

簡易な現場計測器の地山評価への適用性について

EVALUATION OF GROUND CONDITION AT TUNNEL FACE USING IN-SITU TEST

真下英人¹⁾・池口正晃²⁾

Hideto MASHIMO and Masaaki Ikeguchi

It is difficult to survey the geology along a tunnel in advance precisely, so it needs to change the tunnel support pattern evaluating the ground condition during excavation. In this report, some in-situ tests such as seismic prospecting, schmidt hammer test, point load test and so on were carried out at the tunnel face to evaluate the ground condition quantitatively. As a result, we can confirm that elastic wave velocity has relation to the degree of crack and weathering of the rock and could become an index to adopt the auxiliary method. Moreover, the measured value of schmidt hammer test and point load test have relation to the compressive strength of rock and could become an index to change the tunnel support pattern and adopt the auxiliary method.

Key Words: tunnel, ground condition, in-situ test, auxiliary method, support pattern

1. はじめに

トンネル周辺地山の状態を事前探査の段階で的確に予測することは困難であるため、施工段階において切羽面等の地山の状況を観察し、掘削後の地山挙動を計測によって確かめながら、最適な支保設計または補助工法の検討が行われている。しかし、現在のところ、切羽の安定度や地山特性を客観的に評価する手法は確立されておらず、判断材料が乏しい状況下で現場の状況や過去の施工事例を参考にしつつ、これを決定しているのが実態である。このため迅速な対応ができずに対策が後手になり、切羽やトンネル壁面部の崩壊が起こらないとも限らない。現場において迅速に適切な対策が選定できるようにするには地山状態を客観的に評価できる基準を確立することが大きな課題となる。

本報告では、地山の安定性を定量的に評価する指標のひとつとして、簡易弾性波速度試験、ロックシュミットハンマー試験、ポイントロード試験、針貫入試験などの簡易に行える原位置試験から得られた計測値が適用可能であるかを検討するために、施工中のトンネル切羽で現場計測を実施し、その結果を考察した。

2. 計測方法

(1) 簡易弾性波速度試験

簡易弾性波速度試験は、図-1に示すように切羽面に受信点となる3つの地震計を同一線上（以降この線を測線という）に設置し、測線上をハンマーで打撃したときに生じた弾性波（P波）を同じ切羽面上の別の

1) 正会員 工博 建設省土木研究所トンネル研究室

2) 正会員 建設省道路局道路環境課

受信点で受けることによって、その計測区間の伝搬速度を計測した。試験の精度を高めるために、可能な限り1本の測線に対し複数の計測を行い、起振点は測線の両側からそれぞれ打撃することとした。これを1切羽につき数測線計測し、その平均値をその簡易弾性波速度とした。

(2) ロックシュミットハンマー試験

ロックシュミットハンマー試験は切羽面上の5点の測点で実施し、各測点では5回以上の連続打撃を行い、その平均値をその測点の計測値（ロックシュミットハンマー反発値）として各測点の計測値の平均値をその切羽面におけるロックシュミットハンマー試験の代表値とした。

ただし、岩盤が柔らかい等の理由で計測値が得られない場合は、その計測値を0として整理した。

(3) ポイントロード試験

ポイントロード試験は、1切羽につき、切羽面に対して左側と右側各5個ずつの計10個の試料を採取し、全ての試料について試験を実施して点載荷強度 I_s を算出し、その平均値をその切羽面におけるポイントロード試験の代表値とした。なお、岩石の力学的特性が同じでも点載荷強度 I_s は試料の大きさによって値が異なるため、試験結果は直径が50mmの円柱コアを用いたときの点載荷強度に換算した修正点載荷強度 $I_s(50)$ として整理した。

(4) 針貫入試験

針貫入試験は切羽面上の5点の測点で実施し、各測点では3回以上の計測を行い、その平均値をその点の計測値（針貫入勾配）として各測点の計測値の平均値をその切羽面における針貫入試験の代表値とした。

