

投稿論文(和文)

PAPERS

明かり発破施工による超低周波空気振動の検討

辻 勇¹・津垣昭夫²・岸 正広³・科野健三⁴

¹和歌山県土地開発公社 開発課長(平成3年4月～平成5年2月)(〒640 和歌山市西汀丁1-2)

²正会員 鹿島建設株式会社 常任顧問

³正会員 鹿島建設株式会社 建設総事業本部 大阪支店 土木部 担当部長

⁴応用地質株式会社 関西事業本部 京都営業所長

住宅地に近接した明かり発破施工は、今後増加していくものと考えられる。今回この種の施工によって発生した超低周波空気振動の調査を実施する機会を得た。ここでは、発破の諸元、アンケート調査結果および周辺での低周波空気振動測定結果等を整理し、地元住民からの苦情の原因とこれを軽減するための対策について検討した。その結果、ある特定域での許容値を100(dB)に設定し、距離と切羽表面積とを用いた超低周波空気振動圧レベルの施工管理式を作成することによって、ほぼ最適な発破施工を実施することができた。また、この施工管理式を作成する際には、超低周波空気振動特有の地域性を考慮した。

Key Words : bench blasting, vibration, infrasound, electronic delay detonator

1. はじめに

近年、明かり発破掘削による造成工事は工期の短縮を図るために大規模となる傾向にあり、掘削現場も用地買収の制約を受けることによって、住宅地に近接せざるを得ない場合が多くなってきている。

このような状況下で、発破作業時の振動や騒音に関する問題は、調査方法や対策方法についてもかなり普及してきており、これらの問題をクリアにした最適化施工を実施することは可能となってきた。

しかし、発破作業によって発生する低周波空気振動については、現状この性状に不明な点が多く、調査方法、評価方法および対策方法に確立した手法がないため、いずれの掘削現場でも対応に苦慮するのが現状である。

環境庁では周波数が100 Hz前後までの低い可聴音域を含めて「低周波空気振動」として取り扱っているが、ここでは可聴域よりも低い音(20 Hz未満)を「超低周波空気振動」と定義する。

今回、住宅地に近接する明かり発破作業時に地元住民より、低周波空気振動によるものと思われる苦情が発生し、施工管理測定を実施する機会を得ることができた。

この低周波空気振動波形のパワースペクトルを算出した結果、周波数1～3(Hz)にもりあがり有する超低周波空気振動であることがわかった。

今後も住宅地の近接発破施工による超低周波空気振動の問題は増えてくるものと思われるが、調査方法、影響の評価、伝搬予測手法および対策等に関する報告事例は少ない。

本文では住宅地に近接する土取り場における明かり発破により発生した超低周波空気振動の性状と苦情発生原因について検討を行うとともに、この許容値と予測式について検討を加え、調査地に適用可能な施工管理式の提案を行った結果について述べる。

2. 工事概要

本工事(関西国際空港関連事業 和歌山加太土砂採取工事)は、和歌山県土地開発公社が、和歌山市加太地区の地域開発計画において実施されたものであり、施工期間中は発生する土砂を空港島の建設に必要な埋立用土砂として極力安定かつ短期間で供給し続ける必要があった。

工事全体の概要はベンチカット工法により採取した岩石を重機により破砕設備まで運搬し、クラッシャーで破砕後、地下トンネル内に設置された延長2.5 kmのベルトコンベアによってストックパイルに搬送し、栈橋のシップローダーで船積みするものであった。

土砂採取面積は140 haであり、土取り場では採取岩石をダンプトラックにより投入口まで運搬した(図-1)。

ベンチ造成にあたっては、作業の安全性、地質の走向・傾斜を考慮し、受け盤側または走向に直角方向から切羽の展開を行った。ベンチの高さは原則として15 mとし、1発破当たりの平均起砕量は $V \approx 13,000(\text{m}^3)$ とした。

