

式の勾配(m)および切片(n)を求めた検討もある⁷⁾⁸⁾。

$$VL = m \cdot \log_{10}(PPV) + n \quad (6)$$

いま、式(1)を式(2)に代入し、変形すれば次式のように表せる。

$$VL = (91 + 20 \cdot \log_{10}K) + 20 \cdot \alpha \cdot \log_{10}W - 20 \cdot \beta \cdot \log_{10}D \quad (7)$$

式(7)をもとに、最大速度振幅を介さず直接装薬量と距離から振動レベルを求める関係式を得るために、次式による回帰分析を行い、次式の各係数を統計的に求めることも行われている³⁾⁷⁾。

$$VL = a + b \cdot \log_{10}W + c \cdot \log_{10}D \quad (8)$$

最大速度振幅の予測においてはその最大値のみが問題となることから、振動の最大値を規定している段の段当り装薬量を用いて式(1)から最大速度振幅を予測することは妥当であると考えられる。しかし、通常、発破振動が問題となる現場においては段発発破が行われるため、振動レベルは段発発破による振動の発生間隔(秒時差)の影響も受けることになる。したがって、段発発破において上記のような最大速度振幅や装薬量と距離から振動レベルを求める式が成立するとしてもその関係式は各現場の発破条件、例えば発破パターンや秒時差によって大きく左右された結果として得られているにすぎない。その意味においては、段発発破による振動に対して上記した最大速度振幅や装薬量と距離から振動レベルを求める式を予測式または算出式として使用することは望ましくないといえる。

そこで、筆者ら⁹⁾は段発発破において各段の振動の加速度の振幅および波形が同一で、しかも一定の秒時差(Ti (ms))で繰り返されると仮定して、単発発破によって記録された振動の加速度波形から段発発破による振動の加速度モデル波形を作成し、段発発破の初段と最終段の起爆時間差が2秒以上ある場合について次のような予測式を提案した。

$$VL = VL_s + 8 \cdot \log_{10}(1400/Ti) \quad (9)$$

ここで、 VL_s は単発発破による振動の振動レベルであり、上式の右辺第2項は同一加速度波形が一定の秒時差で繰り返されることによる振動レベルの増加の程度を示す項である。

式(9)は振動レベルの予測において秒時差を考慮しているという点においては発破設計を多少なりとも反映した予測式としてある程度意味があると思われるが、各段の振動の振幅および波形が同じで各段の秒時差が一定であるという大きな仮定を設けており、十分とは言いがたい。したがって、段発発破による振動の振動レベルを事前に、さらにより合理的に予測するための方法が必要と考えられる。

3. DS発破に起因する振動の速度波形からの振動レベルの算出方法

段発発破による振動の振動レベルは各段の振動が重畳せず、各段の振動の振動レベルが既知であるとすれば、次のような手順に従ってそれらの振動レベルの加算、すなわちデシベルの加算から算出することができる¹⁰⁾。

手順①: 図1(a)は実際に記録された単発発破による振動速度波形を秒時差 Ti_1 、 Ti_2 で3波重ね合わせた段発発破による振動速度のモデル波形である。ここで、モデル波形の秒時差は $Ti_1 = Ti_2 = 500$ msとしている。

筆者らは鉛直方向の発破振動の周波数が8Hz~90Hzの範囲にあるとすると、振動レベルが最大速度振幅と振動の継続時間(Td (s))を用いて次式で得られることを示している¹¹⁾。

$$VL = 20 \cdot \log_{10}(PPV) + 85 + 10 \cdot \log_{10}(1 - \exp(-Td/0.63)) \quad (9)$$

ここで、0.63は時定数であり、 Td はVanmarcke and Lai¹²⁾による次式から算出した継続時間である。

$$Td = (2.74)^2 \cdot \bar{I} / (PPV)^2 (S) \quad (10)$$

ここに、 I は速度強度であり、 $V(t)$ を速度とすると次式で与えられる。

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} V(t)^2 dt \quad (11)$$

そこで、まず図中の各波形(WAVE1, WAVE2, WAVE3)の振動レベルを、各波形の最大速度振幅(PPV_1 , PPV_2 , PPV_3)と振動の継続時間(Td_1 , Td_2 , Td_3)を用いて式(9)から算出する。

