

地層処分におけるシーリングに関する 基礎的研究（IV）

（動力炉・核燃料開発事業团委託研究内容報告書）

技 術 資 料		
開示区分	レポート No.	受領日
Z	J1600 95-001	1995.4.3
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1995年3月

北海道大学工学部

石島 洋二

PNC ZJ1600 95-001

1995年3月

地層処分におけるシーリングに関する基礎的研究 (IV)

石島 洋二*

概要

本研究の目的は、幾つかあるシーリング技術の中で、高い遮蔽性能を持つ耐圧プラグを取り上げ、プラグに期待される次の2つの機能について、それらの具体的な評価方法の指針を得ることにある。

- 1) プラグの奥の坑道で発生する圧力に対し、破損することなく耐える。
- 2) プラグの奥の坑道に閉じこめられている水やガスが手前の坑道に湧出する量を低減する。

プラグはそれ自体だけで上記の機能を発揮するのではない。プラグの打節されている坑道を取り巻く岩盤、ならびに、岩盤とプラグ間の接合面の3つの要素から構成された構造物(これをプラグ構造体と名付ける)がプラグの機能を規定する。とりわけ、接合面は上記2つの性能に決定的に影響する。そこで、接合面の特性の把握に研究の力点を置くことにした。

まず、プラグ構造体模型の接合面の微視的構造をレプリカ法によって観察し、この面の透水係数が大きく、強度・剛性が小さいことを示唆する結果を得た(2章)。

* 北海道大学工学部・資源開発工学科・岩石力学講座

接合面の力学特性については、昨年を実施した強度特性の調査に続いて、本年度は、剛性の測定方法について研究を進めた。CCDカメラを応用した測定方法を開発し、これを用いて、接合面の応力-相対変位線図を得ることに成功した(3章)。

円柱形プラグを対象に接合面の強度特性を考慮した応力解析を行い、次のような結果を得た。プラグの一端に作用する圧力の増加に伴い、これに接する接合面から引張破壊が生じる。一端、破壊が発生すると、引張破壊が接合面を他端まで不安定に進行する(4章)。

プラグ構造体の浸透性を明らかにするために、トランジェントパルス法をプラグ構造体の模型に応用した。理論的には、この方法で、接合面の透水係数を測定することができる。しかし、供試体の寸法が大きいと、完全に含水飽和させることが極めて難しく、トランジェントパルス法を適用できないことがわかった。そして、この問題を克服する方法を提案した(5章)。

目 次

1	緒言	1
1. 1	研究の目的	1
1. 2	本研究の内容	1
2	プラグ構造体の模型と接合面の微視的構造	3
2. 1	プラグ構造体の模型	3
2. 2	透水試験用のプラグ構造体の模型と作成方法	3
2. 2. 1	透水試験用のプラグ構造体の模型	3
2. 2. 2	透水試験用のプラグ構造体模型の作成方法	4
2. 3	強度・変形特性の試料と供試体の作成方法	4
2. 3. 1	強度・変形特性の試料	4
2. 3. 2	供試体の作成方法	4
2. 4	プラグと岩盤の接合面の観察	5
3	プラグ接合面の強度・変形特性の評価法	8
3. 1	試験方法	8
3. 1. 1	プラグ接合面の強度特性の試験方法	8
3. 1. 2	プラグ接合面の変形特性の試験方法	8
3. 2	接合面の相対変位の計測方法	9
3. 3	接合面の剛性および強度に関する試験の結果	10
3. 3. 1	供試体を構成する砂岩とモルタルの 強度・変形特性	10
3. 3. 2	傾いた接合面をもつ供試体の一軸圧縮 試験結果（強度特性）	10
3. 3. 3	傾いた接合面をもつ供試体の一軸圧縮 試験結果（変形特性）	11
3. 3. 4	一軸引張試験結果	11

4	プラグ構造体の逐次破壊	18
4.1	解析方法	18
4.2	解析結果	
4.2.1	弾性状態	19
4.2.2	破壊の初生以降の挙動	19
4.2.3	プラグの耐圧性能	19
5	プラグ構造体の透水性	23
5.1	プラグ構造体の浸透流試験に トランジェント・パルス法を使用することの 妥当性に関する検討	23
5.2	プラグ構造体の接合面の透水係数の 評価方法と問題点	24
5.2.1	プラグ構造体の接合面の透水係数の評価方法	24
5.2.2	プラグ構造体の接合面の透水係数を評価 する方法の問題点	24
5.2.3	供試体を含水飽和させる方法－現状と 改善方法	25
5.3	プラグ構造体の周りの浸透流に及ぼす 構成要素の寄与	26
5.3.1	解析方法	27
5.3.2	プラグ構造体の透水性に及ぼす接合面の寄与	27
5.3.3	プラグの効果	28
6	結言	36
7	参考文献	38

第1章 緒言

1. 1 研究の目的

耐圧プラグは立坑や坑道の途中に設け、それよりも奥部の地下空洞内に存在する圧力を持った水やガスがプラグの反対側へ漏れてくるのを防ぎ、あるいは、漏れ量を減少させる役目をする。当然のことながら、このためには、プラグ自体およびその周囲岩盤は、プラグの一端に作用する圧力下で破壊しない強度を持っている必要がある。

プラグ構造体は、空洞の設けられた岩盤、プラグ、岩盤とプラグ間の接合面の3つの要素から構成される。漏れに関しては、これら3つの要素が透水経路になるし、破壊に関しても、各要素の強度が問題になる。ただし、最近、プラグの水漏れが専ら接合面を通して発生するという報告¹⁾が出されて以来、接合面が注目を集めている。すなわち、プラグを構成する3つの要素の中で、接合面がプラグの性能を発揮する上で最も重要であると考えられるようになっている。

しかし、この接合面は観察自体が困難なこともあり、その剛性や透水性の評価に関する研究は従来ほとんどなされておらず、接合面の力学的モデル、水利学的モデルも作られていない。そこで、ここでは、この接合面に力点を置いて、プラグのシーリング特性の研究を進めることにした。

1. 2 本研究の内容

本研究では、岩盤模型として砂岩、プラグ模型としてモルタルを用い、強度や透水性を主に模型試験で調べようとした。この場合の接合面の微視的構造をレプリカ法で観察し、その存在と厚みを明らかにした(2章)。

接合面の力学的性質に関しては、昨年度、強度特性の試験法を開発している²⁾。そこで、今年度は、接合面の変形特性を明らかにする簡易な試験

方法の開発に着手した。試験方法としては、強度特性の調査に用いた方法、すなわち、傾斜した接合面を夾んで岩盤とプラグが接する供試体を一軸圧縮する方法を用い、変形特性の評価に必要な変位計測方法の研究を進めることにした（3章）。

明らかになった接合面の強度・変形特性を考慮した数値応力解析を行い、プラグの一端に内圧が作用したときの変形・破壊挙動を試み、プラグの耐圧強度に影響する要因を明らかにしようとした（4章）。

接合面の水利学的性質に関しては、プラグ模型の浸透流試験と浸透流解析を併用することにより、浸透流に及ぼす3つの要素の寄与を定量的に評価することにした（5章）。

第2章 プラグ構造体の模型と接合面の微視的構造

2. 1 プラグ構造体の模型

本研究においては、空洞の設けられた岩盤、プラグ、岩盤とプラグ間の接合面の3つの要素から成る構造体、つまりプラグ構造体の物理模型を製作し、透水試験と強度・変形特性試験に供する。

岩盤模型として、美唄砂岩、また、プラグ模型として、主に、モルタルを用いる。したがって、この場合、プラグ接合面は砂岩-モルタルの境界でできている。

2. 2 透水試験用のプラグ構造体の模型と作成方法

2. 2. 1 透水試験用のプラグ構造体の模型

美唄砂岩は、三美炭鉱の露天掘り現場でコアボーリングにより採取した。直径60mm長さ120mmの円柱形をした砂岩の中心軸に直径20mmの孔を設け、坑道の模型とした。この孔の中心に長さ50mmのモルタルを打設し、プラグの模型とした(図2. 1参照)。プラグの模型は次の3種を用意した。

- (1) モルタルプラグ・・・プラグは、水、セメント、砂を1:2:3の重量比で配合したモルタルを打設
- (2) 膨張モルタルプラグ・セメント、膨張性混和剤(電気化学工業(株)デンカCSA#10)を12:1の重量比で配合し、これを通常のセメントとみなしてモルタルを作成
- (3) 岩石プラグ・・・・・・円柱供試体に孔を設ける際に、真ん中を50mm残したもの。この特殊なプラグ構造体の模型は、プラグと岩盤が同一の材料でできており、かつ接合面が存在しないという特徴がある。

2. 2. 2 透水試験用のプラグ構造体模型の作成方法

図 2. 1 に示すプラグ構造体の模型を作るために、砂岩の厚肉円筒内へ次の要領でモルタルを打設した。厚肉円筒内に、円筒の内径よりわずかに小さい鉄製の円柱を栓の代わりに入れ、その上にモルタルを少量ずつ投入しては、鉄製の棒で突き固めていき、プラグ部分を作成した。

この後、24時間の散水養生を経て、5日間、水中養生し、1日、大気中に放置した後、試験に供した。

2. 3 強度・変形特性の試料と供試体の作成方法

2. 3. 1 強度・変形特性の試料

本研究では、岩盤とプラグの模型に砂岩とモルタルを用いた。砂岩は寒沢露天堀炭鉱（北海道空知群上砂川町）において採取した。当該炭鉱の地層は古第三期石狩統美唄層に属し、採取の対象とした砂岩層は、頁岩、石炭の薄層と互層をなした状態で賦存している。

剥土によって露出した風化の少ない所を選び、直径200mmのコアボーリングをして砂岩を採取した。

モルタルは、配合比がセメント：砂：水＝3：6：2（重量比）とし、2～3週間の養生したものを試験に供した。セメントは、普通ポルトランドセメント、砂は乾燥珪砂7号を使用した。

2. 3. 2 供試体の作成方法

まず、砂岩とモルタルが接合した試料を以下の手順で作成する。

- ①直径200mm長さ約150mmの円柱形の砂岩の端面が平面かつ軸に対し垂直になるように仕上げる。
- ②上記の砂岩試料を鉛直に立てて型枠の中に設置し、その上からモルタルを流し込む。モルタルの配合比は、セメント：砂：水＝3：6：2（重量比）とする。

この試料から、次の要領で、接合面が所定の傾きを持つ直径30mm、長さ60mmの円柱供試体を作製する。まず、クリノメーターを用いて、接合面とコアリングの方向との成す角を所定の大きさ θ になるように試料を台にセットする。次に、コアボーリングして得たコアを整形して供試体とする（図2. 2参照）。接合面の法線と載荷軸との成す角度 θ は $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ とした。

