

観察・計測による地山評価に関する研究

Study on evaluation of ground by observation and measurement

池口 正晃*・真下 英人*・宮川 順一*・大杉 一郎*

Masaaki Ikeguchi, Hideto Mashimo, Junichi Miyagawa, Ichiro Ohsugi

One of methods to evaluate stability of ground around tunnel is observation of qualitative character of its cutting face in under-construction, but evaluation for the method may be varied by the observer, so it is hard to design suitably at present. Therefore, we performed in-situ test by simple tester (ex. seismic prospecting at cutting face) to examine whether the tester, which can represent quantitative character of the ground, can use as index to evaluate the ground. And we examined the relation between the observation record of cutting face and its stability or ground deformation, and studied which items is useful to evaluate the ground.

Keywords: ground evaluation, seismic prospecting, observation of face, quantification 2, tunnel design

1. まえがき

トンネルは地下構造物であることから、事前探査の段階ではトンネル周辺地山の状態を的確に予測することが困難なことが多い。このため施工段階に実際の地山の状況を観察し、掘削に伴う地山の挙動を計測して確かめながら、逐次実際の地山の状況に適合した設計をおこなっている。しかしその際の切羽の安定度や地山の変状などを客観的に評価する手法は現在確立されておらず、力学的かつ経済的に最適な支保の設計、および切羽安定対策をおこなうための客観的な評価基準が求められている。

本研究では、地山評価方法の改善に関する検討の一環として、現行の切羽観察表のなかでどの項目が地山評価に有効な指標であるのかを調べるために、実際に施工されたトンネルより切羽観察表を収集して、統計学的に整理し検討を加えた。また原位置試験の計測値のように定量的評価を加えると、より客観性のある信頼性の高い評価をおこなえることから、地山の安定性を定量的に評価する指標のひとつとして、簡易弾性波試験等の簡易計測器の地山物性値が適用可能であることを検討するために、施工中のトンネル切羽で簡易弾性波試験、シュミットハンマー試験、点載荷試験をおこない、その結果を考察した。

2. 切羽観察表による有効な地山評価指標の検討

*建設省土木研究所道路部トンネル研究室

これまでに切羽観察表（社）日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針に示されているもの）をもとにしたトンネル切羽のデータを収集し、数量化理論第Ⅱ類による統計学的解析を行った結果、トンネル地山を評価する指標として、「圧縮強度」、「風化変質」、「割れ目の状態」の3つの指標が有効であることがわかった¹⁾。そこで、補助工法を実施した切羽を含むトンネルの切羽観察表を用いて、補助工法の実施有無を目的変数（多変量解析によって予測したい指標のこと）とし、「圧縮強度」、「風化変質」、「割れ目の状態」の3つの指標を説明変数（予測するための判断材料にしたい指標のこと）とした多変量解析を行った。なお、目的変数となる補助工法は、土圧による変状に対する補助工法（増しボルト、増し吹付け、ストラット）と、切羽安定のための補助工法（鏡止め、7¹7¹アイソグ等）の2種類に対して行った。またここで対象としている変数の項目およびカテゴリーの一覧を表-1に示す。

表-1 変数の項目およびカテゴリーの一覧

カテゴリー		1	2	3	4
項目	土圧変状に対する補助工法	なし	あり（増ボルト増吹付け等）		
	切羽安定のための補助工法	なし	あり（鏡止め、7 ¹ 7 ¹ アイソグ等）		
説明変数	圧縮強度	$\sigma \geq 1000$	1000～200	200～50	$50 > \sigma$
	風化変質	なし健全	やや低下	相当低下	未固結
	割れ目の状態	密着	部分開口	開口	未固結