図1(b)の実線は加速度モデル波形に対して振動レベル計の数値シミュレーションプログラム¹³⁾から求めた振動レベルの時間的変動を示したものである。

手順②: 図1(a)のような段発発破による振動が振動レベル計に入力するとき、その指針は図1(b)の実線のように振動の入力に従って連続的に変化するが、ここでは図1(b)の破線のように各振動の終了時(すなわち、振動が入力した時ではなく、振動の継続時間(Td)だけ経過した後)に集中して入力が行われるものと仮定する。振動レベル計は入力がない場合にはその指針は減衰時定数0.63秒に従って低下する。つまり、図1(b)において振動レベルはWAVE1により点Aで VL_A ($=VL_1$)まで上昇し、その後WAVE2の入力直前(点Bではなく点C)まで減衰する。そして、この瞬間WAVE2の入力によって振動レベルは再度 VL_C まで上昇すると考えられる。このような仮定から、点CにおいてWAVE2の振動が入力される直前の振動レベル VL_C' は時定数0.63秒での減衰特性を表す次式より求めることができる。

$$VL_C' = VL_1 + 10 \cdot \log_{10}(\exp(-(Ta_1 + Td_2)) / 0.63))$$

$$= VL_1 - 6.89 \cdot T_1 \quad (12)$$

ここに、図1(a)に示されているように T_1 は($Ta_1 + Td_2$)であり、WAVE1とWAVE2の秒時差(点Aと点Cの時間差)である。式(12)からわかるように振動レベルは点Aにおける VL_A から点Cの直前の VL_C' まで時間に対して線形に減衰する。

手順③: 複数の振動源による振動レベルはその個々の振動源の振動レベルの和により求められることが明らかにされている¹⁰。一方、WAVE2の入力に対する振動レベルは点Cにおいて上式による VL_C と VL_2 の振動レベルをもつ振動源が同時に入力したと考えるこ

とができる。すなわち、そのときの点Cの振動レベルは VL_C' と VL_2 のデシベルの和を計算することにより求めることが可能である。すなわち、

$$VL_C = 10 \cdot \log_{10}(10VL_C' / 10 + 10VL_2 / 10) \quad (13)$$

以下、手順②、③の繰り返しにより逐次段発発破による振動の振動レベルを求めていくことができる。

図1(b)の●印は計算結果であり、本方法を用いて各点での振動レベルをほぼ正確に評価できることを示している。

4. 段発発破に起因する振動の振動レベル予測方法と手順

発破設計はせん孔、発破、積み込み、運搬、破砕という一連の作業を考慮の上、最も適した大きさに岩盤を破砕することを主体に考えなければならない。したがって、発破振動が問題となる現場での発破設計は図2に示すようなフローチャートに沿って行われると考えられる。ここで、発破係数とは m 当りの装薬量であり、破砕の程度を大きく左右する係数である。このフローチャートに示すように、通常、振動値の予測のために必要な諸係数および変数(K , α , β , Td)を仮定して、発破条件および方法が検討される。

そこで、より合理的に振動レベルを予測するためには、実際の発破設計に則した方法が望ましい。本研究においては3章で示したような段発発破による振動の振動レベルの計算方法をもとに、次のような発破設計を考慮に入れた、段発発破による振動の振動レベルを予測するための方法および手順を示す。

予測手順(1)

発破設計に従って各段ごとの装薬量が決定されているので、最大速度振幅を予測するための係数(K , α , β)を仮定し、式(1)を用いて各段ごとの最大速度振幅を予測する。

予測手順(2)

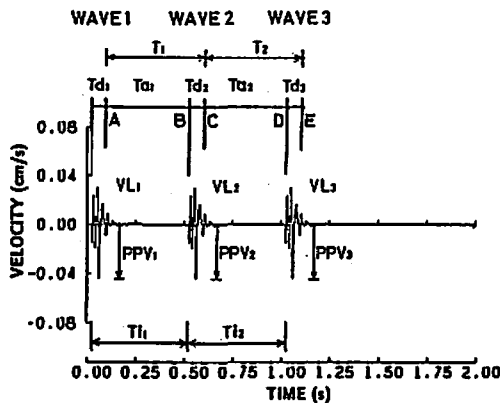
各段の発破振動の振動レベルを最大速度振幅(PPV)と振動の継続時間(Td)を用いて、式(9)により予測する。

予測手順(3)

