

傾斜区分を考慮したトンネル地山評価

Evaluation System for Tunnel Rock Mass Classification
Based on the Topographical Analysis

木村正樹¹・渡辺雄二²・杉田理³・古田尚子³

Masaki Kimura, Yuuji Watanabe, Osamu Sugita, Naoko Furuta

¹正会員 応用地質株式会社 関西支社 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北2-4-66)

E-mail:kimura-masaki@oyonet.oyo.co.jp

²山形県立産業技術短期大学校 (〒990-2473 山形市松栄二丁目 2-1)

³応用地質株式会社 関西支社 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北2-4-66)

Difference is often brought about for the rock mass evaluation in advance and the evaluation of the execution grade in the tunnel execution. The evaluation of the core of boring and various physics investigation are accomplished with the standard which was the same as the decision standard in the execution toward this, and it has being found out that the precision improvement of the primary investigation was possible. However, the investigation is not sometimes done fully from the restriction of the cost and the time, and we have examined relations between the inclination of the geographical features and the cutting face evaluation point this time. It is understood that there is correlation between two these, and it has been gotten the prospects that the precision improvement of the primary investigation becomes possible by adding geographical features information as this result.

Key Words : Evaluation System, Rock Mass Classification, Topographical Analysis

1. まえがき

筆者らはこれまで、トンネル施工段階で用いられる切羽評価点と同じ基準で事前調査、支保設計を行うことにより、施工との乖離を低減する方法を提案してきた¹⁾。これは、図-1フロー、表-1~3、図-2コアの評価点による地質情報の整理に示すようにボーリングコアの評価、孔内検層、地表からの物理探査(弾性波探査トモグラフィ法、二次元比抵抗探査など)の結果を組み合わせる施工段階の基準である切羽評価点で地山分類を行うものである。

これまで、塊状硬質岩である花崗岩地山の実績や層状軟質の付加体地山のトンネルでも同手法により精度の高い地山分類が実施できることが確認されたが^{2,3)}、十分なボーリング調査や物理探査が必ずしも実施されるとは限らない。また、物理探査の結果も地形や地下水状況、造岩鉱物等の相違によって値が異なるため、類似地山の物理探査の結果の物理量を参考に別のトンネルの地山分類を行うのにも限界

がある。そこで今回は、数値地図を利用した地形データの活用について着目し、評価点と地形、特に傾斜量とトンネル支保の関係について考察した。

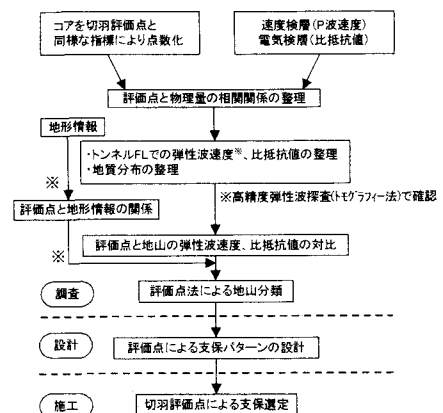
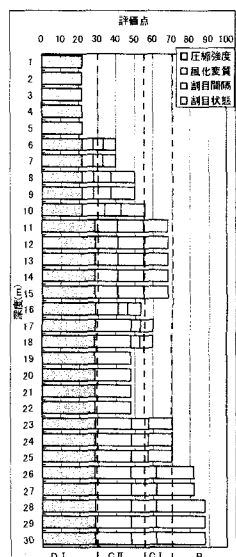


図-1 評価点法を用いた支保選定の流れ ¹⁾に加筆
(※今回加筆した部分)

[illegible]

岩質/評價区分		1	2	3	4	5	6	
柱状強度	塊状	軟質岩	36	29	22	14	7	0
		中硬質・軟質岩	32	26	19	13	6	0
層状		軟質岩	36	29	22	14	7	0
		軟質岩	38	31	24	15	8	0
風化差質	塊状	軟質岩	18	12	6	0	0	0
		中硬質・軟質岩	19	13	6	0	0	0
層状		中硬質岩	22	15	7	0	0	0
		軟質岩	20	13	7	0	0	0
割断層関係	塊状	硬質岩	19	14	9	5	0	0
		中硬質・軟質岩	24	18	12	6	0	0
層状		中硬質岩	3	7	4	2	0	0
		軟質岩	12	9	5	3	0	0
割断面	塊状	硬質岩	26	20	13	7	0	0
		中硬質・軟質岩	25	19	12	6	0	0
層状		中硬質岩	33	25	16	8	0	0
		軟質岩	29	22	14	7	0	0

