

岩盤補強に関する研究（その1）

—ロックボルト効果に関する数値実験—

丹生屋 純 夫 鈴木 健一郎
丸 山 誠 藤 原 紀 夫

Reinforcement of Rock Masses (Part 1)

—Numerical Experiments on Effects of Rock Bolts—

Sumio Niunoya Kenichirou Suzuki
Makoto Maruyama Toshio Fujiwara

Abstract

Rock masses reinforced with rock bolts are required to be modeled as composites of “intact rock” and “joints.” Numerical experiments carried out by the authors using crack tensors by solid models assuming isotropic and anisotropic rock masses to gain an understanding of the number of joints crossed by rock bolts as the first step of the study are reported here.

As a result, it is established that the number of joints crossed by rock bolts is affected by the densities and sizes of joints in case of isotropic models. Anisotropic models are additionally affected by joint direction. There also exists the problem of confirming the mechanical relations between sizes of joints and effects of rock bolts.

Studies show that the optimum direction of rock bolt driving can be predicted from evaluations of crack direction and density.

概 要

現在、ロックボルトによって補強された岩盤を、“岩石部分”と“き裂”の複合体としてモデル化することが求められている。この報告ではロックボルトと交わるき裂の個数を把握するためにクラックテンソルを利用して行った数値実験の結果を示すものである。コンピューター上で作成するモデル岩盤に用いたパラメーターは、き裂の密度と平均長さで、モデル数は統計的解析を行うに十分な数量を作成した。このモデル内にロックボルトを方向、間隔を変えながら設定し、交差するき裂数を計算した。その結果、き裂を等方的に分布させた岩盤の場合、交差き裂数はボルトの設定方向には依存しないこと、異方的に分布させた岩盤の場合はボルトの設定方向によって変化することが確認できた。またこれらの交差数はクラックテンソルによって予測できることがわかり、き裂の方向性、密度などの評価によりロックボルトの最適な打設方向が予測可能であることが示された。

1. はじめに

トンネルや地下発電所などの大規模地下空洞を構築する際、き裂を含む岩盤を補強する手法の一つとしてロックボルト打設工があるが、ロックボルトで補強された岩盤をどのように評価すればよいのかが課題となっており、種々な研究が行われている^{1)~4)}。

現在、補強された岩盤の評価法は“岩石部分”、“き裂”、“ロックボルト”による1つの複合体としてモデル化する方向が主流である⁵⁾。この研究では、ロックボルトがき裂に与える強度変化のような力学的効果を、岩盤内部のき裂寸法の変化に変換し、“岩石部分”と“き裂”の

みの複合体としてモデル化し、解析的にロックボルトの補強効果の評価や最適設計につなげていくことを目的としている。

ロックボルトによる力学的効果には、はり効果や吊り下げ効果などがあるが、少なくともき裂がロックボルトと交わることにより効果が発揮されることから、まずロックボルトに交わるき裂数の定量的評価がこの研究の第1段階となる。この報告は、き裂の方向、密度の表現に有効なクラックテンソル手法を利用して数値実験を実施し、ロックボルトと交わるき裂数量を把握し、ロックボルトの最適な打設方向について検討するものである。

2. 岩盤モデルおよび数値実験概要

我が国の岩盤は大小さまざまなき裂が多く、方向の異方向性が顕著であり、力学的にも複雑なものが多くなっている⁶⁾。そこでこの数値実験では、き裂を異方向的に分布させた岩盤モデルを作成したが、比較のために等方的に分布させたモデルについても検討した。

岩盤モデルは、50 m×50 m×50 m の立方体で、このモデル内に発生させるき裂は指数関数分布に従う半径 r を持つ円盤型であると仮定している。また、き裂の発生条件は表-1、表-2 のように定めており、き裂の中心位置の分布および方向は分散内で一様でき裂密度は0階のクラックテンソル F_0 で1.5としている (今までの我々の現地調査による一般的な F_0 は10前後である)。図-1、図-2 に示すようなき裂を等方的、異方向的に分布させた岩盤モデルを表-3、表-4 に従って、平均き裂径 2 m, 5 m, 10 m の3種類のケースで、それぞれ30個ずつ作成し、数値実験を実施している。方向の異方向性を想定したモデルでは、図-2 中に示した座標系において、Y断面にはほぼ平行 ($\pm 15^\circ$ 以内: 表-2 参照) になるようなき裂を発生させている。

