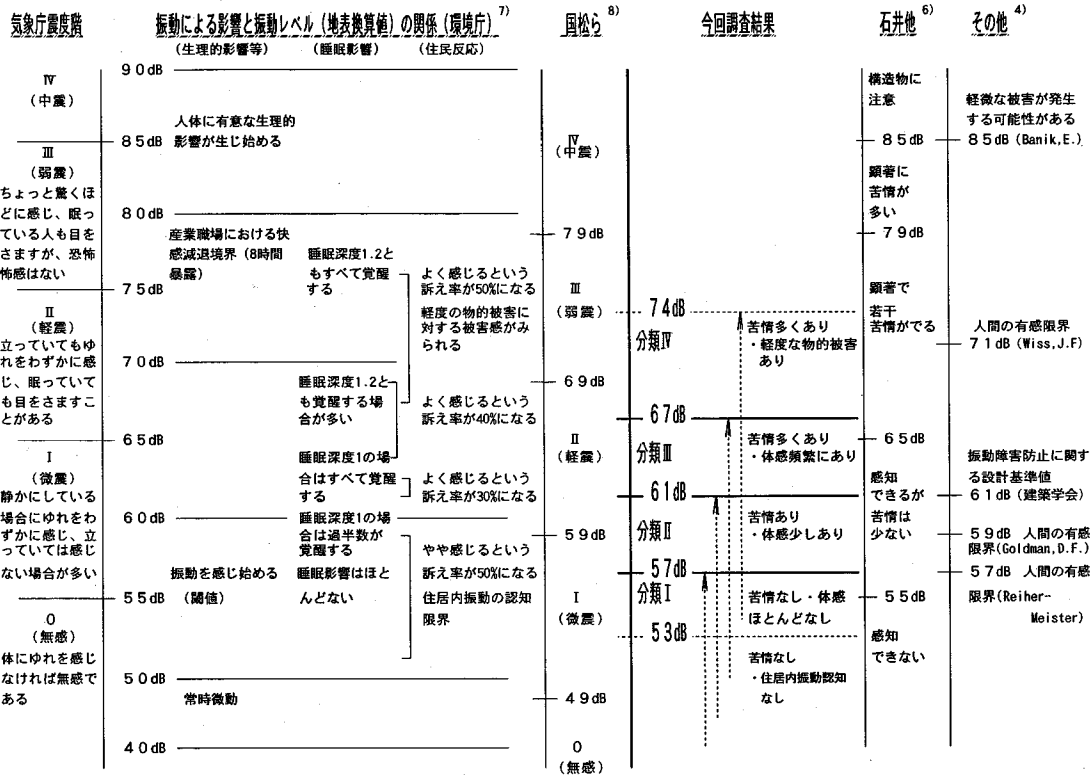
### (3) 発破振動評価基準の比較検討

今回の調査結果を，環境庁が示す振動による影響と振動レベルとの関係<sup>7)</sup>また国松らによる振動レベルによる発破振動の震度区分<sup>8)</sup>および気象庁震度階区分と比較すると表-5のようになる。さらに，石井ら<sup>9)</sup>による発破振動の影響尺度あるいはWissによる分類<sup>9)</sup>等を同表に併せて示す。これらは最大速度振幅（PPV）を用いているため，表中では，下式を用いて，振動レベルに換算し表している。

$$VL=20\log_{10}(PPV)+A \quad (2)$$

尚，式中の右辺のAは，連続正弦振動を対象にして理論的に求められた値(91)に対し<sup>9)</sup>，発破振動のような一過性の波動の場合，約-6dBのレベル差が生じるとした国松らの式<sup>10)</sup>に従い85を用いた。表によると，連続正弦振動を対象とした環境庁に

表-5 発破振動による影響と振動レベルによる評価基準の比較



よる区分では、「住居内振動の認知限界」を60dBとしている。これに対し、国松らは、発破振動のような不規則振動の場合、同一PPVの連続正弦振動とのレベル差が約-6dBであることから、「住居内振動の認知限界」を54dBとしている。今回調査による振動の認知限界が50dB～53dB付近で、苦情発生限界値が57dB付近であることから、国松らの区分と近い結果であることがわかる。

