The Japanese Geotechnical Society

報文—2388

掘削工事に関する解析手法

Analysis Methods for Excavation and Tunneling

小林　晃（こばやし　あきら）
岩手大学助教授　農学部農業生産環境工学科

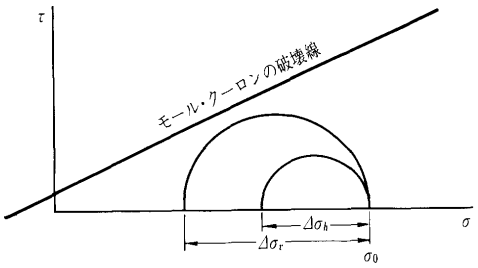
1. はじめに

掘削工事は地盤の地下水から見れば，自由面の創造であり，掘削により地下水は新たな自由面に向かって流れが生じることになる。地下水の流れが変化すれば間隙水圧分布が変化し，それによって有効応力が変化するため地盤が変形する。また，掘削による除荷によって地盤は破壊線に接近するが，その有効応力の変化の仕方に地下水の流れが影響を及ぼす。さらに根切り工事の山留め壁にかかる土圧の変化などにも間隙水圧分布の変化は大きな影響を持っている。このように，掘削工事における地下水が及ぼす影響は掘削工事の成否にかかわる問題であるといえる。したがって，事前に掘削による地下水の挙動を的確に把握できれば，湧水対策，変形対策，安定性対策など効率的に行えるものと期待される。しかし，残念ながら現状ではそこまで精度の高い予測は難しい。それには様々な要因が挙げられるが，最大の原因は地盤の透水性の不均一性の把握が容易でないことであろう。掘削工事にまつわる事故の多くは，偏った地下水の流れが引き起こすことが多い。現状の知識と調査技術をもってしても，地盤中の詳細な水みちとその中の間隙水圧が地盤の挙動にどのように影響を及ぼすかを知ることはかなり難しい。しかし，比較的均一な地盤に対しては，数値解析による予測も可能である。ここでは，まず掘削工事の解析に関する地下水挙動予測の影響を述べ，そして，その評価手法について述べる。

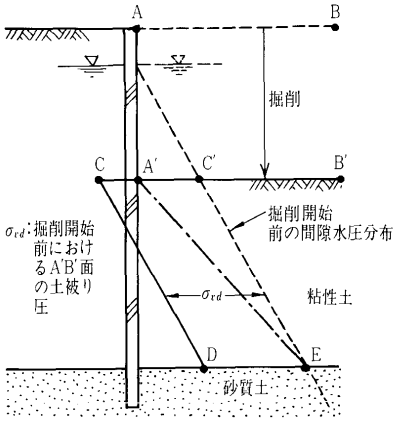
2. 掘削工事における地下水の及ぼす影響

2.1 根切り工事

根切り工事のような掘削では，掘削背面では鉛直有効応力が一定あるいは圧密によって増加し，水平有効応力が $\Delta\sigma_h'$ 減少するので，三軸圧縮状態に近い状態である。一方，掘削底面では反対に鉛直有効応力が $\Delta\sigma_v'$ 減少するので三軸伸張状態に近い状態となる。今，初期に等方的な応力 σ_0' が作用していたとすると，いずれの場合も**図—1**に示すようにモールの応力円は左側に大きくなり，モール・クーロンの破壊線に接近することになる。このように掘削工事は除荷によって地盤を塑性変形する方向へと導き，この点が盛土工事と大きく異なる点であることは指摘されている[1]とおりである。また，$\Delta\sigma_v'$ は掘削除荷による掘削底面の応力減少量であるが，この応力変化は地盤の透水性分布と掘削速度などにより，実際は単純ではないことも指摘されている[2]。例えば，**図—2**に示すように，上部が粘土層，下部が透水性の良い砂層の地盤に山留め壁が砂層まで貫入されている場合を想定すると，粘土層の透水係数が掘削速度に比べて著しく高い場合には，掘削底以深の間隙水圧分布は図のA′Eになる。一方，粘土層の透水係数が極めて低いか，掘削速度が著しく早い場合には，粘土層は非排水条件下の挙動を示し，掘削底以深の間隙水圧は鉛直荷重と等しいだけ減少する（**図—2**のCD）。その後，吸水膨張によってA′Eへと近づく。この場合の応力径路は**図—3**のようになる。図中OA′は K_0 状態を示している。今，掘削開始前における粘土内の応力が K_0 状態にあるとし，その時の全応力，有効応力状態をそれぞれA，A′で表す。掘削直後の非排水条件下では，鉛直，水平方向の全応力は掘削に伴う土被り圧の減少量 σ_{vd} だけ減少し，図のB点に移動する。その際，有効応力は変化しない。その後の吸水膨張によって間隙水圧が徐々に増大し，有効応力はA′（B′）→C′→Dへと移動する。この吸水膨張過程では鉛直方向の全応力は一定であり，全応力と有効応力を表す点は傾き1の直線上にあるので，A′→C′とい