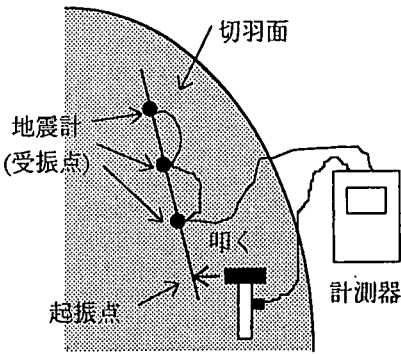


図-1 簡易弾性波速度の計測方法

3. 計測対象トンネル

計測を実施した各トンネルの特性、および各トンネルで実施された試験の種類を表-1に示す。計測値と地山の安定性との関係を考察することが目的のひとつなので、フォアパイルング、鏡ボルトが実施されるような地山状態の悪いトンネルを、幾つか意識的に選定して計測を実施した。

表-1 計測を実施したトンネル

トンネル名	岩種	計測切羽数	計測区間における対策工法、補助工法の採用状況	実施した試験			
				簡易弾性波速度試験	ロックシュミットハンマー試験	ポイントロード試験	針貫入試験
aトンネル	凝灰岩	20	リングカット、フォアパイルング、鏡ボルト	○	○	○	
bトンネル	泥岩	9	フォアパイルング	○	○	○	
cトンネル	花崗岩	3	AGF、PU-IF	○	○		○
dトンネル	蛇紋岩	3	フォアパイルング、鏡ボルト	○	○	○	
eトンネル	泥質片岩	3	鏡吹付け程度	○	○	○	
fトンネル	砂岩	115	ハイプルーフ	○	○		○
gトンネル	砂岩	40	フォアパイルング	○	○		○
hトンネル	砂岩	1	なし	○	○	○	
iトンネル	砂岩	65	フォアパイルング		○		
jトンネル	砂岩	27	フォアパイルング		○		
kトンネル	片麻岩	9	なし		○		

4. 計測結果および考察

(1) 計測値の特性

1) 計測値と一軸圧縮強度との関係

全てのトンネルデータを合わせた簡易弾性波速度、ロックシュミットハンマー反発値、修正点載荷強度 $I_s(50)$ と一軸圧縮強度との関係を図-2、3、4に示す。ただし、一軸圧縮強度は、f、gトンネル以外のデータについては、計測区間で採取した試料を用いて試験した値を、f、gトンネルのデータについては、針

貫入試験から得られる針貫入勾配からの換算値を用いた。簡易弾性波速度と一軸圧縮強度との関係についてはあまり相関が見られないことがわかる。一方、ロックシュミットハンマー反発値および $I_s(50)$ と一軸圧縮強度との関係については一軸圧縮強度が大きくなるほど計測値も大きくなる傾向があり、比較的大まかなオーダーでは、ロックシュミットハンマー反発値、修正点載荷強度は一軸圧縮強度と相関性があるとみなせる。

