押出し抵抗による硬質ゴムシール材の 限界止水圧

加賀 宗彦¹

¹正会員 東洋大学教授 工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail: kaga@toyonet.toyo.ac.jp

この論文では硬質ゴム材単独の押出し抵抗に関する止水機能を調査した。これまでの研究で柔らかい注入式水膨張性ゴム止水材を用いた止水工法の止水のメカニズムは目開きに押出される押出し抵抗であることを見出した。もし硬質ゴムを使用した硬質ゴムシール材が押出し抵抗による止水機能を発揮できるならその限界止水圧は飛躍的に大きくなることが予測できる。そこで硬質ゴムシール材による止水機能の調査を行った。結果として目開きを閉塞するように硬質ゴムシール材を設置することで押出し抵抗による止水性が発揮されることを見いだした。これより実際の注入式シールドセグメントにリーク防止材として設置されている硬質ゴム目詰めシール材にも止水機能があることがわかった。本研究結果は新しい止水工法の開発に役立つことが期待される。

Key Words : *impermeability, leak prevented seal, blocking effect, shield tunnel*

1. はじめに

複雑な地下構造物の継ぎ手面でも確実に止水できる注入式水膨張性ゴム止水材を使用した注入式止水工法が開発された¹⁾²⁾。我々はこれまで、この注入式水膨張性ゴム止水材を用いた継手部の止水のメカニズムを実際のシールドセグメントをモデル化したフランジ型止水実験装置で調査してきた^{3)~5)}。その結果、止水材が継手部間に押し込まれる抵抗による新しい止水のメカニズムを見いだした。このメカニズムは構造物の継手部間に定形止水材をはさみ作用水圧より大きい接面応力まで締め付けることで止水性を保持する従来の止水方法とは異なる。この押出し抵抗を利用した止水方法は、接面応力を大きくできない指で容易に変形できるやわらかいゴム弾性材料でも10MPa (100kgf/cm²)以上の止水能力を発揮した。この研究の過程で、継手面に設けられた止水溝に注入された水膨張性ゴム材がゲル化するまでリーク防止材として使用されている目詰めシール材にも止水機能があることを推定できた。この目詰めシール材は薄い硬質ゴムで作成されている。この硬質ゴムの引張り強度は水膨張性ゴム材に比べて約50倍大きい。もしこのような硬いゴム材そのもので押出し抵抗を利用した止水が可能である場合は、止水能力は飛躍的に大きくなることを推定できる。そこで本研究は硬質ゴム材で作成した硬質ゴムシール材でも押出し抵抗を利用した止水方法に利用できるかどうかを

調査した。結果として、硬質ゴムシール材でも押出し抵抗を利用できるように設置することで大きな止水能力を発揮できることがわかった。ただ、押出し以外の止水抵抗を持っていることも考えられる。そこで実験方法を工夫して硬質ゴムシール材による止水のメカニズムは押出し抵抗であることを確認した。これより硬質ゴムシール材でも押出し抵抗による止水能力を持つことが明らかになった。実際のシールドセグメントは注入式水膨張性ゴム止水材がゲル化するまで硬質ゴム目詰めゴムシール材が使用されている。この硬質ゴム目詰めシール材にも押し出し抵抗による止水能力があると考えられた。そこでその限界止水圧の予測も試みた。今回の調査で得られた結果は、新しい止水方法の開発に利用できると思われる。

2. 使用材料および実験方法

(1) 使用材料と物性

注入式水膨張性ゴム材を用いた実際に使用されているシールドセグメント⁴⁾の模式図を図-1に示す。この注入式水膨張性ゴム材は不定形止水材とも呼ばれているが、本研究ではこれまでの発表論文と統一して注入式止水材と以後呼ぶ。この注入式止水材は図-1に示されるように止水溝に注入される。この止水溝の上下部には、注入材

表-1 止水材の形状と物性

材料No.	材質	型	引張り強度 MPa	厚さ(t) mm	高さ(Ho) mm
T0	ゴム	1枚	5.908	3.1, 5.1, 10.1	4.0~19.0
T1	ゴム	1枚	6.252	5.0	15.6
T2	ゴム	1枚	6.252	10.0	15.6
T3	ステンレス	1枚	—	0.3	10.0
T4	ゴム	2枚合せ	6.252	10.0	15.2 (7.6×2)

