

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	井出豊
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第4492号, 授与年月日:2000年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:瀧口 克己
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第4492号, Conferred date:2000/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

ひびわれの生じたコンクリート壁からの
気体漏洩に関する研究

平成12年度

東京工業大学大学院情報理工学研究科
情報環境学専攻

井 出 豊

謝 辞

本研究を行うにあたり、指導教官である東京工業大学 瀧口克己教授には、懇切丁寧な御指導・御助言および多くの励ましを頂きました。ここで培いました経験を今後の財産として心に刻むとともに、心より感謝いたします。

東京工業大学 堀田久人助教授には、本研究を進めるにあたり多くの御助言・御指導を頂きました。心より感謝する次第です。

東京工業大学滝口研究室の野口聖子事務官には大学院提出資料の作成などで多大な援助を頂きました。 厚く御礼致します。

東京工業大学滝口研究室の博士・修士および学部の方々には研究室内の設備の使い方など筆者が不慣れな部分を多く教えて頂きました。ここに感謝の意を表します。

本研究をまとめる作業にあたり、著者が所属しております株式会社竹中工務店設計部構造課の上司、同僚には多くの協力を得ることができました。ここに記して心より感謝致します。

最後に、多くの支持をしてくれた筆者の家族へ感謝の意を表します。

井出 豊

論文要旨

本論文は、エネルギー関連施設の設計などにおいて必要性が高まっている、ひびわれの生じた鉄筋コンクリート壁を通しての気体漏洩問題について、実験的手法を用いて漏洩量を把握する方法を提示し、漏洩量の定式化を行ったものであり、具体的には以下の6章より構成されている。

第1章「序論」では、本研究における背景および関連する既往の研究についての概要、解決すべき問題点を整理し、本研究の目的であるひびわれた鉄筋コンクリート壁の漏洩性能について目的を明確にしている。

第2章「ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩実験」ではこれまでにほとんど行われてこなかった、ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩実験手法について詳細に説明を行い、2次元ポアズイユ流れを利用した実験式を用いて、漏洩量の基本的な尺度を与えることを目的とした。ひびわれの生じたコンクリートからの気体漏洩についてはひびわれ面の微視的巨視的凹凸形状を考慮すると解析的定量化は困難であり、実験的手法が効果的であると考えられ、漏洩実験方法を提案し実施することは非常に重要であると考えられる。

実験パラメーターは壁厚 (15、30、60cm)、壁両側の圧力差 ($0.01 \leq \Delta p \leq 2.0 \text{ atm}$)、ひびわれ幅 ($0.05 \leq W \leq 0.60 \text{ mm}$) であり、漏洩量の測定には酸素ガスを用いた。実験結果より漏洩量 (Q) を壁厚 (T) ひびわれ幅 (W) 圧力差 (Δp) 粘性係数 (μ)、骨材最大粒径 (D) の関数として定式化を行った。

第3章「気体の圧縮性を考慮した漏洩量予測実験式」では気体の圧縮性を考慮した実験式を提案し、この実験式と新たに行った漏洩実験結果により前章で得られた知見に対しての検討を行った。まず、前章で提示した実験結果について気体の圧縮性を考慮して再整理を行い、流れを一次元等温圧縮流れ仮定した実験式の提案を行った。続いて、粗骨材の粒径を変化させた試験体、アルミニウムのモデル骨材を用いて骨材形状を変化させた試験体、及びガラス板を用いた理想ひびわれモデルの試験体についての結果を示した。いずれの実験結果においても気体漏洩量は、圧縮性流体の一次元定常等温流れを表す式を利用した実験式によって評価することができること、ひびわれ面の摩擦係数は流量およびひびわれ幅の関数となること、また摩擦係数はコンクリートの骨材の粒径・形状等によって変化することを明らかにしている。更に、この評価式を用いて2次元ポアズイユ流れを利用した実験式がひびわれを生じたコンクリート壁からの気体漏洩量実用式となりえる付帯条件について検討を行い、ポアズイユ流れを利用した実験式が簡便に漏洩量を評価できる実用式となり得ることを提示した。

第4章「ひびわれの生じたコンクリート壁からの種類の異なる気体の漏洩」においてはひびわれの生じたコンクリート壁の気体漏洩に関して気体の種類をかえた実験および幅が一定でないひびわれについての漏洩実験を行い前章までに得られた知見の応用を図っている。

まず、第3章で提示した2平板間の一次元定常等温圧縮流れを表す式を利用した実験式の各種気体への適用性について4種類の気体を用いて検討を行い、対象とする気体が違ってもひび割れを極端に理想化した2平板間の気体の流れを表す式を利用して実験結果を精度良く定式できるかどうかについて検討を行った。

さらに、ひびわれ幅が壁厚方向に一定で壁面で緩やかに変化する場合の気体漏洩実験につい

でも実験と検討を行い、ひびわれ幅がゆるやかに変化して一定でない場合の気体漏洩量はひびわれ幅が一定な場合の漏洩結果から推定可能であり、ひびわれ内のコンクリートに関する摩擦係数の評価は共有できることを述べている。

第5章「ひびわれを生じたコンクリート部材からの液化ガスの漏洩」では、海浜地区に建設されているコンクリート構造の液化ガス貯蔵施設において液化ガスを貯液する役目が期待されているコンクリート部材に対し、その主な漏洩経路となるひびわれを通した漏洩について論じている。

このコンクリート部材の極低温液体の貯液能力が確認できれば漏洩防止用に施されている金属製薄膜（メンブレン）を軽減できる可能性があり、大幅なコストダウンにつながる可能性がある。そこで、本章ではひびわれ内の流体の変化に注目して前章までに用いた圧縮流れを利用した実験式を適用しひびわれの生じたコンクリートからの液化ガス漏洩量を把握する方法について論述している。本方法を用いれば液化ガスが外部に多量に漏出する危機的状況が比較的簡易に予測することができ、ひびわれの生じたコンクリート部材の液化ガス貯液性能についての限界状態を把握する上で極めて有効な手法であると結論している。

第6章「結論」では本研究で得られた知見について総括的に述べている。

目 次

第1章 序 論	1
1.1 本研究の背景と目的	2
1.2 既往の研究	3
1.2.1 気体の漏洩に関する研究	3
1.2.2 液体の漏洩に関する研究	4
1.2.3 液化ガスの漏洩に関する研究	4
1.3 論文の構成	5
第2章 ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩実験	8
2.1 はじめに	9
2.2 試験体	9
2.3 シーリング	9
2.4 漏洩実験法	10
2.4.1 ひびわれ幅の制御	10
2.4.2 漏洩量の測定	10
2.4.3 シーリングの確認	11
2.5 実験結果および考察	11
2.6 まとめ	13
第3章 気体の圧縮性を考慮した漏洩量予測実験式	38
3.1 はじめに	39
3.2 試験体及び実験方法	39
3.3 ひびわれを理想化した場合の気体の流れ	40
3.3.1 圧縮性流体の一次元流れの基礎式	40
3.3.2 気体の圧縮性を考慮した実験式	41
3.3.3 ひびわれを理想化した場合の流れ	42
3.4 骨材粒径、骨材形状の影響	43
3.5 コンクリート壁のひびわれからの気体漏洩に関する実用式の提案	43
3.6 まとめ	46
第4章 ひびわれの生じたコンクリート壁からの種類の異なる気体の漏洩	94
4.1 はじめに	95
4.2 試験体	95
4.3 漏洩実験方法	95
4.4 実験結果および考察	95
4.4.1 各種気体の漏洩に関する実験結果	95
4.4.2 ひびわれ幅が一定でない場合の漏洩実験結果	98

4.5 まとめ	99
第5章 ひびわれを生じたコンクリート部材からの液化ガスの漏洩	139
5.1 はじめに	140
5.2 岡村、前川らの実験概要	140
5.3 コンクリートの熱伝導解析	141
5.3.1 熱伝導解析について	142
5.3.2 熱伝導解析モデル	143
5.3.3 温度解析結果	143
5.4 漏洩量に関する実験値と予測値の比較	143
5.5 まとめ	145
第6章 結論	172
参考文献	176
発表論文	178
図表リスト	180
記号リスト	182

第1章 序 論

1.1 本研究の背景と目的

1.2 既往の研究

1.2.1 気体の漏洩に関する研究

1.2.2 液体の漏洩に関する研究

1.2.3 液化ガスの漏洩に関する研究

1.3 論文の構成

1.1 本研究の背景と目的

「日本の原子力開発史上、最悪の事態を招いた茨城県東海村臨界事故が平成 11 年 9 月 30 日に起こった。燃料加工施設という小規模施設で起きた日本初の臨界事故は、民間事業所での極めてずさんな作業実態や、国や自治体の防災体制の不備など、原子力の安全体制の危うさをいやというほどあぶりだした。(1999 年 10 月 2 日 日経新聞)」

この東海村の事故は安全性の確認よりも経済性、効率性を重視したあまり起きた事故であり、明らかなヒューマンエラーであると推察できる。どんなに多重の安全装置を施していてもこのようなヒューマンエラーが起こる限り絶対的な安全は保証できず、不慮の事故に対する最終的な安全設備が不可欠となっているされる理由にもなっている。

将来の日本のエネルギー政策上、環境政策上、原子力を利用した発電の必要性があるならば今後、再発しない仕組みを作る事はもちろんの事、安全を考慮している原子力関連施設の安全性保持方法について再検討する必要性があると考えられる。

原子力関連施設の安全性に大きな影響を与える設備についてはフェイルセーフシステム (fail-safe-system) が採用されており、システムの一部に故障があった場合でも、常に安全状態に向かうという考え方に基いている。その安全性の担保の一つがプラントを覆う遮蔽コンクリート壁であり、万一システムに異常が生じ放射性物質が制御できなくなった場合にも最終的に建屋の外へは漏洩しないように万全を期す目的で十分な厚さを保有するものである。いわばこのコンクリート壁は最後の“安全弁”であり、このコンクリートの遮蔽性が損なわれた場合は即、周辺的环境や住民に放射能の影響が及んでしまう事になることになるのである。

このコンクリート壁の設計、施工においては耐震安全性と絡めて大変慎重さが要求されるわけであるが、とりわけ十分な遮蔽性を得るために大きな障害となるのが硬化時の乾燥収縮や外力により生じる壁厚を貫通するひびわれである。ひびわれを通して流出する気体漏洩量がコンクリート壁の放射性物質の遮蔽性に大きく影響を与えている。実際の原子力施設においては建屋内側を外気に対して僅かに負圧に保って有害物質などが気体と共に漏出しない仕組みを考慮している。しかしながら、何らかの原因で起こった事故の影響により内外の圧力状態を維持できない状況も考えられ、原子力関連施設の設計においてひびわれの生じたコンクリート外壁のを通しての気体漏洩量を把握する重要性が高まっている状況である。

一方、上記の原子力施設と同様に石油代替エネルギーとして需要が増加している液化天然ガス (LNG) の貯蔵施設においても、コンクリート壁の耐震性以外の面である液化ガス遮蔽壁としての必要性が高まっている。

LNG 貯蔵施設において地中にタンクを埋める地下式貯槽タイプは、コンクリート円形躯体、その内側に設置されたメンブレン、及び屋根で構成されている。このメンブレンはガス圧及び液圧を保冷材を介して躯体に伝える金属製薄膜であるため、耐圧部としての機能は要求されないが貯槽内液及びガスに対して液密性及び気密性を有するように設計、製作されたものである。この金属製薄膜が LNG 貯槽施設建設費に占める割合は約 10% と高く、施工期間においても多くの工期を占めている。メンブレンの外周を覆うコンクリート壁に液密性及び気密性が十分に保証され

ば、メンブレンの低減あるいは省略が可能となり、LNG タンクをより経済的に設計できる可能性がある。

コンクリート壁の LNG 貯液性能を確保する上で大きな要因となるのがやはりひびわれを通しての液化ガスの漏出現象であり、これがひびわれの生じたコンクリート壁の液化ガス漏洩問題を前述の気体漏洩問題と関連して、本論文で取り上げた背景である。

以上のように、ひびわれの生じたコンクリート壁あるいはコンクリート部材を通しての気体漏洩あるいは液化ガス漏洩を考える時、最大の要因となる貫通ひび割れを通して流出する流体を定量的に把握する事が特にエネルギー関連施設の設計において急務となっている。しかしながら、現状において得られている知見は決して十分とはいえない状況である。今後、建築基準法の改正など国際化の歩みに合わせた、性能規定の設計法が実践されていくことが予想される。これに伴ない、建築物の保持すべき様々な性能が一つ一つ明らかにされていく作業が急ピッチで進むことになり、さらにアカウンタビリティの徹底により建物の保持する性能をいかに具体的にクライアントに証明できるかが重要なテーマとなっている。本研究の目的は合理的にエネルギー関連施設を設計・施工するために不可欠であるひびわれの生じたコンクリート壁の有する気体漏洩に対する抵抗性能、及び液化天然ガスに対する貯液性能を把握することである。

1.2 既往の研究

1.2.1 気体の漏洩に関する研究

ひびわれたコンクリート壁の気体漏洩に関する本格的な研究は S. H. Rizkalla らの実験(6), (8)が有るのみであり、(8)は(6)の実験結果を気体の圧縮性を考慮して再整理したものである。実験の対象はコンクリート製圧力容器を設定しており、高い内圧により生じたひび割れからの気体漏洩を主対象にしたものである。(6)では厚さ 12.7cm~25.4cm のコンクリート試験体に通した鉄筋に引張り力を加える方法で数本の純粋な引張りひびわれを生じさせて、気体の漏洩量を測定している。実験では鉄筋量もパラメーターにとっているが、漏洩結果には影響はなかったとしている。加える引張り荷重を鉄筋が降伏するまで増加する事でひびわれ幅をコントロールし、各荷重ステップで気体流入側の圧力を 2 気圧程度まで試験している。試験結果は 2 枚の平行な平面間の流れに壁面から摩擦力が働くモデルを想定し、運動量一定則から理論式を導出している。理論式中、摩擦係数と壁の粗度及び流れのレイノルズ数との関係を実験的に推定し、漏洩結果の整理を行っている。さらに、加えた純引張り力からひびわれパターンとひびわれ幅を推定し、置換された等価なひびわれ及びひびわれ間隔から漏洩量を計算する方法についても提案している。いずれの手法を採用しても漏洩量の把握は可能であり、液体などにも適用可能な技術であると述べている。

原子力関連施設などにおいてはコンクリート壁厚が 0.5~1.5m 程度の範囲に有るのに対し、S. H. Rizkalla らの実験(6)では 25cm 程度とあくまでも容器としての厚さの範囲を実験対象としている。壁の厚さは乾燥収縮などといったひびわれの発生に影響を与える要因に大きく影響する事が予想され、また骨材の偏在などのバラツキの影響も受け易いことが考えられる。また試験体コンクリートに埋め込んだ異型鉄筋によって複数のひびわれを発生させておりひびわれ幅としては平均を採用しているが、

ひびわれ幅が大きくなるに従いべき乗的に増大する漏洩量に対し、単純平均では実験式の物理的な意味がなくなってしまう懸念があり、基礎的な一本の引張りひびわれに対する漏洩性状が把握できているとは言えない。

(8)では(6)でのデータを圧縮性を考慮して再整理し、特に流入側が高圧力において実験式の精度が明らかに向上したと述べている。実験自体は新しい方法ではないために同様の指摘が当てはまるが、圧縮性の評価を摩擦のある断面積一定の管内の断熱流れであるファノ流で仮定した事、流入側圧力チャンバーからひび割れまでとひび割れ出口から流出側チャンバーまでに等エントロピーを仮定している点は評価できる。しかしながら平均摩擦係数 f を流量、壁厚、コンクリートひび割れ面の粗さのみの関数と設定しているためにひびわれ幅との重要な関係を解明していない点に問題が残る。

1.2.2 液体の漏洩に関する研究

コンクリートに生じたひびわれを通しての液体の漏洩に関する研究はいくつか散見されるが、比較的最近では渡部の実験(13)がある。(13)は発電所廃棄物処分用コンクリートピットの放射性核種閉じ込め性能を評価するためにコンクリートピットの水密性についてひびわれ部分及び打継ぎ部分で透水実験を行なっている。コンクリート試験体の厚さは六ヶ所村再処理施設用のコンクリートピットを対象としているため 12 cm、流入側にかけた水頭は 200 cm から 5 cm の範囲である。実験結果より透水を生じない限界のひびわれ幅が存在し、透水量は水頭にほぼ比例し平行平板内を流れる二次元・層流・非圧縮流れの流量評価式を利用できることを示した。さらにプレストレスによるひびわれを閉める効果が透水量を減少させる有効な手段であることを示している。

1.2.3 液化ガスの漏洩に関する研究

液化ガスの漏洩に関しては(17)、(19)の文献があるが、いずれも同じ実験結果の報告を行ったものであり、データ整理手法その他は全く同じものである。実験はLNG貯蔵施設におけるコンクリート部材の貯液性能を保持するメカニズムを検証するために行われたものである。液体であるLNGがひびわれに流入してコンクリート断面内で徐々に気化し気体として流出する漏洩量を設計において合理的に評価する目的で実験を行っている。試験体の部材厚さは 25 cm と 50 cm ひびわれ幅は 0 から 0.23 mm まで、貯槽内の圧力は約 1.5 から 2.5 気圧までの範囲で実験を行い、安全のため反応性の低い液化窒素をLNGの代替材料として用いている。実験結果及び考察より部材厚 25 cm で貫通ひびわれが 0.1mm 以内であれば、貯蔵施設の通常の液圧に対して漏洩が生じる事はない。②流出側ひび割れの閉塞ないしは部材厚を増す事でより高い貯液性能が得られる。③断面内にひび割れの生じていない領域（圧縮応力域ゾーン）を残す事は貯液性を確保し、更に漏気も制限する上で有効である。と結論している。

本文献において提示された漏洩実験手法および実験結果は大変貴重なものであると考えられるが、いくつかの問題点も指摘できる。試験体の厚さが 25 cm と 50 cm と比較的小さく壁厚の大きい部材に対しては適用が困難である事。一本のひび割れを対象にしているものの、主なターゲットがプレストレスの入った曲げひび割れを生じる部材であるために発生させたひび割れのひびわれ幅が厚さ方向

にばらついており一定の試験体が少ない。したがって、基本的な漏洩性状を把握するのに必要だと考えられるパラレルのひびわれに対しての十分な実験結果を得られているとは言えない。実験においてはあるひびわれ幅において3点の圧力でのみ漏洩測定を行っているために圧力差と漏洩量の関係図付ける十分なデータが得られていない。これは一つの圧力に対して漏洩量が定常状態になるまでに数十時間の経過が必要である事が主な原因と考えられるが、多数点のデータを用いないと実験式の推定において十分な証明とならない可能性がある。

実験結果の整理においては気液混合2相流を差分法にて解析して計算値を算出しているが、流体の温度を直接求める形ではなく、試験体内部に仕込んだ温度計からコンクリートの温度を時間経過の中で測定して流体の温度はコンクリートの温度と同じであると過程して各定数を各ポイントにおいて算定している。特に気体においてはその低い熱伝達係数のために平衡状態に有っても流体とコンクリートの温度は異なる事が予想され、適切な仮定条件とは言えない。また、温度が与えられている事が解析の前提になっており現実のLNG貯蔵施設においての温度状況が分からない場合の漏洩量の推定は困難であると考えられる。

1.3 論文の構成

本論文は、エネルギー関連施設の設計などにおいて必要性が高まっている、ひびわれの生じた鉄筋コンクリート壁を通しての気体漏洩問題について、実験的手法を用いて漏洩量を把握する方法を提示し、漏洩量の定式化を行ったものであり、具体的には以下の6章より構成されている。

第1章「序論」では、本研究における背景および関連する既往の研究についての概要、解決すべき問題点を整理し、本研究の目的であるひびわれた鉄筋コンクリート壁の漏洩性能について目的を明確にしている。

第2章「ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩実験」ではこれまでにほとんど行われてこなかった、ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩実験手法について詳細に説明を行い、2次元ポアズイユ流れを利用した実験式を用いて、漏洩量の基本的な尺度を与えることを目的とした。ひびわれの生じたコンクリートからの気体漏洩についてはひびわれ面の微視的巨視的凹凸形状を考慮すると解析的定量化は困難であり、実験的手法が効果的であると考えられ、漏洩実験方法を提案し実施することは非常に重要であると考えられる。

実験パラメーターは壁厚(15、30、60cmの3種類)、壁両側の圧力差($0.01\text{atm} \leq \Delta p \leq 2.0\text{atm}$)、ひびわれ幅($0.05\text{mm} \leq W \leq 0.60\text{mm}$)であり、試験体は同一壁厚のものを2体ずつで計6体を製作し、漏洩量の測定には酸素ガスを用いた。漏洩量の定式化に際してはまず、実験結果より漏洩量(Q)が圧力差に比例する範囲を規定し、漏洩量(Q)を壁厚(T) ひびわれ幅(W) 圧力差(Δp) 酸素ガスの粘性係数(μ)、骨材の最大粒径(D)の関数として定式化を行った。

第3章「気体の圧縮性を考慮した漏洩量予測実験式」ではひびわれの生じたコンクリート壁の気

体漏洩に関する実験およびコンクリートのひびわれ内の気体の流れに関する実験およびコンクリートのひびわれ内の気体の流れに関して更なる考察を行った。本章では気体の圧縮性を考慮した実験式を提案し、この実験式と新たに行った漏洩実験結果により前章で得られた知見に対しての検討を行った。前章で提示した実験結果について気体の圧縮性を考慮して再整理を行い、流れを一次元等温圧縮流れ仮定した実験式の提案を行った。続いて、粗骨材の粒径を変化させた試験体、アルミニウムのモデル骨材を用いて骨材形状を変化させた試験体、及びガラス板を用いた理想ひびわれモデルの試験体について前章と同様の実験による結果を示し、前章で得られた結論を証明した。いずれの実験結果においてもひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩量は、圧縮性流体の一次元定常等温流れを表す式を利用した実験式によって評価することができること、ひびわれ面の摩擦係数は流量およびひびわれ幅の関数となること、また摩擦係数はコンクリートの骨材粒径、骨材形状等によって変化することなどを明らかにしている。さらに、この評価式を用いて2次元ポアズイユ流れを利用した実験式がひびわれを生じたコンクリート壁からの気体漏洩量実用式となりえる付帯条件について検討を行い、ポアズイユ流れを利用した実験式が十分な精度でひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩量を把握し得ることを示し、簡便に漏洩量を評価できる実用式となり得ることを提示した。

第4章「ひびわれの生じたコンクリート壁からの種類の異なる気体の漏洩」においてはひびわれの生じたコンクリート壁の気体漏洩に関して気体の種類をかえた実験および幅が一定でないひびわれについての漏洩実験を行い前章までに得られた知見の応用を計っている。

まず、第3章で提示した2平板間の一次元定常等温圧縮流れを表す式を利用した実験式の各種気体への適用性について4種類の気体を用いて検討を行い、対象とする気体が違ってもひび割れを極端に理想化した2平板間の気体の流れを表す式を利用して実験結果を精度良く定式できるかどうかについて検討を行った。

さらに、ひびわれ幅が壁厚方向に一定で壁面で緩やかに変化する場合の気体漏洩実験についても実験と検討を行い、ひびわれ幅がゆるやかに変化して一定でない場合の気体漏洩量はひびわれ幅が一定な場合の漏洩結果から推定可能であり、ひびわれ内のコンクリートに関する摩擦係数の評価は共有できることを述べている。

第5章「ひびわれを生じたコンクリート部材からの液化ガスの漏洩」では、海浜地区に建設されているコンクリート構造の液化ガス貯蔵施設において液化ガスを貯液する役目が期待されているコンクリート部材に対し、その主な漏洩経路となるひびわれを通した漏洩について論じている。

このコンクリート部材の極低温液体の貯液能力が確認できれば漏洩防止用に施されている金属製薄膜（メンブレン）を軽減できる可能性があり、大幅なコストダウンにつながる可能性がある。そこで、本章ではひびわれ内の流体の変化に注目して前章までに用いた圧縮流れを利用した実験式を適用しひびわれの生じたコンクリートからの液化ガス漏洩量を把握する方法について論述している。本方法を用いれば液化ガスが外部に多量に漏出する危機的状況を比較的簡易に予測することができ、ひびわれの生じたコンクリート部材の液化ガス貯液性能についての限界状態を把握する上で本方法が極めて有効な手法であると結論している。

第6章「結論」では本研究で得られた知見について総括的に述べている。

第2章 ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩実験

- 2.1 はじめに
- 2.2 試験体
- 2.3 シーリング
- 2.4 漏洩実験法
 - 2.4.1 ひびわれ幅の制御
 - 2.4.2 漏洩量の測定
 - 2.4.3 シーリングの確認
- 2.5 実験結果および考察
- 2.6 まとめ

2.1 はじめに

本章ではひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩実験手法について説明を行い、2次元ポアズイユ流れを利用した実験式を用いて、漏洩量の基本的な尺度を与える。ひびわれの生じたコンクリートからの気体漏洩についてはひびわれ面の微視的巨視的凹凸形状を考慮すると解析的定量化は困難であり、実験的手法が効果的であると考えられる。したがって、漏洩実験方法を提案し実施することは非常に重要である。また、複雑なひびわれ面の中でランダム性を考えると、漏洩実験結果の蓄積は大きな意味があると考えられる。

実験パラメーターは壁厚、壁両側の圧力差、ひびわれ幅としている。壁厚は15、30、60cmの3種類、圧力差(Δp)の範囲は $0.01\text{atm} \leq \Delta p \leq 2.0\text{atm}$ ($1\text{atm}=1033\text{g/cm}^2$)、ひびわれ幅(W)の範囲は $0.05\text{mm} \leq W \leq 0.60\text{mm}$ である。試験体は同一壁厚のものを2体ずつで計6体である。漏洩量の測定に用いた気体は酸素ガスである。漏洩量の定式化に際してはまず、実験結果より漏洩量(Q)を壁厚(T)ひびわれ幅(W)圧力差(Δp)酸素ガスの粘性係数(μ)、骨材の最大粒径(D)の関数として定式化した。

2.2 試験体

同一寸法のを2体ずつ作製した。試験体の中央部の幅が小さくなっているのは、この部分に引張りひびわれを生じさせるためである。D19はコンクリートに引張り力を伝えるためのものであり、P C鋼棒はひびわれ幅を制御するためのものである。埋込みナットは圧力箱、シール用のゴムを押える鋼板、測定治具を取り付けるためのものである。

試験体リストを表-2.1に示すが、試験体名は、[壁厚のcm表示] - [AまたはBで同一壁厚の試験体を区別するための記号]とした。

コンクリートの打設3日後に脱型を行い、脱型直後に乾燥収縮その他の原因で試験体にひびわれが生じないように、P C鋼棒を4本同一の引張り力になるように締め付けた。四本のP Cの鋼棒の引張りひずみが、約0.1%を保つように実験開始直前まで、毎日締め直しを行った。試験体の養生は、時々水をかけながら気中(実験室内)で行った。図-2.4にP C鋼棒のキャリブレーション結果を示す。本実験で使用したコンクリートは、水セメント比39%スランプ8cmの普通のコンクリートであり、各試験体共通である。使用したコンクリートの調合を表-2.2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は奥多摩産碎石、細骨材は君津産陸砂(重量比70%)と青梅産砕砂(重量比30%)の混合砂である。図-2.5はコンクリートに含まれる骨材の粒度分布を示したものである。最大粗骨材粒径は20mmである。15-A、30-A、60-A試験体の実験が終了した時点で行ったコンクリートシリンダー試験の結果を表-2.3に示す。

2.3 シーリング

試験体に引張り力を加え、ひびわれを発生させ、壁片側表面から酸素ガスを流入させ、壁の裏面に流出させるわけであるが、その時、流入した酸素ガスが他の部分からは漏洩せずすべて壁裏面に流出するように側面にはシーリングを施す必要がある。側面をシーリングする手順を以下に示す。

試験体を横にして、側面に 3 mm 厚のゴムプレート（硬度 30 度）をゴム接着剤（エポキシ系接着剤で硬化後は硬度 60 度のゴム状になるもの）で試験体に接着し、溝と形状を同一にする木材（型わくに使用したもの）をゴムプレートの上に乗せて、接着剤が流れたり、ゴムがはがれてこないようにした。それから一日おいて、接着性のゴムが硬化するのを待って、上から 9 mm 厚の鋼板をボルトで押えた。これは接着剤が硬化する前に圧着すると接着剤が流れ出してしまい十分な密閉性が得られなくなるからである。側面の片側のシーリングを行った後に試験体を裏がえしにして、残る片側のシーリングを行った。押えのための鋼板のボルト穴はルースホールとし、ワッシャーには、テフロンワッシャーを用い鋼板が試験体の変形を拘束することがないようにした。シーリングの方法を説明したのが図-2.6 である。次に、壁表面に取り付ける圧力箱の詳細を示す。図-2.7 に示すように中央に 62×99 mm の開口をもつ厚さ 2 cm、硬度 30 度のゴムプレートをゴム接着剤で壁表面に接着させ、その上に同じ形の硬度 60 度のゴムプレートを接着する。2 枚のゴムの上に 9 mm 厚の鋼板を載せ、ボルトで固定した。ゴムプレートや鋼板のボルト穴はルースホールとし、テフロンワッシャーを用いた。2 枚のゴムプレートと鋼板を圧力箱とした。鋼板にはナイロンチューブを取り付けるためのメネジが 6 個設けてある。

2.4 漏洩実験法

2.4.1 ひびわれ幅の制御

試験体のコンクリートに埋め込まれた、D19 の先端は M16 のネジになっている。このネジを利用して、剛性の高い加力用ビームを試験体の上下に取り付ける。加力用ビームの芯に位置する球座を介して、100 t アムスラー万能試験機で引張り力を加える。加力のシステムを図-2.8 に示す。試験体の中央の危険断面にひびわれを発生させる。ひびわれ幅は図-2.9 に示すように 4 個の変位計によって測定する。4 個の変位計の値を平均してひびわれ幅であるとした。試験体、ひびわれ幅によらず、4 個の変位計はほとんど等しい値を示した。変位計の値と試験機の引張り力でひびわれ幅を制御するわけであるが、酸素ガス流入側の圧力によってひびわれ幅は多少変化する。圧力によるひびわれ幅の変化はできる限り調整するようにした。

2.4.2 漏洩量の測定

漏洩量の測定システムを図-2.10 に示す。ガスボンベから供給された酸素ガスは流入側の圧力箱に入り、ひびわれの間を通過し、流出側の圧力箱に流れる。流出側の圧力箱には、測定範囲の異なる 5 種類の精密ニードルバルブ付の面積流量計が取り付けられている。各流量計の流出側は大気（約 1 atm）へ開放されている。ガスの漏洩量を精度よく測定しうる流量計 1 個を選び、その流量計で漏洩量を測定する。使用しない流量計のバルブは閉めている。5 種類の流量計は [酸素ガス用, 20℃, 1 atm, 最大 20 l/min], [窒素ガス用, 20℃, 1 atm, 最大 10 l/min], [酸素ガス用, 20℃, 1 atm, 最大 2 l/min], [窒素ガス用, 20℃, 1 atm, 最大 0.5 l/min], [酸素ガス用, 20℃, 1 atm, 最大 0.02 l/min] である。窒素ガス用の流量計で得られたデータは酸素ガス用に補正した。

流入側と流出側に取り付けた圧力箱で測定した圧力の差が、壁両面の圧力差（ Δp ）である。

圧力計および流量計と圧力箱の接続には、1/8 インチのナイロン 11 チューブを用い、チューブの接

続にはワンタッチ継手を用いて、実験の簡便を図った。実験中の雰囲気温度も測定したがほぼ 20℃であったので温度による補正は行っていない。

流入側の圧力は酸素ガスボンベと圧力箱の間に取り付けたバルブで制御した。ひびわれ幅をほぼ一定に保った状態で壁面面の圧力差 (Δp) を変化させ、それぞれの圧力差のときの漏洩量を測定し、ひびわれ幅を変化させるという手順で実験を行った。ひびわれ幅 (W) と圧力差 (Δp) と漏洩量 (Q) のすべてが定常状態になったときを測定時とした。

本実験の測定範囲は、ひびわれ幅については 0.05mm~0.60 mm 程度、圧力差については 0.01atm~2.0 atm 程度、流量については 1 (1/min・cm) までとした。ここで 1/(min・cm) は単位ひびわれ長さ (1 cm) 当りの流量 (1/min) を表わす。壁面すなわちガスの流入、流出面での単位ひびわれ長さ (1 cm) である。ただし、ひびわれ長さはひびわれを直線として考えた場合の長さである。具体的には流量計で測定された総流量を圧力箱の幅 9.9 cm で除したものである。

2.4.3 シーリングの確認

この種の実験では、前述したシーリングの効果が十分であったかどうかの確認が不可欠である。シーリング効果の確認試験を実験開始前および実験途中に数回行った。実験前に、図-2.10 に示すようにナイロンチューブを配線し、まず流入側の圧力箱の密閉性を調べた。図-2.11 のバルブ 1 と 4 を閉じ、バルブ 2 と 3 と 5 をあげ、流入側の圧力箱内の圧力を 3 atm 程度に上げた後、バルブ 1~4 を閉め、バルブ 5 をあげ、流入側の圧力箱の圧力の時間的変化を調べる。同様な方法で流出側の圧力箱の密閉性を確認した。圧力低下が 0.001atm/(10sec) 程度であれば密閉性が保たれているとした。実験中のひびわれが生じている場合の密閉性の確認試験は次の手順で行った。図-2.10 においてバルブ 1 と 5 を閉め、バルブ 2~4 をあけて、流入側と流出側の圧力箱内の圧力を 3 atm 程度にあげた後、バルブ 2~4 を閉め、流入側と流出側の圧力箱の圧力の時間的変化を調べた。以上の操作の結果、圧力計の読みの変化の大きい場合は、せっけん水でガスの漏洩か所をさがし、そこを接着性ゴムで補修し、シーリングの効果が十分であることを確認した後、実験を再開した。

2.5 実験結果および考察

図-2.12, 13 は壁厚 (T) およびひびわれ幅 (W) を一定にした場合の流量 (Q) と圧力差 (Δp) の関係の 6 例を示したものである。図示したように、圧力差 (Δp) が小さい範囲では、流量 (Q) は圧力差 (Δp) に比例している。図-2.12 の 15-A, 図-2.13 の 15-B の試験体では、ある圧力差 (Δp) 以上の部分で流量 (Q) と圧力差 (Δp) の比例関係がくずれている。これは一般に流れが層流から乱流に移るときに見られる現象である。流量 (Q) と圧力差 (Δp) の比例関係がくずれるのは層流的な流れから乱流的な流れに変わったためと考えられる。現実問題として、漏洩が問題になるのは、比較的、圧力差が小さい場合であることも考慮して、本論文では層流的な流れの範囲のみを扱うことにした。図-2.14 は 3 軸に壁厚 (T)、圧力差 (Δp)、ひびわれ幅 (W) をとったときに流量 (Q) と圧力差 (Δp) が比例関係からはずれてくる点をプロットして描いた境界面である。原点側の領域が本論文で扱っている範囲である。式で表せば次式となる。

$$-5.25\Delta p W + T + 0.0132\Delta p - 2500W + 81.2 \geq 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

上式は単なる実験式である、 Δp 、 W 、 T の単位はそれぞれ g/cm^2 、 cm 、 cm である。実験式であるので、実験範囲であるところの $\Delta p \leq 2000 g/cm^2$ 、 $15 cm \leq T \leq 60 cm$ をこえるものではない。

ひびわれ幅 (W) および圧力差 (Δp) を一定にしたときの流量 (Q) と壁厚 (T) の関係を図-2.14, 15 に示す。図-2.15, 16 より、流量 (Q) は壁厚 (T) に反比例するといえる。図-2.18 に $Q = \alpha \cdot W^3 \cdot \Delta p / (\mu \cdot T)$ としたときの α と W の関係の頻度分布を示す。図-2.17 に示すように、ひびわれ面を平面と考え、気体は平行平面間で、二次元ポアズイユ流 (非圧縮・層流を仮定した粘性流体の流れ) として流れると仮定すれば、参考文献 5) に示されているように、気体の流量 (Q) は次式となる。

$$Q = \frac{1}{12} \frac{W^3 \Delta p}{\mu T} \dots\dots\dots (2.2)$$

μ は気体の粘性係数である。図-2.16 に示す極端に理想化したモデルによる (2.2) 式から

$$Q = \alpha(W) \frac{\Delta p W^3}{\mu T} \dots\dots\dots (2.3)$$

として、実験結果から、 α を求めようとしたものである。(2.3) 式において酸素ガスの粘性係数は $20^\circ C$ を基準にして $\mu = 2.04 \times 10^{-7} g \cdot sec/cm^2$ とした。図-2.18 によれば、 α はひびわれ幅 (W) に関係し、(2.2) 式における係数 ($1/12$) より、はるかに小さい。図-2.18 から平均的な α と W の関係を求めれば下式となる。

$$\alpha = 3.4 \cdot 10^{-3} (60W + 0.9) \dots\dots\dots (2.4)$$

上式における W の単位は cm である。実験値として、 α が (2.4) 式のような大きな原因として、ひびわれ面が平面でないことが考えられる。実際に、試験体 15-A のひびわれ面の一部の断面を計測した結果は、図-2.19 のような形である。図-2.18 に示すようなひびわれ面の巨視的な凹凸、細骨材の存在による微視的な凹凸が理想モデルとは大きく異なる点であろう。

α を (2.4) 式で表現すれば、次元の問題が生じてくるので (2.4) 式の W をなんらかの基準長さで無次元化できれば、その方がよい。 α が W に関係する一つに、上述のように巨視的なひびわれ面の凹凸が大きく関与していると考えられる。巨視的な凹凸の形状は骨材の最大粒径に大きく影響されるであろう。また極限を考えれば、すなわち、壁厚、ひびわれ幅ともに極めて大きくなれば、 α は ($1/12$)

に近づくものと考えられる。これらのことを勘案し、実験式であるところの (2.3), (2.4) 式を下式のような表示にかえた。

$$Q = \alpha \frac{\Delta p W^3}{\mu T} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\alpha = \frac{1}{12} - \frac{0.0112}{(w + 0.135)} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$w = W / D \dots\dots\dots (2.7)$$

(2.5) 式の μ は酸素ガスの粘性係数であり $\mu = 2.04 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{sec} / \text{cm}^2$ である。(2.7) 式におけるひびわれ幅 W を無次元化するための基準長さ D は骨材の最大粒径である。(2.5) 式の精度を最終的に確認するために (2.5) 式で計算した流量 ($Q_{\text{calculated}}$) と実験で測定された流量 ($Q_{\text{experiment}}$) の比較を行った。その比較の結果を図-2.20, 21 に示す。(2.5) 式の適用範囲は、本実験の範囲をこえるものではない。

2.6 まとめ

コンクリート壁試験体に 1 本の引張りひびわれを生じさせ、酸素ガスを用いた気体漏洩実験の手法と結果を示し、ひびわれによる酸素ガス漏洩量が壁両側の圧力差に比例する範囲が存在し、その範囲内であれば、漏洩量は (2.5) 式で表しうることを示した。

表－ 2.1 試験体リスト

List of specimens

T(wall thickness)	15cm	30cm	60cm
Name of specimen	15-A	30-A	60-A
	15-B	30-B	60-B

表－ 2.2 コンクリート調合表

Mix Proportion of Concrete

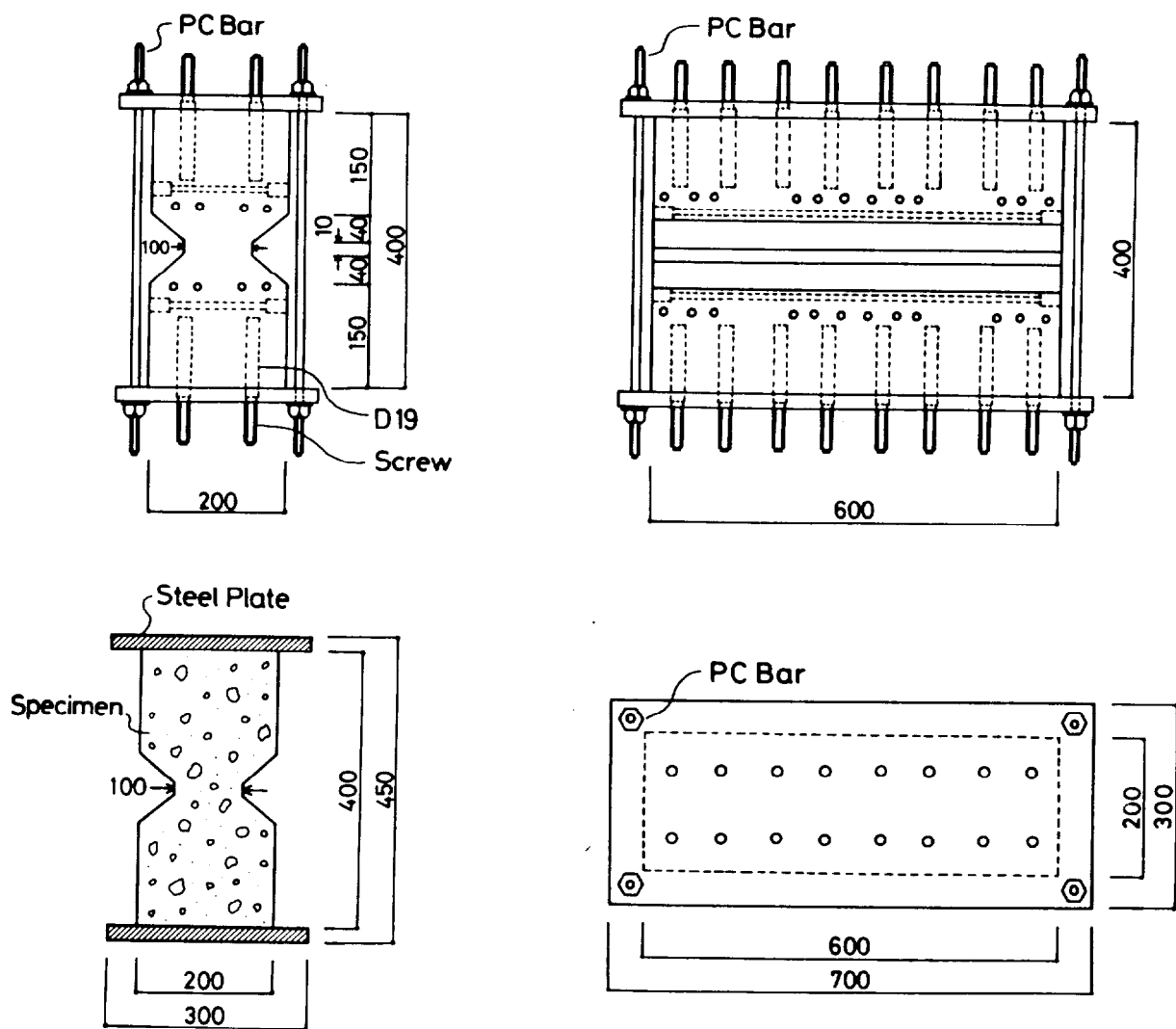
W/C (%)	Mix Proportion (kg/m ³)					Slump (cm)
	Water	Cement	Fine Agg	Coarse Agg	Admixture	
39.0	163	418	718	1023	1.045	8

Maximum Size of Coarse Aggregate 20 mm

表－ 2.3 コンクリート強度試験

Mechanical Property of Concrete

Curing	In Air
Age of Concrete	55 (days)
Compressive Strength	30.4 (MPa)
Splitting Tensile Strength	2.34 (MPa)
Date of Placing	October.22 1985
Diameter and Height of cylinder	10 ϕ X 20 (cm)



図－2.1 試験体 (壁厚60cm)

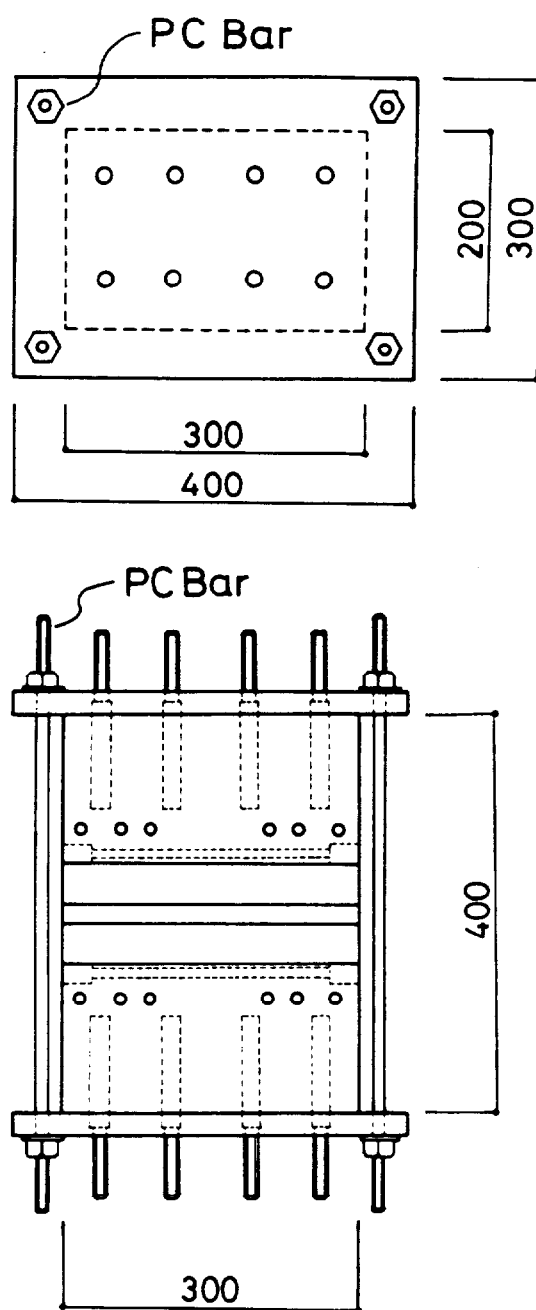
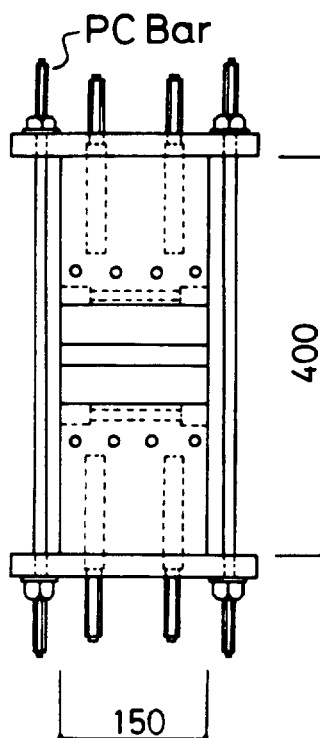
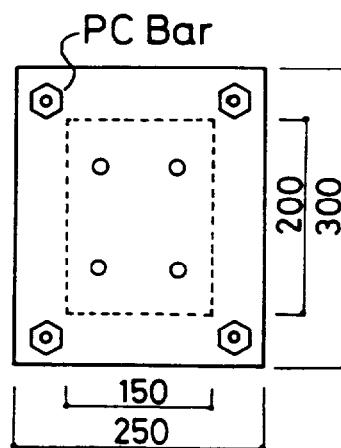


図-2.2 試験体 (壁厚30cm)



図－ 2.3 試験体（壁厚15cm）

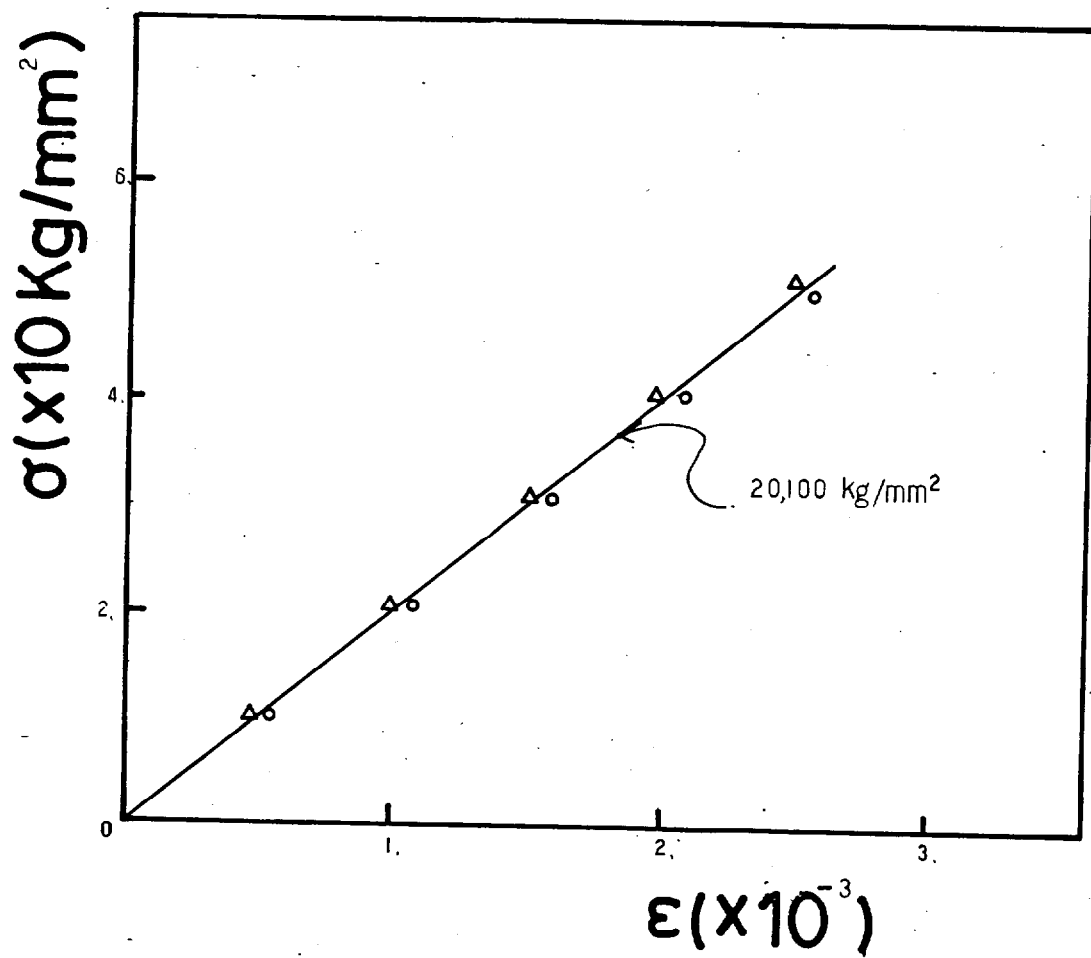
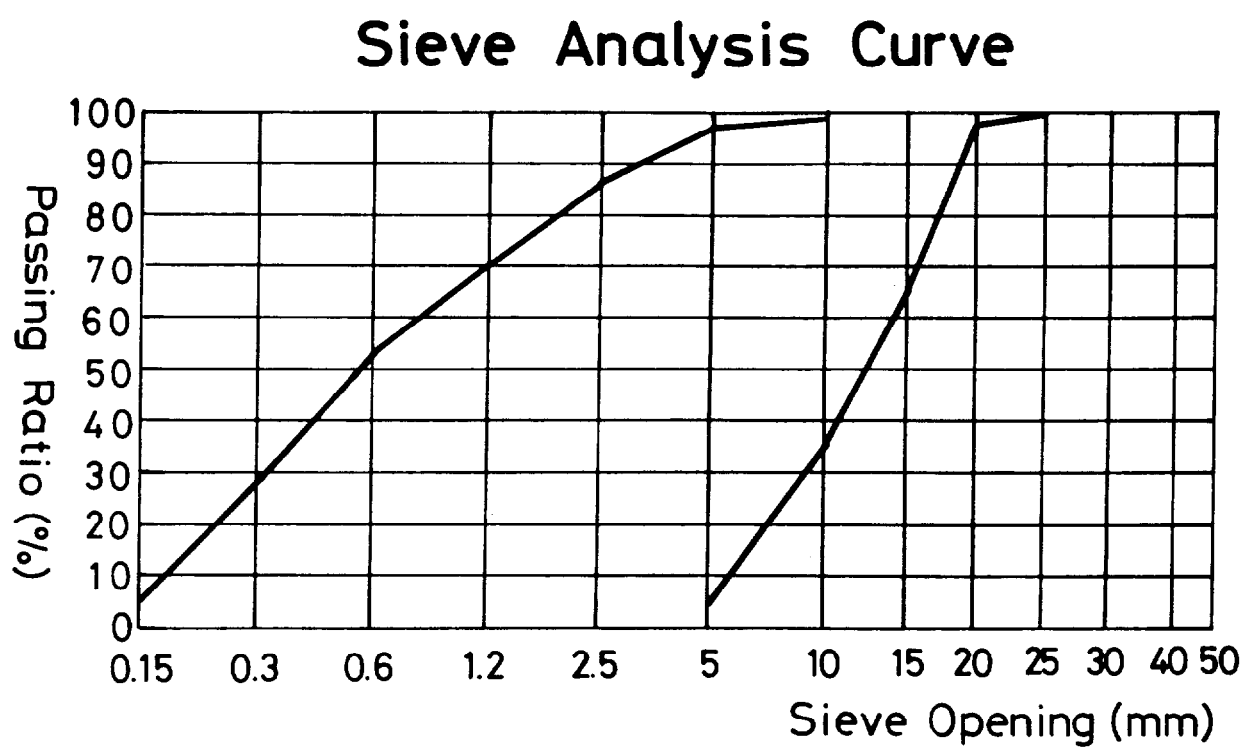


