JNC TY8400 2005−007

セルオートマトン法による亀裂ミクロ構造を考慮した流体物質移動解析

（先行基礎工学研究に関する平成16年度共同研究報告書）

２００５年３月

京　都　大　学
核燃料サイクル開発機構

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184　茨城県那珂郡東海村村松４番地４９
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 京都大学（Kyoto University）
核燃料サイクル開発機構　(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

Ⓚ

JNC TY8400 2005-007
2005 年 3 月

セルオートマトン法による亀裂ミクロ構造を考慮した流体物質移動解析
（先行基礎工学研究に関する平成 16 年度共同研究報告書）

西山哲*1　上原真一*1　矢野隆夫*1　斉藤竜平*1
内田雅大*2　澤田淳*2　武部篤治*2　佐藤久*3

要　旨

サイクル機構と京都大学は，「セルオートマトン法による亀裂ミクロ構造を考慮した流体物質移動解析」に関する共同研究を行っている。本報告書は，その H16 年度の成果をとりまとめたものである。

本研究では，岩盤不連続面のせん断時における透水特性を把握するために，せん断透水同時試験装置の開発を行い，人工供試体を用いてせん断透水試験を行った。せん断時の垂直方向の拘束形式としては垂直応力一定試験と垂直剛性一定試験を採用しており，基本的なパラメータである垂直応力σ_v，垂直剛性 K_v，不連続面表面形状および動水勾配 I などが透水特性に与える影響について考察した。また，開発した LGA 解析コードを用いて，開口幅をパラメータとした平行平板中の流体解析を実施した。そして，その流体解析結果から，開口幅，動水勾配と流量の関係について検討を行い，LGA 法の適用性を確認した。

本報告書は，先行基礎工学分野に関する研究として京都大学と核燃料サイクル開発機構との共同研究により実施した研究の成果である。
機構担当課室：東海事業所　環境保全・研究開発センター　処分研究部　システム解析グループ
*1　京都大学大学院工学研究科土木工学専攻
*2　東海事業所環境保全・研究開発センター処分研究部システム解析グループ
*3　検査開発株式会社

JNC TY8400 2005-007
March, 2005

Analysis of Hydraulic and Transport Characteristics in Fracture of Micro Structure Using Cell Automata
(Document on Collaborative Study
: the JNC Cooperative Research Scheme on the Nuclear Fuel Cycle)

Satoshi NISHIYAMA*1 Shinichi UEHARA*1 Takao YANO*1 Ryuhei Saito*1
Masahiro UCHIDA *2 Atsushi SAWADA*2 Atsuji TAKEBE *2
Hisashi SATO*3

Abstract

JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute) and Kyoto University have carried out research and development titled "Analysis of Hydraulic and Transport Characteristics in Fracture of Micro Structure Using Cell Automata". This report summarized a result in the H16 year in the cooperation research.

In H16, to investigate characteristic of permeability on shear of discontinuity surface of rock, we developed the equipment of shear-permeability test and carried out the test using artificial model. In the test, we gave the vertical fixed condition constant normal load and stiffness, and considered the influence of basic parameter (normal load (σ_v), normal stiffness (K_v), surface of rock fracture, hydraulic gradient (I), etc.) to characteristic of permeability.

We set up aperture of parallel plate to parameter and analyzed fluid flow of parallel plate by using developed LGA code. We examined the relationship to aperture, hydraulic gradient and fluid quantity by the fluid analysis results, and confirmed the applicability of LGA code.

This progress report was the result of cooperated research between Kyoto University and JNC in the field of precedence-foundation engineering.

JNC Liaison : Wastle Isolation Research Division, Tokai Works
*1 Kyoto University
*2 Wastle Isolation Research Division, Tokai Works, JNC
*3 Inspection Development Corporation

目　次

1.　はじめに…… 1

2.　一面せん断透水試験による単一岩盤不連続面の力学･透水特性 …… 3
2.1　目的および背景 …… 3
2.2　せん断透水同時試験の概要 …… 5
2.2.1　供試体 …… 5
2.2.2　実験装置…… 6
2.2.3　実験方法および実験条件 …… 13
2.3　実験結果および考察 …… 15
2.3.1　不連続面の表面凹凸形状が力学・透水特性に与える影響
［実験ケース 1］ …… 18
2.3.2　不連続面に作用する垂直応力が力学・透水特性に与える影響
［実験ケース 2］ …… 30
2.3.3　垂直剛性 K_v が力学・透水特性に与える影響［実験ケース 3］ …… 33
2.3.4　動水勾配が不連続面の透水特性に与える影響［実験ケース 4］ …… 36
2.4　結論 …… 39

3.　LGA 法による流体解析に関する検討…… 41
3.1　目的 …… 41
3.2　解析モデル…… 41
3.3　解析結果 …… 42
3.3.1　検討項目…… 42
3.3.2　平衡までの反復回数の設定…… 42
3.3.3　流れ方向の粒子数の分布 …… 47
3.3.4　開口幅方向の流速分布 …… 48
3.3.5　メッシュ数と開口幅…… 50
3.3.6　開口幅を変えた平行平板での流量と動水勾配の関係 …… 51
3.3.7　同一平行平板での流量と動水勾配の関係 …… 53

4.　おわりに…… 55

参考文献 …… 59

図　目　次

図 1.1　岩盤の透水特性の概念 …… 2

図 2.1.1　せん断様式の分類
（(a)(b)垂直応力一定試験，(c)(d)定体積試験，(e)(f)垂直剛性一定試験） …… 4
図 2.2.1　本研究で用いた供試体の亀裂表面形状 …… 5
図 2.2.2　一面せん断試験器の概念図 …… 10
図 2.2.3　せん断箱 …… 11
図 2.2.4　透水機構部の概略 …… 11
図 2.2.5　止水機構の影響 …… 12
図 2.2.6　定水位試験結果と変水位試験結果の比較 …… 12
図 2.2.7　限界レイノルズ数 R_e と摩擦損失係数 f_r の関係
（(a)JRC の影響，(b)動水勾配 I の影響） …… 12
図 2.3.1　最大閉塞 V_m と初期開口幅 b_0 の関係 …… 17
図 2.3.2　剛性試験結果（(a)t～σ_v の関係，(b)v～σ_v の関係） …… 17
図 2.3.3　CNL（CPT/SCL）試験結果（JRC の影響，(a)u～τ ,b_m 関係，(b)u～τ 関係，
(c)u～T 関係，(d)b_m～T 関係，(e)JRC～T 関係，(f) τ ～T' 関係） …… 22
図 2.3.4　不連続面内の開口幅のヒストグラムとその分布状況（b_m=0.5mm） …… 23
図 2.3.5　(a)JRC と開口幅の平均値，(b)分散および接触率 CR の関係 …… 23
図 2.3.6　CNL（CPT/SCL）試験結果（JRC の影響，b_m～T 関係） …… 24
図 2.3.7　トレーサー試験結果（t～R 関係） …… 24
図 2.3.8　各せん断変位 u における計測時間 t と電気伝導率 R の関係
（(a)u=0.00mm, (b)u=0.05mm, (c)u=0.13mm, (d)u=0.25mm, (e)u=0.75mm,
(f)u=1.00mm，(g)u=1.50mm，(h)u=2.00mm，(i)u=4.00mm） …… 25
図 2.3.9　せん断変位 u と抵抗係数 f_c の関係 …… 25
図 2.3.10　JRC と抵抗係数 f_c の関係 …… 26
図 2.3.11　Mohr-Coulomb の破壊基準と応力経路の模式図 …… 26
図 2.3.12　CNS（FPT/SCS）試験結果（JRC の影響，(a)u～τ ,v 関係，(b)u～τ 関係，
(c)σ_v～η関係，(d)σ_v～τ 関係） …… 27
図 2.3.13　CNS（FPT/SCS）試験結果（JRC の影響，(a)u～T 関係，(b)b_m～T 関係，
(c)JRC～T 関係，(d) τ ～T' 関係） …… 28
図 2.3.14　CNS（FPT/SCS）試験結果（JRC の影響，b_m～T 関係） …… 29
図 2.3.15　CNL（CPT/SCL）試験結果
（垂直応力σ_vの影響，(a)u～τ ,b_m 関係，(b)u～τ 関係，(c)u～T 関係，
(d)b_m～T 関係，(e)σ_v～T 関係，(f) τ ～T' 関係） …… 31

図 2.3.16　CNL（CPT/SCL）試験結果（垂直応力σ_vの影響，b_m～T関係）……32
図 2.3.17　CNS（FPT/SCS）試験結果（K_vの影響，(a)u～τ,b_m関係，(b)u～τ関係，(c)σ_v～η関係，(d)σ_v～τ関係）……34
図 2.3.18　CNS（FPT/SCS）試験結果（K_vの影響，(a)u～T関係，(b)b_m～T関係）……35
図 2.3.19　CNS（FPT/SCS）試験における結果 b_m～T関係（(a)J107 供試体，(b)J200 供試体）……35
図 2.3.20　動水勾配 I と流量 Q および透水量係数 T の関係（(a)I～Q関係，(b)I～T関係）……37
図 2.3.21　力学的開口幅 bm と透水量係数 T の関係（動水勾配 I の影響）……38

図 3.2.1　解析モデルの概念図……41
図 3.3.1　開口幅 50 メッシュ，変換確率 0.1，メッシュあたりの粒子数 3 の場合の流れ方向運動量の推移……44
図 3.3.2　開口幅 10 メッシュ，変換確率 0.1，メッシュあたりの粒子数 3 の場合の流れ方向運動量の推移……44
図 3.3.3　開口幅 50 メッシュ，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数 3 の場合の流れ方向運動量の推移……45
図 3.3.4　開口幅 10 メッシュ，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数 3 の場合の流れ方向運動量の推移……45
図 3.3.5　開口幅 50 メッシュ，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数 1 の場合の流れ方向運動量の推移……46
図 3.3.6　開口幅 10 メッシュ，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数 1 の場合の流れ方向運動量の推移……46
図 3.3.7　流れ方向の粒子数の分布……47
図 3.3.8　変換確率 0.1 の場合の z 方向の流速分布……48
図 3.3.9　変換確率 0.01 の場合の z 方向の流速分布……48
図 3.3.10　開口幅方向の流速分布……49
図 3.3.11　開口幅を変えた場合の開口幅方向の流速分布……50
図 3.3.12　変換確率 0.1 とした場合の開口幅と透水係数の関係……52
図 3.3.13　変換確率 0.01 とした場合の開口幅と透水係数の関係……52
図 3.3.14　変換確率を変えた場合の透水係数の変化（開口幅メッシュ数 10）……54
図 3.3.15　変換確率を変えた場合の透水係数の変化（開口幅メッシュ数 20）……54
図 3.3.16　変換確率を変えた場合の透水係数の変化（開口幅メッシュ数 30）……54

図 4.1　LGA の適用範囲（透水係数の誤差を±10%とした場合）……56

図 4.2　LGA の適用範囲（透水係数の誤差を±5%とした場合）……56
図 4.3　3 次元平行平板の円筒周り流れの解析モデル例……58
図 4.4　3 次元平行平板中の円筒周り流れの解析結果例……58

表　目　次

表 2.2.1　試験方法とその略称 …… 14
表 3.3.1　開口幅のメッシュ数と実際の開口幅の関係 …… 50
表 4.1　開口幅メッシュ数，変換確率と LGA で計算した透水係数の関係 …… 56
表 4.2　LGA で計算した透水係数の相対値（誤差±10%での検討） …… 57
表 4.3　LGA で計算した透水係数の相対値（誤差±5%での検討） …… 57

1. はじめに

近年，大量生産，大量消費型の経済活動に伴う廃棄物処分，資源枯渇，地球温暖化などの地球環境問題が社会的関心を呼ぶ中で，岩盤工学においても，地下エネルギー貯蔵施設の建設，高レベル放射性廃棄物の地層処分，地球温暖化の原因とされている温室効果ガスの一つである CO_2 等の地中貯留などのプロジェクトが注目されている。これらのプロジェクトはいずれも地下深部の岩盤が有する剛性，密閉性，隔離性といった特徴を最大限に活用しようというものである。特に高レベル放射性廃棄物の地層処分においては，地下深部に埋設された廃棄物中の放射性核種が数万年以上の長期間にわたって人工バリアから浸出し，天然バリアである岩盤中を地下水の流れに沿って人間環境に放出されることを想定した「地下水シナリオ」を中心に安全性評価を行うことが重要であるとされている [1)]。

岩盤内には数多くの不均質な亀裂面が存在し，特に亀裂性岩盤においてその透水特性は不均質性に大きく支配される。従って亀裂性岩盤において，上記のプロジェクトを実現するためには周辺岩盤に存在する不均質な透水特性を適切に把握することが重要となる。すなわち，岩盤の透水特性の評価にあたっては図 1.1 に示すように，①巨視的(マクロ)には岩盤中の水みちとなる亀裂が作るネットワーク構造が岩盤全体の透水特性に与える影響を，②微視的(ミクロ)には岩盤中で主要な水みちとなる個々の単一亀裂や亀裂交差部の透水特性を把握することが重要となる [2)]。

そこで本研究は上記②の観点から，岩盤不連続面のせん断時における透水特性を把握するために，せん断透水同時試験装置の開発を行い，人工供試体を用いてせん断透水試験を行った。せん断時の垂直方向の拘束形式としては垂直応力一定試験と垂直剛性一定試験を採用しており，基本的なパラメータである垂直応力 σ_v，垂直剛性 K_v，不連続面表面形状および動水勾配 I などが透水特性に与える影響について考察した。また，亀裂中の流体解析を目的とした LGA 法を用いた解析については，平行平板中の流体挙動を正確に表現できることを示しておく必要があるため，平行平板流体解析を実施し，その結果を用いて LGA 法の適用性について検討した。

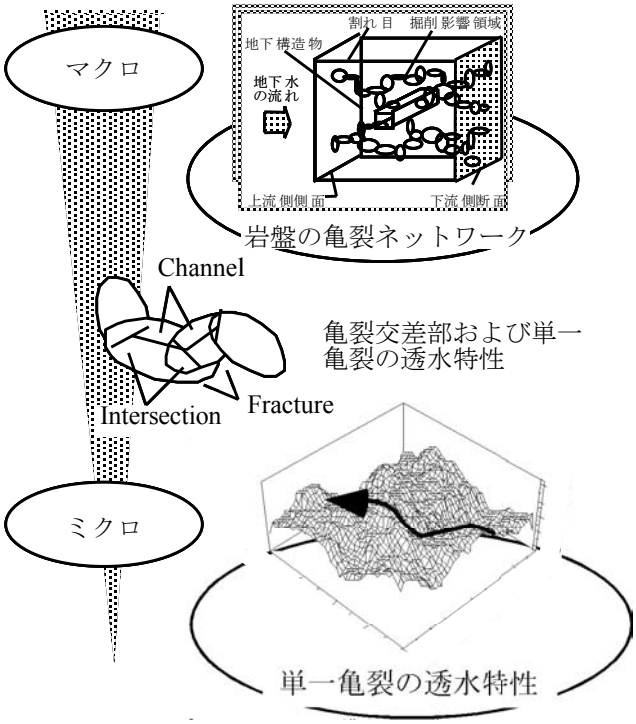


図 1.1　岩盤の透水特性の概念

2. 一面せん断透水試験による単一岩盤不連続面の力学･透水特性

2.1 目的および背景

自然界における岩盤不連続面の透水特性は，不連続面に作用する応力状態や応力履歴，表面凹凸形状や接触状況，不連続面内に存在するガウジなどの介在物，また地質的な条件である動水勾配 I など，極めて多くの要因に支配されている。そのため，単一岩盤不連続面の透水特性を把握しようとする時は，まずこれらのパラメータを自由に設定できる室内実験によってその特性を把握することが有効である。

一般に，岩盤不連続面を対象とした一面せん断試験で実施される試験条件は，垂直応力一定せん断試験（Constant Normal Load : 以下 CNL 試験），定体積試験（Constant Volume : CV 試験）および垂直剛性一定せん断試験（Constant Normal Stiffness : CNS 試験）である。図 2.1.1 は岩盤不連続面のせん断様式の分類である。図 2.1.1(a)は通常よく用いられる垂直応力一定試験であり，図 2.1.1(b)に示すように斜面上で拘束されていないブロックが不連続面上を滑る場合に相当している。図 2.1.1(c)に示す定体積試験は，図 2.1.1(d)のように岩盤内の亀裂が変位を拘束された状態でせん断を受けている場合に相当している。それに対し，図 2.1.1(e)，図 2.1.1(f)は垂直剛性一定試験と呼ばれるものである [3)~6)]。

岩盤不連続面には，垂直応力 σ_v およびせん断応力 τ という，その面に対して 2 方向の応力が作用している。不連続面はこれらの応力によって垂直変位 v，せん断変位 u，表面凹凸形状や岩石基質部の変形，破壊などを生じ，不連続面内の空隙構造を変化させる。特に，表面凹凸形状を有した不連続面がせん断変形を起こした場合には，不連続面のせり上がりなどにより，不連続面内の空隙構造が大きく変化し，それに伴って不連続面の透水特性も大きく変化すると考えられ，その特性を捉えることが重要となる。しかし，これまでの実験的なアプローチとしては，不連続面に作用する σ_v の影響のみに着目した研究が多く見られるものの [7)~9)]，せん断応力下，せん断変形下における不連続面の透水特性について実験的に検討している事例は少ない [10)]。また透水特性の評価手法としては，不連続面を滑らかな平行平板としてモデル化し，その流れを層流と仮定した三乗則（cubic low）が提案され，その妥当性に関する研究が行われてきた [7)]。しかしながら，不連続面内の複雑な空隙構造の変化を平行平板のような単純なモデルで置き換えることには限界があると考えられ，新たな評価手法の確立が必要であると思われる。さらに，岩盤不連続面の水理学的挙動と力学的挙動との同時特性に関する数値解析的なアプローチとしては，例えば，不連続体解析手法を用いた浸透－応力連成解析 [11)] などが挙げられるが，未だ岩盤不連続面のモデル化の問題，水理学と力学との相互作用の考慮が不十分であるといった問題を抱えており，実験による解明が待たれている。

図 2.1.1 に示す試験方法の相違点は試験時の拘束条件（応力状態）が違うことである。そのため，試験時の空隙構造が異なることが予想される事から，透水特性が変化する事が容易に想像できる。そこで本研究では，パラメータを自由に設定できる室内実験によ

って，表面凹凸形状を有する岩盤不連続面のせん断変形時における透水特性を把握するために，透水試験とせん断試験を同時に行える実験装置を開発した。そして介在物を含まない新鮮な単一不連続面を対象に，CNL 試験および CNS 試験と透水試験を組み合わせる事によってせん断透水同時試験を実施し，その透水特性を支配すると予想される基本的なパラメータ，すなわち，不連続面に作用するσ_v，垂直剛性 K_v，不連続面の表面凹凸形状および I が透水特性に与える影響について議論した。

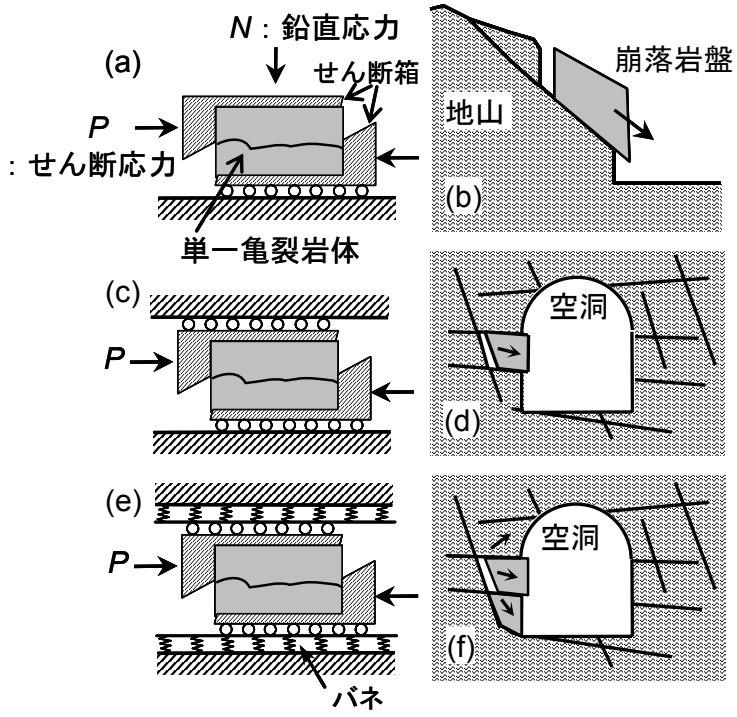


図 2.1.1　せん断様式の分類

（(a)(b)垂直応力一定試験，(c)(d)定体積試験，(e)(f)垂直剛性一定試験）

2.2　せん断透水同時試験の概要

2.2.1　供試体

本実験では，実在の岩盤不連続面をかたどったシリコンゴム型にセメントモルタル（配合比，セメント：ケイ砂 6 号：蒸留水=1:2:0.65）を流し込むことにより，底面から 60.0mm の位置に単一不連続面を有する直方体型の供試体（長さ 80.0mm×幅 120.0mm×高さ 120.0mm）を作製した。

作製した供試体の表面凹凸形状を，非接触型のレーザー変位計（スポット径 0.1mm，光源は 4.0μm の高分解機能を持った半導体レーザーを使用している）を用いたラフネス計測装置により，0.25mm 間隔の格子状での高低差を計測した。図 2.2.1 に本研究で用いた供試体の表面凹凸形状を示す。図の距離の数値は，レーザー変位計からの距離を表している。図中の *JRC* は，Tse and Cruden[12)]によって提案された不連続面の凹凸形状(ラフネス)を特徴づけるパラメータである *Z2* を用いて，Xianbin and Vayssade[13)]が提案した *Z2* と *JRC* との換算式に適用して算出したものである。供試体の詳しい作成方法やラフネス計測装置，ならびに計測方法については文献 14)に譲る。