*: 高さHo 4, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 19mm

図-1 注入式止水材のシールドセグメント継手部の模式図⁹⁾

がゲル化するまでのリーク防止として目詰めゴムシール材と呼ばれる二枚合わせのゴム材が設置される。このような場合の止水のメカニズムを調べるため、目詰めゴムシール材を単純化した一枚型の厚さ0.2~2mmの薄い硬質ゴム目詰めシール材と水膨張性ゴム材とを併用した図-2に示す実験装置で止水実験を行った⁹⁾。その結果、薄い硬質ゴム目詰めシール材は止水を増加させる機能を持っていることがわかった。そこで今回は硬質ゴム材単独でも硬質ゴムシール材として柔らかい水膨張性ゴム止水材のように押し抵抗による止水機能を発揮できるかどうかを調査した。今回の実験で使用した硬質ゴムシール材の厚さ(t)や高さ(Ho)を示した模式図を図-3に示す。硬質ゴムシール材はリング状硬質ゴムである。外形は110mmで一定ある。この硬質ゴムシール材を図-4(a)に示す円形フランジ型止水実験装置に設置し止水実験を行った。止水実験装置の詳細については次の(2)節で説明する。硬質ゴムシール材は厚さ(t)と高さ(Ho)を変えて止水実験に用いた。厚さは内径を調節して変えた。最小の厚さは自立できる必要があるので3.1mmとした。最大厚さは10.1mmである。これらの形状と物性は表-1の材料No.T0に示す。また、硬質ゴムシール材の止水機能を確認するため二枚合せの硬質ゴムシール材やステンレス製のシール材も作製した。その形状と物性は表-1の材料No.T1~T4に示す。この材料とT0材料は同時に発注しなかったので多少材質が異なっている。なお、硬質ゴムを目詰め材と使用した場合は硬質ゴム目詰めシール材、止水材として用いた場合は硬質ゴムシール材と呼ぶ。

(2) 止水実験装置と実験方法

止水実験は、シールドトンネルのセグメントの継手部をモデル化した円形フランジ型の止水実験装置を作製して行った。なお、この止水実験装置はこれまでの研究結

図-2 注入式止水材と硬質ゴムシール材を併用した止水実験の模式図⁹⁾

図-3 硬質ゴムシール材の形状

果を報告した文献3)~5)で使用したものとほぼ同じであるが、使用した硬質ゴムシール材の最大厚さは10.1mmなので限界止水圧も大きくなると考えた。そのため止水実験装置の能力を約10MPa大きくして最大35MPaまで実験可能な装置とした。止水実験装置の概略は図-4(a)に示す。この止水実験装置は上下の円形フランジで構成されている。上フランジに注水孔、空気抜き孔および注入孔が取り付けられている。今回の実験では注入孔を使用しないので、この注入孔に圧力センサーを取付け硬質シール材の接面応力を測定した。また、上下フランジには硬質ゴムシール材を設置する止水溝が取り付けられている。さらに、止水溝の形状の違いによる止水能力を調べるため、溝の高さを変えたものと今回始めて作製したティーパーをつけたもの計6種類の止水実験装置を準備した。それぞれの止水溝の形状部分を図-4(b)に示す。シールドトンネルセグメントなど地下構造物の継手部の従来の止水法は構造物の継手部に硬質ゴム材を設置し水圧より大きな圧力で締め付けて止水性を発揮させる。今回の止水実験は、最初に実験装置の(2)を利用して硬質ゴムシール材を締め付けた従来の接面応力による止水能力を求めた。これ

(b) 止水溝の形状

図-4 止水試験装置と止水溝

は、押出し抵抗を評価するために必要と考えて行った。

そこで図-3に示す硬質ゴムシール材と同じ材質でこれより一まわり大きい外形130mm、内径110mmのリング状のゴムを準備した。このリング状ゴムの厚さ(t)は10mm、高さ(H_0)5mmである。このリング状ゴムを定形止水材として用いるため、止水溝部分を拡大した図-5(a)に示すようにフランジの止水溝の外周に設置した。その後ボルトを締付けて接面応力を大きくして止水実験を実施した。ボルトの締め付け力は、定形止水材とフランジ間の初期接面応力(P_1)が0.5~1.5MPaの範囲になる大きさとした。この場合止水溝の形状は止水能力に影響がないと判断できるので使い勝手が良い図-4(b)の(2)に示す深さ10mmの止水溝を持った止水試験装置を使用した。ゴムの物性は表-1の試料No.T0と同じである。次に押出し抵抗による止水実験方法を説明する。この止水実験は図-4(a)または止水溝部分を拡大した図-5(b)に示すように硬質ゴムシール材を止水溝に設置し注水孔から水压をかけて限界止水圧を測定した。硬質ゴムシール材の止水能力の把握は、目開き(H_1)と止水材の厚さ(t)を変えて行った。ボルトによる締め付けは行っていないので上下フランジと硬質ゴムシール材間に作用する初期接面応力はゼロである。なお、目開きは図-4(b)の(1)(2)(3)(4)に示す高さの異なる止水溝の止水試験機と表-1の材料No.T0に示す高さが異なる10種類の硬質ゴムシール材との組み合わせで設定した。例えば、止水溝の深さ10mmの止水試験機を用いて1mmの

