

(7) 坑内観察による節理分布の把握

(株)大林組 鈴木 健一郎
桑原 徹
土原 久哉
平間 邦興

Prediction of joint distribution using continuously recorded
information of tunnel faces

K. Suzuki, T. Kuwahara, H. Tutihara, K. Hirama
of
TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE of OBAYASHI CORPORATION

Abstract

This Paper presents the procedure for predicting joint distribution using continuously recorded geological information of tunnel and/or gallery faces. The framework consists of 2 main concepts. One is measurement of average joint density by means of crack tensor, the other is estimation of spacial distribution of joint density by means of geostatistics. A case study that provides the applicability of this procedure is also presents.

1. はじめに

岩盤内構造物施工中の坑内観察には、事前に推定された地山の地質モデルの確認と水理・力学モデルのチェックという機能が含まれる。しかし、特にトンネルのような線状の構造物においては、地山の地質構造の不均質性と観察断面の制限が、対象とする領域の地質構造を把握するに当たり、その局所的な変化を捉えるに留まらせているというのが現状であると考えられる。

坑内地質観察から対象となる地山の地質構造の把握、確認、チェックを行なうには、連続的に行なわれている観察から得られる2次元情報を総合的に評価することが必要である。

本報告では、総延長約550mに渡る連続坑内地質観察結果を用いて、特に節理分布の観察結果と地山の地質構造について考察を行なう。

2. 坑内観察による節理分布の解析法

坑内観察という空間的にも時間的にも限られた条件下で掘削に影響を与えるような範囲の節理分布を捉え、岩盤の挙動を推定するには、切羽の進行に伴って得られる坑内観察データを有効に利用することが必要である。

ここでは、掘削進行とともに行なわれる坑内観察、特にスケッチによる節理分布を、地盤統計にあるバリオグラムにより解析し、対象となる領域の3次元節理分布を捉える手法を提案する。その手順は

①切羽のスケッチ及び写真より、2次元の節理分布を捉える。切羽の平均節理密度はクラックテンソルの第一不変量 F 。⁽²⁾ によって表わし得る。

②節理密度 F 。⁽²⁾ を切羽毎に求め、セミバリオグラムを作成する。バリオグラムとは、ある距離 h だけ離れたデータの差の2乗平均値を計算したもので

であり、ここでは式(1) によって求める。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [F_o^{(2)}(x_i) - F_o^{(2)}(x_i+h)]^2$$

バリオグラムの典型的な例を図-1に示す。図中の各パラメータはそれぞれ次のようなことを意味している。縦軸との切片、ナゲット効果は、データの測定誤差や測定よりも小さな構造に関係した量で寸法効果に関係する。シルはデータの分散値を表わしており、レンジは、地盤統計的にある位置のデータに影響を及ぼす範囲、換言すれば、 $F_o^{(2)}(x_i)$ の値が少なからず影響を受ける範囲である。中小規模の節理群はより大規模な地質構造、例えば断層とか破碎帯、大規模節理等の影響を受けて分布している。切羽において観察される節理は、その規模において分類することは不可能である。何故なら、切羽という制限された領域に現われる交線は、領域を越えるような大きさのもであったら、それが岩盤中でどの程度の広がりを持つかが不明であるからである。しかし、トンネル等の掘削方向に限ると、その影響範囲が節理の広がりに対する情報を与える筈である。バリオグラムを解析することで、レンジ(影響範囲)を知ることができる。規模の異なる節理群が存在するため、レンジは1つとは限らない。

③例えば Massoudの例²⁾では、図-2に示すように節理間隔に関するバリオグラムではレンジの異なる2つの構造が現われている。ここでは、平均節理密度のバリオグラムに現われるレンジを節理の平均長さに相当するものと仮定する。