この数値実験は、パソコン上で作成したモデルの中心 (25, 25, 25) を通り、モデルを貫通するロックボルトを、方向を変化させながら設定し、これに交わるき裂の個数を計算するものである。この岩盤モデルにおいては、き裂中心を同じ確率条件で分散させているので、ロックボルト設定位置による交差き裂数の影響は無いものと考えている。

これらの計算結果を任意に重ね合わせるにより、 F_0 の異なる岩盤モデルでの結果が得られる。例えば、き裂密度 $F_0=1.5$ のモデルは1シリーズにつき30個作成されるが、この30モデルから無作為に2モデル取り出す組合せは435通りあるので、 $F_0=3.0$ のモデルによる計算結果が435個得られることになる。同様に $F_0=4.5$ のときは3個取り出す組合せを考えればよく、以降組合せるデータ数を一つずつ増やしていく。最大き裂密度は30個のモデルを全て重ねたときで、 $1.5 \times 30 = 45$ となる。

3. 数値実験結果および考察

3.1 等方性岩盤モデル

き裂を等方的に分布させた岩盤においては、ロックボルト打設方向による影響が無いことを確認する為に、次の作業を行った。図-3 は、モデルの中心を含み直交する3断面内で、その中心を支点として長さ 50 m のロックボルトを1周させ、 30° 毎の交差数を調べたものである。この図-3 は、今回の数値実験のなかでき裂密度が最大の45、平均き裂径が (a) 2 m, (b) 5 m, (c) 10 m のときのものである。各断面は、完全なる等方性ではないところから多少の乱れはあるが、ほぼ円形に接する結果となっており、き裂分布が等方的な場合は、ロックボルトの設定方向に依存せずに交差数が決まることがわか

表-1 き裂発生条件 (等方性)

	傾斜方向	傾斜	密度 F_0	中心分布	き裂形状
岩盤モデル	0±180	0±90	0.5	一様	円盤
	0±90	90±45	0.5 (1.5)		
	90±90	90±45	0.5		

表-2 き裂発生条件 (異方性)

	傾斜方向	傾斜	密度 F_0	中心分布	き裂形状
岩盤モデル	0±15	90±15	1.5	一様	円盤

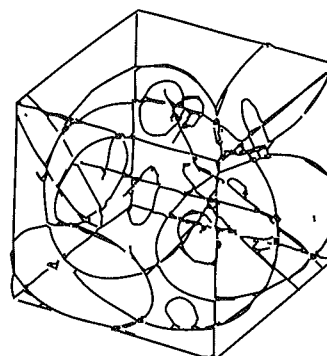


図-1 等方性岩盤モデル一例

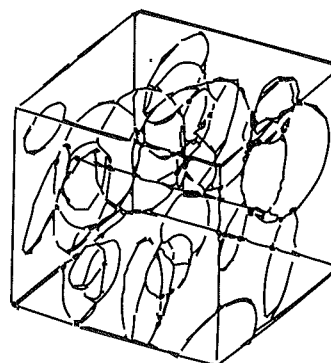


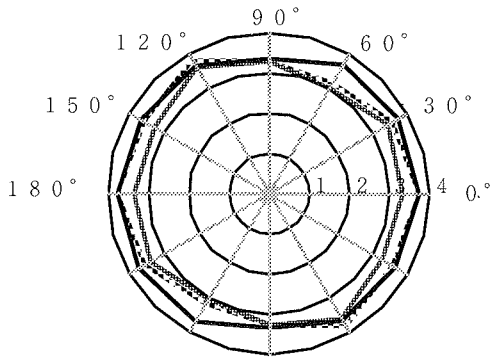
図-2 異方性岩盤モデル一例

表-3 岩盤モデル作成条件 (等方性)

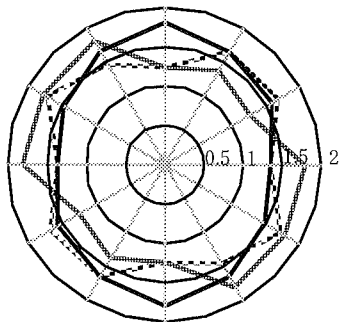
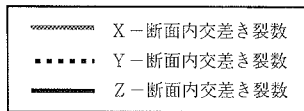
	平均き裂径	モデル数	き裂密度の種類	データ数
I series	2m	30	$1.5 \times n (n=1, 2, \dots, 30)$	$\sum_{n=1}^{30} \binom{30}{n}$
II series	5m	30		
III series	10m	30		

