

目違いが生じた注入式止水材の限界止水圧と 目詰め材の設置方法

加賀 宗彦¹・森 麟²

¹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)

²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)

これまで注入式止水材を用いたシールドセグメント継手面の止水のメカニズムを明らかにするため限界止水圧実験を行ってきた。その結果、この限界止水圧は押し抵抗によって発揮することを見いだした。しかしながら、セグメント継手面に目違いが生じた場合の限界止水圧に関してはまだ検討されていなかった。本論文はセグメント間に目違いが生じた場合の限界止水圧についての研究を行った。結果として、目違いが生じた場合の止水能力はセグメントの組立て条件によって変わることがわかった。また、今回は目詰めシール材の設置方法によって止水能力を向上させることも見いだした。これらの結果は新しい止水方法の開発に利用できると考えられる。

Key Words: shield tunnel, water-expansion rubber material, critical impermeability pressure, blocking effect, predict, irregularity of segment joint, install of leak prevented seal

1. はじめに

大深度地下利用に関する法律が 2001 年に設定されたことで、地下トンネルだけでなく外部に公害を出さない地下処理施設など多目的な利用方法が多くの人によって提案されている。大深度地下に構造物を建設する場合の技術的な問題点の一つとして、止水技術があげられている。地下構造物に作用する土圧の大きさは一定の深さ以上では収束するのに対し水圧は深度に正比例して大きくなる。したがって、地下深度がある以上大きくなると、地下構造物におよぼす外力は、土圧より水圧の影響が大きくなる。このため地下構造物継手面の止水技術は地下構造物の安全性に大きく影響する。現在の主な止水方法は、定形止水材を構造物の継ぎ目間に設置して水圧より大きな圧力で押し付けることで、定形止水材と構造物壁面間の接面応力を大きくして止水機能を確保している。

しかし、この方法では、地下構造物が複雑になればその継ぎ手面の止水は困難となる。また、大深度になるにしたがい水圧が高くなるのでその分大きな接面応力が必要となる。接面応力は通常、締付け用ボルトを締付けることで確保する。しかし、大きな締付けはボルト近辺の

コンクリートを破壊する。また、定形止水材が大きな圧力で締付けられた場合、定形止水材は塑性変形を起こし接面応力の確保は困難となる。この定形止水材の継手面の止水に関しては、文献 1)によって詳しく研究されているが、溶液型止水材を用いた注入式止水材に関する特性はほとんど明らかになっていない。そこで、我々は数年前から、シールドトンネルのセグメントの継手面をモデル化したフランジ型の止水実験装置を作製して、注入式止水材を使用した止水方法の研究を行ってきた。その結果、ゲル化した注入式止水材が、継手面の目開きに押し出される抵抗によって止水性を発揮する新しい止水のメカニズムを見出した。これらの成果は文献 2), 3)で発表した。今回は研究をさらに重ね、継手面に目開きと目違い量が同時に設定できるように工夫した止水実験装置を作成し、目違い量も加味した限界止水圧を検討した。また、注入式止水材と簡単な目詰めシール材を併用することで、止水能力をさらに大きくすることも見出した。本論文はこれらについて報告する。この結果は新しい止水方法の開発に利用できると考えている。

表1 注入式止水材の物性

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(MPa)	—	0.196	—
引っ張り強度 Py (MPa)	0.113	0.098	0.081
含水比 W(%)	95	155	208
ゲル化時間 t (min)	2.0	2.5	3.0
測定温度 31℃			

A:主材 B:反応材

2. 使用材料および実験方法

(1) 使用材料と物性

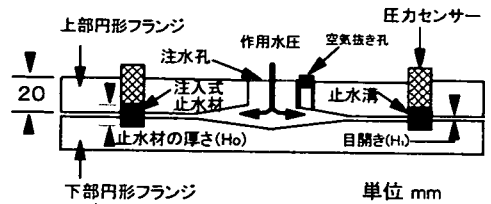
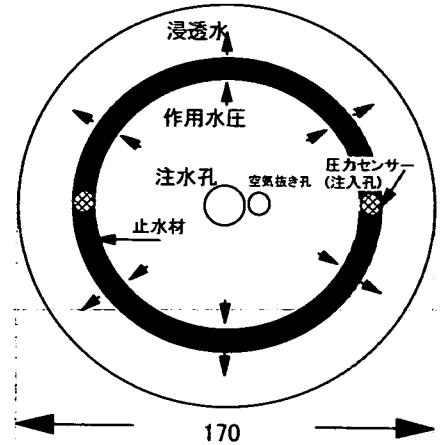
実験に使用した注入式止水材はA液とB液からなる2液混合タイプの溶液型水膨張性ゴム材である。この止水材は不定形止水材とも呼ばれているが本論文では以下、注入式止水材と呼び名を統一する。A液は水膨張性ポリウレタン高分子とゴムからなる主材で、B液は水を主体にした反応剤である。2液を混合するとゲル化しやわらかいゴム弾性体となる。その後はB液に含まれる水と反応して気泡を含みながら膨張する。その膨張量は反応剤に含まれる発泡剤によって調節できる。実験で用いたものは自由膨張量を約2倍とした。また、A液の濃度を高くすることでゲル強度を変えることができるので、本実験ではA、B液の混合比を3段階変えた。これによって、強度の異なった3種類の止水材で実験を行った。ゲル化した注入材の物性を表-1に示す。注入式止水材の含水比はA液とB液を混合しゲル化した時の含水比である。

また、引張り強度試験はJIS K-6301-1995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注入式止水材を流し込みその後、体積変化が生じないように密閉しゲル化させた。この状態で2時間養生してその後、引張り用の供試体を作製した。なお、上述の材料は文献2)と同じである。

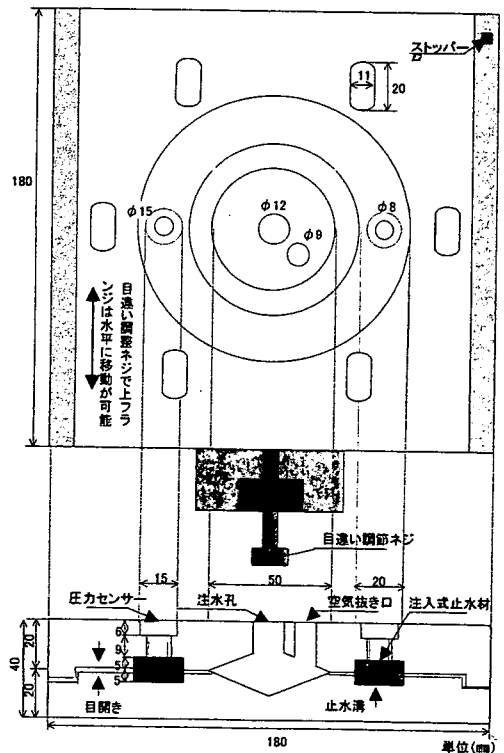
(2) 実験方法

止水実験装置の概略図を図-1(a), (b)に示す。

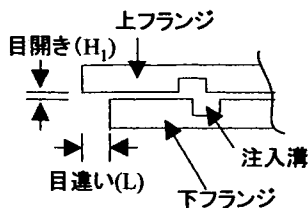
図に示すように止水溝を持った2枚のフランジで構成され、丸型タイプと角型タイプ2種類ある。丸型タイプの止水実験装置は注入式止水材を注入する止水溝があり、また上下フランジ間にスペーサーを置くことで任意の目開きを設置できるようになっている。角型タイプの実験装置は丸型と同じ方法で止水材の注入や目開きを設定できるが、さらにフランジを水平にスライドさせ目違い量



