

JAERI - M
88-185

平行間隙を有するコンクリートの漏水性状

1988年10月

下岡 謙司・阿部 美紀也

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこじください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田 軽印刷所

平行間隙を有するコンクリートの漏水性状

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

下岡 謙司・阿部美紀也

(1988年9月5日受理)

本報告は、ひびわれを有するコンクリートの放射性核種移動に対するバリア性を評価する上で非常に重要である、ひびわれ内部での水の動きに関する基礎データを得るため、実際のひびわれを模擬するものとして、不確定要因を少なくし理想的な微細間隙と考えられる平行平板供試体を用いて行なった実験結果をまとめたものである。

コンクリートのひびわれのような場合、一般にその中での水の流れは層流状態であり、漏水量は幅の3乗及び圧力勾配に比例し、粘性係数に逆比例するといった、粘性流体におけるナビエ・ストークス運動方程式の厳密解で与えられる理論式が成立するとされている。コンクリート試料の0.01 cm幅のひびわれ中の水の流れについて、水頭一定下で水温を徐々に変化させ、式中のパラメータの変化、並びに相互の関係を詳細に調べた結果、上述の理論が非常に良い精度で成り立っていることが確認され、また、水温一定下の試算でも同様の結果が確認された。

Properties of Water Leakage through Concrete Slabs
with a Parallel Gap

Kenji SHIMOOKA and Mikiya ABE

Department of Environmental Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 5, 1988)

This paper describes the experimental results of water flow in concrete crack, in order to get the fundamental data on the barrier effect of the concrete material on the nuclide migration. Concrete slabs with a parallel gap, instead of the unidentified native cracks were used in the experiment and the water leakage through the certain gap was studied in detail.

It is recognized that the water flow through cracks can be generally treated as a laminar flow, thus the theoretical equation derived from Navier-Stokes equation can be applied in the flow analysis. According to the theory, the amount of water flow through the crack is described to be proportional both to the third power of crack width and to the pressure gradient, and also to be inversely proportional to the coefficient of water viscosity.

We have confirmed that the equation can be applied to the water flow through even 0.01 cm width gap in concrete by the experiments, measurement of the water flow under the conditions of constant head and gradually changing temperatures and also at the constant temperatures.

Keywords: Parallel Gap, Concrete Crack, Laminar Flow, Navier-Stokes Equation, Crack Width, Pressure Gradient, Viscosity, Temperature

目 次

1. まえがき	1
2. 供試体の作製	1
3. 試験方法	2
4. 試験結果と考察	3
4.1 漏水性状	3
4.2 レイノルズ数	4
4.3 静止平行平板間の圧力勾配による流れ	5
4.4 理論値との比較	8
4.4.1 流量と $\frac{\text{圧力勾配}}{\text{粘性係数}}$ の関係	8
4.4.2 理論流量と実流量の比	9
4.4.3 健全な場合との透水係数の比較	10
5. まとめ	10
謝 辞	12
参 考 文 献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Preparation of test piece	1
3. Experimental method	2
4. Results and Discussion	3
4.1 Properties of water leakage	3
4.2 Reynolds number	4
4.3 Water flow in parallel gap by pressure gradient	5
4.4 Comparison with theory	8
4.4.1 Relation between amount of flow and pressure gradient/ viscosity	8
4.4.2 Ratio of theoretical flow to actual flow	9
4.4.3 Comparison of hydraulic conductivity of the test piece with that of intact concrete	10
5. Conclusion	10
Acknowledgements	12
References	12

1. ま え が き

原子力発電所より発生する低レベル放射性廃棄物の浅地中埋設による最終貯蔵・処分に当り、その人工バリアの施設構造物として鉄筋コンクリート造のピットが考えられている。この際、特に耐久性、水密性に優れたコンクリートとなるよう設計、施工を行うことが、放射性核種の閉じ込め効果の評価上において非常に重要である。

しかしながらコンクリートは、本来、伸び能力が小さく引張強度が低いといった力学的欠点のために、乾燥による収縮等の種々の原因によりひびわれが発生する可能性を有しており、生じたひびわれはコンクリートの耐力、耐久性、水密性などの諸性能を低下させる大きな要因となる^{1)~5)}。従って、放射性核種の移動が水を媒体として生ずることを考慮に入れた場合に水密性の低下は特に問題であり、コンクリートにひびわれが生じた場合にその内部における水の流れのメカニズムを知ることは、人工バリアの安全評価上重要な課題といえるが、ひびわれを有するコンクリートの漏水現象に関する定量的なデータは現状では非常に不十分な状況にある。

一般に、コンクリートのひびわれのような微細間隙中における水の流れは、流れの方向に垂直な速度成分がほとんどなく、水は正しく流線上を運動していて、その内部においては摩擦力だけが働いているような流れ、すなわち層流と見なすことができ、ひびわれからの漏水量は大きな水圧が作用するほど、またひびわれ幅が大きくなるほど大となり、理論上、幅の3乗に比例して増大するとされている^{5)~8)}。しかしながら、複数の原因により、しかもこれらが互いに他の原因の影響を助長するといった極めて複雑なメカニズムにより自然発生するひびわれの幅を定量的に表わすものとしては、現状では目視で確認できる表面ひびわれ幅のみである。従って、仮にこの幅が同一であったとしても、内部での幅の変動、屈曲の程度等によって漏水量に大きな違いが生じることがこれまでの知見によって得られている⁵⁾。また、ひびわれ幅は温度や湿度によっても影響を受け、特にひびわれ幅の小さい場合は、時間の経過に伴いコンクリートと水の反応による石灰化合物の析出又は水中に存在する固形懸濁物質による物理的空隙捕捉等を原因とする目詰りが生じ、漏水量が徐々に減少し場合によっては漏水が完全に停止するといった現象も見られる^{9)~10)}。

本研究では、以上に述べたような自然ひびわれにおいて見られる不確定要因を極力少なくするために、内部での曲がりもなくし、かつ表面を平滑にしたほぼ理想的な微細間隙を有するコンクリート供試体を作製し、その中での低水頭における水の流れを、特に温度による水の粘性の変化との関係に着目して詳細な実験を行ない、自然ひびわれにおける漏水性状把握の際に基礎となるデータを得ることを目的とした。

2. 供試体の作製

供試体作製に使用したコンクリートの配合を Table 1 に示す。配合の内容は建設現場の構造物

1. ま え が き

原子力発電所より発生する低レベル放射性廃棄物の浅地中埋設による最終貯蔵・処分に当り、その人工バリアの施設構造物として鉄筋コンクリート造のピットが考えられている。この際、特に耐久性、水密性に優れたコンクリートとなるよう設計、施工を行うことが、放射性核種の閉じ込め効果の評価上において非常に重要である。

しかしながらコンクリートは、本来、伸び能力が小さく引張強度が低いといった力学的欠点のために、乾燥による収縮等の種々の原因によりひびわれが発生する可能性を有しており、生じたひびわれはコンクリートの耐力、耐久性、水密性などの諸性能を低下させる大きな要因となる^{1)~5)}。従って、放射性核種の移動が水を媒体として生ずることを考慮に入れた場合に水密性の低下は特に問題であり、コンクリートにひびわれが生じた場合にその内部における水の流れのメカニズムを知ることは、人工バリアの安全評価上重要な課題といえるが、ひびわれを有するコンクリートの漏水現象に関する定量的なデータは現状では非常に不十分な状況にある。

一般に、コンクリートのひびわれのような微細間隙中における水の流れは、流れの方向に垂直な速度成分がほとんどなく、水は正しく流線上を運動していて、その内部においては摩擦力だけが働いているような流れ、すなわち層流と見なすことができ、ひびわれからの漏水量は大きな水圧が作用するほど、またひびわれ幅が大きくなるほど大となり、理論上、幅の3乗に比例して増大するとされている^{5)~8)}。しかしながら、複数の原因により、しかもこれらが互いに他の原因の影響を助長するといった極めて複雑なメカニズムにより自然発生するひびわれの幅を定量的に表わすものとしては、現状では目視で確認できる表面ひびわれ幅のみである。従って、仮にこの幅が同一であったとしても、内部での幅の変動、屈曲の程度等によって漏水量に大きな違いが生じることがこれまでの知見によって得られている⁵⁾。また、ひびわれ幅は温度や湿度によっても影響を受け、特にひびわれ幅の小さい場合は、時間の経過に伴いコンクリートと水の反応による石灰化合物の析出又は水中に存在する固形懸濁物質による物理的空隙捕捉等を原因とする目詰りが生じ、漏水量が徐々に減少し場合によっては漏水が完全に停止するといった現象も見られる^{9)~10)}。

本研究では、以上に述べたような自然ひびわれにおいて見られる不確定要因を極力少なくするために、内部での曲がりもなくし、かつ表面を平滑にしたほぼ理想的な微細間隙を有するコンクリート供試体を作製し、その中での低水頭における水の流れを、特に温度による水の粘性の変化との関係に着目して詳細な実験を行ない、自然ひびわれにおける漏水性状把握の際に基礎となるデータを得ることを目的とした。

2. 供試体の作製

供試体作製に使用したコンクリートの配合を Table 1 に示す。配合の内容は建設現場の構造物

に普通に用いられている標準的なもので、セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は那珂川産骨材である。供試体の寸法は $15 \times 15 \times 15$ cm の立方体で、脱型後 5 日間水中養生し、その後室内放置したものをを用いて、以下に示す手順により、ほぼ理想的な微細間隙を有すると見なされる平行平板供試体を作製した。(Fig. 1 参照)

- ① 供試体ブロックの中央部をコンクリートカッターにて切断する。
 - ② 切断面の若干の凹凸修整のため、供試体の端面仕上機を用いて研磨する。
 - ③ 供試体の両端部に所要厚さ (h) のシックネスゲージ (横幅 1.27 cm) をセットし、両側よりステンレス製のボルトナットで締め付ける。
 - ④ 供試体の流れ方向の長さ (T) は、ノギスで 3ヶ所測定し、その平均値をとる。
 - ⑤ 亀裂の長さ (B) は、同じくノギスで 3ヶ所測定した平均値より、端部にセットしたシックネスゲージの横幅 ($1.27 \times 2 = 2.54$ cm) を差し引いたものとする。
- 本実験で使用したシックネスゲージの厚さ=亀裂の理論幅 (h) は 0.015 cm である。

3. 試 験 方 法

以下に示す手順により行なった。(Fig. 2 参照)

- ① 供試体を漏水試験器にセットし、すきまに供試体上面までアスファルトを充填する。
- ② アスファルトが硬化した後、試験器に上蓋をかぶせ、ボルトナットで固定する。
- ③ マリオットタンクに純水を満たしてタンクの上部を密閉した後、吸気口部と供試体上面との間の高さ (H) を固定する。
- ④ タンクと試験器をチューブで連結し、空気孔を開放した状態でタンクのパルブを開けて水を流す。空気孔から水がオーバーフローして試験器内のエアが十分排除されたことを確認した後、空気孔を閉じる。
- ⑤ 試験器上部の圧力計にて水頭 (H) を確認する。
- ⑥ 一定時間水を流し、流れがほぼ定常流であることを確認した後、水温と間隙を通してビーカーに溜った累積漏水量 (Q) を適時測定してそれぞれ平均値をとり、平均水温 (θ) 及び単位時間当りの漏水量 (q) を求める。
- ⑦ 同じ水頭 (H) を保持したままで、タンク内の水温を変化させ、⑥と同様漏洩した水の温度と漏水量 (Q) を測定してその平均値をとる作業を繰り返し行なう。
- ⑧ 次に、固定する水頭 (H) を変え、④~⑦の手順の測定を繰り返す。
 - ・供試体上面において固定する水頭 (H) は、10, 20, 40, 60 及び 80 cm の計 5 ケースとし、水頭の単調増加又は単調減少が間隙の漏水性状の変化に及ぼす影響の可能性を考慮して、試験の順番はランダムに 40, 20, 60, 10 及び 80 cm の順とした。
 - ・試験は長期にわたるため、供試体の乾燥による流量の低下を防ぐ目的で、試験中断の際は漏水試験器ごと水浸し、次の試験に備えた。
 - ・水温は、マリオットタンク内、漏洩直後及びビーカーに溜った水の計 3ヶ所にて適時測定

