

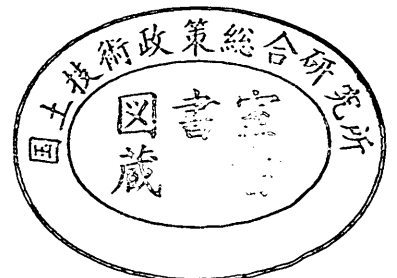
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 21 NO. 4 DEC. 1982

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第21巻 第4号 (Vol. 21, No. 4), 1982年12月 (Dec. 1982)

目 次 (CONTENTS)

1. 恒流に及ぼす風と淡水流入量の影響
——泉南沖データ (1978~1981) による検討——
……………村上和男・森川雅行・坂口達也…………… 3
(Wind Effect and Water Discharge Effect on Constant Flow
—Discussion Using Observation Data at Off-Sennan (1978~1981)—
……………Kazuo MURAKAMI, Masayuki MORIKAWA and Tatsuya SAKAGUCHI)
2. 鋼矢板壁の透水実験……………莊司喜博・糸田政治・富田幸晴…………… 41
(Experiments on Seepage through Interlocking Joints of Sheet Pile
……………Yoshihiro SHOJI, Masaharu KUMEDA and Yukiharu TOMITA)
3. 深層混合処理工法による改良地盤の地震時挙動
……………稲富隆昌・風間基樹・今村俊博…………… 83
(Observation and Analysis of Seismic Response of Improved Ground by Deep Mixing
Method ……Takamasa INATOMI, Motoki KAZAMA and Toshihiro IMAMURA)
4. 底開式バージによる捨石マウンドの造成に関する実験
……………奥出 律・山谷弘幸・松本 茂…………… 131
(Experimental Study on Construction of Rubble Mound by Split Hopper Barge
……………Tadasu OKUDE, Hiroyuki YAMAYA and Shigeru MATSUMOTO)

2. 鋼 矢 板 壁 の 透 水 実 験

荏 司 喜 博*・ 桑 田 政 治**・ 富 田 幸 晴***

要 旨

鋼矢板継手部の透水に関する基本的特性を把握するための室内実験を行った。内容は、Ⅲ型鋼矢板（ラコワナ型継手）を加工した矢板壁の背後に水圧をかけ、継手部からの流出水量と矢板壁前後の圧力水頭を測定するものである。実験ケースは、緊張の程度の異なる継手状態と、砂詰めの有無など矢板壁前後の異なった状態を組合わせたものである。

実験結果では、継手単位長さ当たりの流出量 q は、 $q=K \cdot h^n$ (h : 継手前後の圧力水頭差, K, n : 係数) で表現でき、継手部の砂詰りの有無によって、それぞれ、 $n=1.0, 0.5$ であった。この結果は、継手部を狭水路とみなして水理学的に説明できる。又、実用的には、 $n=1.0, 0.5$ として取扱えることがわかった。さらに、以上の結果をふまえて実際の透水計算における矢板壁の取扱いについて考察した。

* 土質部 基礎工研究室長
** 前土質部 基礎工研究室
*** 土質部 基礎工研究室

2. Experiments on Seepage through Interlocking Joints of Sheet Pile

Yoshihiro SHOJI*

Masaharu KUMEDA**

Yukiharu TOMITA***

Synopsis

Model experiments on seepage through the steel sheet pile walls were performed. The volume of water leaking out through interlocking joints of sheet piles, and the water head at the front and rear parts of the sheet pile wall were measured under the various conditions of the water pressure applied by changing the head of water tank located behind the sheet pile wall.

The results are as follows:

The volume of water flowing out per unit length of interlocking joint, in unit time period, q , is expressed by the formula, $q=K \cdot h^n$, where h is the head loss between the front and rear point of interlocking joint; K and n are coefficients.

The value of n is practically 0.5 for sheet pile walls without saturated soils at the both sides. On the other hand, the value of n is practically 1.0 for sheet pile walls with saturated soils at the one side or both sides.

Based on the results, the practical calculation method of seepage for structures with sheet pile walls was examined.

* Chief of Foundation Laboratory, Soil Division

** Ex-Member of Foundation Laboratory, Soil Division

*** Member of Foundation Laboratory, Soil Division

目 次

| | |
|--------------------------|----|
| 要 旨 | 41 |
| 1. ま え が き | 45 |
| 2. 実験の内容 | 45 |
| 2.1 実験の概要 | 45 |
| 2.2 実験の方法および実験ケース | 46 |
| 3. 実験結果および考察 | 51 |
| 3.1 実 験 結 果 | 51 |
| 3.2 既応の実験結果との比較 | 56 |
| 3.3 継手部の流出水特性についての水理学的考察 | 58 |
| 3.4 ま と め | 69 |
| 4. 透水計算における矢板壁の取扱い | 70 |
| 5. ま と め | 77 |
| 6. あとがき | 78 |
| 参 考 文 献 | 78 |
| 付 録 | 78 |

1. まえがき

鋼矢板壁は、透水性の低いものであることは、一般に知られている。港湾構造物において、透水性の面でのこの特徴を積極的に活用したものとしては、護岸の止水矢板や仮設の止水工がある程度であった。近來は、廃棄物処理護岸に代表されるように、汚濁水、汚染水の流出をおさえる機能を要求される構造物に、矢板壁が多用される。しかも、一重の矢板壁だけでなく、二重矢板式あるいは鋼矢板セル式のような多重の矢板壁の構造物も多くなっている。このような構造物においてはその機能上、構造物の破壊に対する安全性の検討だけでなく、透水計算にもとづく護岸内水位や護岸部からの流出水量などの検討によって断面の設計を行う必要がある。そして、このような透水計算においては矢板壁自体の、すなわち鋼矢板継手部からの透水の特性を反映した厳密な取扱いが要求される。しかし、現状では、その特性が十分把握されていない。そのため、矢板壁をふくむ構造物の実用的計算方法は、確立されていないといえる。また、透水計算に用いる矢板壁の透水性をあらわす諸数値は、現地矢板壁の状態を反映させたものでなければ

ならない。ところで、鋼矢板壁の透水特性に影響を与える要因としては、継手の種類、継手のかみあわせ状態、継手部の錆や付着生物の状態、土砂の種類と継手の砂詰り状態などが考えられる。これらの要因のなかには、継手のかみあわせ状態をはじめとして、現地の状態を室内実験で再現することが極めて困難なものがある。そのため、現地実験または現地規模の模型実験データの蓄積が非常に重要である。しかしながら、鋼矢板継手部の透水の特性に関する正確な認識がなければ、せっかく実施される実験が、適切な内容を持ち、適切なデータを提供するものにならないおそれがある。

本研究は、このような背景に鑑み、透水計算における矢板壁の実用的取扱い方法の検討および、透水計算に活用できる適切な数値の蓄積のための実験促進に、必要な、鋼矢板継手部の透水に関する基本的特性を把握することを目的としたものである。

2. 実験の内容

2.1 実験の概要

実物の鋼矢板を加工した実験用鋼矢板で形成する矢板壁を製作し、この矢板壁を縦の一面とする密閉状態の水

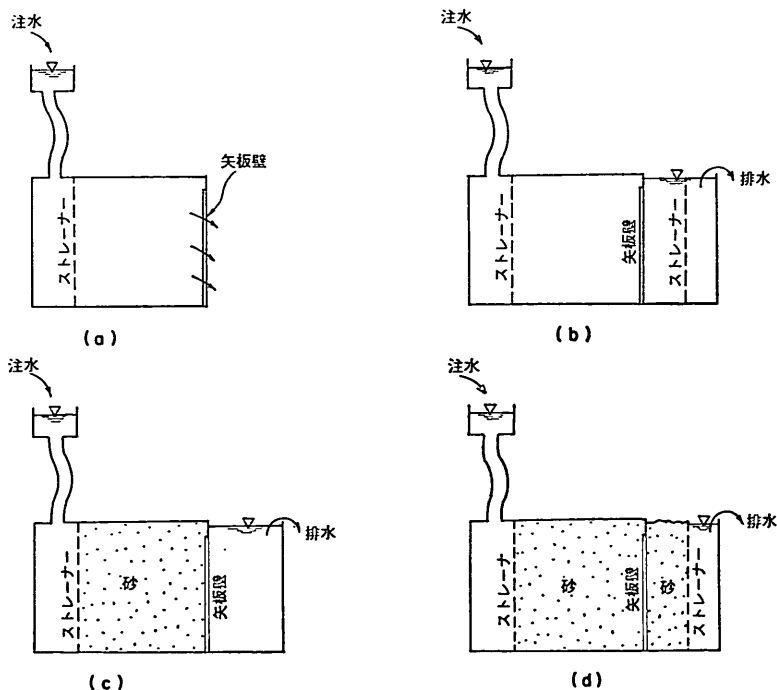


図-2.1 実験状態概念図

槽に、水頭約 50~500 cm の水圧を加えて、矢板壁からの漏水状態を調べる実験を行った。実験に用いた鋼矢板は III 型（ラカワナ型継手）一種類である。実験ケースは、緊張の程度の異なる 2 種類の継手状態と矢板壁前後の状態（図-2.1 に示す 4 通りの状態）を組合わせたものである。測定項目は矢板壁からの流出水量と、矢板壁前後および砂中の圧力水頭である。

2.2 実験の方法および実験ケース

(1) 実験装置

実験装置の全体を写真-2.1 に、断面を 図-2.2 に示し

た。これからわかるように、実験装置は実験用鋼矢板壁をはさんで流入側水槽と流出側水槽に分かれている。流入側水槽は、内りのりで、幅 100 cm、高さ 107 cm のく（矩）形断面の鋼製箱であり、ストレーナーによって後室と後貯水槽に分かれている。流入側水槽は、全体に鋼製ぶたをかぶせてボルト締めによって密閉することができる。鋼製ぶたには、後貯水槽に注水するための円筒管が取り付けられている。この円筒管は内径 76.3 mm のジャバラ式のビニールホースで水位調整箱に接続されている。流出側水槽はストレーナーによって前室と前貯水槽に分

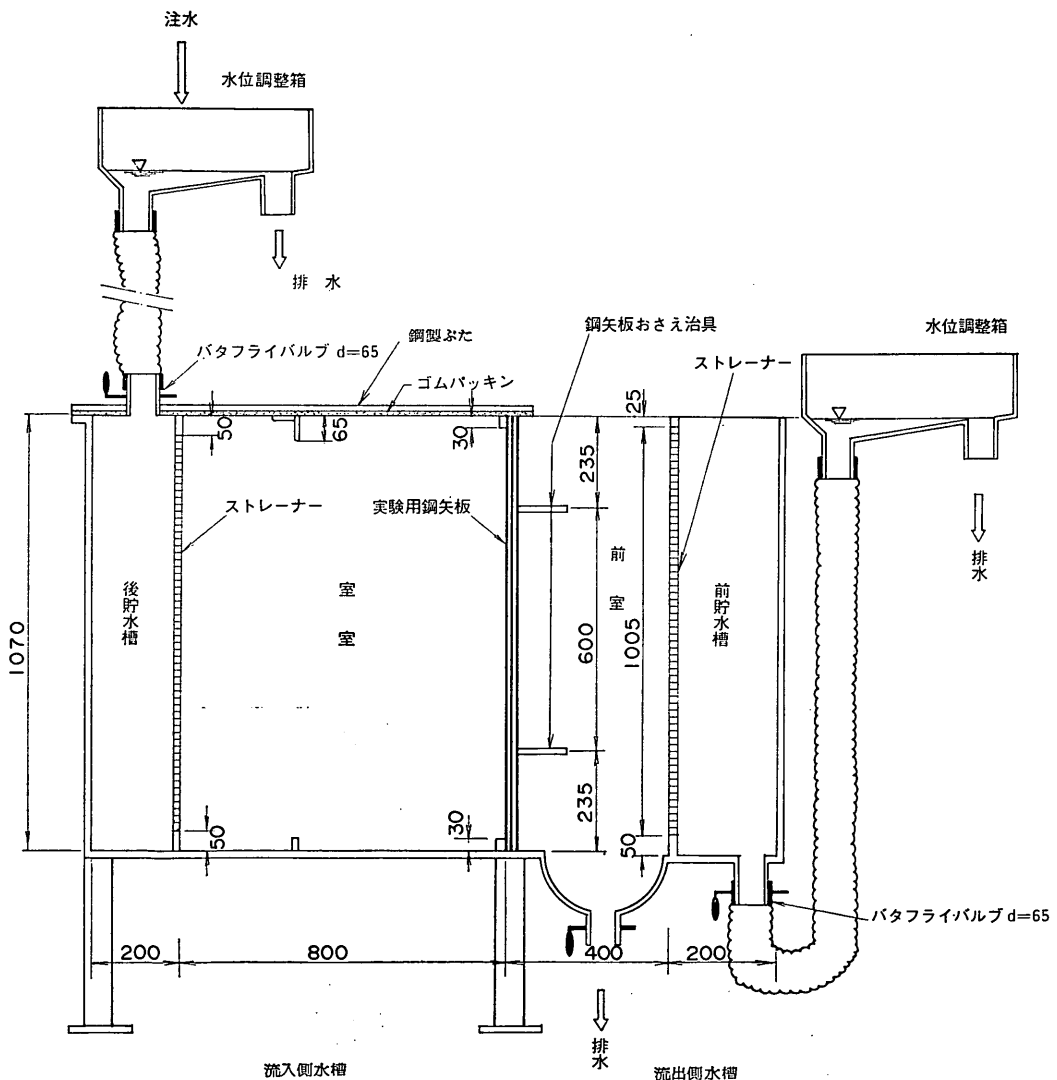


図-2.2 実験装置（断面）

鋼矢板壁の透水実験



写真-2.1 実験装置全体の状況

かれている。前貯水槽は取りはずしが可能であり、前室に、ボルトの締めで取り付けられる。流出側水槽の幅は、内のみで、100cm であり、流入側水槽と同一寸法である。前室および前貯水槽の底部には、バクフライバルブの取付いた円筒管が取りついている。前貯水槽底部の円筒管は、内径 76.3mm のジャバラ式のビニールホースによって水位調整箱に接続されている。

ストレーナーはエキスパンドメタル XG 12 号およびステンレス製網の 420 μ と 75 μ の合計 3 枚を重ねたものである。

実験用の鋼矢板は、Ⅲ型鋼矢板（ラカワナ型継手）を加工したもので、両端に継手のある標準タイプが 3 枚、1 端が継手で、他端に取付用ボルトが溶接してある端矢板が 2 枚、合計 5 枚である（図-2.3 参照）。矢板壁は、この 5 枚の矢板をかみ合わせて形成されている。矢板壁は、水櫃本体に溶接してある矢板取付用フレームに、端矢板をボルト締めすることにより両側端が固定され、かつ、鋼板製の鋼矢板おさえ治具を矢板取付用フレームに水平に 2 箇所取付けることにより、はらみ出しが防止さ

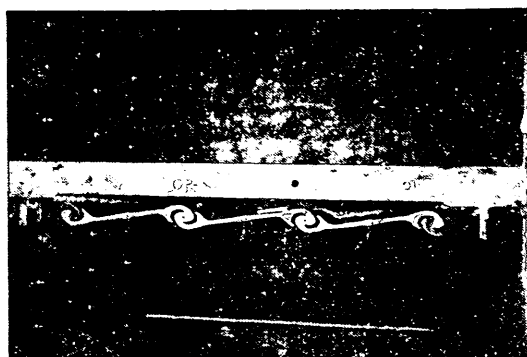


写真-2.2 実験用鋼矢板の組立状況（上からみおろした状態。矢板壁をはさんで上後が後室、下側が前室）

れるようになっている。実験用鋼矢板のかみ合わせ状態を上からみたものが、写真-2.2 である。また、鋼矢板おさえ治具の取付け状態は、写真-2.3、写真-3.2 をみるとわかる。

実験装置には 図-2.4 に示すようにマンオメーターを合計 28 個取付けた。マンオメーターは外径が 6mm、内径 4.5mm のビニールホースである。後室のマンオメーターは砂詰りした状態の実験のときには全個数測定した。その場合、マンオメーターのセンサーとなるビニールホースの先端は、砂詰りを防止するためガラスクロスを 2 枚重ねて巻きつけた。そして、その先端は矢板 Y-2 と Y-3 の継手部の後方にあたる位置まで、砂中をのぼしてある。ビニールホースの先端は、両側壁の間をわたした細い針金にくくりつけることによって位置を固定した。ただし、鋼矢板に最も近い 6 個（A-6~C-6、A'-1~C'-1）は 図-2.4 に示すように、矢板継手部にガムテープで取付けた。

(2) 止水処理および砂詰め

継手部以外からの漏水を防ぐために、流入側水槽のふた、前室と前貯水槽の取付箇所、および矢板取付箇所に入念な止水処理をした。前 2 箇所は、シリコンシーラントを両面に塗ったゴムパッキンをはさんでボルト締めした。矢板取付箇所は、矢板壁取付用フレームに端矢板をボルト締めで固定することにより矢板壁を取り付け、そのあとで矢板壁内外の四周をシリコンシーラントとアラライトを併用して、止水処理をした。そして最後に鋼矢板おさえ治具を取り付け、はらみ出し防止の処置をした、写真-2.3 に矢板壁の流出側の止水処理の状態をのせた。

砂詰め用の砂は茨城県鹿島産の海砂で 図-2.5 に示す

矢板取付部詳細図

端矢板加工図

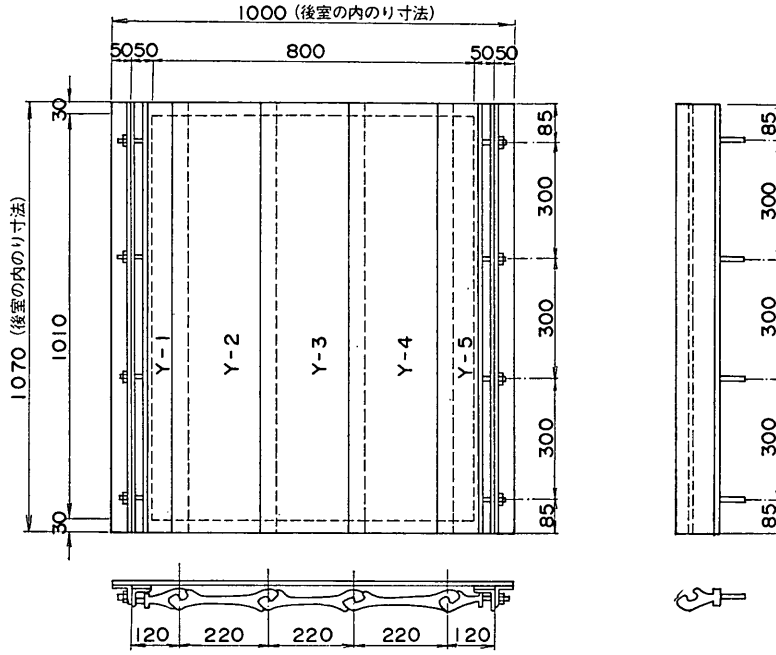
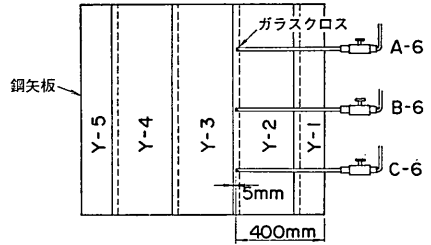
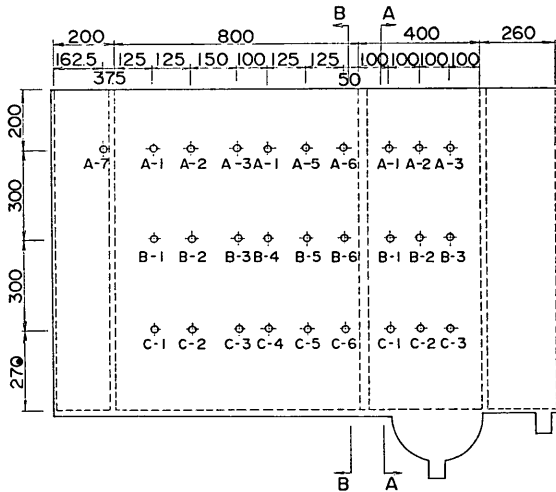


図-2.3 実験用鋼矢板壁 (単位 mm)

マンメーター取付位置図

後室から見る鋼矢板に取り付けたマンメーター (B-B断面)



前室から見る鋼矢板に取り付けたマンメーター (A-A断面図)

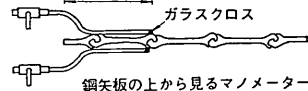
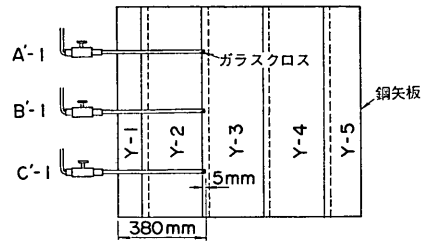


図-2.4 マンメーターの取付状況図 (単位 mm)

鋼矢板壁の透水実験

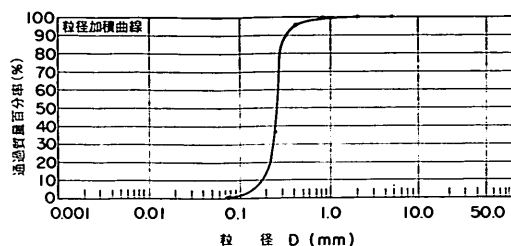


図-2.5 実験に用いた砂の粒径加積曲線

ように細粒分をふくまない、粒径のそろった細砂である。

砂詰めにあたっては、飽和状態の砂層を得ようとして次のような方法をとった。あらかじめ水に投入し、かく拌して空気をおいだした状態の砂を用意した。砂詰めをする槽内には、15 cm 程度の水をはっておき、そこへ、湿潤状態の砂をスコップですくい、少量ずつ投入していった。砂詰め中は砂面が常に水面以下になっているように注意した。後室を砂詰めする場合は、流入側水槽のふた用パッキンと同一面になるまで充てんし、ふたをかぶせてボルト締めした。その後、止水剤の硬化がすすんだ状態で注水しながら、ふたに取り付けた空気抜き用のバルブを利用して槽内の空気を抜いたのち、引きつづき実験を開始した。前室を砂詰めする場合は前室の側壁の高

さまで砂詰めしたが、この状態では矢板継手は完全に砂中に埋まっている状態になる。

(2) 実験ケース

実験のケースを表-2.1 にまとめて示した。継手状態の引張状態とは、左右の端矢板を鋼矢板取付用フレームに取り付けるときのボルト締めするとき、トルクレンチによって 165 kgf/cm まで締付けた状態にしたものである。中立状態とは、一度引張状態にしたのちに、ナットを2回半まわしてゆるめた状態である。

実験は、ケース番号の順に実施された。そして各ケースごとに後室内最上面と水位調整箱の水面の差 H_0 を 50~500 cm の範囲で、段階的に増加するよう、水位調整箱を上昇させていった（以下この段階を上昇と称する）。砂詰めのあるケースでは H_0 が 500 cm に達したうち、さらに段階的に下降させた（以下この段階を下降時と称する）。

各段階では、 H_0 の値設定後 0, 30, 60, 90 分後の時刻に測定を行った。測定項目は、各マノメーターによる圧力水頭と各所静水面の高さおよび流出水量である。流出水量の測定は、30, 60, 90 分後の各時刻の5分前、直前および5分後において計3回行いその平均値をもって、その時刻の流出水量とした。最終的なデータの整理は、90分後における測定値について行った。

表-2.1 実験ケース一覧

| ケース番号 | ケースの呼称 | 継手状態 | 矢板壁前後の状態 | | 摘 要 |
|-------|-----------------|------|----------|----------|--|
| | | | 後 室 側 | 前 室 側 | |
| 1 | 水-空-引張 | 引張状態 | 水中(砂詰なし) | 空中に露出 | 矢板壁のセット |
| 2 | 水-水-引張 | | 水中(砂詰なし) | 水中(砂詰なし) | ケース1の実験後に前貯水槽を取付けて実験 |
| 3 | 砂-水-引張 | | 水中(砂詰) | 水中(砂詰なし) | ケース2の実験後に後室の砂詰めを行って実験 |
| 4 | 砂-砂-引張 | | 水中(砂詰) | 水中(砂詰) | ケース3の実験後に前室に砂詰め。前室の砂は飽和状態で実験 |
| 5 | 水-空-中立 | 中立状態 | 水中(砂詰なし) | 空中に露出 | 矢板壁のセットしなおし |
| 6 | 水-水-中立 | | 水中(砂詰なし) | 水中(砂詰なし) | ケース5の実験後に前貯水槽を取付けて実験 |
| 7 | 砂-水-中立 | | 水中(砂詰) | 水中(砂詰なし) | ケース6の実験後に後室の砂詰めを行って実験 |
| 8 | 砂-水-中立 (1ヶ月) | | 水中(砂詰) | 水中(砂詰なし) | ケース6の実験後手を加えず、前室、後室とも水で満たした状態で1ヶ月放置。放置中の通水は時々行う。 |

