

論文 沈埋トンネル側壁のひびわれからの漏水と自癒効果の確認実験

壹岐直之*¹・清宮 理*²・山田昌郎*³・高野誠紀*⁴

要旨：沈埋トンネル側壁でのひびわれからの漏水量と目詰まりによる漏水量の時間依存を確認するため、長期漏水実験を行った。実験は、沈埋トンネルの側壁の一部を実物大でモデル化した試験体を10体製作し、幅0.070~0.304mmのひびわれを発生させ、14700Paおよび29400Pa（水深30mに相当）の圧力で漏水量を28日間計測した。実験の結果、ひびわれの透水係数は版厚30cm以下で行われた既往の研究よりかなり小さいことが判った。また、一般にひびわれからの漏水量は時間の経過に伴って減少すること（自癒効果）が知られているが、ひびわれ幅が0.2mm以上では自癒効果が小さいことが判明した。

キーワード：沈埋トンネル、ひびわれ、漏水量、時間依存、自癒効果

1. まえがき

沈埋トンネル函体のコンクリート打設時に発生する温度ひびわれは、その性質上部材を貫通する。貫通ひびわれはトンネルの沈設後には漏水の原因となるため、ひびわれ幅の大きな箇所では補修が必要である。日本コンクリート工学協会では、この補修の目安として構造物の耐久性および水密性を確保するために許容ひびわれ幅¹⁾を設定し、補修を必要とするひびわれ幅を0.2mm以上、補修を必要としないひびわれ幅を0.05mm以下としている。この許容ひびわれ幅の根拠となる文献の多くでは版厚は20cm以下を、水圧は3000Pa以下を対象としている。また、他の研究文献で高水圧下でのひびわれからの透水特性に関するものもあるが、このときの版厚は30cm以下である。

ところで、一般に岩盤や土中での浸透流で時間の経過に伴って流量が減少することはよく知られており、同様にコンクリートに発生したひびわれからの漏水についても流量は減少する。この時間依存の原因として、水中の懸濁浮遊物質によるひびわれの目詰まりや、ひびわれ内部のコンクリートの水和反応による固形物の析出等が考えられる。前述の漏水量の経時的な減少効果を、自癒効果と呼ぶ。コンクリートのひびわれの自癒効果に関する研究²⁾も行われているが、水圧は8000Paと小さく、流路長も17cm以下である。

沈埋トンネルのように版厚が厚いときに、前述の水密性に関する許容ひびわれ幅が適用できるか、

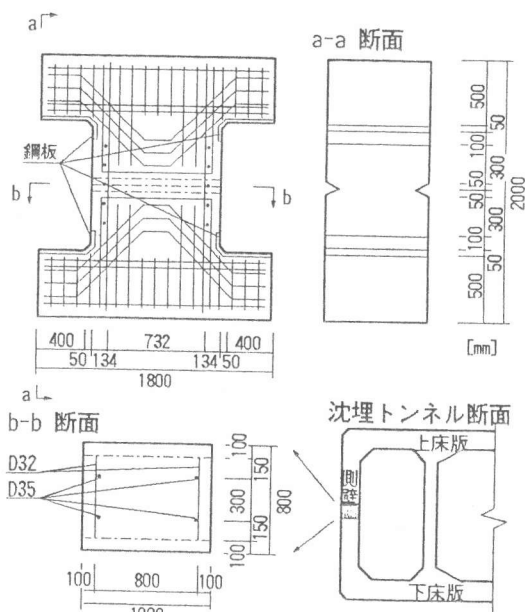


図-1 試験体の形状寸法およびモデル

- *1 若築建設(株) 土木本部 技術調査室 「港湾技研研修生」、(正会員)
- *2 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室長、工博、(正会員)
- *3 運輸省 港湾技術研究所 構造部 構造強度研究室、工修、(正会員)
- *4 運輸省 第一港湾建設局 新潟港工事事務所

また自癒効果が期待できるかは確認されていない。そこで本報告では、版厚1mの試験体に引張荷重によるひびわれを導入し、14700Pa以上の高水圧下での漏水量を28日間測定した。実験によって、版厚1mのコンクリート部材に発生したひびわれからの漏水量に関する定量的な結果を得ることができ、また従来の提案式での係数について検討したので、この結果について述べる。