図—1　モールの応力円から見た除荷過程

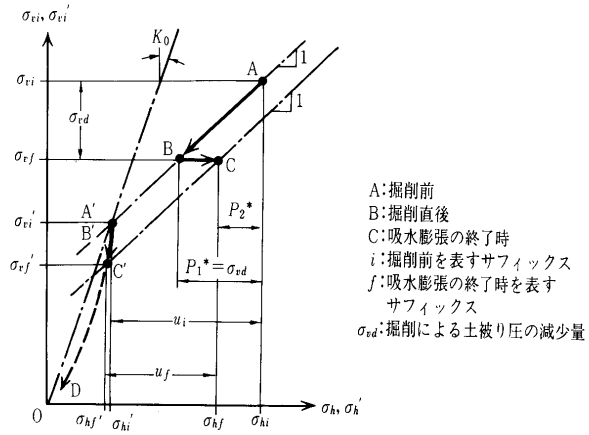


図—2　掘削に伴う間隙水圧の変化の例[2]

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

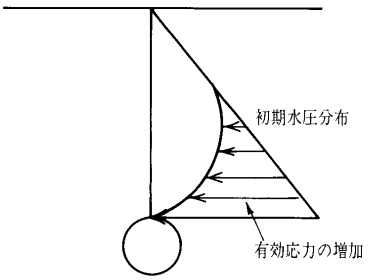
う有効応力の変化によって，水平方向の全応力，すなわち山留め壁にかかる土圧はBからCへと増加することになる。このように，有効応力の変化の仕方や土圧の変化の仕方は地下水の流れ方に強く影響を受け，圧密や吸水膨張にかかる時間と比較して同等あるいはそれより短い掘削期間の挙動を検討する際には，地盤の透水性分布や水理境界条件の評価が非常に重要となることが分かる。



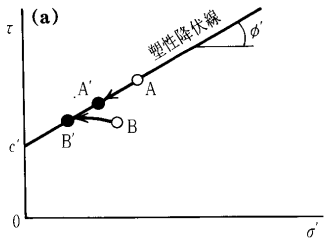
図—3　掘削に伴う掘削底下部地盤の応力径路[2]
（山留め壁の変位，山留め壁と地盤との摩擦を無視した場合の，正規圧密地盤の掘削）

2.2　トンネル掘削

今，等方圧状態で円形の掘削を行う場合を想定すると，弾性を仮定した理論解ではトンネル壁面で接線方向応力は初期等方圧の2倍になり，放射方向応力はゼロとなる。このように壁面周辺の地盤は伸張状態であり，トンネル周辺には塑性領域が発生しやすい状態にある[3]。そして，このような塑性領域の発生にも地下水の流れが影響を及ぼす。例えば**図—4**に示すように，トンネル掘削面が支保されず自由面のままであると，トンネル壁面での水圧はゼロとなり，周辺の地下水はトンネル内へと流入する。そして，その非定常過程では図の様な水圧分布が地盤内に形成され，トンネル周辺の地盤の有効応力が増大し，トンネル周辺の地盤が圧密し，強度の増大が期待される。このように水抜きしながら施工した場合，**図—5**の降伏条件を考えると，図中のA，B点で表される異なる地山内の応力状態が水抜きを中止することにより周辺地山の間隙水圧が回復し，図中のA′，B′点に移行する。すなわち，有効応力の減少により岩盤のせん断抵抗が低下するため塑性域の拡大と変形の増大が生じる[4]。また，このように，水を抜けばトンネル周辺地山の安定性は高まるが，圧密による地盤の変形が問題となる。トンネル工事はこのような地盤の状態を考慮しながら工法を選択することが要点であろう。そして，変形に関する問題では，どのような地盤の応力～ひずみ関係の構成則を用いるかが非常に重要である。さらに，有効応力の変化の仕方は，地下水の流れ方に大きく依存しているために，ここでも地盤中の透水性の分布と水理境界条件が，その予測精度に大きく影響を及ぼすのである。



