

(82) 平行芯抜き発破現場実験の一考察

佐藤工業（株）	正会員	○	南出 英男
佐藤工業（株）			加納 米二
スウェーデン爆破研究所			マクローニ、フィン
山口大学	正会員		中川 浩二

Site Blasting Test on Parallel Hole Cut

Hideo MINAMIDE, Yoneji KANOO, Sato Kogyo Co. Ltd.
Finn OUCHTERLONY, Swedish Detonic Reserch Foundation
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

Experiment was conducted to show the effectiveness of low velocity of detonation (VOD) explosive on excavation of hard rock in tunneling, since, in low VOD explosive, mechanical execution and speed-up of construction are expected. Blasting tests at first square in a parallel hole cut using low and high VOD explosives respectively are conducted. Tests using different VOD explosives were conducted; explosive with low and high VOD were set at first square of blast hole and blasted. The distance between the empty hole to empty hole, that between the blast hole and empty hole, and the charge concentration were chosen as test parameters.

It is shown that low VOD explosive works well at higher charge concentration than high VOD explosive, hence it is very effective on excavation of hard rock.

1. まえがき

硬岩山岳トンネルの掘削法については、トンネルボーリングマシン等の連続掘削機による機械化施工の研究開発が近年旺盛になってきているが、施工法の主力が発破工法であることが変化する状況にはなっていない。発破掘削の施工速度向上は硬岩山岳トンネル施工の最大の課題であり、1ラウンド当たりの進行長を延ばす事は重要な基本要素である。また、削孔やズリ積み作業は近年機械化が進んでいるが、一連の作業中、爆薬の装填作業はいまだに人力が主体で、サイクルに占める所要時間比率も高くなり大きな隘路となっている。爆薬の装填作業の自動化については、薬包用の空気装填機は特殊用途に海外では開発済み¹⁾で、国内でも試作されている²⁾。しかし、現状では、海外諸国でも同様の状況と推察されるが、わが国の火薬事情からみて、行政・製造技術の両面からばら物のANFOを空気装填するのが適当と考えられる。

高い確率で1発破進行長を延ばすためには芯抜き法としてパラレルホールカットの採用が不可欠である。爆薬としてダイナマイトやエマルジョンのような高爆速爆薬を使用したパラレルホールの芯抜き技術はLangefors等により工学的に大体確立しているが、ANFOのような低爆速の爆薬による技術は、トンネル発破にANFOを使用するようになったこと自身が最近の傾向であるため、未解決の部分が多く技術的分析が望まれる。1発破進行長の増加と装填作業の機械化の両者を同時達成するための基礎資料を得るため、主としてパラレルホールカットの基礎部分である第1スクウェアについて、高爆速爆薬と低爆速爆薬の現場での比較実験を数十例行い、その作用効果を求めたので報告する。

2. 実験内容

(1) 実験場所

実験場所は埼玉県秩父郡武甲鉱山の山頂石灰石採掘現場である。ベンチ高さ10m、ベンチ傾斜70°の斜面で平行芯抜き発破実験を行った。表面は採掘のためのベンチ発破で荒れていたため、バックホーで表面整形してから、実験を行った。

実験を行ったベンチの地質は、石灰岩が主体であり、部分的に粘土化した輝緑凝灰岩が認められた。石灰岩は、全体的に割れ目が多く、割れ目間隔は10~20cm、卓越方向はN36~44E/75SEであった。石灰岩の岩石強度は、点载荷引張試験機による引張試験で0.49~15.7MPaの範囲(平均値5.8MPa)であった。

現地のベンチを対象に簡易な弾性波速度測定試験を行った結果、平均で2300m/sの弾性波速度であった。また、この値と岩石の超音波試験の結果(平均値5650m/s)から求めた亀裂係数(1-v/V)は0.83であった。

