

# 砂被覆による発破減音性状と伝播予測に関する 実験的検討

小林茂雄\*・世一英俊\*\*・池田義之\*\*\*・  
中川浩二\*\*\*\*

構造物の解体に発破工法を用いる場合、高爆速の爆薬が必要であること、張り付けタイプの爆薬を用いる場合があることから騒音の制御が大きな問題である。本研究では特殊な衝撃音である爆発音について、砂厚、薬量、距離についてのパラメトリックな検討により減音材として砂を用いた場合の減音効果の特性を明らかにするとともに、それらの関係を定式化し精度の高い音圧ピーク値予測式を導いた。また実際の施工への本式の適用性についても論じた。

**Keywords** : impulsive blast noise, attenuation effect, sand layer

## 1. ま え が き

都市の再開発、敷地の有効利用、老朽化した構造物の機能回復といったニーズを背景に、効率よく、周辺環境に影響をできるだけ及ぼさず、かつ安全に構造物を解体する工法の必要性が高まっている。欧米では早く安く確実に行いうる解体工法として発破による解体撤去工法が汎用されているが、わが国ではいくつかの理由により現在のところ都市部でこの工法が用いられることはない。

その理由としては、①火薬類の使用における安全性の問題、②火薬類の使用に対する法規制、③周辺住民の拒否反応、などの問題が挙げられる。これらの諸問題はそれぞれに解決されなければならないものであるが、中でも③の周辺住民の拒否反応は大きな問題であり、これに対しては①の問題と関連して周辺住民の理解をうるための基本的データの蓄積が重要であることはいままでのない。

いま解体対象がコンクリート構造物である場合には発破法としては内部装薬法をとることになると考えられ<sup>1)</sup>、この場合に施工上大きな問題になるのは、飛石、粉塵および地盤振動であろう。また騒音についても使用薬量によっては問題となる可能性がある。

一方、解体対象が鉄骨構造物の場合には基本的には張付け発破法をとることになると考えられ<sup>2)</sup>、飛石や粉塵の発生は比較的軽微であると思われる。しかしこの場合は空中での爆発による衝撃性の高い音が発生することになり、衝撃音の影響度の把握や予測法、低減法などの騒音制御が、この工法の実用化の上で最大の障害であると考えられる。

発破によって生じる衝撃音による周辺住民に対する環境障害としては、恐怖感や不安感といった心理的な障害の他、会話などの日常生活の妨害や聴力障害を引き起こす可能性がある。また爆源近くの音圧の高い領域では窓ガラスが破損するなどの近隣建造物に対する被害が起こる可能性もある。しかし交通騒音や一般の工事騒音と比較すればその継続時間は短く、また暴露回数も少ないため、現行の騒音規制法による規制値とは異なる多少緩和された管理基準値が与えられるべきであると考えられる。

この管理基準値が現在のところ明確にされていない背景には、その衝撃音により実際に引き起こされる被害の程度が明らかでないことに加えて、発破によって生じる特殊な衝撃音に対してどの程度の対策をとればどの程度の低減効果が期待できるかといった各種減音対策の定量的評価方法が確立されていないことがあると考えられる。

このことから構造物の発破解体の一つの大きな問題となっている発破音とその減音特性について検討することは特に重要であると考えられる。そこで本研究では砂を用いて爆薬を被覆した場合の減音効果把握実験を行い、その効果の基本性状、すなわち砂厚と薬量の組合せによる爆発衝撃音の減音効果、距離減衰特性、周波数特性等を明らかにするとともに、これらのデータをもとに実際の発破解体工事に砂を用いた減音工法を採用した場合の発生騒音の推定法について検討するものである。

## 2. 発破音とその減音特性

### (1) 発破音の評価

発破音は極めて衝撃的な騒音であり、大振幅の衝撃波を形成する。したがって物理現象としては非線形性を有する有限振幅音波を扱うことになり、通常の微小振幅音波とは異なった挙動が予測される<sup>3)</sup>。しかし本研究では

\* 正会員 新日本製鉄(株) 設備技術センター  
(〒299-12 千葉県富津市新富 20-1)

\*\* 正会員 (株) 間組 技術研究所

\*\*\* 日本化薬(株) 厚狭工場

\*\*\*\* 正会員 工博 山口大学教授工学部社会建設工学科

その目的を実用的な予測法の確立に限ることとする。

現在のところ衝撃音の評価については次の2つの方法が用いられている。すなわちひとつは衝撃音の等価騒音レベルに対する寄与を求めたり、あるいは単発騒音暴露レベル  $L_{AE}^{(4)}$  を求める方法であり、他のひとつは動特性  $[J]^{(5)}$  を備えた騒音計で測定する方法である。ここで  $J$  とは Impulse の頭文字である。

これに対し国内では JIS Z 8731 において衝撃音に対して騒音計の速い動特性 (Fast) による指示値の最大値を読み取ることになっているが、Fast 特性の立ち上がり時定数は 125ms であり、時定数 35 ms の Impulse で計測した場合は違った値となる<sup>6)</sup>。

発破解体における衝撃音の規制値を与える指標としては、「コンクリート構造物発破解体工事保安技術指針<sup>7)</sup>」において「周波数補正特性 A 特性、動特性 Fast で測定し、120 dB(A) を管理目標値とする」ことが提唱されているが、規制値として明確な値が設定されているわけではない。しかし発破を用いた解体工法が近い将来実用化されることは、このような指針が作成されたことを見ても明白であり、これに対応すべく効果的な減音方法の確立とその効果の定量的評価が急務であると考えられる。

## (2) 発破音の減音

発破によって生じる衝撃的な騒音を低減する方法としては爆薬を適当な材料で被覆する方法が工夫されており、これまで砂を用いた効果、泡を用いた効果、雪を用いた効果等数ケース検討されている。

斎藤ら<sup>8)</sup>は、砂を用いた減音効果を、砂厚をパラメーターとしてペントライト 20g を爆発させた場合の 30 m 地点の騒音レベルに限って実験的に定式化し

$$S = -29.2 \log \gamma + 123$$

S: 騒音レベル (dB(A))