図- 2.4 PC鋼棒キャリブレーション



图— 2.5 骨材粒度分布

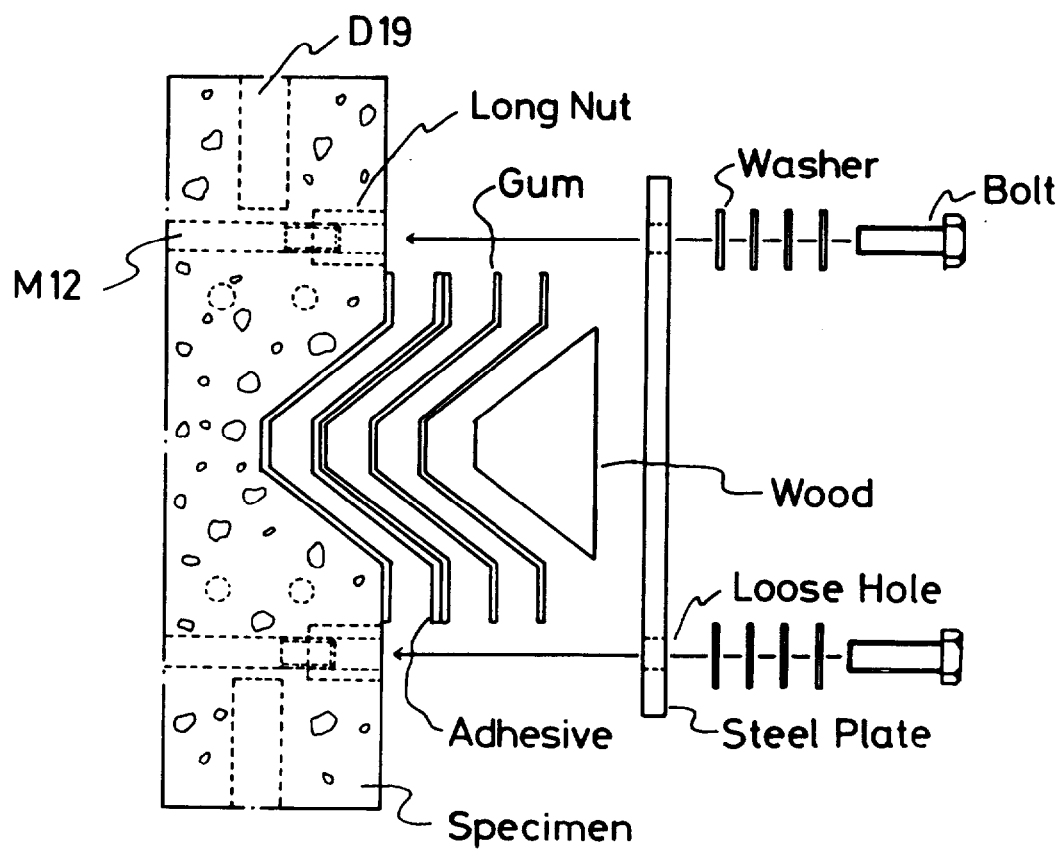


図- 2.6 シーリング

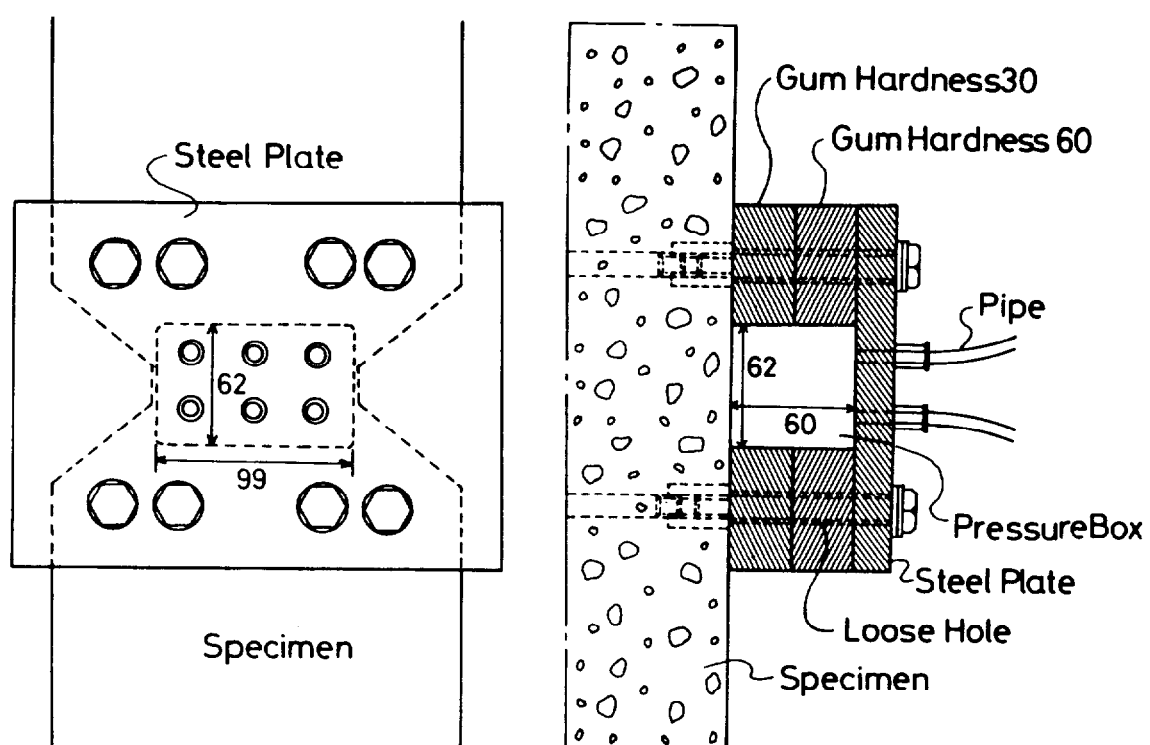
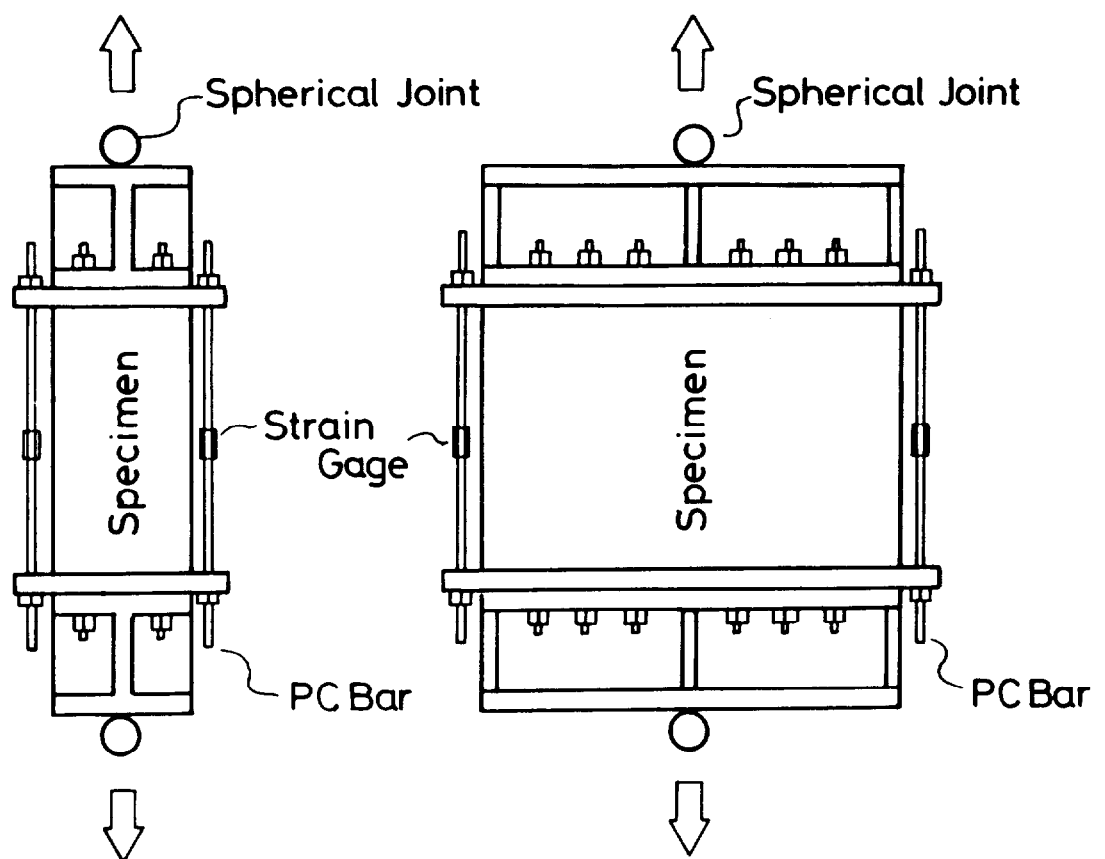
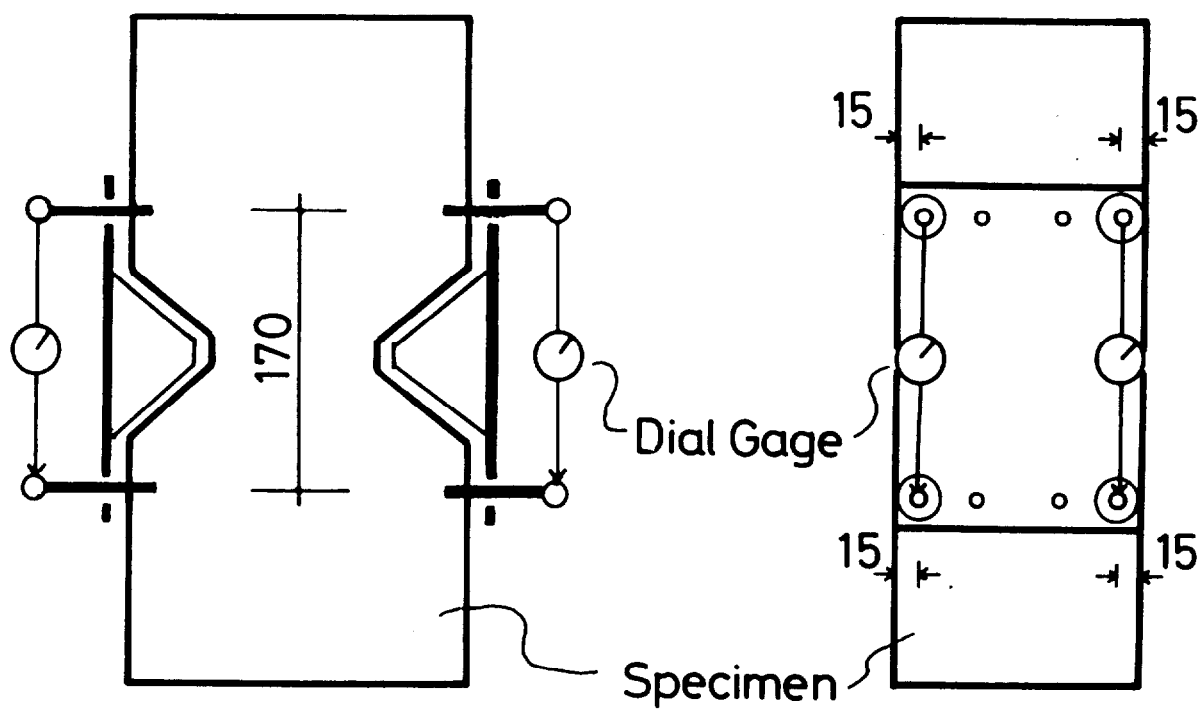


图- 2.7 压力箱



図－ 2.8 ひびわれ幅制御



図－ 2.9 ひびわれ幅計測

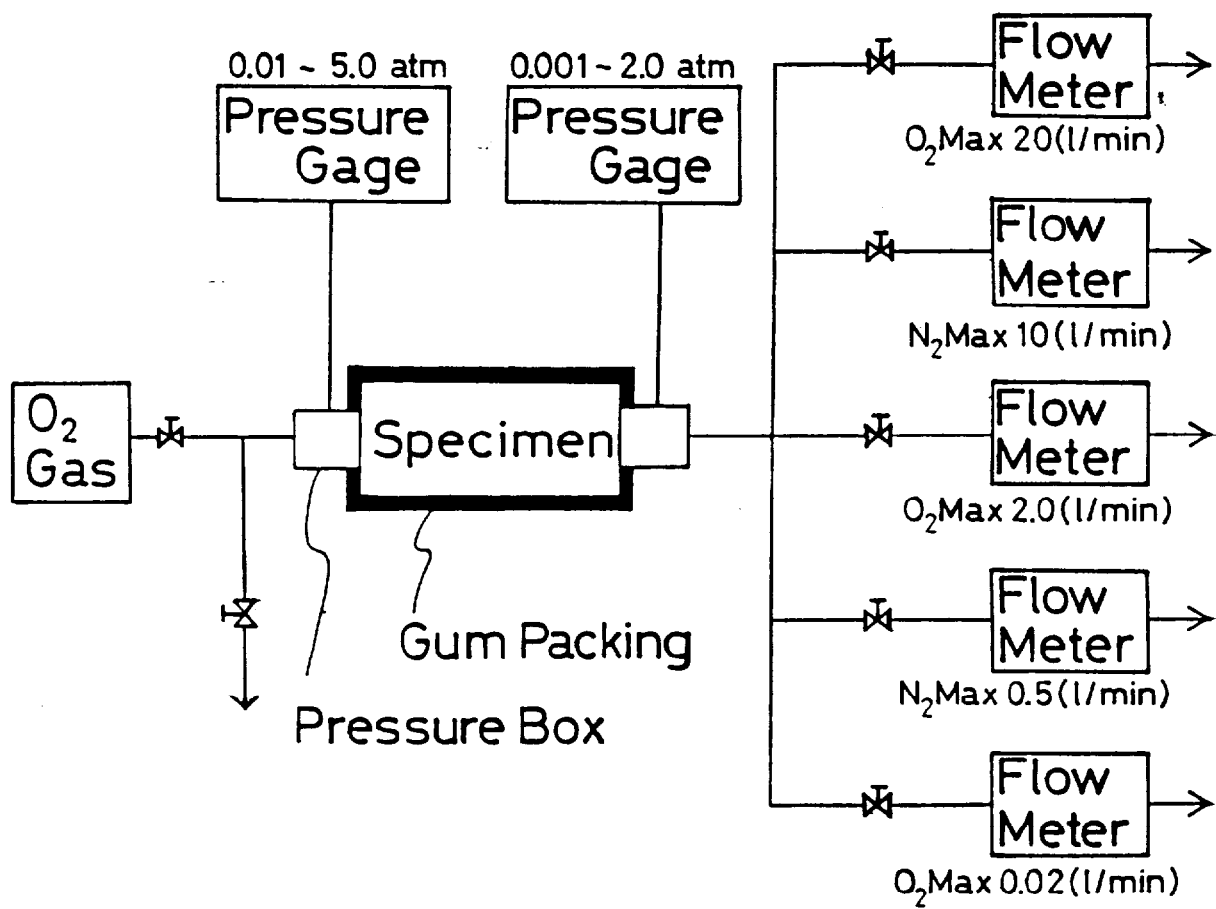
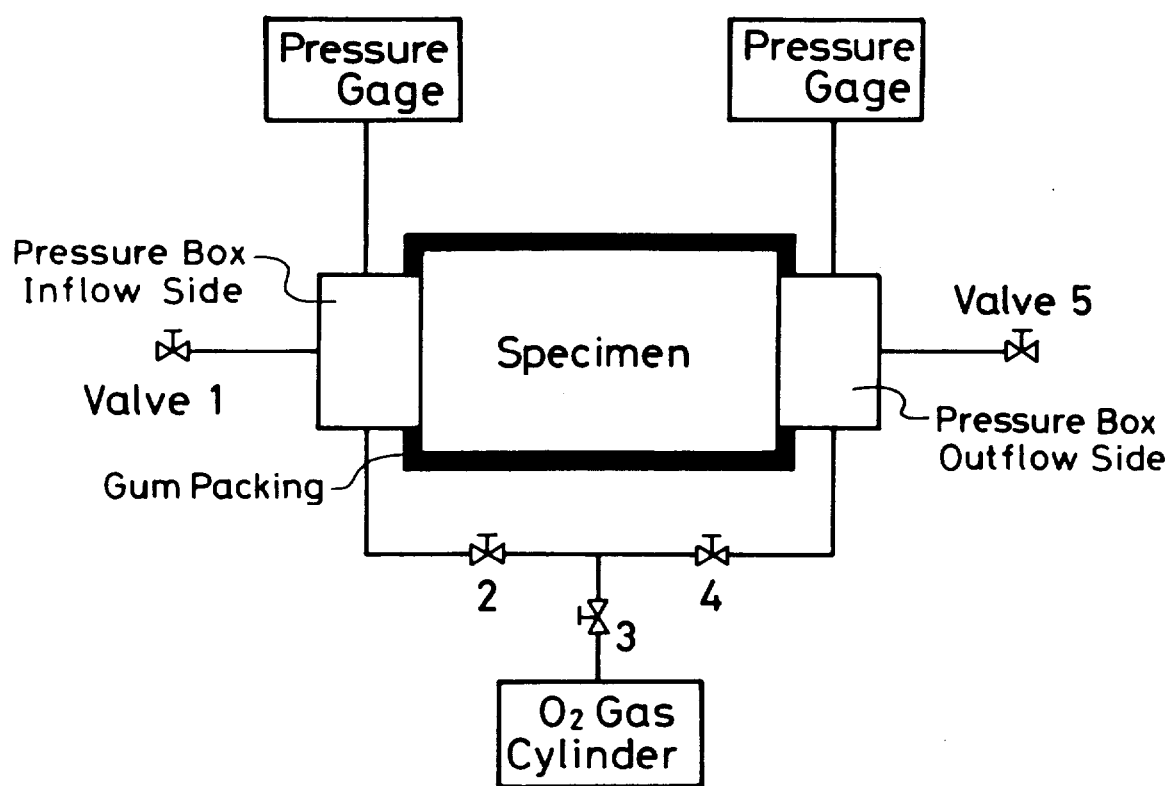


図- 2.10 流量計測システム



図－ 2.11 シーリングの確認

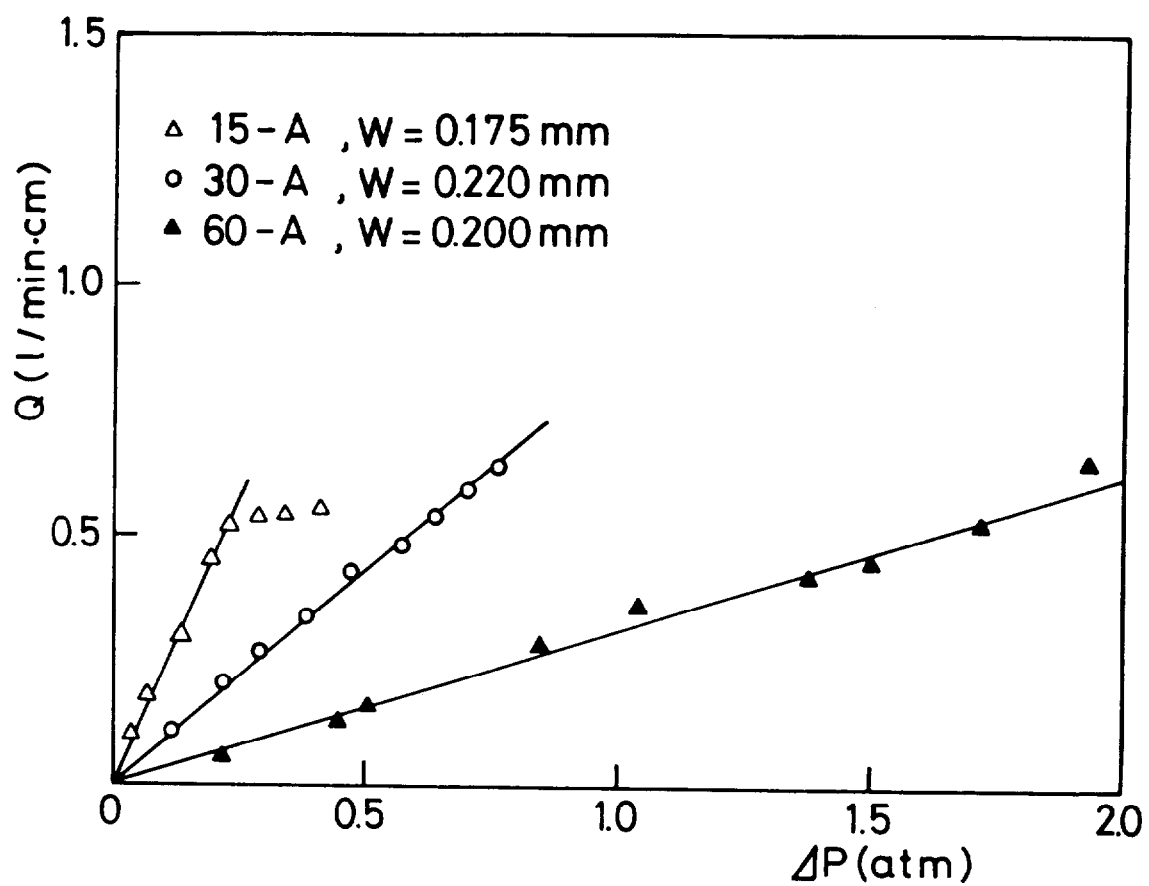


图- 2.12 Q (流量) - Δp (压力差)

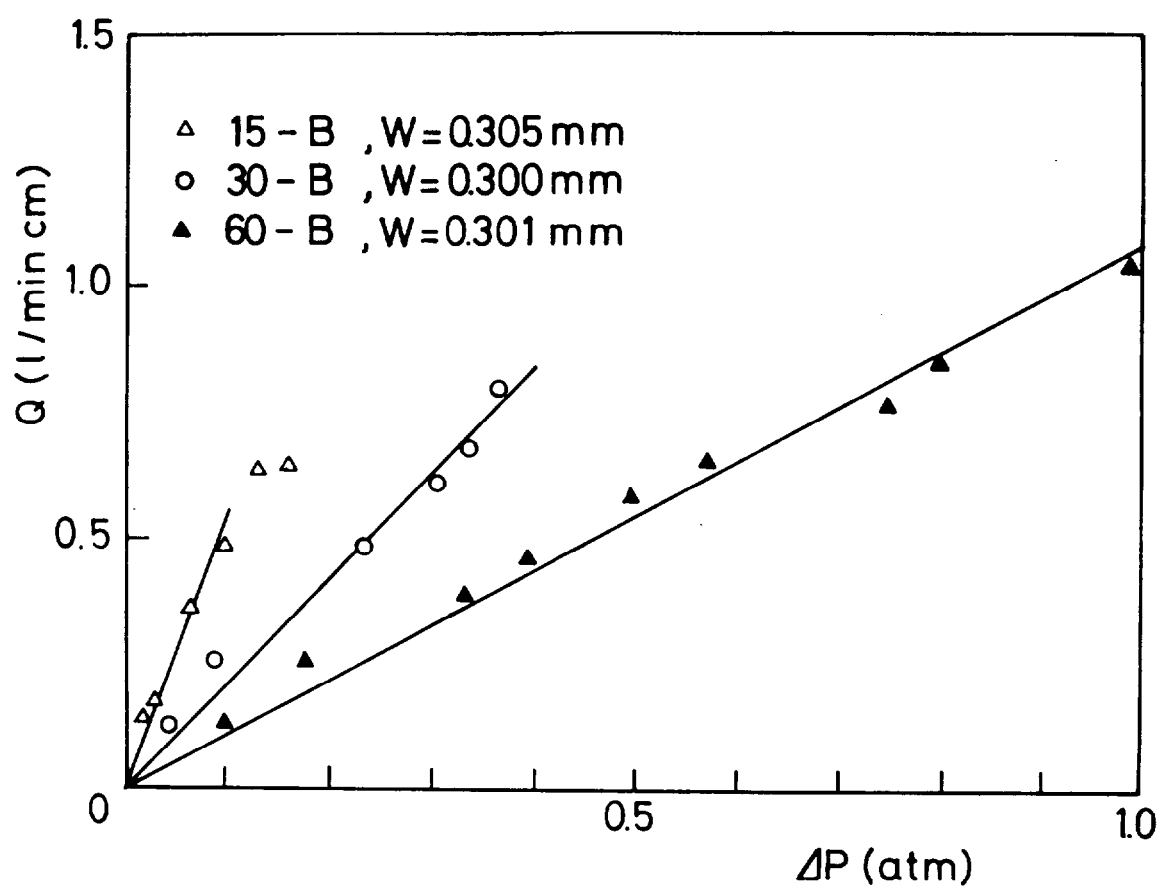
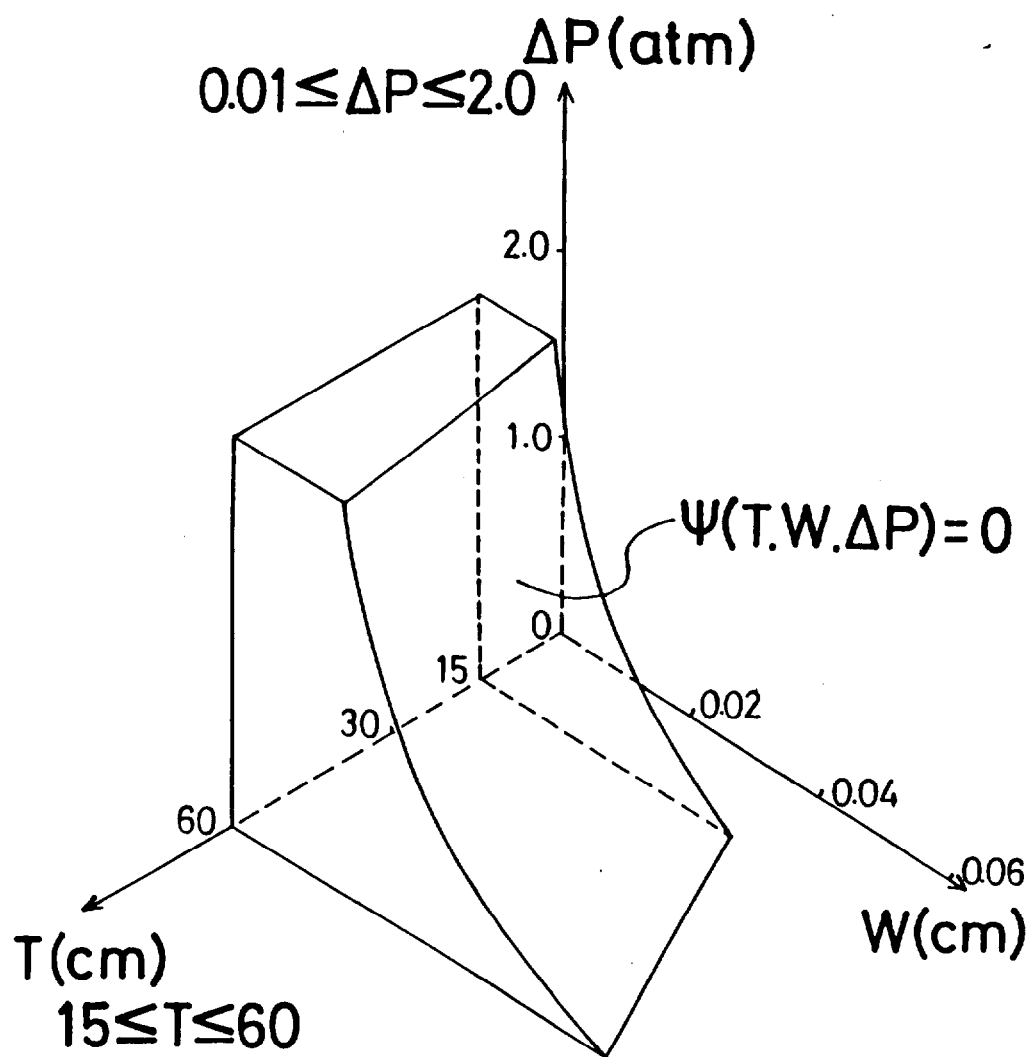


图- 2.13 Q (流量) - Δp (压力差)



図－ 2.14 Q (流量) と Δp (圧力差) の比例範囲

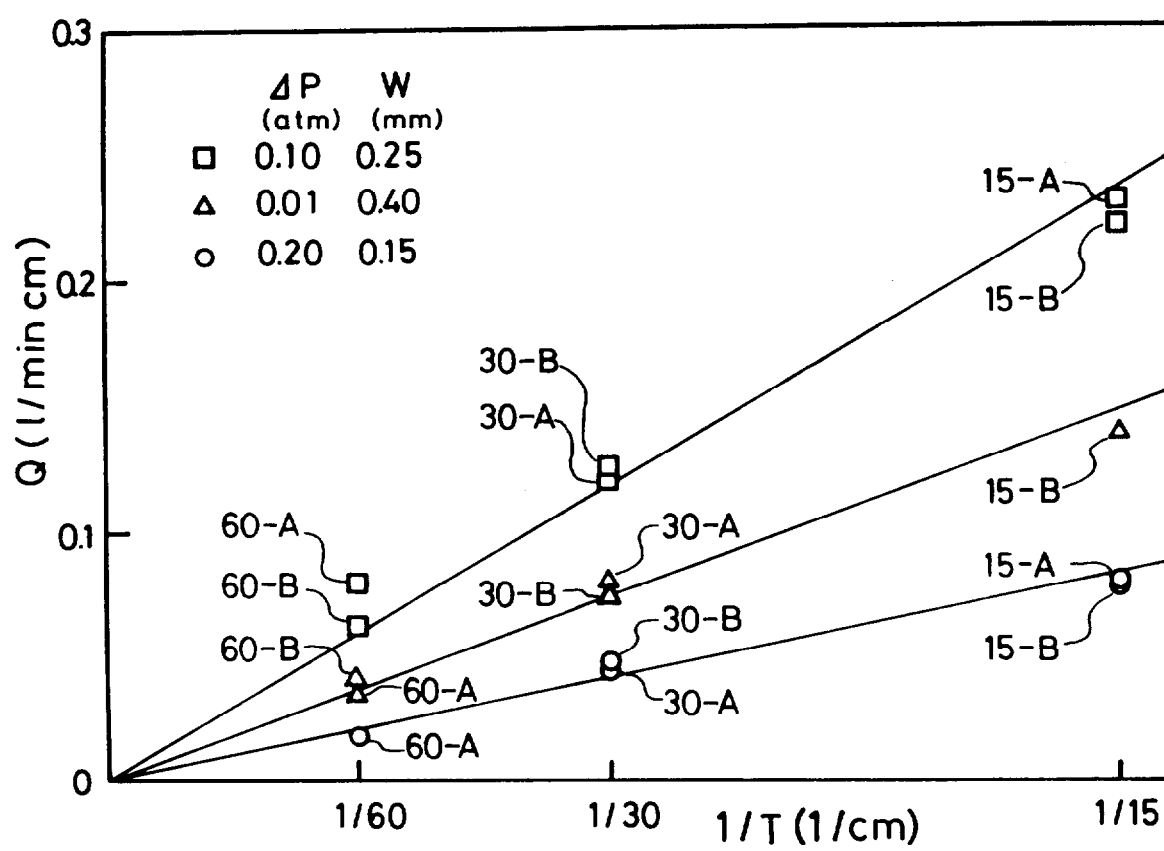


图- 2.15 Q (流量) - T (壁厚)

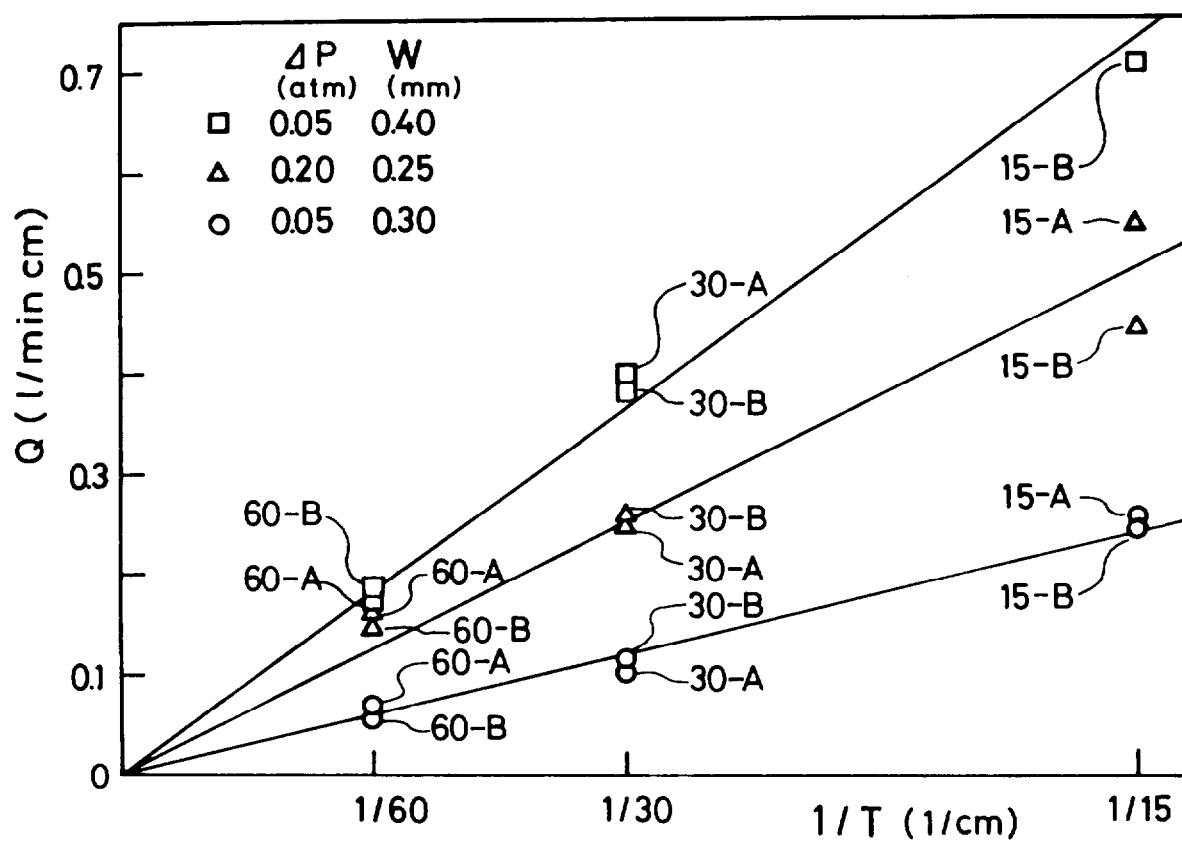


图- 2.16 Q (流量) - T (壁厚)

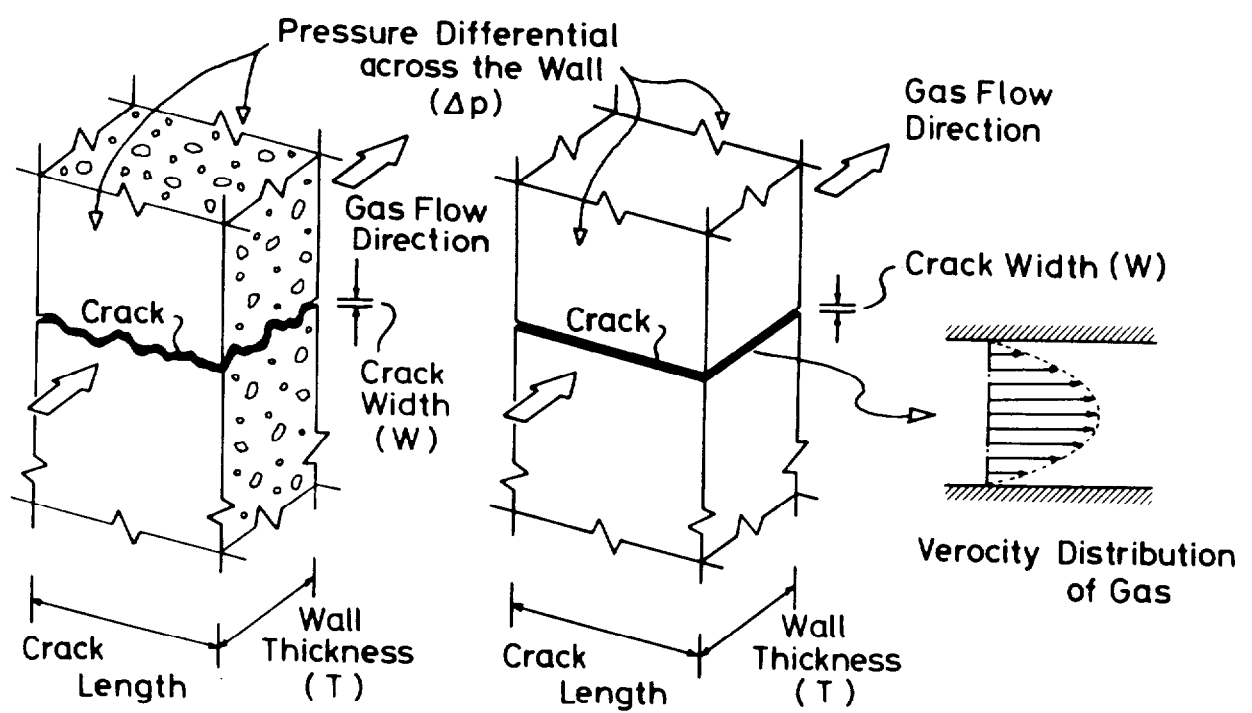


図- 2.17 ひびわれの理想化

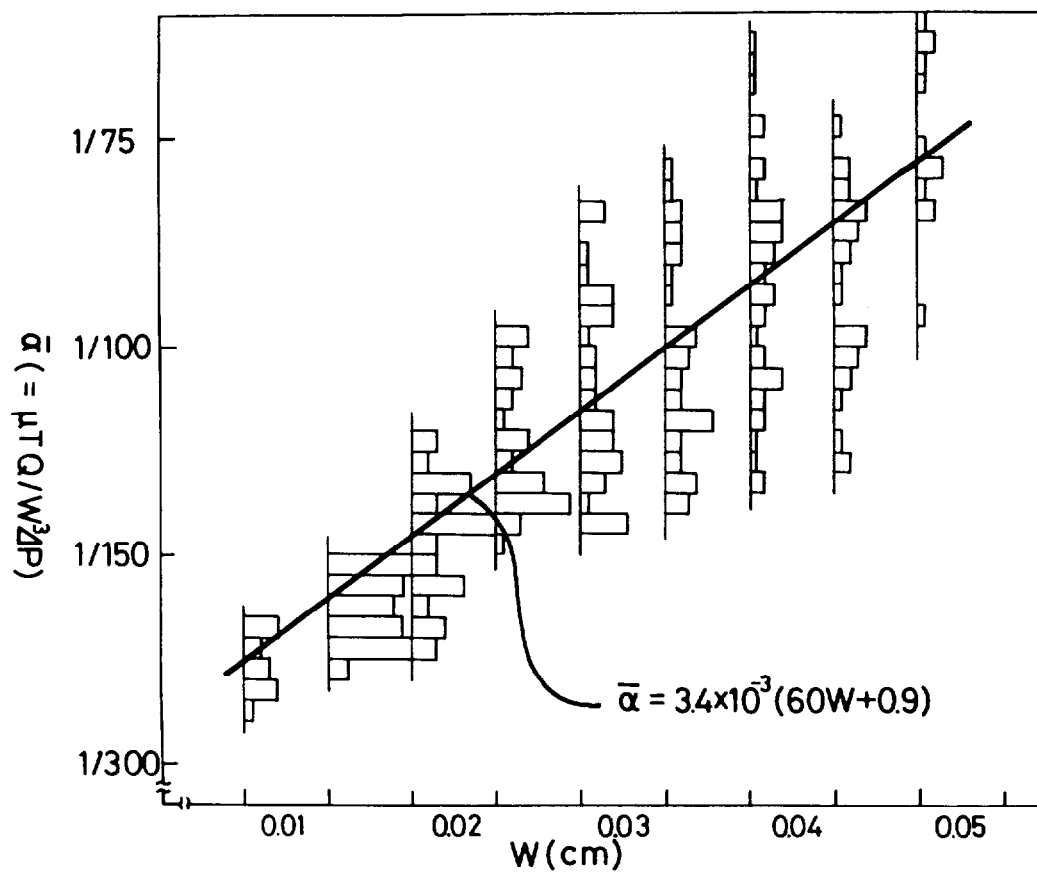
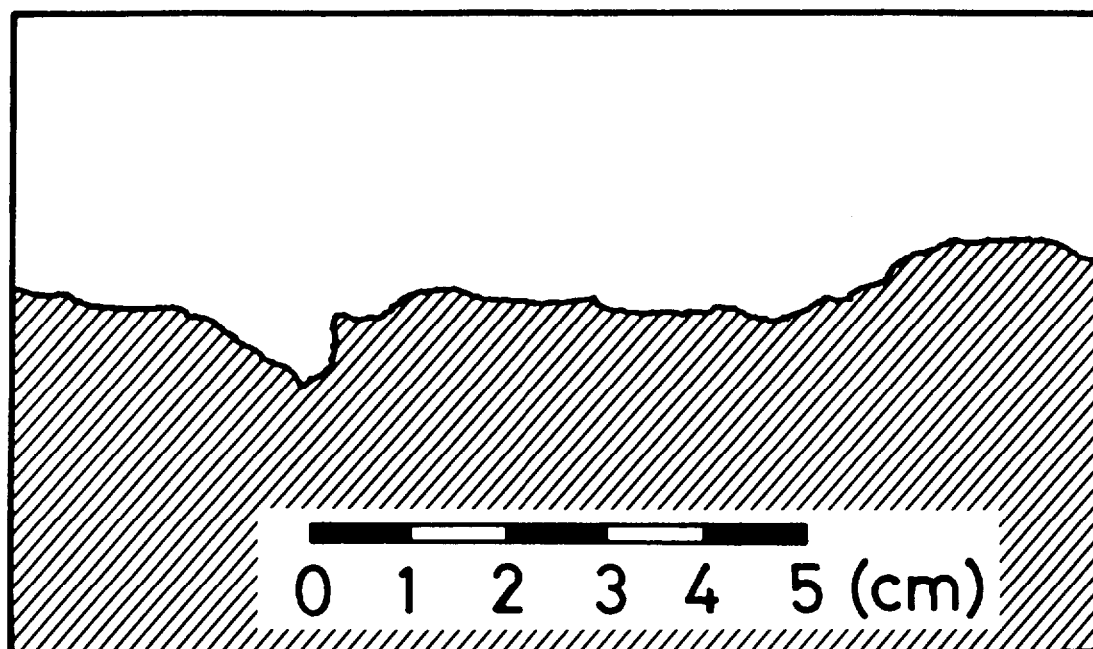
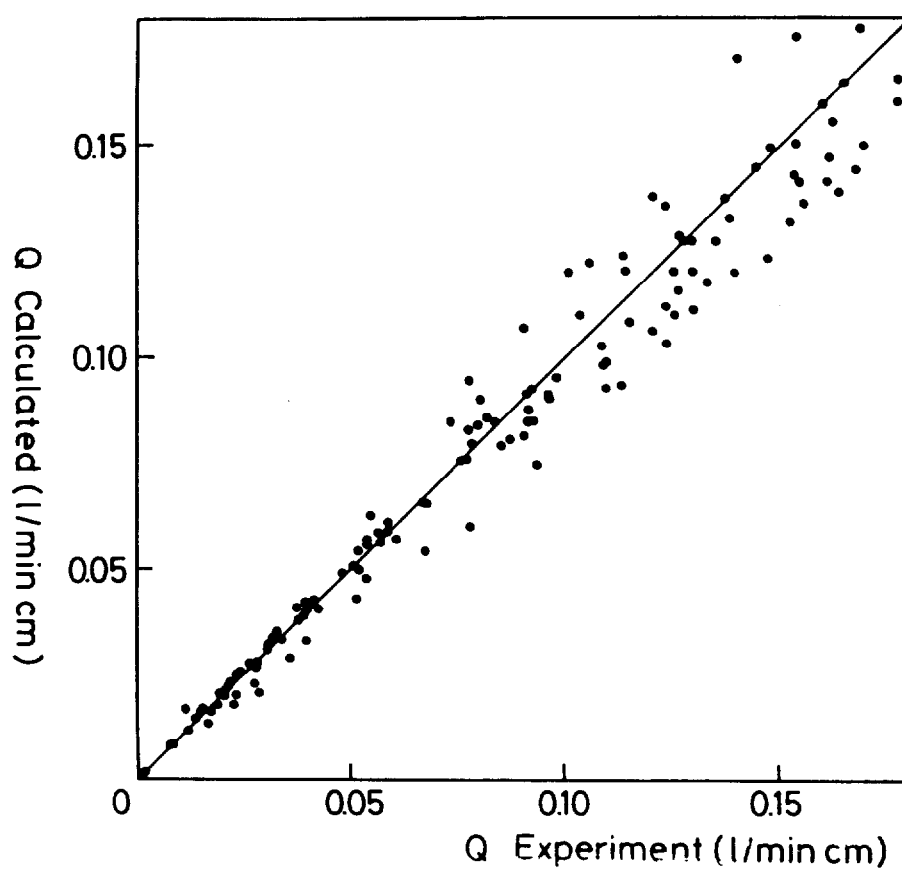


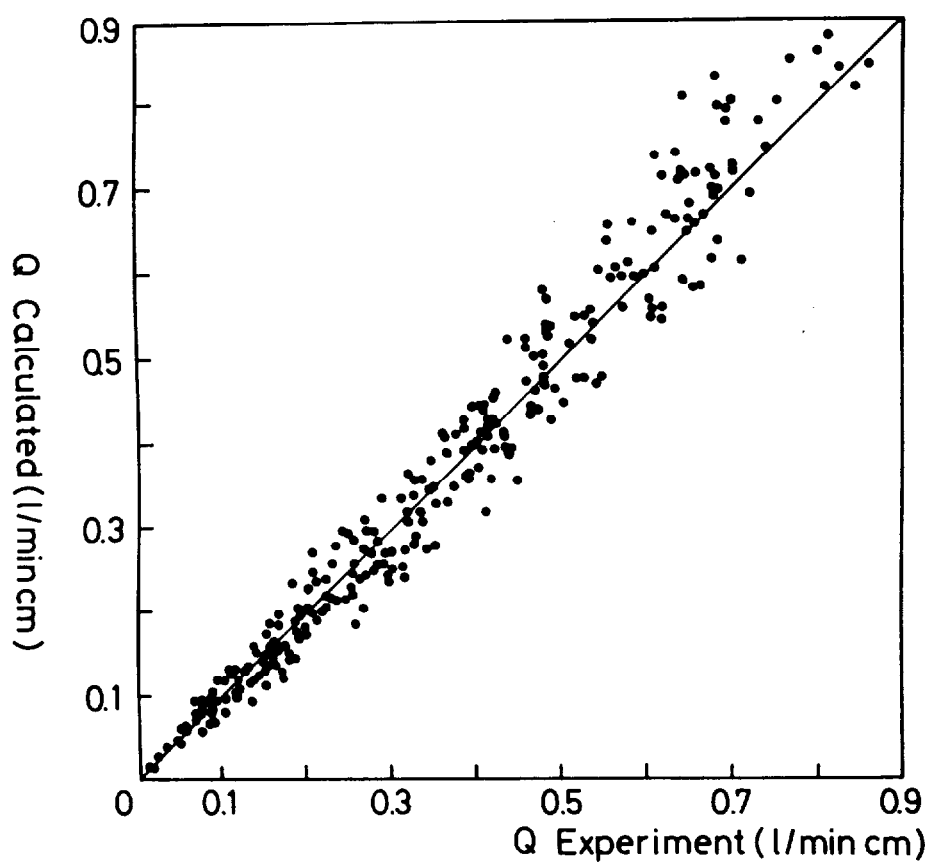
図- 2.18 $\alpha - W$ (ひびわれ幅)



図－ 2.19 ひびわれ断面



図－ 2.20 Q (計算値)と Q (実験値)の対応



図－ 2.21 Q (計算値)と Q (実験値)の対応

第3章 気体の圧縮性を考慮した漏洩量予測実験式

- 3.1 はじめに
- 3.2 試験体及び実験方法
- 3.3 ひびわれを理想化した場合の気体の流れ
 - 3.3.1 圧縮性流体の一次元流れの基礎式
 - 3.3.2 気体の圧縮性を考慮した実験式
 - 3.3.3 ひびわれを理想化した場合の気体の流れ
- 3.4 骨材粒径，骨材形状の影響
- 3.5 コンクリート壁のひびわれからの気体漏洩に関する実用式の提案
- 3.6 まとめ

3.1 はじめに

前章において鉄筋コンクリート壁の気体漏洩問題の中で最も基本的なコンクリート自体について単一ひびわれを通しての気体漏洩実験方法を提示し、実験結果をもとに気体漏洩量には壁両端の圧力差に比例する範囲が存在し、2次元ポアズイユ流れを利用した実験式を用いて場実験結果が精度良く整理できることを示した。本章は気体の圧縮性を考慮した実験式を提案し、この実験式と新たに行った漏洩実験結果により前章で得られた知見に対しての検討を行ったものである。まず、前章で提示した実験結果について気体の圧縮性を考慮して再整理を行い、流れを一次元等温圧縮流れ仮定した実験式の提案を行う。続いて、粗骨材の粒径を変化させた試験体、アルミニウムのモデル骨材を用いて骨材形状を変化させた試験体、及びガラス板を用いた理想ひびわれモデルの試験体について前章と同様の実験による結果を示し、前章で得られた結論に対しての防証を行った。さらに、新たに提示した実験結果の評価式を用いて2次元ポアズイユ流れを利用した実験式がひびわれを生じたコンクリート壁からの気体漏洩量の実用式となりえる付帯条件について検討を行った。

3.2 試験体及び実験方法

試験体リストを表-3.1に示す。試験体名は[壁厚の cm 表示]-[骨材の種類, A, B, C, D, E, ガラス板の試験体 G]-[同一試験体を区別する記号 1, 2]とした。A, B, C シリーズはコンクリート調合用骨材の影響を調べる目的で製作されたものである。B, C シリーズの試験体は骨材粒径の影響を調べる目的で製作されたものである。B, C シリーズそれぞれの粗骨材最大骨材粒径は 25mm、15mm である。図-3.1 に A シリーズのコンクリート骨材の最大粒径分布を、図-3.2 に B, C シリーズのコンクリート骨材の粒径分布を示す。D, E シリーズの試験体は骨材形状の影響を調べるためのもので、粗骨材としてそれぞれ直径 24.8mm の球と一辺 20mm の立方体のアルミニウムを用いている。骨材にアルミニウムを用いたのは、比重が通常の粗骨材とほぼ同じと判断したためであり、コンクリートの分離が打設時に起こりにくいと判断したためである。アルミニウムの表面は耐アルカリ処理を施している。A-E シリーズの試験体形状は、図-3.3 に形状の一例として壁厚 30cm の試験体の試験体図を示す。試験体の中央部の幅が小さくなっているのは、この部分に引張りひび割れを生じさせるためである。D19 はコンクリートに引張り力を伝えるためのものである、PC 鋼棒はひびわれ幅を制御するためのものである。PC 鋼棒と端部プレートの間にはプレート上下面にナットとワッシャーが取り付けられており、ひび割れを広げる場合にも狭める場合にもコントロール可能な仕組になっている。埋め込みナットは圧力箱、シール用のゴムを押さえる鋼板、測定治具を取付けるためのものであり試験体中には通しボルトで型枠に固定してコンクリートを打設している。

コンクリート打設 3 日後に脱型を行い、脱型直後に乾燥収縮その他の原因で試験体にひび割れが生じないように、PC 鋼棒を 4 本同一の引張り力になるように締め付けた。四本の PC 鋼棒の引張り歪みが約 0.1%を保つように実験開始直前まで、毎日締め直しを行った。試験体の養生は、時々水をかけながら気中（実験室内）で行った。

G シリーズの試験体は、ひびわれ面を理想化して滑らかな平面とした場合に流れがどのようなになっているかを調べる目的で作成したものである。図-3.3 に示すように 2 枚のガラス板の間に 0.3mm の

銅製のスペーサーを挟み、他の試験体と同一の圧力箱（ゴムと鋼板）が付くように上下にブロック状の木材を取付けた。壁厚は15cm、隙間長さは他の試験体と同様に10cm、ひびわれ幅に相当するガラス板の隙間幅は0.3mmである。A—Eシリーズの試験体の実験方法の概略を図-3.4に示す。試験体を球座を介してアムスラー100t 万能試験機で引張り、楔状の部分に引張りひび割れを発生させる。荷重の制御と、PC 鋼棒の締め付け力を制御してダイヤルゲージでひびわれ幅を測定する。壁両端には、圧力計を取付けた圧力箱をセットし、一方の圧力箱には酸素ボンベより酸素ガスを送る。もう一方の圧力箱には流量の測定範囲の異なる面積式流量計 5 器継ぎ、適当な流量計 1 つを選び、漏洩量の測定を行う。各流量計の流出側は大気に解放されている。ひびわれ幅は約 0.05mm 間隔で変化させ、同じひびわれ幅で圧力を変えて漏洩量を数点から数十点測定した。流入側に掛ける圧力が大きくなってくると、ひび割れを内部から押し広げようという力が大きくなり、ダイヤルゲージで測定しているひびわれ幅が大きくなってくる事がある。この場合にはひびわれ幅がある一定の許容誤差範囲内に有るうちは測定を続け、許容誤差範囲内を超えた場合はひびわれ幅を PC 鋼棒、加力試験機などで再調整して測定を再開した。

一方、G シリーズの試験体では、ひびわれ幅に相当する 2 枚のガラス板の隙間幅の測定には、ひび割れ観察用のスケール（最小目盛り 1/100mm）付ルーペ（×100）を用いた。漏洩量の測定方法は A—E シリーズと同様である。試験体養生およびゴムシーリングの方法については基本的には前章で述べた方法と同様である。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 圧縮性流体の一次元流れの基礎式

はじめに、実験結果を整理する上で基礎となる圧縮性流体の一次元流れ(12) について述べる。図-3.5 に示すように、幅B、すき間Wの長方形断面を有する管内の一次元定常流れを考える。壁面には単位面積当たり τ_w のせん断力が作用し、管軸方向に dx 隔てた所で断面内の平均流速 u 、平均圧力 p 、平均温度 T_{em} がそれぞれ du 、 dP 、 dT_{em} 変化したものとする。運動量保存の法則、連続条件、気体の状態方程式より次式が成り立つ(12)。

$$\rho \cdot u \cdot A \cdot [(u + du) - u] = P \cdot A - (P + dP) \cdot A - \tau_w \cdot A_s \cdots \cdots (3.1)$$

$$G = \rho \cdot u \cdot A = \text{const.} \cdots \cdots (3.2)$$

$$P = \rho \cdot R \cdot T_{em} \cdots \cdots (3.3)$$

ここに、 ρ_0 は断面内の気体の平均密度、 A は管の断面積（ $=B \cdot W$ ）、 A_s は壁面の表面積（ $=2 \cdot B \cdot dx$ ）、 G は単位時間に断面を通過する気体の質量（マス流量）、 R は気体定数である。

ここで壁面せん断応力 τ_w を単位体積当たりの気体の運動エネルギーで除した値

$$f = \tau_w / \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \right) \cdots \cdots (3.4)$$

を摩擦係数と定義する。摩擦係数 f はレイノルズ数および壁面粗さの関数になることが一般に知られ

ている。この場合、レイノルズ数はマス流量が一定であることから管内で一定、壁面粘さも管内で一定であることから摩擦係数も管内で一定とみなすことができる。(3.2), (3.3), (3.4) 式を用いて (3.2) 式を変形すれば、

$$\frac{du}{u} = -\frac{dP}{\rho u^2} - \frac{f}{W} dx \dots\dots\dots (3.5)$$

を得る。さらに、比較的流速が遅く、管炉が偏平で壁面の表面積が大きい場合、外部との熱の授受により流れは等温とみなせる。

$$T_{em} = T_0 = \text{const.} \dots\dots\dots (3.6)$$

(3.5) の式を (3.6) 式の条件下で、管路の長さを、 T 、上流端の圧力を P_1 、下流端の圧力を P_2 とし解くと、次式を得る。

$$f \frac{T}{W} = \frac{B^2 W^2 (P_1^2 - P_2^2)}{2G^2 RT} + \ln \frac{P_2}{P_1} \dots\dots\dots (3.7)$$

(3.7) 式を温度 T_0 、圧力 P_0 における単位ひびわれ長さ、単位時間当たりの体積流量 Q で表せば、

$$f \frac{T}{W} = \frac{W^2 (P_1^2 - P_2^2)}{2\rho_0 P_0 Q^2} + \ln \frac{P_2}{P_1} \dots\dots\dots (3.8)$$

となる。ここに ρ_0 は温度 T_0 、圧力 P_0 における気体の密度である。

3.3.2 気体の圧縮性を考慮した実験式

本章で提示する気体の圧縮性を考慮した実験式は (3.8) 式をもとに、摩擦係数 f を実験定数として求めるものである。ひびわれ面の凹凸による影響を摩擦係数として捉えることでひびわれによるすき間形状は、単純に上記のような長方形断面の管路に置き換え得るものと考えている。また実験における気体の流速はマッハ数で概算 10^{-2} のオーダーであり、ひびわれによるすき間形状が非常に偏平であることから、流れを等温とみなしても差しつかえないものと思われる。マッハ数で 10^{-2} 程度のオーダーの流速の遅い流れではさらに (3.8) 式の右辺第 2 項は第 1 項に比べ微小となり、(第 2 項は第 1 項に比べ $10^{-3} \sim 10^{-4}$ のオーダーとなる) 無視し得る。そこで、(3.8) 式で右辺第 2 項を無視した。

$$f \frac{T}{W} = \frac{W^2(P_1^2 - P_2^2)}{2\rho_0 P_0 Q^2} \dots\dots\dots (3.9)$$

により、摩擦係数 f を求める形で実験結果を整理した。実験結果は気体漏洩量をすべて 20°C , $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ (1 気圧) 換算の体積流量で表している。したがって (3.9) 式中、 P_0 は $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, ρ_0 は 20°C , $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ における酸素ガスの密度 (1.33 kg/m^3) である。図-3.7 に、実験結果の流量 Q と壁両端の圧力 ($P_1^2 - P_2^2$) の関係の一例を示す。●は実験結果をプロットしたものである。 $Q - (P_1^2 - P_2^2)$ 関係は比例関係ではないがなめらかな曲線で表される。また、図-3.8 から図-3.10 に A シリーズのコンクリートのひびわれ幅が 0.15 mm , 0.20 mm , 0.45 mm における流量 Q と (3.9) 式より求めた摩擦係数 f の関数を示す。壁厚 15 cm , 30 cm , 60 cm の試験体の実験データをそれぞれ Δ , $\square$, $\circ$ で表している。壁厚によって同じ流量での摩擦係数の値に多少のばらつきがあるが、これは、壁厚が厚くなるほどひびわれ幅の制御が困難になることや、試験体により厳密には同じひびわれ幅になっていないこと等、実験誤差によるものがあり、 $f - Q$ 関係は壁厚によらず一定であるといえる。以上より、ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩量は (3.9) 式により評価できることがわかる。図-3.11 から図-3.17 は、摩擦係数と流量の積 $f \cdot Q$ と流量 Q の関係を示したものである。実験データは図-3.8 から図-3.10 と同様、A シリーズのコンクリートのデータである。 $f \cdot Q$ はひびわれ幅によって傾き、切片が異なるもののいずれも流量 Q の 1 次関数で表される。図中の実線は回帰計算により求めた直線を示している。回帰計算より求めた切片 a 、傾き b とひびわれ幅 W の関係を示したのが図-3.18, 図-3.19 である。切片、傾きともひびわれ幅が増加すると減少する。摩擦係数 f は、ひびわれ幅 W , 流量 Q の関数になっており、次式で表せる。

$$f = \frac{a(W)}{Q} + b(W) \dots\dots\dots (3.10)$$

(3.9) 式, (3.10) 式により、コンクリート壁のひびわれからの気体漏洩量は、ひびわれ幅、壁厚、壁両端の圧力と関係づけられる。

3.3.3 ひびわれを理想化した場合の気体の流れ

G シリーズの実験結果を A シリーズと同様に $f \cdot Q$ と Q の関係で図-3.20 に示す。また図-3.21 に二次元ポアズイユ流れの流量を表す式との対比を示す。それぞれ●が実験結果である。図-3.20 では $f \cdot Q$ の値は Q によらずほぼ一定であり、 $12 \cdot \mu / \rho_0$ (破線) に近い値をとっている。 μ は気体の粘性係数である。この $f \cdot Q$ の一定値 ($12 \cdot \mu / \rho_0$) はすき間内の流速分布が気体の分子粘性により、放物線状になるときの理論値である。(3.9) 式に $f \cdot Q = 12 \cdot \mu / \rho_0$ を代入すれば次式を得る。

$$Q = \frac{1}{12} \frac{W^3 (P_1^2 - P_2^2)}{\mu T 2 P_0} \dots \dots \dots (3.11)$$

P_1 , P_2 が極めて P_0 に近ければ(3.11)式は二次元ポアズイユ流参考文献(5)を表す式に一致する。ひびわれを理想化した場合、気体の流れは二次元ポアズイユ流に極めて近いものとなっていることが実際に確かめられた。

3.4 骨材粒径、骨材形状の影響

図-3.22 および図-3.23 に骨材粒径の異なるB, Cシリーズのコンクリートに関して、図-3.24 および図-3.25 に骨材形状の異なるD, Eシリーズについて、 $f \cdot Q$ - Q 関係図を示す。いずれの試験体においても $f \cdot Q$ と Q は直線関係で表され、およそ通常のコンクリートであれば、ひびわれの気体漏洩量は(3.9)式および(3.10)式で評価できる。A~Eシリーズのすべての試験体について、 $f \cdot Q$ - Q 関係を直線回帰したときの切片 a 、傾き b とひびわれ幅 W の関係を図-3.26, 図-3.27 に示す。いずれの試験体においてもひびわれ幅の増加とともに、切片、傾きとも減少する傾向が見られる。理想化したひびわれモデルの気体漏洩に関する実験結果(Gシリーズ)を考え合わせれば、ひびわれ幅無限大では、傾きは零に、切片は $12 \cdot \mu / \rho_0$ に収束するものと考えられる。図-3.26 中 $a = 12 \cdot \mu / \rho_0$ を破線で示した。また各試験体のひびわれ面の形状を、図-3.28 から図-3.32 に示す。図-3.26 でわかるように、前報での筆者らの予想と反して、骨材粒径の大きいコンクリート(30-B)のほうが骨材粒径の小さいコンクリート(30-C)に比べ、同一条件での漏洩量が多いという結果になった。これは粗骨材として碎石を用いていたため、粒径の大きい骨材ほど載荷時に割れる可能性が高く、骨材粒径がひびわれ面の平滑度に反映されなかったためと考えられる。また、骨材形状の影響を調べた実験では、球形の骨材を用いた場合(15-D)のほうが、立方体の骨材(15-E)よりも同一条件下で漏洩量が多いという結果になった。このようにコンクリートのひびわれ面の摩擦係数はコンクリートの骨材粒径、骨材形状により変化することが明らかとなった。摩擦係数を決める要因であると考えられる。あるいは、前報では係数 f を決める要因と考えたひびわれ面の平滑度は、単純に最大骨材粒径により評価できるものではなく、その定性的な評価にはまだ多くの実験結果の蓄積を待たねばならない。

図-3.43 はAシリーズの試験体について一次元圧縮流れの式を利用した実験式によって算出した流量の計算値と実験値の対応を示したものである。計算値の精度は各試験体とも2割程度のばらつきに分布している。図-3.34 は同様にBシリーズの試験体について圧縮性を考慮した実験式によって算出した流量の計算値と実験値の対応を示したものである。図-3.35 はDおよびEシリーズの試験体について圧縮性を考慮した実験式によって算出した流量の計算値と実験値の対応を示したものである。

3.5 コンクリート壁のひびわれからの気体漏洩に関する実用式の提案

コンクリート壁のひびわれからの気体漏洩問題が特に原子力関連施設の設計において重要となって

いるという背景を考えると、対象とする範囲を、壁の両側の圧力が大気圧 ($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$) に近く、圧力差が 0.01 気圧 (10^2 Pa のオーダー) 以下に限定し得る場合も少なくない。このように、絶対圧力が大気圧に近く、圧力差の極めて小さい範囲を問題にする場合、気体の圧縮性は無視し得るものと考えられる。実際に、前章では圧力差と流量が比例する範囲が存在したことから、非圧縮、粘性流体の理論式 (二次元ポアズイユ流) を基に論展開を行った。しかしながら、実験式の適用範囲には、絶対圧力に関する規定がなく、また比例範囲自体が見かけ上現れるものであり、適用範囲に関する規定は誤りであった。本章では、コンクリートのひびわれ内の気体の流れが (3.9) 式、(3.10) 式に従う流れであるとして比例範囲が見かけ上現れることを示すとともに、前章の実験式の適用範囲について再検討を行う。前章における実験式は次式で表される。

$$Q = \alpha \frac{\Delta p W^3}{\mu T} \dots\dots\dots (3.12)$$

一方 (3.9) 式は Q について整理すれば、

$$Q = \frac{W^3 (P_1 + P_2) (P_1 - P_2)}{2 \rho_0 P_0 (fQ) T} \dots\dots\dots (3.13)$$

となる。(3.12) 式、(3.13) 式より、摩擦係数 f と係数 α の間に

$$\alpha = \frac{\mu (P_1 + P_2)}{2 \rho_0 P_0 (fQ)} \dots\dots\dots (3.14)$$

の関係があることがわかる。(3.14) 式中、 μ 、 ρ_0 、 P_0 は定数である。また $(f \cdot Q)$ は Q の 1 次関数で表され流量の増加とともに増大する。にもかかわらず、同じひびわれ幅では流量によらず α が一定とみなせる。つまり、流量と圧力差の比例範囲が存在したということは、壁両端の圧力 P_1 、 P_2 が流量に独立でなかったことを示している。実験では、図-3.36 中右下に示す面積式流量計を用い、出口側を自由放流 (大気圧に放流) として流量を測定していた。ところが流量 Q と、流量計の入口側の圧力、つまり、壁の流出端の圧力 P_1 の間には、図-3.36 に示すような関係があり、流量の増加とともに、壁の流出端の圧力は増大する。したがって α が一定となっていたのは、(3.15) 式で流量の増加による $(f \cdot Q)$ の増加分と $(P_1 + P_2)$ の増加分が釣り合っていたものと考えられる。図-3.37 に A シリーズの壁厚 15 cm の試験体のひびわれ幅 0.45 mm における $\mu / (\alpha \cdot \rho_0)$ に相当する $f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0 / (P_1 + P_2)$ と流量 Q の関係を示す。 $Q = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ 程度までは α はほぼ一定とみなせる。図中の実線は前章で規定した α の式

$$\alpha = 20.4 \cdot W + 3.1 \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (3.15)$$

ただし W の単位は m である。

より求めた $f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0 / (P_1 + P_2)$ を表している。流量と圧力差の間に比例関係が見られるのは流量計の特性の影響によるものであった。次に、(3.13) 式の f より (3.14) 式を用いて求められる α と、報の実験式における α を比較しながら、前報の実験式、(3.13) 式の適用範囲について検討する。図-3.38 から図-3.41 は A シリーズのコンクリートに関して、壁流出端の圧力を $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ とした場合の (3.13) 式の f より求められる $f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0 / (P_1 + P_2)$ と前報の実験式の係数 α (3.15 式) より求められる $\mu (\alpha \cdot \rho_0)$ の比較を行ったものである。図中、破線実線、1 点鎖線は、壁厚 15 cm, 30 cm, 60 cm の試験体について、 f より求められる $f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0 / (P_1 + P_2)$ の流量による変化を表している。また、太線の 2 点鎖線は前報の実験式の係数 α を示している。●で壁両端の圧力差が $0.203 \times 10^5 \text{ Pa}$ (0.2 気圧) となる点を、また 3 点鎖線で見かけのレイノルズ数が 100 となる流量を示した。いずれのひびわれ幅においても、前報の実験式の α (3.15) 式より求めた $\mu (\alpha \cdot \rho_0)$ は流量が比較的小さい場合 (見かけのレイノルズ数が 100 以下、圧力差 Δp が 0.203×10^5 (0.2 気圧) 以下)、(3.13) 式の摩擦係数 f より求めた $f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0 / (P_1 + P_2)$ をほぼ評価しているものとみなせる。図-3.42～図-3.46 は、同様に B, C, D, E シリーズのコンクリートに関して、(3.13) 式の f より求められる $f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0 / (P_1 + P_2)$ と前報と同様の実験結果の整理法により、B から E シリーズまで各々

$$\alpha = 1.16 \cdot 10^{-2} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$\alpha = 14.6 \cdot W + 0.34 \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\alpha = 41.8 \cdot W + 5.44 \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (3.18)$$

$$\alpha = 35.0 \cdot W + 2.04 \cdot 10^{-3} \dots\dots\dots (3.19)$$

と定式化された α より求められた $\mu (\alpha \cdot \rho_0)$ の比較を行ったものである。いずれの試験体においても、やはり見かけのレイノルズ数が 100 以下、壁両端の圧力差 Δp が $0.203 \times 10^5 \text{ Pa}$ (0.2 気圧) 以下であれば、両者はよく対応している。図-3.38～図-3.46 より、少なくとも、絶対圧力 P_1, P_2 が $0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$ から $1.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、圧力差 Δp が $0.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 以下、見かけのレイノルズ数 ($Re = 2 \cdot \rho_0 \cdot Q / \mu$) が 10^1 のオーダーであれば、前報における実験式 (3.12) 式によっても、コンクリート壁のひびわれを通しての気体漏洩量の定量的把握が可能であるといえる。前述のとおり、コンクリート壁の気体漏洩問題は原子力関連施設の設定において重要となっており、対象となる範囲は、ほぼ上述

の範囲に内包されている。そこでより簡単な形である (3.12) 式をひびわれの生じたコンクリート壁の気体漏洩量に関する実用式として提案する。(3.12) 式は実用式として十分な精度でひびわれの生じたコンクリート壁の気体漏洩量を評価し得る。

3.6 まとめ

本章においてはひびわれの生じたコンクリート壁の気体漏洩に関する実験およびコンクリートのひびわれ内の気体の流れに関する実験およびコンクリートのひびわれ内の気体の流れに関する考察をとおして、以下のような結論を得た。

- (1) ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩量は、圧縮性流体の一次元定常等温流れを表す式を利用した実験式 (3.9) 式によって評価することができる。
- (2) (3.9) 式におけるひびわれ面の摩擦係数 λ は流量 Q およびひびわれ幅の関数となっており、(3.10) 式で表される。
- (3) 少なくとも以下に示す範囲内において、二次元ポアズイユ流を表す式を利用した実験式 (3.12) 式によっても、十分な精度でひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩量を把握し得る。

$$0.8 \times 10^5 \text{ Pa} \leq \text{壁両端の絶対圧力 } P_1, P_2 \leq 1.2 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{壁両端の圧力差 } \Delta p \leq 0.2 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{見かけのレイノルズ数 } Re (=2 \cdot \rho_0 \cdot Q / \mu) \leq 10^2$$

(4) (3.9) 式の摩擦係数、あるいは (3.12) 式の係数 α はコンクリートの骨材粒径、骨材形状等によって変化する。

(5) (3) に示した条件が満たされる場合の実用式としては、より簡単な形である (3.12) 式を推奨する。

表－ 3.1 試験体リスト

Name	Wall Thickness	Concrete	Fine Aggregate	Coarse Aggregate
60-A-1	60 (cm)	A	Sand ~ 5 (mm)	Crushed Gravel 10 ~ 20 (mm)
60-A-2	60 (cm)			
30-A-1	30 (cm)			
30-A-2	30 (cm)			
15-A-1	15 (cm)			
15-A-2	15 (cm)			
30-B	30 (cm)	B	Sand ~ 2.5 (mm)	Crushed Gravel: 10 ~ 25 (mm)
30-C	30 (cm)	C		Crushed Gravel: 2.5~ 15 (mm)
15-D	15 (cm)	D		Spherical Aluminum: D=24.8(mm)
15-E	15 (cm)	E		Cubical Aluminum: 20×20×20(mm)
15-G	15 (cm)	Specimen for leakage test of idealized crack. Idealized crack was made of two parallel glass plates.		