(a) 従来の接面応力による止水実験

(b) 押出し抵抗による止水実験

(c) フランジと硬質ゴムシール材間を粗面にした押出し抵抗による止水実験

(d) 接面応力と押し出し抵抗を併用した止水実験

(e) 2枚合わせの硬質ゴムシール材を使用した押出し抵抗による止水実験

図-5 硬質ゴムシール材の止水実験の模式図

目開きをとるためには高さ11mmの硬質ゴムシール材を使用した。また厚さ(t)を変えた硬質ゴムシール材は表-1のNo.To材に示す3種類を準備して使用した。準備した全硬質ゴムシール材は高さ(H_0)を変えた10種類と厚さ(t)を変えた3種類の合計30種類である。目開きの設定で硬質ゴムシール材に接面応力が発生しないように目開きと同じ厚さのスペーサーを上下フランジ間の外周3か所に設置した(図-5(b)参照)。スペーサーの大きさは縦、横約1cmである。この設置によって締め付けボルトを過度に締付けてもスペーサー以下の目開きにはならないのでフランジと硬質ゴム間の初期接面応力は発生しない。締め付けボルトは目的の目開きが得られた位置で固定した。今回の実験の目開き範囲は最小1mmで最大5mmである。参考までに実際の定形止水材による接面応力を利用した止水では、定形止水材の厚さは固定されているので目開きが生ずると接面応力が小さくなる。そのため各企業体のシールドトンネル耐水試験法で採用している許容目開きは2mmとしている。したがって今回の実験で採用した最大目開き5mmは接面応力を利用した止水法の許容目開き2mmに比較してかなり大きい値である。本実験装置の限界止水圧は約35MPaなので、目開き1mm以下ではそれ以上の限界止水圧となるものがあり、目開き1mm以下の実験は困難であった。したがって、目開きの最小値1mmは止水実験装置の能力で制限された。なお、表-1に示す硬質ゴムシール材No.T1～T4は、止水機能確認のために用いた。例えば、No.T3のステンレス製止水材は、剛性が大きくなった場合でも押し出し抵抗を利用した止水が可能かどうかを調べるために用いたものである。また止水のメカニズムは硬質ゴムシール材が目開きに押し出される押し出し抵抗によるものかどうかを確認するため図-5(c)に示すように止水材の外周に紙やすりを張付けて硬質ゴムシール材とフランジ間を粗面にした実験も行った。さらに、同図(d)に示すように押し出し抵抗と接面応力を併用した場合止水能力はどうなるかも調査してみた。上述の実験にはすべて一枚型の硬質ゴムシール材を使用した。

注入材のリーク防止として実際に使用されている硬質ゴムシール材は図-1に示したように二枚合わせとなっている。そこで、実際の目詰め材の構造に近い図-5(e)に示す二枚合わせの硬質ゴムシール材を使用した場合の止水実験を行い一枚型との比較も行ってみた。

3. 硬質ゴムシール材の限界止水圧

これまでの研究で押し出し抵抗による新しい止水のメカニズムを見いだした。本研究はさらに研究を進め目詰めゴムシール材のような硬質ゴムでも押し出し抵抗による止水機能があるかどうかを調べた。

図-6 初期接面応力と限界止水圧

(1) 接面応力による硬質ゴムシール材の限界止水圧

最初に押し出し抵抗による硬質ゴムシール材の限界止水圧を評価するためシールドトンネルセグメント間の止水法に用いられている従来の接面応力による限界止水圧のデータも必要と考えた。前述の実験方法で説明したように図-5(a)に示すようにフランジの止水溝の外周に止水材を設置し、その後ボルトを締め付けて接面応力を大きくして止水実験を実施した。使用したゴムの材質は表-1に示す硬質ゴムシール材T0と同じである。結果を図-6に示す。

図に示されるように初期接面応力に比例して限界止水圧も大きくなっている。この実験の最大初期接面応力(P_i)が1.5MPaの時の限界止水圧(P_w)は、約3MPaであった。同図の測点から初期接面応力と限界止水圧の関係を最小2乗法で求めた回帰直線が同図の実線である。相関係数 R は0.923となった。実際に使用されている色々な定形止水材の初期接面応力と限界止水圧の関係は文献7)で詳しく調査されている。その関係は次の式(1)のように1次関数で示される。この関数の勾配を示す β の値は1.3～2.7でその平均値は2となっている。この β は止水能力を表す。

$$P_w = \beta \cdot P_i \quad (1)$$

P_w : 限界止水圧(漏水時作用水圧)

β : 定数(1.3～2.7)

P_i : 初期接面応力

本実験の硬質ゴムシール材を定形止水材として使用した場合、 β は図-6に示す直線の勾配となり1.9となる。したがって、その止水能力は文献7)に示される実際に使用されている定形止水材の平均的な β の値となる。

(2) 硬質ゴムシール材の形状および設置条件と押し抵抗による限界止水圧

本研究は硬質ゴム材の止水機能を見るため硬質ゴム材の厚さを3.1mm～10.1mmに変えたリング状の硬質ゴムシール材を作製した。この硬質ゴムシール材を図-4(b)に示した止水試験装置の止水溝に設置し、止水試験機の止水溝の高さと硬質ゴムシール材の高さの組み合わせによって目開きを1mm～5mmまで変化させて限界止水実験を行った。次にその結果を述べる。