④切羽進行方向の影響範囲を、切羽面内の直交2方向に適用する。大規模構造物においていくつかの方向に対するデータがある場合には、節理の形状に異方性を持たせればよい。

⑤各種岩盤における節理密度と岩盤の大きさの関係(図-3)³⁾を導入する。図は、4種の異なる岩盤において観察された節理密度と観察面の寸法との関係である。相対誤差(観察最大の領域で得られた節理密度と領域を小さくした場合に得られる節理密度の差/観察最大の領域で得られた節理密度)を相対寸法(部分領域の寸法/最大領域での平均節理長さ)に対してプロットしてある。この図より、観察断面の代表的な大きさ、例えば半径などのレンジに対する比が横軸の値に相当するとして、相対誤差を

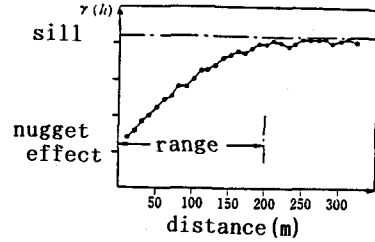


Figure 1 Typical variogram ¹⁾

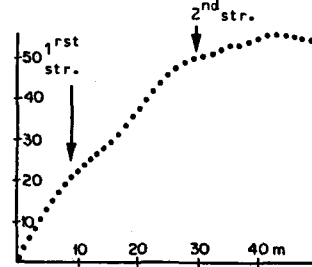


Figure 2 Example of variogram of horizontal distance between fractures ²⁾

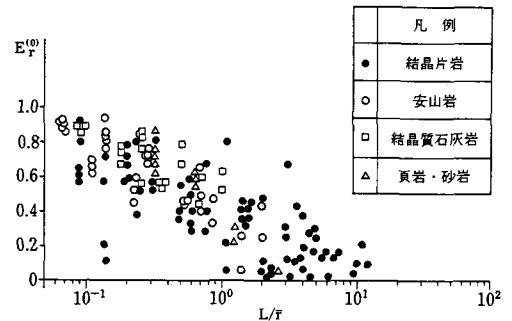


Figure 3 Relationship between relative error and relative scale ³⁾

求める。

⑥観察断面で得られた節理密度 $F_o^{(2)}$ は、対象領域全断面 $F_o^{(2)*}$ と

$$\left| \frac{F_o^{(2)*} - F_o^{(2)}}{F_o^{(2)*}} \right| = \text{相対誤差}$$

の関係にあるから、これより対象領域全断面での $F_o^{(2)*}$ を推定する。

⑦2次元 $F_o^{(2)*}$ と3次元 $F_o^{(3)}$ と関係 ⁴⁾

$$F_o^{(3)} = (1.44 \sim 1.77) F_o^{(2)*}$$

より、3次元の節理密度が知れる。3次元のクラックテンソルを得るには、別に走向、傾斜のデータから方向テンソル N_{ij} を求め、

$$F_{ij} = F_o^{(3)} * N_{ij}$$

より求める。

本手法の適用例について以下に述べる。

2. 地質概要

調査地のトンネルは、およそNNE 方向に地山を貫通するもので総延長552mのうち、約60%が弾性波速度で3.3～3.5Km/sec 程度の新鮮な新第3紀中新世の石英安山岩質凝灰岩、残りは弾性波速度2.0Km/sec 以下の風化岩で構成されている。(図-4 参照) 新鮮岩中には、部分的に破碎され熱水変質を受けた弱部が存在し、これらは、調査地付近で確認されている断層の一般的な方向(ほぼN-S 方向)と高角度で交わる副次的な小規模断層や節理群から成るものである。

3. 坑内観察結果

坑内観察による切羽のスケッチ及び写真から節理に関する情報をディジタイザーにより抽出し、2次元のクラックテンソルを決定した。図-5～7にその結果を示す。図-5は、各ステーションにおける節理密度 F_0 を示している。図-6は、クラックテンソルの最大主値の方向、即ち節理の法線ベクトルの卓越方向の変化を、図-7は、異方性の程度の変化を示している。異方性の程度 ξ は

$$\xi = (2F'_{11}F'_{22})/F_0, \quad F'_{11} = F_{11} - (F_0/2) \delta_{11}$$

によって表現しており、 $\xi = 0$ の時、完全な等方性、 $\xi = 1$ の時、完全な異方性となっている。これらの結果より次のような傾向が指摘される。

