

応答音圧パルス勾配法の 花崗閃緑岩コアに対する適用例

稲森光洋¹・御手洗良夫²・船曳伸二³
甲斐重隆⁴・瀬崎満弘⁵・原田隆典⁶・横田漢⁶

¹正会員 工修(株) 国土開発コンサルタント技術本部 (〒880-0005 宮崎市大工3丁目155)

²正会員 工修(株) 熊谷組 土木事業本部 (〒162-0821 東京都新宿区津久戸町17-1)

³正会員 工修(株) 建設技術研究所 技術第一部 (〒540-0008 大阪市中央区大手前1-2-15)

⁴宮崎県 土木部 道路建設課 (〒880-8501 宮崎市橋通東2-10-1)

⁵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)

⁶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ている。本論文では、著者らが考案した「応答音圧パルス勾配法」の実際問題への適用として、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岩盤ボーリングコアを対象に打診音実験を実施し、ハンマーの打診音を分析した。その結果、土質地盤のボーリングコア柱状図における標準貫入試験のN値のように、「応答音圧パルス勾配」が岩盤のボーリングコア柱状図において構成岩石の強度や変形性を定量的に表現しうる指標になることが示された。本論文はその内容を示すとともに、本指標を岩盤ボーリングコア試料の力学的性質や物性値を定量的に評価する指標として提案するものである。

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

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。しかしながら、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全てにわたって、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ため、岩盤分類を利用することが多い。すなわち岩盤分類は、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、あるいは積算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、利用の仕方も様々である^{1,2)}。その方法としては、まず計画地域周辺の地質や地質工学上の文献調査が行われ、計画地域周辺の地質踏査等の概査が実施される。次に概査の結果に基づいて詳細な地表踏査、あるいはボーリングや弾性波探査等の精査が行われ、定量的あるいは定性的な分類要素が収集される。分類要素には、例えば一軸圧縮強さ、ハンマー打診音、風化の程度、地山の弾性波速度、割れ目の間隔、RQD等があり、大きくは構成岩石の性質

と不連続面の性質に関するものに分けられる。これらの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、岩盤分類の基本である。しかしながら、ロック用のハンマーには250~300gのものから800~900gのものまであり、そのたたき方には個人差があることや定性的な表現で岩盤分類の指標として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。

このような問題点を鑑み、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³⁻⁷⁾。その中で、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した打診音実験の結果からは、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

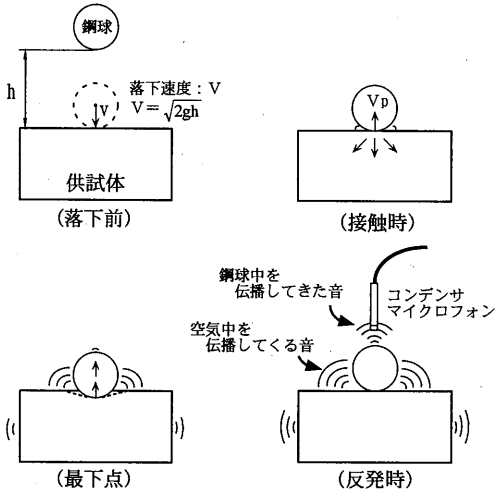


図-1 打診音の発生概念図

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^{3,4)}。また、金属（ステンレス鋼，銅，アルミニウム），塩化ビニール，天然ゴム等といった供試体の製作や加工が容易な材料を対象にした打診音実験の結果からは、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を確認し、この打診条件（鋼球の直径，質量，落下高さ）に応じた影響領域の大きさによって供試体の最小寸法が定められること，すなわち「応答音圧パルス勾配法」によって供試体の打診位置近傍の一定領域内の物性や状態が評価できることを示した⁵⁾。

本研究は、岩盤分類において重要な地質要因である構成岩石の性質（岩石自体の強度および変形性など）と不連続面の性質（岩盤中に分布する割れ目の状態など）のうち、構成岩石の性質に関する定量的な評価指標の確立を最終目的としている。本論文は、岩盤のボーリング柱状図において、土質地盤のボーリング柱状図における標準貫入試験のN値のように地層の強度変化や変形性の変化を定量的に表現しうる指標、すなわち構成岩石の性質（岩石自体の強度および変形性など）に関する定量的指標として「応答音圧パルス勾配法」を提案することを目的としている。なお、この土砂地盤におけるN値に相当する定量的な力学値が岩盤のボーリング柱状図においても必要であることはこれまでに例えば、三木⁸⁾が主張している。

本論文では、実際の岩盤ボーリングコアの一例として、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うとともに、従来方法で地質調査の

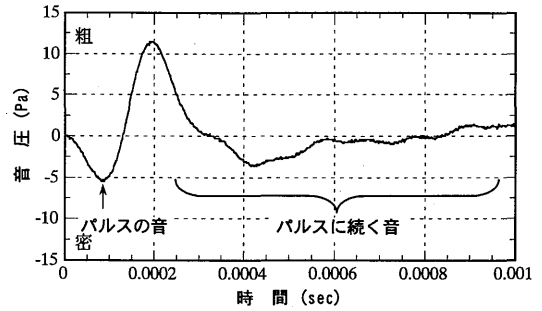


図-2 パルス音とパルスに続く音

専門家による岩級判定を行った。その結果、「応答音圧パルス勾配」とボーリングコア試料の力学的性質や物性値などとの関連性や、岩盤ボーリングコアにおける強度や変形性などに関する定量的指標として本指標の適用性が示された。本論文では、これらに関して得られた知見を述べる。

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100×φ50mmのボーリングコア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⁹⁾。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ものと解釈しデータを整理したところ、既往の研究³⁻⁵⁾で述べたようにこの解釈とデータは調和的であった。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々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。

既往の研究³⁻⁵⁾で供試体に用いた種々の材料に対する打

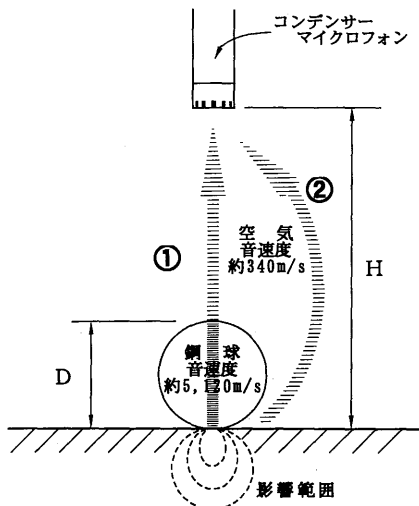


図-3 打診音の伝播経路と影響範囲の概念図

診音の実験結果から、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るので、パルス音の中でも特に音圧波形の立ち上がりの勾配（音圧の時間的变化に相当する）に着目している。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： ΔT 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「被打診物の材質特性を含んだ音圧」が現れていると解釈した³⁻⁵⁾。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： 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るので、解析ではこの直線的に変化する音圧波形の勾配に着目している。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」と定義しデータを整理したところ、既往の研究³⁻⁵⁾で述べたようにこの解釈とデータは調和的であった。

