

岩盤分類の定量的指標としての「応答音圧パルス勾配法」に関する事例研究

A CASE STUDY ON THE APPLICABILITY OF ROCK MASS CLASSIFICATION
USING “RESPONSE SOUND PRESSURE INCLINATION METHOD”

稲森光洋*・御手洗良夫**・船曳伸二***・瀬崎満弘****

Mitsuhiro INAMORI, Yoshio MITARASHI, Shinji FUNABIKI, Mitsuhiro SEZAKI

In the previous research we examined specimens from an artificial rock, metal and nonmetal with various factors such as shape and dimension, boundary condition, tapping position, and uneven surface by tapping with steel ball and analyzed the tapping sound. Results confirmed that “response sound pressure pulse inclination” show difference of mechanical and physical properties of the specimens, and could identify parameters like the minimum size of specimen with fixed tapping conditions. In this report, we examined the tapping test and unconfined compression strength using boring core of granodiorite. We examined the relation between “response sound pressure pulse inclination” and mechanical and physical properties of the specimens, and the applicability of this method on rock mass classification.

Key words : rock mass classification, hammer tapping sound, non-destructive testing of material, granodiorite.

1. はじめに

岩盤分類の要素の一つに、「ハンマー打診による判定方法」がある。これま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とした一連の研究を行っている^{1)~3)}。岩石や岩盤をハンマーで打診したときに生じる音は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）に分類される⁴⁾。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。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広がり、さらに境界条件がまちまちで不明確であることを考慮すると、「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考えられる。そこで、参考文献¹⁾²⁾では、セメントモルタルやセメントベントナイトモルタル等の材料で人工的に製作した模擬岩石を対象に打診音実験を行い、物性値（密度、縦波伝播速度、静ポアソン比、一軸圧縮強さ、弾性係数、動弾性係数）の異なる供試体において、音圧原波形の立ち上がりの勾配やその卓越振動数について考察した。その結果、供試体の形状・寸法や境界条件に影響されることなく、模擬岩石等の力学的性質や物性値を評価する指標になり得るものが音圧の立ち上がりに現れることを見出し、「応答音圧パルス勾配法」を提案した^{1)~3)}。また参考文献³⁾では金属（ステンレス鋼、銅、アルミニウム）、塩化ビニール、天然ゴム等の材料を対象に打診音実験を行い、音圧の立ち上がりの勾配に影響を及ぼす領域が供試体の打診方向および打診直角方向にわたって存在すること等を確認した。本論文では、実際の岩石の一つとして、宮崎県児湯郡木城町で採取された中新世中期の中粒木城花崗閃緑岩のボーリングコアを対象に打診音実験や一軸圧縮試験などを行って、「応答音圧パルス勾配」と試料の力学的性質や物性値などとの関連性について検討を行い、岩盤分類における本指標の有用性について考察する。

* 正会員 ㈱国土開発コンサルタント 技術本部

** 正会員 ㈱熊谷組 土木事業本部

*** 学生員 宮崎大学 大学院 土木環境工学専攻

**** 正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部土木環境工学科

2. 「応答音圧パルス勾配」の定義と実験方法

2.1 「応答音圧パルス勾配」の定義^{1),2)}

打診直後の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-1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： ΔT は式④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音速度（約 340m/s）と鋼球音速度（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「被打診物の材質特性を含んだ音圧」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-2の例に示すように到達時間差： ΔT の間において音圧波形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-2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。

$$\Delta T = \frac{H}{C_A} - \left(\frac{D}{C_S} + \frac{H-D}{C_A} \right) \quad \text{④}$$

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 マイク高さ（80.0mm）
 D 鋼球の直径（27.0mm）

$\frac{H}{C_A}$: 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

2.2 実験方法

実験では図-3に示すように、直径が約 50mm のボーリングコアに対して、(1) コア箱内での打診実験と (2) 一軸圧縮試験を行う前の供試体を用いて打診実験を行った。まず打診実験 (1) ではコア箱内に置いた状態でコア全長 (55.7m) にわたって 10cm ピッチで合計 483 回打診した。次に打診実験 (2) では一軸圧縮試験に用いる長さ約 10cm の供試体 (93 本) をマット (厚さ 2mm の長繊維ポリエステル不織布) の上に設置して縦打診と横打診を行った。