2. 4 プラグと岩盤の間の接合面の観察

プラグ構造体の模型（2. 1. 1項参照）を縦割りにし、断面に表れた接合面を観察の対象にした。接合面は微細なために、その微視的構造はレプリカ法を用いて観察することにした。レプリカ用フィルム（Bioden R. F. A. 応用商事株式会社）はアセチルセルロース製で、厚さ0.034mm 寸法は10cmx12cm である。フィルムに写し取った像は、光学顕微鏡で観察した。

図2. 3は顕微鏡写真で、空隙は黒く見える。接合面に相当する帯状領域では、独立した円形または楕円形の空隙が他の領域に比べて密に分布しているのが認められ、これが接合面の特徴になっている。この接合面に分布する空隙の形状として、モルタルプラグの場合には、径が数十～数百 μm 程度の楕円形が多い（図(a)）。一方、膨張モルタルプラグの場合には、径が数十 μm 程度の円形が多く、また、空隙の分布密度も通常のモルタルプラグに比べて小さい（図(b)）。

上記の特徴から、接合面は他に比べて、強度と剛性が小さく、透水係数は大きいと予想される。

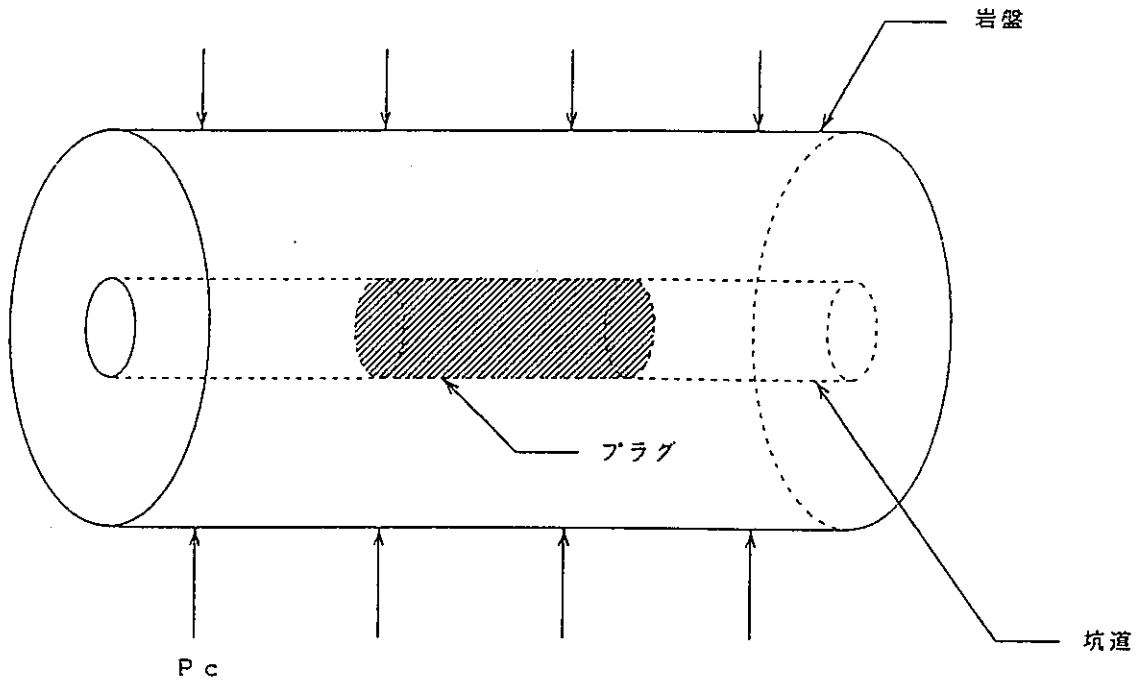


図 2. 1 プラグ構造体の模型。厚肉円筒状の砂岩供試体の孔内にプラグが打設されている。

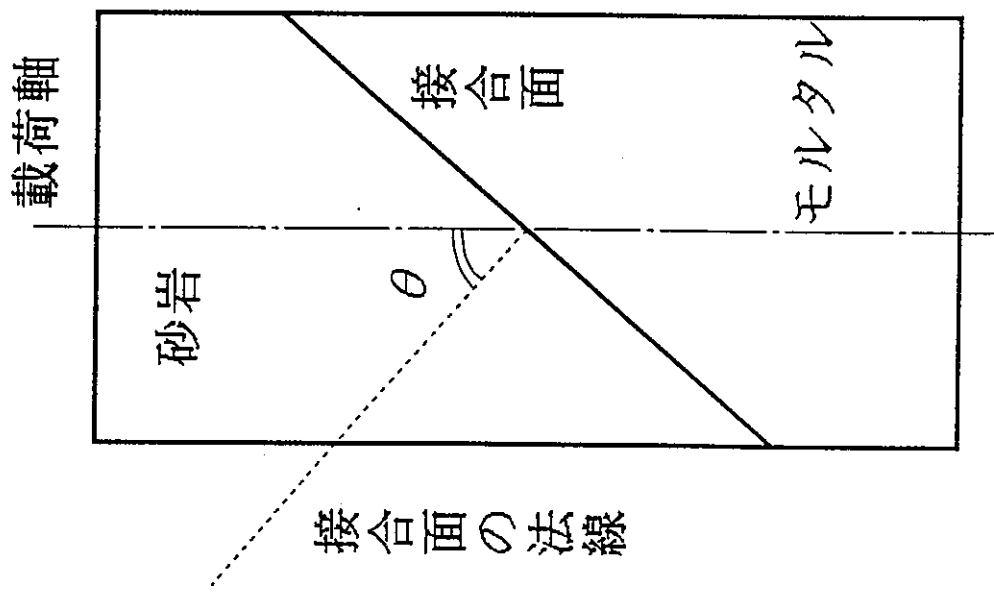
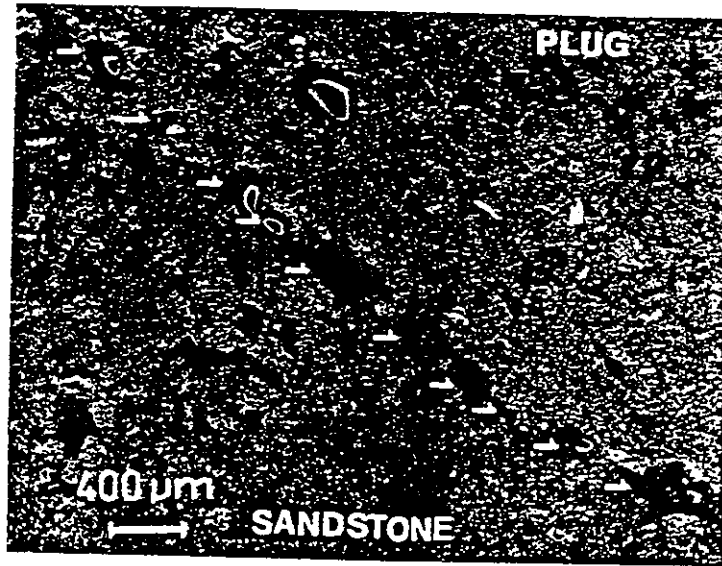
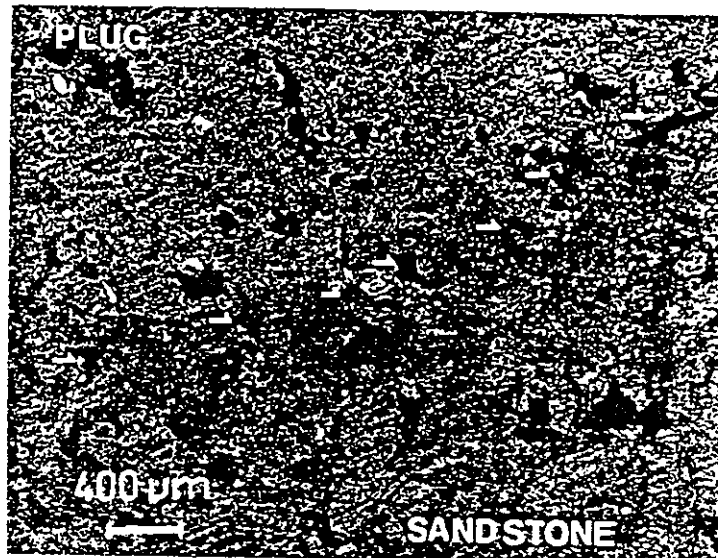


図 2. 2 砂岩-モルタルの供試体



a)



b)

図 2. 3 砂岩—モルタルの接合面の微視的構造。 a) 通常のモルタル、
b) 膨張性モルタル

第3章 プラグ接合面の強度・変形特性の評価法

3. 1 試験方法

3. 1. 1 プラグ接合面の強度特性の試験方法

本研究では、モルタル-砂岩の接合面の強度特性及び変形特性を求めるための簡便かつ正確な試験方法を開発する。このために、図2. 2に示すような一枚の傾いた接合面を持つ円柱形供試体を一軸載荷する試験法を採用することにした。この方法の特徴は、供試体内部の3つの部分、すなわち、砂岩部、モルタル部、接合面のいずれも、一様な一軸圧縮応力状態になっていることである。したがって、応力状態が簡単・明瞭なので、得られる結果の信頼度が高い。欠点は種々の応力下で試験ができないことにある。

載荷応力が σ に達したときに、接合面でせん断破壊が生じた場合、接合面に働く垂直応力 σ_n 、せん断応力 τ は、接合面の法線と載荷軸のなす角度を θ とすれば、次のようになる。

$$\sigma_n = \sigma \cos^2 \theta$$

$$\tau = \sigma \sin \theta \cos \theta$$

いくつかの異なる傾き θ を持つ供試体が、いずれも接合面でせん断破壊するものとする。測定値(σ_n 、 τ)を σ_n - τ 座標にプロットすれば、これらの点を結ぶ曲線は接合面の破壊条件式を与える。もし、曲線が直線になれば、破壊条件はMohr-Coulombの式で近似され、接合面の粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ は、直線の縦座標の切片、傾きとして与えられる。

3. 1. 2 プラグ接合面の変形特性の試験方法

載荷試験に先立ち、載荷軸(x軸に平行と仮定する)に平行な直線上に、接合面を挟む上下の2点に測点を設けておく(図3. 1a参照)。

載荷応力が σ になったときに生じる2つの測点間の相対変位は、x方向成分が Δx 、x軸に垂直なy方向成分が Δy であるとする。これらの相対変位は、砂岩、モルタル、接合面の3つの変位成分の和である。したがっ

