

軟質ゴムシール材の閉塞効果による 止水のメカニズム

MECHANISMS OF IMPERMEABILITY WITH WATER-EXPANSION RUBBER MATERIAL
BY BLOCKING EFFECT

加賀 宗彦¹⁾・松浦 純子²⁾

Monehiko KAGA and Junko MASTUURA

A new water-expansion rubber material of injected type has been developed which can use the impermeability of segment joints. It is practiced in Japan. However, the mechanisms of the impermeability have not been clarified. It is necessary to clarify these mechanisms. As the first step a laboratory impermeability test was conducted by using special permeability test apparatus we have developed. As a result, we have found a mechanism of impermeability by blocking effect. Furthermore the critical impermeability pressure could be expressed by a semi-theoretical equation.

Key Words: Shield tunnel, Cut-off

1. はじめに

本論文はゲル化した軟質ゴムシール材による止水のメカニズムを検討をした。

地下水面下に建設されるトンネルや構造物の止水技術は地下工事の成功に大きく関与する。しかし、この重要性は認識されているけれども、止水に関するメカニズムなどの把握はまだ十分行われていない。^{1) 2)} 一般的な止水方法は、定形シール材を継手面にはさみ、水圧より高い圧力で強制的に締付け止水を保持する。しかし、最近不定形シール材を用いた止水工法が開発され、その止水のメカニズムは異なるようである。この工法は複雑な形状を持った継手面や土圧によって継手面が変形した場合でも止水能力を発揮できるように開発された^{3)・4)}。このシール材は溶液型で継手面に設けられた溝に注入される。その後、ゲル化しゲルの状態は軟質ゴム弾性を示す。このシール材の特徴はゲル化したやわらかいゴム弾性シール材なので、従来のように強制的に水圧より高い圧力でシール材を締付ける事なく止水能力を発揮する。

条件にもよるが、 100kgf/cm^2 (9.8MPa)以上の止水能力がある。したがって、従来の力学的に締付ける工法とは、止水のメカニズムが根本的に異なる。

この止水のメカニズムは、注入圧による接面応力、継手面シール材の付着力、膨張圧や自封作用による接面応力の増加などによるものと考えられている。しかしそのメカニズムは非常に複雑でまだ明確ではない。本研究室ではこれらの一端を解明するためゲル化した軟質ゴムシール材を用いて止水のメカニズムを検討してきた。その結果、これまでは考えられていなかった、閉塞効果による止水のメカニズムを見いだした。今回はこの閉塞効果のみに着目して、理論的な検討と、それに基づく実験解析を行った。結果として、シール材と目開きの断面積比に対して限界止水圧は比例することがわかった。この結果、閉塞による止水の安全率の算定などに利用できる可能性を示唆した。

1) 正会員 工学博士 東洋大学工学部 工学部 環境建設学科

2) 学生会員 大学院 同 上

2. 使用材料および実験方法

(1) 使用材料と物性

シール材料は2液混合タイプの注入型シール材で主成分は水膨張性ゴムである。ゲル化後はやわらかいゴム弾性状態となり、また水を吸収して膨張する。ゲルタイムや強度などは任意に変えられる。本実験で用いたシール材の基本的物性を表1に示す。見かけの密度および含水比は止水実験後、実験装置から取り出し、土の試験法 JSF T 111および JSF T 121に準じて求めた平均値である。それぞれの標準偏差は0.03, 6.6であった。また、引張り強度および引張りヤング率は、硫化ゴム引張り試験法 JIS K-6301に準じて行った。この試験に用いた供試体は、定形の容器に溶液のシール材を入れゲル化する前に密閉し、この状態で約2時間養生して作成した。膨張圧による容器の体積変化を正確に測定しなかったが、視覚による観察では変化が見られなかった。

(2) 実験方法

止水のメカニズムを把握するため、

Fig. 1(a) (b)に示すような目開きを設置できるように2枚の円形フランジからなる特殊な実験装置を作成して止水実験を行った。この装置のシール材を入れる溝の形状は、図(b)に示すような5種類とし、溝の形状のみを変えた図(a)に示す実験装置5台を作製した。溝の形状は縦横の長さを変えたもの、設置方法を垂直や水平に変えたものおよび円形のものとした。呼び名は図(b)に示す通りである。この溝に溶液状態のシール材を注入し、ゲル化後フランジ中央の注入孔から水压を段階的に加えて限界止水圧を求めた。この止水実験は、シール材の形状の影響を求めると同時に、上下フランジの隙間の大きさ（目開き）も変えて、目開きの影響も検討した。なお、今回は実験条件が複雑にならないように、溝の壁にグリスを薄く塗布し、シール材の付着力が作用しないように配慮した。本実験の水压は、手押しの水压ポンプで加えた。最大水压は 200kg/cm^2 (19.6Mpa)である。