縦打診では供試体の片面で打診位置を変えて 5 回ずつ両面で計 10 回の打診を行い、横打診では供試体を螺旋状に約 45° ずつ回転させて計 10 回の打診を行い、各々合計 930 回 (各 10 回×93 本) 打診した。ここで、縦打診と横打診は図-3に示す打診方向である。打診は供試体の鉛直上方から電磁石を用いて鋼球 (直径 27.0mm, 質量 80.20g, 落下高さ 12.5mm) 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 (打診面までの距離: 80.0mm) を用いて測定した。

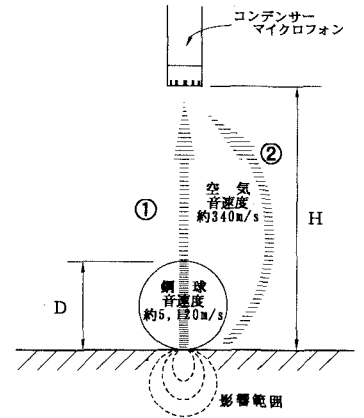


図-1 伝播経路と影響範囲

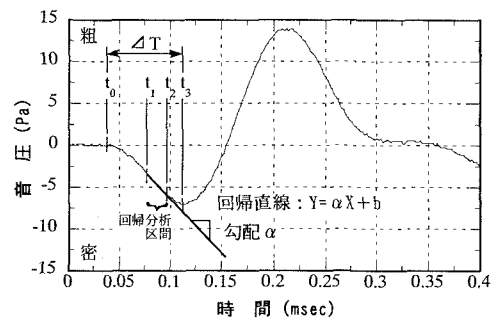


図-2 回帰分析区間

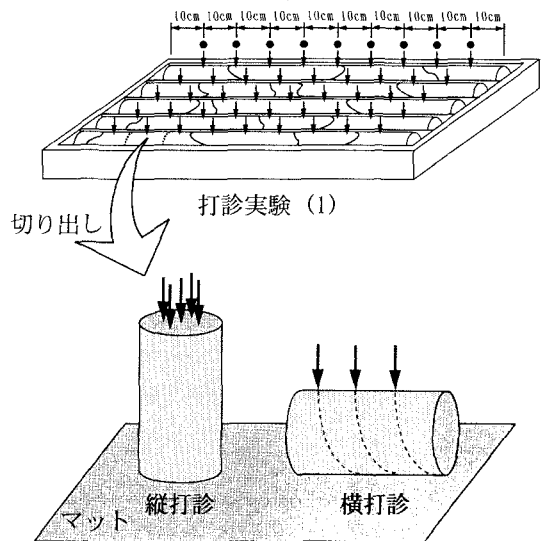


図-3 実験概念図

表-1 代表的な供試体の物性値と応答音圧パルス勾配 (縦打診, 横打診)

供試体	縦波伝播速度 Vp [km/s]	弾性係数* E [MPa]	一軸圧縮強さ qu [MPa]	密度 ρ [t/m ³]	応答音圧パルス勾配 [Pa/ms]	
					縦打診	横打診
a	0.91 (1.0)	—	4.4 (1.0)	2.12 (1.0)	1.9 (1.0)	1.0 (1.0)
b	2.93 (3.2)	11,600 (1.0)	42.8 (9.7)	2.53 (1.2)	57.9 (30.5)	65.2 (65.2)
c	3.97 (4.4)	18,700 (1.6)	68.7 (15.6)	2.61 (1.2)	104.7 (55.1)	99.6 (99.6)
d	5.21 (5.7)	39,100 (3.4)	102.4 (23.3)	2.64 (1.2)	151.7 (79.8)	138.5 (138.5)

