

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

Fundamental Experiment and Consideration about Quantitative Evaluation Method of "Hammer Tapping Sound"
for Rock Mass Classification

稲森光洋*・御手洗良夫**・船曳伸二***・瀬崎満弘****

Mitsuhiro INAMORI, Yoshio MITARASHI, Shinji FUNABIKI and Mitsuhiro SEZAKI

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 mass 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 mass), we propose an approach, "response sound pressure pulse incline", as one of the quantitative evaluation indices for rock mass classification.

1. はじめに

岩盤分類の指標のひとつに、「ハンマー打診による判定方法」がある。この指標は定性的な表現で評価されているため、判定に個人差があり、定量的でない¹⁾。そこで、筆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、その振動特性を分析することで、岩石や岩盤の性質を定量的に評価することを目的に研究を進めている。本論文では、その基礎的実験として人工的に岩石を製作し、この打診音試験結果から供試体の基本的性質と打診音波形の関係を分析したので報告する。

モルタルブロックのような弾性体をハンマーで打診するとき生じる音の主要な発生機構は、ハンマーと被打診物の衝突時の急激な変形による音響放射と、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共振による音響放射とに分けることができる²⁾。前者の成分は被打診物の材質特性を主に反映し、後者の成分はハンマーの形状・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。そこで、筆者らは打診音波形の特に初期の部分（前者の成分）に注目して分析を行った。その分析結果から、岩盤分類の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。

2. 実験方法

実験は図-1に示すように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4種類の鋼球を落下させて行った。それぞれの落下高さは、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。供試体はセメン

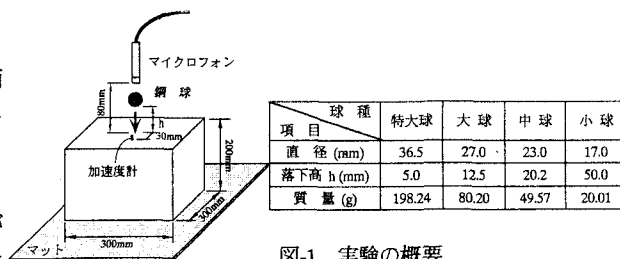


図-1 実験の概要

トモルタルとセメントベントナイトモルタルの合計14種類を製作し実験に供した。表-1に各供試体の配合を、表-2に同じ配合で製作した円柱供試体から得られた物理量と力学的特性を示す。

*正会員 (株)国土開発コンサルタント

**正会員 (株)熊谷組 土木本部

***学生会員 宮崎大学 大学院 土木環境工学科

****正会員 工博 宮崎大学助教授 土木環境工学科

表-1 供試体（セメントモルタル、ベントナイトモルタル）の配合

供試体 No.	水セメント比 W/C	砂セメント比 S/C	ベントナイト セメント比 B/C	セメント量 (kg/m ³)	水和剤 (kg/m ³)	混和材 (kg/m ³)
M-1	2.000	8.000	—	391	—	201***
M-2	2.000	6.000	—	170.1	—	170.1***
M-3	0.650	4.000	—	391.3	—	—
M-4	0.650	3.000	—	448	—	—
M-5	0.500	1.800	—	630	—	—
M-6	0.400	1.600	—	713	—	—
M-7	0.316	1.420	—	740	7.4*	148**
B-1	3.846	—	0.300	233	—	—
B-2	2.777	—	0.223	314	—	—
B-3	1.995	—	0.167	420	—	—
B-4	1.515	—	0.132	530	—	—
B-5	1.177	—	0.108	650	—	—
B-6	0.893	—	0.088	800	—	—
B-7	0.654	—	0.070	1000	—	—

セメント：早強性ポルトランドセメント

1kgf=9.8N

*：減資剤、**：シリカフューム、***：炭酸カルシウム

表-2 供試体（セメントモルタル、ベントナイトモルタル）の物性

供試体 No.	単位体積重量 ρ (t/m ³)	縦波伝播速度 v_p (m/sec)	ポアソン比 ν	一軸圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	弾性係数 E (kgf/cm ²)	動弾性係数 E_d (kgf/cm ²)
M-1	1.82	2850	0.202	75.4	70000	120000
M-2	1.91	2430	0.120	44.6	57000	111000
M-3	2.02	3180	0.192	247	135000	186000
M-4	2.07	3570	0.179	256	178000	249000
M-5	2.13	3760	0.230	421	223000	266000
M-6	2.16	4050	0.220	485	243000	316000
M-7	2.04	3880	0.230	506	240000	273000
B-1	1.14	507	0.154	1.68	940	2830
B-2	1.05	746	0.235	5.73	3070	4990
B-3	1.27	1300	0.194	15.1	10100	19700
B-4	1.30	1660	0.212	42.3	19800	30900
B-5	1.39	2020	0.200	73.9	34300	52100
B-6	1.53	2490	0.229	151	57100	83900
B-7	1.72	3070	0.230	226	101000	143000