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

ここに、 C_A 空気の音速度（約340m/s）
 C_S 鋼球の音速度（約5120m/s）
 H マイク高さ（80mm）

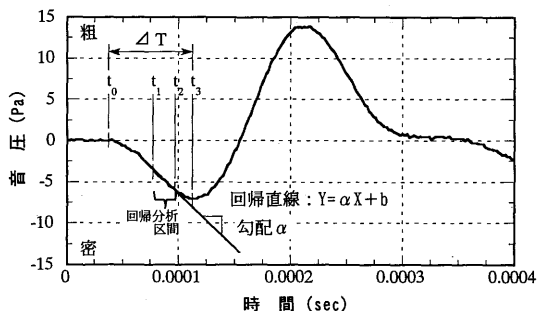


図-4 応答音圧パルス勾配の回帰分析区間

D 鋼球の直径（27mm）

$\frac{H}{C_A}$: 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、ここを原点とする。
- ② t_3 は式(1)から計算される時間差： ΔT で、実験に用いた直径が27mmの鋼球の場合では、 $t_3=0.074\text{ms}$ となる。
- ③ t_0 は目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、 t_3 から任意の時間：0.014msを差し引いた時刻 $t_2=0.06\text{ms}$ から原点側に0.02msもどった時刻 $t_1=0.04\text{ms}$ 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から分析区間は直線的な変化であることを確認する。

3. 実験

(1) 実験概要

実験は直径が約50mm、総延長：58m（Bor.No.1=21m, Bor.No.2=22m, Bor.No.3=15m）の空気乾燥状態のボーリングコアに対して、まずコア箱内での打診音実験を行った。次にこれらのボーリングコアから長さ約10cmの合計93本の軸圧縮試験用供試体を切り出し、試験前の供試体を用いて打診音実験を行った。以下に、基礎的な実験方法と各々の実験内容について述べる。

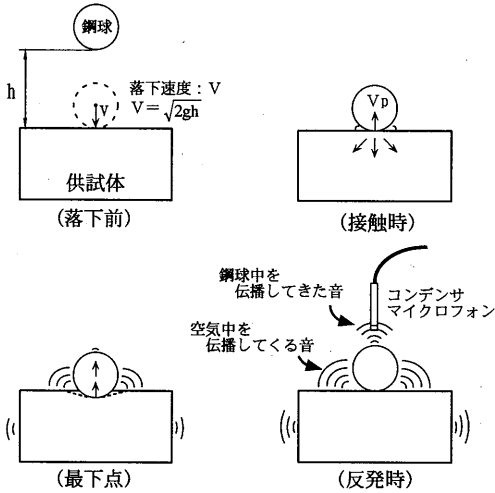


図-1 打診音の発生概念図

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^{3,4)}。また、金属（ステンレス鋼，銅，アルミニウム），塩化ビニール，天然ゴム等といった供試体の製作や加工が容易な材料を対象にした打診音実験の結果からは、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を確認し、この打診条件（鋼球の直径，質量，落下高さ）に応じた影響領域の大きさによって供試体の最小寸法が定められること，すなわち「応答音圧パルス勾配法」によって供試体の打診位置近傍の一定領域内の物性や状態が評価できることを示した⁵⁾。

本研究は、岩盤分類において重要な地質要因である構成岩石の性質（岩石自体の強度および変形性など）と不連続面の性質（岩盤中に分布する割れ目の状態など）のうち、構成岩石の性質に関する定量的な評価指標の確立を最終目的としている。本論文は、岩盤のボーリング柱状図において、土質地盤のボーリング柱状図における標準貫入試験のN値のように地層の強度変化や変形性の変化を定量的に表現しうる指標、すなわち構成岩石の性質（岩石自体の強度および変形性など）に関する定量的指標として「応答音圧パルス勾配法」を提案することを目的としている。なお、この土砂地盤におけるN値に相当する定量的な力学値が岩盤のボーリング柱状図においても必要であることはこれまでに例えば、三木⁸⁾が主張している。

本論文では、実際の岩盤ボーリングコアの一例として、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うとともに、従来方法で地質調査の

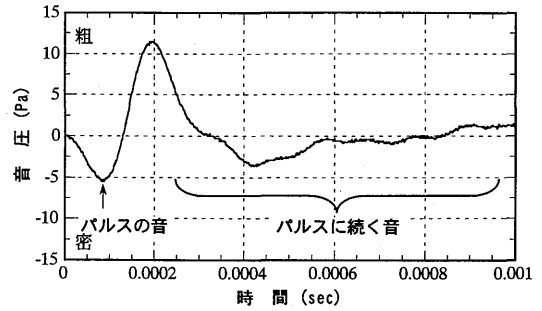


図-2 パルス音とパルスに続く音

専門家による岩級判定を行った。その結果、「応答音圧パルス勾配」とボーリングコア試料の力学的性質や物性値などとの関連性や、岩盤ボーリングコアにおける強度や変形性などに関する定量的指標として本指標の適用性が示された。本論文では、これらに関して得られた知見を述べる。

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 $100 \times \phi 50\text{mm}$ のボーリングコア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⁹⁾。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ものと解釈しデータを整理したところ、既往の研究³⁻⁵⁾で述べたようにこの解釈とデータは調和的であった。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々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。

既往の研究³⁻⁵⁾で供試体に用いた種々の材料に対する打

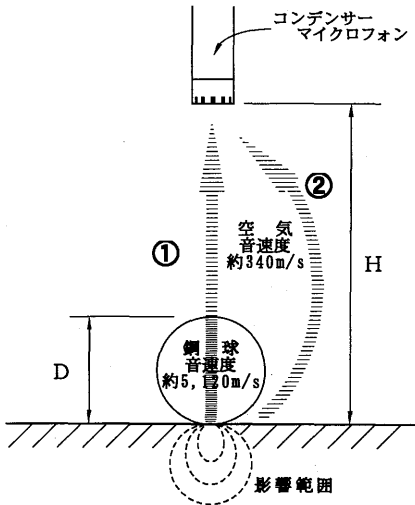


図-3 打診音の伝播経路と影響範囲の概念図

診音の実験結果から、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るので、パルス音の中でも特に音圧波形の立ち上がりの勾配（音圧の時間的变化に相当する）に着目している。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： ΔT 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」が現れていると解釈した^{3)~5)}。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： 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るので、解析ではこの直線的に変化する音圧波形の勾配に着目している。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」と定義しデータを整理したところ、既往の研究^{3)~5)}で述べたようにこの解釈とデータは調和的であった。

