

数値モデルによる岩盤亀裂浸透流の研究

Study on the Seepage Flow in Fractured Rock by means of Numerical Model

神戸大学工学部 正員 川谷 健
神戸大学大学院 学生員 北村 明彦

1. はじめに

岩盤に発達した亀裂を主たる水径（みずみち）として流れる岩盤浸透流は、亀裂の長さ、大きさ、分布によって支配される。亀裂が十分に大きな密度でさまざまな方向に発達し、しかも亀裂の開口幅にばらつきが少ないとき、岩盤浸透流は多孔質媒体中の流れとして取扱える¹⁾。しかし、岩盤におけるトンネルあるいは大規模地下空洞の掘削、ダム基礎岩盤の処理などに関して浸透流を考えると、対象となる岩盤亀裂系を多孔質媒体とみなして解析をすすめることには限界がある。そのため、岩盤浸透流、およびそれに支配される容質や熱の移動を、亀裂系の特性、すなわち亀裂の長さ、方向、開口幅などの関連で捉えることが重要であり、亀裂系のモデル化が必要となる。

Long¹⁾は、岩盤浸透流を個々の亀裂における流れの集合体と捉え、亀裂の長さ、方向、開口幅が一定の確率分布をもつ不規則変数であるとする二次元の亀裂系モデルを提示している。本研究では、Long¹⁾が示したと同様の手法により岩盤亀裂系を二次元亀裂群としてモデル化し、このモデルを用いて、まず亀裂系の特性と岩盤の透水性との関係について調べる。つぎに、このモデルの応用例として、岩盤に掘削した空洞の大きさと空洞への浸出量の関係、およびダム基礎岩盤の遮水率と揚圧力の関係について検討する。

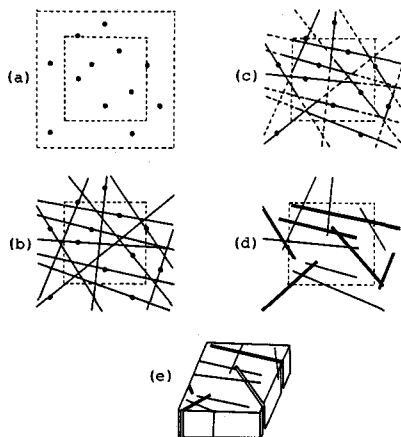


図-1 岩盤亀裂系のモデル化の過程

2. 岩盤亀裂系のモデル化

ここでは二次元亀裂を考え、Long¹⁾が示した方法に従い、つぎの手順で亀裂系モデルをつくり、そこから解析のための試験片を切り出す。

- (1) 亀裂の本数と同数の点を一定範囲内に均一に分布させる(図-1 a)。そのために一様乱数を使用する。
- (2) 亀裂の方向の分布は正規分布であるとし、上述の点を通る無限長の亀裂を発生させる(図-1 b)。
- (3) 亀裂の長さの分布は指数分布であるとし、上述の点を中点とする有限長の亀裂をつくる(図-1 c)。
- (4) 亀裂の開口幅の分布は指数分布であるとし、個々の亀裂の幅を決定する(図-1 d)。
- (5) 亀裂系モデルから試験片を切り出す(図-1 e)。

本研究の試験片について以下に述べる。まず、亀裂の中点を図-2 に示す矩形 EFGH 内に分布させる。ここで、矩形の各辺は適当な代表長を用いて無次元化されているものとし、 $EF = GH = 25$ ， $EG = FH = 40$ とする。つぎに、亀裂と X 軸(図-2 参照)のなす角 θ の平均値

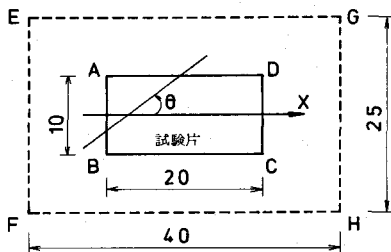


図-2 試験片

(θ_a) および標準偏差 (σ_θ) を規定し、 θ の分布が正規分布であるとして、乱数を発生させて個々の亀裂の方向を決める。以後、 θ を方位角と呼び、その分布を $N(\theta_a, \sigma_\theta)$ と表示する。亀裂長

