

住民感覚に及ぼす発破振動影響の 評価尺度に関する研究

橋爪正博¹・塩月隆久²・古川浩平³・中川浩二³

¹正会員 (株)大林組 本店土木工務部 (〒540 大阪市中央区北浜東4-33) (研究当時 山口大学大学院生)

²正会員 工博 (株)青木建設 研究所 土木研究室 (〒300-26 茨城県つくば市大字要36-1)

³正会員 工博 山口大学 工学部 社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

市街地近郊でのトンネル工事あるいは宅地造成工事等の建設工事において発破工法を用いる場合、その発破振動が住民感覚に及ぼす影響を合理的に評価する必要がある。しかしながら、発破振動は、その特殊性から振動規制法の対象とされず、明確な評価基準が存在しないのが現状である。本研究では、発破振動値が有するばらつきを考慮した上で、重量シミュレーションを用いて発破振動波形を創出する。さらに創出した発破振動波形から振動レベルを求め、発破振動の評価尺度である PPV_{max} および VL_{max} の特性を明らかにする。そして、そのシミュレーションで得られた特性に関する結果を基に、環境問題として捉えた場合の、管理側から見た発破振動の評価尺度に関して検討を行う。

Key Words : rock blasting, blasting vibration, environmental evaluation, vibration control

1. まえがき

社会基盤の開発を進めていく上で、人口の集中した地域での建設工事は避けられない状態にある。このような中、市街地近郊での建設工事においては、環境問題に対する住民意識の変化に伴い、生活環境に及ぼす影響評価の重要性がますます大きくなってきている。

一般に発破工法は、建設工事において硬岩掘削が必要な場合、短期間で多量の掘削が可能であることから多用されてきている。しかしながら、発破が有する特性ゆえに、振動および騒音等を引き起こす問題点もある。近年、市街地近郊でのトンネル工事や宅地造成工事等、発破を用いた建設工事が増加してきている中、発破により生じる振動および騒音が問題となることが多い。特に、生活環境に及ぼす影響評価の重要性が高まってきている今日では、発破を用いた建設工事においても、その振動および騒音が、住民感覚に及ぼす影響を的確に予測・評価することが求められている。

発破振動の評価尺度については、従来より様々な研究がなされてきている¹⁾。これまでは、発破振動

が、発破区域周辺での既存構造物に与える影響が問題とされることが多かったことから、振動の最大速度振幅(PPV)による管理が主流とされてきた。しかし、上述のように最近の発破振動問題の多くは、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(VL)²⁾が用いられることも多い。

しかし、発破振動の場合には、その特殊性から振動規制法の対象とされず、明確な規制基準は存在しない。そのため、発破振動の管理にあたっては、周辺住民との合意の基に、自主管理値を設けて管理を行っているのが現状である。

一方、発破振動は、発破工法および発破箇所の地盤条件等の要因によって大きくばらつき、これらの要因の制御の難しさから、その予測あるいは管理を困難にさせることが多い。そこで筆者らは、発破振動速度のばらつきにかかわる要因を捉え、その要因が発破振動速度全体の分布に及ぼす影響の度合いを明らかにしてきた³⁾。

このように、発破振動速度が有する特性、言い換えれば、その評価尺度の一つであるPPVの特性に関しては、これまで多く論じられてきている。しかし

ながら、振動レベルによる評価が増加してきているにもかかわらず、発破振動が有するばらつきを基にした発破振動レベルの特性評価に関する研究は、あまり示されておらず、さらに、発破振動に対するPPVおよびVLの特性を把握した上で、住民感覚に及ぼす影響評価の観点から発破振動評価尺度として比較検討した研究はされていないのが現状である。

本研究では、発破振動が住民に及ぼす影響を合理的・定性的に把握するために、発破振動が有するばらつきを基に、重畳シミュレーションを行い、任意の多段多孔発破に起因する発破振動波形を創出する。さらに創出した振動波形を振動レベル記録に変換し、発破振動の評価尺度であるPPV_{max}およびVL_{max}の特性を明らかにする。そして、そのシミュレーションで得られた特性に関する結果を基に、環境問題として捉えた場合の、管理する立場で見た発破振動の評価尺度に関する検討を行うものである。

2. 発破振動を創出する重畳シミュレーション

(1) 発破振動を支配する要因

一般に、発破振動の予測式として下式が用いられている⁴⁾。

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

ここに、PPVは発破振動速度波形の最大速度振幅、Wは装薬量、Dは発破点から受振点までの距離、a、bは定数である。また、Kは発破条件、地盤条件等によって決まる定数であり、雑喉はこのKの項(K値)を以下のように整理している⁵⁾。

$$K = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \quad (2)$$

ここに、

- C₁: 発破工法等の種別による要因
- C₂: 破碎効果の良否によって変わる要因
- C₃: 受振点の地盤状況の差異により変わる要因
- C₄: 装薬される爆薬の種類による要因
- C₅: 発破域に対する受振点の方向の差により変わる要因

このように発破振動は、それにかかわる多くの要因に支配されている。そして、発破振動を創出するにあたっては、発破振動にかかわる要因を抽出し、各要因が発破振動に及ぼす影響を把握する必要がある。

筆者らは、これら要因を発破振動を管理する上で問題となるものとそうでないものとに整理した。そ

の結果上記C₁~C₅の中で、その要因の制御・管理が困難であると考えられる破碎効果の違いによる要因(要因C₂)を捉え、そして、その要因により影響を受けた速度振幅のばらつき、速度波形パターンの違いを、現場での実測データより明らかにしてきた。また宮地ら¹⁾が明らかにした雷管の起爆秒時誤差を加えて、それらが発破振動全体のばらつきに及ぼす影響の度合いを重畳シミュレーションにより明らかにすることを試みている³⁾。

(2) 重畳シミュレーション手法

通常、発破工法においては、段当たり多数孔の段発破が用いられる。この時、各段での発破振動波形は、多数孔の振動源からの振動が相互に重畳、干渉しつつ伝播し、観測点における波形が形成されると考えられる。即ち、発破振動波形は、上述した発破振動を支配する要因を考慮した単発の発破振動波形を段当たり孔数分重ね合わせることにより得られる。

本研究において、任意の多段多孔発破に起因する振動波形を創出するにあたっては、上述した考えに基づく重畳シミュレーションを用いている。このシミュレーションでは、任意の発破に対して、発破振動を管理する立場から見た管理パラメータである

- 1) 段当たり孔数(N)
- 2) 使用段数(I)

を用いている。また発破振動の大きさの分布に影響を及ぼす要因として、筆者らはその影響を明らかにした以下のパラメータを

- 3) 雷管の起爆秒時誤差
- 4) 速度振幅のばらつき
- 5) 速度波形パターンの違い

考慮している。尚、シミュレーションは、各ケース当たり1000回の波形を創出して行っている。

以下に、重畳シミュレーションの手順を示す。まず、任意の段番号(i)における段当たり孔数(N)の発破に起因する振動速度波形を創出する。つまり、段当たり孔数(N)に応じた個々の発破孔から発生する単発の発破振動速度波形を筆者らが明らかにした代表的な発破振動速度波形パターン(5パターン)³⁾の中から乱数を用いて発生させる。その速度振幅は、速度振幅のばらつき³⁾を基に正規乱数を用いて与えられる。またその起爆秒時は、段番号(i)に対する雷管の起爆秒時誤差¹⁾に基づき正規乱数により与えられる。この手順を段当たり孔数(N)分繰り返す、これらN個の速度波形を重ね合わせることにより、任意の段番号(i)における段当たり孔数(N)の発破に起因する振動速度波形が求められる。これを対象とす

表-1 発破振動特性評価のためのシミュレーションケース

シミュレーション ケース	初段雷管	発破パターン		目的
		使用段数	各段の段当たり孔数	
1	0 瞬発 (DS1)	18段	1~N (各段同じ)	単純な発破パターンに起因する振動を対象、段当たり孔数のみを変化させ、段当たり孔数が評価尺度に及ぼす影響を評価
	1 段発 (DS2)	17段	1~N (各段同じ)	
2	0 瞬発 (DS1)	変化	1~N (段番号により変化)	トンネル掘進発破における複雑な発破パターンに起因する振動を対象、その発破パターンが評価尺度に及ぼす影響を評価
	1 段発 (DS2)	変化	1~N (段番号により変化)	

