

発破による振動の最大速度振幅と振動レベルの関係に対する一考察

塩月隆久¹・橋爪正博²・古川浩平³

¹正会員 工博 (株) 青木建設 研究所 土木研究室 (〒300-2622 茨城県つくば市大字要36-1)

²正会員 (株) 大林組 広島支店土木工事部 (〒730-0041 広島市中区小町1-25) (研究当時 山口大学 大学院生)

³正会員 工博 山口大学 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

発破による振動の評価尺度として振動レベルが用いられることが多いとなっているが、この場合振動波形が得られない。そのため、加速度を計測して速度に変換し、振動の最大速度振幅と振動レベルの関係式から振動レベルを推定することが多いが、この場合、発破方法の違いが関係式に反映されない。そこで本研究では、重疊シミュレーションにより得られた発破振動の最大速度振幅と振動レベルを用い、発破施工の観点から発破方法の違いによる最大速度振幅と振動レベルの関係について検討する。その結果、初段に用いる雷管の種類、段当たり孔数、発破パターン、振動の継続時間が関係式のA値に及ぼす影響を明らかにした。

Key Words :blast vibration, peak particle velocity, vibration level, detonator

1. まえがき

市街地近郊でのトンネル工事、宅地造成工事等発破工法を用いた建設工事が増加してきている中、発破による振動および騒音が問題とされることが増えてきている。近年では構造物に物的被害が生じるかどうかに加えて、人間に与える精神的不快感等の住民感覚に及ぼす影響が問題となることが多い。

発破振動に対する評価尺度としては、振動の最大速度振幅(PPV)か振動レベル(VL)が用いられる。前者は主として発破による振動が構造物に及ぼす影響評価の観点から用いられるのに対して、後者は、振動が人体感覚に及ぼす影響評価の観点から用いられる。上述したように、最近の発破振動問題は、構造物に対するものに加えて住民感覚に与える影響の方よりも重要視されるようになってきており、振動レベルによる評価が多くなってきている。

振動レベルを振動レベル計で測定することは簡便であるが、振動波形そのものが得られない。そのため振動加速度を計測し、その結果を積分して得られる速度記録を用いることがよく行われている。また過去の測定の多くは加速度計による計測である。振動波形から振動レベルへの変換に際しては、以下に述べるように最大速度振幅と振動レベルとの関係式を用いることがしばしば行われている。

振動の最大速度振幅と振動レベルの関係式として一般に次式(1)が用いられている。

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

ここに、 VLは振動レベル (dB) , PPVは最大速度振幅(kine), Aは定数である。

ここで、周波数8Hz以上の單一周波数の連続正弦振動に対しては式(1)中の定数項Aは理論的にA=91¹⁾となる。

振動レベルによる発破振動管理は、一般に用いられる最大速度振幅の予測式である次式(2)²⁾を式(1)に代入することにより、発破振動レベル推定式として用いている。

$$PPV=K \cdot W^a \cdot D^{-b} \quad (2)$$

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

ここに、 Wは装薬量 (kg) , Dは発破点から受振点までの距離 (m) , K, a, bは定数である。

このように、振動レベルを用いて発破振動管理を行う場合には、式(3)を用いてWを決定することがよく行われているが、この場合式(3)におけるA値の決め方によりWの値が大きく異なるためA値をどのようにして決めるかが重要となってくる。

従来、発破振動の最大速度振幅と振動レベルの関係について多くの検討がなされている。例えば、式(1)中の定数項Aに対して実測データを基に統計的に求めたもの³⁾、また段発発破による振動を単発発破による振動が連続するとした模擬波形により検討を行ったもの等^{4), 5)}がある。しかしながら、最大速度振幅と振動レベルの関係について、発破施工の観点である雷管の違いや発破パターンに基づいて検討を行っているものはない。

これまで筆者らは、発破による振動の評価尺度である最大速度振幅(PPV_{max})と振動レベル(VL_{max})の特性を発破振動が有するばらつきに基づいた重畠シミュレーション^{6), 7)}により検討を行ってきた。本報は、種々の発破方法に対する PPV_{max} と VL_{max} より、両者の関係を表す式(1)中の定数項Aの合理的な決定法を示す。そして、発破振動レベル管理の立場から、発破方法の違いによる PPV_{max} と VL_{max} の関係の把握を目的に検討を行うものである。

2. 従来の研究による最大速度振幅と振動レベルの関係

振動の最大速度振幅と振動レベルの関係は、一般に式(1)で示され、最大速度振幅 PPV が、周波数8Hz以上の单一周波数の連続正弦振動の場合は、式(1)中の定数項Aは理論的にA=91となる。そして、振動レベルを推定するにあたってはこの理論値に基づいてA=91がよく用いられるようである。しかしながら、発破振動の場合、継続時間のきわめて短い衝撃的な振動波形となり、振動レベルが有する指示特性、荷重特性により、A=91では、一般に過大評価となる。そこでこれまで多くの検討がなされている。

例えば、実測データによる検討として、北村³⁾は、トンネル発破現場における実測の最大速度振幅と振動レベルより、A=84を求めており、また国松⁸⁾は、同じくトンネル発破現場での実測データより、A=79を求めており、これに対して、シミュレーションによる検討として、国松⁹⁾は、継続時間Td(sec)を有する任意形状の速度波形の振動レベルと最大速度振幅の関係から

$$A=85+10\log_{10}(1-\exp(-Td/0.63)) \quad (4)$$

を求めており、また段発発破による振動に対しては、清水ら⁴⁾は段発発破によって生じる振動を継続時間0.1秒前後の波群の連続であると見なし、その定数項A=82~84を求めており、