(1) は、その分布が指数分布であるとし、平均値 (l_a) と標準偏差 (σ_l) を規定して、決定する。このとき、亀裂長は矩形域の無次元化に用いたと同じ代表長で無次元化されているものとする。亀裂長の分布は、以後、 $E_l(l_a, \sigma_l)$ と表示する。なお、亀裂長の分布が指数分布に従うとき、亀裂長の下限值 (l_m) は $l_a - \sigma_l$ である。また、開口幅 (b) も、指数分布をするものとし、平均値

(b_a) と標準偏差 (σ_b) を与えて決定する。開口幅は、上述の代表長とは別個の代表長を単位として無次元化されているものとする。この下限値 (b_m) は $b_a - \sigma_b$ である。幅の分布形は、以後、 $E_b(b_a, \sigma_b)$ と表示する。最後に、試験片 ABCD を矩形 EFGH の中央から切り出す。AB = CD = 10, AD = BC = 20 とし、試験片の厚さは 1 とする。図-3 に、岩盤亀裂系モデルの一例を示す。

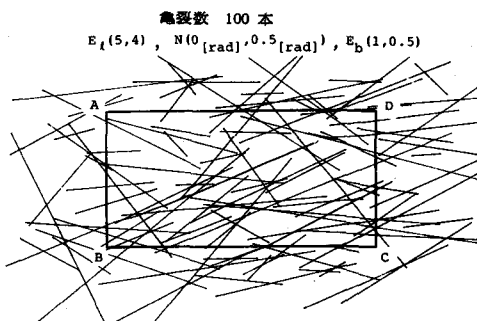


図-3 岩盤亀裂モデル

3. 亀裂系の流れの解析

亀裂内の流れを平滑な平行板間の層流と考えると、平均流速 (v) は

$$v = \frac{\rho g}{12\mu} b^2 \frac{\partial h}{\partial s} \quad - (1)$$

で与えられる²⁾。ここに、 $h = p/\rho g + z$ であり、 $p/\rho g$ は圧力水頭、 z は位置水頭である。また、 b は亀裂の開口幅、 μ と ρ はそれぞれ水の粘性係数と密度、 s は亀裂に沿って測った距離である。

いま、図-4 に示す亀裂の交点 i において、連続の式を適用すると

$$\sum_{j=1}^N v_{ij} b_{ij} = \sum_{j=1}^N \alpha b_{ij}^3 \frac{(h_i - h_j)}{s_{ij}} = 0 \quad - (2)$$

が得られる。ここに、 j は亀裂交点 i に隣接する交点を表わし、 N は隣接する交点の数である。また、 v_{ij} , b_{ij} および s_{ij} は、それぞれ交点 i と j の間の浸透流速、開口幅および距離であり、 h_i と h_j は交点 i と j での水頭である。さらに、 $\alpha = \rho g / 12\mu$ である。式(2)を試験片のすべての亀裂交点 (試験片の境界と亀裂との交点も含む) に適用し、境界条件として水頭が既知である場合はそれらを式に導入する。そして、得られた方程式を連立して解くことで、亀裂交点での水頭値が求まり、亀裂系の浸透流量が算定される。

境界条件は次のように設定する。試験片の境界 AB と BC から水の流入・流出はないものとする。一方、境界 AB と CD では水頭がそれぞれ一定で、その水頭差は 1 であるとする。なお、水頭も、試験片の無次元化に用いたと同じ代表長で無次元化されているものとする。以下では、図-2 に示す X 軸の方向を、浸透流の主流方向と呼ぶ。

4. 亀裂系の特性と岩盤の透水性

4-1 亀裂数と岩盤の透水性

亀裂数の増加に伴う浸透流量 (岩盤の透水性) の変化を調べる。亀裂の長さ、方向および開口幅の分布をそれぞれ一定にし、亀裂の本数を変化させ、亀裂数、亀裂交点数および流量の関係を調べる。亀裂の本数を 10 本ずつ増やしたときの流量を、10 組の乱数を発生させて、平均値と標準偏差、および平均値

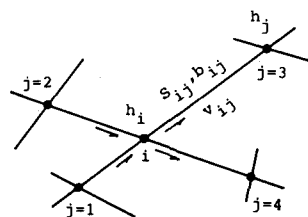


図-4 亀裂と亀裂交点

の回帰直線によって図-5 に示す。長さの分布は $E_L(7, 6)$ 、方位角の分布は $N(0[\text{rad}], 0.8[\text{rad}])$ 、開口幅の分布は $E_b(1, 0.5)$ である。また、回帰直線の相関係数は 0.85 である。流量は亀裂数とともに増加し、また、標準偏差内にとどまる流量の最大値は、ほとんどの場合、平均値の 1.5 倍以下である。

