

分置

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]

~~社内資料~~

本資料は 19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]

PNC I<sub>2</sub>J1600 93-001

## 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・核燃料開発事業団委託研究成果報告書)

1993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)



## 地層処分におけるシーリングに関する基礎的研究(Ⅱ)

石島 洋二\*

## 概要

幾つかあるシーリング技術の中で、最も高い遮蔽性能が期待されるプラグは、高放射能廃棄物の地層処分において、処分の終了した坑道の密閉、処分が終了した坑道群から成るパネルへのアクセス坑道の密閉、全体の処分が終了したときの立坑の密閉など、処分区域と外部とを遮断する主要な手段になると考えられる。プラグには次の2つの機能がある。

- 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。

1) の特性を持つプラグは耐圧プラグと呼ばれるが、所期の圧力に耐えるプラグの設計は比較的容易である。しかし、このような耐圧強度のあるプラグでも、2) の遮水性能はしばしば劣る場合が多い。したがって、遮水性能の向上は耐圧強度の改良以上に解決が困難であるといえる。

本年度はプラグの遮水能力に注目し、遮水性に影響する要因を探り、遮水性能の高いプラグを開発することを研究の目的とした。

このために、まずプラグの回り浸透流解析を行い、遮水性に及ぼす要因

---

\* 北海道大学工学部・資源開発工学科・岩石力学講座

を探ることにした（第2、3章）。この過程で、次の2つ：

1) プラグ長を増す。

2) プラグに接する岩盤に圧力を与える。

は遮水性能を向上する上で有効なことが示唆された。2)の岩盤に圧力を与える方法は幾つか考えられるが、その一つは持続性のある膨張圧を発生する材料で作られたプラグを用いることである。このようなプラグを膨張プラグと呼ぶことにし、このようなプラグの耐圧特性や遮水特性の研究に焦点を当てることにした。そして、本研究では膨張プラグの材料として、膨張セメントを混和したモルタル（またはコンクリート）を選び、膨張圧－膨張量線図で代表される膨張特性と透水特性などの基礎的な特性を調べた（第4章）。その上で、これを膨張プラグに使用した場合の遮水性能と耐圧性能について、模型試験を行い、評価・検討することにした（第5、6章）。

まず、膨張モルタルの膨張特性は、右下がりの膨張圧－膨張量線図として特徴付けられることを実験的に確認した。ただし、膨張圧の絶対値はモルタルの体積によって変わることが示唆された。汎用的な膨張特性の研究は今後に残された課題であるといえる。また、膨張モルタルは通常のもルタルよりも難透水性を示すことが透水試験で確認された。一般に、材料の透水係数は負荷される圧力が増すと減少するが、この効果もあるであろう。

プラグの回りの浸透流に関する模型試験から、膨張モルタルプラグは通常のもルタルプラグよりも浸透流の総量を低減する上でかなり効果があることが明らかになった。これは膨張プラグの場合、プラグに接する岩盤が圧力を受け、このためにその中の浸透流が抑制されるためと考えられる。

3次元模型試験を行い、プラグが一端から圧力を受けるときの挙動を調べた。その結果、膨張モルタルプラグは通常のもルタルプラグよりも大きな破壊圧を示すことがわかった。また、通常のもルタルプラグでは、プラグ端から斜めに発達するき裂の発生が観察されたが、膨張プラグでは認められなかった。

以上のように、膨張圧を発生し岩盤とプラグ自体に圧縮応力を付加する

機能を持つ膨張プラグは、耐圧性と遮水性の両方が通常のタイプよりも向上することが、理論と実験の両方から明らかになった。

最後に、本年度実施した膨張プラグに関する研究は先駆的なものであり、今後、膨張プラグの実用化に向けてなすべき研究課題が多数残されていることを述べておきたい。

# 目 次

1	緒言	1
1. 1	研究の目的	1
1. 2	膨張プラグ	2
2	プラグの回りの浸透流解析	4
2. 1	はじめに	4
2. 2	問題の設定と解析方法	4
2. 3	解析結果	5
3	膨張プラグを有する坑道の浸透流解析	12
3. 1	はじめに	12
3. 2	解析方法	12
3. 3	解析例	13
4	膨張性セメントを混和したモルタルの強度・透水特性	19
4. 1	はじめに	19
4. 2	膨張モルタルの透水係数	19
4. 2. 1	膨張モルタル供試体の作成方法	19
4. 2. 2	透水係数の測定方法	20
4. 2. 3	測定結果	21
4. 3	膨張モルタルの膨張圧－膨張量	21
4. 3. 1	測定方法と供試体の作成方法	21
4. 3. 2	測定結果	22

5	模型試験に基づくプラグの遮水性能の測定	30
5.1	はじめに	30
5.2	供試体と測定方法	30
5.2.1	供試体と作成方法	30
5.2.2	測定方法	31
5.3	測定結果	31
6	膨張プラグの強度特性	35
6.1	はじめに	35
6.2	膨張プラグの模型試験	35
6.2.1	供試模型	35
6.2.2	試験方法	36
6.2.3	試験結果	36
7	結言	44
8	参考文献	46

## 第1章 緒言

### 1. 1 研究の目的

幾つかあるシーリング技術の中で、高い遮蔽性能が期待されるプラグ<sup>1)</sup>は、従来、炭鉱や鉱山においてガスや有害な坑内水の外部への湧出を防ぐことを目的に使用されてきた。最近では、圧縮空気の地下貯蔵や地下石油備蓄など地下貯蔵分野でも、プラグが使用されるようになっている<sup>2)</sup>。

高放射能廃棄物の地層処分において、プラグは処分の終了した坑道の密閉、処分が終了した坑道群から成るパネルへのアクセス坑道の密閉、全体の処分が終了したときの立坑の密閉など、処分区域と外部とを遮断する主要な手段になると考えられる。

プラグには次の2つの機能がある。

- 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。

1) の特性を持つプラグは耐圧プラグと呼ばれるが、形状を工夫し、またプラグの材料として、ある程度の強度を持つものを用いれば、かなり大きな圧力に耐えることは、既に昨年報告した室内模型試験で明らかにされている<sup>1)</sup>。例えば、形状をそろばん玉状とし、岩盤に食い込ませる方法を採用したコンクリートプラグを、中・硬岩内に設けた坑道や立坑に施工した場合には、かなりの高圧に耐えることができる<sup>3)</sup>。しかし、このような耐圧強度のあるプラグでも、遮水性能はしばしば劣る場合が多い。したがって、プラグの問題の中で、遮水性能を向上させる問題は強度の改良以上に解決が困難であるといえる。

本年度はプラグの遮水能力に注目し、遮水性に影響する要因を探り、遮水性能の高いプラグを開発することを研究の目的とした。

このために、まずプラグの回り浸透流解析を行い、遮水性に及ぼす要因を探ることとした(第2、3章)。この過程で、プラグに接する岩盤に圧



力を与えることの有効性が示唆された。岩盤に圧力を与えるためには、次節で述べるように、幾つかの方法が考えられる。その一つは持続性のある膨張圧を発生する材料で作られたプラグを用いることである。このようなプラグを膨張プラグと呼ぶことにし、このようなプラグの耐圧特性や遮水特性の研究に焦点を当てることにした。

本研究では膨張プラグの材料として、膨張セメントを混和したモルタル（またはコンクリート）を選び、膨張圧－膨張量線図で代表される膨張特性と透水特性などの基礎的な特性を調べた（第4章）。その上で、これを膨張プラグに使用した場合の遮水性能と耐圧性能について、模型試験を行い、評価・検討することにした（第5、6章）。

## 1. 2 膨張プラグ

膨張プラグは、岩盤表面に対して長期に亘り圧力を負荷する性能を持つことが要求される。膨張プラグは、膨張圧の発生機構によって次のように分類することができる。

- ①機械式タイプ：機械式の圧力発生機構を持つもので、具体的には、プラグの外周にカーブドフラットジャッキを配置したタイプ、ダブルパッカー型のタイプ、ベローズ型のタイプなどが考えられる<sup>5)</sup>。所定の大きさの圧力をかけられる利点はあるが、構造が複雑になり、耐久性にも問題がある。
- ②ケミカルプリストレスタイプ：水和反応などの化学的な作用により膨張する性質を持つ材料をプラグとして使うもので、膨張セメントを混和したコンクリートやベントナイトなどが代表例である。このタイプはプラグの構造が簡単になるという利点はあるが、発生する圧力の大きさを制御できず、またその大きさを正確に予測するのが難しいという欠点がある。

高放射性廃棄物の地層処分において、ベントナイトはキャニスターとその埋設孔のクリアランスの充填をはじめ、シーリング材として種々の箇所

での使用が検討されている<sup>4)</sup>。したがって、ケミカルプリストレス・タイプのプラグ材料に関する研究は重要である。このため、本研究ではこのタイプのプラグに焦点を当てることにした。

ケミカルプリストレス・タイプの材料の中で、膨張セメントは使用実績が多い<sup>6)7)</sup>。また、かなり高い圧力を発現するものも開発されている。今回は幾つかある膨張セメントの中で、カルシウムサルフォアルミネート系(CSA系)を用いることにした。膨張の発生は、膨張性混和材の水和反応によるエトリンガイトと呼ばれる針状結晶がランダムな方向に成長することによりもたらされる。

膨張セメントを混和したコンクリートをプラグ材として用いると、以下のような効果が期待される。

- 1)ケミカルプレストレスによるプラグ材自体の強度の増大
- 2)ケミカルプレスによる岩盤とプラグの接合部における圧縮応力の発生とこれに伴うせん断抵抗の増大
- 3)圧縮応力の発生によるプラグ周囲の岩盤の透水係数の減少とこれに伴う浸透流量の低減

膨張セメントモルタルの強度・透水特性に関する測定結果は第4章で述べる。

## 第2章 プラグの回りの浸透流解析

### 2. 1 はじめに

無限の広がりを持つ岩盤内に設けた円形断面坑道中に打設された円柱形のプラグに関し、その周囲の浸透流の様子を調べるために数値解析を行う。そして、浸透流解析により、下記の要素が浸透流の挙動に及ぼす影響を調べる。

1) 岩盤とプラグの透水係数の比 ( $K_p/K_r$ ) : これに関して、下記の4ケースを検討する。

1.  $K_p/K_r = 1.00$
2.  $K_p/K_r = 0.20$
3.  $K_p/K_r = 0.10$
4.  $K_p/K_r = 0.01$

2) 円柱形プラグの長さ ( $L$ ) : これに関して、次の3ケースを検討する。

1.  $L/D = 1.0$
2.  $L/D = 2.5$
3.  $L/D = 4.0$

ここで 模型坑道の径  $D$  (次節参照) は  $2\text{cm}$  とした。

3) プラグの形状 : 円柱形の他に、そろばん玉形についても検討する。

### 2. 2 問題の設定と解析方法

上記の領域は軸対称であるので、軸対称定常浸透流問題として扱い、有限要素法による解析を実行することにした。解析においては、要素内では一定の透水速度となる形状関数を仮定した3角形要素が用いられている。

解析モデルの諸寸法と境界条件は、第5章で述べる透水実験と対応させるために、使用した供試体と実験条件に合わせ、図2. 1に示すような設

定をした。同図には、(軸対称な)厚肉円筒の孔内に円柱形のプラグを持つ領域に関し、中心軸(z軸)を通る断面が示されている。厚肉円筒領域の内径、外径、高さはそれぞれ2cm、6cm、12cmである。

この領域において、プラグの一端とこれに接する坑道内および端面は水頭 $h_0$ 、プラグの他端とこれに接する坑道内および端面の水頭は0(大気圧)となっており、岩盤、プラグとも含水飽和されているものとする。また、等方的な透水性を持っている岩盤、プラグの透水係数はそれぞれ $K_r, K_p$ とし、領域の外壁は不透水条件を満たしているものとする。

