

スリットを併用した発破工法による発破振動の低減に関する基礎研究

Reduction of the blast vibrations by blasting with continuous slots

手塚昌信*・大西有三**・三木 茂***・中川浩二****

Masanobu TEZUKA, Yuzo OHNISHI, Shigeru MIKI and Koji NAKAGAWA

It is important to reduce the damage to rocks caused by blast vibrations in excavating caverns or tunnels. We made vibration measurements to obtain the characteristics of vibrations around the continuous slots. During actual excavation, a vibration monitoring was made to clear the difference in the magnitude of vibrations between the conventional blasting method and the blasting method with continuous slots. These results show that propagating wave is diffracted and attenuated at the end of the continuous slots and the intensity of vibrations is lowered behind the continuous slots. In the blasting method with continuous slots, the K value in the prediction formula of blast vibrations was reduced to one third compared with the K value in conventional blasting method.

1. はじめに

発破工法は岩盤を掘削する点においては優れた工法であるが、発破の際に生じる振動により周辺岩盤が損傷を受け、力学的特性が低下することが懸念される。発破による振動を低減し、地下空洞の周辺岩盤の損傷を抑え、既存の亀裂を緩まさないことが、安全施工を行う点、岩盤の緩み範囲の縮小し支保の低減を図る点において重要である。一方、トンネルを掘削する際に発生する振動を低減する工法として、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掘り、発破効率を増すことで振動を低減する工法が開発され、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) 3)}。このスロットにより周辺岩盤への振動が低減されることは明らかであるが、発破位置に近接した場所での振動低減効果については必ずしも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。そこで著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評価するための実験を実施した。

2. 発破振動の評価方法

発破振動は爆源の状況、伝播経路などに大きく影響される。このため、理論的に発破振動の大きさを予測することは困難であり、経験的に発破振動推定式 $PPV=KW^aD^{-b}$ が使用されている。ここで、PPVは受振点における最大速度

-
- * 正会員 関西電力(株)奥多々良木発電所増設工事建設所
 - ** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木システム工学専攻
 - *** 正会員 基礎地盤コンサルタンツ(株)技術本部岩盤工学センター
 - **** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

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。定数 α は薬量の効率を表し、定数 β は振動の距離に対する減衰を表す定数となる。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、 $\beta=2\alpha$ として前述の発破振動推定式を変形した形をとる代表的な発破振動推定式

$$PPV = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-\beta} \quad (1)$$

を用い定数Kを指標にして、スロットによる振動低減効果を評価するものとする。なお、本研究においては、岩盤が受けた平均的な振動速度よりも最大振動速度履歴が重要な要因となると考えている。そこで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、振動速度の強さを表す定数Kについても、両対数グラフ上でのPPVと距離の関係においてプロットされる測定値群の上限をなす近似直線より決定した。

3. 振動計測実験の概要

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ヒン岩が分布する。RQDIは70～100の値を示し、地山の弾性波速度が5.0km/sec前後のB～CH級の良好な岩盤である。基礎実験は中央導坑側壁で行い、アーチ部計測は地下発電所アーチ部中央導坑の実施工時に行った。

基礎実験は図-1に示す計器配置で実施した。スロット、発破孔、加速度計設置点の位置関係は、後述するアーチ部計測における発破孔、スロット、加速度計設置点の位置関係に対応している。スロットは発破孔の位置を中心として高さ4m、深さ2mであり、発破孔の深さは2mとした。実験は、まず、薬量12.5gで発破孔の各深度で起爆を行い、振動の伝播状況を測定した後、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測定を行った。

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形で実施された。掘削はスロット削孔機により天端に地山との縁切りのためのスロットを設け、内部を通常発破工法で行う外周スロット発破工法で実施された。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（SD区間）で、15mを外周スロットを設けず通常発破工法（発破区間）で掘削を行った。発破区間およびSD区間における代表的な発破パターンを図-2に示す。天端最外周孔、助払い孔の孔あたりの薬量は0.4～0.6kgであった。発破区間、SD区間とも発破孔の深さ1.4mであり、SD区間でのスロットの深さは2.0m、幅52mmであった。発破振動の計測（アーチ部計測）は図-3に示すように、発破区間およびSD区間の中央に2箇所ずつアーチ