2. 実験方法および実験結果

2.1 試験体の形状および寸法

試験体は、図-1に示すように新潟港で実際に施工された沈埋トンネルの側壁の一部を実物大でモデル化し、コンクリートの配合および強度も当沈埋トンネルと同じである。コンクリートの配合および強度を表-1に示す。図-1に示すように試験体は、100×80cmの長方形断面とし、純引張部分の長さ100cmの中央にひびわれ導入のため切欠きを設けた。切欠きによる断面積の欠損率は25%である。また、試験体の上下両端には引張荷重用のフーチングを設けた。純引張部分の配筋には、配力筋としてD35、主筋としてD32およびスターラップとしてD22を用いた。この他に、ひびわれ導入時に切欠き位置以外の箇所のひびわれを防止するため、せん断補強筋としてD16を配置した。

表-1 コンクリートの配合および強度

配合 [kgf/m ³]				スランブ [cm]	強度 [kgf/cm ²]
W	C	S	G		
163	413	622	1091	12.0	435

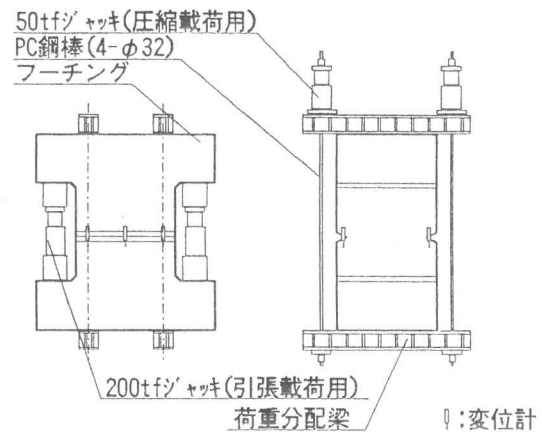


図-2 ひびわれ導入方法および測定位置

2.2 ひびわれ導入方法およびひびわれ幅の設定

貫通ひびわれの導入方法の概要を図-2に示す。試験体のフーチング部間に油圧ジャッキ（容量200tf）を2台配置して引張力を作用させて貫通ひびわれを導入した。ひびわれ導入後、前述の引張荷重用ジャッキと、荷重分配梁とPC鋼棒を介した圧縮用油圧ジャッキ（容量50tf）4台とによってひびわれ幅を所定の値に制御した。ひびわれ幅は、両端面（加圧注水面と漏水流出面）に2箇所ずつと、流路方向の左右に3箇所ずつの、計10箇所の変位計により測定した。目標とするひびわれ幅は0.07mm～0.30mmの範囲内で設定し、所定のひびわれ幅に達した後は、上下のフーチング部間を溝型鋼で固定し、ひびわれ幅が変動しないようにした。

貫通ひびわれ導入後のひびわれ幅を表-2に示す。表中で、“端面ひびわれ幅”とは試験体の両

表-2 ひびわれ幅の導入結果

目標ひびわれ幅	0.070	0.140	0.170	0.200	0.250	0.300
導入後のひびわれ幅 [mm]	{ 上段：端面ひびわれ幅 下段：平均ひびわれ幅					
水圧14700[Pa]	0.081 0.092	0.140 0.144		0.190 0.197		0.304 0.324
水圧29400[Pa]	0.070 0.075	0.134 0.138	0.167 0.168	0.197 0.219	0.245 0.255	0.298 0.323

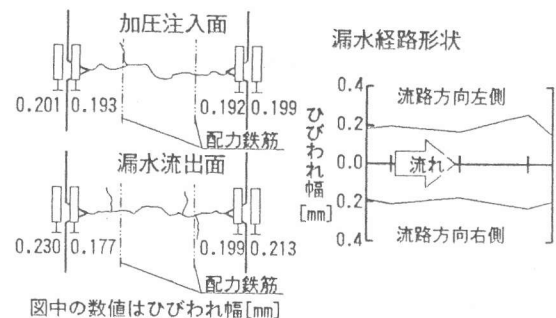


図-3 ひびわれ発生状況
(目標ひびわれ幅0.20mmの試験体)

端面で測定した4箇所の平均値であり、“平均ひびわれ幅”とは全測点10箇所の平均値である。また、後述する2種類の水圧別に表示してある。ひびわれの発生状況と漏水経路の形状の一例として、目標ひびわれ幅 0.200mmの試験体での状況を図-3に示す。ひびわれは曲折して発生しているが、漏水経路の幅についてはほぼ一様であった。他の試験体についても、ひびわれの発生状況および漏水経路の形状は、ほぼ同様であった。