る全段番号に対して行うことにより、任意の多段多孔発破に起因する振動速度波形を求めた。尚、発破振動速度波形パターン、速度振幅のばらつき、起爆秒時誤差については文献³⁾を参照されたい。創出した一回の発破における段発発破振動速度波形の各段の最大速度振幅PPVの最大値をPPV_{max}としている。

また、振動レベル記録については、単発の発破振動速度波形に対する発破振動加速度波形を用いて同様の重畳シミュレーションを行い、段発発破振動加速度波形を創出、この加速度波形を振動レベル記録に変換し、記録値の最大値をもって、振動レベルでの評価尺度VL_{max}を得ている。なお、加速度波形の振動レベル記録への変換に際してはレベル計の数値シミュレーションを用いている⁶⁾。また、用いた単発の発破振動速度波形は、シミュレーションの目的上、C₂要因以外の要因の影響をできるだけ除外するために、発破点から100~200mの距離で、かつ、伝播経路及び受振点の地盤状態が発破点とほぼ同じ地盤上の受振点で記録された波形である。

(3) 発破振動速度、振動レベル特性評価のためのシミュレーションケース

発破は、その工法によって段当たり孔数(N)や使用段数(I)が異なってくる。例えば、造成地等の明かり発破においてよく用いられる盤下げ発破工法では、段当たり1孔、2孔を用いた15段、20段の段発発破が用いられる。また、トンネル掘進発破においては、芯抜きから始まり、順次切り上げの段発発破が用いられる。このとき、発破パターンは、破碎効果の観点に基づく削孔パターンおよびその起爆順序により決定される。そのため、各段(i)における段当たり孔数(N)は、段番号により変化するとともに、使用段数も変化してくる。発破に起因する振動の特性も、その工法によって異なってくると考えられる。つまり、発破振動速度PPV_{max}および振動レベルVL_{max}の特

性を評価するにあたっては、管理パラメータである段当たり孔数(N)および使用段数(I)が評価尺度PPV_{max}およびVL_{max}に及ぼす影響を整理する必要がある。

本研究では、管理パラメータの組み合わせにより、表-1に示すシミュレーション1-0, 1-1および2-0, 2-1の計4ケースについて検討した。

尚、シミュレーション1および2において、その速度振幅を与えるにあたっては、1孔当たりから生じる発破振動の最大速度振幅の平均値PPV(1, μ)=0.02(kine)としてシミュレーションを行うこととする。

3. 段当たり孔数一定の発破を対象とした場合の発破振動速度、振動レベルの基礎的特性の把握

(1) 対象発破パターン

シミュレーション1で対象とした各段における段当たり孔数(N)は、段番号に関係なく、

$$N=1, 2, 5, 10 \text{ (孔)}$$

の計4パターンである。シミュレーション1-0では、DS1~DS18の雷管を用いた発破を対象としているのに対して、シミュレーション1-1では、初段を起爆秒時誤差のほとんどない瞬発雷管DS1から若干のばらつきを有する段発雷管DS2に変更、雷管はDS2~DS18を用いた発破を対象とした。

(2) 発破振動速度、振動レベルに段当たり孔数が及ぼす影響

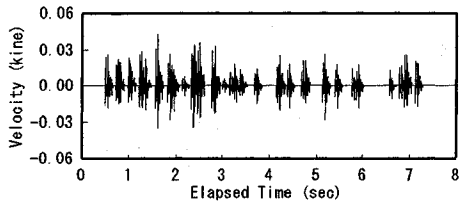
a) 段当たり孔数と発破振動速度PPV_{max}

1) 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合

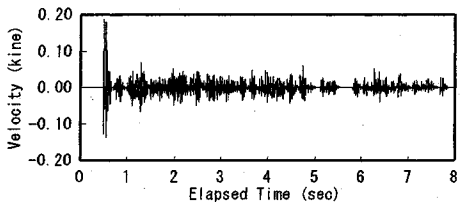
図-1に、初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合の、段当たり2孔および10孔の段発発破による発破振動速度シミュレーション波形の一例を示す。これより、段当たり2孔の場合、各段の振幅はばらつき、その

表-2 段当たり孔数一定の発破を対象とした場合の発破振動速度PPV_{max}シミュレーション結果

段当たり 孔数(N)	初段に瞬発雷管を用いた場合			初段に段発雷管を用いた場合			PPV _{max} 低減効果 PPV _{max} (DS2) /PPV _{max} (DS1)
	PPV _{max} (N, μ) (kine)	重畳孔数 n _{max} (N, μ) (孔)	重畳孔数比 n _{max} (N, μ) /n _{max} (1, μ)	PPV _{max} (N, μ) (kine)	重畳孔数 n _{max} (N, μ) (孔)	重畳孔数比 n _{max} (N, μ) /n _{max} (1, μ)	
1	0.0306	1.53	1.00	0.0306	1.53	1.00	1.00
2	0.0422	2.11	1.38	0.0391	1.96	1.28	0.93
5	0.0867	4.34	2.83	0.0550	2.75	1.80	0.63
10	0.1687	8.44	5.51	0.0731	3.66	2.39	0.43

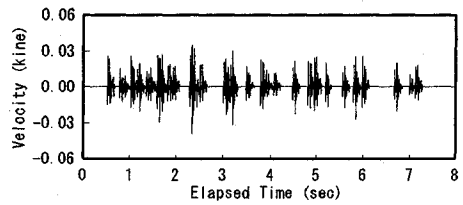


(a) 段当たり孔数2孔

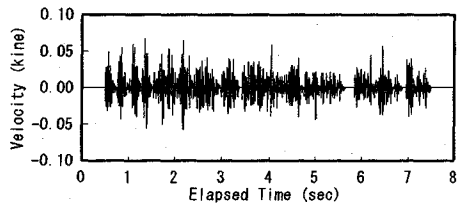


(b) 段当たり孔数10孔

図-1 初段に瞬発雷管を用いた発破振動速度波形

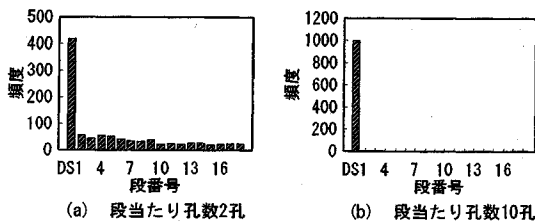


(a) 段当たり孔数2孔



(b) 段当たり孔数10孔

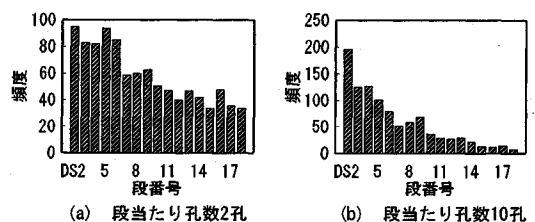
図-3 初段に段発雷管を用いた発破振動速度波形



(a) 段当たり孔数2孔

(b) 段当たり孔数10孔

図-2 初段に瞬発雷管を用いた場合の発破振動速度PPV_{max}を記録した段番号



(a) 段当たり孔数2孔

(b) 段当たり孔数10孔

図-4 初段に段発雷管を用いた場合の発破振動速度PPV_{max}を記録した段番号

中で、5,8,9段目に比較的大きな振動がみられるが、何段目の振動が最大となるかは予想困難なことがうかがわれる。これに対して、段当たり10孔の場合、初段で大きな振幅のピークを持ち、それに比べると2段以降の振幅がかなり小さいという傾向を示している。

瞬発雷管(DS1)を用いた多数孔の発破の場合、各孔から発生する振動の起爆秒時はほぼ一致するため、その発破による振動速度波形の振幅は、段当たり孔数の影響を大きく受ける。即ち、段当たり10孔の発