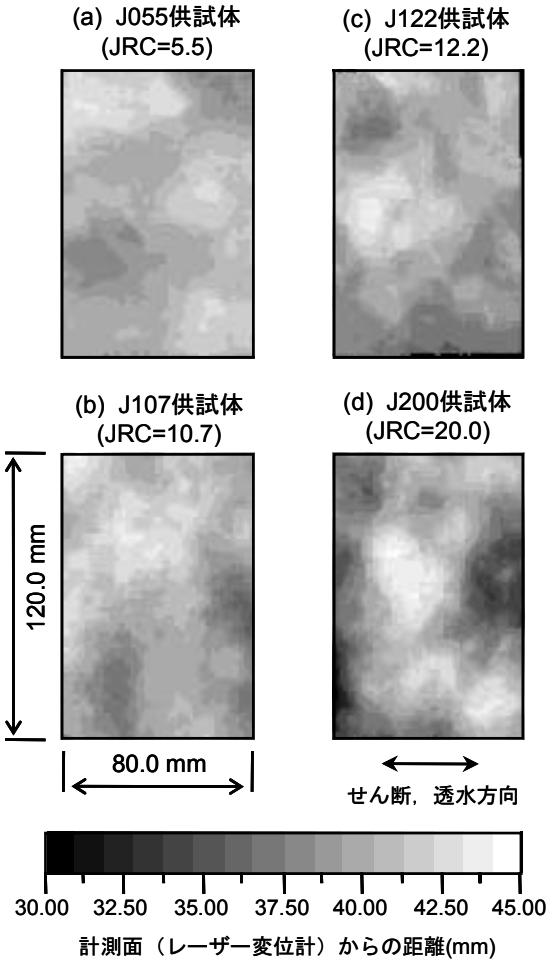


図 2.2.1　本研究で用いた供試体の亀裂表面形状

2.2.2　実験装置

本研究は不連続面のせん断時における透水特性の把握を目的としており，従来の一面せん断試験装置[14]に透水試験（定水位透水試験（Constant-head Permeability Test：以下 CPT 試験），変水位透水試験（Falling-head Permeability Test：以下 FPT 試験））を行うための透水機構および止水機構を組み込みで，さらにトレーサーの流入と計測が行えるように改良したものである。以下，一面せん断試験を行うための部分をせん断装置部，透水試験を行うための部分を透水機構部と呼ぶ。

(1) せん断装置部

せん断試験には一面せん断試験方式を採用した。これは一面せん断試験が，

① 装置が単純である，

② せん断面およびせん断方向が規定できる，

③ τ，σ_v，u および v を容易に制御計測できる，

といった特徴を有するからである。

図 2.2.2 にせん断装置部の概略を示す。本装置の特徴は，せん断箱がカセット式になっていることである。そのため，せん断箱は目的に応じて取り替えて使用でき，あらかじめ供試体を別の場所でセットして試験の直前にこれをせん断機へ装着することが可能である。本研究での透水試験およびトレーサー試験へ対応させるための改良は，このせん断箱を改良することによって行った。

この装置は，フィードバック機構を有する完全閉ループ方式の電気・油圧サーボシステムで，パソコンにより載荷がコントロールされている。したがって，せん断試験中の供試体の面積減少に伴い，σ_vを一定に保つように垂直荷重を減じるような文字どおりの垂直応力一定試験が可能である。計測，制御を迅速，かつ正確に行うためには，その計測，制御時間を出来る限り微小に設定することが望ましく，本装置の制御プログラムには，計測・制御システムを簡単に構築できる計測制御用グラフィカルプログラミングソフトウェア LABVIEW[15]を用いている。また A/D 変換器の分解能は 32Bit，D/A 変換器の分解能は 16Bit である。垂直剛性一定試験[6]のコントロールは LABVIEW を用いているので任意の垂直剛性下での実験が可能となっている。各検出量に対するモニタリングは試験中 CRT 画面上に逐次表示され，制御方法，変位速度，載荷速度および計測時等の計測，制御条件はキーボード上から行うことができ，制御信号は D/A 変換器を介してサーボ機構にフィードバックされる．一面せん断試験装置の詳細は文献 14)に譲る。

(2) 透水機構部

透水機構部は，カセット式せん断箱に止水機構を組み込むことで改良を加え，一面せん断試験装置に上流タンク，トレーサータンクおよび CPT 試験用下流タンク，FPT 試

験用下流端ビューレットを接続することによって透水機構を付加した構造となっている。これによって，σ_v およびτを作用させた亀裂内に一方向流を作り出した。せん断箱は図 2.2.3 に示すように，供試体の側面をゲルシート（図中⑤）と呼ばれる非常に軟らかく変形性にとんだポリマー材を用いて止水する構造となっている。また，亀裂の上下流部には，せん断変形に耐えられるよう形状を工夫した止水ゴム（図中④）を用いて貯留部を設けている。つまり，上流からせん断箱に流入した水は一旦上流端における貯留部に溜まった後，亀裂内を透水し，下流端における貯留部に溜まってから下流タンク，または下流端ビューレットへと流れていくという構造になっている。

図 2.2.4 に透水機構部の概略図を示す。本実験では前述したように CPT 試験においては上流タンク（図中②），またはトレーサータンク（図中⑧）と下流タンク（図中③）の水頭差を一定に保ち，また FPT 試験においては差圧計（図中⑫）によって上流タンク（図中⑨）と下流端ビューレット（図中⑩）の圧力差を計測することで不連続面に作用する水頭差を算出している。しかし，せん断箱（図中①）と上下流でのタンクなどを結ぶパイプの曲部や，パイプ中の所々に設けたバルブなど亀裂以外の透水部においても流速に応じた摩擦などの損失水頭が発生する可能性があるため，算出した水頭差が正しく不連続面に作用しているかを確認する必要がある。よって，本実験では差圧計（図中④）により上流端における貯留部と下流端における貯留部での透水圧力差Δpを計測し，供試体に作用する動水勾配 Iを算出している。Iは以下のように与えられる。

$$I = \frac{\Delta p}{\rho g \cdot (l - u)} \tag{1}$$

ここで，Δp : 透水圧力差，ρ : 水の密度，g : 重力加速度，l : 透水方向の供試体長さ，u : せん断変位である。

また，本実験では流体として蒸留水を用いているが，一般に流体はその温度によって粘性を異にするため，試験中は水温を 20℃に管理した。

ゲルシートと止水ゴムで構成される止水機構は高い止水性が要求されるとともに，その構造がせん断挙動に悪影響を及ばさない事が必要不可欠である。図 2.2.5 に止水機構がある場合と無い場合のせん断挙動を示す。この図から明らかなように，u とτ関係において，止水機構が有る場合は流量 Q を計測するため，せん断を停止させたために応力緩和が起きているものの，止水機構の有無にかかわらずそのせん断挙動はほぼ同一の経路をたどっていることから，止水機構の影響は十分に小さいと言え，本研究で得られたデータは十分信頼できるものと考えられる。

CPT 試験は図 2.2.4 に示すように，図中のバルブ A，B を開き，バルブ C，D，E を閉じる事によって実施できる。CPT 試験用下流タンク（図中③）における水面は，上流タンク（図中②）の水面との相対的な位置関係，すなわち水頭差 h を自由に設定でき

るようにその高さを自由に調整できる機構になっている。さらに，Qによって使い分ける大小 2 つの流量計（図中⑤，⑥）を用意し，下流タンクから水を越流させることによって片方のタンクに透水流を流し込み，差圧計（図中⑦）を用いて 2 つのタンクの水位差を計測することで流れ込む水の Qの計測を行った。

著者らはこれまでにも本試験装置による CPT 試験を行ってきたが [16]，Qが極端に少ない場合は下流タンク越流部での表面張力の影響により流量の計測が困難になること，また計測に要する時間もかなり長くなるなどの問題を生じていた。そのため本研究においては，FPT 試験を行うことが出来るように装置の改良をおこなった。FPT 試験は図中のバルブ D，E を開き，バルブ A、B，C を閉じる事によって実施できる。FPT 試験において水頭差 hは，差圧計（図中⑫）を用いて上流タンク（図中⑨）と下流ビューレット（図中⑩）の差圧を計測して算出する。FPT 試験における透水係数 k および透水量係数 Tは次式によって与えられる。

$$k = -\frac{l}{A}\left(\frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2}\right)\frac{\Delta \ln(h)}{\Delta t} \tag{2}$$

$$T = -\frac{l}{w}\left(\frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2}\right)\frac{\Delta \ln(h)}{\Delta t} \tag{3}$$

ここで，l: 透水方向の供試体長さ，A : 透水方向の断面積，w : 透水方向に垂直な方向の供試体長さ，a_1 : 上流タンクの断面積，a_2 : 下流ビューレットの断面積，h : 上流タンクと下流ビューレットの水頭差，t: 時間である。式(2)，(3)における$\Delta\ln(h)/\Delta t$は，以下のように求められる。まず，最小二乗法を用いて水頭差 h を計測時間 t の関数 $h(t)$とし，次式に示すように極限値として算出される。

$$\frac{\Delta \ln h(t)}{\Delta t} = \lim \frac{\ln h(t_2) - \ln h(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\partial \ln h(t)}{\partial t} = \frac{h'(t)}{h(t)} \tag{4}$$

FPT 試験における kおよび Tは CPT 試験におけるそれと同等の値を持たなければならない。図 2.2.6 は，長さ 80.0mm×幅 120.0mm×高さ 120.0mm の直方体のアクリルに，直径 0.5mm の管路（断面積は 0.196mm^2）を開けたものを用いて透水試験を実施した結果である。この図より，両試験から求められた kは低動水勾配で両者の比が最大 1.6 倍程度となっているが，極めて近い値を示している。よって，本研究で開発した試験装置を用いて観測される透水特性は十分に信頼できるものと考えられる。

流体の流れは，限界レイノルズ数 R_eを境界として層流と乱流の 2 種類に分かれる事が知られているが [17]，流体の透水特性の評価に用いられるダルシー則や三乗則などは層流であることが前提とされている。対象とする流れが層流であるか乱流であるかを議

論することは，ダルシー則や三乗則を適用することが可能かどうかを確かめる上で非常に重要である。そこで，不連続面の透水特性を論じる前にレイノルズ数 R_e と摩擦損失係数 f_r の関係を整理し，対象とする流れが層流であるか乱流であるかを確認した。R_e および f_r は次式で表される[18]。

$$R_e = \frac{2b_h V}{\nu} = \frac{2Q}{\nu w}\left(\because V = \frac{Q}{b_h w}\right) \tag{5}$$

$$f_r = \frac{4gb_h I}{V^2} = \frac{4gb_h{}^3 w^2 I}{Q^2} \tag{6}$$

ここに，b_h：水理学的開口幅，I：動水勾配，Q：流量，V：割れ目内平均流速，w：透水方向に垂直な方向の供試体長さ，ν：流体の動粘性係数，g：重力加速度である。

ここで，b_h とは不連続面間の流れを Poiseuille flow（平行平板間一次元流れ）とした場合に，V と I の間に成立する次式の関係（層流時）を満たす開口幅として定義される[18]。

$$V = \frac{Q}{b_h w} = \frac{gb_h{}^2}{12\nu} I \tag{7}$$

$$\therefore b_h = \sqrt[3]{\frac{12\nu Q}{gwI}} \tag{8}$$

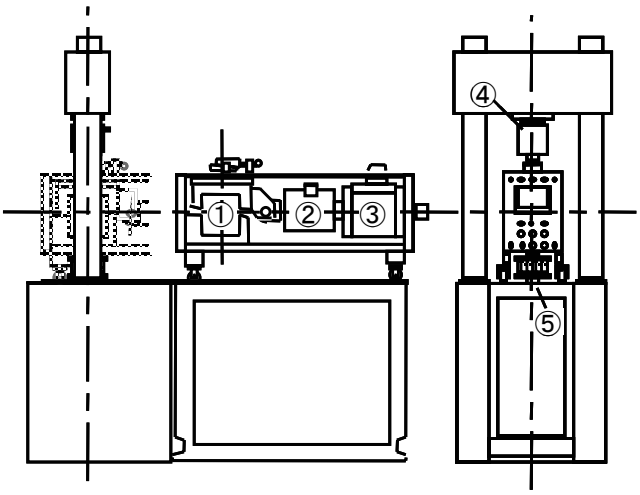
式(5)，(6)により，後述する供試体を用いた実験結果から R_e と f_r の関係について整理した結果を，図 2.2.7(a)には JRC が 5.5，10.7，20.0 の不連続面に対して I が 12.5 の時の流れについて，図 2.2.7 (b)には JRC が 10.7 で I を 6 通りに変化させた時の流れについて示す。なお，図中に示した直線は，式(5)～(8)より導かれた次式に示される平行平板層流流れにおける R_e と f_r 関係の理論曲線である。

$$f_r = \frac{96}{R_e} \tag{9}$$

ここで実験から得られた R_e と f_r が，式(9)の理論曲線上に乗っている範囲が層流であり，その曲線から乖離している範囲が乱流である。表面に凹凸形状をもつ不連続面内の流れでは，平行平板において一般的な値とされる限界レイノルズ数（2000 程度[19]）に比べてかなり低い R_e（岩石の種類，不連続面の表面凹凸形状等によって異なるものの，おおよそ 200～1000 以上）で乱流に遷移することが確認されている[20]。しかし，本研

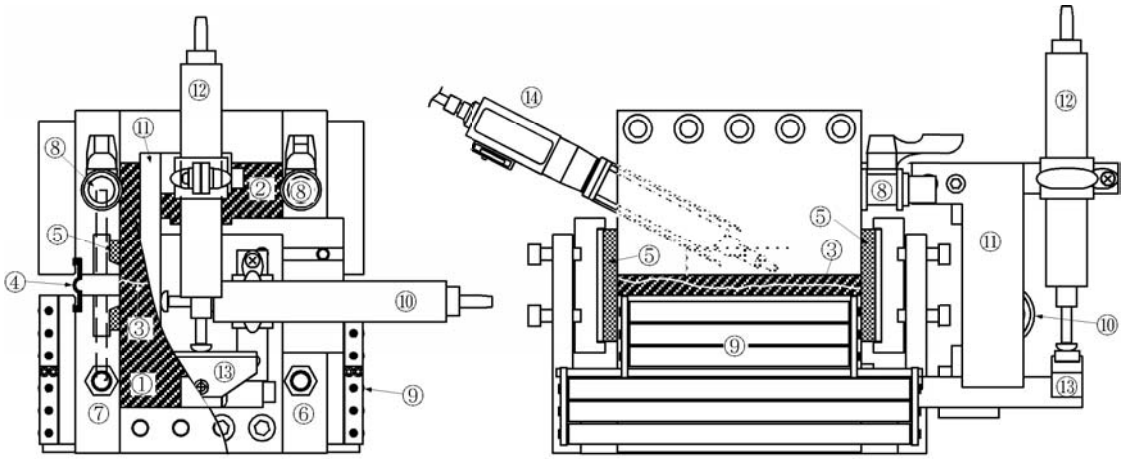
究で得られた結果は図 2.2.7 に示す通り，R_e と f_r が式(9)の理論曲線上に存在し，本研究で行った実験の範囲の流れはすべて層流であることが確認できる。

本装置においては，透水試験中の亀裂内物質移行速度を計測することを目的に，これまでの試験装置へ新たにトレーサー試験（Tracer Test : 以下 TT 試験）を行える機構を加えるという改良も行っている。本試験装置への改良は，透水試験のための機構へ図 2.2.4 で示したトレーサータンク（図中⑧）を接続し，図 2.2.3 に示すように，上下流端の貯留部へセンサーヘッドがくるようせん断箱へ電気伝導率セル（図中⑭）を上下流端にそれぞれ 1 本ずつ設置し，さらにせん断箱と電気伝導率セルの間隙をゴムによって止水することによって行っている。すなわち，本 TT 試験においてはトレーサーに電解質の流体を用い，亀裂内の流体が置換されていく際の流体の電気伝導率 R を計測することによってトレーサーの流出濃度を計測する構造となっている。なお，本電気伝導率セルは，測定範囲が 0.1mS/m～10.0S/m，計測精度が 0.1mS/m であり，センサー部に白金黒電極を使用したもので，交流 2 電極法によって電気伝導率の検出を行うものである。トレーサーとしては，電気伝導率が約 9.5S/m の食塩水を用い，上流端での貯留部と下流端での貯留部における食塩水の濃度時間変化を計測する構造となっている。



①せん断箱設置位置　④ロードセル（垂直方向）
②ロードセル（水平方向）　⑤垂直荷重載荷装置
③水平荷重載荷装置

図 2.2.2　一面せん断試験器の概念図



①：供試体（下部）
②：供試体（上部）
③：不連続面
④：止水ゴム
⑤：ゲルシート
⑥：注入孔
⑦：排出孔
⑧：透水圧測定孔
⑨：ベアリング
⑩：変位計（水平）
⑪：ターゲット（水平）
⑫：変位計（垂直）
⑬：ターゲット（垂直）
⑭：電気伝導率セル

図 2.2.3　せん断箱

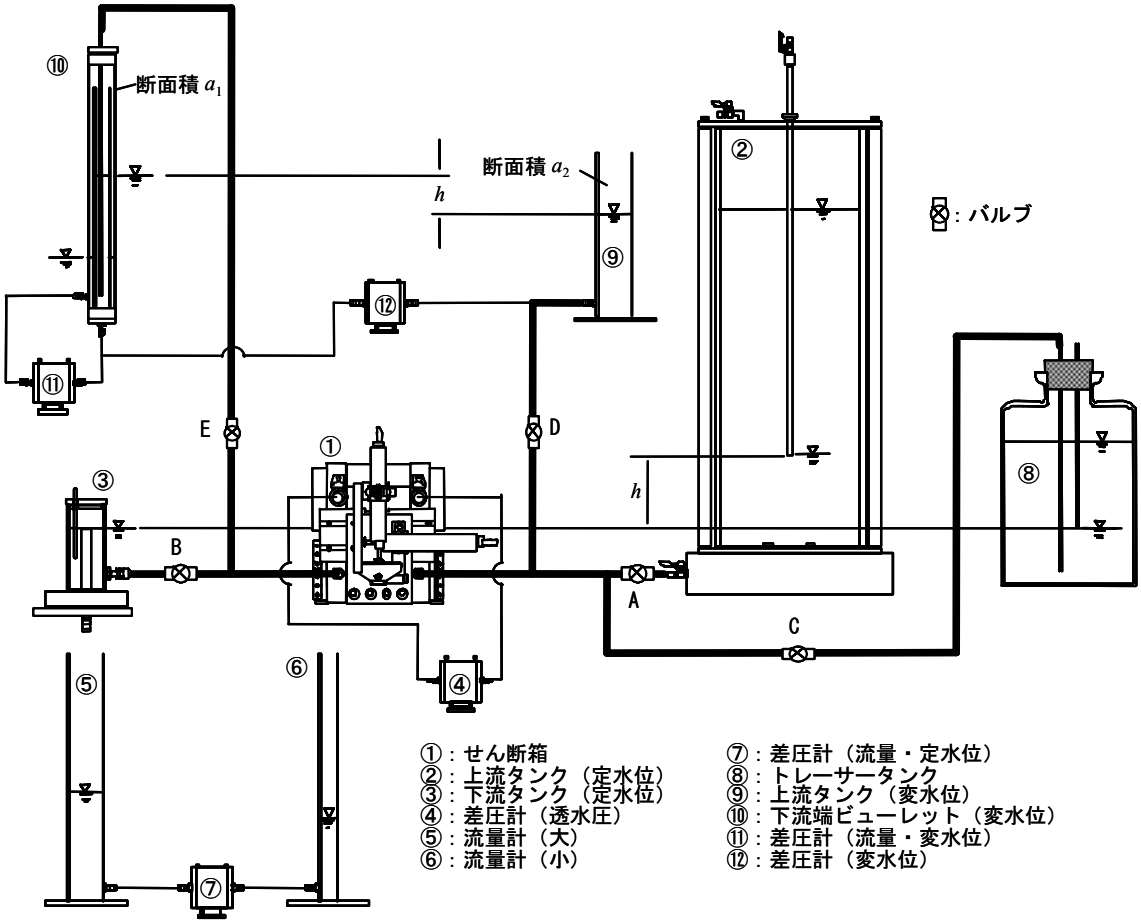


図 2.2.4　透水機構部の概略

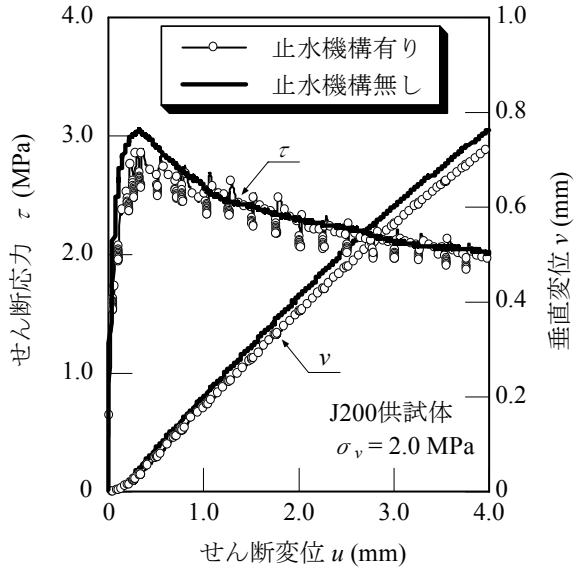


図 2.2.5　止水機構の影響

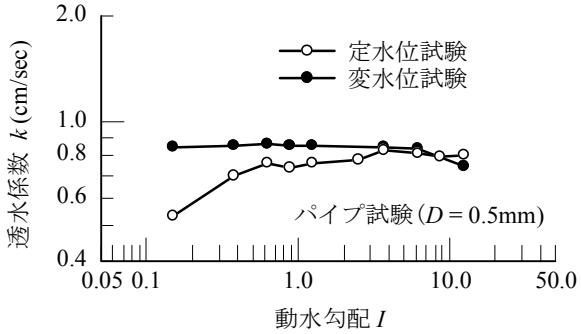


図 2.2.6　定水位試験結果と変水位試験結果の比較

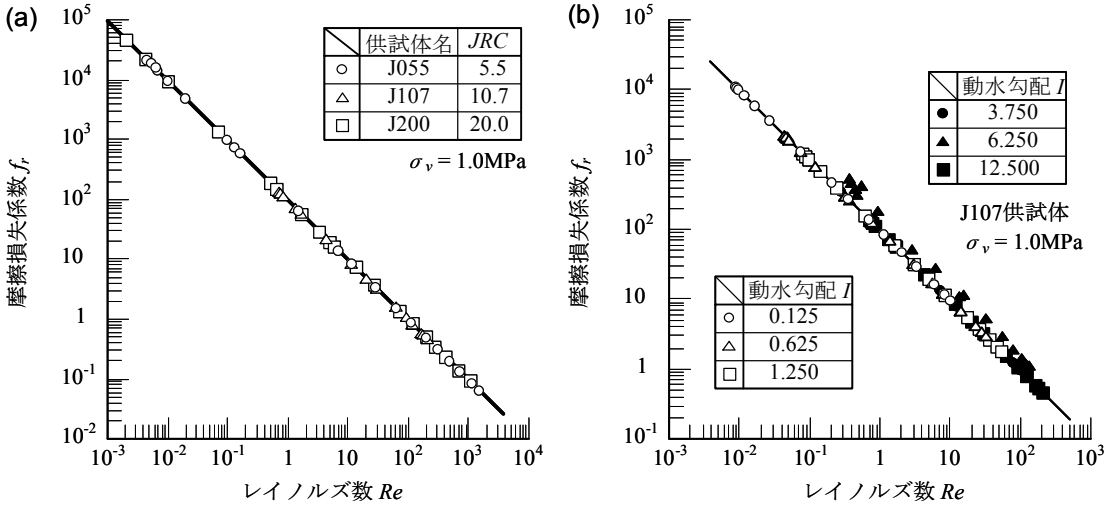


図 2.2.7　限界レイノルズ数 R_e と摩擦損失係数 f_r の関係

（(a)JRC の影響，(b)動水勾配 I の影響）

2.2.3　実験方法および実験条件

前述したように，本装置で実施できる力学試験は垂直応力一定試験，垂直剛性一定試験および剛性試験であり，透水試験は CPT 試験と FPT 試験である。力学試験と透水試験を組み合わせることで，表 2.2.1 に示す試験が可能である。