$\gamma$ : 砂厚 (cm)

なる関係式を得ている。

また和田ら<sup>9)</sup>は泡を用いた効果について、泡単独で被覆した場合、6号雷管1本の爆発音を爆源から30m地点で測定すると、泡厚1mにつき約23dB低下したとしており、これらの効果は薬量が小さいときほど有効であることを示している。

さらに雪を用いた場合について和田ら<sup>10)</sup>は、爆破点近傍の雪が融解、蒸発することにより、爆発ガスのエネルギーを大きく減少させ、結果として雪厚が20cm以上の時9dB/2倍半径の割合で減音効果があると報告している。

これらの減音メカニズムはそれぞれ複雑なものと考えられ、現在のところ明確な説明はなされていないが、いずれもミクロ的に見ればそれぞれの減音材料は固体粒子と空気の互層構造をなしており、これを透過してくる間

表-1 実験ケース一覧

薬量 (g)	被覆砂厚 (cm)									
	0	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25
5	●	●	○	●	○	●		●		
10	●	●	○	●	○	●	○	○	○	●
20		●		●		●	○	●	○	
30			○	○	○	●	○		○	●
40				○		●		●		○
50					○	○	○		○	●
60				○		○		○		
70					○	○	○		○	○
80						○		○		
100						○	○		○	○

●; 実験1、実験2で実施 ○; 実験2でのみ実施

に波動が複雑に反射、屈折、干渉してそのエネルギーを消耗することを期待し、更には物質粒子を飛散させることで、波動エネルギーを運動エネルギーに変換することを期待したものであると考えられる。

筆者らは実構造物解体への適用に即した減音材料として砂の使用を考えている。これは他の材料と比較して実作業における施工性 (機械化すればかなり容易になる)、経済性 (容易に入手可能)、安全性 (飛散しても微粒子のため被害小) および期待効果が優れている (薬量の多い場合にも水、泡、雪と比較して効果大) ことに基づくものである。しかし砂を用いた場合の減音効果について薬量、距離、砂厚の関係から詳細に検討された例はない。

## 3. 砂による減音に関する実験

本研究では、爆発衝撃音と薬量、距離、砂厚との関係を定量的に捉えることを目的としたパラメトリックな実験を行い実用的立場から砂による爆発衝撃音の減音効果を検討した。実験ではそれら3変数の種々の組合せによる音圧変動を計測し、砂による減音機構の基本的特性についての基礎資料を得ることを目的として観測波形の詳細な分析を試みた。

### (1) 実験場所

砂による減音効果を把握するために、実験は2回に分けて行った。すなわち、実験1は距離による減衰効果を調べることを目的として、周辺に障害物や起伏のない場所で行った。選定した場所は周囲800m以内には構造物の存在しない埋立地である。しかしここでは周辺環境の問題から多数回の爆発実験を行うことは困難であった。そこでこの埋立地においては爆発衝撃音の距離による減衰についての実験のみを行うこととし、砂の被覆厚さおよび薬量の影響度合を詳細に調べることを目的とした実験は、実験2として周囲に構造物は存在するが多数回の発破の可能な場所で行うことにした。実験1および2における薬量と砂厚の組合せを表-1に示す。

### (2) 実験方法

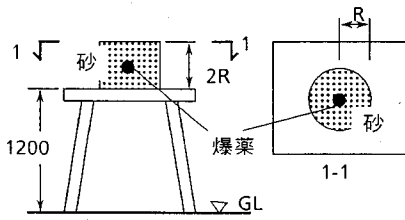


図-1 起爆点の概略図

a) 爆薬

実験に使用した爆薬はペントライトであり、これまで筆者らが鋼構造物の解体用に用いてきた成型爆薬線に使用している爆薬である<sup>2)</sup>。ペントライトの組成はTNTとペンスリットを重量比で1:1の割合で混合したものであり、その爆速は約7800 m/sである。実際の解体工事には膠状ペントライトを成型爆薬<sup>11)</sup>として用いているが、今回の実験では点爆源とすることと取扱易さを考慮して粉状のペントライトを所定の薬量ずつ袋詰めにして用いた。ただし膠状のペントライトと粉状のペントライトについては、同条件で予め騒音測定を行い、発生騒音に明確な差がないことを確認済みである。

なお起爆は6号電気雷管による。

b) 砂被覆

減音材として爆薬を被覆するための砂は一般建設用海砂(中砂)であり、ほぼ表面乾燥飽和状態と思われる状態で使用した。砂は厚さ0.1 mmのクラフト紙製の円筒容器に充填し、その中央部に爆薬をセットし、これを高さ1.2 m、大きさ60 cm×60 cmの鋼製台の上に乗せて起爆した(図-1)。すなわち半径R(cm)、高さ2R(cm)の円筒形状の砂により爆薬を被覆していることになる。

c) 計測システム

発破時の衝撃音を物理的に正確に計測し、予測方法へ反映させる場合には、計測機器の周波数特性、ダイナミックレンジ、計測最高音圧などの特性に注意を払う必要がある<sup>12)</sup>。発破騒音は一般に1 kHz以下に卓越した成分を有する衝撃音であり、例えば3号桐ダイナマイトであればその卓越周波数は100 Hz以下であるとされている<sup>13)</sup>。今回用いたペントライトは爆速が速く、ダイナマイトと比較して多少高周波成分が大きくなることが予測されたがその卓越周波数が1 kHzを越えることはないと考えられた。本実験ではこのことを考慮して計測機器を選定した。

測定は音圧変動を圧力センサー(容量1 kg/cm<sup>2</sup>, 周波数特性DC~1500 Hz)で感知し、動歪計(周波数特性DC~1500 Hz)を介して電圧値に変換した後、データレコーダーに電気信号として記録し、後日必要に応じてデータ処理できるようにした。音圧変動の測定は、実験1では爆源から1 m, 3 m, 5 m, 10 m地点に圧力セ

