

(22) 孔内打撃応答における打撃応答量と変形性の関係 The application of 'Borehole Hammer' to in-situ rock masses

水戸 義忠*・菊地 宏吉*・○宇津木 慎司**・武藤 光***
Yoshitada MITO, Kohkichi KIKUCHI, Shinji UTSUKI and Ko MUTO

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.

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.

1. 緒言

現在、簡易かつ定量的な岩盤評価手法の1つにロックテストハンマー（ロックシュミットハンマー）を用いた方法がある。この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るため、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上で有効なボアリング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ア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、ボア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、

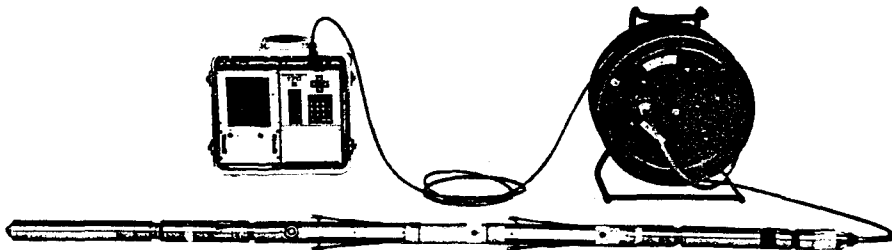


写真-1 孔内打撃応答試験器

-
- * 正会員 京都大学工学部
 - ** 正会員 (株)間組土木統括本部 技術・設計第二部
 - *** 正会員 (株)青山機工 第2工事部

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、原位置において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、数種類の岩盤及びびぐムの堤体コンクリートにおいて本試験を多数行うと同時に、同一箇所でも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原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

試験機本体は、電磁力で駆動する小型ハンマー等を有する「ゾンデ」と、電磁ハンマーを駆動させる機能、収録された波形の処理を行う機能等を有する地上計測部からなる。本試験機は、「ゾンデ」自体が非常に軽量であり、また試験に費やす時間も短いことから、短時間に多数の点で試験を実施できる。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の孔壁に衝突してから離れるまでの挙動が測定され、図-1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。図-1の速度波形は、ハンマーが初速度 V_0 で孔壁に衝突し(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。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¹⁾。

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

但し、 P_{\max} : 加速度波形の最大値 (gal)
 W : ハルス幅 (ms)
 V_0 : 打撃時のハンマーの初速度 (kine)

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-2に示すように岩石の静弾性係数及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¹⁾。

3. 原位置試験方法

本研究においては、上述の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、孔内打撃応答試験及び孔内載荷試験を以下のように実施した。図-3は、ボア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、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-3参照)において孔内載荷試験を実施した。

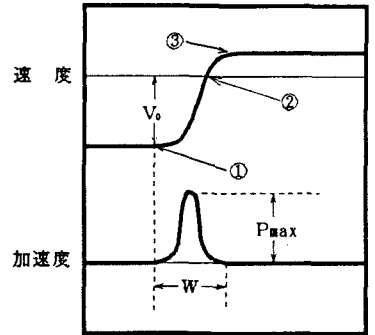
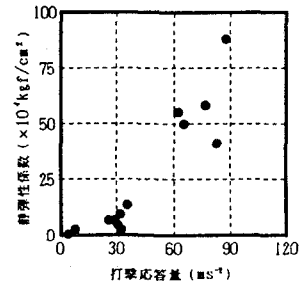
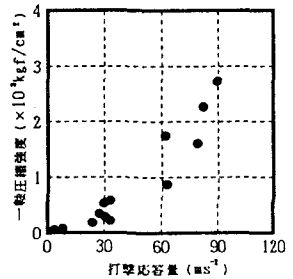