岩盤の透水性は亀裂の連続性によって左右される。他の亀裂と交わらず、孤立している亀裂が水径となることは少ないであろう。この意味で、試験片内の亀裂交点数は亀裂の連続性を表わす 1 つの指標と考えられる。図-6 に示すように、亀裂交点数と流量の相関関係はかなり高いことがわかる。

4-2 亀裂の長さや岩盤の透水性

まず、亀裂の平均長さや流量および亀裂交点数との関係を調べる。亀裂数は 100 本として、亀裂の方向と開口幅の分布は、それぞれ、 $N(0[\text{rad}], 0.5[\text{rad}])$ および $E_b(1, 0.5)$ とする。図-7 に、平均長さの増加に伴う流量と交点数の変化を示す。流量と交点数は平均長さにはほぼ比例して増加しており、平均長さとともに流れの径路が増すことが判る。

つぎに、亀裂の長さの平均値が同じとき、標準偏差の違いによって生ずる流量の違いについて調べる。亀裂長の平均値が 8 であり、標準偏差がそれぞれ 1 と 4 である場合の、流量と亀裂数の関係を、図-8 に示す。亀裂長の標準偏差の違いは、流量あるいは流量と亀裂数との関係にはほとんど違いを生じないといえる。他の結果からも、これと同じことがいえる。

図-9 に、流量と亀裂交点数との関係を示す。両者の関係に、長さの標準偏差による違いはほとんどみとめられない。ここでも流量と交点数は高い相関関係にあることが示されており、亀裂の連続性が岩盤の透水性に深くかかわっていることが判る。

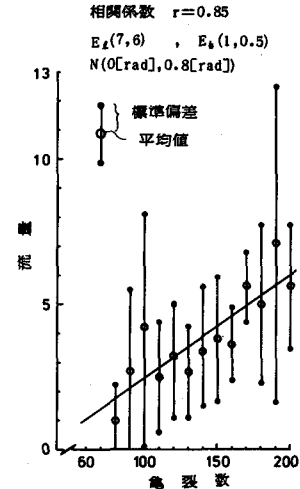


図-5 亀裂数の増加に伴う流量の変化

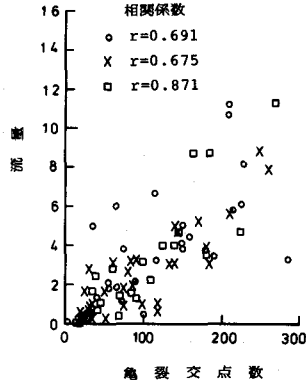


図-6 流量と亀裂交点数の相関

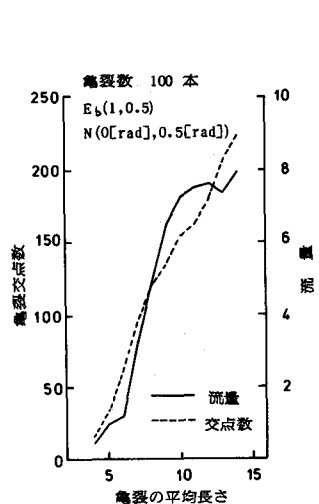


図-7 亀裂の平均長さや流量および亀裂交点数との関係

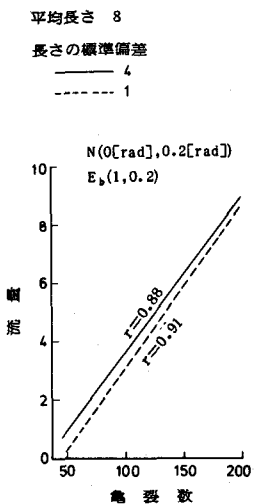


図-8 亀裂長の標準偏差が異なる場合の流量と亀裂数の関係

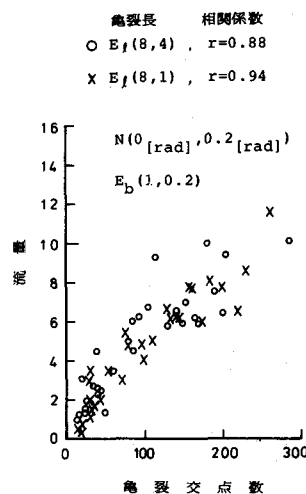


図-9 流量と亀裂交点数の関係

4-3 亀裂の方向と岩盤の透水性

試験片の境界 AB から浸入して境界 CD から流出する流量は、亀裂の方向と方向のばらつきによって大きく変わると考えられる。以下では、亀裂の方向と流量の関係について調べる。先に述べたように、図-2 に示す X 軸の方向を主流方向と呼び、主流方向と亀裂のなす角を方位角 (θ) と呼ぶ。