図－3.1 粒度分布 (Aコンクリート)

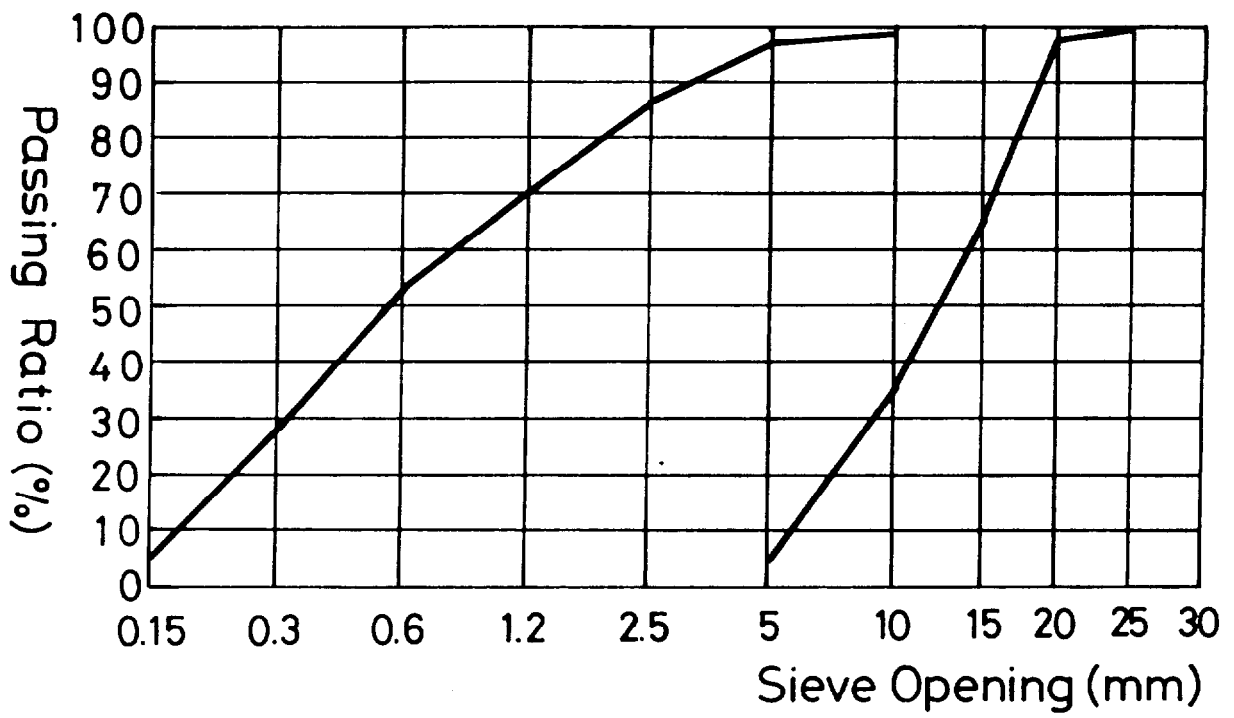
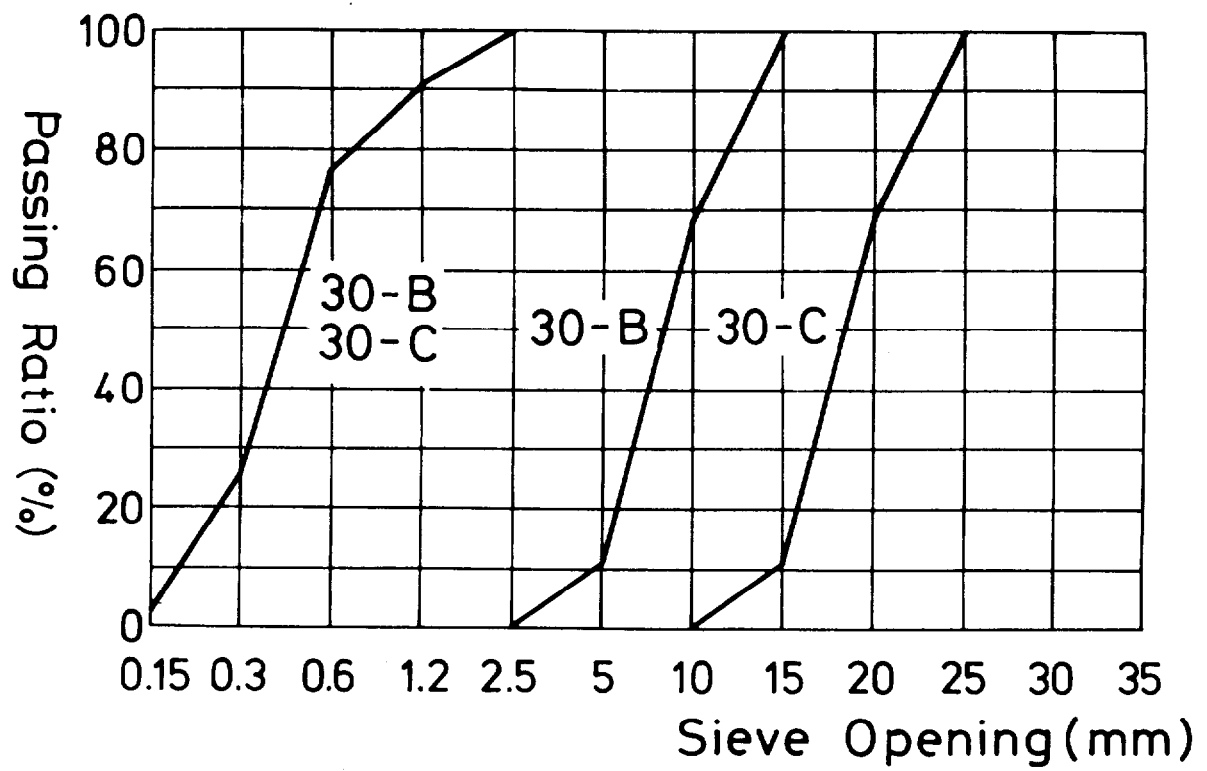
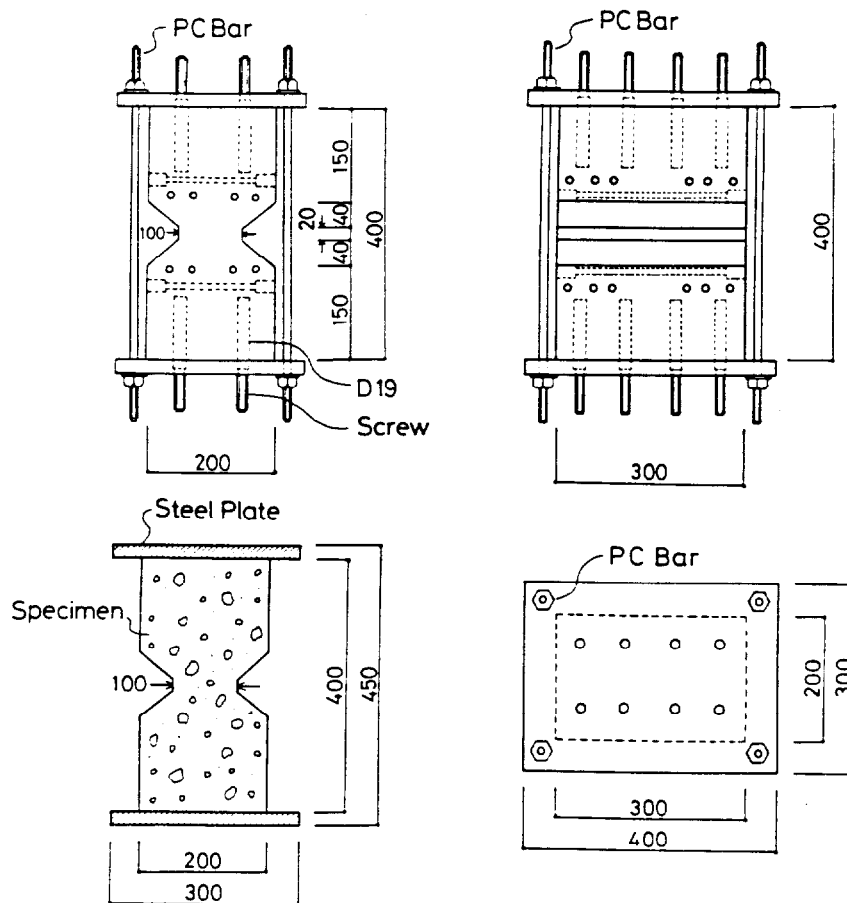


図-3.2 粒度分布 (B、C コンクリート)





図－ 3.3 試験体

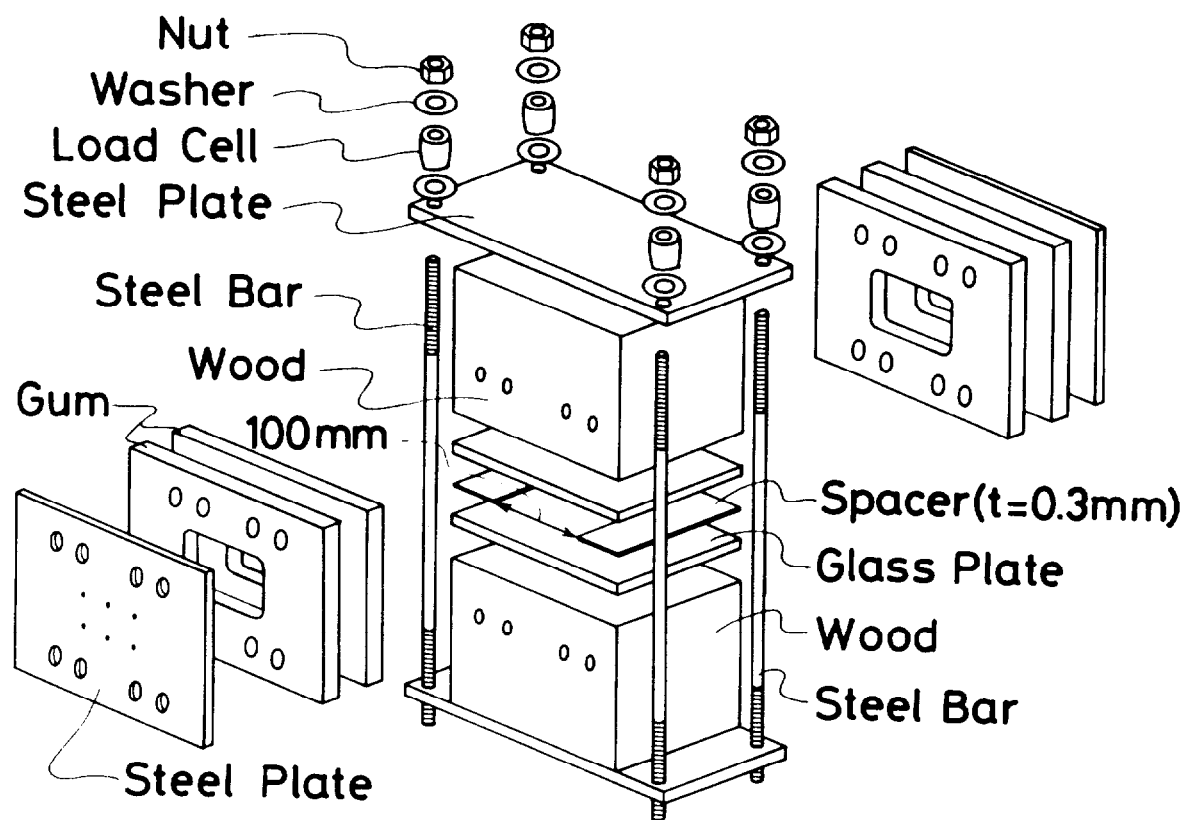
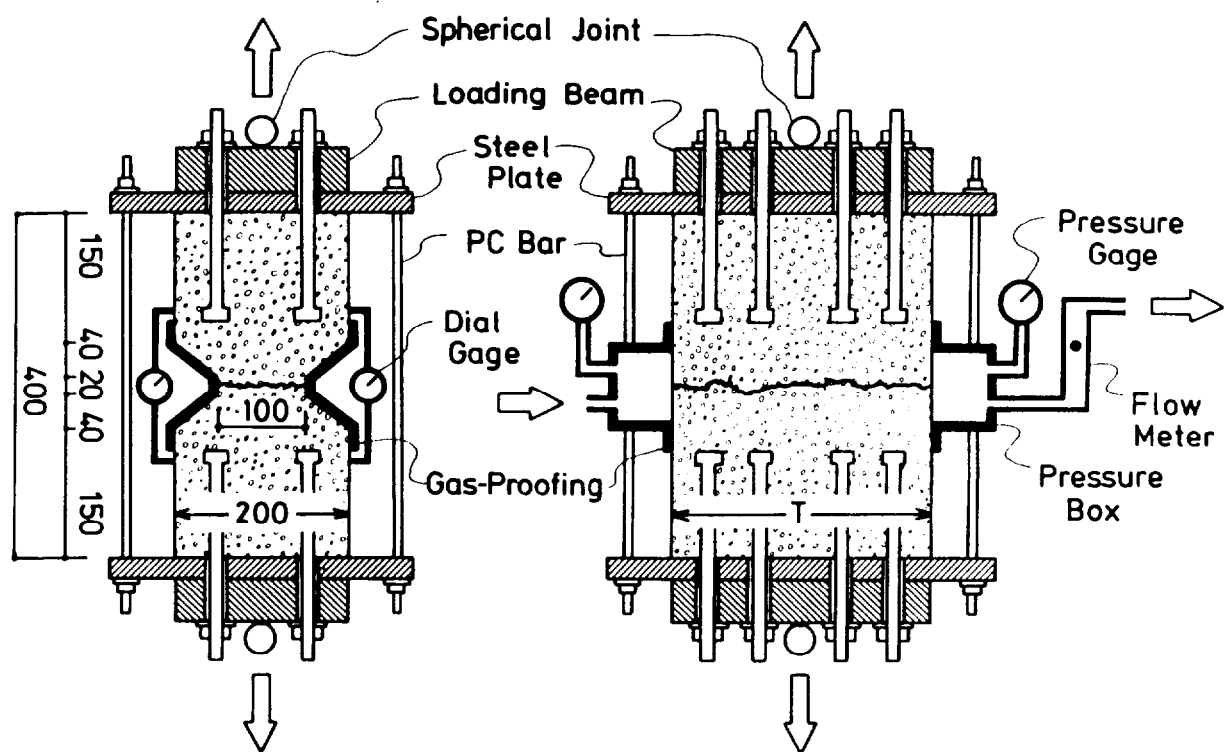
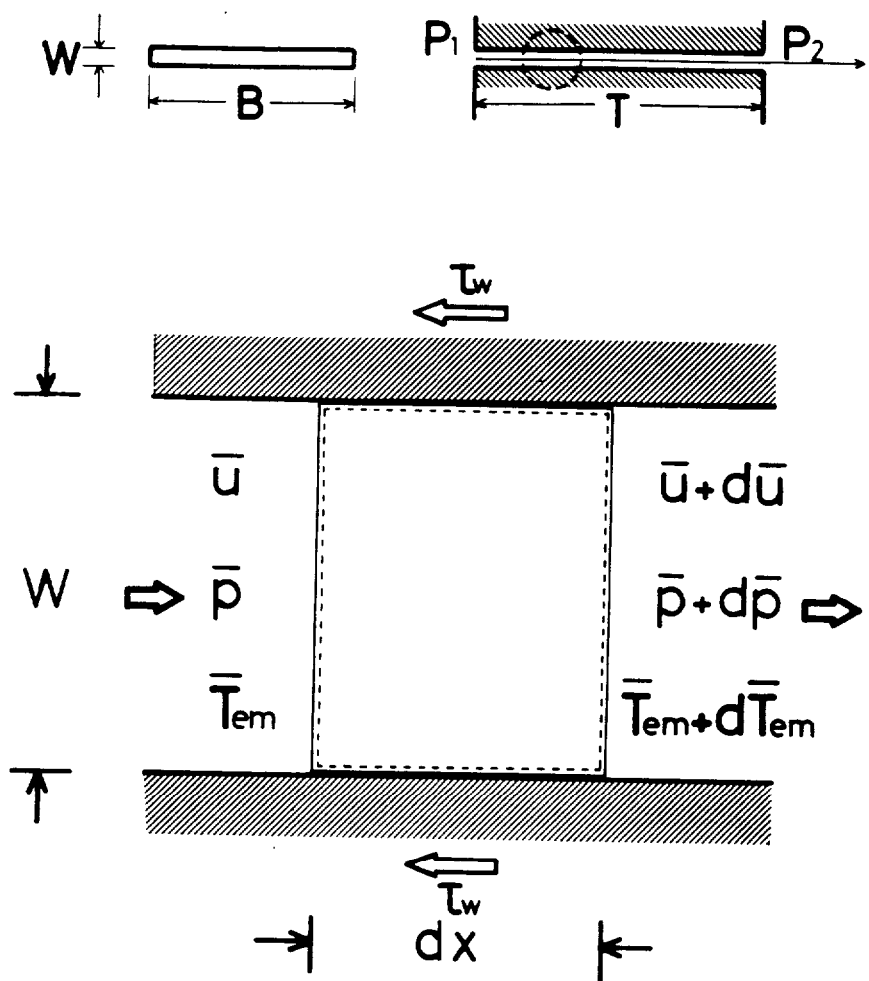


図-3.4 15-G試験体



図－3.5 実験方法



図－3.6 一次元圧縮性流れ

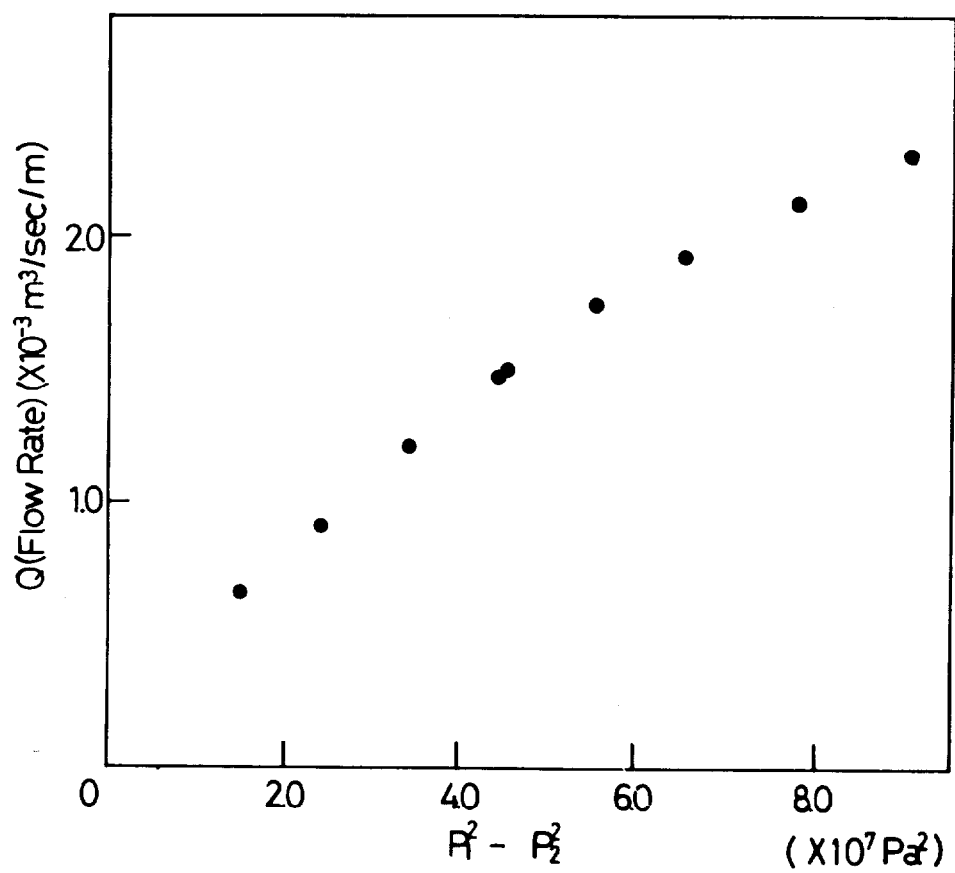


图-3.7 $Q - (P_1^2 - P_2^2)$

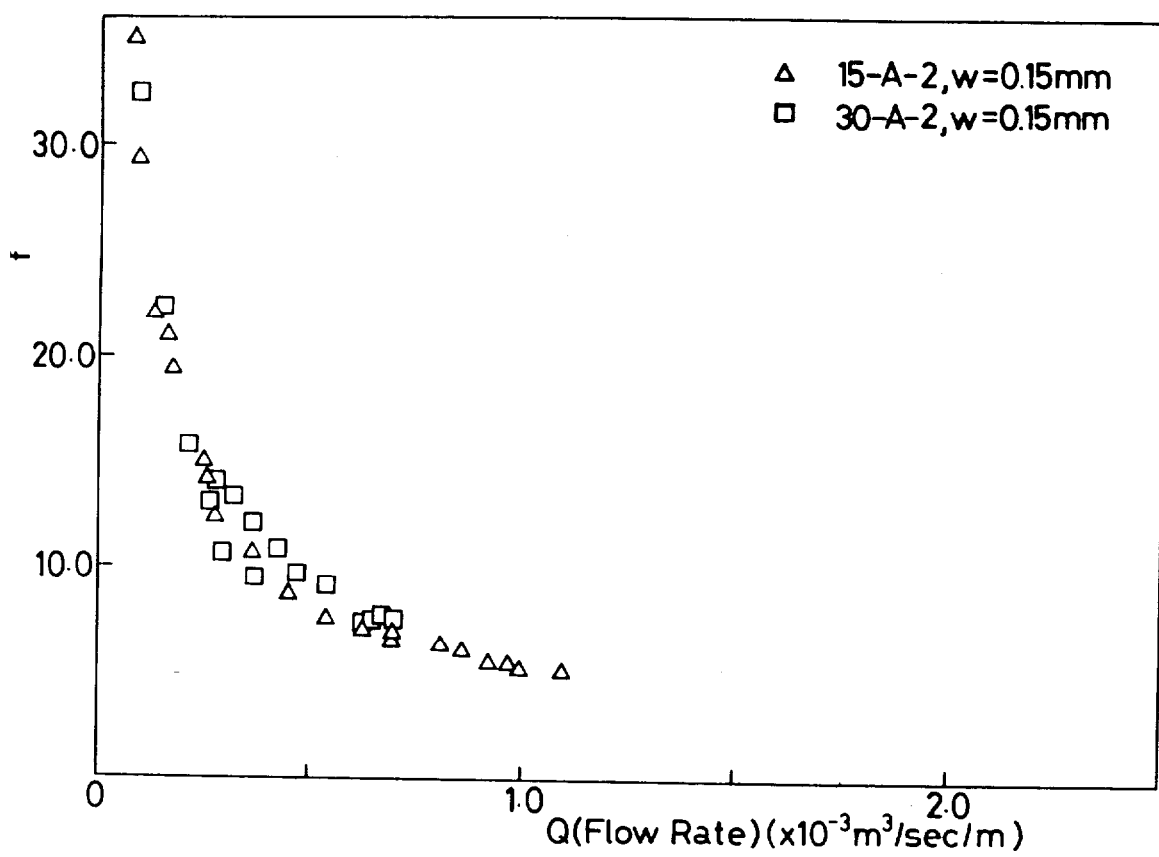


図-3.8 f - Q 関係

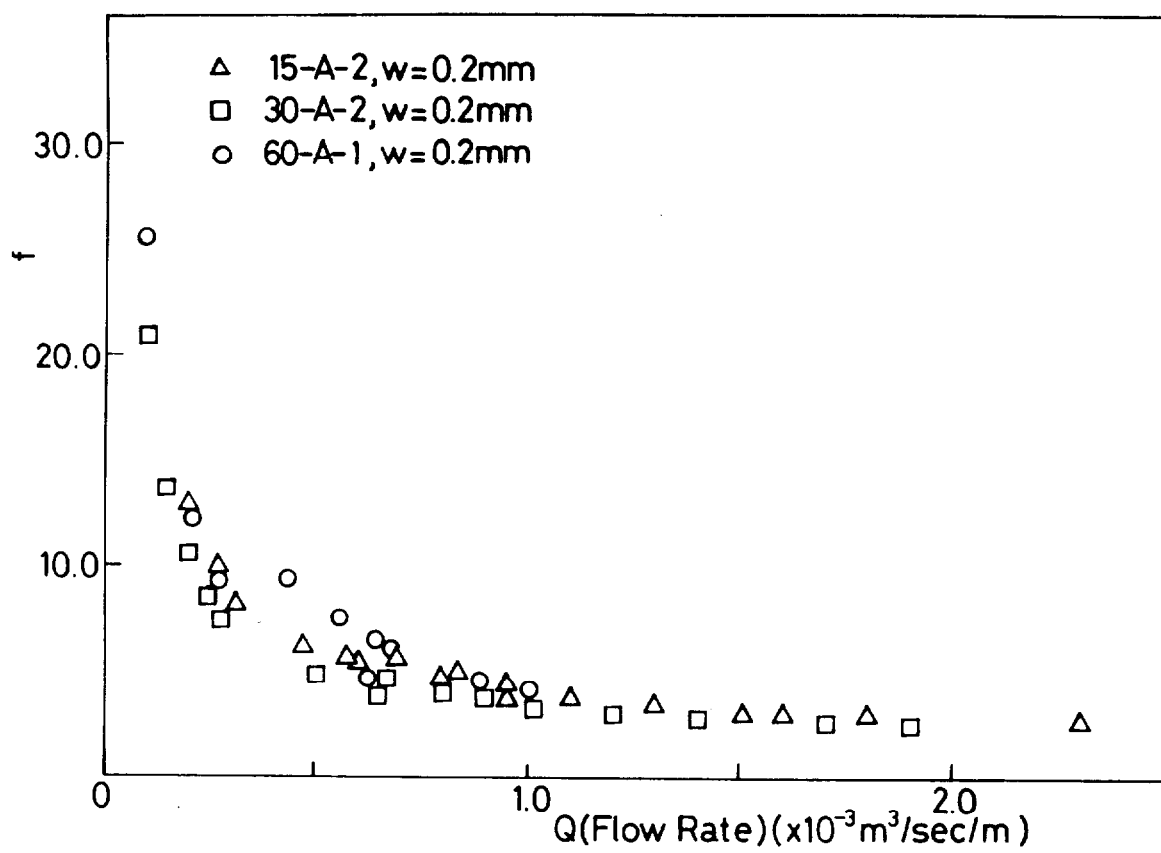


図-3.9 f - Q 関係

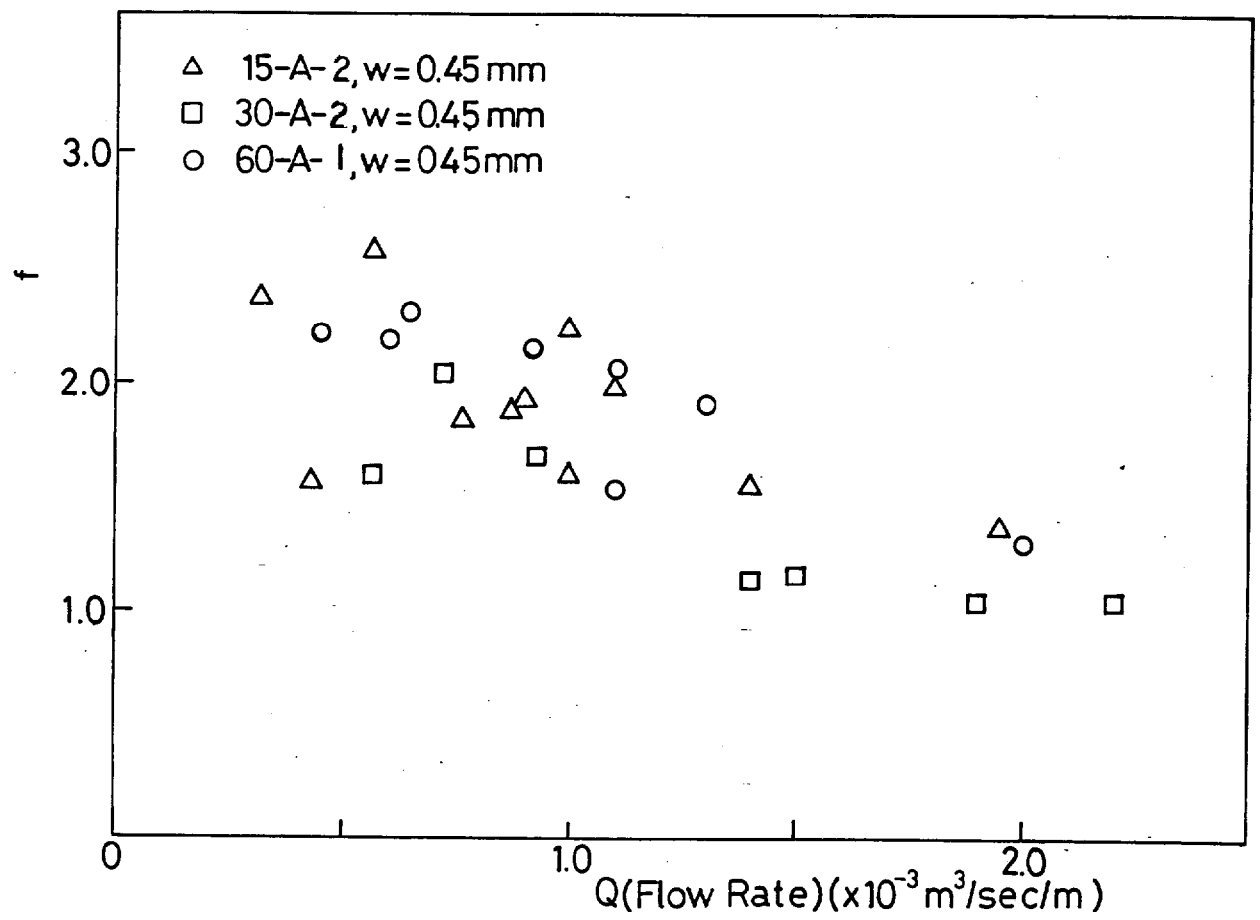


図- 3.10 f - Q 関係

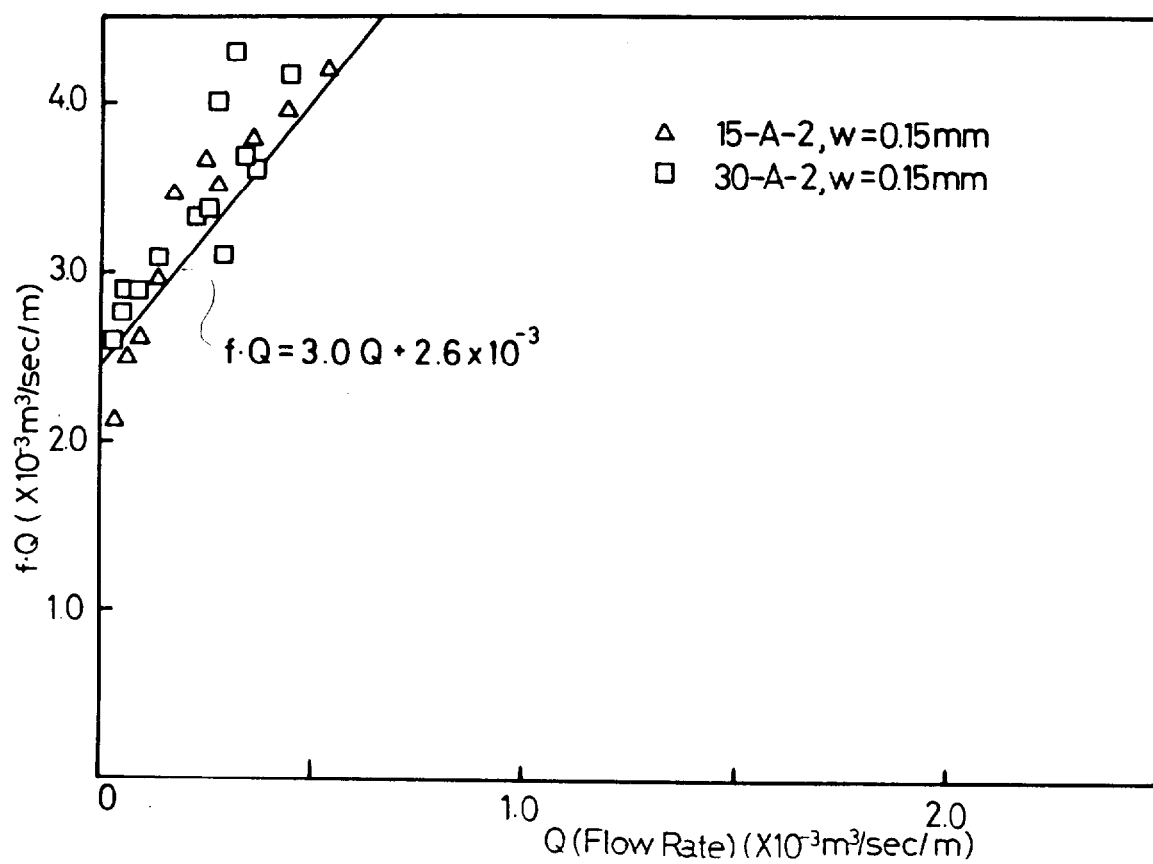


図-3.11 $f \cdot Q - Q$ 関係

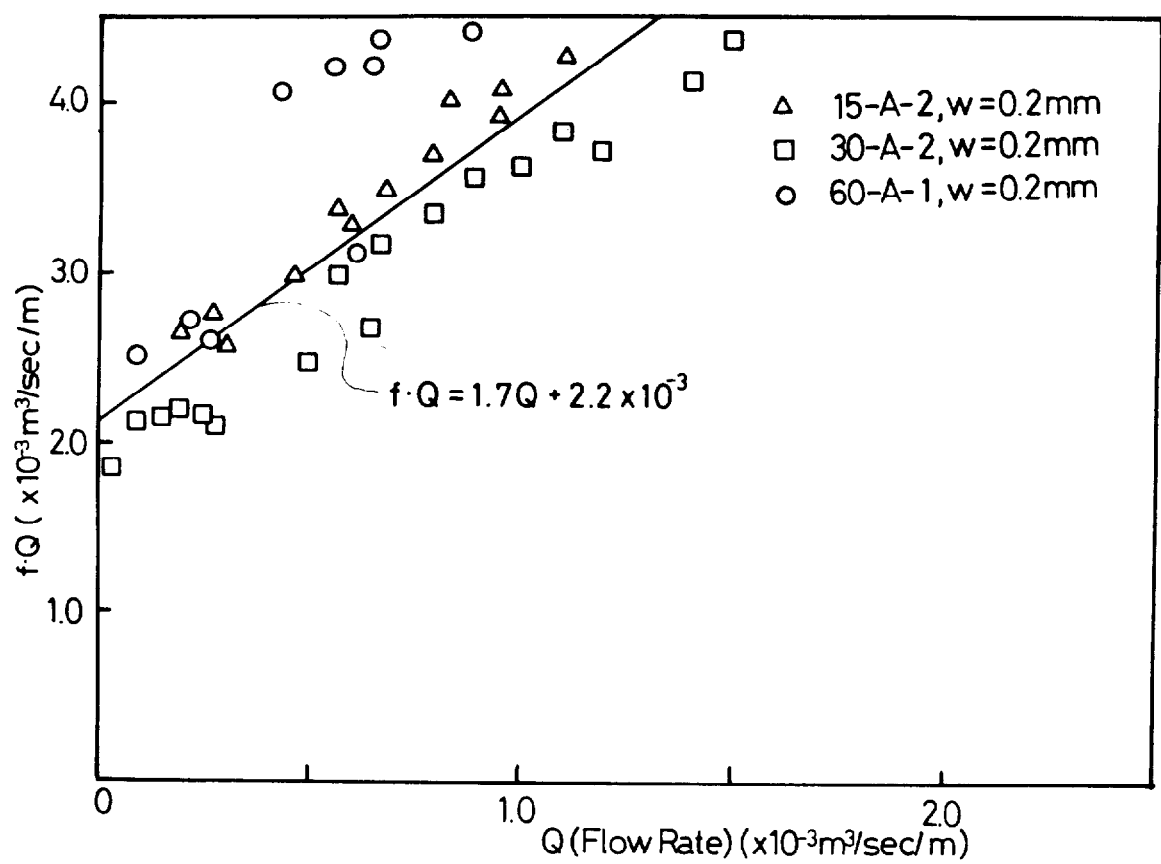
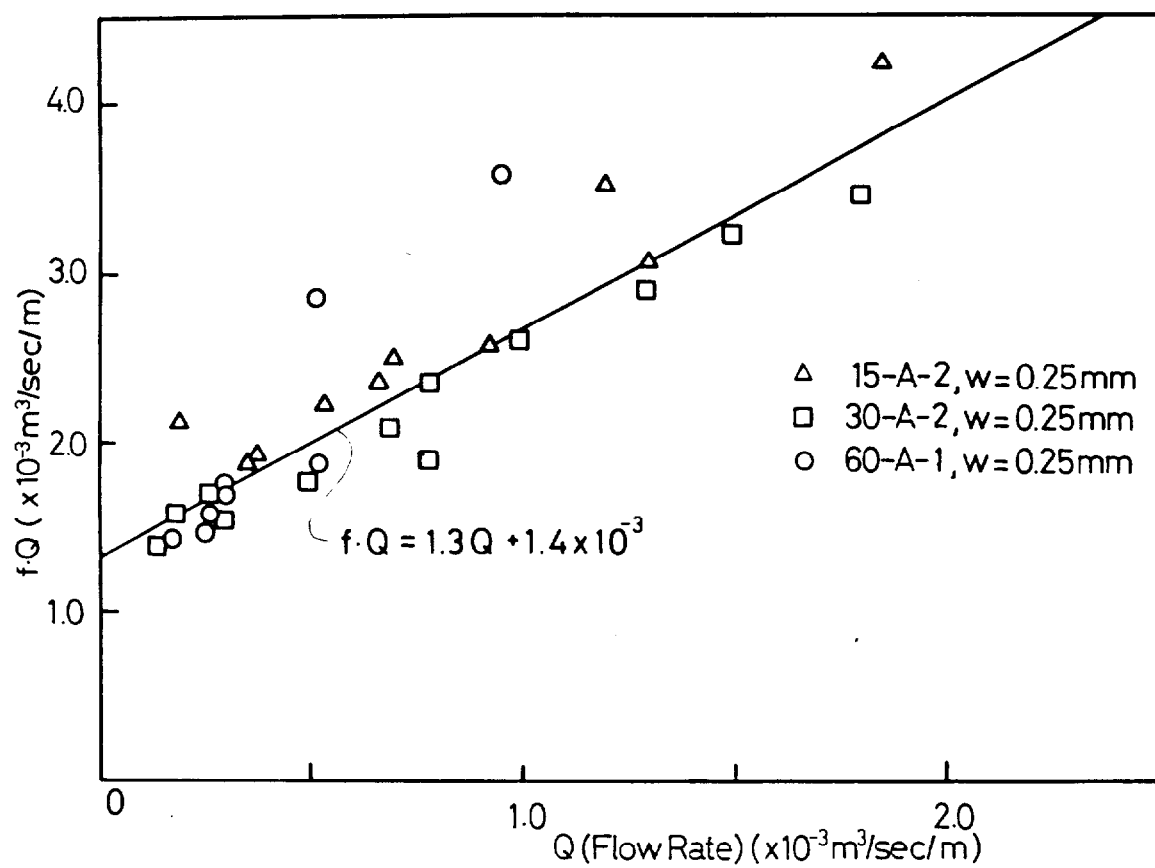


