

PNC ^丁J1600 94-001

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

01.10.4

[技術情報室]

本資料は 17年 8月 9日付けで
登録区分変更する。

[技術展開部技術協力課]

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・核燃料開発事業団委託研究成果報告書)

1994年2月

北海道大学工学部

石 島 洋 二



PNC ~~7~~ J1600 94-001

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・核燃料開発事業団委託研究成果報告書）

1994年2月

北海道大学工学部

石島 洋二

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松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

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



PNC ZJ1600 94-001
1994年2月

地層処分におけるシーリングに関する基礎的研究 (Ⅲ)

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¹⁾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。

昨年までの研究において、プラグと岩盤の接合面が強度的に弱く、また透水性も高いことが示唆された。したがって、プラグの性能を評価する上で、接合面の諸特性の評価は避けて通ることはできない。このために、本年度は、この接合面に焦点を当てて、強度と透水特性を調べることにした。

まず、プラグの力学的な強度特性に関しては、プラグ構造を構成する中で最も弱い要素である空洞壁面とプラグの境界の接合面の強度特性に注目し、これを定量的に評価できるような試験法を開発し、試験の実施を通して問題点の抽出を行い、信頼のおける試験法の確立を目指した。また、片側に圧力を受けるプラグの物理模型試験を実施し、破壊の機構とプラグ強

* 北海道大学工学部・資源開発工学科・岩石力学講座

度の評価法について示唆を得ようとした。この研究に関して、以下の知見が得られた。

- 1) 砂岩とモルタルの接合面の強度は、砂岩とモルタルそれぞれの強度と比較して小さい。これは、プラグ構造体の内で最も弱い部分は接合部であることを意味する。
- 2) 引張強度は、圧裂試験と一軸引張試験の両方で評価したが、差異は小さかった。
- 3) 接合面の傾斜が異なった円柱形供試体を用いた一軸圧縮試験と、回転ダイス型のせん断箱を用いた一面強制せん断試験では、せん断強度に関して同様な結果が得られた。

次に、プラグの遮水能力に関しては、昨年の研究において、強度と同様に、接合面がボトルネックになっていることが実験的に示唆された。そこで、今年は、接合面を考慮したプラグの廻りの浸透流解析手法を開発し、これを用いて、トランジェントパルス法によるプラグの廻りの浸透流の実験結果の解釈を行い、プラグの遮水性に影響する要因を明らかにすることを試みた。この研究に関して、以下の知見が得られた。

- 1) プラグを持つ坑道の廻りの浸透流をトランジェント・パルス法で解析するとき、全体の透水性を「見かけの透水係数」として評価する方法を提案した。
- 2) 接合面内の流れとして、平行板モデルの有用である見通しが得られた。
- 3) 隙間幅は少し大きくなると、そこを通る流れが急激に増し、全体の透水係数が著しく増大する。
- 4) 試験に供したモルタルプラグと砂岩の孔壁間の接合面は、隙間幅の平均値が約0.1mmあり、全体の透水挙動にかなり影響することがわかった。
- 5) プラグの透水係数を岩盤の値の1/10にすると、全体の透水係数を低減する上で効果がある。しかし、透水係数をそれ以上小さくしても効果は期待できない。

目 次

1	緒言	1
1. 1	研究の目的	1
1. 2	研究の方法と本論文の構成	1
2	プラグと岩盤の接合面の強度試験方法の開発と試験結果	3
2. 1	はじめに	3
2. 2	接合面の付着強度の試験方法	3
2. 2. 1	圧裂引張試験	3
2. 2. 2	一軸引張試験	4
2. 2. 3	回転ダイス型せん断試験装置を用いた一面せん断試験	5
2. 2. 4	傾いた接合面を持つ供試体の一軸圧縮試験	6
2. 3	供試体とその作製方法	6
2. 3. 1	圧裂引張試験用供試体の作成	7
2. 3. 2	一軸引張試験用供試体の作成	7
2. 3. 3	一面せん断試験用供試体の作成	7
2. 3. 4	一軸圧縮試験用供試体の作成	8
2. 4	試験結果	8
2. 4. 1	圧裂試験結果	8
2. 4. 2	一軸引張試験結果	8
2. 4. 3	回転ダイス型せん断試験装置を用いた一面せん断試験結果	9
2. 4. 4	傾いた接合面を持つ供試体の一軸圧縮試験結果	9
2. 4. 5	接合面の強度特性の纏めと試験法の妥当性	10

3	プラグの強度に関する模型試験	19
3.1	緒言	19
3.2	模型供試体および試験方法	19
3.2.1	供試体	19
3.2.2	試験装置および試験方法	20
3.3	試験結果と考察	20
4	接合面と多孔質媒体から成る構造体の有限要素法に基づく浸透流解析	24
4.1	緒言	24
4.2	有限要素法による浸透流の定式化	24
4.3	トランジェント・パルス法に関する有限要素法による解析精度	26
4.4	トランジェント・パルス法を用いたプラグの廻りの浸透流実験の評価方法	26
4.5	接合面の隙間幅が及ぼす影響	28
4.6	プラグと岩盤の透水係数の差異が透水特性に及ぼす影響	29
5	結言	38
5.1	本研究で得られた主な知見	38
5.2	今後に残された課題	39
6	参考文献	40

第1章 緒言

1. 1 研究の目的

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¹⁾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。

昨年までの研究において、プラグと岩盤の接合面が強度的に弱く、また透水性も高いことが示唆された。したがって、プラグの性能を評価する上で、接合面の諸特性の評価は避けて通ることはできない。このために、本年度は、この接合面に焦点を当てて、強度と透水特性を調べることにした。

1. 2 研究の方法と本論文の構成

この目的を達成するために、次の方法で研究を実施してきた。

先ず、1)のプラグの力学的な強度特性に関しては、プラグ構造を構成する中で最も弱い要素である空洞壁面とプラグの境界の接合面の強度特性に注目し、これを定量的に評価できるような試験法を開発し、試験の実施を通して問題点の抽出・改良を行い、信頼のおける試験法の確立を目指す(第2章)。また、片側に圧力を受けるプラグの物理模型試験を実施し、破壊の機構とプラグ強度の評価法について示唆を得る(第3章)。

次に、2)のプラグの遮水能力に関しては、昨年の研究において、強度と同様に、接合面がボトルネックになっていることが実験的に示唆された。そこで、今年度は、接合面を考慮するプラグの廻りの浸透流解析手法を開発する。これを用いて、トランジェントパルス法によるプラグの廻りの浸

透流に関する実験結果の解釈を行い、プラグの遮水性に影響する要因を明らかにすることを試みる（第4章）。

第2章 プラグと岩盤の接合面の強度試験方法の開発と試験結果

2. 1 はじめに

プラグ構造で強度的に最も弱い部分は、空洞壁面の岩盤とプラグの境界の接合面である。その背景として次の諸点が考えられる。

- 1) 空洞壁面の岩盤は多少とも損傷し強度が低下している。
- 2) プラグを打設するときに、空洞壁面の岩盤とプラグの境界から完全に隙間を無くすことは困難である。
- 3) コンクリートプラグにおいては、プラグの外側つまり接合面に、強度の小さいレイタンスの層が形成されやすい。

空洞壁面とプラグの境界である接合面の幾何学的特徴は、薄肉の平板状または殻状を呈していることである。接合面の機能の観点から、接合面に要求される強度特性は、「付着強度」という術語で呼ぶことができるが、この付着強度には、引張強度とせん断強度の両方が含まれると考えられる。そこで、通常の連続体の強度試験と同様に、両方の強度を検討対象とすることにした。

2. 2 接合面の付着強度の試験方法

接合面の引張強度を評価するために、圧裂引張試験と一軸引張試験の2つの試験方法を検討した。また、接合面のせん断強度を評価するために、一面強制せん断試験と、傾いた接合面を含む円柱形供試体の一軸圧縮試験の2つの試験方法を検討した。

2. 2. 1 圧裂引張試験

簡便で比較的正確な岩石の引張強度試験方法として、圧裂引張試験方法がある。これを準用し、接合面が1直径に一致するような円盤状供試体

(図2. 1 (a)参照) を用意し、接合面が載荷方向と一致するようにして、上下2枚の剛なプラテンを介して材料試験機により集中荷重を載荷する。そして、実現される(破壊時の)最大荷重Pから、付着面の引張強度 σ_t を、

$$\sigma_t = 2P / (\pi d l) \quad (2.1)$$

として評価する。ここに、d、lは供試体の直径、厚みである。

この式の誘導に際しては、均質・等方な脆性的材料が仮定されている。そこで、接合面をGoodmanのジョイント要素でモデル化し、有限要素法による応力解析をした。その結果、上式は接合面の中央における引張応力の大きさの評価として使える、つまり接合面の引張強度の評価に使える見通しが得られた。

2. 2. 2 一軸引張試験

中央部が接合面で2分されたような円柱形供試体(図2. 1 (b)参照)を用意し、これを軸方向に引張り、実現される(破壊時の)最大荷重Pから、接合面の引張強度 σ_t を、

$$\sigma_t = 4P / (\pi d^2) \quad (2.2)$$

として評価する。

円柱形供試体の両端面は、あらかじめ、エポキシ樹脂系の接着剤(商品名:アラルダイト)を用いて、鋼製のエンドピースへ接着し、このエンドピースを、図2. 2 (a)に示すように、上下にユニバーサルジョイントのついた長さ300mmのロッド2本を介して、材料試験器により引張る方法を用いた。

この試験法では、どの程度正確に一様な引張応力状態を供試体中に作り出せるかが問題で、それさえ解決すれば、本試験から正確な引張強度が評価できる。

このために、試体を挟んだ上下のエンドピースは互いに平行になり、かつ両エンドピース、供試体、ロッドが中心軸上に並ぶように、水準器で平行をとった特殊なスタンドを開発し（図2. 2 (b) 参照）、これを用いてエンドピースへの供試体の接着を行うことにした。また、偏心荷重の負荷を避けるためにロッドは十分に長くした。

2. 2. 3 回転ダイス型せん断試験装置を用いた一面せん断試験

本試験は、図2. 1 (c) に示すような円柱形供試体を用いて行う。この供試体は中心軸を通る断面の一つが接合面になっており、これを介して砂岩とモルタルが接合された構造をしている。図2. 3 (a) に示す要領で、この供試体の接合面で強制的にせん断させるために、図2. 3 (b) に示すような回転ダイス型せん断試験用治具を用い、供試体はこの中に組み込む。その後、治具をインストロン材料試験機に取り付けて圧縮し、供試体の接合面に沿って強制的にせん断破壊させる。