*一軸圧縮強さの 1/3 の応力状態での割線係数, () 内の数字は比率を表す。

3. 結果と考察

3.1 音圧原波形と物性値の関係

一軸圧縮試験の供試体を用いた打診実験 (2) のなかで, 物性値が異なる代表的な 4 供試体の音圧原波形の初期の部分を拡大して重ねたものを図-4 に示す。また表-1 にこれらの物性値と応答音圧パルス勾配を示す。この図から, 初期の音圧原波形の中でも特に立ち上がりの勾配には, 表-1 に示した縦波伝播速度, 弾性係数, 一軸圧縮強さ, 密度の値の違いが現れていることが分かる。具体的には, これらの値が大きくなるほど, 音圧波形の立ち上がりの勾配が大きくなっていく傾向がある。したがって, 参考文献^{1)~3)}で示した材料と同様に, 実際の岩石においてもこの音圧波形の立ち上がりの部分には「供試体の材料特性を含んだ音圧」が現れている。

3.2 応答音圧パルス勾配と打診回数の関係

参考文献³⁾では金属のように打診痕 (圧痕) が見られ塑性変形が生じるような材料においては一定の打診位置で連続して打診すると図-5 の例に示すように 1 打診目に比べて 2 打診目以降の応答音圧パルス勾配の値が大きく, またその値は一定値に収束していく傾向があることを示した。表-1 に示す代表的な供試体において一定の位置で連続打診し, 横軸に打診回数を取り, 縦軸に応答音圧パルス勾配をとって整理したものを図-6 に示す。このように, 実際の岩石においても金属材料と同様の傾向が見られたので, 本論文においては塑性変形の影響が少なくなるように, 1 打ごとに打診位置を変えて実験を行った。

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 (縦波伝播速度, 弾性係数, 一軸圧縮強さ, 密度) の相関関係を調べる目的で, 1) 横軸に応答音圧パルス勾配の平均値 (打診位置を変えた 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と, 2) 横軸に縦波伝播速度をと, 縦軸に各物性値をとって整理したものを図-7 に示す。この図から相関に程度の差はあるが, 「応答音圧パルス勾配」は実際の岩石においても「物性値を評価する指標」になり得るものと考えられる。また, 縦打診に比べて横打診の相関係数が低い理由の一つとして削孔時にボーリングコアの周面に発生することが予想されるマイクロクラックなどの影響が挙げられる。

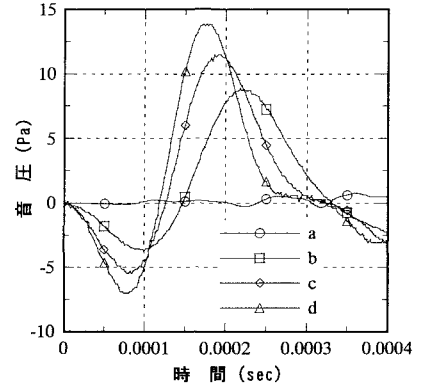


図-4 各音圧波形

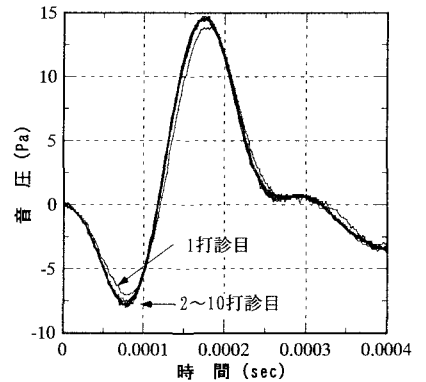


図-5 供試体 d (横打診) 1~10 打診の音圧波形初期の重ね合わせ

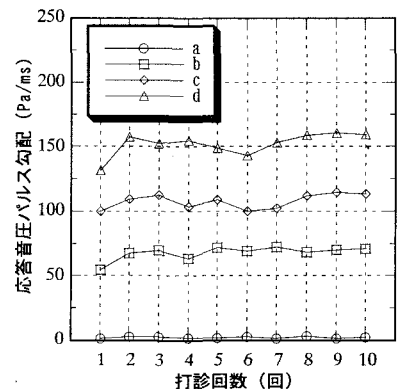


図-6 打診回数と応答音圧パルス勾配との関係 (横打診)

