

不連続性岩盤における 応力-水連成挙動について

亀村 勝美

公益財団法人 深田地質研究所（〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12）
E-mail: kame@fgi.or.jp

岩盤構造物の設計にあたっては、岩盤の非線形性を考慮した連続体解析が用いられることが多い。一方、硬岩の力学あるいは水理学的挙動は岩盤内に存在する大小様々な不連続面に支配されている。したがって連続体解析で推定される掘削影響領域と不連続性を考慮した解析で得られるそれとは異なる場合があり、不連続性を評価することにより岩盤の性能評価結果が変わってくる可能性がある。とくに力学的安定性だけでなく、難透水性などの水理学的性能を期待される石油やガスの水封式地下貯蔵施設や、高レベル放射性廃棄物処分施設では、応力-水連成挙動を詳細に検討し、性能評価する必要がある。

ここでは、既往の連成挙動解析手法を概括し、岩盤構造物の性能評価における問題点について検討した。

Key Words : *discontinuous rock mass, stress-fluid coupled behavior, underground cavern, water sealing energy storage facility*

1. はじめに

まず、2011年3月11日に発生した東日本大震災において亡くなられた方のご冥福をお祈りするとともに、今もなお様々な被害にあっている多くの人々の一日も早い復旧、復興をお祈りしたい。

長年土木技術者としてトンネルや地下空洞などの地下構造物の建設に関わってきた著者にとって今回の大震災は、自然の持つ侮りがたい力を再認識させるものであった。建物や堤防、橋梁、道路などの土木構造物、そして様々な生産施設などが安全に関する十分な検討を経て建設されていたはずであったのに、いとも簡単に破壊され、多くの被災者を生んだことは本当に残念でならない。

また、こうした甚大な被害の原因として「想定外の事象」という言葉が、余りにも容易に用いられていることには大きな抵抗感を抱いている。想定外の事象が生じたのではなく、想定された事象であったにもかかわらず工学的な対応の対象外としたのが実態ではなかったのかと。

著者は、岩盤構造物の性能評価について様々な面から検討を加えてきた。ここでは、これまで一部の研究者によってしか行われてこなかった、岩盤における応力-水連成挙動に関する研究について現況を整理し、問題点や今後の課題を抽出することを試みる。これは、岩盤における応力-水連成挙動が、これからのエネルギー関連の

事業や環境問題において重要となるであろう高レベル放射性廃棄物処分場やCO₂の地中貯留の安全性を論じる上で非常に重要かつ困難な問題であり、こうした重要施設の安全性について「想定外」ということが生じるのではないようにしたいと思うからである。

2. 岩盤における連成問題

これまで岩盤内に構築されたトンネルや地下空洞の性能は、その力学的安定性に主眼が置かれて検討されてきた。しかし地下空間の利用は、久慈、菊間、串木野の3地点においてすでに供用されている石油の地下備蓄や倉敷、波方において建設中のプロパンガス地下貯蔵施設などの新たな用途に拡大されるだけでなく、更には高レベル放射性廃棄物の処分施設、CO₂の貯留なども具体的に検討されるようになってきた。こうした施設では、力学的安定性よりもむしろ地下水や熱の移動に関連する性能について検討することが重要となる。

岩盤の変形、地下水の移動、熱の移動は、それぞれが独立して生じるのではなく、お互いに複雑に影響し合っている。その影響は、概念的には図-1に示すような現象と相互作用、特性、影響として表わすことができる¹⁾。

このような複雑な連成挙動を解析的に解くためには、

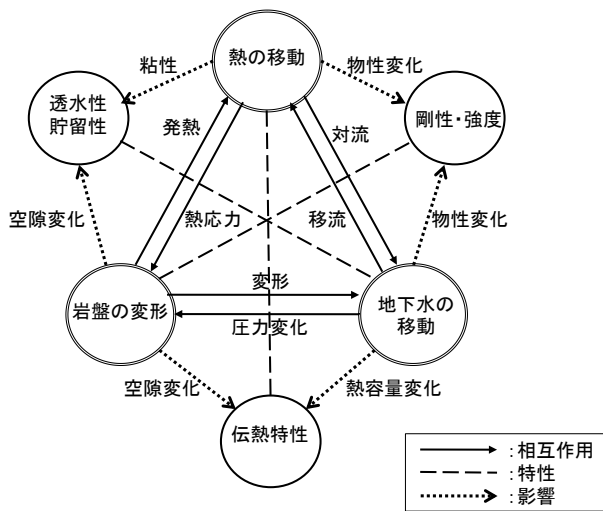


図-1 岩盤における応力-熱-水連成挙動の概念

応力、水、熱の各々の相互影響を考慮した上で釣り合い式、連続式、エネルギー保存則を書下し、これらを連立させて解く必要がある¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

