九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

厳しい地圏環境下における岩盤不連続面のせん断: 透水同時実験方法の開発に関する研究

三谷,泰浩

https://doi.org/10.11501/3151003

出版情報:九州大学, 1998, 博士(工学), 論文博士 バージョン: 権利関係:

第3章 不連続面のせん断一透水同時実験装置

3.1 はじめに

第2章で示したように、岩盤の透水特性は、岩石基質部の透水性と岩盤中の不連続 面の透水性から決定されるが、一般には不連続面の透水性が支配的である。不連続面 の透水性を決定するには、まず、単一の不連続面の透水特性に関する情報が必要であ る. これまでに展開されてきた研究では、かみ合った状態(せん断等の履歴を受けて おらず不連続面上下が完全に一致している状態)の不連続面を対象としたものがほと んどであり、不連続面に作用する応力としては、ほとんどが垂直応力についてのみ考 慮されているに過ぎない. その結果として, 不連続面の透水性は, 不連続面間の垂直 変位や垂直剛性との関連性で示されており、作用する垂直応力に応じた間隙の大きさ に依存するものとされている.

しかしながら、実際の不連続面は垂直応力だけでなくせん断応力も受ける.不連続 面のせん断に依存する力学的特性は、軟化挙動およびダイレタンシー挙動に特徴づけ られる.この場合、せん断の進行とともに不連続面の状況は相互に乗り上げたり、破 砕されたり、 グージが発生するなど複雑になり、 不連続面の両面はかみ合わなくなり、 特にピークせん断応力を超える領域では、透水性は単に間隙の大小だけで論じること ができなくなる.

このことを明らかにするには、その機構を明らかにし、モデル化を行うか、実験的 に現象を明らかにするかいずれかの方法に頼らざるを得ない.しかし、前者の方法は その機構の複雑さ、影響因子の多さから非常に難しく、現状では後者の方法に頼らざ るを得ない、さらに、実験的手法についても現場実験によるもの室内実験によるもの と2つの手法が考えられるが、不連続面の基礎的なせん断-透水機構を明らかにする ためには、応力や変位の境界条件などを制御できる自由度が大きいこと、また、現象 を直接綿密に計測・観察できることなどから室内実験による方法の方が有利である. しかし、不連続面のせん断特性と透水特性を把握するためのカップリング実験は、そ の実験方法や装置の複雑さのために極めて限られた研究成果しかないのが現状である。

本章では、これまでに実施されている不連続面のせん断一透水同時実験に関する研 究成果を整理して、これらの問題点を整理する. さらにこれらの問題点を踏まえて、 新しいせん断-透水同時実験装置を設計・開発した結果を示すともに、開発したせん 断-透水同時実験の一連の実験システムについて示す.

3.2 不連続面のせん断-透水同時実験に関する従来の研究

せん断と透水を同時に行う実験は,装置,操作の難しさ,煩雑さを伴うため,成功 した事例は極めて限られた条件においてのみであり、未だ未開発の段階にあるといえ る、しかしながらせん断特性と透水特性を同時に求めることは単に合理的であるのみ ならず,両者の複雑な関連性を把握するため極めて重要である.そのため、これまで に数例の研究がなされている.以下に不連続面のせん断-透水同時実験に関する従来 の研究について述べるとともにこれらの問題点について整理する.

Teufel(1987)は、排水三軸圧縮試験装置を用いて実験を行っている.試験体は砂岩を 用い、これを直径47.6mm、長さ118~124mmの円柱形に整形し、荷重方向に対して26° ~34°に傾斜した引張亀裂を試験体に発生させる、実験時の諸条件は有効拘束圧15~ 60MPa、軸変位速度5×10-5mm/sec,最大軸変位6mmであり、蒸留水を透水させるため に、注入口に3.5MPaの間隙水圧を作用させる。不連続面内を流れる流量は、出口より 浸出する水の体積を計測することによって決定され、透水係数の計算はダルシー則に よって行われる.実験結果についてFig.3.2-1に示す.これによると不連続面に沿って 生じる部分的な変位とグージ領域の進展のために、せん断変位の進行にともない透水 係数は減少するという結果を示している。

この実験の問題点としては、まず、軸方向の最大変位が6mmであるため、せん断 面に沿ったせん断変位としては、最大でも7.1mmまでに限られている.この時、プラ テンと試験体間にも約6mmの水平変位を生じる.もし、大きなせん断変位を発生さ せた場合には、メンブレンと試験体との間およびプラテンと試験体の間に隙間が生じ ることとなり、不連続面の透水係数を正確に計測することはできない. 第2に、試験 体には軸方向の荷重と周圧による拘束圧が2方向から作用するため、試験体長軸に対 して傾斜している不連続面にせん断時に一様な荷重を作用させることができない. そ して,不連続面に作用するせん断応力を制御することもできない.第3に,透水試験 の通水方向が不連続面のせん断方向と一致しておらず、計測された透水係数が不連続 面のものであるか、不連続面を含む試験体全体のものであるかはっきりとしない. 上 記のような欠点のため、不連続面のせん断時の透水係数を正確に求めているとはいえ tru

Makuratら(1990)は、二軸の載荷装置を有する特殊なセルを用いた実験装置を開発し せん断一透水同時実験を行っている.この実験装置の概念図をFig.3.2-2に示す.不連 続面を有する直径150mmのコアサンプルの上下片をそれぞれコンクリートブロックで 固定し、せん断面が載荷装置に対して45°の傾きを持つようにセル内にセットされる. そして, 直交する2方向のフラットジャッキを制御することで不連続面に垂直変位お よびせん断変位を与える. さらに、せん断変位を与えた条件下で不連続面の透水試験 を行う.その仕様としては、最大せん断変位は5mm、最大有効拘束圧は20MPaである. 実験は、硬岩と軟岩に対して行われ、それぞれのせん断前後の透水係数の比較結果 についてTable.3.2-1に示す.実験結果によると、硬岩の場合、JRC (Bartonら(1985)の 提案する不連続面の粗さ係数)の比較的大きなもの、あるいは垂直応力が小さい場合 には、小さなせん断変位(1~2mm)で不連続面はダイレーションを生じ、透水係数 はせん断前の値より1~2オーダーほど増加する.また、繰り返しせん断を行った際に は、逆に透水係数が小さくなるケースもあることを示しており、これはグージの発生 による不連続面の閉塞による影響であると説明している.軟岩では、JRCが大きい場 合には、1回のせん断によって透水係数は増大するが、その他のケースにおいては透

水係数が減少する結果が示されている.これは不連続面の強度がインタクト部分と比

べてかなり小さいため、間隙が閉塞し透水係数が減少すると説明している.