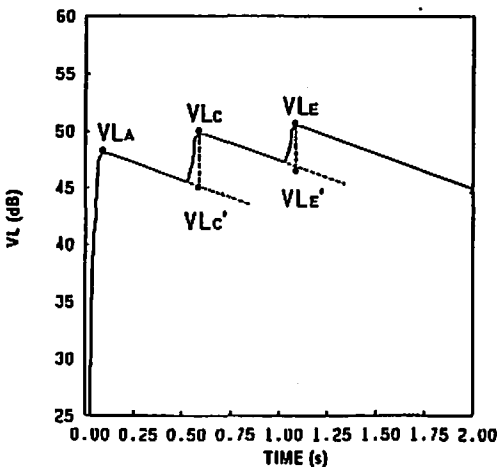
各段ごとの振動レベルと発破設計段階で決定された秒時差を用いて、3章で示した計算手順により段発発破による振動の振動レベルを逐次各段ごとに予測する。

このような手順での予測が各段の振動が重畳しないような段発発破による振動の振動レベルの予測に対してはほぼ妥当であることはすでに前章で示した通りである。また、上記の手順はトンネル掘進発破およびベンチカット発破のどちらにも適用できるものである。

上述の予測手順に従って段発発破による振動の振動レベルの予測を行うとき、予測手順(2)において各段の



(a)



(b)

Fig. 1 Explanation of the procedure predicting the VL for ground motion induced by delayed blasting

(a) A model velocity wave form of delayed blasting vibration,

(b) The time history of the VL.

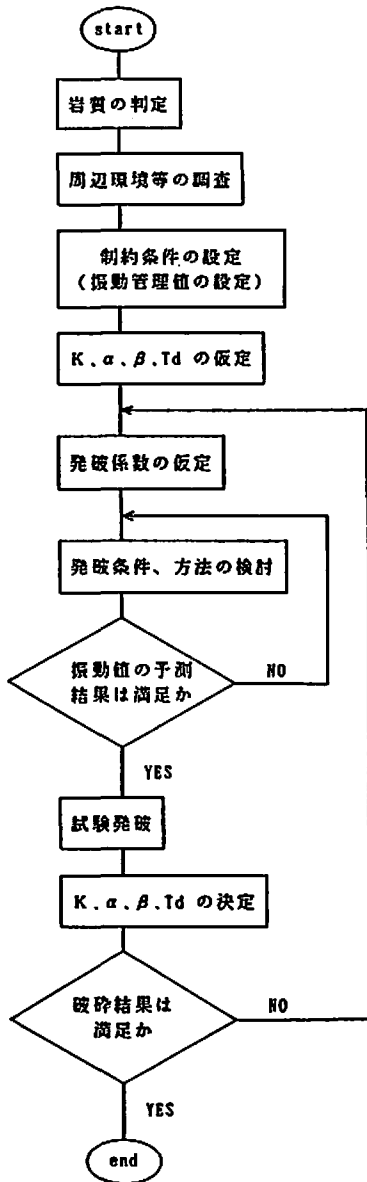


Fig. 2 A flow sheet for blasting design considered control of ground vibration induced by blasting.

振動の継続時間を仮定する必要がある。いま仮に、振動の継続時間を50ms～500msの範囲であると仮定すれば、式(9)の右辺第2項(継続時間に対するレベルの低下量を表す)より低下量は $-11.2\text{dB} \sim -2.6\text{dB}$ と計算され、かなりの幅を持つことになる。したがって、各段の振動の継続時間をどの程度に仮定したらよいかということについての検討が必要となる。

また、上記の手順を各段ごとの振動波形が重畳するような場合、すなわち秒時差が振動の継続時間より短

い場合の段発発破に対して適用した場合における誤差の程度の問題もあげられる。以下の章では、これらの点について検討を行う。

5. 単発発破または斉発発破による振動の継続時間に対する検討

これまで、発破による振動の継続時間について議論、検討した文献は見受けられない。そこで、単発発破による振動の継続時間を評価するため石灰石岩盤上において装薬量0.5, 1.0, 1.5kgの単発発破をそれぞれ5回、計15回行い、爆源からそれぞれ100m, 150m, 200m, 250m離れた位置で振動の加速度を計測した。加速度波形を積分することにより速度波形を求め、それらの速度波形から式(9)を用いて振動の継続時間を算出した。

図3は式(9)を用いて算出された振動の継続時間を距離に対してプロットした結果である。装薬量の変化に対して顕著な差が見られなかったため、図3には各距離に対する全データの平均値(○印)と標準偏差(縦棒)を示している。発破による振動の継続時間は100m～250mの距離において岩盤上では80ms～130msの値となることがわかる。ここで、これらの値を用いて式(9)より振動レベルの低下量を計算すれば $-9.2 \sim -7.3\text{dB}$ となる。いま仮に、振動の継続時間として100msをとれば -8.3dB と計算され、上記の範囲に対して約1dBの誤差で評価できることになる。