1000kgf/cm²=98MPa, 1tf/m²=9800N/m²

3. 結果と考察

3-1 原波形と周波数解析

実験は 14 供試体について 4 種類の鋼球を各 10 回づつ合計 560 (14×4×10) 回打診を行った。これらの中の 2 例を図-2 に示す。図中(a)は音圧原波形であり、(c)はその周波数解析結果（パワースペクトル）である。(b)は供試体表面での上下方向加速度波形であり、(d)はそ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と視認されることから、打診による供試体表面での上下方向の振動と音圧の振動は振動数において似ていることが解る。

3-2 応答音圧パルス勾配と卓越振動数の相関関係

被打診物の材質特性は主に音圧波形の初期の部分に反映されると考え、図-2 中(e)に示すように初期の音圧波形の中でも特に立ち上がりの勾配（音圧の時間的変化に相当する）に着目した。この部分には空気音速度（約 340m/s）と鋼球の音速度（約 5,000m/s）の違いから打診直後に鋼球中を最初に伝播してくる「被打診物の材質特性を含んだ音圧」が現れていると思われる。ここで、この勾配の値を「応答音圧パルス勾配」と呼ぶことにする。図-1 に示す大球を使った実験から得られた 140 個の音圧波形について周波数解析を行ってパワーの大きいものから順に power1, power2, …と名付け、4 個の卓越振動数を取る。この卓越振動数と応答音圧パルス勾配の関係を整理したものを図-3 に示す。またこの中で最もパワーの大きい power1 だけを取り出したものを図-4 に示す。これらの関係より打診音の卓越振動数と応答音圧パルス勾配には相関があると言える。したがって、「応答音圧パルス勾配」は「打診音の振動数特性を表現する指標」の一つになるものと考えられる。

3-3 応答音圧パルス勾配と物性値の相関関係

応答音圧パルス勾配と供試体の物性値（単位体積重量、縦波伝播速度、静ポアソン比、一軸圧縮強度、弾性係数、動弾性係数）の相関関係を調べる目的で、横軸に応答音圧パルス勾配をとり、縦軸に各物性値をとったものを図-5 に示す。ここに、静ポアソン比は一軸圧縮強度の 1/3 の応力状態における値であり、動弾性係数は単位体積重量、縦波伝播速度、静ポアソン比の値を用いて計算した。このように相関に程度の差はあるものの、「応答音圧パルス勾配」は「供試体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。