山辺⁵⁾は、第29回岩盤工学に関するシンポジウムにおけるパネルディスカッション「不連続性岩盤の（数値）解析技術の現状と課題」において熱・応力・浸透連成現象の解析について次のように述べている。「応力浸透連成現象は地盤工学における圧密問題として多くの研究があり、有限変形弾塑性・浸透連成問題までも解くことができる段階に至っている。」また、熱-応力連成、熱-浸透連成についても様々な解析が可能な状態であると述べている。

応力-熱-水の3連成問題は、とくに高レベル放射性廃棄物の地層処分分野で研究が進められており、解析手法を開発した上で現象解明のための実験結果を評価する研究⁶⁾⁷⁾など、すでに多くの実績がある。これらの研究では、廃棄体を取り巻く人工バリアの性能評価が問題とされ、中でも人工バリアを構成する緩衝材のベントナイトの特性について詳細な検討がなされている。

本論文では、こうした応力-熱-水の3連成あるいはさらにこれに化学的作用を加えた4連成⁸⁾などの議論の前に、連成問題として最も基本的な応力と水の連成問題について、とくに岩盤工学の観点から検討を加える。

3. 岩盤における応力-水連成挙動解析

地盤における応力と水の連成挙動の典型は、粘性土地盤における圧密沈下現象である。また、東日本大震災で関東地方の広範囲に発生した地盤の液状化現象もこの応力と水の動的連成挙動に他ならない。そしてこれらの連成問題は、Terzaghi や Biot の圧密理論にもとづいて検討が行われ、対策が講じられてきた。

こうした連成挙動は、圧密沈下の場合には軟弱な粘土層において、液状化の場合は軟弱な砂層において顕著に見られるもので、これまで土質工学の分野で様々な研究が成されてきた。一方で、砂や粘土に比べ非常に剛性の高い（硬い）岩盤については、経験的に連成挙動の影響は無視できるほどに小さいとされ、岩盤構造物における様々な応力と水の問題は個別の問題（非連成問題）として扱われ対処されてきた。

岩盤における応力-水連成問題への圧密理論の適用性について大津ら⁹⁾は、Biot の多次元圧密理論を基本として変形と間隙水圧を未知数とした支配方程式を導き、有効応力係数、Skempton の B 値、比貯留係数 S_s の物理的な意味を明確にするとともに、地盤・岩盤の連成効果が地下水流動特性に与える影響について検討している。表-1 は、変形-応力場をせん断応力が卓越する場合と、体積応力が卓越する場合とに分け、間隙水圧の応答がどう変化するかを示したものである。

このように変形係数が 1GPa 以上の硬岩では、間隙水圧と変形の連成挙動による影響がほとんど無視できる。すなわち地下水流動は、浸透流解析により評価し、結果として得られる浸透力を物体力として変形-応力解析において評価することにより応力と水の問題が解決できる。ただし、浸透力の評価においては有効応力係数が 1.0 以下となることに留意する必要がある。

大津らと同様に Biot の多次元圧密理論にもとづく土質地盤を対象とした連成解析手法を岩盤に対して用いる場合の問題点について細谷ら¹⁰⁾は、地盤における応力-水連成挙動と同様に、岩盤についても連続体とみなせる場合には圧密理論が適用できるが、変形特性や間隙率が大きく異なるため土質材料に対して定義された有効応力や比貯留係数がそのまま岩盤に適用できるとは限らないとしてその適用性について検討している。

結論として土質力学で一般的な有効応力係数 α 、Skempton の B 値、比貯留係数 S_s は、排水時の体積弾性率の大きい岩盤（大津らと同様 1GPa 辺りが目安か）で

表-1 地盤岩盤の連成効果の地下水流動特性に及ぼす影響

応力場	間隙水圧 応答場	基準値 変形係数 $E=1\text{GPa}$	
		(剛性小) 土質材料	(剛性大) 軟岩 → 硬岩
せん断応力 卓越場	即時応答	影響小 (工学的には無視)	影響極小 (工学的には無視)
	再配分過程	影響中 (剛性低下に伴い影響発生)	影響小 (工学的には無視)
体積応力 卓越場	即時応答	影響大 (B 値=1)	影響小 (B 値<1)
	再配分過程	最も影響大	影響小 (工学的には無視)