この装置では、発生させるせん断変位が小さいこと、せん断時に一様な垂直荷重を 不連続面に作用させることができないことなどTeufelの提案した実験装置と同様の問 題点がある.ただし、透水性が卓越する不連続面に平行な方向に透水を行うことがで きろ点では有効な実験装置である.

Gale(1994)は、Makuratらと同様の原理を持つ2軸載荷型のせん断-透水同時実験装 置を開発し、せん断-透水同時実験を行っている.実験装置の概略図をFig.3.2-3に示 す. 本実験装置は, 300mm×200mm×200mmの大型の試験体に対して実験を行うこと ができ、円形のフレーム内に2軸の載荷装置を設置し、2つの載荷装置を制御するこ とで不連続面に作用する垂直応力, せん断応力を制御することができる. 載荷能力と しては、最も大きな試験体を用いた際には、30MPaの垂直応力を、小さな試験体を用 いた場合には50~70MPaの垂直応力を載荷することができる. さらに、本実験装置を 用いてせん断試験以外にも不連続面の透水試験、トレーサー試験などを行うことがで きる. 不連続面の透水は、Fig.3.2-4に示すように異なる境界条件を与えた実験(不連 続面に沿った2方向,不連続面を垂直に横切る1方向の計3方向の透水)が可能であ る. せん断は、載荷荷重もしくは変位経路を実験前に設定し荷重と変位を制御して行 われる.

実験には、コンクリートで人工的に作成したFig.3.2-5に示すような模擬的な不連続 面を用いる.この試験体に対して不連続面の垂直変位特性を把握するために、せん断 応力を発生させない条件下での垂直荷重載荷実験、垂直荷重を制御してせん断力を発 生させたせん断実験、そして垂直およびせん断応力を制御したせん断実験の3種類の 実験を行っている、垂直荷重載荷実験の結果として垂直応力と垂直変位との関係を Fig.3.2-6に、せん断実験の結果としてせん断変位とせん断応力、及びAE[Acoustic Emission] 計測の結果との関係をFig.3.2-7に示す.図に示すように,垂直荷重載荷実験 では, 垂直応力の増加とともに垂直変位が増加し, 載荷ごとに間隙が閉塞している状 況を確認でき、せん断実験では、せん断変位の増加とともにせん断応力が増加してい る挙動が確認される. さらに2つの実験と同時に透水試験も行っており, Fig.3.2-8に 示すように垂直荷重載荷実験では、垂直応力の増加とともに透水量は減少する.この 時には、透水方向の違いによる影響はほとんど確認されない.一方、Fig.3.2-9に示す ようにせん断実験では、せん断応力だけでなく垂直応力も増加し、せん断方向に平行 な方向[lengthwise]での透水量はせん断応力の増加とともに減少するが、せん断方向に 垂直な方向[widthwise]での透水量は急激に増加する結果を示している.これは、せん 断方向に平行な方向に対しては、間隙が貫通していないものの、せん断方向に垂直な 方向には間隙が開口するため、透水性が増加すると考えている.

この装置の基本的な原理はMakuratらによる実験装置と同じであるため、せん断試験 における問題点(発生させるせん断変位が小さいこと、せん断時に一様な垂直荷重を 不連続面に作用させることができないことなど)は解決されていない.しかし、載荷 能力の向上により、比較的大きな試験体に対しても実験が可能となっている.また、 透水試験に関しては透水方向に関する境界条件を制御できる点が改良されている.







Fig.3.2-2 Schematic view of NGI's biaxial cell for shear-flow coupling test (after Makurat, 1990)





Table	3 2-1	Comparison	of
Table	J.2-1	(after Maku	rat
	loint		
	JOINT	JC3/0c	JC
3	1	0.90	
1	ш		
	2 	0.88	
1	3 I II	0.71	
	4	0.68	
	5	0.57	
	6 1	≒1	
	- 11	no visible	
	111	joint	
		surface	
		alteration	
100	7 1	≒1	
-	П	distinct	
		slickenside	
	8 1	≒1	
	11	distinct	
00	100	slickenside	

9 1

10

≒1

0.8

CaCO₃

deposits onjoint

II distinct

slickenside

surface kf : joint conductivity after shear (final) ki : joint conductivity prior to shear (initial)

 δ_h : sher displacement

on of	conductivity	variation	due	to	shear
urat	,1990).				

JCS/σn	JRC	δh[μm]	kf/ki
32	6.1	2625	1.8
160		3145	0.2
45		2570	0.1
8	6.4	1082	3.9
7		908	0.9
40	6.0	1530	44.9
63		3440	92.3
6	1.9	1171	0.9
5	3.8	1945	0.3
3	8	5060	1.2
		5076	0.4
		4889	0.3
9	6	4249	0.9
27	10	3811	2.5
14		4764	0.1
27	3	3733	0.1
54		4842	0.7
3	4	2425	0.03
	1		

-55-

















the graph (after Gale, 1994).

Fig.3.2-7 Plot of shear stress vs. shear disp. for the three shear loading cycles. The square root of the number of acoustic emissions, per 10 second interval, measured for the third shear cycle is plotted along the top of







Boulon(1995)は、岩石の不連続面のせん断挙動と透水係数を同時に調べるための新 しい実験装置の提案を行っている.提案されている実験装置の基本的な構成は、せん 断は直接せん断試験、透水は試験体下部の中央に細孔を設け、この細孔から不連続面 内に放射流を発生させる透水試験からなる.カップリング実験ではFig.3.2-10に示す 力学的パラメータと水理学的パラメータが必要であると考え、実際に不連続面の垂直 剛性を一定に保った条件下でせん断のみを行い、パラメータ抽出の問題点について検 討を行っている.行われた実験結果についてFig.3.2-11に示す.実験の結果、せん断 変位の増加に伴うせん断応力の変化、垂直応力の変化、垂直変位の変化といったせん 断挙動については、十分に把握することができたものの、試験体上箱に回転が生じる ため、不連続面の間隙幅が一定とならないことを指摘している.実験では透水試験と のカップリングは行われていないが、せん断箱の前後で計測された垂直変位から不連 続面の間隙幅を算定し、それに応じた透水量を推定し、間隙幅が0.5mm変化すると流 量が3オーダー程度変化することを示している.