(1) 事前調査で得られていた低速度帯-破碎帯では、目視や写真で評価できる明瞭な節理が少なくなり節理密度としては小さくなる。(図-5のST698 付近) 低速度の原因は、数十cm程度の小規模な節理の密集である。小規模な節理の影響を無視した節理密度で捉えらると、ST698 を対称軸として左右に増加傾向にある。

(2) 2次元の方向分布(図-6)は、ほぼ0プラスマイナス20度程度の変化であり、トンネル全線を通して大きな変動は無いといえる。ST698+70m及びST696+30m 付近に現われる主方向の大きな変動は、図-7の異方性の程度からみて、等方状態に近いための主軸の回転であり、異方性のまま主軸が大きく変化したという意味ではない。

(3) 異方性の程度は、平均では60% 程度であるが、20m 程度の周期性をもって80% 程度の異方性となる。具体的には、傾斜が鉛直に近い節理が平均的に分布し、20m 程度の周期をもって水平方向の節理の

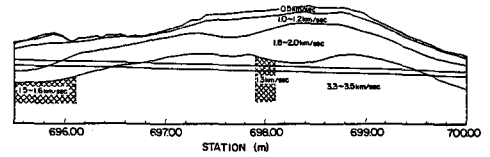


Figure 4 Vertical section of I tunnel

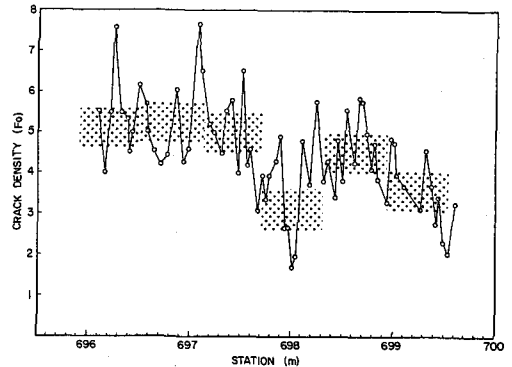


Figure 5 Variation of crack density F_0

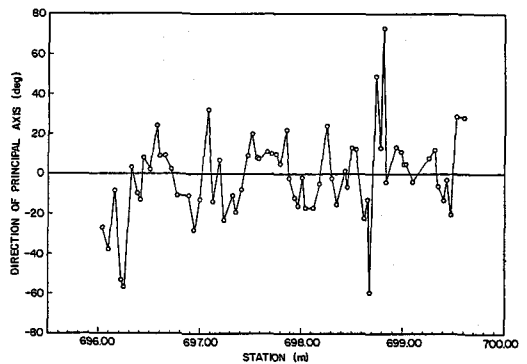


Figure 6 Variation of principal axis orientation of anisotropy

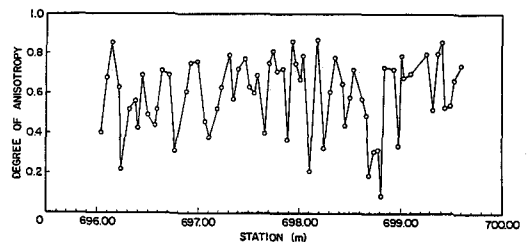


Figure 7 Variation of degree of anisotropy

影響が大きく現われるということになる。

長さ1m程度から切羽で観察される範囲の長さの節理を対象とした今回の観察結果より、地山は、熱水変質を受けた破碎帯 (ST698 付近) を中心に左右の岩盤に大別される。左側はST696 付近の同様の破碎帯の影響を受けて右側の岩盤よりやや節理密度が高いものである。

4. 地山の節理分布モデル

地山の大規模な地質構造は、破碎帯によって特徴付けられる。数十cm以下の小規模な構造は当然破碎帯からの距離によって特徴付けられる筈である。ここではそれ以外の中規模節理の分布を2章で提案された方法によりモデル化することにする。

