

土木研究所資料

堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する

模型実験

平成8年1月

建設省土木研究所
材料施工部 土質研究室

Copyright © (1996) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する 模 型 実 験

材料施工部	土質研究室	室 長	三 木 博 史
		研究員	山 田 哲 也
		研究員	藤 井 厚 企
			野 口 典 孝
			佐 藤 正 博*

要 旨

堤防のパイピング破壊を検討する手法として、クリープ比や限界実流速等の規準が適用されてきた。しかし、これらの規準にはかなりの安全率をとっているものもあり、実現象をうまく説明できない場合も少なくない。そこで、本研究では、水平方向浸透流によるパイピング現象についての小型模型実験及び大型模型実験を行い、従来の規準と比較検討するとともに、砂地盤の土質特性を考慮したより実際のパイピング破壊規準について検討した。

キーワード：パイピング破壊，浸透，堤防，透水性，模型実験

*建設省下館工事事務所 前土質研究室研究員

まえがき

近年、防災構造物としての河川堤防の重要性は一段と高まってきており、堤防の安定度評価手法の高度化を目指した取り組みが精力的に進められている。堤防の安定性のうち、浸透による破壊形態として、パイピング破壊が挙げられるが、それらを大別すると、堤体のパイピング破壊と基礎地盤のパイピング破壊に分けられる。基礎地盤のパイピング破壊は、河川水位の上昇により基礎地盤の透水層内を浸透した水が透水層を通過して、堤内地側へ流出する現象であり、パイピングが激しくなると水の流出に伴って透水層内の土砂を噴出させるもので、これはその規模によっては、河川堤防や周辺に大きな影響を及ぼすこともある。

パイピング破壊を検討する手法としては、従来からクリープ比やジャスティンによる限界実流速、テルツァギーによる限界動水勾配等が適用されてきた。しかし、実際のパイピング破壊に関しては、地盤を構成する土質の非均質性、粒度分布、粘着力、浸透方向など課題が残されており、これらの基準ではうまく説明できない事例もある。そこで、本報告書では、水平方向浸透流によるパイピング現象についての小型模型実験及び大型模型実験を行い、パイピング現象の定性的な傾向及び従来の理論値、実験値との適合性について検討した。

堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する模型実験

目次

まえがき

1. 研究目的	1
2. 小型模型パイピング実験	2
2.1 実験ケース	2
2.2 実験装置	3
2.3 模型作成方法	6
2.4 実験方法	9
2.5 観測方法	10
2.6 実験結果の整理	11
3. 大型模型パイピング実験	47
3.1 実験ケース	47
3.2 実験装置	48
3.3 模型作成方法	49
3.4 実験方法	52
3.5 観測方法	53
3.6 実験結果の整理	54
4. 実験結果とその考察	83
4.1 パイピング現象の発生形態	83
4.2 クリープ比による検討	84
4.3 限界実流速による検討	86
4.4 パイピング破壊時の平均動水勾配に及ぼす粒度特性の影響	87
4.5 浸透流解析による検討	90
5. まとめ	91
参考文献	92
付録一 各試験ケースの砂地盤の粒度試験結果	93
付録二 各試験ケースにおける砂地盤の最大密度・最小密度試験結果 (CASE 1～18)	107
付録三 各試験ケースにおける砂地盤の密度調査結果	111

1. 研究目的

パイピング破壊に対しては、従来から様々な検討がされているが、その破壊に対する予測は非常に難しい。そこで、本研究では、パイピング破壊に対する定量的な安定度評価手法を確立するため、水平方向浸透流によるパイピング現象について、小型模型実験及び大型模型実験を行い、以下の点について検討を行った。

- ①パイピング現象の定性的な傾向及びクリープ比や限界実流速等の従来の理論値、実験値との適合性
- ②基礎地盤の土質特性がパイピング抵抗に及ぼす影響
- ③浸透流解析から求まる局所的な動水勾配を用いた安定度評価手法の確立

2. 小型模型パイピング実験

本実験は、砂地盤と粘性土層との境界部に起こるパイピング現象の発生機構について研究する目的で実施した。

2. 1 実験ケース

実験ケースは、透水層の砂およびパイピング現象を発生させるための弱点箇所の穴の位置、直径を変えた場合について行った。表-2. 1. 1にそれぞれの実験ケースを示す。

表-2. 1. 1 実験ケース

ケース (No.)	地盤使用砂	穴の位置 (cm)	穴の直径 (cm)	備考
1	霞ヶ浦 (麻生)	60	1	
2	霞ヶ浦 (麻生)	90	1	
3	江戸川	30	1	
4	江戸川	60	1	
5	江戸川	90	1	
6	江戸川	60	2. 5	
7	江戸川	60	5	
8	霞ヶ浦 (美浦)	60	1	
9	鬼怒川	60	1	
10	利根川	60	1	
11	霞ヶ浦 (麻生)	60	2. 5	
12	江戸川	60	7. 5	
13	霞ヶ浦 (麻生)	30	2. 5	
14	小貝川	60	1	

*) 実験は各河川の堤内地の掘削現場から発生した試料を用いた。

2.2 実験装置

(1) 模型地盤

本実験で用いた模型地盤は、図-2.2.1に示すような構造である。装置は、全体がアクリル製であり、砂地盤両端がフィルターで仕切られている。

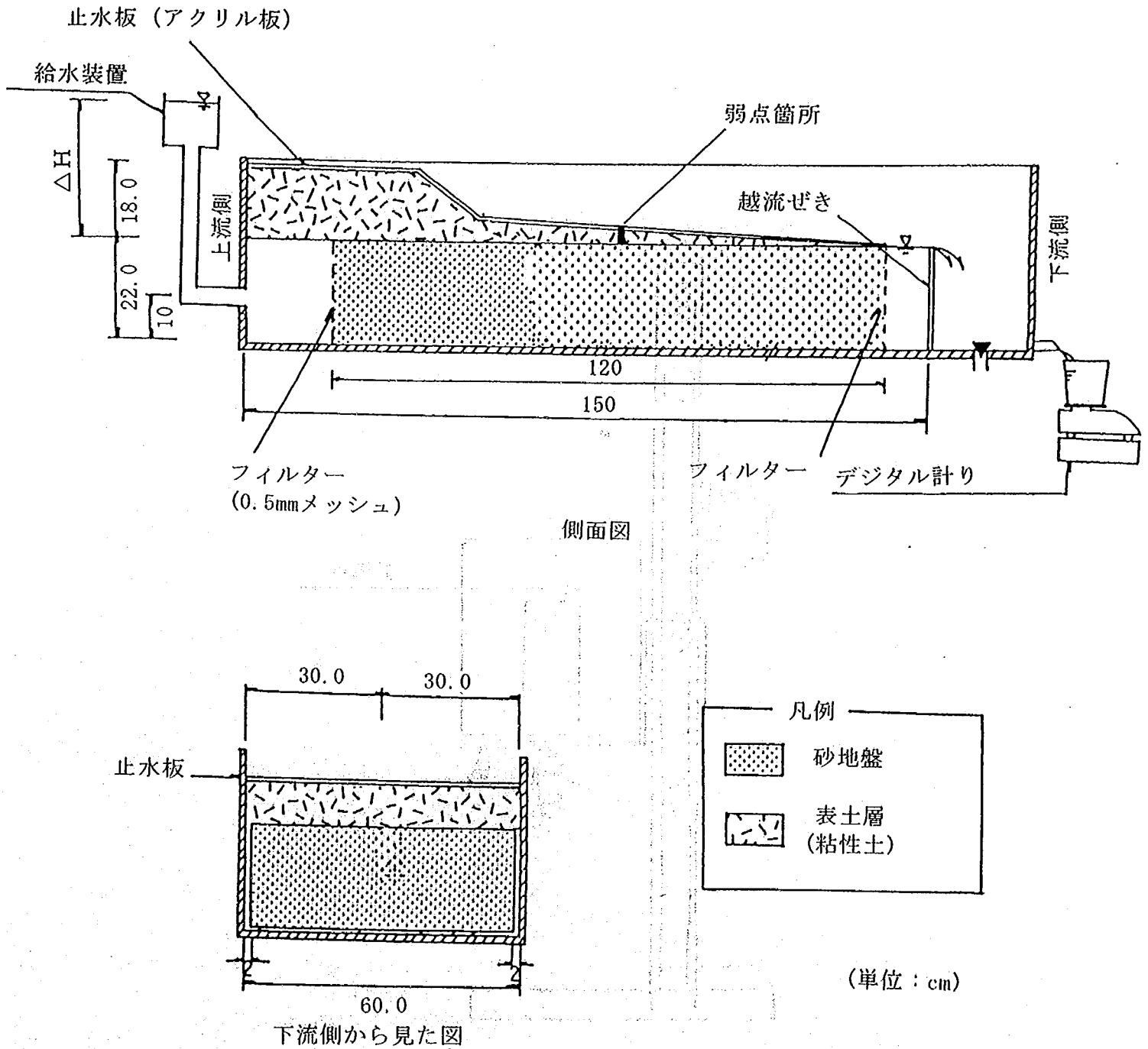


図-2.2.1 模型地盤の形状

(2) 給水装置

給水装置は、図-2.2.2に示すように任意に水頭を自在に設定することが可能である。また、この給水装置は、0.1cm精度で、最大水頭差 (ΔH) 120cmに設定することが可能である。

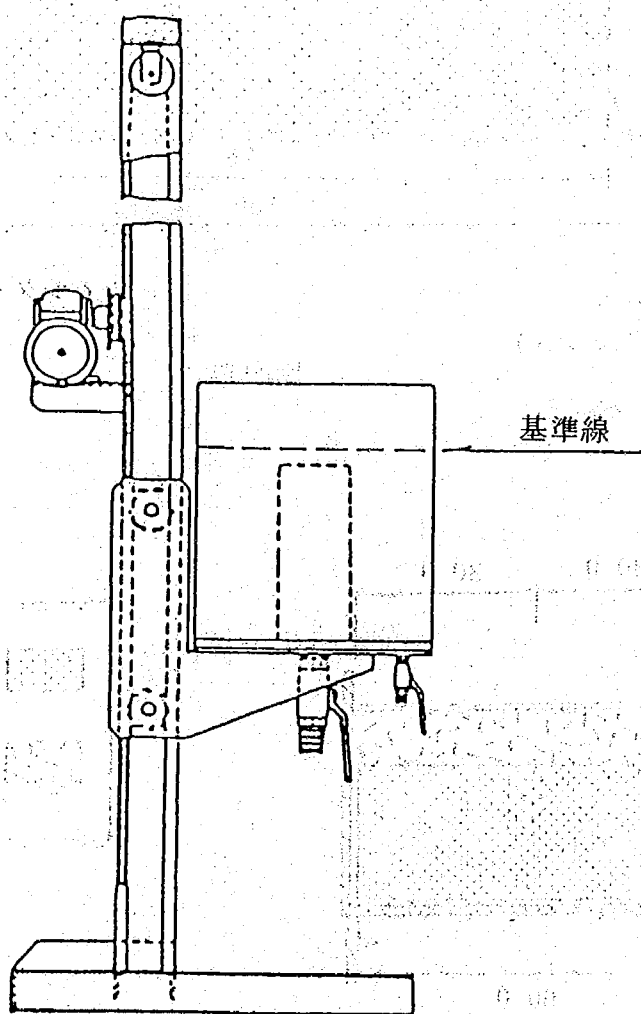


図-2.2.2 給水装置

(3) 計測機器

1) マノメータ

マノメータは、内径約0.7cmの銅パイプと内径約0.6cmのビニールパイプを用いて、図-2.3.3に示すように設置した。マノメータを砂地盤に設置するには、砂による目詰りを防ぐため、埋設部を不織布で覆った。また、砂地盤に埋設した深さは、約2~3cm程度である。マノメータ設置の様子を写真-2.3.1に示す。

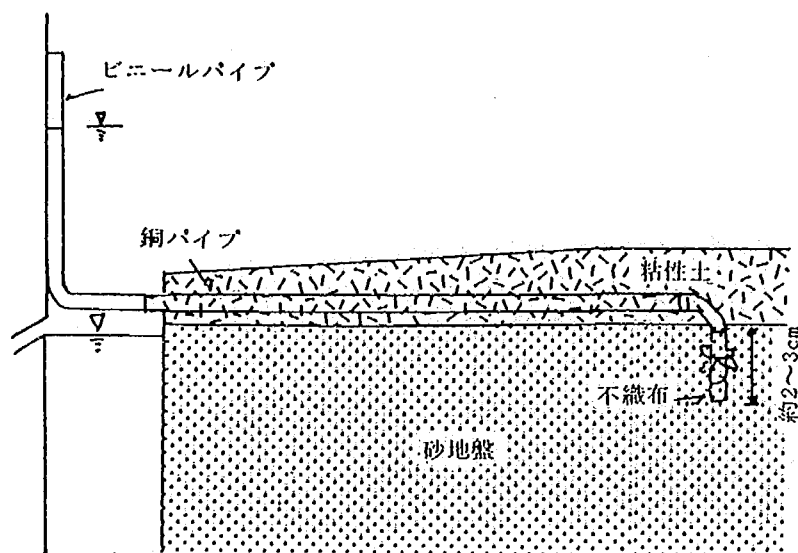


図-2.3.3 マノメータ設置概要図

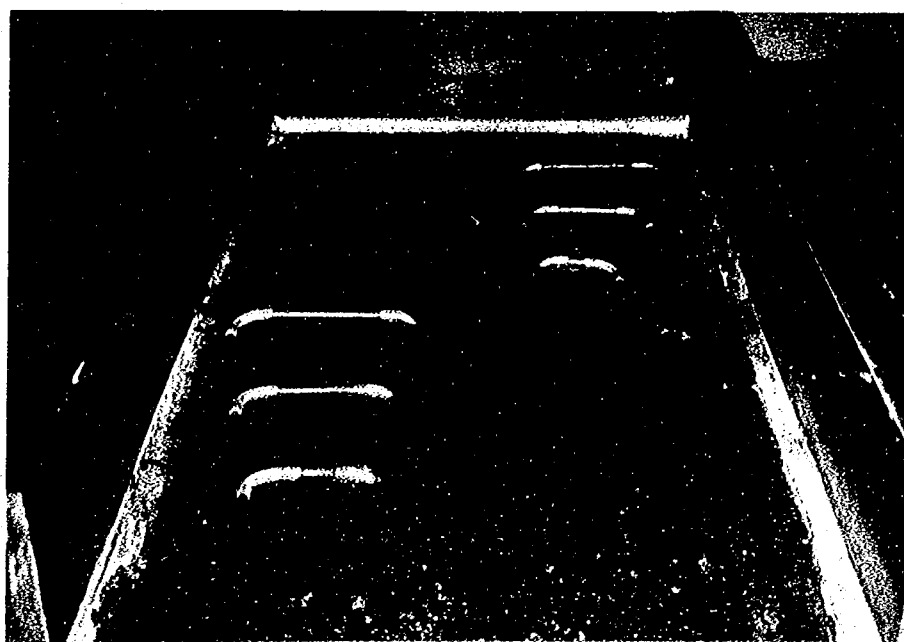


写真-2.3.1 マノメータ設置の様子

2.3 模型作成方法

本実験における模型作成手順及び、各項目の詳細を以下に述べる。また、本実験では、浸透経路長を変化させて実験を行うが、各ケースの模型地盤を図-2.3.1に示す。

また、模型の作成は以下の手順で行う。

1. 止水施工
2. 砂地盤作成
3. 表土層作成 (弱点箇所作成)

(1) 止水施工

砂地盤作成前に、砂粒子の流出を防ぐ目的で、パイピング装置の上流・下流側に0.5mmメッシュのフィルターを取り付けた。次に、砂地盤と接する模型装置側面及び底面に粘性土材料を厚さ約2cm塗り付けた。これは、模型装置がアクリル製である為、砂粒子となじみが悪く、浸透流が砂地盤とアクリル板の境界部分に集中する事を防ぐ目的である。

(2) 砂地盤作成

砂地盤は、実験装置に貯水（水深20cm）し、10mmのふるいを通して、砂を水中落下させる事により作成した。ふるいは、砂粒子を均等に入れる事と粒子管に空気が入り不飽和となる事を防ぐ目的で使用した。砂は水面と同一になるまで投入し、表面を敷き均した。砂地盤作成の様子を写真-2.3.1に示す。

(3) 表土層作成

本実験の表土層は、砂地盤上全体に施工した。施工は、まず、マノメータを地盤上の所定位置に設置し、粘性土材料を用いて砂地盤と表土層の間に空隙及び水みちができないようにパレットナイフ等を使用して注意しながら表土層を作成した。次に、表面を敷き均した後、弱点箇所を所定位置にアクリル製棒を用いて設けた。弱点箇所作成後、水圧による表土層に隆起防止の為、ヒーピング防止板をエア抜きしながら設置した。さらに、弱点箇所からの漏水が測定できるように、粘性土材料を用いて導水路を作成した。ヒーピング防止板の設置状況を図-2.3.2に示す。また、表土層作成の様子を写真-2.3.2に示す。

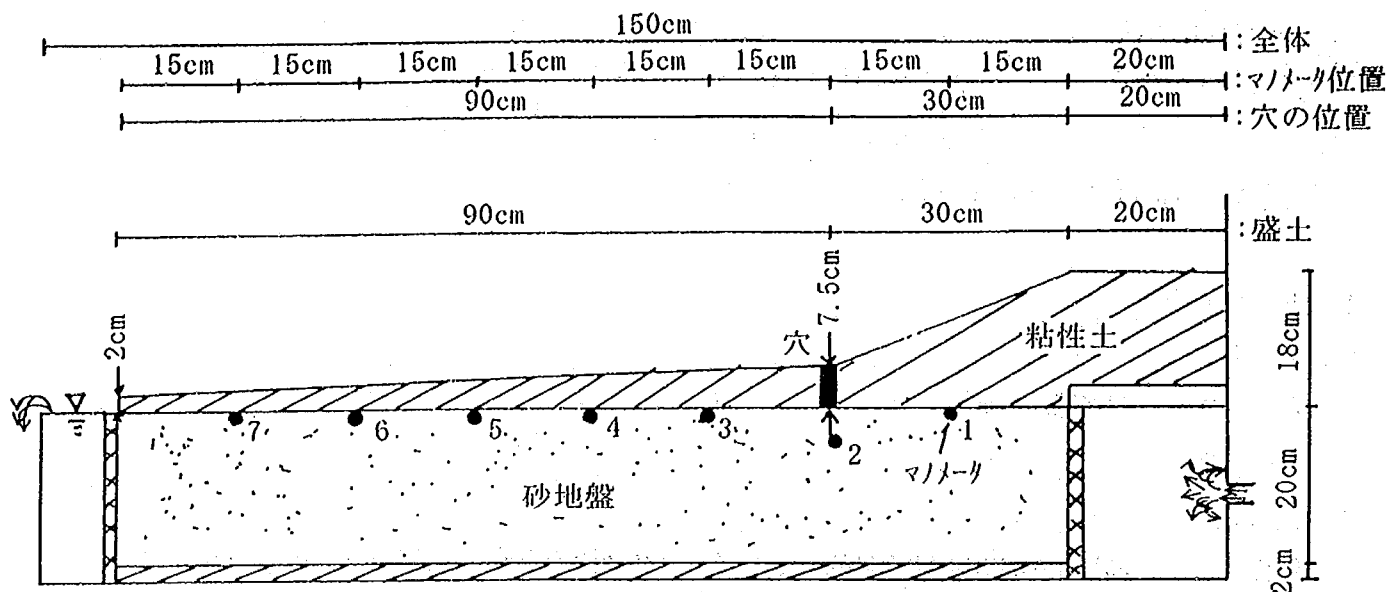


図-2.3.1(1) 模型地盤 (ケース3, 13)

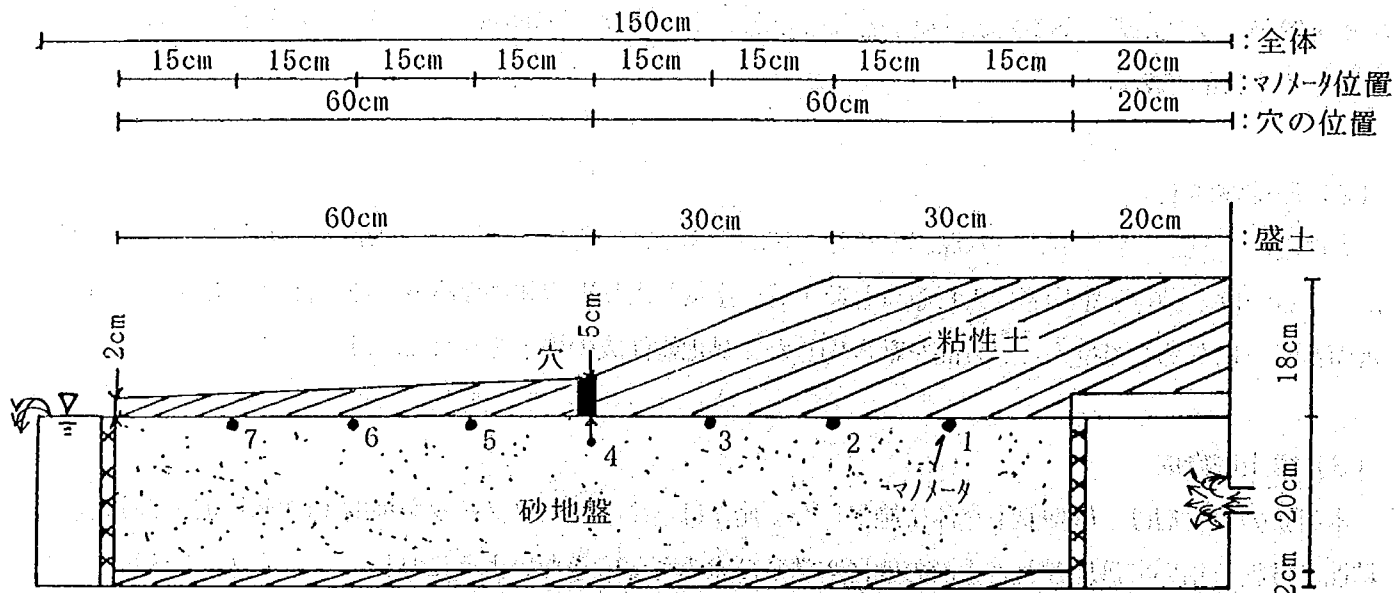


図-2.3.1(2) 模型地盤 (ケース1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14)

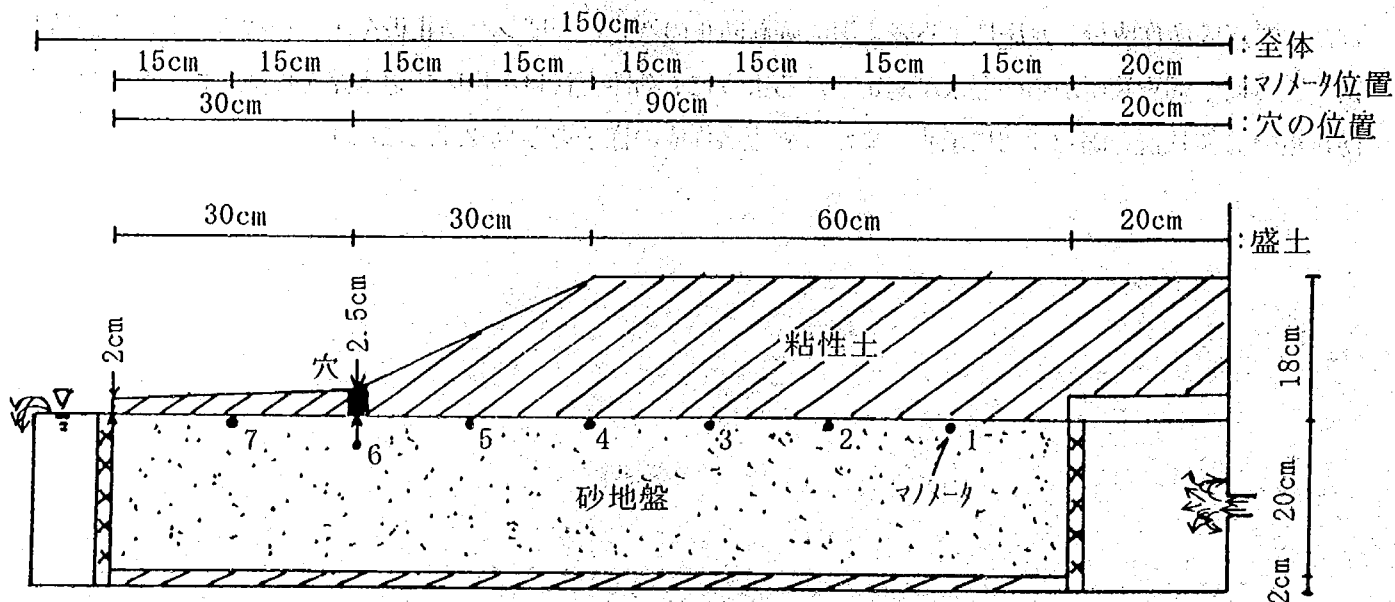


図-2.3.1(3) 模型地盤 (ケース2, 5)

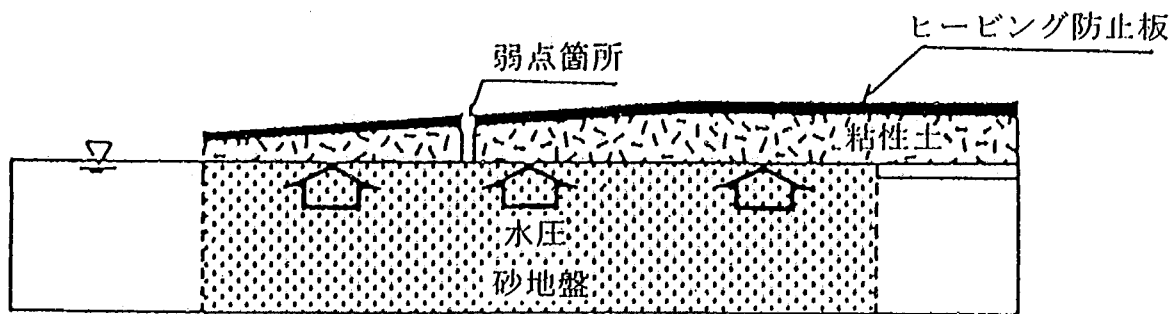


図-2.3.2 ヒービング防止板設置状況



写真-2.3.1 砂地盤作成の様子

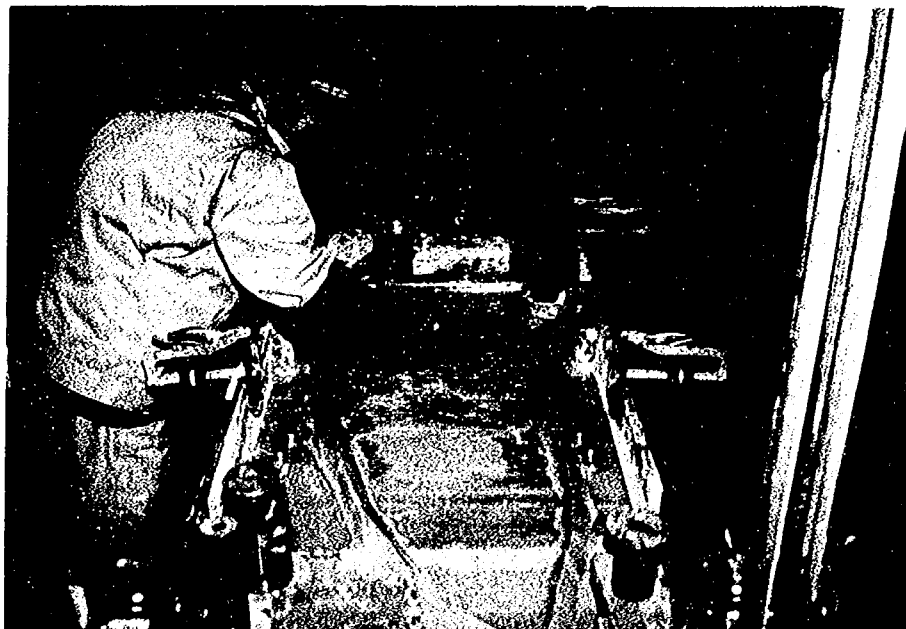


写真-2.3.2 表土層作成の様子

2.4 実験方法

(1) 初期設定

水頭の初期設定は、図-2.4.1に示すように下流側越流ぜきの床からの高さを H_0 とし、上流側の水位を給水装置を用いて H_0 に合わせる方法により行った。また、マノメータの初期設定は、水頭差0cmにおいて、水位が一定になった所を初期とした。

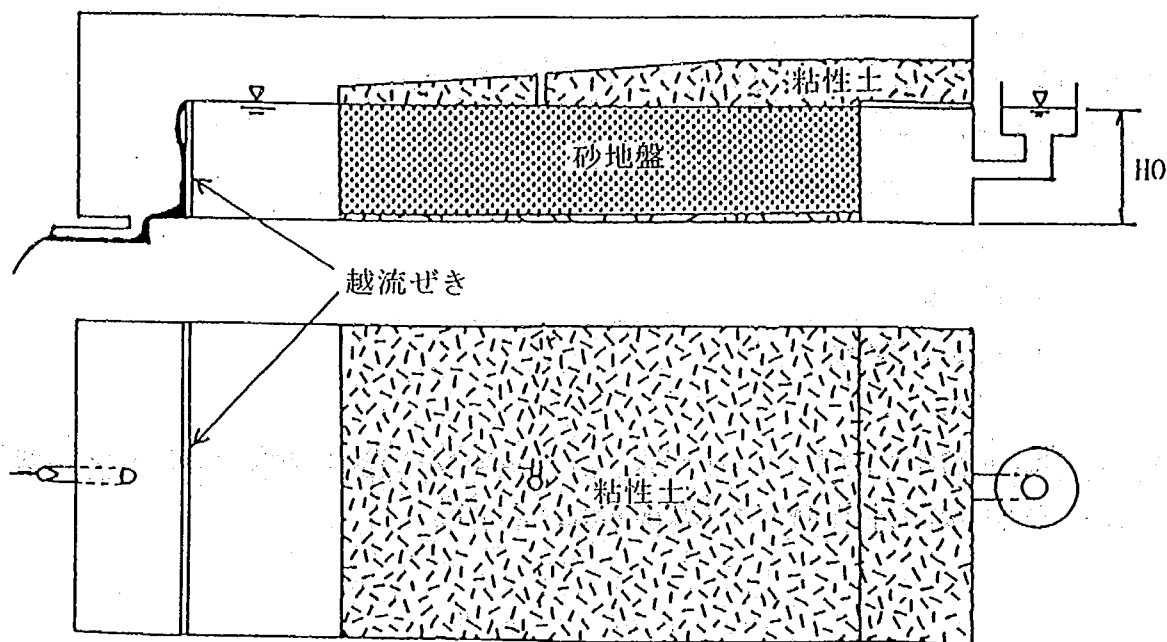


図-2.4.1 越流ぜき設置位置

(2) 水位管理

実験中の水頭差を正確に保つため、上流側の給水は給水装置を用いた。また、水道からの流入量により給水位が変動する可能性があるため、図-2.2.2中に示す基準線を保つように、水道水の流出量を調整した。パイピング装置下流側水位は、越流ぜきにより一定に保つ事ができる。

(3) 実験手順

水頭差 ΔH の増加量は $\Delta H=8\text{cm}$ までは1ステップ2cmとし、それ以降は1ステップ1cmとした。また、各ステップ1cmとした。また、各ステップにおける保持時間 t は、5分間とし、砂が噴出してからパイピングに至るまでは状況に応じて（最低10分間を基準）延長した。砂地盤に水みちが生じ、上・下流間で完全に水みちが通じた時点（パイピング）で実験を終了した。実験終了後、表土層を撤去して最終的な砂地盤状態及び水みちを詳細に観察した。

2.5 観測方法

試験時の観測は、以下の測定項目および目視観察（写真撮影含む）である。測定条件を表-2.5.1に示す。
なお、弱点箇所からの漏水量は、漏水後、デジタル測りを用いて1分毎に測定した。

測定項目

- ・マノメータ水位
- ・砂地盤からの流水量
- ・弱点箇所からの漏水量

実験中に砂地盤上に生じた変化を目視より観察し、写真撮影を行った。また、実験終了後に、砂地盤及び水みちの観察・スケッチおよび写真撮影を行った。主な観察内容は、次に示す通りである。

- ・粒子の上下動
- ・噴砂現象
- ・パイピング現象
- ・水みち

但し、観測は砂地盤の噴砂が始まり、水みちが通じるのではないと思われる噴砂の場合には、観測時間を延長して水みちが通じないと判断されるまで放置することとした。

表-2.5.1 測定条件

項目 測定項目	任意の水頭差における測定	測定方法
マノメータ水位	3分後（1回）	目読みにより 水位測定 (精度0.1cm)
砂地盤からの 流出量	1分後（5回）	最大容量8Kgf デジタル測り (感量0.5g)

2.6 実験結果の整理

本実験では、以下に示す現象を経て最終的にパイピングに至っている。各実験ケースにおける流量の変化状況を表-2.6.1および図-2.6.1に示す。また各ケースのマノメータの変化の状況を図-2.6.2に、実験終了後の水みち観察結果を図-2.6.3に示す。

※パイピング現象における弱点箇所からの目視観察状況

- ・穴（弱点箇所）の水面が現れる
- ・砂の上下動開始
- ・穴からの砂粒子の流出
- ・噴砂現象
- ・パイピング

など

表-2.6.1(1) ケース1の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	10	ほぼ一定 平均456cc/min	測定に至ってない	No. 6が静水圧水頭高さより0.6cm低い、その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	26~30
にごり水発生	14	ほぼ一定 平均631cc/min	1分毎に増加傾向が見られる。 平均8cc/min	No. 6が静水圧水頭高さより0.7cm低い、その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	46~50
噴 砂 開 始	26	ほぼ一定 平均1330cc/min	1分毎に増加傾向が見られる。 平均118cc/min	No. 7を除いてほぼ全体的に0.5~1.0cm低い値を示している。	106~110
パイピング	39	最終測定値 1782cc/min	最終測定値 3260cc/min	測定なし	226~228

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(2) ケース2の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	9	ほぼ一定 平均436cc/min	測定に至ってない	No. 7が静水圧水頭高さより0.4cm低い、その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	21~25
にごり水発生	26	ほぼ一定 平均771cc/min	1分毎に増加傾向が見られる。 平均65cc/min	No. 6 0.4cm } 高い No. 7 0.7cm } その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	56~60
砂の上下動開始	26	ほぼ一定 平均1266cc/min	ほぼ一定 平均65cc/min	No. 1 0.6cm } No. 2 0.1cm } 低い No. 3 0.5cm } No. 4 0.4cm } No. 5 0.5cm } 高い No. 6 0.6cm } No. 7 1.0cm }	106~110
噴 砂 開 始	31	ほぼ一定 平均1528cc/min	1分毎に増加傾向が見られる。 平均123cc/min	No. 6 0.4cm } 低い No. 2 0.4cm } No. 7 0.9cm } 高い その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	131~135
パイピング	53	徐々に低下し、 最終測定値 1941cc/min	急激に増加し、 最終測定値 2176cc/min	測定なし	241~247

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(3) ケース3の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	10	ほぼ一定 平均100cc/min	測定に至ってない	No.2 0.4cm No.3 0.4cm No.4 0.4cm No.5 0.4cm 高いた その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。	26~30
にごり水発生	13	ほぼ一定 平均140cc/min	測定に至ってない	No.2 0.4cm No.3 0.5cm No.4 0.4cm No.5 0.4cm 高いた その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。	41~45
気泡開始	21	ほぼ一定 平均217cc/min	ほぼ一定 平均 20cc/min	No.4 0.4cm No.5 0.4cm No.6 0.5cm 高いた その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。	81~85
噴砂開始	22	ほぼ一定 平均217cc/min	ほぼ一定 平均20cc/min	No.2 0.7cm No.5 0.4cm No.6 0.5cm 低いた 高いた その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。	86~90
パイピング	31	最終測定値 275cc/min	最終測定値 394cc/min	No.1 10.3cm No.2 8.6cm No.3 4.6cm No.4 3.0cm No.5 1.9cm No.6 1.0cm No.7 0.4cm 低いた 上流側が得に低い傾向 が見れる	166~171

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(4) ケース4の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	9	ほぼ一定 平均104cc/min	測定に至ってない	No.5 0.4cm No.6 0.5cm No.7 0.5cm その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。	21~25
にごり水発生	14	ほぼ一定 平均153cc/min	測定に至ってない	No.6が静水圧水頭高さ より0.5cm低いが、そ の他は、ほぼ静水圧水 頭高さに近い値を示し ている。	46~50
噴 砂 開 始	35	ほぼ一定 平均409cc/min	増加傾向が見ら れる。 平均41cc/min	No.1 1.4cm No.2 1.9cm No.3 2.3cm No.4 4.5cm No.5 3.3cm No.6 1.8cm 弱点箇所付近が、特に 低いNo.7は、静水圧水 頭高さどおり	151~155
パイピング	39	最終測定値 488cc/min	最終測定値 282cc/min	No.1 3.4cm No.2 5.1cm No.3 5.5cm No.4 7.3cm No.5 4.8cm No.6 1.8cm No.7 0.5cm 徐々に下り弱点箇所付 近が特に低い	171~188

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(5) ケース5の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マノメータ変化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	9	ほぼ一定 平均93cc/min	測定に至ってない	No.5 0.4cm No.6 0.4cm その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示している。	21~25
にごり水発生	34	ほぼ一定 平均362cc/min	ほぼ一定 平均18cc/min	No.2 0.7cm No.3 0.6cm No.4 0.5cm No.5 0.8cm No.7 0.8cm その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示している。	146~150
噴 砂 開 始	35	ほぼ一定 平均373cc/min	増加傾向が見える 平均26cc/min	No.2 0.7cm No.3 0.7cm No.4 0.7cm No.5 1.0cm No.7 1.0cm その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示している。	151~155
パイピング	44	徐々に低下する 傾向がみられ、 最終測定値は、 149cc/min	徐々に低下する 傾向がみられ、 最終測定値は、 311cc/min	No.1 4.5cm No.2 6.8cm No.3 6.5cm No.4 2.4cm No.5 2.2cm No.6 1.1cm 徐々に下る傾向が見られ、 上流側の方が得に下る。 No7は、ほぼ静水圧水頭高さに近い	196~211

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(6) ケース6の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	12	ほぼ一定 平均155cc/min	測定に至ってない	No.2 0.6cm } 高い No.3 0.5cm } その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。	36~40
にごり水発生	17	ほぼ一定 平均163cc/min	ほぼ一定 平均2cc/min	No.1 0.4cm } 高い No.2 0.9cm } No.3 0.7cm } No.7 0.5cm } 低い その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。	61~65
気 泡 発 生	26	ほぼ一定 平均238cc/min	ほぼ一定 平均19cc/min	No.1 0.4cm } 高い No.2 1.3cm } No.3 0.6cm } No.4 0.4cm } 低い No.7 0.4cm } その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している	106~110
噴 砂 開 始	32	ほぼ一定 平均278cc/min	ほぼ一定 平均65cc/min	No.3 0.5cm } 高い No.4 2.0cm } No.5 0.9cm } No.6 0.7cm } 低い No.7 0.8cm } 弱点箇所が、最も低い No.2は静水圧水頭高さ より0.9cm高く、No.1 はほぼ静水圧水頭高さ に近い値を示している	136~140
パイピング	35	徐々に低下する 傾向がみられ、 最終測定値は、 283cc/min	増加する傾向が みられ、最終測 定値は、 243cc/min	No.1 2.2cm } 低い No.2 2.5cm } No.3 3.9cm } No.4 3.3cm } No.5 1.6cm } No.6 1.2cm } No.7 1.1cm } 弱点箇所付近が、得に 下る	151~167

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(7) ケース7の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	12	ほぼ一定 平均107cc/min	平均2cc/min	No.1 0.4cm 低い No.5 0.4cm No.6 0.4cm No.7 0.4cm } 高い その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。	36~40
にごり水発生	18	ほぼ一定 平均161cc/min	ほぼ一定 平均12cc/min	No.1が静水圧水頭高さ より0.6cm低いが、そ の他は、ほぼ静水圧水 頭高さに近い値を示し ている。	66~70
気 泡 発 生	22	ほぼ一定 平均203cc/min	ほぼ一定 平均22cc/min	No.1 0.7cm No.3 0.4cm No.4 0.8cm } 低い その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。	86~90
パイピング	37	徐々に低下し、 最終測定値は、 306cc/min	徐々に低下し、 最終測定値は、 336cc/min	No.1 4.1cm No.2 8.7cm No.3 8.0cm No.4 6.2cm No.5 3.4cm No.6 2.2cm No.7 0.6cm } 低い No.2, No.3, No.4, が得 に下る (178分目)	161~183