表-1で挙げられている各項目の状態を表す度合いは、数値による定量的なものではなく、状態を幾つかにランク分けして（その各項目ごとに設けられたランクのことをカテゴリーと呼ぶ）定性的な表現で示されているので、各カテゴリー間の関連性を表す順列性や重みが表現されていない。質的なカテゴリーを量的な数値（この数値のことをカテゴリー数量と呼ぶ）に置き換え、カテゴリーの順列またはカテゴリー間の性格の差を見ようとすれば、数量化理論による多変量解析を行うとそれが可能となる。この解析手法を用いると、計算されたカテゴリー数量によって、その数値が高いカテゴリーの状態のときほど補助工法は実施されず、低いほど実施されるケースが多いことがわかる。また表-2に土圧による変状に対する補助工法の有無を目的変数として解析を行った結果を示すが、そのなかにある「風化変質」のカテゴリー数量の解析結果を例に挙げると、「なし健全」と「やや低下」の間が他の数値と比べて近接していることから、例えば、他の項目の評価が全く同じで、かつ「風化変質」の性状だけが「なし健全」と「やや低下」で異なった評価を受けた2種類の地山があるとすると、それらに施す補助工法のレベルにはほとんど差が現れない傾向があることがわかる。また「範囲」からも評価項目が予測に与える影響度を見ることができる。「範囲」とは各項目内のカテゴリー数量の最大値から最小値を引いた値である。項目内のカテゴリーに付けられたカテゴリー数量の値に変化が大きいほど、補助工法施工の可否に与える影響も大きいので、「範囲」の数値が大きい項目

表-2 「土圧による変状に対する補助工法」を目的変数とする解析結果

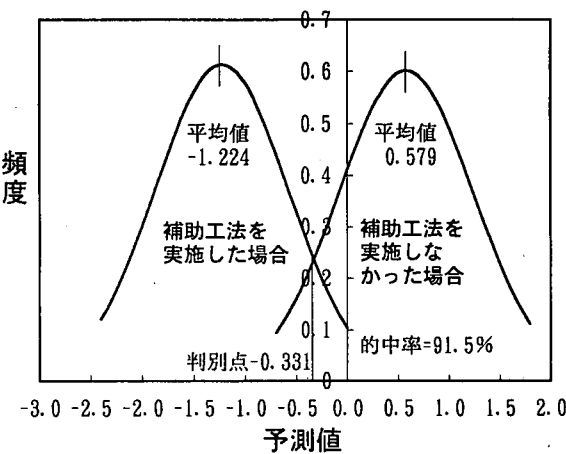
圧縮強度		風化変質		割目の状態		相関係数	
カテゴリー	カテゴリー数量	カテゴリー	カテゴリー数量	カテゴリー	カテゴリー数量	「補助工法」と「圧縮強度」	0.638
$\sigma \geq 1000$	0.326	なし健全	0.215	密着	0.519	「補助工法」と「風化変質」	0.601
1000～200	0.194	やや低下	0.206	部分開口	0.453	「補助工法」と「割目の状態」	0.728
200～50	-0.215	相当低下	-0.131	開口	-1.303	「圧縮強度」と「風化変質」	0.738
$50 > \sigma$	-0.304	未固結	-0.562	未固結	-0.210	「風化変質」と「割目の状態」	0.493
（範囲）=0.630		（範囲）=0.777		（範囲）=1.822		「割目の状態」と「圧縮強度」	0.579

であるほど、その項目は予測に有効であるといえる。

表一 2 の左側の数値は、説明変数の各カテゴリーにつけられたカテゴリー数量、右が目的変数または各説明変数の間の相関係数である。各カテゴリー数量のどれも 1 段目と 2 段目が正、3 段目と 4 段目が負となっており、前者は補助工法が不必要、後者は補助工法が必要である方に影響していることがわかる。また割れ目の状態の「開口」が、-1.303 と他に比べてその絶対値が大きな値となっており、割れ目の状態が開いている場合は他の条件に関係なく何らかの補助工法が必要であることが考えられる。また「割れ目の状態」の「範囲」や目的変数との相

