

I S S N 0386-5878

土木研究所資料第3220号

土 木 研 究 所 資 料

高規格堤防上の越流水の挙動

—高規格堤防の水理設計のために(2)—

平成5年11月

建設省土木研究所
河川部河川研究室

Copyright © (1993) 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。

高規格堤防上の越流水の挙動

—高規格堤防の水理設計のために(2)—

河川研究室 室 長 宇 多 高 明
主任研究員 藤 田 光 一
関東地方建設局荒川下流工事事務所
所 長 布 村 明 彦

要 旨

高規格堤防の設計においては、超過洪水時に発生すると予想される越流に対して十分な強度を持たせることが最も重要な設計要件の1つとなる。高規格堤防の裏のりでは通常の土地利用が前提になっていることから、堤防越流水の裏のり上の流れは通常堤防（超過洪水対策を考えない堤防）に比べて相当複雑になる。このため、上記の設計においては、越流時の挙動についての十分な理解が必要である。そこで、典型的な高規格堤防の形態を数種想定し、それらの直角越流模型を作成し、堤防上の越流水の挙動を調べる実験を行った。その結果から、堤防形態と越流特性との関係を明らかにし、また、越流水の挙動に関して高規格堤防の設計上留意すべき点を示した。

キーワード：高規格堤防，越流，水理設計，土地利用形態，超過洪水対策

目 次

記号の説明

第1章 はじめに	1
1.1 高規格堤防の概要	1
1.2 越流水の挙動にかかわる高規格堤防設計の考え方	2
1.3 本研究の基本的立場と目的	5
1.4 本研究の概要	6
第2章 検討の対象とする高規格堤防の形態	7
2.1 実験の基本方針	7
2.2 実験対象とする高規格堤防の形態	7
2.3 実験方法	15
第3章 越流水の挙動と堤防形態との関係	18
3.1 越流水深と越流量との関係	18
3.2 高規格堤防上の流況	21
3.2.1 水平地盤上に家屋・塀がない場合 (Case 5)	22
3.2.2 水平地盤上に建ぺい率15%の家屋がある場合 (Case 6, 7)	29
3.2.3 水平地盤上に建ぺい率40%の家屋がある場合 (Case 8, 9)	36
3.2.4 水平地盤上に塀と建ぺい率15%の家屋がある場合 (Case 10)	42
3.3 越流水が道路のみを流下する場合の道路部の流況	48
3.3.1 水深	61
3.3.2 流速	63
3.4 高規格堤防上の流速	64
3.4.1 直交道路上の流速	64
3.4.2 水平地盤上の流速	72
第4章 高規格堤防設計への反映	74
4.1 高規格堤防設計水位の算定に用いる流量係数Cの設定について	74
4.2 流量係数C値の制御の必要性について	77
4.3 道路面に作用するせん断力 τ の算定法について	78
4.4 水平地盤の侵食からの防護について	79
4.5 まとめ	81
4.5.1 高規格堤防裏のり上の公共施設等のデザインにおける配慮事項	81

4. 5. 2 堤防材料の選定における耐侵食性の配慮について	81
おわりに	82
謝 辞	83
参考文献	84
付 録	85
1. 街路A・B, 建ぺい率, 塀の構造の選定根拠	87
2. 通常堤防の流量係数	89
3. 流況写真	91
4. 十字路近くの水平地盤上の流速を低減させる工夫	123

記 号 の 説 明

- h : 越流水深 (堤防天端高から測った河川側の水位)
- h_k : 計画堤防天端高を基準とする高規格堤防設計水位
- q : 堤防法線の単位長さ当りの越流量 (法線方向に平均化した値)
- q_r : 単位幅あたりの道路流量 = 一本の道路を流れる流量 Q_r / 道路幅 b
- C : 流量係数 (単位は $[m^{1/2}/s]$; $q = Ch^{3/2}$ で定義される)
- C' : 道路流量係数 (単位は $[m^{1/2}/s]$)
- C_r : 等価道路流量係数 (単位は $[m^{1/2}/s]$)

- V_r : 道路の断面平均流速
- $V_{r\max}$: 道路の一横断測線の中での鉛直平均流速の最大値
- V_g : 水平地盤上の鉛直平均流速
- $V_{g\max}$: 水平地盤上の鉛直平均流速の最大値
- N_r : 等価道路粗度係数
- H_r : 道路上の水深

- r : 最大平均流速比

- L : 堤防天端幅
- B : 堤防法線と直角に走る裏のり道路一本が受け持つ堤防法線長 = 天端部分の実験水路幅
- b : 道路一本の幅
- R_r : 堤防法線と直角に走る裏のり道路一本の幅に対する, その道路が受け持つ堤防法線長の比
= B/b
- I : 高規格堤防の川裏側の勾配 = 堤防法線と直角に走る裏のり道路 (直交道路) の勾配

- τ : 越流水によるせん断力
- I_e : 越流水のエネルギー勾配
- h_s : 高規格堤防の表面における越流水の水深
- W_0 : 水の単位体積重量

- τ_a : 堤防表面の許容せん断力
- n : 道路表面のマニングの粗度係数

- F_r : 河道流れのフルード数
- W : 川幅
- ϕ : 河道流れの流速係数

D : 河道流れの水深

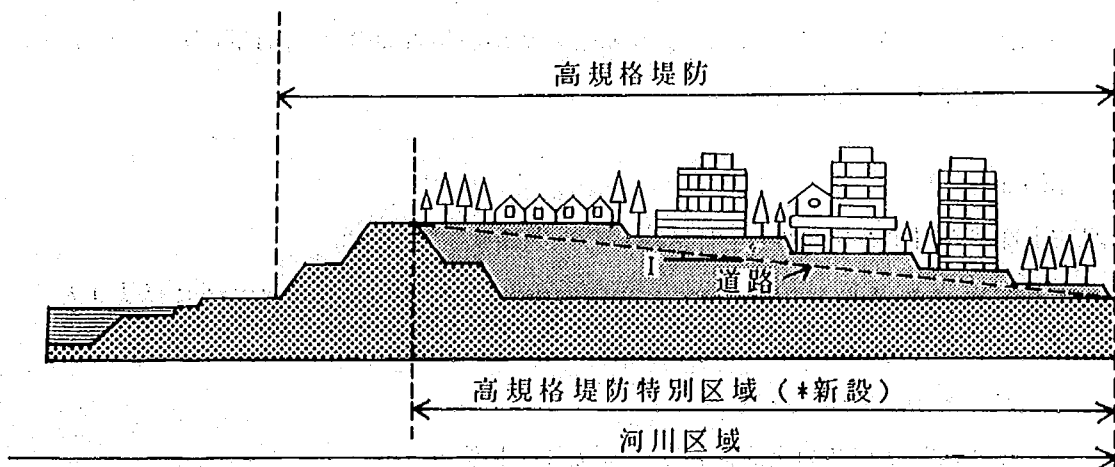
$[H'/H]$: 越流を許さない条件 ($C=0$) での越流水深 (河道水位 - 堤防天端高) に対する越流を許した場合の越流水深の比

第1章 はじめに

1.1 高規格堤防の概要

普通の堤防（以後「通常堤防」と呼ぶ）の設計においては、超過洪水（計画の規模を上回る洪水）への対策は考慮されない。これに対し、高規格堤防（通称「スーパー堤防」）は、通常堤防よりもはるかに緩やかな幅広の裏のり部を持つ盛土構造を基本とする堤防であり、その裏のりが通常の土地利用に供されていることを前提にして、超過洪水の発生時に作用すると予想される諸外力に対して堤体が破壊されないように設計されるものである（河川法第6条2項）。高規格堤防の裏のり上（厳密には、河川法第6条2項において「高規格堤防特別区域」として指定される範囲）では通常の土地利用がなされることが前提であり、そこでの河川法上の規制も極めて緩やかであることから（河川法第26条2項、3項；河川法第27条）、通常堤防を高規格堤防にする際に、規制の程度との関係から、河川管理者が土地を新たに買収する必要がないという大きな特長がある。また、高規格堤防は、越水や河道内洗掘だけでなく浸透と地震にかかわる外力も設計対象となるため、原理的には堤防破壊要因のすべてに対応できる堤防となる。さらに河川近傍の地盤が全体的に底上げされるため、様々な面で河川およびその周辺の環境の質的向上を図ることができる。こうしたことから現在、高規格堤防は、人口・資産・情報が高度に集積した大都市を氾濫原に持つ主要河川の超過洪水対策の主役として位置づけられている^{1),2)}。

図-1.1に標準的と考えられる高規格堤防の形態を示す。高規格堤防は、基本的には、通常堤防と同様の表のり・天端と、通常堤防よりはるかに緩く一定の勾配を持つ裏のりから成る構造を持つ。しかし一般的には、盛土により裏のり面上に水平地盤が造られ、そこが土地利用に供されるので、図-1.1に示したように、数層の水平面とそれらの境界での段差、道路が、高規格堤防の形態を決める3つの基本構成要素となる。これら3つの要素の組合せには様々なパターンが考えられ、それらは高規格堤防の全体的な諸元と土地利用形態に応じて決まる。



*平成3年の河川法改正に伴い新たに設定されたもの

図-1.1 高規格堤防の標準的な形態

1.2 越流水の挙動にかかわる高規格堤防設計の考え方

高規格堤防の設計においては、超過洪水時に発生する越流に対して十分な強度を堤防に持たせることが、最も重要な設計要件の1つとなる。この越流外力に対する高規格堤防設計については、まず、河川管理施設等構造令（以後「構造令」と呼ぶ）の第22条の2において、越流水によるせん断力 τ を高規格堤防に作用する荷重として採用すること、また構造令第18条3項において、この τ に対して洗掘破壊が生じない構造にすること、さらに、第18条2項において、高規格堤防設計水位以下の水位の流水の作用に対して堤防とその地盤が耐えられるようにすることが定められている。高規格堤防設計水位は、構造令第2条10号において次のように定められている。

「高規格堤防を設置すべきものとして工事実施基本計画に定められた河川の区間（第46条2項において「高規格堤防設置区間」という。）の流域又は当該流域と水象若しくは気象が類似する流域のそれぞれにおいて発生した最大の洪水及び高潮に係る水象又は気象の観測の結果に照らして当該区間の流域に発生するおそれがあると認められる洪水及び高潮が生ずるものとした場合における当該区間の河道内の最高水位をいう。」

河川管理施設等構造令施行規則（以後「施行規則」と呼ぶ）によれば、第13条の4の2項において、 τ は次のように計算されるものとしている。

$$\tau = W_0 h_s I_e$$

ここに、 W_0 ：水の単位体積重量、 h_s ：高規格堤防の表面における越流水の水深、 I_e ：越流水のエネルギー勾配である。また、施行規則第13条の5では、河道内の水位が高規格堤防設計水位である場合において、 τ による洗掘に対して堤防が必要なせん断抵抗力を有するものと定めている。

構造令と施行規則に示された以上の考え方に基づいて、越流水による洗掘破壊に対する安全性についての高規格堤防基本構造（具体的には堤防裏のり勾配Ⅰ）の設計は、次に示す方法を基本とする方向で現在検討されている。

越流水によって堤防上部に作用するせん断力 τ が堤防表面のせん断抵抗力以下となるように、堤防形状を設計する。

（具体的な方法）

▲堤防上部に作用するせん断力 τ は次式で表わされる。

$$\tau = W_0 \cdot h_s \cdot I_e \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

ここに、 τ ：越流水によるせん断力

W_0 ：水の単位体積重量

h_s ：高規格堤防の裏面における越流水の水深

I_e ：越流水のエネルギー勾配

堤防形状は、この τ に関する次式が成立するように設計されなければならない。

$$\tau \leq \tau_a \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

ここに、 τ_a ；堤防表面の許容せん断力

▲上式の τ と τ_a は高規格堤防上の土地利用状況によって大きく変化するので、設計においてはそれらの想定とそれに応じた τ と τ_a の算定が最も重要である。

高規格堤防が半永久構造物であり、将来にわたる高規格堤防特別区域の土地利用状況を特定することは不可能であるから、設計においては、当面予想される土地利用状況とは無関係に、設計項目ごとに通常の土地利用として予想される最も厳しい土地利用状況を想定しなければならない。越流水による洗掘破壊を考える場合、一般に、越流水が堤防法線に対し直角に走る道路部にすべて集中する状況が最も厳しいので、この状況において上式が成立することが必要である。道路面に作用するせん断力は、越流した水がすべて道路に集まるとし、また、道路上の流れについて等流条件を仮定して求めた下式より求める。

$$\text{道路に作用するせん断力 } \tau = W_0 \cdot n^{3/5} \cdot q_r^{3/5} \cdot I^{7/10} \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

ここで、 q_r は単位幅あたりの道路流量（＝道路流量／道路幅）である。 q_r は次式より求める。

$$q_r = q \cdot R_r \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

ここに、 q ；単位幅越流量

$$q = C \cdot h_k^{3/2}$$

h_k ：計画堤防天端高を基準とする高規格堤防設計水位

C ：流量係数

I ：堤防の川裏側の勾配（＝堤防法線と直角に走る裏のり道路の勾配）

R_r ：堤防法線と直角に走る裏のり道路一本の幅に対する、その道路が受け持つ堤防法線長の比

n ：道路表面のマニングの粗度係数

上式より求めた τ が τ_a より小さいという条件から、堤防裏のり勾配 I を定めることができる。

R_r には予想される最も大きい値を用いる。

▲高規格堤防設計水位の設定は、超過洪水と超過高潮（計画の規模を上回る高潮）により発生する河道内の最高水位に基づき行い、次の方法により求める。

① 不定流計算および高潮計算

まず、当該高規格堤防設置区間において実現象をもとに発生すると考えられる最大規模の洪水流量を算定する。また、上記区間の河口において実現象をもとに発生すると考えられる最高潮位を、天文潮の解析と高潮計算等から算定する。この潮位を基に下流端水位条件を設定し、堤防からの越流と必要に応じて高潮の河道内遡上を考慮した不定流計算を行い、高規格堤防設置区間各地点でのピーク水位を求める。堤防からの越流の考慮は、堤防越流に関する流量係数 C を導入して不定流計算に横流出を組入れることにより行う。

② 河床変動等に起因する水位変動の加味

高潮に伴い河口から河道内に侵入する波浪の影響が及ばない区間については、予想される洪水時の河床変動等に起因する水位変動の影響を①で求めた水位に加味したものを、超過洪水により発生する河道内の最高水位とする。ここで言う「洪水時の河床変動等に起因する水位変動」としては、不定流計算においては考慮されず、その変動の大きさを予想することは可能であっても、その発生区間の特定とその大きさの制御が実際上不可能な性質を持つものを扱う。また、この水位変動は、堤防越流量の計算に用いられる高規格堤防設計水位の設定において考慮されるものであり、通常堤防の余裕高の設定において考慮される「洪水時の風浪、うねり、跳水等による一時的な水位上昇」とは性格が異なる。すなわち後者は通常堤防の構造上必要となる余裕に関するものであり、一時的な水位上昇の最大値が問題になるのに対して、前者は越流量を支配する水位変動の平均量が問題となるので、前者は後者より小さくなるのが一般的である。なお、水位変動の算定に当たっては、①と同様に、堤防越流に関する流量係数Cを用いて、水位変動に与える洪水流の横流出の影響を考慮する（詳細は、文献3）の第5章3節を参照されたい）。

③ 高潮に伴う河道内への波浪侵入の考慮

高潮に伴い河口から河道内に侵入する波浪の影響が及ぶ区間については、①において不定流計算により求めた河道内水位と高潮計算で想定した風を与え洪水の存在による河道内の流れを考慮して河道内波浪分布を計算し、得られた堤防沿いの風波から堤防越波量を求める。越波量の算出に当たっては必要に応じて斜め入射を考慮する。求めた越波量と時間的に変化しない水位の下で生じる越流量とが等しくなる水位を河道内の最高水位とする。なお、②で述べた水位変動量に比較して高潮に伴う風波の波高は通常はるかに大きいので、上記区間においては②の水位変動量を考慮しないことを原則とする。

以上の計算に当たっては、必要に応じて、適用する計算手法が適切であることを検証計算により確認しておかなければならない。また、計算に用いる各種パラメータの設定は、単に河道および堤防の状況を物理的に正確に反映させるという観点からだけでなく、高規格堤防設計水位の決定根拠を得るという目的を充分踏まえて行わなければならない。高規格堤防設計水位の設定は、計算された河道内の最高水位に基づいて行うことになるが、その際には最高水位の計算精度；計算条件の持つ不確定要素等を充分踏まえ、高規格堤防設計に用いる水位として適切となるように留意する。なお、上記②の具体的方法が、文献(3)で提案されている。

以上に示した方法により、越流外力に対抗するために堤防が持つべき堤防川裏側勾配Iが定まる。Iが定まることにより、図-1.1に示すように、高規格堤防の幅や堤防川裏側の基本的形状が決まってくる。この意味で、Iは高規格堤防構造を定める最も重要な諸元と言える。

このIを決める設計法には、堤防上での特定の土地利用状況を想定せず、越流水に対抗する上で最

も厳しい土地利用状況を想定しているという大きな特徴がある。これは、設計法の中で述べられているように（下線部分）、高規格堤防の本来の趣旨から、そこでの土地利用状況を規定したり予め特定したりすることができないこと、また、川裏側勾配Ⅰのような堤防の基本形状は土地利用状況の変化に応じていちいち変えるような性質のものではないことによる。

したがって、Ⅰの設計にあたって用いる種々のパラメータは、堤防上での実際の土地利用形態に完全に対応すべきもの、あるいはそれらの場所的違いによって細かく変えるべきものではない。そのような短期的視点からの物理的整合性を重視するのではなく、高規格堤防事業が一度できれば事実上変更されることのない新しい地盤形状を造る営為であることを認識した上で、長期的に土地利用形態の変化があっても越流による堤防破壊の防止という機能を保持する堤防基本構造を定めるという視点から、Ⅰの決定、そのためのパラメータ設定を行うことが肝要である。

1.3 本研究の基本的立場と目的

本研究は、前節に示した越流水による堤防破壊を防ぐという観点からの高規格堤防設計の考え方の妥当性を、堤防を越流する水の挙動に関する水理模型実験により確認し、また、越流水の挙動にかかわる堤防設計上の課題とその解決の方向性を得ることを目的とする。特に、「越流水による堤防の洗掘破壊を考える場合、越流水がすべて道路部に集中する状況が最も厳しい」ということを前提とした前述の設計法の妥当性、この前提が大局的には妥当であっても、局所的に存在するかもしれない道路以外の弱点箇所の表われ方と対策について重点的に検討する。

高規格堤防については、その上で相当高速の越流水が生じることから、堤防本体の破壊を防止するだけでなく堤内地での被害防止をも設計目的に入れて、越流水の持つエネルギーの減殺など水防災的観点からの対策を求める意見がある。しかし、堤防を高規格化することにより達成される被害軽減効果に比べれば、越流水の処理による被害軽減効果は非常に小さく、また、越流水による堤内地の災害は堤防高規格化の有無にかかわらず同じように生じ得るもので、高規格堤防にしたために生じる性質のものではない。加えて、計画を上回る規模の洪水の頻度は非常に小さく、その小さい頻度の事象に対応するために越流水減勢施設を永久構造物として設置し、そのために日常生活の利便性・快適性を部分的にでも犠牲（減勢施設による土地の占有も含む）にした市街地構造を採用することは、長期的、総合的に考えても、住民に対し明確な恩恵をもたらすことには必ずしもならない。以上のことから、洪水が計画規模を上回る場合に備えて、高規格堤防化に加え越流水の処理対策まで行うことは、河川行政の責任範囲から考えて過剰対応と言えよう。本研究においても、このような考えに基づき、堤防設計の第一義的目的は堤防破壊の防止にあるとして検討を進め、水防災的観点からの越流水の処理対策については検討対象外としている。

ただし、越流水による堤内地の被害が物的範囲だけでなく人的範囲に及ぶことは避けなければならない。当然、越流発生に備えた警報・避難体制など、人的災害を防ぐための適切な措置が求められる。高規格堤防上にいる人にとっては、堤防破壊が起きないよう高規格堤防が設計されるのであるから、

原則的には堤防上の建物が安全な避難場所となる（建物が大規模に破壊されるようでは堤体の安全性は保てない）。しかし、高速流が生じる道路など部分的には人間にとって危険な場所が生じる可能性があるので、当該高規格堤防の特性を踏まえた上で、堤内地と同じように適切な警報・避難体制が求められる。このようなことから、高規格堤防の完成後も、水防体制が防災上の重要な位置を占めることになる（従来とは質的に異なるであろう）。

最近、日常生活の利便性・快適性を犠牲にする度合いを最小限にとどめながら、ある場合には日常生活にとってプラスの機能を果しながら、越流水の持つエネルギーを減勢できる市街地構造を高規格堤防および周辺について見出すという意欲的な試みがなされている⁴⁾。上記のソフト的対策だけでなく、このように市街地本来の機能と整合のとれたハードの水防災対策を検討することは有意義であり、今後このような市街地づくりの可能性について幅広い観点から建設的な議論を重ねて行くことが期待される。しかし、本研究では、まず堤防破壊を防ぐという最も重要な要件を満たす堤防設計法を確立することが急務であり、またその成果がこのような新しい議論の土台になると考えて、先に述べたような立場からの検討を進めている。

1.4 本研究の概要

高規格堤防の形態は無数にあり、考え得る全ての形態について実験を行うことは不可能である。そこで、高規格堤防上の越流水の挙動の基本的特性を把握し、そこから高規格堤防設計にかかわる本質的な課題が議論できるようにとの観点から、代表的な高規格堤防形態を数種類選び、それらについて水理模型実験を行った。したがって、本研究での実験は、「模型実験」ではあるものの、特定の高規格堤防の設計に直接役立つ情報の獲得を目的にするというよりも、越流水の挙動に関する高規格堤防設計の考え方を議論するための基本情報を提供するという性格を持つ。

第2章では、実験対象とした高規格堤防の形態と実験方法について説明し、第3章では実験から得られた越流水の挙動を堤防形態との関係で述べ、第4章において、高規格堤防設計に関して実験結果から反映すべきと考えられる事項（現在考えられている設計法の妥当性、越流水の挙動にかかわる堤防設計上の課題とその解決の方向性）について述べる。

なお、一連の実験は近畿地方建設局淀川工事事務所の発注により土木研究所において行われた。土木研究所河川部河川研究室は、本省河川局治水課、近畿および関東地方建設局より、実験実施に当たっての技術指導と実験結果の2次分析・考察の依頼を受けた。この土木研究所資料はその成果をとりまとめたものである。

第2章 検討の対象とする高規格堤防の形態

2.1 実験の基本方針

本研究では、1) 河道および堤防法線が直線的である、2) マクロに見た時、堤防形態が縦断的に一様であり、縦断方向に同じ街路パターンを繰返す、3) 河道内の流れのフルード数がそれほど大きくないため、堤防法線に対しほぼ直角に堤防越流が起る、という状況を想定する。この想定に基づき、縦断方向に全く同じに繰返す街路パターンのうち1パターンを取り出した高規格堤防の模型を作成し、直角越流条件で越流実験を行う。

実験対象とした高規格堤防の横断面に関する基本形状は1種類であり、図-2.1に示すように、堤内地盤高および堤外高水敷高からの天端高が4 m、天端幅8 m、裏のり勾配1:30（裏のり部の幅が120 m）という諸元を持つ。この基本形状を持つ堤防の1/7 固定床模型を造り、模型の裏のり上に種々の街路パターンとそれに応じた水平地盤（固定床）を設置し、水平地盤上の種々の土地利用状況を模擬した条件で、越流実験を行った。

街路パターン、水平地盤上の土地利用状況に関する実験条件の設定（次節で説明）にあたっては、通常の土地利用にとって好ましいという観点だけを持ち、水防災上の観点からの越流水の処理という観点は一切入っていない。これは、第1章で述べたように、高規格堤防の裏のり部が通常の土地利用に供された状態で越流時に堤防に起る現象を調べることが本実験の主旨であるからである。この点についての具体的な説明が次節および付録1にあるので参照されたい。

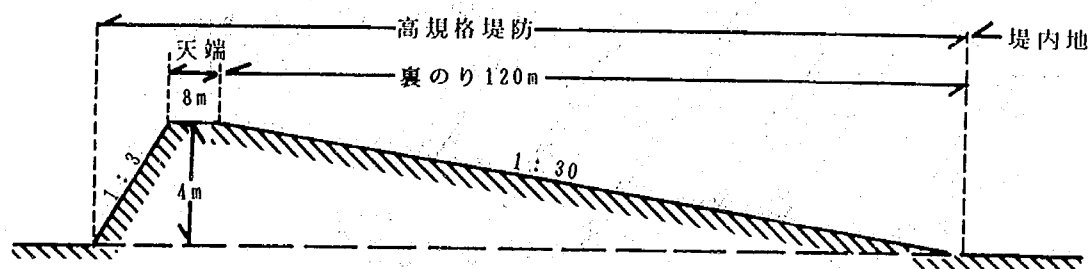


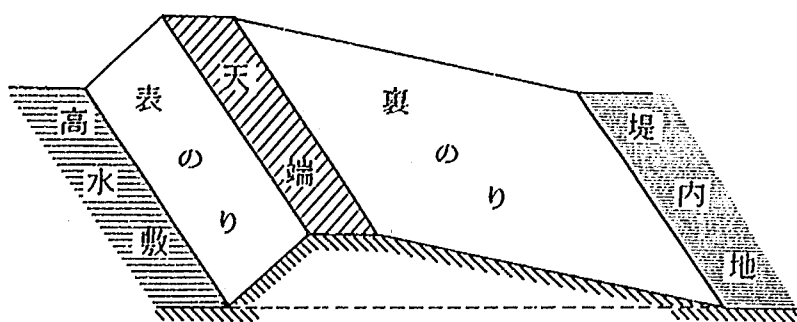
図-2.1 実験対象にした高規格堤防の基本形状（横断面図）

2.2 実験対象とする高規格堤防の形態

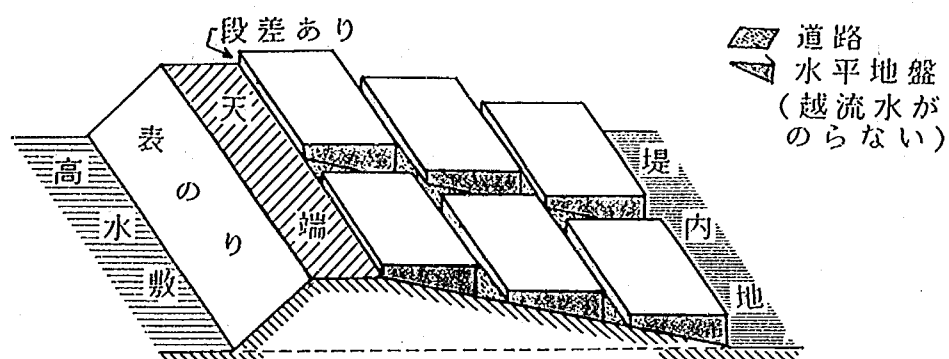
図-2.2に、実験の対象とする11の高規格堤防形態を模式的に示す。図中のa)は裏のりに水平地盤がない場合、b)は道路との段差がある水平地盤が裏のりにある場合（2種類選定）、c)はb)と同じで道路にT字路がある場合、d)は道路との段差のない水平地盤が裏のりにある場合、e)はd)と同じで水平地盤の上に家屋がある場合（4種類選定）、f)はe)に加えて塀がある場合（2種類選定）である。これらの形態を選定した経過と意図を以下に説明する。

高規格堤防形態に関する実験条件は、次の4項目すなわち①街路とそれに応じた水平地盤をどのように配置したか、②水平地盤と道路との段差の程度、③水平地盤上でどのような土地利用状況を想定

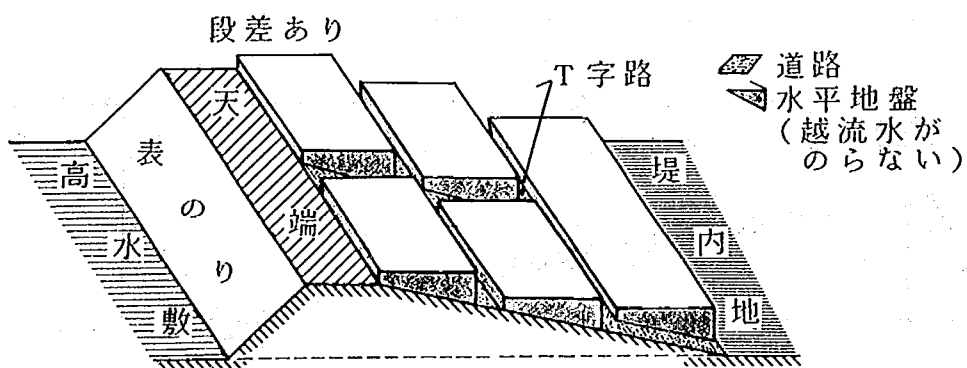
a) Case 1



b) Case 2 ~ 3



c) Case 4



d) Case 5

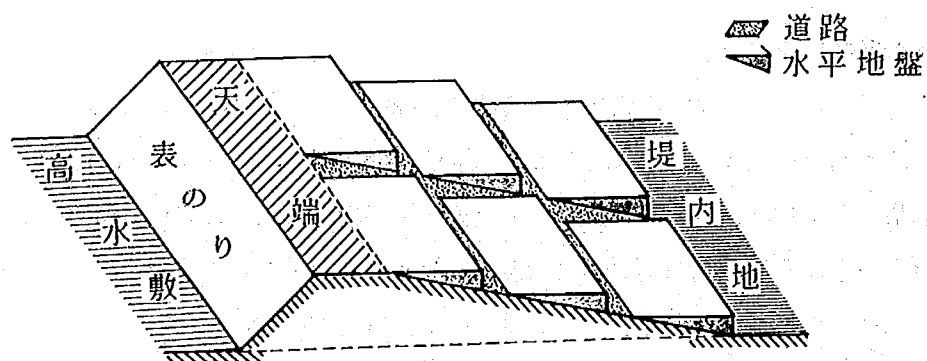
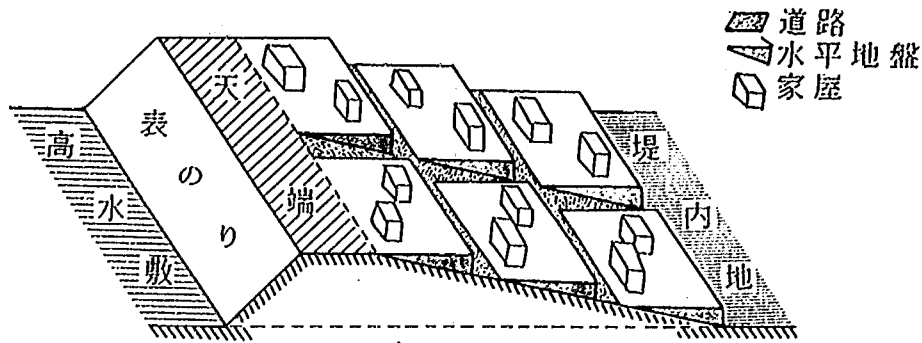


図-2.2 実験対象とした高規格堤防形態の模式図 (その1)

e) Case 6 ~ 9



f) Case 10 ~ 11

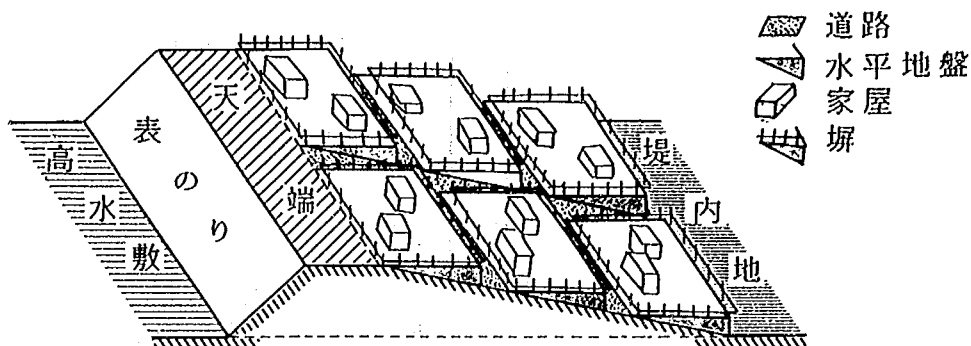


図-2.2 実験対象とした高規格堤防形態の模式図(その2)

したか、④各水平地盤の周囲に堀があるか、に関する条件の組合せにより表-2.1に示すように定めた。各項目について実験で取り上げた条件は次の通りである。まず上記①については、図-2.3に示す4つ〔街路なし、街路A、街路B、T字路付き街路〕の条件を対象とした。

〔街路なし〕

街路も水平地盤もない。したがって堤防は図-2.1、図-2.2 a)に示す基本形状そのままの形を持つ。原則として実際にはあり得ない形状であり、実験装置の精度を確認したり、他の実験条件と比較するために設定した。

〔街路A〕

標準的な街路形態の中で、道路への水の集中度が高いものの代表として選定した。選定に際しては文献(5)を参考にした。選定根拠については付録1を参照されたい。街路Aが、種々の検討の基本パターンとなる。

〔街路B〕

標準的な街路形態の中で、道路への水の集中度が低いものの代表として選定した。選定に際しては文献(5)を参考にした。選定根拠については付録1を参照されたい。街路Bは街路Aの比較対象となる。

〔T字路付き街路〕

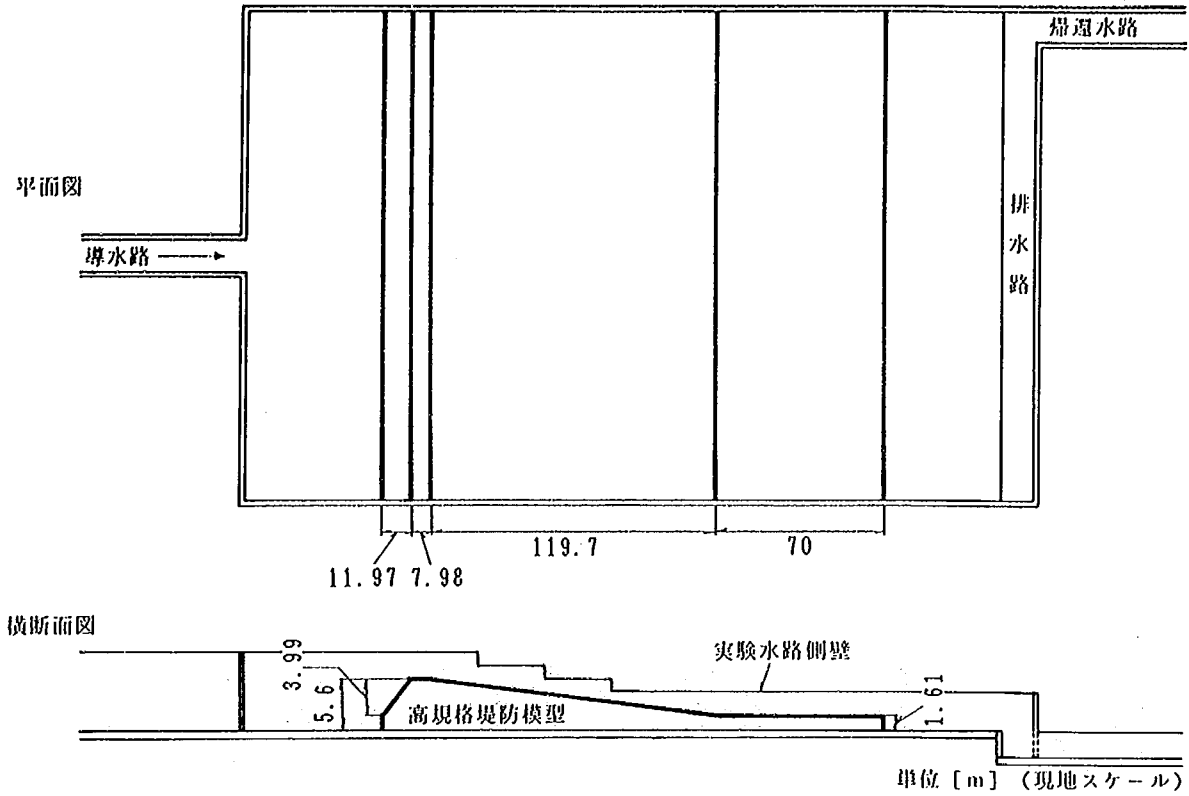
街路の基本的なパターンは街路Aと同じであるが、一部にT字路を持つものである。道路に集中した越流水のT字路での挙動を調べるために、この条件を設定した。

表-2.1 高規格堤防の形態に関する実験条件

高規格堤防 形 態 名	① 街路と水平地盤の配置				② 道路～水平地盤間の段差		③ 水平地盤上の土地利用状況				④ 水平地盤周囲の塀		模 式 図 図－2.2	
	街 路 な し	街路A	街路B	T 字 路 付 き街路	段差あり	段差なし	平 坦	建 物 (建 ぺ い 率 15 %, 配 置 Ⅰ)	建 物 (建 ぺ い 率 15 %, 配 置 Ⅱ)	建 物 (建 ぺ い 率 40 %, 配 置 Ⅰ)	建 物 (建 ぺ い 率 40 %, 配 置 Ⅱ)	塀あり		塀なし
Case 1	○				-	-	-	-	-	-	-	-	-	a)
Case 2		○			○		-	-	-	-	-	-	-	b)
Case 3			○		○		-	-	-	-	-	-	-	
Case 4				○	○		-	-	-	-	-	-	-	c)
Case 5		○				○	○						○	d)
Case 6		○				○		○					○	e)
Case 7		○				○			○				○	
Case 8		○				○				○			○	
Case 9		○				○					○		○	
Case 10		○				○		○				○		f)
Case 11		○				○				○		○		

高規格堤防 形態名	実 験 の 意 図			
Case 1		比較		
Case 2	比較	街路, 水平地盤の存在が	比較	比較
Case 3	街路と水平地盤の配置の違いが	流れに与える影響	T字路が流れに与える影	段差の有無が越流水の挙
Case 4	越流水の挙動に与える影響		響	動に与える影響
Case 5		比較		
Case 6	比較	水平地盤上に建物がある		
Case 7	水平地盤上の土地利用状況の違	この効果		
Case 8	いが越流水の挙動に与える影響		比較	
Case 9			塀の存在が流れに与え	
Case 10			る影響	
Case 11				

〔街路なし〕



〔街路A〕

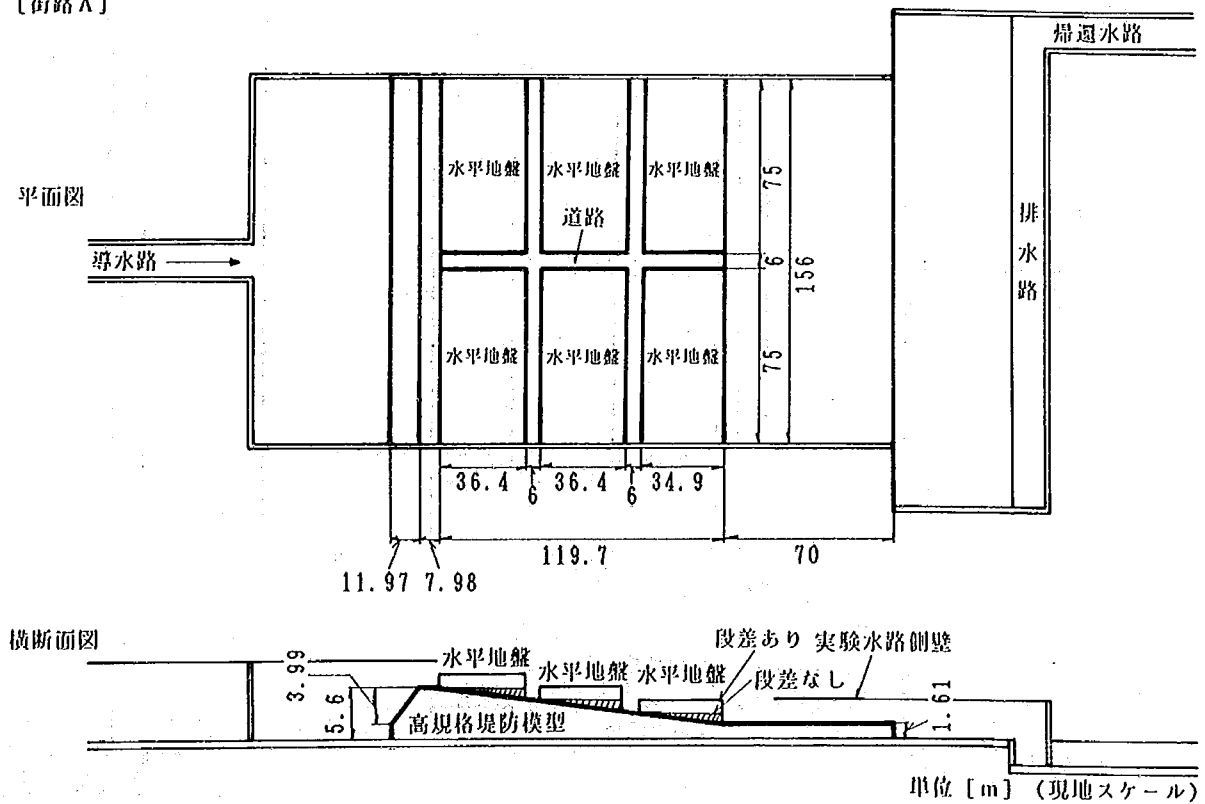
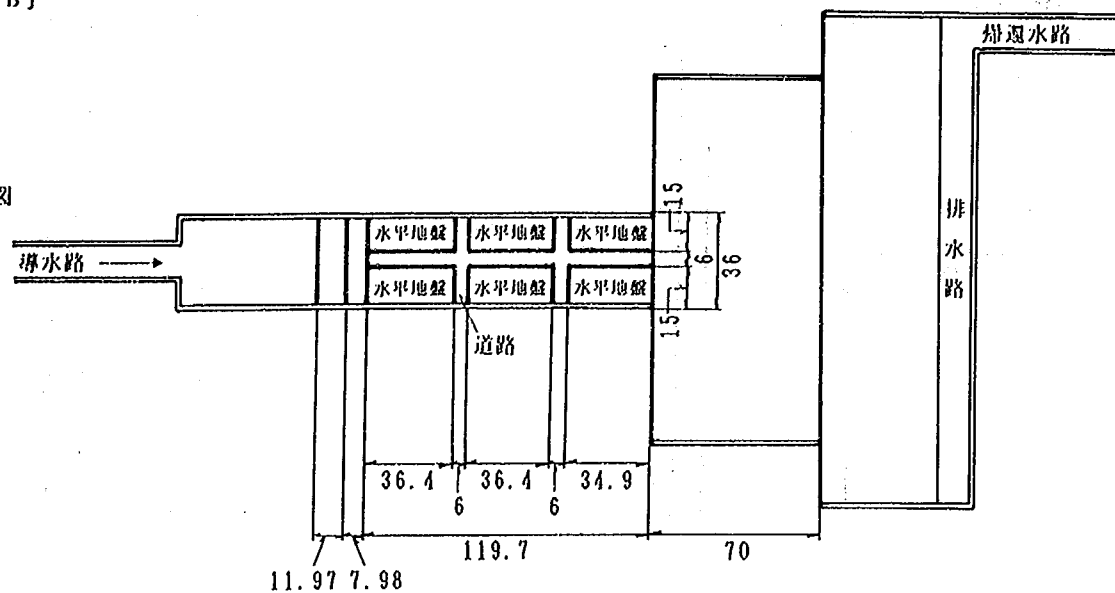


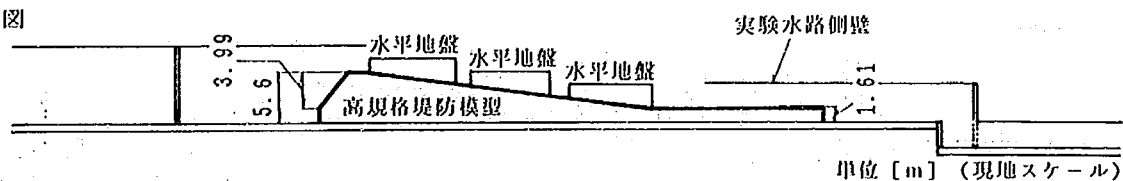
図- 2.3 街路と水平地盤の配置 (その1)

〔街路B〕

平面図

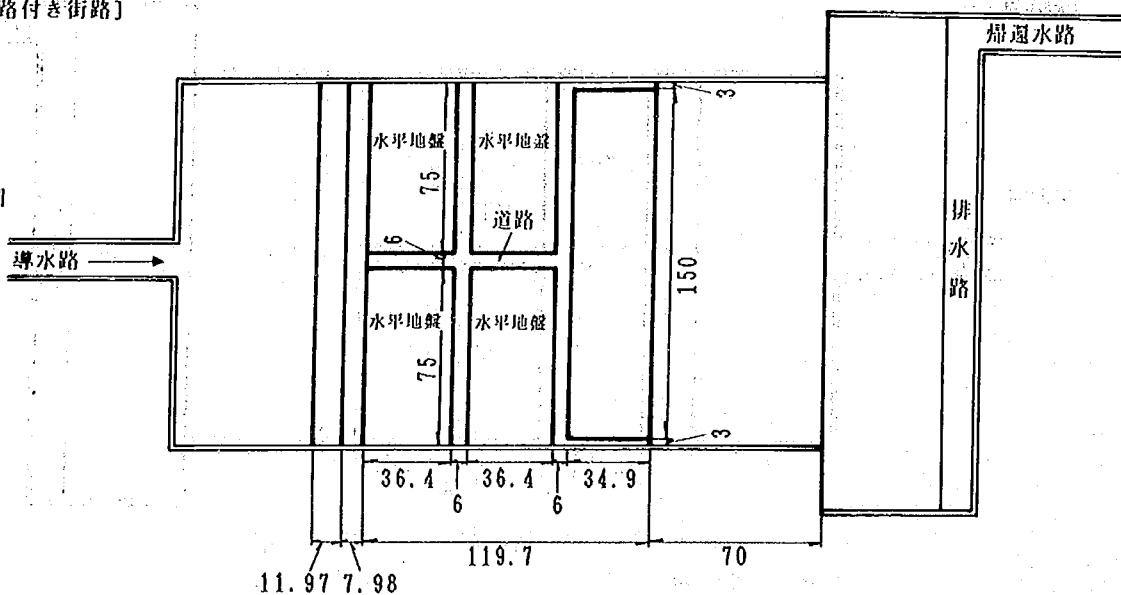


横断面図



〔T字路付き街路〕

平面図



横断面図

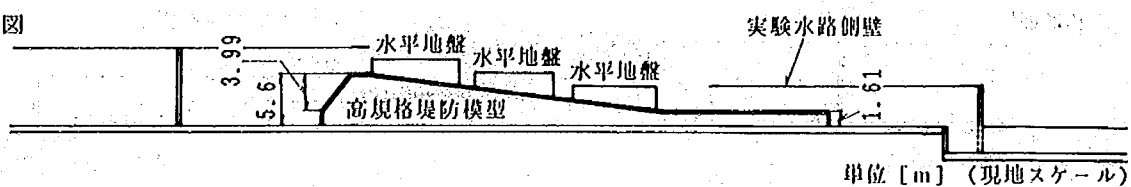


図-2.3 街路と水平地盤の配置 (その2)

図-2.3に示した実験水路内の高規格堤防形態は、堤防法線方向に繰り返される街路パターンの中の1つを取り出したものになっている。すなわち、堤防法線と直角に走る道路を実験水路の中央に配置し、堤防法線と直角に走る隣り合う2本の道路の間に当る位置に水路側壁を置いている。

上記②については、図-2.4に示すように2つ〔段差あり、段差なし〕の条件を対象にした。

〔段差あり〕

1つの水平地盤の川側の境界において、道路と地盤に大きな段差があり、越流水が水平地盤上に一切侵入しない。このため、越流水はすべて道路を通して流下する。

〔段差なし〕

1つの水平地盤の川側の境界において、道路と地盤との間に段差がない（道路と水平地盤の高さが同じ）。この条件では、越流水が水平地盤に入りやすい。

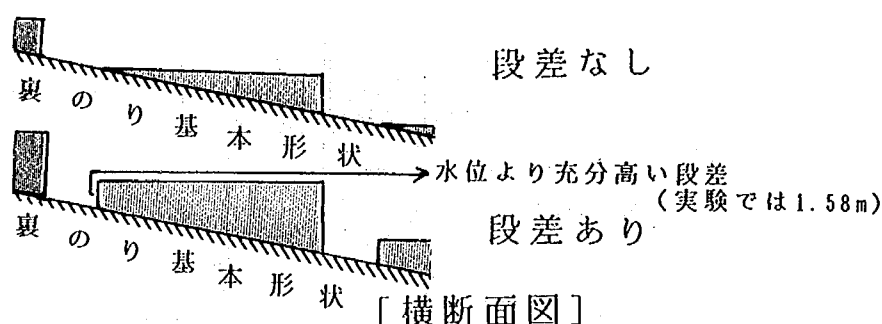


図-2.4 道路～水平地盤間の段差の説明

上記③については、図-2.5に示すように、5つ〔平坦、建物（建ぺい率15%、配置Ⅰ）、建物（建ぺい率15%、配置Ⅱ）、建物（建ぺい率40%、配置Ⅰ）、建物（建ぺい率40%、配置Ⅱ）〕の条件を対象にした。

〔平坦〕

水平地盤上に何も無い状況を再現したものである。

〔建物〕

水平地盤上に建物がある状況を模擬した条件である。水平地盤が宅地に使われるとして、文献(5)を参考に1つの水平地盤を同じ大きさの長方形に区画し、上から見て正方形の家屋を各区画に1つ置いた。1区画内の家屋の設置は、建ぺい率と家屋位置の異なる4つの方法で行った。採用した建ぺい率の根拠については、付録1を参照されたい。

上記④については、2つ〔塀あり、塀なし〕の条件を対象にした。

〔塀あり〕

各水平地盤の周囲に塀がある状況を模擬したものである。この条件での実験と、次の〔塀なし〕の条件での実験を比較することにより、塀の存在が越流水の挙動に与える影響がわかる。ここで

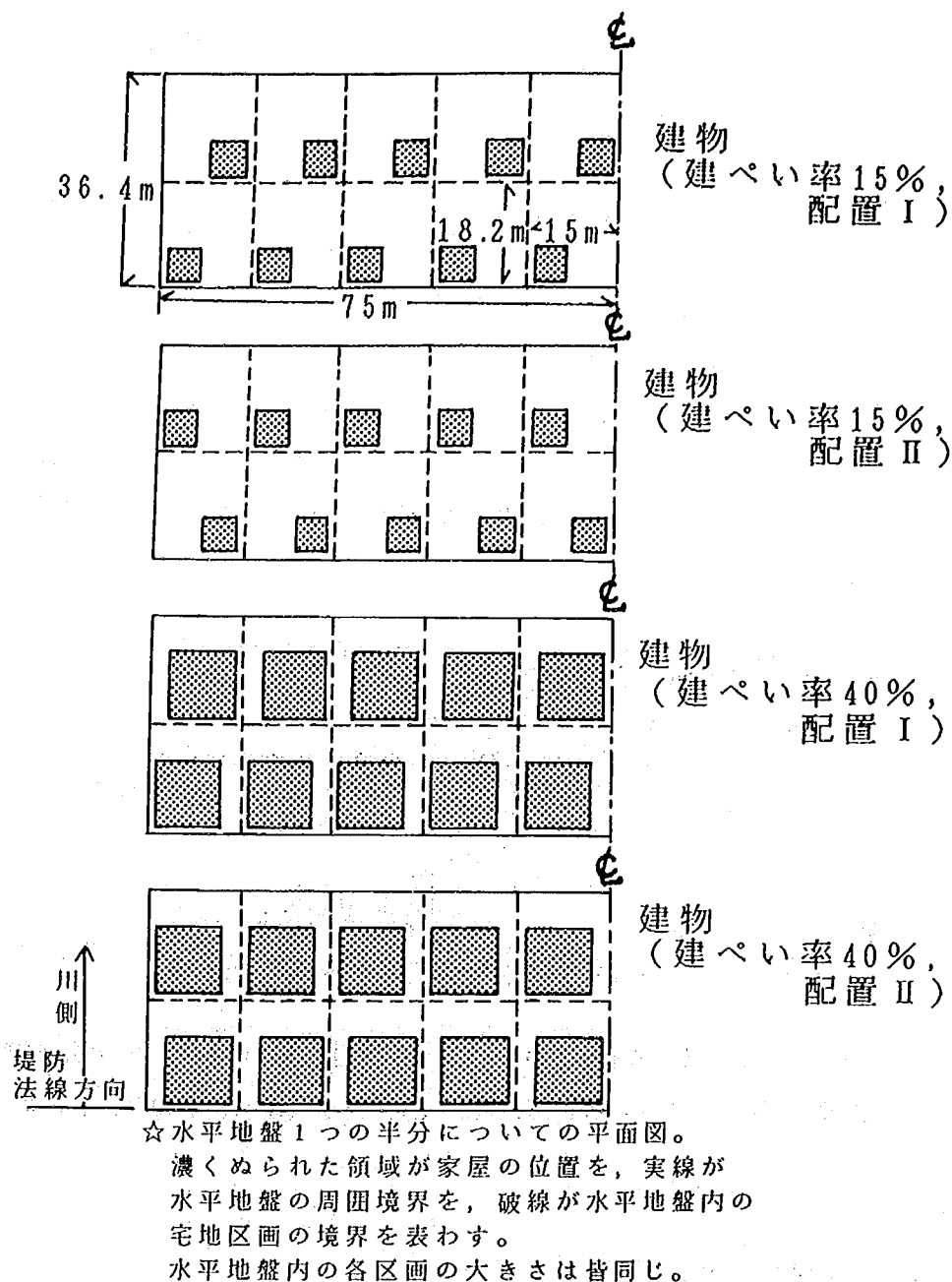
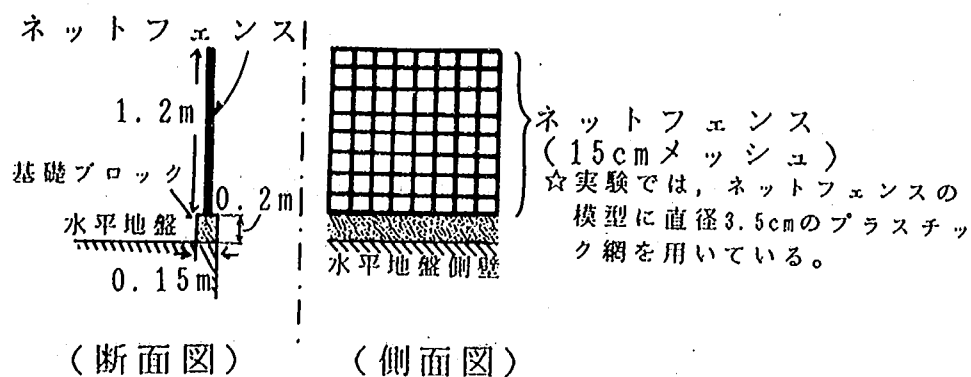