上述の実測データによる検討結果からもわかるよう

に、その値はA=79~84と大きく異なることが見出される。しかもその理由は明らかではない。本研究では、この定数項Aについて発破方法の相違を基に、重畠シミュレーションの結果を用いて検討するものである。

3. 重畠シミュレーションケース

(1) 重畠シミュレーションの概要^{6), 7)}

発破工法においては、段当たり多数孔の段発発破が用いられることが多い。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畠、干渉しながら伝播し、波形が形成されると考えられる。即ち、発破振動波形は、発破振動を支配する要因下で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、上述した概念に基づく重畠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、筆者らがその影響を明らかにした以下のパラメータ

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

を考慮している。3)は雷管自体が持つ起爆秒時のばらつきであり、4, 5)は発破効果の良否によって変わることのばらつきと速度波形パターンの違いである。

発破振動に関しては上記要因以外に岩質や亀裂、さらには受振点の地盤の周波数特性なども影響すると考えられる。岩質や亀裂を直接重畠シミュレーションで表現することは難しいが、岩質や亀裂の有無による発破効果要因の一部はこの重畠シミュレーションで用いる波形パターンの違いや速度振幅のばらつきで表現されている。しかし、岩質全体が軟岩であったり、亀裂が多いなどの条件は、本シミュレーションで用いる波形パターンや振動速度のばらつきには反映されていない。本研究で用いたデータはあくまでも硬岩~中硬岩での発破結果に基づいているからである。

地盤の周波数特性に関してはこのシミュレーションで用いる速度波形パターンが同一地点で観測されたものであるため、余り大きな相違ではなく、周波数特性の違いを明らかにすることは難しい。そのため波形の形は同じであるが、その継続時間を変化させた波形を

表-1 発破振動速度 PPV_{max} と振動レベル値 VL_{max} の関係把握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N		
1	0	瞬発(DS1)	18段	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、 PPV_{max} と VL_{max} の関係を示す定数項Aの基礎的評価
	1	段発(DS2)	17段	N(各段同じ)	
2	0	瞬発(DS1)	変化	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、その発破パターンによる定数項Aの評価
	1	段発(DS2)	変化	N(段番号により変化)	

用いて、擬似的に周波数特性がA値に及ぼす影響を6章で論じる。

以下に、重畠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)⁶⁾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⁶⁾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¹⁰⁾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)分繰り返し、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6)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中の速度振幅の最大値を PPV_{max} としている。

また、振動レベルについては、上述の重畠シミュレーションにより得られた段発発破振動速度波形を用いてレベル計の数値シミュレーション⁵⁾により振動レベル値を求め、その最大値をもって振動レベル VL_{max} を得ている。

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。

(2) 重畠シミュレーションのケース

本研究で用いる PPV_{max} および VL_{max} は、上述の重畠シミュレーションにより得たものを用いている^{6), 7)}。重畠シミュレーションのケースは表-1に示す1-0, 1-1および2-0, 2-1の計4ケースである。ケース1-0, 1-1では使用段数は各々18段、17段(瞬発雷管DS1を用いないため17段)であり、段当たり孔数Nは1~10孔と変化させるが、各段の孔数は一定にした単純な発破

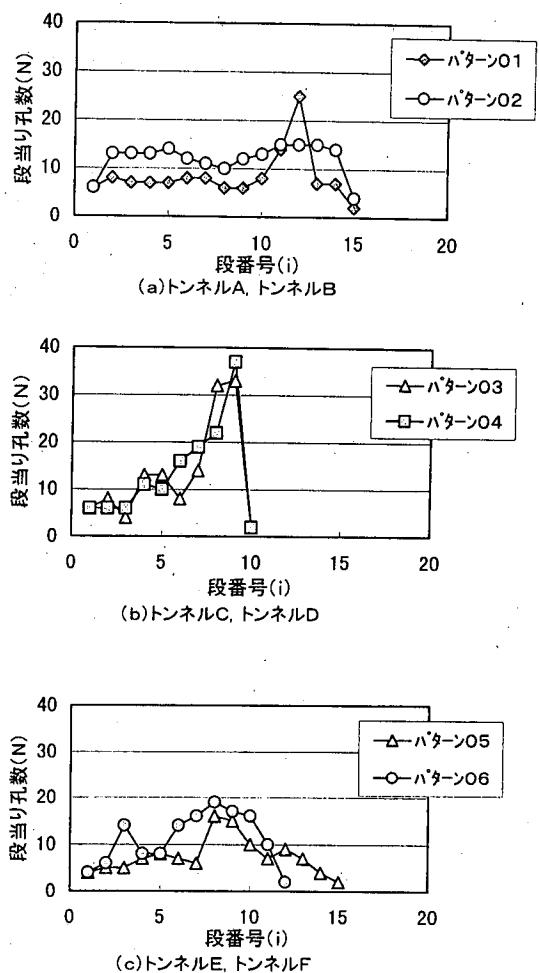


図-1 発破パターン

パターンである。

これに対してケース2-0, 2-1ではトンネル掘進発破における複雑な発破パターンを想定している。実際のトンネルA~Fの発破で用いられた発破パターン(段数、段当たり孔数)を用いてシミュレーションを行った。トンネルA~Fで用いられていた発破パターン

