孔内打撃応答試験機の適用性に関する検討

菊地 宏吉*・水戸 義忠*・宇津木 慎司*

The application of 'Borehole Hammer' to in-situ Rock Masses

Kohkichi KIKUCHI*, Yoshitada MITO* and Shinji UTSUKI*

Key words : 打撃試験 impaction test, 簡易試験 simple test, 孔内試験 borehole test,
変形性 deformability

Abstract

A test system using Rock Test Hammer is often used to evaluate rock mass properties, simply. Strike response value is measured by using this equipment, and the modulus of elasticity and uni-axial strength are expected. In order to apply this principle to the borehole logging, a new tool "Borehole Hammer" was developed. Laboratory testing on rock specimen using this tool has already been carried out and we have successful results.

In this study we conducted the in-situ tests using "Borehole Hammer" and borehole expansion tests in order to grasp the applicability of "Borehole Hammer" to the estimation of rock mass deformability. As the results, the relationship between strike response value obtained by "Borehole Hammer" and elasticity tends to linear and the applicability of "Borehole Hammer" to the in-situ rock masses is clarified.

1. 緒 言

現在、地表や調査横坑における簡易かつ定量的な岩盤評価の手法として、ロックテストハンマー（ロックシュミットハンマーとも呼ばれている）や簡易弾性波測定器などが挙げられる。このうちロックテストハンマーは岩盤の固密性を反発度で表現するものであり、この値から岩盤の変形係数、静弾性係数を簡易に推定することができ、原子力サイトおよび大容量鉄塔基礎の調査など現在建設関連の調査において広く実用化されている¹⁾。しかしながら、このロックテストハンマーは、地表や調査横坑などの岩盤が露出している部分においては適用可能であるが、比較的乱されない状態の岩盤の工学的特性を把

握すると同時に広い範囲の岩盤の工学的特性を把握する上で有効なボーリングの孔内では適用が不可能である。

このような実状から、ロックテストハンマーの原理をボーリング孔に適用することを目的とし、「孔内打撃応答試験機」（写真-1）が考案・開発された²⁾。本試験機は、ボーリング孔の孔壁を小型の電磁ハンマーで打撃し、その際の反発度から岩盤の物性値を推定するものであり、均質な人工材料および岩石供試体を用いた室内試験において、本試験機による測定値と各種物性値との相関性が検証されている。しかしながら、原位置における本試験機による測定実績は極めて少なく、岩盤の各物性値との対応性が検証されていないため、完全な実用化には至っていない。

本研究においては、数種類の岩盤およびダムの堤体コンクリートにおいて本試験を多数行くと同時に、同一箇

* 京都大学工学部 Faculty of Engineering, Kyoto University

写真-1 孔内打撃応答試験機

所で孔内水平載荷試験を実施し、打撃応答量と変形係数ならびに静弾性係数とを比較することによって、孔内打撃応答試験機の実位置における適用性の検討を行った。

2. 孔内打撃応答試験機

まず最初に、孔内打撃応答試験機の概要ならびに測定原理について述べる。

2.1 孔内打撃応答試験機の概要

試験機本体は、電磁力で駆動する小型ハンマーと弾性波を測定する受振センサー等を有するゾンデと、測定によって得られる各波形の増幅、整形、表示および記録を行う機能、電磁ハンマーを駆動させる機能、収録された波形の処理・解析を行う機能等を有する地上計測部からなる。

図-1は、本試験機の孔内への挿入時の概念図を示したものである。本試験機は、ゾンデ自体が非常に軽量であるため、他の多くの孔内試験機のようにロッドで試験機を吊る必要がなく、また試験に費やす時間も短いことから、短時間に連続的に多数の点で試験を実施できる。このように本試験機は簡易かつ迅速な測定ができるという利点を有する。

試験時には、小型の電磁ハンマーに設置された速度計によってハンマーが孔壁に衝突してから離れるまでの挙動が測定され、図-2に示すような速度波形およびそれを微分した加速度波形が地上計測部に表示される。

なお、本試験機は、マスとしての岩盤の情報を補うと同時に従来から行われている速度検層による岩盤の評価と関連づけるため、ハンマーの打撃により発生した弾性波を測定して、弾性波速度を求めることが可能となっている。