(1) 実験方法

せん断透水同時試験はせん断変位制御で行い，せん断速度 0.1mm/min でせん断を行う。また透水試験は所定の u でせん断を一時停止して定常状態での計測を行い，透水試験終了後，再度せん断を開始し，所定の u でせん断を停止させ透水試験を行うという操作を u が 3.0mm になるまで繰り返した。なお，せん断を行う前には，不連続面の表面凹凸を壊さない程度のσ_v（0.25MPa から 1.0MPa/min で最大 4.0MPa まで）での載荷・除荷（剛性試験）を 3 回繰り返した。この試験は，本来不連続面の垂直剛性 k_n[21]を求めるための室内試験であるが，本論文では不連続面の噛み合わせを良くすることで，初期状態を各実験で同等にするため，そして，後述する初期開口幅 b_0 を計算するために行ったものである。

(2) 実験条件

(a) 実験ケース 1

不連続面の表面凹凸形状が透水特性に与える影響を調べるため，異なる表面凹凸形状を持つ供試体を 3 種類用意した。それぞれ J055，J107，J200 供試体とし，それらの供試体の JRC は 5.5，10.7，20.0 である。これらの供試体に対し，CNL 試験に関しては動水勾配 I を 12.5 に保ち，不連続面に作用するσ_vを 1.0MPa に設定して CPT/SCL 試験および CPT/CL 試験を行った。CNS 試験に関しては動水勾配 I を 12.5 に保ち，不連続面に作用する初期垂直応力σ_{v0} を 1.0MPa，垂直剛性 K_v を 1.0GPa/m に設定して FPT/SCS 試験および FPT/CL 試験を行った。

(b) 実験ケース 2

CNL 試験に関しては，不連続面に作用するσ_vが不連続面の透水特性に与える影響を調べるため，同じ表面凹凸形状を持つ供試体（J127 供試体：JRC=12.7）を用いて，I を 12.5 に保ち，σ_vを 0.5，1.0，2.0MPa と変化させて CPT/SCL 試験を行った。

(c) 実験ケース 3

次に CNS 試験に関しては，K_vが不連続面の透水特性に与える影響を調べるため，同じ表面凹凸形状を持つ供試体（J055 供試体：JRC=5.5）を用いて，Iを 12.5，σ_{v0}を 1.0MPa に保ち，K_vを 10.0，30.0，50.0GPa/m と変化させて FPT/SCS 試験を行った。なお，σ_v，σ_{v0}，K_v，Iに上記のような値を用いたのは，本実験はせん断時における不連続面の

透水特性にそれらのパラメータがどのような影響を与えるのかを評価することを目的としていることからであり，実際のプロジェクトにおける原位置での値を表しているわけではない。

(d) 実験ケース 4

さらに，原位置レベルのσ_vやIが不連続面内の流れに与える影響を調べるため，以下に示す 2 種類の実験を行った。まず始めに垂直応力一定下における透水特性を求めるため，J200 供試体（JRC≒20.0）に対して，Iを 0.01 から 1.00，σ_vを 0.1，10.0，20.0MPa と変化させて FPT/CL 試験を行った。その後，せん断過程における透水特性に及ぼすIの影響を調べるため，同じ表面凹凸形状を持つ供試体(J107 供試体：JRC≒10.7)を用いて，σ_vを 1.0MPa に保ち，FPT/SCL 試験を行った。

表 2.2.1　試験方法とその略称

力学試験	透水試験	
	定水位試験 (Constant-head Permiability Test)	定水位試験 (Falling-head Permiability Test)
垂直応力一定せん断試験 (Shear Deformation Under Constant Normal Load)	CPT/SCL	FPT/SCL
垂直剛性一定せん断試験 (Shear Deformation Under Constant Normal Stiffness)	CPT/SCS	FPT/SCS
垂直応力一定試験 (Constant Normal Load)	CPT/CL	FPT/CL

2.3 実験結果および考察

岩盤不連続面の透水特性を表す際に，不連続面内の流れが Darcy 則に従うとすると，一般に透水量係数 T が用いられる [22]。T は次式で表される。

$$T = \frac{Q}{Iw} \tag{10}$$

ここで，Q : 単位時間あたりの流量，I : 動水勾配，w : 透水幅である。

T は，岩盤不連続面の開口幅分布を算定する明確な方法が確立されていないといった問題点から，k に開口幅を乗じた指標となっている。本実験においても，T を用いて透水特性の評価を行う。

また本研究において，開口幅の評価は以下のように行った。実験で得られる v は，試験の開始時にその値をリセット（v=0.0mm）している。しかし，実際にはこの時，不連続面はいくらか開口している可能性があり，不連続面の平均的な開口幅を求める際には，実験開始時で不連続面がどれだけ開口しているか（初期開口幅 b_0）を考慮する必要がある。そこでここでは，実験で得られた v に b_0 を加えたものを不連続面の平均的な開口幅と考え，これを力学的開口幅 b_m と定義する。

$$b_m = v + b_0 \tag{11}$$

また，上記の b_0 は，Bandis ら [23] や Barton ら [24] の方法を用いた。すなわち，図 2.3.1 に示すように，剛性試験と供試体のインタクト部の v と σ_v 関係の差から不連続面だけに関係する v と σ_v 関係を求め，次式に示す双曲線で近似することにより決定した。

$$\sigma_v = \alpha + \frac{\beta}{v + V_m} \tag{12}$$

ここで，α，β は双曲線近似から求まるパラメータであり，σ_v は垂直応力，v は垂直変位，V_m は最大閉塞量である。V_m とは，これ以上応力をかけても開口幅分布に変化がないと考えられる変位量である。V_m は式(12)より式(13)のように与えられ，実験開始時の b_0 は式(13)より式(14)のように与えられる。

$$V_m = \frac{\beta}{\sigma_v - \alpha} - v \tag{13}$$

$$b_0 = V_m - v_i \tag{14}$$

ここに，v_iは任意の垂直荷重における垂直変位である。図 2.3.2 に v～σ_v関係を示す。図 2.3.2(a)に示すように，載荷・除荷を 3 回程度繰り返すとほぼ同一の経路を示し，不連続面のかみ合わせがよくなったと考えられる。よって，図 2.3.2(b)に示すように，3 回目の経路を用いて双曲線近似することにより V_mや b_0を求めることができる。

次に，不連続面を滑らかな平行平板としてモデル化し，かつその流れが層流と仮定した，流れの基礎式である三乗則について述べる。三乗則は“不連続面の平均流量は開口幅の三乗に比例する”というものであり，以下に示す 3 つの仮定を用いることで Navier-Stokes の運動方程式から導出され[25),26)]，式(15)，(16)のように定式化される。

① 流れは定常であり，ハーゲン・ポアズイユ流である。
② 平板に水平な方向の流速に比べて，平板に垂直な方向の流速が無視できる。
③ 板に平行な方向の速度変化が，平板に垂直な方向の速度変化に比べて無視できるほど小さい。

$$\frac{Q}{\Delta H} = C \cdot b^3 \tag{15}$$

$$C = \frac{g}{12\nu} \cdot \frac{w}{l} \tag{16}$$

ここで，Q : 流量，ΔH : 水頭差，b : 開口幅，g : 重力加速度，ν : 透水する流体の動粘性係数，w : 透水方向に垂直な方向の供試体長さ，l : 透水方向の供試体長さである。

三乗則の適用性に関する研究はこれまで数多く行われてきた。Witherspoon ら[7)]は，滑らかな不連続面の場合には，開口幅 4.0～250.0nm の範囲においては三乗則が成立すること，そして，三乗則の適用性に関しては，母岩の種類には影響されず，垂直拘束圧の載荷経路にも依存しないことを示し，また，ラフネスを有する不連続面の透水性に関しては，4.0～40.0%程度の Q の減少を確認した。さらに，平行平板を仮定した三乗則からの乖離を表す抵抗係数 f_cを用いて，岩盤の表面凹凸形状による影響を考慮した次のような修正三乗則を提案している。

$$Q = \frac{1}{f_c} \frac{g}{12\nu} wIb^3 \tag{17}$$

ここで，f_c とは，平行平板を仮定して導かれた三乗則において，不連続面内の流れがいかにその面の凹凸形状に影響を受けているかを示すものである。f_c が 1 に近い方が，その流れが不連続面からうける影響が少なく，平行平板間の流れに比べて Q の減少が少ないと言える。本研究では不連続面の流れについて，b_m を用いて三乗則を議論する際には上式(17)の修正三乗則を用いるものとする。

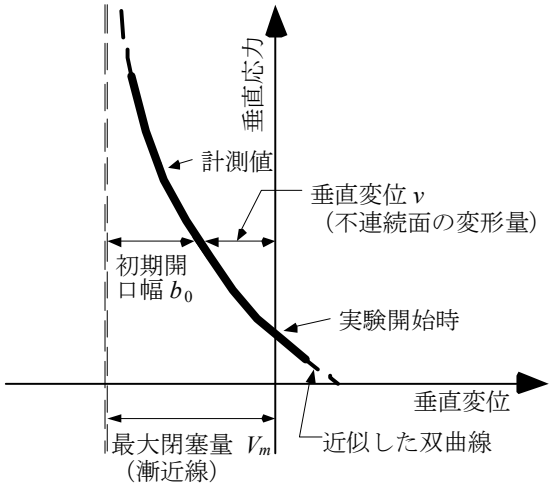


図 2.3.1　最大閉塞 V_m と初期開口幅 b_0 の関係

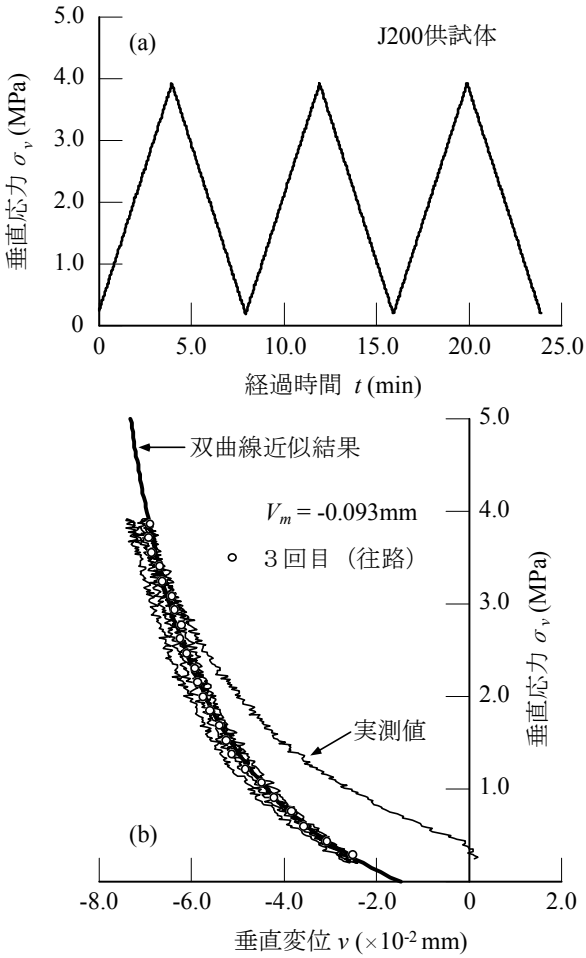


図 2.3.2　剛性試験結果（(a)t～ σ_v の関係，(b)v～ σ_v の関係）

2.3.1　不連続面の表面凹凸形状が力学・透水特性に与える影響［実験ケース 1］

(1) CNL 試験結果

不連続面内の表面凹凸形状は透水特性に大きな影響を与える。そこで，3 種類の異なる表面凹凸形状（JRC≒5.5，10.7，20.0）をもつ供試体について，σ_vが 1.0MPa，Iを 12.5 で CNL（CPT/SCL）試験を行った。図 2.3.3 にその実験結果を示す。なお，せん断過程において不連続面が削られることによりガウジの発生が予測されるが，それが透水特性に及ぼす影響は未知であり，本論文においてはその影響を考慮しない。

せん断変位 u とせん断応力τ，そして力学的開口幅 b_mの関係を図 2.3.3(a)に示す。力学的な現象として，JRC が大きいほどピークせん断応力τ_p が大きくなっており，また力学的開口幅も大きくなっていることがわかる。

次に透水特性について述べる。図 2.3.3(c)に示す u と Tにおいては，図 2.3.3(b)に示す比例限界点に相当するせん断変位 u_lで Tは急激に増加し，τ_pを迎えるせん断変位 u_p以降は両対数軸でほぼ直線的な挙動をしていることがわかる。このように u_l で透水特性が急激に変化する原因としては，せん断初期，すなわち b_mの小さい領域では上下供試体が接触している部分が多いために局所的な流れ，いわゆるチャンネリング現象が起きていると考えられる。せん断が進行すると，b_m の増加と共に接触領域が減少し，チャンネリング現象が解消され，一様な流れに移行するためと推察される。

図 2.3.3(d)に b_mと Tの関係を示し，図 2.3.3(e)に同じ b_mにおける JRCと Tの関係を示す。表面形状の異なる 3 種類の不連続面ともに，b_mが大きくなるほど Tは大きくなっている。しかし，図 2.3.3(e)に示すように表面凹凸形状が異なる不連続面で比べると，同じ b_mであっても Tの値は大きく異なっていることが分かる。このことから，平均的な開口幅である b_mでは，異なる表面凹凸形状を持つ供試体の透水特性を絶対的に評価することは不可能である。この理由として考えられるのは不連続面内の空隙構造の違いである。ここで，各供試体の不連続面に対し，同じ b_mにおける開口幅のヒストグラムと分布の一例を図 2.3.4 に示し，各供試体の開口幅の平均値，分散および接触率 CRを図 2.3.5 に示す。なお，CR とは供試体の面積に対して上下供試体が接している面積の割合であり，楠見ら[27]によって以下のように与えられている。

$$CR = \frac{N_{CR}}{N} \times 100 \tag{18}$$

ここで，N_{CR}は接触点数あり，Nは全計測点数である。また，これらの値は不連続面の表面形状の標高分布から算出したものであり，平均値および分散は開口している部分のみのデータを用いて算出してある。これらの図から明らかなように，開口幅の平均値や分散からは b_m が同じでも表面凹凸形状の違いにより不連続面内の空隙構造が，CRからは接触状況が大きく変わることが分かる。よって，不連続面内の空隙構造や接触状

況は透水特性に大きな影響を与えることが予想され，この空隙内部の開口幅分布の違いが，b_mが同じ状態であっても各供試体でTが違ってくる原因ではないかと推察される。

図 2.3.3(f)にτと正規化透水量係数 T'の関係を示す。ここで，T'は各不連続面の Tのオーダー的な変化量を捉えるために，各せん断変位の Tをせん断変位がゼロの Tで除したものである。この図からは，JRC が大きくなるほどせん断強度がピークを迎えるまでの Tの変化が大きくなる事が読み取れる。JRCが異なる場合，u_pの平均は約 0.25mm であまり変わらないので，JRC が大きいほど，つまりラフネスが粗いほど，せん断に伴う Tの増加量が大きくなることがわかる。これは図 2.3.3(a)に示したように，表面形状が粗いほど，せん断による力学的開口幅が大きくなることに起因していると推測される。

次に，不連続面内のミクロ構造がマクロな透水特性にどのような影響を与えるのかを述べる。ここでは前述した三乗則の成立に関して，不連続面内のミクロな構造を全く考慮していない平均的な開口幅である b_mを用いて，どこまで三乗則が適用できるのかについて考察を行う。不連続面内に存在するミクロな構造による影響が考慮されない b_mを用いて三乗則が適用されることが確認されれば，その範囲では透水特性がミクロな構造に大きな影響をうけていないことが確認できる。図 2.3.6 に b_mと Tの関係を示す。なお，図 2.3.6 には CPT/CL 試験結果，すなわちσ_vを 1.0，1.5，2.0，4.0MPa と変化させて透水試験を行った結果（図中黒印）も示してある。この図からは b_mが大きい範囲では，全ての供試体で Tが b_mの三乗に比例しており，式(17)に示す修正三乗則が適応できることがわかる。しかし，b_m が小さくなればなるほど三乗則から大きく乖離していることが確認でき，三乗則の成立する境界は図 2.3.3(b)に示す u_lであることがわかる。

三乗則から大きく乖離している原因はトレーサー試験からも確認できる。本研究では，亀裂に対するトレーサー試験に先立って，直径 4.0mm の円形孔（長さ 80.0mm）を有するアクリル製供試体に対してトレーサー試験を実施した。このアクリル製供試体においては，透水，物質移行がおこる空隙構造は透水方向に対して一様な形状となっている。この結果と，直径 4.0mm の円形孔と同じ透水断面積を有する複雑な空隙構造を有する不連続面に対して行ったトレーサー試験結果を比較した。その結果，図 2.3.7 に示すように，パイプモデルにおいて下流と上流の t～R 関係はほぼ平行になっており，ハーゲン・ポアズイユ流れになっているものの，不連続面，すなわち壁面形状が複雑な亀裂中の物質移行では，ブレイクスルーカーブに時間的な遅れが確認できる。これは Piggot ら [28]が指摘しているように，亀裂内では複雑な空隙の構造に影響されて亀裂中では物質が局所的に移行される，つまり選択的な流れが生じていることが推察される。

各々の uに対する電気伝導率の時間変化を図 2.3.8 に示す。これらの図からもせん断初期にブレイクスルーカーブに時間的な遅れが確認でき，せん断の進行とともに時間的な遅れが少なくなってきていることが確認できる。よって，u_lで透水特性が急激に変化

する原因としては, 前述したようにチャンネリング現象が大きく影響していると推測できる。

三乗則が成立する範囲において，式(17)における f_c がどのように変化するかを調べた結果を図 2.3.9 に示す。全ての供試体で u の増加に伴い f_c が減少していく様子が確認される。また，図 2.3.10 に示す JRC と f_c 関係から，JRC が大きい，すなわち表面凹凸形状が粗いほうが f_c も大きいことが分かる。よって，不連続面の流れはせん断が進み，開口幅が大きくなるにしたがって，JRC が小さい，すなわち表面凹凸形状が滑らかな方が不連続面内の複雑な空隙形状の影響を受けにくいことがわかる。

(2) CNS 試験結果

ここでは CNS 試験結果について述べる。そこで，3 種類の異なる表面凹凸形状（JRC=5.5, 10.7, 20.0）をもつ供試体について，σ_{v0} が 1.0MPa, K_v が 10000.0MPa/m, 動水勾配 I が 12.5 の下で FPT/SCS 試験を行った。透水特性を述べる前に CNS 試験の力学特性を簡単に述べる。岩盤不連続面のせん断挙動が Mohr-Coulomb の破壊規準にしたがうと仮定すると，その関係式は次式のように表される。

$$\tau = c + \sigma_v \tan\phi \tag{19}$$

ここに，τはせん断強度，σ_vは垂直応力であり，cは見かけの粘着力，ϕは内部摩擦角である。図 2.3.11 は Mohr-Coulomb の破壊規準と CNS 試験のσ_v～τ関係を模式的に示したものである。図 2.3.11(a)に示す破壊規準を，応力比η (=τ/σ_v)を用いて変換すると，図 2.3.11(b)に示すようにその関係は次式のように双曲線となる。

$$\eta = \frac{c}{\sigma_v} + \tan\phi \tag{20}$$

よって，図 2.3.11(b)に示すように計測値をσ_v～ηの関係で表し，そこから双曲線となっている BC 区間を取り出す事ができれば双曲線の曲率と漸近線から c, ϕの値を推定できる。この変換により，応力経路が破壊線に達したところ，すなわち，ηの最大値η_pが図中 B 点で表され，C 点は限界垂直応力σ_{vc}と限界せん断応力τ_{pc}で規定できるので，BC 区間は客観的に見定めることが可能である。なお，σ_{vc}，τ_{pc} とは応力経路が Mohr-Coulomb の破壊規準上を移動できる最大の応力であり，その求め方などは参考文献 4)に詳述してある。