表1は種々の現場で記録された単発発破または斉発発破による振動の速度波形から目測により得られたおおよその振動の継続時間を示している。これらの結果からも単発発破または斉発発破による岩盤上での振動の継続時間を100ms程度とする仮定は妥当であるといえる。

また、発破振動が問題となる地域においては一般に住民が生活しており家屋が存在する。このようなところでは岩盤上に表層地盤が堆積している場合が多い。このことは、4章で提案した予測手順に従って表層地

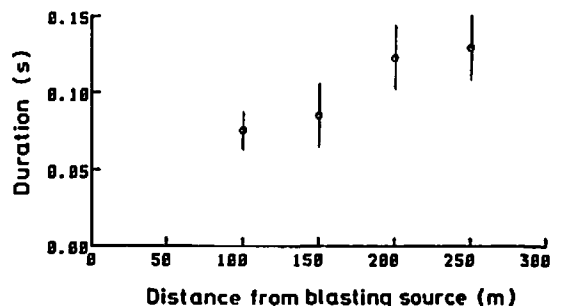


Fig. 3 Relation between the duration and the distance from blasting source for ground motion induced by a single shot blasting recorded on rock.

Table 1 Duration of ground motion induced by a single shot blasting or simultaneous blasting recorded on rock or surface soil at various sites.

No.	受振器の設置箇所	発破の種類	距離 (m)	振動の継続時間 (ms)	備考
1	岩盤	盤打ち	100~250	70~130	石灰岩、単発実験
2	岩盤	トンネル	100~300	50~150	花崗岩、施工記録
3	岩盤	トンネル	200~350	50~150	花崗岩、施工記録
4	岩盤	トンネル	50~100	30~100	花崗閃緑岩
5	地盤	明り	250~300	300~500	採石場、試験発破
6	地盤	明り	950	500	採石場(瞬発)
7	地盤	明り	285、430、450	250以上	造成工事
8	地盤	明り	200	250、350	採石場(DS#1、#5)
9	地盤	明り	100、200、460	80~250	硬岩掘削
10	地盤	トンネル	100~300	100~250以上	施工記録
11	地盤	トンネル	85~125	80~150	施工記録
12	地盤	トンネル	110、120	80~100	施工記録、導水路
13	地盤	トンネル	100、150	250以上	試験発破
14	地盤	トンネル	346、358	80~250以上	施工記録、導水路
15	地盤	トンネル	165、200	120~200	施工記録
16	地盤	トンネル	140、180	80~150	施工記録
17	地盤	トンネル	265、270	80~150	施工記録

盤上での振動レベルを予測する場合には表層地盤上での単発発破または斉発発破による振動の継続時間を知らなければならない。表1から表層地盤上での振動の継続時間はほぼ100ms~500msの範囲にあるように思われる。さらに細かく見れば、明り発破の方がトンネル発破の場合より振動の継続時間は長いようである。この表をもとに、表層地盤上での振動の継続時間はおおまかではあるが明り発破に対して約300ms、トンネル発破に対して約150ms程度を仮定すればよいように思われる。

6. 段発発破において各段の振動波形が重畳する場合についての検討

発破による振動の継続時間は岩盤上では100ms程度であるので、DS発破による振動を岩盤上において

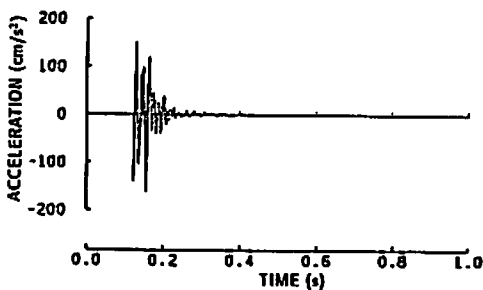


Fig. 4 A accelerogram recorded on rock at 100m from blasting source.

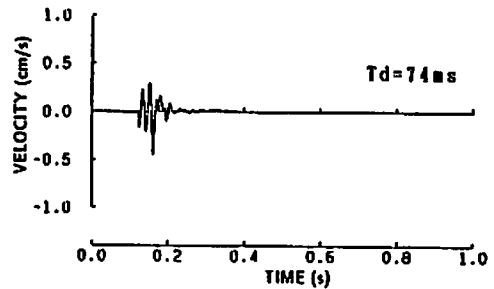


Fig. 5 The velocity wave form integrated the wave form shown in Fig. 4.

