

# 注入式水膨張性ゴムを用いた継手部の止水のメカニズムと限界止水圧

森 麟<sup>1</sup>・加賀 宗彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名誉会員 工博 早稲田大学名誉教授 理工学部土木工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>2</sup> 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部環境建設学科(〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

この論文は、注入式水膨張性ゴムを用いた不定形止水材の継手部の止水のメカニズムを検討した。これまでシールドトンネルなどの継手面では、止水材と継手面間の界面応力を作用水圧より大きくすることで止水性を保持していた。しかし、複雑な継手面で止水性を保持することは困難である。そこで注入式水膨張性ゴム材による止水工法が開発され実用化された。その止水のメカニズムは、従来の界面応力とは異なることが示唆されたので、実験の結果、限界止水圧は押し抵抗によって決まることがわかった。このメカニズムから、押し出しの式をベースにした準理論式によって限界止水圧を予測することも可能となった。

**Key Words :** shield tunnel, impermeability, water-expansion rubber material, blocking effect, critical impermeability pressure, predict

## 1. はじめに

地下水面下に建設されるシールドトンネルなど地下構造物継手面の止水性の確保は重要である。しかしながら、止水に関するメカニズムや止水材の耐久性などに関する研究は十分でない<sup>1), 2)</sup>。これまでの止水方法は構造物の継手面間に定形止水材をはさみ作用水圧より大きい界面圧力まで締め付けることで止水性を保持する方法であった。しかしながら、複雑な形状を持った継手面や構造物のコーナー部分では、十分な界面応力を確保できない。このため複雑な形状の継手面や土圧などで継手面が目開きなどの変形をしても確実に止水できる水膨張性ゴム止水材を使用した注入式の工法が開発された<sup>3), 4)</sup>。この注入式水膨張性ゴム止水材は不定形止水材とも言われゲル化後は指の力で容易に変形する軟質弾性状態となる。この止水材の注入は、継手締め付後に行うので界面応力は注入圧以下で小さいが 9.8MPa (100kgf/cm<sup>2</sup>)以上の止水性を発揮する。したがって、従来の定形止水材に適用される界面応力による止水のメカニズムとは異なると思われる。本止水材の場合のメカニズムを把握するため、注入式水膨張性ゴム止水材を注入できる止水溝をもったフランジ型の特殊止水実験装置を作製して一連の実験を行った。

その結果、この止水材の限界止水圧は従来の界面応力とは異なり継ぎ目間から止水材が押しだされる抵抗であることを見出した。

この押し抵抗による止水のメカニズムは新しい止水工法の開発に役立つものと考えられる。

本論文はこの押し抵抗による止水のメカニズムに着目して理論的な検討とそれに基づく止水実験も行った。

その結果から、限界止水圧は押し出しの式をベースにした準理論式で算定できるようになった。

なお、文献<sup>7)</sup>でも同様な検討を行っているが、今回は3種類の止水材を用いて、目開き間隔を変えた実験を数多く行いデータを積み重ねて再検討を行った。

## 2. 従来の定形止水材の止水のメカニズム

初期段階で液状を示す注入式水膨張性ゴム止水材は不定形止水材とも呼ばれている。

この不定形止水材と硬質ゴムを用いた従来の定形止水材との相違を明確にするため、最初に定形止水材の止水のメカニズムを簡単に説明する。従来の硬質ゴムを用いた定形止水材の止水のメカニズムは、図-1に示されるように構造物の継手面間に止水材を設置し、その後継手面を押し付けることで止水材と継手面の界面応力を作用水圧より大きくして止水性を発揮させる。したがって止水の成立条件を図-1の記号で示すと次のようになる。

$$\sigma_x \geq \sigma_y \quad (1)$$

$\sigma_x$ : 接面応力(初期接面応力+止水材の変形特性による応力増加)

$\sigma_y$ : 作用水圧

定形止水材の初期接面応力と限界止水圧の関係は小泉・小林<sup>5)</sup>が実験で求めている。その結果を図-2に示す。この実験の初期接面応力はボルトの締め付けによるもので限界止水圧(漏水時作用水圧)との関係は次のように示される。

$$P_w = \beta \cdot \sigma_0 \quad (2)$$

$P_w$ : 限界止水圧(漏水時作用水圧)

$\beta$ : 定数(1.3 ~ 2.7)

$\sigma_0$ : 初期接面応力

初期接面応力より限界止水圧が大きくなっているのは自封効果と言われるものである。その増加の割合は $\beta$ で示される。この $\beta$ は止水材の種類によって異なり1.3 ~ 2.7の値で示される。この定形止水材が弾性体であればそのポアソン比は0.19 ~ 0.375であることを意味している。

この限界止水圧を作用水圧と接面応力の関係で整理したのが図-3である。この図には一例として初期接面応力を490kPa(5kgf/cm<sup>2</sup>)としたものをして示している。図に示されるように作用水圧を大きくしていくと接面応力も増加する。その増加の大きさは止水材の種類で決まり定数 $\beta$ の値で示される。したがって、作用水圧が大きくなれば接面応力も増加するが太い実線で示す静水圧線に接したとき作用水圧と接面応力が等しくなり漏水が始まり、限界止水圧となる。図に示す例では637.0 ~ 1323.0kPa(6.5 ~ 13.5kgf/cm<sup>2</sup>)となる。この限界止水圧は、初期接面応力に比例して大きくなる。