このせん断用治具は、予定せん断断面と載荷方向のなす角度（せん断角度） α を、 0° から 90° までの範囲で自由に変えることができる。試験では、せん断角度を $15^\circ \sim 60^\circ$ の範囲に設定し、それぞれの角度について2～3個ずつの試験を行った。

接合面が破断したことを確認して、破断時の荷重Pから、接合面の強度、すなわち、次式で表されるような、接合面に作用する直応力の下でのせん断応力を評価する。

$$\begin{aligned}\sigma(\alpha) &= P \sin \alpha / (d l) \\ \tau(\alpha) &= P \cos \alpha / (\pi d^2 / 8)\end{aligned}\tag{2.3}$$

d, lは供試体の径と長さ

この結果を、図2. 4のように、せん断応力（ τ ）－直応力（ σ ）線図にプロットする。もし、測点にあてはまる直線（破壊限界線）が引くことができれば、直線のが縦軸切片値としてせん断強度（粘着力）c、直線の傾きとして内部摩擦角 ϕ が評価できる。

2. 2. 4 傾いた接合面を持つ供試体の一軸圧縮試験

供試体は図2.1(d)に示すように、直径30mm、高さ90mmまたは100mmの円柱形をしている。供試体の中間部には載荷軸に対して角度 α で傾斜した接合面を含み、その上下は砂岩、モルタルになっている。傾斜 α は、 0° 、 $17^\circ \sim 70^\circ$ の範囲にとり、各 α に対し2~3組ずつ供試体を準備した。供試体の高さ直径比が2でないのは、接合面の角度 α が大きい場合、接合面端部が載荷面に近づき過ぎるためである。

この供試体を通常の方法で一軸圧縮試験をする。そして、接合面から破断したことを確認した後、破断時の荷重Pから、次式により接合面の強度、すなわち接合面の直応力の下でのせん断応力を評価する。

$$\begin{aligned}\sigma(\alpha) &= P(\pi d^2/8)(1-\cos 2\alpha) \\ \tau(\alpha) &= P(\pi d^2/8)\sin 2\alpha\end{aligned}\quad (2.4)$$

必要ならば、2.2.3項に示したのと同じ方法で、接合面の粘着力cと内部摩擦角 ϕ を得ることができる。

2. 3 供試体とその作製方法

本研究では接合面を含んだ供試体として、砂岩とモルタルが平面状の接合面を介して互いに接着したものをを用いた。砂岩は、古第三紀石狩統美唄層に属するもので、寒沢露天炭鉱（北海道空知郡上砂川町）において、直径200mmのコアボーリングをして採取した。

供試体は次の順序で作製した。まず、直径200mmの砂岩のコアを、軸方向の長さが約200mmになるようにダイヤモンドカッターで切断し、切断面をフラットビット（粒度320#）を用いて平滑に仕上げた。両端面の平行度は0.5mm以内に押さえた。接合面となる砂岩の表面の粗さは、摩擦係数で表して、0.47~0.53と評価された。

次に、砂岩の供試体を端面が水平になるように型枠の中に設置し、その上からモルタルを流し込んだ。モルタルの配合比は、普通ポルトランドセメント：乾燥珪砂7号：水＝2：3：1（重量比）とした。1日おいた後、型枠からはずし2～3週間養生した。砂岩とモルタルの主要な物性値を表2. 1に示す。

その後、この砂岩－モルタルから成る円柱形ブロックから、ダイヤモンドカッターで直方体状の試料を切り出した。それから、直方体の向かい合った二つの面が平行で、かつ接合面と垂直になるようにスコヤ（直角定規）や水準器を用いフライス盤で仕上げた。次に述べる4種の供試体はこの直方体ブロックから作製した。

2. 3. 1 圧裂引張試験用供試体の作成

まず、接合面が鉛直になるように、直方体ブロックを置き、ブロックの上面に現れた接合面（ここでは砂岩とモルタルの境界線）を直径とするような直径40mmの円をコンパス等を使って印した。次に、この円と同心円となるように内径35mmのコアビットの位置を調整した上で、作孔した。得られた円柱形コアからダイヤモンドカッターで、図2. 1(a)に示すような厚さ17.5mm、直径30.0mmの円盤形供試体を切りだした。

2. 3. 2 一軸引張試験用供試体の作成

付着面が作孔方向と垂直になるように、直方体ブロックをボーリングマシンにセットし、内径30mmのコアビットでボーリングして、160mmのコアを抜いた。次に、接合面が122mmの長さの円柱形供試体の中央にくるように、ダイヤモンドカッターを用いて160mmの長さのコアの両端を切断した。その後、平面研削盤で両端面を仕上げ、図2. 1(b)のような、中央に接合面を含む直径30mm、長さ120mmの一軸引張試験用供試体を得た。

2. 3. 3 一面せん断試験用供試体の作成

圧裂引張試験用供試体の整形方法とほとんど同じ作業を経て、図2. 1(c)のような直径30mmの円柱形供試体を得た。この一面せん断試験用の供

試体は、圧裂引張試験用の供試体に比べ、高い精度の整形が要求される。特に、円形をした端面に現れる接合面が端面の円に対して1直径となっており、かつ接合面が端面に垂直になるように仕上がっていないと行かない。

2. 3. 4 一軸圧縮試験用供試体の作成

まず、接合面と作孔方向とのなす角が所定の大きさ α となるように、クリノメーターを用いて調整しながら、直方体ブロックをボーリングマシンの固定台にセットする。それから、内径30mmのコアビットを用いて作孔し、得られたコアを、ダイヤモンドカッターで約37mmの長さに切断した後、平面研削盤で端面の平行度を出す。以上の作業により、図 2. 1 (d) のような、端面の直径35mm、高さ35mmの円柱形供試体を得られる。

2. 4 試験結果

2. 4. 1 圧裂試験結果

試験により得られた最大荷重を(2. 1)式に代入して接合面の引張強度を求めた。平均値は2.1MPaと評価された。

破壊時の挙動には次の2つが観察された。第一のグループは、6例中、4例に見られ、比較的小さな破碎音の発生とともに、接合面の中央部が僅かに開口し、荷重は急激に減少した。引き続いて、強制変位を与えると、供試体は接合面から完全に2つに分かれた。

第二のグループでは、破碎音と同時に、供試体が接合面を境に完全に左右に割れた。破面には、くさび型のモルタル片が付着していた。

2. 4. 2 一軸引張試験結果

試験により得られた最大荷重を(2. 2)式に代入して接合面の引張強度を求めた。平均値は1.9MPaと評価された。いずれの供試体においても破面は接合面に一致していた。倍率20倍の顕微鏡下の観察では、砂岩表面に

セメントの付着は認められなかった。

2. 4. 3 回転ダイス型せん断試験装置を用いた一面せん断試験結果

角度 α が 15° 、 30° 、 45° の場合には、想定せん断面つまり接合面ですべりが生じた。 α が 60° のときには、供試体の圧縮とともに冶具の上下が接触し、すべりが生じるまで荷重をかけることができなかった。

破壊時の荷重を(2. 3)式に代入して、所与の垂直応力に対するせん断強度を求め、図2. 4に示した。同図には、最小二乗法を用いて求めた測点のあてはめ直線、つまり破壊限界線も示されている。これから、接合面のせん断強度(粘着力)と内部摩擦角について、 $c = 3.4\text{MPa}$ 、内部摩擦角 $\phi = 39.4^\circ$ の評価が得られる。

破面は接合面に一致した。破面の肉眼観察では、砂岩表面にモルタルの薄層が付着しているのが確認された。また、接触式の表面粗さ計で破面の粗さを計測したところ、砂岩表面の粗さはモルタル表面の粗さに比べ約2倍大きかった。

2. 4. 4 傾いた接合面を持つ供試体の一軸圧縮試験結果

接合面と載荷方向の成す角度 α が 45° より小さい場合、破壊はすべて砂岩とモルタルの接合面より生じた。破壊時の荷重を(2. 4)式に代入して、接合面における垂直応力とせん断応力を求め、両者を $\tau - \sigma$ 線図に表示したのが図2. 5である。図にはまた、最小二乗法を用いて求めた測点のあてはめ直線、つまり破壊限界線も示されている。これから、接合面のせん断強度(粘着力)と内部摩擦角について、 $c = 3.6\text{MPa}$ 、 $\phi = 42.8^\circ$ の評価が得られる。

試験結果は破面の発生場所の違いから2つのグループに分けることができる。第一のグループには、角度 α が 45° より小さい供試体が属し、破面は接合面と一致した。試験後の観察によると、砂岩の接合面側には、モルタルの薄層の様な付着がみられた。第二のグループには、角度 α が 55° 以上の供試体が属し、破面は接合面以外のモルタル内で生じていた。

理論的には、接合面とそれに付着している材料の強度で決まる2つの限

界角 $\phi 1$ 、 $\phi 2$ (いずれも、 0° 以上 90° 以下) が存在し、角度 α が

$$\phi 1 < \alpha < \phi 2 \quad (2.5)$$

のときには、接合面から破壊し

$$\alpha < \phi 1, \phi 2 < \alpha \quad (2.6)$$

のときには、接合面以外で破壊することが予想される。測定結果はこの予想に一致している。なお、今の場合、 $\phi 1$ は 0° に近いために、 $\alpha = 0^\circ$ のときにも接合面で破壊が生じたのであろう。

また、(2.6) 式に従う破壊はモルタルで生じたが、これはモルタルの方が砂岩よりも強度が小さい(表2.1参照)ためである。

2.4.5 接合面の強度特性の纏めと試験法の妥当性

表2.2に圧裂引張試験と一軸引張試験で求められた引張強度を、表2.3に接合面、砂岩、モルタルの引張強度と粘着力を示す。

(1) 接合面の引張強度

表2.2から、一軸引張試験により求められた引張強度は、圧裂引張試験で求められた引張強度と比較して、約10%小さいだけで、両者の差異は小さいことがわかる。したがって、試験法として簡便な圧裂試験は、付着面の引張強度の評価試験法として使用して差し支えないといえる。

(2) 接合面のせん断強度

2つのせん断強度試験の結果から得られた接合面の破壊限界線は、図2.4、図2.5を比較すればわかるように、また、両試験方法より評価された粘着力と内部摩擦角の値を比較すればわかるように、両者には差異が認められない。したがって、いずれの方法も試験法として信頼が置けると判断される。