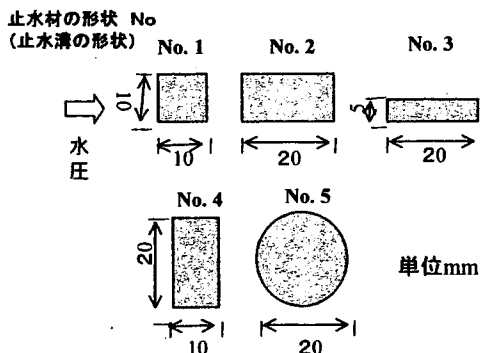
(a) 丸型タイプ止水実験装置



(b) 角型タイプ止水実験装置



(c) 目開きと目違いの模式図



(d) 止水材(止水溝)の形状

図-1 止水実験装置と止水材(止水溝)の形状

も設定できるように工夫したものである。なお、図-1(c)の模式図に示すように上下フランジ間に隙間ができることを目開きと呼び、上下フランジ間に水平なずれが生ずることを目違いと呼ぶ。注入式止水材は丸型、角型フランジ双方とも上フランジに設けてある注入孔から止水溝に注入してゲル化させた。注入孔は止水材を注入した直後に圧力センサーを取付けて密閉する。

図-1(a)に示す丸型タイプの止水溝の形は、同図(d)に示すNo.1~No.5の5種類とし縦横の大きさを変えたものおよび円形とした。この止水溝の形状は止水材の形状となる。角型フランジの止水溝の形状は、縦と横の設定方法を変えたもの2種類とし、丸型フランジのNo.2およびNo.4と同じである。注入式止水材の膨張率は図に示す圧力センサーで測定した。その最大膨張率は約294kPa(3kgf/cm²)であった。膨張率および円形フランジについての詳細は文献2)を参照されたい。目違いは、図-1(b)に示す角型フランジに取り付けた目違い調節ねじをスパナで回転させて設定する。

なお、目詰めシール材と注入式止水材を併用した止水実験も行った。この実験方法については実験結果と併用して説明したほうがわかりやすいので4章で述べる。

3. 目違いを生じた注入式止水材の限界止水圧

(1) 目開きと限界水圧

これまでの研究で、溶液型水膨張性ゴム材を用いた注入式止水材の止水のメカニズムは定形止水材とは異なることを明らかにした^{2),3)}。この止水のメカニズムを明確にするためこの研究結果を簡単に説明する。これまでシールドトンネルセグメントなどの継手面での止水は定形止水材を継手面に設置して、止水材と継ぎ手面の接面圧力を水圧より大きくして止水性を保持していた。これに対して注入式止水材は不定形止水材とも呼ばれ、ゲル化後やわらかいゴム弾性状態となる。このようなやわらかい材料は、ゴム弾性が小さいので定形止水材のように、止水材とセグメント間の接面応力を作用水圧より大きくするまで締付けて止水性を確保することはできない。

しかしながら、注入式止水材は条件にもよるが15MPa(153kgf/cm²)以上の止水性を発揮できる。したがって、注入式止水材の止水のメカニズムは、接面応力による止水のメカニズムと大きく異なる。注入式止水材はやわらかいので作用水圧によって止水材自身が目開きを閉塞して止水性を発揮する。

また、その最大止水圧は止水材が目開きに押し出される抵抗力にほぼ等しい。この押し出し抵抗によるメカニズムが明らかになったことから、金属が変形してダイスから押し出されるエネルギーと押し出すエネルギーが等しいと考えた押し出しの式⁶⁾をベースにして、注入式止水材の限界止水圧を統一的に表す次の準理論式が得られた。

$$P = -b + 2.3a \cdot \log_{10} \frac{H_0}{H_1} \quad (1)$$

P: 限界止水圧(MPa) b, a: 係数
H₀: 水圧に直角方向の止水材の厚さ(cm)
H₁: 目開き(cm)

式(1)より、限界止水圧は注入式止水材の厚さと目開きとの比(H₀/H₁)に比例することがわかる。

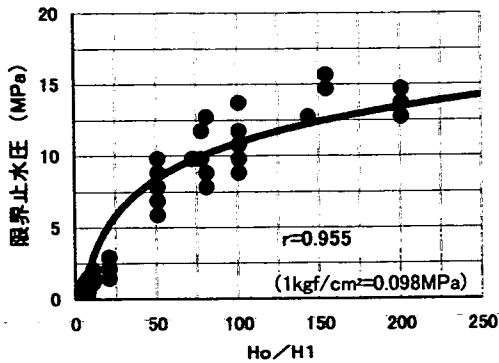
図-1(a)に示す丸型タイプの止水実験装置による実験結果を止水材の強度別に式(1)で整理したものを図-2(a), (b), (c)に実線で示す。また、式(1)の係数aは注入式止水材の強度に関連する値であることから係数αを導入し

$$a = \alpha \cdot P_y$$

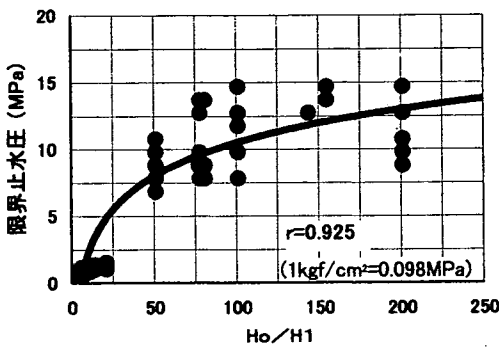
P_y: 注入式止水材の引っ張り強度(MPa)
α: 理論式に考慮されていない補正係数

と表すことができる。詳しくは文献2)を参照されたい。

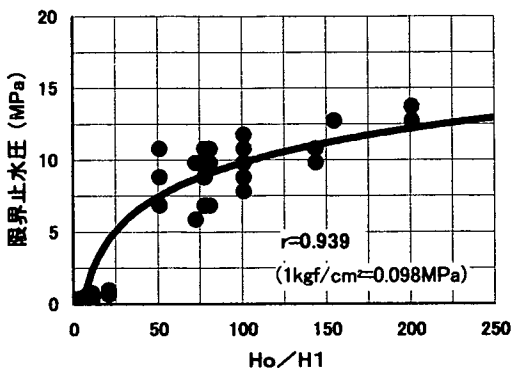
なお、同図に式(1)を適用した時の相関係数rは0.925~0.955である。実験は手押しポンプを用いポンプに設



