

異質層をはさむ地盤を通過する爆破振動

川上 純*, 田中一三**

発破による振動が地盤を伝播するとき、その経路中の地盤に異質の層（このことを以下本文ではハサミ層と呼ぶ）が介在している場合、爆破振動がどのように変化し減衰するかを、コンクリートブロックと砂を用いた実験により検討した。

その結果、あまり顕著ではないが、ハサミ層は固有の周波数透過帯を持つことが確認され、その周波数は計算値と一致していた。また、ハサミ層の砂の内部減衰は、ひずみレベルにより異なる非線型性を考慮しないと実験結果をうまく説明できないこと、そして減衰がひずみの $1/3$ 乗に比例すると仮定すると、減衰は周波数に比例することが明らかになった。

1. 緒言

発破による振動が地盤を伝播するとき、その振動は伝播経路の性質およびその変化により大きく影響される。今回は伝播経路の一例として、経路中に軟弱な（インピーダンスの小さい）ハサミ層が存在する場合について、その影響を実験により検討した。実験はコンクリートブロックとハサミ層として砂を用いて行ない、主にハサミ層の周波数特性について検討した。

2. 実験方法

実験に使用したコンクリートブロック I, II を Fig. 1 に示す。コンクリートブロックの大きさは、 $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ で、砂場に隣接して2個成作し、その表面が地表と一致するようにした。コンクリートブロック I と II の間隔すなわハサミ層の幅 H は、最初は 20 cm として実験を行ない、次にコンクリートブロック II にコンクリートを 10 cm 打ち足し、間隔を 10 cm として同様な実験を行なった。コンクリートブロック間には砂を充てんしハサミ層とした。コンクリートブロックおよび、ハサミ層の砂の弾性波速度は、実測によると、それぞれ $v_1 = 3900\text{ m/sec}$, $v_2 = 160\text{ m/sec}$ であった。また両者の密度は、 $\rho_1 = 2.8\text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 1.8\text{ g/cm}^3$ であり、妥当な値であった¹⁾。

コンクリートブロックには、塩ビ管（内径 $\phi 124\text{ mm}$ ）の下に薬室としてブリキカン（ $l = 100\text{ mm}$, $\phi = 100\text{ mm}$ ）を取り付けた筒を2ヶ所づつ埋め込み、爆破点 A, B,

C, D とした。また、薬室の上部には鉄製のふたを取り付け、その上につめ物として砂袋を入れて発破を行なった。

このような薬室を設けたのは、コンクリートを実験に爆破することなく実験が反覆できるように、爆薬とコンクリート間に隙間を作るためである。薬室の詳細図を Fig. 2 に示す。

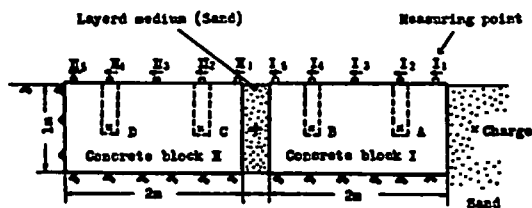


Fig. 1 Scheme for observation

震源としては、発生する周波数および振幅が異なるように、電気雷管単独と、それに導爆線 40 cm を巻きつけたものの2種類を用いた。水中爆発によるエネルギー測定²⁾ から、前者はペンシリット換算 0.5 g 、後者は 4.5 g に相当したもので、それぞれの装薬を本文では薬量 0.5 g および 4.5 g と呼ぶ。

測定点は、コンクリートブロック表面に、各ブロック5点づつ計10点設けた。ピックアップは、コンクリートブロックにあらかじめ埋め込んだ鉄板（ $50 \times 50 \times 4\text{ mm}$ ）に石こうで固定し、震源に向かう水平方向の振動を測定した。また、ハサミ層の固有振動を調べるために、ハサミ層の表面および砂の中（深さ 50 cm ）にも測点を設けた。この測点ではコンクリート内で発破した場合、発生する周波数が高すぎて真の振動が測定で