このような問題点を解決するために、Fig.3.2-12に示すような新しい試験装置の概 念を提案している.この装置の特徴はせん断時にせん断面積が変化する不連続面に対 して垂直方向のジャッキが常に不連続面の中央に位置するように上箱と下箱を同時に 逆方向に移動することができるようなっている.さらに上箱の回転を拘束するような ガイドを設け回転を防ぐような構造を提案している.具体的な装置については現在設 計中であり、実験は行われていない.

Ahola(1995)は、CNWRA(Center for Nuclear Waste Regulatory Analysis)において一面せん断によるせん断-透水同時実験装置を試作して実験を行っている. この実験装置の概略図をFig.3.2-13に示す. 図に示すように不連続面がせん断面となるように試験体を設置する. 試験体は不連続面を境に上下2つのブロックからなり、上部は0.203×0.203×0.102mの直方体、下部は0.305×0.203×0.102mの直方体で、せん断時にせん断面積が変化しないよう下部のブロックの方が上部より大きくなっている. せん断試験は、せん断容器下箱を固定し、水平ジャッキにより上箱を移動させて行う. 最大せん断変位25.4mmまでの実験が可能である. 垂直荷重はせん断容器上部の3つの梁に設置されたジャッキによりローラーを介してせん断上箱に載荷される. 載荷能力としては最大8.0MPaまでの垂直応力の載荷が可能である. せん断変位はせん断箱前後に取り付けられたより計測され、不連続面の垂直変位は不連続面近傍に不連続面を挟むような形で取り付けられた非接触型の変位計を用いて計測される. 透水はせん断面が透水経路となるように一定水量(4cc/min)を注水孔から注入して行われる. その際、透水係数は注水部及び排水部の圧力差を計測することで求められる.

この実験装置を用いて溶結凝灰岩のせん断-透水同時実験を行っている.実験は垂 直応力2.0MPaで4回の繰り返しせん断を行い、4回目のせん断時に透水を同時に行う. そして、垂直応力を4.0MPa、5.0MPaの一定条件下で、せん断-透水同時実験を行っ ている.Fig.3.2-14に垂直応力2.0MPaでの最初のせん断応力-せん断変位関係を Fig.3.2-15に垂直応力2.0MPaでの垂直変位-せん断変位関係を、Fig.3.2-16に垂直応力 2.0MPaでの4回目のせん断時の透水係数-せん断変位関係を示す.せん断応力につい



-58-







Fig.3.2-11 Data of a 2D direct shear test in laboratory, on a joint in salt rock (after Boulon, 1995).



Fig.3.2-12 2D concept of direct shear device avoiding relative rotation of rock walls (after Boulon, 1995).



(a) Top view.



(b) Side view.

1 - Vertical load cell No. 1; 2 - Vertical load cell No. 2; 3 - Vertical load cell No. 3; 4 - Analog summation of total vertical load; 5 - Horizontal load cell; 6 - Horizontal displace, emt of top block relative to bottom block - LVDT1; 8 - Horizontal displace, emt of top block relative to bottom block - LVDT3; 9 - Vertical relative displacement proximeter No. 4; 10 - Vertical relative displacement proximeter No. 5; 11 - Vertical relative displacement proximeter No. 6; 12 - Vertical relative displacement proximeter No. 7; 13 - Horizontal acceleration at near left of upper specimen block.







Fig.3.2-15

Dilation response of rock joint for the first shear loading cycle (after Ahola, 1995).



Fig.3.2-16 Hydraulic response and mechanical dilation of rock joint during the fourth shear cycle under constant applied normal stress of 2.0 MPa (after Ahola, 1995).

Fig.3.2-14 Mechanical response of joint under normal loading for the first shear loading cycle (after Ahola, 1995).

Shear Displacement (mm)

-63-

ては、せん断変位の増加に伴いせん断応力は増加し、一定のせん断応力(残留せん断 応力)を示す.また,残留せん断応力は上箱を押し出した場合のせん断(正方向への せん断)時に比べて上箱を引き戻した場合のせん断(逆方向へのせん断)時の方が低 い. そして、せん断時の透水係数は、せん断とともに増加することを示している.

この実験装置を用いて実施された実験結果を示したが、実験結果が妥当な結果を示 しているとは考えられない.まず、せん断力の載荷用のジャッキにつながるロッド上 に応力検出用のロードセルがあり、このロッドが試験体上箱中央部分とつながってい る. その結果, 計測されたせん断力の値は不連続面に作用するせん断力以外にも試験 機と載荷板との間に発生する摩擦力を含むため、不連続面に発生する正確なせん断力 とはならない. さらに、このせん断力を載荷するロッドが上箱中央につながっている ために、載荷時に上箱の回転をうながす可能性がある.また、せん断箱の上箱と下箱 が完全に分離されておらず、透水試験のために設置されたRubber Shoeが上箱と下箱と の境界部にあるために垂直荷重を載荷した際にこれが荷重を分担し、不連続面のみに 正確な垂直荷重を載荷させることができない. 垂直変位についてもこのRubber Shoeの 影響からか大きなせん断変位が発生する時点まで圧縮変位が生じており、計測された 垂直変位,垂直応力は妥当な結果であるとは考えられない.透水試験に関しては、水 漏れが発生しなかったせん断変位における数点の透水係数しか得られておらず、せん 断変位に伴う連続した透水係数を把握できていない. また, 不連続面の間隙幅の大き さと比べて、不連続面の透水係数はかなり小さく妥当な透水係数とは考えられない. このように、本実験装置はせん断-透水同時特性の把握の目的を達していない.