しかし、不定形止水材は気泡を含む軟らかい弾性ゴム材でポアソン比はゼロに近いので作用水圧によって接面応力を大きくすることはできない。しかしながら、後述するように条件にもよるが9.8MPa(100kgf/cm<sup>2</sup>)以上の止水能力を発揮する。この結果、止水のメカニズムが異なることが考えられる。

次に不定形止水材の止水について検討する。

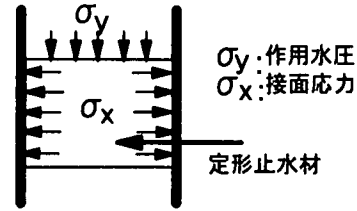


図-1 作用水圧と接面応力

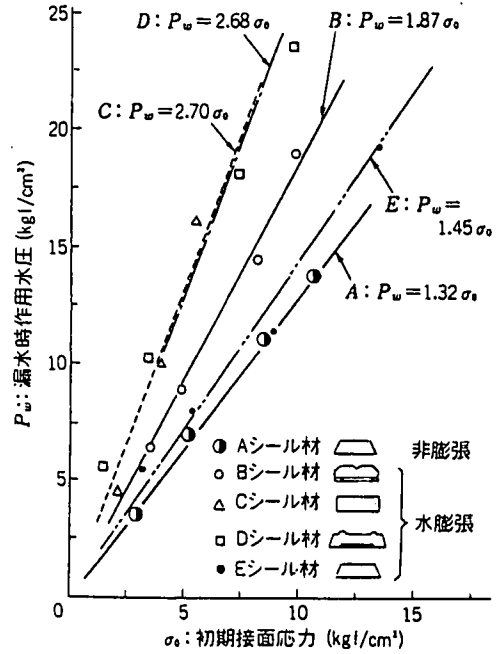


図-2 定形止水材の初期接面応力と限界止水圧の関係<sup>5)</sup>

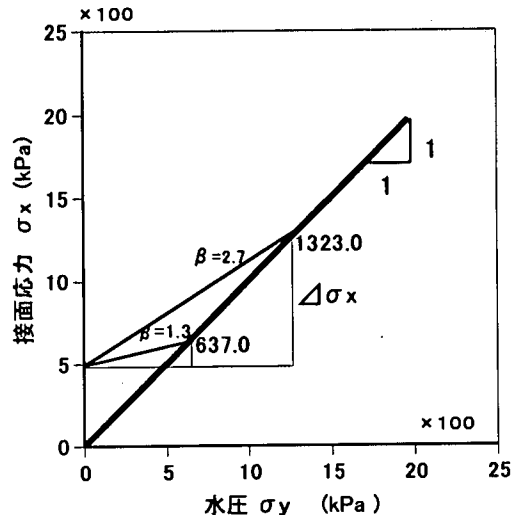


図-3 限界止水圧と接面応力

表-1 注入式水膨張性ゴム材の物性

止水材の種類	T-1	T-2	T-3
配合 A : B	1:0.6	1:1	1:1.5
ヤング率 (E) (kPa)	—	196	—
引張強度 (Py) (kPa)	112.8	98.1	81.3
含水比 (W) (%)	95	155	208
ゲル化時間 (t) (min)	2.0	2.5	3.0

\*測定温度室温 31℃

A : 主材 B:反応材

### 3. 注入式水膨張性ゴム止水材および止水実験方法

#### (1) 止水材料の物性

本研究で用いた止水材は2液(A液, B液)混合タイプである。A液は主材で, 注入式水膨張性ゴム材である。B液は水を主体にした反応剤である。

ゲル化後はやわらかいゴム弾性状態となり, 水を吸って膨張する。膨張量はB液に含まれる発泡剤の量によって調節できる。本実験で用いた止水材の膨張量は約2倍とした。また, A液, B液の混合量を変えてゲル強度を3段階変えた。それぞれの止水材の基本的物性を表-1に示す。

なお, 含水比は止水実験中に吸水膨張して変化するので, A, B液を混合しゲル化した直後の含水比を示した。引張強度は硫化ゴム引張り試験法 JIS K-830 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水膨張性ゴム材を入れゲル化する前に密閉し, この状態で供試体を2時間養生して作製した。

#### (2) 実験装置と実験方法

シールドセグメントの接続部に本止水材を用いた際の止水性能を調べるため, 実際のセグメント継手部をモデル化した止水実験装置を作成した。図-4(a)にその構造を示す2枚の円形フランジからなる特殊な止水実験装置を作製して止水実験を行った。ただし, この装置では, 実際のシールドの作用水圧と漏水の方向が逆になっている。この装置の接合面部で止水材を注入する箇所は, 図-4(b)に示す5種類の