昭和55年7月18日受理

*大成建設株式会社 技術研究所

〒245 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1

**化学技術研究所

〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1

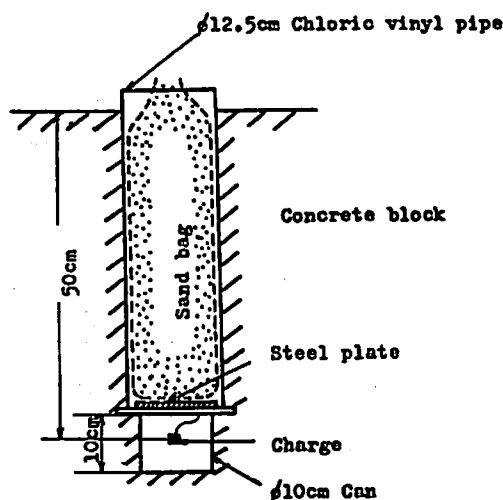


Fig. 2 Explosive chamber

きないので、隣接する砂場において発破を行ない測定した。

ピックアップには、圧電型加速度計（固有振動数23 KHz）を用い、加速度測定を行なった。ピックアップからの出力はインピーダンス変換器を通した後、直流アンプで増幅して、データーレコーダーに記録した。アンプ以降の周波数特性は、20KHz までフラットであるが、加速度計の固有振動数が23KHz であるため、その7割までがフラット領域であるとする、総合特性としては16KHz までフラットである。なお、固有振動数120KHzの加速度計での記録波形との同時測定では、ほぼ同じ波形が得られ、周波数特性としては問題がないことが確認された。

3. 実験結果

3.1 加速度波形の特徴

加速度波形の一例として、薬量 0.5g の場合を Fig. 3 に、4.5g の場合を Fig. 4 に示す。また、各測定点の加速度最大値の概略値を Table 1 に示す。

加速度値は、Table 1 に示すように、各発破によってかなり幅があるが、ハサミ層の手前 (I_0) では、ハサミ層の幅 H によらずほぼ一定であった。ハサミ層通過後は、 H が異なると減衰量も変化している。

また、今回の実験で得られたすべての測定結果について、発破点から測定点までの斜距離と加速度最大値との関係を Fig. 5 に示す。今回の実験モデルは、大きさが限定されたものであり、距離減衰という意味はあまりないが、参考として示す。なお、コンクリートブロック II 内では、距離が遠いほど振動は急に減少しているが、これはコンクリートブロックの長さ方向の固有振動が卓越しているためである。すなわち、コンクリ

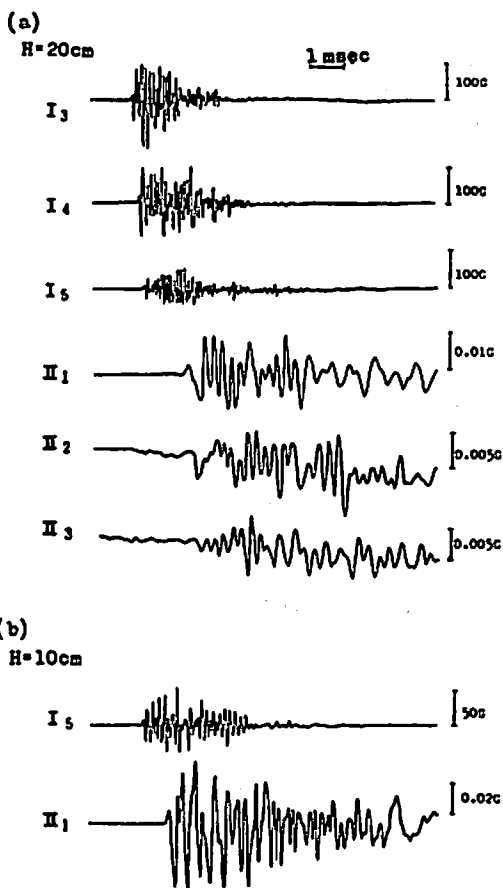


Fig. 3 Examples of observed acceleration waveform (charge 0.5 gram)