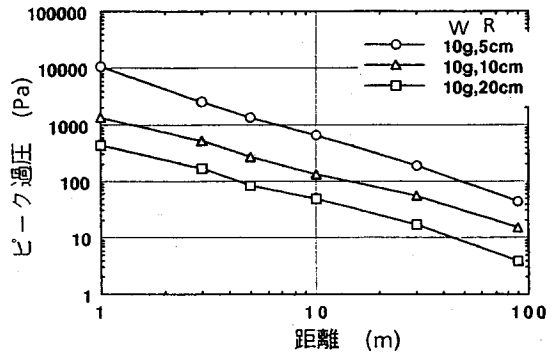


図-2 ピーク過圧の距離減衰の例 (W:薬量, R:砂厚)

ンサーを、10 m, 30 m, 90 mの地点に騒音計(測定範囲60~150 dB, 周波数特性DC~1000 Hz)を配置して行い、10 m地点での測定値をもとに騒音計の測定結果を圧力センサーで測定したものとほぼ合致することを確認した。実験2では5 m地点にそれぞれ120°ごとの3方向に圧力センサーを配置して計測値の方向によるばらつきを確認ができるように考慮した。

なおすべての計測点の高さは地上1.2 mに固定した。

d) データ解析

得られたデータは一旦データレコーダに取り込み、オシロスコープを用いて波形の確認を行った後、2 kHzまでの周波数分析を行うことを考慮するとともにほぼその波形のピーク値が再生できると考えられるサンプリング周波数(5120 Hz)でデータをデジタル化した。再生したデータについてピーク過圧を読み取り、変動波形が充分入る時間長(0.2 s)のデータをFFTにより周波数分析し、1/3オクターブバンドスペクトルとして出力した。なおスペクトルの決定には矩形ウィンドウを用いた。

4. 実験結果とその検討

(1) 距離減衰

実験1の結果をもとに距離伝播に伴う衝撃音特性の変化について検討する。

a) ピーク過圧の変化

爆発に伴う衝撃圧は初期の立ち上がりが非常に急峻で継続時間の短い変動を示す。この立ち上がりの圧力の最大値はピーク過圧(peak overpressure)と呼ばれている。図-2にピーク過圧の距離減衰の1例を示す。図は薬量10 gに対して砂厚5 cm, 10 cm, 20 cmの場合であるが、他の薬量, 砂厚の組合せにおいても同様の距離減衰特性を示している。これらの結果の線形回帰をとり、

$$P_D = K \times D^a$$

の形で表すと砂厚, 薬量にかかわらずそれぞれのケースにおいて $a = -1.02$ から $-0.99$ の値が得られ、ある地点でのピーク過圧 $P_D$ はいずれの場合も音源からの距離

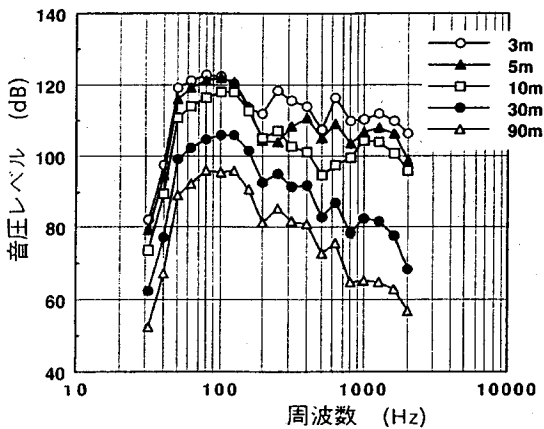


図-3 爆源からの距離毎の周波数特性の変化  
( $W: 30\text{ g}$ ,  $R: 15\text{ cm}$ )

にほぼ逆比例することが示された。

du Pont<sup>(14)</sup> は TNT を基準爆薬とした場合のピーク過圧の伝播を次式で示している。

$$p = 1.9(D/W^{1/3})^{-1.2}$$

ここで、 $p$ : ピーク過圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$D$ : 爆破点からの距離 (m)

$W$ : 爆発薬量 (kg)

この式においては距離減衰指数が $-1.2$ となっており、今回の実験で得られた値 $-1.0$ とは差が見られる。ここで du Pont の示す条件は、無風状態でかつ高さ方向に温度の変化しない理想的な状態において、音波が半球状に広がるという前提にたったものである。これに対し、例えばよく晴れた夜明け直後の地表の冷えた時には、地表面近傍の温度分布は高さに対して増加傾向にあり、この場合には高いところで音速が速くなって、音波の伝播は地面に向かって屈折した形となるため見かけ上距離減衰は小さくなる。逆に地表が充分温まった状態では高さに対して温度分布が負の勾配を持ち、したがって音速も高いところで遅くなるため音波の伝播は空に向かって屈折した形となり見かけ上距離減衰は大きくなる。本実験は、よく晴れた冬の日（地表付近での気温 $6\sim 10^\circ\text{C}$ 、平均風速 $3\text{ m/s}$ )に実施したため、今回得られた結果は幾分か前者の状態に近い条件で実験が行われたことによる影響も含まれると考えられるが、本研究においては成果として $a = -1.0$ を用いることとする。

#### b) 周波数特性の変化

図-3 は薬量 $30\text{ g}$ 、砂厚 $10\text{ cm}$ の場合の各距離毎の $1/3$ オクターブバンドスペクトルであり、爆源からの距離毎の周波数特性の変化を示す1例である。距離が遠くにしたがって減衰幅が大きくなるという幾何学的減衰のほか、超過減衰として、高周波数成分ほど大きな減衰を示す大振幅衝撃音波の減衰特性や、地表面の材質等の