図-8に節理密度に関するバリオグラムを示した。図に示したようにレンジは3つ考えられる。1つは8mのレンジをもつ構造で、これがほぼ切羽の節理分布を特徴付けているものと考えられる。2番目は15mのレンジをもつもので、異方性の周期に近いものである。3番目は60mと大きなレンジを持つもので、広い範囲の節分布を代表すると考えられるものである。ST698を中心60mの範囲でグルーピングを行なうと、場所による構造の平均的な変化を捉えられる。(図-5～図-7参照)ここでは、レンジ8m規模の節理について考えることにする。トンネル上半の代表長さをその半径5mに設定すると、図-3における横軸のL/rは5/8である。図-3より、節理密度の相対誤差は0.46であるから、8mの5倍以上の領域(40m*40m)では、2章の(6)より、トンネル断面で観察される節理密度の1.9倍の密度となる。ST698Nの左側を対象とするとトンネル断面で観察される節理密度F₀は5.3であるから節理分布を代表とすると考えられる領域では、節理密度は10となる。さらに3次元に拡張するには1.5倍すれば良いから40*40*40mを岩盤の対象領域又は解析領域とすれば、そこでの3次元の節理密度は15ということになる。

今、ST697+50m 付近で計測した走行・傾斜のデータから、方向テンソルは主軸について次のように得られている。

$$N_{ij} = \begin{bmatrix} 0.44 & 0.00 & 0.00 \\ & 0.41 & 0.00 \\ & & 0.15 \end{bmatrix} \begin{matrix} 75/268 \\ 74/3 \\ 23/137 \end{matrix}$$

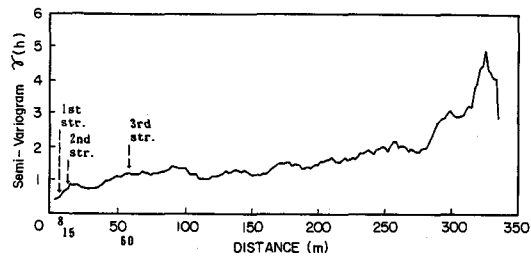


Figure 8 Variogram of crack density

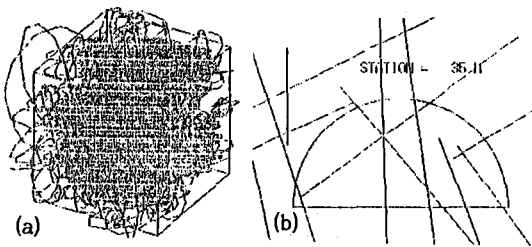


Figure 9 (a) 3D distribution of joint
(b) a face of tunnel

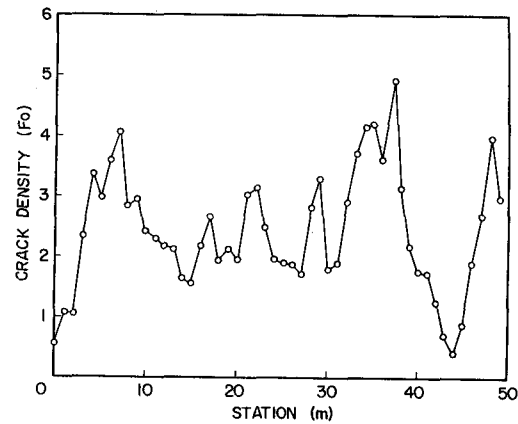


Figure 10 Variation of crack density

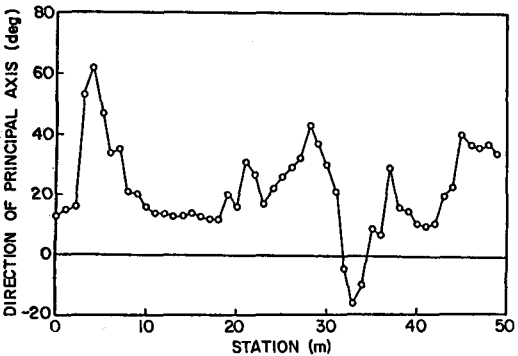


Figure 11 Variation of principal axis
orientation of anisotropy

主軸の方向は、傾斜／傾斜方向でそれぞれ示してある。以上の条件を基に、表－１のような節理を、50*50*50m 領域について発生させ、中心に半径5 mの半円のトンネルを掘削した場合に現われる切羽の節理分布を1m毎に50断面求めた。