写真-2.3 鋼矢板壁周辺の止水処理の状態（流出側下部および側部。写真中央に鋼矢板おさえ治具がみえる）



写真-3.1 矢板継手部からの漏出水の状況（ケース水 - 空気 - 引張）

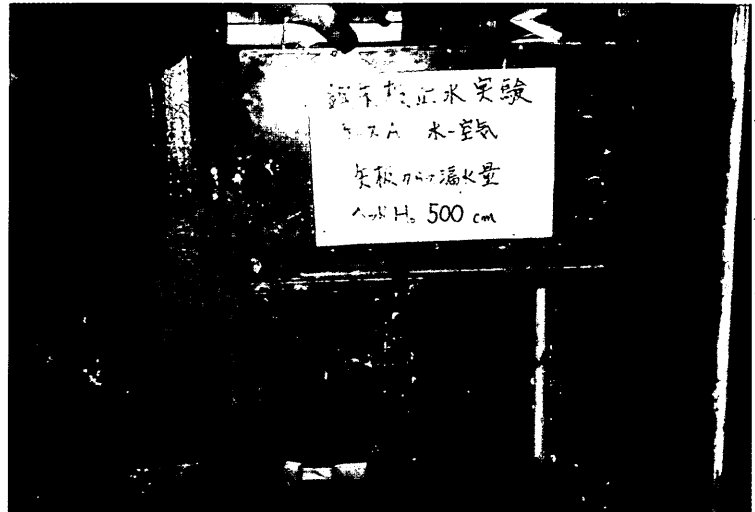


写真-3.2 矢板継手部からの漏出水の状況（ケース水 - 空気 - 中立）



3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

(1) 実験の状況

a) 継手部からの漏水状況

継手部からの漏水状況は、前室側が空中露出しているケース水-空-引張および、水-空-中立の2ケースの観察から知ることができる。ケース水-空-引張についてみると(写真-3.1 参照)、継手部からの漏出水は、継手から空中へ噴出するほど、多量でなく、継手間のすき間をつたって流下し、継手部下端で、まとまって矢板をはなれるように流れ出している。漏出の程度は一樣でなく、矢板 Y-2 と Y-3 の間で多く、矢板 Y-3 と Y-4 の間が少ない。ケース水-空-中立については(写真-3.2 参照)、流出量が矢板 Y-4 と Y-5 の間で非常に多く噴出する状態にある。その他の箇所では、ケース水-空-引張と同様に継手間のすき間をつたって流下している状況にあった。

b) マノメーターの安定状況

砂詰めのないケースでは、注入側の水位調整箱による水位測定直後に安定し、一定値となった。砂詰めのあるケースについては、水位設定後、早い時間に一定値に近づいており、ほとんどのケースで 60 分後と 90 分後の測定値の差は 1mm 以下になっている。水頭の大きな状態では 1mm よりも大きな差がでるものがあったが、それでもおおむね 2~3mm 程度であった。このことからマノメーターの読み値は、流れが定常状態になったときの圧力水頭とみなしうるものと判断される。

c) 砂層中の流れの状況

測定した砂層中の流れにおける水圧の分布状況を示すために、ケース砂-水-引張、砂-砂-引張、砂-水-中立、砂-水-中立(1か月)の4ケースについて、上昇時の $H_0=300\text{cm}$ ときと、最高水位の $H_0=500\text{cm}$ のときの水圧の分布状況を 図-3.1~3.4 に示した。なお、 H_0 は前述のとおり注水側の水位調整水面の高さを、後室内の最上面を基準にして測定した値である。同図中の横軸は、マノメーターの取付位置を示してあり、縦軸は、前貯水槽の静水面を基準とした水圧の水頭表示である。A-6, B-6, C-6 については、側壁におけるマノメーターの取付位置が、矢板直背後から 5cm の位置であるが、センサー部分が矢板継手部に取付けてあるので、矢板直背面の位置にプロットしてある。A-7 は後貯水槽に取付けてあるので、ストレーナー位置における値と同一

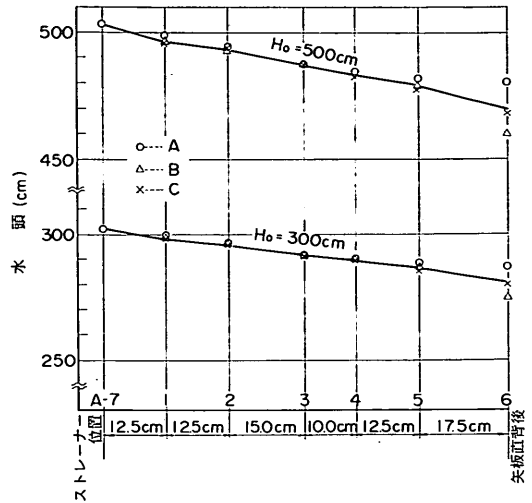


図-3.1 砂層中の水圧分布 (ケース砂-水-引張)

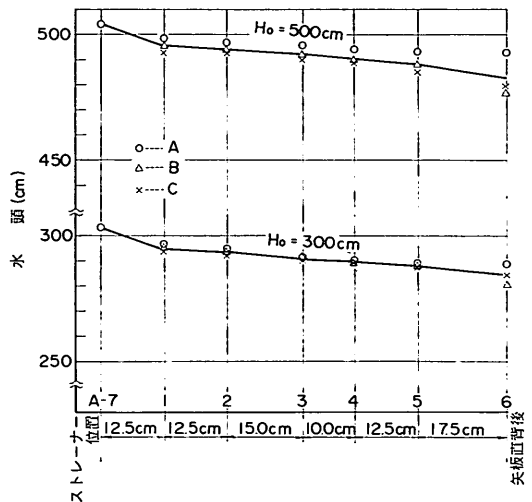


図-3.2 砂層中の水圧分布 (ケース砂-砂-引張)

であるものとして、ストレーナーの位置にプロットしてある。図中の実線は、A, B, Cの平均値を結んだものである。なお、ケース砂-砂-引張では前室側の測定値もあるが、前室砂層内での水圧変化が小さく、図示が困難な程度であること、前室の距離が短く、その結果から砂中の流れの特性を知る資料として有効でないことから、測定結果は示していない。これらの図から次のことがわかる。

① 測線 B, C では、ストレーナー近くと矢板直背後での水頭変化の勾配が急であるが、測点 1~5 では、それよりもゆるい直線的变化をしている。

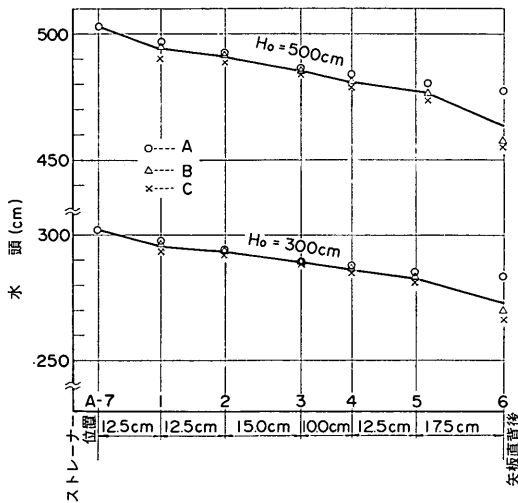


図-3.3 砂層中の水圧分布 (ケース砂 - 水 - 中立)

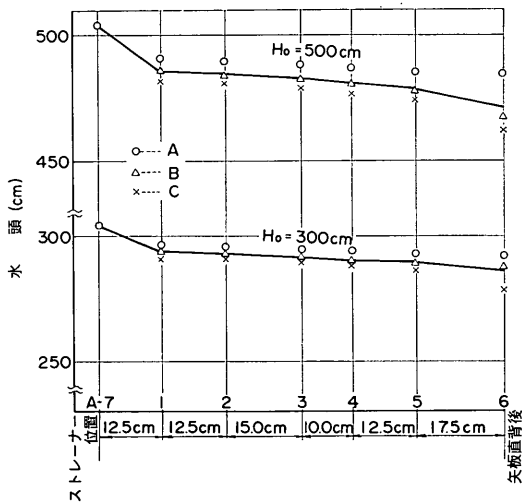
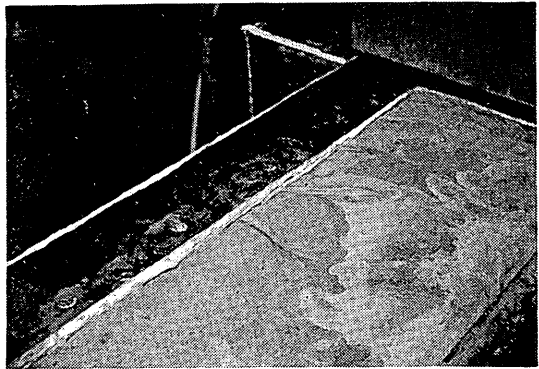
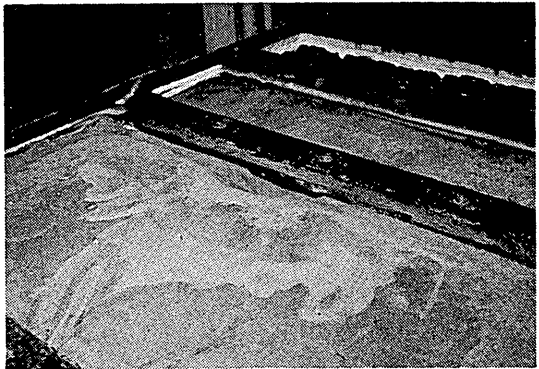


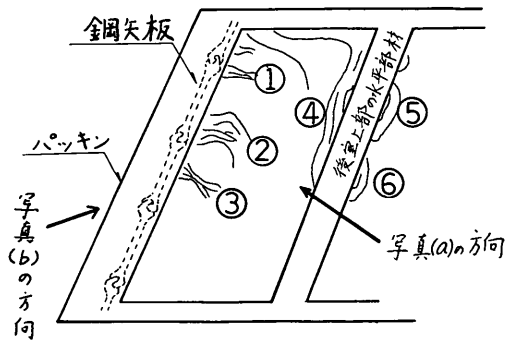
図-3.4 砂層中の水圧分布 (ケース砂 - 水 - 中立 (1ヶ月))



(a)



(b)



みずみちの最大深さ (単位 mm)

- ① 1.8, ② 1.8, ③ 2.5, ④ 1.3, ⑤ 3.5, ⑥ 2.5

写真-3.3 後室砂層の表面の状況 (ケース砂 - 砂 - 引張の実験後)

② 測線Aの水頭は測線B, Cよりも大きい。特に矢板直背後ではその傾向が大きい。ストレナー近くでの水頭変化の勾配が急であるが、その他では、ほぼ直線の、それよりもゆるい勾配の水頭の変化を示す。

③ 3測線の水頭の平均値は、測点1~5では、測線Bの値にほぼ等しく、かつ、直線的に変化している。

実験中の砂層中の流れの状況を推測するために、実験終了後に流入側水槽のふたを取りはずしたのちの砂層表面付近の観察を行った。写真-3.3は、ケース砂 - 砂 - 引張の実験後の状況を示す。このとき、後室内の矢板壁に

近い範囲で平均 1.2cm、後室内の後貯水槽に近い範囲で平均 2.0cm 沈下していることがわかった。後貯水槽、前貯水槽内に土粒子がたまり積しているものの、その量は微量であること、流出水のにごりはほとんどないことから、この沈下の原因は、実験中に砂層の密度が変化したためによるものと考えられる。ケース砂 - 水 - 中立 (1

鋼矢板壁の透水実験

か月)の実験後においても観察したが、ケース砂-砂-引張の実験と類似の状態にあった。以上のことからみて、後室上面近くでは、砂層をぬけて、砂表面上を流れる状態になっていたことがわかる。

実験中の砂層の透水性の変動を知るため、透水係数を、マンメーターによる圧力水頭の測定値から逆算した。具体的には、測点1の圧力水頭の平均値と測点4の圧力水頭の平均値の差からダルシー則が成立するものとして計算した。前述のように厳密には、一様な水平流れになっていないが、砂層の透水性の変動を把握するためには、支障のないものとする。計算結果をまとめたものが図-3.5~3.8である。これによると次のことがわかる。最初の砂詰めを行った実験ケースであるケース砂-水-引張では、上昇時と下降時で大きな差がなく、ほぼ一定の 5×10^{-2} cm/s 程度の値を示している。その後の実験であるケース砂-砂-引張と砂-水-中立では、上昇時には、ほぼ一定の 5×10^{-2} cm/s 程度の値を示しているが、下降時にはこれより大きな値で、最大 9×10^{-2} cm/s 程度の値を示す。そして h が小さくなるにつれて上昇時の値に近づく傾向がある。ケース砂-水-中立(1か月)では、上昇時・下降時とも、 h が大きくなると k も変化して大きくなり、その変化の範囲は $5 \times 10^{-2} \sim 1.2 \times 10^{-1}$ cm/s となっている。要約すれば、実験中の k は $5 \times 10^{-2} \sim 1.2 \times 10^{-1}$ cm/s の範囲にあるということがで

きる。これは、中詰砂の粒径分布からハーゼン(Hazen)の式、 $k=c \cdot D_{10}^2$ で $c=100 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ とし、 $D_{10}=0.02 \text{ cm}$ を代入して求めた $k=4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ より若干大きめの値であるが、大きくかけはなれた値ではない。

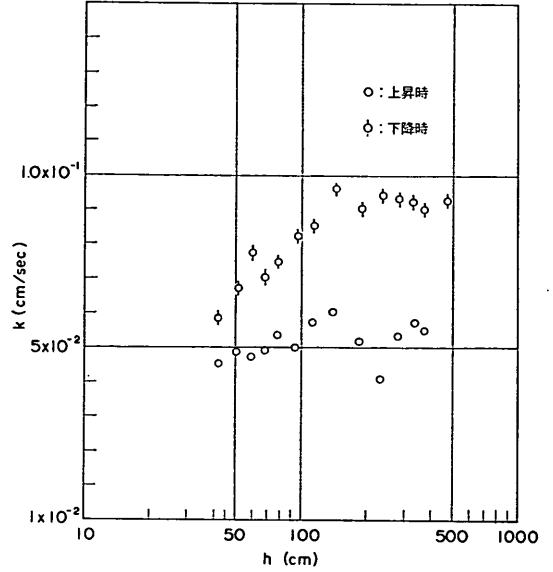


図-3.6 砂層の透水係数の変化(ケース砂-砂-引張), ただし後室のみ

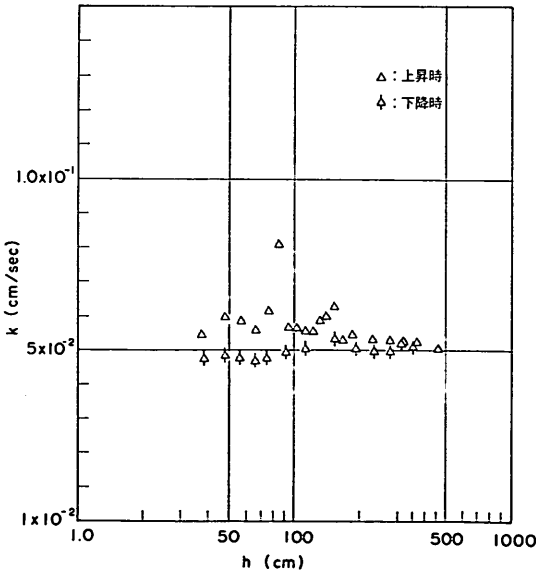


図-3.5 砂層の透水係数の変化(ケース砂-水-引張)

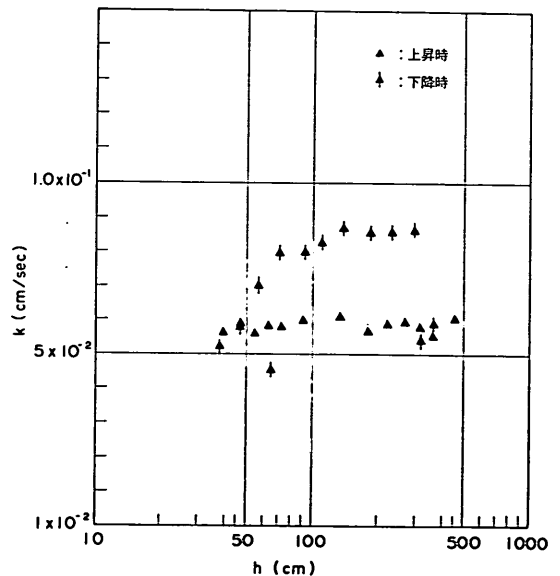


図-3.7 砂層の透水係数の変化(ケース砂-水-中立)

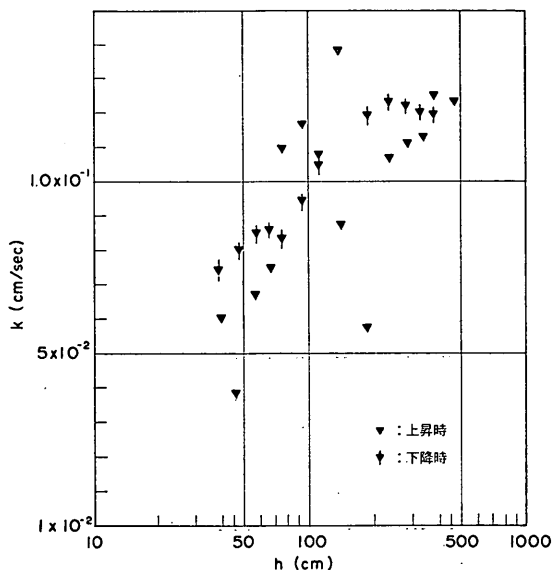


図-3.8 砂層の透水系数の変化 (ケース砂-水-中立 (1ヶ月))

(2) 継手部からの流出水量

継手部からの流出水量の特性をみるために、矢板壁からの全流出量を継手の総延長で除してもとめた継手単位長さ当たりの流出量 q ($\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{cm}$) と継手前後の圧力水頭差 h (cm) との関係を整理した。

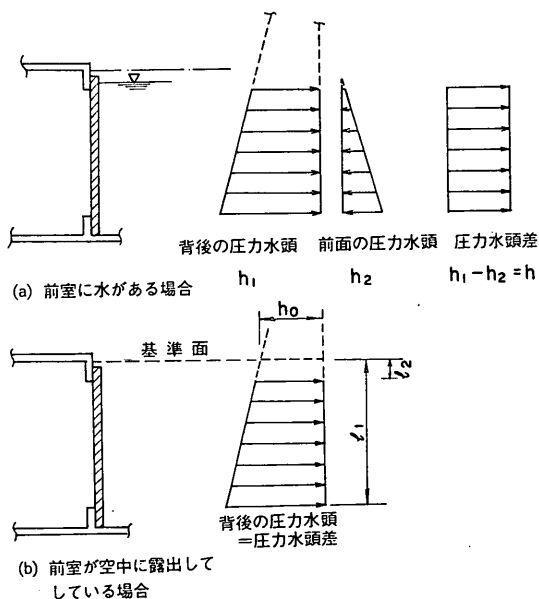


図-3.9 矢板壁に作用する水圧

ケース水-空-引張および水-空-中立の2ケースについての圧力水頭差は 図-3.9 (b) のように台形分布をしている。この場合は、代表値として基準面における値 h_0 (図中に表示) をとり、これを h とおいて整理した。具体的にはマンメーター A-6 の値をとった。

ケース水-水-引張および水-水-中立の2ケースでは、図-3.9 (a) のように一様な圧力水頭差になる。具体的に、 h としてマンメーター A-6 の値と A-1' の値の差をとる。

後室または、後室と前室に砂詰めをしたケースでは、理想的な一様な流れになっていれば 図-3.9 (a) のようになる。そこでマンメーター A-6, B-6, C-6 の平均値と、マンメーター A-1' の値の差 (ただし、ケース砂-砂-引張のケースでは、マンメーター A-1', B-1, C-1' の平均値) を h とおいた。

図-3.10 および 図-3.11 は h と q の関係を、上昇時と下降時に分けて示したものである。

中詰砂のある4ケースについて、上昇時と下降時を同図に示したものが、図-3.12~3.15 である。ケース水-空-中立は流出水が非常に多く、水の供給能力以上になったため、 $h=33\text{cm}$ の1点しか測定できなかった。ま

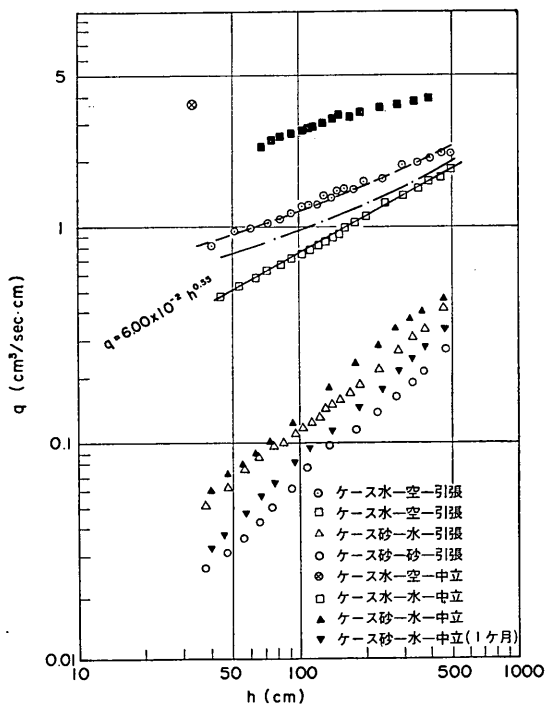


図-3.10 $q \sim h$ 関係図 (上昇時)

鉛矢板壁の透水実験

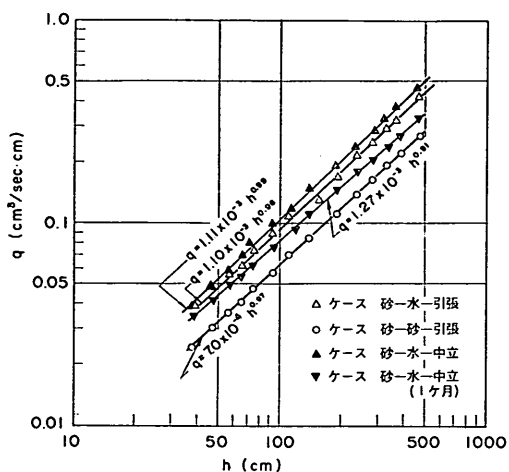


図-3.11 $q \sim h$ 関係図 (下降時)

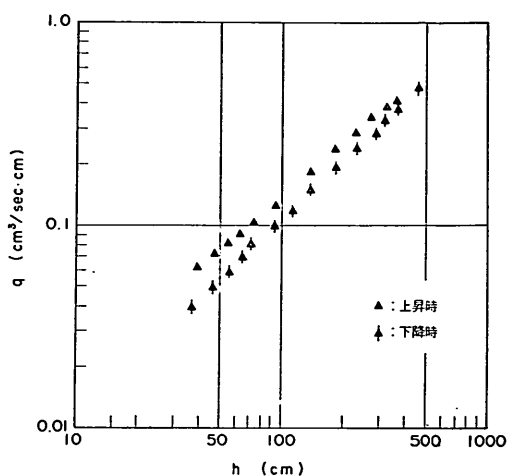


図-3.14 $q \sim h$ 関係図 (ケース砂-水-中立)

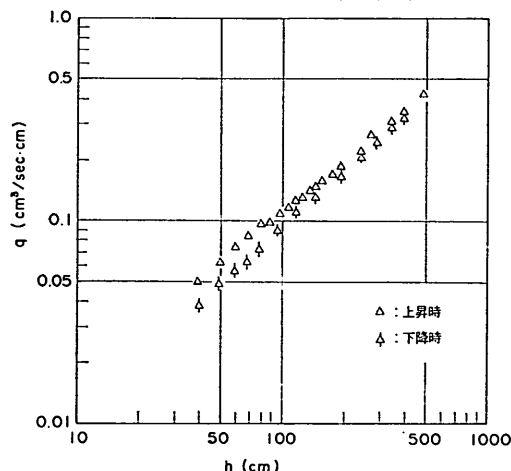


図-3.12 $q \sim h$ 関係図 (ケース砂-水-引張)

