

# 岩盤分類の定量的指標としての 「応答音圧パルス勾配法」

稻森光洋<sup>1</sup>・御手洗良夫<sup>2</sup>・船曳伸二<sup>3</sup>・瀬崎満弘<sup>4</sup>・原田隆典<sup>5</sup>・横田漠<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (株) 国土開発コンサルタント 技術本部 (〒880-0015 宮崎市大工3丁目155)

<sup>2</sup>正会員 工修 (株) 熊谷組 土木本部 (〒162-0821 東京都新宿区津久戸町17-1)

<sup>3</sup>学生会員 宮崎大学 大学院 土木環境工学専攻 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

<sup>5</sup>正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

本研究は、岩盤分類の要素の一つである「ハンマー打診による判定」の定量的評価を目的とした基礎的研究である。ハンマーの打診で岩石や岩盤を任意の段階に区分することは現場的で簡易な方法であるため全ての調査段階で行われ、例えばハンマーによって打診すれば、「澄んだ音を出す」または「濁った音を出す」といった定性的な表現で評価される。このため判定に個人差があり定量的でない。そこで、人工的に製作した模擬岩石を対象に、材質と物性、形状・寸法、境界条件、打診位置および打診面の形状等が異なる種々の供試体の打診音を分析し、これらの諸条件に依存した打診音の特徴を調べた。その結果、岩石や岩盤等といった材料の力学的性質や物性値を評価する指標になり得るもののが音圧の立ち上がりに現れることを見出した。

**Key Words :** quantitative evaluation index for rock mass classification, hammer tapping sound, response sound pressure pulse inclination, non-destructive testing of material

## 1. はじめに

岩盤を対象とした工事を行おうとする場合、工事を安全かつ、合理的に進める上には、岩盤の性質や条件を明らかにしなければならない。しかし、トンネルやダム等の大規模な工事では、事前に行われる地質調査で工事対象地域すべてにわたって、岩盤の工学的特性を定量的に求めることは、技術的、経済的に困難である。そこで、このような工事においては、岩盤分類を利用することが多い。岩盤分類は、複雑な様相を呈する岩盤の性質や条件を簡潔な形で表現し、設計・施工、あるいは安定解析に役立たせるものである。

岩盤分類は、多くの分野で様々な形式のものがあり、利用の仕方も多様である<sup>1)</sup>。一般的には、地質調査等で得られる情報を分類要素とする。分類要素としては、大きく分けて構成岩石の性質と不連続面の性質に関するものがあり、定量的あるいは定性的な要素を組み合わせて分類される。定量的な要素としては一軸圧縮強さ、割れ目間隔、地山の弾性波速度、RQD等があり、定性的な要素としては、ハンマー打診音、風化の程度等がある。

岩盤分類の要素の一つである「ハンマー打診による判定」は、岩石、岩盤、ボーリングコア等の表面をハンマーでたたき、その手ごたえ、音、破面を観察する

ことによって岩石や岩盤の硬さやゆるみを任意の段階に区分するもので、この判定方法は全ての岩盤調査の段階で行われ、岩盤調査の基本であろう。打診は医学のみならず日常の様々な分野で行われている原始的な方法ではあるが、直感的に岩盤の性質を体得できる現場的で簡易な方法である。しかしながら、この分類要素は定性的な表現で岩盤分類に用いられているため、個人の能力と経験によるところが大きく、判定に個人差があり、定量的でないことなどが問題点である<sup>1), 2)</sup>。そこで、著者らはマイクロフォン等を使ってハンマーの打診音波形（音圧の時刻歴変化）を測定し、その波形の形状や振動数特性を分析することで、岩石や岩盤の力学的性質や物性値を定量的に評価することを試みている<sup>3)</sup>。

本研究は、その基礎的研究として人工的に製作した模擬岩石を対象に、材質と物性、形状・寸法、境界条件、打診位置および打診面の形状等が異なる種々の供試体を打診したときの音を分析し、これらの諸条件に依存した打診音の特徴を明らかにするとともに、岩盤分類の要素である岩石自体の強度ならびに変形性に関する定量的な評価指標の一つとして「応答音圧パルス勾配法」を提案するものである。

## 2. 「応答音圧パルス勾配法」の概要

### (1) 衝突音、打診音および打撃音に関する既往の研究

衝突や打診、打撃によって発生する音すなわち衝突音、打診音および打撃音に関する工学的研究は、機械工学、土木、建築工学、木材の品質管理の各分野にみられる。

機械工学の分野では衝突に起因する雑音の除去や制御を行うことを目的としてこれまで多くの研究が発表されている<sup>④～⑯</sup>。時田<sup>④,⑯</sup>は自由支持の鉄板、硝子板、ゴム板に自由支持の種々の直径の鋼球およびゴム球を衝突させ、反衝突側の音圧と板の振動加速度を測定し、板の材料や衝突物の剛性によって振動や音の応答が異なること、振動の加速度と音圧の対応は比較的大きいこと等を見出した。

西村、高橋<sup>⑥,⑯</sup>は自由支持の鋼球同士の衝突音と接触時間を測定し、鋼球の衝突音はパルス音であって、パルスピーカーの大きさは鋼球の衝突による接触点の変形と、それに伴う重心の運動によって説明でき、重心の加速度に比例することを見出した。

富田、堀内<sup>⑮</sup>は自由支持の鋼球同士の衝突音と接触時間を測定し、西村<sup>⑥,⑯</sup>のモデルを拡張した。中川他<sup>⑯</sup>らは自由支持の円形鋼板に自由支持の鋼球を衝突させ、反衝突側で板の変位と加速度、衝突側で音圧を測定し、衝突音の遷移挙動を調べ高次のモードにおいて指向性があることを見出した。また五十嵐らは球と平板が衝突する場合の衝突音について一連の研究<sup>⑩～⑯,⑯</sup>を行った。第1報<sup>⑯</sup>、第2報<sup>⑯</sup>では自由支持された鋼板に自由支持された材質の異なる球（ナイロン、ゴム、プラスチック、鋼）を衝突させ、反衝突側の音圧、接触力、平板の反衝突側での振動加速度を測定し、衝突音は初めのパルス音とパルスに続く音より構成されること、すなわち衝突によって球と平板の間にパルス状の接触力が働いて、平板が板の面に対して垂直方向に瞬間に変形するためにパルス音が発生し、この後に平板の自由振動が励振され、この平板の自由振動が空気中に放射されてパルスに続く音が発生する機構について考察した。続いて第3報<sup>⑯</sup>では、自由支持された材質の異なる平板（鋼、鋳鉄、アルミニウム）に前記の材質の異なる球を衝突させた場合に反衝突側で発生する平板の自由振動による音の減衰特性について考察した。第4報<sup>⑯</sup>では自由支持された鋼板と鋼製のブロックに前記の材質の異なる球を衝突させ、衝突側及び反衝突側の音圧、球の加速度、平板の反衝突側の加速度を測定し、衝突側においても衝突音は初めのパルス音とパルスに続く音より構成されることや、初めのパルス音についてWood、Byrneの理論式<sup>⑯</sup>を用いて考察した。さらに第

5報<sup>⑯</sup>では境界条件の異なる（自由端、4点支持端、固定端の3種類）鋼板に前記の材質の異なる球を衝突させ、反衝突側の音圧、接触力、接触時間測定し、初めのパルス音は境界条件の影響を殆ど受けず、パルスに続く平板の自由振動による音は平板の境界条件の影響を大きく受けること等を見いたした。このように機械工学の分野では、文献<sup>⑨,⑯</sup>を除いた多くの研究において反衝突側での衝突音を対象にしている。また衝突音を分析することで被衝突体の力学的性質や物性値を評価する内容の研究は見あたらない。

土木、建築工学の分野ではコンクリート構造物や鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験への適用を目的として、ハンマーで打撃した被打撃物の自由振動によって発生する音圧波形を分析する研究が発表されている。安藤<sup>⑯</sup>、原田他<sup>⑰</sup>、大岸他<sup>⑱</sup>らは建築物のタイルの剥離診断に関するもの、藤原他<sup>⑲</sup>はトンネル覆工背面の空洞や材質劣化の診断に関する研究を発表している。伊藤、魚本らはコンクリート構造物の打撃音の発生機構を明らかにし、これを利用した非破壊試験測定システムの構築を目指して例えれば<sup>⑲～⑳</sup>の一連の研究を行っている。このように土木工学の分野では、パルスに続く音を対象にした研究が行われている。

木材の品質管理の分野では丸太や角材を等級区分することを目的として、丸太や角材の一端面をハンマーで打撃し、この縦振動によって発生する音圧波形を分析する研究が発表されている。例えば、荒武他<sup>㉑～㉓</sup>は榼積み状態の丸太や棟積み状態の角材の高次固有振動数から、木材の曲げ強度や静的曲げヤング係数を推定し得ることや、丸太や角材の含水率や水分変動の傾向が一定の精度で把握できることを見いたした。さらに高次固有振動数に対して一定の計測精度が保証される「丸太径や角材辺長に対する材長の割合のしきい値」を検討し、木材の品質管理において実用化したシステムを開発した。このようにこの分野においてもパルスに続く音を対象にした研究が行われている。

### (2) 打診音発生機構と応答音圧パルス勾配の定義

岩盤や岩石等をハンマーで打診したときに生じる音の発生機構は図-1の打診音の発生概念図と、図-2の打診音の例（寸法が30×30×20cmのモルタルブロック供試体に鋼球を落下させたときに発生した打診音圧波）に示すように、ハンマーと被打診物の衝突時の急激な変形による音（パルス音）と、その後のハンマーと被打診物の各々に生じる自由振動や内部の共振による音（パルスに続く音）に分類できる<sup>㉔</sup>。前者（パルス音）の成分は被打診物の材料特性（力学的性質と物性値）を主に反映し、後者（パルスに続く音）の成分は両者の材

