

盤下げ発破と大型ブルドーザーを用いた 大規模岩盤掘削の効率化に関する研究

塩月隆久*・坂本浩之**・古川浩平***・
中川浩二****

都市近郊での発破工法に伴う振動、騒音といった環境問題を抑える目的でゆるめ発破がしばしば用いられる。ゆるめ発破はそのままでは重機で起砕困難な岩盤を少量の爆薬を用いた発破により起砕可能なものと変えることを目的とする。本研究はゆるめ発破の全体的な経済性を支配するものは掘削における大塊の個数であることを実験データから示し、大塊の発生機構、大塊を少なくする方法について論じている。

Keywords : loose blasting, ripping, rock excavation, deck charge

1. ま え が き

近年、大都市近郊での大規模岩盤掘削工事が増加している。この大規模岩盤掘削においては、発破を用いたベンチカット工法が最も経済的であり、かつ効率面でも優れているのは周知の事実である。しかしこの発破は一般に振動や騒音が大きく、また飛石などの安全面でも問題が生じる場合があり、近くに民家や重要構造物がある場合、これらの問題でベンチカット発破が使用できないこともある。

このような場合によく用いられるのが、盤下げ発破¹⁾(ゆるめ発破、予備発破などと呼ばれる場合もある)であり、発破による岩盤のゆるめを行った後、重機によりリッピング、ドーピングを行って岩盤掘削を行う工法である。盤下げ発破は岩盤内にクラックを生じさせ、そのままではリッピングが困難な岩盤をリッピング可能な岩盤へと変化させるのが目的である。そのため、ベンチカット発破に比べ装薬量が少なく済み、振動や騒音をかなり小さくすることができる。しかも近年の重機の急速な進歩により、そのリッピング能力も高くなっている。その結果本工法の有効性は飛躍的に大きくなりつつあり、使用例も増加している。

このように盤下げ発破を大規模岩盤掘削に適用した例は多いが、この工法に関する各種のデータはほとんど公表されていないのが実情である。その中で、盤下げ発破の発破孔にエアースペースを設けることにより、岩盤破砕効果を大きくしようと試みた研究が見られる^{2),3)}。この研究においては、発破前後の弾性波速度の計測結果より、発破効果とリッピングが可能か否かの判断を行って

いるのみであり、本研究で試みたように、実際にリッピング・ドーピング・二次破砕を行い、本工法全体をいかに効率的にするかを論じるまでには至っていない。

この工法を効果的に利用する場合に最も必要なのは、盤下げ発破の発破効果と重機の利用との役割分担をどのようにすればよいかということであろう。本研究はこのような観点から3回に及ぶ現場実験のデータを基に、大規模岩盤掘削での盤下げ発破における発破効果と重機の役割分担に関して考察を試み、どのようにすれば本工法を効率的に利用できるかを論じたものである。

2. 実験現場及び計測の概要

(1) 実験現場

現場実験を行ったのは、A社のニュータウン工事現場である。ここは山岳地に大型ニュータウンを建設するための現場であり、都留層群大月累層と呼ばれる火山礫凝灰岩や同じく中新統の西桂層群と呼ばれる泥岩、礫岩が分布し、切土量は土砂112万m³、軟岩53万m³、中硬岩147万m³、硬岩267万m³で、軟岩、中硬岩、硬岩が約80%を占めている。

この現場近くには国道、JR線が通り、民家も近くにある。民家、道路、鉄道から離れている場所ではベンチ高5mのベンチカット発破による岩盤掘削が可能であったが、民家に接近した地点ではベンチカット工法では振動許容値を満足させることができなくなり、深さ3mの盤下げ発破工法へと変更した。しかしこの盤下げ発破工法による掘削についてはその施工法に関する十分な資料がみられない。そこで合理的施工のためには実施工における諸データが必要と考え、現場実験によりデータの収集を行うこととした。実験を行った岩種は火山礫凝灰岩である。3回の実験位置での岩盤状況の相違は目視による限り余り認められず、ほぼ同じ状態であったと考えられる。

* 正会員 (株) 青木建設横浜支店土木部
(〒231 神奈川県横浜市中区本町2-22)

** 正会員 (株) 青木建設横浜支店土木部

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

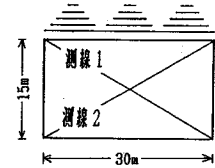
**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

表一 実験1の計測項目

① 発破前弾性波速度	⑪ エンジン回転数
② 発破後弾性波速度	⑫ リフトシリンダーのストローク
③ 発破前孔間弾性波速度	⑬ チルトシリンダーのストローク
④ 発破後孔間弾性波速度	⑭ リフトのヘッド圧
⑤ 削孔間隔	⑮ チルトのヘッド圧
⑥ のみ下がり	⑯ ポンプメインリリーフ圧
⑦ サイクルタイム	⑰ 車体の上下振動
⑧ 発破振動	⑱ 燃料消費量
⑨ 発破時のビデオ撮影	⑲ 大塊数
⑩ リッピング・ドーピング時間	⑳ 出来高測量

表二 実験2,3の計測項目

① 大塊数
② 出来高測量
③ ブルドーザー作業時間
④ 小割時間
⑤ 積込運搬時間



図一 実験対象岩盤と弾性波速度計測の測線

(2) 実験概要

1989年4月の1回目の実験(以下実験1と呼ぶ)においては、削孔間隔と薬量を変化させて計9ケースの実験を行った。ここでは表一に示す計測を行い、盤下げ発破の発破効果の検討および重機利用と発破との役割分担についての基礎的資料を得るのを目的とした。特に、① 削孔間隔や薬量による岩盤破碎状況の評価と、② 合理的な施工のために支配的要因となるとと思われる項目の絞り込みのための計測を重点とした。