に普通に用いられている標準的なもので、セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は那珂川産骨材である。供試体の寸法は $15 \times 15 \times 15$ cm の立方体で、脱型後 5 日間水中養生し、その後室内放置したものを用いて、以下に示す手順により、ほぼ理想的な微細間隙を有すると見なされる平行平板供試体を作製した。(Fig. 1 参照)

- ① 供試体ブロックの中央部をコンクリートカッターにて切断する。
 - ② 切断面の若干の凹凸修整のため、供試体の端面仕上機を用いて研磨する。
 - ③ 供試体の両端部に所要厚さ (h) のシックネスゲージ (横幅 1.27 cm) をセットし、両側よりステンレス製のボルトナットで締め付ける。
 - ④ 供試体の流れ方向の長さ (T) は、ノギスで 3 ヶ所測定し、その平均値をとる。
 - ⑤ 亀裂の長さ (B) は、同じくノギスで 3 ヶ所測定した平均値より、端部にセットしたシックネスゲージの横幅 ($1.27 \times 2 = 2.54$ cm) を差し引いたものとする。
- 本実験で使用したシックネスゲージの厚さ=亀裂の理論幅 (h) は 0.015 cm である。

3. 試 験 方 法

以下に示す手順により行なった。(Fig. 2 参照)

- ① 供試体を漏水試験器にセットし、すきまに供試体上面までアスファルトを充填する。
- ② アスファルトが硬化した後、試験器に上蓋をかぶせ、ボルトナットで固定する。
- ③ マリOTTタンクに純水を満たしてタンクの上部を密閉した後、吸気口部と供試体上面との間の高さ (H) を固定する。
- ④ タンクと試験器をチューブで連結し、空気孔を開放した状態でタンクのパルブを開けて水を流す。空気孔から水がオーバーフローして試験器内のエアが十分排除されたことを確認した後、空気孔を閉じる。
- ⑤ 試験器上部の圧力計にて水頭 (H) を確認する。
- ⑥ 一定時間水を流し、流れがほぼ定常流であることを確認した後、水温と間隙を通してピーカーに溜った累積漏水量 (Q) を適時測定してそれぞれ平均値をとり、平均水温 (θ) 及び単位時間当りの漏水量 (q) を求める。
- ⑦ 同じ水頭 (H) を保持したままで、タンク内の水温を変化させ、⑥と同様漏洩した水の温度と漏水量 (Q) を測定してその平均値をとる作業を繰り返し行なう。
- ⑧ 次に、固定する水頭 (H) を変え、④~⑦の手順の測定を繰り返す。
 - ・供試体上面において固定する水頭 (H) は、10, 20, 40, 60 及び 80 cm の計 5 ケースとし、水頭の単調増加又は単調減少が間隙の漏水性状の変化に及ぼす影響の可能性を考慮して、試験の順番はランダムに 40, 20, 60, 10 及び 80 cm の順とした。
 - ・試験は長期にわたるため、供試体の乾燥による流量の低下を防ぐ目的で、試験中断の際は漏水試験器ごと水浸し、次の試験に備えた。
 - ・水温は、マリOTTタンク内、漏洩直後及びピーカーに溜った水の計 3 ヶ所にて適時測定

したが、パラメータの計算に用いる水温としては、周囲の温度の影響を受けず間隙内の水温とほぼ同一と考えられる漏洩直後の温度（落下する水滴の温度）の平均値を採用した。

- 理論流量を算定する際のパラメータである水の粘性係数 μ ($\text{g} \cdot \text{sec} / \text{cm}^2$)は、上述した漏洩直後の平均水温 θ ($^{\circ}\text{C}$)より次式を用いて求めた¹¹⁾。

$$\mu = \left(\frac{0.0225}{1 + 0.0288 \theta} + 0.000016 \theta - 0.00453 \right) \div 980 \quad (1)$$

- 同様に、水の単位体積重量 w (g / cm^3)は、水温と単位体積重量の関係を示したTable 2の値を基準とし^{11)~12)}、中間の値については比例配分して求めた。

4. 試験結果と考察

Fig. 3~7に各水頭における漏水量の結果を示す。それぞれ縦軸に流量 q 、横軸に圧力勾配 I_p ($= w \cdot \frac{H+T}{T}$)と粘性係数 μ との比 I_p/μ を表わす。

4.1 漏水性状

自然発生のひびわれにおいては、前述したように、特にひびわれ幅が小さく水頭に大きな変化がない場合には、時間の経過と共に目詰りが原因と考えられる漏水量の低下といった現象が見られる。目詰りの発生原因としては、①コンクリートと水の化学反応による石灰化合物の析出、②水中の固形物による物理的空隙補足、③水中溶存酸素・気泡混入等が挙げられるが、ひびわれ内部での幅の変動、屈曲の程度、壁面の粗さの程度等によっても大きく影響を受けるものと考えられる¹⁰⁾。平行平板供試体で表面を平滑にし、かつ純水を用いた場合には上述したような要因が起こることは考えられず、従って本実験においては目詰りに伴う漏水量の低下といった現象は見られなかった。

最初の流し始めにおいては、水温をほぼ一定の条件下に置いても漏水量が予想以上に小さく、また安定しない非定常な流れを観測したが、ある程度の時間、水を流し続けることにより、流量も増加し徐々に定常流となった。この原因としては、気乾状態の供試体を用いたことが挙げられる。すなわち、水の流し始めにおいては供試体のマトリックス部の吸水現象が生じているためであると思われ、この部分が水で十分飽和し、かつ亀裂内部の壁面に十分な“漏れ”が生じることにより、徐々に定常的な流れになったものとする。なお、試験の中断の際は供試体を水浸することにより乾燥が生ずるのを防いだため、試験再開による漏水量の低下といった現象は見られなかった。(なお、上述の理由により、最初に行なった供試体上面での水頭40cmの結果(Fig. 5)においては、流し始めの非定常の部分は除外してある。)

したが、パラメータの計算に用いる水温としては、周囲の温度の影響を受けず間隙内の水温とほぼ同一と考えられる漏洩直後の温度（落下する水滴の温度）の平均値を採用した。

- 理論流量を算定する際のパラメータである水の粘性係数 μ ($\text{g} \cdot \text{sec} / \text{cm}^2$) は、上述した漏洩直後の平均水温 θ ($^{\circ}\text{C}$) より次式を用いて求めた¹¹⁾。

$$\mu = \left(\frac{0.0225}{1 + 0.0288 \theta} + 0.000016 \theta - 0.00453 \right) \div 980 \quad (1)$$

- 同様に、水の単位体積重量 w (g / cm^3) は、水温と単位体積重量の関係を示した Table 2 の値を基準とし^{11)~12)}、中間の値については比例配分して求めた。

4. 試験結果と考察

Fig. 3~7 に各水頭における漏水量の結果を示す。それぞれ縦軸に流量 q 、横軸に圧力勾配 I_p ($= w \cdot \frac{H+T}{T}$) と粘性係数 μ との比 I_p/μ を表わす。

4.1 漏水性状

自然発生のひびわれにおいては、前述したように、特にひびわれ幅が小さく水頭に大きな変化がない場合には、時間の経過と共に目詰りが原因と考えられる漏水量の低下といった現象が見られる。目詰りの発生原因としては、①コンクリートと水の化学反応による石灰化合物の析出、②水中の固形物による物理的空隙補足、③水中溶存酸素・気泡混入等が挙げられるが、ひびわれ内部での幅の変動、屈曲の程度、壁面の粗さの程度等によっても大きく影響を受けるものと考えられる¹⁰⁾。平行平板供試体で表面を平滑にし、かつ純水を用いた場合には上述したような要因が起ることは考えられず、従って本実験においては目詰りに伴う漏水量の低下といった現象は見られなかった。

最初の流し始めにおいては、水温をほぼ一定の条件下に置いても漏水量が予想以上に小さく、また安定しない非定常な流れを観測したが、ある程度の時間、水を流し続けることにより、流量も増加し徐々に定常流となった。この原因としては、気乾状態の供試体を用いたことが挙げられる。すなわち、水の流し始めにおいては供試体のマトリックス部の吸水現象が生じているためであると思われ、この部分が水で十分飽和し、かつ亀裂内部の壁面に十分な“漏れ”が生じることにより、徐々に定常的な流れになったものとする。なお、試験の中断の際は供試体を水浸することにより乾燥が生ずるのを防いだため、試験再開による漏水量の低下といった現象は見られなかった。(なお、上述の理由により、最初に行なった供試体上面での水頭 40 cm の結果 (Fig. 5) においては、流し始めの非定常の部分は除外してある。)

4.2 レイノルズ数

一般に、流体の運動は①慣性力、②圧力、③粘性力、の以上3つの力のつりあいの上に成り立っている。粘性が小さい場合は、流体場の力関係は慣性力と圧力により決まってしまう、その極限は完全流体の流れとなる。反対に慣性力が小さい場合は、流体場においては圧力と粘性力とがつりあいの関係となり、“おそい”流れとなる^{13)~14)}。流体場を左右するこの二つの力(慣性力と粘性力)の大きさの比がレイノルズ数である。

$$Re = \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}} = \frac{U \ell}{\nu} \tag{2}$$

ここに、Re : レイノルズ数
 U : 代表的流速
 ℓ : 代表的長さ
 ν : 動粘性係数

ある任意の断面を有する管内流におけるレイノルズ数は、一般に次式で表わされる^{15)~16)}。

$$Re = \frac{4 R v}{\nu} \tag{3}$$

ここに、Re : レイノルズ数
 v : 管内平均流速 (L T⁻¹)
 ν : 流体の動粘性係数 (L² T⁻¹)
 R : 動水半径 = $\frac{A}{S}$ (L)
 A : 管の断面積 (L²)
 S : 管の断面における周の長さ (L)

今、右図のような寸法 2a × 2b (h = 2b) の長方形管を考えると、

断面積 A = 4 a b, 周の長さ S = 4 (a + b)
 であるから、動水半径 R は、

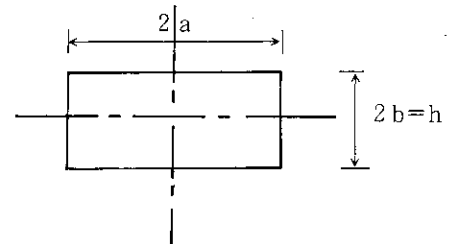
$$R = \frac{A}{S} = \frac{4 a b}{4 (a + b)} = \frac{a b}{a + b}$$

ここで、a → ∞ とすると、 $\lim_{a \rightarrow \infty} R = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{b}{1 + \frac{b}{a}} = b$
 従って、平行平板の場合、レイノルズ数は次式のようになる。

$$Re = \frac{4 R v}{\nu} = \frac{4 b v}{\nu} = \frac{2 h v}{\nu} \tag{4}$$

(h : 亀裂の幅)

管内における流れは、流体粒子が流線を横断することなくこれに沿って運動する流れ(層流)



と、流体粒子が不規則な運動をする流れ（乱流）とに大別され、乱流は平均流速及び管径が小さいほど発生しにくく、また、粘性の大きい流体では発生しにくいとされている。さらに、層流と乱流の限界は流体の種類に関係なくレイノルズ数のある値（これを限界レイノルズ数という）の付近で起こることが知られている^{15)~16)}。

コンクリートのひびわれ中における流れは一般に層流であるとされているが、その確認として本実験におけるレイノルズ数の最大値 ($Re_{(max)}$) を(4)式より求めてみる。ここで、式中のパラメータのうち、平均流速 v (cm/sec) は測定流量 q (cm³/sec) より逆算して得られる値を用い、動粘性係数 ν (cm²/sec) は水温 θ (°C) より次式を用いて求める¹¹⁾。

$$\nu = \frac{0.02247}{1 + 0.02858\theta} + 0.000017\theta - 0.00455 \quad (5)$$

本実験においてレイノルズ数が最大となるのは、供試体上面での水頭 80 cm で平均水温 21.89 (°C) における測定流量 0.732 (cm³/sec) (Fig. 7 参照) の場合である。