て、接合面の存在による Δx 、 Δy の大きさ Δx_c 、 Δy_c は次のようになる。

$$\Delta x_c = \Delta x - \sigma (l_a / E_s + l_b / E_m)$$

$$\Delta y_c = \Delta y$$

ここに、 E_s 、 E_m は、砂岩、モルタルのヤング率である。

変位量 Δx_c 、 Δy_c の内で、接合面に平行、垂直な成分 Δu 、 Δv は次のようになる。

$$\Delta u = \Delta y_c \cdot \sin \theta + \Delta x_c \cdot \cos \theta$$

$$\Delta v = \Delta y_c \cdot \cos \theta - \Delta x_c \cdot \sin \theta$$

したがって、接合面の垂直剛性 K_n 、せん断剛性 K_s は次のように評価される。

$$K_n = \sigma_n / \Delta v$$

$$K_s = \tau / \Delta u$$

3. 2 相対変位の計測方法

上記のように、応力を受けると接合面は相対的な変位を生じる。この内で、接合面に平行な成分は接合面を挟んだ上下測点の向きが異なる。このずれ変位は、不連続な性質があるので、例えば、抵抗線ひずみゲージで計測できない。また、ずれ変位は不連続面の上下面で生じるので、2測点をなるべく接近させる（1mm程度の間隔に）必要がある。πゲージは、この要求に答えることができず、また、測定精度が悪い。このように、市販のひずみゲージや変位計では、接合面の相対的な変位を計測することが困難である。

このために、本研究では、この変位計測方法を新たに開発することにした。結局、測点の移動をCCDカメラで観察し、ビデオテープに記録する方法で測定することにした。微細な移動量を測るには、倍率の高い対物レ

レンズをCCDカメラに取り付ける必要がある。ここでは、1000倍のレンズを採用した。また、2測点の相対的変位を正確に測るには、2つの測点を同一の視野に入れた方がよい。そこで、直径約0.1~0.3mmの細いガラス棒（ウイスキー）の一端を測点に接着し、他端が同一の視野に入るような方法を採用することにした（図. 3. 1b参照）。

載荷試験後、ビデオテープの画像をコンピューターに取り入れ画像処理を施し、各応力レベルにおけるガラス棒同士の相対的な位置関係を測定する。これから2測点の相対変位が求められることができる。

3. 3 接合面の剛性および強度に関する試験の結果

3. 3. 1 供試体を構成する砂岩とモルタルの強度・変形特性

2. 3. 2項で述べた傾いた接合面をもつ供試体（図2. 2参照）を用いて一軸圧縮試験を行った。これに先立ち、供試体を構成する砂岩とモルタルの一軸圧縮試験を行い、強度・変形特性を調べた。結果を表3. 1に示す。

3. 3. 2 傾いた接合面をもつ供試体の一軸圧縮試験結果（強度特性）

接合面でせん断破壊が生じたデータを用いて、破壊時の接合面の応力状態を $\tau-\sigma$ 座標にプロットした結果が、図3. 2、3である。データは直線の上に乗っており、かつ、直線からのばらつきが小さい。したがって、本測定結果は信頼が置けると判断される。

接合面の強度特性値である粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ は、次のように評価される。なお、供試体の命名法であるが、例えば、M1-S1は、モルタルとしてM1、砂岩としてS1を用いたことを意味する。

供試体名	c 、 ϕ	
M1-S1	$c = 1.99 \text{ MPa}$	$\phi = 52.6^\circ$
M2-S2	$c = 6.56$	$\phi = 32.0^\circ$

表 3. 1 からわかるように、モルタル、砂岩とも、供試体間に強度の差異はあまりない。しかし、接合面の強度はかなり異なる。この結果は、構成要素と接合面の強度の間に、高い相関関係が成立する必要はないことを示している。

3. 3. 3 傾いた接合面をもつ供試体の一軸圧縮試験結果(変形特性)

試験結果、図 3. 4、5 に示す応力-変位線図を得た。なお、2 点間の相対変位は接近を正とした。

測点にはかなりのばらつきがあるが、応力が小さい立ち上がりの領域では、直線の周りにばらついているように見える。このみかけのあてはめ直線から、3. 1. 2 項で示した方法によって、接合面の垂直剛性 K_n 、せん断剛性 K_s を下記のように評価することができる。

供試体名	K_n	K_s
M1-S1	1.59 MPa/ μm	1.14MPa/ μm
M3-S3	17.4	3.25

いずれも、垂直剛性はせん断剛性よりも大きい。これは、岩盤の不連続面の場合と同じである。砂岩のヤング率は、表 3. 1 に示すように、S3の値はS1よりも2倍以上大きい。M3-S3はM1-S1に比べて剛性が大きいが、構成要素の剛性を反映しているのかも知れない。

応力が大きくなると、応力の増分に対するずれ変位(接合面に平行な相対変位)の増分は大きくなり、見かけの剛性が低下していることを示している。これは、応力が強度の限界に近ずき、降伏が始まっていることを示している。

3. 3. 4 一軸引張試験結果

端面に平行な接合面を中央に持つ直径約30mm、長さ約120mmの円柱形供試体の両端部を特殊なエンドピースに接着し、エンドピースをユニバーサ

ルジョイントのついた長さ300mmのロッドを介して一軸方向に引っ張った。引張破壊は接合面で起こったので、接合面の引張強度は、構成要素である砂岩、モルタルの引張強度よりも小さいことが示された。

供試体M1-S1の接合面の引張強度は 4.14MPa と評価された。

表 3. 1 構成要素の力学的性質

構成要素	供試体	圧縮強度 MPa	ヤング率 GPa	ポアソン比	縦弾性波速度 Km/s
モルタル	M1	44.2	12.7	0.20	2.77
	M2	42.2	11.3	0.18	2.99
	M3	42.3	12.0	0.23	3.02
砂岩	S1	73.3	10.8	0.11	2.22
	S2	80.4	23.3	0.13	3.91
	S3	163.0	27.8	0.15	3.82

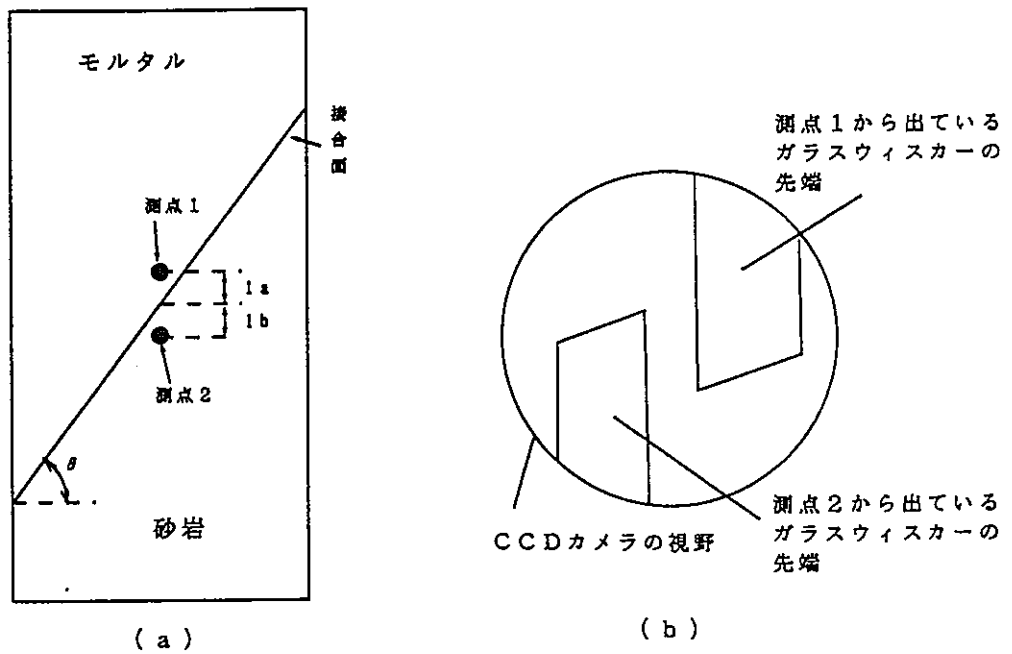


図 3. 1 傾いた接合面をもつ供試体の測点 (a) と2つの測点をCCDカメラの同一の視野に入れる方法 (b)

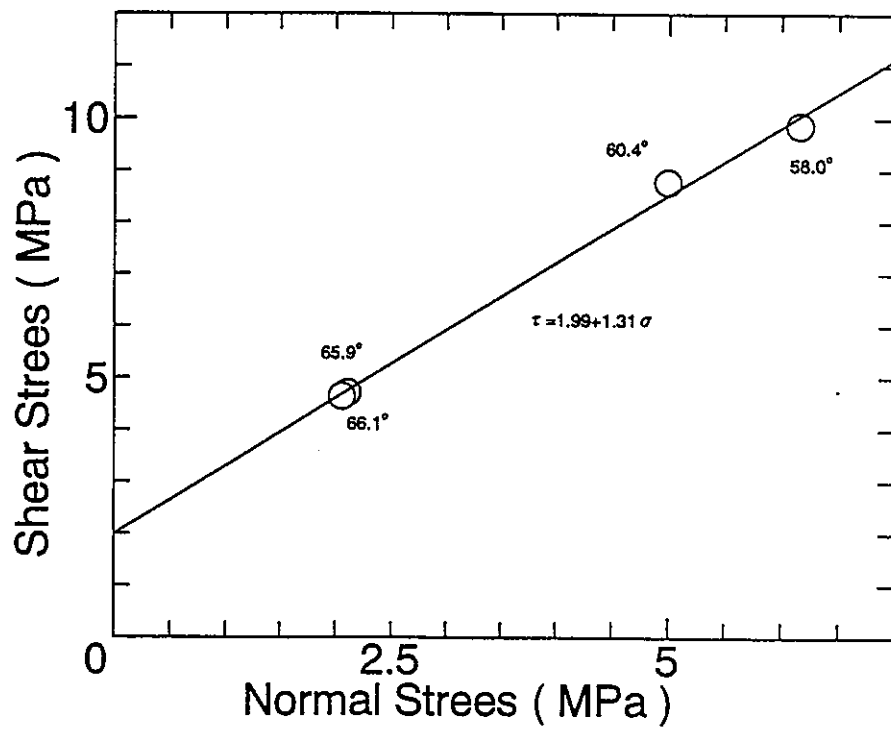


図 3. 2 接合面の破壊時の $\tau - \sigma$ 線図 (供試体 M1-S1)