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

ここに、 C_A 空気音速度（約340m/s）
 C_S 鋼球音速度（約5,120m/s）
 H マイク高さ（80mm）

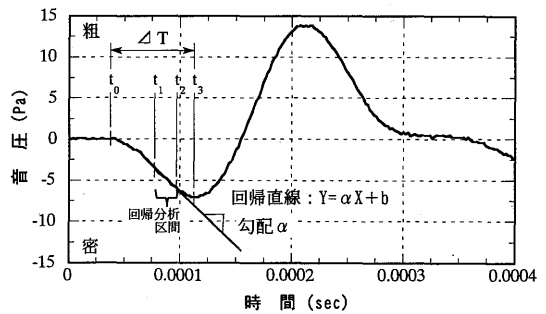


図-4 応答音圧パルス勾配の回帰分析区間

D 鋼球の直径（27mm）

$\frac{H}{C_A}$: 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、ここを原点とする。
- ② t_3 は式(1)から計算される時間差： ΔT で、実験に用いた直径が27mmの鋼球の場合では、 $t_3=0.074\text{ms}$ となる。
- ③ t_0 は目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、 t_3 から任意の時間：0.014msを差し引いた時刻 $t_2=0.06\text{ms}$ から原点側に0.02msもどった時刻 $t_1=0.04\text{ms}$ 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から分析区間は直線的な変化であることを確認する。

3. 実験

(1) 実験概要

実験は直径が約50mm、総延長：58m（Bor.No.1=21m、Bor.No.2=22m、Bor.No.3=15m）の空気乾燥状態のボーリングコアに対して、まずコア箱内での打診音実験を行った。次にこれらのボーリングコアから長さが約10cmの合計93本の一軸圧縮試験用供試体を切り出し、試験前の供試体を用いて打診音実験を行った。以下に、基礎的な実験方法と各々の実験内容について述べる。

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 (採取位置*)	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 (10打診の平均)	横打診 (10打診の平均)
a (Bor.No.1, 6.3-6.4m)	0.82 (1.0)	—	2.0 (1.0)	2.11 (1.0)	2.6 (1.0)	1.4 (1.0)
b (Bor.No.1, 18.2-18.3m)	2.71 (3.3)	6,200	27.5 (13.8)	2.43 (1.2)	32.2 (12.4)	19.4 (13.9)
c (Bor.No.2, 12.1-12.2m)	4.91 (6.0)	29,600	84.6 (42.3)	2.62 (1.2)	124.0 (47.7)	89.0 (63.6)
d (Bor.No.2, 18.6-18.7m)	5.53 (6.7)	49,900	140.5 (70.3)	2.65 (1.3)	158.8 (61.1)	145.2 (103.7)

*図-11, 12 参照, **一軸圧縮強さの 1/3 の応力状態での割線係数, ***空気乾燥状態の密度, () 内の数字は a に対する比率を表す。

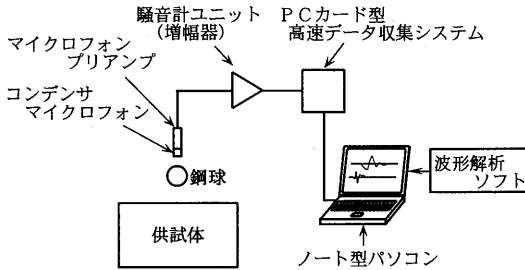


図-5 測定装置ブロックダイアグラム

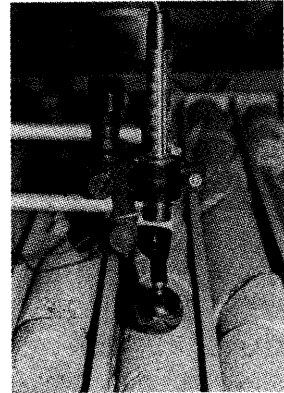


写真-1 ボーリングコア箱内の打診状況

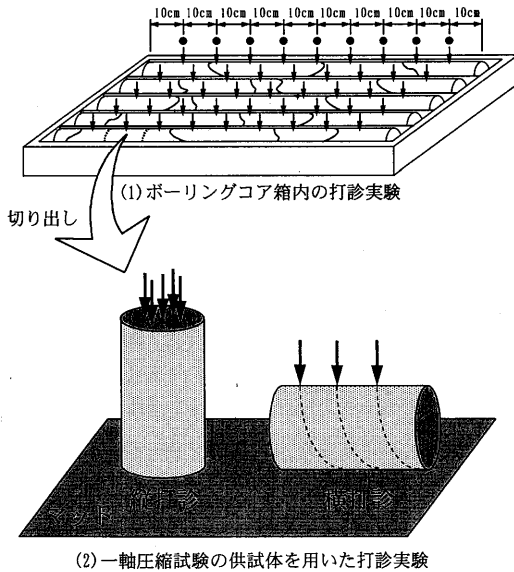


図-6 打診実験概念図

(2) 実験方法

打診は供試体の鉛直上方から電磁石を用いて鋼球 G4805-SUJ2 (直径 27mm, 質量 80.20g) を供試体の表面に対して 12.5mm の高さから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。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量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アグラムに示す。

(3) ボーリングコア箱内での打診音実験

実験は写真-1, 図-6 の (1) に示すように, ボーリングコアを木製の箱に置いた状態でコア全長 (58m) にわたって 10cm ピッチで合計 483 回 (Bor.No.1 : 179 回, Bor.No.2 : 182 回, Bor.No.3 : 122 回) 打診した。

なお, 10cm ピッチの打診位置と開口亀裂との間隔が 10mm 未満の場合には, 開口亀裂 (端部) の影響が懸念されるので⁹⁾, 開口亀裂から 10mm 離れた位置で打診した。

(4) 一軸圧縮試験の供試体を用いた打診音実験

図-6 の (2) に示すように一軸圧縮試験に用いる前の長さ約 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-6 の (2) に示す打診方向である。