図-2.5 水平地盤上の土地利用状況に関する実験条件

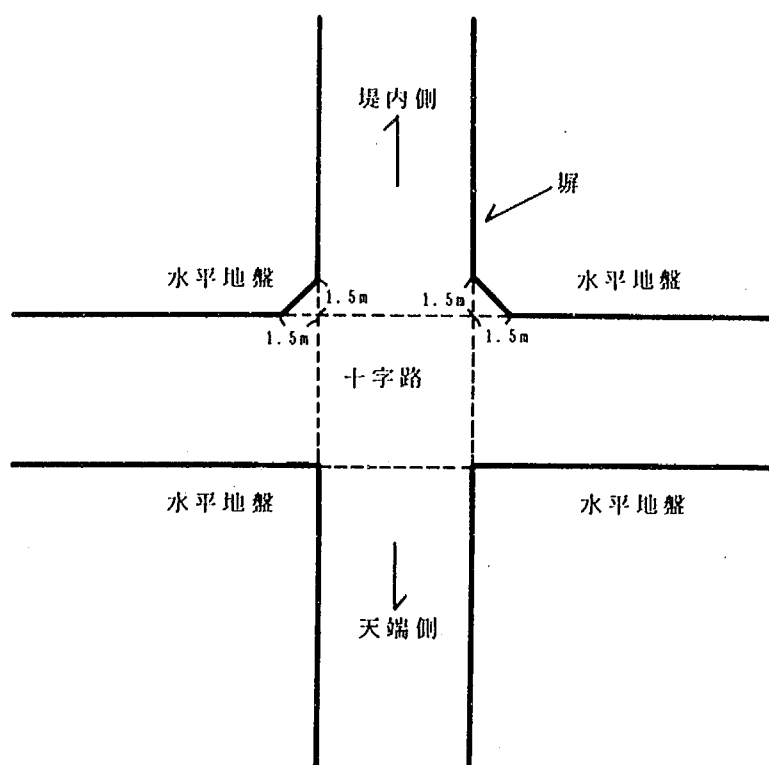
は、宅地において各区画の周囲にある塀を考えている。本実験では、ネットフェンスを用いた塀を模擬した図-2.6に示す構造を塀の模型として設置した。ネットフェンス型の塀を採用した理由については付録1を参照されたい。なお本実験では、塀の模型を全ての区画の周囲に設置することはせず、各水平地盤の周囲にだけ設置している。また、十字路の4つの角(かど)のうち堤内地側の二カ所については、図-2.7のように角を直線で切った形で塀を設置した。

[塀なし]

塀が全く無い条件での実験である。



図－2.6 実験対象にしたネットフェンス型の塀



図－2.7 十字路角での塀の平面形状

以上の①～④の項目についての条件を表－2.1に示すように組合せることにより、高規格堤防の形態に関する11の実験条件を設定した。表－2.1中の実験条件名が図－2.2中の堤防形態名に対応している。取り上げた各堤防形態の実験意図が表－2.1中に記されている。

2.3 実験方法

高規格堤防模型の縮尺は1/7であり、道路部の模型表面はコンクリート（コテ押え仕上げ）で、水平地盤の表面は葉の長さがおよそ0.5cm（模型植）の人工芝でできている。これらの材料の粗度係数は、現地スケールでそれぞれ0.015と0.030であり、それぞれアスファルト道路表面と芝生の粗度係

数に対応している。家屋の模型には建材用ブロックを用いており、水が家屋模型を透過することはない。なお、表のり、天端、街路がなく裏のり勾配が一樣の場合の裏のりの表面は、道路部と同じコンクリート（コテ押え仕上げ）で造られている。

前節に示した11の堤防形態のそれぞれについて、直角越流条件で種々の流量を流して水位、流速、流況を測定し、それらをフルード相似則に基づき現地の水理量になおして種々の整理、分析を行った。本資料中の水理量は、特に断わらない限り、すべて現地換算した値で表示されている。本実験で対象にした流量は、実際に高規格堤防で生じうる越流規模を考慮して、堤防法線長さ当りの越流量で0.1～0.5 m³/s/m程度としている。次章以降の越流水の挙動に関する記述は、この越流規模に関するものである。

第3章 越流水の挙動と堤防形態との関係

3.1 越流水深と越流量との関係

越流水深と越流量との関係が堤防形態ごとにどのように異なるかを調べる。以下では、越流水深 h と越流量 q との関係を表わす図、流量係数 C と〔越流水深 h / 天端幅 L 〕との関係を表わす図を用いて説明する。これらの量は次のように定義される。

越流水深 h : 堤防天端高を基準に測った河川内水位。本実験においては、堤防表のり肩より川側に28m離れた地点（堤防への接近流速の影響を受けていない地点として選定）の水位を河川内水位とした。

越流量 q : 堤防単位長さ当たりの越流量。実験で与えた流量 Q を天端部分の実験水路全幅 B で割ったもの。

流量係数 C : 次式で定義される。

$$q = Ch^{3/2} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

道路流量係数 C' :

水平地盤と道路との間に段差があり、水平地盤に水が入らない場合に適用する。 C' の算出には、 $q_r = Q/b$ （ここで、 b : 道路一本の幅）を用いた下式を使う。

$$q_r = C'h^{3/2} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

Case 5, Case 1 の $h \sim q$ 関係, $C \sim h/L$ 関係をそれぞれ図-3.1, 図-3.2に示す。Case 5 と Case 1 との比較から、一様勾配の裏のり面の場合に比べ、裏のり面に段差なしの水平地盤が存在すると、同じ水深に対して2～3割ほど越流量が減少し、流量係数 C が2～3割ほど減少することがわ

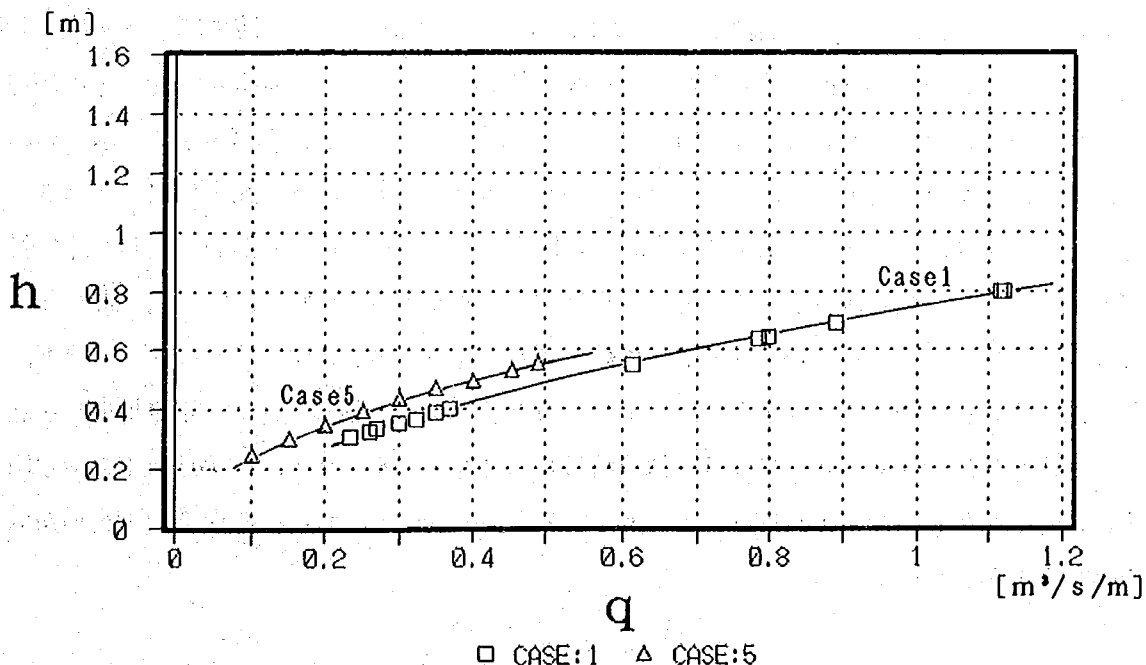


図-3.1 $h \sim q$ 関係 (Case 1, Case 5)

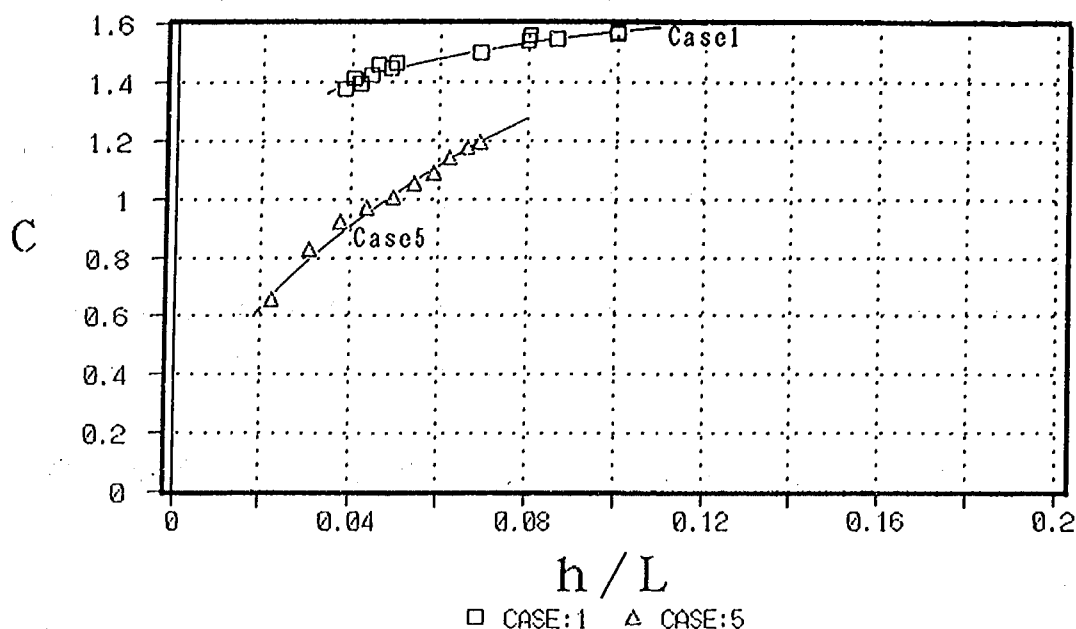


図-3.2 $C \sim h/L$ 関係 (Case 1, Case 5)

かる。これは、天端に接続する水平地盤が天端上の水位を堰き上げるからである。

一様勾配の裏のり面に水平地盤を造ることによる流量係数 C の減少程度は R_r (R_r : 堤防法線と直角に走る裏のり道路一本の幅に対する、その道路が受け持つ堤防法線長の比 $= B/b$) によって異なり、 R_r が大きくなる程その度合いが大きくなると考えられる。なお、通常堤防の流量係数 C との比較については付録 2 を参照されたい。

Case 5, 6, 10, 8, 11, 2 の $h \sim q$ 関係、 $C \sim h/L$ 関係をそれぞれ図-3.3, 図-3.4 に示す。これらの実験ケースは、いずれも街路および水平地盤の同一配置を持つ堤防に関するものであり、Case 5, 6, 10, 8, 11, 2 の順に水平地盤上の流水障害度が高くなる。Case 5 には障害要因がなく、Case 6, 8 では障害要因が家屋となり、Case 10, 11 ではこれに塀が加わる。Case 2 は水平地盤～道路間に段差があり水平地盤上に水が入らないことから、水平地盤上の流水が完全に障害される条件とみなせる。これら 2 つの図から、水平地盤上の流水障害度が高くなるにしたがい、同じ水深に対する越流量が減少し流量係数 C が減少すること、水平地盤上に水が入らない Case 2 では、他の実験ケースとの差が顕著であることがわかる。天端に接続した水平地盤上の流水障害度が高くなるほど、天端上水位の堰き上げ程度が大きくなるため、以上のような特性が現われる。特に、水平地盤～道路間の段差による水平地盤上からの水の排除は、越流特性に大きな影響を与える。水平地盤上の流水障害度の増大に伴う流量係数 C の減少程度は R_r によって異なり、 R_r が大きくなる程その度合いが大きくなると考えられる。

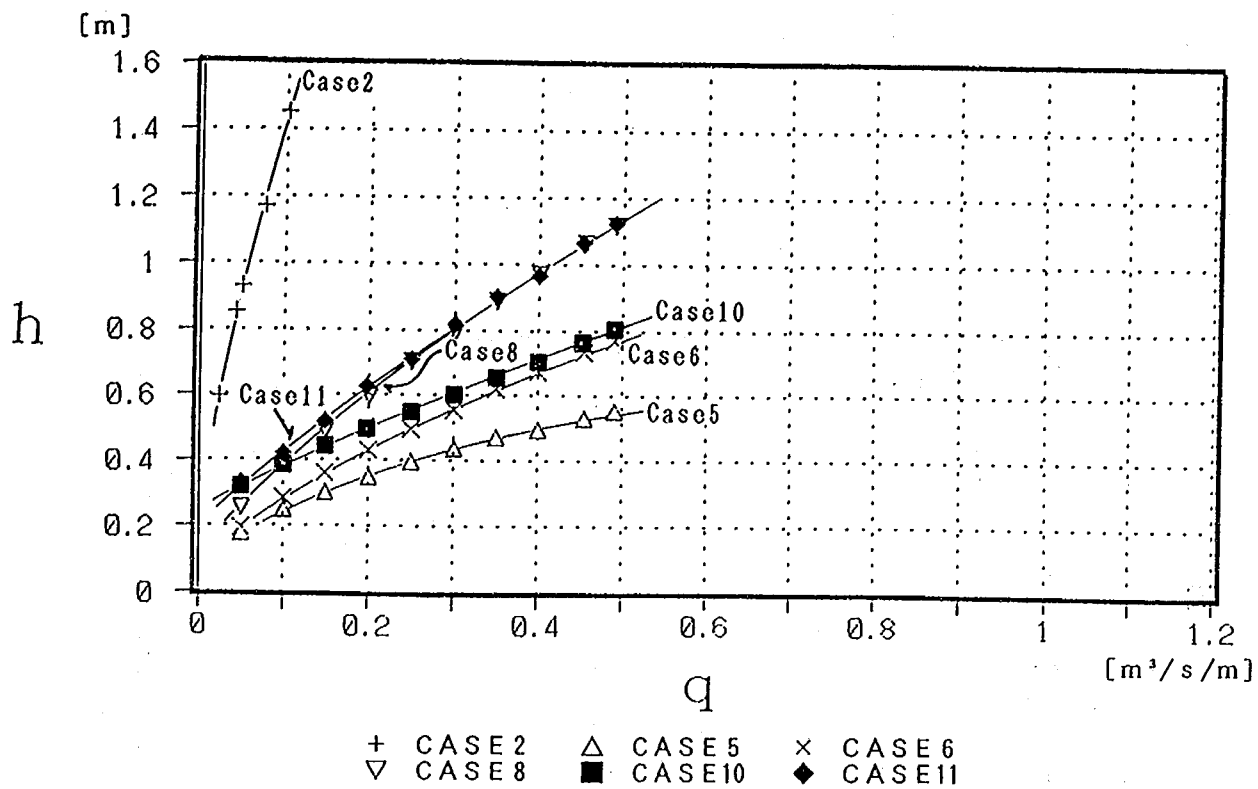


図-3.3 $h \sim q$ 関係 (Case 5, 6, 10, 8, 11, 2)

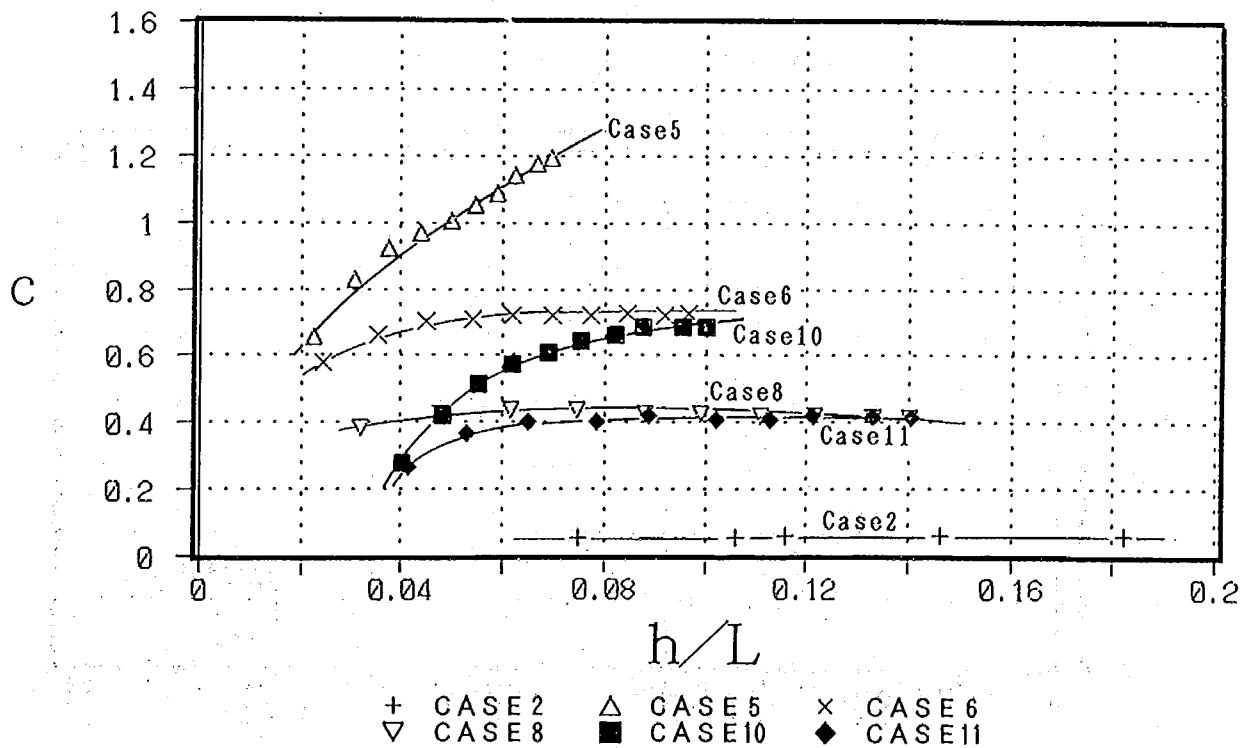


図-3.4 $C \sim h/L$ 関係 (Case 5, 6, 10, 8, 11, 2)

Case 3, Case 2 の $h \sim q$ 関係, $C \sim h/L$ 関係をそれぞれ図-3.5, 図-3.6 に示す。これらいずれの実験ケースにおいても, 水平地盤～道路間に段差があり水平地盤には水が侵入せず, すべての越流水が道路を流下する。Case 2 は $Rr = B/b = 26$, Case 3 は $Rr = 6$ である。両図から, Case 2の方が, 同じ水深に対する越流量が小さく, 流量係数 C が小さいことがわかる。これは, Rr が大きいと, 堤防法線と直角をなす道路の単位堤防法線長さ当たりの本数が少なくなるためである。図-3.7

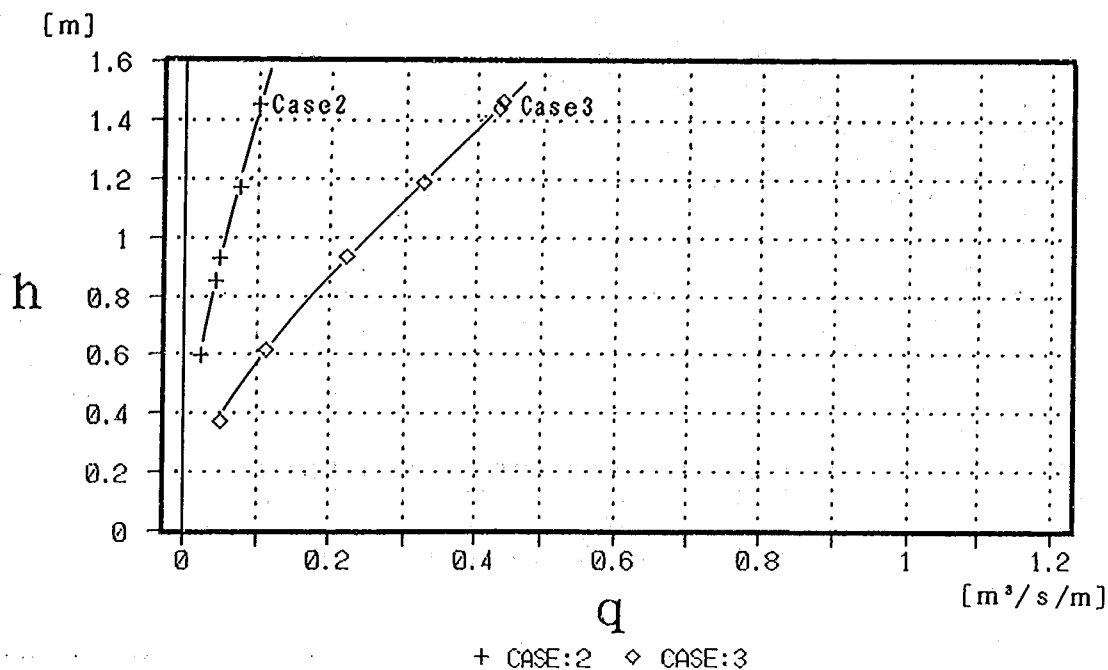


図-3.5 $h \sim q$ 関係 (Case 3, Case 2)

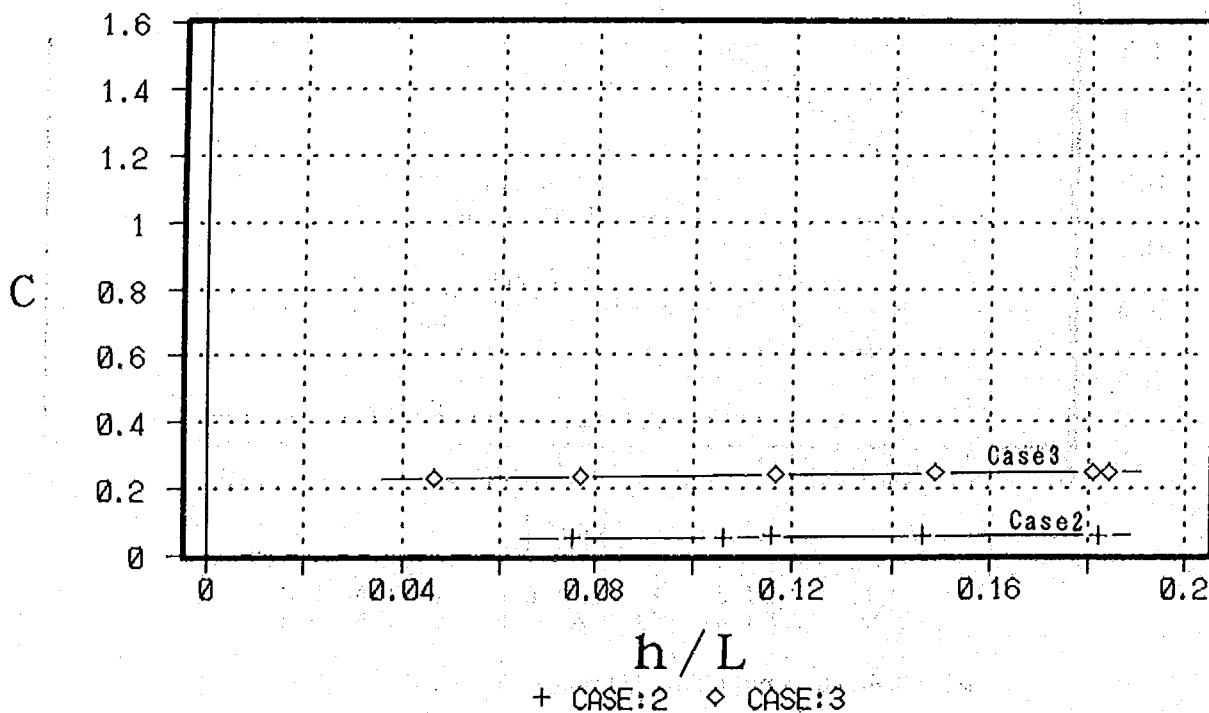


図-3.6 $C \sim h/L$ 関係 (Case 3, Case 2)

は、Case 3, Case 2 の C' (道路流量係数) $\sim h/L$ 関係を示したものであり、Case 3 と Case 2 の $C' \sim h/L$ 関係がほぼ一致することがわかる。これは、天端から一本の道路に流入する越流水の流量と越流水深との関係が、少なくとも $Rr = 6$ 以上では Rr によらず一定であることを意味している。この特性が表われるのは、 Rr がある値以上であれば、天端沿いに隣り合う道路に流入する流れの間に干渉がないためである。

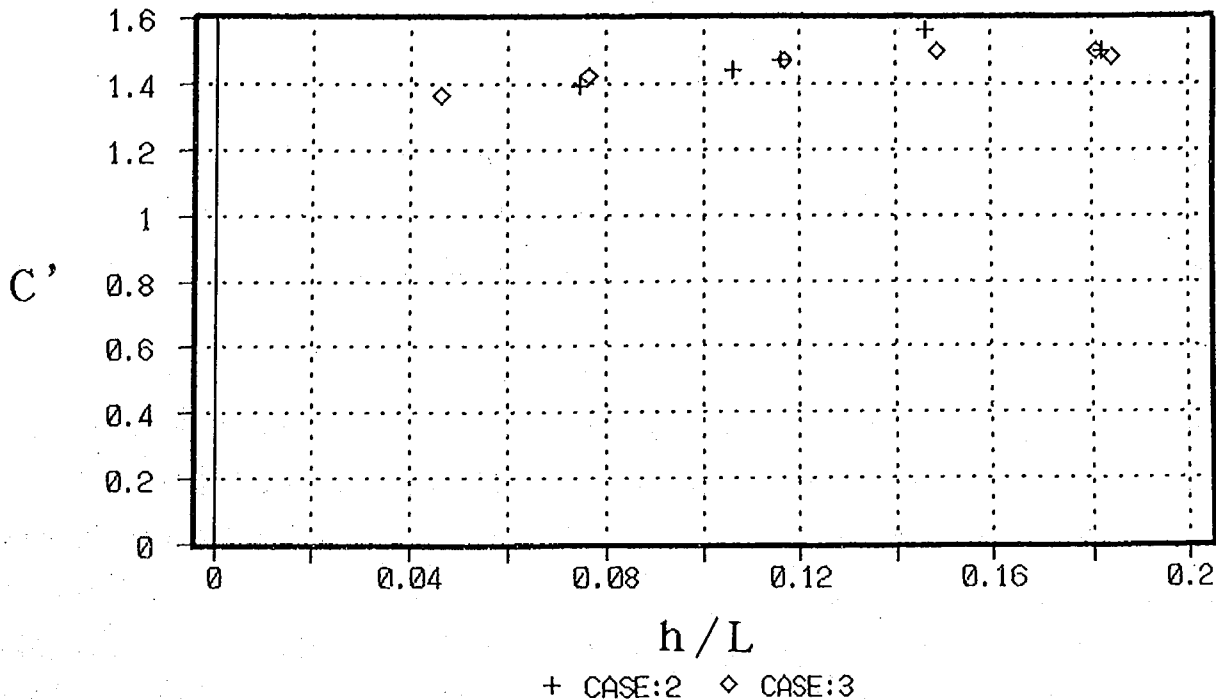


図-3.7 $C' \sim h/L$ 関係 (Case 3, Case 2)

3.2 高規格堤防上の流況

高規格堤防上の流況が堤防形態によってどのように変るかを調べる。流況は、1) 堤防上の流線の平面パターン、2) 堤防法線と直角に走る道路上の水位、3) 堤防法線と直角に走る道路上の流速、4) その道路近傍の水平地盤上の流速、5) 流速の平面分布、により表現する。各堤防形態ごとに、1)～5) により表現された流況の特徴を述べる (第3章2節1項～第3章2節4項)。この際、4つの堤防形態、すなわち Case 5 (水平地盤上に家屋などの粗度要素がない)、Case 6, 7 (水平地盤上に建ぺい率15%の家屋がある)、Case 8, 9 (水平地盤上に建ぺい率40%の家屋がある)、Case 10 (水平地盤上に建ぺい率15%の家屋と塀がある) に分けて説明する。なお、流れが道路でしか生じない Case 2～4 (水平地盤と道路との間に段差がある) の道路上の流況については第3章3節で述べる。Case 1 では一定勾配の裏のり面を越流水が堤防法線方向に一様に流下するだけなので、その流況は取り上げない。

以下の説明では、次の用語を用いる。

直交道路：堤防法線に対し直角に走る道路。

平行道路：堤防法線と平行に走る道路。

第一平行道路，第二平行道路：天端から，それぞれ一番目，二番目の平行道路

第一段，第二段，第三段：天端から，それぞれ一番目，二番目，三番目の水平地盤

3.2.1 水平地盤上に家屋・塀がない場合（Case 5）

Case 5 には，水平地盤と道路からなる高規格堤防上の流れの基本的な特徴が現われることから，そこの流況の特性を把握しておくことは非常に大切である。

図-3.8 に流線の平面パターンを，図-3.9 に直交道路上の水位縦断分布を，図-3.10 に直交道路上の流速の縦断分布を，図-3.11 に直交道路との境界近傍の水平地盤上での流速分布（堤防法線と直交する方向の分布）を，図-3.12 に等流速線により表わした流速の平面分布を示す。流線の平面パターンは，付録3の写真に示すように，投入された染料の軌跡を観察することにより求めた。流速は6割水深での値である。直交道路上の水位および流速の縦断分布は，道路幅中央の水位および流速を直交道路沿いに測定して求めたものである。

図-3.8 には，水平地盤と道路からなる高規格堤防上の流れの特徴が最もよく現われている。すなわち，第一段上では堤内地側に行くほど流線が直交道路の方に偏り，第一段から直交道路に越流水が落ち込む。第一平行道路と直交道路との交差点では，直交道路上を流下してきた越流水が第二段上に拡がる。直交道路から両側に拡散した流線は，しかし，第二段の堤内地寄りの領域まで進むと再び直交道路の方に偏り，第二段から直交道路への越流水の落ち込みが見られる。第二段で生じた流線パターンと同じような流線パターンが第三段においても起こる。以上の結果，直交道路を軸に見た場合，高規格堤防上の流線は，第一段の天端近くと第二・三段の中ほどで膨らみ，直交道路と平行道路の交差点で収縮するという“たまねぎの断面”のような線対称のパターンを描く（ただし，越流量 q によって流線の膨らみ方と縮み方が異なる。このことについては後述する）。水平地盤上では常流，直交道路では射流となっているため，交差点において流線が水平地盤に拡がる場所で跳水が起こる。越流水が水平地盤から平行道路に落下すると射流になるので，平行道路においては，隣接する天端側の水平地盤との境界付近でも跳水が生じる。道路上の流れは，交差点部の角や落ち込み流れが引起こす衝撃波を持つ。

図-3.12 からは流速の平面分布の特徴がわかる。 $q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の場合を例にとりて説明すると，水平地盤上の流速は直交道路近くを除く大部分の場所で 1 m/s 以下の低い値にとどまっており，一方，直交道路近くでは 2 m/s を越える高流速が生じ，特に，直交道路を流下してきた越流水が拡散する交差点の近くでは，図-3.11 を併せ見ればわかるように 4 m/s 前後の高い流速を示す。図-3.10 を見ると，直交道路での流速は水平地盤上に比較して相当大きく， $q = 0.1 \sim 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の条件で，第一平行道路との交差点より堤内側では全面的に 5 m/s 程度になっていることがわかる。

直交道路沿いの水深は，図-3.9 からわかるように，直交道路の流れが交差点に向う時に大きくなり，交差点から出る時小さくなる。これは，交差点の天端側では水平地盤から直交道路への流入が，交差点より堤内側では水平地盤への流出があるためである。

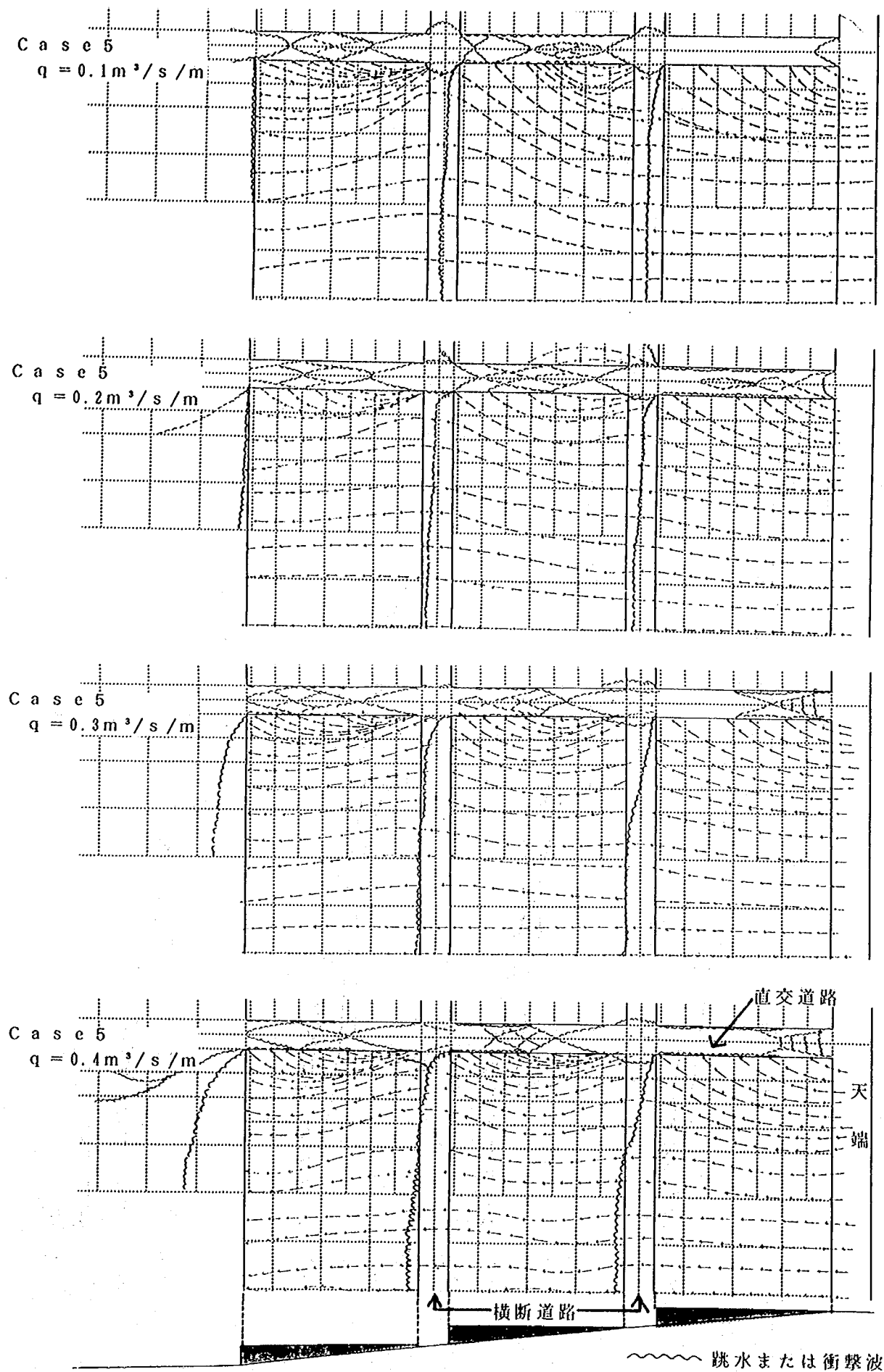


図-3.8 流線の平面パターン (Case 5)

（直交道路沿いの横断面図）

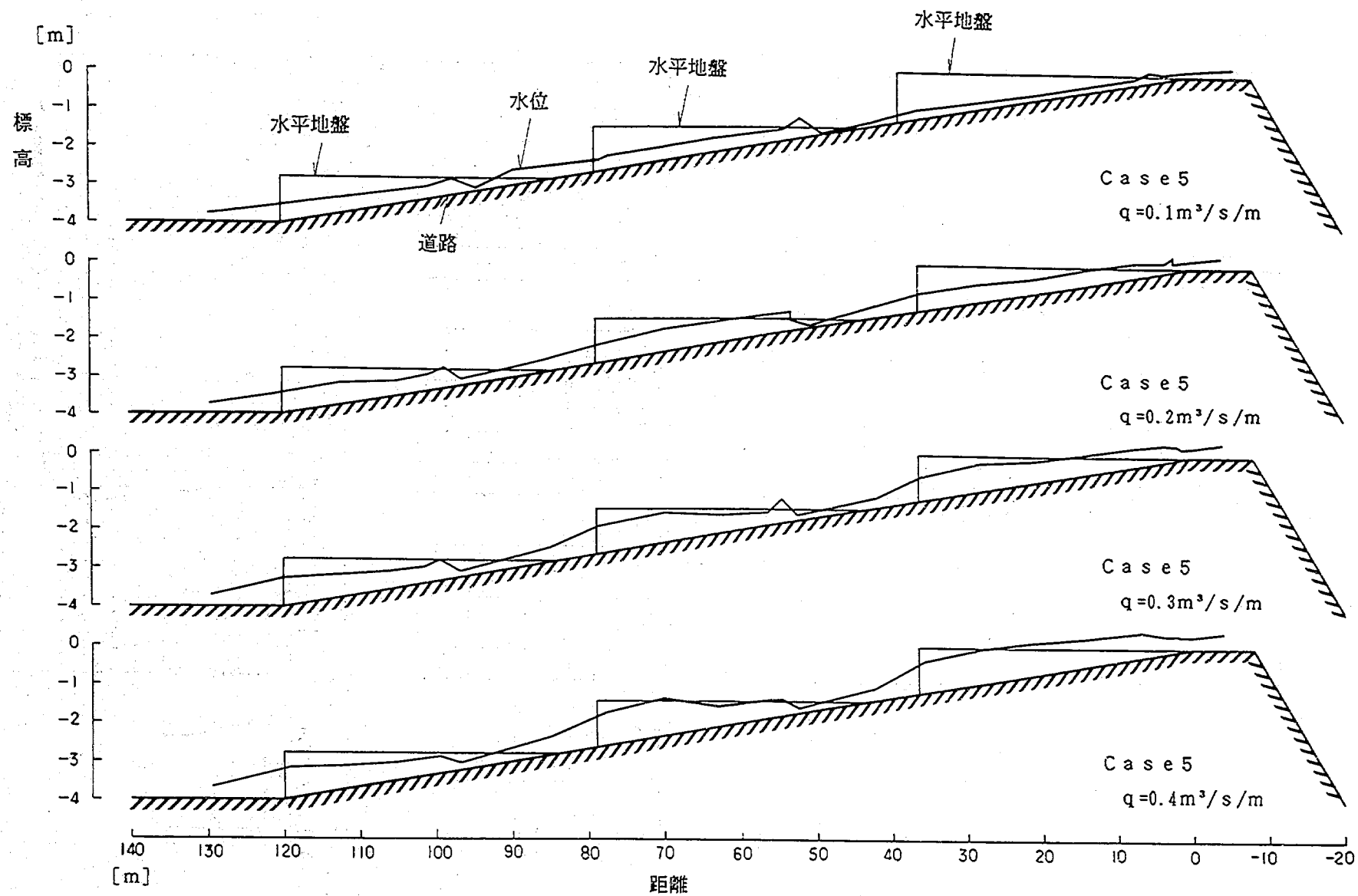


図-3.9 直交道路上の水位（Case 5）

Case 5

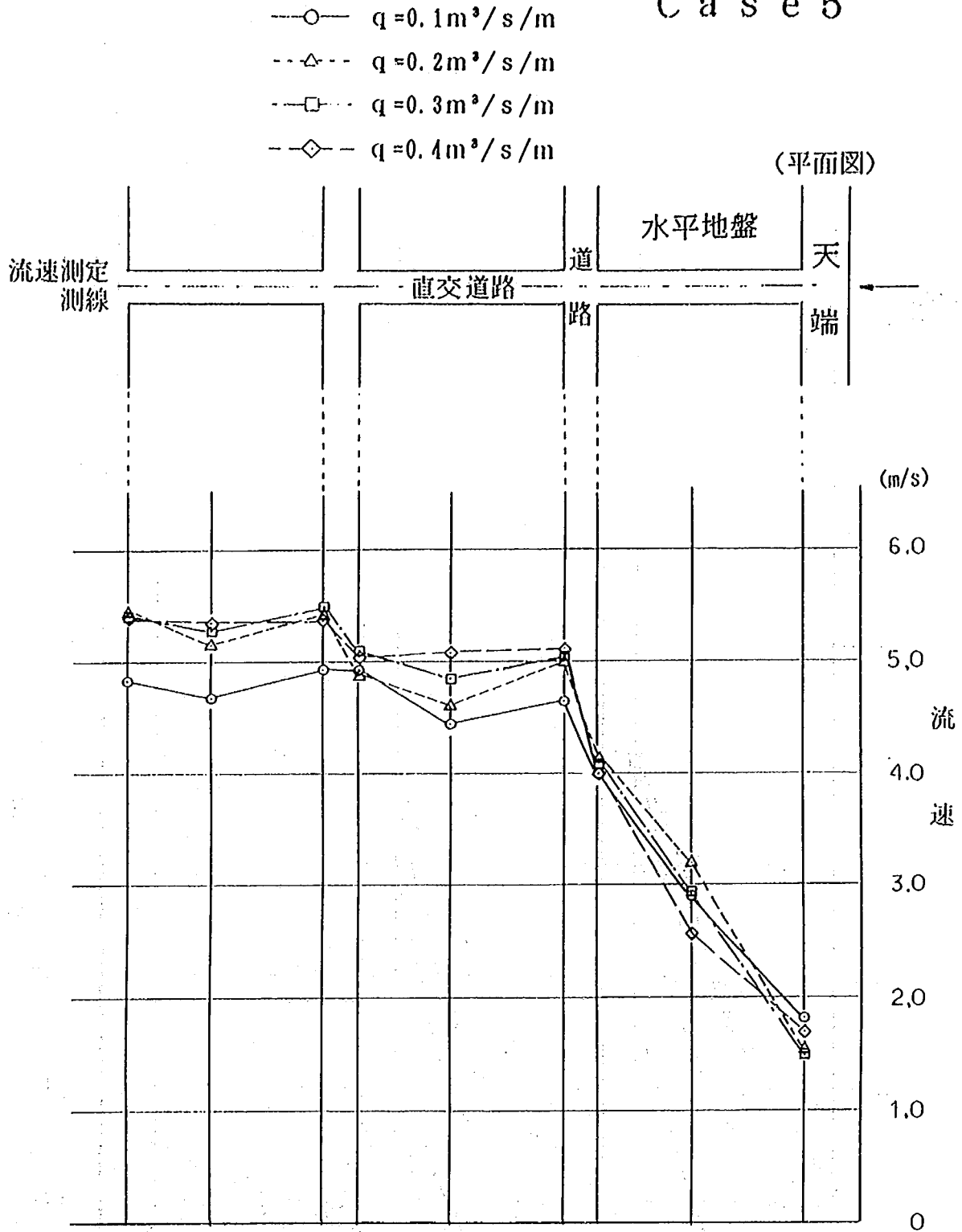


図- 3.10 直交道路上の流速 (Case 5)

Case 5

- $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
- △--- $q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
- $q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
- ◇- $q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

(平面図)

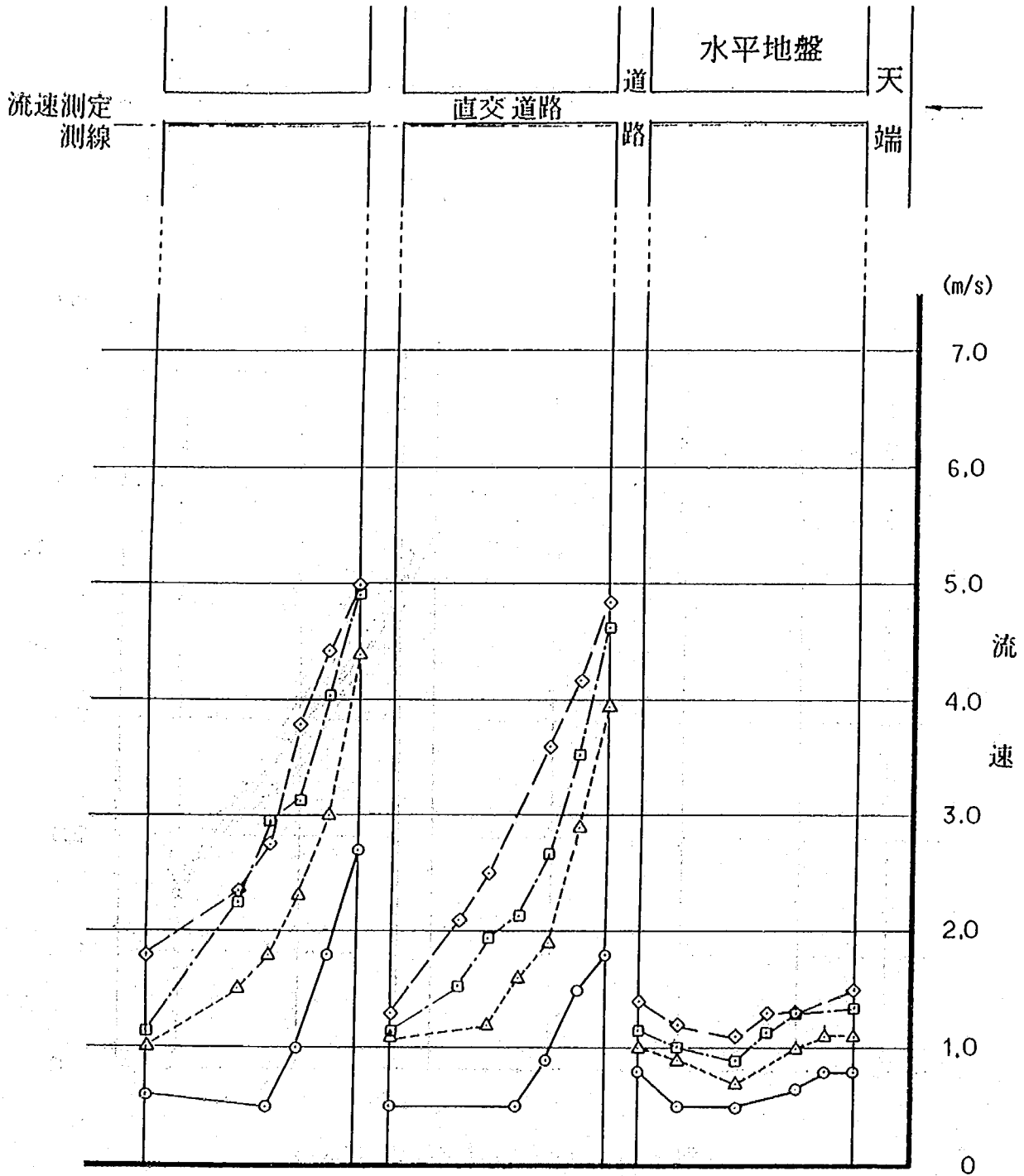
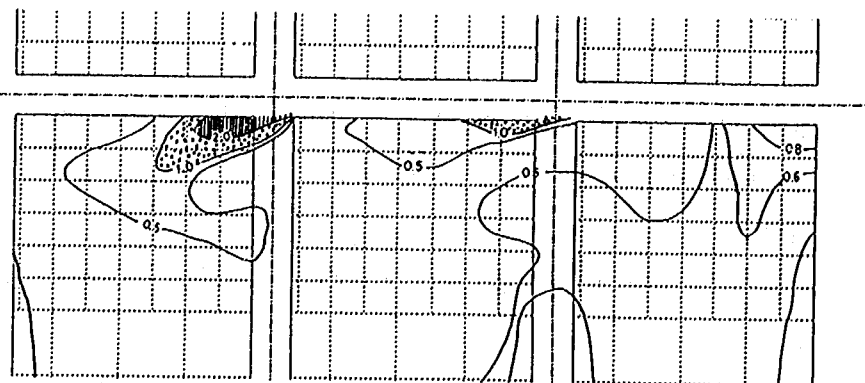
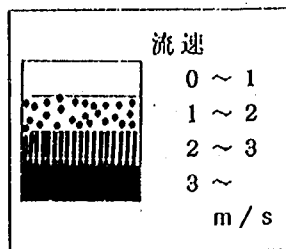
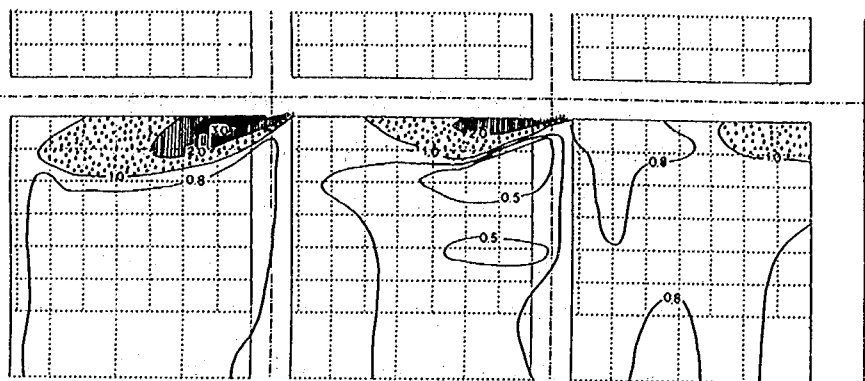


図- 3.11 直交道路との境界近傍の水平地盤上の流速 (Case 5)

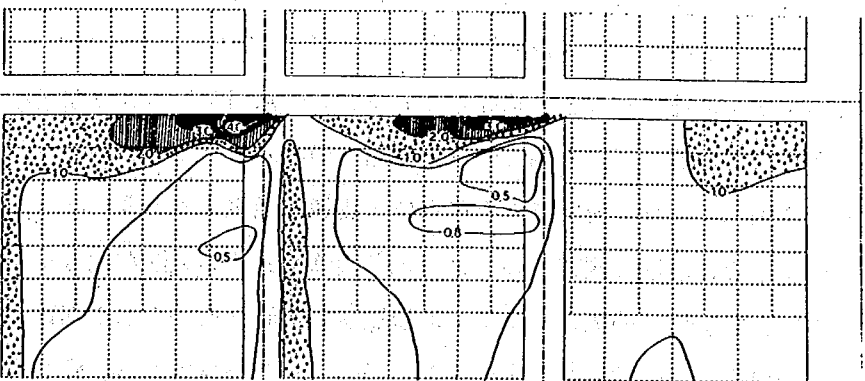
Case 5
 $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$



Case 5
 $q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$



Case 5
 $q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$



Case 5
 $q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

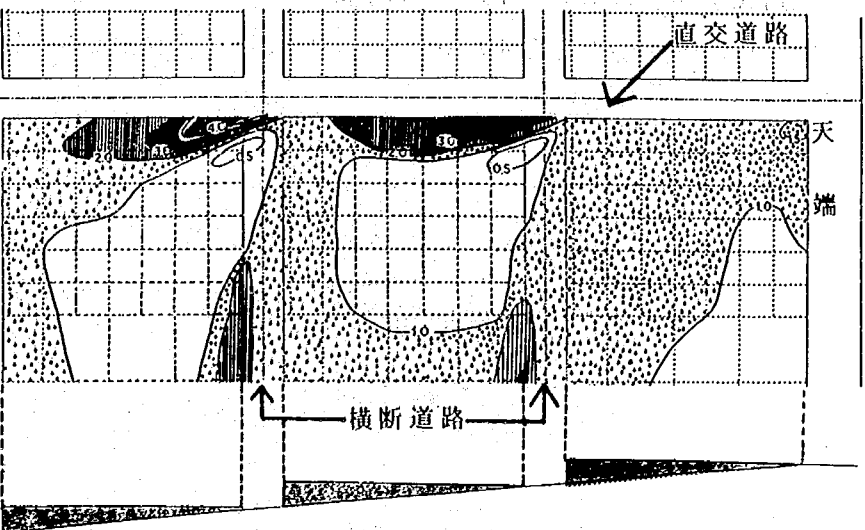


図- 3.12 流速の平面分布 (Case 5)

以上に示した流況は、基本的には、次に示す2つの現象の組合せにより決まると考えられる。

- ① 直交道路の高さがその両側の水平地盤高より低い区間における、水平地盤から直交道路への落下み流れ
- ② 直交道路の高さとその両側の水平地盤高さがほぼ同じ区間における、直交道路内の高速流の水平地盤への拡散