### 2. 3 解析結果

図2. 2に示す要素分割に対応した解析結果を評価するために、図2. 1に示すような3つの境界における水の流出量 $Q_1, Q_2, Q_3$ と全体の流出量 $Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3$ ( $m^3/min$ )を求めた。結果は表2. 1に示されている。また、全体の流量 $Q_t$ を基に、次式で定義される見かけの透水係数 $K_{app}$ ( $cm/s$ )を計算した。

$$K_{app} = \{100Q_t / (60S)\} / (\Delta h/L)$$

ここで、 $L$ ( $m$ )=モデルの長さ、 $\Delta h = h_0$ =水頭差、 $S$ ( $m^2$ )=断面積

図2. 2は、 $L/L_0 = 1.0$ 、 $K_p/K_r = 1.0$ の場合について、流線ベクトルを表したものである。坑道の加圧側から非加圧側への流れには2系統が認められる。一つは、高圧側の坑道壁面や端面から岩盤内へ流入した水がプラグの周囲の岩盤内を浸透し、低圧側の坑道壁面や端面へ流出する系統で、流量は $Q_2 + Q_3$ で与えられる。2つの流量 $Q_2, Q_3$ の中では、坑道壁面同士をつなぐ流れの量 $Q_2$ が大きい。もう一つは、 $Q_1$ の流量で表されるプラグの加圧側端面から反対側の端面へプラグ内を浸透する流れの系統である。表2. 1に示すように、総流量に占める割合は圧倒的に第1の系統が大きい。

したがって、プラグ自体の不透水性を高めても、プラグの遮水性能はあ

まり向上しないと予想される。実際に、プラグと岩盤の透水係数の比は、表 2. 1 に示すように、プラグの透水係数を 0. 1 倍に落としても、総流出量  $Q_t$  にはそれほど影響せず、したがって見かけの透水係数は 14.5 % しか減少していない。

プラグを長くすると、第一の系統の流れの起こる領域、つまりプラグの高圧側から低圧側へ至る岩盤領域が広がり、このために動水勾配が小さくなる。その結果、浸透流量が減少し、遮水性を高める上で効果があるものと予想される。実際に、表 2. 2 に示すように、プラグ長が 4 倍になると、総流出量  $Q_t$  は 0. 35 倍になり、遮水性能がかなり向上することがわかる。

なお、同一のプラグ長の下では、プラグの形状がそろばん玉状と円柱状との間で、浸透流量の大きさに関し、ほとんど差異がないことがわかった。

見かけの透水係数  $K_{app}$  と岩盤の透水係数  $K_r$  の比：  $K_{app}/K_r$  は、表 2. 3 に示すように、いずれも 1 より大きい。この比が大きいほど、全体の浸透流  $Q_t$  に対するプラグ内の浸透流  $Q_1$  やプラグに沿った坑壁内の浸透流  $Q_2$  の寄与が大きく、したがって、プラグの遮水効果が小さいと判断される。この観点から、難透水性材を使った長いプラグの比は最も 1 に近く、試験した条件の中では、最も遮水効果があるといえる。

表 2. 1 流出量に及ぼすプラグの透水性の影響  
(L/D=2.5の場合)

(  $\times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$  )

Kp/Kr	Q 1	Q 2	Q 3	Q t (合計)
1.0	0.3904	1.864	0.2765	2.531
	15.4 %	73.7 %	10.9 %	100 %
0.2	0.08544	1.838	0.2834	2.206
	3.8 %	83.3 %	12.8 %	100 %
0.1	0.04338	1.838	0.2844	2.166
	2.0 %	84.9 %	13.1 %	100 %
0.01	0.004409	1.837	0.2863	2.128
	0.2 %	86.3 %	13.5 %	100 %

表 2. 2 流出量に及ぼすプラグ長の影響  
( $K_p/K_r=1.0$ の場合)

(  $\times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$  )

L/D	Q 1	Q 2	Q 3	Q t (合計)
1.0	0.7783	3.659	0.1816	4.619
	16.8 %	79.2 %	3.9 %	100 %
2.5	0.3904	1.864	0.2765	2.531
	15.4 %	73.7 %	10.9 %	100 %
4.0	0.2598	1.033	0.4895	1.782
	14.6 %	58.0 %	27.5 %	100 %

表 2. 3 見かけの透水係数  $K_{app}/K_r$

$K_p/K_r$	L/D	1.0	2.5	4.0
1.0		3.27	1.79	1.26
0.2		2.73	1.56	1.12
0.1		2.66	1.53	1.10



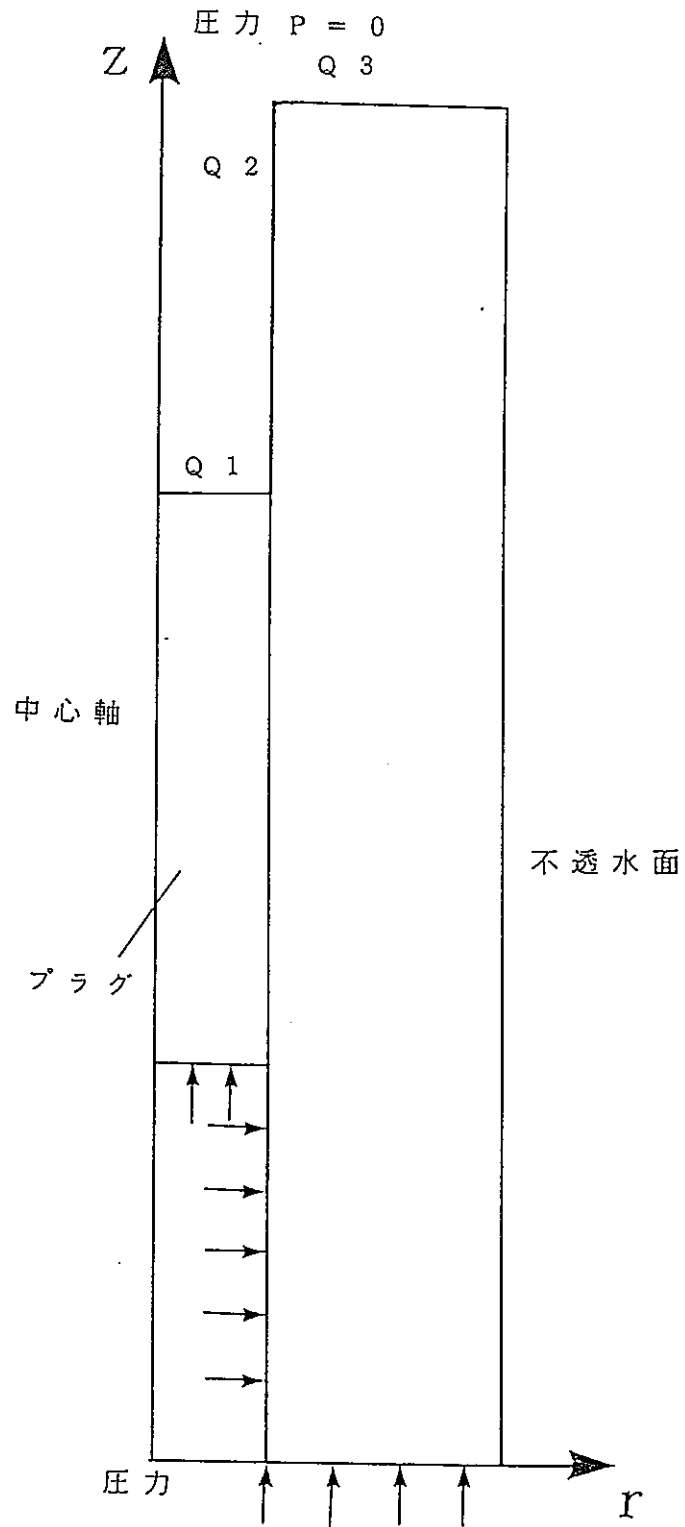


図 2. 1 プラグ周囲の浸透流解析のための境界条件と Q 1、Q 2、Q 3 の流出域の定義 ( $L/D=2.5$ )。軸対称問題のために z 軸と通る断面が示されている

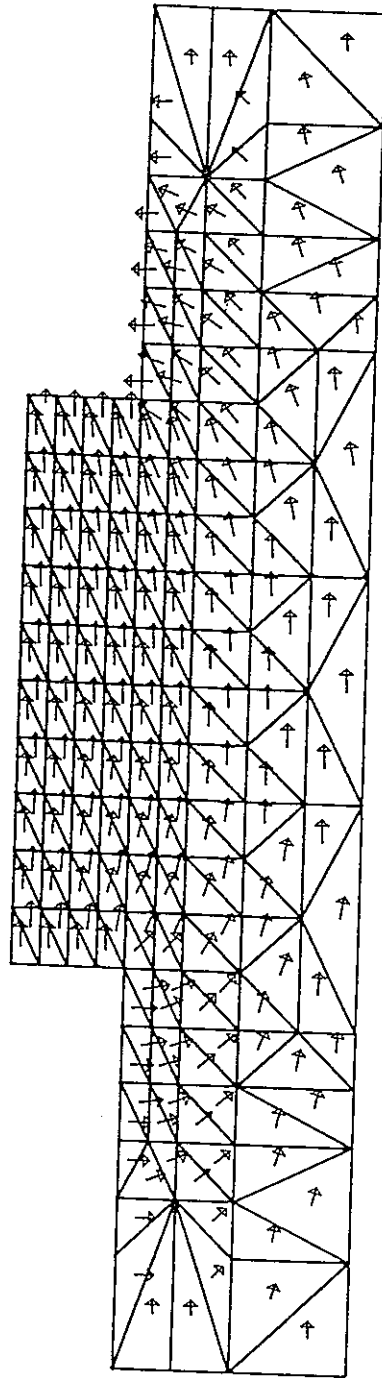


図 2. 2 図 2. 1 に対応する浸透流解析の要素分割と浸透流の流線ベクトル

## 第3章 膨張プラグを有する坑道の浸透流解析

### 3.1 はじめに

岩盤の透水係数は一定ではなく、岩盤に作用する応力の大きさ・状態により著しく異なることはよく知られている。すなわち、同じ岩石でも、図3.1に示した例からわかるように、静水圧が作用すれば、透水係数は小さくなる。逆に、引張応力が作用すれば、その方向の透水係数は大きくなる。坑道の壁面に垂直な地圧成分は、掘削により初期状態の値よりも低減し、0に近い値になる。また、坑道の施工に伴い、周囲の壁面には多少ともひび割れが誘起される。これらはどちらも、坑道周囲の透水性を著しく高める結果を招き、プラグの遮水性能の観点からは好ましくない。

対策として、次の2つが考えられる。第一は、グラウチングによって岩盤の遮水性を改良する方法で、岩盤内のき裂や空隙をセメントで塞ぐことにより、透水性の低減が計られる。プラグの打設に先立ち、プラグ中央の断面において、坑道から放射状に設けたボアホールを利用してグラウトをし、不透水性を高めた人工的な面を作る工法は、カーテングラウトと呼ばれる。このグラウトは標準的な工法として耐圧プラグの施工に先立ち実施される。

第二は、何らかの手段によって、圧力（プリ・ストレス）を坑道壁面に負荷する方法である。これは膨張プラグ（1.2節参照）を用いることによって達成される。ここでは、ケミカルプリストレスタイプの膨張プラグの使用が、プラグの遮水性能と耐圧性能の改良にどの程度の効果があるかを検討することにする。