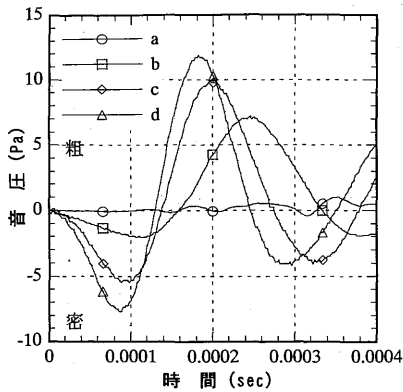


図-7 4 供試体の音圧波形

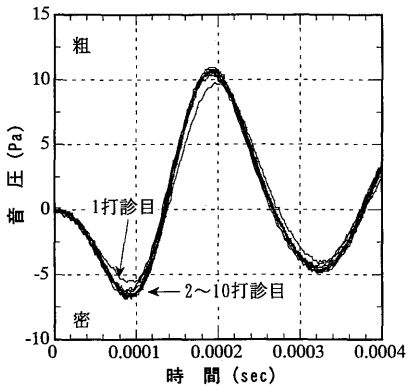


図-8 供試体 b の連続打診の音圧波形

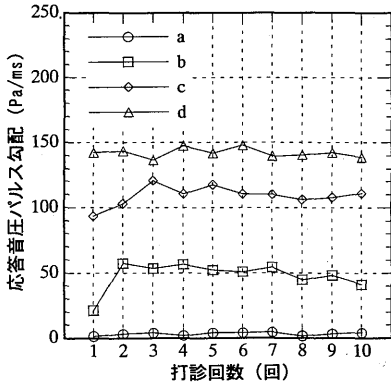


図-9 打診回数の影響

4. 結果と考察

(1) 音圧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-7 に示す。また表-1 にこ

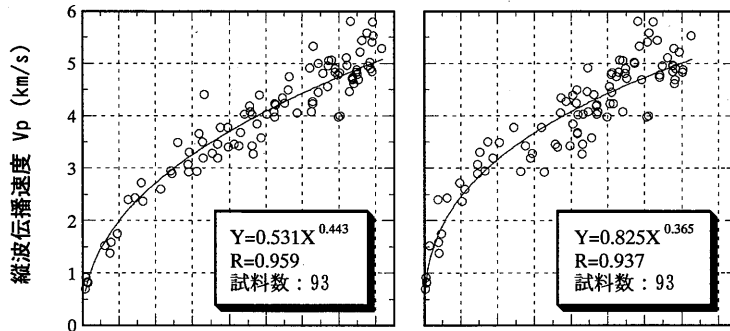
れらの物性値と応答音圧パルス勾配を示す。これらから、初期の音圧原波形の中でも特に立ち上がりの勾配には、表-1 に示した縦波伝播速度、弾性係数、一軸圧縮強さ、密度の値の違いが現れていることが分かる。ここに、弾性係数は一軸圧縮強さの 1/3 の応力状態での割線係数である。具体的には、これらの値が大きくなるほど、音圧波形の立ち上がりの勾配が大きくなっていく傾向がある。したがって、既往の研究³⁾⁻⁵⁾で供試体に用いた材料（セメントモルタル、セメントベントナイトモルタル、ステンレス鋼、銅、アルミニウム、塩化ビニール、天然ゴム）と同様に、実際の岩石においてもこの音圧波形の立ち上がりの部分には「供試体の材料特性を含んだ音圧」が現れていることが分かる⁶⁾。

(2) 応答音圧パルス勾配と打診回数との関係

既往の研究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-8 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が分かった。そこで表-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-9 に示す。なお、このときの打診は横打診を対象としている。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) 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）を取り、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取り、縦軸に各物性値をとって整理したものを各々図-10 (1) および図-10 (2) に示す。この図から相関に程度の差はあるものの、応答音圧パルス勾配と各物性値の相関は、縦波伝播速度を指標にする場合と同等程度に高いと言える⁶⁾。したがって、「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若干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考えられるが、この点については (6) 節で考察する。



*空気乾燥状態の密度

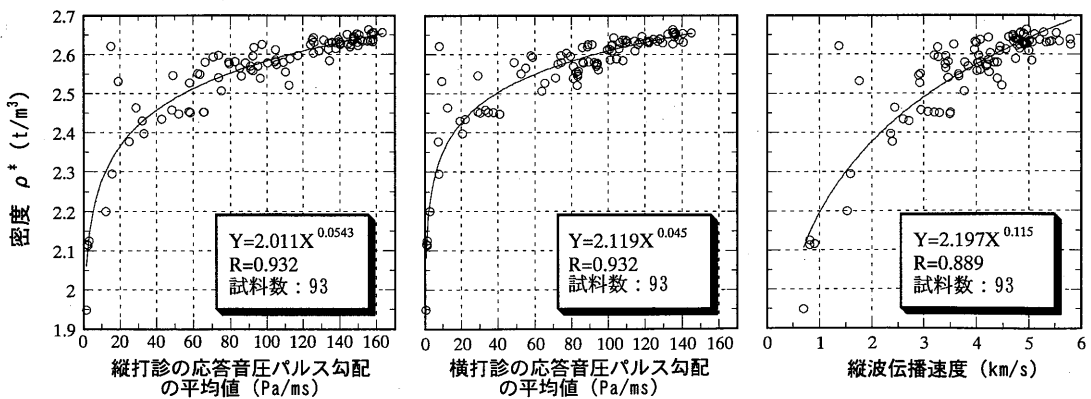
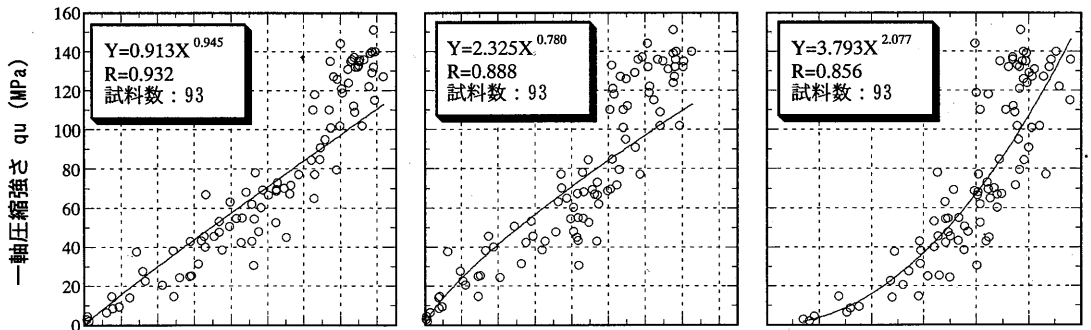
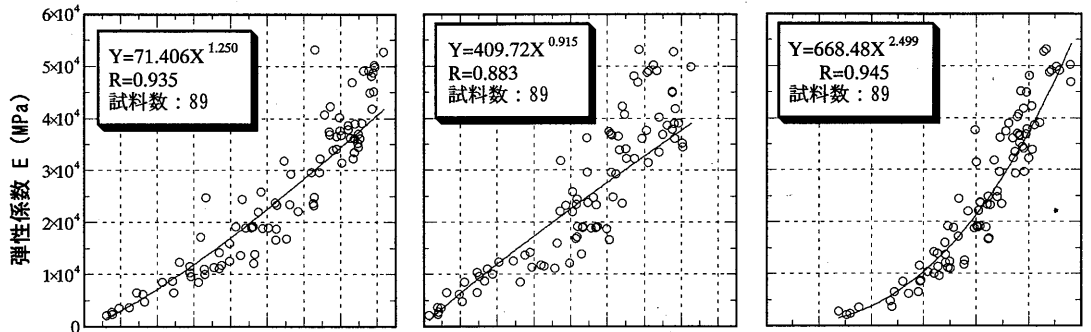