破における初段の速度振幅のピークは、この瞬発雷管(DS1)に起因するものである。これに比べて段当たり2孔の発破の場合は、波形の時間的な重なりはあってもその他のばらつき要因のため必ずしも初段がPPV_{max}を与えない。

図-2に段当たり2孔および10孔のPPV_{max}を記録した段番号のヒストグラムを示す。これによると、段当たり10孔の場合、PPV_{max}は、シミュレーション回数1000回中1000回が初段で記録されている。これに対して、段当たり2孔の場合、PPV_{max}を初段で

記録したのは、1000回中420回であり、1000回中580回は、2段以降において記録されており先のことが確認される。

ここで、段当たり孔数(N)の段発発破による発破振動速度を、1孔当たりから生じる発破振動の平均的な最大振動速度で除した値を考え、これを重畳孔数と呼び、次式で定義する。

$$n_{\max}(N) = \frac{PPV_{\max}(N)}{PPV(1, \mu)} \quad (3)$$

ここに、

$PPV_{\max}(N)$: 段当たり孔数(N)の多段発破に起因する振動速度 PPV_{\max}

$PPV(1, \mu)$: 1孔当たりの発破から生じる最大振動速度の平均値 (=0.02(kine))

これは、N孔を同段で発破する多段発破において、そのうちのある段で最大n孔分の速度波形が重畳したとする考え方である。

段当たり孔数(N)の発破に対する1000回のシミュレーションにより得られた振動速度の平均値 $PPV_{\max}(N, \mu)$ および重畳孔数の平均値 $n_{\max}(N, \mu)$ について表-2に示す。

初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合、段当たり孔数1孔の発破では、 $n_{\max}(1, \mu)=1.53$ である。対象とした発破の場合、18段の段発発破であるから、1回の発破で計18孔が秒時差を持って起爆され、各々の孔から発破振動が発生する。発破振動の評価尺度である PPV_{\max} は、18孔から発生した発破振動波形の PPV の最大値である。そのため $n_{\max}=1$ とはならず、この場合 $n_{\max}(1, \mu)=1.53$ となっている。

段当たり孔数(N)の発破における重畳孔数を下式を用いて正規化する。ここで、正規化したものを段当たり1孔の発破に対する重畳孔数比と呼ぶ。

$$(\text{重畳孔数比}) = \frac{n_{\max}(N, \mu)}{n_{\max}(1, \mu)} \quad (4)$$

ここに、

$n_{\max}(N, \mu)$: 段当たり孔数(N)の発破に対して得られた重畳孔数の平均値

$n_{\max}(1, \mu)$: 段当たり1孔の発破に対して得られた重畳孔数の平均値

重畳孔数比を表中に併せて示す。これによると、段当たり孔数(N)の発破による発破振動速度 PPV_{\max} は、段当たり1孔の発破と比較すると、段当たり2孔の場合で1.38倍、段当たり10孔においても、5.51倍にすぎないことが見出される。各孔同じ装薬状態で、段

当たり1孔の18段段発発破と、段当たり10孔の18段段発発破とでは、発破にかかわる多くの要因の影響により、10倍となっていないことが理解される。さらに、明かり発破等においては、段当たり1孔、2孔を用いた15、20段の段発発破がよく用いられる。このとき発破振動低減の一手法として、段当たり孔数を、2孔から1孔へと変更することがしばしば見られる。しかしシミュレーション結果より、段当たり孔数を2孔から1孔に変更したとしても PPV_{\max} は1/2に低減せず、1/1.38程度の低減しか見込めないことが理解される。

2) 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合

図-3に、初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の、段当たり2孔および10孔の段発発破による発破振動速度シミュレーション波形の一例を示す。段当たり10孔の場合も、初段に大きな振幅のピークは生じていない。図-4に、初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の、段当たり2孔および10孔の PPV_{\max} を記録した段番号のヒストグラムを示す。これより、段当たり10孔の場合、 PPV_{\max} を初段で記録しているのは、1000回中196回にすぎないことが見出され、初段に瞬発雷管を用いる時との相違が認められる。

ここで、初段に段発雷管(DS2)を用いることによる PPV_{\max} の低減効果を次式で定義する。

$$(\text{PPV}_{\max} \text{低減効果}) = \frac{PPV_{\max}(\text{DS2})}{PPV_{\max}(\text{DS1})} \quad (5)$$

ここに、

$PPV_{\max}(\text{DS2})$: 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の $PPV_{\max}(N, \mu)$

$PPV_{\max}(\text{DS1})$: 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合の $PPV_{\max}(N, \mu)$

表-2中の PPV_{\max} 低減効果にその結果を示す。雷管の瞬発性が PPV_{\max} に及ぼす影響の度合いにより、低減効果も異なってきているが、段当たり孔数が多い発破ではその低減効果は大きく、段当たり10孔の場合は、その低減効果により0.43倍と半分以下になることが分かる。

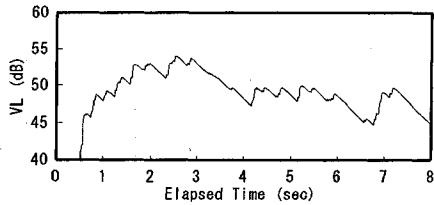
b) 段当たり孔数と発破振動レベル VL_{\max}

1) 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合

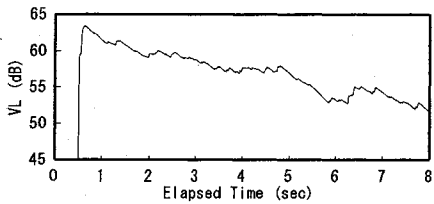
図-5に、図-1に示した初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合の、段当たり2孔および10孔の段発発破に起因する振動速度波形に対する振動レベル記録を示す。前述のように、振動レベルの算出はコンピュータプログラムによる数値シミュレーションによっている。段当たり2孔および10孔の段発発破に起因する振動に対する振動レベル記録を見ると、振動速

表-3 段当たり孔数一定の発破を対象とした場合の発破振動レベル VL_{max} シミュレーション結果

段当たり孔数(N)	初段に瞬発雷管を用いた場合		初段に段発雷管を用いた場合		VL _{max} 低減効果
	VL _{max} (N, μ)	振動レベル差 VL _{max} (N, μ) -VL _{max} (1, μ)	VL _{max} (N, μ)	振動レベル差 VL _{max} (N, μ) -VL _{max} (1, μ)	VL _{max} (DS1) -VL _{max} (DS2)
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
1	49.9	0.0	49.9	0.0	0.0
2	52.6	2.7	52.4	2.5	0.2
5	57.1	7.2	56.1	6.2	1.0
10	62.1	12.2	58.9	9.0	3.2

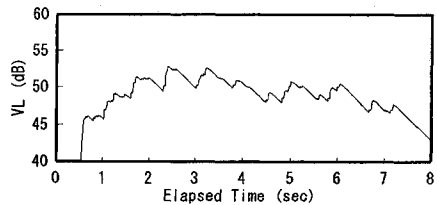


(a) 段当たり孔数2孔

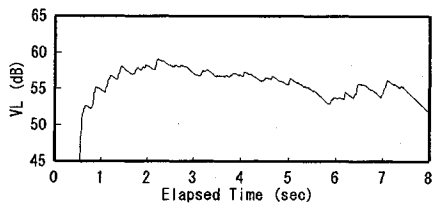


(b) 段当たり孔数10孔

図-5 初段に瞬発雷管を用いた発破振動レベル記録

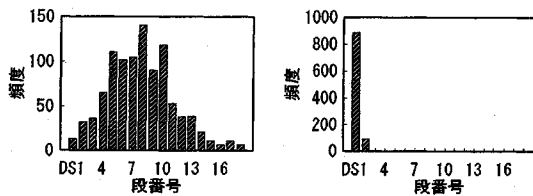


(a) 段当たり孔数2孔



(b) 段当たり孔数10孔

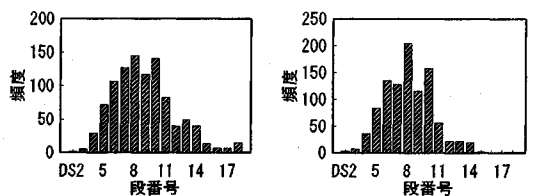
図-7 初段に段発雷管を用いた発破振動レベル記録



(a) 段当たり孔数2孔

(b) 段当たり孔数10孔

図-6 初段に瞬発雷管を用いた場合の発破振動レベル VL_{max} を記録した段番号



(a) 段当たり孔数2孔

(b) 段当たり孔数10孔

図-8 初段に段発雷管を用いた場合の発破振動レベル VL_{max} を記録した段番号

度波形同様、段当たり孔数により形状が異なっていることが認められる。即ち、段当たり2孔の場合、初段から徐々に振動レベル値が増加し、国松らに示されているように⁶⁾約2秒後(8段目)に最大値 VL_{max} を記録している。これに対して、段当たり10孔の場合、初段で振動レベル値は最大値 VL_{max} を記録した後、減衰していく。