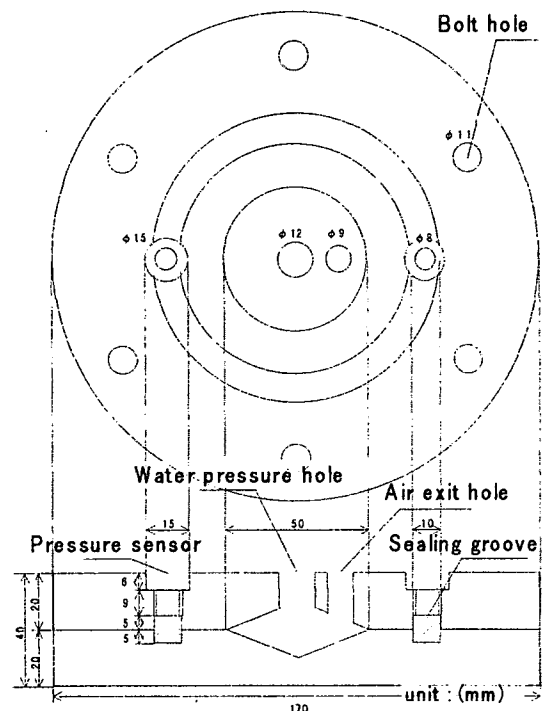
3. 定形シール材による自封作用

本実験で用いた軟質ゴム弾性シール材と従来の定形シール材の止水性の違いを明確にするため、最初に定

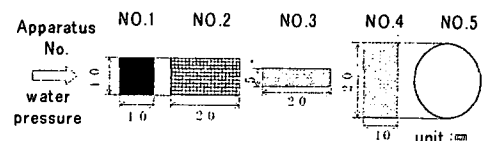
Table 1 Physical properties of gel of water-expansion rubber

Apparent density	1.037 g/cm^3
Water content	181%
Tensile strength	1.0 kgf/cm^2
Yaung's modulus	2 kg/cm^2
Gel time	30 min

$$1\text{ kgf/cm}^2 = 98\text{ kPa}$$



(a) Experimental apparatus for impermeability



(b) Cross section of sealing grooves

Fig. 1 Experimental apparatus for impermeability and cross section of sealing grooves

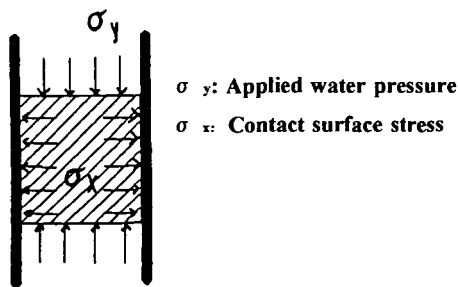


Fig. 2 Relationship between applied water pressure and contact surface stress

形シール材による止水のメカニズムを簡単に説明する。定形シール材は Fig. 2 に示すように水圧 σ_y が作用した場合、接面応力 σ_x が

$$\sigma_x > \alpha \sigma_y$$

α : 係数

を満足することで止水条件が成立する。

また、小泉⁵⁾によれば初期接面応力と漏水時作用水圧（限界止水水圧）には fig. 3 に示す一定の関係が見られ、その関係は次のように示されている。

$$P_w = \beta \sigma_0$$

P_w : 漏水時作用水圧（限界止水水圧）

β : 定数 (1.3~2.7)

σ_0 : 初期接面応力

初期接面応力より漏水時の作用水圧（限界止水水圧）が大きいのは止水材料の自封効果と言われるもので水圧によってシール材の接面応力が増加するものである。

これを水圧と接面応力の関係で整理しのが fig. 4 である。この図には一例として初期接面応力を 5kg/cm^2 (490kPa) としたものを示してある。この状態で水圧が 5kg/cm^2 を越えると自封作用により接面応力も増加する。その増加の大きさは、シール材の種類によって異なり、1.3~2.7 の値 (β) で示されている。もし弾性体であればポアソン比は 0.19~0.375 となる。したがって水圧が大きくなれば接面応力も大きくなるが、太い実線で示した等水圧線に接した時、漏水が始まる。なお、便宜上この漏水が始まる圧力を“限界止水水圧”と以後呼ぶ。図 4 に示した $\Delta\sigma_x$ が自封効果と言われる応力になる。この限界止水水圧は接面応力が大きくなれば比例して限界止水水圧も大きくなる。しかし、