流れの断面積 $A = Bh$ (B : 亀裂の長さ)

であるから、

$$q = Av = Bhv \text{ より } v = \frac{q}{Bh}$$

(5)式に $\theta = 21.89$ (°C) を代入して、 $\nu = 0.00964$ (cm²/sec)

従って、最大レイノルズ数は、

$$Re_{(max)} = \frac{2h \cdot \frac{q}{Bh}}{\nu} = \frac{2q}{B\nu} = \frac{2 \times 0.732}{12.553 \times 0.00964} = 12$$

この値を、前述した層流と乱流の限界における限界レイノルズ数 $Rec = 2,800$ (長方形すきまで縦横比 104 ~ 165 での値、円管の場合で $Rec = 2,100$ ¹⁶⁾、因に本実験の場合、すきまの縦横比は $\frac{B}{h} = \frac{12.553}{0.015} = 837$) と比較してみると十分小さい値であることがわかり、従って流れは層流であるということが確認できた。

4.3 静止平行平板間の圧力勾配による流れ

速度成分 (u, v, w) をもつ非圧縮性粘性流体の場合のナビエ・ストークス運動方程式は次式で表わされる¹³⁾。

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに ρ は流体の密度、 μ は粘性係数であり、左辺は慣性力、右辺の第一項は質量力、第二項

は圧力，第三項は粘性力を，それぞれ表わす。微分演算子 D/Dt は，

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (7)$$

を意味し，流体塊と共に移動するときのその流体の特性量の時間変化率という概念であり，実質微分と呼ばれる。この場合の特性は速度成分であり，実質加速度である。また，流体が非圧縮性の場合，連続の式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

本実験のような平行平板間の流れは前項で確認されたように層流となり，この場合，すべての流体粒子は一方向（平行平板の方向）に流れ，他の方向の流速成分を持たない。この方向を x 軸方向，壁に垂直な方向を y 軸とし，これらに直角に z 軸をとれば， $v \equiv w \equiv 0$ であるから，連続の式 ((8)式) より明らかに $\frac{\partial u}{\partial x} \equiv 0$ である。従って平行流では，

$$u = u(y, z, t); v \equiv 0; w \equiv 0 \quad (9)$$

これらを(6)の第2，3式に代入すると，質量力を無視して $\frac{\partial p}{\partial y} \equiv 0$ ， $\frac{\partial p}{\partial z} \equiv 0$ となるから，圧力 p は x のみの関数となり，結局ナビエ・ストークスの方程式の第1式より，

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

が得られる。これは， $u(y, z, t)$ に関する線型偏微分方程式である。

右図のような静止平行平板間の定常な流れ（すなわち $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ ）を考える。このとき，運動方程式は(10)式より，

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (11)$$

平行壁の間隔を h とすると，境界条件は，

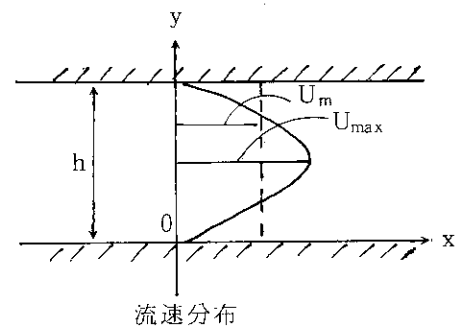
$$y = 0; u = 0 \quad (12)$$

$$y = h; u = 0 \quad (13)$$

(11)式より， $\frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx}$

積分して， $\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} y + C_1$ (14)

さらに， $u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + C_1 y + C_2$ (15)



境界条件より, $C_2 = 0$, $C_1 = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} h$
 よって流速分布は,

$$u(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 - \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} hy = \frac{y}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y-h) \quad (16)$$

平均流速 U_m は,

$$\begin{aligned} U_m &= \frac{1}{h} \int_0^h u dy = \frac{1}{2\mu h} \frac{dp}{dx} \int_0^h (y^2 - hy) dy \\ &= \frac{1}{2\mu h} \frac{dp}{dx} \left[\frac{y^3}{3} - \frac{h}{2} y^2 \right]_0^h = \frac{1}{2\mu h} \frac{dp}{dx} \left(\frac{h^3}{3} - \frac{h^3}{2} \right) \\ &= -\frac{h^2}{12\mu} \frac{dp}{dx} \end{aligned} \quad (17)$$

最大流速 U_{max} は $\frac{du}{dy} = 0$ より, $y = \frac{h}{2}$ を(16)式に代入して,

$$U_{max} = -\frac{h^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} = 1.5 U_m \quad (18)$$

間隙の長さを B とすると, 流れの断面積, $A = Bh$ であるから流量 q は,

$$q = A U_m = -\frac{Bh^3}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad (19)$$

従って, 幅 h (cm), 長さ B (cm) の亀裂を有する供試体の一面に H (cm) の水頭が作用する場合の亀裂からの漏水量 q (cm^3/sec) は, 水の単位体積重量を w (g/cm^3), 供試体の流れ方向の長さを T (cm) とすると, (19)式中の $-\frac{dp}{dx}$ は圧力勾配であるから, これを I_p と書くと,

$$-\frac{dp}{dx} = w \cdot \frac{H+T}{T} = I_p \quad (20)$$

となり, 結局本実験における理論流量を求めるものとして次式が導き出される。

$$q = \frac{Bh^3}{12\mu} I_p \quad (21)$$

ここに, q : 理論流量 (cm^3/sec)

B : 亀裂の長さ (cm)

h : 亀裂の幅 (cm)

μ : 粘性係数 ($\text{g} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2$)

I_p : 圧力勾配 $= w \cdot \frac{H+T}{T}$ (g/cm^3)

w : 単位体積重量 (g/cm^3)

H : 供試体上面での水頭 (cm)

T : 流れ方向の供試体長さ (cm)

流れが層流の場合ダルシーの法則が成立し、流速は動水勾配に比例する。比例定数である透水係数を k (cm/sec), 動水勾配を i とすると、平均流速 U_m (cm/sec) は、

$$U_m = k i \quad (22)$$

一方(17)式と(20)式より、

$$U_m = - \frac{h^2}{12\mu} \frac{dp}{dx} = \frac{h^2 w}{12\mu} \frac{H+T}{T} \quad (23)$$

動水勾配 $i = \frac{H+T}{T}$ であるから、両式を較べて静止平行板における透水係数は次式のようになり、水温が一定の場合に亀裂の幅の2乗に比例して増大することがわかる。

$$k = \frac{h^2 w}{12\mu} \quad (24)$$

ここに、 k : 透水係数 (cm/sec)

h : 亀裂の幅 (cm)

w : 単位体積重量 (g/cm³)

μ : 粘性係数 (g · sec/cm²)

以上、静止平行平板間の圧力勾配による流れにおける各パラメータ間の関係を Fig. 8 に示す。

4.4 理論値との比較

4.4.1 流量と $\frac{\text{圧力勾配}}{\text{粘性係数}}$ の関係

静止平行平板間の圧力勾配による流れ(層流)における理論流量を表わす(21)式によれば、漏水量は間隙幅の3乗及び圧力勾配に比例し、粘性係数に逆比例している。各水頭における結果を示す Fig. 3 ~ 7 中の点線は、この理論式に基づいた(ただし、例えば Fig. 3 においては亀裂の理論幅 h を 0.0100 cm としたときの)ものであり、前述から明らかなように、漏水量と $\frac{\text{圧力勾配}}{\text{粘性係数}}$ との間には比例関係が成立し、直線で表わすことができる。一方、実流量(図中の・印を結んだ折線)についてみると、すべての水頭にわたりほぼ同様の関係が成立しているものと考えられる。実測値より計算した1次回帰式はそれぞれ図中実線のようになり、パラメータ間の相関も非常によい結果となった。(相関係数の値は供試体上面での水頭 10 cm において最小値 0.96 を示す。)なお、回帰式の横のカッコ内に示す h' は、それぞれの回帰式の傾きより逆算して求めた亀裂の幅であり、0.0105 ~ 0.0115 cm とすべて理論上の亀裂の幅、すなわち使用したゲージの幅 0.015 cm より小さな値となった。この理由としては、実験中の供試体下部における流れの状態の観察、すなわち、亀裂全体に湿ってはいたが流れは一樣ではなく、主に両端部から大きな水滴が短い時間的間隔で落ち、中央部では水滴の大きさも小さく間隔も長かったことから、厳密には亀裂の中は平行平板ではなく、中央部に若干ながら凸形の障害物を有する、いわば四角錐2つが重なり合っていていってしまったためではないかと考えられる。因に、このような条件での亀裂幅を計

算してみると、0.010 cmが得られる。

Fig. 9は漏水量(q)と圧力勾配/粘性係数(I_p/μ)との関係をすべての実測値についてプロットしたもので、 q と I_p/μ との間の比例関係は非常によく、回帰式はほぼ原点を通る式で表わすことができる。(相関係数 $r^2 = 0.99$)特に、供試体上面での水頭60~80 cmの推移を見ると、20~40~60 cmに見られるような変化点(水頭が変わることにより流量が減少する)はなく、非常になめらかに推移していることがわかる。

回帰式の傾きより逆算した亀裂の幅 h' は0.0102 cmとなり、各水頭の回帰式から逆算した幅よりさらに小さな値となっている。また個々の水頭における換算幅は、 $H = 10$ cmの場合を除くと、水頭が大きくなるにつれて小さくなっている。すなわち、水頭が大きくなるにつれて、前述したように間隙内部に若干の凹凸があるために形成された供試体両側の水みちのようなものの漏水に与える影響が強くなり、その結果流れの断面積が小さくなっている。このような傾向にあることも考慮すると、この供試体において層流を十分保ち得る範囲内で水圧が増加した場合、その流量 q はほぼ幅 $h' = 0.0102$ cmか、又はそれより若干小さな値の3乗に比例する形で増加するのではないかと予想される。参考として、Fig. 10に各々の水頭における回帰式を表わす。

Table 3は、水温を一定にした場合に、各々の水頭における回帰式を用いて算定した流量(q)と、その水面での圧力勾配/粘性係数(I_p/μ)との関係を示したものである。いずれの水温においても両者の相関は非常によく(水温一定の場合の回帰式の相関係数 r^2 は、最低でも水温100 °Cにおける0.98)また、各々の回帰式より逆算した亀裂の幅 h'' も0.0102 cm前後で、水頭一定の場合の換算幅と等しい結果となった。

4.4.2 理論流量と実流量の比

Table 4は各水頭における σ 値(亀裂の幅を0.015 cmとしたときの理論流量と実流量との比)の算定結果を示したものである。これによると、 σ の平均値は水頭の変化にかかわらずほぼ一定値を示しているが、その標準偏差及び変動係数の値は、 $H = 10$ cmの場合を除くと、水頭が大きくなるほど小さくなっている。(Fig. 11参照)すなわち、水頭が大きくなるほど間隙の中の流れの状態が安定する傾向にあると言える。この理由としては、水頭が小さい場合は、水温の変化に伴う粘性の微妙な変動の流れに与える影響が相対的に大きく、供試体にかかる水頭が大きくなるにつれて、この影響が小さくなることと、また、水頭が小さい場合は、前述した内部の若干の凹凸により形成された水みちのようなものが一定せず、実験の中断その他による原因でこれも微妙に変化する可能性があることが考えられる。

Table 4中のカッコ内に示した値は、 σ 値から逆算したひびわれ幅であるが、 σ の平均値がほぼ一定値であることから明らかなように、換算幅もほぼ一定値を示している。また、その値は水温一定の場合とほぼ同一の値である。前項の議論(個々の水頭における回帰式から算定した換算幅が水頭が小さいほど大きい、すなわち q と I_p/μ の関係における傾きが大きい)を考え合わせると、水頭が小さい場合は、粘性の変化による流れへの影響が大きく、これに水みちの変化の影響が重なり、結果として水温の微妙な高低が流量に大きく作用する形となり、逆に、水頭が比較的大きくなると、水みちはほぼ一定で変化せず、水温の変化による粘性の変化が正しく流量の変化へと結び付く形になっていると考えられる。