第一段すべてと、第二、三段の堤内側寄りでは現象①が、交差点および第二、三段の天端寄りでは現象②が卓越する。本節で対象にしているような、交差点を除く全ての区間で水平地盤高が直交道路より高い高規格堤防では、基本的に現象①が現象②より卓越する。しかし、現象①が進むと直交道路への流量集中度が増し直交道路内の水位と流勢が大きくなるため、交差点での現象②が促進される。現象②は逆に直交道路内の水位を低くし流量を減少させるため現象①を強める。このような性質があるため、越流水が水平地盤を何段も流下するうち、最終的には①、②がつりあうような同じ形の“たまねぎ型”流線パターンが繰返されるようになると考えられる。

図-3.8を見ると、越流量が大きい $q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の場合には第二・第三段の流線パターンがほぼ同じであるのに対して、越流量の小さい $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の場合には第二・第三段の流線パターンがかなり異なり、第二段では直交道路へ流れの集中（現象①）が第三段に比べ明らかに卓越していることがわかる。このことは、越流量が大きい方が‘より早く’（より少ない数の段の流下で）平衡状態の流線パターンに達することを意味している。この傾向が現われる理由は次の通りと考えられる。越流量 q が大きくなるほど、天端での直交道路への流入量と水平地盤から直交道路へ落ち込む水量が多くなり、直交道路内のより上流側で大きな水位・流速が発生するようになる。このため、直交道路と平行道路との交差点における側方への流れの拡散の強度とその範囲が大きくなり、現象②がより早く発達する。

“たまねぎ型”の流線パターンに象徴される直交道路と水平地盤との間の流れの出入りは、道路と水平地盤を持つ高規格堤防上の流況の最も大きな特徴である。直交道路上の流速が高いことから、上記の流れの出入りは水平地盤上への高流速水の流入を伴う。したがって、水平地盤の侵食をきっかけとする堤防破壊の防止を検討する際には、この現象を考慮することが重要である。

3.2.2 水平地盤上に建ぺい率15%の家屋がある場合 (Case 6, 7)

これらの Case では、水平地盤上に家屋が置かれることによって前項で述べた流況がどのように変わるかを調べることができる。図-3.13 に流線の平面パターンを、図-3.14 に堤防法線と直交する道路上の水位縦断分布を、図-3.15 にその道路上の流速の縦断分布を、図-3.16 にその道路近傍の水平地盤上の流速の縦断分布を、図-3.17 に等流速線により表わした流速の平面分布を示す。

図-3.13 を図-3.8 と比較すればわかるように、Case 6 は Case 5 と違って、流量が大きい $q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の場合でも、第一段だけでなく第二段においても水平地盤から直交道路への流れ (第3章 2 節 1 項で述べた現象①) が卓越し、第二段の交差点 (第一平行道路との交差点) での直交道路から水平地盤への流れの拡散 (現象②) が弱くなっている。この原因は、1) 水平地盤上の家屋が大きな粗度要素となって水平地盤上の水深を増大させ、同時に堤内地側方向の流速を小さくするため、水平地盤上から直交道路へ水が落ち込みやすくなったこと、2) 直交道路から水平地盤上へ拡散する流れが家屋によって減勢させられるようになったこと、にあると考えられる。

図-3.14 を図-3.9 と比較すればわかるように、同じ q に対応した直交道路上の水深は、Case 6, 7 の方が Case 5 より大きくなっている。このことは、家屋の存在により水平地盤上の水深が増加したため、天端での直交道路への流入量と水平地盤から直交道路への横流入量が増加し、同じ q で家屋がない場合に比べ直交道路内の流量が大きくなったことを示している。この流量増加の影響は、直交道路内の流速にも現われ、図-3.15 に示された流速は家屋のない場合の図-3.10 の流速よりもやや大きくなっている。(ただし、水平地盤から直交道路へ運動量の小さい水が流入し、これが直交道路内の流れを堰き上げることも、大きな水深が現われた一因と考えられる。この要因は、直交道路内の水深・流量の増加程度のわりには流速の増加程度がそれほど大きくないという特徴をもたらす。) このように、家屋の存在により直交道路内の流勢 (水深・流速) が大きくなるにもかかわらず、上述のように現象①が卓越するのは、流線の平面パターンに対しては、上記 1), 2) に示した家屋の効果 (水平地盤上から直交道路へ水を落ち込みやすくすること、直交道路から水平地盤上へ拡散する流れを減勢すること) の方がより大きいとと考えられる。

このような家屋の存在による流況変化は、水平地盤上の流速分布にも現われている。図-3.17 を図-3.12 と比較すればわかるように、Case 6 の流速 1 m/s 以上の範囲が、Case 5 での同じ q について同範囲よりも小さくなっている。これは、Case 6 の方が直交道路内流水の水平地盤への拡散範囲が小さいこと、同様に水平地盤上の水深が全体的に大きく流速が小さいことによる。このように、家屋が置かれることによって比較的高い流速が発生する範囲は小さくなるが、直交道路との境界近傍で発生する各水平地盤内の最大流速は家屋が置かれてもあまり減少せず、 q が小さい場合にはむしろ増加する。このことは図-3.16 と図-3.11 に示された流速を比較すればわかる。直交道路との境界近傍で発生する水平地盤上の流速は、交差点での直交道路内流れの拡散程度と直交道路内の流勢の両方に支配される。家屋が置かれると、前述のように前者は小さくなるが後者は大きくなる。このため、直交道路との境界近傍での水平地盤上の流速 (= 各水平地盤内の最大流速) は、家屋が置かれても必

ずしも減少しないと考えられる。

Case 6 と Case 7 の違いは、家屋の配置の違いがもたらす流況の差異を表わしている。Case 7 においては、交差点付近から水平地盤へ拡散する直交道路流れの影響が直接及ぶ範囲に家屋が 1 つ置かれ (図- 3.13, 3.17 の黒丸のついた家屋)、この点が Case 6 との大きな違いになっている。図- 3.13 ~ 3.17 から見る限り、本実験で設定した家屋配置の違いが流況に与える影響は、家屋の有無が流況に与える影響に比べ小さいようである。それでも、図- 3.13, 3.17 における Case 7 の実験結果から、交差点で広がった直交道路流れが上記の家屋にぶつかり、その家屋の左右に振分けられ、その結果、その家屋の左側 (堤内地側に向って) の流れがやや増大し、直交道路からの流れの拡散領域が小さくなるという特徴を観察することができる。

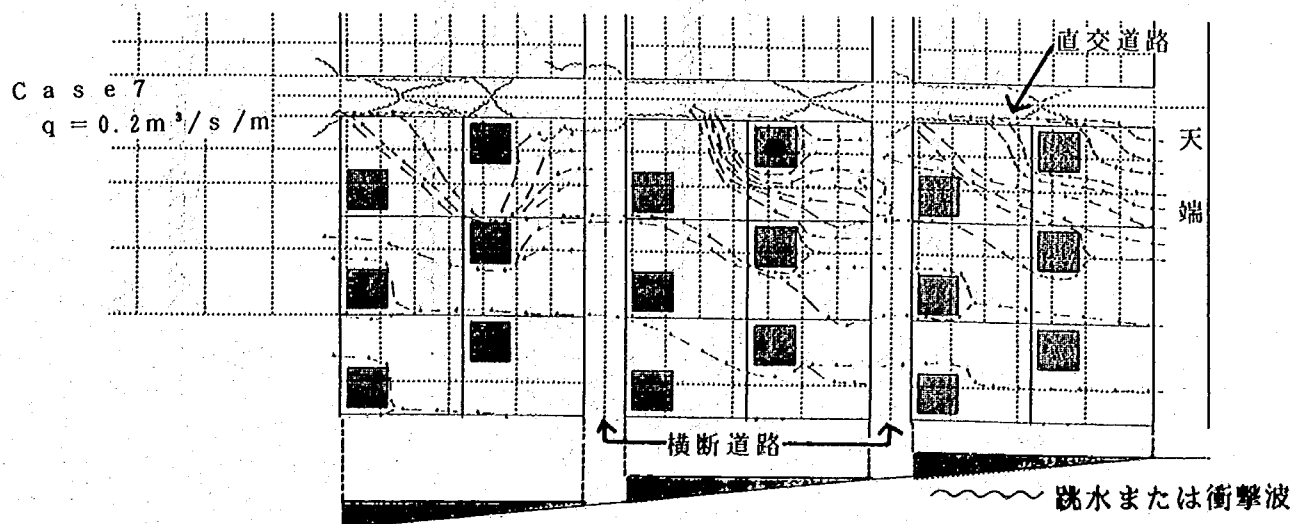
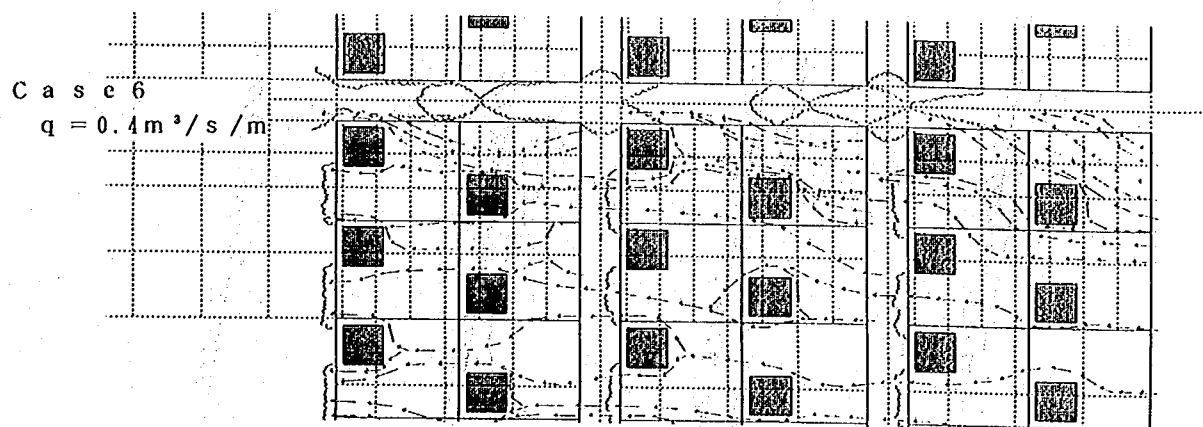
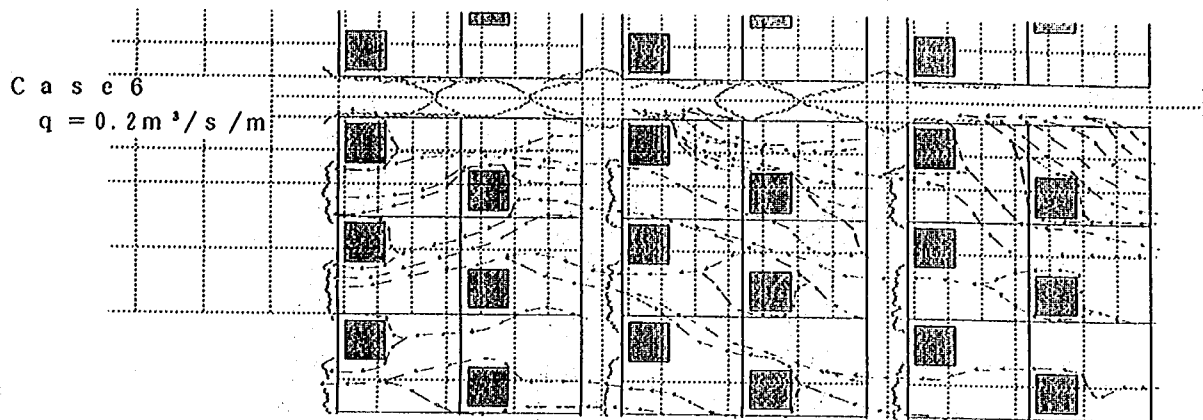
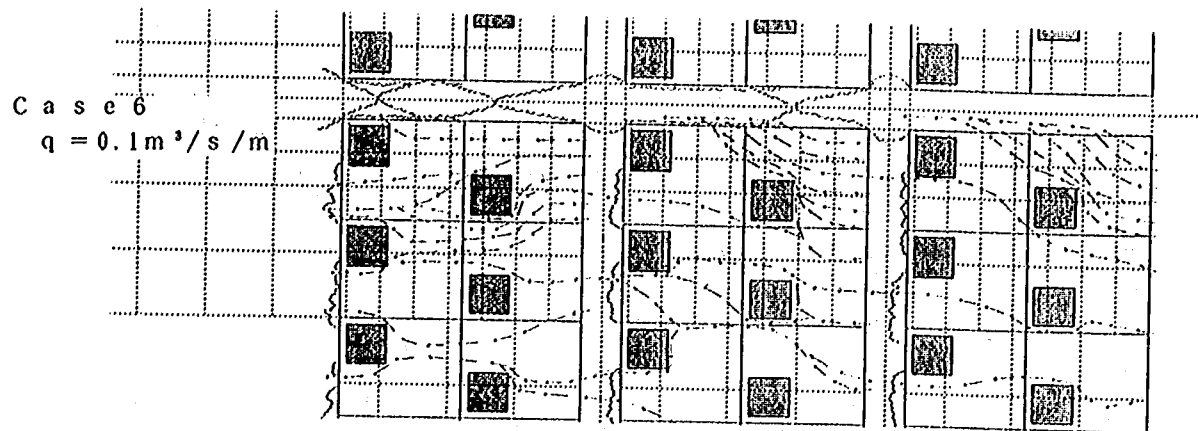


図-3.13 流線の平面パターン (Case 6, Case 7)

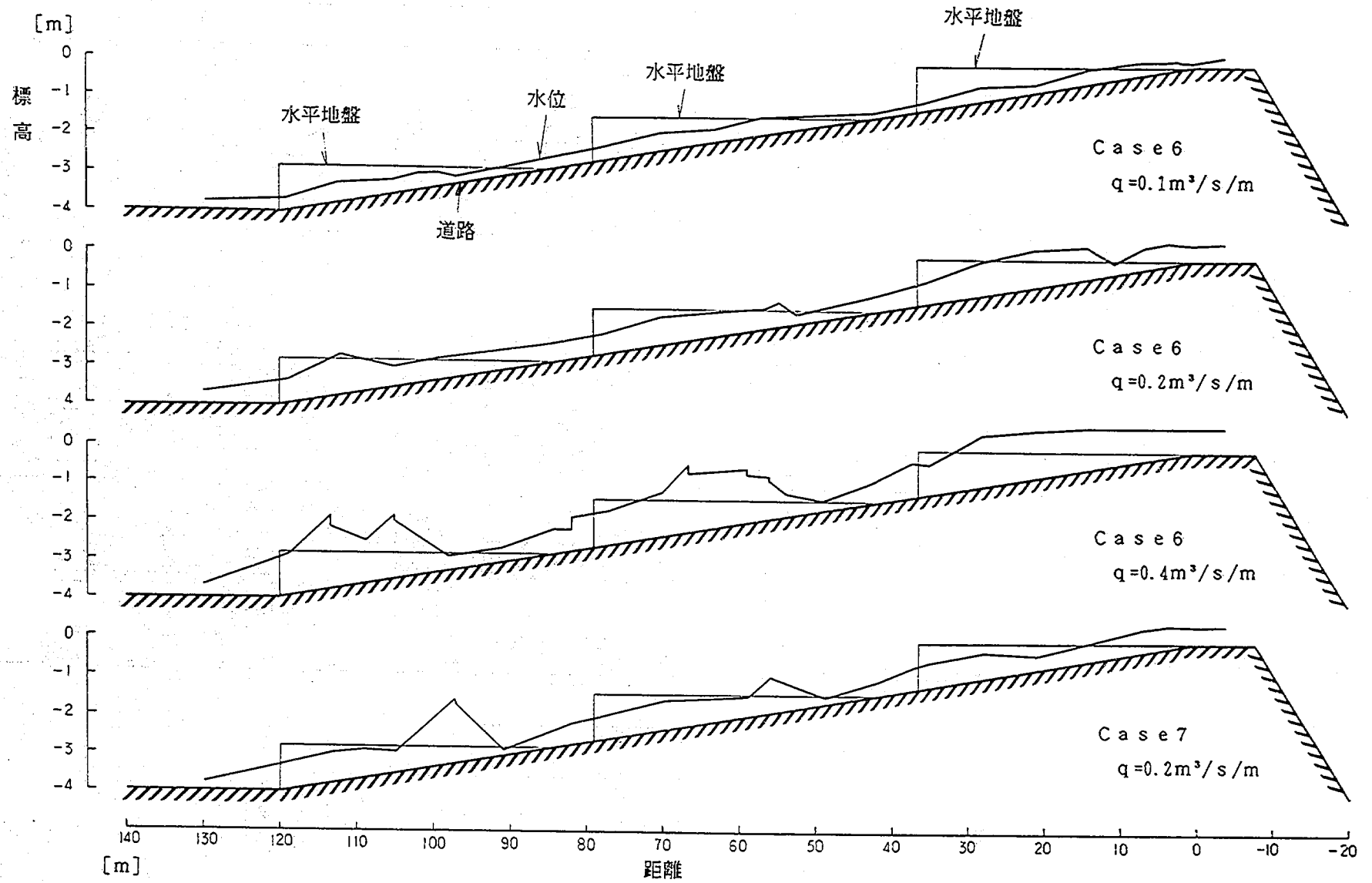


図-3.14 直交道路上の水位 (Case 6, Case 7)

Case 6

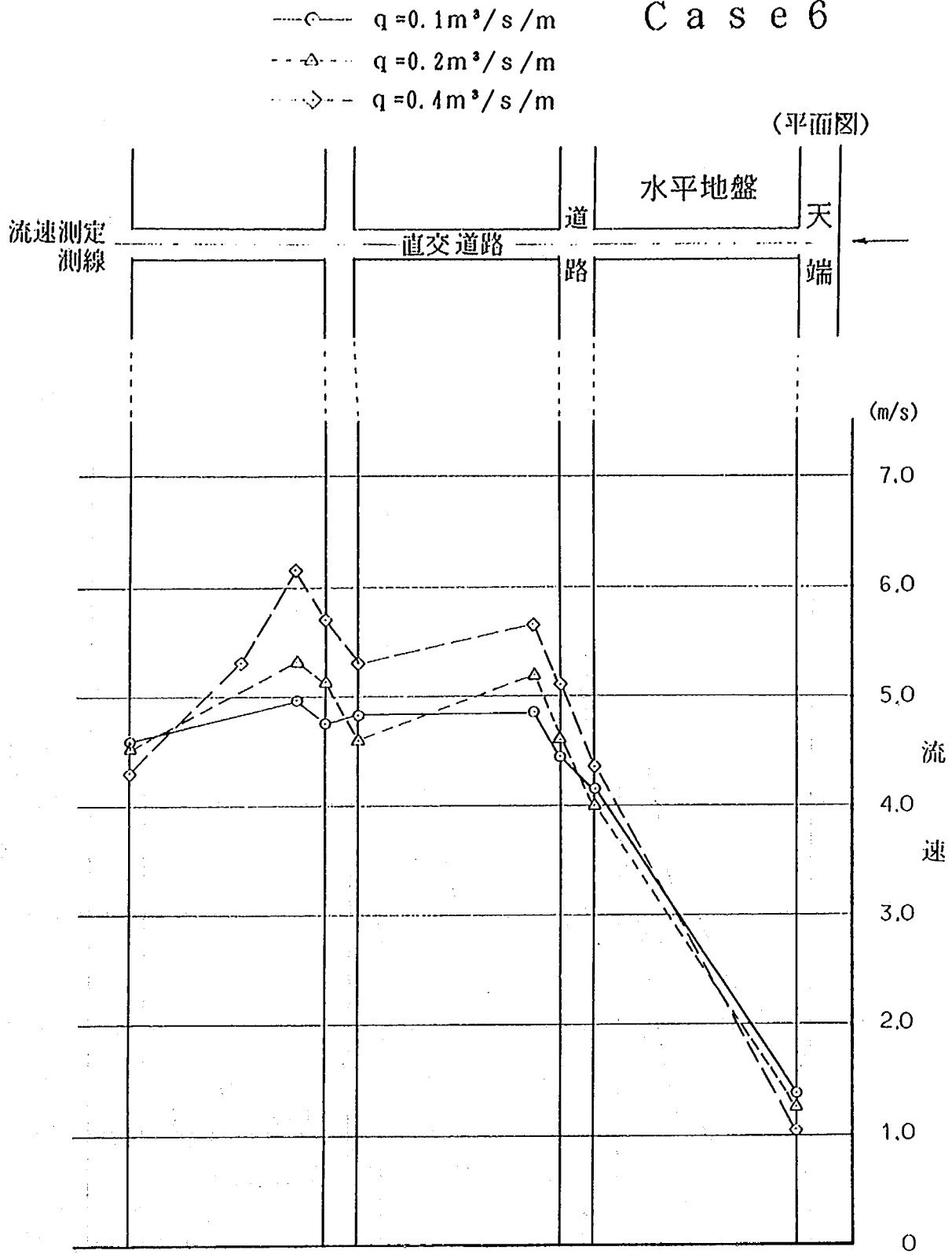


図-3.15 直交道路上の流速 (Case 6)

Case 6

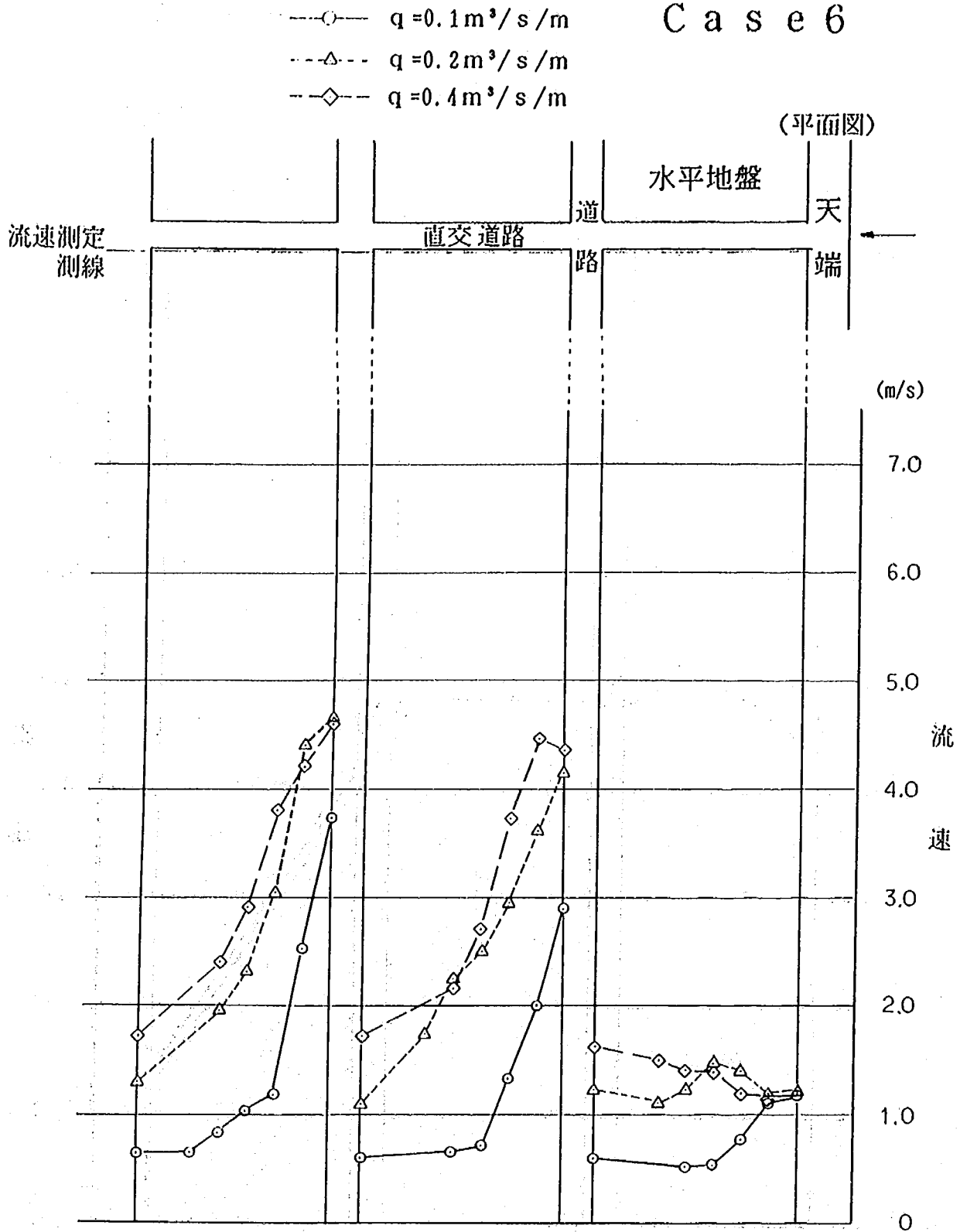


図- 3.16 直交道路との境界近傍の水平地盤上の流速 (Case 6)

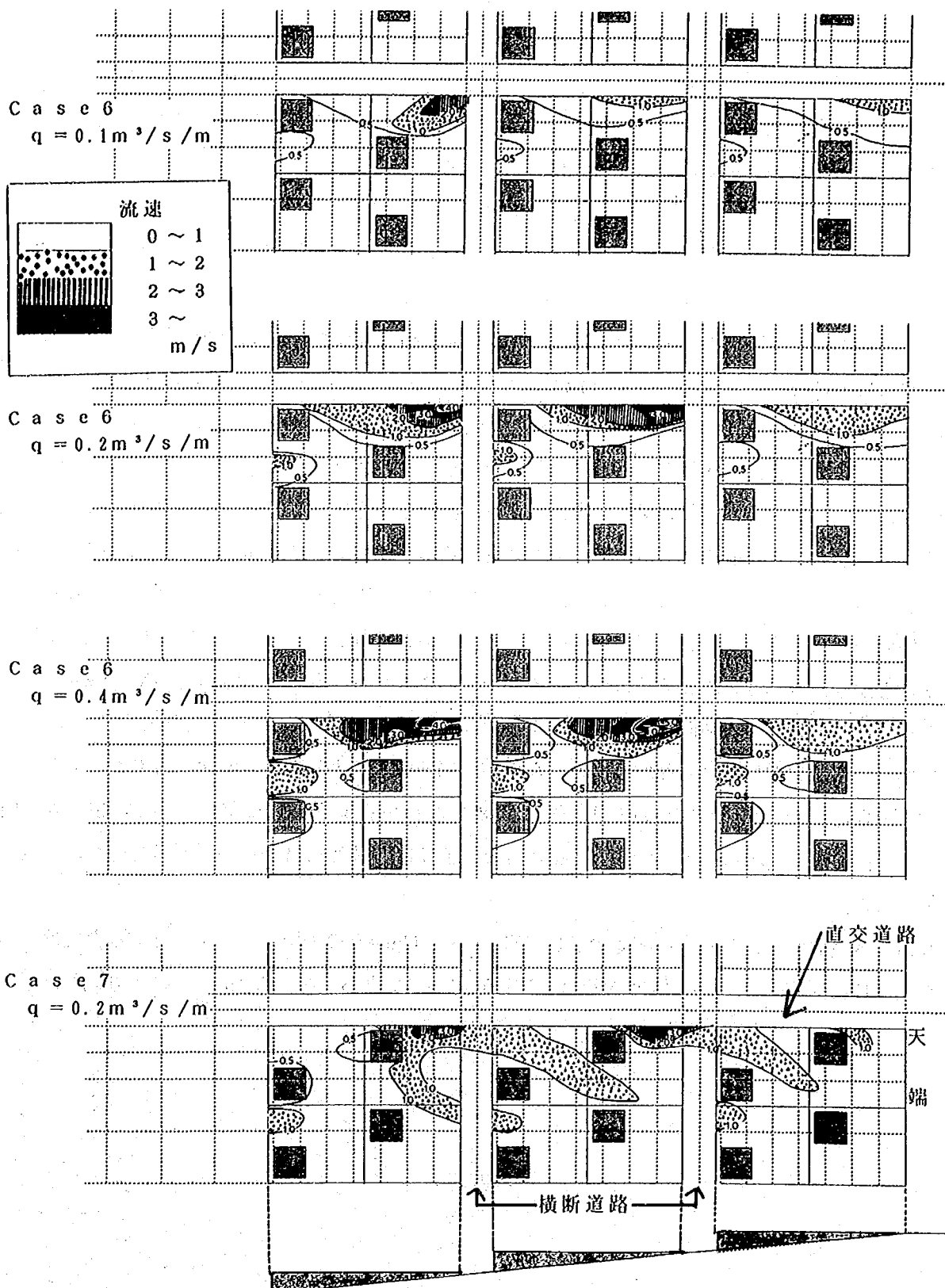


図-3.17 流速の平面分布 (Case 6, Case 7)

3.2.3 水平地盤上に建ぺい率40%の家屋がある場合 (Case 8, 9)

これらの Case では、水平地盤上の家屋密度が高まることによって前項で述べた流況がどのように変わるかを調べることができる。図-3.18 に流線の平面パターンを、図-3.19 に堤防法線と直交する道路上の水位縦断分布を、図-3.20 にその道路上の流速の縦断分布を、図-3.21 にその道路近傍の水平地盤上の流速の縦断分布を、図-3.22 に等流速線により表わした流速の平面分布を示す。

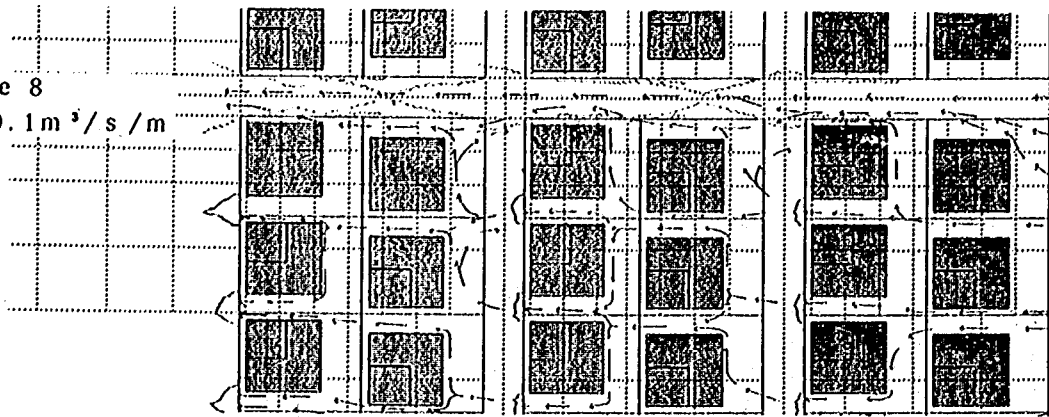
図-3.19 を図-3.14 と、図-3.20 を図-3.15 と比較することにより以下のことがわかる。建ぺい率が40%になると、水平地盤上の流れに対する家屋の粗度効果が建ぺい率15%の場合よりも一層大きくなるため、越流水の道路への集中度が高くなり、家屋の存在により直交道路内の流勢（水深、流速）が増すという第3章2節2項で述べた特徴がより顕著になる。また、図-3.19 から、水位縦断分布の凹凸が Case 6, 7 の場合に比べ激しくなっていることがわかる。これは、水平地盤から直交道路への水の落ち込みによる減勢効果が縦断方向に断続的に現われるようになるためと考えられる（家屋と家屋の間という限定された区間からのみ水の落ち込みがあるため）。

流線の平面パターンと流速の平面分布は、家屋の影響を強く受けるようになる。図-3.22 からは、交差点付近からの直交道路流れの拡散により発生する水平地盤上の高流速域が、直交道路との境界近くに設置された家屋によって狭い領域に押込められること、直交道路から離れていても、水平地盤の堤内地側の外縁近くの家屋と家屋の間には $q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の場合 2 m/s 以上の比較的高い流速が発生することが観察される。直交道路近傍の高流速域が小さくなくても、その流速は、図-3.21 に示されるようにむしろ増加する傾向にある。このように、建ぺい率が15から40%に増加したことにより、比較的大きな流速が発生する領域は小さくなるが、局所的にはより大きな流速が発生するようになる。一方、流線の平面パターンについては、図-3.18 からわかるように、家屋の占める面積が大きいため‘たまねぎ型’の流線パターンが不明瞭になり、家屋間の隙間（格子状の平面形を持つ）を流れる流況となる。

なお、本実験で設定した家屋配置の違い（Case 8 と Case 9 の差異）が流況に与える影響は、第3章2節2項に述べた建ぺい率15%の場合と定性的に同じである（図-3.18, 3.22 より）。