図-10 (1) 応答音圧パルス勾配と物性値の関係

図-10 (2) 縦波伝播速度と物性値の関係

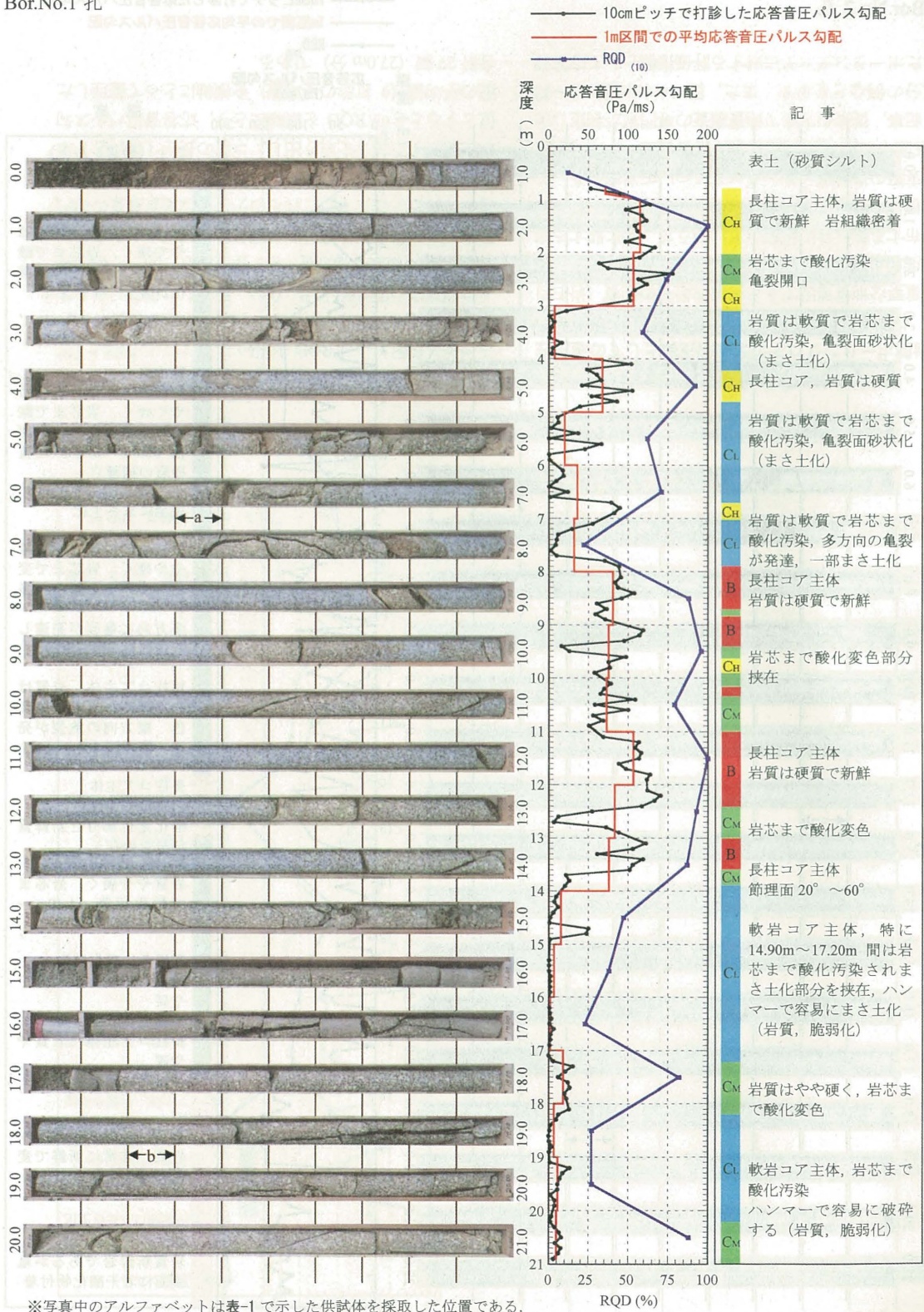


図-11 Bor.No.1 孔 ボーリングコアデータ

—●— 10cmピッチで打診した応答音圧パルス勾配
 — 1m区間での平均応答音圧パルス勾配
 — RQD₍₁₀₎

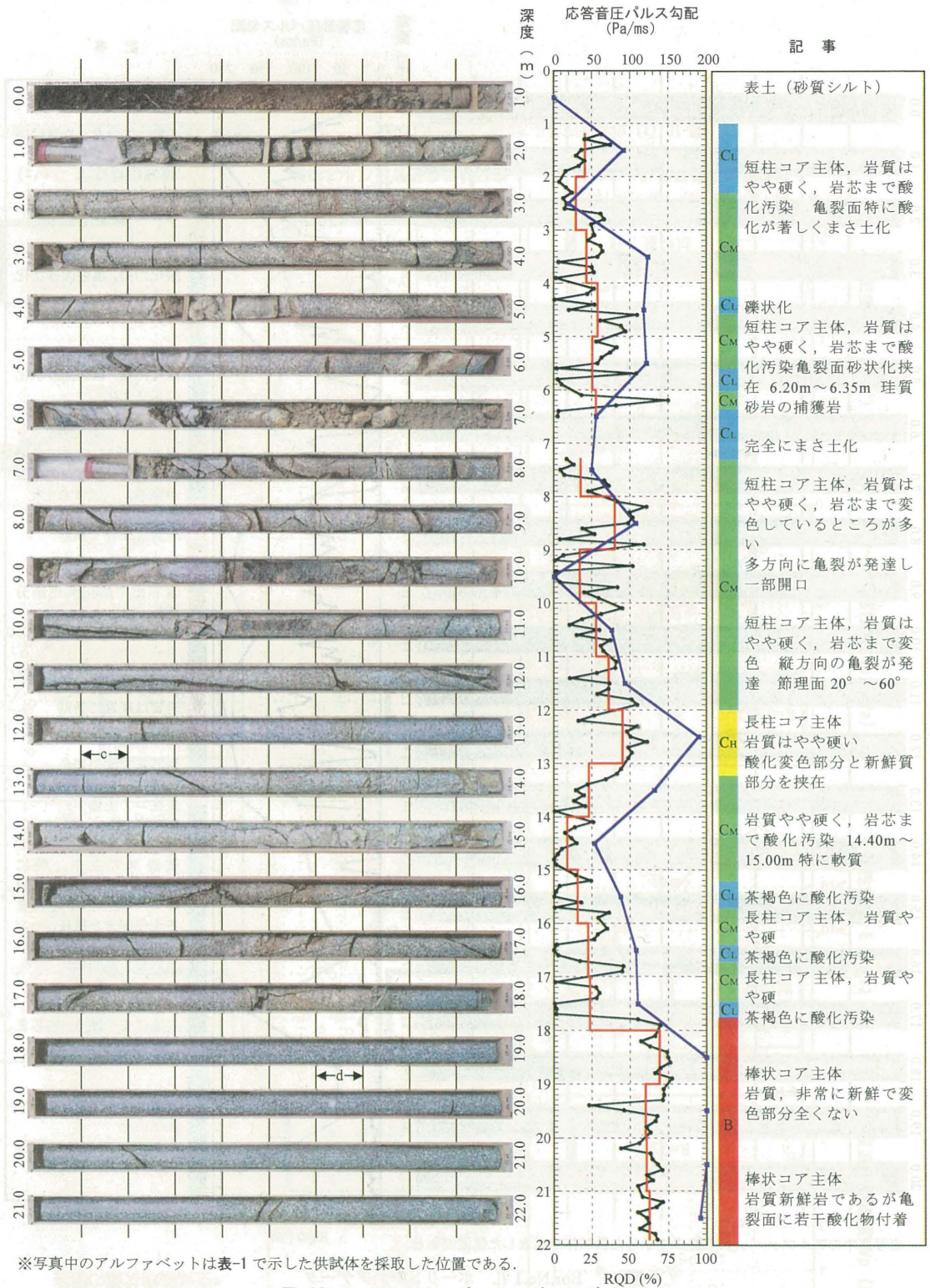


図-12 Bor.No.2 孔 ボーリングコアデータ

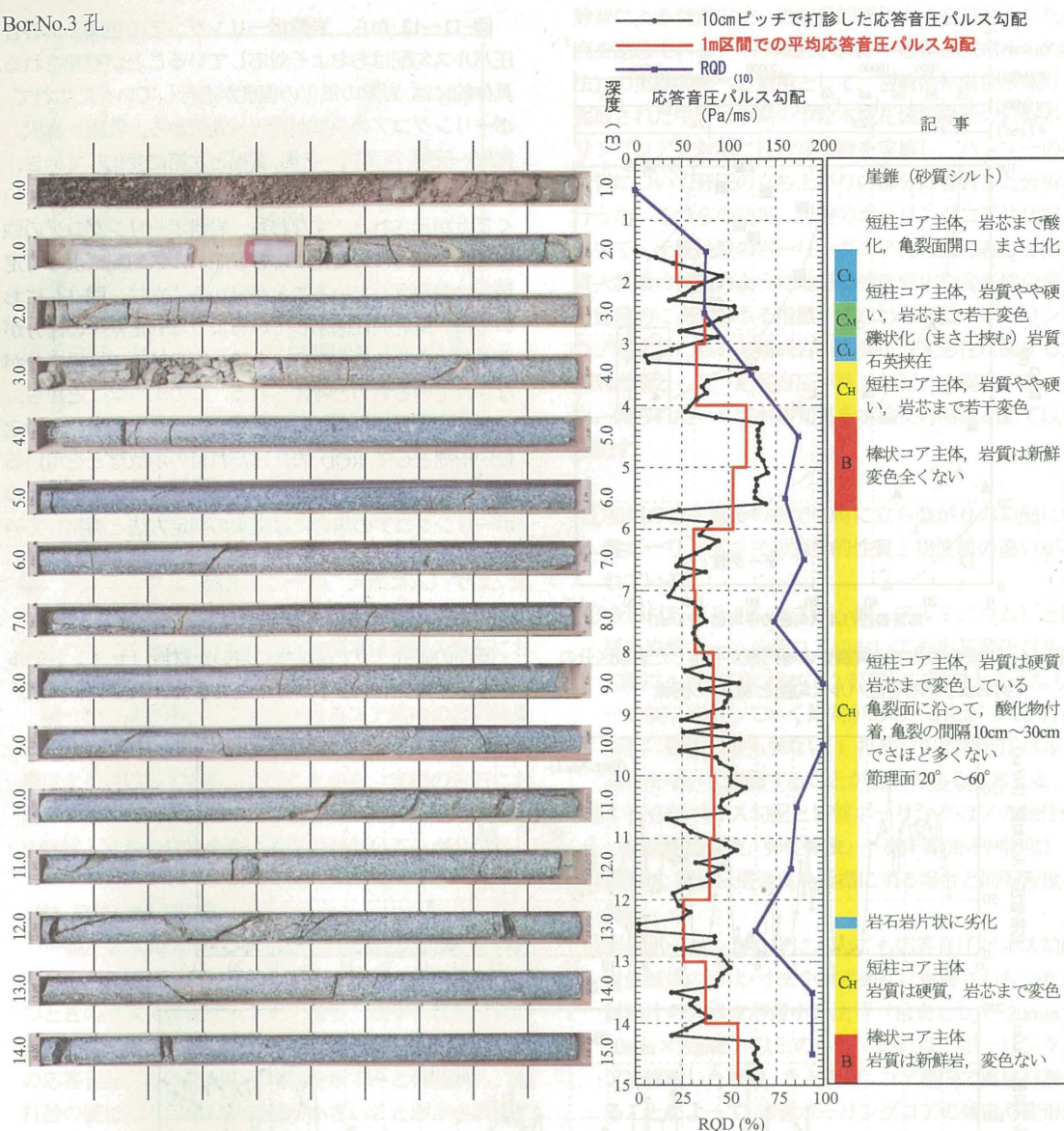


図-13 Bor.No.3 孔 ボーリングコアデータ

(4) 岩盤ボーリングコアの定量的指標としての適用性
 前節(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うることを示した。本節では図-11~13に示す実際の岩盤ボーリングコアについて考察する。ここで、各図中にはコア写真、RQD、応答音圧パルス勾配、深度、記事、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などを示す。また、図-14には図-11~13に示したボーリングコアに対する評価指標として応答音