は、固体部分と液体部分の変形を考慮する必要があることを指摘している。

このように岩盤についても連続体と見なせる場合には、多次元圧密理論を基本とする応力-水連成解析ができる。後は岩盤特有の非線形性をどう評価するかである。たとえば大槻ら¹¹⁾は、軟岩に対して提案されたひずみ軟化型弾粘塑性モデルを岩盤挙動の拘束圧依存性、クリープにおけるひずみ速度依存性を考慮して拡張した上で、土-水連成 FEM 解析を用い、堆積軟岩空洞掘削問題を検討している。

一方硬岩では岩盤の力学的、水理学的挙動を支配している不連続面をどう取り扱うかが問題となる。

木下ら¹²⁾は、掘削に伴う空洞周辺の不連続性岩盤の透水性の変化について原位置試験（透水試験，ボアホール TV）を行い，その原因を検討した結果として以下の項目を挙げている。

- ・発破による岩盤の直接損傷
- ・空洞周辺の応力集中による岩盤の破壊
- ・空洞周辺の応力再配分による既存不連続面の開口

桜井ら¹³⁾は，こうした岩盤の透水性を支配している不連続面が検討対象とする構造物の規模に比べて十分に小さく，また空間的に十分な数が等方的に分布していると仮定し透水テンソルを導入することによって不連続面に起因する異方的な透水性を評価している．そこでは透水性の変化は，実験により得られる応力依存性を仮定し評価されている。

一方吉田ら¹⁴⁾は，MBC(Micromechanics Based Continuum)モデルにより不連続面を含む岩盤の幾何学的，力学的特性を評価し，解析的に求められる不連続面の開口幅から平行板流れの透水係数を求め，等価浸透性媒体としての透水テンソルを算定している．そして田部井¹⁵⁾はこのMBCモデルを用い，放射性廃棄物処分空洞における掘削問題を解析している。

これらの手法は，ともに不連続性に起因する透水性を任意の体積において平均化し，等価な浸透性媒体とすることで地盤における連成解析手法を適用している。

こうした不連続面の影響を等価な連続体として評価する方法に対し，より具体的に不連続面の発生，進展を考慮する試みがある．たとえば，ガスなどのエネルギー貯蔵のための水封式岩盤タンクの気密性評価を目的として青木ら^{16,17)}は，岩盤の力学的挙動については粒状体個別要素法を，ガスや地下水の浸透挙動については粒状体モデルに対応した CDN(Channel-Domain Network)モデルを用いた応力-浸透連成解析手法を提案し，その妥当性について検討している。

また，個別要素法を用い直接的に不連続面をモデル化

し，その力学的挙動を水との連性を考慮して解析する方法も提案されている．しかしこうした個別要素法では，不連続面のモデル化手法，力学的あるいは水理学的特性評価手法に不明な点が残されている．したがって室内試験や原位置計測結果のシミュレーション等は可能であっても，事前の調査試験結果にもとづいて具体的な連成問題を検討することは現時点では困難であり，その適用にあたっては妥当性の検討を積み重ねていく必要がある。

4. 不連続性岩盤の応力-水連成解析における課題

(1) 水理学的的外乱の影響の評価

さて木下ら¹²⁾が示した不連続性岩盤の透水性変化の原因とした3つの項目はいずれも力学的な外乱によるものである．図-1 に示した連成の概念からすると，実際の透水性の変化には水理学的な外乱によるものも考慮する必要がある．それらは，

- ・空洞周辺地下水の自然あるいは人為的な操作による水位変化に起因する不連続面内水圧の変化による不連続面の開口・閉口
- ・グラウトによる局所的増分圧力による不連続面の開口
- ・グラウトによる岩盤透水性変化による水圧分布変化とそれによる不連続面の変位（開口，閉口）

などである。

基本は常に応力-水連成作用にあり，どちらの境界条件が変化しても最終的に地下水流れが変化することになる．これらの項目の相関を示したのが図-2 である。

ここで図-2 を基に応力と水の連成挙動を具体的に書き下してみる。

まず掘削による影響は，図-3 ①に示すように発破などによる岩盤の直接損傷や掘削に伴う応力再配分によって岩盤変位が生じる．この変位は，不連続面にその挙動が支配される岩盤においては，不連続面の変位（発生，開口，閉口）として顕著に表れる。