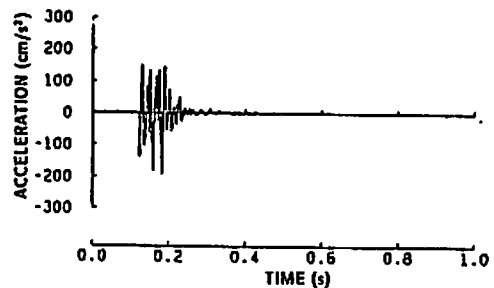
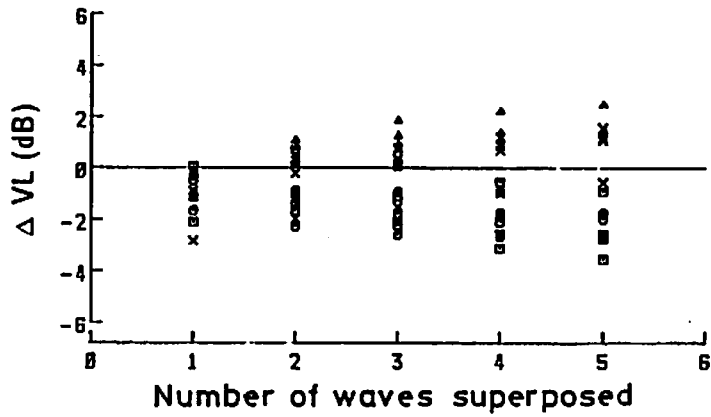
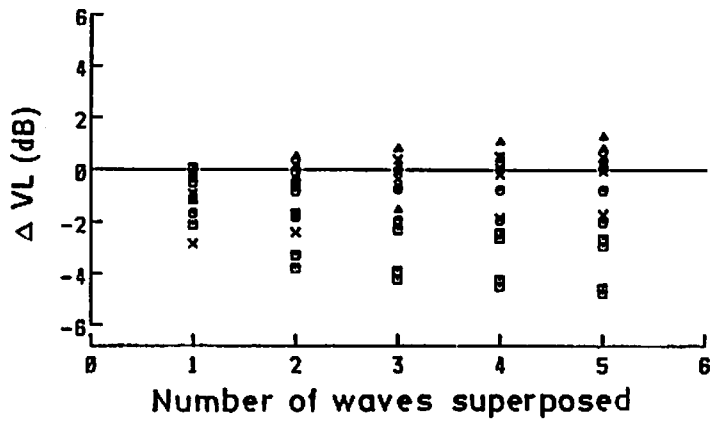


Fig. 6 The synthetic wave form superposed two wave forms of the wave form shown in Fig. 4 with delay time of 25ms to simulate ground motion of delayed blasting.

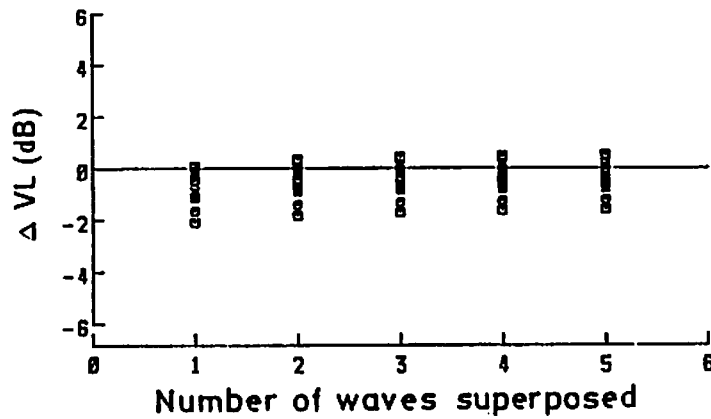
観測する場合には各段の振動はほぼ分離した振動波形として観測される。したがって、本研究で提案した予



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Relation between ΔVL and number of wave forms superposed recorded on rock
 (○: 100, △: 150m □: 200m, ×: 250m).
 (a) delay time of 25ms. (b) delay time of 50ms. (c) delay time of 250ms.

測手順に従ってDS発破による振動の振動レベルを予測することは妥当であると考えられる。

しかし、MS発破の場合や、表層地盤の影響等により振動の継続時間がDS電気雷管の秒時差より長くなるような場合には各段の振動は重畳することになる。

本研究で提案した段発破による振動の振動レベルの算出方法および予測方法は2つの振動レベルの和(パワー和)の式(9)を基本としている。提案した方法によって予測される段発破の振動レベルは、各段の振動が重畳しない場合には各段の振動の振動レベルが精度よく予測できれば正確に求めることができる。しかし、各段の振動が重畳する場合には各段の振動の干渉のため各段の振動は複雑に変化することから各段の振動に対して予測された振動レベルと当然異なることになる。したがって、そのような場合についての誤差の程度を明らかにし、提案した予測方法の妥当性について検討を行う必要がある。