2.2 孔内打撃応答試験の原理

図-2の速度波形は、ハンマーが初速度 V_0 で孔壁に

図-1 孔内打撃試験の概要

図-2 ハンマーの速度波形および加速度波形と打撃モード

衝突し (①)、速度が次第に減少してやがて速度が0になった (②) 後に、反対方向への速度が次第に増加し、孔壁から離れる (③) といった典型的なモードを示したものである。

この速度波形を時間微分した加速度波形のパラメータのうち、加速度波形の最大値 P_{max} は、強度や変形係数の大きい材料ほど高くなり、波形のパルス幅 W は低くなることが知られており、また P_{max} や W の値は、ハンマーの初速度 V_0 によって変化することが知られている。このことから、孔内打撃応答試験の特性量として、打撃応答量なる量が次式のように定義されている³⁾。

$$\text{打撃応答量 (ms}^{-2}\text{)} = \frac{P_{max}}{W \cdot V_0} \quad (1)$$

ただし、 P_{max} : 加速度波形の最大値 (gal)

W : パルス幅 (ms)

V_0 : 打撃時のハンマーの初速度 (kine)

図-3 打撃応答量と岩石供試体の物性値の関係

図-4 孔内打撃応答試験と孔内載荷試験の位置関係

均質な人工材料および岩石供試体を用いた室内試験の結果、打撃応答量は、図-3に示すように岩石の静弾性係数および一軸圧縮強度と高い相関関係を示すことが知られている³⁾。また、岩盤をばねとしてモデル化することによって運動方程式を解くと、打撃応答量が岩盤のばね定数に比例することが判明している³⁾。

3. 原位置試験方法

本研究においては、孔内打撃応答試験機の測定値である打撃応答量と岩盤ならびにコンクリートの変形性との対応関係を検討するために、孔内打撃応答試験および孔内載荷試験を以下のように実施した。

図-4は、ボーリング孔内における孔内打撃応答試

験、孔内載荷試験の実施箇所の位置関係を示したものである。試験順序としては、まず非破壊試験である孔内打撃応答試験を行い、その後に、孔内打撃応答試験の打撃点と載荷区間が重複するような位置(図-4参照)において孔内載荷試験を実施した。このような測定区間をさまざまな地点において削孔された多数のボーリング孔内に設け、孔内載荷試験によって得られる変形性(変形係数ならびに静弾性係数)と孔内打撃応答試験の測定値との対応関係を検討した。

なお、試験を実施した岩種は、中生代白亜紀の流紋岩、中生代白亜紀の砂岩、新第三紀の凝灰角礫岩、中生代白亜紀の溶結凝灰岩、中生代白亜紀の花崗岩であり、試験を実施したコンクリートは、在来工法によるコンク

リートダム (A ダム) の堤体ならびに RCD 工法によるコンクリートダム (B ダム) の堤体である。

4. 原位置試験結果・考察

4.1 打撃応答量と変形性の関係

ロックテストハンマーの反発度と同様に、孔内打撃応答試験機の打撃応答量は点で得られるデータであるため、打撃点近傍に位置する節理など、岩盤の局所的な性状の影響を受けやすく、1点において得られた打撃応答量のみから広がりを持った範囲の岩盤を評価することは困難であると考えられる。

このことを踏まえ、本研究においては、図-4(a)に示すような20 cm 間隔で隣合う4打撃点において得られる打撃応答量の平均値と、同一測定区間における孔内載荷試験から得られた岩盤の変形係数ならびに静弾性係数(接線弾性係数)との対応関係を検討した。

図-5は、ある程度広範囲の物性値が得られた3種類の岩盤における打撃応答量の平均値と変形性の関係である。これらの図を見ると、いずれの岩盤においても打撃応答量の平均値の増加に伴って変形係数および静弾性係数が増加していることがわかる。図-6(a)は5種類の岩盤と2種類のコンクリートにおける打撃応答量の平均値と変形係数との関係であり、図-6(b)は打撃応答量の平均値と静弾性係数との関係をそれぞれ示したものである。なお、図中には最小二乗法による回帰式ならびにそれを中心とするおよその分布域を示してある。これらの図を見ると、それぞれ多少のばらつきはあるものの、打撃応答量の平均値と岩盤の変形性とは比較的高い相関性を有していることがわかる。