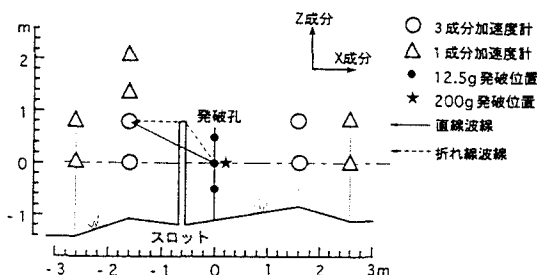


図-1 基礎実験の測定レイアウト

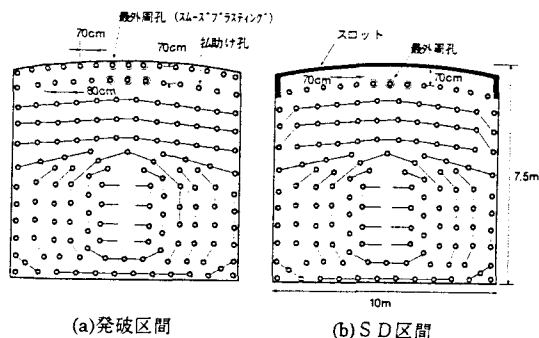


図-2 中央導坑発破パターン

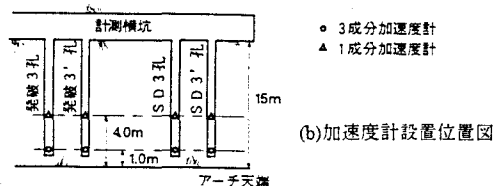
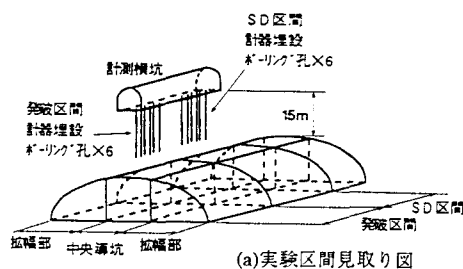


図-3 アーチ部計測のレイアウト

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。

4. 計測結果

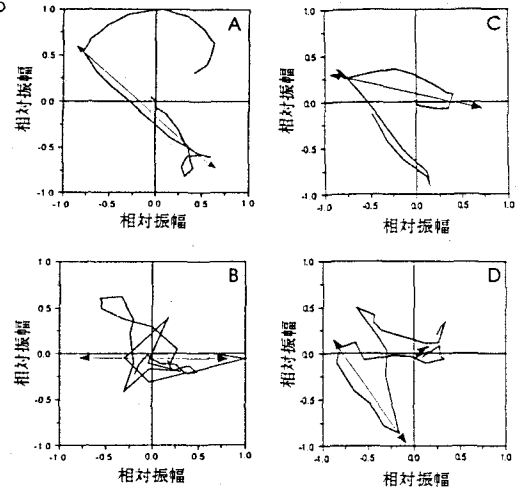
4・1 基礎実験結果

3成分加速度計による測定結果から、各測点での振動軌跡を示したものが図4(a)であり、その結果より波動の伝播方向を示したものが図4(b)である。測定波形には反射波などが含まれており複雑な振動軌跡を示すため、振動方向の同定には主要動の第1波目を用いた。図4(b)において、爆源と観測点の間にスロットを挟まない位置では、振動方向は発破点を始点とする方向にある。一方、スロットを挟む観測点においては、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P波であることから、振動方向は波動の伝播方向を示すことになる。従って、爆源と観測点の間にスロットを挟む場合、スロット端部で回折し波動が伝播することを示唆している。また、薬量12.5gの発破実験で走時図を作成すると、スロット端部で回折し波動が伝播する波線距離で整理した場合、ばらつきの少ない走時図が作成された。

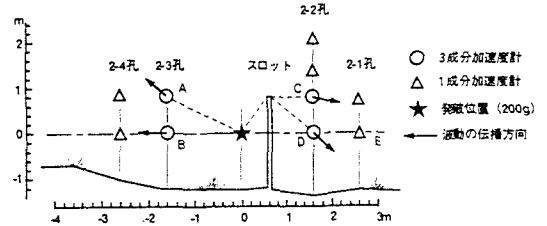
薬量0.2kgでの実験において、PPVと薬量で補正した距離（換算距離）の関係を図5に示す。ここで、PPVは3成分加速度計で測定したもののについては、発破点、観測点を含む平面上でベクトル合成した値である。また、1成分加速度計での測定値は、波動入射方向 θ を考慮し、観測最大速度 V_0 に対して、 $V = V_0 / \cos \theta$ で補正を行っている⁴⁾。また、爆源と観測点の間にスロットを挟む場合、波動の入射方向は前述の結果よりスロット端部とした。図5においてプロットの上限は、式(1)において $\beta=2$ 、 $K=355$ で近似できる。爆源から直接、観測点に波が伝播する位置の測定値（図中、黒抜き）は、スロットを挟む位置での測定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、スロットを挟む観測点における測定値（図中、白抜き）の上限は、換算距離に対して大きく変化していない。

