

打球探査による迅速安全な トンネルの切羽の岩盤物性評価

小泉 悠^{1*}・吉田 輝¹・山本 拓治¹・池尻 健²・海野 忠行²

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²株式会社 セントラル技研 地盤技術部（〒192-0063 東京都八王子市元横山町1-2-13）

*E-mail: koizumyu@kajima.com

打球探査とは、加速度計が取り付けられた鋼球で探査対象を打撃し、取得した加速度波形をHertzの衝突理論に基づき解析することで、その弾性係数を迅速に求められる探査技術である。ここでトンネルの切羽を探査対象とする場合、危険な切羽からできる限り離れ、安全に作業するために装置を改造する必要がある。そこで筆者らは、球体部を2mの棒の先端に取り付けて対象を突く、新しい打撃法を考案した。地山の硬軟が異なるトンネル2現場での適用試験の結果、考案した打撃法の作業性は良好で、得られた弾性係数は通常の打撃法による値と同等であった。従って、本手法によりトンネルの切羽の岩盤物性を迅速安全に得ることができる。

Key Words : colliding-ball test, tunnel face, elastic modulus, rock mass classification

1. はじめに

トンネル工事では、計画調査段階において、地表地質踏査や弾性波探査、ボーリング調査といった広域の調査が行われ、掘削対象となる地山の性状が予測される。しかし、地山は一般に不均一で、不連続性、異方性を有するため、その性状は位置によって変化する。また、当初の想定と異なる地山が出現することも少なくない。

そこでトンネル工事では、施工中の切羽において、地質状況の観察、記録を行う。トンネル標準示方書¹⁾では、切羽の①地質状況 ②硬軟の程度 ③割れ目 ④断層 ⑤湧水 ⑥切羽の安定性について、目視観察やハンマー打撃による地山評価を実施することが定められている。そしてこの地山評価が、所期に想定された地山評価から乖離する場合、施工の安全性や経済性を考慮し、支保パターンの変更が行われる。

この目視観察やハンマー打撃に基づく地山評価であるが、定性的であり、観察者の主観に左右されることが懸念される。経験豊富な地質技術者があるトンネルの切羽の評価を継続的に行う場合、一定の精度が期待できると考えられる。しかし、そのような技術者を切羽に常駐させることは現実問題として難しい。

このような背景のもと、経験豊富な地質技術者に代わり、岩盤を迅速かつ定量的に評価する手法として、シュ

ミット式ハンマー試験方法²⁾や岩石の点載荷試験方法³⁾が考案された。両者ならびに本論文で報告する打球探査の概要を表-1に示す。打球探査の探査原理は土質分野で既に多数の適用実績を得ている落球探査⁴⁾と同様で、打球探査では、落球探査よりも小さい、直径5cm程度の鋼鉄製の球体を用いる。球体に加速度計を取り付け、岩石または岩盤を打撃して、図-1に示すような加速度波形を得る。そして、Hertzの衝突理論に基づき、鋼球が探査対象物と衝突するときの打撃速度および接触時間から、対象の弾性係数を求めることができる。打撃速度を一定とした場合、接触時間が短いほど、対象の弾性係数は大きくなる。

表-1にも記した通り、シュミット式ハンマー試験は、

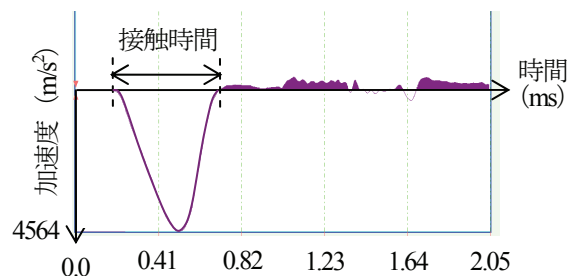
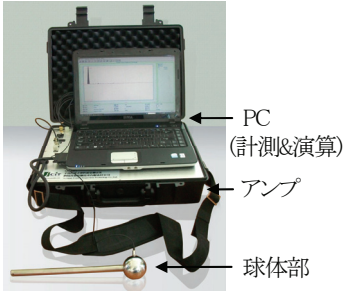
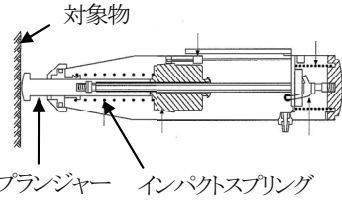
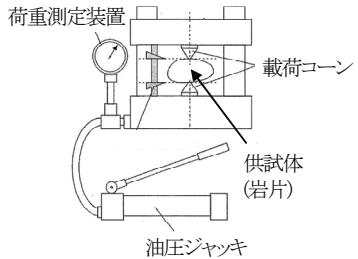