表-2 段当たり孔数一定の発破を対象とした場合の定数項A

段当たり 孔数(N)	初段に瞬発雷管DS1を用いた場合		初段に段発雷管DS2を用いた場合	
	定数項Aの 平均値 $A(N,\mu)$	$A(10,\mu)=77.6$ に 対する振動レベ ルの増加量 $dA(N,\mu)$	定数項Aの 平均値 $A(N,\mu)$	$A(10,\mu)=77.6$ に 対する振動レベ ルの増加量 $dA(N,\mu)$
1	80.3	2.7	80.3	2.7
2	80.2	2.6	80.7	3.1
5	78.4	0.8	81.4	3.8
10	77.6	0.0	81.7	4.1

の代表例をパターン01～06として図-1に示す。トンネルA（パターン01）及びトンネルB（パターン02）は初段孔数6孔、総段数15段である。トンネルC（パターン03）及びトンネルD（パターン04）は、初段孔数6孔、総段数10段である。トンネルE（パターン05）は、初段孔数4孔、総段数15段である。トンネルF（パターン06）は、初段孔数4孔、総段数12段である。

以下、ケース1-0, 1-1を4章で、ケース2-0, 2-1を5章で検討する。また、発破振動の継続時間がPPVやVLに及ぼす影響も(1)ですぐに述べたように大きく、この点については主として6章で検討を加える。

4. 段当たり孔数一定の発破を対象とした場合の定数項Aの検討

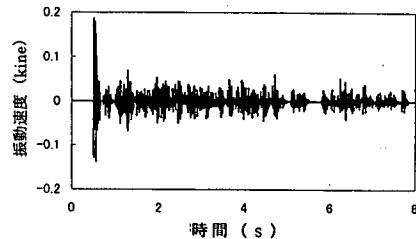
段当たり孔数一定の発破を対象としたシミュレーション（ケース1-0, 1-1）で得られた PPV_{max} と VL_{max} に基づき、式(1)を用いて、式(1)中の定数項Aを求めた。表-2に段当たり孔数(N)を1～10としてシミュレーションを行った定数項Aの平均値（以下、 $A(N,\mu)$ と表現する）を示す。以下、定数項Aについて検討を加える。

(1) 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合

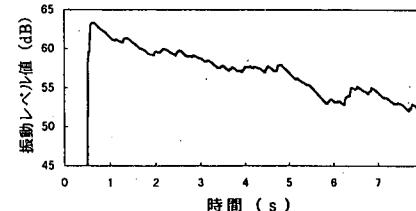
表-2より、段当たり1孔の発破では $A(1,\mu)=80.3$ が得られた。段当たり2孔の発破では $A(2,\mu)=80.2$ であり、両者はほぼ等しい。これに対して、段当たり10孔では、 $A(10,\mu)=77.6$ になっている。段当たり孔数が多数孔になるとほど定数項Aの値が低下していくことが分かる。

図-2(a)に初段に瞬発雷管(DS1)を用いた段当たり10孔の発破振動速度シミュレーション波形の一例を示す。また図-2(b)には、その速度波形に対する振動レベル波形を示す。

図-2(b)より、初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合振動レベル波形は初段で振動レベルの最大値 VL_{max} を記録した後、徐々に減衰していることが分かる。段發

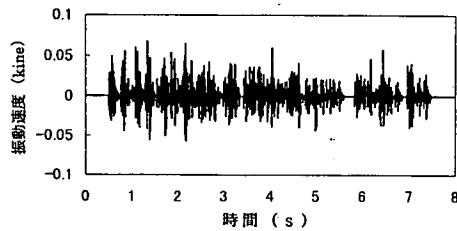


(a) 段当たり10孔の発破振動速度波形の一例

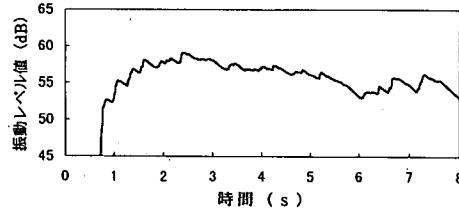


(b) 段当たり10孔の発破振動レベル波形の一例

図-2 初段に瞬発雷管を用いた場合



(a) 段当たり10孔の発破振動速度波形の一例



(b) 段当たり10孔の発破振動レベル波形の一例

図-3 初段に段発雷管を用いた場合

発破による振動の振動レベル VL_{max} は、各段から生じ

る振動のデシベル和の最大値で表される。しかしこの場合、初段の瞬発雷管(DS1)に起因する振動が振動レベルに及ぼす影響が大きく、段発発破でありながら2段以降の振動が VL_{max} に影響を及ぼさなくなっていることが分かる。つまり、最大速度振幅 PPV_{max} と振動レベル VL_{max} の関係は、単発発破による関係とほぼ同じ特性を示すこととなっている。

上述したように、任意形状を有する速度波形の振動レベルと最大速度振幅の関係は、国松ら⁹⁾により検討がなされ、式(4)の形で示される。単発発破に起因する振動の平均的な継続時間は宮地ら¹⁰⁾が実測値から求めているように、ほぼ170ms程度と考えられる。そこで、単一発破による振動の継続時間 $Td=170ms$ とすると、式(4)より、 $A=78.7$ となる。表-2で初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合のシミュレーション結果のA値である $A(N,\mu)=77.6\sim80.3$ と比較するとほぼ等しいことが見出される。