要因により減衰幅が極大となる周波数が距離により幾分変化するなどの現象<sup>(15)</sup>が見られる。しかしその程度は後で述べる薬量と砂厚の変化にともなう特性の変化と比較して小さく、全体的な形状には大きな変化は見られず、ほぼ平行な減衰幅を示している。このことから発生源近傍での爆発衝撃音の性状を予測できれば、距離減衰を考慮するだけで任意距離での音の性状をある程度の精度で予測することが可能になると考えられる。

#### (2) 薬量と砂厚の変化に伴う衝撃音圧波形の変化

実験2の結果をもとに砂厚-薬量関係の変化に伴う衝撃音特性の変化について検討を加える。

##### a) 発破音の方向性

装薬は砂円柱のほぼ中心であり、ほぼ完全な点爆源であるため、 $5\text{ m}$ 地点でのピーク過圧は砂被覆がない状態と同様3つの方向に対してほぼ一定の値を示すはずである。しかし実際には砂の詰め方が完全に一樣でないなどの理由により、部分的に弱点を有することから音波の伝播は幾分方向性を持つ可能性があると考えられた。

実験の結果は3方向に対していずれも幾分ばらついた値を示したが、その幅は大きくとも $\pm 20\%$ 以下であり、ほとんどすべてのケースにおいて砂被覆がない状態と同様小さなばらつきにとどまっていることが認められた。特に薬量の増加によってばらつきが大きくなるなどの可能性の検討のためにそれらを分散分析したところ、薬量および砂厚の変化と関係を持った変化傾向は示さず、 $5\%$ の水準で各ケース間に有意な差はないと判断された。このことから砂被覆により音波の伝播に多少の方向性はあると考えられるものの、その傾向は砂厚によって変化せず、またその程度も砂被覆が無い場合と比べて大きいものではないと判断した。

##### b) 音圧変動特性

① 圧力波形の変動特性 前述のように爆薬の爆発によって生じる爆発衝撃音の圧力波形は一般に時刻歴の始めの部分に急激なピークを持ち、極めて短い継続時間の波動である。これを種々の厚さの砂で被覆した場合の $5\text{ m}$ 地点で観測された波形の一覧を図上の見かけの振幅をほぼ同じにして図-4に示す。

図からみられるように音圧変動特性は被覆厚と薬量の組合せによりその特徴ごとに概略以下の3つのグループに分けることができる。i) 砂の被覆厚さに対して比較的薬量が多い場合には、圧力変動特性は時刻歴の初期に鋭い圧縮（正圧側の変動）のピークを持ち、そのまま急激に減衰し、ほとんど引張り（負圧側の変動）の部分を有さない。これは砂の被覆を行っていない場合と同様の変動特性である。ii) 砂の被覆厚さを増していくと初期の変動性状は最初のものに似ているが、圧縮のピーク値が低下すると同時に同程度の引張りのピークが発生し、また全体的に緩やかな変動を示すようになってくる。

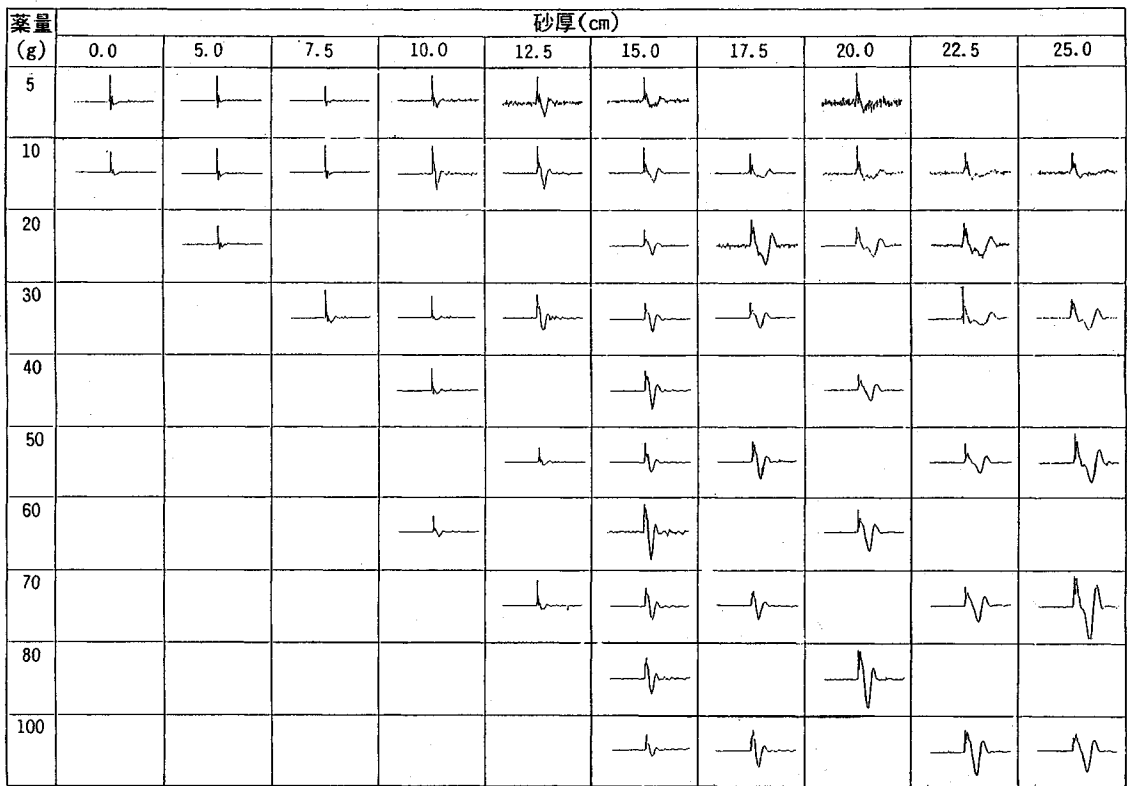


図-4 波形の一覧

iii) 更に砂の被覆厚さを増すと見かけの立ち上り性状に前者二つと大きな差異はないが、一層ピーク過圧は抑えられ、また波動の後半にはかなり緩やかな変動の継続が見られる。