このほか、石井らによると「感知できるが、苦情が少ない」範囲は55dB(0.03kine)～65dB(0.1kine)である。また、Wissは「感じる程度」と「感じない」の境を71dB(0.2kine)としており、今回の調査結果と比べると高い値となっている。

以上のことから、次のことが考察される。

- ① 今回調査に基づく発破振動の振動レベルによる評価基準の区分が、国松らによる振動レベルによる発破振動の区分と近い結果となり、今回調査による評価基準の妥当性が確認できた。
- ② このことから、今回の調査において、発破振動に起因する住民生活への影響の振動レベルによる評価基準として、50dB～53dBが振動の認知限界値であり、57dB付近が発破振動苦情発生限界値であると判断された。

## 5. 発破施工管理手法の提案

### (1) 発破振動レベル管理手法の現状と問題点

発破振動管理は、一般に用いられている最大速度振幅 (PPV) の予測式 ( $PPV=K \cdot W^a \cdot D^{-b}$ ) を振動レベル (VL) と最大速度振幅の関係式に代入した次式 (3) を発破振動レベル推定式として用い、式 (3) での W, K の値を、施工計画時、試験発破時および本施工時において補正を行いながら、発破振動が振動レベル管理基準値を満たすように管理を行っている。

$$VL=20 \cdot \log_{10} (K \cdot W^a \cdot D^{-b}) + 85 \quad (3)$$

ここに、W は装薬量 (kg)、D は発破中心からの距離 (m)、K, a, b は定数である。この式 (3) は、発破振動のような一過性の波動を対象とした国松らの式<sup>10)</sup>を用いた。

しかし、式 (3) での発破振動レベルに影響する定数の中でK値は発破方法や地盤の特性などによって変化する不確定な要因を含んでいるため、このK値の設定によって予測値と計測値が大きくばらつくことがあり、発破振動レベル管理上問題がある。従っ

て、①発破振動レベルのばらつきは何故起こるのか、②発破振動レベルを制御するには、どの要因をどのように管理すれば良いのかを求めることは、よりばらつきの少ない合理的な発破振動レベル管理を目指す上で重要な課題となる。

## (2) 発破振動のバラツキの要因の絞り込み

発破振動のばらつきを少なくするためには、ばらつきに影響を与えている支配的な要因を制御することであるが、制御できる要因と制御できない要因がありそれらを絞り込む必要がある。雑喉<sup>11)</sup>はK値を

$$K=C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \quad (4)$$

の形で表しており、以下のように示されている。

- ①振動源にかかわる要因 (C<sub>1</sub>: 発破工法等の種別による要因, C<sub>2</sub>: 破碎効果の良否によって変わる要因, C<sub>4</sub>: 装薬される爆薬の種類による要因)
- ②伝播経路にかかわる要因 (C<sub>5</sub>: 発破域に対する受振点の方向の差により変わる要因)
- ③受振点にかかわる要因 (C<sub>3</sub>: 受振点の地盤状況の差異により変わる要因)

これらから、②と③はばらつきに大きく影響する要因として考えられるが、明かり発破の場合多くは発破箇所や受振点が広範囲に存在するため制御することは困難である。しかし、ある程度地盤特性を把握することで、K値の受振点の地域毎の分類(層別化)ができると考える。①については、C<sub>1</sub>の盤打ち発破とベンチカットの工法の違いによるばらつきの差異が大きく、これらを層別化することができる。

以上、ばらつきを大きく支配する要因を絞り込んだ上で、その他の制御できない要因による発破振動のばらつきを変動係数として振動レベル予測式に取り込み、この変動係数を考慮した管理手法の確立を試みる。

### a) 受振点の地盤特性、伝播経路特性要因

図-3, 4に3m盤打ち発破と6m盤打ち発破のX,Y,Z地区別の振動レベルと水平距離の関係を示す。図中で、X,Z地区の分布を回帰直線で、また、Y地区の分布を破線で範囲を表した。これを見ると、計測を行った3地区の中でY地区の振動レベル値が他の2地区のものと異なり低い値を示している。Y地区は、X地区、Z地区に比べ発破箇所に近く、しかも発破対象土量が最も多いのはC-9エリアであり、距離・発破頻度から最も条件が厳しい地区であるはずなのに、発破振動レベル計測値が低く、また発破振動に対する苦情も少なかった。地質調査報告書、地形図及び現地踏査の調査結果から、①地質