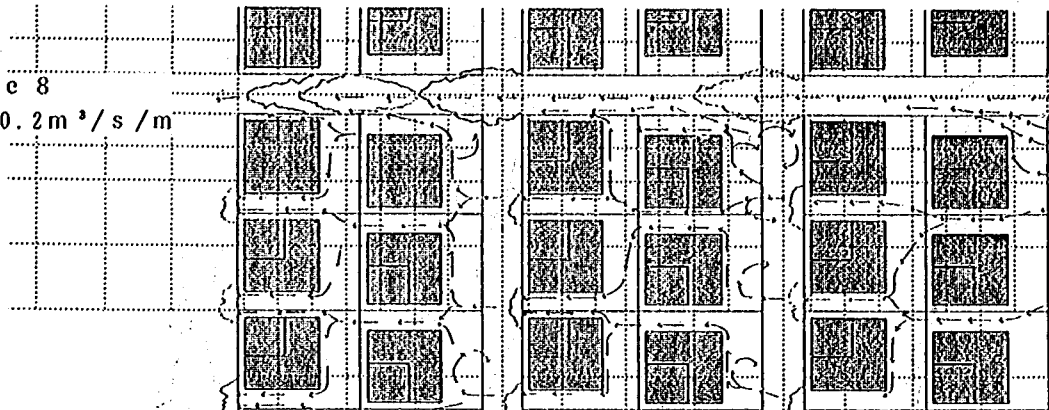
C a s e 8

$$q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$



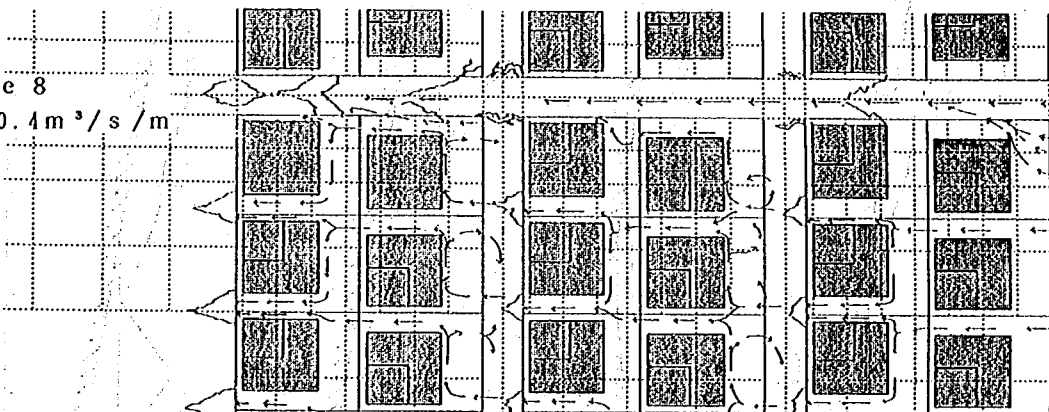
C a s e 8

$$q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$



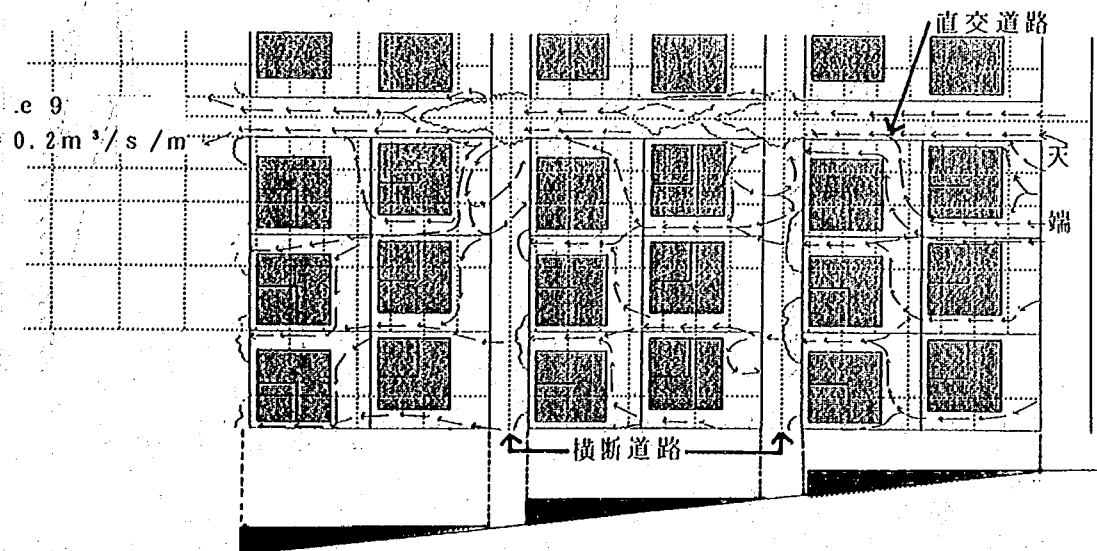
C a s e 8

$$q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$



C a s e 9

$$q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$



~~~~~ 跳水または衝撃波

図-3.18 流線の平面パターン (Case 8, Case 9)

(直交道路沿いの横断面図)

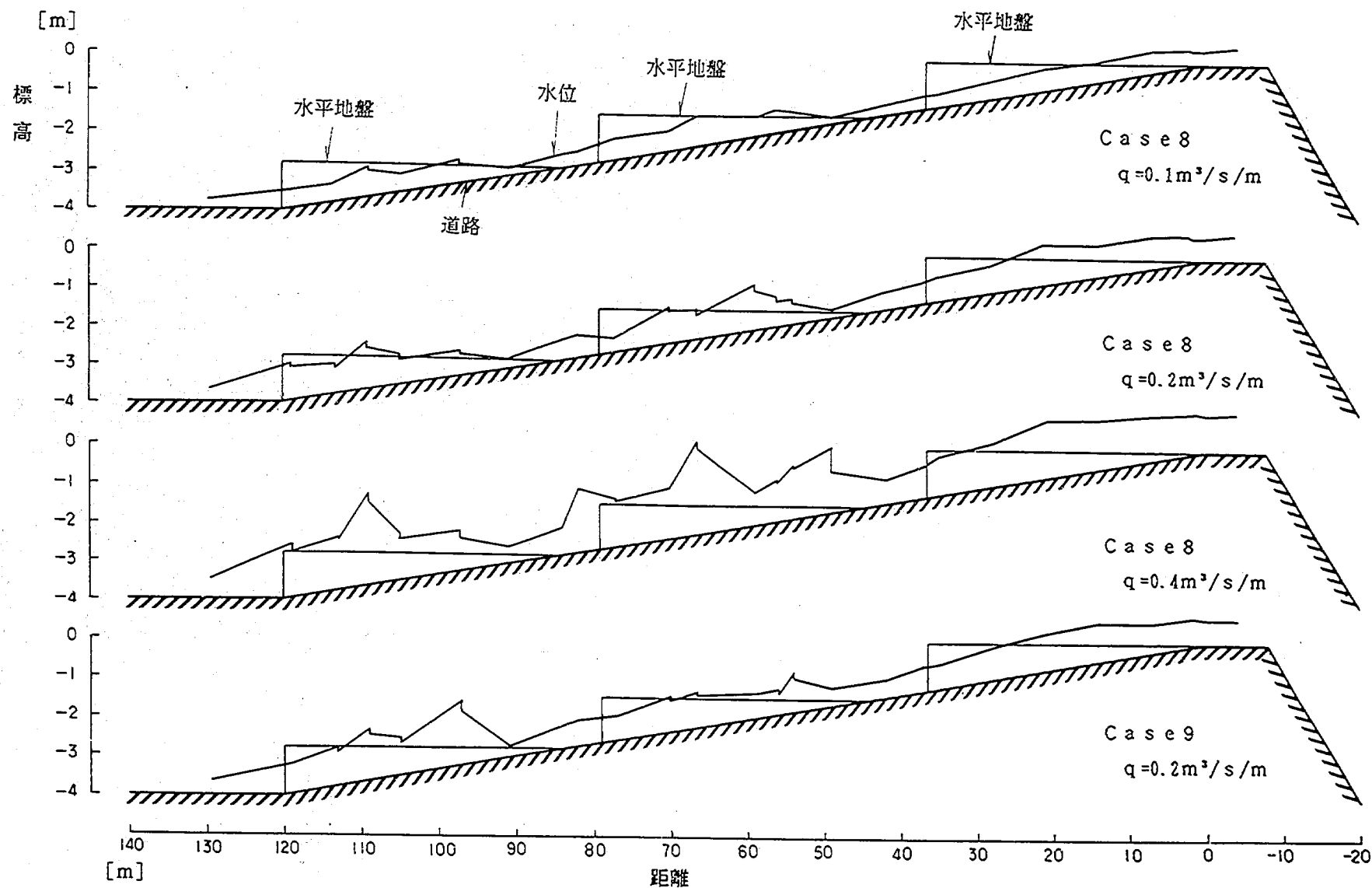


図- 3.19 直交道路上の水位 (Case 8, Case 9)

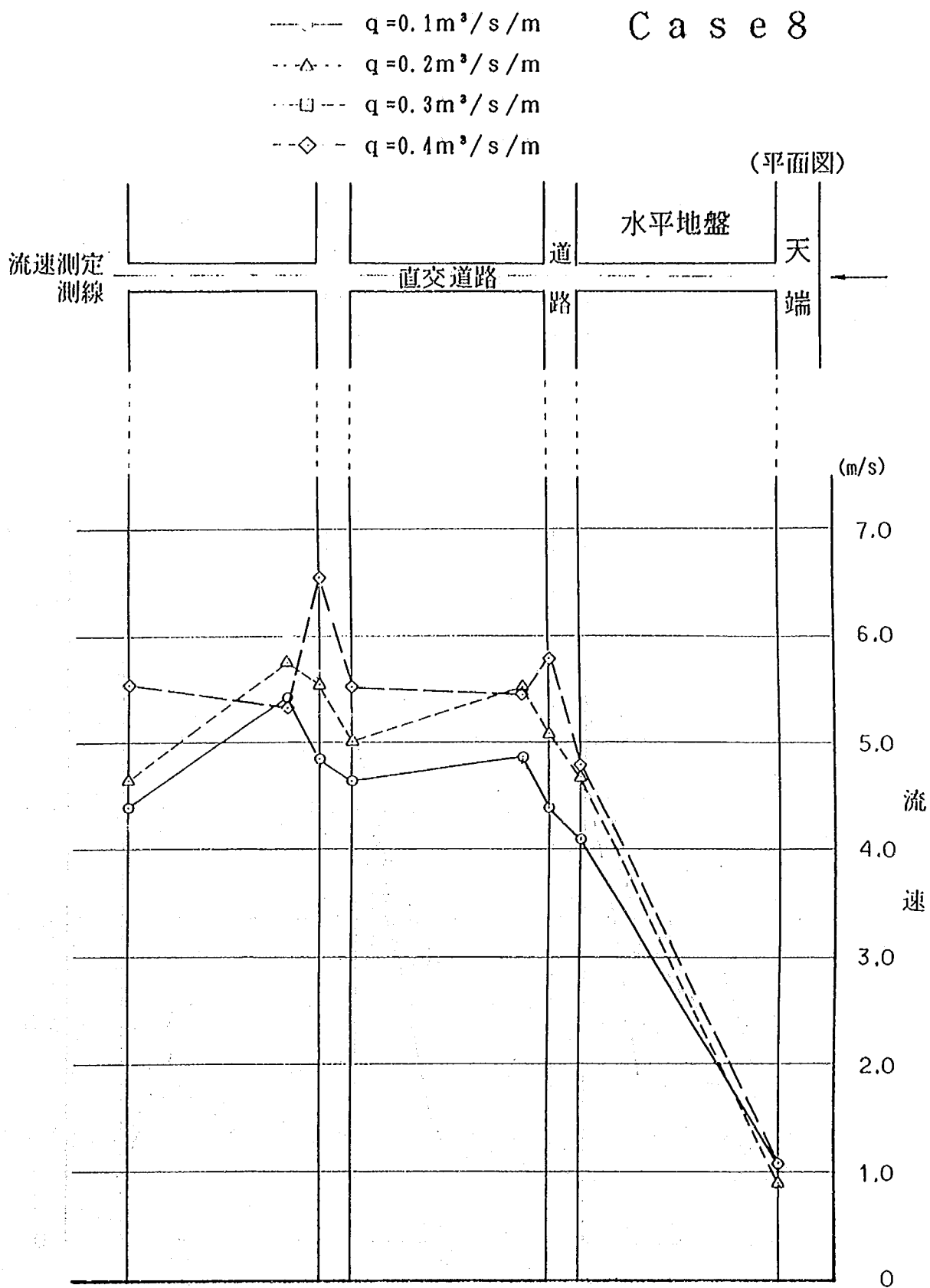


図-3.20 直交道路上の流速 (Case 8)

# Case 8

- $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
- △---  $q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
- $q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
- ◇---  $q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

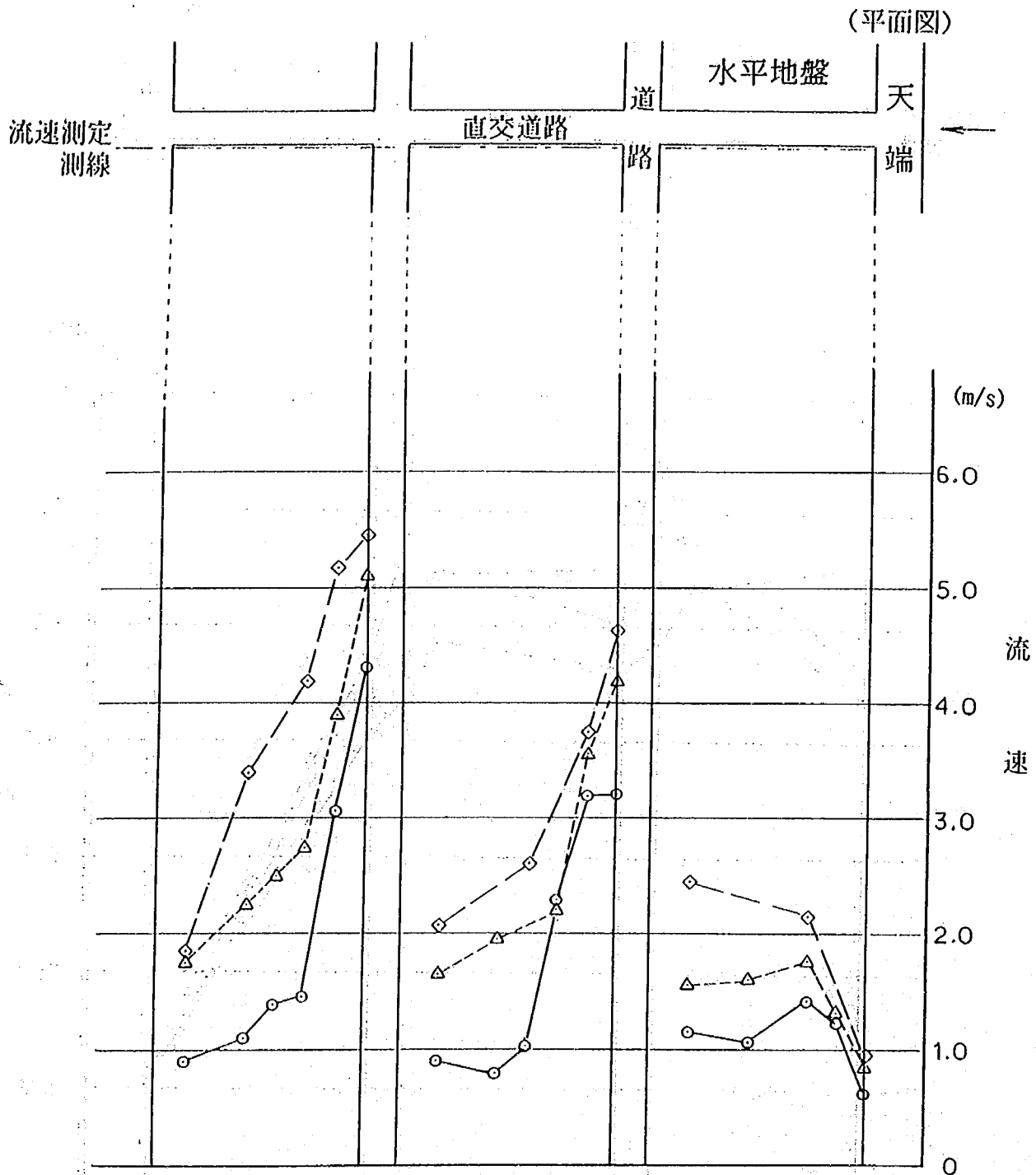


図- 3.21 直交道路との境界近傍の水平地盤上の流速 (Case 8)

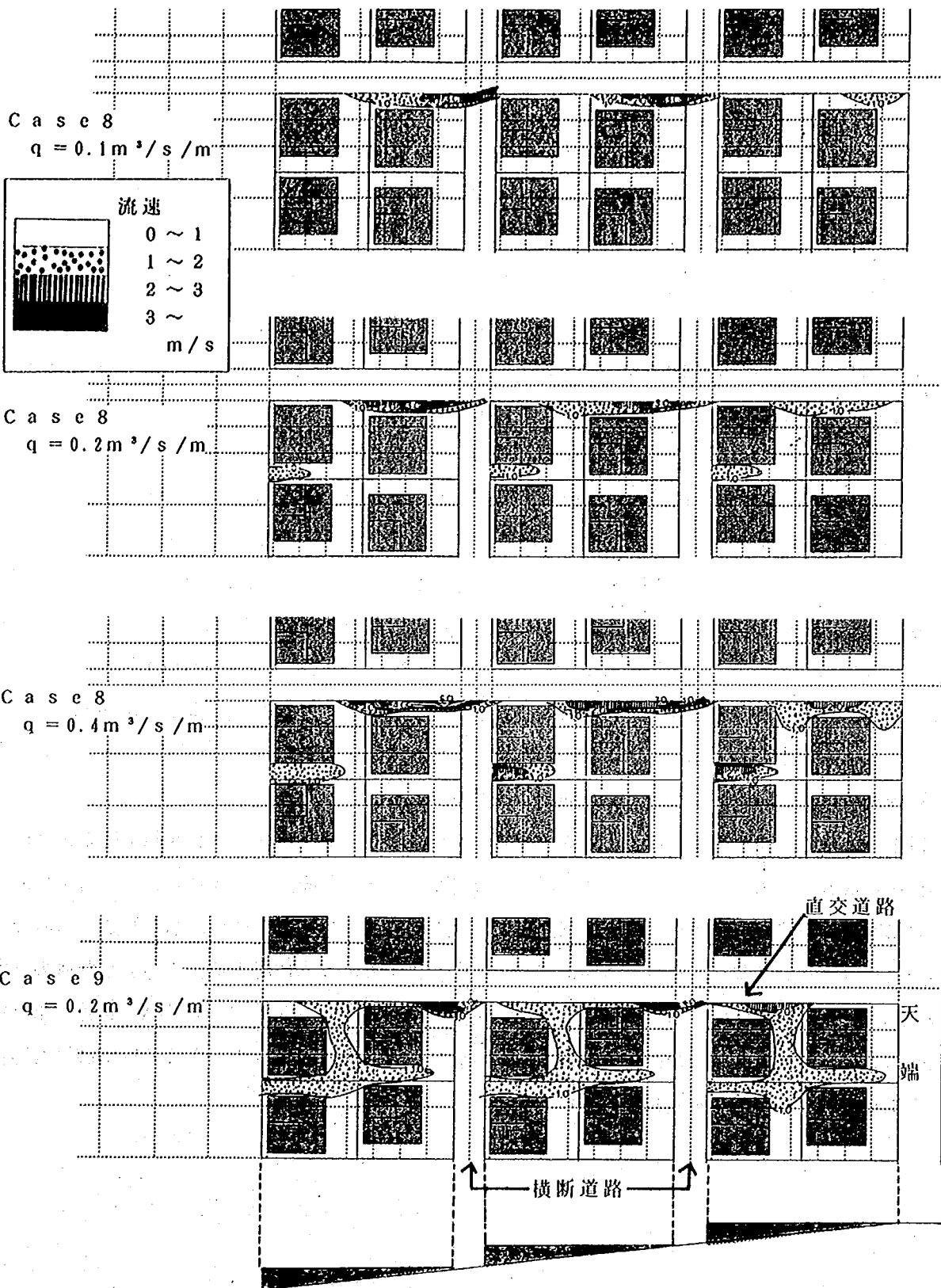


図-3.22 流速の平面分布 (Case 8, Case 9)

### 3.2.4 水平地盤上に塀と建ぺい率15%の家屋がある場合 (Case 10)

この Case では、水平地盤上に家屋だけでなく塀 (図-2.6 参照) があることによって第3章2節2項で述べた流況がどのように変るかを調べることができる。図-3.23 に流線の平面パターンを、図-3.24 に堤防法線と直交する道路上の水位縦断分布を、図-3.25 にその道路上の流速の縦断分布を、図-3.26 にその道路近傍の水平地盤上の流速の縦断分布を、図-3.27 に等流速線により表わした流速の平面分布を示す。

図-3.23 ~ 3.27 をそれぞれ図-3.13 ~ 3.17 と比較することにより、各水平地盤の周囲に塀があることの効果を述べる。流線の平面パターンについては (図-3.23, 3.13), 塀があると交差点における直交道路内流れの水平地盤への拡散がほとんど見られなくなる。これは、交差点付近の道路と交差点の堤内地側にある水平地盤との境界にある塀が、直交道路内の流れの拡散を抑えるからである。直交道路沿いの水位については (図-3.24, 3.14), 塀がある方が水深が小さくなり水位縦断分布の凹凸の度合いが減少する。道路内の流速も (図-3.25, 3.15), 塀がある方がやや小さくなる。これらは、直交道路両側の塀によって、そこへ落込む水量が減少するとともに水量が直交道路沿いに均一化されるためと考えられる。直交道路との境界近傍の水平地盤上流速には、塀の有無による差が顕著に現われる。図-3.26, 3.16 からわかるように、そこでの流速が塀の存在により大幅に減少し、特に  $q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  以下では、最大  $4 \text{ m}/\text{s}$  以上あったものが  $2 \text{ m}/\text{s}$  以下になる。流速の平面分布については、直交道路から水平地盤への流れの拡散による高流速域が無くなるか ( $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), 大幅に縮小し ( $q = 0.2, 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), その領域内の最大流速も大幅に減少する。これらは、いずれも、直交道路内流れの水平地盤への拡散を塀が抑制するためである。

以上のように、図-2.6 に示した、不透過部分の高さが  $0.2 \text{ m}$  と低くその上は透過性の非常に高い部材からなる塀であっても、それが各水平地盤の周囲にあると、流況にかなり大きな影響を与える。その影響は、交差点付近からの直交道路内流れの水平地盤上への拡散を抑え、水平地盤から直交道路への落込み流れを抑制し、それを直交道路方向に均一化するように作用する。このような塀の効果は、‘たまねぎ型’の流線パターンに象徴される直交道路と水平地盤との間の流れの出入りに伴う水平地盤上への高流速水の流入、その高流速による水平地盤の侵食、それをキッカケとする堤防破壊を防止する方策を検討する上で、参考にすべき重要な現象である。

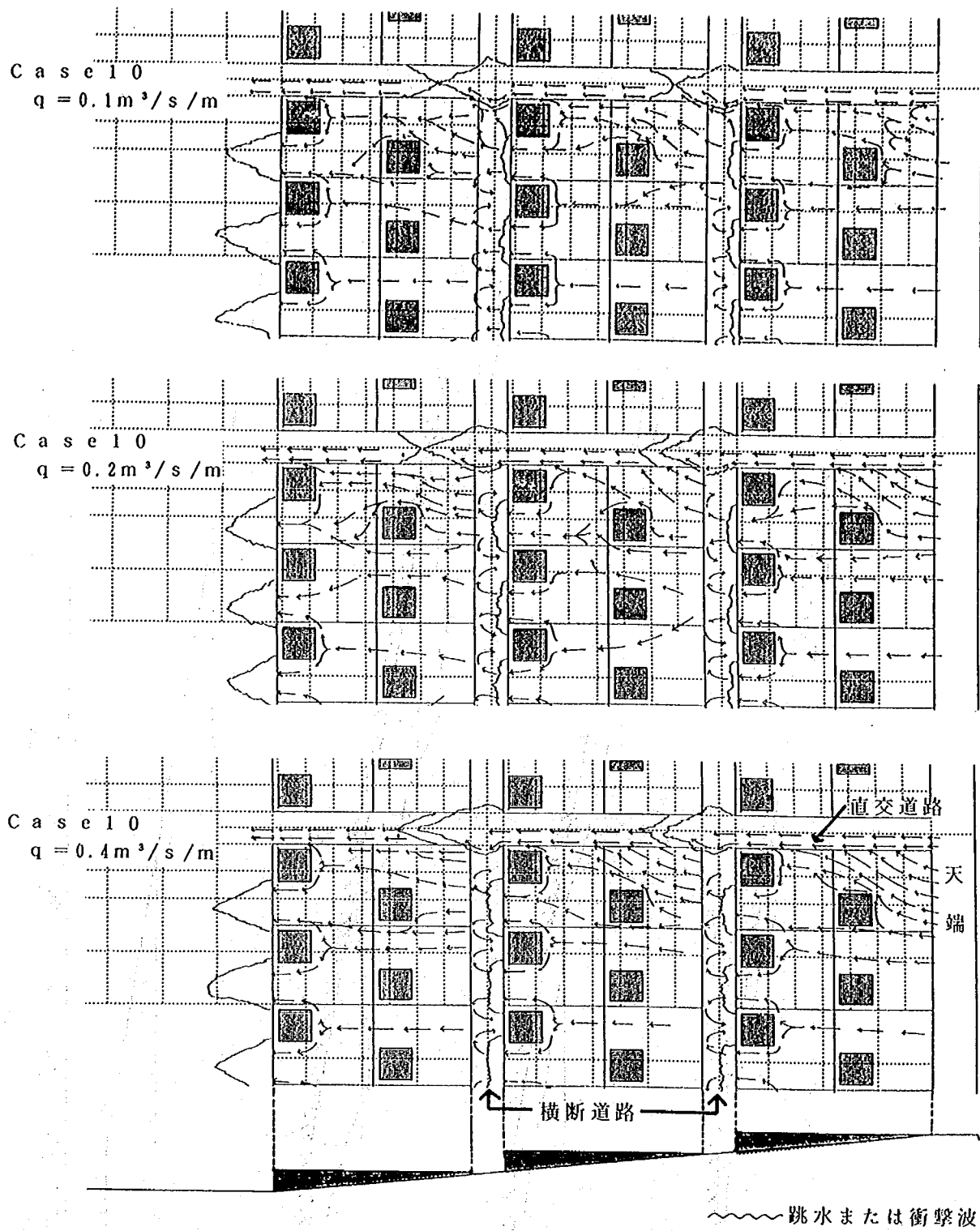


図-3.23 流線の平面パターン (Case 10)

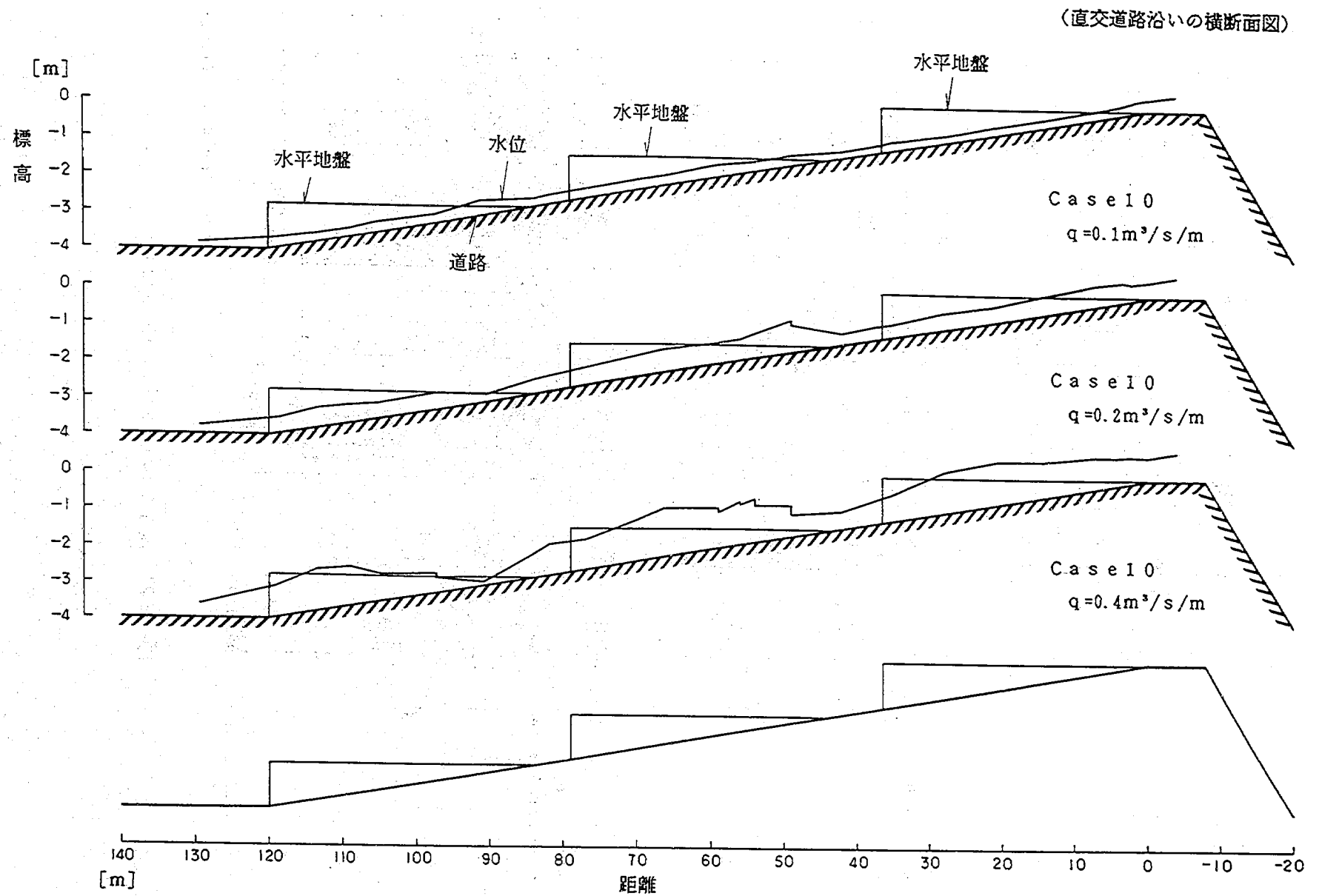


図-3.24 直交道路上の水位 (Case 10)

# Case 10

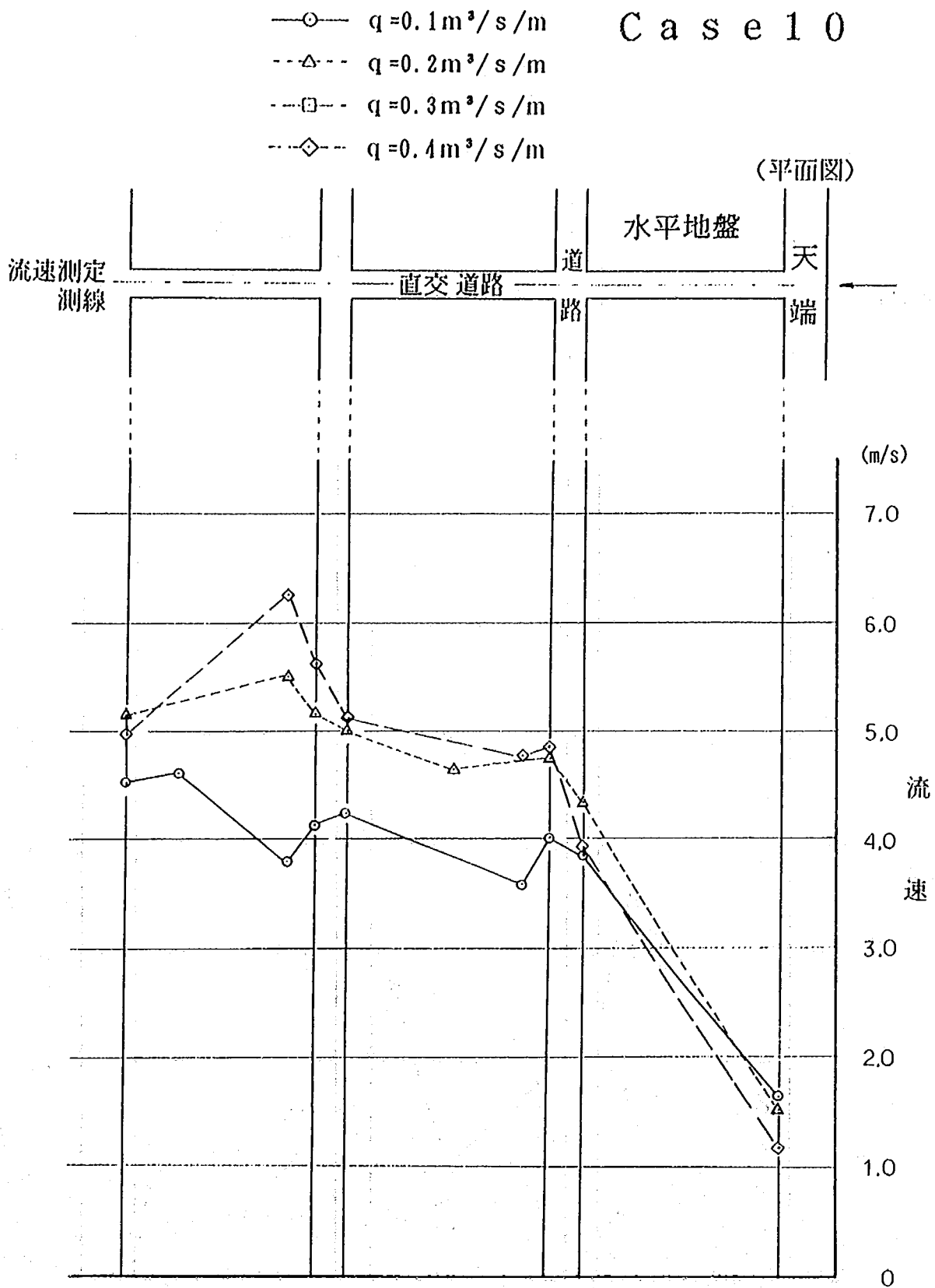


図-3.25 直交道路上の流速 (Case 10)

# Case 10

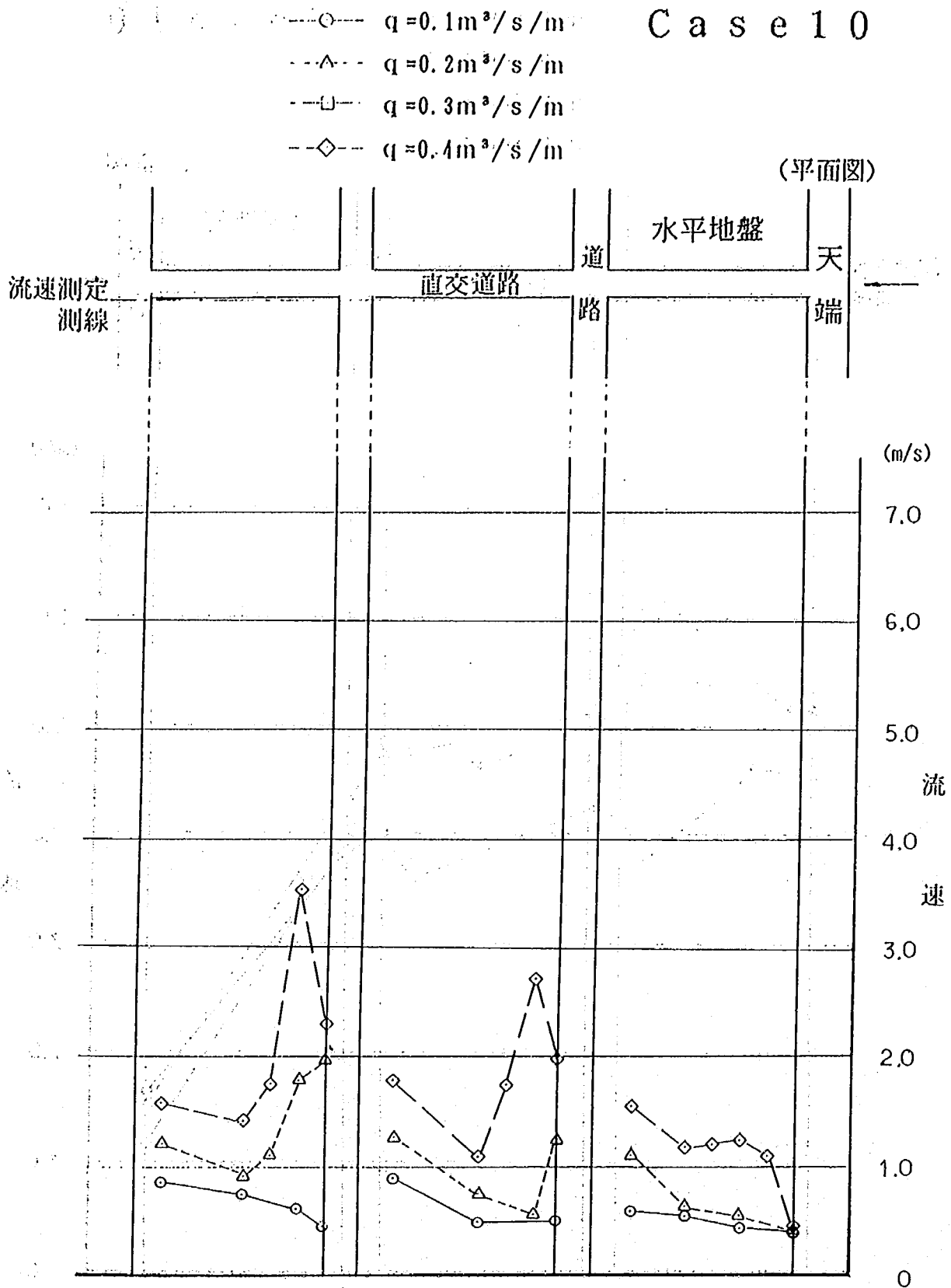


図-3.26 直交道路との境界近傍の水平地盤上の流速 (Case 10)

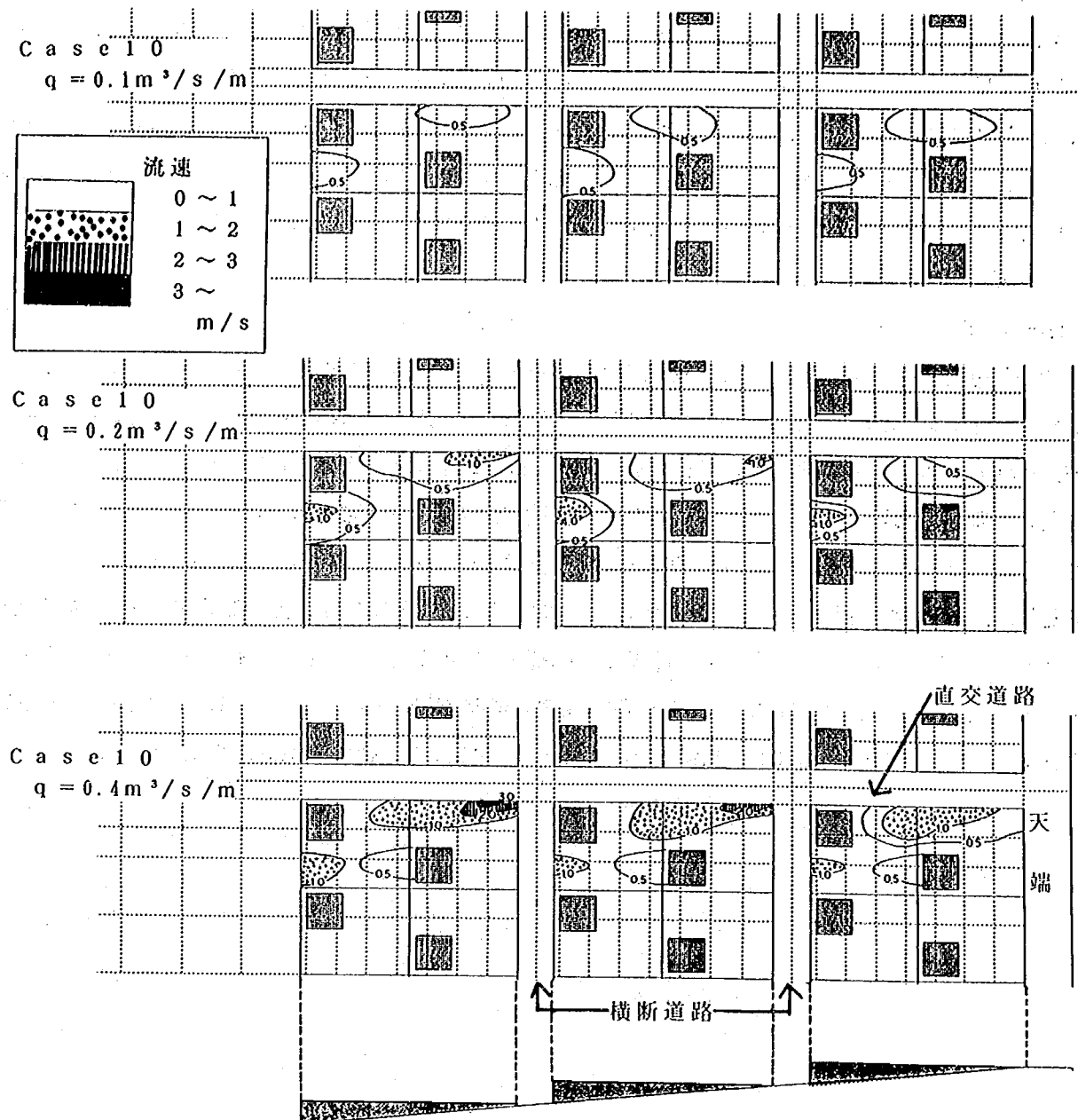


図- 3.27 流速の平面分布 (Case 10)

### 3.3 越流水が道路のみを流下する場合の道路部の流況

本節では、Case 2～4の実験結果を述べる。これらのCaseは道路と水平地盤との間に段差がある高規格堤防を対象にしているため（表－2.1参照）、越流水は水平地盤へ一切侵入せず、すべての越流水は道路を流れる。したがって、これらのCaseからは、水平地盤に越流水を入れないために確保すべき道路～水平地盤間の段差量（道路際での水深、水平地盤周囲での水深がこの量に対応する）、道路侵食破壊を防止する観点から見て最も厳しい条件（道路にすべての越流水が集中する）での道路流況を把握することができる。

図－3.28～3.30に、それぞれCase 2の3つの越流量（ $q = 0.025, 0.05, 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ）が生じた時の道路流況を、図－3.31にT字路を持つCase 4（ $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ）の道路流況を示す。また、これらの実験Caseのさらに局所的な流況を表わした図を、図－3.32（Case 2において天端から直交道路へ越流水が流入する付近の流況）、図－3.33（Case 2において直交道路と第二平行道路との交差点付近の流況）、図－3.34（Case 4におけるT字路付近の流況）、図－3.35（Case 4においてT字路を通る第二平行道路の堤内地側の壁際に沿った水位分布）に示す。以下で、これらの図を参照しながら道路流況の特徴を説明する。なお、Case 3については、第3章1節で図－3.7を参照しながら述べたように、越流水深と直交道路1本の流量との関係がCase 2と同じであり、越流水深が同じ（したがって直交道路1本の流量が同じ）であればCase 2の道路流況と同一である。以後、Case 3の道路流況がCase 2の道路流況の説明で代用できるものとし、Case 3の道路流況は取り上げない。

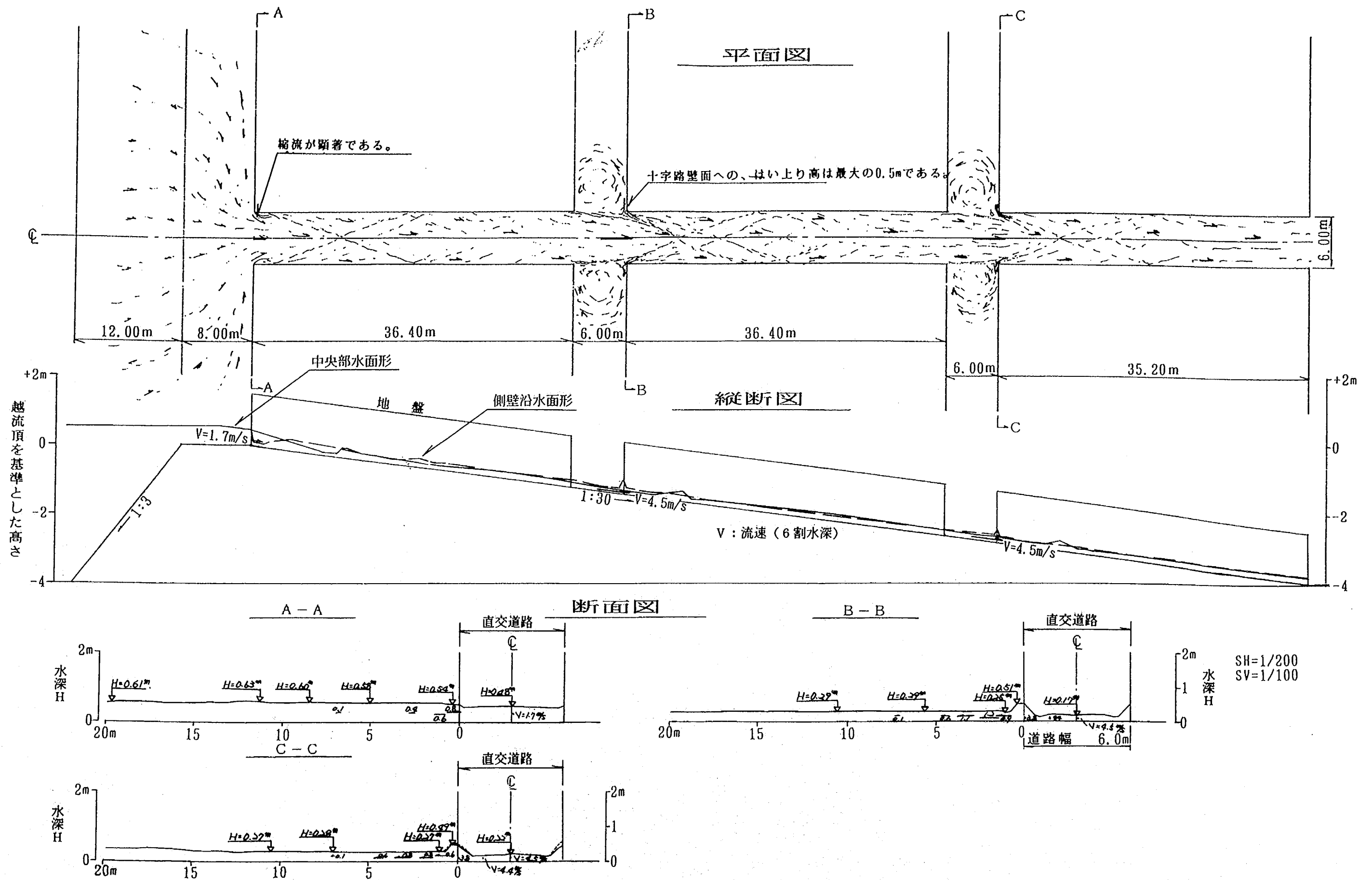


図-3.28 Case 2 の道路の流況 ( $q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 0.65 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )



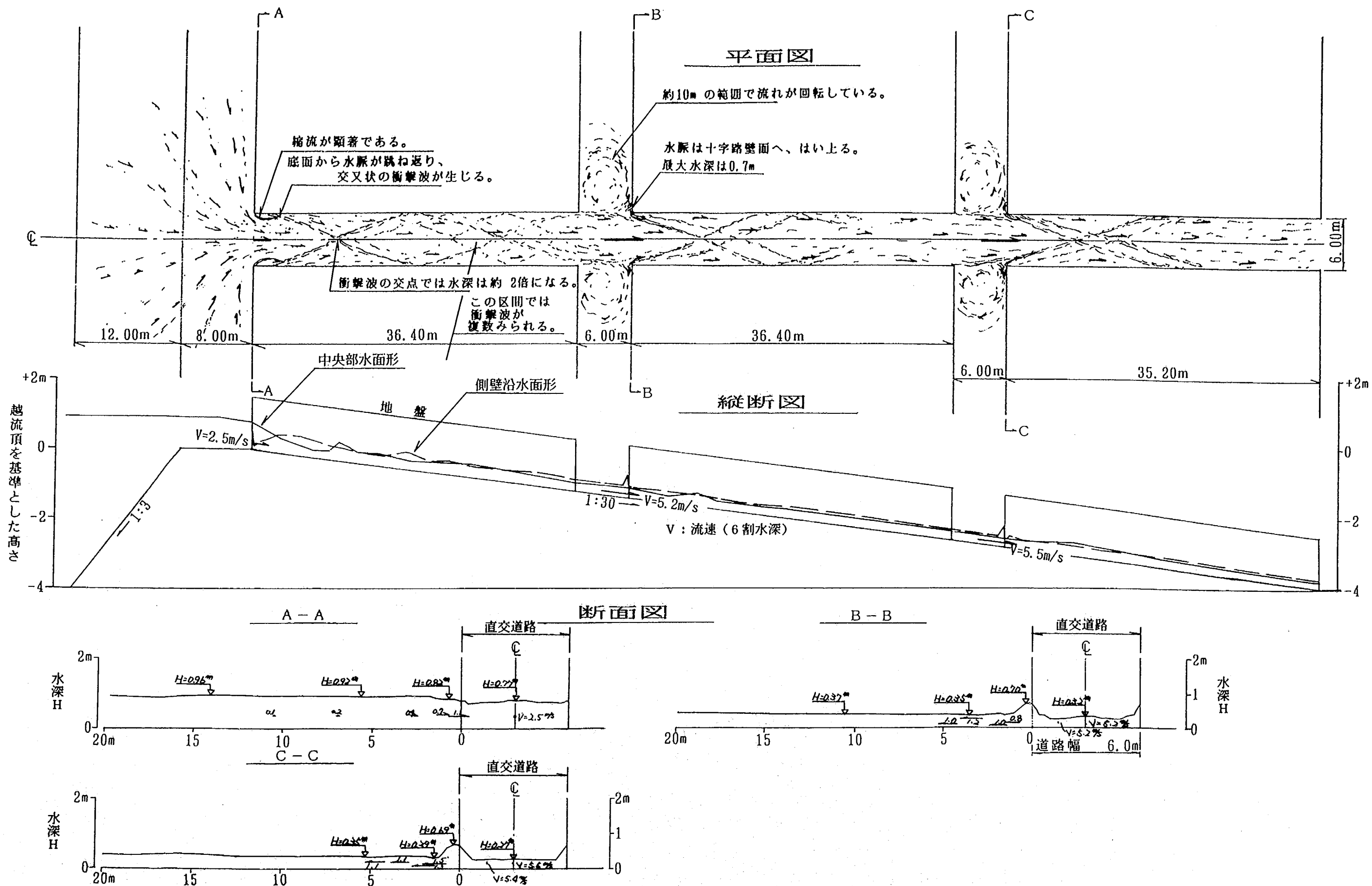


図-3.29 Case 2 の道路の流況 ( $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 1.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )



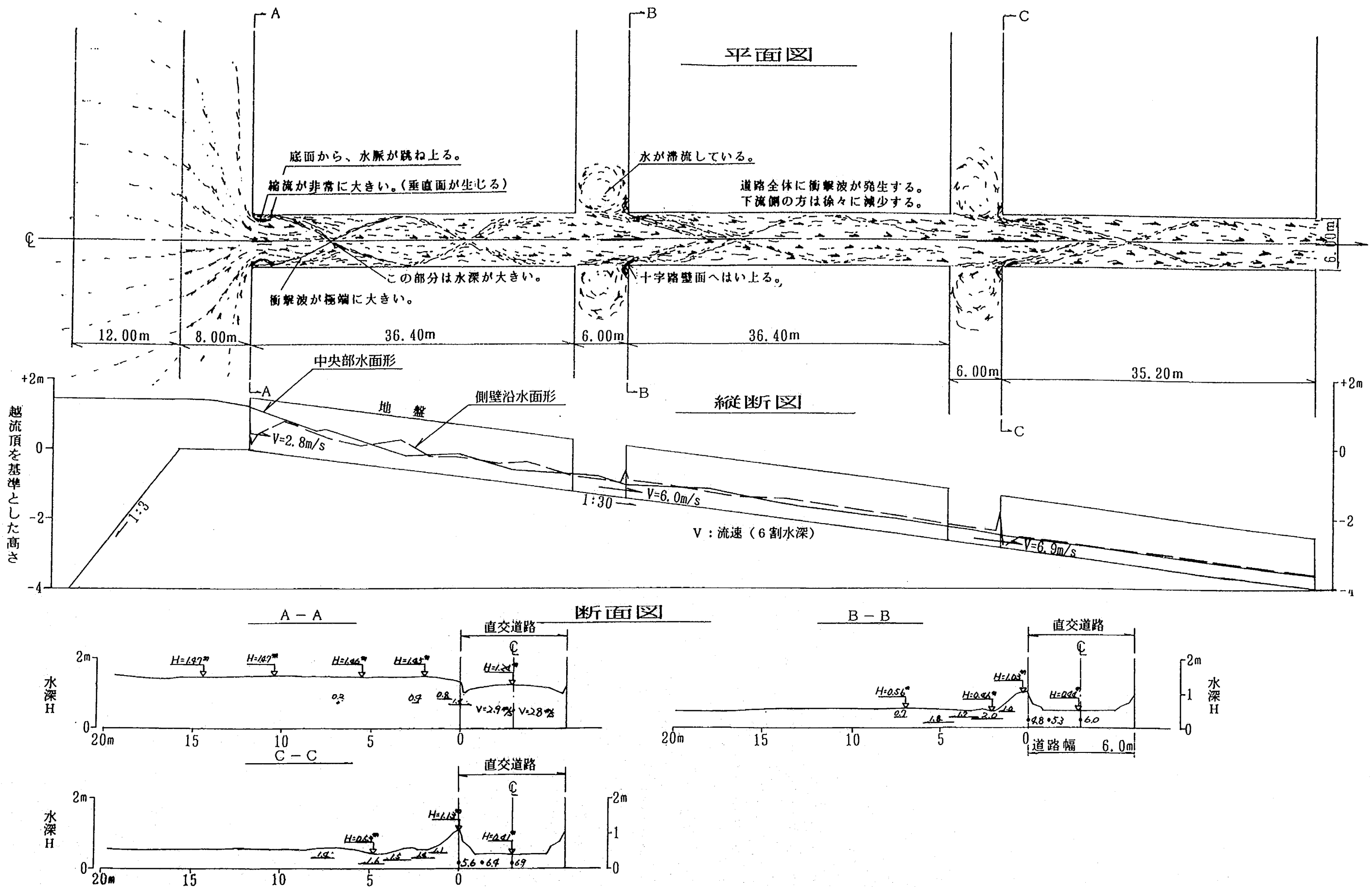


図-3.30 Case 2 の道路の流況 ( $q = 0.10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 2.60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )



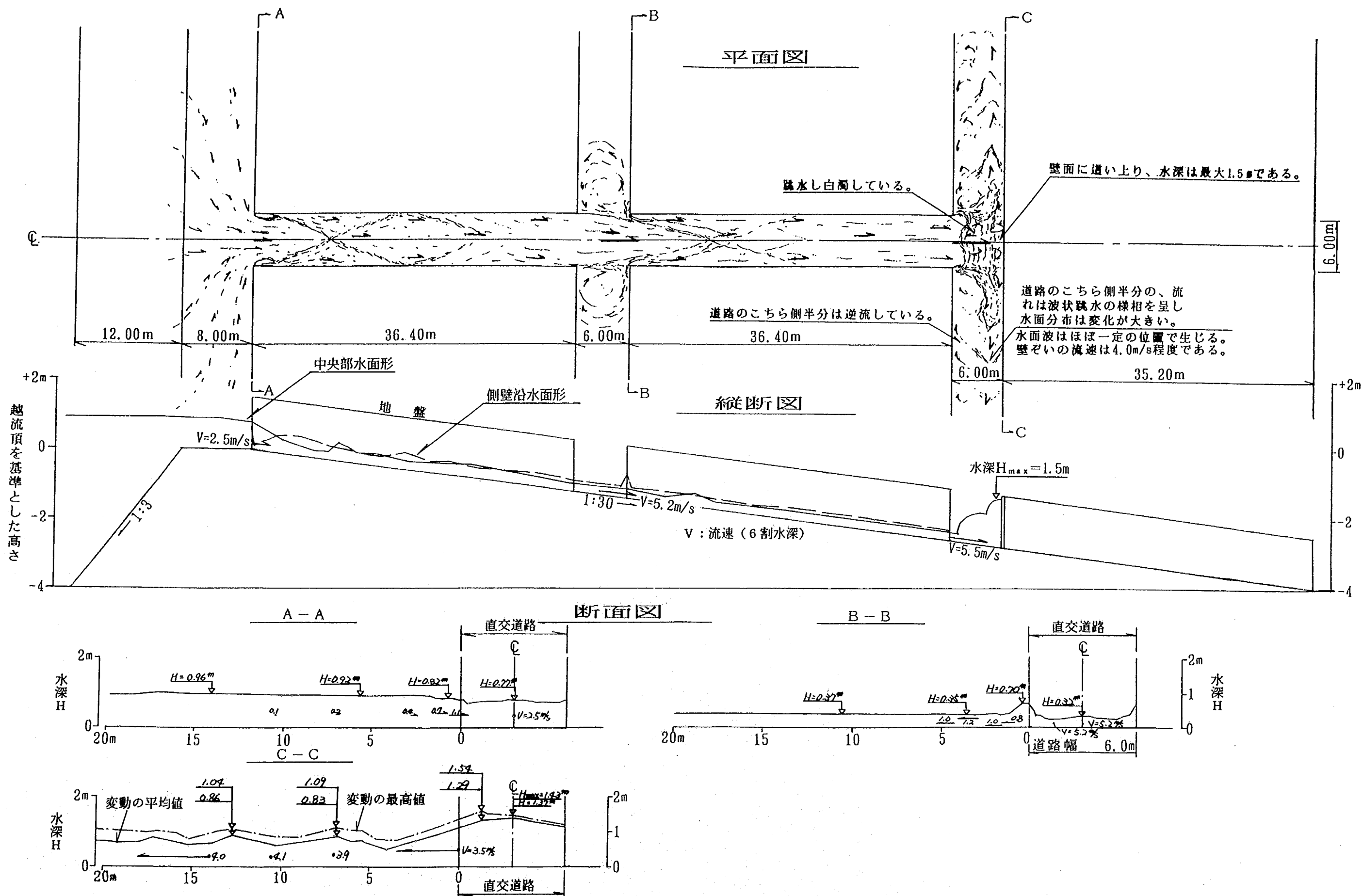
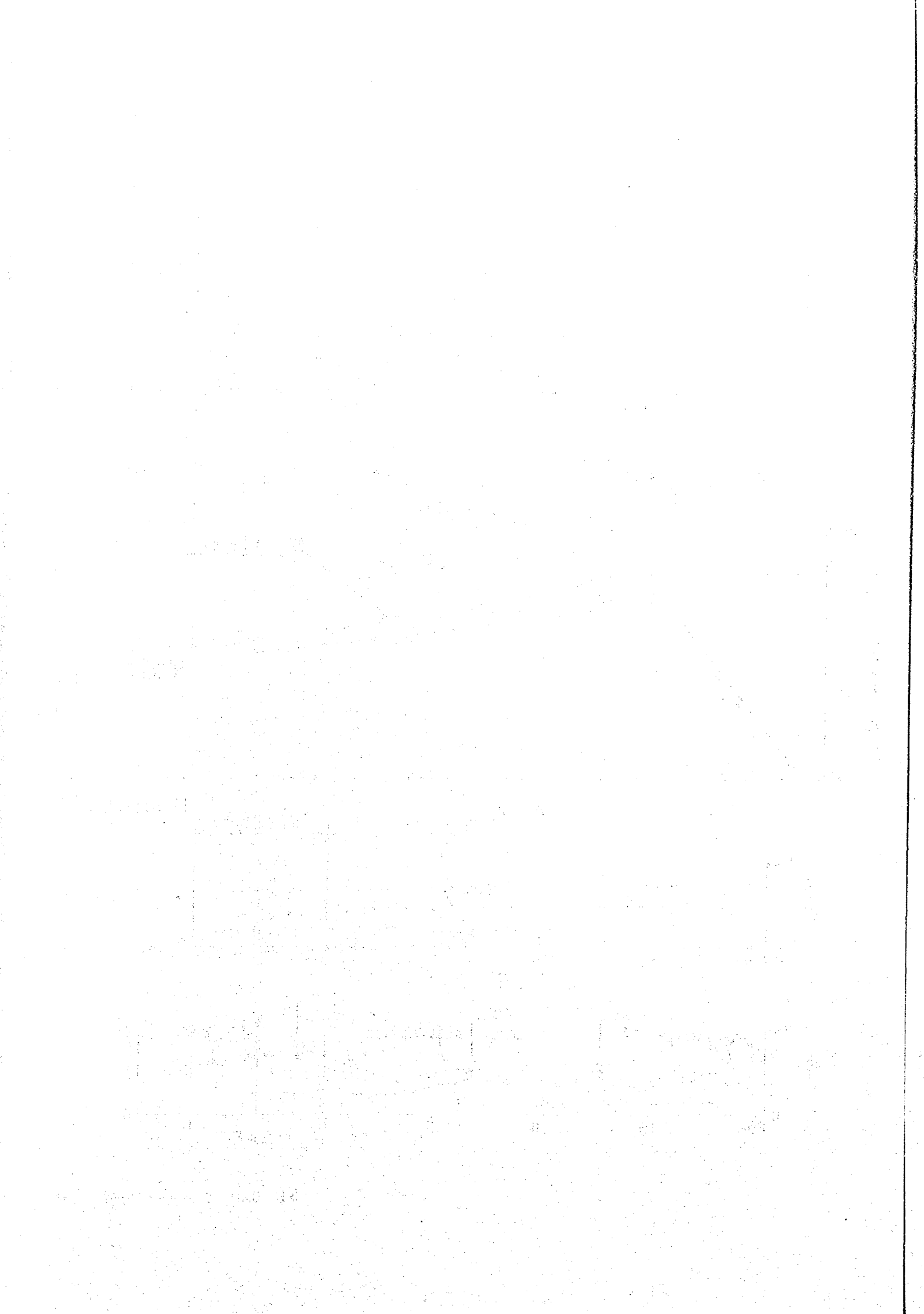


図-3.31 Case 4 の道路の流況 ( $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 1.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )



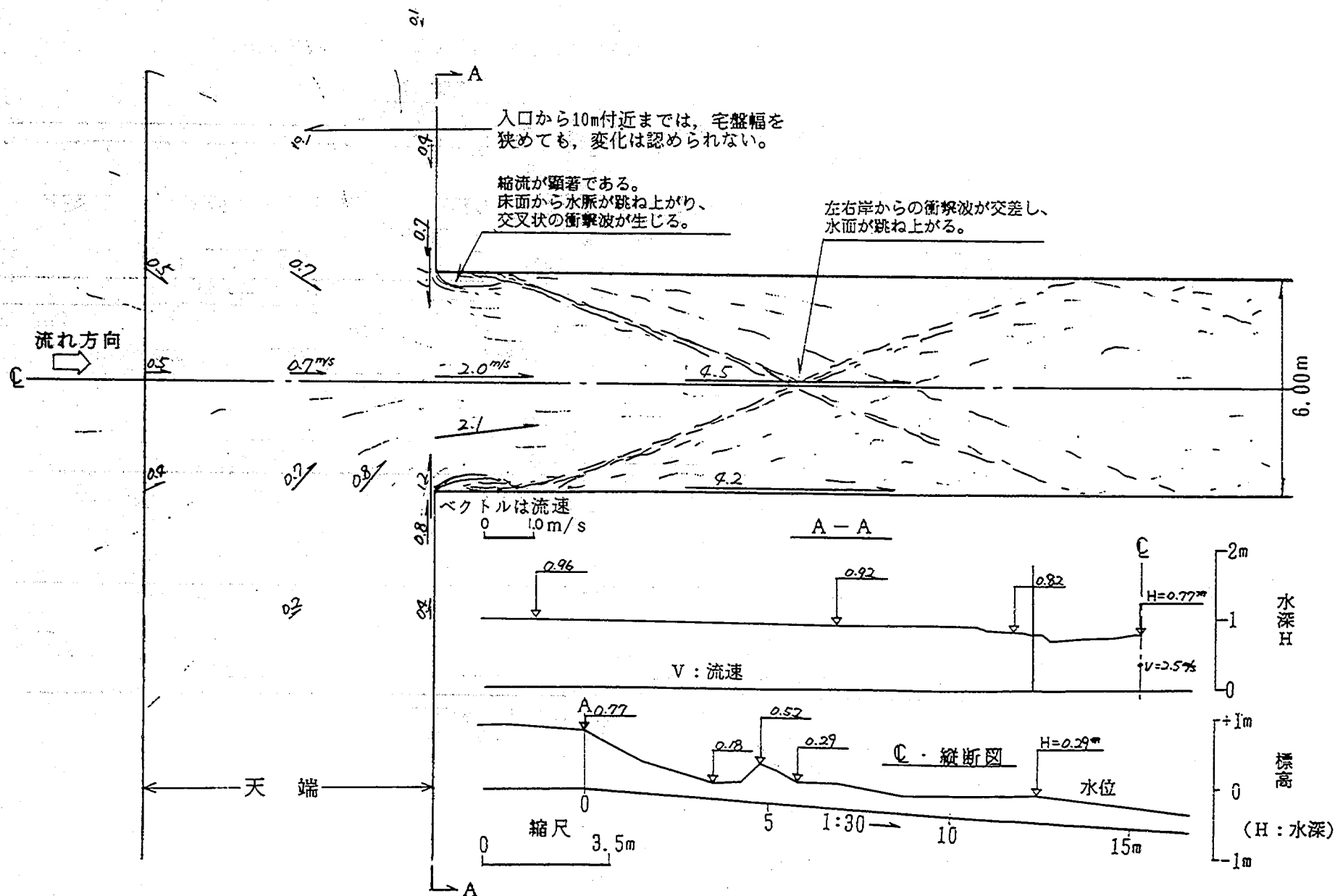


図-3.32 道路入口部での流況図 (Case 2 :  $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 1.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )

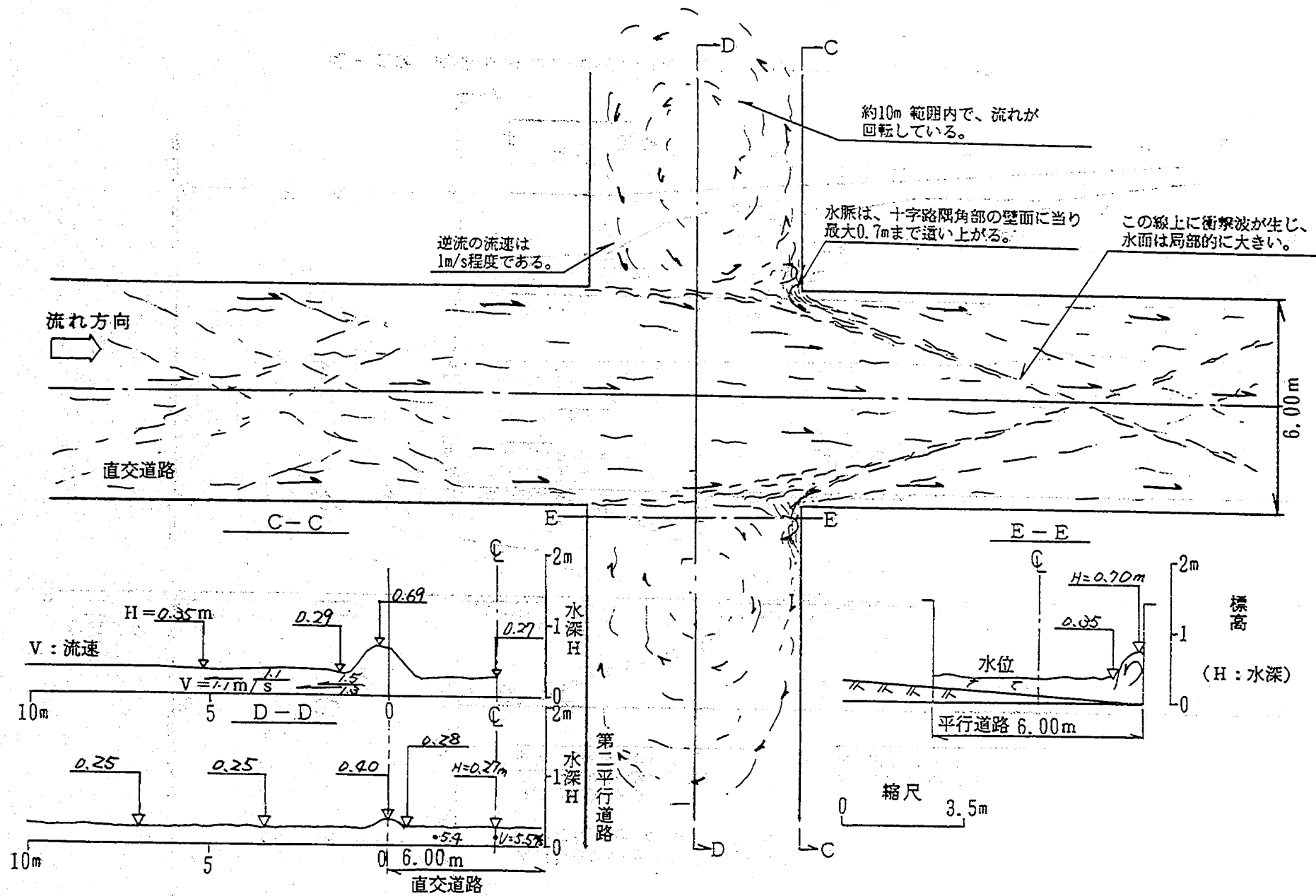


図- 3.33 第二平行道路との十字路での流況図 (Case 2 :  $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s/m}$ ,  $q_r = 1.30 \text{ m}^3/\text{s/m}$ )

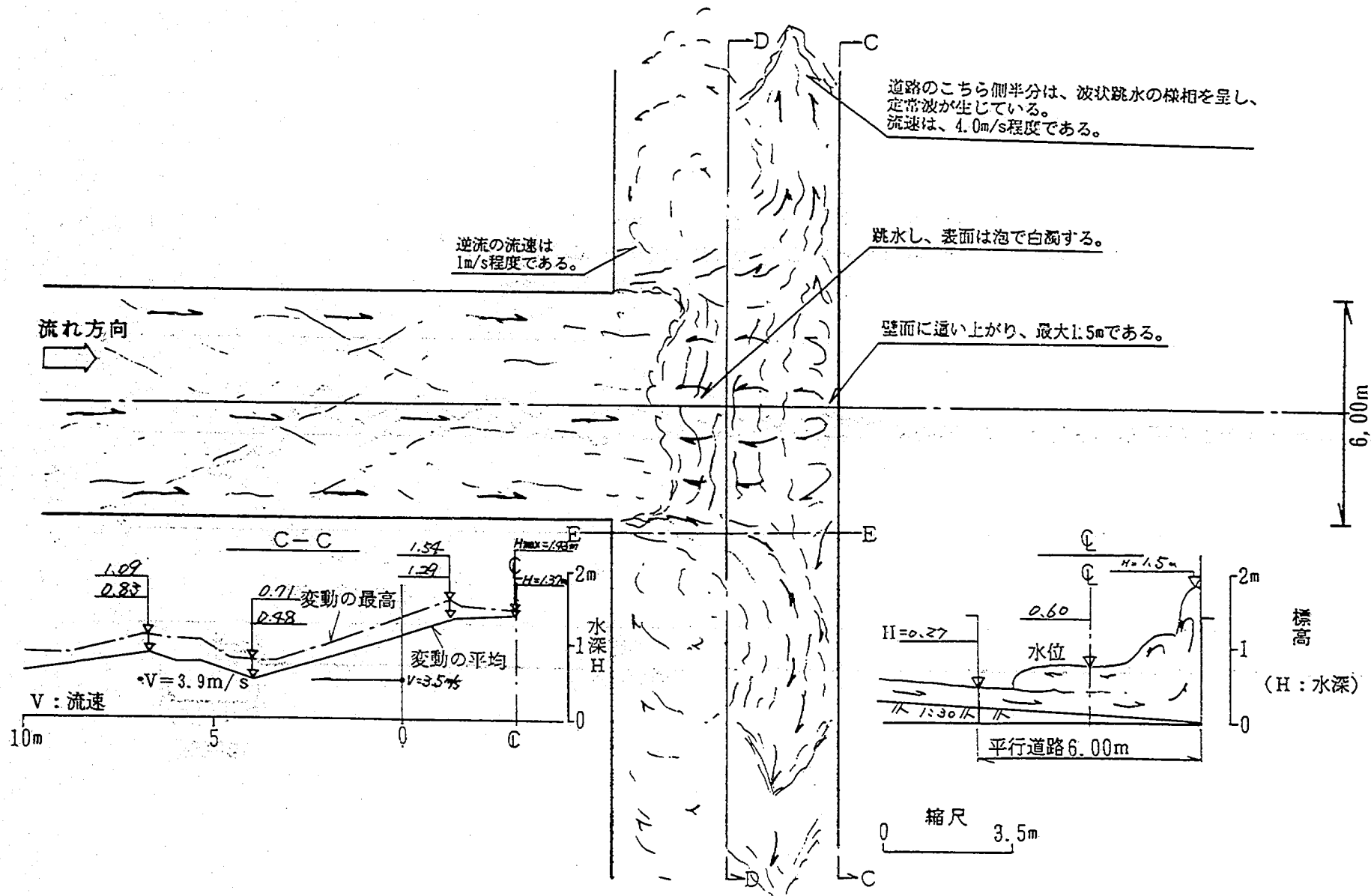


図-3.34 T字路での流況図 (Case 4 :  $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 1.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )

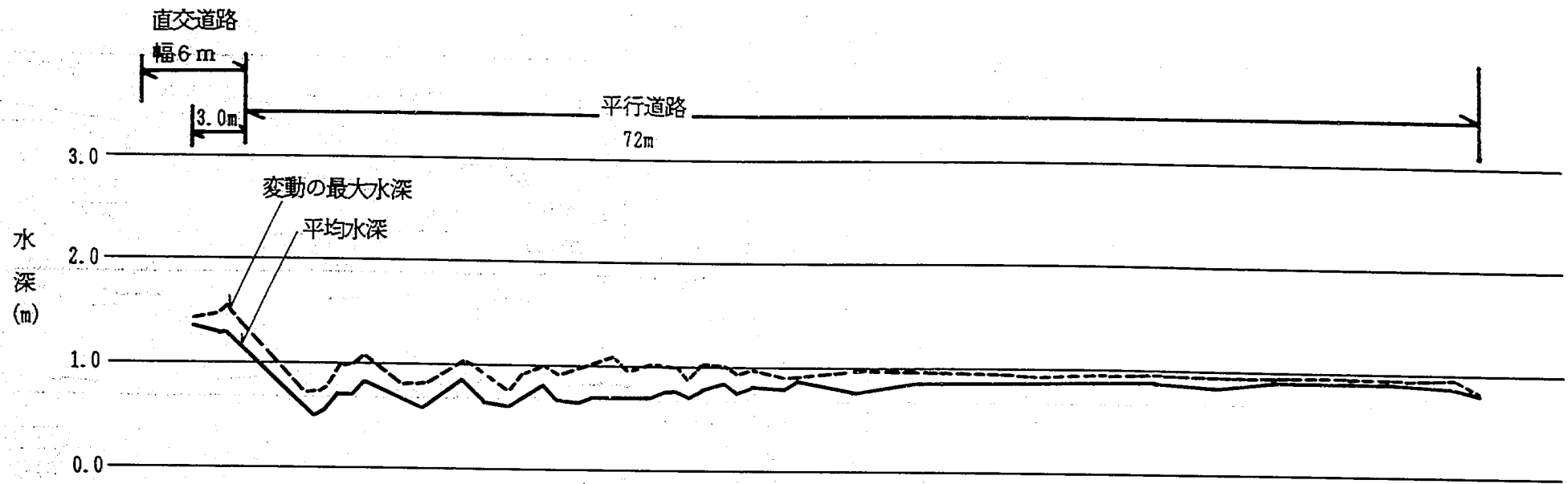


図-3.35 T字路を通る第二平行道路の堤内側の壁ぎわに沿った水深分布  
(Case 4 :  $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 1.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )

### 3.3.1 水深

Case 2 での直交道路上の流れは、天端からの入口付近で限界水深となり、その下流では射流の  $S_2$  曲線となる。したがって、そこでの水深は下流に向かって等流水深に近づくように漸減する（図－3.28～3.30 の水面形参照）。ただし、平行道路と交差する十字路における堤内地側の角（かど）近傍では、直交道路を流下してきた早い流れがぶつかるため、周囲に比べ局所的に高い水位が生じる。この十字路角（かど）近傍の水位の周辺水位に対する盛り上がり量は、より堤内地側の十字路に行くほど、また  $q_r$ （道路単位幅あたりの流量）が増すほど大きくなる（図－3.28～3.30 の B, C 断面の水深分布参照）。 $q_r = 2.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  ( $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) 時の第二平行道路との交差点では 60cm 程度の盛り上がり量を示し、盛り上がりの頂上の水深は 1 m 以上に達している（図－3.30 の C 断面の水深分布参照）。この場所以外に、天端から直交道路への流入や上記の十字路を通過する際に生じる衝撃波が存在する場所でも周囲に対する水位の局所的な盛り上がりが見られるが、その量は十字路角で生じるほどの大きさは持たない（図－3.28～3.30 の水面形・平面流況、図－3.32 の水面形・平面流況を参照）。

Case 2 の平行道路の流れは、十字路近くを除いてほぼ静止状態（死水域）にあり、平行道路沿いの水位も十字路の近くを除きほぼ一定である（図－3.29 の平面流況と B, C 断面の水深分布を参照）。平行道路の中央に沿った測線上の水位分布を見ると、平行道路内の水位は直交道路の水位とほぼ同じである（図－3.33 の D 断面の水深分布を参照）。

Case 4 での直行道路の流れは、T 字路に入るまでは同じ  $q$ ,  $q_r$  での Case 2 とほぼ同じであるが、T 字路に入ると、堤内地側の水平地盤の壁に当たって水位を急激に盛り上げ、そこで跳水を起こす（図－3.31 の水面形・平面流況を参照）。T 字路内の跳水領域では大きな水位変動が見られ、この変動の最高位置で見ると、堤内地側の壁際での最高水深は 1.5 m となる（図－3.31 の水面形、図－3.34 の水位・水深分布を参照）。跳水を起こした流れは、流向を  $\pm 90^\circ$  変え左右の平行道路に向うが、この際主流が堤内地側の壁に押しつけられ実質的な流路幅が道路幅の  $1/3$  程度になるため、再び射流になる。その後、波状跳水を伴いながら常流に移行し、最終的には水位変動の少ない常流となって、堤内地側に直交道路を持つ T 字路に向う。平行道路沿いでは、流れ方向に水位が増大し、波状跳水が終ると水位変化が小さくなり 90cm 程度の水深となる（図－3.34, 3.35 参照）。T 字路での跳水部と同様に、平行道路で波状跳水が生じている区間でも平均水深に対し無視できない水位変動を伴う。

図－3.36 は、水平地盤周囲の水深と  $q_r$ （単位幅あたりの直交道路流量）との関係を、代表的な場所について示したものである。まず、 $q_r = 0.65 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  ( $q = 0.025 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , 越流水深  $h = 60 \text{ cm}$  に対応) という最も越流量の小さい実験条件においても、P1 点水深（○印）が 60cm 程度あることがわかる。このことは、天端上の越流水をすべて直交道路に入れようとすると、越流水深  $h$  と同じ程度の大きな段差を必要とすることを意味している。

同じ  $q_r$  について P6 点の水深は 30cm 程度、P2, P3 点は 50cm 程度になっている。P6 点水深は、P6 点を持つ平行道路が通る十字路中心位置での水位と平行道路水位が等しいことから決まる（十字

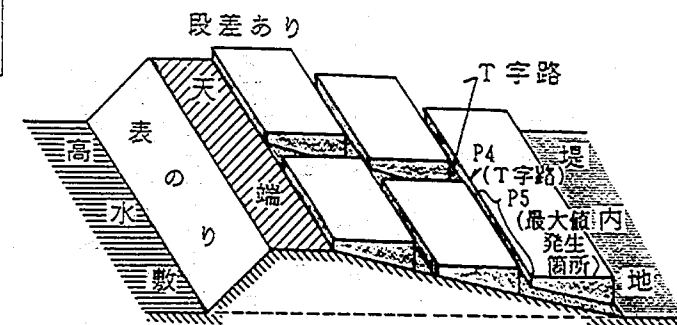
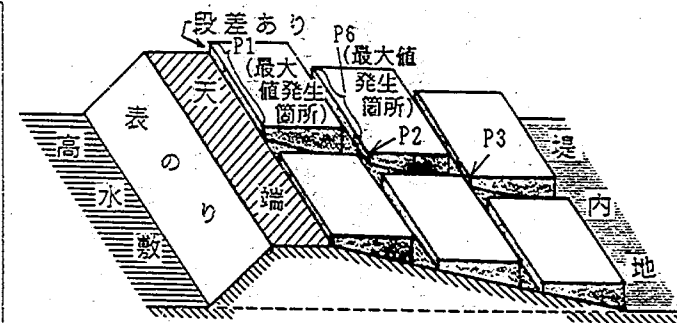
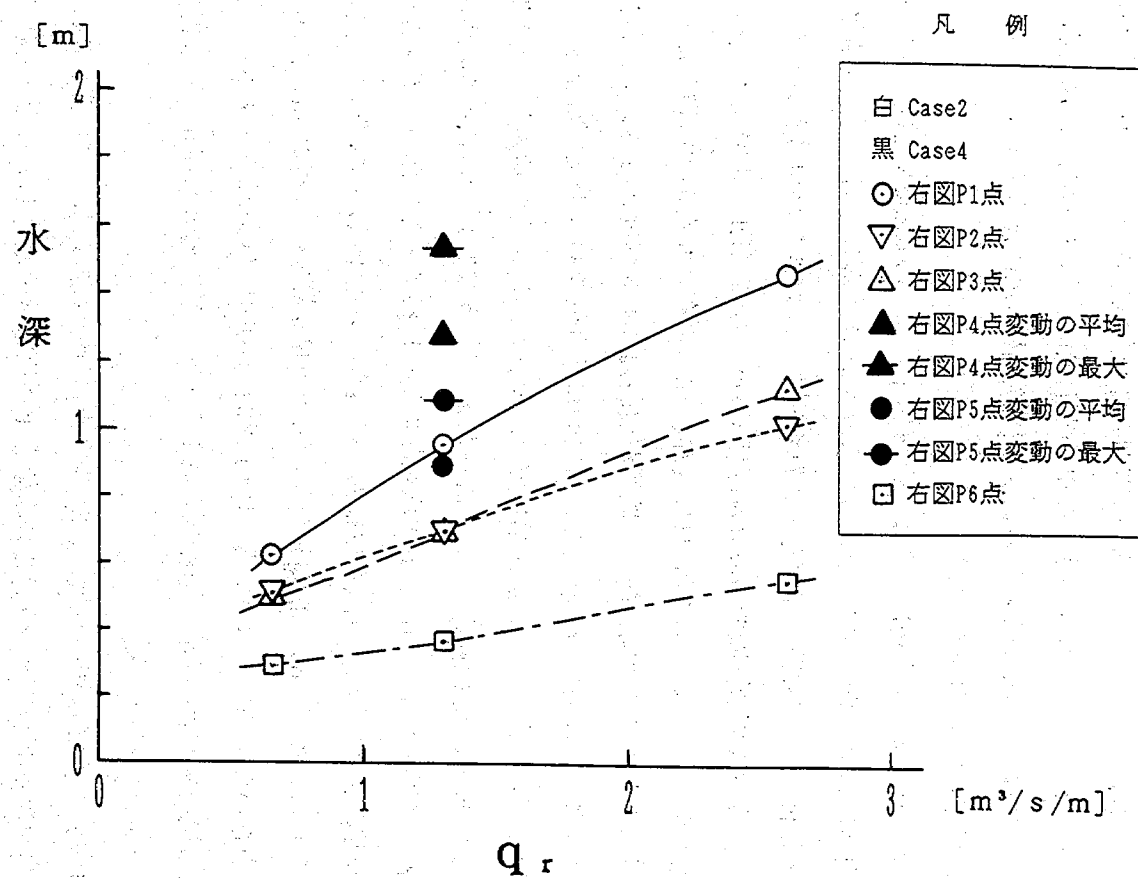


図- 3.36 水平地盤周囲の水深と  $q_r$  (単位幅あたりの直交道路流量) との関係

路近くを除く)。したがって十字路近傍を除く平行道路から水平地盤への越流水の侵入を防ぐには、水平地盤高を当該十字路の中心位置水位より高くする必要があることがわかる。十字路の堤内地側の角（P2, P3点）では、十字路中心位置での水位より高い（ $q_r = 0.65 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  で +20 cm 程度）水位が局所的に発生するので、ここでの必要段差はこの水位増分だけ大きくなる。

T字路とそこを通る平行道路では、図-3.36の中のパ4, P5点のプロットからわかるように、十字路とそこを通る平行道路に比べ大きな水深が発生する。ここでは水深に対し無視できない水位変動が生じるため、変動の最大水深は平均水深に対し例えば  $q_r = 1.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  の場合で 20~25 cm 大きくなる。以上から、T字路を通る平行道路の堤内地側の水平地盤が持つべき段差は、十字路の場合に比べ大きくなり、 $q_r = 1.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ （ $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ）の条件で交差点付近で 1.6 m、それ以外で 1.1 m 程度になる。

以上から、水平地盤周囲の水深は、本実験で対象にした流量範囲では、小さい場所でも 30 cm 以上、大きい場所では 1.5 m 以上にもなることが明らかとなった。これだけの段差が水平地盤の天端側につけられると土地利用上の支障が大きくなる。これらのことは、段差をつけることにより水平地盤への越流水侵入を完全に防ぐことが非現実的なことを示している。

### 3.3.2 流速

越流水が直交道路を射流で流れ、等流に達した状態において、最も大きな流速が生じる。Case 2 において天端から 2 番目の十字路における C 断面（図-3.28 ~ 3.30 参照）は、天端から 84.8 m の位置にあり、これは、本実験条件に関しては、流れが等流状態に至るのに十分な距離である（不等流計算によれば、本実験条件の範囲では、越流水が天端より水深  $\times 60$  倍の距離を流下すると、ほぼ等流状態になる）。そこで、ここでの流速について述べる。

2 番目の十字路における C 断面中央での水深は、 $q_r = 0.65, 1.3, 2.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  それぞれについて 0.22, 0.27, 0.41 m となっている。これらの水深は、道路部のマンニングの粗度係数  $n = 0.015$  を用いた等流計算から求まる値（それぞれの  $q_r$  に対し 0.17, 0.26, 0.40 m）に概ね対応しているが、計算値の方がやや小さい。計算値と実験値に差が出た理由は、十字路や天端から直交道路への入口で発生する衝撃波と十字路の角での局所的な水位盛り上がりの影響で、直交道路の壁面沿いに流速の遅い領域が形成され、直交道路の流れ全体に関する粗度係数が道路表面の粗度係数である 0.015 よりやや大きくなったことにあると考えられる。

一方、C 断面中央の流速は、 $q_r = 0.65, 1.3, 2.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  それぞれについて 4.5, 5.5, 6.9 m/s となっている。この流速値も、上記の等流計算から求まる値（それぞれの  $q_r$  に対し 3.8, 5.0, 6.6 m/s）に概ね対応しているが、計算値の方がやや小さい。先に述べた理由で直交道路の壁面沿いに流速の遅い領域が形成され、流速が横断方向に一様でなくなり、中央部の流速が断面平均流速よりも大きくなったため、断面平均流速を表わす計算値の方が小さく出たと考えられる。例えば、図-3.30 の C 断面の流況を見ると、断面中央に比較して側壁近くの流速が小さくなっていることがわかる。

直交道路上で等流状態にある流速が道路上で起こりうる最も大きな流速であり、跳水や衝撃波など

の流れの減勢要因がこの流速値を減少させる。

### 3.4 高規格堤防上の流速

高規格堤防上の流速は堤防侵食破壊の外力であるから、その大きさを見積ることは堤防設計のために重要である。第3章2節において堤防上の流況を説明する中で流速の特性についても述べたが、流速と越流量・堤防形態との定量的な関係、これを踏まえた流速の見積り法については触れていない。本節では、直交道路・水平地盤それぞれについて、流速の決定機構とその見積り法について検討する。なお、水平地盤に越流水が全く入らない条件は第3章3節1項で述べたように現実的でないので、本節では水平地盤に越流水が入る（水平地盤と道路との間に段差がない）実験条件を対象にする。

#### 3.4.1 直交道路上の流速

まず、図-3.37に、直交道路上で発生する最大流速と流量・堤防形態との関係を示す。最大流速は、図-3.10、3.15、3.20、3.25に示した直交道路中央沿いの6割水深での流速測定値の中から最大値を取ったものである。この図から、越流量 $q$ や堤防形態による最大流速の変化が意外に小さく、概ね5~6 m/sの範囲にあることがわかる。特に $q$ の影響については、等流条件において流速が流量の2/5乗に比例することから考えて、 $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ から $0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ と4倍に増えたわりには流速の増大量が少ないと言える。

本実験を模型実験として見るならば、図-3.37に示された数値をそのまま高規格堤防の設計に用いることもできよう。しかし、この数値は限られた実験条件から出てきたものであるから、その数値を一般的なものとして用いることは妥当でない。そこで以下では、直交道路内の流速の決定機構について考察し、直交道路内流速の一般的な推定法に結びつく情報を得る。

##### (1) 流速の決定機構にかかわるパラメータ

流速の決定機構を次の3段階で考える。

##### 1) 直交道路を流下する越流水の単位幅当たりの流量 $q_r$ が越流水深 $h$ から決まる。

$h \sim q_r$  関係が次式で表わされるとする。

$$q_r = C_r \cdot h^{3/2} \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$C_r$ は、水平地盤に越流水が入らない条件では道路流量係数 $C'$ と同じ意味を持つことから、等価道路流量係数と呼ぶ。ここでは水平地盤と直交道路との間に越流水の出入りがある堤防形態を対象にしているので、ほぼ一定値をとる $C'$ と異なり（図-3.7参照）、 $C_r$ は水理条件や堤防形態、 $q_r$ は測定位置によって変化する。

##### 2) $q_r$ から直交道路内の断面平均流速 $V_r$ が決まる。

$q_r \sim V_r$  関係が次式で表わされるとする。