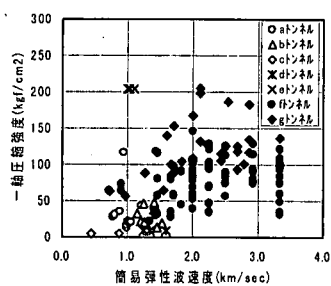


図-2 簡易弾性波速度と一軸圧縮強度との関係

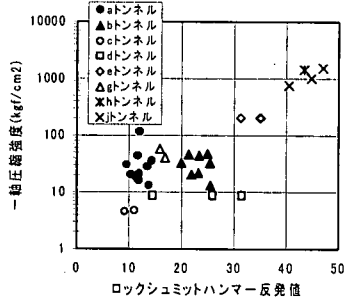


図-3 ロックシュミットハンマー反発値と一軸圧縮強度との関係

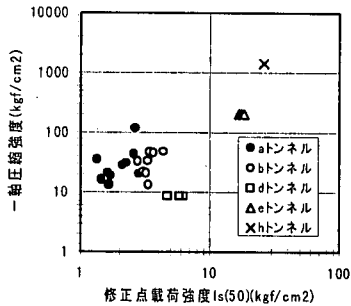


図-4 修正点載荷強度と一軸圧縮強度との関係

2) 計測値と地山性状との関係

切羽観察表の項目のうち、数量化理論を用いた分析から地山評価に有効である¹⁾とされた「風化変質」、「割目の状態」、「圧縮強度」のカテゴリーと計測値の関係について考察を加えた。図-5、6は「風化変質」、「割目の状態」のカテゴリーと、そのカテゴリーの評価を受けた地点の簡易弾性波速度の平均値と標準偏差の関係を示したものである。「風化変質」、「割目の状態」のカテゴリーとその平均値を各トンネル間で比較すると、b トンネルの[2]の平均値と f トンネルの[2]の平均値がかなり異なるように、同じカテゴリーで評価されているのに、平均値がかなり異なっていることがわかる。しかし、各トンネルの中でカテゴリー間の平均値を比較すると、f、g トンネルの「風化変質」のカテゴリー間の平均値は、風化の進行度合によってかなり異なり、岩盤が新鮮であるほど簡易弾性波速度が速いことがわかる。また「割目の状態」についても、標準偏差が大きいものの、亀裂が少ないほど簡易弾性波速度が速いことがわかる。したがって、同一のトンネル内における、「風化変質」、「割目の状態」と簡易弾性波速度には比較的關係性があり、地山条件によっては、同一トンネル内における風化および亀裂の度合いを表す相対的な評価に適用できる場合があるといえる。

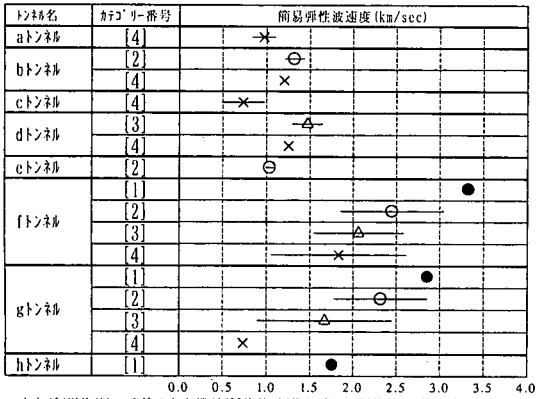


図-5 簡易弾性波速度と「風化変質」との関係

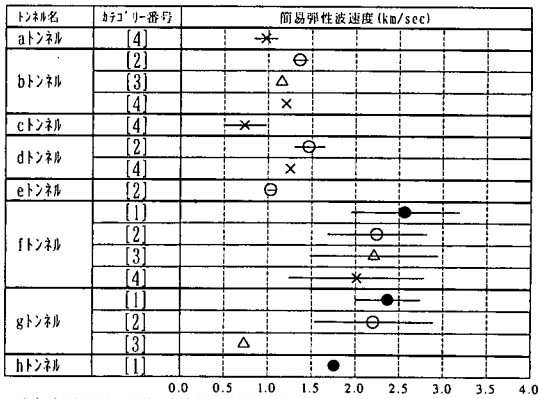


図-6 簡易弾性波速度と「割目の状態」との関係

切羽観察表の「圧縮強度」のカテゴリーと、各カテゴリーの評価を受けた地点におけるロックシュミットハンマー反発値の平均値と標準偏差の関係を図-7に示す。k トンネルを除くと「圧縮強度」が高く評価されるほどロックシュミットハンマー反発値が大きくなり、ロックシュミットハンマー反発値からおおまかに「圧縮強度」が予測でき、一軸圧縮強度の大きさを切羽観察表における「圧縮強度」のカテゴリーのような4段階でランク分けする程度の精度であれば、これらの試験で代用できると考えられる。一方、「切羽の状態」、「風化変質」、「割目の状態」とロックシュミットハンマー反発値の大きさとの順列性は小さい場合が多く、とくに「割目の状態」については亀裂の程度とロックシュミットハンマー反発値との間の順列性は小さい結果が得られた。これは、ロックシュミットハンマー試験の計測が、ある切羽の1点に対して行われるため、面的に広がる亀裂の分布を把握できないことが要因と考えられる。