図—4　水抜き工による周辺地盤の水圧変化



図—5　水抜き工の中止による有効応力変化[4]

3．掘削工事に関する解析手法

3.1　解析手法の概略

地下水の移動のみを予測するのであれば，浸透流解析手法[5]を用いることができる。しかし，その場合にも事前に地盤中の卓越した水みち径路を同定することは容易ではない。現状の解析では掘削面からの全流出量の予測精度を論議できる程度である。したがって，突発湧水や逸水問題などを事前に把握することは非常に困難である。突発湧水や逸水は，地盤の局所的な破壊とも関連しているため，換言すれば，これらの問題は地盤の局所的な弱部の推定精度の問題とも言える。また，掘削問題は上述のように破壊の危険性が大きく関係していることを考えると，地盤変形と地下水挙動の連成した解析手法が望まれるところであろう。しかし，現状で変形から破壊までを一連の解析で評価した例は研究レベル[6]にとどまっており，通常は弾塑性圧密解析手法が適用される。弾塑性圧密解析は有効応力を考慮した釣合い式と貯留項に変形による間隙率変化を考慮した浸透流解析を連成させて行うものであり，一般に次式の支配方程式で表される。

$$\left(C_{ijkl}\varepsilon_{kl}-\rho_f p\delta_{ij}\right)_{,j}=0 \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\frac{\partial\varepsilon_{nn}}{\partial t}=-\left\{k_{ij}\left(p+z\right)_{,j}\right\}_{,j} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで，ε_{ij}はひずみテンソル，pは圧力水頭，ρ_fは水の単位体積重量，そしてC_{ijkl}は応力～ひずみ関係を定義するマトリックスで，ここに当該地盤に適切な構成則を適用する。また，(2)式の地下水の連続式で，k_{ij}は透水係数テンソル，zは位置水頭である。根切り掘削問題で地下水の低下による不飽和部の発生も解析に反映させるときには，(2)式左辺の時間微分項に飽和度の時間変化を考慮して次式のような時間微分項を用いる。

$$S_r\frac{\partial\varepsilon_{nn}}{\partial t}+\frac{\partial\theta\partial\varphi}{\partial\varphi\partial t} \quad \cdots\cdots(3)$$

ここでS_rは飽和度，φはサクション（負の圧力水

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

頭）である。また $\partial\theta/\partial\varphi$ は不飽和水分特性曲線から求められる比水分容量である。また，透水係数に不飽和部での飽和部に対する相対透水係数（通常，体積含水率の関数になる）を乗じて飽和時の透水係数よりも小さく見積る。有効応力原理に関しては Bishop（ビショップ）の有効応力パラメーター[7]を用いる場合が多いが，これはサクションがほかの作用応力よりも小さい状態，すなわち破壊応力に近いところでは成り立つことが知られている[8]。

また，適用に際しては，パラメーターや初期・境界条件をどのように設定するかが問題となる。

3.2 弾塑性モデルのパラメーター同定法

粘性土の弾粘塑性モデルである関口・太田モデル[9]は，軟弱地盤の掘削や盛土の解析で成功したモデルの一つである。このモデルの特徴はそのダイレイタンシー挙動の再現性にあり，初期異方応力状態（K_0 状態）にある土の挙動の予測精度が高いことである。そして，このモデルが現象の予測で多くの成功を収めている一つの大きな理由は，簡易かつ実用的なパラメーター同定手順が検討されており[10]，それが有効に働いたからであると思われる。関口・太田モデルには，圧密試験，透水試験，数種の三軸試験が必要であるが，一般の工事で行われる土質調査では，このすべての試験が行われることはほとんどない。そこで，パラメーターの決定を比較的容易に得られる塑性指数 PI を主に用いて推定する方法が提案されたのである。それによると，各パラメーターは，物理試験，一軸圧縮試験，圧密試験および初期間隙水圧調査結果により決定できる。その詳細に関してはほかの文献[11]に譲るが，ここでは地下水の挙動評価がそのようなパラメーターに与える影響について述べる。

