

土 木 研 究 所 資 料

トンネル河川水理模型実験

平成12年2月

建設省土木研究所
河川部都市河川研究室

Copyright © (2000) 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。

トンネル河川水理模型実験

都市河川研究室 室 長 末 次 忠 司

主任研究員 河 原 能 久

研 究 員 小 林 裕 明*

研究補助員 岡 部 勉

研究補助員 武 富 一 秀

交流研究員 秋 山 真 吾**

要旨

トンネル河川の断面は、河川砂防技術基準等により決められている。この設計基準では計画流量を流下させることができる断面に一定の余裕を設けて設計するよう規定されている。しかし、場合によっては洪水に対してかなりの大断面になる場合もあるため、設計基準の緩和が求められている。

本研究では、種々の計画流量、勾配に対して従来の基準で設計した断面または余裕を緩和した断面のトンネル河川模型を製作し、流木などによる閉塞などの問題が発生しないかどうかを実験により明らかにした。

キーワード：トンネル河川、断面設計基準、標準馬蹄形、流木、閉塞

* 現 土木研究所企画課

** 交流研究員在職期間（平成9年4月から平成10年3月まで）

目次

第1章 トンネル河川の概要及び実験目的	1
1.1 トンネル河川の概要	1
1.2 現状の設計基準	1
1.3 実験目的	4
第2章 水理模型実験の方法及び実験内容	5
2.1 実験方法	5
2.2 実験条件	6
2.3 直線部実験条件	8
2.4 屈曲部実験条件	10
2.5 実験内容	11
2.6 流木模型設定条件	12
2.7 実験ケース	17
2.8 水位縦断図及び横断流速分布図	18
第3章 実験結果（直線部）	40
3.1 流木閉塞回数	40
3.1.1 余裕率と閉塞との関係	44
3.1.2 勾配と閉塞との関係	46
3.2 余裕率と流木滞留率との関係	48
3.3 まとめ	50
第4章 実験結果（屈曲部）	51
4.1 実験概要	51
4.2 実験方法	51
4.3 実験結果	51
4.3.1 流況	51
4.3.2 閉塞状況	52
4.3.3 実験条件と閉塞との関係	54
4.4 まとめ	57

第5章 実験結果（強制閉塞）	5 8
5.1 目的	5 8
5.2 実験方法	5 8
5.3 実験ケース	5 8
5.4 実験結果	6 3
5.5 まとめ	6 4
参考文献	6 5
参考資料	6 6

第1章 トンネル河川の概要及び実験目的

1. 1 トンネル河川の概要

トンネル河川とは、地上開水路河川以外のトンネル構造河川のうち、特に流入・排水施設を持たないものをトンネル河川という。

このトンネル河川の設置に関して河川砂防技術基準（案）では、次のように記載してある。『トンネル構造による河川は、地形の状況、その他特別の理由によりやむをえない場合に限り設けるものとする。』つまり、出来る限り河道計画ではトンネル構造による河川は避け地上開水路河川により対処すべきとの見解である。この理由としては、大まかに次の2点が考えられる

1. 洪水時の流下物による断面閉塞
2. 維持・管理・改修が困難など

このように限定された条件下で施工されるトンネル構造河川ではあるが、流域の都市化に伴う諸問題、例えば土地問題等から、今後トンネル構造河川の必要性は高まると考えられる。

1. 2 現状の設計基準

トンネル河川の設計基準に関しては、トンネル河川の種類（開水路方式・圧力管方式）により異なる。設計基準の対象施設は、トンネル本管・呑口部・吐口部からなり、それぞれにおいて流下に対する安全性や洗掘防止の観点から基準が設けられている。ここでは、今回の実験で検証する開水路方式によるトンネル河川本管の断面（以下、トンネル断面）に関する設計基準を記述する。

トンネル断面の設計基準としては、河川砂防技術基準（案）において以下のように記載してある。

《トンネル断面の設計基準》

トンネルの断面は、設計流量の流下に必要な断面積の他に、原則として十分な空面積を確保するものとする。

また、上記の太字の設計流量及び空面積に関しても同様に河川砂防技術基準（案）に以下のよう

に記載してある。

設計流量：原則として計画で配分される計画高水流量の130%流量以上とする（割増率）。

空面積：設計流量の流下に必要な断面積の15%を下回らない値を標準として空断面積を設ける必要がある（空面積率）。

以上をまとめると設計基準によるトンネル断面は、

$$\text{トンネル断面} = \text{【計画高水流量の1.3倍の流量（設計流量）が流下するのに必要な断面積】} \\ + \text{【設計流量が流下する断面積の15%の空面積】}$$

となる。

ここで上記の割増率・空面積率を設ける理由と使用されている係数の数値的根拠を以下に記述する。

○設計流量について

①『都市河川計画の手引き』－立体河川施設計画編－（財）国土開発技術研究センター¹⁾

設定理由：計画変更や超過洪水への対応、ゴミ、土砂等による疎通障害を考慮して設けている。

数値的根拠：地先の河道特性、流域の特性および地下河川的方式（開水路・圧力管方式等）により一律の割増率を設定出来ない。ただ、開水路方式において実施された事例としては130%が多い。

②河川砂防技術基準（設計編）

設定理由：計画変更や超過洪水への対応、ゴミ、土砂等による疎通障害を考慮して設けている。

数値的根拠：地先の河道特性、流域の特性および地下河川的方式（開水路・圧力管方式等）により一律の割増率を設定出来ないが、一般的に開水路方式の場合は、計画で配分されている計画高水流量の130%流量以上とする。但し、河道計画において現状の河道を廃止する場合は、以下のケースの

流量においていずれか大きいものを下回らない流量とする。

ケース 1 : トンネルの上流の現状河道が有堤の場合、その流下能力の 1
30 % 流量

ケース 2 : トンネル呑口部または流入施設における超過確率 1/100 流量
の 130 % 流量

○空面積率について

①『都市河川計画の手引き』－立体河川施設計画編－（財）国土開発技術研究センター

設定理由 : 空気の補給（騒音発生の原因）や浮遊物の付着による閉塞の恐れ、負圧が生じる事を考慮して設けている。

数値的根拠 : 実験より標準馬蹄形の場合、相対水深〔 H （水深）／ R （直径）〕が 0.8 を超えると、管内の流速が遅くなることから浮遊ゴミの流下速度が遅くなり、引っかかる確率が高くなる。この相対水深 0.8 時の流下断面積／総断面積は約 0.85 であり、空面積 15 % が算出される。

②河川砂防技術基準（計画編）

設定理由 : 浮遊ゴミ等の流下による疎通障害や高速水流が流れると空気圧が低下する。これらを防ぐために空気流の流下が出来るように空面積を確保する必要がある。

数値的根拠 : 記載なし

以上の資料より、設計流量・空面積率を設ける理由は、流下物による閉塞防止や計画以上の流量への対応また、空気流の流下のためである。また使用されている係数の数値的根拠に関しては、割増率では事例数が多い値が基準に採用されている。

本実験では、適用条件を設ける理由のうち、流下物による閉塞及び空気流の流下を観測することにより、洪水を安全に流下させることができる断面であるかどうかを判断した。すなわち実験

の結果得られる基準が適用できる条件は、以下の通りである。

適用条件 1：今後トンネル部上流において大幅な河川改修がないこと

適用条件 2：トンネル呑口部において河川の堤防高さが呑口部形状と比較して極端に高くないこと

1. 3 実験目的

トンネル河川断面の設計において、河川砂防技術基準(案)より設計すると、計画流量が流下した際のトンネル内水深はトンネル直径の約6割程度であり、かなりの余裕を見込んだ設計基準となっている。また、コスト的にみてもトンネル河川の場合、余裕率と工事費減少率との関係（表-1）から断面を縮小することによるコスト縮減効果はかなり大きい。ここで工事費減少率とは、設計基準通りの余裕率（ $0.3Q + 15\%$ ）でトンネル河川を建設した場合の工事費を基準とし、余裕率を減少させた場合に削減出来る工事費の割合を表すものである。

表-1 余裕率と工事費減少率

流量 (m³/s)	余裕率 (%)	勾配	断面積 (m²)	費用減少率 (%)
50	10	1/200	14.9	37
	15		15.8	33
	20		16.0	28
	25		16.5	23
	30		17.1	17
	35		17.7	11
	40		18.3	5
	15+0.3Q		18.8	—
200	10	1/1000	77.6	37
	15		80.1	33
	20		82.8	28
	25		85.7	23
	30		88.7	17
	35		91.8	11
	40		94.9	5
	15+0.3Q		97.5	—

本実験においては、流量・勾配及びそれぞれにおいて余裕率（割増率＋空面積率）を変化させ、トンネル河川の流下能力に関する水理模型実験を実施することにより治水安全度を確保し、より合理的かつ経済的なトンネル河川の設計基準を確立することを目的とする。

第2章 水理模型実験の方法及び実験内容

2. 1 実験方法

土木研究所内の実験施設において図-1に示すような施設を設置した。トンネル部分の断面形状は、標準馬蹄形としアクリルにて作製した（巻末資料、写真-1、2）。

実験は、指定した余裕率（割増率+空面積）を確保出来るような流量を流下させ、定常状態において実験を行った。実験方法は、各実験ケースにおいて流木模型と根毛群（詳細は2. 6に記載）合わせて22本を2秒毎に20回投入、この20回の投入作業を1ケースとし実験では20ケース行い流木模型及び根毛群がトンネル本管内に閉塞するかどうか、また空気流が流下できているかどうかについて実験を行った。

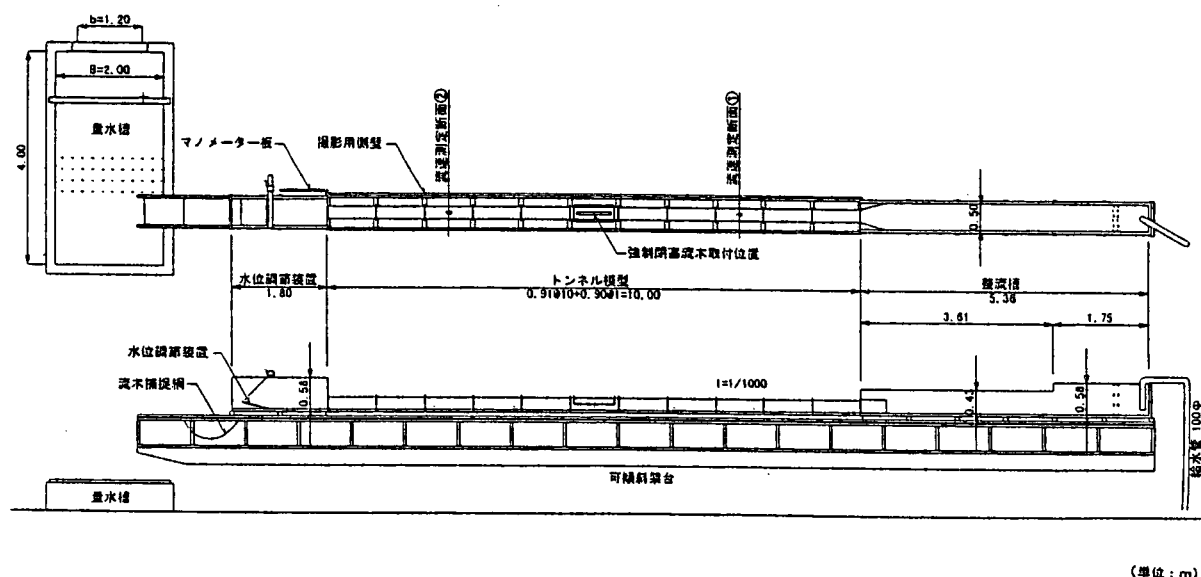


図-1 実験施設図

2. 2 実験条件

今回の実験条件を以下に記述する。なお、実験における相似則はフルードの相似則を用いた。

①縮尺 1／30

アクリル模型において、施工直後のトンネル壁面の粗度係数（ $n=0.015$ ）にあわせようとした場合、縮尺は約1／22が適当であるが、今回は、実験場の条件から縮尺は1／30としている。

②トンネル断面形状（標準馬蹄形断面）

断面形状において標準馬蹄形を選択した理由としては、昭和60年度に土木研究所都市河川研究室で行ったトンネル河川アンケート調査²⁾（以下、アンケート）のデータより（表-2）、事例数が多いことまた、形状毎の供用年数のデータ（表-3）から矩形に比べて標準馬蹄形の方が古い事から選定した。

表-2 トンネル断面形状

断面形状	標準馬蹄形	矩 形	そ の 他	計
事 例 数	50	54	12	116
割合（％）	43	47	10	100

表-3 形状毎の供用年数

使用年数	0－10年	10－20年	20－30年	30年－
矩 形	0	5	14	1
標準馬蹄形	0	2	13	9

* アンケート調査時の年数であり、現時点の年数ではない

また、今回選定した標準馬蹄形断面について、形状（図-2）及び断面に関する式³⁾を簡単に紹介する。

標準馬蹄形の断面は、上部は半径 r なる半円、側壁は半径 $2r$ なる弧、底は半径 $2r$ 、中心角 Φ なる弧より成る断面である。断面に関わる式は、以下の通りである。この式を用いて実験に使用するトンネル模型を作成した。

《一般的な馬蹄形の式》

$$y = r \cos \theta \quad h = 2r \left(1 - \cos \frac{\Phi}{2}\right)$$

$$2b = 4r \sin \frac{\Phi}{2} \quad \psi = \arccos \frac{r+b}{2r}$$

$$H = h + 2r \sin \psi + y$$

$$A = r^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sin 2\theta + 2\psi - \theta + 4\Phi - 2 \sin \Phi (1 + \tan \Phi) - \tan \Phi \right)$$

標準的な馬蹄形の場合

$\psi = 48^\circ 35' 24''$ $\Phi = 24^\circ 47' 42''$ となるので

$b = 0.8229r$ $h = 0.1771r$ となる。以下では、標準的な馬蹄形を使用している。

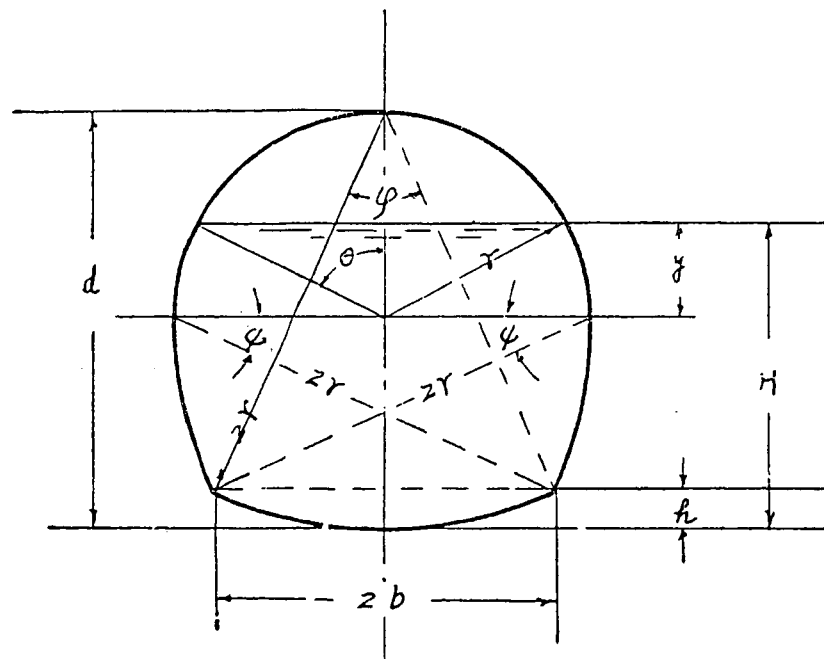


図-2 標準馬蹄形断面図

2. 3 直線部実験条件

①トンネル部の長さ

トンネル部の長さは、アンケートデータより表-4のような分布となっているが、実験ではトンネル部の1部として延長を10m（模型値）とした。

表-4 トンネルの長さ

	0～300m未満	300m～1000m 未満	1000m以上
事例数	30	40	47
割合（％）	26	34	40

* 数値は全て現地値

②実験流量・勾配

実験流量と勾配の組み合わせに関しても、アンケートデータ（表-5、図-3）より大体のトンネル河川をカバー出来るような勾配と計画流量の条件を表-6のように設定した。

表-5 計画流量(m^3/s)と勾配のクロス表

計画流量 勾配	0～74 (m^3/s)	75～149 (m^3/s)	150～249 (m^3/s)	250～ (m^3/s)	合 計
～1/99	8	2	0	1	11
1/100～1/199	19	4	2	0	25
1/200～1/499	18	6	7	5	36
1/500～1/1999	11	10	6	2	29
1/2000～	2	2	0	0	4
合 計	58	24	15	8	105

* 数値は全て現地値

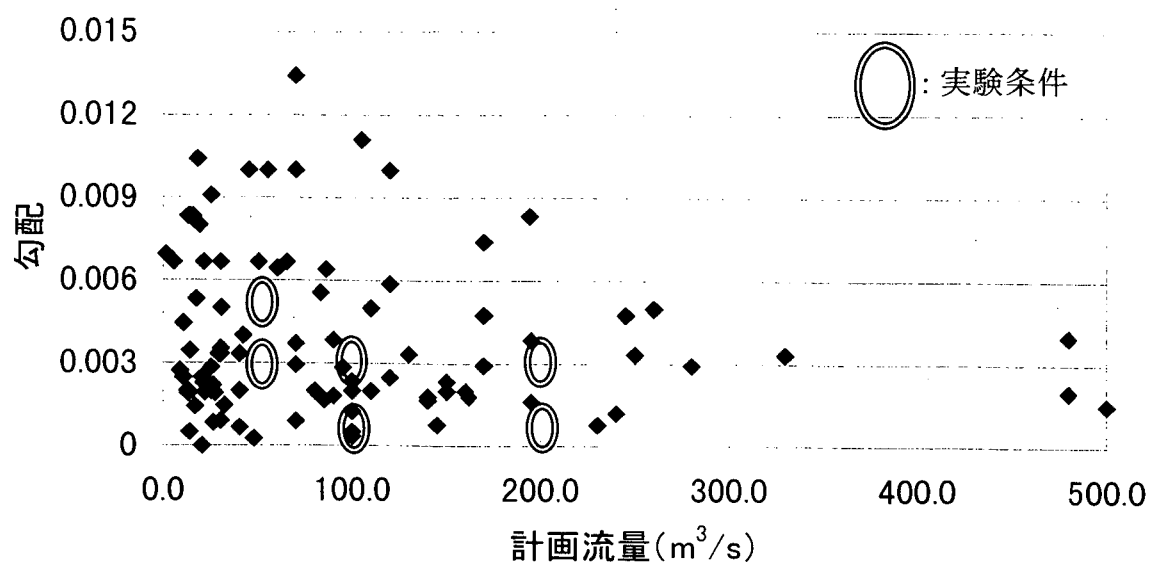


図-3 計画流量と勾配の分布図

表-6 勾配と計画流量の実験条件

	勾配	計画流量(m^3/s)
勾配・流量ケース 1	1/200	50
勾配・流量ケース 2	1/300	50
勾配・流量ケース 3	1/300	100
勾配・流量ケース 4	1/300	200
勾配・流量ケース 5	1/1000	100
勾配・流量ケース 6	1/1000	200

* 数値は全て現地値

2. 4 屈曲部実験条件

①実験流量・勾配

実験流量と勾配の選定に関しては、アンケート調査結果を元に決定した。それらに関する資料を以下に示す。

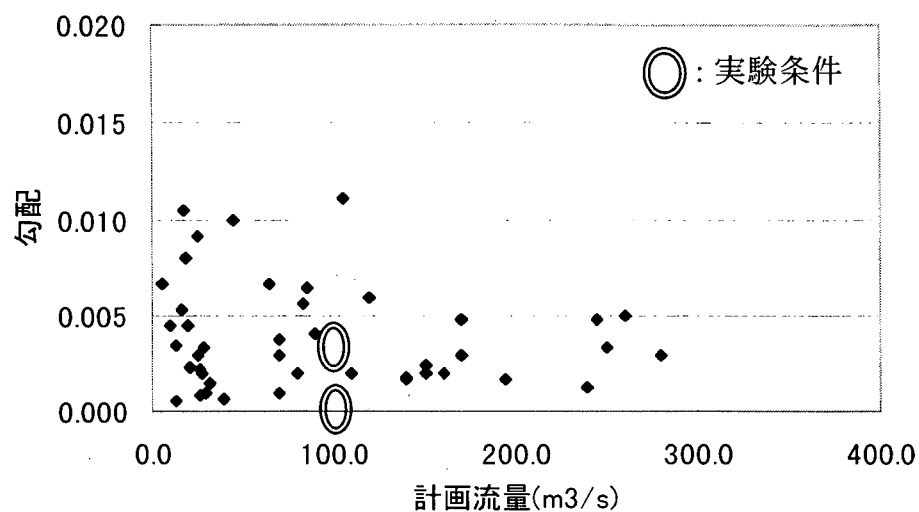


図-4 計画流量と勾配（屈曲有りトンネル河川）

表-7 計画流量と勾配のクロス表

計画流量(m³/s)	0～199	200～399	400～
勾配			
～1/1001	5	0	0
1/1000～1/501	5	1	0
1/500～1/334	10	1	1
1/333～1/251	3	1	0
1/250～1/201	4	1	0
1/200～	3	1	0
合 計	30	5	1

以上より、屈曲部の実験条件を表-8に示す。

表-8 屈曲部実験条件（計画流量、勾配）

屈曲部実験ケース	計画流量 (m ³ /s)	勾配
屈曲部実験ケース 1	100	1/300
屈曲部実験ケース 2	100	1/1000

②曲率半径と中心角度

次に屈曲部の曲率半径と中心角度条件選定に関する資料を表-9に示す。

表-9 曲率半径と中心角度のクロス表（屈曲部）

曲率半径(m) 中心角度	0～99	100～299	300～
0 ～ 29	14	3	11
30 ～ 59	19	12	7
60 ～ 120	12	11	1
120 ～	1	1	0
合 計	46	27	19

以上より、屈曲部の曲率半径と中心角度を以下のように決定した。

表-10 屈曲部実験条件（曲率半径、中心角度）

	曲率半径 (m)	中心角度
屈曲部形状 1	50	90
屈曲部形状 2	200	45

* 数値は全て現地値

2.5 実験内容

各実験条件を設定し、流木模型及び根毛群を流下させ1ケース毎に流況を観察するとともに以下の項目に関して計測を行った。

● 観測項目

- ① 1 ケース終了後のトンネル内に閉塞・滞留している流木
- ② 各模型ごとの流速断面分布
- ③ 各模型ごとの水位縦断図

そして20ケースの結果を集計して、各断面に関する測定結果とした。

2. 6 流木模型設定条件

実験で使用した流木模型の形状・寸法及び投入数の決定根拠を以下に記述した。

① 流木模型の形状

形状の選定根拠としては、過去の洪水時及び洪水後の流木に関する写真及び砂防関係の学識経験者に対するヒアリング結果より代表的な形状を選定した。参考にした写真を巻末資料写真-3～写真-6に示した。写真-3・4より洪水時の流下物には流木だけでなく草や根の固まりみたいな物もあることが分かる。写真-5は、撤去された流木の写真であるが、流木には様々な長さや太さの物があり、写真-6からは流木の中には枝付きの流木もあることが分かる。以上より流木の形状は、幹のみの流木、根付きの流木及び枝付きの流木を設定した。また、流木以外の草や根の固まりみたいな流下物（巻末資料写真-7）として根毛群を設けた。

② 流木・根毛群模型の寸法

流木の寸法に関しては、過去の洪水時及び洪水後の流木調査結果より決定した。決定の際に参考にしたデータを表-11に示す。

表-11 洪水時及び洪水後の流木調査データ

	直 径 (c m)		長 さ (m)	
	最 大 値	平 均 値	最 大 値	平 均 値
狩野川台風 ⁴⁾ (S 3 3)	—	51	4～25	13
山形県温海町 ⁵⁾ (S 6 2)	37～55	23～27	10～14	4～6. 5
愛知県伊香川 ⁶⁾ (H 1)	—	—	23	11
熊本県一宮町 (H 2)	8～25	6～13	8～12	5. 3～7. 7

* 数値は全て現地値

表-11 より直径及び長さの最大値と平均値ごとに代表値を表-12 のように設定した。

表-12 洪水時及び洪水後の流木調査データ

	直 径 (c m)		長 さ (m)	
	最 大 値	平 均 値	最 大 値	平 均 値
模型代表値	50	24	12	6

* 数値は全て現地値

これより、流木寸法は現地値で長さ 12m－直径 50cm、長さ 6 m－直径 24cm とし、またこの中間の長さ 9m－直径 39cm の流木も設けることとした。

流木模型の寸法に関して、念のため流木模型の寸法と実際の流木（巻末資料写真-8）とを比較した。写真-8 の流木は、静岡県狩野川放水路において実際に流下してきた流木の写真である。流木の寸法は、長さ 9.5m、直径 20 c mであり、今回の流木模型と比較すると若干幹の太さに関しては細かいが、長さに関しては流木模型と変わらないことが確認された。

また、根毛群の寸法は洪水時の観測より現地値で約 3 m の長さとした。

③投入 1 回当たりの流入本数

1 回当たりの投入本数の根拠であるが、昭和 33 年の狩野川台風時の流木量調査⁴⁾より 1 秒当たり約 12 本の流木を投入することが適当であるとの結果を得た。今回の実験では、1 回当たりの流木模型投入本数を 12 本、根毛群模型を 10 個とし合計 22 個の模型を流下させる事から毎秒ではなく 2 秒に 1 回とした。

根毛群の投入個数は、洪水時の観測より流木と同程度の 10 個とした。

④投入 1 回当たりの流木本数の内訳

昭和 62 年の山形県温海町の流木調査⁵⁾より、流木を形状別に分類すると幹のみが約 7 割を占め、残りが幹＋根などが約 3 割を占めている事が判明した。これより投入 1 回当たりの投入本数のうち幹のみを 7 本、幹＋根を 5 本と設定した。

次に幹のみ及び幹＋根の寸法ごとの内訳は、平均値の流木寸法の割合が一番高くなるように設定した。

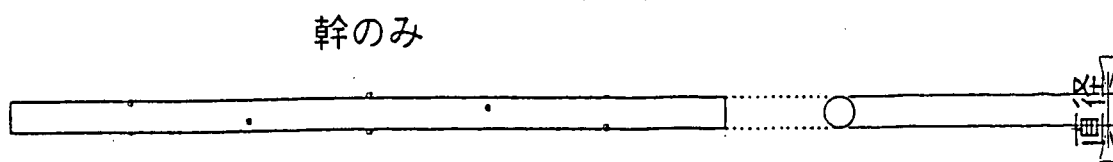
以上①～④より、今回実験で使用した流木模型の寸法・形状及び投入 1 回当たりの内訳数を表-13 に示した。またそれぞれの形状を図-5 に示した。