(3) 接合面とそれに付着した岩石・モルタルの強度の比較

表2.1に示した砂岩とモルタルの強度試験結果から、それぞれについて破壊限界線の評価してみた(図2.6参照)。接合面のせん断強度はその面を挟む材料(砂岩とモルタル)のいずれよりも小さいことがわかる。また、表2.3に示すように、接合面の引張強度は、砂岩の55%、モルタルの38%という値となっており、いずれよりも小さい。要するに、接合面

は、プラグを構成する部材要素の中では、引張強度もせん断強度も最も小さいことがわかった。

実際のプラグにおいても、接合面の強度は岩石やプラグ材料の強度と比較して小さく、強度的に弱い箇所であると考えられる。プラグの強度を設計・施工する場合に注意すべきことが示されたといえる。

表 2. 1 試料の種類と物性値

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	P波速度 (km/s)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
砂岩	66.2	3.8	2.7	10.5	0.16
モルタル	42.6	5.6		14.8	0.16

表 2. 2 各引張試験法による付着面の引張強度

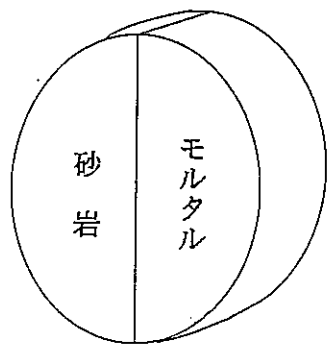
	引張強度 (MPa)	標準偏差 (MPa)
圧裂引張試験	2.1	0.3
直接引張試験	1.9	0.4

表 2. 3 付着面および砂岩、モルタルの引張強度と粘着力

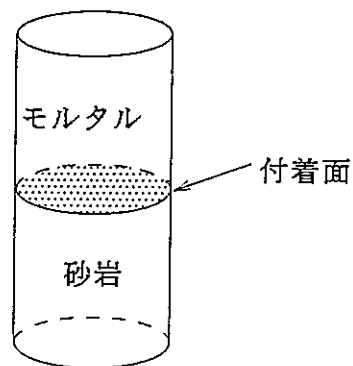
	引張強度 (MPa)	粘着力 (MPa)
付着面	2.1	3.6
砂岩	3.8	11.3
モルタル	5.6	10.6

* 引張強度は圧裂引張試験による。

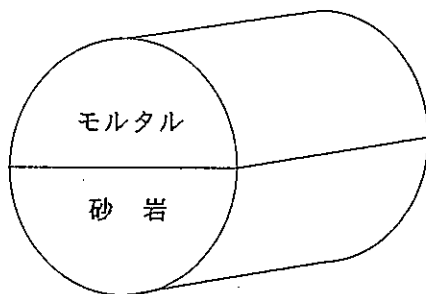
* 粘着力は一面せん断試験による。



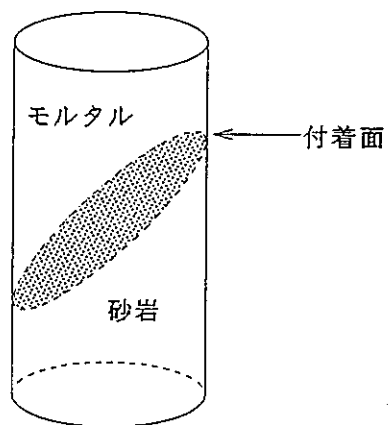
(a)



(b)



(c)



(d)

図 2. 1 各試験に用いる供試体の形状

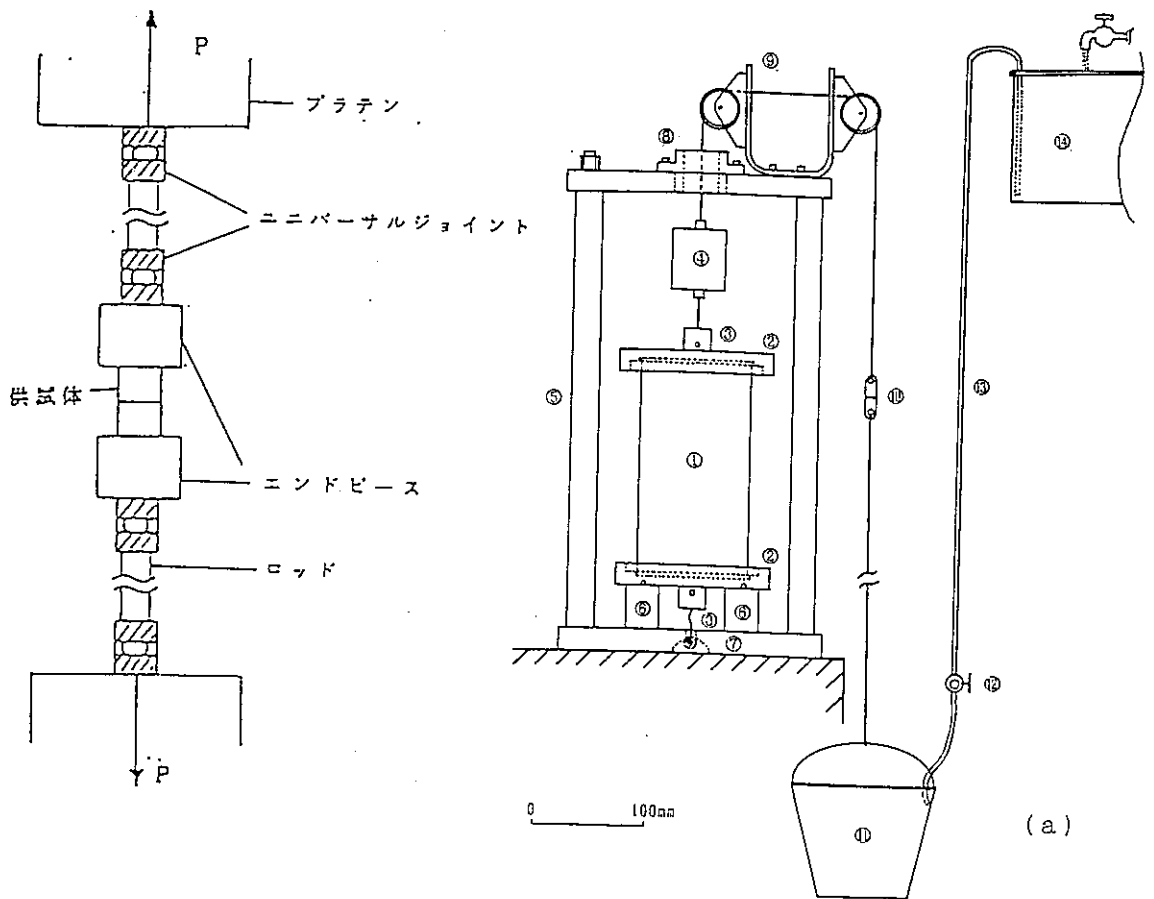


図 2. 2 一軸引張試験用治具 (a) とエンドピースに供試体を埋め込むスタンド (b)

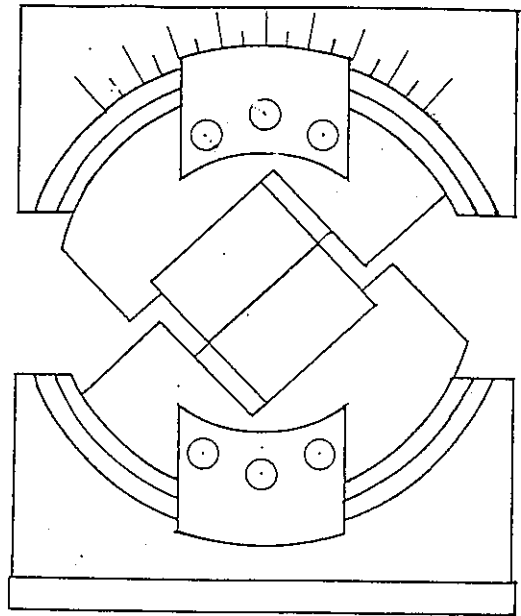
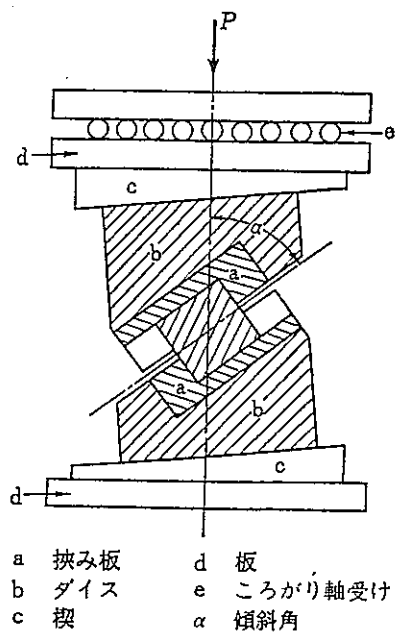


図 2. 3 圧縮試験機を用いた強制一面せん断試験の概要(a)と回転ダイス式一面せん断試験器(b)

