

スロット（縁切り）工法による爆源近くの 発破振動低減に関する検討

手塚昌信¹・三木 茂²・中川浩二³

¹正会員 関西電力株式会社 奥多々良木発電所増設工事建設所 (〒679-34 兵庫県潮来郡潮来町多々良木字灰原 1139-85)

²正会員 理修 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 技術本部 (〒102 東京都千代田区九段北 1-11-5)

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

地下空洞を掘削する際、発破振動を低減し周辺岩盤の損傷を最小限に抑えることが重要である。筆者らは地下発電所アーチ部掘削において、アーチ天端にスロットを設け、発破振動を低減する工法を採用した。スロットを設けた区間とスロットを設けなかった区間で発破振動の比較計測を行うとともに、発破孔、スロットおよび振動計測点の位置関係が設定された状態での基礎実験を行い、発破振動の低減効果、スロット周辺の振動の伝播特性の検討を行った。その結果、スロットを設けた区間では、発破振動推定式における振動の強さを表す定数K値で約1/3の低減効果が認められた。また、発破振動の低減はスロットによる自由面の増加で破碎効果（効率）が良くなったこと、スロット近傍においてスロット端部で振動が回折減衰することによるものと考察された。

Key Words: blast vibration, vibration control, continuous slot, elastic wave propagation

1. はじめに

岩盤内地下空洞、トンネル等を発破を用いて掘削するに際して、発生する振動を低減するための方法が種々考えられている。その中で、近年、スロット削孔機¹⁾を用いて切羽外周部あるいは切羽中央部に連続した溝を堀り、発破効率を増すことで振動を低減する工法がある。また、現場実験により、スロットによる振動低減効果について検討が加えられている²⁾。このスロットを設けることにより周辺岩盤へ伝播する振動が低減されることは予測されるが、発破位置に近接した場所での振動低減効果については定量的に明らかにされていない。周辺岩盤の損傷、岩盤中の亀裂への発破振動の影響を評価するためには、発破位置近くの振動性状を明らかにしなければならないが、発破振動の計測においても発破源に近接して計測を行った事例³⁾は少ない。従って、近接発破における周辺岩盤への影響程度、発破振動の予測をどのように考えるかについては、必ずしも明らかにされていない。

そこで筆者らは、地下空洞を掘削する際、外周部（アーチ部天端）にスロットを設けることで周辺岩盤への発破振動の影響を低減する工法を採用するとともに、発破振動の周辺岩盤への影響を定量的に評価するための実験を実施した。本研究は、発破位置近傍の振動特性を計測するとともに

もに設定した条件での振動計測実験を行い、スロットによる振動低減効果を定量的に評価する試みを行ったものである。

2. 発破振動の評価

(1) 発破振動推定式による評価の検討

発破振動の推定式としては経験的に

$$PPV = KW^\alpha D^{-\beta} \quad (1)$$

がしばしば使用されている。ここで、PPV(Peak Particle Velocity)は受振点における最大発破振動の速度振幅、Wは同一段で起爆した合計薬量、Dは発破位置と受振点の距離、K、 α 、 β は定数である。

萩森⁴⁾は、スロットによる発破振動の低減効果を大きく、

①自由面の増加による荷の軽減および薬量低減効果

②爆源距離の増加による振動低減効果

③スロットによる振動低減効果

に分析し、雑候⁵⁾の定数Kに与える要因分析に従い発破振動低減の観点から考察を行い、スロットによる発破振動低減効果を定数Kにより評価することを試みている。この中で、萩森⁴⁾はある程度以上爆源から離れた位置での振動

の低減を①の自由面の増加による荷の軽減と薬量低減効果から説明している。スロットによる振動低減効果のうち、②③による効果は、爆源あるいはスロット至近距離における効果であり、爆源あるいはスロットから遠ざかるにつれて効果が減少することが考えられる。すなわち、爆源あるいはスロット至近位置においてはこの②、③の効果を検討することもまた重要となる。

一方、式(1)において、PPV を規定する要因としては、薬量とその効率を表す定数 α がある。1孔あたりの薬量が異なる場合、薬量の効果を補正しなければ振動速度を比較することができない。そこで、本研究では、 $\beta = 2\alpha$ として式(1)を変形した形をとる代表的な発破振動推定式⁶⁾

$$PPV = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{\beta} \quad (2)$$

を用いスロットの効果の検討を行った。

このようなことから本研究においては、実施工時の至近距離における発破振動の計測以外に、スロット、爆源の位置を特定しスロットおよび爆源の周囲に密に振動計を配置して、振動伝播特性を把握する実験を実施した。これらの実験結果を検討し、スロット近傍における振動低減効果を、式(2)で示される発破振動推定式における定数Kを指標にして、定量的に評価するものとする。

(2) 実験の概要と目的

本研究において実施した実験は大きく2分できる。一つは爆源やスロットの位置を特定し、条件を単純化することで、スロット近傍の振動伝播特性を把握するために実施した基礎実験であり、もう一つはアーチ部中央導坑施工時に実施した発破振動の計測である。以下、各実験の概要を示す。

a) 基礎実験

本実験は、スロットを設けることにより、発破振動の伝播特性がどのように変化するかを、スロット、発破点および振動計設置位置が明確である理想化された状態で把握するために実施したものである。スロットを設けたことによる振動速度と距離の関係、振動の伝播状況の変化、スロットによる振動低減効果、爆源距離増加による振動低減効果について定量的に評価することを試みた。

b) アーチ部計測

地下空洞アーチ部の掘削時に、スロットによる振動低減効果を評価するために実施した計測である。スロットによる効果を分離するために、実験区間を設定し、アーチ部にスロットを設けた場合と設けなかった場合について比較計測を行っている。発破に際しては、爆源と振動計測点の距離を明確にするために、後述するよう

に各段の起爆による振動を分離計測できる発破設計を行った。

3. 振動計測実験の概要

(1) 実験対象の岩盤状況

検討を行った発電所地下空洞付近の地質は、おもに流紋岩からなり貫入岩としてピン岩が分布する。RQDは70~100の値を示し、地山の弾性波速度が5.0km/s 前後のB~CH級の良好な岩盤である。また、岩石の一軸圧縮強度は2000~2500kgf/cm²(196~245MPa)、超音波速度は5.0~5.5km/sの値を示す。基礎実験は中央導坑(後述)で行い、アーチ部計測はアーチ部中央導坑の実施工時に行った。実験および計測を行った地点の地質は流紋岩であった。

(2) 実験の概要

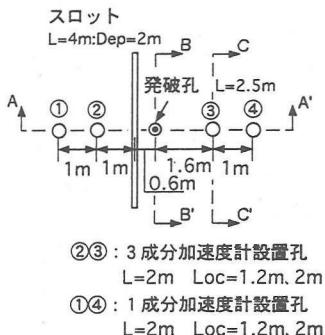
a) 基礎実験

基礎実験は、中央導坑側壁(アーチ拡幅部)において実施した。図-1にスロット、発破孔および加速度計の設置孔の位置関係を、写真-1に実験岩盤面の状況を示す。図-1(a)および写真-1に示すように、それぞれの孔は同一平面内にあり、加速度計の設置孔は発破孔に対して左右対称、1.6mと2.6mの位置にある。加速度計の設置状況を図-1(b)に示す。すなわち、発破孔の左右1.6mにある孔には、孔口より1.2m、2.0mの位置に3成分加速度計を、左右2.6mにある孔には孔口より1.2m、2.0mの位置に1成分加速度計を設置した。また、これらに加えて、発破孔の左側(スロットをはさむ側)1.6mの孔には孔口より2.6m、3.3mの位置にも1成分加速度計を設置した。3成分加速度計の計測軸は孔軸方向とそれに垂直な鉛直、水平方向であり、1成分加速度計は孔軸に垂直な水平方向成分を計測方向とした。スロットは写真-1のように、幅5.2cm、高さ4mであり、深さは2mである。