数値実験としてはGutierrezら(1994)が、単一不連続面のせん断・透水挙動を把握す るために個別要素法コードUDECを用いた数値解析による検討を行っている.ここで は、単一不連続面のせん断変位に伴う力学的・水理学的挙動についてFig.3.2-17に示 すようなモデルを用いて解析を行っている.この図に示すように、モデルの下半分を 固定し、垂直応力を一定とし、一定速度でせん断を行う状況をシミュレートし、同時 に不連続面の両端に異なる水頭を与え、その透水の状況をモデル化している. 解析結 果から不連続面内の任意の各点における接触長さ、接触角、間隙幅、せん断応力と垂 直応力の比及び間隙幅に応じた透水係数を求めている.得られた結果から、不連続面 全体のせん断変位-せん断応力、せん断変位-透水係数およびせん断変位-ダイレイ ションの関係を評価した結果をFig.3.2-18に示す.これらの結果を見ると、不連続面 のせん断変位とせん断応力の関係については、典型的な不連続面の挙動を示している が、せん断時の透水挙動の変化については実際の挙動と一致するかどうかを確認する 必要がある.

以上のように、せん断特性と透水特性とのカップリングに関する実験的研究は、ま だ限られた条件での研究しか行われておらず、現状では、実際の挙動を適切に評価で きる実験装置の開発には至っていない.



Fig.3.2-17 Fracture subjected to direct shear loading (after Guitierrez, 1995).



Fig.3.2-18 Calculated fracture response during shear loading (a) stress strain curve, (b) dilation, and (c) permeability (after Guitierrez, 1995). 3.3 せん断-透水同時実験装置の設計・開発

前節で述べたようにせん断特性と透水特性の同時特性に関する実験的研究は、現時 点では、十分な成果が得られていない. これはせん断装置の設計の難しさに加えて透 水をも同時に行うことの難しさに原因があると考えられる.

せん断一透水同時実験装置の設計・開発にあたっては以下の点に留意する必要があ る.

① 不連続面にできるだけ一様なせん断力を作用させることができること.

② 不連続面に作用するせん断力を正確に計測できること.

③ せん断応力の残留領域までの大きなせん断変位を与えることができること.

④ 不連続面に適切な垂直応力を作用させることができること.

⑤ せん断変位に伴う垂直変位を計測できること.

⑥ せん断変位が進行する過程で透水試験を行うことができること.

以上のような基本的な設計思想に則り,新しいせん断-透水同時実験装置の設計・ 開発を行った.

今回開発したせん断-透水同時実験装置は、大別してせん断装置部と透水加圧装置 部,それに付随する計測・制御装置部および人工不連続面作成装置部から構成される. これらの装置の概略図をFig.3.3-1に、写真をPhoto.3.3-1に、システムの概略図を Fig.3.3-2に示す.以下,本装置各部の開発にあたって設計上考慮した点およびその特 徴について以下に示す.

3.3.1 せん断装置部および計測・制御装置部

岩のせん断試験方法には様々な方法があり、いずれも長所短所があるので1つの方 法であらゆる目的を達成することはできないが,不連続面のせん断特性を最も一般的 に試験する方法として,不連続面を上下のせん断箱の中央に置き,不連続面をせん断 試験面と一致させる一面せん断試験がある、これは、装置や操作、計測が比較的簡便 であり、不連続面に作用するせん断応力と垂直応力との組み合わせを制御しやすく、 大きなせん断変位まで計測が可能であり、比較的現象を理解しやすいなどの利点を持 つ. 今回開発したせん断試験装置はこの一面せん断試験による方法を採用した.

一般に,不連続面を有しない材料に対する室内のせん断試験方法としては,三軸圧 縮試験がよく用いられるが、これは一面せん断試験が以下のような問題点を有するた めである.

① せん断面が限定されている.

② 応力やひずみの分布が不均一で進行性破壊を生じる.

③ せん断中にせん断面積が変化する.

④ 非排水や間隙水圧下での実験が困難である.

⑤ せん断箱の回転や試験体との摩擦が試験結果に影響を及ぼす。

これらのうち、①.②について、この問題は一面せん断試験装置が有する宿命的な 欠点であるものの、岩盤不連続面を対象とした実験では、その影響は非常に小さくな る. つまり、せん断面は不連続面であり、実験前からすでに分離している面であるこ







Fig.3.3-2 The experimental system for shear-flow coupling test.



-68-

-69-



と、さらに不連続面はインタクトな部分の強度剛性と比べて非常に小さいことからこ の面をせん断面とすると、与える垂直応力程度では均質な材料のせん断試験の際に生 じるような試験体側面付近の応力集中や進行性破壊はほとんど問題にならない.③に ついては、せん断変位が大きくなるとせん断面積が小さくなるため、不連続面に作用 するせん断応力は大きくなる.一方、不連続面に作用する垂直応力もせん断に伴って 大きくなる.せん断面積の変化を考慮した場合のせん断応力と垂直応力との関係は、 せん断面積の変化を考慮しない場合とほぼ同じ関係を示す.よって、せん断応力に対 して面積の変化を考慮する必要はなく、垂直応力一定として試験結果を評価すること で対処することができる.④については、不連続面では間隙水圧よりも垂直応力、せ ん断応力の影響が卓越すること、また間隙水圧を与えるためにはせん断箱自体を圧力 容器にしなければならないなどの制約を受けることなどの理由からせん断試験として の性能を重視し間隙水圧を与えられるようには設計しなかった.⑤の問題点について は以下のようにして問題点の解決を図りながら設計上の配慮を行い装置の開発を行っ た.