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、 ± 0.3 cm程度の差。(自視測定のため)

表-2.6.1(8) ケース8の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	9	ほぼ一定 平均469cc/min	測定に至ってない	全て静水圧水頭高さに近い値を示している	21~25
にごり水発生	12	ほぼ一定 平均609cc/min	測定に至ってない	全て静水圧水頭高さに近い値を示している	36~40
気 泡 発 生	23	ほぼ一定 平均1311cc/min	ほぼ一定 平均75cc/min	No.1 2.2cm No.2 2.5cm No.3 3.9cm No.4 3.3cm No.5 1.6cm No.6 1.2cm 低い 弱点箇所付近が、低い No.7は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している	91~65
砂の上下動開始	25	ほぼ一定 平均1445cc/min	2分後よりほぼ一定 平均104cc/min	No.1 2.2cm No.2 2.5cm No.3 3.9cm No.4 3.3cm No.5 1.6cm No.6 1.2cm 低い 気泡発生時よりもさらに下っている。No.7はほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している	101~105
噴 砂 開 始	37	徐々に低下する傾向がみられる 平均1881cc/min	10分間に急激な増加がみられたが、10分~15分間では、ほぼ間の 平均856cc/minである	No.1 3.9cm No.2 3.3cm No.3 5.9cm No.4 7.5cm No.5 6.1cm No.6 3.5cm No.7 1.7cm 低い 弱点箇所が、得に下っている (173分目)	161~175
パイピング	38	徐々に低下する傾向がみられ、最終測定値は、 1515cc/min	増加傾向がみられ、最終測定値は、 1972cc/min	No.1 3.3cm No.2 3.6cm No.3 6.9cm No.4 7.9cm No.5 6.4cm No.6 3.7cm No.7 1.7cm 低い 弱点箇所が、得に下っている	176~183

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(9) ケース9の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	12	ほぼ一定 平均456cc/min	測定に至ってない	No.2 0.6cm No.3 1.0cm No.7 0.4cm 高い その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 ている。	36~40
砂の上下動開 始	46	ほぼ一定 平均3331cc/min	急激な増加が見 られる 平均63cc/min	No.1 2.0cm No.2 0.4cm No.3 1.5cm No.4 2.3cm No.5 1.2cm 低い その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 ている。	206~210
パイピング	47	最終測定値 3396cc/min	最終測定値 85cc/min	No.1 2.0cm No.4 2.0cm No.5 1.2cm No.6 0.4cm No.3 0.5cm 低い 高い その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 ている。	211~214

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、 ± 0.3 cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(10) ケース10の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	10	ほぼ一定 平均1121cc/min	測定に至ってない	No.1が静水圧水頭高さより0.4cm低い、その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	26~30
にごり水発生	15	バラツキはあるものの ほぼ一定 平均1697cc/min	ほぼ一定 平均38cc/min	No.1が静水圧水頭高さより0.6cm低い、その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	51~55
細かい砂少々 流出	25	ほぼ一定 平均2962cc/min	急激に増加する 傾向が見られる 平均219cc/min	No.1 1.8cm No.2 1.2cm No.3 0.8cm No.4 0.8cm No.5 1.3cm 低い その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	101~105
砂の上下動開始 噴砂開始	41	ほぼ一定 平均4627cc/min	多少バラツキはあるものの ほぼ一定 平均620cc/min	No.1 4.4cm No.2 3.8cm No.3 4.1cm No.4 3.7cm No.5 3.8cm No.6 1.5cm 低い No.7は、静水圧水頭高さどおりの値を示している	181~185
パイピング	48	最終測定値 4822cc/min	最終測定値 1467cc/min	No.1 6.1cm No.2 5.4cm No.3 4.9cm No.4 5.4cm No.5 5.3cm No.6 2.5cm 低い No.7は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している	231~240

注1: 5分間の平均値

注2: 静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(11) ケース11の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	12	ほぼ一定 平均588cc/min	測定に至ってない	全て静水圧水頭高さに近い値を示している	36~40
砂の上下動開始	29	ほぼ一定 平均1654cc/min	ほぼ一定 平均78cc/min	No.1 0.7cm No.2 0.5cm No.4 0.6cm No.7 0.6cm 低いの高い その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	121~125
気 泡 発 生	30	ほぼ一定 平均1608cc/min	ほぼ一定 平均83cc/min	No.1 0.7cm No.2 0.5cm No.3 0.4cm No.4 0.6cm No.7 0.5cm 低いの高い その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	126~130
細砂流出開始	32	ほぼ一定 平均1721cc/min	ほぼ一定 平均98cc/min	No.1 0.9cm No.2 0.7cm No.3 0.4cm No.4 0.7cm No.7 0.6cm 低いの高い その他は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している。	136~140
噴 砂 開 始 ・ パイピング	35	徐々に低下する傾向がみられ、最終測定値は、1521cc/min	増加する傾向がみられ、最終測定値は、1180cc/min	No.1 1.5cm No.2 2.2cm No.3 2.8cm No.4 3.9cm No.5 2.3cm No.6 1.5cm 低いの 弱点箇所が、他に比べ下る。No.7は、ほぼ静水圧水頭高さに近い値を示している	151~160

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(12) ケース12の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	10	多少のバラツキ が見られる ほぼ一定 平均136cc/min	測定に至ってない	No. 2が0.4cm高いが、 その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している	26～30
にごり水発生	17	ほぼ一定 平均195cc/min	ほぼ一定 平均30cc/min	No. 2が0.5cm高く、 No. 4が0.5cm低い、 静水圧水頭高さに近い 値を示している	61～65
気 泡 発 生	27	ほぼ一定 平均278cc/min	ほぼ一定 平均124cc/min	No. 2 0.4cm No. 3 1.8cm No. 4 2.6cm No. 5 1.3cm No. 6 0.7cm } 低い 弱点箇所付近が、他に 比べ下る傾向がみられ る。その他は、ほぼ静 水圧水頭高さに近い値 を示している	111～115
噴 砂 開 始 ・ パイピング	31	最終測定値 279cc/min	増加傾向がみら れ、最終測定値 は、 477cc/min	No. 1 4.2cm No. 2 5.8cm No. 3 6.5cm } 低い なお、No. 4～No. 7は、 測定なし	131～133

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.1(13) ケース13の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	マ ノ メ ー タ 変 化 注2	経過時間 (分)
水面現れる	10	3分後よりほぼ 一定 平均456cc/min	測定に至ってな い	全て静水圧水頭高さに 近い値を示している	26~30
気 泡 発 生	16	ほぼ一定 平均641cc/min	2分後よりほぼ 一定 平均68cc/min	No.1 0.5cm No.2 0.6cm No.3 0.4cm No.7 0.4cm その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 している。 低い 高い	56~60
噴 砂 開 始	26	5分後よりほぼ 一定 平均844cc/min (86分~90分間)	5分後よりほぼ 一定 平均352cc/min (86分~90分間)	No.1 1.4cm No.2 1.6cm No.3 0.8cm No.5 0.5cm No.7 0.4cm その他は、ほぼ静水圧 水頭高さに近い値を示 を示している(88分) 低い 高い	81~90
パイピング	26	最終測定値 1015cc/min	増加傾向がみら れ、最終測定値 は、 1212cc/min	No.1 4.2cm No.2 3.5cm No.3 2.5cm 上流側が、得に下る。 No.4~No.7は、測定な し (118分) 低い	111~118

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表-2.6.14(14) ケース14の実験時変化状況

流量は、水頭差の増加毎に徐々に増加する傾向がみられ、水頭差62cmにおける最終測定値は、3cc/minであった。

また、漏水量はなく、マノメータの測定は不可能であった。

なお、水頭差62cmで表層土が破壊し、実験を終了した。

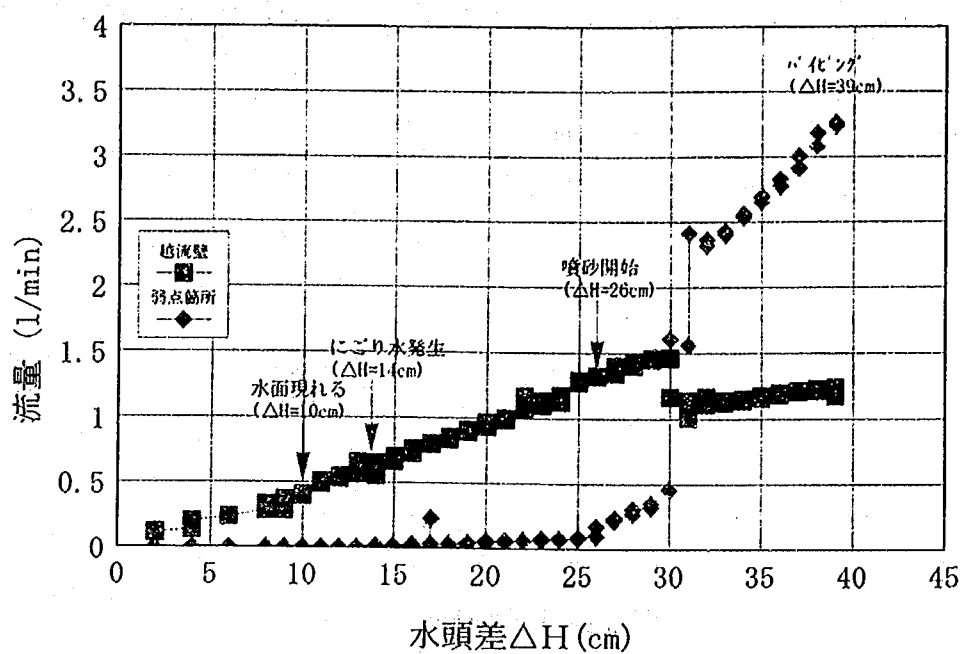


図-2.6.1(1) 水頭差と流量の関係 (ケース1)

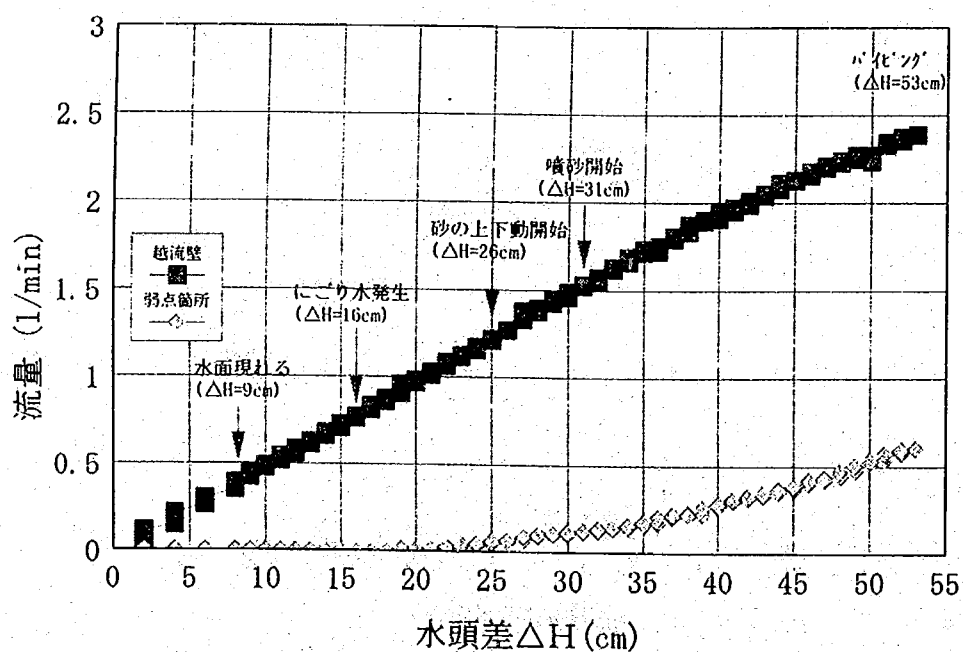


図-2.6.1(2) 水頭差と流量の関係 (ケース2)

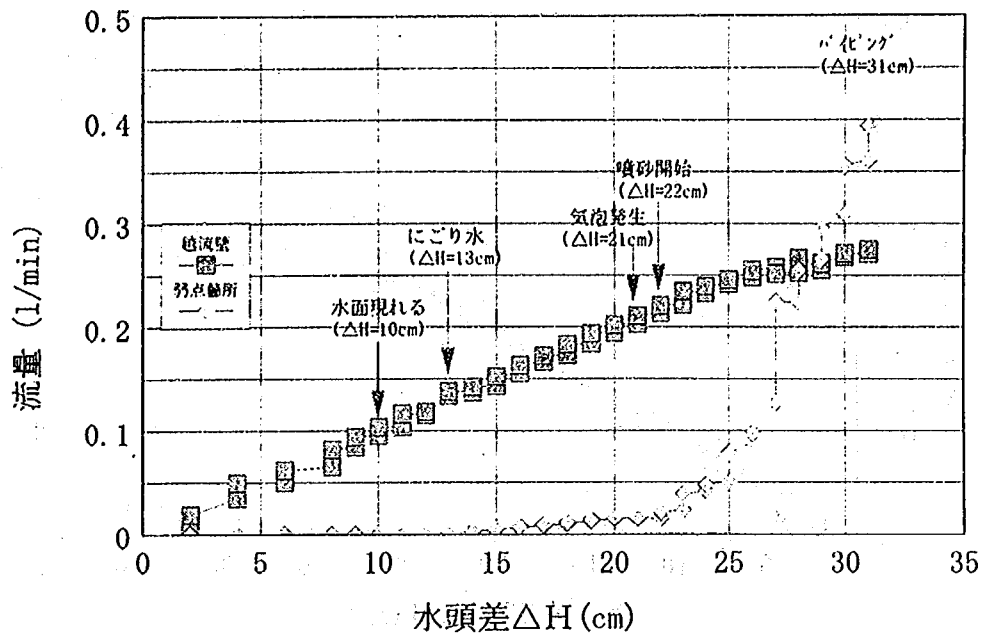


図-2.6.1(3) 水頭差と流量の関係 (ケース3)

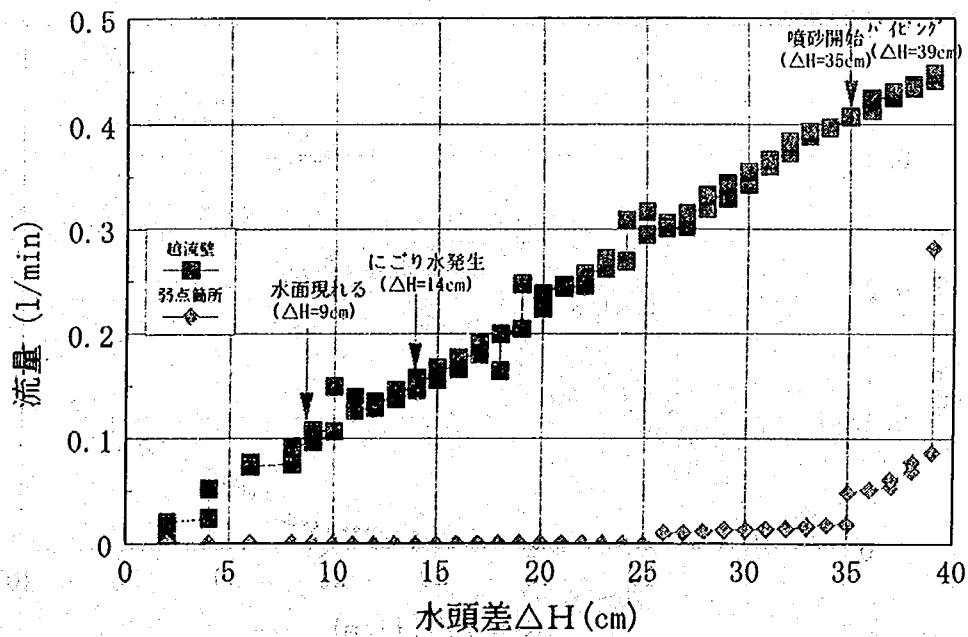


図-2.6.1(4) 水頭差と流量の関係 (ケース4)

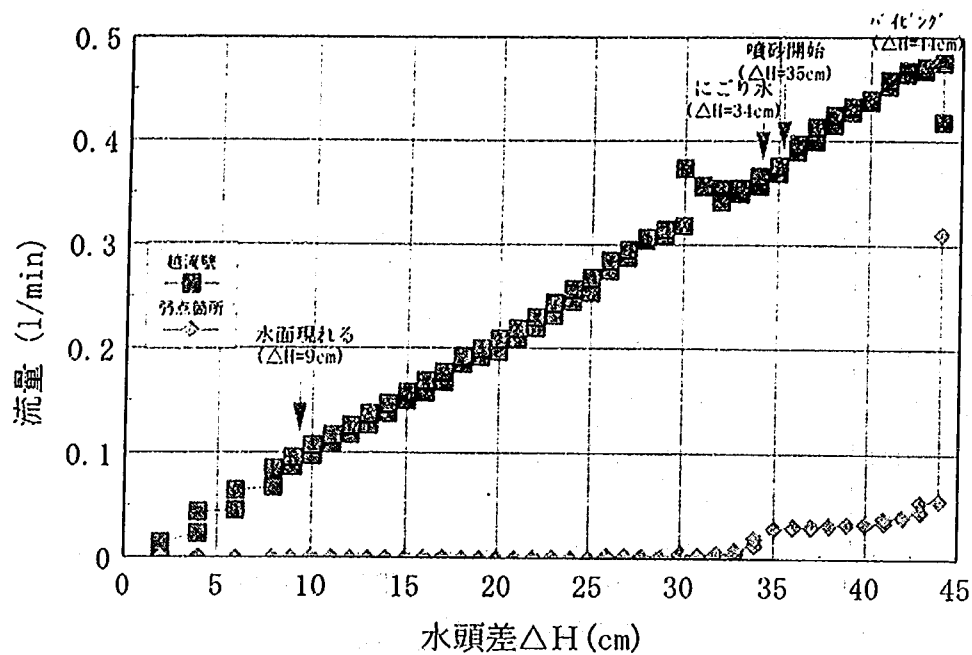


図-2.6.1(5) 水頭差と流量の関係(ケース5)

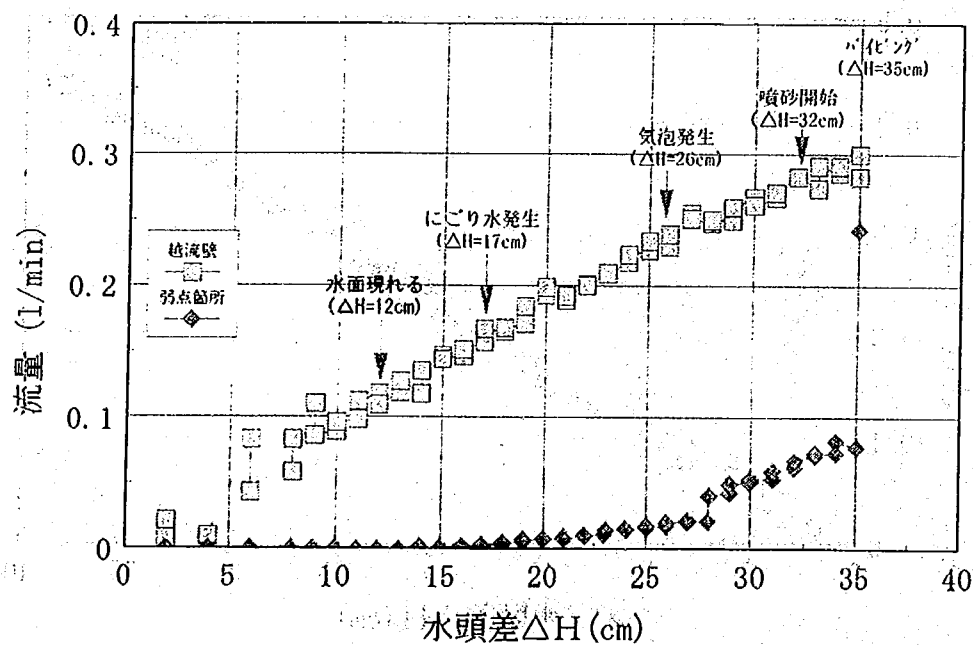


図-2.6.1(6) 水頭差と流量の関係(ケース6)

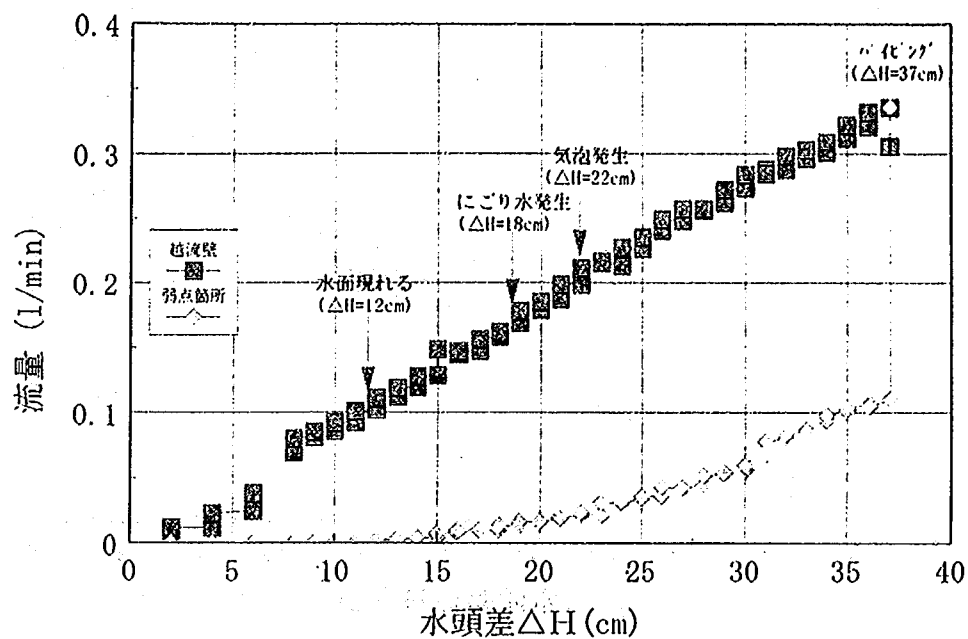


図-2.6.1(7) 水頭差と流量の関係 (ケース7)

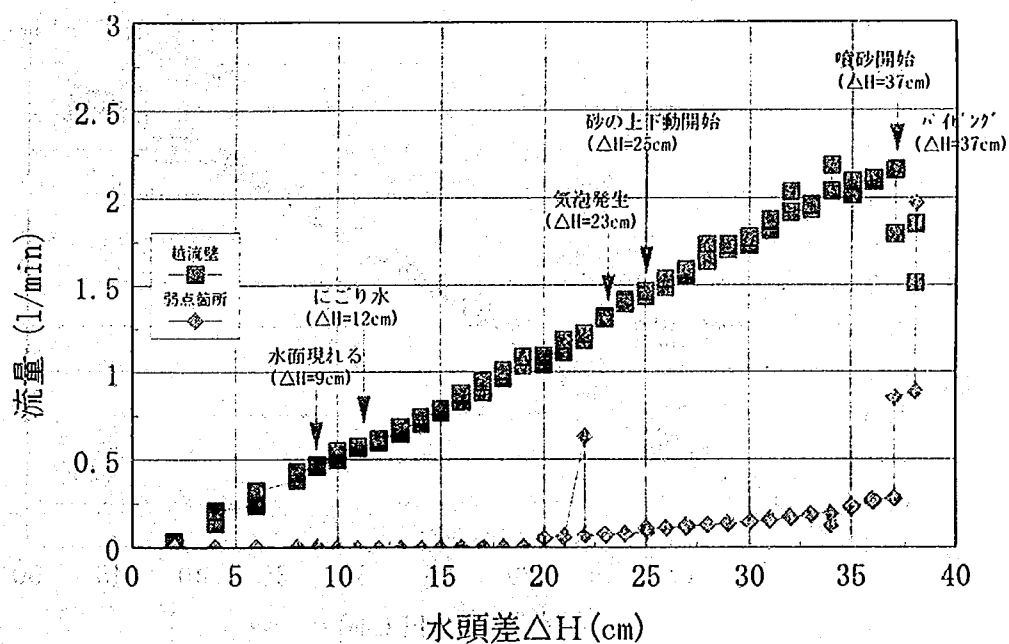


図-2.6.1(8) 水頭差と流量の関係 (ケース8)

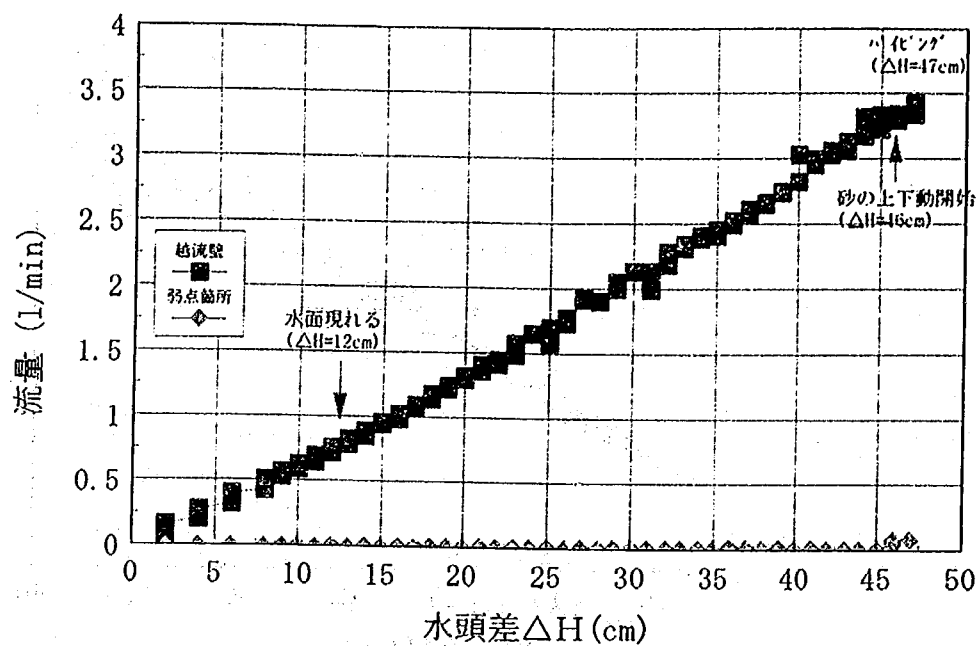


図-2.6.1(9) 水頭差と流量の関係 (ケース9)

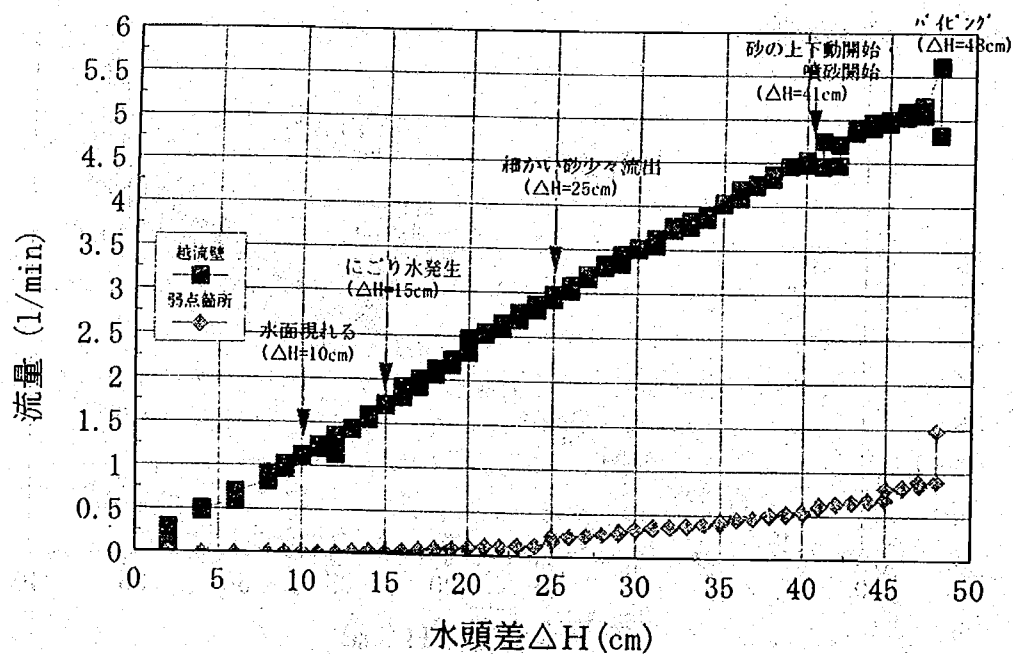


図-2.6.1(10) 水頭差と流量の関係 (ケース10)

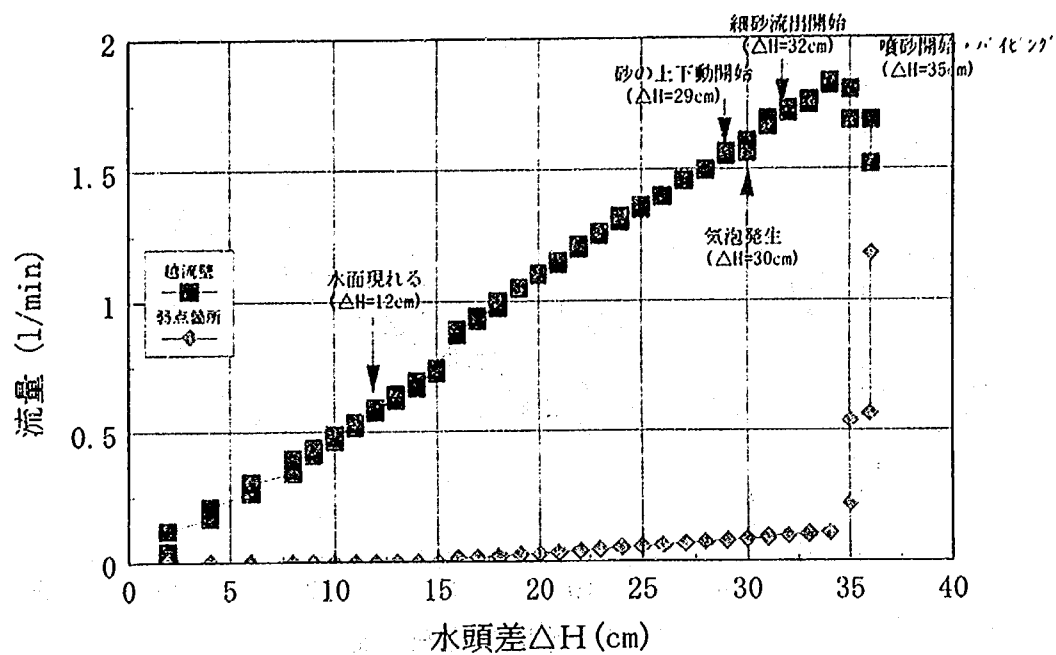


図-2.6.1(11) 水頭差と流量の関係 (ケース11)

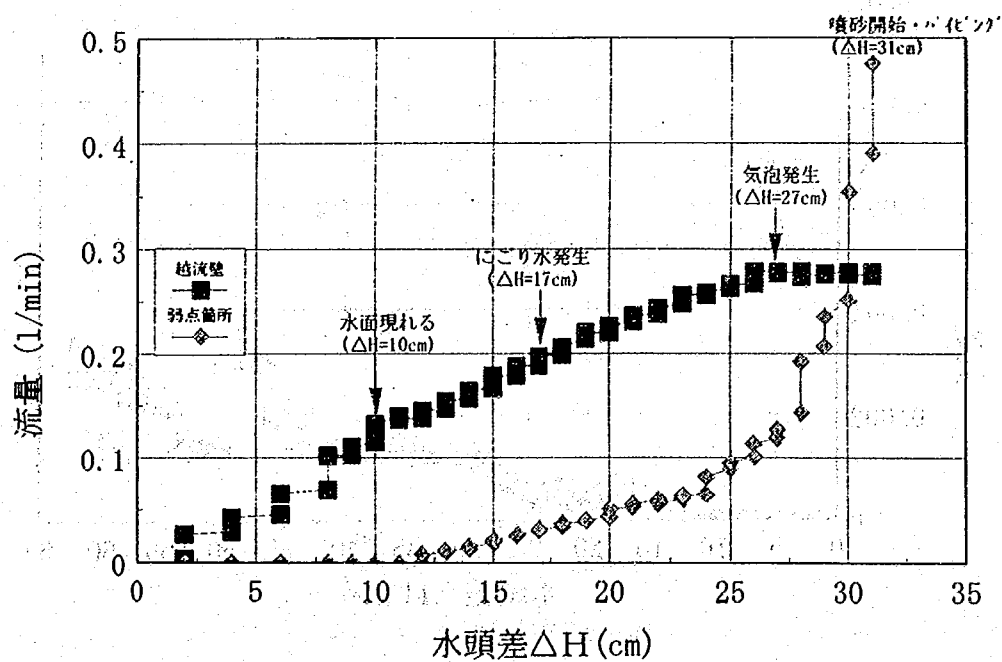


図-2.6.1(12) 水頭差と流量の関係 (ケース12)

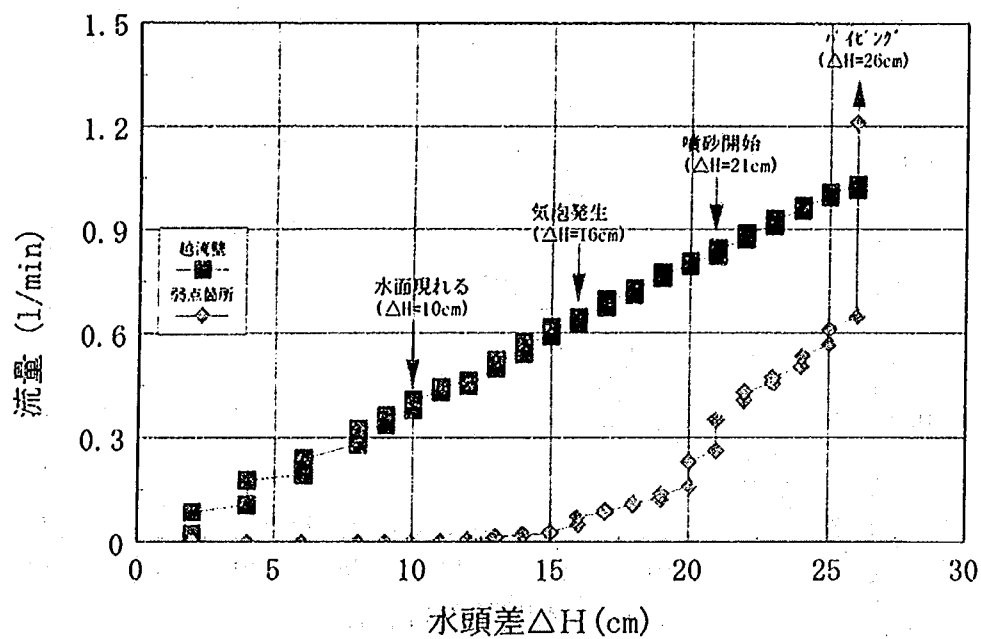


図-2.6.1(13) 水頭差と流量の関係 (ケース13)

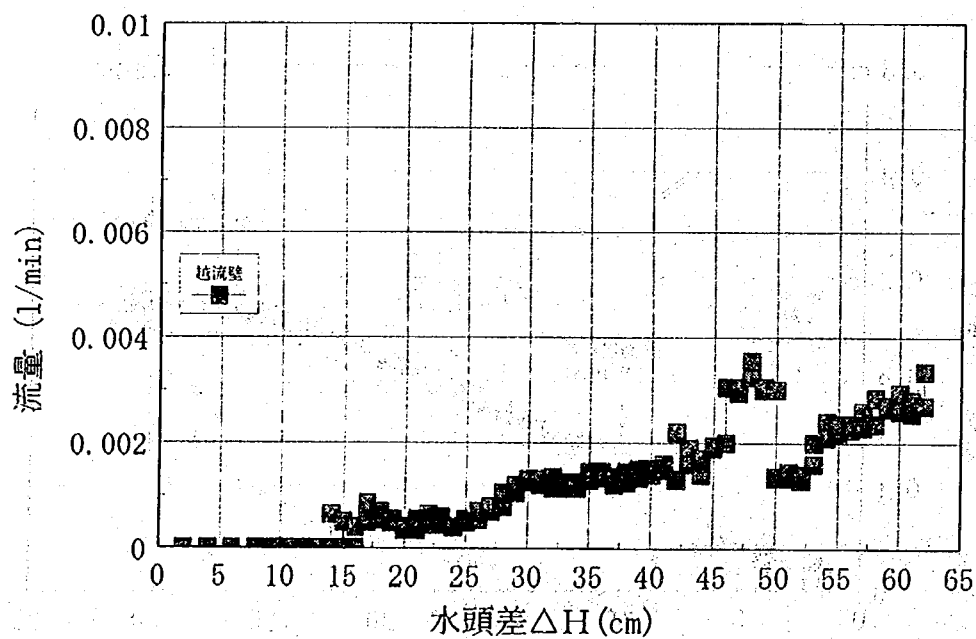


図-2.6.1(14) 水頭差と流量の関係 (ケース14)

(注) 漏水量は、測定不可能であった。

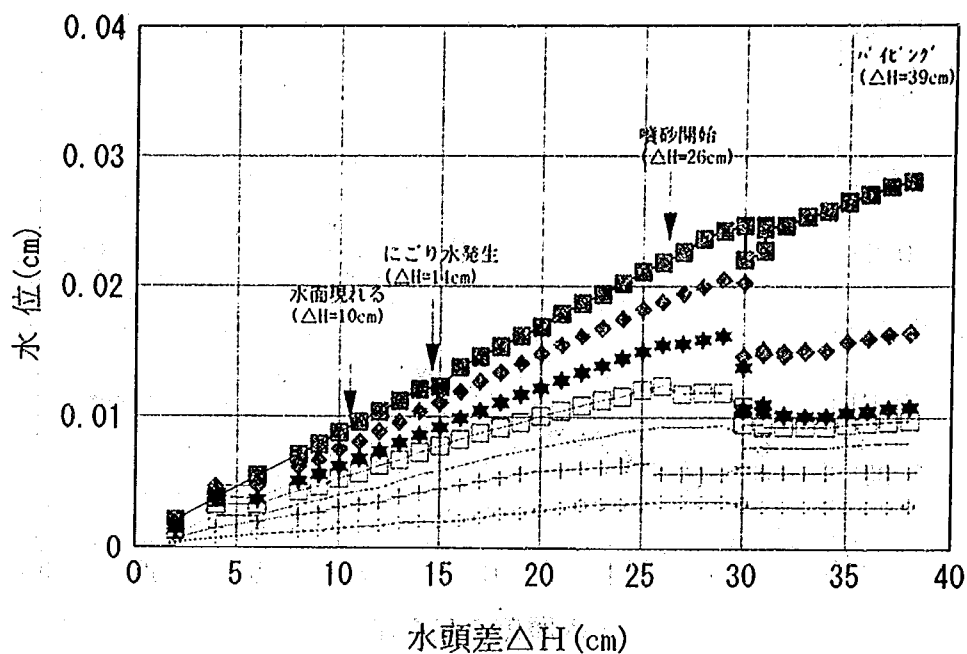


図-2.6.2(1) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース1)

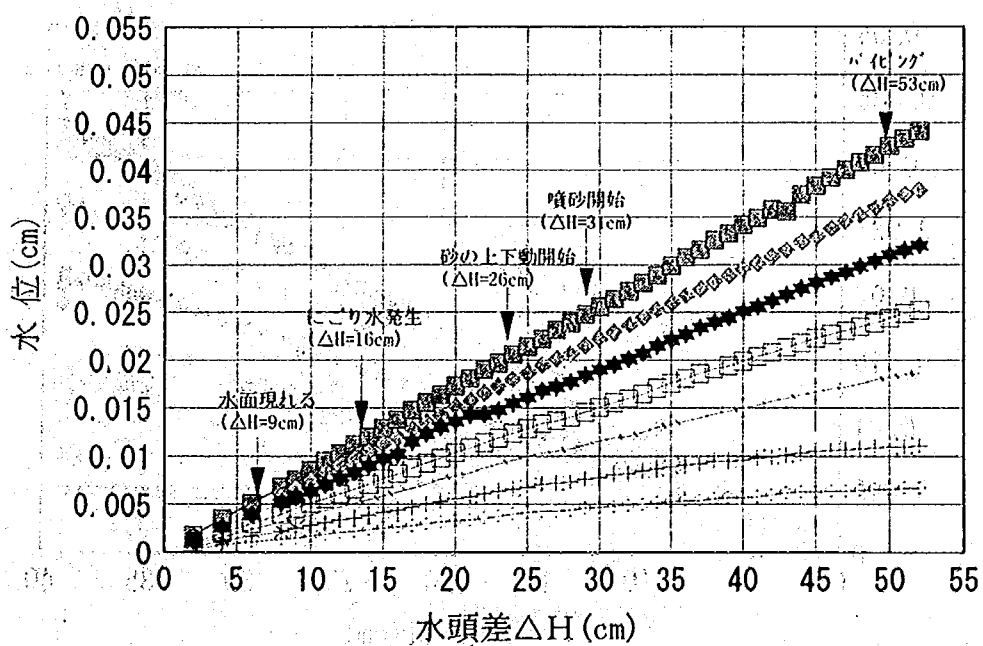


図-2.6.2(2) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース2)