1989年12月の2回目の実験(以下実験2と呼ぶ)においては、実験1の結果をふまえ薬量のみを変化させて計6ケースの実験を行い、表二に示すような計測のみを行った。これは上記②の計測結果の検討から計測項目を絞ったものである。この実験2では主として最適な単位薬量の存在の有無の確認を試みた。

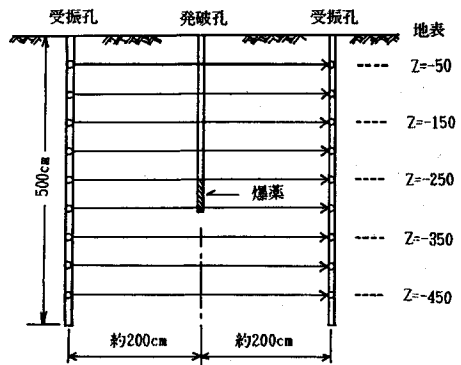
実験1および実験2において前のサイクルの盤下げ発破で緩められた掘削対象地盤の上層部分から大塊が多く発生することが確認された。1990年2月の3回目の実験(以下実験3と呼ぶ)においてはこれを減少させる方法について検討するため、デッキ装薬と普通の装薬との2ケースの実験を行った。実験3においても表二に示す実験2と同じ項目を計測した。

(3) 計測概要

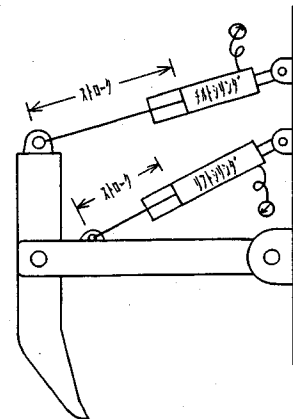
実験1,2,3における主要な計測項目はすでに表一,2に示したが、ここではその中でも重要と思われる、① 弾性波速度、② 孔間弾性波速度、③ 重機に取り付けた各種の計測装置、④ 大塊数、に関して概要を述べる。

発破前後の弾性波速度の測定に関しては発破前後の岩盤の緩みを調査する目的ではざり取り法による計測を行った。すなわち図一に示すように矩形にとられた各実験対象岩盤の対角線を測線方向と決め、2方向について測定を行った。また各方向について、発振点を測線の両側にとり計2回、時には測線中央を発振点にする計測も行った。結局1実験対象岩盤で最低4回計測している。

盤下げ発破の各孔の発破において岩盤がどのように破碎されるかを検討するために発破前後で孔間弾性波速度計測を行った。発破孔としては盤下げ発破の1孔だけを



図二 発破方法および孔間弾性波速度の平行測線(水平測線)



図三 重機主要部の模式図と測定箇所

取り出して行う形とし、孔周辺の破碎状況を調査する目的で、図二に示すように発破孔の両側に約2mの間隔を置き、各5m深さの削孔を行い、その間の水平平行測線において弾性波速度の計測を行った。弾性波速度計測のための発振は機械式であり、発振部に内蔵されたハンマーが孔壁を打撃する形式となっている。これは発破前及び発破後の発破孔中央部及びその周辺での盤下げ発

表—3 実験1の計測結果 (但し、全掘削土量に関する値)

ケース名	A	B	C	A'	D	E	F	G	H
削孔間隔 (m)	1.8	2.0	2.2	1.8	1.8	1.8	1.6	2.0	1.8
孔当り重量 (kg)	1.975	1.975	1.975	1.975	1.600	2.350	1.975	2.350	2.350
大塊数 (個)	84	216	238	81	90	162	198	148	372
掘削量 (m ³)	1617	1574	1415	1806	1752	1698	1567	1658	1781
発破前速度 (m/s)	1760	1771	1944	1410	2135	1160	1931	1697	1730
上層の平均層厚 (m)	1.66	1.69	0.96	2.42	1.18	1.70	1.86	1.39	1.78
発破後速度 (m/s)	780	675	949	530	740	495	599	563	614
正味リップ時間 (min)	89.2	167.8	129.2	37.7	63.9	93.1	135.6	96.8	89.7
正味押土時間 (min)	110.7	153.1	136.8	66.5	106.2	118.0	132.3	123.1	192.8
重機作動時間 (min)	242.0	383.0	338.5	115.0	222.5	289.5	389.0	285.0	374.0
燃料消費量 (l)	543	640	630	465	297	640	590	630	610

破時の緩みがどの程度の範囲にわたって生じているかを明らかにするためのものである。

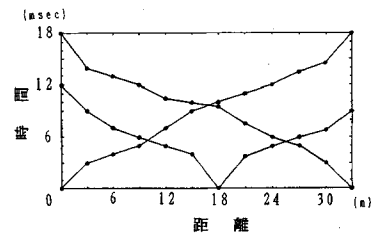
実験1では重機に各種の測定装置を取り付けたが、その測定は次のように行った。95トン級ブルドーザのリップバ主要部の模式図を図—3に示す。図中のリフトシリンダーとチルトシリンダーのストローク及びヘッド圧を計測した。これはリップング時間と回数を正確に記録するためである。またこれらとポンプメインリーフ圧よりドージングに関する正確な記録も求めた。リップング、ドージング時間については現場で係員がストップウォッチで別途計測も行ったが、計測機器による計測結果の方が正確でかつ詳細なデータがとれているので、本解析においてはそのデータを用いた。