これらの特性を、周波数分析により得られた1/3オクターブバンドスペクトルとして示したものが図-5であり、薬量が10gの場合について図-4から前述 i) ii) iii) に対応すると思われる代表的な波形を選んでいる。図において砂厚が増すに従って特に高い周波数成分の音圧レベルの低下が著しい。特に特徴的なのは砂厚を増すことによって、まず200Hz以上の高い周波数領域のレベルが減少し(前述 ii)に対応)、更に砂厚を増すと、続いて100Hz付近以下の低い周波数成分のレベルが減少してくる(前述 iii)に対応)という点である。図-5によると、砂被覆のない場合と比較して砂厚5cmではまず全体的なレベルの低下を示し、10cmになると100Hzより低い周波数帯ではレベルの低下は見られないが200Hz以上では著しい低下を示す。さらに20cmになると低周波を含んだ広い領域でレベルの低下を示すといった具合である。この特徴は他の薬量の場合にも見られる。

このことより砂による減音効果はピーク過圧を抑えるだけでなく、周波数特性にも著しい影響を及ぼす。充分

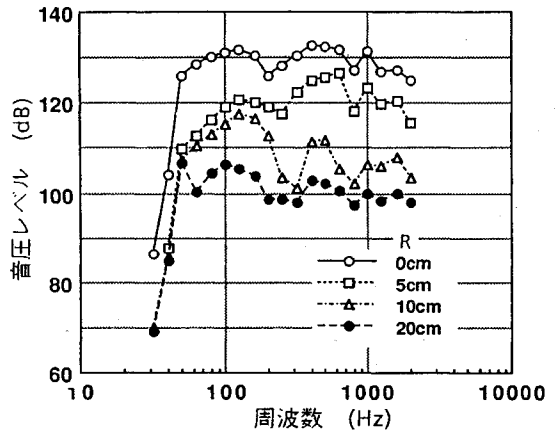


図-5 種々の砂厚における1/3オクターブバンドスペクトル (薬量: 10g)

な砂厚の場合にはピーク周波数を50Hz付近にまで低下させることができると考えられる。すなわち、砂被覆を適正な厚みあるいはある程度以上の厚みに設定することにより、特に鋭い衝撃的な音が容易に抑えうることを示しており、砂被覆が発破による衝撃音の減音対策として有効な手段となりえることを示唆するものであると考えられる。

また周波数特性の急激な変化の表れる砂厚を騒音対策

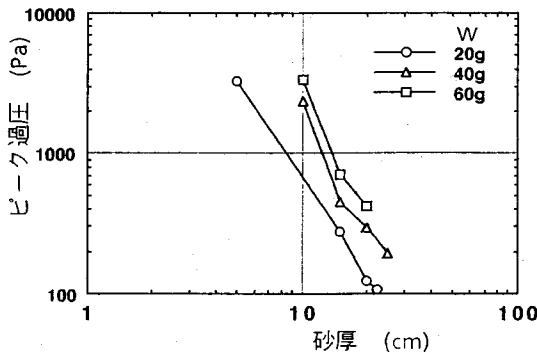


図-6 各薬量における砂厚-ピーク過圧関係図

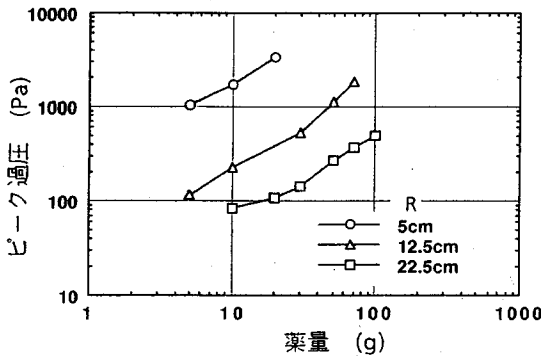


図-7 各砂厚における薬量-ピーク過圧関係図

として有効な砂被覆厚と考えれば、今回の実験範囲では、図-4 から判断して薬量にかかわらず 15 cm 前後がそれにあたると考えられる。

②ピーク過圧の変化特性 ピーク過圧-砂厚関係を薬量 20 g, 40 g および 60 g の場合について図-6 に示す。ピーク過圧は両対数紙上で概ね砂厚の増加に対して直線的に減少していることがわかる。

次にピーク過圧-薬量関係を砂厚 5 cm, 12.5 cm および 22.5 cm の場合について図-7 に示す。ピーク過圧は両対数紙上で概ね薬量に比例して増加していることがわかる。

これらの諸数値を対数変換した後線形重回帰分析を行い、音圧、砂厚、薬量の関係を定式化した結果式(1)の関係が得られた。

$$P_5 = 0.30 \times W^{0.92} \times R^{-2.21} \dots\dots\dots (1)$$

$P_5$ : 音源から 5 m 地点でのピーク過圧 (Pa)

$W$ : 薬量 (g)

$R$ : 砂厚 (m)

すなわち、薬量を増すことによるピーク過圧の増加はほぼ薬量の 1 乗できているのに対し、砂厚を増すことによるピーク過圧の減少はその 2 乗以上できており、砂による発破音の制御が非常に効果的であることを示し

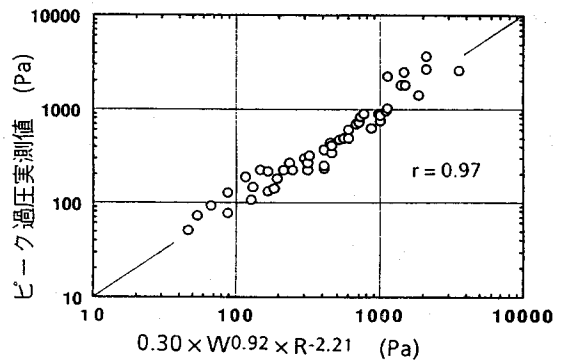


図-8  $P_5 = 0.30 \times W^{0.92} \times R^{-2.21}$  と実測値との相関

ている。

式(1)と測定値との相関を図-8 に示す。相関係数  $r = 0.97$  という高い相関が得られている。

ここで 4. (1) に述べたようにピーク過圧は距離に逆比例することから、音源から任意の距離  $D$  m でのピーク過圧  $P_D$  は距離 5 m に対する式(1)の末尾に  $\times D^{-1}$  を入れ、係数を  $5^{-1} = 0.2$  で除して任意距離に対する式として変換することにより、

$$P_D = 1.50 \times W^{0.92} \times R^{-2.21} \times D^{-1.00} \dots\dots\dots (2)$$