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」との関連について示す⁹⁾。なお、図-14に併記した各物性値(V_p :縦波伝播速度、 E :弾性係数、 q_u :一軸圧縮強さ、 ρ :密度)は図-10の横打診の回帰式から求めたものである。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。

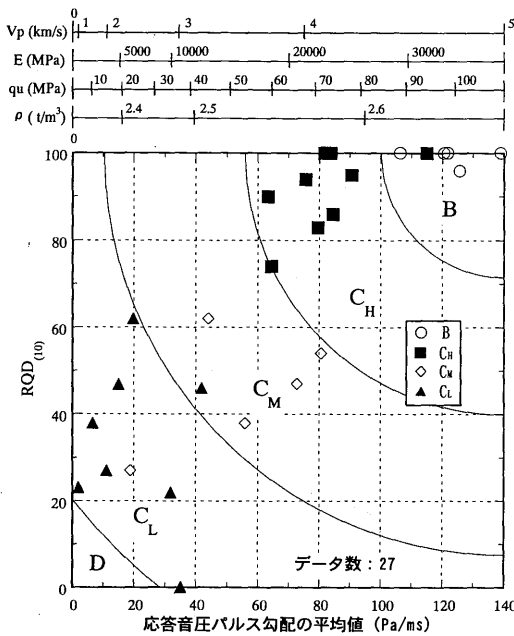


図-14 従来の方法で地質調査の専門家が判定した岩級区分の例および応答音圧パルス勾配とRQDの関係

図-11~13 から、岩盤ボーリングコアの色調と応答音圧パルス勾配はおおよそ対応していることが視認される。具体的には、岩盤の風化の程度が進行していくにつれて、ボーリングコアの色調が青灰～乳灰から、乳灰～褐灰、褐灰～灰褐、淡黄褐～黄褐、黄褐と次第に変化していき、これにともなって応答音圧パルス勾配は小さくなっていくことが示される。すなわち、岩盤ボーリングコアの強度変化や変形性の変化が応答音圧パルス勾配によって定量的に表現されていることが分かる。次に、図-14においては、概念的に図示しているような判定基準の区分があぶ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。このようなことから、上記④の定量的指標として応答音圧パルス勾配、⑥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新しい岩級区分の判定基準による結果は、花崗閃緑岩のボーリングコアの場合には従来の判定方法と調和していると考えられる。

(5) 供試体の形状・寸法と境界条件の影響

既往の研究^{3)~5)}で供試体に用いた材料(セメントモルタル、セメントベントナイトモルタル、ステンレス鋼、

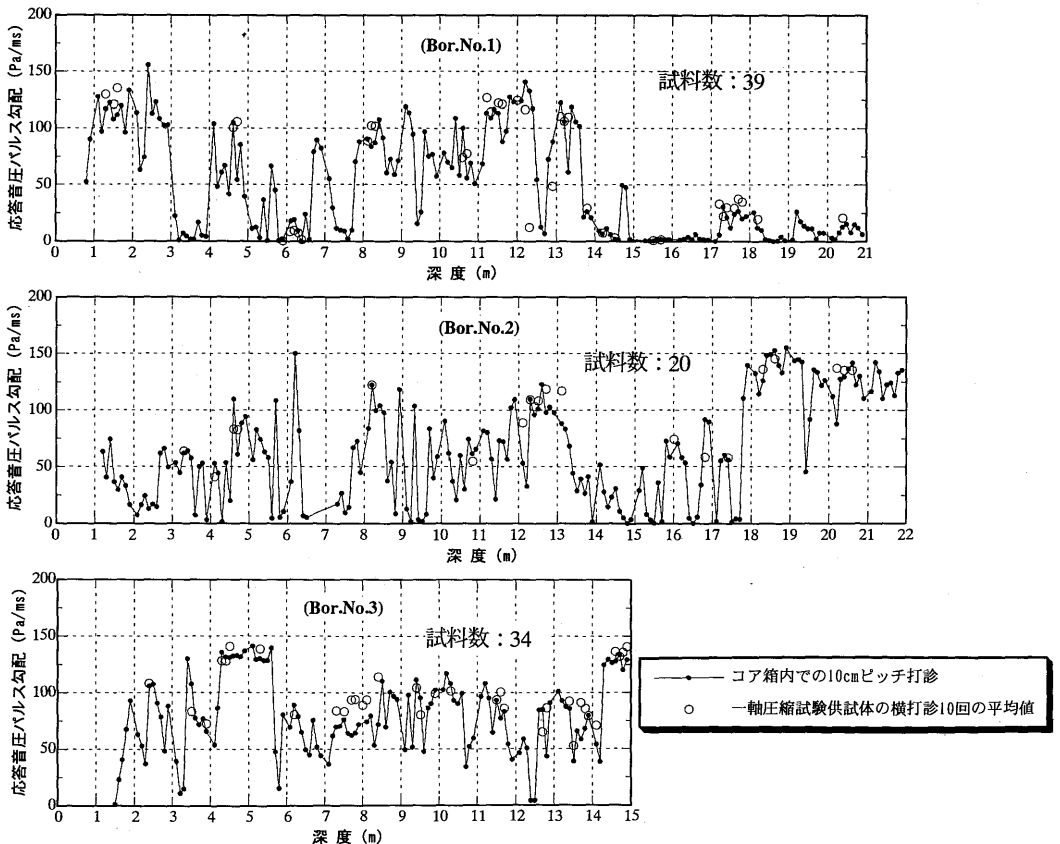


図-15 コア箱内打診とマット上打診の比較

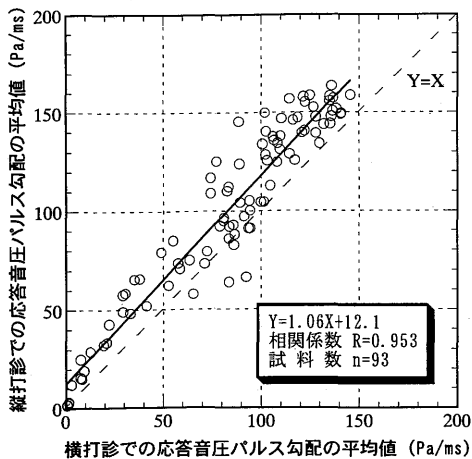


図-16 一軸圧縮試験用供試体の縦打診と横打診の関係

銅、アルミニウム、塩化ビニール、天然ゴム)では、応答音圧パルス勾配は供試体の形状・寸法や境界条件に影響されることが示されたが、本節では実際の岩石において考察する。