図- 3.12 $f \cdot Q - Q$ 関係



図－ 3.13 $f \cdot Q - Q$ 関係

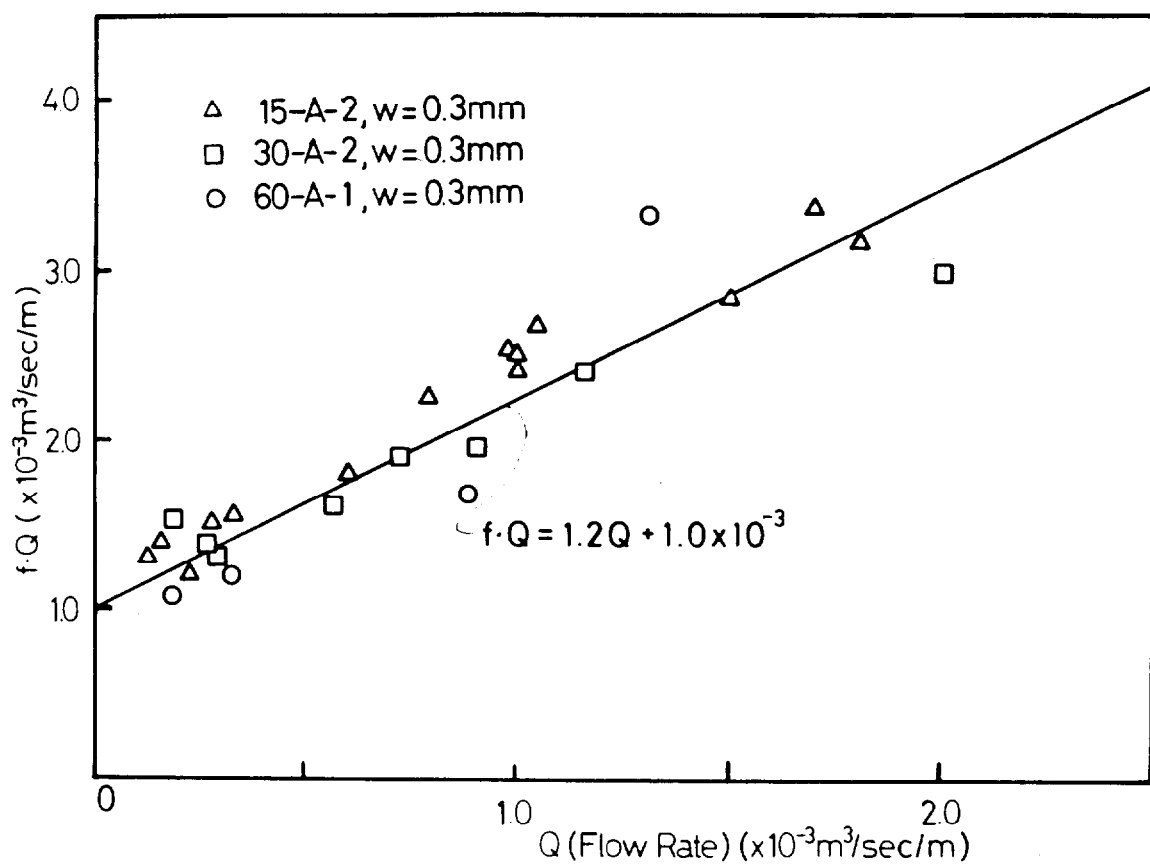


図- 3.14 $f \cdot Q - Q$ 関係

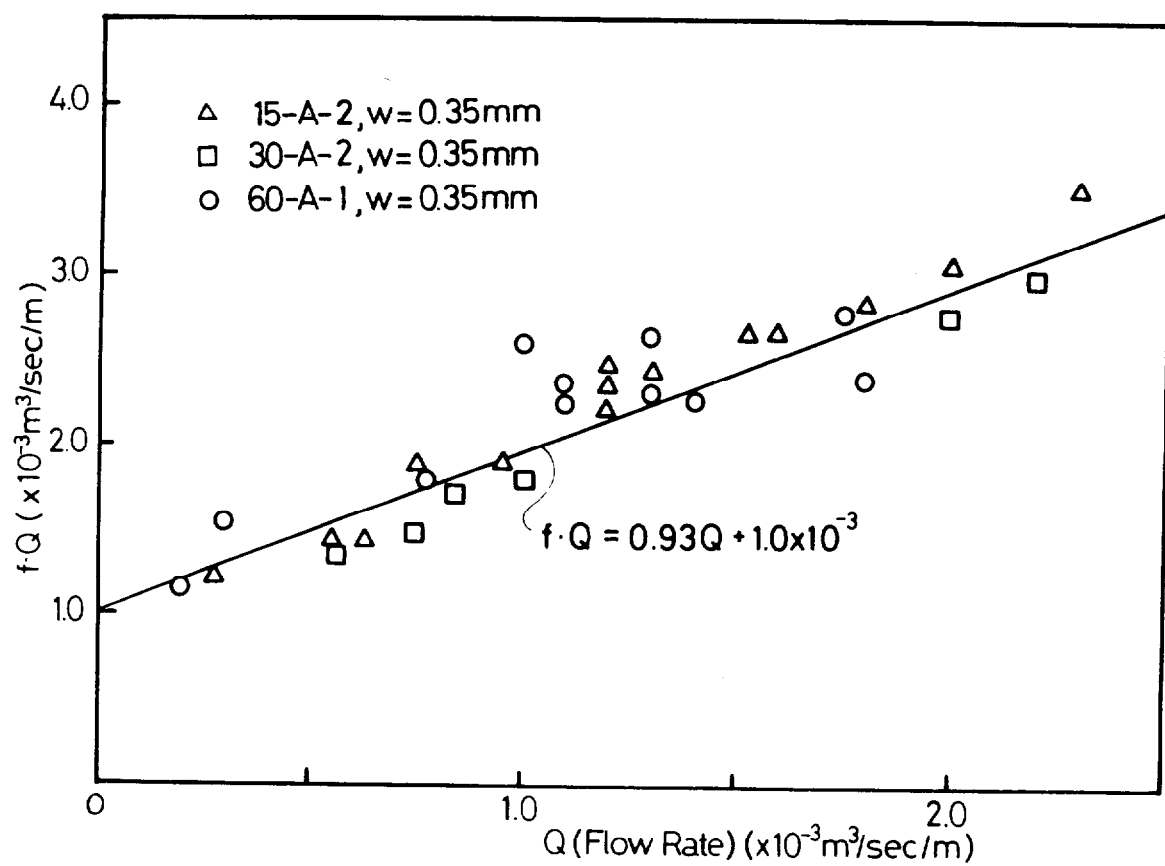


図-3.15 $f \cdot Q - Q$ 関係

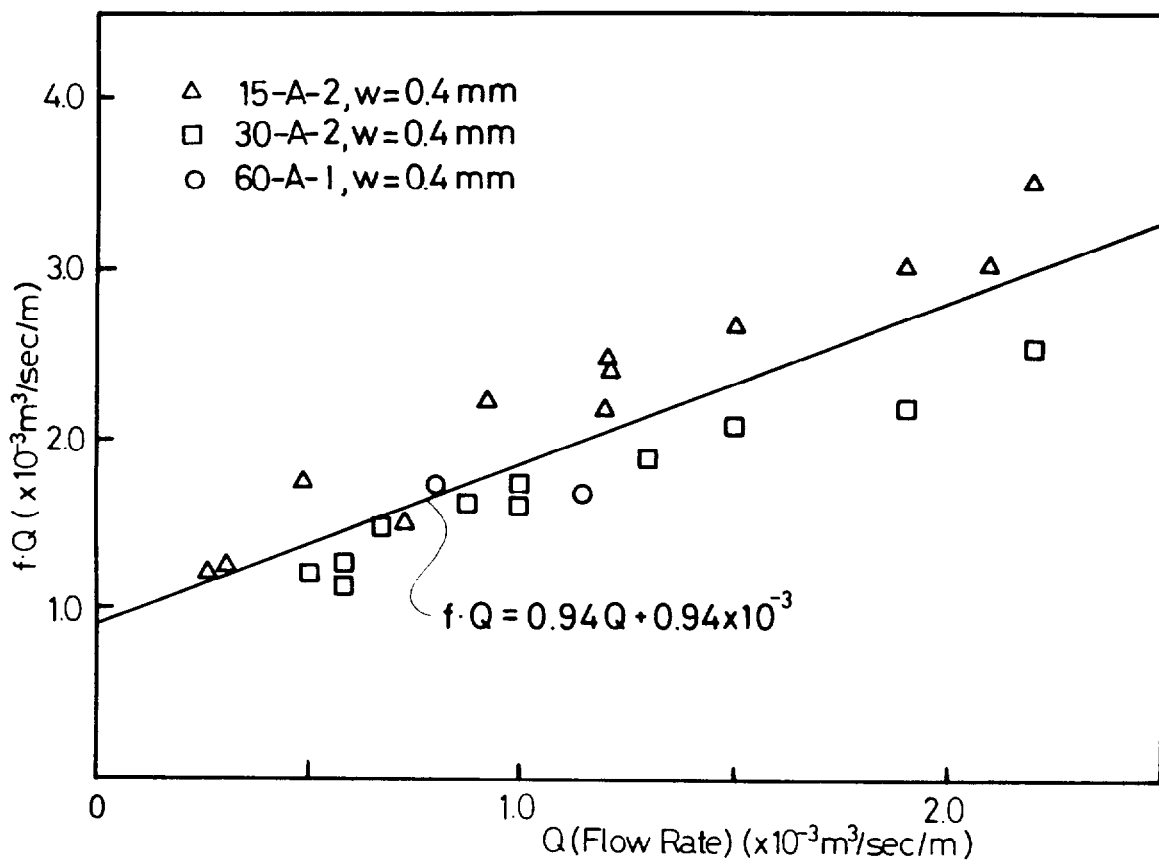


図-3.16 $f \cdot Q - Q$ 関係

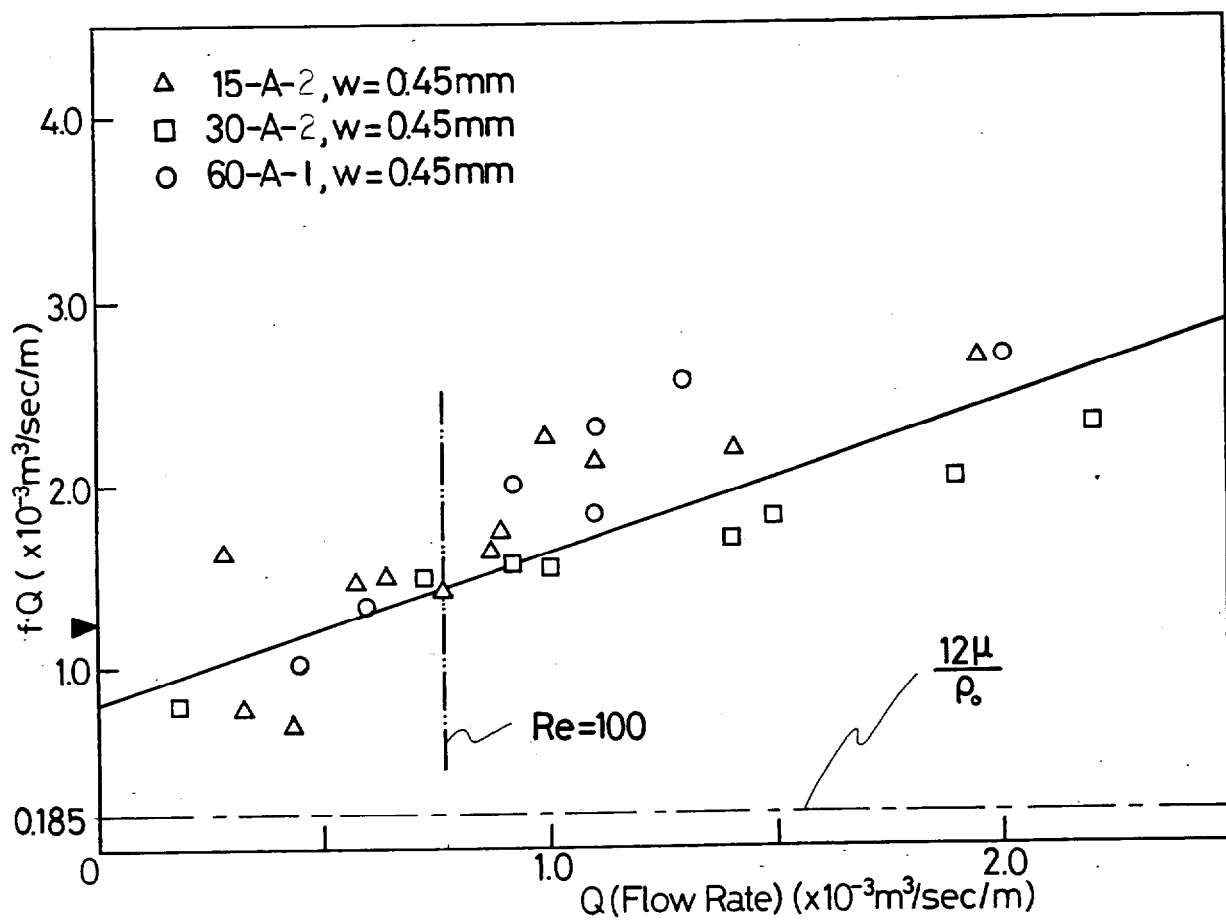


図- 3.17 $fQ-Q$ 関係

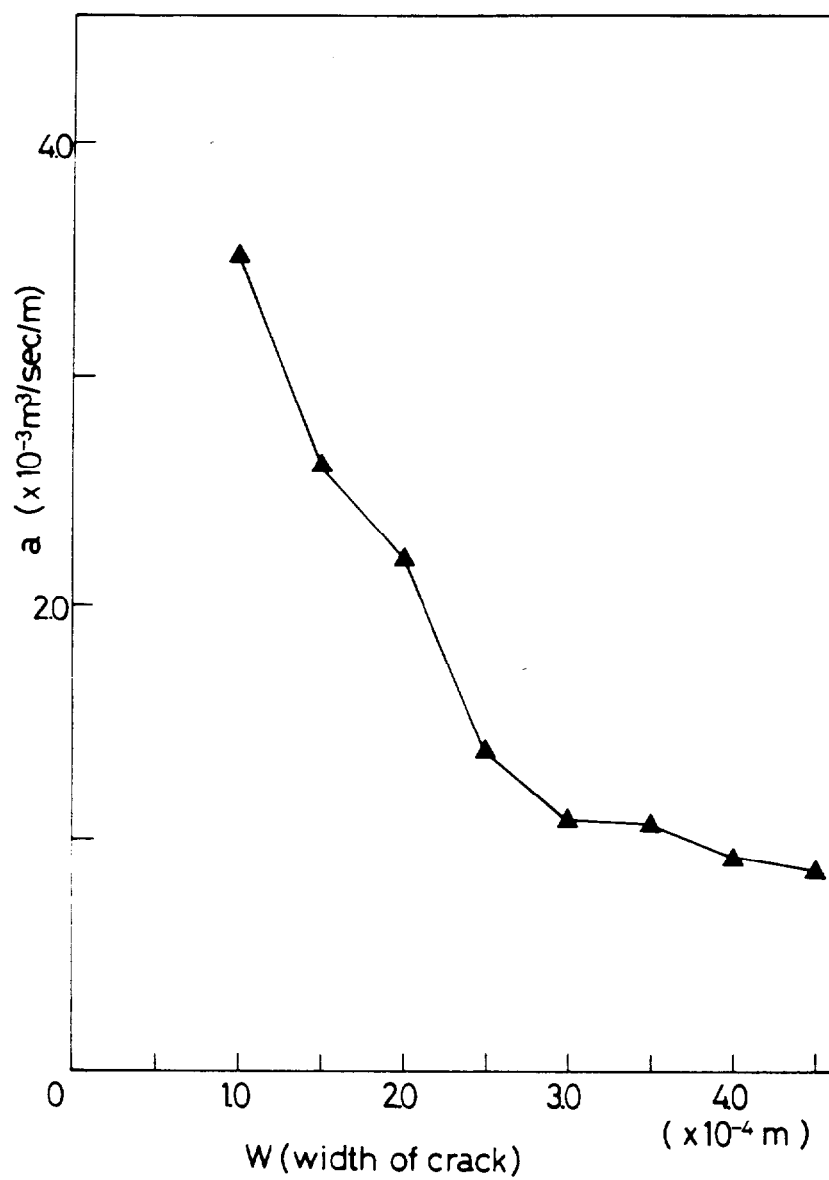


図-3.18 a - W 関係

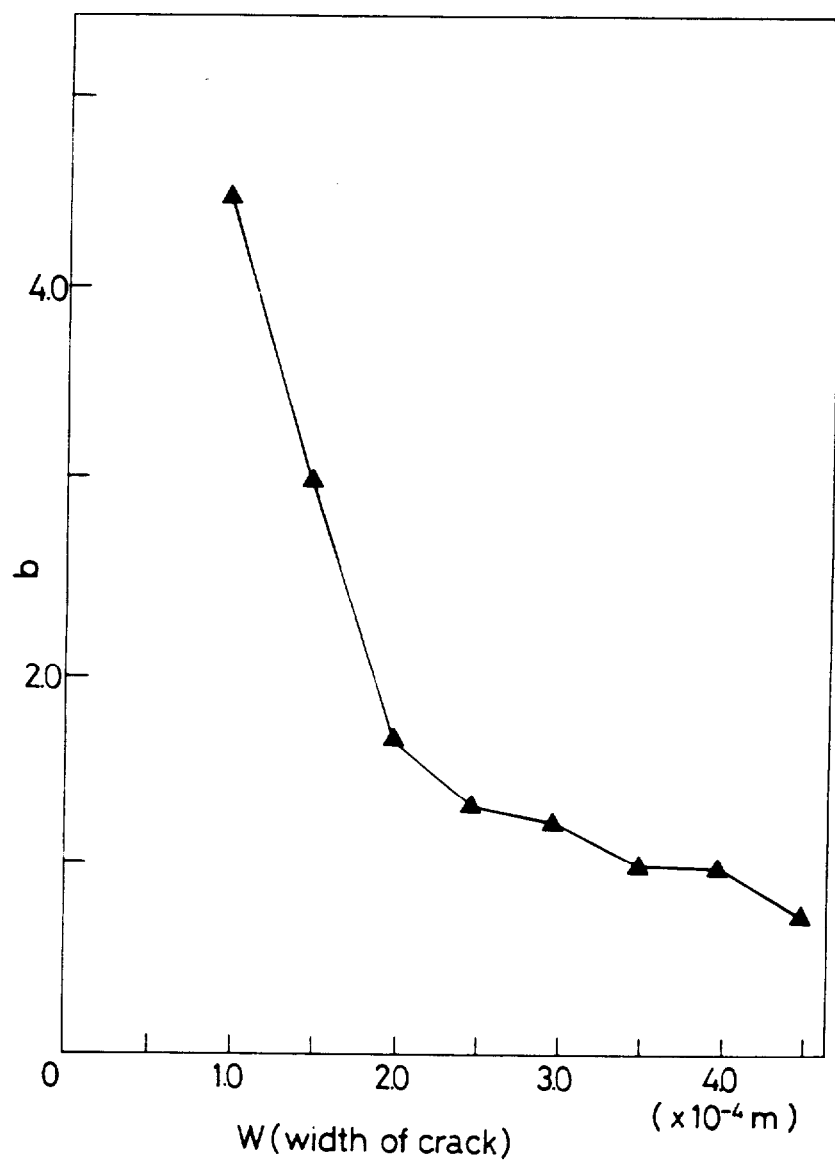
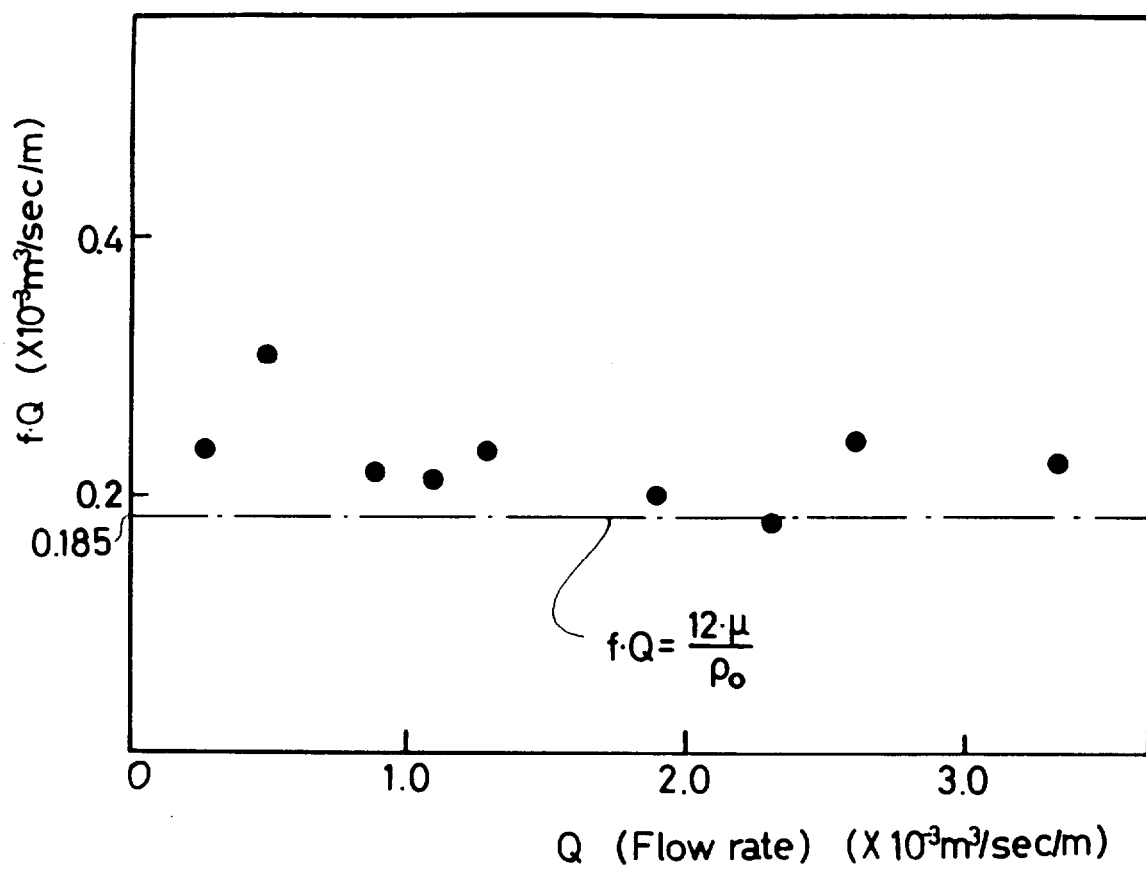


図- 3.19 $b-W$ 関係



図－3.20 $f \cdot Q - Q$ 関係 (15-G)

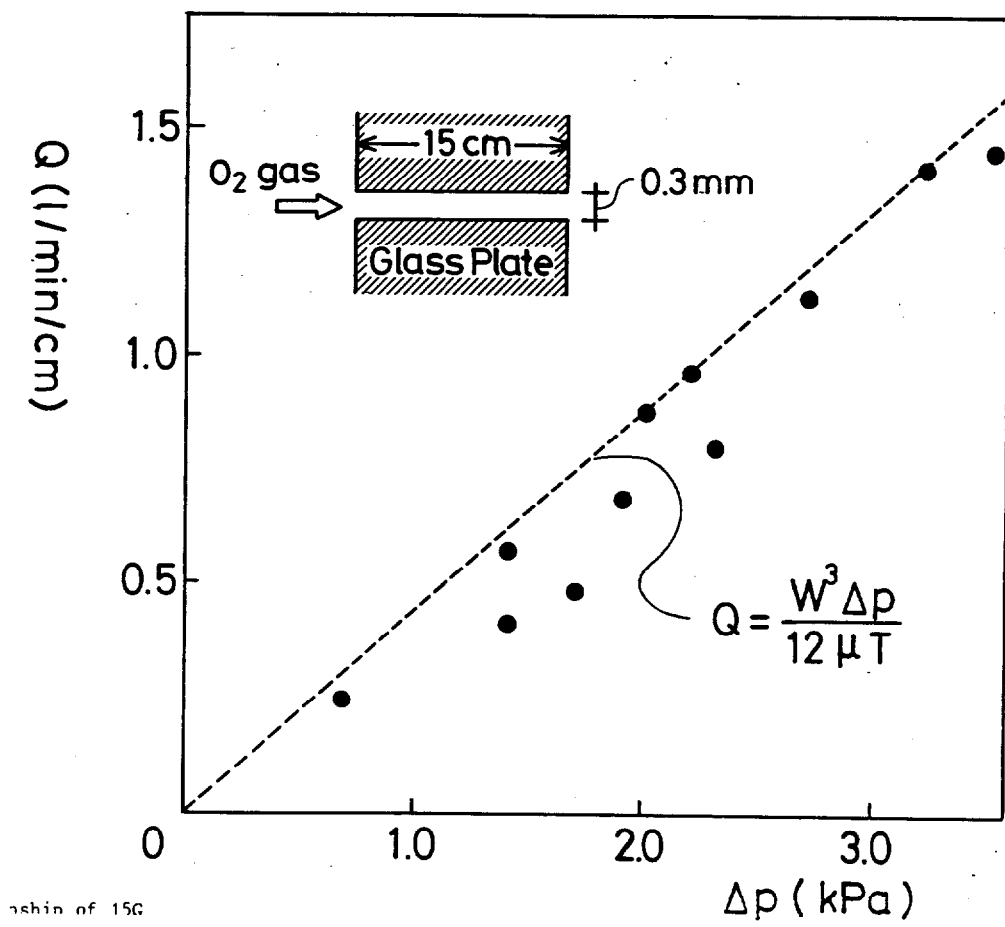


図-3.21 $Q-\Delta P$ 関係 (15-G)

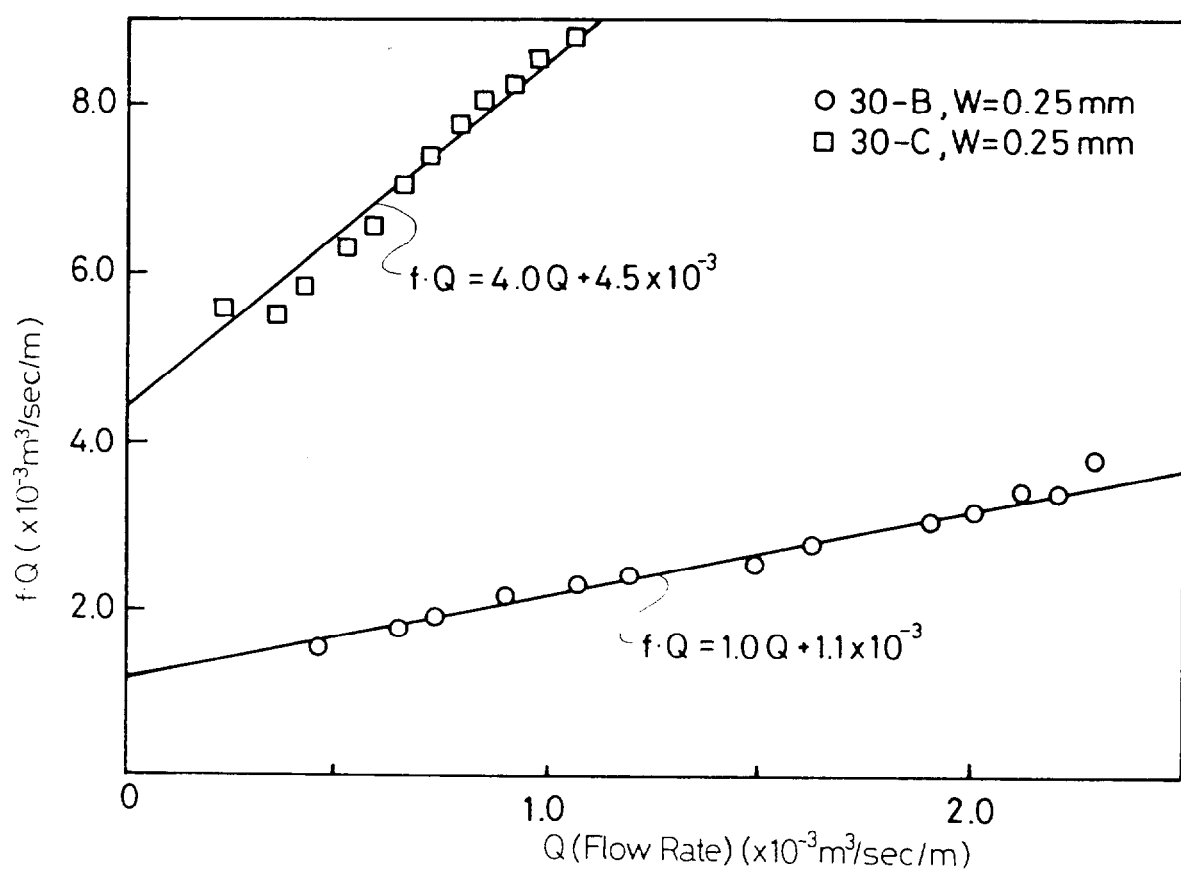


図- 3.22 $f \cdot Q - Q$ 関係

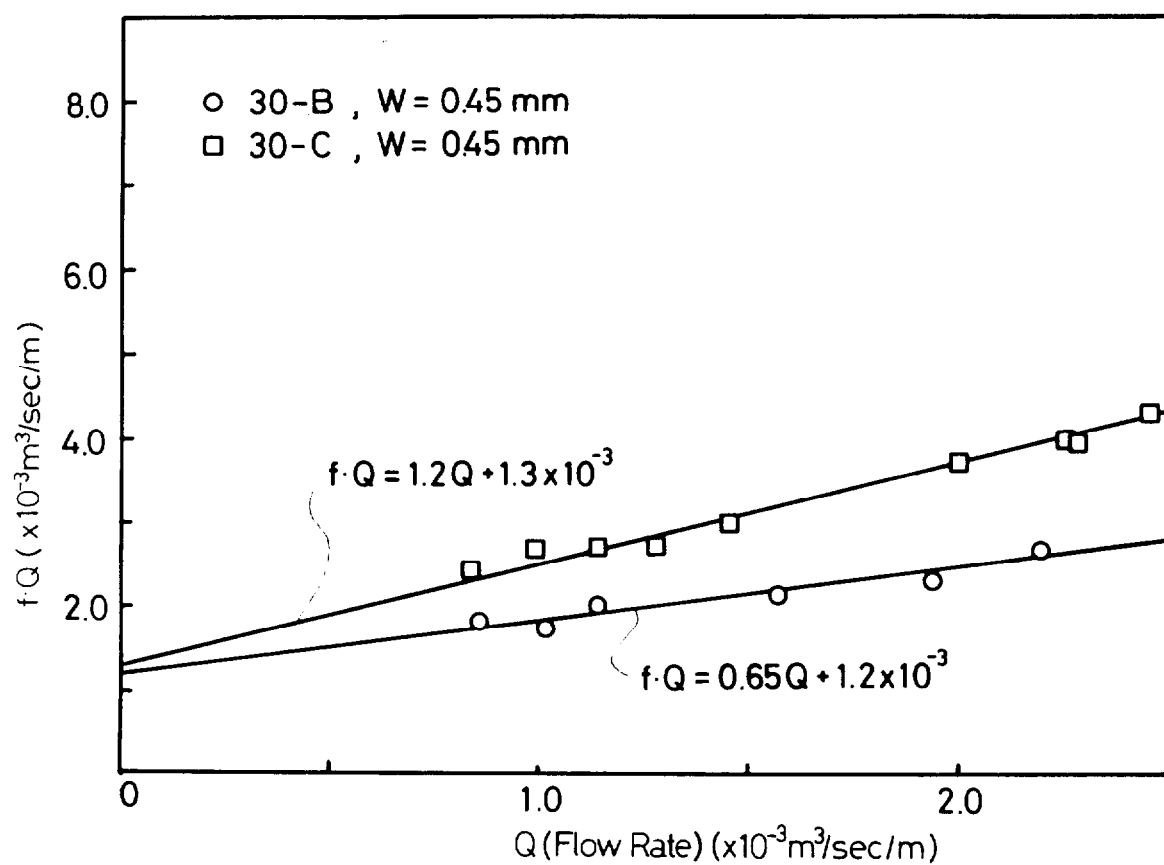


図- 3.23 $f \cdot Q - Q$ 関係

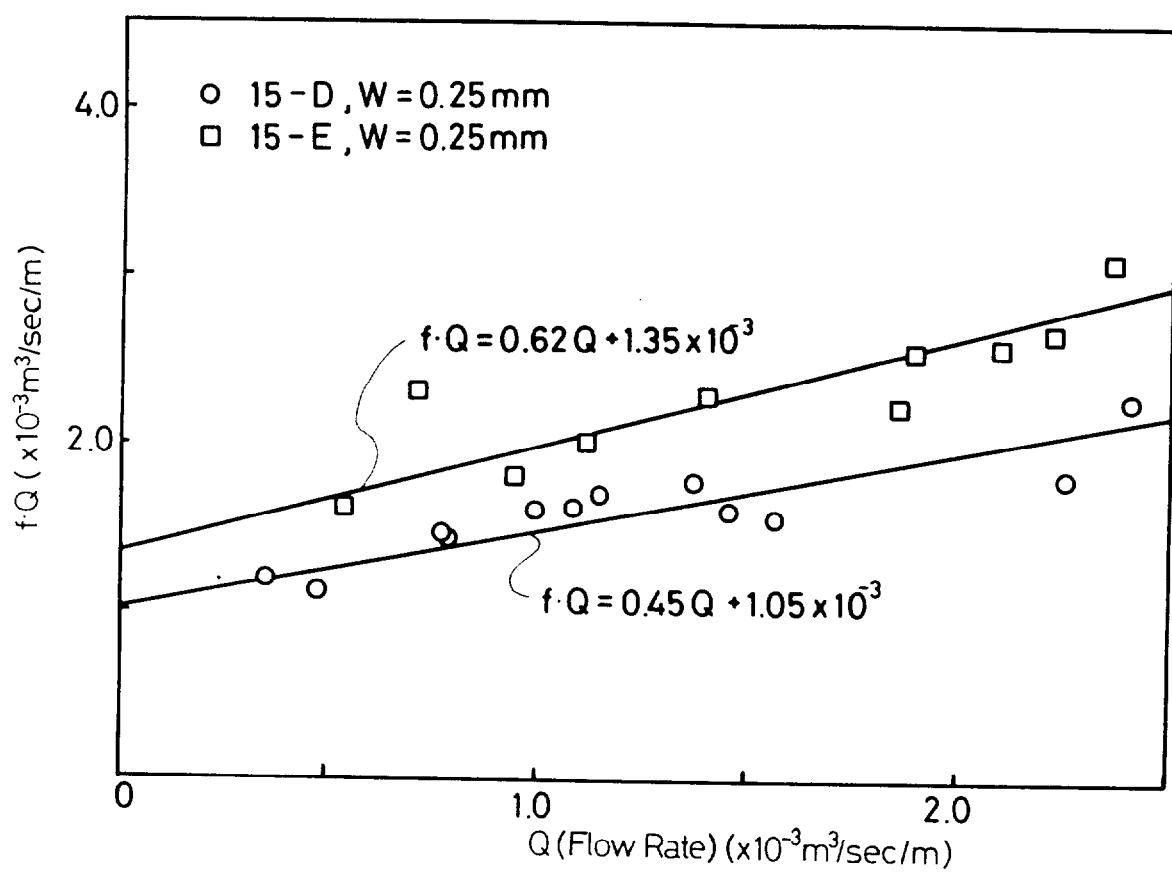


図-3.24 $f \cdot Q - Q$ 関係

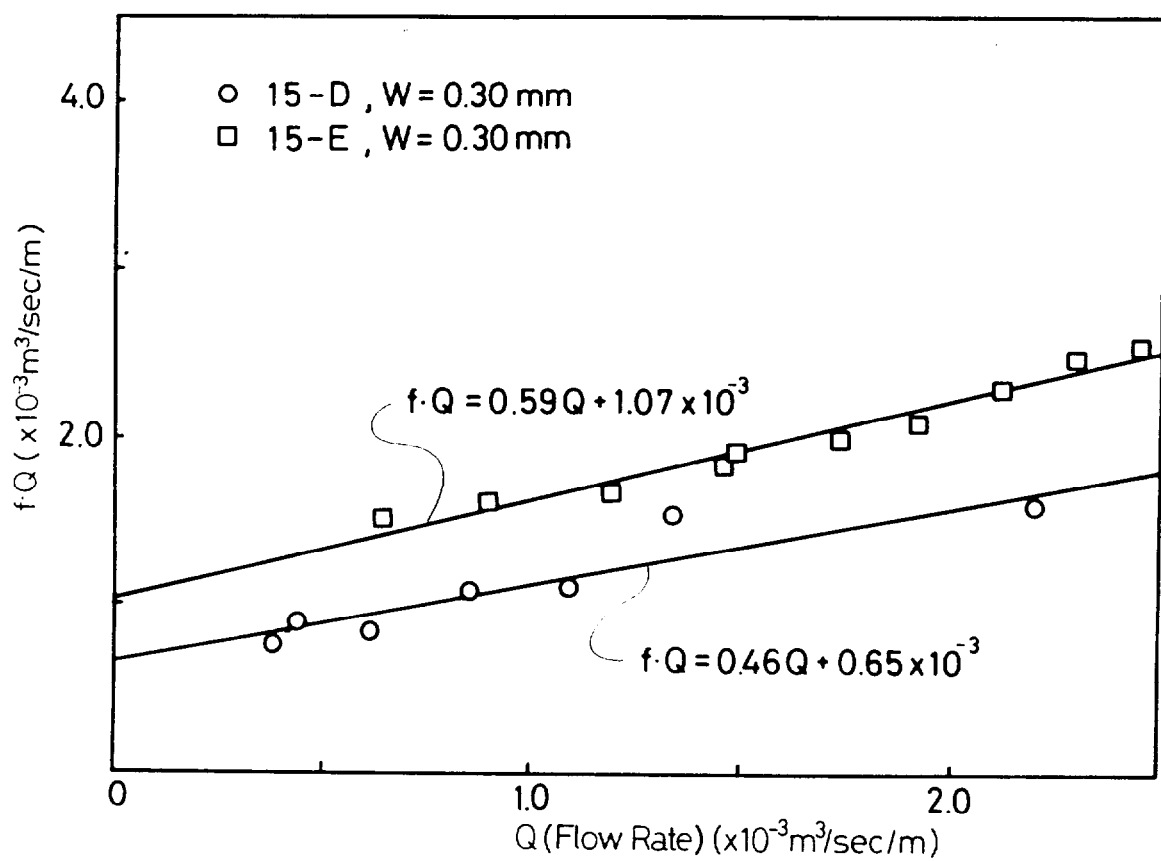


図- 3.25 $f \cdot Q - Q$ 関係

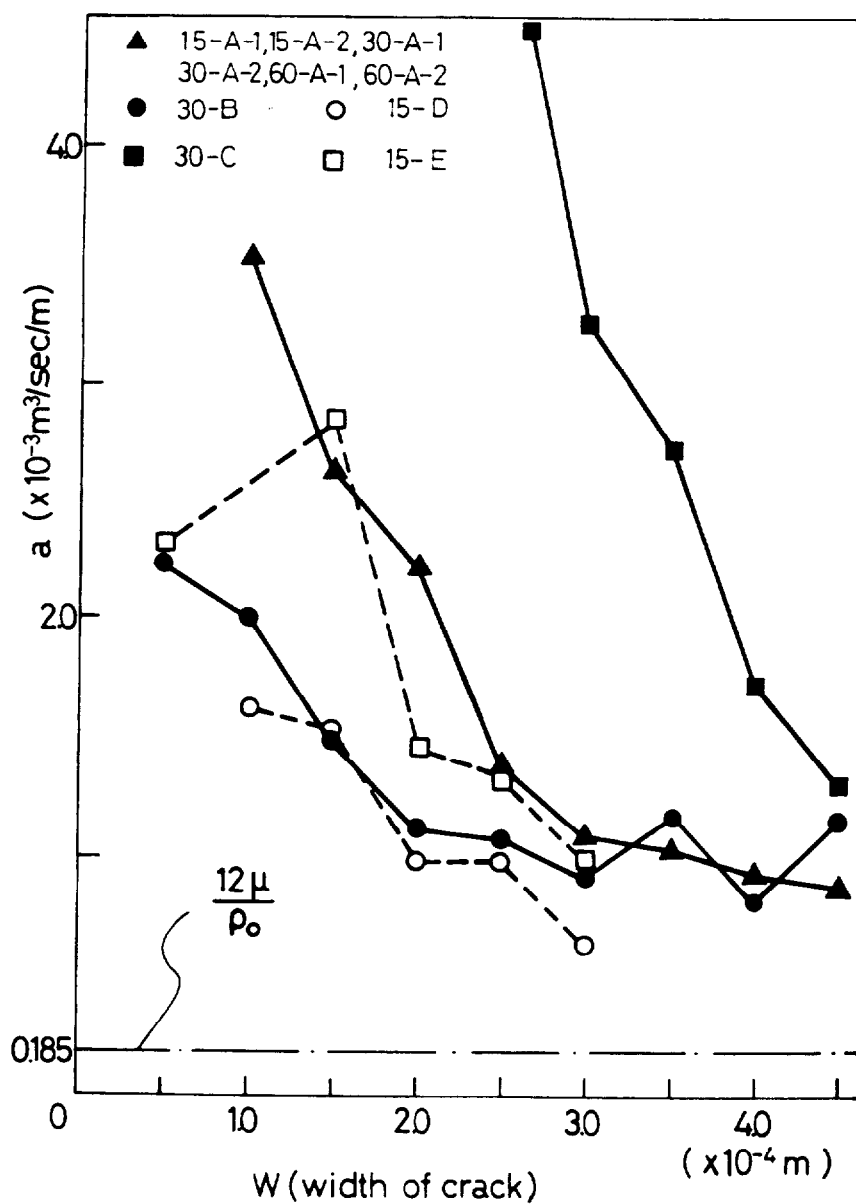


図-3.26 a-W 関係

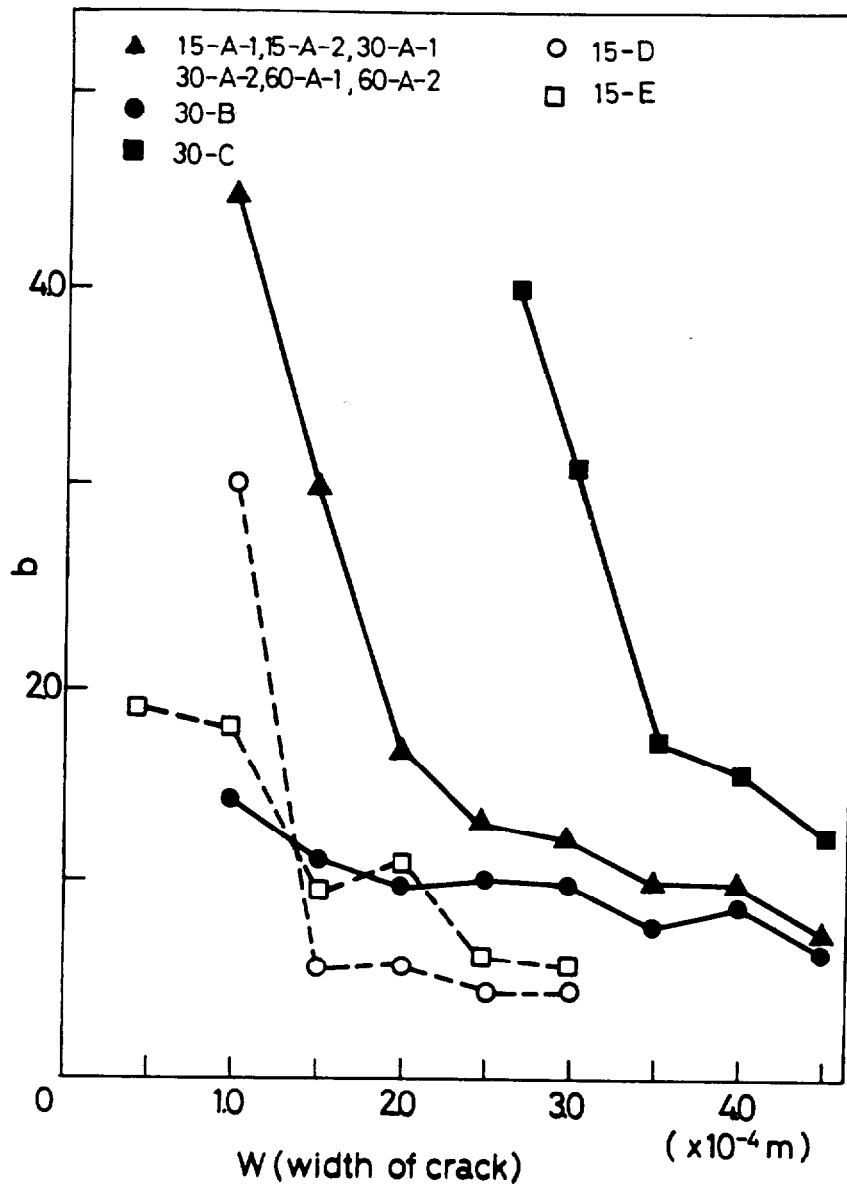
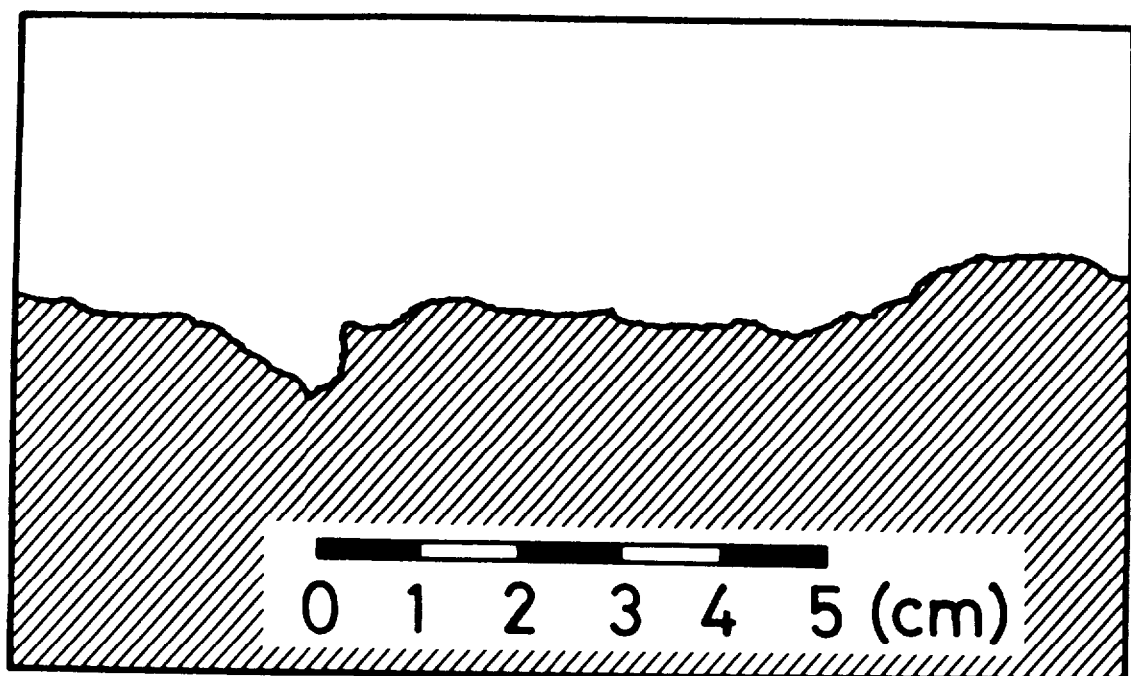
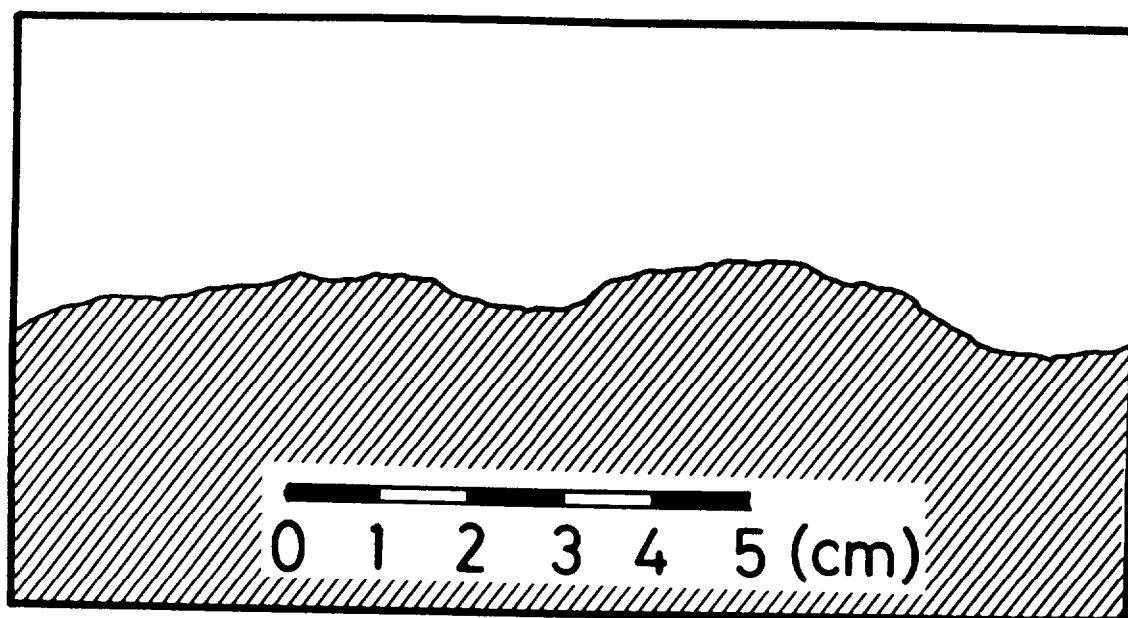


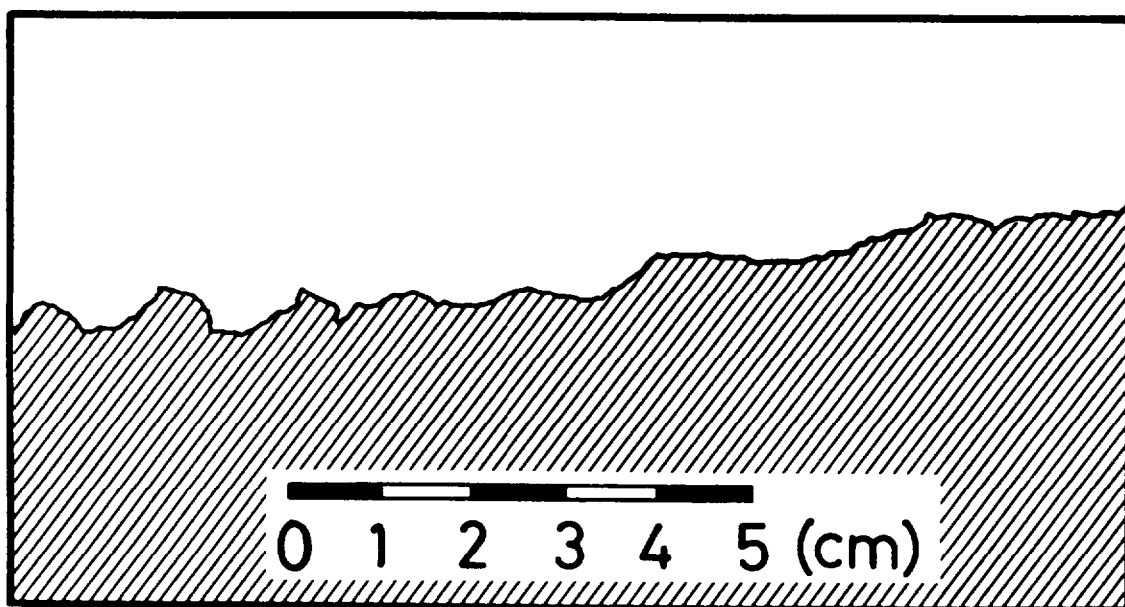
図-3.27 b-W 関係



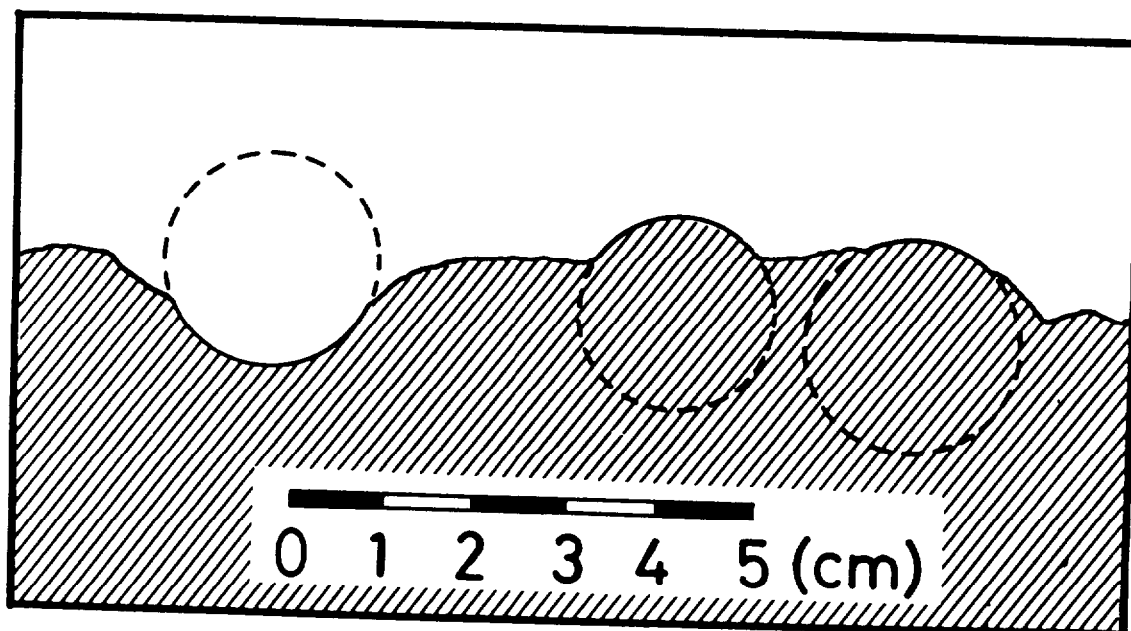
図－ 3.28 コンクリートひびわれ断面 (A コンクリート)



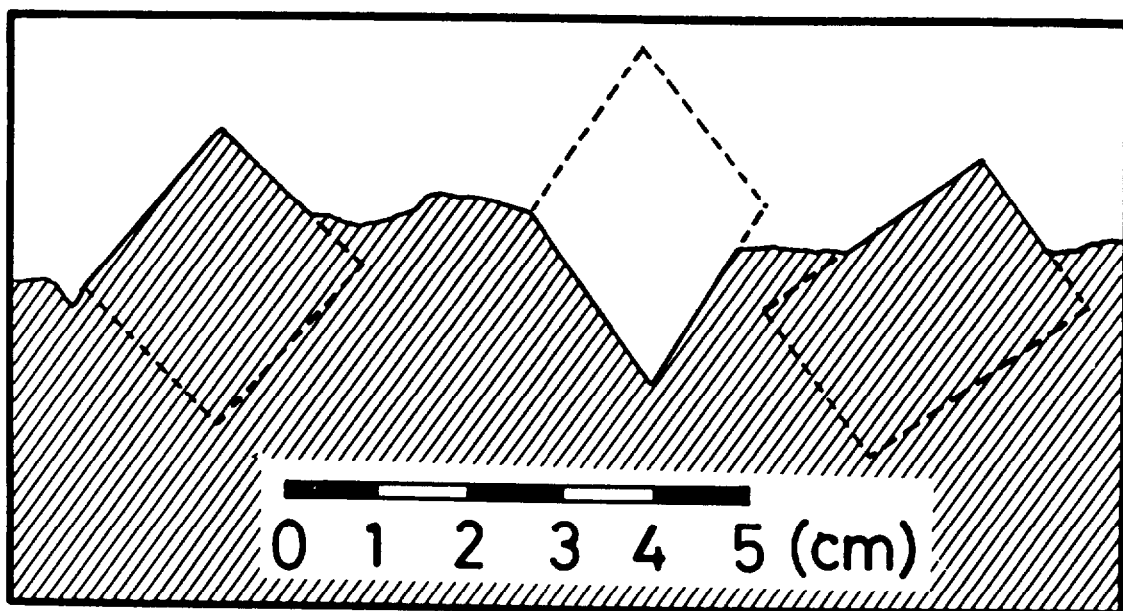
図－ 3.29 コンクリートひびわれ断面 (B コンクリート)



図－ 3.30 コンクリートひびわれ断面 (C コンクリート)



図－ 3.31 コンクリートひびわれ断面 (D コンクリート)



図－ 3.32 コンクリートひびわれ断面 (E コンクリート)

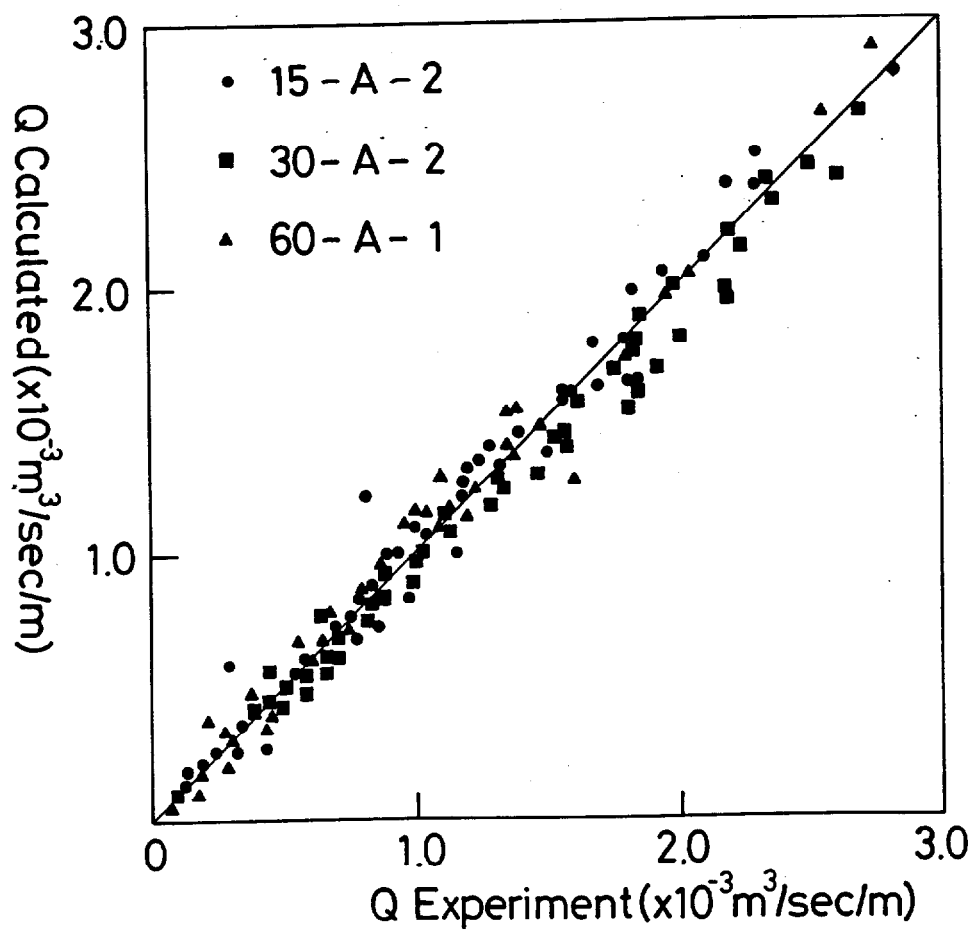


図- 3.33 Q (計算値)- Q (実験値) 関係

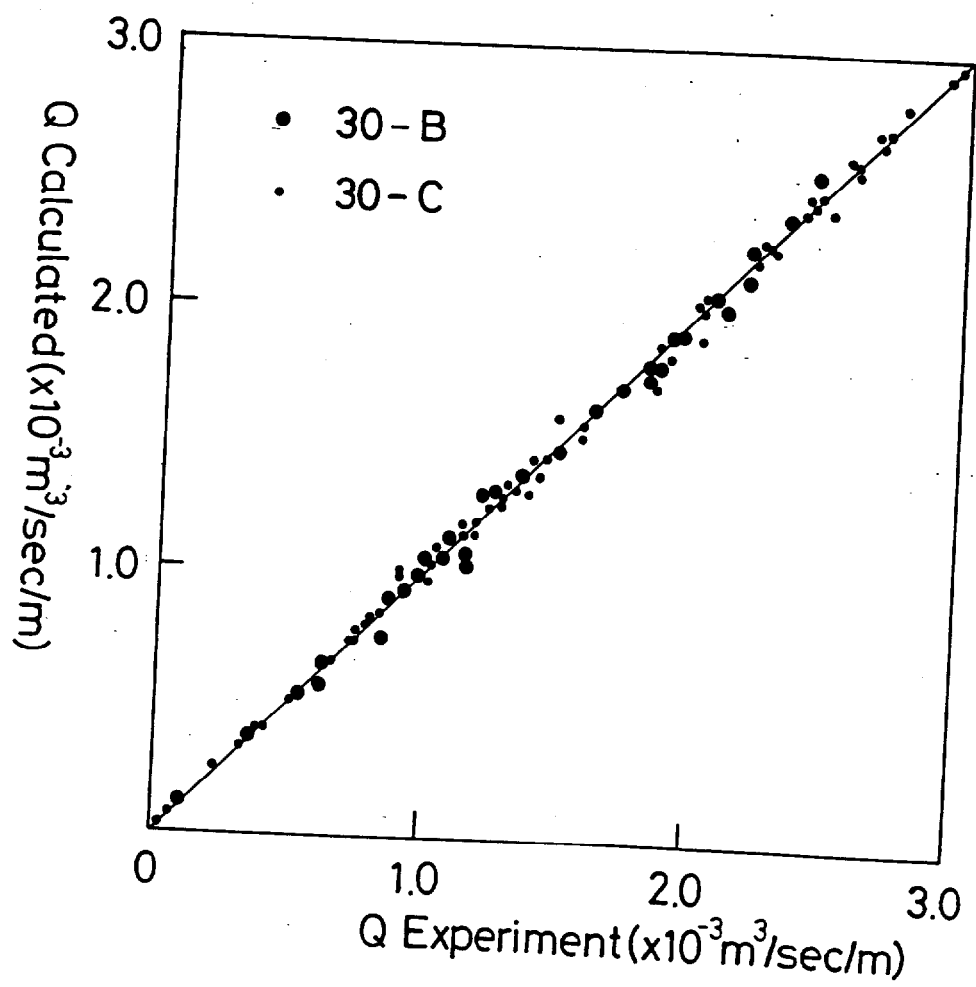
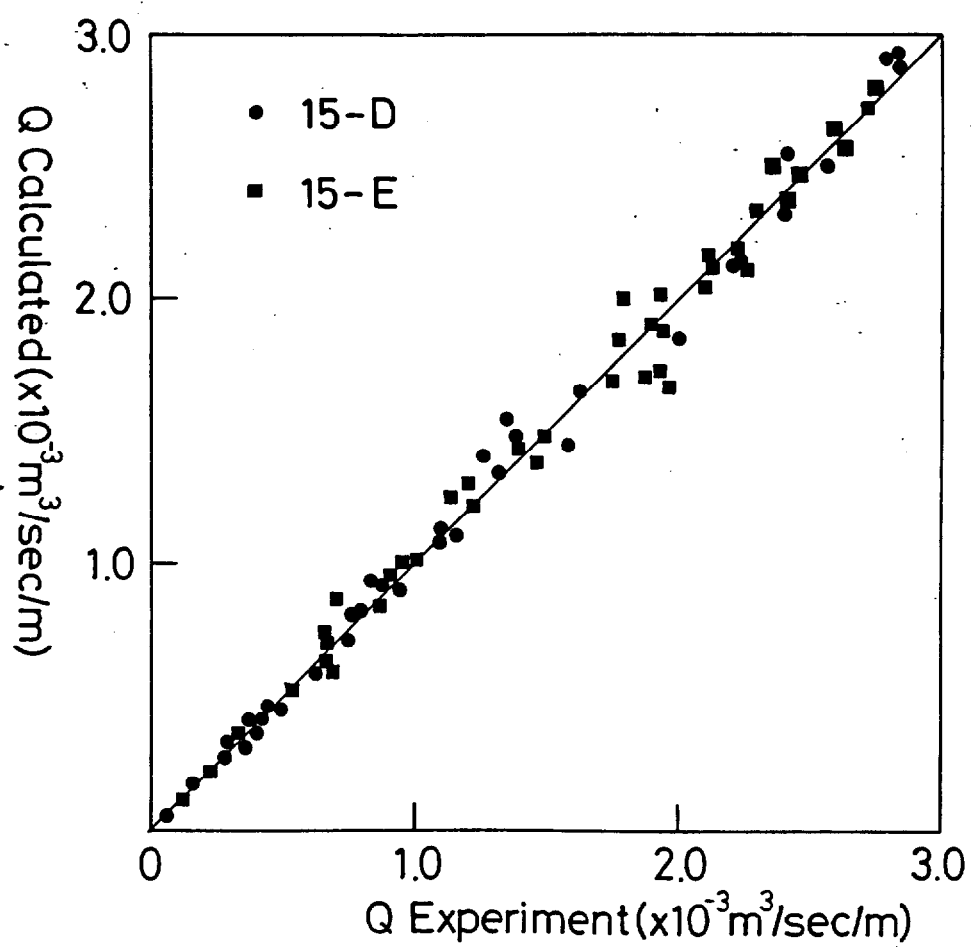