表-4 岩盤モデル作成条件 (異方性)

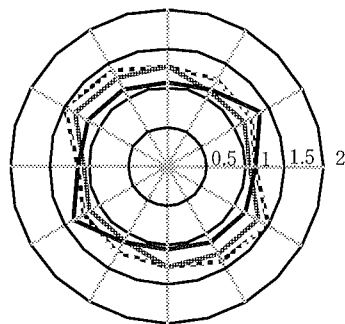
	平均き裂径	モデル数	き裂密度の種類	データ数
IV series	2m	30	$1.5 \times n (n=1, 2, \dots, 30)$	$\sum_{n=1}^{30} \binom{30}{n}$
V series	5m	30		
VI series	10m	30		



(a) 平均き裂径 2 m

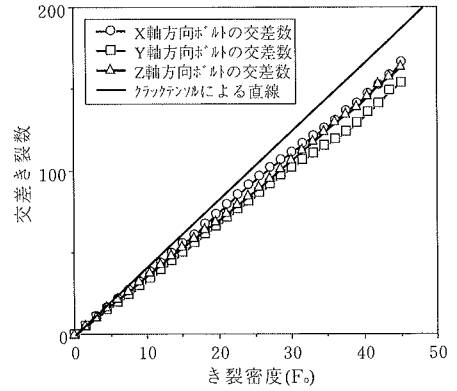


(b) 平均き裂径 5 m

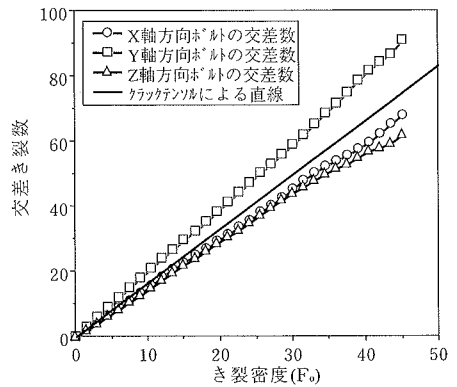


(c) 平均き裂径 10 m

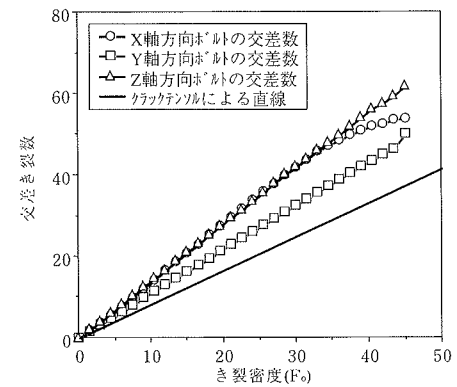
図-3 交差き裂数とボルト打設方向 (等方性)



(a) 平均き裂径 2 m



(b) 平均き裂径 5 m



(c) 平均き裂径 10 m

図-4 き裂密度と交差き裂数の関係 (等方性)

り、これらのモデルが妥当なものであることが確認できた。

次に、岩盤モデル内に想定したロックボルトと交差するき裂数とき裂密度 F_0 との関係を図-4 に示す。図は、縦軸にロックボルトに交差するき裂数を、横軸にき裂密度 F_0 を示しており、(a) が平均き裂径 2 m、(b) が 5 m、(c) が 10 m のときのものである。モデルの中心を通り、直交する 3 方向に設定したロックボルトに交わるき裂数のそれぞれの平均値は、X、Y、Z の 3 方向ともほぼ重なっているのが確認できる。この場合の乱れも、完全な等方性でなく、さらにある 1 方向のみに限った結果か

らくるものと思われる。

ロックボルトと交差き裂数の関係は岩盤に任意に引いた基準線 (通称走査線) と交差き裂数の関係に置き換えられる。クラックテンソルと走査線に交わるき裂数との関係は小田により次のように表されている⁷⁾。

$$F_{ij} = \frac{3\pi \langle l^2 \rangle}{8 \langle l \rangle} \frac{m^{(L)}}{h \langle n \cdot q \rangle} N_{ij} \quad \dots\dots\dots(1)$$