$D$ : 音源からの距離 (m)

となり、薬量と砂厚と距離をパラメータとしたピーク過圧の評価式が得られる。

## 5. 実施工への適用

### (1) 減音器具

本節では筆者らがこれまでにに行った実際の鉄骨構造物の発破解体工事に適用した砂を用いた減音対策工の施工例を示すと共に、これらの減音効果に対する式(2)の適用について述べる。

鉄骨構造物の構造部材は主に H 形鋼や U あるいは L 型の鋼材を組み合わせたものからなる。またこれらを発破を用いて解体する際、その目標とする倒壊モードによっては地上数 m の高さの地点に爆薬を装着する場合もある。

したがって減音対策工として砂を用いる場合、砂を爆薬周辺に固定する方法が必要となる。筆者らは

- 1) 複雑な形状の部材へも取り付けやすいこと
- 2) 高所へも比較的簡単に取り付けられ、爆発の際に飛散しても、周辺保安物に衝撃を与えない軽微なものであること
- 3) 容易に手に入り、後かたづけも容易であることなどの理由から、その方法として部材を包むように木箱を取り付け、その中に砂を入れることとした。図-9 に減音器具の取り付け状況を示す。

### (2) 推定式の実施工への適用について

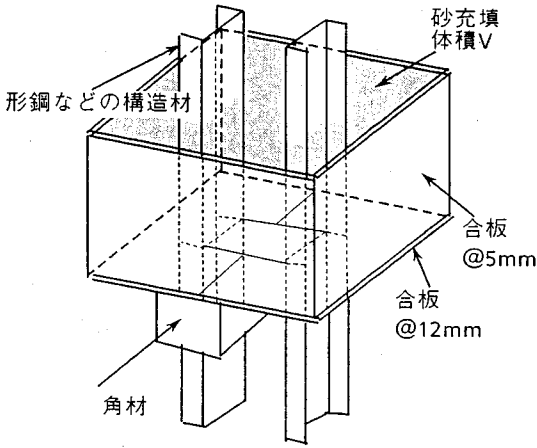


図-9 防音箱概要図

表-2 実施例における発破計画

実験工事		解体工事
CASE. 1	CASE. 2	
2 構面につき 1~4 の順で 4 段階発破		

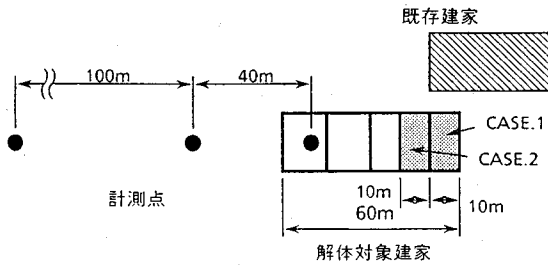


図-10 実験工事平面図

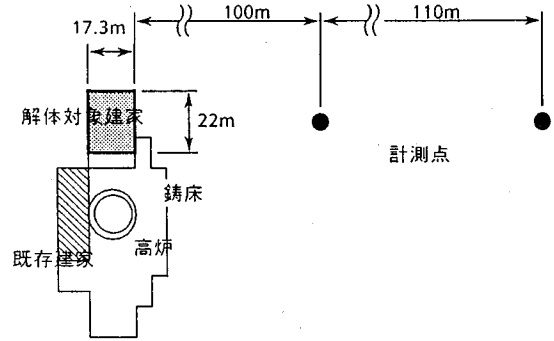


図-12 解体工事平面図

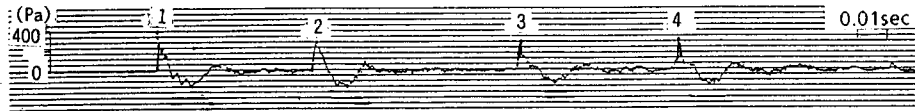


図-11 音圧変動波形(実験工事) 数字は段発

砂を用いた減音器具による実施工例としては次の2つがある。

例1：鉄骨建家発破解体実験工事<sup>2)</sup>

これは既存の工場建家を成型爆破線を用いて倒壊させた実大実験の例である。倒壊させた建家は単純な工場建家の一部でありこれを2~3スパン(柱4~6本)ずつ縁切りし、5回に分けてそれぞれ違う倒壊形で倒壊させたものである。内2回の実験で騒音計測を行っている。建家周辺の様子と計測器の配置を合わせて図-10に示す。

計測を行った各ケースの爆薬装着箇所を表-2に示す。この実験では2構面の同じ箇所位置する2カ所毎に1箇所あたり約30gの成型爆薬を4本から12本同段の雷管で起爆している。またこれらは40msの時差をつけて4段階、合計8カ所爆破している。そのため、図-11に示すように計測された音圧波形は4つのピークがおのおの独立して計測されている。したがって各ケースにつき4回ずつ、計8回の発破について60m、100m、200mの3点で計測しており、合計24個の実測例が得

られていることになる。

例2：鉄骨建家発破解体工事<sup>16)</sup>

これは既存の工場建家を実施工という立場から成型爆破線を用いて一気に倒壊させた例である。対象とした建家は同じく単純な工場建家であるが、床高さGL+7.8mの鑄床上に建造されていることが特徴として上げられる。この時の建家周辺の様子と計測器の配置を合わせて図-12に示す。また爆薬の装着箇所を表-2に示す。