これらに加えて、発破後のリップング、ドージングに際して生じる径1m以上の大塊数を計測した。これは盛土時の撒き出し厚さ(1m)から明らかに小割を必要とする大きさの岩塊の数であり、盛土時に重機オペレーターが小割を行った大塊数として計測した。

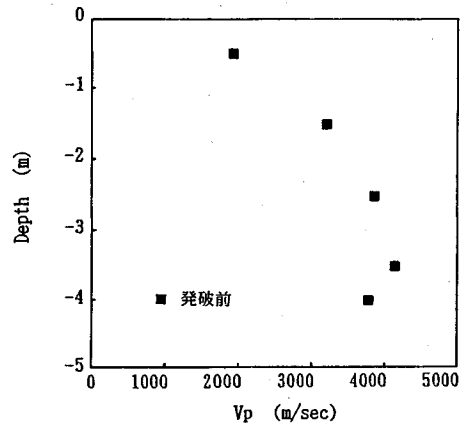
3. 実験1の結果および考察

(1) 原地盤の状況

まず原地盤の状況を把握するため、発破前の弾性波速度とのみ下がり測定した。発破前の弾性波速度の測定結果である走時曲線の1例を図—4に示す。これより次のことがわかる。この走時曲線には明らかに異なる2種類の弾性波速度が存在する。すなわち掘削対象岩盤は低速度域の上層と高速度域の下層とに分けられる。これは前サイクルの盤下げ発破で、掘削対象岩盤上部はかなりゆるめられていることを意味する。2層地盤と考えた場合の上層の平均層厚は後に表—3に示すように1.2~1.8m程度で、今回の盤下げ3mのほぼ半分は発破以前に既にゆるめられている地盤と考えることができる。なお、図—4には3つの曲線が示されているが、これは発振点を測線の両端および中央にとって計3回計測した結果である。さらに、図には示していないが、測定は実験対象



図—4 発破前の弾性波速度の走時曲線の例



図—5 発破前の孔間弾性波速度の計測例

岩盤を対角線状に2測線をとって行ったところ、その両者でかなり値が異なっていたものもあった。その原因は明らかでないが、岩盤の節理方向などが関与しているものと考えられる。

図—5に発破前の孔間弾性波速度を計測した1例を示す。この図からも明らかなように上層は発破前にすでに緩められていることがわかる。表—3に示す発破前速度は上、下層の平均層厚を考慮して次式により弾性波速度Vを求めた結果である。

$$V = \frac{3V_L V_U}{(3 - X_U)V_U + X_U V_L} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 V_U, X_U はそれぞれ上層の弾性波速度及び層厚、

V_L は下層の弾性波速度である。また表—3の発破後速度に関しては、図—4のような2種類の弾性波速度は認められなかったため、走時曲線から求めた弾性波速度の平均をもって発破後の速度とした。

(2) 実験経過

1989年4月に行った実験1においては孔当り薬量を3種、削孔間隔を4種変化させることを目標とした。これらの全ケースを行うには実験ヤードが十分に広くなく、また多大な時間と経費が必要なことから、まず薬量が同一で削孔間隔を変化させた実験を行い、その結果を見て以後の実験ケースを決めることとした。削孔長は3mで、爆薬にはANFOを用い、プースターには3号桐100gを用いている。また発破振動をなるべく小さくするため、1~20段のDS雷管で各段1孔のみの発破を行い、振動の重畳を避けた。

実験1に使用できる対象岩盤は現場の状況から9箇所と限定されたため、まず薬量を同一(孔当り1.975kg)にして削孔間隔を3種(1.8m, 2.0m, 2.2m)変化させた実験を行った。これを実験A, B, Cとする。削孔間隔1.8mの実験Aの大塊数が少なかったため、確認のため再度同じ薬量、間隔で実験を行った(実験A')。その後間隔は1.8mで薬量を変化させた実験D, Eを行った。実験A, B, CでAの大塊数が最も少なかったため、これと同じ薬量で削孔間隔を小さくし、 m^3 当り薬量を大きくした実験Fを行った。さらに孔当り薬量を2.35kgとし、削孔間隔を2.0, 1.8mとした実験G, Hを行った。実験1で得られた主な計測結果を表—3に示す。

(3) 実験1の結果と考察

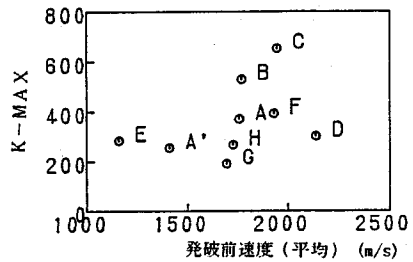
計測された発破振動の最大速度値 (PPV) から、

$$\text{発破振動推定式} \quad PPV = KW^{3/4}D^{-2} \dots\dots (2)$$

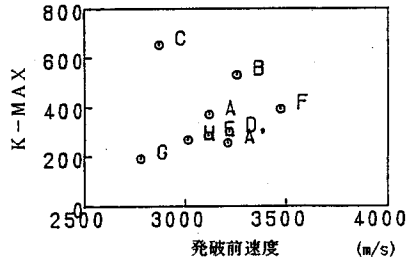
を用いて各発破の各段での最大の K 値を算出した。ここで W は各段の薬量、 D は発破孔から計測点までの距離である。

まず発破前の平均弾性波速度と最大 K 値との関係を図—6に示す。図から明らかなようにほとんど相関はない。これに対して、下層の弾性波速度と最大 K 値の関係を図—7に示す。実験Cを除けば明らかに両者には相関が見られる。上層は前サイクルの発破ですでにゆるんでおり、発破振動の発生が主としてまだゆるんでいない下層地盤に支配されているため、下層地盤の弾性波速度と K 値との相関が見られたものと考えられる。このことは岩盤の評価に K 値の利用が可能であることを示唆しており、特に施工中の岩盤評価には弾性波速度の計測よりも手軽であり、有効なものと考えられる。