図-1 ハンマーの速度波形・加速度波形



(a) 打撃応答量と静弾性係数の関係



(b) 打撃応答量と一軸圧縮強度の関係

図-2 打撃応答量と各物性値との関係

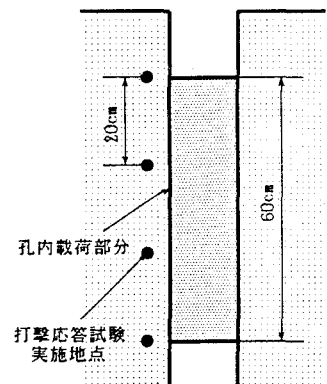


図-3 孔内試験実施位置

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

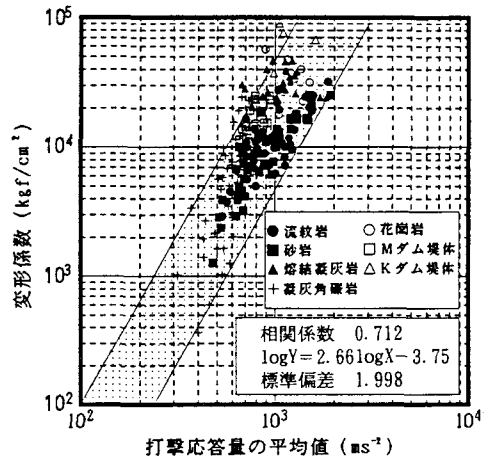
4. 原位置試験結果・考察

4.1 打撃応答量と変形性の関係

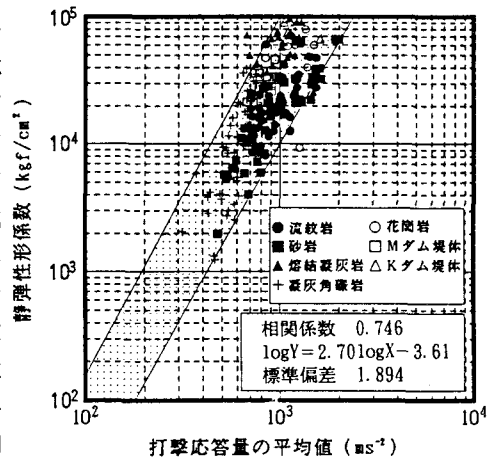
ロケットホマーの反発度と同様に、打撃応答量は点で得られるデータであるため、打撃点近傍に位置する節理など、岩盤の局所的な性状の影響を受けやすく、1点において得られた打撃応答量のみから広がりを持った範囲の岩盤を評価することは困難であると考えられる。このことを踏まえ、本研究においては、図-3に示すような20cm間隔で隣合う4打撃点において得られる打撃応答量の平均値と同一区間における孔内載荷試験より得られた岩盤の変形係数ならびに静弾性係数（接線弾性係数）との対応関係を検討した。図-4(a)は5種類の岩盤と2種類のコンクリートにおける打撃応答量の平均値と変形係数との関係であり、図-4(b)は打撃応答量の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。これらの図をみると、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-3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77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つの点での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つの点での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小さくなる傾向がみられ、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



(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-4 打撃応答量の平均値と岩盤の変形特性との関係

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
	凝結凝灰岩	0.14318
少ない	Aダム堤体	0.18549
	Bダム堤体	0.15923

きが小さくなることが明らかになった。

図-4をみると、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あたっては、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。

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

但し、 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)
 Y : $\frac{60 \text{ (cm) (一測定長)}}{\text{測定区間に存在する割れ目数}}$
 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リガコフ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(割れ目密度を考慮)	・静弾性係数に関する推定式(割れ目密度を考慮)
$\log E' = 2.01 \log X - \frac{0.96}{\log Y} - 1.02 \quad (3)$	$\log E' = 2.02 \log X - \frac{1.02}{\log Y} - 0.73 \quad (4)$

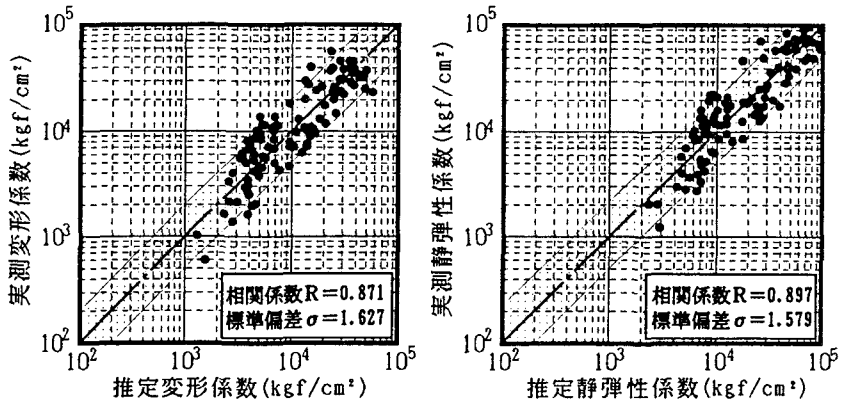
図-5(a)は(3)式に打撃応答量の平均値を代入することによって得られる推定変形係数および推定静弾性係数と実測値との関係を示したものである。また、割れ目密度を考慮せずに打撃応答量の平均値のみから最小二乗近似によって求めた推定式は、以下の通りである。

・変形係数に関する推定式(打撃応答量のみ)	・静弾性係数に関する推定式(打撃応答量のみ)
$\log E' = 2.66 \log X - 3.75 \quad (5)$	$\log E' = 2.70 \log X - 3.61 \quad (6)$

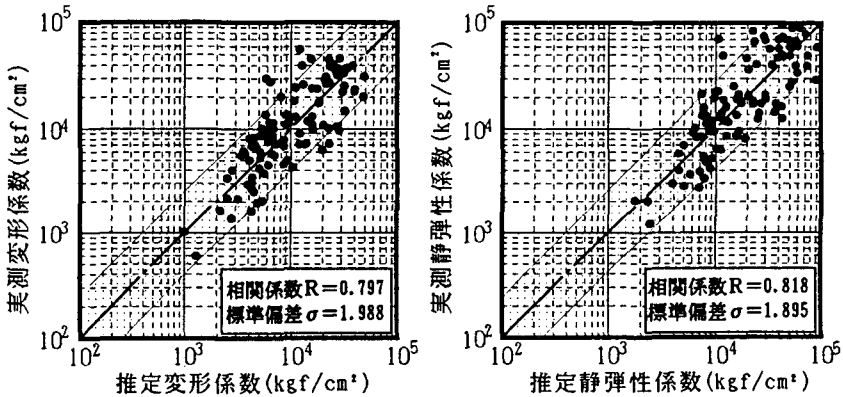
これらの式に実測の打撃応答量の平均値を代入することによって得られる推定変形係数および推定静弾性係数と実測値の関係を示したものが、図-5(b)である。なお、岩盤の変形係数は静弾性係数と比較して割れ目の影響を受け易いことが知られており、図-5(b)に示した相関係数についても割れ目の影響を受けにくい静弾性係数の方が高く、このことから割れ目の影響を考慮することが重要であることが伺える。

ここで、図-5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の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易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)。

以上の検討結果より、割れ目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。



a) 節理の分布密度を考慮した場合



b) 節理の分布密度を考慮しない場合

図-5 推定弾性係数と実測弾性係数との関係

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20cm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 測定範囲における割れ目の分布密度を考慮にいたした打撃応答量による変形性の推定式を考案し、変形係数及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。

6. 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. 256-260.