本装置は、せん断容器の上箱と下箱が完全に分離されており、下箱が移動する構造 となっている. これは不連続面に垂直応力を載荷する際に試験体とせん断箱の間に発 生する摩擦力の発生を抑え、かつ不連続面に正確な垂直応力を作用させるためである. 上箱には、その箱を挟み込むようにせん断荷重計測用の2個のロードセル(引張・圧 縮両用型,容量各20ton)を組み込んだ1対のロッドが,両側面からせん断方向への移 動を拘束するような状態で、取り付けられ、せん断荷重を検出する、この場合、せん 断方向のジャッキとロードセルを組み込んだロッドとせん断面(不連続面)は、せん 断箱にモーメントが発生しないよう同一平面上に配置され、不連続面に作用するせん 断力を正確に計測できるよう工夫されている. せん断時に上部せん断箱に作用する力 をFig.3.3-3(a)に、下部せん断箱に作用する力をFig.3.3-3(b)に示す。通常のせん断試験 機では、せん断力(S)は、油圧ジャッキの圧力、またはジャッキと下箱の間に取り付け た荷重計で計測されるが、その値は求めるせん断力(S)のほかに下箱下面の摩擦力(F2) や上箱と下箱間の摩擦力(F3)を含んだものとなる。そして、これらの摩擦力は垂直荷 重およびせん断変位が増すほど大きくなる.本装置では、上下のせん断箱は接触しな いため、摩擦力(F3)は発生しない.また、上箱固定側のロッドで計測した値は、求め ようとする不連続面のせん断力(S)の他に上箱上部に生じる摩擦力(F1)が加わったもの となるが、上箱につながるロッドの伸縮はロードセルのわずかな変位のみで摩擦力 (F1)も無視できる.特に影響するとみられる摩擦力(F2)は生じたとしても、上箱につ ながれたロードセルには検知されないのでせん断力(S)に近いものが得られる.また、 上下方向,回転に自由度を持つ上箱が安定となるようにその形状を考慮し,ロッド両 端の取り付け部は回転を許す構造となっており、かつ十分に長いロッドを使用してい るので、上箱の上下方向の移動及び回転が自由な構造となっている. そして、これら 上下方向の変位, 上箱の回転量は上箱の4隅に取り付けられた変位計によって計測さ れる.実験では4つの変位計は、ほぼ同じ値を示し、上箱の回転はほとんど生じない ことが確認されている.

以上の結果から、⑤で指摘されたせん断箱の回転や試験体に発生する摩擦による影 響を最小限にとどめ、また、従来のせん断試験機の上箱と垂直荷重載荷面との摩擦力 は上箱の移動がほとんどないためほとんど発生せず、もし摩擦力が発生したとしても ローラーにより十分に低減されているため、発生する摩擦力による影響はほとんどな く、垂直方向の応力、変位に対して正確な値を検出することができる.

載荷は,垂直方向,せん断方向ともに油圧サーボ方式によって,コントロールボッ クスもしくは制御用コンピュータで制御される任意の速度の下に、それぞれの変位制 御または荷重制御が選択できる. せん断方向の最大載荷能力は, 前進方向40ton, 後退 方向35ton,最大変位20mmであり,垂直方向の最大載荷能力は200tonである.せん断 容器の上箱の4隅にはそれぞれに変位計(東京測器製CDP-10,感度1000µ/mm)を設 置し、上箱の垂直変位および回転変位を計測する. ロードセルおよび変位計により計 測された垂直方向, せん断方向の荷重および変位のデータは, データロガー(東京測 器製TDS-302)を経由してコンピュータ上に自動記録される.そして、これらの制御収 録のためのプログラムも独自に開発した.

3.3.2 透水加圧装置部および計測・制御装置部

不連続面に対する透水試験としては、試験体側面を完全に密閉し不連続面の一端か ら水頭を与え、他端の圧力を計測する方法もしくは流量を計測する方法などが考えら れる.しかし、この方法はせん断変位が生じている状態で試験体側面を密閉し、不連 続面からの漏水を生じないようにするには技術的に問題が多いため, 不連続面中央部 からのラジアルフロー(放射流)による透水方法を考案した.これは、試験体の不連 続面の中央に小さな細孔を設け、不連続面の4辺のへりに向かって放射流の透水を行 い,不連続面を通過した流量を計測する方式である.この方法を用いることで、せん 断変位が生じた状態でも比較的容易に透水ができる.ただし、透水係数の評価のため には何らか対策が必要であるが、これについては後述する.

透水試験は、Fig.3.3-4に示すように、自動給水のできる容量約10リットルの容器を 用いて定水位法による透水を行う. 与える水頭差は、給水タンクの位置を調節するこ とで約200cmまでが可能である. せん断容器下箱にある注水孔(直径8mm)を通して 供給された水は、試験体の下半分の中央に設けられた細孔(直径6mm)を通り、不連 統面内を中心から放射状に流れる.そして,不連続面を流れ出た水は,せん断面が完 全に水没するようにその約5mm上に設定された排水側の堰から定水位で越流する.透 水量の計測には透水係数の数オーダーの変化に対応するため、電子天秤 (AND社製, FX3000, 最小読みとり精度10mg, 最大秤量3100g)を用い, その値はコンピュータに 送られる.計測は、流量に応じて10~60秒間の平均流量を重量で計測し、その値がほ ぼ一定になったことをモニター上で確認した後、さらに10回程度の計測を行いその平 均値を透水量とする.

3.3.3 人工不連続面作成装置部

従来、試験体を圧縮試験機により圧裂引張破壊させることで人工不連続面を作成し









Fig.3.3-3 Forces acting on the shear testing apparatus.

ていたが、この作業では激しい破壊を生じることが多く、結果として不連続面が大き く開口したり、破片が飛散したりして、個々の試験体ごとに作成された不連続面の間 隙幅が大きく異なることとなる.さらに、この作業は試験体をせん断箱から取り出し て行うため、試験体の上部と下部の相対的な位置関係をずらすことなく、かつ不連続 面を開口させることなく試験体をせん断箱に設置することは非常に困難となる.そこ で試験体の違いによらず同じ様な不連続面の幾何学的特性を有する人工不連続面を作 成するために、Fig.3.3-5に示す人工不連続面作成装置を開発した.