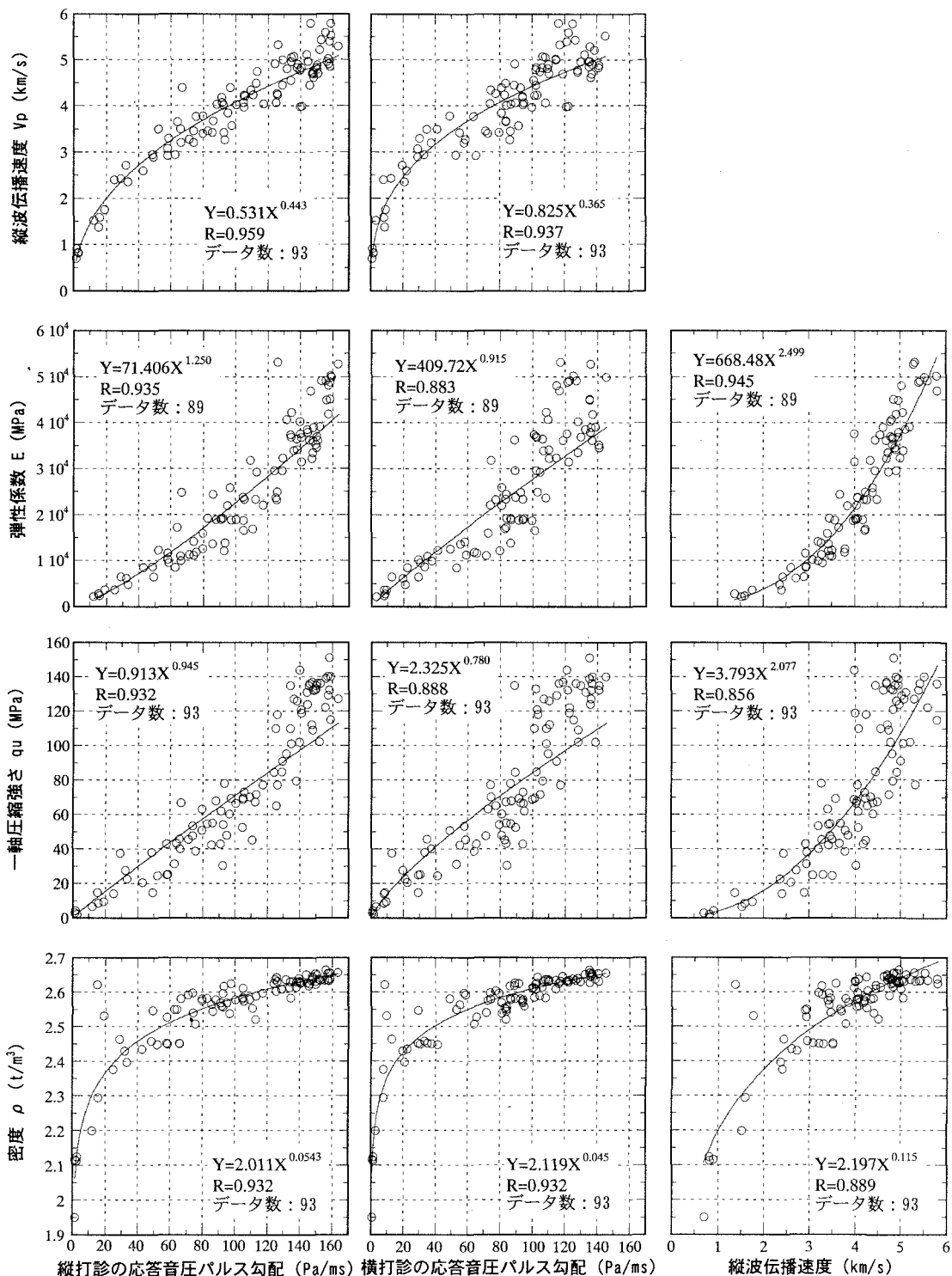


図-7 縦・横打診の応答音圧パルス勾配と各物性値（縦波伝播速度，弾性係数，一軸圧縮強さ，密度）および縦波伝播速度と各物性値との関係

3. 4 「応答音圧パルス勾配法」の岩盤分類の指標としての適用性

前節 3. 3 では「応答音圧パルス勾配」は岩盤分類において重要な地質要因である④構成岩石の性質（岩石自体の強度および変形性など）、⑤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、④に関する定量的指標になり得ることを示した。本節では上記④、⑤の定量的指標として応答音圧パルス勾配および RQD を用いて、これらの指標と「従来の方法で地質調査の専門家が判定した岩級区分の例」との関連について図-8 に示し考察する。また図-7 に示した横打診の回帰式から求めた各物性値を併記する。ここで、これらのデータは地質調査の専門家が判定した岩級区分において、同一の岩級区分が 1.0m 以上連続する部分を取り出し、コアの長さ 1.0m を 1 単位とするときの RQD を縦軸にとり、応答音圧パルス勾配の平均値（9 打診の平均値）を横軸にとって整理した合計 27 個（27.0m 分）である。この判定例では、概念的に図示したような判定基準が炙り出されることから、ある一定の精度で岩級区分がなされているものと考えられる。しかしながら、図中の 4 つの三角形が示すように“判定基準の曖昧さ”も伺える。このようなことから、個人の能力と経験に委ねられている従来のボーリングコアの判定方法に比べて、上記④の定量的指標として応答音圧パルス勾配、⑤の定量的指標として RQD または割れ目の本数などを用いることによって、より一層の精度の向上が望めるものとする。

