

海底発破に伴う地盤振動の低減方法の試み

後藤英一*, 山下理雄**, 川上 純***

海底発破の場合は、水圧が加わっており、確実に岩盤を破碎する必要があるため、過装薬になりがちである。しかし、海底発破では、陸上発破で行われている段発発破やプレスブリット工法などの発破振動の低減方法は、困難となっている。

筆者等は、本州四国連絡橋の児島～坂出ルート of 南北備讃瀬戸大橋建設工事において、海底発破時に発生する地盤振動を低減するために、発破パターンの周辺を先行して発破する工法を試みた。

その結果、この方法は、地盤振動のうち直接P波およびSV波に対して効果があることが分かった。そして、新規発破部の半分程度が既発破区域に接している場合は15%程度の振動低減が、また全周が既発破区域に接している場合は、30%程度の振動低減があることが分かった。

1. はじめに

航路の浚渫や海中構造物の基礎工事においては、海底発破が行われる場合が多い。海底発破の場合は自由面上に水が存在し、その水圧のために陸上発破に比べて破碎効果が減少する。したがって、それを補うために陸上発破より使用薬量が増大する。使用薬量の増加量は{水深(m)×1%}程度¹⁾であり、水深が50mの場合は5割程度増大することになる。さらに、海底発破では後工程におけるずり処理での手戻りをなくすために、確実に岩盤を破碎する必要があるため過装薬になりがちである。一方、施工が海底であることから、陸上で行われている段発発破やプレスブリット工法等の発破振動の低減方法²⁾は困難となっている。

以上のように、海底発破での過装薬傾向と、水中衝撃圧や地盤振動の低減といった相反する状況に対して、本工法の発展のためにはより適正な評価法と工法を開発していく必要がある。

筆者等は、本州四国連絡橋の児島～坂出ルート of 南

北備讃瀬戸大橋建設工事において、海底発破時に発生する地盤振動の低減に関して、周辺先行発破工法という一つの試みを行い、良好な結果を得た。以下にその結果について報告する。

2. 発破方法および地盤振動計測方法

1) 発破方法

振動低減工法を試みたのは、南北備讃瀬戸大橋の6P基礎掘削のための海底発破である。掘削は全発破が終了した後に行ったので、発破方式はすべて一自由面発破となっている。海底地盤は、風化花崗岩から成っているが、6Pの北側は岩盤が露出しているのに対して、南側の番の州では沖積層が10～15m程度の厚さで分布している。

Fig. 1に示すように、6P発破地点の南側約500mの番の州には石油精製所があり、その諸施設への発破振動の影響が懸念された。そこで、Fig. 2に示すように、石油精製所に近い側から小薬量で発破を開始し、次第に薬量を増しながら遠くの発破を行う方式を採用した。また、なるべく発破区域の周辺が既発破区域で囲まれるような発破順序とした。Fig. 2の図中の○印の中の数字は、発破順序を示している。このように、既発破区域の背後で発破を行うことにより、振動が低減することを期待した。発破の薬量は360～1080kgであり、また爆源からの距離は584～2750mである。

地盤振動の計測はFig. 1に示すS1～S6およびS11～S13の計9箇所で行った。北側の測点S11～S13は岩盤上の測点であるが、測点S1～S6は沖積層上の測点である。