そこで、先に述べた岩盤上および表層地盤上で記録された単発破による振動の加速度波形とその波形を積分した速度波形とを用いて、前章の計算方法によって算出される振動レベルの予測値から実際に記録された加速度波形を時間差(秒時差)をつけて線形に重畳させた段発破による振動の加速度モデル波形から算出した振動レベルを引いた値(ΔVL)について検討した。

図4は岩盤上で記録された単発破による振動の加速度記録(表1, No.1)の例(爆源から100m)を示している。図5は図4の加速度記録を積分した速度波形である。図中のTdは式(9)を用いて算出した振動の継続時間である。図6は図4に示した加速度波形を秒時差25msで2波重畳させた加速度モデル波形の例である。図7は例示したような加速度モデル波形について、3章で示した算出方法による振動レベルとモデル波形に対して得られた振動レベルとの差を示したものである。ここで、モデル波は数波を重畳させているがこの波数を横軸に、両者の方法で得られた振動レベルの差 ΔVL を縦軸にとっている。図中の○, △, □, ×はそれぞれ爆源から100m, 150m, 200m, 250m地点で記録された加速度波形を用いた場合の結果である。また図7(a), (b), (c)はそれぞれ重畳した波の間の秒時差25ms, 秒時差50ms, 秒時差250msの場合の結果である。各振動が重畳しない秒時差250msの場合にはレベル差は2dB程度であるが、秒時差25ms, 50msの場合には重畳波数の増加とともにレベル差が大きくなっている。

図8は爆源から水平距離約300mの表層地盤上で記

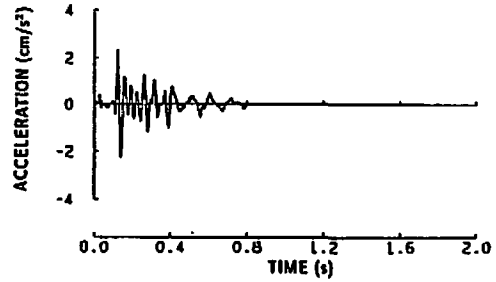


Fig. 8 A accelerogram recorded on surface soil.

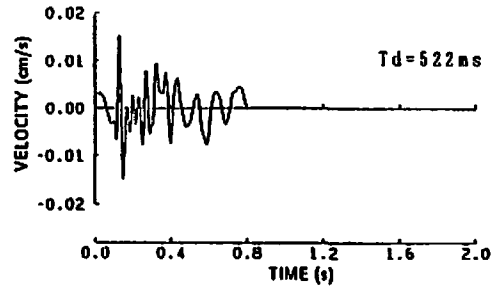
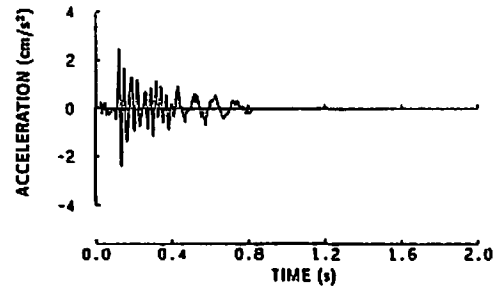
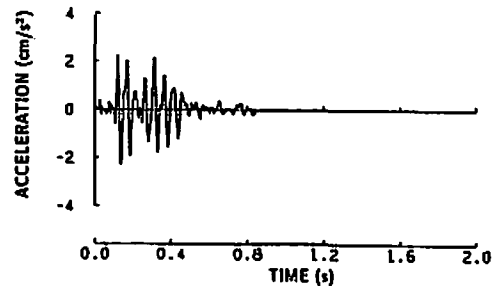


Fig. 9 The velocity wave form integrated the wave form shown in Fig. 8.

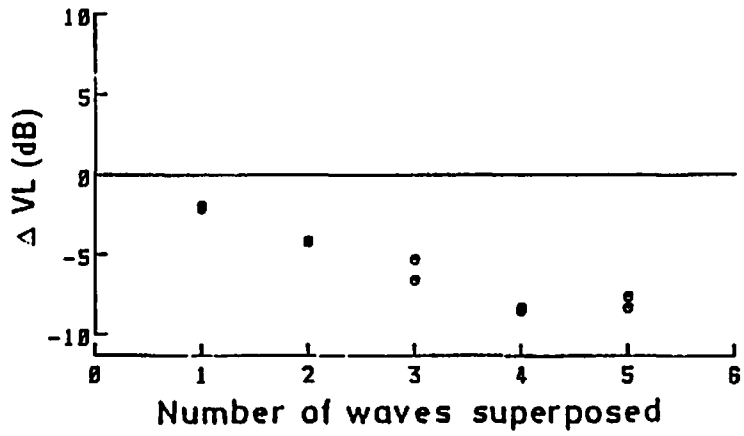


(a)