		湧水量の評価区分			
		1	2	3	4
劣化の 評価区分	1	0	0	-5	-10
	2	0	-5	-7	-10
	3	-5	-7	-10	-15
	4	-7	-10	-15	-20



(1 m毎に地質を切羽
評価点と同じ指標で評価)

Suzuki et al. 1985によると図-3に示すように基盤岩の強度および透水係数のにより谷密度と起伏量が変化する⁴⁾。ここで、谷密度などの平面形に関する地形量は末風化新鮮岩の物性に支配され、しかも力学的強度ではなく、透水性に強く制約され、一方起伏量などは、強度に加えて透水性にも制約されているとされている。すなわち、一般に透水性が高く強度の大きい地山では比高が大きく谷密度の低い地形となり、透水性が低く強度の小さい地山では比高が小さく谷密度が高い地形となると述べている⁵⁾。したがって、谷密度と傾斜からトンネル地山の強度や透水性を評価することが可能であると考えられる。

なお、地形とトンネル支保との地山分類の関係について、山田ら(2002)の土被りと支保の関係に着目して整理しており、中国地方の花崗岩・頁岩類で土被りと支保パターンの関連性が強いことがのべられている⁷⁾が風化の及ばない深部で軽い支保が選定さ

1cmあたりの 等高線本数	傾斜量 (度)
2	2
4	7
6	11
8	16
10	20
15	29
20	37
25	44
30	49
35	54
40	57

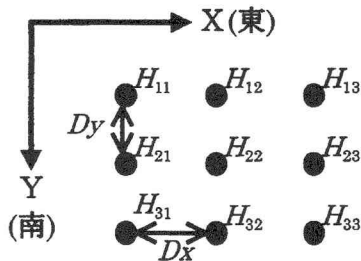
- 70 -

3. ケーススタディー

2章に述べたように、谷密度、傾斜区分図等の地形データは岩盤の強度や透水性と関連性を持つことが予想されるため、支保選定に用いた切羽評価点、実績支保パターンとの関係を以下の3トンネルについて整理した。

傾斜については、数値地図 50m メッシュ (標高) を用い、一次メッシュ (緯度 40 分ごと、経度 1 度ごとに区切った区画；概ね 1/200,000 地勢図に対応) ごとに傾斜量を計算した。図-5 にはデータの配列と計算の方法を示したが、東 (右) 方向に X 軸を、南 (下) 方向に Y 軸をとった場合、対象とする格子点の標高を H_{22} とし、これに隣接する格子点の標高を H_{11} , H_{12} , H_{13} , H_{21} , H_{23} , H_{31} , H_{32} , H_{33} とすと X 方向の傾斜 S_x および Y 方向の傾斜 S_y から (1) を用いた傾斜 S を計算できると述べられている⁶⁾。

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (1)$$



傾斜の計算に使用する格子点

- : 格子点
- H_{22} : 注目している格子点の標高
- $H_{11} \sim H_{33}$: 隣接する格子点の標高
- Dx, Dy : X 方向, Y 方向の格子間隔

図-5 データ配列と傾斜計算

特に今回の評価では、50mメッシュのDEMデータのうち、トンネルルートセンターの左右約200mについて各メッシュの交点間の傾斜を算出し、最大および最小傾斜、平均傾斜を求めた。

表-4 ケーススタディートンネル

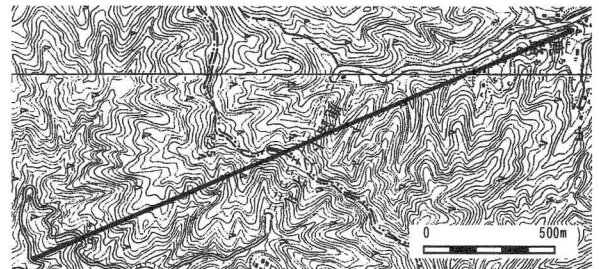
トンネル名	延長	岩質	実績支保
SRトンネル	約2400m	花崗岩類	C I, C II
Kトンネル	1652m	泥岩	D I, C II
		花崗斑岩	C I, B
Tトンネル	1696m	付加体砂岩頁岩	D I, D II