### 3.2 解析方法

解析は前章と同様に軸対称領域を仮定し、次に述べるように2段階に分

けて行う。

1) 第1段階の解析：まず、初期地圧状態にある岩盤内に円形断面坑道を掘削した後、膨張圧を発生する円柱形プラグを打設する。この膨張圧は内部ひずみ $\varepsilon_0$ の存在によってもたらされるものとする。また、岩盤は弾性的に挙動するものとし、応力解析は3角形定ひずみ有限要素法を用いて実施する。

2) 第2段階の解析：第1段階の解析と同じ有限要素モデルと境界条件を用いて浸透流解析を行う。このとき、岩盤の透水係数 $K$ は岩盤内の応力の関数として次のように表されるものとする（応力は圧縮を-、引張を+に取る）。

$$K = K_0 (1 + d \cdot \sigma)$$
$$\sigma = (\sigma_r + \sigma_z) / 2$$

上式において、応力 $\sigma$ として第1段階で得た解析結果を用いる。なお、軸対称のために、水は $\theta$ 方向には流れないことを考慮し、透水係数 $K$ は主応力の一つである $\sigma_\theta$ の影響を受けないものとした。このために、 $K$ は $\sigma_\theta$ の関数になっていない。このように定義された岩盤の透水係数は場所によって異なり、透水性に関して不均質になる。

### 3. 3 解析例

各条件は次のように設定した。

1) 第1段階の解析：初期地圧は大きさが10MPaの等方圧とし、プラグの1端の坑道には20MPaの水圧が作用し、多端は大気圧状態にあるものと仮定した（図3.2参照）。また、岩盤は弾性的に挙動するものとし、岩盤とプラグのヤング率、ポアソン比をそれぞれ、 $1.0^5$ MPa、0.2、 $0.8 \times 10^5$ MPa、0.3とし、プラグの膨張圧の発生源となる内部ひずみは $\varepsilon_0$ は、 $10^{-3}$ とした。

図3. 3はz軸を通る断面内の主応力の状態を示したものである。膨張圧のないプラグを用いると、高圧側のプラグ端に、引張応力が発生する。また、プラグに接する岩盤の $\sigma_{\theta}$ は引張になる。これに対して、膨張プラグでは、対応する箇所に対応する応力成分は圧縮になる。膨張プラグの場合、高圧側の坑道の壁面の応力成分 $\sigma_{\theta}$ だけが引張になる。

2) 第2段階の解析： $K_0 = 1$ とし、次の2通りについて計算を実行した。

- ① 膨張圧の発生しないプラグの場合： $d = 0$ を仮定した。この場合には、 $K = K_0$ となり、透水係数は応力に依存せず一定となる。
- ② 膨張圧の発生するプラグの場合： $d = 0.95$ を仮定した。

解析結果、高圧側の坑道から低圧側の坑道に流入する総水量 $Q_t$ は次のようになった。

- ① 膨張圧の発生しないプラグ  $Q_t = 1.13$
- ② 膨張圧の発生するプラグ  $Q_t = 0.95$

両者の差異は19%あり、膨張圧の発生するプラグを用いると、かなり遮水効果のあることがわかる。以上の解析では弾性岩盤を仮定している。坑道周囲が塑性状態になっている場合や、き裂が生じている場合には、膨張圧の効果はさらに顕著になると考えられる。したがって、膨張圧を発生するプラグは遮水性能を高める上で有効と考えられ、研究を今後も続ける価値があるといえよう。