図-15には各ボーリングにおけるコア箱内の打診結果とマット上での横打診の結果を並べて示してあるが、両者はよく対応している。このことから、実際の岩石においても他の材料と同様に、応答音圧パルス勾配は供試体の形状・寸法や境界条件に影響されることが分かる。

(6) 打診位置の影響

一軸圧縮試験用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ものを図-16に示す。このときの境界条件はマット上である。図中の横軸は横打診の応答音圧パルス勾配の平均値を示し、縦軸は縦打診の応答音圧パルス勾配の平均値を示す。この図から、縦打診の値に比べて横打診の値が小さいことが示される。このことはボーリングコア程度の曲面($\phi=50\text{mm}$)では平坦面の場合と同等の応答音圧パルス勾配を示すという既往の研究結果⁴⁾(供試体の材料としてセメントモルタル、セメントベントナイトモルタルを使用)とは異なっている。この理由の一つとしては、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考えられるが、こ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。

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

診音による判定方法」の定量的評価方法を目的とした研究を進めている^{3)~7)}。本論文では、「応答音圧パルス勾配法」の実際問題への適用として、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岩盤ボーリングコアを対象に打診音実験を実施し、ハンマーの打診音について音圧の立ち上がりの部分に着目した分析を行った。これらの結果、岩盤のボーリングコア柱状図において、土質地盤のボーリングコア柱状図における標準貫入試験のN値のように地層の強度変化や変形性の変化を定量的に表現しうる指標、すなわち岩盤のボーリングコア柱状図において構成岩石の強度や変形性に関する定量的指標として「応答音圧パルス勾配」を提案する。また、得られたいくつかの知見を本論文の結論として以下に記す。

- ①初期の音圧波形の中でも特に立ち上がりの勾配に岩盤ボーリングコアの力学的性質と物性値の違いが現れている。
- ②金属材料(ステンレス鋼、銅、アルミニウム)と同様に岩盤ボーリングコアにおいても応答音圧パルス勾配は1打診目に比べて2打診目以降で大きくなり、一定値に収束していく傾向がある。したがって、打診回数の影響が最も少ない1打診目の応答音圧パルス勾配を用いて評価することが適切であると考えられる。
- ③応答音圧パルス勾配と岩盤ボーリングコアの物性値(縦波伝播速度、弾性係数、一軸圧縮強さ、密度)の相関は、縦波伝播速度を指標にする場合と同等程度に高い。
- ④岩盤ボーリングコアにおいても応答音圧パルス勾配は供試体の形状・寸法や境界条件に影響されないため、試験片の大きさが最小寸法⁵⁾(目安として $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$)以上のものであれば、ボーリングコアを採取した状態、たとえば、コア箱内で直接打診することによって、岩盤ボーリングコアの強度や変形性などを定量的に把握することが可能である。
- ⑤岩盤ボーリングコアの風化の程度を表す色調と応答音圧パルス勾配はおおよそ対応していることが確認された。このことと、上記③、④の内容から、岩盤ボーリングコアの強度変化や変形性の変化が応答音圧パルス勾配によって定量的に表現されうると言える。すなわち、土質地盤のボーリングコア柱状図における標準貫入試験のN値に相当する定量的な力学値として、応答音圧パルス勾配は岩盤のボーリングコア柱状図における有用な指標になり得るものと考えられる。
- ⑥構成岩石の性質(岩石自体の強度および変形性など)の定量的指標として応答音圧パルス勾配、不連続面の性質(岩盤中に分布する割れ目の状態など)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新しい岩級区分の判定基準による結果は、花崗閃緑岩のボーリングコアの場合には従来の判定方法と調和していると考えられる。

これらは、あくまでもただ一種類の塊状岩のボーリングコアから得られた結論であって、このほかの岩種に対して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、実際の岩盤ボーリングコア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」は岩盤ボーリングコアの岩級区分において重要な地質要因である構成岩石の性質（岩石自体の強度および変形性など）と不連続面の性質のうち、構成岩石の性質に関する定量的指標になり得るものと考えられる。

今後は、層状岩などにおいても研究を進め、岩種の異なる複数のボーリングコアを対象に実験データを収集することによって、岩盤ボーリングコアの定量的指標としての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。また、トンネルの切羽、ダム基礎、切土斜面などといった実際のマシブな岩盤評価においての本指標の適用を念頭に置いて、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きたい。

謝辞: 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 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) 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) 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, pp.335-351, 1999.
- 5) 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, 材料掲載予定, 第49巻9号, 2000.
- 6) 稲森光洋, 御手洗良夫, 船曳伸二, 瀬崎満弘: 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, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.30, pp.183-187, 2000.
- 7) 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」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回年次学術講演会講演概要集, III-A 384, pp.768-769, 1999.
- 8) 三木幸蔵著: 絵とカラー写真で理解する岩盤力学入門, pp.127-185, 1986.
- 9) 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.

(2000.1.19 受付)

AN APPLICATION OF “RESPONSE SOUND PRESSURE PULSE INCLINATION METHOD” FOR BORING CORE OF GRANODIORITE

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

This is one of the studies aimed at quantitative evaluation of the indices for rock mass classification that deals with “judgment method by the hammer tapping”. In this study, we examined the tapping test and unconfined compression strength using boring core of granodiorite, which was gathered at Kijyo in Miyazaki for application of practical problems. As a result, we showed “response sound pressure pulse inclination” can be applied as a quantitative index, like N-value of soil boring log, for strength and ductility of stratum. So we propose this inclination to be used as a quantitative index for rock mass boring core.