実験は、まず、薬量12.5gで図-1(c)に示す発破孔の各深度で起爆を行い、振動の伝播状況を計測した後、深度1.2mの位置において薬量0.2kgで最終発破を行い振動の計測を行った。なお、この実験は3回実施した。

b) アーチ部計測

地下空洞アーチ部の施工は、中央導坑を先行掘削し左右を拡幅掘削する方法で実施した。掘削は、スロット削孔機により天端外周部に地山との縁切りのための外周スロットを設け、内部を通常の発破工法で行う外周スロット発破工法で実施した。スロットによる振動低減効果を検証するために、中央導坑に長さ30mの実験区間を設け、15mを上記に示した外周スロット発破工法で掘削を行い、15mを外周スロットを設けない通常の発破工法で掘削を行った。以降、実験区間において外周スロット発破工法で掘削を行った区間をSD区間、通常の発破工法で掘削を行った区間を



(a) 正面図

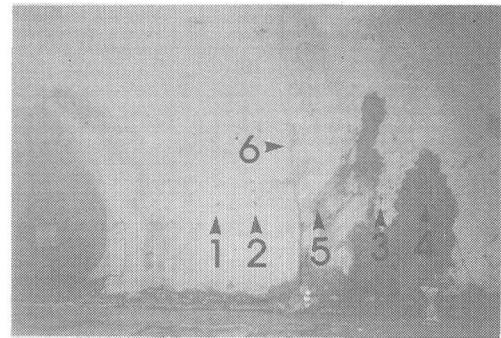
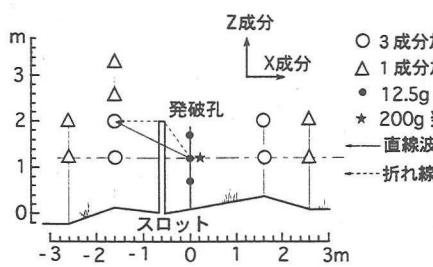
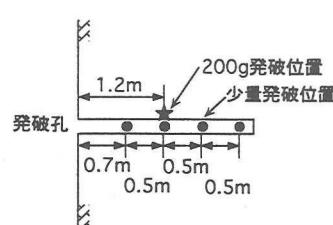


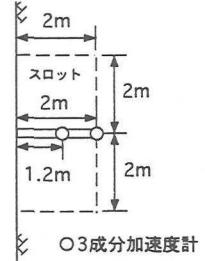
写真-1 基礎実験の状況 1, 4: 計測孔 (1成分加速度計), 2, 3: 計測孔 (3成分加速度計), 5: 発破孔, 6: スロット



(b) 平面図 (A-A' 水平面断面)



(c) 断面図 (B-B' 発破孔断面)



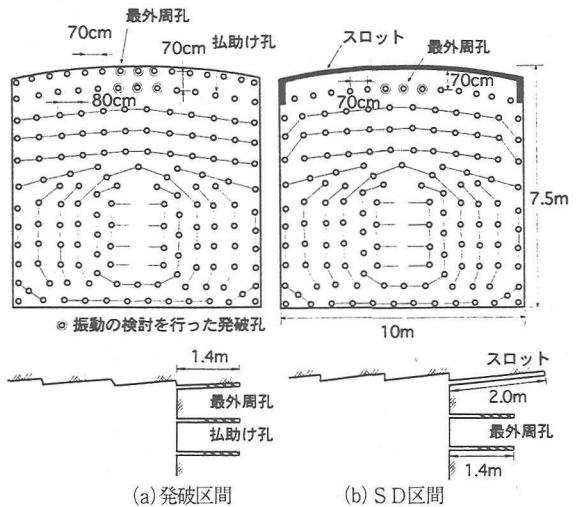
(d) 断面図 (C-C' 計測孔断面)

図-1 基礎実験のレイアウト

発破区間と呼ぶことにする。なお、実験区間において明瞭な地質状況の変化は認められなかった。

発破区間およびSD区間の中央導坑における代表的な発破パターンを図-2に示す。ここにおいて、発破区間天端払助け孔における発破孔の位置と、SD区間最外周孔における発破孔の位置は、空洞アーチ外周に対して同じ位置関係になっている。掘削断面積は約75m²であり両区間とも全断面発破とした。発破区間での代表的なパターンにおける発破孔数は156孔、発破段数は38段、総薬量107kg、天端最外周孔、天端払助け孔の孔あたりの薬量は0.4~0.6kgであった。SD区間での代表的なパターンにおける発破孔数は142孔、発破段数は41段、総薬量99.4kg、最外周孔の孔あたりの薬量は0.4~0.6kgであった。SD区間においては、図-2に示されるように発破区間の最外周孔に相当する部分がスロットとなっているので、SD区間の総薬量は発破区間に比較して少なくなっている。発破区間、SD区間とも発破孔の深さ1.4mであり、SD区間におけるスロットの深さは2.0m、幅52mmであった。また、1回の発破あたりの平均掘進長は、発破区間で1.4m、SD区間で1.6mであった。

発破に際しては、両実験区間ともノネル雷管を使用した。また、爆薬は、発破区間では親ダイに2号複ダイナマイト



(a) 発破区間 (b) SD区間

図-2 中央導坑発破パターン

を増ダイに含水爆薬を、SD区間では親ダイ、増ダイとも含水爆薬を使用した。

発破振動の計測は図-3に示すように、発破区間およびSD区間の中央に2個所づつアーチ天端中央から1mおよび4mの位置に圧電型加速度計を埋設することによって実施した。1mの位置には3成分加速度計を埋設し、空洞長軸

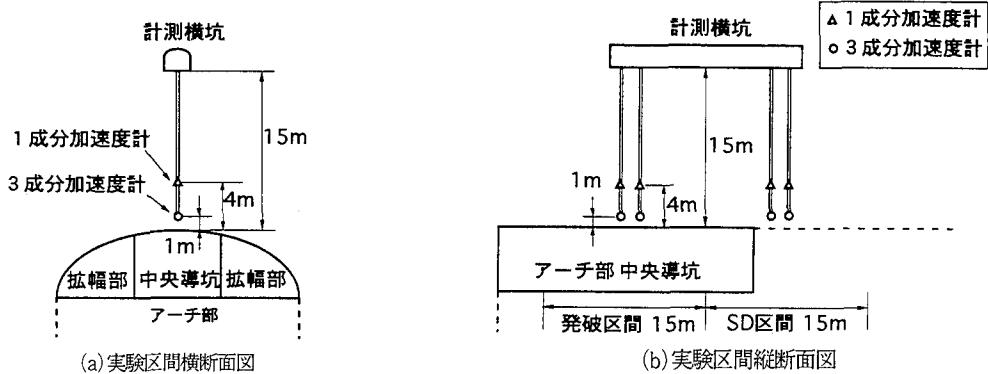


図-3 アーチ部計測のレイアウト

表-1 主要測定機器の仕様

測定機器	型番	製作所	使用区分	主な仕様
加速度計 (3成分)	612Z	ティアップ	アーチ部計測 基礎実験	最大加速度: $\pm 1000G$ 周波数帯域: 0.1Hz～20kHz, 共振周波数: 約40kHz
加速度計 (1成分)	607	ティアップ	アーチ部計測	最大加速度: $\pm 1000G$ 周波数帯域: 0.1Hz～8kHz, 共振周波数: 約20kHz
加速度計 (1成分)	613	ティアップ	基礎実験	最大加速度: $\pm 1000G$ 周波数帯域: 0.1Hz～15kHz, 共振周波数: 約35kHz
チャージ アンプ	SA-610	ティアップ	アーチ部計測 基礎実験	周波数帯域: 1Hz～30kHz
データ レコーダ	RTP- 652B	共和電業	アーチ部計測 基礎実験	チャンネル数: 21 周波数帯域: DC～40kHz
変換 ボード	ADJ-98	カノーブス	アーチ部計測 基礎実験	チャンネル数: 16 分解能: 12bit, 変換時間: 25 μ s
電磁オシ ログラム	5L47	N E C三栄	アーチ部計測 基礎実験	チャンネル数: 15 周波数帯域: DC～1kHz
オシロ スコープ	SS7602	岩崎通信	アーチ部計測 基礎実験	2現象、外部トリガ 周波数帯域: DC～50MHz