※実施支保は坑口を除く代表的支保

(1) SR トンネル (花崗岩類) (図-6~7 参照)

地質は全線が花崗岩および花崗閃緑岩類であり、中央付近を境として終点側は全体に鉍化変質を受けている。深成岩の特徴として、地下深部で形成された岩塊が地表に出現する段階で生じる断層や変質帯などは縦方向の地質構造であることが多いため、トンネル施工基面付近の地質状況はほぼ直上の地表面に連続すると考えることができる。

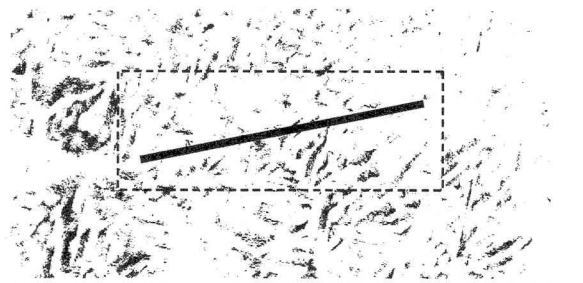
図-7 に示した地表面の傾斜についてみると、坑口付近を除く最大傾斜は $40^\circ \sim 50^\circ$ で全線を通じてほぼ同じであり、平均傾斜も同様であることから、これらと施工実績の施工パターンを比較しても有意の相関があるとはいえない。最小傾斜については、支保が軽いほど傾斜が急になるような傾向がみえるが不明瞭である。



(a) トンネル周辺の地形図⁸⁾



(b) トンネル周辺の傾斜量図 (傾斜 30 度以上を着色)



(c) トンネル周辺の傾斜量図 (傾斜 40 度以上を着色)

図-6 SR トンネル周辺の地形図・傾斜量図
(b, c の破線部が地形図 a の範囲)

次に、傾斜と切羽評価点について比較する。図-7には、最大傾斜についてトンネル中央付近を境として起点側の花崗片麻岩と終点側の鉍化変質部に区分し、切羽観察による評価点と傾斜の対比を示した。この図では、終点側のデータについて比較的よい相関が得られており、切羽評価点と傾斜に関係のある可能性が示された。なお、起点側の花崗片麻岩で相関が不明瞭であるが、これは起点側の土被りが200m近くあることでトンネル位置と地表付近で岩盤状況が必ずしも同じでないことが考えられる。

以上について傾斜と切羽評価点は相関がある可能性が示されたが、施工実績支保パターンと傾斜の関係はあまり明瞭でないといえる。これは、施工実施の支保パターンがある程度の岩盤状況の変化に対応し安全側で対応しているため、毎日の切羽観察で評価する切羽評価点ほど細かな変化を生じないことによると考えられる。

谷密度については、値が大きいほど強度が低い岩盤と考えることができ、全線で比較すれば支保が重い区間の谷密度が大きい傾向があるようにみえるが、50mメッシュに対応する細かな区間では明確に対応しているとはいえない状況である。これは、谷密度を求める場合に、ある程度の広い範囲で集計する必要があるためであり、支保の変更を考慮する地山の変化はそれより短い区間となることから、谷密度の統計方法の問題ともいえる。

なお、筆者らはSRトンネルについて、高精度電気探査等の調査結果と切羽評価点による事前調査と支保設計を用い、設計と施工実績の乖離が小さくでき

たことを述べてきた²⁾。しかし、距離程 400~700mの区間を事前調査でBパターンとしたが実績ではCⅠ~CⅡとなり、この区間だけが大きな乖離を示した。これについて今回の傾斜区分による評価をみると、この区間は両側の区間に比較して傾斜が小さい。この区間の切羽観察結果では「切羽は自立し硬質な岩盤であるが、最大 200 リットル/分の湧水」の区間であり、図-3で「岩盤強度が大きく、透水性の高い地山：図上では右上ブロック」に相当する。