亀裂数と流量の関係は、平均方位角が $+\theta_a$ である場合と $-\theta_a$ である場合とでは、統計的に等しいと考えられる。したがって、方位角の平均値が $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ および 90° である場合のそれぞれについて、方位角の標準偏差を $0.2[\text{rad}](11.5^\circ)$ 、 $0.5[\text{rad}](28.6^\circ)$ および $0.8[\text{rad}](45.8^\circ)$ として、流量と亀裂数の相関々係を調べた。結果を、図-10 に示す。亀裂の長さおよび開口幅は図に示すとおりである。

方位角の平均値が 0° から 90° へと変わり、亀裂の方向と主流方向のずれが大きくなるほど、亀裂数の増加に伴う流量増加の割合は小さくなる。図-11 に、平均方位角と流量の関係を示す。ここで、流量は平均方位角が 0° であるときの流量で正規化した値である。また、亀裂数は 200 本であり、方位角の標準偏差は 0.8 $[\text{rad}]$ である。亀裂の方向が主流方向からずれるほど流量も小さくなること判る。

平均方位角が 0° の場合、方位角の標準偏差の違いによる流量および亀裂数増加に伴う流量増加の割合に大きな違いはみとめられない。しかし、平均方位角が大きくなるにつれて、標準偏差が 0.2 $[\text{rad}]$ の場合には、流量が著しく減少し、流れが生じない場合もある。一般に、方位角の標準偏差が大きいほど、亀裂の連続性が増すと考えられ、したがって、流量および亀裂数増加に伴う流量増加の割合も大きくなると考えられる。ただ、平均方位角が 30° 以上のとき、亀裂交点数は方位角の標準偏差が大きいほど多くなるが、流量はそれほど増えない。これは、方位角のばらつきが大きいと亀裂の交わりは増えるが、亀裂の方向が主流方向とずれるために、上・下流の境界を結ぶ水径の数はあまり増えないからであると考えられる。

4-4 亀裂の開口幅と岩盤の透水性

亀裂の分布や長さを変えずに、すべての亀裂の開口幅だけを一律に a 倍すると、浸透流量は、式(2)によって、 a^3 倍になることが判る。

つぎに、開口幅の平均値を一定に保ち、その標準偏差を変えた場合の、流量と亀裂数の相関々係を調べる。開口幅の平均値が 1 で、標準偏差が $0.2, 0.5$ および 0.8 である場合の亀裂数と流量の関係を、図-12 に示す。長さの分布が $E_L(5, 4)$ で、方位角の分布が $N(0[\text{rad}], 0.2[\text{rad}])$ である場合と、方位角の分布はそのまま、長さの分布が $E_L(8, 1)$ の場合である。

開口幅の標準偏差が大きいほど、流量は大きく、亀裂数の増加に伴う流量増加の割合も大きい。これは以下の理由によると考えられる。前述のように、各々の亀裂内の流量は開口幅の 3 乗に比例する。したがって、亀裂系の全流量のうち多くの部分は、上・下流境界をつなぐいくつかの水径のなかで相対的