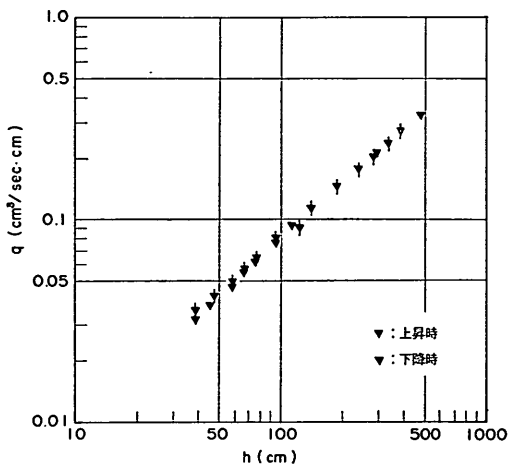


図-3.15 $q \sim h$ 関係図 (ケース砂-水-中立 (1ヶ月))

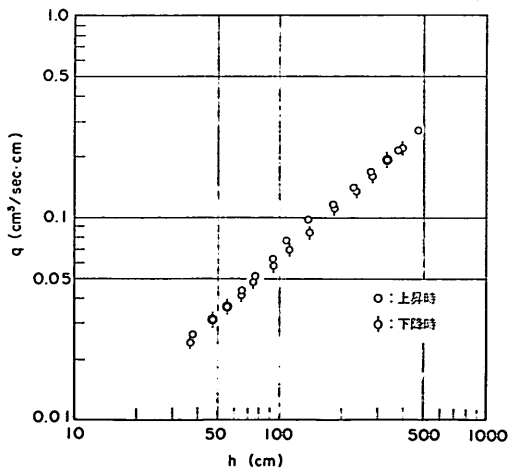


図-3.13 $q \sim h$ 関係図 (ケース砂- \vdash -引張)

た、ケース水-水-中立は、止水処理が十分でなく矢板取付部周辺からの漏水があり、止水の応急処置をしていることから、信頼できるデータではない。そのため、この2ケースを除いた他のデータを中心に結果を論ずることとする。

はじめに、矢板壁の両側に砂詰めのないケースについて考える。

ケース水-水-引張の実験結果は $q=0.060h^{0.55}$ であらわせる。矢板壁前面が空中に露出している場合と、水中にある場合のちがいをみるために、ケース水-空-引張と水-水-引張の結果を比較する。ケース水-空-引張の h が台形分布の圧力水頭差の代表値をとって

るため、直接比較することはできない。そこで、ケース水-水-引張の実験結果から得られた $q=0.060h^{0.55}$ をもとに、ケース水-空-引張の実験と同じ台形の圧力水頭差の分布の場合の流出量を推定した結果と比較することとする。 l_1, l_2 を継手下端および上端の基準面から距離(図-3.9 (b) 参照)とすると、ケース水-空-引張と同じ台形の圧力水頭差の分布を仮定したときの推定流出量 q' ($\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{cm}$) は次式でもとまる。

$$q' = \frac{1}{l_1 - l_2} \int_{h_0 + l_2}^{h_0 + l_1} K h^n dh$$

$$= \frac{K}{(n+1)(l_1 - l_2)} \{ (h_0 + l_1)^{n+1} - (h_0 + l_2)^{n+1} \}$$

(3.1)

ここに、 $K=0.06$
 $n=0.55$

(3.1) 式でもとめた q' の値および、その 1.25 倍を図示したのが図-3.10 の 1 点鎖線と破線である。破線はケース水-空-引張の実験結果と比較的よい一致をしている。このことから、矢板壁前面が空中に露出している場合でも、前面が水中にある場合と同じように、 $h \propto h^{0.55}$ に近い関係式が成立するものと推測できる。そして比例係数 (K に相当するもの) は、前面が水中の場合より大きく、1.25 倍であるということが推測できる。

次に、矢板壁の両側または流入側が砂詰めされたケースについてみる。矢板壁背後(後室)に砂を投入して最初に行った実験ケースであるケース-砂-水-引張、砂-水-中立の 2 ケースをみると、上昇時と下降時では、下降時のほうが流出量が小さい。また、すべてのケースで、上昇時より下降時のほうが比較的直線上にのり、安定した $q \sim h$ 関係があることがわかる。これらのことは、透水実験を行っていく過程で継手部の砂詰まりの状態が変化し、しだいに安定した状態に変わっていくことをものがたるものと考えられる。より安定な状態になった下降時の $q \sim h$ 関係は、図-3.11 中の実線で近似でき、その関係式を図中に記した。これによると、 q は h の 0.91~0.99 乗に比例するという結果になっていることがわかる。

次に、同じ継手状態の実験ケース間の比較をする。継手が引張状態にある実験ケース間では、同じ圧力水頭差に対する流出量 q に着目すると、矢板壁前後が水中にある場合(ケース水-水-引張)を基準にして考えると、矢板壁前面が空中に露出している場合(ケース水-空-引張)は 1.25 倍の流出量(前述の検討結果による)と

なり、背後に砂詰めされた場合(ケース砂-水-引張)は、 $h=50\text{cm}$ で 0.091 倍、 $h=500\text{cm}$ で 0.23 倍の流出量となる。さらに前面に砂詰めすると(ケース砂-砂-引張に相当)、背後だけ砂詰めされた場合(ケース砂-水-引張)の 0.66~0.68 倍の流出量になる。

継手が中立状態の実験ケース間の比較では、ケース水-水-中立の実験結果が信頼できるものでないで、矢板壁前後が水中の場合と、矢板壁背後が砂詰めされた場合との比較が、正確にできないが、継手が引張状態の場合より、背後の砂詰めによる流出量の低下の割合が大きいように思われる。ケース砂-水-中立と砂-水-中立(1 か月)の実験結果の比較からは、1 か月放置により、流出量が 0.84~0.70 倍に低下したことがわかる。

3.2 既応の実験結果との比較

まずはじめに既応の実験結果で、今回の実験結果と対比できる形で整理されたものとして、山村和也他 3 名によるもの¹⁾と久保浩一・村上守によるもの²⁾をとりあげて、今回の実験と比較してみる。

山村等は、実験用矢板壁として II 型鋼矢板(ラコワナ型継手)を加工したものと、NKK 軽量鋼矢板の 2 種類を用いて、矢板壁の両側が水中または砂中にある状態での矢板壁前後の圧力水頭差と流出水量の関係を把握している。使用砂は粒径の比較的そろっている川砂と、細粒分をふくむ海岸砂の 2 種類であり、その粒径分布は図-3.16 中に示すものである。実験用矢板壁は、砂層に打ちこんだものでなく、あらかじめ矢板壁をたてこみ、そのあと砂を前後に投入している。

久保・村上は、V 型鋼矢板(ラコワナ型継手)を用い、矢板壁の両面に水位の異なる静水面が存在する状態での流出量を測定しており、矢板壁の両側とも砂詰めのない場合と、片側に砂詰めされた場合について実験を行っている。実験に用いた砂は粗い川砂で、その粒径分布は図-3.16 に示すとおりである。砂詰めのない場合の実験結果からは、両面が水中にある継手部と片面が空中に

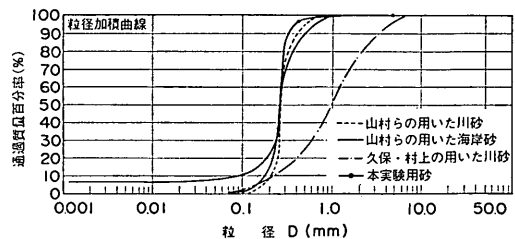


図-3.16 実験に用いた砂の粒径分布の比較

鋼矢板壁の透水実験

露出している継手部の流出特性は同一であると仮定して、継手前後の圧力水頭差と流出量の関係をもとめた。又、砂詰りのある場合の実験では、砂詰りのない場合の実験結果を利用して、砂に接していない継手部からの流出量を推定し、実験結果を補正して砂中にある継手部からの流出量を求めた。そして、矢板壁前面とその背後 30 cm 砂中に入った点との圧力水頭の差と流出量の関係を整理して求めている（矢板壁背後 30 cm の間の砂中の流れによる損失水頭は、継手部における損失水頭に比較して小さいので、矢板壁前面の圧力水頭とその背後 30 cm の砂中での圧力水頭の差は、継手前後の圧力水頭に近いものと思われる）。

今回の実験結果をふくめて砂詰りのない場合の実験結果から得た継手単位長さ当たりの流出量 q ($\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{cm}$) と継手前後の圧力水頭差 h (cm) の関係を 図-3.17 にまとめて示す。図中の破線、一点鎖線に付記された式は、もとの文献に記載された実験式^{3,4)}の単位を変えたものであり、線の範囲は実験の h の範囲にあたる。図-3.21 から次のことがいえる。

今回の実験で、実施されていない h の小さな範囲においても $q \propto h^n$, $n \approx 0.5$ が成立することがわかる。したがって今回の実験結果をふまえると、 $h < 500$ cm の範囲では、 $q \propto h^n$, $n \approx 0.5$ が成立するものと判断することができる。

砂詰りのある場合の実験から得た結果をまとめて 図-3.18 に示した。図中の破線および一点鎖線は 図-3.17 の

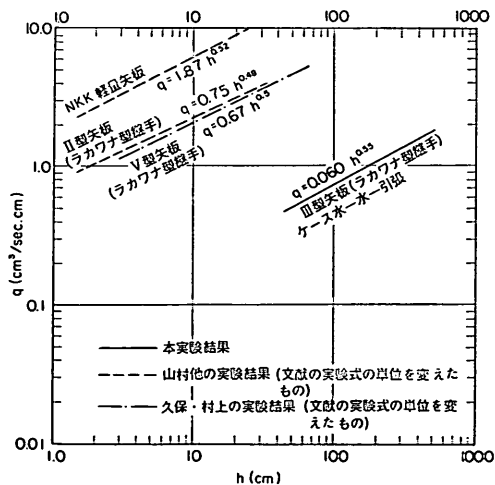


図-3.17 $q \sim h$ 関係図 (矢板壁の両側に砂詰りがない場合)

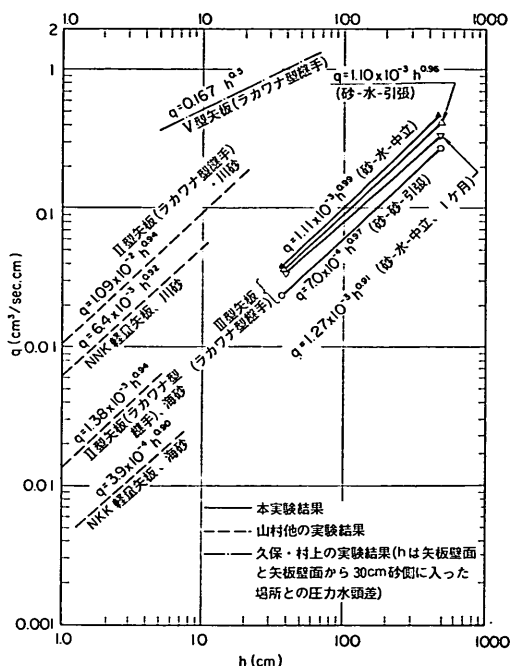


図-3.18 $q \sim h$ 関係図 (矢板壁の両側または片側に砂詰りがある場合)

場合と同様^{5,6)}である。図-3.18 から次のようなことがいえる。

山村他の実験結果は、今回の実験結果と同じ $q \propto h^n$, $n \approx 1.0$ という関係が h の小さな範囲についても成立することを示す。しかし、久保・村上の結果はこれとはちがって砂詰りのない場合の関係式と同一の形をしているものになっている。ところで、久保・村上が実験に用いた砂は、図-3.16 からわかるように、最大粒径 5 mm 程度、 d_{50} が 1 mm の非常に粗いものである。そのため、継手部に砂が十分詰まっていなかった状態になっていることが考えられる。かりにそのような状態になっていれば、砂詰りのない場合の関係に近い特性を示すことがありうるかも知れない。しかし、久保・村上による文献⁷⁾をふりかえると、筆者自らも指摘しているように実験結果が非常にばらついている。図-3.18 中に記した式はそのような実験結果から、大胆に $q \propto h^{0.5}$ の関係があるものとみなしてもとめられたものである。したがって、このことを考えると彼等の実験結果が $q \propto h^n$, $n \approx 0.5$ の関係であらわされると判断するには問題があるものと考えられる。

以上のことから、久保・村上の実験の場合のような非

常に粗い土砂の場合には疑問が残るが、すくなくとも、今回の実験や、山村他の用いたような砂によって、砂詰めがなされている場合には、 $h < 500 \text{ cm}$ の範囲で $q \propto h^n$ 、 $n \approx 1.0$ の関係が成立すると判断することができる。

今回の実験は、継手の種類とかみ合わせ状態、砂詰め用の砂の種類などの条件が限られたものであるが、矢板壁前後の状態に応じた流出量のちがい等についての情報を与えるものである。ただ、今回の実験用鋼矢板壁は現地矢板壁のおかれた状態とは、異なっていると考えられるので、この点に注意を払う必要がある。そのため、ここで今回の実験用鋼矢板壁と現地鋼矢板壁の透水性との定量的な比較を試みることにする。

現地における鋼矢板壁の透水性について報告されている文献としては、岸壁の残留水位の調査結果をもとに矢板壁構造物を、換算壁体幅 1 m の均一なダルシー則の成立する仮定の壁体におきかえた場合の換算透水係数 k' をもとめてたものがある⁹⁾。その結果は $k' = 1 \sim 5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ となっている。ただし、この場合の背後土砂の背後土砂の透水係数は、 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ のオーダーであった。そこで、現地での k' として大きめの $5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ をとったときの流出量と今回の砂詰めのある場合の実験結果を比較してみる。

今、換算壁体幅が L 、壁体前後の圧力水頭差を h とすると、漏水する壁体の鉛直方向の長さが、 h に比較して十分大きい場合を考えると、矢板壁の単位面積当たりの流出量 q_p は $q_p \approx k'(h/L)$ でもとまる。そして、 $h = 100 \text{ cm}$ のときで考えると、 $q_p = 5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}^2$ となる。これと比較すべき今回の実験は砂詰めのあるケースであり、流出量の最も少なかったケース砂 - 砂 - 引張の実験結果と比較することとすると、 $h = 100 \text{ cm}$ のとき $q = 6.1 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}$ である。実験用の矢板壁の継手幅は 22 cm であるので単位面積当たりの流出量は $6.1 \times 10^{-2} / 22 = 2.77 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}^2$ となる。さらに、現地の継手間隔を 40 cm として換算すると $2.77 \times 10^{-3} \times (22/40) = 1.52 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}$ となる。これは、現地の 30 倍の流出量である。本実験矢板壁がこのように現地矢板壁より大きい透水性を示す理由は、砂詰めした砂の透水係数が $0.5 \sim 1 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ と現地の裏込め土砂より大きいことから、継手部に詰まっている土砂も、今回の実験のほうが透水性がよいものであると考えられること、現地の矢板が打込まれたのに対して、本実験では単にたてこんだのちに砂詰めしているため、継手部のかみ合わせや砂詰り状態がちがうこと、時間経過と環境の差による継手部の

目づまり状態や錆および付着生物の状態がちがうこと等々が考えられる。いずれにしても、今回の実験結果を定量的な透水量の推定のために用いようとする場合は、上述のような現地矢板壁とのちがいについて、注意を払う必要がある。

3.3 継手部の流出水特性についての水理学的考察

(1) 矢板壁の両側が砂詰めされていない場合

実験用鋼矢板継手形状は、図-3.19 に示すようなも

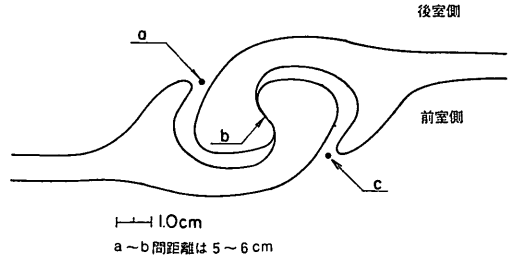


図-3.19 実験用鋼矢板継手拡大図

のである。矢板壁背面に砂詰めされたケースでは、 $a \sim b$ 区間に砂が詰まっている状態に、矢板壁の両面に砂詰めされたケースでは、さらに $b \sim c$ 区間に砂が詰まった状態になっている。このような継手部をもつ鋼矢板壁を次のような簡単なモデルにおきかえて、継手部の透水に関する一般的特性の把握と実験結果の解釈を試みる。すなわち、継手間隔に等しい幅を有する後室と前室に相当する水路と、継手部に相当する狭水路からなる、図-3.20 に示ような平面形状をもつ水路を考える。そして、この水路中の鉛直方向単位長さ当たりの流れを考える。図-3.20 中の狭水路部は、図-3.19 に示した継手部形状の実際の断面を、幅が漸減し、水路中間部に最狭部をもち、さらに漸増する水路におきかえたものである。ここで、以下の検討に用いるおもな記号を示すと次のとおりである。

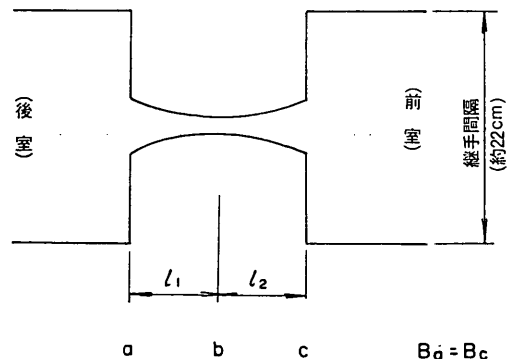


図-3.20 継手部のモデル (砂詰めのない場合)

v_i ; 断面 i での平均流速
 \bar{v}_i ; 断面 i が土砂で詰まっているときの土砂中の流れの実質流速 (平均流速)
 p_i ; 断面 i における水圧
 γ_w ; 水の単位体積重量
 g ; 重力加速度。980 cm/s²
 x ; 狭水路入口 (断面 a) に原点をおく、水路中心沿いの距離

$B(x)$; x における水路幅
 B_i ; 断面 i における水路幅
 q ; 水路の単位時間当たりの流出量。3.1 および 3.2 でいう継手単位長さ当たりの流出量に相当。

h_{ij} ; 断面 i と j の間の圧力水頭差。
 Δh_{ij} ; 断面 i と j の間の全損失水頭
 Δh_{fsij} ; 断面 i と j の間の土砂中の流れによる摩擦損失水頭
 Δh_{fwiij} ; 断面 i と j の間の土砂中でない流れによる摩擦損失水頭

$\Delta h_{ij}'$; Δh_{ij} のうち Δh_{fsij} と Δh_{fwiij} 以外の損失水頭
 はじめに、実験ケース水-水-引張に対応する矢板壁の両側が水中の状態を考える。図-3.20 の断面 a と c との間にベルヌーイの定理を適用する。位置の水頭は一定なので省略して次式を得る。

$$\frac{p_a}{\gamma_w} + \frac{v_a^2}{2g} = \frac{p_c}{\gamma_w} + \frac{v_c^2}{2g} + \Delta h_{ac} \quad (3.2)$$

そして、 $B_a = B_c$ なるので $v_a = v_c$ であるから次式となる。

$$\frac{p_a - p_c}{\gamma_w} = h_{ac} = \Delta h_{ac} \quad (3.2)'$$

ここで、 Δh_{ac} 摩擦損失水頭 $\Delta h_{f_{wac}}$ と、その他の損失水頭 $\Delta h_{ac}'$ に分けて考える。後者については、断面 $a \sim b$ 間の断面縮小による損失水頭、 $b \sim c$ 間の断面拡大による損失水頭および $a \sim c$ 間の屈曲による損失水頭が考えられる。このうち、断面縮小と屈曲による損失水頭は、水路の断面形状がなめらかな変化をしているため、縮流や渦流が生じることがなく無視しうる程度と考えられる。したがって、 $\Delta h_{ac}'$ としては、次式であらわされる断面拡大による損失水頭を考えればよい。

$$\Delta h_{ac}' = f_{e1} \frac{(v_b - v_c)^2}{2g} + f_{e2} \frac{(v_c - v_{c0})^2}{2g} \quad (3.3)$$

第1項は、断面 $b \sim c$ 間の断面急拡による損失水頭、第2項は断面 c での断面急拡による損失水頭である。ここに、 f_{e1} 、 f_{e2} は断面形状によって決まる係数で、形状

によって、最大 1.2 程度の値になる⁹⁾。 v_{c0} は、断面 c での断面急拡後の平均流速である。そのため $v_{c0} \ll v_c \ll v_b$ であるので、式 (3.3) は次式とみなすことができる。

$$\Delta h_{ac}' = f_{e1} \frac{v_b^2}{2g} \quad (3.3)'$$

次に、摩擦損失水頭 $\Delta h_{f_{wac}}$ を考える。摩擦損失水頭は、流れが層流の場合と乱流の場合で特性が異なる。層流が乱流かはレイノルズ数 Re によって判断され、 Re は $Re = vD/\nu$ (v ; 平均流速、 D ; 代表寸法、 ν ; 動粘性係数で水の場合、10°C で 0.0131 cm²/s) で定義される。ここで代表寸法として水路幅をとると $Re = q/\nu$ となる。ケース水-水-引張の実験結果によると、 $h = 50 \text{ cm} \sim 500 \text{ cm}$ (h は h_{ac} に相当する) では、単位継手長さ当たりの流出量 q は 0.52~1.83 cm³/cm·s であった。したがって、レイノルズ数は $Re = 40 \sim 140$ と小さいため、層流状態になっているものと考えられる。層流状態の流れに直角な断面内の流速分布は一様でなく放物線分布であり、平均流速 $v(x)$ は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$v(x) = -\frac{g}{12\nu} \{B(x)\}^2 \frac{dh}{dx} \quad (3.4)$$

したがって、断面 $a \sim b$ 間での層流の摩擦損失水頭 $\Delta h_{f_{wac}}$ は、

$$\begin{aligned} \Delta h_{f_{wac}} &= \int_a^c -\frac{dh}{dx} dx = \frac{12\nu}{g} \int_a^c \frac{v(x)}{\{B(x)\}^2} dx \\ &= \frac{12\nu q}{g} \int_a^c \frac{1}{\{B(x)\}^3} dx = \frac{12\nu}{g} K_{1q} \quad (3.5) \end{aligned}$$

となり、ここに

$$K_1 = \int_a^c \frac{1}{\{B(x)\}^3} dx \quad (3.6)$$

である。層流状態の速度分布は放物線分布であると述べたが、実際には断面 a で等分布であるものが、ある距離離れたのちに放物線分布になる。したがって $\Delta h_{f_{wac}}$ としては、この遷移区間を考慮するのが正確であるが簡単のためにこれを無視した。また、等分布な流速が放物線分布に変化する間に圧力水頭が $f_{e3} \cdot v_a^2/2g$ (ここに f_{e3} は係数で円形一様断面の水路では 1.0 であるが¹¹⁾、ここで考えている水路の場合は 1.0 より小さな値となる) 低下する。したがって、これは $\Delta h_{ac}'$ に含まれるべきものであるが、 $f_{e3} \cdot v_a^2/2g$ が $v_b^2/2g$ に比較して小さいので無視している。

以上のことから、結局、式 (3.2)' は次のようになる。

$$h_{ac} = f_{e1} \frac{v_b^2}{2g} + \frac{12\nu}{g} K_{1q} = \frac{f_{e1}}{2gB_b^2} q^2 + \frac{12\nu}{g} K_{1q} \quad (3.7)$$

これが継手部からの流出量 q と継手前後の圧力水頭

h_{ac} (前節までに用いた h に相当する) の関係式である。この式は、摩擦損失水頭である第 2 項が、第 1 項に比較して無視できるほど小さいとき、 $q \propto h_{ac}^{0.5}$ となることを、逆に摩擦損失水頭が支配的である場合は $q \propto h_{ac}$ であることを示す。