Table 1 acceleration at measuring point

charge (gram)	H (cm)	acceleration (G)	
		I_5	II_1
0.5	10	50~180	0.03~0.05
	20	70~100	0.01~0.02
4.5	10	400~700	0.15~0.55
	20	500~700	0.03~0.07

ートブロックの固有振動モードは、端部 (II_1) が振動の腹となり、中央 (II_3) が節となるため、見かけ上の距離減衰が大きくなっている。

3.2 薬量と周波数の関係

ハサミ層の幅 H 20cm の場合の加速度波形のフーリエスペクトルを Fig. 6 に示す。

ハサミ層の手前 (I_0) では、10KHz 前後の周波数成分が卓越している。この周波数成分は、薬量によってさほど変化がなく、コンクリート中の薬室の固有振

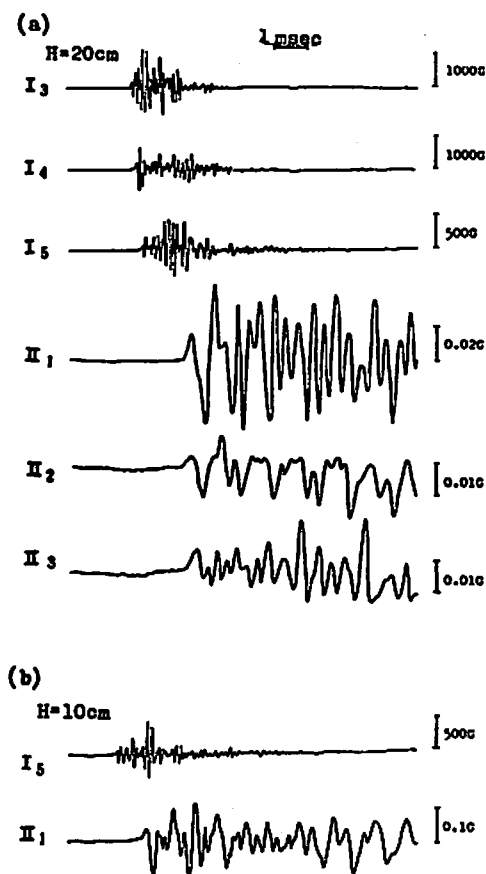


Fig.4 Examples of observed acceleration waveform (charge 4.5gram)

動に関係すると思われた。

薬量の違いにより発生する周波数の変化を見るために、測点 I₅ において比較してみた。Fig.7 は測点 I₅ について、薬量 4.5g のときのフーリエスペクトルを薬量 0.5g のそれで除したものである。ただし縦軸は対数にとってあり、数回の実験について平均したものである。Fig.7 を見ると、薬量が大きい方が低周波成分が多く発生していることが分かる。

3.3 ハサミ層通過後の周波数

ハサミ層を通過すると、加速度は極端に小さくなるが、その特性は周波数の関数であり、振幅だけでは一概に比較できない。ハサミ層を通過することによって、波の高周波成分はほとんど減衰し、数 KHz 以下の成分だけが残る。

通過後に現われる振動は、コンクリートブロックの長さ方向の固有振動に関係している。コンクリートブロックの固有振動数 f_n は、伝播速度 v_1 、コンクリートブロックの長さ L により、