表-13 流木模型の寸法・形状及び投入1回あたりの投入本数

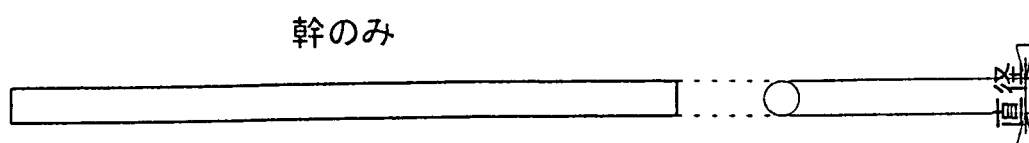
流木模型 No.	直径 (cm)	長さ (cm)	1 投入当たりの本数	形状
1	約 1.7	40	2	幹のみ
2	約 1.3	30	2	幹のみ
3	約 1.3	30	1	幹+根
4	約 0.8	20	3	幹のみ
5	約 0.8	20	2	幹+根
6	約 0.7	20	2	枝+根

* 数値は全て模型値

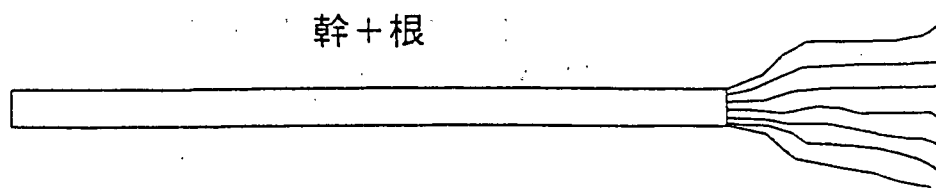
流木No. 1



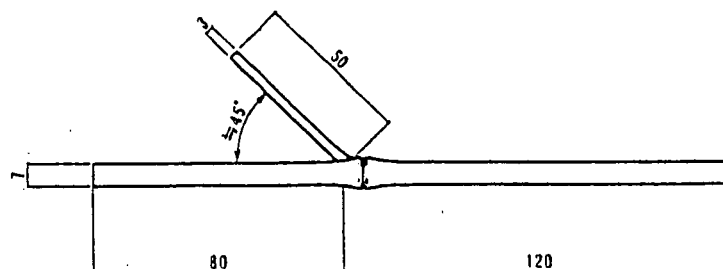
流木No. 2、4



流木No. 3、5



流木No. 6



単位：(cm)

図-5 流木模型の形状

各流木模型の形状は、以上のようなになっている。流木模型製作において幹のみの最大長流木（流木模型N o. 1）に関しては、平成 11 年度の模型では、模型値で 2mm 程度の枝を約 10 個ほどバランス良く付けた。設けた理由としては、平成 9 年度の実験において表面張力によりトンネル本管内に滞留する流木があまりにも多く実験結果を得ることが困難なため、平成 10 年度の流木模型では流木の片側に輪ゴムを巻き付け凹凸を設けた。ところが、今度は輪ゴムと壁面（アクリル）との摩擦で流木模型が滞留したため、平成 11 年度の流木模型では、より実際の木に近い材料と形状を考慮し、2mm 程度の枝を設けた。その他の根や枝が付いている模型では、根や枝の本数・長さ・角度に関する必要データを実際の木々より調査し決定した。また、流木以外の流下物として、草や木の枝・根を想定した根毛群模型の形状を図-6 に示す。根毛群模型は、長さ 10cm の麻紐合計 9 本をほどいて輪ゴムで束ねた。

流木及び根毛群模型の投入方法は、流木N o. 1 を一番下に一列に並べて、その上に流木N o. 2 から順番に重ね、最後に根毛群模型を乗せ一束にしてトンネル呑口より静かに投入する。この時根付きの模型に関しては、根のある方を上流側に向けて流下させた。枝付きの模型に関しては枝の付いている方を下流側に向けて流下させた。

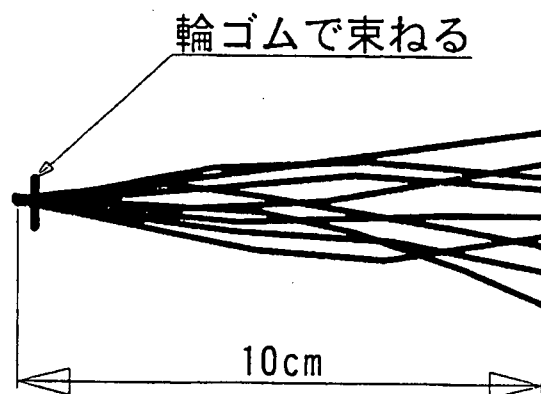


図-6 根毛群模型

⑤最大流木長（=L）とトンネル河川断面直径（=2r）との関係

流木がトンネル内に閉塞する原因の一つとして、流木長とトンネル断面直径との関係が考えられる。実験で選定した各流量ごとのトンネル断面直径（=2r）と最大流木長 12m との関係を図-7 に示した。図より流木長 12m の場合、流量が多く成る程、断面直径と流木長が等しくなることが分かる。

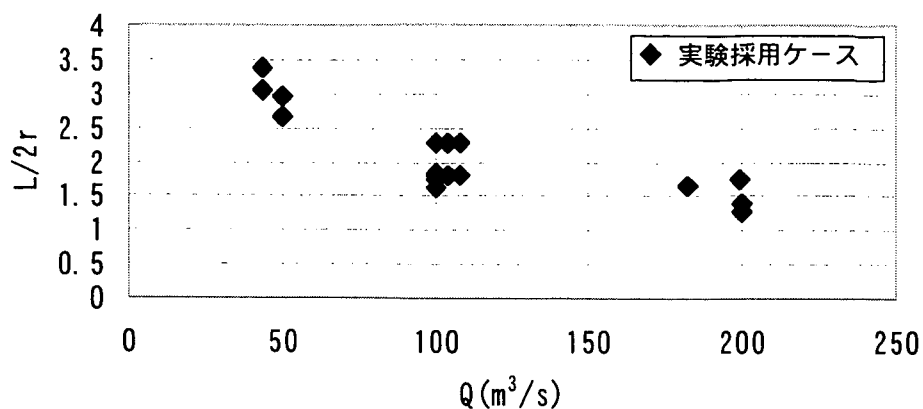


図-7 最大流木長とトンネル河川断面直径との関係

2. 7 実験ケース

これまでに、実験を行った直線部実験ケースを表-14 に、屈曲部実験ケースを表-15、16 に示した。表中の流量は実験で計測された流量であり、前述した計画流量とは若干異なっている。また、屈曲部実験投入回数は直線部同様 20 回としている。

表-14 直線部実験ケース表

実験ケース	流量 (m³/s)	余裕率	勾配	2 r (m)	水深 (m)	投入回数
1	43	15%	1/200	3.5	2.8	20
2	43	0.3Q + 15%	1/200	3.8	2.5	20
3	50	15%	1/300	4.0	3.2	20
4	50	0.3Q + 15%	1/300	4.4	2.8	20
5	100	15%	1/300	5.2	4.2	20
6	100	15%	1/1000	6.5	5.3	20
7	104	10%	1/1000	6.5	5.5	20
8	108	5%	1/1000	6.5	5.9	20
9	182	0.3Q + 15%	1/300	7.2	5.0	20
10	199	15%	1/300	6.8	5.4	20
11	200	15%	1/1000	8.5	6.8	20
12	200	0.3Q + 15%	1/1000	9.4	6.0	20
参考	100	10%	1/1000	6.5	5.5	100

* 数値は全て現地値

表-15 屈曲部実験ケース表（曲率半径 50m、中心角度 86°）

屈曲部実験ケース	流量 (m ³ /s)	余裕率 (%)	勾配	2r (m)	水深 (m)
1	100	15	1/300	5.3	4.2
2	108	5	1/1000	6.6	5.9
3	104	10	1/1000	6.6	5.6
4	100	15	1/1000	6.6	5.3

* 数値は全て現地値

表-16 屈曲部実験ケース表（曲率半径 200m、中心角度 43°）

屈曲部実験ケース	流量 (m ³ /s)	余裕率 (%)	勾配	2r (m)	水深 (m)
5	106	7	1/300	5.3	4.6
6	104	10	1/300	5.3	4.5
7	100	15	1/300	5.3	4.2
8	100	15	1/1000	6.6	5.3

* 数値は全て現地値

2. 8 水位縦断面図及び横断流速分布図

流木の流下に影響を与えると思われるトンネル部の水位と断面流速を以下に示す。なお、水位については水深を計測し、流速はプロベラ式流速計を使用した。水位計測結果より実験条件によっては、波が発生する実験ケース（巻末資料写真-9）と発生しない実験ケースがあることが判明した。波が発生した原因として、導水路部からトンネル呑口において水路幅が急縮することが考えられる。発生する波の振幅と波の状況について、直線部実験を表-17 に屈曲部実験を表-18 に示した。また、直線部実験における各実験ケースの水位縦断面図と横断流速分布図を図-8 から図-19 に、屈曲部実験における各実験ケースの水位縦断面図と横断流速分布図を図-20 から図-27 に示した。

表-17 直線部の実験条件と波の振幅

実験ケース	波の振幅 (m)	流況パターン	波の分類
1	0.00~0.24	流況2	大
2	0.00~0.42	流況2	大
3	0.06~0.39	流況3	大
4	0.00~0.06	流況2	中
5	0.06~0.27	流況3	大
6	0.01~0.03	流況1	小
7	0.01~0.03	流況1	小
8	—	流況1	小
9	0.00~0.33	流況3	中
10	0.09~0.27	流況2	中
11	—	流況1	小
12	—	流況1	小

* 数値は全て現地値

表-18 屈曲部実験条件と波の振幅

実験ケース	波の振幅 (m)	流況パターン	波の分類
1	0.05~0.34	流況3	大
2	0.01~0.04	流況1	小
3	0.02~0.05	流況1	小
4	0.02~0.03	流況1	小
5	0.01~0.83	流況3	大
6	0.04~0.28	流況3	大
7	0.03~0.41	流況3	大
8	0.01~0.04	流況1	小

* 数値は全て現地値

《 流況パターン 》

流況1 : 波が殆ど発生しない

流況2 : トンネル呑口で波が発生するが、次第に減勢する

流況3 : トンネル呑口で波が発生し、最後まで波が収まらない

《 波の分類 》

大 : 振幅がトンネル断面直径の約6%から10%の場合

中 : 振幅がトンネル断面直径の約1%から5%の場合

小 : 振幅が殆どない

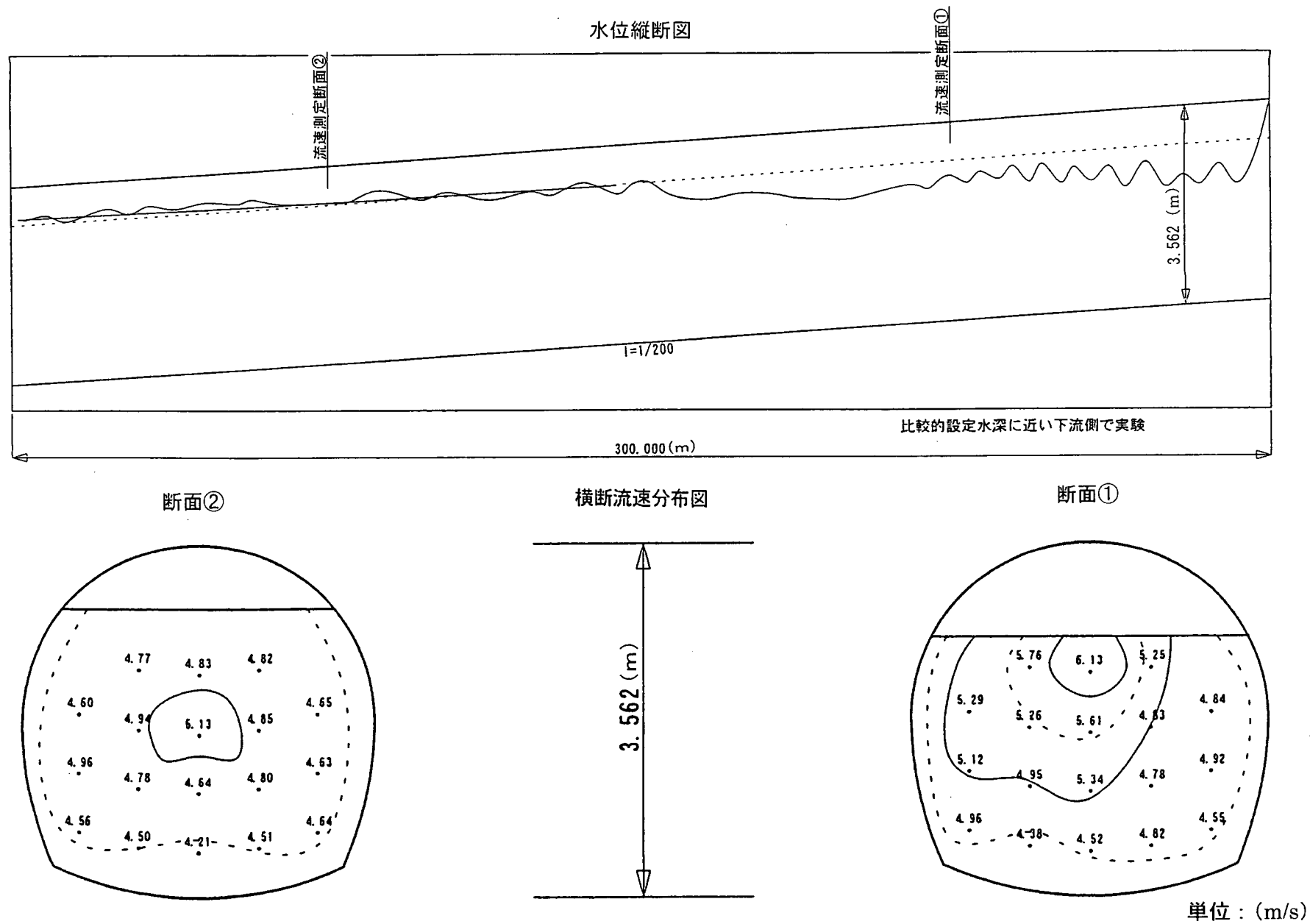
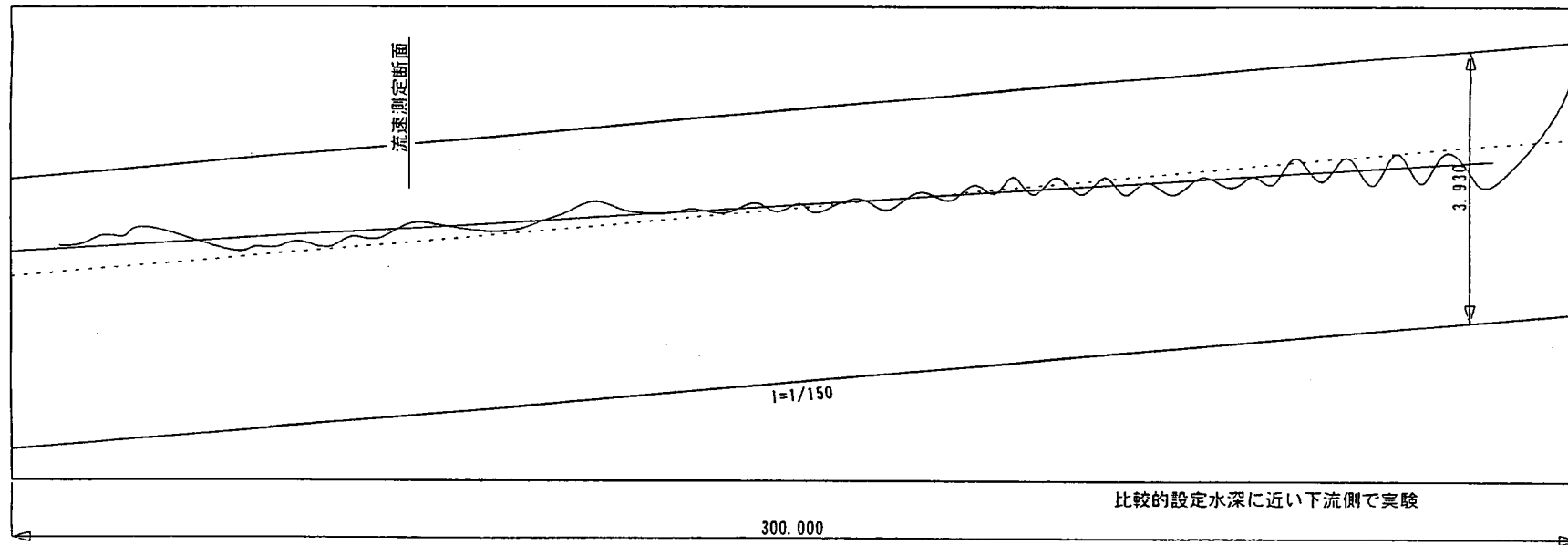


図-8 水位縦断面図及び横断流速分布図
直線部実験ケース 1 (余裕率 15%、勾配 1/200、流量 43m³/s)

水位縦断面図



横断流速分布図

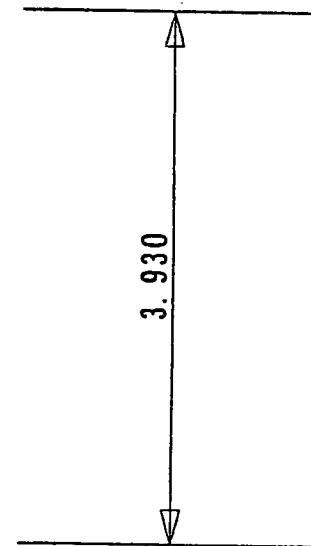
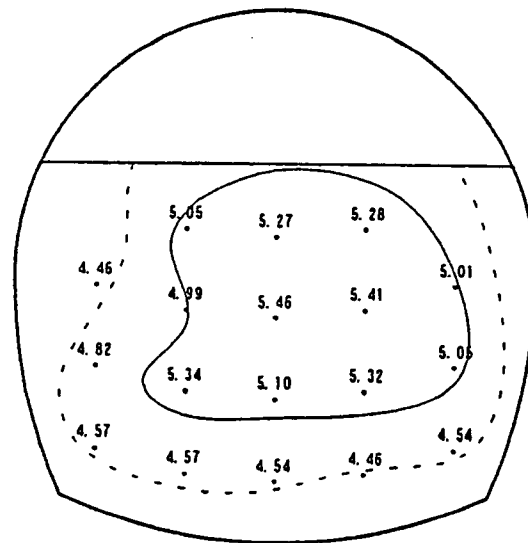
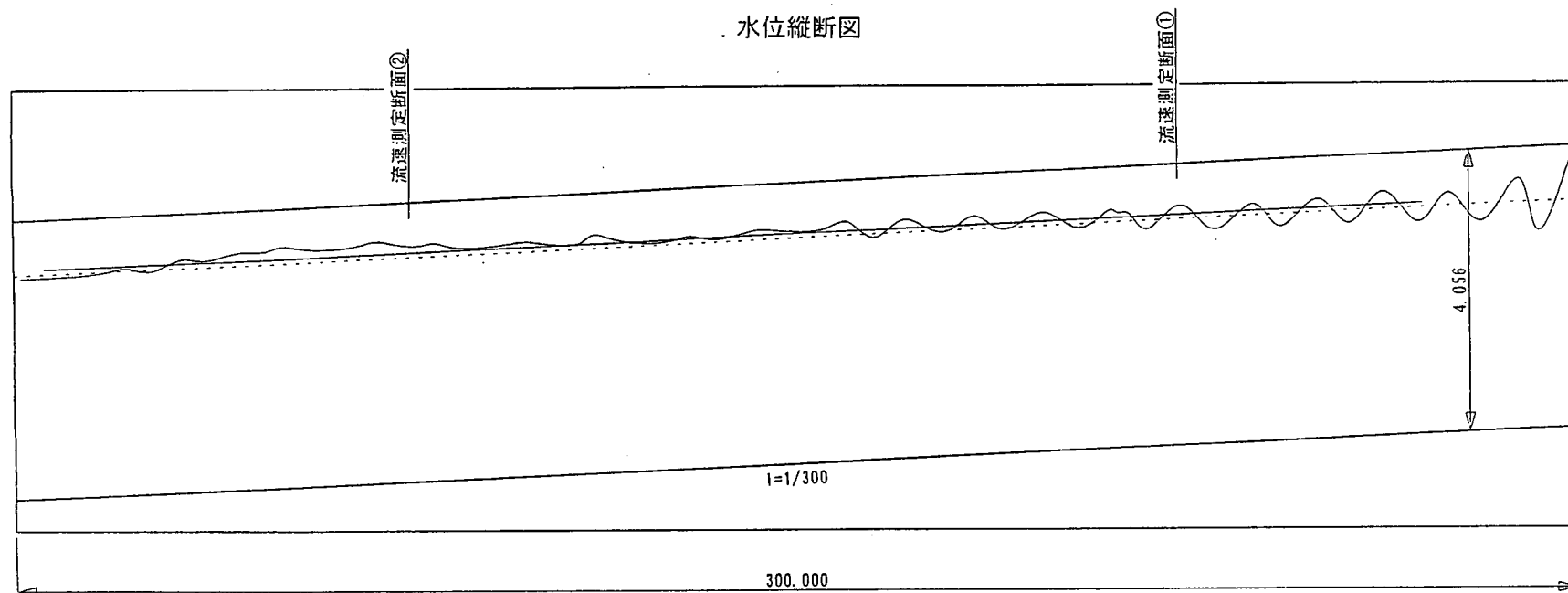


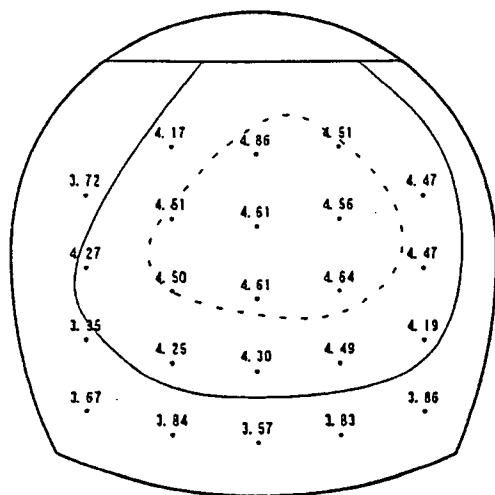
図-9 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 2 (余裕率 0.3Q+15%、勾配 1/200、流量 43m³/s)

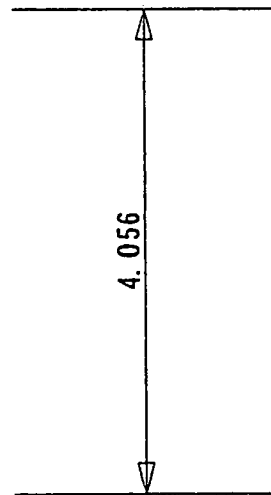
水位縦断面図



断面②



横断流速分布図



断面①

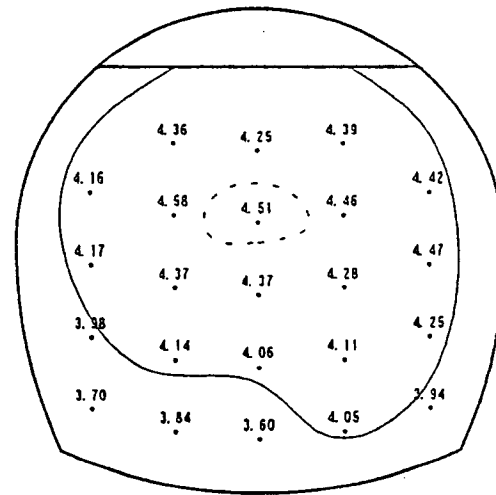


図-10 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 3 (余裕率 15%、勾配 1/300、流量 50m³/s)