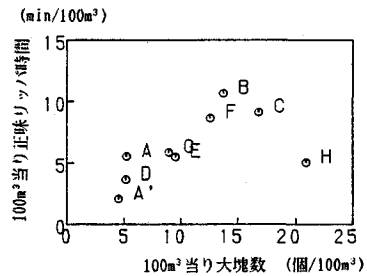
のみ下がりについては削孔機毎に係員がついてストップウォッチでのみ下がり時間を計測したが、同じ岩盤でも用いた機種により、またオペレーターにより値が大きく異なっていた。また、のみ下がりとは上述の発破前弾性波速



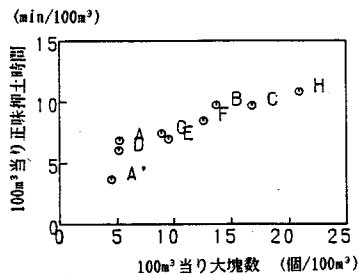
図—6 発破前平均弾性波速度と最大 K 値との関係



図—7 発破前下層弾性波速度と最大 K 値との関係



図—8 100 m^3 当り大塊数と 100 m^3 当り正味リップ時間との関係



図—9 100 m^3 当り大塊数と 100 m^3 当り正味押土時間との関係

度との相関も認められなかった。

発破結果として最も簡単にかつ正確に測定できるものとして径が1m以上の大塊数が考えられる。本研究ではこれと出来高測定の結果を用いて、100 m^3 当りの大塊数として考察する。またリップング、ドーピングに際して図—3に示した各種センサーから得られたデータから各実験毎に正味リップ時間および正味押土時間を求めた。その結果も表—3中に示されている。図—8, 9に示すのは100 m^3 当り大塊数を横軸に、100 m^3 当り正味リッ

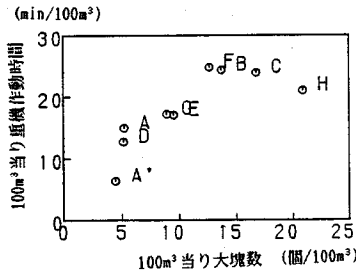


図-10 100 m³ 当り大塊数と 100 m³ 当り重機作動時間との関係

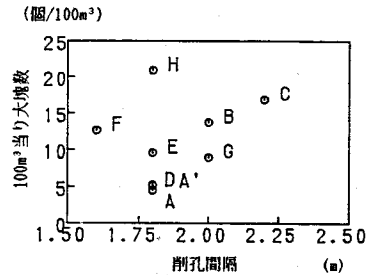


図-13 削孔間隔と 100 m³ 当り大塊数との関係

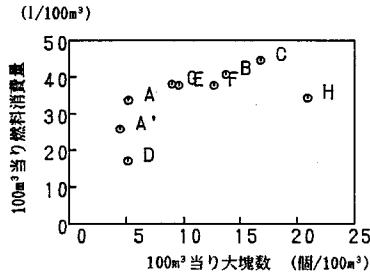


図-11 100 m³ 当り大塊数と 100 m³ 当り燃料消費量との関係

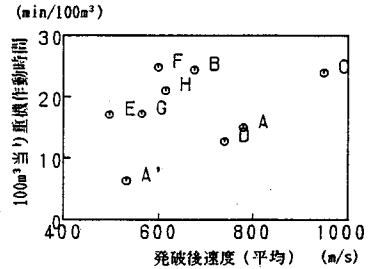


図-14 発破後弾性波速度と 100 m³ 当り重機作動時間との関係

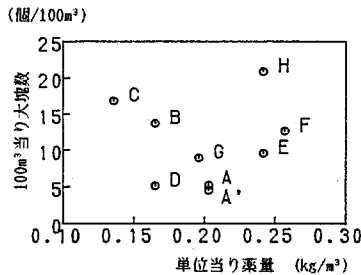


図-12 単位当り薬量と 100 m³ 当り大塊数との関係

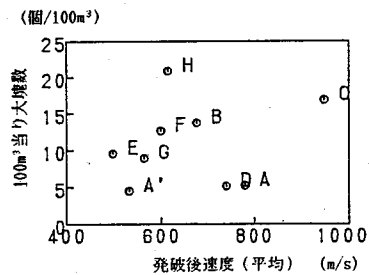


図-15 発破後弾性波速度と 100 m³ 当り大塊数との関係

ピング時間と正味押土時間を縦軸にとった相関図である。明らかに 100 m³ 当り大塊数と正味リッピング、押土時間とは明確な相関関係にあることが分かる。正味リッピング、押土時間以外の時間をも加えた 100 m³ 当り重機作動時間と 100 m³ 当りの大塊数との関係を図-10 に示す。同様に 100 m³ 当りの燃料消費量と 100 m³ 当りの大塊数との関係を図-11 に示す。いずれも明確な相関関係を示し、重機使用を含めた発破効果は 100 m³ 当りの大塊数を用いれば、容易でまた確実に判定できることが分かる。

図-12 は 100 m³ 当り大塊数を縦軸に、単位当り薬量を横軸にとり、両者の関係を求めた図である。図-12 は 100 m³ 当り大塊数を最小にする最適な薬量が存在することを示唆しているかのようである。これと類似した結果は他の現場でも報告されている⁴⁾。この件に関しては、後述の実験 2 で再度検討を行ったのでそこで考察を行う。