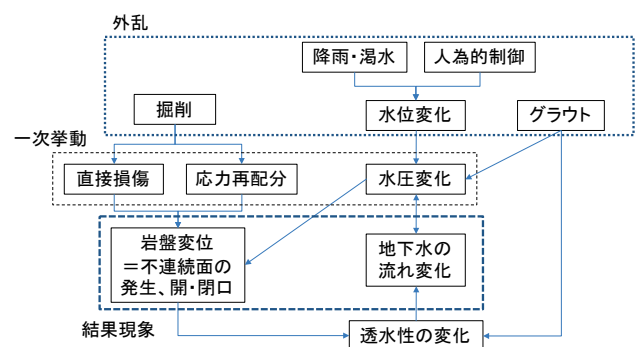


図-2 応力-水連成挙動における相関

不連続面の透水性は、よく用いられる平行板理論では不連続面の開口幅の3乗に比例するため、不連続面のわずかな開口も透水係数としては非常に大きな変化として表れる。

たとえば当初開口幅が0.5mmであったものが0.6mmに変化したとすると、透水性は $(0.6/0.5)^3 = 1.728$ 倍となり流量は73%も増加することになる。

こうした透水性の変化は地下水流れを大きく変化させ、空洞周辺の間隙水圧も変化する。そしてその結果として不連続面の変位を生じさせ、再び透水性が変化するというループを描く。

地下水位の変化の影響を②に示す。地下空洞周辺岩盤の地下水は、降雨や湧水あるいは水封式地下貯蔵タンクのように人工的な制御によりその水位が変化する。水位の変化により空洞周辺岩盤の水圧は変化し、地下水流れが変化すると同時に不連続面の変位を生じさせる。結果として透水性が変化し、地下水流れが更に変化することになる。

一方グラウトの影響は③に示すように、グラウト圧によるものとグラウトの結果として得られる透水性の変化の2つが考えられる。

まず硬岩におけるグラウトは、その効果を確実なものとするため高い圧力で行われることが多い。しかしこの岩盤内に局所的に作用する高い圧力は、新たな不連続面の発生、進展、開口を生じる。そして、これにより透水性が変化し、地下水流れも空洞周辺の間隙水圧も変化する。その結果として不連続面の変位を生じさせ、再び透水性が変化するというループを描く。

またグラウトは、不連続面の空隙を充填することによって直接的に透水性を変化させる。この透水生の変化は地下水流れを変化させ、不連続面の変位を誘発し更なる透水生の変化へと繋がる。

これまで応力-水連成問題という掘削に伴う透水場への影響という面に主眼が置かれ検討されてきた。しかしここで述べたように応力-水連成挙動では、水理学的な外乱の影響も無視できるものではなく、水理学的特性にその機能を期待する岩盤構造物の検討にあたっては十分な議論が必要である。

(2) 不連続面の水理学的特性の評価

不連続性岩盤における応力-水連成挙動の評価にあたっては、等価連続体としてモデル化する場合でも、個別要素法のように不連続体としてモデル化する場合でも不連続面の透水性の評価が重要である。

不連続面を含む岩盤の透水性の評価では、不連続面が平行な平板で構成されていると仮定し、ダルシー則にもとづき一般に3乗則と呼ばれる関係式を導き用いている場合が多い。しかし不連続面が平行平板であることはな