a）有効土被り圧

これは，掘削前の初期状態を知る上で必要な情報である。有効土被り圧は全応力 $\rho_t Z$（ρ_t：湿潤密度，Z：地表面からの深さ）から地盤内の間隙水圧を差し引いて求められる。しかし，この深度方向の間隙水圧分布の測定が通常の土質調査ではあまり行われないのである。また，難透水性部分の水圧測定は多くの時間を有し，実際には困難である。大都市の地盤では70年代途中まで続いた高度成長期の地下水汲上げの影響を受けて，現在でも水圧分布が静水圧分布よりも小さいところが多く，そのような地域ではいまだ地下水は回復過程にあるといえる。そのような状況を再現するために100年間の一次元圧密解析を行い，現時点の間隙水圧分布を推定した例もある[12]。また，建築物基礎の根切り工事や地下鉄，下水道などの坑道工事も頻繁に行われており，都市部の地下水の状態は常時変化している。そのような状況では，広域の三次元あるいは準三次元の浸透流解析や沈下解析を行い，施工地点での現状の水圧分布を推定することも有効と思われる。その際には，何らかの実測値との比較によってキャリブレーションや解析結果を検証する必要がある。ちなみに前述の100年間の一次元圧密解析では，実測された地盤の圧縮量とほかの工事現場で計測された水圧分布との比較により解析手法を検証している。

b）原位置静止土圧係数 K_i と限界状態パラメーター M

K_i は次式により推定することができる[10]。

$$K_i = K_0(\mathrm{OCR})^{0.54\exp(-PI/122)} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここで，K_0 は先行圧密時の静止土圧係数であり，PI により推定することができる[10]。過圧密比 OCR は先行圧密降伏応力と先述の有効土被り圧から求められる。したがって，ここでも有効土被り圧の推測精度が影響を持つ。また，M は有効内部摩擦角や非可逆比 Λ（$=1-C_s/C_c$）から求める手法があるが，一軸圧縮強度 q_u，PI，先行圧密荷重 σ_{vo}'，有効土被り圧 σ_{vi}'，OCR そして Λ から求める手法もある[10]。この場合には K_i と同様に有効土被り圧の推定精度が重要となる。K_i は根切り掘削の場合には山留め壁にかかる土圧の算出に大きく影響を与え，M は critical state を規定するパラメーターであり，安全性を論議する上で非常に重要な定数である。このように，施工前の初期水圧分布が掘削問題に与える影響は非常に大きいと言え，慎重な検討が必要である。

c）透水係数の間隙比依存性

ダルシー則の透水係数は運動量保存則から導かれるが，その結果は以下のように表される[13]。

$$k_{ij} = n\overline{BT_{ij}} \quad \cdots\cdots(5)$$

n は間隙率，B は長さの2乗の単位をもつ係数で，流路形状に依存している。$\bar{}$ は積分された値であることを示している。$\bar{T}$ は無次元の2階のテンソルであるが，ミクロな間隙中における局所座標とマクロな地盤の全体座標径の変換マトリックスであり，物理的には地盤の屈曲度に等しい。すなわち，$\bar{B}$ は個々の間隙が持つ水みちとしての流路の形状を表すものであり，$\bar{T}$ はその方向を表すものである。したがって，本来なら変形による間隙形状の変化とそのつながり具合の変化を解析に反映させるべきであろうが，現状の土質地盤に関する解析技術や計測技術では間隙の形状変化まで評価することは難しい。そこで，通常用いられるのが間隙比 e と透水係数 k の対数値との関係である。これは，圧密試験結果を整理することにより求めることができ，$e\sim\log k$ の傾き C_k は一定値になる。そして，この C_k の値はおおよそ圧縮指数 C_c と同じ大きさになることも知られている[14]。