4.2 割れ目の分布密度を考慮した測定数量の検討

表-1に、図-4(a)に示した1測定区間内の4つの打撃点で得られた打撃応答量の変動係数、およびコア観察によって得られた割れ目の分布密度を岩種別(コンクリート含む)に示す。4つの点において得られた打撃応答量のばらつきが大きければこの値は大きくなり、逆に4つの点において得られた打撃応答量のばらつきが小さければこの値は小さくなる。本表を見ると、岩盤については、割れ目が多い不均質な岩盤ほど変動係数が大きくなり、割れ目が少ない均質な岩盤ほど変動係数が小さくなる傾向が見られ、またコンクリートでは、割れ目の少ない岩盤の場合とはほぼ等しい値を示していることがわかる。このことから、割れ目が多い岩盤においては各点において得られる打撃応答量のばらつきが比較的大きく、割れ目の少ない岩盤、あるいはコンクリートにおいてはそのばらつきが小さくなることが明らかになった。

表-1 各種岩盤における4点の打撃応答量の変動係数

割れ目の分布	岩 種	変動係数
多 い	凝灰角礫岩	0.23616
	砂 岩	0.33181
	流 紋 岩	0.21484
	花 崗 岩	0.15273
	熔結凝灰岩	0.14318
少 ない	Aダム堤体	0.18549
	Bダム堤体	0.15923

以上のことにかんがみ、割れ目の分布密度を考慮に入れた孔内打撃応答試験の測定数量について検討することにする。

(1) 割れ目密度が高い(不均質)岩盤に関する検討

上述したように、割れ目が多く見られる岩盤においては、それぞれの打撃点において得られる打撃応答量の値のばらつきが比較的大きいが、このことから、より正確な岩盤評価を行うためには、打撃点間隔を狭くしてより多くの点の情報を考慮することが考えられる。ここでは、10 cm 間隔で隣合う7点における打撃応答量の平均値について検討する。

図-4(b)に打撃点の位置を示す。試験を実施した岩盤は、割れ目が非常に多く岩盤等級区分がD~C_L級を呈する凝灰角礫岩、および割れ目が比較的少なく岩盤等級区分がB~C_H級を呈する花崗岩、の2種類の岩盤である。

ここで、図-4(a)に示した20 cm 間隔で隣合う4点において得られた打撃応答量の平均値と、同一測定区間において図-4(b)に示した10 cm 間隔で隣合う7点で得られた打撃応答量の平均値との関係を示したものが図-7である。本図を見ると、割れ目が多く見られる凝灰角礫岩岩盤においても割れ目が比較的少ない花崗岩岩盤においても、図-6に示した4点における平均値と7点における平均値との相違はほとんど認められない。

また、図-8(a)は2種類の岩盤における7点での打撃応答量の平均値と変形係数との関係、図-8(b)は7点の打撃応答量の平均値と静弾性係数との関係をそれぞれ示したものであるが、これらの図においても4点の平均値を用いた場合とはほぼ同様の比例関係がみられ、7点を平均することによる顕著な精度の向上が認められない。このことから、最大4点における打撃応答量の平

図-5 各種岩盤における打撃応答量の平均値と変形性の関係

a) 打撃応答量の平均値と変形係数の関係

b) 打撃応答量の平均値と静弾性係数の関係

図-6 5種類の岩盤, 2種類のダム堤体における打撃応答量の平均値と変形性の関係

図-7 4点の打撃応答量の平均値と7点の打撃応答量の平均値の関係

均値を用いることによって、十分な評価が行えるものと思われる。

(2) 割れ目密度が低い(均質)岩盤に関する検討

表-1を見ると、割れ目がほとんど存在していない岩

盤やコンクリートなどほぼ均質な状態のものを対象とする場合には、打撃応答量の位置的变化は少なく、ほぼ一定の値をとっている。そこで、このような場合には、上記(1)の検討とは逆に、測定数量を減らしても打撃応答量の平均値が4点の平均値の場合と同様に岩盤ならびにコンクリートの変形性と良い対応関係を示すことが推察される。

以上のことを踏まえ、比較的割れ目の少ない岩盤とダムの堤体コンクリートにおいて、図-4(c)に示した20 cm 間隔で隣合う2点における打撃応答量の平均値について検討を行った。なお、検討を実施した岩盤は、割れ目がほとんど見られず岩盤等級区分がB~C_H級を呈する熔結凝灰岩、および割れ目が比較的少なく岩盤等級区分がB~C_H級を呈する花崗岩、の2種類の岩盤であり、またコンクリートは、Aダム堤体、Bダム堤体(RCD)の2種類である。