(2) 実験ケース

平行芯抜きの基礎部分である第1スクウェアについて実験を行った。

実験固定因子

- ・計画削孔長4m; 実験上の削孔精度の影響を明確にするため及び将来の延伸化傾向を踏まえたものである。
- ・起爆秒時差75ms以上; NONEL雷管のGT/Tシリーズの0, 1段³⁾を基本にしたものである。
- ・空孔2×φ102mm; 空孔は1つよりも2つの方が成功率が高く、かつ空孔径が大きい方が成功率が高いため実用性を考慮した。

実験可変因子(基本因子)

- ・爆薬; エマジョン爆薬(φ30mm、φ25mm), ANFO爆薬
- ・雷管; 導火管付き雷管, ハーキデット非電気式段発雷管
- ・削孔径; 空孔; φ114mm、φ102mm
装薬孔; φ48mm、φ45mm、φ43mm

- ・計画抵抗線長; 300mm、200mm
- ・計画空孔間隔; 300mm、200mm

基本的実験ケースは26ケースである。さらに秒時差0, 25, 50msの3ケースと空孔径を装薬径と同径にした

3ケースを追加した。ケース内容は、エマジョンにはE, ANFOにはAをつけて第1発破抵抗線長の短い順に並べて表-1に示した。

(3) 削孔精度

削孔後に反射ターゲットを1m間隔で貼付した込め棒を孔に挿入し、孔口と孔口手前1mの点のx, y, z座標を三次元測定システム(MONMOS)⁴⁾にて計測した。孔口から4m奥の座標は孔口と孔口手前1mの2点から算出した。

削孔ズレは、口付けズレ、方向ズレ、岩石内ズレの3要素で構成されている。

口付けズレは空孔(上)を基準にして、各孔の計画位置からのズレである。

方向ズレと岩石内ズレの合成ズレは基準の空孔(上)を空孔(下)、装薬孔1、装薬孔2の各孔の孔口に平行移動して、孔口でのズレを無くした場合の4m孔奥でのズレである。

削孔ズレは口付けズレと合成ズレ(方向ズレ+岩石内ズレ)との合計とした。

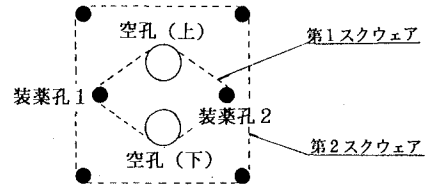


図-1 削孔形状

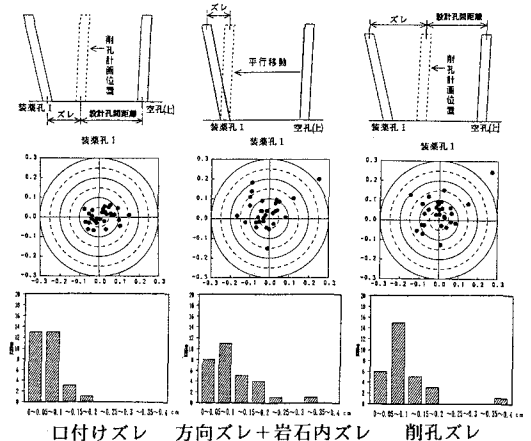


図-2 削孔ズレ

3. 実験結果及び考察

(1) 観察結果

表-1において抵抗線長を次のように定義する。1ケースあたり4本の孔で形成されるひし形断面を2つの空孔を軸とした2つの三角形に分割する。3孔のうち最短削孔長の孔に着目し、その孔の孔尻位置で、孔軸に垂直な面内の三角形を考える。そして、三角形上空孔軸間を結ぶ直線への装薬孔からの垂線の長さを各抵抗線長とする。なお、垂線が空孔軸間にない場合は、装薬孔から最短距離の空孔までの長さを抵抗線長とする(図-3参照)。