2) 計測方法

地盤振動の測定は、すべて動電コイル型の3成分速

1992年9月7日受理

*大成建設株式会社技術本部

〒169 東京都新宿区百人町3-25-1

TEL 03-5386-7511

FAX 03-5386-7576

**本州四国連絡橋公団企画開発部

〒105 東京都港区虎ノ門5-1-5 虎ノ門45森ビル

TEL 03-3434-7281

FAX 03-3578-9298

***大成建設株式会社技術研究所

〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1

TEL 045-812-1211

FAX 045-812-1247

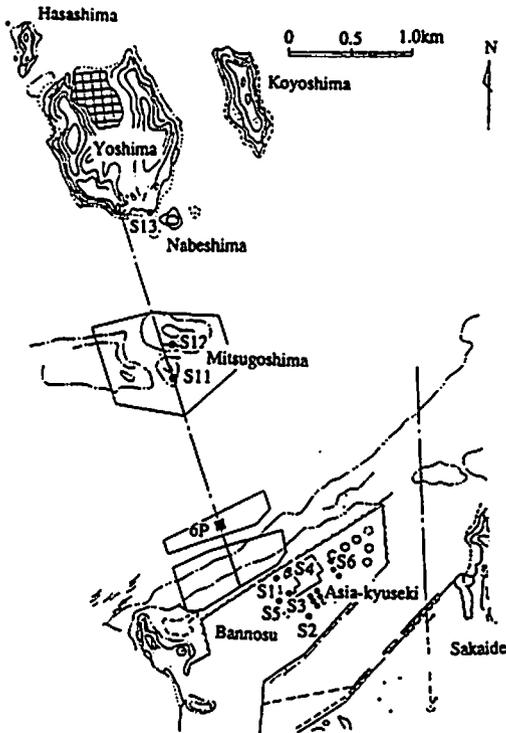


Fig. 1 Under water blasting area and ground vibration measuring points (S1~S6, S11~S13)

度計を用いた。S1~S6およびS11ではSM-335(東京測振社製)を、S-12、S-13にはHS-I-LP-3D(Geo Space社製)を用いた。SM-335の振動数特性は1.4~120Hzで平坦であり、HS-I-LP-3Dは4.5~100Hzで平坦である。速度計の感度方向は、爆源から遠ざかる水平方向をR、爆源に向かって右向き水平方向をT、鉛直上方向をVとした。

3. 振動低減の要因

発破パターンの近傍に既発破区域(岩盤の破碎帯)が存在することによる振動の低減には、以下の2つの要因が考えられる。

- 発破パターンの周囲に破碎帯が存在すると、爆発による衝撃波は破碎帯内で減衰する。また、破碎帯の存在により爆源周囲の岩盤の剛性が低下しているので、爆発ガスの圧力も低下する。
- 爆源から岩盤内へ放射された応力波が、伝播経路中の破碎された岩盤内を通過することにより振動が低減する。すなわち、破碎帯が振動遮断溝の作用をする。

a)に関するものは、爆源から生じる振動自体の低減であるので、爆源域効果と呼び、b)の要因を経路減衰効果と呼ぶことにする。

Fig.3は、測定された地盤振動のうち、V方向の最

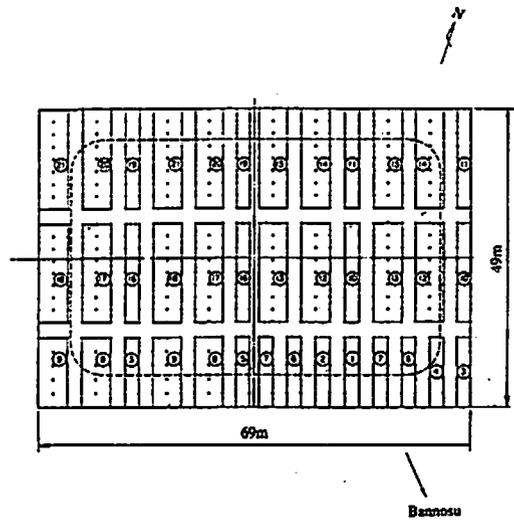


Fig. 2 Blasting pattern and blasting order of 6P point

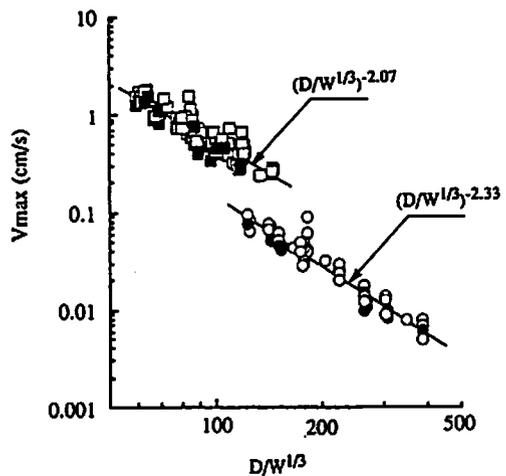


Fig. 3 Relation between maximum amplitude of vertical component (V_{max}) and reduced distance ($D/W^{1/3}$)

(○:at rock surface, □:at soil surface, ●: blasting points are adjacent to fractured region)