以上より、広域に分布する深成岩地山では地形解析から得られる傾斜は切羽評価点との対比ができる可能性が考えられ、これまでに提案してきた事前調査評価の精度をさらに高めることができる可能性があるといえる。ただし、土被りが200~300mと大きい場合は、地表と地下の岩盤状況が異なる場合も想定でき、ボーリングや物理探査等、他の地質調査結果等を参考として考察する必要がある。

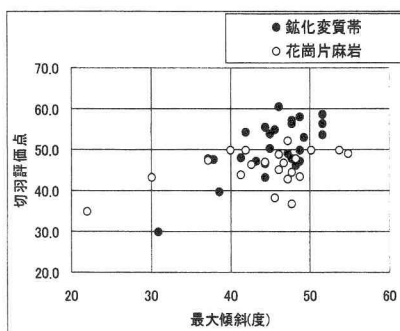


図-8 最大傾斜と切羽評価点の関係 (SRトンネル)

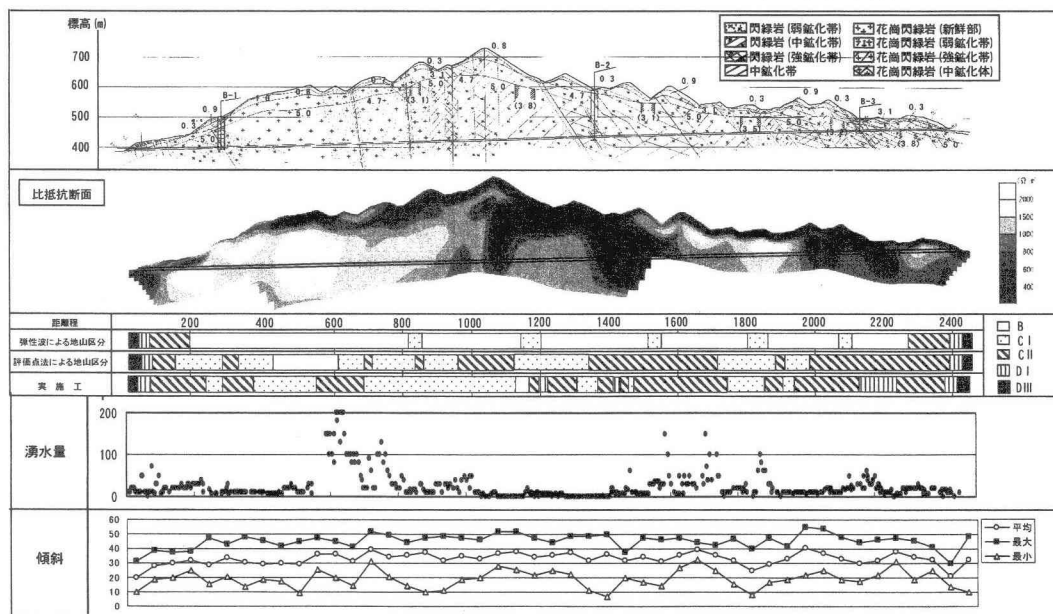


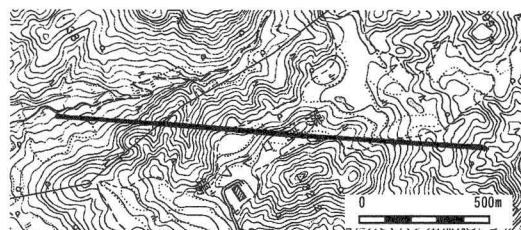
図-7 SRトンネル縦断図 (地質縦断図、支保パターン、傾斜)

本トンネルはほぼ中央を境として起点側に新三紀の泥岩類、終点側にこれを貫いて噴出した花崗斑岩が分布する。用地上の関係から事前調査は、両坑口部の弾性波探査（ハギトリ法）と全線の二次元比抵抗探査のみであり、この結果を基に地山評価、設計が行われていた⁹⁾。堆積岩類が分布する区間では D I、C II パターン主体で、花崗斑岩の分布する区間では硬質塊状で B 又は C I パターンを主体で設計・施工された。

図-9 には、トンネル周辺の地形図と傾斜量図を示した。地形図および傾斜量図によると、Kトンネル周辺の地形の特徴は、河川沿いの傾斜 30 度以下の緩斜面と傾斜 40 度以上の急傾斜面、および急傾斜面に囲まれた傾斜 30 度以下の緩斜面に分類される。