実験ケースごとに進行率を90%以上と89%以下に区分し、空間断面積を大、中、小に区分して、表-2の判断基準に従って良、可、不可に分類した。ここで進行率とは空孔下での発破長/削孔長である。また、空間断面積が大とは4孔が連結した場合、中とは空孔2つと装薬孔1つの3孔が連結した場合、小とはうまく連結しなかった場合である。なお、現地での起爆順序の設定は3次元測量結果のうちのX,Y座標から、孔尻での空孔間直線と装薬孔間直線との交点を求め、装薬孔交点間距離の短い方を第1発破とした(図-4参照)。

表-1 実験ケース及び実験結果

ケース	爆薬	雷管	秒時差削孔径(mm)		装薬径空孔間隔抵抗線長(mm)		装薬集中度(N/m)			進行率	空間断面積	結果		
			(ms)	空孔	装薬孔	(mm)	第1発破	第2発破	第2発破					
E-1	エマルジョン	ハーフデット	100	102	45	30	200	35	160	8.33	7.45	****	小	不可
E-2	エマルジョン	NONEL	75	102	45	25	211	71	280	5.49	5.39	100	大	良
E-3	エマルジョン	NONEL	75	102	45	30	330	126	250	6.86	7.45	100	中	良
E-4	エマルジョン	NONEL	75	102	45	25	248	163	****	5.78	4.31	44	大	不可
E-5	エマルジョン	NONEL	75	102	45	25	434	223	330	5.59	5.29	****	小	不可
E-6	エマルジョン	NONEL	75	102	45	25	197	244	280	5.29	5.29	****	小	不可
E-7	エマルジョン	NONEL	75	102	45	30	197	286	220	7.25	6.96	****	小	不可
E-8	エマルジョン	ハーフデット	100	102	45	30	170	288	280	6.76	7.45	100	中	良
E-9	エマルジョン	NONEL	75	102	45	30	341	390	390	7.06	6.86	****	小	不可
A-1	ANFO	NONEL	75	102	43	43	282	80	160	16.86	14.21	88	大	良
A-2	ANFO	ハーフデット	100	102	48	48	383	91	220	15.39	15.88	94	大	可
A-3	ANFO	NONEL	75	48	48	48	145	94	250	16.76	19.11	81	大	可
A-4	ANFO	NONEL	75	102	45	45	331	128	270	15.97	14.60	99	大	良
A-5	ANFO	NONEL	75	102	43	43	258	131	150	16.17	14.21	97	大	良
A-6	ANFO	ハーフデット	100	114	45	45	264	146	260	12.15	12.54	94	大	良
A-7	ANFO	NONEL	0	102	48	48	505	177	250	14.60	14.60	80	大	可
A-8	ANFO	NONEL	75	48	48	48	190	195	250	16.86	19.40	100	大	良
A-9	ANFO	NONEL	75	102	45	45	89	202	300	13.62	18.03	****	小	不可
A-10	ANFO	NONEL	75	102	43	43	217	208	370	17.05	15.88	98	中	良
A-11	ANFO	NONEL	75	102	48	48	270	208	560	16.17	18.23	100	中	良
A-12	ANFO	ハーフデット	100	114	48	48	242	219	160	16.86	8.53	****	小	不可
A-13	ANFO	ハーフデット	100	45	45	45	138	245	190	14.41	14.60	100	大	良
A-14	ANFO	NONEL	50	102	48	48	241	246	190	15.97	15.39	100	大	良
A-15	ANFO	NONEL	75	102	43	43	195	256	170	12.84	12.84	100	大	良
A-16	ANFO	NONEL	75	102	45	45	245	265	400	12.25	14.60	100	中	良
A-17	ANFO	NONEL	75	102	43	43	374	275	370	16.95	14.11	56	中	不可
A-18	ANFO	NONEL	75	102	48	48	327	275	320	16.86	17.64	94	中	良
A-19	ANFO	NONEL	25	102	48	48	324	283	220	16.86	14.50	80	大	可
A-20	ANFO	NONEL	75	102	45	45	258	332	150	13.92	13.33	92	大	良
A-21	ANFO	ハーフデット	100	102	45	45	291	349	210	13.82	13.62	100	大	良
A-22	ANFO	NONEL	75	102	48	48	262	353	340	16.86	18.52	100	中	良
A-23	ANFO	NONEL	75	102	48	48	160	384	460	12.84	****	****	****	?