方向をX, 短軸方向をY, 上下方向をZとした。また、4mの位置に設置した加速度計は上下方向1成分とした。計測は、発破区間およびSD区間の発破ごとに実施し、発破区間ににおいて11回、SD区間ににおいて9回の計測を行った。切羽の進行にともなう爆源と加速度計測点の距離は概ね2.2～10mであった。

(3) 振動信号処理

振動記録は、データレコーダに収録し、再生波形をA/D変換した後、数値処理によるデータ処理を実施した。表-1に実験に使用した加速度計および測定器の仕様を示す。計測波形の処理は、まず、加速度計の共振の影響を除去するため、数値フィルタにより10kHz以上の周波数成分を減衰させた後、商用電源によるノイズを除去するため100Hz以下の周波数成分を減衰させた。これを基本加速度波形として、さらに、この波形を数値積分することにより速度波形を得て最大振動速度PPVの読み取り、フーリエスペクトルの計算などに供した。ただし、基礎実験における伝播時間の読み取りに際しては、各種数値フィルタによる時間遅れが問

題となるので、無処理の加速度波形を用いた。

振動計測で得られた波形からPPVの値を読み取るにあたっては速度波形の最大片振幅をもってPPVとした。また、式(2)における定数Kの値を求めるにあたっては次のように考えた。通常の発破振動の計測において、定数K値は個々の発破（各孔ごとの発破）に関するものでなく、一連の発破についての最大値として扱われることが多い。しかし、ここではほぼ完全に発破孔の把握できる基礎実験と、実施工であるがゆえに必ずしも発破孔の把握が完全でないアーチ部計測に分けそれぞれ次のように考えた。また、得られるデータ数が多くないことから $\beta=2$ を仮定した。

a) 基礎実験

個々の発破に関して、式(2)からK値をもとめ、その平均値 m と標準偏差 σ から $K=m+\sigma$ として式(2)のK値を決定した。発破位置近傍の周辺岩盤の損傷を考える場合、岩盤が履歴した平均的な振動速度よりも最大の振動速度が重要であると判断したためである。しかし、発破振動は種々の要因によりばらつきが大きく、まれに突発的に大きな振動速度となることもある。そこで、平均値 m に標準偏差 σ

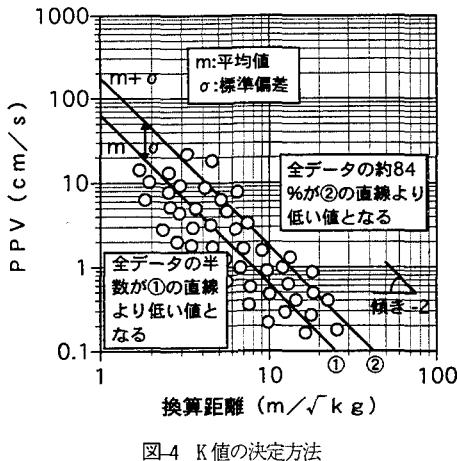


図-4 K 値の決定方法

を加えた値を K 値とした。図-4 に示すように、この値を定数 K とする直線を振動速度と換算距離の関係でプロットされた両対数紙に引くと、統計的には計測値の約 84% がこの直線より低い値を示し、直線はプロット群のほぼ上限近くを通ることになる。なお、K 値の決定に用いた計測値は、図-1 において爆源と計測点の間にスロットが関与しない位置での計測値である。

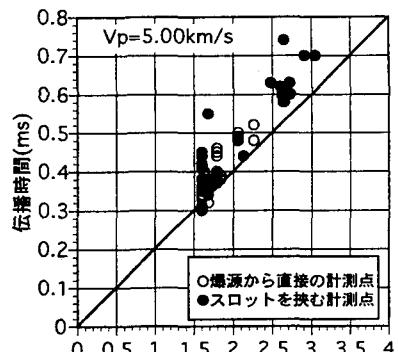
b) アーチ部割計測

基礎実験と同様の手続きでもって K 値を決定した。K 値の決定に使用したデータは、図-2 に示すように発破孔が最外周孔および天端押助け孔のアーチ天端中央の 3 孔について、切羽が計測点に達するまでの計測結果である。SD 区間での K 値の決定に際しては、前述の事由より、爆源と計測点の間でのスロットの関与にかかわらず、対象となった全ての計測結果を用いた。

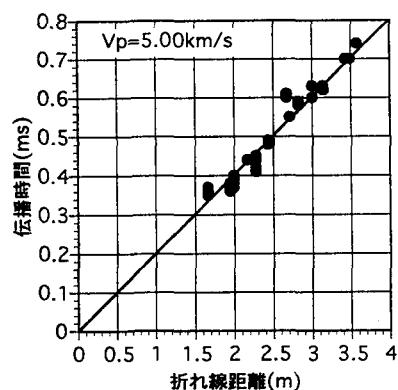
4. 計測結果

(1) 基礎実験

図-5 は、発破孔の各深度で実施した少量発破実験(薬量 12.5g)結果より、振動の伝播時間の関係を示したものである。図-5(a)は、振動伝播距離を直線として伝播時間の図を示したものであり、起爆点と計測点の間にスロットを挟む場合も距離は直線としている。図-5(b)はスロットの存在を考慮し、起爆点と計測点の間にスロットを挟む場合、振動の伝播経路は起爆点からスロット端部で回折し計測点にいたる折れ線距離として伝播時間の関係を整理したものである。この結果より、折れ線距離として整理した場合、図中のプロットは、ばらつきが少くなり正しい伝播時間の関係を示すことが示唆される。また、この伝播時間の図から決定される岩盤の弾性波速度は、岩石供試体における超音波速度、孔間の弾性波速度の測定結果と比較して



(a) 直線経路波線

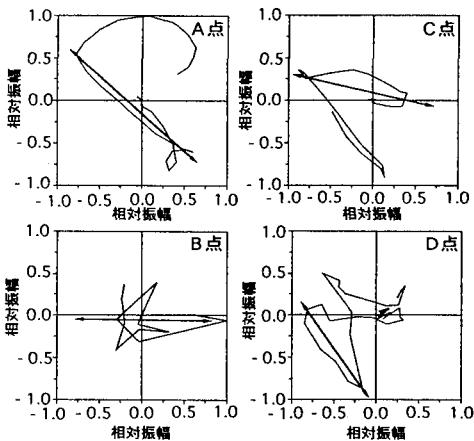


(b) 折れ線経路波線

図-5 振動伝播時間による伝播経路の検討（基礎実験、少量発破実験結果）

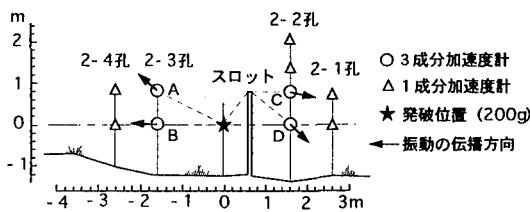
妥当な値であると判断できる。一方、薬量 0.2kg における発破実験時の 3 成分加速度計による計測結果から、各測点での振動軌跡を示したもののが図-6(a)であり、その結果より振動の伝播方向を示したもののが図-6(b)である。実験においては、スロット、発破点、計測点は同一平面(水平面)上に位置しているので、この平面上(図-1(a)の XZ- 平面)における振動方向として検討している。計測波形には自由面(中央導坑側壁)などからの反射波などが含まれていると考えられ複雑な振動軌跡を示すため、振動方向の同定には計測波形における主要動の第 1 波目を用いた。図-6(b)において、爆源と計測点の間にスロットを挟まない位置(図中 A, B)では、振動方向は発破点を始点とする方向にある。一方、スロットを挟む計測点においては、振動方向がスロット端部を始点とする方向となる結果となっている。検討を行った波は弾性波速度から P 波であると見なせることから、振動方向は振動の伝播方向を示すことになる。従って、爆源と計測点の間にスロットを挟む場合、スロット端部で回折し計測点に振動が伝播することを示唆している。