2.3 加圧漏水実験の方法

加圧漏水実験の試験装置の概要を図-4に示す。作用水圧は 14700Paおよび 29400Paの2種類とした。ひびわれ導入用の切欠きはエポキシ樹脂による充填工法で補修した。加圧注水面と漏水流出面には、ひびわれを覆うように半透明板による枠をエポキシ樹脂で接着した。圧力容器(耐圧980000Pa、容量1kQ)に入れた水道水をコンプレッサーで加圧し、レギュレーターで圧力を 29400Paに制御した。加圧水は分割して10体の試験体に同時に注水できるように配管し、そのうち4体は減圧バルブを用いて 14700Paに制御した。漏水量はメスシリンダーおよび電子はかりを用いて1日に1回計測した。ひびわれの長さは60cm、漏水の流路長は 100cmである。

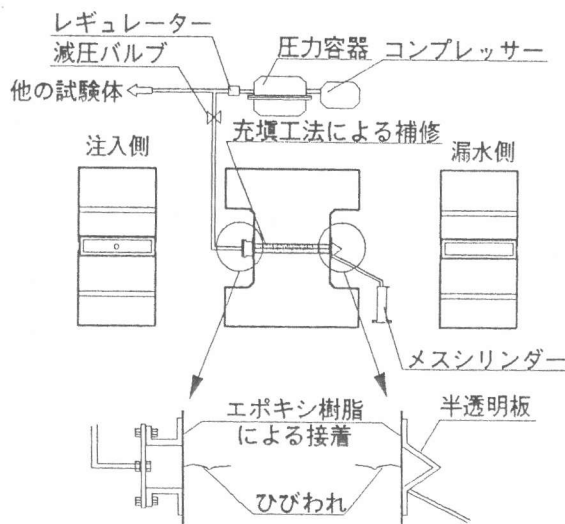


図-4 漏水試験装置

2.4 加圧漏水実験の結果

ひびわれからの漏水量の実験結果を図-5に示す。ひびわれ幅0.20mm未満と0.20mm以上とで2つのグラフに分けてあり、図中の数値は端面ひびわれ幅を表す。実験開始から1日目の初期漏水量は4.89~85.8Q/日と広い範囲に分布し、28日目の漏水量は0.09~3.00Q/日となった。また、漏水量は経時的に減少し、その減少量は実験開始後1週までは大きく、3週以降は小さくなり、漏水量はほぼ定常状態となった。

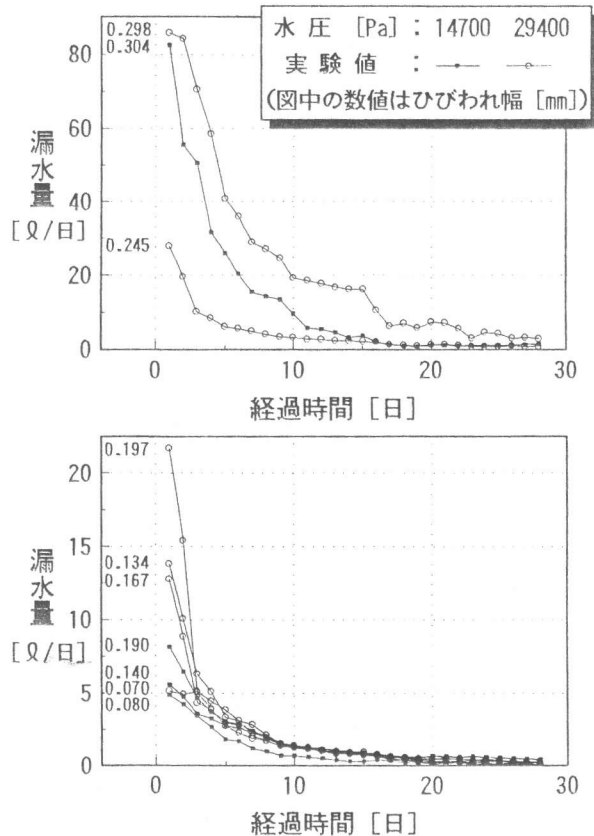


図-5 ひびわれからの漏水量

3. 実験結果の定量評価および考察

3.1 初期漏水量

実験開始後1日目の透水係数とひびわれ幅の関係を図-6に示す。透水係数は式(1)で求めた。

$$q = k \cdot i \cdot A = k \cdot (H/L) \cdot (B \cdot W) \quad (1)$$

ここで、 q : ひびわれからの漏水量[cc/sec]、 k : 透水係数[cm/sec]、 i : 動水勾配、 A : 流路断面積[cm²]、 H : 水頭[cm]、 L : 流路長[cm]、 B : ひびわれ長さ[cm]、 W : ひびわれ幅[cm]とする。ひびわれ幅0.25mmまでは、透水係数は0.005~0.01cm/secとほぼ一定の値となったが、ひびわれ幅0.3mm程度での透水係数は、水圧14700Pa(水頭1500cm)で0.035cm/sec、水圧27400Pa(水頭3000cm)で0.019cm/secとなった。