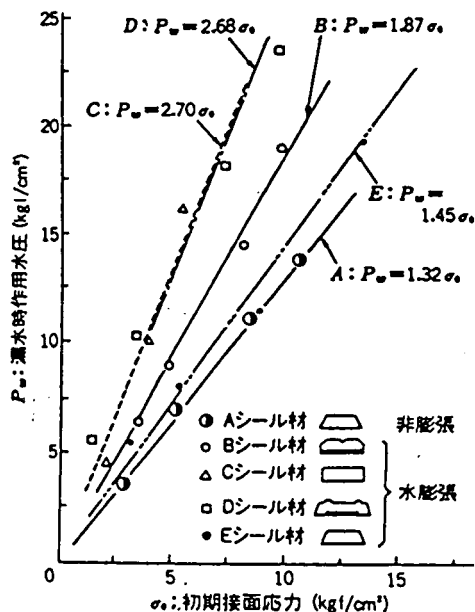


Fig. 3 Relationship between initial contact surface stress and critical impermeability pressure for various samples⁵⁾

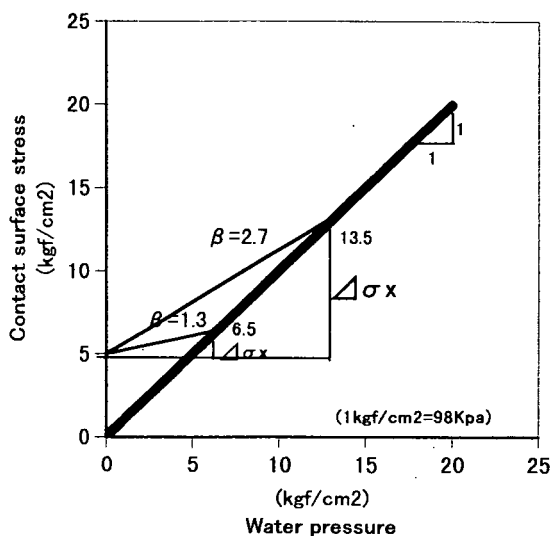


Fig. 4 Relationship between contact surface stress and critical impermeability pressure

軟質ゴムシール材は定形シール材に比べて非常にやわらかいので、締付けで接面応力を大きくすることはできない。したがって高い止水能力を発揮できないと考えられるが、後述するように条件によっては 100kgf/cm^2 (9.8MPa)以上の止水能力を発揮する。この結果、定形シール材と軟質ゴムシール材による止水のメカニズムは、異なるものと考えられる。この止水のメカニズムは、注入圧による接面応力、継手面と止水材の付着力、膨張圧や自封作用による接面応力の増加などによるものと考えられているが、明確ではない。本研究室では、実験によって限界止水圧と目開きやシール材の形状の関係を検討した結果、これまで定形シール材とは異なった閉塞効果によっても止水を保持できる事を見いだした。今回は、この閉塞効果のみに着目して理論的な検討を行った。この閉塞効果による止水は定形シール材の接面応力による止水のメカニズムとは全く異なる。次に、この閉塞効果による止水のメカニズムについて検討する。

4. 軟質ゴムシール材による止水のメカニズム

不定形シール材による止水工法はすでに実用化されている^{31)・41)}。しかしその止水のメカニズムは、上述したように非常に複雑でまだ明確にされていない。これらの止水のメカニズムを把握するため、最初のステップとして、浸透水の流れを直接観察できるように透明アクリル円筒モールドと着色水を使用して視覚による止水実験を行った。また、この実験では、不定形シール材の止水のメカニズムをできるだけ単純にするため、モールドにシール材を充填するための注入圧は最小限に抑さえ、その圧力はほぼゼロであった。これは初期接面応力ができるだけ生じないように考慮したためである。またアクリル円筒の内面にはグリースを薄く塗布し、シール材とアクリル円筒壁間に付着力が生じないようにした。さらに、この実験のみに限定して、水膨張生ゴム材の濃度を半分にし