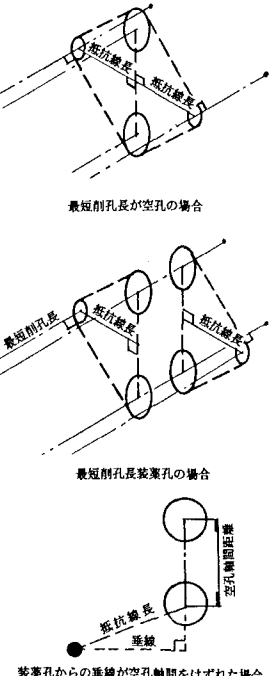


図-3 抵抗線長の考え方

表-2 実験結果判断基準

		進行率	
		90%以上	89%以下
		良	可
空間断面積	大・中		
	小	不可	不可

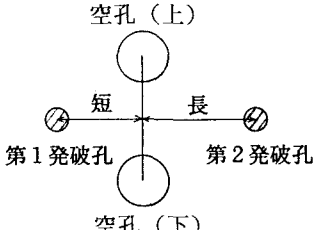


図-4 現地起爆順序設定法

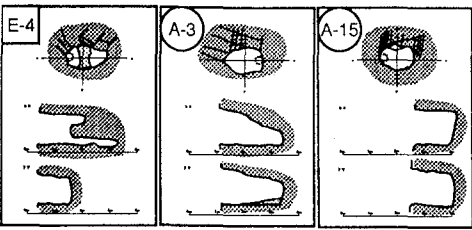


図-5 観察結果例

(2) 空孔径と抵抗線長

2つの空孔を近接して削孔した場合は、設計上あたかも2つの空孔の面積和と同面積の空孔が両空孔の中間位置に1つあるものとして、空孔を考慮する。図-6の矢印の元のプロットラインはこの考え方に基いて、設計空孔径と抵抗線長の関係を第1発破孔について求めたものである。しかし、右下の3点は、孔は連結していないのに、連結して良好な結果が得られたようになり現象と相反する。そこで、実空孔径と抵抗線長とに修正して関係を求めたものが、矢印の先のプロットラインである。実空孔径で整理すると、孔の連結の問題が解決するので現象を正しく表現できる。したがって、当実験のように2つの空孔が近接していない場合は、設計空孔径ではなく実空孔径で考えるべきであろう。

(3) 空孔間隔と抵抗線長

図-7は各ケースの観察結果から良/不良の、装薬孔中心から空孔壁までの距離を抵抗線長とした限界抵抗線長を求め、点をプロットして良のケースのかたまりを爆薬ごとに線で囲ったものである。ANFO爆薬は抵抗線長と空孔間隔の組み合わせ範囲が広いが、エマルジョン爆薬の範囲は狭い。しかも、範囲内に不可の3つのケースがある。

図-8は第1発破の孔奥位置での抵抗線長と空孔間隔の関係を求め、良の範囲を示した。エマルジョン爆薬の良の範囲内に不可のケースが近接して3点あり、エマルジョン爆薬の場合は、削孔精度等の微妙な差が結果の良否を左右していると考えられる。

図-9は第2発破について、自由面幅と抵抗線長との関係を求めたものである。ここで自由面幅とは第1発破側の装薬孔が空孔(上)、空孔(下)と連結した場合は、2空孔の外壁間距離を言う。また、連結しない場合は、空孔径を自由面幅としている。図-9は第1発破で2つの空孔が連結すれば発破効果が良いことを示している。