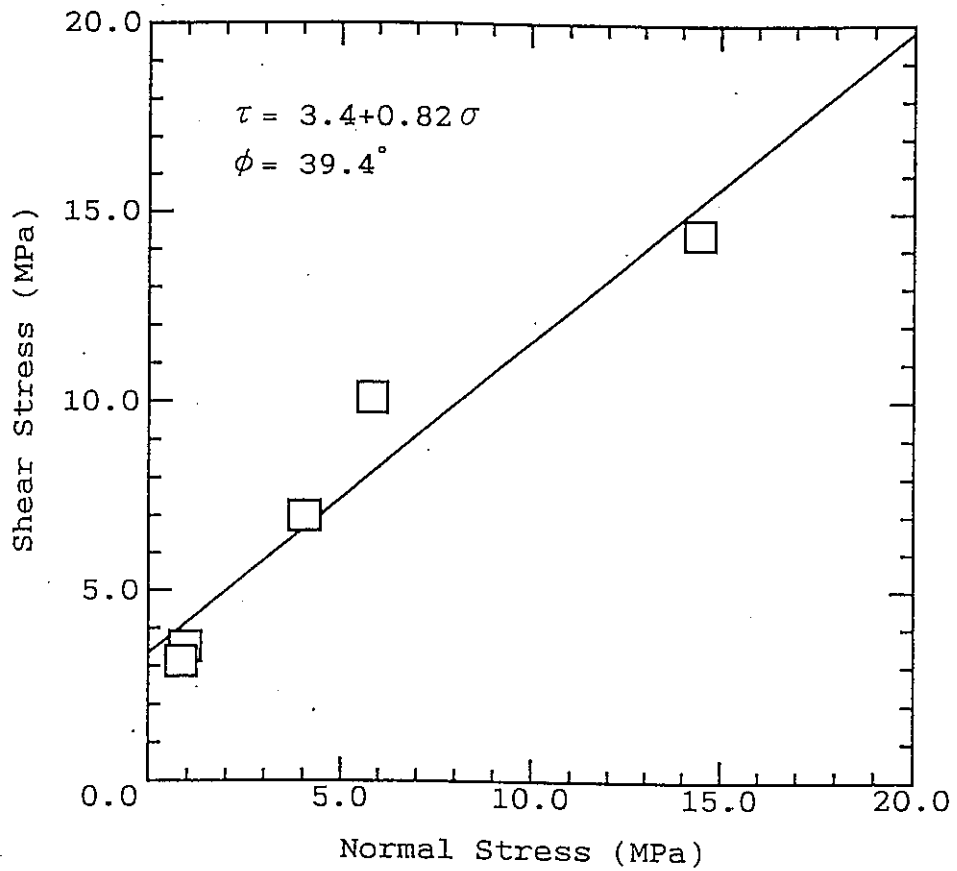


図 2. 4 強制一面せん断試験から得られた接合面の破壊限界

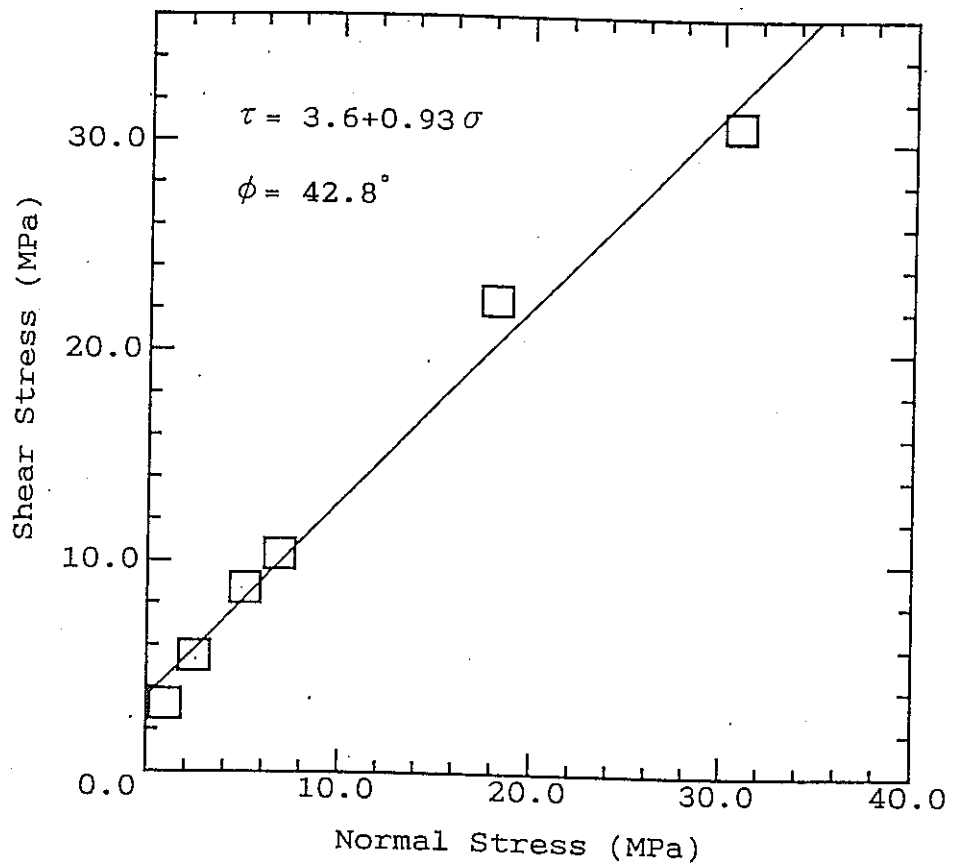


図 2. 5 傾いた接合面を持つ供試体の一軸圧縮試験結果から得られた接合面の破壊限界

- 砂岩の破壊限界線 : $\tau = 11.3 + 1.29\sigma$
- - - - - モルタルの破壊限界線 : $\tau = 10.3 + 0.8\sigma$
- 付着面のすべり限界線 : $\tau = 3.6 + 0.93\sigma$

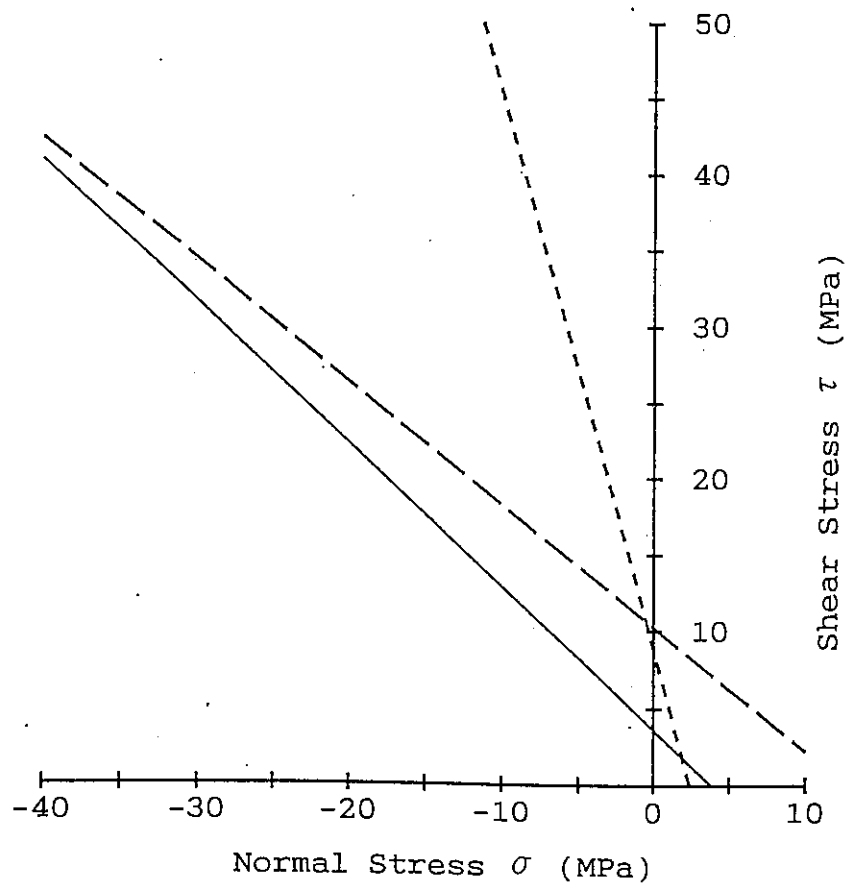


図 2. 6 接合面、砂岩、モルタルの破壊限界

第3章 プラグの強度に関する模型試験

3. 1 緒言

砂岩の厚肉円筒供試体を、坑道を有する岩盤の模型とみなし、この供試体の円孔内にモルタル製のプラグを打設して、これをプラグの模型とした。そして、初期地圧下に置かれた岩盤を模擬するために、模型に封圧をかけ、その下でプラグの一方の側の円孔内を油で満たし、プラグの破壊などによって圧力が減少するまで、圧力を増加させる試験を行った。

3. 2 模型供試体および試験方法

3. 2. 1 供試体

砂岩の厚肉円筒形供試体は、第2章の各試験で使用した砂岩と同じ美唄層から直径155mmのコアとして採取ものである。なお、採取場所は若干異なる。

まず、砂岩の円柱形供試体は、ダイヤモンドカッターで切断した後、平行度が0.3mm以内になるようにフライス盤で端面を整形し、長さ250mmの円柱形に仕上げた。次に、供試体の中心軸に沿って作孔し、径20mmの円孔を貫通させ、模型坑道とした。なお、この坑道は、素掘りのままの状態で開催試験に供した。それから、20mmの円孔の底部から硬質のスポンジを坑内に挿入・固定した後、上部の孔口からモルタルを流し込み、押し固めてプラグとした。プラグ材料のモルタルは、配合比をセメント：砂：水＝2：3：1（重量比）とした。

プラグは円柱形であるが、プラグの直径と長さの比が1と2、すなわち20mmの長さとなら40mmの長さの2種類のプラグをそれぞれ3個ずつ作成した。供試体は1週間水中養生し、実験日の前日に水中から取り出し、自然乾燥させた後、試験に供した。実験に供した砂岩とモルタルの物性値を表3.1に示す。

3. 2. 2 試験装置および試験方法

供試体への載荷状況を図 3. 1 に示す。供試模型にはあらかじめ封圧と軸圧を負荷した。封圧を負荷するために、供試体は圧力容器に入れた。また、軸圧はアムスラー型材料試験機により、ピストン、載荷板を介して載荷した。封圧、軸圧は共に 10MPa とした。

円孔内への圧力の負荷は、電磁バルブ付き油圧ポンプを用い、圧力の増加速度が一定となるようにバルブを調整しながら行った。内圧が急激に下がった時点で破壊が生じたものと判断し試験を終了した。内圧に急激な変化が見られず、内圧と共に封圧が上昇し続けたときは、内圧が 30MPa に達したときに試験を終了した。

3. 3 試験結果と考察

破壊時の内圧の大きさなどの試験結果を表 3. 2 に示す。試験終了後、供試体をダイヤモンドカッターで切断し、切り口断面を観察したところ、以下の 3 つの破壊形態が認められた。

タイプ 1：プラグが滑動し、これに伴い内圧が急激に下がった。供試体の砂岩表面には、き裂が見られなかった。プラグ長がいずれも 20mm と短い 2 例がこの破壊を起こした。

プラグが滑動したときと同じ圧力条件で、数値応力解析を行ったところ、接合面の応力（平均値）として ($\sigma_r=12\text{MPa}$ 、 $\tau_{rz}=4\text{MPa}$) が得られた。この値は、2 章で述べた接合面の破壊限界線よりかなり小さいことがわかった。

この結果は、プラグの強度を接合面の平均的な応力を用いて判定評価してはならないことを示唆している。プラグの端部には引張応力または大きなせん断応力が生じたので、ここから破壊が発生し、接合面の中を破壊が逐次的に進展してプラグの滑動に至ったものと推測できる。これについての詳細な検討は今後に残されている。