式 (3.7) の関係式で、今回の実験結果が説明できるかどうか検討してみる。そのためには、具体的に B_b と K_1 が与えられなければならない。すなわち、狭水路の形状を決める必要がある。ここでは簡単のために狭水路の幅 $B(x)$ は直線的に変化すると仮定する。このとき $B(x)$ は次式となる。

$$B(x) = \begin{cases} B_a + (B_b - B_a) \frac{x}{l_1} & (\text{断面 a} \sim \text{b 間}) \\ B_b + (B_a - B_b) \frac{x - l_1}{l_2} & (\text{断面 b} \sim \text{c 間}) \end{cases} \quad (3.8)$$

そして、実際の継手形状 (図-3.6) を参考として、 $l_1 + l_2 = 10 \text{ cm}$ 、 $B_a = 0.5 \text{ cm}$ と仮定する。また $f_{e1} = 1.0$ と仮定する。

今回の実験結果によれば、ケース水 - 水 - 引張では $q \propto h^{0.55}$ であり、第 2 項を無視した場合の $q \propto h^{0.5}$ に近い結果を得ている。そのため、まず式 (3.7) の第 2 項が無視しうようなものがどうか検討する。すなわち、第 2 項の第 1 項に対する比を X とおいて、次式を計算してみる。

$$X = \frac{24\nu B_b^2 K_1}{q} \quad (3.9)$$

ここで、 K_1 は次式となる。

$$K_1 = \int_a^c \frac{1}{\{B(x)\}^3} dx = \frac{B_a + B_b}{2B_a^2 B_b^2} (l_1 + l_2) \quad (3.6)'$$

したがって、

$$X = \frac{12\nu(B_a + B_b)(l_1 + l_2)}{B_a^2} \cdot \frac{1}{q} \quad (3.9)'$$

となる。そして $B_a \gg B_b$ と考えてよいので式 (3.9)' 中で $(B_a + B_b)/B_a^2 \approx 1/B_a$ とみなせる。ここで、前述のとおり $l_1 + l_2 = 10 \text{ cm}$ 、 $B_a = 0.5 \text{ cm}$ とおく。また、 $h = 50 \sim 500 \text{ cm}$ に対する実験結果 $q = 0.5 \sim 1.83 \text{ cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}$ を代入すると

$$X = \frac{12 \times 0.0131 \times 10}{0.5} \left(\frac{1}{0.52} \sim \frac{1}{1.83} \right) = 6.0 \sim 1.7$$

となる。この X の値からは第 2 項が無視できないというより、第 2 項のほうが、第 1 項より大きいことになる。つまり $q \propto h_{ac}^n$ 、 $n \approx 0.5$ という関係が成立しないということであり、式 (3.7) の関係式では説明できないということになる。ところで、式 (3.9) に代入した q は矢板

壁からの全流出量を継手給延長で除して得た平均値である。したがって、上記の検討は矢板壁の継手が全延長にわたって、代表的な一継手状態にあることを想定したものであるといえる。しかし、実際の継手部の状態は、実験ケース水 - 空 - 引張や水 - 空 - 中立の漏出水の状態の観察結果でもわかるように、全体が同一の状態になっていない。そのため、この点を考慮した考察が必要であると考えられる。具体的には狭水路形状の違いを評価する必要があるが、ここでは単に B_b だけが違うという状態に想定し、 B_b のちがいが、 $q \sim h$ の関係にどう影響するのかを式 (3.7) により検討する。式 (3.7) に仮定した数値を代入すると次式となる。

$$5.102 \times 10^{-4} \frac{1}{B_b^2} q^2 + 3.208 \times 10^{-3} \frac{0.5 + B_b}{B_b^2} q - h_{ac} = 0 \quad (3.10)$$

B_b 仮定して式 (3.10) を解いた結果を表-3.1 に示す。同表中の h_{ac}'/h_{ac} は式 (3.10) 中第 1 項の全損失水頭に対する比に相当する。 n は、記入されている欄に対応する h_{ac} についての計算結果 q と $h_{ac} = 10 \text{ cm}$ の場合の計算結果 q が、 $q \propto h^n$ の関係を満たすとして逆算した n である。 Re は代表寸法として水路幅 $B(x)$ をとったときのレイノルズ数で、 $Re = v \cdot B(x) / \nu = q / \nu$ で計算した。ただし $\nu = 0.0131 \text{ cm}^2/\text{s}$ (at 10°C) をとった。

表-3.1 から次のようなことがわかる。まず、 B_b が小さいと h_{ac}'/h_{ac} がほとんど 0 に近く摩擦損失水頭が支配的であることがわかる。そして、そのときの流れは Re が小さいことから、層流状態である。その結果 n が 1.0 に近い値を示す。逆に B_b が大きいと摩擦損失水頭の占める割合は低下し、その結果 n は 0.5 に近づく。又、 B_b が一定の場合は h_{ac} が小さいほど摩擦損失水頭の占める割合が大きくなる。次に、流出量の絶対値は B_b が大きくなると大きくなるが、 B_b の変化の割合以上に变化する。ちなみに、単位水路幅当たりの流出量 (q/B_b) を $B_b = 0.01$ のときの値を基準にして比で示すと $h_{ac} = 500 \text{ cm}$ のとき、 B_b が 0.05, 0.01, 0.005, 0.001 cm の順に 1.13 : 1.00 : 0.86 : 0.34 であり、 $h_{ac} = 50 \text{ cm}$ のとき同様に、1.47 : 1.00 : 0.67 : 0.16 である。

ここで、実験結果と計算結果の比較を試みる。実験結果の $n = 0.55$ に近いのは、 B_b が 0.05 cm 程度以上の場合であるが、このときの流出量は実験結果の約 26 倍以上と、はるかに大きい。一方、実験結果の流出量に近いのは B_b が 0.005 cm よりいくぶん小さな場合であるが、このときは n は実験結果の 0.55 よりずっと大

鋼矢板壁の透水実験

表-3.1 継手部最小間隔 (B_0) と流出特性 (砂詰めなし, 前室側水中の場合)

| B_0 (cm) | | 0.05 | | | | |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|-------|------|--|--|
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 47.8 | 0.93 | 3649 | 0.55 | | |
| 250 | 33.3 | 0.91 | 2542 | 0.56 | | |
| 50 | 14.02 | 0.80 | 1070 | 0.58 | | |
| 10 | 5.48 | 0.61 | 418 | — | | |
| B_0 (cm) | | 0.01 | | | | |
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 8.43 | 0.72 | 644 | 0.71 | | |
| 250 | 5.58 | 0.63 | 426 | 0.73 | | |
| 50 | 1.914 | 0.37 | 146.1 | 0.80 | | |
| 10 | 0.525 | 0.14 | 40.0 | — | | |
| B_0 (cm) | | 0.005 | | | | |
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 3.61 | 0.53 | 276 | 0.82 | | |
| 250 | 2.26 | 0.42 | 172.5 | 0.85 | | |
| 50 | 0.642 | 0.17 | 49.0 | 0.91 | | |
| 10 | 0.147 | 0.04 | 11.2 | — | | |
| B_0 (cm) | | 0.001 | | | | |
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 0.285 | 0.08 | 21.8 | 0.98 | | |
| 250 | 0.1485 | 0.05 | 11.3 | 0.97 | | |
| 50 | 0.0308 | 0.01 | 2.4 | 1.00 | | |
| 10 | 6.21×10^{-3} | 0.00 | 0.5 | — | | |
| B_0 (cm) | | 0.0001 | | | | |
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 3.11×10^{-3} | 0.00 | 0.2 | 1.00 | | |
| 250 | 1.56×10^{-3} | 0.00 | 0.1 | 1.00 | | |
| 50 | 3.12×10^{-4} | 0.00 | 0.02 | 1.00 | | |
| 10 | 6.23×10^{-5} | 0.00 | 0.005 | 1.00 | | |
| 実験結果 q ($cm^3/s \cdot cm$) | | ケース 水-水-引張 | | | | |
| h_{ac} (cm) | | | | | | |
| 500 | 1.83 | | | | | |
| 250 | 1.25 | | | | | |
| 50 | 0.52 | | | | | |
| 10 | — | | | | | |

註: 実験結果 $q = 6.0 \times 10^{-4} h^{0.55}$

表-3.2 継手部最小間隔 (B_0) と流出特性 (砂詰めなし, 前室側空中の場合)

| B_0 (cm) | | 0.05 | | | | |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|-------|------|--|--|
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 48.6 (1.02) | 0.97 | 3709 | 0.53 | | |
| 250 | 34.1 | 0.95 | 2603 | 0.53 | | |
| 50 | 14.81(1.06) | 0.90 | 1131 | 0.54 | | |
| 10 | 6.19 | 0.78 | 472 | — | | |
| B_0 (cm) | | 0.01 | | | | |
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 9.13 (1.08) | 0.85 | 697 | 0.62 | | |
| 250 | 6.24 | 0.80 | 477 | 0.63 | | |
| 50 | 2.43 (1.27) | 0.60 | 185.5 | 0.68 | | |
| 10 | 0.812 | 0.34 | 62.0 | — | | |
| B_0 (cm) | | 0.005 | | | | |
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 4.22 (1.17) | 0.73 | 322 | 0.71 | | |
| 250 | 2.80 | 0.64 | 214 | 0.73 | | |
| 50 | 0.961(1.50) | 0.38 | 73.4 | 0.80 | | |
| 10 | 0.265 | 0.14 | 20.2 | — | | |
| B_0 (cm) | | 0.001 | | | | |
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 0.477 (1.67) | 0.23 | 36.4 | 0.93 | | |
| 250 | 0.266 | 0.14 | 20.3 | 0.95 | | |
| 50 | 0.0599(1.94) | 0.04 | 4.6 | 0.98 | | |
| 10 | 0.0123 | 0.01 | 0.9 | — | | |
| B_0 (cm) | | 0.0001 | | | | |
| h_{ac} (cm) | q ($cm^3/s \cdot cm$) | $\frac{h_{ac}'}{h_{ac}}$ | R_e | n | | |
| 500 | 6.21×10^{-3} (2.00) | 0.00 | 0.5 | 1.00 | | |
| 250 | 3.11×10^{-3} (| 0.00 | 0.2 | 1.00 | | |
| 50 | 6.23×10^{-4} (2.00) | 0.00 | 0.05 | 1.00 | | |
| 10 | 1.25×10^{-4} (| 0.00 | 0.01 | — | | |
| 実験結果 q ($cm^3/s \cdot cm$) | | ケース 水-空-引張 | | | | |
| h_{ac} (cm) | | | | | | |
| 500 | 2.29(1.25) | | | | | |
| 250 | 1.56(1.25) | | | | | |
| 50 | 0.64(1.25) | | | | | |
| 10 | — | | | | | |

註: 実験結果 $q = 1.25(6.0 \times 10^{-2} \cdot h^{0.55})$

きい 0.8~0.9 程度の値となる。このことは、実験結果と矛盾し、継手部を狭水路と考えた場合の水理学的考察で説明できないように見えるのは、すでに X の計算結果によって言及したのと同様である。しかし、水路の最小幅 B_0 が、継手全体が同一でないという前提で次のように考えることによって実験結果の説明ができる。矢板壁からの全流出量は、継手部の最小間隔 (水路の最小幅 B_0) の広い部分からの流出量に、ほとんど占められている。そして、そのような箇所では、流出量が h^n , $n \approx 0.5$ に比例するような関係にあるので、矢板壁からの全流出

量もこの特性を反映する。ただし、このような箇所の全継手延長に占める割合が小さいため、矢板壁からの全流出量を平均して継手単位長さ当りの流出量に換算すると非常に小さな値となる。したがって、実験結果の q をもとに、代表的な1つの狭水路で、現象を説明しようとすると、水理学的に矛盾が出る。表-3.1 はこのような解釈を交づけるものである。

ところで、表-3.1 中の Re に着目すると、 B_0 が大きくなると相当大きな値を示している。そのような場合には、当初想定した層流状態になっているのか検討して

みる。

ここで考えているような2次元的な水路の場合の限界レイノズル数はよくわからない。しかし、開水路の場合のレイノズル数 Re_c は、径深 R ($R=A/U$, ここに A は流水断面積, U は潤辺) を用いて $Re_c=vR/\nu$ であらわされ、限界レイノズル数 $Re_{c0}=500$ といわれている¹²⁾。そこで、ここで考えている水路において、 U の代りに水路壁面に接している綫辺長をとって開水路に準じて考えるとすると、鉛直方向の単位長さ当たりの流れに対して、 $R=B(x) \times 1.0/2 \times 1.0=B(x)/2$ となる。したがって $v\{B(x)/2\}/\nu=Re_{c0}$ となるので、この水路での限界レイノズル数 $Re_c=vB(x)/\nu=2$, $Re_{c0}=1000$ という結果を得る。この値が、いくぶん目安になるものと推測されるので、かりに $Re_c=1000$ と考えてみると、 $B_0>0.01$ では B_0 増大とともに、乱流状態に移行していくことがわかる。ただし、乱流状態になるようなレイノズル数を示す流れの場合でも、狭水路部に入ってすぐ断面 a から乱流状態になるということではなく、ある程度流れがすすんでから乱流状態になるものと考えなければならぬが、どの程度流れがすすんでから乱流状態になるのかはよくわからない。仮に a~c 間全域が乱流状態であると想定すると、式 (3.7) の摩擦損失水頭に起因する右辺第2項は $f_{ca} \cdot v_b^2/2g$ (ここに f_{ca} は水路形状によって決まる係数) という形の式になる。従って、式 (3.7) の右辺全体が q^2 の項になるので $q \propto h^{0.5}$ という関係になり、このような状態であっても前述の実験結果の説明をくつがえすものとはならない。このように、 B_0 と h_{ac} が大きく Re が大きくなるときの継手部 (狭水路部) の流れの状態については、明確にはわからないものの、そのような B_0 の大きな場合では摩擦損失水頭が全損失水頭に占める割合が非常に小さいので計算結果の q , n , Re の値は表-3.1のそれとほとんどちがってこないものと考えてよい。

次に、実験ケース水-空-引張に対応する矢板壁の流出側が空中に露出している状態を考える。この場合は、断面 a からの流れが空中に噴出する状態になる、このときの噴出流の断面が αB_a (α は 1.0 を下まわる値の係数¹⁴⁾) であったとする。そして断面 a と断面 b (正確には断面 αB_b の噴出流の断面) の間にベルヌーイの定理を適用すると次式を得る。

$$\frac{p_a}{\gamma_w} + \frac{v_a^2}{2g} = \frac{v_b^2}{2g} + \Delta h_{ab} \quad (3.11)$$

そして、連続の式 $q=B_a v_a=\alpha \cdot B_b v_b$ が成立するが、 $B_a \gg B_b$ であるので式 (3.11) の左辺第2項は無視でき

る。したがって、式 (3.11) は次式となる。

$$\frac{p_a}{\gamma_w} = h_{ab} = \frac{v_b^2}{2g} + \Delta h_{ab} \quad (3.11)'$$

ここで、 Δh_{ab} を摩擦損失水頭 $\Delta h_{f_{wab}}$ とその他の損失水頭 $\Delta h_{ab}'$ に分けて考える。後者については、断面 a~b 間の断面縮少と屈曲による損失水頭が考えられるが、継手前後が水中にある状態と同じように無視しうるものと考えられる。したがって、摩擦損失水頭のみを考えればよいので

$$\Delta h_{ab} = \Delta h_{f_{wab}} \quad (3.12)$$

摩擦損失水頭については、継手前後が水中にある場合と同様に層流状態にあることを想定すると、式 (3.7) と (3.6) の代りに次式を得る。

$$h_{ab} = \frac{v_b^2}{2g} + \frac{12\nu}{g} K_2 q = \frac{1}{2g(\alpha B_b)^2} q^2 + \frac{12\nu K_2}{g} q \quad (3.13)$$

$$K_2 = \int_a^b \frac{1}{\{B(x)\}^3} dx \quad (3.14)$$

これが矢板壁の前面が空中に露出しているときの、流出量 q と継手前後の圧力水頭差 $h_{ab} (=h)$ の関係式である。

ここでも、狭水路の断面については、幅が直線的に変化すると仮定すると式 (3.14) は次式となる。

$$K_2 = \frac{B_a + B_b}{2B_a^2 B_b^2} l_1 \quad (3.14)'$$

さらに、 B_a は 0.5 cm, l_1 が l_1+l_2 の 1/2 の 5 cm という仮定と、簡単のため $\alpha=1.0$ という仮定をおく。

ここで、ケース水-空-引張の実験結果の $h=50\sim 500$ cm (h は h_{ab} に相当する) に対する流出量 $q=0.64\sim 2.29$ cm³/s·cm と $B_a \gg B_b$ という仮定のもとに、式 (3.13) の第2項の第1項に対する比を計算すると 2.4~0.7 となり、第2項が無視できない。したがって、 $q \propto h_{ab}^n$, $n \approx 0.5$ という関係が、平均的流出量と、1つの代表断面を考えた場合は、実験結果の説明がつかないという、ケース水-水-引張に対するのと同様の結果となる。ここで矢板壁の両側が水中の場合と同様式 (3.13) に諸数値を代入すると次式を得る。

$$5.102 \times 10^{-4} \frac{1}{B_b^2} q^2 + 1.6040 \times 10^{-3} \frac{0.5 + B_b}{B_b} q - h_{ab} = 0 \quad (3.15)$$

そして、 B_b を仮定して式 (3.15) を解いた結果を表-3.2 に示した。表中の記号は表-3.1 と同じ意味をもつ。ただし q の横の () 内は表-3.2 の q を表-3.1 の q で除した値である。式 (3.10) と式 (3.15) のち

がいは、第2項の係数が l_1 と l_1+l_2 のに応じて $1/2$ になっているだけである。すなわち、摩擦損失水頭が小さいということである。しかし、その影響は B_0 の範囲の小さなおとこで、流出量が約2倍になってあらわれているが、 B_0 が大きくなると、ほとんど影響があらわれていないということが表-3.2 からわかる。表-3.2 にあらわれている B_0 による流出特性のちがいというのは、矢板壁の両側が水中の場合と同様なものであり、継手部の最小間隔が矢板壁全体に同一になっていないという前提によって、実験結果を説明できるというのも同じである。

q の絶対値は、表-3.1の矢板壁の両側が水中の場合に比較して、大きな値をしめているが、 B_0 大きいほど、 h_{ab} が大きいほど、その差がすくなくなっている。そして、実験結果にみられる、両者の比が 1.25 で近似できるという結果と定性的には矛盾したものとはなっていない。

最後に、ここで留意しなければならないのは、表-3.1, 3.2 は、いずれも、多くの仮定をおいたうえに計算された結果であるということである。したがって、継手部の透水に関する基本的性質の認識と、実験結果の説明には十分に有効であるが、計算結果、たとえば流出量の定量的な議論に用いるには多くの問題を含んだものと考えなければならぬ。

(2) 矢板壁の両側または片側に砂詰めされた場合

初めに、実験ケース砂-砂-引張に対応する矢板壁の両側が砂詰めされている状態について考える。この場合も、(1) におけると同様の水路を考える。そして、図-3.21 に示す、狭水路部全域に砂が詰まっている状態(イ)と狭水路の最狭部に砂の詰まっていない状態(ロ)を考える。

断面 a~c 間にベルヌーイの定理を適用して次式を得る。

$$\frac{p_a}{\gamma_w} + \frac{\bar{v}_a^2}{2g} = \frac{p_c}{\gamma_w} + \frac{\bar{v}_c^2}{2g} + \Delta h_{ac} \quad (3.16)$$

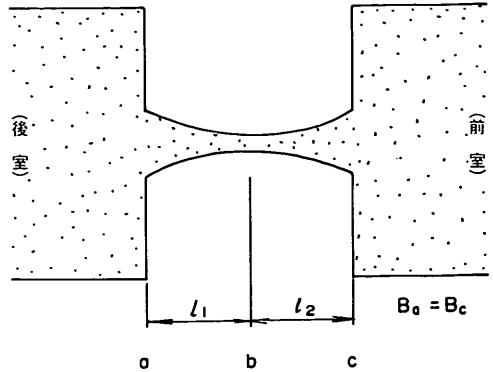
ここで $\bar{v}_a = \bar{v}_c$ であるので次式となる。

$$\frac{p_a - p_c}{\gamma_w} = h_{ac} = \Delta h_{ac} \quad (3.16)'$$

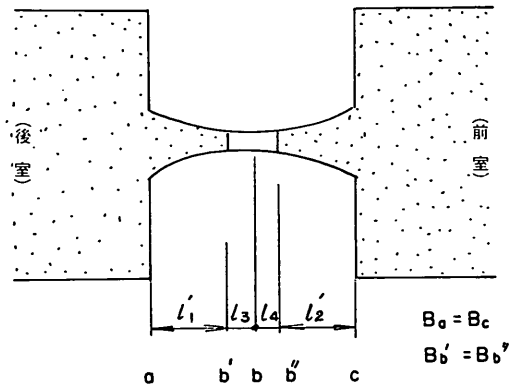
Δh_{ac} として、まず土砂中の流れによる摩擦損失水頭 $\Delta h_{f_{ac}}$ を考える。土砂中の流れに対しては一般に次式が成立する。

$$-\frac{dh}{dx} = \frac{\xi}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (3.17)$$

ここに、 ξ は抵抗係数、 d は土砂の代表粒径、 v はみかけの流速である。そして、土砂中の流れに対するレイ



(イ) 狭水路全体に砂が詰まっている状態



(ロ) 狭水路の最狭部に砂の詰まっていない状態

図-3.21 継手部のモデル (矢板壁両側が砂詰めされた場合)

ノルズ数 $Re' (=vd/\nu)$ と ξ には次式で示される関係があることがわかっている¹⁶⁾。

$$Re'\xi = A_1 + A_2 Re' \quad (3.18)$$

したがって、式(3.17)は次のように変形される。

$$-\frac{dh}{dx} = \frac{A_1 \nu}{2gd^2} v + \frac{A_2}{2gd} v^2 = \frac{A_1}{2gd^2} \cdot \frac{q}{B(x)} + \frac{A_2}{2gd} \cdot \frac{q^2}{\{B(x)\}^2} \quad (3.17)'$$

ここに、 A_1, A_2 は土砂によって決まる定数である。ただし A_2 はあるレイノルズ数 (限界レイノルズ数, Re'_c) 以下の状態では0である。式(3.17)は次のようなことを示す。すなわち、レイノルズ数が限界レイノルズ数以下の流れでは右辺第2項が0であるので、損失水頭が流速に比例する。このような状態が層流状態である。

通常、土砂中の流れが支配されるダルシーの法則が成立するのはこの条件であるが、ダルシーの法則で定義された透水係数 k は $2gd^2/A_1\nu$ に相当する。レイノルズ数が十分に大きい状態の流れでは、右辺第2項が支配的となるので損失水頭が流速の2乗に比例するようになる。このような状態が完全な乱流状態である。そして、その中間は層・乱流の遷移領域である。

式 (3.17)' から、土砂中の流れによる摩擦損失水頭は次式でもとまる。

$$\Delta h_{f_{\text{fac}}} \left\{ \begin{array}{l} \int_a^c -\frac{dh}{dx} dx = \frac{A_1\nu}{2gd^2} K_3 q + \frac{A_2}{2gd} K_4 q^2 \quad (\text{状態①に対して}) \\ \int_a^{b'} -\frac{dh}{dx} dx + \int_{b''}^c -\frac{dh}{dx} dx \\ = \frac{A_1\nu}{2gd^2} K_3' q + \frac{A_2}{2gd} K_4' q^2 \quad (\text{状態②に対して}) \end{array} \right. \quad (3.19)$$

ここに、

$$\left. \begin{array}{l} K_3 = \int_a^c \frac{1}{B(x)} dx, \\ K_3' = \int_a^{b'} \frac{1}{B(x)} dx + \int_{b''}^c \frac{1}{B(x)} dx \\ K_4 = \int_a^c \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx \quad (\text{ただし, } vd/\nu = qd/\nu B(x) \\ \geq Re_c' \text{ の範囲についての積分}) \\ K_4' = \int_a^{b'} \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx + \int_{b''}^c \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx \\ (\text{ただし, } vd/\nu = qd/\nu B(x) \geq Re_c' \\ \text{の範囲についての積分}) \end{array} \right\} \quad (3.20)$$

ここで、狭水路部の形状について、(1)での検討で仮定したのと同じく、幅 $B(x)$ が直線的に変化するものと仮定することとする。このとき、

$$qd/\nu B(x) > Re_c' \quad (3.21)$$

の条件をみたす範囲は、

状態①に対しては、次式と式 (3.21) から

$$B(x) = \begin{cases} B_a + (B_b - B_a) \frac{x}{l_1} & (0 \leq x < l_1) \\ B_b + (B_a - B_b) \frac{x - l_1}{l_2} & (l_1 \leq x \leq l_1 + l_2) \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\left. \begin{array}{l} \left(B_a - \frac{dq}{Re_c' \nu} \right) \frac{l_1}{B_a - B_b} = x_0 < x < l_1 \quad \text{および} \\ l_1 < x < l_1 + (l_1 - x_0) \frac{l_2}{l_1} \end{array} \right\} \quad (3.23)$$