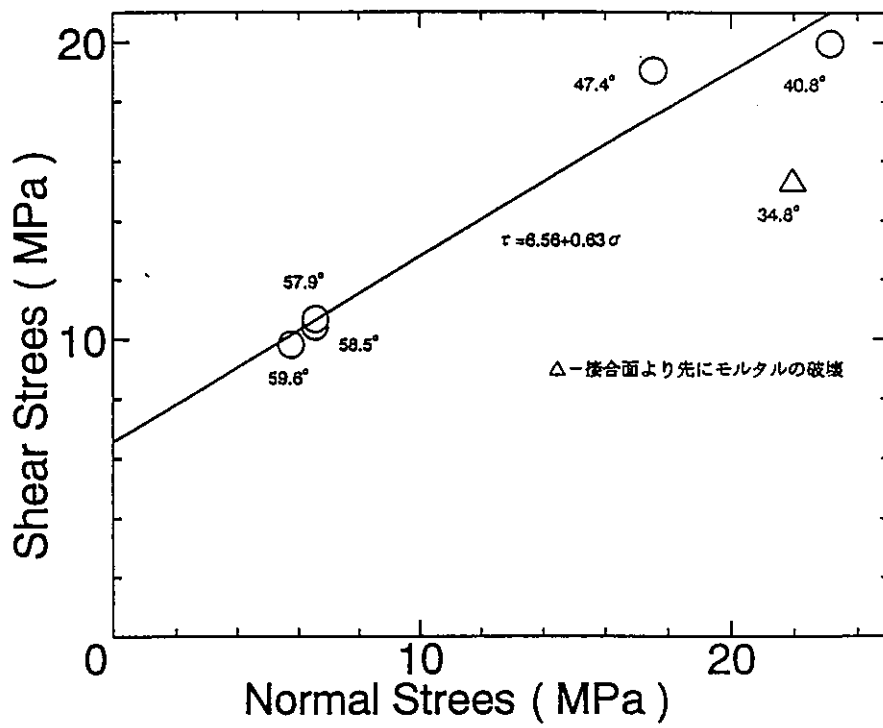


図 3. 3 接合面の破壊時の $\tau - \sigma$ 線図 (供試体 M2-S2)

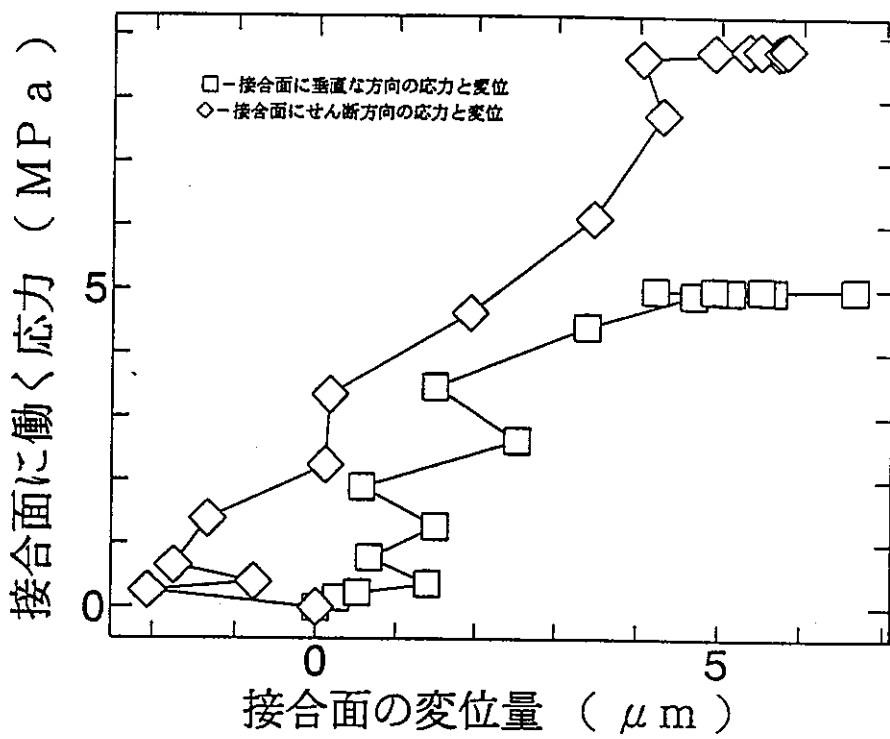


図 3. 4 接合面に作用する応力-相対変位線図。相対変位は 2 測点間の値である。(供試体 M1-S1)

$\theta = 60.4^\circ$, $l a = 0.9\text{mm}$, $l b = 1.0\text{mm}$

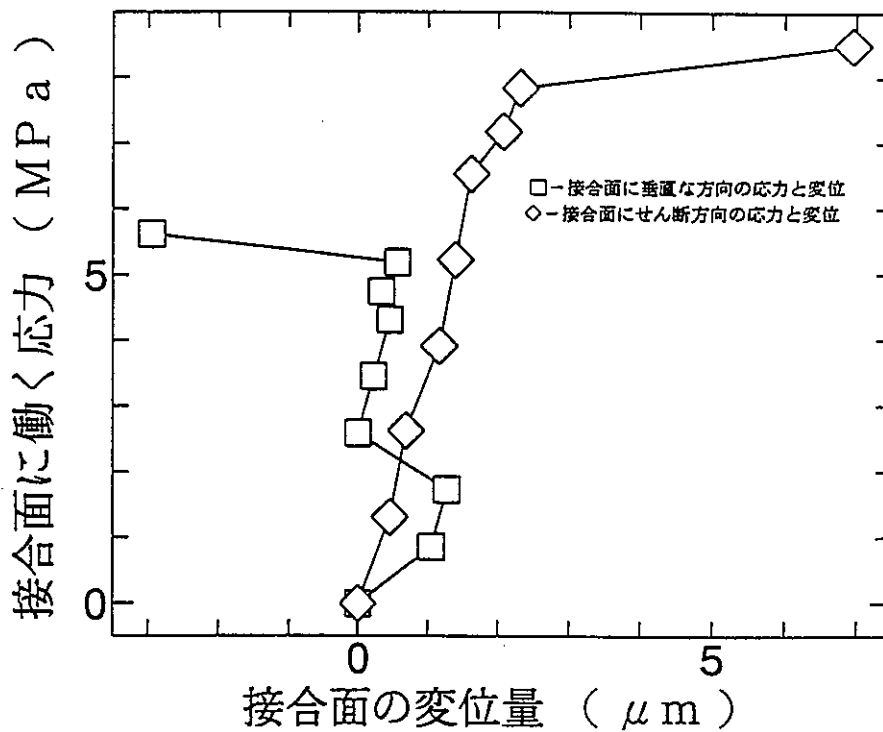


図 3. 5 接合面に作用する応力-相対変位線図。相対変位は 2 測点間の値である。(供試体 M3-S3)
 $\theta = 44.8^\circ$, $1 a = 0.5\text{mm}$, $1 b = 0.5\text{mm}$

第4章 プラグ構造体の逐次破壊

4.1 解析方法

耐圧プラグの一端（の側）が大気圧に等しいときに、他端（の側）に圧力 p が作用する場合、発生する破壊のモードと破壊圧を予測するために、8 節点アイソパラメトリック有限要素を用いた有限要素法によって数値応力解析を行う。

図 4. 1 に示すような軸対称領域を解析の対象にする。すなわち、円柱形をしたプラグが円形断面坑道に打設されている場合を想定する。この場合、プラグと岩盤間の接合面は、薄肉円筒形を呈することになる。プラグ長 (L) の影響をみるために、次のような 2 つの長さ L_1 、 L_2 について計算を実行する。

ケース 1 : $L_1 = 1.25 D$

ケース 2 : $L_2 = 2.50 D$ (D : 円形断面坑道の径)

地圧は、大きさ $\sigma = 0.1 \text{MPa}$ の等方圧が解析領域の遠方に作用しているものとする。岩盤、プラグは、それぞれ砂岩、モルタルで構成されているものとする。これらの強度・変形特性特性は 3 章で明らかにされており、次の値を用いる。

モルタルのヤング率 $E_m = 11.3 \text{GPa}$, ポアソン比 $\nu_m = 0.18$

砂岩の " $E_s = 23.3 \text{GPa}$, " $\nu_s = 0.13$

接合面の剛性は十分に大きく、また、接合面の引張強度 σ_t は、砂岩、モルタルよりも小さいものとする。このような仮定の下では、弾性状態の場合の領域の変形は接合面の存在の影響は受けない。

4.2 解析結果

4. 2. 1 弾性状態

図4. 2は、ケース2の場合のプラグ周辺の径方向の応力成分 σ_r の分布を示したものである。ほとんどの場所で圧縮になっているが、圧力の作用する側のプラグ端近傍は例外で、ここでは σ_r は引張になっている。この値はプラグ端で最大になる。円周方向の応力成分 σ_θ にも局部的に引張が現れるが、その大きさは σ_r に比べて1ケタ近く小さい。ケース1についても応力分布に関して同じ特徴が見られる。

したがって、いずれのケースについても、接合面端部の σ_r が引張強度 σ_t に達すると、ここで破壊が生じる。すなわち、プラグ端の接合面で最初の破壊が生じると予想される。ケース1、2について発生する最大引張応力の値は、それぞれ0.13、0.051なので、破壊の初生の圧は、ケース2の方がケース1より約2倍大きい。

4. 2. 2 破壊の初生以降の挙動

次に、この接合面の端部で引張破壊が発生し、ここに引張き裂が入った以降の挙動についての解析結果をみってみる。僅かの長さのき裂の存在は、残りの接合面の引張に対する抵抗力の負担を高め、接合面における応力成分 σ_r は、ほとんどの領域で引張になり、端部に接する極く狭い領域で圧縮が生じるだけである(図4. 3参照)。引張応力の最大値は、大気圧側の端部の圧縮場に隣接した所とする。その値は、ケース1、2の場合、弾性解の3.24、7.24倍になる。

したがって、一旦、引張型の破壊の初生がプラグ端部の接合面で起これば、引張き裂は一気に接合面を進み、他端に達してしまうと予想される。

4. 2. 3 プラグの耐圧性能

円柱形プラグは、不安定破壊をするという意味で危険であり、負荷する圧力は初期地圧の大きさ以下にとどめるべきことが解析で示唆された。耐圧性能を増すために、プラグに膨張性をもたせるのは効果があろう。不安定破壊を防ぐには、プラグ形状をそろばん玉型にするなどして、接合面内

を引張破壊が伝搬しないようにするのが効果的であると考えられる。

なお、プラグの強度が十分に大きくなり、プラグで破壊しなくなった場合には、最初の破壊は、圧を受ける側の坑道で引張破壊が起き、その結果、縦き裂などが発生する。これは、プラグの補強はある限界を越えて行う必要がないことを意味する。