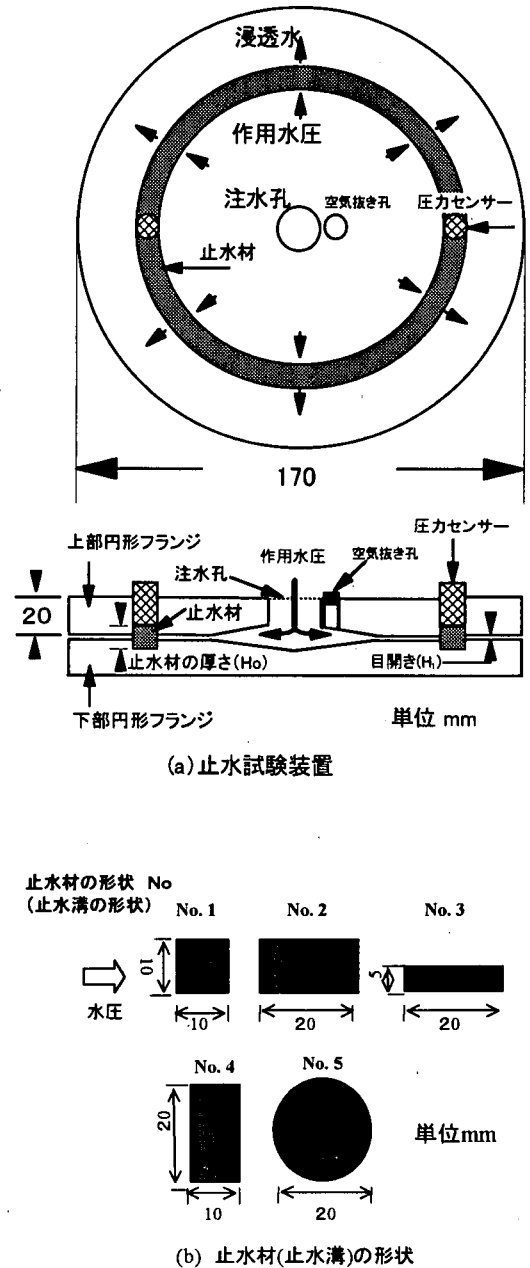


図-4 止水実験装置と止水材(止水溝)の形状

溝型形状とし形状が止水能力に与える影響も検討した。溝の形状は縦横の長さを変えたものおよび円形の形状にしたものとした。これら溝の形状が止水材の形状となる。この形状番号は同図(b)に示す通りである。この溝に溶液状態の止水材を注入してゲル化させた後30分間膨張圧を測定した。その後フラ

ンジ中央の注水孔から水圧を段階的に加え止水材外側の目開きから漏水が生ずる限界止水圧を求めた。

この止水実験装置では止水材の形状とフランジ間の目開きをそれぞれ変えてその影響を検討した。目開きの大きさは最小 0.05mm で最大 3mm の大きさである。最大目開きは、シールドセグメントの定形止水材の一般的な設計方法に準じて決めた。なお、注入式水膨張性ゴム止水材の付着力は約 294kPa (3kgf/cm<sup>2</sup>) とかなり大きな値を持っており<sup>3)</sup>、作用水圧に対してかなり抵抗できるものと推定できる。

以上から、本止水材による止水のメカニズムは複雑であると考えられる。

このため本研究では、複雑な止水のメカニズムを一つ一つ段階的に解決するため、止水材を注入する溝には薄くグリスを塗布し付着力を除去した場合の止水性能にのみ着目して研究を進めた。

#### 4. 不定形止水材の膨張圧と限界止水圧

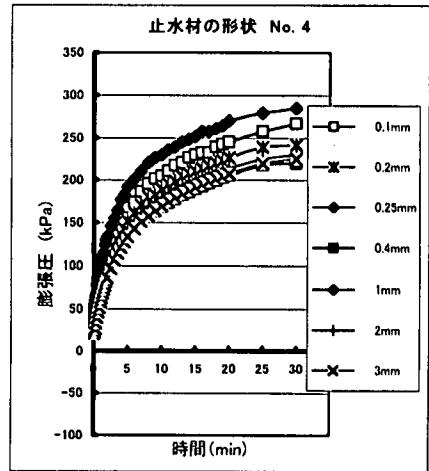
##### (1) 不定形止水材の膨張圧と止水

2章で述べたように定形止水材の界面応力の大きさは限界止水圧に大きく影響する。したがって、注入式水膨張性ゴムを用いた不定形止水材の界面応力の大きさも把握する必要がある。そのため図-4に示す止水実験装置に不定形止水材を注入しゲル化後の膨張圧を測定した。その結果を形状 No.4 について図-5(a) (b) (c) に示す。同図(a)は不定形止水材 T-1, (b)は T-2, (c)は T-3 を用いた結果を示している。ゲル化後この止水材の強度は、表-1に示すように T-1> T-2> T-3 である。また図中には上下フランジ盤の目開きを変えた結果も示してある。膨張圧は時間とともに変化するが、約 30 分でほぼ一定となることが判明したので、測定は 30 分間行うこととした。

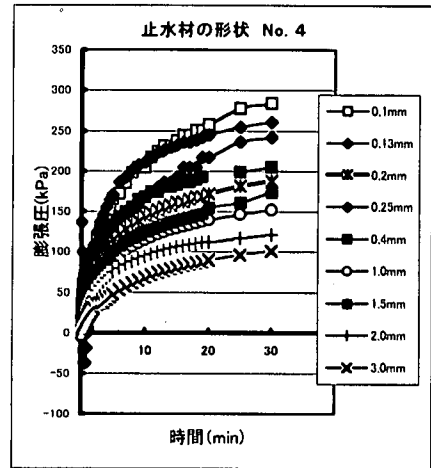
結果は図に示されるように目開きと膨張圧はほぼ逆比例している。

しかしながら、その大きさは 98 ~ 294kPa (1.00 ~ 3.00kgf/cm<sup>2</sup>) の範囲で大きな変化はない。ただし、例外的に図-5(c)の目開き 3mm の膨張圧のように実験中何らかの影響で極端に小さい値を示す場合もあるが、例外を除けば膨張圧は止水材の形状が変わってもほぼ上述の範囲にある。