図 2.3.12 に CNS(FPT/SCS)試験における力学挙動を示す。図 2.3.12(a)，(b)からは力学的な特徴として，JRC が大きいほどτが大きくなっており，また垂直変位も大きくなっていることがわかる。また，図 2.3.12(c)，(d)は式(20)を適用した結果であり，図

2.3.12(c)からは上記の双曲線による近似法の適用性が確認でき，図 2.3.12(d)の応力経路からはMohr-Coulombの破壊規準を良く表現していることが，さらにJRCが大きいほどcやϕは大きくなっていることがわかる。

図 2.3.13 に CNS(FPT/SCS)試験における透水特性を示す。これらの図からは CNS 試験においても CNL 試験と同じような透水特性を有することがわかる。特に，図 2.3.13(a)に示す u と Tにおいては，図 2.3.13(b)に示す比例限界点に相当するせん断変位 u_l付近で Tは急激に増加し，η_p以降は両対数軸でほぼ直線的な挙動をしている。この結果を CNL 試験と対比すると，τ_pとη_pは共に Mohr-Coulomb の破壊線に到達する点であるので，u～Tに関係における透水特性はMohr-Coulombの破壊線に到達する前後で大きく異なることがわかる。

次に，三乗則の適用性について述べる。図 2.3.14 に b_mと Tの関係を示す．なお，図には FPT/CL 試験結果，すなわちσ_vを 1.0，2.0，4.0，8.0，16.0MPa と変化させて透水試験を行った結果（図中黒印）も示してある。この図からは b_mが小さくなればなるほど三乗則から大きく乖離していることが確認でき，u_l付近で Tは急激に増加していることがわかる。したがって，式(17)に示す修正三乗則が適応できる境界は CNL 試験と同様に図 2.3.12(b)に示す u_lであることがわかる。このことから，岩盤不連続面の透水特性は試験方法，すなわち垂直方向の拘束条件を問わず同じような特性を有することがわかる。

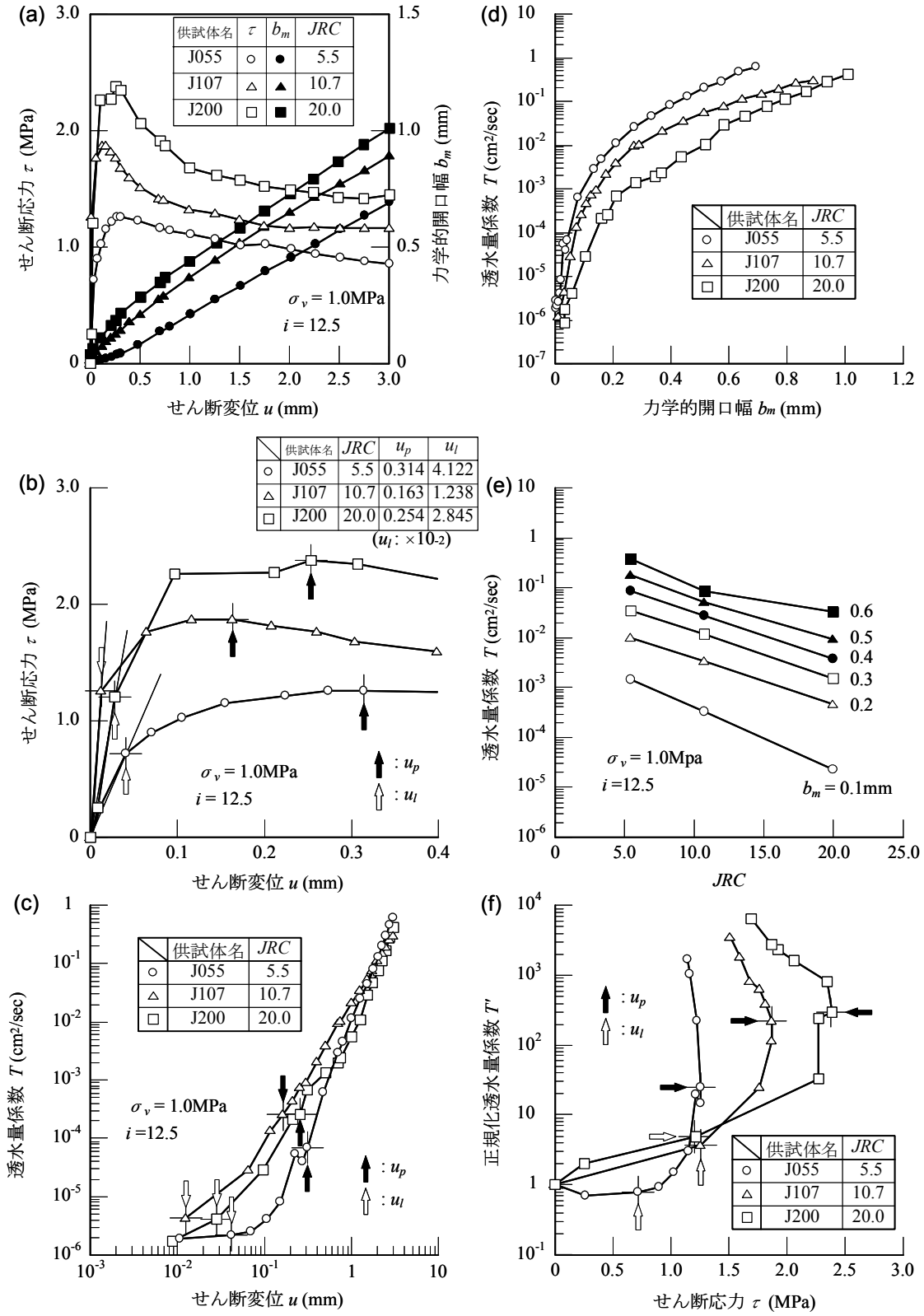


図 2.3.3　CNL（CPT/SCL）試験結果（JRC の影響，(a)u～τ ,b_m 関係，(b)u～τ 関係，(c)u～T 関係，(d)b_m～T 関係，(e)JRC～T 関係，(f) τ ～T' 関係）

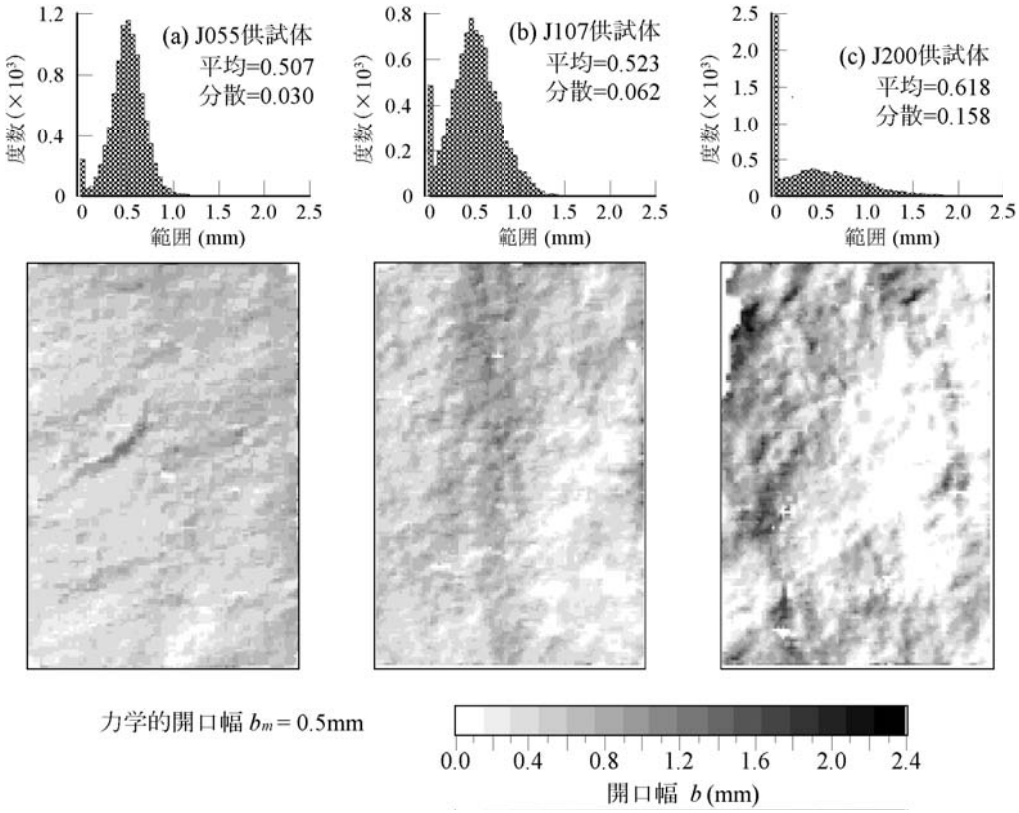


図 2.3.4　不連続面内の開口幅のヒストグラムとその分布状況（b_m=0.5mm）

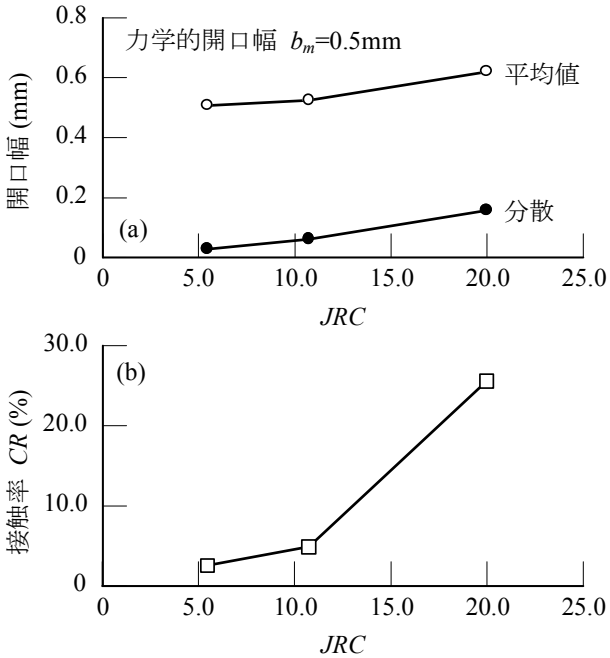


図 2.3.5　(a)*JRC* と開口幅の平均値，(b)分散および接触率 *CR* の関係

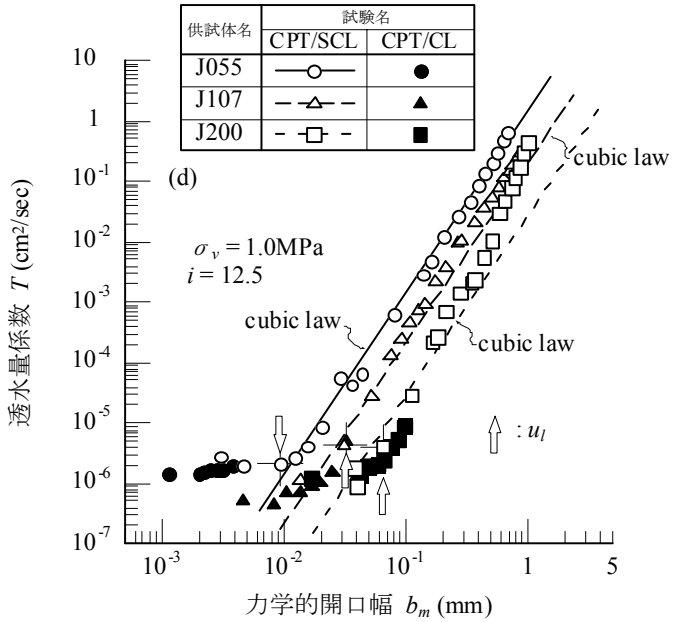


図 2.3.6　CNL（CPT/SCL）試験結果（JRC の影響，b_m～T 関係）

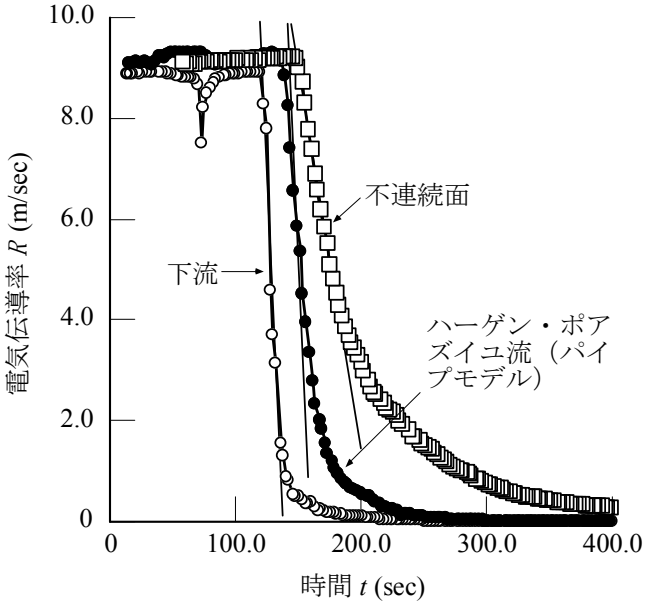


図 2.3.7　トレーサー試験結果（t～R 関係）

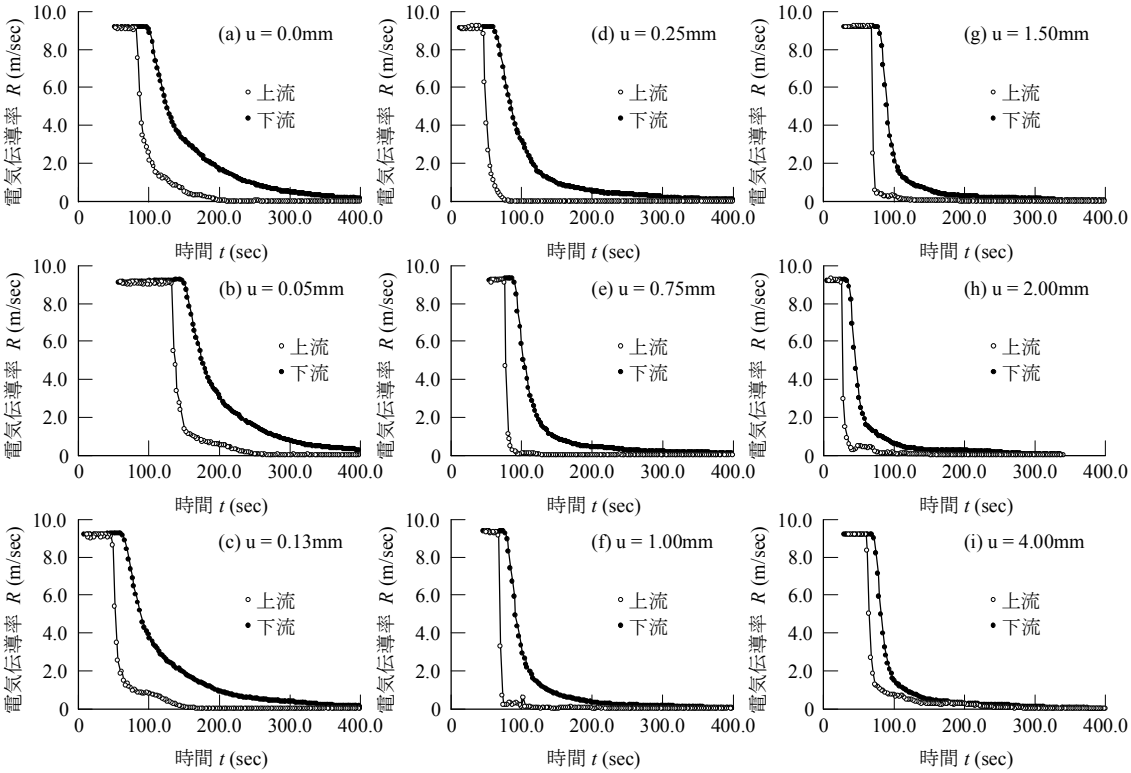


図 2.3.8　各せん断変位 u における計測時間 t と電気伝導率 R の関係

（(a)u=0.00mm，(b)u=0.05mm，(c)u=0.13mm，(d)u=0.25mm，(e)u=0.75mm，(f)u=1.00mm，(g)u=1.50mm，(h)u=2.00mm，(i)u=4.00mm）