大速度振幅と換算距離 $D/W^{1/3}$ との関係を示したものであり、図中の●と■印は既発破区域に隣接した発破パターンでの測定値である。この図から、既発破区域がある程度振動低減に寄与していることが分かる。しかし、最大値を与える波動の種類は測点によって異なるため、最大値では低減効果を定量的に検討することができない。したがって、測定された波動の性質を分析し、各波動成分について振動低減効果を以下に検討する。

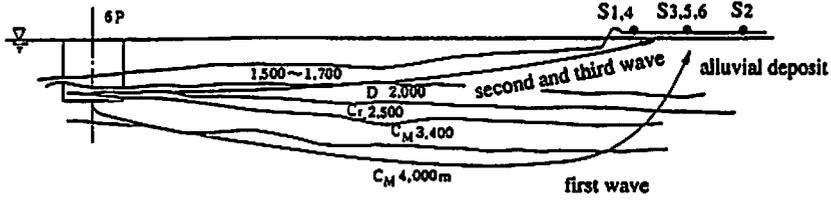


Fig. 4 Velocity profile of southern part of blasting point 6P

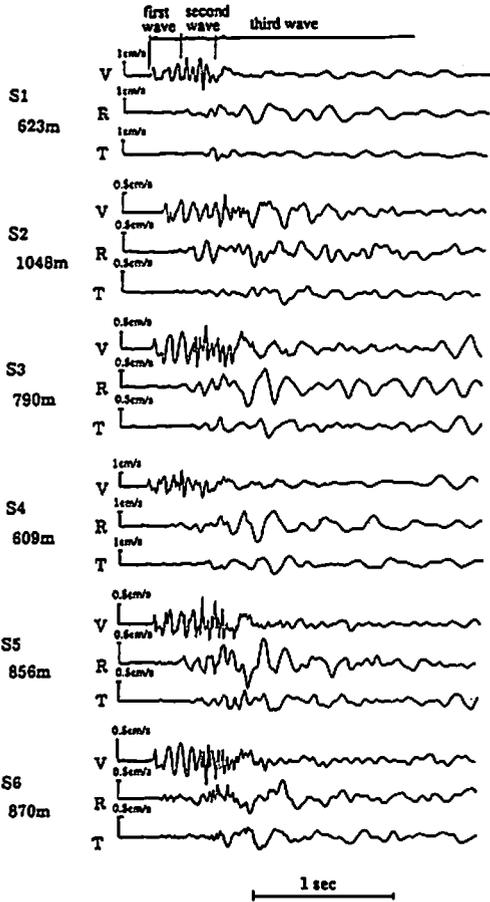


Fig. 5 Example of ground vibrations measured at S1~S6

4. 波動の性質の分析

1) 沖積層上での地盤振動の特徴

Fig. 4は、6P地点から両側の地質構造を示したもので、沖積層の下部に風化岩があり、最下部には弾性波速度が4000m/s以上の未風化岩が分布している。6P地点の南側の測点S1~S6の記録波形例をFig. 5に示す。この地盤振動波形は、その波形の特徴から以下の3つの部分に分けられる。

第1波: 振動数10~25Hzでほぼ上下動のみである。

第2波: 振動数20~40Hzと第1波よりやや高く、上下動が卓越しているが、水平動のR成分が上下動の1/2程度の振幅を持っている。この波動が上下動の最大値となっている。

第3波: 振動数4~6HzでR成分の水平動が卓越しており、継続時間も3秒程度と最も長い。

これらの波動の性質について以下に検討する。第1波と第2波の初動から伝播速度を算出すると、それぞれ4700m/sおよび1500~1600m/sであった。第1波の伝播速度は最下層の未風化岩のP速度に対応しており、また振動方向がほぼ鉛直方向であることから、未風化岩を伝播して番の州付近で屈折し、ほぼ真下から入射した屈折P波であることが分かる。

第2波は走時曲線がほぼ原点を通るので直接波であり、またその伝播速度から沖積層内あるいは水中を伝播してきた直接P波であることが分かる。

第3波についてはその初動が特定できないので、振動軌跡からその波動の性質を検討する。Fig. 6に、S3の振動波形のうち第3波の振動軌跡の例を示した。鉛直面内ではほぼ45度方向に振動しており、屈折SV波であると考えられる。なお、表面波があまり卓越していないのは、伝播経路の上部がほとんど海水で覆われていたためと考えられる。以上で推定した各波動の伝播経路をFig. 4に示した。