この工事は6本の柱について2カ所ずつ同段の雷管で起爆している。各柱の起爆間隔は公称250msとしているため、計測された音圧波形の6つのピーク過圧は完全に独立して計測されており(図-13)、それぞれ柱1本分に対応したピーク過圧値として評価できると考えられる。また計測点は100m、210mの2点である。したがって本工事から実測例として12個のデータが得られていることになる。

以上2例の場合の爆発衝撃音のピーク過圧の測定結果を表-3にまとめた。3.で行った実験とは異なり、実際

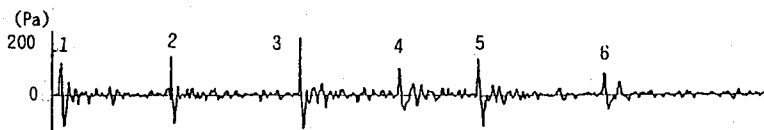


図-13 音圧変動波形（解体工事）数字は段発

表-3 実際の工事におけるピーク過圧測定結果

計測結果	段発	実験工事								解体工事					
		Case.1				Case.2									
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
ピーク過圧 (Pa)	60m	402	379	408	346	172	234	201	406	-	-	-	-	-	-
	100m	135	-	-	-	139	111	139	173	145	145	209	151	99	87
	200m	-	-	-	-	47	39	39	52						
	210m									48	42	64	48	36	30

表-4 式(3)を用いたピーク過圧の計算

		実験工事		解体工事		
		Case.1	Case.2			
箇所あたり薬量(kg)		0.440	0.460 0.075	0.76	0.60	
箇所あたり砂量(m <sup>2</sup> )		0.1215	0.1215 0.0080	0.24	0.24	
計測 の(Pa)	箇所	60m ①	124	130		
		②		183		
	100m ③	75	78	75	60	
		④		110		
	200m ⑤	37	39			
		⑥		55		
	210m ⑦			35	29	
算測 した(Pa)	60m	248 (①×2)	313 (①+②)			
	100m	150 (③×2)	188 (③+④)	150 (③×2)	120 (③×2)	
	200m	74 (⑤×2)	94 (⑤+⑥)			
	210m			70 (⑦×2)	58 (⑦×2)	

Case.2の①③⑤は薬量・砂厚の欄の上段を用いた値  
②④⑥は薬量・砂厚の欄の下段を用いた値

の工事例では切断部材の形状に合わせて膠状のペントライトを棒状に成型したものを爆薬として用いている。また作業性などの観点から減音のための被覆は直方体形状の木箱に入れた砂で行っている。したがってこれらの減音効果を評価するにあたっては、円筒状の砂被覆で得られた式(2)を直接適用することはできない。そこでこれらの式を以下のように改良して適用を試みた。

円筒状の砂被覆で行った実験における砂の体積をVとすると  $V=2\pi R^3$  と表せることにより、式(2)はRを  $(V/2\pi)^{1/3}$  で置きかえて、

$$P_d = 1.50 \times W^{0.92} \times (V/2\pi)^{-2.21/3} \times D^{-1.00}$$

$$= 5.81 \times W^{0.92} \times V^{-0.74} \times D^{-1.00} \dots \dots \dots (3)$$

となる。すなわち、このように被覆砂の体積についての評価が可能であるとすれば、形の上では爆薬の形状および被覆砂の形状にはかかわらず、実際の解体工事に用いられる成型爆破線の発破衝撃音の砂による制御効果の推定が可能となると考えられる。

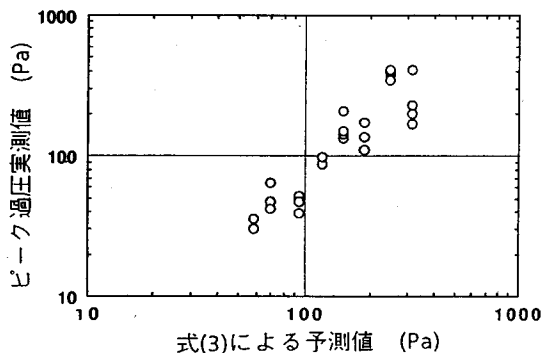


図-14 実施工における予測値と実測値の相関（ピーク過圧）

なお、表-2に示すように各ケース、1段につき2箇所ずつ爆破しているが、2箇所でも同時に発生した騒音については

①同時起爆した2カ所の爆破による波形は図-11、図-13に示す実測波形を見てわかるように、ほぼ完全に重なっていること。

②2つの爆破点間の距離に比較して計測点までの距離は十分に長く、ほとんど同時に同様の入射角で感知されていると考えられること。

③安全側の評価となること。  
といった理由により、箇所毎の予測値を単純に加算することとした。

以上の考え方に基づいた例1,2における音圧ピーク過圧の予測値の計算を表-4に、また計測値と予測値を比較したものを図-14に示す。

図-14によると先の実験と成型爆破線を用いた実施例の条件は異なるにもかかわらず、式(3)に基づく予測値と計測値の間にはかなり近い関係が見られ、この考え方によりおよその近似が可能であると思われる。安全側の評価が得られるように2箇所の予測値を単純加算したのに拘らず、ほとんど予測値と一致した値が得られたのは、特に実験工事実施時、計測方向に後の実験ケースで倒壊予定の構造物が40mにわたって残存しており



(図-10参照), これらがあたかもメガホンのような効果を発揮し, 完全な自由空間で得られる値よりも大きめの値が計測されたためと考えられる. これらの結果から式(3)は実用的な精度を有する予測式として用いるものと考えられる.

実際の工事においてはここで示したピーク過圧の推定式をもとに, 窓ガラス等の周辺構造物への影響を考察したり, 騒音レベルへの変換を介して付近住民への説明に用いることとなろう. 特に騒音レベルへの変換については爆発衝撃音に対して適した計測方法や評価モードが基準として定められた後, これに応じて行うべきであり今後の課題と考えられる. またその際用いる周波数補正の方法によっては, 4.で述べた砂厚と薬量の組合せによる周波数特性の変化がその予測値に影響してくるものと考えられる.