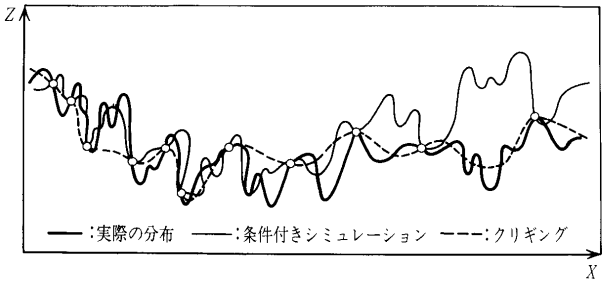
3.3 透水係数の不均一性の評価法

以上のように，掘削問題にかかわる地下水解析は，単に掘削による水理境界の変化による流れの変化の解析ばかりでなく，地盤の初期状態の評価でも重要な役割を持っており，また変形問題のパラメーター決定にも影響を及ぼす。そして，有効応力分布が間隙水圧分布すなわち透水係数分布に依存しているために，地盤の変形も透水係数分布に依存することになる。さらに透水係数は上述のように変形過程で変化するので，問題は極めて複雑である。

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

一般に地盤水理の解析に必要な透水係数や透水量係数，層の厚さ，貯留係数などは位置の関数であり，非常に強い不均一性を持っている。それらは構成地質によって明確に区別できることもあれば，そうでない場合もある。多くの場合には，これらの特性は全くランダムに分布しているというわけではなく，空間的に相関がある。すなわち，近い所の値は同じような大きさを持ち，離れると異なる値を持つようになる。このような分布に相関があるという特性を用いると，実測値から実測されていない地点の値を合理的に推定することができる。このような地盤統計学における不均一性の推定法には大別するとKriging（クリギング）とSimulation（シミュレーション）という二つの方法がある[15]。クリギングは実測値間の値を滑らかに補間するものであり，一般にestimationと呼ばれる。シミュレーションは一次と二次の統計量，すなわち平均，分散，共分散特性を維持して再現するものであり，乱数の取り方によって様々なパターンの不均一性を再現する。**図—6**はクリギングとシミュレーションの差の概念図を示したものである。同図よりクリギングは測定値間の値を滑らかに補間しているが，そのばらつきは実際とは異なる。一方，シミュレーションではそのばらつき具合は良く再現しているが，必ずしも値そのものは実際とは一致しないことがわかる。一般にシミュレーション法を用いる場合には，モンテカルロ法的に多くの不均一パターンを再現して，解析結果を統計的に整理する。シミュレーションではその平均は実測のそれと同じであるので，再現の回数を多くすると，その平均値は実際のものに近づく。また，シミュレーション法の内，実測された位置と値を維持して再現する方法をConditional simulation（条件付きシミュレーション）と呼び，クリギングと通常のシミュレーション法の両方を用いる。条件付きシミュレーションに地質構造の推定結果や物理探査などの情報を補助データとして精度の高いモデルを作成することができ，この手法をノンパラメトリック（non-parametric）手法[16]と呼び，地盤の透水性の評価でも種々の試みがなされている[17]。掘削問題の突発湧水や逸水問題の原因となる偏った地下水の流れの評価としてはこの様な手法の適用が考えられる。



図—6 クリギングと条件付きシミュレーションの例[15]

3.4 岩盤掘削に関する解析

岩盤中の亀裂密度が高い場合や構造物の規模が亀裂間隔よりも十分に大きい場合には岩盤を連続体と見なして評価することができるが，個々の亀裂の存在を無視できないような場合には，ジョイント要素を用いた解析や個別要素法を用いた解析が必要となる。岩盤の場合には変形，地下水の流れとも亀裂内で起こる現象の影響が大きいので亀裂の力学的，水理学的特性のモデル化が連続および不連続体のいずれの場合にも必要となる。単一亀裂の連成モデルとして，欧米で良く用いられるのがBarton-Bandis（バートン・バンデス）モデル[18]と呼ばれるものである。これはJRCおよびJCSという亀裂の形状に関する係数と亀裂壁面の圧縮強度を基に，既往の実験結果を整理することにより得られたモデルで，ジョイント要素にも個別要素法にも取り入れられている。このような単一亀裂モデルをジョイント要素網の解析に取り組むことにより，(5)式で表せるような間隙構造の形状変化を再現することも可能である。

また，近年，難透水性岩盤の掘削で問題となっているのは，掘削による水圧低下によって，地下水中の溶存酸素が気体となり，岩盤中に不飽和領域が形成される問題である。しかし，このような現象が実際に起こるかどうかは，境界条件，透水性，掘削による透水性変化の影響などに依存しており，メカニズムに不明な点が多い[19]。

