

和泉層群における発破振動と爆発音

本州四国連絡橋公団 正員 今中靖雄・川井幸一郎
日本土木工業協会 正員 丸山智義・〇正員 谷本親伯

1. まえがき

建設工事の大型化および施工能力の増大に伴い、工事区域周辺には大なり小なり環境変化をもたらしている。更に、こうした環境変化に対する地域住民の問題意識も増え、工事関係者は構築物の施工管理に加えて工事箇所周辺の環境保護のための管理が重要な任務となり、環境保全の問題は入さくなっていく。昭和50年夏3ヶ月にわたり大鳴門橋建設予定地において岩盤斜面の切取工事や現場付近の民家に及ぼす影響を調査する試験工事を実施した。これにより得られた結果の一部から砂岩・頁岩の互層帯で風圧作用を受けている、いわゆる和泉層群における発破振動に伴う発破振動および爆発音の測定結果について報告するものである。

2. 試験概要

大規模切取工事の予定されている標高約80mのスミ山山頂より海に向かって1:0.8の勾配に岩盤斜面掘削を進めるもの、8通りの削孔パターンについて震種および震量を算定し、発破による施工性とともに起る振動と爆発音を測定した。主として用いた削孔パターンと図-1に示す。削孔長はいずれも2.5m、削孔はCD型ツワドリルにより65mmのビットを使用して行った。図-2は測定箇所付近の代表的な断面を示すもの、右方約700mの位置に海岸線がある。V₂, V₄, V₅ および S₄, S₅ はそれぞれ振動計および圧電計の設置位置を示している。V₅ 付近に数軒の民家がこの山と取り巻く様に帯状に分布している。斜面は1~2m厚の表土を被り、その下は砂岩・頁岩の互層帯である。この付近の岩盤内P波伝播速度は、ほぼ1.8~2.0 km/secで、砂岩より採取したボーリングコア超音波伝播速度は3.8 km/secである。斜面の下端より海に向かって砂質地盤が平坦に続き、その砂層厚は斜面下端付近より1.5m、海に向って次第に厚くなり民家付近では7~8m程度と考へる。試験発破には、3号鋼ダイタイト(爆速6000 m/sec)、アンソル爆薬(爆速2500 m/sec)およびコンクリート破砕薬(CCR, 爆速60 m/sec)の3種の爆薬を使用し、試験回数は16回である。

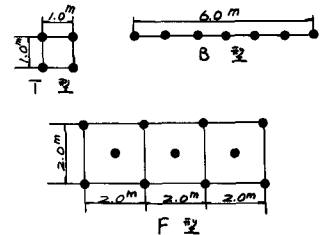


図-1 削孔パターン

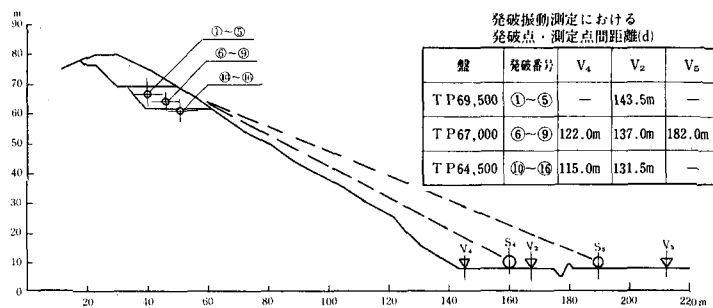


図-2 測定箇所断面図(測定V₂, V₄, V₅ および S₄, S₅の場合)

表-1 測定使用機器一覧

機 種	型 式	社 名	台数	振動測定	騒音測定	備 考
低 域 振 動 計	VP3300LL	国際機械振動研究所	6	○		速度型。
増 幅 器	VM3300LL	"	2	○		3チャンネル/台。出力は加速度。
データレコーダー	R-70	TEAC	4	○	○	4チャンネル/台。
ビ ジ グ ラ フ	PR101	三 栄 測 器	1	○		6チャンネル/台。
公 害 振 動 計	PV-10B VM-12A	リ オ オ ン	3	○		加速度レベル(dB)で測定。
高速度レベルコーダー	LR-03	"	2	○	○	1チャンネル/台。
指 示 騒 音 計	NA-09	"	3		○	おもにC特性で測定。
1/3オクターブ分析器	SA-57	"	1		○	