また、ベンチの起砕方法は、岩石を短期間で安定的に搬出する必要があったため、軟岩・硬岩にかかわらず全て発破によった。また、発破は昼と夕の2回に分けて行

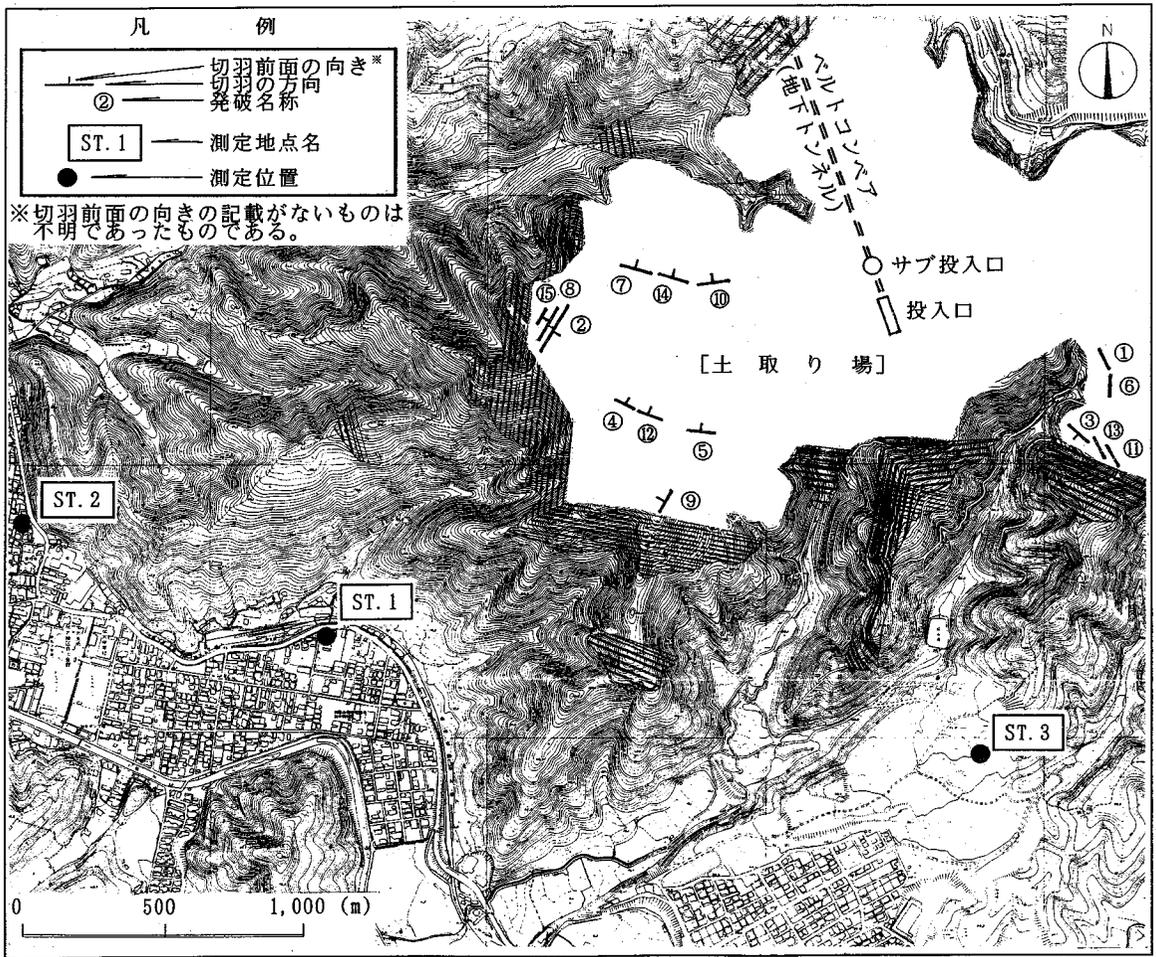


図-1 調査地平面図

い、1日当たりの発破回数は平均5回程度とした。

なお、施工是和歌山加太J.V. [鹿島建設(株)、(株)青木建設、(株)熊谷組、清水建設(株)、佐藤工業(株)、三井建設(株)、戸田建設(株)、住友建設(株)、(株)銭高組、(株)浅川組] が実施した。

3. 調査に至る経緯

工事区は、和歌山県と大阪府を境とする和泉山地西端部の山体に位置する。山体の標高は70~250mであり、工事区周辺に端を発する阿振川、大谷川、日野川等の小河川が谷地地形を形成し、主として北、西、南の3方向に延びている。

山体を構成する地質は主として中生代白亜紀の砂岩・泥岩互層からなる和泉層群であり、岩質は硬いが脆い。

施工期間中は発破の振動と騒音には十分留意し、周辺民家でも数多くの測定を行い、許容値を厳守しつつ施工

を行った。しかし、周辺住民からの苦情を完全に無くすことはできなかった。

工事区の西部から南西部にかけての低地上と南部の高台に密集した住宅地(図-1)は、いずれも発破箇所から500m~2,000m程度離れており、振動と騒音による影響とは考えにくかった。

施工当初、発破の施工管理は振動レベルと騒音レベルによっており、本施工に先立ち実施した試験発破により、敷地境界線における許容値をそれぞれ振動レベルピーク値で73(dB)、騒音レベルピーク値で70(dB)に設定し、発破作業を開始した。

施工期間中の敷地境界線における振動レベルは60~70(dB)、騒音レベルは40~60(dB)程度であり、共に許容値を十分下回っていたが、地元住民から「びっくりする」、「うるさい」、「ガラス、サッシががたつく」、「床が揺れる」、「振動と騒音が大きすぎる」等の苦情が発生した。

苦情内容の中には文献⁹⁾等から、事前に検討評価のなされていなかった低周波空気振動による影響と考えられるものが多かった。そこで、施工期間中に本施工に即した試験発破を実施することにより、超低周波空気振動の検討も可能な低周波空気振動を中心とした調査を以下の考え方と方法によって実施することとした。

4. 調査計画の立案および方法

(1) 測定位置

苦情発生箇所が工事区の西部から南西部にかけての低地上と南部の高台に密集した住宅地に集中していたことから、苦情発生原因と対策を地区別に検討できる位置(図-1, ST.1~ST.3)を選定した。

音源近傍の投射音圧は、安全面を考慮した場合、測定不可能であった。

なお、ST.3については、南部の高台の住宅地を考慮し、選定した位置であるが、現地への立ち入りが困難であったため、工事区とこの高台とのほぼ直線上に位置する工区内に設定した。

(2) 測定対象とする建物

苦情は建物の種類に関わらず発生していたことから、ST.1~ST.3を同一種類の建物とせず、それぞれ種類の異なった建物を選定することとした。また測定階は現地状況の制約を受けない箇所を選定した。

測定位置別の建物の種類と測定階は、下記のとおりである。

- ・ST.1 (RC造) : 2F・ST.2 (木造) : 1F
- ・ST.3 (ユニット連結式プレハブ) : 2F

(3) 測定項目

苦情は、発破箇所から500m~2,000m程度遠方の住民から発生しており、苦情内容も低周波空気振動による影響と考えられるものが多かったため、上記ST.1~ST.3の屋外で低周波空気振動の測定を行い、性状を把握することとした。

また、苦情内容の中にはガラス、サッシのがたつきや床の振動によるものもあったため、構造物近傍の地盤、床、窓に振動計を設置し、発破時における床と窓の挙動が地盤振動によるものか低周波空気振動によるものかを把握することとした。

以上のことから、測定は上記3箇所において低周波空気振動と地盤・床・窓の振動の4項目について行うこととした。

(4) 計器設置方法

計器設置模式図を図-2に示す。

まず、低周波マイクロホンの設置方法について述べる。

低周波マイクロホンの設置位置に関しては、音波の計測という観点から、いわゆる騒音測定に準じ、地点別に下記の位置に三脚にて設置、固定した。

- ・ST.1 : 2F 屋外ベランダ床上1.2m, 地盤上4.5m
- ・ST.2 : 1F 地盤上1.2m・ST.3 : 1F 地盤上1.2m

また、マイクロホンの設置平面位置は背後の建物の壁から1m程度離すこととした。

マイクロホンの設置方向については、本施工時に発生した苦情が必ずしも切羽の方向に関係していないことが経験的にわかっていたことや、切羽の方向を考慮した発破施工が不可能であること等を考慮し、測定期間中はマイクロホンを工事区の中心に向け、固定しておくこととした。

次に、振動計の設置方法について述べる。

振動計の設置方向は地盤と床の場合、上下動とし、窓の場合、水平動とした。振動計の設置方法については接触共振のないよう、確実に取り付けるように努め、地盤の場合、石膏によりアスファルトまたはコンクリート上に設置した。また、床・窓の場合、両面テープにより敷居上またはガラス面の中心に設置した。