F_{ij} : クラックテンソル

$m^{(L)}$: 走査線に交わるき裂数

h : ロックボルト長

$\langle l \rangle$: トレース長 (壁面とき裂面の交線長) の平均値

$\langle l^2 \rangle$: トレース長の2乗平均

$\langle |n \cdot q| \rangle$: き裂法線ベクトルと走査線ベクトルとの内積絶対値の平均

N_{ij} : 方向テンソル

このとき、完全な等方性を仮定すると走査線に交わるき裂数の方向による補正項は全方向に一樣に分布しているとして積分ができ、またき裂径の分布が指数関数であるとすると、最終的に F_0 と平均き裂径 r およびロックボルトの延べ長さ h との関係がつぎのように求められる。

$$m^{(4)} = \frac{h}{6\langle r \rangle} F_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

F_0 : クラックテンソル第一不変量 (き裂密度)

$\langle r \rangle$: 平均き裂径

ここで、 $h=50$ m, $\langle r \rangle=2, 5, 10$ m としたときの F_0 と交差き裂本数 $m^{(4)}$ との関係を図-4 (a), (b), (c) に実線で示すと実験結果とほぼ同じ傾向を示すことが確かめられる。以上のことから、あるき裂密度、平均き裂長さの等方性岩盤において、ロックボルトを打ったとき、ロックボルト総延長当たりの交差き裂数を (2) 式により予測できることがわかった。

次に、ロックボルトを2本設定した場合を考える。1本1本のボルトの交差き裂数は (2) 式で予測できるわけだが、その中には2本のボルト両方に交差して、2重に数えられているき裂が存在する可能性がある。そこで図-5 に同一き裂密度 ($F_0=45$) における隣合った2本のロックボルトに交わる平均延べき裂総数に対する、同時に交差するき裂数の割合と平均き裂径の関係を示した。左縦軸に平均延べ交差き裂総数、右縦軸に2本同時に交差するき裂数の割合、そして横軸に平均き裂径を示しており、2本のボルトを15° 間隔で設定した場合が点線、30° 間隔で設定した場合が実線である。平均延べ交差き裂数 (丸プロット) に関しては、点線も実線もほぼ重なって推移しているが、2本同時に交差するき裂数の割合 (菱形プロット) は、点線の方が常に約10%程大きい値を示しながら推移していることがわかった。

3.2 異方性岩盤モデル

前節と同様に、まずモデルの中心を含み、座標の X, Y, Z 断面それぞれに平行な3断面上における30° 毎のロックボルトの交差き裂数を調べた。完全な等方性に近くなるほど、図-2の、特に(a)のように、その各端点を結んだ軌跡は完全な円形を示していく。しかし、図-6 (a) ~ (c) では Y 断面における軌跡が極端に小さくなっている。これは、Y 断面に設定したロックボルトにはき裂がほとんど交差していないことを示している。また、その他の X, Z 断面の軌跡では、異方的に発生させたき裂群の面に垂直に設定した時に最大交差き裂数が得られている。

次に、モデルの中心を通り、X, Y, Z 軸それぞれに平行にロックボルトを打設した場合の交差き裂数を調べ、図-7 にき裂密度 F_0 と平均交差き裂数の関係を示した。

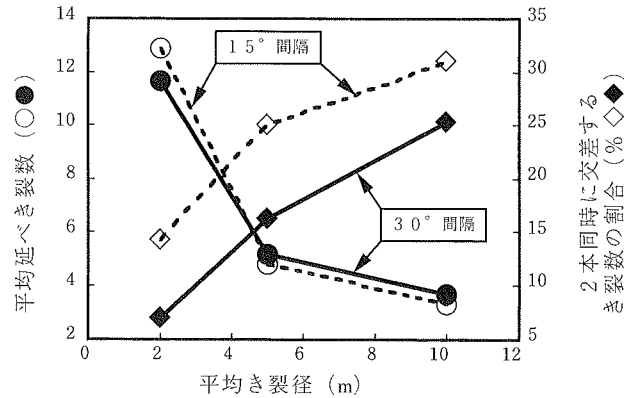


図-5 2本のボルトに交差するき裂数と平均き裂径の関係 ($F_0=45$)