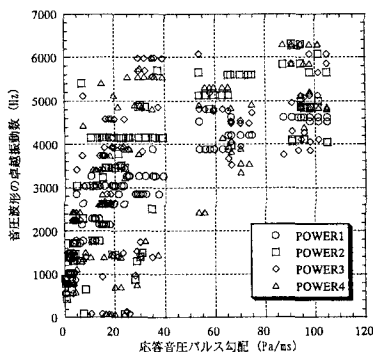


図-3 音圧波形の卓越振動数と応答音圧パルス勾配の関係

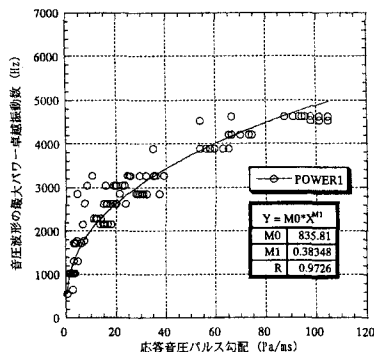


図-4 音圧波形の最大パワー卓越振動数と応答音圧パルス勾配の関係

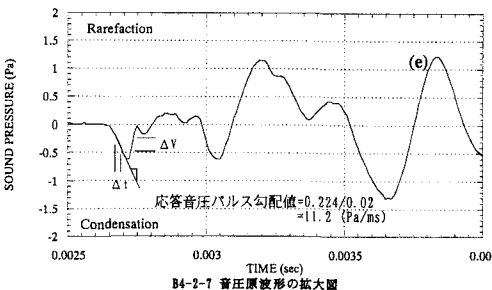
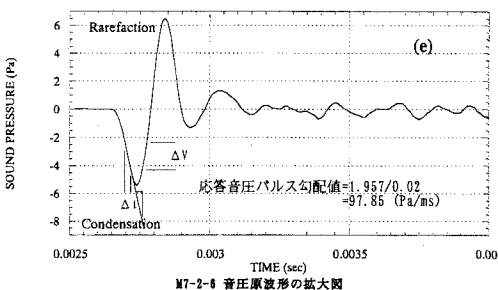
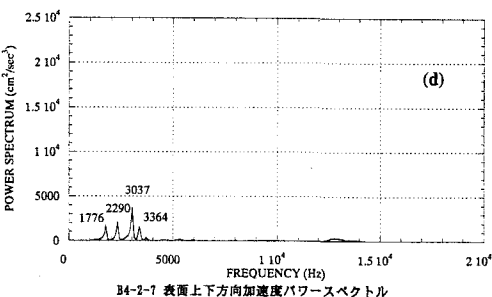
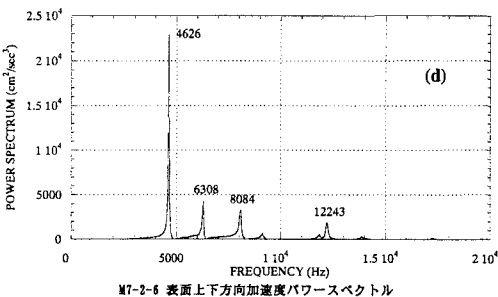
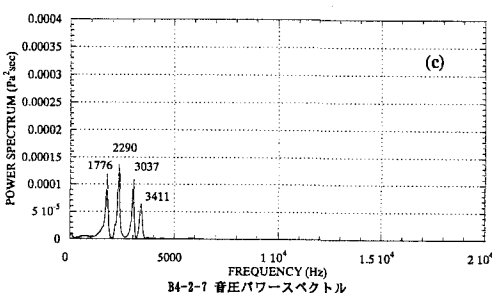
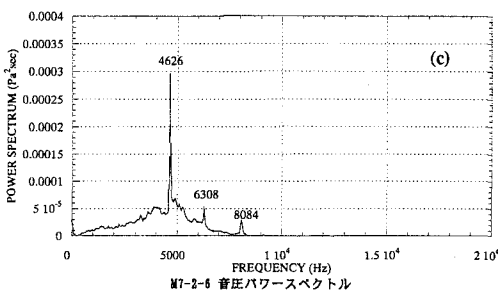