測定は延べ5日間の連続測定であったが、低周波マイクロホンと振動計の設置箇所については、設置方法にともなう測定誤差が生じない様、測定期間中固定しておくこととした。

(5) 測定・解析方法

図-3に測定および記録再生時のブロックダイヤグラムを示す。

低周波マイクロホンは可聴音域以下の超低周波空気振動の測定も可能なセラミック型マイクロホンを用いた。

低周波空気振動測定の総合周波数特性は前置増幅器を内蔵した低周波マイクロホンを増幅器と組み合わせることにより、周波数1~90(Hz)の範囲で出力が空気振動圧に比例し、平坦である。また、このマイクロホンの測定範囲は空気振動圧レベルで55~120(dB)である。

なお、測定前後には増幅器による内部校正を行い、測定誤差の発生しないように努めると共に、測定時は風による影響の少ない様、防風スクリーンを使用した。

振動計は増幅器と組み合わせることにより、周波数1~500(Hz)の範囲で出力が振動加速度に比例し、平坦な周波数特性を有する圧電型の振動ピックアップを用いた。

測定時には、測定地点毎に1台のデータレコーダによって、空気振動圧記録と振動加速度記録の磁気テープによる同時記録を得ることとした。

測定地点毎に同時記録を得ようとした理由は、低周波空気振動と地盤・床・窓それぞれの振動発生時刻との相

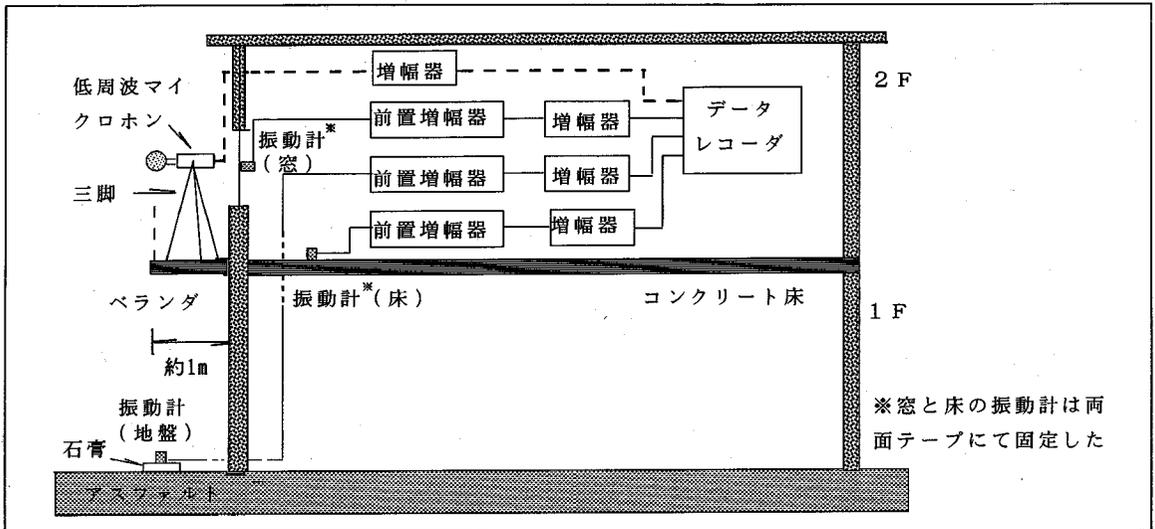


図-2 計器設置模式図

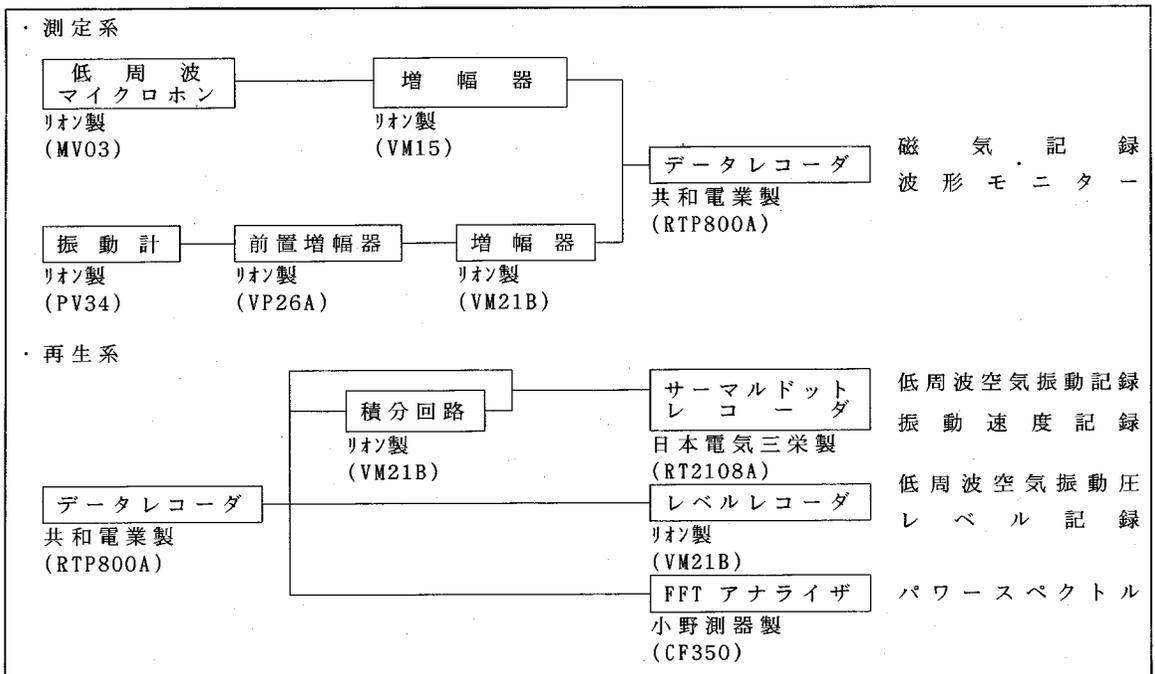


図-3 測定・再生系統図

対的な時間のずれの把握が可能となるようにし、苦情発生原因について検討する際の基礎資料とするためである。

したがって、測定時は原則として1箇所・1回の発破につき低周波空気振動1波と振動速度3波、計4波の同時再生波形記録を得るように努めた。

また、低周波空気振動記録については、高速度レベル

レコーダを用い、空気振動圧レベル記録を得ることとした。この際、ペンの動特性は発破音の測定に準じ、“FAST”とした。

このようにして得られた各波形記録について、最も大きな振幅を示す波の片振幅を読みとり、低周波空気振動圧 (Pa) および速度振幅 (cm/s) を求め、レベル記録についてはピークレベル値を読みとり、低周波空気振動圧