表-5 理論式代入値

i	F_{ii}	$\langle n \cdot q_i \rangle$
1	0.754	1.289E-1
2	43.485	9.787E-1
3	0.761	1.295E-1

これによると、Y 軸に平行に打設した場合の結果が他の2方向に比べて突出しているのが確かめられた。

理論的にはロックボルトに交わるき裂数 m とクラックテンソル F との関係は、(1)式のクラックテンソルと走査線に交わるき裂数との関係式を m について整理し直すことにより、次のように表される⁷⁾。

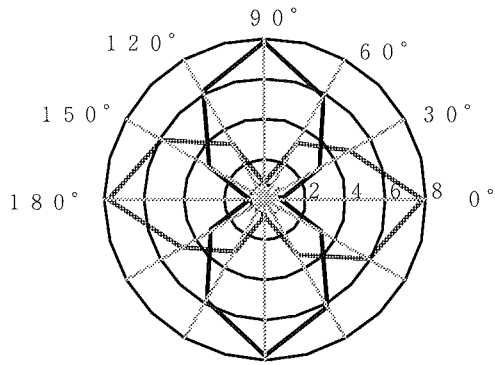
$$m_i^{(4)} = \frac{h \langle |n \cdot q_i| \rangle}{3 \langle r \rangle} F_{ii} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$m_i^{(4)}$: 走査線に交わるき裂数

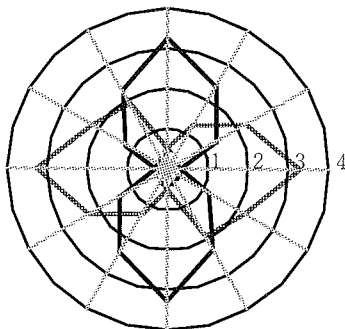
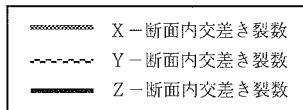
F_{ii} : i 方向き裂密度 (クラックテンソル ii 成分)

$\langle |n \cdot q_i| \rangle$: き裂法線ベクトルと走査線ベクトルとの内積絶対値の平均

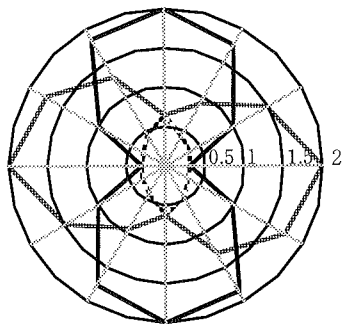
m と F の関係を示す直線の勾配は、単位き裂密度当たりの交差き裂数を意味しており、この交差き裂数が多くなるに従って直線勾配は急になっていく。ここで、表-2より算出した表-5の値を (3) 式に代入する。このときの m 値と原点を通る直線を、図-7 (a) ~ (c) に実線、破線および一点鎖線で示すと、今回の数値実験結果と良く近似していることがわかる。多少の差が生じているのは、計算式における分散 $\pm 15^\circ$ の計算精度によるものと思われる。以上より、あるき裂密度、平均き裂長さで異方的に方向分布された異方性岩盤において、ロックボルトを複数本打設したとき、交差き裂数はロックボルトの打設方向によって変化し、その中でもき裂群の面に垂直に設定した時、最大交差き裂数が得られることが確認された。さらに、それぞれのロックボルトにおける交差き裂数はき裂の長さ、クラックテンソル、ロックボルトの打設方向を調べることにより (3) 式で予測できることがわかった。