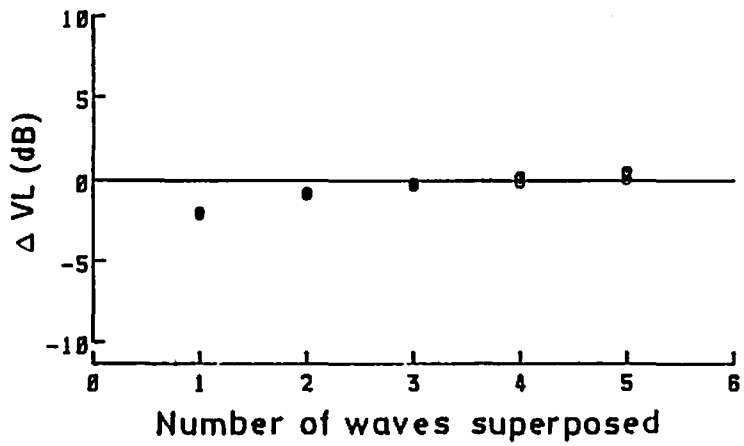


(b)

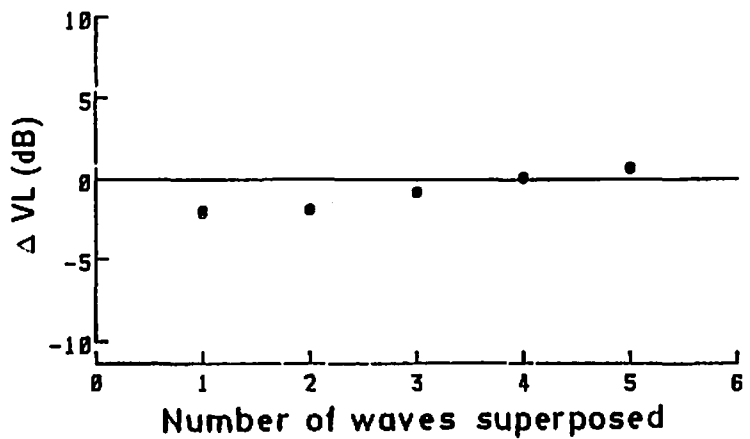
Fig. 10 The synthetic wave form superposed two wave forms of the wave form shown in Fig. 9 by delay time of 25ms and 50ms to simulate ground vibration of delayed blasting. (a) delay time of 25ms (b) delay time of 50ms



(a)



(b)



(c)

Fig. 11 Relation between ΔVL and number of wave forms superposed recorded on surface soil (a) delay time of 25ms, (b) delay time of 50ms, (c) delay time of 250ms.

録された装薬量33kgの2孔斉発破による加速度記録(表1, No.5)である。図9はその記録を積分した速度波形である。振動の継続時間(T_d)は522msであり、秒時差250msでも速度波形は重畳することになる。図10は図8の加速度波形を秒時差25ms(図10(a))と秒時差50ms(図10(b))で2波重畳させた加速度モデル波形である。図8の加速度波形の最大振幅を示す振動の周波数が約30Hzであるため、秒時差25msでの加速度モデル波形は原波形とはかなり異なった波形となっていることがわかる。図11は加速度モデル波形を用いて計算した振動レベルをもとに、重畳する振動波形の数を横軸、 ΔVL を縦軸にとりプロットした結果である。秒時差50ms、250ms(図11(b), (c))においては本研究で提案した方法によってその振動レベルを予測することは可能であるように思われるが、秒時差25ms(図11(a))に対する予測結果はかなり大きめの値として得られている。

以上のことから秒時差が小さいときには3章の算出法にもとづく振動レベルの予測はかなりの誤差を含むことになるが現在市販されているDS雷管(秒時差250msを基準)を用いて段発発破を行う場合にはかなり精度良く予測が可能なるように思われる。