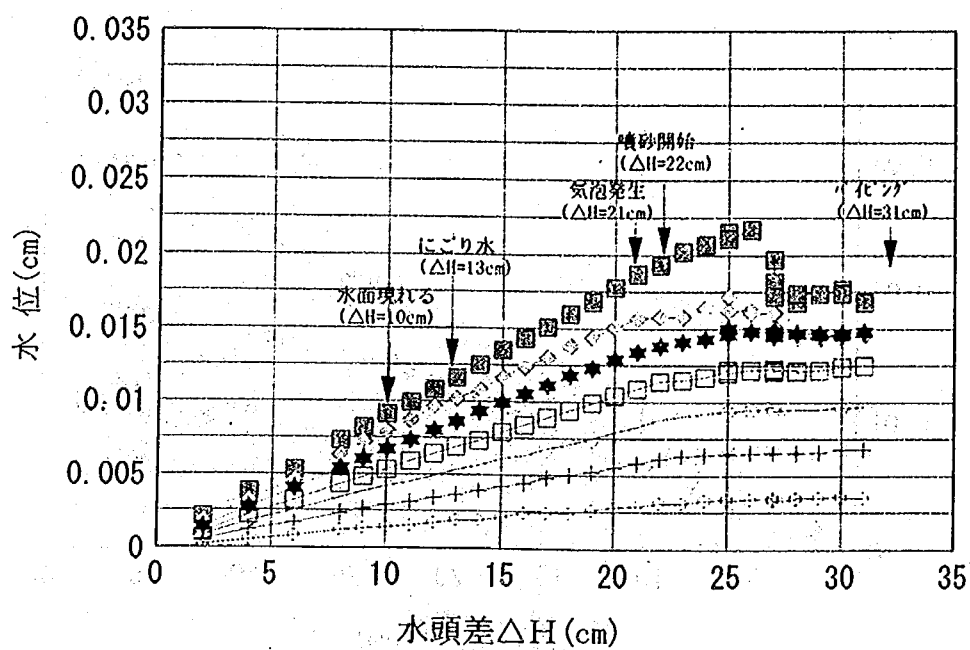


図-2.6.2(3) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース3)

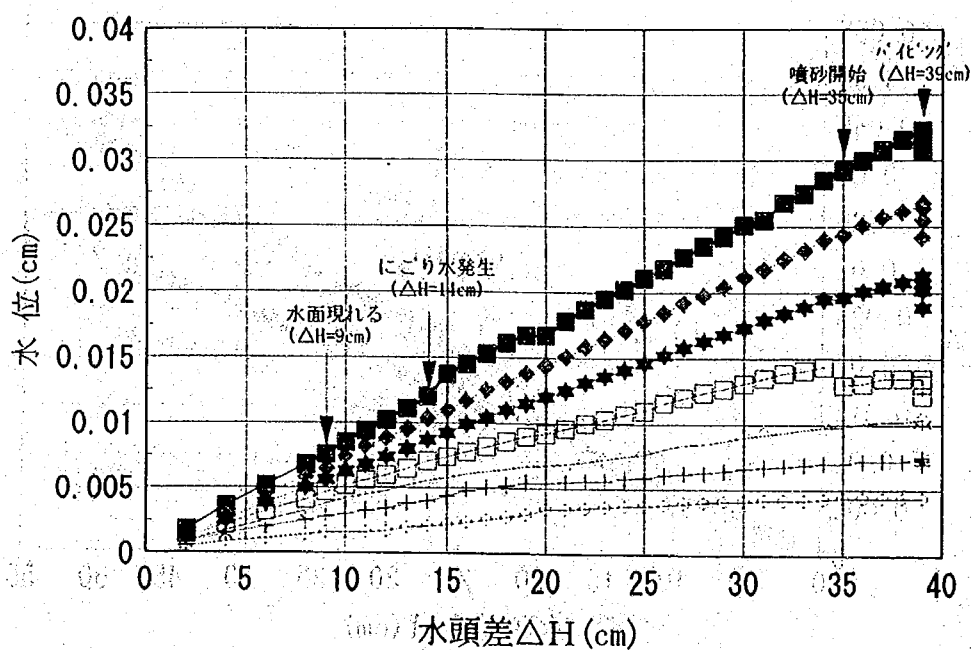


図-2.6.2(4) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース4)

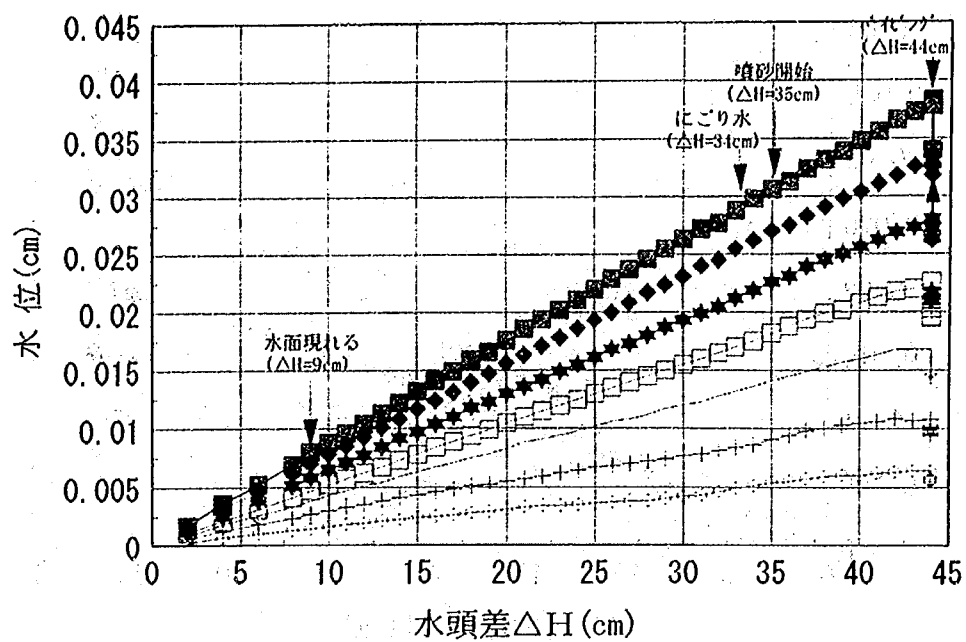


図-2.6.2(5) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース5)

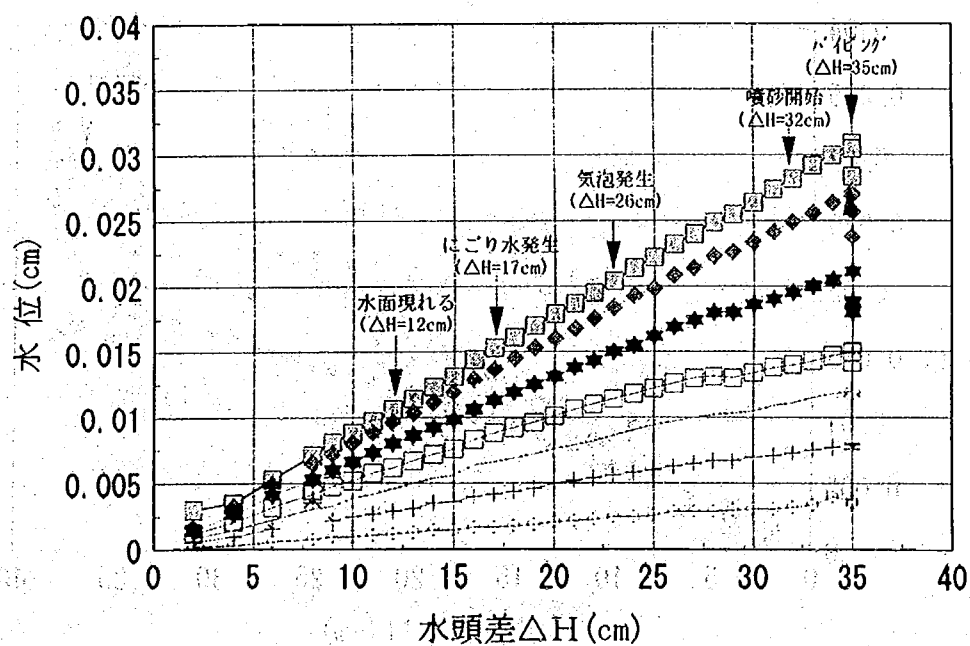


図-2.6.2(6) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース6)

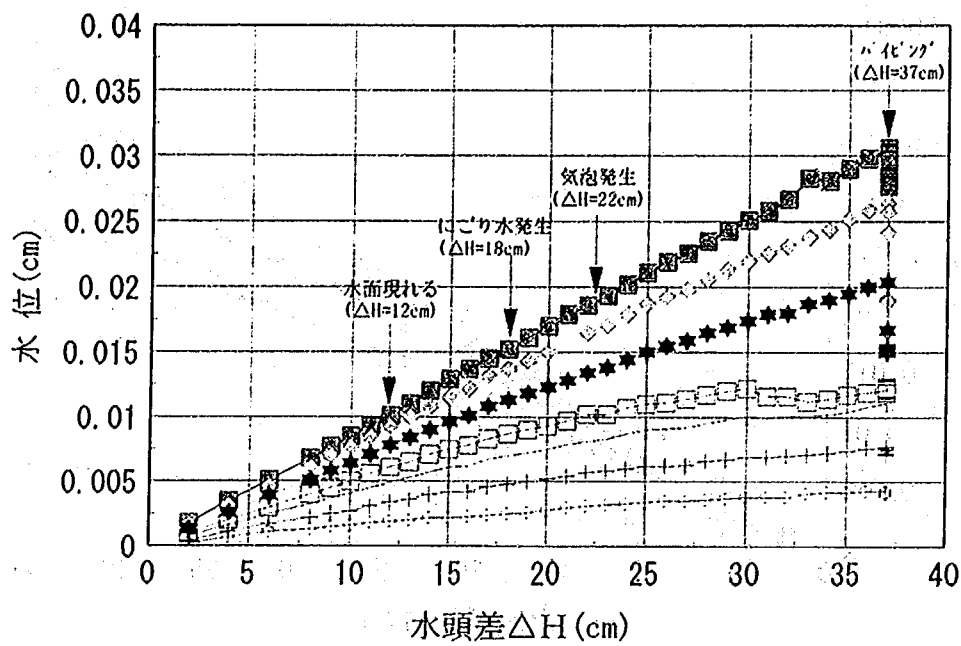


図-2.6.2(7) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース7)

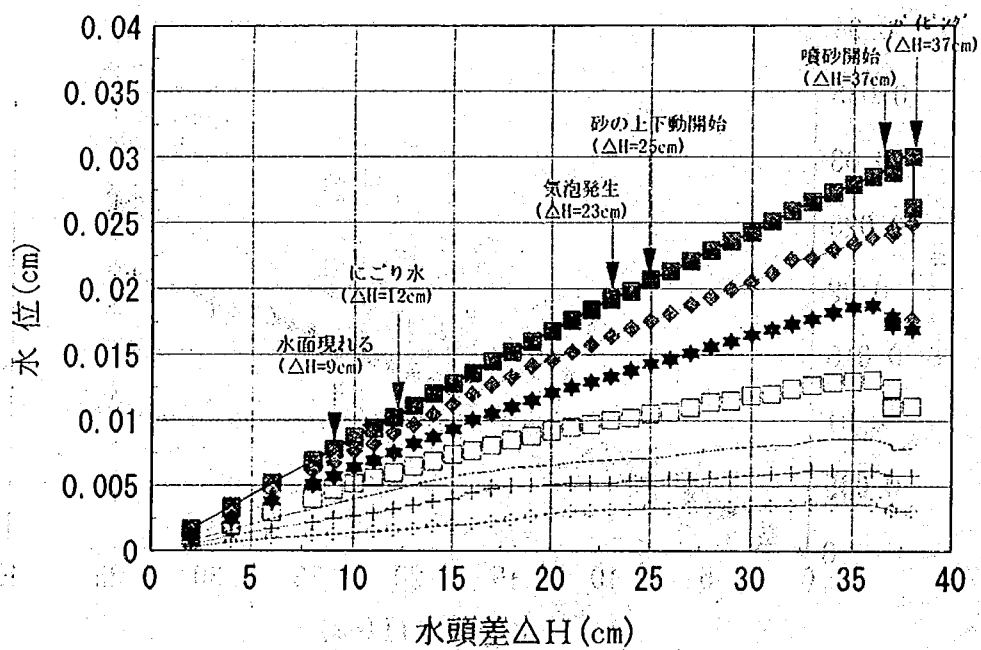


図-2.6.2(8) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース8)

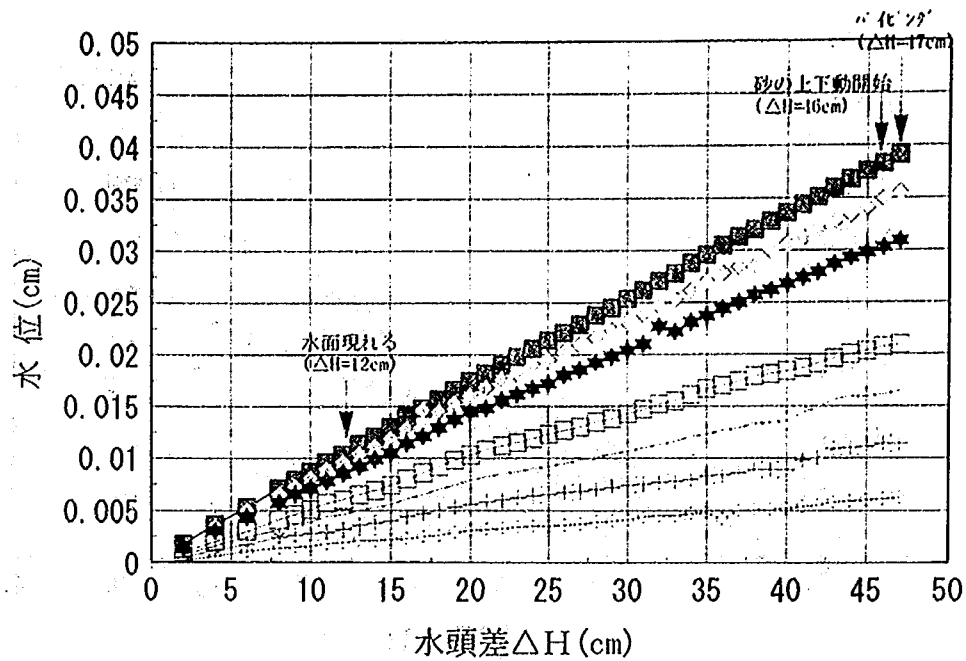


図-2.6.2(9) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース9)

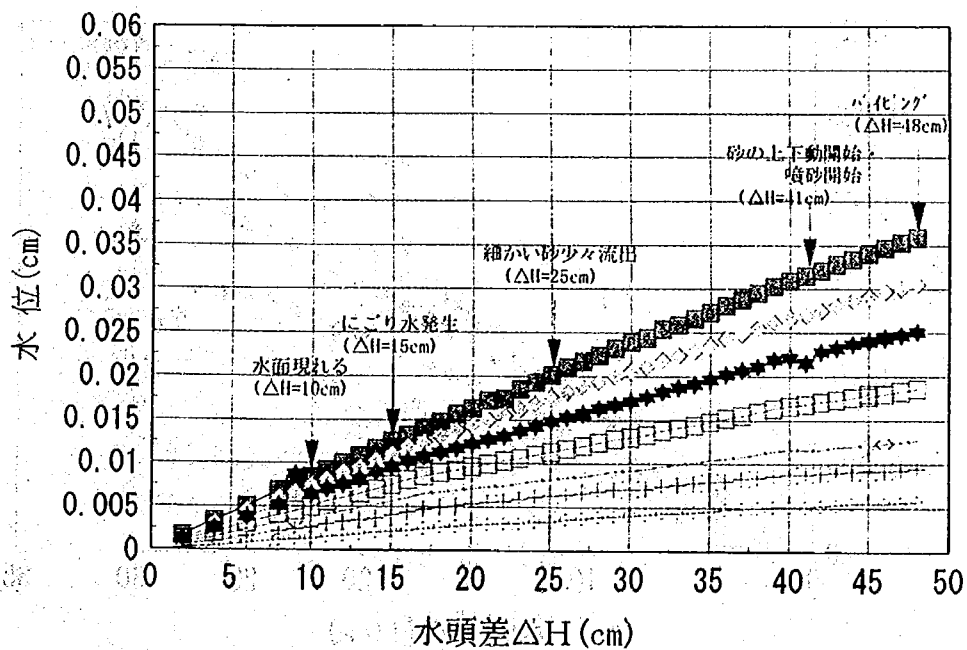


図-2.6.2(10) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース10)

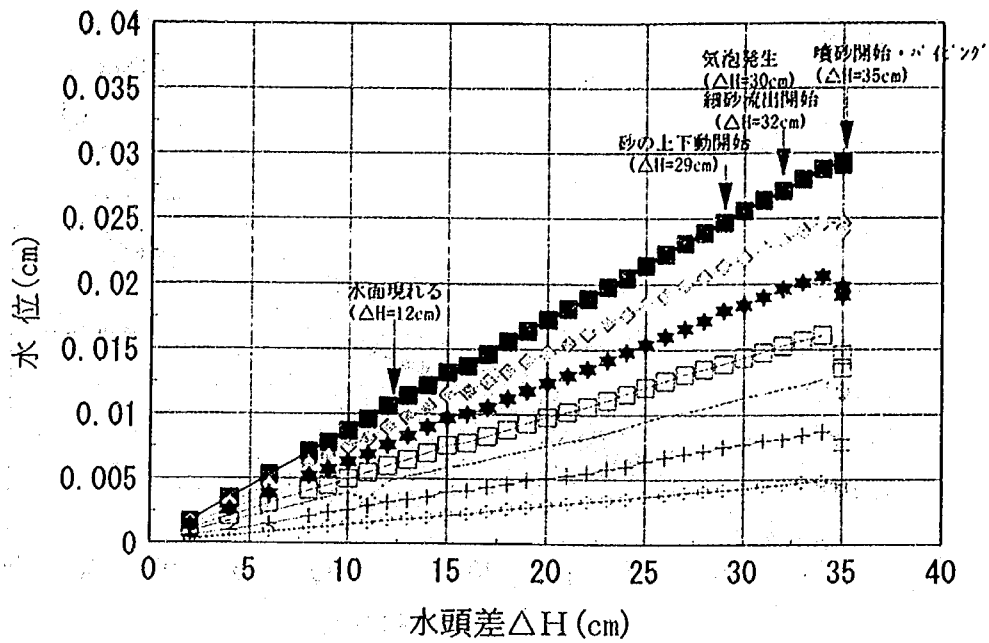


図-2.6.2(11) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース1.1)

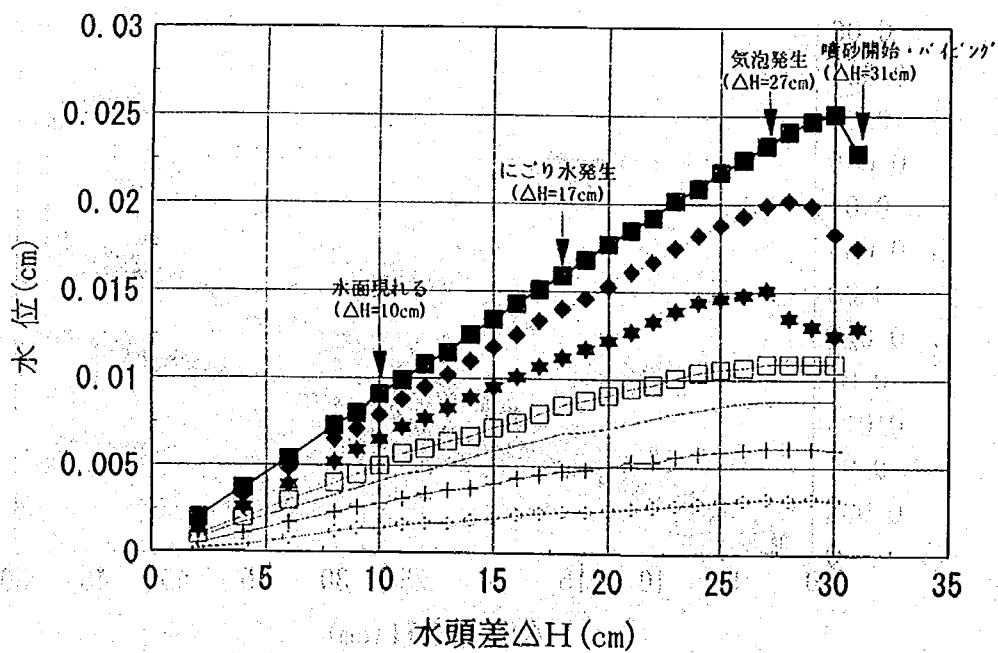


図-2.6.2(12) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース1.2)

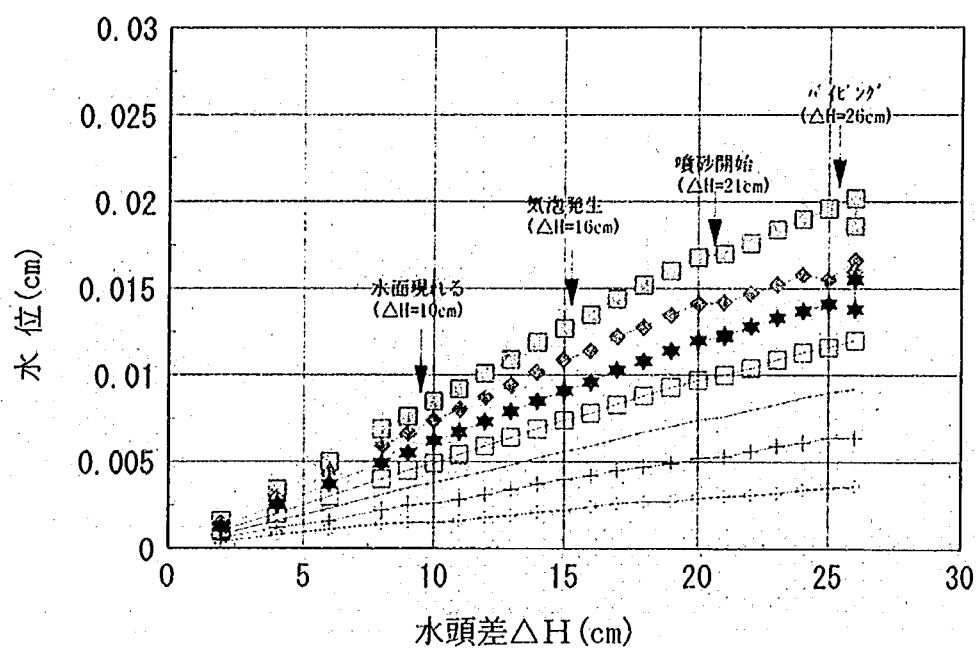


図-2.6.2(13) 水頭差とマノメータによる水位の関係 (ケース13)

※ケース14のマノメータ水位は、測定不可能であった。

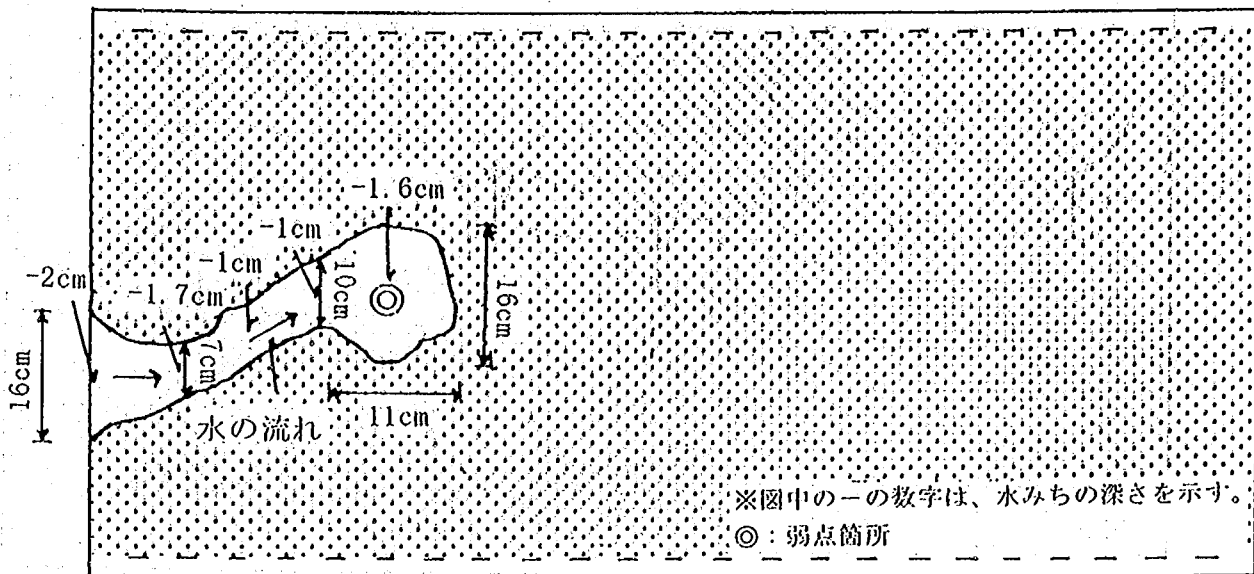


図-2.6.3(3) 実験後の地盤の状況 (ケース3)

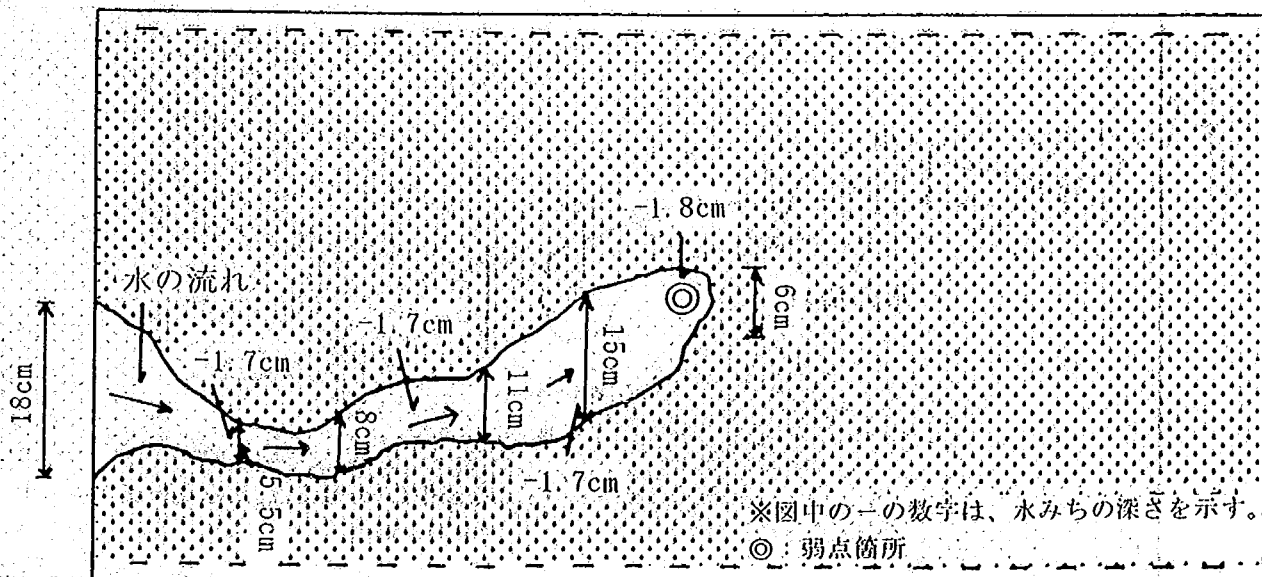


図-2.6.3(4) 実験後の地盤の状況 (ケース4)

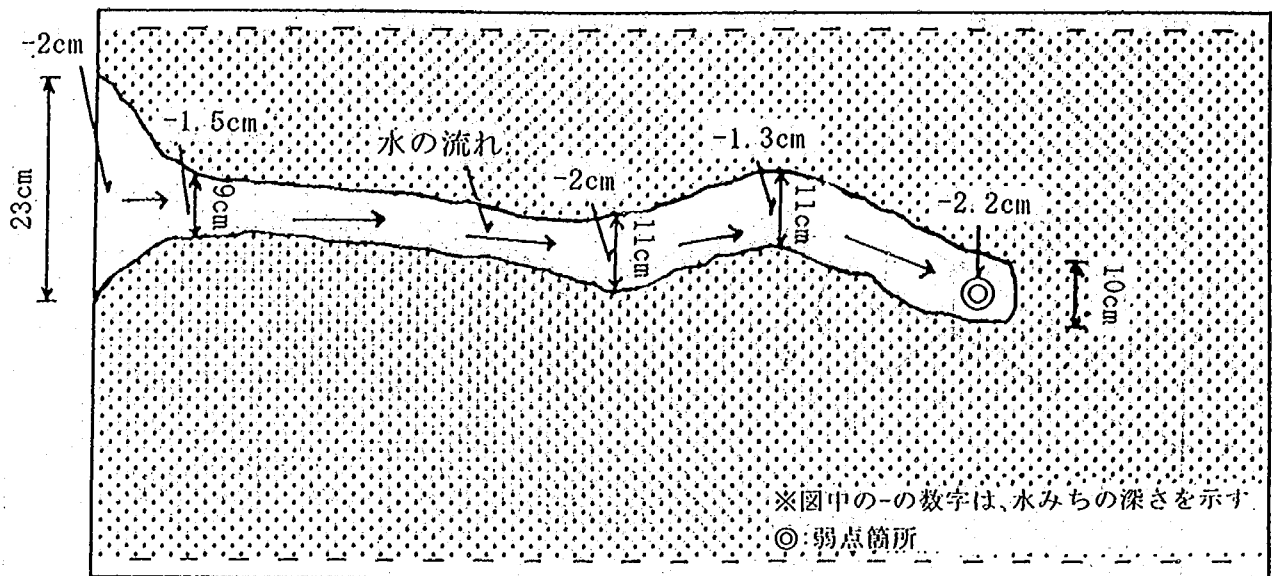


図-2.6.3(5) 実験後の地盤の状況 (ケース5)

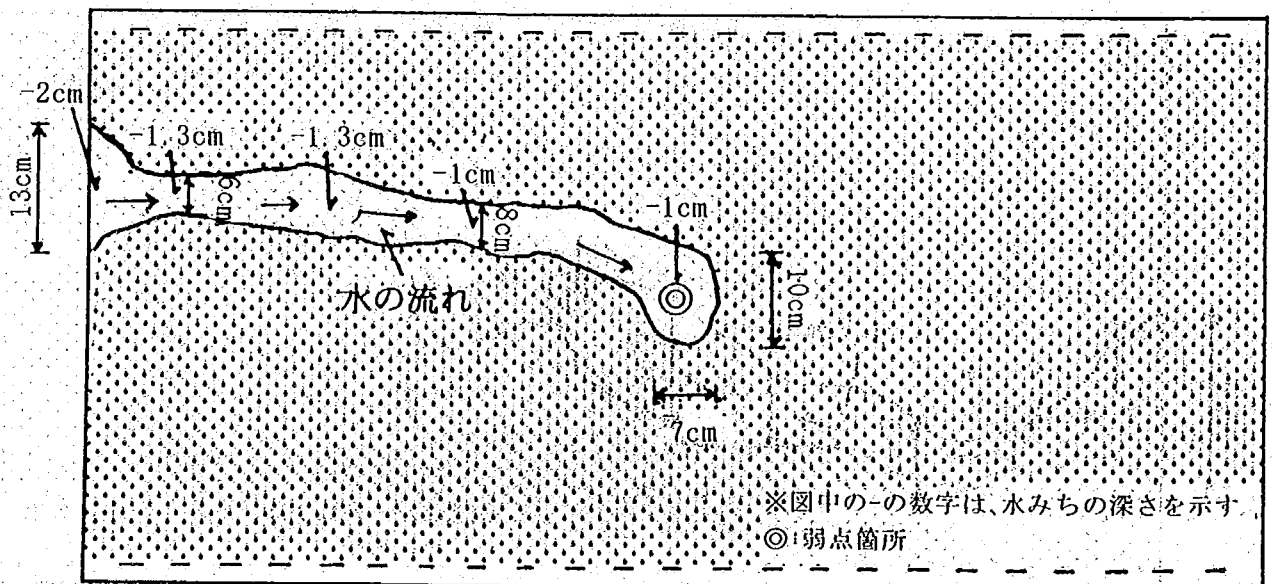


図-2.6.3(6) 実験後の地盤の状況 (ケース6)

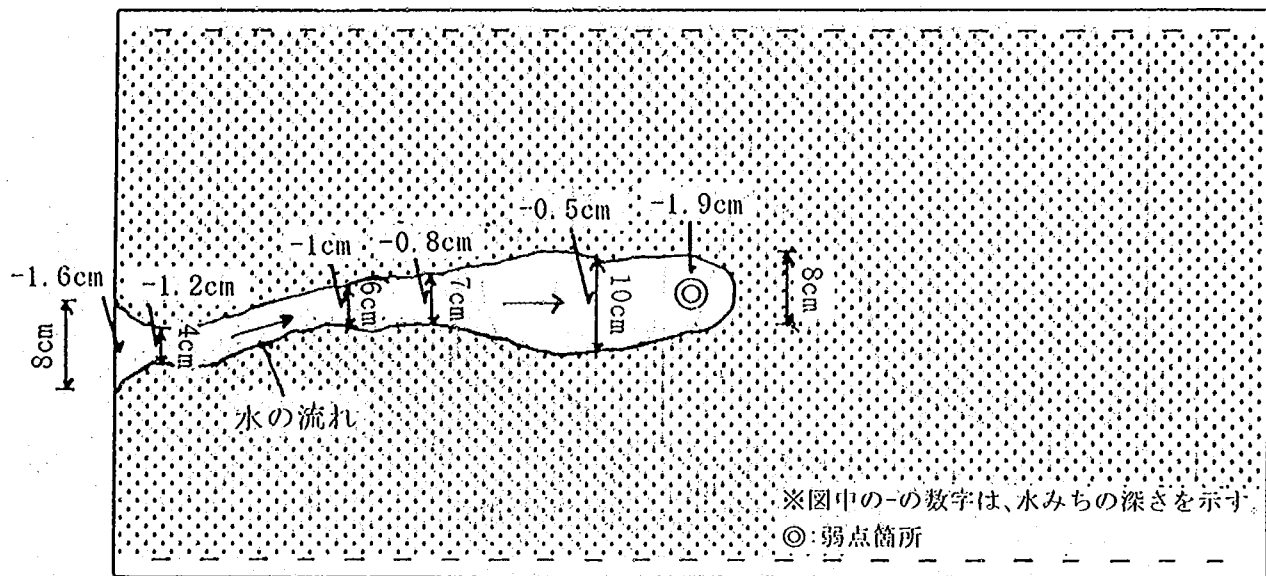


図-2.6.3(7) 実験後の地盤の状況 (ケース7)

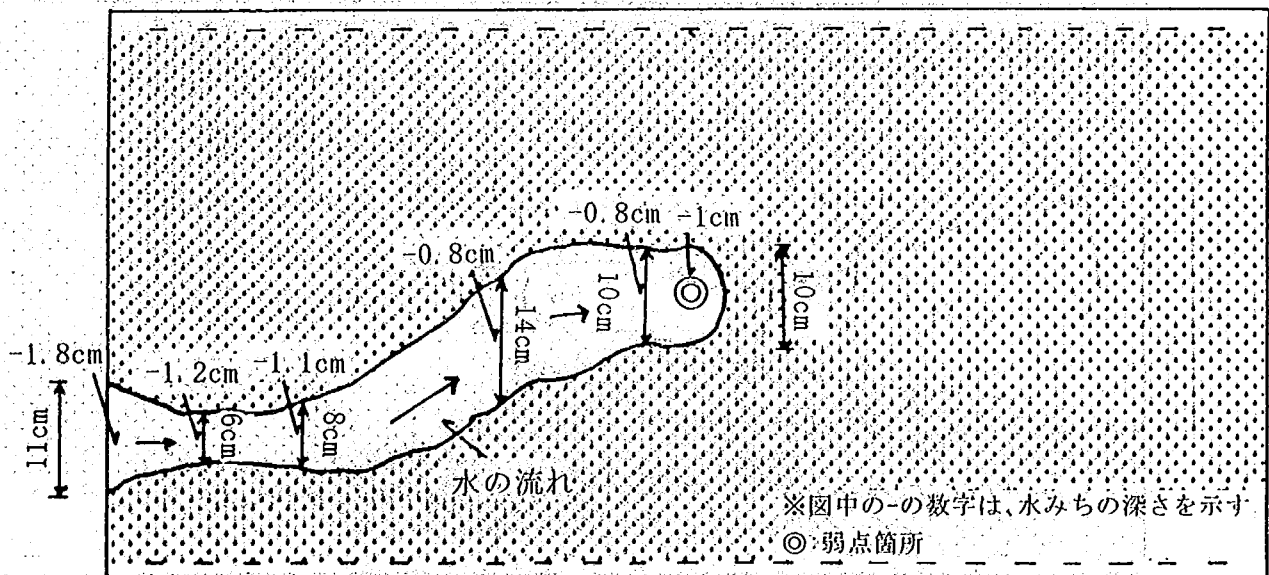


図-2.6.3(8) 実験後の地盤の状況 (ケース8)

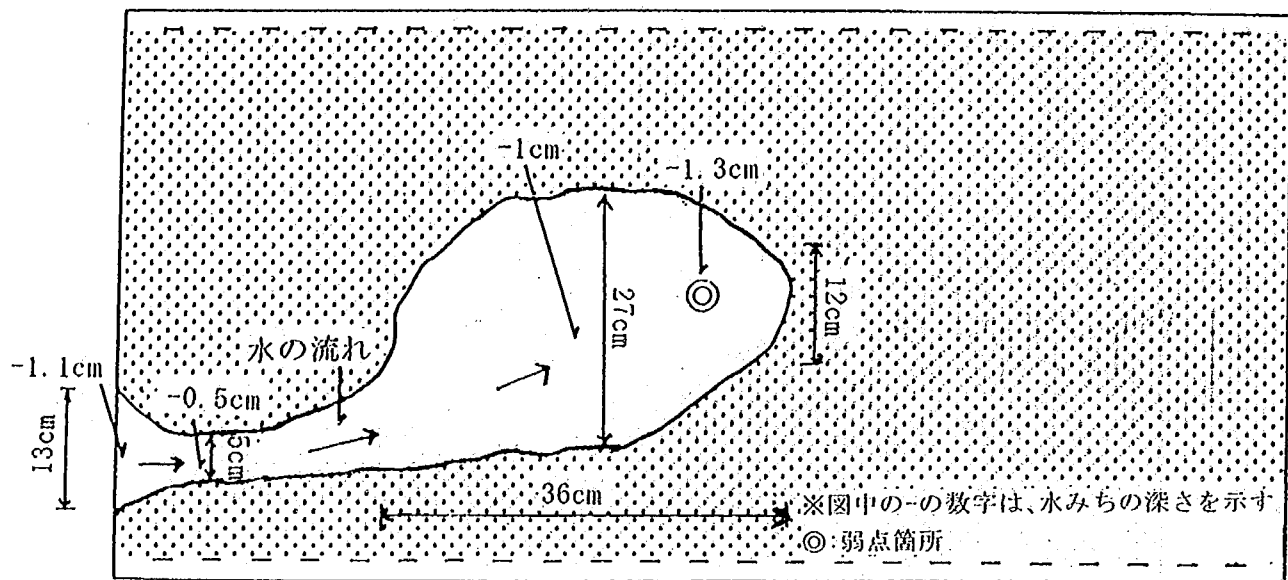


図-2.6.3(9) 実験後の地盤の状況 (ケース9)