(a) 平均き裂径 2 m

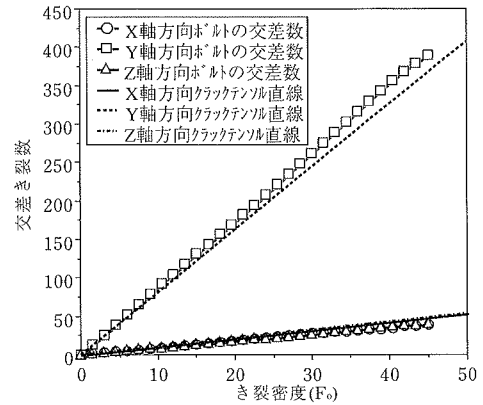


(b) 平均き裂径 5 m

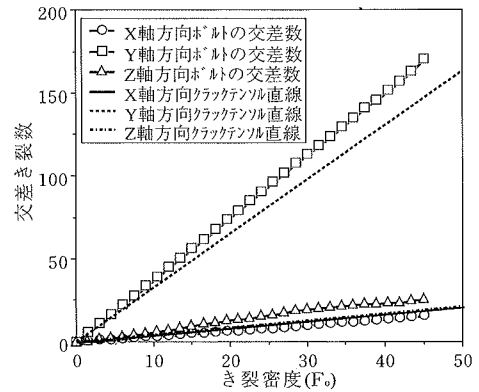


(c) 平均き裂径 10 m

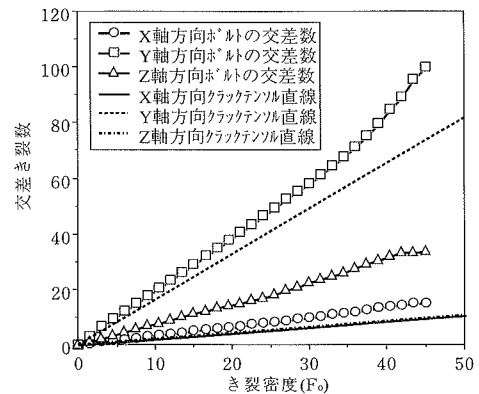
図-6 交差き裂数とボルト打設方向 (異方性)



(a) 平均き裂径 2 m



(b) 平均き裂径 5 m



(c) 平均き裂径 10 m

図-7 き裂密度と交差き裂数の関係 (異方性)

次に、同一き裂密度 ($F_0=45$) における隣合ったロックボルトに交わる平均延べき裂総数に対する2本同時に交差するき裂数の割合と平均き裂径との関係を図-8に示した。右縦軸, 左縦軸, 横軸および点線, 実線とも図-5と同じ項目を指しており, (a) は X 断面, (b) は Y 断面, (c) は Z 断面における結果である。平均延べき裂数 (丸プロット) は, (a), (b), (c) ともに点線と実線はほぼ同じ値を示している。それに対して, 2本同時に交差するき裂数の割合 (菱形プロット) は, (a), (c) においては, ともに約10%程, 点線が実線を上回りながら, 平行に推移している。(b) の Y 断面では他に比べて延べ

数が極端に少ないため, き裂数の割合に多少の乱れが生じているが, 点線が実線を上回っているのは明らかである。これは, 等方性岩盤モデルにおける数値実験結果図-5と同じ性質を表していることになる。またき裂数の割合は, (a), (b), (c) ともに, 延べき裂数に差が生じているものの点線, 実線どうしがほぼ同じ値で推移しているのは興味深いことである。