図- 3.34 Q (計算値)- Q (実験値) 関係



図－ 3.35 Q(計算値)－Q(実験値) 関係

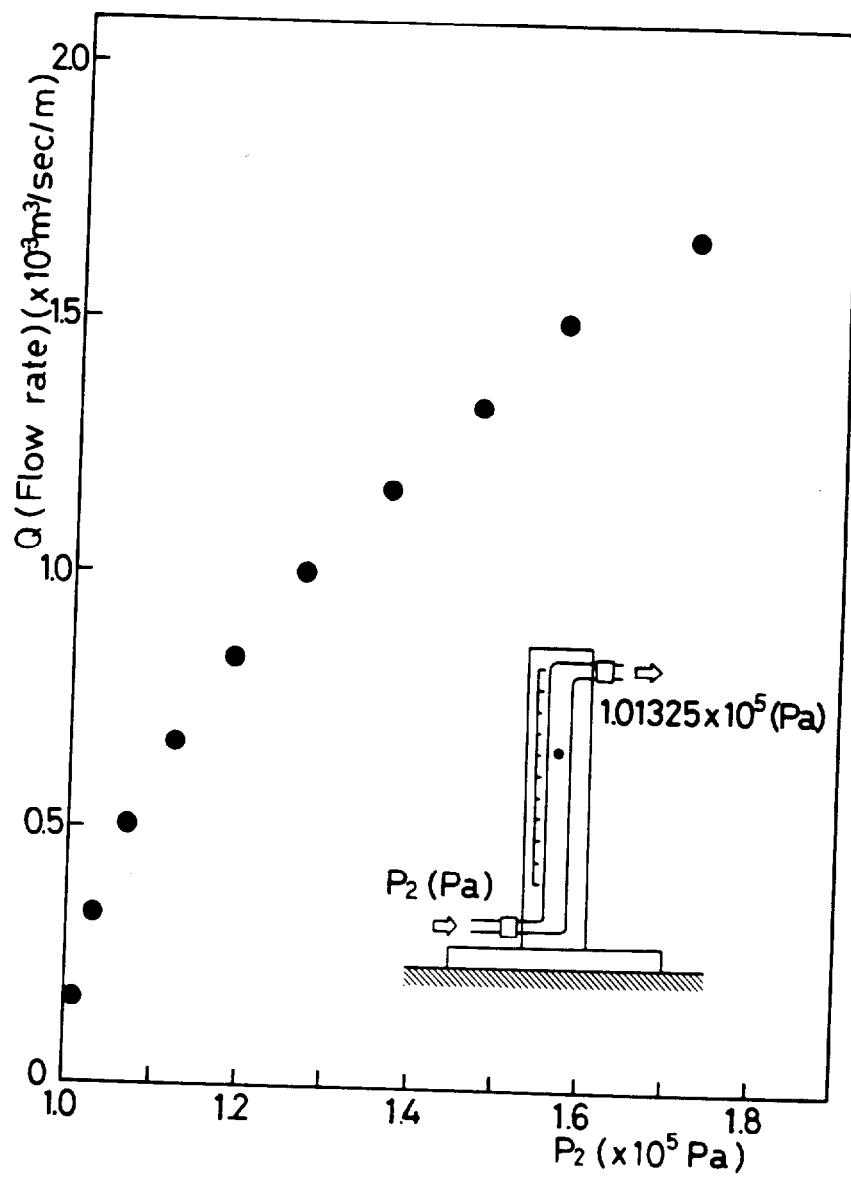


図- 3.36 流量計の特性

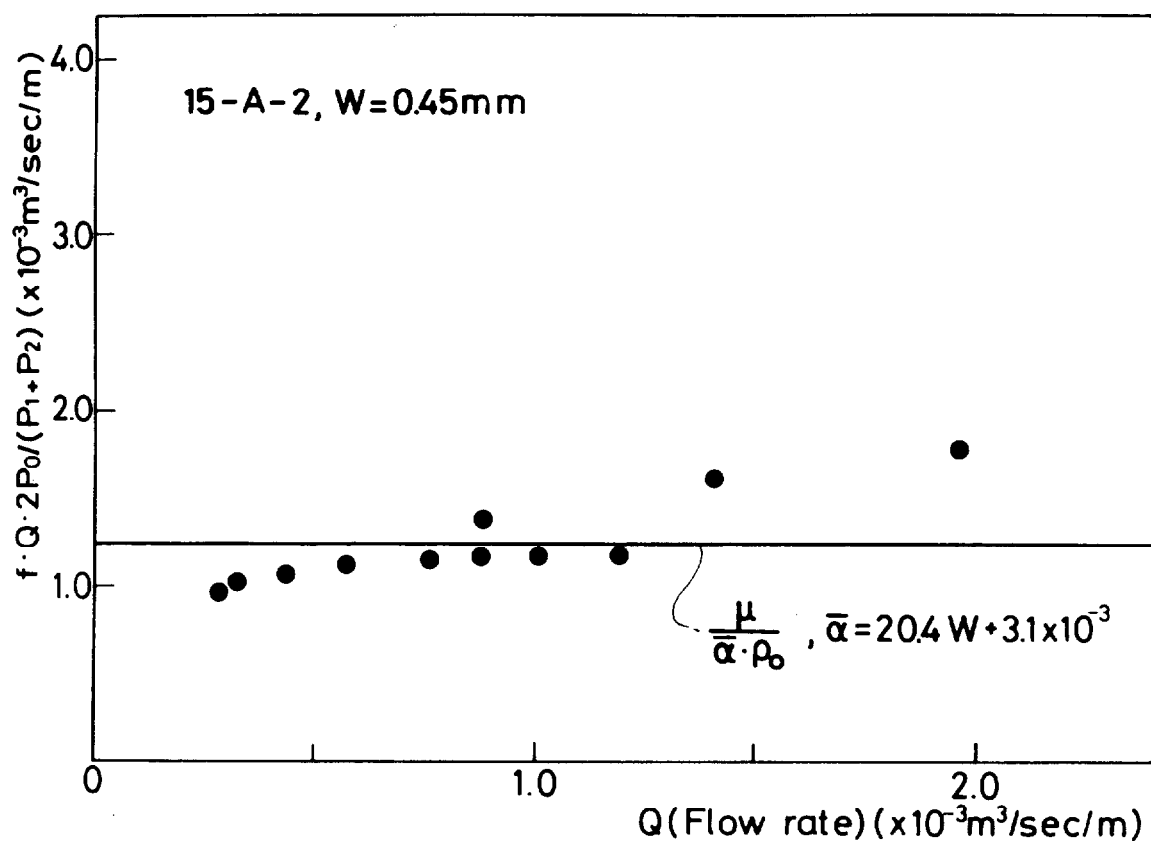


図-3.37 $f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係

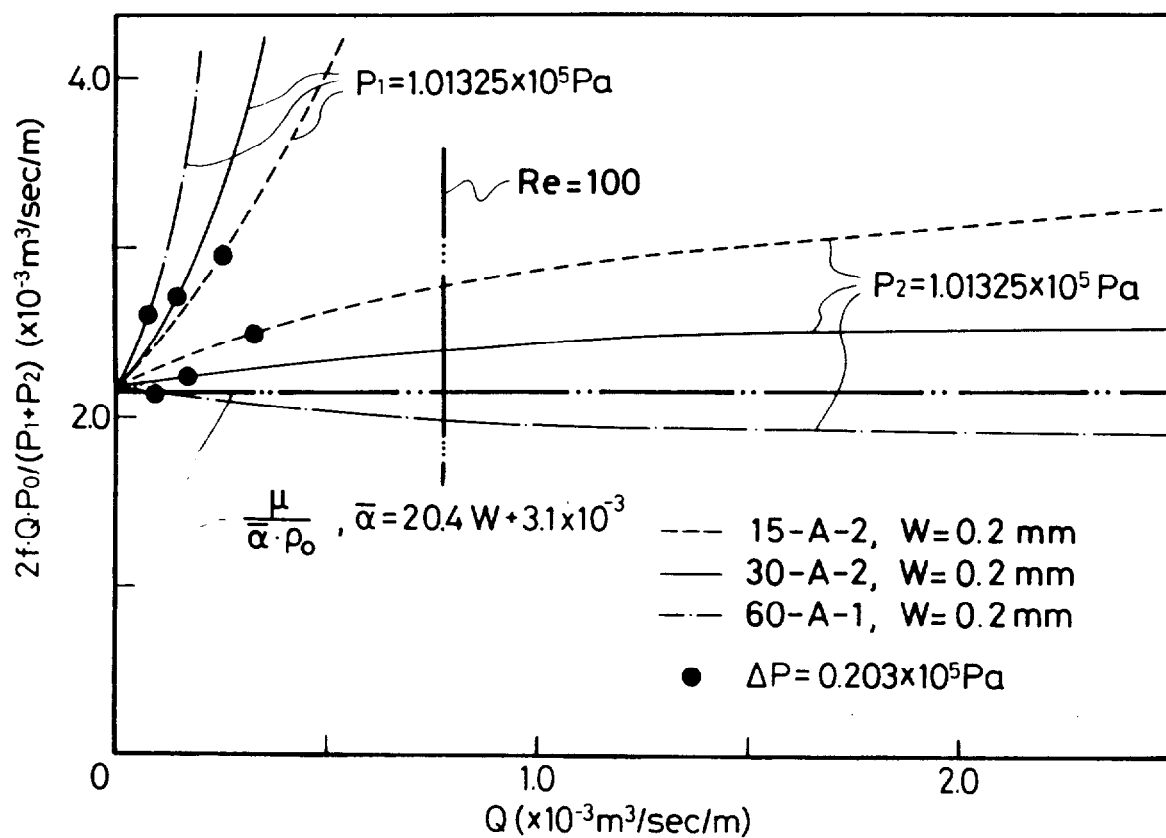


図- 3.38 $2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係

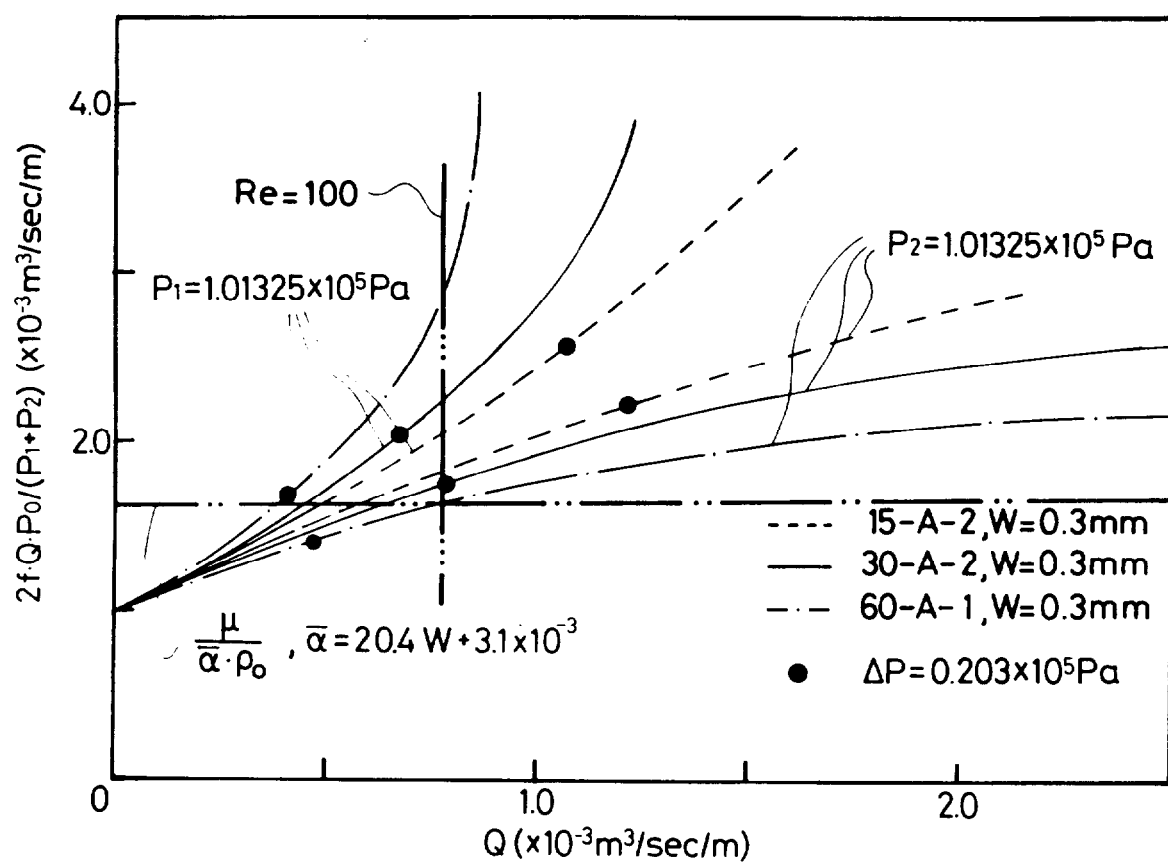


図- 3.39 $2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係

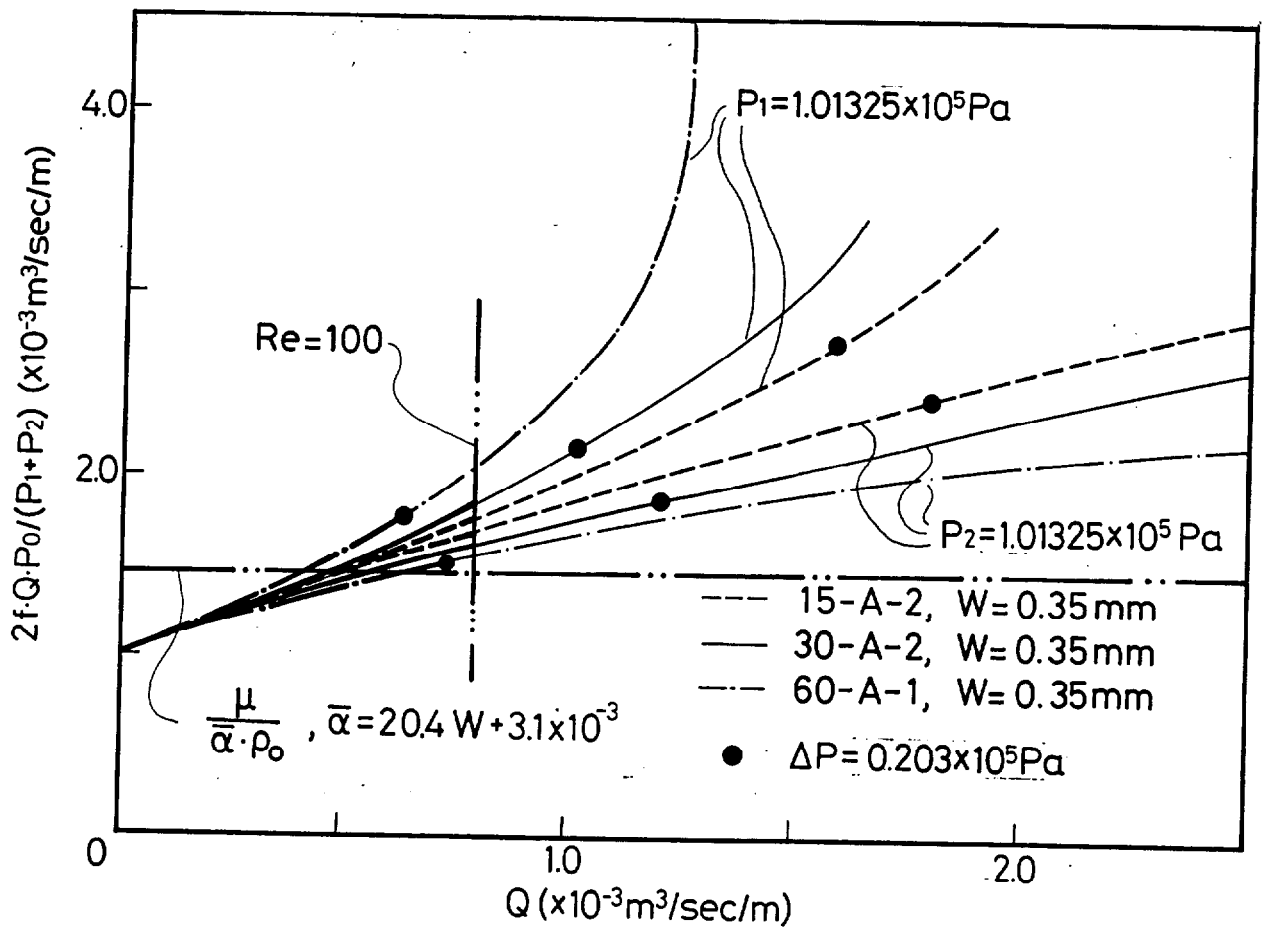


図- 3.40 $2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係

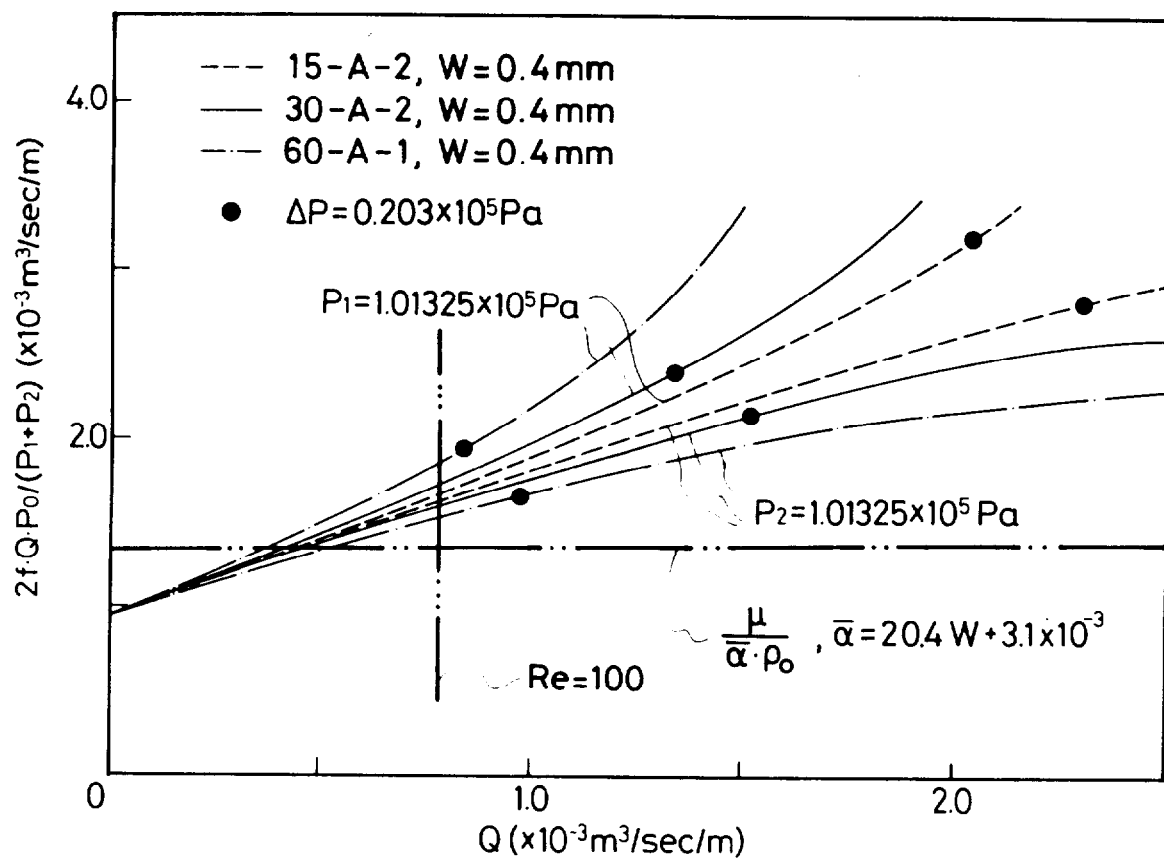


図- 3.41 $2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係

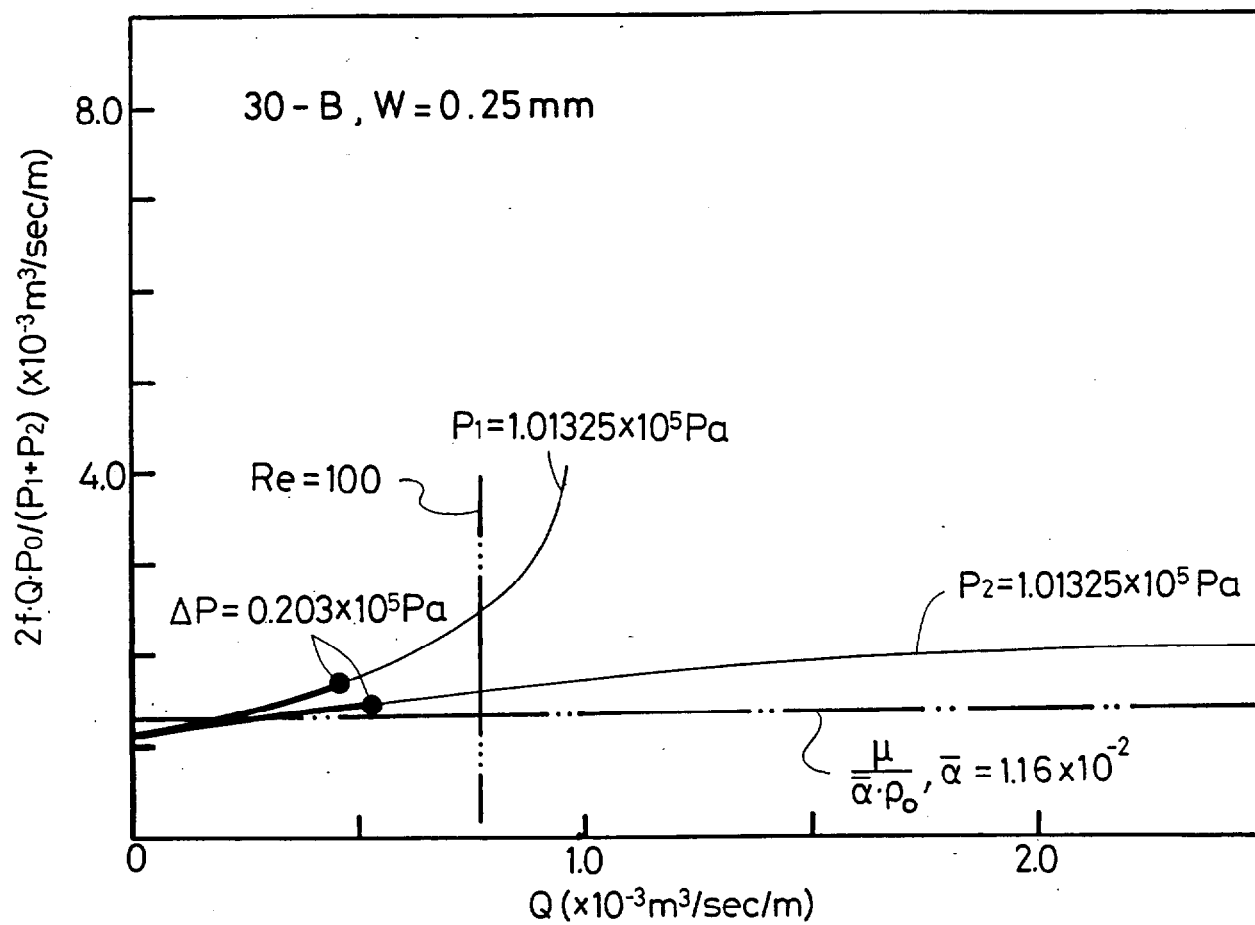


図 - 3.42 $2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係

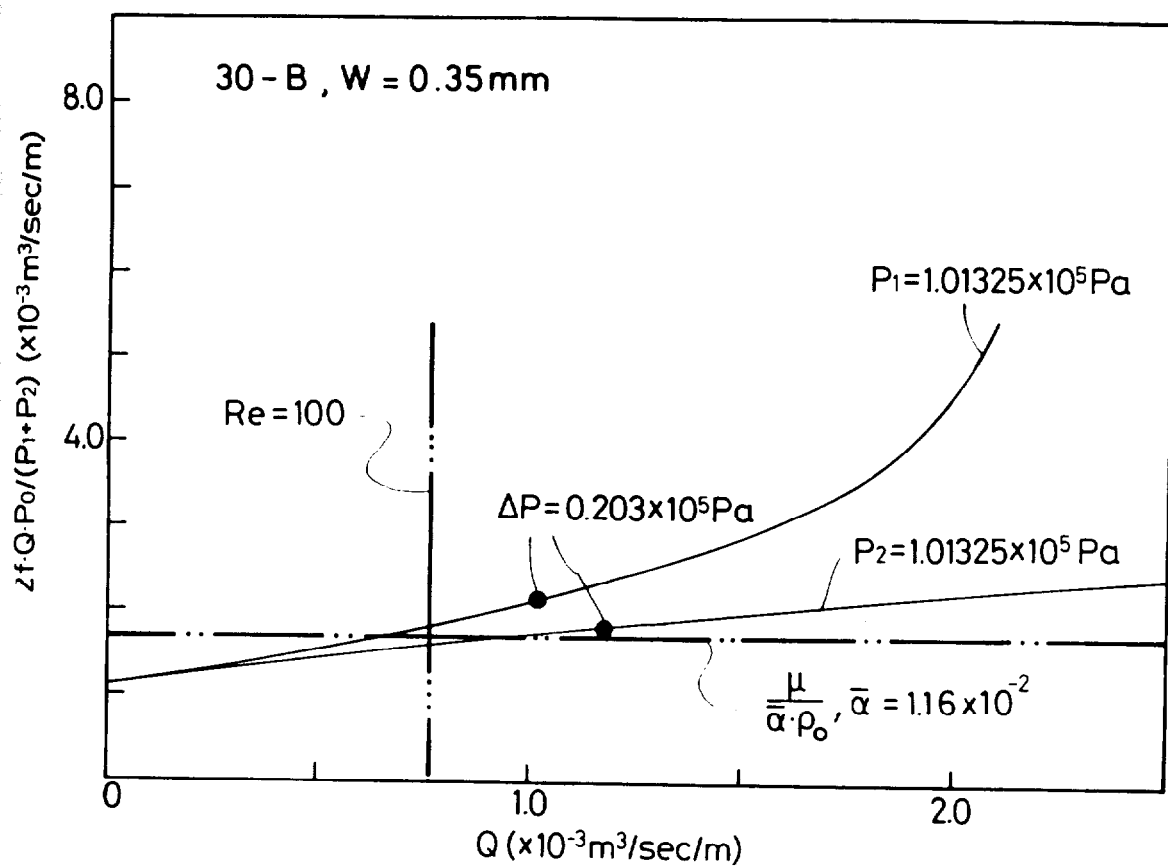
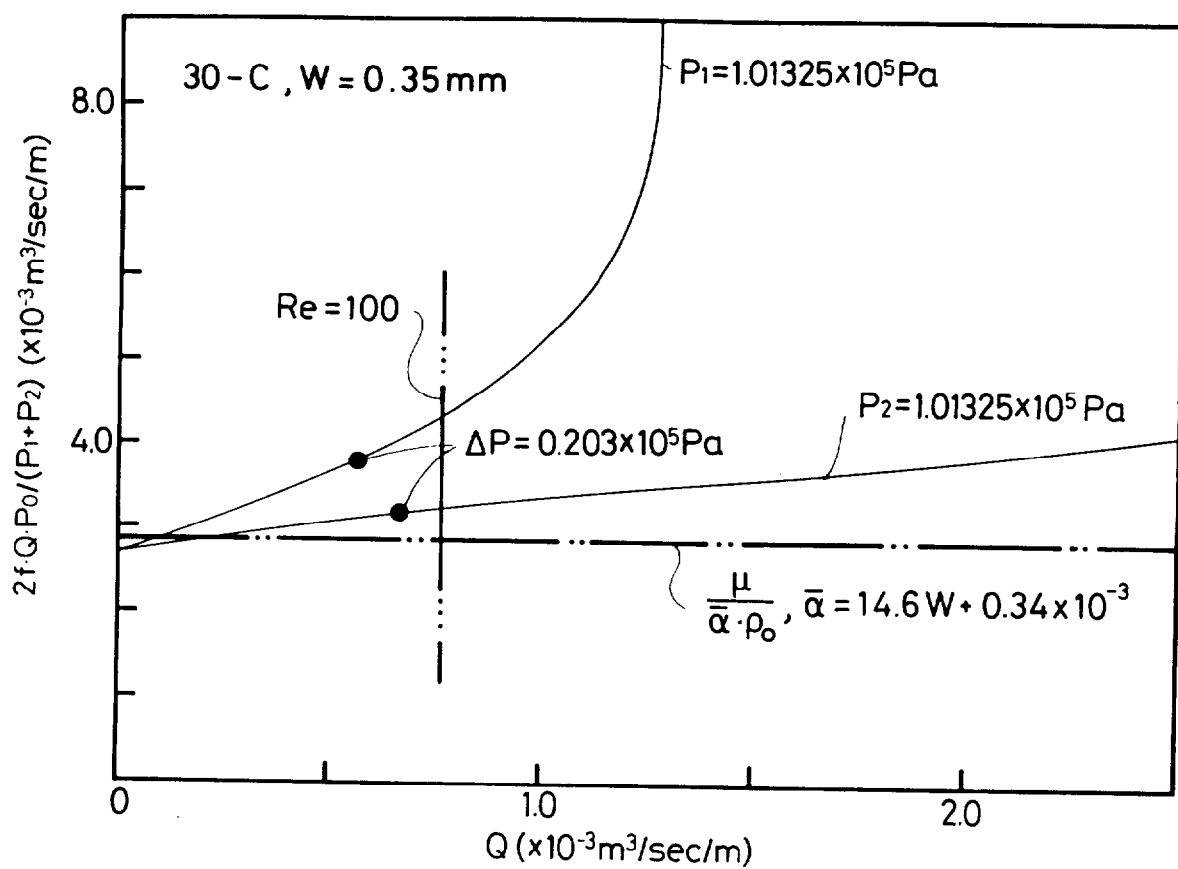


図 - 3.43 $2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係



図－ 3.44 $2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係

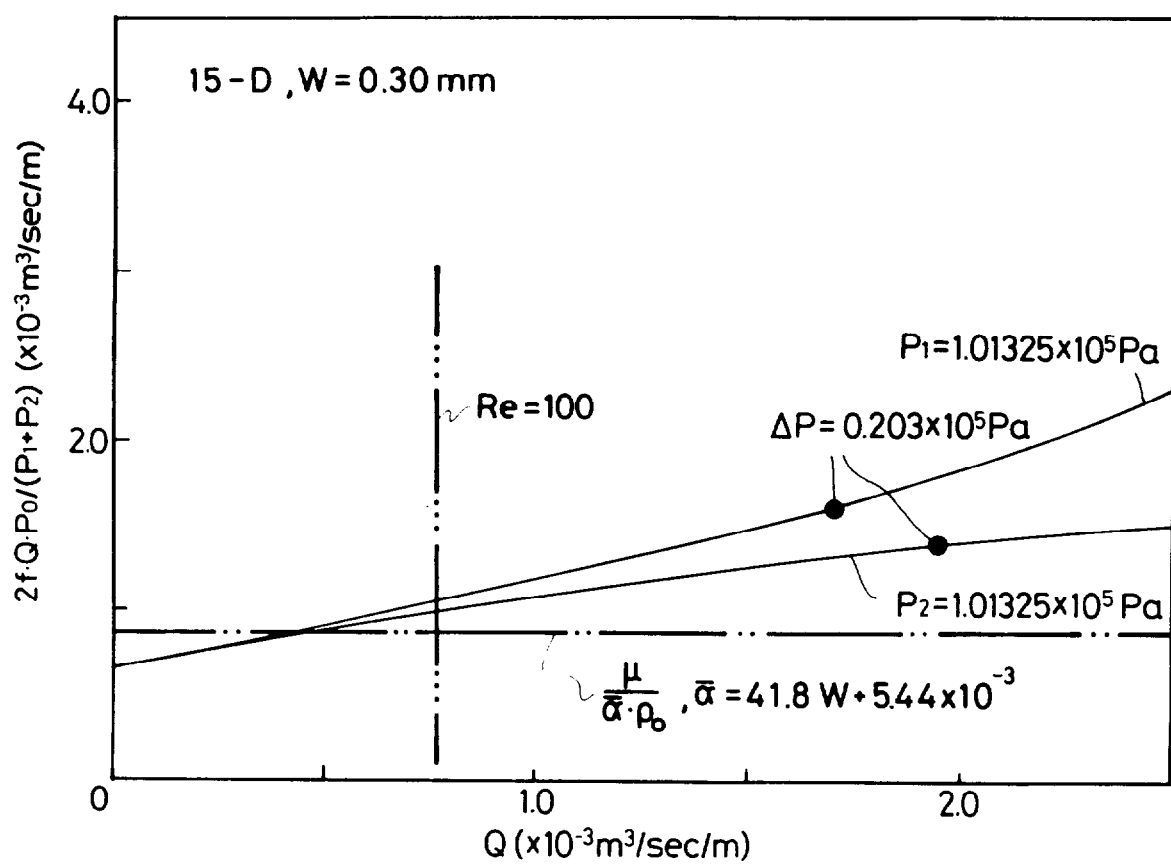
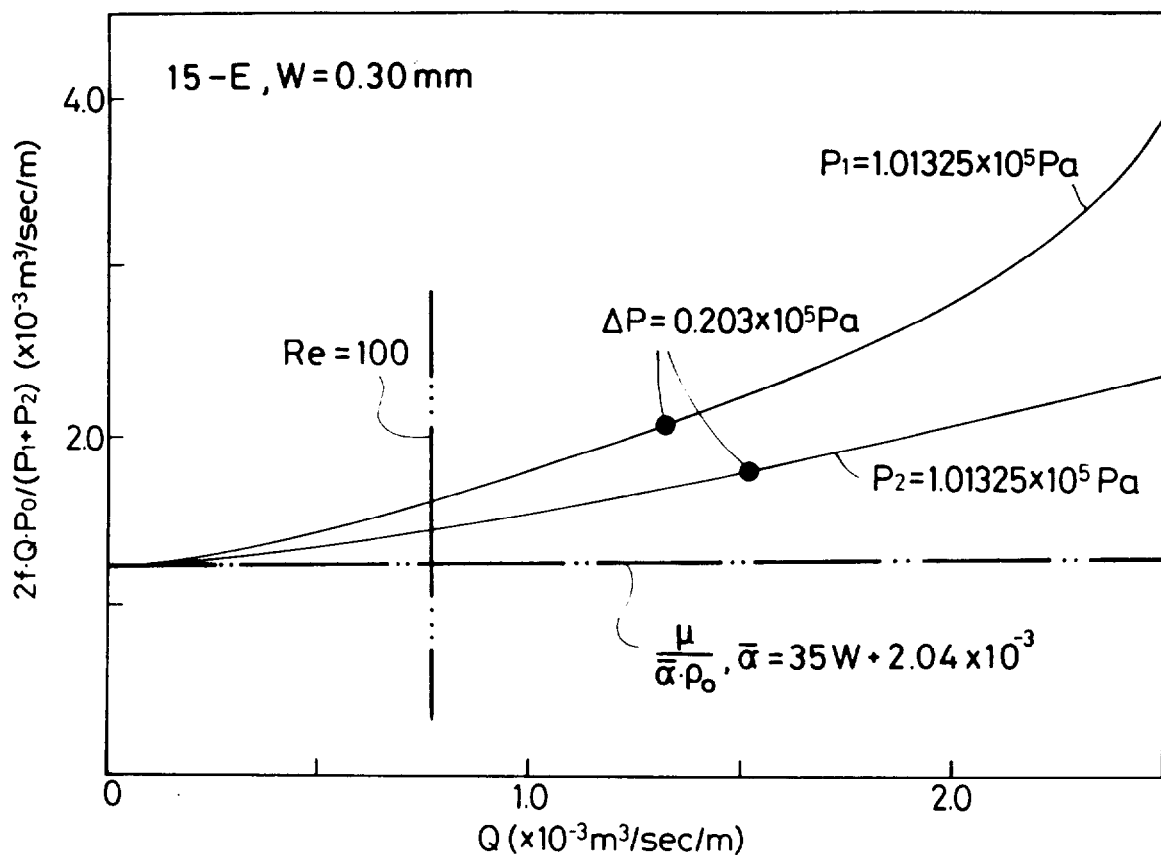


図 - 3.45 $2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係



図— 3.46 $2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係

第4章 ひびわれの生じたコンクリート壁からの種類の異なる気体の漏洩

4.1 はじめに

4.2 試験体

4.3 漏洩実験方法

4.4 実験結果および考察

4.4.1 各種気体の漏洩に関する実験結果

4.4.2 ひびわれ幅が一定でない場合の漏洩実験結果

4.5 まとめ

4.1 はじめに

前章においてひび割れの生じたコンクリート壁からの酸素ガス漏洩量に関して、2平板間の一次元定常等温圧縮流れを利用した実験式が適切な付帯条件が設定された場合には簡便な実験式となり得る事を示した。

本章では上記の2平板間の一次元定常等温圧縮流れを表す式を利用した実験式の各種気体への適用性について検討する。実験で使用した気体はヘリウムガス(He)、窒素ガス(N₂)、酸素ガス(O₂)、炭酸ガス(CO₂)の4種類である。対象とする気体が違ってもひび割れを極端に理想化した2平板間の気体の流れを表す式を利用して実験結果を精度良く定式できるかどうかを第一目的としているが、ひびわれ幅が壁厚方向に一定で壁面で緩やかに変化する場合の気体漏洩実験についても実験と検討を行っている。

4.2 試験体

試験体については前章で説明した形状の試験体を表-4.1に示す壁厚15cm、及び60cmの2体を製作した。試験体の形状を図-4.1に示す。使用したコンクリートの調合を表-4.2に用いた骨材の粒度分布を図-4.2に示す。圧力箱の詳細を図-4.3に示す。実験開始前に行ったコンクリートの材料試験の結果を表-4.4に示す。表-4.3に3章で実験を行った全てのコンクリートの調合を比較のため示す。また、表-4.5に3、4章で実験を行った全てのコンクリートの強度試験結果を載せる。

4.3 漏洩実験方法

実験方法についても前章で示した方法と同様であるが、同一ひびわれ幅においてヘリウムガスにおいては5点程度、他の気体については8点程度流入側圧力を変化させて測定を行い、4種類の気体について測定を終えた後ひびわれ幅を変えて同様の測定を繰り返した。漏洩量の測定システムを図-4.4および図-4.5に示す。ひびわれ幅は 2×10^{-4} ~ 5×10^{-4} mの範囲で 0.5×10^{-4} mの間隔で測定を行っている。実験の様子をPhoto.1およびPhoto.2に示す。写-4.1は壁厚15cmの試験体を100ton 万能試験機セットした状況を、写-4.2は壁厚60cmの試験体の流出側の圧力箱近傍の状況をそれぞれ示すものである。

4.4 実験結果および考察

4.4.1 各種気体の漏洩に関する実験結果

一次元定常等温流れを表す式は下式である。

$$f = \frac{W^3(P_1^2 - P_2^2)}{2\rho_0 P_0 Q^2 T} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに f :摩擦係数 W :ひびわれ幅 P_1 :壁入口の絶対圧力 P_2 :壁出口の絶対圧力 ρ_0 :20℃, 1気圧 ($1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)における気体の密度 P_0 : $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ Q :20℃, 1気圧換算の単位時間当たり単位ひびわれ長さ当たりの気体の体積流量 T :壁厚である。

上式に4種類の気体について行った漏洩実験の結果を代入し摩擦係数 f を求めた。図-4.6 および図-4.7 に f と流量 Q の積である $f \cdot Q$ と Q の関係を示す。図-4.6 は 60-Fのひびわれ幅 $W=0.4 \text{mm}$ のときの $f \cdot Q$ と Q の関係であり, 図-4.7 は 15-Fのひびわれ幅 $W=0.4 \text{mm}$ のときの $f \cdot Q$ と Q の関係である。いずれの気体においても $f \cdot Q$ と流量 Q は直線で関係づけることができ, 酸素ガスを用いて行った漏洩実験2様に次式が成り立つ。

$$f = \frac{a(W)}{Q} + b(W) \dots\dots\dots (4.2)$$

上式中 $a(W)$ および $b(W)$ は $f \cdot Q$ と Q を直線回帰したときの切片, 傾きを表しており, 気体の種類によって異なる。前報 2)では, ひびわれ幅無限大ではひびわれ内の気体の流れは二次元ポアズイユ流になると考え, $a(W)$ はコンクリートによらず, μ を粘性係数として $12 \cdot \mu / \rho_0$ に漸近するとした。この $12 \cdot \mu / \rho_0$ は気体によって異なる。そこで, $a(W)$ を $12 \cdot \mu / \rho_0$ で無次元化した値を $a - (W)$ として, ひびわれ幅 W との関係で図-4.8 および図-4.9 に示した。60-Fについて図-4.8 に 15-Fについて図-4.9 に示した。図中●は炭酸ガス, ○は窒素ガス, ▲は酸素ガス, △はヘリウムガスの実験結果をそれぞれ表している。図-4.6 および図-4.7 で示した4種類の気体の切片の値が統一的に扱えるといえる。図に示した式は4種類の気体の結果をひびわれ幅無限大で図中に一点鎖線で示した $a(W)=1.0$ に漸近するように近似した曲線である。この曲線はひびわれ幅が零で無限大になるような形で仮定したが, 実験結果がプロットされていない範囲のこの曲線の形すなわち $a(W)$ の値にはほとんど意味はない。図-4.10 および図-4.11 に傾き $b(W)$ とひびわれ幅 W の関係を示す。図-4.10 は 60-Fに関するもので, 図-4.11 は 15-Fに関するものである。多少のバラツキはあるものの, $b(W)$ に関しても4種類の気体の実験はほぼ同様の値を示している。図中の式は4種類の気体についてプロットされた点を近似したものであり, ひびわれ幅無限大で $b(W)=0$ にひびわれ幅が零で無限大になるように決めた。以下のように求められた $a(W)$ および $b(W)$ を用いて計算された流量($Q_{\text{calculated}}$)と実験値である($Q_{\text{experiment}}$)の関係を図-4.12 および図-4.13 に示す。図-4.12 が 60-F, 図-4.13 が 15-Fについて比較行ったものである。いずれの試験体についても流量の計算値は実験値をよく表しており, 実験に用いたすべての気体に圧縮性を考慮した(1)式が適用しうるといえる。次に 2 章においてある範囲内における実用式として提案した二次元ポアズイユ流を表す式を利用した実験式によっても各種気体の漏洩量が定式化できることを示す。二次元ポアズイユ流を表す式を利用した実験式は次式で表せる。

$$Q = a(W) \frac{\Delta p W^3}{\mu T} \dots\dots\dots (4.3)$$

ここに ΔP :壁両端の圧力差 μ ; 気体の粘性係数である。2 章において示した上式が適用できる範囲である入口、出口の絶対圧力が $0.8 \times 10^5 \text{Pa}$ 以上 $1.2 \times 10^5 \text{Pa}$ 以下、圧力差が $0.2 \times 10^5 \text{Pa}$ 以下、みかけのレイノルズ数 $Re=100$ 以下の範囲内の実験結果から求められた(4.3)式中の $\alpha(W)$ とひびわれ幅 W との関係を図-4.14 および 15 に示す。気体により $\alpha(W)$ の値が大きく異なることはなく、ひびわれ幅が増すに従い増加している。二次元ポアズイユ流を表す式を利用した(4.3)式により、圧縮性を考慮した(4.1)式中の流量 Q の1つを消去すれば次式となる。

$$\alpha = \frac{\mu(P_1 + P_2)}{2\rho_0 P_0 (fQ)} \dots\dots\dots (4.4)$$

$\alpha(W)$ と $\mu \cdot (P_1 + P_2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0)$ が等しければ、(4.1)式と(4.3)式は同一になるという意味である。実験結果から求められた f および $\alpha(W)$ より、 $\alpha(W)$ と $\mu \cdot (P_1 + P_2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0)$ の関係の例を図-4.16～図-4.19 に示す。図-4.16～図-4.19 に示す曲線は、壁入口あるいは出口の圧力を $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ とした時の $\mu \cdot (P_1 + P_2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0)$ を表している。 $\alpha(W)$ は流量 Q に無関係であるので Q 軸に平行な直線となる。すべてひびわれ幅は 0.2mm におけるものであり、図-4.16に60-Fのヘリウムガスについて、図-4.17に60-Fの炭酸ガスについて、図-4.18に15-Fのヘリウムガスについて、図-4.19に15-Fの炭酸ガスについてそれぞれ示してある。図中、一点鎖線でひびわれ幅 W の一次関数で回帰した $\alpha(W)$ の値を表し、二点鎖線でみかけのレイノルズ数($Re=2 \cdot \rho_0 \cdot \mu / Q$)が 10^2 となる流量を示している。また、●で壁両端の圧力差が $0.203 \times 10^5 \text{Pa}$ ($=0.2$ 気圧)となる点を示している。いずれにおいても、(4.3)式により求められた $\alpha(W)$ 値はみかけのレイノルズ数 100 以下、壁入口、出口の絶対圧力が $0.8 \times 10^5 \text{Pa}$ 以下、壁両端の圧力差 $0.203 \times 10^5 \text{Pa}$ 以下の範囲(太線で示した)であれば、(4.1)式中の f より求めた $\mu \cdot (P_1 + P_2) / ((\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0))$ をほぼ近似している。図-4.20 および図-4.21 にひびわれ幅 W の一次関数である $\alpha(W)$ から計算された流量($Q_{\text{calculated}}$)と実験値($Q_{\text{experiment}}$)の関数を示す。上述の範囲内であれば、二次元ポアズイユ流を表す式を利用した実験式である(4.3)式によっても各種気体の漏洩量を把握することができる。図-4.22 あるいは図-4.23 にこれまで通常のコンクリートについて行ったすべての漏洩実験における $\alpha(W)$ と W の関係を示す。図中、一点鎖線で示したAシリーズは第2章で示した試験体であり、破線および二点鎖線で示したB、Cシリーズは第3章で報告した骨材粒径をパラメーターにした実験に用いた試験体である。Fシリーズについては、60-Fと15-Fの2体の平均を実線で表している。図-4.24に、60-Fと15-Fの試験体2体の結果を平均した $a(W)$ および $b(W)$ から計算した流量($Q_{\text{calculated}}$)と実験値($Q_{\text{experiment}}$)の関係を示す。2体の試験体は同じコンクリートで作製されたものであるが、白丸で示した壁厚 15cm の試験体 15-Fの実験結果と黒丸で示した壁厚 60cm の試験体 60-Fの実験結果には、それほど大きくはないが差異が生じている。この差異は試験体によるバラツキであると考えられる。気体漏洩量は、ひびわれ面の微

視的形状および巨視的形状に大きく影響されると思われる。ここでいう試験体によるバラツキとは、試験体に生じたひびわれ面の巨視的形状のバラツキといえる。粗骨材の最大粒径のオーダーで考えるひびわれ面の形状、すなわち、粗骨材の表面に沿った凹凸等のバラツキは、本実験の試験体程度のスケール、すなわち、10 cm×15 cmあるいは10 cm×60 cmの断面全体で考えた場合は平均化されるものと思われる。しかしながら、実験で取り扱う範囲においては、ひびわれの壁面における長さが相当大きくなっても、平均化されないひびわれ面の巨視的形状のバラツキが本格的に存在すると考えるべきであろう。正確に記述することはむずかしいが、両試験体のひびわれ面の巨視的形状について説明すれば、15-F試験体の場合、壁厚15 cm全域が蒲鉾形であったのに対し、60-F試験体では、気体流入側の壁面から約10 cmの範囲および流出側の壁面から約20 cmの範囲のひびわれ面の巨視的形状が蒲鉾形であり、壁断面の中央部約30 cmのひびわれ面の巨視的形状はほぼ平坦といえるものであった。このひびわれ面の巨視的形状の違いによって実験結果に差異が生じたものと考えられ、これは試験体によるバラツキと考えるのが妥当であると思われる。本実験結果では壁厚の大きい60-F試験体の方が、小さい15-F試験体に比べ流量が多い、すなわち摩擦係数 f が小さくなっており、図-4.24に見られる両試験体の実験結果の差異を壁厚の影響と考えることもできよう。しかしながら、第2章で提示したAシリーズの試験体の実験結果では、壁厚60 cmの60-Aがほかの試験体に比べ、摩擦係数 f が大きい方にばらついており、本実験結果と、壁厚 T と摩擦係数 f の関係が逆になっている。

このように、これまでに蓄積された実験結果を総合して考えると、壁厚 T と摩擦係数 f の相関は見いだせない。したがって、この実験結果の差異は、壁厚の影響によるものではなく、やはり、「試験体によるバラツキ」と考えたい。図-4.25に2体の試験体の実験結果を平均した $\alpha(W)$ から計算した流量($Q_{\text{calculated}}$)と実験値($Q_{\text{experiment}}$)の関係を示す。同様に、若干の差異は生じているものの、これは試験体によるバラツキ、すなわちひびわれ面の巨視的形状のバラツキによるものと考えられる。

4.4.2 ひびわれ幅が一定でない場合の漏洩実験結果

一定なひびわれ幅について実験を行った後、表-4.7にその値を示すが、幅が一定でない3つのケースについて漏洩実験を行った。壁面においてひびわれ幅が変化する場合の実験においても4種類(He, N₂, O₂, CO₂)の気体を用いている。図-4.26および図-4.27 (あるいは図-4.28 および図-4.29)に各ケースについて一定なひびわれに関して行った漏洩実験結果から計算された漏洩量と実験から得られた漏洩量との比較を行った。流量の計算値は(4.1)式と(4.2)式を連立して得られる単位時間当たり単位ひびわれ長さ当たりの流量 Q の正根をひびわれ長さ方向(具体的には0→0.1m)に積分したものであり、次式により示される。

$$(Q_{\text{calculated}}) = \int_0^{0.1} \left\{ \sqrt{a(W)^2 + 4 \cdot b(W) \cdot C \cdot W^3 - a(W)} / (2 \cdot b(W)) \right\} dx \cdots \cdots (4.4)$$

(4.4)式中のCは次式で表せる。

$$C = \frac{(P_1^2 - P_2^2)}{2\rho_0 P_0 T} \dots\dots\dots (4.5)$$

いずれのケースにおいても計算値と実験結果はよく一致しており、ひびわれ幅が壁厚方向一定で、壁面でゆるやかに変化する場合の気体漏洩量は壁面方向の単純な積分により計算できる。

図-4.30 は2次元ポアズイユ流れを利用した実験式を用いてひびわれ幅が一定でない場合についての流量の計算値と実験値の対応を示したものである。前述の圧縮性を考慮した実験式を利用した場合と同様に精度よく計算値が実験値を表していると考えられる。

4.5 まとめ

本章ではひびわれの生じたコンクリート壁の気体漏洩に関して気体の種類をかえた実験および幅が一定でないひびわれについての漏洩実験を行い以下のような結論を得た。

- (1) ヘリウムガス、窒素ガス、酸素ガスおよび炭酸ガスを用いて行った漏洩実験から、 $2 \times 10^{-4} \text{m}$ $\sim 5 \times 10^{-4} \text{m}$ の一定幅のひびわれが生じたコンクリート壁を通しての気体漏洩量は、ひびわれを極端に理想化した二平板間の気体の流れを表す式を利用した実験式によって表せる。
- (2) ひびわれ幅が壁厚方向に一定で、壁面でゆるやかに変化する場合の気体漏洩量は壁面方向の単純な積分により計算できる。

表－ 4.1 試験体リスト

	Wall Thickness T	Concrete	Fine Agg.	Coarse Agg.
15-F	15cm	F	Sand	Crushed gravel
60-F	60cm	F	Size:- 5mm	Size:5-15mm

表－ 4.2 F コンクリートの調合

W/C (%)	Water (Kg/m ³)	Cement (Kg/m ³)	Fine Agg. (Kg/m ³)
45	189	420	748.4

Coarse Agg. (Kg/m ³)	Slump (cm)
916.6	15

表－ 4.3 第3章で用いたコンクリートとの調合比較

Concrete	W/C (%)	Mix Proportion(kg/m ³)				Admixture	Slump (cm)
		Water	Cement	Fine Agg	Coarse Agg		
A	39	163	418	718	1023	1.045	8.0
B	42	170	411	883	938	－	2.0
C	42	170	411	883	938	－	1.5
D	39	156	400	1100	788	－	1.5
E	39	156	400	1100	788	－	2.0
F	45	189	420	748	916	－	15.0

表－ 4.4 F コンクリートの強度試験結果

Curing	In Air
Age of Concrete	32 (days)
Compressive Strength 10 ϕ x 20 (cm)	44.9 (MPa)
Splitting Tensile Strength 10 ϕ x 10 (cm)	2.9 (MPa)
Date of Placing	November.1 1987

表－ 4.5 第3章で用いたコンクリートとの強度試験結果の比較

Concrete	Age of Concrete (days)	Compressive Strength 10φx20 cm (MPa)	Splitting Tensile Strength 10φx10 cm (MPa)
A	45	30.3	2.4
B	35	37.3	2.9
C	35	32.1	2.8
D	42	27.2	2.1
E	42	21.5	2.1
F	32	44.9	2.9

All the testpieces are cured in air.

表－ 4.6 実験で用いた各種気体の密度および粘性係数

Gas	Density ρ (Kg·m ⁻³) 20°C 1atm	Viscosity μ (10 ⁻⁶ Pa·s) 20°C 1atm
He	0.1663	19.6
N ₂	1.165	17.6
O ₂	1.331	20.4
CO ₂	1.842	14.7

参考資料：理科年表 昭和63年度版

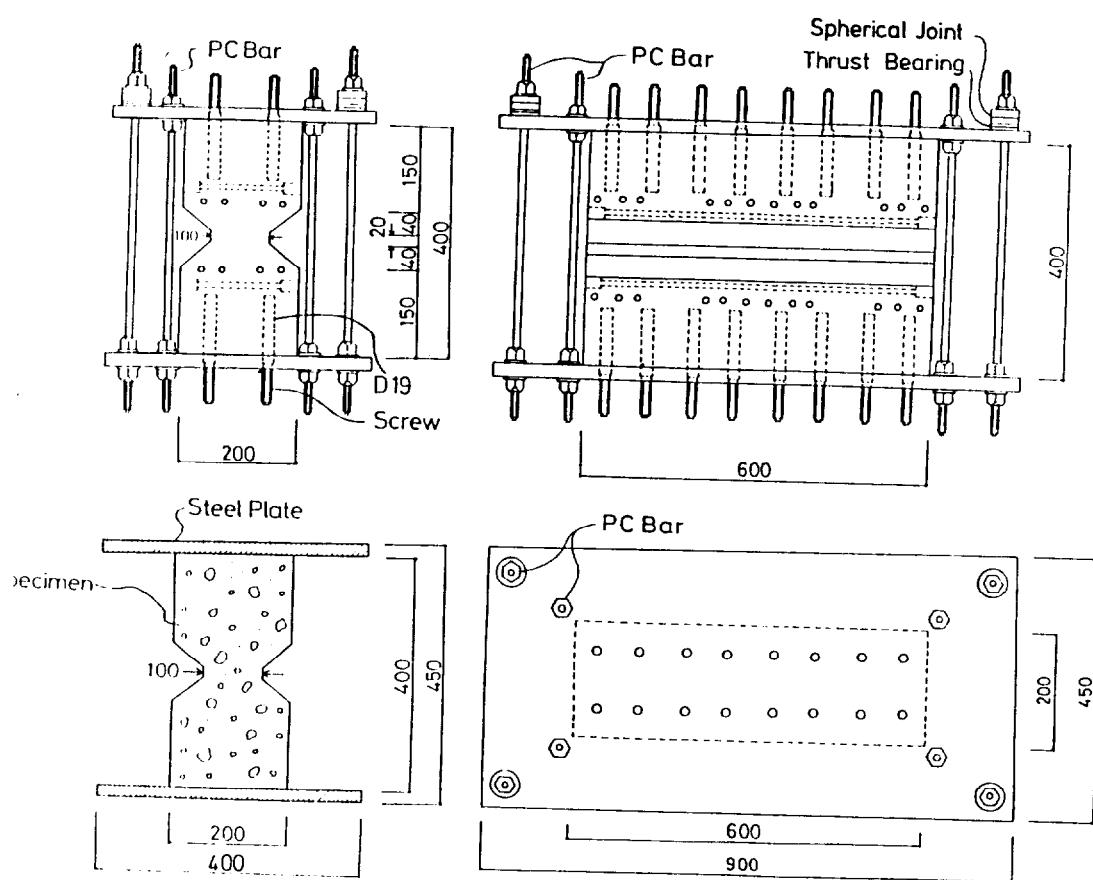
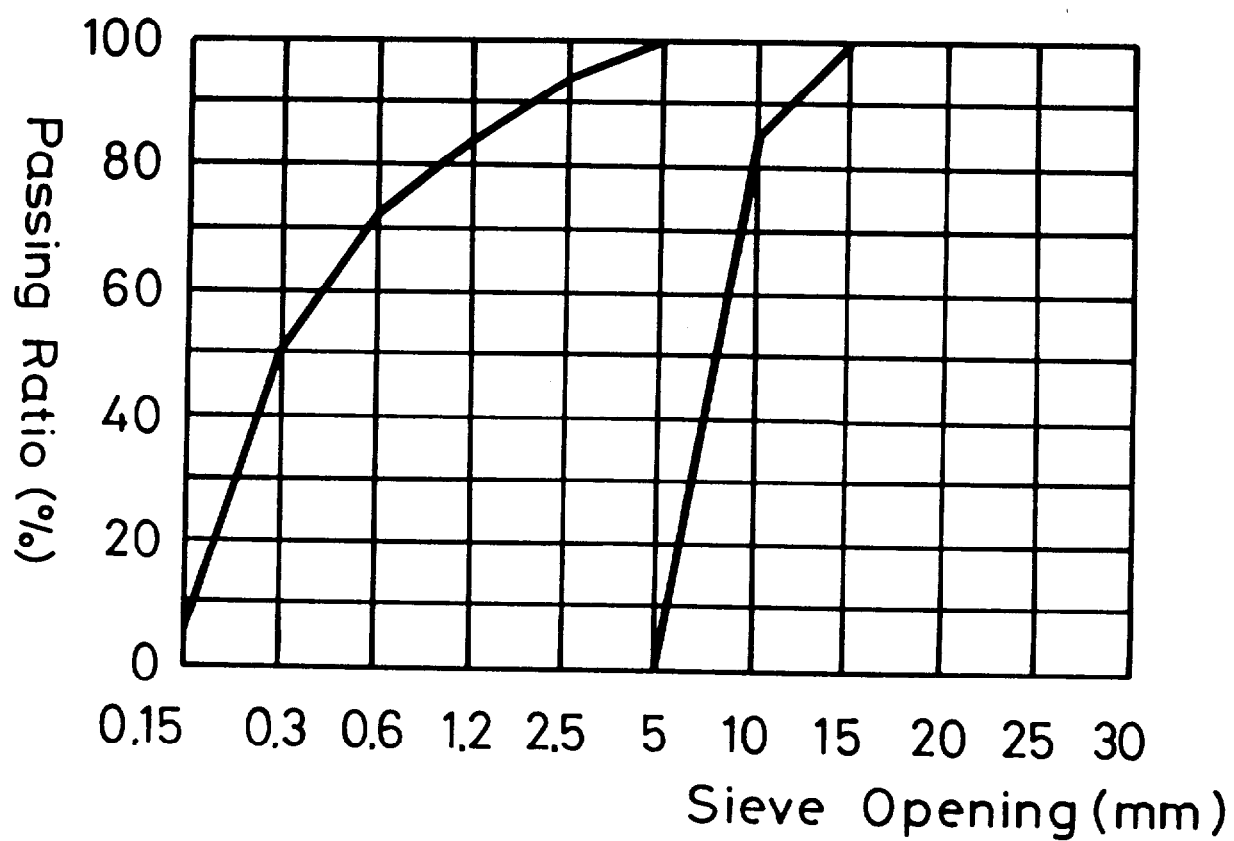
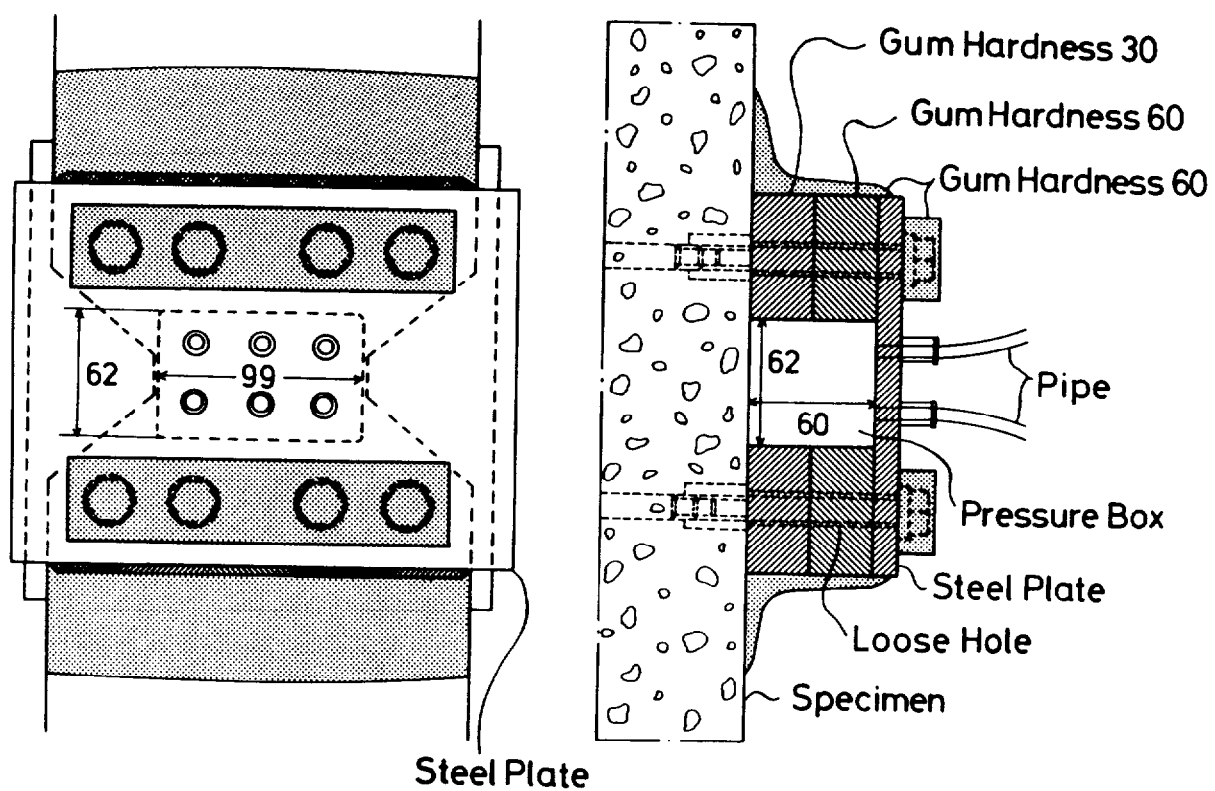