薬量 0.2kg での実験において、PPV と薬量で補正した距



(a) 各計測点での振動軌跡（パーティクルモーション）

両矢印は主要動、第1波目の振動方向を示す。



(b) 振動軌跡から推定される振動伝播方向（矢印は波の進行方向を示す。）

図-6 振動軌跡による振動伝播経路の検討（基礎実験、200g発破実験結果）

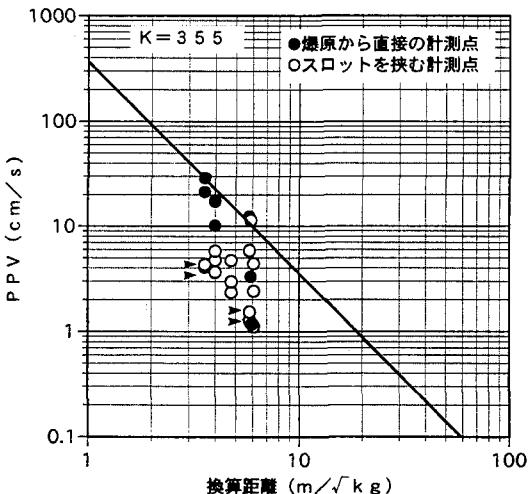
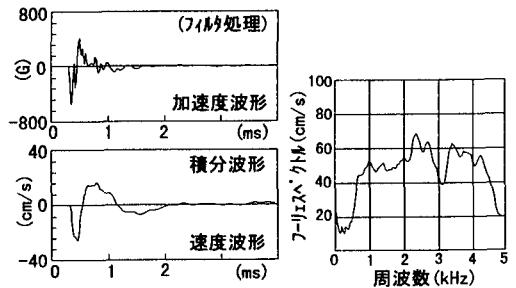
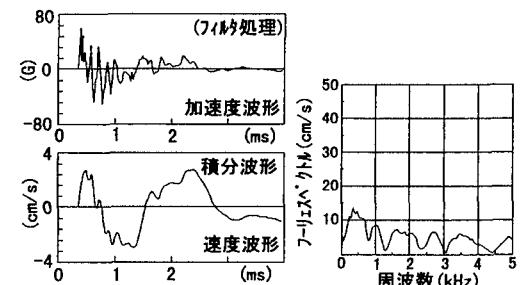


図-7 最大振動速度と距離の関係（基礎実験、距離は直線で整理。図中の ▶ 印は図-6(b)C, D 計測点における計測結果。）



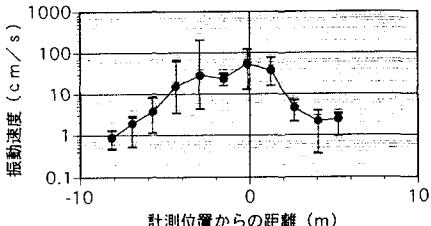
(a) スロット前面（図-6(b), B点）での計測波形



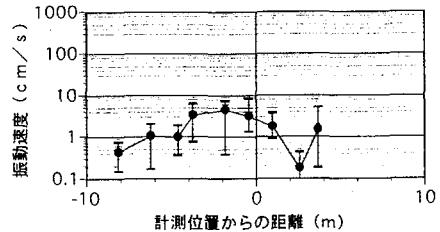
(b) スロット背面（図-6(b), D点）での計測波形

図-8 基礎実験の計測波形とフーリエスペクトル（200g発破における波形）

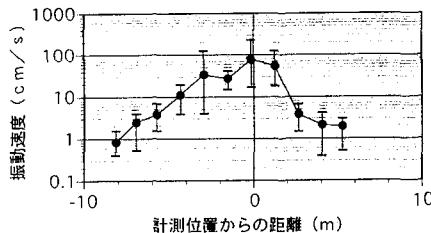
離（以降、換算距離と呼ぶ）の関係を図-7に示す。ここで、PPVは3成分加速度計で計測したものについては、発破点、計測点を含む平面上でベクトル合成し、X成分とZ成分の2乗和の平方根を用いている。また、1成分加速度計（X成分）については、振動の入射方向 θ を考慮し、計測最大速度 V_0 に対して、 $V=V_0/\cos\theta$ で補正を行い、この値をPPVとして整理を行っている。また、爆源と計測点の間にスロットを挟む場合、振動の入射方向は前述の結果よりスロット端部とした。図-7はPPVと換算距離の関係を示したものである。図中において黒抜きのプロットは爆源から直接、計測点に振動が到達する位置における計測結果であり、白抜きのプロットは爆源と計測点の間にスロットを挟む位置における計測結果である。プロットの上限は、式(2)において $\beta=2$ 、 $K=355$ で近似でき、爆源から直接、計測点に振動が伝播する位置の計測値は、スロットを挟む位置での計測値より振動速度は大きく、近似直線に沿うものとなっている。一方、スロットを挟む計測点における計測結果は、換算距離に対して変化があまりみられず、換算距離が短くなるにつれて近似直線からPPVの低い値側に離れる傾向がある。さらに、スロットを挟む計測点での計測結果では、爆源と計測点を結ぶ直線とスロットが直交する位置（スロットによる振動伝播の折れ曲がり角度が大きくなる位置）のPPVが低い値となる傾向がある。



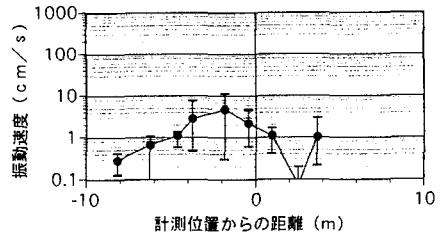
(a) 発破区間 (3' 孔 鉛直 1m 上方での空洞長軸方向の振動速度)



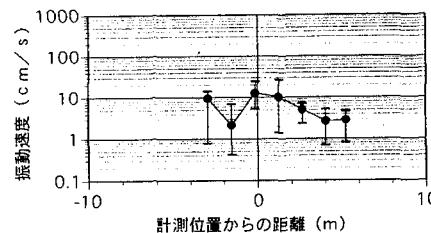
(b) S D区間 (3' 孔 鉛直 1m 上方での空洞長軸方向の振動速度)



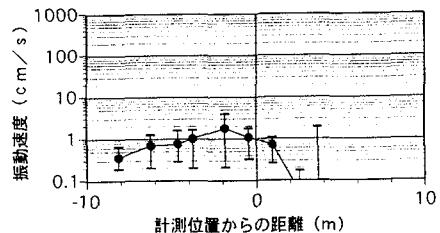
(c) 発破区間 (3' 孔 鉛直 1m 上方での空洞上下方向の振動速度)