(a) 注入式止水材 T-1 (引張り強度 $P_y=0.113\text{MPa}$)



(b) 注入式止水材 T-2 (引張り強度 $P_y=0.098\text{MPa}$)



(c) 注入式止水材 T-3 (引張り強度 $P_y=0.081\text{MPa}$)

図-2 注入式止水材の厚さ(H_o)と目開き(H_1)の比(H_o/H_1)で整理した限界止水圧

置されているメータの読み取りなのでデータも多少ばらついているが式(1)は適用できると判断した。これまでの実験結果から目開きの大きさと使用材料の引張り強度を知ることができれば、限界止水圧は予測可能である。

しかしながら、セグメントが平行にずれる目違いと呼ばれる変形が生じた場合の限界止水圧については未確認であった。次のステップとしてこの目違いについての実験を実施した。次節でこの結果について検討をする。

(2) 目違い量と限界止水圧

これまで注入式止水材を用いた止水実験でセグメント間に目違いが生じた場合の限界止水圧に関する検討は行っていなかった。そこで、セグメントの組立て時に目違いが生じた場合の限界止水圧を検討した。

注入式止水材はセグメント組み立て後に注入材を止水溝に注入しゲル化させるので、セグメントの組み立て時に目違いが生じた場合、ゲル化した止水材は目違いによる強制的な変形を受けない。これに対して、ゲル化した後に目違いが生じた場合、止水材は強制的な変形を受ける。したがって、注入前に生ずる目違いと注入ゲル化後に生ずる目違いとは止水材の変形の状態が異なる。

このため、止水能力に違いが生ずることを推定できるので、注入前に生じた目違いと、注入材がゲル化し止水能力を発揮してから生じた目違い、2通りに分けた止水実験を行った。それぞれを注入前目違い、注入後目違いと呼ぶ。注入前または注入後の目違いを検討するため、目違い量が設定できるような図-1(b)に示す角型タイプ止水実験装置を用いて限界止水圧実験を実施した。次にこの結果を述べる。

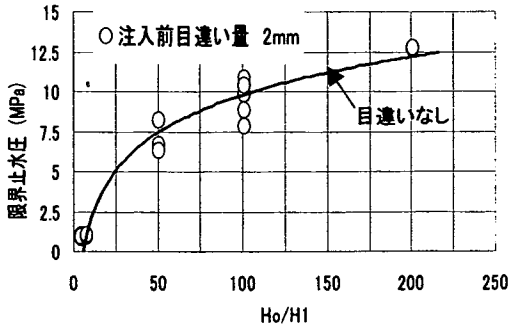
a) 注入前目違いの場合

セグメント組立て時に目違いが生じ、その後セグメント間に設けられた注入溝に止水材を注入した場合の目違い量の影響を見るため、図-1(b)に示す止水実験装置を用いて限界止水圧試験を実施した。今回は目違いに関する実験は初めてなので、2mmの目違い量で実験を行った。

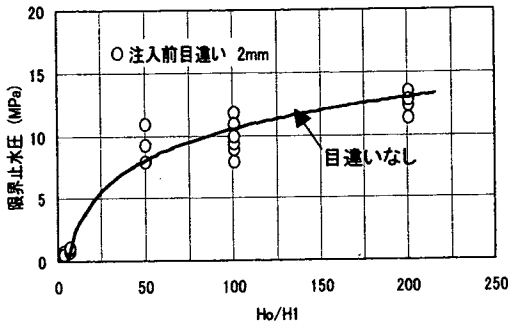
この目違い量は実際のセグメントに設定されているボルトクリアランスの約半分である。本実験で用いた注入式止水材3種類の結果を図-3(a), (b), (c)に○印で測点を示す。比較のため、前述の図-2に示した目違い量ゼロの場合の限界止水圧も同図に示してある。ただし、図が煩雑になるので図-2(a), (b), (c)に示してある回帰曲線のみを細い実線で示す。

図に示されるように注入前の目違いは目違い量ゼロの限界止水圧にほぼ一致する。注入前の目違いは目違いが生じた後に注入されるため、止水溝に目違いによる段差は生じるが、注入材は止水溝を完全に満たす事ができる。

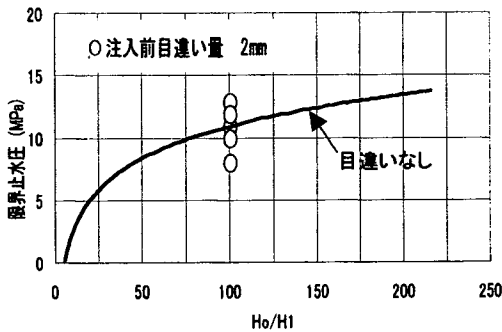
またこの止水溝が止水材の形状となり、目違いによる強制的な変形はない。注入前目違い量を模式的に描いて



(a) 注入式止水材 T-1



(b) 注入式止水材 T-2



(c) 注入式止水材 T-3

図-3 注入前目違い量と限界水圧

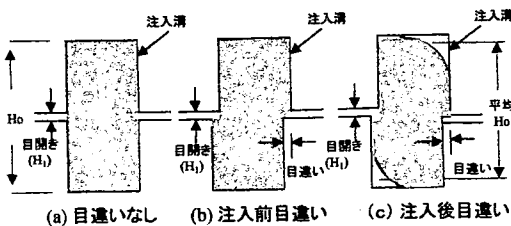


図-4 目違い量の模式図

見ると図-4(b) に示す状態が推測できる。この状態と図-4(a) に示す目違いゼロの状態を式(1)で比較検討してみると、注入前目違いは目違いが生じても注入式止水材の厚さ(H_0)に変化がない。このため、目開き(H_1)が同じであれば(H_0/H_1)の値は変わらないので、限界止水圧は同じとなり実験結果と一致する。これより、注入式の止水材は、セグメント組立てに際し目違いが生じても止水能力にほとんど影響しないものと考えられる。

一方、定形止水材は界面応力を利用して止水性を発揮する。この定形止水材の界面応力の推定法りに使用されている見かけのヤング率の算定法には、定形止水材の幅から目違い量を差し引いた値を用いている。したがって、界面応力は目違いの量に影響される。このため目違いが生ずれば止水能力は変化する。この特性は押し出し抵抗を利用した注入式止水材と比較して大きな違いがある。

b) 注入後目違いの場合

前項では注入前の目違いと限界水圧の関係を検討した。その結果、注入前に生じた目違いは、その後に注入式止水材が注入されるので、目違いによる強制的変形はない。これより注入前目違いは、限界止水圧に影響を及ぼさないことがわかった。

しかし注入式止水材がゲル化後に目違いが生じた場合は、止水材が目違いによって強制的に変形させられる。

その変形は図-4(c) に示されるようになっているものと推測される。この変形は止水能力に影響することが予測できる。これを確かめるため注入式止水材がゲル化後、2mm および 4mm の目違い量を強制的に与えた止水実験を行った。最大目違い量 4mm は各企業体のシールドトンネル耐水圧試験法で採用している 3mm よりやや大きな値である。図-5(a), (b), (c) に実験結果を示す。