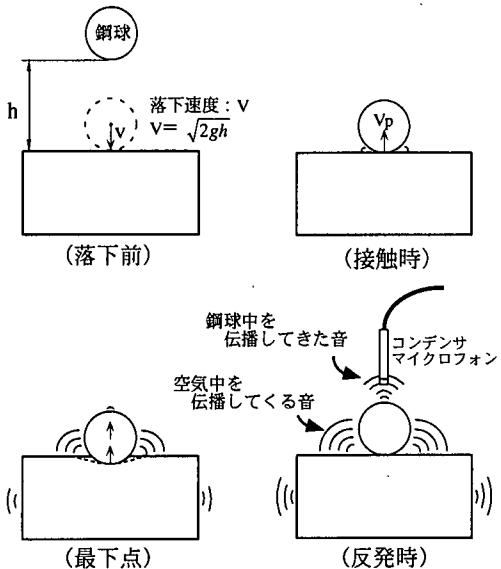


図-1 打診音の発生概念図

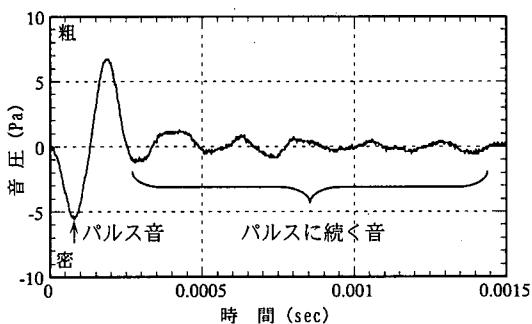


図-2 パルス音とパルスに続く音

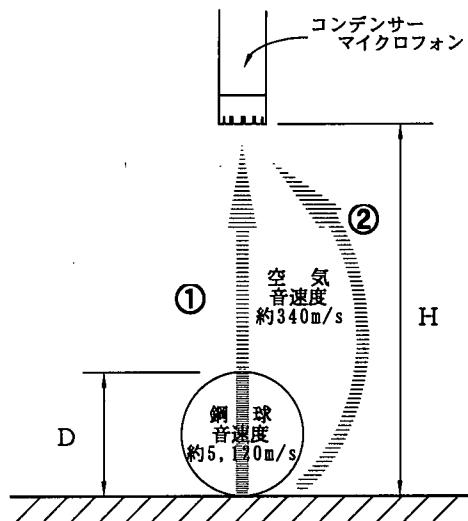


図-3 打診音の伝播経路図

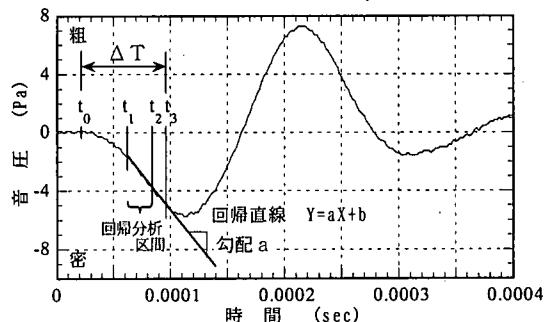


図-4 応答音圧パルス勾配の回帰分析区間

料特性に加えてハンマーの形状・寸法や、被打診物の形状・寸法および境界条件等の物理特性に強く支配されるものと思われる。したがってコンクリート構造物や木材のように形状・寸法や境界条件が予め明確なものについては、パルスに続く音すなわち固体中を伝播する振動を分析することで、その固体全体の平均的な物性や状態等を評価することが可能であろう。一方、岩石では形状・寸法がまちまちであり、岩盤では半無限状態に拡がり、さらに境界条件はまちまちで不明確である。このようなことを考慮すると、「パルス音すなわち衝突時の変形によって発生した音圧」を分析することで打診位置近傍の物性や状態等を評価することが重要と思われる。

予備実験を繰り返す中で、被打診物の材料特性は主に音圧波形の初期の部分に反映されていることが考え

られたので、パルス音の中でも特に音圧波の立ち上がりの勾配（音圧の時間的変化に相当する）に着目した。いま、初期の打診音がマイクロフォンに伝播するまでの伝播経路を考えると、図-3に示すように①の鋼球中を通して空気中を伝播してくる音と②の空気中のみを伝播してくる音の2通りが考えられる。この経路の違いによって生じる到達時間差： $\Delta T$ は式(1)で計算され、この時間帯には最初に鋼球中を通して伝播してきた音のみが存在する。すなわち、この時間帯には空気の音速度（約340m/s）と鋼球の音速度（約5,120m/s）の違いから打診直後に鋼球中を最初に伝播してくる「被打診物の材料特性を含んだ音圧」が現れていると考えられる。また種々の音圧波形の立ち上がりの部分を見ると、図-4の例に示すように到達時間差： $\Delta T$ の間において音圧は曲線的な変化から直線的な変化に移行することが認め

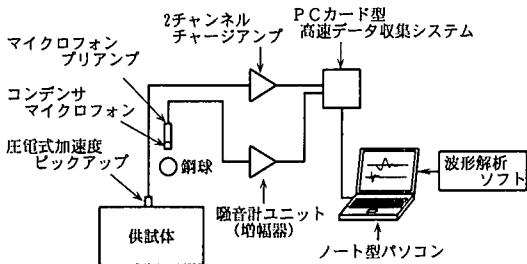


図-5 測定装置ブロックダイヤグラム

られたので、今回の解析ではこの直線的に変化する音圧の勾配に着目した。ここで、図-4に示すように音圧波形の立ち上がり部分の一定時間( $t_1 \sim t_2$ 間)において、回帰分析した回帰直線の勾配の値を「応答音圧パルス勾配」と定義する。

$$\Delta T = \frac{H}{C_A} - \left( \frac{D}{C_s} + \frac{H-D}{C_A} \right) \quad (1)$$

ここに、  
 $C_A$  空気の音速度（約340m/s）  
 $C_s$  鋼球の音速度（約5,120m/s）  
 $H$  マイクの高さ（80mm）  
 $D$  鋼球の直径  
 $\frac{H}{C_A}$  : 経路②での伝播時間  
 $\left( \frac{D}{C_s} + \frac{H-D}{C_A} \right)$  : 経路①での伝播時間

その求め方は次の通りである。

- ①  $t_0$ は音圧波の立ち上がりの時間で、これを原点とする。
- ②  $t_1$ は式(1)から計算される時間差： $\Delta T$ で、例えば鋼球の直径：Dが27mmの場合では、 $t_1=0.074ms$ となる。
- ③  $t_0$ は自測で決定しているため、真値に対して誤差を含んでいる場合もある。この影響を除去するためには、 $t_1$ から任意の時間:0.014msを差し引いた時刻 $t_1=0.06ms$ から原点側に0.02msもどった時刻 $t_1=0.04ms$ の0.02ms間の11ヶのデータを用いて回帰分析を行う。  
 (データのサンプリング間隔:0.002ms)

④ 回帰分析の相関係数値から分析区間は直線的な変化であることを確認する。

また、打診音初期の伝播機構を確認する目的で実施した実験の結果と考察を付録に記す。

### 3. 実験

#### (1) 実験概要

本研究では、予備実験をふまえてまず基礎実験を行った。実験では材質と物性の異なる模擬岩石を人工的に製作し、これらの打診音試験から「被打診物の材料特性（力学的性質と物性値）または打診音の特性」と相関の高い指標として「応答音圧パルス勾配」を見出した<sup>3,4</sup>。

次に、被打診物の形状・寸法や境界条件および打診位置等の変化が、「被打診物の材料特性または打診音の特性」と「応答音圧パルス勾配」との相関に及ぼす影響について調べた<sup>3,4</sup>。さらに、実際の岩石や岩盤の打診面の形状（凹凸の状態）を想定して、打診面の形状が「応答音圧パルス勾配」に及ぼす影響について調べた。

なお、これらの実験は各々異なった時期に実施しているため、各実験で円柱状供試体を用いて材令28日での力学的性質と物性値を調べた。以下に、基本的な実験方法と各々の実験内容について述べる。

#### (2) 実験方法

実験では材質と物性、形状・寸法、境界条件、打診位置および打診面の形状等が異なる種々の供試体を打診し、所定の位置での音圧の時刻歴や供試体表面での上下方向振動加速度の時刻歴を測定した。打診は各供試体のほぼ中央部付近に鉛直上方から電磁石を用いて鋼球を自由落下させて行った。打診音は鋼球の直上に設置したコンデンサマイクロフォン（リオン株式会社製、UC-30型）を用いて測定した。このときの供試体表面からマイクロフォンまでの距離は80mmとした。また供試体の上下方向振動加速度は打診点から30mm離れた位置で圧電式加速度ピックアップ（リオン株式会社製、PV-90B）を用いて測定した。これらの測定結果は、データ間隔0.002msでノート型パソコンにデジタル化として記録し解析に用いた。これらの機器の構成は図-5の測定装置ブロックダイヤグラムに示す。