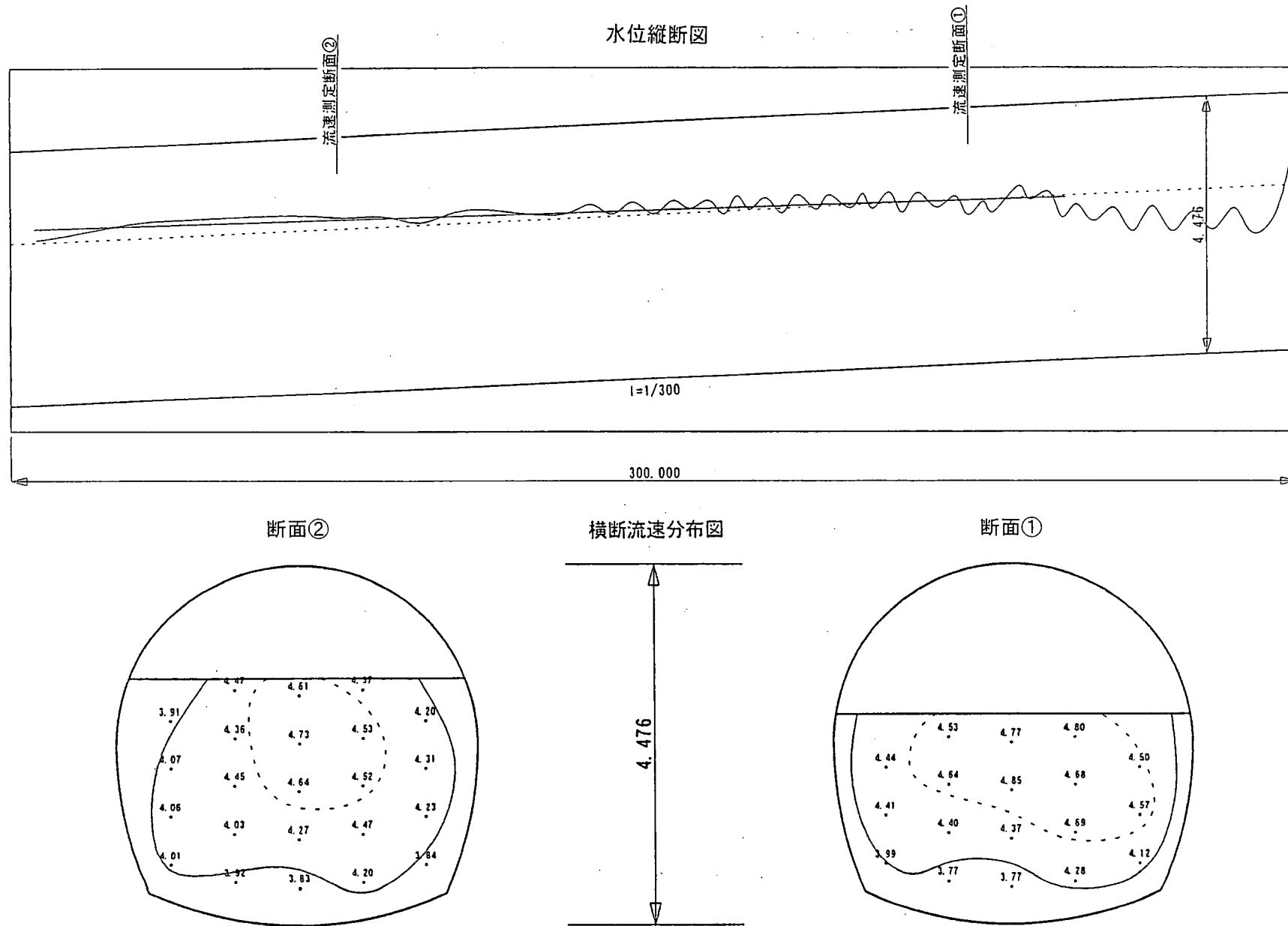
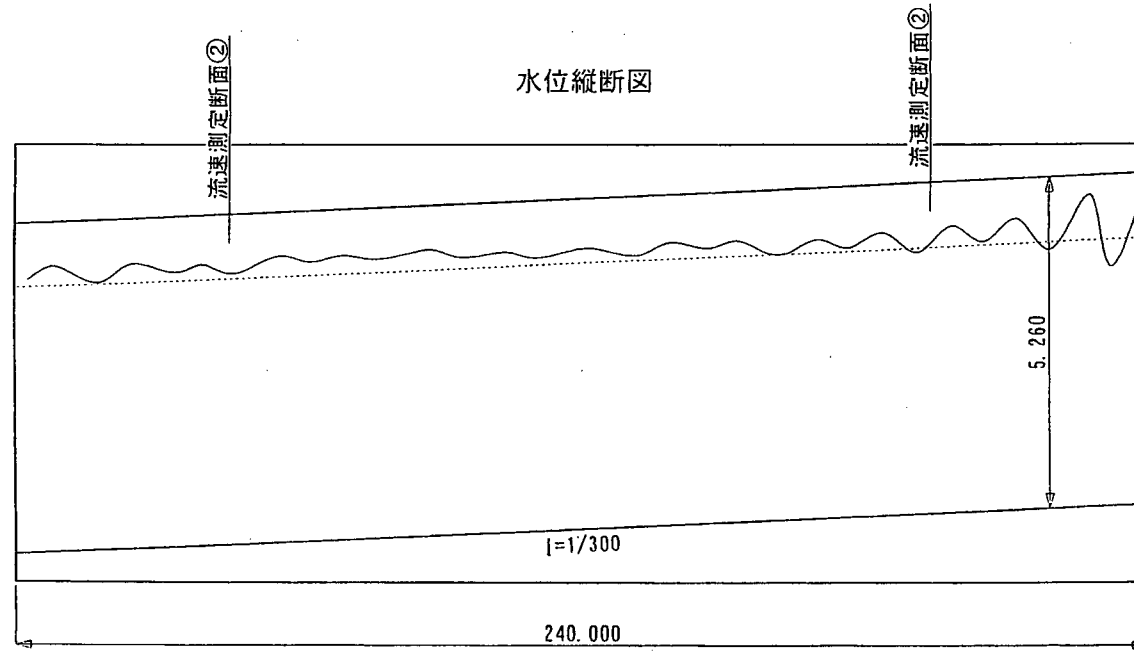


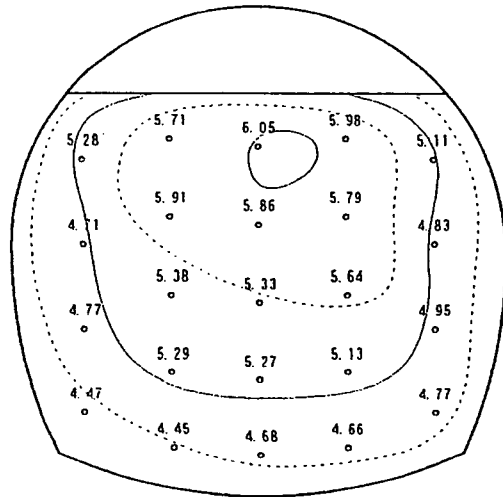
図-11 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 4 (余裕率 0.3Q+15%、勾配 1/300、流量 50m³/s)

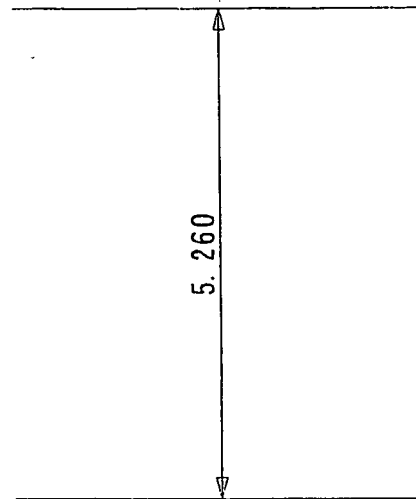
水位縦断面図



断面②



横断流速分布図



断面①

図-12 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 5 (余裕率 15%、勾配 1/300、流量 $100\text{m}^3/\text{s}$)

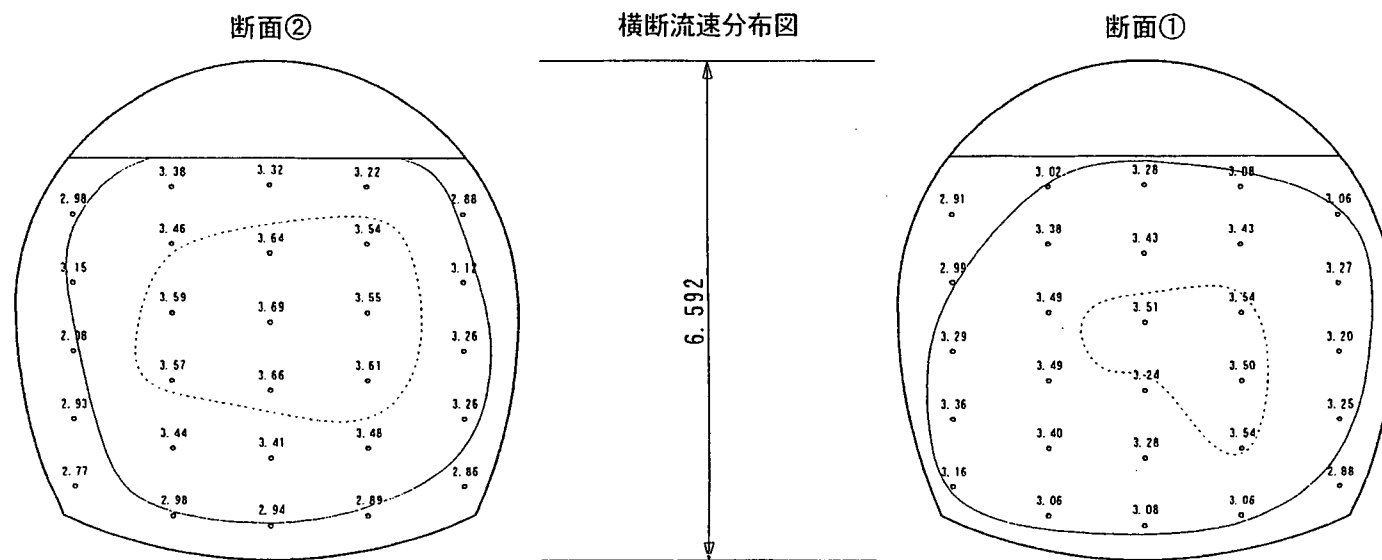
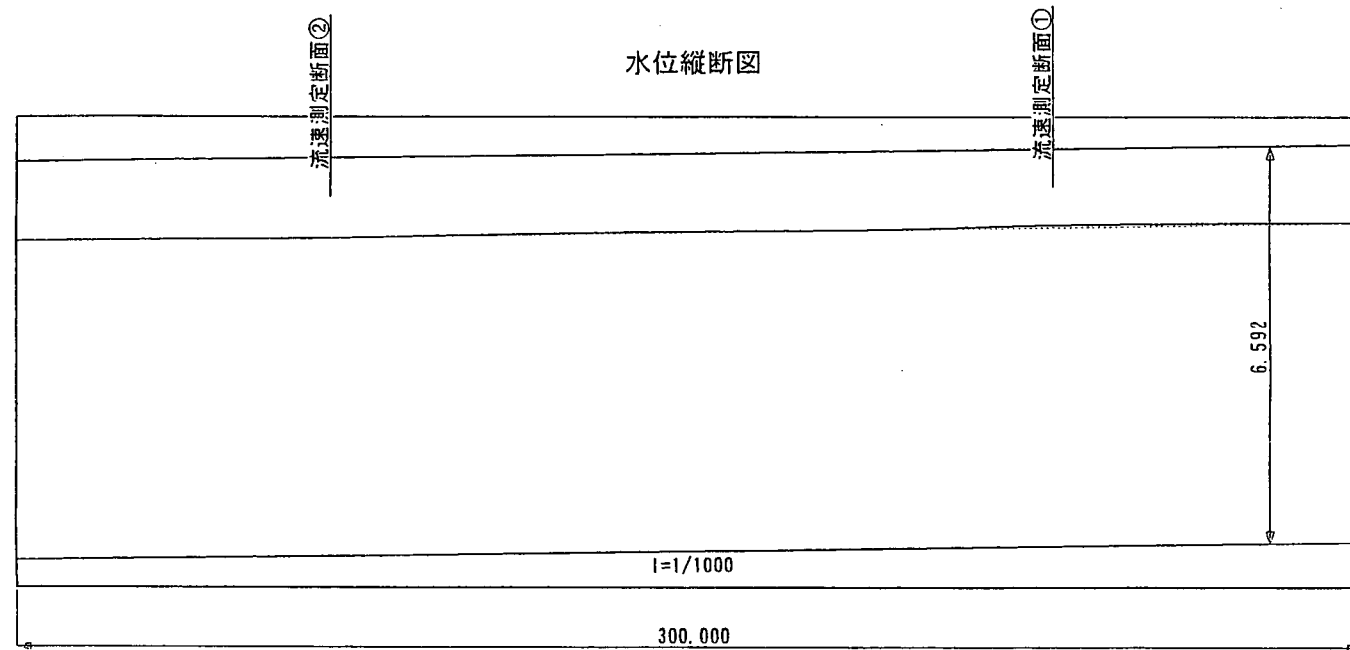


図-13 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 6 (余裕率 15%、勾配 1/1000、流量 100m³/s)

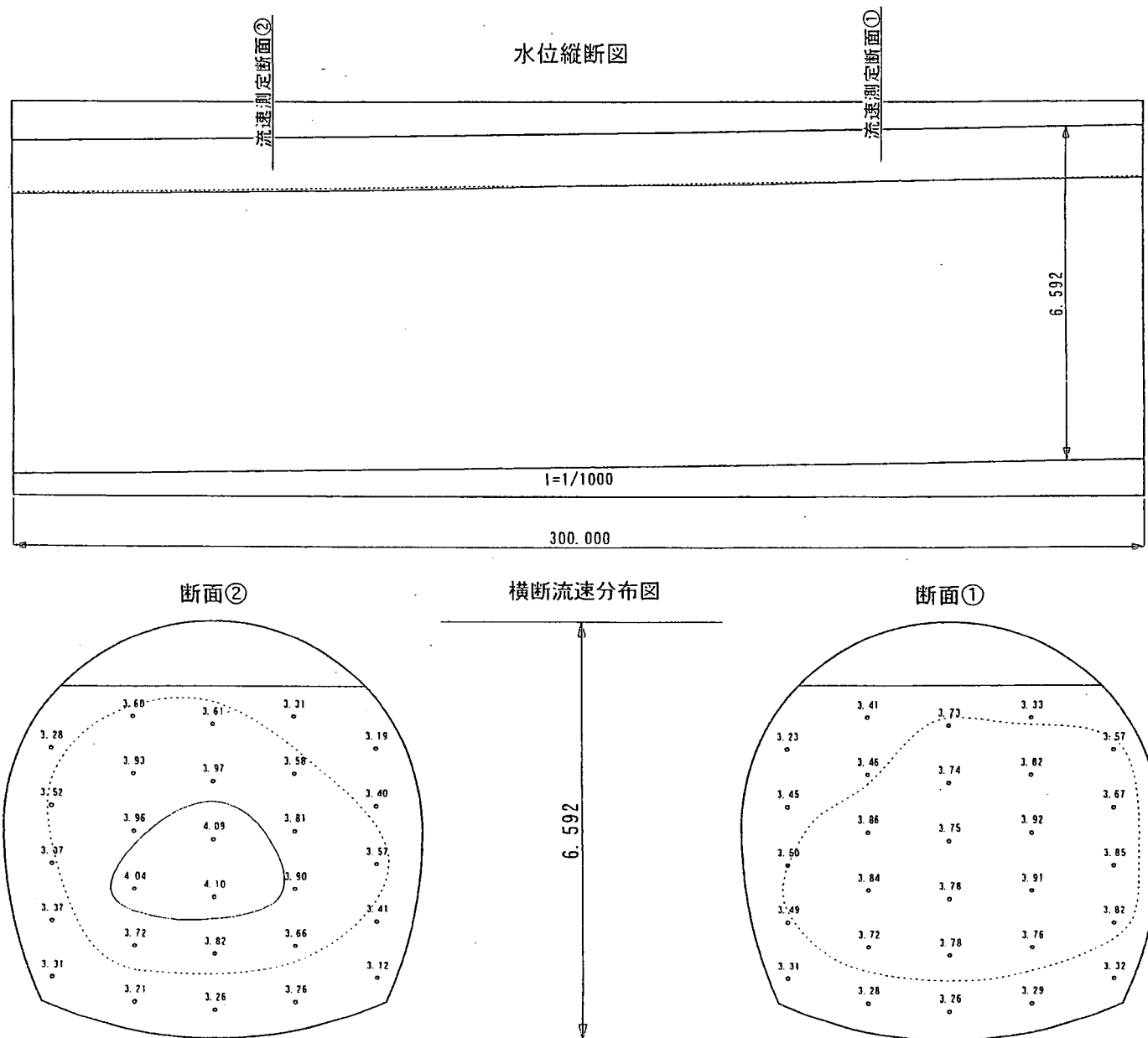


図-14 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 7 (余裕率 10%、勾配 1/1000、流量 104m³/s)

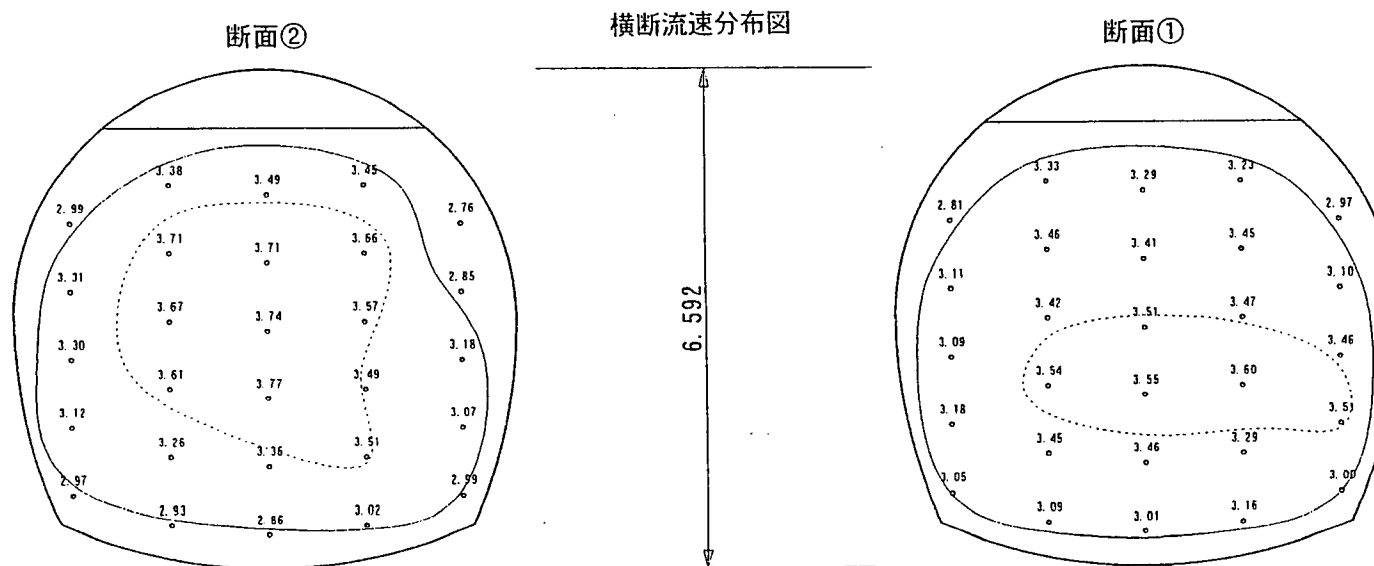
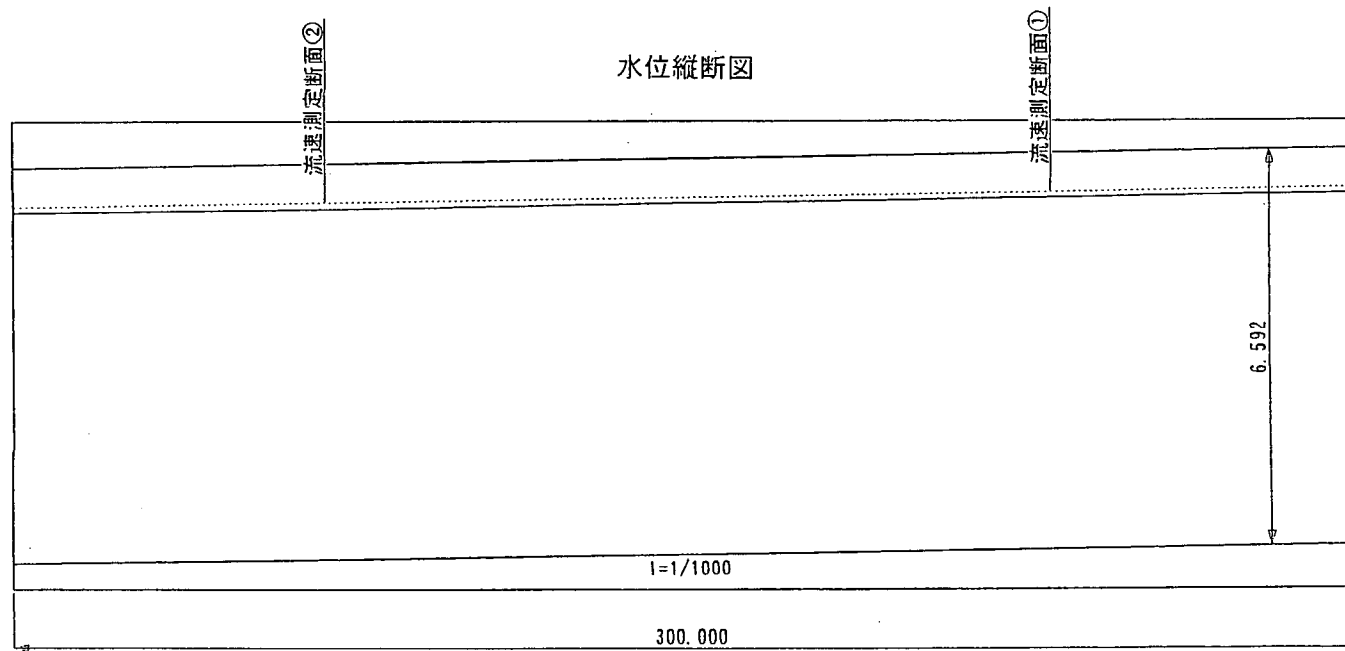
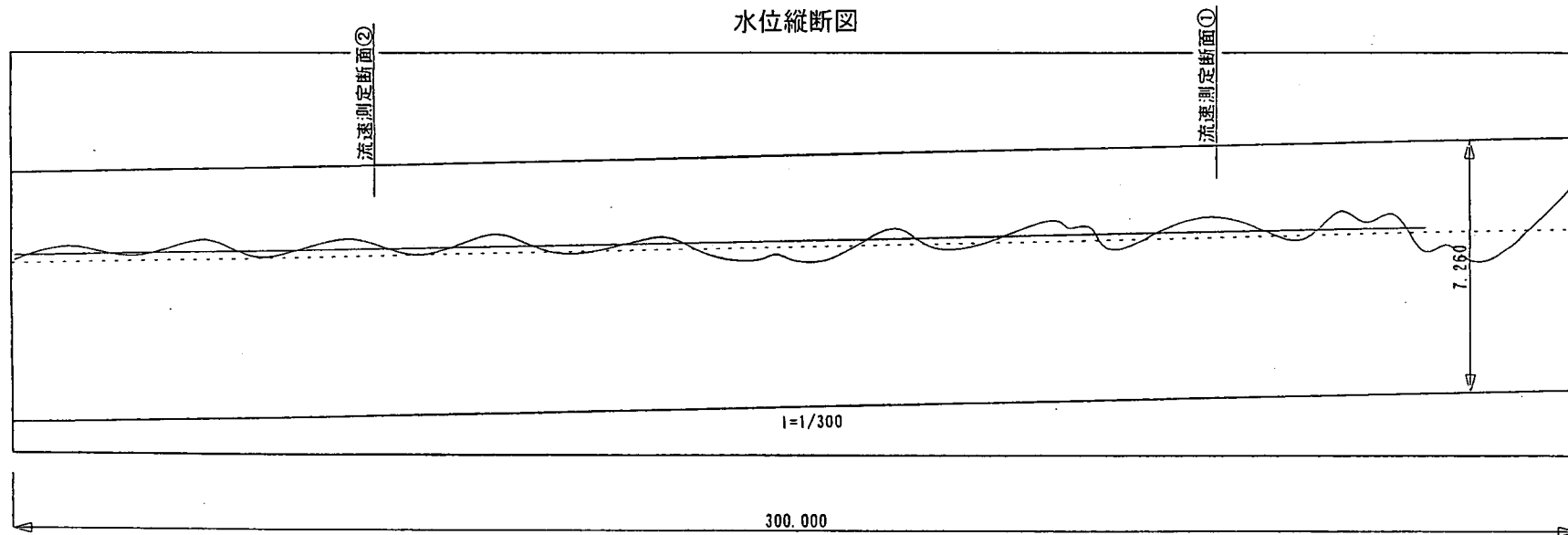


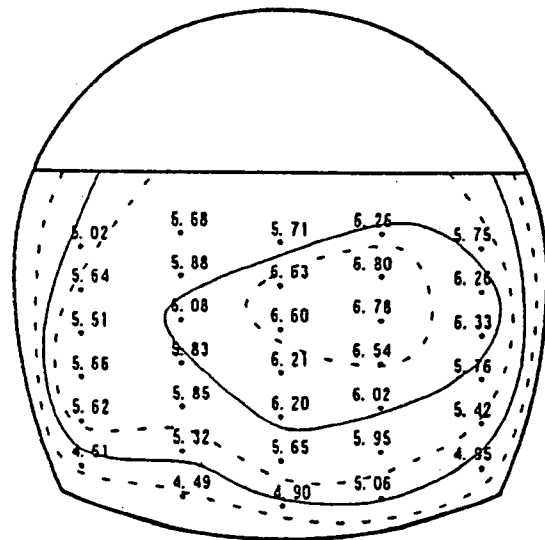
図-15 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 8 (余裕率 5 %、勾配 1/1000、流量 108m³/s)

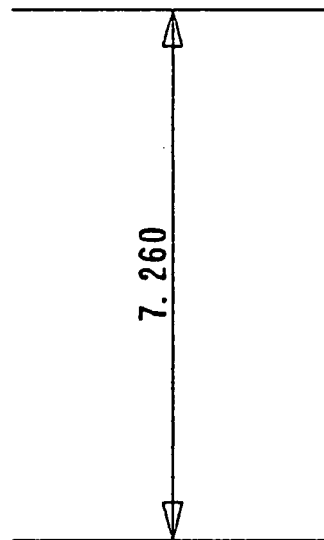
水位縦断面図



断面②



横断流速分布図



断面①

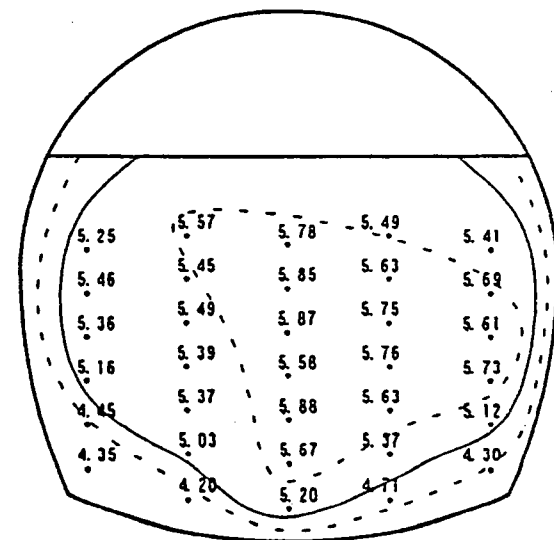


図-16 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 9 (余裕率 $0.3Q + 15\%$ 、勾配 $1/300$ 、流量 $182\text{m}^3/\text{s}$)