(4) 抵抗線長と装薬集中度

図-10は第1発破について、エマルジョン爆薬(重量ストレングス113)とANFO爆薬(重量ストレングス100)の重量ストレングスを同一になるように換算して、抵抗線長と装薬集中度の関係を求めたものである。エマルジョンは通常の使用範囲⁵⁾内のものでも良のケースが少なく範囲外の方が良のケースが多い。また、ANFOは範囲外の高装薬集中度に位置している。そこで、実験データをもとに爆薬ごとの適用範囲を求める。なお、集

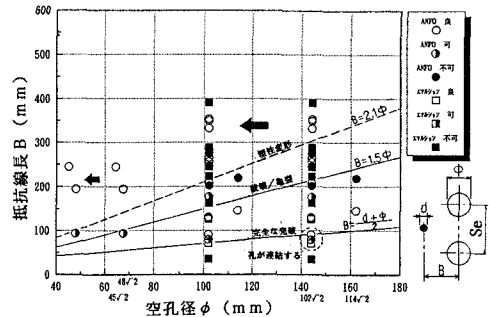


図-6 設計空孔径と抵抗線長
(第1発破孔)

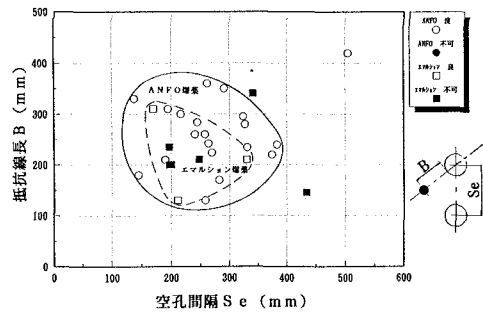


図-7 抵抗線長と空孔間隔の関係
(第1発破孔と第2発破孔)

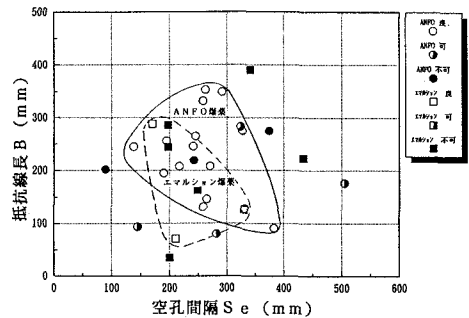


図-8 第1発破の抵抗線長と発破効果

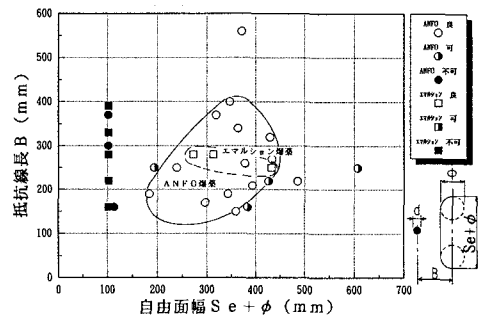


図-9 第2発破の自由面幅と発破効果

中装薬度は重量ストレングス換算をしない実施集中装薬度とする。

図-11で実験による適用範囲内の不可のケースは、E-4、E-7である。E-4は3次元測定データ消失で詳細には不明であり、E-7は削孔精度が悪く、しかも現地では2次元で起爆順序を設定したが、3次元でデータ整理した結果、起爆順序が逆になったケースである。

図-12で実験による適用範囲内の不可のケースは、A-12、A-17である。A-12は起爆順序違い（前述E-7と同様の理由）と雷管死圧であろうと思われるケースである。A-17は削孔精度が悪く、孔口面積よりも孔尻面積の方が広いので破碎岩が排出されにくい形状になったケースである。

空孔径が $\phi 45$ 、 $\phi 48\text{mm}$ のケースに*を付した。A-3は進行率が80%しか得られていない。3ケースだけでは判断しかねるが、確率1/3で進行率が低いのは実用上問題が残ろう。図-11、12から削孔精度が発破効果に影響を与えるが、ANFO爆薬の方が影響は小さく、装薬集中度の適用範囲は広いと考えられる。