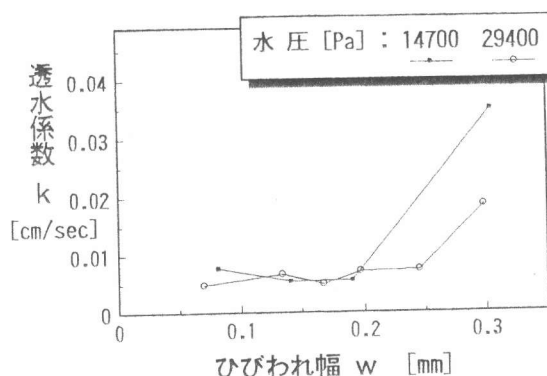


図-6 初期透水係数とひびわれ幅の関係

通常、ひびわれからの漏水量はPoiseuilleの法則³⁾(平行平板内の粘性流体)で求められる流量に、ひびわれの壁面粗度や曲がり等の不確定要因を集約した補正係数を乗じた式(2)で求められる。

$$q = C \cdot \frac{P \cdot B}{12 \cdot \mu \cdot L} \cdot W^3 \quad (2)$$

ここで、 C : 補正係数、 P : 水圧[Pa]、 μ : 水の粘性係数($=1.138 \times 10^{-3}$)[Pa·sec]とする。この補正係数が1.0に近ければ見かけ上はPoiseuilleの流れに近いこととなる。既往の研究^{2) 4) 5)}では、補正係数は0~2.5程度とし、ひびわれ幅が大きくなるにしたがって補正係数は小さくなるとしている。今回の実験でのReynolds数は0.083~1.454であり、層流と見なせるため式(2)の関係は成り立つと考える。式(2)の関係から求めた補正係数とひびわれ

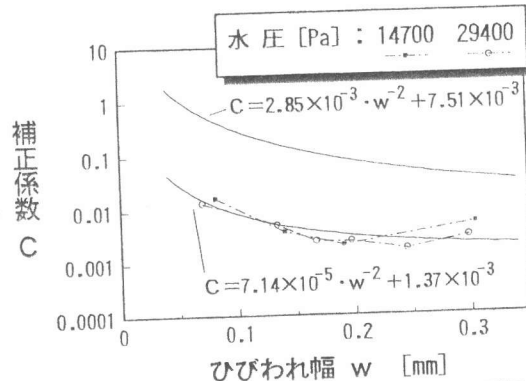


図-7 補正係数Cとひびわれ幅の関係

幅との関係を図-7に示す。補正係数は、ひびわれ幅が大きくなるほど減少する傾向を示し、ひびわれ幅0.080mmで最大値0.0165、ひびわれ幅0.245mmで最小値0.0017となった。伊藤ら²⁾の研究と同様に、補正係数Cとひびわれ幅w[mm]の関係を双曲線近似させると式(3)で表せる。(図-7参照)

$$C = 7.14 \times 10^{-5} \cdot w^{-2} + 1.37 \times 10^{-3} \quad (\text{相関係数 } r=0.910) \quad (3)$$

伊藤らの研究では、補正係数Cとひびわれ幅w[mm]の関係は式(4)で表されるとしている。(図-7参照)

$$C = 2.85 \times 10^{-3} \cdot w^{-2} + 7.51 \times 10^{-3} \quad (4)$$

本実験における補正係数は、伊藤らの研究結果の 1/100程度となり、他の研究での補正係数と比較しても 1/100程度となった。伊藤らの研究では漏水の流路長は15~17cm程度である。本実験では流路長が1 mとかなり大きいため、ひびわれ内部の曲がりや壁面粗度等の要因が大きくなり、漏水量がかなり少なくなったと考える。