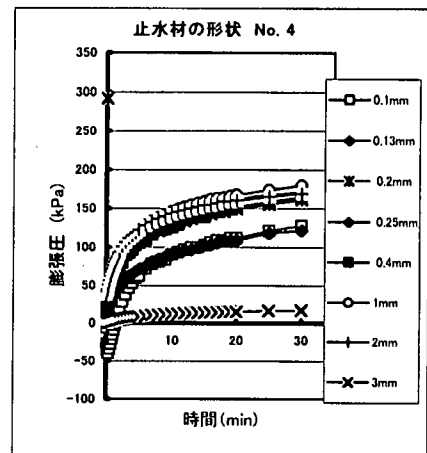
この膨張圧は初期界面応力と考えることができる。初期界面応力の大きさがわかったので、従来の定形止水材の設計方法で限界止水圧を予測して見る。その一例として図-5(b)の目開き 1.0mm の限界



(a) 止水材 No. T-1 (Py=112.8kPa)



(b) 止水材 No. T-2 (Py=98.1kPa)



(c) 止水材 No. T-3 (Py=81.3kPa)

図-5 注入式水膨張性ゴム材の膨張圧

止水圧を求めて見た。膨張圧に相当する初期接面応力は 152kPa (1.55kgf/cm<sup>2</sup>) であり、従来の限界止水圧を求める式(2)によるとこの止水材の限界止水圧は 198 ~ 410kPa (2.02 ~ 4.18kgf/cm<sup>2</sup>) となる。

しかし、本実験によると 1446kPa (14.7kgf/cm<sup>2</sup>) で、式(2)による値と大きく異なる。したがって、注入式水膨張性ゴム材を用いた不定形止水材による止水のメカニズムは定形止水材と大きく異なることが予測される。

## (2) 限界止水圧

不定形止水材を注入溝に注入しゲル化させ 30 分間膨張圧を測定した後は、漏水するまで水圧を加え限界止水圧を測定した。

実験結果を図-6(a)(b)に示す。図に示す縦軸は限界止水圧である。横軸は不定形止水材の形状の影響を考察できるように同じ目開きのものを選定して示してある。この図から、不定形止水材の形状が同じもの同士を比較して見ると(例えば 図-6(a), (b)の No.1), 目開きが小さいと限界止水圧は高くなる傾向を示す。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、不定形止水材の形状が同じであれば目開きと限界止水圧は逆比例するものと判断できる。しかしながら、同じ目開きで、形状の異なる止水材の止水能力を比較してみると一定ではない(例えば目開き 0.1mm の No.1 ~ No.5)。

不定形止水材の形状により異なるものや、ほぼ同一のものなどがある。結果として、不定形止水材の体積や目開きから、限界止水圧との関係を整理してみたが、統一的な関連性を求めることは困難であった。このため、浸透水の流れや不定形止水材の変形を直接観察できるように作成したアクリル円筒モールドで実験を試みた。次にこの実験結果を検討する。

## 5. アクリル円筒モールドによる止水実験と止水のメカニズム

注入式水膨張性ゴム材による不定形止水材を用いた止水工法はすでに実用化されている<sup>3), 4)</sup>。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、当初は土の締め固め試験(JSF T 711-1990)に使用される内径 10cm の鋼製モールドを利用して、上版および底版にはそれぞれ注水孔および排水孔を設け、さらにモールド側面には圧力計、間隙水圧計をそれぞれ

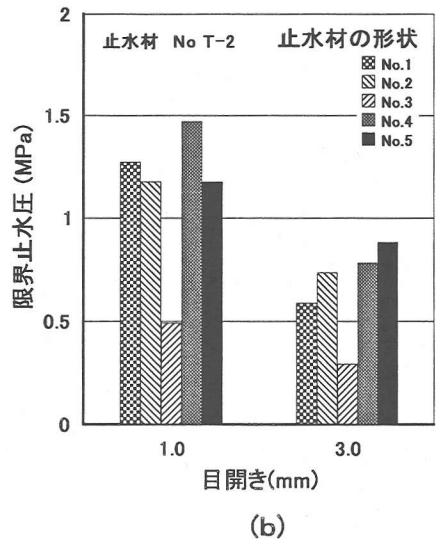
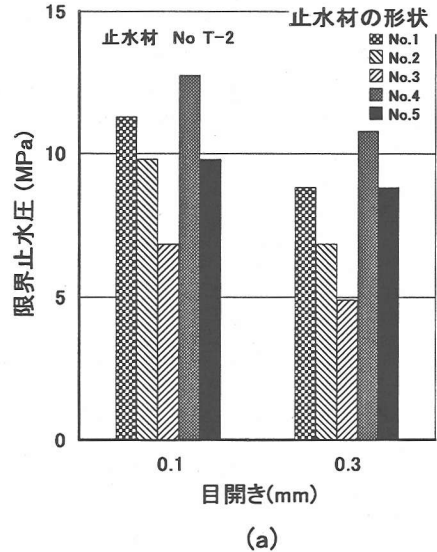