発破振動および爆発音の測定には表-1に示す機器を使用した。振動は上下方向成分、水平進行方向成分、水平直交方向成分の3成分を同時に測定した。これら方向成分に対しては、以下に示す(2), (J), (x)の表示を用いたこととする。記録はすべて再生可能な様にテープレコーダを使用した。16成分を同時に記録が可能であったが、発破時刻を示すショットマークの記録のため実際に使用したのは12成分である。記録の再生にはビジュウツを用いたが、これと互に1/3オクターブ分析器により波の卓越周波数を解析した。

3. 測定結果

発破振動の大きさや爆源からの距離や薬量との関係については次に示す実験式を提示されている。^{(1), (2), (3), (4)}

$$A = K \cdot L^m \cdot d^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、A：発破振動の振動変位速度振幅 (kine)，L：薬量 (g)，d：距離 (m)，K：火薬類，発破条件，岩盤条件，伝播経路等により定まる定数であり，指数mの値は1/2～3/4，nの値はほぼ-2とする場合が多い。今回の解析にあたり、前出実験および久保府泉南郡・和泉郡群で実施された実験⁽⁵⁾の結果を参考としてm=2/3，n=-2とした。後述の減衰状態の検討において、n=-2の妥当性が裏付けられた。今回の測定対象となった民家付近の地質は、基岩盤（和泉郡群）上に砂層が堆積したもので、最大振動方向成分を検討したところ表-2に示す結果を得た。たとえばK(2)の表示は、上下方向成分の振動の係数Kを示す。K(y)つまり水平進行方向成分が最大値を示し、K(2)とK(x)はほぼ同程度である。

薬種による振動の相違については、特に3号相とアンホについて詳細に検討したが、たとえば表-3に示すように、いずれも顕著な差は認められなかった。コンクリート破砕薬は破壊機構も前二者と異なり、ガス圧を主伴としたもので⁽⁶⁾、その振動の大きさはダイナサイト系爆薬の1/10以下であることが確認されている。^{(2), (3)}

初段（心抜き）と後段（松い）における振動の比較は表-4に示すようである。発破番号2, 3, 7および8の一群と11および12の一群では地質状況が多少異なっている。前者は、風化の著しい砂岩・頁岩の互層であったが、後者は砂岩を主とした堅硬な岩盤であった。最大振動を生ずる方向成分について考えれば、主伴として後段における振

表-2 振動の各方向成分の比較

記録番号	d (m)	K (z)	K (y)	K (x)
2-1	136.0	4.29	5.04	2.79
2-2	"	1.12	1.25	1.40
2-3	"	0.76	0.77	2.23
3-1	"	2.57	5.36	4.24
3-2	"	3.71	4.35	(11.80)
3-3	143.5	1.93	3.91	(11.69)
3-1	"	2.93	4.66	3.11
3-2	"	3.98	3.91	3.04
3-3	"	3.41	4.06	3.35
比		1.0	$\frac{K(y)}{K(z)}=1.35$	$\frac{K(x)}{K(z)}=0.34$

① () 中のデータは除く。

記録番号	d (m)	K (z)	K (y)	K (x)
7-1	130	5.52	3.78	3.84
7-2	"	3.01	3.94	3.38
7-3	"	2.41	2.87	2.51
7-1	137	3.69	5.40	5.48
7-2	"	4.60	6.76	8.13
7-3	"	3.46	6.76	3.98
8-1	130	4.61	3.55	2.91
8-2	"	3.40	3.05	2.81
8-3	"	3.05	2.34	2.23
8-1	137	7.17	6.62	5.20
8-2	"	4.74	4.75	4.94
8-3	"	5.20	3.12	4.94
比		1.0	$\frac{K(y)}{K(z)}=1.16$	$\frac{K(x)}{K(z)}=0.99$