関係係数が高いことから、補助工法可否の決定の要因に大きく影響していることがわかるが、「圧縮強度」と「風化変質」との間の相関係数が比較的高いことから、これら 2 つは比較の種類性が高いといえ、例えば「風化変質」を削除して、「圧縮強度」と「割れ目の状態」の 2 つの説明変数で解析を行った場合は、「圧縮強度」にも高い「範囲」が示され、決定の要因に大きく影響を与えるものと考えられる。

一方、図一 1 に各トンネルの切羽データ 1 枚ごとに対して求めた目的変数の予測値の頻度分布を示す。この予測値とは各説明変数のカテゴリー数量の総和である。例えばある地山評価の結果が、「 $\sigma \geq 1000$ 」、「なし健全」および「密着」であった場合、その地山の目的変数に付けられる予測値は、 $(0.326) + (0.215) + (0.519) = (1.060)$ である。この表では「補助工法なし」の分布曲線の頂点が (0.579) であるが、これは「補助工法なし」である全ての切羽断面において、それらの評価結果をそれぞれカテゴリー数量の総和で表わした場合、その平均は (0.579) であることを表している。次に図一 1 中の的中率の定義について述べる。この図を見ると、予測値の正の方に「補助工法なし」のグループが、負の方に「補助工法あり」の頻度分布のグループが存在し、予測値の正負の境界付近でこれらの 2 つの曲線がクロスしていることがわかる。よって実際の施工では「補助工法なし」であるのに、「補助工法あり」のグループに近い予測値が得られることから「補助工法あり」と誤って判別したり、あるいはその逆が起こったりする可能性があるといえる。この重なり度合いを示す指標のひとつとしての的中率があり、「補助工法なし」であるのに「補助工法あり」と誤って判別する確率と、「補助工法あり」であるのに「補助工法なし」と誤って判別する確率とが同じになる予測値 $(= -0.331)$ を境にして、その値より大きい場合を「補助工法なし」、また小さい場合を「補助工法あり」と予測することにした場合、それが当たっている確率を的中率と呼ぶ。具体的には、「土圧による変状に対する補助工法」の実施可否を予測したときの的中率は、 $[-0.331$ から右の範囲の「補助工法なし」



図一 1 「土圧による変状に対する補助工法」を目的変数とした場合のその予測値の頻度分布

表一 3 「切羽安定のための補助工法」を目的変数とする解析結果

圧縮強度		風化変質		割目の状態		相関係数	
カテゴリー	カテゴリー数量	カテゴリー	カテゴリー数量	カテゴリー	カテゴリー数量	「補助工法」と「圧縮強度」	0.435
$\sigma \geq 1000$	0.215	なし健全	0.286	密着	0.814	「補助工法」と「風化変質」	0.563
1000～200	0.295	やや低下	0.129	部分開口	0.414	「補助工法」と「割目の状態」	0.609
200～50	-0.475	相当低下	-0.215	開口	-0.579	「圧縮強度」と「風化変質」	0.619
50> σ	-0.121	未固結	-0.352	未固結	-1.490	「風化変質」と「割目の状態」	0.780
(範囲) = 0.770		(範囲) = 0.638		(範囲) = 2.305		「割目の状態」と「圧縮強度」	0.457

の分布曲線を積分して得られる面積)/[「補助工法なし」の分布曲線を全範囲で積分して得られる面積] (= [-0.331 から左の範囲の「補助工法あり」の分布曲線を積分して得られる面積]/[「補助工法あり」の分布曲線を全範囲で積分して得られる面積]) で算出しているが、図-1 的的中率は高いことから、かなり高い確率で中していることがわかる。

表-3 は切羽安定のための補助工法の有無を目的変数とする解析結果である。土圧による変状に対する補助工法の場合と同様に、1 段目と 2 段目は補助工法が不必要、3 段目と 4 段目は補助工法が必要である方に影響しており、また補助工法の必要性の予測に対しても、割れ目の状態が大きく影響していることがわかる。また図-2 に目的変数の予測値の頻度分布を示すが、土圧による変状に対する補助工法ときと比較して的中率が低い。これは土圧による変状に対する補助工法に対し、切羽安定のための補助工法の方がそれらの実施の可否を判断する際の判断が難しく、切羽の状況に応じた最適な補助工法を行っていくことが背景にあるものと考えられる。