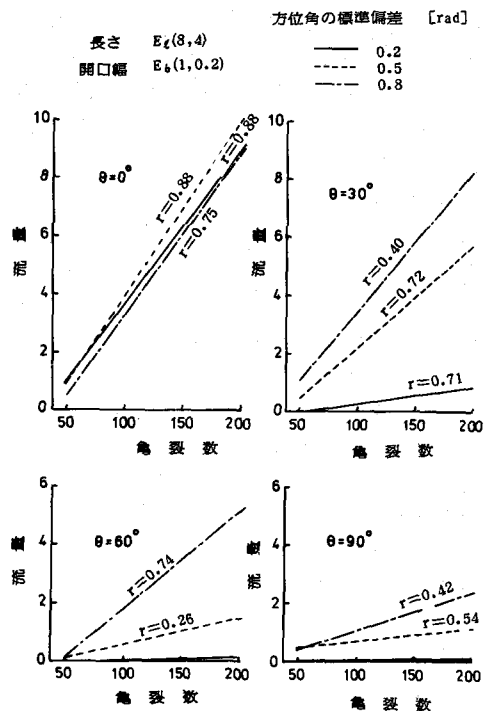


図-10 方位角の平均値と標準偏差が異なる場合の流量と亀裂数の関係

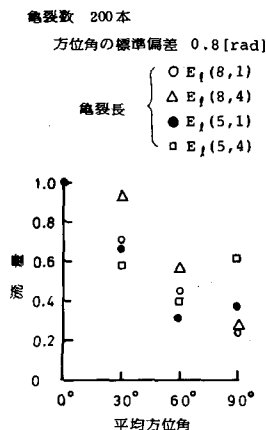


図-11 平均方位角と流量の関係

に亀裂の幅の大きい水径を流れる流量によって占められているであろう。したがって、亀裂系が同じであれば、開口幅の標準偏差が大きいほど、上・下流境界をつなぐ「より太い水径」の存在する確率が高くなり、流量も増えることになる。

4-5 まとめ

岩盤の透水性は、(1)亀裂数が多いほど、すなわち、亀裂の密度が高いほど、(2)亀裂が長いほど、(3)亀裂の方位角が小さく、また、その標準偏差が大きいほど、そして、(4)亀裂の開口幅の平均値も標準偏差も大きいほど、高くなる。

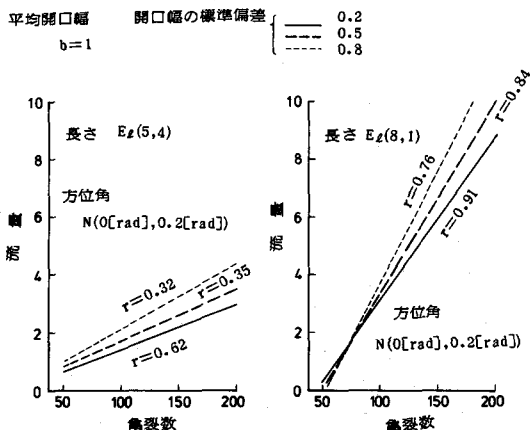


図-12 開口幅の標準偏差が異なる場合の流量と亀裂数の関係

5. 岩盤亀裂系モデルの応用

5-1 地下空洞への地下水浸出量

亀裂の発達した岩盤に空洞を掘削する場合をとりあげ、空洞の大きさと空洞内への地下水浸出量との関係について調べる。

解析領域は、前述の試験片と同じである。空洞は領域の中央に中心をもつ円形とする。境界 AB および CD の水頭をそれぞれ 2 と 1 とし、空洞内壁の水頭を 0 とする(図-13参照)。また、境界 AD と BC は不透水性境界とする。図-14に、空洞の半径と空洞への浸出量および空洞内壁に現われる亀裂数との関係を示す。ここで、亀裂長の分布は $E_L(6, 5)$ 、開口幅の分布は $E(1, 0.5)$ 、方位角の分布は $N(0[\text{rad}], 0.8[\text{rad}])$ であり、亀裂数が 100 本の場合と 70

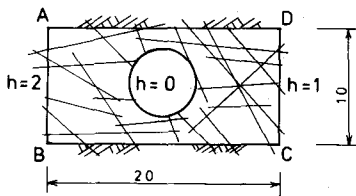


図-13 空洞のある岩盤内の浸透流の解析領域

本の場合である。

空洞の半径にはほぼ比例して、空洞壁に現われる亀裂の数が増え、空洞への浸出量も増加する。また、亀裂総数(亀裂の密度)が大きいほど、空洞半径の増加に伴う浸出量の増加割合は大きい。以上の結果から、例えば、異なる 2 つの半径の空洞掘削での地下水浸出量を知れば、より大きな空洞掘削での浸出量を推定すること