表-3 3号相・アンホ振動比較(初段)

比較番号	距離 d (m)	3 号 桐			ANFO		
		K(z)	K(y)	K(x)	K(z)	K(y)	K(x)
2-1 3-1	136.0	4.29	5.04	2.79			
2-1 3-1	143.5	—	—	—	2.93	4.66	3.11
7-1 8-1	130.0	5.52	3.78	3.84	4.61 (0.84)	3.55 (0.94)	2.91 (0.76)
11-1 12-1	115.0	—	4.26	—	—	4.54 (1.07)	—
11-1 12-1	131.5	—	11.61	—	—	9.24 (0.80)	—
11-1 12-1	147.5	—	10.55	—	—	15.37 (1.46)	—
11-1 12-1	166.5	—	6.04	—	—	6.62 (1.10)	—
11-1 12-1	186.5	—	6.84	—	—	7.09 (1.04)	—
11-1 12-1	202.0	—	7.31	—	—	4.30 (0.59)	—
11-1 12-1	—	—	—	—	—	—	—

表-4 初段・後段における振動比較

記録番号	d (m)	初 段	2 段	3 段	備 考
		K (z)	K (y)	K (x)	
2	136.0	4.29 (0.1)	5.04 (1.0)	2.79 (1.0)	2 段/初段 K (z) : 1.02 K (y) : 0.96 K (x) : 1.38
3	136.0	2.57 (1.0)	5.36 (1.0)	4.24 (1.0)	
3	143.5	2.93 (1.0)	4.66 (1.0)	3.11 (1.0)	
7	130.0	5.52 (1.0)	3.78 (1.0)	3.84 (1.0)	3 段/初段 K (z) : 0.78 K (y) : 0.79 K (x) : 1.31
7	137.0	3.69 (1.0)	5.40 (1.0)	5.48 (1.25)	
8	130.0	4.61 (1.0)	3.55 (1.0)	2.91 (1.0)	
8	137.0	7.17 (1.0)	6.62 (1.0)	5.20 (1.0)	
11	115.0	3.23 (1.0)	11.61 (1.0)	10.61 (1.0)	K (y) のみ 2 段/初段 K (y) : 0.64
11	147.5	6.04 (1.0)	6.84 (1.0)	7.31 (1.0)	
12	166.5	3.44 (1.0)	9.24 (1.0)	15.37 (1.0)	3 段/初段 K (y) : 0.68
12	186.5	6.62 (1.0)	7.09 (1.0)	4.30 (1.0)	
12	202.0	6.62 (1.0)	7.09 (1.0)	4.30 (1.0)	

動は初段のそれらに比べて6~8割程度であるといえる。

周波数については、2.5Hz間隔で卓越周波数の分布状態を検討したところ図-3に示すような結果を得た。各薬種毎、各地支毎および成分毎の卓越周波数の分布状態を求めたが、薬種(コンクリート破砕薬を除く)、地支、成分について目立った相違は認められず、いずれの場合もほぼ30~40Hz付近に集中している傾向がある。したがって、今回の試験箇所(斜面掘削)に発破を使用した場合に周辺の民家に対する発破振動の周波数は35Hz近傍のものに卓越するものと考えてよいであろう。

距離による振動の減衰状態を把握することは、将来の施工時に発する振動の大きさを推定する上で重要である。今回の測定では、発破番号10~13において距離の異なる6測定のり方向成分の振動の減衰状態を検討した。これは減衰を示す指数であるデータから最小自乗法を用いて求めた。その結果は、表-5および図-4に示すようである。これは-1.3~-3.5とばらつきがみられるが、平均値を求めると、-2.0となる。試験発破により得られた結果を施工に利用するためには、振動式における係数Kの値を決定せねばならない。3号桐、アンホの両者間には差が認められなかったため今回の試験発破実施箇所の発破掘削における3号桐、アンホの係数Kは同一とし、表-3の平均値から6.84、約7の値を定めた。また、払い発破における係数Kを整理すると、表-6のようになり、平均値4.87を得、約5となる。コンクリート破砕薬については、今回の測定定とした100~200mの距離では、波動が到達せず測定不可能であった。他の実験結果^{2),3),4)}よりダイナマイト系爆薬の1/10以下の振