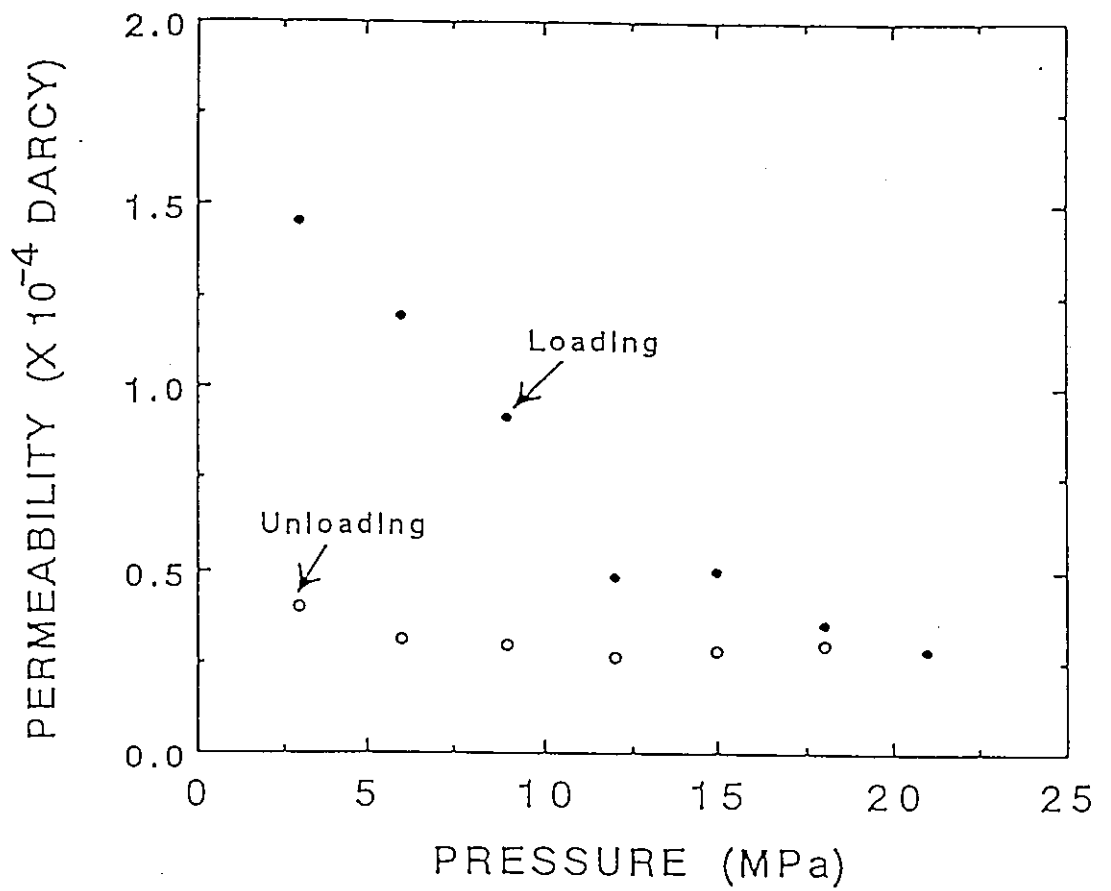


図 3. 1 静水圧-透水係数の関係、供試体：幌延泥岩（声問層）  
間隙水圧は 1 MPa に保った

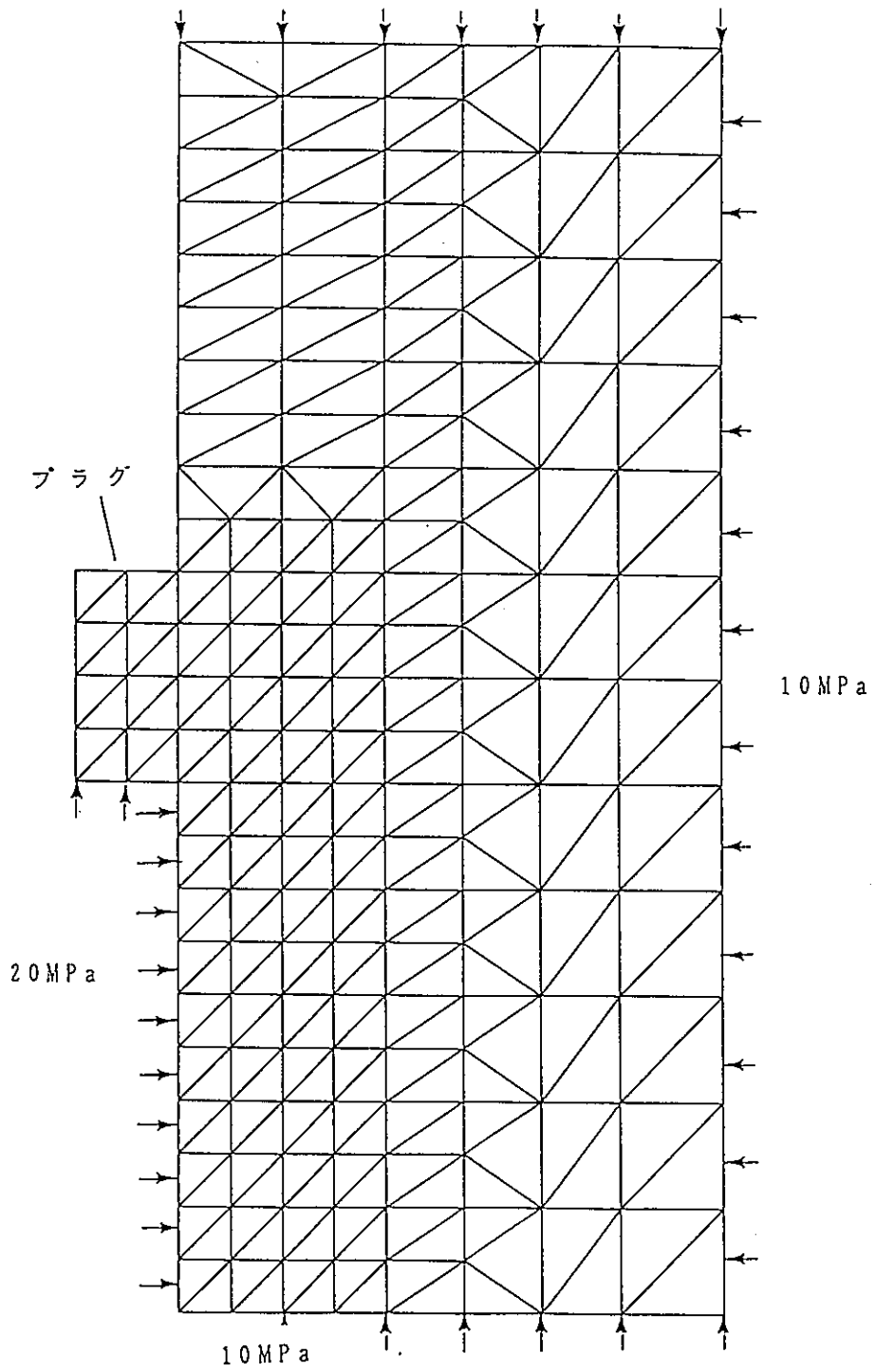


図 3. 2 有限要素モデルと境界条件

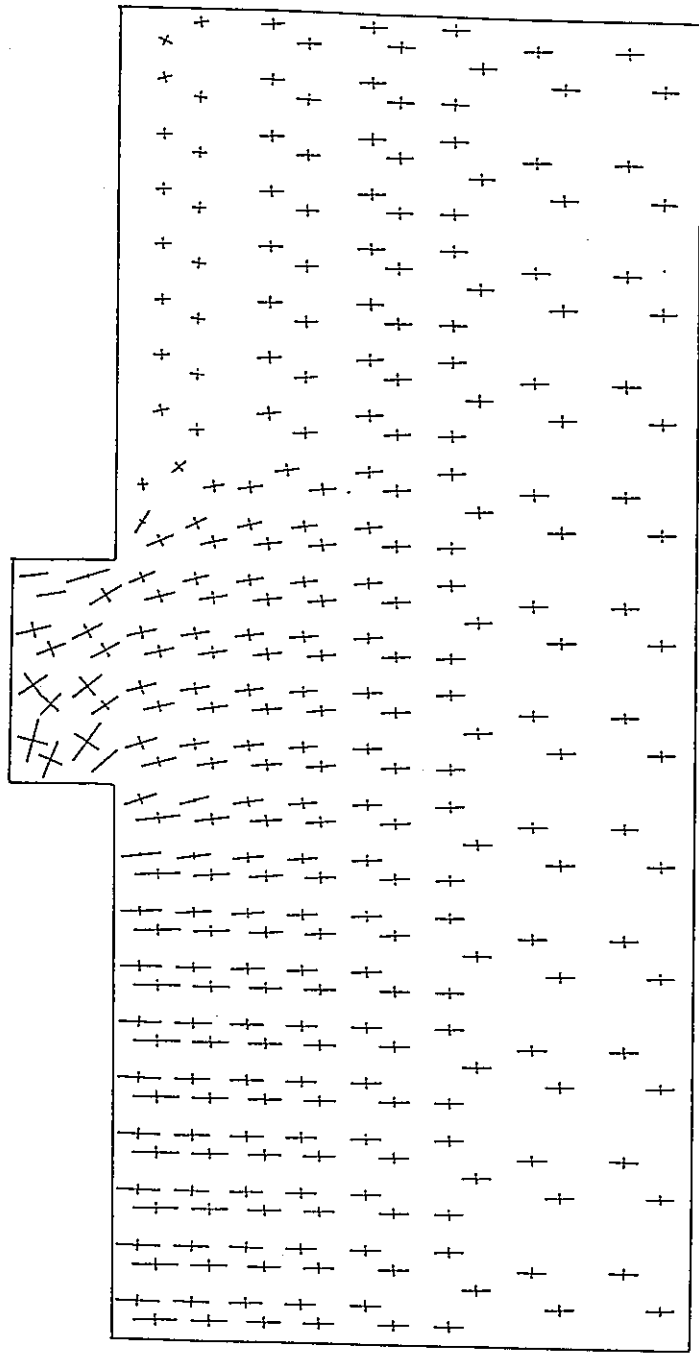


図 3. 3 a z 軸を通る断面内の主応力分布 (膨張しないプラグの場合)



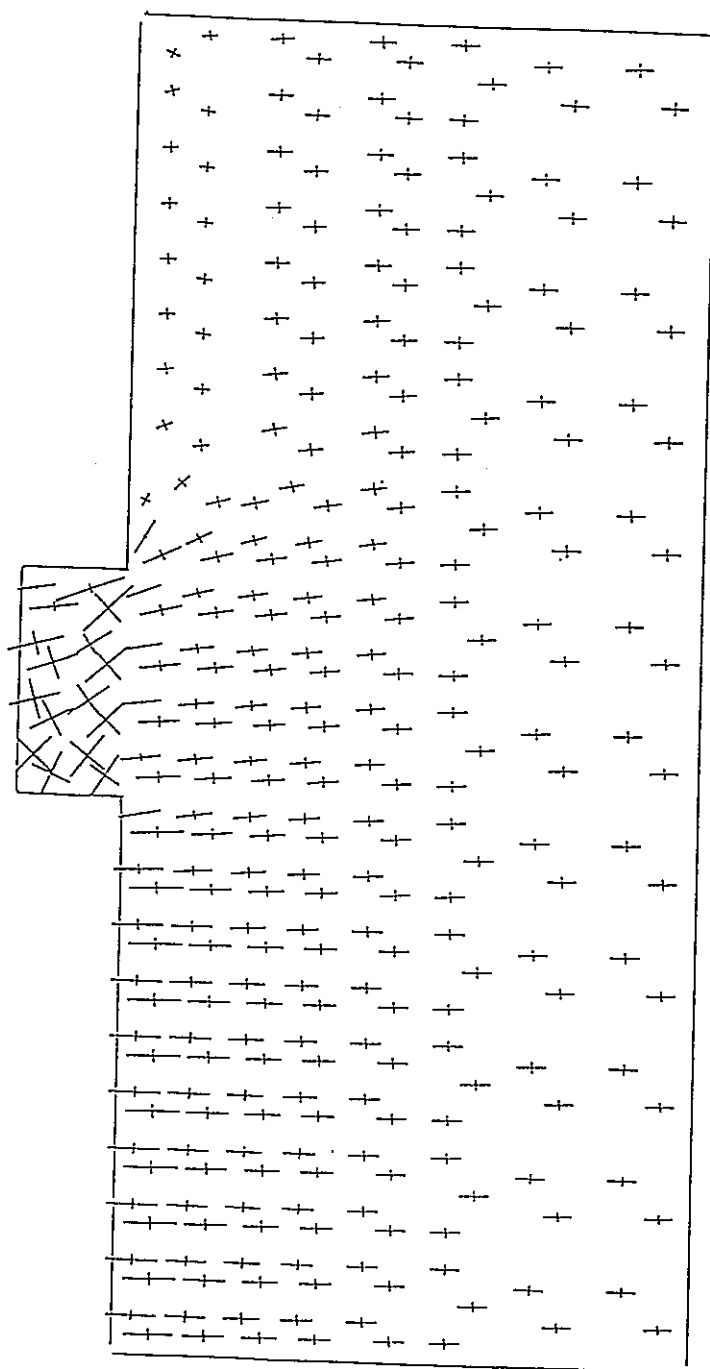


図 3. 3 b z 軸を通る断面内の主応力分布 (膨張するプラグの場合)

## 第4章 膨張性セメントの混和したモルタルの強度・透水特性

### 4.1 はじめに

本章では、ケミカルプリストレスタイプのコンクリートまたはモルタルの膨張特性や透水特性を実験的に明らかにすることを試みる。膨張セメントとして用いることにしたカルシウムサルフォアルミネート系（CSA系と呼ばれ、商品名は電気化学工業(株)デンカCSA<sup>#10</sup>）の膨張の発現は、（膨張性混和材の水和反応によりエトリンガイトと呼ばれる針状結晶がランダムな方向に成長することによりもたらされる。

透水係数を測定する場合に、膨張モルタルを供試体として用いるときの実験的な困難点は、固結の過程で適当な拘束がないとひび割れを起こし、はなはだしい場合には自壊してしまうことである。したがって、材料をむきだしのまま供試体として使うわけにはいかず、何らかの拘束をしなければならない。具体的な方法として、鉄管の中に膨張モルタルを打設し、その状態で測定することが考えられる。しかし、この場合には、所定の封圧や軸圧を設定するのに困難さを伴い、また供試体の側面のシーリングなどの諸問題が発生する。これらの根本的な解決は今後に残された問題である。今年度はとりあえず、透水係数を測定するに際して材料をむき出しの状態ですえるようにするために、膨張性混和剤の混入量は収縮を防ぐ程度にとどめた。

### 4.2 膨張モルタルの透水係数

#### 4.2.1 膨張モルタル供試体の作成方法

モルタルの材料としては、十分に乾燥した7号珪砂を使用し、配合比は重量比で水、セメント、砂を1：2：3とした。膨張性混和剤はセメントに対し重量比で1：12だけ添加した。この程度の添加量は収縮を防ぐ効

果しかないことがわかっている。

十分に混合攪拌したモルタルを少量ずつ、内径80mm、深さ160mmの鉄製の円筒形枠の中に投入し、投入毎に円筒上端から入れた鉄棒を介してハンマーでモルタルを打ちつけた。モルタル打設後、24時間の散水養生を行い、表面が固化した後、水中養生を行った。モルタルは次の2通りの方法で養生した。

①試料を形枠に入れたまま6日間水中養生を行った。このように、試料を円筒形枠内に入れて養生したのは、固化の過程で試料が膨張するために、拘束がないと自壊する恐れがあったためである。

②参考のために、一部は打設後24時間で形枠から取り出し、水中養生を行った。

水中養生を終えた試料の中央部から、ダイヤモンド・ビットを用いてコアを採取し、ダイヤモンド・カッターを用いて所定の長さに切り、その後、平面研削盤を用いて端面を整形し、直径30mm長さ60mmの円柱形供試体に仕上げた上で試験に供した。

#### 4. 2. 2 透水係数の測定方法

トランジェントパルス法による透水試験は、次の要領で実施した。

(1) ベッセル内に供試体を静置した後、供試体の含水飽和の促進を図るために、約10時間ほど真空ポンプを運転し真空引きを行う。その後、供試体に、先ず80kgf/cm<sup>2</sup>の封圧を設定した後、50kgf/cm<sup>2</sup>の水圧を作用させる。これにより供試体には間隙圧が発生するが、一様な間隙水圧の状態が実現するまで約8時間静置する。

(2) 間隙水圧が完全に安定した後、封圧を150kgf/cm<sup>2</sup>に設定し直す。その後、間隙水圧が再び安定するまで24時間以上静置する。

(3) 間隙水圧が安定した後、セパレート・バルブを閉じ、供試体の上端面および下端面に接続されている圧力回路を遮断する。そして、再び差圧が安定するまで約6時間ほど静置する。上述した作業手順を経た後、供試体の下端面に1kgf/cm<sup>2</sup>のパルス圧を与え、高圧・低圧側のタンクの圧力差、つまり差圧の変化を5sec毎に計測する。

#### 4. 2. 3 測定結果

トランジェントパルス法で得られた差圧の経時変化は、図4. 1に示すように、拘束のままで水中養生した膨張モルタルは、ほとんど起こらず、透水性が極めて小さいことがわかる。封圧評価された透水係数の値は表4. 1に示す通りである。通常モルタル自体、難透水性材であることがわかっているが、無収縮モルタルの透水係数はこれよりもさらに小さい。なお、浸水前後の重量変化の測定より、有効空隙率について約0.04%という結果が得られた。

図4. 2に示す顕微鏡写真から、球形をした空隙は互いに独立しており、この点からも難透水性材であることが伺える。

#### 4. 3 膨張モルタルの膨張圧－膨張量

##### 4. 3. 1 測定方法と供試体の作成方法

膨張セメントによって発現する膨張圧または膨張量は、拘束の程度によって異なる。そこで、肉厚の異なる鋼製の円筒を用い、この中に膨張セメントモルタルを入れ、養生過程で発生する膨張の時間的推移を調べることにした。この時の膨張圧・膨張量を知るために、円筒の外壁に抵抗線型ひずみゲージをはりつけ、ひずみの計測を行った（図4. 3参照）。

試験に供したヤング率210GPa、ポアソン比0.3の鉄製円筒の寸法を表4. 2に示す。クロス型の抵抗線ひずみゲージは、円筒形棒の外側中央部において180°の角度で相対する位置に2枚張り付けた。

計測には最低でも数日間を要し、ひずみの計測は温度変化の影響を受けやすいので、測定は、供試体のみならず計測記録装置も24℃に保たれた恒温槽内に入れて行った。ひずみや温度は、データロギングシステムに取り込み、GP-IBインターフェースを通して、パーソナルコンピュータに送り、10分ごとにフロッピーディスクに記録する方法をとった。

モルタルの配合は、重量比で、7号硅砂：膨張セメント：水＝3：2：1、膨

張性混和剤は、全セメント量の15%とした。十分に練り混ぜたモルタルを少しずつ円筒に入れ、投入する毎に棒でつき固めた。これにより、気泡がなく密なモルタルが作成されたと考えられる。表面がある程度固化するまで1日程度放置し、その後、供試体を水槽中に入れた。このとき供試体の上端面が水面から出るようにし、上端面は濡れた布で覆い、散水養生とした。3日間散水養生した後、濡れた布を取り外し、その後は気乾養生の状態にした。ひずみが安定し、経時変化がないことを確認してから計測を終了した。