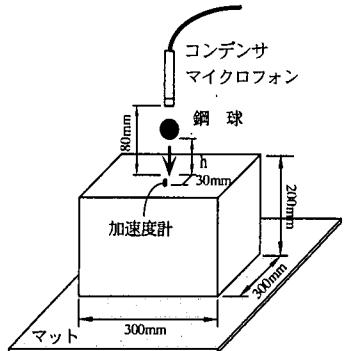


図-6 実験概念図

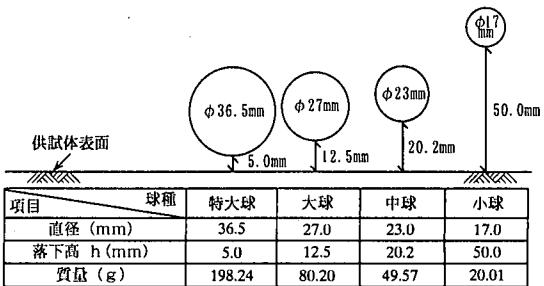


図-7 実験に用いた4種類の鋼球と落下高さ

表-1 供試体の示方配合

材質	供試体No.	水セメント比 W/C	砂セメント比 S/C	ペントナイトセメント比 B/C	セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )	混和材 (kg/m <sup>3</sup> )
セメントモルタル	M-1	2.00	8.00	—	201.0	—	201.0***
	M-2	2.00	6.00	—	170.1	—	170.1***
	M-3	0.65	4.00	—	391.3	—	—
	M-4	0.65	3.00	—	448.0	—	—
	M-5	0.50	1.80	—	630.0	—	—
	M-6	0.40	1.60	—	713.0	—	—
	M-7	0.32	1.42	—	740.0	7.4*	148.0**
セメントナイトモルタル	B-1	3.85	—	0.300	233.0	—	—
	B-2	2.78	—	0.223	314.0	—	—
	B-3	2.00	—	0.167	420.0	—	—
	B-4	1.52	—	0.132	530.0	—	—
	B-5	1.18	—	0.108	650.0	—	—
	B-6	0.89	—	0.088	800.0	—	—
	B-7	0.65	—	0.070	1000.0	—	—

セメント：早強性ポルトランドセメント \*：減水剤， \*\*：シリカフューム， \*\*\*：炭酸カルシウム

表-2 材令 28 日での供試体の力学的性質と物性値

材質	供試体 No.	密 度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	維波伝播速度 $V_p$ (m/s)	一軸圧縮強さ $q_u$ (MPa)	弾性係数 $E$ (MPa)
セメントモルタル	M-1	1.92	2650	7.389	6860
	M-2	1.91	2430	4.371	5674
	M-3	2.02	3180	24.206	13230
	M-4	2.07	3570	25.088	17440
	M-5	2.13	3760	41.258	21850
	M-6	2.16	4050	47.530	23810
	M-7	2.04	3890	49.588	23520
セメントモルタル	B-1	1.14	507	0.163	92
	B-2	1.05	746	0.562	300
	B-3	1.27	1300	1.480	989
	B-4	1.30	1660	4.145	1940
	B-5	1.39	2020	7.242	3352
	B-6	1.53	2490	14.798	5596
	B-7	1.72	3070	22.148	9898
物性値の範囲	1.05~2.16 (t/m <sup>3</sup> )	507~4050 (m/s)	0.163~ 49.588 (MPa)	92~ 23810 (MPa)	

### (3) 基礎実験

実験は図-6 に示すようにマット（厚さが 2mm の長繊維ポリエスチル不織布）の上に設置した 30×30×20cm の供試体を打診し、音圧の時刻歴と供試体表面での上

下方向振動加速度の時刻歴を同時に測定した。打診は供試体中央部付近に鉛直上方から、図-7 に示す 4 種類の鋼球を落させて行った。それぞれの落下高さについては、予備実験で運動量を一定にした実験とエネルギーを一定にした実験をしてみたが、特に有意性は見られなかったため、ここでは供試体に与えるエネルギーが一定になるように設定した。供試体には砂岩を模擬したものとしてセメントモルタル（C モルタル）の 7 種類と、泥岩を模擬したものとしてセメントペントナイトモルタル（CB モルタル）の 7 種類の合計 14 種類を製作し実験に供した。表-1 に各供試体の示方配合を、表-2 に同じ示方配合で製作した円柱状供試体から得られた材令 28 日での力学的性質と物性値を示す。ここに、弾性係数は一軸圧縮強さの 1/3 の応力状態での割線係数である。

### (4) 供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置の影響

基礎実験で用いた供試体は 30×30×20cm の板状供試体であったが、ここで用いた供試体の形状・寸法は、図-8 に示すように板状供試体の 3 種類、ボーリングコア状供試体の 3 種類、円柱状供試体、角柱状供試体の各 1 種類の合計 8 種類とした。

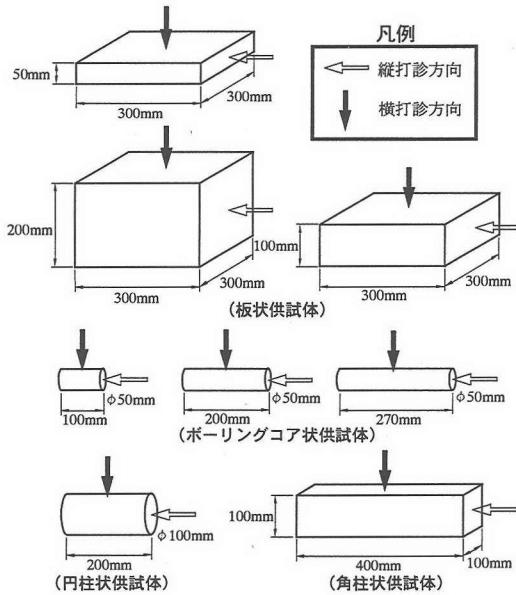


図-8 供試体の形状・寸法

表-3 材令 28 日での供試体の力学的性質と物性値（形状・寸法、境界条件、打診位置の影響実験）

供試体 No.	密度 $\rho$ ( $t/m^3$ )	縦波伝播速度 $V_p$ (m/s)	一軸圧縮強さ $q_u$ (MPa)	弾性係数 E (MPa)
M-2	1.88	2820	10.39	9496
M-5	2.08	3790	53.21	20380
B-4	1.07	1650	4.38	1725
B-7	1.64	3120	26.66	10290

また供試体の示方配合は表-1に示したM-2,M-5,B-4,B-7の4種類である。表-3に円柱状供試体から得られた材令28日での力学的性質と物性値を示す。

前節の基礎実験ではマット上に設置した状態で打診したが、ここでは図-9に示すように、この状態に加えて二点支持状態、砂土槽に埋め込んだ状態（土槽埋設）の3種類の境界条件を設定した。また、供試体の打診は基礎実験の結果において、各物性値と応答音圧パルス勾配の相関が高かった図-7に示す大球（直径27mm、落下高さ12.5mm）を用いて縦打診と横打診を行った。ここで、縦打診、横打診は図-8に示す打診方向である。

#### (5) 打診面形状の影響

実験では発泡スチロール化粧型枠を用いて、 $30 \times 30 \times 20$ cmの板状供試体の一面に凹凸面を人工的に製作した。凹凸面の形状は図-10に示すように凹凸面大と凹凸面小（カネパールサービス株式会社製、K010, K008）の2種類である。供試体の示方配合は表-1に示したM-2, M-5, B-4, B-7の4種類である。表-4に同じ示方配合で製作した円柱状供試体から得られた材令28日の力学

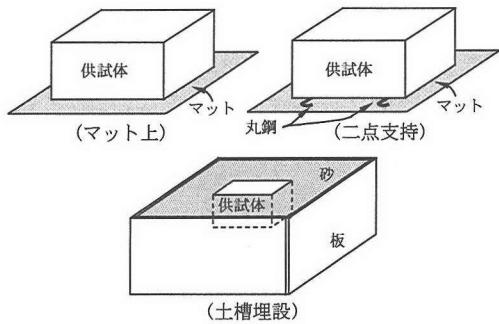


図-9 供試体の境界条件

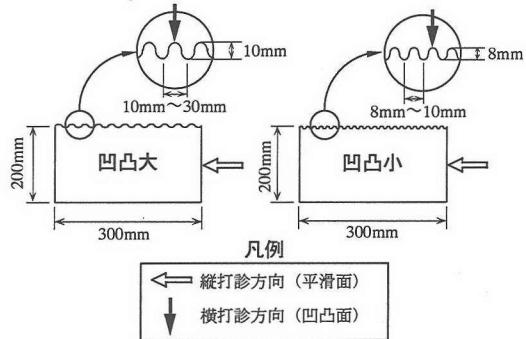


図-10 打診面の形状

表-4 材令28日での供試体の力学的性質と物性値（打診面形状の影響実験）

供試体 No.	密度 $\rho$ ( $t/m^3$ )	縦波伝播速度 $V_p$ (m/s)	一軸圧縮強さ $q_u$ (MPa)	弾性係数 E (MPa)
M-2	1.95	3020	11.76	11960
M-5	2.19	4230	55.17	28220
B-4	1.00	1810	5.51	2626
B-7	1.67	2990	24.40	7154

的性質と物性値を示す。また、供試体の打診は前節と同様に基礎実験の結果において、各物性値と応答音圧パルス勾配の相関が高かった図-7に示す大球（直径27mm、落下高さ12.5mm）を用いて縦打診と横打診を行った。ここで縦打診、横打診は図-10に示す打診方向で、凹凸面の打診は横打診に相当する。

## 4. 結果と考察

### (1) 原波形と周波数解析

#### a) 基礎実験

実験では14配合の供試体について図-7に示す4種類の鋼球を各10回づつ合計560( $14 \times 4 \times 10$ )回の打診を行った。これらの中から、物性値の異なる二つの供試体（示方配合M-7とB-4）の計測例とその解析例を選び、図-11（示方配合M-7）、図-12（示方配合B-4）に示す。