(d) S D区間 (3' 孔 鉛直 1m 上方での空洞上下方向の振動速度)



(e) 発破区間 (3' 孔 鉛直 4m 上方での空洞上下方向の振動速度)



(f) S D区間 (3' 孔 鉛直 4m 上方での空洞上下方向の振動速度)

図-9 アーチ部計測における振動速度の分布 (――は分布範囲, ●は平均値を示す。)

図-8 は、基礎実験における代表的な計測波形（速度波形）とそのスペクトルを示したものである。発破位置から直接伝播した振動は、鋭いパルス状の波形を示し、そのスペクトルは、1~4kHzにかけて幅広い周波数の分布を示す。一方、スロットを挟む計測点での振動は、なだらかに尾を引く波形であり、卓越周波数は500Hz前後となる。

(2) アーチ部計測

図-9 はアーチ部計測において、天端から 1m および 4m の位置で計測された空洞長軸(X)方向および上下方向(Z)の振動速度の分布を平均値と上下限値で示したものである。図中における 0m は加速度計を設置した地下空洞長軸方向の位置を示す。発破区間 (図-9(a), (c))、天端から 1m の位置における計測結果では、11 回の発破において、平均値で概ね 0.8~80cm/s の振動速度が計測されているが、100cm/s を越す振動速度も見られる。切羽が計測点に近づくにつれて振動速度は大きくなり、直下近くに達したときに最大振動速度を記録している。一方、天端から 4m の位置における計測結果 (図-9(e)) は、最大で概ね 30cm/s の振動速度が計測されている。

S D区間、天端から 1m の位置における計測結果 (図-9(b), (d)) では、9 回の発破において、平均値で概ね 0.2~4.5cm/s の振動速度が計測されており、10cm/s を越える値は少ない。切羽が計測点に近づくにつれて振動速度は大きくなるが、最大振動速度は切羽が計測点に達する手前で記録しており、スロットにより振動の直線的伝播がさえぎられる状況に対応している。また、発破区間と S D区間で計測された振動速度を比較すると、図-9 で示されるように S D区間の最大振動速度は、発破区間の最大振動速度の約 1/10 となっている。しかし、計測点が切羽の進行が初期の段階 (計測位置からの距離が -8~ -6m) では、S D区間の振動速度は発破区間の振動速度の 1/2~1/3 程度である。

一方、天端から 4m の位置における計測結果 (図-9(f)) は、平均値で概ね 0.3~2cm/s の振動速度が計測されており、切羽の進行に伴う振動速度の変化は、天端から 1m の位置における計測結果と類似している。

なお、計測結果のうち、天端から 4m の位置に設置した加速度計は共振周波数が低く、計測波形に共振の影響が含まれている懸念があったので以降の検討にはこの加速度計による計測結果は使用していない。

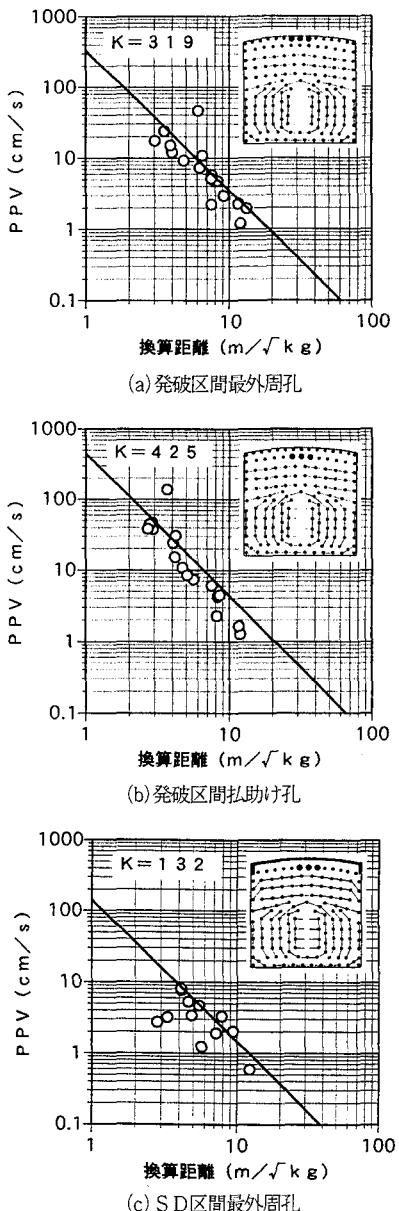


図-10 最大振動速度と距離の関係（アーチ部計測、切羽が計測位置に達するまでの計測結果。距離は直線距離で整理）

切羽が音測点に達するまでの計測結果について、PPV と換算距離との関係を図-10 に示す。図-10(a) (b) は、発破区間において、発破孔が最外周孔のアーチ天端中心の 3 孔である場合と、天端払助け孔のアーチ天端中心の 3 孔である場合の計測結果である（発破孔位置をそれぞれの図中の孔配置図に●印で示す）。

一方、図-10(c) は、S-D 区間ににおいて、発破孔が最外周孔のアーチ天端中心の 3 孔である場合の計測結果である。ここで、発破孔と計測点の距離は直線距離をとっている。

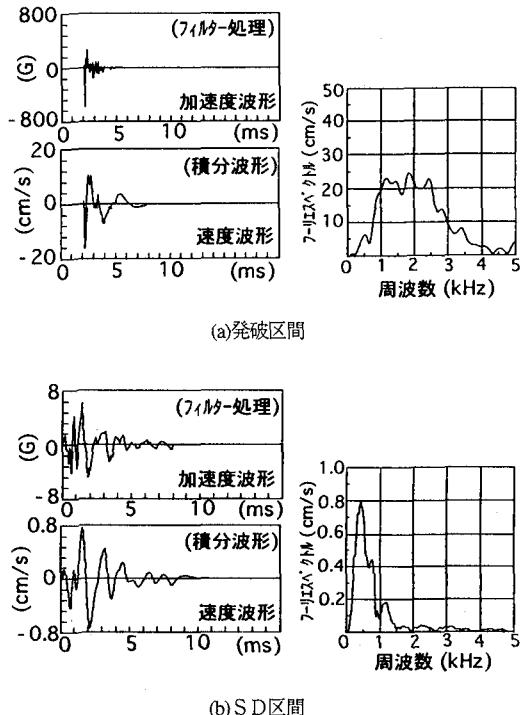


図-11 アーチ部計測の計測波形とフーリエスペクトル（切羽が各実験区間中央に達したときの計測波形）

PPV の値はベクトル合成を行い X, Y, Z 成分の 2 乗和の平方根としてある。発破区間最外周孔での計測値の上限は、 $\beta=2$, $K=319$ で近似でき、天端払助け孔での計測値の上限は、 $\beta=2$, $K=425$ で近似できる。一方、S-D 区間では、最外周孔での計測値の上限は、 $\beta=2$, $K=132$ で近似できる。発破振動推定式における定数 K は、S-D 区間では発破区間の $1/2.5 \sim 1/3$ 程度となっている。発破区間では換算距離に関わらずプロットは近似直線に沿う形で分布し、爆源距離が減少すれば PPV は増大するが、S-D 区間では換算距離が概ね $4m/kg^{1/2}$ 以下で、爆源距離が減少しても PPV は増大しない傾向にある。これは S-D 区間ににおいては、爆源の接近とともに、爆源と計測点の間の振動伝播経路にスロットが近づき、後述するような影響をおよぼすためであると考えられる。また、切羽が各実験区間中央付近に達したときの代表的な計測波形（速度波形）とそのフーリエスペクトルを図-11 に示す。発破区間における速度波形は、立ち上がりの鋭い波形を示しており $1 \sim 2.5\text{kHz}$ の周波数成分が幅広く卓越している。一方、S-D 区間ににおける計測波形は、尾を引く振動波形であり振動継続時間も発破区間における波形に比較して長い。フーリエスペクトルは、 500Hz 附近に卓越周波数が見られ、発破区間における計測波形より低い周波数成分が卓越している。一方、爆源と計測点との距離が増加すると各実験区間とも振動波形の周波数は低下するが、明らかに発破区間の振動波形は S-D 区間の振動