$$V_r = 1/N_r \cdot H_r^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$$H_r = (N_r^2 q_r^2 / I)^{3/10} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

ここで、 $N_r$ ：等価道路粗度係数、 $H_r$ ：直交道路の水深、 $I$ ：直交道路の勾配、である。上式は、

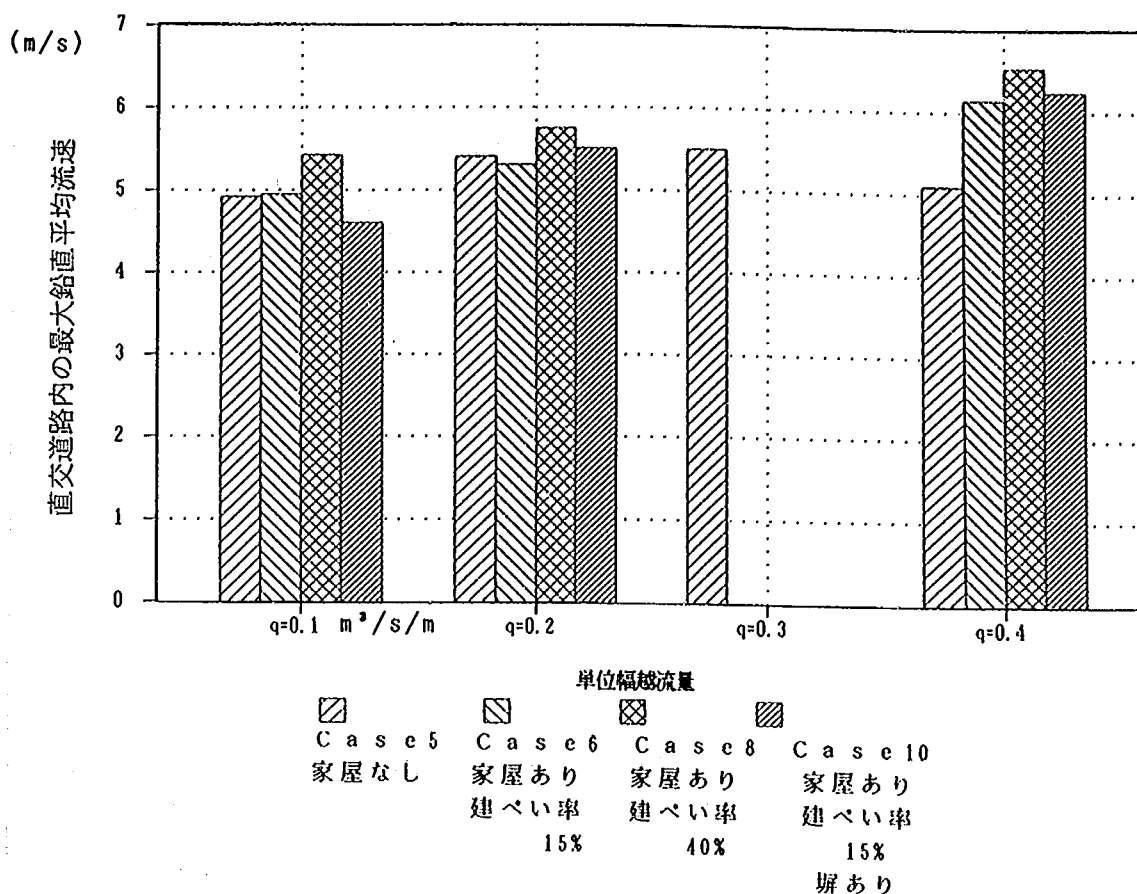


図-3.37 直交道路内の最大鉛直平均流速

等流条件を仮定して  $V_r$  を求めようとするものである。実際には、水平地盤と直交道路との間に水のやりとりがあるので、厳密な意味での等流水深は生じない。このため  $N_r$  は、等流に近い状態にあるとみなせる断面について、上式から適切な  $V_r$  が求まるように定められるという性格を持つ。このことを考慮して、 $N_r$  に等価という言葉を加えている。

3)  $V_r$  から、その横断測線内の鉛直平均流速の最大値  $V_{r \max}$  が決まる。

$V_r \sim V_{r \max}$  関係が次式で表わされるとする。

$$V_{r \max} = r V_r \quad (3.6)$$

ここで、 $r$  は、 $V_{r \max} / V_r$  を表わす係数で、「最大平均流速比」と呼ぶことにする。

$C_r$ 、 $N_r$ 、 $r$  がわかれば、式 (3.3) ~ (3.6) から  $V_{r \max}$  を求めることができる。そこで、これら3つのパラメータの特性を実験結果から調べる。表-3.1に、 $C_r$ 、 $N_r$  測定値の整理結果を一覧にして示す。この表は、水平地盤第一段の末端（堤内側の段差）位置の直交道路断面（以後、断面No.1と呼ぶ）、同じく第二、第三段の末端での直交道路断面（以後、それぞれ断面No.2、No.3と呼ぶ）における流量測定結果を基に、 $C_r$  と  $N_r$  を式 (3.3) ~ (3.5) より算出したものである。断面No.1、2、3での流量は、直交道路の中央と左右の壁面から70cmの所について6割水深での流速を測り、これら3つの流速値の平均に水深を掛けて求めたものである。1断面での流速測定点数が少ないこと、水平地盤からの横流入などによる水面の乱れ・流速変動があることから、算出された

表-3.1 直交道路内の流れの水理量一覧 (Case 5~11 について)

| 実験条件                                   | 単位幅流量<br>$q$<br>[m <sup>3</sup> /s/m] | 全流量<br>$Q$<br>[m <sup>3</sup> /s] | 断面No. 注) | 道路部水深<br>$H_r$<br>[m] | 道路部平均流速<br>$V_r$<br>[m/s] | 道路部流量<br>$Q_r$<br>[m <sup>3</sup> /s] | 道路部単位幅流量<br>$q_r$<br>[m <sup>3</sup> /s/m] | 堤防越流水深<br>$h$<br>[m] | 等価道路流量係数<br>$C_r$<br>[m <sup>1/2</sup> /s] | 等価道路粗度係数<br>$N_r$<br>[s/m <sup>1/3</sup> ] | 流量比<br>$Q_r/Q$ |
|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|
| CASE: 5<br>家屋なし                        | 0.10                                  | 15.60                             | 1        | 0.24                  | 3.00                      | 4.28                                  | 0.71                                       | 0.32                 | 3.91                                       | 0.023                                      | 0.27           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 2        | 0.26                  | 3.93                      | 6.11                                  | 1.02                                       | 0.32                 | 5.57                                       | 0.019                                      | 0.39           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 3        | 0.24                  | 3.82                      | 5.54                                  | 0.92                                       | 0.32                 | 5.05                                       | 0.019                                      | 0.35           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 1        | 0.48                  | 3.14                      | 9.10                                  | 1.52                                       | 0.50                 | 4.35                                       | 0.036                                      | 0.29           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 2        | 0.42                  | 3.89                      | 9.72                                  | 1.62                                       | 0.50                 | 4.65                                       | 0.026                                      | 0.31           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 3        | 0.43                  | 4.45                      | 11.59                                 | 1.93                                       | 0.50                 | 5.55                                       | 0.024                                      | 0.37           |
|                                        | 0.30                                  | 46.80                             | 1        | 0.64                  | 3.10                      | 11.85                                 | 1.97                                       | 0.60                 | 4.25                                       | 0.044                                      | 0.25           |
|                                        | 0.30                                  | 46.80                             | 2        | 0.65                  | 4.10                      | 16.01                                 | 2.67                                       | 0.60                 | 5.74                                       | 0.033                                      | 0.34           |
|                                        | 0.30                                  | 46.80                             | 3        | 0.60                  | 4.42                      | 15.97                                 | 2.66                                       | 0.60                 | 5.73                                       | 0.029                                      | 0.34           |
| CASE: 6<br>家屋あり<br>建ぺい率: 15%           | 0.10                                  | 15.60                             | 1        | 0.28                  | 4.11                      | 6.90                                  | 1.15                                       | 0.28                 | 7.60                                       | 0.019                                      | 0.44           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 2        | 0.35                  | 4.75                      | 9.98                                  | 1.66                                       | 0.28                 | 10.98                                      | 0.019                                      | 0.64           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 3        | 0.32                  | 4.51                      | 8.71                                  | 1.45                                       | 0.28                 | 9.60                                       | 0.019                                      | 0.56           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 1        | 0.57                  | 3.86                      | 13.25                                 | 2.21                                       | 0.43                 | 7.83                                       | 0.033                                      | 0.42           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 2        | 0.56                  | 4.52                      | 15.30                                 | 2.55                                       | 0.43                 | 9.04                                       | 0.028                                      | 0.49           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 3        | 0.66                  | 4.46                      | 17.53                                 | 2.92                                       | 0.43                 | 10.36                                      | 0.031                                      | 0.56           |
| CASE: 8<br>家屋あり<br>建ぺい率: 40%           | 0.10                                  | 15.60                             | 1        | 0.39                  | 3.97                      | 9.39                                  | 1.56                                       | 0.38                 | 6.63                                       | 0.025                                      | 0.60           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 2        | 0.43                  | 4.56                      | 11.63                                 | 1.94                                       | 0.38                 | 8.21                                       | 0.023                                      | 0.75           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 3        | 0.48                  | 4.27                      | 12.25                                 | 2.04                                       | 0.38                 | 8.64                                       | 0.026                                      | 0.79           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 1        | 0.63                  | 4.65                      | 17.55                                 | 2.92                                       | 0.59                 | 6.39                                       | 0.029                                      | 0.56           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 2        | 0.77                  | 4.98                      | 22.89                                 | 3.81                                       | 0.59                 | 8.33                                       | 0.031                                      | 0.73           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 3        | 0.88                  | 4.60                      | 24.32                                 | 4.05                                       | 0.59                 | 8.85                                       | 0.036                                      | 0.78           |
| CASE: 10<br>家屋あり<br>建ぺい率: 15%<br>(塀あり) | 0.10                                  | 15.60                             | 1        | 0.22                  | 3.81                      | 5.07                                  | 0.85                                       | 0.39                 | 3.54                                       | 0.018                                      | 0.33           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 2        | 0.26                  | 4.20                      | 6.63                                  | 1.10                                       | 0.39                 | 4.62                                       | 0.018                                      | 0.42           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 3        | 0.27                  | 4.39                      | 7.11                                  | 1.19                                       | 0.39                 | 4.96                                       | 0.017                                      | 0.46           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 1        | 0.36                  | 4.64                      | 9.97                                  | 1.66                                       | 0.50                 | 4.77                                       | 0.020                                      | 0.32           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 2        | 0.55                  | 4.91                      | 16.26                                 | 2.71                                       | 0.50                 | 7.79                                       | 0.025                                      | 0.52           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 3        | 0.42                  | 5.09                      | 12.95                                 | 2.16                                       | 0.50                 | 6.20                                       | 0.020                                      | 0.42           |