a) 目開きと限界止水圧

最初に目開きと止水能力を検討してみる。代表例として硬質ゴムシール材の厚さ t 5.1mmを使用して目開きを変えた実験結果を図-7に示す。この場合に使用した止水試験機の溝の深さは10mmで硬質ゴムシール材の高さは11mm, 13mm, 15mmの3種類である。それぞれの目開き H_1 は1mm, 3mm, 5mmとなる。図-7に示すように、限界止水圧は目開き H_1 に逆比例して大きくなる。目開き5mmで約9MPa, 目開き1mmで約35MPaの限界止水圧を示す。前節(1)の接面応力による止水方法での最大限界止水圧は約3.5MPaあった。今回の実験のように目開きを閉塞するように硬質ゴムシール材を設置することで初期接面応力がゼロでも大きな限界止水を得る事ができる。ただ、水圧が作用した場合、ゴム弾性変形によって上下フランジと硬質ゴムシール材間にも接面応力は生じる。いま、図-8に示すように作用水圧を P_a 、これに直角方向に生ずる接面応力を P_R 、ゴムのポアソン比を ν とする。また接面方向のひずみ ϵ_R はフランジで拘束されるのでゼロとなる。この条件で簡単のため2次元状態でその関係を求めると $P_R = \nu P_a$ となる。これより硬質ゴムシール材が完全弾性体($\nu=0.5$)でも接面応力は限界水圧以上にはならない。また、限界止水圧は一定でなく図-7に示すように目開きの大きさに影響される。したがって、止水のメカニズムは文献4), 5)で述べた押し抵抗によって発揮されていることを推定できる。限界止水圧に至る直前の目開きを観察すると硬質ゴムシール材がわずかに変形して目開きに押し出される様子が見られた。ただし、図-8に矢印で示した作用水圧方向のフランジ面と硬質ゴムシール材間には作用水圧以上の圧力が生ずることも考えられるのでこれについては次に述べる。

b) 硬質ゴムシール材を粗面にした限界止水圧

図-8に示されるように作用水圧を示した矢印方向の硬質ゴムシール材とフランジ外周面間の接面応力は、次の理由で作用水圧より大きくなっていることが推測される。硬質ゴムシール材(フランジ止水溝)の外周面積 A_r 、これに作用する水圧 P_a 、硬質ゴムシール材に接している目開きの面積 a 、硬質ゴムシール材とフランジ間の接面応力 P_c とすれば、 $P_c(A_r - a) = A_r \cdot P_a$ の関係となり、これより、 $P_c > P_a$ の関係を得る。フランジと硬質ゴムシール材間の

図-7 目開きと限界止水圧 (硬質ゴムシール材T0)

図-8 作用水圧によって生ずる接面応力

(a) 硬質ゴムシール材 $t=10\text{mm}$ $H_0=15.6\text{mm}$

(b) 硬質ゴムシール材 $t=5\text{mm}$ $H_0=15.6\text{mm}$

図-9 設定条件を変えた限界止水圧

接面応力は作用水圧より大きくなり、これによって止水能力を発揮していることも推定できる。そこで図-5(c)に示すように接面応力が発生しないように止水溝の外周に紙やすり(A-60)を張付けその限界止水圧を調査した。また、実際の場合、セグメントはセメントコンクリートで造られている。実験で使用している鋼製のフランジのように平滑でない。フランジの止水溝外周に紙ヤスリをはりつけた状態が実際の現状に近いモデルとも考えられる。

実験の結果を図-9(a)に示す。同図の材料No.T1(0)-Cがその結果である。同図No.T1(0)は紙やすりのない場合である。なお、T1の()内の添え字は締付けボルトのトルクの大きさである。この場合締め付けは行っていない。双方の目開きは5.6mmである。両図を比較すると紙ヤスリの有無にかかわらずこの限界止水圧はほぼ等しい。この結果からフランジと硬質ゴムシール材間を粗面にして作用水圧方向の接面応力が生じないようにしても硬質ゴムシール材は適度な弾性を持っているので、作用水圧によって変形して目開きを閉塞し止水性を発揮しているものと推測できる。したがってその限界止水圧は、目開きに押し出され破壊した時が限界止水圧となる。この推論を補足するため、弾性率がゴム材に比較して100倍以上大きいステンレス製(表-1のNo.T3)のシール材で止水実験を行ってみた。その結果、限界止水圧はゼロで、目開きを閉塞できない場合は止水機能を発揮できない事がわかった。

c) 接面応力と押し出し抵抗を併用した場合の限界止水圧

硬質ゴムシール材と上下フランジ間に接面応力を作用させた状態で押し出し抵抗を利用した止水を行った場合、接面応力によって止水能力がさらに付加されるかどうかはまだ確認されていない。これを確かめるため図-5(d)に示すように締付けボルトによってフランジと硬質ゴムシール材間に接面応力を生じさせてこの場合の限界止水試験を行った。締付けボルトは、2.5kN・mのトルクになるまで締付けた。使用した硬質ゴムシール材の形状と物性は表-1の材料No. T1, T2である。この方法で行った実験結果を評価するため、同じ寸法と材料で実施した初期接面応力をゼロとした時の限界止水圧を示した前述の図-9(a), (b)に並べて示す。同図(a)は厚さ(t) 10mm, 同図(b)が5mmの硬質ゴムシール材を使用した実験結果である。

硬質ゴムシール材の高さ(H_0)は双方とも同じで15.6mmである。また止水試験機の溝の深さは10mmである。締付けボルトをトルク2.5kN・mで締付けた時の接面応力の大きさや目開きは表-2にまとめて示してある。図-9(a), (b)に示すT1(2.5) およびT2(2.5)が接面応力を設定した場合の実験結果である。なおT1, T2の()内の添字はトルクの大きさを示す。この結果と接面応力がゼロのT1(0), T2(0)と比較すると接面応力を設定した場合の限界止水