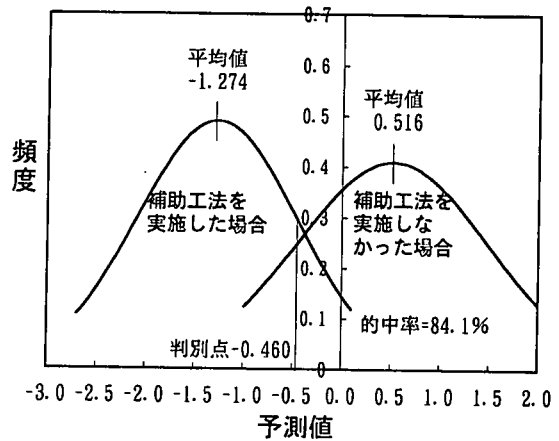


図-2 「切羽安定のための補助工法」を目的変数とした場合のその予測値の頻度分布

3. 簡易計測器による原位置試験

3. 1 簡易弾性波試験

簡易弾性波試験とは、トンネル切羽表面の一部をハンマー等で打撃を与え、そのときに生じた波動を同じ切羽面状の別の複数の受振点で受けることによって、その計測区間の伝搬速度を測定する調査法のことである(図-3 参照)。ただしその速度は、起振点から直接切羽面を通して受振点へ到達する直接波ではなく、切羽奥へ向かって伝搬した波が切羽表面とその奥の部分との境界で屈折し、境界沿いを横方向に進み、再び切羽面に伝わり受振点へ到達する屈折波(図-4 参照)の速度であるから、この計測値は切羽表面の少し奥の部分の弾性波速度を知る手掛かりとなりうる。

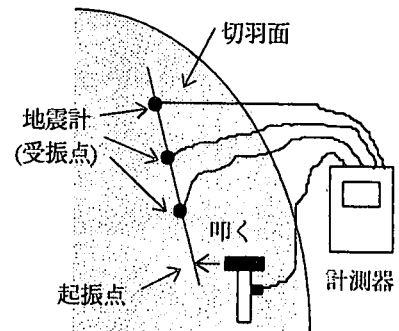


図-3 簡易弾性波試験の模式図

計測方法は、切羽面に受振点となる 3 つの地震計をそれぞれの間隔が 0.5~1.0m となるように同一線上(測線と呼ぶ)に設置し、測線上を打撃して波動を測定器へ送り、そこで走時曲線(図-5 参照)を求めた。これを 1 切羽につき数測線計測し、その平均値を簡易弾性波速度の測定値とした。なお計測したトンネルは全部で 4 箇所である。