本装置は、載荷装置としてせん断方向と直交する方向に設置された一対の油圧ジャッ キ(最大載荷能力20ton)と鋼製くさび(厚さ10mm,長さ11.5cm,幅30mmのプレート の長手方向の片面をくさび状に加工したもの)から構成される.人工不連続面は以下 の方法で作成される.まず、試験体に応力履歴による影響を与えない程度の垂直荷重 を加えた後、せん断方向と直交する方向に取り付けられた一対の水平油圧ジャッキを 用いて水平荷重を試験体側面に載荷する. このジャッキの先端に取り付けられたくさ びは試験体側面の中央に水平に入れられたスリット(試験体側面にあらかじめ入れら れた深さ10mm,幅1mmの溝)に押し当てられている.そして水平油圧ジャッキによ る一定荷重を載荷した状態で垂直応力ー垂直変位の挙動をモニターしながら垂直荷重 を徐々に除荷する.これにより、くさびが試験体に食い込みスリットを押し広げ、引っ 張り破壊による人工不連続面が作成される.不連続面作成時(岩石破断後)には,垂 直変位及び垂直荷重が急激に増加するが、装置のサーボ機構によって直ちに平衡状態 が保たれ、間隙幅のばらつきが比較的小さく抑えられる. その際の垂直変位-垂直応 力の関係をX-Yレコーダーで監視・記録することで、不連続面の初期の間隙幅を正確 に計測できる.この開発した装置を用いることで、試験体をせん断箱内にセットした まま,人工不連続面を作成することができ,不連続面作成後,一連のせん断-透水同 時実験を行うことができる.

3. 4 試験体

せん断試験において、寸法効果は無視できない問題である.実際には大型の試験体 を用いることが望ましいが、多少大きくしても現場試験と比べれば不利であることは 否めない.また、様々な室内試験指針を見ても一面せん断試験に用いられる試験体の 寸法に関する記述は見られない.唯一、CANMET(1977)において「せん断面の面積と して少なくとも39cm²程度が必要である.」という記述がある程度で特にその大きさ の指定はなされていない.そのため、寸法効果については試験結果の評価時に対処す ることとし、簡便で数多く行える室内試験としての特徴を活かすことにして、試験体 を縦120mm×横100mm×高さ80mmの直方体とした.

実験には、人工的に作成した人工不連続面や原位置で採取した自然の不連続面を有 する試験体が用いられる.人工不連続面は、不連続面の基礎的なせん断特性や透水特 性を把握することを、自然の不連続面は原位置の条件下における不連続面のせん断特 性や透水特性を把握することを目的として用いられる.



Vertical jack ______(Normal stress)

人工不連続面の場合は、岩石を縦120mm×横100mm×高さ80mmに整形し、この岩 石ブロックをせん断容器内に設置した状態で前節で述べた人工不連続面作成装置を用 いて、不連続面を作成したものを試験体とする(Fig.3.4-1).

自然の不連続面の場合,試験体となる岩石はボーリングコアであったり岩塊であっ たり採取状況によって様々な形をしている.そのため,せん断容器に収まるように整 形する必要があり,その際に鋼製のガイド(外寸法が縦148mm×横130mm×高さ 61.5mmのみぞ型鋼)を用いる.まず,試験体を鋼製のガイドに収まるような適当な 大きさに整形し,不連続面が開口しないように不連続面部分の周囲を粘着テープでしっ かり固定する.鋼製のガイドの側方に型枠をあて,不連続面がせん断面と一致するよ うに(不連続面が水平となるように)不連続面より下半分の部分の試験体を設置し, 固結材料(エポキシ樹脂と珪砂を1:2の比で混合したSBモルタル,ショートボンド建 設社製,硬化時の圧縮強度50MPa)を流し込み試験体と鋼製のガイドを一体化する. この作業を不連続面より上半分の部分についても行い,固結材硬化後,型枠を取り外 し,鋼製のガイドと一体化したものを試験体とする(Fig.3.4-2).

また,いずれの試験体に対しても試験体下半分の中央位置から試験体内部を通って 不連続面の位置まで透水試験用の細孔を貫通させる.この位置はせん断箱下部中央に 設けられた給水孔の出口と一致するように配置される.

3.5 透水係数の算定方法

せん断試験と同時に行われる透水試験は不連続面中央からのラジアルフロー(放射 流)による方式を採用している.せん断-透水同時実験では,放射流で透水させてい るにもかかわらず不連続面が長方形であるため透水距離が場所によって変化すること や,せん断変位によって透水面積が変化することなどの理由から,実験によって得ら れた流量から直接透水係数を算出することができない.また,不連続面自体の透水係 数は不連続面の間隔幅や凹凸の影響を受けること,不連続面は3次元的に広がった空 間であることなどから何らかの仮定が必要となる.したがって,ここでは不連続面を ある間隙幅を持つ平行平板と仮定し,平行平板内の透水モデルによりせん断変位に応 じた不連続面の透水係数を決定する.

まず、せん断に伴い透水面積が変化するため、差分法を用いて不連続面の水頭分布 を求める.不連続面を一様な単位間隙幅 d を有する平行平板と仮定しFig.3.5-1に示す ように不連続面(透水面)をメッシュに分割する.垂直方向の流速を無視すると、任 意の要素Sijにおける x, y 方向の流量変化 ΔQ_x , ΔQ_y は, $S_{i,j}$ とそれに隣り合う要素 $S_{i-1,j}$, $S_{i,j-1}$, $S_{i,j+1}$ からの流量の変化量として以下のように表される.

 $\Delta Q_x = \Delta Y \cdot C \cdot \left\{ (h_{i-1,j} - h_{i,j}) / \Delta X - (h_{i,j} - h_{i+1,j}) / \Delta X \right\}$ $\Delta Q_y = \Delta X \cdot C \cdot \left\{ (h_{i,j-1} - h_{i,j}) / \Delta Y - (h_{i,j} - h_{i,j+1}) / \Delta X \right\}$ (₹3.5-1)



Fig.3.4-1 The specimen with an artificial joint.



Fig.3.4-2 The specimen with an natural joint.

ここで、ΔX.ΔY : X.Y方向のメッシュの幅

: メッシュSiiにおける水頭 h

: メッシュ相互の透水性に関する係数で以下の式で C

・表される.



- : 重力加速度
- 平行平板の単位間隙幅

: 水の動粘性係数

定常状態では、 $\Delta Q_r + \Delta Q_s = 0$ であるので、 $\Delta X = \Delta Y = \Delta とすると、$

 $h_{ii} = (h_{i+1,i} + h_{i-1,i} + h_{i,i+1} + h_{i,i-1})/4$ (式3.5-2)

が成り立つ.よって平行平板と仮定した任意の要素Si,の水頭は式3.5-2により求められ 3.