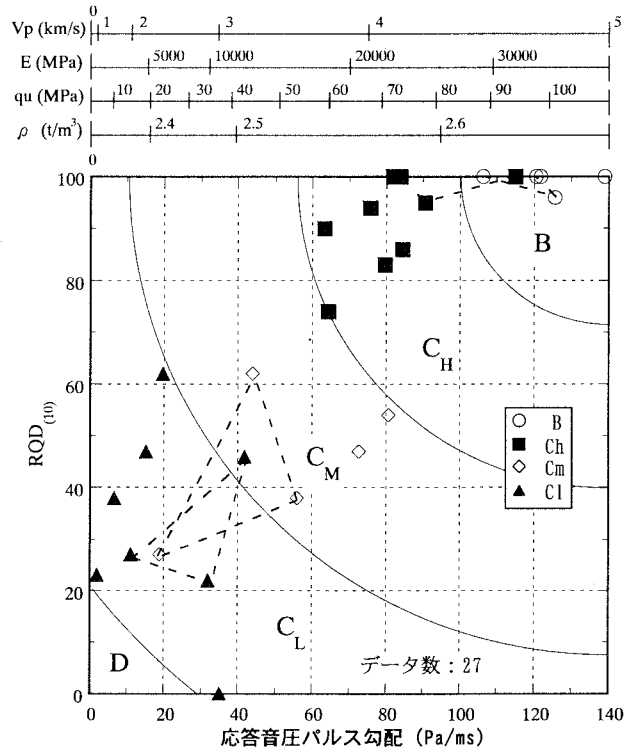


図-8 応答音圧パルス勾配と RQD、地質調査の専門家が判定した岩級区分との関係

4. おわりに

宮崎県児湯郡木城町で採取された中新世中期の中粒木城花崗閃緑岩のボーリングコアを対象に打診音実験を行った結果、既往の研究^{1)~3)}で示された種々の材料と同様に実際の岩石においても「供試体の力学的性質や物性値」を評価できる指標として「応答音圧パルス勾配法」の有用性が示された。さらに、従来の方法で地質調査の専門家が判定した岩級区分の例においては、RQD を併用することによって「応答音圧パルス勾配」は岩盤分類の定量的指標の一つとして適用性があることが示された。今後は、多くの岩種において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。最後に、本研究を行うにあたり試料の提供を頂いた宮崎県土木部 甲斐重隆氏、萬代優氏ならびに、協力を頂いた(株)国土開発コンサルタント 倉永輝雄氏、宮崎大学工学部土木環境工学科 鶴澤稔氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 稲森光洋, 御手洗良夫, 船曳伸二, 瀬崎満弘, 原田隆典, 横田漢: 岩盤分類の定量的指標としての「応答音圧パルス勾配法」, 土木学会論文集, No.638/III-49, 1999.12.掲載予定
- 3) 稲森光洋, 御手洗良夫, 船曳伸二, 瀬崎満弘, 原田隆典, 横田漢: 「応答音圧パルス勾配法」の材料非破壊試験への適用性に関する基礎的研究: 材料投稿中
- 4) 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 1,2) 土木学会第 48 回年次学術講演会概要集, pp.534-537, 1993.