図-13 に削孔間隔と 100 m³ 当り大塊数との関係を示

す。この図からも最適間隔の存在あるいは間隔を小さくすれば大塊数が小さくなることが示唆されるかのようである。間隔が小さくなれば大塊数が少なくなることは納得できる結果であるが、実験 E と H は同じ間隔、薬量の発破にもかかわらず大塊数が大きく異なり、原地盤の破碎状況、節理などにより発破効果は大きく異なる可能性のあることを示しており、この点をいかに事前に把握するかが問題である。

発破後の弾性波速度の値はすでに表-3 に示した。発破後弾性波速度と 100 m³ 当り重機作動時間との関係を図-14 に、発破後弾性波速度と 100 m³ 当りの大塊数との関係を図-15 に示す。いずれも特に相関は認められず、また発破前速度と同様発破後速度も実験対象岩盤の 2 測線についての値がかなり異なり、節理や発破の効き具合が反映されているものと考えられる。このように発破後の岩盤のゆるめられている程度は計測される位置などにより異なり、それを簡単にかつ正確に把握することは難しいと考えられる。すなわち、発破後の岩盤の弾

表—4 ベンチ発破と盤下げ発破のコスト比較

	5mベンチ発破	3m盤下げ発破
発破コスト	77	96
切土コスト	13	52
二次破碎コスト	10	41
計	100	189

性波速度を計測しても、場所により値が大きく異なり、余り有効でないものと考えられる。

また、実験1ではどの位置からいくつの大塊が出たかという測定を行っていないのでデータとして示せないが、リッピングしている間の状況を見ると、実験対象岩盤の上層部から大塊が多く出現し、下層では少なかった。このことはすでに図—4, 5で示したように、上層部は発破前にすでにかなりゆるんでいたため、主として下層に装薬された爆薬の爆発の影響が上層に及んだ時、その破壊力が逃げ、大塊が多く残ったのではないかと考えられる。これを防ぐ発破の工夫は後述の実験3で試みる。

(4) コストの比較

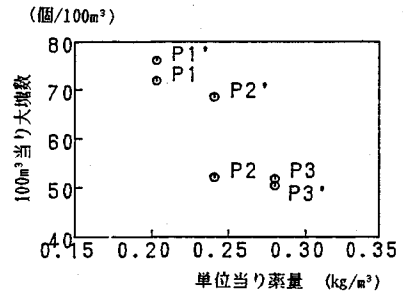
盤下げ発破は振動や騒音上の制約のため行われることが多く、当然各種のコスト増になることが考えられる。そこで5mのベンチカット発破と3mの盤下げ発破の概略のコスト比較を行った。その結果を表—4に示す。用いたデータは実験現場の各々3ヶ月分の実績値である。ここでは5mのベンチカット発破コストを100として示している。発破コストについては3m盤下げ発破は5mベンチカット発破に比べ1.25倍程度だが、リッピングやドーピングに必要な重機の経費および小割りにかかる経費が大きく、全体では約1.9倍となる。一般に無発破で岩盤を掘削する費用は発破の5~10倍と言われており、これに比べると盤下げ発破の有効性は大きいと考えられる。

4. 実験2の結果及び考察

実験1の結果、次のことが明らかになった。

- ① 盤下げ発破の発破効果は単位掘削量当りの大塊数で判定できる
- ② 大塊数が少なくなる発破を行えば効率的であり、そのためには最適な削孔間隔、薬量が存在する可能性が考えられる。
- ③ 大塊が出るのは主として掘削対象地盤の上層部分からである

この3つの結果のうち、①に関しては実験1の結果より明確な知見として扱おうが、②、③に関しては合理的な盤下げ発破を行うに際して、より一層の検討が必要である。そこで実験2で②に関する検討を行い、実験3において③に関する検討を行うこととする。



図—16 単位当り薬量と100m³当り大塊数との関係

実験2ではこの最適な薬量の存在の有無を確かめるために削孔間隔を1.8mと一定とし、孔当り薬量を1.975 kg, 2.35 kg, 2.725 kg (m³当り装薬量0.203, 0.241, 0.280 kg/m³)の3種に変化させた実験を各2ケース合計6ケース行った。薬量の決定にあたり、次のように考えた。実験1以後も当現場では3mの盤下げ発破を行っていたが、それらの結果を見ると、目視による限り岩質の差は認められなかったが、岩のねばさが増し、発破による破碎効果が落ちていることは明らかであった。そのため、実験1より少し多い目の薬量を用いて実験を行うこととした。その結果を図—16に示す。P1, P2, P3の順に単位掘削量当りの薬量が多い実験である。この結果を見ると、最も破碎効率の良い薬量は明確には見出せず、薬量が多い方が大塊数が少なくなっている。このことに関しては、前述のように岩質が実験1よりねばさが増しており、その影響も考えられるが、実験結果のみからではその影響を論ずることは難しい。図を見て分かるようにP1, P1'とP3, P3'は100m³当り大塊数がそれぞれほぼ等しく、比較的安定した発破結果が得られていると言える。これに対してP2とP2'とは大塊数に大きな差があり、不安定な結果となっている。盤下げ発破は振動や騒音をなるべく小さくするために行う発破であり、これらの許容値との関係から大きな薬量を用いることは実際上現実的でなく、なるべく少ない薬量で効果的な発破を行う必要がある。これらのことを考え合わせ、現場技術者の意見を参考にしてこの現場ではP2の薬量より少し多い薬量を基準薬量と考えることとした。これは前回の実験1の結果と合わせて、盤下げ発破においては、安定して大塊数が少なくなる程度の薬量を用いることが、重機との併用を考える上で最適と考えた結果である。