その1例を図－9に示す。図－10から図－13に断面の解析結果を示す。図－10は節理密度 F_0 の変化、図－11は主軸方向の変化、図－12は異方性の程度の変化である。これらの変化そのものは実際の観察結果と一致することはないが、単純な分布則により図のような変化を表現できるところに意味がある。図－13はバリオグラムであるが、レンジと節理の平均長さが一致しており、2章の仮定が確かめられたところが興味深い。8m以上のバリオグラムの挙動は、実測結果の第2構造を考慮していないためで、それを重ね合わせて評価することで、より現実に近い節理分布モデルが作成できるものである。

5. まとめ

トンネルに限らず重要な構造物であれば、岩盤の掘削に伴って通常行なわれている坑内観察により非常に多くの情報が得られる。これらの情報を有効に用いて地山構造推定の一助とする手法を提案した。クラックテンソルは観察された節理分布の相対的な量を与え、変形係数や透水係数を与える。バリオグラムはその空間的な分布に関するデータを提供

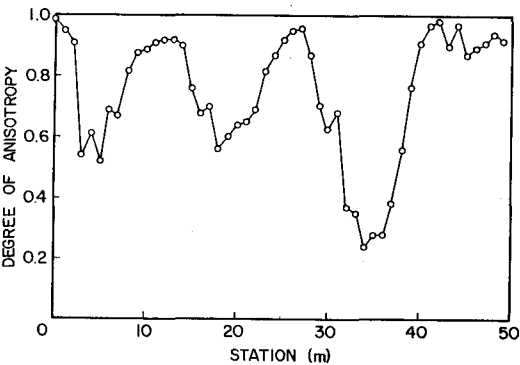


Figure 12 Variation of degree of anisotropy

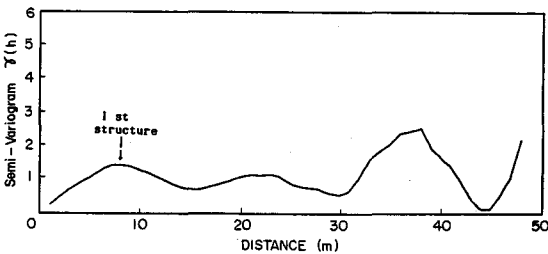


Figure 13 Variogram of crack density

し、観察領域と解析領域の間を結ぶものとして役に立つ手法である。

本手法に対する信頼性の議論は行なっていないが、データを蓄積することによりそれは解決されるものとする。

Table 1 Condition of joint distribution model

	節理直径分布	傾斜分布	傾斜方向分布	密度分布	節理形状
JOINT SET 1	$f(r) = (1/8) e^{-(r/8)}$	70 +- 20	240 +- 20	6	円盤
JOINT SET 2	$f(r) = (1/8) e^{-(r/8)}$	70 +- 20	- 20 +- 20	6	円盤
JOINT SET 3	$f(r) = (1/8) e^{-(r/8)}$	20 +- 20	120 +- 20	3	円盤

【参考文献】 1) 桑原 啓三、原口 強；“ジオスタティスティックスとその地質工学への適用”、土木技術資料 29-12、pp 14-19 (1987)

2) B.Feuga; “Modelling of flow through fractured rocks:Geostatistical generation of fracture networks.Stress-flow relationship in fractures” ,Groundwater Flow and Quality Modelling, pp 269 - 297,D.Reidel Publishing Company (1988)

3) 鈴木健一郎、桑原 徹、丸山 誠、平間邦興；“各種岩盤の構造最小単位について” 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp 115 - 120, (1987)

4) 小田 匡寛、亀村 勝美、羽出山裕吉；“不連続性岩盤のRepresentative Elementary Volume (REV) について”、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp 109 - 114, (1987)