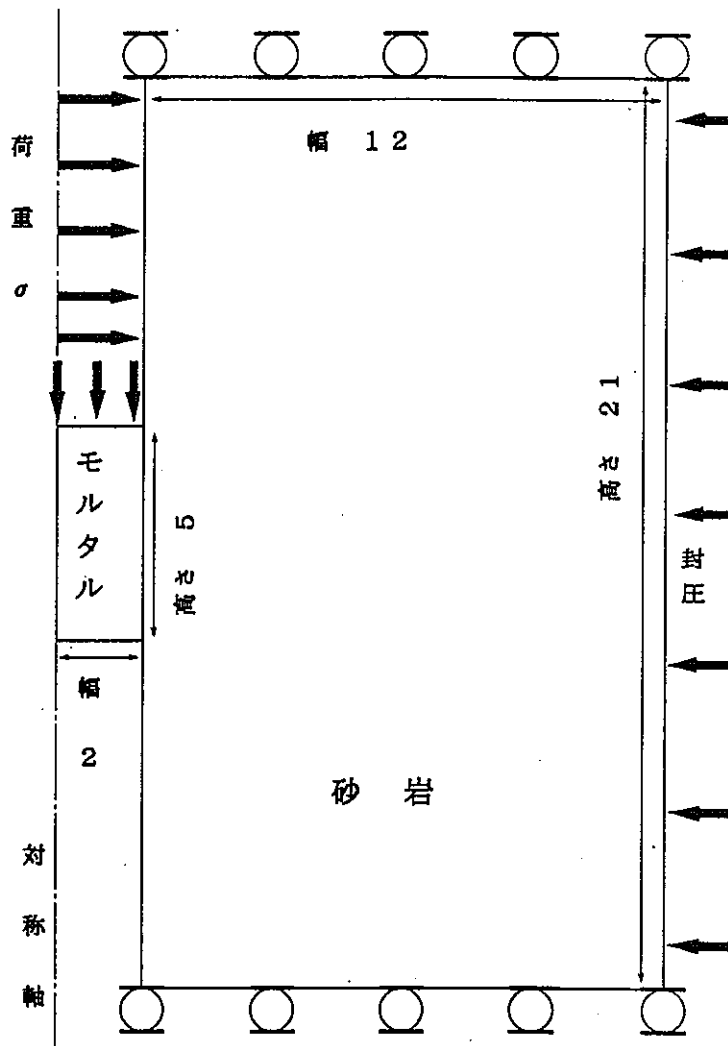


図 4. 1 解析モデルと境界条件

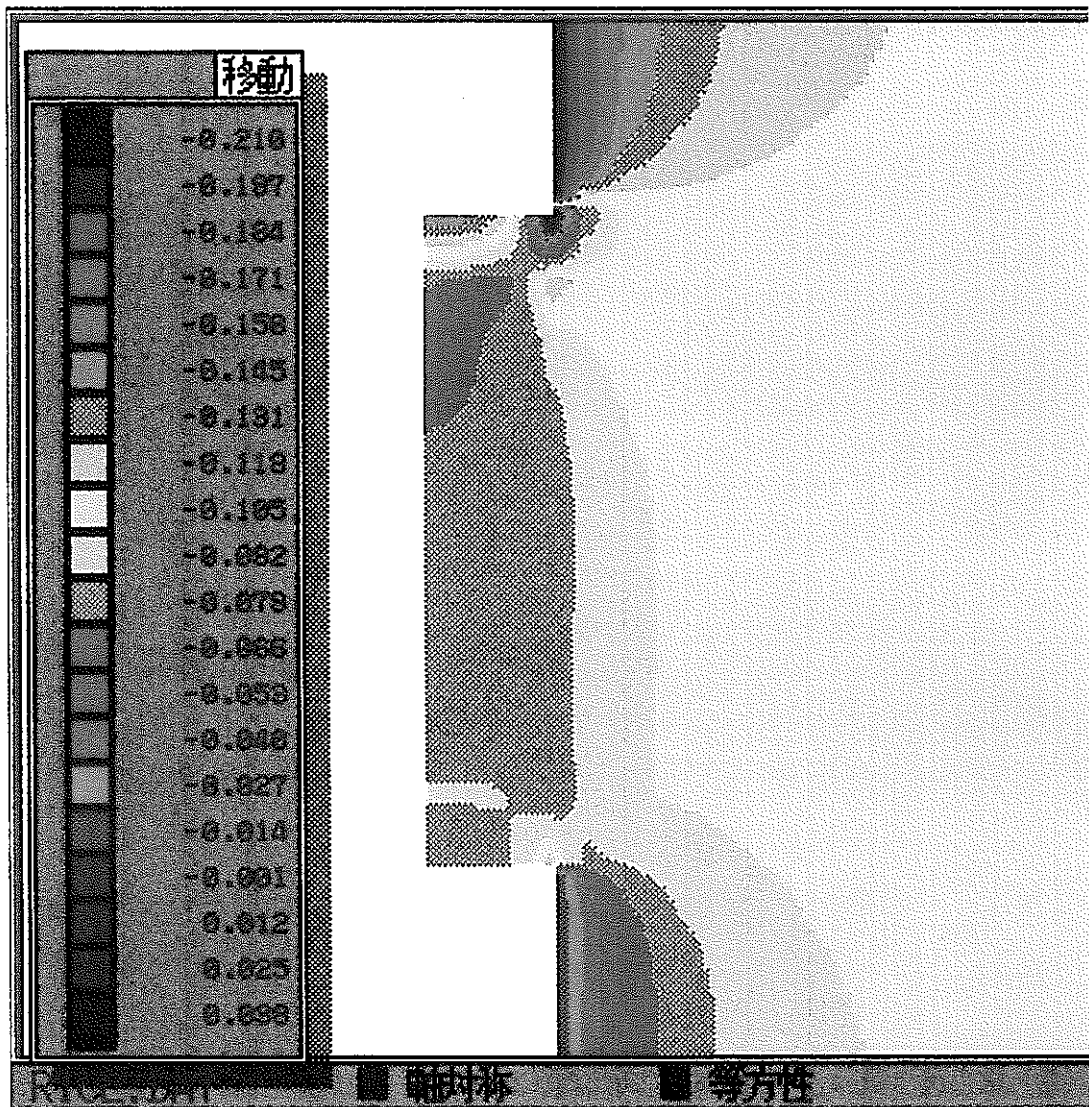


図 4. 2 σ_r の分布 (弾性解)。ケース 2

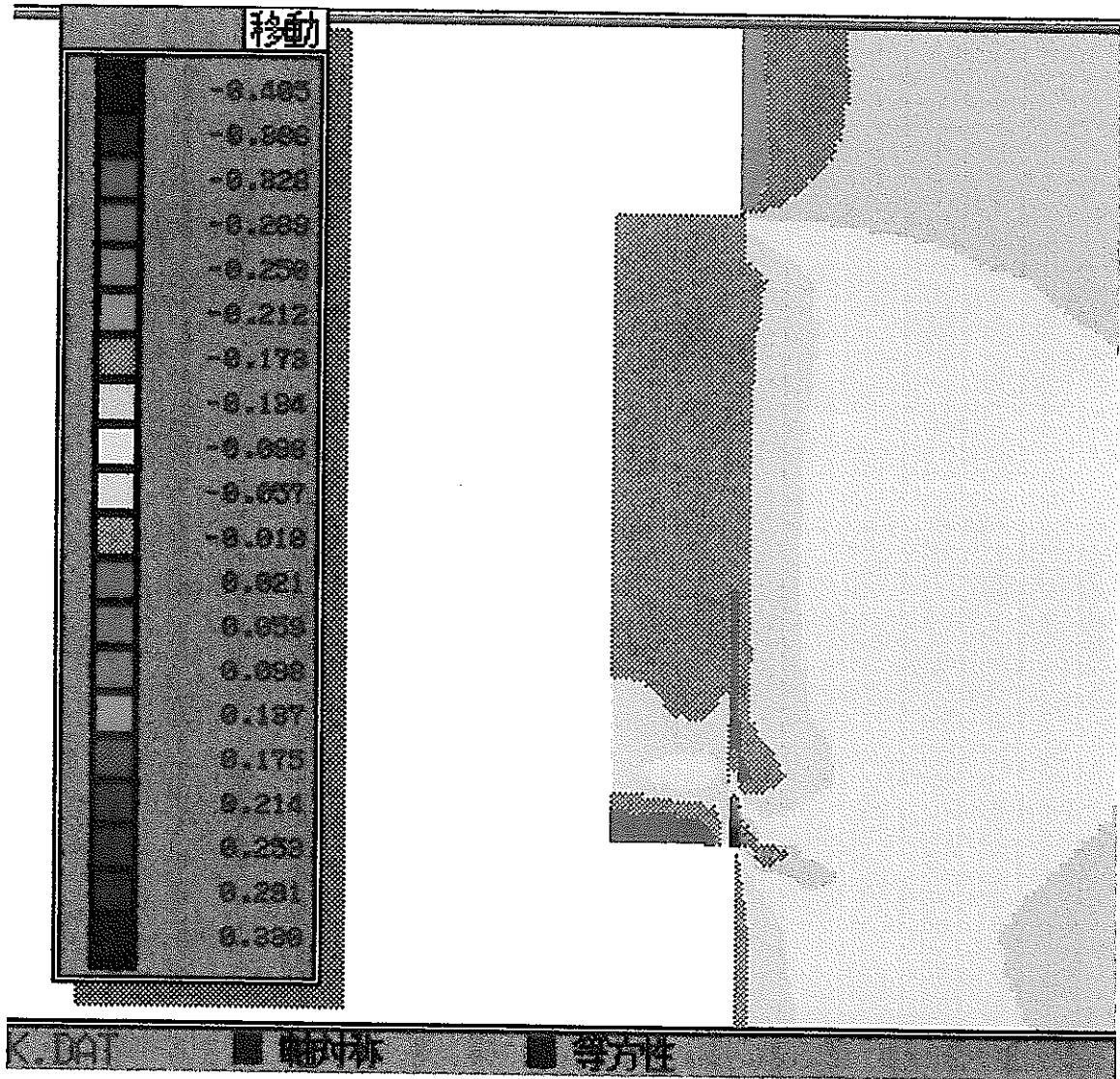


図 4. 3 σ_r の分布（圧力側の端部で引張り裂が入った場合）。ケース 2

第5章 プラグ構造体の透水性

5. 1 プラグ構造体の浸透流試験にトランジェントパルス法を使用することの妥当性に関する検討

岩石の透水係数の測定方法として広く使われるようになっているトランジェントパルス法では、供試体として、通常は、均質な透水係数を持つ円柱形供試体が用いられる。そして、あらかじめ一定の間隙水圧の下で含水飽和させた供試体に対して、一端の水圧をステップ状に上げて、その後の供試体両端間の差圧の経時変化を測定する。差圧-時間線図は、片対数座標上で直線となり、その傾きとして透水係数が求められる。

本研究においては、供試体が図2. 1に示すようなプラグ構造体の場合にもトランジェントパルス法を応用して、透水性を調べることを考える。しかし、試験で得られる差圧-時間線図が片対数座標上で直線になるかは不明である。もし、直線にならなければトランジェントパルス法は使えないことになる。そこで、これをまず確認することにした。

このために、プラグも岩盤と同じ材料で作られ、かつ接合面のない岩石プラグ構造体(2. 1. 1項参照)を取り上げ、これにトランジェントパルス法と同じ初期条件、境界条件を設定して、透水挙動を調べることにした。このために、軸対称構造物を対象とした非定常浸透流解析法を有限要素法によって実行した。