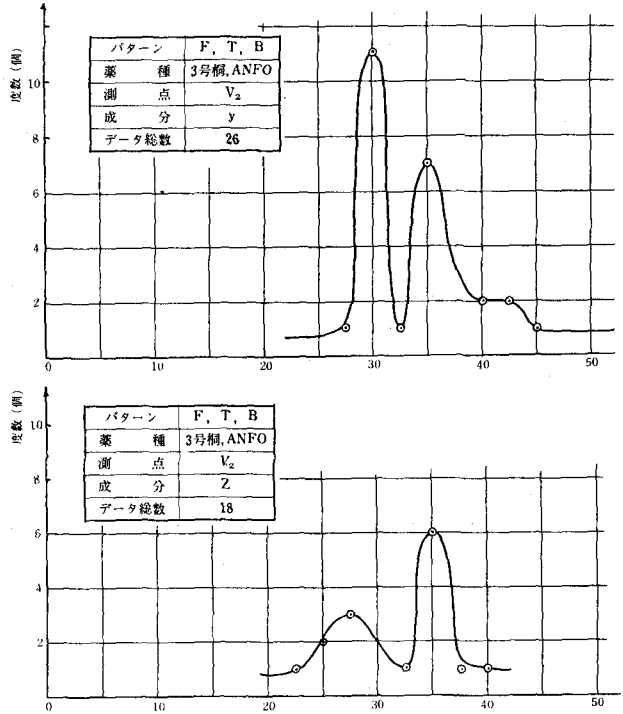


図-3 発破振動の卓越周波数の分布状態

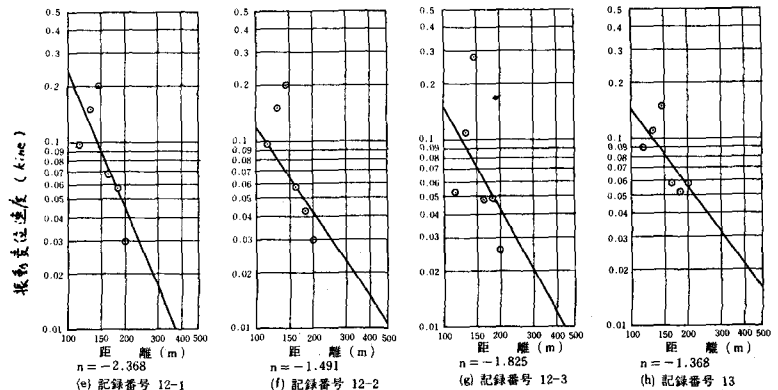


図-4 発破振動の距離減衰状態

表-5 距離減衰状態と指数n

K(y)	d (m)	n	対応する図
10	0.108 0.184 0.123 0.050 0.028 0.022	-3.577	(a)
11-1	0.091 0.191 0.138 0.062 0.056 0.051	-3.80	(b)
11-2	0.042 0.156 0.158 0.058 0.034 0.045	-1.282	(c)
11-3	0.050 0.132 0.217 0.058 0.037 0.018	-2.41	(d)
12-1	0.097 0.152 0.201 0.068 0.058 0.030	-2.388	(e)
12-2	0.058 0.063 0.157 0.057 0.043 0.030	-1.491	(f)
12-1	0.053 0.111 0.278 0.048 0.049 0.026	-1.825	(g)
13	0.089 0.210 0.148 0.057 0.051 0.057	-1.368	(h)

表-6 払い発破におけるK値

盤	記録番号	別型発破でのK (y)	平均値	平均値
T P 69,500	5-1	2.31 2.63 2.07	2.67	4.87
	5-2	2.77 2.93 3.30		
T P 67,000	9	4.66 8.20 6.47	5.31	
		2.73 5.16 4.61		
T P 64,500	13	3.93 6.30 10.66	6.62	
		5.23 5.87 7.70		