## 6. む す び

本研究では, 今後の都市部での発破による構造物解体工法の実用化に対して大きな環境問題と考えられる騒音問題に関し, その防護策として砂を用いた方法を選択し, その場合の防音効果を実験的に検討した. また, その際のパラメータである薬量, 砂厚, 距離とピーク過圧との関係を定式化し, その予測式を示すとともに実施工との対比を試みた.

得られた成果を列挙すると以下のとおりである.

(1) 砂被覆をした場合のピーク過圧は, 距離にほぼ逆比例する.

(2) 砂被覆をした場合も点音源であれば騒音の方向的なばらつきに, 砂被覆のない場合と比較して大きな変化はない.

(3) 砂被覆の効果は大きく2つあり, ひとつはピーク過圧を抑制する効果, 他のひとつは衝撃音の持つ周波数特性を変化させることである. 特に200 Hzより高い周波数の成分の騒音に対して大きな低減効果が見られ, また薬量と砂被覆厚との組合せにより, この効果は多少変化する.

(4) (3)の2つの効果のうち周波数特性に変化を与える効果は, 砂厚15 cm前後を境界として発現する. すなわち減音材として十分な効果を発揮させるための砂厚は最低15 cmと考えられる.

(5) 砂被覆をした場合の減音効果のある程度の精度で予測できる予測式が得られた. さらにこの予測式を用いて実施工の結果を検討したところ, ほぼ満足のいく結果が得られた.

ここで薬量 $W$ の指数に関して du pont の式との間に差が見られるが, 被覆体の有無という大きな条件の差異があるため, これについては今後の検討課題と考えている.

本研究は基礎的なものであり, 実際の工事を考えると, 減音メカニズムを明確にした上で, コンパクトで施工性のよい減音器具の考案が必要であると考えられる.

また規制値の設定については, 衝撃音を精度良く計測評価するのに適した規格を有する機器を選定した上で, 真に人間の感覚や, 周辺構造物に対する影響についてのデータを蓄積した後可能になると思われ, 発破解体工法の実用化に向けこの分野の更なる研究が望まれる.

おわりに本研究を進めるにあたり, 特に衝撃音の評価の面で井清武弘室長をはじめとする工技院資源環境技術総合研究所の方々に御指導頂いた. また, 実験・解析の実施にあたっては坂尾和男技官をはじめとする山口大学工学部社会建設工学科の関係諸氏にお手伝い頂いた. ここに深い謝意を表する.

## 参 考 文 献

- 1) Gustafsson, R.: Swedish Blasting Technique, pp.285~289, 1973.
- 2) 小林茂雄・草深守人・池田義之・中川浩二: 発破による鉄骨建家の倒壊工法に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第415号/VI-12, pp.145~154, 1990.
- 3) 中村 昭: N波の伝搬特性, 日本音響学会誌, 33巻5号, pp.275~281, 1977, 等
- 4) 日本規格協会: 日本工業規格, 騒音レベル測定法, JIS Z 8731.
- 5) IEC. Publication. 651.
- 6) 国松 直・小島直哉・今村 威・中川浩二: 衝撃音の音圧レベル, 騒音レベルの推定のための精密騒音形のシミュレーション, 工業火薬第48巻第6冊, pp.395~401, 1987.
- 7) 全国火薬類保安協会: コンクリート構造物発破解体工事保安技術指針, 1991.
- 8) 斎藤照光他: 砂中爆破法の性質と応用 (I)~(V), 工業火薬, Vol.48,41,1987, 火薬と保安, Vol.19, No.4, pp.21~25, 1987, Vol.20, No.2, pp.23~31, No.4, pp.17~21,1988, 工業火薬, Vol.50, No.3, p.168, 1989.
- 9) 和田有司他: 泡による爆発音の消音 (I)~(III), 工業火薬, Vol.50, No.3, p.174,1989, 安全工学, Vol.28, No.2, p.102,1989, 工業火薬, Vol.51, No.1, p.22, 1990.
- 10) 和田有司他: 雪による爆発音の消音 (I), 工業火薬, Vol.49, No.6, p.375, 1988.
- 11) 松原重一: 爆薬による鋼板切断の研究, 東京大学工学系研究科学位論文, 1978.
- 12) 国松 直・今泉博之・井清武弘他: 発破音の計測上の諸問題, 資源素材学会, 研究・業績発表講演会講演要旨集, pp.45~46, 1991.
- 13) 井清武弘・国松直他: 発破音の特性およびその伝播について, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム '91 講演論文集, pp.622~627, 1991.
- 14) du Pont: Blasters' Handbook, 175 th Anniversary Edition, pp.434~446, 1980.

15) 井清武弘：騒音伝播に対する地表面の影響，騒音制御，  
Vol.14, No.1, pp.4~8, 1990.

の発破解体工法における設計・施工，構造工学論文集，  
Vol.38 A, pp.1213~1225, 1992.

16) 小林茂雄・木下雅敬・中津賢一・中川浩二：鉄骨構造物

(1992.2.10 受付)

---

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON IMPULSIVE BLAST NOISE ATTENUATION CHARACTERISTICS BY A SAND LAYER AND THE PREDICTION OF SOUND WAVE PROPAGATION

Shigeo KOBAYASHI, Hidetoshi YOICHI, Yosiyuki IKEDA and Koji NAKAGAWA

In blasting demolition work of steel-framed structures, it is very important to reduce the level of impulsive blast noise to less than the permissible level prescribed by local authorities. In this paper we describe an experimental study on the attenuation effect of sand covering the blast point on the impulsive blast noise and the empirical equation for predicting the blast noise level.

The experiments indicated that sand reduced the magnitude of peak over-pressure of air blast, as well as changed the frequency characteristics of the blast noise such that higher frequency components were suppressed. The prediction obtained from the empirical equation was compared with the values measured in the field of actual demolition work, and proved to be good for practical purposes.

---