図-6に、段当たり2孔および10孔の VL_{max} を記録した段番号のヒストグラムを示すが、これからも、段当たり2孔の場合、5段から10段付近で VL_{max} の多

くが記録されているのに対して、段当たり10孔では、 PPV_{max} 同様、ほぼ初段で記録されているのが認められる。段当たり10孔の場合、振動レベルに対しても、初段で生じた大きな振幅のピークを有する振動速度波形の及ぼす影響が大きいことが理解される。

段当たり孔数(N)の発破による発破振動レベル VL_{max} が、段当たり1孔の発破によるそれと比較してどれほどであるかを、下式による段当たり1孔の場合との振動レベルの差を用いて検討する。

表-4 シミュレーション対象トンネル掘進発破諸元

	断面積 (m ²)	掘進長 (m)	1m ³ 当り 爆薬量 (kg/m ³)	1m ² 当り 孔数 (孔/m ²)	発破 パターン	段当たり孔数\段番号															全孔数 (孔)
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Aトンネル	44.1	1.5	1.03	2.86	パターン01 ⁷⁾	6	8	7	7	7	8	8	6	6	8	14	25	7	7	2	126
	44.1	1.5	1.02	2.99	パターン02 ⁷⁾	6	6	10	6	5	8	8	6	10	10	17	26	6	6	2	132
	44.1	1.2	0.84	2.18	パターン03 ⁷⁾	6	4	7	5	7	8	6	6	3	5	7	18	6	6	2	96
Bトンネル	33.1	1.5	0.80	3.19	パターン04 ⁸⁾	4	5	5	7	8	7	6	16	15	10	7	9	7	4	2	112
Cトンネル	46.3	1.2	1.70	3.89	パターン05 ⁹⁾	6	13	13	13	14	12	11	10	12	13	15	15	15	14	4	180
Dトンネル	52.4	1.8	1.10	2.56	パターン06 ⁷⁾	4	6	14	8	8	14	16	19	17	16	10	2				134
	52.4	1.8	1.10	2.56	パターン07 ¹⁰⁾	4	6	12	8	8	17	13	18	17	17	12	2				134
Eトンネル	43.3	1.8	1.10	3.07	パターン08 ¹¹⁾	6	8	4	13	13	8	14	32	33	2						133
Fトンネル	49.3	2.5	1.04	2.74	パターン09 ¹²⁾	6	6	6	11	10	16	19	22	37	2						135

$$(\text{振動レベル差}) = VL_{\max}(N, \mu) - VL_{\max}(1, \mu) \quad (6)$$

ここに、

$VL_{\max}(N, \mu)$: 段当たり孔数(N)の発破による振動レベルのシミュレーション平均値

$VL_{\max}(1, \mu)$: 段当たり1孔の発破による振動レベルのシミュレーション平均値

表-3にシミュレーション結果を示す。これより、段当たり2孔の場合、+2.7(dB)、段当たり10孔では、+12.2(dB)も、振動レベル値が増大することが見出される。

2) 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合

図-7に、図-3に示した初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の、段当たり2孔および10孔の段発発破に起因する振動速度波形に対する発破振動レベル記録を示す。これより、初段に段発雷管(DS2)を用いることにより、段当たり10孔の場合、その振動レベル記録が段当たり2孔の場合と同様、初段から徐々に振動レベル値が増加し、約1.8秒後(7段目)で最大値 VL_{\max} を記録している。特に、初段の振動レベル値が、図-5に比べて大きく低減していることが見出される。図-8に、 VL_{\max} を記録した段番号のヒストグラムを示す。段当たり10孔の場合、初段に段発雷管(DS2)を用いることにより、5段から9段付近で、 VL_{\max} の多くを記録していることが見出される。

ここで、初段に段発雷管(DS2)を用いることによる VL_{\max} の低減効果を次式で定義する。

$$(\text{VL}_{\max}\text{低減効果}) = VL_{\max}(\text{DS1}) - VL_{\max}(\text{DS2}) \quad (7)$$

ここに、

$VL_{\max}(\text{DS1})$: 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合の $VL_{\max}(N, \mu)$

$VL_{\max}(\text{DS2})$: 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の $VL_{\max}(N, \mu)$

シミュレーション結果を表-3中の VL_{\max} 低減効果

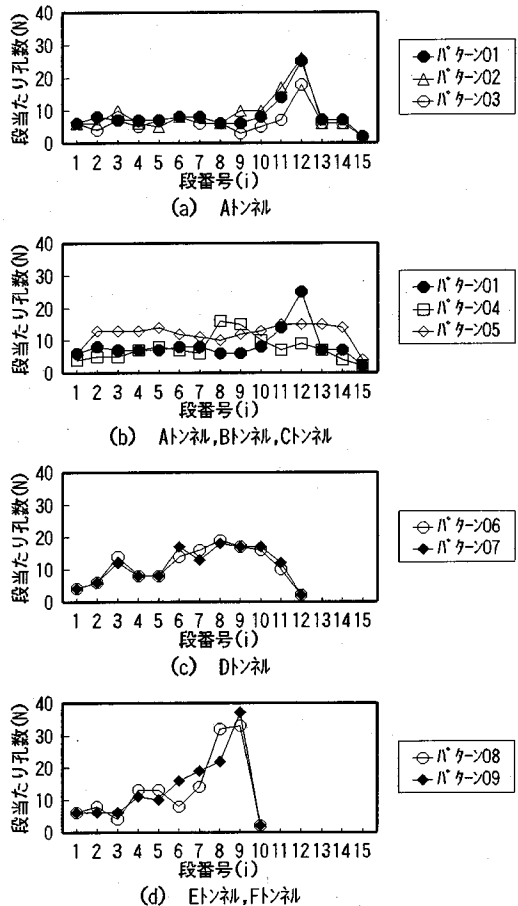


図-9 発破パターン

を示す。これによると、段当たり2孔では、0.2(dB)で、ほとんど低減していないが、段当たり10孔では、3.2(dB)の低減効果が理解される。

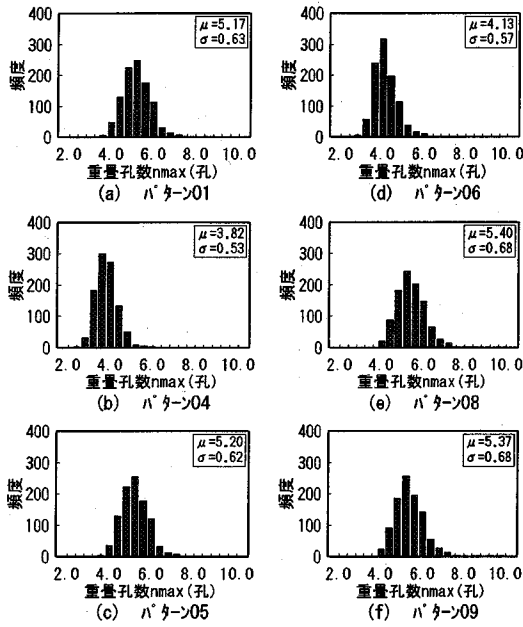


図-10 初段に瞬発雷管を用いた場合の各パターンにおける重畳孔数 n_{max} の分布

4. トンネル掘進発破を対象とした発破振動速度、振動レベルの特性の把握

(1) 対象発破パターン

対象とした発破諸元を表-4に示す。また各パターンにおける段当たり孔数を図-9に示す。これらの発破パターンは、実際のトンネル現場において採用されたもので、表-4に示すように、6トンネル現場(A~Fトンネル)から計9パターン(パターン01~09)を抽出した。各発破パターンの特色として、パターン01~05が15段の段発破、パターン06,07が12段の段発破、パターン08,09が10段の段発破と大別できる。また、全孔数は、パターン03,05で異なるが、他は110~130孔程度でほぼ等しい。パターン05(Cトンネル)は、全孔数=180孔である。これは、発破振動軽減対策として、一発破進行長を抑制し、装薬量を減少させ、1m²当たり削孔数、即ち、全孔数を増加させた場合の発破パターンである。尚、実施工では、初段の雷管は、瞬発雷管(DS1)が用いられている。