となる。

状態②に対しては、次式と式 (3.21) から

$$B(x) = \begin{cases} B_a + (B_b' - B_a) \frac{x}{l_1'} & (0 \leq x < l_1') \\ B_b + (B_a - B_b') \frac{x - l_1' - l_3 - l_4}{l_2'} & (l_1' + l_3 + l_4 \leq x \leq l_1' + l_3 + l_4 + l_2') \end{cases} \quad (3.24)$$

$$\left. \begin{array}{l} \left(B_a - \frac{dq}{Re_c' \nu} \right) \frac{l_1'}{B_a - B_b'} = x_0' < x < l_1' \quad \text{および} \\ l_1' + l_3 + l_4 < x < l_1' + l_3 + l_4 + (l_1' - x_0) \frac{l_2'}{l_1'} \end{array} \right\} \quad (3.25)$$

となる。その結果、式 (3.20) は次式となる。

$$\left. \begin{array}{l} K_3 = \int_0^{l_1+l_2} \frac{1}{B(x)} dx = \frac{l_1+l_2}{B_a - B_b} \ln(B_a/B_b) \\ K_3' = \int_0^{l_1'} \frac{1}{B(x)} dx + \int_{l_1'+l_3+l_4}^{l_1'+l_3+l_4+l_2'} \frac{1}{B(x)} dx \\ = \frac{l_1'+l_2'}{B_a - B_b'} \ln(B_a/B_b') \\ K_4 = \int_{x_0}^{l_1+(l_1-x_0)l_2/l_1} \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx \\ = \frac{(l_1+l_2)(l_1-x_0)}{B_b \{B_a l_1 + (B_b - B_a)x_0\}} \\ K_4' = \int_{x_0'}^{l_1'} \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx \\ + \int_{l_1'+l_3+l_4}^{l_1'+l_3+l_4+(l_1'-x_0)l_2'/l_1'} \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx \\ = \frac{(l_1'+l_2')(l_1'-x_0')}{B_b' \{B_a l_1' + (B_b' - B_a)x_0'\}} \end{array} \right\} \quad (3.20')$$

次に、土砂中の流れによる摩擦損失水頭以外の損失水頭については、状態①の場合は考慮する必要はないが、状態②の場合は、断面 $b' \sim b''$ 間の摩擦損失水頭 $\Delta h_{f_{\text{wb}b'}}$ と断面 $b \sim b''$ 間のその他の損失水頭 $\Delta h'_{\text{bb}''}$ を考える必要がある。

$\Delta h_{f_{\text{wb}b'}}$ は、 bb' 間の流れが層流状態であり断面 b' ですでに流速が放物線分布になっているものと仮定して、式 (3.4) を用いると、次式で与えられる。

$$\Delta h_{f_{\text{wb}b'}} = \Delta h_{f_{\text{wb}b''}} = \int_{b'}^{b''} \frac{dh}{dx} dx = \frac{12\nu}{g} K_1' q \quad (3.26)$$

ここに、 K_1 は次式である。

$$K_1' = \int_{b'}^{b''} \frac{1}{\{B(x)\}^3} dx = \frac{B_b' + B_b}{2B_b'^2 B_b^2} (l_3 + l_4) \quad (3.27)$$

$\Delta h'_{\text{bb}''}$ としては、まず、断面 b' において土砂中の流れが土砂のない領域に移るときの断面急拡による損失水

鋼矢板壁の透水実験

頭がある。土砂中の透水に有効な断面の割合をあらわす有効間げき率を n_e とすると、土砂中の実質の流速 \bar{v}_b は $\bar{v}_b = v_b/n_e$ であり、この流速が v_b に変化したことによる損失水頭がこれにあたる。すなわち、 $f_{cs}(v_b/n_e - v_b)^2/2g$ で与えられる。 $n_e = 0.3 \sim 0.4^{(17)}$ であるので、 $f_{cs} = 1.0$ とみなすと $f_{cs}(v_b/n_e - v_b)^2/2g = (5.4 \sim 2.3) \times v_b^2/2g$ となる。ここでは、 $5.0v_b^2/2g$ を採ることにする。

次に、断面 $b \sim b'$ 間の断面拡大による損失水頭がある。これは、 $f_{e0}(v_b - v_{b'})^2/2g$ であるが、 $f_{e0} = 1.0$ とみなして $(v_b - v_{b'})^2/2g$ を採ることにする。したがって、 $\Delta h'_{b'b''}$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta h'_{ac} = \Delta h'_{b'b''} &= 5.0 \frac{v_b^2}{2g} + \frac{(v_b - v_{b'})^2}{2g} \\ &= \frac{1}{2g} \left\{ \frac{5.0}{B_b'^2} + \left(\frac{1}{B_b} - \frac{1}{B_b'} \right)^2 \right\} q^2 \end{aligned} \quad (3.28)$$

以上のことから、式 (3.16)' は次の式となる。

$$\begin{aligned} h_{ac} = \Delta h_{ac} &= \left\{ \begin{aligned} \Delta h_{rsac} &= \frac{A_1 \nu}{2gd^2} K_3 q + \frac{A_2}{2gd} K_4 q^2 \\ &\quad \text{(状態 ㊸ の場合)} \\ \Delta h_{rsac} + \Delta h_{rwb'b''} + \Delta h'_{b'b''} &= \frac{A_1 \nu}{2gd^2} K_3' q + \frac{A_2}{2gd} K_4' q^2 + K_1' q \\ &\quad + \frac{1}{2g} \left\{ \frac{5}{B_b'^2} + \left(\frac{1}{B_b} - \frac{1}{B_b'} \right)^2 \right\} q^2 \\ &\quad \text{(状態 ㊹ の場合)} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (3.29)$$

式 (3.29) が、矢板壁の両側が砂詰めされた状態で、の流出量 q と継手前後の圧力水頭差 $h_{ac} (=h)$ の関係式である。

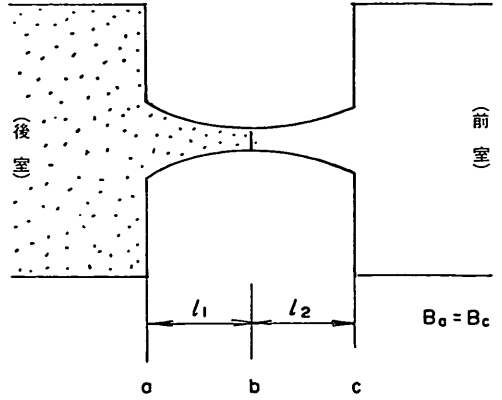
次に、実験ケース砂 - 水 - 引張、砂 - 水 - 水 - 中立 (1 か月) に対応する。矢板壁の流入側だけが砂詰めされ、流出側が水中にある状態を考える。この場合も a) におけるのと同様の水路を考える。そして、図-3.22 に示す ㊸、㊹ の 2 つの状態を考える。

断面 $a \sim c$ にベルヌーイの定理を適用し

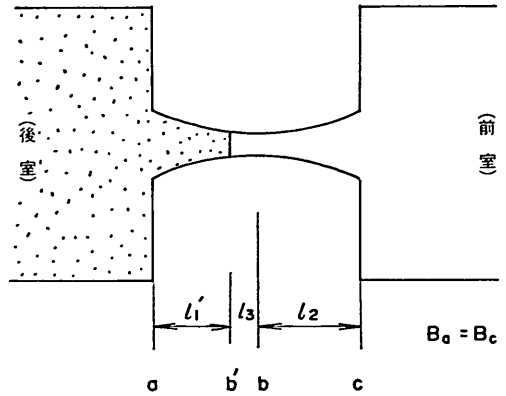
$$\frac{p_a}{\gamma_w} + \frac{\bar{v}_a^2}{2g} = \frac{p_c}{\gamma_w} + \frac{v_c^2}{2g} + \Delta h_{ac} \quad (3.30)$$

ここで、 $\bar{v}_a^2/2g$ と $v_c^2/2g$ は他の項に比較して微小であり、無視すると次式を得る。

$$\frac{p_a - p_c}{\gamma_w} = h_{ac} = \Delta h_{ac} \quad (3.30)'$$



(イ) 狭水路の最狭部まで砂が詰まっている状態



(ロ) 狭水路の最狭部まで砂が詰まっていない状態

図-3.22 継手部のモデル (矢板壁片側が砂詰めされた場合)

Δh_{ac} として、まず土砂中の流れによる摩擦損失水頭 Δh_{rsac} を考えると、次式で与えられる。

$$\Delta h_{rsac} = \begin{cases} \int_a^b -\frac{dh}{dx} dx = \frac{A_1 \nu}{2gd^2} K_3 q + \frac{A_2}{2gd} K_6 q^2 & \text{(状態 ㊸ に対して)} \\ \int_a^{b'} -\frac{dh}{dx} dx = \frac{A_1 \nu}{2gd^2} K_3' q + \frac{A_2}{2gd} K_6' q^2 & \text{(状態 ㊹ に対して)} \end{cases} \quad (3.31)$$

ここに、 K_3, K_3', K_6, K_6' は、水路幅 $B(x)$ が直線的に変化するという仮定をとると

$$\left. \begin{aligned}
 K_5 &= \int_a^b \frac{1}{B(x)} dx = \int_0^{l_1} \frac{1}{B(x)} dx \\
 &= \frac{l_1}{B_a - B_b} \ln(B_a/B_b) \\
 K_5' &= \int_a^{b'} \frac{1}{B(x)} dx = \int_0^{l_1'} \frac{1}{B(x)} dx \\
 &= \frac{l_1'}{B_a - B_{b'}} \ln(B_a/B_{b'}) \\
 K_6 &= \int_a^b \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx \quad (\text{ただし, } qd/\nu B(x) > Re_c' \\
 &\quad \text{の範囲についての積分}) \\
 &= \int_{x_0}^{l_1} \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx = \frac{l_1(l_1 - x_0)}{B_b \{B_a l_1 + (B_b - B_a)x_0\}} \\
 &\quad \left(\text{ただし, } x_0 = \left(B_a - \frac{dq}{Re_c' \nu} \right) \frac{l_1}{B_a - B_b} \right) \\
 K_6' &= \int_a^{b'} \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx \quad (\text{ただし, } qd/\nu B(x) > Re_c' \\
 &\quad \text{の範囲についての積分}) \\
 &= \int_{x_0'}^{l_1'} \frac{1}{\{B(x)\}^2} dx \\
 &= \frac{l_1'(l_1' - x_0')}{B_{b'} \{B_a l_1' + (B_{b'} - B_a)x_0'\}} \\
 &\quad \left(\text{ただし, } x_0' = \left(B_a - \frac{dq}{Re_c' \nu} \right) \frac{l_1'}{B_a - B_{b'}} \right)
 \end{aligned} \right\} (3.32)$$

次に土砂中の流れ以外の摩擦損失水頭 $\Delta h_{f_{wac}}$ として、状態①と②に対してのおのおの、断面 $b \sim c$ 間、断面 $b' \sim c$ 間の流れが層流状態と想定し、断面 b または b' で、流速が放物線分布になっているものと仮定して、式 (3.4) を用いると、次式を得る。

$$\Delta h_{f_{sac}} = \begin{cases} \Delta h_{f_{wbc}} = \int_b^c -\frac{dh}{dx} dx + \frac{12\nu}{g} K_1'' q & (\text{状態①に対して}) \\ \Delta h_{f_{wb'c}} = \int_{b'}^c -\frac{dh}{dx} dx = \frac{12\nu}{g} K_1''' q & (\text{状態②に対して}) \end{cases} (3.33)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned}
 K_1'' &= \int_b^c \frac{1}{\{B(x)\}^3} dx = \frac{B_a + B_b}{2B_a^2 B_b^2} l_2 \\
 K_1''' &= \int_{b'}^c \frac{1}{\{B(x)\}^3} dx \\
 &= \frac{B_b + B_{b'}}{2B_b^2 B_{b'}^2} l_3 + \frac{B_a + B_b}{2B_a^2 B_b^2} l_2
 \end{aligned} \right\} (3.34)$$

$\Delta h_{f_{sac}}, \Delta h_{f_{wac}}$ 以外の損失水頭 $\Delta h_{ac}'$ としては、土砂中の流れから、土砂のない状態の流れに変化するときの損失水頭と断面 $b \sim c$ 間の断面拡大による損失水頭がある。

前者は、状態①では、 $f_{es}(v_b/n_e - v_b)^2/2g$ 状態②では、 $f_{es}(v_b/n_e - v_b')^2/2g$ で与えられる。ここでは、 $f_{es} = f_{es}' \doteq 1.0$ とし、 $(1/n_e - 1)^2 = 5$ を採ることとする。後者については、式 (3.3) で与えられ、結局、式 (3.3)' となる。ただし、 $f_{e1} \doteq 1.0$ とする。したがって、 $\Delta h_{ac}'$ は次式で与えられる。

$$\Delta h_{ac}' = \begin{cases} \Delta h'_{bc} = \frac{5}{2g} v_b^2 + \frac{v_b^2}{2g} = \frac{6}{2g} v_b^2 = \frac{3q^2}{gB_b^2} & (\text{状態①に対して}) \\ \Delta h'_{b'c} = \frac{5}{2g} v_{b'}^2 + \frac{v_{b'}^2}{2g} & \\ = \left(\frac{5}{2gB_{b'}^2} + \frac{1}{2gB_b^2} \right) q^2 & (\text{状態②に対して}) \end{cases} (3.35)$$

結局式 (3.30)' は

$$h_{ac} = \Delta h_{ac} = \begin{cases} \Delta h_{f_{sab}} + \Delta h_{f_{wbc}} + \Delta h'_{bc} & \\ = \frac{A_1 \nu}{2gd^2} K_5 q + \frac{A_2}{2gd} K_6 q^2 + \frac{12\nu}{g} K_1'' q & \\ + \frac{3q^2}{gB_b^2} & (\text{状態①に対して}) \\ \Delta h_{f_{sab'}} + \Delta h_{f_{wb'c}} + \Delta h'_{b'c} & \\ = \frac{A_1 \nu}{2gd^2} K_5' q + \frac{A_2}{2gd} K_6' q^2 + \frac{12\nu}{g} K_1''' q & \\ + \left(\frac{5}{B_{b'}^2} + \frac{1}{B_b^2} \right) \frac{q^2}{2g} & (\text{状態②に対して}) \end{cases} (3.36)$$

これが、矢板壁の流入側が砂詰めされていて、流出側が水中にある状態の流出量 q と継手前後の圧力水頭差 $h_{ac} (=h)$ の関係式である。

ここで、今回の実験での継手部形状や土砂などの条件をあらゆる諸数値を設定し、適当に仮定した B_b について式 (3.29) および (3.36) を解いて、その結果によって、 B_b による流出特性のちがいの認識と実験結果の解釈を試みる。

まず、継手部に詰まっている砂については、実験に用いた砂詰用の砂と同じものと仮定する。そして、図-2.5 に示した粒径分布から、最小粒径が 0.01 cm であることから、砂詰まりはこの最小粒径に等しい水路までおきていると仮定すると、 $B_b \geq 0.01$ cm では、状態①がおきており、 $B_b < 0.01$ では状態②になっていることになり、 $B_{b'} = B_{b''} = 0.01$ cm となる。 A_1, A_2 は、土砂の種類によ

り、異なった値をとるが、ここでは Schneebeli (シュネベリ) が、石英砂についての実験結果から $Re'_c > 2$ に対して与えている $A_1=1100, A_2=30$ を採ることとする¹⁸⁾。 Re'_c をもとめる代表粒径は d_{50} をとることになると、図-2.5 から $d=2.5 \times 10^{-2}$ cm となる。狭水路の形状に関しては、 $B_s=0.5$ cm, $l_1=l_2=5$ cm とする。⊙の状態の場合の断面 $b' \sim b''$ の距離は、 $B_b=B_{b''}=0.01$ cm としたことにより、図-3.6 からわかるように非常に小さな値となる。ここでは、 $l_3=l_4=0.25$ cm する、したがって、 $l'_1=l'_2=4.75$ cm である。また、 $\nu=0.0131$ cm²/s (at 10°C), $g=980$ cm/s² である。ところで、 $k=2gd^2/A_1\nu$ の関係があることはすでに述べたが、ここで仮定した数値をとると $k=2 \times 980 \times (2.5 \times 10^{-2})^2 / (1100 \times 0.0131) = 0.085$ cm/s となる。これは、砂詰用の砂の透水係数と同程度のものである。したがって、砂詰用の砂と同一粒度のものが継手部に詰まっていると仮定すると、ここで仮定した A_1, d が実際と大きくかけはなれたものではないものと考えられる。

以上の諸数値を用いた結果、式 (3.29) と (3.36) は以下ようになる。

矢板壁両側に砂詰めのある場合

①の状態に対して ($B_b \geq 0.01$ cm)

$$\frac{6.122(5-x_0)}{B_b\{2.5-(B_b-0.5)x_0\}}q^2 + \frac{117.63 \ln(0.5/B_b)}{0.5-B_b}q - h_{ac} = 0 \quad (3.37)$$

⊙の状態に対して ($B_b < 0.01$ cm)

$$\left\{ \frac{1187.0(4.75-x_0)}{4.847-x_0} + 5.102 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{B_b} - \frac{1}{0.01} \right) \right\}^2 + 25.51 \left\{ q^2 + \left[892.2 + 0.4010 \left(\frac{0.01+B_b}{B_b^2} \right) \right] q \right\} - h_{ac} = 0 \quad (3.38)$$

矢板壁背面に砂詰め、前面は水中の場合

①の状態に対して ($B_b \geq 0.01$ cm)

$$\left[\frac{3.061(5-x_0)}{B_b\{2.5+(B_b-0.5)x_0\}} + \frac{3.061 \times 10^{-3}}{B_b^2} \right] q^2 + \left\{ 58.82 \frac{\ln(0.5/B_b)}{0.5-B_b} + 1.6041 \times 10^{-3} \frac{0.5+B_b}{B_b^2} \right\} q - h_{ac} = 0 \quad (3.39)$$

⊙の状態に対して ($B_b < 0.01$ cm)

$$\left\{ 593.5 \left(\frac{4.75-x_0'}{4.847-x_0'} \right) + \frac{5.102 \times 10^{-4}}{B_b^2} \right\}^2 + 25.51 \left\{ q^2 + \left[446.1 + 0.2005 \frac{0.01+B_b}{B_b^2} \right] q \right\} - h_{ac} = 0 \quad (3.40)$$

$$+ 1.6041 \times 10^{-4} \frac{0.5+B_b}{B_b^2} \left\{ q - h_{ac} = 0 \right. \quad (3.40)$$

ただし、 x_0, x_0' は次のとおり q の関数である。

$$x_0 = \frac{2.5-4.771q}{0.5-B_b} \quad \left(\begin{array}{l} \text{ただし、} x_0 < 0 \text{ のとき } x_0 = 0, \\ x_0 > 5 \text{ のとき } x_0 = 5 \text{ とする} \end{array} \right) \quad (3.41)$$

$$x_0' = 4.847 - 9.250q$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{ただし、} x_0' < 0 \text{ のとき } x_0' = 0, \\ x_0' > 5 \text{ のとき } x_0' = 5 \text{ とする} \end{array} \right) \quad (3.42)$$

式 (3.38)~(3.40) のうち \sim 印の項は土砂中の流れによる摩擦損失水頭に関する項である。式 (3.37)~(3.40) を実際に解くには、はじめ x_0 , または x_0' を適当に仮定して、2次方程式を解いて q をもとめ、得られた q を式 (3.41) または (3.42) に代入して x_0 または x_0' を再度計算し、これを又式 (3.37)~(3.40) に代入するというくりかえし計算を行うことになる。実際には、2回程度のくりかえしで十分収束する。いくつか仮定した B_b に対する計算結果を表-3.3 と表-3.4 に示した。

表中の h_{rs} は土砂中の流れによる摩擦損失水頭を意味する。 h_{rs1} は h_{rs} のうち式 (3.19) または式 (3.31) の第1項に相当する q に比例するものである。 h_1 は h_{ac} のうち q に比例する成分で式 (3.37)~(3.40) の第2項に相当する。 Re' は土砂中の流れのレイノルズ数であり、 Re は土砂のない区間の流れでのレイノルズ数である。

表-3.3 および表-3.4 から、 B_b のちがいがいによる流出特性に関して次のようなことがわかる。

$B_b \geq 0.01$, すなわち、継手部の最小間隔のところまで砂詰めされている状態では、両側砂詰めされている場合は土砂が水路全体に詰まっているので当然であるが、水路の半分しか土砂が詰まっていない、片側しか砂詰めされていない場合でも、 $h_{rs}/h_{ac} > 0.97$ となっており、土砂中の流れによる摩擦損失以外の損失水頭は無視できる状態にある。 $B_b < 0.01$, すなわち、継手部の最小間隔のところ砂詰めされていない区間が残っている状態では、 h_{rs}/h_{ac} に着目するとわかるように、 B_b が小さくなるにつれて、土砂中の流れによる損失水頭が全損失水頭に占める割合が低下してくるが、それでも $B_b = 0.005$ cm 程度では、70~80% 以上は土砂中の流れによる損失水頭である。しかし、 B_b が 0.001 程度まで小さくなると、その割合は約 10~20% までに低がってくる。

土砂中の流れの状態は、 h_{ac} が小さいときは、土砂中のすべての領域が $Re' \leq Re'_c = 2$ になっており (このとき $x_0=l_1=5$ cm または $x_0'=l'_1=4.75$ cm) 完全な層流

表-3.3 継手部最小間隔 (B_b) と流出特性 (両側砂詰めの場合)

| B_b (cm) | | 0.10 | | | | | | | |
|---|---|--------------------------------------|-----------------|--------------|---------------|-------|---------------|-------|------|
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | $(h_{ac}=h_{fs})$ h_{fs}/h_{fs} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | 断面a 断面c | 断面b | | | | | |
| 500 | 0.864 (0.57) | 0.82 | 3.3 | 15.5 | 0.0 | 0.95 | | | |
| 250 | 0.471 | 0.89 | 1.8 | 9.0 | 0.6 | 0.96 | | | |
| 50 | 0.1056(0.52) | 1.00 | 0.4 | 2.0 | 5.0 | 1.00 | | | |
| 10 | 0.0217 | 1.00 | 0.08 | 0.41 | 5.0 | - | | | |
| B_b (cm) | | 0.05 | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | $(h_{ac}=h_{fs})$ h_{fs}/h_{fs} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | 断面a 断面c | 断面b | | | | | |
| 500 | 0.656 (0.59) | 0.79 | 2.5 | 25.0 | 0.0 | 0.94 | | | |
| 250 | 0.364 | 0.88 | 1.4 | 13.9 | 1.7 | 0.96 | | | |
| 50 | 0.0820(0.53) | 0.99 | 0.3 | 3.1 | 4.7 | 0.99 | | | |
| 10 | 0.0166 | 1.00 | 0.06 | 0.6 | 5.0 | - | | | |
| B_b (cm) | | 0.01 | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | $(h_{ac}=h_{fs})$ h_{fs}/h_{fs} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | 断面a 断面c | 断面b | | | | | |
| 500 | 0.363 (0.62) | 0.68 | 1.4 | 69.3 | 1.6 | 0.90 | | | |
| 250 | 0.210 | 0.79 | 0.8 | 40.1 | 3.1 | 0.93 | | | |
| 50 | 0.0506(0.54) | 0.95 | 0.2 | 9.7 | 4.6 | 0.97 | | | |
| 10 | 0.0106 | 1.00 | 0.04 | 2.0 | 5.0 | - | | | |
| B_b (cm) | | 0.005 | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | h_{fs}/h_{fs} | h_s/h_{ac} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n |
| | | | | | 断面a 断面c | 断面b' | | | |
| 500 | 0.329 (0.61) | 0.84 | 0.70 | 0.74 | 1.3 | 62.7 | 1.8 | 25.1 | 0.92 |
| 250 | 0.1857 | 0.82 | 0.81 | 0.84 | 0.7 | 35.4 | 3.1 | 14.2 | 0.95 |
| 50 | 0.0427(0.52) | 0.80 | 0.96 | 0.97 | 0.2 | 8.1 | 4.5 | 3.3 | 0.98 |
| 10 | 8.83×10^{-3} | 0.78 | 1.00 | 1.00 | 0.03 | 1.7 | 4.75 | 0.7 | - |
| B_b (cm) | | 0.001 | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | h_{fs}/h_{fs} | h_s/h_{ac} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n |
| | | | | | 断面a 断面c | 断面b' | | | |
| 500 | 0.0919(0.52) | 0.18 | 0.90 | 0.97 | 0.4 | 17.5 | 4.0 | 7.0 | 0.99 |
| 250 | 0.0460 | 0.17 | 0.95 | 0.99 | 0.2 | 8.8 | 4.4 | 3.6 | 1.00 |
| 50 | 9.42×10^{-3} (0.51) | 0.17 | 1.00 | 1.00 | 0.04 | 1.8 | 4.75 | 0.7 | 1.00 |
| 10 | 1.89×10^{-3} | 0.17 | 1.00 | 1.00 | 0.007 | 0.4 | 4.75 | 0.1 | - |
| 実験結果 q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | | | | | | | | | |
| ケース h_{ac} (cm) | 砂-砂-引張 | | | | | | | | |
| 500 | 0.29 [0.74] | | | | | | | | |
| 250 | 0.148[0.73] | | | | | | | | |
| 50 | 0.031[0.70] | | | | | | | | |
| 10 | - | | | | | | | | |