| CASE: 11<br>家屋あり<br>建ぺい率: 40%<br>(塀あり) | 0.10                                  | 15.60                             | 1        | 0.27                  | 4.03                      | 6.48                                  | 1.08                                       | 0.42                 | 3.95                                       | 0.019                                      | 0.42           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 2        | 0.28                  | 4.74                      | 7.96                                  | 1.33                                       | 0.42                 | 4.86                                       | 0.016                                      | 0.51           |
|                                        | 0.10                                  | 15.60                             | 3        | 0.26                  | 5.05                      | 7.91                                  | 1.32                                       | 0.42                 | 4.83                                       | 0.015                                      | 0.51           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 1        | 0.48                  | 4.20                      | 12.12                                 | 2.02                                       | 0.63                 | 4.07                                       | 0.027                                      | 0.39           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 2        | 0.58                  | 4.25                      | 14.69                                 | 2.45                                       | 0.63                 | 4.93                                       | 0.030                                      | 0.47           |
|                                        | 0.20                                  | 31.20                             | 3        | 0.52                  | 5.58                      | 17.41                                 | 2.90                                       | 0.63                 | 5.84                                       | 0.021                                      | 0.56           |

注) 断面No. 1: 水平地盤第1段の末端

断面No. 2: 水平地盤第2段の末端

断面No. 3: 水平地盤第3段の末端

流量は±2割程度の誤差を含み得ると考えられる。この誤差によるバラツキが $C_r$ 、 $N_r$ にあったとしても、 $C_r$ 、 $N_r$ と堤防形態・水理条件との関係を把握する意味は大きいと考え、以下では表-3.1の結果をもとに上記の関係について分析する。ただし、 $C_r$ 、 $N_r$ の値そのものを設計等に用いる際には、それらに誤差が含まれている可能性があることに留意しなければならない。

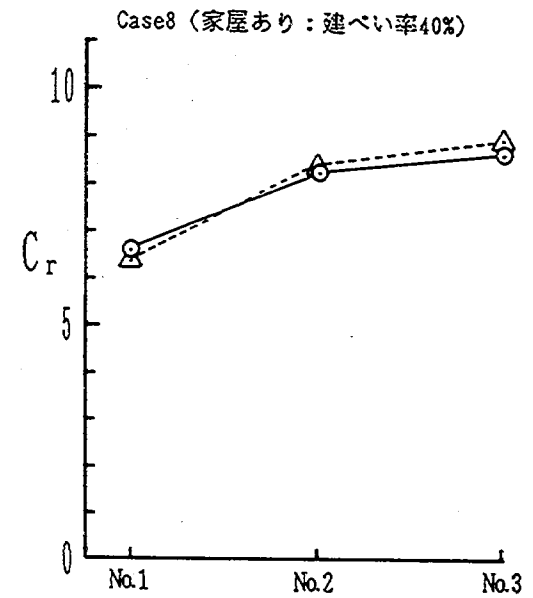
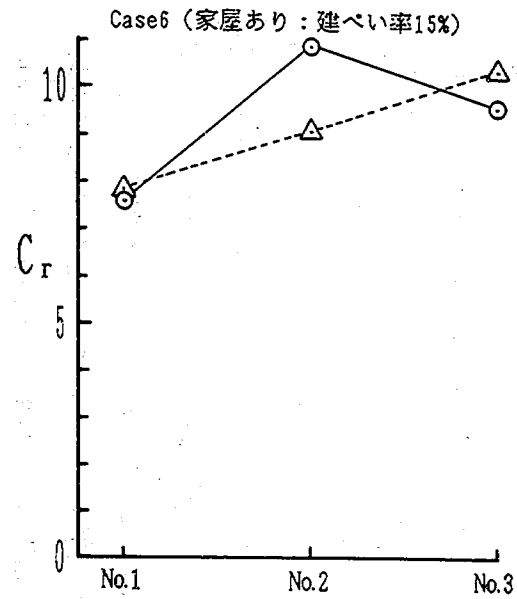
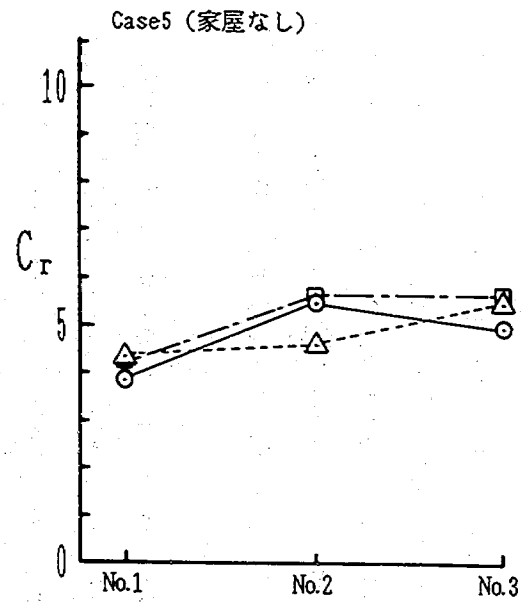
## (2) 等価道路流量係数 $C_r$ の特性

図-3.38に、種々の実験条件での $C_r$ 値を断面位置(No.1, 2, 3)との関係で示す。Case 5, 6, 8を比較すると、Case 6の $C_r$ が一番大きく、次いでCase 8、Case 5の順になっている。Case 6の $C_r$ がCase 5より大きいのは、水平地盤に家屋があると、そこでの堤内地方向の流速が水深の割に小さくなり、水平地盤から直交道路へ落ち込む水量が増えるためである。言い換えれば、家屋の存在によって一本の直交道路がより広い範囲から越流水を集めるようになるためである。家屋の建ぺい率がさらに高くなる(Case 8)と、この傾向はさらに強まるが、直交道路への水の落ち込みを家屋が阻害する効果も大きくなるため、かえって $C_r$ が小さくなると考えられる。

Case 5, 6, 8について $q$ による $C_r$ の変化を見ると、ここで示した $q=0.1\sim0.2\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の範囲では $C_r$ に大きな変化がないことがわかる。このことは、通常の堰の越流における単位幅越流量と越流水深との関係と同じように、 $q_r$ が概ね $h^{3/2}$ に比例することを示している。一方、 $C_r$ 値は5~10程度であり、これは、通常の堰越流の場合と同じような値を持つと考えられる道路流量係数 $C'$ (1.4~1.6程度、図-3.7より)の3~6倍である。これらの特性は、天端から直交道路に流入する越流量に加えて水平地盤から直交道路へ落ち込む水量が $C_r$ に含まれていることに着目すれば説明できる。すなわち、1本の直交道路への流入にかかわる実質的な越流幅は、直交道路幅に加えて直交道路への落ち込み流れがある水平地盤~直交道路境界の長さを含むため、直交道路幅より大きくなり(図-3.39参照)、 $C_r/C'$ が〔実質越流幅/直交道路幅〕を表わしていると考えるのである。この考え方にしたがえば、本実験条件の範囲内では、直交道路幅の3~6倍程度の実質越流幅があることになる。

塀が $C_r$ 値に与える効果はCase 6に対して10を、Case 8に対して11を比較すればわかる。いずれも塀があると $C_r$ が小さくなる。これは、直交道路への水平地盤からの落ち込みが塀により阻害され、上記の実質越流幅が減少するからである。Case 10では $q$ が増すと急に $C_r$ が増えるが、これは $q$ が小さい時には不透過部分の塀の高さ(20cm、図-2.6参照)と水平地盤水深が同程度であるためと考えられる。Case 11で $q$ の影響が大きいのは、家屋が密なため $q$ が小さい時でも不透過部分の塀に対し水深が充分大きいためであろう。

Case 5, 6, 8のいずれも、直交道路沿いに断面がNo.1, 2, 3と下流にいくほど $C_r$ が大きくなる傾向がある。その度合いは、Case 5で小さく、Case 6, 8で大きい。Case 6, 8が大きいのは、第3章2節2項で述べたように、水平地盤から直交道路への水の落ち込みを家屋が強化するため、各水平地盤で同じ流況パターンが繰り返される状態に至るのにより多くの水平地盤の流下を必要とするからである。



凡 例

- $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s/m}$
- △---  $q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s/m}$
- $q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s/m}$

No.1：第一段水平地盤末端  
 No.2：第二段水平地盤末端  
 No.3：第三段水平地盤末端

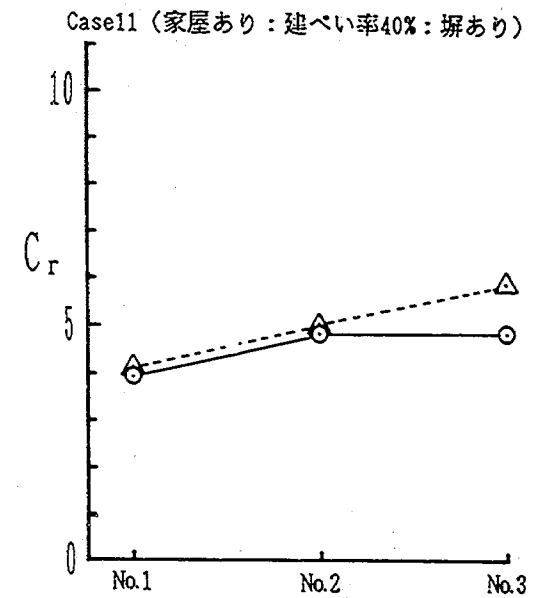
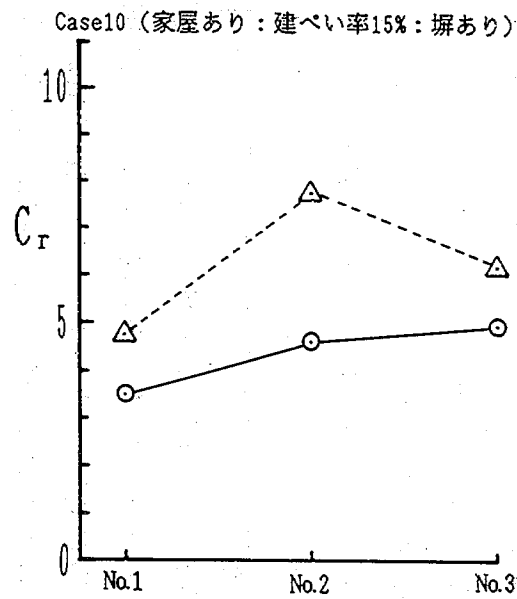
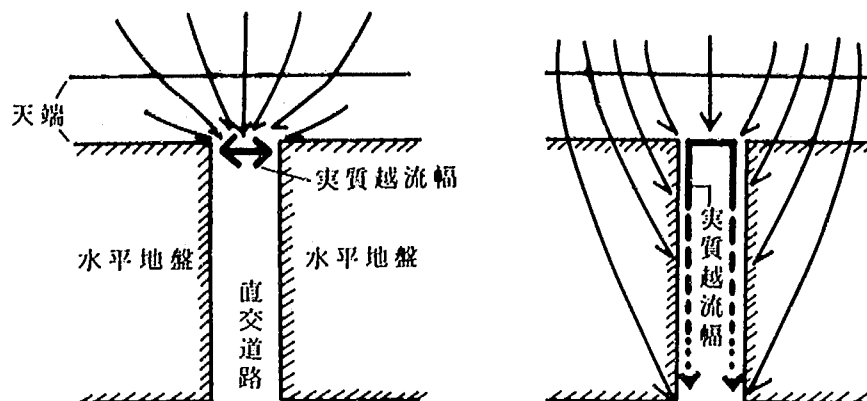


図- 3.38 種々の実験条件での  $C_r$  値

〈水平地盤に水が入らない（段差あり）〉

〈水平地盤に水が入る（段差なし）〉



図－3.39 実質越流幅の概念図

以上の特性から、 $C_r$  値を支配する主要な因子として、〔水平地盤上の粗度要素、水平地盤周囲の塀〕があげられる。 $C_r$  とこれら 2 つの因子との関係は次のようなものと推定される。水平地盤上の粗度要素が大きくなるにしたがい最初は  $C_r$  値が増大するが、粗度要素がさらに大きくなると  $C_r$  値が減少するようになり、最終的には  $C'$  値に近づく。水平地盤の塀の透過度が低くなるほど  $C_r$  値が減少し、最終的には  $C'$  値に近づく。

これらの特性を踏まえて、図－3.38 に示した  $C_r$  値の最大値が高規格堤防に起こり得る最大値とどのような関係にあるか考察する。まず、水平地盤周囲の塀に関しては、それが無い条件での実験を行っており、 $C_r$  値が最も大きくなる結果が含まれているはずである。水平地盤上の粗度要素に関しては、Case 5, 6, 8 と粗度要素が大きくなる過程で  $C_r$  値が増大して減少する傾向を示していることから、概ね Case 6 が水平地盤上の粗度要素を変えた時の最大  $C_r$  値の目安となろう。厳密には Case 6 の粗度要素を少し変えた所に真の極大値があるかもしれないが、粗度要素に対して  $C_r$  値が鋭く応答するとは考えられないので、この判断は妥当と考えられる。また、直交道路の間隔が小さくなると、両者へ落ち込む流れが干渉し合い、干渉しない時よりも  $C_r$  値が小さくなると予想される。しかし、本実験の場合、直交道路の間隔は干渉が起こらない距離よりも大きく設定されているので（第 3 章 1 節の最終段落を参照）、こうした干渉による  $C_r$  値の減少効果は実験結果に現われていないはずである。以上のことから、図－3.38 に示した  $C_r$  値の最大を、高規格堤防に関して実際に起こり得る最大  $C_r$  値の目安にできると考えられる。ただし、2 段目以降の水平地盤において越流水を直交道路に集めるような特殊な形態を堤防裏のりが取る場合には、この限りでなく、 $C_r$  値がさらに大きくなり得る。なお、水平地盤の 1 段目に道路への越流水の集中をもたらす施設（たとえば、道路・天端との段差）がある場合には、同一の越流水深に対して越流量が減るので、 $C_r$  がむしろ小さくなる。

### (3) 等価道路粗度係数 $N_r$ の特性

図－3.40 に種々の条件での  $N_r$  値を示す。この図に示した  $N_r$  値は、No. 2 断面のデータを用いて

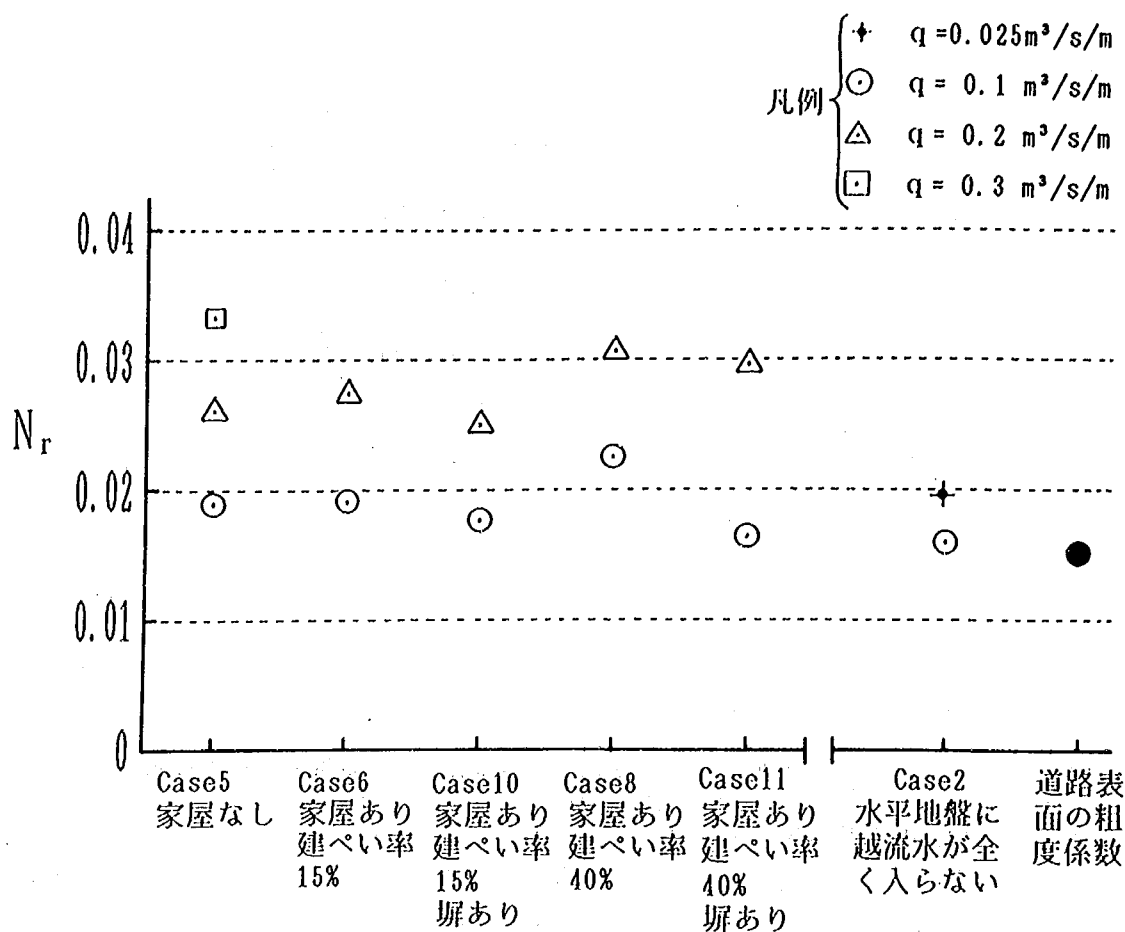


図-3.40 種々の実験条件での  $N_r$  値 (No. 2 断面)

求められている。図-3.38を見ればわかるように断面No. 2～3間の  $C_r$  値の増加量がNo. 1～2間の変化に比べ小さく、これは、断面No. 2より下流側の水平地盤での平面流況に大きな違いがないことを意味している。また、各水平地盤の末端部の直交道路断面は、当該水平地盤から道路への水の落ち込みが終わる場所にあたり、隣り合う十字路の間の直交道路内では最も流量が多い場所である。以上のことから、本実験において直交道路の流速を検討する基準断面として断面No. 2を採用した。

この図から越流量  $q$  によって  $N_r$  が大きく変化することがわかる。 $q$  が  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  と小さい場合には  $N_r$  が Case 8 を除き  $0.02$  以下であり、図中に比較対象として付けた道路表面粗度係数  $0.015$  や道路だけを越流水が流下する場合の直交道路流れの粗度係数 (Case 2 の結果より算出) と大きな差がない。一方  $q$  が  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  以上になると、 $N_r$  が  $0.025 \sim 0.03$  にまで増大する。以上のことは、 $q$  が小さいうちは  $N_r$  が道路表面の粗度係数と大きな差を持たないが、 $q$  が大きくなると道路表面以外の抵抗要因が卓越してくることを示している。そして、この抵抗増加原因は、水平地盤から直交道路への落ち込み流れにあると考えられる。抵抗増加の機構は、 $q$  が大きくなると運動量 (直交道路内の主流方向の) をほとんど持たない水の直交道路への落ち込み量 (いわゆる横流入量) が増えるため、見かけの抵抗が増大するというものである。

図-3.41 は  $N_r$  と  $H_r$  (：道路水深) との関係をやはり断面No. 2 について示したものである。この

図から、 $H_r$ が大きくなると $N_r$ が増するという明確な傾向を読み取ることができる。この理由については次のように考えられる。 $H_r$ が大きいということは、十字路付近において直交道路から水平地盤に拡散する水量も多いことを表す。水平地盤上の平面流況が同じパターンの繰り返しになった状態では、上記の拡散した流れはその水平地盤から再び直交道路に戻ることになる。以上のことは、 $H_r$ が大きいほど、1つの水平地盤における直交道路～水平地盤間の水のやり取りが多いこと、したがって、直交道路への水平地盤からの横流入量も多いことを表す。これが、図-3.41に見られる $N_r \sim H_r$ 関係の傾向の原因と考えられる。

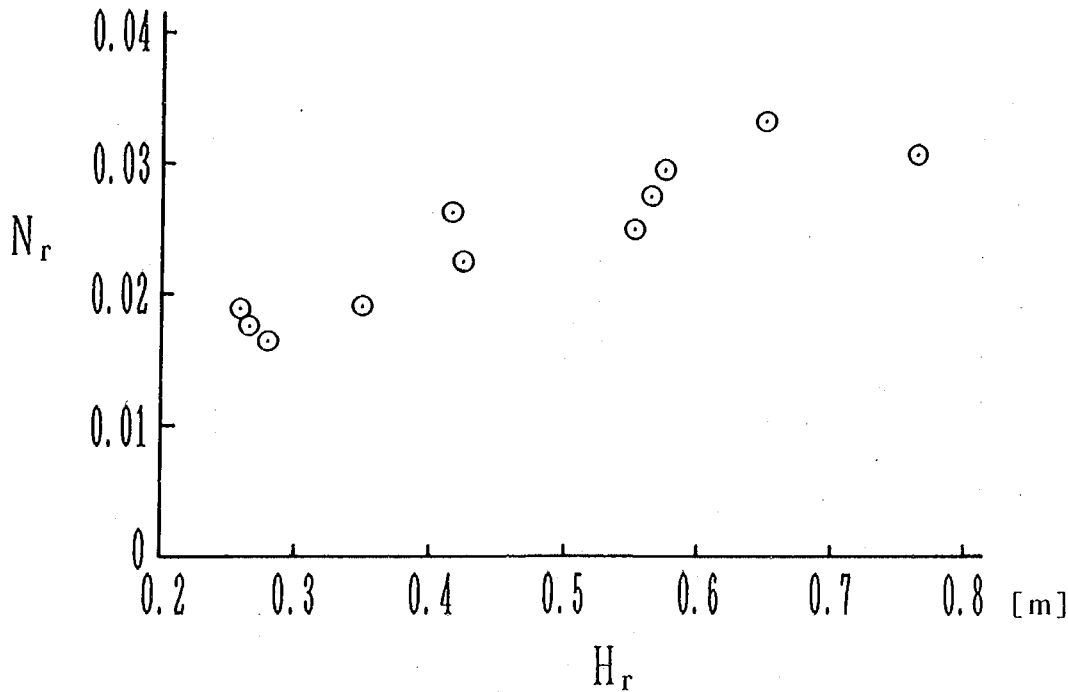


図-3.41  $N_r \sim H_r$ 関係 (No. 2 断面)

図-3.40, 3.41に見る限り、 $N_r$ に与える $q$ (あるいは $H_r$ )の影響に比較して、水平地盤の家屋や塀の状況が与える影響は小さいようである。

#### (4) 最大平均流速比 $r$ について

本節で対象にしている水平地盤に越流水が入る(水平地盤と道路との間に段差がない)実験条件に関しては、信頼性のある $r$ 値を算出する測定がなされていない。そこで参考として、道路だけを越流水が流下する条件のCase 2の測定結果から、断面No. 2での $r$ を計算すると、 $q_r = 0.65, 1.3, 2.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ それぞれについて1.5, 1.14, 1.09となる。直交道路内の流れは、衝撃波や水平地盤からの横流入の影響などを受けて複雑な流況を呈するもので、条件によっては $r$ 値が1よりもかなり大きくなり、ばらつきの幅も大きいと予想される。

$r$ 値について一般的な情報を得るには、直交道路内の流速分布特性をもう少し調べる必要がある。

### 3.4.2 水平地盤上の流速

図-3.42 に、水平地盤上で発生する最大流速と流量・堤防形態との関係を示す。最大流速は、図-3.11, 3.16, 3.21, 3.26 に示した直交道路との境界近傍の流速測定値（6割水深）の中から最大値を取ったものである。この図から、図-3.37 に示した直交道路上で発生する最大流速の場合と異なり、最大流速が越流量  $q$  や堤防形態によりかなり変化することがわかる。

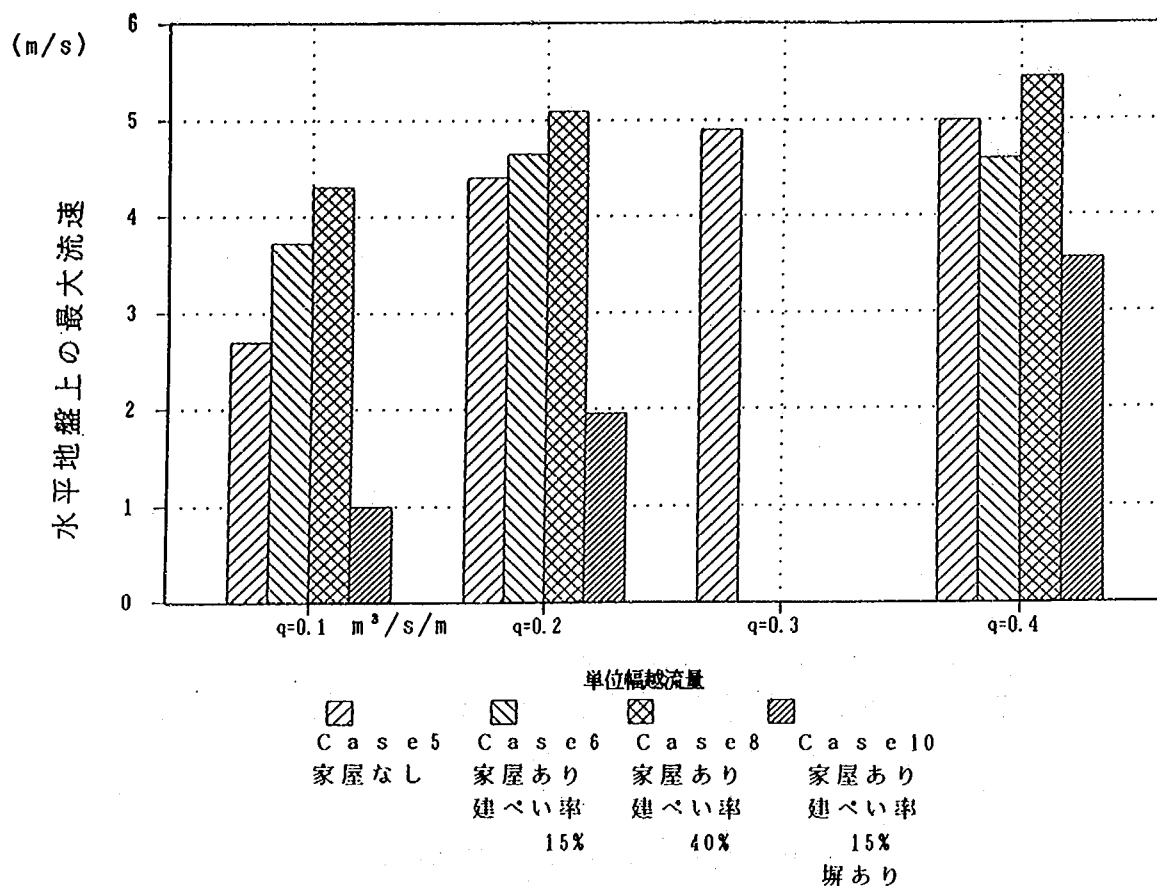


図-3.42 水平地盤上の最大鉛直平均流速

水平地盤上の最大流速は十字路近くの直交道路近傍で生じることから、その値は直交道路流速  $V_r$  と密接な関係を持っているはずである。そこで、水平地盤上の最大流速を  $V_{gmax}$  と名付け、 $V_{gmax}/V_r$  と直交道路水深  $H_r$  との関係を調べた。結果を図-3.43 に示す。なお、この図では、 $V_r$  と  $H_r$  に断面No. 2（水平地盤第2段の末端）での値を用いている。この図から、Case 10を除いて、1)  $H_r$  が 0.5m 以上では  $V_{gmax}/V_r$  が概ね 1 前後であること、2)  $H_r$  が 0.5m 以下では、 $V_{gmax}/V_r$  が 1 より小さく、 $H_r$  の増大とともに  $V_{gmax}/V_r$  が増大することがわかる。このことは、道路水深がある程度以上（本実験では 0.5m 以上）になると、道路から水平地盤に流速を保ったまま越流水が侵入するのに対して、水深がそれより小さいと、道路から水平地盤に水が侵入する時に流速低減が大きくなり、 $V_{gmax}$  が  $V_r$  より小さくなることを示している。Case 10 では他の実験条件に比べて  $V_{gmax}/V_r$  が相当小さくなる。これは、越流水が直交道路から水平地盤に侵入する際に、水平地盤周囲の塀が流速を大幅に低減させるからである。

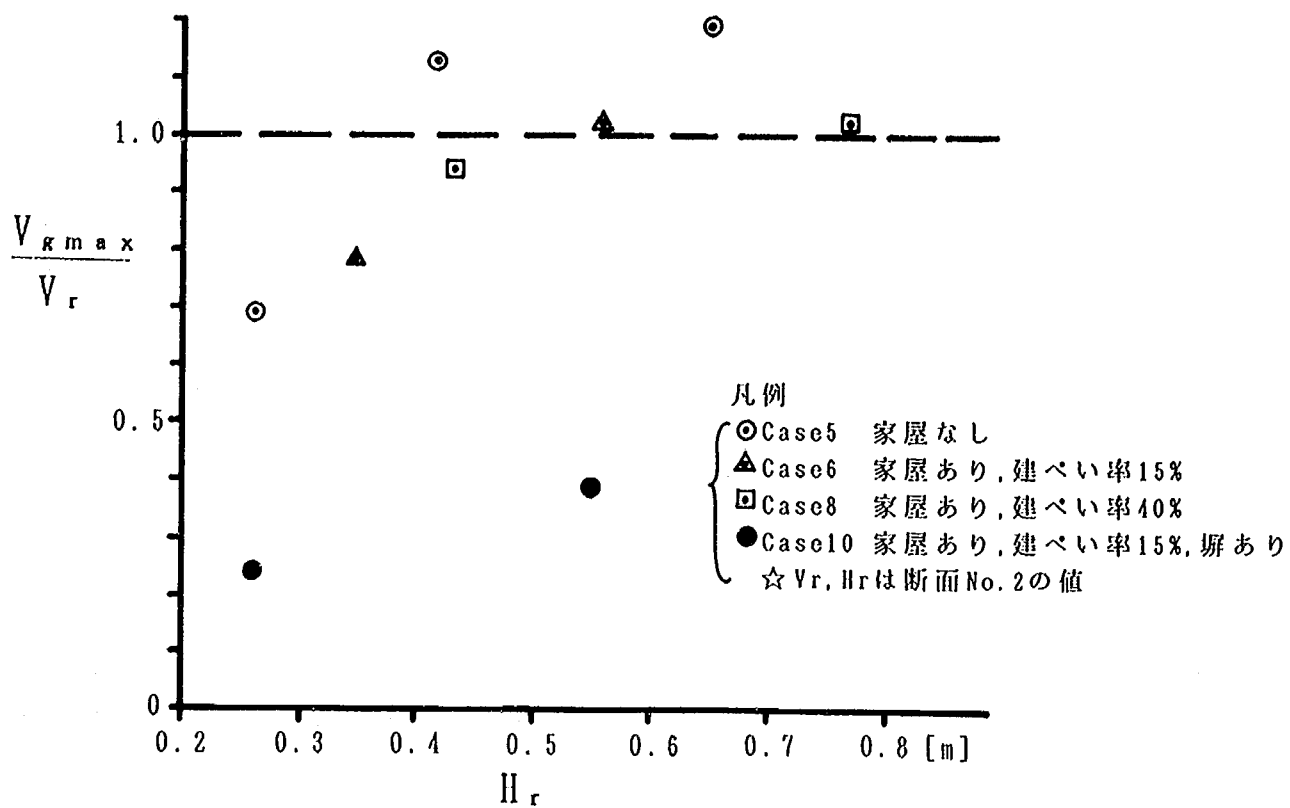


図-3.43  $V_{gmax}/V_r \sim H_r$  関係

以上から、水平地盤上の最大流速は、〔直交道路上の流速〕×〔越流水が直交道路から水平地盤に入る際の流速の低減率〕という構図から決まることが明らかになった。この低減率は、直交道路水深と水平地盤周囲の塀に大きな影響を受ける。

## 第4章 高規格堤防設計への反映

本章では、第3章に述べた越流水の挙動と堤防形態との関係を、第1章2節で述べた高規格堤防設計の考え方と比較することにより、設計で想定した越流水の挙動と実態について一致点および相違点を分析する。それを基に、第1章2節の設計法の有効性とさらに検討すべき課題を明らかにする。ただし、越流水の挙動を精度よく予測・再現することと適切な設計法を構築することとは必ずしも同じでない。設計法の検討にあたっては、実現象を設計にいたずらに細かく反映させることよりも、実現象の予測の限界を踏まえながら必要な要件を満たす構造物を合理的に設計する方法を見出すという観点が優先されるべきである。このことから、以下の検討も、越流水の挙動の実態を設計法に反映させることを基本にするものの、実現象と設計法とが一致しなければならないという立場はとらず、あくまで構造物の設計法としての合理性を重視する。

### 4.1 高規格堤防設計水位の算定に用いる流量係数Cの設定について

第3章1節の図-3.2, 3.4, 3.6に示したように、流量係数Cは高規格堤防の天端・裏のりの形やその上の土地利用形態によって大きく変化する。天端幅が通常の堤防と同じで裏のり勾配が一樣の場合（Case 1：図-3.2参照）には、通常の堤防とあまり変らないC値（1.4～1.6；付録2参照）を取るが、高規格堤防の形態の特徴がはっきり現れるにしたがって（Case 1→5→6→10→8→11→2の順）、C値が大きく減少する（図-3.2, 3.4, 3.6参照）。Case 5, 6, 8は高規格堤防の典型的な形態の1つと考えられるが、それらのC値はCase 1の半分程度である。道路のみを越流水が流れるCase 2の条件でのC値はさらに小さく、Case 1の1/30程度になる。

このように、高規格堤防の流量係数Cは堤防の形態や土地利用状況によって値を大幅に変え、一般には、通常堤防よりも小さな値を取るようになる。第1章2節枠内の①②に示したように、高規格堤防設計水位は、洪水が越流しながら河道を流れる状況を想定して設計され、越流の水理的表現において流量係数Cが用いられる。この流量係数Cの値の設定には、当然、高規格堤防のC値に関する上述の特性が反映されなければならない。

高規格堤防設計水位には、河道沿いの水位分布を精確に表現することではなく、高規格堤防の設計において適切な越流外力を与える根拠になることが求められる。高規格堤防裏のりの土地利用形態について当面の状況を想定することによって、C値を縦断的に細かく変えることは可能である。しかし、長期的には堤防裏のりの土地利用形態は変化し、それを事前に予測することは不可能であるから、このようなC値の設定は堤防設計としては意味がない。さらに、越流水位はある程度の河道区間長の平均的なC値に支配され、C値の細かな縦断変化は越流水位に敏感には応答しない。これらのことから、高規格堤防設計水位の算定に用いるC値としては、それを縦断的に変化させるのではなく、高規格堤防裏のりの平均的な土地利用形態に対応するC値を河道縦断方向に一定値で与えることが妥当と考えられる。ただし、C値が小さいほど設計水位は大きく算定されるので、上記の「平均的な土地利用形