2) 岩盤上での地盤振動の特徴

6P地点の北側には、沖積層がなく直接岩盤が露出し

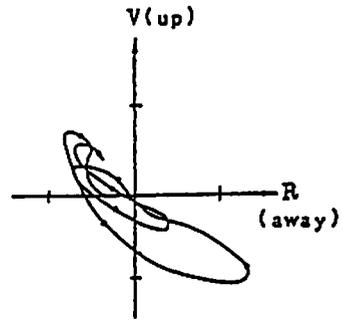


Fig. 6 Locus of third wave measured at S3

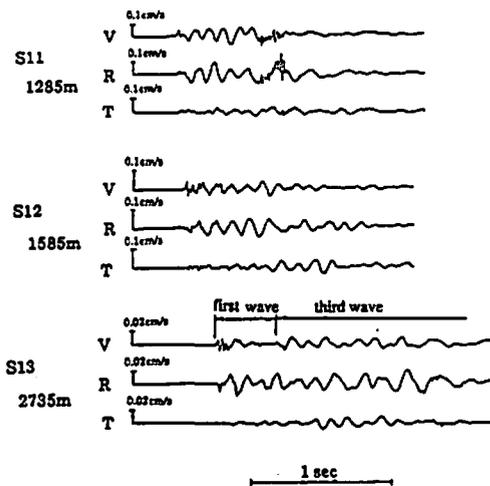


Fig. 7 Example of ground vibrations measured at S11~S13

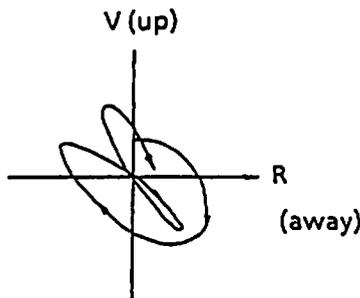


Fig. 8 Locus of third wave measured at S11

ている。6 P地点の北側の測点S11~S13の記録波形の例をFig. 7に示す。南側の測点での波形とは明らかに異なっている。まず、第1波の部分はR成分の振幅が大きいこと、第2波に相当する部分が見られないこと、そして第3波の継続時間が短いことである。

第1波は、伝播速度が5000m/sであり、下部の未風化岩を伝播してきた屈折P波であることが分かる。第1波でR成分の振幅が大きくなっているのは、沖積層がないためP波の屈折角が小さくなり、斜めから入射

したためと考えられる。南側に見られた第2波が顕著でないのは、沖積層がないためであろう。また、第3波に相当する部分の鉛直断面内の軌跡はFig. 8のように、斜め方向に振動しており、南側と同様SV波であると考えられる。

5. 各発破から発生する振幅の比較方法

以上検討した第1波~第3波の振幅は以下のようにして読み取った。第1波については、V方向の初動の振幅(以後V1と記す)を、第2波については番の州側の測点のV方向の振幅(以後V2と記す)を、そして第3波についてはR方向の振幅(以後SVと記す)を読み取った。なお、振幅値は同一波動成分のうち、同位相と認められるものを読み取ることとした。測点S1とS6については、他の測点での波形と位相関係が明確でないため、検討から除外した。

上記のV1、V2、SV波の同位相の振幅 A_i ($i=V1, V2, SV$)、薬量(W :kg)および(R :m)について以下の式を仮定し、重回帰分析を行った。その結果をTable 1に示す。

$$A_i = K_i W^n D^m \quad (1)$$

各発破の薬量は、360kg~1080kgであり、また爆源までの距離も異なるので、振幅値自体では各発破から発生する振動の大きさを直接比較することはできない。したがって、振幅 A_i ($i=V1, V2, SV$)の代わりに(1)式の K_i の値を用いて比較することとした。なお、 K_i の算定に当たっては、 n と m 値はTable 1の値を使用した。この K_i 値を各発破毎に測点S2~S5およびS11~S13で平均した値 $K_{i,ave}$ を算出し、各発破によって発生する振動の大きさを比較した。

6. 振動低減効果の検討

1) 爆源域効果の検討

発破パターン近傍の既発破区域の数量化としては、以下のようにした。すなわち、Fig. 9に示すように、既発破区域に接している発破孔の数の全発破孔数に対する割合を Q_s とした。したがって、 Q_s 値は1に近いほど既発破区域の影響が大きいことになる。