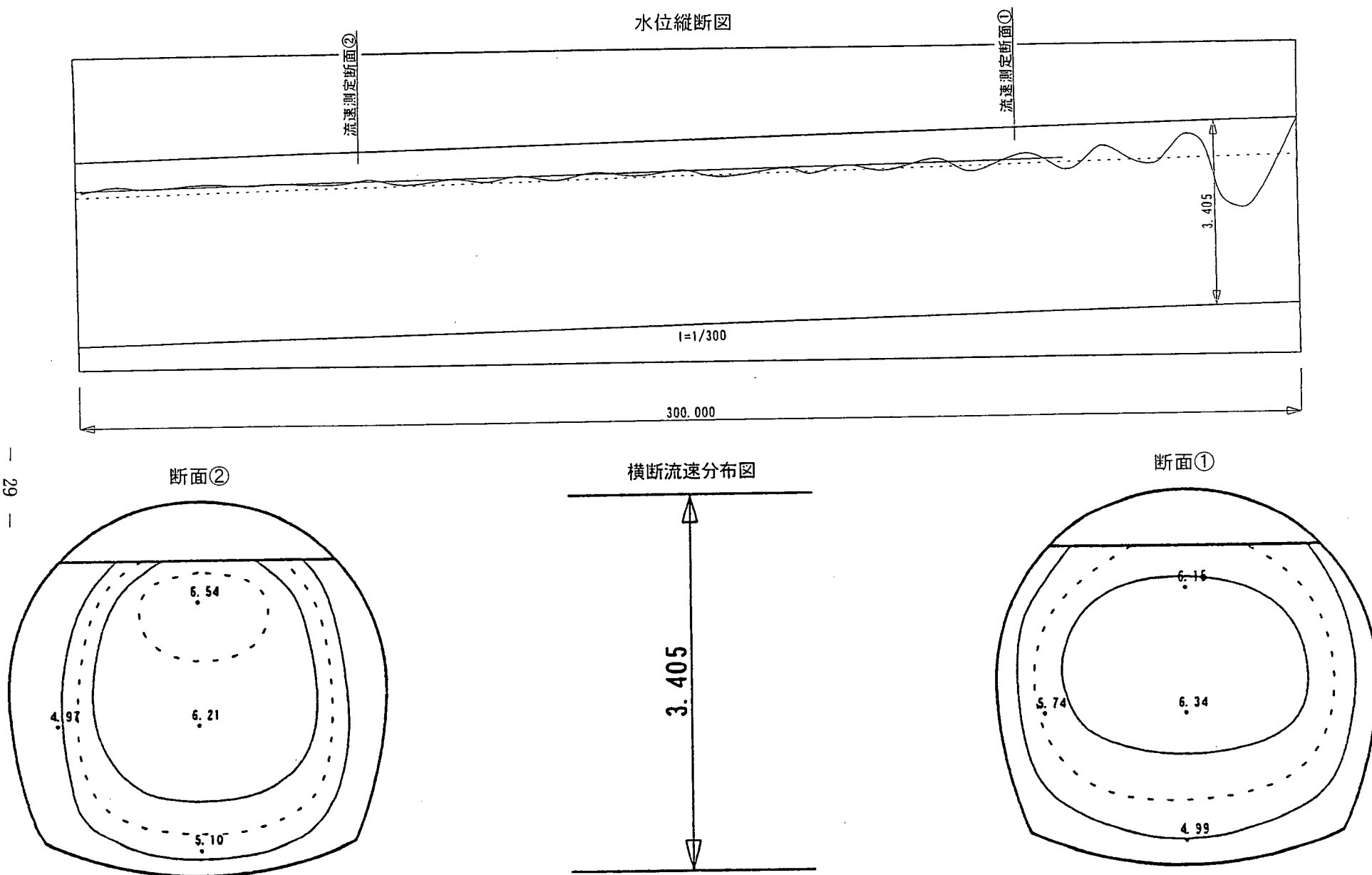


図-17 水位縦断面図及び横断流速分布図
直線部実験ケース 10 (余裕率 15%、勾配 1/300、流量 $199\text{m}^3/\text{s}$)

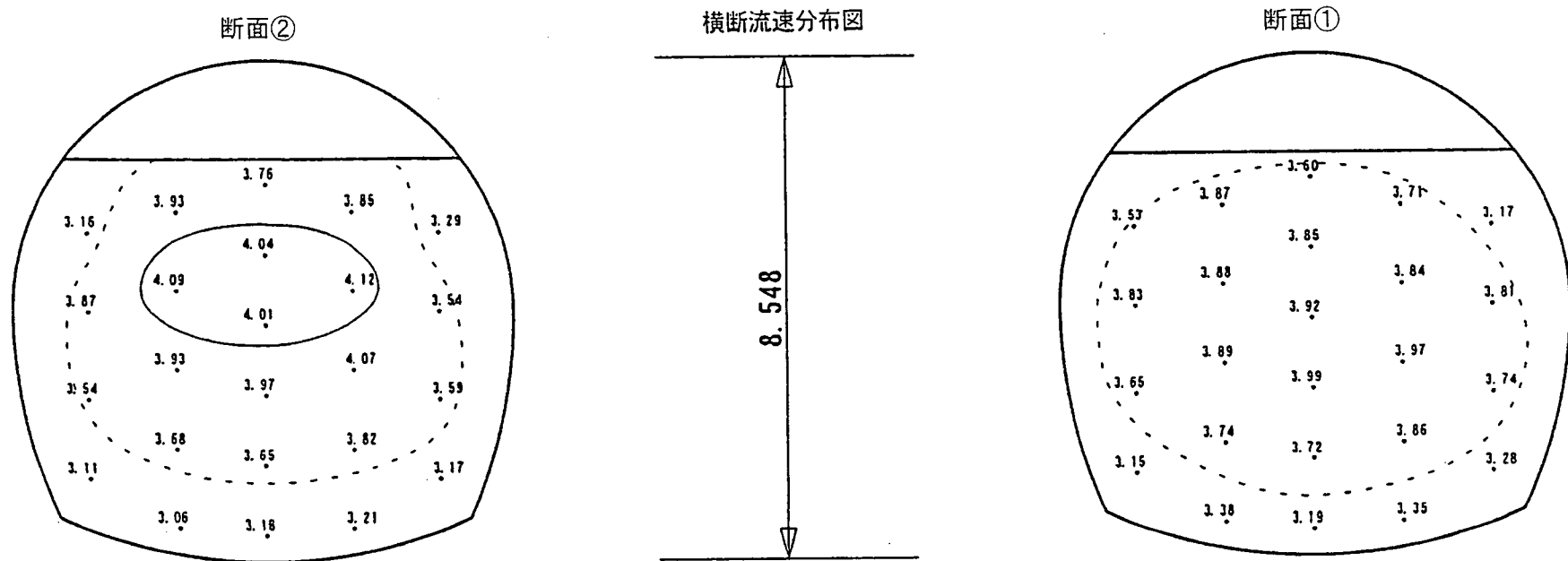
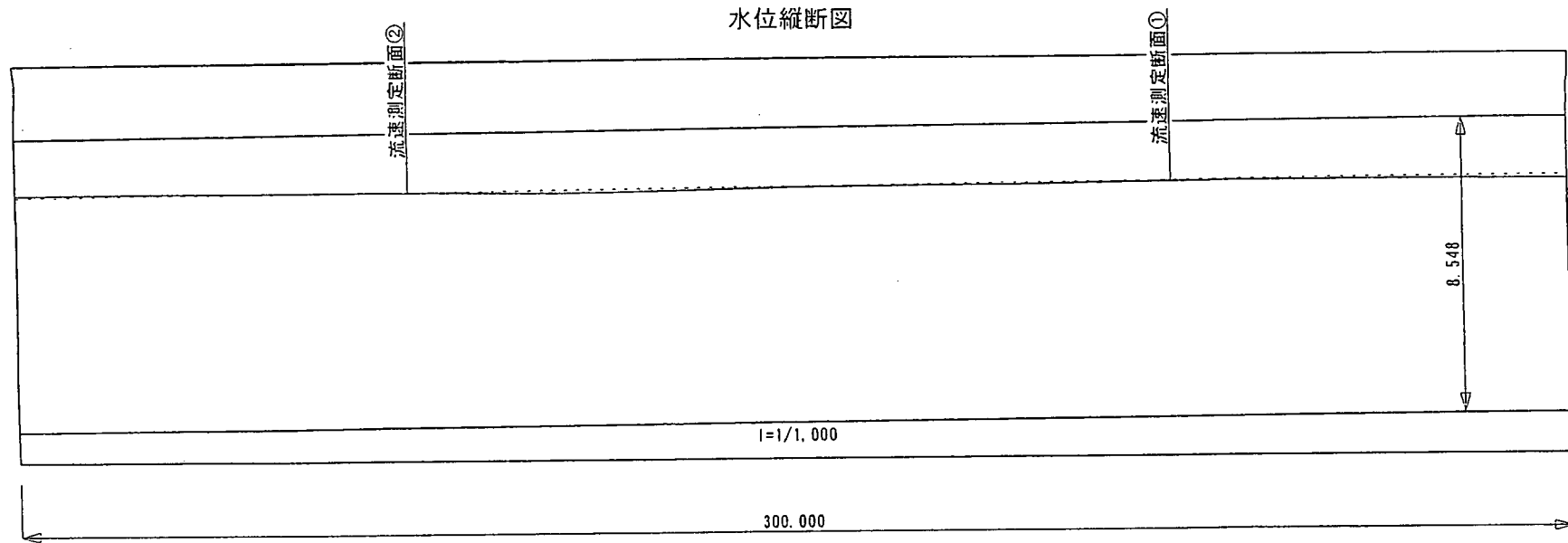
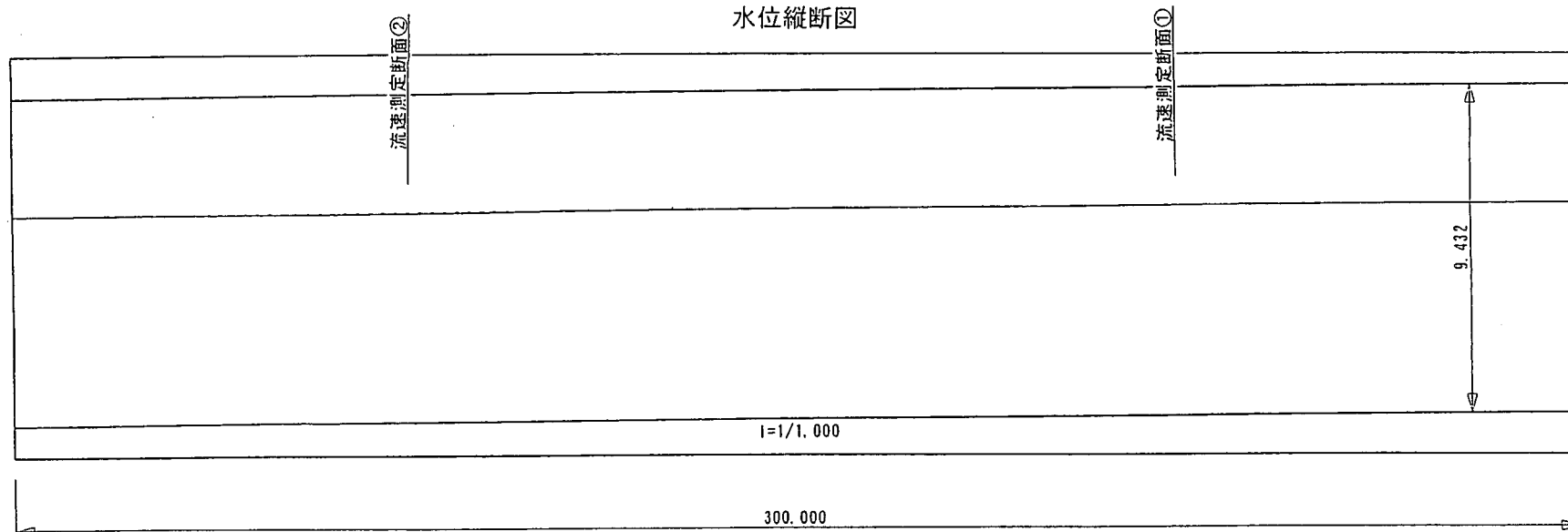


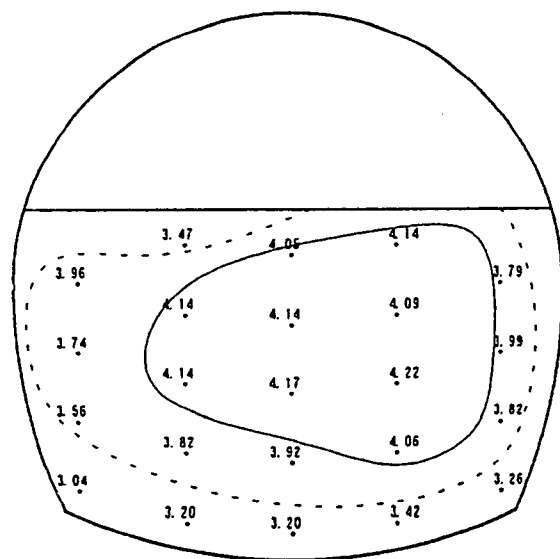
図-18 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 11 (余裕率 15%、勾配 1/1000、流量 200m³/s)

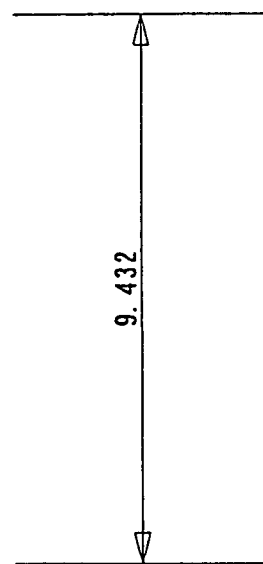
水位縦断面図



断面②



横断流速分布図



断面①

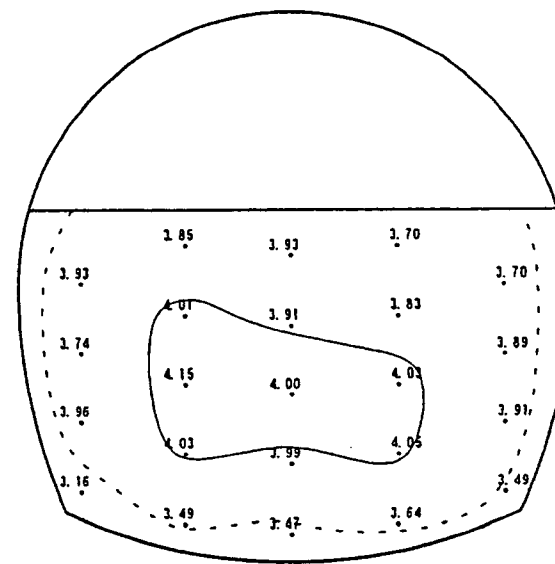
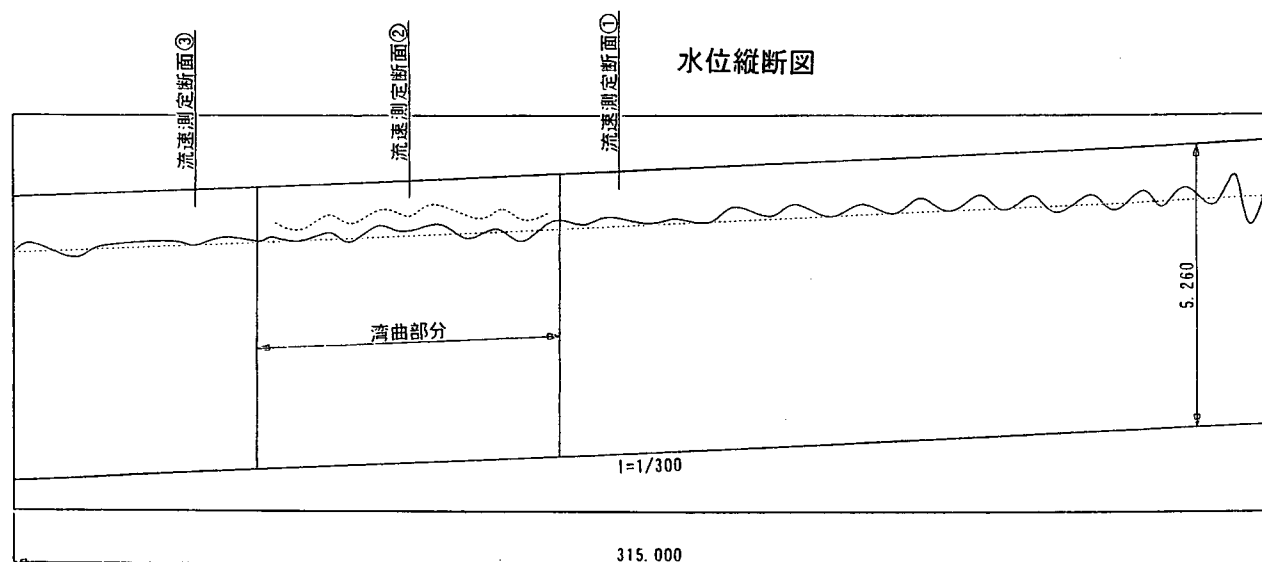


図-19 水位縦断面図及び横断流速分布図

直線部実験ケース 12 (余裕率 $0.3Q + 15\%$ 、勾配 $1/1000$ 、流量 $200\text{m}^3/\text{s}$)

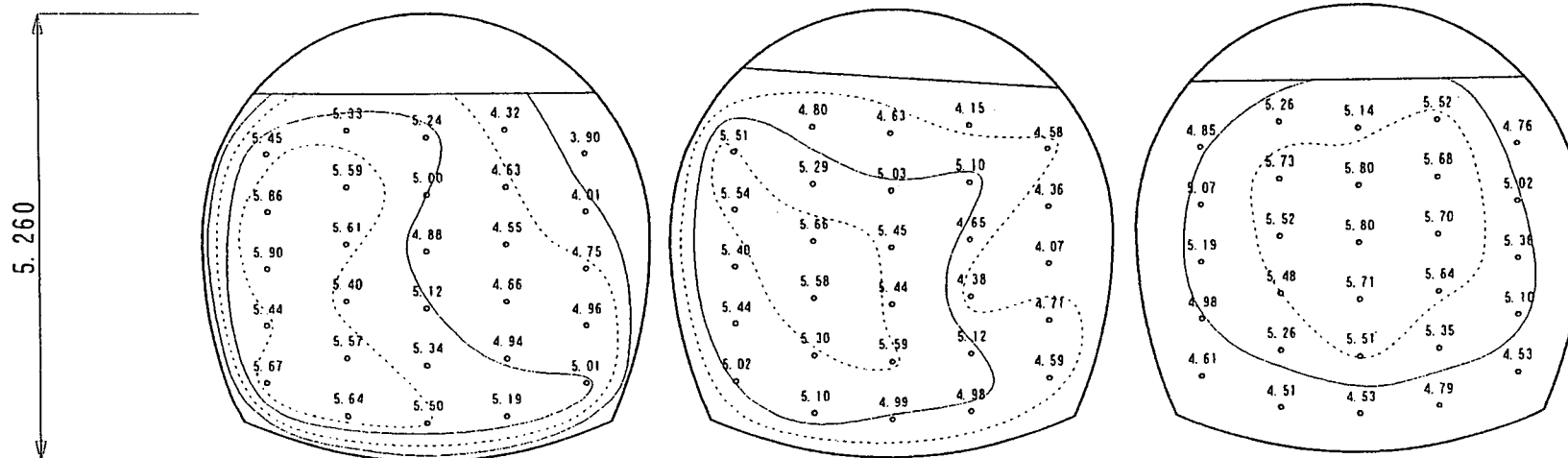


横断流速分布図

断面②

断面①

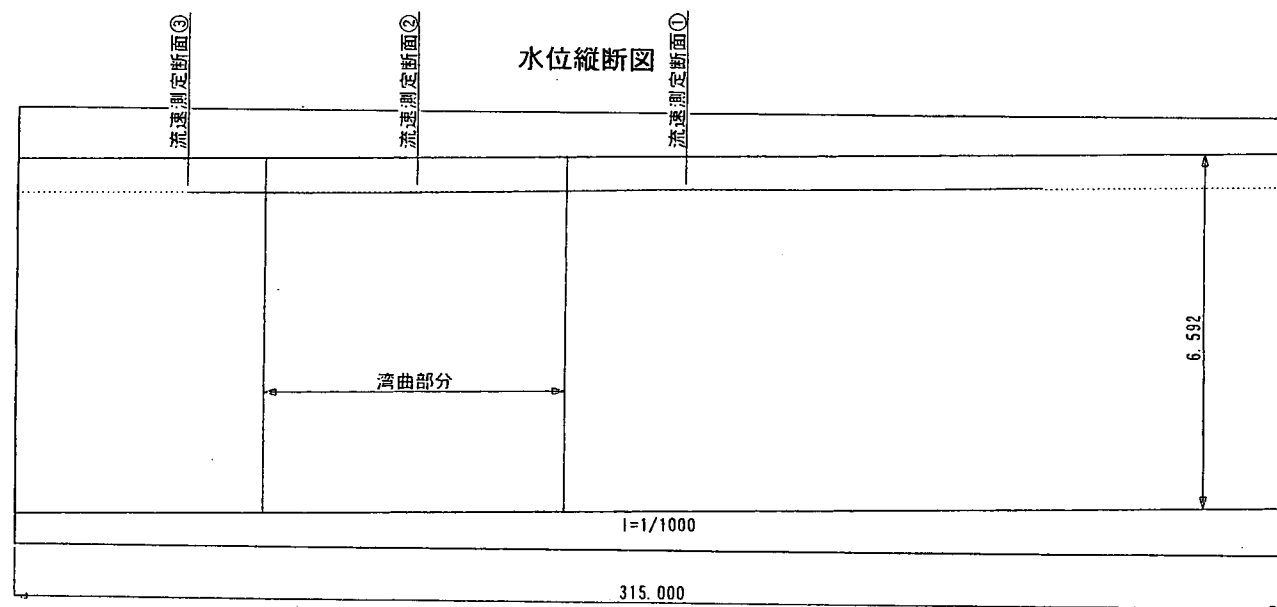
断面③



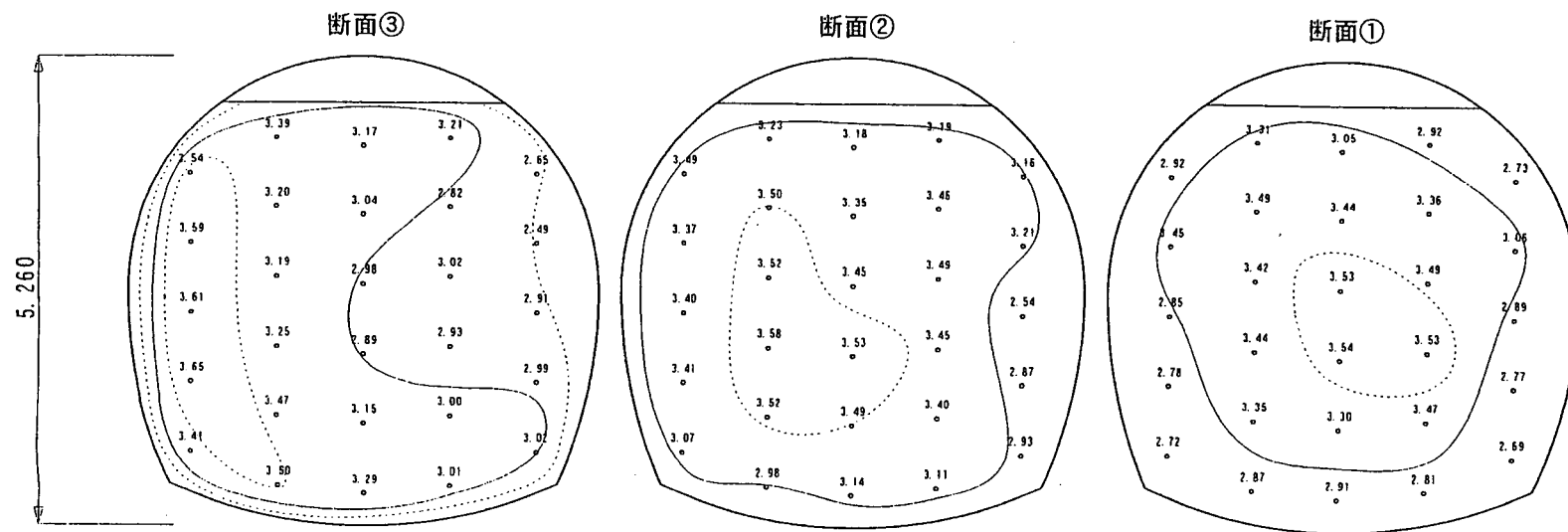
勾配	1/300
形状	50m, 86°
余裕率	15%
水深	4.232m
流量	100.00m ³ /s

図-20 水位縦断面図及び横断流速分布図

屈曲部実験ケース 1



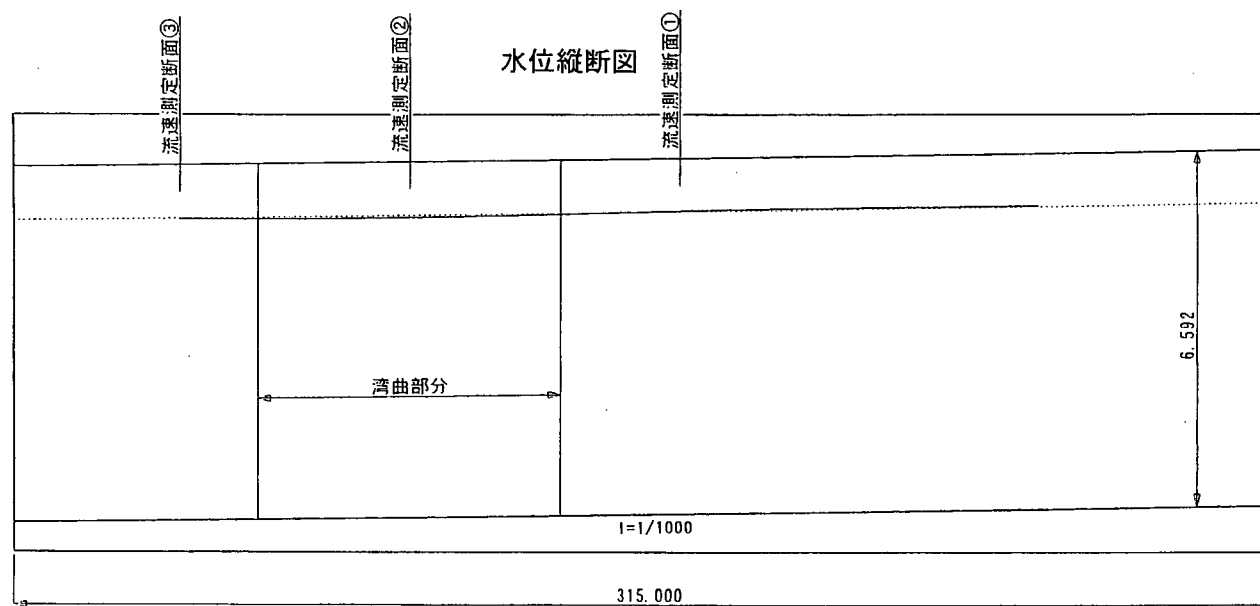
横断流速分布図



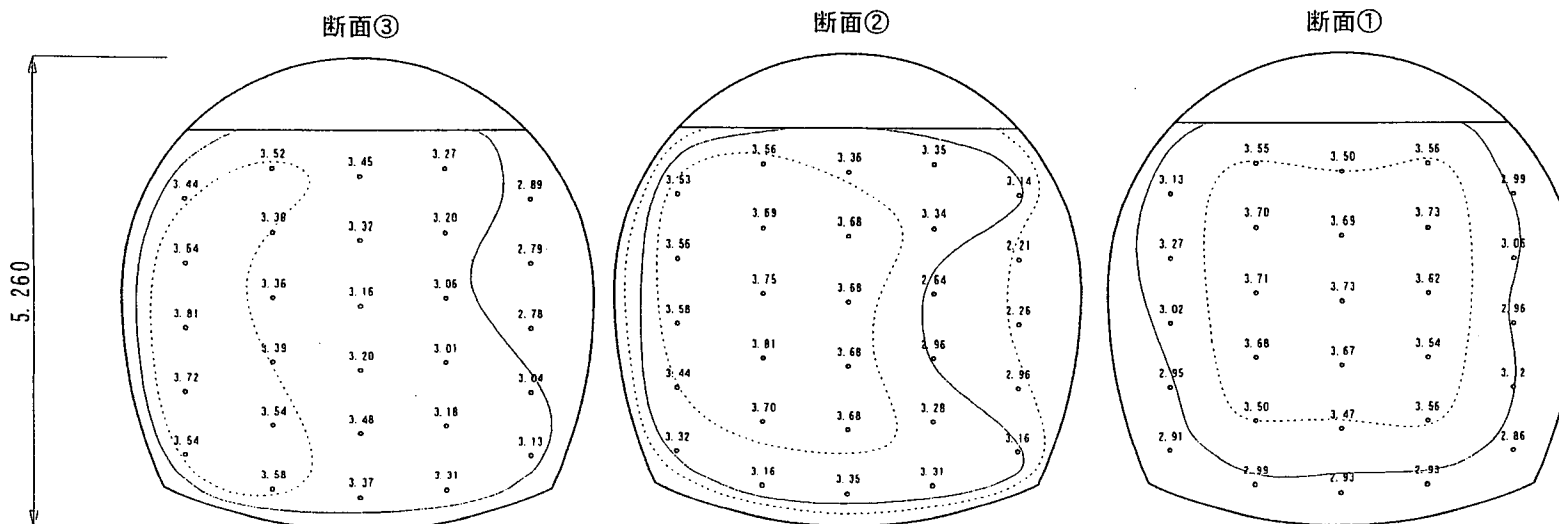
勾配	1/1000
形状	50m, 86°
余裕率	5%
水深	5.948m
流量	108.00m ³ /s