5. 実験3の結果及び考察

実験1で大塊数が少ない発破が盤下げ発破として総合的に最も効果的であることがわかった。実験2では大塊数が少なくなる最適薬量の検討を試みたが、最適薬量の一意的な決定は難しく、実験を行った岩盤で安定した結果を得るには振動や騒音が許容される限度内で薬量は多

い方が良いことが明らかになった。さらに実験3では上層部から出る大塊を減らすことについての検討を行った。

(1) 上層部から出る大塊に関する検討

上層部から大塊が多く出るとは実験1及び2を行った際に、何人かの重機の担当者やオペレーターからの一致した意見であり、誤りのないものと考えられる。この検証は実際上必ずしも容易ではないが、これを明らかにするため発破前後の孔間弾性波速度の計測結果を基に考察する。これは発破孔中央部およびその周辺での盤下発破時の発破位置周囲の岩盤のゆるみかどの程度の範囲にわたって生じているかを明らかにするために実験1を行った横の岩盤で1孔ずつの発破を行って測定したものである。この発破方法や測定時の測線などは既に図-2に示した。発破に際しては実際の現場での施工となるべく同じになるようにし、発破孔の削孔深さは3m、発破時の使用薬量は孔当り100gの親ダイを含んで1.975kgとした。

図-17に発破源を横切る測線での孔間平行測線弾性波測定結果を、図-18に発破源から0.8m離れた平行測線の測定結果を、図-19には図-17, 18とは別の発破源の場合であるが、発破源から2m離れた測線での測定結果を示す。図-19のデータを含むグループの計測は1孔の発破の影響がどの程度にまで及ぶのかを明らかにするために行ったものであるが、この計測中にフロッピーディスクの一部が破壊したために一部のデータが採取できなかった。そのため図-20に示す別の発破源A₁のa₁-b₁及びa₂-b₂測線のデータを発破源及び発破源から0.8m離れた測線の測定結果として用いた。本来は同一の発破源による測定結果を用いるべきであるが、データが欠落したため、上述のように図-17, 18は別の発破源(A₁)に対応するデータを用いざるを得なかった。その結果、図-20のa₂-b₂測線で得られた図-18には、発破孔A₁だけでなくA₂による発破の影響も一部含まれていると考えられる。

図-17の発破前の測定結果を見ると、発破前の上層1m程度はそれ以深に比べかなり弾性波速度が低い。すなわち発破を行う前に上層1m程度はすでにある程度ゆるんでいたことがわかる。また、発破前の値や発破後の深さ4.5mの値から原地盤の弾性波速度が4000m/s程度であり、それが発破により3000m/s程度にゆるめられていることも分かる。これらは地表から3mの深さで発破した結果であるが、爆薬装填位置よりそれ以深の方が弾性波速度の低下が大きい。このことから、発破により掘削対象ではない3m以深の岩盤もかなりゆるめられてしまうことがわかる。

図-18についても、図-17と同様上層1m位は発破前にすでにゆるんでいたと考えられること、発破により

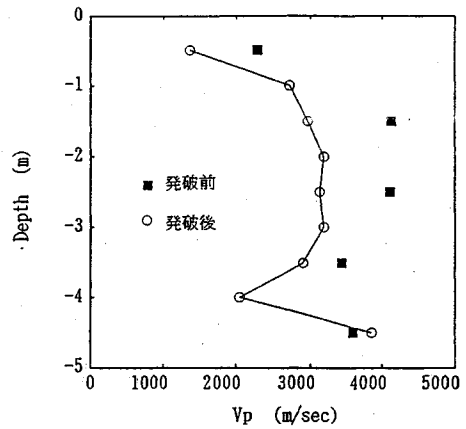


図-17 発破源を横切る測線での孔間弾性波速度測定結果

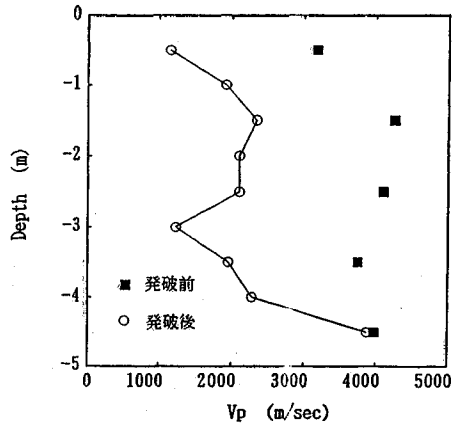


図-18 発破源から0.8m離れた測線での孔間弾性波速度測定結果

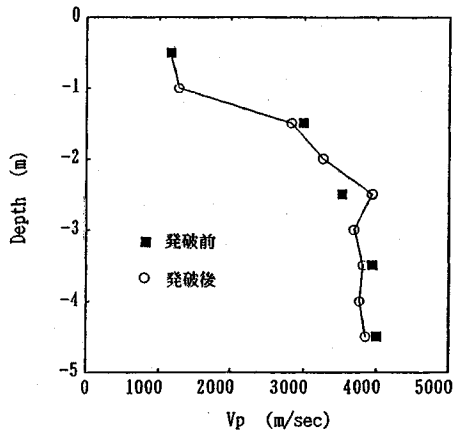


図-19 発破源から2m離れた測線での孔間弾性波速度測定結果

大きくゆるめられる位置が図-17では-4m付近だったのが、-3m付近にまで上昇していることが分かる。両者の測線間の距離が0.8mということを考え合わせると、発破の影響はほぼ45°の線に沿って上方へ及んで