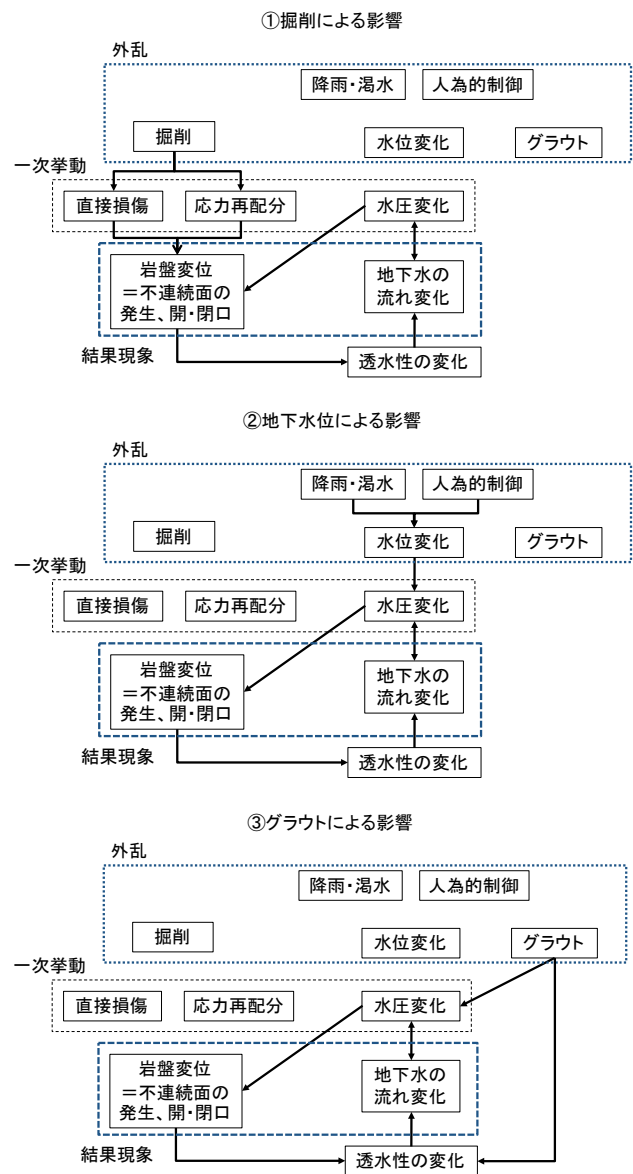


図-3 様々な外乱による応力-水連成挙動の概念

く、複雑な起伏を持っている。

したがって不連続性岩盤の応力-水連成解析を行うにあたっては、不連続面の任意の応力条件下での変形挙動とその水理特性を明らかにする必要がある。

たとえば岩野ら¹⁸⁾は、花崗閃緑岩の供試体を用い透水性の拘束圧・応力履歴依存性を議論している。また須藤ら¹⁹⁾は、大型の岩盤ブロックを用い等方応力解放に伴う透水性の変化を議論している。

一方せん断時の不連続面の透水性について千葉ら²⁰⁾は、実際の不連続面から型取ったモルタル供試体を用いた一面せん断試験を行っている。また三谷ら²¹⁾は、独自に開発したせん断試験装置を用いせん断時の異方的な透水性変化について検討している。結果として不連続面の異方的な透水性は、垂直応力の増減に伴うものだけでなく、せん断に伴う不連続面の間隙の変化により複雑に変化することを示している。

同様の検討を不連続面の開口幅分布の変化に着目して上原ら²⁾も行っており、不連続面のせん断時の破壊に伴う開口幅の変化を考慮すべきであるとしている。

以上のように不連続面の透水性の応力依存性の議論は、個々の不連続面の幾何学的特性や力学的特性を如何に評価するかという方向に向かっている。しかし現実的には大小様々な不連続面の全てについてそのような評価を行うことは不可能であり、検討対象とする岩盤構造物に要求される性能、規模、サイトの岩盤特性などに応じたミクロからマクロまでの一貫した評価解析手法を構築する必要がある。

この意味において、供試体レベルの検討に加えて原位位置での詳細な連成挙動にかかわる試験・計測を行うことは重要である。

5. おわりに

不連続性岩盤における応力-水連成挙動の評価においては、まだ多くの解決すべき課題がある。特に、不連続性岩盤へのグラウトのメカニズムとその効果の評価、不連続面の透水性の評価については今後の更なる研究が不可欠である。

こうした研究においては、これまでに建設された石油地下備蓄施設や建設中のガス地下備蓄施設における情報がある。またそれらと並行して、不連続面の透水性の評価に関する基礎的な実験的研究も行う必要がある。

こうした努力により、長年にわたって研究が進められてきている高レベル放射性廃棄物の地下処分施設や地球環境を守るための新たな課題として浮かび上がってきた二酸化炭素の地下貯留施設などの安全性の評価が可能になる。

参考文献

- 1) 里優, 亀村勝美: 岩盤内における間隙水および熱の移動を考慮した変形解析法について, 第 16 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.46-49, 1984.
- 2) 大西有三, 柴田裕章, 小林晃: 有限要素法による応力-浸透-熱移動連成問題解析手法, 土木学会論文集 No.370/III-5, pp.151-158, 1986.
- 3) 浜島良吉, 桜井孝臣, 草深守人, 渡辺正明, 小出仁: 不連続性岩盤内の熱と水の連成解析, 第 19 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.226-229, 1987.
- 4) 浜島良吉, 船生健一, 草深守人, 渡辺正明, 小出仁: 3 次元不連続性岩盤の熱と応力の連成解析, 第 19 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.221-224, 1987.
- 5) 山辺正: 岩石・岩盤を対象とした熱・応力・浸透連成現象

の解析と問題点, 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.321-324, 1999.