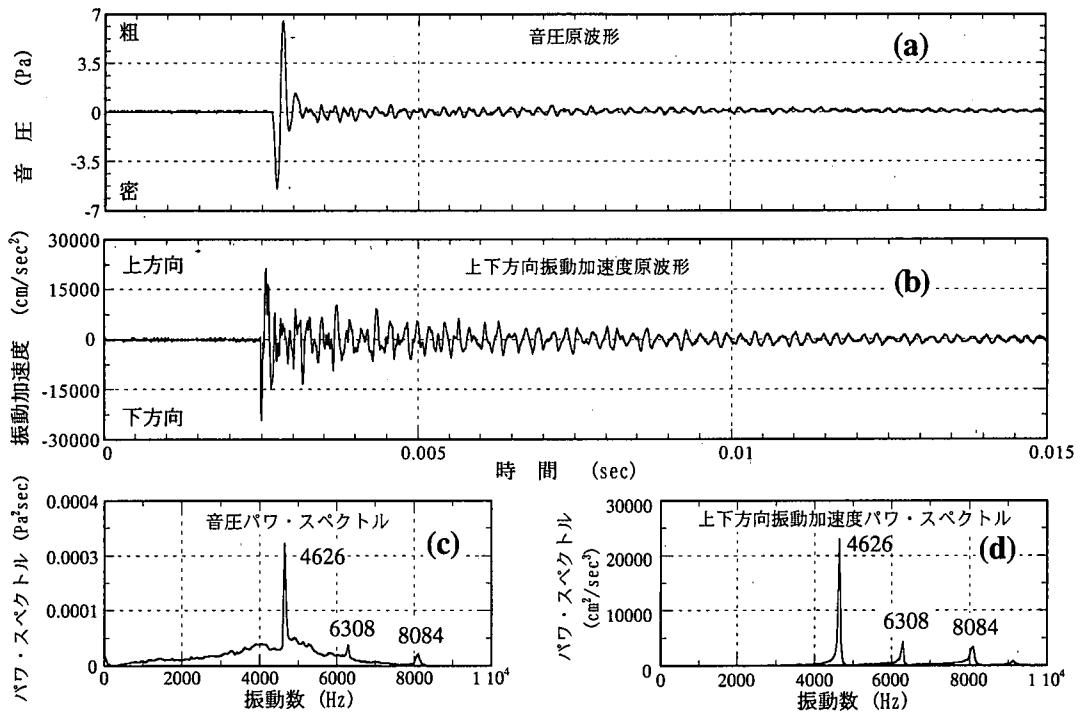


図-11 示方配合M-7供試体の音圧原波形と上下方向振動加速度原波形、およびその周波数解析結果

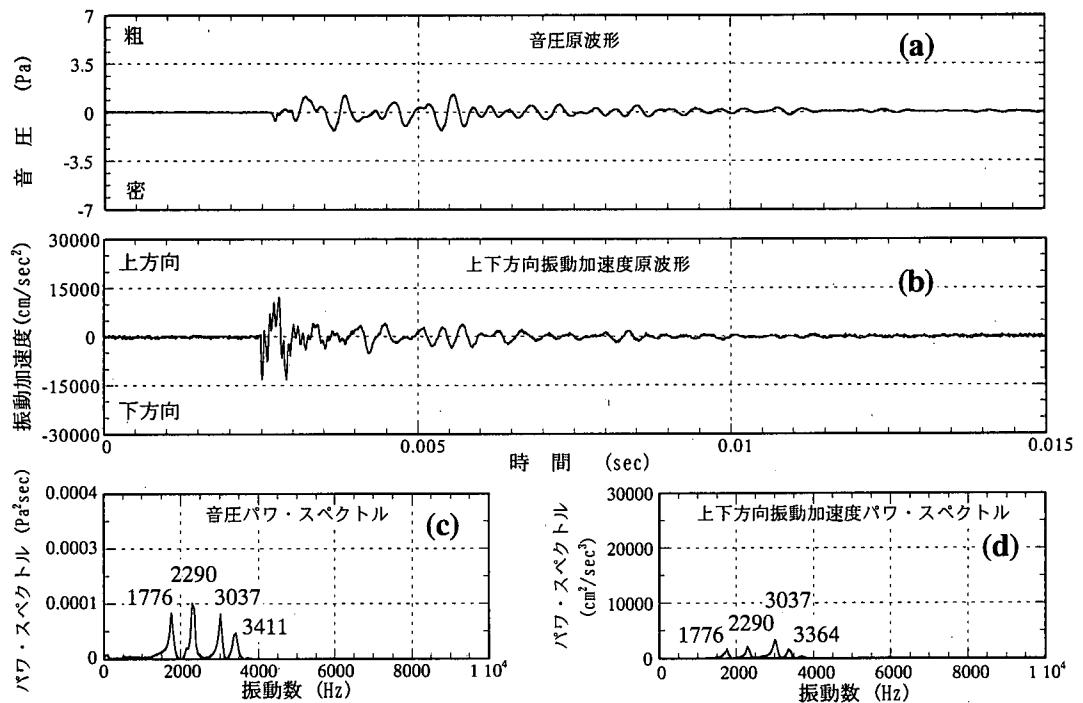


図-12 示方配合B-4供試体の音圧原波形と上下方向振動加速度原波形、およびその周波数解析結果

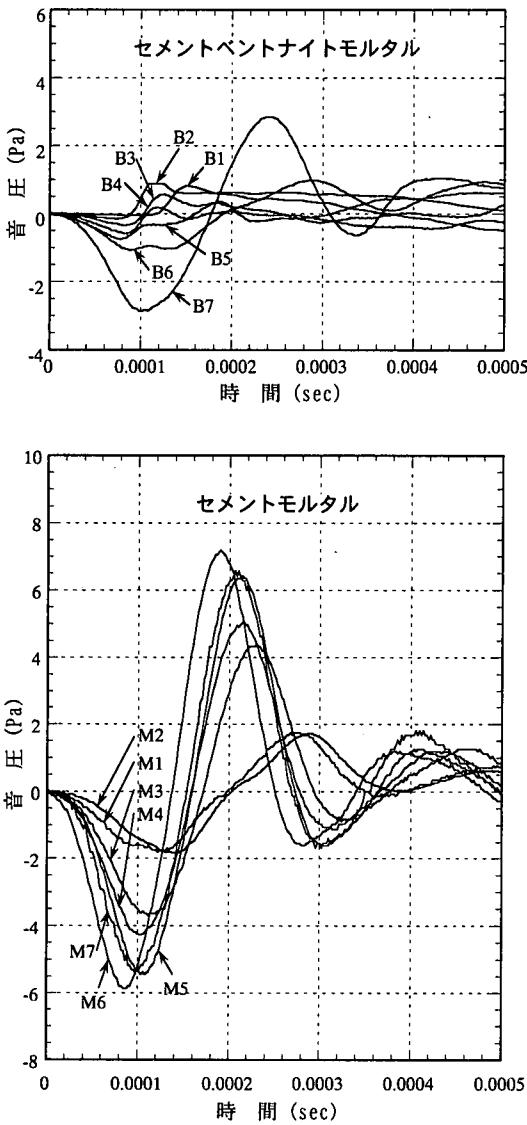


図-13 基礎実験での音圧原波形の初期部分の重ね合わせ

図中(a)は音圧原波形、(b)は供試体表面での上下方向振動加速度原波形、(c)は音圧原波形の周波数解析結果(パワ・スペクトル)、(d)は供試体表面での上下方向振動加速度原波形の周波数解析結果である。これらから両方の卓越振動数がほぼ一致していることや、原波形の後半部分では振動数においてよく一致していることが観察されることから、打診によって発生した供試体表面での上下方向の振動が音圧として伝播している様子がわかる。

また、セメントモルタルの7配合とセメントベントナイトモルタルの7配合の合計14ケースの音圧原波形の初期の部分を拡大して重ねた例を図-13に示す。これらから、

表-5 形状寸法、境界条件、打診位置の影響を調べた  
38 ケースの打診実験の内容

形状	実験ケース	寸法	境界条件	打診位置
ボーリング コア状	15	Φ5cm×10cm	マット上	縦・横打診
		Φ5cm×20cm	二点支持	横打診
		Φ5cm×27cm	土槽埋設	縦・横打診
板状	15	30×30×5cm	マット上	縦・横打診
		30×30×10cm	二点支持	横打診
		30×30×20cm	土槽埋設	縦・横打診
角柱状	5	10×10×40cm	マット上	縦・横打診
		二点支持	横打診	
		土槽埋設	縦・横打診	
円柱状	3	Φ10cm×20cm	マット上	縦・横打診
		二点支持	横打診	

初期の音圧原波形の中でも特に立ち上がりの勾配には物性値の違いが現れていることがわかる。

#### b) 供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置の影響

実験では基礎実験で用いた14配合の中から4配合を選択し、各配合において表-5に示す条件(38ケース)で合計152(4×38)ケースの打診試験を行った。供試体の打診は図-7に示す大球を用いて各10回ずつ合計1520(152×10)回行った。これらの中の例として示方配合がB-7のときの音圧原波形とその周波数解析結果(パワ・スペクトル)を図-14に示す。また、示方配合M-5とB-7のケースにおいて供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置をパラメータとして、音圧原波形の初期の部分を各打診条件別にまとめたものを図-15に示す。これらから、供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置によって音圧原波形の後半部分の形状やその卓越振動数の値は大きく変化することがわかる。その一方で初期の音圧原波形の中でも特に立ち上がりの勾配は変化が少ないとわかる。

また、ボーリングコア状供試体の縦打診と横打診での応答音圧パルス勾配について比較した例を図-16に示す。このときの境界条件はマット上と土槽埋設の2種類である。図中の横軸は横打診の応答音圧パルス勾配を示し、縦軸は縦打診の応答音圧パルス勾配を示す。このように打診面がボーリングコア程度の曲面(Φ=50mm)においては、打診面が平坦な場合の応答音圧パルス勾配との相関が高く、しかも回帰直線の傾きは1.0に近いことから、ボーリングコア程度の曲面では平坦面の場合と同等の応答音圧パルス勾配を示し、差が見られないと言えよう。