得られた結果を図5. 1に示す。これから、プラグ構造体においても、差圧-時間線図は片対数座標上で直線になることがわかる。この直線になるという挙動は、プラグ構造体を構成するプラグと岩盤の透水係数が異なっても、また、両者の間に接合面が介在しても、同じと考えられる。要するに、トランジェントパルス法はプラグ構造体についても応用できると結論してかまわない。

図5. 1には、砂岩の岩石プラグ構造体の測定結果も示されている。当然のことながら、試験結果も差圧-時間線図は片対数座標上で直線になっ

ている。この場合、予測計算において透水係数を $K=7.3\text{mdarcy}$ とすれば、予測と実験結果が一致するので、これが砂岩の透水係数になる。

5. 2 プラグ構造体の接合面の透水係数の評価方法と問題点

5. 2. 1 プラグ構造体の接合面の透水係数の評価方法

プラグ構造体に対してトランジェントパルス法を応用し、接合面の透水係数を評価する方法について考える。図 2. 1 に示すようなプラグ構造体は、透水係数に関して 3 つの異なる材料から構成される。あらかじめ、岩盤とプラグの両材料については、円柱形供試体を用いた標準的な方法で透水係数を測定しておく。さらに、このプラグ構造体に対して、トランジェント・パルス法を適用する。試験で得られた差圧-時間線図の傾きが λ^* であるとする。

試験に並行して、試験に供したプラグ構造体模型について、トランジェント・パルス法の数値シミュレーションを行う。このとき、岩盤模型、プラグ模型の透水係数については、実験で得た値を使い、(未知の)接合面の透水係数については適当な値 K_g を幾つか仮定する。それぞれの K_g 値に対して、シミュレーションを実施し、差圧-時間線図の傾き $\lambda(K_g)$ を求める。すると、

$$\lambda^* = \lambda(K_g)$$

を満たす K_g が求める接合面の透水係数になる。

このように、原理的には、接合面の透水係数が評価できる。しかし、この方法には以下に述べるような問題点がある。

5. 2. 2 プラグ構造体の接合面の透水係数を評価する方法の問題点

本方法で求めた岩石プラグ(砂岩)の透水係数は、5. 1 節で述べたように、 $K=7.3\text{mdarcy}$ である。ところが、プラグ構造体の模型よりも径が小さい円柱形供試体を用い、封圧 15MPa の下で試験した結果、次のような値を得た。

$K=1.89 \mu \text{ darcy}$ (径60mm 長さ120mm)

$K=5.75 \mu \text{ darcy}$ (径30mm 長さ60mm)

このように桁数が異なるような大きな差異の生じた原因として、プラグ構造体の模型の寸法が大きいために、完全に含水飽和していなかったことが考えられる。供試体内の周辺部分に不飽和領域が存在している場合、差圧の経時変化に及ぼす影響を調べるための簡単な解析を行ってみた。すなわち、不飽和領域では浸透流が飽和領域のようにスムーズに行われないうであろうから、不飽和領域を不透水層として近似した。そして、飽和領域が不透水層によって囲まれている場合と、全領域が完全飽和している場合について、トランジェント・パルス法を適用した場合の数値シミュレーションを実施した。図5. 2は得られた差圧-時間線図を示したものである。線図の傾きは、前者の方が大きい。これは、透水係数が実際よりも大きく評価されることを意味する。

5. 2. 1項で述べた接合面の透水係数を評価する方法は、含水飽和の条件が満たされていない場合には使うことができない。プラグ構造体の模型の場合、この条件を満たしていない疑いが濃厚であると判断せざるを得ない。

なお、上記のように、供試体の径が30mmと60mmでは、透水係数の値に差異がみられる。両者のトランジェントパルス法で得られた差圧-時間線図を図5. 3に示す。径が30mmと60mmを比べると、後者の場合、差圧が理論的な予測通りに直線的に低下していないことがわかる。大きい供試体では完全な含水飽和状態が実現していないことを示唆している可能性を指摘することができる。

5. 2. 3 供試体を含水飽和させる方法-現状と改善方法

プラグ構造体の模型を対象に、トランジェントパルス法による透水試験をするために、従来使われている次の方法によって供試体を含水飽和させた(封圧15MPaで試験する場合)。

まず、模型供試体を圧力容器内に設置し、その上下端面と貯留タンクを

結ぶ間隙水圧ライン内の真空脱気を24時間かけて行った。次に、封圧を10MPa程度に設定した。供試体内への水の浸透により、間隙水圧は時間とともに減少するが、設定圧で安定するまで24時間～3日間程度静置した。間隙水圧が安定した後、封圧15MPaに設定しなおした。封圧の増加に伴い間隙水圧も増加するが、4、5日程度の時間をかけて、設定圧で安定するように間隙水圧を調整した。

供試体両端の圧力差がなくなった時点で含水飽和状態に達したものと解釈し、試験を開始した。しかし、この確認方法は、結果的にあまり正確なものではなかったと判断される。

要するに、供試体の寸法が大きい場合、特に、浸透流が生じる軸方向に長い場合には、1週間程度の時間をかけても、採用した方法によって完全に含水飽和させることは難しいようである。

これに代わる方法として、次のような方法を提案したい。すなわち、図5.4のように、プラグ構造体の模型を輪切りにした軸方向に短い供試体を用いる。このような供試体であれば、従来の方法で完全に含水飽和させることができるので、信頼の置ける測定結果が得られる。測定結果に4.2.1項で述べた方法を適用すれば、接合面の透水係数の評価が可能になる。

図2.1に示したプラグ構造体の透水挙動を、実験によって直接的に得ることは困難である。しかし、これを構成する3つの個々の要素の透水係数は評価できる：

- ・ 岩石模型とプラグ模型の透水係数は、円柱形供試体を用いた標準的な方法で測定すればよい。
- ・ 接合面の透水係数は上記の方法で得ることができる。

これらを入力データとして数値解析による浸透流のシミュレーションをすれば、プラグ構造体の透水挙動に関する正確度の高い予測を得ることができる。

5.3 プラグ構造体の周りの浸透流に及ぼす構成要素の寄与

5. 3. 1 解析方法

プラグの一端に作用する圧力水は、図5. 5に示すように、構造体を構成する3つの要素内を流れ、他端側に流入する。このとき、岩盤、プラグ、接合面を通る流量を、それぞれ、 Q_s 、 Q_p 、 Q_j とする。総流量を Q_t とすれば、

$$Q_t = Q_s + Q_p + Q_j$$

が成立する。

浸透流がプラグ構造体のどの場所を通りやすいかは、比： Q_s/Q_t 、 Q_p/Q_t 、 Q_j/Q_t の大小によって与えられることは明かである。そこで、有限要素法による浸透流解析によって、いくつかの条件の下でプラグ構造体の透水性を検討することにする。なお、プラグ構造体としては、図2. 1に示したモデルを仮定する。

5. 3. 2 プラグ構造体の透水性に及ぼす接合面の寄与

プラグ構造体の透水性に及ぼす接合面の寄与を明らかにするために、次のような方法を試みた。すなわち、プラグと岩盤の透水係数は、実験で得た値に等値させた。そして、接合面の透水係数だけを変化させて、それに伴う透水挙動をシミュレーションによって調べた。ところで、接合面の透水係数は不明なので、平行平板モデルを仮定し、平行平板の厚みが透水性に及ぼす影響を検討することにした。

図5. 6は計算結果を示したものであるが、接合面の厚みが $0.1\mu\text{m}$ を境に、それ以上大きくなると全流量に占める接合面の寄与の割合が急激に大きくなり、逆に、それ以上小さくなると、接合面の流れは全体の流れに対して無視し得る大きさになることがわかる。

膨張性モルタルプラグの遮水性能は、通常モルタルプラグのそれよりも優れていることが明らかになっている。この理由の一つとして、膨張性モルタルプラグの場合、接合部の隙間が無くなることを挙げることができる。

5. 3. 3 プラグの効果

プラグ構造体の透水性に及ぼすプラグの長さや透水係数の影響を調べてみた。

計算結果を示した図5. 7から、プラグ自体の透水係数を小さくしたり、プラグ長を増しても、プラグ構造体の透水性を改善する上であまり効果のないことがわかる。

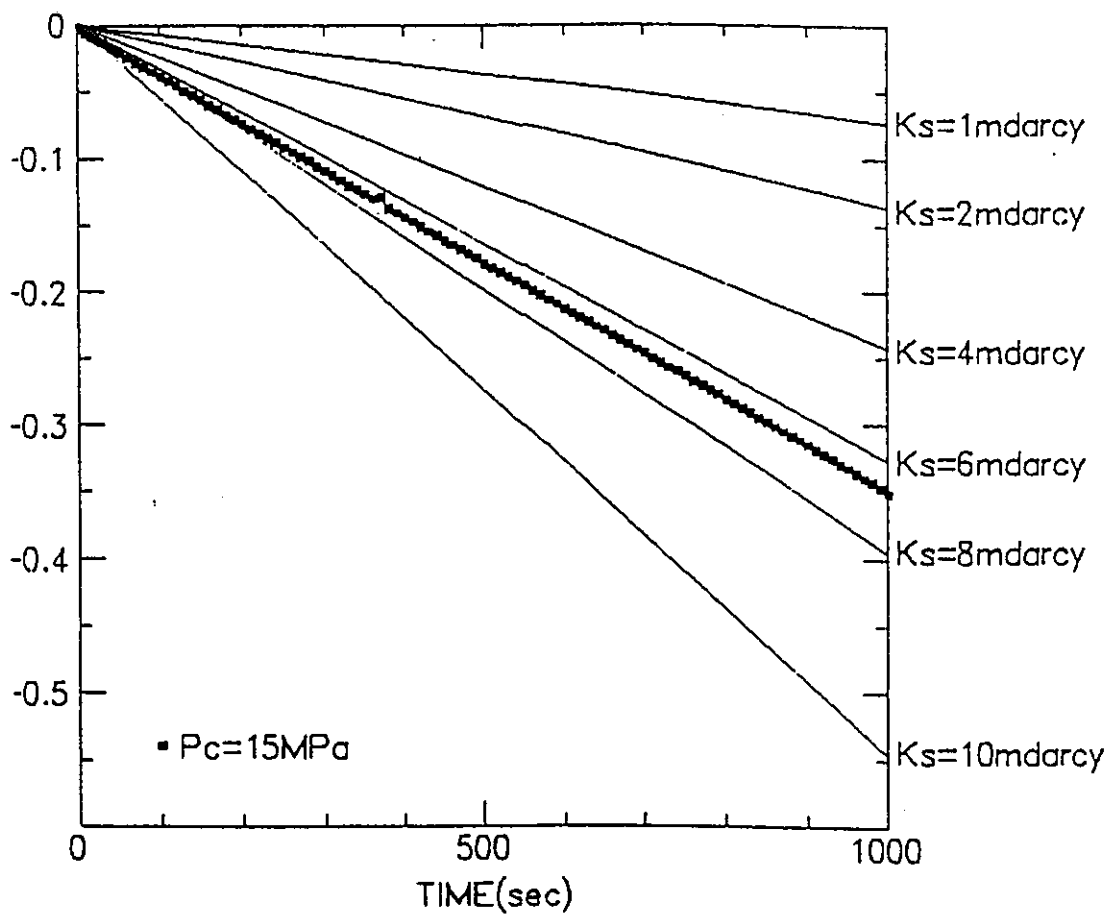


図5. 1 図2. 1に示すプラグ構造体の模型（岩盤プラグ模型。2. 2節参照）にトランジェントパルス法による境界条件と初期条件を与えた場合の差圧-時間の挙動に関する有限要素法による予測。 K_s は仮定した透水係数。太線は模型供試体の実験結果。