なお、幅 0.05 cm 前後の自然ひびわれを有するコンクリート供試体について同様な試験を行っている文献値によれば⁶⁾、 σ 値として 3 ~ 15 (平均値 9 程度) と大きなばらつきを伴う結果が出ており、その値からわかるように、実流量は理論流量に比較して非常に小さな値となっている。また、本実験との比較においても、両実験で対象としているひびわれ幅の相違を考慮に入れると、自然ひびわれにおける漏水量は非常に小さいものであることが示唆される。

4.4.3 健全な場合との透水係数の比較

水温 15°C における本実験で使用した供試体の透水係数を算定してみる。亀裂の幅として、Table 3 中の水温 15°C の場合の回帰式より逆算した幅 $h^* = 0.0102 \text{ cm}$ を採用し、単位体積重量 $w = 0.99913 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 、粘性係数 $\mu = 1.1655 \times 10^{-5} \text{ (g}\cdot\text{sec/cm}^2\text{)}$ を(24)式に代入すると、

$$k = \frac{0.0102^2 \times 0.99913}{12 \times 1.1655 \times 10^{-5}} = 0.743 \text{ (cm/sec)}$$

自然ひびわれにおいては、幅が同一の場合、上記の値より 1 ~ 2 オーダー小さくなると思われるが、コンクリートが健全な場合の透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ (cm/sec)}$ 程度であるとされている^{1)~2)}。従って、構造物の壁面にある程度の大きさの貫通ひびわれが生じた場合には、水はその時点から非常に大きな速度で壁を通過してしまうであろうと予想される。種々の文献・仕様書によると、水密性からの許容ひびわれ幅を 0.005 ~ 0.006 cm と規定しているものが多いが⁵⁾、放射性廃棄物の処分用施設構造物に要求されるものとしては、ひびわれ幅はこの値よりさらに小さな値とすることが望ましく、従ってプレストレストコンクリートの導入等といったひびわれの発生を極力おさえるような施工法を採用することが必要になると考えられる。

5. ま と め

低レベル放射性廃棄物の最終貯蔵・処分の施設構造物材料として考えられているコンクリートは、種々の外的要因が作用した場合ひびわれが生じ易いという特性を有している。ひびわれの発生はコンクリートの水密性低下の大きな要因であり、従って、ひびわれを通しての漏水性状を知ることが、放射性核種の移動に対するコンクリートピット等の人工バリアの安全性評価において重要なことである。しかしながら、種々の要因が複雑に重なり合った結果生ずる自然のひびわれにおいては、その形態を数量化することは困難であり、漏水のメカニズムについても現状では解明されていない点が多い。それ故、本研究においては、コンクリートに自然発生するひびわれを模擬するものとして、微細間隙をもつ平行平板供試体を作製し、その中での水の流れを調べることにより、自然ひびわれにおける漏水性状把握の際の基礎データを得ようと試みた。以下に試験の結果を要約して述べる。

- (1) 表面を滑らかに仕上げた平行平板供試体においても、供試体が乾燥状態では流量も少なく、流れは非定常であるが、湿潤状態に向かうに従い流量も増加し、定常流となる。また、本実

なお、幅 0.05 cm 前後の自然ひびわれを有するコンクリート供試体について同様な試験を行っている文献値によれば⁶⁾、 σ 値として 3 ~ 15 (平均値 9 程度) と大きなばらつきを伴う結果が出ており、その値からわかるように、実流量は理論流量に比較して非常に小さな値となっている。また、本実験との比較においても、両実験で対象としているひびわれ幅の相違を考慮に入れると、自然ひびわれにおける漏水量は非常に小さいものであることが示唆される。

4.4.3 健全な場合との透水係数の比較

水温 15°C における本実験で使用した供試体の透水係数を算定してみる。亀裂の幅として、Table 3 中の水温 15°C の場合の回帰式より逆算した幅 $h^* = 0.0102$ cm を採用し、単位体積重量 $w = 0.99913$ (g/cm³)、粘性係数 $\mu = 1.1655 \times 10^{-5}$ (g·sec/cm²) を (24) 式に代入すると、

$$k = \frac{0.0102^2 \times 0.99913}{12 \times 1.1655 \times 10^{-5}} = 0.743 \text{ (cm/sec)}$$

自然ひびわれにおいては、幅が同一の場合、上記の値より 1 ~ 2 オーダー小さくなると思われるが、コンクリートが健全な場合の透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-10}$ (cm/sec) 程度であるとされている^{1)~2)}。従って、構造物の壁面にある程度の大きさの貫通ひびわれが生じた場合には、水はその時点から非常に大きな速度で壁を通過してしまうであろうと予想される。種々の文献・仕様書によると、水密性からの許容ひびわれ幅を 0.005 ~ 0.006 cm と規定しているものが多いが⁵⁾、放射性廃棄物の処分用施設構造物に要求されるものとしては、ひびわれ幅はこの値よりさらに小さな値とすることが望ましく、従ってプレストレストコンクリートの導入等といったひびわれの発生を極力おさえるような施工法を採用することが必要になると考えられる。

5. ま と め

低レベル放射性廃棄物の最終貯蔵・処分の施設構造物材料として考えられているコンクリートは、種々の外的要因が作用した場合ひびわれが生じ易いという特性を有している。ひびわれの発生はコンクリートの水密性低下の大きな要因であり、従って、ひびわれを通しての漏水性状を知ることが、放射性核種の移動に対するコンクリートピット等の人工バリアの安全性評価において重要なことである。しかしながら、種々の要因が複雑に重なり合った結果生ずる自然のひびわれにおいては、その形態を数量化することは困難であり、漏水のメカニズムについても現状では解明されていない点が多い。それ故、本研究においては、コンクリートに自然発生するひびわれを模擬するものとして、微細間隙をもつ平行平板供試体を作製し、その中での水の流れを調べることにより、自然ひびわれにおける漏水性状把握の際の基礎データを得ようと試みた。以下に試験の結果を要約して述べる。

- (1) 表面を滑らかに仕上げた平行平板供試体においても、供試体が乾燥状態では流量も少なく、流れは非定常であるが、湿潤状態に向かうに従い流量も増加し、定常流となる。また、本実

- 験では、純水を使用したこともあり、時間の経過に伴う目詰りの発生は見られなかった。
- (2) 本実験で採用した間隙幅 (0.015 cm)、及び水頭 (供試体上面で最大 80 cm) の範囲においては、そのレイノルズ数は限界レイノルズ数に比較して 2 オーダー小さく、水は完全な層流状態で流れる。従って、施設構造物に自然発生する可能性のあるひびわれについて、仮に貫通しているひびわれ幅の最大値として種々の文献において水密性からの許容値としている 0.006 cm をとり、水深の最大値を 5 m 前後と考えると、その内部の流れは層流になるものと予想される。
- (3) 流れが層流の場合、流量 (q) と圧力勾配 / 粘性係数 (I_p / μ) との間には、ナビエ・ストークス運動方程式の厳密解で与えられる比例関係が理論上成立するが、実測値についても非常によい相関が見い出され、ほぼ原点を通る回帰式が導き出された。一方、間隙幅 (h) と流量 (q) との関係においても、理論と同様間隙幅の 3 乗に比例するという結果が見い出された。しかし、この場合の幅 (回帰式より逆算した幅) は、供試体製作の際に若干の凹凸が生じたと考えられるため、理論幅である使用したゲージの幅より小さな値となった。また、水温を一定と仮定した場合も同様に良好な比例関係が成り立ち、回帰式より換算したひびわれ幅は全実測値より導出した回帰式を用いて算定した換算幅と同一の値となった。
- (4) 間隙幅としてゲージ幅を採用し、これを基に計算した流量を理論流量とし、それと実流量との比 (σ) を各水頭において比較してみると、水頭の変化による σ の平均値の変化はほとんどなく、従って間隙内の漏水性状は、巨視的には作用する水頭によらずほぼ一定であると見なせる。また、 σ 値の標準偏差、変動係数は水頭が大きくなるほど小さくなる傾向にあり、水頭の増加に伴い流れの状態が安定する方向に向かうものと考えられた。
- (5) 個々の水頭についてみると、水頭一定の場合の各回帰式より算定した換算ひびわれ幅は、水頭が大きくなるほど小さくなり、全実測値より算定した換算幅に漸近する結果となった。これらの結果より、水頭が小さければ小さいほど、間隙内の水みちの状態及び水の粘性の変化により、水頭が比較的大きい場合に較べて、漏水量が大きく変動する可能性を有することがわかった。
- (6) 本実験で用いた供試体の透水係数は、同一の幅を有する自然ひびわれの透水係数に比較して 1~2 オーダー大きなものと考えられるが、コンクリートが健全な場合と比較すると、自然ひびわれにおいても透水係数は非常に大きな値であると言えることができる。従って、実際の施設構造物の施工に当っては、ひびわれの発生を極力おさえるような方法の検討が望まれる。
- (7) 結局、理想的な微細間隙における漏水量については、幅の 3 乗及び圧力勾配に比例し、粘性係数に逆比例するとしている理論が非常に良い精度で成り立つことが確認された。この漏水量は、同一の幅を有する自然発生のひびわれにおける漏水量の最大値とみなすことができると考えられる。従って、今後は自然発生のひびわれについて、その目詰りを伴う複雑な漏水性状の解明と共に、理論との比較における定量化への何らかのアプローチが重要な課題である。

謝 辞

本報告書をまとめるに際して貴重な御助言を頂いた環境安全研究部低レベル放射性廃棄物処理処分研究室和達嘉樹室長に深く感謝致します。また、実験を進めるにあたり種々の御助言を頂いた環境安全研究部井伊博行氏、弘末文紀氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧（1985）
- 2) ネビル，後藤，尾坂，監訳：ネビルのコンクリートの特性，技報堂（1979）
- 3) 土木学会編：わかり易い土木講座 10 コンクリート工学（I）施工，彰国社（1976）
- 4) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート技術の要点'85，技報堂（1985）
- 5) 日本コンクリート工学協会編：コンクリートのひびわれ調査，補修・補強指針，技報堂（1987）
- 6) 石川広三：モルタル・コンクリート壁体の亀裂からの漏水について，“亀裂の形状による漏水量の変動”，日本建築学会大会学術講演梗概集，（1977年10月）
- 7) 重倉祐光：ひびわれと防水，コンクリートジャーナル，No. 9（1973）
- 8) 松下清夫：鉄筋コンクリート陸屋根施工法の試案，UDC（1969）
- 9) 向井毅：コンクリートのキレツ巾と漏水について，日本建築学会関東支部，第38会研究発表会梗概集（1967）
- 10) 伊藤，坂口，西山，清水：コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究，セ技年報（1987）
- 11) 太田英一：水力学および流体力学演習，学献社（1966）
- 12) 本間仁：標準水理学，丸善（1972）
- 13) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店（1974）
- 14) 日本流体力学会編：流体力学ハンドブック，丸善（1987）
- 15) 板谷松樹：水力学，朝倉書店（1966）
- 16) 日本機械学会編：機械工学便覧（1977）

