地表面での盤下げ発破に対するトンネル坑内での振動計測結果に関する一考察

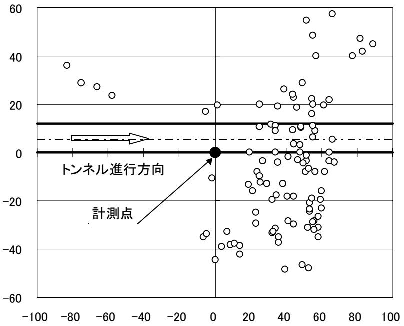
○（株）大本組　愛宕山トンネル作業所　正会員　丸山　功
国土交通省　中国地方整備局　山口工事事務所　正会員　大久保雅憲
（株）大本組　技術本部　技術開発部　正会員　鈴木昌次
旭化成ジオテック（株）　西日本化薬営業部　松岡秀之
山口大学　工学部　社会建設工学科　正会員　中川浩二

１．はじめに

愛宕山トンネルは、主としてCM～CH級に分類される広島型花崗地山を貫く延長668m、断面積77.6m^{2}の道路トンネルである。トンネル工事着手時には既に地表部での宅地造成工事が進められており、両工事の同時進行となった。このため、トンネル掘削に対する影響範囲と考えられる土被り2D位置まで盤下げ掘削を先行し、トンネルでの一次支保工施工後に、トンネル直上15.4mの造成計画高さまでの盤下げ掘削を再開する計画とした。施工時には、事前の検討結果の検証、トンネル構造の安定性等を確認する目的で盤下げ掘削再開後の各種計測を実施した。本文では、地表面での発破掘削に伴う振動をトンネル坑内で連続計測した結果を報告する。

表－１　発破緒元

パターン	発破数	削孔長(m)	薬量(kg/孔)	孔数
1	163	3.0	2.35	20
2	17	2.5～2.8	1.2～1.3	10～20



図－１　平面位置図

２．盤下げ掘削での発破緒元と計測概要

盤下げ発破は、親ダイに３号桐、増しダイにANFOを用いた10～20孔のDS雷管による段発発破である。発破振動を計測したイベント数は180回である。発破緒元を表－１に示す。計測はトンネル下半盤にピックアップを固定した連続計測とした。図－１に平面位置を示す。平面距離は発破作業領域の中心から計測点までの10.7m～94.6m範囲、高低差は削孔底面から計測点までの29.9～42.9m範囲にある。トンネルとの位置関係では、進行方向右側91、左側15、直上57イベントである。

表－２　パターン１計測データの基本統計量

		距離			振動速度			
		平面	高低	斜	VX	VY	VZ	V
振動速度	VX	-0.52	-0.33	-0.52	1			
	VY	-0.33	-0.34	-0.35	0.69	1		
	VZ	-0.53	-0.42	-0.54	0.63	0.63	1	
	V	-0.49	-0.39	-0.50	0.95	0.81	0.74	1
周波数	FX	-0.17	-0.28	-0.19	0.56	0.47	0.20	0.55
	FY	-0.15	-0.26	-0.18	0.19	0.35	0.29	0.24
	FZ	-0.03	-0.24	-0.05	0.11	0.36	0.40	0.24

３．発破振動計測結果

盤下げ発破でのほとんどが同一薬量であるため、本文では主として表－１に示すパターン１での163イベントを対象とする。表－２にパターン１に関する計測データの相関係数を示す。表中のVXはトンネル直交方向、VYは軸方向、VZは上下方向の振動速度であり、Vは３成分の合成速度である。FX、FY、FZは同方向の卓越周波数である。表－２より、振動速度は平面距離、高低差に関して負の相関関係にある。卓越周波数は距離と負の相関、速度と正の相関にあり、近距離であるほど振動速度が大きく、卓越周波数も高いことを示す。

図－２では発破位置と各振動速度成分の代表値を示した。ただし、トンネル左側でのイベント数は少ないため割愛した。図より、発破位置に係わらず、トンネル直交方向の振動が卓越し、軸方向が最小となることがわかる。図－３は斜距離と合成速度の関係を示した。図中の式は各振動成分および合成値に対して薬量一定条件下で式（１）においてαを変数とした回帰式であり、R^2は回帰係数を示す。30m程度以遠の振動速度は式（１）で予測され、距離減衰を与えるαは-2.0とするのが一般的である。これに対して、本トンネルでは-0.8～-1.3

キーワード：明かり発破、山岳トンネル、発破振動、坑内計測
連絡先（岩国市南岩国町4-591　（株）大本組　愛宕山トンネル作業所　TEL0827-34-2250　FAX：0827-34-6411）

表－３　回帰モデルの係数

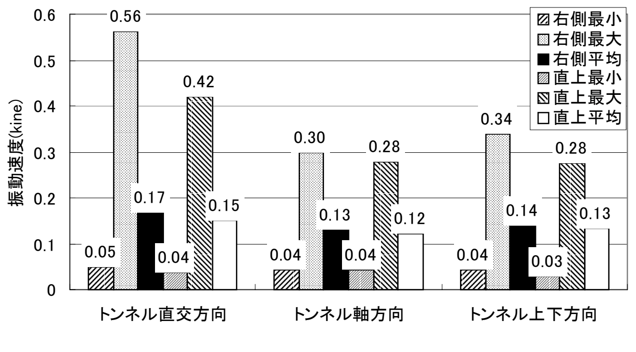
成分	トンネル右側		トンネル直上	
	α	R^2	α	R^2
直交方向	-1.3	0.3	-1.7	0.5
軸方向	-0.5	0.1	-1.2	0.4
上下方向	-0.7	0.1	-1.7	0.5