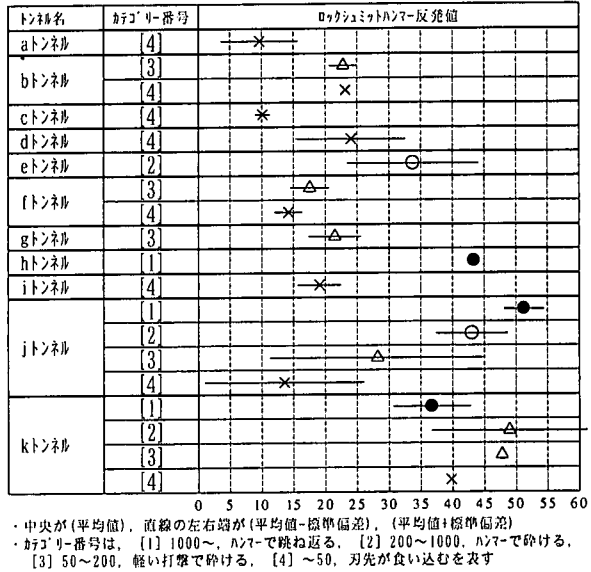


図-7 ロックシュミットハンマー反発値と「圧縮強度」との関係

なお、ポイントロード試験、針貫入試験も、ロックシュミットハンマー試験と同様に「圧縮強度」が高く評価されるほど計測値が大きくなり、おおまかに「圧縮強度」が予測できる可能性が示された。

(2) 計測値と支保パターン、補助工法との関係の考察

1) 計測値と支保パターン、補助工法との関係

図-8、9は、「支保パターン」、「補助工法」のカテゴリーと、そのカテゴリーの評価を受けた地点の簡易弾性波速度の平均値と標準偏差の関係を示したものである。「支保パターン」との関係については、g トンネルのように各トンネルのカテゴリーの中で順列性を保っているものと b、f トンネルのように保っていないものもあり、簡易弾性波試験の計測値を用いて支保パターンの分類ができるかどうか断定するには至っていない。「補助工法」との関係については、b トンネルを除けば、補助工法を採用する場合の方が、簡易弾性波速度の計測値が相対的に低く、地山条件によっては、同一トンネルにおける補助工法の採用の有無を相対的に評価する際に、有効となる場合があると考えられる。