(2) 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合

表-2より、例えば段当たり1孔および2孔の場合を見ると、 $A(1,\mu)=80.3$ 、 $A(2,\mu)=80.7$ となり孔数の増加に伴いわずかであるがAの値が増加する。さらに、段当たり10孔では、 $A(10,\mu)=81.7$ である。初段に瞬発雷管を用いた場合と比較すると、孔数の増加に伴い定数項Aの値が増加していることが分かる。これは初段に瞬発雷管を用いた場合と逆の傾向である。

図-3(a)に、初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の段当たり10孔の発破振動速度シミュレーション波形の一例を示す。また図-3(b)には、その速度波形に対する振動レベル波形を示す。

図-3(b)より、初段に段発雷管(DS2)を用いた場合、その振動レベル記録は、初段から徐々に振動レベル値が増加し、7段目で最大値 VL_{max} を記録している。これは初段に段発雷管(DS2)を用いたため、雷管の秒時誤差により10孔が齊発せず、図-2(a)に比べると初段での発破振動が小さくなり、その結果振動レベル値は初段で最大にならず初段から徐々に増加する形となっている。この初段の振動レベル値と VL_{max} の差は単発発破に対して、段発発破による振動レベルがデシベル和に基づいて増加する増加量と理解される。次にその増加量について検討する。

(3) 段発発破による振動レベルの増加量 $dA(N,\mu)$

段当たり孔数(N)の段発発破におけるA値の、単発発破に対する振動レベルの増加量（以下、 $dA(N,\mu)$ と示す）を下式で定義する。

$$dA(N,\mu) = A(N,\mu) - 77.6 \quad (5)$$

ここに、右辺の定数項77.6は、先の初段に瞬発雷管を用いた段当たり10孔の発破による定数項Aの値である（この場合初段波形の形状は単発波形とほぼ同じで PPV は約10倍となる）。

表-2中の $dA(N,\mu)$ にその結果を示す。この $dA(N,\mu)$ の値が大きいほど、その振動レベル波形が初段から増加する形状を示すことを意味する。例えば、初段に段発雷管(DS2)を用いた段当たり10孔の発破の場合、その増加量は4.1(dB)である。

すなわち、 $dA(N,\mu)$ はある発破が振動レベルから見て単発波形時の $A=77.6$ から周波数8Hz以上の单一周波数の連続正弦振動の $A=91$ までのどのあたりに位置しているかを示している。 $N=1$ の場合、ほぼ同じような波形が7秒間で18段分あり初段を除いた17段分のデシベル和による増加量が2.7(dB)である。図-3(b)に示す初段に段発雷管を用いた段当たり10孔の発破においても、初段を除く16段分（もっとも実際に $dA(N,\mu)$ に寄与しているのは7-8段分だが）のデシベル和による増加量が4.1(dB)になる。

(4) 振動レベル管理側の観点からの定数項Aの評価

以上、得られた定数項Aについて、発破振動レベル管理の観点から評価すると次のようになる。

- ① 明かり発破等でよく用いられる段当たり1孔および2孔の段発発破の場合は、初段に用いる雷管の種類にかかわらず定数項 $A=80.2\sim80.7$ 程度を考慮すればよい。
- ② 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた段発発破の場合、その初段孔数が多数孔になるほど、初段に大きなピークを持つ振動波形となり、振動レベルは初段で最大値 VL_{max} を記録するようになる。そのため PPV_{max} と VL_{max} の関係は、単発発破による関係と等しくなり段当たり10孔の場合は $A=77.6$ を用いればよい。
- ③ 一方、初段に段発雷管(DS2)を用いた段発発破の場合、その振動レベル記録は、初段から徐々に増加して最大値 VL_{max} に至る形状を示す。そのため定数項Aは単発発破の場合と比較して増加し、例えば段当たり10孔の場合では、定数項Aは4.1増加し $A=81.7$ となる。
- ④ このことは、計測した振動レベル記録が、初段付近で最大値 VL_{max} を記録している場合、薬量の設定などで PPV_{max} との関係式を用いるに際して、定数項 $A=78$ 等小さい値を考慮する必要があり、初段から徐々に増加し最大値 VL_{max} に至る場合は、段発発破による振動レベルの増加量 $dA(N,\mu)$ を考慮する必要があることを意味する。

表-3 トンネル掘進発破における定数項A

初段孔数	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
			A(μ)	A(μ)
6孔	Aトンネル	パターン01	79.2	82.2
	Bトンネル	パターン02	79.9	81.9
	Cトンネル	パターン03	81.3	82.6
	Dトンネル	パターン04	81.4	82.8
4孔	Eトンネル	パターン05	81.5	82.3
	Fトンネル	パターン06	82.3	82.4

5. トンネル掘進発破を対象とした場合の定数項Aの検討

段当たり孔数一定の発破と比較するとその発破パターンが複雑であるトンネル掘進発破における PPV_{max} と VL_{max} の関係について検討する。

(1) 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合

図-4に初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合の各発破パターンに対する定数項Aの分布を示す。図中、●印は1000回のシミュレーションから得られたA値の平均値 μ であり、○印は各々 $\pm \sigma$ の範囲を表している。これによると各パターンによりその平均値が大きく異なることが分かる。表-3に各パターンにおける定数項Aのシミュレーション平均値 $A(\mu)$ を示す。これまでには $A(N, \mu)$ 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、これ以後では実際の発破パターンを用い孔数(N)は段毎に一定ではなく、図-1に示すような孔数となるので以降この添え字(N)は省略する。