地形解析から得られる傾斜(図-10 における傾斜は最大傾斜量)を比較すると、沢沿いの起点側の傾斜が 30 度以下と小さく終点側が 40 度程度と大きい傾向が明瞭であり、この地域の地質と対比すると第三紀の泥岩と花崗斑岩に対応し、地質状況の変化が地表面の傾斜量と関係があると言える。

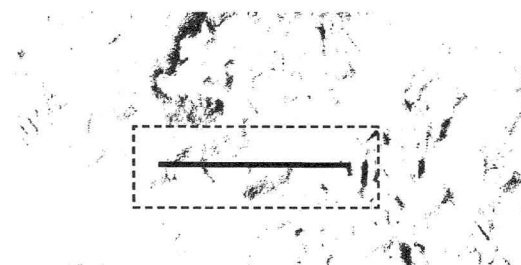
なお、最大傾斜量の算出は 50m メッシュの DEM データを用いているために平均的な傾斜で表現されがちであるが、図-4 に示した等高線間隔と傾斜の関係から急崖の傾斜を読み取ると 50 度以上の部分もある。また、この傾斜量と施工実績を比較した場合、支保パターンが重くなるほど、傾斜量が小さくなっている。ただし図-10 に示すように地表面と地形の関係が明瞭であっても、地質境界が緩やかな場合には、地表面の傾斜変化点の直下のトンネル施工レベルが地質境界でない区間もあるため、地質踏査、ボーリング、物理探査で境界面を評価することが重要である。



(a) トンネル周辺の地形図¹⁰⁾



(b) トンネル周辺の傾斜量図(傾斜 30 度以上を着色)



(c) トンネル周辺の傾斜量図(傾斜 40 度以上を着色)

図-9 Kトンネル周辺の地形図・傾斜量図

(b, c の破線部が地形図 a の範囲)

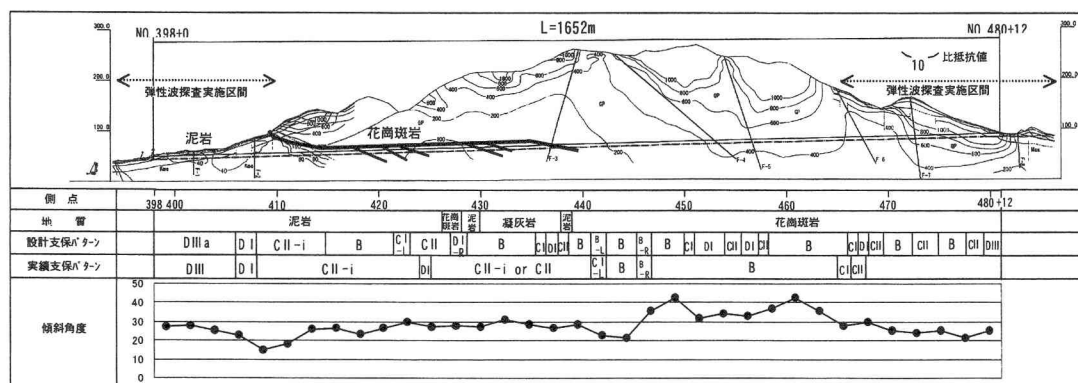


図-10 Kトンネル縦断図 (地質縦断図, 支保パターン, 傾斜)

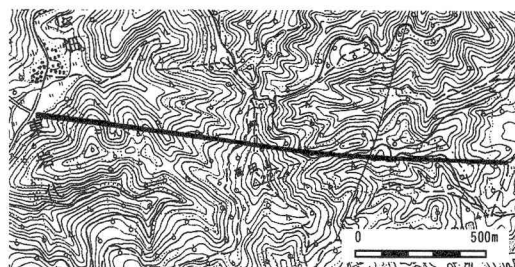
(3) Tトンネル (付加体砂岩頁岩) (図-11～13参照)

本トンネルは、紀伊半島の四万十帯に位置する付加体の堆積岩類から構成されている³⁾が、その地質構成グループをトンネル中央付近で区分することができる。すなわち、起点側の標高が高い山地には起点側に向かって傾斜する砂岩泥岩互層、終点側の低い丘陵にはほぼ垂直な構造の泥岩層が分布する。