厚肉円筒に関する平面応力条件下の弾性解に基づくならば、円筒内壁に作用する圧力 $P_a$ 、および体積ひずみ $\varepsilon_{vol}$ と外壁の円周方向のひずみ $\varepsilon_\theta$ との間には、

$$\begin{aligned}\varepsilon_\theta &= 2 P_a \{ r_a^2 / (r_b^2 - r_a^2) \} / E \\ \varepsilon_{vol} &= \{ (1 - \nu) + (1 + \nu) r_b^2 / r_a^2 \} \varepsilon_\theta\end{aligned}$$

が成立する。ここに、 $E$ ：ヤング率、 $\nu$ ：ポアソン比、 $r_a$ ：内半径、 $r_b$ ：外半径である。円筒外周のひずみ $\varepsilon_\theta$ をこの式に代入することにより、膨張圧・膨張量が求まる。

#### 4. 3. 2 測定結果

得られたひずみ-時間線図の例を図4. 4に示す。ひずみ-時間線図より次のことがわかる。水中養生は3日間継続したが、この間、ひずみは増加し続けた。水中養生をこれ以上の期間、継続したならば、膨張はもう少しの間持続したものと予想される。気乾養生の開始後、やがてひずみの上昇は止まり、あるいは若干の収縮が起こった。したがって、膨張圧の発現にとって水の十分な供給が不可欠なのであろう。

得られた膨張圧-膨張量の関係を図4. 5に示す。実験では供試体の容積に関して2種類用いたが、これに応じて異なる線図が得られている。この結果は、膨張特性が体積にも依存していることを示唆している。なお、線図自体は、膨張量の増大に伴い膨張圧が減少するというもっともらしい

傾向が得られている。

表 4. 1 モルタルの透水係数

封圧 150 kgf/cm<sup>2</sup>における測定結果

$\times 10^{-6}$  darcy

通常のもルタル	5. 0
膨張もルタル（1日で拘束解除）	2. 4 1
膨張もルタル（6日で拘束解除）	0. 1 4

表 4. 2 鋼製の円筒棒の寸法と膨張ひずみ  $\varepsilon_{\theta}$

供試体 No	内径 (mm)	外径 (mm)	肉厚 (mm)	高さ (mm)	$\varepsilon_{\theta}$ $\times 10^{-6}$
25-1	25	29	2	75	1070
25-2	25	31	3	75	680
25-3	25	34	4.5	75	510
40-1	41	44.7	1.9	100	510
40-2	41	45.5	2.3	100	620
40-3	41	48.4	3.7	100	360

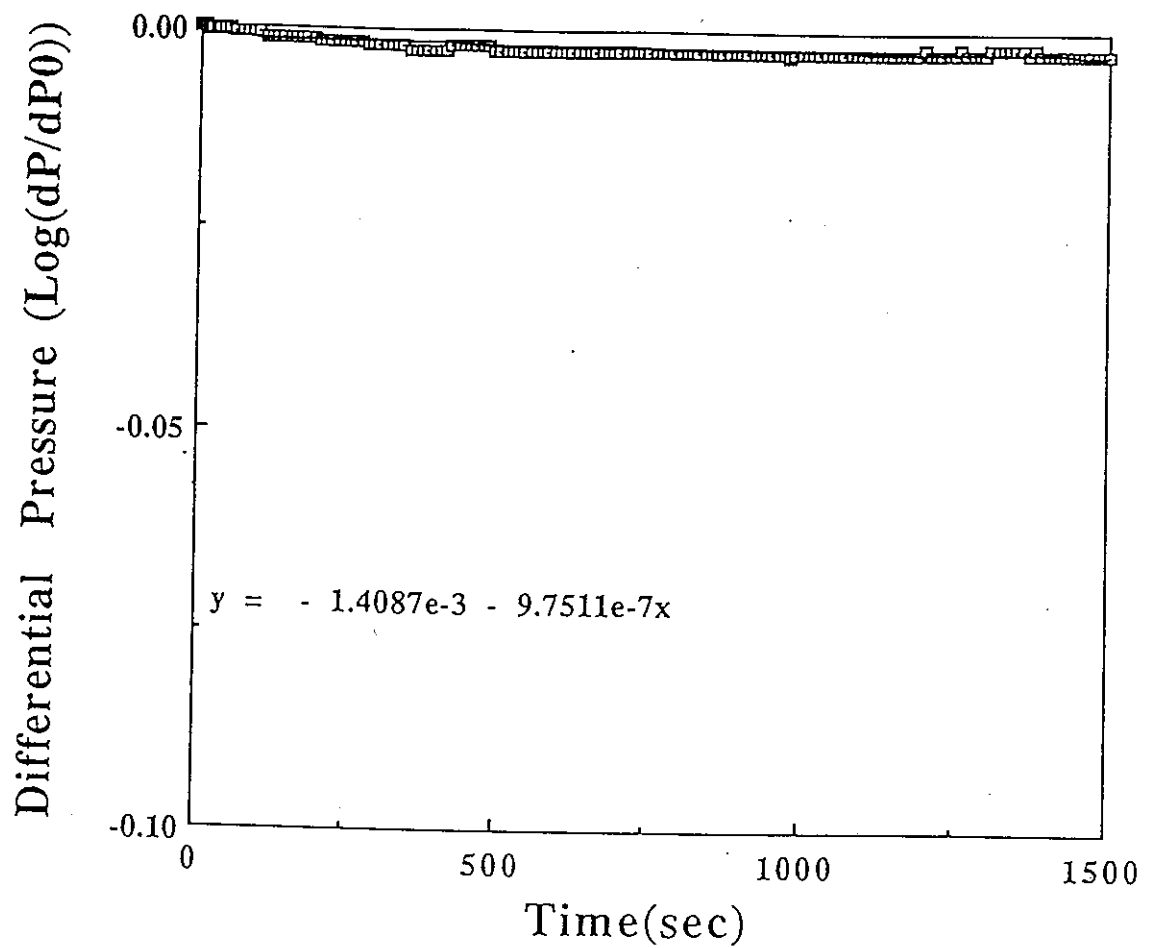


図 4. 1 トランジェントパルス法により得られた差圧-時間線図  
 (封圧: 150 kgf/cm<sup>2</sup>)  
 供試体: 6日間水中養生をした無収縮モルタル



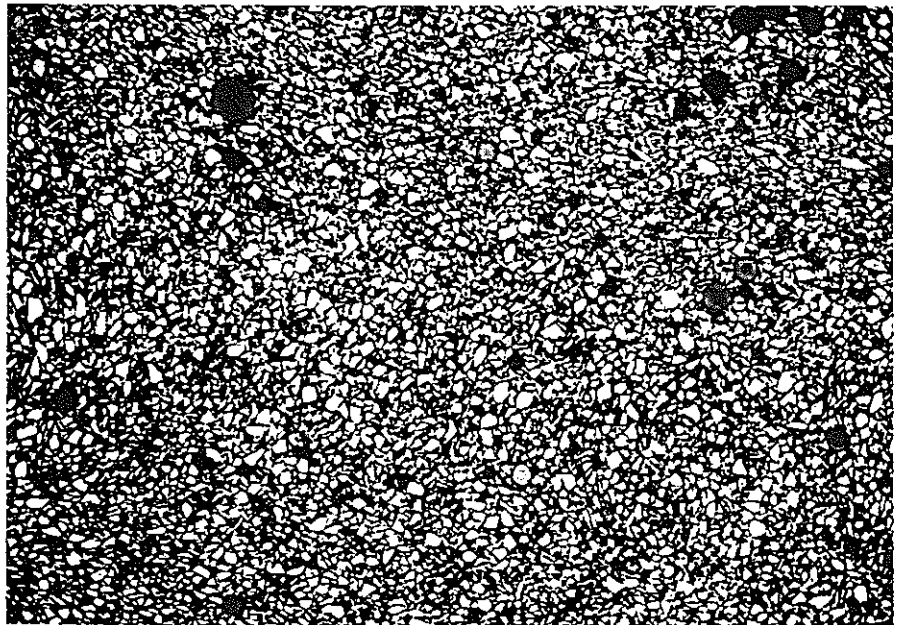


図4. 2 無収縮モルタル供試体の微視的構造（薄片の顕微鏡写真）。青く着色されている空隙は、円形（球形）をし互いに独立している。

供試体は1日で拘束解除したものを使用

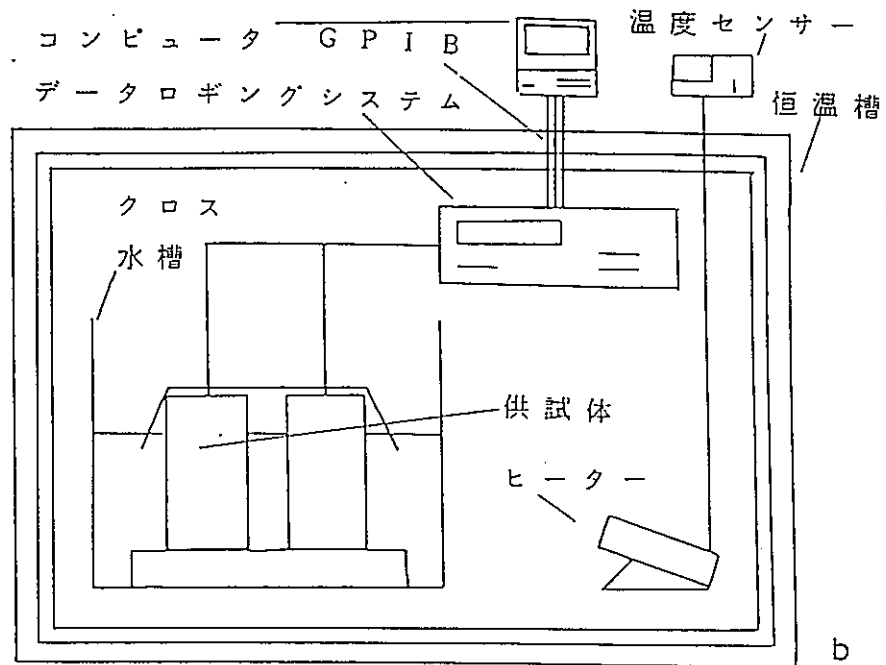
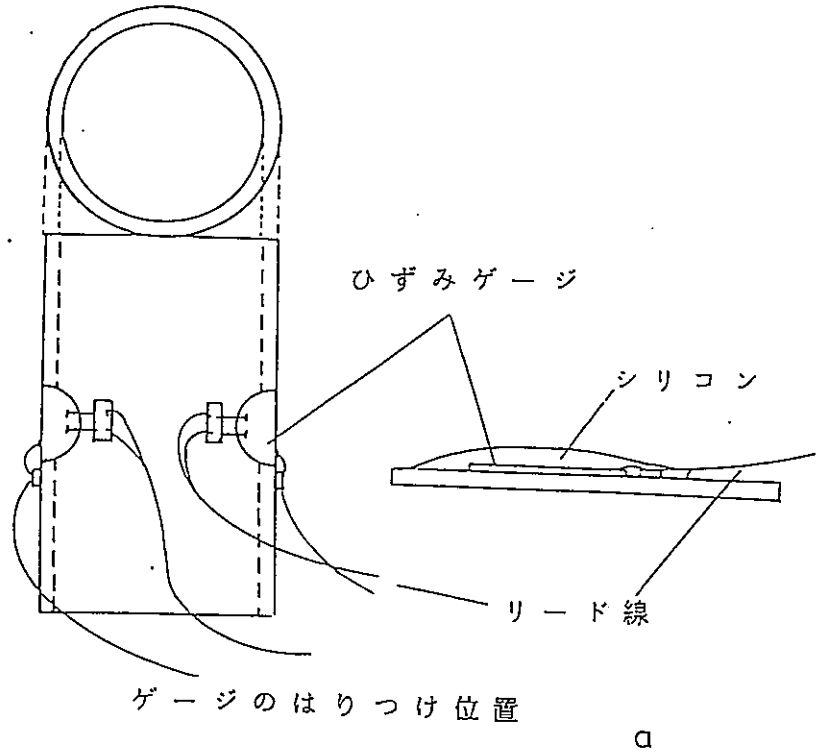