図- 4.1 試験体



図－ 4.2 コンクリート骨材の粒度分布



图— 4.3 压力箱

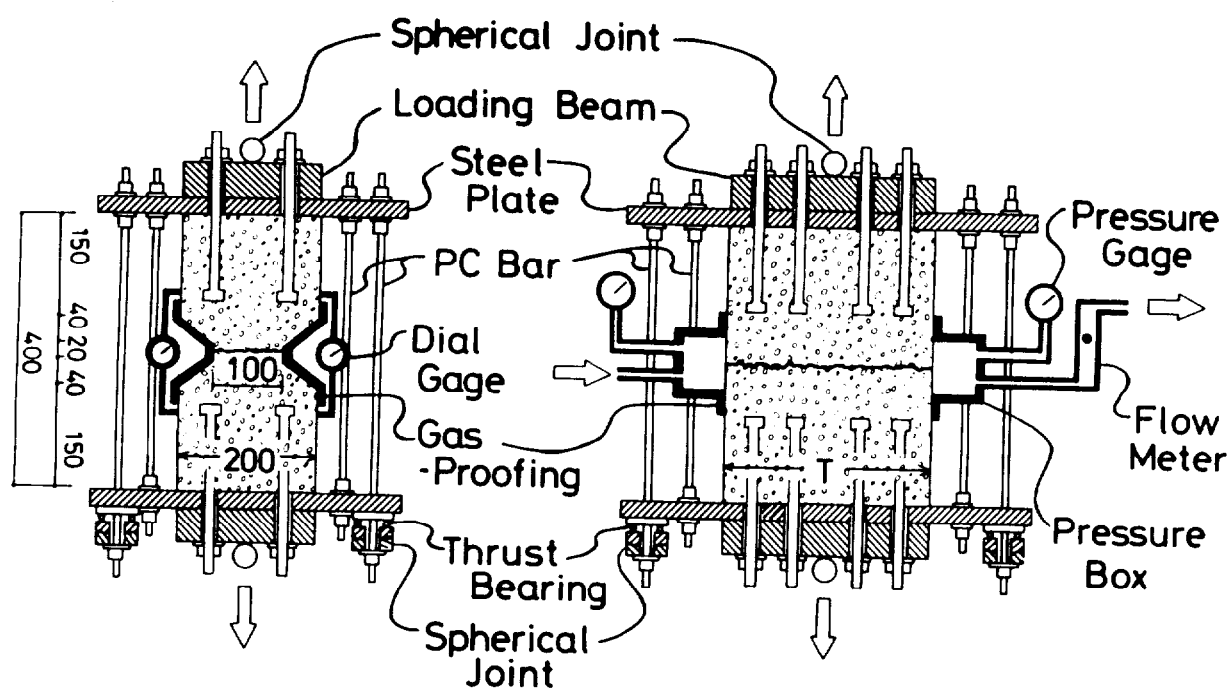
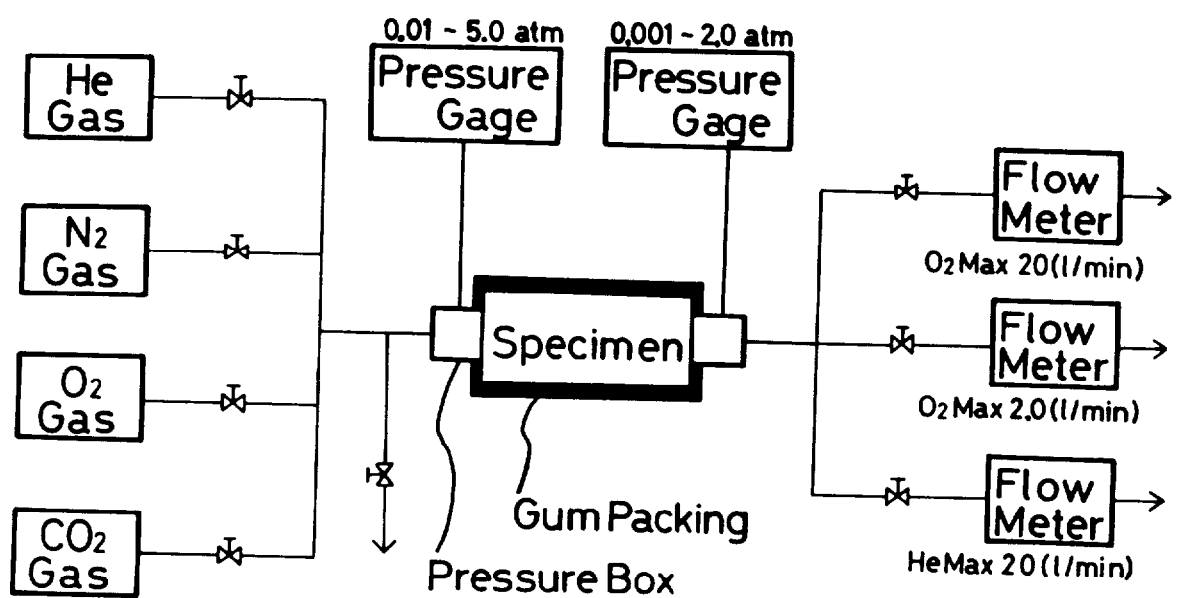
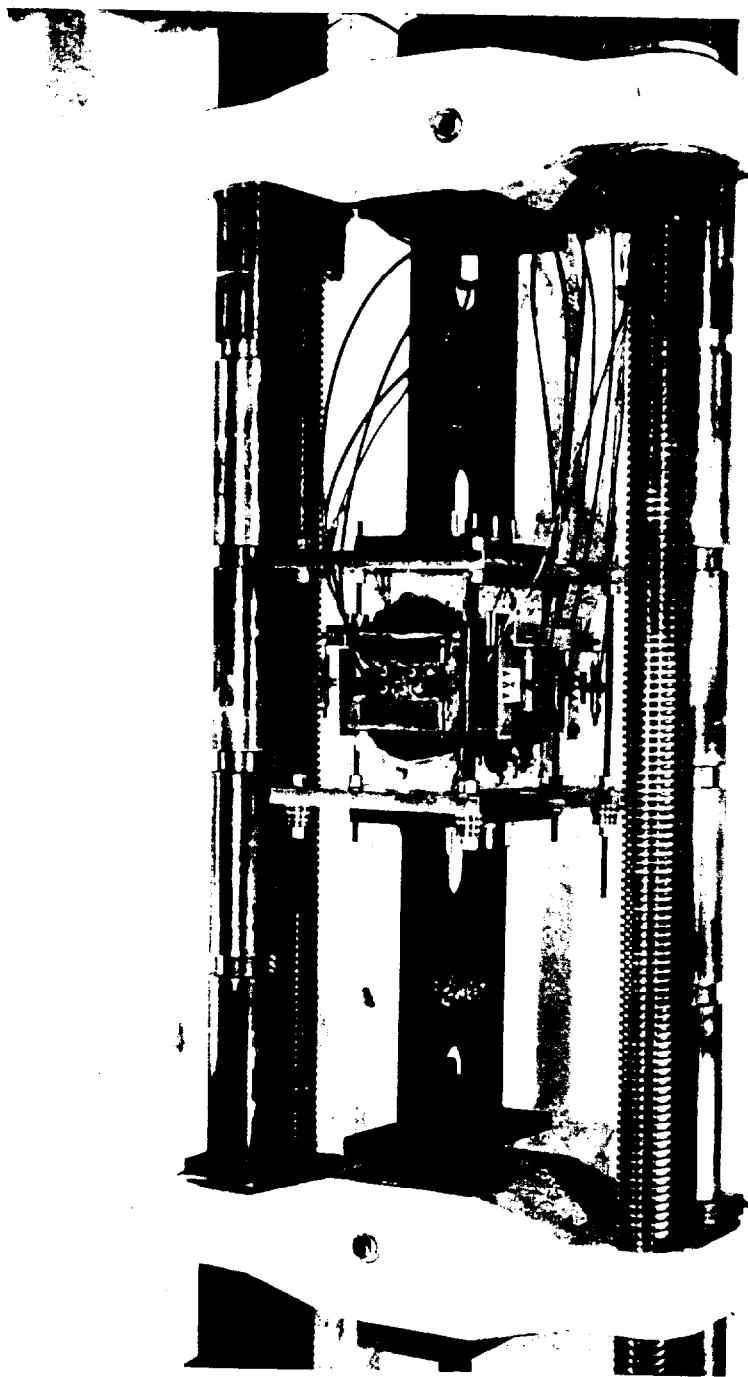


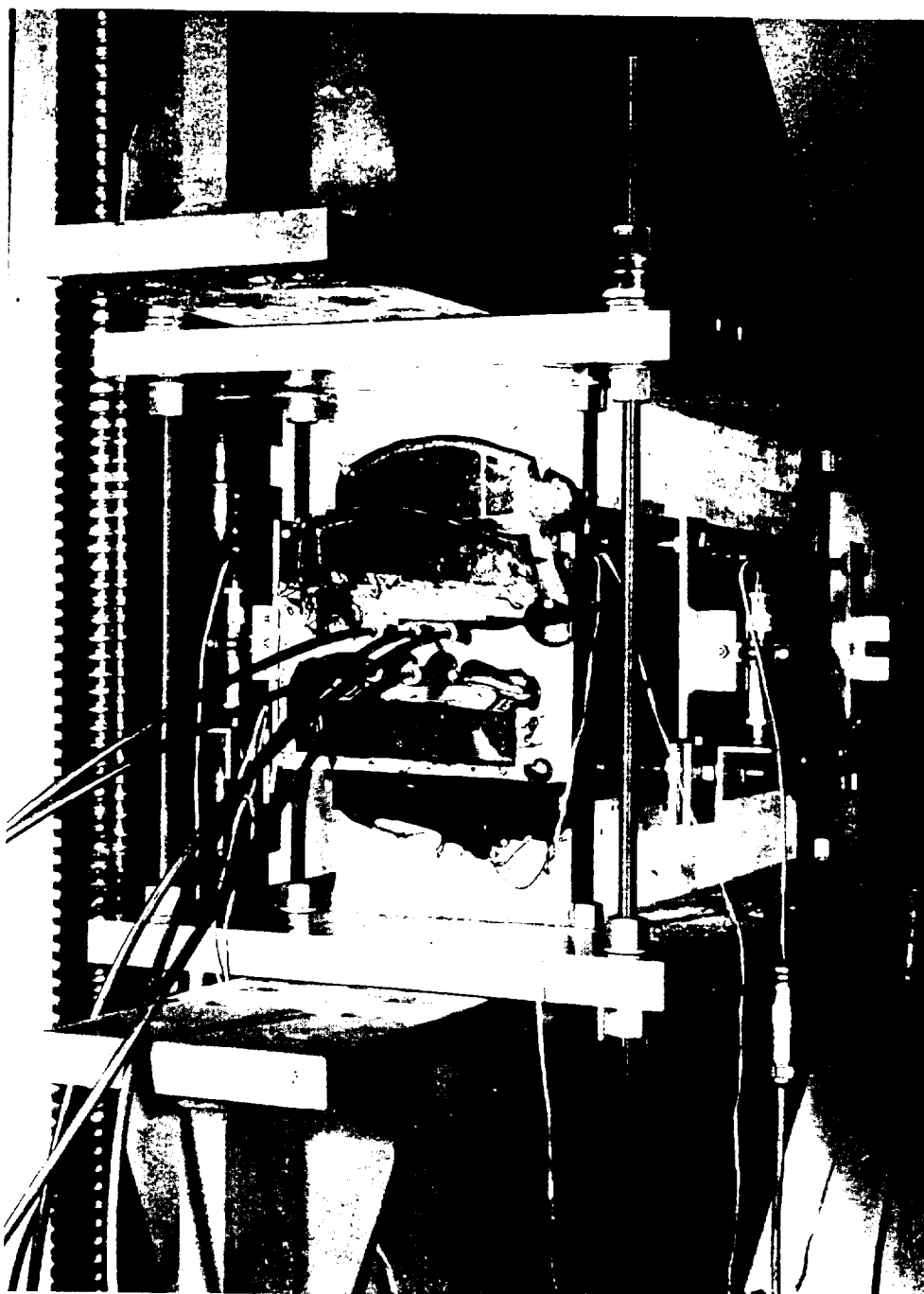
図-4.4 試験状況



図－ 4.5 流量測定システム



写-4.1 15-F 試験体



写－ 4.2 60－F 試験体

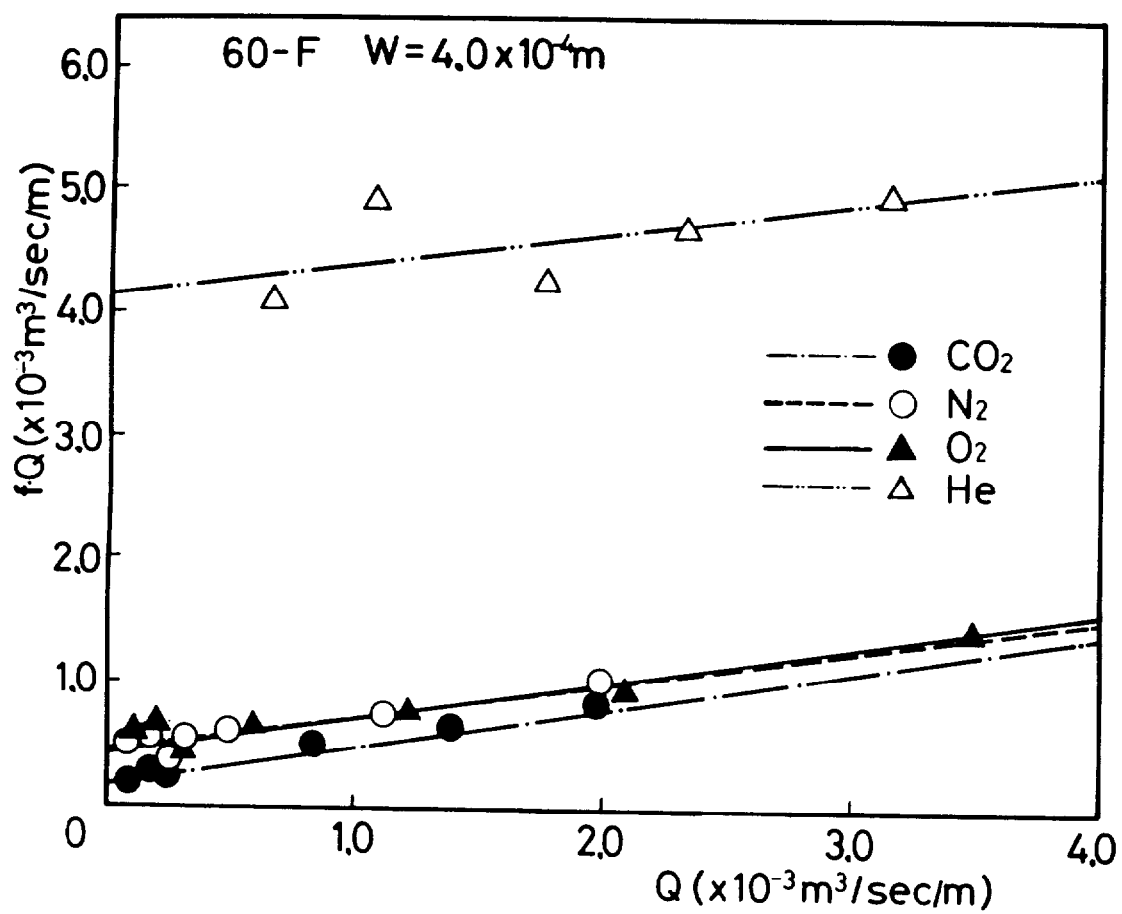


図-4.6 $fQ-Q$ 関係

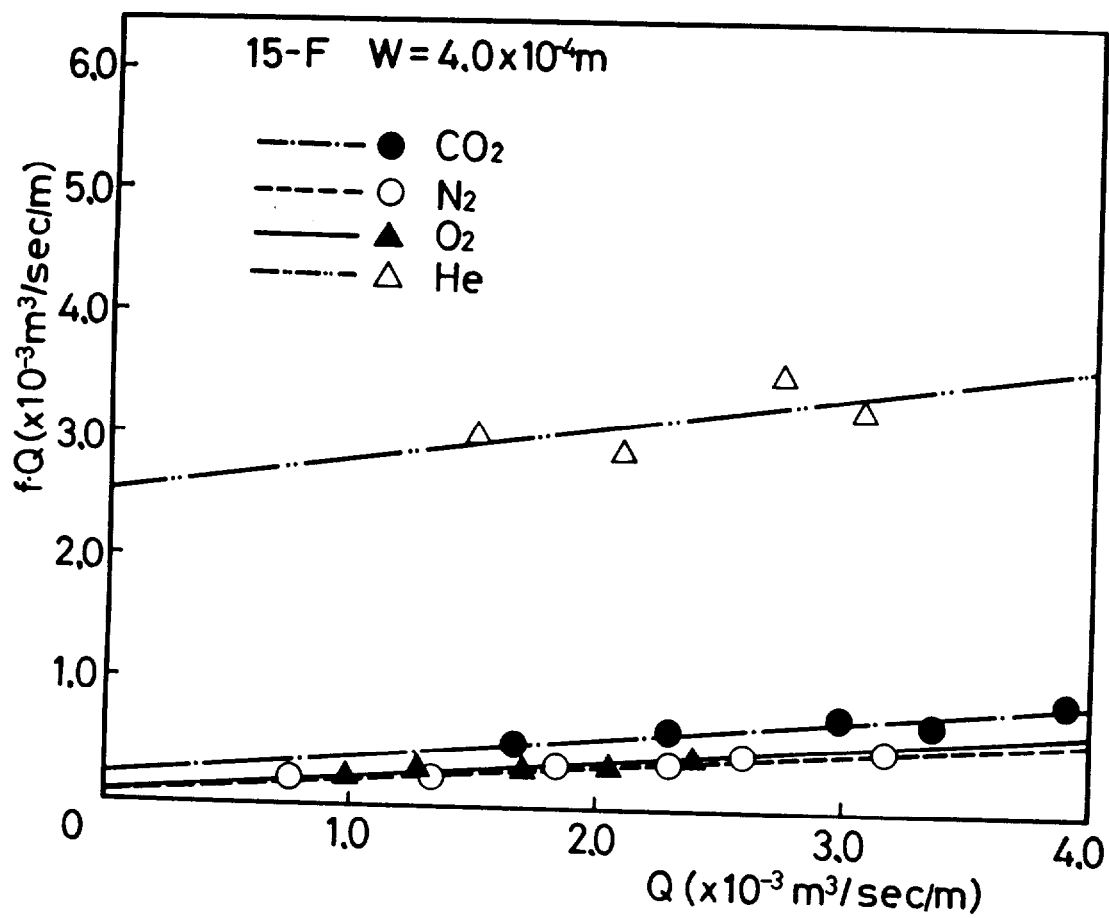


図-4.7 $fQ - Q$ 関係

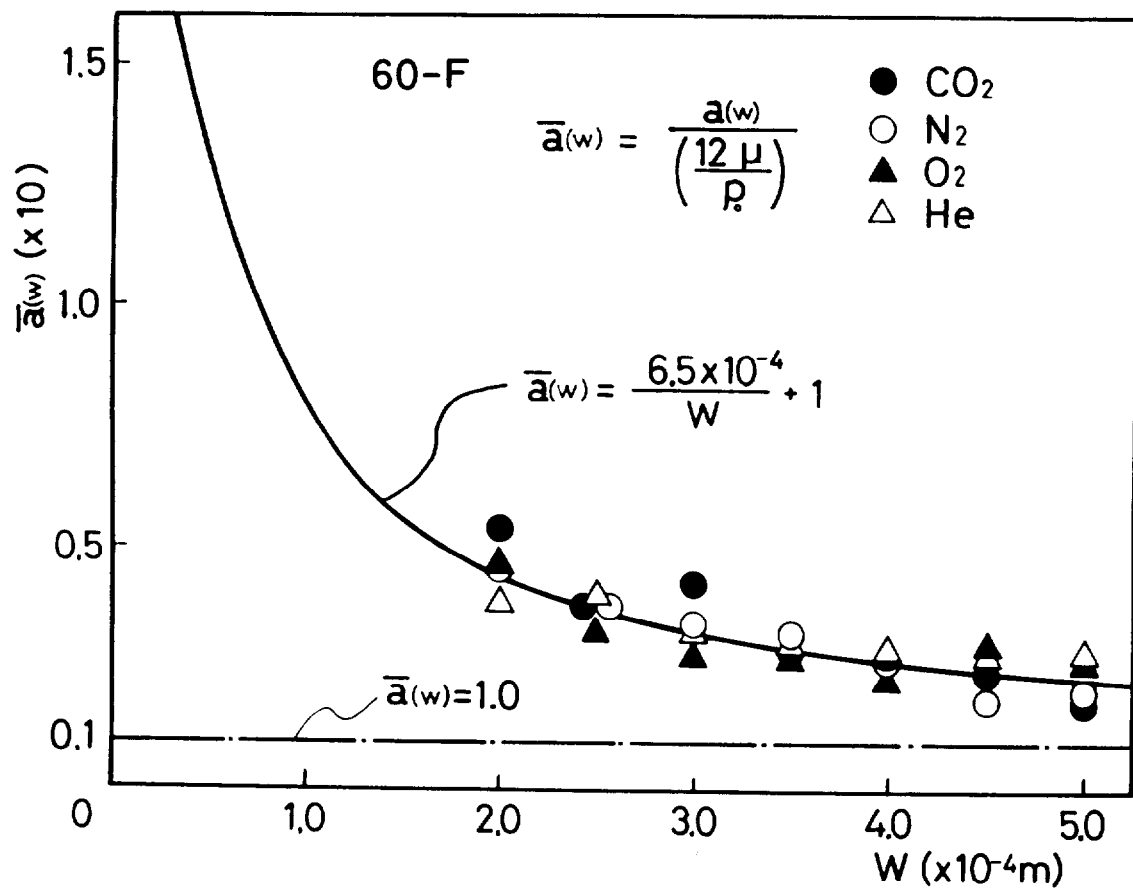


図-4.8 a-W 関係

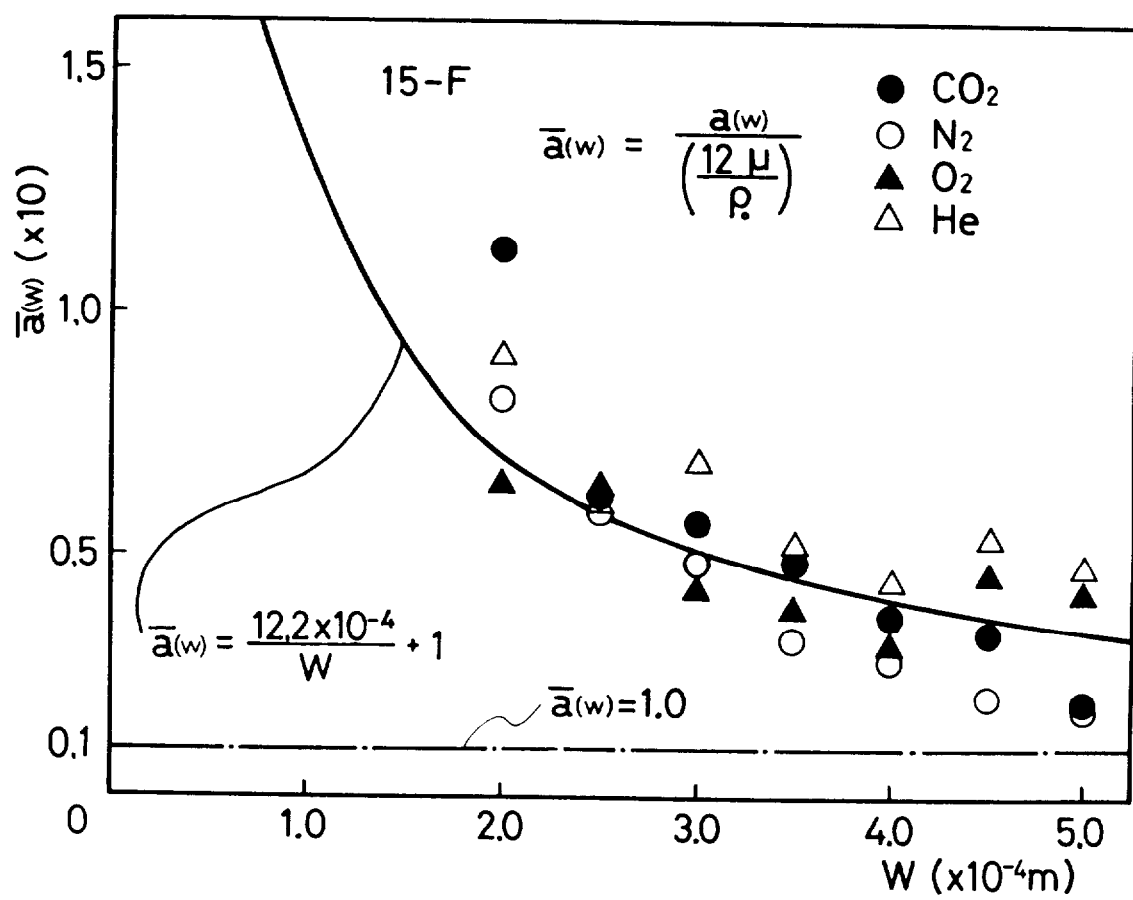


図- 4.9 a-W 関係

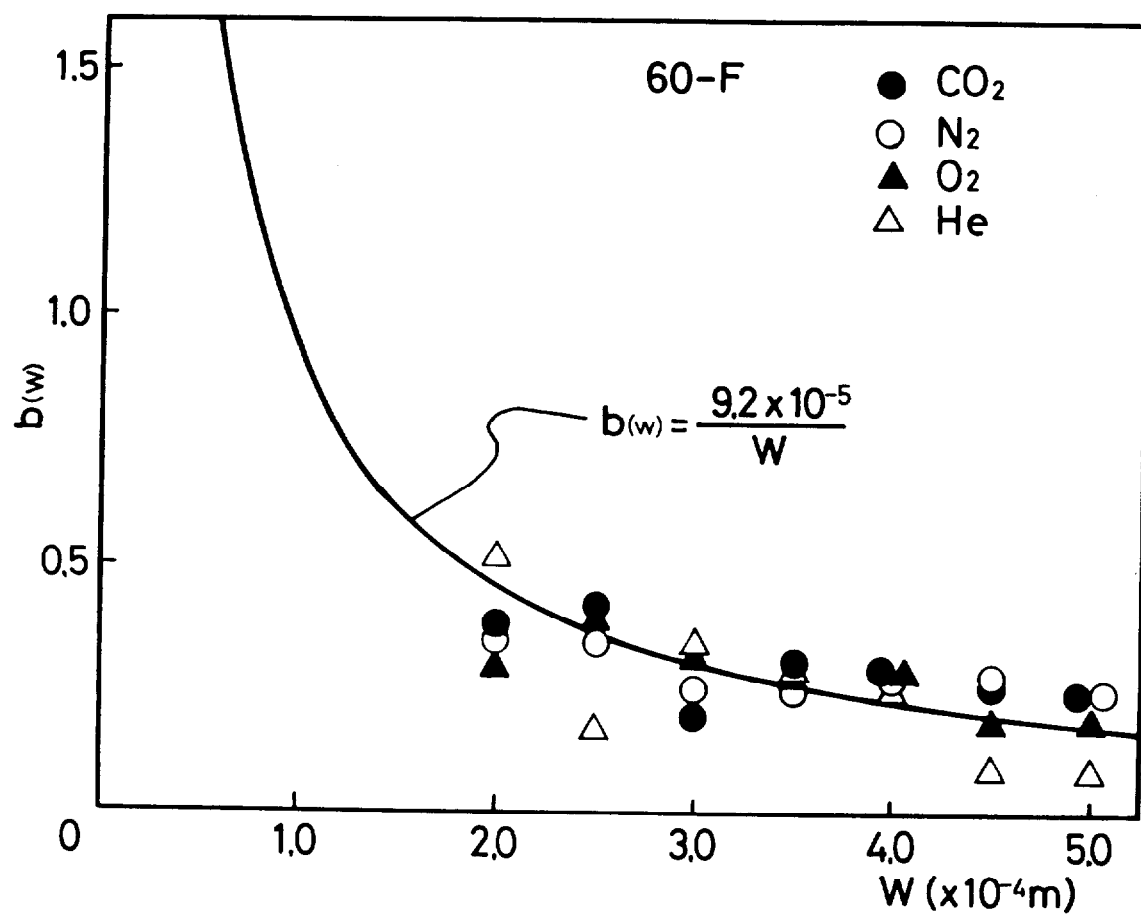


図-4.10 $b-W$ 関係

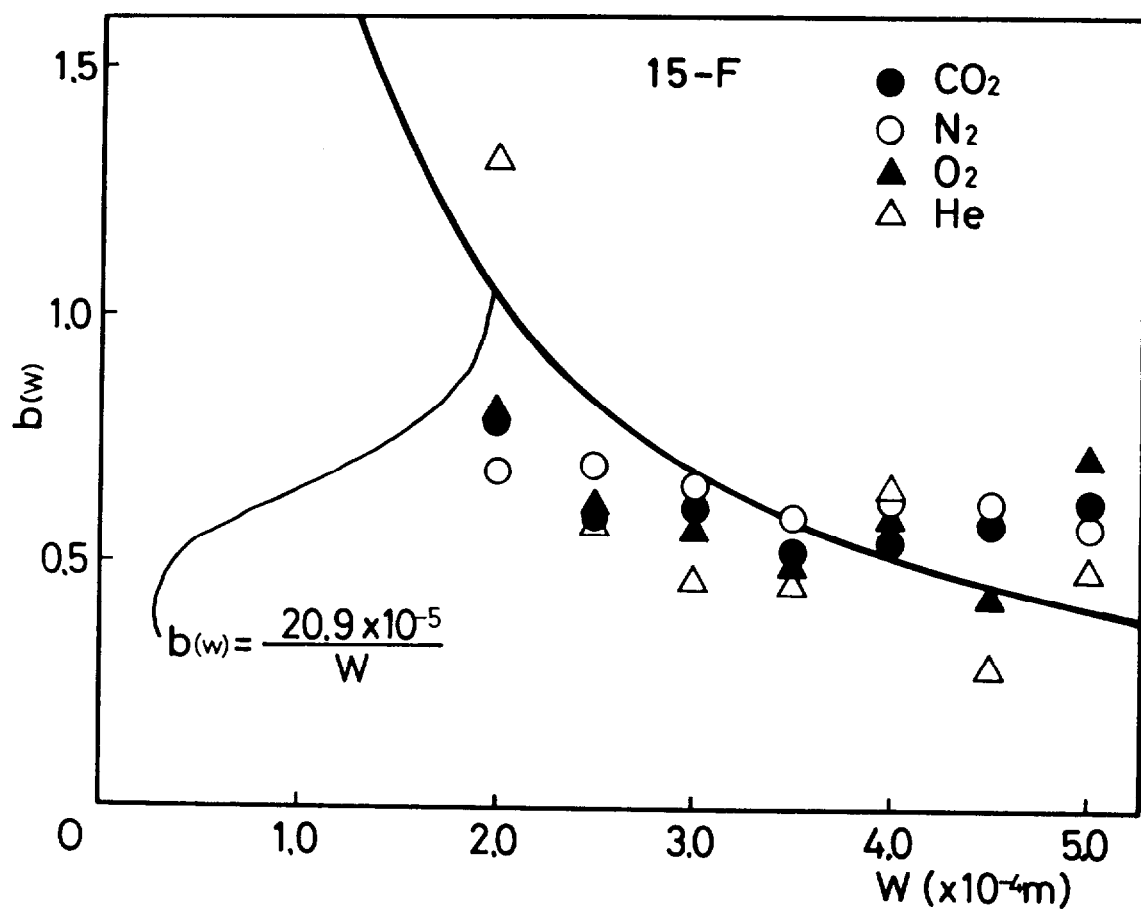


図- 4.11 b-W 関係

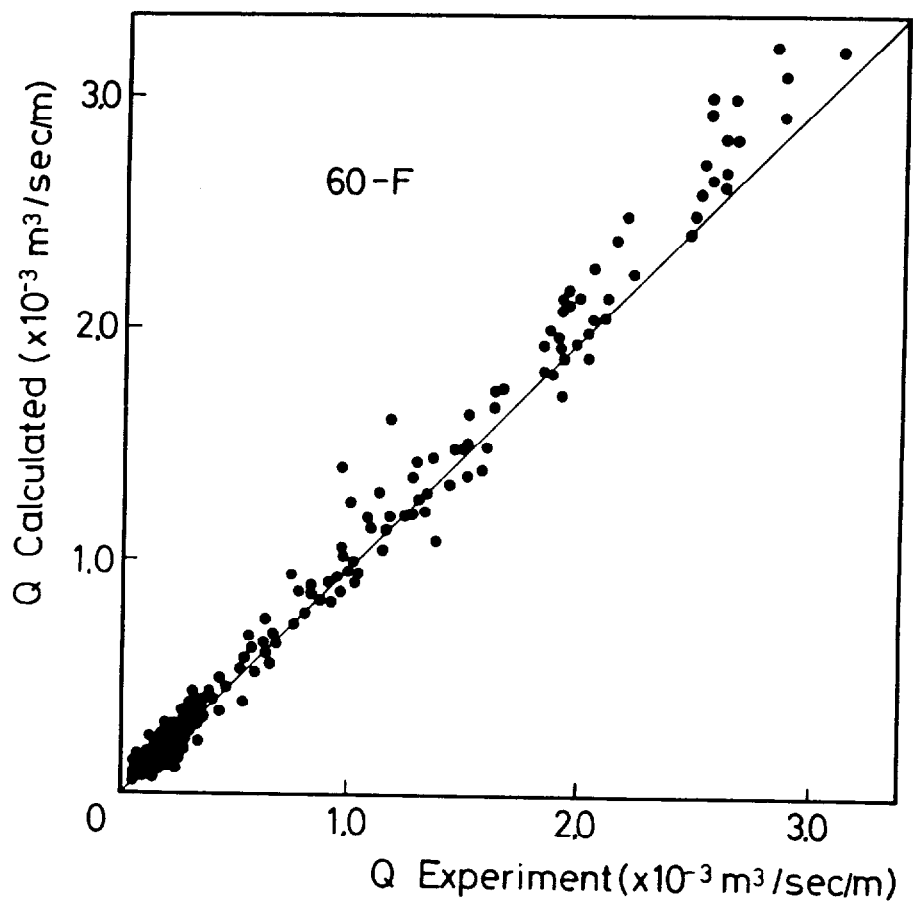
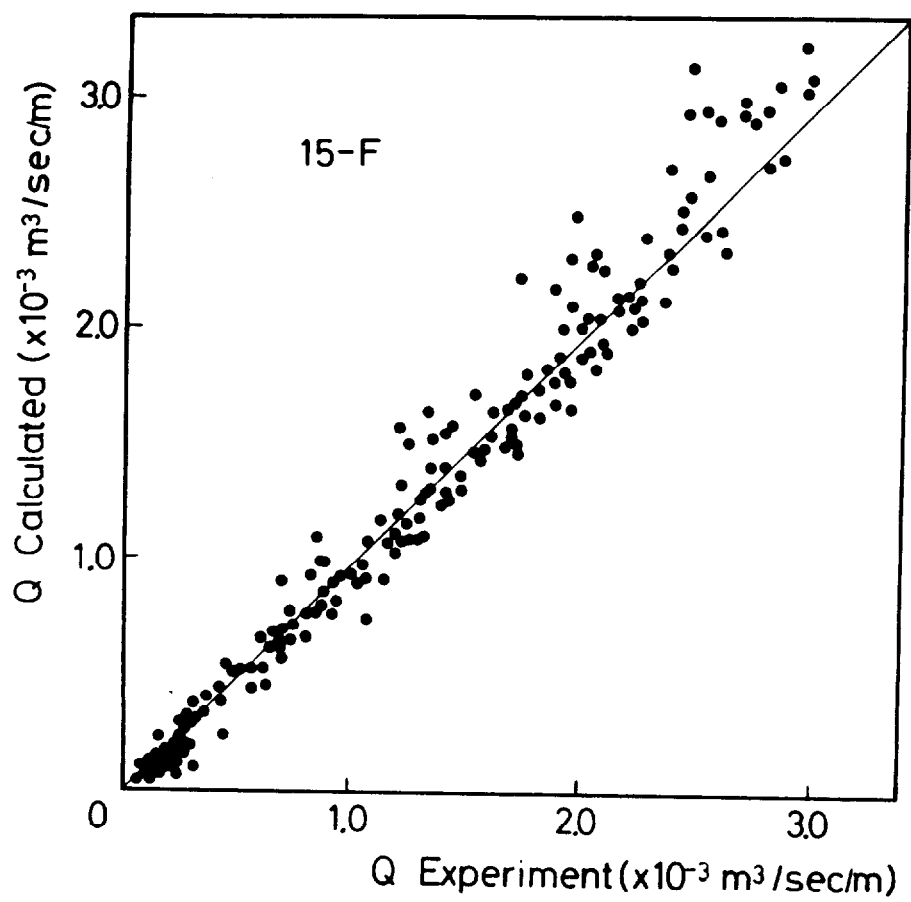


図- 4.12 Q(計算値)-Q(実験値) 関係



図－ 4.13 Q (計算値)－ Q (実験値) 関係

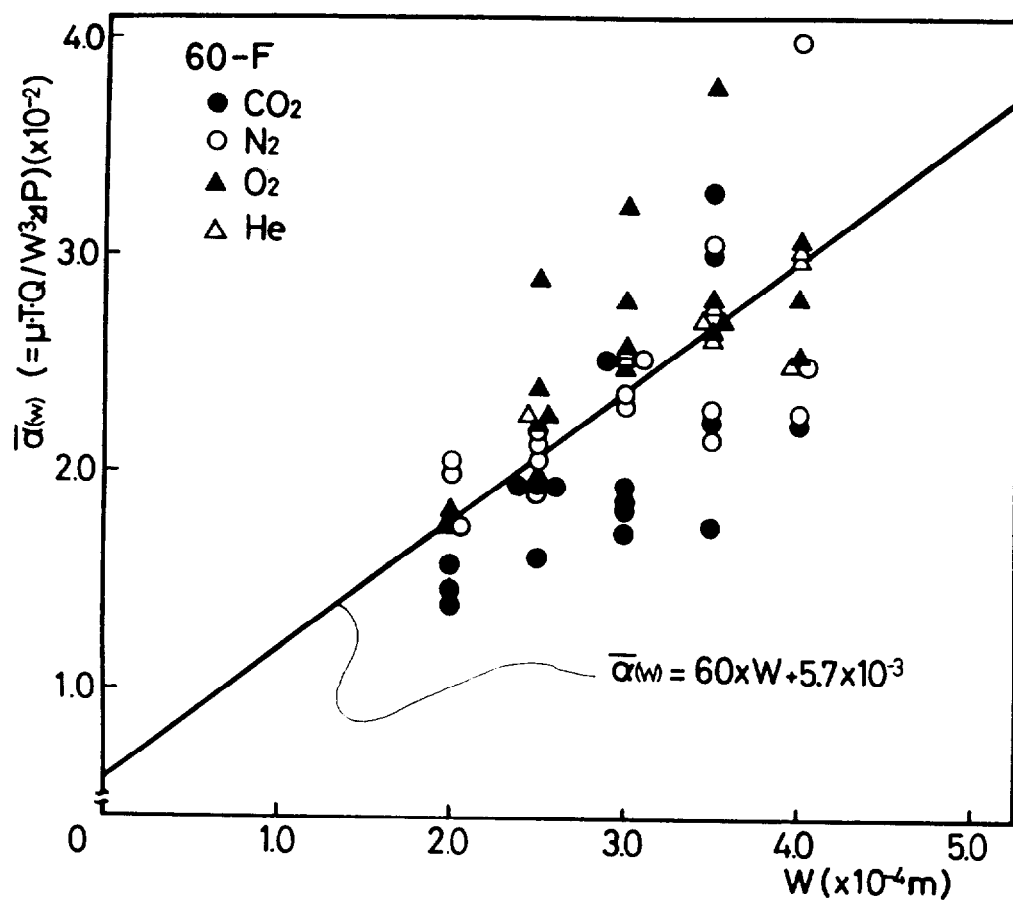


図- 4.14 $\alpha - W$ 関係

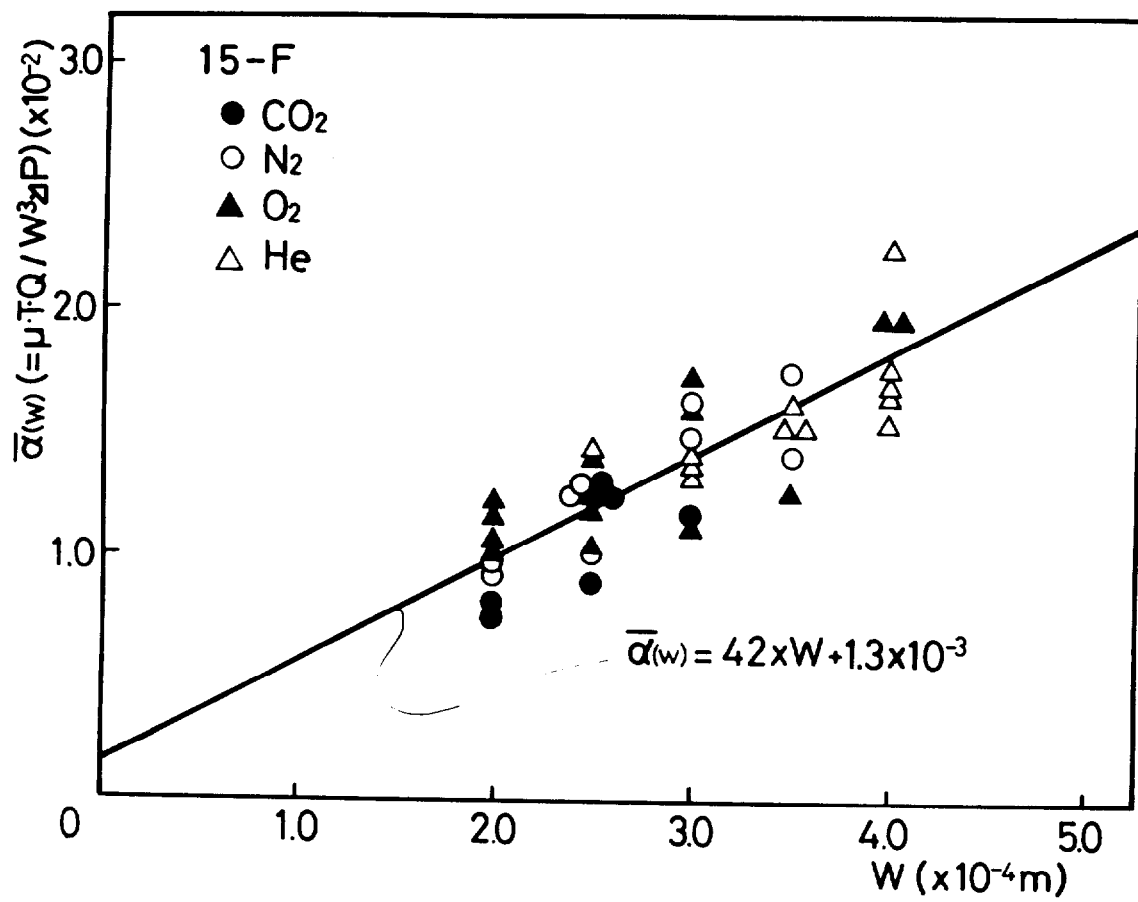


図-4.15 $\alpha - W$ 関係

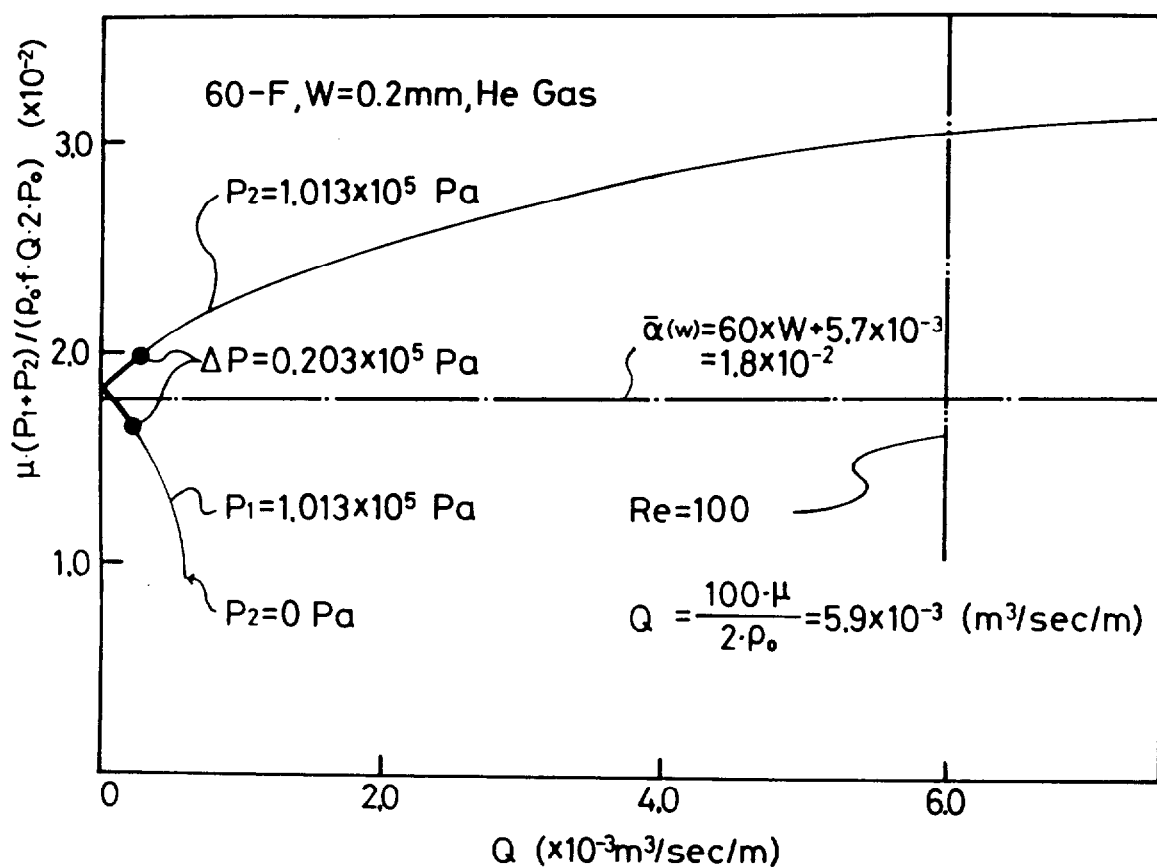


図 - 4.16 $[\mu \cdot (P_1 + P_2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0)] - [Q]$ 関係

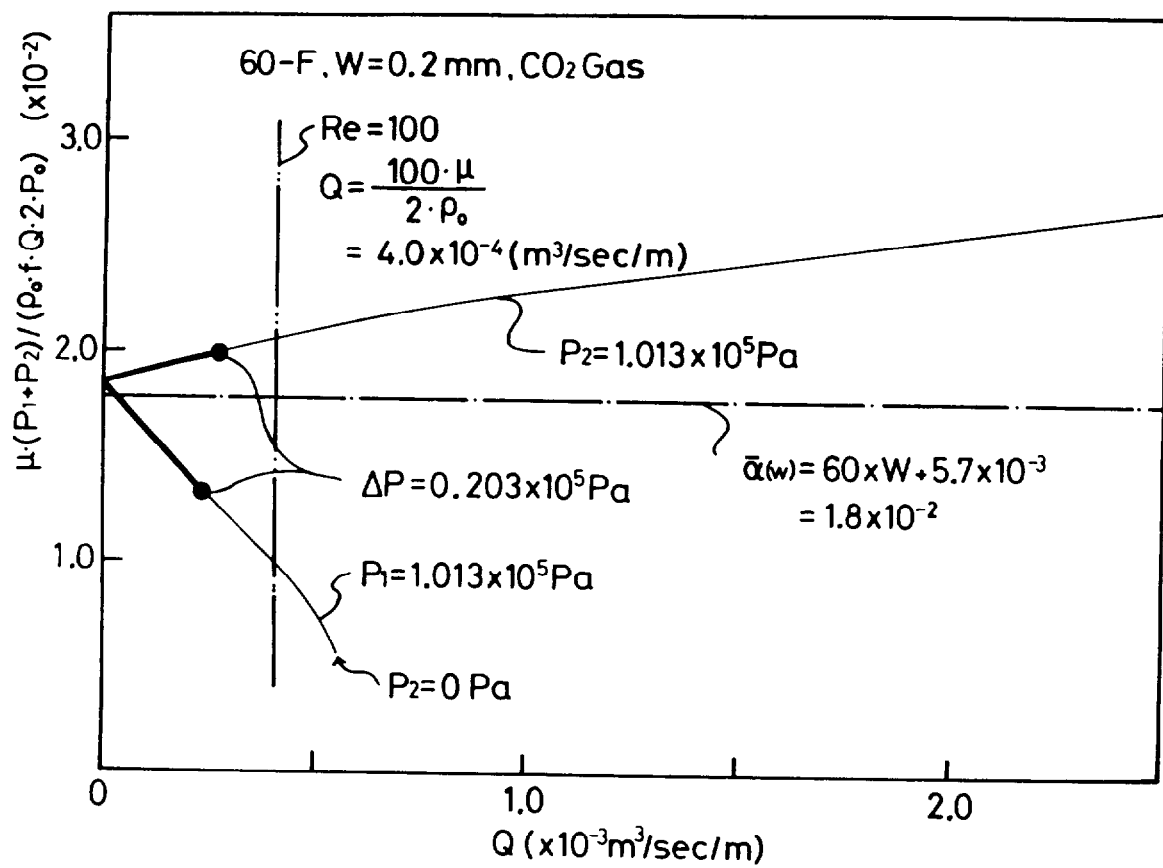


図-4.17 $[\mu \cdot (P_1 + P_2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0)] - [Q]$ 関係

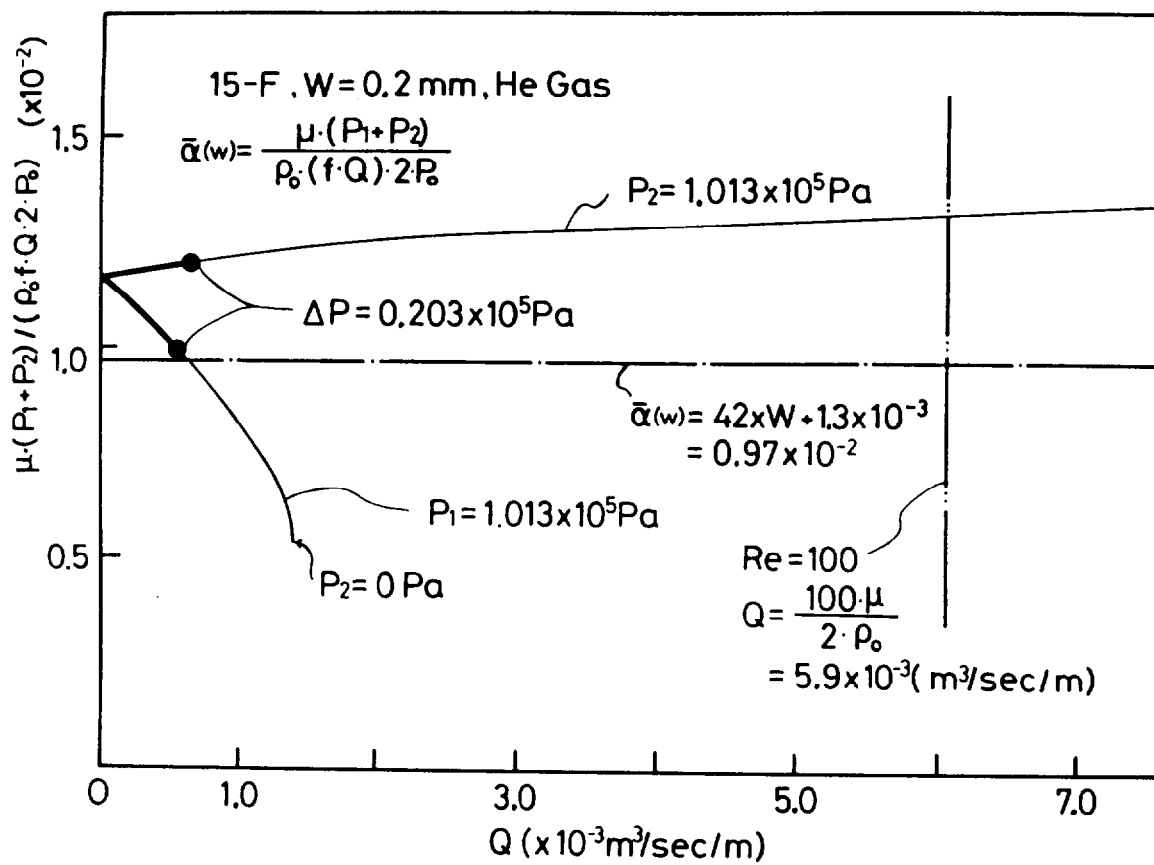


図-4.18 $[\mu \cdot (P_1 + P_2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2 P_0)] - [Q]$ 関係

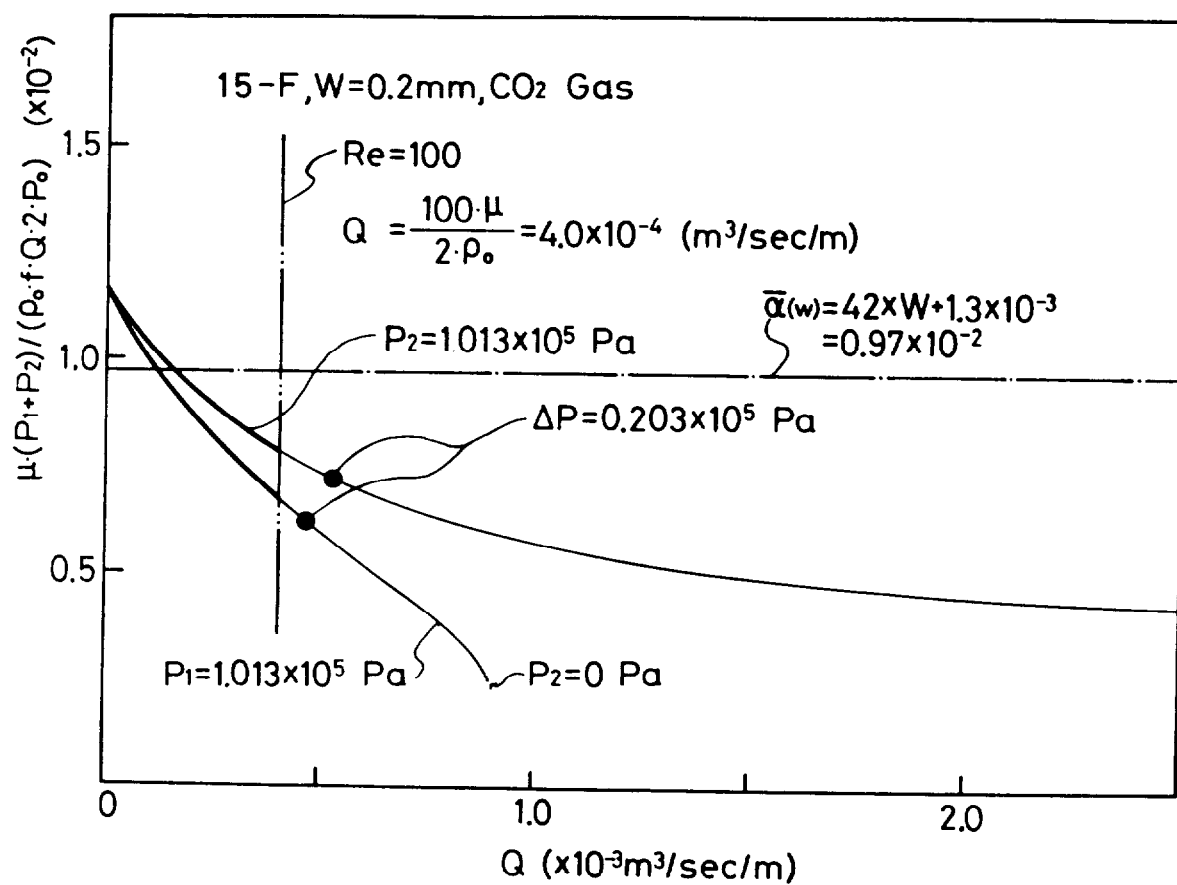


図- 4.19 $[\mu \cdot (P_1 + P_2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2 P_0)] - [Q]$ 関係

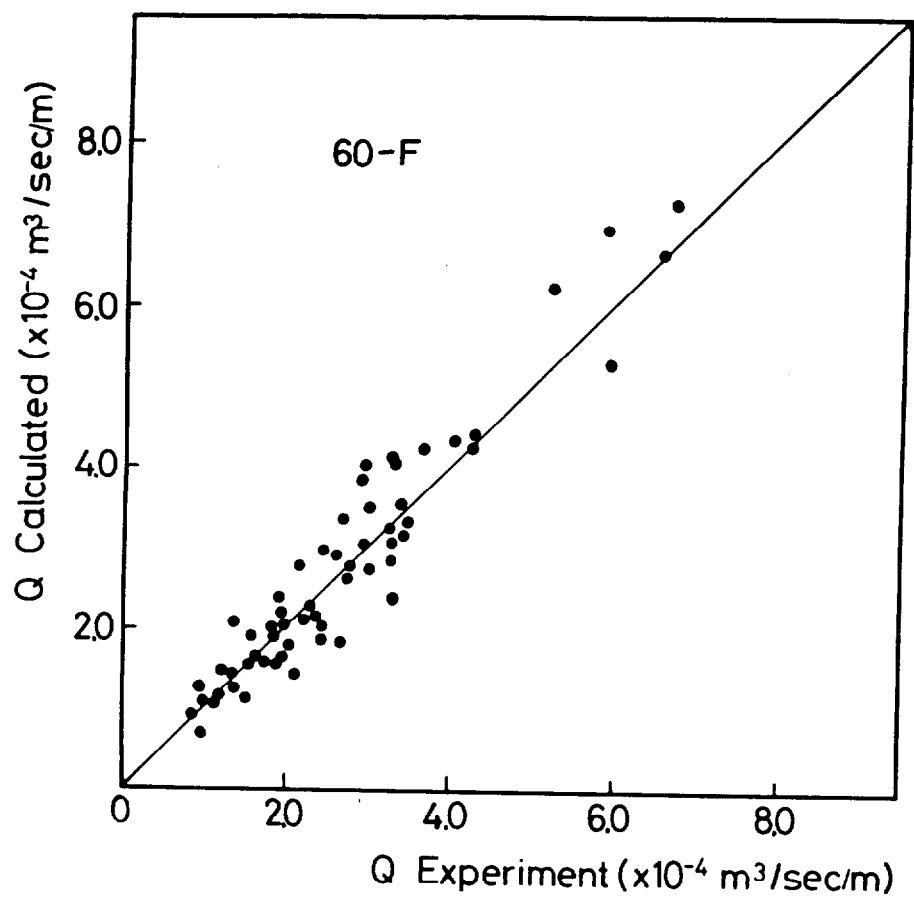
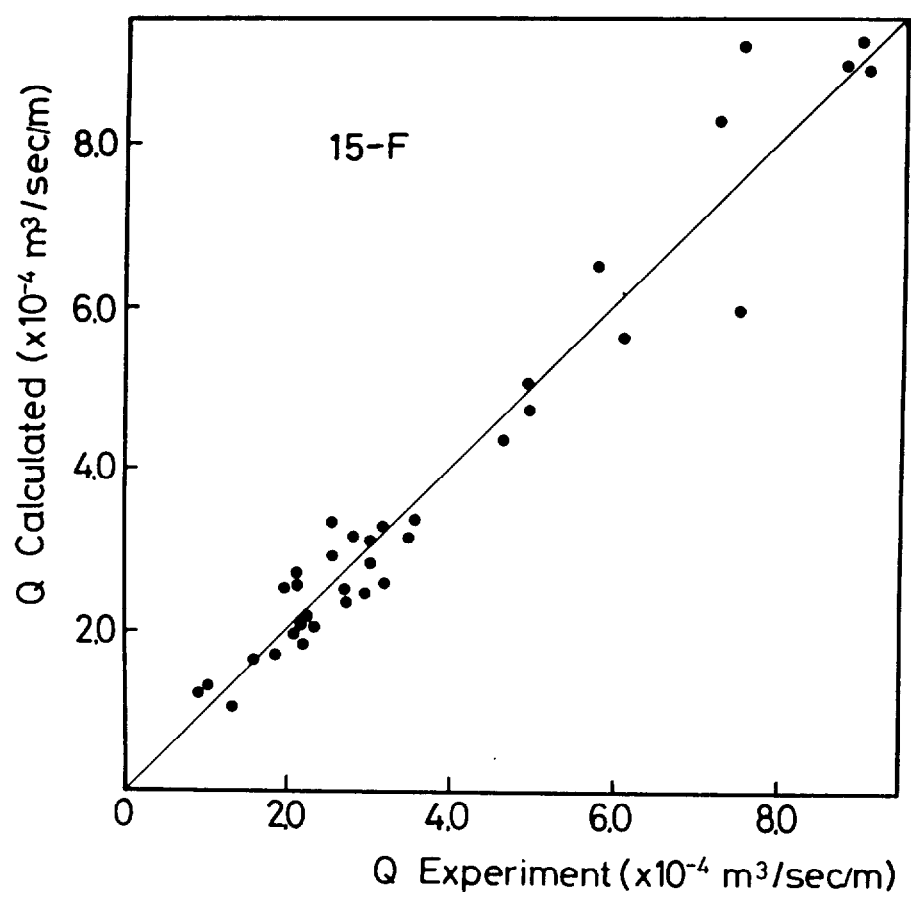