図-6 に、計測した 4 トンネルの各切羽ごとの簡易弾性波速度と一軸圧縮強度(シュミットハンマーまたは針貫入試験の計測値の換算も含

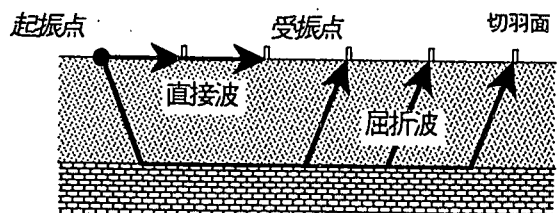


図-4 切羽面における簡易弾性波の伝播ルート

む)との関係を示す。ちなみにそれぞれのトンネルの岩種は、S トンネルは砂岩、Z トンネルは泥岩、W トンネルは花崗岩が風化してマサ化したもの、Y トンネルは凝灰岩である。この図によると、一軸圧縮強度と弾性波速度は必ずしも相関があるとはいえないことがわかる。例えば、Z トンネルと Y トンネルの一軸圧縮強度はほぼ同程度であるにもかかわらず、簡易弾性波速度の計測値については分布が異なる傾向にある。この理由として考えられるのは、一軸圧縮強度は切羽の一部分から抽出されたある点の強度を表わすのに対し、簡易弾性波は測線間の地山物性を評価し、切羽面の岩盤の不連続性に大きく影響を受けており、亀裂の程度、もしくは切羽面を幅広い範囲で評価した安定度を表す指標として有効である可能性があることを表している。一方、原位置試験と切羽の安定度との関係であるが、S トンネルは比較的安定、Z トンネルは切羽面の岩盤の一部が時々軽く抜け落ちる程度、W トンネルは AGF 工法、または注入式フォアポーリングによる安定対策工の実施、Y トンネルはリングカット、フォアパイリングによる安定対策工が実施されていたという状況から考慮すると、概して弾性波速度が高いほど切羽の安定性も高いという傾向があるといえる。このことから、点的にみれば強度の高い岩盤でも、亀裂の度合いが多いと切羽全体の安定性が悪くなる可能性もあることが推測される。ただし、簡易弾性波試験が亀裂の度合いを評価しているとする、切羽面の割れ目の方向性にも影響を受けることになるため、測線の取り方によっては同じ切羽面でも測定値がかなり異なる可能性があり、その影響の有無および効果的な計測方法については今後も検討する必要がある。

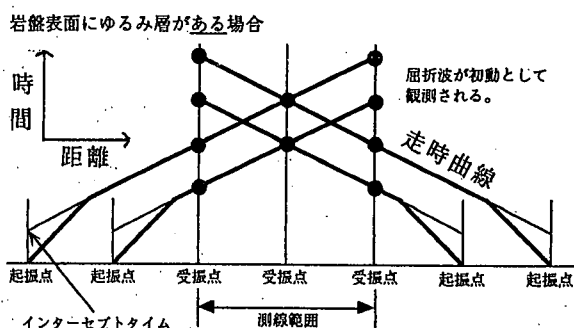


図-5 走時曲線

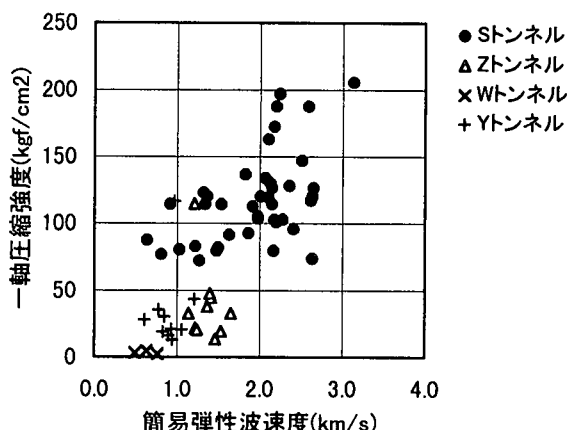


図-6 簡易弾性波速度と一軸圧縮強度との関係

3. 2 シュミットハンマー試験および点載荷試験

シュミットハンマー試験とは、試験器に取り付けられたハンマーをバネの力で岩盤面にたたきつけ、その反発値を測定する試験であり、点載荷試験（ポイントロード試験）とは、岩石試料のある2点を1軸圧縮方向へ力をかけて試料を破断させ、そのときの最大許容荷重から強度を算出する試験である。本研究では、それらの2試験を4. 1の簡易弾性波試験と同様に切羽面において実施し、地山評価指標の検討の一環として、それぞれの計測値の特性について考察した。

計測方法は、シュミットハンマーについては、簡易弾性波速度を計測した測線上の点で5回計測し、その平均値をシュミットハンマーの試験値とし、点載荷試験については、試料として切羽付近で採取された岩石を用い、試料1切羽につき切羽左側および右側から各5個の岩石を抽出し、それら10個の試料につき試験を行い、その平均値を点載荷試験の試験値、すなわち点載荷強度とした。なお点載荷強度は試料の厚さの関数であるため、岩石の力学的特性が同じでも試料の大きさによって異なる値をとるので、任意の大きさのコアを用いた点載荷試験に対して、その試験値は径50mmの円柱コアを用いたときの点載荷強度になるよう