この図の (a), (b), (c) は注入式止水材それぞれ T-1, T-2, T-3 を用いた結果である。図に示されるように同じ目違い量であれば式 (1) で整理でき、太い実線は目開き 2mm、やや細い実線は目開き 4mm の回帰曲線である。

また細い実線は、図-2 に示した目違いゼロの回帰曲線である。目違い量ゼロの細い実線は目違い量による限界止水圧の影響を見るための基準値となる。

これらの図から注入後の目違いによる限界止水圧を見てみると、注入前目違いと異なり、限界止水圧は、目違い量が大きくなると限界止水圧は小さくなる傾向を示す。明らかに限界止水圧は目違いの影響を受けることがわかる。

この理由を式 (1) から推測してみると、注入前目違いと異なり、止水材が目違いによって強制的に変形させられるので、限界止水圧に関連する止水材の高さ H_0 が小さくなりこれによって限界水圧は減少したものと推測できる。

この推測を検討してみるため、図-5(a), (b), (c) に示す目違い量 0mm, 2mm, 4mm 対して式 (1) を適用し

表2 目違い量の大きさと係数の変化

(a) 目違い量 0mm

No	Py(MPa)	α	a	b	Xo
T-1	0.113	32.3	3.65	5.95	5.11
T-2	0.098	36.8	3.61	6.12	5.45
T-3	0.081	42.2	3.42	5.97	5.73

(b) 目違い量 2mm

No	Py(MPa)	α	a	b	Xo
T-1	0.113	22.5	2.54	3.41	3.83
T-2	0.098	24.5	2.40	3.49	4.28
T-3	0.081	23.0	1.86	2.33	3.50

(c) 目違い量 4mm

No	Py(MPa)	α	a	b	Xo
T-1	0.113	19.0	2.15	2.65	3.43
T-2	0.098	21.3	2.09	3.09	4.39
T-3	0.081	20.6	1.67	2.57	4.66

た回帰曲線から α , a, およびbを求め整理したのが表2である。aと α の関係は $a = \alpha \times Py$ である。この表には回帰曲線がX軸を切る点Xoも求めて示してある。

最初に表-2(a), (b), (c) に示したXoの値を見てみると、その範囲は3.4~5.7で、Xoの平均値4.55からの差は1.45である。

本実験のHo/H1の最大値は210なので、これより、Xoの値を巨視的に見れば、ほぼ一定と考えることができる。

式(1)から係数bは $b = 2.3a \cdot \log_{10} Xo$ で求められ、bはaとXoの関数となる。本実験でのXoは概略的に一定と考えることができるので、係数bの値は係数aの値で決まる。したがって、式(1)は次のように表すことができる。

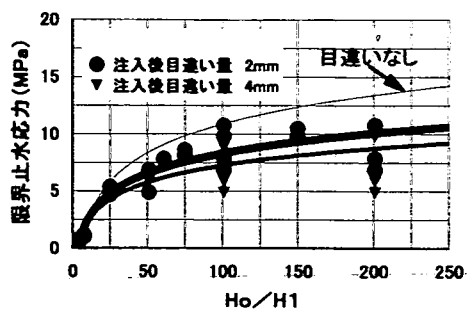
$$P = 2.3a \cdot \log_{10} \frac{Ho}{H_1 Xo} \quad (2)$$

この式はXo点を固定点とした係数aに比例した曲線で表示される。これより、係数aの大きさで、目違が生じた場合の止水能力を評価することができる。この、係数aで目違いの影響を検討するため、式(2)の係数aを a_0 として目違いゼロの限界水圧を表すとし、目違が生じた場合の限界水圧のaの記号を変えて次の式で表す。

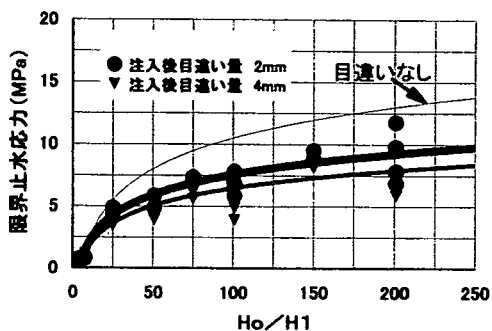
$$Pi = 2.3a_i \cdot \log_{10} \frac{Ho}{H_1 Xo} \quad (3)$$

Pi : 注入後目違の限界止水圧(kPa)

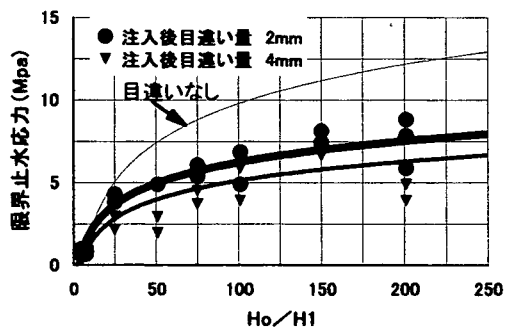
a_i : 注入後目違の係数a



(a) 注入式止水材 T-1



(b) 注入式止水材 T-2



(c) 注入式止水材 T-3

図5 注入後目違いと限界止水圧

式(2)と(3)の比は一定となり β で表すと $\beta = a_i/a_0$ となる。 $a_i = a_0 \cdot \beta$ と変形して式(3)に代入すれば

$$Pi = 2.3a_0 \cdot \log_{10} [Ho / (H_1 Xo)]^\beta \quad (4-1)$$

と表すことができる。止水溝の止水材は目違いによって図-4(c)のような変形を受けると考えられるので、平均的なHoは図に示すように小さくなる。Hoが小さくなることで、限界止水圧は減少するものと考えられる。しかし、

目違い量が生じた場合でも式(4-1)では H_0 を用いおり H_0 は変わらないので、係数 β はこれを補完する係数と考えられる。

止水材の種類別にこの係数 β の値を目違い量(L)で整理したのが図-6(a), (b), (c) である。図に示されるように β の値は目違い量が大きくなるにしたがい小さくなる。

この係数 β を次のように示すと式(1)の補正係数と考え

$$P_i = 2.3a_0 \beta \cdot \log_{10}[H_0/(H_1 X_0)] \quad (4-2)$$

られ目違いが生じた場合の近似的な減少率を表す係数として扱うこともできる。

したがって、式(4-1)の限界止水圧は目違い量が大きくなると限界止水圧も小さくなる。

今回の実験範囲で β の最小値は、最も弱い止水材 T-3 で目違い量 4mm の時、約 0.5 であり、この場合の限界止水圧は目違い量ゼロの限界止水圧の約 50% となる。

この係数 β は図-6に示したように目違い量(L)で整理でき、回帰曲線を求めると次ぎの 2 次関数で表すことができた。

$$\beta = X_1 L^2 - X_2 L + 1 \quad (5)$$

L:目違い量(mm)