表-5 デッキ装薬発破と従来の装薬法による発破とのコスト比較

ケース名	区分	発破コスト	重機コスト	2次破碎コスト	積込運搬コスト	総コスト	100m ³ 当り大塊数
R1	デッキ	43	14	10	33	100	32
R2	従来	34	18	14	36	103	44
P1	従来	33	26	23	39	121	72
P2	従来	34	21	17	46	118	52
P3	従来	36	21	17	38	112	52
P1'	従来	33	26	25	39	123	76
P2'	従来	34	21	22	38	115	68
P3'	従来	36	18	16	34	104	50

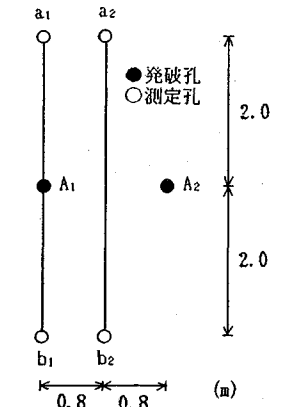


図-20 発破孔と測線の位置関係

いることも認められる。図-17と比較すると図-18の発破前の孔間弾性波速度は同じ位だが、図-18の方が発破による孔間弾性波速度の低下度は大きい。これは上述のように図-17の発破源A₁の反対方向の発破源A₂の影響と考えられる。

図-19からも図-17、図-18同様上層がすでにゆるんでいることと、この程度の薬量(1.975 kg)では2m離れた場合、ほとんど影響がないことが分かる。先ほどの図-18の考察でもわかるように、3mの盤下げ発破が発破源から2m離れた地点で影響するのはほぼ地表付近の範囲のみである。しかるにこの部分は前サイクルの発破ですでに緩められてはいるが、細かく破碎されている状況には至っておらず、しかも今回の緩め発破ではこの部分が効果的に破碎されず、大塊が多く残るのではないかと考えられる。これらのことより、すでにゆるんでいる部分への発破効果が小さいことが推定できる。

さらに、掘削対象岩盤の上部の岩盤掘削時の盤下げ発破の影響はこれらの図-17~図-19を比べることにより、より明解に示すことができる。図-17,19の発破前の-0.5m~-1.5mの部分の孔間弾性波速度の傾きと図-18の発破後の-3m~-4.5mのそれとは非常に類似している。このことから盤下げ発破により、掘削対象岩盤の下の岩盤をもかなり緩めてしまっていることが推測できる。

また、表-3の弾性波速度と図-17~図-19の孔間弾性波速度に大きな差があるが、これは弾性波速度、孔間弾性波速度両計測システムの間で使用弾性波周波数をはじめ大きな相違があり、絶対値についての比較はできないものと考えられる。

(2) デッキ装薬に関する検討

このように主として掘削対象岩盤の下層部分に盤下げ発破の効果があり、上層部に効果が少なく、その結果上層部に大塊が残ることが明らかになった。そこでどのような発破を行えば上層部分も効率的に破碎できるか検討

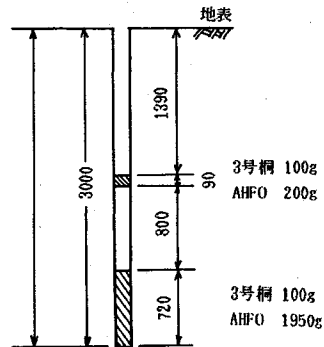


図-21 デッキ装薬の装薬状況

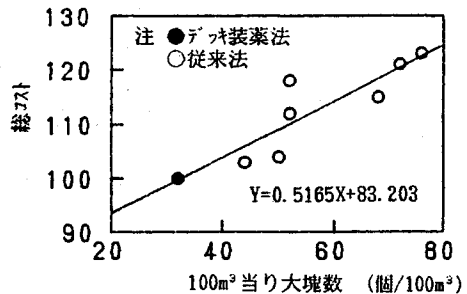


図-22 100 m³当り大塊数と総コストとの関係

を行った。上層部分での破碎効果を大きくする工法の1つとして、エアギャップを設ける工法^{2),3)}も提案されているが、岩種にかかわらず確実に上層部を破碎させるためには、その部分でも発破を行う以外に効果的な方法を見出せなかったため、デッキ装薬発破を行うこととした。

図-16に示す結果と比べ易くするため、P2, P2'と同じ孔当り薬量(2.35 kg)と削孔間隔を用いて、図-21に示すデッキ装薬発破を行った。下層には2.05 kg、上層には0.3 kgの薬量を用いた。この薬量にはいずれも親ダイ0.1 kgが含まれている(ケースR1)。この実験を行った岩盤は図-16の岩盤と離れており、岩質が異なっている可能性がある。そこでデッキ装薬の結果を評価するため、従来と同じ装薬での発破も行った(ケースR2)。その結果はデッキ装薬、従来の装薬法による

100 m³当り大塊数は32個, 44個となり, 図-16の結果よりいずれも小さかった。これは実験対象岩盤の岩盤状況の差と考えられる。この両者の大塊数はデッキ装葉の方が従来の装葉の場合の3/4であり, デッキ装葉を行うことにより大塊数をかなり減少できる可能性を示唆している。

またこれらの実験2,3における詳細なコスト比較を表-5に示す。表中ケースR1のみがデッキ装葉である。この数値はデッキ装葉の総コストを100とした比率で示している。表-5中のR1とR2のデータを比べてわかるように, R1は発破コストはR2より高いが, 他の重機や2次破碎, 積込運搬コストが小R2より小さく, 総コストはR1の方が小さい。