図 - 4.20 Q(計算値)-Q(実験値) 関係



図－ 4.21 Q(計算値)－Q(実験値) 関係

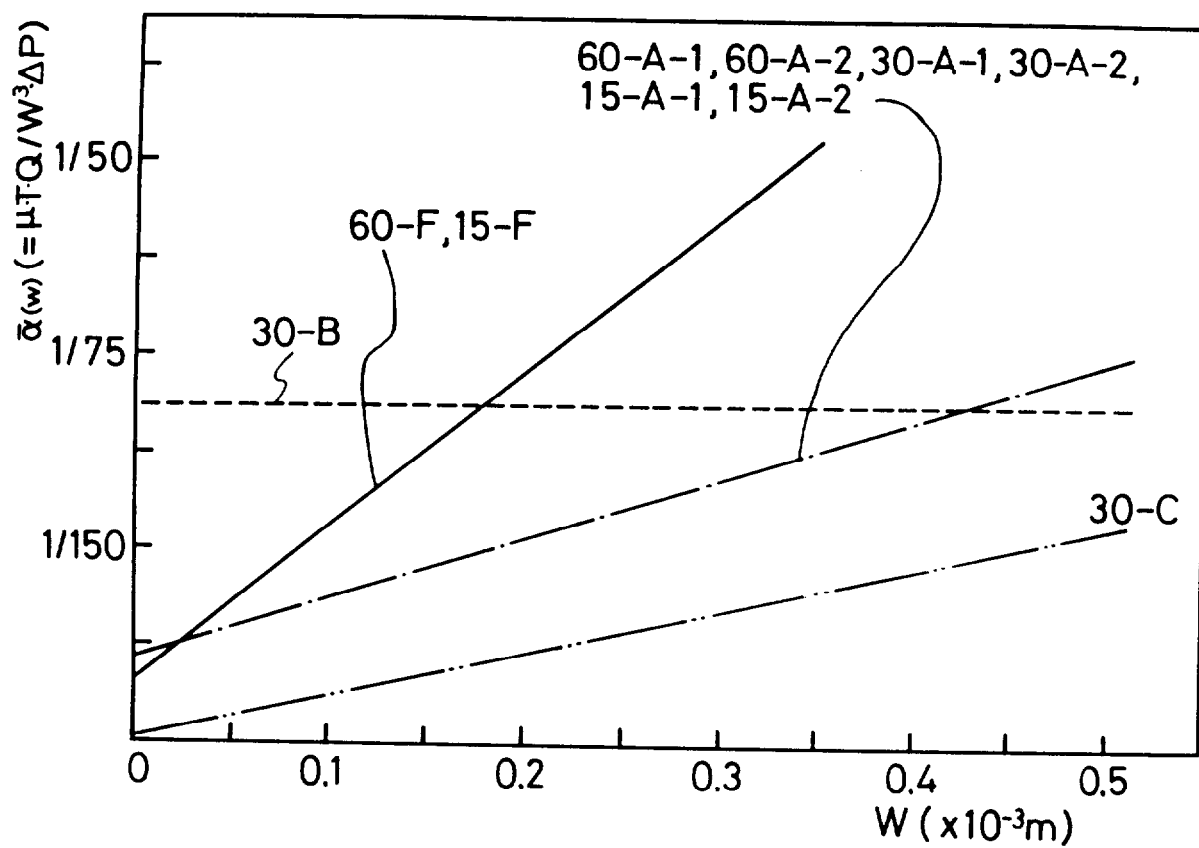


図- 4.22 $\bar{\alpha} - W$ 関係

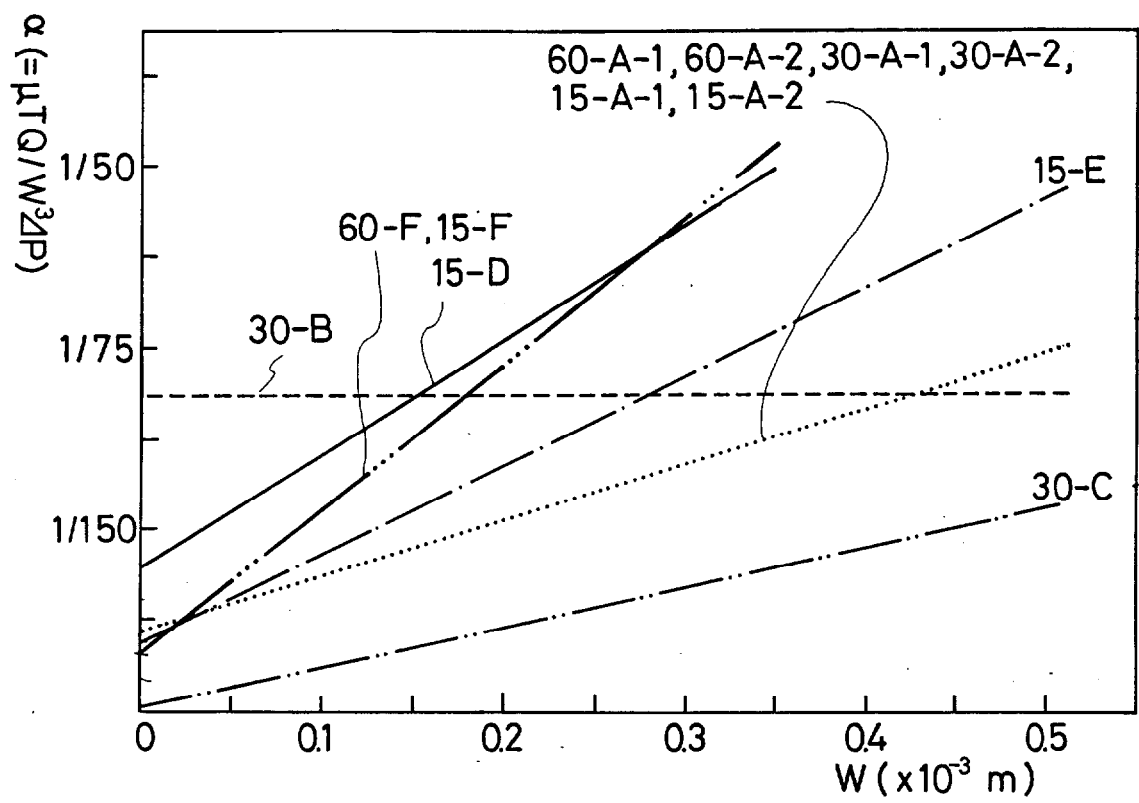


図-4.23 $\alpha - W$ 関係

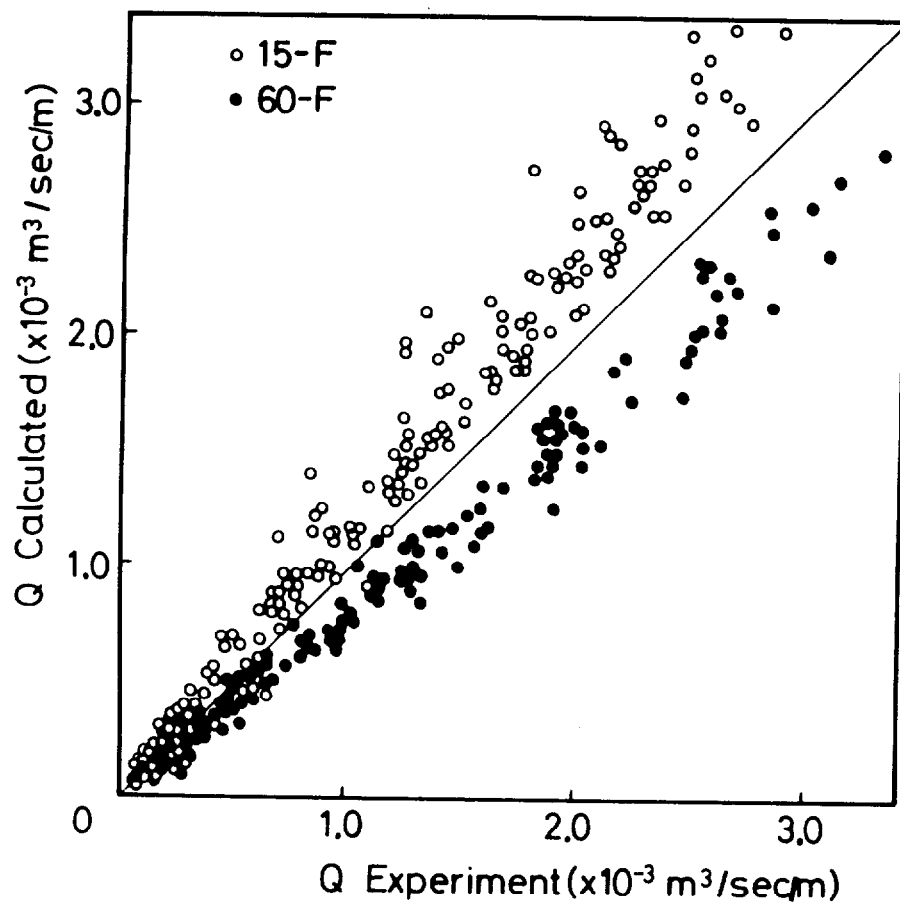


図- 4.24 Q (計算値)- Q (実験値) 関係

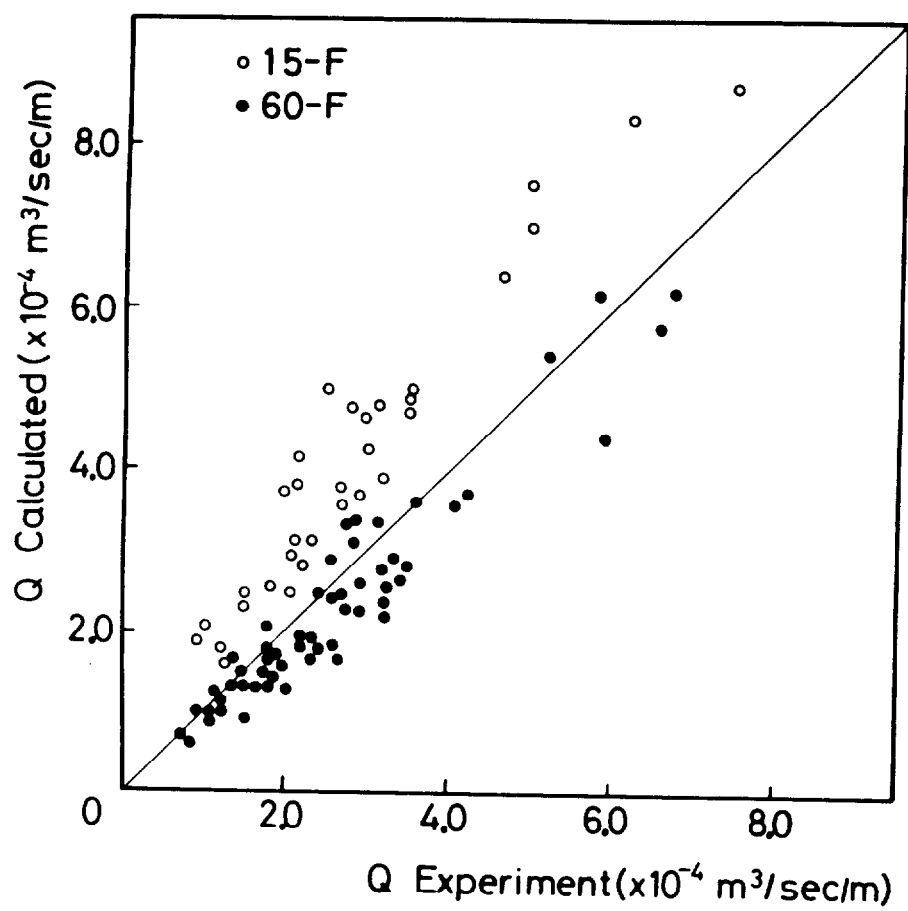
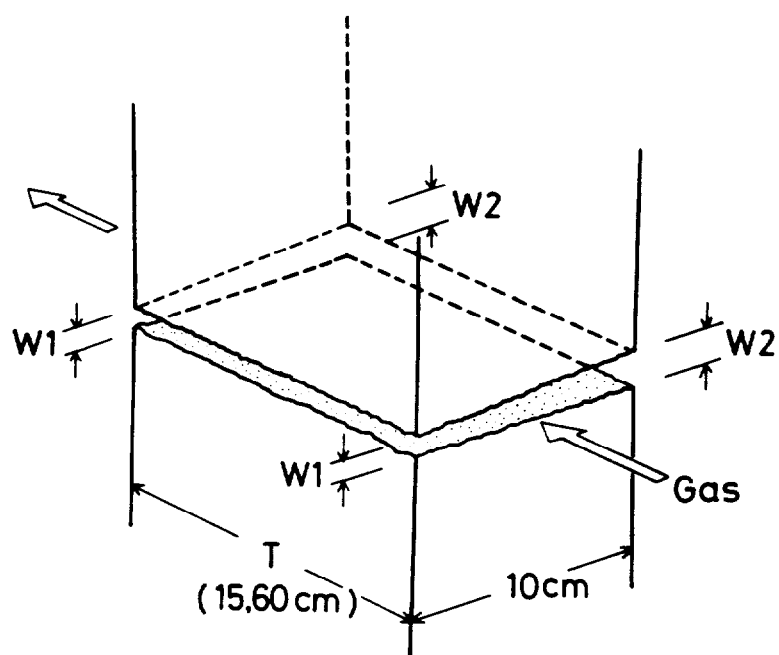


図- 4.25 Q (計算値)- Q (実験値) 関係

表－ 4.7 ひびわれ幅が一定でない場合の漏洩実験におけるのひびわれ幅

Case	Specimen	Txcm	$W1 \times 10^{-4} \text{m}$	$W2 \times 10^{-4} \text{m}$
1	15-F	15	2.75	3.40
2	15-F	15	3.95	4.60
3	60-F	60	3.75	4.25



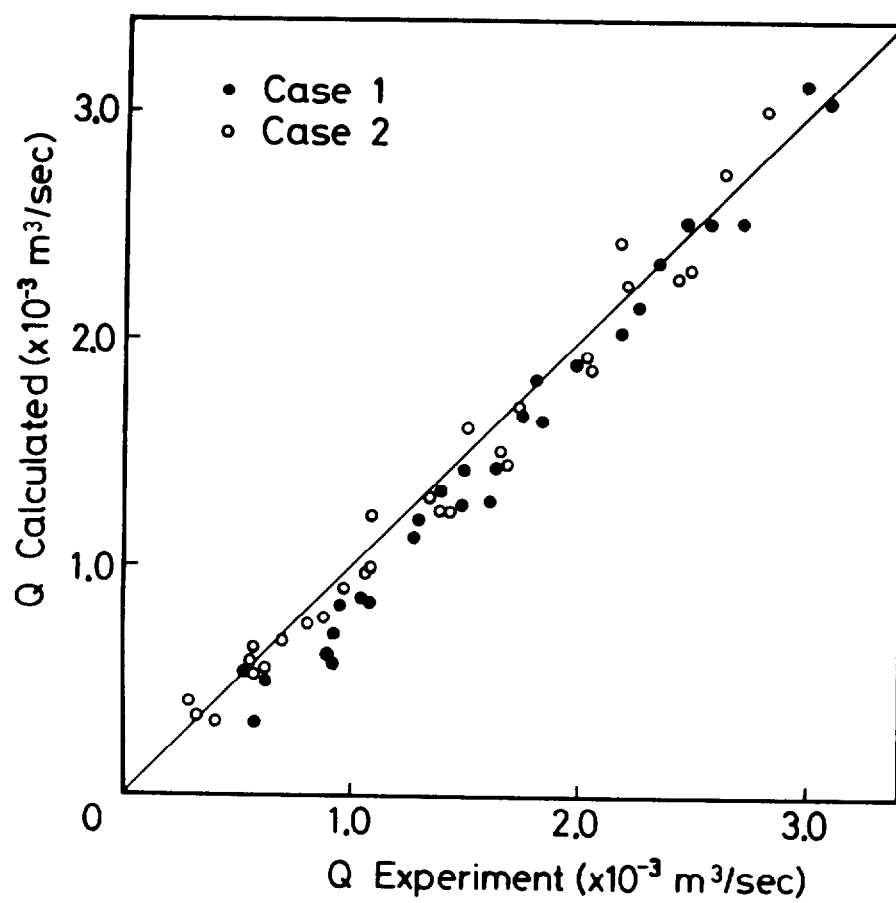
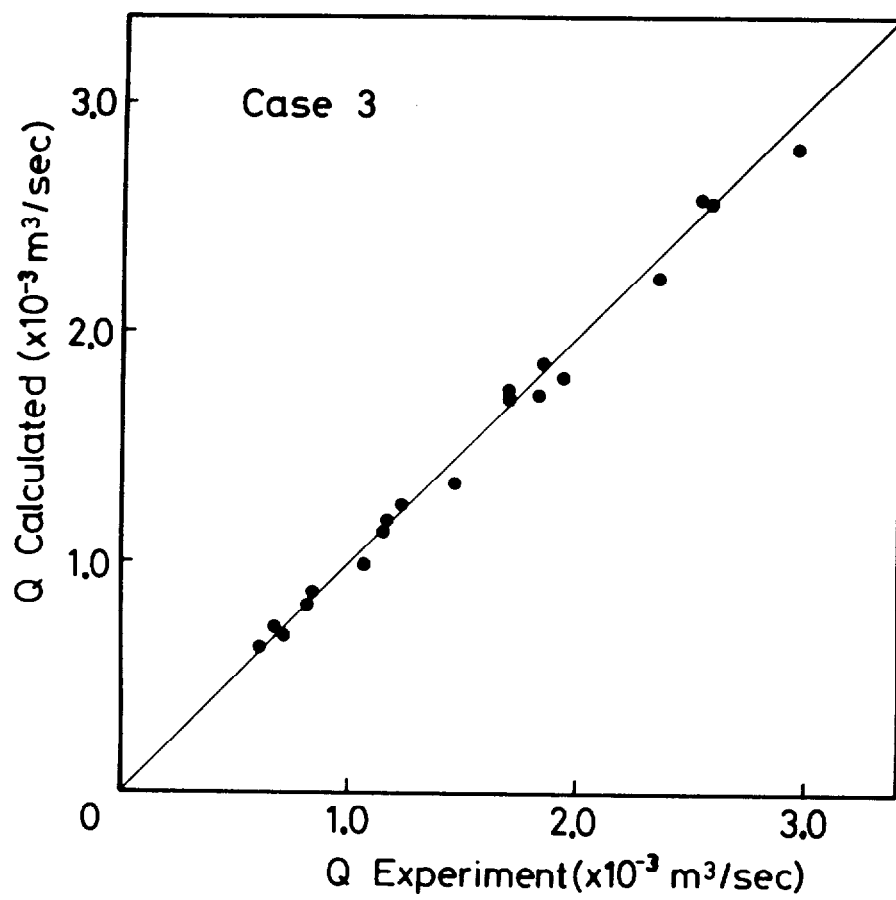
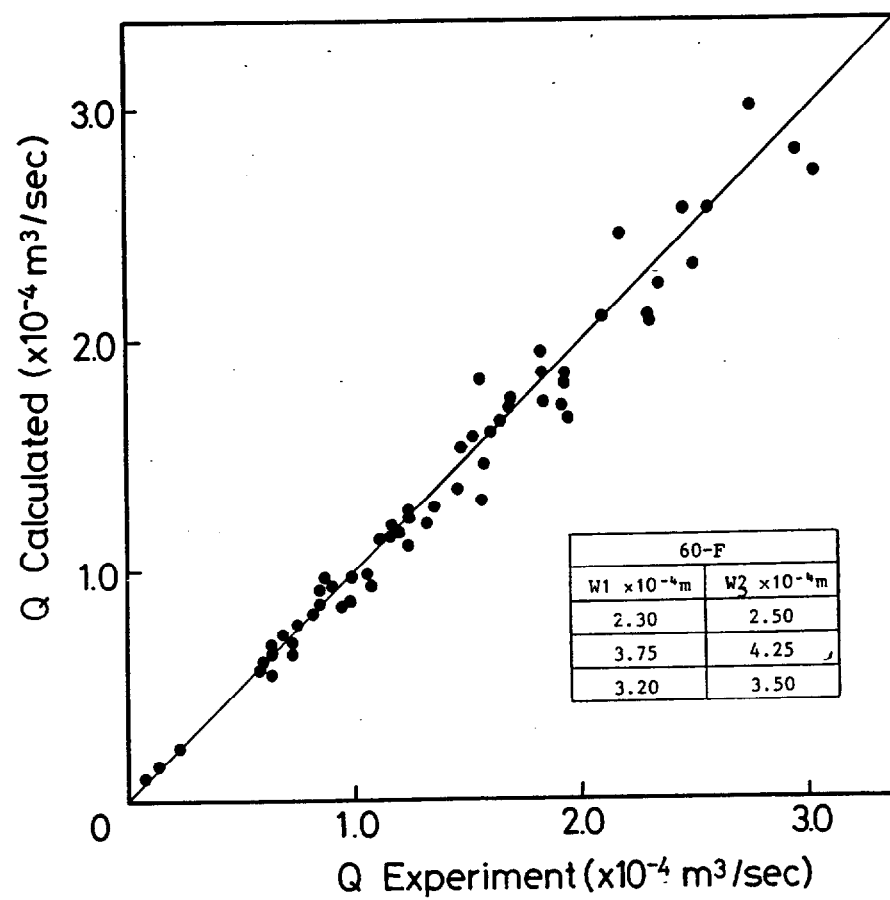


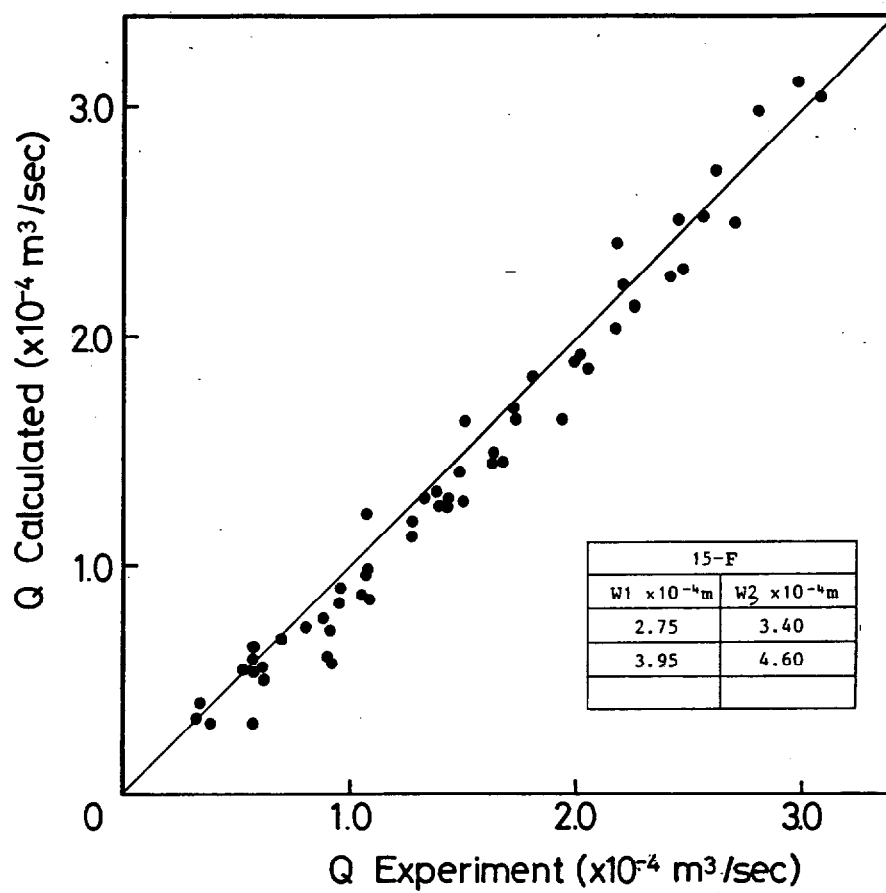
図- 4.26 Q (計算値)- Q (実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)



図－ 4.27 Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)



図－ 4.28 Q (計算値)－ Q (実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)



図－ 4.29 Q (計算値)– Q (実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)

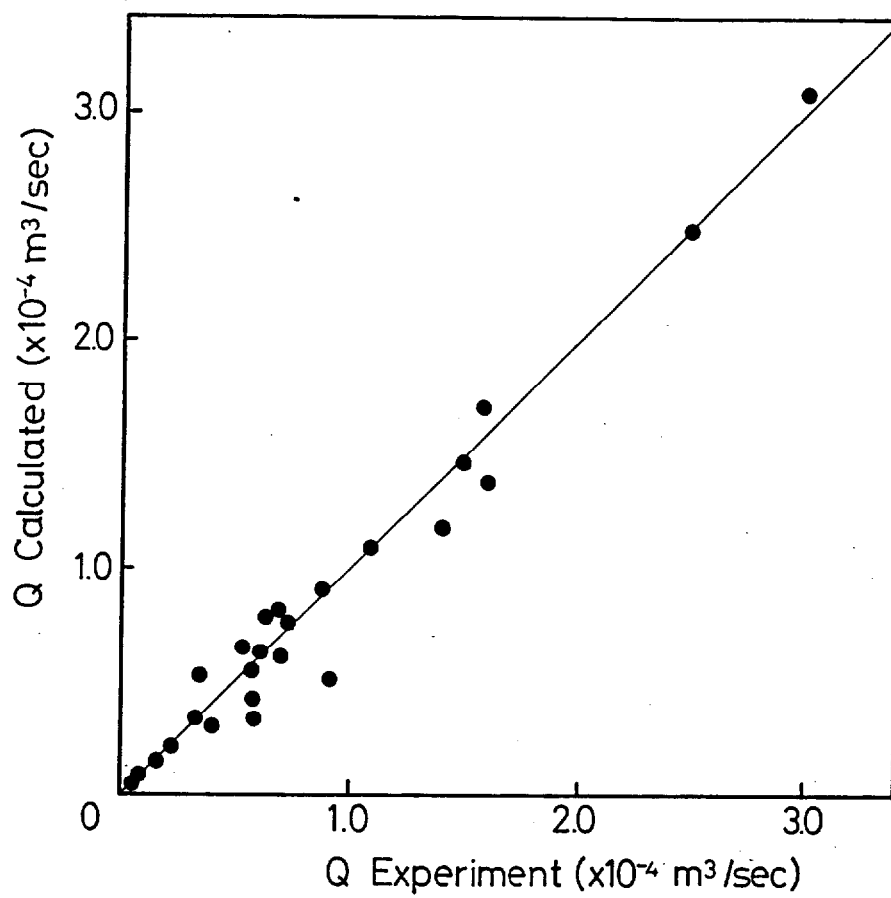


図- 4.30 Q (計算値)- Q (実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)

第5章 ひびわれを生じたコンクリート部材からの液化ガスの漏洩

- 5.1 はじめに
- 5.2 岡村、前川らの実験概要
- 5.3 コンクリートの熱伝導解析
 - 5.3.1 熱伝導解析について
 - 5.3.2 熱伝導解析モデル
 - 5.3.3 温度解析結果
- 5.4 漏洩量に関する実験値と予測値の比較
- 5.5 まとめ

5.1 はじめに

前章においてひび割れの生じたコンクリート壁からの気体の漏洩に関する各種ガスを用いた実験の結果を示し、対象とする気体が異なっても、ひび割れを極端に理想化した二平板間の一次元定常等温圧縮流れの理論を利用した実験式で漏洩量を精度良く定式化できることを示した。

一方、近年 海浜地区に建設されているコンクリート構造の液化ガス貯蔵施設においてはコンクリート部材に液化ガスを貯液する性能が期待されており、コンクリート部材に十分な極低温液体の貯液能力が確認できれば漏洩防止用に施されている金属製薄膜（メンブレン）を軽減できる可能性がある。このコンクリート部材の極低温液化ガスの貯液性能についての研究は岡村、前川らの実験が有るのみである。部材厚さ 25 cm 及び 50 cm のコンクリート試験体を用い、ノッチに入れた 1 本のひびわれからの漏洩実験及び解析を行なっている。試験結果から、「①部材厚 25 cm で貫通ひびわれ幅が 0.1 mm 以内であれば、通常の液圧に対して漏洩が生じる事はない。②流出側ひびわれの閉塞と部材厚を増すことで、より高い貯液性能が得られる。③断面内にひびわれの生じていない領域を残すことは、漏気を制限する上で有効な方法である。」と結論している。岡村、前川らの実験で述べられている液化ガスの貯液性能評価及び気体と液体の相変化を扱った解析手法は有効で実験データの蓄積としても非常に貴重であると言える。しかしながら、その漏洩量評価手法において実験で得られた温度分布を流体の温度と同一であるとしている点、コンクリート部材の温度測定が必要な点、液化ガスが気化する際にコンクリートひびわれ面から吸収すると考えられる潜熱などを考慮していない点など改善する部分もあると考えている。そこで、本章では比較的簡単なコンクリートの熱伝導解析を用いてひびわれ内の流体の相変化を推測し、さらに 筆者らが用いた圧縮流れを利用した実験式を適用してひびわれの生じたコンクリートからの液化ガス漏洩量を把握しようとするものである。なお、今回 新たな実験は行っていない。岡村、前川らの実験に示された実験結果を筆者らの提案する方法で整理したものである。

5.2 岡村、前川らの実験概要

岡村、前川らの実験では貫通ひびわれを有するコンクリート部材の貯液性能に関する実験をひびわれ幅・形状による 8 ケースに対して液化窒素 (LN_2) を用いて行っている。実験の詳細は参考文献に有るが今後の議論の為に表 1 に試験体のリストと漏出ガス量を示す。試験体 3 は上面側のみひびわれを発生させ、下面側はひびわれの生じていない状態としたものであり、ケース 4 は無筋コンクリートのひびわれ面にコンクリートを打継いだ状態のものである。1 - 2 の試験体についてはガスで 216 リットル漏出後、液体で漏出したものである。実験では同じ貯槽内圧力に対しては時間の経過に従い気体漏洩量が増加し 12 時間程度経つとほぼ一定量に収束していることが示されており、供試体温度分布の経時変化が定常となると漏洩量も一定となることが示されている。また、ほぼ同じひびわれ幅を持ちコンクリート厚さが異なる試験体結果から、流体に熱を供給するコンクリートひびわれ面積が大き

くなるに従い液体から気体への相変化が起こりやすくなり、漏洩抵抗が増すことを確認している。貯液限界を把握する為に行ったひびわれ断面内の一次元気液 2 相流モデルを用いたシミュレーションでは、気相と液相の平均速度が同じであると考え気相の圧縮性、既往の摩擦損失実験結果などを考慮した差分方程式を解いている。この際、流体の温度依存性物性値はコンクリート試験体の測定温度結果から算定しており、シミュレーションで得られた漏出ガス量は実験値を実用上十分な精度で表しているとしている。図-5.1, 2 に実験概要及び試験体形状の概要を示すが使用材料及び配筋量などについては漏洩量への影響が小さいと判断して表していない。

5.3 コンクリートの熱伝導解析

5.3.1 熱伝導解析について

熱伝導率が等方性で温度に対して一定の場合、図-5.3 に示す辺長 dx, dy, dz を持つ微小六面体における熱伝導方程式は次式となる。

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \cdots \cdots (5.1)$$

ここに、 T は温度、 λ は熱伝達率、 ρ は密度、 c は比熱、 t は時間、 Q は単位体積当りに供給される熱量を示す。

境界条件として図-5.4 に示す温度規定、熱流束規定、熱伝達を考える。

熱伝達においては熱量 q は T_c を外部温度として (5.2) 式のように表せる。

$$q = \lambda (T - T_c) \cdots \cdots (5.2)$$

要素内の温度分布 T を要素の節点温度 ϕ と形状関数 N を用いて次式のように表す。

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \cdot \{\phi(t)\} \cdots \cdots (5.3)$$

(5.1) 式を (5.2) 式などの境界条件のもとで (5.3) 式を用いて展開すると、解析対象全体有限要素式は次式のように表せる。

$$[K]\{\Phi\} + [C]\left\{\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right\} = [F] \cdots \cdots (5.4)$$

ここで、 $[K]$ は熱伝導マトリクス、 $\{\Phi\}$ は全体の節点温度ベクトル、 $[C]$ は熱容量マトリクス、 $[F]$ は熱流束マトリクスである。

更に、定常問題においては左辺第 2 項がなくなり (5.5) 式となる。

$$[K]\{\Phi\} = [F] \cdots \cdots (5.5)$$

5.3.2 熱伝導解析モデル

ひびわれ内での液体から気体の相変化を伴う流体の性質について示した模式図が図-5.5 である。ひびわれに流入した液化ガスはコンクリートひびわれ面から熱を吸収し、徐々に温度を上げその圧力時点での沸点温度に近づく。液体の状態を保持している状況では、圧力の変化は小さく、圧縮性について無視でき、したがって平均の流体速度もほぼ一定であると考えられる。いったん流体の温度が沸騰温度に到達すると、気化現象が開始し、流体は液体と気体の2相混相流となる。液体と気体が共存している状況では供給されている熱量は潜熱に変換され、流体温度には大きな変化はない。気相が生じてくるに従い圧力効果が始まり、それに伴って定常流れにおいては同じマス流量を保持する為に速度は徐々に増加する。この相変化現象が終了して流体がすべて気体に変化すると、流出側に至るまで、圧力低下を起こし、気体平均速度は上昇し続ける。気体へのコンクリートひびわれ面から供給される熱流束は液体への熱流束に比較して非常に小さいと考えられる為、流出側まで流体温度に大きな変化は生じないものと考えられる。図-5.6に仮定した実験での温度状況を示す。流入側の液相温度が貯液槽と同じ-200℃、液体部分で沸点に上昇し(約-190℃)その後の流出側までの気体部分では大きな温度変化はしないことを仮定した。更に、ひびわれから流出した気体の温度は上昇し流量計付近では参考文献³⁾より摂氏0℃とし、試験体周辺の室内温度については20℃と考えた。図-5.7にコンクリートの熱伝導解析モデルの概要を示す。図-5.6で示した試験体全体の半分を2次元でモデル化し、定常熱伝導解析を行った。図-5.7において、気化の起こる部分はある長さを持っているはずではあるが、ポイントとして扱った。これは流量の評価には気体部分の長さが重要であり、気液混合状態の長さもいくらか影響を及ぼすと考えられる。この影響を考慮する方法として気液混合部分のある中間点を見かけ上の液相と気相分岐点(気化ポイント)と評価したためである。従って、流入側から気化ポイントまでは液体、気化ポイントから流出側は気体に変化していると考えた。また、コンクリートと流体の熱伝達は熱伝達率が大きく異なることから液体部分でその大部分が行われると考え、液体部分の温度は十分時間の経過した平衡状態ではコンクリート表面温度と同一とした。したがって、蒸発ポイントは液体の温度(コンクリート表面の温度と同じ)がN₂ガスの沸騰温度となった地点となる。液体から気体へ変化する蒸発熱は実験結果の流量から計算しひびわれ内の液体部分に接するコンクリートから供給されるとし、試験体の周囲の境界条件は熱伝達率で設定する。熱伝達要素の温度参照点はコンクリート面から1メッシュ離れた所で設定し、液体窒素は-200℃、ひびわれ内の温度は-190℃とした。ここで、ひびわれ内の液体部分は本来は温度の連続性から言って-200℃から-190℃に変化するはずであるが、流体が吸収する潜熱を流入側から気化ポイントまで均一に分布させているので-190℃で一定と考えた。また、試験装置周辺の気温は常温の20℃と考え、ひびわれ内での参照点はひびわれ幅(流入側と流出側の幅の平均)の半分の距離を持った点とした。

一方、気化ポイントの設定は沸点に対して仮定した気化ポイントが適当かどうかで判断し収束計算を行った。

図-5.8 は収束過程のフローを示したものである。各試験体に対応したコンクリート厚さ、形状をモデル化し、温度境界条件や熱伝達境界条件などの設定を行う。更に実験で測定された流量結果から潜熱を計算し、仮定した気化ポイントから流入側の範囲に均等に分割する。この熱伝導解析を行い、気化ポイントの温度 T_p とその圧力での沸点温度 T_v との比較を行いほぼ同じと見なされれば仮定した気化ポイントは正しいと考え、 T_p が T_v より低ければ、液体の範囲を大きくする為に気化ポイントを流出側にずらし、逆であれば液体の範囲を縮小して収束させる。

解析上で設定した諸定数を表-5.2 に示す。なお、このコンクリート試験体の有限要素法による温度解析は 5.3.1 で示した方法を採用している解析コード MSC/NASTRAN 定常熱伝導解析を用いて行った。

5.3.3 温度解析結果

図-5.9～図-5.14 に定常状態の試験体の温度分布を示し、温度解析から求められた試験体厚さ内での液体部分の長さを表3に示す。点線で参考文献の温度コンターも各図に示す。試験体外周側は測定治具、試験体のひびわれ長さ方向影響を受けることが予想され、温度分布はずれている。しかしながら、ひびわれ面に沿った気化するポイントに最も近い -150°C 等温線は試験体 2-2 を除いてほぼ近いと考えられる。試験体 2-2 では圧力差による流量および温度分布の変化が大きいことが文献に示されており、参考で図中に記した圧力差 1.0kgf/cm^2 の -150°C 線は圧力差 1.5kgf/cm^2 の -150°C とは大きく異なっている。試験体 2-2 で温度分布の相違が大きいことは温度分布が流量に非常に敏感であるためと考えられる。また、1-1 試験体結果より参考文献に指摘されている通り、圧力差が大きくなるに従い液体部分の領域が増加し、流量が増える事が分かる。1-2 試験体は液体で流出したケースであるが、温度解析の結果はやはり試験体厚さ全長に渡り液体が存在する結果となり、実験結果に符合する。また、厚さが異なりひびわれ幅がほぼ同じ試験体である 1-2 (25cm) と 2-1 (50cm) の結果より試験体厚さが大きくなると液体部分の長さも小さくなり、流出量ははるかに小さくなる。漏洩性能向上には部材厚さを大きくする事が大変有効である事がわかる。

5.4 漏洩量に関する実験値と予測値の比較

漏洩量の把握は図-5.5 における液体部分の長さを評価し、気体部分の長さを特定した上で一次元圧縮性流体を利用した実験式を用いて可能になると考えた。ひびわれ内で液相部分では圧力降下はなく気相に変化したポイントから流出側までの距離が見かけ上の壁厚さと考え気体漏洩量実験式を液化ガス漏洩量に対して適用した。一次元定常等温流れで摩擦係数 f を示す式を再掲すると以下の式となる。

$$f \cdot \frac{T}{W} = \frac{B^2 \cdot W^2 \cdot (P_1^2 - P_2^2)}{2 \cdot G^2 \cdot R \cdot T_{em}} \dots\dots\dots (5.6)$$

ここに、 f は摩擦係数、 T は壁厚、 W はひびわれ幅、 B は幅、 P_1 、 P_2 は流入側および流出側の絶対圧力、 G は単位時間に断面を通過する気体質量（マス流量）、 R は気体定数、 T_{em} は断面内の気体の平均温度である。（図－5.15）

(5－6)式におけるマス流量 G を圧力 P_0 、温度 T_0 の下での単位ひびわれ長さ、単位時間当りの体積流量 Q で表せば、

$$f \cdot \frac{T}{W} = \frac{W^2 \cdot (P_1^2 - P_2^2) \cdot T_0}{2 \cdot \rho_0 \cdot P_0 \cdot Q^2 \cdot T_{em}} \dots\dots\dots (5.7)$$

となる。ここに ρ_0 は圧力 P_0 、温度 T_0 における気体の密度である。

(5－7)式に試験体毎の結果を代入し摩擦係数 f を求めるが、(5－7)式において、 T_{em} は断面内の平均温度（約－190℃）と考え、 T_0 は流量計地点の温度を採用して 0℃を用いた。壁厚 T は表 5.3 の温度解析結果より部材厚さから液体部分の長さを差引いた気体部分の長さを用いている。

図－5.16～19 に摩擦係数 f と流量 Q の関係を複数の圧力差で漏洩実験を行った試験体 1－1、1－4、2－1、及び 2－2 について示す。図－5.17 においてバラツキはあるものの液化ガスについても f と Q には試験体 1－4 を除いて逆比例の傾向が認められる。試験体 1－4 では気圧差 0.5 気圧と 1.0 気圧のデータにおいて単純な逆比例以外の傾向を示しているものの、流量の増加に対して摩擦係数が減少するという性質については他の試験体と同様である。図－5.20～23 に f と流量 Q の積である $f \cdot Q$ と Q の関係を示す。図中の実線は一回帰計算により求めた直線を表している。やはり、試験体 1－4 で近似した直線から 15% 程度実験値が離れている。この影響は後で流量の計算値と実験値の対応を考察する時に述べる。試験体 1－1、1－4、2－1、及び 2－2 の $f \cdot Q$ と Q の関係から液化ガスの漏洩試験結果についても概ね $f \cdot Q$ は Q の一次関数になっており、次式が成立すると考えられる。

$$f = \frac{a(W)}{Q} + b(W) \dots\dots\dots (5.8)$$

ここに、 $a(W)$ 、 $b(W)$ は $f \cdot Q$ と Q を直線回帰した時の切片および傾きをそれぞれ表している。測定点のひびわれ幅、圧力差などが非常に限定されているものの、いずれも前報での知見が適用できる事がわかる。

図－5.24 と図－5.25 は参考として今回得られた(8)式における $a(W)$ と $b(W)$ の値を筆者らの行った実験で得られた最大と最小の結果の上にプロットしたものである。試験体 2－2 を除いて、全体的には実験範囲の相違、試験体ごとのひびわれ凹凸面のバラツキ、ひびわれ幅の試験体厚さ方向の不均一などを考慮すると筆者らの行った実験の結果とオーダー的には大きくかけ離れたものとはなっていない。試験体 2－2 では $a(W)$ が大き

く、 $b(W)$ の値が極端に小さくなっている。これは先程の温度分布の相違でも述べたように圧力差 1.5 kgf/cm^2 のケースの温度解析から求められる気体部分の長さが現在より小さく評価されると、図-5.23 の $f \cdot Q$ の値が大きくなり $a(W)$ が減少し、 $b(W)$ が増加する方向に点が移動することになる。つまり、ひびわれ幅の大きい 2-2 試験体の温度分布が流量に敏感であるため実際の気体部分の長さが大きく評価されているためと考えられる。図-5.26 に流量の実験値と計算値の対応関係を示す。計算値は各試験体毎に(5.8)式の摩擦係数を求め(5.7)式に代入して算定した。実験で得られた摩擦係数を使っているので計算値が実験値に近いのは当然であるが、試験体 1-4 の図-5.21 程度実験値がばらついていても比較的精度良く計算値が求められる。

5.5 まとめ

本章ではひびわれの生じたコンクリート部材からの液化ガス漏洩の定量化手法を提案し、実験結果を精度よく整理できることを示した。液化ガスがひびわれ内で気化することなく外部に多量に漏出する危機的状況も本手法によれば比較的簡易に予測することができ、ひびわれの生じたコンクリート部材の液化ガス貯液性能についての限界状態を把握する上で極めて有効な手法であると言える。

表－ 5.1 前川らの実験の試験体リスト

試験体名	部材厚 さ(cm)	初期ひびわれ幅(mm)		漏洩量(リットル/分)		
		流入側	流出側	圧力差 (kgf/cm ²)		
				0.5	1.0	1.5
1-1	25	0.20	0.00	10	23	36
1-2	25	0.20	0.11	-	216	-
1-3	25	0.09	0.09	-	10	-
1-4	25	0.11	0.01	5	8	15
2-1	50	0.22	0.11	5	11	18
2-2	50	0.23	0.23	45	118	192
3	25	0.21	圧縮ゾー ン(10 cm)	-	0	0
4	25	0.00	0.00	-	0.3	0.4

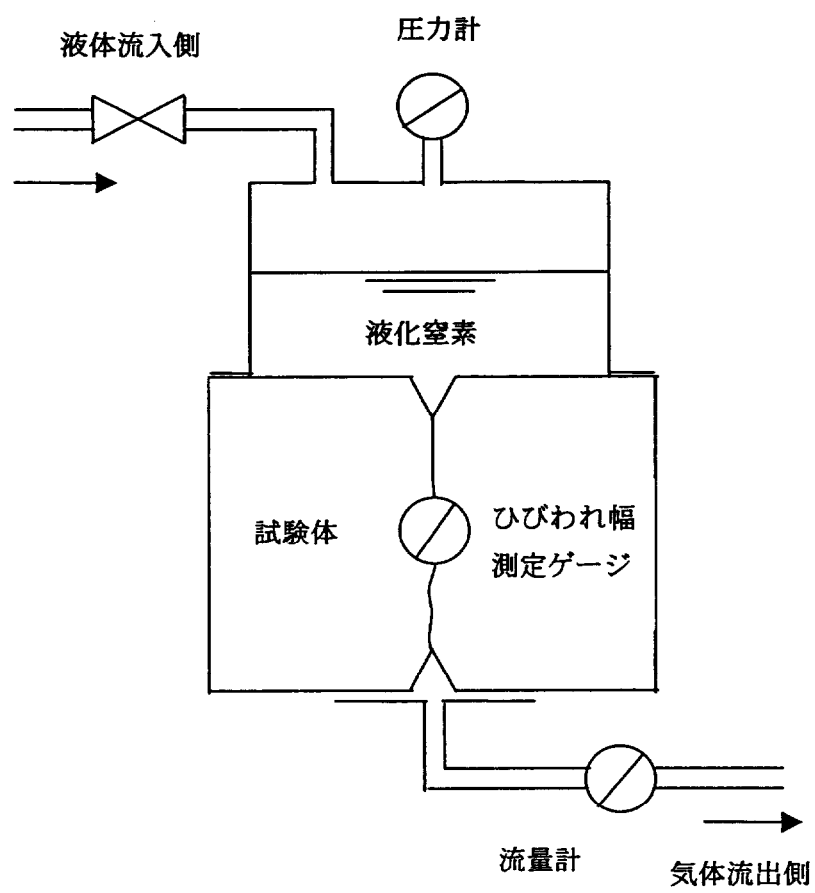
表－ 5.2 温度解析で用いた諸定数

コンクリートの 熱伝導係数	2.33 (J/m/sec) (参考文献)
液化ガスとコンクリートの 熱伝達係数	10^3 (J/m ² /sec) (参考文献)
ガスとコンクリートの 熱伝達係数	10^1 (J/m ² /sec) (参考文献)
圧力を考慮した N ₂ ガスの 沸騰温度	－190 (℃) (参考文献)
N ₂ ガスの蒸発熱	5.58 (J/mol) (参考文献)

表－ 5.3 温度解析より得られた液体部分の長さ

試験体名	部材厚さ (cm)	ひびわれ 幅(mm)	液体部分の長さ(cm)		
			($P_1 - P_2 =$) 0.5 (kgf/cm ²)	($P_1 - P_2 =$) 1.0 (kgf/cm ²)	($P_1 - P_2 =$) 1.5 (kgf/cm ²)
1-1	25	0.100	0.5	2.5	3.5
1-2	25	0.155	-	25.0	-
1-3	25	0.090	-	2.5	-
1-4	25	0.060	0.5	1.0	2.5
2-1	50	0.165	0.0	0.5	1.5
2-2	50	0.230	2.5	4.5	7.5

(P_1 流入側の絶対圧力、 P_2 流入側の絶対圧力)



図－ 5.1 前川らの実験

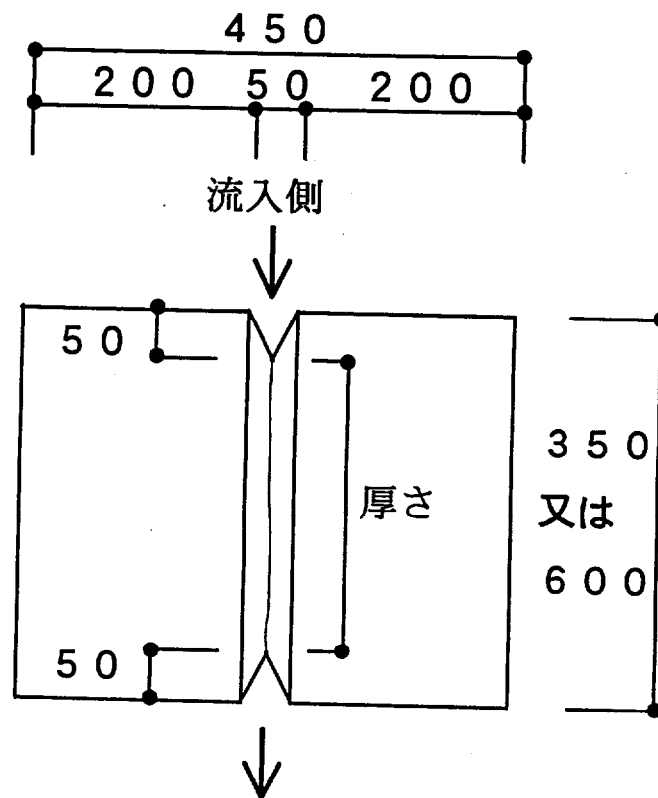


図 - 5.2 試験体形状 (単位 mm)

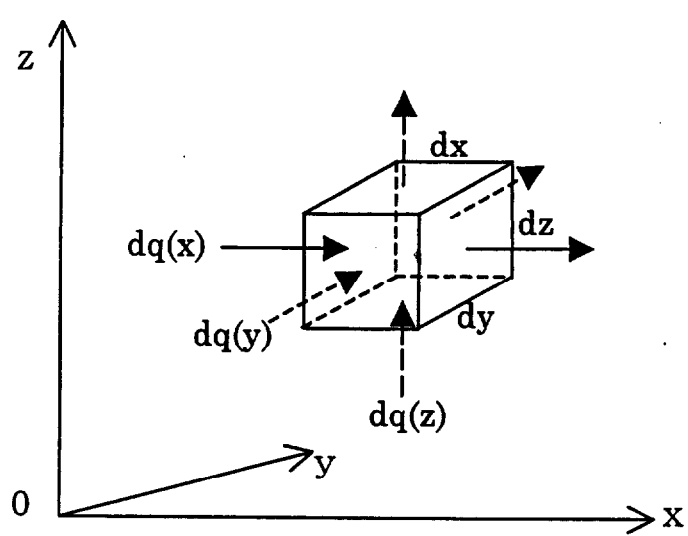


图- 5.3 微小直六面体

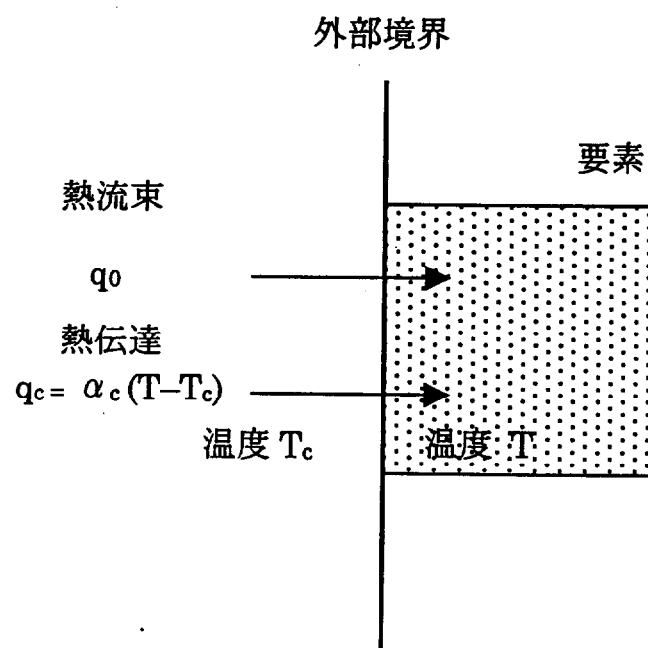
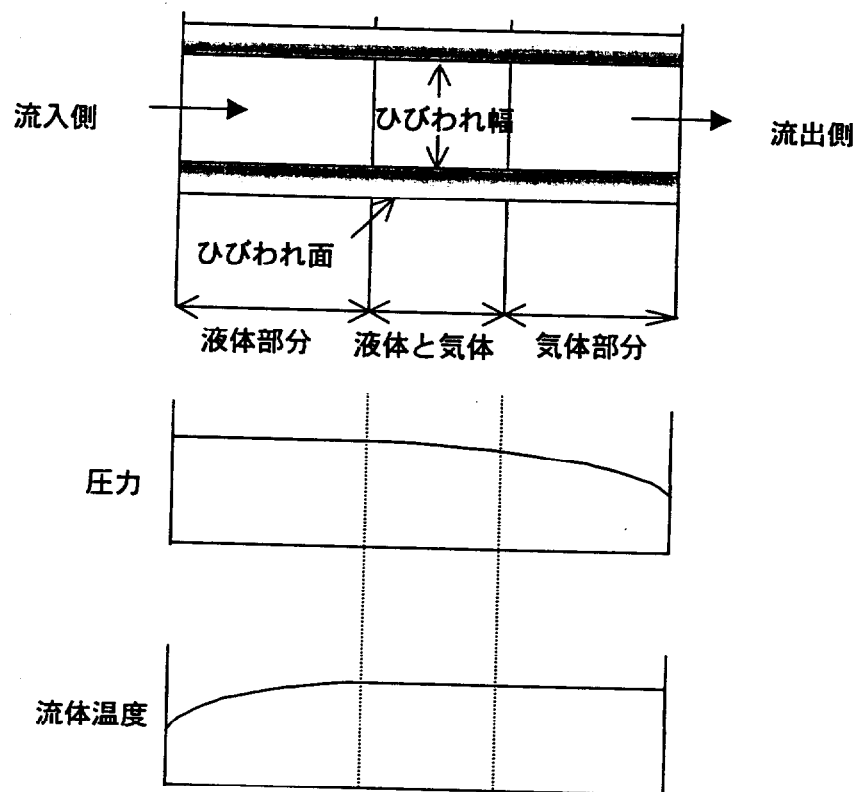
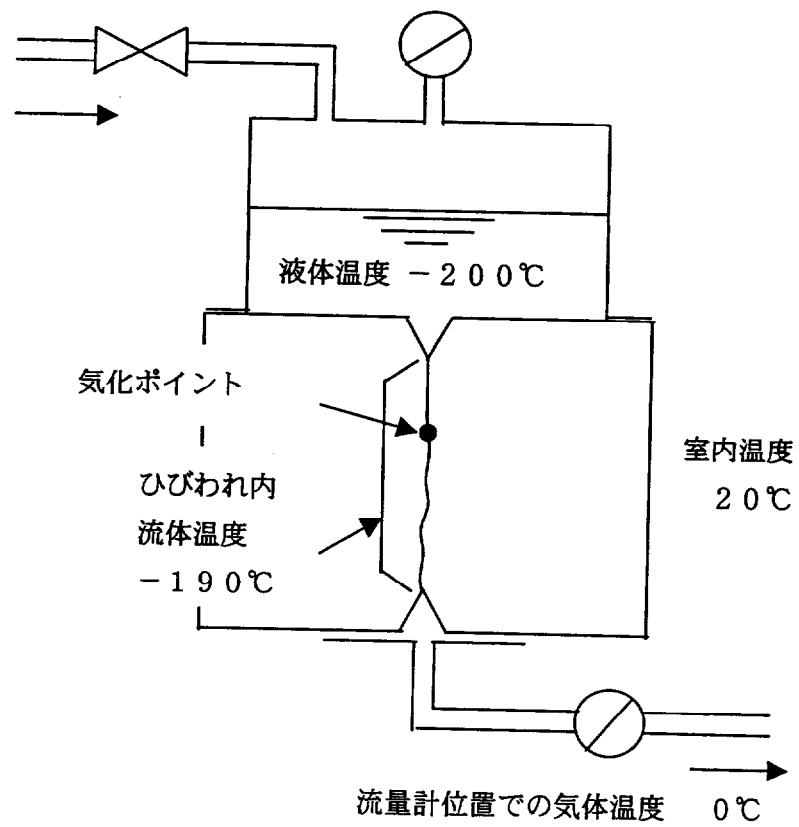