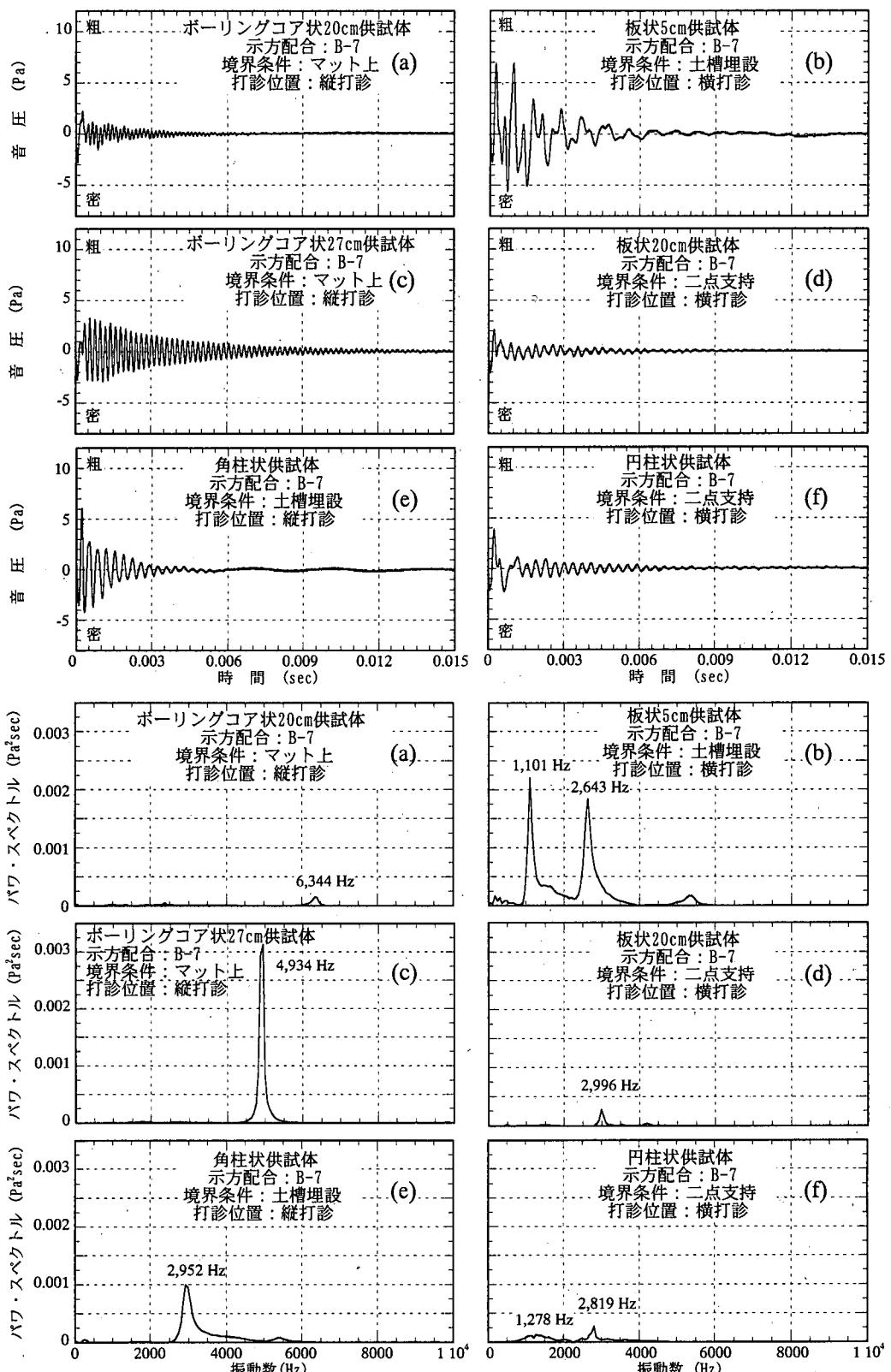


図-14 示方配合 B-7 供試体の音圧原波形とその周波数解析結果（パワ・スペクトル）

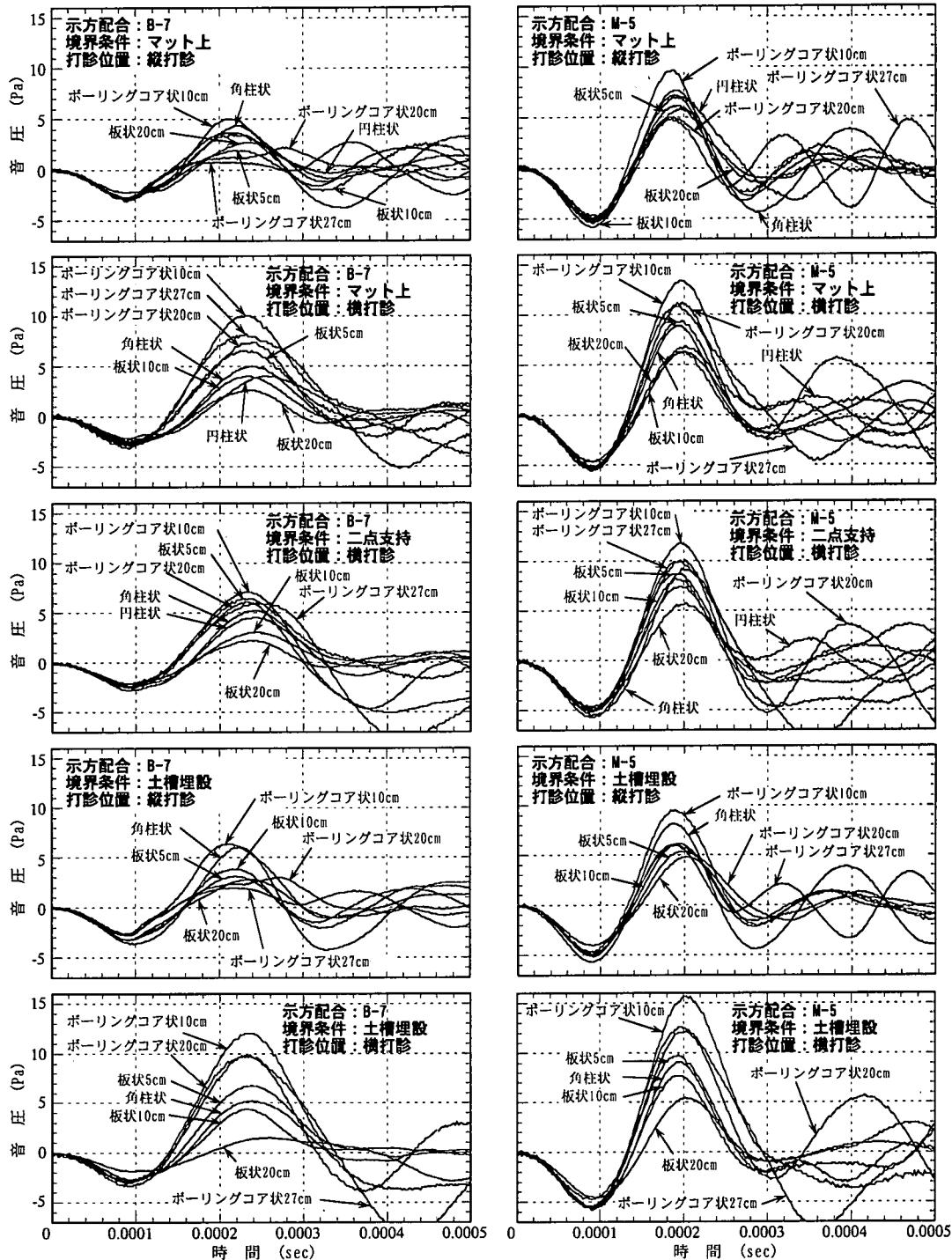


図-15 音圧原波形の初期部分の重ね合わせ（示方配合 B-7, M-5）

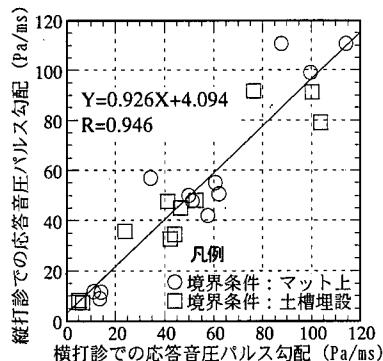
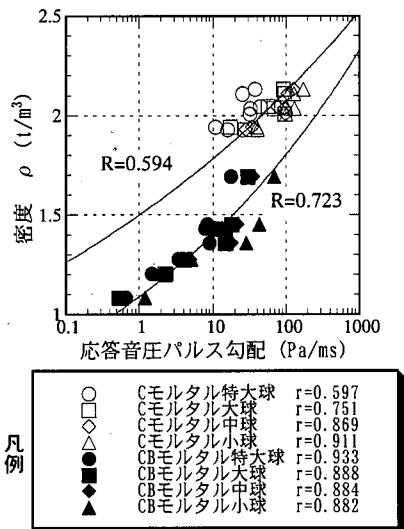