謝 辞

本報告書をまとめるに際して貴重な御助言を頂いた環境安全研究部低レベル放射性廃棄物処理処分研究室和達嘉樹室長に深く感謝致します。また、実験を進めるにあたり種々の御助言を頂いた環境安全研究部井伊博行氏、弘末文紀氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧（1985）
- 2) ネビル，後藤，尾坂，監訳：ネビルのコンクリートの特性，技報堂（1979）
- 3) 土木学会編：わかり易い土木講座 10 コンクリート工学(I) 施工，彰国社（1976）
- 4) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート技術の要点'85，技報堂（1985）
- 5) 日本コンクリート工学協会編：コンクリートのひびわれ調査，補修・補強指針，技報堂（1987）
- 6) 石川広三：モルタル・コンクリート壁体の亀裂からの漏水について，“亀裂の形状による漏水量の変動”，日本建築学会大会学術講演梗概集，（1977年10月）
- 7) 重倉祐光：ひびわれと防水，コンクリートジャーナル，No. 9（1973）
- 8) 松下清夫：鉄筋コンクリート陸屋根施工法の試案，UDC（1969）
- 9) 向井毅：コンクリートのキレツ巾と漏水について，日本建築学会関東支部，第38会研究発表会梗概集（1967）
- 10) 伊藤，坂口，西山，清水：コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究，セ技年報（1987）
- 11) 太田英一：水力学および流体力学演習，学献社（1966）
- 12) 本間仁：標準水理学，丸善（1972）
- 13) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店（1974）
- 14) 日本流体力学会編：流体力学ハンドブック，丸善（1987）
- 15) 板谷松樹：水力学，朝倉書店（1966）
- 16) 日本機械学会編：機械工学便覧（1977）

Table 1 Specified mix of concrete

design strength (kgf/cm ²)	proportioning strength (kgf/cm ²)	slump (cm)	air content (%)	M. S. (mm)	W / C (%)	s / a (%)	quantity of material per unit volume of concrete (kg/m ³)				
							W	C	S	G	ad
240	285	12	3.9	25	52.5	40.6	158	301	757	1110	0.752

M.S. : maximum size
of aggregate

W/C : ratio of water
to cement

s/a : sand percentage

W : water

C : cement

S : fine aggregate

G : coarse aggregate

ad : additives

Table 2 Relation between water temperature and weight of unit volume
(1 atm)

water temperature θ (°C)	0	4	10	15	20	25	30
weight of unit volume W (g/cm ³)	0.99987	1.00000	0.99973	0.99913	0.99823	0.9971	0.9957

Table 3 Relation between the amount of leakage (q) and the ratio of pressure gradient / coefficient of viscosity (I_p/μ) at constant water temperature

head H (cm)	regression equation at constant head ($q = a + b \frac{I_p}{\mu}$)	width derived from the equation h' (cm) ($h = \sqrt[3]{\frac{12b'}{B}}$)	water temperature 0 °C			water temperature 10 °C			water temperature 15 °C			water temperature 20 °C			water temperature 100 °C		
			pressure gradient $\frac{I_p}{\mu}$ ($= \frac{W \cdot H + T}{B}$) (g/cm ³)	$\frac{I_p}{\mu}$	q (cm ³ /sec)	pressure gradient $\frac{I_p}{\mu}$ ($= \frac{W \cdot H + T}{B}$) (g/cm ³)	$\frac{I_p}{\mu}$	q (cm ³ /sec)	pressure gradient $\frac{I_p}{\mu}$ ($= \frac{W \cdot H + T}{B}$) (g/cm ³)	$\frac{I_p}{\mu}$	q (cm ³ /sec)	pressure gradient $\frac{I_p}{\mu}$ ($= \frac{W \cdot H + T}{B}$) (g/cm ³)	$\frac{I_p}{\mu}$	q (cm ³ /sec)	pressure gradient $\frac{I_p}{\mu}$ ($= \frac{W \cdot H + T}{B}$) (g/cm ³)	$\frac{I_p}{\mu}$	q (cm ³ /sec)
10	$q = -0.030 + 0.128 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 0.96$)	0.0107	1.6585	0.904 × 10 ⁵	0.086	1.6583	1.241 × 10 ⁵	0.129	1.6573	1.422 × 10 ⁵	0.152	1.6558	1.612 × 10 ⁵	0.176	1.5898	5.430 × 10 ⁵	0.665
20	$q = -0.078 + 0.161 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 1.00$)	0.0115	2.3172	1.264 × 10 ⁵	0.126	2.3169	1.733 × 10 ⁵	0.201	2.3155	1.987 × 10 ⁵	0.242	2.3134	2.252 × 10 ⁵	0.285	2.2211	7.586 × 10 ⁵	1.143
40	$q = -0.077 + 0.141 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 0.98$)	0.0110	3.6346	1.982 × 10 ⁵	0.202	3.6341	2.719 × 10 ⁵	0.306	3.6319	3.116 × 10 ⁵	0.362	3.6286	3.533 × 10 ⁵	0.421	3.4838	11.898 × 10 ⁵	1.601
60	$q = -0.051 + 0.122 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 0.99$)	0.0105	4.9519	2.700 × 10 ⁵	0.278	4.9512	3.704 × 10 ⁵	0.401	4.9483	4.246 × 10 ⁵	0.467	4.9438	4.813 × 10 ⁵	0.536	4.7465	16.211 × 10 ⁵	1.927
80	$q = -0.063 + 0.124 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 1.00$)	0.0105	6.2693	3.419 × 10 ⁵	0.361	6.2684	4.690 × 10 ⁵	0.519	6.2646	5.375 × 10 ⁵	0.604	6.2590	6.093 × 10 ⁵	0.693	6.0093	20.524 × 10 ⁵	2.482
10~80	$q = 0.003 + 0.112 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 0.99$)	0.0102	regression equation at the water temperature of 0 °C ($q' = a' + b' \frac{I_p}{\mu}$) $q' = -0.012 + 0.109 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 1.00$)			regression equation at the water temperature of 10 °C ($q' = a' + b' \frac{I_p}{\mu}$) $q' = 0.001 + 0.110 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 1.00$)			regression equation at the water temperature of 15 °C ($q' = a' + b' \frac{I_p}{\mu}$) $q' = 0.009 + 0.110 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 1.00$)			regression equation at the water temperature of 20 °C ($q' = a' + b' \frac{I_p}{\mu}$) $q' = 0.017 + 0.111 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 0.99$)			regression equation at the water temperature of 100 °C ($q' = a' + b' \frac{I_p}{\mu}$) $q' = 0.180 + 0.112 \times 10^{-5} \frac{I_p}{\mu}$ ($r^2 = 0.98$)		
			width h'' (cm) derived from the equation ($h'' = \sqrt[3]{\frac{12b'}{B}}$)			width h'' (cm) derived from the equation ($h'' = \sqrt[3]{\frac{12b'}{B}}$)			width h'' (cm) derived from the equation ($h'' = \sqrt[3]{\frac{12b'}{B}}$)			width h'' (cm) derived from the equation ($h'' = \sqrt[3]{\frac{12b'}{B}}$)			width h'' (cm) derived from the equation ($h'' = \sqrt[3]{\frac{12b'}{B}}$)		
			0.0101			0.0102			0.0102			0.0102			0.0102		

Relation between weight per unit volume and coefficient of viscosity at various water temperature under 1 atm

water temperature θ (°C)	0	10	15	20	100
weight of unit volume W (g/cm ³)	0.99987	0.99973	0.99913	0.99823	0.9584
coefficient of viscosity μ (g·sec/cm ²)	1.8337×10^{-5}	1.3366×10^{-5}	1.1655×10^{-5}	1.0272×10^{-5}	0.2928×10^{-5}

width of gap B = 12.553 (cm)
length of flow path T = 15.180 (cm)

Table 4 Ratio (σ) of theoretical amount of leakage (q) to measured amount of leakage (q') at $h = 0.015$ cm

head H (cm)	number of measurement	range of water temperature θ ($^{\circ}$ C)	range of σ value (calculated width $h = \frac{0.015}{\sqrt{\sigma}}$ (cm))	mean value of σ (calculated width $h = \frac{0.015}{\sqrt{\sigma}}$ (cm))	standard deviation of σ	coefficient of variation
10	26	4.80 ~ 17.51	3.22 ~ 3.62 (0.0102 ~ 0.0098)	3.39 (0.0100)	0.1232	3.63
20	49	4.70 ~ 20.82	2.77 ~ 3.30 (0.0107 ~ 0.0101)	2.97 (0.0104)	0.1312	4.42
40	29	6.00 ~ 23.85	2.83 ~ 3.25 (0.0106 ~ 0.0101)	3.06 (0.0103)	0.1096	3.58
60	42	9.03 ~ 22.88	3.11 ~ 3.33 (0.0103 ~ 0.0100)	3.19 (0.0102)	0.0456	1.43
80	38	8.91 ~ 21.89	3.07 ~ 3.27 (0.0103 ~ 0.0101)	3.12 (0.0103)	0.0392	1.25
10~80	184	4.70 ~ 23.85	2.77 ~ 3.62 (0.0107 ~ 0.0098)	3.13 (0.0103)	0.1667	5.33

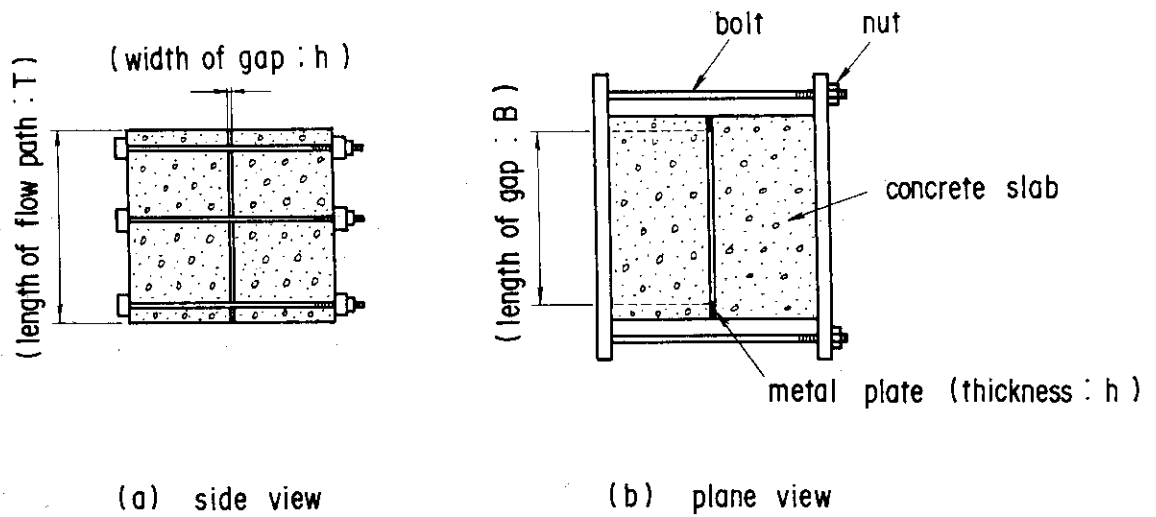


Fig. 1 Concrete slabs with a parallel gap

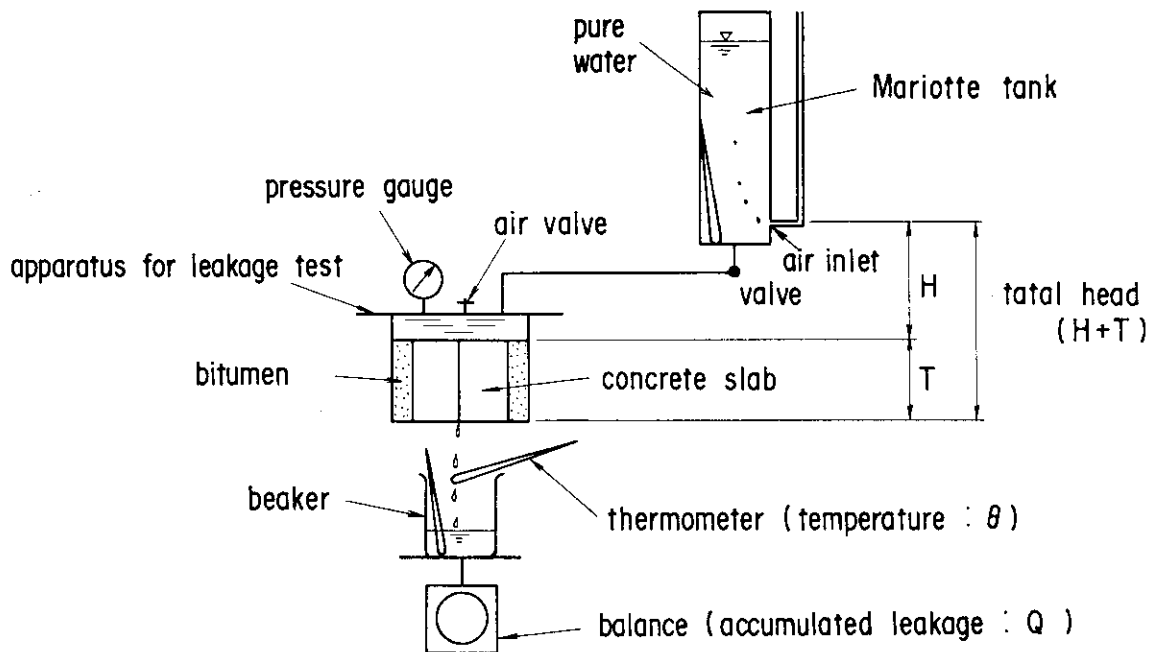


Fig. 2 Set-up of the leakage experiment using concrete slabs with a parallel gap

length of gap $B = 12.553$ (cm), length of flow path $T = 15.180$ (cm)
 head $H = 10$ (cm)