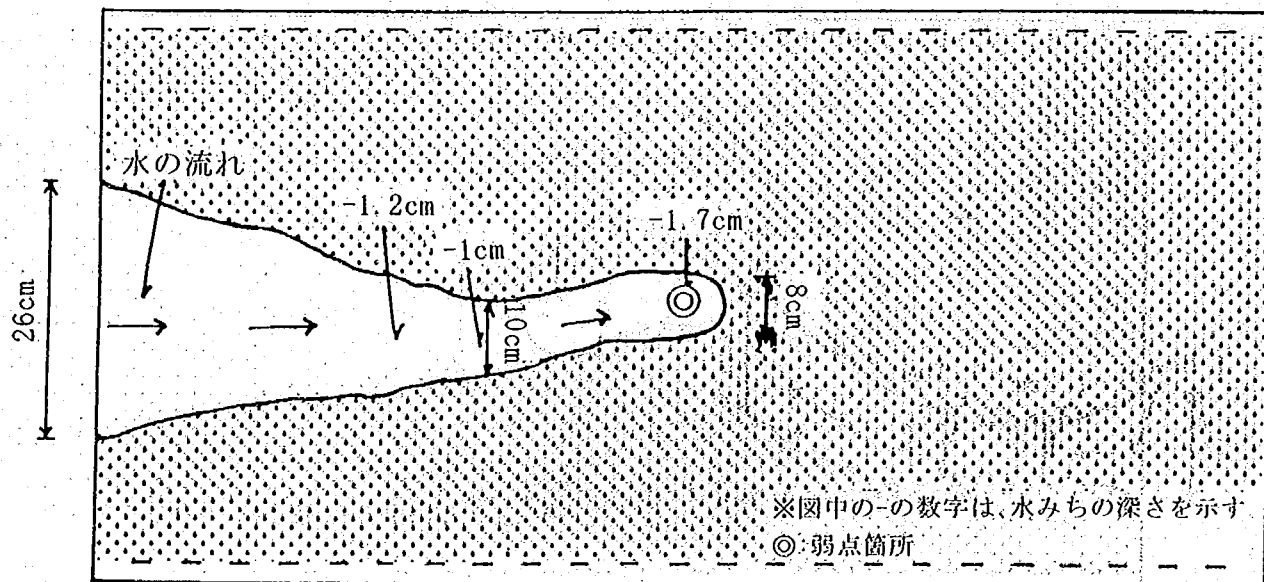


図-2.6.3(10) 実験後の地盤の状況 (ケース10)

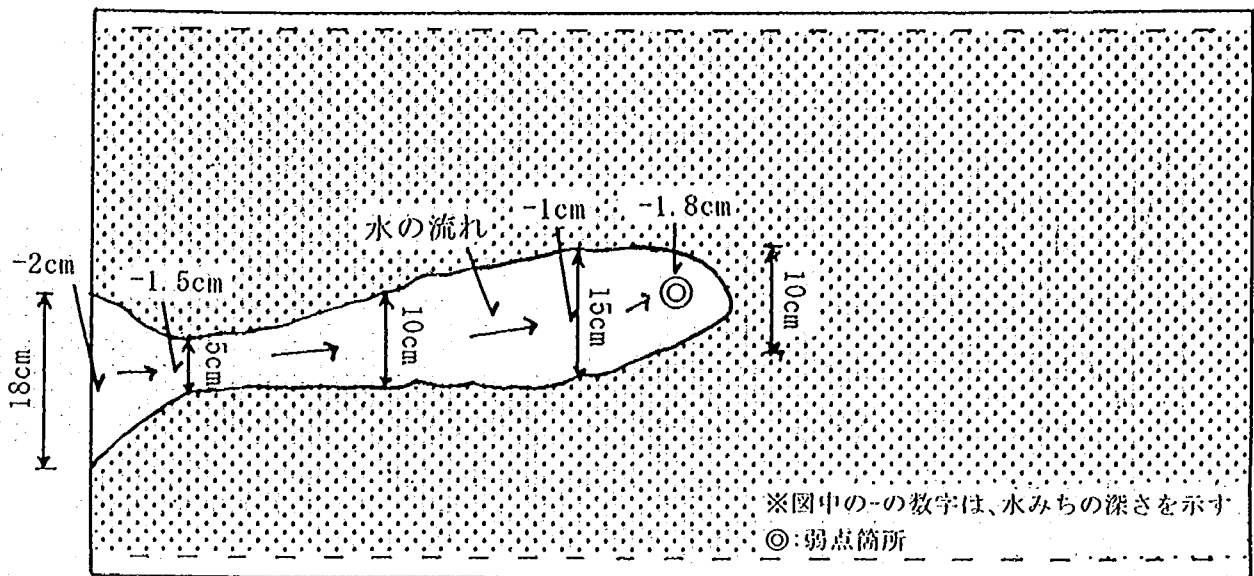


図-2.6.3(11) 実験後の地盤の状況 (ケース1.1)

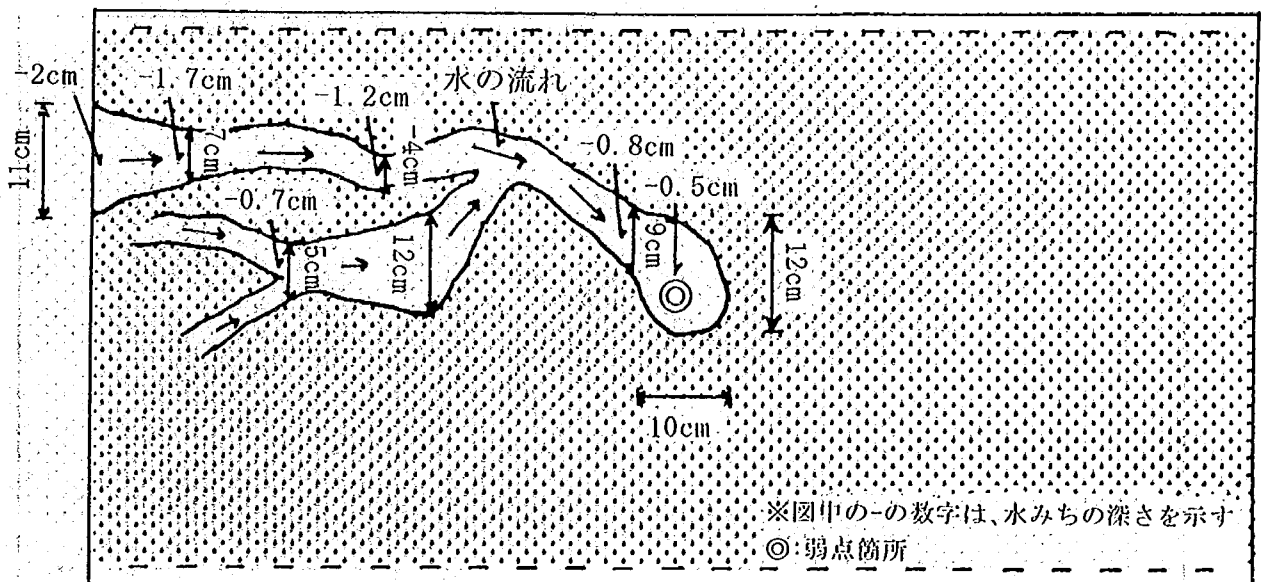


図-2.6.3(12) 実験後の地盤の状況 (ケース1.2)

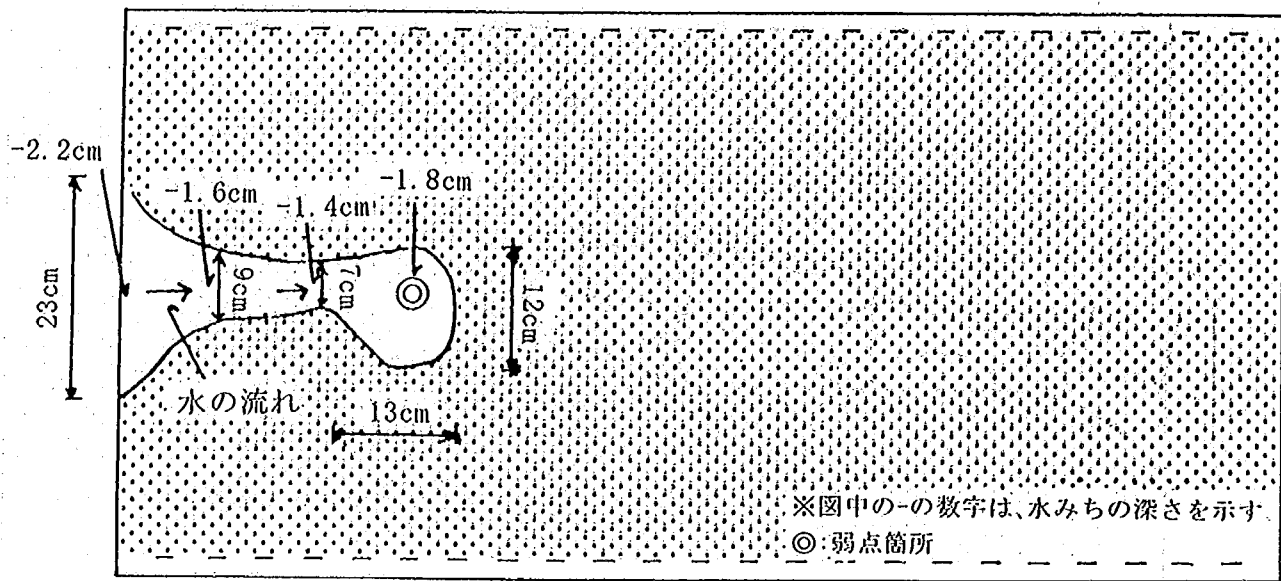


図-2.6.3(13) 実験後の地盤の状況 (ケース13)

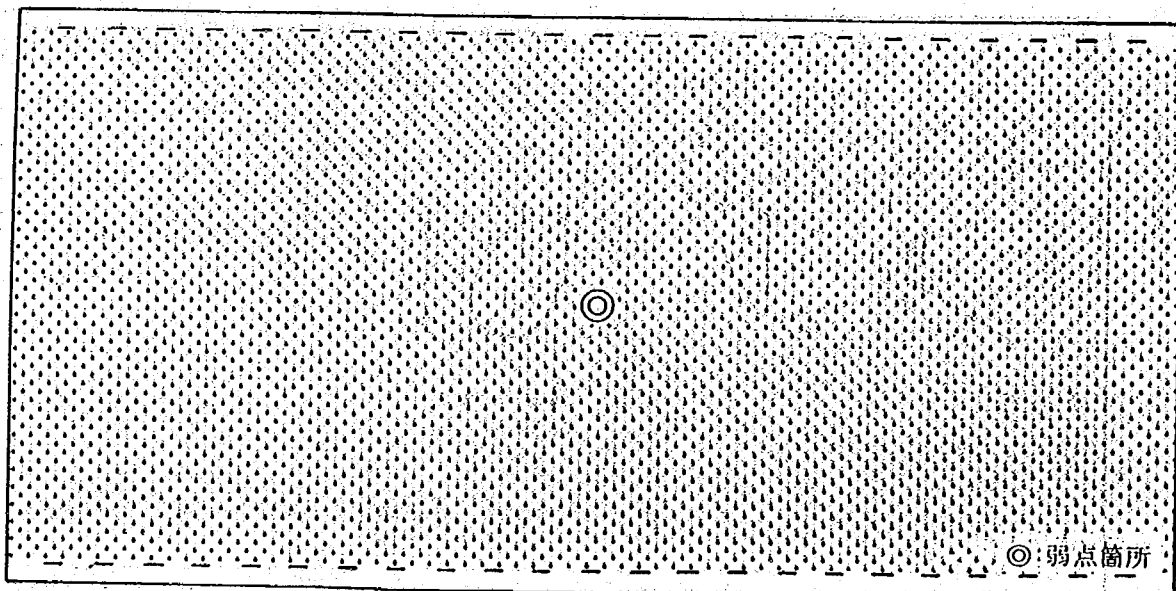


図-2.6.3(14) 実験後の地盤の状況 (ケース14)

3. 大型模型パイピング実験

本実験は、浸透経路長300cmの大型模型を用いて、水平方向浸透流によるパイピング現象の発生について研究する目的で実施した。

3. 1 実験ケース

大型模型パイピング実験は、表-3. 1. 1に示す14種類の砂試料を用いて、各試料について1ケースずつ計14ケース行った。なお、実験試料の粒度特性から判断して、パイピングが発生しにくいと考えられるケースでは、浸透経路長を2mとして実験を行った。

表-3. 1. 1 実験ケース

ケース(No)	地盤使用砂	浸透経路長
15	霞ヶ浦(美浦)	3m
16	鬼怒川	3m
17	利根川	3m
18	江戸川(シルト混り)	3m
19	霞ヶ浦(麻生1)	3m
20	玉造	3m
21	鬼怒川	3m
22	霞ヶ浦(麻生2)	3m
23	利根川下流	2m
24	長良川	3m
25	霞ヶ浦(西の州)	3m
26	江戸崎	2m
27	小貝川(吉沼)	2m
28	渡良瀬川	3m

*) 実験は各河川の堤内地の掘削現場から発生した試料を用いた。

3.2 実験装置

実験は、建設省土木研究所浸透実験棟施設内で行った。模型地盤の作成前に、各実験で使用する給水槽の清掃並び給水に使用する孔を除いた全ての孔をゴム栓およびコーキング剤にて止水した。また、不透水シートを設置し、固定しやすいように（北側、南側、西側）に基礎となるシートを高さ0.5cmの所に付設した。また、碎石部を、高さ0.5m×各実験槽の幅でフレームパイプにて組立て各実験槽の東側（上流側）と西側（下流側）に設置した。写真-3.2.1に実験土槽を、写真-3.2.2に碎石部を示す。

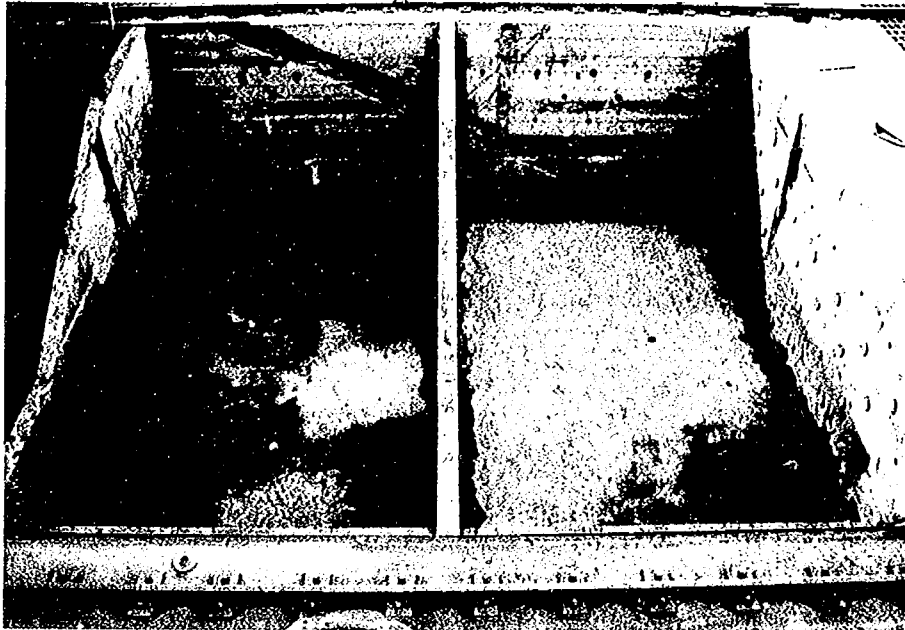


写真-3.2.1 実験土槽

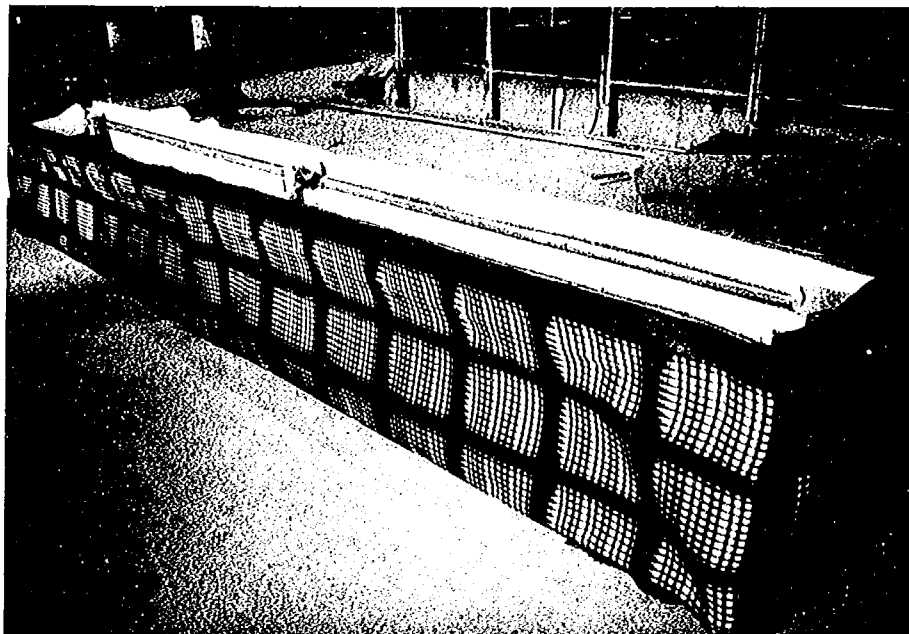


写真-3.2.2 碎石部

3.3 模型作成方法

(1) 砂地盤作成

模型地盤は、コンクリート壁で4つに仕切られた土槽の給水側と越流壁側に碎石部〔高さ0.5m×奥行き0.5m×幅3.9mを鉄パイプで組立、その中に碎石を投入したもの〕を設置後、水を満たし試料を水中落下させて気泡が砂地盤中に残らないように作製した。

(2) 表土層作成

砂地盤上には、図-3.3.1に示すように粘土層(厚さ5cm)を敷いた後、上部に不透水シート敷き、さらに、アップリフトを防ぐため押え盛土を築造した。

また、パイピング現象を一定の位置で発生させるため浸透経路長(3mまたは2m)の場所に直径50mmの穴を粘土層・不透水シートに開け、その上に粘土(3cm)を敷き、さらに、耐久合板(15mm)を設置したものを図-3.3.2に示す。また、観察しやすいように鉄板で円筒にして囲い、流量計測のために水路を設置し、さらに、水路に流出しやすいように円筒の中を粘土で傾斜を付け弱点箇所を作製した。写真-3.3.1に完成後の模型地盤の完成状況を示す。

(3) 計測機器

1) 弱点箇所

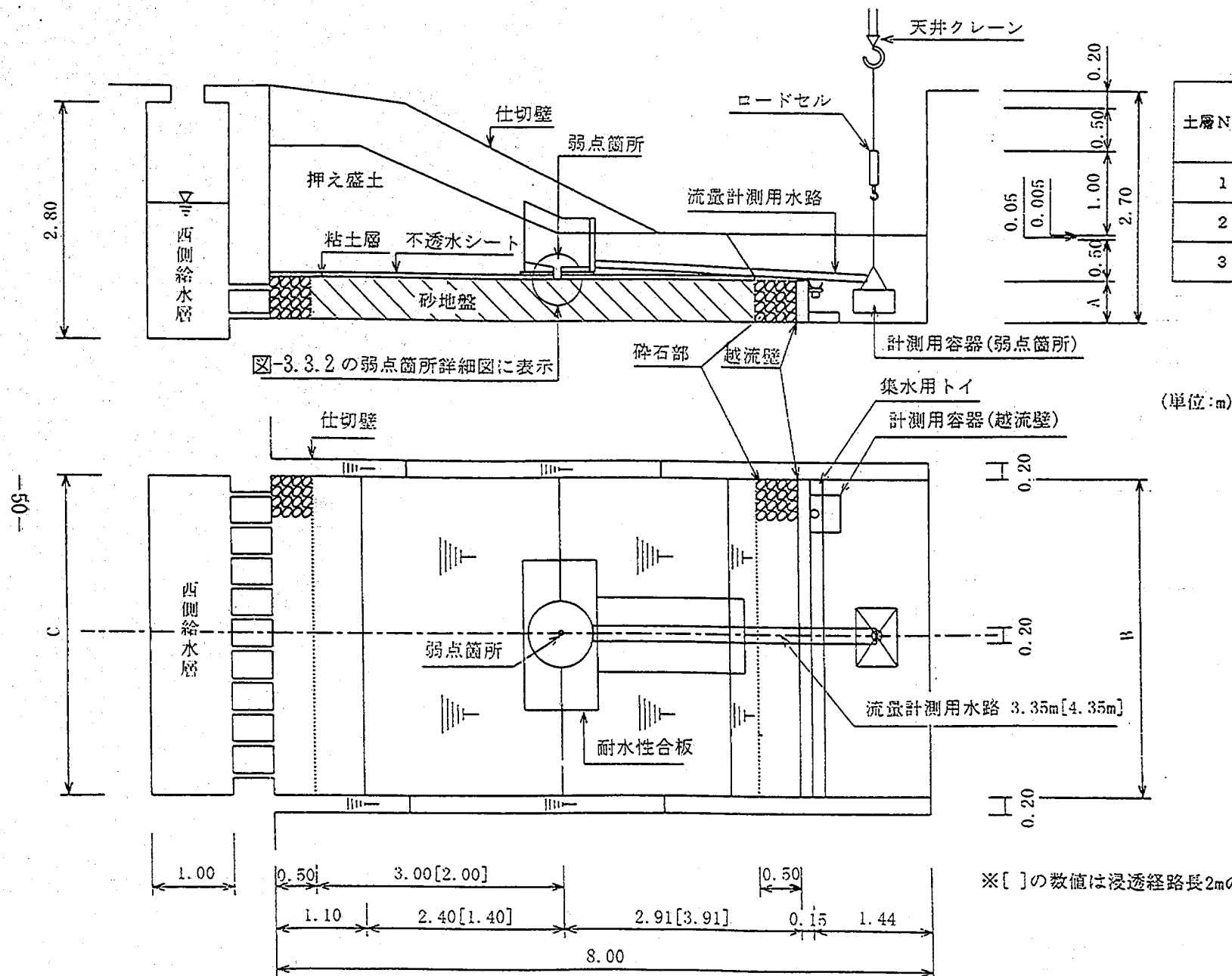
弱点箇所からの流出量は、弱点箇所に設置した流路端に、天井クレーンにて釣り上げたロードセルに容器を下げて自動計測を行った。

2) 越流壁

越流壁よりオーバーフローした流出量は、壁に設置したトイにて集水し容器で受けデジタル秤に載せて計測を行った。



写真-3.3.1 模型堤防完成状況



土層No.	越流壁高さ A	実験槽幅 B	給水槽幅 C
1	0.504m	3.88m	5.48m
2	0.502m	3.80m	3.74m
3	0.513m	3.81m	3.74m

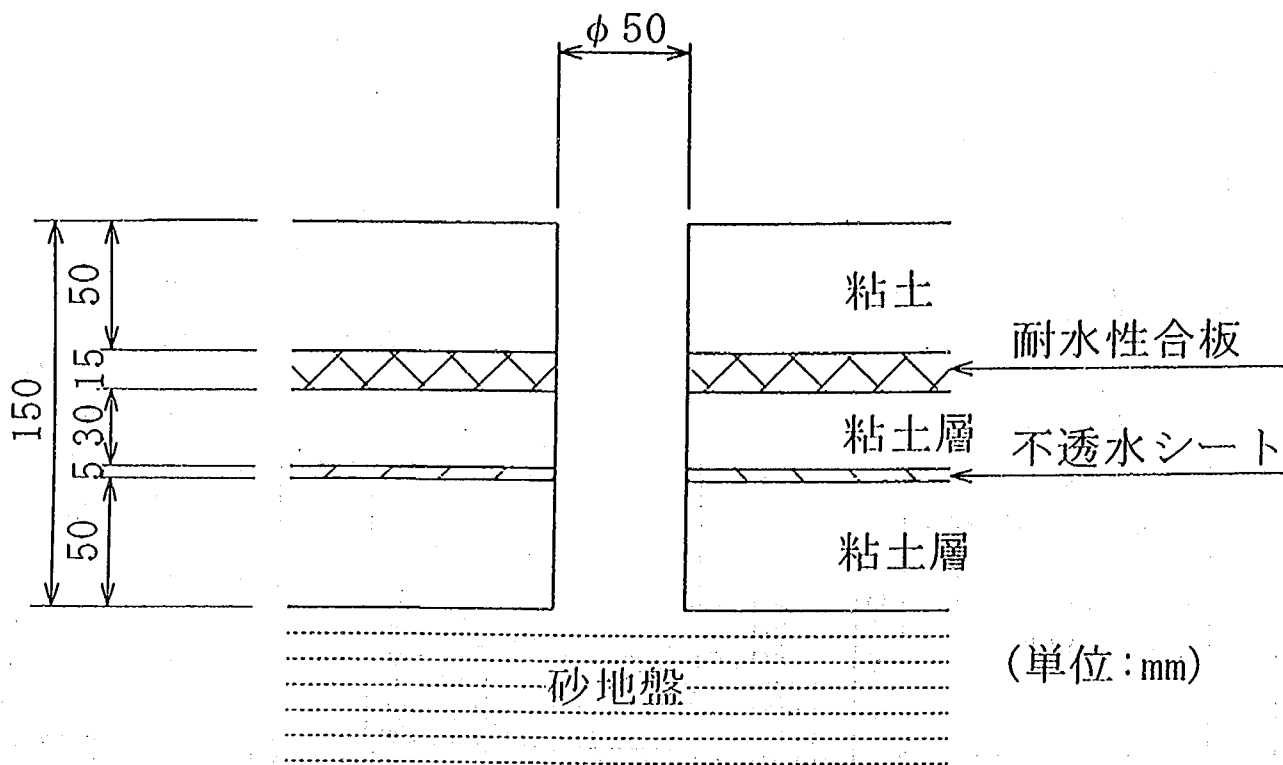


図-3.3.2 弱点箇所詳細図

3.4 実験方法

実験は、模型地盤作製後、各実験槽東側に設置してある給水槽に水中用ポンプで給水し、段階的に水位を上昇させ、砂地盤及び弱点箇所での流出量とパイピングの進行について観測を行った。

水頭の上昇過程は、水頭差0～80cmまでは、1段階10cmを10分間隔、水頭差85～130cmまでは、1段階5cmを15分間隔、水頭差135～170cmまでは、1段階5cmを20分間隔で水頭を上昇させることを標準とし、上下流が完全に繋がったと判断された時点で実験終了とした。

ただし、実験中に噴砂が始まり、水みちが通じる可能性があると思われる噴砂の場合には、観測時間を延長した。

3.5 観測方法

観測は、各段階毎に水頭を上昇させ、弱点箇所及び越流壁からの流出量の計測と弱点箇所においてパイピング現象に至るまでの進行状況の観測を行った。

弱点箇所及び越流壁からの流出量の計測は、弱点部流量は、弱点箇所に設置した流路端に、天井クレーンにて釣り上げたロードセルに容器を下げて自動計測を行った。越流量は、越流壁よりオーバーフローした流量を、壁に設置したトイにて容器で受けデジタル秤に載せて計測を行った。計測時間を、表-3.5.1に示す。

また、実験中の弱点箇所でのパイピング現象に至るまでの進行状況を、写真撮影及びビデオ撮影で収めた。さらに、実験終了後（押え盛土・不透水シート・粘土層撤去後）の砂地盤上における水みちの観察を行い、さらに、スケッチ及び写真撮影を行った。

主な観察内容を下記に示す。

- ・弱点箇所及び越流壁からの出水
- ・弱点箇所からのにごり水発生
- ・弱点箇所からの噴砂開始
- ・弱点箇所からのパイピング現象
- ・実験終了後の水みち観察

表-3.5.1 弱点箇所及び越流壁の流出量計測時間一覧表

計測項目	計 測 時 間
弱点箇所からの流出量	1分毎にデータロガーによる自動計測
越流壁からの流出量	一定水位時間10分時（4、8分） 一定水位時間15分時（4、8、12分） 一定水位時間20分時（4、8、12、16分） ＊上記の計測時間につきデジタル秤にて計測

3.6 実験結果の整理

本実験では、以下に示す現象を経て最終的にパイピングに至っている。各実験ケースにおける弱点箇所及び越流部の流量の変化状況を表-3.6.1および図-3.6.1に示す。

また、図-3.6.2に、実験終了後の砂地盤上の水みちの観察を行い、状況をスケッチにした結果を示す。

また、CASE19～20では、図中の①、②、③として、砂地盤の密度を測定するための採取位置を示す。

＊パイピング現象における弱点箇所からの目視観察状況

- ・ 穴（弱点箇所）に水面が出現
- ・ 砂の上下動開始
- ・ 穴からの砂粒子の流出
- ・ 噴砂現象
- ・ パイピング

など

表3.6.1(1) ケース15の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	30	ほぼ一定 2.46 l/min	測定に至ってない	20~29
にごり水発生	40	ほぼ一定 3.85 l/min	ほぼ一定 0.13 l/min	30~39
気 泡 発 生	60	ほぼ一定 5.83 l/min	ほぼ一定 0.33 l/min	50~59
噴 砂 開 始	115	ほぼ一定 11.74 l/min	最大測定値 2.27 l/min	170~199
パイピング	135	最終測定値 24.45 l/min	最終測定値 11.76 l/min	245~288

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(2) ケース16の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	40	測定に至ってない 0.00 l/min	測定に至ってない 0.07 l/min	30~39
にごり水発生	80	ほぼ一定 4.10 l/min	ほぼ一定 0.27 l/min	70~79
砂の上下動開始	110	ほぼ一定 6.00 l/min	ほぼ一定 1.20 l/min	155~169
噴 砂 開 始	140	2.00→5.21 l/min に大きく変化する 傾向がみられる	8.14→12.74 l/min に大きく変化する 傾向がみられる	255~274
パイピング	150	最終測定値 22.3 l/min	最終測定値 9.02 l/min	295~299

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(3) ケース17の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	40	ほぼ一定 0.00 l/min		30~39
気 泡 発 生	40	測定に至ってない	測定に至ってない	30~39
にごり水発生	60	ほぼ一定 0.00 l/min	ほぼ一定 0.20 l/min	50~59
砂の上下動開始	90	ほぼ一定 3.30 l/min	ほぼ一定 0.67 l/min	100~109
噴 砂 開 始	95	ほぼ一定 3.62 l/min	ほぼ一定 0.80 l/min	110~124
パイピング	130	最終測定値 7.88 l/min	最終測定値 13.49 l/min	230~244

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(4) ケース18の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	95	測定に至ってない	測定に至ってない	110～124
気 泡 発 生	105	測定に至ってない	測定に至ってない	185～199
にごり水発生	140	ほぼ一定 1.18 l/min	ほぼ一定 0.87 l/min	300～319
噴 砂 開 始	180	ほぼ一定 3.42 l/min	ほぼ一定 1.94 l/min	460～489
パイピング	至らず	——	——	——

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(5) ケース19の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	10	ほぼ一定 0.00 l/min	測定に至ってない	0~9
にごり水発生 気泡発生	50	ほぼ一定 0.00 l/min	ほぼ一定 5.67 l/min	40~49
噴砂開始 パイピング	175	0.66→32.00l/min に大きく変化する 傾向がみられる	0.07→11.82l/min に大きく変化する 傾向がみられる	400~407

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(6) ケース20の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	95	ほぼ一定 0.14 l/min	測定に至ってない 0.00 l/min	110~124
気 泡 発 生	125	ほぼ一定 0.24 l/min	ほぼ一定 0.00 l/min	200~214
にごり水発生	150	ほぼ一定 0.34 l/min	測定に至ってない 0.00 l/min	315~329
噴 砂 開 始 パイピング	165	ほぼ一定 31.08 l/min	1.20→5.68 l/min に大きく変化する 傾向がみられる	370~375

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3. 6. 1(7) ケース2 1の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる 気 泡 発 生	40	ほぼ一定 1.09 l/min	ほぼ一定 1.03 l/min	30~39
にごり水発生	70	ほぼ一定 3.16 l/min	ほぼ一定 0.47 l/min	60~69
砂の上下動開始 噴 砂 開 始	135	ほぼ一定 5.98 l/min	2.34→11.29l/min に大きく変化する 傾向がみられる	230~279
パイピング	140	測定不能	最終測定値 28.79 l/min	280~281

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(8) ケース22の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	40	0.68→0.80 l/min に大きく変化する 傾向がみられる	測定に至ってない 0.00 l/min	30～39
気 泡 発 生	50	ほぼ一定 1.08 l/min	ほぼ一定 0.07 l/min	40～49
にごり水発生	85	ほぼ一定 1.86 l/min	0.27→0.47 l/min に大きく変化する 傾向がみられる	80～94
砂の上下動開始 噴 砂 開 始	110	ほぼ一定 2.18 l/min	ほぼ一定 1.14 l/min	155～184
パイピング	120	最終測定値 2.70 l/min	最終測定値 1.87→5.28 l/min	206～225

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(9) ケース23の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	145	ほぼ一定 0.02 l/min	測定に至ってない 0.00 l/min	205~224
にごり水発生	170	ほぼ一定 0.06 l/min	測定に至ってない 0.00 l/min	305~324
噴 砂 開 始	至らず	——	——	——
パイピング	至らず	——	——	——

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(10) ケース24の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	60	ほぼ一定 2.48 l/min	測定に至ってない	50~59
にごり水発生 気泡発生	70	ほぼ一定 2.92 l/min	ほぼ一定 0.13 l/min	60~69
砂の上下動開始	105	ほぼ一定 4.02 l/min	ほぼ一定 0.87 l/min	140~149
噴 砂 開 始	110	ほぼ一定 4.28 l/min	ほぼ一定 1.07 l/min	155~169
パイピング	125	最終測定値 68.92 l/min	最終測定値 4.42 l/min	185~215

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(11) ケース25の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	50	ほぼ一定 0.70 l/min	測定に至ってない 0.00 l/min	40~49
気 泡 発 生	85	ほぼ一定 1.56 l/min	ほぼ一定 0.07 l/min	80~94
にごり水発生	125	ほぼ一定 2.64 l/min	ほぼ一定 0.13 l/min	200~214
噴 砂 開 始 パイピング	200	測定不能	最終測定値 0.40 l/min	455~457

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、 $\pm 0.3\text{cm}$ 程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(12) ケース26の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	80	測定に至ってない 0.00 l/min	測定に至ってない 0.00 l/min	70～79
にごり水発生 気泡発生	135	14.3→36.7 l/min に大きく変化する 傾向がみられる	測定に至ってない 0.00 l/min	230～244
砂の上下動開始	150	測定不能	0.94→3.07 l/min に大きく変化する 傾向がみられる	275～289
噴砂開始	至らず	——	——	——
パイピング	至らず	——	——	——

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(13) ケース27の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	至らず	——	——	——
にごり水発生	至らず	——	——	——
気 泡 発 生	至らず	——	——	——
砂の上下動開始	至らず	——	——	——
噴 砂 開 始	至らず	——	——	——
パイピング	至らず	——	——	——

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、 $\pm 0.3\text{cm}$ 程度の差。(目視測定のため)

表3.6.1(14) ケース28の実験時変化状況

目 視 観 察 (弱点箇所)	水頭差 (cm)	流 量 変 化 注1	漏水量変化 注1	経過時間 (分)
水面現れる	40	ほぼ一定 1.62 l/min	測定に至っていない 0.07 l/min	30～39
にごり水発生	50	ほぼ一定 2.08 l/min	ほぼ一定 0.13 l/min	40～49
気 泡 発 生	60	ほぼ一定 2.50 l/min	ほぼ一定 0.14 l/min	50～59
噴 砂 開 始	100	ほぼ一定 3.78 l/min	0.73→1.74 l/min に大きく変化する 傾向がみられる	125～139
パイピング	115	測定不能	最終測定値 14.56 l/min	200～202

注1：5分間の平均値

注2：静水圧水頭高さに近い値とは、±0.3cm程度の差。(目視測定のため)

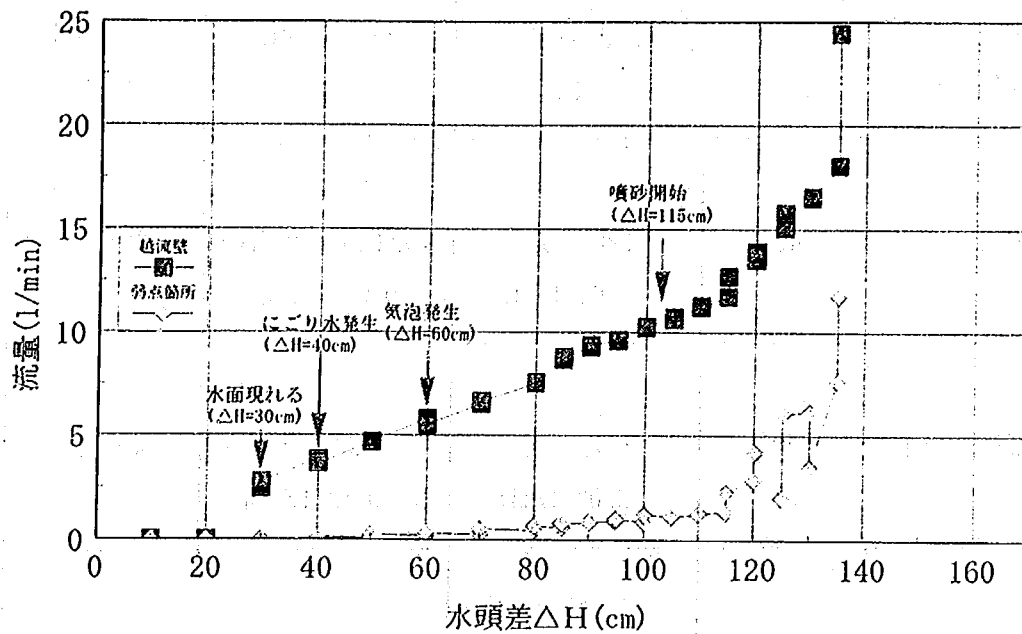


図-3.6.1(1) 水頭差と流量の関係 (ケース15)

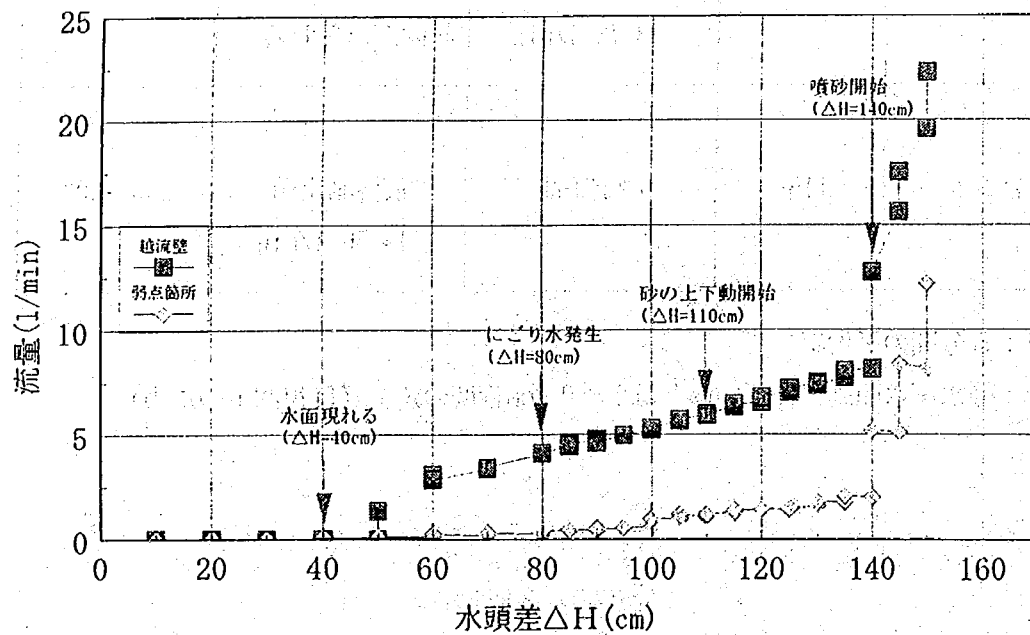


図-3.6.1(2) 水頭差と流量の関係 (ケース16)

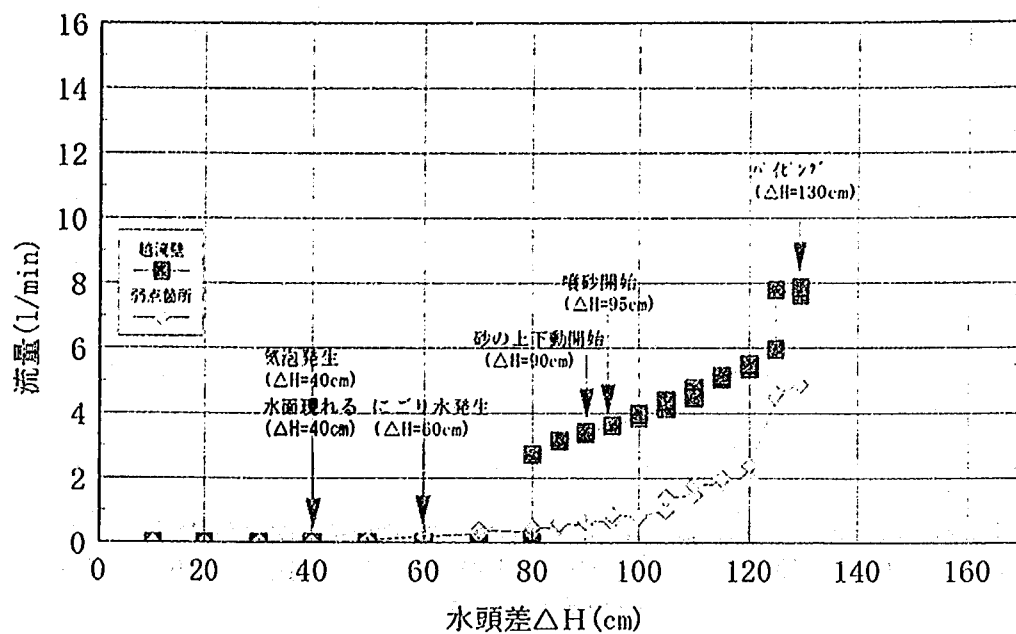


図-3.6.1(3) 水頭差と流量の関係 (ケース17)