表-7 振動式の係数Kの値

薬種	発破形式	K 値
3号桐ダイナマイト	1自由面発破	7
ANFO	〃	7
CCR	〃	0.7
3号桐ダイナマイト	払い発破	5

動は初段のそれらに比べて6~8割程度であるといえる。他の実験結果^{2),3),4)}よりダイナマイト系爆薬の1/10以下の振

動と考えらる。従って、表-7に示すようなK値を推定することが出来る。また、3号桐にて自由面爆破を行う場合の振動ノイズ量は、図-5に示すようであり、地山のP波伝播速度1.8~2.0 km/sec程度の和泉夕群に適用できるものと考えよ。

一方、爆発音については、次に述べるようである。

装薬量と音圧との関係については、過去の定数結果⁴⁾から音圧は装薬量のほぼ平方根に比例する。すなわち、

$$P = J \cdot L^{0.5} \dots (2)$$

ここに、P:音圧(μbar),
L:装薬量(kg), J:係数である。今回の爆発音については、発音源から発生したものとみなし、距離100mの場合に換算して音圧、音圧レベルおよび騒音レベルを求め、係数Jを比較することにより、薬種および発破形式による爆発音を比較した。その結果は、表-8に示すようである。表中①~⑤に対する係数Jの値は、それぞれ5.42, 3.53, 12.95, 2.83および18.44であり、便宜上、6, 4, 15, 3および20とする。

爆発音の(2)式より各装薬量に対する音圧を定まり、音圧レベルを求めることが出来る。①~⑤に対する卓越周波数は図-7に示すようであり、A, BおよびC特性に応じた聴感補正を行うことにより、騒音レベルを求めることが出来る。図-6は、C特性における騒音レベルと装薬量との関係を示したものである。

4. 文献

1)土木学会:土木技術者のための名盤力学, 6.7 p. 406 (昭50), 2)藤井・谷本:土木建設, 19巻12号 (昭45), 3)伊藤・佐々・谷本:爆破振動の軽減法に因る検討, 土木学会26回年次講演会 Ⅲ 38 (昭46), 4)伊藤:工業火薬協会誌, 34巻1号 (昭40) p. 4, 5)木村・谷本:発破に伴う振動, 爆発音, 飛石に因る定数, 第12回道路会議特定課題論文 215 (昭50), 6)伊藤・佐々・谷本:爆破による岩石の破壊機構, 第3回岩石力学国内シンポジウム (昭45)