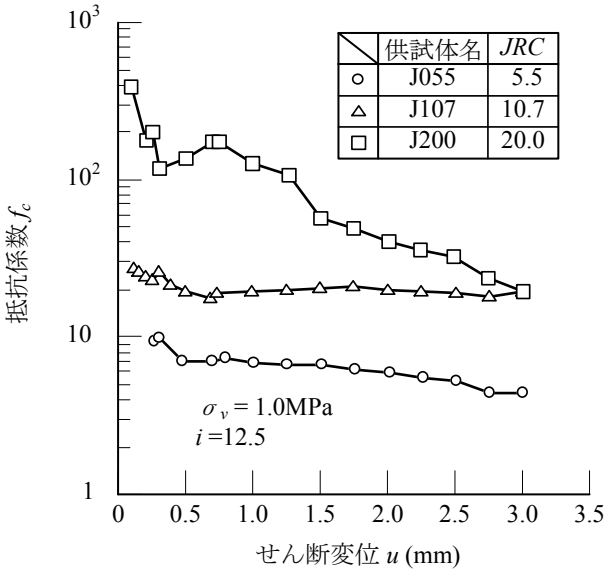


図 2.3.9　せん断変位 u と抵抗係数 f_c の関係

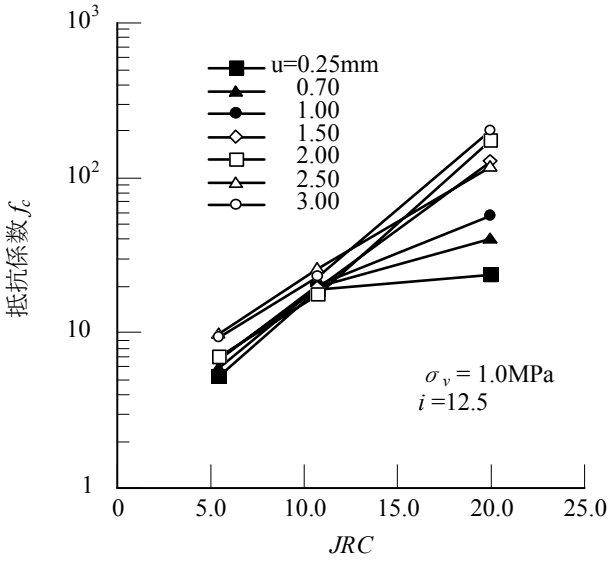


図 2.3.10　*JRC* と抵抗係数 f_c の関係

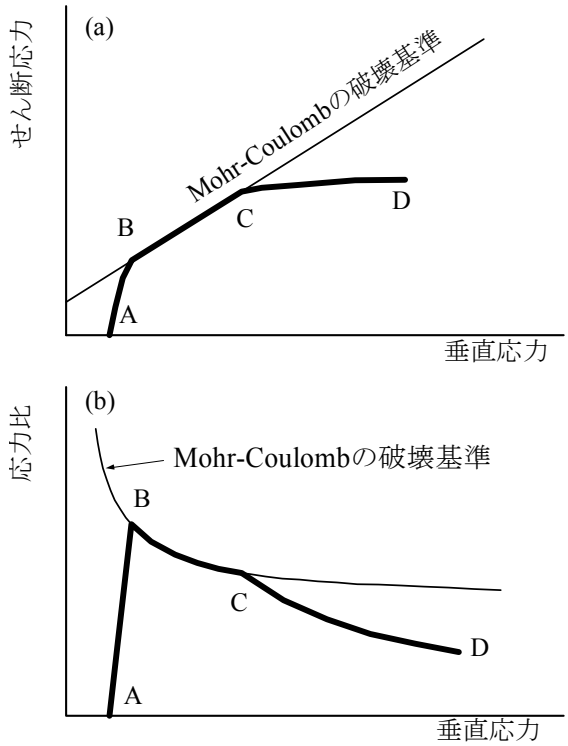


図 2.3.11　Mohr-Coulomb の破壊基準と応力経路の模式図

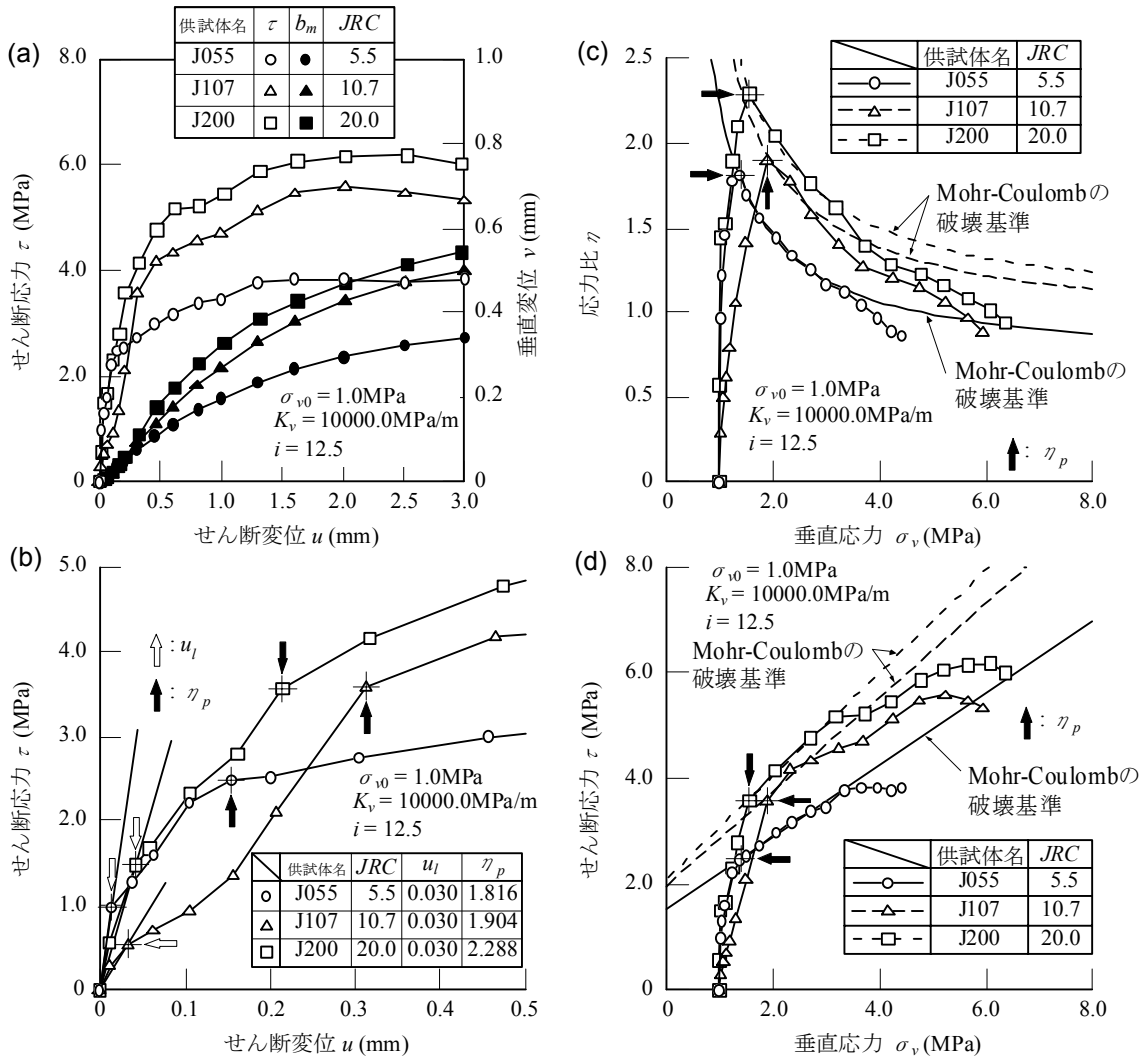


図 2.3.12　CNS（FPT/SCS）試験結果

（JRC の影響，(a)u～τ ,v 関係，(b)u～τ 関係，(c)σ_v～η関係，(d)σ_v～τ 関係）

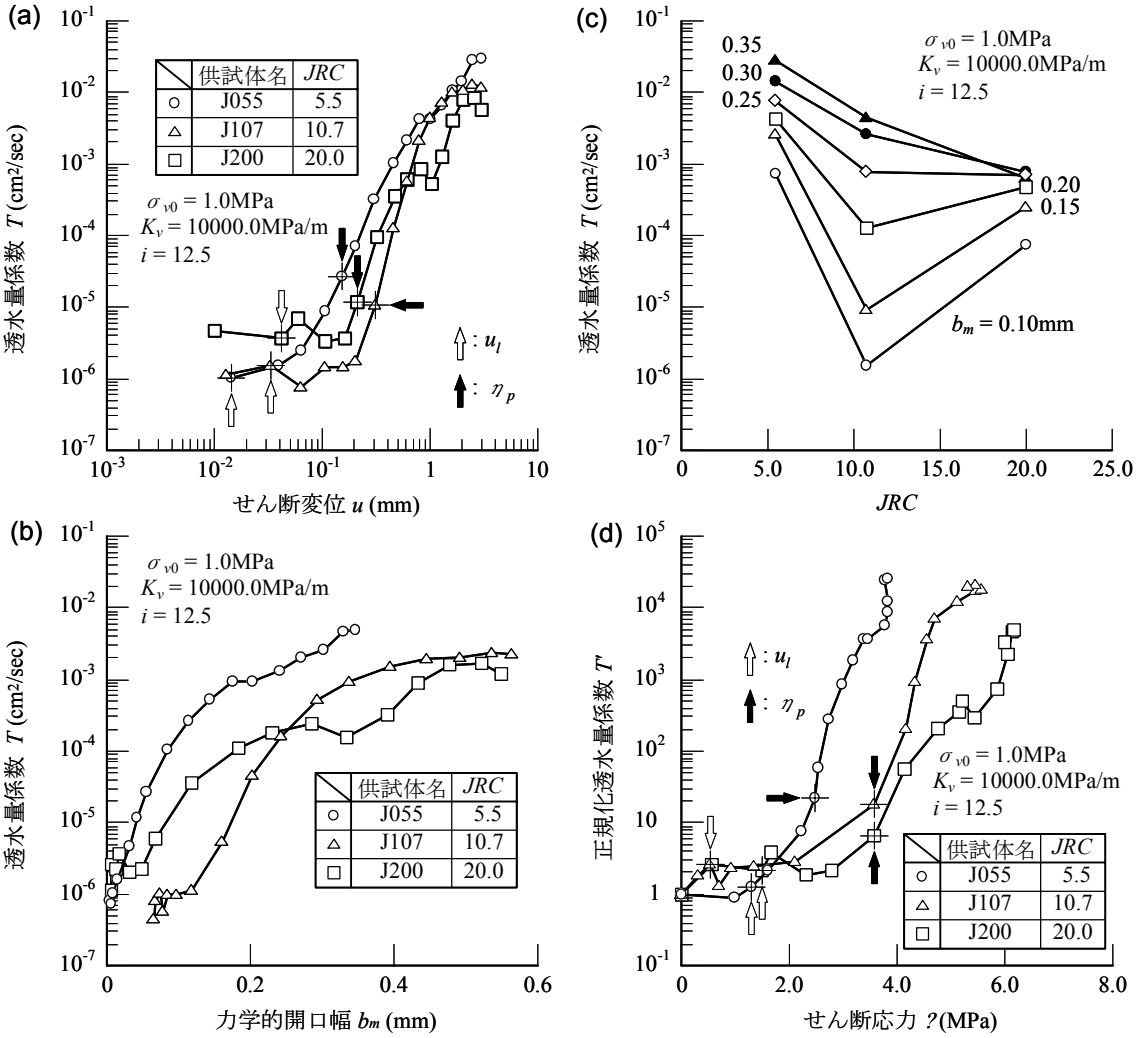


図 2.3.13　CNS（FPT/SCS）試験結果

（JRC の影響，(a)u～T 関係，(b)b_m～T 関係，(c)JRC～T 関係，(d) τ ～T' 関係）

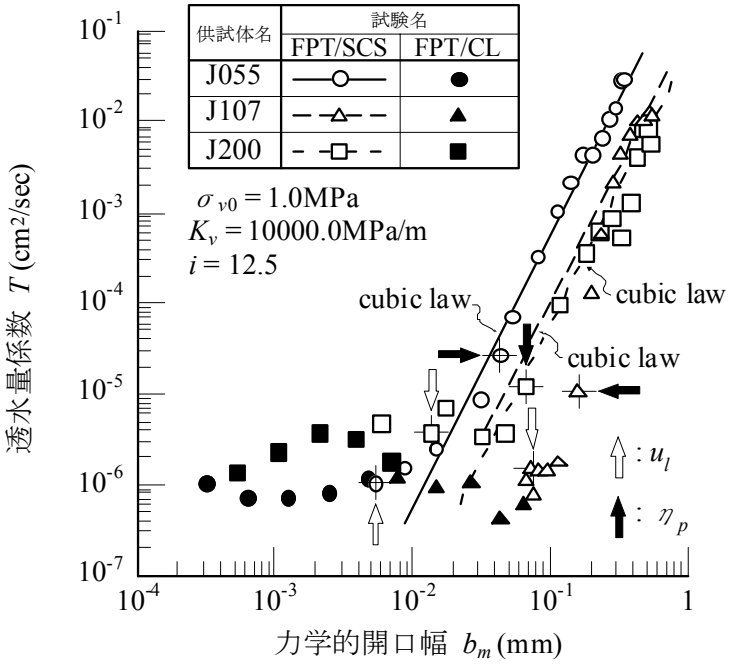


図 2.3.14　CNS（FPT/SCS）試験結果（JRC の影響，b_m～T 関係）

2.3.2　不連続面に作用する垂直応力が力学・透水特性に与える影響［実験ケース 2］

不連続面に作用するσ_vは対象とするプロジェクトがどの程度の地下深部で行われるかによって変化し，その面の力学・透水特性に大きく影響を及ぼす。よって，それらの影響を把握することは重要な問題である。そこで，同一の表面凹凸形状を持つ供試体（J127 供試体, JRC=12.7）を用いて, 3 種類の異なる垂直応力下（σ_v=0.5, 1.0, 2.0MPa）で，Iを 12.5 に固定し，CPT/SCL 試験を行い，図 2.3.3 で見られた現象がσ_vに関係するかどうかを検証した。図 2.3.15 にその実験結果を示す。

図 2.3.15(a)に u とτ，そして b_mの関係を示す。この図からは，すべてのσ_v下において，せん断が進行するにつれて b_mが増加し，また同じ u で b_mを比較すると，σ_vが大きいほど垂直変位が抑制されるため, b_mは小さくなっていることがわかる。図 2.3.15(c)に uと Tの関係を示す。これによると uの増加に伴い Tも増加していくが，同じ uであってもσ_vの違いにより Tは大きく異なる。これは図 2.3.15(a)に示したように，σ_vにより垂直変位が抑制され，b_m が小さくなることが原因であると考えられる。また，uと Tにおいて，図 2.3.15(b)に示す u_lで Tは急激に増加し，u_p以降は両対数軸でほぼ直線的な挙動をしていることがわかる。

次に，b_mと Tの関係を図 2.3.15(d)に示した。この図から，すべてのσ_v下にある不連続面は b_mの増加に伴い Tも増加しているが, 全体としてσ_vが大きくなるほど Tは小さくなる傾向が見られる。図 2.3.15(e)に同じ b_mにおけるσ_vと Tの関係を示す。この図からも明らかなように，b_mが同じ状態であってもσ_vが変化すると Tが変化することがわかる。この原因として，不連続面内部の空隙構造の違いが考えられる。同じ表面凹凸形状を持つ不連続面で，σ_vが異なるのに b_mが同じということは，その時の uが異なることを意味する。uが異なれば，不連続面内の開口幅分布や接触状況が変化し，その影響により同じ b_mでも Tが異なってくるものと推察される。

図 2.3.15(f)にτと T'の関係を示す。ピークせん断強度を迎えるまでに変化する Tの割合はσ_vによらずほぼ一定であった。よって，σ_vは垂直変位を抑制し，Tを減少させるものの，せん断過程においては b_mや Tの増加の割合には大きな影響を与えないことが分かる。

次に，三乗則の適用性について述べる。図 2.3.16 に b_mと Tの関係を示す。この図からは，開口幅が大きい範囲では Tが b_mの三乗に比例していることがわかる。しかし，せん断初期の開口幅が小さな範囲では，Tが b_mの三乗に比例していない。これは上述したように不連続面内のミクロな構造に影響を受けていると考えられる。前述したように，三乗則の成立する境界は，図 2.3.15(b)に示す u_lを，図 2.3.16 に適用することで求まる。

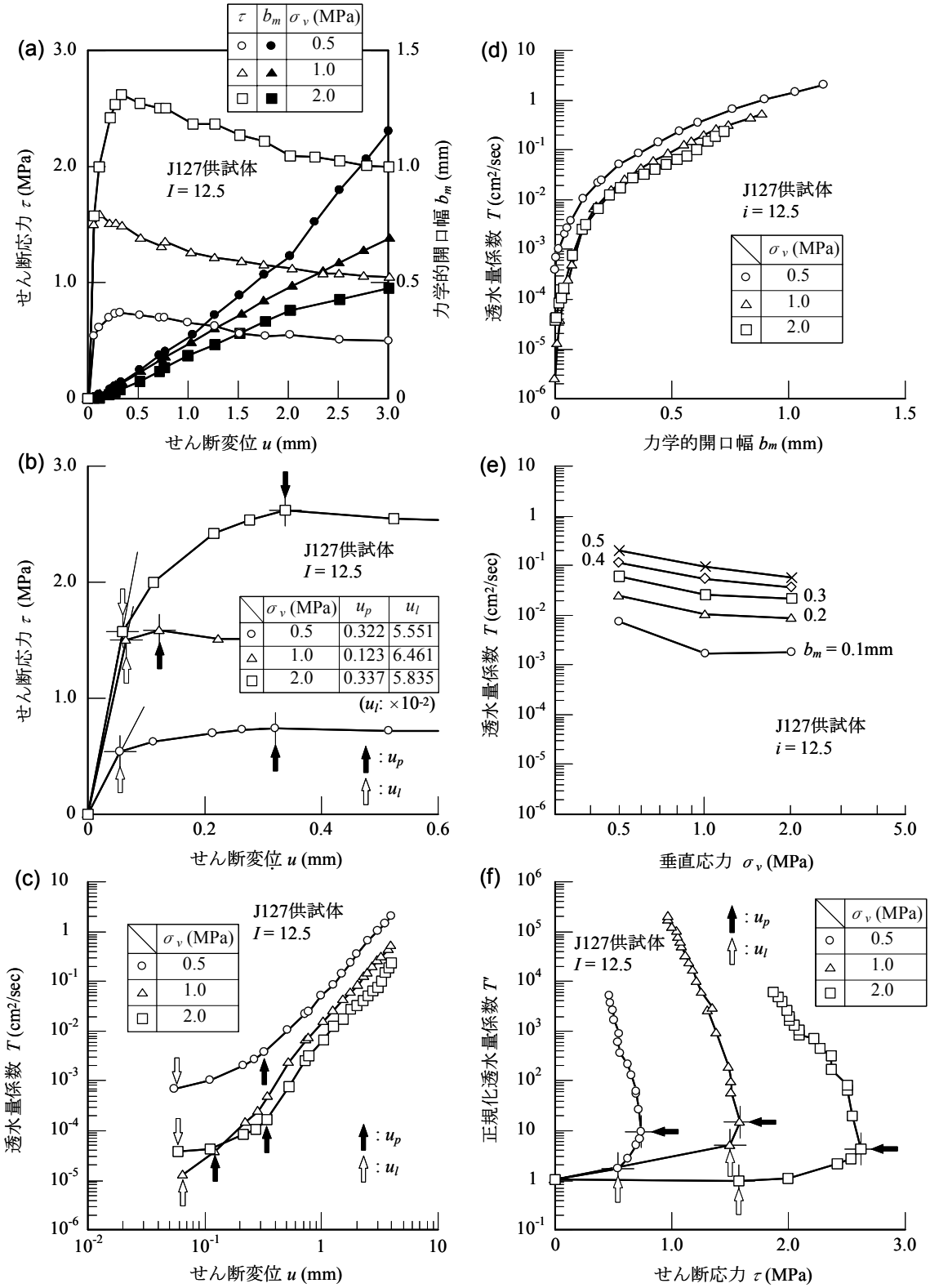


図 2.3.15　CNL（CPT/SCL）試験結果（垂直応力 σ_v の影響，(a)u～τ ,b_m 関係，(b)u～τ 関係，(c)u～T 関係，(d)b_m～T 関係，(e)σ_v～T 関係，(f)τ ～T' 関係）

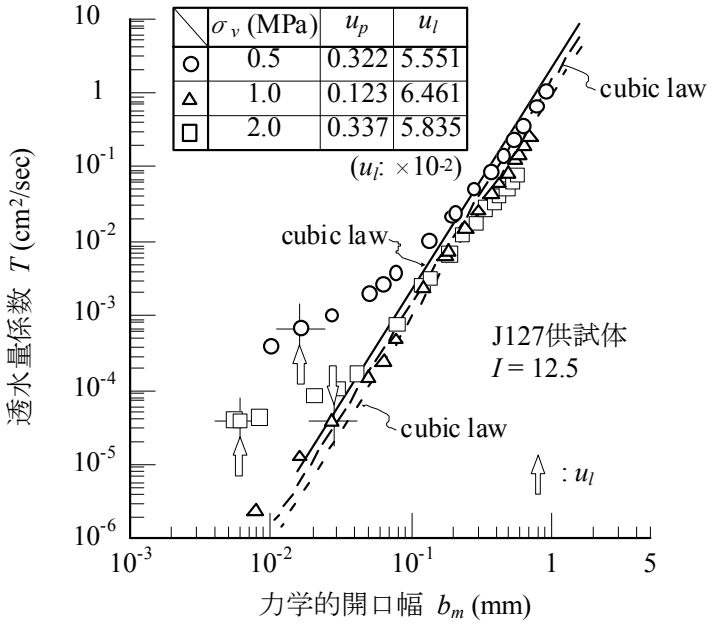


図 2.3.16　CNL（CPT/SCL）試験結果（垂直応力σ_vの影響，b_m～T関係）

2.3.3　垂直剛性 K_v が力学・透水特性に与える影響［実験ケース 3］

ここでは CNS 試験における K_v の設定値が岩盤不連続面の力学・透水特性に与える影響について述べる。そこで，同一の表面凹凸形状を持つ供試体（J055 供試体，JRC=5.5）を用いて，3 種類の異なる垂直剛性下（K_v=10.0，30.0，50.0GPa/m）で，I を 12.5 に固定し，FPT/SCS 試験を行った。

まず始めに力学特性について述べる。図 2.3.17 に CNS(FPT/SCS)試験における力学挙動を示す。なお，図には CNL 試験結果も示しており，従来より行われてきた CNL 試験は，v の増減によらず σ_v の値が一定であるので，K_v がゼロである CNS 試験であるとして比較検討することが可能である。

図 2.3.17(a)に u と τ，そして b_m の関係を示し，図 2.3.17(b)に u～τ 関係の拡大図を示す。なお，σ_{v0} は 1.0MPa である。図 2.3.17(a)，(b)の u～τ，b_m 関係からは K_v が大きくなる程，より大きい τ が発現していることが，また，u～b_m 関係からは K_v が大きくなる程，b_m の発現が抑制されていることがわかる。

図 2.3.17(c)は式(2)を適用した結果であり，双曲線近似法の適用性が確認できる。図 2.3.17(d)は応力経路であり，双曲線法より求めた c，ϕ を適用した結果，c は K_v の大きさによって大きくばらつくものの，ϕ はほぼ同じ値を示していることがわかる。

次に，透水特性について述べる。図 2.3.18(a)に u と T の関係を示す。この図から，図 2.3.17(b)に示す u_l 付近で T は急激に増加し，η_p 以降は両対数軸でほぼ直線的な挙動をしていることがわかる。

図 2.3.18(b)に b_m と T の関係を示す。なお，図中には CPT/CL 試験結果，すなわち σ_v を 1.0，1.5，2.0，4.0MPa と変化させて透水試験を行った結果（図中黒印）も示している。この図から，b_m が小さくなればなるほど三乗則から大きく乖離していることが確認でき，三乗則の成立する境界は図 2.3.17(b)に示す u_l であることがわかる。しかし，b_m が大きい範囲では，全ての供試体で T が b_m の三乗に比例しており，式(17)に示す修正三乗則が適応できることがわかる。また，b_m が大きくなるに従って同一経路を移行しようとする傾向が読み取れる。このことは不連続面の形状が同じであれば b_m が大きい領域では同様の透水特性を示すことを意味している。この現象は図 2.3.19 に示す他の供試体（J107，J200 供試体）にも認められ，図 2.3.16 に示す σ_v を変化させて行った CNL（CPT/SCL）試験結果にも見られるものである。