波形より高い周波数となっている。

基礎実験における振動波形とアーチ部計測での振動波形を比較するといいくつかの共通点が認められる。すなわち、基礎実験スロット前面での振動波形(図-8(a))とアーチ部計測発破区間での振動波形(図-11(a))では、波形は鋭い立ち上がりを示し、周波数1kHz以上において幅広い卓越周波数のピークを示すことに共通点が見られる。一方、基礎実験スロット背面での振動波形(図-8(b))とアーチ部計測SD区間での振動波形(図-11(b))では、波形は尾を引く振動波形となり、卓越周波数が500Hz付近にあることが共通している。

5. スロットによる振動低減効果の検討

(1) スロットによるK値の低減

アーチ部計測において、発破孔が加速度計に対して同じ位置関係にあたる発破区間天端拡助け孔とSD区間最外周孔での計測結果は、発破区間でK=425、SD区間でK=132であった。一方、振動を同定した段の孔あたりの薬量は、いずれの区間とも0.4~0.6kgであった。

森森^{2), 4)}は、スロットによる発破振動の低減効果の要因の一つとして、自由面の増加による薬量低減効果を示し、この要因を論じるには発破パターンに対して適正薬量であったか否かを検討する必要性を指摘している。一方、発破条件がK値に及ぼす要因として、発破のかかり方、荷の重さ、軽さが指摘されている⁴⁾。実験区間の施工においては、発破区間、SD区間とも孔あたりの薬量はほぼ同一であり、かつ両区間とも正常に発破を実施することができているが、何をもって適正薬量と定義するかは必ずしも容易ではない。従って、アーチ部での計測結果ではSD区間ににおいてK値が発破区間の約1/3に低減されているが、その要因については現場施工者による爆薬の選択を含めて自由面の増加により発破による破碎効果が良くなつたことが主たるものと判断できる。そこで、本研究では、薬量低減の効果、荷のかかり方などを含めて、スロットにより自由面が形成され、発破による破碎効果が良くなつたことによる効果としてK値が低減されたと考える。

(2) スロット周辺の振動伝播特性

爆源近くにスロットを設けた場合の振動伝播特性について検討する。

基礎実験における結果、図-5および図-6より、爆源から放出された波はスロット端部で回折し、爆源からみてスロットの影となる部分(以降、スロット背面と呼ぶ)に伝播することが明らかになった。その際、図-8で示されるように振動速度は減衰するとともに計測される振動波形の卓越周波数が低下する。

スロット背面での振動速度減衰については、その要因と

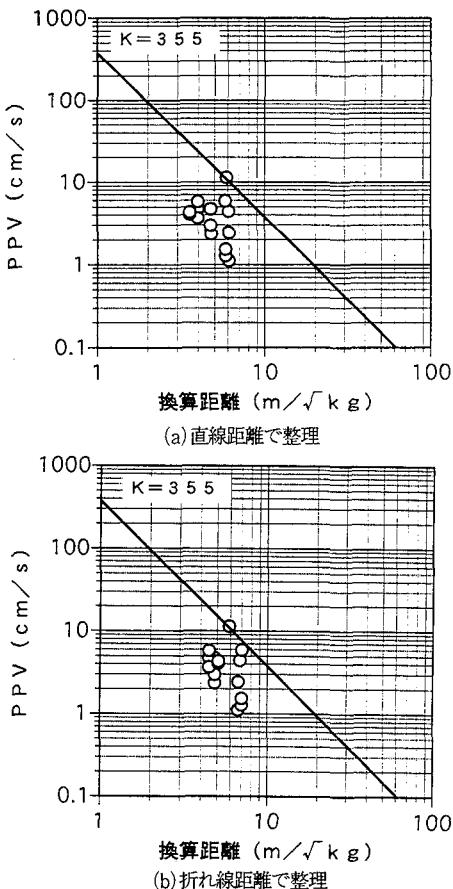


図-12 最大振動速度と距離の関係(基礎実験 200g 発破)

して①スロットで生じる回折現象による減衰、②爆源からの伝播距離の増加による減衰が考えられる。①の要因は、スロット、爆源および計測点の位置、伝播する振動の波長が減衰効果に関与する。②の要因は、式(1)あるいは式(2)で示されているように、伝播距離に対する減衰を考えるものである。基礎実験で示されたように、スロットで直線伝播経路が遮断されているため、スロット端部を通る折れ線波線となりスロット背面では伝播距離が長くなる。スロット背面で生じている減衰は、①および②の要因の複合であると想定されるが、スロットにより実際に回折減衰が生じているかの検討を行う。

図-12(a)は、図-7で示した計測結果のうち、スロットを挟む計測結果を抽出したものである。この図においてスロット背面での計測点におけるPPVは、換算距離に対して大きく変化していない。図-12(b)は、スロット背面での計測点と爆源の距離をスロット端部での折れ線としてPPVと換算距離の関係を示したものである。図-12(a)と図-12(b)を比較すると、スロット背面での計測値は近似直線に近づいているものの、近似直線に沿うプロットになっているとは言い難く、近似直線で示される値より低い振動速度となっ

ている。すなわち、スロット背面での振動速度は、図-5および図-6で示したように振動の伝播経路が折れ線波線となることによる爆源からの距離の増加による減衰だけでは説明できず、スロット端部での回折に起因する減衰効果が加味された結果であると考えられる。この関係については、5.(3)において定量的に検討を加える。

スロットによる振動伝播特性への影響として、計測された振動波形の周波数がある。基礎実験では、スロット背面における振動波形の卓越周波数は約500Hzであるのに対して、爆源近傍の直達波は1~4kHzの幅広い周波数のピークを有しており、波形もパルス状に近い。アーチ部計測でも、同様の傾向を示す。一方、アーチ部SD区間の計測における爆源、スロットおよび計測点の位置関係に着目すると、SD区間初期の発破では、計測点はスロット背面側にあるものの爆源と計測点の間にスロットは挟まない。このときの振動波形を発破区間において爆源距離がほぼ等しい場合の振動波形と比較しても、SD区間の振動波形は周波数が低い。これらのことから、スロットの振動伝播への影響として、振動周波数の低下をもたらすことが想定される。また、その影響は、爆源から見てスロット背面に位置する部分だけでなく、スロットに関わる一定の範囲でも見られるものと考えられるが、その範囲については確認することができなかった。

また、いずれの実験においても、爆源近傍においてスロットに関わる振動波形の卓越周波数は約500Hzとなっている。基礎実験およびアーチ部SD区間におけるスロットの深さはいずれも2mであり、卓越周波数とスロットの深さに何らかの関係が考えられるが、詳細については明らかにすることはできなかった。

(3) 簡易計算によるスロット周辺の振動の評価

基礎実験より、スロット背面近傍では、式(1)あるいは式(2)で示される発破振動推定式から予測される振動速度より低い振動速度となることが示された。そこで、スロット背面における振動速度の低減効果を簡易に評価する試みを行う。