表-1 発破諸元例一覧表

発破名称	ベンチ高さ (m)	切羽標高 E.L. (m)	最小抵抗線 (m)	穿孔間隔 (m)	穿孔長 (m)	電気雷管	段数 (段)	穿孔行列	薬種別段当たり薬量 (kg)			総薬量 (kg)	発破後岩砕高 (m)	発破後岩砕巾 (m)	起砕量 (m³)	切羽表面積 A (m²)	切羽の地質状況
									あかつき	アンホ薬量×本数	小計						
⑥	13.5	145	6.0	7.0	14.0	M S	9	7孔+2孔 (千鳥2列)	1.5	@25×5 = 125	126.5	1138.5	-	-	5,500	570	軟岩 I ~軟岩 II
⑦	15.0	103	6.0	6.5	15.0 16.0 18.0	M S	11	11孔 1列	5.0	@25×7 @25×6 @25×5	180.0 155.0 130.0	1855.0	13	15	10,480	980	中硬岩 ~硬岩
⑧	12.0 13.5	111	6.0	7.0	13.5 14.5	M S D S	11	11孔 1列	1.5	@25×5 @25×7	126.5 176.5	1641.5	11~ 13	12~ 13	7,000	910	中硬岩
⑨	10.0	123	6.0	6.5	12.0	M S	13	3孔+10孔 (千鳥2列)	1.5	@25×4 = 100	101.5	1319.5	8	10	8,875	645	中硬岩
⑩	15.0	103	6.0	6.5	18.0	M S	11	11孔 1列	5.0	@25×7 = 175	180.0	1980.0	13	15	12,045	980	軟岩 II ~中硬岩
⑪	13.0	145	6.0	7.0	14.0	M S	10	1孔1列 3孔3列	1.5	@25×5 = 125	126.5	1265.0	-	-	5,900	180	軟岩 I ~軟岩 II
⑫	10.0 11.0	111	6.0	7.0	11.5 12.5	M S D S	14	14孔 1列	1.5	@25×4 @25×5	101.5 126.5	1671.0	9~ 10	10~ 11	7,400	990	中硬岩

レベル (dB) を求めた。

更に、発破により発生伝搬した低周波空気振動と地盤・床・窓それぞれの振動の周波数特性について調べるため、パワースペクトルを算出した。

(6) 測定時間

本施工時の発破は昼と夕の2回に分けて行っていたことから、試験発破もこれとほぼ同一時間帯の11:00~12:00の間と17:00~18:00の間とした。

(7) 気象条件

本施工時の苦情発生日は特に気象条件(天候、気温、気圧、風向、風速等)に左右されているわけではなかった。

また、低周波空気振動の測定はそれ自体、風の影響を大きく受けることから、測定は無風に近い日を選んで実施することとした。

測定期間中の気象条件は下記のとおりほぼ同一であったことから、ここでは、主として発破の施工方法による低周波空気振動の性状の違いについて検討することとした。

- ・天候:晴れ、
- ・気温:5~8℃
- ・気圧:1,005~1,020 mbar
- ・風向:無~南または北
- ・風速:0~0.5 m/s

(8) 発破の方法

本施工時のベンチ発破位置は施工効率を考慮し、施工区域内に散在させていた。

したがって、試験発破も本施工時と同様、施工区域内の広範囲のベンチ発破を対象とすることとした(図-1)。

また、掘削性を考慮した場合、薬量と薬種的大幅な変更は得策ではないとの判断から、両者については極力本施工に近いものとした。

ベンチの方向、高さ、切羽の規模、発破の方法等については、発破毎にその諸元を収集・整理(一例を表-1に示す)すると共に、切羽の写真撮影も行い、測定結果と併せて検討を行う基礎資料を得るものとした。

(9) 許容値の推定方法

苦情内容と発破施工との関係について検討を行うと共に、低周波空気振動の許容値について検討を加えるため、ここでは第三者としての測定員によるアンケート調査を実施することとした。

アンケート項目は本施工期間中に発生した苦情の中から、苦情内容の件数が多く、測定員が第三者的な立場で実施可能なものを抽出した。

アンケート実施箇所は上記(2)の3種類の建物内とし、下記の項目についてアンケート調査を実施することとした。

- ① 心理的影響
 - ・感じる
 - ・うるさい
 - ・びっくりする
- ② 物理的影響
 - ・床が揺れる
 - ・ガラス、サッシががたつく

苦情内容と発破の因果関係について検討を行う際は、これらの内容が低周波空気振動によるものか振動による

表一 2 振動・低周波空気振動測定結果例一覧表

発破 名称	地盤速度振幅			床速度振幅			空気速度振幅			低周波空気振動			卓越周波数 f (Hz)												低周波空気振動圧			斜距離		
	V0 (cm/s)			V1 (cm/s)			v1 (cm/s)			圧 Px (Pa)			低周波空気振動			地盤振動			床の振動			窓の振動			レベルSL (dB)			R (m)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
㊸	12	20	16	04	22	-	-	65	2.21	81.4	7.2	55	1.31	47.5	16	6.0	7.5	4.0	10	5.0	6.5	14.5	99	97	111	1500	1990	680		
㊹	35	-	10	13	54	-	43	2.6	162.4	25.4	65	1.01	105.5	5.0	4.5	8.5	13.5	10	6.0	6.5	5.0	102	101	109	580	1190	1080			
㊺	45	40	08	13	32	-	65	65	382.1	115	6.5	40	1.21	36.0	16	6.5	4.0	8.0	10	6.0	6.5	19.5	101	98	110	710	1030	1100		
㊻	-	25	10	16	22	-	97	43	1.62	41.4	8.8	60	0.90	106.0	5.0	5.5	6.0	5.5	10	6.0	7.0	15.5	101	97	113	660	1170	720		
㊼	13	44	10	11	54	17	12	2.5	592.3	115	7.65	1.05	15.5	14	5.0	5.5	14	5.0	13	27	5.0	101	95	109	960	1320	990			
㊽	-	04	09	07	05	16	97	95	781.2	54	7.4	1.5	1.4	10	7.5	14	5.5	4.5	14	5.0	13.5	13	5.0	96	89	111	1470	1990	590	
㊾	24	27	10	21	32	13	163	2.7	221.8	89.7	2.2	7.0	10	8.5	13.5	22.5	9.0	13.5	22.5	13.5	12	5.0	100	93	114	710	1150	850		