となっている。表－３では発破位置を右側と直上に分割して、同様に薬量一定条件下で得られるαと回帰係数を示した。表より、トンネル右側では-0.7～-1.3、直上では-1.2～-1.7 となるが。トンネル右側での軸方向と上下成分はばらつきが大きい。また、最も卓越する直交方向成分では-1.3～-1.7 の範囲で比較的高い相関を有する。このように、本トンネルでの発破振動に対する距離減衰はα>-2 であり、位置関係においては直上での発破による直交方向と上下方向振動ではα=-1.7 と二乗則に近くなる。また、パターン１の全データを用いた場合の合成振動ではα=-1.1 となるが、データのばらつきと卓越成分を考慮した場合にはα=-1.3～-1.7 の範囲と考えるのが妥当であろう。

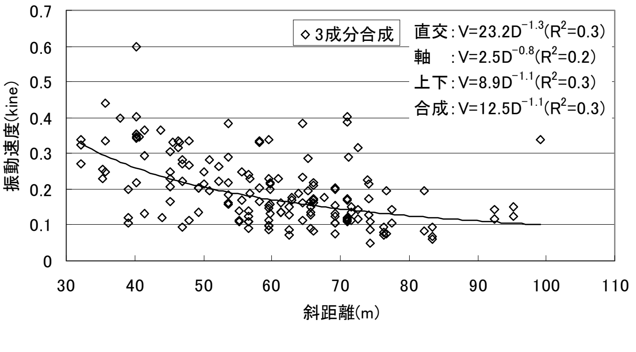
$V = K \times W^{\beta} \times D^{\alpha}$ (1)　W：斉発薬量（Kgf)、D：距離（m)、K、α、β：定数

図－４は薬量の異なるパターン２のイベントに対し、式（１）のβを 2/3 としてα=-1.1 とα=-2.0 の場合の K 値を逆算し、さらに各々の平均 K 値を用いて改めて振動速度を予測したものである。図中の直線は計測値と予測値の一致点を示す。図より、α=-1.1 の場合がより計測値との近似度が高いことがわかる。

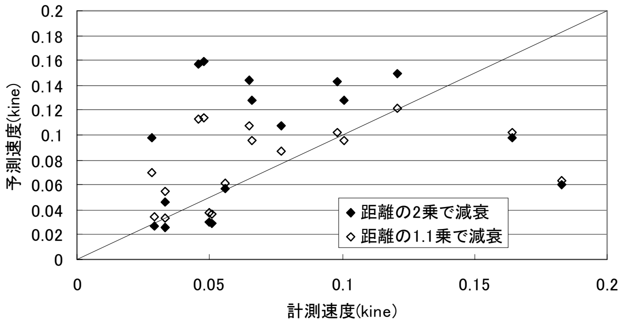
盤下げ発破に対する許容振動速度は過去のトンネル近接発破事例を参考にトンネル天端において 10kine としたが、上記の距離減衰を用いてトンネル天端での振動速度を予測した結果、平均 K 値を用いた場合に最大速度 0.5kine（平均速度 0.2kine)、最大 K 値を用いた場合にも最大速度 1.5kine（平均速度 0.7kine）となり、トンネルに対する十分な安全性が確認できた。なお、図－５には卓越周波数の発生頻度を示した。図より、卓越周波数は 150Hz 以下がほとんどを占めることがわかる。



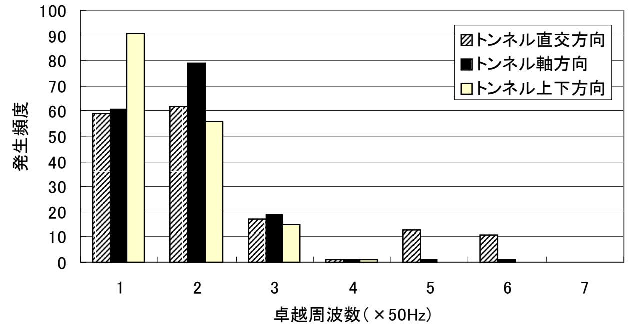
図－２　発破位置および振動速度成分



図－３　斜距離と振動速度の関係



図－４　振動速度に関する計測値と予測値の関係



図－５　卓越周波数

４．おわりに

地表面での発破作業によるトンネル坑内での振動特性を調べた。この結果、振動はトンネル直交方向に卓越し、その距離減衰は-1.3～-1.7 乗の範囲であり、卓越周波数は 150Hz 以下であることを示した。また、安全側を考慮して距離減衰を計測データ最適値の-1.1 乗とした場合においてもトンネル天端位置での平均発破振動は 1kine 未満であり、十分安全であったと判断できる。末尾ながら、貴重な発破データを提供頂いた山口県住宅供給公社、清水・戸田・洋林・井森・勝井 JV 愛宕山地域開発事業造成工事建設所に御礼を申し上げる。