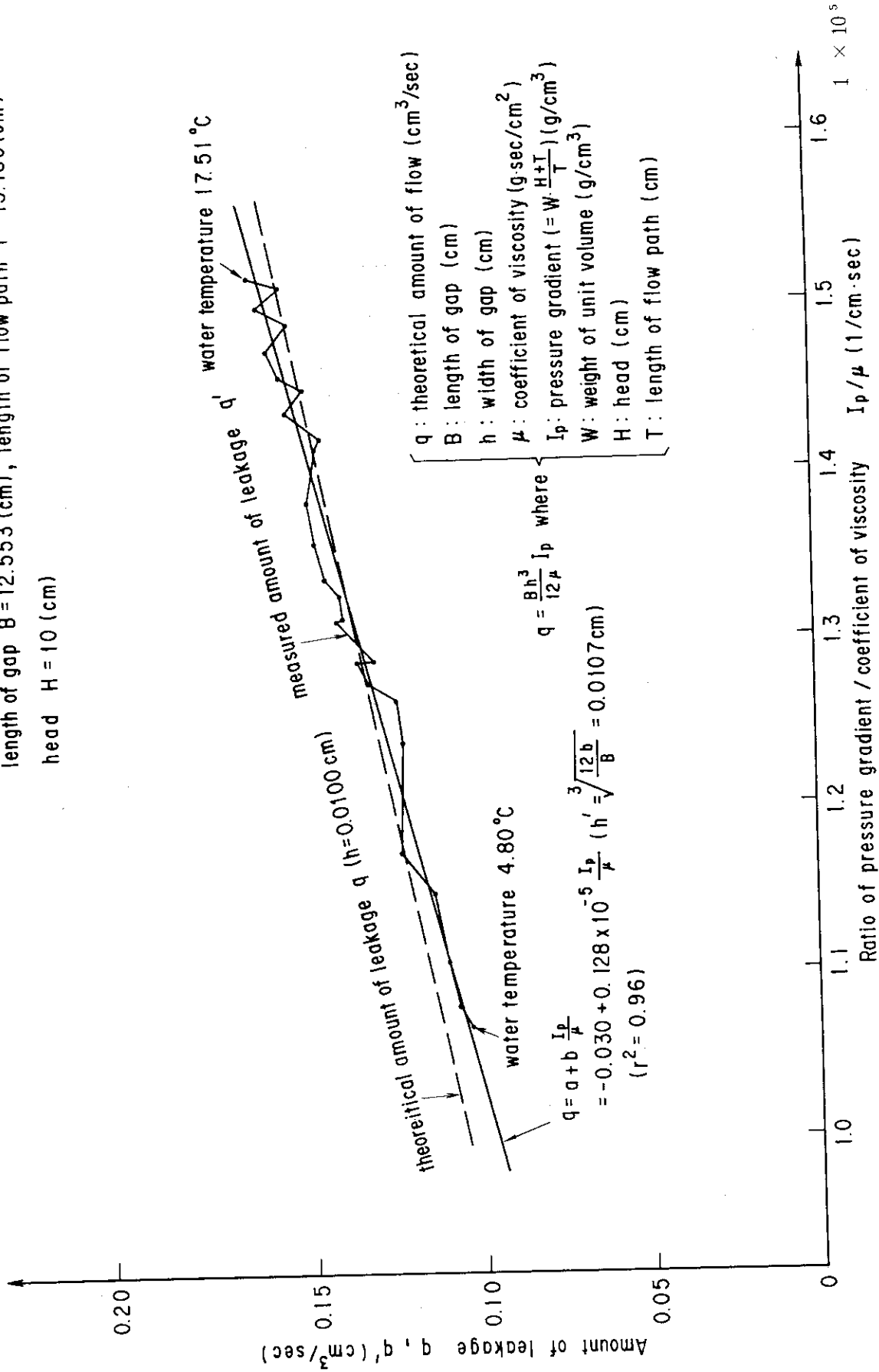


Fig. 3 Relation between the amount of leakage (q) and the ratio of pressure gradient / coefficient of viscosity (I_p/μ) (head : 10 cm, thickness of metal plate : 0.015 cm)

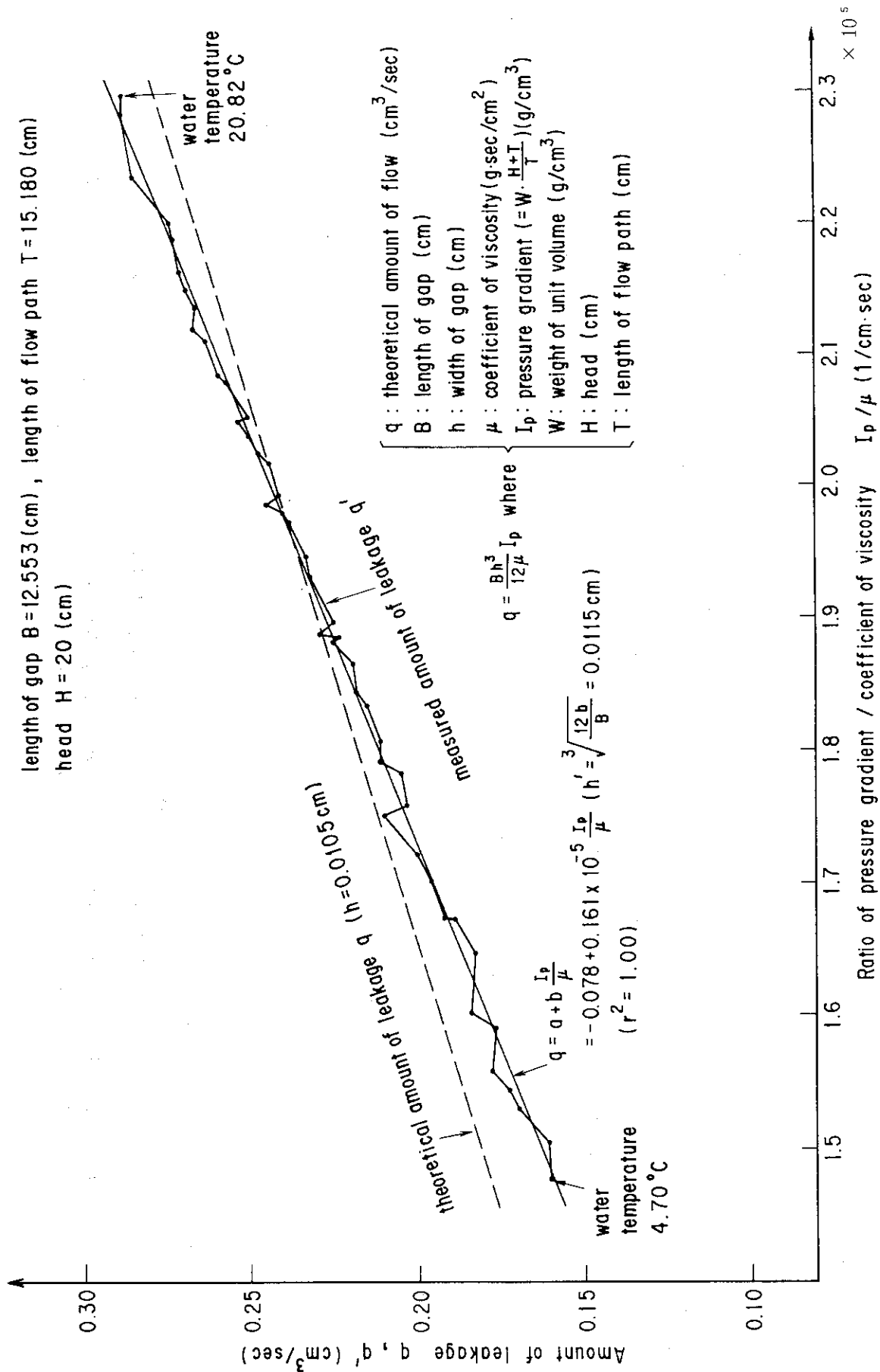


Fig. 4 Relation between the amount of leakage (q) and the ratio of pressure gradient / coefficient of viscosity (I_p / μ) (head : 20 cm, thickness of metal plate : 0.015 cm)

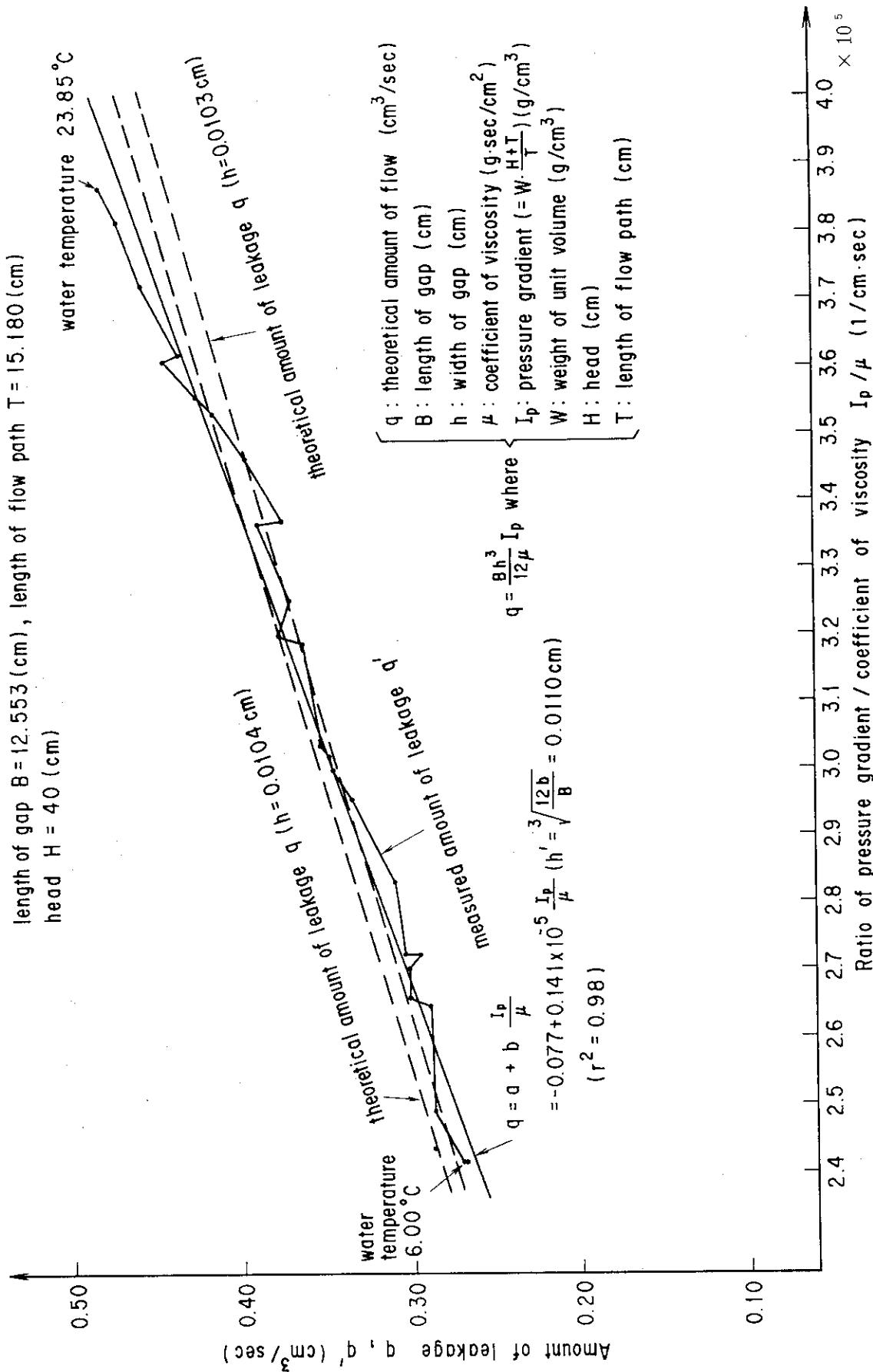


Fig. 5 Relation between the amount of leakage (q) and the ratio of pressure gradient / coefficient of viscosity (I_p / μ) (head : 40 cm, thickness of metal plate : 0.015 cm)