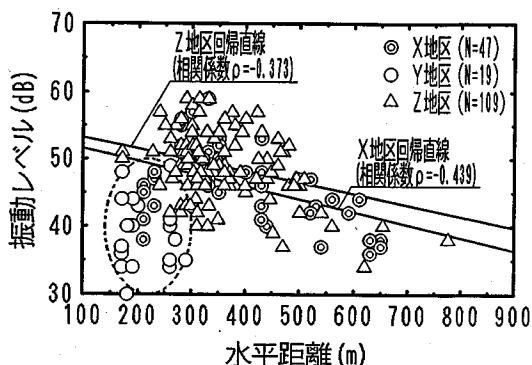


図-3 3m盤打ち発破の振動レベルの分布

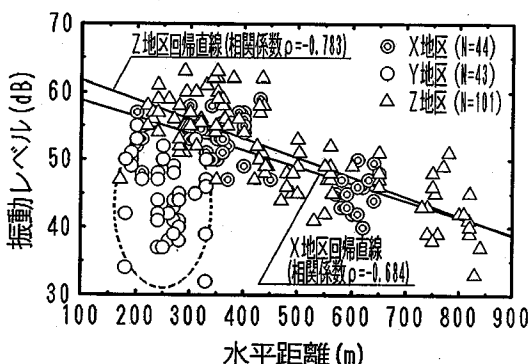


図-4 6m盤打ち発破の振動レベルの分布

表-6 工種別振動レベルの変動係数

工 種		$\delta$
3m盤打ち発破	一段一孔	0.080
	一段多孔	0.092
6m盤打ち発破	一段一孔	0.065
6mベンチカット	一段一孔	0.042

特性として、X,Z地区は基盤岩の上に沖積段丘堆積物・崖錘性堆積物や二次ローム堆積物が厚さ10~16m程堆積している被覆層の上に位置している。それに対し、Y地区は被覆層が薄く周囲は基盤岩の細粒凝灰岩が露頭している比較的硬い地盤部分の上に位置しているため、Y地区の方が振動が小さくなったと考えられた。また、②Y地区付近に、Y地区とC-9発破箇所を結ぶ線上にはほぼ直交するような形で、破碎幅1m程の断層が地質調査から認められる。溝による振動低減効果の事例が報告されている<sup>12)</sup>ように、この断層が振動を低減させた可能性も考えられる。以上の結果からY地区は他の地区と違った地盤特性要因によって振動レベルの低下が生じたと考え、K値の各地区毎の分類(層別化)が