図-6 止水材の形状と限界止水圧

4 個取付けた装置を作製した。この装置により不定形止水材の膨張圧、また注水孔から水圧を加えた時、モールド側面に作用する圧力(接面応力)や間隙水圧を測定した。この結果、おおよそ不定形止水材の膨張圧(約 294kPa (3kgf/cm<sup>2</sup>))までは、注水孔から加えた水圧よりモールド側面の圧力は大きい。この場合は、従来の接面応力で止水を保持していることが推定できる。しかしながら水圧を徐々に大きくすると、加えた水圧、側面圧力、間隙水圧が全て同じ値になり、その後止水材が押し出され止水性を失った。

この計測結果から止水のメカニズムを検討したが、従来の接面応力の考え方からは、止水のメカニ

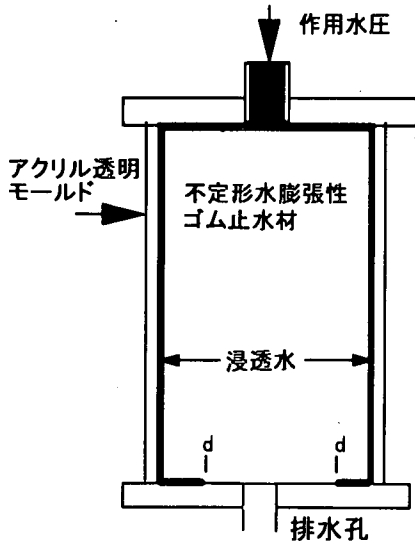
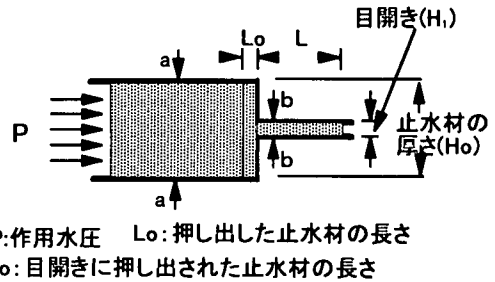


図-7 非常に濃度の薄い注入式水膨張性ゴム材を使用した浸透水把握実験(モールド内径 10cm, 高さ 12.7cm)

ゴムを説明することは出来なかった。そこで、浸透水の流れを直接観察することで、止水のメカニズムを解決できる手がかりを得ることができるのではないかと考え透明アクリル円筒モールドと着色水を使用して透視できる止水実験を行った。モールドの大きさは締固め試験 10cm モールドと同じ大きさである。

また、この実験では不定形止水材の止水のメカニズムを単純に調査するため、初期接面応力ができるだけ生じないようにした。注入式水膨張性ゴム止水材は反応剤によって膨張しながらゲル化する、そのためモールド一杯まで止水材を注入すると、4.(1)で述べたように膨張圧が生ずる。そこで、膨張圧が出来るだけ発生しないようにゲル化後の止水材がちょうどモールドを充填するように調整した。またアクリル円筒の内面にはグリースを薄く塗布し、止水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、止水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、透明アクリル円筒そのものの破壊強度が小さいためである。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、止水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。

実験モデルを図-7に示す。この図に示されるように作用水圧の上昇につれてモールド壁面と止水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の一部まで着色水が浸透した。しかし 980kPa (10kgf/cm<sup>2</sup>) 付近まで、止水は保持された。



P:作用水圧 L<sub>0</sub>:押し出した止水材の長さ  
L:目開きに押し出された止水材の長さ

図-8 押し出しモデル

この作用水圧に抵抗できる力について考察する。着色水が浸透していない d-d 点間を直径とするモールド底面積 ( $A_1$ ) に作用する応力は、円筒壁面の摩擦を取り除いているので作用水圧にほぼ等しいと考えられる。また、この作用水圧を  $P_0$  とし、排水孔面積を  $a_0$  とすれば、モールド底面に接触している止水材の面積は ( $A_1 - a_0$ ) となる。したがって、接面応力を  $P_x$  とすれば  $A_1 \times P_0 = (A_1 - a_0) P_x$  の関係から、 $P_x > P_0$  となり接面応力は作用水圧より大きくなり止水を保持しているものと考えられる。

この状態での止水保持のメカニズムは 2 章で述べた定形止水材のメカニズムと同じである。しかし、作用水圧を増加していくと止水材の一部が排水孔から押出され止水性を失うことからこの注入式水膨張性ゴム材の限界止水圧は排水孔から止水材が押出される抵抗力であることが推定できる。

この限界止水圧を決めるメカニズムは従来の定形止水材の接面応力とは異なる。

## 6. 押し出し抵抗力の検討

従来の定形止水材の止水のメカニズムでは、押し出し抵抗によって限界止水圧が決まると考えることはできない。したがって押し出し抵抗による止水のメカニズムは、注入式水膨張性ゴム止水材を用いた不定形止水材独特のものと考えられる。前述したこの止水材の止水メカニズムを解決する第一歩として、押し出し抵抗に限定したメカニズムに着目して、図-8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 断面の止水材が、b-b 面にある目開きに押しだされる。