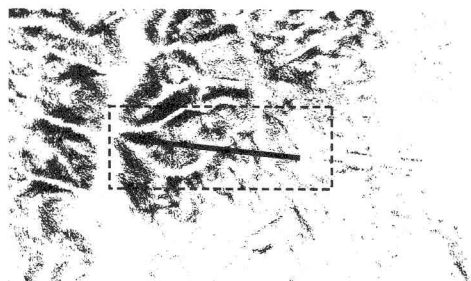
この地質の相違は図-11の傾斜量図に明瞭に現れており、砂岩泥岩互層の部分は傾斜40度以上の部分もある(図-11b)。これに対し、泥岩、特に地すべりを起こすような破碎さる(図-11c)

施工実績支保パターンは、全線がほとんどDⅡパターンでありDⅠやCⅡの部分をまれにはさんでいる。支保パターンの変化が無い場合、傾斜との細かな相関が得られない状態である。ただし、切羽評価点データと傾斜を比較することを試みた結果、特に終点側(図上では右側)については良い相関関係が得られたが、起点側については良い一致とならなかった。これについて、終点側では地層の傾斜が垂直に近い場合、トンネルとその直上が同じ地層なるが、起点側では地層が傾斜していることで地表部とトンネル施工基面付近の地質がずれることが考えられた。そこで、地質縦断面図に基づいて相互のデータをずらして比較したところ、起点側においてもよい相関のあることが示された。

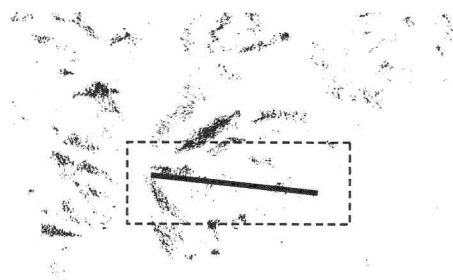
つまり、地表面の地形データを用いる場合は、3次元的な地質構造を考慮して地表とトンネル施工位置の対比に注意する必要があるといえ、踏査やボーリング、物理探査の結果で大局的な地質構造が確認できれば付加体のような複雑な地層でも傾斜区分を参考に、精度の高い地山分類を行える可能性がある。特に、和歌山県をはじめとする四万十体の地質構成は覆瓦構造と呼ばれる東西走向で北傾斜の地層が多いと言われている。地山評価の際には、地層とトンネル掘削方向の関係を吟味して、急傾斜の比較的硬質な岩盤がトンネルのどの位置に分布し、地表では地すべりを発生させ、切羽での押し出しや大変形を生じさせるような破碎された泥岩(メランジェ)がどこに分布するのかを、まず、傾斜区分図と地表地質踏査の結果から判断する。しかし、複雑な付加体の地下構造を正確に判定することは困難なので、地形評価の結果に基づきボーリング位置や高精度のトモグラフィー的な弾性波探査および二次元比抵抗探査の計画を提案し、その結果に基づきトンネル施工レベルの地山評価を行うことが望ましい。



(a) トンネル周辺の地形図¹⁾



(b) トンネル周辺の傾斜量図(傾斜 30 度以上を着色)



(c) トンネル周辺の傾斜量図(傾斜 40 度以上を着色)

図-11 Tトンネル周辺の地形図・傾斜量図
(b, cの破線部が地形図aの範囲)