タイプ 2：砂岩が縦割れをした。き裂は 1 本で、供試体を縦断するものが

多く、プラグが抜け落ちた例もあった。このタイプの破壊は3例みられた。いずれもプラグ長は40mmであった。プラグの強度は充分あり、そういった状況の下で、砂岩の孔壁が破壊したといえる。

タイプ3：内圧の急激な降下がなく、内圧の上昇に伴い封圧も漸増していき、実験を中止した。この場合には内圧の漏れが起こったことを意味する。なお、内圧を増加させる過程で一瞬、圧力の低下が生じた。このときの低下直前の値を破壊時の圧力値とした。このタイプは1例だけ見られた。プラグの滑動は生じていなかった。

砂岩内のエンドピースに近いところで、き裂が三方向に見られた。このき裂は外周には達しておらず、途中で止まっているようにみえた。供試体には夾みがあり、この夾みの幾つかの部分では空気の漏れることが確認された。したがって、内圧の漏れはこのはさみの弱部を通して生じたと思われる。

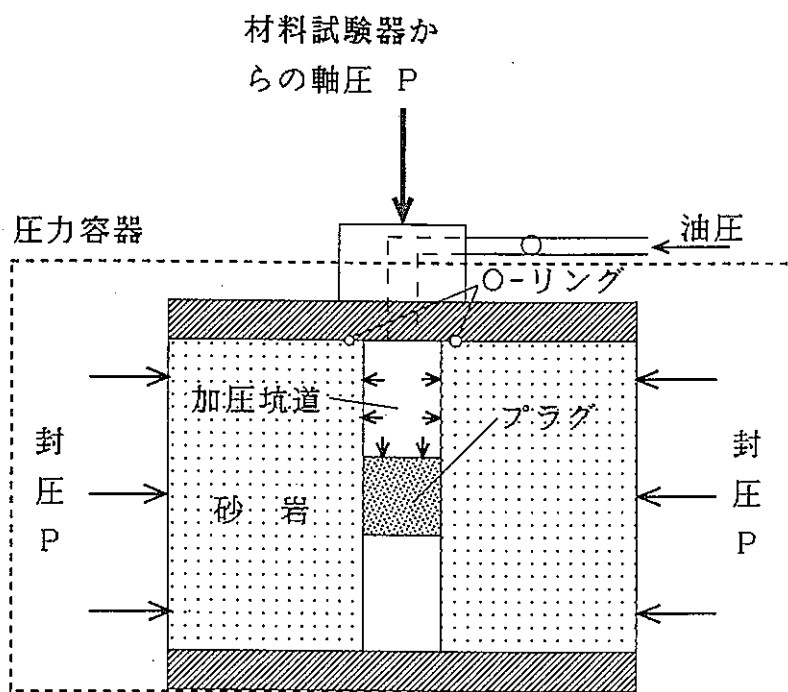
表 3. 1 砂岩とモルタルの物性値

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	P 波速度 (km/s)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
砂 岩	77.9	4.7	2.4	13.9	0.15
モルタル	42.6	5.6		14.8	0.16

表 3. 2 プラグ模型試験結果

模型 番号	プラグ長 (cm)	破壊時の 圧力 (MPa)	破壊の タイプ
1	2	16.9	1
2	2	16.0	3
3	2	17.3	1
4	4	24.8	2
5	4	23.8	2
6	4	20.5	2

表中の破壊タイプの番号については、本文の 3. 3 節を参照されたい。



3. 1 模型への圧力負荷試験の概要

第4章 接合面と多孔質媒体から成る構造体の有限要素法に基づく浸透流解析

4. 1 緒言

1章で述べたように、プラグに所与の強度をもたせることは技術的に可能と考えられる。しかし、プラグに期待される遮水性能を持たせるのはかなり難かしい。

昨年実施した室内実験において、強度特性と同様に、プラグの遮水性能に対しては、プラグと岩盤の間の接合面を通る流れが決定的に影響することが示唆された。この影響は、実規模の試験においても存在することが明らかにされており(8)、接合面の透水機構の解明が望まれる。

一方、昨年度実施したプラグに関する室内模型試験では、トランジェント・パルス法が用いられた。この方法では、プラグを含む構造体全体を円柱形供試体に置き換えたときの透水係数(いわゆる、見かけの透水係数)のみが評価される。昨年度の時点では、正確な見かけの透水係数を得るための具体的な評価方法は不明であり、今後の課題として残されていた。

以上の2つの研究課題は相互に関係している部分があり、これらを解決する手段として、任意の浸透流領域に対して、トランジェント・パルス法を適用したときの解析を実施する方法の開発が必要になった。この解析法においては、浸透流領域の一つの構成要素であるプラグと岩盤の間の接合面の存在も考慮できなければならない。本年度は、この解析システムの開発を行うことにし、システムの中核を成す浸透流解析の実行には、有限要素法を用いることにした。

4. 2 有限要素法による浸透流の定式化

岩石やプラグ材料は多孔質媒体と考えられ、その中の浸透流は、

- ・連続性（質量保存）
- ・ダルシーの法則

の2つに従うものとする。これに対応した有限要素法による浸透流解析の定式化は既に多くの研究者によってなされている。

ここでは、専ら、接合部を対象に、有限要素法による浸透流解析の定式化について検討する。

接合面では、その面内の流れが卓越するというに着目し、準1次元的な流れとする(図4.1)。ただし、この面に垂直方向の流体の流入出は考慮するものとする。

接合面の中の流れは、不連続面に対してしばしば仮定されているように、滑らかな平板内間を流れる非圧縮性流体の運動方程式に従うものとする。この場合、流れの向きに x を取り、平均流速を u^j 、圧力を p とすれば、両者の間には

$$u^j = \rho (2b)^2 / (12\mu) \cdot \{dp/dx\} \quad (4.1)$$

の関係が成立する。ここで ρ 、 μ は浸透流媒体の密度と粘性係数、 b は隙間幅の半分ある。いま、(4.1)式の右辺の係数を

$$K^j = \rho (2b)^2 / (12\mu) \quad (4.2)$$

とおけば、(4.1)式は

$$u^j = K^j \{dP/dx\} \quad (4.3)$$

と表せる。この式は多孔質媒体の(1次元)ダルシー流れと全く同じである。定数 K^j は接合面の透水係数と呼ぶことにする。

浸透流領域が、多孔質材の他に接合面からも構成されているときには、(4.3)式と、通常多孔質媒体中の非定常浸透流を支配する式とを組み合わせればよい。解析を実行するためのプログラムの詳細は省略す

る。

4. 3 トランジェント・パルス法に関する有限要素法による解析精度

半径 $R=1.5\text{cm}$ 、長さ $L=6.0\text{cm}$ の円柱形供試体（対応する解析モデルを図 4. 2 に示す）を対象に、軸対称有限要素法を用いてトランジェント・パルス法のシミュレーションを実施し、解析精度の確認をした。

高圧・低圧側の貯留タンクの容積 V_1 、 V_2 をいずれも 1000cm^3 、タンク内の初期の圧力を 50kgf/cm^2 とする。時刻 $t=0$ において両タンクに大きさ 1kgf/cm^2 の差圧（パルス圧）を与え、時間刻みを $\delta t=5\text{s}$ として、非定常浸透流の挙動を解析によって追跡した。浸透流媒体は水とし、必要な定数は水の標準的な値を用いた。

図 4. 3 は計算結果の一部を示したもので、両タンクの差圧（の対数）－時間経過の線図である。相異なる 3 つの透水係数に対して、計算をしたが、図に示すように、線図はいずれも直線になっている。この直線の傾き λ から

$$K = 0.0926 \lambda L V_1 V_2 / \{A (V_1 + V_2)\} \quad (4.4)$$

によって透水係数 K を求めたところ、3 つの透水係数のいずれについても、仮定した値と最大 2 % の誤差内で一致していることがわかった。ここに、 A は供試体の断面積である。したがって、有限要素法による解析の精度は十分に高いと判断される。

4. 4 トランジェント・パルス法を用いたプラグの廻りの浸透流実験の評価方法

開発した有限要素法による非定常浸透流解析が有効であることが認めら

れたので、次に、プラグを含む厚肉円筒形供試体に対して、トランジェント・パルス法を適用した場合の浸透流解析を行うことにした。図4.4(a)示す浸透流領域のモデルにおいて、厚肉円筒の長さ $L=12\text{cm}$ 、外半径 $R=3\text{cm}$ 、内半径 $r=1\text{cm}$ 、プラグ長 $l=5\text{cm}$ とした。このモデルの要素分割を図(b)に示す。

計算に際しては、岩盤、プラグとも透水係数は同じ値 $K=0.1\text{cm/s}$ を持つものとし、岩盤-プラグ間の接合面はないものとした。これ以外は、4.3節で示したのと同じ定数を用いた。

図4.5は計算結果の一部を示したもので、両タンクの差圧(の対数)-時間経過の線図である。この場合にも、線図は直線になっている。これは、プラグを含む構造全体の中の流れがダルシー流れであったことを意味する。この直線の傾き λ から

$$K^* = 0.0926 \times \lambda \sqrt{V_1 V_2} / \{A(V_1 + V_2)\} \quad (4.5)$$

によって透水係数 K^* を求めることを考える。この場合、得られる透水係数 K^* はプラグを含む構造全体の値であることに注意されたい。この意味で、

K^* は見かけの透水係数と呼ぶことにする。この際、上式で K^* を評価するときに、供試体の代表的な長さ x と断面積 A として、どのような値を用いるのが合理的かが問題になる。

このために、プラグ、岩盤ともに同じ透水係数 K を持つ浸透流領域(図4.4(a)参照)について、プラグ長 l を幾つか変えて、トランジェント・パルス法の浸透流に関するシミュレーションを行った。このとき、プラグと岩盤の間の接合面は存在しないものとした。

計算結果、両タンクの差圧(の対数)-時間経過の線図は、いずれも、直線になった。この直線の傾き λ を(4.5)式に代入し、

$$x = \{A K (V_1 + V_2)\} / \{0.0926 \lambda \sqrt{V_1 V_2}\} \quad (4.6)$$

より、 x を決めた。このとき、断面積 A としては、

$$A = A_1 + A_2 \quad (4.7)$$

A_1 : プラグの断面積、 A_2 : 供試体端面のリング状の断面積

を採用することにした。もし、(4.4)式に、(4.7)式の A と $L = x$ を代入すれば、入力したのと同じ K 値が得られるはずである。

構造体の長さ L 、外半径 R 、内半径 r が同一で、プラグ長 l が変わる場合には、 x も変わる。図 4.6 はこの様子を示したものである。以下の見かけの透水係数 K^* は、(4.4)式の L として図 4.6 から得られる x 、(4.7)式で得られる断面積 A を用いることにした。