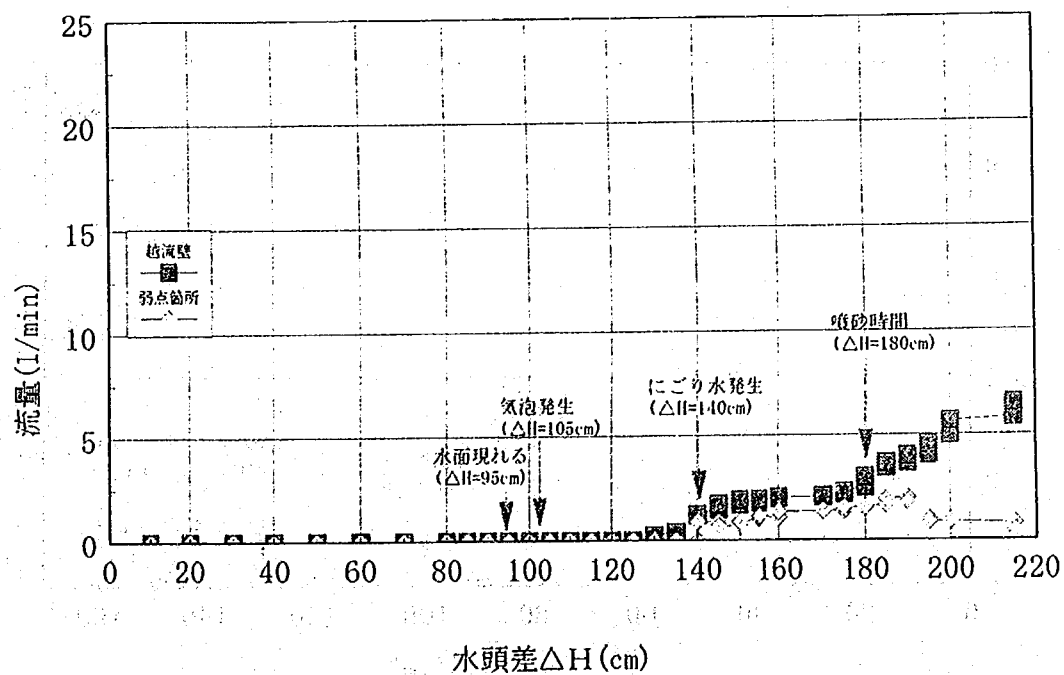


図-3.6.1(4) 水頭差と流量の関係 (ケース18)

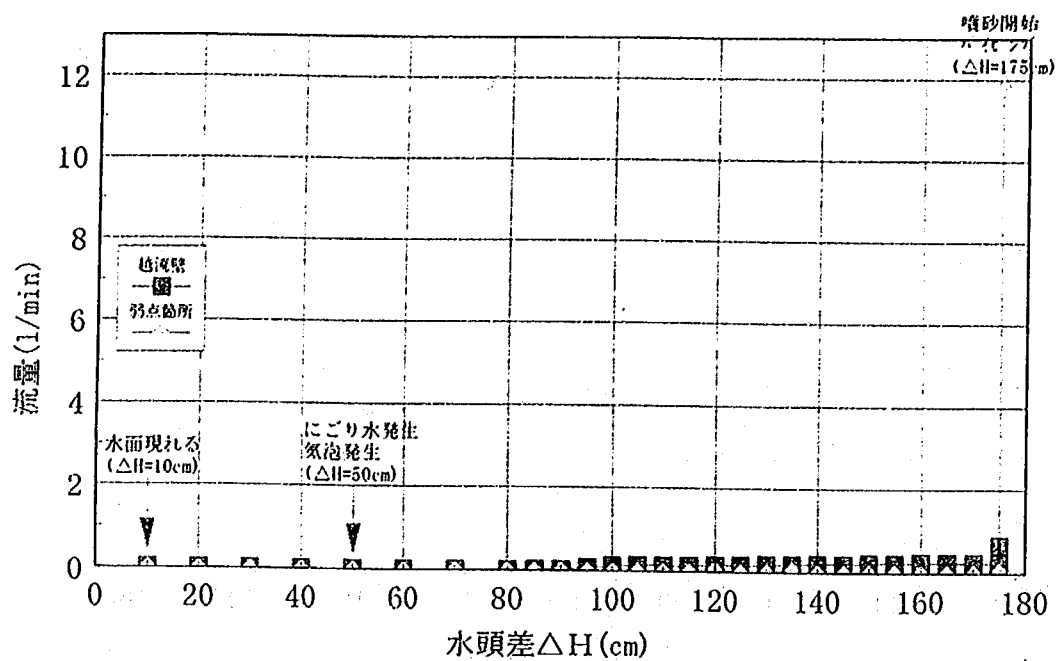


図-3.6.1(5) 水頭差と流量の関係 (ケース19)

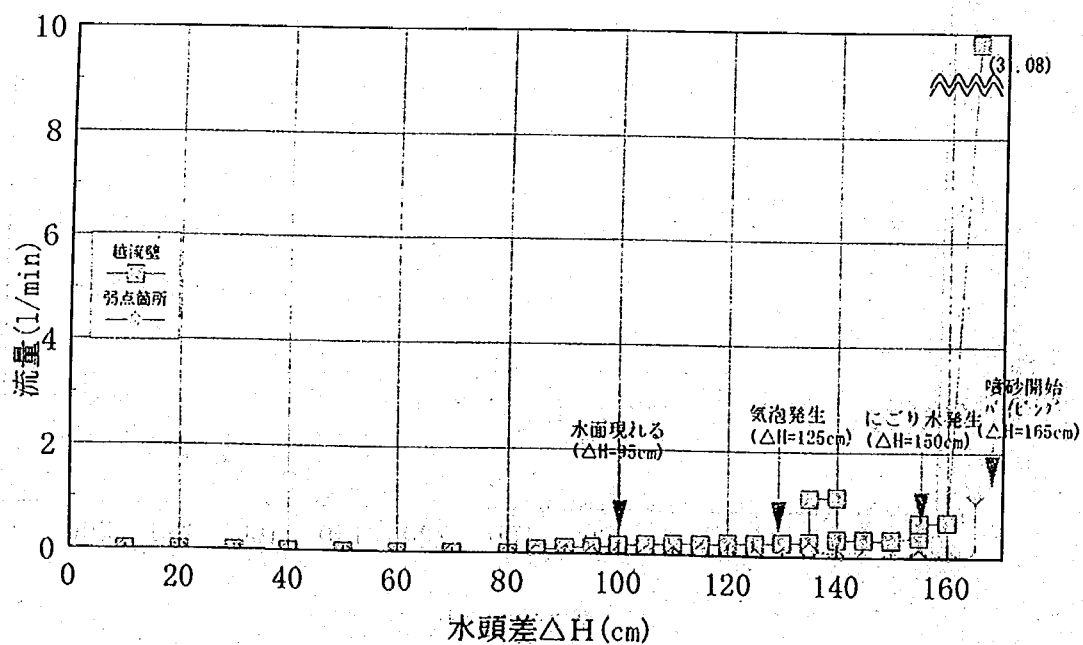


図-3.6.1(6) 水頭差と流量の関係 (ケース20)

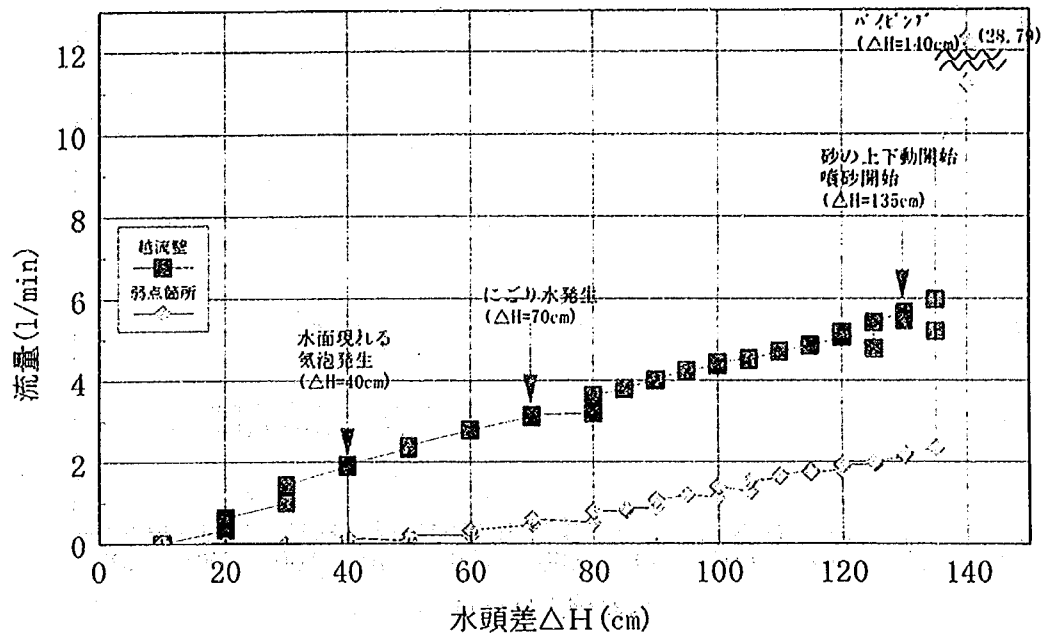


図-3.6.1(7) 水頭差と流量の関係 (ケース2-1)

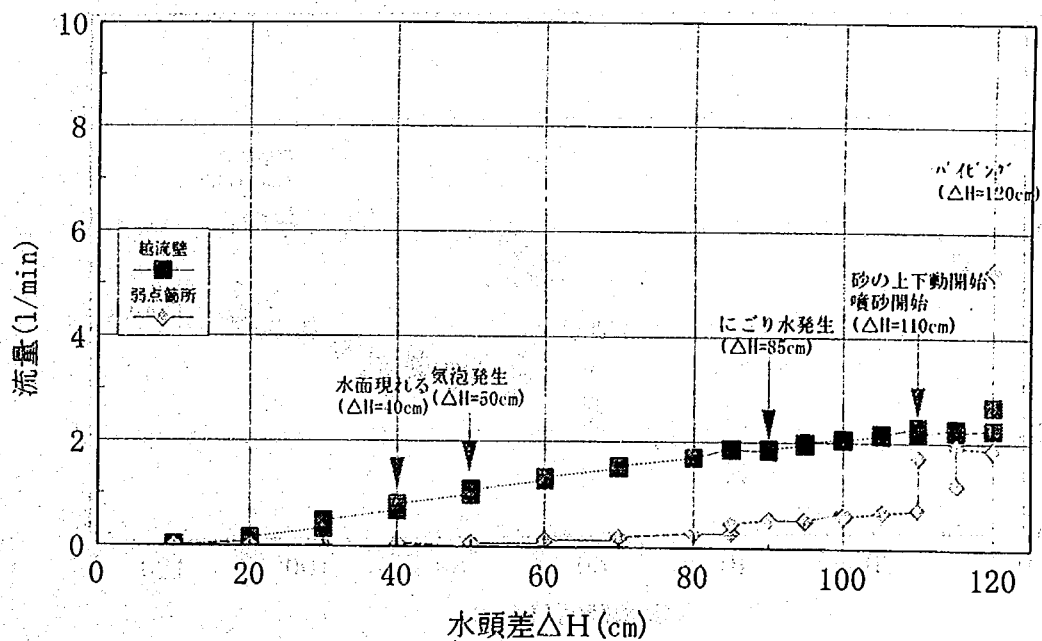


図-3.6.1(8) 水頭差と流量の関係 (ケース2-2)

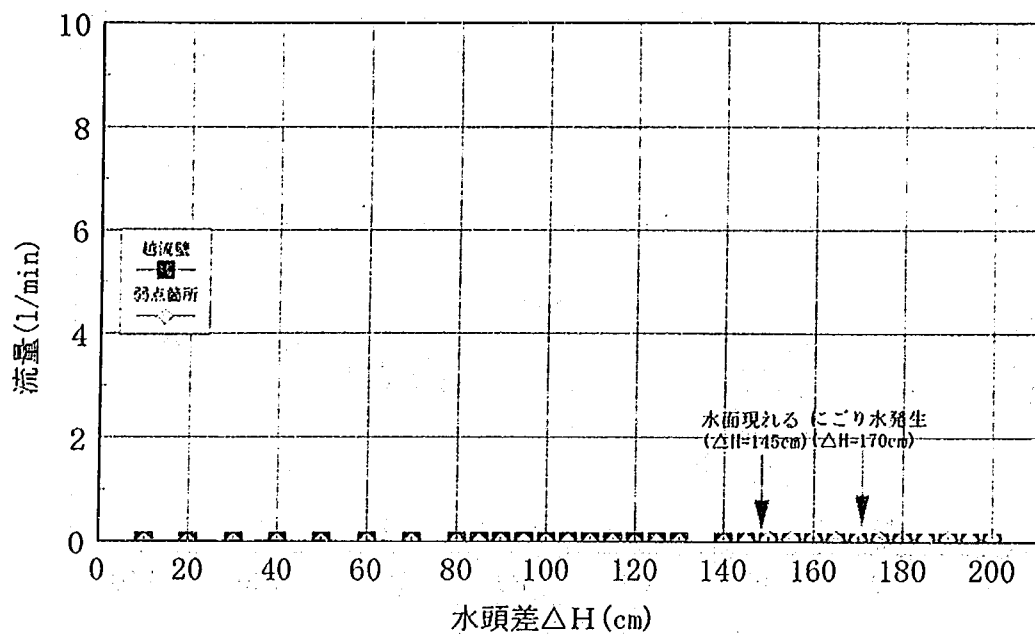


図-3.6.1(9) 水頭差と流量の関係 (ケース2.3)

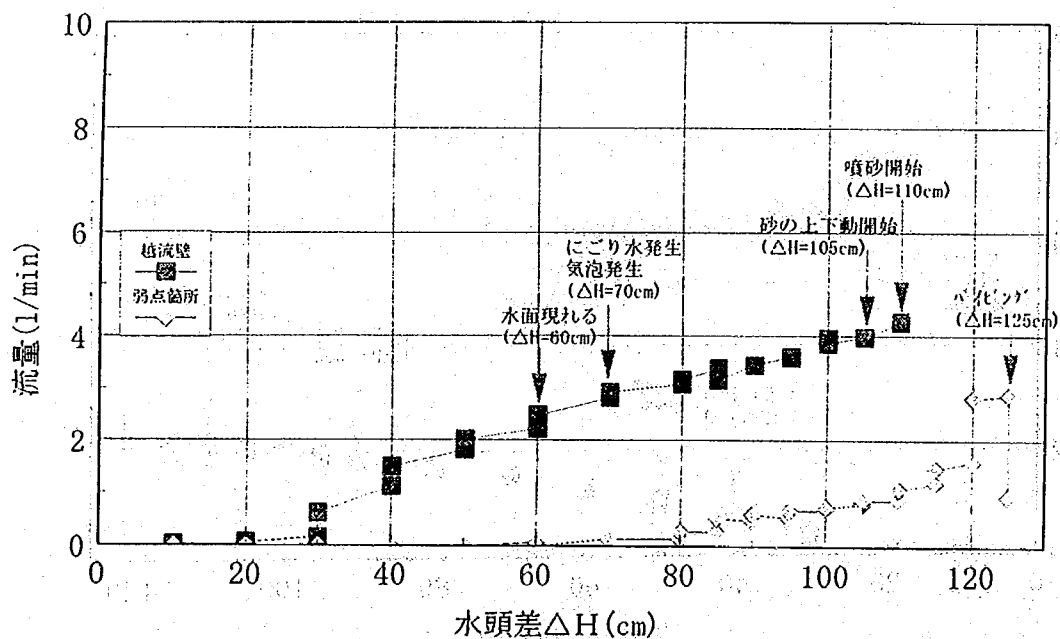


図-3.6.1(10) 水頭差と流量の関係 (ケース2.4)

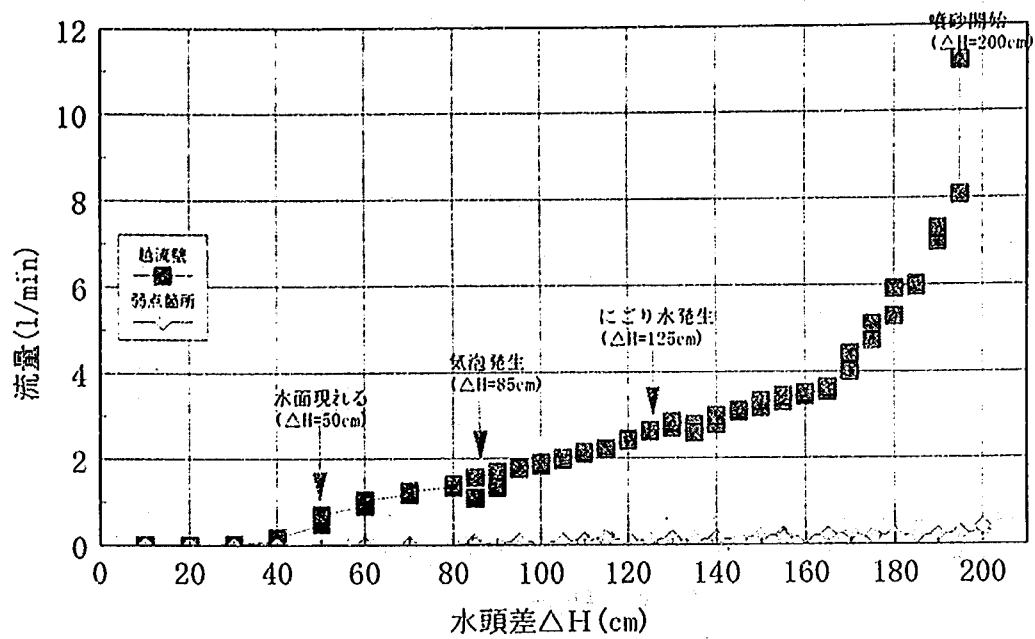


図-3.6.1(11) 水頭差と流量の関係 (ケース25)

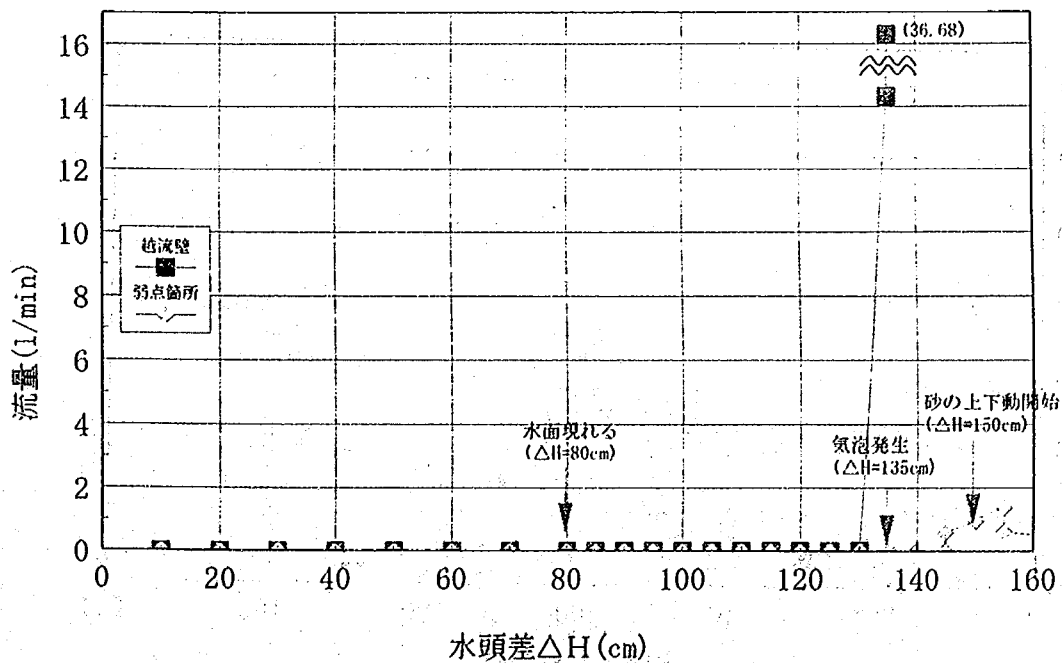


図-3.6.1(12) 水頭差と流量の関係 (ケース26)

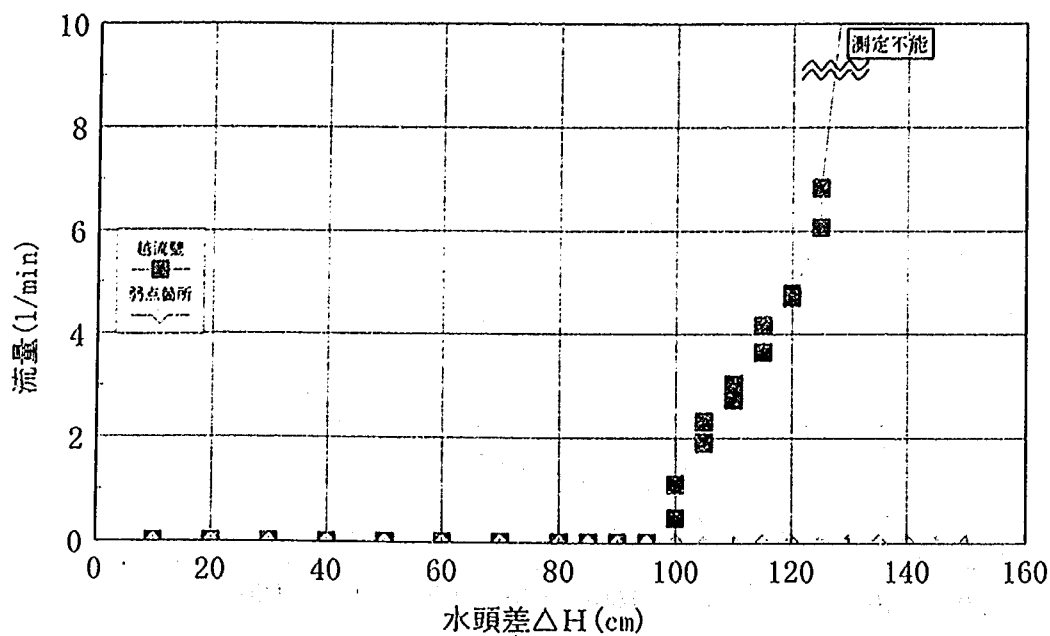


図-3.6.1(13) 水頭差と流量の関係 (ケース27)

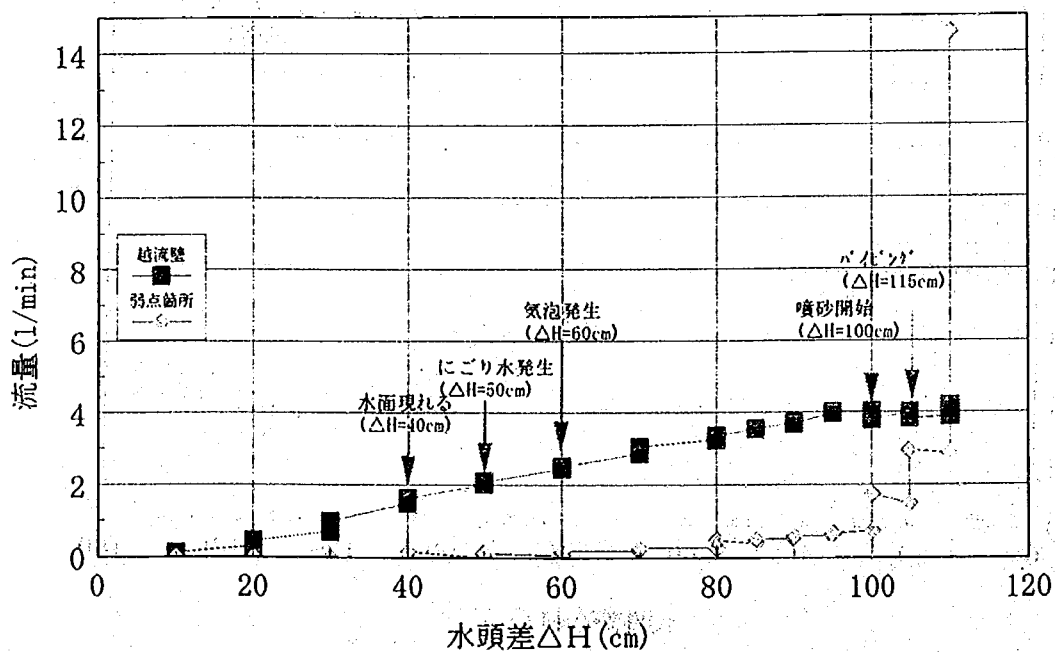


図-3.6.1(14) 水頭差と流量の関係 (ケース28)

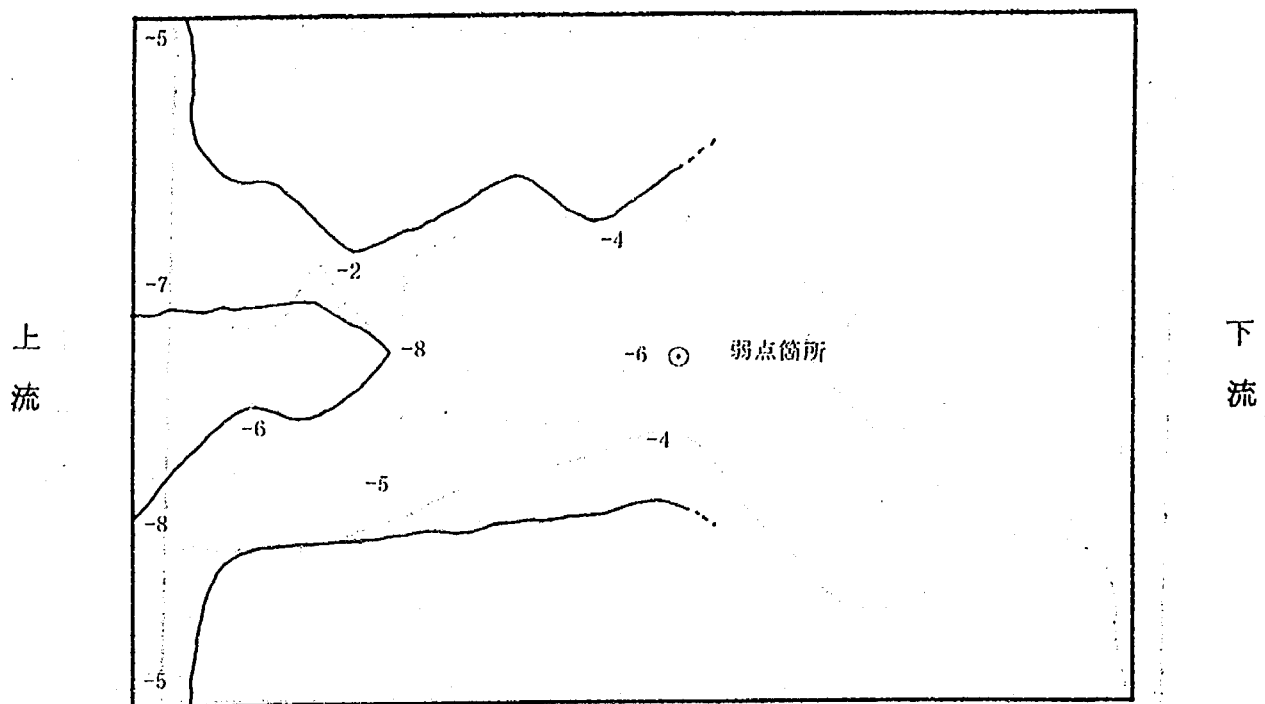


図-3.6.2(1) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース15)

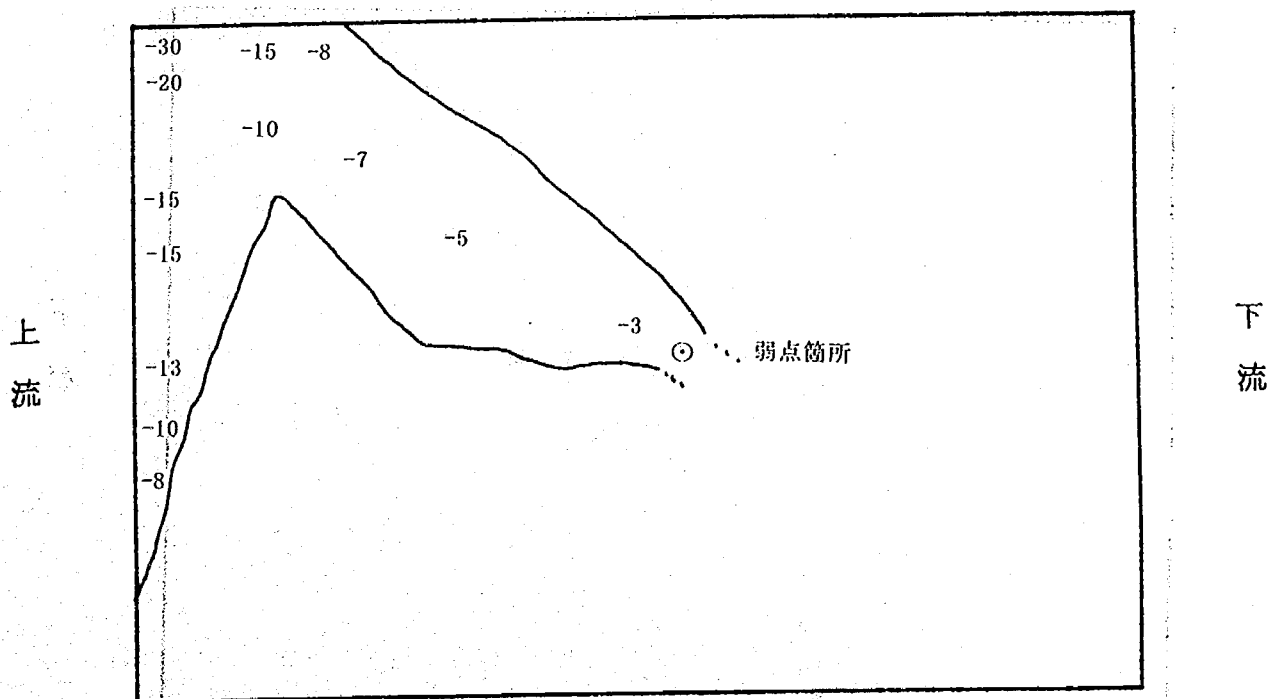


図-3.6.2(2) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース16)

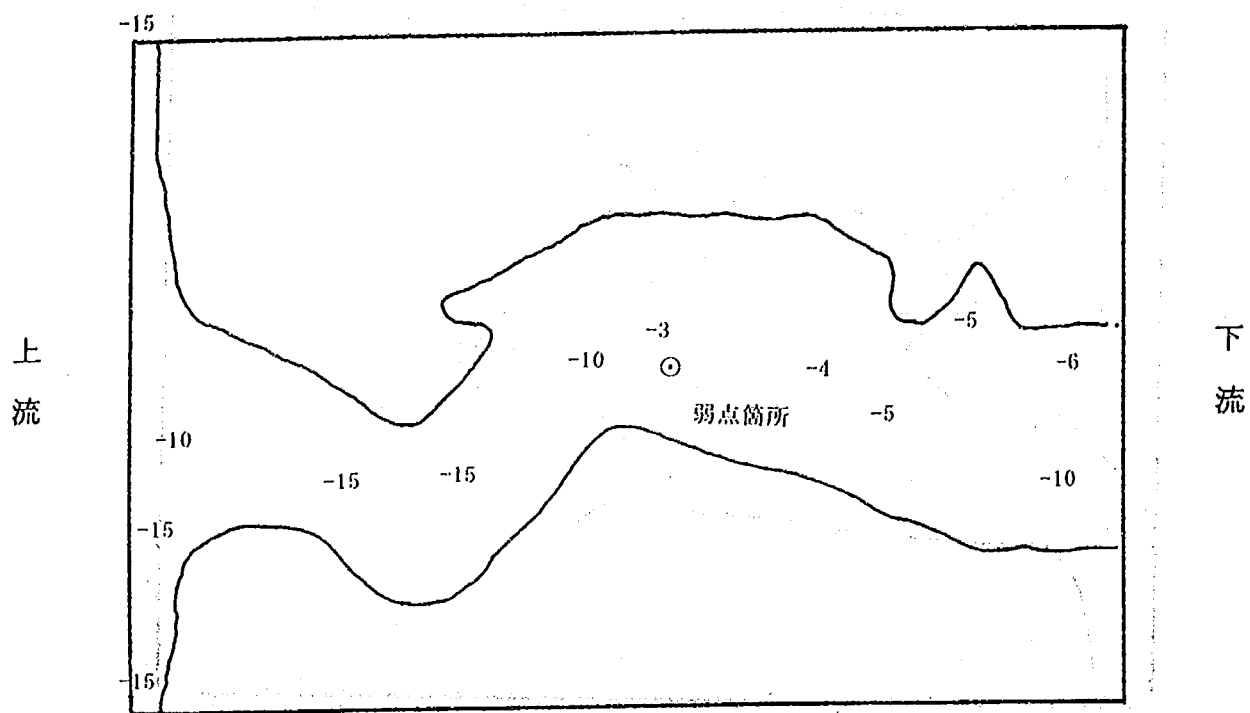


図-3.6.2(3) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース17)

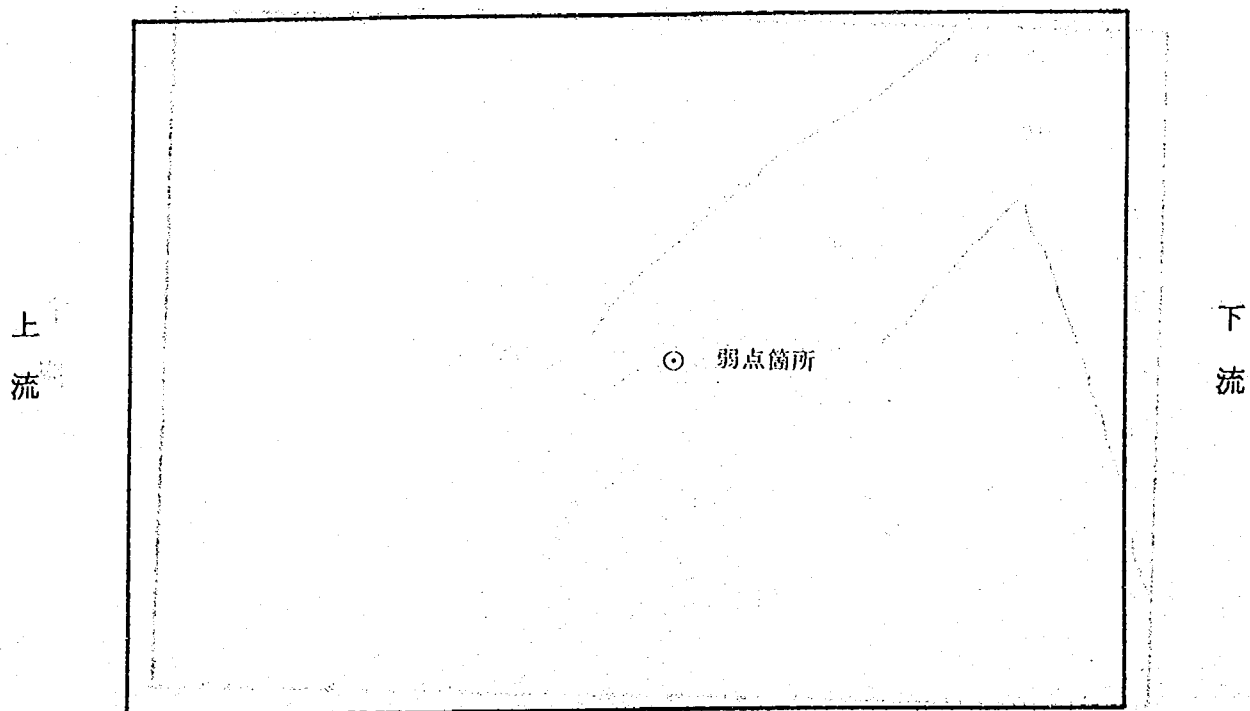


図-3.6.2(4) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース18)

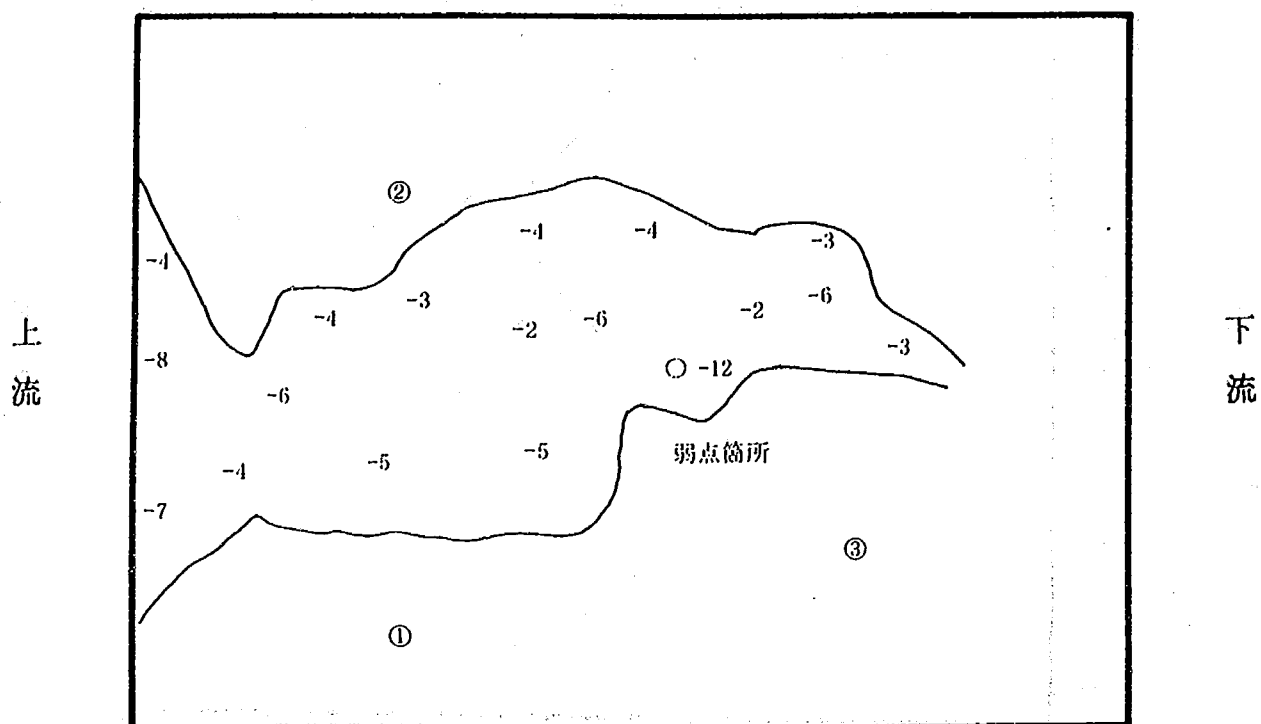


図-3.6.2(7) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース2.1)