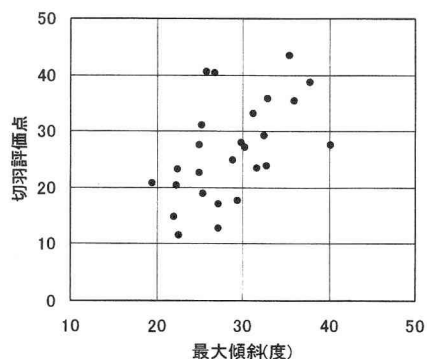


図-12 最大傾斜と切羽評価点の関係

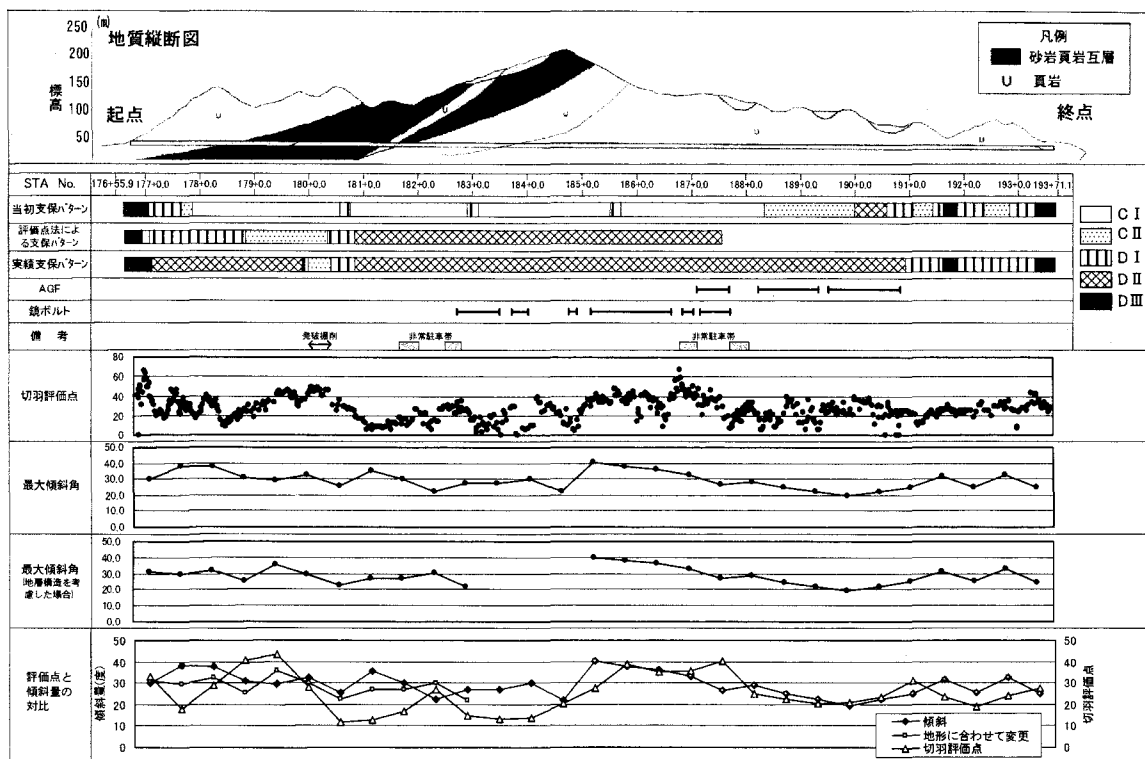


図-13 Tトンネル縦断面図 (地質縦断面図, 支保パターン, 傾斜)

4. 考察

筆者らは、3トンネルについて地表の傾斜や水系密度等のデータと施工実績とを比較した。その結果、各トンネルによる差異はあるものの、これら地形データと支保パターン(あるいは切羽評価点)には、相関関係があり、湧水発生の可能性を検討することも可能であることが示された。

このような相関関係は、分布する地質によりその良否にかなりの差異がある結果となったが、今回は3つのトンネルによるケーススタディーの結果であり、今後データを追加することでさらに精度が上がるものと考えている。

今回の結果より以下のことが考えられる。

- 1) 花崗岩など塊状深成火山岩類は、傾斜や水系密度の差が出にくい。
他の地形要素や解析手法を検討する必要がある。
- 2) 堆積岩類は、地形と支保パターンの対比が良い。
ただし、今回は地層の走向に対して高角度で掘削したトンネルのため、データを蓄積して地質構造との関係を検討する必要がある。
- 3) 地形の真下がトンネル位置の地質を必ずしも表現しているわけではない。調査結果や施工中の切羽観察等により推定された地質構造をもとに、地

表とトンネル位置の対応を考慮する必要がある。

地質分布状態によっては、トンネル付近に分布する地質が地表に表れないこともあり、図-14のような地質構造の場合は注意が必要である。

なお、50mメッシュのDEMデータは2万5000分の1の地形図を元に作成されているため、含まれる情報量としては地形図より劣ることになる。しかし、支保との関係が認められたことから、設計上での支保パターンや同一支保区間長の検討には、小断層等の評価を除き、傾斜区分が利用できると考えられる。