表-3中、パターン01は $A(\mu)=79.2$ であり、またパターン06は $A(\mu)=82.3$ である。パターン01, 02, 03およびパターン04は初段孔数が6孔であり、パターン05, 06は初段孔数が4孔である。初段孔数が6孔の発破パターンの方が定数項Aは小さい値を示していることが分かる。表-2に示した段当たり孔数一定の結果に基づくと、初段に瞬発雷管(DS1)を用いていることから、初段孔数が多いパターンの方が単発波形に近くそのためAの値が小さくなったと推察される。

図-5に、初段孔数6孔のパターン01および初段孔数4孔のパターン06における振動レベル波形の一例を示す。 $A(\mu)=79.2$ であるパターン01ではやはり初段付近で振動レベルの最大値 VL_{max} を記録している。これに対して、 $A(\mu)=82.3$ のパターン06は初段から徐々に振動レベル値が増加して最大値 VL_{max} に至っていることが分かる。

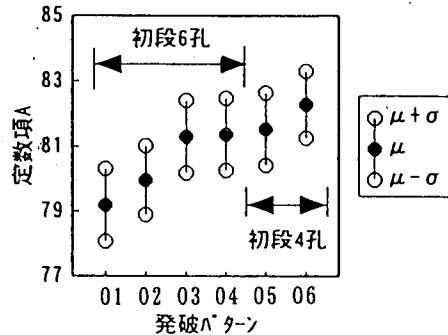
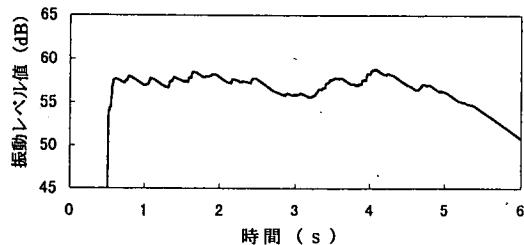
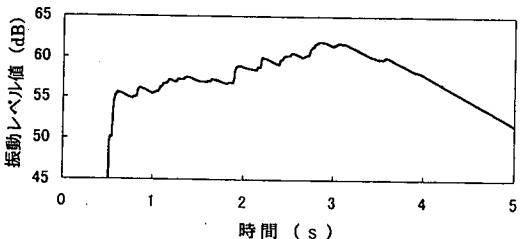


図-4 初段に瞬発雷管を用いた場合の各パターン毎の定数項Aの分布



(a) パターン01



(b) パターン06

図-5 初段に瞬発雷管を用いた場合のパターン01, 06の振動レベル波形の一例

(2) 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合

図-6に初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の定数項Aの分布($\mu \pm \sigma$)を示す。図-4に示した初段に瞬発雷管を用いた場合と比較すると、発破パターンによる定数項Aの分布の違いが少なくなってきたている。

図-7に初段に段発雷管(DS2)を用いた場合の振動レベル波形の一例を示す。図-5と比べて分かるように、いずれもその振動レベル波形は徐々に大きくなる形状となっている。つまり初段に段発雷管を用いた場合、初段に大きな速度振幅のピークを生じることはなくなり、その振動レベルは初段から徐々に増加する形状となるため、パターンによる違いが少なくなったものと考えられる。

(3) 発破パターンと PPV_{max} と VL_{max} の関係

図-4, 6より、初段に瞬発雷管および段発雷管を用いた場合のそれぞれの各パターンによる定数項Aの分布($\mu \pm \sigma$)を見ると、初段に段発雷管を用いた場合にはその分布域はパターンによらず約2程度の範囲内でほぼ同じであり、逆に瞬発雷管を用いた場合には最大速度振幅 PPV_{max} と振動レベル VL_{max} の関係が発破パターンにより固有のものであることが示唆される。

6. 振動の継続時間が定数項Aに及ぼす影響の検討

前報における重畠シミュレーション^{6), 7)}では、単発発破の振動継続時間(Td)を170(ms)としてこれを重ね合わせることによって段発波形を創出している。この継続時間Td=170(ms)は、宮地ら¹⁰⁾に示されているように、公害振動として問題となることが多い発破点からの距離が150~200mの場合における平均的な振動の継続時間を用いている。しかし、振動の継続時間Tdは、発破点からの距離及び受振点の状況(例えば地盤条件など)に応じて変化し、その距離が短くなり、地盤条件が良くなるほど振動の継続時間も短くなる特性がある。

前章では、発破振動速度と振動レベルの関係に、発破パターンが大きく影響を及ぼしていることを述べたが、ここでは、単発発破の振動継続時間Tdの変化が発破振動速度、振動レベル両者の関係に及ぼす影響について検討を行った。

シミュレーションでは単発発破による振動の継続時間Tdを図-8に一例として示すように平均的なTd=170(ms)に加えて、継続時間Td=120(ms)(120/170≈0.7倍)及びTd=255(ms)(255/170=1.5倍)の場合の3つの継続時間

