

(46) 膨張性プラグの遮水性能に関する基礎実験

北海道大学工学部	石島 洋二
北海道大学工学部	大西 康智
清水建設 (株)	福田 和寛
工業技術院地質調査所	高橋 学

A Fundamental Test on the Sealing of the Expansive Plug

Yoji ISHIJIMA, Faculty of Engineering, Hokkaido University
Yasutomo ONISHI, Faculty of Engineering, Hokkaido University
Kazuhiro FUKUDA, Shimizu Corporation
Manabu TAKAHASHI, Geological Survey of Japan

It is possibly expected that expansive cement of plugs should improve its sealing quality extensively. Effects of plug conditions on the sealing were tested by means of thick-wall cylindrical specimens modelled as tunnels with plugs. Conductivity tests with 4 types of plugs under confining pressure were performed.

As the result, mixtures of plugs with expansive admixtures was confirmed to improve the sealing quality of plugs to a great extent. Conductivity values of plugs mixed with the expansive admixtures were 1 order less than those of ones without the admixture. And the values with the expansive admixtures were nearly equal to those of cylindrical specimens.

1 はじめに

遮水プラグ工において、プラグ材に膨張性のセメントを用いれば、プラグの遮水性能を大幅に向上させることが期待できる。そこで、円筒の中央にプラグを持つ厚肉円筒供試体をプラグを有するトンネルの模型とみなし、プラグの特性が遮水性能に及ぼす効果を実験的に調べた。

2 模型供試体

模型の形状を図1に示す。

模型岩盤としては、北海道美瑛市の露天掘り炭鉱で採取した古第三紀の美瑛層に属する砂岩を用いた。当該箇所地層は累層構造をしており傾斜約 13° 、傾斜方位NW-SEである。表1に示す寸法を持つ円柱形または円筒形供試体で以下に示す4種類を作成した。

- 円柱形供試体
- 岩石プラグを有する厚肉円筒供試体
- モルタルプラグを有する厚肉円筒供試体
- c)と同じ。なお、セメントには膨張性混

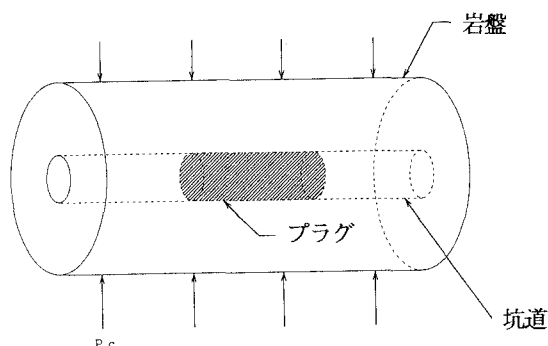


図1 模型試験の概略図

和剤を配合した

(b) の供試体は円柱形供試体の上下から作孔し、中央部を残すことにより製作した。供試体は両端面の平衡度が $\pm 1/100\text{mm}$ 以下となるようにした。円筒はダイヤモンド・ビットを用いて円柱形供試体の中央に作孔し設けた。

モルタルの作成には十分に乾燥した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。水、セメント、砂を1:2:4とする標準的な配合比を用いた場合、珪砂の吸水量が予

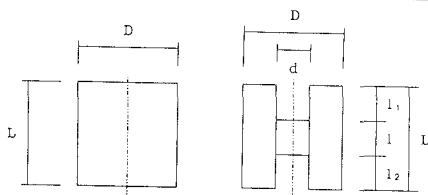
想以上に多く、厚肉円筒内に打設するのが困難なほどモルタルの流動性が小さいために上記のような配合比を採用した。また、膨張セメントの配合においては、セメント、膨張性混和剤を重量比で12:1としたものを通常のセメントとみなし、モルタルと同様に打設した。

厚肉円筒供試体内へのモルタルの打設は次のようにした。軸が鉛直になるように置いた供試体の円筒内に径が内径よりわずかに小さい鉄の棒を入れ、そこに十分に混合攪拌したモルタルを少量ずつ投入した。投入毎に供試体の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、モルタルが所定のところで隙間が無く密に詰まるようにした。この方法により、気泡がなく、孔壁との接触が完全なプラグが作られるものと考えられる。モルタル打設後、24時間は散水養生、その後5日間は水中養生を行った。7日目に供試体を水槽から取り出し、厚肉円筒内を散水養生しつつ、外壁を自然乾燥させた。