交通車両、工場施設からの騒音を防止するために、しばしば遮音壁が設置されるが、その際、遮音壁の効果を評価するために、図-13に示すような前川⁷⁾の回折減衰のモノグラフが利用されている。図-13の縦軸は遮音壁による回折減衰量であり、横軸はフレネルナンバーNである。フレネルナンバーNは、音源(爆源)と遮音壁端部と計測点を結ぶ折れ線距離から音源(爆源)と計測点を直線で結ぶ距離を引いた行路差δの2倍を音波の波長で除したものである。フレネルナンバーNが大きいほど回折減衰量は大きくなり、遮音効果は高くなる。遮音壁とスロットの類似性、回折による振動の伝播の類似性によりスロットによる振動低減効果の評価への適用性が考えられる。畠山⁸⁾はウレタ

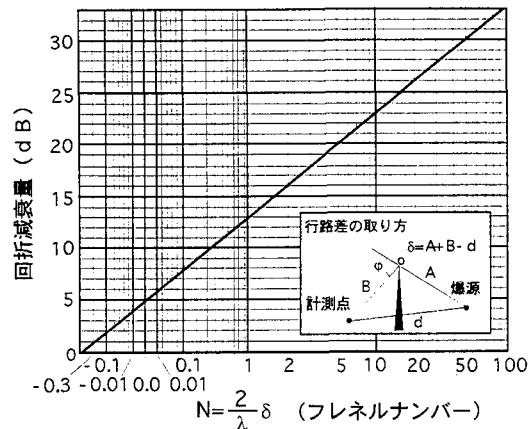
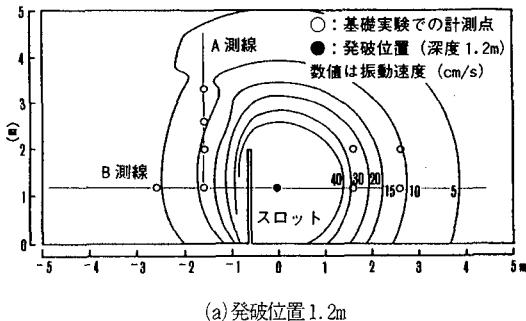


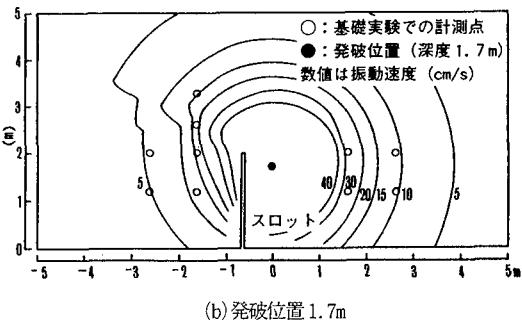
図-13 回折による行路差と減衰量の関係 (λ : 波長, δ : 行路差)。前川⁷⁾に加筆

ンホームで模型地盤を作成し、模型地盤表面上の振動源から60cmの位置に幅10cm、深さ30cmの切り込み(溝)を設け、周波数20~70Hzの正弦波で振動を与え、切り込みによる回折減衰について調べた。また、前川⁷⁾と同様、Kirchhoffの回折近似値を計算し実験結果と比較した。公害振動を対象とした周波数領域(1~100Hz)では、溝に比較して波長が長くなるため、振動減衰効果については期待できず、前川⁷⁾の実験結果を適用することに問題がある。しかし、本研究においては対象としている振動が実体波(疎密波)であり、その周波数も500Hz以上であることから、岩盤中を伝播する振動は、空気中の音と類似の特性を示すものと仮定できる。すなわち、第一近似として前川⁷⁾の実験結果を適用できることが考えられる。以下、図-13を基にスロットによる振動低減効果の評価法をまとめる。

- ①爆源は点振源であると仮定し、爆源から伝播する振動は、発破振動推定式(式(2))におけるパラメータに従って減衰するものとする。
- ②回折減衰量は、スロット、爆源、計測点(振動を評価したい位置)から図-13に示すように行路差δを計算し、グラフより求める。その際、周波数は予想される卓越周波数として弾性波速度から波長λを計算する。行路差δと波長λからフレネルナンバーNを計算する。
- ③計測点の振動速度は、爆源から計測点に振動が直達したとき予想される振動速度を発破振動推定式より推定し、②で求めた回折減衰量より計算する。ここで、波長が短いほど回折減衰量が大きくなることは明らかである。
- ④②および③の手順を繰り返すことでスロット周辺の振動速度の分布の推定を行う。



(a) 発破位置 1.2m



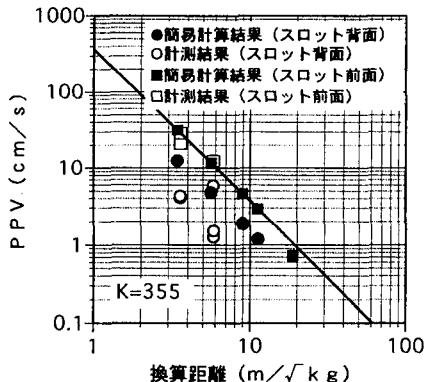
(b) 発破位置 1.7m

図-14 簡易計算によるスロット周辺の振動速度の分布

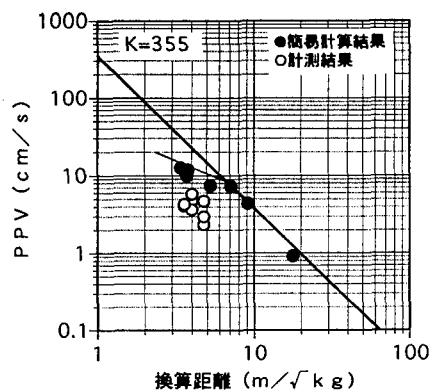
すなわち、発破振動推定式が同定されており、弾性波速度、卓越周波数がわかれば、任意の位置の振動速度が推定できることになる。①については発破振動推定式（式(2)）において、至近距離においても $\beta=2$ で近似できることとして、点振源を仮定できる。

基礎実験に対する計算結果を図-14 に示す。計算に用いたパラメータは、実験結果より $W=0.2\text{kg}$, $K=355$, $\beta=2$, 周波数 500Hz としている。ここで、周波数 500Hz は図-8(a) の卓越周波数の下限値に近い値をとったものであり、周波数が高くなると、フレネルナンバー N は大きくなる。図-14(a) は、発破点の深度を 1.2m として振動速度の分布を簡易計算より求めたものである。このとき、フレネルナンバー N は概ね 0.3 以下となる。振動速度の分布は爆源に対して非対称となり、スロット背面では明らかに振動速度の低下が認められる。図-14(b) は、同じ計算パラメータについて、発破点の深度を 1.7m とした場合の計算結果である。このとき、フレネルナンバー N は概ね 0.06 以下となる。発破点がスロット端部に近づくとスロット背面における振動速度は増加し、スロットによる振動低減効果が低くなることが明らかになっている。

振動速度と距離の関係について、簡易計算結果と実測値の対比を示すのが図-15 である。図中において白抜きのプロットは、簡易計算を行った測線上で計測された基礎実験における実測値である。簡易計算に使用した K 値は、図-7 で示したように、計測値の上限から決定していることを考慮すると、簡易計算結果は概ね実測値に近い値を得ている



(a) B測線に沿った位置における振動速度



(b) A測線に沿った位置における振動速度(アーチ部計測における発破点、スロットおよび計測点の位置関係に対応)

図-15 振動速度と距離の関係（簡易計算結果と基礎実験 200g 発破実験結果の比較）

と見なしてよい。また、図-15(b)は、アーチ部計測に対応する発破点と計測点の位置関係において、振動速度と距離の関係について整理したものであるが、アーチ部での計測結果と同様、発破点と計測点の距離が短くなると、 $\beta=2$ で近似される直線から振動速度は低い値にずれる。