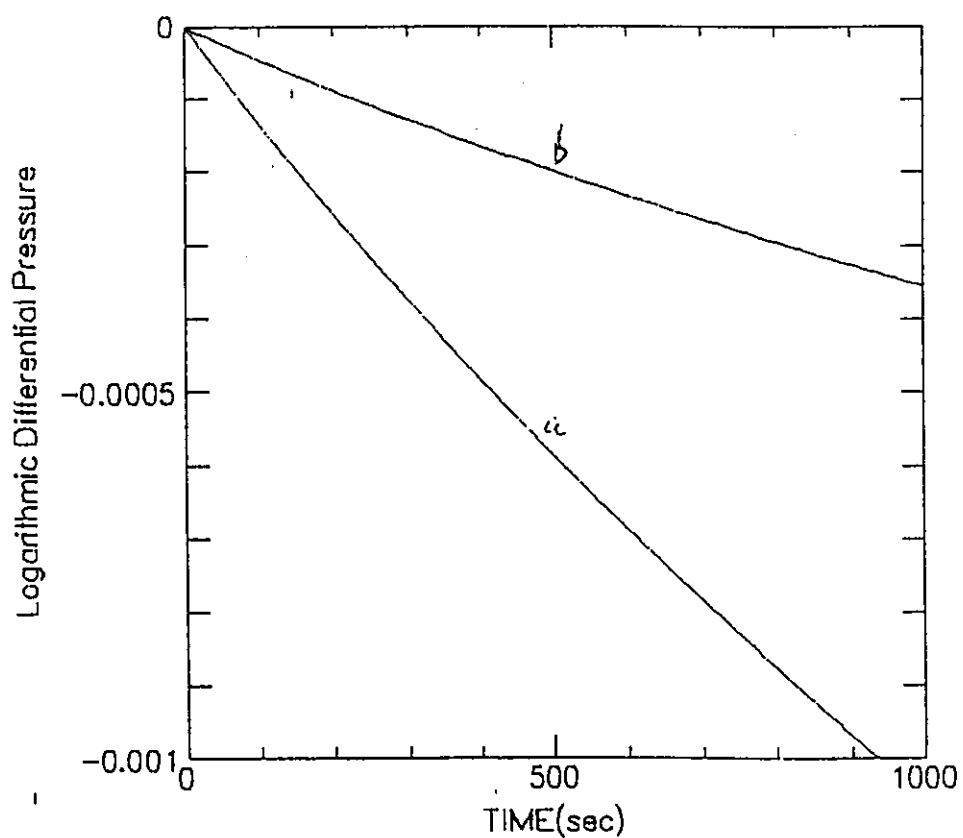
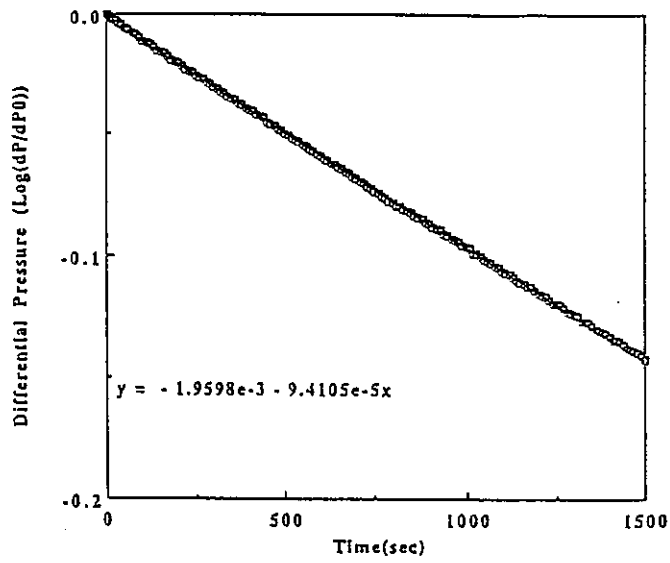
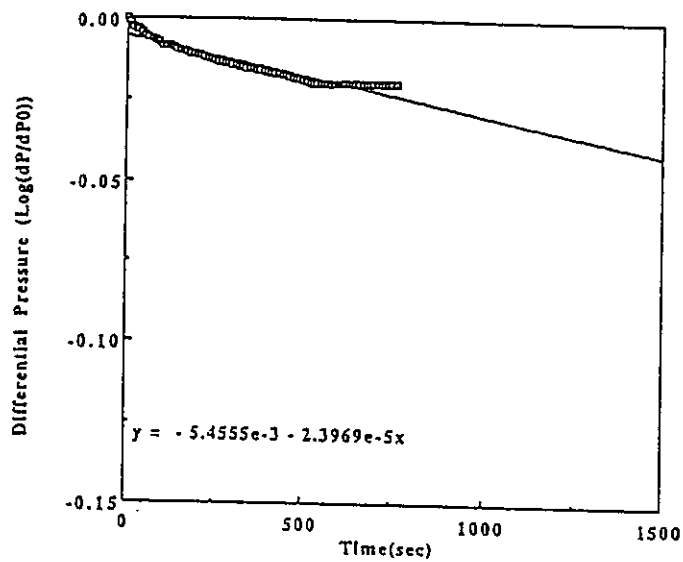


図 5. 2 図 2. 1 に示すプラグ構造体において、外半径だけを 2 通りに異ならせ、トランジェントパルス法による境界条件と初期条件を与えた場合の差圧-時間の挙動に関する有限要素法による予測。a は b に比べて外半径が小さい。



(a)



(b)

図 5. 3 トランジェントパルス法により得られた円柱形砂岩供試体の差圧-時間線図。供試体の直径、長さは、a では 30mm、60mm、b では 60mm、120mm、試験時の封圧は a では 15MPa、b では 25MPa である。