図-1 打球探査により得られる加速度波形の一例

〔※ 2 章に示すモルタルの壁を通常法で打球探査した結果、得られた波形である。〕

表-1 打球探査およびシュミット式ハンマー試験、点載荷強度試験の概要

試験名		新技術	既往技術	
		打球探査	シュミット式ハンマー試験 ²⁾	点載荷強度試験 ³⁾
試験装置				
探査対象	岩盤	○	○	×
	岩石	○ (φ 30cm以上)	○ (φ 50cm程度)	○ (通常整形不要)
探査原理 および 一次出力物性の 導出方法		Hertz の衝突理論に基づく (1) 式により、加速度波形から弾性係数を演算する。 $T = a \left[\frac{\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}{\sqrt{R \cdot V_0}} \cdot \frac{M}{\pi} \right]^{\frac{2}{5}} \quad (1)$ T: 接触時間, a: 定数, ν: ポアソン比, E: 弾性係数 (下付 1: 地盤, 2: 球体), M: 球体質量 R: 球体半径である。	ハンマーに内蔵されるバネの力により、プランジャー部で探査対象を打撃する。このとき、測定面の硬さに応じてハンマーが跳ね返る。ハンマーが打撃開始前に動いた距離に対して、跳ね返った距離の百分率を反発度と定義する。	圧裂引張試験と同様に、上下載荷点を結ぶ中心線で、引張破壊を引き起こす。 $I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (2)$ I: 点載荷強さ, P: 破壊荷重, D_e: 等価コア径である。 ただし, $D_e = D$ (供試体が円柱の場合) $D_e = 4WD/\pi$ (それ以外の場合)
一次出力物性		弾性係数	反発度	点載荷強さ
二次換算物性		一軸圧縮強さ等	一軸圧縮強さ 変形係数・弾性係数	引張強さ・一軸圧縮強さ
迅速性		○ (瞬時)	○ (瞬時)	△ (10分程度)

岩盤物性を迅速評価できる点で優れ、例えば、切羽観察ができないTBM施工の現場などで、側壁を対象によく用いられる。一方、山岳トンネルの標準工法であるNATMの現場で切羽評価に用いられることは少ない。これは、シュミット式ハンマー試験を実施するためには、探査対象に近づかねばいけないが、掘削後の切羽は力学的に不安定であり、探査を遂行することが不安全であるためである。点載荷試験は、引張試験や一軸圧縮試験に比較すると簡易であるが、やはり打球探査やシュミット式ハンマー試験に比べると迅速性に劣るため、トンネル現場での使用は限定的である。

打球探査も、球体部に取り付けた取っ手を把持し、探査対象を打撃する限りでは、シュミット式ハンマー試験と同様、トンネルの切羽評価に適用するに当たり安全面に問題があった。しかし、打球探査装置は、シュミット式ハンマーに比較して小型軽量であることから、装置を改造することで、探査者が切羽から一定距離だけ離れられると考えた。そして、従来の取っ手を把持して打撃する打球探査法 (以下、通常法と呼ぶ) に対し、球体部を棒の先端に取り付けて探査対象を突く方法 (以下、突き

棒法と呼ぶ) を新たに考案した。これを、実験場のモルタルの壁を対象に予備試験した後、地山の硬軟が異なる2つのトンネル現場で試験し、適用性を評価した。次章以降、それらの結果について報告する。