4・2 アーチ部計測結果

図6³⁾はアーチ部計測において、天端から1mの位置で計測された空洞長軸方向の振動速度の分布を示したものである。発破区間では、概ね0.8~80cm/secの振動速度が観測されており、切羽が測定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最大振動速度を記録している。SD区間では、概ね0.3~4.5cm/secの振動速度が観測



(a)各観測点での振動軌跡（両矢印は主要動第1波目の振動方向）



(b)振動軌跡から推定される波動伝播方向
（基礎実験、200g 発破実験の結果）

図-4 振動軌跡による波動伝播経路の検討

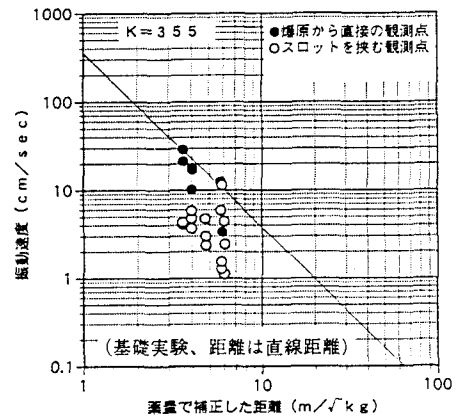


図-5 最大発破振動速度と距離の関係

されており、切羽が測定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測定点に達する手前で記録している。

切羽が観測点に達するまでの測定結果について、PPVと換算距離との関係を図-7に示す。いずれの結果も天端中央3孔での発破時の測定結果である。発破区間最外周孔（図-7(a)）での測定値の上限は、 $\beta=2$ 、 $K=319$ で近似でき、天端端払い孔（図-7(b)）では、 $\beta=2$ 、 $K=425$ で近似できる。一方、SD区間では最外周孔（図-7(c)）での測定値の上限は、 $\beta=2$ 、 $K=132$ で近似できる。振動速度の強さを表す定数Kは、SD区間では発破区間の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するが、SD区間では換算距離が概ね $4\text{m/kg}^{1/2}$ 以下となる点においてプロットが近似直線からPPVの低い値側にずれる傾向がうかがえる。