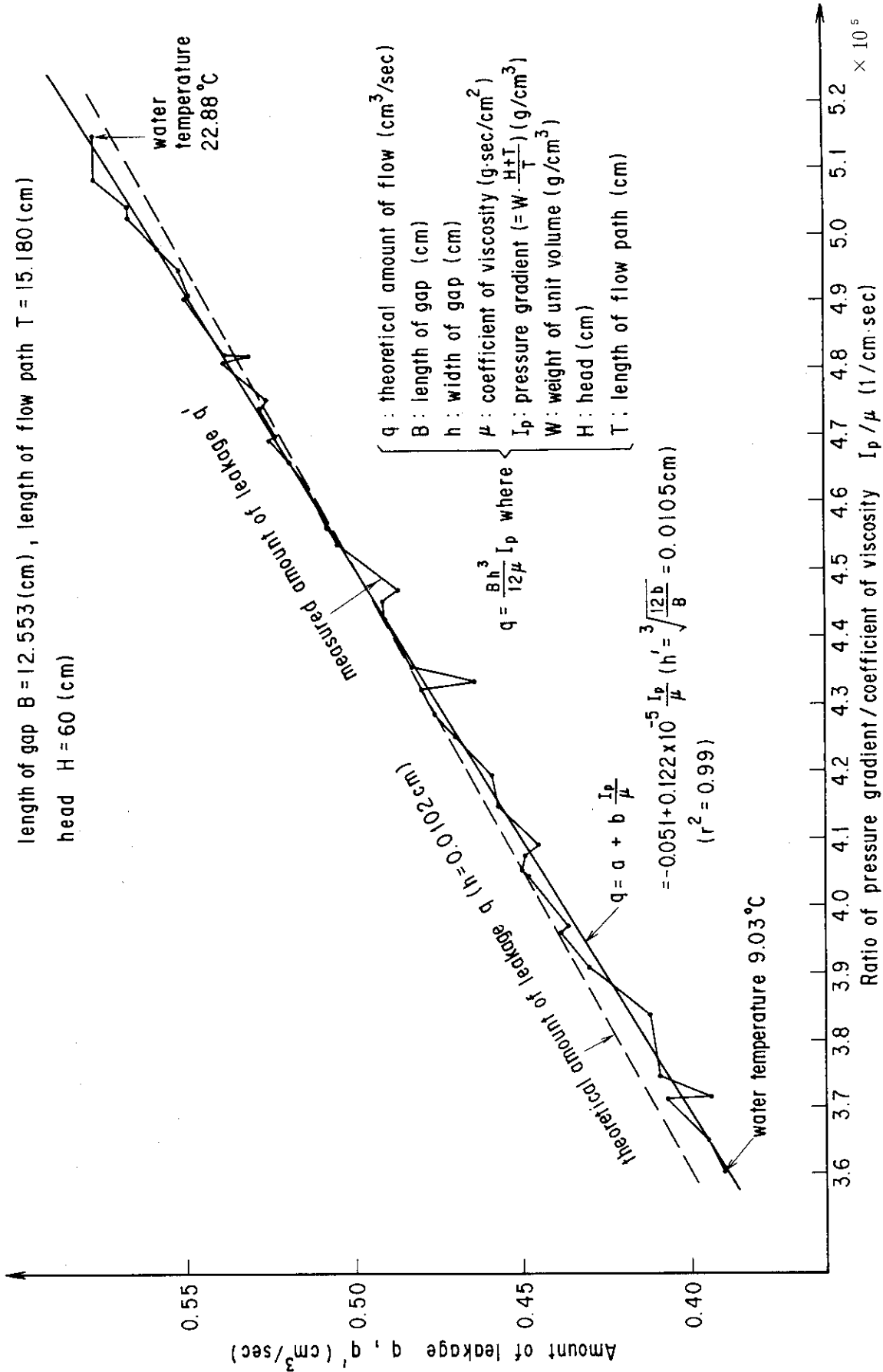


Fig. 6 Relation between the amount of leakage (q) and the ratio of pressure gradient/coefficient of viscosity (I_p/μ) (head : 60cm, thickness of metal plate : 0.015 cm)

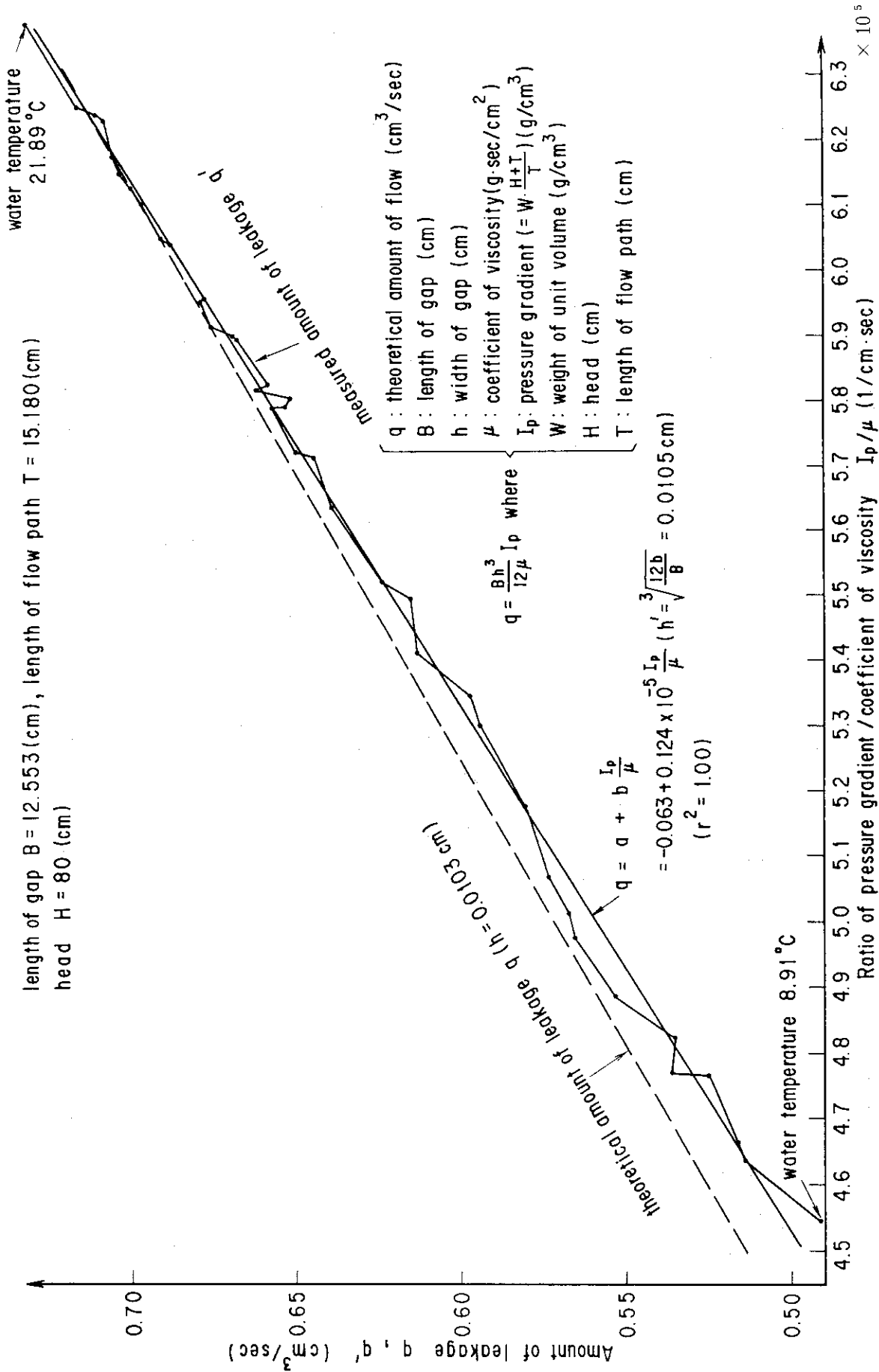


Fig. 7 Relation between the amount of leakage (q) and the ratio of pressure gradient/coefficient of viscosity (I_p/μ) (head : 80 cm, thickness of metal plate : 0.015 cm)

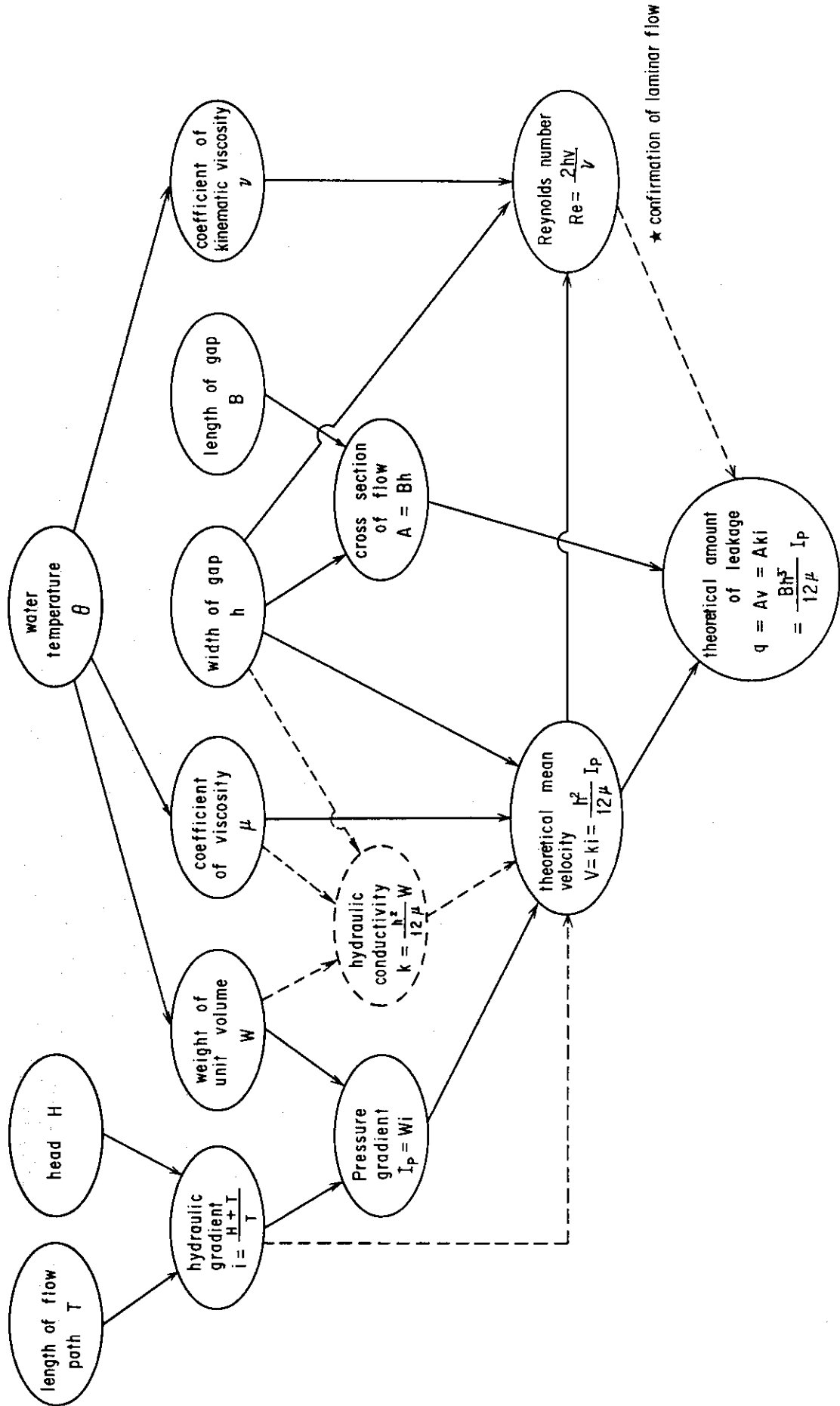


Fig. 8 Relations of parameters affect to the flow in a parallel gap due to pressure gradient