図-21 水位縦断面図及び横断流速分布図

屈曲部実験ケース 2

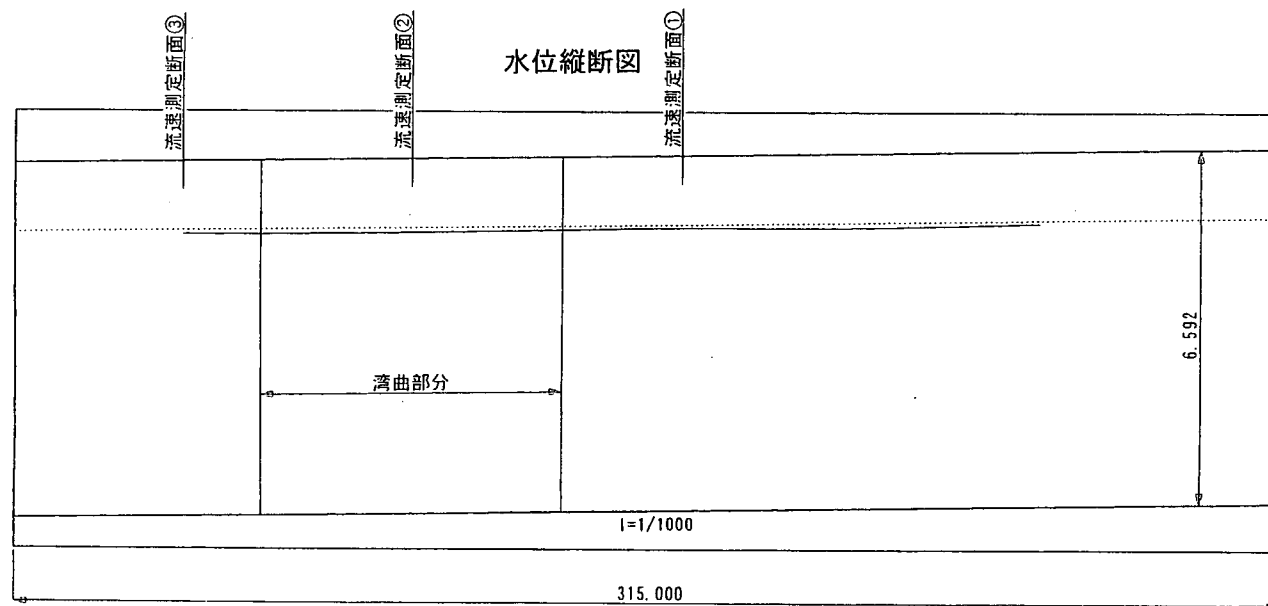


横断流速分布図

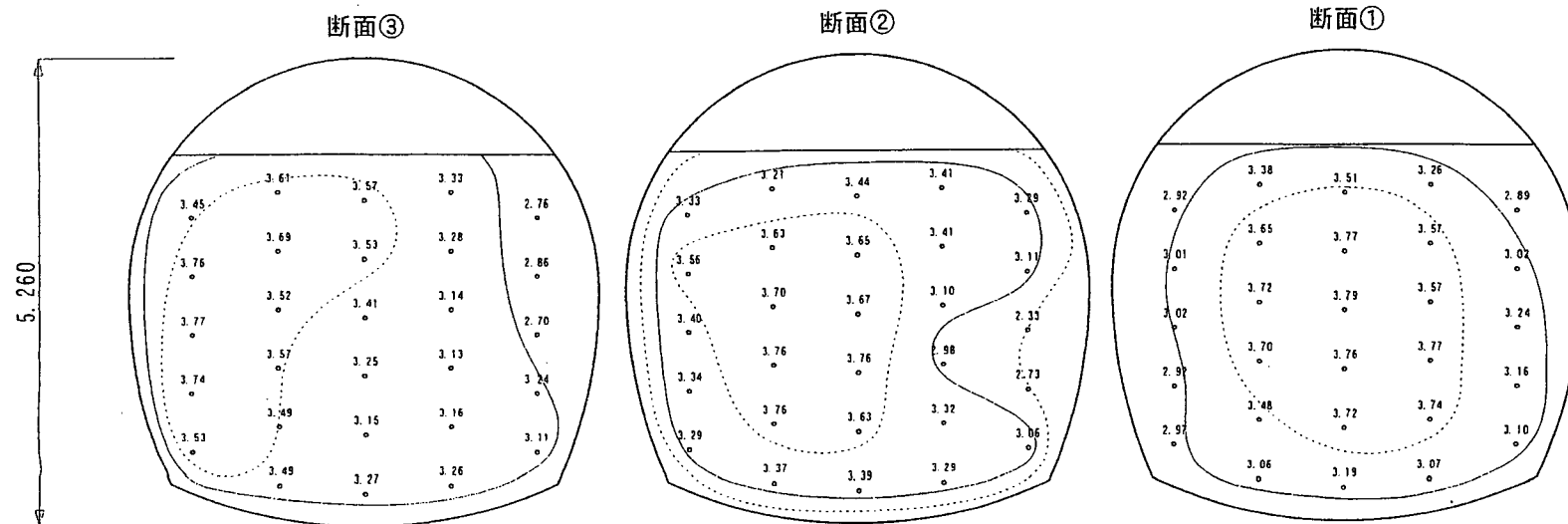


勾配	1/1000
形状	50m, 86°
余裕率	10%
水深	5.589m
流量	104.36m ³ /s

図-22 水位縦断面図及び横断流速分布図
屈曲部実験ケース 3

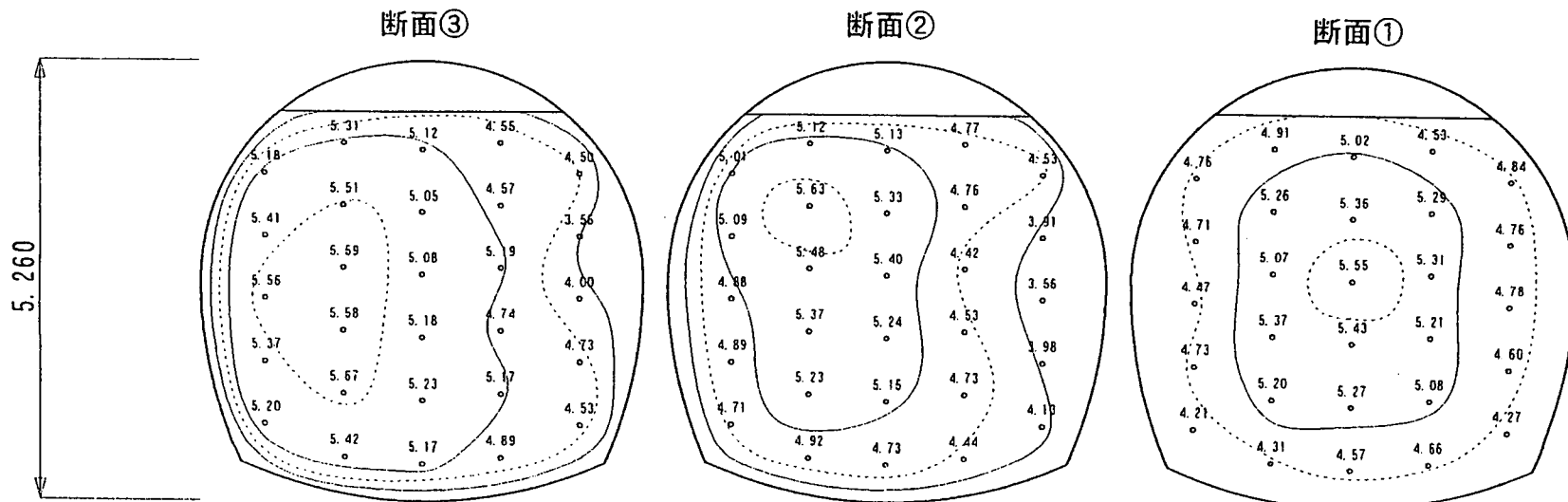
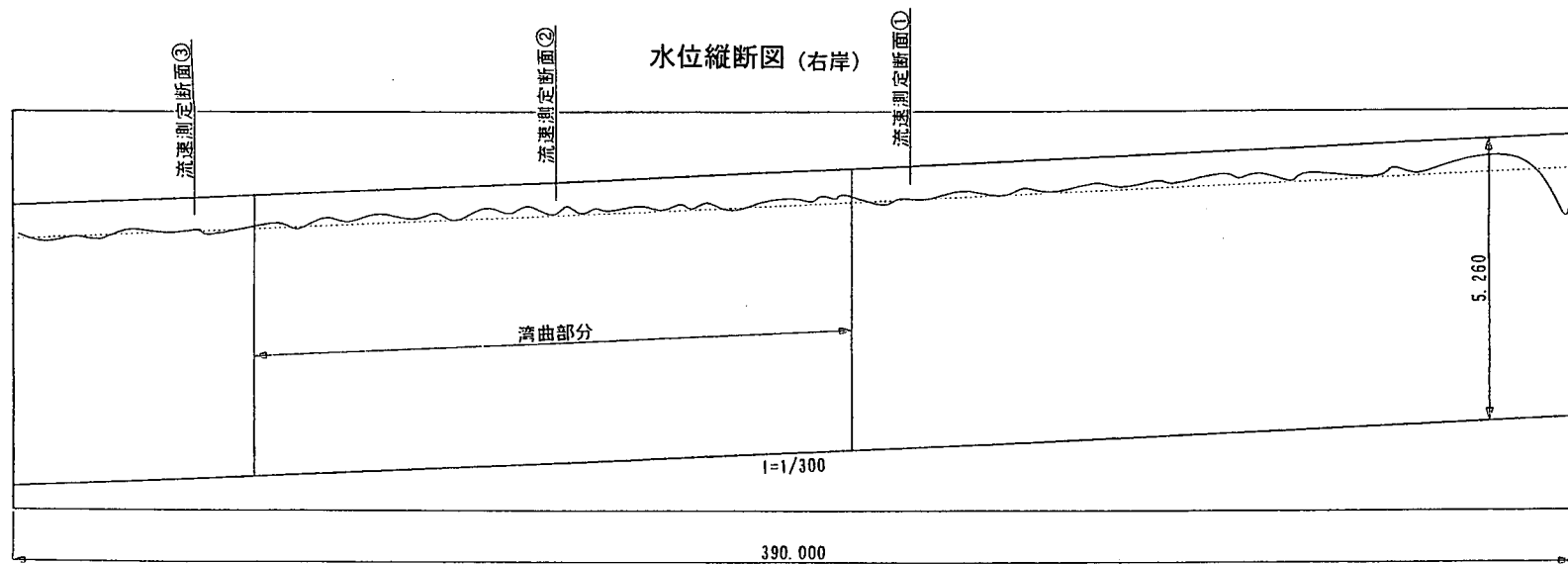


横断流速分布図



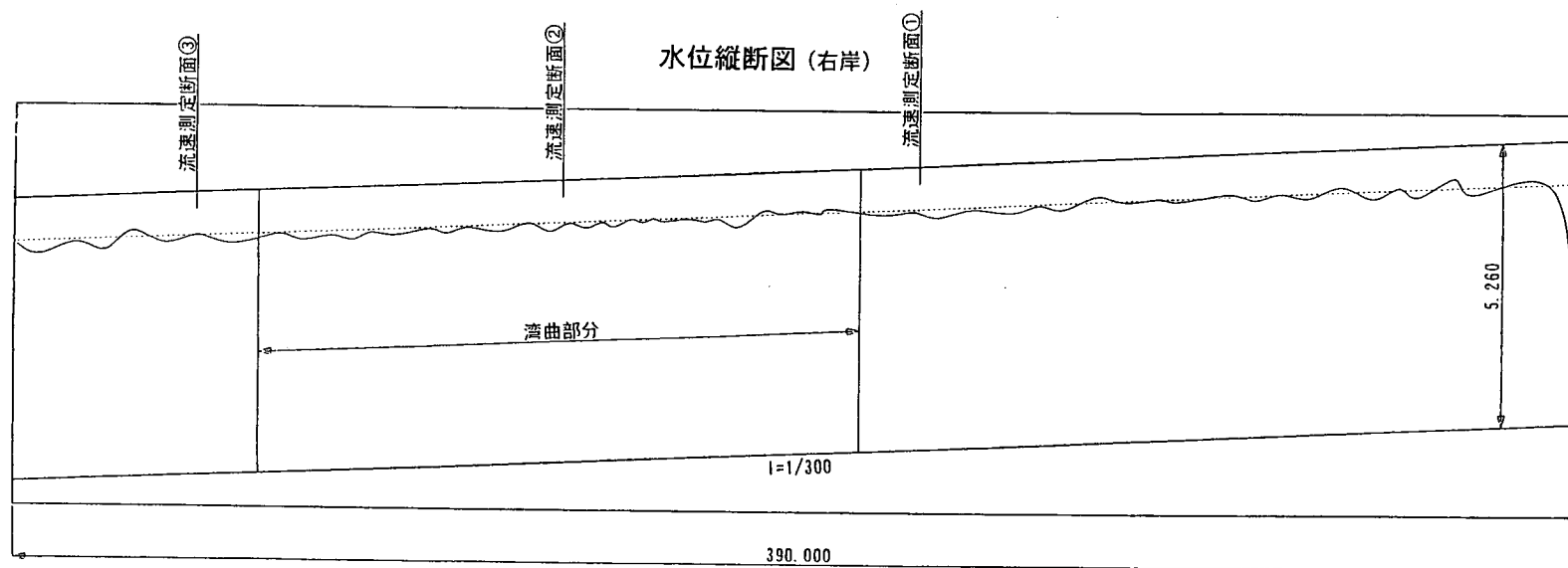
勾配	1/1000
形状	50m, 86°
余裕率	15%
水深	5.304m
流量	100.00m ³ /s

図-23 水位縦断面図及び横断流速分布図



勾配	1/300
形状	200m, 43°
余裕率	7 %
水深	4.622m
流量	106.71m ³ /s

図-24 水位縦断図及び横断流速分布図
屈曲部実験ケース 5

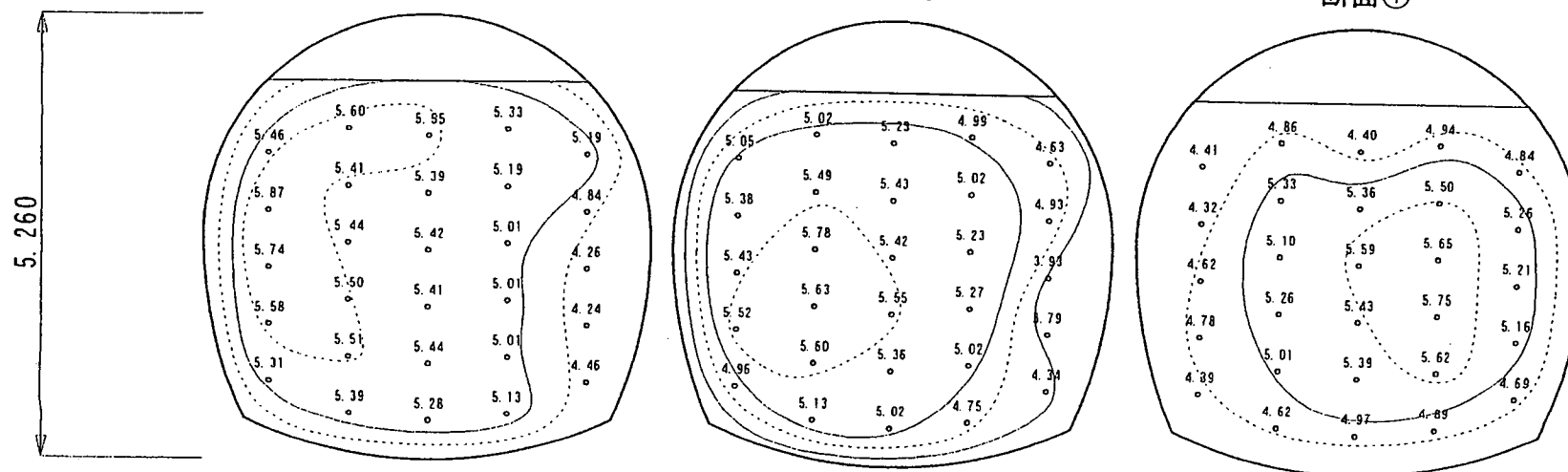


横断流速分布図

断面②

断面①

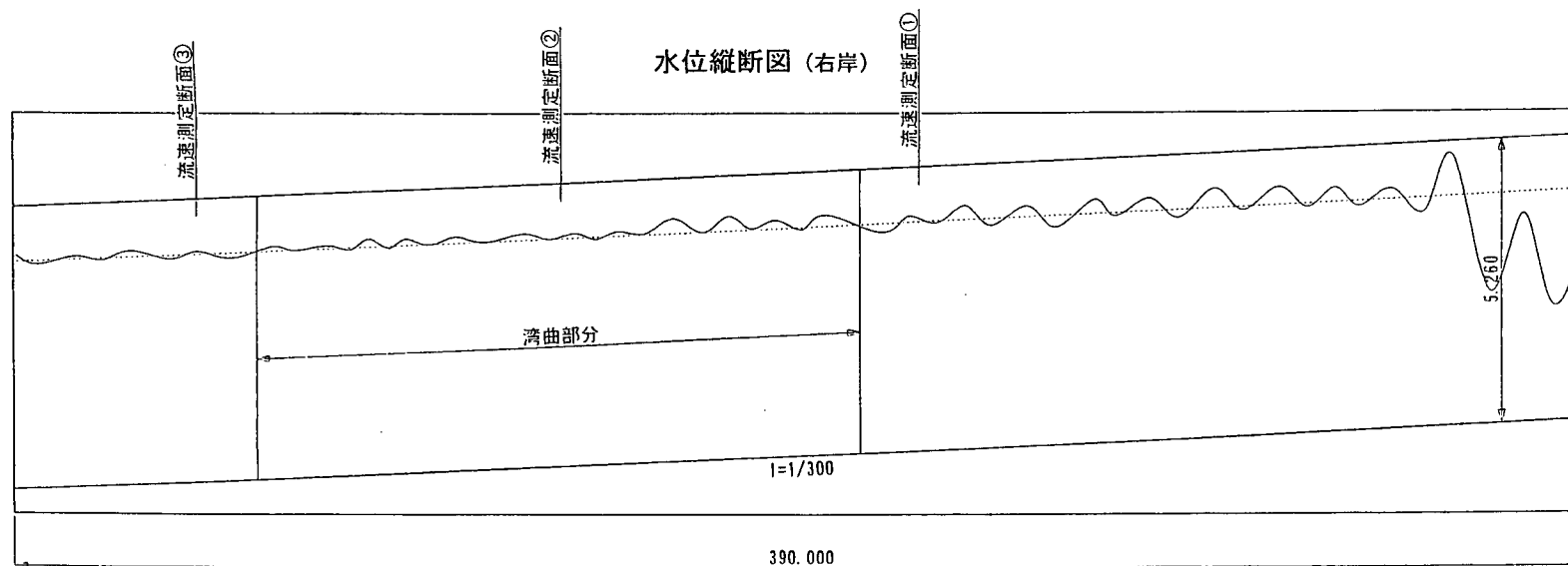
断面③



勾配	1/300
形状	200m, 43°
余裕率	10%
水深	4.460m
流量	104.36m ³ /s

図-25 水位縦断面図及び横断流速分布図

屈曲部実験ケース 6

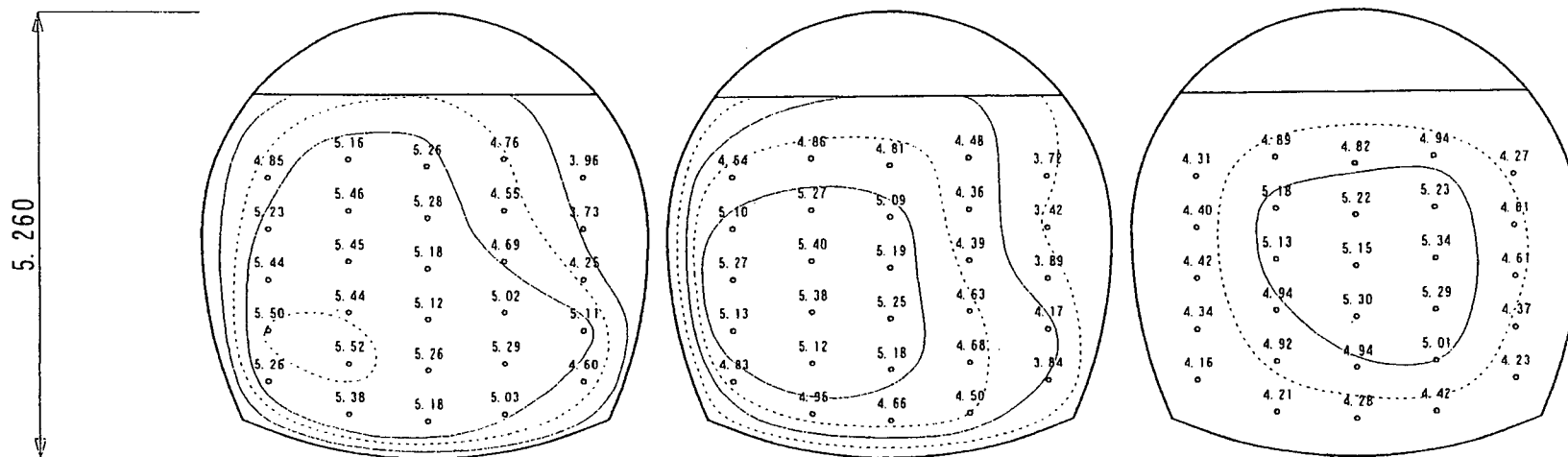


横断流速分布図

断面③

断面②

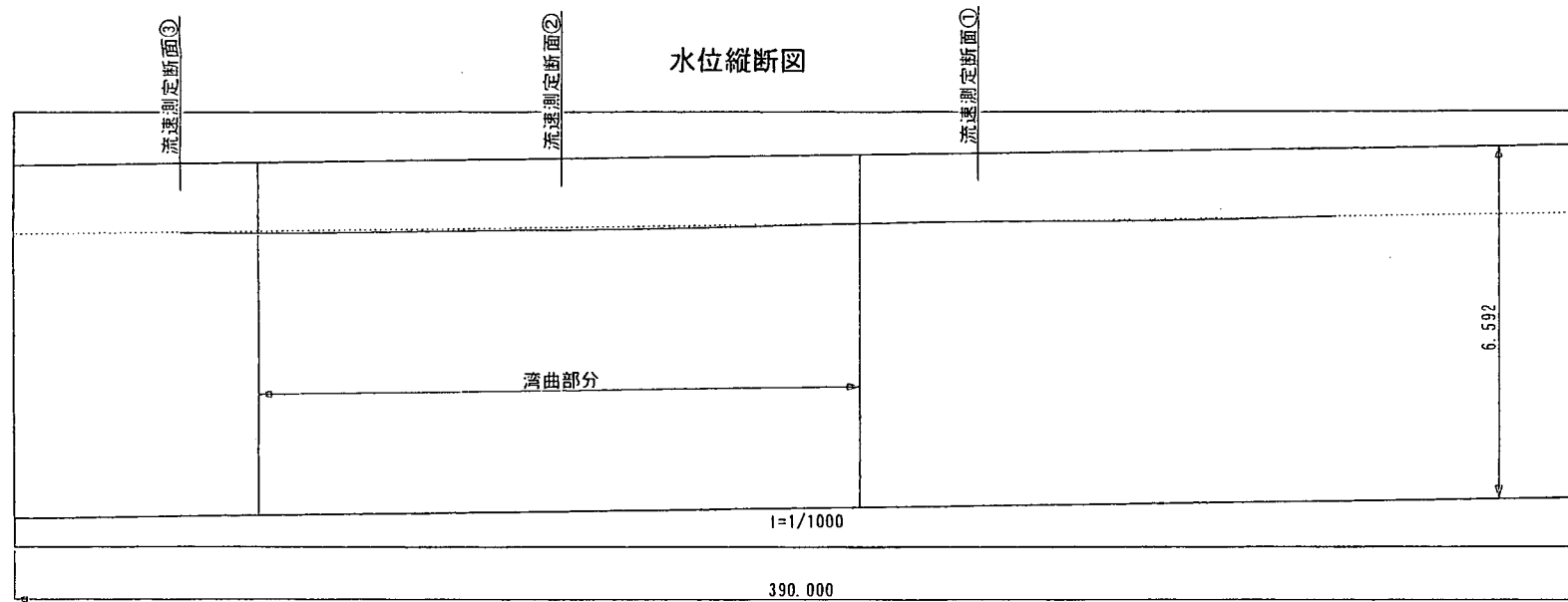
断面①



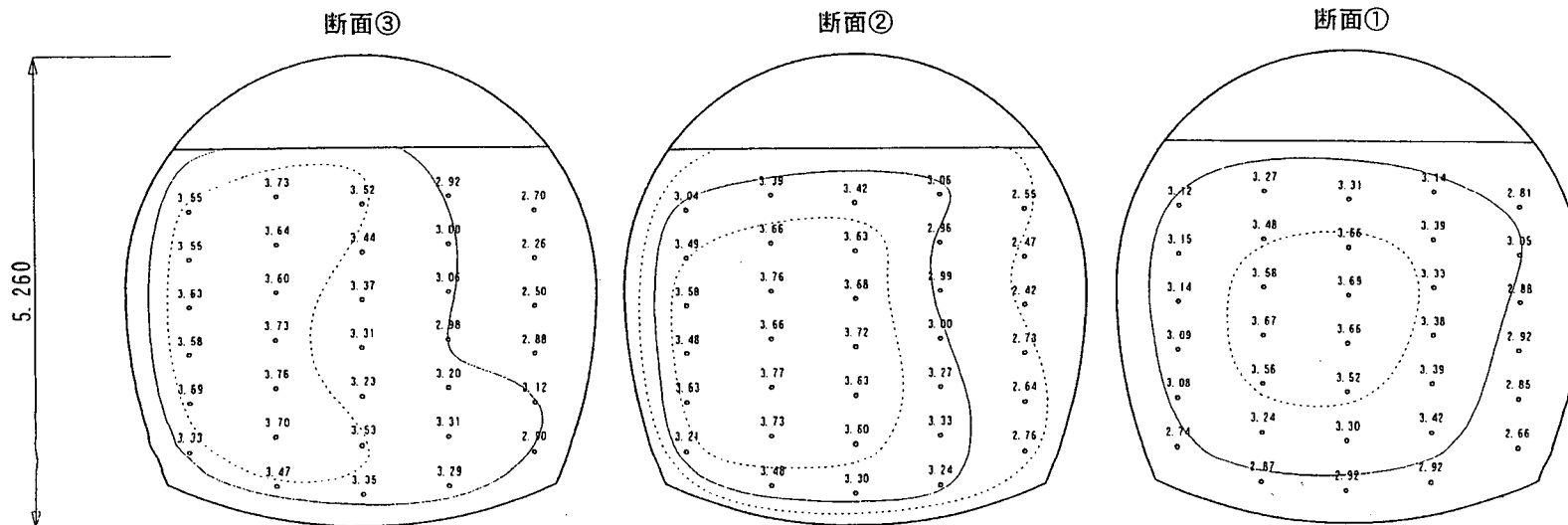
勾配	1/300
形状	200m, 43°
余裕率	15%
水深	4.232m
流量	100.00m ³ /s