{ 註1 : () は表3-4の q に対する比
 註2 : 実験結果は $q = 7.0 \times 10^{-4} \cdot h^{0.97}$
 註3 : [] は表3-4のケース 砂-水-引張の
 実験結果の q に対する比

表-3.4 継手部最小間隔 (B_b) と流出特性 (後室側砂詰め, 前室側水中の場合)

| B_b (cm) | | 0.10 | | | | | | | | | |
|---|---|-----------------|-----------------|--------------|-------------|-------|---------------|-------|------|--|--|
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | h_{fs}/h_{fs} | h_s/h_{ac} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a 断面b | 断面c | | | | | |
| 500 | 1.515 | 1.00 | 0.72 | 0.72 | 5.8 | 28.9 | 0.0 | 115.6 | 0.92 | | |
| 250 | 0.863 | 1.00 | 0.82 | 0.82 | 3.3 | 16.5 | 0.0 | 65.9 | 0.94 | | |
| 50 | 0.205 | 1.00 | 0.97 | 0.97 | 0.8 | 3.9 | 3.8 | 15.6 | 0.98 | | |
| 10 | 0.0422 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.2 | 0.8 | 5.0 | 3.2 | - | | |
| B_b (cm) | | 0.05 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | h_{fs}/h_{fs} | h_s/h_{ac} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a 断面b | 断面c | | | | | |
| 500 | 1.133 | 1.00 | 0.68 | 0.68 | 4.3 | 43.2 | 0.0 | 86.5 | 0.90 | | |
| 250 | 0.654 | 1.00 | 0.79 | 0.79 | 2.5 | 25.0 | 0.0 | 49.9 | 0.93 | | |
| 50 | 0.1583 | 1.00 | 0.95 | 0.95 | 0.6 | 6.0 | 3.9 | 12.1 | 0.97 | | |
| 10 | 0.0332 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.1 | 1.3 | 5.0 | 2.5 | - | | |
| B_b (cm) | | 0.01 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | h_{fs}/h_{fs} | h_s/h_{ac} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a 断面b | 断面c | | | | | |
| 500 | 0.585 | 0.97 | 0.57 | 0.56 | 2.2 | 111.6 | 0.0 | 44.7 | 0.86 | | |
| 250 | 0.355 | 0.97 | 0.69 | 0.68 | 1.4 | 67.7 | 1.6 | 27.1 | 0.88 | | |
| 50 | 0.0939 | 0.98 | 0.90 | 0.90 | 0.4 | 17.9 | 4.2 | 7.2 | 0.94 | | |
| 10 | 0.0206 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.08 | 3.9 | 4.9 | 1.6 | - | | |
| B_b (cm) | | 0.005 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | h_{fs}/h_{fs} | h_s/h_{ac} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a 断面b' | 断面c' | | | | | |
| 500 | 0.535 | 0.82 | 0.58 | 0.64 | 2.0 | 102.1 | 0.0 | 40.8 | 0.89 | | |
| 250 | 0.315 | 0.79 | 0.72 | 0.75 | 1.2 | 60.1 | 1.9 | 24.0 | 0.91 | | |
| 50 | 0.0778 | 0.76 | 0.91 | 0.93 | 0.3 | 14.8 | 4.1 | 5.9 | 0.96 | | |
| 10 | 0.0166 | 0.75 | 0.99 | 0.99 | 0.1 | 3.2 | 4.7 | 1.3 | - | | |
| B_b (cm) | | 0.001 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | h_{fs}/h_{fs} | h_s/h_{ac} | R_e' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a 断面b' | 断面c' | | | | | |
| 500 | 0.1387 | 0.15 | 0.85 | 0.96 | 0.5 | 26.5 | 3.6 | 10.6 | 0.99 | | |
| 250 | 0.0908 | 0.14 | 0.92 | 0.98 | 0.3 | 17.3 | 4.2 | 6.9 | 0.99 | | |
| 50 | 0.0144 | 0.13 | 0.99 | 1.00 | 0.05 | 2.7 | 4.7 | 1.1 | 1.00 | | |
| 10 | 2.89×10^{-3} | 0.13 | 1.00 | 1.00 | 0.01 | 0.6 | 4.75 | 0.2 | - | | |
| 実験結果 q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | | | | | | | | | | | |
| ケース h_{ac} (cm) | 砂-水-中立 | | 砂-水-引張 | | | | | | | | |
| 500 | 0.48 | | 0.39 | | | | | | | | |
| 250 | 0.24 | | 0.20 | | | | | | | | |
| 50 | 0.047 | | 0.044 | | | | | | | | |
| 10 | - | | - | | | | | | | | |

註: ケース 砂-水-中立; $q = 9.0 \times 10^{-4} h^{1.01}$
 ケース 砂-水-引張; $q = 1.07 \times 10^{-3} h^{0.96}$

状態になっているが、 h_{ac} が大きくなると $Re' > 2.0$ の領域が広がってくる。そして、土砂中の流れ全体が $Re' > 2.0$ の領域に入ってしまう状態になる（このとき $x_0 = 0$ または $x_0' = 0$ ）。しかし、 $h_{ac} = 500$ cm の状態になっても h_{fs1}/h_{fs} は両側砂詰めの場合で、約 0.7 以上、片側砂詰めの場合で約 0.6 以上になっており、完全な乱流状態にまでは達していないものと考えられる。

土砂のない区間での流れは、 Re が小さいことから、当初仮定した層流状態にあると考えてよい。

流出量は B_b が大きくなると大きくなるが、 B_b の変化の割合ほど大きく変化しない。それを示すため、単位水路幅当たりの流出量 (q/B_b) を $B_b = 0.01$ のときの値を基準にして比で示す。両側砂詰めの場合には、 $h_{ac} = 500$ cm のとき、 B_b が 0.05; 0.01, 0.005, 0.001 cm の順に 0.36 : 1.00 : 1.81 : 2.5 であり、 $h_{ac} = 50$ cm のとき、同様に 0.32 : 1.00 : 1.69 : 1.86 である。片面が水中にある場合は、 $h_{ac} = 500$ cm のとき、 B_b が 0.05; 0.01, 0.005, 0.001 cm の順に 0.39 : 1.00 : 1.83 : 2.4 であり、 $h_{ac} = 50$ cm のとき、同様に 0.33 : 1.00 : 1.66 : 1.53 である。この結果を砂詰めのない場合の結果 (p. 60, 下から 11 行目以下) と比較すると、その傾向がよくわかる。

n については、片側しか砂詰めのない場合は、両側砂詰めされた場合に比較して小さな値を示しており、 $B_b = 0.01 \sim 0.005$ cm では、 h が大きいときに 0.9 を若干下まわる値を示すが、全体としては $n \approx 1.0$ とみなせる程度になっていると考えてよいと思われる。両側砂詰めされている場合は B_b がどの値でも、 $n \approx 1.0$ とみなせるものとなっている。これは、前述のように、 B_b がある程度大きい範囲では、土砂中の流れによる摩擦損失水頭が継手部における全損失水頭を支配しており、その土砂中の流れが完全な乱流状態になっていない範囲にとどまっているためであり、 B_b が非常に小さい範囲では土砂中の流れによる損失水頭よりも、土砂詰まりのない区間での流れによる摩擦損失水頭が支配的となるが、その状態の流れが層流状態にあるためである。

以上のことをふまえて実験結果を解釈するには、矢板壁前後に砂詰めのない場合と違って、矢板壁全体の平均的流出量である実験結果の q と h の関係を、1 つの水路断面 (ケース砂 - 砂 - 引張, 砂 - 水 - 引張, 砂 - 水 - 中立のいずれの実験結果に対しても、0.005 cm より若干小さな、ある B_b の値をもつ水路) で説明しようとしても、明瞭な矛盾がおきてくることにならない。しかし、現実の矢板壁の継手部の間隔の状態は一様でないの

で、間隔の広い箇所の流出量が、矢板壁全体の流出量に占める割合が大きいことになるが、 B_b のちがいのによる q の差が大きくないので、ごく一部の B_b 大きい継手部からの流出量が、矢板壁全体の流出量を支配するという状態にはないと考えられる。

両側砂詰めのある場合と片側が水中にある場合の流出量は、実験結果のケース砂 - 砂 - 引張がケース砂 - 水 - 引張の約 0.7 倍であるのに、表-3.3 は表-3.4 の計算値の 0.5~0.6 倍となっており、若干小さな値となっているがさほどへだたったものではない。

ところで、(1) の末尾で表-3.1, 3.2 について言及したことが、表-3.3, 3.4 についても云えることに留意する必要がある。ことに、表-3.3, 3.4 は、継手部の砂詰りの状態と詰まった砂に関する仮定が加わっている分だけ、問題を多くふくんでいるといえよう。

3.4 まとめ

考察の結果得られた結論をまとめると次のとおりである。

① 矢板壁の透水性を示す関係式は、次式で表現できることが、実験的に確認された。

$$q = Kh^n \quad (3 \cdot 43)$$

ここに、 q ; 継手単位長さ当たりの流出量 ($\text{cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}$)

h ; 継手前後の圧力水頭差 (cm)

K ; 継手部の状態によって決まる係数 (cm^{2-n}/s)

n ; 継手部の状態によって決まる係数であり、継手部に土砂の詰まっていない場合は $n \approx 0.5$ 、継手部に土砂の詰まっている場合は $n \approx 1.0$

② 限定された条件下のものであるが、矢板壁の透水性を示す資料が得られた。ただし、今回の実験結果を、透水量の定量的評価に利用する場合は、実験用矢板壁と現地矢板壁の状態との違いに注意する必要がある。

③ 継手部を狭水路とみなした水理学的考察により、継手部の透水に関する一般的特性が理解された。又、実験結果の説明ができることがわかった。その内容は④~⑥のとおり。

④ 継手部に土砂詰りのない状態の一般的特性は次のとおり。継手部の間隔の広い場合では摩擦損失水頭は小さく、継手部での損失水頭はおおむね継手部の最小断面での速度水頭に等しくなるので、 $q \propto h^n$, $n \approx 0.5$ という関係が成立する。一方、継手部の間隔の狭い状態では摩擦損失水頭が継手部での損失水頭を支配するが、その状

態での流れは層流状態であるので、 $q \propto h^n$, $n \approx 1.0$ という関係が成立する。又、継手部の最小間隔のちがいによる q の差が大きい。

⑤ 矢板壁の両側に砂詰めのない場合の実験結果が $q \propto h^n$, $n \approx 0.5$ であるのは、継手の全延長で同一の継手間隔を有していないため、延長では短い継手間隔の広い箇所の流出量が矢板壁全体の流出量のほとんどを占めるので、継手全延長の平均流出量が継手間隔の広い箇所の特性を反映することによる。

⑥ 継手部に土砂が詰まっている状態では、継手間隔が広い場合でも狭い場合でも $q \propto h^n$, $n \approx 1.0$ が成立する。これは次の理由による。継手間隔がある程度広い場合では、継手前後での全損失水頭は土砂中の流れによる摩擦損失水頭によって支配される。そして、土砂中の流れは完全な乱流状態に到らない範囲にあるので、 $q \propto h^n$, $n \approx 1.0$ となる。継手間隔が狭い場合では、最狭部付近は土砂の詰まっていない状態になると考えることができる。このような状態で、継手間隔が極端に狭くなると、土砂中の流れによる摩擦損失水頭ではなく、土砂のない領域での摩擦損失水頭が支配的となる状態になる。しかし、その場合には流れが層流状態にあるため $q \propto h^n$, $n \approx 1.0$ となる。又、継手部の最小間隔のちがいによる流出量の差は大きくない。

⑦ 矢板壁の両側または流入側に砂詰めのある場合の実験結果は⑥の特性を反映したものである。

4. 透水計算における矢板壁の取扱い

前章では、矢板壁の透水実験における継手部からの流出量がどのような関係式で表わされるか知ることができた。又、その実験結果を水理学的に説明するとともに、継手部の透水に関する特性の認識を深めることができた。本章では、このような成果をふまえて、矢板壁を有する護岸等構造物の透水計算において、矢板壁を実用的にどう取扱うのかという点について考察を加える。

すでに矢板壁の継手部からの流出量について式(3.43)の関係式が成立することが示されている。しかし、この関係式が成立すると判断する資料を与えた今回の実験および参考とした既応の研究における実験は、数少ない種類の矢板と継手状態について行ったものである。ところが、図-4.1に例をあげたように鋼矢板の種類は多く、継手部のおかれている状態も、さまざまである。そのため、式(3.43)の関係式が一般に適用できるものか検討を加える必要がある。この点に関して、ここでは、継手

部に土砂の詰まっていない状態と、詰まっている状態に分けて考えてみることにする。

はじめに、継手部に土砂の詰まっていない状態の場合について考える。この場合は、実際の矢板壁の継手部の状態が、継手全延長にわたって同一でなく、継手間隔の狭いところから広いところまで変化していると考えることにより、どの矢板のどのような継手状態においても矢板壁の平均的流出量である q が $q \propto h^n$, $n \approx 0.5$ の関係式であらわされることが水理学的考察から判断できる。

継手部に土砂が詰まっている状態の場合にはいろいろな視点から考える必要がある。

はじめに、継手部に土砂が詰まっている状態として、今回の実験では、矢板壁の流入側だけまたは両側に砂詰めした場合の実験ケースだけであり、その場合について式(3.43)が成立することを確認している。しかし、継手部に土砂が詰まっている状態として流出側だけに砂詰めのある場合、すなわち、流れが水中→矢板壁→砂中という状態の場合も、実際にある。このような場合についての流出量を支配する関係式について考える。この場合について3.3(2)と同様の水理学的考察を加えると、今回の実験結果で得られたと同様の流出量に関する特性があるという結果になろう。そして、定量的にみれば、流入側だけに砂詰めのある状態と比較すると、継手部を水路とみたとときの断面拡大による損失水頭と砂中から砂のない状態に変わるときに生ずる損失水頭がなくなるために、継手部の最小間隔(B_0)が小さな範囲では、いくぶん流出量が大きくなる傾向にあるが、継手部の最小間隔が大きいときには、ほとんど差がないものになるものと思われる。

次に、継手部に詰まる土砂について考えてみる。今回の実験に用いた砂詰め用の砂は、細粒分が全くないのであり、透水係数は、実験結果から $0.05 \sim 0.12 \text{ cm/s}$ であることがわかっている。このような土砂は、通常、矢板壁が打設される地盤や、裏込めする土砂と比較すると、非常に透水性のよい種類にはいるものである。矢板壁前後の砂詰め用の砂がこのようなものであることから、継手部に詰まっている土砂も、これに近い非常に透水性のよいものであることが推測される。3.3(2)の考察にあたっては、 $A_1=1100$, $d=d_{50}=2.5 \times 10^{-2} \text{ cm}$ を採ったが、これは、透水係数 $k=2gd^2/A_1\nu=0.085 \text{ cm/s}$ の土砂を考えていることになる。ここで、この透水係数の4倍の透水係数をもつ土砂が継手部に詰まっている状態での流出水の特性がどうなるかを推測するために、流

鋼矢板壁の透水実験

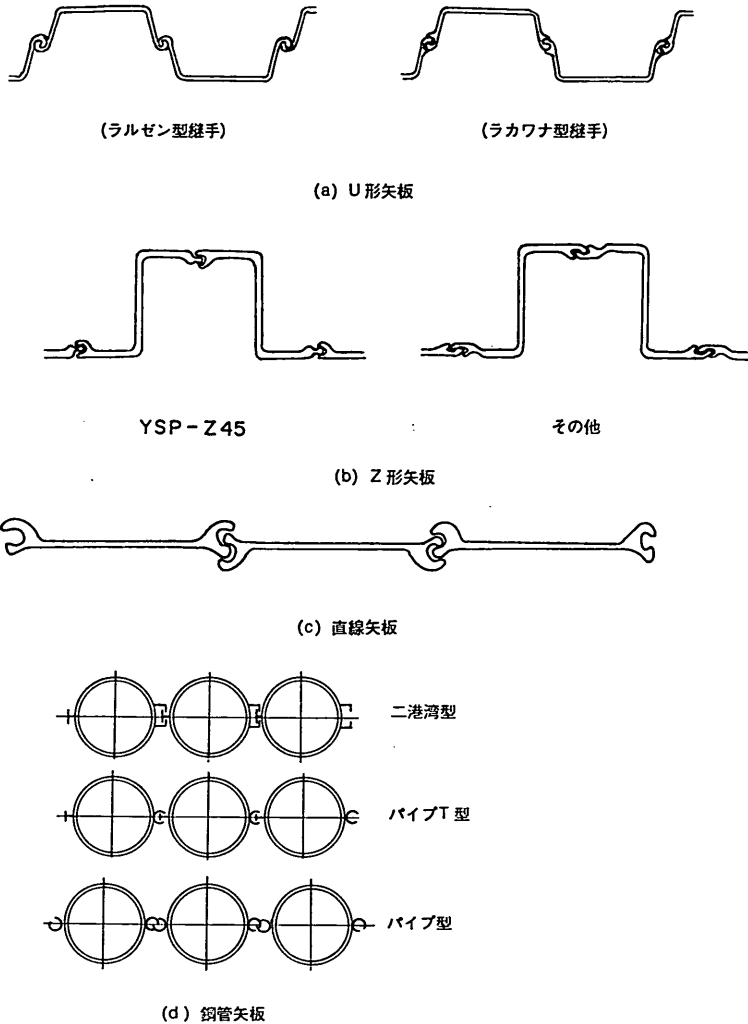


図-4.1 鋼矢板の種類 (例)

入側だけに土砂詰まりのある場合について、3.3 (2) で考えたと同様の水理学的モデルによって試算してみる。具体的には、 $d = d_{50} = 5.0 \times 10^{-2} \text{ cm}$ の土砂を考えることにより、 $k = 2gd^2/A_1\nu = 0.34 \text{ cm/s}$ の場合を考える。又、このときの最小粒径は 0.02 cm と仮定し、水路幅 0.02 cm のところまで砂詰りがある状態を考える。その他はすべて 3.3 (2) における仮定と同様とする。その計算結果を表-4.1 に示す。同表からわかるように、 h_{rs1}/h_{rs} が表-3.4 に比較するとずっと小さな値となっており土砂中の流れは完全な乱流状態に近づいているものと考えられる。そして n は、 $B_0 \geq 0.005 \text{ cm}$ では、 $h > 50 \text{ cm}$ で、

$0.75 \sim 0.85$ の範囲にあり、 $n \approx 1.0$ とはいいがたい程度である (ただし、 $h < 50 \text{ cm}$ では n は 0.9 に近い状態にある)。このことから、透水性の非常によい本実験用土砂の 4 倍の透水係数をもつような土砂が継手部に詰まっている状態の場合には、 $n \approx 1.0$ とはいえないことがわかる。しかし、ほとんどの土砂に対しては今回の実験結果の適用が可能であると判断できる。

次に、継手の種類と継手部のかみ合わせの状態について考える。つまり、各種の矢板とその継手の現地でおかれた状態を考えたときに、今回の実験におけるのと同様に継手部に十分砂詰まりが生ずるかどうかを考える。

表-4.1 継手部最小間隔 (B_b) と流出特性 (後室側砂詰め, 前室側水中の場合, 砂の透水係数大の場合)

| B_b (cm) | | 0.10 | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|-----------------|------------------|--------------|--------|-------|---------------|-------|------|--|--|
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 3.18 | 0.99 | 0.38 | 0.38 | 24.3 | 121.4 | 0.0 | 243 | 0.77 | | |
| 250 | 2.04 | 0.99 | 0.49 | 0.48 | 15.6 | 77.9 | 0.0 | 155.7 | 0.80 | | |
| 50 | 0.634 | 1.00 | 0.75 | 0.75 | 4.8 | 24.2 | 0.0 | 48.5 | 0.86 | | |
| 10 | 0.158 | 1.00 | 0.94 | 0.94 | 1.2 | 6.0 | 2.5 | 12.1 | — | | |
| | | | | | | | | | | | |
| B_b (cm) | | 0.05 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 2.29 | 0.99 | 0.35 | 0.35 | 17.5 | 174.7 | 0.0 | 174.8 | 0.75 | | |
| 250 | 1.485 | 0.99 | 0.45 | 0.45 | 11.3 | 113.4 | 0.0 | 113.4 | 0.78 | | |
| 50 | 0.475 | 0.99 | 0.72 | 0.72 | 3.6 | 36.3 | 0.0 | 36.3 | 0.85 | | |
| 10 | 0.122 | 0.99 | 0.92 | 0.92 | 0.9 | 9.3 | 3.0 | 9.2 | — | | |
| | | | | | | | | | | | |
| B_b (cm) | | 0.01 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 1.451 | 0.91 | 0.30 | 0.34 | 11.1 | 277 | 0.0 | 110.8 | 0.75 | | |
| 250 | 0.944 | 0.89 | 0.40 | 0.44 | 7.2 | 180.2 | 0.0 | 72.1 | 0.77 | | |
| 50 | 0.304 | 0.85 | 0.67 | 0.71 | 2.3 | 58.0 | 0.0 | 23.2 | 0.84 | | |
| 10 | 0.0781 | 0.82 | 0.90 | 0.91 | 0.6 | 14.9 | 3.5 | 6.0 | — | | |
| | | | | | | | | | | | |
| B_b (cm) | | 0.005 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 1.267 | 0.73 | 0.33 | 0.45 | 9.7 | 242 | 0.0 | 96.7 | 0.81 | | |
| 250 | 0.797 | 0.68 | 0.44 | 0.56 | 6.1 | 152.1 | 0.0 | 60.8 | 0.83 | | |
| 50 | 0.232 | 0.60 | 0.73 | 0.82 | 1.8 | 44.3 | 0.0 | 17.7 | 0.90 | | |
| 10 | 0.0543 | 0.55 | 0.93 | 0.96 | 0.4 | 10.4 | 3.9 | 4.1 | — | | |
| | | | | | | | | | | | |
| B_b (cm) | | 0.001 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 0.237 | 0.062 | 0.72 | 0.93 | 1.8 | 45.3 | 0.5 | 18.1 | 0.98 | | |
| 250 | 0.1231 | 0.055 | 0.84 | 0.96 | 0.9 | 23.5 | 2.6 | 9.4 | 0.99 | | |
| 50 | 0.0254 | 0.049 | 0.97 | 0.99 | 0.2 | 4.9 | 4.5 | 1.9 | 1.00 | | |
| 10 | 5.12×10^{-3} | 0.048 | 1.00 | 1.00 | 0.04 | 1.0 | 4.75 | 0.4 | — | | |

$B_b \geq 0.02\text{cm}$

$$\left\{ \frac{1.5306(5-x_o)}{B_b \{2.5+(B_b-0.5)x_o\}} + \frac{3.061 \times 10^3}{B_b^2} \right\} q^2 + \left\{ 14.704 \frac{\ell_n(0.5/B_b)}{0.5-B_b} + 1.6041 \times 10^3 \frac{0.5+B_b}{B_b^2} \right\} q - h_{ac} = 0$$

$$x_o = \frac{2.5-9.542q}{0.5-B_b} \text{ (ただし, } x_o < 0 \text{ のとき } x_o = 0, x_o > 5 \text{ のとき } x_o = 5 \text{ とする)}$$