5 今後のテーマ

今回のケーススタディーでは、地形情報より傾斜と水系密度(SRトンネルのみ)について、実績との比較を行った。その中で、付加体のTトンネルでは切羽評価点のデータと傾斜が良い一致を示すことが示された。これは、地形と切羽評価点に相関があることを示すものであり、筆者らがこれまでに述べてきた調査手法を補完する有効な手段となる可能性が考えられる。

切羽評価点の評価項目は、強度、風化変質、割れ

目間隔、割れ目状況、走向傾斜などとなっており、これらは地形の成因あるいは形成過程において重要な要素となるものである。

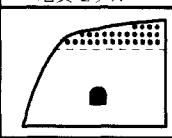
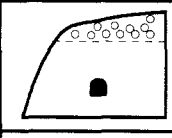
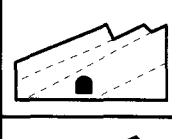
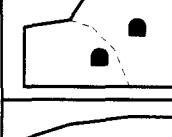
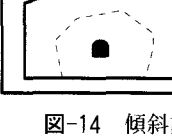
地質モデル	記 事
	厚い風化層 花崗岩類の真砂状風化 堆積岩類の地下水面上位の強風化
	段丘堆積物の被覆 新期堆積岩の被覆
	崖堆積物の被覆
	硬軟の堆積岩の繰り返し (ケスタ地形を形成する場合)
	付加体堆積物等硬軟混在岩 (ケース3のTトンネル)
	噴出岩境界付近 噴出岩頂部の緩斜面
	地表に現れない貫入岩体

図-14 傾斜評価で注意すべき地質構造

したがって、切羽が人工的な掘削面であるならば、地形は自然が地山を掘削した面であるといえ、自然斜面は地山の状況を反映したものと見える。つまり、侵食や崩壊によって形成された地形であれば、切羽評価点と対比できる可能性があると考えられる。

地形学では地形を、地形の形状、地質構造、成因、形成時代など種々の要素で分類しており、今回のケーススタディーに用いた傾斜は、地形が種々の傾斜を持つ斜面が連続するものと考えれば、一つの地形分類要素といえる。

今後、どのような地形分類要素が切羽評価点を構成する主要な項目（岩片強度、風化変質、割目間隔、割目状態）のどの要素と良い相関を示し、その要素をどのような手法で評価して合理的な地山評価を行っていくかについて検討していく予定である。

参考文献

- 1) 木村正樹, 杉田 理, 長谷川信介, 古田尚子: トンネル建設時における評価点法の活用に関する考察, 第13回トンネル工学論文・報告集, 2003年11月
 - 2) 木村正樹・杉田 理・大塚康範: 評価点法を用いた事前調査による地山評価と施工, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集 第11巻 p87-92 2001.11
 - 3) 木村正樹・長谷川信介・古田尚子: 付加体におけるトンネル周辺の地山弾性波速度と地山評価, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集 第11巻 2002.11
 - 4) Suzuki, T., Tokunaga, E., Noda, H and Awakaea, H(1985) :Effects of rock strength and permeability on hill morphology, *Transaction, Japan, Geomorphological, Union*, 6-2, pp101-130
 - 5) 日本応用地質学会編: 山地の地形工学, pp40~41, 古今書院, 2000. 10
 - 6) 神谷 泉, 黒木貴一, 田中耕平: 傾斜量図を用いた地形・地質の判読, 情報地質第11巻 第1号, p11-24, 2000
 - 7) 山田章裕, 保岡哲治, 徳外幸隆, 重田佳幸, 進士正人, 中川浩二: 土被り厚を考慮した中国地方の NATM 施工実績に基づくトンネル事前設計に関する研究, 第32回岩盤力学に関するシポジウム講演論文集, pp57~64, 2003.1
 - 8) 国土地理院発行 2万5千分の1地形図「畝傍山」, 「古市場」
 - 9) 古田尚子・大橋弘紀・木村正樹・片山政弘・松岡洋平: ボーリング孔壁画像のトンネル切羽前方探査への適用事例, 日本応用地質学会関西支部平成14年度講演会概要集, 2002.6
 - 10) 国土地理院発行 2万5千分の1地形図「紀伊勝浦」
 - 11) 国土地理院発行 2万5千分の1地形図「紀伊田辺」
- ※図-6, 9, 11の傾斜量図についてはカシミール3Dで作成した