またここで、孔当たりの薬量、各孔に対するK値は孔配置にかかわらず便宜上すべて同一として扱うこととする。

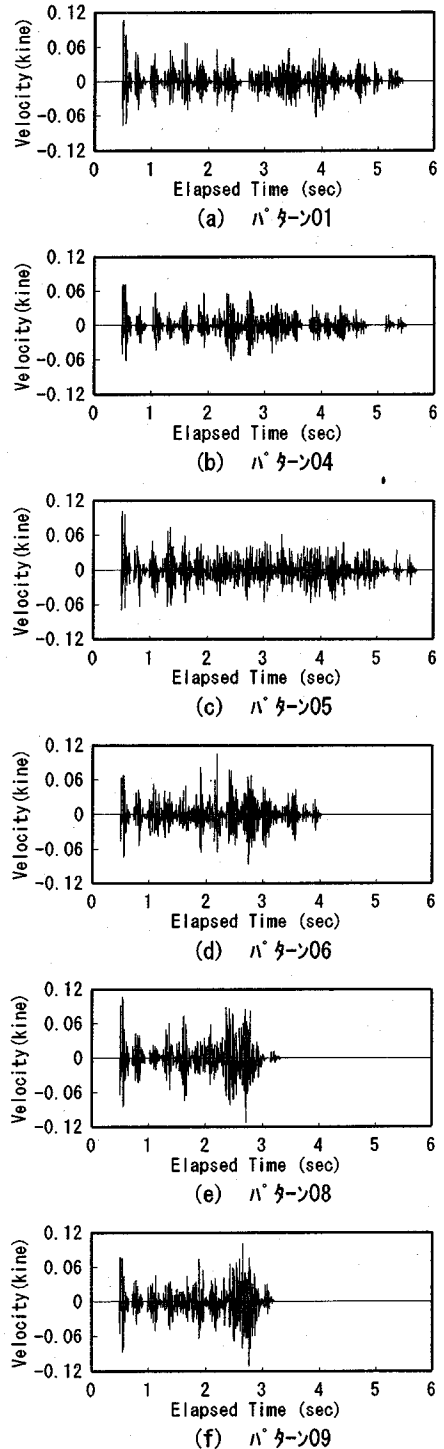


図-11 初段に瞬発雷管を用いた発破振動速度波形

表-5 トンネル掘進発破を対象とした場合の発破振動速度PPV_{max}シミュレーション結果

トンネル	発破 パターン	初段に瞬発雷管を用いた場合		初段に段発雷管を用いた場合		PPV _{max} 低減効果 PPV _{max} (DS2) /PPV _{max} (DS1)
		PPV _{max} (μ) (kine)	重畳孔数 n_{max} (μ) (孔)	PPV _{max} (μ) (kine)	重畳孔数 n_{max} (μ) (孔)	
Aトンネル	パターン01	0.1034	5.17	0.0717	3.58	0.69
Bトンネル	パターン04	0.0763	3.82	0.0682	3.41	0.89
Cトンネル	パターン05	0.1040	5.20	0.0788	3.94	0.76
Dトンネル	パターン06	0.0826	4.13	0.0789	3.95	0.96
Eトンネル	パターン08	0.1080	5.40	0.0925	4.63	0.86
Fトンネル	パターン09	0.1075	5.37	0.0889	4.44	0.83

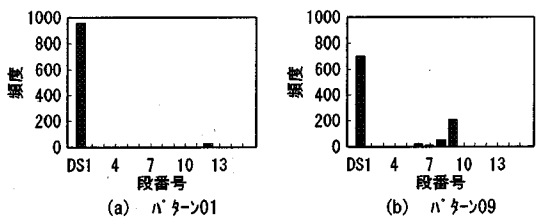


図-12 初段6孔の発破パターンのPPV_{max}を記録した段番号

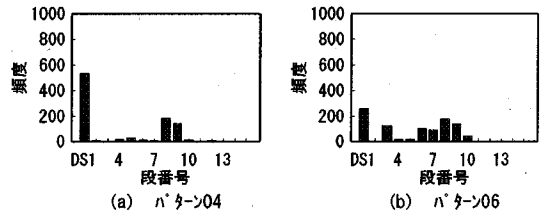


図-13 初段4孔の発破パターンのPPV_{max}を記録した段番号

(2) トンネル掘進発破における発破振動速度、振動レベルの特性評価

a) 発破パターンと発破振動速度PPV_{max}

1) 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合

図-10に、初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合の、各パターンにおける重畳孔数 n_{max} の分布を、ヒストグラムで示す。これより、各パターンとも重畳孔数 n_{max} にして、約2孔程度のばらつきを有しており、その分布は、初段孔数が6孔のパターン01,05,08,09と、初段孔数が4孔のパターン04,06とで、明らかに異なることが見出される。各パターンにおける重畳孔数のシミュレーション平均値 $n_{max}(\mu)$ を、表-5中に示す。尚、これまで重畳孔数および振動レベルのシミュレーション平均値はそれぞれ $n_{max}(N, \mu)$ および $VL_{max}(N, \mu)$ と示してきた。ここで添え字(N)は段当たり孔数一定の発破におけるその孔数(N)を意味するものであり、以降この添え字(N)は省略する。表-5より、初段孔数が6孔であるパターン01,05,08,09が、

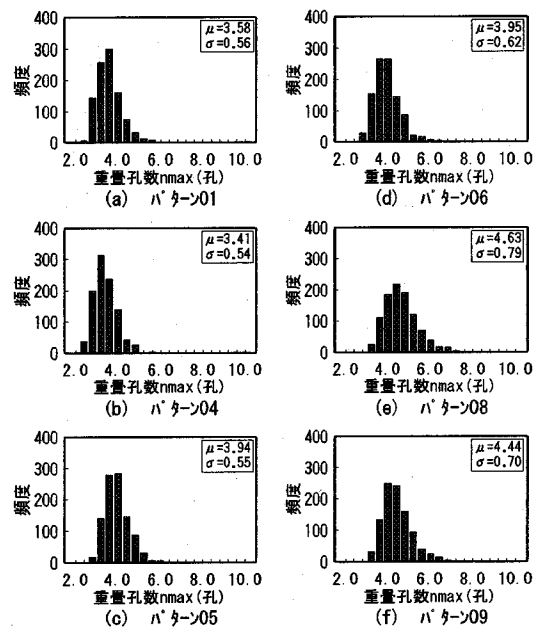


図-14 初段に段発雷管を用いた場合の各パターンにおける重畳孔数 n_{max} の分布

$$n_{max}(\mu)=5.17\sim 5.40 \text{ (孔)}$$

である。また、初段孔数が4孔のパターン04,06が、

$$n_{max}(\mu)=3.82\sim 4.13 \text{ (孔)}$$

である。やはり、初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合、トンネル掘進発破においても、初段の段当たり孔数が発破振動速度PPV_{max}に及ぼす影響が大きいたことが見出される。

図-11に初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合の、異なるトンネル現場における発破パターン01,04,05,06,08,09による代表的な発破振動速度シミュレーション波形を示す。例えば、初段孔数が6孔で等しいパターン01およびパターン09に起因する振動速度波形を見ると、パターン01の場合、初段に大きな振幅