ここで、図-4(a)に示した20 cm 間隔で隣合う4点において得られた打撃応答量の平均値と、図-4(c)に示した20 cm 間隔で隣合う2点において得られた打撃応答量の平均値との対応関係を示したのが図-9である。本図を見ると、比較的割れ目が少ない岩盤およびコ

(a) 打撃応答量の平均値と
変形係数との関係

(b) 打撃応答量の平均値と
静弾性係数との関係

図-8 7点の打撃応答量の平均値と変形性の関係

図-9 4点の打撃応答量の平均値と2点の打撃応答量の
平均値の関係

ンクリート堤体においては、多少ばらつきが見られるものの、4点における平均値と2点における平均値とがほぼ等しくなっていることがわかる。また、図-10(a)は、打撃応答量の平均値と同一地点における変形係数との関係、図-10(b)は、2点における打撃応答量の平均値と静弾性係数との関係を示したものである。2点の打撃応答量の平均値と変形性の関係は、多少のばらつきが見られるものの、本研究で検討を行った岩盤における場合と概ね同様の範囲内にプロットが位置していると思わ

れる（ほとんどの点が図-6に示した4点の場合における点の分布域内に入っている）。

以上のことから、割れ目がほとんど存在していないほぼ均質な状態の岩盤およびコンクリートにおいては、20 cm 間隔で隣合う2点での打撃応答量の平均値によって変形性のある程度推定できるものと考えられる。

4.3 割れ目の分布密度を考慮した変形性の評価

打撃応答量は、局所的な打撃によって得られるため岩質部分の状態の他に割れ目の存在に強く影響を受けると考えられる。

図-6を見ると、熔結凝灰岩や花崗岩のような割れ目密度の低い岩盤やコンクリートほど、打撃応答量の平均値に対する変形性の値が比較的大きくなり、割れ目密度の高い岩盤ほど、その値は小さくなる傾向が認められる。このことから、打撃応答量を用いてより正確な岩盤評価を実施するに当たっては、割れ目の分布密度を用いた評価方法を確立することが必要であると考えられる。

ここで、割れ目の分布密度を考慮した打撃応答量による変形性の評価式を以下のように提案する。

$$\log E' = a \log X - \frac{b}{\log Y} + c \quad (2)$$

ただし、 E' : 推定変形係数または推定静弾性係数 (kgf/cm²)

X : 打撃応答量の平均値 (4点) (ms⁻²)

図-10 2点の打撃応答量の平均値と変形性の関係

$$Y = \frac{60(\text{cm}) (\text{一測定長})}{\text{測定区間に存在する割れ目数}}$$

a, b, c : 定数

本式は、割れ目の多い岩盤ほど打撃応答量の平均値に対する変形性の値が小さくなり、割れ目の少ない岩盤ほど打撃応答量の平均値に対する変形性の値が大きくなる現象の影響を、割れ目の分布密度を考慮することによって軽減させるものである。なお、式中の係数である a, b, c は、実測変形係数、実測静弾性係数と(2)式の推定変形係数、推定静弾性係数との対応関係を基に算出された最適値を用いる。

今回は、上述の5種類の岩盤において得られた実測データのうち、コアによって割れ目情報が得られたデータを用いて最小二乗法により最適値を算出した結果、変形係数、静弾性係数のそれぞれについて、以下のような推定式を得た。なお、割れ目密度として、測定区間におけるボーリングコア中に存在する割れ目数で測定区間長を除いた値を用いている。

・変形係数に関する推定式

$$\log E' = 2.01 \log X - \frac{0.96}{\log Y} - 1.02 \quad (3)$$

・静弾性係数に関する推定式

$$\log E' = 2.02 \log X - \frac{1.02}{\log Y} - 0.73 \quad (4)$$

図-11(a)は(3)式に打撃応答量の平均値を代入することによって得られる推定変形係数および推定静弾性係数と実測値との関係を示したものである。また、割れ目密度を考慮せずに打撃応答量の平均値のみから最小二乗近似によって求めた推定式は、