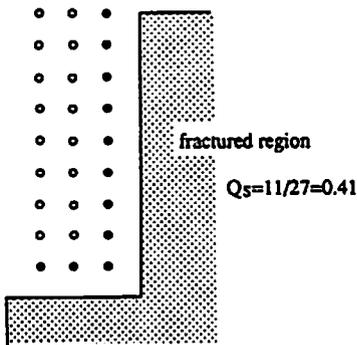
この Q_s と $K_{i,ave}$ ($i=V1, V2, SV$)との関係をFig. 10

Table 1 Result of multiple regression analysis for each wave

component	at rock surface			at soil surface		
	K	m	n	K	m	n
V1	2980	0.67	-2.17	1671	0.41	-1.71
V2	—	—	—	290	0.84	-1.77
SV	12450	0.72	-2.37	2466	0.77	-2.04

Table 2 Result of F testing for regression line

	S11~S13		S2~S5		
	KV1,ave	KVS,ave	KV1,ave	KV2,ave	KVS,ave
n	21	18	21	18	21
F value	3.66	6.78	0.355	6.62	4.16
F(1,n-2;0.95)	4.38	4.49	4.38	4.49	4.38
F(1,n-2;0.90)	2.99	3.05	2.99	3.05	2.99



$$Q_s = \frac{\text{number of blasting holes adjacent to fractured region}}{\text{number of total blasting holes}}$$

Fig. 9 Method to express source holes condition by some values

に示す。図中の r は相関係数である。また、Table 2 に回帰曲線の有意性に関する F 検定の結果を示す。

Table 2 より、測点 S2~S5 での $K_{v2,ave}$ と測点 S11~S13 での $K_{vs,ave}$ は、95% の信頼性を満足する。また、90% の信頼性では、測点 S2~S5 での $K_{v1,ave}$ と測点 S11~S13 での $K_{v1,ave}$ が満足する。したがって、 Q_s は、 $K_{v2,ave}$ および $K_{vs,ave}$ と、ある程度相関関係が認められるが、 $K_{v1,ave}$ とはほとんど相関が認められない。これは、屈折 P 波である V1 波は、主に新鮮な岩盤内を伝播してくる波動であり、爆源では主に鉛直下向きに働く力によって発生するものであるため、爆源の周囲の発破状況は、V1 波の振幅に影響を与えなかったと考えられる。一方 V2 波および SV 波は、爆源域の周方向へ働く力により発生するものと考えられ、そのため爆源周囲の破砕状況がその振幅に影響を与えたものと考えられる。低減効果は、Fig. 10 から、発破パターンの周囲の半分程度が既発破域であれば、振幅は約 15% 低減し、全周が既発破区域で囲まれていると約 30% 低減することが分かる。

発破区域の周囲が既発破区域であるという状況は、

陸上発破における振動低減工法として使用されているプレスブリット工法と同様な状況と考えられる。プレスブリット工法の振動低減効果については、勝山等³⁾による数値計算例があり、それによると破砕帯の幅 H が波長 λ より十分大きい場合 ($H/\lambda > 0.5$) は、音響インピーダンス理論が当てはまり、新鮮な岩盤に比べて破砕帯のヤング率が $1/10$ で密度が $1/2$ 程度の場合は、透過率は 70% 程度となるとしている。

以上のように、破砕帯を振動が通過することにより振動が低減したことも一つの理由として考えられる。しかし、発破パターンの北側には既発破区域が存在していないが、北側測点 S11~S13 においても振動が低減しており、以上の理由のみでは説明できない。他の理由は定かではないが、発破区域の周囲が破砕されているため、爆源近傍の岩盤の剛性が低下し、岩盤が変形しやすくなっており、爆発ガスが岩盤に作用する圧力が低下したためとも考えられる。

2) 経路減衰効果の検討

振動が通過する破砕域を以下のように数値化する。すなわち、Fig. 11 のように、注目する発破孔から測点方向 (S1~S6 の中心方向) へ 2θ の角度をとる。その範囲内において、東西方向の発破孔の各列別に既発破孔の孔数比 u_i を計算し、その値を全ての発破孔列について加え合わせたものを u とした。このようにすると、ある列 i のうち 2θ 内のすべてが既発破孔であれば、 $u_i = 1$ となり、 u の値は経路中に東西方向の既発破孔列が何列あるかを示すことになる。そして、この u の値を発破パターン内の各発破孔について算出し、その平均値を Q_p とした。この Q_p は、発破区域から発生する振動が既発破孔列を平均して何列通過するかを示すこととなる。なお θ としては 15 度としたが、 θ を多少変化させても各発破パターン間の Q_p は、相対的にはほとんど変化しなかった。