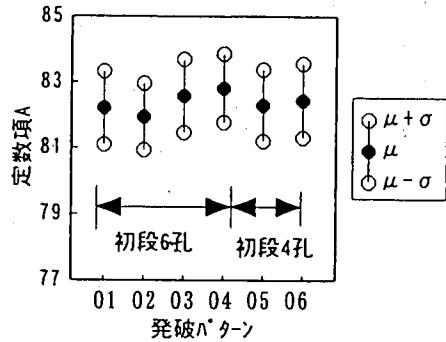
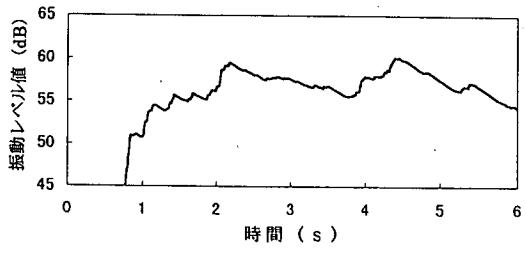
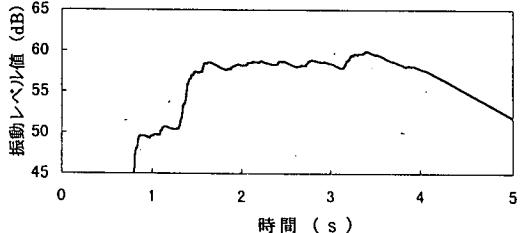


図-6 初段に段発雷管を用いた場合の各パターン毎の定数項Aの分布



(a) パターン01



(b) パターン06

図-7 初段に段発雷管を用いた場合のパターン01, 06の振動レベル波形の一例

を用いて検討を行った。

但し、同じ振動波形のTdを変化させると周波数が変化するなどの問題点が生じるが、単発発破による振動の継続時間等について実測されたデータはほとんどなく、しかも異なった波形パターンの出現頻度まで示したものは筆者らの研究⁶⁾以外に見当たらない。そのため、上述のような問題はあるが文献6)で用いた5つの波形の継続時間Td=170(ms)をそれぞれTd=120(ms)またはTd=255(ms)に変化させて、これをシミュレーションに用いた。

発破パターンは、トンネル掘進発破で初段に瞬発雷管を用いた場合、定数項Aが大きく異なるパターン01, 04(初段孔数6孔)およびパターン06(初段孔数4孔)を

表-4 初段に瞬発雷管を用いた場合の継続時間Tdの変化による定数項

初段瞬発雷管DS1	初段孔数	定数項Aの値			dA(μ,120)	dA(μ,255)
		A(μ,120)	A(μ,170)	A(μ,255)		
パターン01	6	77.3	79.2	81.1	-1.9	1.9
パターン04	6	79.8	81.4	82.9	-1.6	1.5
パターン06	4	81.0	82.3	83.6	-1.3	1.4

表-5 初段に段発雷管を用いた場合の継続時間Tdの変化による定数項

初段段発雷管DS2	初段段数	定数項Aの値			dA(μ,120)	dA(μ,255)
		A(μ,120)	A(μ,170)	A(μ,255)		
パターン01	6	80.8	82.2	83.2	-1.4	1.0
パターン04	6	81.8	82.8	83.8	-1.1	1.0
パターン06	4	81.4	82.4	83.6	-1.0	1.2

対象とした。

(1) 初段に瞬発雷管(DS1)を用いた場合

図-9にパターン01において継続時間をTd=120(ms)およびTd=255(ms)に設定したときの発破振動速度シミュレーション波形の一例を示す。単発発破の振動継続時間の違いが段発発破の波形に大きく影響を及ぼしていることが分かる。特に、Td=255(ms)の場合、各段から生じた振動を分離することが困難なほど連続する波形となっている。

継続時間Td=120(ms), 170(ms)および255(ms)のシミュレーション結果である定数項Aの値をA(μ,120), A(μ,170), A(μ,255)として表-4に示す。また、継続時間の変化が定数項Aに及ぼす影響をdA(μ,Td)として式(6)で定義した。

$$dA(\mu, Td) = A(\mu, Td) - A(\mu, 170) \quad (6)$$

ここで、

A(μ, Td): 継続時間Tdにおける定数項A(μ)の値

A(μ,170): 継続時間Td=170(ms)における定数項A(μ)の値

尚、dA(μ,Td)は、式(6)からも分かるように、継続時間Td=170(ms)を基本としている。表中にdA(μ,Td)を併せて示す。

まず表-4中の継続時間の違いによる変化量dA(μ,Td)の影響を見る。継続時間Tdを0.7倍(≈120ms/170ms)にしたTd=120(ms)のとき定数項Aはすべてのパターンで小さくなりdA(μ,120)=−1.3～−1.9になる。これに対し継続時間を1.5倍(≈225ms/170ms)にしたTd=225(ms)のとき定数項Aはすべてのパターンで大きくなり、dA(μ,225)=+1.4～+1.9となる。