$B_b < 0.02\text{cm}$

$$\left\{ \frac{151.47(4.75-x_o')}{4.948-x_o'} + \frac{5.102 \times 10^4}{B_b^2} + 6.378 \right\} q^2 + \left\{ 93.68 + 5.013 \times 10^2 \frac{0.02+B_b}{B_b^2} + 1.6041 \times 10^3 \frac{0.5+B_b}{B_b^2} + 93.68 \right\} q - h_{ac} = 0$$

$$x_o' = 4.948 - 18.885q \text{ (ただし, } x_o' < 0 \text{ のとき } x_o' = 0, x_o' > 4.75 \text{ のとき } x_o' = 4.75 \text{ とする)}$$

表-4.2 継手部最小間隔 (B_b) と流出特性 (後室側砂詰め, 前室側水中の場合, 砂詰まり延長の短い場合)

| B_b (cm) | | 0.10 | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|-----------------|------------------|--------------|--------|-------|---------------|-------|------|--|--|
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 3.26 | 0.99 | 0.54 | 0.54 | 12.4 | 62.2 | 0.0 | 249 | 0.85 | | |
| 250 | 1.984 | 0.99 | 0.66 | 0.66 | 7.6 | 37.8 | 0.0 | 151.4 | 0.88 | | |
| 50 | 0.530 | 1.00 | 0.88 | 0.88 | 2.0 | 10.1 | 0.0 | 40.5 | 0.93 | | |
| 10 | 0.1181 | 1.00 | 0.98 | 0.98 | 0.45 | 2.3 | 1.2 | 9.0 | — | | |
| | | | | | | | | | | | |
| B_b (cm) | | 0.05 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 2.38 | 0.99 | 0.51 | 0.50 | 9.1 | 90.8 | 0.0 | 181.7 | 0.83 | | |
| 250 | 1.469 | 0.99 | 0.63 | 0.62 | 5.6 | 56.1 | 0.0 | 112.1 | 0.86 | | |
| 50 | 0.405 | 0.99 | 0.86 | 0.86 | 1.5 | 15.5 | 0.0 | 30.9 | 0.92 | | |
| 10 | 0.0920 | 1.00 | 0.97 | 0.97 | 0.4 | 3.5 | 1.3 | 7.0 | — | | |
| | | | | | | | | | | | |
| B_b (cm) | | 0.01 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 1.128 | 0.92 | 0.40 | 0.38 | 4.3 | 215 | 0.0 | 86.1 | 0.77 | | |
| 250 | 0.725 | 0.93 | 0.51 | 0.49 | 2.8 | 138.4 | 0.0 | 55.3 | 0.80 | | |
| 50 | 0.225 | 0.96 | 0.77 | 0.75 | 0.9 | 42.9 | 0.3 | 17.2 | 0.87 | | |
| 10 | 0.0556 | 0.97 | 0.94 | 0.93 | 0.2 | 10.6 | 1.4 | 4.2 | — | | |
| | | | | | | | | | | | |
| B_b (cm) | | 0.005 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 1.180 | 0.66 | 0.12 | 0.36 | 4.5 | 225 | 0.0 | 90.1 | 0.76 | | |
| 250 | 0.763 | 0.59 | 0.17 | 0.47 | 2.9 | 145.6 | 0.0 | 58.2 | 0.79 | | |
| 50 | 0.241 | 0.40 | 0.40 | 0.74 | 0.9 | 46.0 | 0.8 | 18.4 | 0.86 | | |
| 10 | 0.0606 | 0.26 | 0.75 | 0.93 | 0.2 | 11.6 | 1.4 | 4.6 | — | | |
| | | | | | | | | | | | |
| B_b (cm) | | 0.001 | | | | | | | | | |
| 計算項目 h_{ac} (cm) | q ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{cm}$) | h_{fs}/h_{ac} | $h_{fs'}/h_{fs}$ | h_1/h_{ac} | R_w' | | x_o (cm) | R_e | n | | |
| | | | | | 断面a | 断面b | | | | | |
| 500 | 0.1601 | 0.27 | 0.96 | 0.96 | 0.6 | 30.6 | 1.1 | 12.2 | 0.99 | | |
| 250 | 0.0815 | 0.27 | 0.98 | 0.98 | 0.3 | 15.6 | 1.3 | 6.2 | 0.99 | | |
| 50 | 0.0166 | 0.27 | 1.00 | 1.00 | 0.06 | 3.2 | 1.5 | 1.3 | 1.00 | | |
| 10 | 3.32×10^{-3} | 0.27 | 1.00 | 1.00 | 0.01 | 0.6 | 1.5 | 0.3 | — | | |

$B_b \geq 0.01\text{cm}$

$$\left\{ \frac{1.0714(1.75-x_o)}{B_b \{0.875+(B_b-0.5)x_o\}} + \frac{3.061 \times 10^3}{B_b^2} \right\} q^2 + \left\{ 20.59 \frac{\ell_n(0.5/B_b)}{0.5-B_b} + 5.614 \times 10^3 \frac{0.5+B_b}{B_b^2} \right\} q - h_{ac} = 0$$

$$x_o = \frac{0.875-3.340q}{0.5-B_b} \text{ (ただし, } x_o < 0 \text{ のとき } x_o = 0, x_o > 1.75 \text{ のとき } x_o = 1.75 \text{ とする)}$$

$B_b < 0.01\text{cm}$

$$\left\{ \frac{187.42(1.5-x_o')}{1.5306-x_o'} + \frac{5.102 \times 10^4}{B_b^2} + 25.51 \right\} q^2 + \left\{ 1.6041 \times 10^4 \frac{0.5+B_b}{B_b^2} + 0.2005 \frac{0.01+B_b}{B_b^2} + 140.87 \right\} q - h_{ac} = 0$$

$$x_o' = 1.5306 - 2.921q \text{ (ただし, } x_o' < 0 \text{ のとき } x_o' = 0, x_o' > 1.50 \text{ のとき } x_o' = 1.50 \text{ とする)}$$

鉛矢板壁の透水実験

図-4.2~4.6 は各種の継手の拡大図である。そして図-4.2~4.5 には矢板の中心間距離が最もはなれた状態、最も接近した状態およびその中間の状態（各々、引張状態、圧縮状態、中立状態と称する）を示している。ただし、ここで云う引張状態と中立状態は今回の実験での引張状態および中立状態と対応するものでない。

これらの継手の状態を観察すると砂詰まりが十分におきない場合として次の2つが考えられる。まず、第一に、Ⅲ型鉛矢板（ラカワナ型継手）の圧縮状態、Ⅲ型鉛矢板（ラルゼン型継手）の圧縮状態、YSP-Z₄形鉛矢板の圧縮状態、直線鉛矢板の引張状態に着目する。これらの状態では継手部の中間に、比較的広い幅をもち前後が急縮している水路部分（各図中に①で示してある）をもち、継手部の出口または入口に近い部分では、土砂の詰まるところがほとんどない状態である。これらの状態では①の部分に土砂詰まりがなければ、土砂中の流れによる摩擦損失水頭が小さいため流出量が大きくなり、土砂中の流れが乱流状態に近くなることが考えられる。その結果 $q \propto h^n$, $n \approx 1.0$ の関係が成立しない可能性がある

る。第二に、各矢板の中立状態では継手部の最小間隔が広いので、継手の両側に土砂がない場合には、土砂が水とともに流出する状態になり、継手部に土砂が詰まっている状態を保てるかという点に疑問が生ずる。

第一の点に関して、土砂詰りが十分でないときにどの程度流出特性がちがってくるかについて試算をしてみる。とりあげるのは、継手の片側にのみ砂詰りがある場合で、図-3.22において、 $l_1=1.75\text{ cm}$, $l_1'=1.5\text{ cm}$, $l_3=0.25\text{ cm}$ という条件を想定する。その他の条件は、3.3(2)での検討におけるのと同じである。計算結果を表-4.2に示す。表-4.2を、表-3.4と比較すると $B_0=0.001\text{ cm}$ では、もともと土砂中流れによる摩擦損失水頭のウェイトが小であるためほとんど差がない。 $B_0 \geq 0.005\text{ cm}$ では、同じ B_0 に対して、 q の値が、 $h_{ac}=500\text{ cm}$ のときで、約2倍、 $h_{ac}=10\text{ cm}$ のときで約3倍程度に増えていることがわかる。そして、 h_{r1}/h_{rs} は若干小さくなる程度で余りがわかないが、 h_{r1}/h_{rs} が低下している。そのため n が一般に小さくなっており、 $h_{ac} \geq 250\text{ cm}$ では、 $n \approx 1.0$ とみなすには困難な結果になっている。

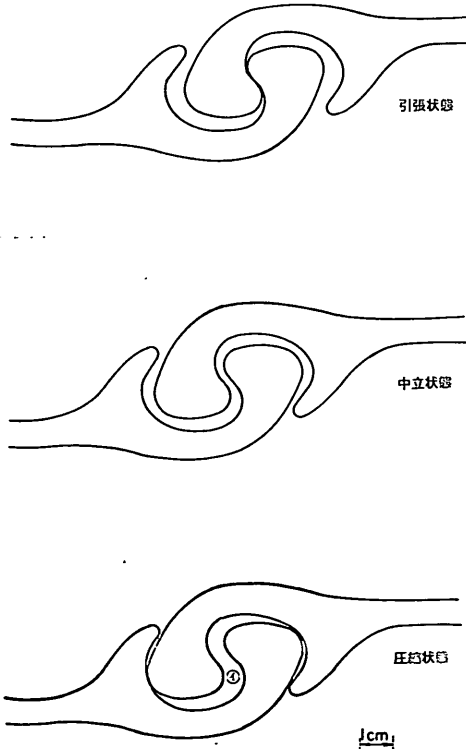


図-4.2 Ⅲ型鉛矢板（ラカワナ型継手）拡大図

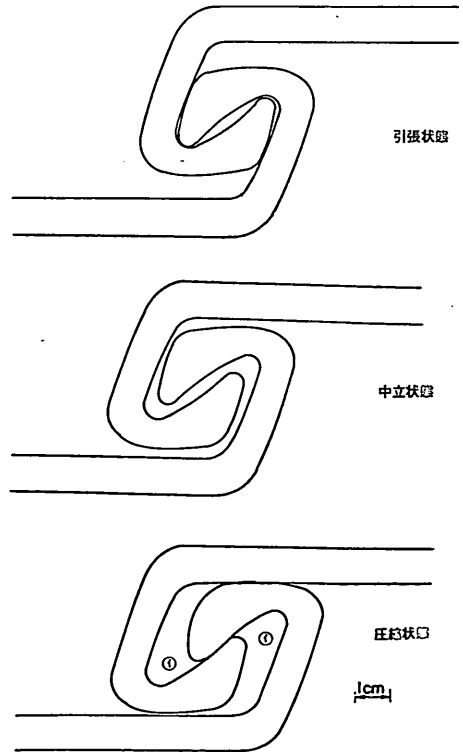


図-4.3 Ⅲ型鉛矢板（ラルゼン型継手）拡大図

いても、矢板壁の片側または両側が土砂で詰まっている状態においては、 $q \propto h^n$ 、 $n \approx 1.0$ の関係があるとみなすことができるものと推測される。ただし、このことは、実際に確認したものではないので、その確認は今後の課題として残されているものと考えている。

ここで実際の現象を説明する $q = Kh^n$ 、 $n \approx 0.5$ または 1.0 の関係式を $n = 0.5$ 、1.0 と近似的においた場合の誤差を試算してみる。真の現象を説明する関係式 $q_r = K_r h_r^{n_r}$ を近似的に $q = Kh^n$ とおいたとする。そしてこのときの K は $h = h_1$ のときの実測値 q_r にもとづいて設定したと仮定すると、 $q_r = K_r h_1^{n_r} = K \cdot h_1^n$ であるので $K = K_r h_1^{n_r - n}$ となる。ここで、 $h = h_2$ ときにこの近似式で計算した流量 $q = Kh_2^n$ と真の流量 $q_r = K_r h_2^{n_r}$ の比をとると、次式であらわされる。

$$\frac{q}{q_r} = \frac{K \cdot h_2^n}{K_r \cdot h_2^{n_r}} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{n - n_r}$$

土砂の詰まっていない継手状態の場合について、 $n_r = 0.55$ 、 $h_1 = 50 \text{ cm}$ と仮定すると、 $n = 0.5$ であるから

$$\frac{q}{q_r} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{-0.05} = \begin{cases} 1.084 & (h_2/h_1 = 1/5, h_2 = 10 \text{ cm}) \\ 1.035 & (h_2/h_1 = 1/2, h_2 = 25 \text{ cm}) \\ 0.966 & (h_2/h_1 = 2, h_2 = 100 \text{ cm}) \\ 0.923 & (h_2/h_1 = 5, h_2 = 250 \text{ cm}) \\ 0.891 & (h_2/h_1 = 10, h_2 = 500 \text{ cm}) \end{cases}$$

砂詰まりのある継手状態の場合について、 $n_r = 0.95 \sim 0.90$ 、 $h_1 = 50 \text{ cm}$ と仮定すると、 $n = 1.0$ であるから

$$\frac{q}{q_r} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{0.05 \sim 0.10} = \begin{cases} 0.923 \sim 0.851 & (h_2/h_1 = 1/5, h_2 = 10 \text{ cm}) \\ 0.966 \sim 0.933 & (h_2/h_1 = 1/2, h_2 = 25 \text{ cm}) \\ 1.035 \sim 1.071 & (h_2/h_1 = 2, h_2 = 100 \text{ cm}) \\ 1.084 \sim 1.175 & (h_2/h_1 = 5, h_2 = 250 \text{ cm}) \\ 1.122 \sim 1.259 & (h_2/h_1 = 10, h_2 = 500 \text{ cm}) \end{cases}$$

という結果を得る。この程度の誤差は透水計算全体の精度を考慮すると、実用的にみて許容できるものと考えられる。

以上のことをふまえて、矢板壁の透水性を支配する実用的関係式は次のように設定できる。

$$\left. \begin{aligned} q_p &= K_p h^n \\ q &= K \cdot h^n \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

ここに、 q_p ; 矢板壁単位面積当たりの透水量。継手部からの流出量を矢板壁単位面積当りに換算したもの。(cm³/s・cm²)

q ; 継手単位長さ当たりの流出量

(cm³/s・cm)

K_p ; 係数。 $K_p = K/D$ (cm¹⁻ⁿ/s)

K ; 継手部の状態によって決まる係数 (cm²⁻ⁿ/s)

D ; 継手間隔 (cm)

h ; 継手前後の圧力水頭差 (cm)

n ; 係数、継手部に土砂の詰まっている場合、1.0、詰まっていない場合、0.5。

式(4.1)は、継手前後の圧力水頭差 h と流出量の関係式である。しかし、実際にこの関係式による K または K_p の値を実測値から求めようとする場合、矢板壁前後に土砂のない状態は問題がないが、前後いずれかに土砂がある場合には継手前後の圧力水頭差 h の測定は難しい。特に現地矢板壁の場合は困難である。一方、矢板壁近傍の土砂中の流れは、矢板壁法線方向に一樣な流れにならないが、実用的には一樣として、近似的な二次元の取扱いをせざるを得ない。そのため、継手前後の圧力水頭差と q の関係を苦労して把握しても、それをそのまま生かすことができない。このようなことを考慮すると、鋼矢板と近傍の土砂のある領域を仮想の矢板壁と考えて、その前後の圧力水頭差と流出量の関係を把握し、透水計算に用いることが実用的にみて有効である。このような考えは、久保・村上によってすでにとられており、彼等は矢板をふくむ流れ方向に 30 cm の領域を考え、合成継手という呼び方をしている。ここでも、仮想の矢板壁を合成継手と称することとする。この合成継手内の土砂中の流速は、継手部の土砂中の流速に比較してはるかに小さいので、この間の土砂流中の摩擦損失水頭は継手部のそれに比較してずっと小さなものであるので、式(4.1)の h の代わりに、合成継手前後の圧力水頭差をとっても、同様の関係式が成立するものと推測できる。図-4.7は今回の実験で得られた矢板壁後方 80 cm の砂中の場所と矢板壁前面との圧力水頭と流出量の関係を整理したものである。矢板壁後方 80 cm とは後室のストレーナーの位置になるので、具体的には後貯水槽内の A-7 と矢板壁前面の圧力水頭の差と流出量の関係である。図-4.7に示された関係式は 図-3.11のそれとほとんど差のないものであることがわかる。このようなことから式(4.1)における h は、継手前後または合成継手前後の圧力水頭といいかえることができるものと考えよう。

最後に、式(4.1)の関係式をもとに実際の透水計算を行う場合の具体的方法について考えてみる。

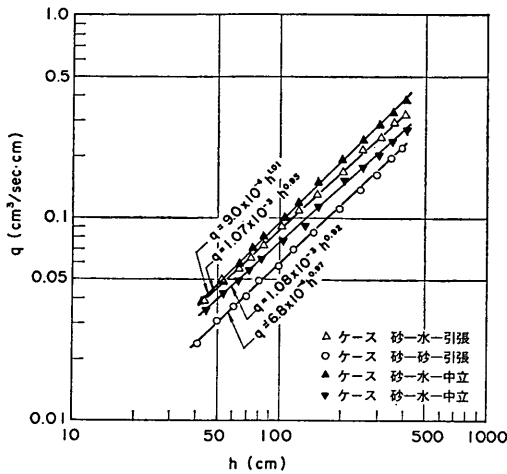


図-4.7 後貯水槽と矢板壁前面の圧力水頭差と継手単位長さ当たりの流出量の関係（砂詰めのある場合の下降時）

実際の矢板壁のおかれる状態は表-4.3の参考図の(a)~(e)のいずれかの状態になる。そして、矢板壁前後の状態に着目すると矢板壁の透水のパターンは①~⑧に分類することができる。表中には各パターンの流出量を支配する関係式を示している。これらのパターンのうち、①, ②, ③, ⑥は今回の実験ケースにも入っており、実験的にも確認されている。その他は、今回の実験結果と

水理学的考察によって類推した。すなわち n については、矢板壁の前後いずれかが土砂中にあれば、継手部に土砂が詰まっているものと考えて $n=1.0$ とおいた。 K についてはおおの、次のように考えた。パターン③は、p. 70, ll. 22~29に述べた理由によりパターン⑥よりも流出量が大きくなると思われるので $K_3 > K_6$ と考えた。パターン⑤はパターン①とパターン②の K の比較から $K_5 > K_6$ とした。パターン④は、パターン③とパターン⑥の比較から $K_4 > K_6$ と考えた。簡便に割り切った取扱いとする必要があるときには透水計算全体の精度を考慮した上で、 $K_1 \doteq K_2$, $K_3 \doteq K_4 \doteq K_5 \doteq K_6$, $K_7 \doteq K_8 \doteq 2K_6$ として取扱うことも考えられる。

一般に矢板壁を有する構造物は、表-4.3のパターン①と②だけしか考える必要のない限定された場合を除くと、土と矢板壁との混在した断面になる。そして、土はダルシーの法則に従うものとして取扱われるので、ダルシーの法則とちがった式(4.1)の関係式をそのまま使って解くのは、極めて簡単な断面で、かつ、計算条件の簡単な場合でなければ困難である。そのため、一般には次に述べる換算透水係数を用いるのが実用的方法としてとられている。

換算透水係数を用いる方法というのは土中の流れがダルシーの法則に従うものとして取扱われるのにあわせて、そのなかでの流れがダルシーの法則に従う仮定の壁体を考える方法である。

表-4.3 鋼矢板壁の透水パターンと流出量を支配する関係式

| パターンの種類 | 呼称 | 流出量を支配する関係式 $q_p = K_p h^n$ の係数 | 透水パターンのおきる状態の例(参考図) |
|---------|--|---------------------------------|---------------------|
| ① | 水中→矢板→空中 | $n_1 = 0.5$ $K_1 (> K_2)$ | |
| ② | 水中→矢板→水中 | $n_2 = 0.5$ K_2 | |
| ③ | 水中→矢板→土中 | $n_3 = 1.0$ $K_3 (> K_6)$ | |
| ④ | 水中→矢板→土中(空)** | $n_4 = 1.0$ $K_4 (> K_6)$ | |
| ⑤ | 土中→矢板→空中 | $n_5 = 1.0$ $K_5 (> K_6)$ | |
| ⑥ | 土中→矢板→水中 | $n_6 = 1.0$ K_6 | |
| ⑦ | 土中→矢板→土中 | $n_7 = 1.0$ $K_7 (< K_6)$ | |
| ⑧ | 土中→矢板→土中(空)** | $n_8 = 1.0$ K_8 | |
| 註 | **; 矢板継手の前面(漏出側)における静水面より上の部分の土中に流出するものである | | |

仮定の壁体中の流れがダルシーの法則に従うとすれば

$$q_s = k' \cdot i \quad (4.2)$$

ここに、 q_s ； 仮想壁体単位面積当たりの流出量
($\text{cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}^2$)

k' ； 換算透水係数 (cm/s)

i ； 動水勾配

が成立しなければならない。そして、 q_s は式 (4.1) で表される q_p と等しくなければならない。ここで、仮想壁体内の流れが矢板壁に直角な様な流れであれば、仮想壁体の壁体幅を L (cm) とすると $i = h/L$ が成立するので、 $K_p h^n = k' i = k' h/L$ という関係から次式となる。

$$k' = L K_p h^{n-1} \quad (4.3)$$

$$n = 1.0 \text{ のとき} \quad k' = L K_p \quad (4.3)'$$

$$n = 0.5 \text{ のとき} \quad k' = L K_p h^{-0.5} \quad (4.3)''$$

すなわち継手部に土砂詰りのある状態 ($n = 1.0$) では、 k' は h にかかわらず一義的に定まる。一方、継手部に土砂詰りのない状態 ($n = 0.5$) では k' は h の関数となるので、注意が必要である。矢板壁の前後における圧力水頭差 h が一定の状態にあるような場合の透水計算では、その h に対応する一定の k' を設定すればよいが、このような状態はごく限定された場合にしか生じない。一般には、 h は矢板壁の上で、場所的に変化しており、又非定常な透水計算をする場合には時間的にも変化する。そのため、このような場合に、 k' を h の関数として取扱えずやむを得ず、一定の値を用いる場合には、その値の選定には十分注意を払う必要がある。

ところで、式 (4.3) で得られる換算透水係数が式 (4.1) 式で示される矢板壁の透水特性と全く等価な透水性を示すためには、仮想壁体内での流れが壁体に直角な一様流になっていなければならないが、換算透水係数を用いた透水計算の結果は一般にはそうならない。しかし、透水計算全体の精度を考えれば、この程度の近似的な取扱いは実用上の支障とはならないと考えてよい。

なお、矢板壁が不透水層まで打設されており、矢板壁からの透水だけを考えればよい簡単な場合について式 (3.1) の関係式をそのまま適用した解法例を付録としてのせた。それによれば表-4.3 のパターン①と②が組合わされている付録 (1) 以外の場合では、1枚の矢板壁において K (式 (4.1) 中の K に相当) が一定という条件をおけば、矢板壁を式 (4.3)' であらわされる換算透水係数をもつ、幅 L なる仮想壁体と考えた場合の解析結果¹⁰⁾と同じになっていることがわかる。

5. ま と め

図-2.2 に示した実験装置を使い、加工したⅢ型鋼矢板 (ラコワナ型継手) を組合わせた矢板壁 (図-2.3 参照) の背後に水圧を加えたときの矢板壁からの流出水量と矢板壁前後の圧力水頭を測定する実験を行った。加えた水圧は、水頭で 50~500 cm の範囲で段階的に上昇・下降させた。実験ケースは矢板壁前後の状態や継手の状態を変えた 8 ケースであり、各ケースの内容と呼称は表-2.1 に示す。