境界条件の1つである不連続面中央位置での水の入口水頭は、給水タンクの位置水 頭H(不連続面位置に堰の高さ5mmを加えた位置を基準とした位置水頭)と比べて管 路の拡縮、曲がり、摩擦などによる損失を伴う.この損失水頭については、せん断箱 上部および試験体の不連続面より上の部分を取り除いた状態で通水試験を行い Fig.3.5-2に示すような,損失水頭△hと流量Qとの関係から実験的に求められる.こ の結果を最小二乗法により近似した結果を以下に示す。

 $\Delta h = 0.197Q + 0.004Q^2$

(式3.5-3)

よって,不連続面中央位置での水の入口水頭は,給水タンクの位置水頭Hとこの損 失水頭∆hとの差で与えられる.

一方,不連続面内の水の流れは,通水孔を流れる流速と比較して非常に緩やかであ ることから、ダルシー則が成立するとして、不連続面の水頭分布は以下のようにして 求める.まず,不連続面中央位置での水の入口を中心として不連続面を4つの領域に 分割する(Fig.3.5-1). この4つの領域のうち2つは、せん断によって面積が減少す る. それぞれの領域を対象として1mm×1mmのメッシュを作成し, 差分法による逐次 近似法による収束計算を行い,不連続面すべての要素における水頭値を求める.

さらに得られた水頭値を用いて不連続面から外部へ流れ出る流量を求める. 一番外 側の境界部の任意のメッシュS_s,(i,j)における水頭値をh_s,(i,j),出力側の水頭値をh_pとする と、S_{s.(i,j}からの流量Q_{s.(i,j}はダルシー則より以下のように表される.

> $Q_{s,(i,j)} = d \cdot C \cdot (h_{s,(i,j)} - h_D) / \Delta$ (式3.5-4)

したがって、全流量Q.は、以下のように求められる.

 $Q_{\rm c} = \sum Q_{\rm s,(i,i)}$

(式3.5-5)







Fig.3.5-1 Fracture model divided into square meshes for calculation of hydraulic conductivity.





成立するとすると、以下の式が成り立つ. $Q = A \cdot e_h^3$

式3.5-5により求められた流量および設定した単位間隙幅dを式3.5-6中のepに代入 することによって、単位間隙幅に応じた各せん断変位における係数Aの値を算出する ことができる.

そして、得られた比例係数Aと実験で得られた流量を式3.5-6に代入し、各せん断変 位における試験体不連続面の水理学的間隙幅epを求める.最終的にこの水理学的間隙 幅を以下の式に代入することによって透水係数を算出する.

> $k = \frac{ge_h^2}{ge_h^2}$ 12v

3. 6 AE計測システム

AE[Acoustic Emission]は、物体が破壊したり変形したりする際の音の放出である. そ の発生メカニズムは物体に応力が作用すると物体内で微少なクラックが発生し、その クラックが成長していく. その際にクラックの周りに蓄えられていた弾性ひずみエネ ルギーが開放され、弾性波が発生する.もしくは破壊に到らない場合でも塑性域が進 展する場合には同様の現象がみられる、このような固体材料内部の微少な破壊あるい はそれと同様なエネルギー開放過程によって発生する弾性波動現象(AE)を観測する ことで、固体材料の破壊現象の微視的過程を把握することができる. AE計測の利点としては以下の点が挙げられる.

- る必要がない.
- に検出することができる.
- 記録性がよく、一旦作動させれば無人で計測可能である。
- 一方、欠点としては以下の点が挙げられる.
- W.
- れは使い方によっては利点となりうる.
- · 雑音特に機械的雑音の少ない環境であることが必要である.

このように、一般にはAEは健全な材料が破壊するときに発生するが、不連続面にお いてもせん断に伴って不連続面の凹凸が破壊されたり、凹凸を乗り上げたりする時に 発生すると考えられる. そこで、このような利点・欠点を踏まえた上で、せん断過程 における不連続面中の凹凸の破壊状況を把握するためにAE計測を行う. AEは微小な 破壊に対応して発生することがわかっているので、破壊状況を把握するためにはAEの

一方,平行平板流れでは,流量Oは水理学的間隙幅enの3乗に比例するCubic lawが

(式3.5-6)

(式3.5-7)

従来のひずみ計その他の検出器と違い、応力集中部に近接して検出器を設置す

 ・ 高感度であるため、クラック発生のような微視的な挙動を目視で観測する以前

AE変換子を試験体表面に音響的に結合する必要があり、無接触の測定はできな

カイザー効果による履歴現象があるため測定は一回しかできない.ただし、こ

発生頻度を調べる.この発生頻度はAEイベントと呼ばれ、あるしきい値(ディスクリ レベル)を越える振幅があるとその1パルスをカウンタに送信し、検波信号の個数を 計数するものである.実験ではせん断によって生じるAEイベント数を計測し、その数 によって破壊の進展を推定する.

使用したAE計測システムは、Fig.3.6-1に示すようにNF回路設計ブロック製の MAGIC [Multi-channel Acoustic-emmision Graphic Imaging Computer]システムで、セン サー(AE-960:応答周波数0.4~2.0MHz),プリアンプ(AE-912:増幅率40dB),ローカ ルプロセッサー(9600:4チャンネル,外部パラメータ入力可)、およびパソコンにより 構成されている.

実験時において、試験体はせん断箱に覆われているためセンサーを直接取り付ける ことができない. そこで、せん断箱の前後左右に感熱式の接着剤を用いて4つのセン サーを取り付けることにした. センサーによって検出されたAE信号はプリアンプで 40dB増幅された後、ローカルプロセッサ内のディスクリミネータに送られる.ここで、 所定のディスクリレベル(80dB)を超えた波形についてのみAEイベントがカウント され、パルス方式の事象計数法により計数される. 収集されたイベントデータはコン ピュータに送られ、それと同時に外部パラメータとしてせん断変位を入力できるシス テムとなっている.