て非常にやわらかい状態で行った。これは、実験を始めた初期段階での水圧ポンプ能力が 10kgf/cm^2 (98KPa)であったことや、透明アクリル円筒の破壊強度の条件で決められた。ただし、この段階での目的は、単に水の移動を把握するためなので、水膨張性ゴム材の濃度は実験に大きく影響しないものと考えて行った。結果を Fig. 5 に示す。この図に示されるように水圧の上昇につれてモールド壁面とシール材との間に着色水が浸透しその後さらに水圧を上げると底面部まで着色水が浸透した。

しかし 10kgf/cm^2 付近まで、止水は保持された。これより、止水のメカニズムは接面応力によるものでなく、排水孔の閉塞によって止水が保たれていることが明確になった。この結果から、軟質ゴムシール材は目開きを閉塞する機能を持ち、これによって止水性を発揮できることが推測できた。便宜上ここでは、この機能を”閉塞効果”と呼ぶ。

従来の定形シール材では、この閉塞効果による止水のメカニズムを見ることはできない。この止水のメカニズムは、軟質ゴムシール材独特のものと考えられる。前述した複雑な不定形シール材の止水のメカニズムを解決する第一歩として、閉塞効果のみによる止水のメカニズムに着目して、Fig. 6 に示すモデルで理論的に考察してみた。このモデルは水圧が作用したとき a-a 断面のシール材が、b-b 面にある目開きに押されて目開きが、閉塞され止水機能を発揮する。水圧が徐々に大きくなるとやがて止水材は目開きから押し出される。この時点でシール材の一部が破壊され止水機能は失われるものと推定した。

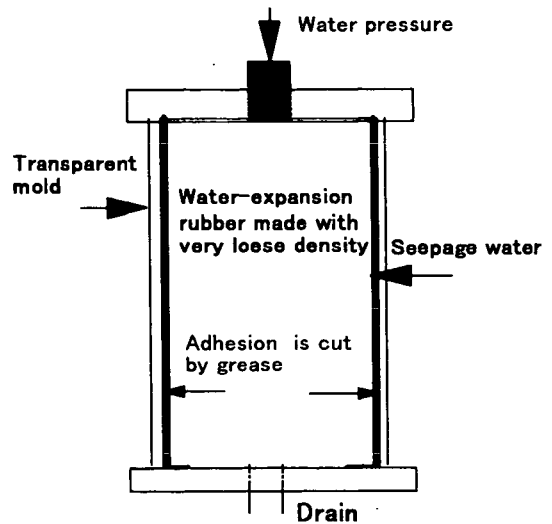


Fig. 5 Equipment for impermeability pre-test by using water-expansion rubber material made with very loose density

この押し出し理論⁵⁾によれば、降伏点を過ぎた材料の変形に要するエネルギー(W)は(Fig. 6 参照)

$$W=YV \times \log e - \frac{1}{L} \tag{1}$$

Y:降伏応力
V:押し出された材料の体積

また押し出しに必要な载荷エネルギー(W)は、

$$W = \sigma V \tag{2}$$

σ : 押し出し応力

で表され、式(1), (2)は等しくなる。

さらに、 $V=AoL$ $V=A1l$

Ao: a-a 断面の断面積

A1: b-b 断面の断面積

なので、結果として次の式が得られる。

$$\sigma = Y \times \log e - \frac{Ao}{A1} \tag{3}$$

この閉塞効果による止水のメカニズムは接面応力による止水機能とは全く異なる。この式によれば止水の限界は断面積比(AO/A1)に比例する。これを確かめるため、Fig. 1に示した特殊な円形フランジによる止水実験装置で限界止水圧を求めた。次に実験結果と式(3)の適用性について検討する。

5. 円形フランジ止水実験による限界止水圧

軟質ゴムシール材の止水性能とメカニズムを検討するため Fig. 1 に示す特殊な装置で止水実験を行った。シール材が設置される溝の形状は、5種類とし、形状が止水能力に与える影響も検討した。さらに、上下面のフランジ間に隙間(目開き)を設置し、目開きの影響も検討した。目開きの大きさは最小0.1mmで最大3mmの大きさである。この間の目開きの大きさは、測点が連続するようにシール溝の形状を考慮して決めた。なお、この実験で使用しているゲル化したシール材は軟質ゴム弾性なので、フランジを強制的に締め付けても接面応力を大きくすることはできない。したがって強制的に接面応力を大きくして止水能力を発揮する定形シール材とは止水のメカニズムが全く異なる。