2. 探査装置の改造

既に述べたように、掘削後の切羽は力学的に不安定であり、岩塊の崩落等が発生し得るため、極力近づくべきでない。これに関して「トンネルの切羽近傍での労働災害の80%以上が切羽から2m以内で起こる⁹⁾」との報告も確認された。そこで筆者らは、打球探査をトンネルの切羽評価に適用するに当たり、探査者が探査対象から2m離れて作業できることを目標に装置を改造することとした。

はじめに、シュミット式ハンマーに比較して、打球装置の球体部が小型軽量であることに着目し、球体部を長さ2mの棒の先端に取り付けることとした。そして、実験場にてモルタルの壁を棒で突く試験を行った。試験状況を写真-1に示す。また、通常の打球探査状況を写真-2に示す。突き

棒法の作業性に問題はなかったが、写真-3に示すように、球体部を棒先端に剛結したところ、得られた加速度波形（図-2）が、通常法により得られた加速度波形（図-1）か



写真-1 突き棒法による打球探査試験状況



写真-2 通常法による打球探査試験状況



写真-3 突き棒法の先端（改良前）



写真-4 突き棒法の先端（改良後）

ら大きく相違する結果となった。探査者は、通常法と同様に、球体部が壁と一度だけ衝突するように突いているのであるが、その意図に反して球体部が壁と複数回衝突してしまっていることが、図-2より推察された。そこで、球体部を棒の先端に取り付けたレール上に乗せ、球体部がレール上を自由に滑動する構造へと改良した。これにより、壁との衝突時、球体部は壁から受ける反力に対して自然に押し戻され、衝突を繰り返さないものと考えた。再度、突き棒法を試験した結果、通常法と同様の加速度波形（図-3）を得ることができた。なお、最終的には写真-4ならびに図-4に示すように球体部と棒の先端の間にバネを取り付け、衝突時に押し戻された球体部が、打撃後、元の位置に戻る構造とした。この場合でも、得られる加速度波形に有意な変化は生じず、通常法と同様の作業の迅速性が確保できた。一方、棒を2mよりも長くした場合、狙った位置を正確に打撃することが困難となることが分かったが、この問題の改善は今後の課題とし、次に現場での適用試験を行うこととした。

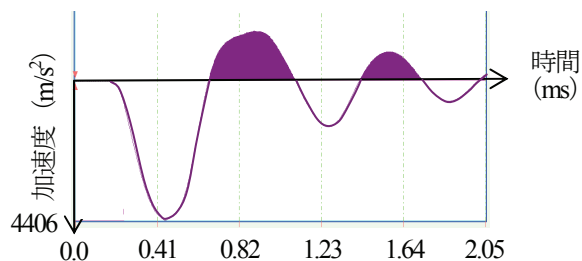


図-2 突き棒法（当初）の加速度波形

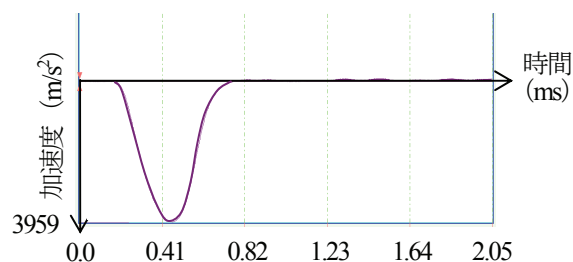


図-3 突き棒法（改良）の加速度波形

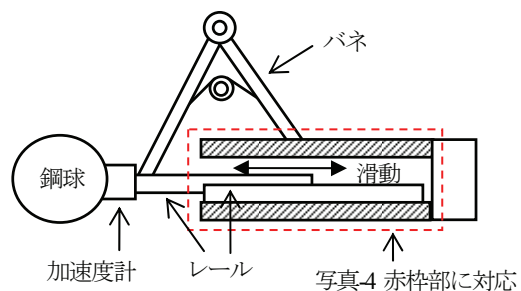


図-4 突き棒法の先端の構成図（改良後）

3. 現場適用試験結果

地山が軟質の泥岩からなるAトンネル、比較的硬い玄武岩からなるBトンネルの2現場にて、打球探査の現場適用試験を実施した。

(1) Aトンネル

Aトンネルは道路トンネルであり、地山は一軸圧縮強さ1.0MPa程度の軟質な泥岩からなる。また、トンネル周辺地山を対象に、掘削事前に地盤改良が実施された。そこで、下半切羽の泥岩部5カ所、セメント改良土部1カ所を対象に打球探査を実施した。