表-2 実験開始時の硬質ゴムシール材の状態

材料No.	トルク R (kN・m)	厚さ t (mm)	接面応力 Pc (kPa)	目開き H1 (mm)
T1	T1(0)	0	0	5.6
	T1(2.5)	2.5	568	4.9
T2	T2(0)	0	0	5.6
	T2(2.5)	2.5	1081	2.8
T4	T4(0)	0	0	5.2

図-10 ダイスから押出される金属の模式図

圧は大きくなっている。ただ、接面応力を発生させるため締付けボルトを締付けることで表-2に示すように目開き(H_1)は小さくなっている。したがって、この限界止水圧の増加は接面応力によって目開き(H_1)は小さくなるのでこの影響による押し出し抵抗で止水圧が大きくなったのか、押し出し抵抗に接面応力による止水圧が付加されて止水圧が大きくなったのかここでは判断できない。これについては押し出しの式をベースにした準理論式で検討する。なお、T1(2.5)およびT2(2.5)止水材の初期接面応力は表-2に示すようにそれぞれ0.568MPa, 1.081MPaである。初期接面応力のみで止水した場合の限界水圧を本実験で得られた $\beta=1.9$ を使用して式(1)から推定してみる。その大きさは1.08MPaおよび2.05MPaとなる。

(3) 準理論式で整理した硬質ゴムシール材の限界止水

硬質ゴムシール材単独での止水能力を見るため硬質ゴムシール材をフランジ型止水実験装置に設置して止水溝の形状および目開きを変えてその限界止水圧を測定した。結果として3章(2)で考察したように限界止水圧は押し出し抵抗によるものと推定された。この押し出し抵抗による限界止水圧は目開きが同じでも止水材の形状で異なることは文献4)で検討され、目開きと限界止水圧は、連続的な関数で表すことができなかった。そこで、図-10に示すダイスから押し出される金属の押し出し理論式⁸⁾(2)をベースに限界止水圧を求める準理論式(3)が得られた^{4),5)}。

$$P_e = Y \log_e \frac{A_0}{A_1} \quad (2)$$

P_e : 押し出し力, A_0 : A-A断面の断面積

A_1 : B-B断面の断面積, Y : 伏応力

$$P = -b + 2.3a \cdot \log_{10} \frac{H_0}{H_1} \quad (3)$$

P : 限界止水圧(MPa), a, b : 係数,

H_0 : 止水材の高さ(cm) H_1 : 目開き(cm)

この式(3)は目開きや止水材の高さなど止水材の形状が変わっても限界止水圧を連続的に表示できる。柔らかい注入式止水材に適用した式(3)を本実験結果にも適用できるかどうかを最初に検討した。No.T0止水材を使用した実験結果を硬質ゴムシール材の厚さ(t)別に図-11(a), (b), (c)に示す。それぞれの厚さは同図(a)が3.1mm, 同図(b)が5.1mm, 同図(c)が10.1mmである。図の横軸は硬質ゴムシール材の高さ(H_0)と目開き(H_1)の比(H_0/H_1)を取り縦軸は限界止水圧である。同図(a), (b), (c)に示す実線は最小2乗法で整理した回帰曲線である。硬質ゴムシール材は文献3), 4)で調査した注入式止水材に比べ約50倍強度が大きい。最初に同図(a)を見てみると、硬質ゴムシール材の限界止水圧も柔らかい注入式止水材に適用した式(3)で連続的に整理できることがわかった。その相関係数 R は0.92であった。同図(b), (c)は測点を表示しないで回帰曲線のみ示してある。これは、凸や凹型の止水溝(図-4(b)の(5)(6))、二枚合せの硬質ゴムシール材や接面応力を作用させた場合の止水能力を評価するときその測点と重複し図が煩雑なるのを避けるための配慮である。それぞれの回帰曲線の相関係数 R は、同図(b)で0.90, 同図(c)で0.96と同図(a)と同様に高い相関性で整理ができた。式(3)が硬質ゴムシール材にも適用できる事がわかったので次に止水溝の形状や接面応力の影響を検討した。最初に図-4(b)の(5)(6)に示した止水溝に凸や凹を付けた場合、限界止水圧にどのような影響を与えるかを調べてみる。この凸や凹を設けた止水溝に厚さ(t)5.1mmおよび10.1mmのT0止水材を設置した。その止水実験結果の測点を図-11(b), (c)に示す。それぞれの図に示される□印は凹止水溝, △印は凸止水溝の結果である。この図に示されるようにそれぞれの測点は実線で示される回帰曲線に沿っており特別な優位性または劣勢は見られない。したがって、図-4(b)の(5)(6)に示すように止水溝に片側10° 以内のテーパを付けても止水能力に大きな影響はないと推定できる。続いて締付けボルトで硬質ゴムシール材を締付けて初期接面応力を設定した場合の止水能力の評価をしてみる。実験結果は前述の図-9(a), (b)に示されるように初期接面応力を作用させた場合、限界止水圧は増加した。ただ、この場合では、初期接面応力によって目開き(H_1)は小さくなるので、その影響によるのか、押出し抵抗に初期接面応力による止水圧が付加されたのか判断ができなかった。そこでこの場合の H_0/H_1 を求め、厚さ5mmのT2(2.5)の限界止水圧は◆印で図-11(b)に、厚さ10mmのT1(2.5)の限界止水圧は同図(c)に◇印でプロットした。 H_0 は締め付け後の硬質ゴムシール材の高さで H_1 はその時の目開きである。同図(c)の◇印はT(2.5)-Cの測点◆印と重なって見えないが、結果は、同図(b)(c)に示すようにそれぞれの実線で描いた回帰曲線にほぼ一致した。参考までに、同じ硬質ゴムシール材で接面応力ゼロのT1(0), T2(0)および