Q_p と $K_{i,ave}$ ($i = V1, V2, SV$) との関係を図 12 に示す。この図から、 Q_p はいずれの $K_{i,ave}$ に関しても相関がみられず、振動の伝播経路上の破砕域は、振動低

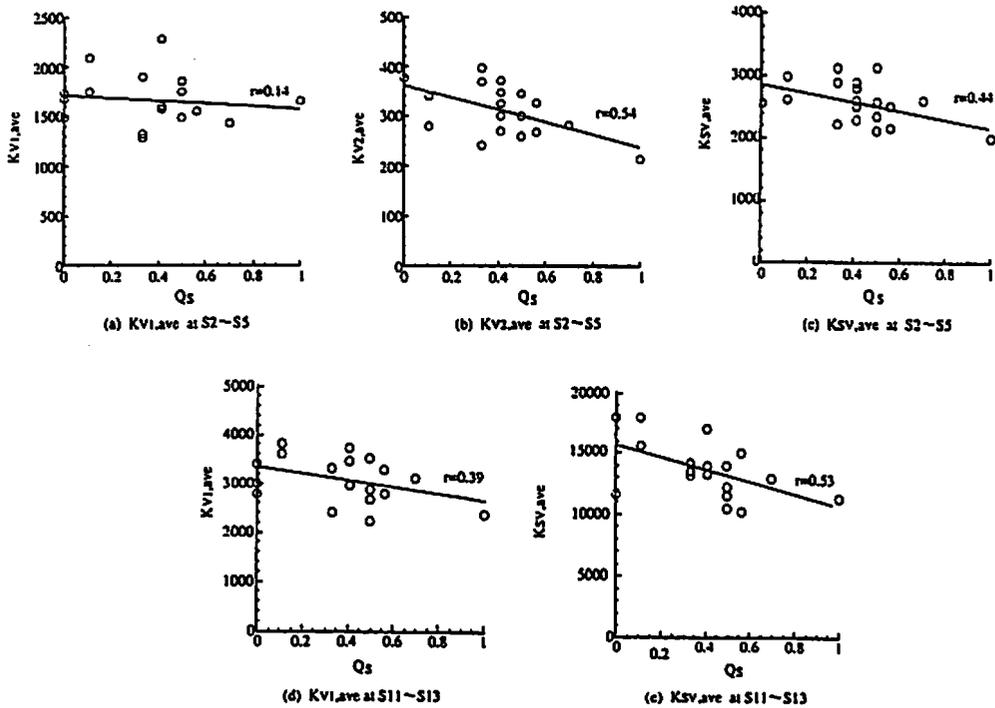


Fig. 10 Relation between K_i, ave and source condition index Q_s

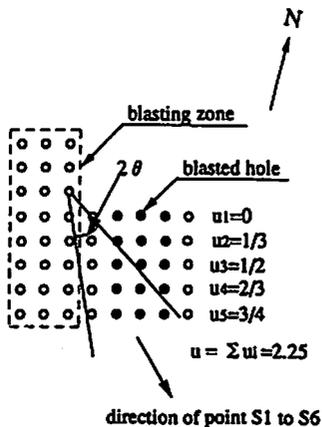


Fig. 11 Method to express pass condition by some values

減には影響しないと考えられる。

伝播経路上の破砕域は振動低減溝として作用すると考えられる。振動低減溝の効果は、溝が十分大きくまた周囲の地盤とのインピーダンス比が大きい場合には効果があるが、溝が浅くまたインピーダンス比が小さい場合は、低減効果が十分発揮されないとされている。⁴⁾

経路中の破砕帯が振動低減効果を示さなかったのは、

既発破区域の大きさは、1発破パターン程度とそれほど大きくないこと、および海底発破であるため、既発破による岩盤の破砕帯内は海水で満たされているため、破砕帯のインピーダンスの低下が顕著でなかったためと考えられる。