4. まとめ

近い将来, 多くの大規模地下構造物が構築されることが予想される。その際, その構造物に対する支保設計は

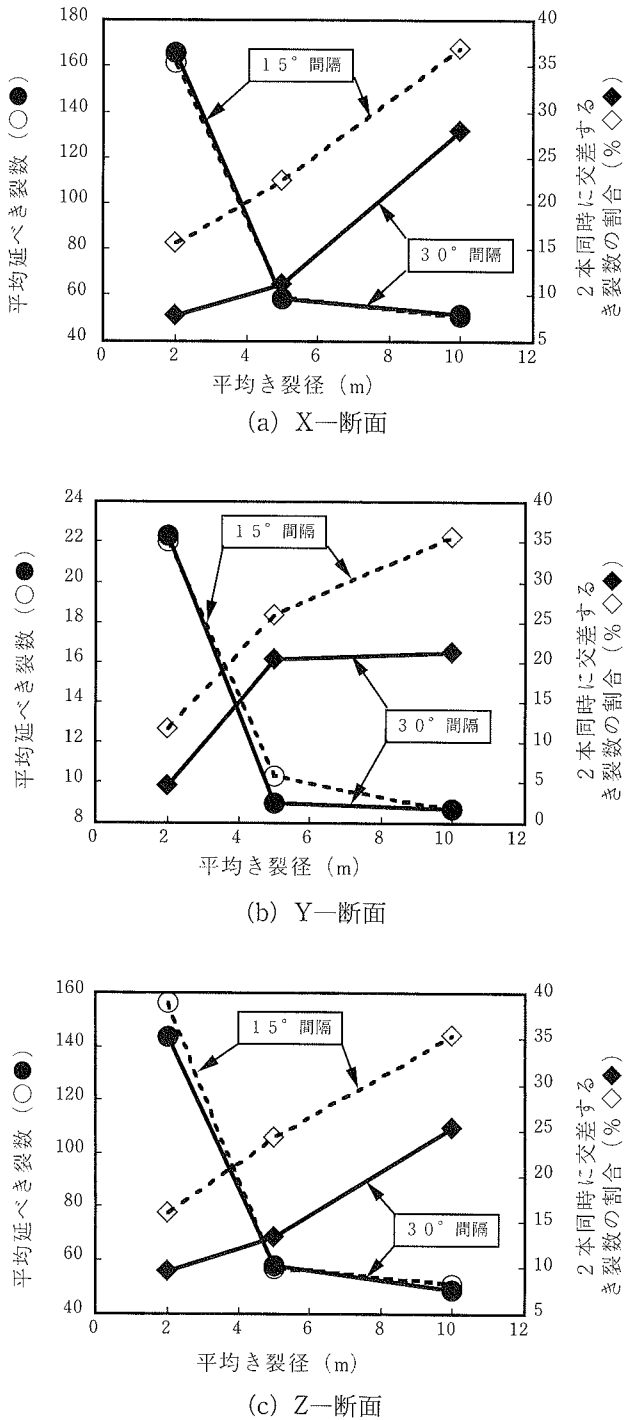


図-8 2本のボルトに交差するき裂数と平均き裂径の関係 ($F_0=45$)

重要な項目となる。従来のトンネル等に対する施工経験による支保設計も重要であることはいうまでもないが、今までにない大断面の掘削が行われることから不十分ではないかと考えられる。その意味からも各々の岩盤対

する最適な支保工の選定が求められ、合理的な設計方法の構築が早急に求められる。

今回の報告は、新設計法構築のための第一歩として、岩盤内に存在するき裂の方向性、密度に対するロックボルトの数量的評価を等方性岩盤モデルと異方性岩盤モデルにより検討したものであり、次の①～③の成果が得られた。

① 次の理由により、今回作成した岩盤モデルの妥当性が確認できた。

- き裂を等方的に分布させた場合、交差き裂数はロックボルトの設定方向には依存しなかった。
- き裂を異方的に分布させた場合、交差き裂数がロックボルトの設定方向によって変化した。

② ロックボルトは、き裂群の面に垂直に打設した時に最も多くのき裂と交差できることが確認できた。

③ 交差き裂数は、き裂の方向、密度などの幾何学的特性を評価するクラックテンソルにより予測できることがわかった。

以上の①～③より、き裂の幾何学的特性の評価によりロックボルトの最適打設方向が実際にも予測可能であることが示された。今後は、き裂を拘束しているロックボルトの本数を考慮しながら、その力学的拘束効果をき裂の幾何学的特性に変換する方法を確立し、ロックボルトによる補強効果を数値解析で検証していく予定である。

なお、この研究は土原氏（現島勝トンネル工事事務所勤務）に負うところが大きかった。また、神戸大桜井教授より助言頂いたことを申し添え、ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 永井, 桜井: 不連続性岩盤におけるロックボルトの評価に関する一考察, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, p. 560~561, (1990)
- 2) 土原, 鈴木, 丸山, 平間: ロックボルトを含む不連続性岩盤のモデル化, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p. 181~185, (1992)
- 3) 大西, 鍵本: 岩盤割れ目性状の評価方法に関する一考察, 土木学会論文集 No. 400III-10, p. 29~38, (1988)
- 4) 吉田, 堀井: 破壊するジョイントを含む岩盤の構成式のモデル化と FEM 解析, 第9回岩の力学シンポジウム講演論文集, p. 1~6, (1994)
- 5) 桜井: 不連続性岩盤における有限要素法の利用, 第8回岩盤システム工学セミナー, p. 153~169, (1991)
- 6) 三木: わかりやすい岩石と岩盤の知識, 鹿島出版社
- 7) M. Oda: Modern developments in Rock Structure Characterization, Comprehensive Rock Engineering, vol. 1, p. 185~200, (1978)