4.5 接合面の隙間幅が及ぼす影響

プラグを含む構造体は、プラグ、岩盤、両者の境界の接合面の 3 者からなる。前節における解析では、接合面の存在は考慮しなかった。ここでは、接合面の存在が透水挙動に及ぼす影響について検討する。

4.2 節で述べたように、接合面の特性は、プラグ外壁と岩盤壁面との間の隙間幅で表される。そこで、この幅が構造物全体の透水係数に及ぼす影響を調べたのが、図 4.7 である。浸透流領域のモデルは 4.4 節のそれと同じにした。隙間幅としては、ここでは、 $10^{-5} \sim 5 \cdot 10^{-2} \text{mm}$ までの 4 種類を選び、岩盤、プラグの透水係数は、いずれも $K = 0.1 \text{cm/s}$ とした。

この図から、接合部の隙間幅が小さくなるに従い、構造物の見かけの透水係数の値は小さくなり、一定の値、すなわち接合面のないときの値に漸近するのが認められる。接合部の隙間幅が大きくなると、この中を流れる流量が全体に占める割合は急激に大きくなり、同時に、透水係数も隙間幅の 2 乗に比例して急激に大きくなるのがわかる。隙間幅が 0.05mm のときには、隙間がないときに比べて、見かけの透水係数は倍近く大きくなっている。

神岡鉦山のCAES実証試験の報告によると、コンクリートプラグの奥に閉じこめた高圧水の漏れの約70%は、プラグと岩盤の隙間を通ることがわかった(8)。昨年実施した模型試験においても、通常のもルタルプラグの場合、水の漏れの約70%は接合面を通ることがわかった。これらは、遮水能力の高いプラグを開発するには、接合面がkeyになることを示している。

もルタルプラグについては、試験終了後、模型供試体の中心軸を通る断面に沿って切断し、岩盤-接合部-もルタルの一部を薄片にして顕微鏡観察に供し、中心軸に平行な1つの測線に沿って接合面の隙間幅を調べた。図4.8はその様子を示したもので、隙間幅は平均0.1mm程度と評価される。

4.6 プラグと岩盤の透水係数の差異が透水特性に及ぼす影響

図4.9は、岩盤の透水係数 K_c を一定(0.1cm/s)にし、プラグの透水係数 K_p を $5 \times 10^{-4} \sim 0.5$ cm/sまで変えたときの見かけの透水係数に及ぼす影響を調べたものである。浸透流領域のモデルは、4.4節のそれと同様とした。また、接合面の存在も考慮し、隙間幅として、0.01、0.001mmの2種類を仮定した。

図から、プラグ材の透水性の低下に伴い、全体の透水性も低下する傾向が認められる。したがって、プラグの透水性を低めることは、全体の透水性を低める上で効果があるといえる。ただし、プラグの透水係数 K_p を、 $K_p/K_c=0.1$ 以下にしても、見かけの透水係数は $K_p/K_c=0.1$ のときの値と変わらないので、プラグの透水性を必要以上に低くしても効果がないことがわかる。

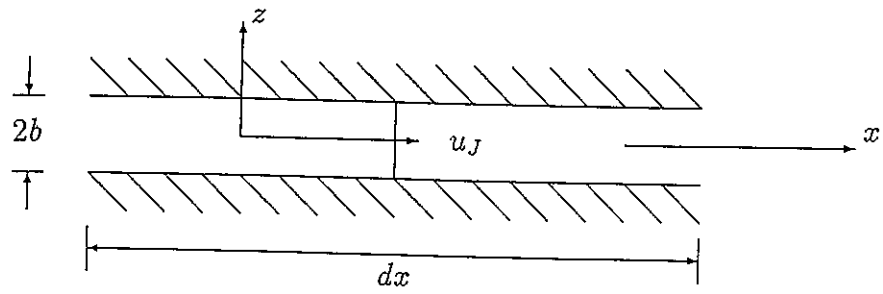


図 4. 1 平行平板モデル

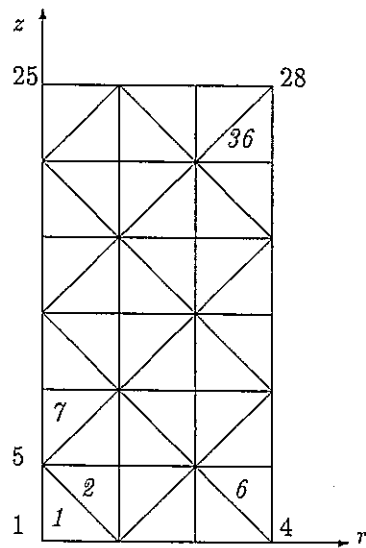
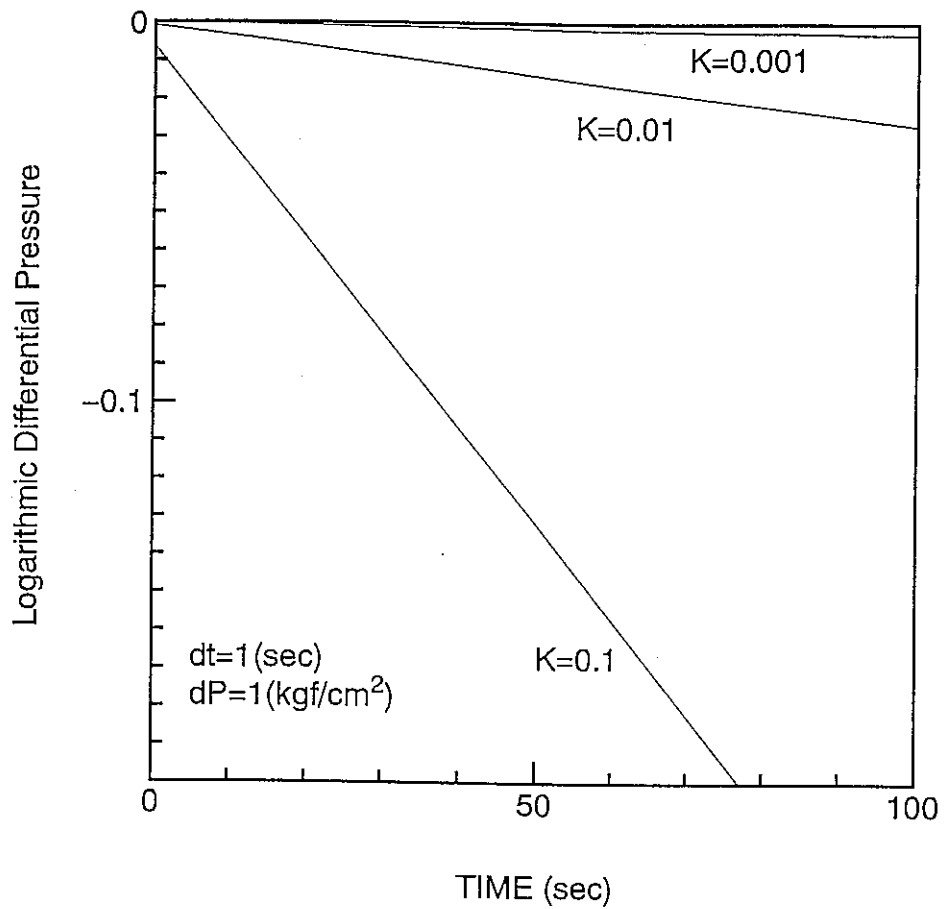


図 4. 2 円柱形供試体の有限要素モデル



$$K=0.1 \text{ (cm/sec)} : \lambda = -2.511665 \times 10^{-3}$$

$$K=0.01 \text{ (cm/sec)} : \lambda = -2.592663 \times 10^{-4}$$

$$K=0.001 \text{ (cm/sec)} : \lambda = -2.600891 \times 10^{-5}$$

図 4. 3 トランジェント・パルス法による試験後の両タンク内の圧力差 (の対数) の経時変化 (図 4. 2 に示す円柱形供試体を使用)