実験結果を fig. 7(a) (b)に示す。図に示す縦軸

は限界止水圧である。横軸は、各シール溝(装置 No)ごとに目開きを変えた結果を棒グラフで示してある。この図に示したデータは、各シール溝の影響を考察できるよう共通の目開きのもののみ示してある。

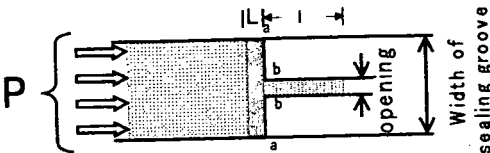


Fig. 6 Extrusion model

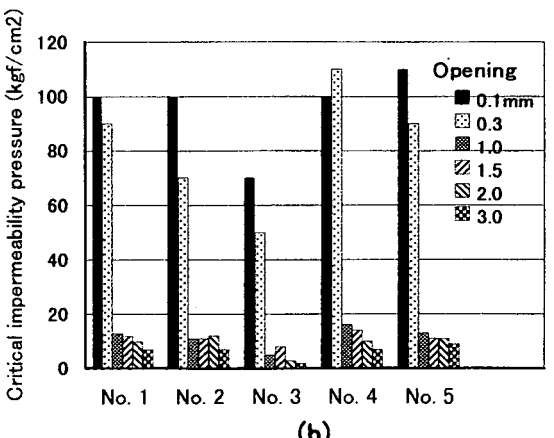
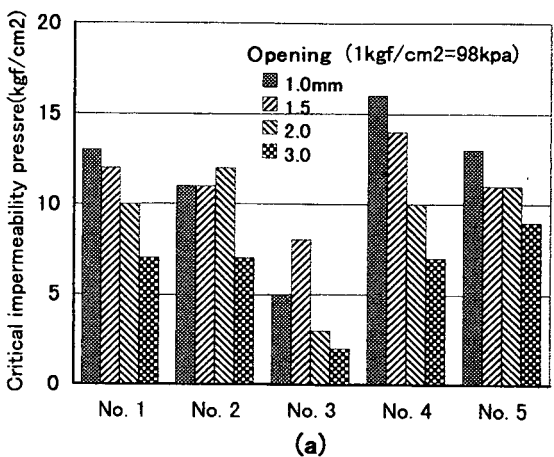


Fig. 7 Relationship between sealin grooves that differ in shape and critical impermeability pressur

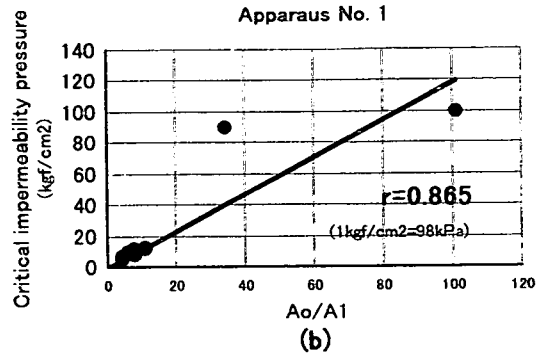
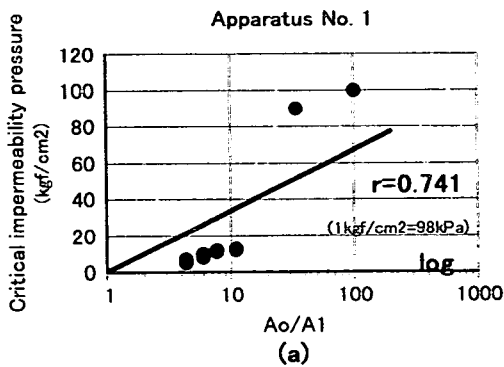