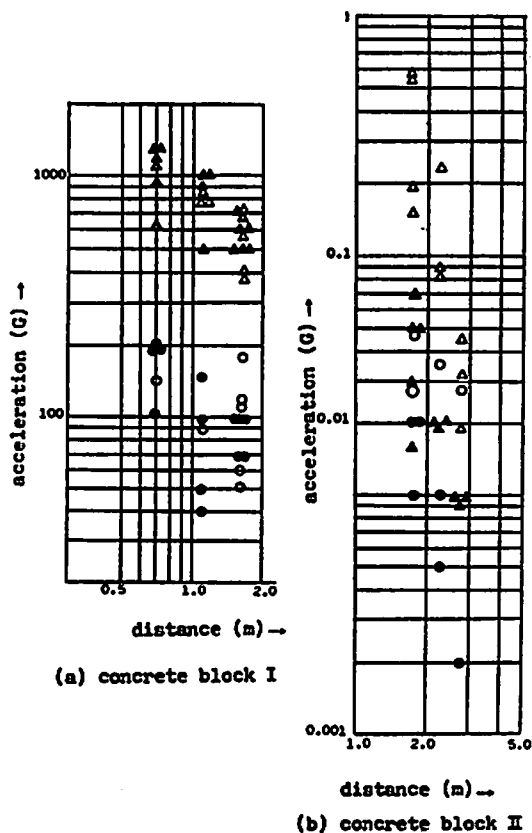


Fig.5 Relation between acceleration and distance

○; H=10 cm charge 0.5 gram
△; " " 4.5 "
●; H=20 cm " 0.5 "
▲; " " 4.5 "

$$f_n = \frac{nv_1}{2L} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

と表わされる。今、 $v_1=3900\text{m/sec}$ 、 $L=2\text{m}$ であるので、 $f_1=975\text{Hz}$ となる。Fig.6 には、これに対応する振動数のピークが表わされている。

3.4 ハサミ層の減衰特性

ハサミ層による振動の減衰は、実験結果を見ると周波数により異なっており、またハサミ層の幅にも関係していると考えられる。

ハサミ層による減衰の周波数特性を調べるために、ハサミ層通過後 (II₁) のフーリエスペクトルを、通過前 (I₅) のフーリエスペクトルで除したものを Fig.8 に示す。これを数回の実験の平均値 ($H=20\text{cm}$ のとき 5 回、 $H=10\text{cm}$ のとき 6 回) で表わすと、Fig.9 のようになった。ただし Fig.8 と違って、縦軸は減衰比の対数にとってある。

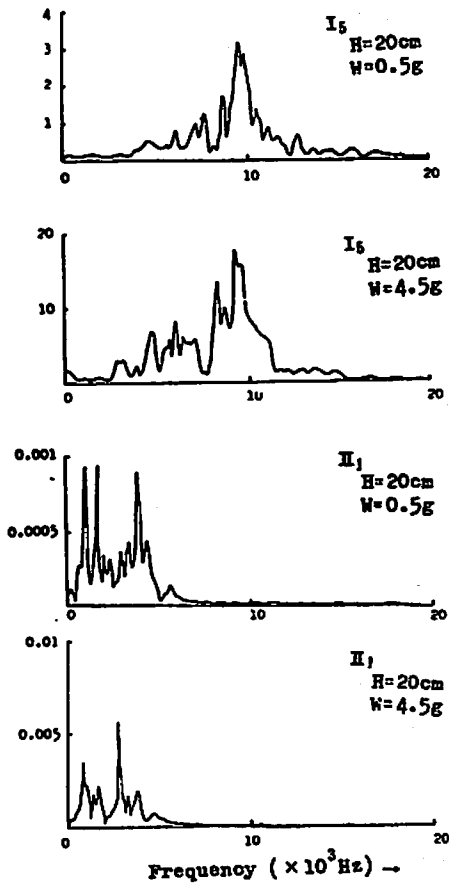


Fig. 6 Fourier spectra of acceleration
(H=20cm)

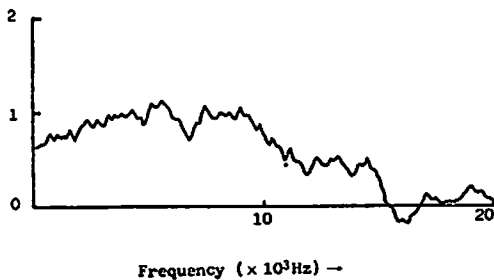


Fig. 7 Logerical Fourier spectra ratio
(charge 4.5g/0.5g, at I_5)

Fig. 8 を見ると、いくつかのピークが見られ、ある固有の周波数を選択的に透過する性質を持っていることが予想される。一方、Fig. 9 は、縦軸が対数にとってあるため、広い周波数にわたって全体の傾向を見ることができ、その結果、周波数の範囲によって若干の凹凸はあるが、ならして見た場合、3KHz~10KHz の