金属の押し出し理論<sup>9)</sup>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

$$W = Y \cdot V \cdot \log_e \frac{L}{L_0} \quad (1)$$

Y:降伏応力  
V:押し出された材料の体積  
L:目開きから押し出された長さ  
L<sub>0</sub>:押し出された材料の長さ

また押し出しに必要な载荷エネルギー(W)は、

$$W = P \cdot V \quad (2)$$

P: 押し出し抵抗力(限界止水圧)  
で表され、式(1)、(2)は等しくなる。さらに、

$$V = A_0 \cdot L_0 \quad V = A_1 \cdot L$$

A<sub>0</sub>: a-a 断面の断面積 (H<sub>0</sub> × w)

A<sub>1</sub>: b-b 断面の断面積 (H<sub>1</sub> × w)

w: 奥行き

なので、結果として次の式が得られる。

$$P = Y \cdot \log_e \frac{A_0}{A_1} \quad (3)$$

また、A<sub>0</sub>とA<sub>1</sub>の奥行き(w)は等しいので  
A<sub>0</sub>/W = H<sub>0</sub>(止水材の厚さ), A<sub>1</sub>/w = H<sub>1</sub>(目開き)となるので式(3)は次のように置き換えられる。

$$P = Y \cdot \log_e \frac{H_0}{H_1} \quad (4)$$

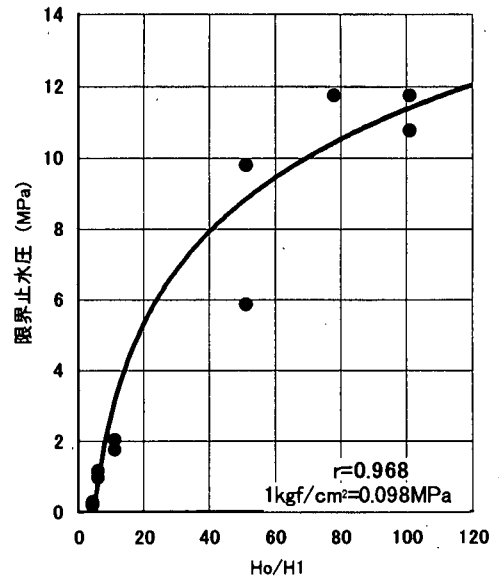
H<sub>0</sub>: 止水材の厚さ    H<sub>1</sub>: 目開き

式(4)による限界止水圧は従来の接面応力による限界止水圧とは全く異なる。この式によれば限界止水圧は H<sub>0</sub>/H<sub>1</sub>(止水材の厚さ/目開き)に比例する。

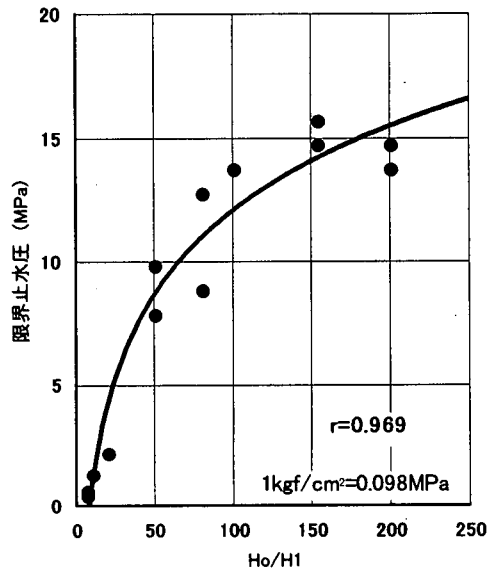
この考えが不定形止水材の限界止水圧の予測に適用できるかを調べるため図-1に示した特殊な円形フランジによる止水実験装置による限界止水圧を用いて検討した。次章に実験結果と式(4)の適用性について示す。

## 7. 押し出しの式で準理論的に検討した限界止水圧

ゲル化した注入式水膨張性ゴム材による不定形止水材の止水のメカニズムを検討した結果、押し出し抵抗によって限界止水圧が決まる事をアクリル円筒モールド実験で見いだした。この結果から、止水のメ



(a) 止水材の形状 No. 1



(b) 止水材の形状 No. 4

図-9 Ho/H<sub>1</sub>で整理した限界止水圧

カニズムは不定形止水材が目開きから押し出され破損し、止水能力を消失すると考えられ、上述の押し出しの理論から式(4)を得た。

この式から、限界止水圧は、止水材の厚さ/目開き(H<sub>0</sub>/H<sub>1</sub>)に比例する事がわかる。

したがって、図-6の表示方法を変えて、縦軸に限界止水圧、横軸に止水材の厚さ(H<sub>0</sub>/H<sub>1</sub>)を取り、

実験結果をプロットした。

その代表的結果を図-9(a), (b)に示す。図-9(a)には、止水材の形状 No.1 の厚さ 10mm, 幅 20mm の結果を、また、No.4 の厚さ 20mm, 幅 10mm の結果を図(b)に示す。止水材はそれぞれ同じ強度の T-1 を使用したものである。図-9(a), (b)に示す実線は最小二乗法を用いて対数関数で整理したものである。前述の式(4)は、 $H_o/H_1$  が 1 のとき、限界止水圧(P)はゼロとなる。しかし、図-9(a), (b)に示される様に、実線は座標点(1, 0)を通らない。この理由として式(4)は、押し出し抵抗以外、周面摩擦や付着力などの条件を考慮していないためと考えられる。しかしながら、図-9(a) (b)に示されるように、その回帰曲線(実線)の相関係数(r)は高い値を示した。