態'を想定する際には、裏のり上に多くの粗度要素がある状況（小さいC値が現われることに対応）が出現する可能性をより高く見込むべきである。

以上の考えに基づき、本実験の結果から高規格堤防設計水位の算定に用いるべき流量係数Cの値を検討する。C値検討の基になる高規格堤防裏のりの平均的な土地利用形態としてCase 5, 6, 8を考  
える。越流水深hが数十cm、天端幅Lが8m程度と仮定すると、 $h/L = 0.02 \sim 0.04$  ぐらいになる。  
この時、Case 5, 6, 8のC値がそれぞれ0.8, 0.6, 0.4程度になることが図-3.4からわかる。これ  
らの3つの平均値を取ることで、次のC値が得られる。

$$C = 0.6$$

この値が、高規格堤防設計水位を算定する際に用いるべき流量係数Cの1つの目安になる。

ところで、高規格堤防設計水位を設定するための水理検討においては、通常堤防と同じかそれより  
やや小さい程度のC値（1.4程度）が用いられることが多いようである。そこで、C値が1.4から  
上記の目安値すなわち0.6になることにより、高規格堤防設計水位の算定結果にどのような影響が出  
るかを調べてみる。第1章2節枠内の①②に示したように、C値は、洪水位が堤防天端高を上回るた  
めに生じる越流量と越流水深との関係を規定する。C値が小さくなると、越流によって河道流量  
が減少することによる洪水位低下効果（これを以後「越流水深分散効果」と呼ぶ；文献3）5章3節  
参照）が小さくなるので、越流水深が大きく算定される。文献3）において、C値の変化がもたらす  
越流水深の変化が調べられており、それによると、越流を許さない条件（ $C = 0$ ）での越流水深（河  
道水位－堤防天端高）に対する越流を許した場合の越流水深の比（ $H'/H$ ）が、主に $F_r$ と $\{W/$   
 $(C\phi^2 D)\}$ に支配されることがわかっている。ここで、 $F_r$ ：河道流れのフルード数、 $W$ ：川幅、 $D$ ：  
河道内流れの水深、 $\phi$ ：河道内流れの抵抗を表わす流速係数である。文献3）の図-5.4と図-A 6.  
2には、 $(H'/H)$ と $F_r$ 、 $\{W/(C\phi^2 D)\}$ との関係の代表例が、それぞれa) 堤防天端高が一部区  
間で他より低いために生じる越流、b) ある地点で疎通能力が下流に向かって急減するために生じる越  
流、について図示されている。

（ただし、図-5.4と図-A 6.2では、本研究と異なり、次式で定義される無次元形のCが用い  
られていることに注意されたい； $q = (2g)^{1/2} C h^{3/2}$ 。また、そこではWの代りにBが、Dの代  
りにhが用いられている。）

これらの図から、C値が1.4から0.6に変化する、すなわち1/2.3に減少すると、1～4割程度の  
 $(H'/H)$ の増大、すなわち越流水深の増大が起り得ると判断できる。以上のことから、ここで取  
上げた1.4→0.6に代表される一定以上のC値の変化は算定される越流水深に無視できない影響を与  
えるので、第1章2節枠内①②の検討においては妥当なC値を用いることが重要と言える。

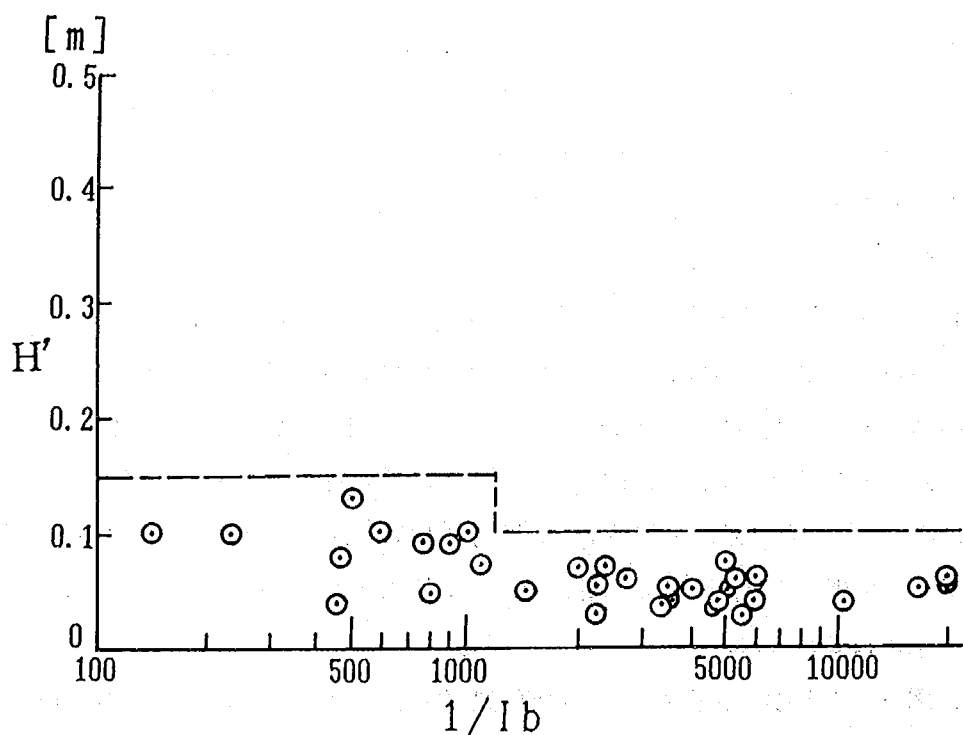
文献3）の第5章4節では、無次元形のCに0.32（本研究で用いている有次元形のCで1.42に対応）  
を与えて、越流を考慮した場合の水位変動による越流水深 $H'$ を求め、文献3）の図-5.5 b)に河床  
勾配の逆数との関係で示している。有次元形のCに上で取上げた0.6を用いて同様の図を作ると、図

— 4.1 のようになる。なお、いずれの図も、兩岸堤防からの越流を想定して、上記の  $C$  値の 2 倍の  $C$  値を計算で与えている。この図と文献 3) の図— 5.5 b) を比較すると、 $C$  が小さくなったことにより図— 4.1 の越流水深  $H'$  が全体的にやや大きくなっていることがわかる。しかし、越流水深  $H'$  の包絡線としては、文献 3) の図— 5.5 b) での破線、すなわち

$$H' < 15 \text{ cm} \quad I_b > 1/1200$$

$$H' < 10 \text{ cm} \quad I_b \leq 1/1200$$

をそのまま採用して構わないようである。これは、 $C = 0.6$  を用いたことに伴う越流水深  $H'$  の増加が、結果的に、包絡線を押し上げるほどのものではなかったためと考えられる。したがって、 $C$  が 1.4 から 0.6 に変化しても、文献 3) の 5 章 4 節と 5 章 5 節 2 項の結論は変える必要が無いと判断できる。



参考図 文献 3) 図— 5.5 b) 水位変動による越流水深  $H'$  と河床勾配  $I_b$  との関係

(越流を考慮。有次元形  $C$  に 1.42 (無次元形で 0.32 に対応) を採用)

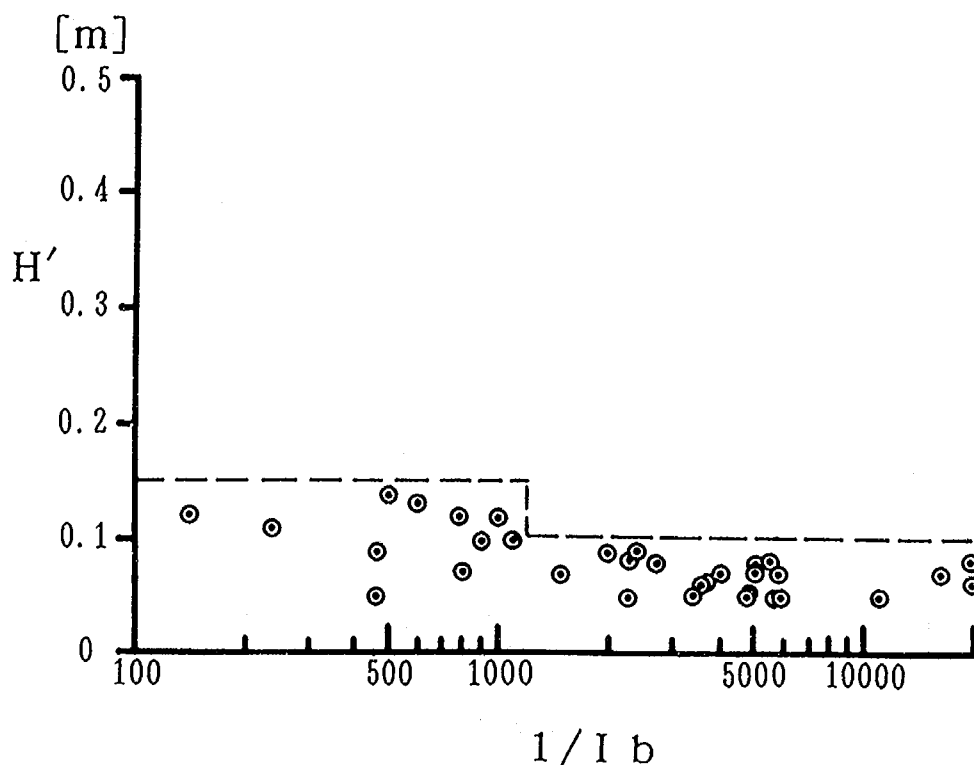


図- 4.1 水位変動による越流水深  $H'$  と河床勾配  $I_b$  との関係

(越流を考慮。有次元形 C に 0.6 (無次元形で 0.136 に対応) を採用。有次元形 C に 1.42 (無次元形で 0.32 に対応) を採用した文献 3) 図- 5.5 b) と比較されたい)

#### 4.2 流量係数 $C$ 値の制御の必要性について

前節に述べたように、高規格堤防の流量係数  $C$  は、通常堤防の  $C$  の半分以下になる場合が多いと予想される。このため同一河川において超過洪水時に、通常堤防が残されている区間の方が高規格堤防整備済みの区間よりも越流量が多いという状況が発生し得る。加えて、高規格堤防整備区間では破堤が起こらない。これらのことから、高規格堤防整備の途中段階においては、超過洪水発生時における通常堤防の破堤危険度が、高規格堤防整備が始まる前よりも高くなると考えられる。したがって、高規格堤防整備の途中段階において、超過洪水に対して、高規格堤防整備済み区間と未整備区間との間で安全度のバランスにどのように配慮するかについて検討する必要がある。

このような検討の過程で、高規格堤防の流量係数  $C$  を制御する (例えば、通常堤防並みの値に低下させる) という考え方が出てくるかもしれない。しかし、高規格堤防の越流係数  $C$  を制御するためには、その天端付近においてかなり大規模な導水施設を造る必要があり、その実現は實際上難しく、また堤防裏のりを通常の土地利用に供するという高規格堤防の趣旨にも合わない。高規格堤防整備区間と通常堤防区間との  $C$  値の差をなくすという目標に限定すれば、むしろ、堤防天端高に着目した対応が現実的である。すなわち、越流量に与える天端高の影響は  $C$  値と同等あるいはそれ以上に大きい

ら、天端高を少し調整することがかなり大きなC値調整につながる可能性がある。通常堤防の余盛などが、天端高調整の手段になり得る。

いずれにしても、高規格堤防整備の途中段階における整備区間と未整備区間との治水安全度のバランスについては、ある限られた水理量に関して机上検討だけから出てきた数値の違いにとらわれすぎず、実際の堤防の状況を踏まえて、バランスを取ることも含めより広い観点から検討することが肝要である。

#### 4.3 道路面に作用するせん断力 $\tau$ の算定法について

第1章2節では堤防上部に作用するせん断力の中で、道路に集中した越流水によって作用するせん断力が、堤防破壊の防止を考える上で最も厳しいとしている。すなわち、道路に集中した越流水によって道路が破壊されなければ堤防は越流水による侵食破壊に関して安全と判定するとしている。この前提の成立範囲は次節に述べるとして、ここでは、道路が越流水によって破壊されないかどうかの判定式である式(1.3)、(1.4)の妥当性について考える。

式(1.3)、式(1.4)による道路に作用するせん断力 $\tau$ の算定過程には、次のような問題点がある。式(1.3)の $q_r$ は式(1.4)にあるように $q \cdot R_r$ から求められている。これは、堤防法線方向に平均化された越流量 $q$ が $R_r$ の割合で道路に集中することを表わしている。一方、この $q$ は、 $R_r$ とは関係なく $C \cdot h_k^{2/3}$ から求められる。しかし実際は、 $R_r$ と $C$ との間に密接な関係がある。すなわち、道路への越流水の集中度 $R_r$ が高くなるほど $C$ が小さくなる。このことは、すべての越流水が道路に集中するCase2のC値が他のCaseのC値に比べ非常に小さいことからよくわかる(図-3.4参照)。したがって、 $R_r$ と $C$ とを独立に用いている式(1.3)、式(1.4)は、論理的にあいまいな部分を残していると言える。本章の最初に述べたように、本研究で扱っているのは堤防設計法であるから、そこで用いられる各種パラメータの数値が実際の堤防状況と完全に対応している必要はないが、用いる式自体には論理的整合性を求められる。そのような意味で、式(1.3)、式(1.4)は改善されるべき部分を残していると言えよう。

ここでは、式(1.3)、式(1.4)の代りに次のような方法で道路に作用するせん断力 $\tau$ を求める方法を提案する。第3章4節1項の(1)の内容からわかるように、道路表面に作用するせん断力 $\tau$ の決定機構は、〔設計水位(越流水深) $h_k \rightarrow$ 単位幅当たり直交道路流量 $q_r \rightarrow$ 直交道路の断面平均流速 $V_r \rightarrow$ 直交道路の最大の鉛直平均流速 $V_{r \max} \rightarrow$ せん断力 $\tau$ 〕の流れにある。したがって、 $q$ や $R_r$ を介さず上記の流れで $\tau$ を求めた方が、実現象との物理的対応が明確になり、論理的整合性も確保できる。この考えに基づいて、式(3.3)、(3.4)、(3.5)、(3.6)と式(1.3)とを組合せると次式が得られる。

$$\tau = W_0 \cdot \left( \frac{n r}{N_r} \right)^2 \cdot N_r^{3/5} \cdot C_r^{3/5} \cdot h_k^{9/10} \cdot I^{7/10} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

上式を用いることにより、高規格堤防設計越水位 $h_k$ 、堤防裏のり勾配 $I$ から $\tau$ を求めることができる。

上式を設計に用いる際重要なことは、パラメータすなわち $n$ 、 $r$ 、 $N_r$ 、 $C_r$ の値を適切な高規格堤

防設計ができるように定めることである。具体的には、1) 上式の適用目的が実現象の精確な予測にあるわけでないこと、2) 高規格堤防裏のりが通常の土地利用に供され、その規制が極めて緩やかであるために、土地利用形態の制御や予測が非常に限定されていることを踏まえ、上記のパラメータ値の設定にあたっては予想される最も厳しい状況を想定する必要がある。このことに基づき、次のようにパラメータ値を設定してみた。

$C_r$  について：第3章4節1項(2)の検討結果を参考に、予想し得る最大値に匹敵すると考えられる 12 を与える。

$N_r$  について：第3章4節1項(3)の検討結果を参考に、予想し得る最小値に匹敵すると考えられる 0.018 を与える。

$n$  について：アスファルト舗装面の粗度係数として大きめの 0.016 を与える。

$r$  について：第3章4節1項(4)の検討結果を参考に、1.2 を与える。

これらのパラメータ値を式(4.1)に代入すると次式が得られる。

$$\tau \text{ (tonf/m}^2\text{)} = 0.46 h_k^{9/10} \cdot I^{7/10} \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、 $h_k$  は m 単位である。上式が、本研究で提案する高規格堤防設計における  $\tau$  の計算法である。なお、第3章4節1項(2)で述べたように、水平地盤2段目以降が道路に越流水を集中させるような特殊な形状を持つ場合には、 $C_r$  値が12よりもさらに大きくなり得るので、また、他のパラメータの特性も大きく変る可能性があるので、上式を設計に用いることはできない。式(1.3)、(1.4)において、 $n^{3/5} \cdot C^{3/5} \cdot R_r^{3/5} = 0.46$  となるような  $n$  値、 $C$  値、 $R_r$  値の組合せを用いると、式(1.3)、(1.4)によっても、式(4.2)と同じ  $\tau$  が計算される（たとえば、 $C = 1.6$ 、 $n = 0.016$ 、 $R_r = 10.5$  の組合せ）。

#### 4.4 水平地盤の侵食からの防護について

第3章2節で述べたように、直交道路近傍を除く水平地盤では、1 m/s 以上の流速が現れる場所はわずかであり、2 m/s 以上の流速が出るのは家屋のない Case 5 の  $q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  における平行道路近くのみである（図-3.12、3.17、3.22、3.27 参照）。土の表面は、砂分が多くシルト・粘土分が極端に少ない材料でできている場合を除けば、1.5 m/s 程度の流速には耐えると考えられる（たとえば参考文献7）参照）。このことから、直交道路近傍を除く水平地盤は、特殊な条件を除けば侵食破壊に関して危険な状況には至らないと判断できる。この特殊な条件としては、堤体が侵食に極端に弱い砂からなる場合、水平地盤上に家屋がなく  $q$  が  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  以上の規模を持つ場合（平行道路近くの水平地盤で 2 m/s 以上の流速が発生）があげられる。この2つの条件のうち前者については堤防がそのような材料で造られないようにすること、後者については、そのような条件が現れる際に平行道路と水平地盤との境界付近で高流速が生じないように何等かの対策を平行道路において取ることが必要である。なお、水平地盤から水が落ち込む場所に道路（平行）が無い場合には、落ち込む流れが水平地盤表

面の土をたたくので、 $q$ が $0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ より小さくても、そこで洗掘が発生する可能性が大きい。そのような場合には、1つ上の水平地盤から水が落込む場所に洗掘防止工（例えばふとん籠やコンクリートブロックなど）を適切な範囲・深さに埋設しておく必要がある。

一方、水平地盤上の中でも十字路付近の直交道路近くは、第3章4節2項で述べたように、直交道路内の流速（ $4 \sim 7 \text{ m/s}$ ）に匹敵する高流速が発生し得る。そのような高流速が発生する範囲は、図-3.12、3.17、3.22からわかるように、家屋密度が小さい場合には道路幅と同じスケールを持ち、決して小さくはない。このことは、直交道路近傍の水平地盤が高流速によって侵食を受け、この侵食が堤防破壊につながる恐れがあることを示している。このような堤防破壊の危険性をなくすためには、つぎのような方策を考える必要がある。

1) 第3章4節2項で述べたように、水平地盤の周囲に塀があると、上記の流速が大幅に低減される。

塀あるいはそれと同じ機能を持つ構造物を十字路近くの水平地盤周囲に設置し、十分な流速低減を図る。

2) 水平地盤と道路を隔てる擁壁を充分強固なものにして、水平地盤の侵食が起こっても水平地盤を取り巻く擁壁が損傷を受けないようにする。これにより、水平地盤の侵食がある程度進めば侵食の進行が食い止められると考えられる。

いずれの方策を取るにしても、具体的な構造の検討、それにより侵食破壊が防がれるかどうかのチェック、またそのような方策を取ることが實際上可能かどうかの検討を実施しなければならない。上記1)については、付録4に若干の追加検討結果を示しているので参考にされたい。なお、道路と水平地盤との段差を大きくして水平地盤に水を入れないという方策は、第3章3節1項で述べたように現実的でないのでここでは取上げていない。また、高流速が発生する部分の水平地盤を強化するという方策も、水平地盤上の土地利用を制約することから高規格堤防本来の趣旨に反するので取上げていない。

水平地盤と道路との間に段差がなく、天端からの直交道路がT字路にぶつかる場合には、今まで考えてきた十字路の場合に比べはるかに広範囲により高い流速が水平地盤上に発生することが第3章3節に述べた結果から予想される。この流況は堤防にとっても水平地盤上の家屋にとっても非常に危険な状況であるから、天端からの直交道路がT字路にぶつかるという街路形態は避けるべきである。ただ、そのような特定の街路形態を避けることが實際上難しい場合には、上記のT字路にかかわる堤防破壊の危険をなくすための対策を立てる必要があり、そのたたき台として、やはり上記1)、2)があげられよう。ただし、十字路の場合に比べ越流水の外力が大きいので、対策の規模も大きくならざるを得ない。

以上のように、第1章2節の設計の考え方については、水平地盤の一部が高流速にさらされ、そこでの侵食が堤防破壊につながる危険性を持つという点で、補完すべき部分を残している。堤防破壊につながるような水平地盤の侵食を防ぐ対策の詳細検討において、特に上記2)に示したように一定の侵食を許した段階で侵食の進行を止めるという考え方をする場合、水平地盤を移動床とし、移動床材

料に堤体土の耐侵食力に対応した粒径を用いた実験が有力な手段となる。

## 4.5 ま と め

### 4.5.1 高規格堤防裏のり上の公共施設等のデザインにおける配慮事項

高規格堤防上の裏のりは通常の土地利用に供され、その法的な規制は極めて緩やかなものであることから、その理由が裏のり上の越流水の挙動に関するものであったとしても、高規格堤防裏のり上の土地利用形態の規制は行うべきではない。一方、第4章4節に述べたように、越流水が堤防破壊につながるような性質を局所的に持つ場合があり、また第4章3節の最後で述べたように裏のりが特殊な形状を持つ場合には堤防設計の前提条件に大きな影響を与える可能性がある。したがって、高規格堤防の裏のりにおける街路や擁壁等の公共施設あるいはそれに準ずる施設の設計においては、必要に応じて、これらの問題に適切に対処するよう配慮する必要がある。このために、公共施設等のデザインについて、技術的知見を土台として、高規格堤防築造にかかわる行政（国や地方自治体）と住民等との間で街づくりや防災を含む幅広い観点から建設的な議論および意志決定が行われることが望まれる。

本章で指摘した配慮事項を以下にまとめて示す。

- 水平地盤の第2段以降で越流水を直交道路に集中させる裏のり形態、直交道路が堤内側に向ってT字路にぶつかる街路形態をどのように扱うか。
- 1つ上の水平地盤からの越流水を受け止める平行道路がなく、それが直接水平地盤をたたくために生じる洗掘の対策
- 直交道路近傍の水平地盤上に発生する高流速による侵食の対策
- 水平地盤上に家屋がなく  $q$  が  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  以上の規模を持つ場合に、平行道路近くの水平地盤で  $2 \text{ m/s}$  以上の流速が発生することによる侵食の対策

### 4.5.2 堤防材料の選定における耐侵食性の配慮について

浸透や滑り破壊に対する安全性の確保に適した土であっても、越流水による侵食に著しく弱い（たとえば、流速  $1 \text{ m/s}$  以下で侵食が相当進むような）土を堤防材料に用いることは好ましくない。堤防材料の選定において耐侵食性にも配慮することが必要と考えられる。

## お わ り に

本実験により代表的な高規格堤防について、その上の越流水の挙動が明らかになり、また、その結果を侵食破壊防止の観点からの堤防設計に反映させるための基本事項が示された。今後、この成果を基に、高規格堤防の趣旨を充分踏まえつつ、その構造と設計法について幅広い観点から具体的に検討して行く必要がある。

## 謝

## 辞

本研究を進めるに当たり、一連の実験を担当した(株)建設技術研究所の最上谷吉則技師からは、実験結果の考察を行う上で有益な情報をいただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 河川審議会：「超過洪水対策及びその推進方策について」についての答申，昭和62年3月。
- 2) 建設省河川局監修：今後の河川整備はいかにあるべきか，(社)日本河川協会，pp. 103～115，1991。
- 3) 山本晃一・藤田光一・布村明彦：堤防満杯流量時の水位変動による堤防越流－高規格堤防の水理設計のために(1)－，土木研究所資料，第3161号，1993。
- 4) 福岡捷二・内山雄介：水防災と環境に配慮したスーパー堤防上沿川市街地構造の研究，土木学会水工論文集，第37巻，pp. 833～836，1993。
- 5) 新版宅地開発便覧編集委員会編：新版宅地開発便覧，鹿島出版会，pp. 160～163，昭和60年。
- 6) 文献5)のpp. 130。
- 7) 佐々木克也・山本晃一・藤田光一：大型不攪乱資料を用いた土の侵食特性把握実験，第48回年次学術講演会，II－17，1993。
- 8) 土木学会：水理公式集，昭和60年版，第4編発電編，第1章，1985。
- 9) 本間 仁：低溢流堰堤の流量係数(第二編)，土木学会誌，第26巻，第9号，pp. 849～862，1940。
- 10) 吉川秀夫・芦田和男・土屋昭彦：幅厚ぜきの流量係数に関する研究，土木研究所報告，103号，pp. 123～137，1959。

## 付 録

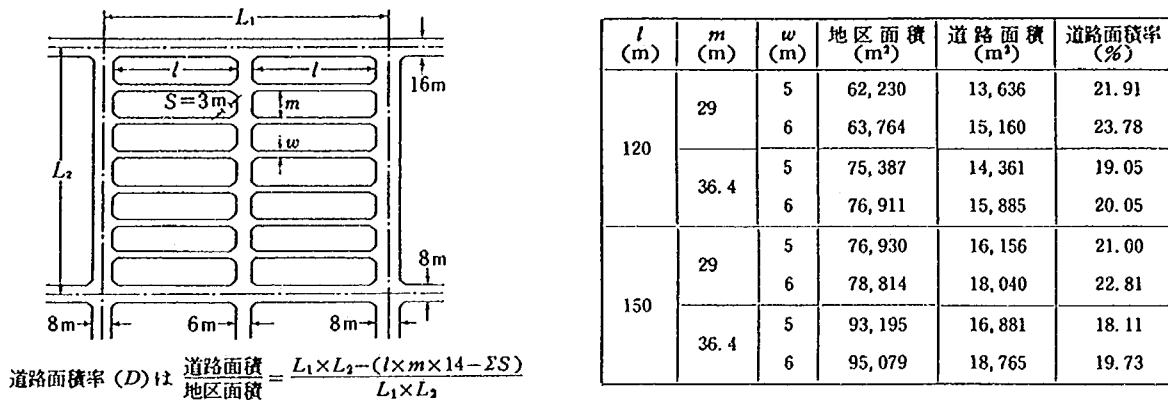
1. 街路A・B，建ぺい率，塀の構造の選定根拠
2. 通常堤防の流量係数
3. 流況写真
4. 十字路近くの水平地盤上の流速を低減させる工夫

☆文中の参考文献番号は，本編の参考文献番号に対応する。

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
LIBRARY  
540 EAST 57TH STREET  
CHICAGO, ILL. 60637

## 1. 街路 A・B, 建ぺい率, 塀の構造の選定根拠

高規格堤防の裏のり上は「通常の土地利用」に供されることが前提であり、本研究の目的は、「通常の土地利用」の下での越流水の挙動を調べることにある。したがって、裏のりに関する実験条件は、堤防破壊を防止するのに有利な形態あるいは越流水の処理に有利な形態という観点から設定するのではなく、あくまで「通常の土地利用」を代表するように設定しなければならない。本研究では、「通常の土地利用」の代表的形態は、河川とかかわりなく作られた、土地利用形態の決定に関する種々の法規・基準・それに類するものに現われていると考える。そして、具体的には、宅地に関する通常の土地利用を想定して宅地開発便覧<sup>5)</sup>を取り上げ、その内容を参考に裏のり形態の実験条件を定める。宅地開発便覧<sup>5)</sup>は、第6章2節2～7項において、都市計画法を中心に法解釈プラス行政指針を加えて、宅地造成設計における平面的技術検討を解説している。その中で、適当な街区構成の例として図A-1.1を示している(文献5)の図6-7を転載)。一街区は長方形であり、その長辺が堤防法線と平行になる街区配置が直角になる街区配置に比べ越流水の道路への集中度が高くなることから、実験では街区長辺が堤防法線と



図A-1.1 街区構成  