図4. 3 ひずみゲージを張り付けた鋼製円筒 (a) と、計測システム (b)

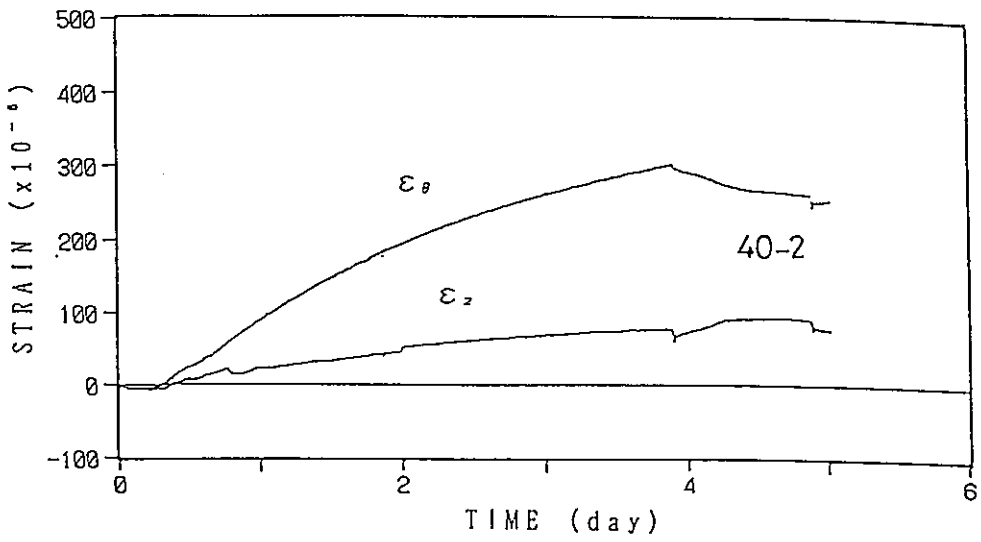
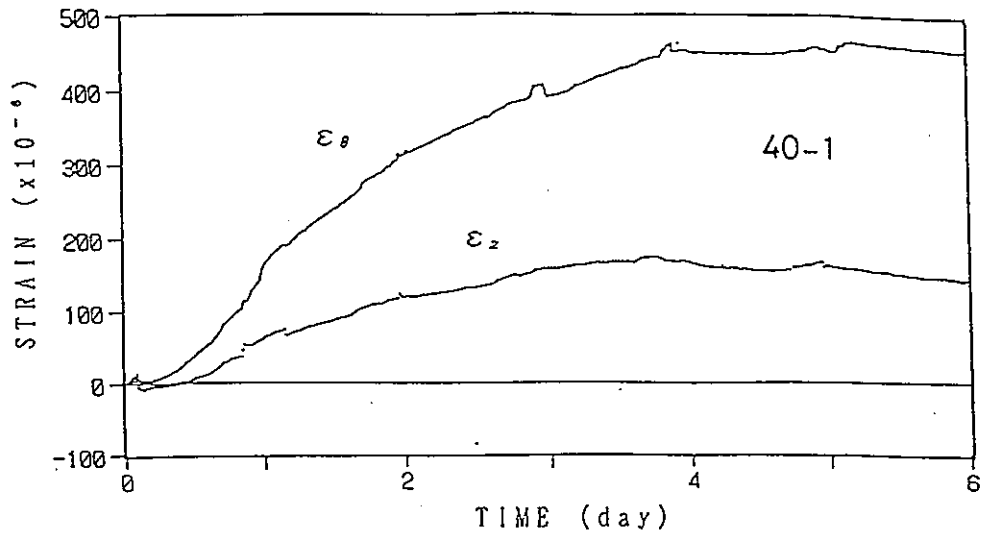


図 4. 4 円筒外側のひずみの経時変化

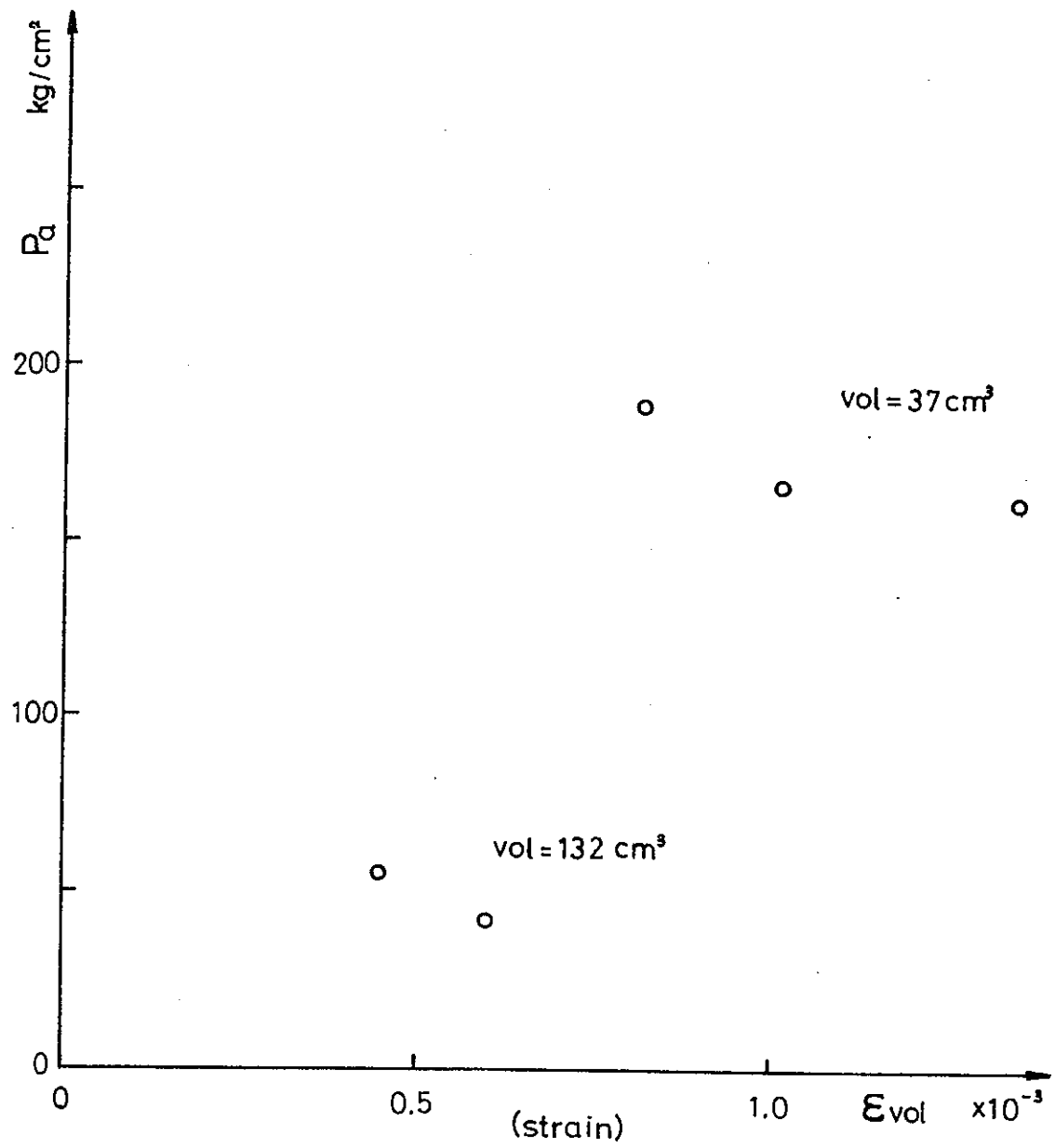


図 4. 5 膨張圧 (Pa) - 膨張量 (ε vol) の関係

## 第5章 模型試験に基づくプラグの遮水性能の測定

### 5. 1 はじめに

プラグの遮水性能を実験的に明らかにするために、砂岩の厚肉円筒形供試体を用意し、この中の一部に、普通モルタルおよび無収縮モルタルを打設した。供試体は、素堀の（円形断面）坑道を含む岩盤、後者はプラグを模している。この供試体の透水特性をトランジェントパルス法によって調べた。後で述べるように、模型プラグの遮水性能を測定の目標にする場合には、トランジェントパルス法よりも別の方法を用いる方がより直接的な評価が行える。しかし、準備等の関係で、新しい試みの実施は次年度以降に廻すことにした。

### 5. 2 供試体と測定方法

#### 5. 2. 1 供試体と作成方法

外径60mm、内径30mm、高さ120mmの厚肉円筒形供試体として、美唄砂岩を用いた。参考のために、円柱形供試体も用意した。端面の平滑度は $\pm 1/100$ mm以下となるように仕上げている。円孔内中央部には、下記の要領で長さ50mmのプラグを打設した。すなわち、十分に混合攪拌したモルタルを厚肉円筒供試体の孔内に少量ずつ投入し、その都度、両端より鉄棒を介してハンマーで打ちつけた。この方法により、所定の位置（孔の中央）に密に詰まり、かつ孔壁との接触が完全なプラグが作られたものと考えられる。モルタル打設後は、24時間の散水養生とその後の5日間の水中養生を経て、7日目に供試体を水槽から取り出し、孔内を散水養生しつつ、供試体外壁を自然乾燥させた。モルタルの配合比については、4. 2節を参照されたい。

このように仕上げた供試体の上下にエンドピースを置き、両端の隙間をエポキシ樹脂で充填した後、接着部を熱収縮性チューブで被覆し、さらに

その上からシリコンゴムを数回に分け塗布し、供試体全体をシールした。これは、供試体の外に封圧をかけて試験をするときに、封圧媒体が供試体に浸透するのを防ぐためである。

エンドピースには多数の小孔が設けられており、供試体への水の供給と供試体からの水の排出はこの孔を通過して行われる。なお、間隙流体としてイオン交換樹脂を通過させ十分に脱気した純水を用いた。

## 5. 2. 2 測定方法

上記の供試体を用い、トランジェントパルス法により透水試験を行った。

トランジェントパルス法による透水試験は、4. 2節で述べた要領で実施した。試験は3つの封圧に対して行っているが、最初、封圧150 kgf/cm<sup>2</sup>で計測した後、封圧を200 kgf/cm<sup>2</sup>に上げて計測し、最後に封圧250 kgf/cm<sup>2</sup>に設定しなおして計測した。

測定結果は差圧の常用対数-時間線図として整理し、線図の傾きλから次式によって見かけの透水係数 $K_{app}$ を算出した。

$$K_{app} = 2.303 \lambda \mu c (L/A) V_1 V_2 / (V_1 + V_2)$$

ここで、 $\mu$ 、 $c$ は水の粘性係数、圧縮率、 $V_1$ および $V_2$ はタンクの容積、 $A$ 、 $L$ は供試体の断面積、長さである ( $c = 0.42 \times 10^{-10}$  cm<sup>2</sup>/dyne、 $\mu = 1.43 \times 10^{-2}$  dyne·sec/cm<sup>2</sup>、 $V_1 = V_2 = 1000$  cm<sup>3</sup>)。

2章で述べたように、供試体の材料・寸法が同じ場合、 $K_{app}$ の値が小さいほどプラグの遮水性があると判断される。

## 5. 3 測定結果

トランジェントパルス法においては、供試体内部に実現される間隙圧はプラグを挟む高圧側と低圧側で等しい。実際には（特に、耐圧プラグの場合には）、プラグの低圧側は大気圧状態になっているのが普通であり、プ