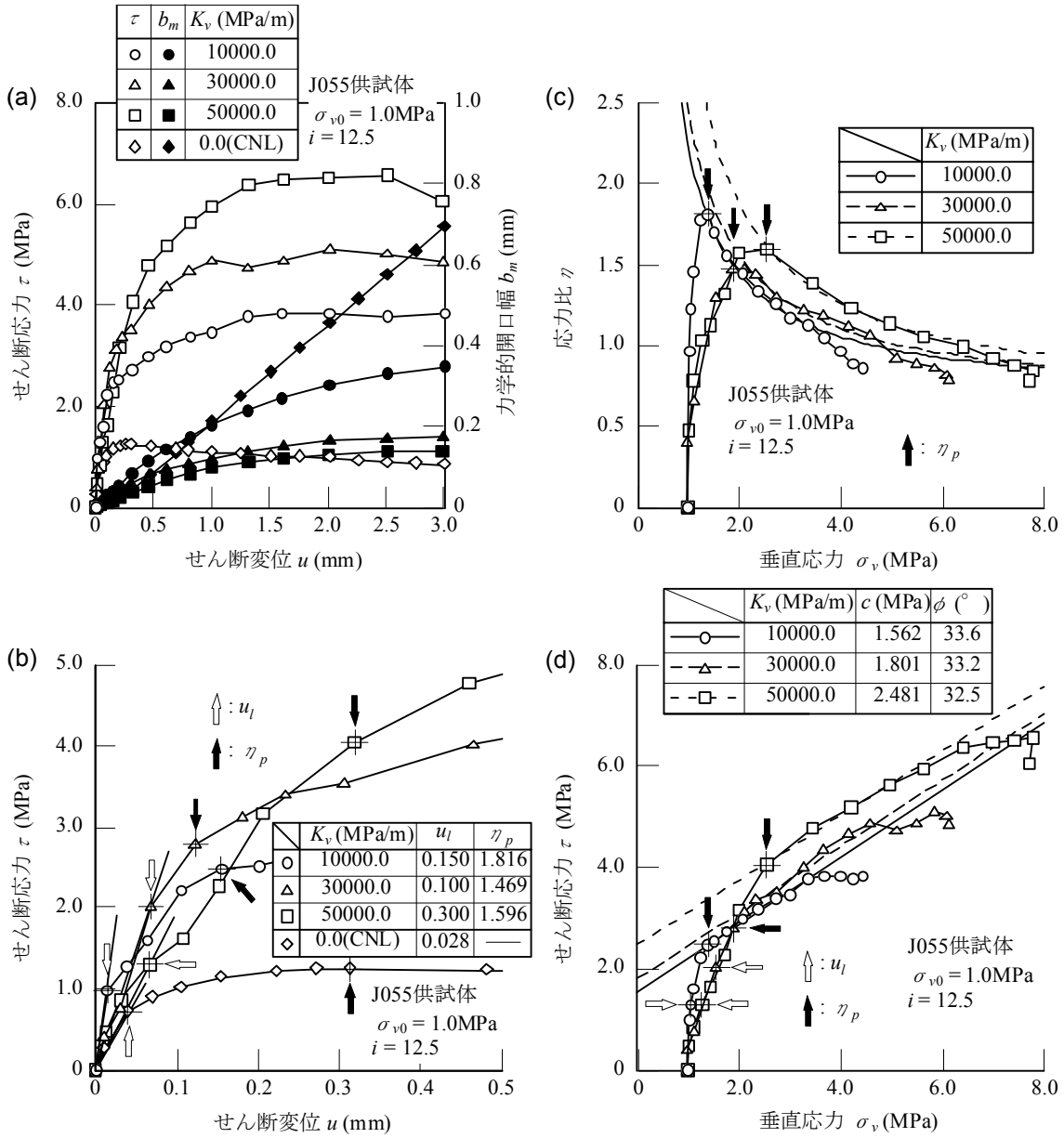


図 2.3.17　CNS（FPT/SCS）試験結果

（K_vの影響，(a)u～τ ,b_m関係，(b)u～τ関係，(c)σ_v～η関係，(d)σ_v～τ関係）

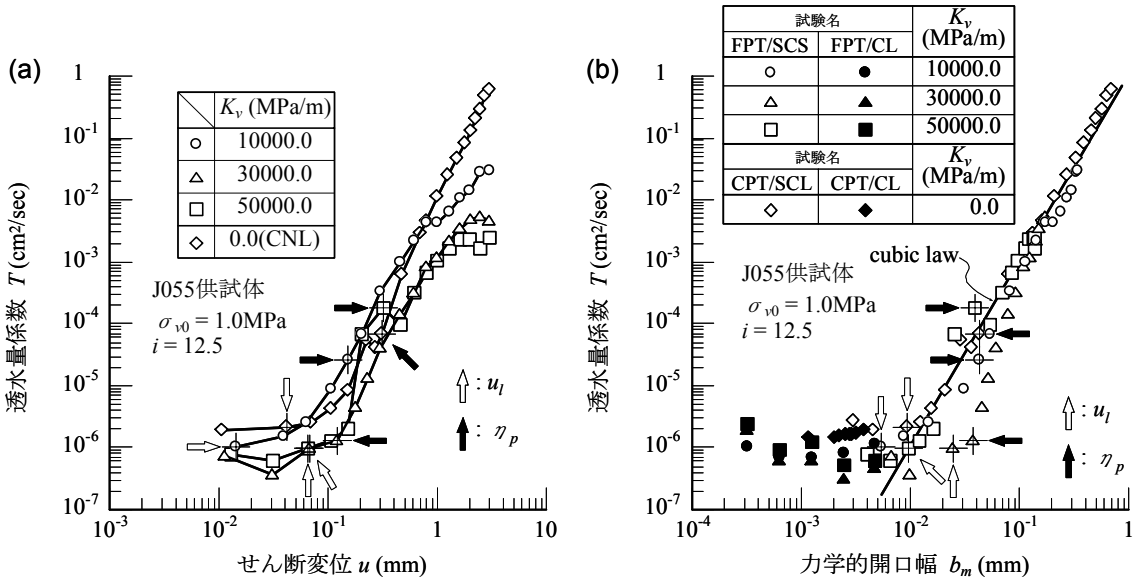


図 2.3.18　CNS（FPT/SCS）試験結果（K_vの影響，(a)u～T関係，(b)b_m～T関係）

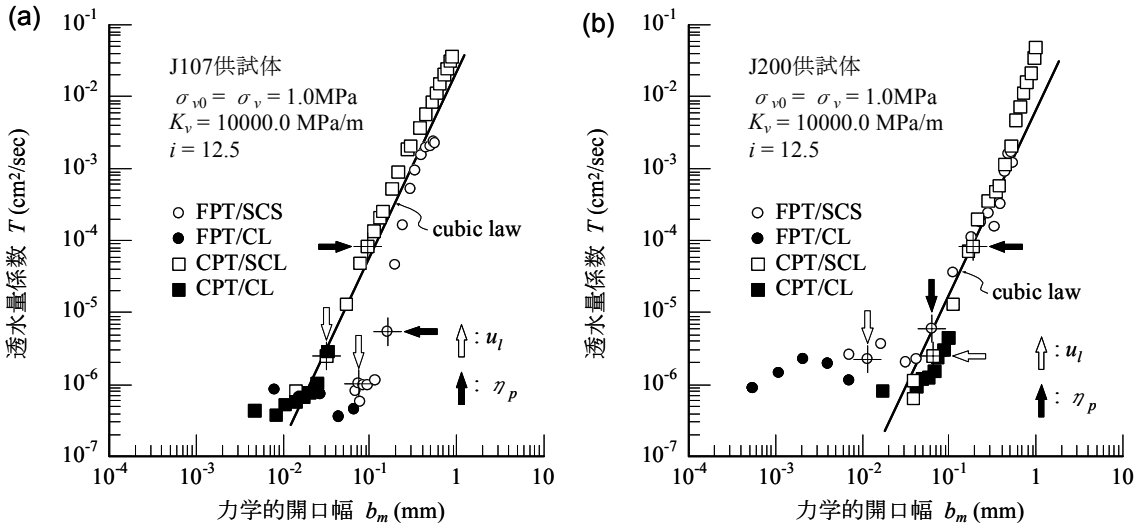


図 2.3.19　CNS（FPT/SCS）試験における結果 b_m～T関係
（(a)J107 供試体，(b)J200 供試体）

2.3.4　動水勾配が不連続面の透水特性に与える影響［実験ケース 4］

水理学的パラメータとして I が挙げられる。ここでは，垂直応力一定下において，I を変化させて FPT/CL 試験を行うことで，I が透水特性に与える影響を調べ，続いて FPT/SCL 試験を行うことで，せん断過程の透水特性について検討し，その結果を述べる。特に，ここでは実際に地層処分が検討されている約 300m 以深の地下深部を再現することとした。約 300m 以深の地下深部では，I が 4/100 程度と非常に小さくなる所が多く存在すると報告されているものの [1)]，現在までに数多く行われてきた研究では，この原位置での I よりもはるかに大きな I が用いられているものが多く，そのため原位置レベルの I が透水特性に与える影響に対して考察する必要がある。

地下深部と呼ばれる場所での不連続面と地表近くの不連続面を比較するため，I を 0.01 から 1.00，σ_v を 0.1，10.0，20.0MPa と変化させて FPT/CL 試験を行い，I が透水特性に及ぼす影響を論じる。ここで，供試体の単位体積重量を 26000.0kN/m^3 で一様とすると，0.1MPa の σ_v は地下約 4.0m，10.0MPa は地下約 400.0m，20.0MPa は地下約 800.0m に存在する岩盤に作用する σ_v に相当する．なお，供試体は J200 供試体（JRC=20.0）を用いた。

図 2.3.20(a)に FPT/CL 試験における I と Q の関係を示す。なお，図は理解しやすいように対数表示してあり，図中の線は最小二乗法によって求めた回帰曲線である。この図から，σ_v や開口幅に関係なく Q は I に比例し，ダルシー則が成立していることがわかる。また，T を縦軸に，I を横軸にとると図 2.3.20(b)のようになり，各垂直応力別に見ると T は I によらず一定であることが分かる。つまり，透水特性の変化は不連続面内の空隙構造など力学的条件のみに影響され，本研究で用いた I の範囲内ではその特性に影響を及ぼさないことが確認できる。

次に，せん断過程における透水特性に I が及ぼす影響について述べる。ただしここでは三乗則の適用性について着目する。図 2.3.21 に b_m と T の関係を示す。なお，本実験では，I=0.125，0.625，1.25，3.75，6.25，12.5，と設定した。この図より，全ての I において，T が b_m の三乗に比例する範囲とそうでない範囲が見られ，さらにその境界も I によって変化することが無いことが確認できる。よって，I は上述した三乗則に関する透水特性の変化に影響を与えておらず，岩盤不連続面の透水特性は力学的条件，すなわち，図 2.3.4 や図 2.3.5 に示したように空隙構造や接触状況のみに影響されていることが分かる。

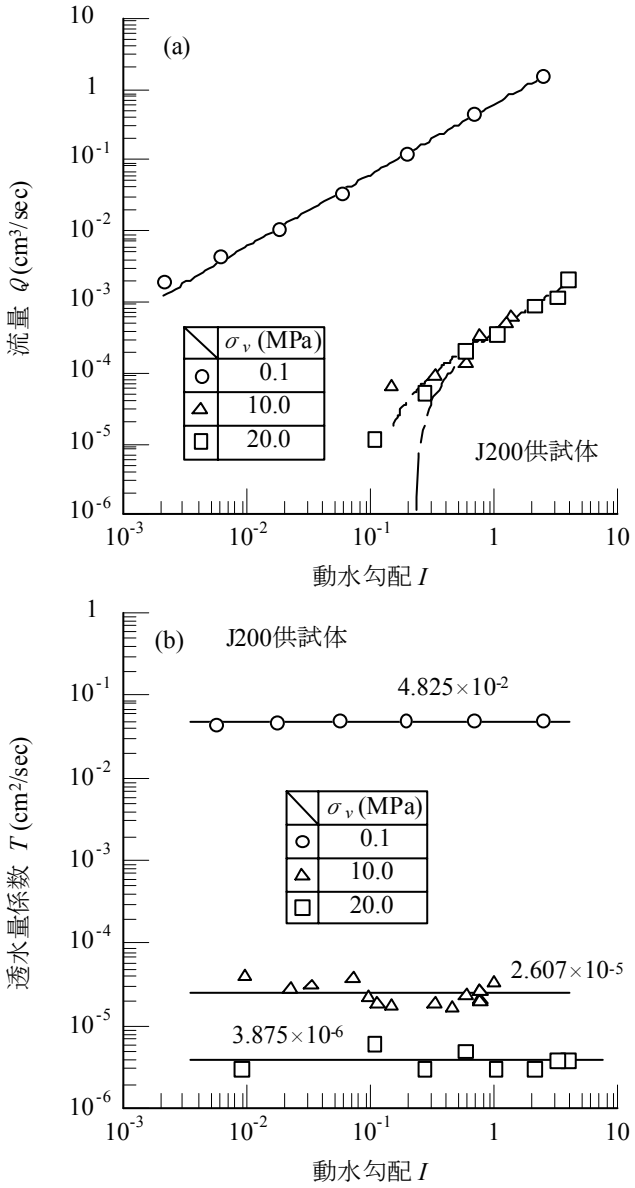


図 2.3.20　動水勾配 *I* と流量 Q および透水量係数 *T* の関係（(a)*I*～Q 関係, (b)*I*～*T* 関係）

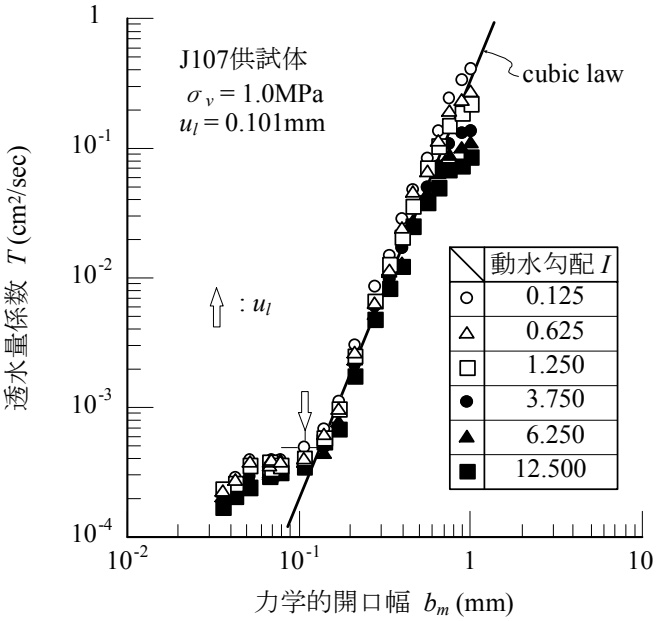


図 2.3.21　力学的開口幅 *bm* と透水量係数 *T* の関係（動水勾配 *I* の影響）

2.4 結論

本研究では，岩盤不連続面の透水特性の解明を目的とし，垂直応力一定透水試験および垂直剛性一定せん断透水試験を行った。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

① u と T の関係において，T が急激に増加する点は u_l であることがわかった。また，その関係は CNL 試験においては τ_p 以降で，CNS 試験においては η_p 以降で両対数軸においてほぼ直線的な挙動をすることがわかった。このことから，τ_p と η_p は共に Mohr-Coulomb の破壊線に到達する点であるので，u～T 関係における透水特性は Mohr-Coulomb の破壊線に到達する前後で大きく異なるがわかった。

② 不連続面内の b_m が同じ状態であっても，その面の空隙構造が異なる場合は透水特性が変化することがわかった。

③ b_m と T の関係において，特に b_m が小さい場合には T が b_m の三乗に比例しない範囲が存在していることがわかった。この原因として，b_m の小さい領域ではチャンネリング現象が起きていると考えられ，せん断が進行すると共にチャンネリング現象が解消され，一様な流れに移行するためと推察される。

④ ③の事柄は TT 試験結果からも確認することができた。すなわち，せん断初期にブレイクスルーカーブに時間的な遅れが認められ，せん断の進行とともに時間的な遅れが少なくなっていく様子が見られた。

⑤ T が b_m の三乗に比例しない範囲と比例する範囲の境界は，u と τ 関係において u_l であり，力学的な挙動と関連していることがわかった。

⑥ 同一供試体を用いた試験結果の b_m～T 関係において，b_m が大きくなるに従って同一経路を移行している様子が読み取れることから，不連続面の形状が同じであれば b_m が大きい領域では同様の透水特性を示すことがわかった。

上記の知見を整理すると，外部から受けるマクロな力学的作用によって不連続面内部のミクロな空隙の構造が変化し，それに伴って透水特性が変化すると考えられる。さらに，そのミクロな空隙の構造の変化と，それに伴う不連続面全体のマクロな透水挙動の変化は力学的挙動と深く関連していると推察される。

以上，岩盤不連続面の透水特性について論じてきたが，以下に問題点や今後の課題を示す。

上記の知見②を受けて，亀裂内で形成される複雑な流れを支配する亀裂内部の複雑なミクロ構造とそこを流れる水との相互作用を考慮して，透水特性の評価を行わなければならない。

上記の知見①と③～⑥より，透水特性が不連続面内のミクロな構造により影響をうけるものと推測されるが，具体的にはどの因子に強く影響を受けているのかは明らかでない。その要因としては，不連続面内の大部分が接触していることにより水みちが何本にも分断されること，すなわち，チャンネリングの影響や，不連続面の壁面と流体との摩

擦が卓越することによる影響，削れ粉など不連続面介在物による影響などが考えられる。しかし，実験的手法では，不連続面内の局所的な現象を計測することが困難であり，今後は数値解析的手法を用いて，これらのミクロな構造が透水特性に与える影響を調べていくことが重要である。

3. LGA 法による流体解析に関する検討

3.1 目的

数値的手法により解析を行う場合，解析を行いたいモデルに近い，できれば理論解が知られている問題を正しく解けることを確認しておく必要がある。したがって，亀裂中の流体解析を目的とした LGA 解析コードについは，平行平板中の流体の挙動が正確に解析できることを示しておく必要がある。しかし，本解析コードに関して，Face Centered Hyper-Cube（FCHC）を用いた 3 次元の解析では，平行平板中の流体の挙動が正確に解析できることが十分に示されていない。

FCHC 格子を用いた平行平板中の流体の解析を行い，LGA 法の成立性に関する検討を行った。主に，平行平板中の流体の挙動として，以下の項目について検討した。

① 動水勾配が場所によらず一定である
② 開口幅方向の流速分布が二次曲線である
③ 同一平行平板で流量が動水勾配に比例する
④ 開口幅が異なる平行平板で動水勾配が同じ場合，流量が開口幅の三乗に比例する

3.2 解析モデル

解析モデルの概念図を図 3.2.1 に示す。流体の流れの方向を x，平行平板の開口方向を z とした。この検討では x 方向メッシュ数 100，y 方向メッシュ数 20，第四軸方向メッシュ数 3 で固定して，z 方向メッシュ数を変化して開口幅を調整した。x=0 の端で粒子を加速した。したがって，流体は+x の方向に流れる。x 及び y 軸に垂直な境界は周期境界とし，+x 側の境界から出た粒子は-x 側の境界から入り，-x 側の境界から出た粒子は+x 側の境界から入るものとした。y 軸に垂直な境界からの粒子の出入りについても同様とした。z 軸に垂直な境界では「すべりなし」とし，平行平板の上下面での流速 0 を表現した。第四軸に垂直な境界では「すべりあり」とした。

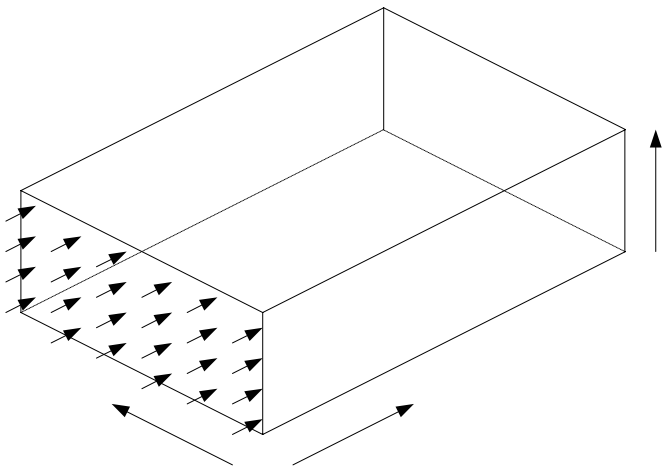


図 3.2.1　解析モデルの概念図

3.3 解析結果

3.3.1 検討項目

定常流を評価する解析であるので，LGA 法による解析が平衡状態に達することが前提となる。この解析では粒子が静止した状態を初期状態として，粒子が反復毎に加速するので，まず反復毎の粒子の運動量の和が変化する様子を調べる。

次に動水勾配に対応する流れ方向の粒子数の分布について検討する。さらに開口幅方向の流速分布を調べ，解析可能な最小（最大）の開口幅方向のメッシュ数について検討する。また，開口幅方向の流速分布の流れ方向のばらつき，開口幅方向のメッシュ数と実際の開口幅の関係を検討する。

上記の基礎的な検討結果をもとに，開口幅，動水勾配と流量の関係について検討を行い，LGA 法の適用性を明確にする。

3.3.2 平衡までの反復回数の設定

初期状態では各メッシュにランダムな運動量をもつ粒子を配置した。これは流体が静止している状態を表す。各ステップにおいて，x=0（-x 側の境界）で，ある確率（変換確率）をもって，流れ方向（x 方向）の運動量成分をもたない粒子を流れ方向の運動量成分をもつ粒子に変換する。反復のたびに，x 方向の運動量をもつ粒子が増加するので，流体が+x 方向に流れ出す。z 軸に垂直な境界での「すべりなし」の境界条件により，x 方向の運動量は減少するので，運動量の変換による x 方向の運動量の増加と壁面での全反射による運動量の減少が釣り合った時点で平衡に達する。この平衡状態を定常状態として解析結果とする。

図 3.3.1(a)に開口幅 50，変換確率 0.1，メッシュあたりの粒子数を約 3 とした場合の，x 方向の粒子の運動量の和の推移を示す。全粒子数が比較的多い場合，10000 回の反復で流量に相当する粒子の運動量の和は精度よく計算できることがわかる。図 3.3.1(b)に 100 回及び 1000 回の移動平均値の推移を示す。

図 3.3.2(a)に開口幅 10，変換確率 0.1，メッシュあたりの粒子数を約 3 とした場合の，x 方向の粒子の運動量の和の推移を示す。開口幅が小さいため，メッシュ数が少なく全粒子数が少ないので，10000 回の反復後でも流量の算出には相当のばらつきが伴うことがわかる。図 3.3.2(b)に 100 回及び 1000 回の移動平均値の推移を示す。1000 回の移動平均をとることによって流量のばらつきはある程度抑えられるものの，それでもある程度のばらつきがあり，流量を精度よく決定することは難しい。

図 3.3.3(a)に開口幅 50，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数を約 3 とした場合の，x 方向の粒子の運動量の和の推移を示す。図 3.3.3(b)に 100 回及び 1000 回の移動平均値の推移を示す。変換確率を下げると，粒子の動きが少なくなるため，図 3.3.1 の場合に比べて相対的な変動が若干大きくなる。

図 3.3.4(a)に開口幅 10，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子密度を約 3 とした場

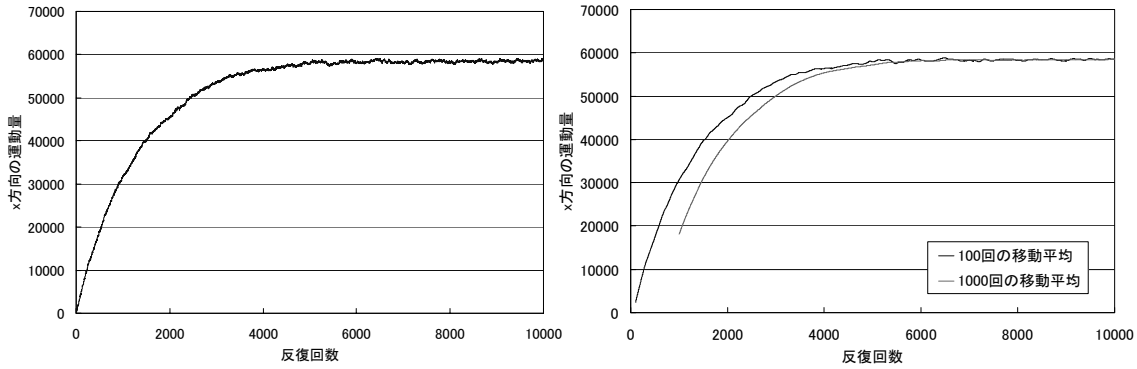
合の，x 方向の粒子の運動量の和の推移を示す。図 3.3.4(b)に 100 回及び 1000 回の移動平均値の推移を示す。全体の粒子数が少なく，変換確率も低いので，粒子の動きがかなり少なく相対的な変動は非常に大きくなる。1000 回の移動平均をとっても流量を決定することは難しい。