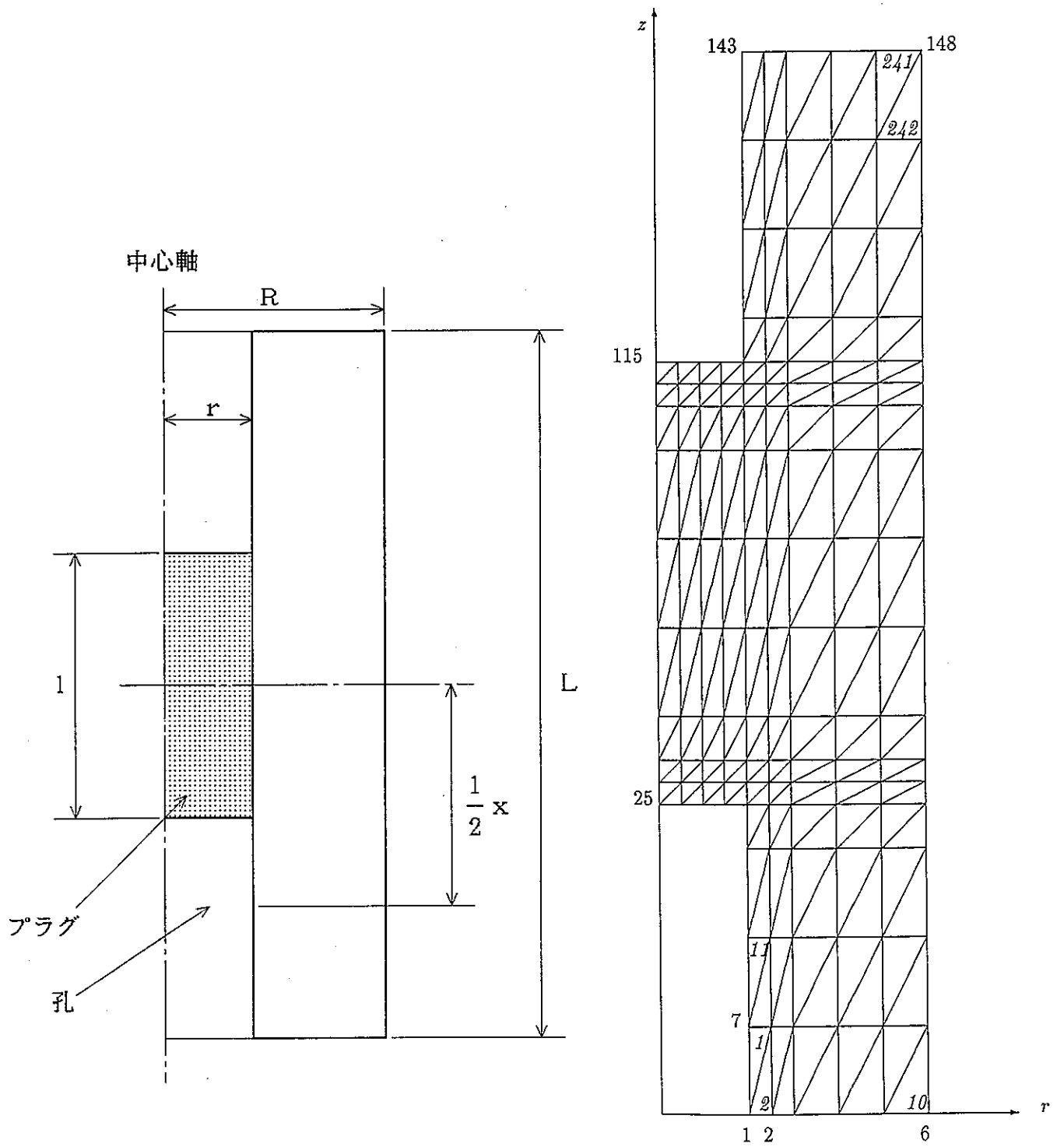
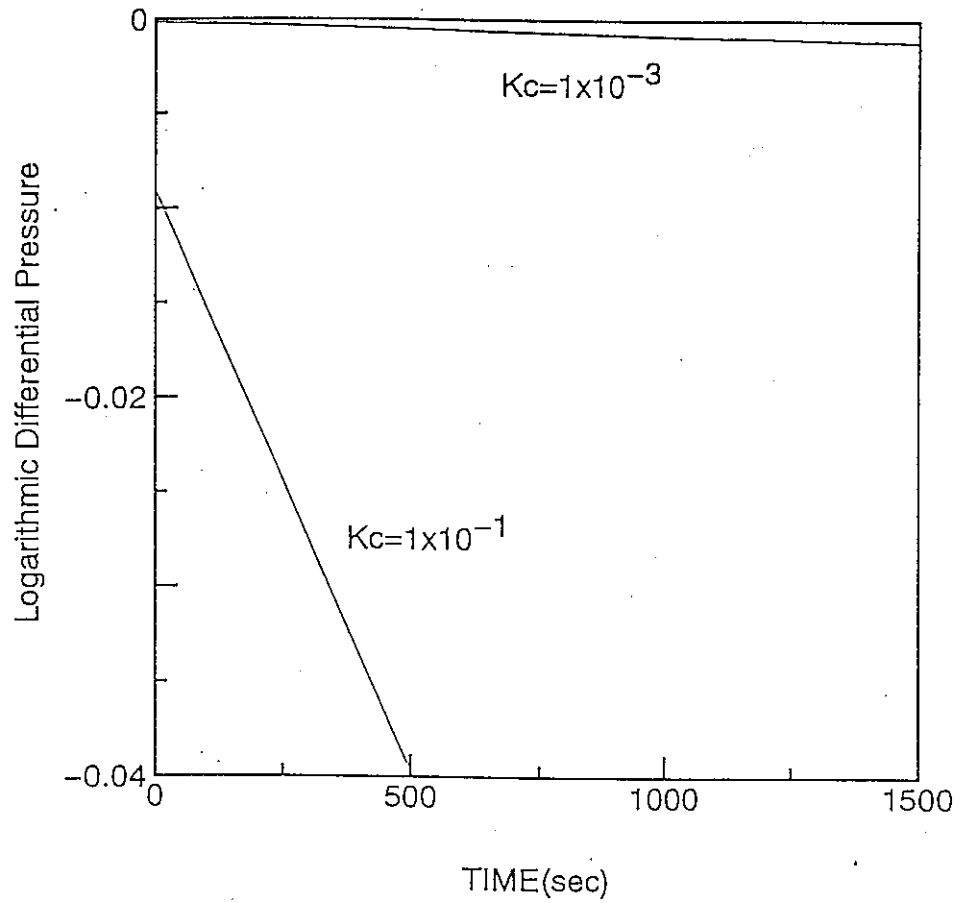


図 4. 4 プラグを含む厚肉円筒形供試体 (a) とその有限要素モデル (b)



$$Kc=1 \times 10^{-1} \text{ (cm/sec)} : \lambda = 6.158777 \times 10^{-5}$$

$$Kc=1 \times 10^{-3} \text{ (cm/sec)} : \lambda = 6.526133 \times 10^{-7}$$

図 4. 5 トランジェント・パルス法による試験後の両タンク内の圧力差（の対数）の経時変化。図中に示す 2 種の砂岩の透水係数 Kc に対する結果が示されている。プラグの透水係数は $Kp=10^{-7}$ cm/とし、図 4. 4 に示す供試体を使用。

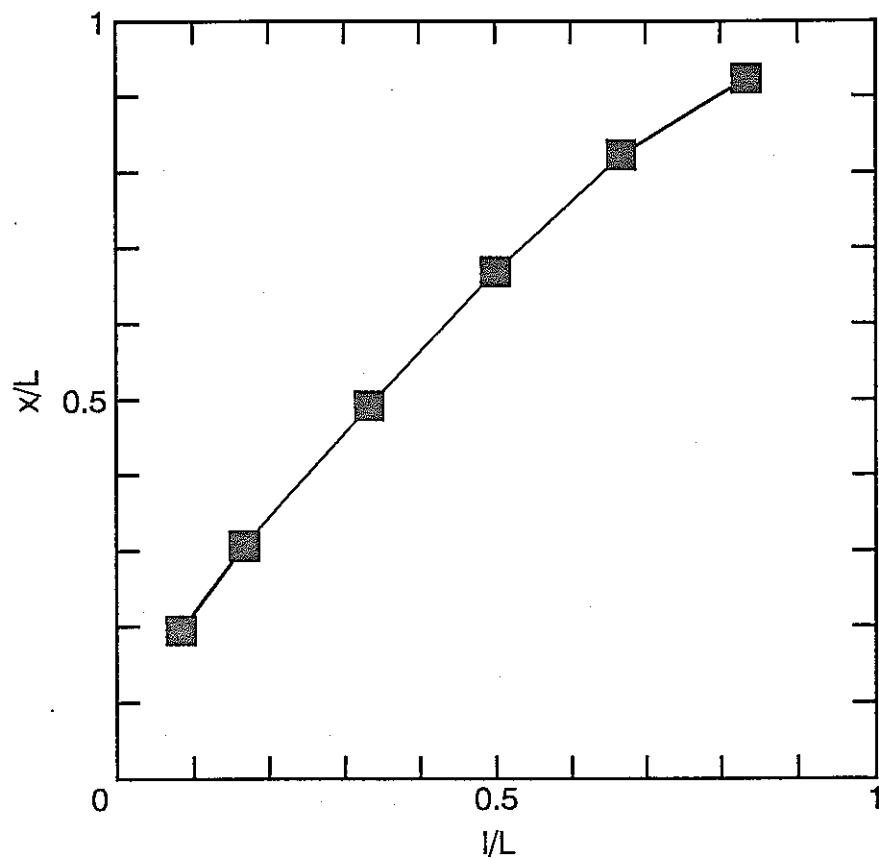


図 4. 6 図 4. 4 に示すプラグの構造体の見かけの透水係数 K^* を得るために (4. 5) 式で用いる x の評価。 x はプラグ長 l によって変わる。