これより次の準理論式を得た。ただしこの式の表示は常用対数としている。

$$P = -b + 2.3a \cdot \log_{10} \frac{H_o}{H_1} \quad (5)$$

P:限界止水圧(MPa) a, b:係数

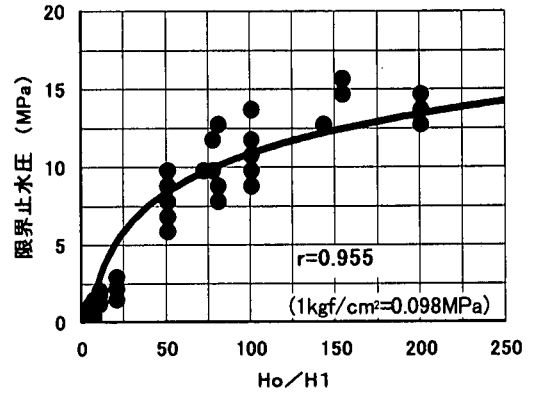
図-9(a) (b)の回帰曲線は相関係数(r), 0.968, 0.969 と高いが、式5の a, b の値について見ると a は 3.76 と 4.94 であり、b は 5.93, 10.4 となった。図の(a)と(b)では相違がある。この a, b の違いの主な原因は止水材の形状の影響と考える。今回は5種類の形状の止水材を用いているので、それぞれの a, b に違いはあるが、その平均の a, b を用いた式5が一般的な予測式になりうるかを次に検討してみる。

## 8. 限界止水圧の予測

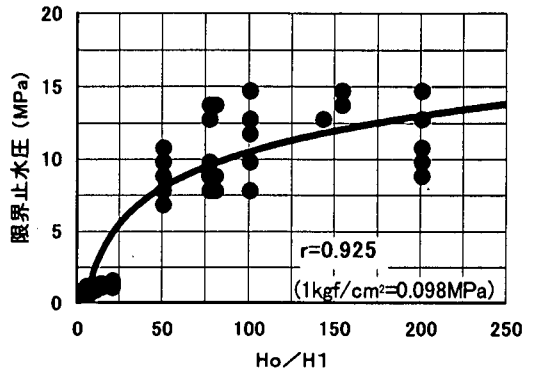
限界止水圧と  $H_o/H_1$  の基本的な関係を見るため止水材の形状を特に区別しないで、止水材の強度別に全測点をプロットした図-10(a) (b) (c)に式(5)を適用してみた。それぞれの図は止水材の種類別(T-1, T-2, T-3)で整理したものであり、相関係数(r)は図に示されるように、それぞれ  $r=0.955$ ,  $r=0.925$ ,  $r=0.939$  で 0.9 以上の相関性を得た。この結果からこれまで不定形止水材の限界止水圧を統一的に表す方法はなかったが、 $H_o/H_1$  の関数で限界止水圧(P)を式(5)で統一的に整理できることがわかった。

次に、限界止水圧と  $H_o/H_1$  に連関性を見出したことより、限界止水圧の予測が可能かどうかの検討も行った。

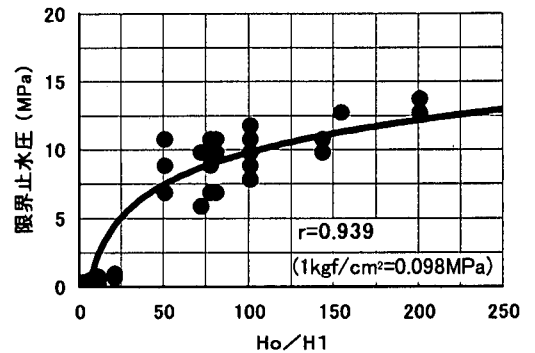
式(5)の係数 a は、式(4)と比較することで、材



(a) 止水材 No. T-1 (引張り強度  $P_y=0.113$ MPa)



(b) 止水材 No. T2 (引張り強度  $P_y=0.098$ MPa)



(c) 止水材 No. T-3 (引張り強度  $P_y=0.081$ MPa)

図-10  $H_o/H_1$  と限界止水圧



表-2 止水材と係数

止水材 No	引張り強度 (Py) (MPa)	a	$\alpha$	b
T-1	0.113	3.65	32.3	5.95
T-2	0.098	3.61	36.8	6.12
T-3	0.081	3.42	42.2	5.97

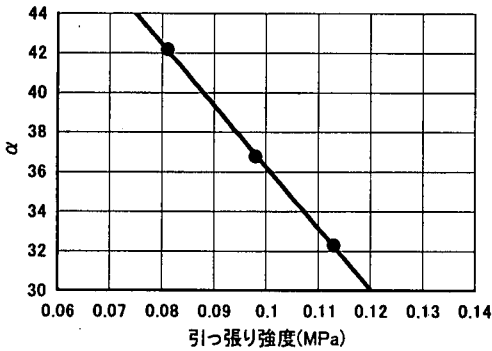


図-11 引張強度と係数 $\alpha$

料の降伏応力(Y)に関連することは容易に推測できる。降伏応力として本止水材では測定しやすい引張強度(Py)を用いたので、係数 $\alpha$ を導入して $a = \alpha \cdot Py$ とすると、式(5)は次のようになる。

$$P = -b + 2.3 \alpha \cdot Py \cdot \log_{10} \frac{H_0}{H_1} \quad (6)$$

P: 限界止水圧 (MPa)  $\alpha$ , b: 係数

Py: 注入式水膨張性ゴム止水材の引張強度 (MPa)