(a) 硬質ゴムシール材厚さ $t=3.1\text{mm}$ (b) 硬質ゴムシール材厚さ $t=5.1\text{mm}$ (c) 硬質ゴムシール材厚さ $t=10.1\text{mm}$

図-11 硬質ゴムシール材の限界水圧

紙やすりを図-5(c)のように取り付けたT1(0)-C またこの状態で接面応力を作用させたT1(2.5)-C のデータもプロットしてある。これらの測点は、限界止水圧の大きさは異なるが H_0/H_1 で整理したT0硬質ゴムシール材の回帰曲線にほぼ一致する、この結果、図-9に示した接面応力を作用させたT1(2.5), T2(2.5)硬質ゴムシール材の限界止水圧の増加は、目開きが小さくなった影響と考えられ、接面応力によって止水能力が新たに付加されたものでないことが推定できる。したがって、押出し抵抗を利用した止水方法に接面応力を併用しても単に目開きを狭くするだけで、接面応力の付加による止水能力の増加は小さいと推測できる。なお、T1, T2材料の厚さ(t)はT0に比較して0.1mm薄くなっているがデータの傾向を見るためには大きく影響しないと判断した。最後に、二枚合せの硬質ゴムシール

材を検討してみる。形状と物性は表-1に示す材料No.T4である。実験結果を図-11(c)に×印で示す。図に示されるように限界止水圧は21~23MPaで回帰曲線のやや下方にプロットされるが一枚型の硬質ゴムシール材から求めた回帰曲線にほぼ等しい。この二枚合せの硬質ゴムシール材が限界水圧になるときの状態を観察すると、一枚型硬質ゴムシール材と同様で、目開きから硬質ゴムシール材の一部が押し出されて止水能力を失う。二枚合せの合せ目からの漏水はなかった。これは重要なことなので何度も確認した。これより、二枚合せの硬質ゴムシール材の合わせ目は止水機能の障害とならないものと判断できる。

4. 限界止水圧の予測と準理論式の適用性

金属の押し出し理論式(2)をベースに限界止水圧を求める準理論式(3)が得られた。この準理論式(3)は、押し出し抵抗を利用した限界止水圧と目開きの関係を連続的に示すことが可能であった。したがってこの準理論式(3)の係数 a , b 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である。そこで、式(2), (3)の関係を見てみると係数 a は式(2)の降伏応力 Y に関連していることが推測できる。準理論式(3)は図-11(a), (b), (c)に示す硬質ゴムシール材から文献5)で報告した柔らかい注入式止水材まで適用可能であった。参考までに文献5)に示した実験結果を図-12に再表示する。準理論式の係数 a の傾向を把握するため図-11, 図-12の回帰曲線の係数 a をまとめて表-3に示す。この表には係数 b および回帰曲線の精度を表す相関係数 R も同時に示す。係数 a は降伏応力との関連性が強いことが推定されたので、次の式(4)で単純に硬質ゴムシール材の引張り強さまたは目詰めシール材と注入式止水材を併用の場合はその合計引張り強さ P_t を求めた。

$$P_t = t_1 \times 0.01 \times P_{t1} + t_2 \times 0.01 \times P_{t2} \quad (4)$$

P_t : 引張り強さ(N), t_1 : 硬質または目詰めゴムシール材の厚さ(m), t_2 : 注入式止水材の厚さ(m), 0.01: 硬質ゴムシール材および注入式止水材の奥行(m),

P_{t1} : 硬質ゴム(目詰め)シール材の引張り強度(kPa)

P_{t2} : 注入式止水材の引張り強度(kPa)

式(4)で求めた引張り強さを表-3に示す。また係数 a とその引張り強さの関係を示したのが図-13である。この図には、文献4)で報告した注入式止水材のみの場合の係数 a も示してある。この図に示されるように係数 a と引張り強さには相関性がある。その関係は次の式で表わされる。

表-3 硬質ゴムシール材と係数

シール材の種類	シール材の厚さ t (mm)	係数 a	係数 b	引張り強さ P_t (N)
硬質ゴム	3.0	17.7	11.1	182.0
硬質ゴム	5.0	16.8	2.6	304.0
硬質ゴム	10.0	24.3	0	608.0
目詰め+注入式	2.0	10.7	13.3	140.0
目詰め+注入式	1.5	6.4	7.51	108.0
目詰め+注入式	0.5	3.31	4.12	78.0
注入式	*20.0	3.65	5.95	18.6