Fig. 8 Relationship between critical impermeability pressure and Ao/A1

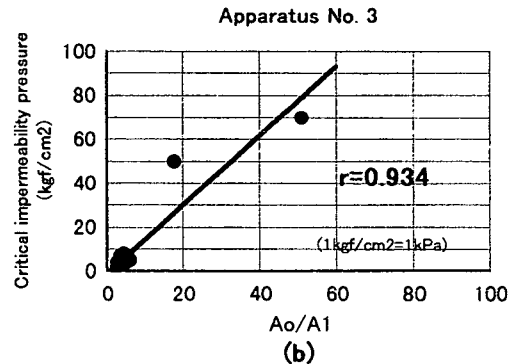
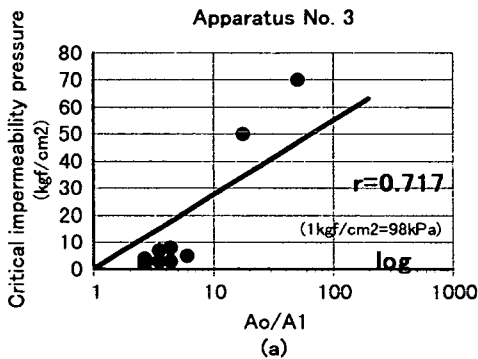


Fig. 9 Relationship between critical impermeability pressure and Ao/A1

なお、Fig. 7 (a)は目開き1mm～3mmの結果をスケールを大きく変えて示したものである。この図から、溝の形状が同じであれば目開きが小さいと限界止水圧は高くなる傾向を示す。最大で120kgf/cm² (11.8MPa)の値を得ている。逆に目開きが大きくなると止水能力は低下する傾向を示す。これより、目開きと限界止水圧は逆比例するものと判断ができる。しかしながら、同じ目開きで、止水能力を比較してみると、シール溝の形状で異なるものや、ほぼ同一のものなどがあり、一定でない。結果として、シール材の体積や目開きから、限界止水圧との関係を整理したが、統一的な関連性を求めることは困難であった。これらを考慮して押出し理論から求めた式3でその適用性を検討した。

6. 準理論的に検討した限界止水圧

軟質ゴムシール材の止水のメカニズムを検討した結果、閉塞効果によることを実験で見いだした。この結果から、止水機能はシール材が目開きから押出された時破損し、その能力を消失するものと仮定して、上述の押出しの理論から式(3)を得た。次に、前述のFig. 7の表示方法を変えて、この式が適用できるかどうかを検討する。その代表的結果をFig. 8～9の(a)(b)に示す。Fig. 8は溝の形状が縦、横10×10mmでFig. 9は、5×20mmのものである。これらの図は式3に従って、縦軸は限界止水圧で横軸はシール材の水圧に直角方向の断面積(Ao)と目開きの断面積(A1)の断面積比(Ao/A1)で示してある。ただし、それぞれの図(a)の横軸の目盛りは対数で、図(b)は算術目盛りで示してある。また、図(a)に示す実線は式3に従って、

図(b)の実線は一次関数で、それぞれ最小2乗法を用いて整理してある。ただ、前述の式3は、壁面とシール材の摩擦を考えていないので $Ao/A1$ が1のとき、 σ はゼロとなる。摩擦がない場合は理論的に正しいと考えられるので、最小2乗法で実験結果を整理するときは、 $Ao/A1=1$ で、限界止水圧=0となるような方法で計算した。結果は、Fig. 8~9(a) (b)に示される

ように、一次関数で整理した方が相関性が良かった。一次関数整理での相関係数(r)はFig. 8(b)の0.865がもっとも小さく、他は、これ以上の相関係数を示した。これに対して、対数関数による整理での相関係数(r)は、0.7代の値であった。この結果、式3の対数関数より一次関数で表示した方が適切と考えられる。これより次の準理論式を得た。

$$P = a + b \frac{Ao}{A1} \quad (4)$$

P: 限界止水圧 (kgf/cm²) a, b: 係数

次に、溝の形状に関係なく全測点をプロットしたFig. 10に式(4)を適用してみた。

ただし今回は断面積比 ($Ao/A1$) が大きい時は

式(4)を適用できないと考えて断面積比 ($Ao/A1$) の大きさを

100の範囲内で整理した。図上の実線は最小2乗法で求めた直線である。

この図に示すようにシール溝の形状に関係なく限界止水圧と $Ao/A1$ は式(4)で整理できることがわかった。また、相関係数(r)を、前述したy軸(限界止水圧)=0, x軸 ($Ao/A1$)=1に固定したものと、原点ゼロに固定したもの2通りの方法で求めてみた。結果はそれぞれ $r=0.912$ 、0.914でほぼ等しい値を得た。したがって、本実験では、式(4)の係数aをゼロとしても大きな誤差は生じないと判断できた。係数aをゼロにした時は、相関係数などを求めるとき計算が簡単となる。