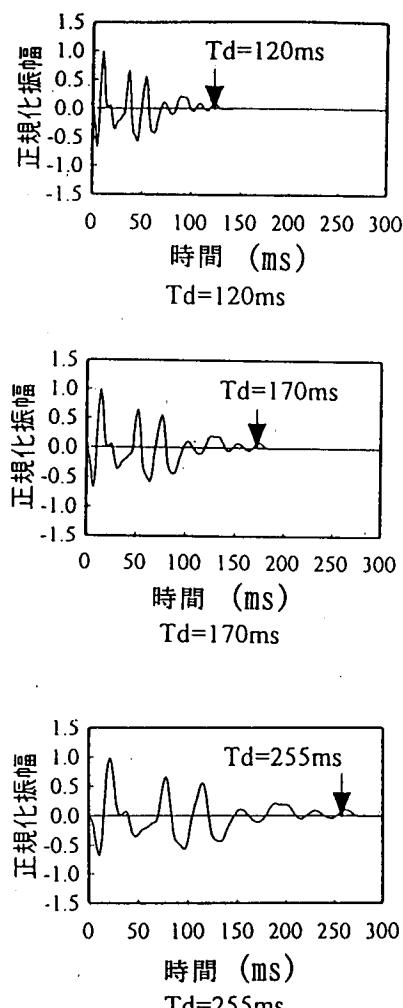
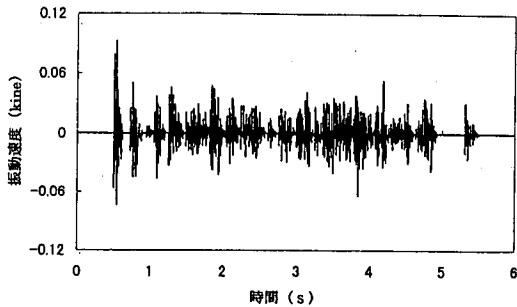
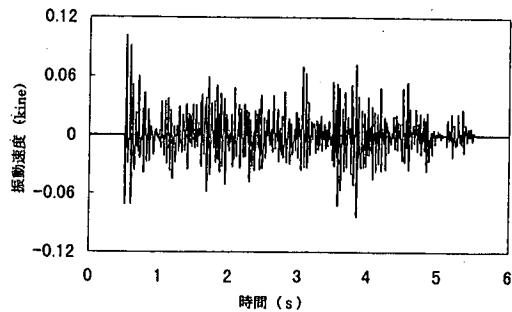


図-8 継続時間Tdの単発発破波形



(a) 繼続時間Td=120ms



(b) 繼続時間Td=225ms

図-9 発破継続時間Td=120, 225 (ms) のパターン01による振動速度波形の一例

次ぎにパターンの違いによる変化量 $dA(\mu, Td)$ の影響を見る。表-4中、パターン01の場合、継続時間Tdの変化による $dA(\mu, Td)$ はその絶対値をとると、 $|dA(\mu, Td)|=1.9$ である。パターン06の場合、 $|dA(\mu, Td)|=1.3 \sim 1.4$ である。継続時間Tdの変化率は、Td=120(ms)に対してTd=170(ms)は $170/120=1.4$ 倍、またTd=170(ms)に対してTd=225(ms)は1.5倍になる。即ち、先の絶対値の値は、単発破による振動の継続時間Tdが1.4~1.5倍変化した場合の定数項Aの変化量、言い換えれば、振動レベルの変化量である。表-4の結果によるとパターンによってその変化量が異なっていることが分かる。

これを基本とした継続時間Td=170(ms)（表-4中のA($\mu, 170$)）で見ると、パターン01の場合A($\mu, 170$)=79.2になり、パターン06の場合A($\mu, 170$)=82.3である。

$A(\mu, 170)=79.2$ とその値が小さいパターン01の場合、即ち、先の図-5(a)で示したように初段で大きな速度振幅のピークを生じその結果初段付近で振動レベルが最大値を記録する場合の方が、継続時間Tdの変化が振動レベルに及ぼす影響は大きいことが分かる。

これに対して、 $A(\mu, 170)=82.3$ とその値が大きいパターン06の場合、即ち、先の図-5(b)で示したようにその振動レベル記録が、各段からの振動のデシベル和をとりながら徐々に増加し最大値に至る場合の方が、継続時間Tdの変化が振動レベルに及ぼす影響は小さいことが見出される。

この理由として振動レベルが有する指示特性が考えられる。パターン01の方が、継続時間Tdの変化による振動レベルの変化が大きかったのは、初段の瞬発雷管DS1で生じた振動が振動レベルに大きく影響を及ぼしているためと考えられる。例えば、継続時間を短くした場合は、その初段の振動波はより衝撃的な波動となるが、その振動レベル値は、指示特性により平滑化がなされ、結果的に定数項Aの値がより低下する。

これに対して、パターン06のように初段から徐々に振動レベル値が増加する場合、初段のみならず、2段

以降の振動も振動レベルに影響を及ぼす。2段以降の振動は、雷管の起爆秒時誤差によって、起爆秒時が一致せず、結果的に、振動の継続時間は増加する。そのため、単発発破の振動継続時間Tdを変化させることによる影響は、初段で振動レベルの最大値を記録する場合（先のパターン01）と比較して小さくなつたものと考察される。

(2) 初段に段発雷管(DS2)を用いた場合

先述の結果を基に初段に段発雷管DS2を用いた場合の検討を行うと、振動レベル波形は、どれも初段から徐々に増加する形であるため、前項で述べた理由から継続時間Tdの変化による影響は少ないと考えられる。シミュレーション結果を表-5に示す。各パターンとも $|dA(\mu, Td)|=1.0 \sim 1.4$ 程度であり先のことが確認される。