はじめに下半切羽から2m離れた位置で、突き棒法打球探査を実施した。その後、探査対象が下半切羽であり、高さが1.5m程度であったことから、切羽監視員を配置し、十分注意した上で、通常法打球探査を実施した。突き棒法、通常法ともに、打撃のエネルギーはシュミット式ハンマーに比較して十分小さい。しかし、探査により測定面が傷む可



写真-5 採取した岩塊および打球探査状況

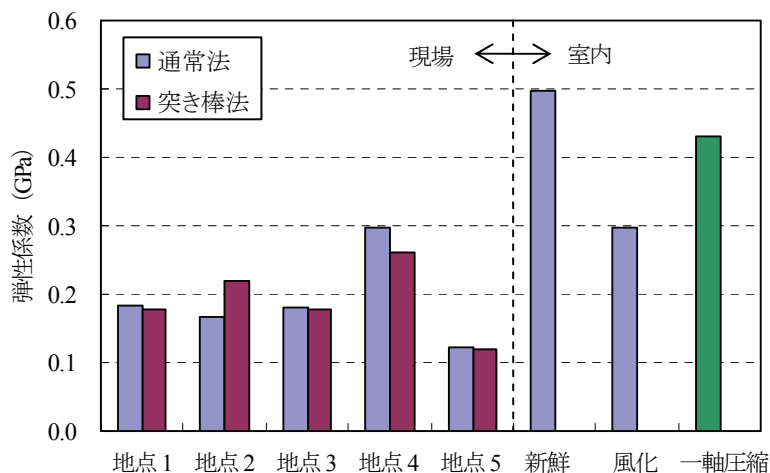


図-5 現場および室内での打球探査と一軸圧縮試験による泥岩の弾性係数

能性を考慮し、5cm程度の間隔を置きながら、1カ所につき5点の測定を行った。突き棒法打球探査の作業性に問題はなく、切羽から2m離れた位置から、通常法と同様に1点当たり10秒程度でデータを取得することができた。また、写真-5に示す泥岩の岩塊およびセメント改良土塊を現場で採取し、泥岩塊については新鮮な面と風化した面の2点を対象に、室内で通常法による打球探査を実施した。さらに、コアリングし、弾性係数を得るための一軸圧縮試験を実施した。

通常法および突き棒法打球探査により得られた泥岩の弾性係数、室内での通常法打球探査により得られた泥岩塊の弾性係数、一軸圧縮試験により得られた弾性係数の値の範囲を図-5に示す。同図に示す弾性係数はいずれも取得した5データの平均値である。図-5から分かるように、通常法と突き棒法とで、弾性係数は地点ごとにほぼ等しかった。室内での打球探査により得られた岩塊の弾性係数は、現場で得られた弾性係数（通常法5地点の平均で0.19GPa）に対して、風化部で約1.5倍、新鮮部で約2.5倍大きかった。また、一軸圧縮試験により得られた弾性係数は、それら風化部・新鮮部の中間よりやや大きい0.43GPaであった。現場で得られた弾性係数が室内で得られた弾性係数の半分程度となった要因として、表層がゆるみの影響により劣化した原位置岩盤と岩石との差異が反映されたものと考えられる。一方、図-6に示すセメント改良土はデータ数が十分でなく、通常法と突き棒法との間で弾性係数の乖離が大きいが、現場および室内での打球探査、また、別途実施された多数の一軸圧縮試験結果で、弾性係数はおおよそ等しい範囲に入っていると考えている。