透水試験に先立ち、供試体に被覆を施した。まず、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た。その後、供試体の側面にシリコンゴムを数回に分け塗布した(図2参照)。また、通常の透水試験は供試体とエンドピースの間に、間隙水の分散を促すスペーサを挟むが、模型試験においては供試体の寸法が大きいために設置が困難であり、エンドピースをスペーサ兼用として用いた。

表1 供試体の寸法(任意の3ヵ所で測った算術平均をとった)

	L	D	d	l_1	l_2	l
a) 円柱供試体	120.82	59.78	-	-	-	-
b) 岩石「ラカ」を有する厚肉円筒供試体	121.13	59.78	19.80	34.38	34.10	52.65
c) モルタル「ラカ」を有する厚肉円筒供試体	120.27	59.78	19.82	33.42	38.77	48.08
d) 膨張セメントの「ラカ」を有する厚肉円筒供試体	119.88	59.72	19.85	31.60	33.32	54.96



円柱形供試体の寸法
(各記号は表1の記号に対応する)

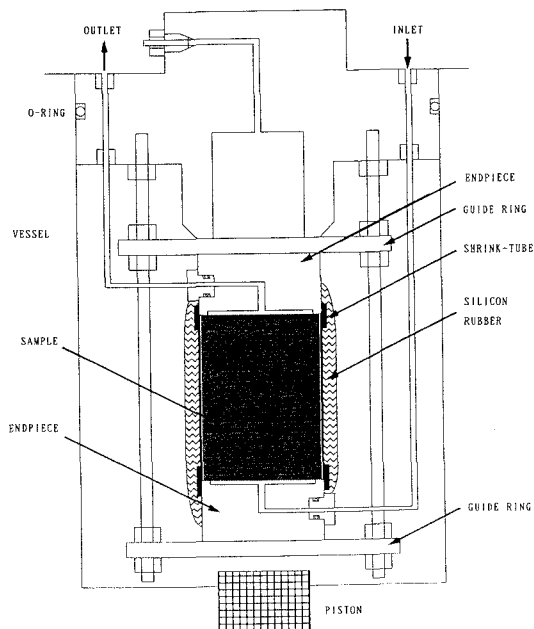


図2 模型試験における供試体の被覆

3 実験方法

透水試験は Transient Pulse法により次の要

領で行った。試験に際しては、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。

- (1) ベッセル内に供試体を設置した後、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った。その後、供試体に約80kgf/cm²の封圧を設定した後、50kgf/cm²の水圧を作用させた。これにより供試体には間隙水圧が発生するが、一様な間隙水圧の状態が実現するまで約8時間静置した。
- (2) 間隙水圧が完全に安定した後、封圧を150kgf/cm²に設定し直した。このとき、封圧の増加により供試体内の間隙が減少するので間隙水圧は一時的に約10kgf/cm²程度上昇するが、再び設定値に戻るまで24時間以上かけて調整した。
- (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力回路を遮断した。そして、再び差圧が安定するまで約6時間程静置した。上述した作業手順を経た後、供試体の下端面に1kgf/cm²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毎に計測した。
- (4) 封圧150kgf/cm²で測定した後、封圧を200kgf/cm²と250kgf/cm²に設定し直し、それぞれについて測定を行った。

4 プラグ材料の透水特性

4.1 供試体の準備

模型試験で用いた砂岩、モルタル、膨張セメントの透水特性を調べるために、直径30mm、長さ60mmの寸法を持つ円柱形供試体を用いて透水試験を実施した。供試体の整形にあたっては端面精度が±1/100mm以下となるようにした。

モルタル供試体の作成は次のようにした。内径80mm、深さ160mmの鋼鉄製の円筒形整形枠の中に、十分に合攪拌したモルタルを少量づつ投入した。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打ちつけた。この方法により、気泡が除去され空隙率が小さいモルタルが得られるものと考えられる。モルタル打設後、24時間は散水養生し、その後枠から取り出し水中養生を5日間行った。7日目にモルタルを水槽から取り出し、ダイヤモンド・ビットを用いてモルタルの中央部よりコアを採取した。採取したコアはダイヤモンド・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た。