図-26 水位縦断面図及び横断流速分布図

屈曲部実験ケース 7



横断流速分布図



勾配	1/1000
形状	200m, 43°
余裕率	15%
水深	5.304m
流量	100.00m ³ /s

図-27 水位縦断図及び横断流速分布図

屈曲部実験ケース 8

第3章 実験結果（直線部）

3. 1 流木閉塞回数

各実験ケースにおいて、投入1ケース終了後にトンネル本管内に流木及び根毛群が閉塞していた回数を閉塞回数としてカウントしたのが表-19である。ここで言う閉塞とは、巻末資料写真-8のような状況とし、一瞬だけ閉塞した場合や少数の流木が壁面との表面張力または摩擦力により滞留している場合は除くものとする。また、呑口部において発生した波により流木が閉塞することもあるため、極端な波が発生していない範囲で閉塞をカウントした。

表-19 実験結果

実験ケース	流量 (m ³ /s)	余裕率	勾配	閉塞回数
1	43.3	15%	1/200	6
2	43.3	0.3Q + 15%	1/200	0
3	50	15%	1/300	3
4	50	0.3Q + 15%	1/300	0
5	100	15%	1/300	0
6	100	15%	1/1000	0
7	104.3	10%	1/1000	0
8	108	5%	1/1000	0
9	182	0.3Q + 15%	1/300	0
10	199	15%	1/300	0
11	200	15%	1/1000	1
12	200	0.3Q + 15%	1/1000	1

* 数値は全て現地値

次に、閉塞に至る状況毎に分類した。分類の種類を巻末資料写真-10、11、12に示した。写真-10の閉塞状況は、赤色の流木のみ滞留し、後から流下してきた流木が衝突して閉塞する（以下、Aパターンとする）。写真-11の閉塞状況は、根付きの流木（中央の黒い流木）は流下する途中で根の付いている方が重いため傾きまたは1回転しながら流下する。この時閉塞し、後から流下してくる流木等が閉塞する（以下、Bパターン）。写真-12の閉塞状況は、投入した流木が流れの影響で流木群になり、複雑に絡み合って閉塞する（以下、Cパターン）。これより、閉塞回数を閉塞状況別に分けたのが表-20である。ここで、Aパターンの閉塞原因である滞留している流木が本当に詰まっているのか、それともトンネル壁面との摩擦力または表面張力によって留まっているのかの判断をするために、赤色流木模型（流木模型No. 1）滞留時に作用していると思われる力を図-28に示した。また、閉塞確率と相対水深（＝平均水深／トンネル直径）との関係を図-29に示した。図中で使用している閉塞確率とは、閉塞したケース数を20ケースで除算しパーセントで表した数値である。

表-20 閉塞状況による分類

実験ケース	閉塞回数	閉 塞 パ タ ー ン		
		Aパターン	Bパターン	Cパターン
1	6	6	0	0
3	3	1	1	1
1 1	1	1	0	0
1 2	1	0	1	0

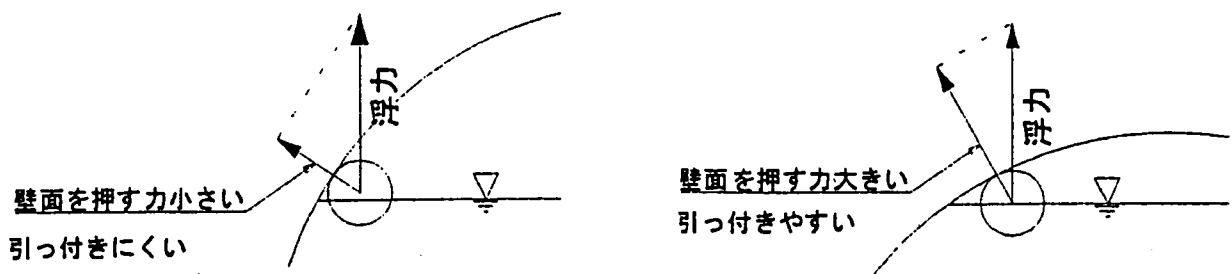


図-28 流木に作用する力

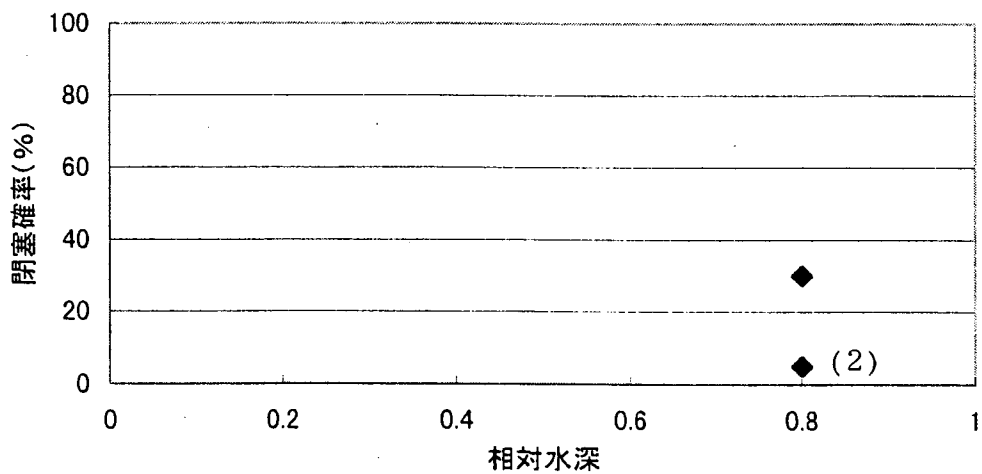


図-29 閉塞確率と相対水深

図中の◆印右の数字は、重なっている実験ケース数を表している。図-28、29より相対水深が1に近づく程、閉塞確率が高くなることから流木の滞留原因は、壁面との摩擦力や表面張力が原因と考えられるため、閉塞していると考えるのは難しい。しかし、実際のトンネル河川においてこのような現象が発生しているかどうかデータがないため今回、Aパターンの状況は閉塞回数から除

ような現象が発生しているかどうかデータがないため今回、Aパターンの状況は閉塞回数から除き、準閉塞回数とした。

以上より閉塞・準閉塞と実験条件及び流況との関係を表-21 に示した。また、閉塞・準閉塞と波との関係をあき水深として表-22 に示した。あき水深とは、実験において閉塞・準閉塞した箇所付近の波の波高より、トンネル頂部から水面までの高さを求めた数値である（図-30）。

以下、閉塞・準閉塞と余裕率・勾配との関係を検討した。

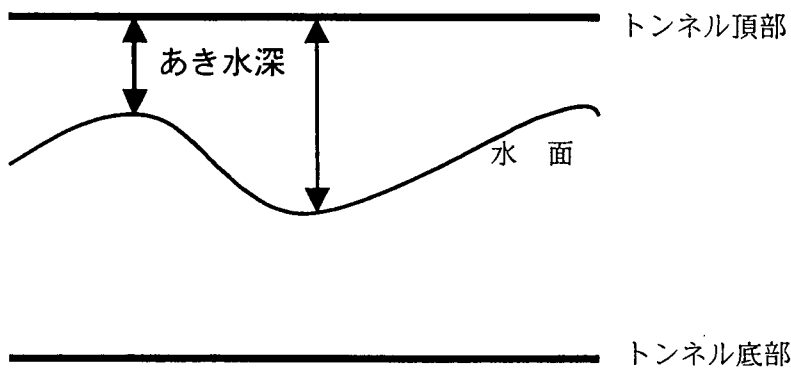


図-30 あき水深

表-22 閉塞・準閉塞箇所とあき水深

実験ケース	直径 2 r (m)	閉塞・準閉塞		あき水深 (m)
		閉塞	準閉塞	
1	3. 5	—	1 回目	0. 63～0. 81
		—	2 回目	0. 72～1. 08
		—	3 回目	0. 72～1. 08
		—	4 回目	0. 51～0. 66
		—	5 回目	0. 63～0. 81
		—	6 回目	0. 51～0. 57
3	4. 0	1 回目		0. 48～0. 63
		2 回目		0. 51～0. 66
			1 回目	0. 39～0. 78
1 1	8. 5		1 回目	2. 25
1 2	9. 4		2 回目	2. 82

* 数値は全て現地値

なお閉塞箇所のあき水深は、閉塞箇所以外のあき水深と比較して、特に顕著な差はみられなかった。

表-2 1 実験条件と閉塞表

実験ケース	流量(m^3/s)	余裕率(%)	勾配	直径(2r)	流況パターン	波の振幅(m)	閉塞回数			準閉塞回数
							Bパターン	Cパターン	合計	Aパターン
1	43.3	15%	1/200	3.5	流況 2	0.00~0.24			0	6
2	43.3	0.3Q+15%	1/200	3.8	流況 2	0.00~0.42			0	0
3	50	15%	1/300	4.0	流況 3	0.06~0.39	1	1	2	1
4	50	0.3Q+15%	1/300	4.4	流況 2	0.00~0.06			0	0
5	100	15%	1/300	5.2	流況 3	0.06~0.27			0	0
6	100	15%	1/1000	6.5	流況 1	0.01~0.03			0	0
7	104.3	10%	1/1000	6.5	流況 1	0.01~0.03			0	0
8	108	5%	1/1000	6.5	流況 1	—			0	0
9	182	0.3Q+15%	1/300	7.2	流況 3	0.00~0.33			0	0
10	199	15%	1/300	6.8	流況 2	0.09~0.27			0	0
11	200	15%	1/1000	8.5	流況 1	—			0	1
12	200	0.3Q+15%	1/1000	9.4	流況 1	—	1		1	0

3. 1. 1 余裕率と閉塞との関係

表-21 の閉塞・準閉塞回数を元に余裕率と閉塞・準閉塞発生確率の関係を図-31 に示した。ただし、閉塞・準閉塞発生確率が0%のものは表示していない。なお、発生確率とは、閉塞・準閉塞回数を20ケースで除算し、パーセントで表したものである。

以下、解析において閉塞確率が高い実験ケースと低い実験ケースに分けて解析を行うため、閉塞確率が5%の実験ケースは閉塞確率が低いものとする。

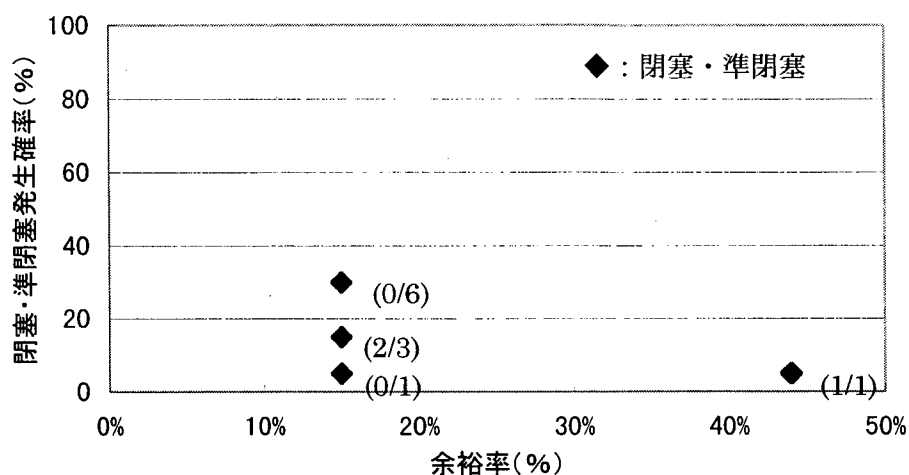


図-31 余裕率と閉塞・準閉塞確率

図中で余裕率 0.3Q+15%は、44%としている。図中◆印右の数字は、(閉塞回数／閉塞+準閉塞回数)を表している。この図から余裕率 0.3Q+15%の時には、どの条件においても閉塞・準閉塞する確率が低いことが判明した。なお余裕率 44%時の閉塞は、実験ケース 12 で発生した。閉塞原因としては、閉塞した流木の長さで断面直径の大きさが同程度の為に閉塞したと考えられる。

次に余裕率 15%のケースにおいて閉塞・準閉塞確率が高い実験ケースと流況を表-23、表-24 に、確率が低い実験ケースの実験ケースと流況を表-25、表-26 に示した。

表-23 閉塞・準閉塞する確率が高い実験ケース

実験 ケース	流量 (m^3/s)	2 r (m)	勾配	閉塞・準閉塞 回数 (確率%)	閉塞回数 (確率%)
1	43	3.5	1/200	6 (30)	—
3	50	4.0	1/300	3 (15)	2 (10)

表-24 閉塞・準閉塞する確率が高い実験ケースの流況

実験ケース	閉塞・準閉塞		波の分類	相対水深	あき相対水深 (あき水深/直径)
	閉塞回数	準閉塞回数			
1	—	6	大	0.8	0.2~0.24
3	2	1	大	0.8	(閉塞) 0.12~0.16 (準閉塞) 0.09~0.20

表-25 閉塞・準閉塞する確率が低いケース

実験 ケース	流量 (m^3/s)	2 r (m)	勾配	閉塞・準閉塞 回数 (確率%)	閉塞回数 (確率%)
5	100	5.2	1/300	—	—
6	100	6.5	1/1000	—	—
10	199	6.8	1/300	—	—
11	200	8.5	1/1000	—	—

表-26 閉塞・準閉塞する確率が低い実験ケースの流況

実験ケース	閉塞・準閉塞		波の分類	相対水深
	閉塞回数	準閉塞回数		
5	—	—	大	0.80
6	—	—	小	0.82
10	—	—	中	0.79
11	—	—	小	0.80

表-24 より閉塞・準閉塞する確率が高い実験ケースの流況は、相対水深が 0.8 程度で、波の振幅が大きいケースである。また、閉塞した箇所（あき水深／直径）と準閉塞した箇所（あき水深／直径）を比べてみたが特に顕著な差はみられなかった。なお閉塞・準閉塞した結果、上流側において実験ケース 1 では全て満管になり実験ケース 3 でも 2 回が満管に至っている。このことから、断面が小さいトンネル河川ほど流木が閉塞した影響で満管になる確率が高くなる。

また実験ケース 8 の余裕率 5 % の場合、あき水深が小さいため投入した流木がトンネル頂部に押しつけられ一時的に閉塞・準閉塞してしまう状況が多く見られた。結果的に閉塞に至ったケースは今回の実験ではなかったが、余裕率 5 % は危険であると思われる。

3. 1. 2 勾配と閉塞との関係

表-21 を元に勾配と閉塞・準閉塞発生確率との関係を表したのが図-32 である。ただし、閉塞・準閉塞する確率が 0 % のものは表示していない。

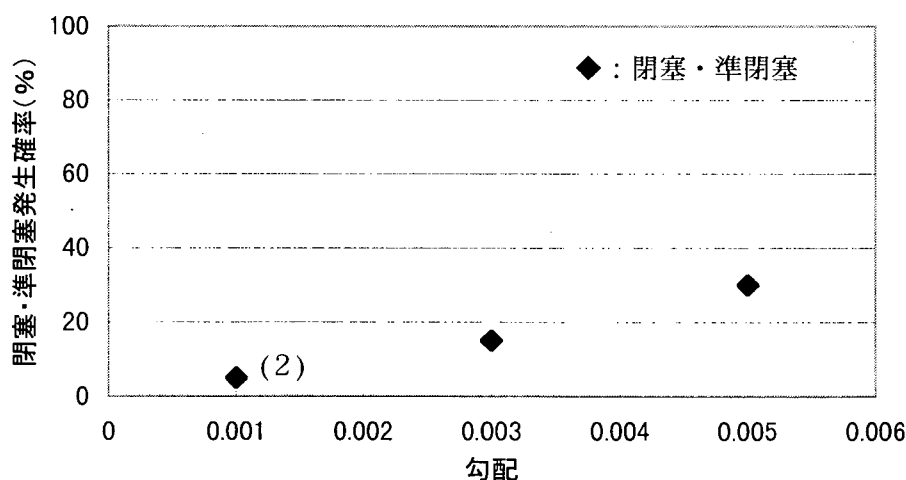


図-32 勾配と閉塞発生確率の関係

図中◆印右の数字は重なっている実験ケース数である。

次に勾配毎に閉塞する確率が高い場合と低い場合での実験条件と流況を勾配 1/300 から表-27、表-28、表-29、表-30 に、以下同様に勾配 1/200 で実験条件と流況を表-31、表-32、表-33、表-34 に示した。

表-27 勾配 1/300 時の閉塞する確率が高い実験ケース

実験 ケース	流量 (m^3/s)	2 r (m)	余裕率 (%)	閉塞・準閉塞 回数 (確率%)	閉塞回数 (確率%)
3	50	4.0	15	3 (15)	2 (10)

* 数値は全て現地値

表-28 閉塞・準閉塞する確率が高い実験ケースの流況

実験ケース	閉塞・準閉塞		波の分類	相対水深	あき水深／直径
	閉塞回数	準閉塞回数			
3	2	1	大	0.8	0.2～0.24

表-29 勾配 1/300 時の閉塞する確率が低い実験ケース

実験 ケース	流量 (m^3/s)	2 r (m)	余裕率 (%)	閉塞・準閉塞 回数 (確率%)	閉塞回数 (確率%)
4	50	4.4	44	—	—
5	100	5.2	15	—	—
9	182	7.2	44	—	—
10	199	6.8	15	—	—

表-30 閉塞・準閉塞する確率が低い実験ケースの流況

実験ケース	閉塞・準閉塞		波の分類	相対水深
	閉塞回数	準閉塞回数		
4	—	—	中	0.64
5	—	—	大	0.8
9	—	—	中	0.69
10	—	—	中	0.79

表-31 勾配 1/200 時の閉塞・準閉塞する確率が高い実験ケース

実験 ケース	流量 (m^3/s)	2r (m)	余裕率 (%)	閉塞・準閉塞 回数 (確率%)	閉塞回数 (確率%)
1	43	3.5	15	6 (30)	—

* 数値は全て現地値

表-32 勾配 1/200 時の閉塞・準閉塞する確率が高い実験ケースの流況

実験ケース	閉塞・準閉塞		波の分類	相対水深
	閉塞回数	準閉塞回数		
1	—	6	大	0.8

表-33 勾配 1/200 時の閉塞・準閉塞する確率が低い実験ケース

実験 ケース	流量 (m^3/s)	2r (m)	余裕率 (%)	閉塞・準閉塞 回数 (確率%)	閉塞回数 (確率%)
2	43	3.5	32	—	—

* 数値は全て現地値

表-34 勾配 1/200 時の閉塞・準閉塞する確率が低い実験ケースの流況

実験ケース	閉塞・準閉塞		波の分類	相対水深
	閉塞回数	準閉塞回数		
2	—	—	大	0.66

これらの、勾配毎の閉塞・準閉塞した実験ケースの流況表より、閉塞・準閉塞するのは相対水深が 0.8 程度で波の振幅が大きいケースで閉塞している事が分かる。また閉塞・準閉塞による上流側への影響は、トンネル断面が小さく成る程、満管に至る実験ケースが多くなる。

3. 2 余裕率と流木滞留率との関係

閉塞・準閉塞に関係なく実験終了後にトンネル本管内に残っている流木をカウントし、投入 1 ケース当たりの平均流木滞留数を求めた。求めた結果を表-35 に示した。なお流木滞留率とは、流木滞留本数を投入 1 ケース当たりの流木投入本数 440 本で除算しパーセントで表した値である。また実余裕率とは、波の波高の計測より実際の実験において平均的に確保されていると思われる余裕を表している。

表-35 実験ケース毎の平均流木滞留率

直 線 部 実験ケース	実余裕率	平均流木滞留数 (本)	平均滞留率 (%)
1	8.3	25.7	0.06
2	4.9	0.5	0.00
3	4.2	10.7	0.02
4	4.3	6.6	0.02
5	8.3	1.4	0.00
6	15	5.7	0.01
7	10	1.7	0.00
8	5.0	16.5	0.04
9	8.8	6.0	0.01
10	3.9	0.0	0.00
11	15	7.7	0.02
12	44	24.4	0.06

表-35 の結果より実余裕率と平均流木滞留率との関係を図-33 に示した。

実余裕率と平均流木滞留率

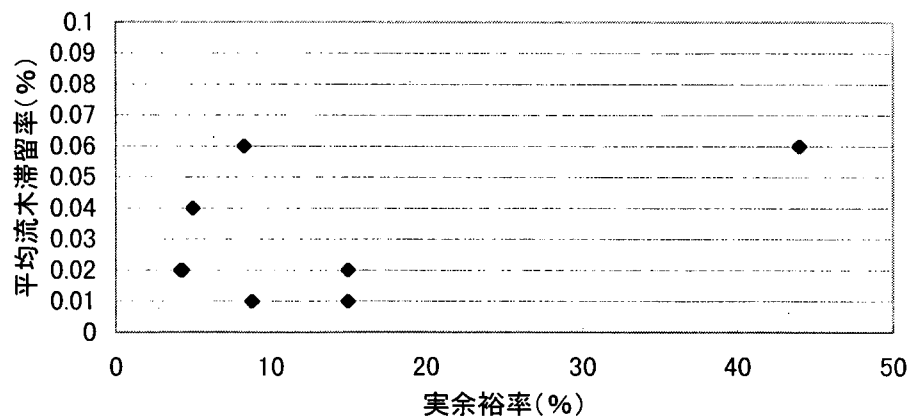


図-33 実余裕率と平均流木滞留率との関係

図-33 より実余裕率が 10%を下回ると平均流木滞留率が増加することが判明した。これは余裕率が減少することにより流木がトンネル壁面に押しつけられ滞留する流木が増えると考えられる。また、実余裕率 44% (0.3Q+15%) において平均流木滞留率が高い値を示しているのは、実験条件が、現地値で $I = 1/200$ 、 $Q = 199 \text{ (m}^3/\text{s)}$ よりトンネル内の流速が遅いことから幹のみの流木がトンネル壁面との摩擦などで滞留し易いことが考えられる。

3. 3 まとめ

以上の結果をまとめると以下のことが判明した。ただし閉塞・準閉塞した結果、閉塞・準閉塞箇所の上流においてトンネル河川が満管になるかどうかについては、閉塞・準閉塞するタイミングにより大きく結果が異なる為、あくまでも参考程度である。

- ・今回の実験ケースでは、どの実験条件においても従来通りの $0.3Q+15\%$ では閉塞・準閉塞する確率は低いことが判明した
- ・今回の実験から、相対水深が 0.8 以上で大きな波が発生する場合、閉塞・準閉塞する確率が高くなることが判明した
- ・トンネル断面が小さい程、閉塞・準閉塞した場合、上流側で満管に至る確率が高い
- ・勾配が急になるほど波が発生するため、閉塞・準閉塞する確率が高くなる
- ・平均流木滞留率は、余裕率が 10% を下回ると滞留する確率が増加する。特に余裕率 5 % では、閉塞・準閉塞は起こらなかったが、投入した流木がトンネル頂部に押しつけられ一時的に閉塞・準閉塞状況となっていることから、余裕率 5 % は閉塞・準閉塞する可能性が高いと考えられる
- ・勾配が緩く余裕率 44% の条件では、流水の流下に影響はないがトンネル本管内の流速が遅いためトンネル壁面との摩擦により滞留する幹のみ流木が増加する

《余裕率削減適用範囲》

○閉塞回数より

相対水深が 0.8 未満で、流下する流水の波の振幅が小さい場合、閉塞・準閉塞確率は低くなる。これより波の振幅が小さければ余裕率を 15% 程度に軽減出来る。

○流木滞留率より

余裕率が 10% を下回ると滞留する流木数が増加する。

以上より十分な安全性を考慮し、流水の流下において波の波高が小さいときに限り余裕率を 15% に軽減できる。

第4章 実験結果（屈曲部）

4. 1 実験概要

アンケート調査より、平面屈曲があるトンネル河川は全体の約5割を占めている。このためトンネル平面形状は、直線部だけではなく、屈曲部における流木流下実験を行うこととした。屈曲部実験施設を図-34に示した。