図-16 ポーリングコア状供試体の縦・横打診の比較例

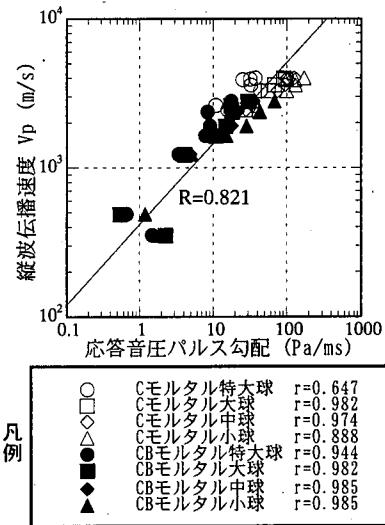


(1) 応答音圧パルス勾配と密度との関係

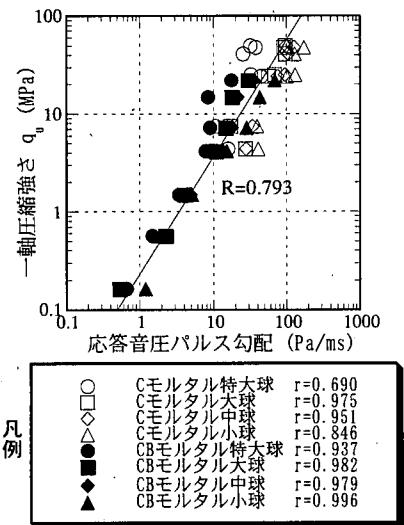
## (2) 応答音圧パルス勾配と物性値の相関関係

### a) 基礎実験

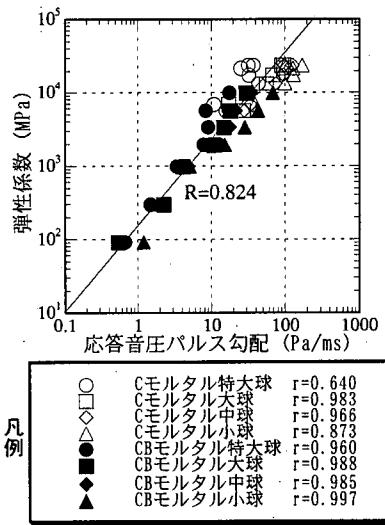
応答音圧パルス勾配と供試体の物性値（密度、縦波伝播速度、一軸圧縮強さ、弾性係数）の相関関係を調べる目的で、横軸に応答音圧パルス勾配（10回の打診の平均値）をとり、縦軸に各物性値をとって整理したものを図-17に示す。図中の白抜きの記号はセメントモルタルを示し、黒塗りの記号はセメントベントナイトモルタルを示す。また図中のrは供試体の材質と鋼球の種類別に求めた相関係数を示し、Rは全体の相関係数を示す。このように相間に程度の差はあるものの、特に弾性係数、縦波伝播速度、一軸圧縮強さでは相関



(2) 応答音圧パルス勾配と縦波伝播速度との関係

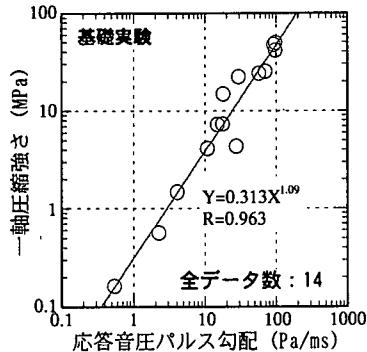


(3) 応答音圧パルス勾配と一軸圧縮強さとの関係

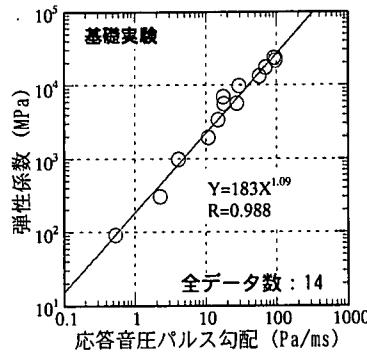


(4) 応答音圧パルス勾配と弾性係数との関係

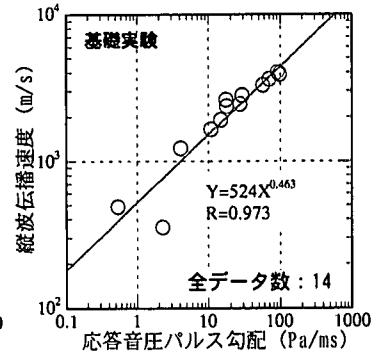
図-17 応答音圧パルス勾配と物性値の関係



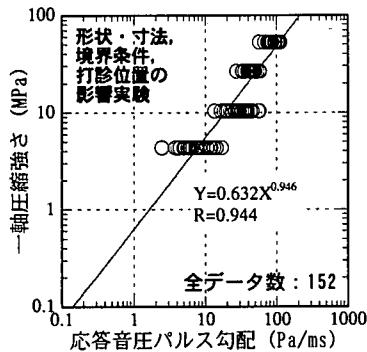
(1) 基礎実験



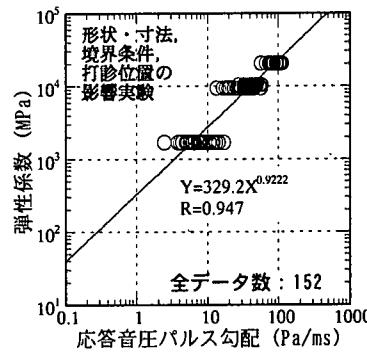
(1) 基礎実験



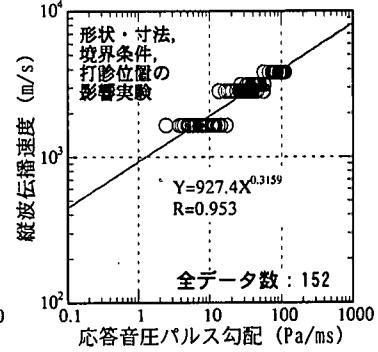
(1) 基礎実験



(2) 形状・寸法、境界条件、打診位置の影響実験



(2) 形状・寸法、境界条件、打診位置の影響実験



(2) 形状・寸法、境界条件、打診位置の影響実験

図-18 応答音圧パルス勾配と一軸圧縮強さとの関係

図-19 応答音圧パルス勾配と弾性係数との関係

図-20 応答音圧パルス勾配と縦波伝播速度との関係

が高いと言える。また供試体と鋼球の種類別に整理して相関を見ると、さらに高い相関が得られる。この理由としては、鋼球の違い（直径や質量）によって鋼球と供試体の接触面積や接触応力等が異なり、これらと音圧の発生が複雑に関連しているためと推測される。これらの点については、今後の研究課題として取り組んでいきたい。また実際の適用に際しては鋼球の種類を統一することが望ましいと考える。しかしながら、「応答音圧パルス勾配」は「セメントモルタルやセメントペントナイトモルタルのような材料の物性値を評価する指標」の一つになり得るものと考えられる。

#### b) 供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置の影響

前項a)では応答音圧パルス勾配と供試体の物性値に高い相関が示されたが、ここでは供試体の形状寸法、境界条件、打診位置が変化することでこれらの相間に及ぼす影響を調べ、特に相間の高い弾性係数、一軸圧縮強さ、縦波伝播速度について考察する。前項a)で示した図-17の中で相対的に相間の高い大球を使った実験結果を取り出して、図-18、図-19、図-20の上段(1)に示す。また、4.(1).b)項で大球を使った実験から求

めた応答音圧パルス勾配と供試体の物性値の相関関係を整理して、図-18、図-19、図-20の下段(2)に示す。これらを比較してみると、供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置をパラメータにした実験結果においても、これらの条件が同一である実験結果と同様に応答音圧パルス勾配と物性値との相間は高い。また、回帰式には大きな違いが見られないことからも、「応答音圧パルス勾配を評価指標とする打診音試験」は「材料の非破壊試験方法」として有用性があるものと考える。

#### c) 打診面形状の影響

前項までに、被打診物の材料特性を評価できる指標として「応答音圧パルス勾配法」の工学的有用性を述べた。そこで、本項では実際の岩石や岩盤の打診面の形状（凹凸の状態）を想定して多少極端ではあるが、発泡スチロール化粧型枠を用いて、 $30 \times 30 \times 20\text{cm}$  の板状供試体の一面に凹凸面を人工的に製作し、この凹凸面と平滑面（側面）の打診音における応答音圧パルス勾配を比較した。その結果として、縦軸に凹凸面打診の応答音圧パルス勾配をとり、横軸に平滑面（側面）打診の応答音圧パルス勾配をとって整理したものを

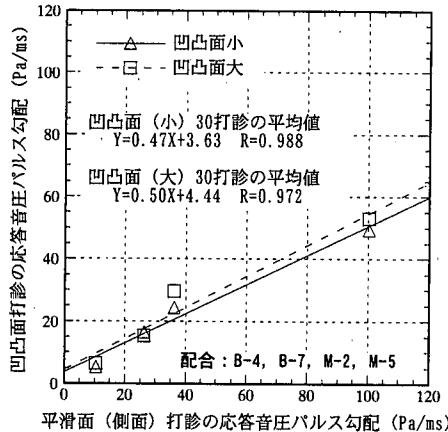


図-21 凹凸面打診と平滑面（側面）打診の応答音圧パルス勾配の関係

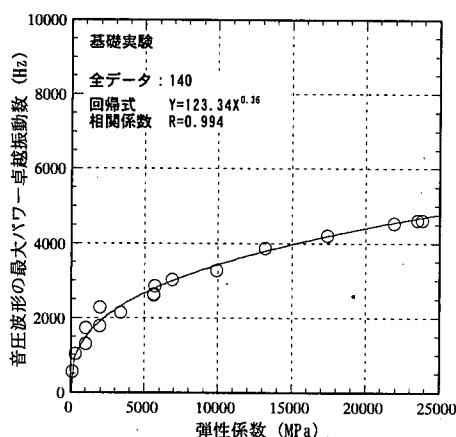
図-21に示す。

両者の関係から凹凸面打診の応答音圧パルス勾配は平滑面（側面）打診の応答音圧パルス勾配の約50%の値になり、凹凸の影響が顕著に見られる。このようのことから、凹凸の著しい打診面についてはある程度平滑に整形する必要があるといえる。