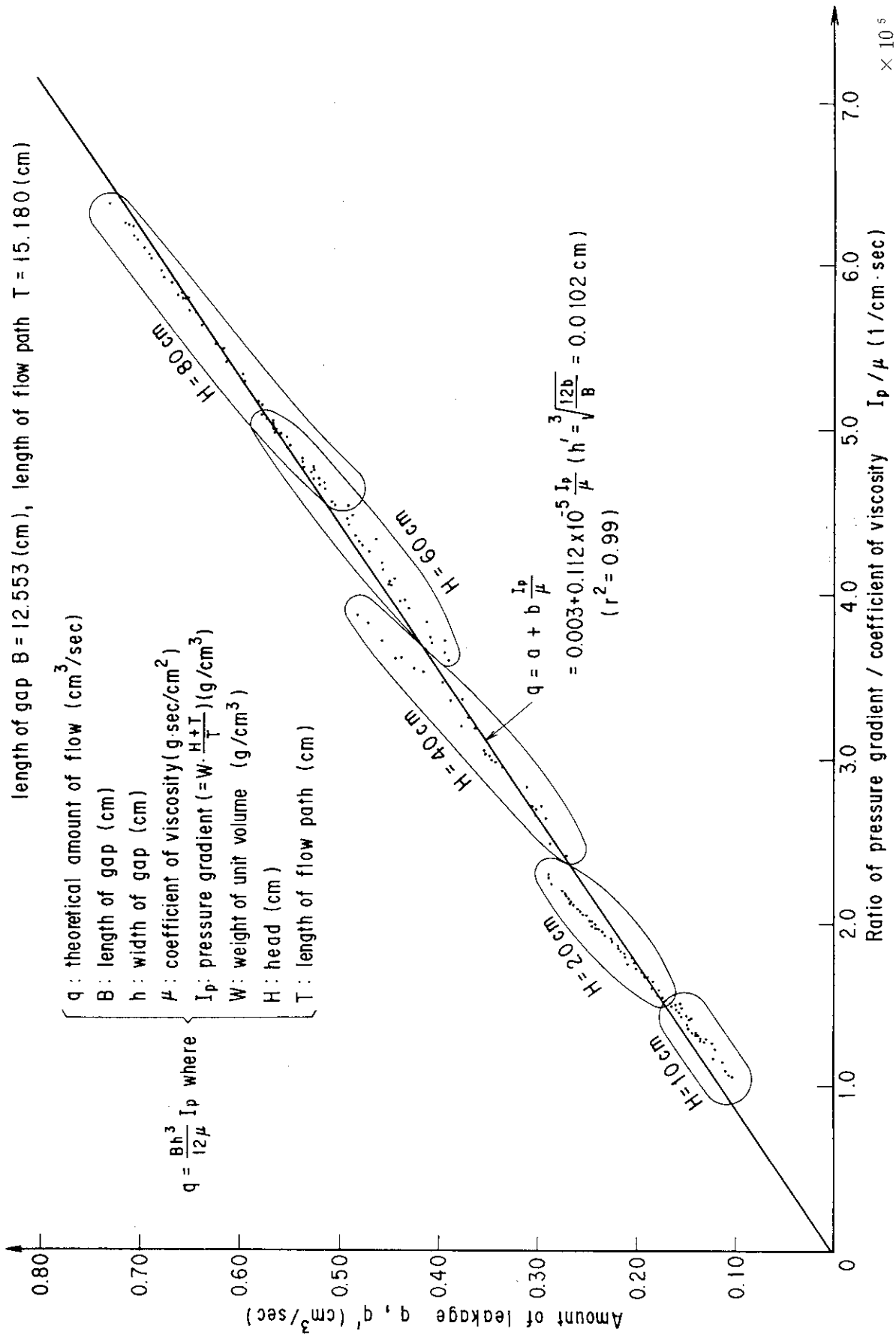


Fig. 9 Relation between the amount of leakage (q) at the head of 10cm ~ 80cm and the ratio of pressure gradient / coefficient of viscosity (I_p/μ)

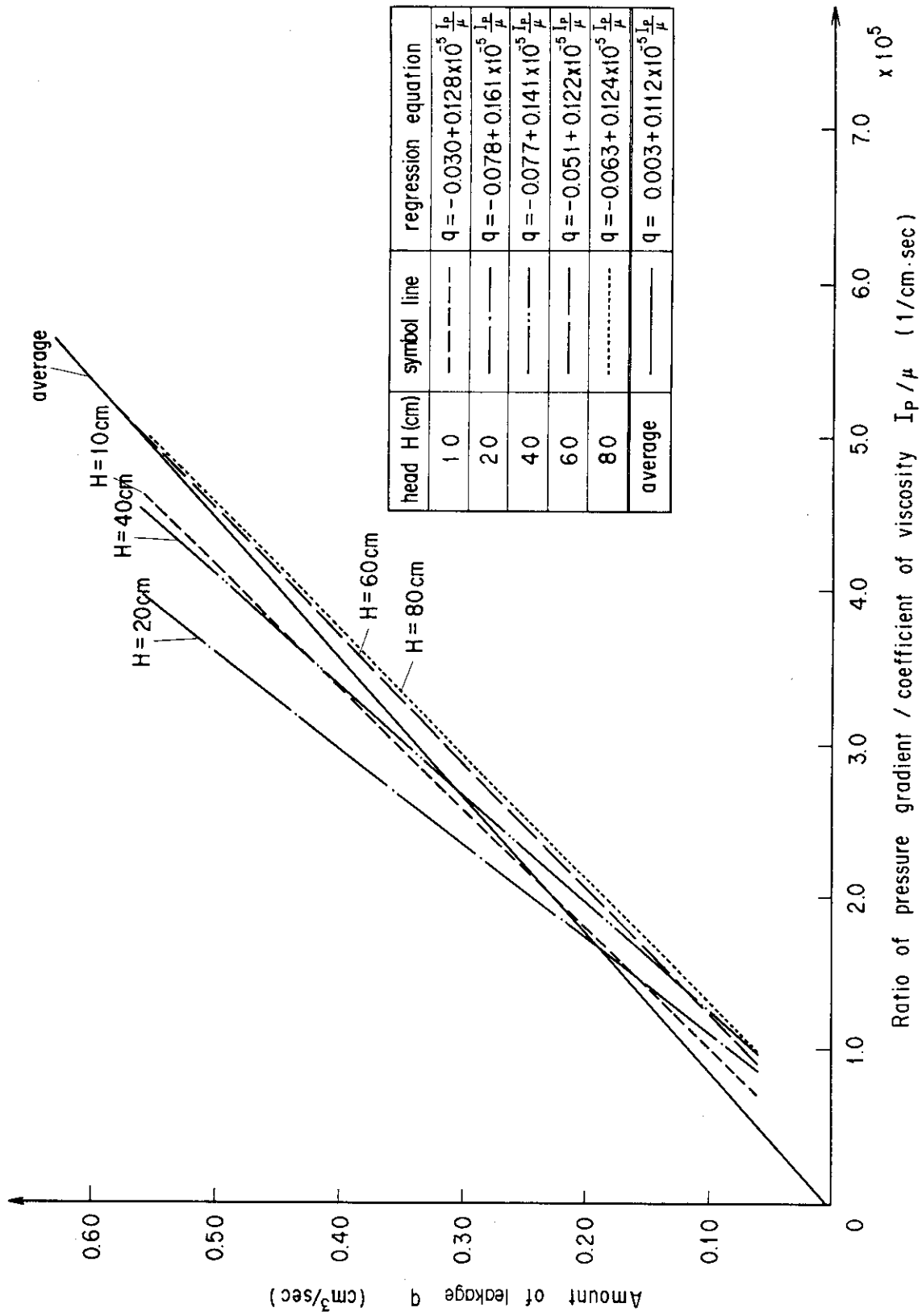


Fig. 10 Regression lines for the relations between q and I_p/μ at each head

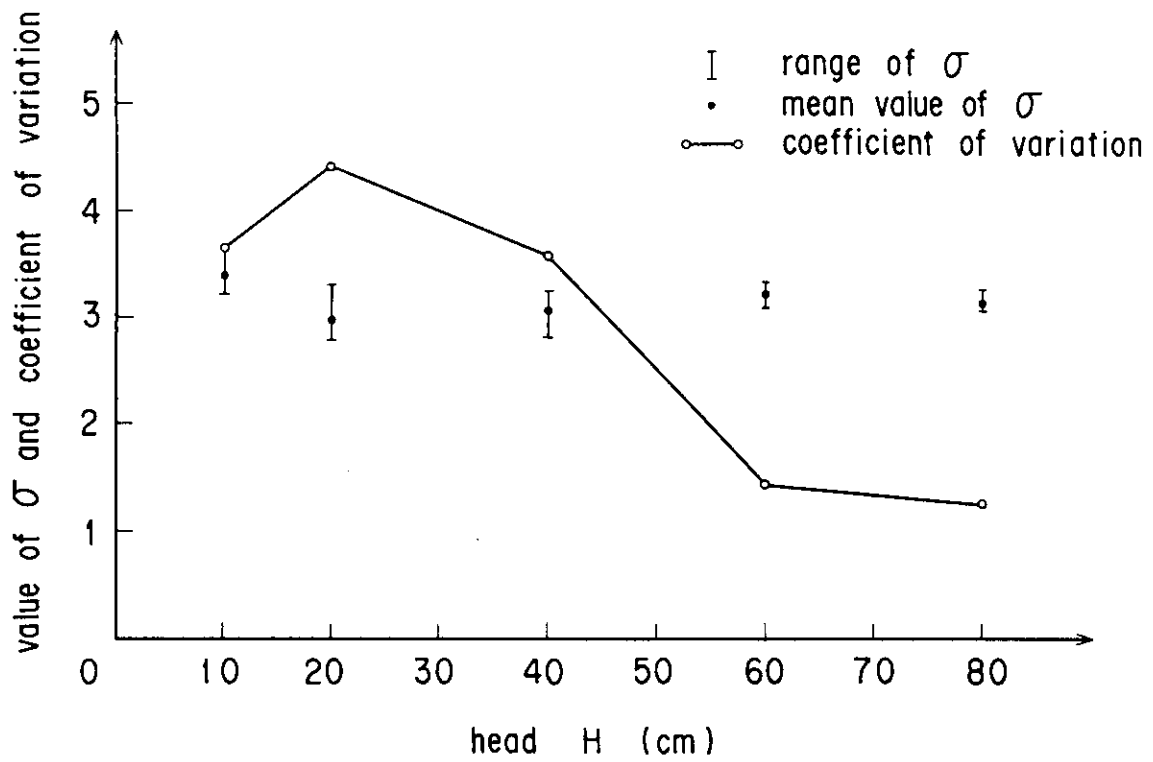


Fig. 11 Distribution of σ and its coefficient of variation at each head