3.7 不連続面表面形状の計測システム

不連続面の凹凸を計測するための完全自動計測システムを構築した. Fig.3.7-1に本 計測システムの概略図を示す.本計測システムは、精密 x-y 位置決めテーブル(日 本トムソン社製,ストローク長120mm×120mm,繰り返し位置決め精度±0.002mm), 位置決め制御用コントローラー,高精度非接触型のレーザー変位計(キーエンス製, スポット径0.05mm,分解能0.5µm)及びデータ計測用コンピュータから構成される.

レーザー変位計はテーブル上の架台に固定されており、テーブル上に置かれた不連 続面表面までの距離を計測し、不連続面の凹凸の高さ(z座標)を求める、試験体を 固定したテーブルは、コントローラーにより所定の位置(x, y座標)に正確に移動 し、計測位置を求める.これによって、不連続面凹凸の3次元的な位置を計測するこ とができる.

レーザー変位計によって測定されたレーザー変位計から不連続面凹凸までの距離 (不連続面のプロファイル)は電気信号に変換され、ひずみ計(東京測器社製) TDS-301) にアナログ出力される.また,位置決め制御用コントローラーには計測位 置が出力される. これらのデータをコンピュータ内で合成し, 不連続面凹凸の高さと 計測位置はデジタル量として取り込まれる.

計測は通常,不連続面の上下両面に対して行う.あらかじめ設定された移動間隔を コントローラに入力し、テーブルの移動を自動制御し、不連続面の各点におけるレー ザー変位計から不連続面までの距離(凹凸の高さ)を自動計測し、コンピュータに記 録する.





Fig.3.7-1 Schematic view of the developed three dimensional laser scanning instrument for measurement of fracture surface profiles.

3.8 せん断-透水同時実験システム

せん断-透水同時実験システムは、せん断-透水同時実験装置(せん断装置部,透 水加圧装置部からなる),同実験装置に付随する人工不連続面作成装置部,AE計測シ ステム,不連続面表面形状計測システムから構成される.各システムのつながりを実 験の手順に沿って説明する.

不連続面を有する試験体をせん断箱にセットする.人工的に不連続面を作成する場合には、インタクトな岩石をせん断箱にセットした後、人工不連続面作成装置を用いて、不連続面を作成する.

せん断-透水同時実験では、変位制御により、通常、せん断速度約0.1mm/secでせん断を行う.最大せん断変位は20mmで、せん断は下箱を前方に押し出す順方向、下箱を引き戻す逆方向の両方向のせん断が可能である.不連続面に対する垂直方向の境界条件は、荷重制御による垂直応力一定条件もしくは変位制御による垂直変位一定条件を設定することができる.実験時には、せん断変位、せん断応力、垂直変位、垂直応力をコンピュータ上でモニターしながら各データを収録する.

透水はせん断前およびせん断中に,透水加圧装置を用いて,所定の水頭を不連続面 に与えて行う.透水は定水位法を用いるため透水量が定常状態になるまでに時間がか かる.そのため各せん断変位毎に停止し,透水量を計測する.そして,得られたデー タを基に各せん断変位における透水係数が算出される.

AE計測は、AE計測システムを用いてせん断と同時に計測が行われる.

また,必要に応じてせん断前後に試験体を一旦せん断箱から取り出して不連続面表 面形状計測システムにより表面形状の計測を行う.

このようにせん断-透水同時実験を行うとともに、AE計測、表面形状の計測を行えるシステムを構築した.

3.9 まとめ

せん断と透水を同時に行う実験は、両者の複雑な関連性を把握するために、極めて 重要である.そのため、これまでに幾つかのせん断一透水同時実験に関する研究がな されている.せん断一透水同時実験は、せん断により不連続面上下の位置がずれた状 態での不連続面の透水を行うため、実験が非常に複雑となり、操作も難しくなる.そ の結果、現状では、作用させる垂直応力がせん断中一定でなかったり、その値が小さ かったり、与えたせん断変位が小さいなど、応力状態ならびにせん断や透水の計測範 囲など極めて限られた条件下での研究成果しか存在しない.さらに、いずれの研究も 実験によりせん断一透水同時特性を把握しようと試みているものの、実験装置自体に 多くの問題点を抱えており、十分な成果は得られていない.そこで、これらの問題点 を整理し、新しいせん断一透水同時実験装置の設計・開発を行った.

せん断の方式は,装置や操作,計測が比較的簡便であり,不連続面に作用するせん 断応力と垂直応力との組み合わせを制御しやすく,かつ残留域までの大きなせん断を 行うことが可能な一面せん断を採用した.せん断箱は,実験装置に発生する摩擦力に よる影響を最小限にとどめ、たとえ発生したとしても、不連続面に発生するせん断力 を正確に計測できるように、せん断箱の上箱と下箱を分離し、下箱を移動させ、不連 続面と同じレベルで上箱につながっているロッドを用いてせん断力を計測するような 構造とした.また、このロッドは十分に長く、上箱の上下方向の移動および回転が自 由な構造となっており、ダイレーションによる垂直変位が生じたとしても正確なせん 断力を計測できるよう設計した.

透水は、せん断変位が生じている状態で試験体側面を完全に密閉し不連続面の一端 から透水する方式では、不連続面からの漏水を生じないようにするには、技術的に問 題が多いため、試験体の不連続面の中央に小さな細孔を設け、不連続面の4辺のへり に向かって放射流の透水を行い、不連続面を通過した流量を計測する方式による透水 方法を考案した.これにより、大きなせん断変位が発生したとしても、せん断と同時 に容易に透水を行うことができる.

さらに、整形された試験体や原位置でサンプリングされた試験体など様々な形態の 試験体に対して、実験ができるようなせん断箱の開発を行うとともに、せん断箱内に インタクトな岩石をセットした状態で、人工的に不連続面を作成することができる装 置の開発も行った.これにより、ばらつきの少ない人工不連続面を作成することがで き、初期の不連続面間隙幅の正確な計測が行える. また、不連続面のせん断過程における凹凸の破壊状況を定量的に評価するためのAE 計測装置をせん断-透水同時実験と同時に行えるように組み込んだ.さらに、不連続 面のせん断特性と透水特性に影響を与える不連続面の幾何学的形状を定量的に評価す るための表面形状計測装置の開発も行った.