図 3.3.5(a)に開口幅 50，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数を約 1 とした場合の，x 方向の粒子の運動量の和の推移を示す。図 3.3.5(b)に 100 回及び 1000 回の移動平均値の推移を示す。粒子数が少ないので，図 3.3.1，図 3.3.3 の場合に比べて相対的な変動がさらに大きくなる。

図 3.3.6(a)に開口幅 10，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子密度を約 1 とした場合の，x 方向の粒子の運動量の和の推移を示す。図 3.3.6(b)に 100 回及び 1000 回の移動平均値の推移を示す。全体の粒子数がさらに少なく，変換確率も低いので，粒子の動きが少なく相対的な変動は非常に大きくなる。1000 回の移動平均をとっても流量を決定することは難しい。

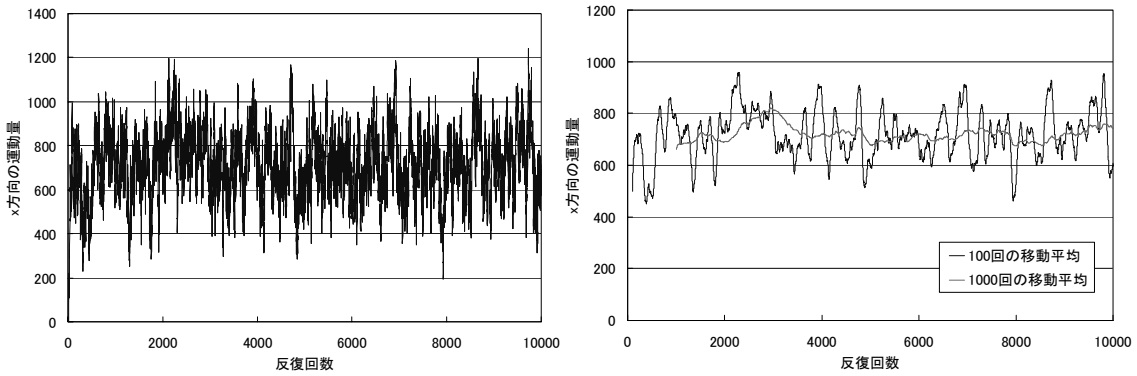
したがって，メッシュあたりの粒子数は多い方が安定していて，変換確率は開口幅が 50 メッシュであれば 0.01 程度，開口幅が 10 メッシュであれば 0.1 程度以上であることが必要である。

以下の検討では，メッシュあたりの粒子数は 3 とし，計算時間を考慮した現実的な反復回数として 10000 回とし，最後の 1000 回の移動平均をとるものとする。



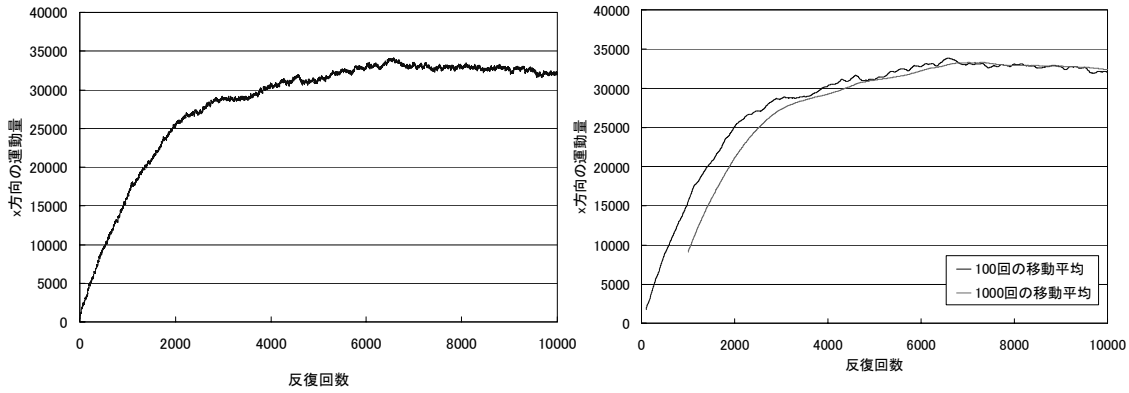
(a)各反復での運動量　　(b)100 回及び 1000 回の反復での移動平均

図 3.3.1　開口幅 50 メッシュ，変換確率 0.1，メッシュあたりの粒子数 3 の場合の流れ方向運動量の推移



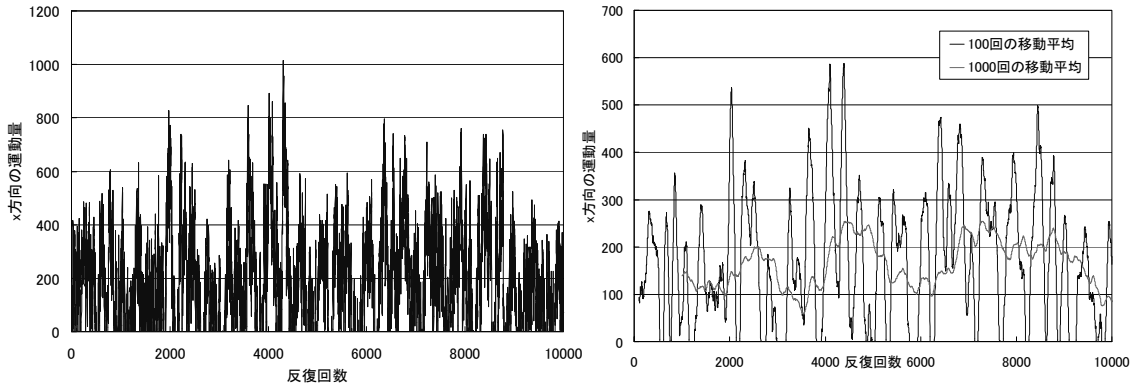
(a)各反復での運動量　　(b)100 回及び 1000 回の反復での移動平均

図 3.3.2　開口幅 10 メッシュ，変換確率 0.1，メッシュあたりの粒子数 3 の場合の流れ方向運動量の推移



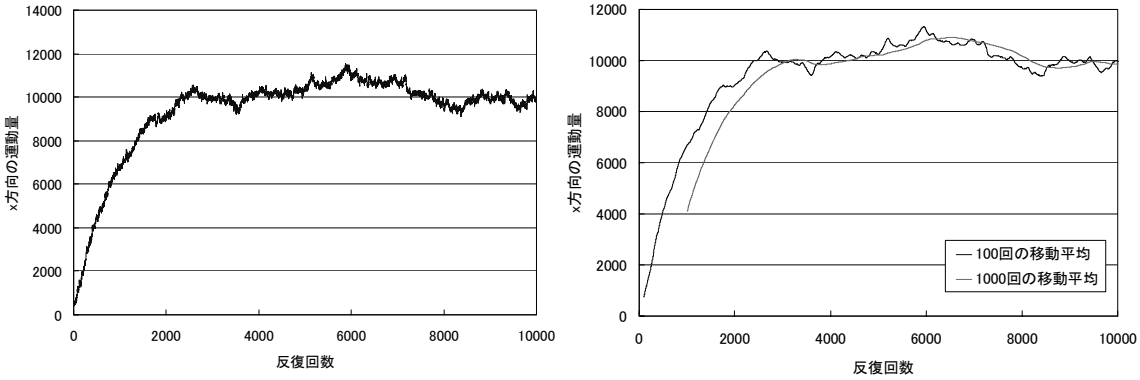
(a)各反復での運動量　　(b)100 回及び 1000 回の反復での移動平均

図 3.3.3　開口幅 50 メッシュ，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数 3 の場合の流れ方向運動量の推移



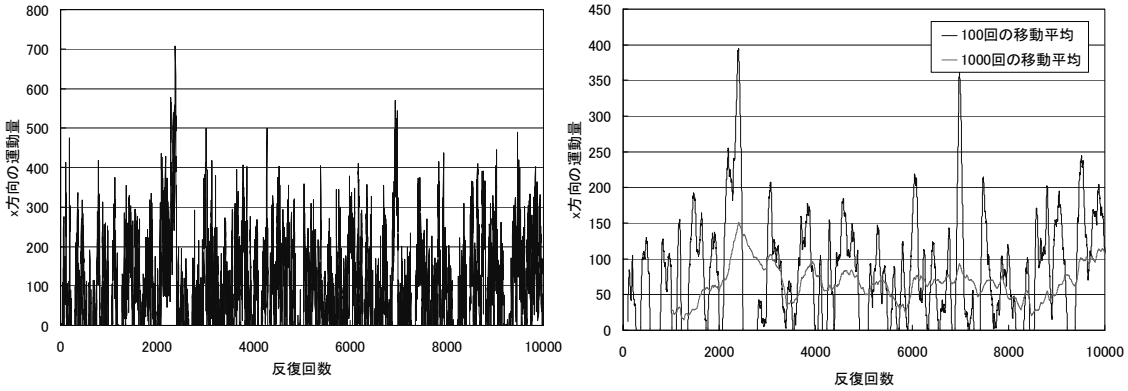
(a)各反復での運動量　　(b)100 回及び 1000 回の反復での移動平均

図 3.3.4　開口幅 10 メッシュ，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数 3 の場合の流れ方向運動量の推移



(a)各反復での運動量　　(b)100 回及び 1000 回の反復での移動平均

図 3.3.5　開口幅 50 メッシュ，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数 1 の場合の流れ方向運動量の推移

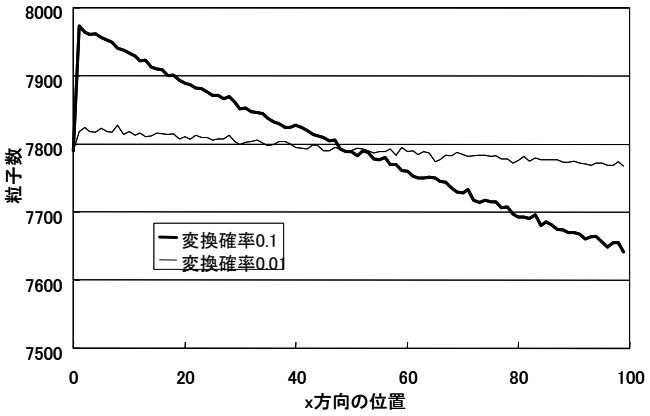


(a)各反復での運動量　　(b)100 回及び 1000 回の反復での移動平均

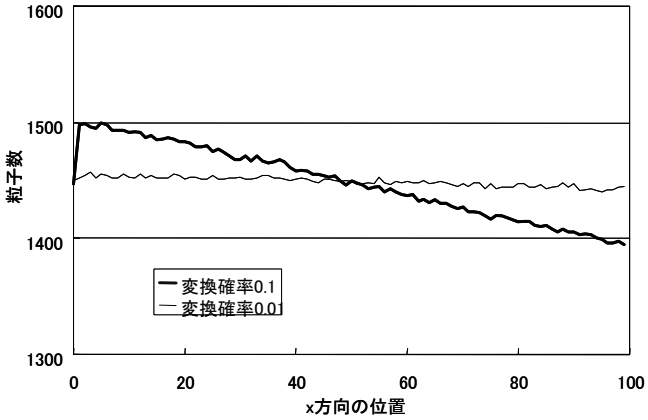
図 3.3.6　開口幅 10 メッシュ，変換確率 0.01，メッシュあたりの粒子数 1 の場合の流れ方向運動量の推移

3.3.3　流れ方向の粒子数の分布

流れ方向の粒子数の分布は動水勾配を求める上で必要となる。図 3.3.7 に流れ方向の粒子数の分布を示す。粒子数は，x 軸に垂直な平面状にある全メッシュ上の粒子数の和である。図 3.3.7(a)は開口幅を 50 メッシュとした場合で，変換確率 0.1 と 0.01 の場合，図 3.3.7(b)は開口幅を 10 メッシュとして，変換確率 0.1 と 0.01 の場合の粒子数の分布である。いずれの場合も粒子数の分布はほぼ直線上に乗っていて，平行平板中の流れ方向の動水勾配は一定であることを正しく表現している。また，粒子数の勾配より動水勾配を正確に算出することが可能である。なお，x 方向の位置が 0 の場所は粒子の加速を行うメッシュであるので，勾配の算出の際には除外する。



(a)開口幅 50 メッシュ



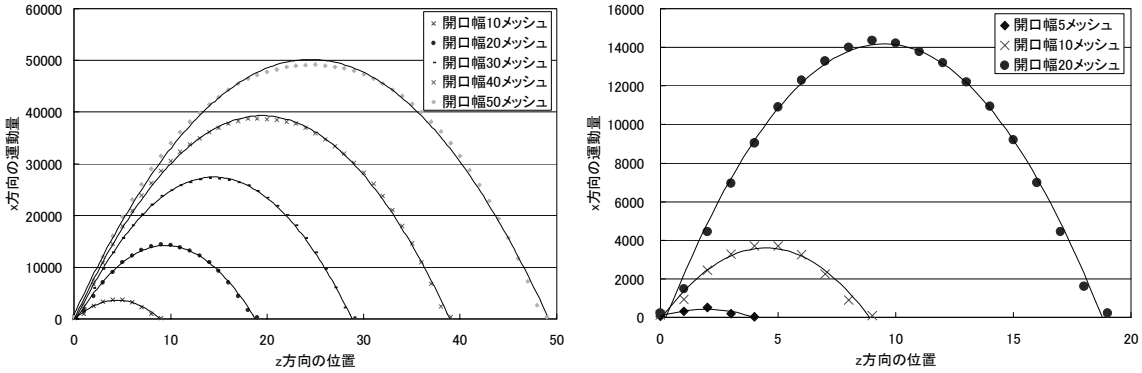
(b) 開口幅 10 メッシュ

図 3.3.7　流れ方向の粒子数の分布

3.3.4　開口幅方向の流速分布

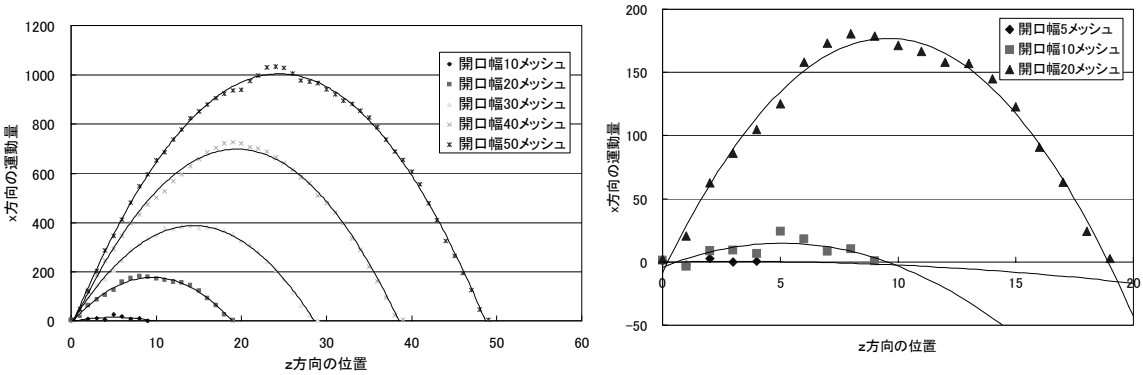
(1)　開口幅方向の流速分布

開口幅方向（z 方向）の流速分布を調べるため開口幅メッシュ数 5～50，変換確率 0.1 と 0.01 とした場合の流速分布を図 3.3.8, 図 3.3.9 に示す。変換確率を 0.1 とした場合，z 方向の流速分布はかなり正確な二次曲線状になる。一方，変換確率を 0.01 とした場合，開口幅メッシュ数が大きい場合はほぼ二次曲線状の分布となるが，開口幅メッシュ数が減るにつれて分布が乱れる。この結果から，変換確率を 0.01 とする場合，メッシュ数は 20 以上である必要であると考えられる。



(a)開口幅 10～50 メッシュ　　(b) 開口幅 5～20 メッシュ

図 3.3.8　変換確率 0.1 の場合の z 方向の流速分布



(a)開口幅 10～50 メッシュ　　(b) 開口幅 5～20 メッシュ

図 3.3.9　変換確率 0.01 の場合の z 方向の流速分布

(2) 流れ方向の開口幅方向流速分布の相違

流れ方向の開口幅方向流速分布について検討を行った。図 3.3.10 に開口幅メッシュ数を 50 とした場合の，全領域での平均値，粒子注入側から 10 番目，50 番目，90 番目のメッシュを通る面での分布を示す。単一のメッシュを通る面での分布は全領域での分布に比べてばらつきは大きいが，場所による決定的な違いはみられない。したがって，平行平板中の開口幅方向の流速分布は場所によらず一定であることを正しく表現している。

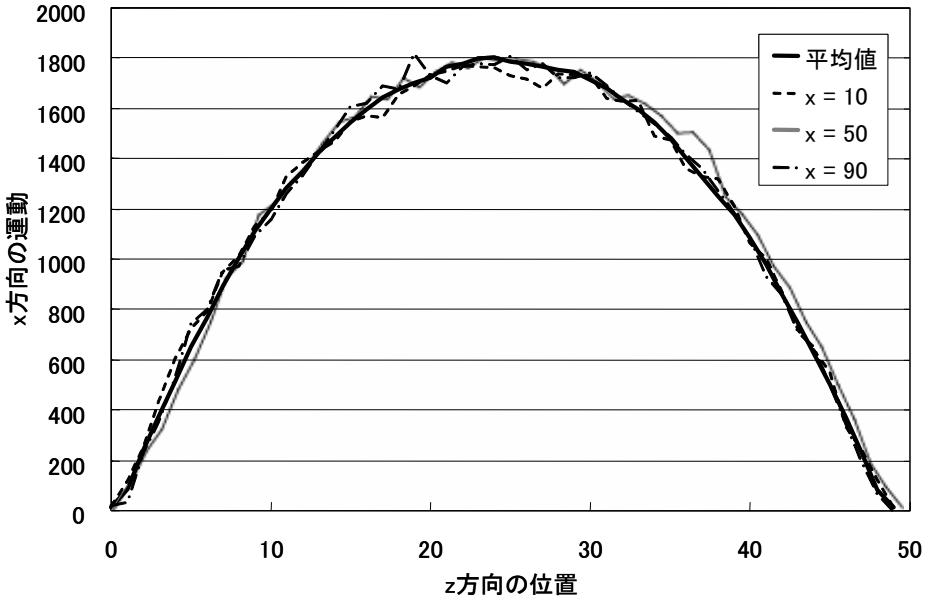


図 3.3.10　開口幅方向の流速分布

3.3.5　メッシュ数と開口幅

開口幅メッシュ数（z 方向メッシュ数）と実際の開口幅の関係を調べるために開口幅の異なったモデルでの z 方向の流速分布について検討を行った。図 3.3.11 に開口幅メッシュ数を 10，20，30，40，50 とした場合の z 方向の流速分布（全領域での平均値）を示す。平行平板中の開口幅方向の流速分布は二次関数となるので，各開口幅での流速分布を近似した二次曲線を併せて示す。近似二次曲線が図の x 軸と交わる 2 点の幅を実際の開口幅と考えると，開口幅メッシュ数と実際の開口幅の関係は，表 3.3.1 のようになる。開口幅方向の両端のメッシュはすべりなしの境界条件を与えているので，流速は 0 となる。したがって，開口幅方向のメッシュ数から 1 を減じた値が実際の開口幅となることが予測される。表 3.3.1 の結果では，実際の開口幅は開口幅方向のメッシュ数から 1.51～0.61 を減じた値となった。以下の検討において，開口幅は「(メッシュ数) -1」とする。

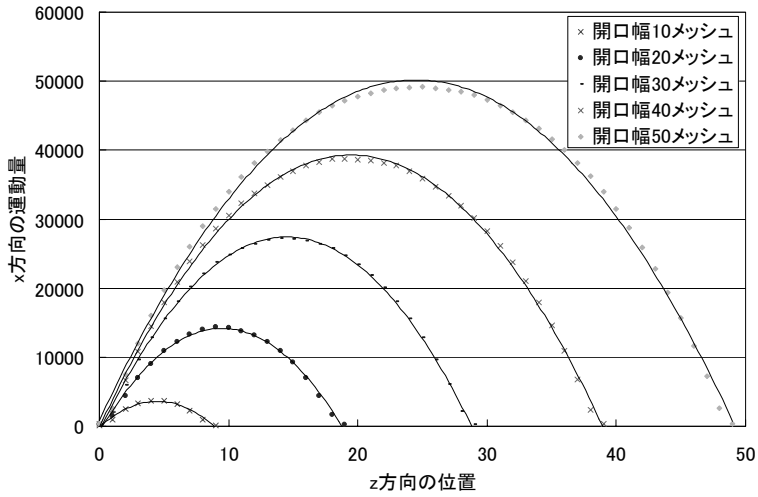


図 3.3.11　開口幅を変えた場合の開口幅方向の流速分布

表 3.3.1　開口幅のメッシュ数と実際の開口幅の関係

開口幅メッシュ数	実際の開口幅
10	8.81
20	18.49
30	28.65
40	38.91
50	49.39

3.3.6　開口幅を変えた平行平板での流量と動水勾配の関係

開口幅メッシュ数（z 方向メッシュ数）を変えた場合の開口幅と透水係数の関係を調べた。開口幅メッシュ数は 5，10，20，30，40，50 とした。図 3.3.12 に，変換確率を 0.1 とした場合の開口幅と透水係数の関係を示す。図中の直線は（透水係数）∝（開口幅の三乗）を表す。10～40 メッシュでは，三乗則にしたがっているが，メッシュ数が 5 あるいは 50 の場合は三乗則から乖離する。図 3.3.13 に，変換確率を 0.01 とした場合の開口幅と透水係数の関係を示す。図中の直線は（透水係数）∝（開口幅の三乗）を表す。20～50 メッシュでは，三乗則にしたがっているが，メッシュ数が 10 以下では三乗則から乖離する。