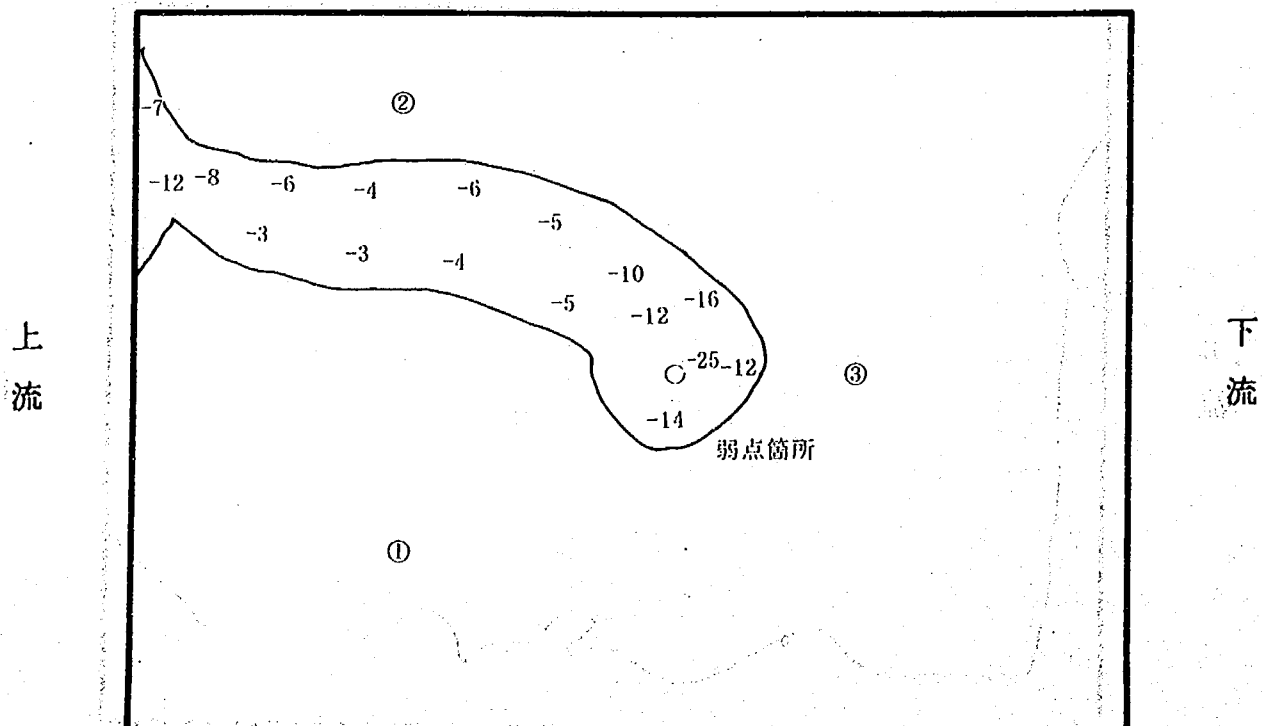
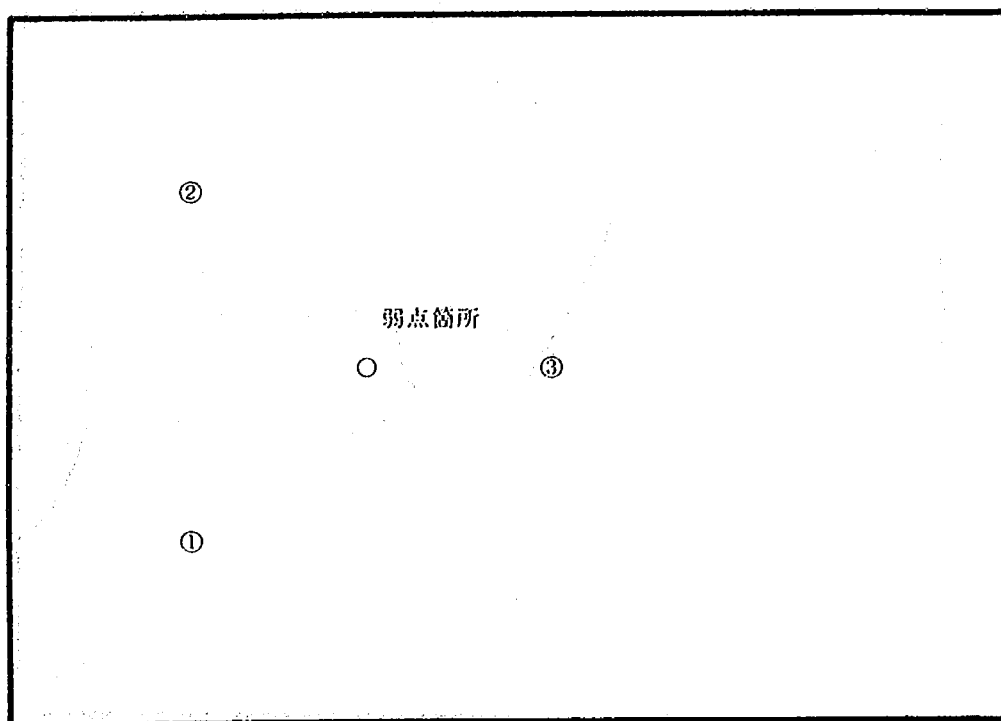


図-3.6.2(8) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース2.2)

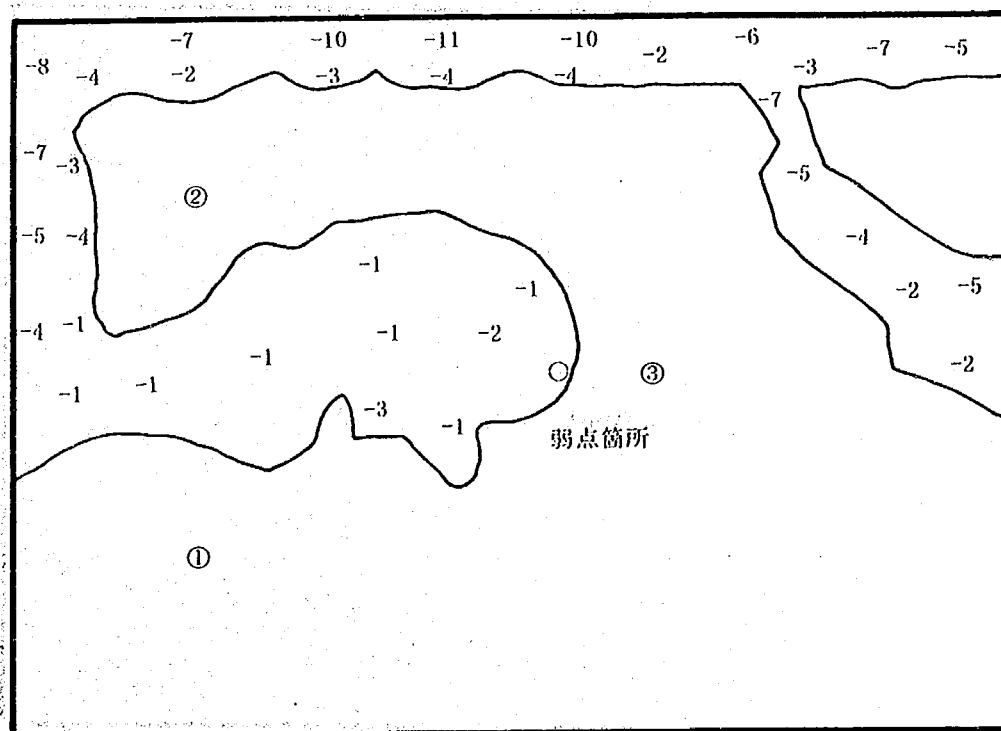
上
流



下
流

図-3.6.2(9) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース23)

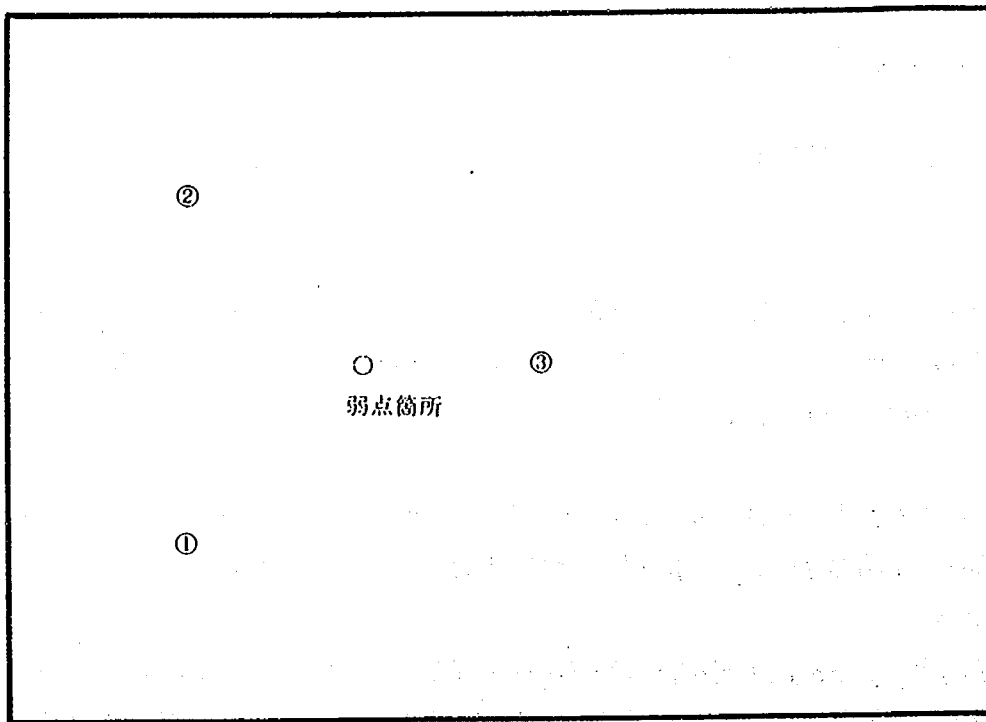
上
流



下
流

図-3.6.2(10) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース24)

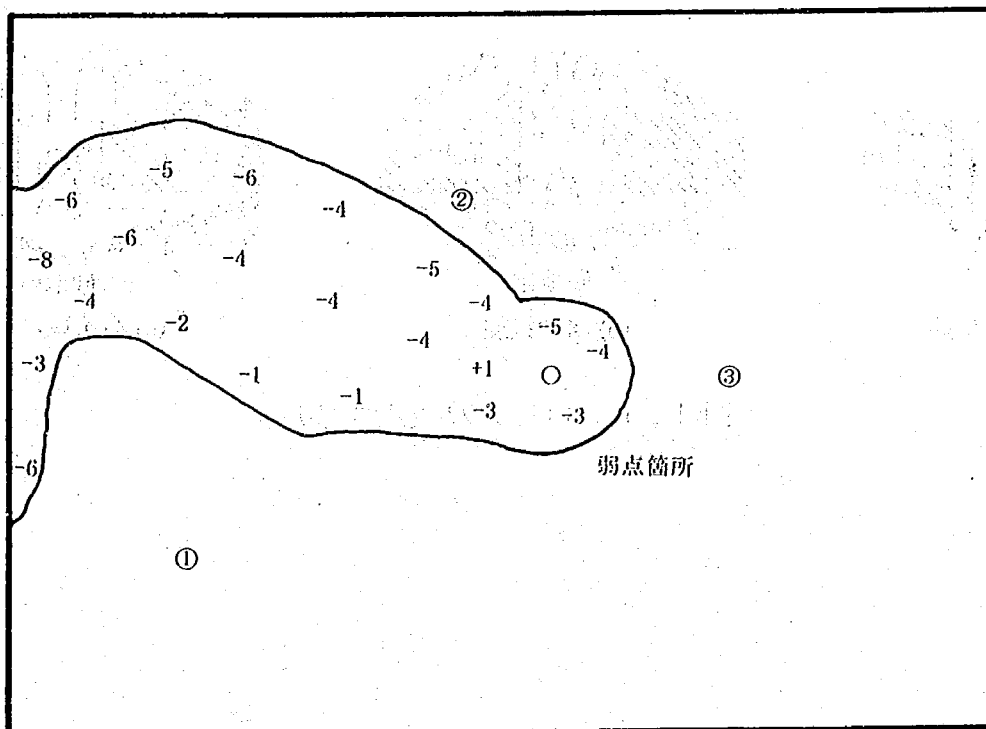
上
流



下
流

図-3.6.2(13) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース27)

上
流



下
流

図-3.6.2(14) 実験終了後の砂地盤の水みち観察 (ケース28)

4. 実験結果とその考察

4.1 パイピング現象の発生形態

実験結果よりパイピング破壊の発生に至る進行形態は、図-4.1.1に示すように(a)浮遊状態、(b)噴砂状態、(c)パイピング破壊の3段階に分けられる。

(a)浮遊状態

ある水位に達すると砂地盤からの浸透水の流れに対し、土粒子の水中重量と流れに対する抗力が釣り合い、土粒子が水中で浮遊状態となる。なお、この現象は水位差の増大に伴い、粒径の小さな粒子の上下運動から始まり、やがて全ての粒子が動き、浮遊状態となる。

(b)噴砂状態

水位差をさらに大きくすると弱点部で浮遊している土粒子が上昇を始め、弱点部の外へ流れだし、表土層と砂地盤の境界面に空洞部分が生じ、水位を上げてもしばらくは、この状態を繰り返す。

(c)パイピング破壊

さらに水位を増大させると弱点部回りにできた砂の堆積部を越えて砂が流出するようになる。これに伴い表土層と砂地盤との境界面の空洞部分がより拡大されて、地盤内の浸透流が空洞部分に集中し、空洞部分の流速が益々大きくなり、水みちが上流側へと発達してパイピング破壊に至る。

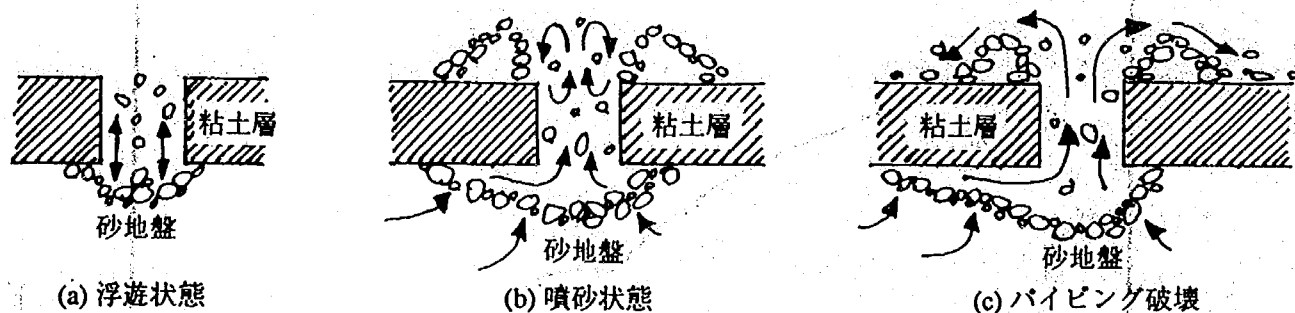


図-4.1.1 パイピング現象と進行状況

4.2 クリープ比による検討

パイピング破壊規準の1つとして、表-4.2.1に示すようなブライ(Bligh)あるいはレーン(Lane)のクリープ比が提案されている。ここでクリープ比の定義は、図-4.2.1に示すとおりである。これは、パイピング破壊を生じたダムについて、水位差に対するダム堤体下の浸透経路長の比を調べた結果に基づいている。

表-4.2.2に今回の実験で得られたパイピング破壊発生時のクリープ比を示す。なお、表中のクリープ比は、水位差と浸透経路長の比であり、ブライのクリープ比に対応する。また小型模型実験では、弱点箇所の大さや浸透経路長を変化させた場合も実験しているが、それらの影響を避けるため、表中では各試料に共通の試験条件である浸透経路長60cm、弱点箇所の径が5cmの場合についてとりまとめた。実験結果では、限界クリープ比は小型模型実験で1.4～1.8程度、大型模型実験で2.0～3.3程度となっており、大型模型実験では小型模型実験よりパイピングが発生しやすくなっている。また、これらの結果は、今回の地盤条件に相当するブライのクリープ比(12～15)や、水平方向の浸透経路長を1/3に評価しているレーンのクリープ比(5～7, すなわち水平方向の浸透経路長を1/3に評価しなければ15～21)と比較するとかなり小さい。

この原因として、ブライやレーンのクリープ比は、地盤と石積ダムの著しい剛性の差のため水みちが生じやすいことを反映していることや、スケール効果のため、同じクリープ比であってもダムの場合は堤防に比べて、地盤に働く水圧が大きいことなどが影響していると考えられる。したがって、堤防のパイピング破壊規準としてはより現実に即した規準を考える必要があるといえる。

表-4.2.1 地盤材料のクリープ比

材 料	クリープ比	
	ブライ	レーン
	Cc	Cw
非常に細かい砂あるいはシルト	18	8.5
細 砂	15	7.0
中 砂	—	6.0
粗 砂	12	5.0
細砂利	—	4.0
中砂利	9	3.5
グリ石を含む粗砂利	4～6	3.0
グリ石と砂利を少し含む玉石	—	2.5

〈ブライのクリープ比〉

$$C_c = L/H$$

$$= (2 \sum D + B)/H$$

〈レーンのクリープ比〉

$$C_w = [2 \sum D + (B/3)]/H$$

L: 浸透経路長

H: 水位差

B: ダム敷幅

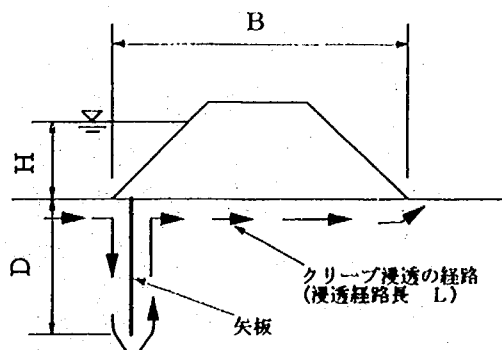


図-4.2.1 クリープ比の定義

表-4.2.2 パイピング破壊時のクリープ比

ケース	試料名	実験規模	クリープ比	ケース	試料名	実験規模	クリープ比
1	霞ヶ浦(麻生)	小型(L=60)	1.75	20	玉造	大型(L=300)	2.00
4	江戸川	小型(L=60)	1.76	21	鬼怒川	大型(L=300)	2.40
8	霞ヶ浦(美浦)	小型(L=60)	1.82	22	霞ヶ浦(麻生2)	大型(L=300)	2.86
9	鬼怒川	小型(L=60)	1.43	23	利根川下流	大型(L=200)	—
10	利根川	小型(L=60)	1.40	24	長良川	大型(L=300)	2.86
15	霞ヶ浦(美浦)	大型(L=300)	2.50	25	霞ヶ浦(西の州)	大型(L=300)	1.62
16	鬼怒川	大型(L=300)	2.22	26	江戸崎	大型(L=200)	—
17	利根川	大型(L=300)	2.61	27	小貝川	大型(L=200)	—
18	江戸川	大型(L=200)	—	28	渡良瀬川	大型(L=300)	3.00
19	霞ヶ浦(麻生1)	大型(L=300)	1.87				

4.3 限界実流速による検討

クリープ比以外のパイピング破壊規準として、限界実流速が挙げられる。なお、限界実流速とは、砂地盤中の間隙を流れる流速を意味し以下のように求める。

$$V_q = \frac{v}{1 - (1 - n)^{2/3}} \quad v = \frac{Q_f}{A} \quad (1)$$

V_q : 限界実流速 n : 間隙率 A : 面積 Q_f : パイピング発生時の砂地盤からの流出量

図-4.3.1に、これまで提案されている限界実流速もしくは限界流速と粒径の関係図に今回の実験結果を加えたものを示す。まず、今回の実験結果は、これまでに提案されている従来の小型模型実験結果と比較して、限界実流速はやや小さくなっており、実験規模を大きくすることで、パイピング破壊が発生しやすくなっていることがわかる。

また、ジャスティンの限界流速は、今回の実験結果と比較してかなりパイピング破壊が発生しにくくなっている。これは、ジャスティンの限界流速は、単一粒子が鉛直上昇流によって浮揚する限界時の流速を理論的に求めたもので、弱点箇所付近の局所的な流速を表していると考えられるのに対し、今回の実験結果は、地盤の平均的な流れに着目していることによると思われる。

しかし、実際の設計を考えると、弱点箇所付近の局所的な流速を予測することは極めて困難なことから、二次元浸透流解析を前提とした地盤の平均的な流速を考える今回のような整理の仕方が、現実的なパイピング破壊規準としてより有効であると思われる。

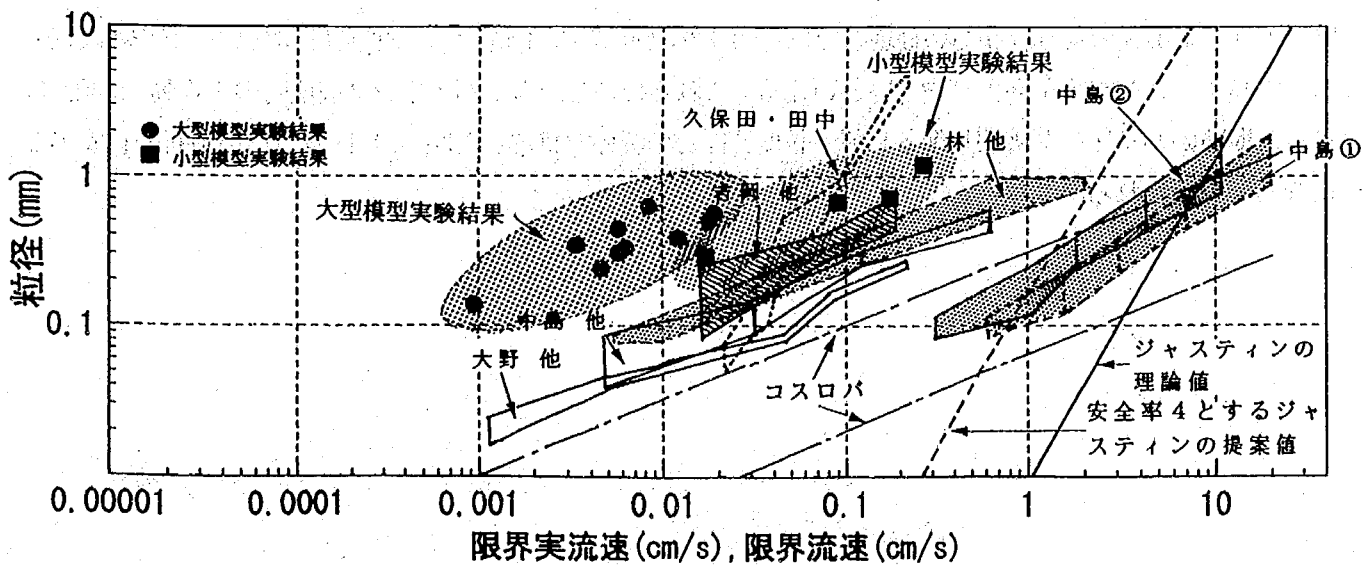


図-4.3.1 50%粒径と限界実流速の関係

4.4 パイピング破壊時の平均動水勾配 i に及ぼす粒度特性の影響

前述のとおり、ブライやレーンのクリープ比は、堤防基礎地盤のパイピング破壊規準として用いるには、かなり大きな安全率をみており、ジャスティンの限界流速は、逆に危険側の評価につながる場合もあることがわかった。そこで、今回の実験結果において、より実際的な堤防基礎地盤のパイピング破壊規準を検討するため、まず、ブライのクリープ比の逆数である平均動水勾配 i に着目して粒度特性との関係を調べた。なお、実際の河川現場でも過去の漏水等で表層に弱点箇所が形成されているため、平均動水勾配 i が0.2~0.6程度でパイピングが観測されており、模型を大型化することで現地再現性がより高くなっていると考え、実験結果は大型模型実験結果を対象として検討した。

(1) 実験結果

図-4.4.1に、50%粒径とパイピング破壊時の平均動水勾配 i の関係を示す。これより、50%粒径が0.3~0.4mm付近でパイピング破壊が発生しやすくなっている。しかし、細粒分を多く含む場合(CASE19)や最大粒径の大きい場合(CASE25)は、パイピング破壊が発生しにくく、50%粒径と平均動水勾配との間に一義的な関係は見られない。

また、図-4.4.2は細粒分含有率とパイピング破壊時の平均動水勾配 i の関係を示す。パイピング破壊が発生した試料は、細粒分が10%以下であり、逆に15%以上細粒分を含むとパイピング破壊に至っていない。これより、粘性抵抗に寄与する細粒分含有率もパイピング破壊の重要な影響要因であることがわかる。

さらに、均等係数とパイピング破壊時の平均動水勾配 i の関係を図-4.4.3に示す。パイピング破壊に至る場合は、均等係数が大きくなるとパイピング破壊時の平均動水勾配 i もそれに伴い大きくなる。また、本実験の動水勾配では、均等係数が12より大きい場合は、パイピング破壊が発生しておらず、均等係数もパイピング破壊の発生に大きく影響していると考えられる。

以上より、本実験のようなゆるい砂地盤では、50%粒径が0.3~0.4mm程度、細粒分は10%以下、均等係数が5以下でパイピング破壊が発生しやすいといえる。これらのことから、パイピング破壊時の平均動水勾配 i に着目した堤防のパイピング破壊規準として、粒度特性との関係で整理した図-4.4.1~4.4.3が判断の目安の1つになると考えられる。

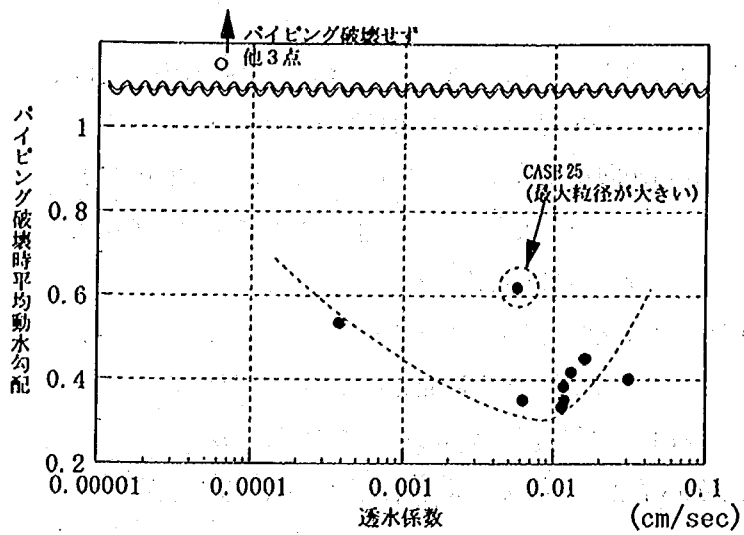


図-4.4.1 50%粒径と平均動水勾配の関係

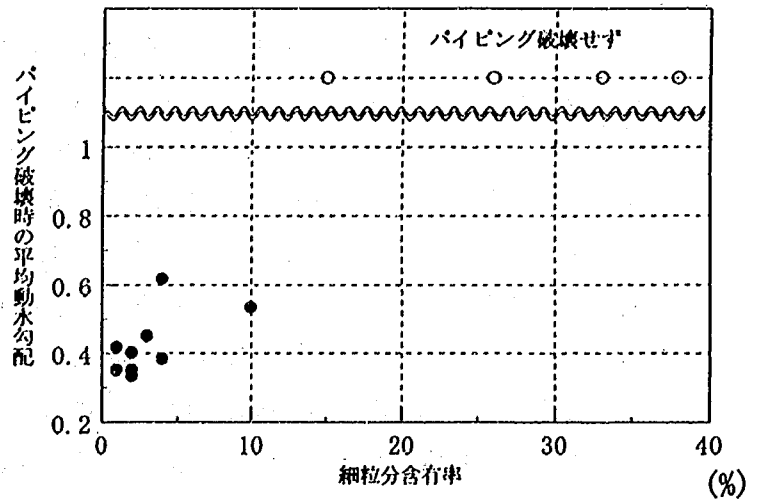


図-4.4.2 砂粒分含有率と平均動水勾配の関係

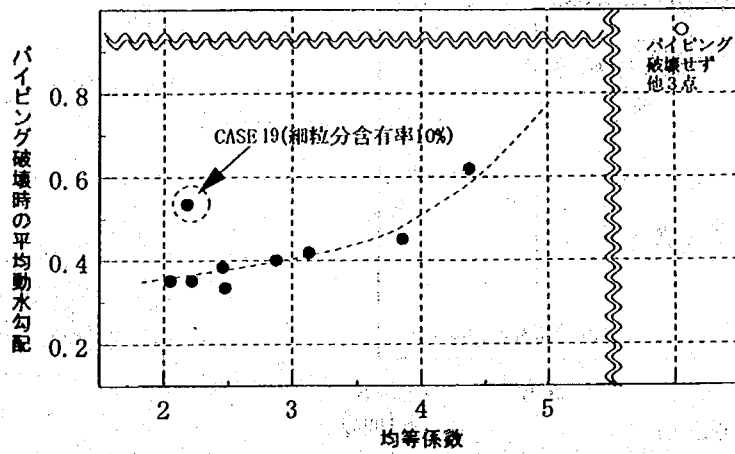


図-4.4.3 均等係数と平均動水勾配の関係

(2) 考察

図-4.4.4にパイピング破壊時の平均動水勾配と透水係数の関係を示す。一般に、パイピング破壊の発生は、地盤の透水力と土粒子の抵抗力の釣合いによって決定されるが、図によると、透水係数が $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ より大きいと、パイピング破壊時の平均動水勾配も幾分増加する傾向が見られる。これは、透水係数が $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ より大きいと、地盤内流速も増加するが、50%粒径や最大粒径が大きく、土粒子の移動に対する抵抗力も増加するため、パイピング破壊時の平均動水勾配が大きくなるものと考えられる。

また、逆に透水係数が $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 以下では、パイピング破壊が発生していないことがわかる。パイピング破壊に至らない試料は、細粒分含有率が高く、パイピング破壊を起こすのに十分な地盤内流速が生じていないことや粘性の増加に伴い抵抗力が増大するために、パイピング破壊に至らなかったと考えられる。

このように、粒度と密接な関係にある地盤の透水係数がパイピング抵抗を大きく支配していることがわかる。

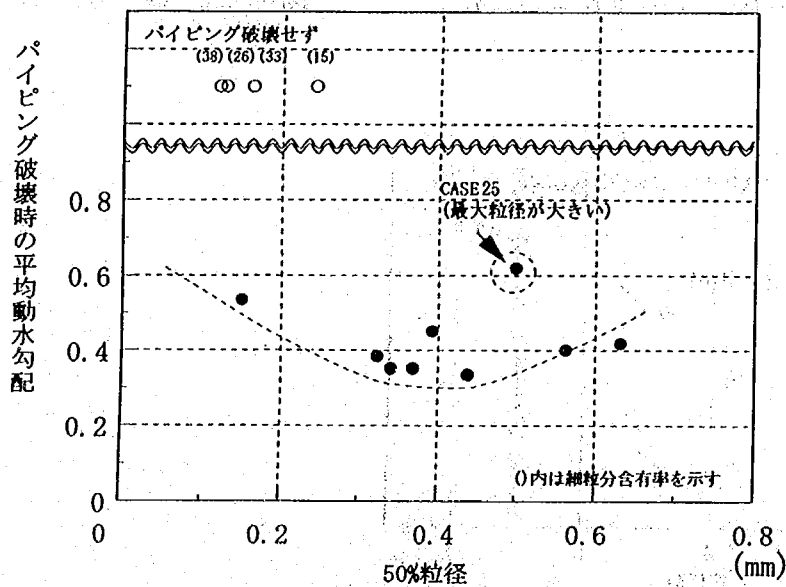


図-4.4.4 透水係数と平均動水勾配の関係

4.5 浸透流解析による検討

実際のパイピング破壊を予測するためには、実現場の土層構成の複雑さや対策工の効果を評価できることが望ましい。そこで、それらの条件を再現することが可能な二次元の非定常浸透流解析を行い、噴砂時の弱点箇所の要素での局所的な動水勾配 i^* に着目した検討を行った。なお、解析に用いた透水係数は、噴砂時の砂地盤からの流出量から同定した。

図4.5.1、図4.5.2に、噴砂時の局所的な動水勾配 i^* と50%粒径および均等係数の関係を示す。また、これらの図には(2)式から求まるテルツァギーの限界動水勾配 i_c も併記している。

$$i^* = \frac{G_s - 1}{1 + e_0} \quad (2)$$

G_s : 土粒子の比重、 e_0 : 間隙率

これらの図を見ると、限界動水勾配 i_c は、粒度に関わらず1.0付近に集まっているのに対し、局所的な動水勾配 i^* は、粒度の影響を反映していることがわかる。

すなわち、図-4.5.2において最大粒径が大きい場合(CASE25)や細粒分を10%程度含む場合(CASE19)を除くと、均等係数が3以下の試料では、局所的な動水勾配 i^* が0.7~0.9程度、均等係数が3より大きければ1.1~1.2程度で噴砂に至っている。これは、大小粒のかみ合わせや細粒分による粘性抵抗が影響しているものと考えられる。

前述したように、実際のパイピング破壊の予測には、様々な地盤条件や各種対策工の効果を考慮しなければならないが、前項で述べたパイピング破壊時の平均動水勾配に着目する方法では、ある程度の判断の目安は得られるが、上記の諸条件を考慮した詳細な検討を行うには限界がある。

それに対し、局所的な動水勾配 i^* は地盤の複雑な土層構成や対策工の効果を考慮でき、地盤の粒度特性と併せて検討することで、パイピング破壊予測に関して重要な指標となりうる可能性があると考えられる。

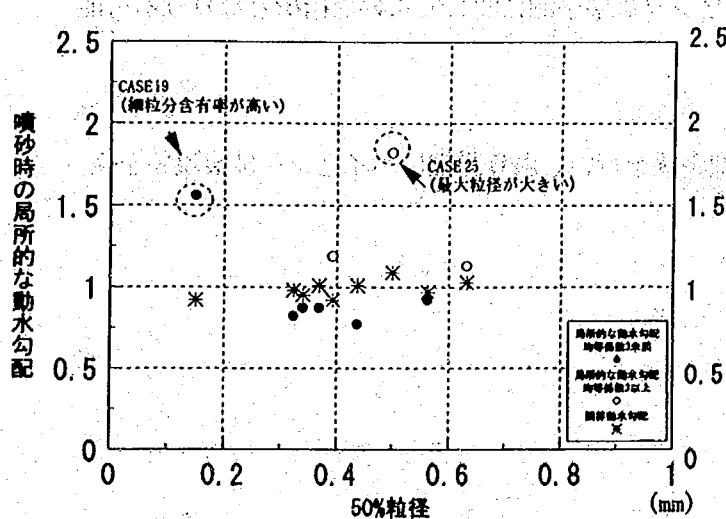


図-4.5.1 50%粒径と局所的な動水勾配の関係

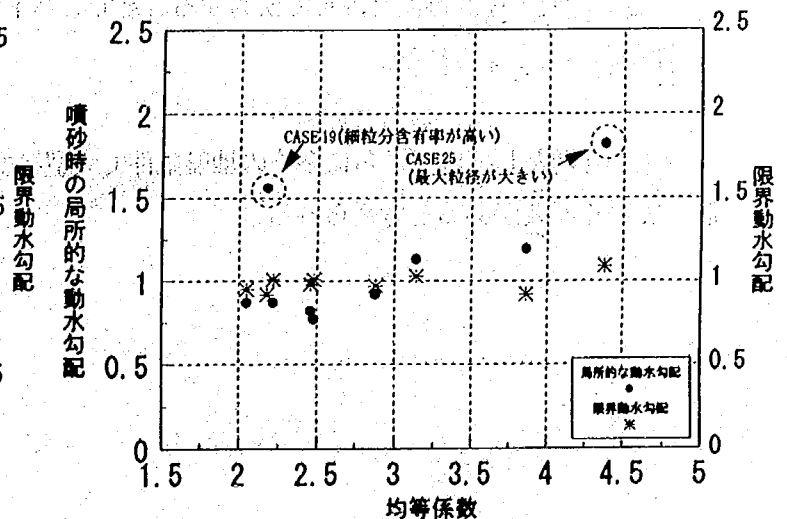


図-4.5.2 均等係数と局所的な動水勾配の関係

5.まとめ

本研究では、水平方向浸透流によるパイピング現象について、小型模型実験及び大型模型実験を行い、パイピング現象の定性的な傾向及び従来の理論値、実験値との適合性について検討した。また、基礎地盤の土質特性がパイピング抵抗に及ぼす影響や浸透流解析から求まる局所的な動水勾配を用いた評価方法について考察を加え、以下のことを明らかにした。

- (1) クリープ比や限界実流速による従来のパイピング破壊規準と今回の実験結果を比較したところ、パイピング破壊時のクリープ比は2～3程度でありブライやレーンの提案しているクリープ比と比較して、かなり小さい結果であり、堤防の基礎地盤のパイピング破壊規準として用いるにはかなり大きな安全率をみていると考えられる。また、今回の実験で得られた限界実流速は、ジャスティンの限界流速など従来から提案されている限界実流速と比べてやや小さく、危険側の評価につながる場合もあることがわかった。
- (2) 模型を大型化することによって小型模型実験よりパイピングが発生しやすくなっているが、実験結果より得られた平均動水勾配は、河川現場で観測されている平均動水勾配とほぼ一致しており、モデルを大型化することで現地の再現性がより高くなっていると考えられる。
- (3) 本実験のようにゆるい地盤では、50%粒径が0.3～0.4mm、細粒分が10%以下で均等係数5以下の場合に、パイピング破壊が発生しやすく、平均動水勾配が0.33～0.45程度で破壊に至った。
これより、パイピング破壊時の平均動水勾配に着目した堤防のパイピング破壊規準として、粒度特性との関係で整理する方法は、パイピング破壊発生予測の1つの目安となりうると考えられる。
- (4) 本実験では、地盤の透水係数が 1.0×10^{-4} cm/s以下では、パイピング破壊が発生せず、また 1.0×10^{-2} cm/sより大きいと、パイピング破壊時の平均動水勾配も増加する傾向が見られた。このように、粒度と密接な関係にある地盤の透水係数はパイピング抵抗を大きく支配していることがわかった。
- (5) 浸透流解析から求まる局所的な動水勾配は、最大粒径が大きい場合や細粒分を10%程度含む場合を除き、均等係数と有意な相関が認められた。局所的な動水勾配は、地盤の複雑な土層構成や対策工の効果を考慮でき、地盤の粒度特性と併せて検討することで、パイピング破壊予測に関して重要な指標となりうる可能性があると考えられる。

今後の課題としては、さらに多くの地盤条件で大型模型実験を行い、より詳細にパイピング破壊現象を検討していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 山田哲也、三木博史、佐藤正博：水平方向の浸透流による砂地盤のパイピング現象について、第29回土質工学研究発表会、土質工学会, pp. 1903-1904, 1994. 6
- 2) 三木博史、佐藤正博、山田哲也：砂地盤のパイピング破壊に関する大型模型実験、第29回土質工学研究発表会、pp. 1905-1906
- 3) 三木博史、山田哲也、藤井厚企、野口典孝：砂地盤のパイピング破壊に関する大型模型実験、第50回年次学術講演会講演概要集第3部(A), PP. 158~159. 1995. 9
- 4) 三木博史、山田哲也、藤井厚企、野口典孝：堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する考察、土木技術資料 Vol137. No12. pp40-45

巻末付録－ 1

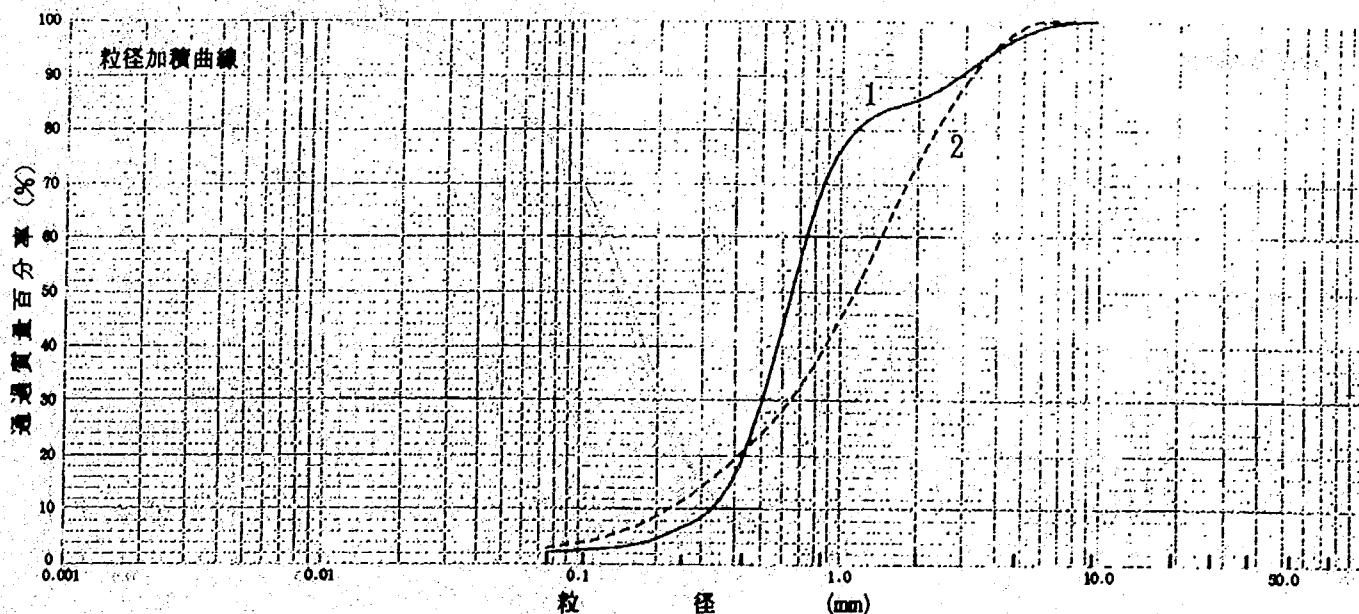
各試験ケースにおける砂地盤の粒度試験結果

調査件名

試験年月日

試験者

試料番号 (深さ)	1 CASE 1, 2, 11, 13 霞ヶ浦(麻生)産		2 CASE 10 利根川産		試料番号 (深さ)	1 CASE 1, 2, 11, 13 霞ヶ浦(麻生)産		2 CASE 10 利根川産	
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %		粗 礫 分 %	0.0	0.0	0.0
ふるい	75		75		中 礫 分 %	3.2	1.9		
	53		53		細 礫 分 %	11.5	24.7		
	37.5		37.5		粗 砂 分 %	66.3	53.0		
	26.5		26.5		細 砂 分 %	16.8	17.5		
	19		19		シルト分 %	2.2	2.9		
	9.5	100.0	9.5	100.0	粘土分 %	85.3	73.4		
	4.75	96.8	4.75	98.1	2mmふるい通過質量百分率 %	19.0	20.4		
	2	85.3	2	73.4	0.425mmふるい通過質量百分率 %	2.2	2.9		
	0.85	68.9	0.85	38.8	0.075mmふるい通過質量百分率 %				
	0.425	19.0	0.425	20.4					
析	0.250	6.8	0.250	11.6	最大粒径 mm	9.5000	9.5000		
	0.106	2.5	0.106	4.0	60 % 粒径 D_{60} mm	0.7412	1.4424		
	0.075	2.2	0.075	2.9	50 % 粒径 D_{50} mm	0.6493	1.1359		
					30 % 粒径 D_{30} mm	0.5025	0.6406		
					10 % 粒径 D_{10} mm	0.3244	0.2202		
					均等係数 U_c	2.28	6.55		
					曲率係数 U_c'	1.05	1.29		
					土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.717	2.771		
					使用した分散剤				
					溶液濃度, 溶液添加量				
沈降析					20% 粒径 D_{20} mm	0.4316	0.4166		
					クレーガーによる透水係数	5.32E-02	4.93E-02		