・変形係数に関する推定式

$$\log E' = 2.66 \log X - 3.75 \quad (5)$$

・静弾性係数に関する推定式

$$\log E' = 2.70 \log X - 3.61 \quad (6)$$

となるが、これらの式に実測の打撃応答量の平均値を代入することによって得られる推定変形係数および推定静弾性係数と実測値の関係を示したものが、図-11(b)である。なお、岩盤の変形係数は静弾性係数と比較して割れ目の影響を受けやすいことが知られており、図-11(b)に示した相関係数についても割れ目の影響を受けにくい静弾性係数の方が高く、このことから割れ目の影響を考慮することが重要であることがうかがえよう。

ここで、図-11中の帯は、いずれも Y 距離 (推定式と実測値との Y 軸に沿った距離) の標準偏差の2倍の範囲 (96%信頼区間) を示している。これらの図を見ると、割れ目の分布密度を考慮した推定を行った方が点のばらつきおよび信頼区間の幅が小さくなっており、変形係数に関しては約18%程度、静弾性係数に関しては約16%程度信頼区間の幅が小さくなり、推定精度が向上していることがわかる (なお、割れ目の影響を受けや

図-11 推定物性値と実測物性値の関係

すい変形係数の方が推定精度の向上度合いが若干高くなっている)。

以上の検討結果から、割れ目の分布密度を考慮した場合、打撃応答量による変形性の推定精度が向上することが判明した。

5. 結 論

本研究においては、孔内打撃応答試験の原位置における適用性を検討するために、多数の原位置試験を実施し、その測定結果の検討を行った。本研究によって得られた知見は以下の通りである。

I 測定範囲に 20 cm 間隔で設定した 4 つの打撃応答

量の平均値は、岩種・コンクリート等の材質によらず、変形係数・静弾性係数と比較的高い相関性を示し、このことから孔内打撃応答試験機が原位置における適用性を有することが明確になった。

II より正確な岩盤評価を行う目的で 10 cm 間隔で隣合う 7 点における打撃応答量の平均値を算出したところ、20 cm 間隔で隣合う 4 点における平均値とほぼ同様の値を示すことが明らかになった。本試験機の最大の特徴である簡易性を保持する意味でも、打撃応答量による岩盤評価の際には 4 点の平均値で十分であると考えられる。

III 割れ目の分布密度が低い岩盤およびコンクリートな

どの比較的均質な材料の場合には、20 cm 間隔で隣合う2点の打撃応答量の平均値が、4点の平均値の場合と同様、岩盤およびコンクリートの変形性と比較的高い相関性を示した。

Ⅳ 測定範囲における割れ目の分布密度を考慮にいった打撃応答量による変形性の推定式を考案し、変形係数および静弾性係数の推定値と実測値の関係を調べたところ、さらに推定精度が向上し、より正確な岩盤評価が可能となった。

本研究においては、5種類の岩盤および2種類のコンクリート堤体において多数の原位置試験を実施し、その結果を用いて孔内打撃応答試験機の原位置における適用性の検討を行ったが、この検討によって、原位置における変形性の推定に関する本試験機の適用性がある程度検証されたものと思われる。

本試験機は、基本的に岩盤を打撃するのみの試験機であるため、測定に費やす時間が非常に短く、また基礎岩盤全体に比較的多く実施されるボーリング孔を利用した試験機であることから、広い範囲の岩盤を簡易かつ迅速に評価することができると考えられる。したがって、岩

盤の変形性の推定のみにとどまらず、ボーリング孔における客観的・定量的な岩盤評価（強度も含む）をする上でも非常に有益であると考えられる。

なお、本研究を実施するに当っては、文部省科学研究費試験研究（B）（2）（研究代表者菊地宏吉、課題番号03555134、孔内打撃応答試験機の実用化に関する試験研究）の補助を一部受けた。ここに記して謝意を述べる。

参 考 文 献

- 1) 斎藤和雄，楠建一郎，菊地宏吉（1982）：簡易測定機による岩盤評価，電力土木 No. 176, pp. 54 - 61.
- 2) 鈴木英世，野沢是幸，菊地宏吉，藤枝 誠，曾根好得（1987）：ボーリング孔を利用した簡易打撃応答試験機の開発，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 217 - 222.
- 3) 鈴木英世，野沢是幸，菊地宏吉，藤枝 誠，曾根好得（1989）：孔内簡易打撃応答試験機の開発と適用（その2），第21回土木学会岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 255 - 260.

（1994年7月14日受付，1995年12月21日受理）