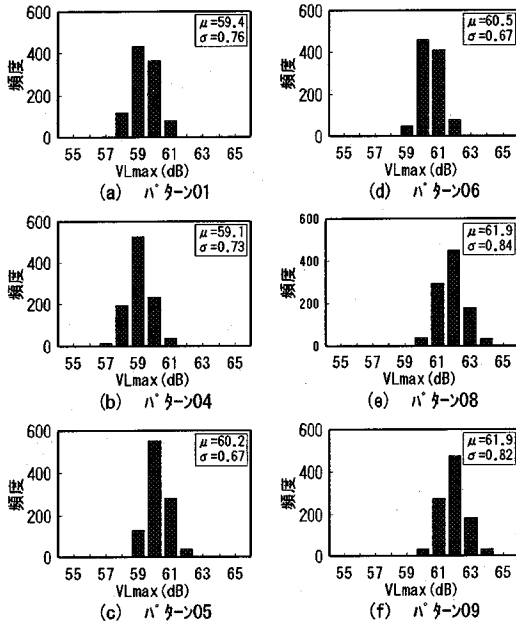


図-15 初段に瞬発雷管を用いた場合の各パターンにおける発破振動レベルVLmaxの分布

のピークを持ち、2段以降の振幅が小さい傾向を示しているのに対して、パターン09の場合、初段のみならず後段においてもピークを持っている。

図-12に、初段孔数が6孔のパターン01,09のPPVmaxを記録した段番号のヒストグラムを示す。パターン01では、PPVmaxを初段で記録したのは、1000回中957回であるのに対して、パターン09では、PPVmaxを初段で記録したのは、1000回中703回であり、1000回中210回は、最大段当たり孔数37孔を起爆している9段目で記録していることが見出される。図-13には、初段孔数が4孔のパターン04,06のPPVmaxを記録した段番号のヒストグラムを示す。初段孔数が6孔の場合と比較すると、瞬発雷管(DS1)に起因する振動が、発破振動速度PPVmaxに及ぼす影響がかなり小さくなっていることが見出される。パターン06では、雷管が有する起爆秒時誤差が比較的小さい3段目に段当たり14孔、また6~10段目にかけては、連続して段当たり14~19孔を起爆している。このような場合、初段でPPVmaxを記録したのは、1000回中261回にすぎないことが見出される。

2) 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合

実施では、初段に瞬発雷管(DS1)が用いられているが、初段を段発雷管(DS2)に変更することにより、発破振動速度PPVmaxがどの程度低減可能であるのか、検討する。図-14に、初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の、各パターンにおける重畳孔数

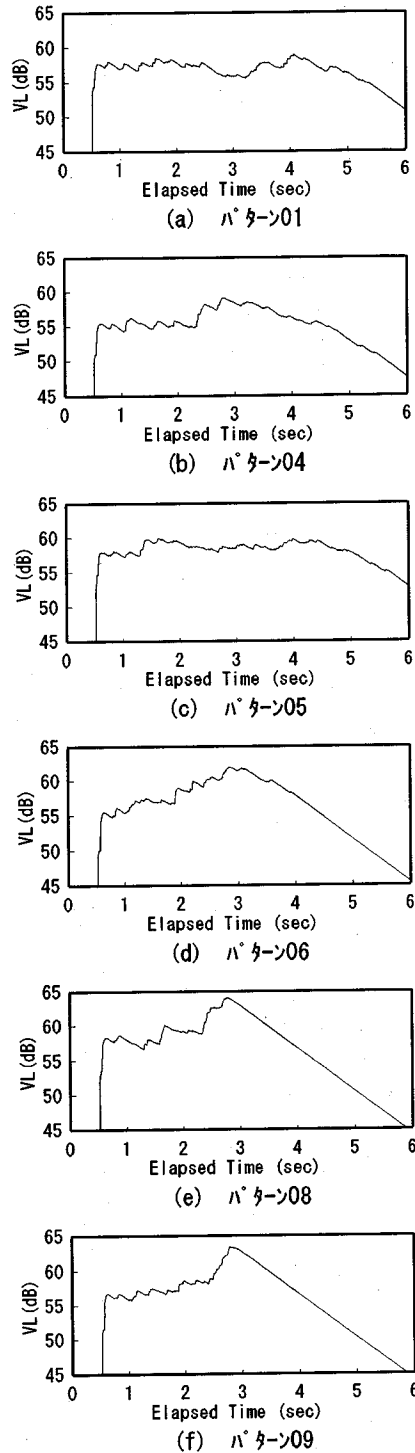


図-16 初段に瞬発雷管を用いた発破振動レベル記録

nmaxの分布を、ヒストグラムで示す。図-10の初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合と比較すると、各パターンによりnmax(PPVmax)の低減効果が異なってきてい

表-6 トンネル掘進発破を対象とした場合の発破振動レベルVL_{max}シミュレーション結果

トンネル	発破パターン	初段に瞬発雷管を用いた場合		初段に段発雷管を用いた場合		VL ₁ 低減効果		VL _{max} 低減効果	
		VL ₁ (μ) (dB)	VL _{max} (μ) (dB)	VL ₁ (μ) (dB)	VL _{max} (μ) (dB)	VL ₁ (DS1) -VL ₁ (DS2) (dB)	VL _{max} (DS1) -VL _{max} (DS2) (dB)		
Aトンネル	パターン01	57.7	59.4	51.4	59.2	6.3	0.2		
Bトンネル	パターン04	54.3	59.1	49.5	58.9	4.8	0.2		
Cトンネル	パターン05	57.7	60.2	51.4	59.8	6.3	0.4		
Dトンネル	パターン06	54.3	60.5	49.5	60.3	4.8	0.2		
Eトンネル	パターン08	57.7	61.9	51.4	61.8	6.3	0.1		
Fトンネル	パターン09	57.7	61.9	51.4	61.7	6.3	0.2		

る。初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の $n_{max}(\mu)$ を、表-5に併せて示す。また、初段に段発雷管(DS2)を用いたことに起因するPPV_{max}の低減効果を、表-5中のPPV_{max}低減効果に示す。これによると、初段孔数が6孔のパターン01では、PPV_{max}が0.69倍に低減しているのに対して、パターン09では、0.83倍にすぎない。さらに、初段孔数が4孔のパターン06では、0.96倍である。上述するように、各パターンにより、初段の瞬発雷管(DS1)に起因する振動が、PPV_{max}に及ぼす影響が異なる。そしてこの影響が小さいほど、PPV_{max}の低減効果も小さい。このように、トンネル掘進発破において、発破振動速度PPV_{max}の低減を検討するにあたっては、初段の雷管のみを変更するだけでなく、発破パターンの変更も必要であることが見出される。

b) 発破パターンと発破振動レベルVL_{max}

1) 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合

図-15に、初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合の、各発破パターンにおける発破振動レベルVL_{max}の分布を、ヒストグラムで示す。各パターンにおけるVL_{max}の分布は、パターン01,04がほぼ59~60(dB)、パターン05,06が60~61(dB)、パターン08,09が61~63(dB)である。パターン08,09を除くと、各段の孔数がほぼ等しいような発破の場合、発破パターンが全く異なるにもかかわらず、その振動レベルVL_{max}は、ほぼ59~61(dB)の範囲内にあることが分かる。段発発破における発破振動レベルVL_{max}は、初段からの振動のデシベルの和をとっていくことから、各段の孔数が比較的等しい発破の場合は、特異な発破パターンを除いてVL_{max}は発破パターンによらずほぼ同じになることが見出される。

図-16に、図-11に示した発破振動速度波形に対する振動レベル記録を示す。他のパターンと比較してVL_{max}がやや高い分布域を示したパターン08,09の振動レベル記録を見ると、一度初段付近で振動レベル値