(2) Bトンネル

Bトンネルはガス管理設用のトンネルであり、地山は一

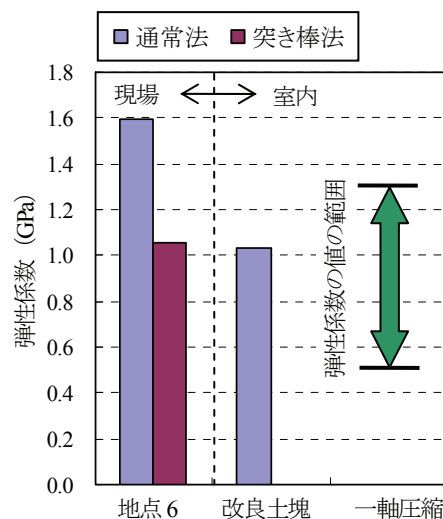


図-6 現場および室内での打球探査と一軸圧縮試験によるセメント改良土の弾性係数

軸圧縮強さ80MPa程度の玄武岩からなる。掘削は小口径のTBMによりなされ、岩盤が露出する下半側壁を対象に打球探査を実施した。はじめに掘削済みの約2000mについて、目視観察およびハンマー打撃による地山評価を行った。そして、岩盤等級がB級と認められた3カ所、C級と認められた4カ所、D級と認められた3カ所の合計10カ所を探査対象として選出した。B級と認められた箇所はハンマーで打撃すると跳ね返され、キンキンと高く澄んだ音が生じた。風化変質の影響はなく、割れ目は無いが、あっても密着していた。一方、D級と認められた箇所は、基本的に坑口付近であり、風化の影響が著しい。ハンマーによる打音はドスト



写真-6 突き棒法打球探査の実施状況
(Bトンネル)

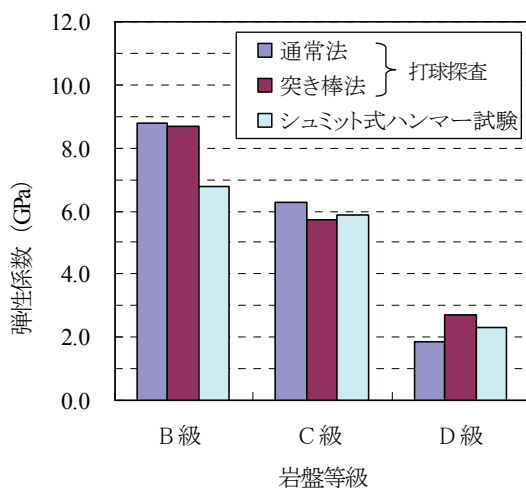


図-7 岩盤等級ごとの弾性係数の平均値

表-3 岩盤等級から想定される弾性係数⁹⁾

岩盤等級	岩盤の弾性係数 (GPa)
A～B	8.0 以上
C _H	4.0～8.0
C _M	1.5～4.0
C _L	1.5 以下
D	

スと低い音であった。また、トンネル施工時、部分的に崩落が生じた箇所であった。Bトンネルでは、通常法および突き棒法打球探査と、打球探査との比較のため、シュミット式ハンマー試験を行った。突き棒法打球探査の実施状況を写真-6に示す。Bトンネルはトンネルの直径が23mと非常に小さかったことから、便宜上、ここでの棒の長さは1mとした。シュミット式ハンマー試験の基準²⁾において、1測定面につき9点以上の測定を行うことを推奨されていることから、打球探査、シュミット式ハンマーとともに、打撃点を5cm程度ずつずらしながら、1カ所につき10点のデータを取得した。

得られたデータを演算処理し、弾性係数が最大となるデータ、最小となるデータを除き、残り8つのデータから平均値を求めた。なお、シュミット式ハンマー試験については、地盤工学会が定める基準²⁾に示される次式により、ハンマー反発度Sから弾性係数D (MPa) への換算を行った。

$$\log D = 0.0331 \cdot S + 2.695 \quad (3)$$

B級、C級、D級の岩盤等級ごとに求めた弾性係数の平均値を図-7に示す。同図より、Aトンネルでの結果と同様に、通常法と突き棒法で得られた弾性係数が同等であることが分かった。そして、岩盤等級が下がるにつれて、弾性係数が低下する妥当な結果となった。また、シュミット式ハンマー試験から推定される弾性係数と比較すると、B級では25%ほどの乖離が見られたが、C級とD級ではほぼ等しいことが分かった。以上より、新たに考案した突き棒法打球探査であるが、これにより得られる弾性係数は、既に実用化され、データの蓄積が進められている通常法打球探査と同様に評価して問題ないことが分かった。また、既往のシュミット式ハンマー試験による推定値との整合性も良好であった。なお、表-3は菊池ら⁹⁾が取りまとめた、岩盤等級から想定される弾性係数の範囲であるが、打球探査により得られた弾性係数が、同表に示される値の範囲とよく整合することが分かる。このことから、打球探査により得られた弾性係数から、逆に岩盤等級を推定することができる可能性が示された。