今回の実験結果を示した図-6(a), (b), (c) に式(5)を適用した場合の相関係数は 1 となった。

また、式(5)の係数 X_1 , X_2 は、止水材の引張り強度 P_y に関連しているので、 P_y との関連性をみたのが図-7である。図に示すように P_y の値に逆比例しており、その関係は次ぎの 1 次関数で表すことができた。

$$X_1 = 0.81 P_y + 0.11 \quad (6-1)$$

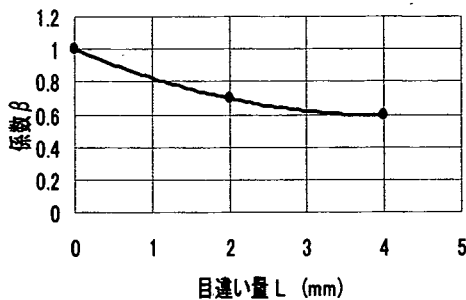
$$X_2 = 0.43 P_y + 0.65 \quad (6-2)$$

本実験材料に限定すれば、注入式止水材の引張り強度 P_y を式(6-1), (6-2)に代入することで係数 X_1 , X_2 を求めて係数 β を予測することが出来る。今後、いろいろな止水材で、 X_1 , X_2 と P_y の関係を求めておくことで止水材の引張り強度(P_y)から目違い量による限界止水圧の減少率を表す係数 β を予測することは可能である。

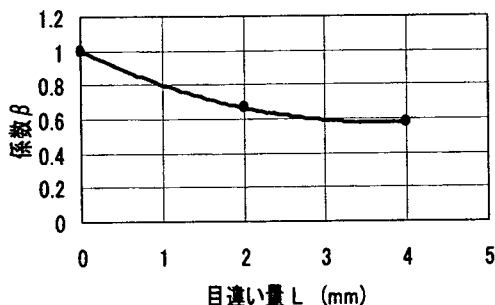
なお、目違いが生じない限界止水圧の予測については文献 1)を参照されたい。

4. 目開き部に目詰めシール材を併用した場合の限界止水圧

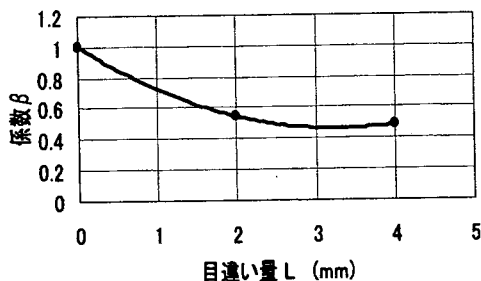
注入式止水材を用いた実際のシールドセグメントは、図-8に示すような構造となっている。なお、この図は文



(a) 注入式止水材 T-1



(b) 注入式止水材 T-2



(c) 注入式止水材 T-3

図-6 目違い量と係数 β

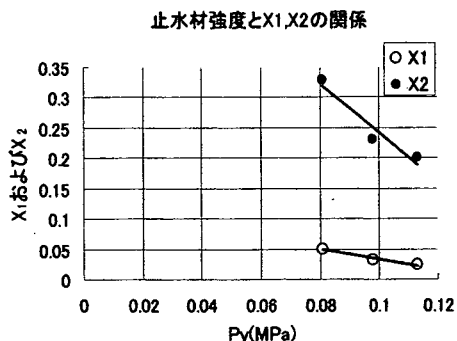


図-7 止水材強度と X_1 , X_2 の関係

献 4)の詳細図を模式図に描き直してある。

図-8に示すように、セグメントの継目間に設けられた注入溝の上下両端には2枚の硬質ゴムの目詰りシール材と呼ばれるゴムが設置されている。締め付けによってセグメント間の目開きがゼロの場合、目詰りシール材は5mm(2.5mm×2枚)圧縮される。この目詰りシール材の目的は注入式止水材として用いている溶液型水膨脹性ゴム材がゲル化するまでのリーク防止である。しかしながら、論文2)で明らかにしたように、注入式止水材の限界水圧は、止水材の厚さが一定なら目開きに逆比例する。したがって、目開きを小さくすることで止水機能を高くすることができる。

目詰りシール材は目開きを小さくする機能も持ち合わせていることも考えられる。また、これまで目詰りシール材の大きさや設置方法などについては実務的な調査にとどまり詳しく検討されていなかったので目詰りシール材の機能を調査する必要がある。そこで、目詰りシール材を単純な構造にしてその特性を段階的に明確にした方が良く考えた。この考えに従って2枚合せ型になっている目詰りシール材を図-9に示す1枚型のゴム板とした。実験は、ゴム板の設置方法と厚さを変えた止水試験を行った。

その結果、限界止水圧はゴム板の形状と設置方法によって、大幅に影響を受けることがわかった。次にこれらの結果について述べる。

(1) 薄板状ゴム目詰りシール材を用いた場合の限界止水圧

これまでの研究から限界止水圧は注入式止水材の厚さ(H_0)と目開(H_1)の比(H_0/H_1)に比例して大きくなる事がわかっている。したがって、目開(H_1)を人工的に小さくすることができれば限界止水圧を大きくでき、その結果として止水能力を向上させることができる。目詰りシール材として使用したゴム板の形状と設置方法にこの考えを取り入れ、最初に図-10(a)に示すような方法で止水実験を行った。この方法は目開き間にゴム薄板の目詰りシール材を設置した後、上下フランジを締め付け目詰りシール材との接面応力を大きくしてその後注入式止水材を注入し、限界止水圧を測定した。また注入式止水材の効果を見るため、注入式止水材を注入しないで目詰りシール材のみによる実験も行った。ただし、本実験での目詰りシール材の設置方法は単純に上下フランジ間にゴム板の目詰りシール材を設置したもので、目詰りシール材を設置するための特別な溝は設けていない。この目詰りシール材は、図-9(a)に示すような円形のゴム薄板で、厚さ2mm、幅8mmである。引張り強度は6.252MPaである。目詰りシール材の接面応力は上部フランジに取り付けた圧力センサーで測定した。実験結果の1例を図-11に示す。