なお、図-14、図-15 における計算結果においては、次の理由により、自由面、スロットよりの反射波は考慮していない。基礎実験においては、爆源および計測点は自由面に近く、振動波形は直達波と反射波が分離できていないものと判断できる。従って、最大振動速度の読み取りにおいては反射波の影響が含まれており、 K 値についても反射波の影響が含まれたものとなっている。このため、図-14 における計算結果において、自由面近傍の振動分布は正確ではない。反射を考慮する計算を行う場合、自由面に対して、発破点あるいは計測点に対応する鏡像点を置くことによりその影響を考慮することができる。

ここで示した計算方法は、波長とスロットまでの距離、スロットの長さとの関係、波長と回折角の関係など考慮さ

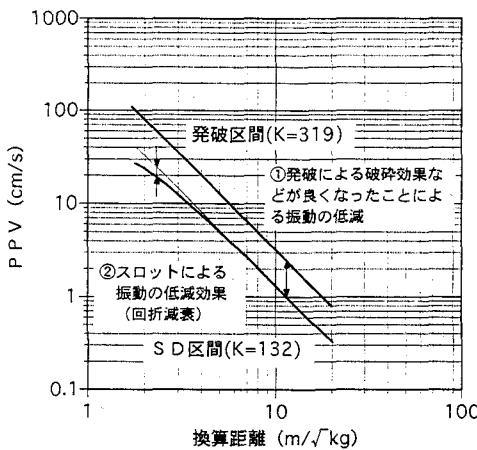


図-16 スロットによる振動低減効果の概念図。周波数を 500Hz, 弾性波速度を 5km/s として、アーチ部計測におけるスロットによる振動低減効果を簡易計算より概算したときの例。

れておらず厳密に欠けるものである。しかし、図-15 に示されるように、実験結果と計算結果は近い傾向を示しており、大まかな近似としてスロットによる振動低減効果を評価できるものと判断できる。

(4) スロットによる振動低減効果

スロットによる振動低減効果として、①発破による破碎効率が良くなったとされるK値の低下と②スロット背面における回折減衰による振動速度の低下を示した。さらに、萩森⁴⁾が示したように、スロットにより爆源距離が増加することによる振動速度の低下が確認された。図-16 は、これらを概念的に示したものである。①は発破振動全体の低下を意味し、②はスロット背面近傍での振動の低下を意味している。①は自由面増加による薬量の低減効果、発破に荷の変化によるK値の変化を包含したものである。②は爆源近傍において、スロットによる振動低減効果、爆源距離の増加による振動低減効果を総合したものと見なせる。図-9 に示したアーチ部計測結果において、切羽の進行が初期の段階（計測位置からの距離-8~6m）で SD 区間の振動速度が発破区間の1/2~1/3程度であることは①の効果に対応したものとみなせる。一方、切羽が計測位置に接近し、最大の振動速度を計測したとき、SD 区間の振動速度が発破区間の約 1/10 となっているは①の効果に②の効果が加味されたものとみなせる。

スロットによる振動低減効果を周辺岩盤への影響の観点から考察すると、K 値の低下は発破振動全体の低下を意味していることから、周辺岩盤中の亀裂を緩めない点で有効であると考えられる。一方、爆源近傍でのスロットによる振動低減（回折減衰）効果は、K 値の低下に加えて局所的に振動を低下させることにより、爆源近くの岩盤に強度

の低下を招くような損傷を低減できるものと考えられる。

6.まとめ

発電所地下空洞の掘削に際して、振動速度を抑え周辺岩盤への損傷を最小限にとどめる観点から、基礎実験、実施工にともなう振動計測を実施した。本研究で得られた主な知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 実施工時におけるアーチ部計測結果、外周スロットを設けたことにより、計測位置での発破振動は、通常の発破に比較して約 1/10 に低減された。
- (2) 最大振動速度と距離の関係は、計測値群を

$$PPV = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-\beta}$$

で整理し、定数 β を 2 として近似することができる。アーチ部施工時の計測結果、アーチ外周に対して同じ位置となる点での発破において、発破区間では $K=425$ 、SD 区間では $K=132$ となり、外周スロットにより、通常の発破に比較して K 値で約 1/3 に低減された。

- (3) スロットによる振動低減効果は、大きく、スロットにより発破の破碎効果が良くなったことによる K 値の低下と、スロット背面近傍ではスロット端部での回折減衰による低減効果の合成効果と考察される。
- (4) 発破振動と空气中を伝播する音の類似性から防音壁の評価に用いられるモノグラフ（図-13）を利用することにより、スロット近傍での振動速度を評価することができる。

以上のようにスロットによる振動低減効果を実証、分析し簡易な評価方法を示したが、いくつかの検討課題を残している。スロットによる K 値の低減に関しては、自由面の増加に伴う薬量の低減と発破の荷に対する K 値の変化の関係についての検討が必要であろう。スロット近傍の振動速度の評価については、発破振動推定式において、ほぼ $\beta=2$ で近似できたことより、点振源であるとして検討を行ってきたが、一孔あたりの薬量が多い場合は装薬長を考慮しなければならない。これらは今後の課題としたい。

謝辞：本研究を行うにあたり、ご協力をいただいた関係機関には謝意を表す。発破振動の計測に際して、奥多々良木発電所増設工事 2 工区企業体、蓮井課長（現株式会社間組）には終始便宜をはかっていただくとともに、多くの助言をいただいた。また、京都大学工学部、足立紀尚教授ならびに大西有三教授には多くの議論をまじえ貴重なご意見をいただいた。本論文をまとめるにあたり関西電力株式会社奥多々良木発電所増設工事建設所の皆様方に多大な支援をいただいた。あわせて感謝を表したい。

参考文献

- 1) 本田裕夫, 萩森健治, 古川浩平, 中川浩二:硬岩トンネルの無発破掘削に関する研究, 土木学会論文集, No. 379/VI-6, pp. 55-64, 1987.
- 2) 萩森健治, 竹知芳男, 古川浩平, 中川浩二:スロット工法を用いた低振動発破工法に関する研究, 土木学会論文集, No. 391/VI-8, pp. 142-150, 1988.
- 3) たとえば, 中野研一郎, 岡田滋, 古川浩平, 中川浩二:トンネル掘削における超近接発破に関する研究, 土木学会論文集, No. 462/VI-18, pp. 53-62, 1993.
- 4) 萩森健治:スロット削孔機を用いた硬岩トンネル掘削の研究, 名古屋大学学位論文, 1991.
- 5) 雜侯謙:発破振動の周辺への影響と対策, 鹿島出版会, 1984.
- 6) E.I.duPont de Nemours & Co.(Inc.): Blaster's Handbook, 16th Edition, Wilmingtton, Delaware 19898, p.426, 1977.
- 7) 前川純一:障壁(屏)遮音設計に関する実験的研究, 日本音響学会誌, No. 18-4, p. 187, 1962.
- 8) 畠山直隆:環境汚染制御, 昭和 49 年度特定研究(1), 353, 1975.

(1997.5.19受付)

REDUCTION OF BLAST VIBRATION BY SLOT-LIKE CONTINUOUSLY DRILLED HOLES

Masanobu TEZUKA, Shigeru MIKI and Koji NAKAGAWA

Blasting vibration during the construction of underground caverns causes unwanted damage to the surrounding rock. In this research, the effects of slot (holes continuously drilled along the perimeter of the tunnel) on the blast induced vibration reduction were investigated by the vibration measurement. The results revealed that the slot reduced the vibration in the surrounding rock to 1/3 in terms of vibration constant K. The reduction in vibration can be attributed to the decrease of burden and the reflection and diffraction of stress waves by the surface created by the slots.