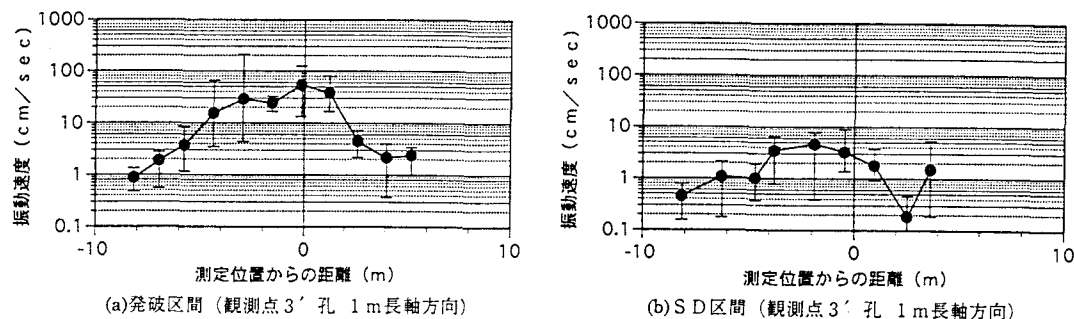


図-6 アーチ部計測における発破振動の分布⁵⁾

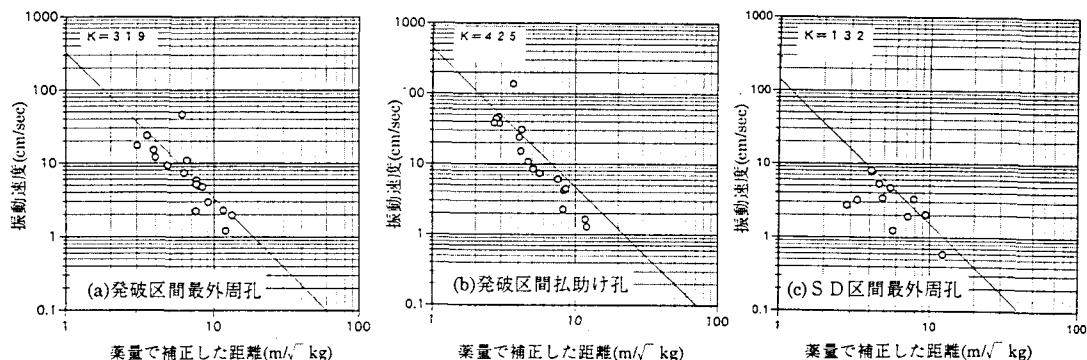


図-7 最大発破振動速度と距離の関係（アーチ部計測）

5. スロットによる振動低減効果の検討

アーチ部計測において、発破孔が同じ位置関係にあたる発破区間天端助付け孔とSD区間最外周孔での測定結果は、発破区間で $K=425$ 、SD区間で $K=132$ であった。発破区間、SD区間とも薬量はほぼ同一であり、両区間とも正常に発破を実施することができていることから、薬量についてはほぼ適正なものであったと判断される。従って、アーチ部での計測結果ではSD区間において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自由面の増加による発破が容易になったことが主たる

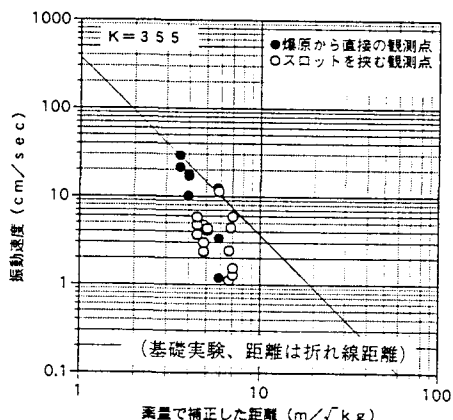


図-8 最大発破振動速度と距離の関係

ものと判断できる。

基礎実験の結果、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（スロット背面）に伝播することが明らかになった。スロット背面での振動速度の減衰については、その要因として①回折現象による減衰、②爆源から伝播距離の増加による減衰が考えられる。②の要因が主体であると仮定すると、波動の伝播経路に従い距離を折れ線波線の長さとしたとき、図-5におけるスロット背面での測定値は図中に示した近似直線にプロットが沿う形となることが考えられる。図-8はスロット背面での観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。スロット背面での測定結果のプロットは、図中の近似直線に沿う結果とはなっておらず近似直線より低い振動速度となっている。この低下量は波動の伝播経路を考慮した爆源からの距離の増加だけでは説明することが困難であり、①および②の要因の複合であると想定される。また、岩盤中を伝播する波動の卓越周波数が1～4kHz、波長が1～5mと比較的短く、スロットと騒音防止のための遮音壁が類似することから、前川⁶⁾の実験結果によるモノグラフからスロットによる回折減衰量を計算すると、図-4(b)におけるD点の振動速度はB点の約1/3となる。そこで、式(1)で示される距離による減衰とスロットによる回折減衰を掛け合わせると実験結果に近い値となった。

6. まとめ

発電所地下空洞掘削に際して、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、実施工にともなう振動計測、基礎実験を実施した。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、外周スロットにより天端中央から1mの位置において発破振動は約1/10に低減された。また、アーチ外周に対して同じ位置での発破において、発破区間では $K=425$ 、SD区間では $K=132$ となり、スロットにより K 値が約1/3に低減された。
- (2)スロットによる振動低減効果は、自由面の増加で発破が容易になったことによる K 値の低下と、スロット端部での回折減衰およびスロットを設けることによる爆源距離の増加で、スロット背面近傍の振動速度が低下することに分析される。

謝 辞

本研究を行うにあたり、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。発破振動の測定にあたり、奥多々良木発電所増設工事第2工区共同企業体および関係者に多くの協力を得た。また、同共同企業体蓮井昭則氏（現株式会社間組）には、多くの議論をまじえ貴重なご意見をいただいた。山口大学大学院工学研究科小嶋賢氏（現石川島建材工業株式会社）には、計測データの整理を手伝っていただくとともに多くの議論をまじえた。あわせて感謝を表す。

7. 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) 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。
- 4) 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。
- 5) 小嶋 賢：硬岩盤トンネルの掘削における発破損傷の傾向と対策に関する研究，山口大学大学院工学研究科修士論文，1996。
- 6) 前川純一：障壁（塀）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。