4. あとがき

石灰岩盤のベンチ発破斜面で行ったパラレルホールカットの第1スクウェアに関する高爆速爆薬と低爆速爆薬との比較実験を紹介した。

低爆速爆薬は、削孔間隔の適用性が広くANFOチャージャーの適正空気圧で得られる装薬集中度が適正装薬量であると考えられる。この範囲は高爆速爆薬では焼結が起こりやすいと言われている⁵⁾ことからすると、低爆速爆薬は現場への適用性が高いと考えられる。

一連の実験から、平行芯抜きにばら物のANFO爆薬を空気装填する方法は、1発破進行長の増加と装填作業の機械化を同時に達成するのに有効な手段であると考えられる。また、非電気式雷管は空気装填時の摩擦による静電気の影響を受けず逆起爆が可能であるのでANFOとの組み合わせに有効であろう。特に、導火管付き雷管は死圧もなく、実験で有効性が確認できた。

この実験を行うにあたり、実験場所を提供し、安全面その他のいろいろの面でお世話になった武甲鉱業（株）の関係各位に謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 和田満穂, 西田 佑, 佐野良一, 城 好彦; 新しい発破技術, 森北出版, pp104~110, 1981年
- 2) 佐野良一, 山本二郎, 斉藤辰生, 黒川孝一, 川村 実, 今田孝治, 中村吉男; トンネル発破のための爆薬装填用ロボットの開発と適用, 第1回建設ロボットシンポジウム論文集, pp317~324, 1990年
- 3) NONEL ユーザーマニュアル, Nitro Nobel, ppl~15
- 4) 三次元測定システム MONMOS, (株) ソキア, ppl~20
- 5) Stig o Olofsson; Applied Explosives Technology for Construction and Mining, ppl40, 1991年
(訳本, 発破技術委員会: 最新発破技術ハンドブック, 山海堂, pp127, 1992年)

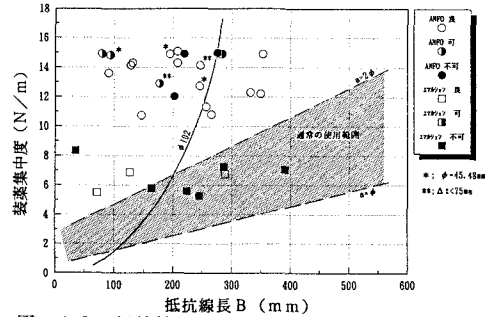


図-10 抵抗線長と装薬集中度の関係 (第1発破)

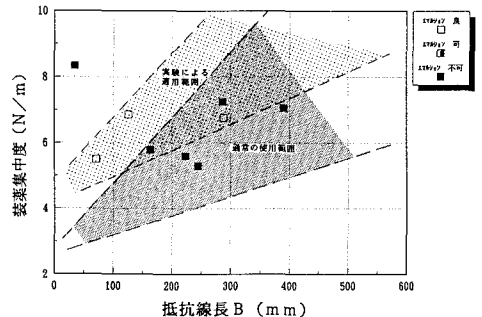


図-11 抵抗線長と装薬集中度の関係 (エマルジョン)

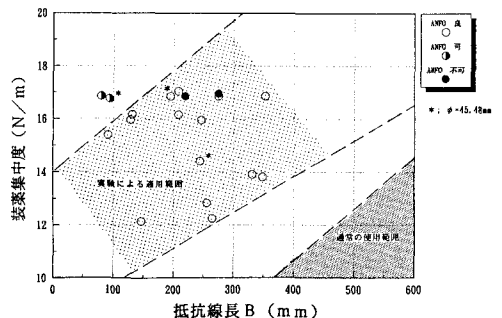


図-12 抵抗線長と装薬集中度の関係 (ANFO)