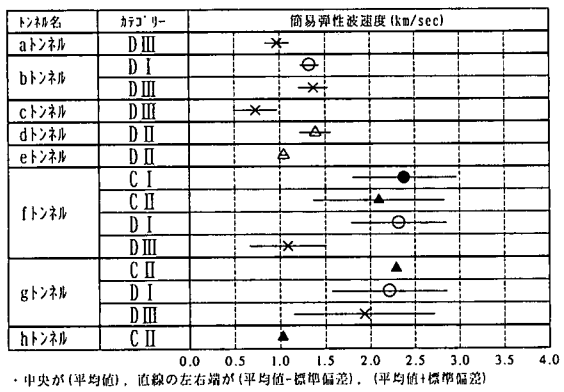


図-8 簡易弾性波速度と「支保パターン」との関係

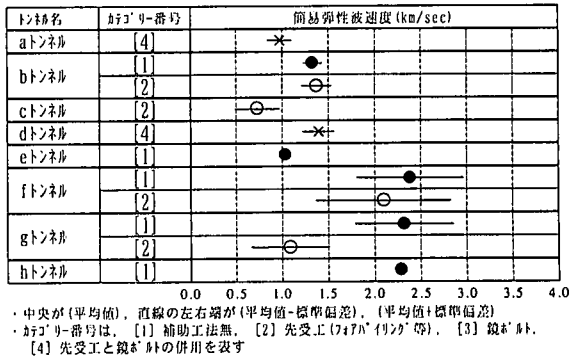


図-9 簡易弾性波速度と「補助工法」との関係

図-10, 11は「支保パターン」, 「補助工法」の категорияと, そのcategoryの評価を受けた地点のロックシュミットハンマー反発値の平均値と標準偏差の關係を示したものである。g, i, j トンネルでは「支保パターン」が軽くなるほどロックシュミットハンマー反発値が大きくなる順列性が見られる。一部のトンネルで順列性が見られたのは, これらのトンネルの支保パターンが切羽觀察表の「圧縮強度」と關連性が高かったことが想定され, 支保パターン分類の検討に「圧縮強度」は有効な指標のひとつであることが伺える。「補助工法」についても, i, j トンネルでは補助工法が採用されない方が平均値は高くなるという順列性が見られ, 補助工法の採用有無の判断に「圧縮強度」は有効な指標のひとつになると言える。

なお, 修正点載荷強度についてはデータ数が少ないので, あまり明確な考察を行うことはできなかったが, 少しの差ではあるものの支保が軽い方が平均値は高く, また補助工法が採用されない方が平均値は高いという傾向が見られた。

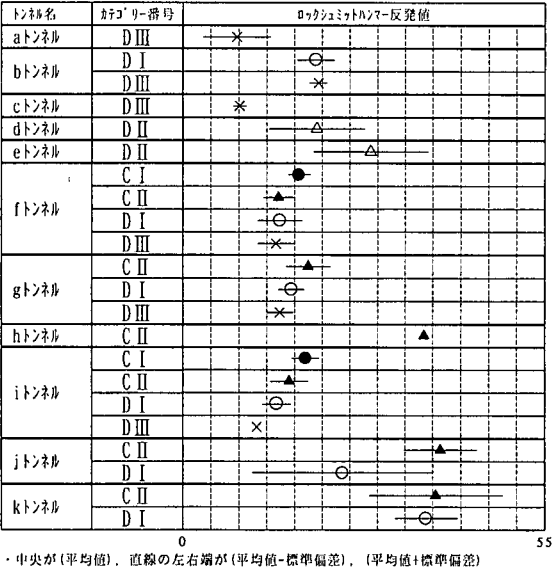


図-10 ロックシュミットハンマー反発値と「支保パターン」
との關係

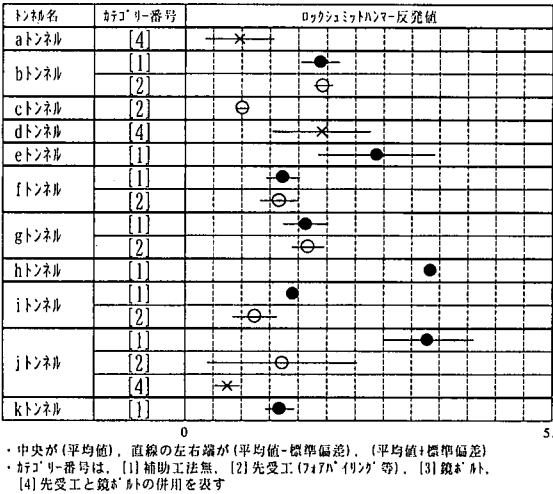


図-11 ロックシュミットハンマー反発値と「補助工法」
との關係

2) 簡易弾性波速度と一軸圧縮強度の組み合わせと, 支保パターン, 補助工法との關係

全てのトンネルのデータを対象とした, 簡易弾性波速度と一軸圧縮強度の組み合わせと補助工法, 支保パターンとの關係を
図-12, 13に
示す。補助工法に
関しては概して簡
易弾性波速度が速
く, 一軸圧縮強度
が大きいほど補助
工法が採用され
ず, 逆に簡易弾性
波速度が遅く, 一
軸圧縮強度が小さ
いほど先受工が採
用される傾向があ