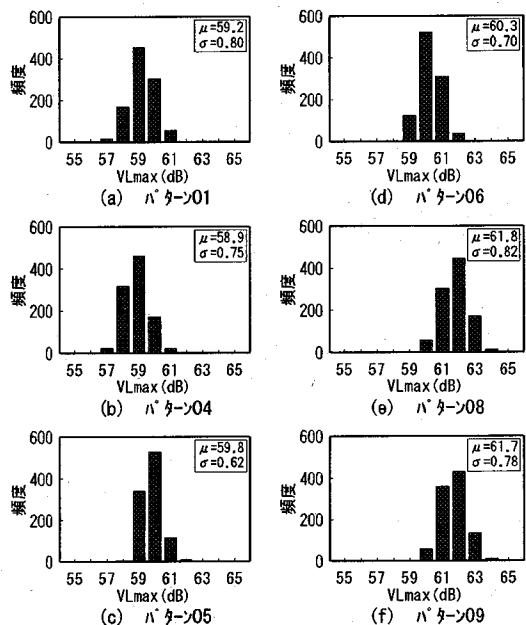


図-17 初段に段発雷管を用いた場合の各パターンにおける発破振動レベルVL_{max}の分布

がほぼ一定を示した後、約2秒後(8段目)より大きく振動レベル値が増加して最大値を示している。パターン08,09の発破パターンは、8段目から9段目にかけてパターン08では計65孔、パターン09では計59孔が起爆されており、振動レベルが大きく増加したのは、集中して起爆したことによることが考察される。これと対比して、180孔を起爆しているにもかかわらずパターン01同様、VL_{max}が60(dB)前後であるパターン05の振動レベル記録を見ると、同じくパターン01同様、初段付近で振動レベルの最大値に近い値を示した後、振動レベル値がほぼ一定を示している。そのパターンは、初段と15段目を除いて、各段の段当たり孔数は、11孔~15孔で一定である。多数孔を起爆する場合にお

表-7 パターン別による重畳孔数 n_{max} の最大値と最小値およびその比

トンネル	発破パターン	初段に瞬発雷管を用いた場合			初段に段発雷管を用いた場合		
		重畳孔数 n_{max} (MAX) (孔)	重畳孔数 n_{max} (MIN) (孔)	n_{max} (MAX) / n_{max} (MIN)	重畳孔数 n_{max} (MAX) (孔)	重畳孔数 n_{max} (MIN) (孔)	n_{max} (MAX) / n_{max} (MIN)
Aトンネル	パターン01	7.29	3.14	2.32	5.87	2.18	2.70
Bトンネル	パターン04	6.60	2.45	2.69	6.19	2.41	2.57
Cトンネル	パターン05	7.29	3.36	2.17	6.10	2.75	2.22
Dトンネル	パターン06	6.68	2.73	2.45	7.24	2.67	2.71
Eトンネル	パターン08	9.19	3.76	2.44	8.68	2.89	3.00
Fトンネル	パターン09	9.42	3.80	2.48	7.18	2.87	2.51

表-8 パターン別による発破振動レベル VL_{max} の最大値と最小値およびそのレベル差

トンネル	発破パターン	初段に瞬発雷管を用いた場合			初段に段発雷管を用いた場合		
		VL_{max} (MAX) (dB)	VL_{max} (MIN) (dB)	VL_{max} (MAX) - VL_{max} (MIN) (dB)	VL_{max} (MAX) (dB)	VL_{max} (MIN) (dB)	VL_{max} (MAX) - VL_{max} (MIN) (dB)
Aトンネル	パターン01	61.8	57.3	4.4	61.8	56.7	5.1
Bトンネル	パターン04	61.4	56.6	4.8	62.1	56.8	5.3
Cトンネル	パターン05	62.4	58.5	3.9	62.2	58.1	4.0
Dトンネル	パターン06	62.6	58.7	3.9	62.9	58.2	4.7
Eトンネル	パターン08	64.6	59.6	5.0	64.7	59.5	5.2
Fトンネル	パターン09	64.6	59.5	5.1	64.7	59.5	5.2

いても、2段以降における各段の段当たり孔数を等しくすることにより、2段以降の振動が VL_{max} に及ぼす影響を小さくすることが可能であることがうかがえる。

2) 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合

初段に段発雷管(DS2)を用いることにより、発破振動レベル VL_{max} がどの程度低減可能であるのか、検討する。図-17に、初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の、各発破パターンにおける発破振動レベル VL_{max} の分布を、ヒストグラムで示す。図-15の初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合と比較すると、 VL_{max} の分布はほとんど変化していないことが見出される。表-6にシミュレーション結果を示す。表-6中の $VL_1(\mu)$ とは、初段振動のみによる振動レベル値のシミュレーション平均値である。

VL_{max} 低減効果の定義に基づき、 VL_1 の低減効果を、次式で定義する。

$$(VL_1 \text{低減効果}) = VL_1(DS1) - VL_1(DS2) \quad (8)$$

ここに、

$VL_1(DS1)$: 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合の $VL_1(\mu)$

$VL_1(DS2)$: 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の $VL_1(\mu)$

その結果を表中の VL_1 低減効果に示す。これより、

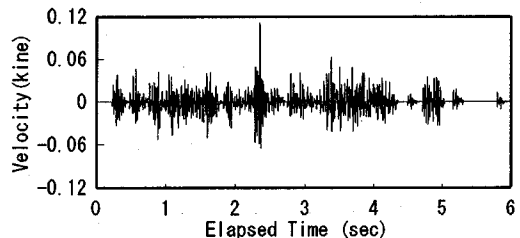


図-18 重畳により衝撃的波動を生じた発破振動速度波形

初段を瞬発雷管(DS1)から段発雷管(DS2)に変更した場合、初段の振動レベル値 $VL_1(\mu)$ は明らかに低減し、その低減効果は、4.8~6.3(dB)である。

しかし、表中の VL_{max} 低減効果を見ると0.1~0.4(dB)である。トンネル掘進発破の場合、発破振動レベル VL_{max} はほとんど低減しないことが見出される。

(3) 発破振動の重畳に対する評価

発破振動の場合、定常振動と異なり、発破振動にかかわる要因により重畳し、図-18に示すような非常に大きな振幅のピークを持つ振動を生じることがある。このような重畳による影響がどの程度である

のか、1000回シミュレーションの最大値(MAX)と最小値(MIN)を用いて検討する。ここで、シミュレーションの最大値と最小値を用いて検討を行うのは、管理できる要因に対して、全く同じ状態を考慮しているにもかかわらず、管理できない要因に起因されて、発破振動がどの程度ばらつくかを、定量的に把握したいためである。

a) 発破振動速度 PPV_{max} に対する検討

表-7に、重疊孔数 n_{max} のシミュレーション最大値 $n_{max}(MAX)$ と最小値 $n_{max}(MIN)$ および最大値と最小値の比 $n_{max}(MAX)/n_{max}(MIN)$ をまとめて示す。これによると、初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合、

$$n_{max}(MAX) / n_{max}(MIN) = 2.2 \sim 2.7 \text{倍}$$

である。さらに初段に段発雷管(DS2)を用いた場合、

$$n_{max}(MAX) / n_{max}(MIN) = 2.2 \sim 3.0 \text{倍}$$

である。

シミュレーション結果より、発破に対する荷の重さ・軽さ、および雷管の起爆秒時誤差に起因して、 PPV_{max} の値は、約2~3倍程度変化することが見出される。

b) 発破振動レベル VL_{max} に対する検討

振動レベルの場合、重疊による衝撃的な波動に対しては、指示特性により振動レベルの平滑化がなされるため、結果的に振動レベル値は、さほど増加しない特性がある。このことを考慮した上で、シミュレーションによる最大値 $VL_{max}(MAX)$ と最小値 $VL_{max}(MIN)$ の検討を行う。表-8に、発破振動レベル VL_{max} のシミュレーション最大値 $VL_{max}(MAX)$ と最小値 $VL_{max}(MIN)$ および最大値と最小値の差 $VL_{max}(MAX) - VL_{max}(MIN)$ をまとめて示す。これによると、初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合、

$$VL_{max}(MAX) - VL_{max}(MIN) = 3.9 \sim 5.1(\text{dB})$$

である。さらに初段に段発雷管(DS2)を用いた場合、

$$VL_{max}(MAX) - VL_{max}(MIN) = 4.0 \sim 5.3(\text{dB})$$

である。表-8より、初段雷管にかかわらず、発破振動レベル VL_{max} の分布が小さいのは、各段の段当たり孔数がほぼ等しいパターン05,06の場合で、約4(dB)程度であることが見出される。