この場合の目詰りシール材の初期接面応力は2.1MPa

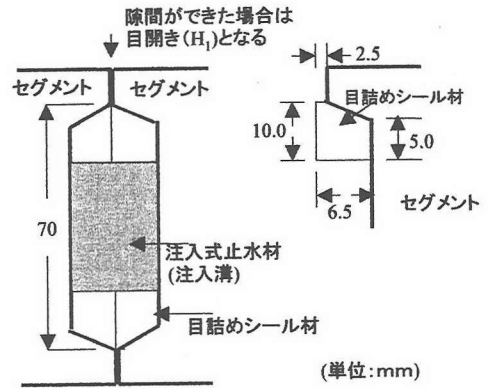


図-8 実際に使用されている注入溝と目詰りシール材の模式図⁴⁾

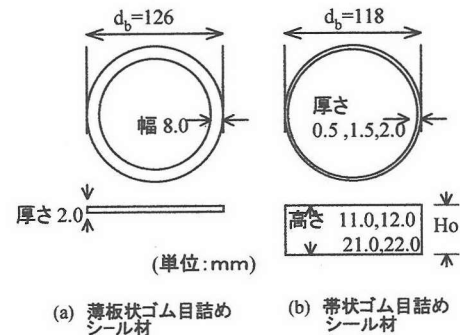
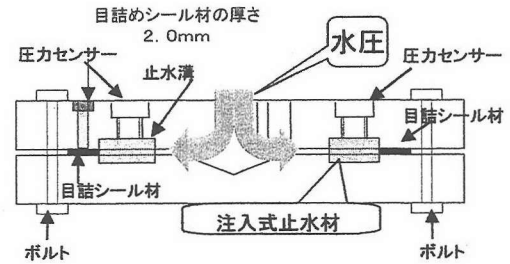
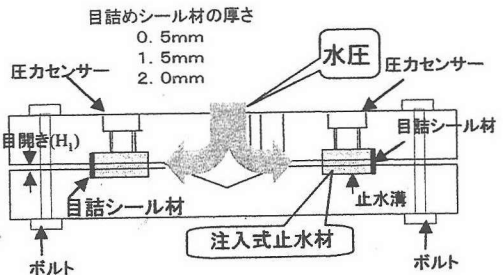


図-9 実験で使ったゴム目詰りシール材



(a) 薄板状ゴム目詰りシール材



(b) 帯状ゴム目詰りシール材

図-10 目詰りシール材を用いた止水実験

で、目詰めシール材の厚さは1.85mmとなった。図の横軸は限界止水圧まで段階的に加えた水圧で、縦軸は目詰めシール材とフランジ間の接面応力である。図に示されるように注入式止水材を用いていない目詰めシールのみでの止水および目詰めシール材と不定形止水材を併用した止水のどちらも作用水圧を増加すると接面応力も比例して大きくなる。さらに作用水圧を大きくすると双方ともある圧力で目詰めシール材が外側に押出され漏水が生じ限界止水圧となる。この限界止水圧は双方ともほぼ同じである。今回、上述のように目詰めシール材と注入式止水材を併用した止水実験と目詰めシール材単独での止水実験で、その限界止水圧はほぼ等しくなったが、限界止水圧に至るまでのメカニズムは異なるものと考えられる。

最初に図-10(a)に示す目詰めシール材と注入式止水材を併用した場合について検討してみる。注入式止水材に水圧が作用するとこの止水材は目詰めシール材方向に押し込まれようとする。目詰めシール材が完全に固定され堅牢な材料であればフランジと目詰めシール材間の目開き(H₁)はゼロなので式(1)のH₀/H₁は無有限大となり限界水圧も無有限大となる。しかしながら、目詰めシール材は目詰めシール材とフランジ間の接面応力によって生ずる摩擦で固定されている。目詰めシール材は水圧によって押し込まれようとする注入式止水材をこの摩擦で支えているものと考えられる。注入式止水材がさらに大きな水圧によって押し込まれ、この力が目詰めシール材とフランジ間の摩擦より大きくなった時、目詰めシール材は外に押出される。この時が限界水圧となる。なお、この止水実験と同じ条件の目開きが1.85mmで注入式止水材のみの限界水圧を文献2)の予測式で求めると0.6MPaとなる。

この値は目詰めシール材が設置されていない時、注入式止水材が発揮できる限界止水圧となる。目詰めシール材と注入式止水材を併用した場合の限界止水圧は上述の注入式止水材単独の限界止水圧0.6MPaを含んでいるものと考えられるが、その値は小さいので、目詰めシール材の摩擦で発揮される限界止水圧が優先になるものと考えられる。

次に目詰めシール材単独で行った止水実験を検討してみる。目詰めシール材単独で行った場合も図-11に示すように目詰めシール材の初期接面応力は2.1MPaで目詰めシール材と注入式止水材を併用した場合と同じである。

しかしこの場合の止水のメカニズムは接面応力を作用水圧が越えた場合に限界止水圧となる。従来止水のメカニズムを適用できる。したがって、目詰めシール材と注入式止水材を併用した場合と目詰めシール材単独の止水とはそのメカニズムが異なる。今回の実験で、限界止水圧はほぼ一致したが目詰め止水材と注入式止水材を併用した場合、もし目詰めシール材とフランジ間の摩擦を何らかの方法で大きくできれば、限界水圧も大きくな

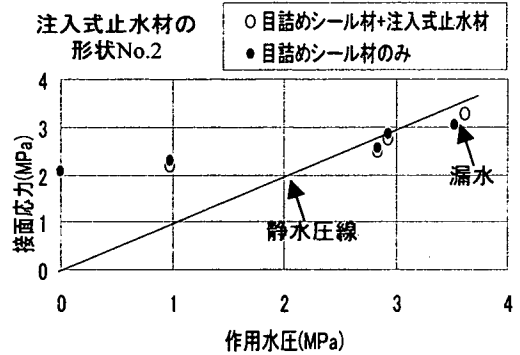
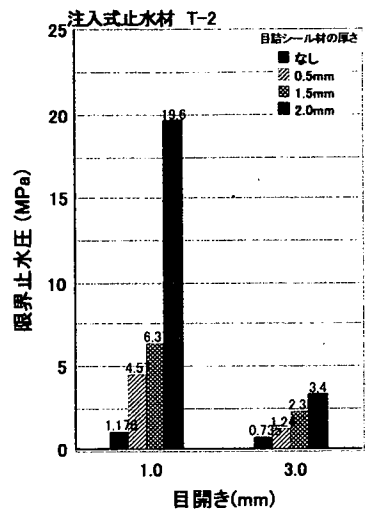
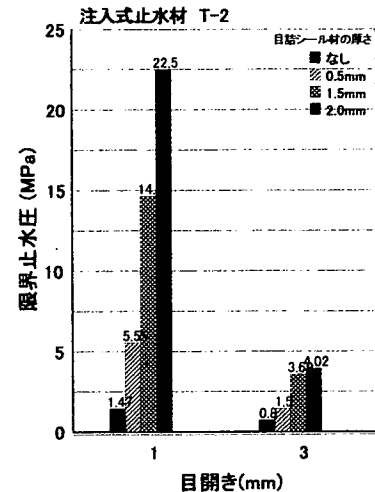