式(6)の係数 $\alpha$ およびb値を知ることができれば限界止水圧(P)を予測することは可能となる。

初めに、 $\alpha$ を求めるためには $a = \alpha \cdot Py$ の関係からaには図-10(a)(b)(c)の回帰曲線で求めた値、Pyには、今回の実験に使用したゲル化した止水材の引張強度を代入して、 $\alpha$ の値を計算した。結果を表-2に示す。この表に示されるように、 $\alpha$ は30~40程度の値である。引張り強度と $\alpha$ の関係を図-11に示す。この関係は式(7)で示される。

$$\alpha = (67.2 - 310Py) \quad (7)$$

$\alpha$ : 係数

Py: 引張強度

この係数 $\alpha$ の特性を狭義に把握するため、文献(6)を参考に前述の式(6)を $b=0$ 、 $P = Pt$ とすれば $Pt = \alpha \cdot Py \cdot \log_{10}(H_0/H_1)$ と表わされ理論式(4)との比をとれば $\alpha = Pt/Py$ となる。これより係数 $\alpha$ は理論式(4)に考慮されていない条件を補足する係数と考えることができる。この係数 $\alpha$ は、図-11に示されるように引張り強度が大きくなれば小さくなる傾向を示す。

次にb値の特性を検討するため、実測のb値を前述の表-2に示す。この表に示されるように、b値は、止水材の強度が異なっても、その値は5.95~6.12の範囲でバラツキが少ないのでその平均値を6.01とした。これらの値を式(6)に代入すれば限界止水圧を予測することが可能である。ただ、さらに高い精度で限界止水圧を予測することが必要であれば止水材の形状別にbと $\alpha$ 値を用いる必要がある。

なお、不定形止水材の強度が表-2に示す範囲の場合で、限界止水圧の目安を知るだけであれば表-2のaおよびb値の平均値( $a$ ,  $b$ )を式(5)に代入して限界止水圧を簡単に求めることができる。

それぞれの平均値  $a=3.56$ ,  $b=6.01$  である。求められる値は2%の誤差で図-10の回帰曲線とほぼ同じとなる。

## 9. 結論

1) 注入式水膨張性ゴム止水材を使用した不定形止水材による構造物継手面の限界止水圧は接面応力を利用した止水のメカニズムとは異なる。

2) 不定形止水材による限界止水圧と止水材の形状に一連の関係を求めることは困難である。

3) 不定形止水材による限界止水圧は  $H_0/H_1$  (止水材の厚さ/目開き) に比例し、一連の関連性が見られ、準理論式(6)を得た。この式の係数 $\alpha$ とbを知ることができれば、限界止水圧を予測することが可能である。

4) 準理論式の係数 $\alpha$ は限界止水圧に対する比例係数を意味し、不定形止水材強度が大きくなれば小さくなる。これに対し、係数bは止水材の強度に影響されない値であることがわかった。

5) 本実験の範囲に限定すれば係数 $\alpha$ は引張強度より予測でき、また係数bはほぼ一定の値となるので、限界止水圧を予測する事は可能である。

## 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，pp.226-239，1997.2.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書「シールド工法編」・同解説，179-160，1996.7.
- 3) 尾見仁一，上野時夫，本間昭，安藤博雄：セグメント止水材・注入工法の開発（その2），土木学会第49回年次学術講演会概要集，pp.1220-1221，1994. (2000.9.19受付)
- 4) 福田誠，鈴木明彦，山上清，江川昌男：セグメント止水材・注入法の開発（その3），土木学会第49回年次学術講演会概要集，pp.1228-1229，1994.
- 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），トンネルと地下，第23巻5号，pp.43-51，1992.
- 6) Parson, E. and Parking, N.: *The Extrusion of Metals*, CHAPMANHALL, LTD, PP.201-222, 1961.
- 7) 加賀宗彦，松浦純子：軟質ゴムシール材の閉塞効果による止水のメカニズム，トンネル工学研究論文・報告集，土木学会，第8巻，pp.79-86，1998.

## CRITICAL PRESSURE AND MECHANISM OF IMPERMEABILITY OF JOINT PLANE USED A NEW WATER-EXPANSION RUBBER MATERIAL OF INJECTION TYPE

Akira MORI and Munehiko KAGA

This report examines the mechanisms of the impermeability used in a new water-expansion rubber material of injected type. Until now, Impermeability of segment joint of shield tunnel was retained by increasing contact surface stress between segment by pressing. However, it is very difficult to retain the impermeability in the complicated joint plane. Then, a new water-expansion rubber material of injected type has been developed. we researched the mechanism of impermeability because it was indicated that the mechanism differed from conventional contact surface stress. As a result, we found a mechanism of impermeability by blocking effect. From this mechanism, it was possible to predict the critical impermeability pressure by a semi-theoretical equation based on the equation of the extrusion.