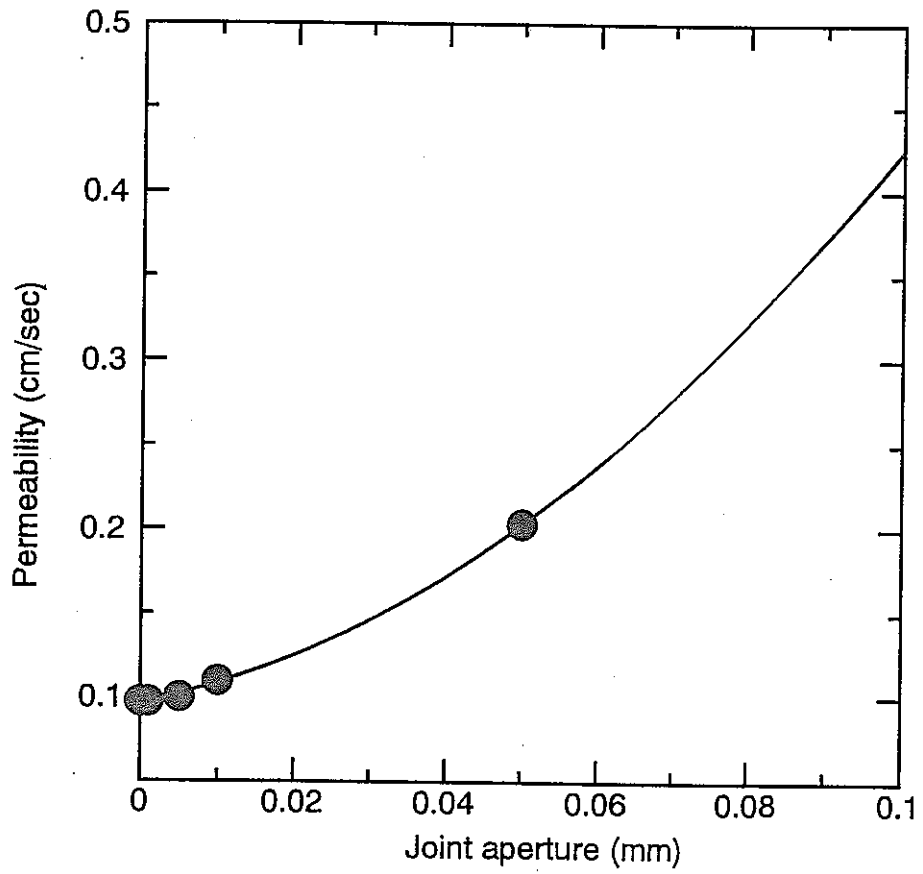


図 4. 7 プラグと孔壁の接合面の隙間幅がプラグを含む構造体の見かけの透水係数に及ぼす影響

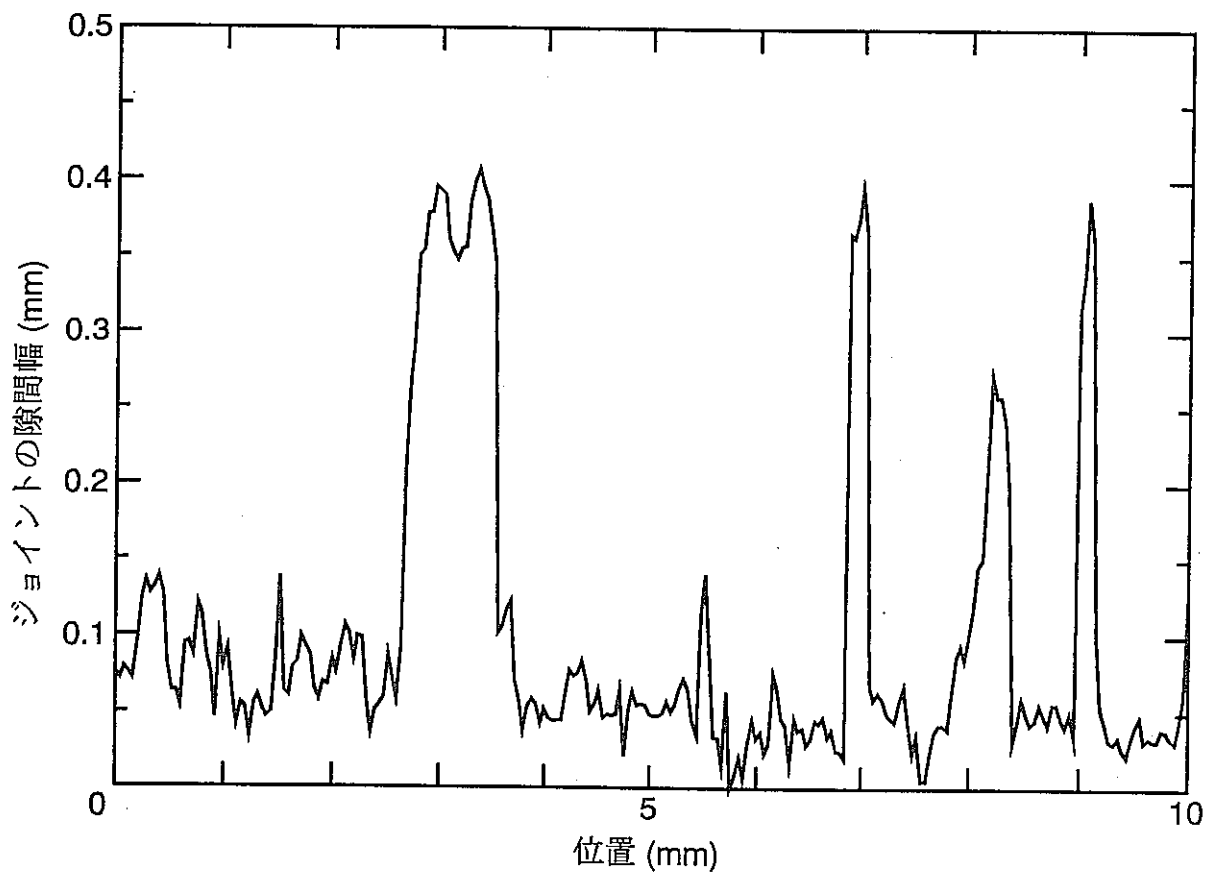


図4. 8 プラグと孔壁の接合面の隙間幅の測定結果（通常のもルタルプラグの場合）

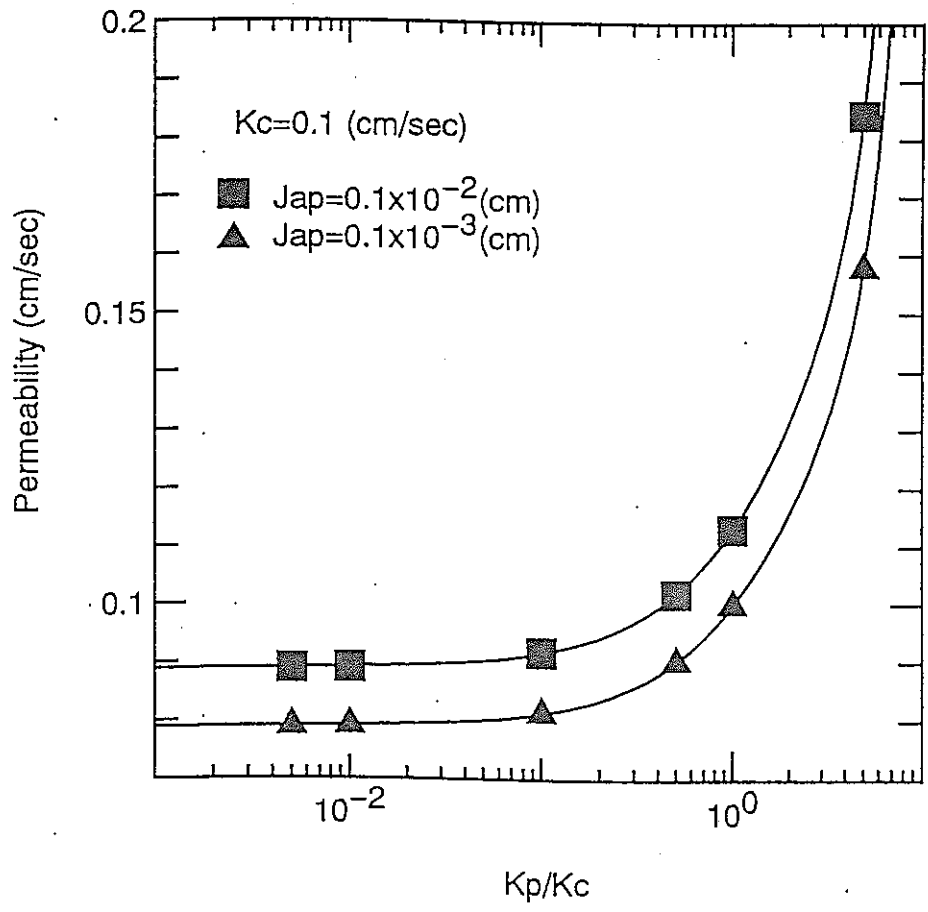


図 4. 9 プラグの透水係数がプラグを含む構造体の見かけの透水係数に及ぼす影響

第5章 結言

5. 1 本研究で得られた主な知見

プラグと岩盤の間の付着強度を明らかにするため、砂岩とモルタルで作成した接合面を試験の対象として、4つの方法で試験を行った。また、プラグが一方から圧力を受けるときの破壊条件を調べるために、模型試験を行った。その結果、次の知見が得られた。

- 1) 砂岩とモルタルの接合面の強度は、砂岩とモルタルそれぞれの強度と比較して小さい。これは、プラグ構造体の内で最も弱い部分は接合部であることを意味する。
- 2) 引張強度は、圧裂試験と一軸引張試験の両方で評価したが、差異は小さかった。
- 3) 接合面の傾斜が異なった円柱形供試体を用いた一軸圧縮試験と、回転ダイス型のせん断箱を用いた一面強制せん断試験では、せん断強度に関して同様な結果が得られた。

接合面の存在が考慮できるような有限要素法に基づく浸透流の数値解析法を開発し、プラグを持つ坑道模型に対してトランジェント・パルス法を適用した場合のシミュレーションを行い、以下のような知見が得られた。

- 1) プラグを持つ坑道の廻りの浸透流をトランジェント・パルス法で解析するときに、全体の透水性を「見かけの透水係数」として評価する方法を提案した。
- 2) 接合面内の流れとして、平行板モデルの有用である見通しが得られた。
- 3) 隙間幅は少し大きくなると、そこを通る流れが急激に増し、全体の透水係数が著しく増大する。
- 4) 試験に供したモルタルプラグと砂岩の孔壁間の接合面は、隙間幅の平均値が約0.1mmあり、全体の透水挙動にかなり影響することがわかった。
- 5) プラグの透水係数を岩盤の値の1/10にすると、全体の透水係数を低減

する上で効果がある。しかし、透水係数をそれ以上小さくしても効果は期待できない。

5. 2 今後に残された課題

接合面は全体の強度特性と透水特性の両方に著しい影響を及ぼすことが明らかになった。そこで、これについて研究をさらに進める必要がある。当面の具体的な課題を挙げると次のようになる。

- 1) 接合面の変形・強度特性に関しては、接合面の強度特性が明らかになったが、接合面の変形特性の評価は今後に残されている。また、接合面要素と通常の連続体要素からなる構造体に関して、逐次破壊を扱える応力解析システムを有限要素法に基づいて開発し、プラグの一方から圧力を受けるときの逐次破壊のシミュレーションを行うことが望まれる。
- 2) プラグと岩盤の接合面の隙間の状態を定量的に観察する手法を確立し、資料の集積を計ることと、接合面内の流れとして平行板モデルを用いることの妥当性について実験と解析の両方から検討を進める必要がある。

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、(動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書)、PNC PJ1600 92-001(2)、1992
- 2) 財団法人新エネルギー財団：新型負荷平準化電源環境影響評価技術調査報告書、1992
- 3) 金属鉱業事業団：坑道閉塞の手引き、1985
- 4) J. Guadalupe Argello: Numerical Simulation of WIPP Panel Entry Seal/Formation Structural Interaction, Key Question in Rock Mechanics, 1988
- 5) Peter Sitz & Wolfgang Forster: Design of Sealing System for Shaft, Borehole and Access Tunnels - Basis for Gas Storage in Abandoned Mines and Rockcaverns, Storage of Gases in Rock Caverns, 1989
- 6) 河野新他：新しいコンクリート工学、朝倉書房、1987
- 7) 國府武志他：最新コンクリート技術選書8(膨張コンクリート・高強度コンクリート)、オーム社、1988
- 8) 中田雅夫, 山地宏志, 木山保, 山田文孝：閉塞プラグの繰り返し載荷時の挙動について, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 707-712, 1994

- 9) 動燃技報 PNC Technical Review: 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発特集、PNC TN1340 93-001 ISSN 0289-6605, 1993
- 10) 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)
- 11) STEPHEN R. BROWN: Fluid Flow Through Rock Joints: The Effect of Surface Roughness, Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. B2, pp. 1337-1347, 1987