図-11 薄板状ゴム目詰めシール材を用いた限界止水圧



(a) 注入式止水材の形状 No. 2



(b) 注入式止水材の形状 No. 4

図-12 限界止水圧

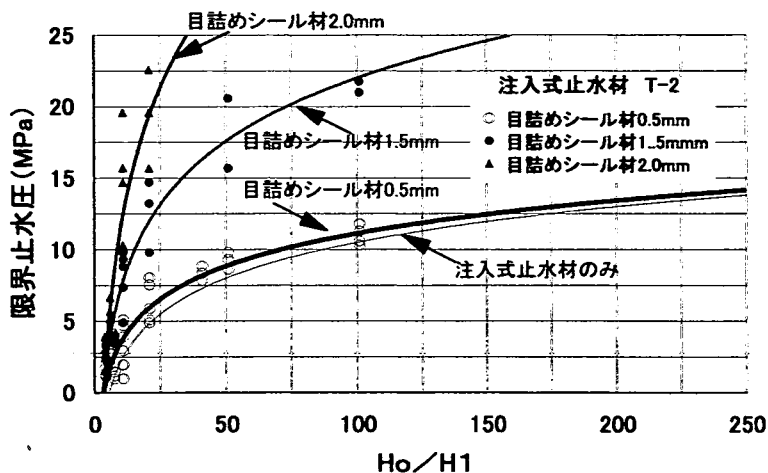


図-13 Ho/H₁で整理した目詰めシール材と限界止水圧

ることが予測できる。これに対し目詰めシール材単独の場合は界面応力で限界止水圧は決まるので摩擦を大きくしても限界止水圧は変化しないものと考えられる。したがって双方の止水のメカニズムは異なることを推定できる。

今回の実験結果から図-10(a)のような目詰めシール材の設置方法では目開きを小さくしても注入式止水材の止水機能を十分発揮させることができないので、このことから、目詰めシール材の形状と設置方法を変えた止水実験を実施した。次にこの結果について述べる。

(2) 帯状ゴム目詰めシール材を用いた場合の限界止水圧

前節 4 (1)で薄板状ゴム目詰めシール材と不定形止水材を併用した止水実験では、薄板状ゴムの目詰めシール材がフランジの外に押し出されるため注入式止水材の押し抵抗を有効に利用できなかった。そのため、ここでは前述の薄板状ゴムの代わりに図-10(b)に示すように目開き部を内側からふさぐように止水溝の外周に薄い帯状ゴムの目詰めシール材を設置し、その後注入式止水材を注入する方法で止水実験を行った。止水実験装置は丸型タイプを使用した。注入式止水材の膨張圧は文献1)と同様で98~29kPaであった。目詰めシール材の形状は図-9(b)に示す帯状のゴムリングである。厚さ(t)は0.5, 1.5, 2.0 mmの3種類を使用した。

また、目詰めシール材の高さは、図-10(b)に示す止水溝の高さ(H_0)とした。引張り強度は6.252MPaである。止水溝の形状は図-1(d)に示すNo.2, No.4の2通りで行った。目開きは1mmと3mmで止水実験を行った。その結果を、図-12(a), (b)に示す。図には目詰めシール材の影響がわかるように同じ目開き土士の限界

表-3 使用目詰めシール材と係数

No	a	b	X ₀
St-0.5	3.31	4.12	3.47
St-1.5	6.41	7.51	3.22
St-2.0	10.7	13.3	3.47

St:目詰めシール材(添え字は厚さ,mm)

止水圧を示す。

図に示されるように、限界止水圧は目詰めシール材の厚さに比例する。本実験で用いた最も厚い2mmの目詰めシール材の場合、限界止水圧は約4倍~16倍向上した。目開きがさらに小さくなれば限界止水圧はより大きくなるが、目開き1.0mm以下での限界止水圧は20MPa以上となり実験装置の能力を超えるので危険のため実験ができなかった。

なお、注入式止水材を併用しない目詰めシール材だけの止水実験では、その限界止水圧はゼロで目詰めシール材単独での止水能力はなかった。次に、図-12の表示方法では、限界水圧を連続的に表示できないので、Ho/H₁で限界止水圧との関係をプロットしその回帰曲線を求めた結果を図-13に示す。

比較のため図-2(b)に示した注入式止水材単独で行った限界止水圧の回帰曲線を細い実線で示してある。

この図でも目詰めシール材を用いると限界止水圧が大きくなることが示されている。ただ、本実験で使用した止水実験装置は、前述したように20Mpa(約200kgf/cm²)以上では危険なので実施していない。

図-13の目詰めシール材の厚さ(t)0.5, 1.5, 2.0mmを用いた場合のそれぞれの回帰曲線を見てみると、い

ずれも式 (1)が適用できることがわかる。この回帰曲線から係数 a, b および X 軸を切る点 Xo を求め整理したのが表-3である。

表-3に示す係数 a および係数 b を何らかの方法で求めることができれば、目詰めシール材と注入式止水材を併用した場合の限界止水圧を式(1)で予測できる。そこで、最初に係数 a は止水材の引張り強度に関連する値であるので引張り強度との関係を検討してみる。

前述したように図-10(b)のように目詰めシール材を設置した場合目詰めシール材単独では止水性を発揮できないが注入式止水材を併用することで、注入式止水材単独の限界止水圧に比べ大きくすることができる。

このことより、目詰めシール材と不定形シール材は複合材として止水性を発揮しているものと推測できる。

そこで止水材が目開きから押出される時の止水溝内の変形領域は目開きの大きさによってどのように変化するかを概略的にでも知る必要があると考え、図-14(a)に示すダイスから押し出される塑性材料の変形領域を求めた塑性理論式⁵⁾を用いて止水溝内の変形領域を求めて見た。止水溝の形状 No.4 で本実験の最大目開き 3mm のときが最も大きい変形領域を示した。その値は、3.8mm であった。

この変形領域は止水溝の形状や目開きの大きさで変わることもわかった。ただ、今回の変形領域の試算は完全塑性材料と考えた結果なので本実験で行った複合材にそのまま適用できないが複合材の場合でも溝の形状や目開きの大きさが変われば変形領域も変化することは推測できる。したがって目詰めシール材の厚さが同じでも止水溝の形状や目開きが変化すれば変形領域も変化すると推定される。そのため変形に伴って発揮する複合材の引張り強度も変わるので止水溝の形状が変わるたびに引張り強度を算定する必要がある。

式 (1) は止水溝の形状が変化しても係数 a は一定と考えているので引張り強度が変化すると係数 a の予測は煩雑になり実務的でない。そのため、単に係数 a を実験式で予測するのであれば係数 a に比例する数値があればよいと考えた。したがってここでは式 (1) で導入した係数 α は用いていない。そこで、図-14(b)に示すように目詰めシール材を含めた変形領域を 5mm に固定して次ぎに示すように単純に単位面積当たりの平均引張り強度(Pya)を求めた。

$$Pya = (tr \times 1.0 \times Pr + (0.5 - tr) \times 1 \times Py) / 0.5 \times 1 \quad (7)$$

Pya : 平均引張り強度

Pr : 目詰めシール材の引張り強度(6.252MPa)

Py : 注入式止水材の引張り強度(0.098MPa)

tr : 目詰めシール材の厚さ(cm)

1.0 : 奥行き 1cm

表-4 変形領域 0.5mm とした単純平均引張り強度(Pya)

止水溝No.	目詰めシール材の厚さ(tr) mm	単純平均引張り強度(Pya) MPa
No.2	0.5	0.713
および	1.5	1.944
No.4	2.0	2.560