7. まとめ

海底発破に伴う地盤振動の低減方法として、周辺先行発破工法という一つの試みを行った。そして、発破地点周辺の既発破区域の振動に対する低減効果について検討を行い、以下のことが明らかとなった。

- (1) 震源と受振点間に既発破による破砕帯を設けても、その破砕幅に対応した振動低減効果(経路減衰効果)は認められない。
- (2) 新規発破部に既発破による破砕帯が隣接している場合、振動低減効果が認められた。

これによれば、新規発破部の半分程度が既発破区域に接している場合は15%程度の振動低減が、また全周が既発破区域に接している場合は、30%程度の振動低減がある。本知見によれば、発破パターンの選択のみで、このような振動低減効果が見られるので、振動低減方法の一助になるものと考えられる。

また、地盤振動の振幅は、薬量の約0.7乗に比例するため、地盤振動が15%の低減が見込まれる

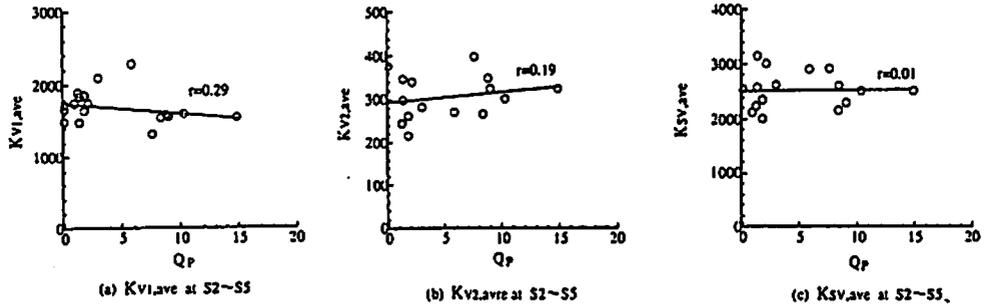


Fig. 12 Relation between $K_{i,ave}$ and pass condition index Q_p

場合は、薬量は27%増加させることができ、また30%の低減が見込まれる場合は、薬量は66%増加させることができる。このように、一回当たりの使用薬量の増加が可能になると、工期の短縮や経済性に対して大幅な貢献が期待できる。

最後に工事・計測・研究を通じてご指導頂いた総合安全工学研究所の福山委員長をはじめとする各委員に対して厚く御礼申し上げます。

文 献

1) 工業火薬協会編,「発破ハンドブック」, p.

249(1976),山海堂

2) 発破専門部会座談会,「発破振動の低減工法について」,工業火薬,43,3,pp.182~184(1982)

3) 勝山邦久,佐々宏一,伊藤一郎,「プレスブリッキングにより生成したプレスブリットの効果について」,日本鉱業会誌,89,1024,pp.357~362(1973)

4) 斎藤二郎,小出忠男,木村薫,「地盤振動と対策について(その4)」,大林組技術研究所報, No. 21, pp.33~37(1980)

An attempt to decrease ground vibrations during underwater blasting

by Eiichi GOTO*, Michio YAMASHITA and Jun KAWAKAMI*****

Compared with inland blasting, underwater blasting tends to overcharge, leading to increase ground vibrations, since it is necessary to make sure that rock breaks under water pressure. It is however difficult to apply usual inland blasting methods such as delay blasting and pre-splitting to decrease ground vibrations in underwater blasting.

An new attempt to decrease ground vibration generated by underwater blasting was made during the construction of the Namboku-Bisanseto Bridge on the Honshu-Shikoku Route. Performed was a series of peripheral blastings to cut off a section of rock from ground prior to a main blasting.

This method was proved effective to decrease directly the amplitudes of P- and SV-waves. The reduction rate was about 15% in case half of a new blasting region overlapped the region which had already been blasted, while it was approximately 30% in case all the new blasting region was within the perimeter of the blasted region.

(*Technology Division, Taisei Corporation, 3-25-1 Hyakunincho, Shinjuku, Tokyo, 169 Japan)

**Honshu-Shikoku Bridge Authority, Toranomon-45-Mori Bldg., 5-1-5 Toranomon, Minatoku, Tokyo, 105 Japan

***Technology Research Center, Taisei Corporation, 344-1 Nasemachi, Totsukaku, Yokohama, 245 Japan)