0.005	0.075	0.425	2	4.75	19	75
粘土	シルト	細砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫

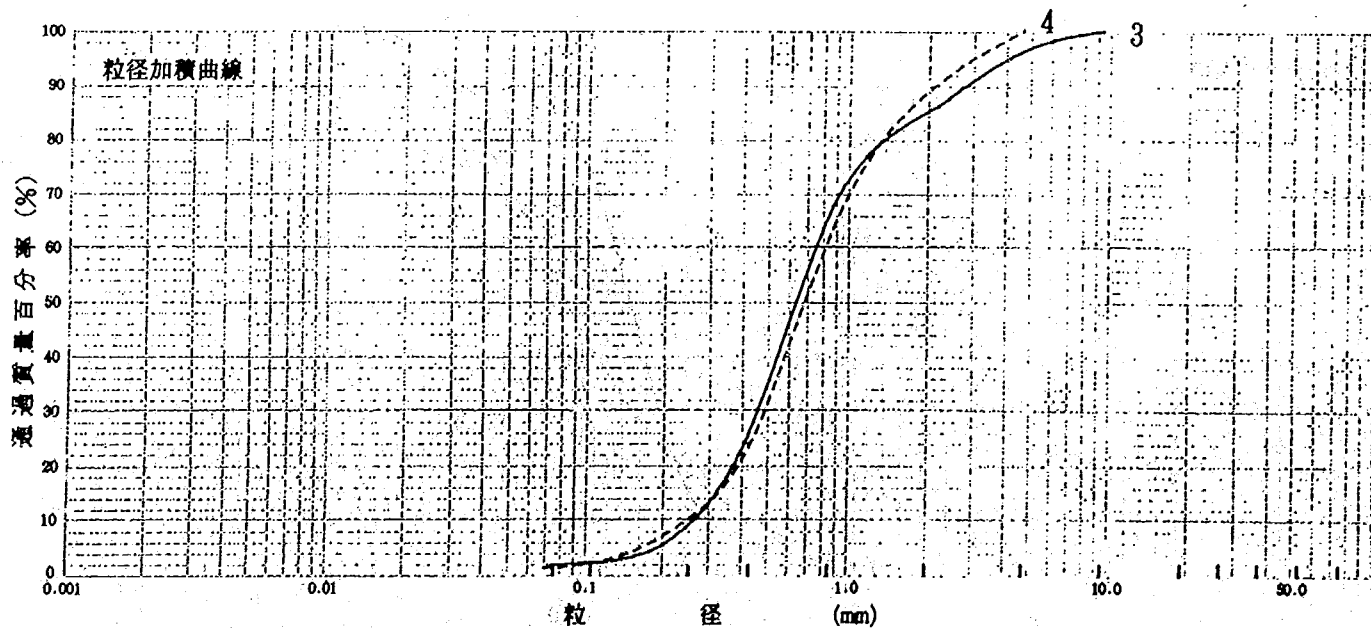
特記事項

調査件名

試験年月日

試験者

試料番号 (深さ)	3 CASE 8 霞ヶ浦(美浦)産		4 CASE 9 鬼怒川産		試料番号 (深さ)	3 CASE 8 霞ヶ浦(美浦)産	4 CASE 9 鬼怒川産
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %			
ふるい 分析	75		75		粗 礫 分 %	0.0	0.0
	53		53		中 礫 分 %	3.8	0.0
	37.5		37.5		細 礫 分 %	11.4	11.5
	26.5		26.5		粗 砂 分 %	59.4	65.5
	19		19		細 砂 分 %	23.7	21.8
	9.5	100.0	9.5		シルト分 %	1.7	1.2
	4.75	96.2	4.75	100.0	粘土分 %		
	2	84.8	2	88.5	2mmふるい通過質量百分率 %	84.8	88.5
	0.85	65.8	0.85	61.7	0.425mmふるい通過質量百分率 %	25.4	23.0
	0.425	25.4	0.425	23.0	0.075mmふるい通過質量百分率 %	1.7	1.2
	0.250	8.9	0.250	10.1	最大粒径 mm	9.5000	4.7500
	0.106	2.1	0.106	2.0	60 % 粒径 D_{60} mm	0.7599	0.8233
	0.075	1.7	0.075	1.2	50 % 粒径 D_{50} mm	0.6411	0.6901
沈 降 分 析					30 % 粒径 D_{30} mm	0.4627	0.4902
					10 % 粒径 D_{10} mm	0.2651	0.2488
					均等係数 U_c	2.87	3.31
					曲率係数 U'_c	1.06	1.17
					土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.735	2.721
					使用した分散剤		
					溶液濃度、溶液添加量		
					20% 粒径 D_{20} mm	0.3745	0.3917
					クレーガーによる透水係数	3.84E-02	4.28E-02



0.006	0.075	0.425	2	4.75	19	75
粘土	シルト	細砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫

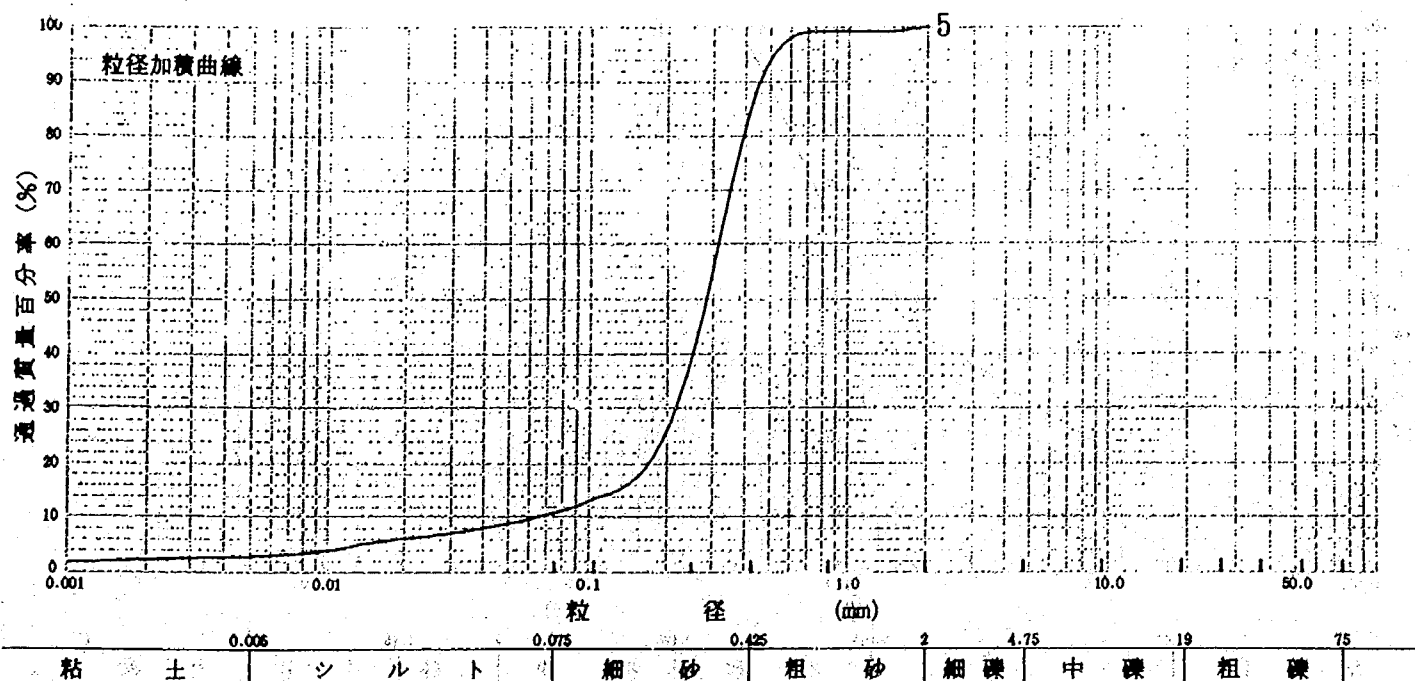
特記事項

調査件名

試験年月日

試験者

試料番号 (深さ)	5 CASE 3~7, 12 江戸川産		試料番号 (深さ)	5 CASE 3~7, 12 江戸川産	
ふるい	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗 礫 分 %
	75		75		0.0
	53		53		0.0
	37.5		37.5		0.0
	26.5		26.5		13.7
	19		19		75.3
	9.5		9.5		8.1
	4.75		4.75		2.9
	2	100.0	2		2mmふるい通過質量百分率 %
	0.85	98.9	0.85		100.0
	0.425	86.3	0.425		0.425mmふるい通過質量百分率 %
	0.250	40.0	0.250		86.3
	0.106	13.9	0.106		0.075mmふるい通過質量百分率 %
	0.075	11.0	0.075		11.0
沈降	0.0540	9.3			最大粒径 mm
	0.0383	8.0			2.0000
	0.0243	6.6			60 % 粒径 D_{60} mm
	0.0141	5.3			0.3119
	0.0100	4.0			50 % 粒径 D_{50} mm
	0.0071	3.3			0.2805
	0.0035	2.7			30 % 粒径 D_{30} mm
	0.0014	2.0			0.2133
					10 % 粒径 D_{10} mm
					0.0624
析					均等係数 U_c
					5.00
					曲率係数 U'_c
					2.34
					土粒子の密度 ρ_s g/cm ³
					2.722
					使用した分散剤
					溶液濃度, 溶液添加量
					20% 粒径 D_{20} mm
					0.1664
					クレーガーによる透水係数
					5.66E-03



特記事項

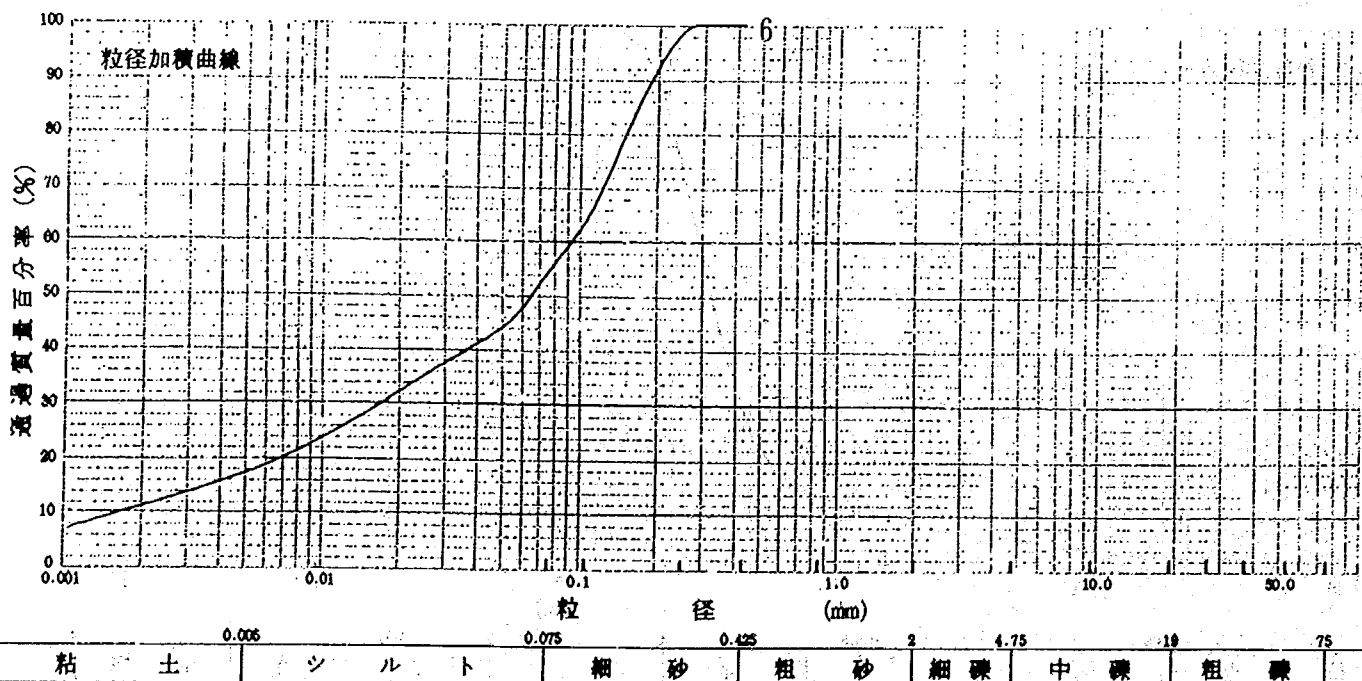
PAGE93

調査件名

試験年月日

試験者

試料番号 (深さ)	6 CASE 14 小貝川産				試料番号 (深さ)		6 CASE 14 小貝川産
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗 礫 分 %		0.0
ふるい	75		75		中 礫 分 %		0.0
	53		53		細 礫 分 %		0.0
	37.5		37.5		粗 砂 分 %		0.0
	26.5		26.5		細 砂 分 %		45.6
	19		19		シルト分 %		37.0
	9.5		9.5		粘土分 %		17.4
	4.75		4.75		2mmふるい通過質量百分率 %		100.0
	2		2		0.425mmふるい通過質量百分率 %		100.0
	0.85		0.85		0.075mmふるい通過質量百分率 %		54.4
	0.425	100.0	0.425				
析	0.250	98.8	0.250		最大粒径 mm		0.4250
	0.106	64.2	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm		0.0923
	0.075	54.4	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm		0.0647
	0.0581	47.1			30 % 粒径 D_{30} mm		0.0167
	0.0415	41.6			10 % 粒径 D_{10} mm		0.0016
	0.0265	36.0			均等係数 U_c		57.69
	0.0155	29.0			曲率係数 U_c'		1.89
	0.0110	24.9			土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		2.701
	0.0078	21.2			使用した分散剤		
	0.0039	15.6			溶液濃度, 溶液添加量		
析	0.0016	10.0			20% 粒径 D_{20} mm		0.0069
					クレーガーによる透水係数		5.85E-06



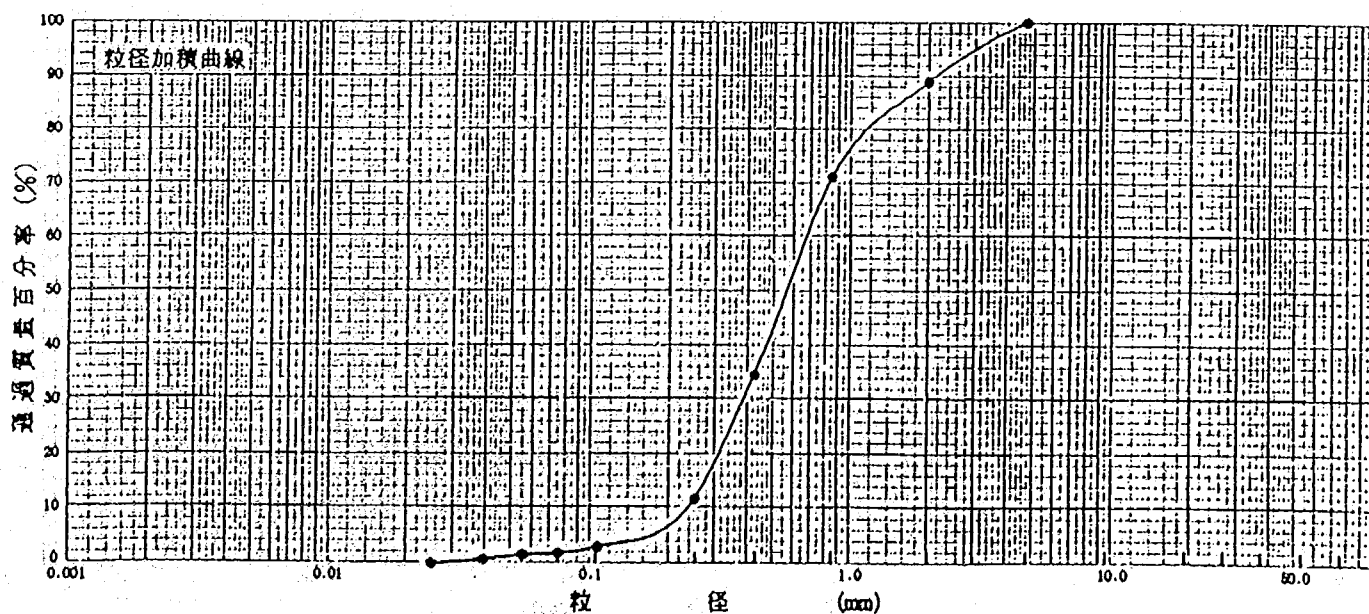
特記事項

調査件名 パイピング大型模型実験

試験年月日 平成 5 年 9 月

試験者 松井 孝夫

試料番号 (深さ)	CASE 15 霞ヶ浦				試料番号 (深さ) m~m		
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗 礫 分 %	0	
ふ ろ い 分 析	75		75		中 礫 分 %	0	
	53		53		細 礫 分 %	11	
	37.5		37.5		粗 砂 分 %	54	
	26.5		26.5		細 砂 分 %	33	
	19		19		シルト分 %	2	
	9.5		9.5		粘土分 %	0	
	4.75	100.0	4.75		2mmふろい通過質量百分率 %	89	
	2	88.9	2		0.425mmふろい通過質量百分率 %	35	
	0.85	71.2	0.85		0.075mmふろい通過質量百分率 %	2	
	0.425	34.7	0.425				
	0.250	11.9	0.250		最大粒径 mm	4.75	
	0.106	3.1	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm	0.670	
	0.075	1.9	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm	0.563	
					30 % 粒径 D_{30} mm	0.385	
沈 降 分 析	0.0547	1.6			10 % 粒径 D_{10} mm	0.233	
	0.0388	0.8			均等係数 U_c	2.88	
	0.0245	0.0			曲率係数 U'_c	0.947	
					土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		
					使用した分散剤		
					溶液濃度, 溶液添加量		



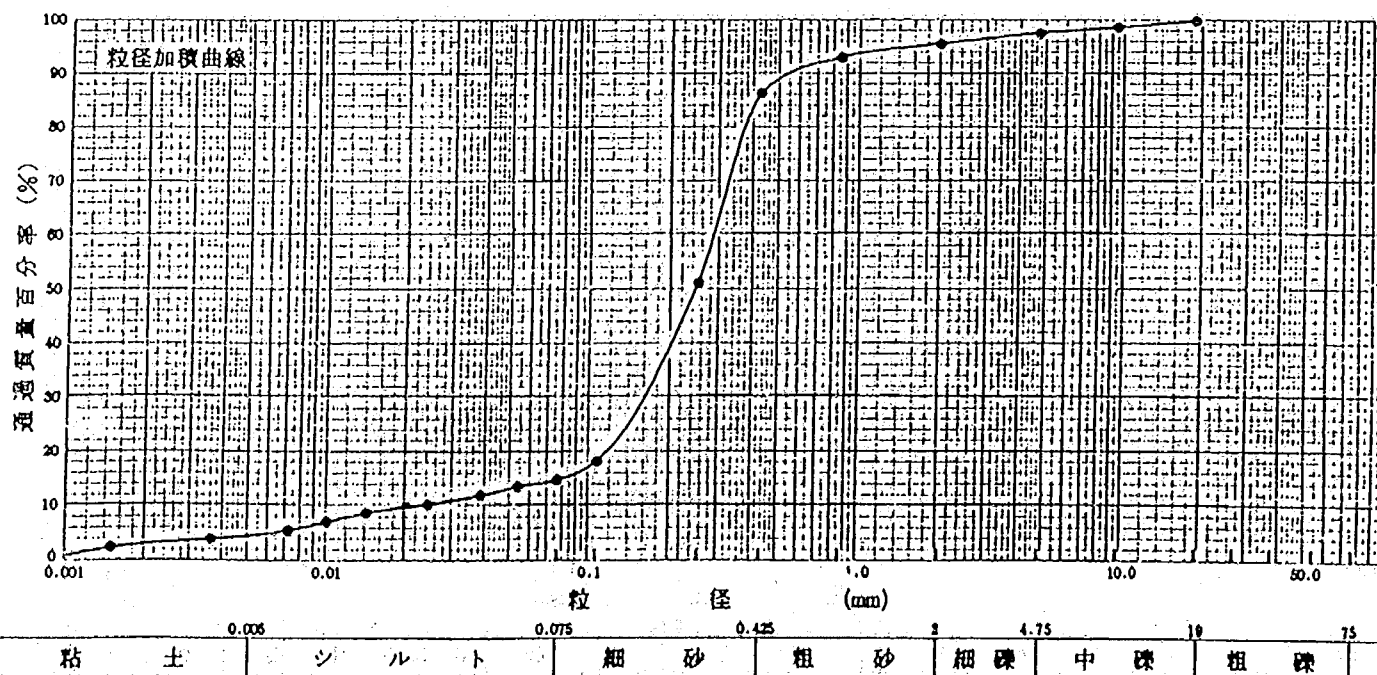
特記事項

調査件名 パイピング大型模型実験

試験年月日 平成 5 年 9 月

試験者 松井 孝夫

試料番号 (深さ)	CASE 18 江戸川				試料番号 (深さ) m~m		
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗 礫 分 %	0	
ふるい	75		75		中 礫 分 %	2	
	53		53		細 礫 分 %	2	
	37.5		37.5		粗 砂 分 %	10	
	26.5		26.5		細 砂 分 %	71	
	19	100.0	19		シルト 分 %	10	
	9.5	98.8	9.5		粘土 分 %	5	
	4.75	97.7	4.75		2mmふるい通過質量百分率 %	96	
	2	95.7	2		0.425mmふるい通過質量百分率 %	86	
	0.85	93.1	0.85		0.075mmふるい通過質量百分率 %	15	
	0.425	86.3	0.425				
分析	0.250	51.4	0.250		最大粒径 mm	19.0	
	0.106	18.4	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm	0.284	
	0.075	15.0	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm	0.243	
	0.0530	13.8			30 % 粒径 D_{30} mm	0.159	
	0.0377	12.2			10 % 粒径 D_{10} mm	0.0198	
	0.0240	10.6			均等係数 U_c	14.3	
	0.0140	8.9			曲率係数 U'_c	4.50	
	0.0099	7.3			土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		
	0.0071	5.7			使用した分散剤		
	0.0036	4.1			溶液濃度, 溶液添加量		
沈降分析	0.0015	2.4					



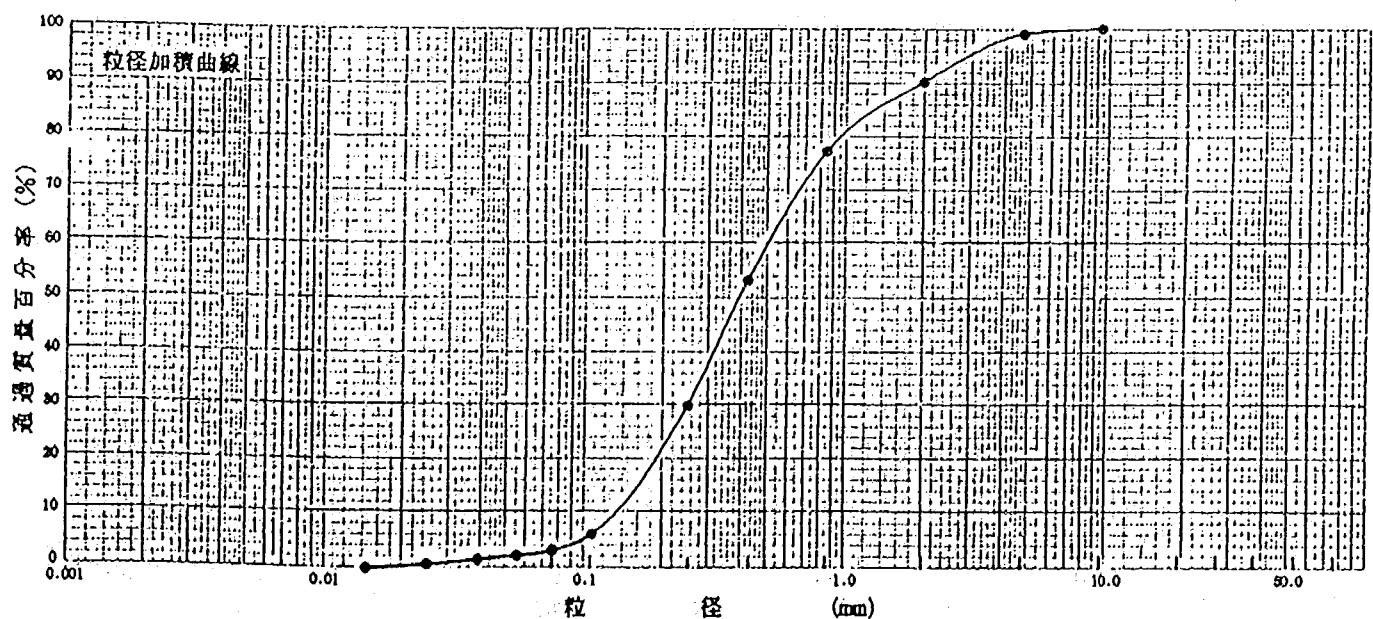
特記事項

調査件名 パイピング大型模型実験

試験年月日 平成 5 年 9 月

試験者 松井 孝夫

試料番号 (深さ)	CASE 16 鬼怒川				試料番号 (深さ) m-m		
	粒径 mm	通過質量百分率%	粒径 mm	通過質量百分率%	粗 礫 分 %	0	
ふるい 分析	75		75		中 礫 分 %	1	
	53		53		細 礫 分 %	9	
	37.5		37.5		粗 砂 分 %	37	
	26.5		26.5		細 砂 分 %	50	
	19		19		シルト分 %	3	
	9.5	100.0	9.5		粘土分 %	0	
	4.75	99.1	4.75		2mmふるい通過質量百分率 %	90	
	2	90.2	2		0.425mmふるい通過質量百分率 %	53	
	0.85	77.2	0.85		0.075mmふるい通過質量百分率 %	3	
	0.425	53.3	0.425				
	0.250	30.1	0.250		最大粒径 mm	9.50	
	0.106	6.2	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm	0.504	
	0.075	3.2	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm	0.393	
					30 % 粒径 D_{30} mm	0.249	
沈 降 分 析	0.0546	2.4			10 % 粒径 D_{10} mm	0.130	
	0.0387	1.6			均等係数 U_c	3.86	
	0.0246	0.8			曲率係数 U'_c	0.944	
	0.0142	0.0			土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		
					使用した分散剤		
					溶液濃度, 溶液添加量		



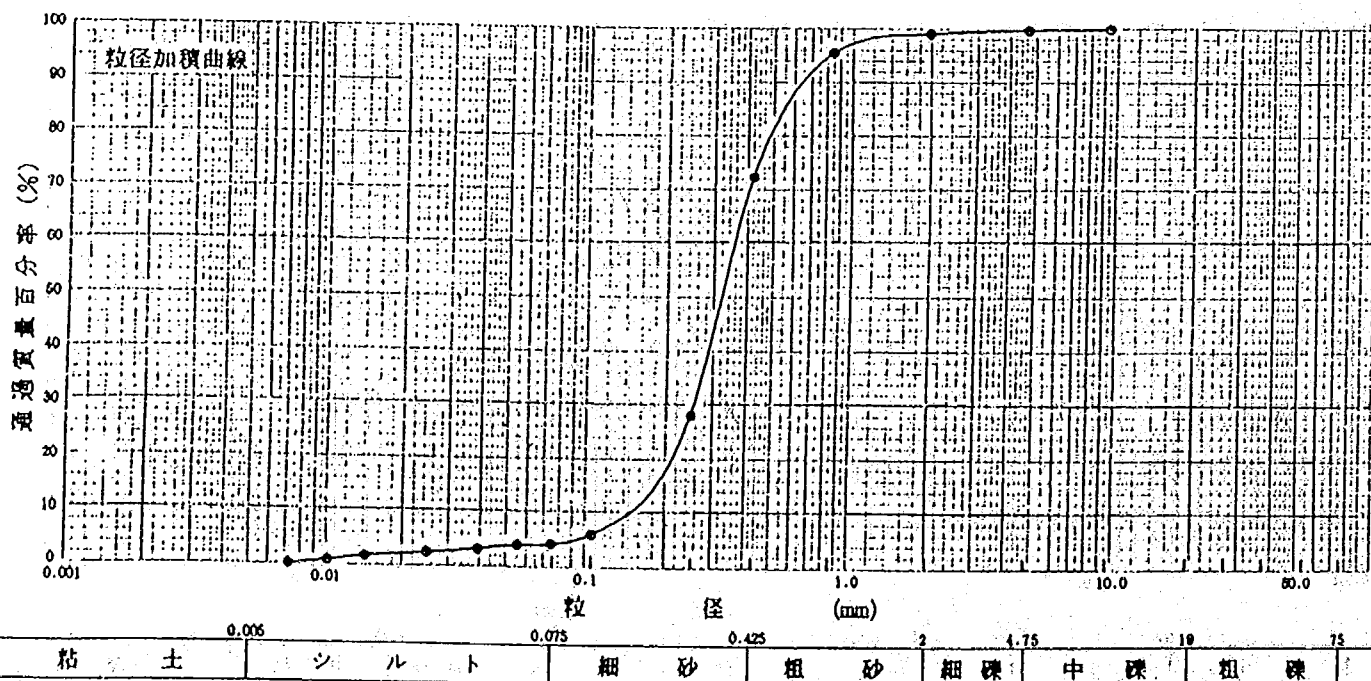
特記事項

調査件名 パイピング大型模型実験

試験年月日 平成 5 年 9 月

試験者 松井 孝夫

試料番号 (深さ)	CASE 17 利根川		試料番号 (深さ) m-m			
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗 礫 分 %	0
ふるい	75		75		中 礫 分 %	0
	53		53		細 礫 分 %	1
	37.5		37.5		粗 砂 分 %	27
	26.5		26.5		細 砂 分 %	68
	19		19		シルト分 %	4
	9.5	100.0	9.5		粘土分 %	0
	4.75	99.8	4.75		2mmふるい通過質量百分率 %	99
	2	99.1	2		0.425mmふるい通過質量百分率 %	72
	0.85	95.5	0.85		0.075mmふるい通過質量百分率 %	4
	0.425	72.4	0.425			
析	0.250	28.2	0.250		最大粒径 mm	9.50
	0.106	6.1	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm	0.361
	0.075	4.2	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm	0.324
	0.0551	4.1			30 % 粒径 D_{30} mm	0.257
	0.0391	3.2			10 % 粒径 D_{10} mm	0.147
	0.0248	2.4			均等係数 U_c	2.46
	0.0144	1.6			曲率係数 U'_c	1.24
	0.0102	0.8			土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	
	0.0072	0.0			使用した分散剤	
					溶液濃度, 溶液添加量	



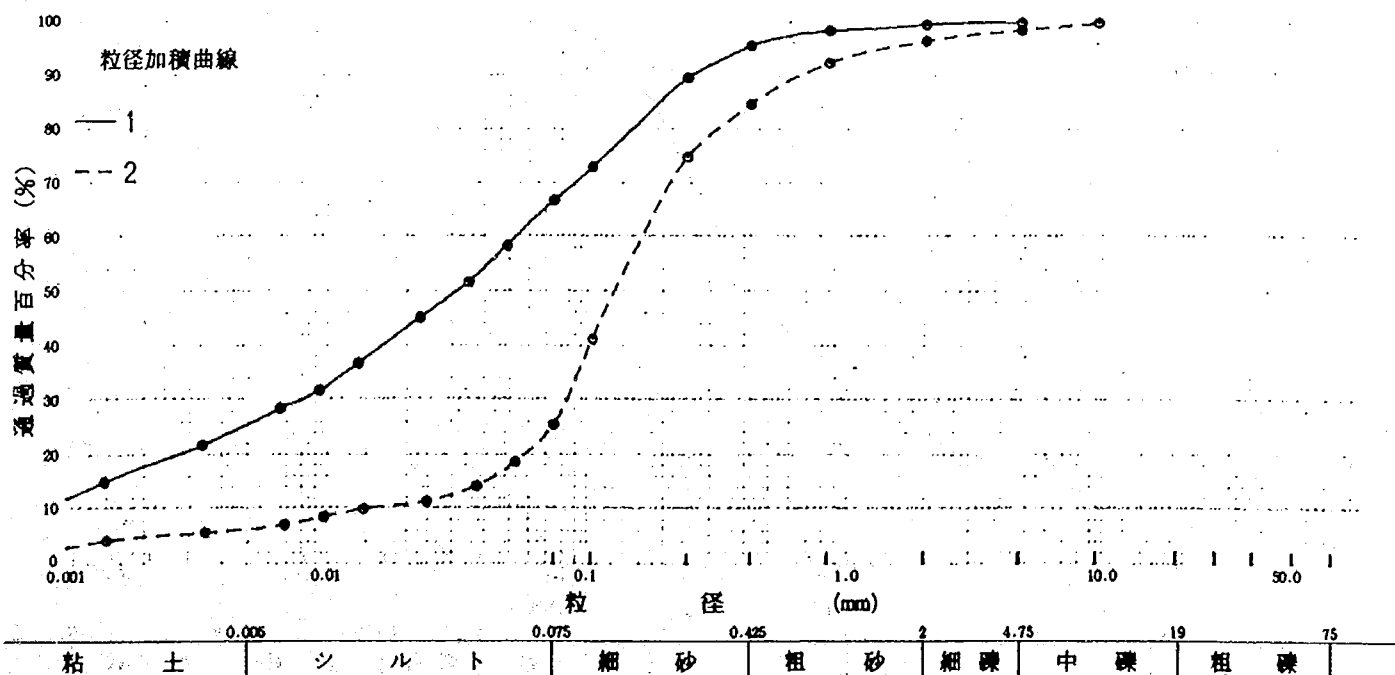
特記事項

調査件名

試験年月日 平成 6 年 12 月

試験者 松井 孝夫

試料番号 (深さ)	1 CASE 26 江戸川		2 江戸崎		試料番号 (深さ) m-m	1 CASE 26 江戸川		2 江戸崎	
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %					
ふるい	75		75		粗 礫 分 %	0	0		
	53		53		中 礫 分 %	0	1		
	37.5		37.5		細 礫 分 %	0	2		
	26.5		26.5		粗 砂 分 %	4	12		
	19		19		細 砂 分 %	29	59		
	9.5		9.5	100.0	シルト 分 %	42	20		
	4.75	100.0	4.75	98.7	粘土 分 %	25	6		
	2	99.7	2	96.6	2mmふるい通過質量百分率 %	100	97		
	0.85	98.5	0.85	92.5	0.425mmふるい通過質量百分率 %	96	85		
	0.425	95.6	0.425	84.8	0.075mmふるい通過質量百分率 %	67	26		
析	0.250	89.6	0.250	74.9	最大粒径 mm	4.75	9.50		
	0.106	73.0	0.106	41.4	60 % 粒径 D_{60} mm	0.0524	0.163		
	0.075	66.9	0.075	25.7	50 % 粒径 D_{50} mm	0.0313	0.129		
	0.0488	58.5	0.0527	18.7	30 % 粒径 D_{30} mm	0.0079	0.0834		
	0.0350	51.9	0.0376	14.4	10 % 粒径 D_{10} mm	—	0.0135		
	0.0225	45.2	0.0240	11.5	均等係数 U_c	—	12.0		
	0.0132	36.8	0.0139	10.1	曲率係数 U'_c	—	3.16		
	0.0094	31.8	0.0098	8.7	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³				
	0.0067	28.4	0.0070	7.2	使用した分散剤	特殊高分子化合物	特殊高分子化合物		
	0.0034	21.7	0.0035	5.8	溶液濃度, 溶液添加量	(ボイズ530)	(ボイズ530)		
沈降	0.0014	15.1	0.0014	4.3					



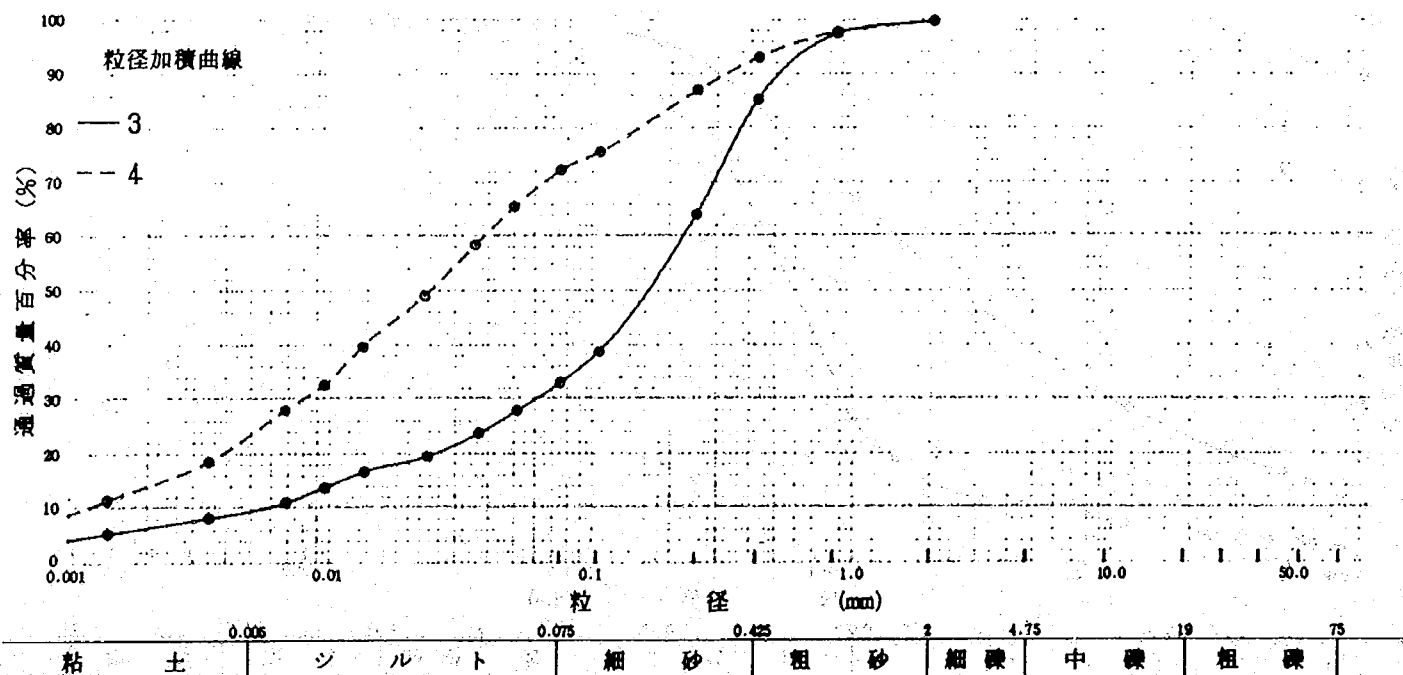
特記事項

調査件名

試験年月日 平成 6 年 12 月

試験者 松井 孝夫

試料番号 (深さ)	3 CASE 27 小貝川		4 赤土 (江戸崎産)		試料番号 (深さ) m~m		3 CASE 27 小貝川	4 赤土 (江戸崎産)
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	粗 礫 分 %	中 礫 分 %	0	0
ふる い 分 析	75		75		細 礫 分 %	粗 砂 分 %	0	0
	53		53		細 砂 分 %	シルト 分 %	0	0
	37.5		37.5		粘土 分 %	2mm 以下の通過質量百分率 %	14	7
	26.5		26.5		0.425mm 以下の通過質量百分率 %	0.075mm 以下の通過質量百分率 %	53	20
	19		19				23	49
	9.5		9.5				10	24
	4.75		4.75				100	100
	2	100.0	2	100.0			86	93
	0.85	97.8	0.85	98.1			33	73
	0.425	85.7	0.425	93.4				
	0.250	64.3	0.250	87.3	最大粒径 mm		2.00	2.00
	0.106	39.1	0.106	75.9	60 % 粒径 D_{60} mm		0.221	0.0379
	0.075	33.4	0.075	72.5	50 % 粒径 D_{50} mm		0.163	0.0237
					30 % 粒径 D_{30} mm		0.0589	0.0078
沈 降 分 析	0.0515	28.2	0.0501	65.8	10 % 粒径 D_{10} mm		0.0054	0.0011
	0.0368	24.0	0.0358	58.7	均等係数 U_c		40.8	33.3
	0.0235	19.8	0.0230	49.3	曲率係数 U_c'		2.88	1.42
	0.0137	16.9	0.0134	39.9	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³			
	0.0097	14.1	0.0096	32.9	使用した分散剤		特殊高分子化合物 (ボイズ530)	特殊高分子化合物
	0.0069	11.3	0.0068	28.2	溶液濃度, 溶液添加量		(ボイズ530)	(ボイズ530)
	0.0035	8.5	0.0035	18.8				
	0.0014	5.6	0.0014	11.7				