以上の結果，開口幅メッシュ数 5 では平行平板間の三乗則に従って，流れが正確に表現できないと考えられる。また，変換確率 0.1 では開口幅メッシュ数 10～40 の範囲では解析できるが，メッシュ数がこれ以上大きいと三乗則から乖離する。図 3.3.11 の開口幅 50 メッシュの流速分布で，LGA 解析の流速が，中央付近で近似二次曲線よりも下に来ていることから，流速が大きくなると，検討を行った条件では追随できなくなることなどが原因として考えられる。一方，変換確率を 0.01 とすると開口幅メッシュ数 20 以上では解析できるが，開口幅がこれより小さい場合，三乗則からのばらつきが大きいなどの理由により，正しく解析できていないものと考えられる。

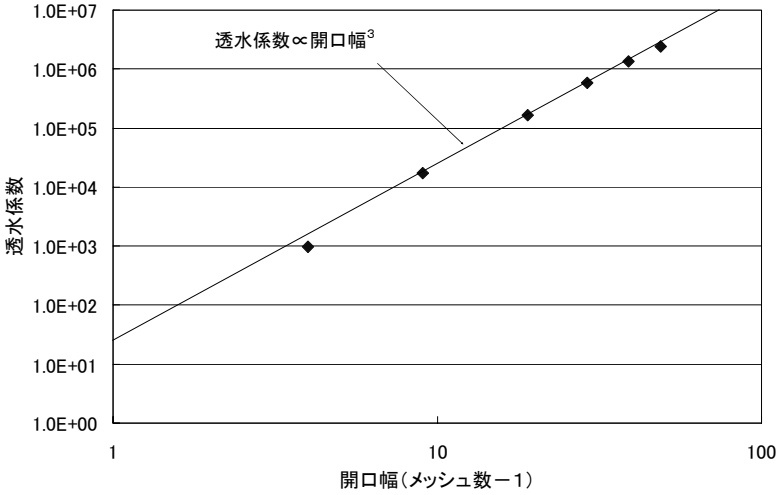


図 3.3.12　変換確率 0.1 とした場合の開口幅と透水係数の関係

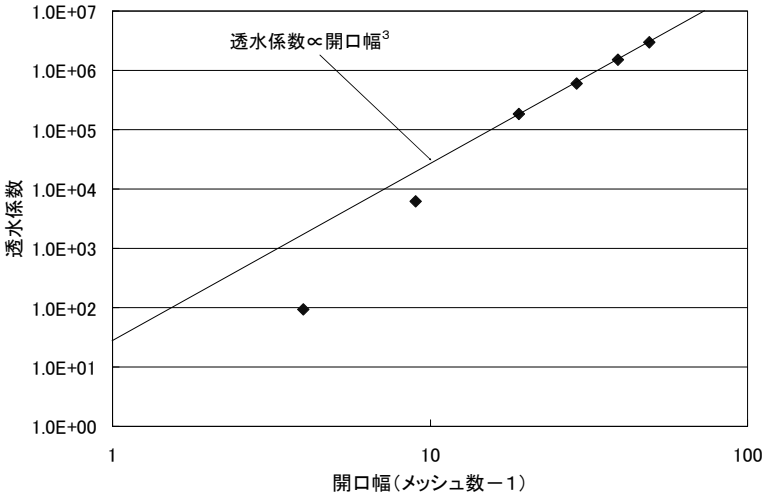


図 3.3.13　変換確率 0.01 とした場合の開口幅と透水係数の関係

3.3.7　同一平行平板での流量と動水勾配の関係

x 方向の粒子数の勾配を動水勾配，x 方向の運動量の和を流量として，透水係数を算出した。変換確率を 0.01～0.1 の場合の透水係数を，開口幅 10，20，30 メッシュとした場合についてそれぞれ図 3.3.14，図 3.3.15，図 3.3.16 に示す。理論的には，開口幅メッシュ数が一定なので，透水係数は一定になるはずである。開口幅 10 メッシュとした場合, 変換確率 0.05～1 の範囲で±5%の幅に入る。開口幅が 20 メッシュとした場合，変換確率 0.02～0.2 の範囲で±5%の幅に入る。開口幅が 30 メッシュとした場合，変換確率 0.01～0.1 の範囲で±5%の幅に入る。

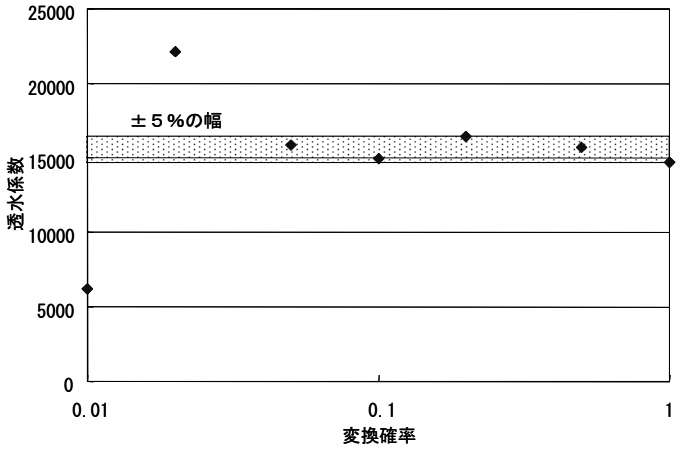


図 3.3.14　変換確率を変えた場合の透水係数の変化（開口幅メッシュ数 10）

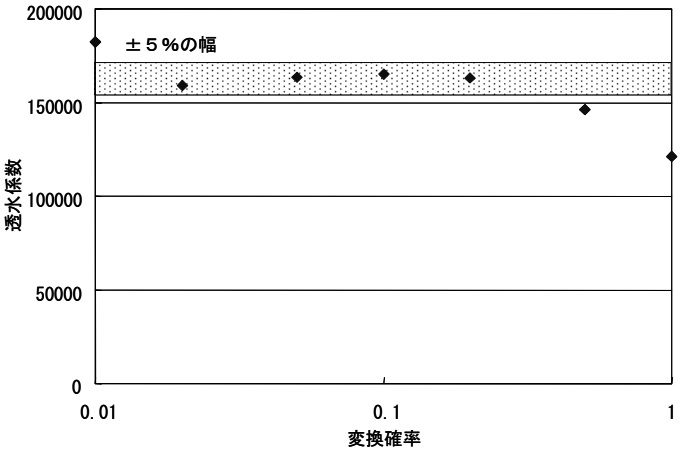


図 3.3.15　変換確率を変えた場合の透水係数の変化（開口幅メッシュ数 20）

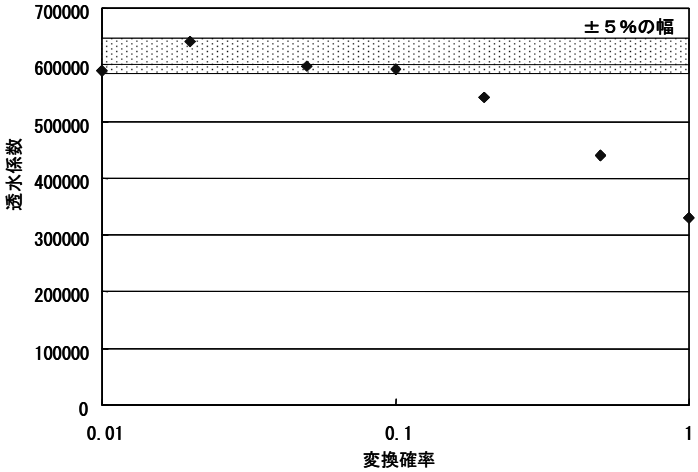


図 3.3.16　変換確率を変えた場合の透水係数の変化（開口幅メッシュ数 30）

4. おわりに

以上の検討結果を以下に示す。

① 粒子数の流れ方向の分布はほぼ直線上にのり，動水勾配は流れ方向に一定である。
② 開口幅メッシュ数は10以上でないと平行平板中の流速分布が正しく計算できない。
③ 変換確率が小さい場合，三乗則からの乖離が大きくなり，流量を正確に決定することが難しくなる。
④ 開口幅を表すメッシュ数と変換確率が大きい場合，平行平板中央部の流速が大きくなると正しく計算できない。

したがって，単一のモデルで解析が可能な開口幅を表すメッシュ数と変換確率の組み合わせは限られた範囲の中になる。なるべく少ないメッシュ数で解析を行うことを前提として，これまでの結果をまとめ，透水係数の誤差の許容範囲を±10%とした場合のLGAの適用範囲を図4.1,図4.2に示した。図4.1は,透水係数の誤差の許容範囲を±10%とした場合の LGA の適用範囲である。図の点●が，誤差の±10%範囲内の組み合わせである。また図4.2は，透水係数の誤差の許容範囲を±5%とした場合の開口幅メッシュ数と変換確率の組み合わせを示したものである。

適用できる範囲を明確に示すためには，同一の解析モデルの中に開口幅や動水勾配が異なる場所が共存する解析を行い有限要素法などの解析結果と比較する作業を行う必要がある。しかしながら本研究では，まずはLGAには適用できる範囲が存在するかどうかを考慮するための解析を目的としており，もっとも簡単な例題でLGAの解析能力を定量的に判断するため，前記開口幅や動水勾配が異なる場所が共存するという仮定は設けずに解析をおこなった。逆に言えば，本研究の例題においても著しい制限が LGA には設けられることが明らかになったと考える。

これらの図を作成したもととなった計算結果について，表4.1に示す。ここで，LGAで計算した透水係数とは図3.3.14～図3.3.16の縦軸の値を用いており，x方向の粒子数の勾配を動水勾配，x方向の運動量の和を流量として，流量を動水勾配で除することにより求めたものである。

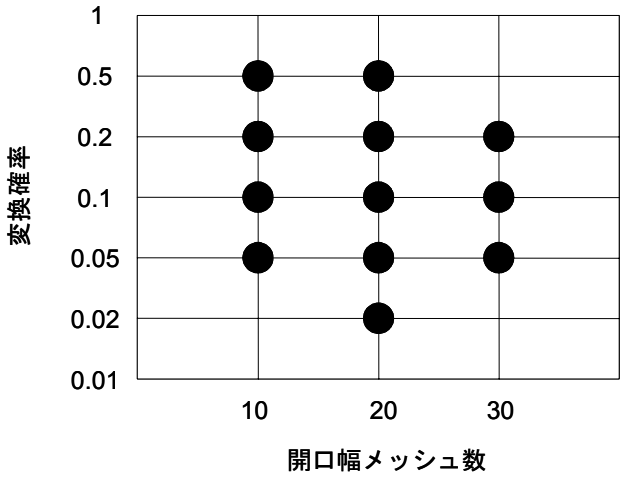


図 4.1　LGA の適用範囲（透水係数の誤差を±10%とした場合）

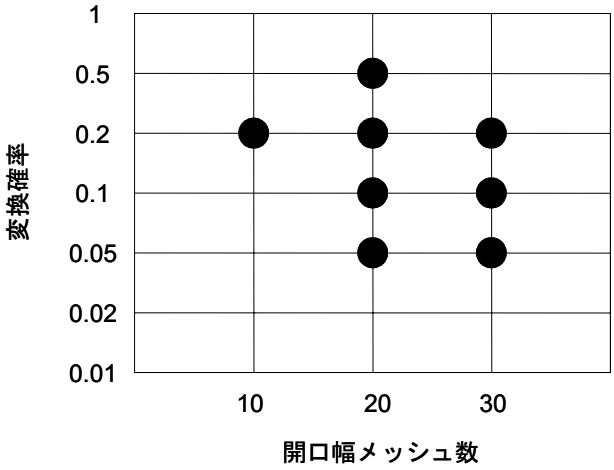


図 4.2　LGA の適用範囲（透水係数の誤差を±5%とした場合）

表 4.1　開口幅メッシュ数，変換確率と LGA で計算した透水係数の関係

変換確率	開口幅メッシュ数		
	10	20	30
0.01	6.20E+03	1.82E+05	5.90E+05
0.02	2.21E+04	1.59E+05	6.41E+05
0.05	1.59E+04	1.63E+05	5.97E+05
0.1	1.50E+04	1.65E+05	5.93E+05
0.2	1.64E+04	1.63E+05	5.43E+05
0.5	1.57E+04	1.46E+05	4.40E+05
1	1.47E+04	1.21E+05	3.31E+05

これより LGA が適用できる可能性のある範囲が限定されることが示されているが，その範囲を考察するために標準の透水係数を 22.7×(開口幅メッシュ数－1)^3 と仮に設定した場合，表 4.1 の値を標準の透水係数で割った結果を表 4.2 に示す。色をつけた解析条件では，誤差が標準の透水係数に対して±10%の範囲となっている。これをプロットしたものが図 4.1 である。また，標準の透水係数を 23.4×(開口幅メッシュ数－1)^3 と仮に設定した場合，表 4.1 の値を標準の透水係数で割った結果を表 4.3 に示す。色をつけた解析条件では，誤差が標準の透水係数に対して±5%の範囲となっている。これをプロットしたものが図 4.2 である。

表 4.2 および表 4.3 において，変換効率 0.01，メッシュ数 30 のとき，誤差の範囲内に値はおさまっているが, いずれも開口幅 30 で変換確率 0.02 が適用範囲外になっており，その値と比較して開口幅 30 で変換効率 0.01 が適用範囲になるというのは，現象論的に信用できない範囲になると考え，整合した結果が得られている図 4.1 および図 4.2 の適用範囲には含めないことにした。

表 4.2　LGA で計算した透水係数の相対値（誤差±10%での検討）

変換確率	開口幅メッシュ数		
	10	20	30
0.01	0.37	1.17	1.06
0.02	1.34	1.02	1.16
0.05	0.96	1.05	1.08
0.1	0.90	1.06	1.07
0.2	0.99	1.05	0.98
0.5	0.95	0.94	0.79
1	0.89	0.78	0.60

表 4.3　LGA で計算した透水係数の相対値（誤差±5%での検討）

変換確率	開口幅メッシュ数		
	10	20	30
0.01	0.36	1.14	1.03
0.02	1.30	0.99	1.12
0.05	0.93	1.02	1.05
0.1	0.88	1.03	1.04
0.2	0.96	1.02	0.95
0.5	0.92	0.91	0.77
1	0.86	0.76	0.58

図 4.1，図 4.2 の結果から，メッシュ数を増やし，低い変換確率を適用して解析を実施することも可能であると考えられるが，亀裂内における流体解析を行う場合，メッシュ数が膨大になると，PC に負担がかかり，計算時間が膨大になるなどの問題が生じる。3 次元 LGA 解析計算を行った事例として，3 次元で平行平板の円筒まわりの流れ（カルマン渦）の解析を行った例を示す[29]。図 4.3 にこの研究で用いられた解析モデルの概念図を，図 4.4 にその解析結果を示す。この研究で用いられた解析モデルの開口幅方向のメッシュ数は 128 個と大きく設定されており，本研究のメッシュ数の検討に関してはあまり参考にならない。なお，今回設定した変換確率は検討を行った流れ方向 100 メッシュでの条件であるので，流れ方向のメッシュ数がかわった場合，適正な変換確率の値も変化させる必要があると考えられる。

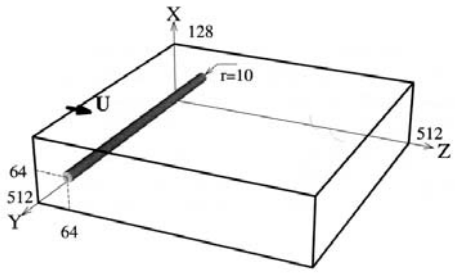
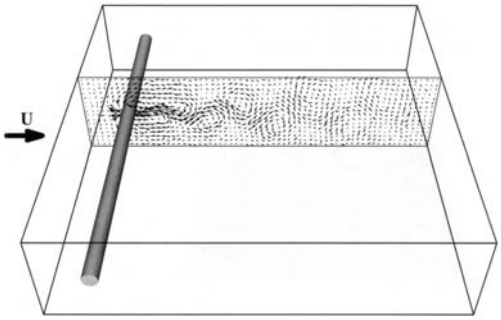
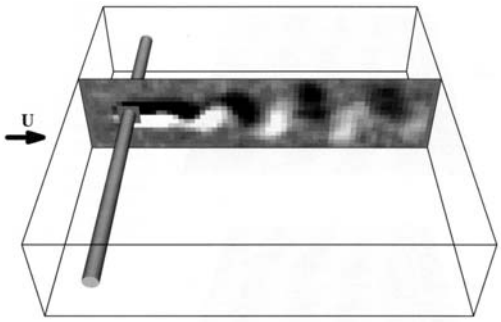


図 4.3　3 次元平行平板の円筒周り流れの解析モデル例[29]



a) ある断面における流速ベクトル図



b) ある断面におけるスパン方向の渦度

図 4.4　3 次元平行平板中の円筒周り流れの解析結果例[29]

参考文献

1) 核燃料サイクル開発機構："わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－分冊 3"，JNC TN1400 99-023，(1999).

2) 核燃料サイクル開発機構："高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 13 年度報告－"，JNC TN1400 2002-003，(2002).

3) Kishida, K., Taniya, H., Nakashima, S., Adachi, T. : "Shear behavior of rock joints under constant normal stiffness conditions"，*NARMS-TAC 2002*, *Mining and Tunneling Innovation and Opportunity*, Hammah et al. (eds), University of Toronto，pp. 53-61，(2002).

4) 蒋宇静，棚橋由彦："垂直剛性自動制御試験による不連続面のせん断強度評価"，資源素材学会 2002 年秋季大会講演集，pp.13-16，(2002).

5) Yano, T., Ohnishi, Y., Nishiyama, S., Aoki, K. : "Strength Estimation of Rock Joints by Shear Tests under Constant Normal Stiffness Condition"，*Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*,（投稿中）.

6) 矢野隆夫，青木一男，大西有三，大津宏康，西山哲，高木克己："垂直剛性一定一面せん断時の岩盤不連続面のせん断挙動"，土木学会論文集，第 729 号／Ⅲ-62，pp.115-130，(2003).

7) Witherspoon, P. A., Wang, J. S. Y., Iwai, K., Gale, J. E. : "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture"，*Water Resource Research*, Vol.16, No.6，pp.1016-1024，(1980).

8) 多田浩幸，木下直人，若林成樹："岩盤割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法"，第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.139-144，(1994).

9) Pyrak-Nolte, L. J. and Morris, J. P. : "Single fractures under normal stress － The relation between fracture specific stiffness and fluid flow"，*Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*，Vol.37，pp.245-262，(2000).

10) 江崎哲郎, 三谷泰浩, 亀田伸浩:"岩盤不連続面のせん断–透水同時試験装置の開発"，資源と素材，Vol.112，pp.213-218，(1996).

11) 大西有三，大津宏康，西山哲，小山倫史："マニフォールド法による浸透の影響を考慮した不連続性岩盤の応力・変形解析", 第 36 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp. 583-584，(2001).

12) Tse, R. and Cruden, D. M. : "Estimating joint roughness coefficients"，*Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*，Vol.16，pp.303-307，(1979).

13) Xianbin, Y. and Vayssade, B. : "Joint Profiles and their Roughness Parameters"，*Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*，Vol.28，No.4，pp.333-336,

(1991).

14) 大西有三，矢野隆夫，岩本宏，西川直人：“岩石一面せん断試験装置およびラフネス計測装置の開発・研究とその変遷”, 土木学会論文集, No.645/Ⅲ-50, pp.307-320, (2000).

15) National Instrument Corporation：LabVIEW User Manual，(2003).

16) Chiba, S., Ohnishi, Y., Ohtsu, H., Nishiyama, S., Yano, Y., Koyama, T.：“The Development of New Apparatus Considering the Effect of Shear Deformation on Hydraulic Characteristics of a Single Joint”，*Proceedings of the first Kyoto International Symposium on Underground Environment, Environmental Rock Engineering*，*edited by Saito & Murata*，*A.A.BALKEMA*，pp.93-100, (2001).

17) 禰津家久：水理学，朝倉出版，pp114-121，(2000).

18) 吉川秀夫：水理学，技放堂出版，pp.107-140, pp.229-237，(1976).

19) 室田明：応用流体力学，共立出版，pp.43-45，(1969).

20) 角江俊昭：“節理性岩盤の透水特性評価ならびに基礎処理工法に関する研究”，京都大学博士論文 pp.59-69，(2003).

21) Goodman, R. E.：“Methods of geological engineering in discontinuous rock”，*West Publishing Company*，*San Francisco*，(1976).

22) Domenico, P. A. and Schwartz, F. W.：地下水の科学Ⅰ−地下水の物理と科学−，土木工学社，pp.90，(1995).

23) Bandis, S. C., Lumsden, A. C., Barton, N. R.：“Fundamentals of rock joint deformation”，*Int. J Rock Mesh. Soil & Geomech. Abstr.*，Vol.20，No.6，pp.249-268，(1983).

24) Barton, N. R., Bandis, S. C., Bakhtar, K.：“Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints”，*Int. J Rock Mesh. Soil & Geomech. Abstr.*，Vol. 22，No. 3，pp. 121-140，(1985).

25) Iwai, K.：“Fundamental studies of fluid flow through a single fracture”，*Ph. D. Thesis*，Univ. of California，Berkeley，(1976).

26) Snow, D. T.：“F A Parallel Plate Model of Fractured Permeable Media”，*Ph. D. Thesis*，Univ. of California，Berkeley，(1965).

27) 楠見春重，金田俊哉，西田一彦，上枝和司：“拘束圧下にある単一岩盤亀裂の開口幅分布と透水特性”，第 10 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.347-352，(1998).

28) Piggot, R. A. and Elsworth, D.：“Laboratory Assessment of the Equivalent Apertures of a Rock Fracture”，*Geophysical Research Letters*, Vol.20, No.13, pp.1387-1390，(1993).

29) Rivet, J. P.：“Spontaneous symmetry-breaking in the 3-D wake of a long

cylinder simulated by the lattice gas method and drag coefficient measurements", Appl. Sci. Res. vol. 51, pp.123 -126, (1993).