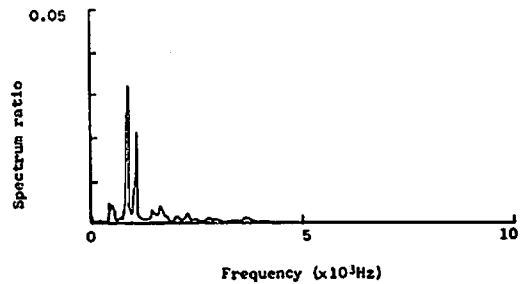


Fig. 8 Fourier spectrum ratio of II_1 and I_5

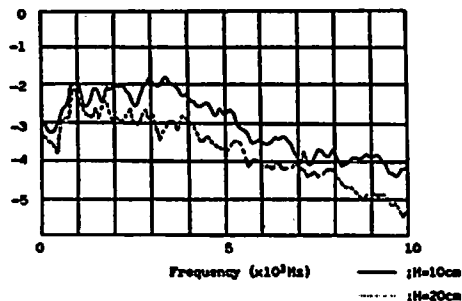


Fig. 9 The averages of logarithmic attenuation

間ではほとんど直線になっており、ハサミ層の減衰性は、周波数の関数となっていることが分かる。

すなわち、ハサミ層の特性としては、ある固有の周波数を選択的に透過させる性質、そして周波数の関数となる減衰特性を持っていることが分かる。

4. 考 察

ハサミ層への入射波のフーリエ変換を $g_1(\omega)$ (ω : 角周波数)、ハサミ層への透過波を $g_1'(\omega)$ 、ハサミ層を通過し境界の手前を $g_2'(\omega)$ 、そしてハサミ層の通過後を $g_2(\omega)$ とする。そして、コンクリート及びハサミ層のインピーダンスを、それぞれ $z_1 = \rho_1 v_1$, $z_2 = \rho_2 v_2$ とし、反射係数を $r = (z_1 - z_2) / (z_1 + z_2)$ とする。なお今回の実験では、 $r = 0.938$ である。

このようにおくと、ハサミ層の境界では以下の式が成り立つ³⁾。

$$\frac{g_1'(\omega)}{g_1(\omega)} = 1 + r, \quad \frac{g_2(\omega)}{g_2'(\omega)} = 1 - r \quad (2)$$

また、 $g_2'(\omega)$ と $g_1'(\omega)$ の関係は、ハサミ層内で波が1回往復反射するたびに $r^2 e^{-2i\omega T}$ だけの因子がかかるので、

$$g_2'(\omega) = g_1'(\omega) e^{-i\omega T} (1 + r^2 e^{-2i\omega T} + r^4 e^{-4i\omega T} + \dots + r^{2n} e^{-2ni\omega T} + \dots) \quad (3)$$

となる。ここで、 T は波がハサミ層を通過する時間、そして $e^{-i\omega T}$ は時間 T だけの遅延に関するフーリエ変換である。(3)式の無限級数の和をとると、

$$\frac{g_2'(\omega)}{g_1(\omega)} = \frac{e^{-i\omega T}}{1-r^2 e^{-i\omega T}} \quad (4)$$

となる。(4)式の絶対値をとり、(2)式を用いて(4)式を入射波 $g_1(\omega)$ と透過波 $g_2(\omega)$ に書き直すと、

$$\left| \frac{g_2(\omega)}{g_1(\omega)} \right| = \frac{1-r^2}{\sqrt{1-2r^2 \cos 2\omega T + r^4}} \quad (5)$$

となる。(5)式は、 $\cos 2\omega T=1$ のとき、すなわち以下の(6)式で与えられる周波数のとき最大値1をとる。

$$f_n = \frac{n v_2}{2H} \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

ここで、 $f_n = \omega_n / 2\pi$ である。すなわち、ハサミ層はある固有の周波数の波を選択的に透過させる性質を持つ。今回の実験では、 $v_2=160\text{m/sec}$ であるので、 $H=20\text{cm}$ のとき $f_1=400\text{Hz}$ 、 $H=10\text{cm}$ のとき $f_1=800\text{Hz}$ の整数倍が透過周波数となる。