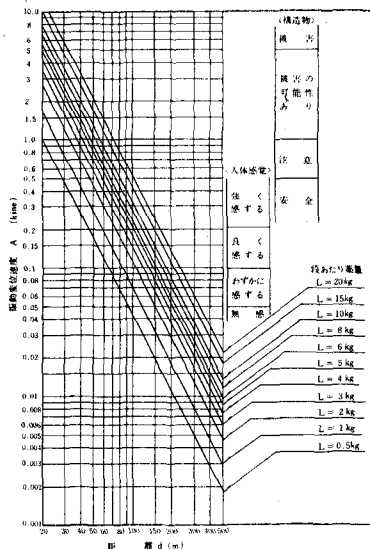


図-5 3号桐にて自由面発破時の振動ノイズ

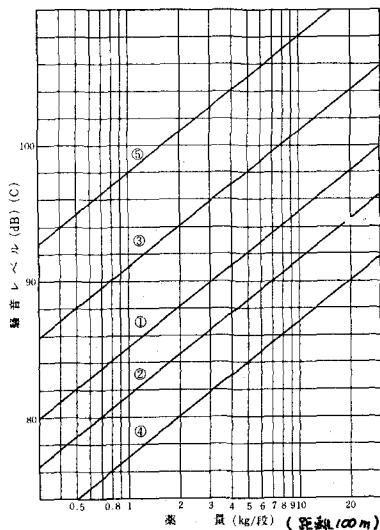


図-6 発破騒音の騒音レベルと装薬量との関係

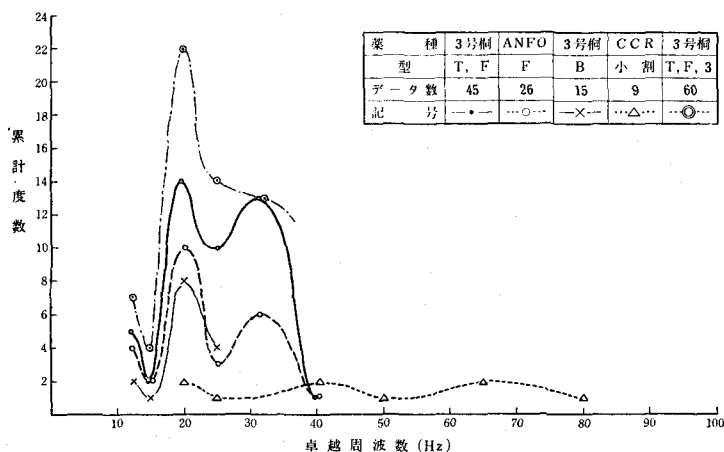


図-7 発破騒音卓越周波数分布累計度数

薬種	3号桐	ANFO	3号桐	CCR	3号桐
型	T, F	F	B	小割	T, F, 3
データ数	45	26	15	9	60
記号	—●—	—○—	—×—	—△—	—◇—

表-8 薬種および発破形式による騒音比較

番号	薬種	発破形式	音圧比	騒音レベル差
①	3号桐	1自由面	1.00	0 (dB)
②	ANFO	1自由面	0.65	-3.7 (dB)
③	3号桐	掘	2.38	+7.5 (dB)
④	CCR	1自由面	0.52	-5.7 (dB)
⑤	CCR	小割	3.40	+10.6 (dB)

Ground Vibration and Explosion Sound caused by Blasting in Izumi-layers

by Yasuo IMANAKA, Koichiro KAWAI,
Tomoyoshi MARUYAMA and Chikaosa TANIMOTO

Ahead of the operation of blasting it should be discussed the influence to adjacent inhabitants and structures which may be caused by blasting.

Field test and measurement searching for effects of blasting were done during three months in summer of 1975 as one part of the investigations for the construction of Ohnaruto Bridge connecting Shikoku Island and Awaji Island.

Blasting was tested on the rockground called Izumi-layers which is the alternative layers of weathered sand stone and shale where the seismic velocity is 1.8 to 2.0 km/sec.

Drilling pattern, kind of explosives, charge, distance, attenuation of seismic wave, period of delay shot, predominant frequency, peak particle velocity, sound level etc. and their relations are discussed in this paper.

The results about blasting in Izumi-layers are as follows:

1) In DS-delay intervals which are 500ms for No. 2 Cap, 250ms for No. 3 to No. 9, and 300-500ms for No. 10 and followings peaks of waves are separated, and the quantity of charge for one shot is determined by the quantity per one delay.

2) There is no remarkable difference of vibration in Izumi-layers between Shinkiri-dynamite and ANFO.

3) The equation shown below is applicable to the estimation of ground vibration in Izumi-layers.

$$A = K \cdot L^{2/3} \cdot d^{-2}$$

where A: peak particle velocity (kine), L: charge per delay (g), d: distance (m) and K: 7 for dynamite and/or ANFO in one free face, 5 in 2 free face and 0.7 for concrete cracker.

4) The vibration by initial ignition shows the highest peak and others do 60-80% of it.

5) Predominant frequencies are 30-40 Hz for ground vibration and 20-40 Hz for explosion sound.

6) The explosion sound of Sankiri-dynamite is 4 dB and 6 dB higher than ANFO and concrete cracker.

7) For the excavation of Izumi-layers the nomograms shown in Fig. 5 and 6 are useful, and Fig. 5 is used in the case of one free face blasting by dynamite and ANFO and Fig. 6 is used in the case of the distance of 100m where ①, ②, ③, ④ and ⑤ indicate one free face blasting by dynamite, one free face blasting by ANFO, two free face blasting by dynamite, one free face blasting by concrete cracker and fragmentation by concrete cracker.