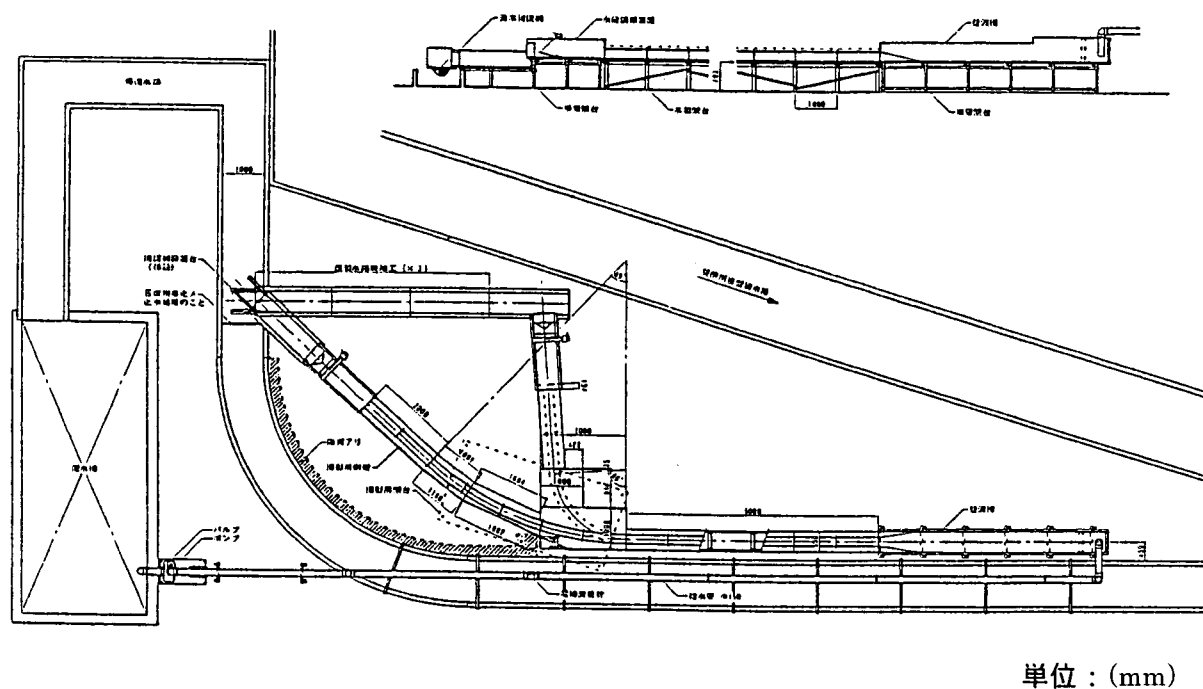


図-34 屈曲部実験施設図

4. 2 実験方法

屈曲部のトンネル模型を製作し、後は直線部実験同様に流木流下実験を行った。

4. 3 実験結果

4. 3. 1 流況

屈曲部の流況としては、図-20～図-27の水位縦断図より屈曲部において内側と外側の水位差は

殆ど発生しない。内・外側の水位差が最も大きい屈曲部実験ケース 1 においても水位差は模型値で最大数ミリ程度である。

波の発生に関しても図-20～図-27 より勾配が急なほど波が発生していることが分かる。これは直線部実験同様、勾配が急になるほど導水路からトンネル呑口部において流下断面が急縮することから発生する波であり、実験施設上発生した波と考えられる。

4. 3. 2 閉塞状況

各実験ケースにおいて、投入 1 ケース終了後にトンネル本管内に流木及び根毛群が閉塞している場合のみをカウントしたのが表-36 である。なお、閉塞・準閉塞状況のパターンは、直線部同様である。

表-36 実験結果

屈曲部実験ケース	流量 (m^3/s)	余裕率 (%)	勾配	曲率半径(m) 中心角度($^\circ$)	閉塞回数
1	100	15	1/300	50 86	3
2	108	5	1/1000	50 86	4
3	104	10	1/1000	50 86	1
4	100	15	1/1000	50 86	0
5	106	7	1/300	200 43	3
6	104	10	1/300	200 43	3
7	100	15	1/300	200 43	0
8	100	15	1/1000	200 43	0

* 数値は全て現地値

屈曲部実験の閉塞・準閉塞状況を観測すると、殆どが直線部で閉塞しており屈曲部で閉塞する実験ケースは 2 つしか無かった。この理由として、図-35 より屈曲部では流木と水路との接触が少な

く流木の滞留が発生しにくいことが考えられる。屈曲部で閉塞した実験ケースは、例えば屈曲部実験ケース6の閉塞状況は、根付きの流木模型の長さとトンネル断面の直径がほぼ同じ大きさの為に閉塞したと考えられる。

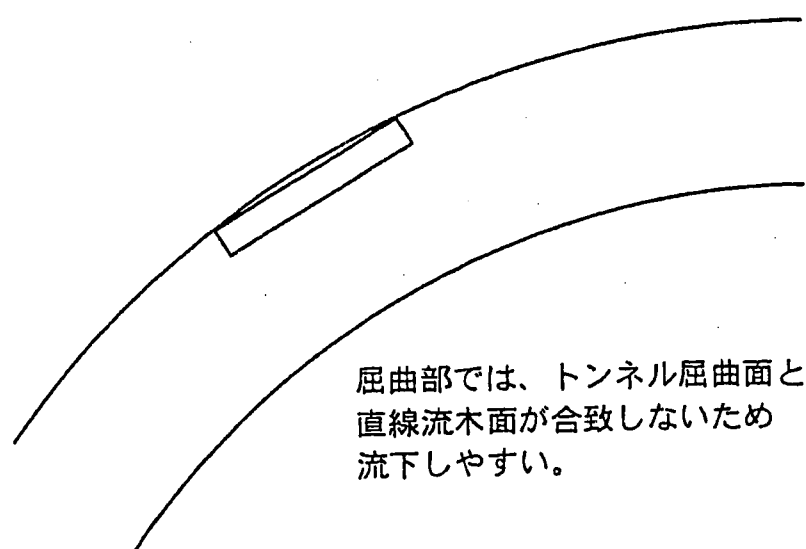


図-35 屈曲部における流木

次に、閉塞回数を閉塞の状況別に分けたのが表-37である。Aパターンは、直線部実験同様、赤色の流木のみ滞留し、後から流下してきた流木が衝突して閉塞する。Bパターンは、根付きの流木は流下する途中で根の付いている方が重いため傾きまたは1回転しながら流下する。この時閉塞し、後から流下してくる流木等が閉塞する。Cパターンの閉塞状況は、投入した流木が流れの影響で流木群になり、複雑に絡み合っ閉塞する。

表-37 閉塞パターン

実験ケース	閉塞回数	閉 塞 パ タ ー ン		
		Aパターン	Bパターン	Cパターン
1	3	—	3	—
2	4	1	—	3
3	1	—	1	—
5	3	1	2	—
6	3	—	3	—

表中の閉塞Aパターンは、直線部と同様に閉塞から除き準閉塞として解析するものとする。閉塞・

準閉塞した屈曲部実験ケースと閉塞箇所のあき水深を表-38 に示した。以上の結果を用いて閉塞・準閉塞と余裕率・勾配との関係を検討した。

表-38 閉塞・準閉塞箇所とあき水深

実験ケース	直径 2r (m)	閉塞・準閉塞		あき水深(m)
		閉塞	準閉塞	
1	5.3	1回目	—	0.81~1.16
		2回目	—	0.91~1.04
		3回目	—	0.76~1.05
2	6.6	1回目		0.64
		2回目		0.64
		3回目		0.64
		—	1回目	0.64
3	6.6	1回目	—	1.00
5	5.3	1回目	—	0.56~0.71
		2回目	—	0.50~0.63
		—	1回目	0.49~0.58
6	5.3	1回目	—	0.71~0.94
		2回目	—	0.78~1.07
		3回目	—	0.81~0.91

*数値は全て現地値

4. 3. 3 実験条件と閉塞との関係

余裕率と閉塞の関係を図に示した。曲率半径 50m で中心角 86° を図-36 に、曲率半径 200m で中心角 43° を図-37 に示した。

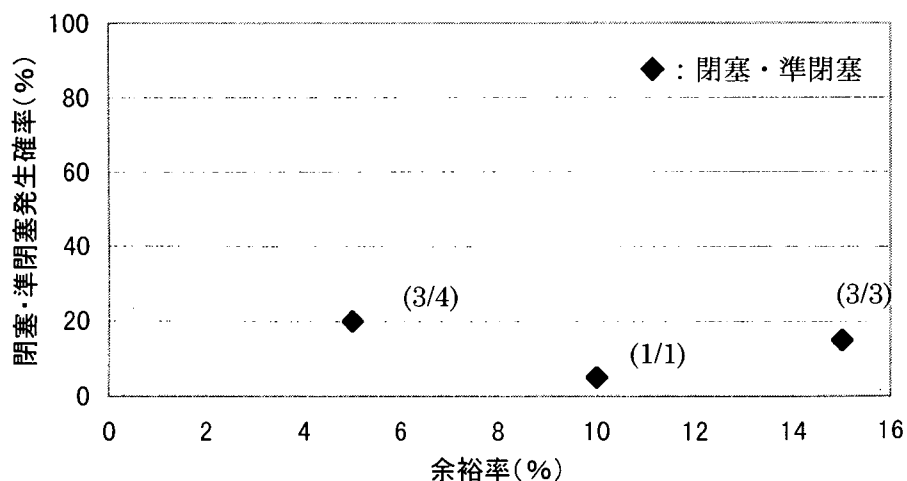


図-36 余裕率と閉塞確率（曲率半径 50m で中心角 86°）

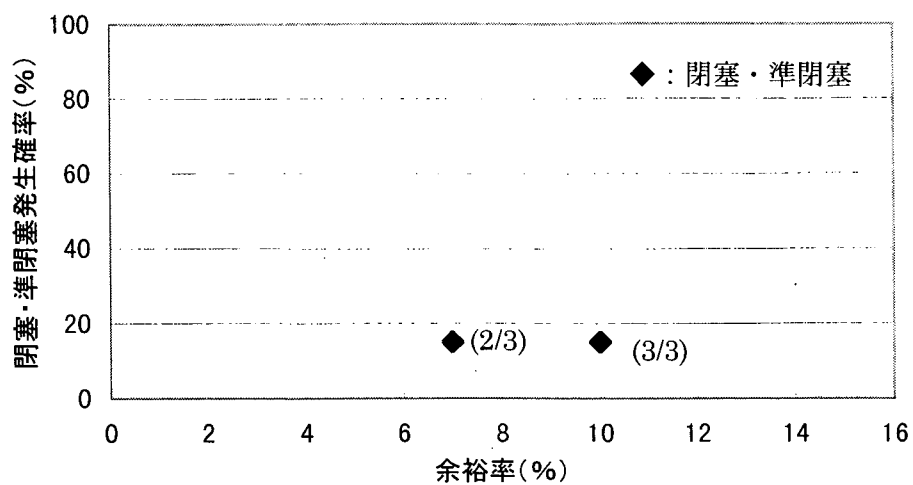


図-37 余裕率と閉塞確率（曲率半径 200m で中心角 43°）

図中◆印右の数字は（閉塞回数／閉塞＋準閉塞回数）を表している。図-36、37 より閉塞・準閉塞する確率が高い屈曲部実験ケースとその流況を表-39、40 に、確率が低い実験ケースと流況を表-41、42 に示した。

表-39 閉塞・準閉塞発生確率が高い実験条件

屈曲部実験ケース (曲率半径) (中心角度)	流量 (m ³ /s)	余裕率 (%)	勾配	閉塞・準閉塞 回数 (確率%)	閉塞回数 (確率%)
1 50m 90°	100	15	1 / 300	3 (15)	3 (15)
2 50m 86°	108	5	1 / 1000	4 (20)	3 (15)
5 200m 43°	106	7	1 / 300	3 (15)	2 (10)
6 200m 43°	104	10	1 / 300	3 (15)	3 (15)

表-40 閉塞・準閉塞する確率が高い実験ケースの流況

屈曲部実験ケース	閉塞・準閉塞		波の分類	相対水深	あき水深／直径
	閉塞回数	準閉塞回数			
1	3	—	大	0.79	0.15～0.20
2	3	1	小	0.90	(閉塞) 0.10 (準閉塞) 0.10
5	2	1	大	0.87	(閉塞) 0.07～0.13 (準閉塞) 0.10
6	3	—	大	0.85	0.15～0.18

表-41 閉塞・準閉塞する確率が低い実験ケース

屈曲部実験ケース	流量 (m ³ /s)	余裕率 (%)	勾配	閉塞・準閉塞回数 (確率)	閉塞回数 (確率)
3	104	10	1/1000	1 (5)	1 (5)
4	100	15	1/1000	—	—
7	100	15	1/300	—	—
8	100	15	1/1000	—	—

表-42 閉塞・準閉塞する確率が低い実験ケースの流況

屈曲部実験ケース	閉塞・準閉塞		波の分類	相対水深
	閉塞回数	準閉塞回数		
3	1	—	小	0.85
4	—	—	小	0.80
7	—	—	大	0.79
8	—	—	小	0.80

4. 4 まとめ

屈曲部実験より以下のことが判明した。しかし余裕率の削減については、実験ケースが少ないため今後、実験ケースを増やして検討することが必要である。

- ・ 屈曲部において閉塞・準閉塞する確率は低い
- ・ 屈曲部より下流部では、流木は外側の壁に沿って流下する
- ・ 流木の閉塞・準閉塞の原因として相対水深と波の大きさが考えられる
- ・ 勾配が急に成る程、波が発生する

《屈曲部実験より閉塞する確率が高い条件》

閉塞・準閉塞するのは、相対水深が0.8以上で波の振幅が大きい時である。ただし、余裕率が0.9程度になると波の振幅に関係なく閉塞・準閉塞する確率が高くなる。また閉塞・準閉塞による上流側への影響は、トンネル断面が小さく成る程、満管に至る実験ケースが多くなる。

第5章 実験結果（強制閉塞）

5. 1 目的

トンネル河川において、最悪の状況である洪水時の閉塞に関して実験を行う事で、どのように流木が詰まり、また閉塞することによる閉塞部上流側への影響把握を目的とし、強制閉塞実験を行った。

5. 2 実験方法

基本的には、直線部の実験と同じである。但し、巻末写真-13（写真中央の赤色の流木）に示すように流木を流下させる前から、トンネル本管内に1本（以下、固定木）閉塞させておき流木実験を行った。固定木は流木模型No. 1である。

5. 3 実験ケース

強制閉塞実験を行った実験ケースを表-43に示す。なお実験ケースの選定は、アンケート調査より現状の設定基準では、流木により閉塞した事例が無いことから、余裕率15%で実験を行った。なお、流木の投入ケース数は5回とする。

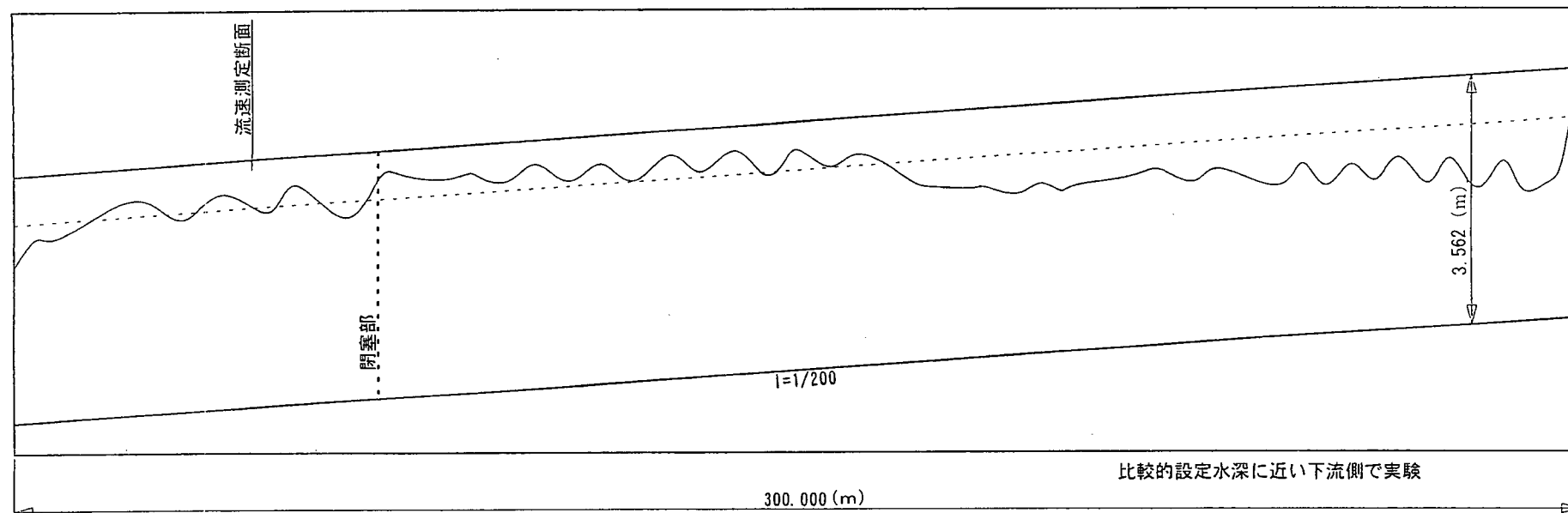
表-43 強制閉塞実験ケース

強制閉塞 実験ケース	流量 (m ³ /s)	余裕率 (%)	勾配	2r (m)	水深 (m)
1	43.3	15%	1/200	3.5	2.8
2	50	15%	1/300	4.0	3.2
3	199	15%	1/300	6.8	5.4
4	200	15%	1/1000	8.5	6.8

* 数値は全て現地値

各実験ケースにおいて、閉塞後の水位縦断図及び横断流速分布図を図-38 から図-41 に示した。なお実験ケース3のみ固定木を設置した時点で殆ど満管に近い状況になっている。

水位縦断面図（閉塞前）



横断流速分布図

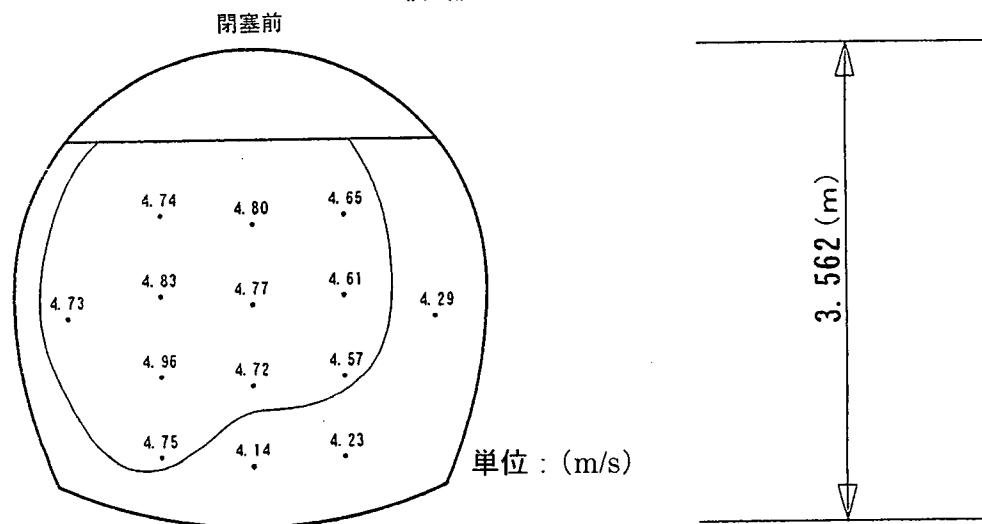
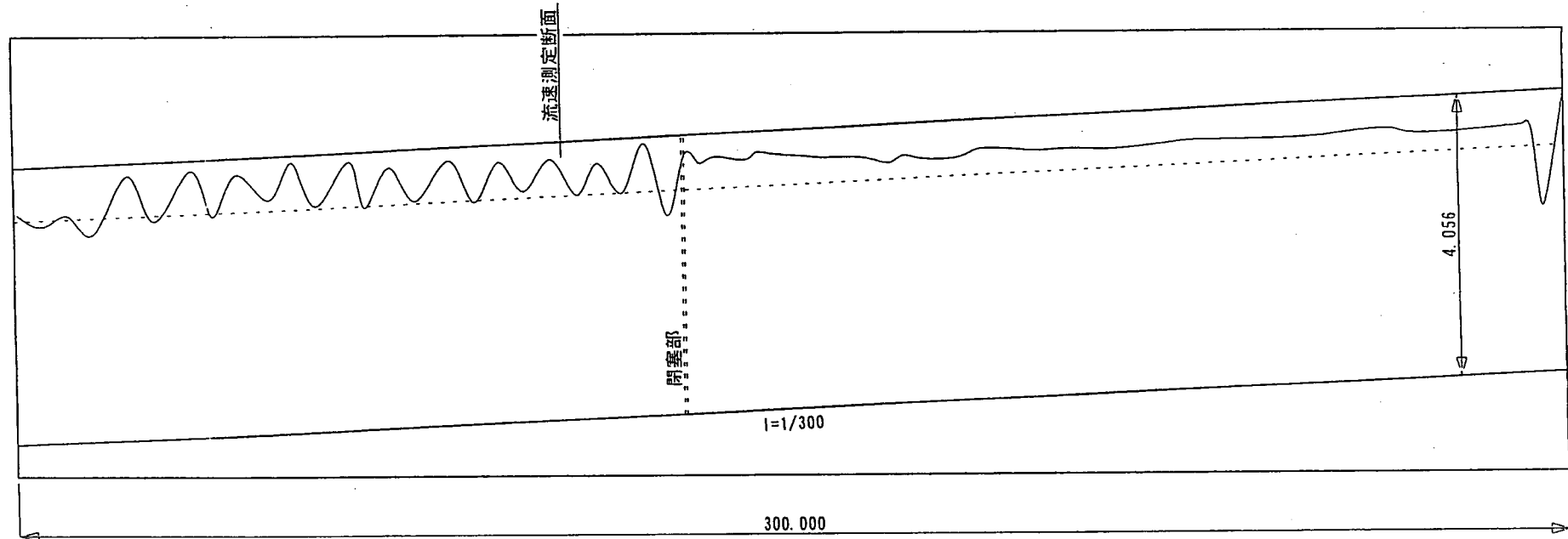


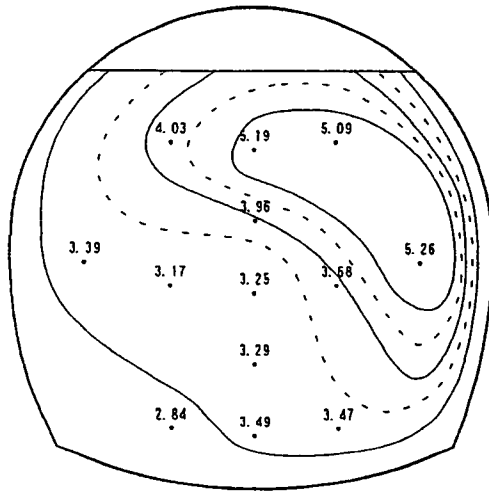
図-38 水位縦断面図及び横断流速分布図

強制閉塞実験ケース 1

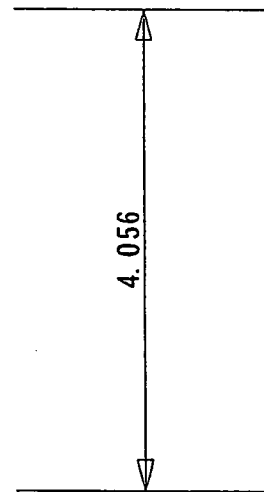
水位縦断面図（閉塞後）



閉塞後



横断流速分布図



閉塞前

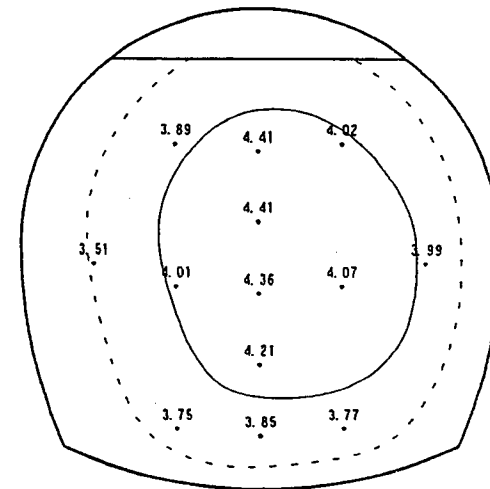
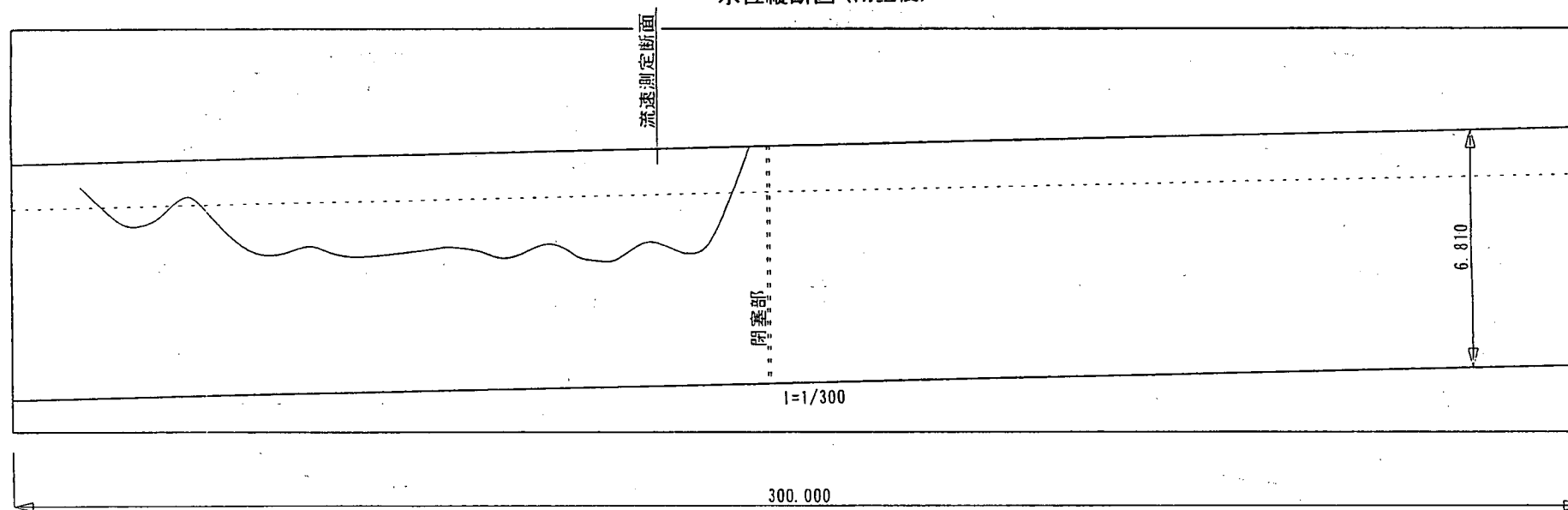