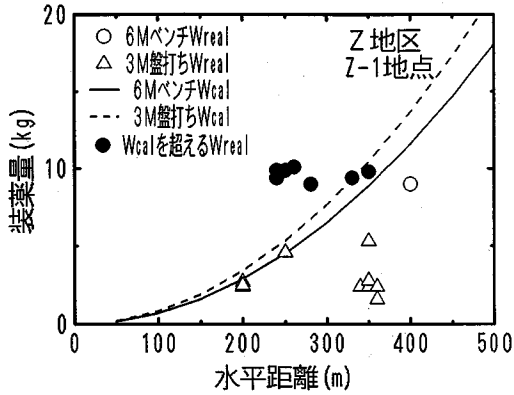


図-5 Z地区 Z-1地点におけるWcalとWreal

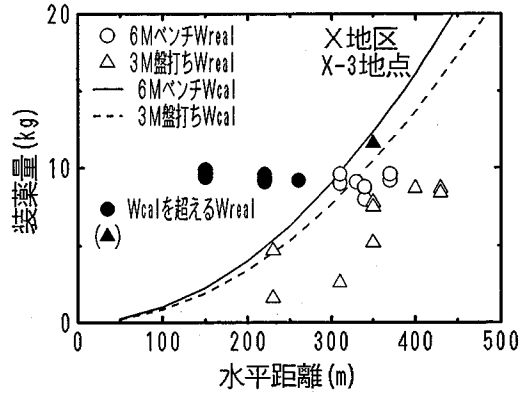


図-7 X地区 X-3地点におけるWcalとWreal

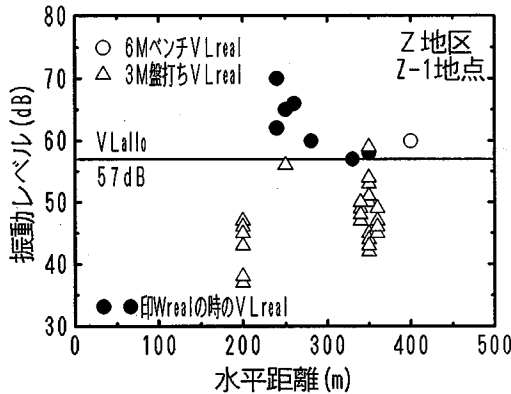


図-6 Z地区 Z-1地点におけるVLalloとVLreal

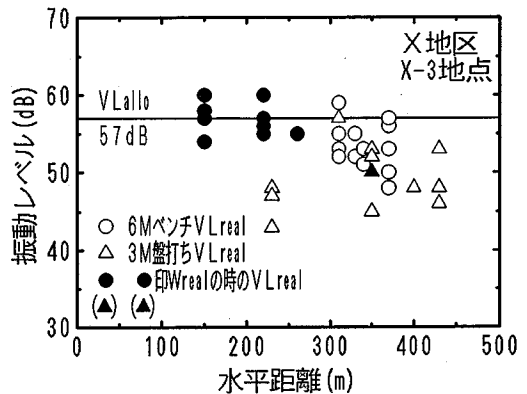


図-8 X地区 X-3地点におけるVLalloとVLreal

必要と考える。

また、施工場所に応じて伝播経路が変わることから、施工時計測データを基に逐次K値を変更することで、伝播経路特性を考慮すべきと考える。

### b) 発破工法による要因

発破源にかかわる要因として、発破工法等の種別によるばらつきの要因が考えられる。盤打ち発破とベンチカットでは、1自由面発破と2自由面発破の差があり、発破振動のばらつきもそれらの影響を受ける。しかし、発破振動のばらつきは地区毎(受振点)にはあまり影響を受けず、工種別の影響が大きかった。そのため工種別に実測された振動レベルより、その変動係数を求め、分類(層別化)を行う。

表-6に、各地区の代表的な工種別の振動レベルの変動係数を示す。

### c) その他の要因

上記の要因の層別化によって絞り込まれたその他の要因による振動のばらつきは、管理できない要因によるばらつきとして、前項の工種別に層別化した変動係数に包括させると考え、本研究で提案する管

理手法の中の変数(変動係数)に、この変動係数を用いる。

### (3) 確率論手法による発破振動レベル管理手法

発破振動は制御できないあるばらつきを持っており、現行の発破振動レベル予測式に基づく発破振動レベル管理においても計測される振動レベルはあるばらつきを持つことになる。人体感覚に与える影響を考慮した評価基準を発破振動レベル管理値として、その管理値を越える確率をある値以下に管理すれば、住民生活に与える影響も許容限界以下になるという考えに基づき、以下の確率論に基づく管理手法を適用する。

本手法の基本モデルは、吉岡・宮地他<sup>13)</sup>が提案している確率論手法に基づく発破振動管理手法を応用したもので、発破振動レベル(以下VL)の分布が正規分布であると仮定して、計測されるVLがある許容値VLallo(今回の評価基準値に基づく管理基準値)を越える確率を一定値(Pa)以下にする管理手法で、Paはδを変動係数とすると次式で表さ

れる。

$$P(VL_{Lallo} \leq VL) = \Phi(\infty) - \Phi\left(\frac{VL_{Lallo} - VL_{mean}}{\delta \cdot VL_{mean}}\right) = Pa \quad (4)$$