注) 目詰め: 目詰めシール材 硬質ゴム: 硬質ゴムシール材

* 注入式止水材の厚さ t 注入式: 注入式止水材

図-12 目詰めシール材と注入式止水材を併用した限界止水圧⁵⁾

図-13 係数 a とシールの引張り強さ

図-14 係数 b とシール材の引張り強度

$$a = 15.9 \log_{10}(P_t) - 21.9 \quad (5)$$

a : 係数 P_t : 引張り強さ(N)

その相関係数 R は0.89であった。本実験範囲での止水材の引張り強さは、約20～600Nの範囲である。本実験の止水材料に限定すれば係数 a の予測に式(5)が使用できると考える。ただ、硬質ゴムシール材の材料が異なれば式(5)の関係も変わるかもしれない。今後のいろいろな異なる材料で式(5)を検証する必要がある。今後調査しなければならない課題と考える。次に係数 b について検討してみる。この係数 b は理論式(2)に考慮されない条件を補足する値と考えられる。理論式(2)は、前述の図-10に示すダイスから金属を押出すエネルギーと押出された金属のエネルギーは等しいと考えている。そこでこの式(2)で考慮されていない条件を整理してみた。

- 1) 押出し金属は均一であるのに対し本研究のシール材は、目詰めシール材と注入止水材などの組み合わせがあり均一ではない。
- 2) 押出し金属とダイス間の摩擦は考慮されていない。本研究の場合もダイスの幅広い部分に相当する止水溝とシール材間に摩擦を生じると考えられるが考慮されていない。またシール材の厚さは0.5～20mmまで変化し止水溝との摩擦はそれぞれの厚さで異なる。
- 3) 押出し金属はダイスの狭いスリット方向に横変形を伴って押し出される。この変形のエネルギーは考慮されていない。シール材も同様に形を変えて目開きから押し出されるのでこの変形のエネルギーは考慮されない。

以上から係数 b は理論式(2)に考慮されていない上述の条件を補足する値と考える。この推測から上述の1)～3)と係数 b には関連性があると考え、2)を参考にシール材の厚さと係数 b の関係をプロットしてみた。結果は統一性のある関係は得られなかった。1), 3)においても係数 b との関連性を結びつける手法は現在見出せなかった。そこで係数 a のように止水材の引張り強さ P_t に関連あるのではないかと考えその関連を調べてみた。結果を図-14に示す。図に示すようにその関係はベル型となった。ただ、その理論的な把握はまだできていない。実務を重視すれば係数 a と同じ引張り強度で整理した図-14は係数 b を予測する手段になると考える。今回の使用止水材の引張り強さ P_t は約20～600Nの範囲である。この範囲での係数 b の値は0から15まで変化した。係数 a および b の評価については今後さまざまな材料を使用した止水実験でデータを積み重ねその特性を把握する必要がある。なお、この係数 a , b の予測に関しては文献4), 5)でも行っている。文献4)では注入式止水材に対する係数 a を予測するため係数 a を導入して $a = a P_n$ とした方法で予測した。 P_n は引張り強度(MPa)である。また文献5)では薄い目詰めゴム

シール材と注入式止水材を併用した場合の係数 a の予測を金属がダイスから押し出される変形領域を参考にして予測をした。しかし、これらの方法は止水材の単位面積当たりの強さを利用して係数 a を予測する方法であった。

この場合注入式止水材の厚さは大きく変化しなかった。今回の硬質ゴムシール材のようにシール材の厚さが大きく変わる場合は引張り強さ P_t も大きく変わるので、単位面積当たりの引張り強さで係数 a を予測するのは困難である。これに対し今回の引張り強さを利用した式(5)の予測法は文献4), 5)の係数 a の予測も可能で予測法の汎用性が改善されてきているものとする。

5. 実際の目詰めゴムシール材の限界止水圧

本研究は、硬質ゴムシール材でも押出し抵抗機能を発揮し、接面応力によらない止水ができる事を明らかにした。注入式止水材を用いた実際のシールドセグメントの構造は前述の図-1に示すような構造となっている。止水溝の上下両端にある二枚合わせの目詰めゴムシール材は注入式止水材がゲル化するまでのリーク防止の目的で設置されている。しかしこの目詰めゴムシール材はセグメント間に目開きが生じた場合、目開きを塞ぐように設置されているので本実験で行った硬質ゴムシール材と同じ働きを持っていることが推定できる。そこで、この目詰めゴムシール材が目開きを塞ぎ押し抵抗を発揮した場合のその止水能力を推定してみた。ただ本実験の止水試験で用いた硬質ゴムシール材の断面は一枚型で矩形となっているのに対し実際の二枚合わせの目詰めゴムシール材はセグメント継ぎ目方向に先端が鈍角となっている。この違いの影響の一端を見るため、前述のテーパーを持った止水溝や二枚合わせの硬質ゴムシール材による実験を行った。結果として、テーパーがある場合とない場合および二枚合わせと一枚型の硬質ゴムシール材では、3章で述べたようにほぼ同じ止水能力があることが調査された。このことを考慮して今回の止水実験結果から実際の目詰めゴムシール材のおおよその止水能力は把握できると考え検討してみた。計算に用いた目詰めシール材の厚さは鈍角になっている部分を無視し5mmとして検討した。目開きはシールドトンネルの限界止水圧の検討で一般に用いられている2mmとした。この場合目詰めゴムシール材の高さ H_0 はセグメントが完全に密着された場合の目詰めゴムシール材の高さ H_0 は4+4=8mmに目開き2mmを加えた10mmとなる。また、実際の目詰めゴムシール材の引張り強度は6.6MPaで本実験に使用したT0材料の6.08MPaとほぼ同じである。式(4)から硬質ゴムシール材の引張り強さを求めると

$$P_1=0.005 \times 0.01 \times 6600000 + 0 \times 0.01 \times P_2 \\ =330\text{N}$$