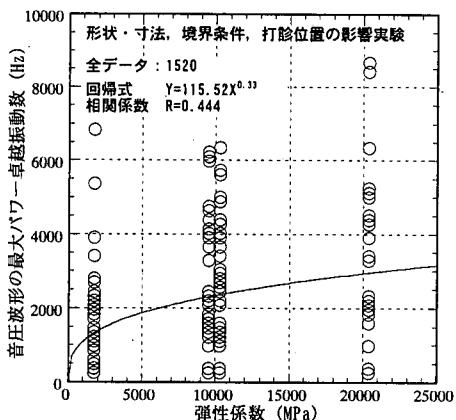
### (3) 弾性係数または応答音圧パルス勾配と打診音の卓越振動数の相関関係

#### a) 基礎実験

図-7に示す大球を使った実験から得られた140個の音圧原波形について周波数解析を行って最もパワーの大きな卓越振動数と、弾性係数または応答音圧パルス勾配の相関関係を整理し図-22、図-23の上段(1)に示す。

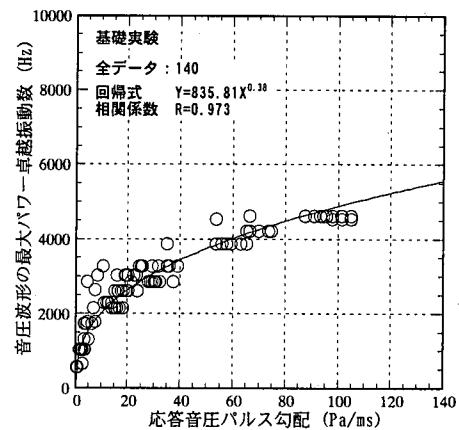


(1) 基礎実験

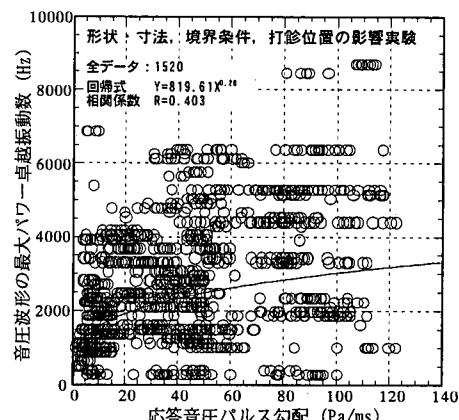


(2) 形状・寸法、境界条件、打診位置の影響実験

図-22 音圧原波形の最大パワー卓越振動数と弾性係数との関係



(1) 基礎実験



(2) 形状・寸法、境界条件、打診位置の影響実験

図-23 音圧原波形の最大パワー卓越振動数と応答音圧パルス勾配の関係

これらの関係より形状・寸法や境界条件を同一にした供試体においては、その打診音の卓越振動数と弾性係数には高い相関があることがわかる。具体的には、打診音の卓越振動数が高くなると、弾性係数の値も大きくなり、我々の耳で聞いている音の特性がよく現れていると言える。一方、応答音圧パルス勾配においても弾性係数と同様に打診音の卓越振動数と高い相関があることがわかった。したがって、形状・寸法や境界条件を同一にした供試体において、「応答音圧パルス勾配」は「打診音全体の振動数特性を表現する指標」の一つになるものと言える。

#### b) 供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置の影響

前項 a) では打診音の卓越振動数と弾性係数または応答音圧パルス勾配に高い相関が示されたが、ここでは供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置が変化することでこれらの相間に及ぼす影響を調べ考察する。

4. (1), b) 項で大球を使った実験から得られた 1520 個の音圧原波形について周波数解析を行って最もパワーの大きい卓越振動数と弾性係数または応答音圧パルス勾配の相関関係を整理し、図-22、図-23 の下段(2)に示す。

これらを比較してみると、供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置等の諸条件が変化する場合には、前項 a) で述べたようなこれらの条件が同一の場合とは著しく異なって、打診音の卓越振動数と弾性係数または応答音圧パルス勾配のあいだでは相関性が低いと言える。前項の結果とこのことから、同一の力学的性質や物性値をもった供試体においても、その形状・寸法、境界条件、打診位置等の諸条件によって、打診音全体の振動数特性は著しく変化することがわかる。したがって、ハンマーの打診によって岩石や岩盤の力学的性質や物性値を評価する際には、打診音のみでなく、その手応えや破面を観察することによって判断することが大切である。

## 5. まとめ

著者らは、岩盤分類の要素の一つである「ハンマー打診による判定」の定量的評価を目的とした研究を進めている<sup>3,33~35</sup>。本研究では、その基礎的研究として人工的に製作した模擬岩石を対象に種々の打診音実験を実施し、ハンマーの打診音について主に音圧波形の立ち上がりの部分に着目した分析を行った。これらの考察の結果、岩石や岩盤といった材料の力学的性質や物性値を定量的に評価できる指標として「応答音圧パルス勾配法」を提案する。ハンマーと被打診物の接触の問題、Boussinesq の問題、半無限弾性体の点振源と

しての Lamb の問題、供試体の形状・寸法や境界条件の問題等が複雑に関連しているため、音圧波形の全体にわたって詳細に分析するには至らないが、主として音圧波形の立ち上がりの部分を分析することで得られた知見を本論文の結論として以下に記す。

- ① 打診による供試体表面での上下方向の振動が音圧として伝播する。その音圧波形の中でも特に立ち上がりの勾配には供試体の力学的性質と物性値の違いが現れている。
- ② 同一の力学的性質や物性値をもつ供試体においても、供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置等の諸条件によって、打診音圧波形の後半部分の形状が変化するとともに、打診音全体の卓越振動数の値も変化する。その一方で、初期の音圧波形の中でも特に立ち上がりの勾配には変化が見られない。
- ③ 応答音圧パルス勾配と供試体の物性値（密度、縦波伝播速度、一軸圧縮強さ、弾性係数）の相関関係には、程度の差はあるものの、特に弾性係数、縦波伝播速度、一軸圧縮強さでは相関が高い。
- ④ 応答音圧パルス勾配と供試体の物性値の相関関係には、供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置等の影響は見られず、その相関は高い。したがって、「応答音圧パルス勾配を評価指標とする打診音試験」は「岩石や岩盤といった材料の非破壊試験方法」として有用性が高い。
- ⑤ 打診面の凹凸が著しい場合においては応答音圧パルス勾配にその影響が顕著に現れる。このため、打診面はある程度の平滑度を要する。
- ⑥ ポーリングコア程度の曲面（Φ=50mm）においては、平坦面の場合と同等の応答音圧パルス勾配を示し、差が見られない。
- ⑦ 同一の力学的性質や物性値をもつ供試体においても、供試体の形状・寸法、境界条件、打診位置等の諸条件によって打診音全体の振動数特性は著しく変化する。したがって、ハンマーの打診によって岩石や岩盤の力学的性質や物性値を評価する際には、打診音のみでなく、その手応えや破面を観察することによって判断することが大切である。

これらは、あくまでも人工的に製作した模擬岩石を対象にした実験から得られた結論であって、実際の岩石や岩盤にそのまま適用できるものではない。しかしながら、本研究の内容は、セメントモルタルまたはセメントベントナイトモルタルで製作した模擬岩石の力学的性質や物性値を定量的に評価できる一面を把握しているものと思われる。したがって、「応答音圧パルス

勾配法」は岩盤分類において重要な地質要因である①構成岩石の性質(岩石自体の強度および変形性など), ②不連続面の性質(岩盤中に分布する割れ目の状態など)のうち, ②に関する定量的指標になり得るものと思われる。現在著者らは岩種の異なるボーリングコアを対象に上記①の定量的指標として応答音圧パルス勾配, 上記②の定量的指標として RQD を用いて, これらの指標と, 「ボーリングコアを対象に地質調査の専門家が判定した岩盤分類の結果」ならびに「ボーリングコアの力学的性質と物性値」などとの関連性について検討を進めている。これらの検討結果については別機会に報告していきたい。

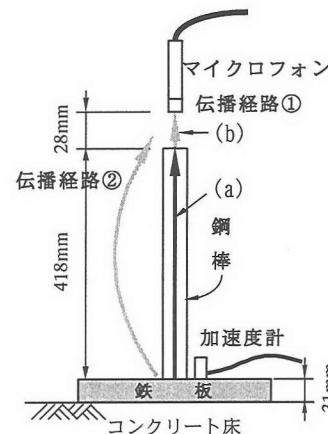
今後は、任意方向の打診が可能な装置の開発や例えば岩盤の耐荷性や工事の施工性に関する評価が定量的で簡易に行える自動計測システムを構築していくとともに、実際の岩石、岩盤、ボーリングコアなどを対象に実験データを収集することによって、本指標の工学的有用性をさらに検討していく予定である。