ここに、添字 mean は平均を表す。 $\Phi(\infty) = 1$  より、

$$VL_{mean} = \frac{VL_{Lallo}}{1 + \delta \cdot \Phi^{-1}(1 - Pa)} \quad (5)$$

この  $VL_{mean}$  を次式に代入し、薬量  $W$  を決定する。

$$VL_{mean} = 20 \cdot \log_{10}(K \cdot W^a \cdot D^{-b}) + 85 \quad (6)$$

ここで、発破振動の苦情が最も多かった Z 地区 Z-1 地点の 1989 年 3 月の計測データを用いて、3m 盤打ち発破と 6m ベンチカットについて上記手法に基づいた計算値と実測データとの比較シミュレーションを行い、当管理手法の実施工への適用の有効性の検証を試みた。ここに、変動係数 ( $\delta$ ) と K 値はシミュレーションに用いたデータ以前に記録された計測値から求めた。Pa は、実際の施工にあたって考える標準的な値を基に 5% に、また、許容値  $VL_{Lallo}$  は 4. の結果より 57dB (苦情発生限界値) とした。

図-5 は水平距離を横軸に装薬量を縦軸に、式 (6) に示す本手法に従って計算された装薬量  $W_{cal}$  (図中では、6m ベンチカットは実線で、3m 盤打ち発破は破線で示す) と実測データの実装薬量  $W_{real}$  との比較を示す。図-6 は水平距離を横軸に振動レベルを縦軸に、図-5 の実装薬量のデータと対応する実測の振動レベル値  $VL_{real}$  と管理基準値 (許容値  $VL_{Lallo}$ ) との比較を示す。また、これらの図中に、計算された装薬量  $W_{cal}$  より多い実装薬量  $W_{real}$  とこれに対応する実測の振動レベル値  $VL_{real}$  を●印でプロットした。

これらの図から 6m ベンチカットの実装薬量  $W_{real}$  が計算された装薬量  $W_{cal}$  より多いものが多く、このとき実際に計測された振動レベル  $VL_{real}$  も許容値  $VL_{Lallo}$  を越えているのが多いのが分かる。これに対し、3m 盤打ち発破の場合、実装薬量  $W_{real}$  はすべて計算された装薬量  $W_{cal}$  以下であり、振動レベルも許容値  $VL_{Lallo}$  を越えているものがほとんどない。この例で示したように、計算された装薬量  $W_{cal}$  より多い装薬量のときに、発生する振動レベルが管理基準値 (許容値  $VL_{Lallo}$ ) を越えており、

発破振動苦情が多く発生しており家屋の被害も発生したものと考えられる。

次に、時に発破振動に対する住民の訴えがあった X 地区 X-3 地点の 1988 年 12 月と 1989 年 1 月の計測データを用いて、3m 盤打ち発破と 6m ベンチカットについて同様な計算値と実測データとの比較シミュレーションを行った。図-7 に計算された装薬量  $W_{cal}$  と実測データの実装薬量  $W_{real}$  との比較を、図-8 に振動レベル実測値  $VL_{real}$  と管理基準値 ( $VL_{Lallo}$ ) の比較を示す。また、これらの図中に、計算された装薬量  $W_{cal}$  より多い実装薬量  $W_{real}$  とこれに対応する実測の振動レベル値  $VL_{real}$  を●印または▲印でプロットした。

6m ベンチカットは水平距離 260m 以内において装薬量  $W_{cal}$  に比べ過装薬であり、振動レベル実測値  $VL_{real}$  も管理基準値 ( $VL_{Lallo}$ ) を越える確率が多くなっているのが分かる。また、それ以外で振動レベルが管理基準値を越えているものもあるが、確率 95% の管理目標には管理されていることになる。

これに対して、3m 盤打ち発破はほぼ計算された装薬量以下に実装薬量があり、発生した振動レベルも管理基準値内に収まっている。以上のことから、本手法の管理手法としての有効性が分かり、また、管理基準値 (許容値  $VL_{Lallo}$ ) と苦情発生との相関から、発破振動レベル管理基準値としての今回の評価基準の妥当性も確認できた。

## 6. まとめ

本研究の結果は次のようにまとめられる。

1) 従来の発破振動に対する評価単位である最大速度振幅とは別に、実施工における発破振動に対する住民の苦情のデータを基に振動レベルの観点から発破振動が住民の生活環境に与える影響を評価することができた。その結果、振動レベルを用いた生活環境への発破振動の評価基準として以下のような振動レベルによる分類ができた。

53dB 以下 苦情なし、住居内振動認知なし  
53dB ~ 57dB 苦情なし、振動の体感ほとんどなし  
57dB ~ 61dB 苦情あり、振動の体感少しあり  
61dB ~ 67dB 苦情多くあり、振動の体感多くあり  
67dB 以上 苦情多くあり、軽度な物的被害あり