ものかについて、検討を加える。

低周波空気振動の許容値については、継続時間の極めて長い(30秒~30分間)周期的な波形による暴露実験は数多く行われている¹⁾。

しかし、発破の様に衝撃性で継続時間の短い低周波空気振動の許容値を設定する場合、これらの実験結果をそのまま適用するわけにはいかない。また、このような発破の低周波空気振動の許容値について検討した事例はみあたらない。

そこで、ここでは発破の低周波空気振動の許容値について、心理的影響と物理的影響との2つに分類して検討を加えることとした。

検討時は、共に上記の各項目のいずれかが現れたものを出現個数1個とした。そして、振動圧レベルに対応させた発生個数の累積曲線をもとに、調査地における低周波空気振動の許容値を推定することとした。

以下、調査結果について検討考察する。

5. 調査結果の検討および考察

(1) 調査地における低周波空気振動の性状

発破による低周波空気振動の周波数特性を調べるために算出したパワースペクトルの一例を図-4と図-5に示す。

図-4は同一測定地点における異なる発破のスペクトル例であり、図-5は同一発破による異なる測定地点におけるスペクトル例である。

これらのスペクトルから明らかとなり、調査地の低周波空気振動は、周波数1~3(Hz)にもりあがり有

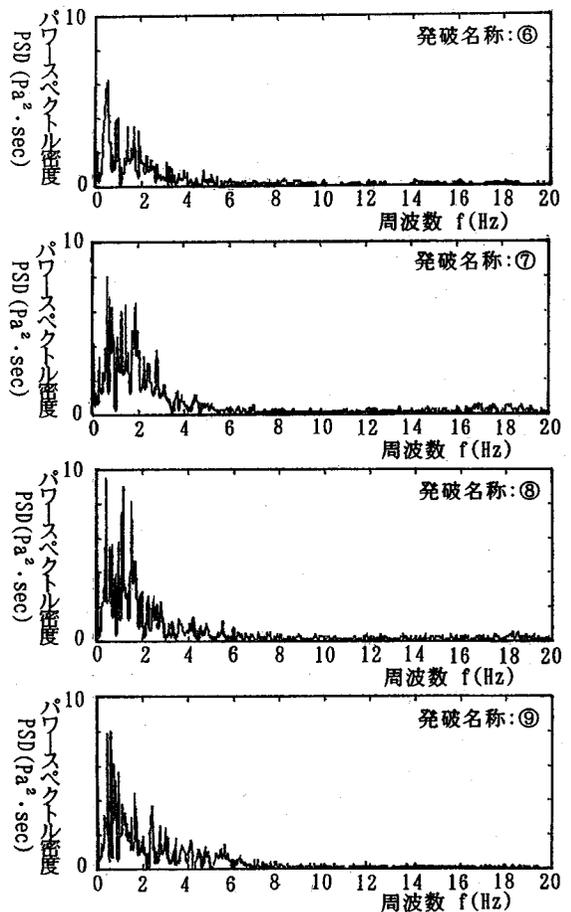
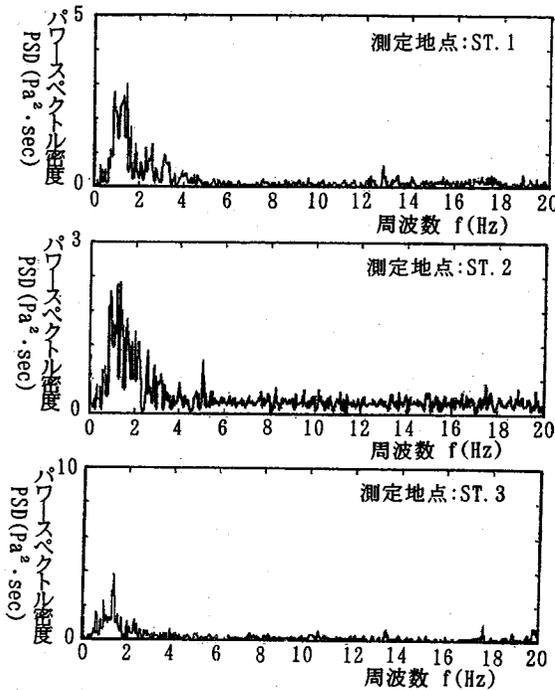


図-4 低周波空気振動(測定地点:ST.1)スペクトル例



図一五 低周波空気振動（発破名称：⑩）スペクトル例

する超低周波空気振動であり、スペクトルの形状は測定地点や発破の位置によって顕著な違いはみられない。

なお、スペクトルによっては0.5 (Hz) 付近にピークを有するものもあるが、前章(5)節で述べた計器の総合周波数特性を考慮すると1 (Hz) 未満のピークについてはやや信頼性に欠ける。

測定結果の一例を表一2に示す。

以下、まず調査地において、このような超低周波空気振動が観測された理由について検討した結果を述べる。

- ① 調査地における発破の薬量（段当り薬量で100～200 kg 程度、総薬量で500～2,000 kg 程度）や切羽の規模（切羽表面積 $A \approx 150 \sim 1,100 \text{ m}^2$ ）が大規模であり、発破のエネルギー自体大きかった。
- ② 使用した電気雷管の遅延時間は25～50 (ms) と短いMS雷管であり、調査地の岩盤は硬くて脆く、発破によりクラックが数多く発生していた。そして、各段の発破により発生するガスが、全段総薬量消費後、ほぼ同時かつ大量に放出され、極めて波長の長い空気振動が発生した。
- ③ 上記②と同様、遅延時間の短いMS雷管であったことから、発破による切羽全体の大規模で急激な岩盤の体積変化が全段総薬量消費後、ほぼ同時に大気中への波長の長い圧力変動を発生させた。
- ④ ベンチ発破は施工効率を考慮すると、軟岩と硬岩で同様の発破施工を実施せざるを得なかったが、軟岩では

上記②、③による影響が硬岩に比べて特に強くなっていた。

一方、調査地の測定波形例（図一6）によると、超低周波空気振動の波形は、地盤や床の振動波形のように発破の各段毎の波形の分離はされず、あたかも斉発破のような波形にみとれる。この波形と上記のスペクトルパターンより、可聴域を含む高周波領域の発破音や、周波数が20～100 (Hz) 程度の低周波空気振動は伝搬過程で完全に減衰しているものと思われる。

なお、地盤や床の振動が発生した時点で低周波空気振動がわずかに発生している理由は、低周波マイクロホンを地盤上に設置した三脚に取り付けているためであり、地盤振動による三脚の2次的な振動が結果的にマイクロホンの圧力変動としてとらえられたためと考えている。