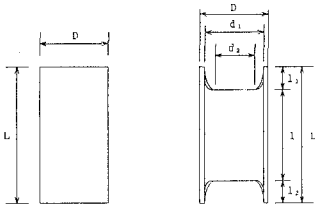
膨張セメント供試体の作成においては、膨張圧の発生が透水性に及ぼす影響を調べるため、次のようにした。外径30mm、内径28mm、長さ60mmの鉄製の薄肉円筒内に膨張

セメントを打設した。打設方法および養生期間においてはモルタル供試体と同様に行った。打設位置に関しては、薄肉円筒の長さより両端が約5mm短くなるようにした。また、円筒内壁面と膨張セメントの隙間を間隙流体が流れるのを防ぐために、両端面の周囲にシリコンゴムを薄く塗布した。

(表2参照)

表2 供試体の寸法(任意の3ヵ所で測った算術平均をとった)

	L	D	d ₁	d ₂	l ₁	l ₂	l
a) 美瑛砂岩：円柱供試体	60.22	29.82	-	-	-	-	-
b) モルタル：円柱供試体	60.20	29.84	-	-	-	-	-
c) 膨張セメントを打設した薄肉円筒供試体	60.05	30.02	28.02	23.24	4.32	4.46	51.27



円柱形供試体の寸法(各記号は表2の記号に対応する)

4.2 実験方法

透水試験は Transient Pulse法により模型試験に準じて行った。なお、ベッセル内への供試体の設置については模型試験と異なるため図3に概略図を示す。

5 プラグの遮水性能（見かけの透水係数 K ）の評価

供試体を円柱形と見なし下記に示す通常の方法によって透水係数 K を評価した。 K は、測定によって得られた差圧の常用対数を縦軸に、時間を横軸にプロットして得られる差圧—時間線図を直線で近似し、その傾きから次式によって算出する。

$$K = 1.152 \lambda \mu c \frac{L}{A}$$

ここで λ は直線近似した線図の傾き、 μ 、 c は流体の粘性係数、圧縮率、 A 、 L は供試体の断面積、長さである。定数 μ 、 c は $\mu = 1.43 \times 10^{-2} \text{ dyne} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2$ 、 $c = 0.42 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{dyne}$ を用いた。

供試体にプラグがある場合、この値が小さいほどプラグの遮水性能があると判断され、 K を見かけの透水係数と呼ぶことにする。

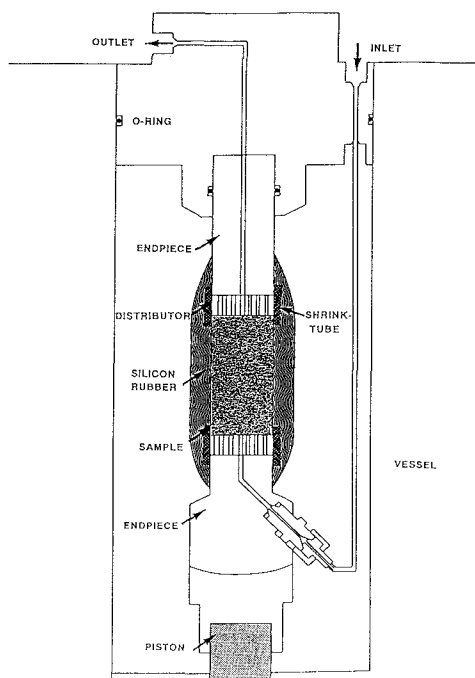


図3 プラグ材料試験における供試体の被覆

6 実験結果

6.1 模型試験

本実験で用いた供試体は直径が60mm、長さが120mmあり、寸法が大きいために、供試体を含水飽和させるのに多大の時間を要した。また、封圧 $150 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ の実験の後に、封圧を $200 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ に設定し直したが、この設定条件の変更の際、供試体内部の間隙水圧が一樣になるまでに48時間以上の調整時間を要した。図4には縦軸に差圧の対数、横軸に時間をとって代表的な実験結果の一例を示した。また、図中の数式は差圧—時間線図の直線近似式である。