2) この分類は、環境庁による振動の影響と振動レベルの関係等との比較からその妥当性が得られ、国松らによる振動レベルによる発破振動の区分とよく一致することが確認できた。

3) 発破振動のばらつきに影響する要因の絞り込みを行った上で、絞り込まれたばらつきを包括する変動係数を用いて、今回の分類に基づく評価基準を発破振動レベル管理値として、確率論に基づく管理手法の提案を行った。

4) 本手法に基づき求められた許容装薬量と実装薬量との比較シミュレーションの結果、実装薬量が許容装薬量に比べ過装薬の時、振動レベル実測値も管理基準値を越える確率が多くなり、実装薬量が許容装薬量以下の時は、振動レベル実測値も管理基準値を越える確率が少ないことが分かり、本手法の有効性を明らかにすると共に、管理基準値としての今回の評価基準の妥当性も確認できた。

## 7. あとがき

本研究の結果より、従来の最大速度振幅を用いた評価基準とは別に、振動レベルによる評価基準を用いた確率論に基づく管理手法が、ばらつきの要因を多く含んだ発破振動の管理において合理性をもち、発破振動に対する生活環境の影響との相関もよいことを明らかにした。今回は、発破振動苦情に関するデータの収集の難しさから、1現場のデータしか調査が行えなかったが、今後、別の現場でのデータの収集を積み重ねたいと考えている。

謝辞：本研究の資料の収集・調査にあたり（株）青木建設横浜支店土木部石樽 潔氏、清家善助氏および坂本浩之氏の御支援を得た。また、計測に際し大阪ロック開発（株）橋口純秀氏および植木三男氏の御助力を得た。記して謝意を表す。

## 参考文献

1) 建設省：環境政策大綱， pp.8-13， 1994.

2) 日本規格協会編：日本工業規格 振動レベル計， JIS C 1510.

3) Wiss, J.F. : Effects of blasting vibrations on building and people, Civil Engineering-ASCE, pp.46-48, July, 1968.

4) 工業火薬協会編：新・発破ハンドブック，山海堂， pp.372-374， 1989.

5) 雑喉 謙：発破振動の周辺への影響と対策，鹿島出版会， pp.8-13， 1984.

6) 石井康夫，西田佑，中野雅司，坂野良一：最新発破技術，森北出版， pp.154-155， 1984.

7) 湯田坂益利：土木施工一計画と施工技术一，土木学会編，新体系土木工学 99，技報堂， p.70， 1981.

8) 国松 直，井清武弘，三浦房紀，中川浩二：振動レベルによる発破振動の震度区分に関する考察，資源・素材学会誌，VOL.107， No.7， pp.81-86， 1991.

9) たとえば，公害防止の技術と法規編集委員会編：公害防止の技術と法規・振動編，産業公害防止協会， p.25， 1985.

10) 国松 直，三浦房紀，今村 威，中川浩二：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 / VI -8， pp.134-141， 1988.

11) 雑喉 謙：発破振動の周辺への影響と対策，鹿島出版会， pp.14-21， 1984.

12) たとえば，オロフソン，S.O.：最新発破技術ハンドブック，最新発破技術ハンドブック編集委員会訳，山海堂， p.217， 1992.

13) 吉岡幸雄，宮地明彦，古川浩平，中川浩二：確率論手法に基づく発破振動管理手法に関する一提案，土木学会論文集，第 403号 / VI -10， pp.199-208， 1989.

(1994. 8. 5受付)

## A STUDY FOR THE BLASTING VIBRATION CONTROL AND THE CRITERION BASED ON EFFECTS OF BLASTING VIBRATION LEVEL ON PEOPLE

Takahisa SHIOTSUKI, Masahiro HASHIZUME,  
Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

In urban and suburban area, rock blasting is often used in tunnelling and formation of housing site, however engineers are often faced with vibration complaints. In this paper, we show the new criterion using vibration level for blasting vibration control, depending on the record of vibration complaints and the measurements of blasting vibration level at a resident area. According to the above criterion, we propose the method of blasting vibration control based on probabilistic approach.