今回、断面積比 ($Ao/A1$) が100以上になると式(4)で処理できないと考えた理由は、軟質ゴムシール材に大きな水圧が作用するとシール材が降伏状態となり、目開に関係なく破壊するのではないかと考えた。ただ、現在は推論の域を出ない。

しかしながら、式(4)の適用範囲は限定されるが、水圧100kgf/cm² (9.8MPa)まで適応できるので実用範囲と考えている。次に、式(4)の係数bは、式(3)と比較することで、降伏応力(Y)に関連することは簡単に推測できる。この推定に従って、また上述より $a=0$ として、bに今回の実験に使用したシール材の引張り強度を代入して求め、その直線を図に点線である。ただし、近似的に引張り強度と降伏応力は比例するものとした。実線と点線の直線から、 α を係数として、 $\alpha Y = b$ の関係をj得る。したがって、限界止水圧は引張り強度から次の式で予測できる。

$$P = \alpha Y \frac{Ao}{A1} \quad (5)$$

P: 限界止水圧 (kgf/cm²)

今回得たbの値は1.20であった。従って、シール材の引張り強度(Y)は1.00kgf/cm²の値を得ているので α の値は1.2となる。

また、式(5)によれば、限界止水圧はシール材の断面積に比例し、目開きには逆比例することもわかる。しかし、今回は1種類のみのシール材で実験を行い式(5)の適用性を検討した。今後、引張り強度またはヤング

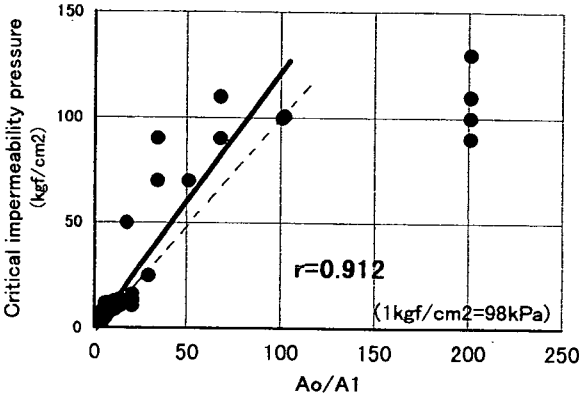


Fig. 10 Relationship between critical impermeability pressure and $Ao/A1$

率が異なるシール材にも適用できるかどうか、幅広い実験を行う必要がある。したがって係数 α の値や A_0/A_1 の適用限界などについては今後の課題である。ただし、限界止水圧と断面積比(A_0/A_1)に明確な関連性があることは明らかである。今後、軟質ゴムシール材の閉塞効果による止水の安全率の算定に利用できる可能性が示唆された。本実験材料に限定すれば可能である。

最後に早稲田大学、名誉教授 森 麟先生には啓発を賜り厚く感謝を表します。また、本研究で終始助言得ました、国立長岡工業高等専門学校 福田 誠博士、旭電化工業 高橋 亮氏、三井建設 石田 喜久男氏に深く感謝を申し上げます。

6. 結論

- 1) 軟質ゴム弾性シール材による構造物継手面の止水は接面応力を利用した止水のメカニズムとは異なる。
- 2) 軟質ゴムシール材による限界止水圧とシール溝の形状から一連の関係を求めることは困難である。
- 3) しかし、軟質ゴム弾性による限界止水圧は断面積比(A_0/A_1)に比例し、関連性が見られる。
- 4) 上述 3) の関係を見いだしたことで、軟質ゴムシール材の閉塞効果による限界止水圧はシール材の引張り強度から予測できる可能性を得た。

7. 参考文献

- 1) 地盤工学会：シールド工法の調査・設計から施工まで、1997. 2
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書「シールド工法編」・同解説、1996. 7
- 3) 尾見仁一、上野時夫、本間昭、
安藤博雄：セグメントシール材注入工法の開発（その2）、土木学会第49回年講、平成6年
- 4) 福田誠、鈴木明彦、山上清、江川昌男、他3名：セグメントシール材注入法の開発（その3）、土木学会第49回年講、平成6年
- 5) 小泉淳、小林亨：最新のシールドトンネルにおける防水技術（その2）、トンネル地下、第23巻5号、pp43-51, 1992. 5
- 6) E. PARSON, N. PARKING: THE EXTRUSION of METALS, CHAPMAN HALL, LTD, PP. 201-222, 1961