に換算して整理を行っている。また一軸圧縮試験も実施したが、その試料は切羽から採取したブロックを室内で $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$ のコア状に整形したものを使用した。

図-7にシュミットハンマー試験と一軸圧縮強度との関係、図-8に点載荷試験と一軸圧縮強度との関係をあらわす。これによると、シュミットハンマー試験の試験値は、同じトンネルのデータのグループのなかでは試験値がほぼ同じ数値であるのに対して、点載荷強度試験の方は、試験値のバラツキが大きいことがわかる。各トンネルの計測ポイントの地質が切羽進行に従ってほぼ変化がないとすると、シュミットハンマー試験の方が、点載荷強度試験よりも測定結果のバラツキが少ない試験である可能性があるといえる。しかし上記の考察に普遍性があるかどうかを論じるには、さらに種々の岩質において実験を行って改めて考察することが重要であると考えられる。

4. 結 論

補助工法（土圧による変状および切羽安定の2ケース）の実施有無を目的変数、「圧縮強度」、「風化変質」、「割れ目の状態」の地山性状を表す指標を説明変数として数量化理論第Ⅱ類による解析を行った結果、的中率も高く、これらの説明変数が地山評価に有効であることが示された。また施工中のトンネル切羽で計測を行った結果、簡易弾性波試験から得られる弾性波速度は高いほど切羽の安定性が高く、シュミットハンマー試験は点載荷強度と比較して計測値にバラツキが少ない傾向がみられた。

5. あとがき

地山評価手法の確立を進めるにあたり、その手法が多く の地山に適用できる普遍的なものである必要があることから、切羽観察表の項目から有効な地山評価指標を抽出する統計処理に基づく検討、および簡易弾性波速度試験の適用性に関する検討をそのなかに活かしていくとすれば、ともに多種類の地山から集めたデータを収集し、その全体を見た上で評価方法の検討を進めていく必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 大杉, 真下, 池口; 切羽観察からの地山評価に関する研究, 土木学会第51回年次学術講演会論文集Ⅲ-B56, pp112-113, 1996.9

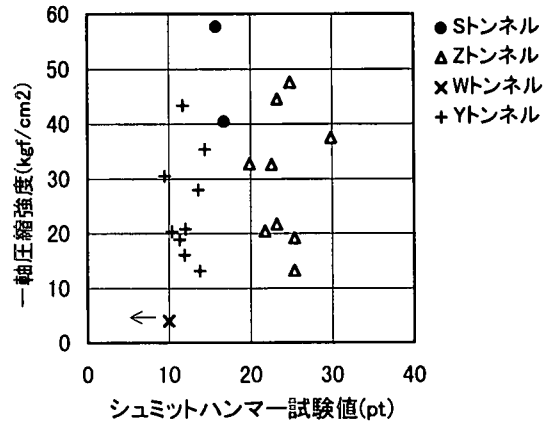


図-7 シュミットハンマーポイント値と一軸圧縮強度との関係

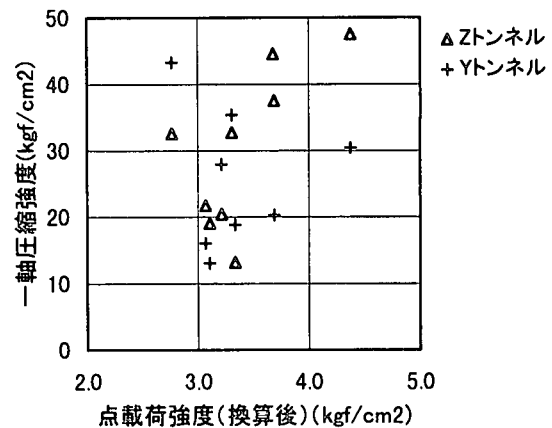


図-8 点載荷強度と一軸圧縮強度との関係