以上のことから、調査地で得られた超低周波空気振動は、発破の規模が大きかったこと、MS雷管を使用したこと、切羽の地質状況が調査地固有のクラッキーな岩盤であったこと等の理由により、全段総薬量消費後、一気に大気中への圧力変化（自由面から発生するガス圧や岩盤の体積変動圧）を作用させたため発生したものと考えた。

(2) 苦情発生の原因

図一6に示したST.2における測定波形例をみると、窓の振動波形の振幅は超低周波空気振動発生直後に大きくなっている。このような傾向はST.1, ST.3の波形についてもみられ、苦情発生の原因の一つに超低周波空気振動によって2次的に発生した窓・サッシ等のがたつきを挙げることができよう。

また、構造物の床の振動は地盤振動が到達した時点で発生しており、時系列的には床の振動が減衰した直後、超低周波空気振動による窓のがたつきが始まることとなる。

これらの事項を併せて考えると、ST.2付近の住民は結果的に1回の瞬間的な発破（0.2～0.5秒）で床の振動を2～3秒感じた直後、約2秒の窓の振動を感じることとなり、比較的長い時間（計、約5秒）、構造物（床と窓）の振動を感じていたものと推察される。

以上のことから、調査地における苦情発生の原因の一つに超低周波空気振動が大きく関与しており、これを軽減するための対策について検討することが最適な発破施工を実施していく上で不可欠と考えた。

(3) 許容値の設定

まず、超低周波空気振動の許容値について検討するため、物理的影響と心理的影響に分けて実施したアンケート調査結果を図一7と図一8に示す。

図一7は振動によって発生する床の揺れと超低周波空気振動によって発生する窓、サッシのがたつきを反映し

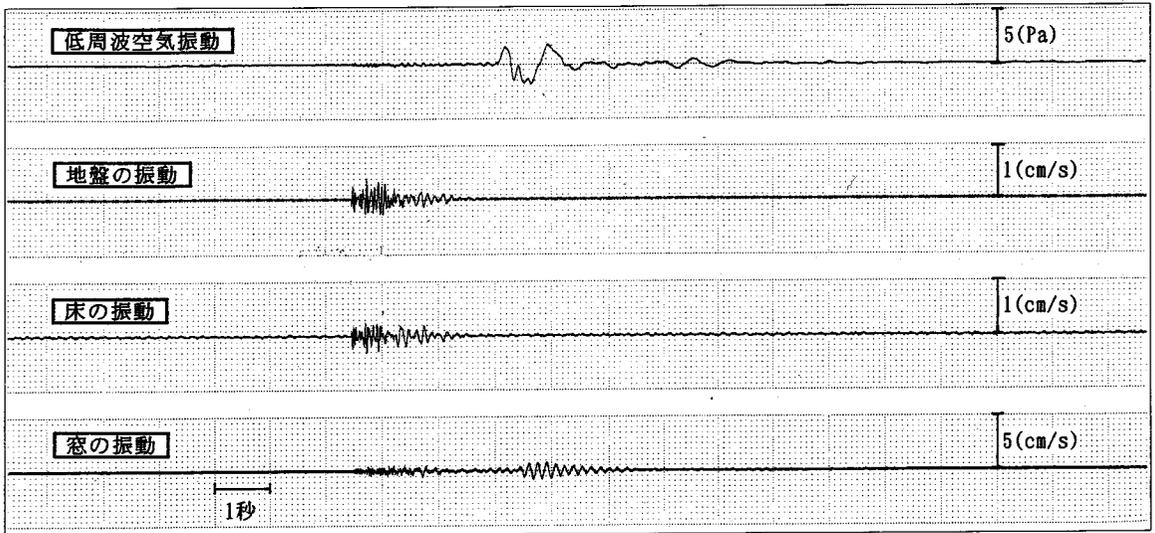


図-6 測定波形例 (測定地点: ST.2, 発破名称: ⑧, 天候: 晴れ
 気温: 9°C, 気圧: 1,010 mbar, 風向・風速: 無, 発破時刻: AM 11:20)

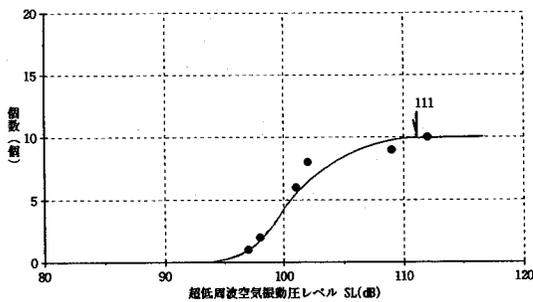


図-7 物理的影響頻度曲線

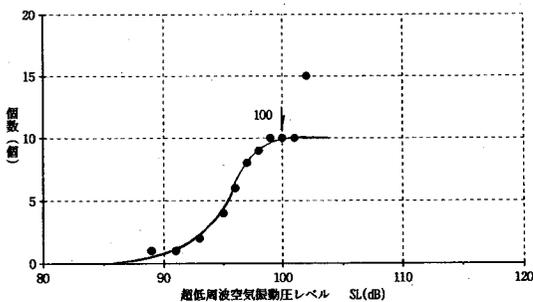


図-8 心理的影響頻度曲線

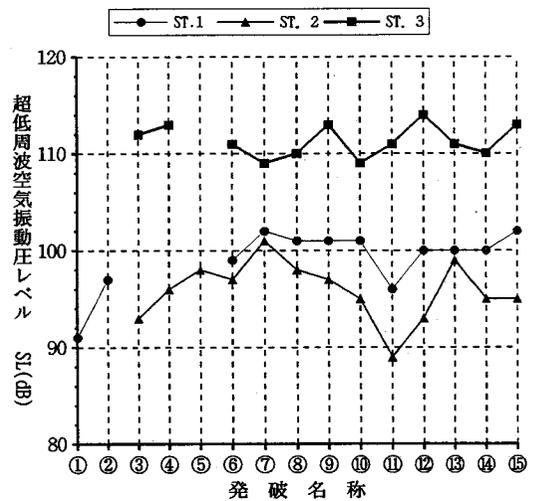


図-9 超低周波空気振動圧レベル一覧図

た結果といえる。後者は常に前者に比べて大きかった(表-2)ことから、図-7は超低周波空気振動によって2次的に発生する窓、サッシの許容値を推定する際の基礎資料になりうるものと思われる。