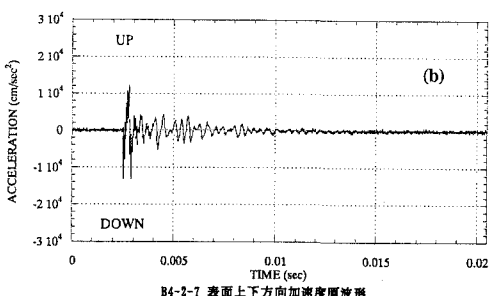
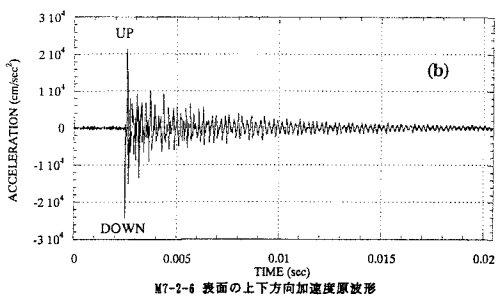
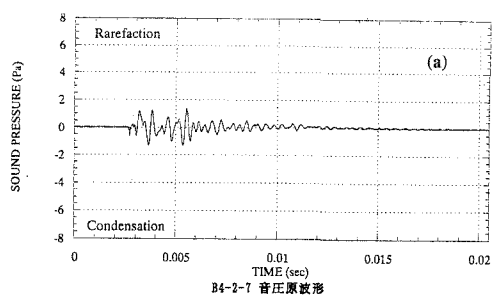
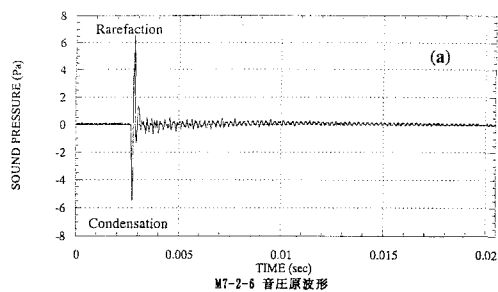
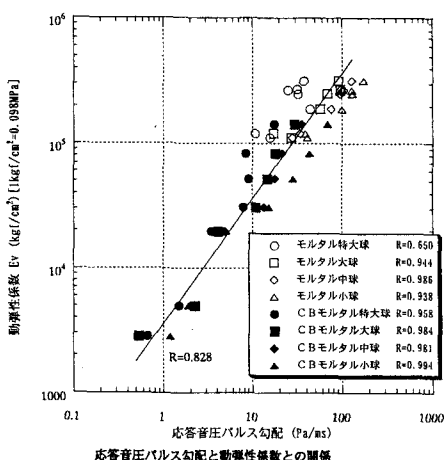
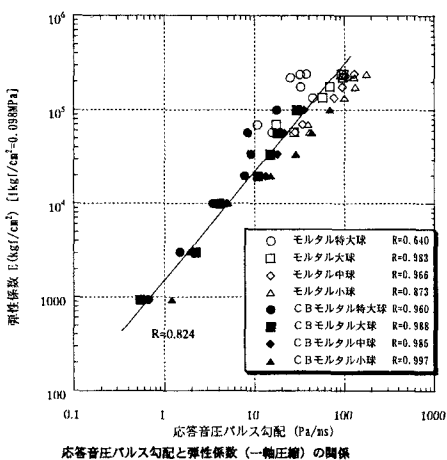
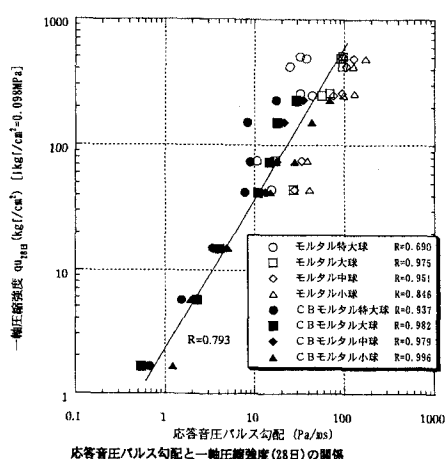
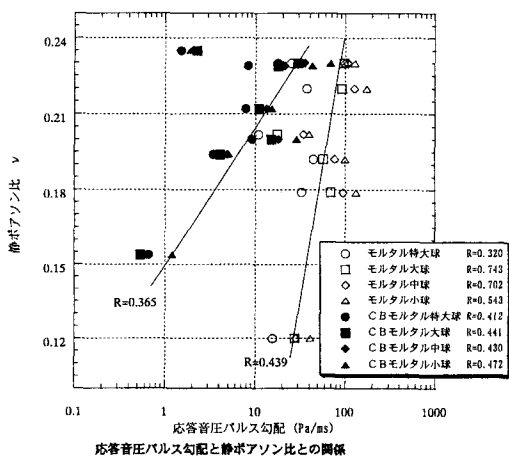
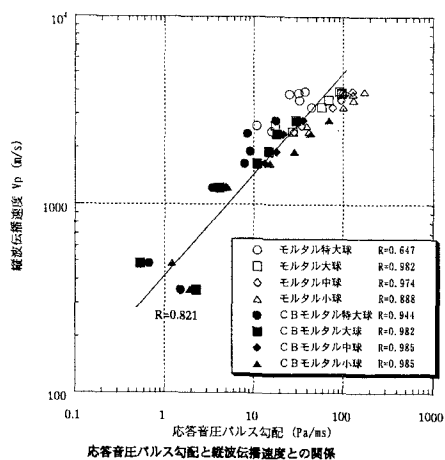
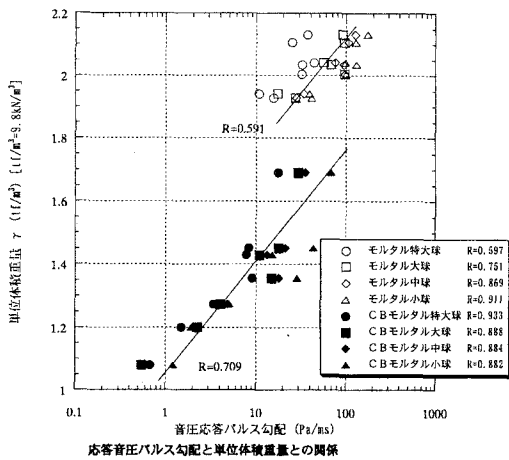