7. 結 論

従来、段発発破による振動の振動レベルは最大速度振幅のみを用いて算出または予測されてきたが、段発発破の振動の振動レベルの予測に対しては各段の秒時差の影響を考慮しなければならない。そこで、本研究では発破設計段階において設定された各段の装薬量および秒時差を用いて、より合理的に段発発破による振動の振動レベルを予測する方法を示した。その方法はまず各段の装薬量から最大速度振幅を予測し、次にその各段の最大速度振幅と仮定された各段の振動の継続時間から各段の振動レベルを予測する。その後それらを設定された秒時差に従って、振動レベル計の減衰特性を考慮しながら振動レベルの和の計算を行い、逐次段発発破による振動の振動レベルの大きさを予測するという方法である。

また、本方法を用いて段発発破による振動の振動レベルの大きさを予測するときの問題点、すなわち各段の発破による振動の継続時間の見積り問題と各段の発破による振動が重畳するような場合に生じる誤差の程度についても検討を行った。

段発発破による振動の振動レベルの予測に対して今まで合理的な方法が示されていなかったが、本研究の成果から段発発破による振動の振動レベルの予測をある程度合理的に、精度良く行えるようになったと考えられる。

表1に見られるように表層地盤上での振動の継続時間はかなり広い範囲にあるといえる。この点について表層地盤が振動の継続時間に与える影響についてさらに細かく分類できれば(例えば、発破の種類、表層の厚さ、N値、弾性波速度等を用いて)、表層地盤上での振動の継続時間に対する仮定の誤差を小さくすることができると思われる。しかし、現時点においては上記のような観点から整理されたデータはなく、今後データの蓄積を行って検討する必要があると思われる。

謝 辞:本論文の作成に当り、京都大学工学部資源工学科教授佐々宏一博士に貴重な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) たとえば、工業火薬協会編、発破ハンドブック、山海堂(1976)
- 2) 庄司 光・山本剛夫・島山直隆編、衛生工学ハンドブック(騒音・振動編)、朝倉書店、pp. 489—501(1982)
- 3) 日本トンネル技術協会編:都市型トンネル掘削工法施工技術に関する調査研究(その2)報告書、(1989)
- 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、25、pp. 139—153(1984)
- 5) 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、362、pp. 481—484(1985)
- 6) 国松 直・吉岡幸雄・宮地明彦・岡村昭彦・中川浩二、最大速度振幅で管理されたトンネル掘進発破振動の振動レベルについての考察、第21回岩盤工学に関するシンポジウム講演論文集、pp. 116—120(1989)
- 7) 内山成和・大山卓夫・金子忠夫、発破振動の性状について、応用地質調査事務所年報No. 1、pp. 55—74、(1979)
- 8) 三谷 健、発破騒音、振動を軽減するトンネル掘削の研究(1)、建設の機械化、pp. 49—54(1988)
- 9) 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、367、pp. 45—51(1986)
- 10) 国松 直・三浦房紀・今村 威・中川浩二、段発発破振動速度波形からの振動レベルの算出、土木学会論文集、403、pp. 265—268(1988)
- 11) 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、391、pp. 134—141(1988)
- 12) Vanmarcke, E. H. and Lai, S. P., Strong-motion

duration and rms amplitude of earthquake records,
Bulletin of the Seismological Society of America,
Vol.70, No.4, pp. 1293—1307, (1980)

13) 国松 直・三浦房紀・今村 威・中川浩二, 振動
レベル計の計算機によるシミュレーション, 山口

大学工学部研究報告, 39, 1, pp. 205—211 (1988)

14) 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, (1985)

Prediction of the Vibration Level of Ground Vibration Induced by Delayed Blasting

by Sunao KUNIMATSU*, Fusanori MIURA**, Takeshi IMAMURA***
and Koji NAKAGAWA**

As vibration level (VL) is a unit which includes human response for vibration, it is used to estimate environmental vibrations. In cases where the blasting vibrations are treated as environmental vibrations, the VL should be used to estimate the blasting vibrations.

The purpose of this study is to propose a predictive method of the VL of blasting vibration induced by delayed blasting (VLd). The charge weight of the explosive per delay and delay time are determined before the blast. The VLd is predicted by the following procedures:

- (1) Prediction of the peak particle velocity (PPV) and duration (Td) of vibration in each delay,
- (2) Prediction of the VL of each delay,
- (3) Prediction of the VLd.

The VLd is calculated by adding the VL of each delay and the VL considered attenuation caused by the delay time in the order of the number of delays.

(*Industrial Safety Department, National Research Institute for Pollution and Resources, Ministry of International Trade and Industry, 16-3 Onogawa Tsukuba City, Ibaraki Pref., 305 Japan.

**Faculty of engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube City, Yamaguchi Pref., 755 Japan.

***Ube Industries LTD., Akasaka, Minato-ku, Tokyo, 107 Japan.)