Fig. 8 は、前述のように $H=20\text{cm}$ の場合の $|g_2(\omega)/g_1(\omega)|$ である。(5)式と比較すると、図には f_1 に相当して 400Hz 附近に小さなピークが見られる。 1KHz 前後の大きなピークは、コンクリートブロック内の重複反射による固有振動数（計算によれば 975Hz ）によるもので、ハサミ層の効果ではない。

f_2, f_3 以後のピークは、Fig. 8 では必ずしも明確ではない。(5)式では、 f_n の位置では透過率は1であるが、Fig. 8 でそれより小さいのは砂の非弾性的な性質による減衰効果のためであろう。

$H=10\text{cm}$ の場合は、 f_1 がコンクリートブロック内の重複反射の周波数に近いので、(5)式の性質ははっきり確認できなかった。

このように、Fig. 8 では(6)式の f_1 に相当するピークが見られたが、高周波では減衰し、(5)式のグラフとは異なっている。そこで減衰を含めて(5)式を修正してみる。それにはハサミ層内を通過するフーリエ変換を、 $e^{-i\omega T}$ のかわりに、

$$e^{-i\omega T - \alpha x} = e^{-(\alpha + \frac{i\omega}{v_2})x} \quad (7)$$

を用いれば良いと思われる。(7)式のように距離 x だけ進むときの一般的複素演算子を用いると(5)式は、

$$\left| \frac{g_2(\omega)}{g_1(\omega)} \right| = \frac{(1-r^2)e^{-\alpha x}}{\sqrt{1-2r^2 e^{-2\alpha x} \cos 2\omega T + r^4 e^{-4\alpha x}}} \quad (8)$$

となる。この式は α が大きいときは分母の第2項以下が無視できるので

$$\left| \frac{g_2(\omega)}{g_1(\omega)} \right| = (1-r^2)e^{-\alpha x} \quad (9)$$

となる。また、両辺の対数をとると、

$$\log \left| \frac{g_2(\omega)}{g_1(\omega)} \right| = \log(1-r^2) - \alpha x \quad (10)$$

となる。

incident wave	Layered medium	transmission wave
$g_1(\omega)$	$g_1'(\omega) \quad g_2'(\omega)$	$g_2(\omega)$

Fig. 10 Fourier transforms at boundary

実験結果の Fig. 9 は、縦軸を対数目盛としたものであり、(10)式に対応するグラフである。この図ではほとんど一定の傾きをもった直線とみなせるが、ハサミ層の幅 H ((10)式の x) に比例した傾きとはなっていない。これは、(10)式で $\alpha = K\omega$ とみなしたのではだめで、そのほかに

$$\log(1-r^2) - \alpha x - l\omega \quad (11)$$

のような $l\omega$ という付加項を持っていることに相当する。 $l\omega$ の項が発生する原因は、ハサミ層の幅によらないことから、コンクリートと砂の境界での減衰が考えられる。

5. 非線型効果

前節では現象をあくまでも線型の範囲で考察したが、非線型効果を考えに入れて実験結果を考察してみる。すなわち減衰は、ひずみとの関数であると考え。そこで(7)の α を角周波数 ω とひずみ ϵ の関数であるとし、

$$\alpha = \alpha(\omega) \cdot \beta(\epsilon) \quad (12)$$

とおく。ここでひずみに関する項 $\beta(\epsilon)$ の関数型は今回の実験では分からないので、原のグラフ⁴⁾を参照して、減衰はひずみの $1/3$ 乗に比例すると仮定する。すなわち、

$$\alpha = \alpha(\omega) \cdot \epsilon(\omega)^{1/3} \quad (13)$$

とする。このように仮定すると、前節の(10)式は、

$$\begin{aligned} \log \left| \frac{g_2(\omega)}{g_1(\omega)} \right| &= \log(1-r^2) - \alpha(\omega) \cdot \epsilon(\omega)^{1/3} \cdot x \\ \log \left| \frac{g_2(\omega)}{g_1(\omega)} \right| - \log(1-r^2) &= -\alpha(\omega) \cdot x \cdot \epsilon^{1/3} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。