また、図-8の心理的影響については図-7に比べて収束状態の悪い結果となっている。これは、心理的影響

の場合、調査地の超低周波空気振動の周波数が1~3(Hz)と可聴音域よりはるかに低く、アンケート調査員の感覚的な個人差の影響を強く受けたためと考えている。

以上のことから、調査地における超低周波空気振動の許容値として、心理的には大半の人が感じるが、物理的な影響を半減できる程度の100(dB)に設定することとした。

一方、この許容値の設定箇所について検討するため、地点別の超低周波空気振動圧レベルを発破名称別にプロットし、一覧図として図-9に示す。

同図によると、空気振動圧レベルは発破毎にばらつき

ながらも、全体として (ST.2) < (ST.1) < (ST.3) の順に大きくなり、地域性の極めて強い結果となっている。

この測定地点による空気振動圧レベルの違いは、切羽からの距離、切羽と測定位置間の地表面性状³⁾(植生の有無、樹種等)や周辺地形の違い等の地域特性によるものと考えているが、ST.1における許容値を100 (dB)程度に設定することによって、住民の理解を求めることとなった。周辺住民からの苦情は今まで以上に軽減されるものと判断した。

(4) 施工管理式の提案

既往文献等では、超低周波空気振動圧レベルの予測式はないため、まず、ST.1~ST.3で得られたできるだけ多くのデータを用いて調査地全体に平均的に適用できる予測式を作成する。次に、この計算結果と実測結果を地点別に対比することによって、ST.1における概略の空気振動圧レベルの把握が可能な施工管理式を作成することとした。

また、この予測式は実用的な観点から、使用するパラメーターは極力簡便なものとする必要があった。

佐々らによると、発破音を軽減するためには、次式(1)の a 、即ち面音源の大きさを小さくするのが有効としている³⁾。

$$P_x = P_0 \cdot N \cdot a / x \quad (1)$$

ここで、距離 x における位置の最大音圧 (Pa) : P_x 、面音源近傍の投射音圧 (800~4,000 Pa) : P_0 、面音源の形によって決まる係数 : N 、面音源の短辺の長さ (m) : a 、面音源に垂直な方向への距離 (m) : x

調査地における超低周波空気振動について、空気振動圧と面音源の面積 (切羽表面積) の関係をみるために作成した図を図-10 に示す。

同図をみると超低周波空気振動圧レベルは切羽表面積が大きくなると、ばらつきの幅を持ちながらも大局的には大きくなっており、全体として切羽表面積を2倍にすれば、振動圧レベルは4~5 (dB) 増加する傾向を伺うことができる。

ここで、切羽表面積 $A(m^2)$ は、(1)節で述べた超低周波空気振動の性状と、入力するパラメーターとしての簡便さから、図-11の模式図に示すベンチ高さ $h(m)$ と装薬孔最大間隔 $l(m)$ の積によって算出するものと定義した。

超低周波空気振動の性状を考えた切羽表面積を設定する場合、厳密には両端の装薬孔からのびる放射線状の破碎線の形状を考慮した $L(m)$ を用いた方が適切と思われるが、この形状は不確定な場合が多く、両者の差 ($L-l$) は装薬孔最大間隔 $l(m)$ に比して十分に小さいと考え、簡単のため $l(m)$ をベンチ幅として採用した。

また、穿孔行列が2列以上となった場合にも、上記と

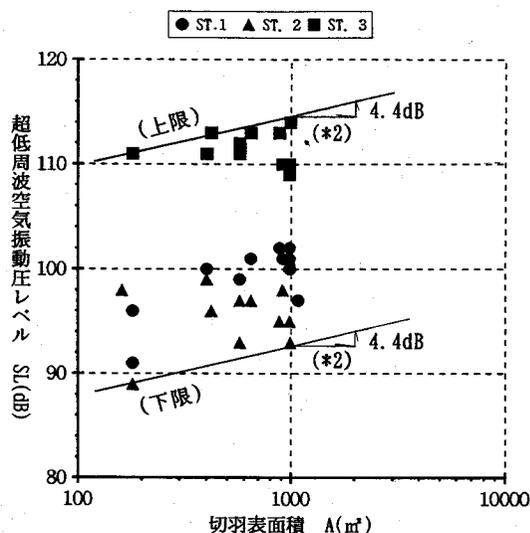


図-10 切羽表面積、超低周波空気振動圧レベル関係図

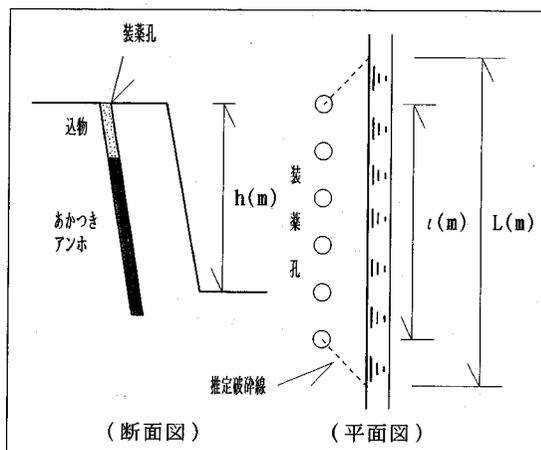


図-11 切羽表面積算出模式図

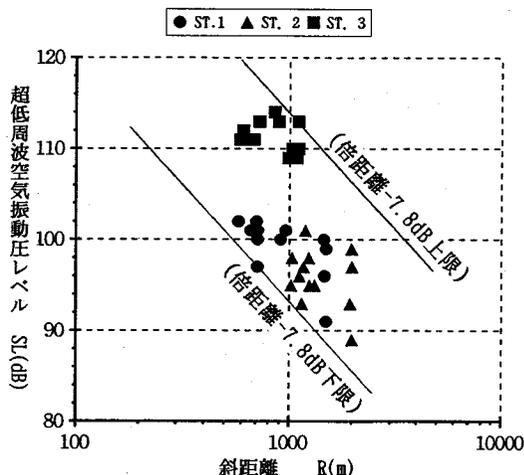


図-12 斜距離、超低周波空気振動圧レベル関係図

同様の理由により自由面に最も近い列の装葉孔最大間隔 l (m) をベンチ幅とした。

次に、式(1)でもわかるとおり、発破の音圧は理論的には倍距離 - 6 (dB) の減衰特性を示す²⁾。調査地における超低周波空気振動圧レベルと斜距離との関係を図-12に示す。