3. 2 漏水量の時間依存

ある時間経過したときの漏水量の初期漏水量に対する比率の経時変化を図-8に示す。実験開始後1週程度まで漏水量は大きく減少し、3週以降では漏水量は変化せず、ほぼ定常状態となった。しかし、水圧およびひびわれ幅と、漏水量の経時変化の傾向との明確な相関関係はみられない。

次に、佐藤ら⁶⁾が提案する目詰まり機構の数学モデルを用いて、本実験における漏水量の経時変化の定量評価を試みた。佐藤らによると、任意の時刻 t の空隙の幅は、空隙内の容積の減少量が累積流量に比例すると仮定した式(5)で表される。また、任意の時刻での流量はPoiseuilleの法則に従うとすると式(6)で表され、この微分方程式を解くと式(7)で表される。

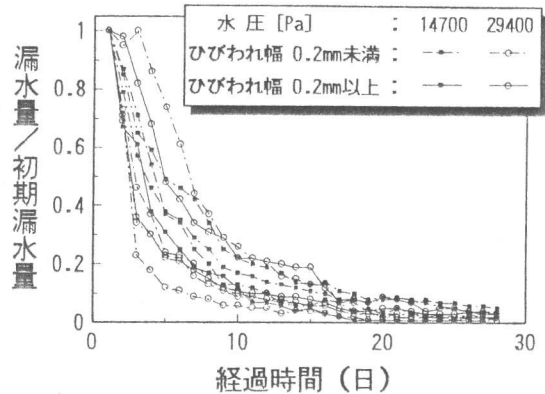


図-8 ひびわれからの漏水量変化

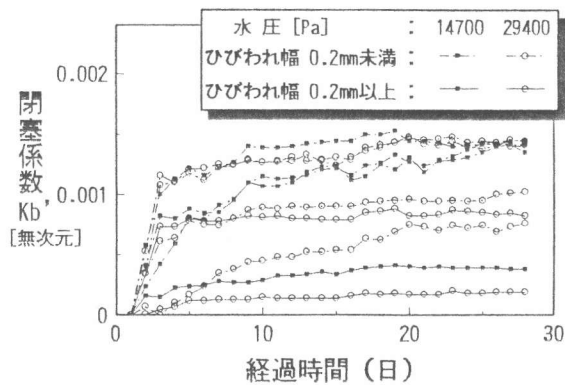


図-9 閉塞係数 Kb' の変化

$$W_t = W_{t=0} - \frac{Kb'}{L} \cdot Q'_t \quad \text{----- (5)}$$

$$q'_t = \frac{dQ'_t}{dt} = C \cdot \frac{P}{12 \cdot \mu \cdot L} \cdot W_t^3 = q'_{t=0} \cdot \left[1 - \frac{Kb'}{L \cdot W_{t=0}} \cdot Q'_t \right]^3 \quad \text{--- (6)}$$

$$q'_t = q'_{t=0} \cdot \left[1 + 2 \cdot \frac{Kb' \cdot q'_{t=0}}{L \cdot W_{t=0}} \cdot t \right]^{-3/2} \quad \text{----- (7)}$$

ここで、t : 時刻[日]、Kb' : 閉塞係数[無次元]、Q'_t : 時刻 t まででの単位ひびわれ長さあたりの累積流量 [cc/cm]、q' : 単位ひびわれ長さあたりの漏水量 [cc/日/cm] とする。すなわち、Kb' はひびわれを通過する液体中の懸濁物質がひびわれ内部の壁面に拘留される割合を表す。ただし、式(7)において佐藤らの研究では浸透流量は時間に依存する流量と時間に依存しない流量(恒常流量)との和として表しているが、本報告において恒常流量を0として表した。

式(7)による任意の時刻 t での、Kb' 算定値を図-9に示す。閉塞係数 Kb' は、実験開始後3週以降ではほぼ一定値である。t=28日での Kb' を用いて算定した漏水量を図-10に示す。漏水量の経時変化について、算定結果は実験結果とほぼ一致した。

閉塞係数 Kb' (t=28日) とひびわれ幅の関係を図-11に示す。水圧 14700Pa および 29400Pa の両方について、閉塞係数 Kb' はひびわれ幅 0.2mm を越えると急激に減少する。これは、幅 0.2mm 以