このようにデッキ装葉を行うことによって, 上層部の大塊がうまく破碎でき, 大塊数を減少させられることが期待できる。しかし, デッキ装葉では雷管や親ダイが2倍必要なためそれらのコストは大きくなるのに加えて, 装葉にかかる労務費も従来のやり方の1.5倍と見積ったため, デッキ装葉のコストはかなり高く見積っていると考えられる。この点については標準工法の仕様を変更することでコスト低減は十分可能であり, 今後詳細な検討を行う予定である。例えば, 発破コストを従来の装葉方法の最高である36程度までに低減可能と考えれば, R1とR2の間では総コストに約10%の差があるものと考えられ, かなりのコスト削減が期待できる。

また数値データとして計測できないので数値として示すことができないが, 現場の担当者やオペレーターの話ではデッキ装葉を行った対象岩盤R1の岩の粒度分布が良く, 二次破碎や積み込み運搬がやりやすかっただけでなく, 今回の研究対象外ではあるが, 盛土の敷均し, 転圧も施工し易かったとのことであり, 全体として見ると数値に現れている以上の効果が期待できるものと考えられる。

図-22は表-5に示す総コストを縦軸に, 大塊数を横軸にして描いたものである。100 m³当りの大塊数とコストはほぼ線形の密接な関係にあることがわかる。岩盤状況にかかわらず大塊数のかなりの部分はデッキ装葉により減少でき, デッキ装葉の発破コストは上述のようにまだまだ改善の余地があることを考え合わせると, 重機を併用した岩盤掘削においては, デッキ装葉による盤下げ発破を行うことにより, 総コストを大きく引き下げられる可能性のあることが分かる。

また重機の担当者やオペレーターの話では, デッキ装葉を行ったR1はリッピングやドーピングが他のケースに比べ非常にやりやすかったということであり, 本工法の今後の発展を占う上で, 貴重な意見と考えている。

6. ま と め

本研究は近年非常にその需要が高まっているにも関わらず, その本格的な研究が遅れている盤下げ発破を用いた大規模岩盤掘削に関し, 3回に及ぶ現場実験の結果を基に, その効率化を試みたものである。本研究の結果は次のようにまとめられる。

- 1) 盤下げ発破の発破効果は大塊数で簡単に判定でき, 大塊数が少なくなる発破を行えば効率的である。大塊数が少ない発破を行えば, 大型ブルドーザーによるリッピング・ドーピングもやり易く, かつ短時間で済み, 小割の作業も少なく最も経済的である。
- 2) 大塊は掘削対象岩盤の上層部から多く出現する。これは掘削対象岩盤の上の岩盤を掘削した際のゆるめ発破により, すでに岩盤がゆるめられていて, 今回の発破の破碎効果が余り効かなかったためである。
- 3) この掘削対象岩盤の上層部の大塊はデッキ装葉を行うことにより効果的に破碎できる可能性がある。
- 4) 盤下げ発破と大型ブルドーザーによりリッピング・ドーピングを行う本工法の工費はベンチ高5mのベンチカット発破に比べると総合的なコストで見ると約2倍程度となる。
- 5) デッキ装葉を用いた盤下げ発破は通常の盤下げ発破工法に比べ, 発破に関するコストは大きくなるが, リッピング・ドーピングや積み込み運搬コストが小さく済み, 総合的に見て, かなり経済的となる可能性がある。

7. あとがき

このように, 本研究で試みた盤下げ発破と大型ブルドーザーを用いた大規模岩盤掘削低公害工法は, 経費面から見ても十分な合理性をもつことを明らかにした。デッキ装葉に関しては実験対象岩盤との関係上, 1回しか実験を行えなかったが, 今後別の現場でさらに実験を積み重ねたいと考えている。今後デッキ装葉の標準化によりコストの低減を試みると同時に, デッキ装葉をより効果的に利用するための各種の技術開発を試みる所存である。

本研究を行うにおいて, 青木建設四方津作業所総合所長田中尚史氏の御支援を得た。また計測を行うにあたり, 新キャタピラー三菱(株)の永田隆, 斎藤敏行氏をはじめSSセンターの方々の助力を得た。孔間弾性波の計測, 解析に関しては(株)間組技術研究所の薄井昭則氏の助力を得た。また, 計測結果の解析には山口大学工学部の中尾絵理子教務員および当時山口大学工学部建設工学科学生野田誠氏の助けを得た。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 佐々宏一：予備発破を利用する岩盤掘さく法について,

-
- 石灰石, No. 186, pp. 26~30, 1980年.
- 2) 和田満穂・坂野良一・村上孝・沖津敏洋：先行発破工法によるゆるめ発破とその結果, 工業火薬協会誌, 43巻, 3号, pp. 138~143, 1982年.
- 3) 和田満穂・坂野良一・沖津敏洋・井上讓輔：先行発破工法による岩盤ゆるめ効果とその評価法, 石灰石, No. 203, pp. 47~57, 1983年.
- 4) 運輸省第3港湾建設局：関西空港建設のための土砂採取技術調査報告書, 1983年.
- (1991.7.15 受付)

THE EFFECTIVENESS OF LOOSE BLASTING TECHNIQUE IN ROCK EXCAVATION

Takahisa SHIOTSUKI, Hiroyuki SAKAMOTO,
Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

In urban and suburban areas, engineers are often faced with noise and vibration complaints, caused by rock blasting. In these cases the loose blasting technique is often used. In loose blasting, a small-scale charge is used to blast the rock mass into the fractured mass, which can be excavated by ripping and bulldozing equipment. In this study, it is shown through experiments that the overall economy of the excavation method using loose blasting is determined by the number of boulders produced in the process. Large boulders result in the loss of output of ripping, bulldozing and loading equipment. The rock fragmentation mechanism in loose blasting and the technique to reduce the number of boulders and discussed.