ここでは、発破音の理論的に理想的な条件下での面音源としての距離減衰勾配をそのまま適用するよりも、超低周波空気振動圧レベルの実測データを用いた近似式を採用する方がより実態にあっているものと判断した。

そこで、調査地における発破による超低周波空気振動圧は次式(2)で表現できるものと考えた。

$$P_x = P_0(L, t, \rho) \cdot R^{-m} \cdot A^n \quad (2)$$

ここで、X地点における超低周波空気振動圧 (Pa) : P_x 、伝搬途中の地表面性状や周辺地形の違い等による地域特性 (L)、風速・気温・天候等 (t)、大気中へ投射される音源近傍の音圧 [P (Pa)] に関わる関数 : $P_0(L, t, P)$ 、斜距離 (m) : R (500~2,000)、切羽表面積 (m²) : A (150~1,100)、切羽表面積、斜距離に係る指数 : m, n したがって、超低周波空気振動圧レベル SL (dB) は式(2)を変形した式(3)で表わされる。

$$SL = SL_0 - m \cdot \log R + n \cdot \log A \quad (3)$$

そこで、実測データの最良近似となるように式(3)の定数を求めると、次式(4)となる。

$$SL = 138 - 26.0 \cdot \log R + 14.5 \cdot \log A \quad (4)$$

ここで、式(4)は、ST.1~ST.3の伝搬途中の地表面性状や周辺地形の違い等による地域特性等を同一と考えた式であり、施工管理を行っていくためには、ST.1付近における地域特性を考慮し、計算結果が実測結果により近づくことが望ましい。

式(4)による計算結果と実測結果によるデータを地点別に対比し、図-13に示す。

同図には、ST.1の実測結果のばらつきの上限、下限、中央値を示す直線も併せて示した。

式(4)による計算結果はST.1~ST.3全体の実測結果と概ね±15 (dB) の範囲でばらつくこととなるが、ST.1における施工管理式を作成する場合、計算結果は対象となる地点の実測結果の中央値となることが都合よく、また、このような地点別のばらつき傾向の違いがみられる原因の一つに、先に述べた地域特性も関係しているものと考えた。

以上のことから、ST.1における地域特性も考慮した予測式はST.1の中央値を示す直線になるものと考え、式(4)から2 (dB) 減じた式とした。

しかし、この予測式はデータのばらつきを考慮しておらず、いわば安全率を考慮していない式であることから、ST.1の施工管理式にこの予測式をそのまま適用するわけにはいかない。

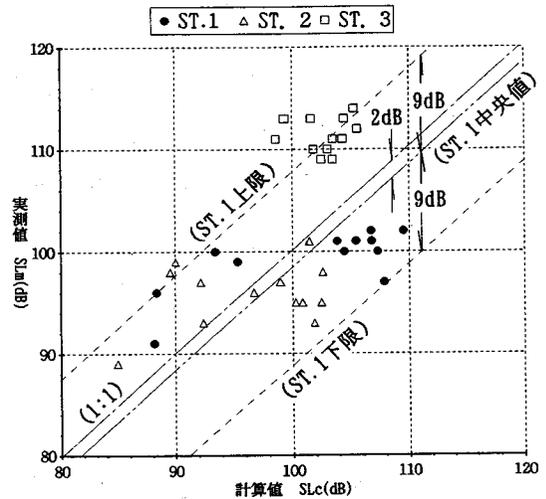


図-13 計算結果—実測結果対比図

そこで、上記の中央値に9 (dB) 加えた上限を示す直線を施工管理式として採用することとした。この管理式を次式(5)に示す。

$$SL_1 = 145 - 26.0 \cdot \log R + 14.5 \cdot \log A \quad (5)$$

ただし、ST.1における超低周波空気振動圧レベル : SL_1 (dB)、斜距離 : R (m)、切羽表面積 : A (m²)

以上のことから、ST.1における許容値を100 (dB) 程度に設定し、式(5)を用いた発破計画による施工を進めることによって、超低周波空気振動の影響はかなり軽減されるものと判断した。

今回はこの検討結果を定量的に検証する機会を得ることはできなかったが、ここで行ったような超低周波空気振動に関する施工管理式と別途実施した発破振動に関する施工管理式を施工に生かすことによって、地元住民からの苦情は減少していくものと考えている。

6. おわりに

以上、明かり発破施工で発生した超低周波空気振動による苦情を軽減するための調査の考え方、調査方法、調査結果から得られたその性状についてのとりまとめと検討考察および超低周波空気振動軽減策等について検討を加えた結果について記した。

将来は、超低周波空気振動を音源側で更に積極的に軽減する方法として、電子式遅延電気雷管⁴⁾を使用する機会も増加してくるものと考えているが、その効果を十分発揮するためにも、個々の施工箇所特有の超低周波空気振動の性状を十分に把握しておくことが必要と考えている。

本報告が、今後住宅地等に近接する明かり発破施工の

参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 例えば, 庄司 光, 山本剛夫, 畠山直隆 編集: 衛生工学ハンドブック騒音・振動編, 朝倉書店; 落合博明, 小見茂光, 山下充康: 低周波空気振動の家屋等へ及ぼす影響, 騒音制御, Vol. 4, No.4, 1980.
- 2) 例えば, 船津弘一郎: 発破による低周波音, トンネルと地下, 第 16 巻 6 号, 1985 年 6 月.
- 3) 井清武弘, 国松 直, 今泉博之: 発破音の伝搬予測および制御に関する考察, 資源・素材学会誌, 107(1991), No. 13, 1991 年 5 月.
- 4) 山本雅昭, 市川 清: EDD による発破振動・音の予測と軽減, 1988 年 9 月, Kogyo Kayaku, Vol. 49, No. 6, 1988.

(1993.9.24 受付)

STUDY OF INFRASOUND BY BENCH BLAST CONSTRUCTING

Isamu TUJI, Akio TUGAKI, Masahiro KISI and Kenzoh SINANO

An increasing number of bench blasting are doing in neighboring towns. We can catch the chance of making investigation into infrasound by constructing of the same kind. In this paper, by using results of data arrangement of blasting method, questionnaire and infrasound measurement, we studied about cause of complaints and method in order to reduce complaints. Then, by establishing permitted value to 100 (dB) at a certain place and by drawing expression for controlled construction of infrasound pressure level by using distance and an area of bench surface, we can construct by the fittest blasting method. And, we took regional characteristic into consideration when drawing this expression for controlled construction.