ひずみ $\epsilon(\omega)$ は、変位 $A(\omega) = A_0 \sin \frac{\omega}{v} x$ の x 微分であるので、 $\epsilon(\omega) = (\omega/v) \cdot A(\omega)$ で表わせる。加速度 $g(\omega)$ を用いると、 $\epsilon(\omega) = g(\omega)/\omega v$ となる。そこで、ハサミ層のひずみ $\epsilon(\omega)$ を、ハサミ層の両境界のひずみ $\epsilon_1'(\omega)$ 、 $\epsilon_2'(\omega)$ を用いて、以下の(15)式で概算した。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon(\omega) &= \sqrt{\epsilon_1'(\omega) \cdot \epsilon_2'(\omega)} \\ \epsilon_1'(\omega) &= \frac{g_1'(\omega)}{\omega v_2} = \frac{1+r}{\omega v_2} g_1(\omega) \\ \epsilon_2'(\omega) &= \frac{g_2'(\omega)}{\omega v_2} = \frac{g_2(\omega)}{(1-r)\omega v_2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

なお、今回の実験では、 $r=0.938$ である。

実験結果を、(15)式を用いて(14)式のように計算を行なった結果を Fig. 11 に示す。

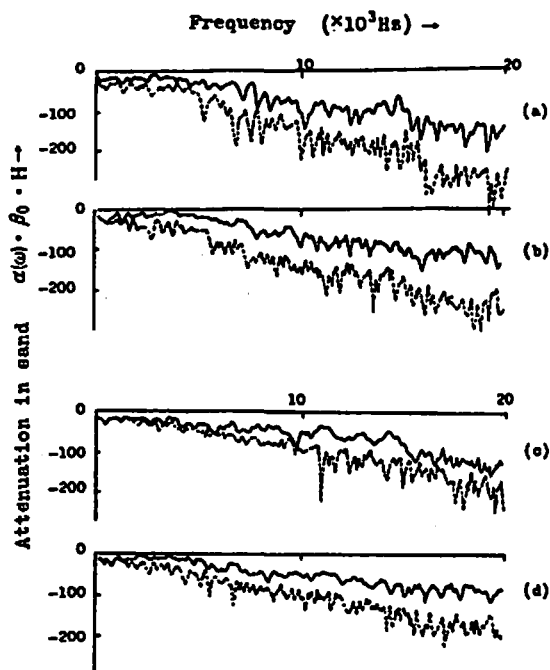


Fig. 11 Relation between attenuation in sand and frequency (in considering of nonlinearity of sand attenuation)

— ; $H = 10\text{cm}$, - - - - ; $H = 20\text{cm}$

- (a) Charge = 0.5 gram, shot point; A
 (b) " " " ; D
 (c) Charge = 4.5 gram, shot point; A
 (d) " " " ; D

この図を見ると、4KHz~12KHzではほぼ直線となっており、その直線の傾きは $H=20\text{cm}$ では $H=10\text{cm}$ の場合の2倍となっており、00式を満足している。そして $\alpha(\omega)$ の形が直線となっていることから、

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \omega \quad 00$$

の関係が成立し、ハサミ層の砂の減衰は周波数に比例することが分かる。

ただ、Fig. 11 は、薬量によって直線の傾きがやや異なり、厳密には00式を満足していない。この理由としては、境界での特性あるいはひずみによる非線型性

の仮定に問題があったのではないかと考えられる。

6. 結 言

コンクリートブロックと砂を用いて、軟弱なハサミ層がある場合の振動伝播について実験により検討したハサミ層の周波数特性として、ある固有の透過周波数があることを予想し解析を行なった結果、あまり顕著ではないが、ハサミ層の幅 $H=20\text{cm}$ の場合、400Hzに固有透過帯があることが確認され、計算値と一致していた。なお、明確なピークが現われなかった理由として、発破によって発生する周波数が高かったことと、砂の減衰が大きかったことが考えられる。