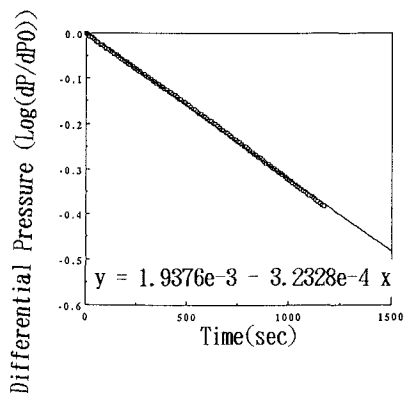


図4 模型試験結果の一例

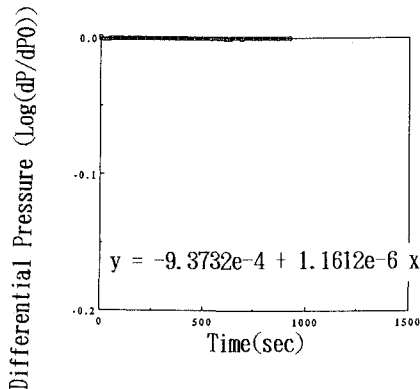


図5 プラグ材料試験結果の一例

6.2 プラグ材料の透水特性

図5には縦軸に差圧の対数、横軸に時間をとってプラグ材料の実験結果例を示した。また、図中の数式は差圧－時間線図の直線近似式である。各々の封圧において、岩石供試体では立ち上がりのをのぞく線図が直線となった。しかし、モルタルおよび膨張セメントの場合は、試験期間中、有意な差圧が発生せず、透水係数は0と評価される。

この結果より得られた各々の供試体の見かけの透水係数Kを表3に示す。

表3 見かけの透水係数に及ぼす封圧の効果

($\times 10^{-6}$ darcy)

封圧	150 kgf/cm ²	200 kgf/cm ²	250 kgf/cm ²
円柱形供試体 φ 60mm × 120mm	1.87	0.51	0.78
円柱形供試体 φ 30mm × 60mm	5.77×10^{-2}	1.28×10^{-2}	0.99×10^{-2}
岩石プラグを有する 厚肉円筒形供試体	10.4 (41.3)	7.90 (31.2)	7.30 (28.7)
モルタルプラグを有する 厚肉円筒形供試体	11.8 (41.8)	10.6 (38.6)	9.58 (34.8)
膨張性混和材を配合した モルタルプラグを有する 厚肉円筒形供試体	2.03 (8.43)	0.53 (2.20)	0.21 (0.90)

各値のうち、()の無いものは供試体の寸法としてL・Dを、()の付いたものはL・dを用いて透水係数を評価した。

7 考察とまとめ

プラグの模型試験の透水試験結果とプラグ材料の透水試験結果の比較から、以下の諸点が導かれる。

- (1) 各供試体とも封圧の増加にともない、見かけの透水係数が減少している。
- (2) 見かけの透水係数Kに関して、モルタルプラグを有する供試体は岩石プラグを有する供試体とほぼ同じ大きさを示した。一方、モルタルの透水係数は実質的に0であることがわかった。これより、モルタルを用いた模型試験で認められた透水性は、間隙流体が砂岩内または砂岩とプラグとの隙間を流れたことによって引き起こされたものと考えられる。
- (3) 膨張セメントを用いた供試体においては、模型試験の場合、見かけの透水係数Kがモルタルプラグに比べかなり小さなものとなった。一方、膨張セメントの膨張圧の発生がプラグの遮水性能にかなりの効果が期待されるものと考えられる。
- (4) 美唄砂岩は供試体の寸法が小さくなると透水性も小さくなり、寸法効果の存在が示唆された。

8 問題点と今後の方針

プラグ材料試験において、モルタルおよび膨張セメントの透水係数が0と評価された。

この点について、パルス圧の大きさが透水性の評価に影響を及ぼすものと考えられることから、今後の課題としたい。

また、浸透流解析を実施し、プラグの遮水効果を直接的に評価することも考えている。