プラグを挟む両側の圧力差は相当に大きいのが普通である。したがって、トランジェントパルス法と実際の場とでは、実現される浸透流の挙動はかなり異なるであろう。ただし、本研究では、トランジェントパルス法による測定から、見かけの透水係数を評価している。この値は、2章で述べたように、相対的なプラグの遮水性能の指標として意味をもっている。

そこで、表5.1に示す各供試体の見かけの透水係数 $K_{app}$ を比較すると、無収縮モルタルを用いたプラグの遮水性能は、他に比べて際だって高いことがわかる。無収縮モルタル自体の透水性は極めて小さいので（4.2節参照）、無収縮モルタルを用いたプラグの浸透流は、砂岩供試体の孔壁から孔壁への流れによってもたらされると考えられる。これは2章で述べた予想と符合する。

また、いずれの供試体においても、封圧が大きくなるにつれて、見かけの透水係数 $K_{app}$ は小さくなっている（ただし、砂岩の長いプラグは除く。この場合には封圧 $250\text{ kgf/cm}^2$ の値は $200\text{ kgf/cm}^2$ の値よりも少し大きい。これは、試験を急いだために、十分な含水飽和状態が実現していなかったためと考えられる）。これも従来得られている知見と一致する（3章参照）。つまり、測定結果から、同一条件であれば、打設深度が大きい方が遮水性能は向上するものと推定される。

表 5. 1 プラグを持つ砂岩の厚肉円筒供試体の見かけの透水係数  $K_{app}$  に及ぼす封圧の効果

$\times 10^{-6}$  darcy

封圧 プラグの種類	見かけの透水係数 $K_{app}$		
	150	200	250
	kgf/cm <sup>2</sup>		
砂岩の長いプラグ a	1.89	0.52	0.73
砂岩の短いプラグ b	10.7	8.0	7.42
無収縮モルタル	0.67		
通常のもルタル	11.7	10.9	9.81

- a 円孔内が砂岩で詰まっている。つまり、円柱形供試体
- b 円孔を中央部 50 mm 残して上下から作孔



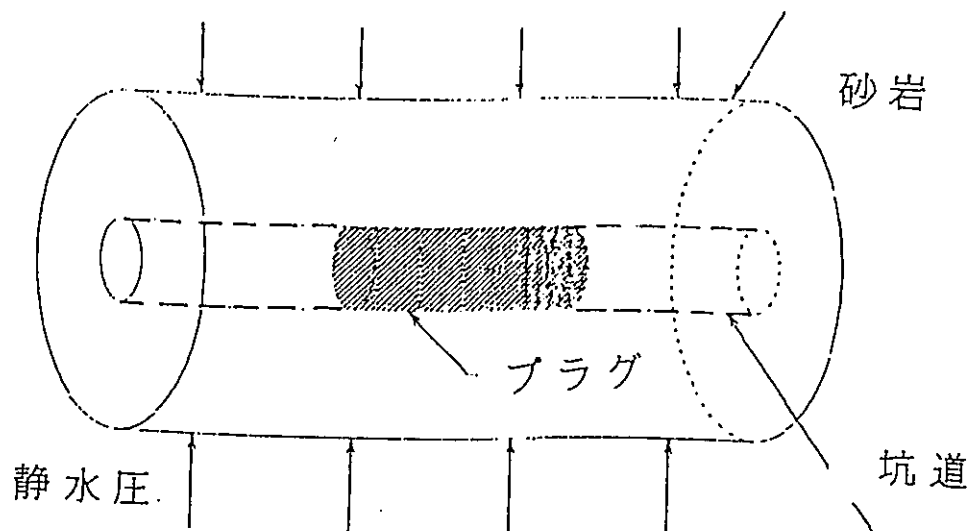


図 5. 1 プラグを有する厚肉円筒供試体

## 第6章 膨張プラグの強度特性

### 6. 1 はじめに

圧力を受けるプラグの耐圧性能は、プラグ自体の強度よりは、プラグと岩盤の間の接合部の強度に支配される。通常、プラグはコンクリート製であるが、この場合、乾燥収縮により、接合部の強度（接着力など）がかなり低下する。

もし、プラグが膨張性を示す材料から作られている場合には、つまり、膨張プラグを用いる場合には、接合部に圧縮応力を与え、それによって接合部の強度を高めることができるであろう。

膨張プラグは形状が円柱でも十分に接合部の強度がでるので、従来のように、岩盤を掘削してソロバン玉の形をしたプラグを打設する必要がない。したがって、施工性や経費の点でも優れていると考えられる。

ここでは膨張プラグの耐圧性能を調べるために、縮尺1/100の3次元模型試験を行った。

### 6. 2 膨張プラグの模型試験

#### 6. 2. 1 供試模型

岩盤の模型として、一辺が250mmのモルタルブロックを用い、この中に作孔した40mm径の孔を坑道にみたて、孔の中心に40mmの長さを持つモルタル製のプラグを打設した（図6. 1参照）。モルタルブロックの配合比は、重量比で、砂利：セメント：水＝4:2:1で、50日間水中養生した。プラグとしては、膨張モルタル、無収縮モルタル、通常のモルタルの3種類を試験した。各モルタルの配合比は表6. 1に示す通りである。

プラグを打設後、約1週間水中養生した。ただし、膨張モルタルを使用した場合には、養生中に膨張圧により、供試体が破壊する恐れがあるので、

供試体にはあらかじめ水平面内の2方向から10MPaの大きさの等方圧をかけた状態にして置き、プラグは散水養生した。

### 6. 2. 2 試験方法

供試体は円筒形の反力枠に組み込み、供試体の側面をフラットジャッキで2軸載荷し、水平面内は10MPaの等方圧状態にした。坑道内に圧力を負荷するときの反力を得るために、供試体の上下方向には250x250x30mm角の鋼製のプラテンを介しアムスラで、10MPaの軸圧を与えた。この状態で、模型内のプラグの一端の坑道内に油を送り込み、破壊が起きるまで次第に油圧を増大させた。他端の坑道は大気圧状態とした。なお、坑道は素掘りのままとし、人工的な被覆は施さなかった。

試験後、供試体を取り出し、径100mmのコアビットを用いてプラグとその周囲の岩盤を含むコアを抜きだし、さらに、縦方向と横方向にコアを切断し、プラグとその周囲の岩盤の様子を細かく観察した。

### 6. 2. 3 試験結果

プラグの一端の坑道に油を圧送したときの、圧力-時間線図の例を図6.2に示す。圧力は最大圧をとった後、ブレークダウンしている。最大圧は次のようであった。

膨張モルタルのプラグ	19.2 MPa
無収縮モルタルのプラグ	16.5
通常モルタルのプラグ	17.0

無収縮モルタルプラグと通常モルタルプラグとでは、破壊圧に差異はない。これに対し、膨張モルタルプラグの破壊圧は、前2者より1割程度大きい。

試験後に行った供試体の観察では、いずれの場合も、プラグのずれ（つまり、剛体的な移動）は認められなかった。そして、き裂の発生が認められたが、その破面の形態は図6.3に示すように両者で若干異なっていた。無収縮モルタルと通常モルタルを使用したプラグの場合、加圧側坑道では縦割れが生じており、また、加圧側のプラグ端部からき裂が非加圧坑道

の岩盤の奥部へ向かって斜めに発達していた。どちらのき裂が最初に発生したのかは不明であるが、両方のき裂とも応力解析の結果から説明することができる。

膨張モルタルプラグの場合、縦割れは加圧側坑道だけに留まらず非加圧坑道にも達していた。縦割れは当然のことながらプラグも貫通していた。この場合、縦割れは加圧坑道側から発生し、それが非加圧側へ発達したものと推測される。

膨張圧の発生によりプラグとその周囲の岩盤がどのような挙動を示すかを有限要素法により解析した結果はすでに報告した(第3章)。通常のプラグの場合には、プラグの加圧側の端部において引張応力がみられるのに対し、膨張プラグの場合には、プラグに接する岩盤は端部を含めて全て圧縮応力状態になっていた。加圧坑道では、円周方向の応力成分が引張になっており、圧力が十分大きくなると縦割が発生すると予想される。

これらの結果は、模型試験で得られた破壊の様式をよく説明できるといえる。

表 6. 1 各種モルタルの配合比 (重量比)

	珪砂 (g)	セメント (g)	膨張性 混和材	水 (g)
通常の モルタル	300	200	- (0%)	100
無縮補 モルタル	390	240	20 (7.5%)	130
膨張 モルタル	300	170	30 (15%)	100

注) ( )は、膨張性混和材の、セメントに対する割合 (重量比)