図-39 水位縦断面図及び横断流速分布図
強制閉塞実験ケース 2

水位縦断面図（閉塞後）



横断流速分布図

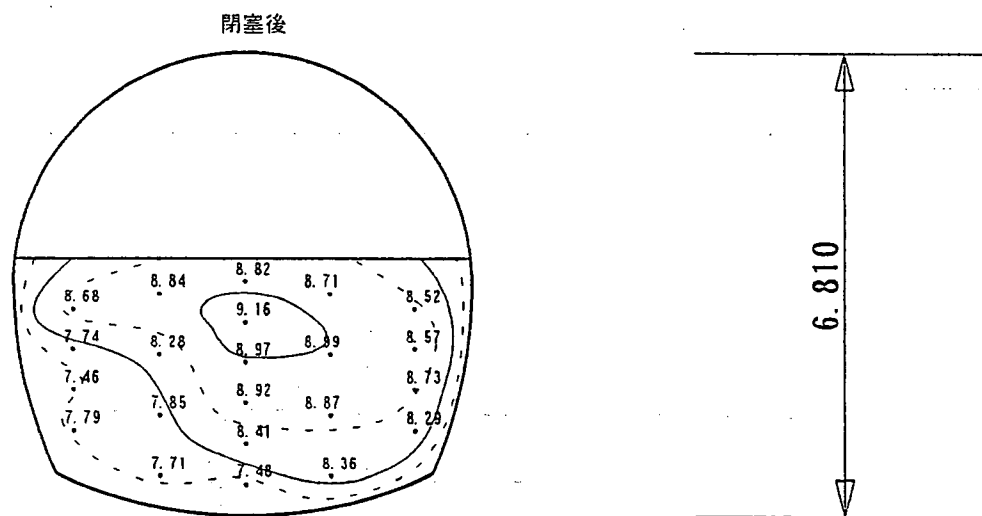
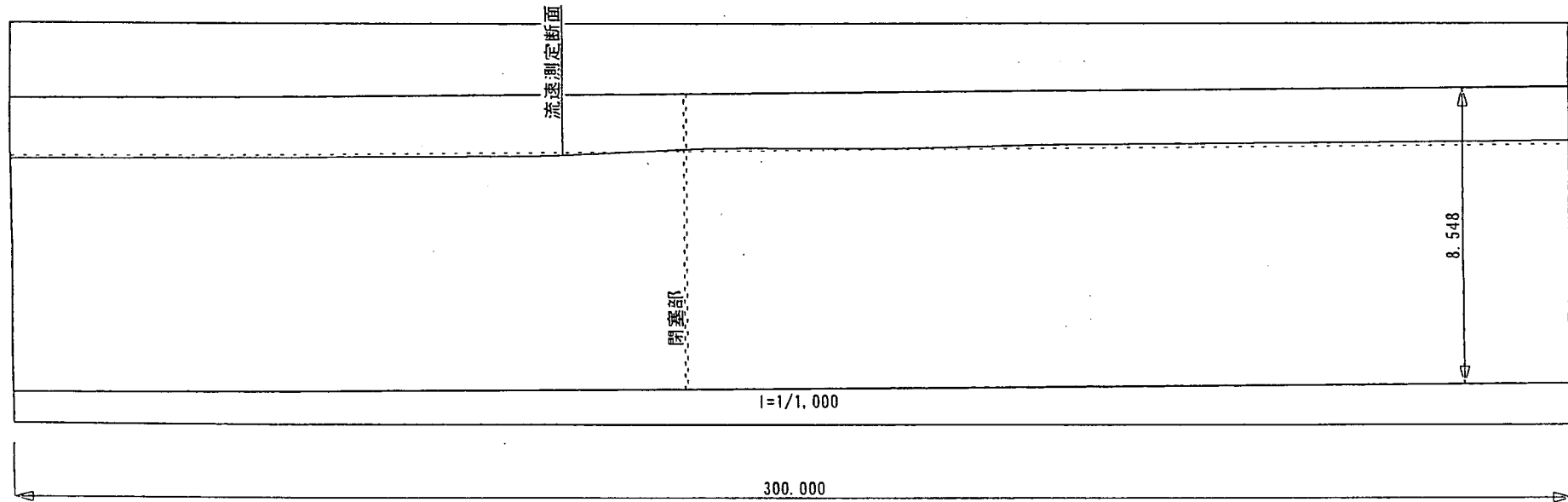


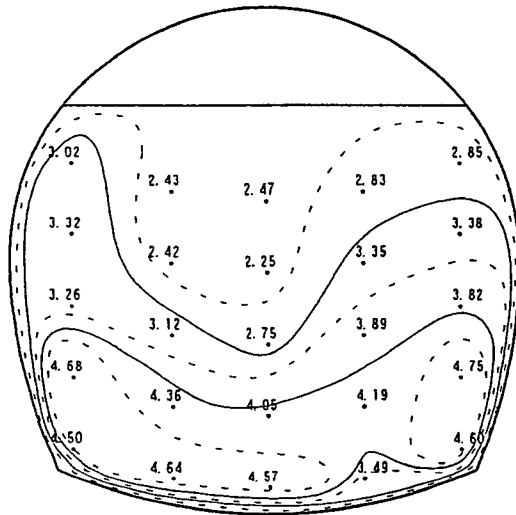
図-40 水位縦断面図及び横断流速分布図

強制閉塞実験ケース 3

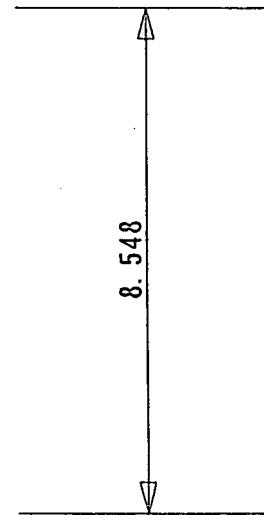
水位縦断面図（閉塞前）



閉塞後



横断流速分布図



閉塞前

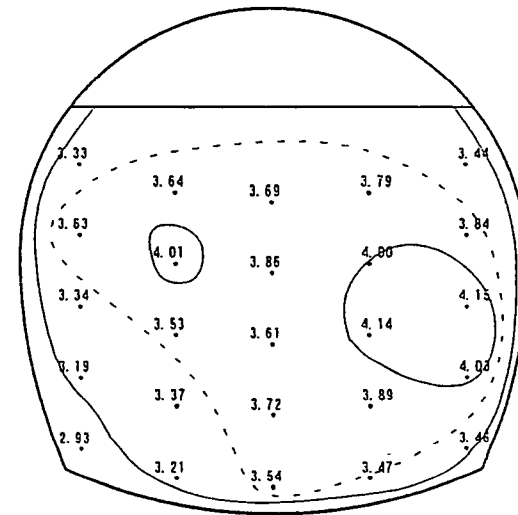


図-41 水位縦断面図及び横断流速分布図
強制閉塞実験ケース 4

5. 4 実験結果

閉塞に関しては、実験を行った全てのケースで閉塞し満管に至った。各ケースにおける閉塞に至る状況を以下に記述した。なお、その時の代表的な写真を巻末写真-14 に示した。

○強制閉塞実験ケース 1.

流木が固定木に交差するように引っかかり、そこに根毛群が束で引っかかる。そして、水位が上昇し、閉塞部より上流で流木が滞留する。最終的に閉塞箇所の上流側では、満管に至った。また閉塞後、固定木の上下流での水位差は現地値で約 1.56m となる。

○強制閉塞実験ケース 2.

流木・根毛群が、ほぼ同時に固定木に引っかかる。そして、水位が上昇し閉塞部より上流で流木が滞留する。最終的に閉塞箇所の上流では、満管に至った。また閉塞後、固定木の上下流での水位差は現地値で約 1.65m となる。

○強制閉塞実験ケース 3.

根毛群が固定木に巻き付くように引っかかる。そして水位が上昇し閉塞部より上流で流木が滞留する。また、閉塞部を通過する流木がケース 1. 2. と比べると多い。最終的に閉塞箇所の上流では、満管に至った。また閉塞後、固定木の上下流での水位差は現地値で約 2.58m となる。

○強制閉塞実験ケース 4.

流木が固定木に交差するように引っかかる。そして水位が上昇し、閉塞部より上流で流木が滞留する。また、閉塞部を通過する根毛群の数が、他のケースに比べて多い。最終的に閉塞箇所の上流では、満管に至った。また閉塞後、固定木の上下流での水位差は現地値で約 1.74m となる。

5. 5 まとめ

強制閉塞実験より全ての実験ケースにおいて固定木により流木が閉塞した。各実験ケースにおいて閉塞に至る過程に殆ど違いがなく、また閉塞の結果全ての実験ケースにおいて閉塞箇所の上流で満管に至った。満管に至る時間は、勾配が急で流量が多い実験ケースほど時間が短い。実験後の固定木上下流の水位差は、勾配が急で流量が多い実験ケースほど差が大きくなる。しかし、各実験ケースにおいて水位差の違いによる閉塞に至る状況に顕著な差は見られなかった。また、満管に至る過程で流木だけではなく根毛群もかなりの影響を与えていることが判明した。

《 参 考 文 献 》

- 1) 『都市河川計画の手引き - 立体河川施設計画編 -』, (財) 国土開発技術研究センター, 山海堂, 平成 7 年
- 2) トンネル河川設計の手引き (案), 土木研究所都市河川研究室, 昭和 60 年
- 3) 『開渠・暗渠及び河川の流量断面算定例解』, 原 澳造, 東京土木雑誌社, 昭和 30 年
- 4) 『洪水時に流木が橋梁及び堤防に及ぼす影響とその対策に関する研究』, 米元, 早稲田大学理工学研究所報告, 昭和 36 年
- 5) 『昭和 62 年 8 月山形県温海町土石流・流木災害調査報告書』, 土木研究所砂防研究室, 土木研究所資料 第 2580 号, 昭和 63 年
- 6) 『平成元年 9 月愛知県伊香川土石流・流木災害調査報告書』, 土木研究所砂防研究室, 土木研究所資料 第 2833 号, 平成 2 年

《 写 真 提 供 》

- 写真-3、5: 『平成 2 年 7 月 2 日梅雨前線による 豪雨災害誌』, 大分県土木建築部河川課, 平成 3 年 3 月
- 写真-4、6: 『報道写真集 ' 93 夏 鹿児島風水害』, 南日本新聞社, 平成 5 年 10 月

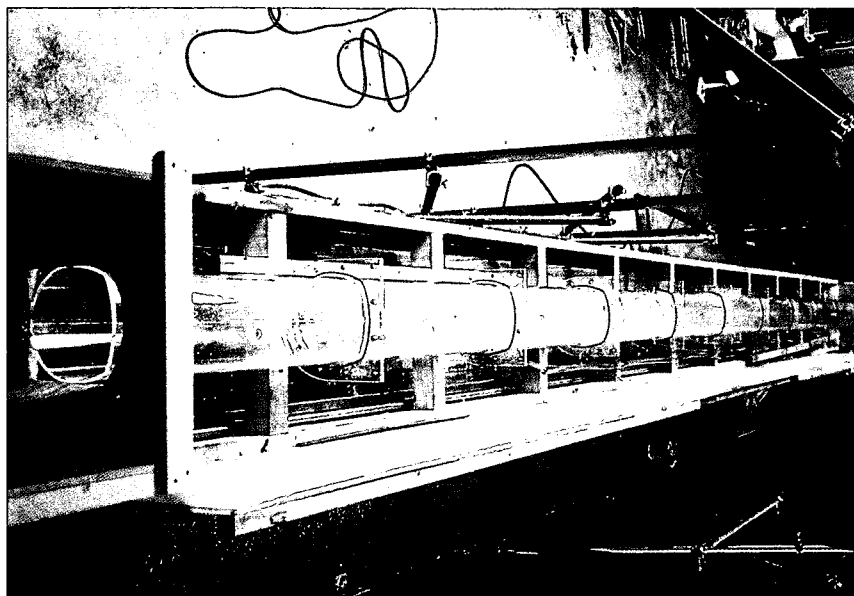


写真-1 直線部実験模型上方より

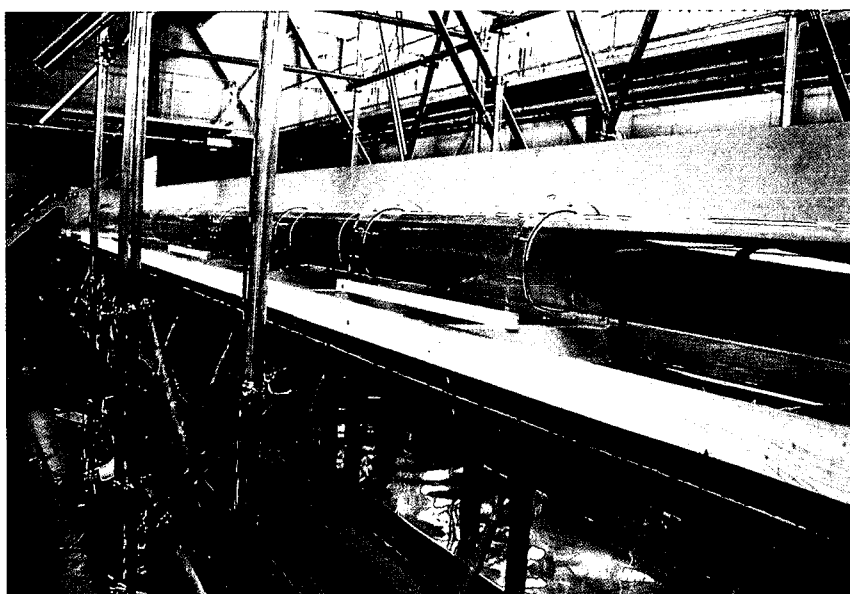


写真-2 直線部実験模型側面より

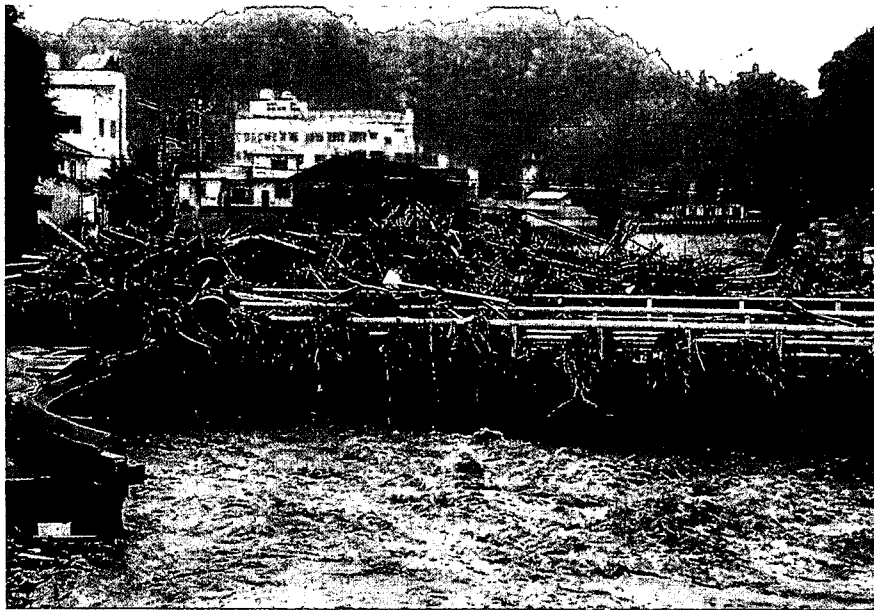


写真-3 平成2年7月2日梅雨前線による『豪雨災害誌』より稲葉川豊岡橋



写真-4 93夏鹿児島風水害より鹿児島市玉江橋



写真-5 平成2年7月2日梅雨前線による『豪雨災害誌』より



写真-6 93夏鹿児島風水害より



写真-7 洪水時に流下する根毛群



写真-8 狩野川放水路で確認された流木

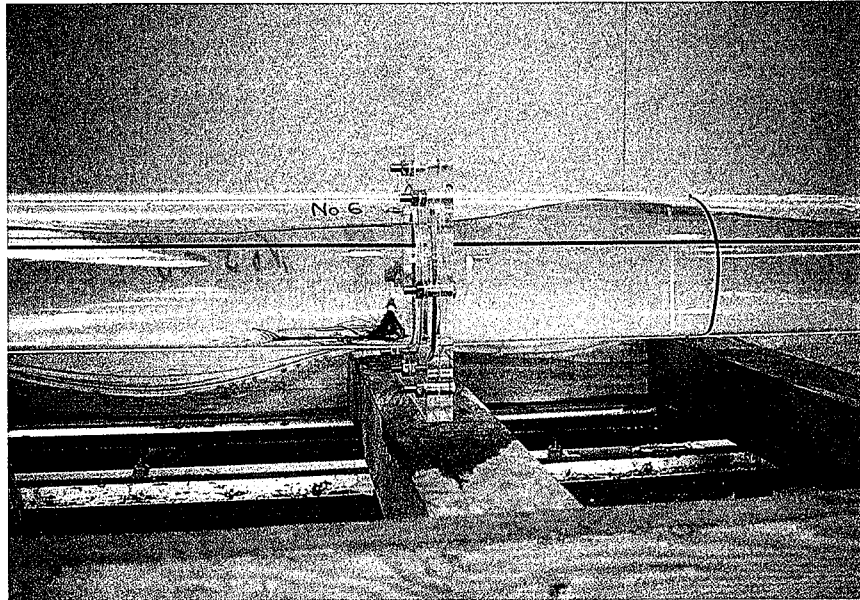


写真-9 発生する波

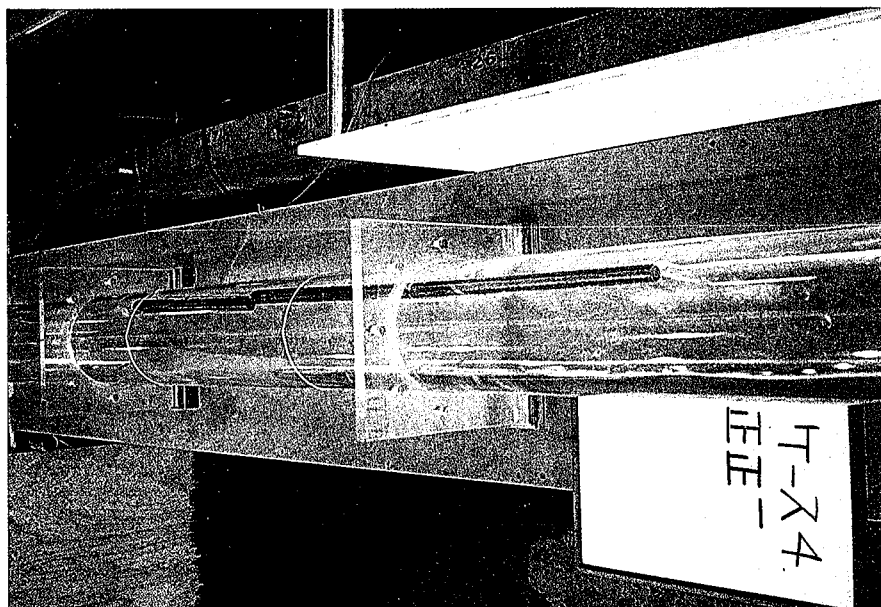


写真-10 閉塞状況（Aパターン）

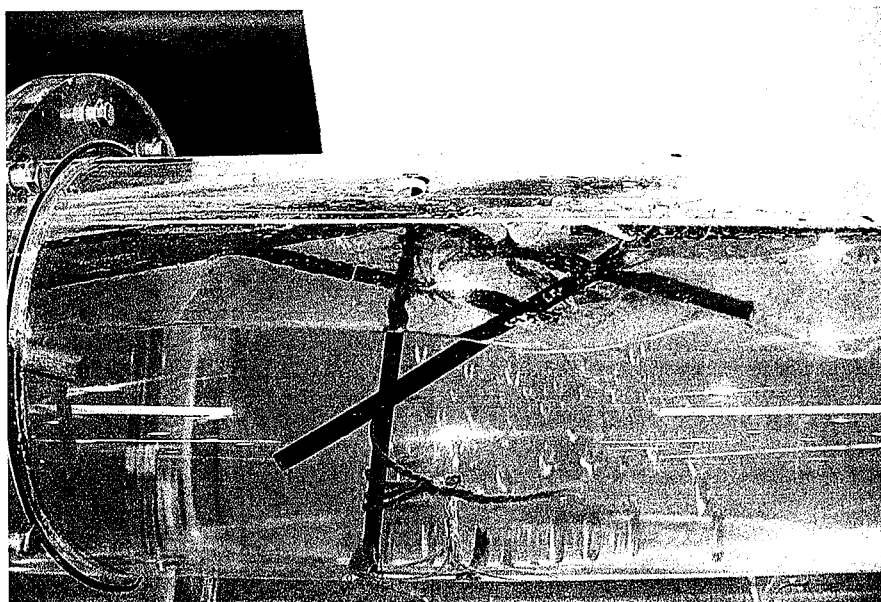


写真-11 閉塞状況（Bパターン）

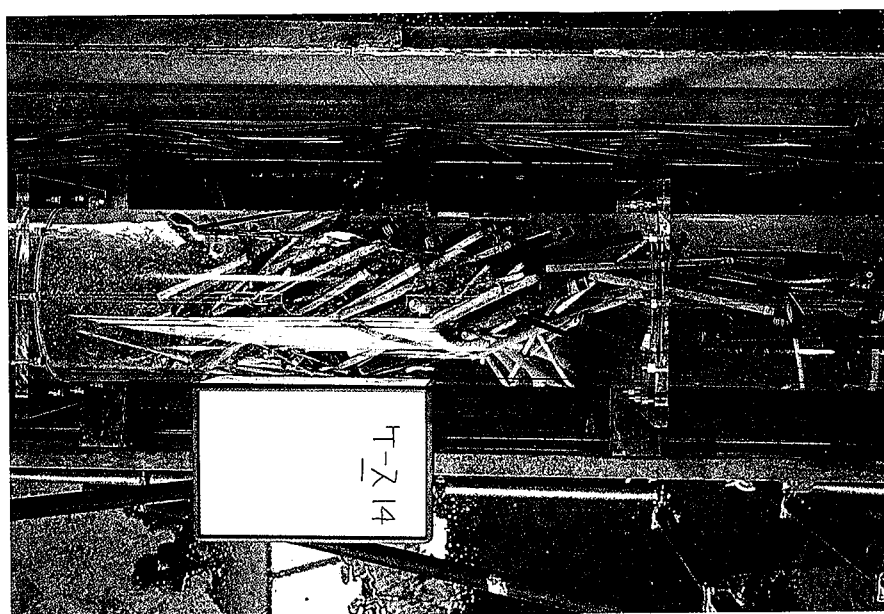


写真-12 閉塞状況（Cパターン）

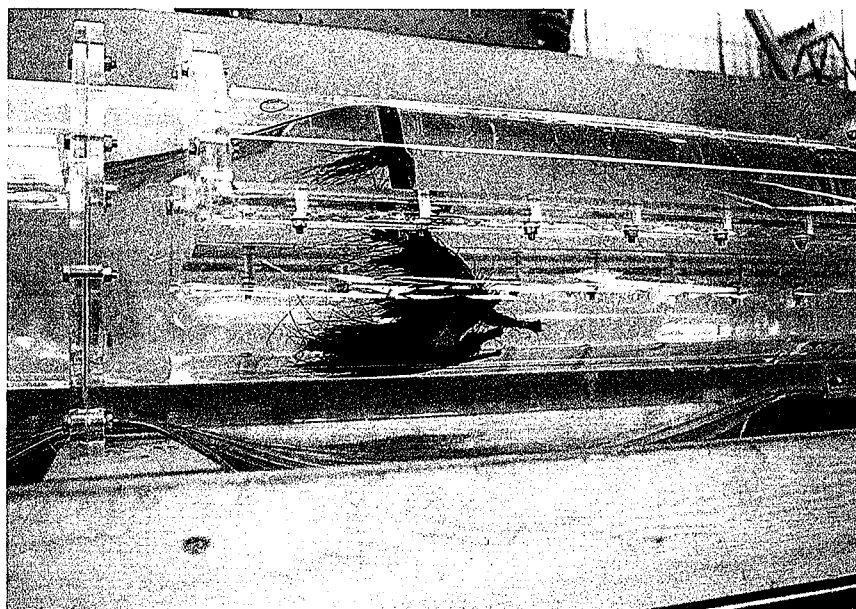


写真-13 強制閉塞実験状況

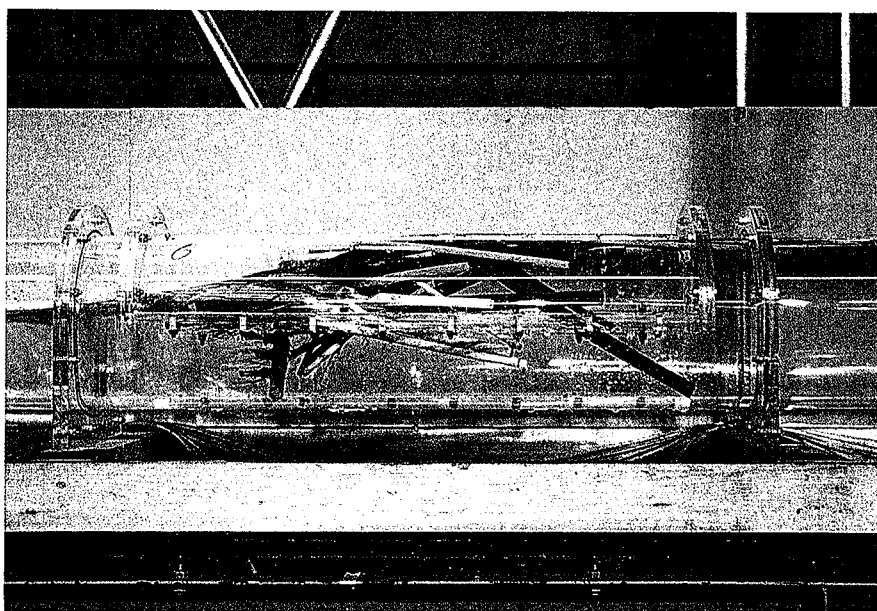


写真-14 強制閉塞における閉塞状況