図-2 大球を用いて供試体 (M7 及び B4) を打診したときの波形とパワースペクトル (音圧と表面上下方向加速度)



(注) 図中の R は相関係数を表す。

図-5 エネルギー一定条件での応答音圧パルス勾配と供試体物性値との相関関係

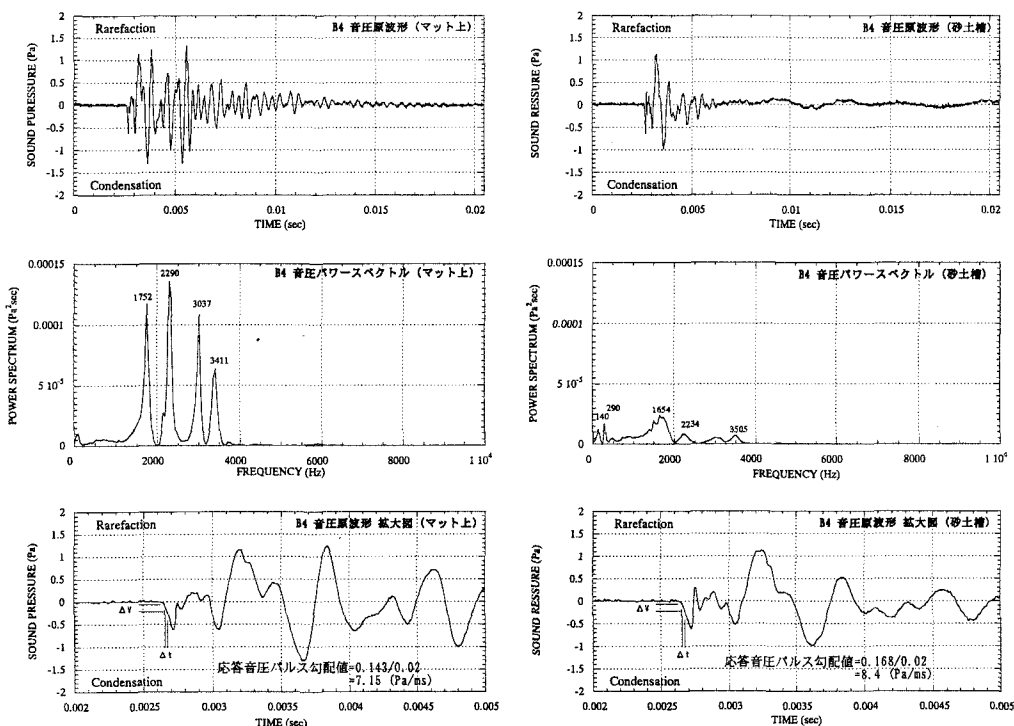


図-6 音圧波形にあらわれる境界条件の影響

3-4 境界条件の影響

上述の結果と考察は供試体をマット上に載せた状態で打診したものである。そこで、供試体を砂土槽の中に埋め込んで境界条件を変えた実験を試みた。その一例として供試体 No.B4 の砂土槽とマット上での実験結果から、音圧原波形、周波数解析結果（パワースペクトル）、音圧原波形の初期部分の拡大図を図-6 に示す。これらから、音圧波形の初期の部分は似ているもののそれ以降は境界条件によって大きく変わること、その振動数特性は卓越振動数のパワーやピークの鮮明度に差が生じること、その一方で「応答音圧パルス勾配」は変化が少なくほぼ一定であることなどが言えよう。

4. おわりに

岩盤分類の指標の一つであるハンマー打診音について、音圧波形の立ち上がりの部分に着目して分析を行った結果、岩石や岩盤の力学的性質や物性値を評価できる可能性をもった指標として「応答音圧パルス勾配法」を提案する。接触の問題、Boussinesq の問題、半無限弾性体における点振源としての Lamb の問題、形状・寸法や境界条件の問題などが複雑に関連しているため、音圧波形の全体を分析するにはまだ至らないが、「応答音圧パルス勾配」には岩石に衝撃力を与えたときの「力と変位の関係」が現れているように思われる。今後は供試体の形状・寸法、境界条件、打診面の状態、割れ目の状態等が応答音圧パルス勾配に与える影響について報告するとともに、実際の岩石、岩盤、ボーリングコアなどにおいて研究を進めていく予定である。

最後に、研究を進めるにあたり宮崎大学土木環境工学科の原田隆典教授に、貴重など意見を頂きました。

5. 参考文献

- 1) 吉中龍之進・桜井春輔・菊池宏吉 編著：岩盤分類とその適用，土木工学社。
- 2) 伊藤良浩・高橋浩・白木徳夫・小池哲生：打音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)，土木学会第 48 回年次学術講演会 p.534～p.535, 1994.9。