次に、ハサミ層内の砂の減衰についてその周波数との関係を検討した。実験結果からは、ハサミ層の通過による減衰量 A は、周波数 f の高い成分ほど大きく、ほぼ

$$\log A = C - K\omega$$

の形で表わされた。ハサミ層の幅が変わると、上式の C が変化して全体のレベルを変えたが、係数 K はほとんど変化しなかった。この結果を説明するためには、減衰がひずみレベルによって異なるような非線型性を考慮に入れる必要があること、そして減衰がひずみの $1/3$ 乗に比例すると仮定すると、うまく説明できることを明らかにした。ただ薬量が異なる場合については完全な解析ができず、減衰のひずみ依存性についてさらに検討を行なう必要があることが今後の課題として残された。

本報告の終りにあたり、この実験をおすすめていただいた大成建設土木技術室の和田潤穂氏ならびに日本ロックエンジニアリング株式会社清水達英顧問に、心から御礼申し上げます。併せて、この実験に際して御力添えいただいた、大成建設技術研究所の方々にも心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) 山口、井上、伊藤、日本鉱業会誌、85、851(1969)
- 2) 田中一三、工火誌、40、306(1979)
- 3) 須藤、大久保、田中、「火薬と発破」、オーム社書店(1971)
- 4) 原昭夫、第2回地盤震動シンポジウム資料集、33、(1973)

A Study on Seismic Wave Passing Through a Layered Medium

by Jun KAWAKAMI* and Kazumi TANAKA**

The propagation of the seismic wave passing through in a layered medium composed of mortar blocks and the sand layer have been studied by model blasting experiments.

As the results, the vibration of inherent frequencies pass through the layered medium which agreed with the calculated one, however it is not remarkable.

The amplitude attenuation in the sand is nonlinear, and it depends on the strain. Assuming that the attenuation ratio is proportional to the $1/3$ power of strain, the attenuation ratio is directly proportional to the frequency.

(*The Technical Institute of Taisei Construction Co. 344-1 Naze-cho, Totsuka-ku, Yokohama, Japan

**The Technical Institute for Chemical Research 1-1 Yatabe-cho-east, Tsukuba-gun, Ibaragi, Japan)

ニュース

“聞こえぬ騒音” 初の提訴—超低周波公害—
頭痛、イライラ、不眠から聴覚、痛みまで、「新型の振動公害」として住民を悩ませている超低周波公害が、奈良で始めて裁判で争われることになった。建設省によると、いまのところ表立って問題となっているのは日本道路公団の一部沿道だけ、というが、実際は道路橋のかなりの部分で超低周波公害がじわじわと広がっているといわれる。

建設省や日本道路公団によると、超低周波公害問題が起きたのは、48年に山梨県大月市の中央自動車道葛野川橋付近が最初。49年には、長野県下伊那郡阿智村の同じく中央自動車道阿知川橋付近でも発生、このほか、今回裁判に持ち込まれた香芝町のケースや西宮市塩瀬町の中国自動車道沿線などでも問題になっている。

これで見ると、問題が表面化したのは比較的最近で、同じ道路公害でも騒音、日照侵害、振動と

は異なっているのが特色だ。

訴状によると、西名阪道路は四車線の高速道路で、47年12月開通。問題の香芝高架橋は、鉄筋コンクリートの床板と鋼材とを結合した合成けた橋。この合成けた橋は柔構造で全体に剛性に乏しく、各方向への揺れ、たわみが発生しやすい欠陥がある。橋に車の重量がかかると、全体が大きく揺れ、空気を振るわせ、超低周波を発生させる。沿線の超低周波は香芝町の調査によると最高90～95デシベル。騒音のエネルギー強度に換算すると、大阪空港にジャンボ機が着陸する際の滑走路から千メートル手前の直下ごう音に匹敵。しかも四六時中、発生している。前述のような影響の他、教育への障害も深刻。さらに振動によってかわらが割れ、壁にき裂が入るなど家屋の被害も大きい。

朝日新聞 昭和55年10月7日（同日付けの他の新聞においても大きくとりあげられている）。

（黒田英司）