4. おわりに

本研究では、岩石や岩盤の弾性係数を迅速に求められる打球探査に着目し、装置を改造することにより、切羽から2m離れて安全に探査できる突き棒法打球探査を考案した。実験場にて、得られる加速度波形が適当であることを確認した後、硬軟の異なる2つのトンネル現場で適用試験した。その作業性および出力された弾性係数について検討した結果、得られた知見を以下に示す。

- ・ Aトンネルの下半切羽にて、軟質泥岩を対象に、突き棒法および通常法による打球探査を行った。突き棒法打球探査の作業性に問題は無く、切羽から2m離れた位置から、通常法と同様に、1点10秒程度で迅速にデータを取得できた。
- ・ 両打撃法の弾性係数は0.2GPa程度で、探査箇所ごとにほぼ等しかった。
- ・ 現場での打球探査により得られた弾性係数0.2GPaは、室内での打球探査および一軸圧縮試験により得られた岩石の弾性係数の約半分であった。これは、表層が劣化した岩盤と岩石の差異が反映されたことによるものと考えられる。
- ・ Bトンネルの側壁にて、岩盤等級がそれぞれ異なる玄武岩を対象に、突き棒法および通常法による打球探査を行った。その結果、各岩盤等級で得られた弾性係数は突き棒法と通常法とでほぼ等しかった。Aトンネルでの結果と合わせ、新規考案した突き棒法打球探査は、既に実用化されている通常法打球探査と同等の探査精度を有するものと評価できる。
- ・ 打球探査により得られた弾性係数は、シュミット式ハンマー試験の反発度から推定された弾性係数とほぼ等

しかった。また、岩盤等級ごとに定められる弾性係数を取り得る範囲との整合性も良好であった。打球探査の結果から、切羽等の探査対象とした岩盤の岩盤等級が推定できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 社団法人土木学会編：トンネル標準示方書 [山岳工法]・同解説, pp.247-270, 丸善, 2006.
- 2) 社団法人地盤工学会：岩盤のシュミット式ハンマー試験方法 (JGS3411-2004), 岩の試験・調査方法の基準・解説書 平成 18 年度版, pp.65-87, 2006.
- 3) 社団法人地盤工学会：岩石の点載荷試験方法 (JGS3421-2005), 岩の試験・調査方法の基準・解説書 平成 18 年度版, pp.89-105, 2006.
- 4) 吉田輝, 北本幸義, 川野健一, 池尻健：落球探査による地盤の諸特性の評価, 第 46 回地盤工学研究発表会, pp.113-114, 2011.
- 5) 鹿島プレスリリース：切羽より 2m 離れた位置から火薬を装填, <http://www.kajima.co.jp/news/press/200810/7c1-j.htm>
- 6) 菊池宏吉・藤枝誠・岡信彦・小林隆志：ダム基礎岩盤の耐荷性に関する地質工学的総合評価, 応用地質特別号, pp.103-118, 1984.

RAPID AND SAFE INVESTIGATION OF ROCK MASS PROPERTIES OF TUNNEL FACE USING COLLIDING BALL TEST

Yu KOIZUMI, Teru YOSHIDA, Takuji YAMAMOTO, Takeshi IKEJIRI
and Tadayuki UMINO

In terms of safety and economical efficiency, tunnel support is often changed from initially designed support based on careful observation of tunnel faces. The purpose of our work was to develop colliding ball test to apply it for rock mass classification of tunnel faces. The authors modified the test system, attaching a part of it to the tip of a two-meter-long rod, and examined the new testing method at two tunnel construction sites where very soft rock and hard rock is excavated, respectively. As a result, almost the same elastic moduli were obtained from new and conventional testing methods. In conclusion, the devised colliding ball test enables to investigate rock mass properties of tunnel faces rapidly and safely.