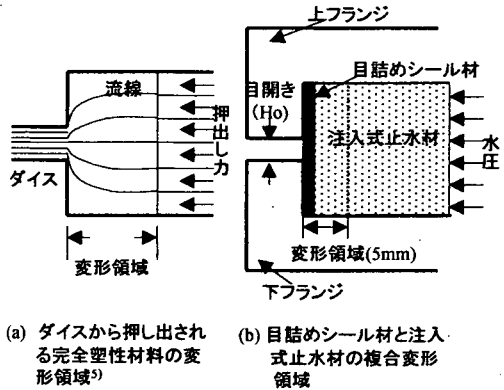
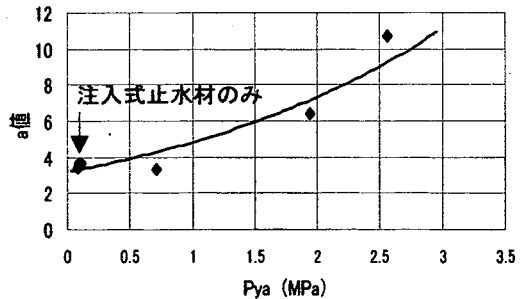
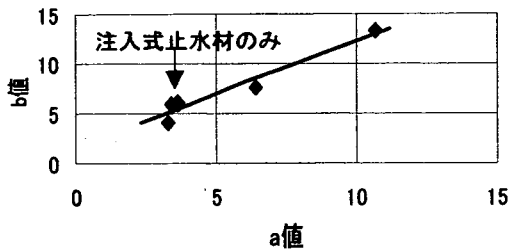


図-14 変形領域



(a) Pyaと係数aの関係



(b) 係数aと係数bの関係

図-15 係数 a および係数 b の変化

ただし、ひずみの影響は考慮していない。

結果を表-4に示す。この場合は変形領域を5mmに限定したので目詰めシールの厚さが一定なら溝の形状が変わっても引っ張り強度は変化しない。変形領域を5mmに決めた理由は塑性理論式から求められた最大値3.8mmよりいくぶん大きい値で区切りの良い数値とした。

複合変形領域5mmと固定して求めた P_{ya} と係数 a の関係を図-15(a)に示す。この図には、文献1)に示した注入式止水材による止水実験で求めた3種類の係数 a も示してある。図に示されるように、その相関係数は0.947とかなり高い。したがって、変形領域を5mm一定とした平均張り強度は係数 a を予測する簡便法として使用できる。平均引張り強度と係数 a の回帰曲線を求めると下記の式(8)に示す指数関数で整理できた。

$$a=3.2e^{0.418P_{ya}} \quad (8)$$

P_{ya} : 平均引張り強度(MPa)

目詰めシール材+注入式止水材の合計厚さを5mmとした単位面積当たりの引っ張り強度

係数 b については表-3に示したように X_0 がほぼ一定なので係数 a と強い相関性を持つことが考えられる。

そこで係数 a と b の関連性を調べて見た。結果を図-15(b)に示す。図に示されるように次の1次関数で整理でき、相関性を表す相関係数(R)は0.97である。

$$b=1.71+1.05a \quad (9)$$

a, b : 係数

なお、 X_0 を一定と考えれば係数 b はつぎのように求めることができる。

$$b=2.3aP_y \cdot \log_{10}X_0 \quad (10)$$

上述のように実験的な手法であるが係数 a と b は目詰めシール材と注入式止水材の平均引張り強度を求めることができるので、式(1)からゴム薄帯状目詰めシール材と注入式止水材を併用した場合の限界止水圧の予測は可能である。

(3) 実際に使用されている目詰めシール材の限界止水圧について

注入式止水材を用いた実際のシールドセグメントは、図-8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2枚合せの目詰めシール材の目的は注入式止水材がゲル化するまでのリーク防止である。

しかし、この目詰めシール材はセグメント間に目開

きが生じた場合、目開きをふさぐように設置されているので本実験で行った帯状ゴム目詰めシール材と同じ働きも持ち合わせていることが推定できる。

また、帯状ゴム目詰め材よりはるかに頑丈な構造となっているので、実際の止水能力は目詰めシール材によって大きく向上しているものと考えられる。ただ、現在この目詰めシール材の特性についてほとんど明らかになっていない。今後、詳しい研究が必要である。

5. 結論

本研究の結果次のことがわかった。

1) これまでの研究で、溶液型水膨張性ゴム材を用いた注入式止水材の止水のメカニズムは定形止水材とは異なることを明らかにした。この結果、押出しの式をベースにして、注入式止水材の限界止水圧を統一的に表す準理論式が得られた。しかしながら、目違いが生じた場合の限界止水圧実験は行っていないので目違いが生じた場合の限界止水圧の検討を行った。その結果、目違いは注入前に生ずる注入前目違いと、注入後、止水材がゲル化したあとに生ずる注入後目違い2通りに分類できた。その止水性能は次ぎに示すように異なった。

2) 注入前目違いは目違いゼロの限界止水圧とほぼ等しい。これより、注入式止水材はセグメントの組立てに際し目違いが生じてでも止水能力にはほとんど影響しないものと考えられる。この特性は、目違いが生ずると止水能力が変化する定形止水材と比較して違いがある。

3) 注入後目違いは、目違いが生ずることで止水能力が減少することがわかった。本実験データ範囲ではその減少率を式(5)の係数 β で予測することが可能である。

4) 目詰めシール材と注入式止水材を併用した場合目詰めシール材の設置方法は止水の能力に大きく影響する。厚さ2mmの帯状ゴム目詰めシール材を目開きをふさぐように設置した場合、止水能力は約4~16倍向上した。実際に使用されている目詰めシール材も目開きをふさぐように設置されているので、止水能力はかなり向上しているものと推定できる。

参考文献

- 1) 大塚正博, 塩治幸男, 小林亨, 小泉淳: シールド工使用セグメントの水膨張シール材による止水設計法について, 土木学会論文集, No. 651/VI-47, pp. 61-79, 2000. 6.
- 2) 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.

- 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) 石田喜久雄, 阿部和歌, 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.

- 5) 木弘: 塑性加工, 葦華房, pp. 162-166, 1987.
- 6) Parson, E. and Parking, N.: *The Extrusion of Metals*, CHAPNANHALL LTD, pp.201-202, 1961

(2002.5.10 受付)

CRITICAL IMPERMEABILITY PRESSURE OF IRREGULARITY
JOINT PLANE USED A NEW WATER-EXPANSION
RUBBER AND CONDITION OF INSTALLATION
ABOUT LEAK PREVENT SEAL

Munehiko KAGA and Akira MORI

Until now, we have found a new mechanism of impermeability by blocking effect when a new water-expansion rubber of injected type is used impermeability of segment joint of shield tunnel. However, we did not examine impermeability pressure as the irregularity occurred for segment joint of shield tunnel. To clarify it, the impermeability tests about irregularity were conducted. As a result, it became apparent that the critical Impermeability pressure is not proportional to the irregularity. Further we also examined functions of the leak prevented seal. The leak prevented seal is used as leak prevention of a new water-expansion rubber. However, it was found that the leak prevented seal raises ability of impermeability.