**謝辞:** 本研究を行うにあたり、(株) 国土開発コンサルタント 倉永輝雄氏、宍戸地質研究所 宍戸章氏には貴重なご助言を頂きました。  
ここに感謝の意を表します。

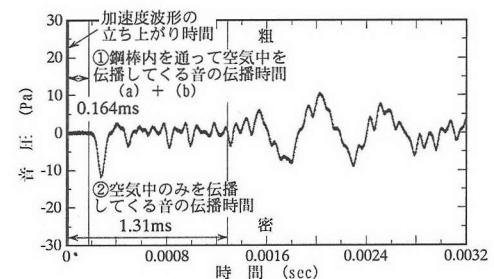
## 付録

### 打診音初期の伝播機構の確認実験

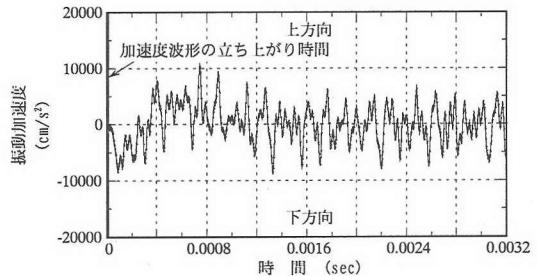
2章(2)節で述べた打診音初期の伝播機構を確認する目的で、長さ 418mm の鋼棒を用いた確認実験を行った。その結果を用いて、伝播経路が異なる場合の伝播時間について考察する。実験では付図-1 に示すように、まず厚さ 31mm の鉄板に上下方向振動加速度計を取り付け、コンクリート床上に設置した。次に鋼棒の鉛直上方にマイクロフォンを設置し、任意の高さから鋼棒を落下させ、鉄板上面の上下方向加速度の時刻歴と音圧の時刻歴を同時に測定した。その一例を付図-2、付図-3 に示し、図中に伝播経路が異なる場合(経路①: 鋼棒内を通って空気中を伝播してくる音、経路②: 空気中のみを伝播してくる音)の理論上の伝播時間を示す。またここで打診時刻は上下方向振動加速度波形の立ち上がりの時刻とした。この結果から、鋼棒内を通って空気中を伝播してくる音の理論上の到達時刻が音圧波形の立ち上がりの時刻にほぼ一致することや、空気中のみを伝播してくる音の理論上の到達時刻直後から音圧波形に変化が見られること、具体的には相対的に周期の長い成分が現れることからも、2章(2)節



付図-1 実験概要および経路



付図-2 音圧原波形



付図-3 上下方向振動加速度原波形

で述べた打診音初期の伝播機構の妥当性が示される。

① 鋼棒内を通って伝播してくる音の伝播時間

(a) 鋼棒内伝播時間

$$\frac{41.8(\text{cm})}{512,000(\text{cm/s})} \approx 0.0816\text{ms}$$

(b) 空気内伝播時間

$$\frac{2.8(\text{cm})}{34,000(\text{cm/s})} \approx 0.0824\text{ms}$$

(a)+(b) ≈ 0.164ms

② 空気中のみを伝播してくる音の伝播時間

$$\frac{41.8 + 2.8(\text{cm})}{34,000(\text{cm/s})} \approx 1.31\text{ms}$$

## 参考文献

- 1) 吉中龍之進, 桜井春輔, 菊地宏吉編著: 岩盤分類とその適用, pp.1-142, 1988.
- 2) 土質工学会編: 岩の工学的性質と設計・施工への応用, pp.341-342, 1989.
- 3) 稲森光洋, 御手洗良夫, 船曳伸二, 瀬崎満弘: 岩盤分類の指標である「ハンマー打診音」の定量的評価方法に関する基礎的実験と考察, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.29, pp.236-240, 1999.
- 4) 時田保夫: 衝撃による振動と音響(Ⅰ), 日本音響学会誌, Vol.16, No.3, pp.170-177, 1960.
- 5) 時田保夫: 衝撃による振動と音響(Ⅱ), 日本音響学会誌, Vol.17, No.2, pp.116-122, 1961.
- 6) 西村源六郎, 高橋浩一: 鋼球の衝突音の研究, 精密機械, Vol.28, No.4, pp.220-230, 1962.
- 7) 西村源六郎, 高橋浩一: 玉軸受音, 精密機械, Vol.30, No.6, pp.475-489, 1964.
- 8) 富田豊, 堀内敏夫: 鋼球の衝突音, 日本音響学会誌, Vol.34, No.5, pp.318-322, 1978.
- 9) 中川紀寿, 川井良次, 中村典生: 機械の衝突音の研究(第1報, 円盤から発生する衝突音), 日本機械学会論文集C, Vol.51, No.467, pp.1786-1792, 1985.
- 10) 五十嵐昭男, 後藤誠, 川崎哲: 衝突音に関する研究(第1報, 平板に球が衝突する場合), 日本機械学会論文集C, Vol.50, No.453, pp.840-847, 1984.
- 11) 五十嵐昭男, 相本豊賀: 衝突音に関する研究(第2報, 音の発生機構) 日本機械学会論文集C, Vol.50, No.458, pp.1799-1806, 1984.
- 12) 五十嵐昭男, 笹岡誠二: 衝突音に関する研究(第3報, 板の自由振動による音の減衰特性), 日本機械学会論文集C, Vol.51, No.471, pp.3065-3070, 1985.
- 13) 五十嵐昭男, 宮山直喜: 衝突音に関する研究(第4報, 衝突側における音の発生), 日本機械学会論文集C, Vol.54, No.498, pp.423-431, 1988.
- 14) Wood,L.A. and Byrne,K.P.: *J.Sound and Vib.*, 88-4, pp.489-499, 1983.
- 15) 五十嵐昭男, 平岡秀介: 衝突音に関する研究(第5報, 音に及ぼす平板の境界条件の影響), 日本機械学会論文集C, Vol.55, No.520, pp.2992-2998, 1989.
- 16) 安藤伸治: 外壁タイルの剥離診断方法, 施工, No.195, pp.65-70, 1982.
- 17) 原田実, 菅真一郎, 山中實, 白石康信, 是永雄二, 早崎祐治: 打診音によるタイル仕上げ等のはく離検査法, 鹿島技法, No.32, pp.175-182, 1984.
- 18) 大岸佐吉, 小野博宣, 大岡俊彦: 赤外線映像, 衝撃振動応答, 打音の3方法による鉄筋コンクリート内部欠陥および仕上モルタル, タイル剥離の探査性能に関する研究, コンクリート工学, Vol.27, No.8, pp.101-114, 1989.
- 19) 藤原康雄, 司城能治郎, 小野田滋, 井上和彦, 牛田稔, 川上義輝: 打診音解析器を用いたトンネル覆工調査, 土木学会関西支部発表会VI, pp.5-1-5-2, 1989.
- 20) 伊東良浩, 高橋浩, 白木徳夫, 小池哲生: 打診法のトンネル覆工背面空洞調査への適用について(その1), (その2), 土木学会第48回年次学術講演会概要集, pp.534-537, 1993.
- 21) Ito,Y. and Uomoto,T.: Effect of Coarse Aggregates on Velocity of Elastic Waves Through Concrete, *Far East Conference of NDT*, pp.291-298, 1994.
- 22) 伊東良浩, 魚本健人: コンクリート打撃音の定量的評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.859-864, 1995.
- 23) 伊東良浩, 魚本健人: コンクリートのひび割れ深さが打撃音に及ぼす影響, 生産研究, Vol.47, No.5, pp.34-37, 1995.
- 24) Ito,Y. and Uomoto,T.: Non-Destructive Testing Method of Concrete using Impact Acoustics, *International Symposium of NDT-CE'95*, Vol.1, pp.513-520, 1995.
- 25) 伊東良浩, 魚本健人: パラツキを考慮したコンクリート打撃音の振幅の評価, 生産研究, Vol.48, No.3, pp.70-76, 1996.
- 26) 魚本健人, 伊東良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.1, pp.143-152, 1996.
- 27) 伊東良浩, 魚本健人: 鉄筋コンクリートのひび割れが打撃音に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.77-82, 1996.
- 28) 伊東良浩, 魚本健人: ひび割れを有する鉄筋コンクリートの打撃音, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.169-176, 1997.5
- 29) Ito,Y. and Uomoto,T.: Influence of Moisture Content on Impact Acoustics of Reinforced Concrete Beams with Cracks, *International Symposium of NDT-CE'97*, pp.563-576, 1997.
- 30) 荒武志郎, 有馬孝禮, 迫田忠芳, 中村徳孫: 横積み状態における丸太の高次振動数からの製材品MORとMOEの推定, 木材学会誌, Vol.38, No.11, pp.995-1001, 1992.
- 31) 荒武志郎, 有馬孝禮: 横積み状態における丸太の高次振動数からの製材品MORとMOEの推定(第2報), 木材学会誌, Vol.40, No.9, pp.1003-1007, 1994.
- 32) 荒武志郎, 有馬孝禮: 高次固有振動の計測制度に及ぼす材長と縦振動音検出位置の影響, 木材工業, Vol.52, No.6, 1997.
- 33) 瀬崎満弘, 稲森光洋, 船曳伸二: 岩盤分類の指標である

- 「ハンマー打診音」に関する基礎的実験と考察（その1）  
—鋼球による打診音の特徴と被打診物の物性について  
—、土木学会第 54 回年次学術講演会、III-A382,  
pp.764-765, 1999.
- 34) 船曳伸二, 稲森光洋, 御手洗良夫: 岩盤分類の指標である「ハンマー打診音」に関する基礎的実験と考察（その2）—鋼球による打診音の音圧波形の立ち上がりと被打  
診物の物性について—、土木学会第 54 回年次学術講演会、III-A383, p.766-767, 1999.
- 35) 稲森光洋, 御手洗良夫, 船曳伸二: 岩盤分類の指標である「ハンマー打診音」に関する基礎的実験と考察（その3）—実務用ロックハンマーによる打診音の特徴と被打  
診物の物性について—、土木学会第 54 回年次学術講演会、III-A384, pp.768-769, 1999.

(1999.4.14 受付)

## “RESPONSE SOUND PRESSURE PULSE INCLINATION METHOD” AS A QUANTITATIVE INDEX FOR ROCK MASS CLASSIFICATION

Mitsuhiro INAMORI, Yoshio MITARASHI, Shinji FUNABIKI  
Mitsuhiro SEZAKI, Takanori HARADA and Hiroshi YOKOTA

One of the indices for rock mass classification deals with "judgment method by the hammer tapping". It has been based on qualitative evaluation rather than the quantitative one. In the course of our study, it was observed that the quantitative evaluation of the properties of rock is established by analyzing the vibration of the tapping sound wave obtained from measurements by a microphone. From the analysis results of the fundamental experiments (using the artificial rock), we propose an approach, "response sound pressure pulse inclination", as one of the quantitative evaluation indices for rock classification.