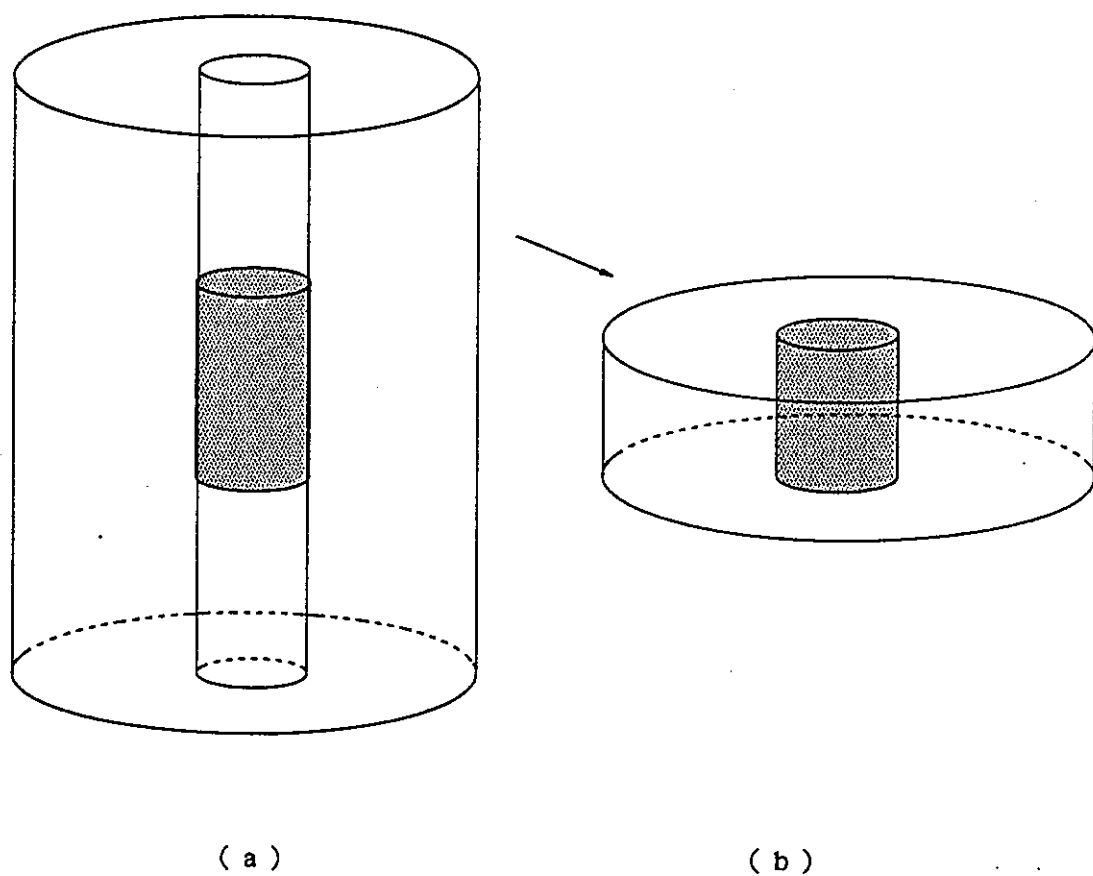


図 5. 4 プラグ構造体 (a) の接合面の透水係数をトランジェントパルス法によって測定するための供試体 (b) 。

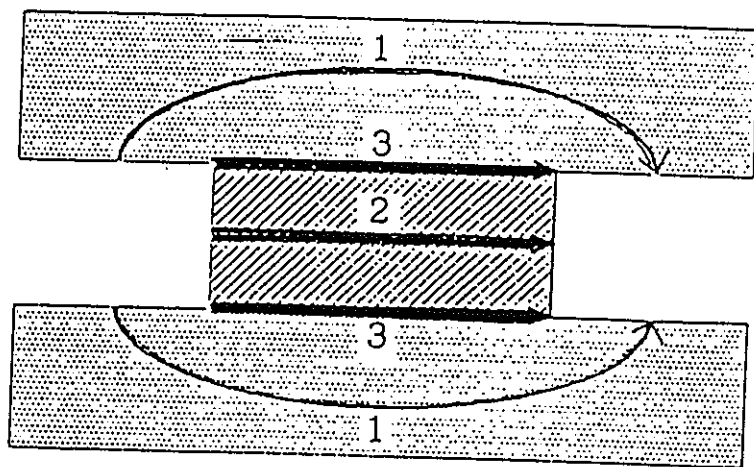


図 5. 5 プラグ構造体を流れる 3 つの流路。 1 : 岩盤内、 2 : プラグ内、
3 : 接合面

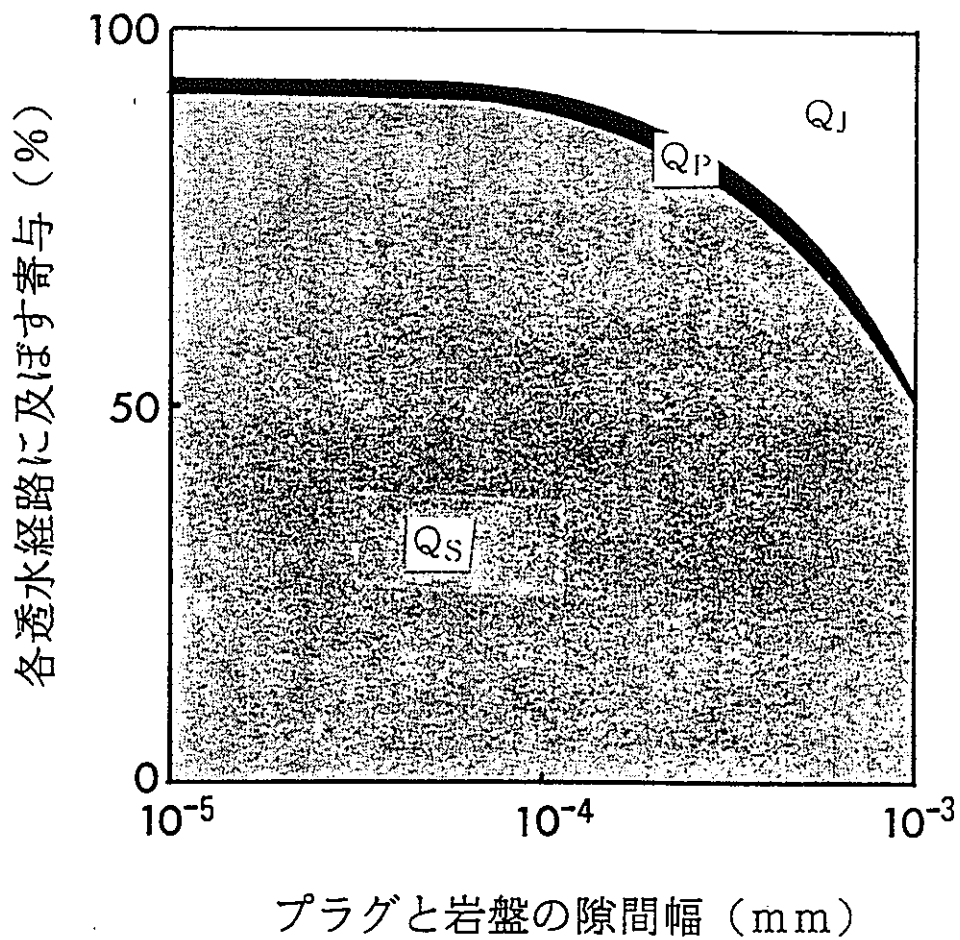
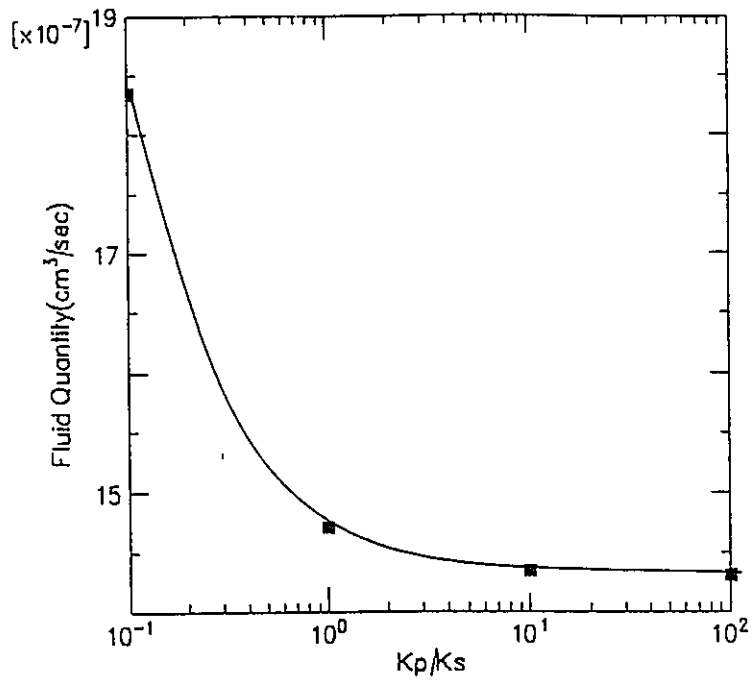
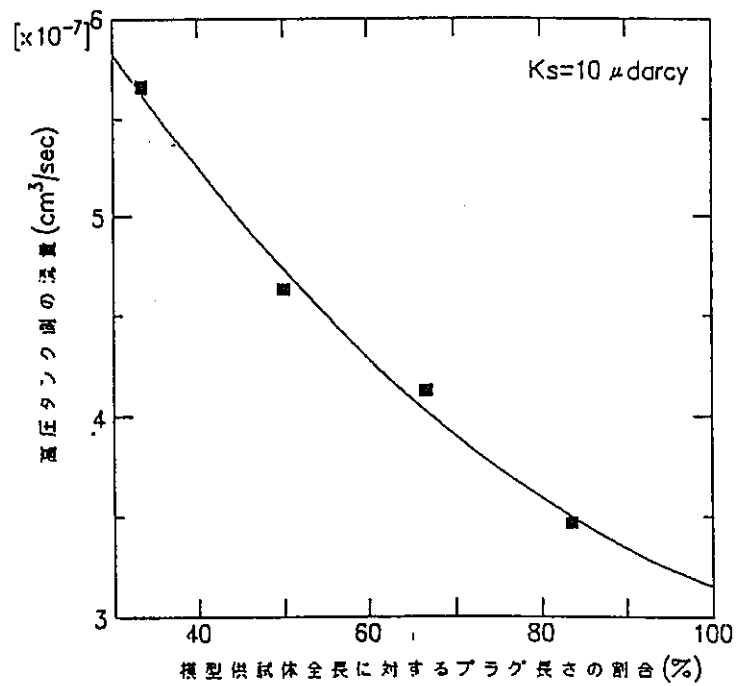


図 5. 6 プラグ構造体において、接合面の透水係数が透水量に及ぼす影響。接合面として平行板モデルを仮定し、隙間幅を幾通りか変えている。



(a)



(b)

図 5. 7 プラグ構造体において、プラグの透水係数 (a) と長さ (b) が透水量に及ぼす影響。 K_s 、 K_p はそれぞれ岩石、プラグの透水係数である。

第6章 結言

本研究で得られた主な結論は以下のようである。

砂岩—モルタルから成るプラグ構造体の接合面の微視的構造をレプリカ法を用いて観察した(2章)。接合面に相当する帯状領域に添って、独立した数十～数百 μm 程度の径を持つ円形または楕円形の空隙が他の領域に比べて密に分布しているのが観察された。このために、他に比べて接合面では透水係数が大きくなり、剛性・強度が小さくなると推測される。

接合面の剛性を評価するには、接合面の上下間の微小な相対的変形を測定する必要がある。このために、この相対的変位を、高倍率の対物レンズを付けたCCDカメラで観察・記録する方法を開発した(3章)。2測点を同一視野に入れる方法の採用により、 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ の読み取り精度を得ることに成功した。これを、1枚の接合面で挟まれた砂岩—モルタル供試体の一軸載荷試験に応用し、接合面を夾む2点間の相対変位—応力線図を得た。そして、線図の傾斜として接合面の剛性を評価した。得られた接合面のせん断剛性は垂直剛性より小さいことがわかった。また、接合面の剛性は、構成要素である砂岩とモルタルの剛性と相関のあることが示唆された。

接合面の強度特性を考慮した有限要素法による数値応力解析により、円柱形プラグの一端に圧力が作用したときの変形・破壊挙動を予測し、次のような結果を得た(4章)。内圧の大きさが主に地圧の大きさに依存する値に達すると、最初の破壊が圧力の作用するプラグ端の接合面で起こる。一端、破壊が起こると、引張破壊が接合面の中を他端まで不安定に進行する。

プラグ構造体の透水挙動を明らかにするために、プラグ構造体の模型にトランジェント・パルス法を適用し、浸透流解析を行って、接合面の透水

係数を評価することを試みた（5章）。得られた知見を箇条書きに示す。

- 1) プラグ構造体にトランジェントパルス法を応用し、接合面の透水係数を評価することは理論的には可能である。
- 2) プラグ構造体は寸法が大きいので、トランジェントパルス法を適用するための前提条件である、供試体の完全な含水飽和を実現することが難しい。
- 3) 上記の欠点を克服する方法について検討した。
- 4) 接合面の透水特性によっては、プラグ構造体全体の浸透流れが大きな影響を受ける可能性がある。

第7章 参考文献

- 1) 石島洋二：地層処分におけるシーリングに関する基礎的研究（Ⅰ）、動力炉・核燃料事業団研究内容報告書、(1992)
- 2) 石島洋二：地層処分におけるシーリングに関する基礎的研究（Ⅱ）、動力炉・核燃料事業団研究内容報告書、(1993)
- 3) 石島洋二：地層処分におけるシーリングに関する基礎的研究（Ⅲ）、動力炉・核燃料事業団研究内容報告書、(1994)
- 4) 山下秀，天野勲三，川辺金光：人工き裂面を有する試験片の力学的性質，日本鉱業会誌，Vol. 99, No. 1150, pp1021-1027, (1983)
- 5) 栗原宏武，深沢栄造，菊地宏吉：人工軟岩の製造と諸性質について，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 509-514, 1994
- 6) ISRM: Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 15(3), 99-103(1978)
- 7) 小林良二，松本浩二，奈良坂孝：岩石の簡易一面せん断試験，資源・素材学会昭和52年度春季大会研究・業績発表講演要旨集 279-280, (1977)
- 8) 小林良二，杉本文夫，奈良坂孝，川口荘太郎：岩石の一面せん断試験，資源・素材学会昭和54年度春季大会研究・業績発表講演要旨集，293-294, (1979)
- 9) 楠見晴重，寺岡克己，谷口敬一郎，西田一彦：不連続面の粗さ評価法とせん断強度特性との関係について，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 491-496, 1994
- 10) 永山功，則松春秀，片平博，小沢祐二，森田信吾：岩盤のせん断強度の及ぼす節理の角度と節理面のせん断強度の影響について，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 391-396, 1994
- 11) 石島洋二，熊倉聡，中田雅夫：耐圧プラグの強度特性に関する実験的研究，資源・素材学会平成4年度春季大会研究・業績発表講演要旨集，311-312, (1992)