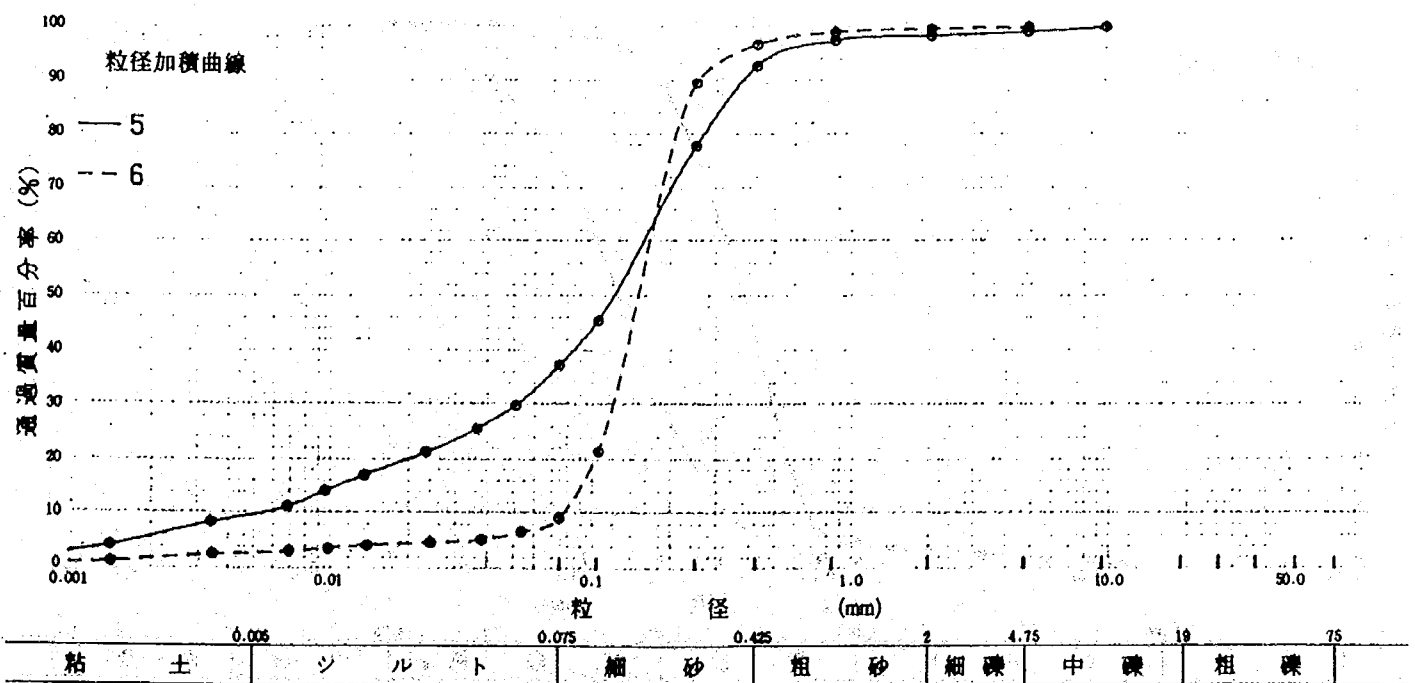


特記事項

調査件名	試験年月日 平成 6 年12 月
------	------------------

試 験 者 松井 孝夫

試料番号 (深 さ)	5 CASE 23 利根川下流		6 CASE 19 霞ヶ浦(麻生 1)		試 料 番 号 (深 さ) m~m	5 CASE 23 利根川下流	6 CASE 19 霞ヶ浦(麻生 1)
	粒 径 mm	通過質量百分率%	粒 径 mm	通過質量百分率%			
ふるい分け	75		75		粗 礫 分 %	0	0
	53		53		中 礫 分 %	1	0
	37.5		37.5		細 礫 分 %	1	0
	26.5		26.5		粗 砂 分 %	5	3
	19		19		細 砂 分 %	55	87
	9.5	100.0	9.5		シ ル ト 分 %	28	7
	4.75	99.2	4.75		粘 土 分 %	10	3
	2	98.4	2	100.0	2mmふるい通過質量百分率 %	98	100
	0.85	97.5	0.85	99.7	0.425mmふるい通過質量百分率 %	93	97
	0.425	92.8	0.425	96.8	0.075mmふるい通過質量百分率 %	38	10
沈降分析	0.250	77.9	0.250	89.7	最 大 粒 径 mm	9.50	4.75
	0.106	45.7	0.106	21.7	60 % 粒 径 D_{60} mm	0.157	0.167
	0.075	37.5	0.075	9.5	50 % 粒 径 D_{50} mm	0.121	0.151
	0.0513	30.1	0.0541	6.9	30 % 粒 径 D_{30} mm	0.0510	0.121
	0.0367	25.8	0.0384	5.5	10 % 粒 径 D_{10} mm	0.0052	0.0766
	0.0234	21.5	0.0243	5.0	均 等 係 数 U_c	30.5	2.18
	0.0137	17.2	0.0140	4.4	曲 率 係 数 U'_c	3.20	1.14
	0.0097	14.3	0.0099	3.9	土 粒 子 の 密 度 ρ_s g/cm ³		
	0.0069	11.5	0.0070	3.3	使用した分散剤	特殊高分子化合物 (ボイズ530)	特殊高分子化合物
	0.0035	8.6	0.0035	2.8	溶液濃度, 溶液添加量	(ボイズ530)	(ボイズ530)
	0.0014	4.3	0.0014	1.4			

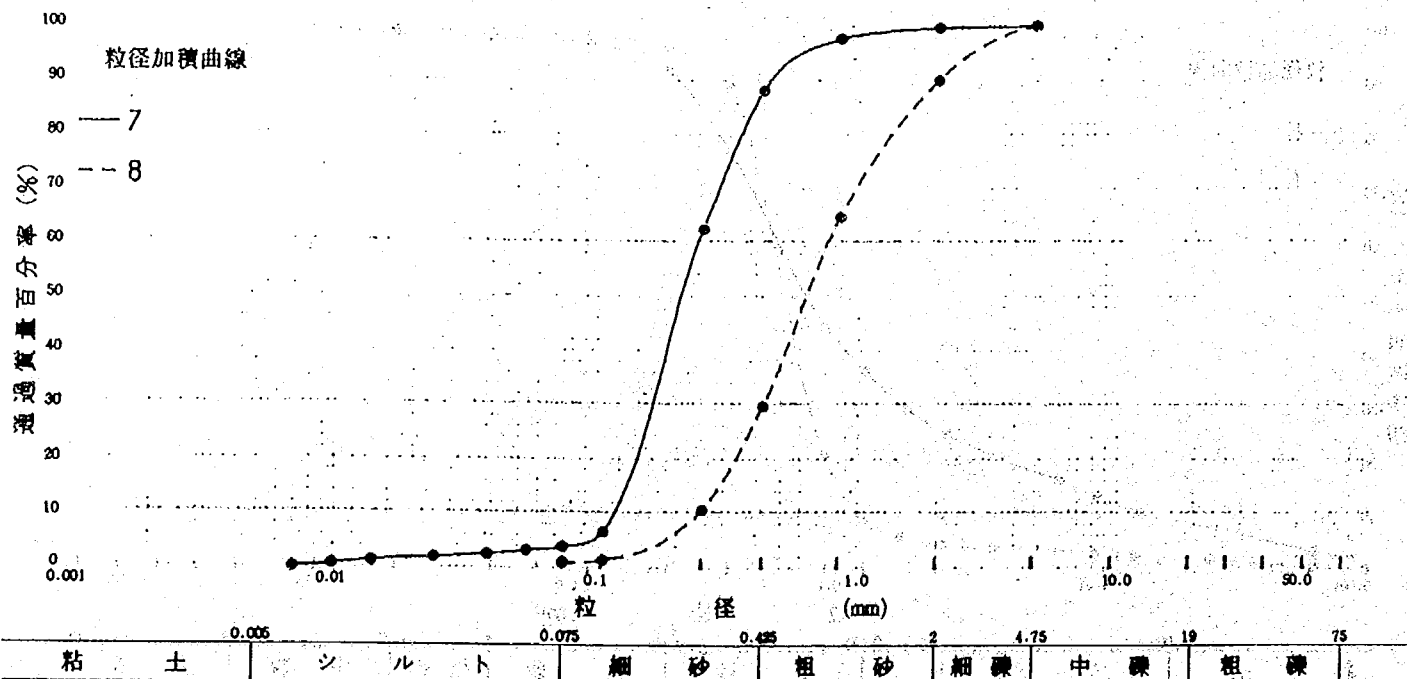


調査件名

試験年月日 平成 6 年 12 月

試験者 松井 孝夫

試料番号 (深さ)	7 CASE 20 玉造		8 CASE 21 鬼怒川		試料番号 (深さ) m-m	7 CASE 20 玉造	8 CASE 21 鬼怒川
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %			
ふるい	75		75		粗 礫 分 %	0	0
	53		53		中 礫 分 %	0	0
	37.5		37.5		細 礫 分 %	0	10
	26.5		26.5		粗 砂 分 %	12	60
	19		19		細 砂 分 %	84	29
	9.5		9.5		シルト 分 %	4	(-1)
	4.75	100.0	4.75	100.0	粘土 分 %	0	
	2	99.6	2	89.9	2mmより通過質量百分率 %	100	90
	0.85	97.6	0.85	64.7	0.425mmより通過質量百分率 %	88	30
	0.425	88.1	0.425	29.6	0.075mmより通過質量百分率 %	4	1
分析	0.250	62.4	0.250	10.6	最大粒径 mm	4.75	4.75
	0.106	6.6	0.106	1.5	60 % 粒径 D_{60} mm	0.239	0.764
	0.075	3.9	0.075	1.0	50 % 粒径 D_{50} mm	0.207	0.632
	0.0547	3.2			30 % 粒径 D_{30} mm	0.160	0.429
	0.0387	2.6			10 % 粒径 D_{10} mm	0.117	0.243
	0.0245	1.9			均等係数 U_c	2.05	3.14
	0.0142	1.3			曲率係数 U'_c	0.914	0.989
	0.0100	0.6			土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		
	0.0071	0.0			使用した分散剤	分散剤, 不使用	分散剤, 不使用
					溶液濃度, 溶液添加量		

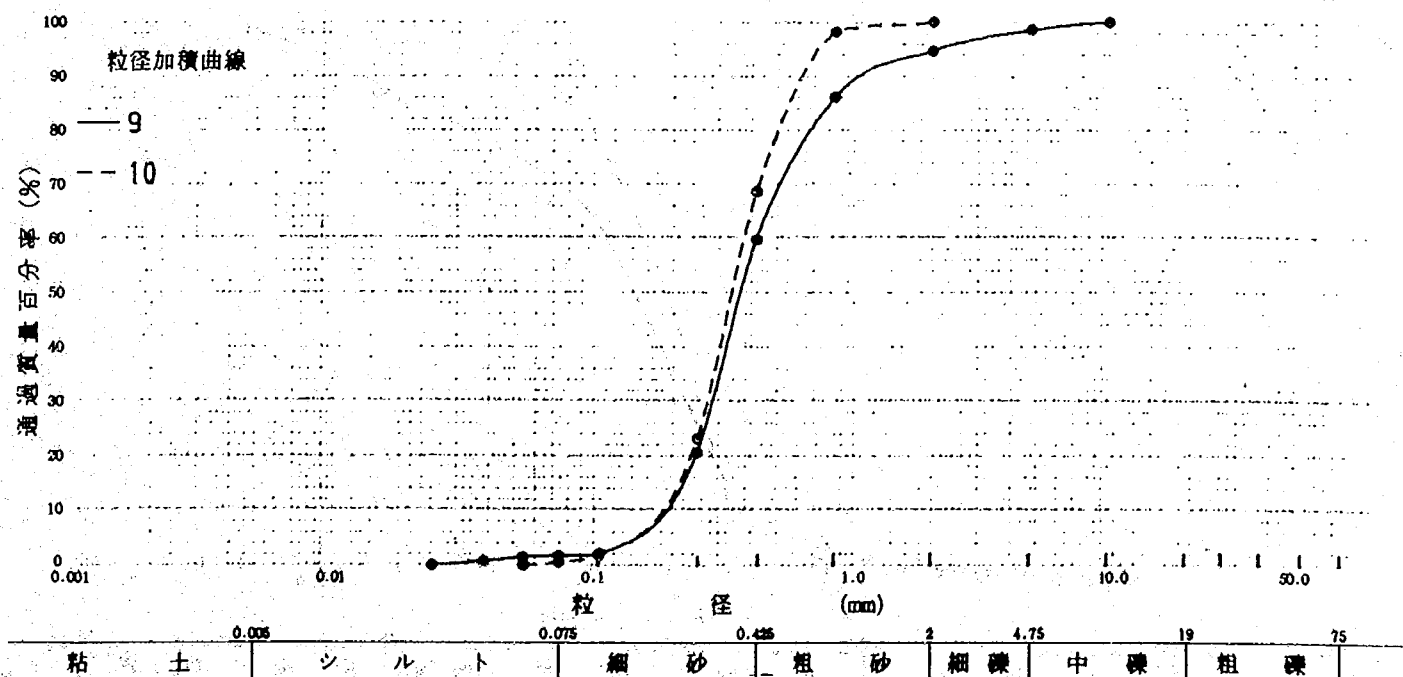


特記事項

調査件名	試験年月日 平成 7 年 1 月
------	---------------------

試 験 者 松井 孝夫

試料番号 (深 さ)	9 CASE 22 霞ヶ浦(麻生2)		10 CASE 24 長良川		試 料 番 号 (深 さ) m~m	9 CASE 22 霞ヶ浦(麻生2)	10 CASE 24 長良川
	粒 径 mm	通過質量百分率%	粒 径 mm	通過質量百分率%			
ふるい	75		75		粗 礫 分 %	0	0
	53		53		中 礫 分 %	1	0
	37.5		37.5		細 礫 分 %	4	0
	26.5		26.5		粗 砂 分 %	35	31
	19		19		細 砂 分 %	58	68
	9.5	100.0	9.5		シ ル ト 分 %	2	1
	4.75	98.6	4.75		粘 土 分 %	0	0
	2	94.7	2	100.0	2mmふるい通過質量百分率 %	95	100
	0.85	86.0	0.85	98.2	0.425mmふるい通過質量百分率 %	60	69
	0.425	59.8	0.425	68.6	0.075mmふるい通過質量百分率 %	2	1
沈降分析	0.250	20.6	0.250	23.2	最 大 粒 径 mm	9.50	2.00
	0.106	2.2	0.106	1.9	60 % 粒 径 D_{60} mm	0.426	0.380
	0.075	1.8	0.075	0.7	50 % 粒 径 D_{50} mm	0.369	0.341
	0.0548	1.5	0.0550	0.0	30 % 粒 径 D_{30} mm	0.288	0.274
	0.0388	0.8			10 % 粒 径 D_{10} mm	0.192	0.185
	0.0246	0.0			均 等 係 数 U_c	2.22	2.05
					曲 率 係 数 U'_c	1.01	1.07
					土 粒 子 の 密 度 ρ_s g/cm ³		
					使用した分散剤		
					溶液濃度, 溶液添加量	分散剤,不使用	分散剤,不使用



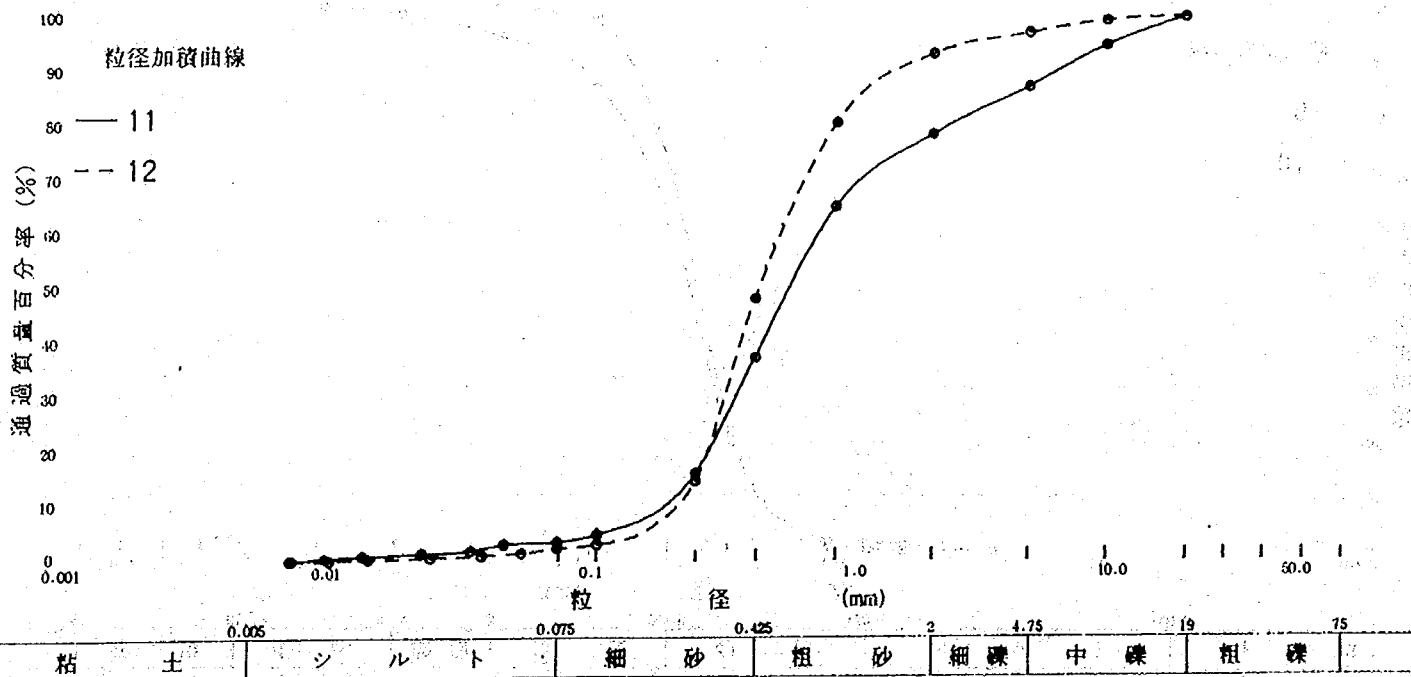
特記事項

調査件名

試験年月日 平成 7 年 3 月

試験者 松井 孝夫

試料番号 (深さ)	11 CASE 25 霞ヶ浦(西の州)		12 CASE 28 渡良瀬川		試料番号 (深さ) m~m	11 CASE 25 霞ヶ浦(西の州)	12 CASE 28 渡良瀬川
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %			
ふるい	75		75		粗 礫 分 %	0	0
	53		53		中 礫 分 %	13	3
	37.5		37.5		細 礫 分 %	9	4
	26.5		26.5		粗 砂 分 %	41	45
	19	100.0	19	100.0	細 砂 分 %	33	46
	9.5	94.8	9.5	99.4	シルト 分 %	4	2
	4.75	87.1	4.75	97.0	粘土 分 %	0	0
	2	78.3	2	93.2	2mmふるい通過質量百分率 %	78	93
	0.85	65.0	0.85	80.5	0.425mmふるい通過質量百分率 %	37	48
	0.425	37.4	0.425	48.2	0.075mmふるい通過質量百分率 %	4	2
析	0.250	16.0	0.250	14.6	最大粒径 mm	19.0	19.0
	0.106	4.9	0.106	3.0	60 % 粒径 D_{60} mm	0.730	0.528
	0.075	3.5	0.075	2.4	50 % 粒径 D_{50} mm	0.571	0.439
	0.0470	3.1	0.0548	1.5	30 % 粒径 D_{30} mm	0.356	0.324
	0.0357	2.0	0.0391	1.1	10 % 粒径 D_{10} mm	0.191	0.213
	0.0232	1.4	0.0250	0.7	均等係数 U_c	3.83	2.47
	0.0138	0.9	0.0145	0.4	曲率係数 U'_c	0.912	0.934
	0.0099	0.6	0.0103	0.1	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		
	0.0072	0.0	0.0074	0.0	使用した分散剤		
					溶液濃度, 溶液添加量		
沈降							
分析							



特記事項

卷末付録－2

各試験ケースにおける砂地盤の
最大密度・最小密度試験結果

(CASE 1～18)

調査件名

試験年月日

試験者

モールド		Na				容 積 V cm^3		113.1
		質 量 g	822.82					113.08
試 料 番 号 (深 さ)			CASE 1, 2, 11, 13 霞ヶ浦 (麻生) 産					
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	1009.11	1009.89	1009.90				
	炉乾燥試料質量 m_1 g	186.29	187.07	187.08				
	乾燥密度 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.647	1.654	1.654				
	平均値 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.652						
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	982.48	982.83	983.75	983.08	982.14		
	炉乾燥試料質量 m_2 g	159.66	160.01	160.93	160.26	159.32		
	乾燥密度 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.412	1.415	1.423	1.417	1.409		
	平均値 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.415						
土粒子の密度 ρ_s g/cm^3		2.717	最小間隙比 $e_{\min}$			特記事項		
間隙比 e			最大間隙比 $e_{\max}$					
試 料 番 号 (深 さ)			CASE 3~7, 12 江戸川産					
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	999.01	999.16	999.18				
	炉乾燥試料質量 m_1 g	176.19	176.34	176.36				
	乾燥密度 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.558	1.559	1.560				
	平均値 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.559						
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	959.56	959.62	959.44	959.72	959.59		
	炉乾燥試料質量 m_2 g	136.74	136.80	136.62	136.90	136.77		
	乾燥密度 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.209	1.210	1.208	1.211	1.209		
	平均値 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.209						
土粒子の密度 ρ_s g/cm^3		2.722	最小間隙比 $e_{\min}$			特記事項		
間隙比 e			最大間隙比 $e_{\max}$					
試 料 番 号 (深 さ)			CASE 8 霞ヶ浦 (美浦) 産					
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	1010.01	1010.25	1010.11				
	炉乾燥試料質量 m_1 g	187.19	187.43	187.29				
	乾燥密度 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.655	1.657	1.656				
	平均値 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.656						
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	985.22	985.08	984.44	984.99	984.00		
	炉乾燥試料質量 m_2 g	162.40	162.26	161.62	162.17	161.18		
	乾燥密度 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.436	1.435	1.429	1.434	1.425		
	平均値 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.432						
土粒子の密度 ρ_s g/cm^3		2.735	最小間隙比 $e_{\min}$			特記事項		
間隙比 e			最大間隙比 $e_{\max}$					

$$\rho_{d\max} = \frac{m_1}{V}$$

$$\rho_{d\min} = \frac{m_2}{V}$$

調査件名

試験年月日

試験者

モールド		No			容 積 V cm^3		113.1	
		質 量 g	822.82				113.08	
試 料 番 号 (深 さ)			CASE 9 鬼怒川産					
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	1011.75	1011.77	1011.65				
	炉乾燥試料質量 m_1 g	188.93	188.95	188.83				
	乾燥密度 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.671	1.671	1.670				
	平均値 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.671						
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	983.28	983.12	983.64	983.04	982.66		
	炉乾燥試料質量 m_2 g	160.46	160.30	160.82	160.22	159.84		
	乾燥密度 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.419	1.418	1.422	1.417	1.414		
	平均値 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.418						
土粒子の密度 ρ_s g/cm^3		2.721	最小間隙比 $e_{\min}$				特記事項	
間 隙 比 e			最大間隙比 $e_{\max}$					
試 料 番 号 (深 さ)			CASE 10 利根川産					
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	1021.07	1021.60	1021.56				
	炉乾燥試料質量 m_1 g	198.25	198.78	198.74				
	乾燥密度 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.753	1.758	1.758				
	平均値 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.756						
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	985.83	985.46	985.93	985.13	986.92		
	炉乾燥試料質量 m_2 g	163.01	162.64	163.11	162.31	164.10		
	乾燥密度 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.442	1.438	1.442	1.435	1.451		
	平均値 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	1.442						
土粒子の密度 ρ_s g/cm^3		2.771	最小間隙比 $e_{\min}$				特記事項	
間 隙 比 e			最大間隙比 $e_{\max}$					
試 料 番 号 (深 さ)			CASE 14 小貝川産					
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	983.48	983.41	983.13				
	炉乾燥試料質量 m_1 g	160.63	160.56	160.28				
	乾燥密度 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.420	1.420	1.417				
	平均値 $\rho_{d\max}$ g/cm^3	1.419						
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	934.74	934.85	934.50	934.74	934.64		
	炉乾燥試料質量 m_2 g	111.89	112.00	111.65	111.89	111.79		
	乾燥密度 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	0.989	0.990	0.987	0.989	0.989		
	平均値 $\rho_{d\min}$ g/cm^3	0.989						
土粒子の密度 ρ_s g/cm^3		2.701	最小間隙比 $e_{\min}$				特記事項	
間 隙 比 e			最大間隙比 $e_{\max}$					

$$\rho_{d\max} = \frac{m_1}{V}$$

$$\rho_{d\min} = \frac{m_2}{V}$$

調査件名 パイピング大型模型実験

試験年月日 平成 6年 1月

試験者 福原 誠

モールド	No			容 積 V	cm ³	113.1
	質 量	g	825.89			
試 料 番 号 (深 さ)			CASE 18 江戸川			
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量	g	989.84	989.53	991.73	
	炉 乾 燥 試 料 質 量 m_1	g	163.95	163.64	165.84	
	乾 燥 密 度 $\rho_{d\max}$	g/cm ³	1.450	1.447	1.466	
	平 均 値 $\rho_{d\max}$	g/cm ³	1.454			
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量	g	947.79	947.75	946.62	946.98
	炉 乾 燥 試 料 質 量 m_2	g	121.90	121.86	120.73	121.09
	乾 燥 密 度 $\rho_{d\min}$	g/cm ³	1.078	1.077	1.067	1.071
	平 均 値 $\rho_{d\min}$	g/cm ³	1.074			
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³			最小間隙比 $e_{\min}$		特記事項	
間 隙 比 e			最大間隙比 $e_{\max}$			
試 料 番 号 (深 さ)			CASE 17 利根川			
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量	g	995.23	997.26	996.83	
	炉 乾 燥 試 料 質 量 m_1	g	169.34	171.37	170.94	
	乾 燥 密 度 $\rho_{d\max}$	g/cm ³	1.497	1.515	1.511	
	平 均 値 $\rho_{d\max}$	g/cm ³	1.508			
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量	g	954.14	955.38	956.78	955.75
	炉 乾 燥 試 料 質 量 m_2	g	128.25	129.49	130.89	129.86
	乾 燥 密 度 $\rho_{d\min}$	g/cm ³	1.134	1.145	1.157	1.148
	平 均 値 $\rho_{d\min}$	g/cm ³	1.146			
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³			最小間隙比 $e_{\min}$		特記事項	
間 隙 比 e			最大間隙比 $e_{\max}$			
試 料 番 号 (深 さ)			CASE 15 霞ヶ浦			
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量	g	1009.85	1011.25	1010.37	
	炉 乾 燥 試 料 質 量 m_1	g	183.96	185.36	184.48	
	乾 燥 密 度 $\rho_{d\max}$	g/cm ³	1.627	1.639	1.631	
	平 均 値 $\rho_{d\max}$	g/cm ³	1.632			
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量	g	972.10	972.75	973.10	972.37
	炉 乾 燥 試 料 質 量 m_2	g	146.21	146.86	147.21	146.48
	乾 燥 密 度 $\rho_{d\min}$	g/cm ³	1.293	1.299	1.302	1.295
	平 均 値 $\rho_{d\min}$	g/cm ³	1.297			
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³			最小間隙比 $e_{\min}$		特記事項	
間 隙 比 e			最大間隙比 $e_{\max}$			

$$\rho_{d\max} = \frac{m_1}{V}$$

$$\rho_{d\min} = \frac{m_2}{V}$$

調査件名 パイピング大型模型実験

試験年月日 平成 6年 1月

試験者 福原 誠

モールド	No 質量 g	825.89	容 積 V	cm ³	113.1	
試料番号(深さ)		CASE 16 鬼怒川				
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	1016.06	1015.82	1015.93		
	炉乾燥試料質量 m_1 g	190.17	189.93	190.04		
	乾燥密度 $\rho_{d \max}$ g/cm ³	1.681	1.679	1.680		
	平均値 $\rho_{d \max}$ g/cm ³	1.680				
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量 g	975.08	975.85	976.92	976.45	975.57
	炉乾燥試料質量 m_2 g	149.19	149.96	151.03	150.56	149.68
	乾燥密度 $\rho_{d \min}$ g/cm ³	1.319	1.326	1.335	1.331	1.323
	平均値 $\rho_{d \min}$ g/cm ³	1.328				
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		最小間隙比 $e_{\min}$		特記事項		
間隙比 e		最大間隙比 $e_{\max}$				
試料番号(深さ)						
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量 g					
	炉乾燥試料質量 m_1 g					
	乾燥密度 $\rho_{d \max}$ g/cm ³					
	平均値 $\rho_{d \max}$ g/cm ³					
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量 g					
	炉乾燥試料質量 m_2 g					
	乾燥密度 $\rho_{d \min}$ g/cm ³					
	平均値 $\rho_{d \min}$ g/cm ³					
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		最小間隙比 $e_{\min}$		特記事項		
間隙比 e		最大間隙比 $e_{\max}$				
試料番号(深さ)						
最大	(炉乾燥試料+モールド)質量 g					
	炉乾燥試料質量 m_1 g					
	乾燥密度 $\rho_{d \max}$ g/cm ³					
	平均値 $\rho_{d \max}$ g/cm ³					
最小	(炉乾燥試料+モールド)質量 g					
	炉乾燥試料質量 m_2 g					
	乾燥密度 $\rho_{d \min}$ g/cm ³					
	平均値 $\rho_{d \min}$ g/cm ³					
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³		最小間隙比 $e_{\min}$		特記事項		
間隙比 e		最大間隙比 $e_{\max}$				

$$\rho_{d \max} = \frac{m_1}{V}$$

$$\rho_{d \min} = \frac{m_2}{V}$$

卷末付録－ 3

各試験ケースにおける砂地盤の密度測定結果

・CASE1~14

実験終了後のコアカッター法による地盤の密度測定結果を表-1に示す。

表-1 模型地盤の乾燥密度 (砂地盤)

ケース (No)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)			平均乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)
	1	2	3	
1	1.628	1.648	1.628	1.635
2	1.655	1.632	1.649	1.645
3	1.427	1.408	1.418	1.418
4	1.392	1.371	1.366	1.376
5	1.488	1.433	1.432	1.438
6	1.398	1.407	1.411	1.405
7	1.431	1.339	1.410	1.413
8	1.634	1.626	1.616	1.625
9	1.663	1.694	1.691	1.683
10	1.731	1.705	1.715	1.717
11	1.630	1.655	1.663	1.649
12	1.447	1.440	1.441	1.443
13	1.656	1.655	1.639	1.650
14	1.394	1.391	1.394	1.393

・CASE15 ～18

実験終了後、押え盛土および不透水シート撤去後、乱されない砂地盤から3ヶ所で表面より5 cm掘削し、図-1に示す①、②、③の場所でコアカッター（容積500cm³）にて試料を採取した結果を表-2に示す。

図-1 密度測定を試料採取場所

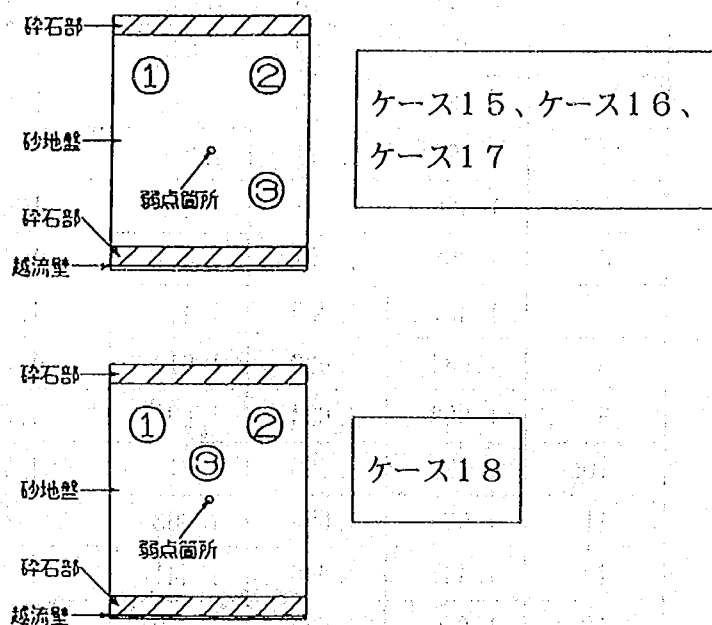


表-2 実験終了後の砂地盤の密度測定

実験ケース	試料採取 No.	湿潤質量 (g)	乾燥質量 (g)	容器質量 (g)	試料乾燥 質量(g)	土中の水量 (g)	コアッター容積 (cm ³)	試料採取時 含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)
1 5	1	1373.6	1270.6	513.5	757.1	103.0	500.0	13.6	1.720	1.514
	2	1329.1	1212.0	446.7	765.3	117.1	500.0	15.3	1.765	1.531
	3	1409.0	1301.8	506.9	794.9	107.2	500.0	13.5	1.804	1.590
	平均								1.763	1.545
1 6	1	1518.1	1341.3	509.3	832.0	176.8	500.0	21.2	2.018	1.664
	2	1546.3	1365.5	524.8	840.7	180.8	500.0	21.5	2.043	1.681
	3	1488.0	1318.4	513.3	805.1	169.6	500.0	21.1	1.949	1.610
	平均								2.003	1.652
1 7	1	1386.9	1231.9	513.5	718.4	155.0	500.0	21.6	1.747	1.437
	2	1345.7	1163.9	446.7	717.2	181.8	500.0	25.3	1.798	1.434
	3	1445.1	1260.1	506.9	753.2	185.0	500.0	24.6	1.876	1.506
	平均								1.807	1.459
1 8	1	1461.9	1257.3	506.9	750.4	204.6	500.0	27.3	1.910	1.501
	2	1403.9	1204.9	446.7	758.2	199.0	500.0	26.2	1.914	1.534
	3	1478.0	1280.7	513.5	767.2	197.3	500.0	25.7	1.929	1.517
	平均								1.918	1.591

・CASE19～28

実験終了後、押え盛土・粘土層・不透水シートを撤去した後、乱されていない砂地盤の表面を5cm掘削し、図-3.6.2で示す①、②、③の位置でコアカッター（容積 500cm^3 ）にて試料を採取して密度測定を行った結果を表-3に示す。

表-3 実験終了後の砂地盤の密度測定

実験ケース	試料採取 No.	湿潤質量 (g)	乾燥質量 (g)	容器質量 (g)	試料乾燥 質量(g)	土中の水量 (g)	コアッター容積 (cm ³)	試料採取時 含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)
19	1	1384.8	1178.7	464.6	714.1	206.1	500.0	28.9	1.840	1.428
	2	1648.5	1441.6	721.1	720.5	206.9	500.0	28.7	1.855	1.441
	3	1589.5	1338.2	656.9	731.3	201.3	500.0	27.5	1.865	1.463
	平均								1.583	1.444
20	1	1450.5	1276.5	464.6	811.9	174.0	500.0	21.4	1.972	1.624
	2	1720.3	1546.5	721.6	825.4	173.8	500.0	21.1	1.998	1.651
	3	1652.9	1480.9	656.9	824.0	172.0	500.0	20.9	1.992	1.648
	平均								1.987	1.641
21	1	1329.0	1263.1	464.6	798.5	65.9	500.0	8.3	1.729	1.597
	2	1591.0	1528.0	721.1	806.9	63.0	500.0	7.8	1.740	1.614
	3	1547.1	1481.3	656.9	824.4	65.8	500.0	8.0	1.780	1.649
	平均								1.750	1.620
22	1	1340.6	1241.3	464.6	776.7	99.3	500.0	12.8	1.752	1.553
	2	1625.1	1533.9	721.1	812.8	91.2	500.0	11.2	1.808	1.626
	3	1551.1	1454.4	656.9	797.5	96.7	500.0	12.1	1.788	1.595
	平均								1.783	1.591
23	1	1356.3	1134.5	464.6	669.9	221.8	500.0	33.1	1.783	1.340
	2	1659.7	1426.6	721.1	705.5	233.1	500.0	33.0	1.877	1.411
	3	1595.3	1357.2	656.9	700.3	238.1	500.0	34.0	1.877	1.401
	平均								1.846	1.384
24	1	1288.2	1216.1	464.6	751.5	72.1	500.0	9.6	1.647	1.503
	2	1554.2	1475.5	721.1	754.4	78.7	500.0	10.4	1.666	1.509
	3	1449.3	1428.2	656.9	771.3	71.1	500.0	9.2	1.685	1.543
	平均								1.666	1.518
25	1	1395.3	1315.1	464.6	850.5	80.2	500.0	9.4	1.861	1.701
	2	1626.9	1551.9	721.1	830.8	75.0	500.0	9.0	1.812	1.662
	3	1617.4	1546.0	656.9	889.1	71.4	500.0	8.0	1.921	1.778
	平均								1.865	1.714
26	1	1391.0	1136.4	464.6	671.8	254.6	500.0	37.9	1.853	1.344
	2	1673.2	1411.7	721.1	690.6	261.5	500.0	37.9	1.904	1.381
	3	1602.7	1356.6	656.9	699.7	246.1	500.0	35.2	1.892	1.399
	平均								1.883	1.375
27	1	1457.2	1230.0	464.6	765.4	227.2	500.0	29.7	1.985	1.531
	2	1691.4	1470.2	721.1	749.1	221.2	500.0	29.5	1.941	1.498
	3	1650.1	1422.9	656.9	766.0	227.2	500.0	29.7	1.986	1.532
	平均								1.971	1.520
28	1	1316.9	1250.7	464.6	786.1	66.2	500.0	8.4	1.705	1.572
	2	1571.9	1509.6	721.1	788.5	62.3	500.0	7.9	1.702	1.577
	3	1510.4	1444.8	656.9	787.9	65.6	500.0	8.3	1.707	1.576
	平均								1.704	

堤防基礎地盤のパイピング破壊に
関する模型実験

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第3399号
平成8年1月 (1996)

材料施工部 土質研究室 室長 三木博史
研究員 山田哲也
研究員 藤井厚余
野口典孝
佐藤正博*

要 旨

堤防のパイピング破壊を検討する手法として、クリープ比や限界実流速等の規準が適用されてきた。しかし、これらの規準にはかなりの安全率をとっているものもあり、実現象をうまく説明できない場合も少なくない。そこで、本研究では、水平方向浸透流によるパイピング現象についての小型模型実験及び大型模型実験を行い、従来の規準と比較検討するとともに、砂地盤の土質特性を考慮したより実際的なパイピング破壊規準について検討した。

キーワード：パイピング破壊，浸透，堤防，透水性，模型実験

*建設省下館工事事務所 前土質研究室研究員

郵便はがき

50円切手
をはって
下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

材料施工部土質研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第3399号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

土木研究所資料第3399号



堤防基礎地盤のパイピング破壊に
関する模型実験