式(5)から係数 a を求めると

$$a=15.9\log_{10}(330)-21.9 \\ =18.1$$

また、図-14から係数 b を求めると $b=2.0$ となる。この係数 a , b を使用して式(3)から目開き $H_1=2\text{mm}$, 目詰めゴムシール材の高さ $H_0=10\text{mm}$ で式(3)から限界止水圧を求める。

$$P=-2.0+2.3 \times 18.1 \times \log_{10} \frac{10}{2} \\ P=27.1\text{MPa}$$

結果として硬質ゴムシール材が押し出し抵抗機能を発揮した場合約27MPaの限界止水圧が期待できる。しかし、当初この目詰めゴムシール材は注入式止水材のリーク防止として設置されたもので止水機能を考慮していない。

ただ、実際には目詰めゴムシール材も目開きを塞ぐように設置されているので止水能力は目詰めゴムシール材によって大きく向上するものと推測できる。この止水機能は、今後大深度地下などの開発が進んで構造物の継ぎ目間に大きな水圧が作用し接面応力による止水が不可能な個所に役立てる事ができると考える。なお、目違いが生じた場合の硬質ゴムシール材の止水実験は今回実施していない。注入式止水材を用いた目違い止水実験では文献5で実施しその結果を報告している。この場合の止水特性は注入前に生じる目違いと注入後に生ずる目違い2通りに分類できた。注入前目違いは目違いのない限界止水圧とほぼ同じであった。注入後に生ずる目違いでは止水材高さ目開きの比(H_0/H_1)が小さくなることから限界止水圧も小さくなる傾向を示した。今回の硬質ゴムシール材に目違いが生じた場合、この止水特性にもなんらかの変化が生じる事を推測できる。これについての調査は今後の課題と考えている。

6. 結論

- 1) 硬質ゴムシール材を目開きを塞ぐように設置することで押し出し抵抗を利用した止水機能を発揮させることができた。

- 2) 柔らかい注入式止水材の限界止水圧を統一的に表す準理論式は硬質ゴムシール材の限界止水圧にも適用できた。
- 3) 初期接面応力と押し出し抵抗を併用した限界止水は、初期接面応力によって目開きは小さくなるため押し出し抵抗が大きくなる。しかし押し出し抵抗は初期接面応力が付加されても大きくはならない。
- 4) 二枚合せの硬質ゴムシール材は一枚型硬質ゴムシール材と同様に目開きから硬質ゴムシール材の1部分が押し出されて止水能力を失う。二枚合せの合せ目からの漏水はない。これより、二枚合せの硬質ゴムシール材の合わせ目は止水機能の大きな障害とならないと判断できた。
- 5) 実際の目詰めゴムシール材は目開きを塞ぐように設置されているので止水機能を発揮した場合はかなり大きな止水能力を持ち合わせていることが推測できた。

謝辞：この研究は東洋大学特別研究援助成金を受けて実施した成果である。感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 福田誠, 鈴木明彦, 山下清, 江川昌男：セグメント止水材・注入工法の開発(その3), 土木学会第49回年次学術講演会概要集, pp.1228-1229, 1994.
- 3) 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.
- 4) 森 麟, 加賀宗彦：溶液型を用いた継手部の止水のメカニズムと限界止水圧, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp.135-144, 2001.9.
- 5) 加賀宗彦, 森 麟：目違いが生じた注入式止水材の限界水圧と硬質ゴムシール材の設置方法, 土木学会論文集, No.728/VI-58, pp.173-187, 2003.3.
- 6) 石田喜久雄, 阿部和毅, 福田誠, 鈴木明彦, 川村邦基, 本間昭：セグメント継手面止水工法(注入シール工法)の開発, 三井建設技術研究報告, No.19, pp.97-103, 1995.
- 7) 小泉淳, 小林享, 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.
- 8) Parson, E. and Parking, N.: *The Extrusion of Metals*, Chapman & Hall, pp.201-202, 1961.

(2010.4.9受付)

CRITICAL IMPERMEABILITY PRESSURE OF LEAK PREVENTED SEAL BY BLOCKING EFFECT

Munehiko KAGA

We have carried out the research on the impermeability of segment joint of shield tunnel used in a new water-expansion rubber material of injected type. As the result, we found a new mechanism of impermeability by blocking effect. As next step, we investigated the impermeability function of a hard rubber leak prevented seal. It can be estimated that the critical impermeability pressure rapidly increases if the hard rubber leak prevented seal has a cut-off performance by blockage effect. Consequently, we clarified that the hard rubber leak prevented seal has impermeability function by blocking effect. This result can be utilized for the development of impermeability method.