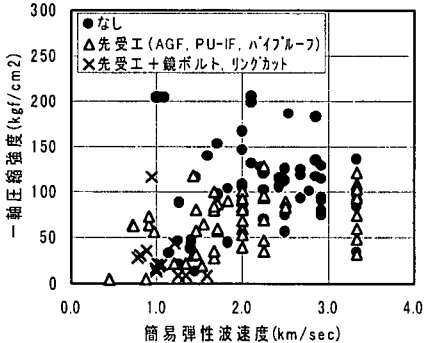


図-12 簡易弾性波速度, 一軸圧縮
強度と「補助工法」との關係

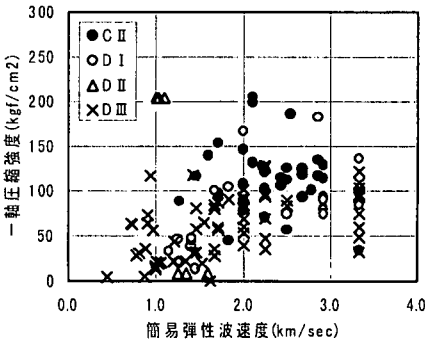


図-13 簡易弾性波速度, 一軸圧縮
強度と「支保パターン」との關係

る。また補助工法が[なし]のグループと、[先受工]のグループは、それぞれ群をなして分布し、それぞれ分布する場所が異なる傾向が見られ、おおよそ簡易弾性波速度 1.0km/sec 以下、または一軸圧縮強度 50kgf/cm^2 以下で補助工法が採用されるケースが多いことがわかる。したがって、地山の条件によっては、簡易弾性波速度と一軸圧縮強度を組み合わせることにより、補助工法の採用可否の判断を行える場合があるといえる。一方、「支保パターン」に関しては、B、C I パターンのデータがない等、検討するのに十分なデータ量がないこともあって簡易弾性波速度および一軸圧縮強度と「支保パターン」との間には明確な関係は認められない。

5. 結論

トンネルの掘削現場で地山の安定性を簡易に定量的に評価する方法を確立することを目的に、簡易弾性波速度試験、ロックシュミットハンマー試験、ポイントロード試験、針貫入試験を実施し、地山の性状、支保パターン、補助工法との関係について検討を加えた。得られた結論は以下のようである。

- 1) 簡易弾性波速度と一軸圧縮強度の間にはあまり相関性が見られないが、簡易弾性波速度は同一トンネル内における風化および亀裂の度合いを表す相対的な評価に適用できる場合がある。
- 2) ロックシュミットハンマー反発値、修正点載荷強度、針貫入勾配は、おおまかに見ると一軸圧縮強度とは相関性が認められ、切羽観察表における「圧縮強度」の4段階のカテゴリーを定量的に評価する指標として有効である。
- 3) 地山条件によっては、簡易弾性波速度の大小と「補助工法」の採用の有無との間に関連性が見られることから、簡易弾性波速度によって同一トンネルにおける補助工法の有無を相対的に評価することができる場合がある。また、ロックシュミットハンマー反発値、修正点載荷強度と「支保パターン」または「補助工法」の採用可否との間に関連性が見られる場合がある。
- 4) 地山条件によっては、簡易弾性波速度と一軸圧縮強度を組み合わせることにより、補助工法の採用可否の判断を行える場合がある。

参考文献

- 1) 池口・真下・宮川・大杉：観察・計測による地山評価に関する研究，トンネル工学研究論文・報告集，第6巻，1996