4. おわりに

掘削にかかわる解析は，目的や地盤の状態によりどのような解析手法を選択するかを検討する必要がある。近年では解析コード自体は汎用的なものからかなり専門的なものまで市販されており，解析を行う人には多くの選択肢がある。いたずらに問題を複雑にせず，効率的かつ経済的に問題を解決できる手法を選択することが肝要であろう。そしてそれをどのように実際の問題に適用し，その結果を評価するかがエンジニアとしての真骨頂となっていると思われる。ここでは，主に連成現象の解析手法を用いる際の留意点について述べたが，パラメーターの決定法や地盤のモデル化の手法に関する研究は，理論と経験の両方の裏付けが必要である。さらには，個人の現象に対するイメージと周辺状況に対する理解もモデル構築の際の重要な要素になっている。始めに道具ありきではなく，主となるべきは現象であることは言を待たない。大雑把な，解析のための解析ではなく，問題解決の道具としての使い込みが，さらなる解析手法の発展のために必要であろう。

参考文献

1) 田村　武：掘削と周辺地盤の現状　2. 地盤の堀削と変形—土圧と水圧—，土と基礎，Vol. 42, No. 12, pp. 79～86, 1994.
2) 本多　隆：山留めの施工管理における有限要素法の適用に関する研究，京都大学学位論文，1986.
3) H.カスナー原著，金原　弘訳：トンネルの力学，森北出版，1976.
4) 足立紀尚・田村　武：高圧湧水下のトンネル工における水抜き孔の効果と注入域の適正規模，土木学会論文報告集，第280号，pp. 87～98, 1978.
5) 西垣　誠：掘削と周辺地盤の変状　4. 掘削と水理条件

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

の変化，土と基礎，Vol. 43, No. 3, pp. 55～60, 1995.
6) Yatomi, C., A. Yashima, A. Iizuka and I. Sano : General Theory of Shear Bands Formation by a Non-Coaxial Cam-Clay Model, Soils and Foundations, Vol. 29, No. 3, pp. 41～53, 1989.
7) Bishop, A. W. and G. E. Bright : Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partially Saturated Soils, Geotechnique, Vol. 13, No. 3, pp. 117～197, 1963.
8) 軽部大蔵：不飽和土の応力・ひずみ式と有効応力，土と基礎，Vol. 29, No. 6, pp. 13～18, 1981.
9) Sekiguchi. H. and H. Ohta : Induced anisotropy and time dependency in clay, Proc. Specialty Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo, pp. 229～239, 1997.
10) 太田秀樹・鍋谷雅司・藤井信二・山本松生：弾・粘塑性有限要素解析の入力パラメーター決定における一軸圧縮強度の利用，土木学会論文集，第400号，pp. 45～54, 1988.
11) 太田秀樹・松本江基・小林　晃：軟弱地盤の応力状態の評価手法とその適用性，土木学会論文報告集，No. 487/III-26, pp. 217～226, 1994.
12) 小林　晃・太田秀樹・松本江基・三反畑勇：都市周辺軟弱地盤の圧密履歴について（その2）解析結果，第23回土質工学研究発表会講演集，pp. 265～268, 1988.
13) Bear, J. : Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications, Inc., pp. 104～118, 1972.
14) 松本江基・小林　晃：軟弱地盤上の基礎工事に伴う地盤の変形予測，間組研究年報，pp. 177～187, 1989.
15) Journel, A. G. and Huijbregts, Ch. J. : MINING GEOSTATISTICS, Academic Press, 1978.
16) Journel, A. G. : Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons Short Course in Geology : Volume 8, American Geophysical Union, 1989.
17) 小林　晃：地盤環境汚染の現況とその対策 6. 地盤環境汚染の解析手法（2），土と基礎，Vol. 42, No. 9, pp. 65～72, 1994.
18) Barton, N., S. Bandis and K. Barkhtar : Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 3, pp. 121～140, 1985.
19) 小林　晃，千々松正和：掘削による単一亀裂内の流れの変化に関する数値解析的検討，第28回土質工学研究発表会講演集，pp. 1411～1414, 1993.

（原稿受理　1995.4.26）

NII-Electronic Library Service