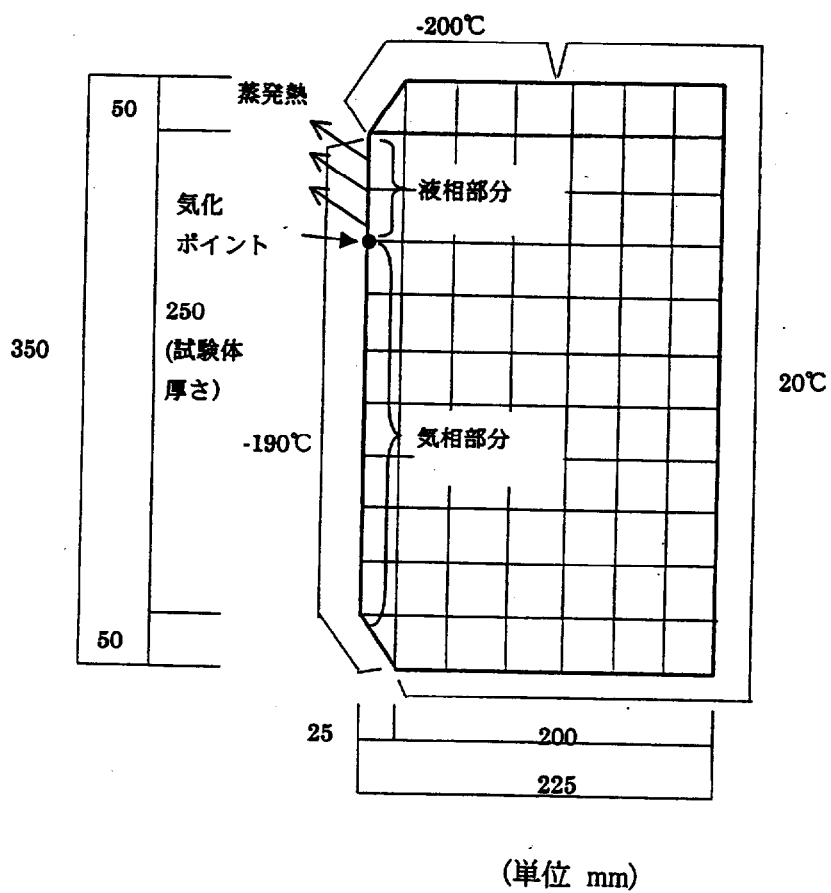
図 - 5.4 境界条件



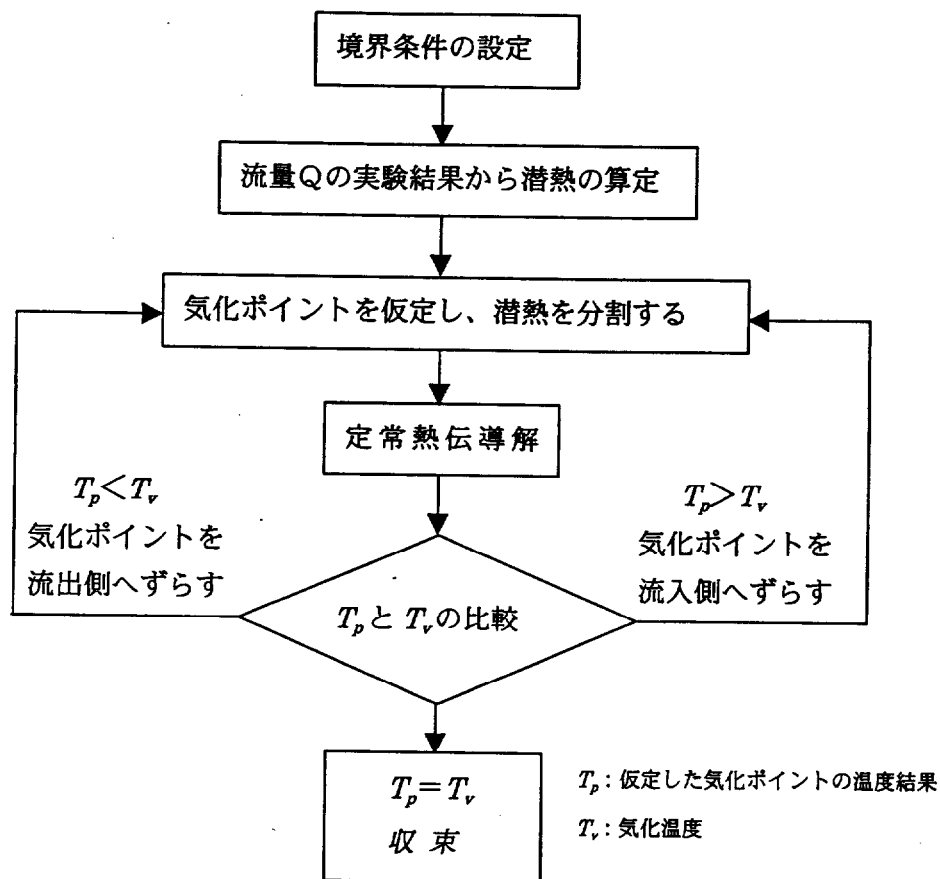
図－ 5.5 ひびわれ内での気化現象の模式図



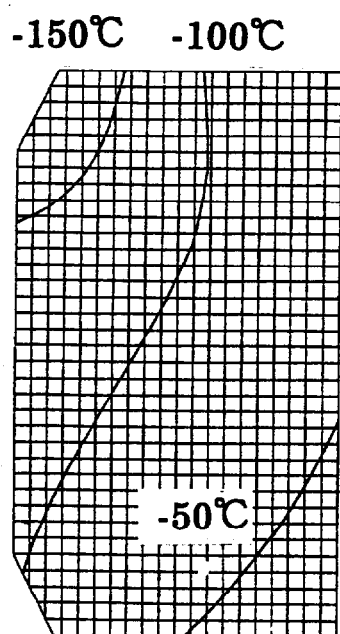
図－5.6 温度の境界条件



図－ 5.7 厚さ25cmコンクリート温度解析モデル
(試験体周囲の温度は熱伝達要素の参照する点における温度)



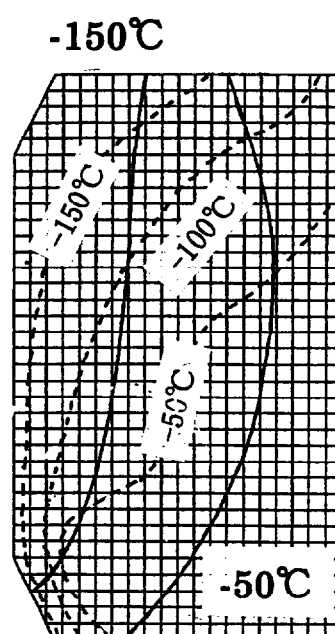
図－ 5.8 温度収束過程



(1-1, 压力差 0.5 kgf/cm²)

W = 0.100 mm

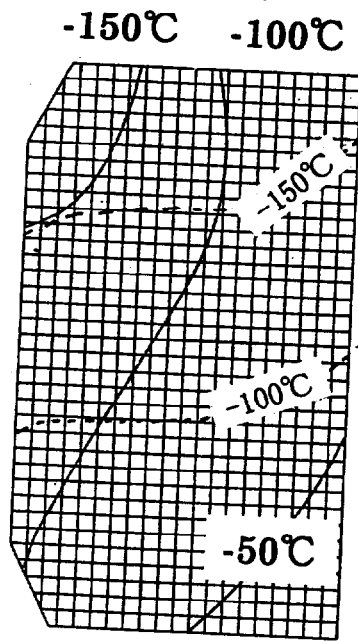
图— 5.9 温度分布



(1-2, 压力差 1.0 kgf/cm²)

W = 0.155 mm

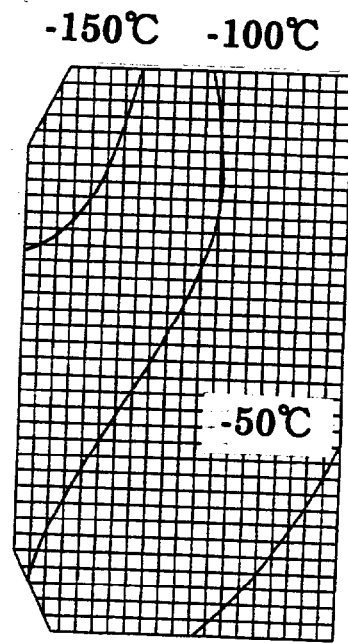
图— 5.10 温度分布



(1-3, 压力差 1.0 kgf/cm^2)

$W = 0.090 \text{ mm}$

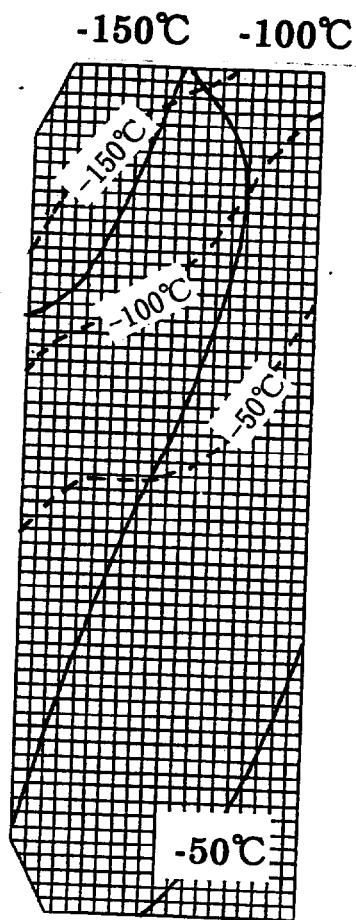
图-5.11 温度分布



(1-4, 压力差 1.5 kgf/cm^2)

$W = 0.060 \text{ mm}$

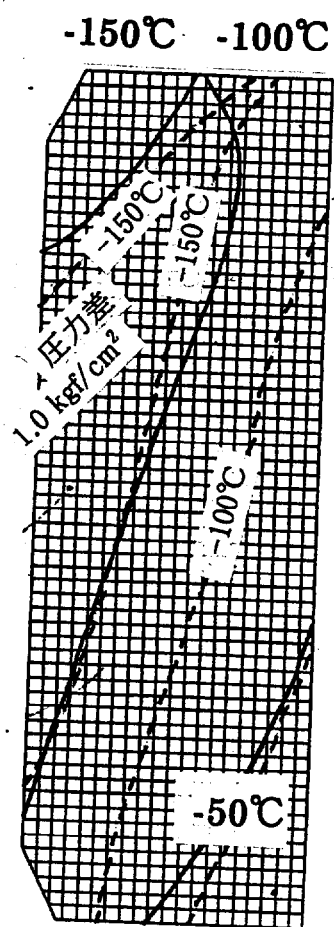
图-5.12 温度分布



(2-1, 压力差 1.5 kgf/cm^2)

$W = 0.165 \text{ mm}$

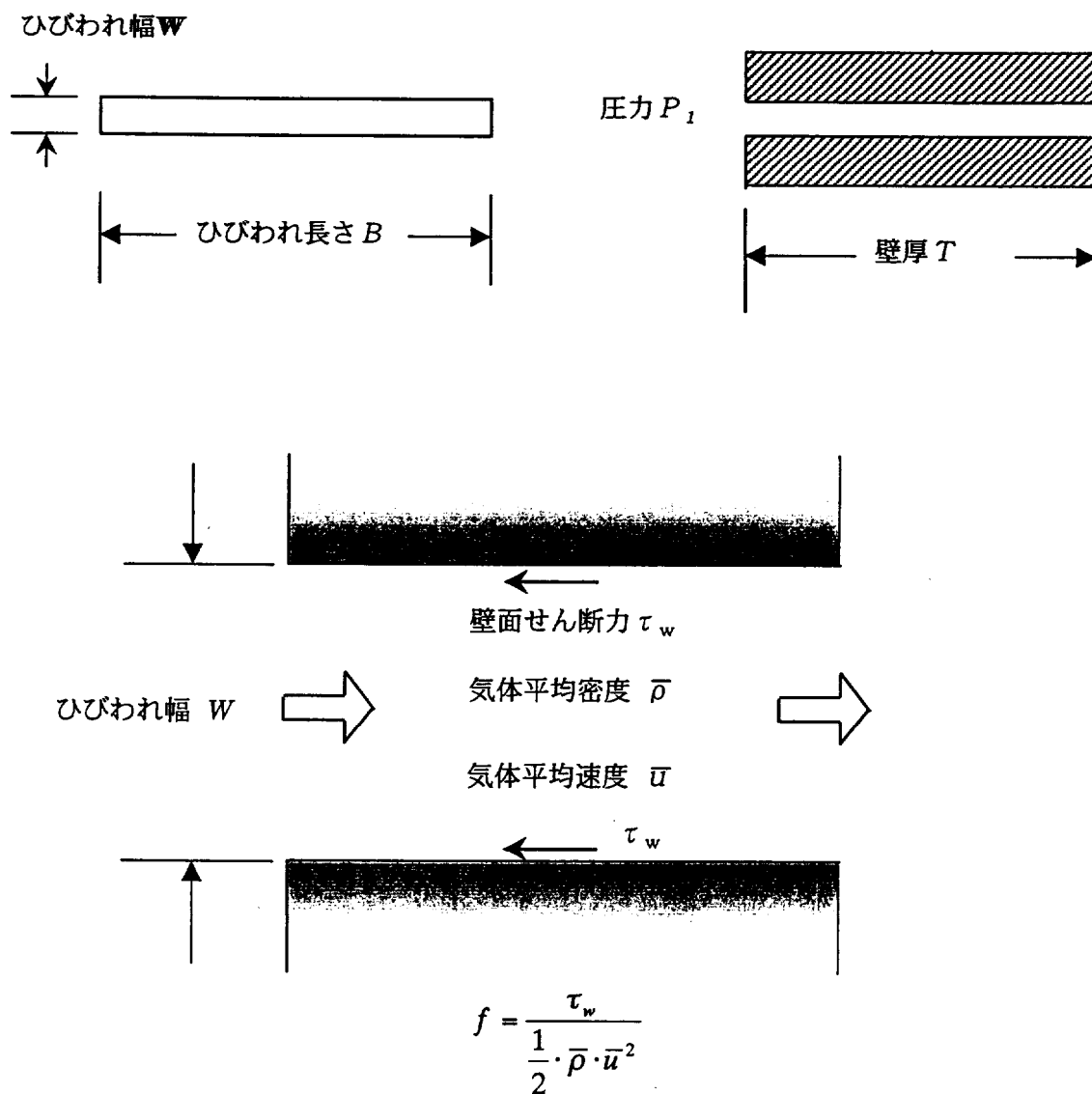
图- 5.13 温度分布



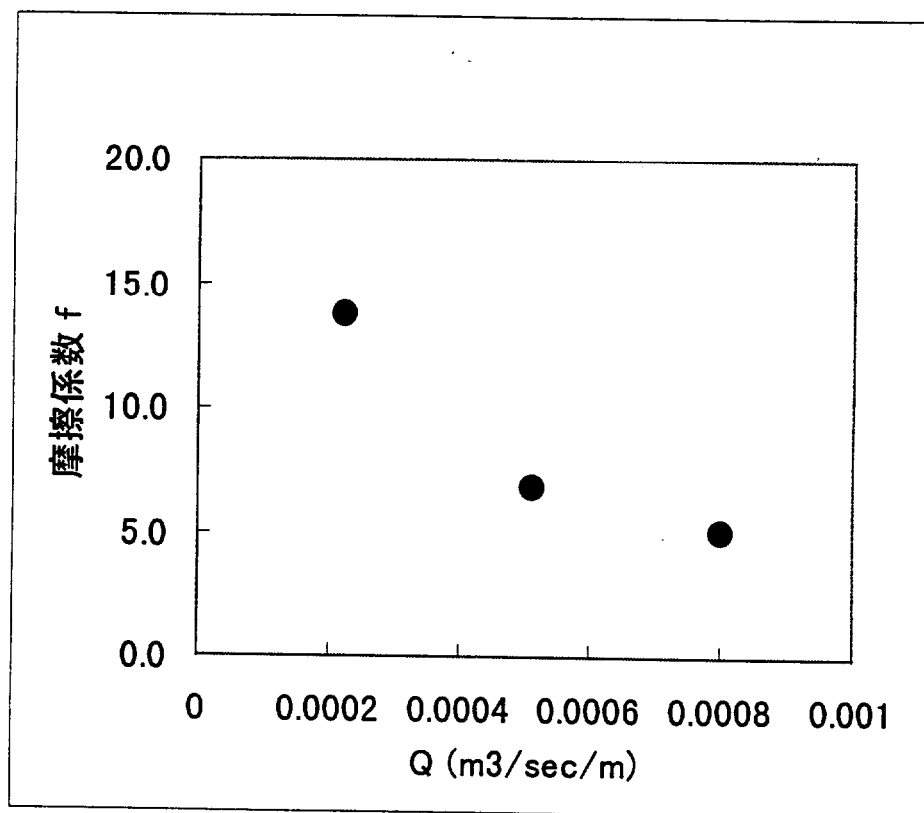
(2-2, 压力差 1.5 kgf/cm^2)

$W = 0.230 \text{ mm}$

图- 5.14 温度分布



図－ 5.15 ひびわれ内の流れ



图— 5.16 摩擦系数 f —体积流量 Q (1—1)

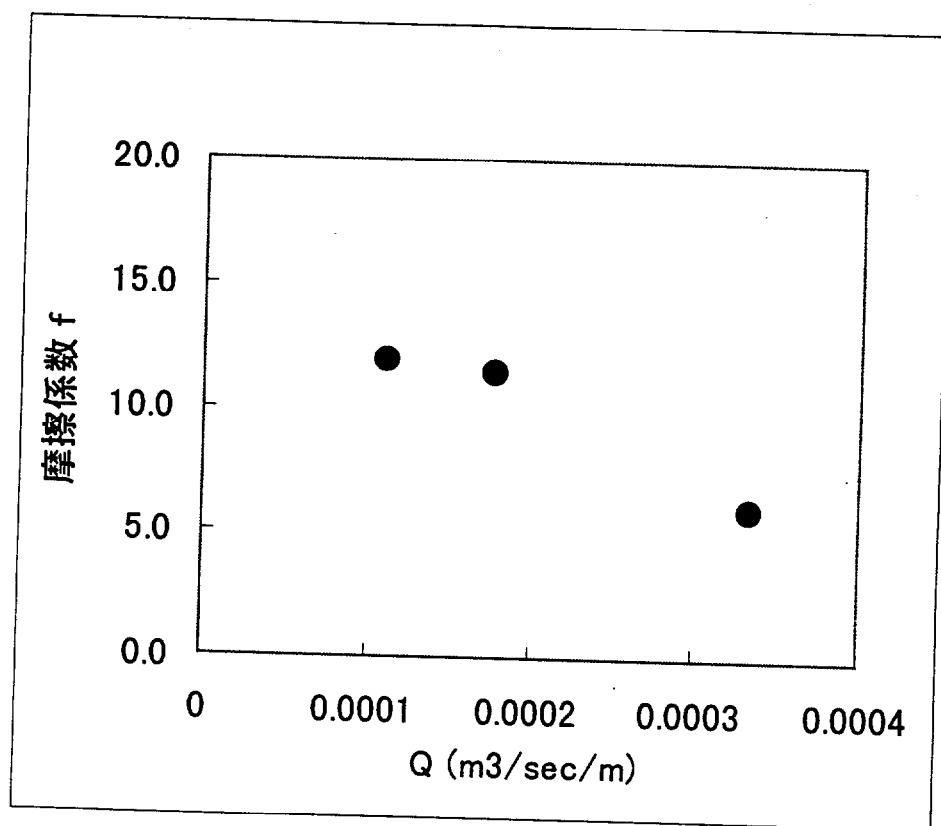
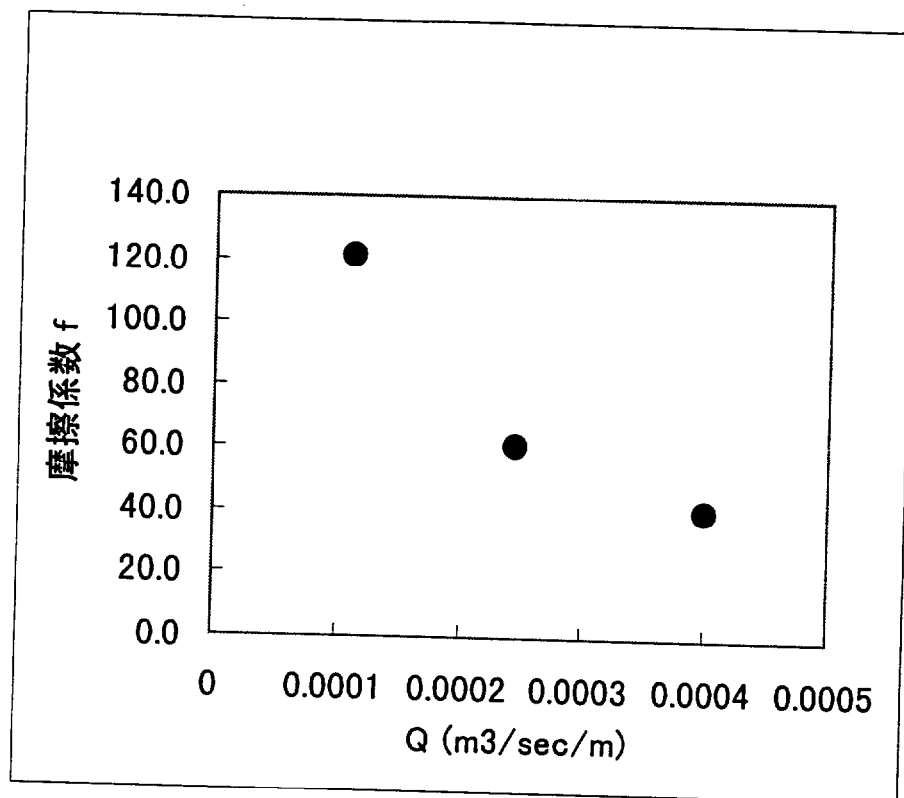


図- 5.17 摩擦係数 f —体積流量 Q (1—4)



圖— 5.18 摩擦係數 f —體積流量 Q (2—1)

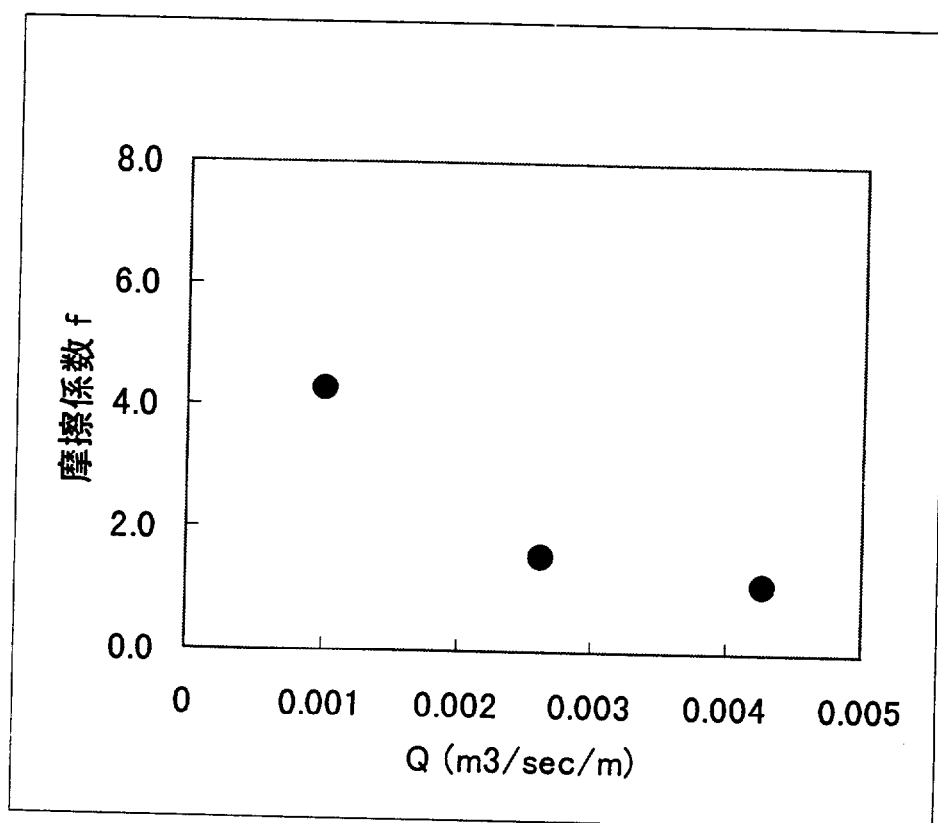


図- 5.19 摩擦係数 f —体積流量 Q (2-2)

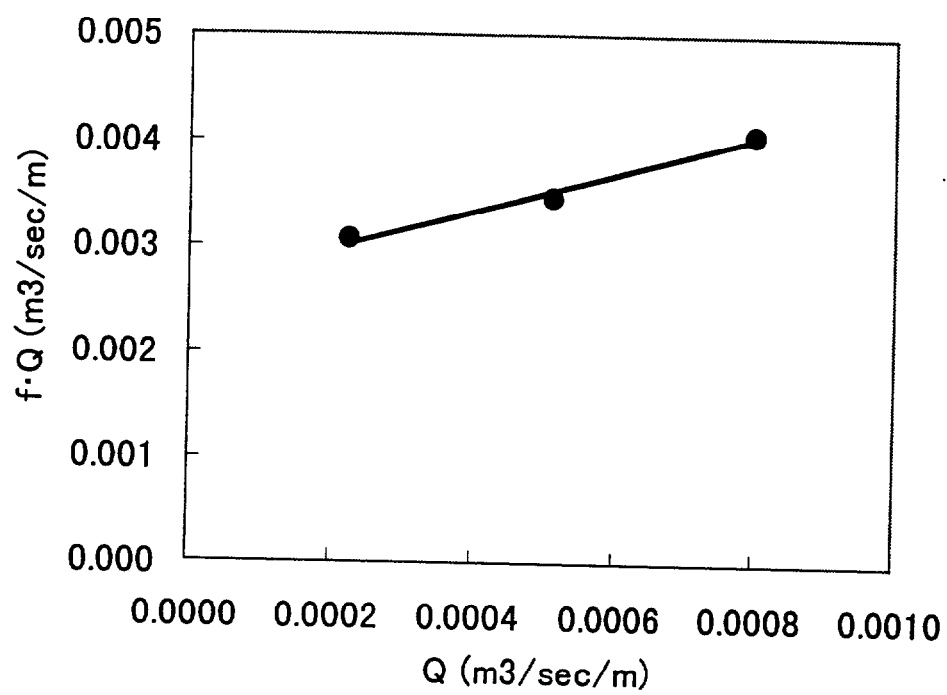
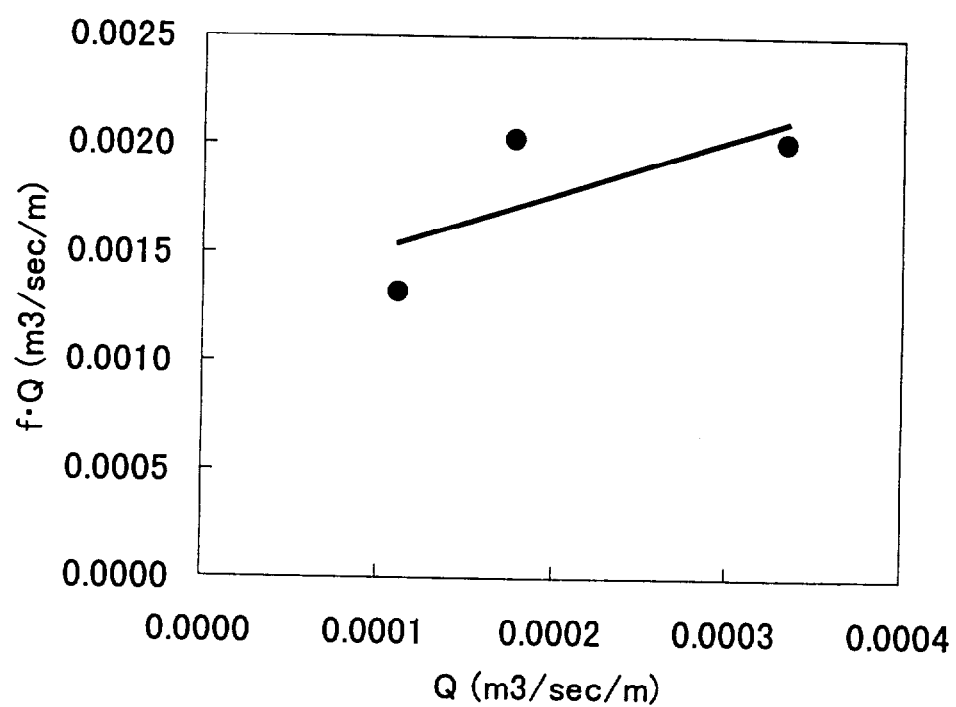
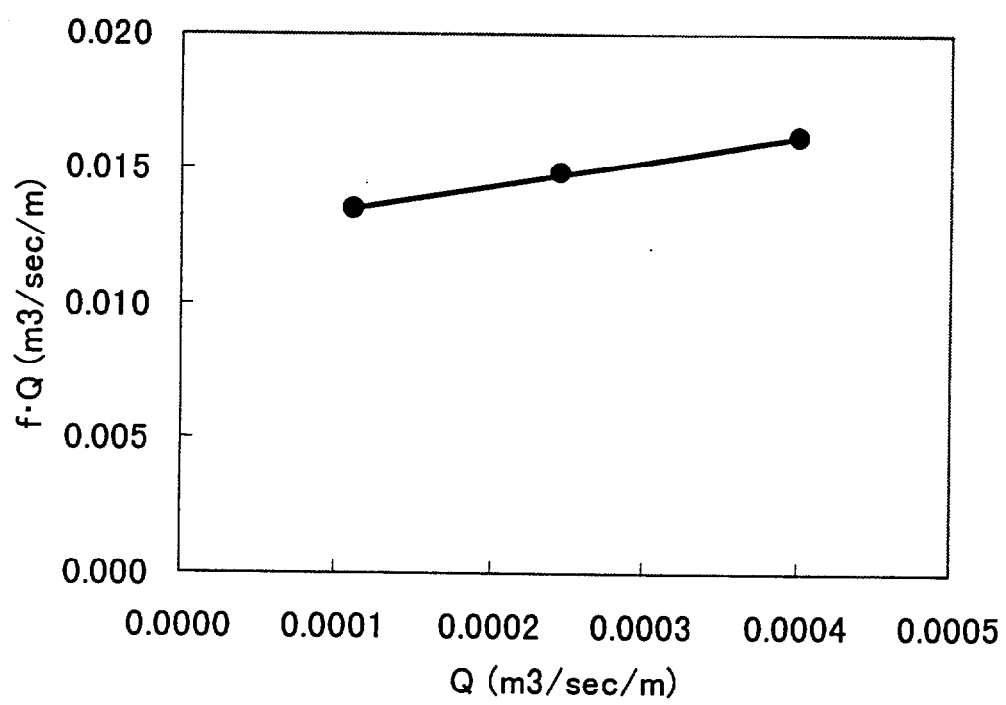


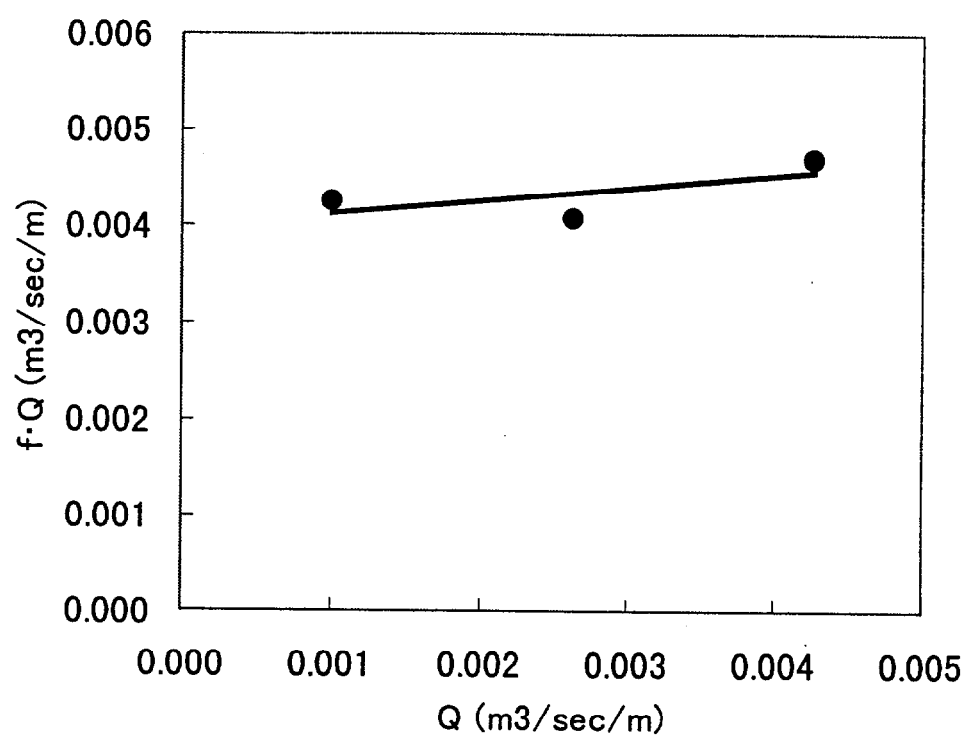
図 - 5.20 摩擦係数 $f \times$ 体積流量 Q - 体積流量 $Q(1-1)$



图— 5.21 摩擦係数 $f \times$ 体積流量 Q —体積流量 $Q(1-4)$



図－ 5.22 摩擦係数 $f \times$ 体積流量 Q －体積流量 Q (2-1)



圖— 5.23 摩擦係數 $f \times$ 體積流量 Q —體積流量 Q (2—2)

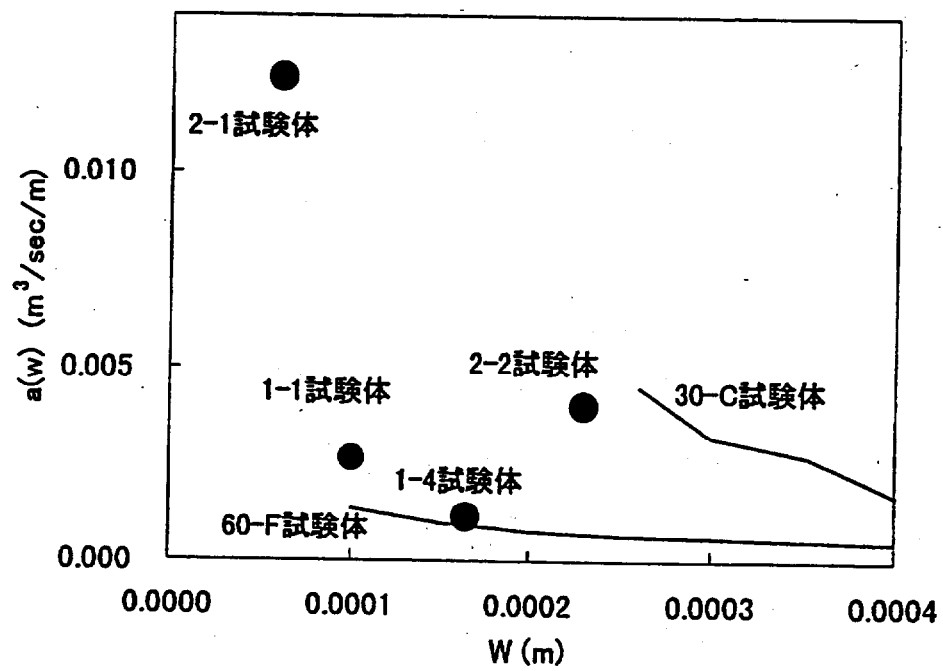
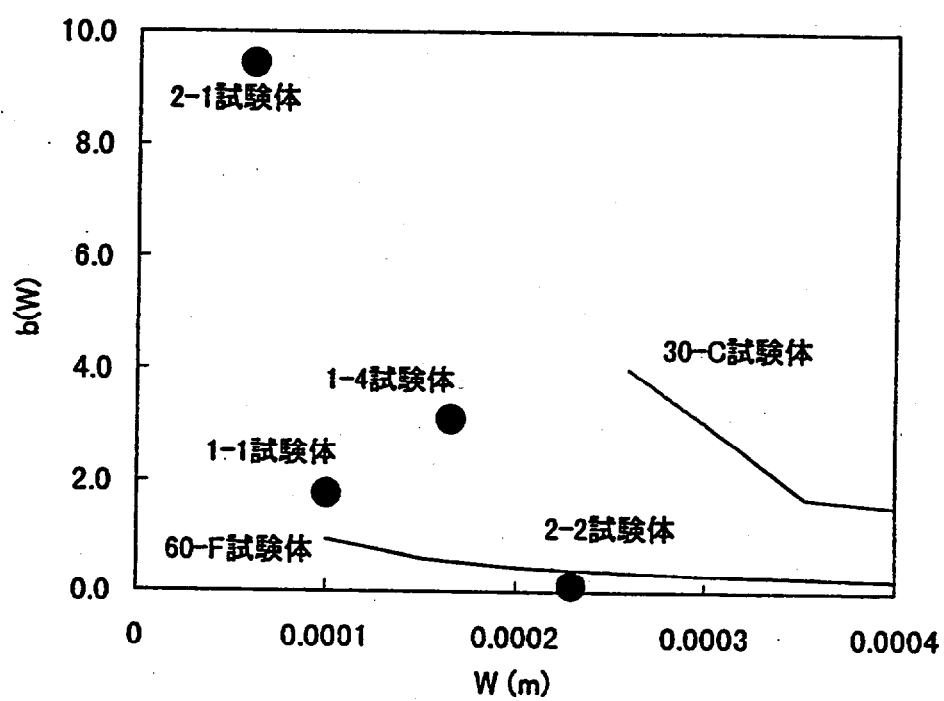
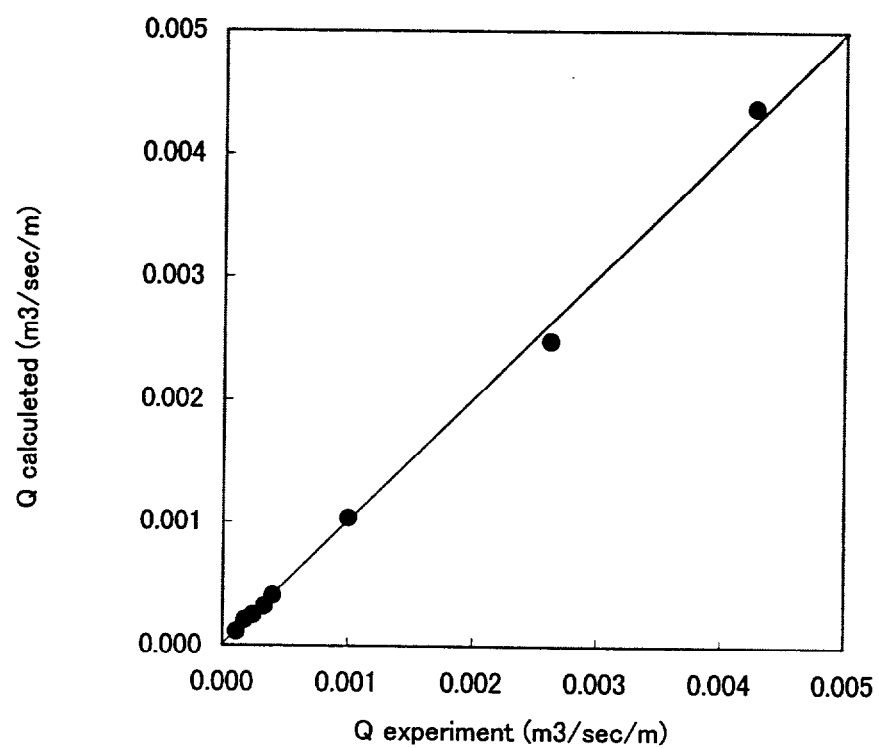


図- 5.24 $a(W)$ とひびわれ幅 W



図－ 5.25 $b(W)$ とひびわれ幅 W



図－ 5.26 Q (計算値)と Q (実験値)の対応

第 6 章 結論

第6章 結論

本論文は、エネルギー関連施設の設計などにおいて必要性が高まっている、ひびわれの生じた鉄筋コンクリート壁を通しての気体漏洩問題について、実験的手法を用いて漏洩量を把握する方法を提示し、漏洩量の定式化を行ったものであり以下の様に総括できる。

第2章ではひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩実験手法について説明を行い、2次元ポアズイユ流れを利用した実験式を用いて、漏洩量の基本的な尺度を与えた。ひびわれの生じたコンクリートからの気体漏洩についてはひびわれ面の微視的巨視的凹凸形状を考慮すると解析的定量化は困難であり、実験的手法が効果的であると考えられ、漏洩実験方法を提案し実施することは非常に重要である。また、複雑なひびわれ面でのランダム性を考えると、漏洩実験結果の蓄積は大きな意味があると考えられる。

実験ではまずコンクリート壁試験体に1本の引張りひびわれを生じさせ、酸素ガスを用いた気体漏洩実験を行い、実験結果の考察においてはひびわれによる酸素ガス漏洩量が壁両側の圧力差に比例する範囲が存在し、その範囲内であれば、漏洩量は2次元ポアズイユ流れを利用した実験式で評価できることを示した。

漏洩量の定式化に際してはまず、実験結果より漏洩量(Q)が圧力差に比例する範囲を規定し、その比例領域のみに限定して漏洩量(Q)を壁厚(T) ひびわれ幅(W) 圧力差(Δp) 酸素ガスの粘性係数(μ)、骨材の最大粒径(D)の関数として定式化した。

第3章においては新たに気体の圧縮性を考慮した実験式を提案し、この実験式と新たにを行った漏洩実験結果により第2章で得られた知見に対しての検討を行った。まず、前章で提示した実験結果および新たに行った実験について気体の圧縮性を考慮して整理を行い、流れを一次元等温圧縮流れで仮定した実験式がひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩量を精度良く評価できることを述べた。さらに、ひびわれ面の摩擦係数は流量およびひびわれ幅の関数となっており、コンクリートの骨材粒径、骨材形状等によって変化することについて考察を行った。

続いて、粗骨材の粒径を変化させた試験体、アルミニウムのモデル骨材を用いて骨材形状を変化させた試験体、及びガラス板を用いた理想ひびわれモデルの試験体について同様の漏洩実験による結果を示し、前章で得られた結論に対しての防証を行った。さらに、新たに提示した実験結果の評価式を用いて2次元ポアズイユ流れを利用した実験式がひびわれを生じたコンクリート壁からの気体漏洩量実用式となりえる、付帯条件についても詳細に検討を行い、実用式としては、より簡単な形である2次元ポアズイユ流れを利用した実験式を推奨した。

第4章では2平板間の一次元定常等温圧縮流れを表す式を利用した実験式の各種気体への適用性について検討した。実験で使用した4種類の気体(ヘリウムガス、窒素ガス、酸素ガス、炭酸ガス)に対してもひびわれを極端に理想化した2平板間の気体の流れを表す式を利用して実験結果を精度良く定式できることを述べ、さらにひびわれ幅が壁厚方向に一定で壁面で緩やかに変化する場合の気体漏洩量についてもひびわれ幅が一定な実験結果に基づいた考察により漏洩量を高い精度で推定した。

第5章では前章までに得られた気体漏洩についての知見をひびわれを生じたコンクリート壁の液化天然ガス漏洩問題に応用を図り、ひびわれの生じたコンクリート部材からの液化ガス漏洩の定量化手法を提案し、実験結果を精度よく整理できることを示した。

まず、比較的簡単なコンクリートの熱伝導解析を用いてひびわれ内の流体の相変化を推測した後、圧縮流れを利用した実験式を適用してひびわれの生じたコンクリートからの液化ガス漏洩量を把握した。本章で提示した手法が、液化ガスがひびわれ内で気化することなく外部に多量に漏出する危機的状況も比較的簡易に予測することができ、ひびわれの生じたコンクリート部材の液化ガス貯液性能についての限界状態を把握する上で極めて有効な手法であることを結論した。

参考文献
発表論文

参考文献

- 1) Shapiro, Ascher H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressive Fluid Flow", Vol.1, John Wiley and Sons, 1953
- 2) 社団法人 日本化学会編 化学便覧 基礎編 改訂4版、丸善
- 3) 小茂鳥和生：非接触シール論，コロナ社，1973 年版
- 4) LNG地下式貯槽指針、1981 年 12 月
- 5) 高野 日章：流体力学、岩波書店、1982 年版
- 6) S. H. Rizkalla, B.L.Lau, S.H.Simmonds: Air Leakage Characteristics in Reinforced Concrete: Journal of Structural Engineering, Vol. 110, No.5, May 1984
- 7) 高橋亮一、富山明男：二相流の数値解析に関する一考察、日本原子力学会誌 Vol. 26 1984.11, p.74 - p.84
- 8) J.Tinker, R.Del Frate, S. H. Rizkalla: The Prediction of Air Leakage Rate Through Cracks in Pressurized Reinforced Concrete Containment Vessels: Transactions of the 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Vol. J(J1/7) 1985
- 9) 矢川元基：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析、サイエンス社、1985 年版
- 10) 井出 豊：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する基礎的研究、東京工業大学卒業論文 (1986.3)
- 11) W.H.Booth : HANDBOOK FOR THERMAL ANALYSIS MSC/NASTRAN VERSION 65 (1986)
- 12) 生井武文、松尾一泰：圧縮性流体の力学、理工学社、1986 年版
- 13) 渡部直人：鉄筋コンクリート構造物の止水性評価：土木学会第42回年次学術講演会、1987.9
- 14) 井出 豊：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する研究、東京工業大学修士論文 (1988.2)
- 15) 日本原子力学会、熱流動数値解析高度化特別専門委員会：二相流数値解析法の基礎と応用、(1989.11)
- 16) 小島 直樹：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩、東京工業大学修士論文 (1990.2)
- 17) 岡村甫、前川宏一、北村八郎、芳賀孝成、黒坂敏正：低温液化ガス用コンクリート部材の貯液性能に関する研究－その1、その2：土木学会第45回年次学術講演会、pp.304～307、1990 年 9 月
- 18) 鈴木敏郎、滝口克己、堀田久人、小島直樹：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩：日本建築学会構造系論文報告集、第416号、pp.10～18、1990 年 10 月
- 19) K.Maekawa, H.Hasegawa, T.Kurosaka, K.Asai, H.Kitamura, Gas-Liquid Two Phase

Flow through a Crack in Concrete, The Third East Asia-Pacific Conference on
Structural Engineering & Construction, 415-420, (1991)

- 2 0) 北條勝彦、木本恭司、越智敏明：わかる伝熱工学、槇書店、1993 年版
- 2 1) 高橋亮一、棚町芳弘：差分法、培風館、1994 年版
- 2 2) 株式会社 富士総合研究所：FUJI α -FLOW マニュアル、1995 年
- 2 3) 土木学会：コンクリート標準示方書、設計編 1996 年版
- 2 4) 北村八朗：PCLNG 貯槽の開発、東京大学博士論文 (1999.3)
- 2 5) 日本経済新聞：1999 年 10 月 2 日 朝刊

発表論文

- 1) T.Suzuki, K.Takiguchi, Y.Ide, S.Takahashi: Leakage of Gas through Cracked Concrete Walls: Transactions of 9th International Conference on structural Mechanics in Reactor Technology Vol. H 1986
- 2) 鈴木、滝口他：ひびわれの生じたコンクリート壁の酸素ガス漏洩に関する実験：日本建築学会大会 1986 年 北海道
- 3) 鈴木、滝口他：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する研究（その 1）：日本建築学会大会 1987 年 近畿
- 4) 鈴木、滝口他：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する研究（その 2）：日本建築学会大会 1987 年 近畿
- 5) 鈴木、滝口他：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する研究（その 3）：日本建築学会大会 1987 年 近畿
- 6) 鈴木、滝口他：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する研究（その 4）：日本建築学会大会 1987 年 近畿
- 7) 鈴木、滝口他：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する研究（その 5）：日本建築学会大会 1987 年 近畿
- 8) T.Suzuki, K.Takiguchi, Y.Ide, K.Kimura: Leakage of Gas through Cracked Concrete Walls: IABSE Symposium Paris-Versailles 1987
- 9) 鈴木敏郎、滝口克己、井出 豊、内山政彦：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する基礎的実験：日本建築学会構造系論文報告集、第 373 号、1987 年 3 月
- 10) 鈴木敏郎、滝口克己、堀田久人、井出豊：ひびわれの生じたコンクリート壁からの気体漏洩に関する実験研究－気体の圧縮性を考慮して実験式の検討－：日本建築学会構造系論文報告集、第 384 号、pp.15～25、1988 年 2 月
- 11) 鈴木敏郎、滝口克己、井出豊、堀田久人：ひびわれの生じたコンクリート壁からの各種気体の漏洩に関する研究：日本建築学会構造系論文報告集、第 391 号、pp.10～18、1988 年 9 月
- 12) 井出豊、瀧口克己：ひびわれの生じたコンクリート壁からの液化ガス漏洩に関する研究：日本建築学会構造系論文報告集 審査中

図表リスト
記号リスト

記号リスト

第2章

Δp : 圧力差

W : ひびわれ幅

B : ひびわれ長さ

Q : 単位ひびわれ長さ当りの流量または漏洩量

T : 壁厚

μ : ガスの粘性係数

D : 骨材の最大粒径

α : 2次元ポアズイユ流れを表す式を利用した流量の実験式における係数

w : W/D

第3章および第4章

τ_w : 壁面に働く単位面積当たりのせん断力

u : 断面内の平均流速

p : 平均圧力

T_{em} : 平均温度

A : 管の断面積 ($= B \cdot W$)

AS : 壁面の表面積 ($= 2 \cdot B \cdot dx$)

G : 単位時間に断面を通過する気体の質量 (マス流量)

R : 気体定数

ρ_0 : 断面内の気体の平均密度

f : 摩擦係数

Re : 見かけのレイノルズ数 ($= 2 \cdot \rho_0 \cdot Q / \mu$)

P_1 : 上流端の圧力

$a(W)$: $f \cdot Q$ と Q の関係を一次回帰した時の切片

$b(W)$: $f \cdot Q$ と Q の関係を一次回帰した時の傾き

第5章

T : 温度

λ : 熱伝達率

ρ : 密度

c : 比熱

t : 時間

Q : 単位体積当りに供給される熱量

q : 伝達する熱量
 $\phi(t)$: 要素の節点温度
 N : 形状関数
 $[K]$: 熱伝導マトリクス
 $\{\Phi\}$: 全体の節点温度ベクトル
 $[C]$: 熱容量マトリクス
 $[F]$: 熱流束マトリクス
 T_p : 気化ポイントの温度
 T_v : その圧力での沸点温度

図表リスト

第2章

表－ 2.1	試験体リスト
表－ 2.2	コンクリート調合表
表－ 2.3	コンクリート強度試験
図－ 2.1	試験体（壁厚60cm）
図－ 2.2	試験体（壁厚30cm）
図－ 2.3	試験体（壁厚15cm）
図－ 2.4	PC鋼棒キャリブレーション
図－ 2.5	骨材粒度分布
図－ 2.6	シーリング
図－ 2.7	圧力箱
図－ 2.8	ひびわれ幅制御
図－ 2.9	ひびわれ幅計測
図－ 2.10	流量計測システム
図－ 2.11	シーリングの確認
図－ 2.12	Q （流量）－ Δp （圧力差）（A シリーズ）
図－ 2.13	Q （流量）－ Δp （圧力差）（B シリーズ）
図－ 2.14	Q （流量）と Δp （圧力差）の比例範囲
図－ 2.15	Q （流量）－ T （壁厚）
図－ 2.16	Q （流量）－ T （壁厚）
図－ 2.17	ひびわれの理想化
図－ 2.18	α － W （ひびわれ幅）
図－ 2.19	ひびわれ断面
図－ 2.20	Q （計算値）と Q （実験値）の対応
図－ 2.21	Q （計算値）と Q （実験値）の対応

第3章

表－ 3.1	試験体リスト
図－ 3.1	粒度分布（Aコンクリート）
図－ 3.2	粒度分布（B、C コンクリート）
図－ 3.3	試験体
図－ 3.4	15-G試験体
図－ 3.5	実験方法
図－ 3.6	一次元圧縮性流れ
図－ 3.7	$Q-(P_1^2 - P_2^2)$
図－ 3.8	f － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.15\text{mm}$ ）
図－ 3.9	f － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.20\text{mm}$ ）
図－ 3.10	f － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.45\text{mm}$ ）
図－ 3.11	$f \cdot Q$ － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.15\text{mm}$ ）
図－ 3.12	$f \cdot Q$ － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.20\text{mm}$ ）
図－ 3.13	$f \cdot Q$ － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.25\text{mm}$ ）
図－ 3.14	$f \cdot Q$ － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.30\text{mm}$ ）
図－ 3.15	$f \cdot Q$ － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.35\text{mm}$ ）
図－ 3.16	$f \cdot Q$ － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.40\text{mm}$ ）
図－ 3.17	$f \cdot Q$ － Q 関係（A シリーズ、 $W=0.45\text{mm}$ ）
図－ 3.18	a － W 関係
図－ 3.19	b － W 関係

図－ 3.20	$f \cdot Q - Q$ 関係 (15-G)
図－ 3.21	$Q - \Delta P$ 関係 (15-G)
図－ 3.22	$f \cdot Q - Q$ 関係 (B,C シリーズ、 $W=0.25\text{mm}$)
図－ 3.23	$f \cdot Q - Q$ 関係 (B,C シリーズ、 $W=0.45\text{mm}$)
図－ 3.24	$f \cdot Q - Q$ 関係 (D,E シリーズ、 $W=0.25\text{mm}$)
図－ 3.25	$f \cdot Q - Q$ 関係 (D,E シリーズ、 $W=0.30\text{mm}$)
図－ 3.26	$a - W$ 関係
図－ 3.27	$b - W$ 関係
図－ 3.28	コンクリートひびわれ断面 (A コンクリート)
図－ 3.29	コンクリートひびわれ断面 (B コンクリート)
図－ 3.30	コンクリートひびわれ断面 (C コンクリート)
図－ 3.31	コンクリートひびわれ断面 (D コンクリート)
図－ 3.32	コンクリートひびわれ断面 (E コンクリート)
図－ 3.33	$Q(\text{計算値}) - Q(\text{実験値})$ 関係 (A シリーズ)
図－ 3.34	$Q(\text{計算値}) - Q(\text{実験値})$ 関係 (B,C シリーズ)
図－ 3.35	$Q(\text{計算値}) - Q(\text{実験値})$ 関係 (D,E シリーズ)
図－ 3.36	流量計の特性
図－ 3.37	$f \cdot Q \cdot 2 \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (A シリーズ、 $W=0.45\text{mm}$)
図－ 3.38	$2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (A シリーズ、 $W=0.20\text{mm}$)
図－ 3.39	$2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (A シリーズ、 $W=0.30\text{mm}$)
図－ 3.40	$2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (A シリーズ、 $W=0.35\text{mm}$)
図－ 3.41	$2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (A シリーズ、 $W=0.40\text{mm}$)
図－ 3.42	$2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (B シリーズ、 $W=0.25\text{mm}$)
図－ 3.43	$2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (B シリーズ、 $W=0.35\text{mm}$)
図－ 3.44	$2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (C シリーズ、 $W=0.35\text{mm}$)
図－ 3.45	$2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (D シリーズ、 $W=0.30\text{mm}$)
図－ 3.46	$2 \cdot f \cdot Q \cdot P_0 / (P_1 + P_2) - Q$ 関係 (E シリーズ、 $W=0.30\text{mm}$)

第4章

表－ 4.1	試験体リスト
表－ 4.2	F コンクリートの調合
表－ 4.3	第3章で用いたコンクリートとの調合比較
表－ 4.4	F コンクリートの強度試験結果
表－ 4.5	第3章で用いたコンクリートとの強度試験結果の比較
表－ 4.6	実験で用いた各種気体の密度および粘性係数
表－ 4.7	ひびわれ幅が一定でない場合の漏洩実験におけるのひびわれ幅
写－ 4.1	15-F 試験体
写－ 4.2	60-F 試験体
図－ 4.1	試験体
図－ 4.2	コンクリート骨材の粒度分布
図－ 4.3	圧力箱
図－ 4.4	試験状況
図－ 4.5	流量測定システム
図－ 4.6	$f - Q$ 関係 (60-F、 $W=0.40\text{mm}$)
図－ 4.7	$f - Q$ 関係 (15-F、 $W=0.40\text{mm}$)
図－ 4.8	$a - W$ 関係 (60-F)
図－ 4.9	$a - W$ 関係 (15-F)
図－ 4.10	$b - W$ 関係 (60-F)
図－ 4.11	$b - W$ 関係 (15-F)

図－ 4.12	Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (60-F)
図－ 4.13	Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (15-F)
図－ 4.14	α －W 関係 (60-F)
図－ 4.15	α －W 関係 (15-F)
図－ 4.16	$[\mu \cdot (P1+P2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2P0)] - [Q]$ 関係 (60-F, He)
図－ 4.17	$[\mu \cdot (P1+P2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2P0)] - [Q]$ 関係 (60-F, CO2)
図－ 4.18	$[\mu \cdot (P1+P2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2P0)] - [Q]$ 関係 (15-F, He)
図－ 4.19	$[\mu \cdot (P1+P2) / (\rho_0 \cdot f \cdot Q \cdot 2P0)] - [Q]$ 関係 (15-F, CO2)
図－ 4.20	Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (60-F)
図－ 4.21	Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (15-F)
図－ 4.22	$\underline{\alpha}$ －W 関係
図－ 4.23	α －W 関係
図－ 4.24	Q(計算値)－Q(実験値) 関係
図－ 4.25	Q(計算値)－Q(実験値) 関係
図－ 4.26	Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)
図－ 4.27	Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)
図－ 4.28	Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)
図－ 4.29	Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)
図－ 4.30	Q(計算値)－Q(実験値) 関係 (ひびわれ幅が一定でない場合)

第5章

表－ 5.1	前川らの実験の試験体リスト
表－ 5.2	温度解析で用いた諸定数
表－ 5.3	温度解析より得られた液体部分の長さ
図－ 5.1	前川らの実験
図－ 5.2	試験体形状
図－ 5.3	微小直六面体
図－ 5.4	境界条件
図－ 5.5	ひびわれ内での気化現象の模式図
図－ 5.6	温度の境界条件
図－ 5.7	厚さ25cmコンクリート温度解析モデル
図－ 5.8	温度収束過程
図－ 5.9	温度分布 (1-1)
図－ 5.10	温度分布 (1-2)
図－ 5.11	温度分布 (1-3)
図－ 5.12	温度分布 (1-4)
図－ 5.13	温度分布 (2-1)
図－ 5.14	温度分布 (2-2)
図－ 5.15	ひびわれ内の流れ
図－ 5.16	摩擦係数 f －体積流量 Q (1-1)
図－ 5.17	摩擦係数 f －体積流量 Q (1-4)
図－ 5.18	摩擦係数 f －体積流量 Q (2-1)
図－ 5.19	摩擦係数 f －体積流量 Q (2-2)
図－ 5.20	摩擦係数 $f \times$ 体積流量 Q －体積流量 Q (1-1)
図－ 5.21	摩擦係数 $f \times$ 体積流量 Q －体積流量 Q (1-4)
図－ 5.22	摩擦係数 $f \times$ 体積流量 Q －体積流量 Q (2-1)
図－ 5.23	摩擦係数 $f \times$ 体積流量 Q －体積流量 Q (2-2)
図－ 5.24	$a(W)$ とひびわれ幅 W
図－ 5.25	$b(W)$ とひびわれ幅 W
図－ 5.26	Q(計算値)とQ(実験値)の対応