上のひびわれでは流量から求められる見かけのひびわれ幅の減少が遅いこと、すなわち、ひびわれ内部の目詰まり等による自癒効果が遅いことを表す。

4. まとめ

今回の実験によって得られた主要な結果を以下に示す。

①流路長1m鉄筋コンクリート製の試験体を用いたひびわれからの漏水実験を行い、流路長30cm以下として行われた既往の研究との比較を行った。ひびわれ内の流れを平行平板内の粘性流体(Poiseuilleの法則)としたときの補正係数の値は、前述の既往の研究での値の1/100程度であった。本実験でひびわれからの漏水量は、既往の研究での漏水量よりかなり少なかった。

②ひびわれからの漏水に対する目詰まり等による自癒効果は、ひびわれ幅0.2mm付近を境にしてかなり異なった。すなわち、ひびわれの閉塞係数はひびわれ幅0.2mm以下で $7.6 \times 10^{-4} \sim 14.5 \times 10^{-4}$ であり、ひびわれ幅0.2mm以上では $1.9 \times 10^{-4} \sim 8.2 \times 10^{-4}$ であった。また、ひびわれ幅が0.2mmを越えると、ひびわれ幅の増加に対して閉塞係数は急激に減少し、自癒効果は小さくなった。

③版厚1mで水圧29400Pa(水深30m相当)を受けるときの許容ひびわれ幅として0.2mm以下を設定すると、自癒効果によって漏水量は早い段階で減少すると考えられる。

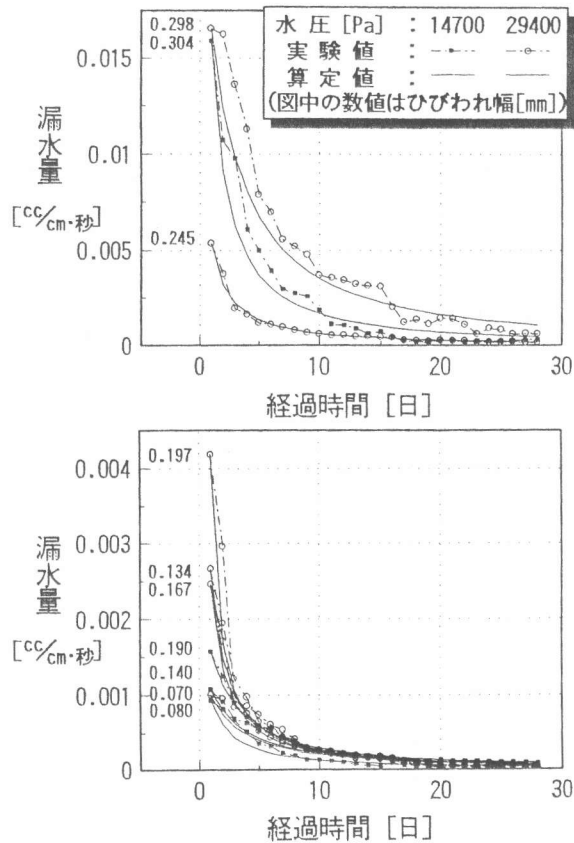


図-10 ひびわれからの漏水量計算値

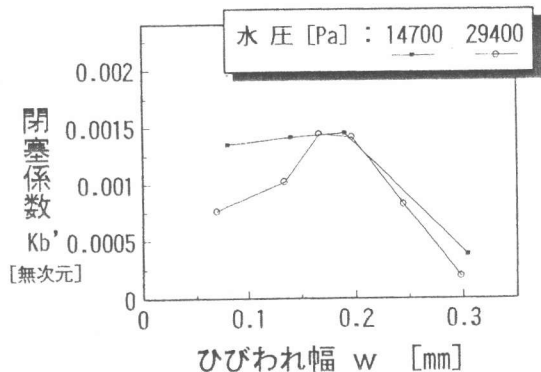


図-11 閉塞係数とひびわれ幅の関係

参考文献

- [1] 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひびわれ調査・補修指針、pp.51~77、1980
- [2] 伊藤洋・坂口雄彦・西山勝栄・清水昭男：コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究、セメント技術年報、Vol.41、pp.217~220、1987
- [3] 日野幹雄：流体力学、朝倉書店、p.115、1974
- [4] 渡部直人：発電所廃棄物陸地貯蔵・処分用コンクリートピットの水密性に関する研究、電力中央研究所報告、U87023、1987.9
- [5] 伊藤祐二・青景平昌・笹谷輝勝：高水圧下におけるコンクリートのひびわれからの漏水に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.447~450、1991
- [6] 佐藤邦明・伊藤洋：岩盤内浸透流の時間依存と目詰まり機構、土と基礎、Vol.36、No.4、pp.21~25、1988.4