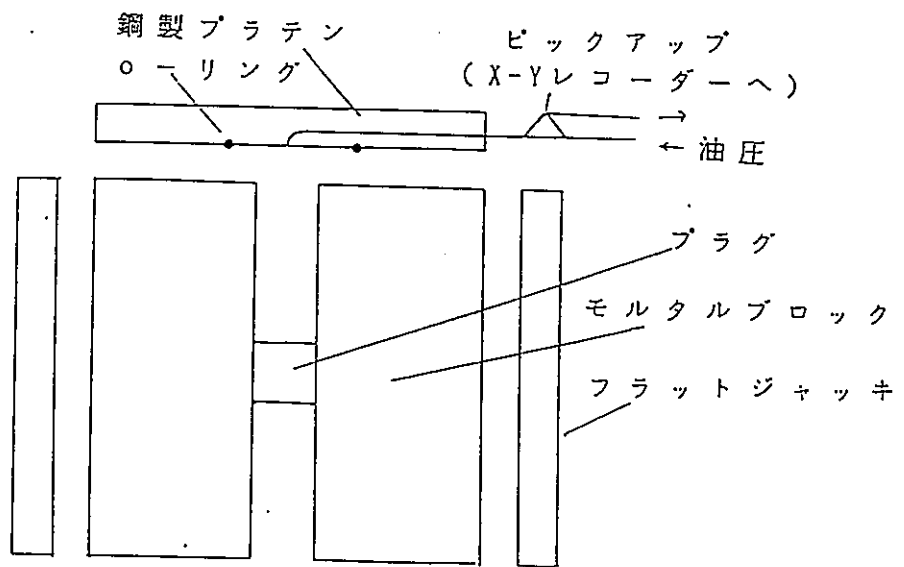


図 6. 1 プラグを持つ坑道の模型と上下端のシーリング方法

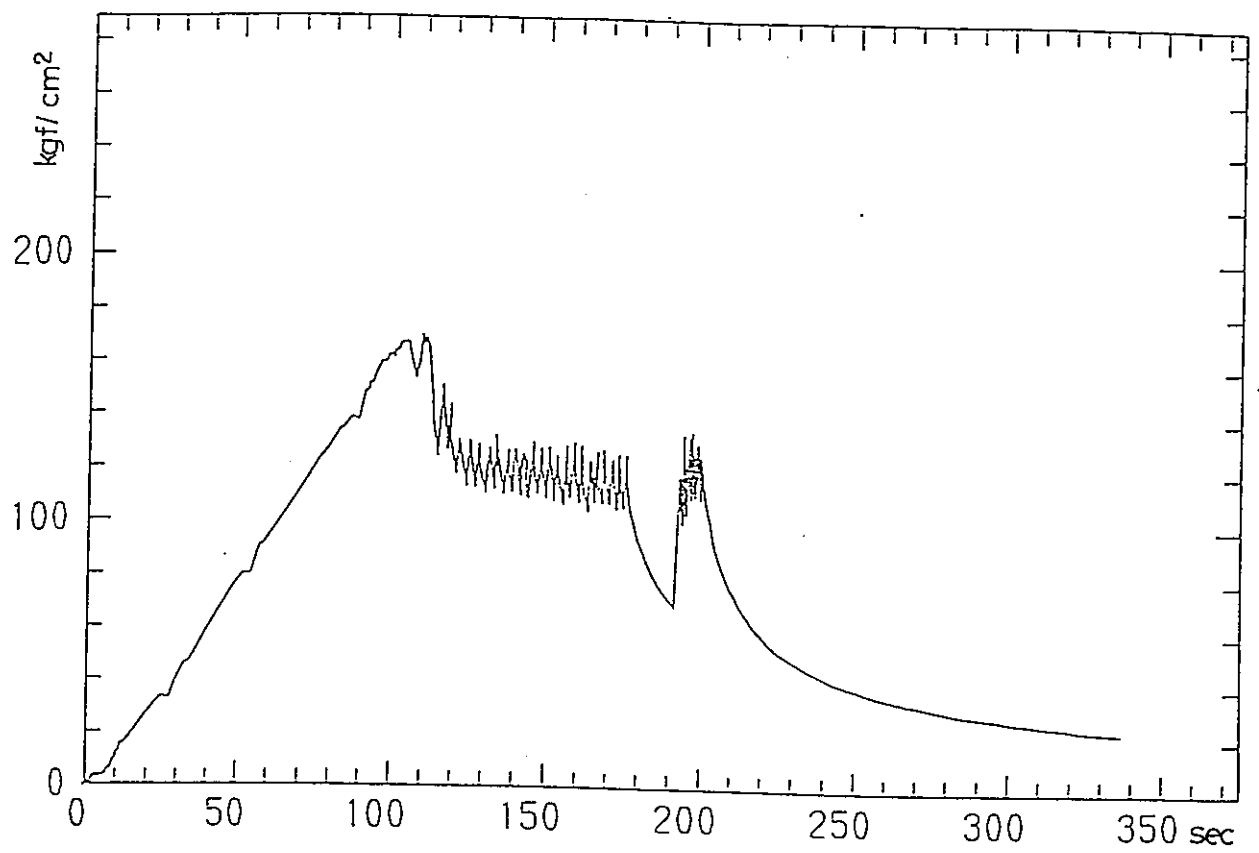


図 6. 2 圧力-時間線図。膨張モルタルのプラグの場合

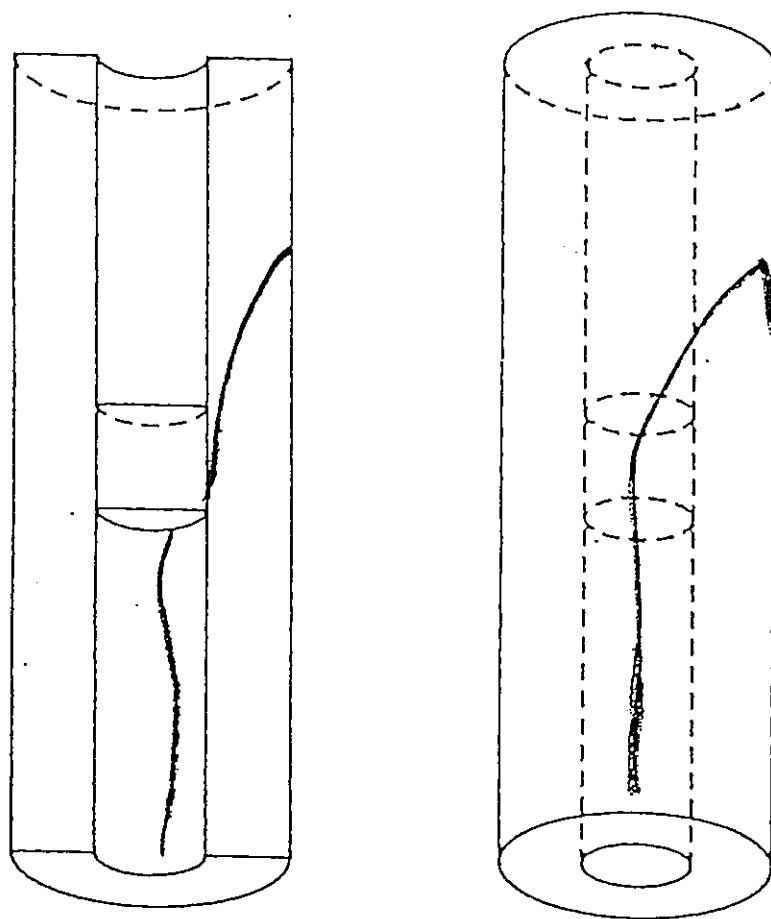


図 6. 3 ( a ) 破壊の様子。通常のモルタルを用いたプラグの場合



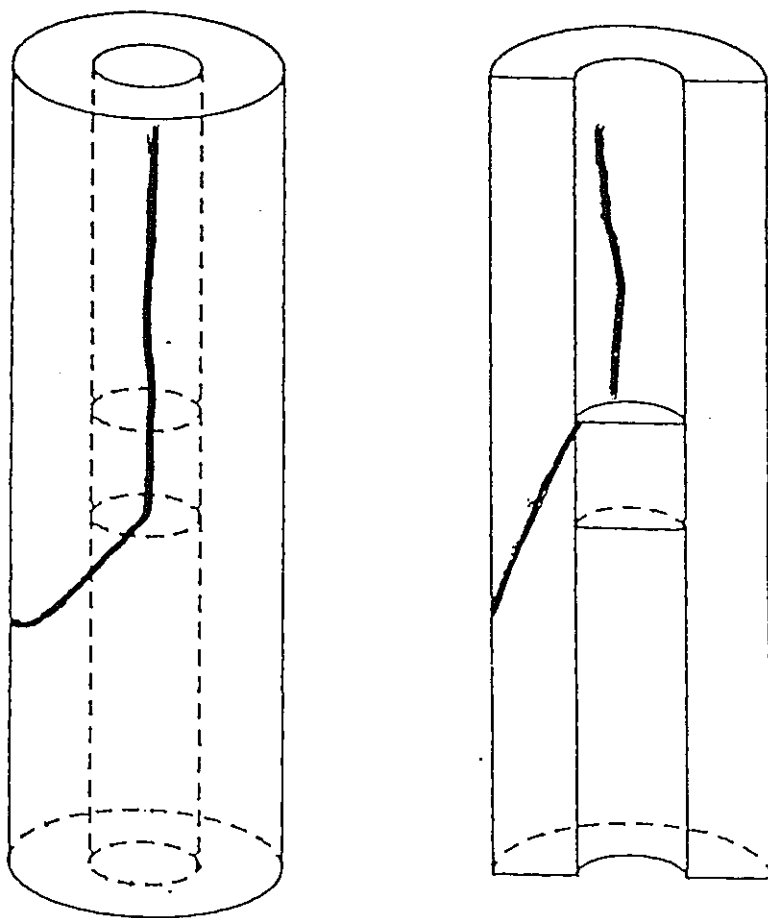


図 6. 3 (b) 破壊の様子。無収縮モルタルを用いたプラグの場合

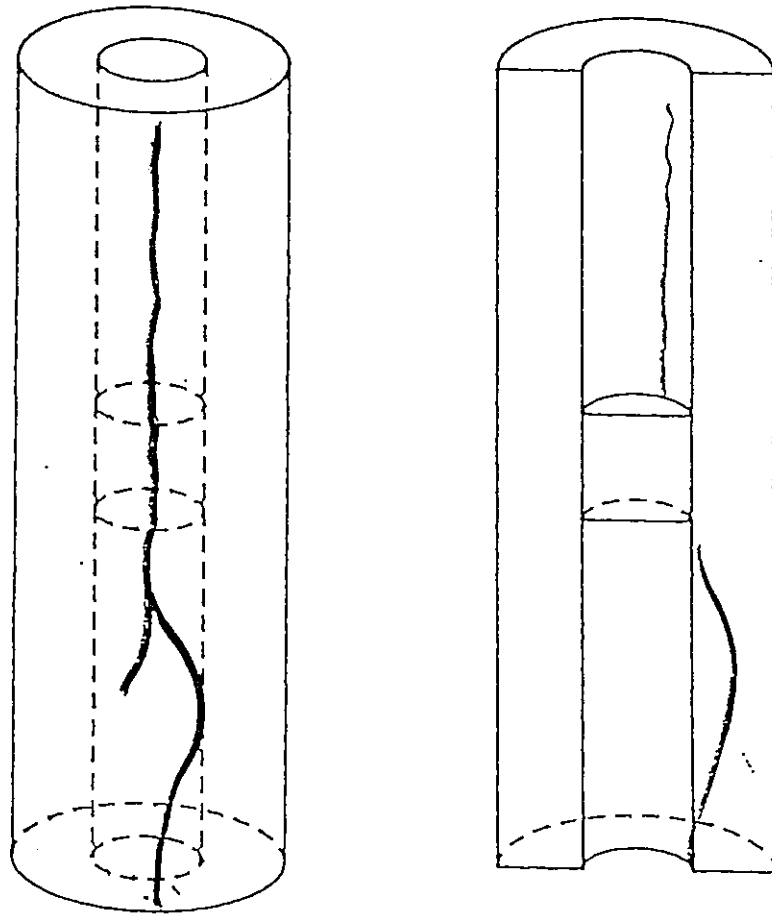


図 6. 3 (c) 破壊の様子。膨張モルタルを用いたプラグの場合

## 第7章 結言

膨張圧を発生し岩盤と自身に圧縮応力を付加する機能を持つ膨張プラグは、耐圧性と遮水性の両方が通常のタイプよりも向上することを、理論と実験の両方から明らかにした。得られた主な知見を列挙すると次のようになる。

- 1) 浸透流解析から、従来のソロバン玉状のプラグは、円柱形プラグに比べて耐圧性能はあるが、遮水性能には差異がないことが明らかになった。また、プラグ長を増加させると、遮水性能は向上することもわかった。
- 3) 浸透流解析に基づく計算で、膨張プラグはプラグの非加圧側への浸透流の総量を減少させる効果を持っていることが認められた。
- 4) 肉厚の異なる鋼製の円筒を用いた試験から、膨張セメントを混入したモルタルの膨張特性は、右下がりの膨張圧－膨張量線図として特徴付けられることがわかった。ただし、膨張圧の絶対値はモルタルの体積によって変わることが示唆された。膨張特性に関してより一般的な法則を導くことが今後に残された課題である。また、膨張圧が発現する期間（または膨張圧の持続性）の確認と持続期間に影響する因子の究明も今後の研究課題として残されている。
- 5) トランジェントパルス法による透水試験の結果、無収縮モルタルは通常のモルタルよりも難透水性を示すことがわかった。一般に、材料の透水係数は負荷される圧力が増すと減少するが、この効果もあるであろう。

膨張モルタルの透水係数に関して、信頼の置ける測定方法の開発は今後の重要な研究課題である。

- 6) 無収縮モルタルプラグは通常のモルタルプラグよりも浸透流の総量を低減する上で効果があることを、プラグ模型に対してトランジェントパルス法を適用した測定で確認した。
- 7) 3次元模型試験の結果、膨張モルタルプラグは通常のモルタルプラグよりも大きな圧力に耐えることが確認された。また、通常のモルタル

プラグでは、プラグ端から斜めに発達するき裂の発生が観察されたが、膨張プラグでは認められなかった。

最後に、本年度実施した膨張プラグに関する研究は先駆的なものであり、今後、膨張プラグの実用化に向けてなすべき研究課題が多数残されていることを付言しておきたい。

## 第8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、(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