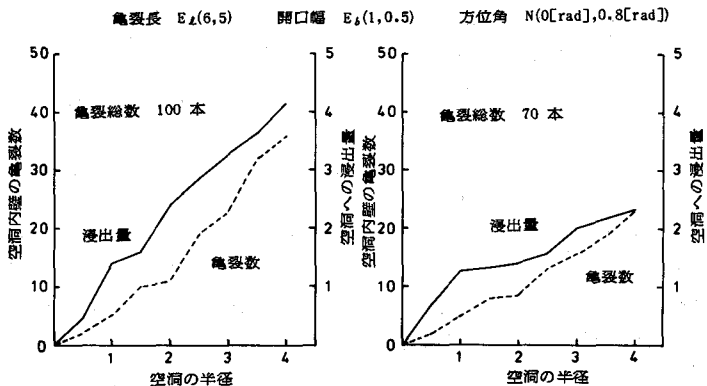


図-14 空洞の半径と空洞内への浸出量および内壁の亀裂数

とも可能と思われる。なお、この解析条件のもとでは、空洞半径が 0.5 であるとき、境界 AB からの流入量の一部は空洞に浸出し、他は境界 CD から流出する。半径が 1 以上になると、境界 AB と CD の両方から空洞へ向う流れとなる。

5-2 カーテングラウト工の揚圧力軽減効果

ダムなどに作用する揚圧力を軽減するための一手段として、カーテングラウト工により基礎岩盤の止水が行われる。グラウト液はボーリング孔から岩盤亀裂内に圧入されるが、亀裂のつながり方や注入孔の位置によっては未止水の亀裂が残ることも考えられる。ここでは、グラウト柱列による亀裂の止水率と揚圧力減少の関係について、亀裂系モデルを用いて調べる。

解析モデルを図-15に示す。グラウト柱は堤体の上流端に、中心間隔を1として、不透水層に達するように施行する。亀裂系モデルは幅10、奥行20とし、亀裂数は100本、亀裂長の分布は $E_L(7, 7)$ 、方位角の分布は $N(0[\text{rad}], 0.5[\text{rad}])$ 、開口幅の分布は $E_b(1, 0.5)$ であるとする。また、上流端水位は1、下流端水位は0とする。グラウト柱による上流端の締切り率と揚圧力の関係を、図-16に示す。ここで、揚圧力は亀裂交点における水圧の平均値として評価し、締切りの無い場合の揚圧力との百分率で示してある。

締切り率が90%に達しても、揚圧力の低下は13%ほどである。岩盤の亀裂が不規則に分布している場合、一定間隔で配置した注入孔からのグラウト注入で、すべての亀裂を止水できる確率は低いと考えられる。そして、グラウト柱の間に未止水の亀裂があれば、止水壁の下流では亀裂が互いにつながっているため、揚圧力の低下はほとんど生じないと思われる。これと同様の結果が、岩盤を多孔質媒体として解析した場合にも得られている³⁾。したがって、ダム基礎岩盤の止水は完全止水を目標に慎重に行なわなければならない。

6. おわりに

本研究では、二次元の岩盤亀裂系モデルを用いて、岩盤の透水性と亀裂系の特性との関係を明らかにした。ここで用いた亀裂系モデルは、亀裂特性を不規則変数として取扱える利点があり、実際の岩盤亀裂系の特性が既知であれば、そこでの浸透流を解析するのに有効なモデルである。しかし、反面、このモデルは二次元モデルであり、実際には三次元的つながりをもつ亀裂群を表現するのに不十分であることは否めない。今後、この点についての研究が重要であると考えられる。また、ここでは被圧浸透流についての解析を行ったが、自由水面をもつ岩盤浸透流の解析も興味ある課題である。

参考文献

- 1) Long, J.C.S., J.S. Remer, C.R. Wilson, and P.A. Whitherspoon : Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resources Research, 18(3), 645-658, 1982
- 2) 佐藤邦明, 佐々木康夫 : きれつ系岩盤の浸透流による伝熱・溶質分散に関する実験的研究, 第28回水理学講演会論文集, 573-578, 1984
- 3) 川谷健, 松井繁憲, 飯田武 : カーテングラウト工のダム揚圧力軽減効果について, 建設工学研究所報告, 25, 243-253, 1983

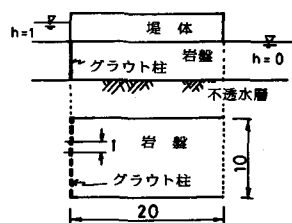


図-15 グラウト柱による止水効果についての解析領域

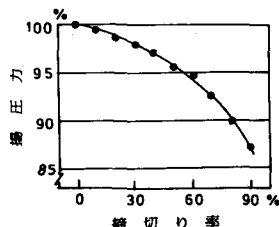


図-16 グラウト柱による締切り率と揚圧力の関係