- 6) 千々松正和, 谷口航, 鈴木英明, 西垣誠: 熱-水-応力連成モデルを用いた高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド評価, 土木学会論文集 No.687/III-56, pp.9-25, 2001.
- 7) 操上広志, 千々松正和, 小峯秀雄, 小林晃, 大西有三: 膨潤評価式を適用した熱-水-応力連成解析, 土木学会論文集 No.771/III-68, pp.21-31, 2004.
- 8) 伊藤彰, 杉田裕, 川上進, 油井三和, 石原義尚, 千々松正和, 根山敦史, 菱谷智幸: 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析の取り組み, 土木学会第 58 回年次学術講演会, CS7-041, pp.359-360, 2003.
- 9) 大津宏康, 大西有三, 亀村勝美: 間隙水と変形・応力の連成を考慮した地盤構造物の設計に関する一考察, 土木学会論文集 No.457/III-21, pp.87-96, 1992.
- 10) 細谷真一, 徳永朋祥: 応力変化によって生じる間隙水圧変化に関する考察-岩盤と土質材料の比較-, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.301-306, 2004.
- 11) 大槻英夫, 田坂嘉章, 鈴木康正, 大森剛志, 岸田潔, 足立紀尚: 土・水連成ひずみ軟化型弾粘塑性モデルの拡張と堆積軟岩空洞掘削問題への適用, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.231-236, 2006.
- 12) 木下直人, 石井卓, 安部透, 竹村友之: 空洞掘削に伴う周辺不連続性岩盤の透水性変化, 第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.206-210, 1996.
- 13) 桜井英行, 里優, 木下直人, 石井卓: 掘削の影響による岩盤透水性の変化に関する研究, 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.43-49, 1999.
- 14) 吉田秀典, 糸山豊, 堀井秀之: 空洞掘削に伴う不連続性岩盤の変形と浸透流の連成解析, 応用力学論文集, Vol2, pp.325-334, 1999.
- 15) 田部井和人, 森川誠司, 森孝之, 岩野圭太, 吉田秀典, 堀井秀行: MBC モデルによる不連続性岩盤の三次元変形・浸透流連成解析, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.29-34, 2006.
- 16) 青木謙治, 水戸義忠, 松岡哲也, 近藤大介: 高压ガス貯蔵岩盤タンク設計のための新しい岩盤の変形・浸透流解析手法の提案, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.447-452, 2005.
- 17) 青木謙治, 水戸義忠, 田尾拓也, 張傳聖, 田坂嘉章, 前島俊雄: 岩盤タンクの気密性評価における応力-浸透流連成解析手法の適用性, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.35-38, 2007.
- 18) 岩野政浩, 青木智幸, 飯星茂: 岩盤亀裂透水性の拘束圧・応力履歴依存性に関する考察, 土木学会第 49 回年次学術講演会, III-374, pp.738-739, 1994.

- 19) 須藤賢, 鈴木健一郎, 杉江茂彦, 上野孝之: 亀裂性岩盤ブロックの等方応力解放に伴う透水性について, 土木学会第 58 回年次学術講演会, III-400, pp.799-800, 2003.
- 20) 千葉周平, 大西有三, 大津宏康, 西山哲, 矢野隆夫: 拘束応力が単一不連続面のせん断-透水特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会, III-399, pp.797-798, 2003.
- 21) 三谷泰浩, 江崎哲郎, 中島祐一, 郷家光男, 石井卓, 木下直人: 岩盤不連続面の透水異方性に関する実験的研究, *The 11th Japan National Symposium for Rock Mechanics 2002*, G04.
- 22) 上原真一, 大西有三, 西山哲, 矢野隆夫, 斉藤竜平: 岩盤不連続面のせん断に伴う表面形状の変化と水理学的特性におけるその影響, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.65-72, 2005.

ON THE STRESS-FLUID COUPLED BEHAVIOR OF DISCONTINUOUS ROCK MASS

Katsumi KAMEMURA

For the design of underground structures, a continuum analysis considering the nonlinearity of rock mass is usually used. On the other hand, discontinuities of hard rock, ranging from mm to m in scale, is governing the mechanical and the hydraulic properties. Therefore, the performance estimated by the continuum analysis might be different from that by discontinuum analysis. So, for the underground structures which are expected to have a hydraulic performance not only a mechanical performance, it is important to examine the stress-fluid coupled behavior considering discontinuities. Here previous studies about stress-fluid coupled analysis are surveyed and problems to be solved are discussed.