〈実験結果を要約すると次のとおりである〉

- ① 矢板壁の両側が砂詰めされていない状態での実験結果は
 - ④ ケース水-水-引張の継手前後の圧力水頭差 h (cm) と継手単位長さ当たりの流出量 q ($\text{cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}$) の間には $q = K h^n$ ($K = 6.0 \times 10^{-2}$, $n = 0.55$) の関係があった。
 - ⑤ ケース水-空-引張の実験結果は、ケース水-水-引張の q と h の関係における K を 1.25 倍した関係が成立するとした結果とよい一致をみた。
- ② 矢板壁の流入側または両側が砂詰めされた状態での実験結果は
 - ④ 矢板壁背後砂層中の圧力水頭の測定結果をみると、矢板壁後方 30~67.5 cm の範囲でほぼ一定の動水勾配を示した。この動水勾配から逆算した透水係数は、全ケースを通じて $5 \times 10^{-2} \sim 1.2 \times 10^{-1} \text{ cm}/\text{s}$ の範囲であった。
 - ⑤ $\log q \sim \log h$ の関係は、加えた水圧の上昇段階より下降段階に安定した直線性を示す。そして、その関係式は $q \propto h^n$, $n = 0.91 \sim 0.99$ であった。
 - ⑥ 矢板壁背後を砂詰めしたケース砂-水-引張の流出量は、継手が同じ引張状態で、砂詰めのないケース水-水-引張の場合と比較すると、 $h = 50 \text{ cm}$, 500 cm において、それぞれ 0.091 倍、0.23 倍になった。さらに矢板壁の両側を砂詰めしたケース砂-砂-引張では、ケース砂-水-引張の場合の 0.66~0.68 倍の流出量になった。
 - ⑦ ケース砂-水-中立の実験終了後の状態で、矢板壁を水面下においた状態で 1 か月放置すると、流出量が $h = 50, 500 \text{ cm}$ に対して、それぞれ 0.84, 0.70 倍に低下した。

〈以上の実験結果に考察を加えた結果、次の結論を得た。〉

- ① 矢板壁の透水性を示す関係式は次式で表現されるものであることが実験的に確認された。

$$q = K \cdot h^n \quad (3.43) \text{ 再掲}$$

ここに、 q ；継手単位長さ当たりの流出量

h ；継手前後の圧力水頭差

K ；継手部の状態によって決まる係数

n ；継手部の状態によって決まる係数であり継手部に土砂の詰まっていない場合は、 $n \approx 0.5$ 、継手部に土砂の詰まっている場合は $n \approx 1.0$

- ② 限定された条件下のものであるが、矢板壁の透水性を示す資料が得られた。ただし、その活用にあたっては、実験用矢板壁と現地の矢板壁の状態の違いに留意する必要がある。

- ③ 継手部を狭水路とみなした水理学的考察により、継手部の透水に関する一般的特性の把握ができた。又、①に示した実験結果の特性を説明することができる。〈次に、矢板壁をふくむ護岸等構造物の透水計算をする場合の矢板壁の実用的取扱いについて考察を加えた。その主な内容は以下のとおり〉

- ① 矢板壁の透水性を支配する関係式として、①の式(3.43)で、 n は継手部に土砂の詰まっていない状態では0.5、詰まっている状態では1.0とおいたものを用いて、実用上支障ないものと推測した。

- ② 矢板壁の片側または両側に砂詰めのある場合は、矢板と近傍の土砂のある領域を仮想の矢板壁（合成継手と称する）と考え、その前後の圧力水頭と流出量の関係で矢板壁の透水性を考えることが実用上有利であることを述べた。

- ③ ①の関係式を適用した簡単な条件の場合の透水計算の解法例を付録に示した。又、矢板壁のダルシー則の成立する仮想の壁体におきかえて透水計算をする場合の換算透水係数のとり方について考えを整理した。

6. あとがき

本研究により鋼矢板壁の透水に関する基本的性質をある程度明らかにすることができたと考えている。今後、本研究で得られた知見が、各種矢板壁の透水性に関する有効なデータの取得に活用され、透水計算法の確立に資するものになることを期待する。

鋼矢板壁の透水に関する基本的性質の究明という点において、残された課題としては本文中で指摘したように、矢板壁が土砂に接しておかれている状態の場合に関して

- ① 粗い土砂において、今回の実験結果と同様の特性を示す限界を追求すること、および②延長があり、継手状態が一定でない現地矢板壁の場合、平均的にみれば $q \propto h^n$ 、 $n \approx 1.0$ とみなせると推定した点を各種の矢板壁について確認することがあげられる。これらに取り組むには、現地における矢板壁の状態についての的確な認識にたった調査・研究が必要と考える。

最後に本研究の遂行にあたって、実験装置の製作と実験の一部を実施するのに港湾事業調査費が充当されていることを申し添えるとともに、本文とりまとめにあたり助力をうけた基礎工研究室 春日井康夫君に謝意を表します。
(1982年9月30日受付)

参考文献

- 1) 山村和也・藤山忠彦・犬束昌生・二馬健次郎：鋼矢板の止水性に関する実験，土木研究所報告，Vol. 123, No. 3, 昭和39年1月。
- 2) 久保浩一・村上 守：鋼矢板壁の透水性に関する一つの実験，土と基礎，Vol. 11, No. 2, 1963, pp. 25~31。
- 3) 文献1) 参照，p. 7, 図-7。
- 4) 文献2) 参照，p. 28, 図-9。
- 5) 文献1) 参照，p. 10, 図-10。
- 6) 文献2) 参照，p. 28, 図-11。
- 7) 文献2) 参照，p. 29。
- 8) 古土井光昭・片山猛雄：残留水位測定調査，港湾技研資料，No. 115, Mar. 1971, p. 102。
- 9) 本間 仁・安芸皎一：物部水理学，岩波書店，1962, p. 138。
- 10) 文献9) 参照，p. 457。
- 11) 文献9) 参照，p. 58 および p. 458。
- 12) 土木学会：土木工学ハンドブック（上巻），技報堂，1974, p. 414。
- 13) 文献9) 参照，pp. 190~196。
- 14) 石原藤次郎・本間 仁：応用水理学（上），丸善株式会社，1957, p. 29。
- 15) 文献9) 参照，p. 529。
- 16) 地下水ハンドブック，建設産業調査会，1979, p. 72。
- 17) 久保田敬一・河野伊一郎・宇野尚雄：透水－設計へのアプローチ，鹿島出版会，1976, p. 14。
- 18) 文献9) 参照，p. 533。
- 19) 文献16) 参照，p. 170。
- 20) 松尾新一郎・河野伊一郎：地下水位低下工法，鹿島出版会，1970。

付 録

矢板壁の透水計算の解法例（矢板壁が不透水槽層まで根入れされている場合）

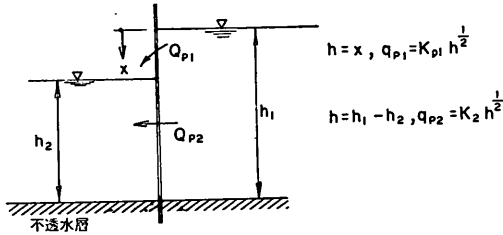
記号一覧

鉛矢板壁の透水実験

- Q_p ; 矢板壁からの流出量
- q_p ; 矢板壁単位面積あたりに換算した継手部からの流出量
- h ; 継手(または合成継手)前後の圧力水頭差
- K ; q_p を支配する式 $q_p = K \cdot h^n$ の係数。ただし $n=0.5$ 又は 1.0
- x ; 壁体の鉛直方向の距離, 原点は付図中に示す。
- Q_s ; 砂層部分の流出量
- k ; 砂層部分の透水係数

各記号に付けたサフィクスは各ケースの付図中に示したように各箇所におけるそれぞれの値であることを示す。

(1) 矢板壁前後に静水面がある場合



付図-1

$$Q_{p1} = \int_0^{h_1-h_2} q_{p1} dx = \int_0^{h_1-h_2} K_1 h^{1/2} dh$$

$$= \frac{2}{3} K_1 (h_1 - h_2)^{3/2} \quad \text{①}$$

$$Q_{p2} = \int_{h_1-h_2}^{h_1} q_{p2} dx = \int_{h_1-h_2}^{h_1} K_2 h^{1/2} dx$$

$$= K_2 h^{1/2} \int_{h_1-h_2}^{h_1} dx = K_2 (h_1 - h_2)^{1/2} h_2 \quad \text{②}$$

$$Q_p = Q_{p1} + Q_{p2} = \frac{2}{3} K_1 (h_1 - h_2)^{3/2} + K_2 (h_1 - h_2)^{1/2} h_2$$

$$= (h_1 - h_2)^{1/2} \left\{ \frac{2}{3} K_1 (h_1 - h_2) + K_2 h_2 \right\} \quad \text{③}$$

$K=K_1=K_2$ のとき

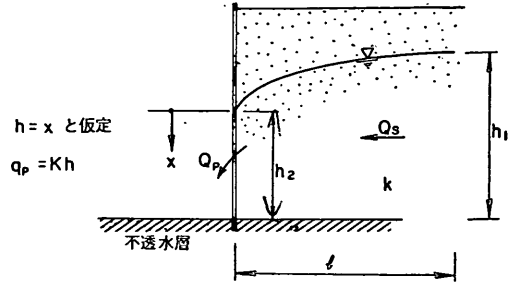
$$Q_p = K (h_1 - h_2)^{1/2} \left\{ \frac{2}{3} (h_1 - h_2) + h_2 \right\} \quad \text{④}$$

(2) 矢板背後が土砂で、前面が静水面の場合 (自由水面が土砂内にある)

Dupit-Forchheimer の準一様流の仮定が成立するとして

$$Q_s = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l} \quad \text{①}$$

$$Q_p = \int_0^{h_2} q_p dx = \int_0^{h_2} K h dh = \frac{K}{2} h_2^2 \quad \text{②}$$



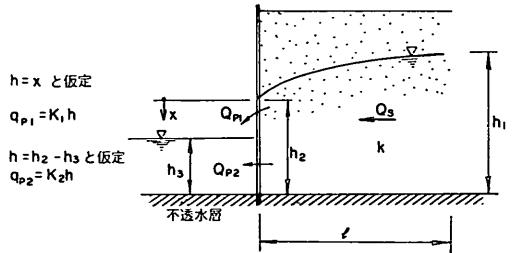
付図-2

$$Q = Q_s = Q_p \quad \text{③}$$

①と②から h_2 を消去

$$Q = \frac{1}{\frac{l}{k} + \frac{1}{K}} \cdot \frac{h_1^2}{2} \quad \text{④}$$

(3) 矢板壁背後が土砂で、前面が静水面の場合 (自由水面が土砂内にある)



付図-3

Dupit-Forchheimer の準一様流の仮定が成立するとして,

$$Q_s = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l} \quad \text{①}$$

$$Q_{p1} = \int_0^{h_2-h_3} q_{p1} dx = \int_0^{h_2-h_3} K_1 h dh = \frac{K_1}{2} (h_2 - h_3)^2 \quad \text{②}$$

$$Q_{p2} = \int_{h_2-h_3}^{h_2} q_{p2} dx = K_2 h \int_{h_2-h_3}^{h_2} dx = K_2 (h_2 - h_3) h_3 \quad \text{③}$$

$$Q_p = Q_{p1} + Q_{p2} = (h_2 - h_3) \left\{ \frac{K_1}{2} (h_2 - h_3) + K_2 h_3 \right\} \quad \text{④}$$

$$Q = Q_s = Q_p \quad \text{⑤}$$

式①, ④から

$$\frac{k}{2l} (h_1^2 - h_2^2) = (h_2 - h_3) \left\{ \frac{K_1}{2} (h_2 - h_3) + K_2 h_3 \right\}$$

変形すると

$$\frac{1}{2} \left(\frac{k}{l} + K_1 \right) h_2^2 + (K_2 - K_1) h_2 h_3 + \left(\frac{K_1}{2} - K_2 \right) h_3^2$$

$$-\frac{k}{2l}h_1^2=0$$

これを解いて工学的意味のある根をとると

$$h_2 = \frac{1}{\frac{k}{l} + K_1} \{ (K_1 - K_2)h_3 + \sqrt{A} \} \quad (6)$$

ここに

$$A = \left\{ (K_2 - K_1)^2 - \left(\frac{k}{l} + K_1 \right) (K_1 - 2K_2) \right\} h_3^2 + \frac{k}{l} \left(\frac{k}{l} + K_1 \right) h_1^2 \quad (7)$$

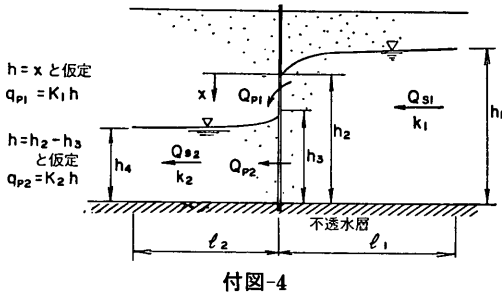
式⑥を式①に代入する

$$Q = \frac{k}{2 \left(l + \frac{k}{K_1} \right)^2} \left[\left(l + \frac{k}{K_1} \right) h_1^2 + \left\{ \left(l + \frac{k}{K_1} \right) \left(1 - \frac{2K_2}{K_1} \right) - 2 \left(1 - \frac{K_2}{K_1} \right) l \right\} h_3^2 - \frac{2(K_1 - K_2)lh_3}{K_1^2} \sqrt{A} \right] \quad (8)$$

$K=K_1=K_2$ のとき式⑧から

$$Q = \frac{1}{\frac{l}{k} + \frac{1}{K}} \cdot \frac{h_1^2 - h_3^2}{2} \quad (9)$$

(4) 矢板壁両面が土砂の場合 (自由水面が土砂内にある)



付図-4

Dupuit-Forchheimer の準一様流の仮定が成立するとして

$$Q_{s1} = k_1 \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_1} \quad (1)$$

$$Q_{s2} = k_2 \frac{h_2^2 - h_3^2}{2l_2} \quad (2)$$

$$Q_{p1} = \int_0^{h_2-h_3} q_{p1} dx = \int_0^{h_2-h_3} K_1 h dh = \frac{K_1}{2} (h_2 - h_3)^2 \quad (3)$$

$$Q_{p2} = \int_{h_2-h_3}^{h_2} q_{p2} dx = K_2 h \int_{h_2-h_3}^{h_2} dx = K_2 (h_2 - h_3) h_3 \quad (4)$$

$$Q_p = Q_{p1} + Q_{p2} = \frac{K_1}{2} (h_2 - h_3)^2 + K_2 (h_2 - h_3) h_3 = (h_2 - h_3) \left\{ \frac{K_1 (h_2 - h_3)}{2} + K_2 h_3 \right\} = \frac{K_1}{2} h_2^2 + (K_2 - K_1) h_2 h_3 + \left(\frac{K_1}{2} - K_2 \right) h_3^2 \quad (5)$$

$$Q = Q_p = Q_{s1} = Q_{s2} \quad (6)$$

式①, ②から

$$h_2 = \sqrt{h_1^2 - \frac{2l_1 Q}{k_1}}, \quad h_3 = \sqrt{h_4^2 + \frac{2l_2 Q}{k_2}} \quad (7)$$

式⑦を式⑤に代入

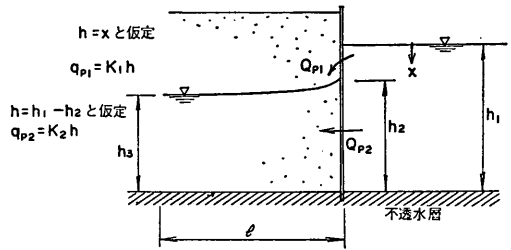
$$Q = \frac{K_1}{2} \left(h_1^2 - \frac{2l_1 Q}{k_1} \right) + (K_2 - K_1) \sqrt{\left(h_1^2 - \frac{2l_1 Q}{k_1} \right) \left(h_4^2 + \frac{2l_2 Q}{k_2} \right)} + \left(\frac{K_1}{2} - K_2 \right) \left(h_4^2 + \frac{2l_2 Q}{k_2} \right) \quad (8)$$

変形すると Q に関する二次方程式となり, この解をもとめれば Q がもたまる。

$K=K_1=K_2$ のとき式⑧を変形すると

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2}} \cdot \frac{h_1^2 - h_4^2}{2} \quad (9)$$

(5) 矢板壁背後に静水面があり, 前面は土砂の場合 (自由水面が土砂中にある)



付図-5

Dupuit-Forchheimer の準一様流の仮定が成立するとして,

$$Q_s = k \frac{h_2^2 - h_3^2}{2l} \quad (1)$$

$$Q_{p1} = \int_0^{h_1-h_2} q_{p1} dx = \int_0^{h_1-h_2} K_1 h dh = \frac{K_1}{2} (h_1 - h_2)^2 \quad (2)$$

$$Q_{p2} = \int_{h_1-h_2}^{h_2} q_{p2} dx = q_{p2} \int_{h_1-h_2}^{h_2} dx = K_2 (h_1 - h_2) h_2 \quad (3)$$

鋼矢板壁の透水実験

$$Q_p = Q_{p1} + Q_{p2} = \frac{K_1}{2}(h_1 - h_2)^2 + K_2(h_1 - h_2)h_2$$

$$= (h_1 - h_2) \left\{ \frac{K_1(h_1 - h_2)}{2} + K_2 h_2 \right\} \quad (4)$$

$$Q = Q_p = Q_s \quad (5)$$

式①と④から

$$\frac{k_1}{2l}(h_2^2 - h_3^2) = (h_1 - h_2) \left\{ \frac{K_1}{2}(h_1 - h_2) + K_2 h_2 \right\}$$

変形すると

$$\left(\frac{k}{2l} - \frac{K_1}{2} + K_2 \right) h_2^2 + (K_1 - K_2) h_1 h_2 - \frac{K_1}{2} h_1^2 - \frac{k}{2l} h_3^2 = 0$$

これを解いて工学的に意味ある根をとると

$$h_2 = \frac{(K_2 - K_1)h_1 + \sqrt{A}}{\frac{k}{l} - K_1 + 2K_2} \quad (6)$$

ただし

$$A = \left(K_2^2 + \frac{k}{l} K_1 \right) h_1^2 + \left(\frac{k}{l} - K_1 - 2K_2 \right) \frac{k}{l} h_3^2 \quad (7)$$

式⑥を式①に代入する

$$Q = \frac{k}{2l \left(\frac{k}{l} - K_1 + 2K_2 \right)^2} \left[2(K_1 - K_2)^2 + \left(\frac{k}{l} - K_1 + 2K_2 \right) K_1 \right] h_1^2 + \left(\frac{k}{l} - K_1 + 2K_2 \right) (K_1 - 2K_2) h_3^2 - 2(K_1 - K_2) h \sqrt{A} \quad (8)$$

$K = K_1 = K_2$ のとき式⑧から

$$Q = \frac{1}{\frac{l}{k} + \frac{1}{K}} \cdot \frac{h_1^2 - h_3^2}{2} \quad (9)$$

これは (3) の式⑨と同形である。

(6) 二重矢板壁の流出側に静水面がある場合 (自由水面は土砂中にある)
Dupuit-Forchheimer の準一様流の仮定が成立するとして

$$Q_{s1} = k_1 \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_1} \quad (1)$$

$$Q_{s2} = k_2 \frac{h_3^2 - h_4^2}{2l_2} \quad (2)$$

$$Q_{p1} = \int_0^{h_2 - h_3} q_{p1} dx_1 = K_1 \int_0^{h_2 - h_3} h dh = \frac{K_1}{2} (h_2 - h_3)^2 \quad (3)$$

$$Q_{p2} = \int_{h_2 - h_3}^{h_2} q_{p2} dx_1 = K_2 (h_2 - h_3) \int_{h_2 - h_3}^{h_2} dx_1 = K_2 (h_2 - h_3) h_3 \quad (4)$$

$$Q_{p3} = \int_0^{h_4 - h_5} q_{p3} dx_2 = K_3 \int_0^{h_4 - h_5} h dh = \frac{K_3}{2} (h_4 - h_5)^2 \quad (5)$$

$$Q_{p4} = \int_{h_4 - h_5}^{h_4} q_{p4} dx_2 = K_4 (h_4 - h_5) \int_{h_4 - h_5}^{h_4} dx_2 = K_4 (h_4 - h_5) h_5 \quad (6)$$

$$Q = Q_{s1} = Q_{s2} = Q_{p1} + Q_{p2} = Q_{p3} + Q_{p4} \quad (7)$$

ここで、 $K_1 = K_1 = K_2$, $K_{11} = K_3 = K_4$ の場合について考える。

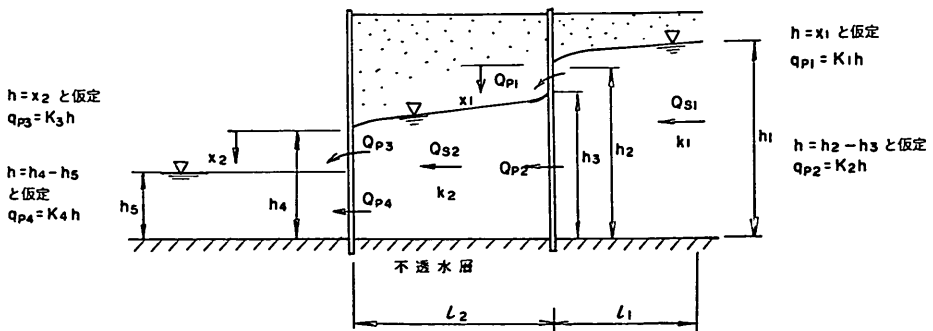
式③,④,⑦および, 式⑤,⑥,⑦から

$$Q = K_1 \frac{h_2^2 - h_3^2}{2} \quad (8)$$

$$Q = K_{11} \frac{h_4^2 - h_5^2}{2} \quad (9)$$

式①,②,⑧,⑨から h_2, h_4 を消去すると

$$Q = \frac{1}{\frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2} + \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_{11}}} \cdot \frac{h_1^2 - h_3^2}{2} \quad (10)$$



付図-6

(7) 二重矢板壁の流入側に静水面がある場合（自由水面は土砂中にある）

Dupuit-Forchheimer の準一様流の仮定が成立するとして

$$Q_{s1} = k_1 \frac{h_2^2 - h_3^2}{2l_1} \quad (1)$$

$$Q_{s2} = k_2 \frac{h_4^2 - h_5^2}{2l_2} \quad (2)$$

$$Q_{p1} = \int_0^{h_1-h_2} q_{p1} dx_1 = K_1 \int_0^{h_1-h_2} h dh = \frac{K_1}{2} (h_1-h_2)^2 \quad (3)$$

$$Q_{p2} = \int_{h_1-h_2}^{h_1} q_{p2} dx_1 = K_2 (h_1-h_2) \int_{h_1-h_2}^{h_1} dx_1 = K_2 (h_1-h_2) h_2 \quad (4)$$

$$Q_{p3} = \int_0^{h_3-h_4} q_{p3} dx_2 = K_3 \int_0^{h_3-h_4} h dh = \frac{K_3}{2} (h_3-h_4)^2 \quad (5)$$

$$Q_{p4} = \int_{h_3-h_4}^{h_3} q_{p4} dx_2 = K_4 (h_3-h_4) \int_{h_3-h_4}^{h_3} dh = K_4 (h_3-h_4) h_4 \quad (6)$$

$$Q = Q_{s1} = Q_{s2} = Q_{p1} + Q_{p2} = Q_{p3} + Q_{p4} \quad (7)$$

ここで、 $K_1 = K_1 = K_2$, $K_{11} = K_3 + K_4$ の場合について考える

式(3),(4),(7)および、式(5),(6),(7)から

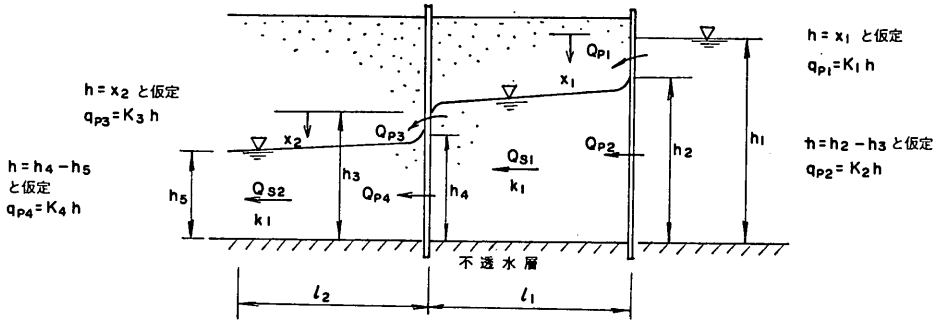
$$Q = K_1 \frac{h_1^2 - h_2^2}{2} \quad (8)$$

$$Q = K_{11} \frac{h_3^2 - h_4^2}{2} \quad (9)$$

式(1),(2),(8),(9)から h_2, h_3 を消去すると

$$Q = \frac{1}{\frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2} + \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_{11}}} \cdot \frac{h_1^2 - h_5^2}{2} \quad (10)$$

(6) の式(10)と同形である。



付図-7