5. 管理側から見た発破振動の評価尺度に関する検討

(1) 発破振動速度 PPV_{max} 、振動レベル VL_{max} が有するばらつきに対する検討

段当たり多数孔を用いた段発発破によるその振動波形は、図-11、18に示すように、各段で生じた振動波形が、発破にかかわる要因の影響により、大き

くばらついた形となる。発破振動速度 PPV_{max} は、計測された発破振動速度波形の速度振幅のピーク値であり、発破振動にかかわる要因の影響が直接反映され、時には重疊により大きなピーク値を示すことがある。例えば、シミュレーションによる発破振動速度 PPV_{max} の最大値と最小値の振幅比をとると、2.2~3.0倍と、非常に大きいばらつきを有することが見られた。

これに対して、段発発破に起因する振動に対する振動レベル VL_{max} は、各段から生じる振動レベルのデシベル和で示される。そして、トンネル掘進発破の場合、段当たり40孔のように集中して起爆する特異な発破パターンを除いて、振動レベル VL_{max} は、発破パターンによらず、約3(dB)の範囲内で、ほぼ一定の値を示すことが見られた。これは一つに、重疊に起因する衝撃的な波動に対する振動レベルが有する指示特性も寄与していると考察される。

以上から、発破振動に対しては、発破振動レベル VL_{max} を管理値として用いることにより、その数値の変動のもつ心理的な影響も含めて発破パターンおよび発破にかかわる要因の影響に左右されにくく、比較的一定な発破振動となり、発破振動管理が容易であると考察される。

また、これまで筆者らは、発破振動を住民感覚に及ぼす影響として捉えた場合の、合理的な発破振動管理に対して検討を行い、その一つの管理手法として確率論を用いてきた¹³⁾。発破振動レベル VL_{max} が、発破にかかわる要因の影響に直接大きく左右されないことは、確率論による合理的な発破設計においても有効であると考察される。

(2) 発破振動低減に関する検討

発破振動を低減する場合、発破振動速度 PPV_{max} を用いた管理では、初段に瞬発雷管(DS1)を用いている場合は初段孔数を少なくすることにより、もしくは初段の雷管を瞬発雷管から段発雷管に変更することにより、容易に発破振動速度 PPV_{max} の低減が可能である。これに対して、発破振動レベル VL_{max} を用いた管理では、特にトンネル掘進発破のような段当たり孔数の多い発破では、初段の雷管の種別また発破パターンによらず VL_{max} はほぼ同じ値をとる。従って、振動レベル VL_{max} を低減させるには、一発破に用いる薬量の低減かあるいは、段数を増やし段当たり薬量を少なくする方法が考えられるが施工上容易でないことも考えられる。

しかしながら発破振動を住民感覚に及ぼす影響として捉えた場合、一般に最初の振動が小さい場合の方が、住民感覚に及ぼす影響は小さく、明かり発破

等においては、受振点より遠い方から起爆する例がしばしば見られる。つまり、初段孔数を少なくし、かつ瞬発雷管を用いないことは、 VL_{max} には反映されないが、一つの効果的手法と考えられる。

6. まとめ

本研究の結果は次のようにまとめられる。

- 1) 発破振動速度 PPV_{max} は、発破にかかわる要因が直接反映され、そのばらつきが大きくなるとともに、時には重畳により大きなピーク値を示すことがある。シミュレーションによる PPV_{max} の最大値と最小値の比をとると、2.2~3.0倍と非常に大きいばらつきを有することが知見された。
- 2) 段発発破に対するその振動レベル VL_{max} は、各段から生じる振動のデシベル和で示される。そのため、初段孔数が非常に多い場合あるいは最大段当たり孔数が30、40孔の場合等の特異な発破パターンを除いて全孔数がほぼ等しい場合、 VL_{max} は発破パターンによらず約3(dB)の範囲内で、ほぼ一定の値を示すことが見出された。
- 3) 初段雷管を瞬発(DS1)から段発(DS2)へと変更した場合、初段の振動レベル値は大きく低減するが、初段からの振動のデシベル和である発破振動レベル VL_{max} はほとんど低減しないことが見出された。
- 4) このことは、振動レベル VL_{max} を低減させるには、初段雷管の変更だけでは有効な方法とは言えず、一発破に用いる薬量の低減があるいは段数を増やし段当たり薬量を少なくするといった方法を用いざるを得ず、その低減が容易でないことが知見された。
- 5) 振動レベルが有する特性の一つに指示特性がある。これにより、重畳によりたまたま生じた衝撃的な大きな波動に対しても平滑化がなされるため、振動レベル値はさほど増加しない。その結果 VL_{max} のばらつきが小さく、シミュレーションによる最大値と最小値の差をとると、例えば、各段の段当たり孔数がほぼ等しいような発破パターンの場合、約4(dB)程度であった。
- 6) この振動レベルの指示特性を構造物に対する発破振動影響の観点から捉えると、その振動の影響を過小評価することとなる。

以上、発破振動速度 PPV_{max} および振動レベル VL_{max} が有する特性を明らかにしてきた。これを基に、住民感覚を対象にして発破振動を管理する側から見た発破振動の評価尺度について検討を行うと、

発破による計測結果のばらつきが少ないため、発破振動レベル VL_{max} が優位であると考察される。

参考文献

- 1) 例えば、宮地明彦、古川浩平、吉川和行、中川浩二：重畳孔数の考え方にに基づくトンネル掘進発破振動の評価について、土木学会論文集，No.480/VI-21，pp.53~62，1993年12月。
- 2) 日本規格協会編：日本工業規格 振動レベル計，JIS C 1510。
- 3) 塩月隆久、橋爪正博、古川浩平、中川浩二：発破振のばらつきの要因分析とこれを考慮した重畳シミュレーションによる振動評価、土木学会論文集，No.534/VI-30，pp.185~200，1996年3月。
- 4) 例えば、日本トンネル技術協会、トンネル爆破技術指針，第5章トンネル爆破に係わる環境技術指針，pp.142~143，1982年2月。
- 5) 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年。
- 6) 国松 直、中川浩二、三浦房紀、今村 威：発破振動における振動レベルの推定，土木学会論文集，No.367/ VI-4，pp.45~51，1986年3月。
- 7) 吉川和行：雷管の起爆秒時誤差を考慮した発破振動の評価，山口大学修士論文，pp.31~34，1993年2月。
- 8) 雑喉 謙：発破振動の周辺への影響と対策，鹿島出版会，pp.48~72，1984年。
- 9) 坂川 勝、森川英雄、武内 登、清水政幸：発破（騒音・振動）の軽減対策，一般国道162号食見トンネル、トンネルと地下，Vol.21，No.6，pp.473~479，1990年6月。
- 10) 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考察，土木学会論文集，No.403/VI-10，pp.199~208，1989年3月。
- 11) 吉見憲一、古川浩平、井澤幸一、中川浩二：節理系岩盤のトンネル掘削におけるスムーズプラスティング効果の検討，土木学会論文集，No.391/VI-8，pp.220~227，1988年3月。
- 12) 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プラスティングに関する研究，土木学会論文集，No.367/VI-4，pp.52~61，1986年3月。
- 13) 塩月隆久、橋爪正博、古川浩平、中川浩二：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，土木学会論文集，No.516/VI-27，pp.143~153，1995年6月。

(1996. 3. 21受付)

**THE STUDY ON EVALUATION UNIT OF BLASTING VIBRATION
BASED ON EFFECTS ON PEOPLE**
**Masahiro HASHIZUME, Takahisa SHIOTSUKI,
Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA**

In urban and suburban areas, rock blasting is often used in tunnelling and formation of housing site, at this time, the considerable effect on people is often a problem, and engineers need to evaluate the effects of blasting vibration on people. In this paper, we carried out a simulation of velocity wave induced by blasting, including factors related to blasting vibration, and cleared characteristic of PPV(the peak particle velocity) and VL(vibration level) as an evaluation unit of blasting vibration. And we investigated evaluation unit of blasting vibration based on the effects on people.