(3) 継続時間が及ぼす影響の評価

以上のことから、単発発破による振動の継続時間Tdの変化が、発破振動速度、振動レベル両者の関係に及ぼす影響として、初段の振動が振動レベルに及ぼす影響が大きいほど、継続時間Tdにより定数項Aは大きく変化する。たとえば、初段に瞬発雷管を用いる場合、単発発破による振動の継続時間がTd=120(ms)からTd=255(ms)へと約2倍変化した場合の変化量は $|dA(\mu, 120)|+|dA(\mu, 255)|$ の和で示され、表-4より、パターン01で約4(dB)程度変化する。これに対して、初段に段発雷管を用いる場合のように、振動レベル値が初段から徐々に増加し最大値に至る場合は、継続時間Tdの変化が定数項Aに及ぼす影響は小さく、同じくその継続時間が約2倍変化した場合、表-5より、パターン04, 06では約2(dB)程度である。

7. まとめ

これまでの発破振動レベルによる管理の場合、その予測式である式(1)に対しては、初段に用いる雷管の種類、段当たり孔数、発破パターン等を考慮した検討がなされていなかった。本研究はこれらの影響について重畳シミュレーションを用いて明らかにしたもので、その結果は次のようにまとめられる。

- 1) 明かり発破等でよく用いられる段当たり1孔および2孔の段発発破の場合は初段に用いる雷管の種類にかかわらず定数項A=80.2~80.7程度を考慮すればよい。
- 2) トンネル発破等のように段当たり孔数が多数孔(5~10孔程度)になった場合は、初段に瞬発雷管(DS1)を用いるか段発雷管(DS2)を用いるかにより定数項Aの値は異なる。瞬発雷管を用いる場合はA=77~79程度と小さく見積る必要があり、逆に段発雷管を用いる場合はA=82程度を考慮すべきである。
- 3) 初段に瞬発雷管を用いて段当たり多数孔を発破する場合、発破パターンによる定数項Aの分布域($\mu \pm \sigma$)は、約2程度であり発破パターンにより固有なものであることが示唆された。
- 4) 単発発破による振動の継続時間Tdの変化が振動レベルに及ぼす影響として、その継続時間Tdが短くなった場合、定数項Aの値は低下するのに対して、継続時間Tdが長くなった場合、定数項Aの値は増加する。
- 5) この継続時間Tdの変化が振動レベルに及ぼす影響が大きいのは、初段付近で振動レベルが最大値を記録する場合である。この場合、継続時間Tdが約2倍変化したことによるA値への影響は約4(dB)である。
- 6) 継続時間Tdの変化が振動レベルに及ぼす影響が小さいのは、初段に段発雷管を用いた場合のように、初段から振動レベルが徐々に増加し、最大値に至る場合である。このとき、継続時間Tdが約2倍変化したことによるA値への影響は約2(dB)である。

すでに3.(1)でも述べたように本研究で行った重畳シミュレーションの原データは硬岩~中硬岩での発破結果から得られたものである。そのため本研究の結果はこれらの硬岩あるいは中硬岩での発破に適用するのが妥当であろう。軟岩や亀裂の多い岩盤でのA値については、これらの岩種での発破結果を基に検討すべきものと考えられる。

また、上でも述べたように本シミュレーションの原

データは同一地点で計測されたものであるため、5つの波形パターンの周波数に大きな違いはない。本研究では振動の周波数そのものの違いがA値に及ぼす影響は検討できなかったが、振動の継続時間を変化させることで擬似的に周波数の変化がA値に及ぼす影響を明らかにできた。その影響は初段の瞬発雷管使用の有無と同程度と考えられる。これら本研究で明らかにできなかった要因については、今後データの収集に努め明らかにしたいと考えている。

参考文献

- 1) 例えば、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、1985年。
- 2) 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。
- 3) 北村泰寿：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、No.362/I-4、pp.481~484、1985年10月。
- 4) 清水則一、北村泰寿、桜井春輔：トンネル発破による地表面および家屋の振動測定、建設工学研究所報告、第25号、pp.139~153、1984年。
- 5) 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。
- 6) 塩月隆久、橋爪正博、古川浩平、中川浩二：発破振動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。
- 7) 橋爪正博、塩月隆久、古川浩平、中川浩二：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、土木学会論文集、No.553/VI-33、pp.171~185、1996年12月。
- 8) 国松直：発破に起因する振動の振動レベルに関する研究、京都大学提出学位論文、pp.51~52、1990年11月。
- 9) 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、No.381/VI-8、pp.134~141、1988年3月。
- 10) 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。

(1999. 8. 16受付)

THE RELATIONSHIP BETWEEN PEAK PARTICLE VELOCITY AND VIBRATION LEVEL ON BLAST VIBRATION

Takahisa SHIOTSUKI, Masahiro HASHIZUME and Kohei FURUKAWA

Vibration level (VL) is often used as an evaluation index for intensity of blast vibration on site. However, VL does not indicate an actual wave form of vibration velocity. VL is estimated by peak particle velocity (PPV) obtained from measurements of vibration acceleration, in depending on a relative expression between PPV and VL. On the other hand, differences of blasting methods are not taken into consideration for the relative expression. In this paper, the relative expression between PPV and VL is investigated by means of estimating simulations based on the number of overlapping holes. The A- value of the relative expression is proposed according to such factors as the difference of instantaneous detonator, delay detonator, number of blast-hole, blasting pattern and elapsed time in blast.