(文献5)の図6-7を転載)

平行になる街区配置をまず採用する。さらに、この配置条件では、長辺が長い方が越流水の直交道路への集中度が高くなる。以上から図A-1.1の中で、長辺1として最も長い150mを持つ街区を実験条件として採用する。街区短辺mの長さについては、[裏のり長さ/3]の値とほぼ同じ36.4mを採用する。この結果裏のりでは、堤防法線と直角方向に、ほぼ同じ大きさの3つの街区(=3つの水平地盤)が並ぶことになる。こうした根拠により設定されたのが「街路A」である。街路Bは、上記の短辺が堤防法線と平行になるよう配置された街区(上記の街区が90°回転)に基づき設定されたものである。

水平地盤上の家屋の建ぺい率については建築基準法で定められている割合を参考に水理特性を配慮して設定した。同法第53条には建ぺい率が用途地域等の種別ごとに示されており、その割合は3/10～8/10にわたっている。また、防火地域では条件によっては8/10より大きな数値を取りうる。以上のように、法的規制からみると、3/10～8/10が通常考えられる建ぺい率の範囲となる。しかし、第3章で述

べているように、水理的には、建ぺい率 0/10～4/10 の範囲で大きな特性変化が見られる。以上から、実験における建ぺい率として、0/10、1.5/10、4/10、10/10（段差あり）を設定した。

塀の構造の選定に関しては次のように考えた。近年の宅地づくりにおいては、良好な居住環境が維持されるように、区画間および道路との境界を区切る塀として、ブロックあるいは石でできた固い材料でなく、生け垣やネットフェンスなど柔らかく開放的な部材が用いられることが多くなっている<sup>6)</sup>。また、ブロックや石積みの高い塀は、水平地盤と道路との間に段差がある場合と同じ水路特性を持つと考えられる。塀に関しては、それが柔らかく開放的な部材でできたものであっても一定の効果を持つかどうかを知ることが大事である。以上のことから、図-2.6 のような構造を選定した。

## 2. 通常堤防の流量係数

通常堤防の溢水に伴う越流の流量係数  $C$  の値を推定する手段として、まず、いわゆる堰の流量公式を適用することを考えた。表 A-2.1 に代表的な 4 つの流量公式について、対象にしている堰形状と、 $h/W$ 、 $h/L$  の適用範囲を示す<sup>8), 9), 10)</sup>。ここで、 $h$ ：越流水深、 $W$ ：地盤からの堤防高さ、 $L$ ：天端幅、である。実際の溢水による堤防越流の  $h/W$ 、 $h/L$  の範囲は、それぞれ  $0.01 \sim 0.1$ 、 $0.01 \sim 0.07$  程度と考えられるから、これら 4 つの公式すべてが堤防越流に合った適用範囲を持っている訳で

表 A-2.1 せきの流量公式の適用条件

| 公 式                       | せきの形状          | $h/W$            | $h/L$           |
|---------------------------|----------------|------------------|-----------------|
| 本間の式                      | 台 形<br><丸あり>*) | 0.25 ~ 0.5<br>程度 | 0.8 ~ 1.3<br>程度 |
| Govinda-Rao<br>の式の 1 つ**) | 長方形            | 0 ~ 1            | 0 ~ 0.1         |
| Beresinski<br>の式の 1 つ**)  | 長方形<br><丸あり>   | ?                | 0.1 ~ 0.4       |
| 吉川・芦田・<br>土屋の図表           | 長方形, 台形        | 0.03 ~           | 0.05 ~          |

\*) <丸あり>：表法肩に丸味をつけているもの

\*\*) いくつかある式のうち、堤防越流の条件に最も近いものを選定

はないことがわかる。特に、本間の式は、堰のスケールに比べ越流水深がかなり大きい状況を対象にしているので、堤防越流の流量係数を推定するには必ずしも適さない（実際よりも大きめの  $C$  値を出すと考えられる）。各公式の適用範囲の中で実際の堤防越流の条件になるべく近い  $h/W$ 、 $h/L$  について流量係数  $C$  値を求めると、図 A-2.1 のようになる（K、H、G、B の点を参照）。

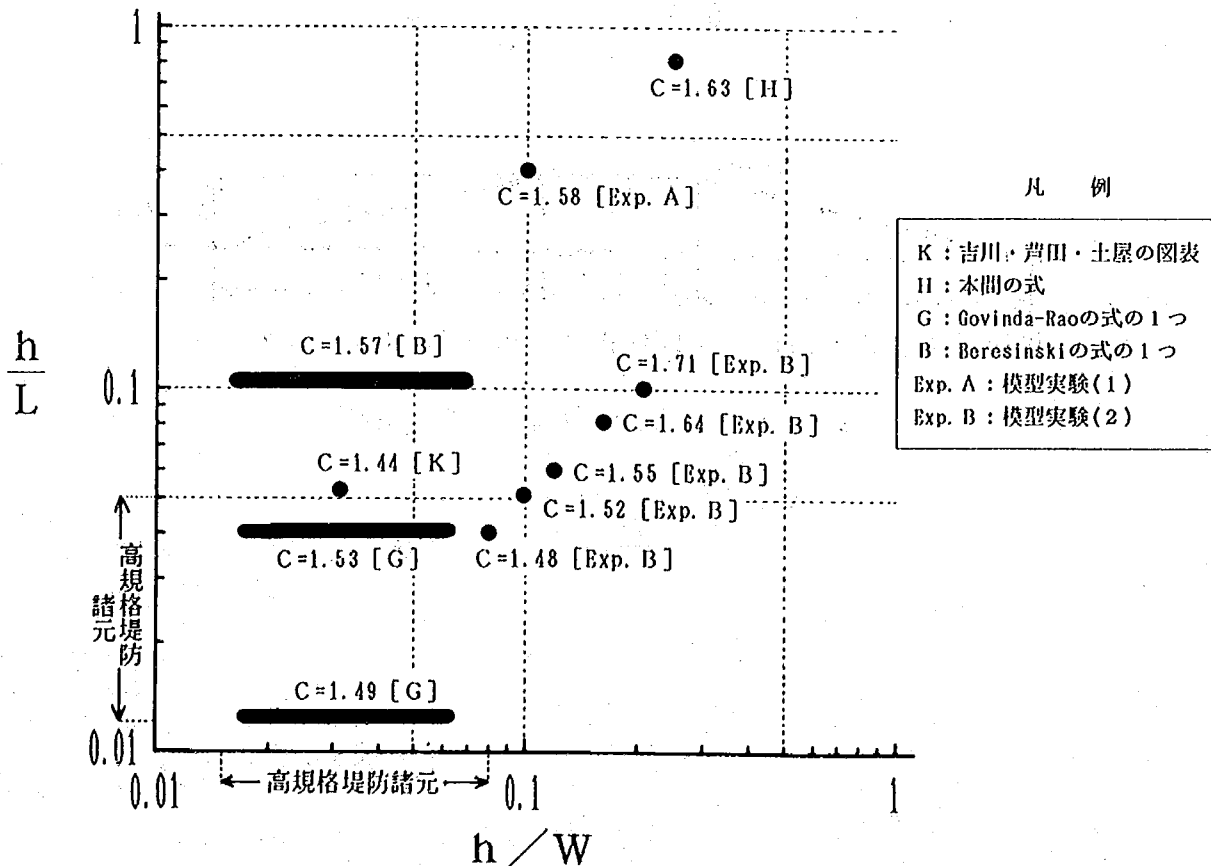
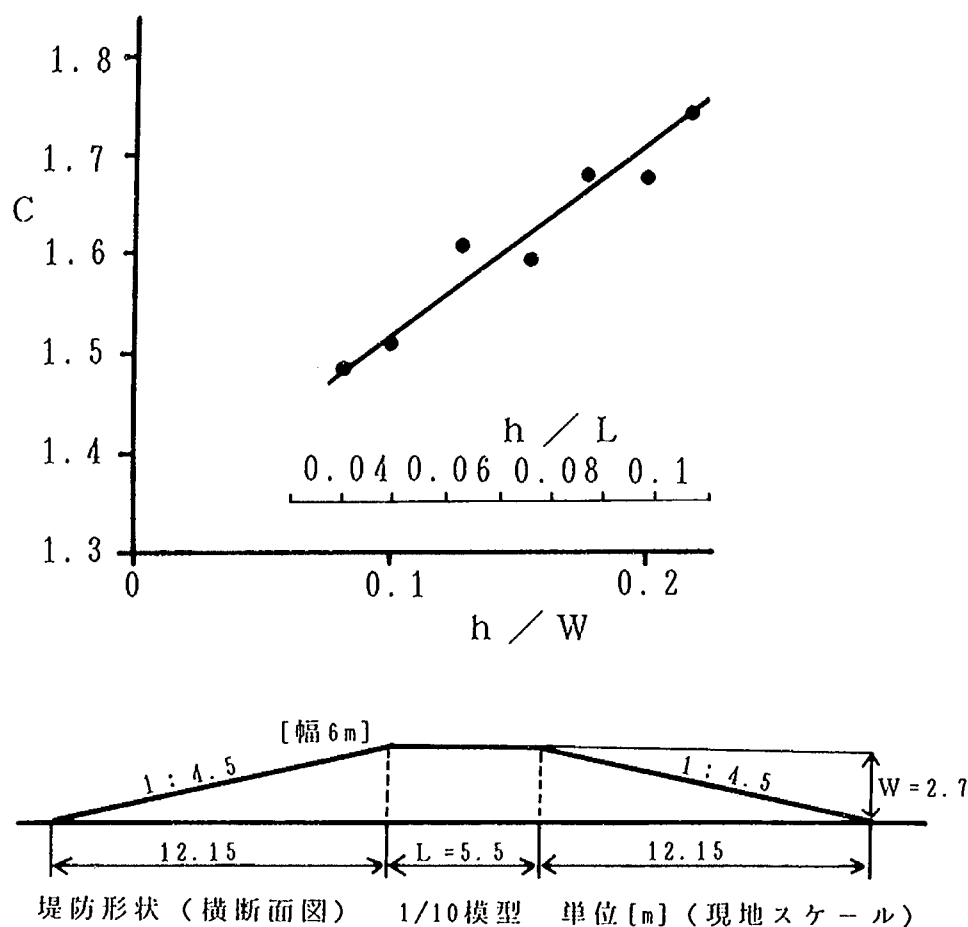


図 A-2.1 流量係数  $C$  と  $h/W$ 、 $h/L$  との関係

一方、堤防越流に関する模型実験も行われており、その結果の一例が図A-2.2に示されている。この結果も図A-2.1上にExp.Bの点として示されている。図A-2.1上には、もう1つの実験結果のデータもExp.Aとして記されている。

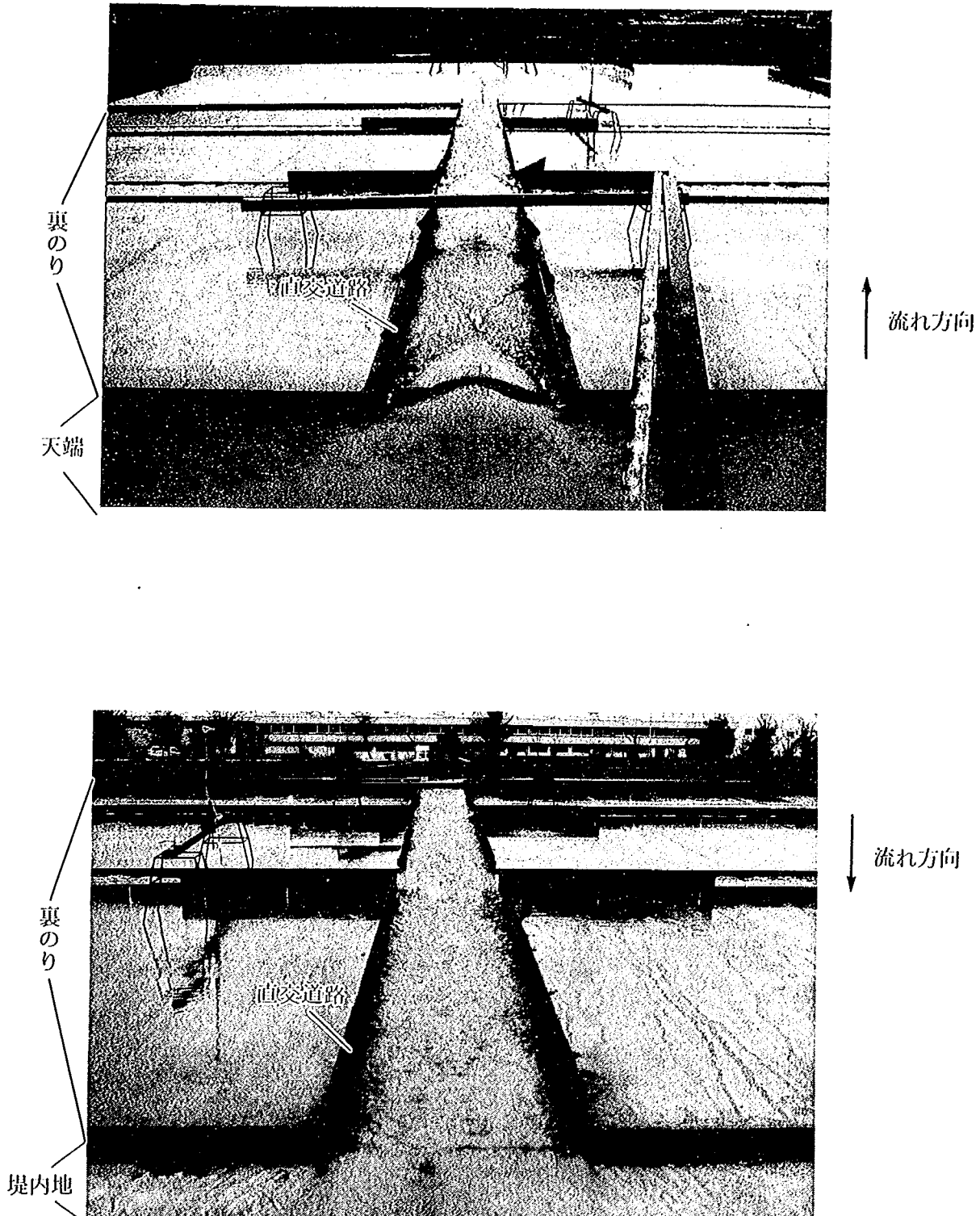
図A-2.1から総合的に判断すると、実際の堤防越流の $h/W$ 、 $h/L$ の範囲においては、流量係数 $C$ 値が1.4～1.6の範囲にあると言える。この値と図-3.2、3.4、3.6の $C$ 値を比較すればわかるように、高規格堤防の流量係数は通常堤防に比べかなり小さい。



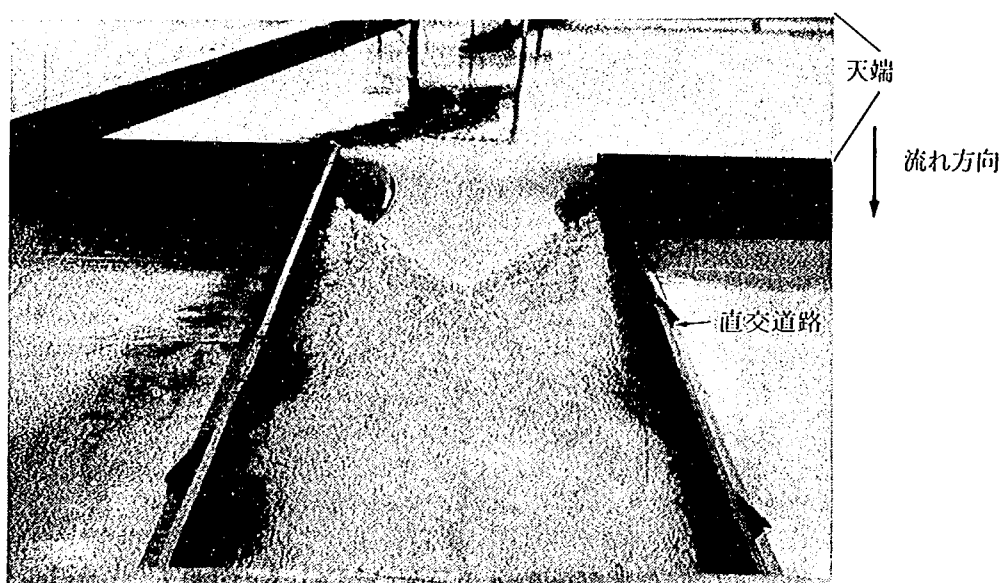
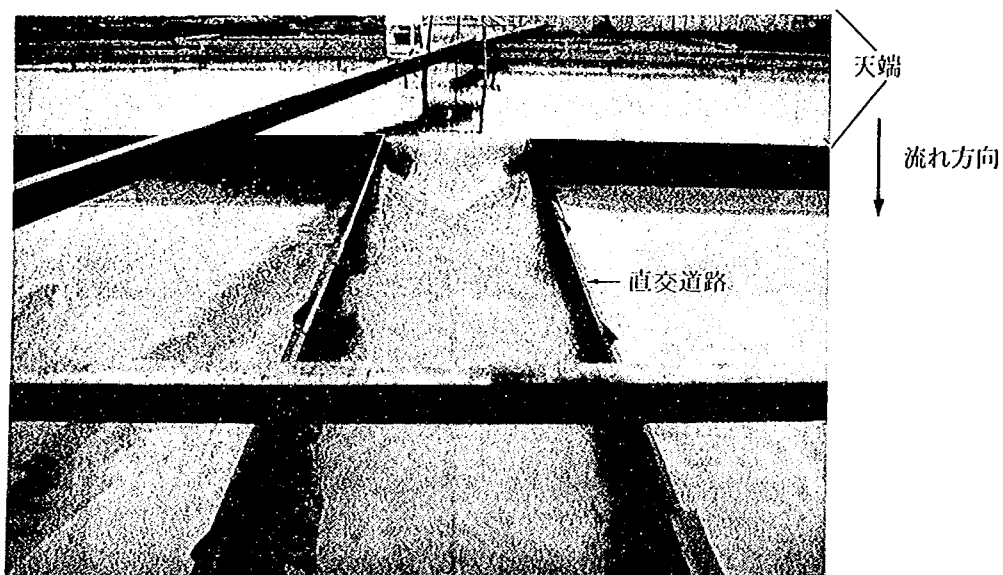
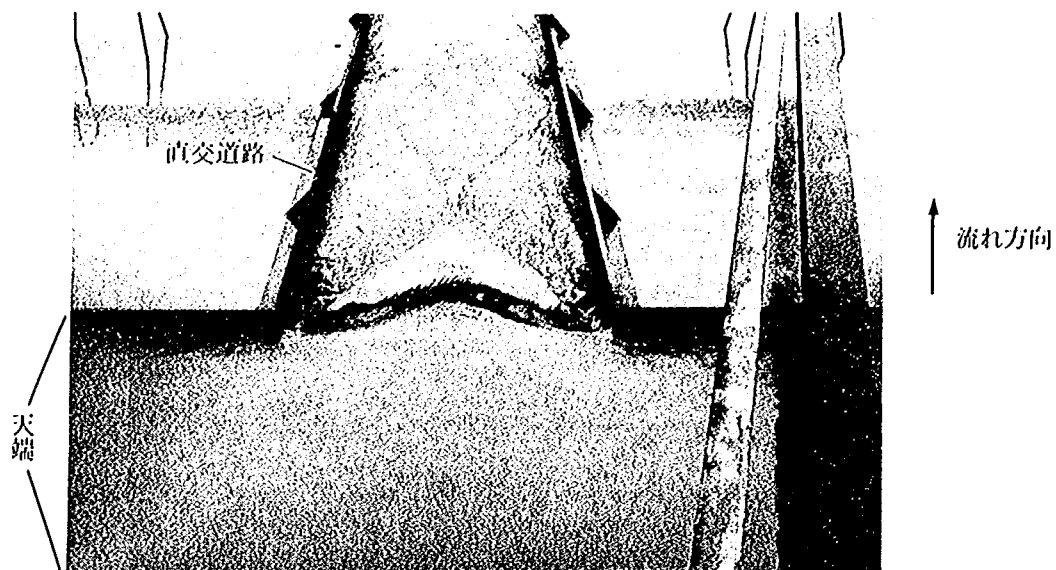
図A-2.2 堤防越流の流量係数の実験値

### 3. 流況写真

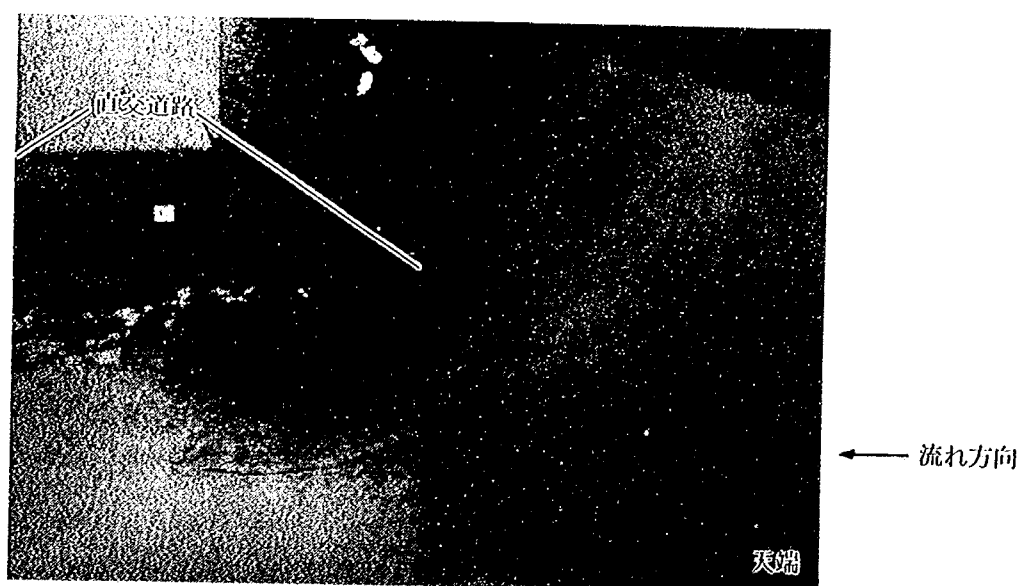
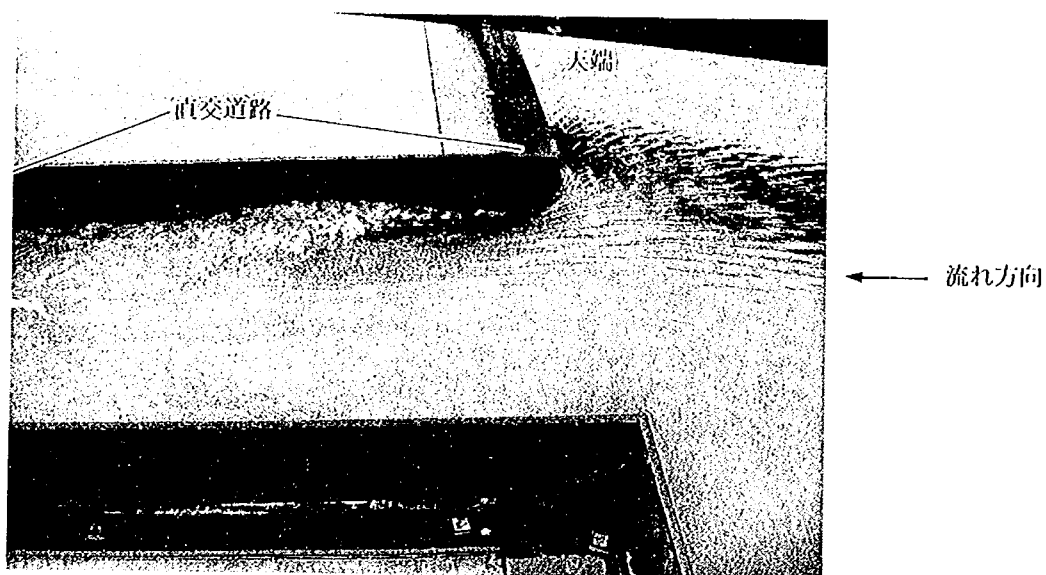
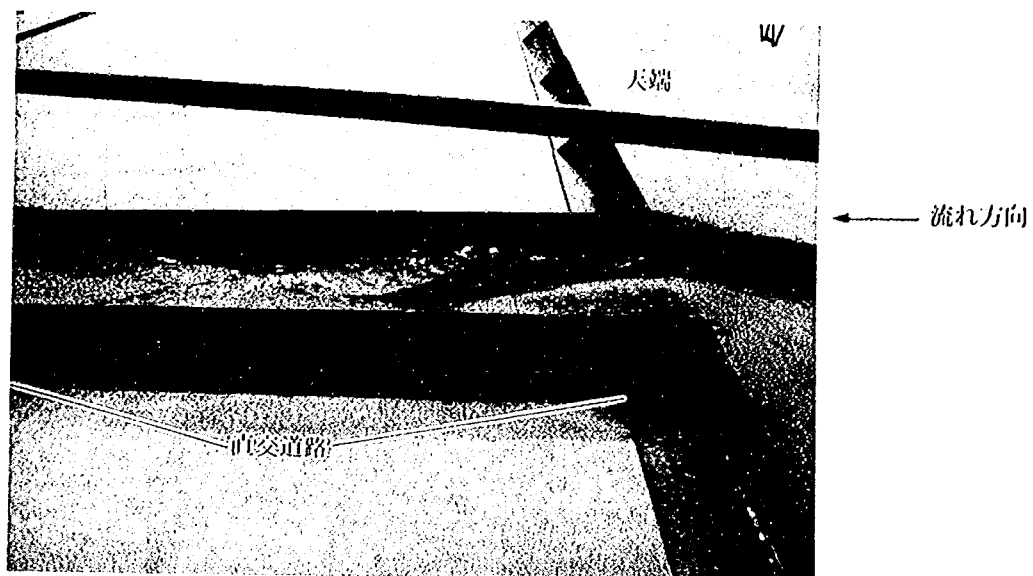
写真A-3.1～3.22に代表的な流況写真を付ける。



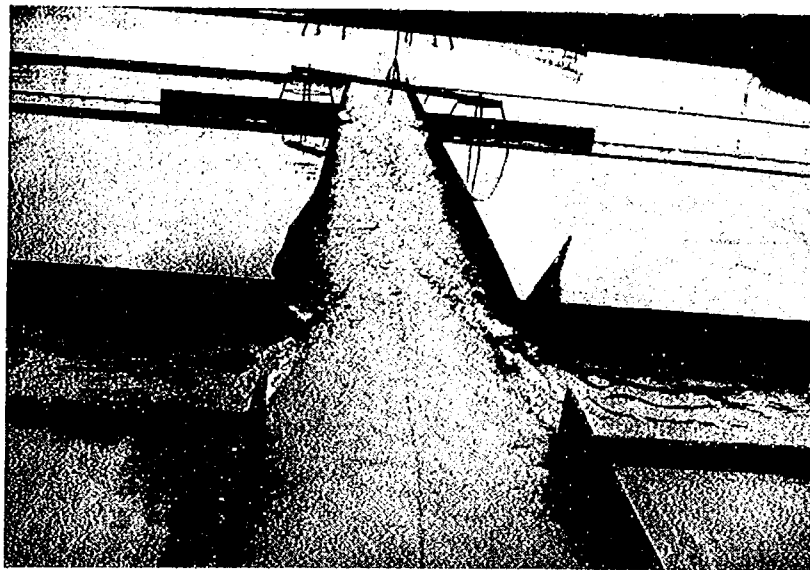
写真A-3.1 Case 2 - 全体  
( $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 2.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )



写真A-3.2 Case 2 - 天端から直交道路への入口  
 $(q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}, q_r = 2.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m})$



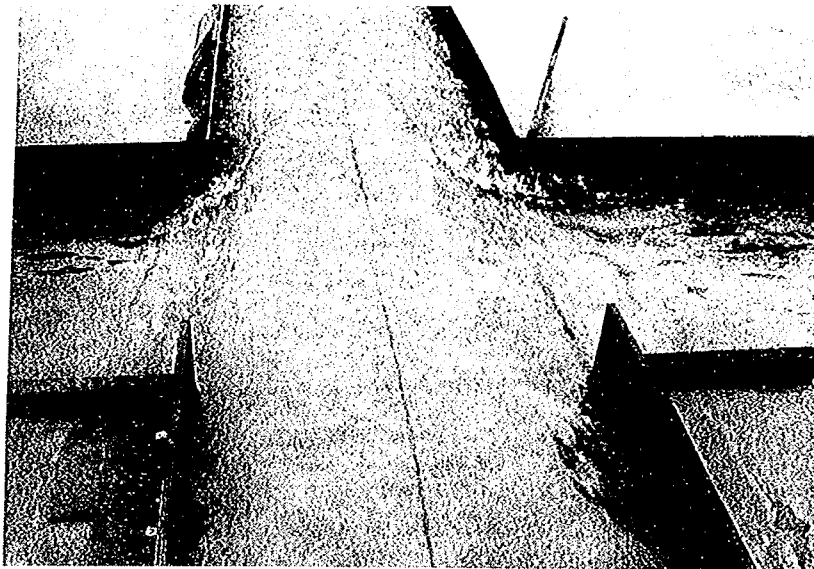
写真A-3.3 Case 2 - 天端から直交道路への入口  
 $(q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}, q_r = 2.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m})$



流れ方向

平行道路

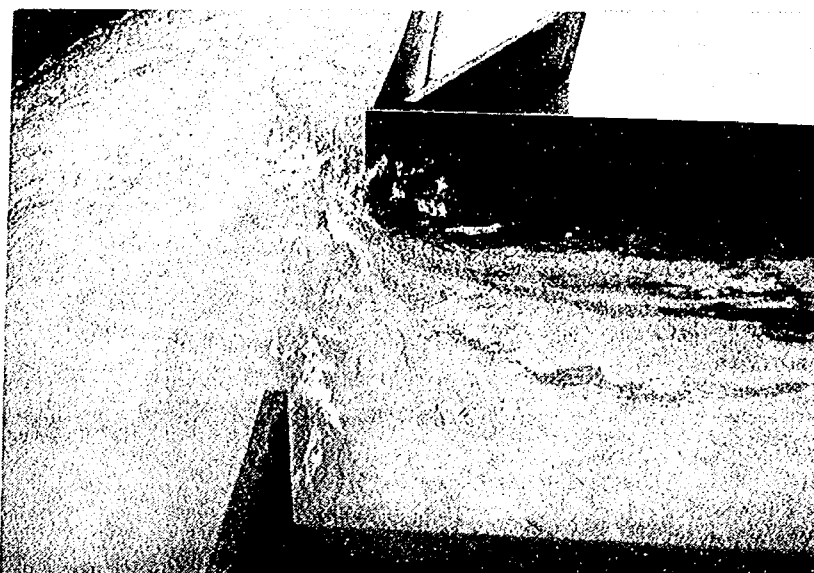
直交道路



流れ方向

平行道路

直交道路

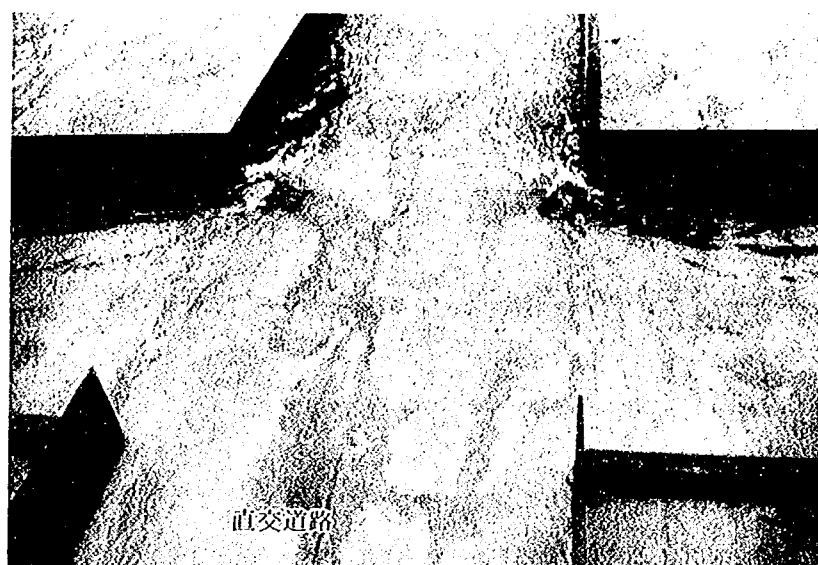


流れ方向

平行道路

直交道路

写真A-3.4 Case 2 - 第一平行道路と直交道路との十字路  
 $(q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}, q_r = 2.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m})$



↑  
流れ方向

平行道路

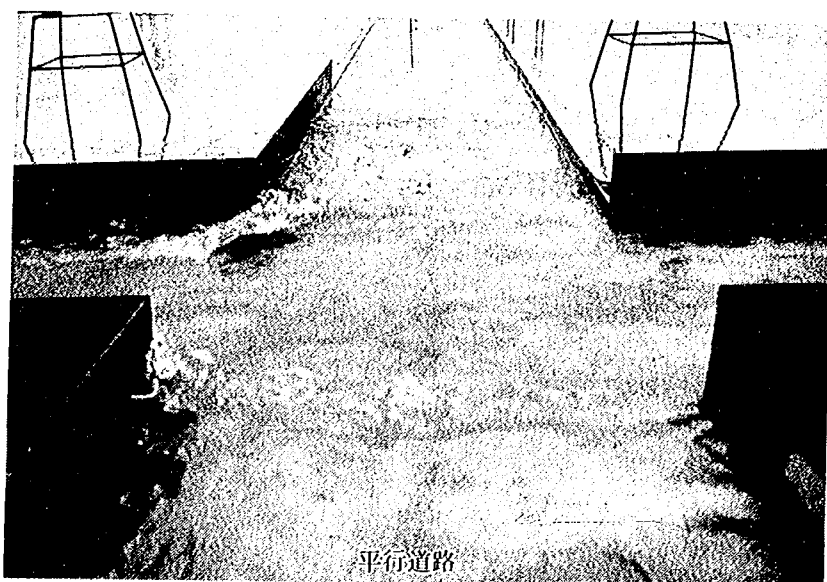
直交道路



平行道路

↓  
流れ方向

直交道路

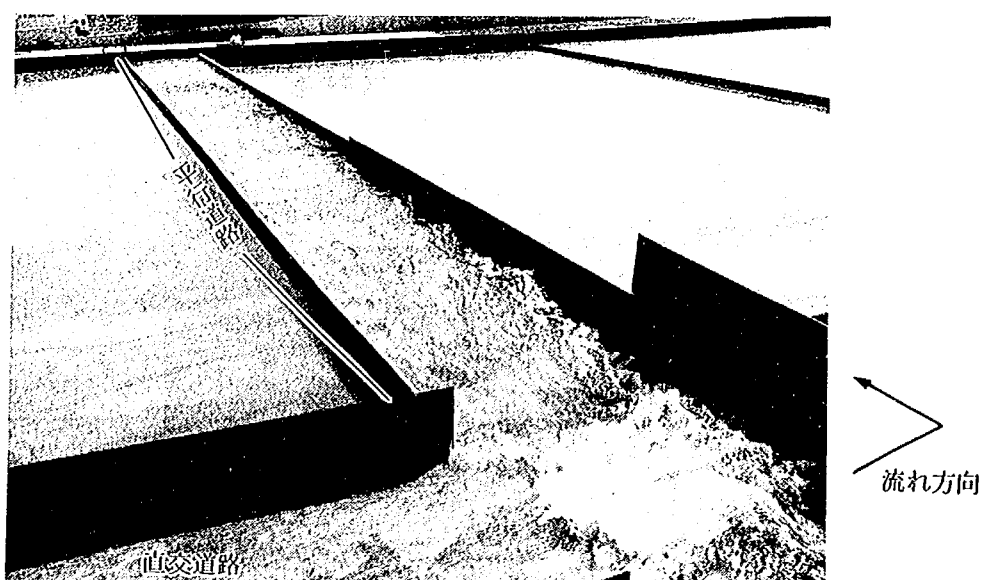
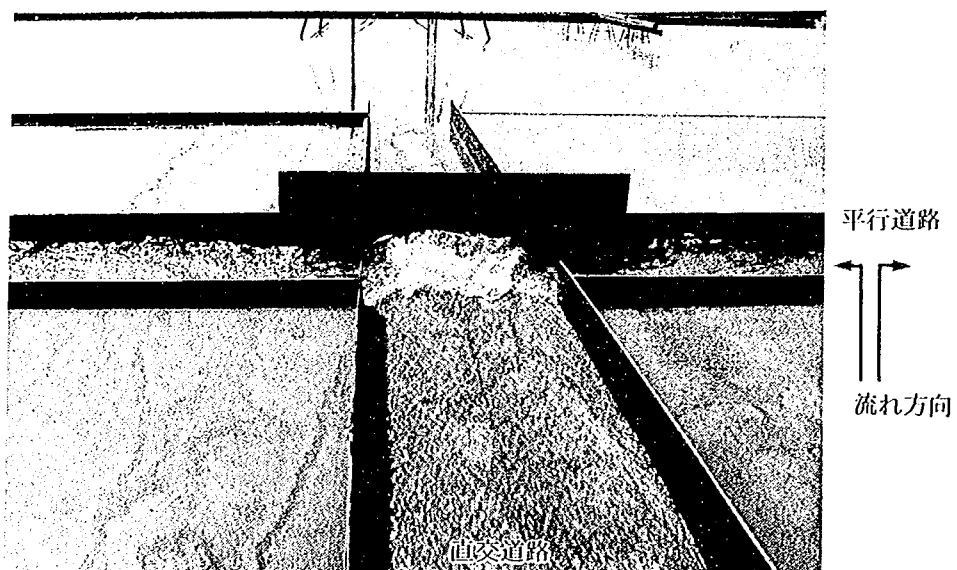
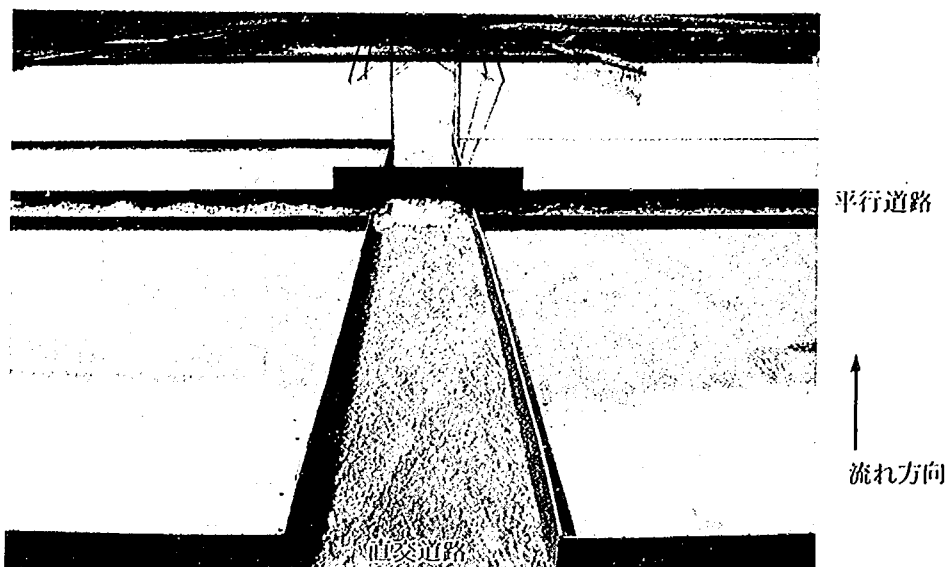


← 流れ方向

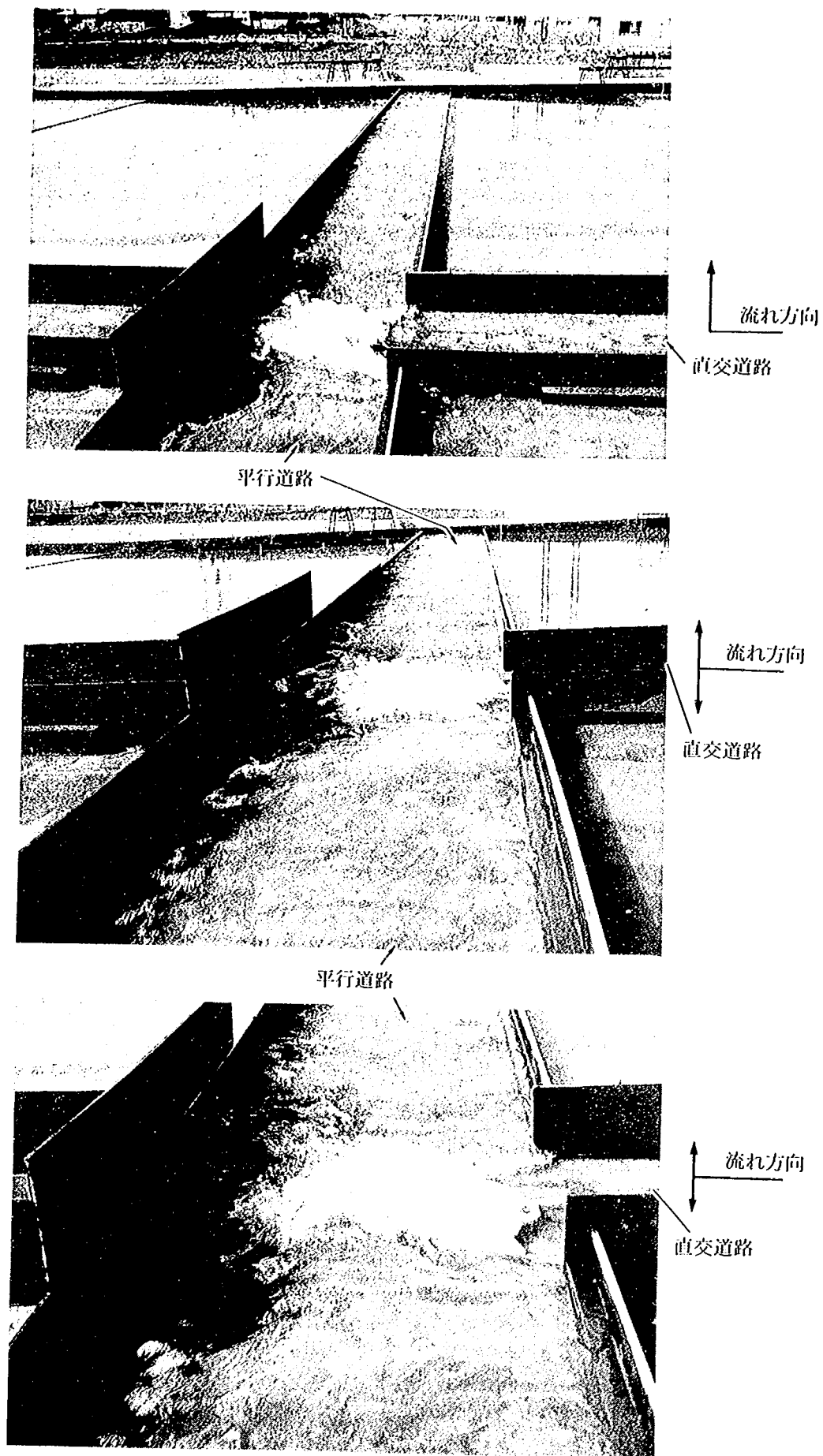
直交道路

平行道路

写真 A - 3.5 Case 2 - 第二平行道路と直交道路との十字路  
( $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 2.6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )

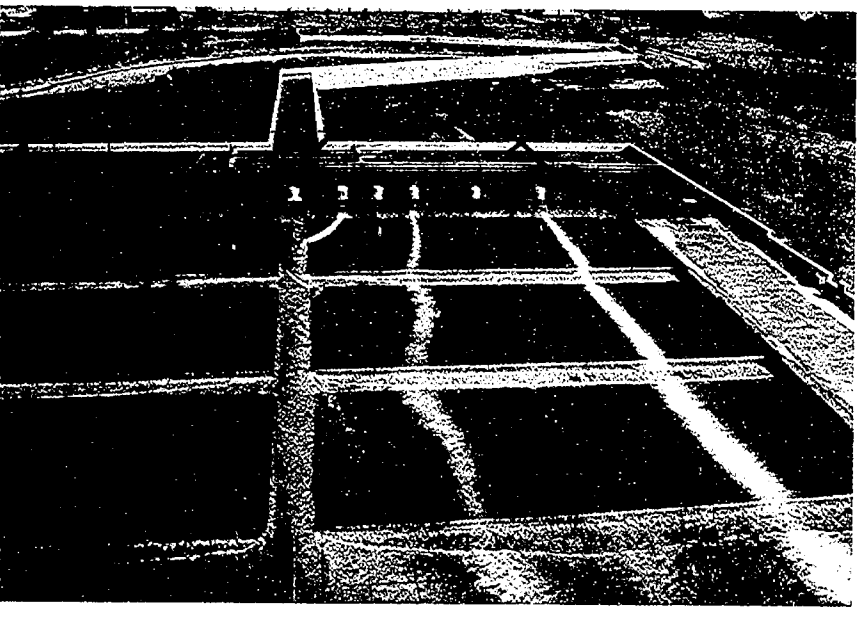
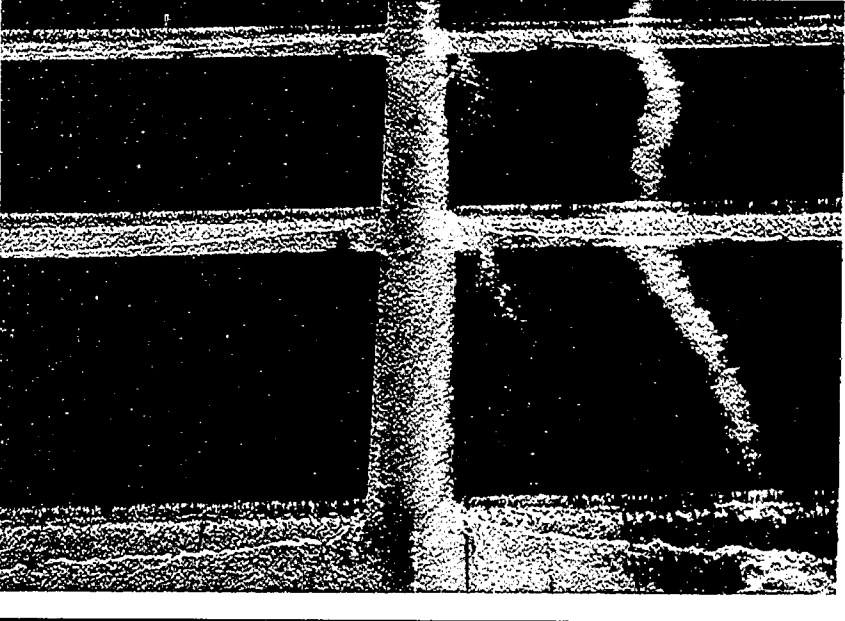
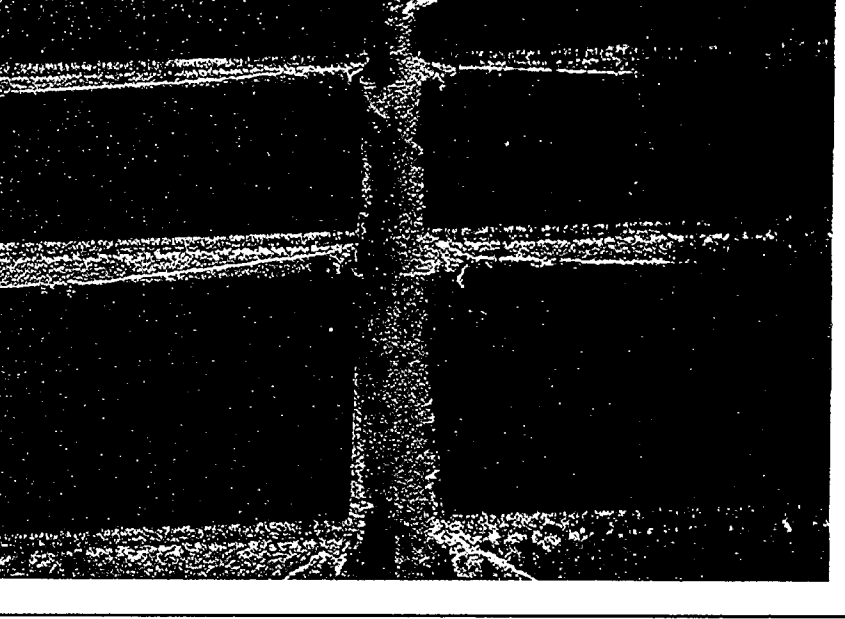


写真A-3.6 Case 4 - T字路  
 ( $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $q_r = 1.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )



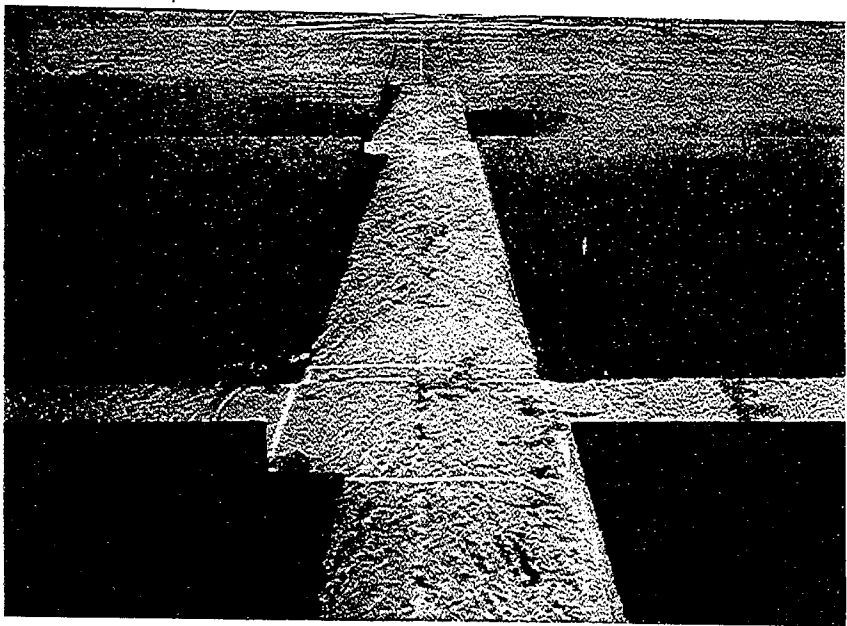
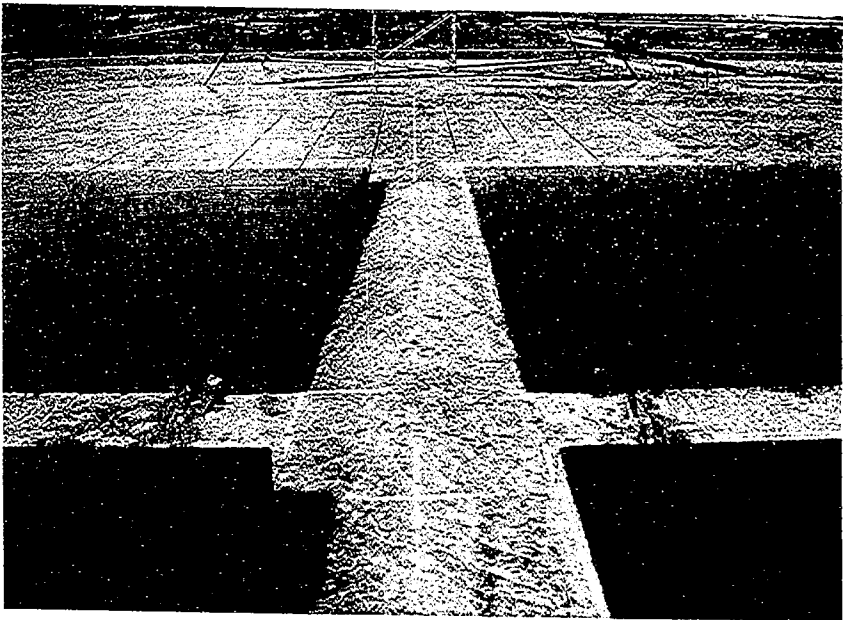
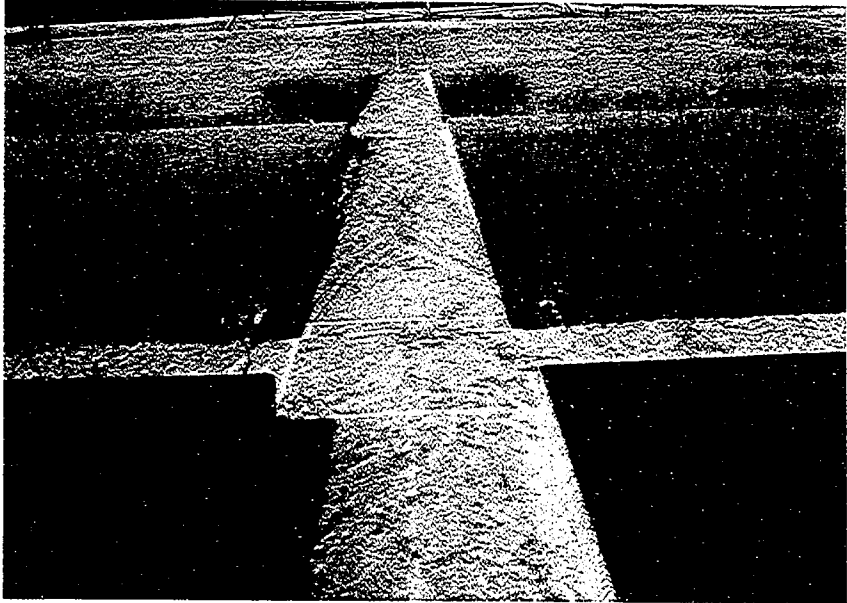
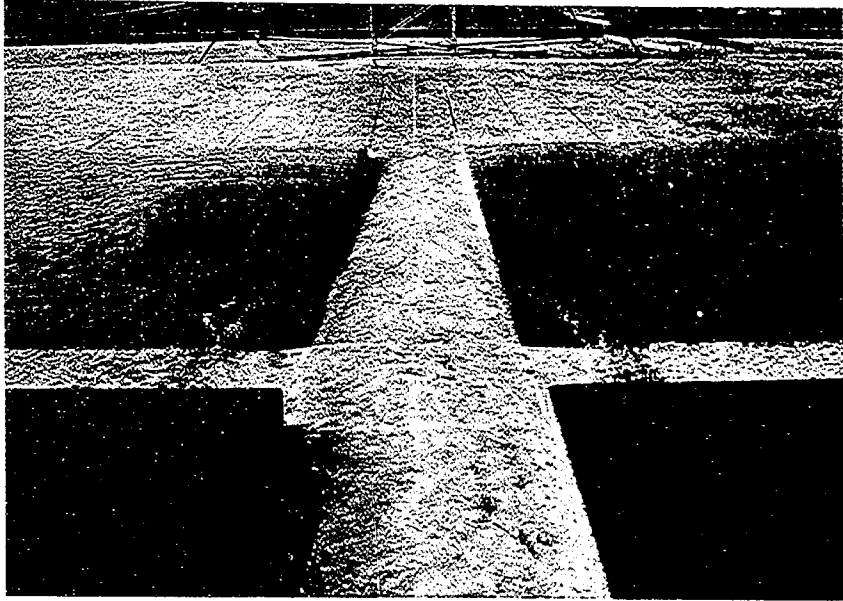
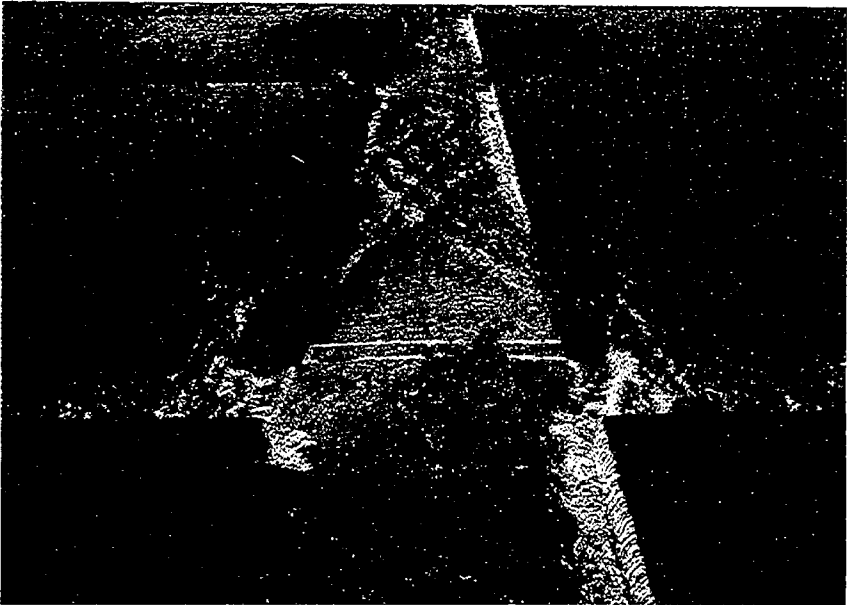
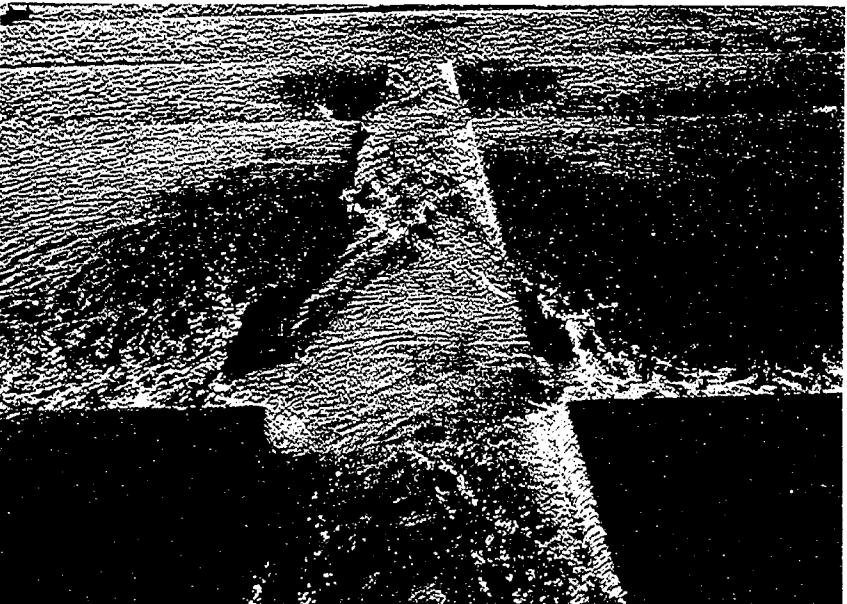
写真A-3.7 Case 4 - T字路  
 ( $q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s/m}$ ,  $q_r = 1.3 \text{ m}^3/\text{s/m}$ )



|                                                  | ① 高規格堤防上の越流状況（全景）                                                                    | ② 道路部から水平地盤上への流入状況（全景）                                                                |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.1$ |    |    |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.2$ |   |   |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.3$ |  |  |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.4$ |  |  |

○ 水平地盤上に建物がない状況（流れは上から下）

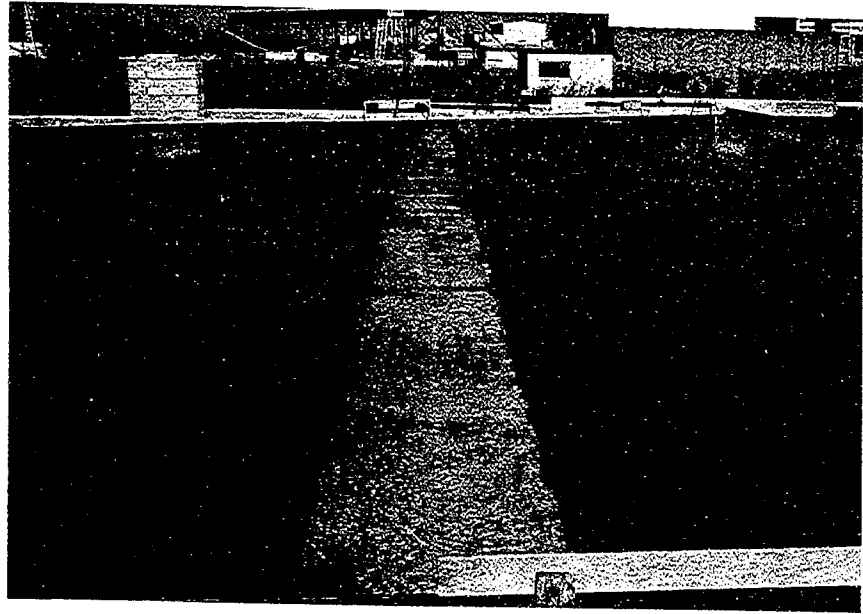
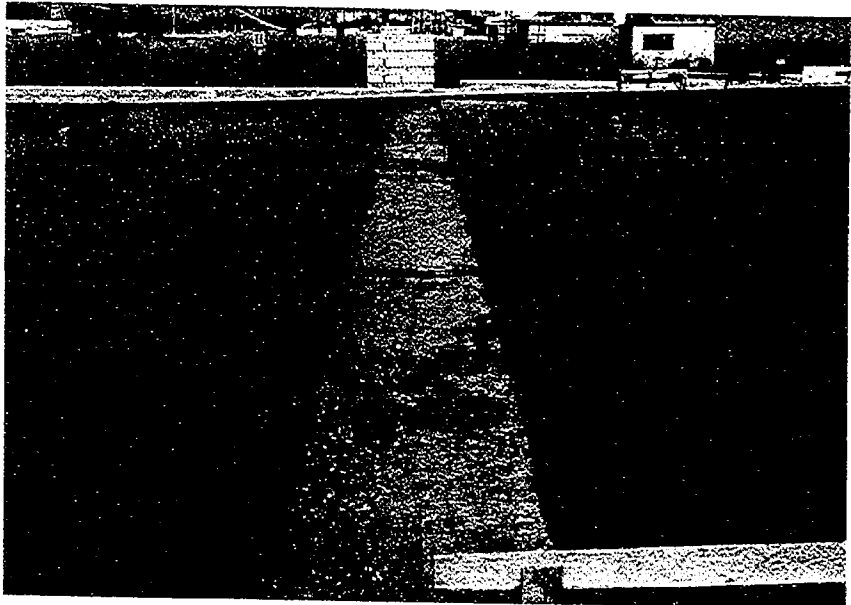
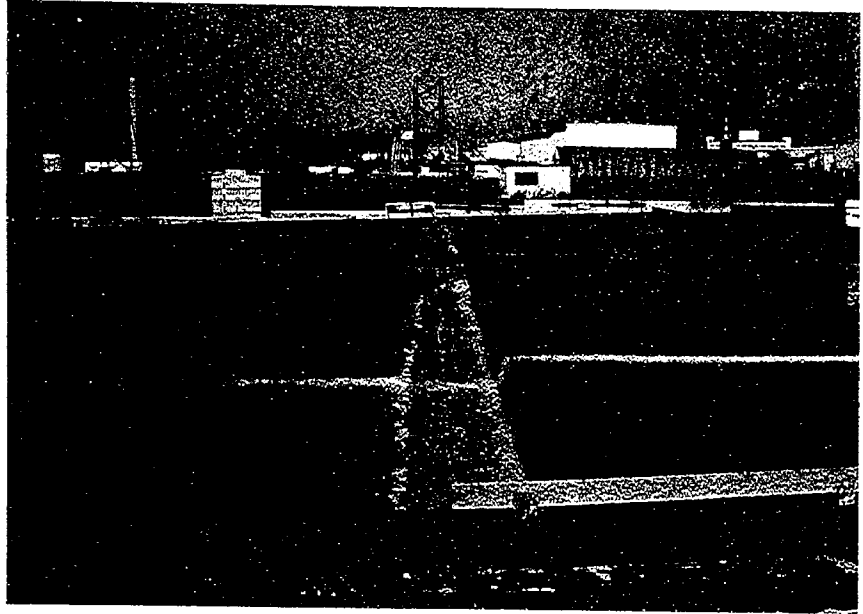
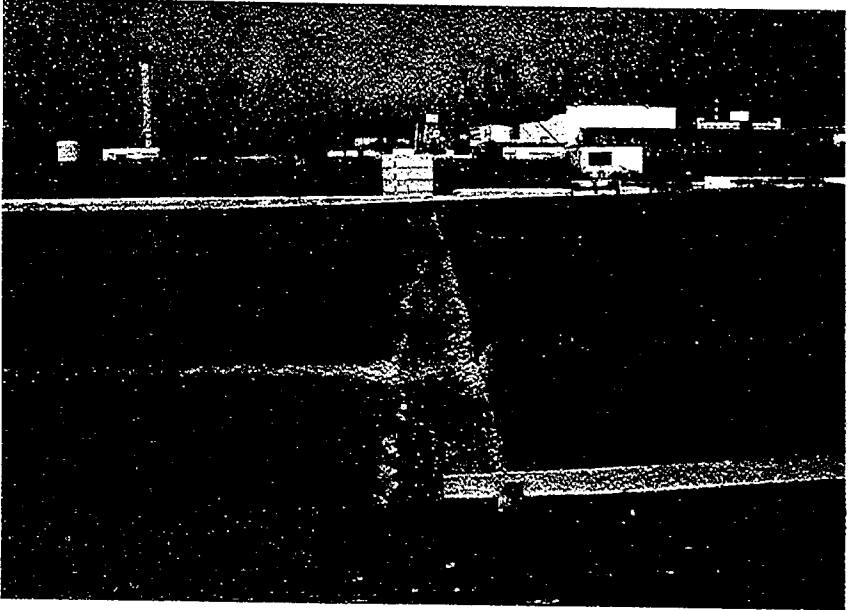
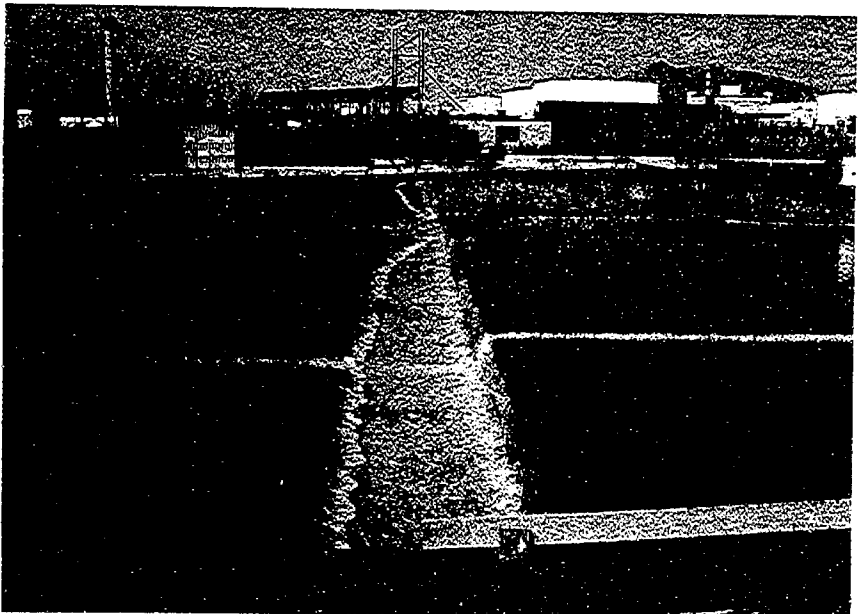
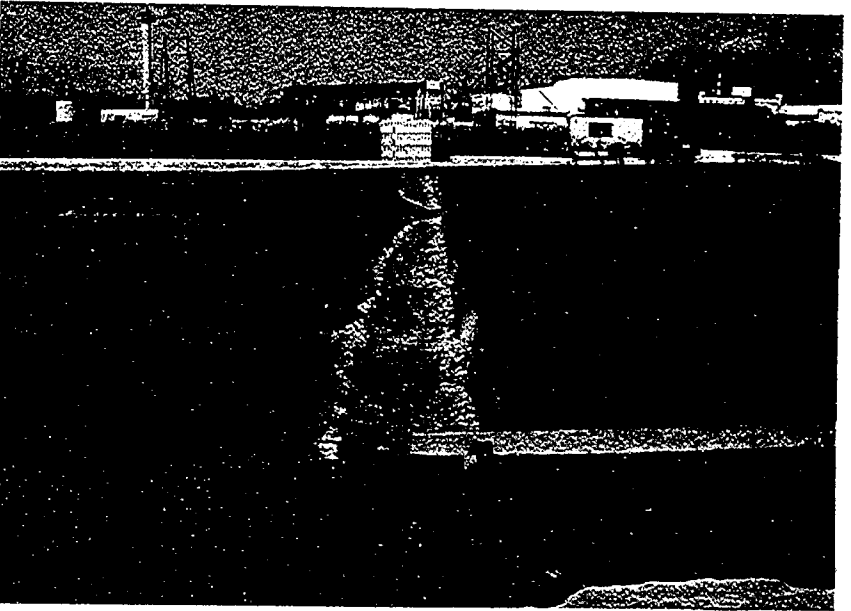
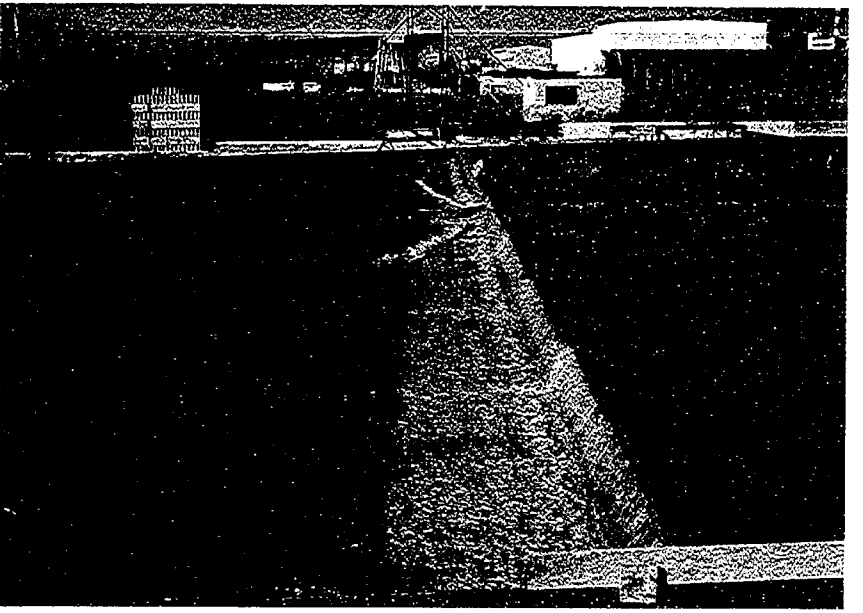


|                                                  | ⑤ 道路部から第2段水平地盤部への流入状況                                                                | ⑥ 道路部から第3段水平地盤部への流入状況                                                                 |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.1$ |    |    |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.2$ |   |   |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.3$ |  |  |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.4$ |  |  |

○水平地盤上に建物がない状況（流れは下から上）

写真 A - 3.9 Case 5

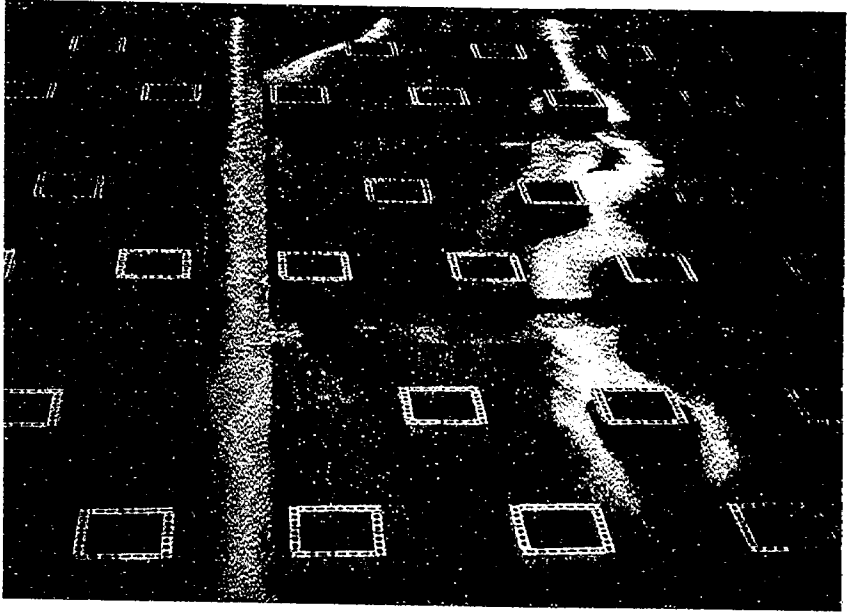
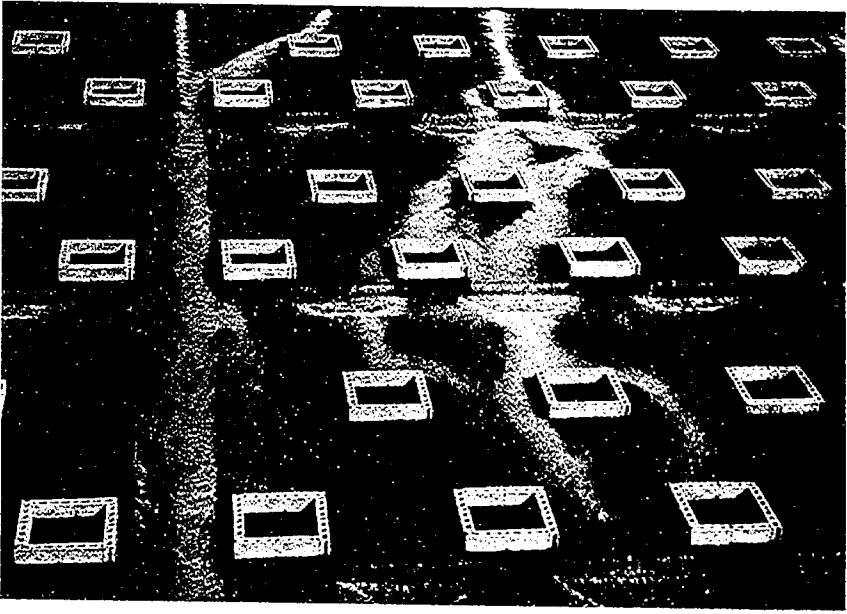
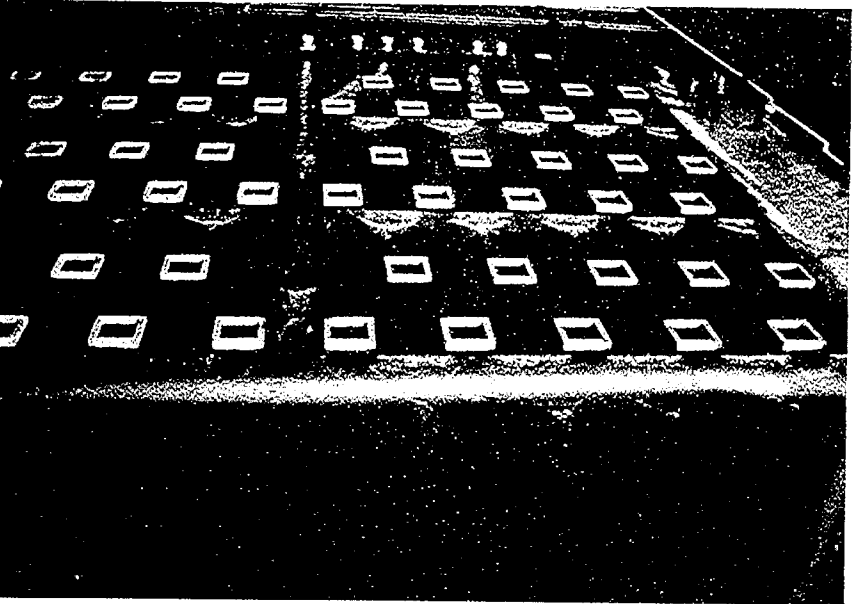
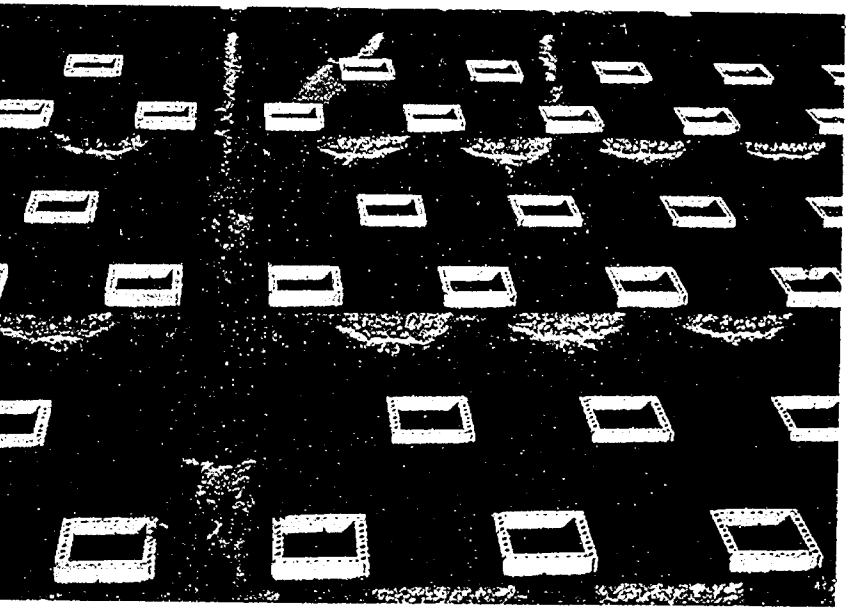
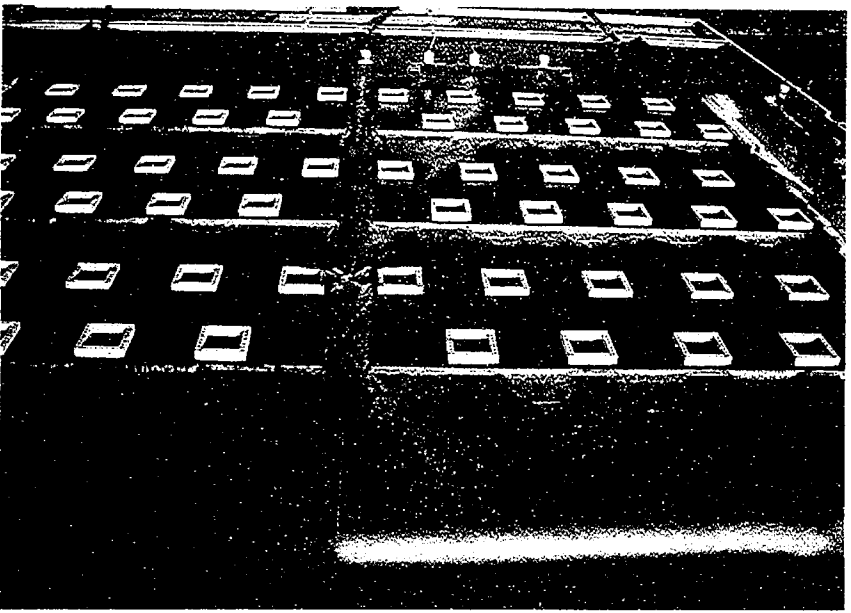
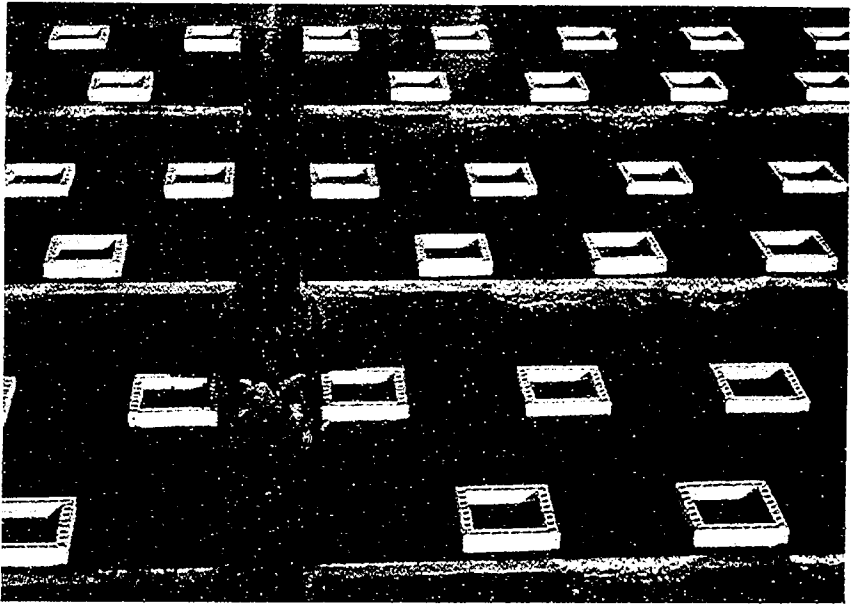


|                                                  | ③ 第1段水平地盤部からの落ち込み状況                                                                  | ④ 第2段水平地盤部からの落ち込み状況                                                                   |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.1$ |    |    |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.2$ |   |   |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.3$ |  |  |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.4$ |  |  |

○ 水平地盤上に建物がない状況（流れは右から左）

写真 A - 3.10 Case 5

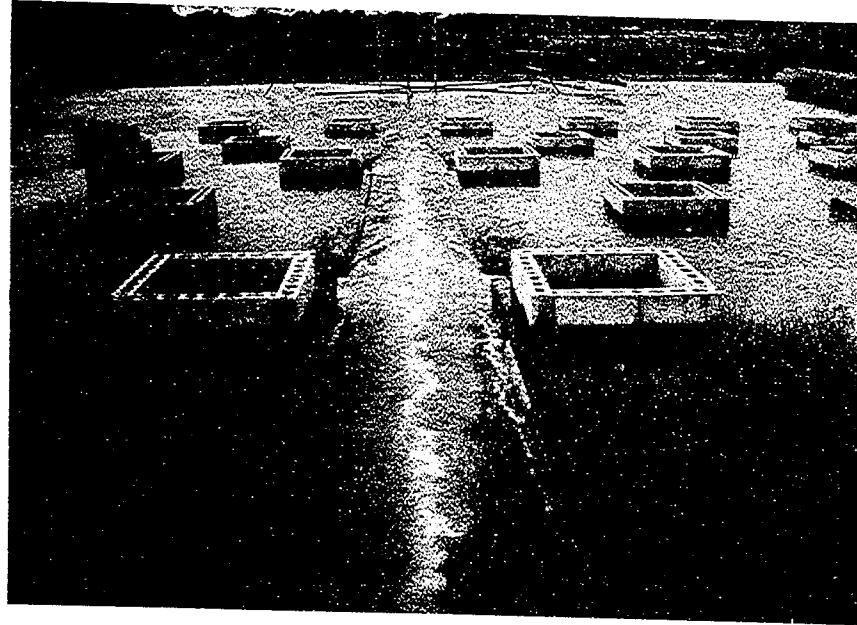
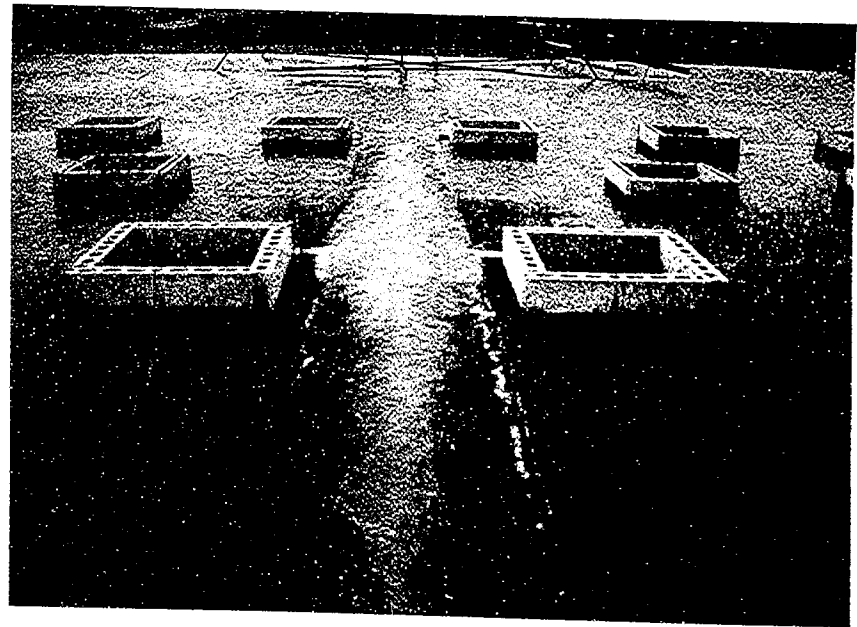
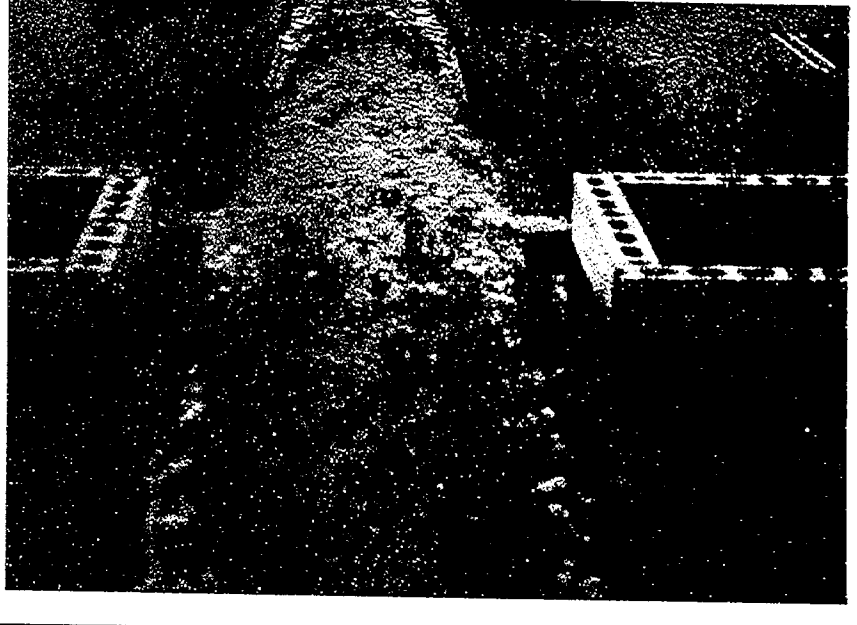
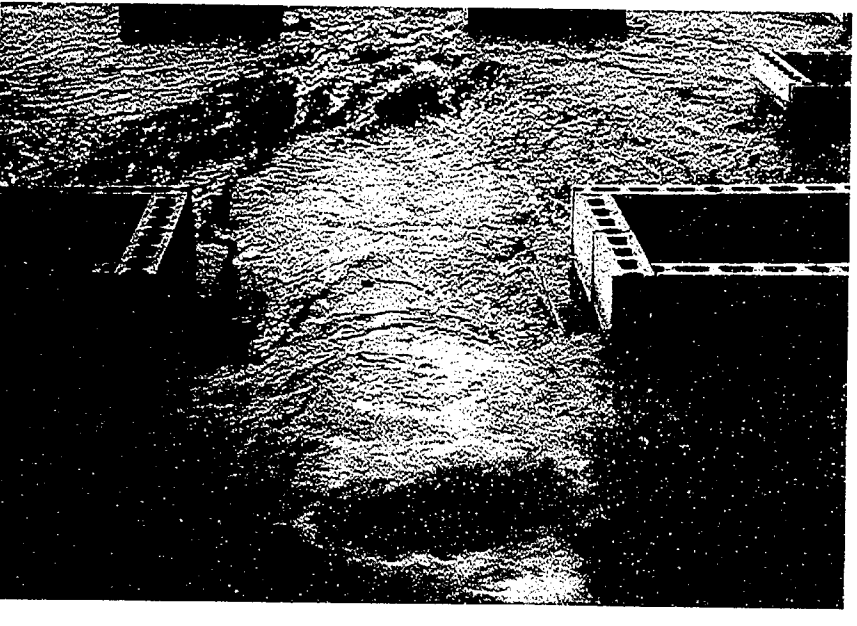
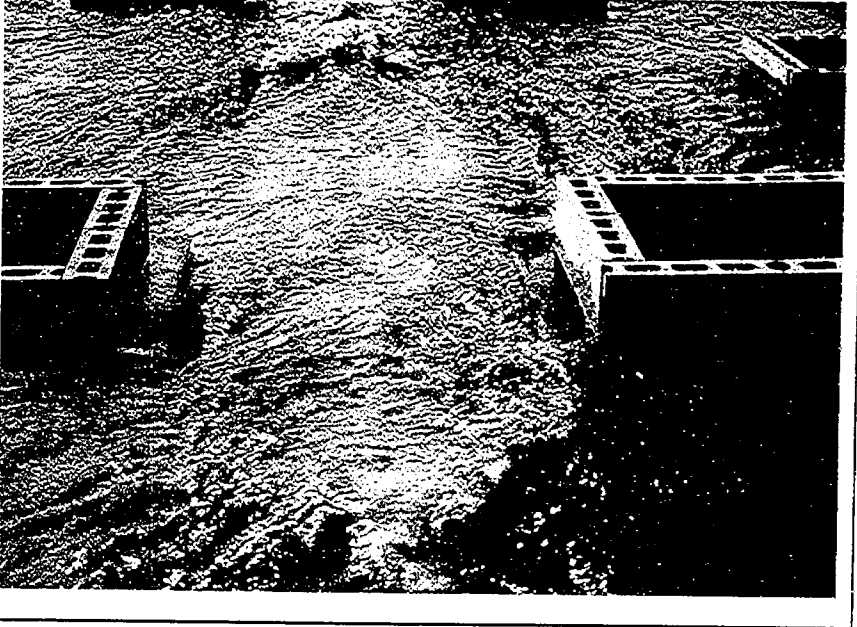
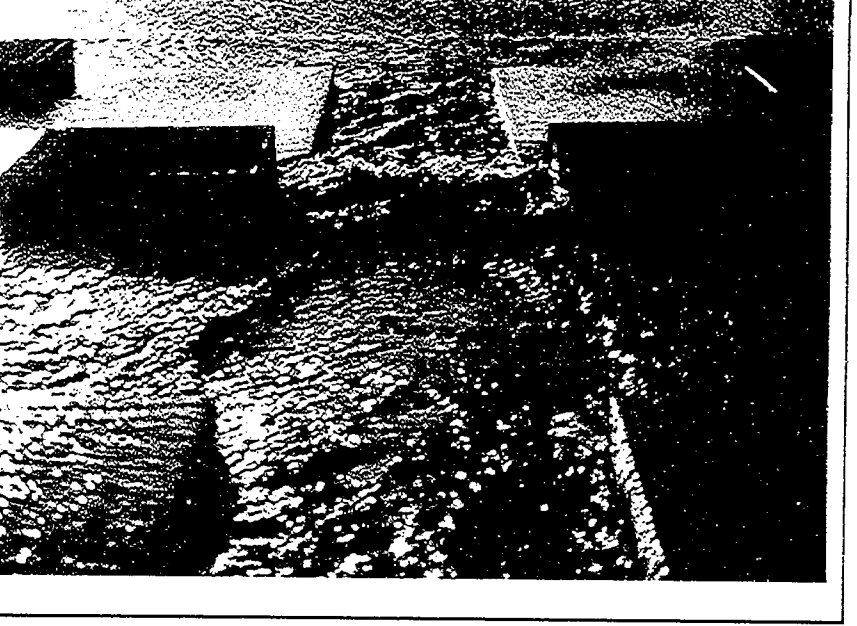


|                                                                   | ① 高規格堤防上の越流状況（全景）                                                                    | ② 道路部から水平地盤への流入状況（全景）                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.1$<br><br>配置Ⅰ |    |    |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.2$<br><br>配置Ⅰ |   |   |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.4$<br><br>配置Ⅰ |  |  |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.2$<br><br>配置Ⅱ |  |  |

○建ペイ率15%の状況（流れは上から下）

写真A-3.11 Case 6, Case 7

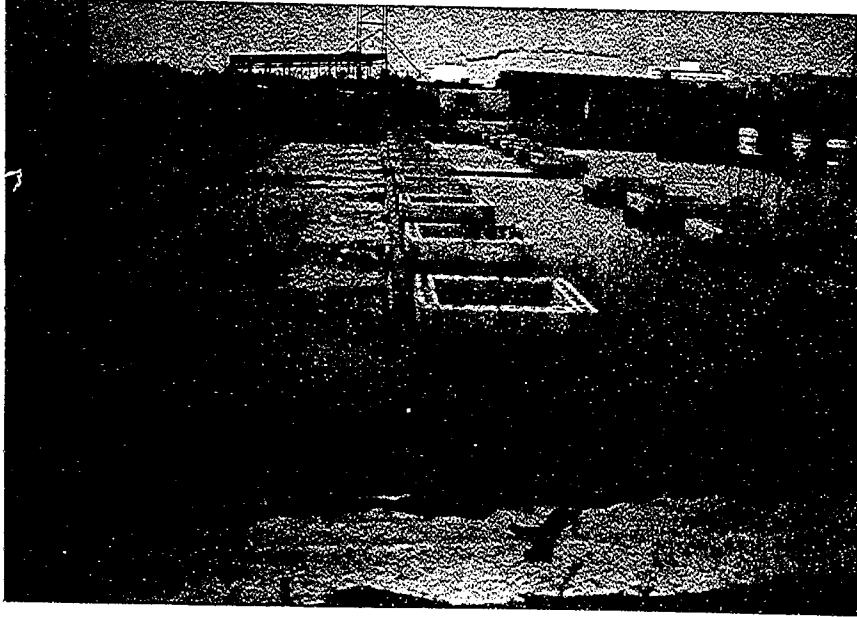
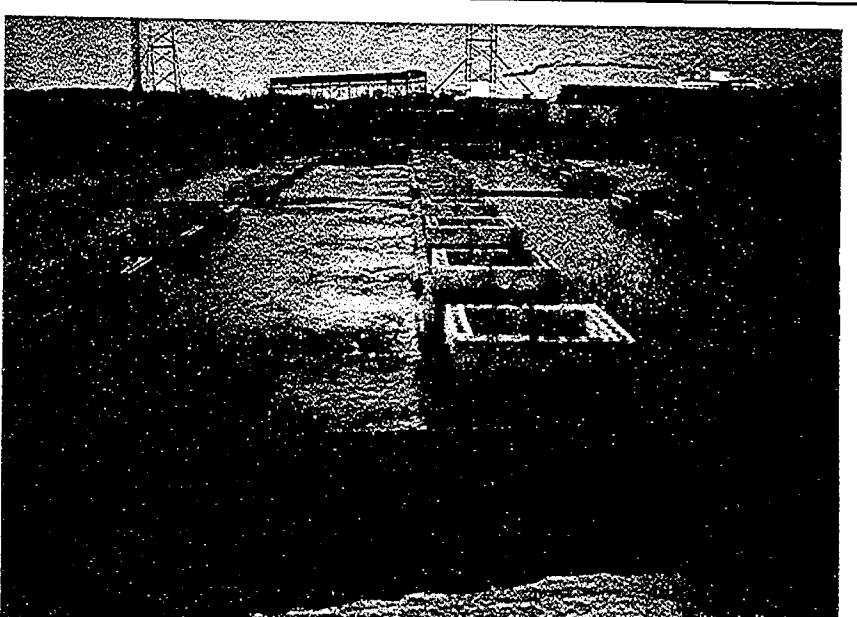
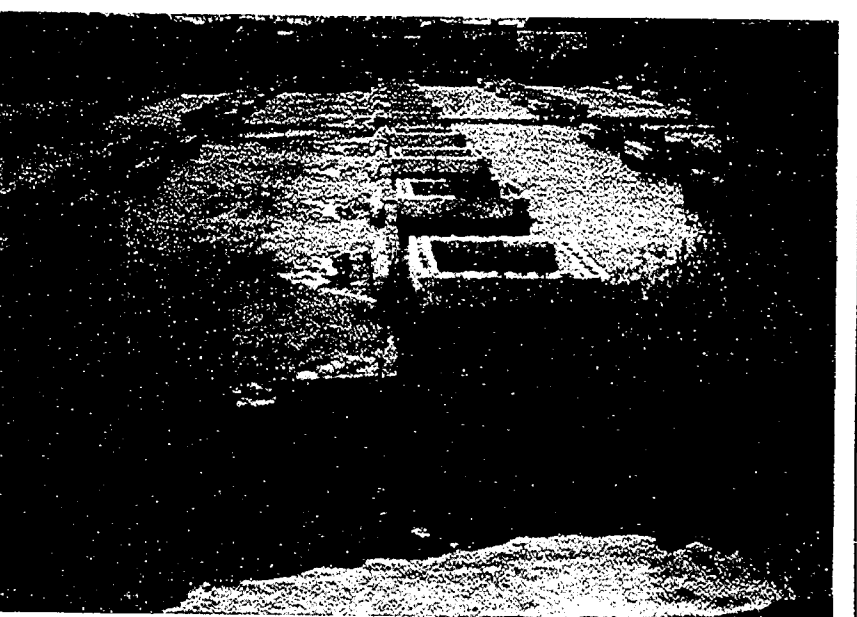
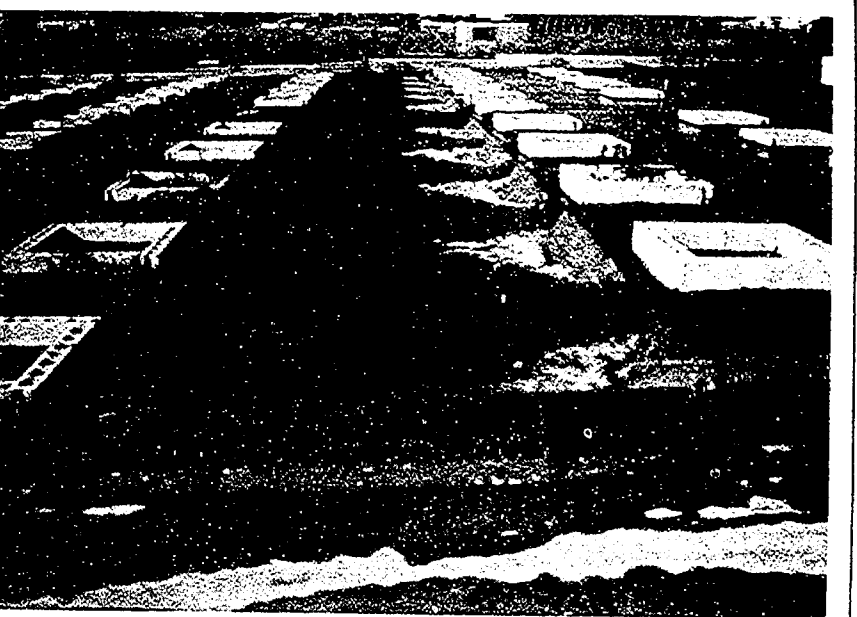
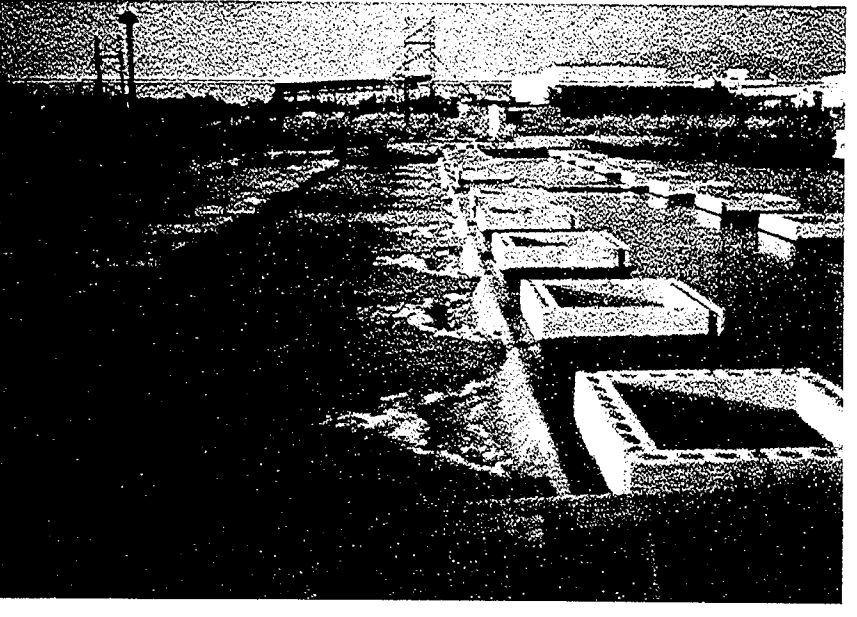
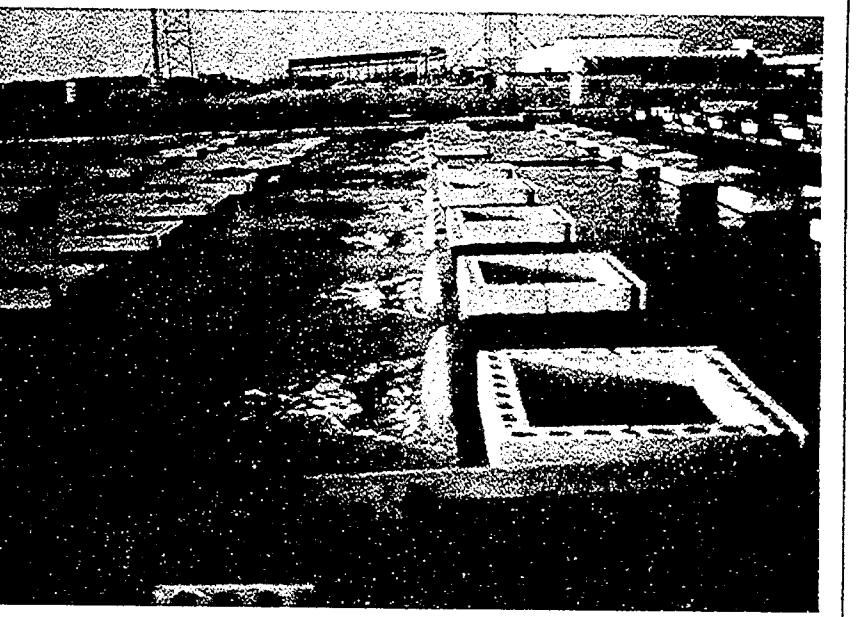


|                                                                     | ③ 第1段水平地盤部からの落ち込み状況                                                                  | ④ 第2段水平地盤部からの落ち込み状況                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.1$<br><br>配置 I  |    |    |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.2$<br><br>配置 I  |   |   |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.4$<br><br>配置 I  |  |  |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.2$<br><br>配置 II |  |  |

○建ペイ率15%の状況（流れは下から上）

写真 A - 3.12 Case 6, Case 7

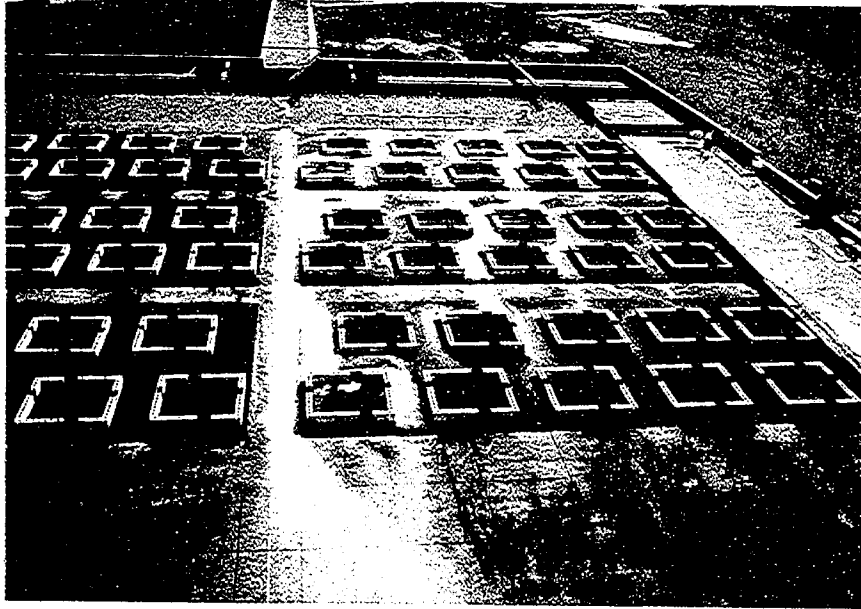
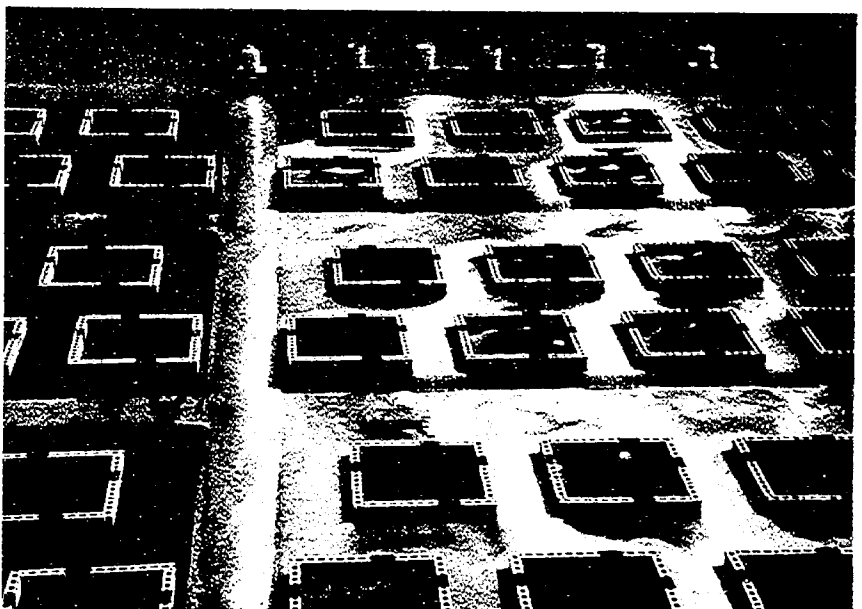
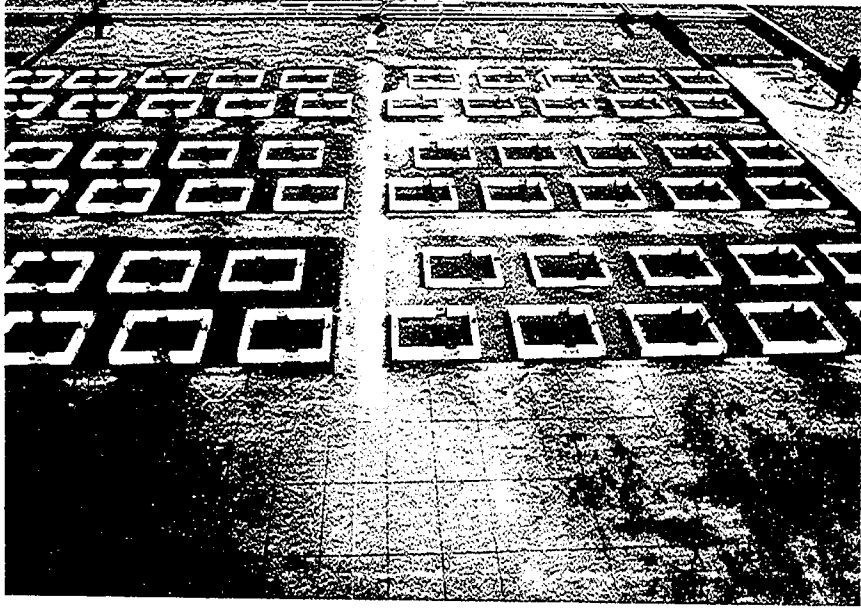
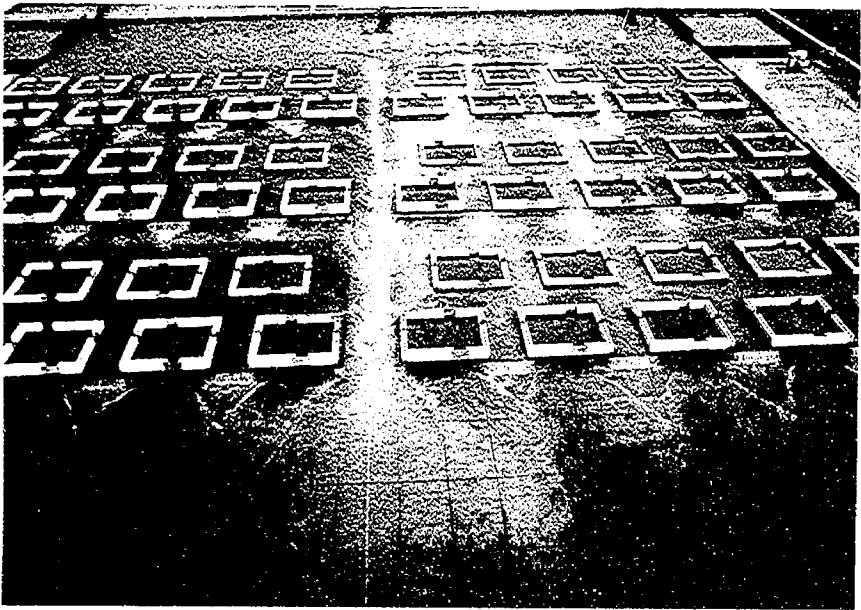
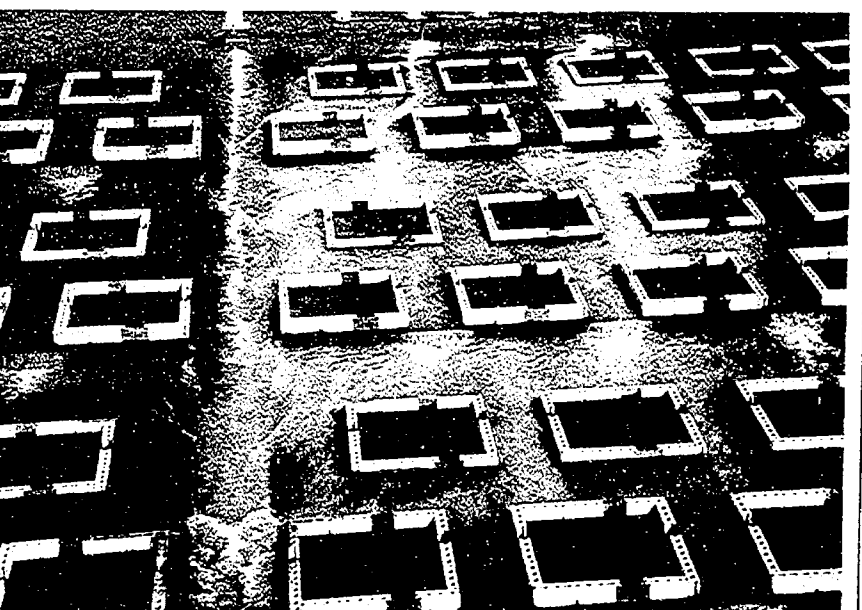


|                                                                     | ⑤ 道路部から第2段水平地盤部への流入状況                                                                | ⑥ 道路部から第3段水平地盤部への流入状況                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.1$<br><br>配置 I  |    |    |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.2$<br><br>配置 I  |   |   |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.4$<br><br>配置 I  |  |  |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.2$<br><br>配置 II |  |  |

○建ペイ率15%の状況（流れは右から左）

写真 A - 3.13 Case 6, Case 7

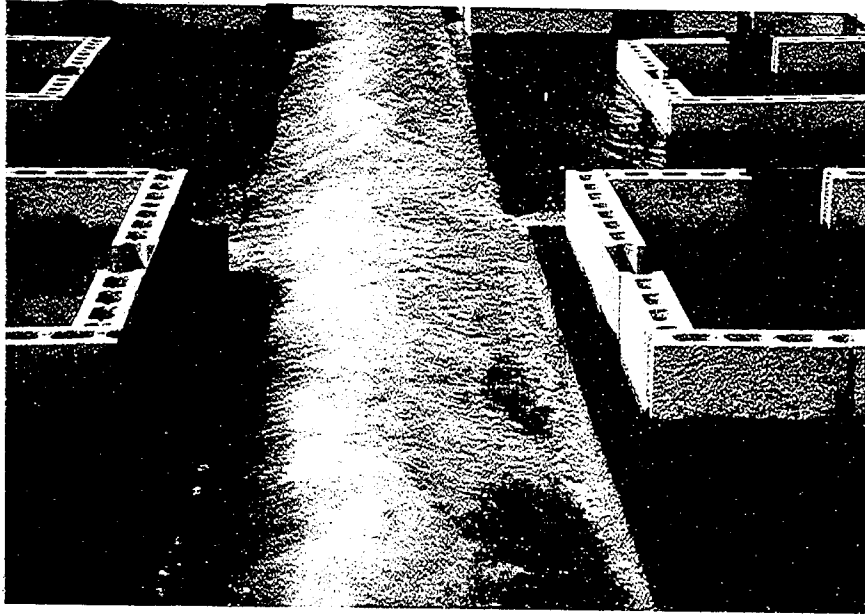
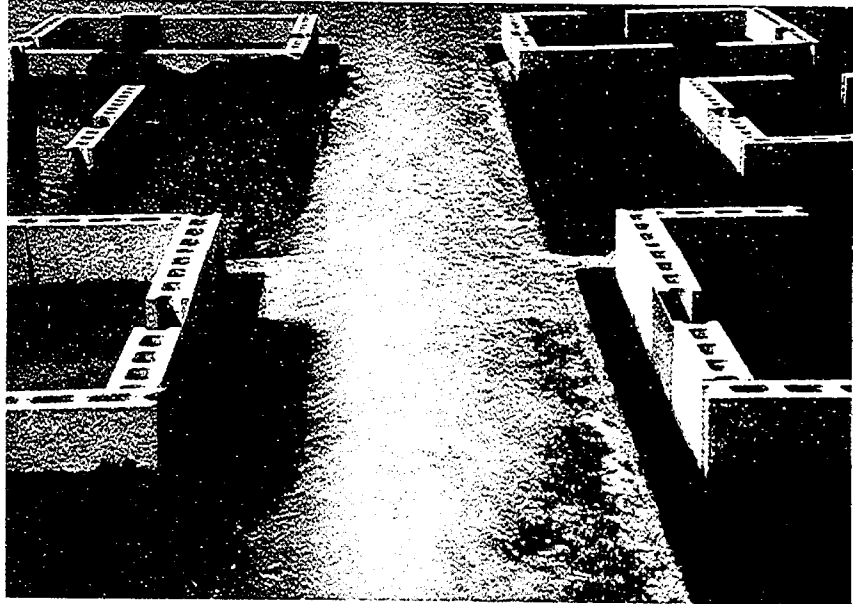
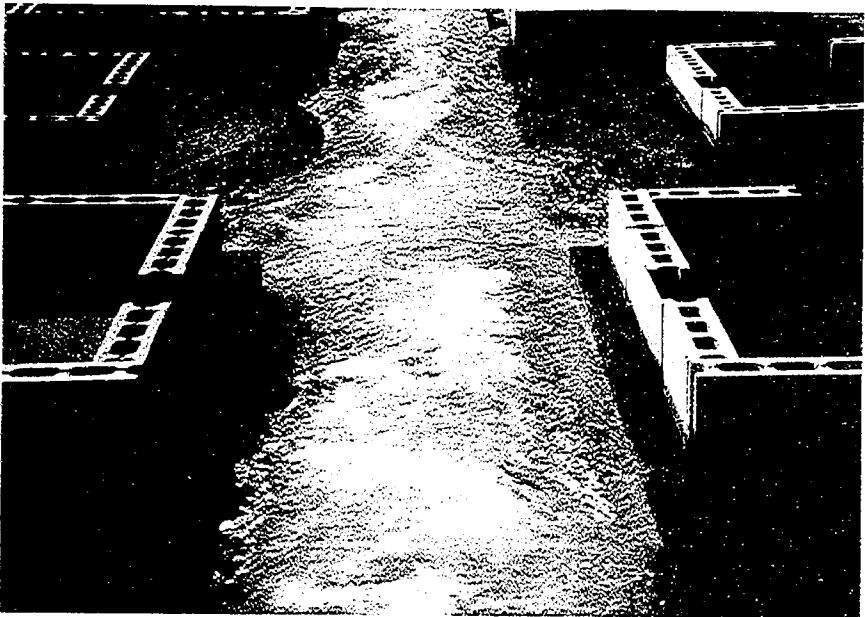
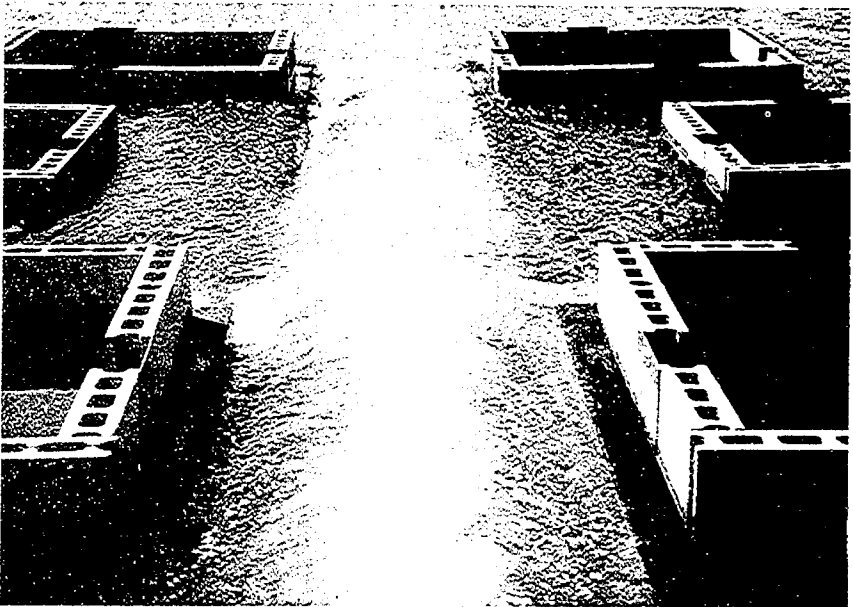
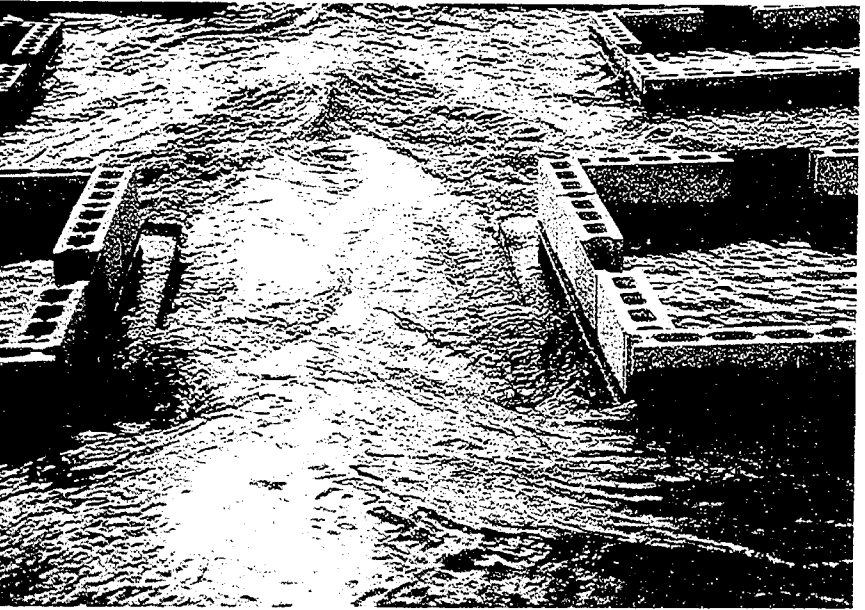
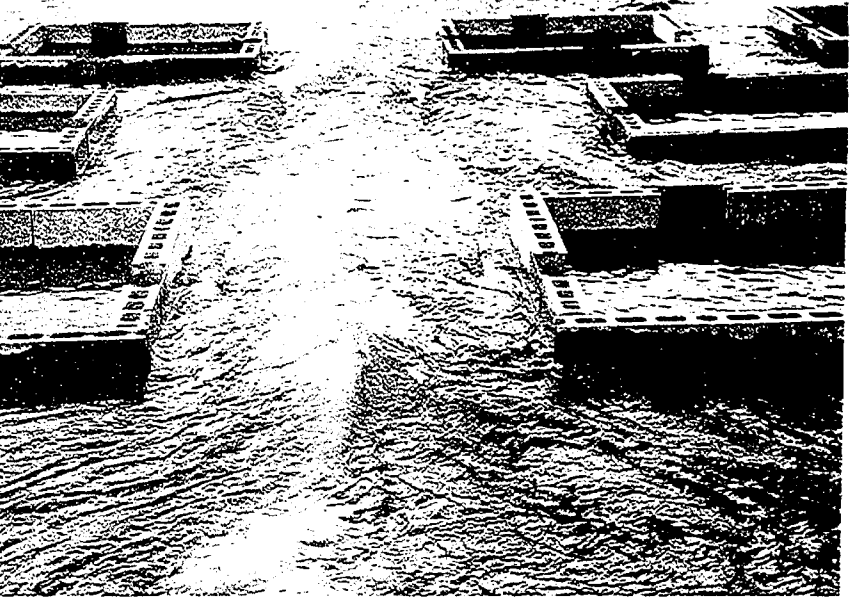


|                                                       | ① 高規格堤防上の越流状況（全景）                                                                    | ② 道路部から水平地盤上への流入状況（全景）                                                                |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.1$ |   |   |
| 単位幅流量<br>$q(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.2$ |  |  |
| 単位幅流量<br>$q(\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.4$ |  |  |

○ 建ペイ率40%の状況（流れは上から下）

写真A－3.14 Case 8

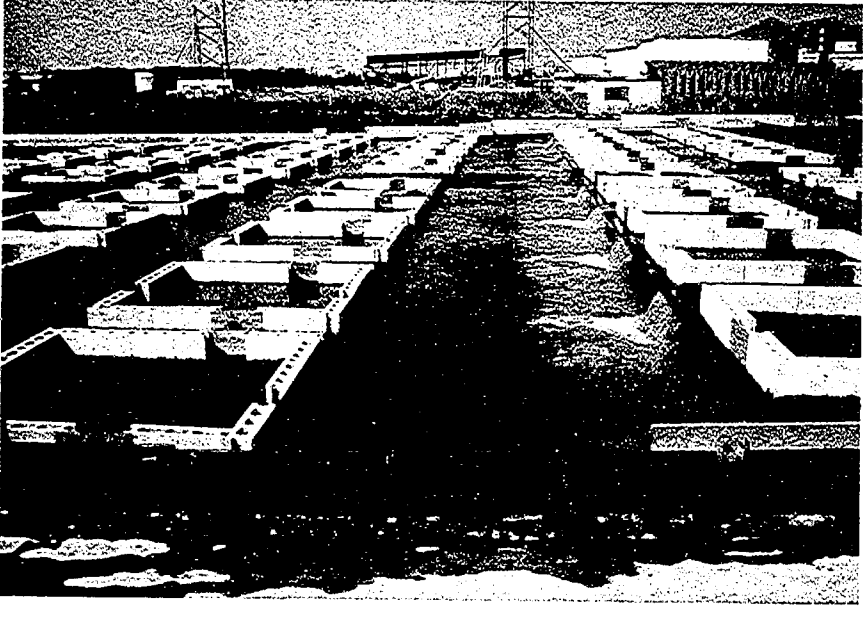
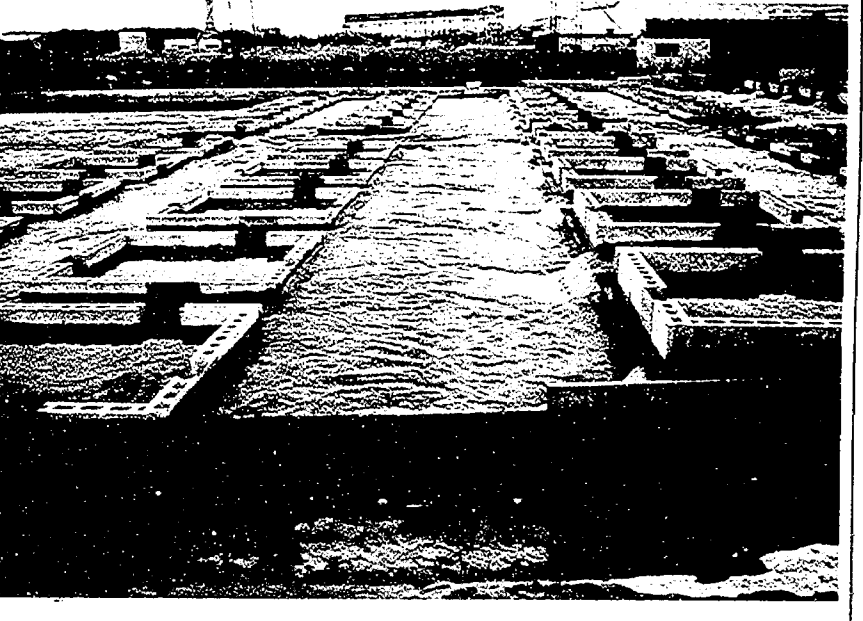


|                                                        | ③ 第1段水平地盤部からの落ち込み状況                                                                  | ④ 第2段水平地盤部からの落ち込み状況                                                                   |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.1$ |   |   |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.2$ |  |  |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.4$ |  |  |

○建ペイ率40%の状況（流れは下から上）

写真A - 3.15 Case 8

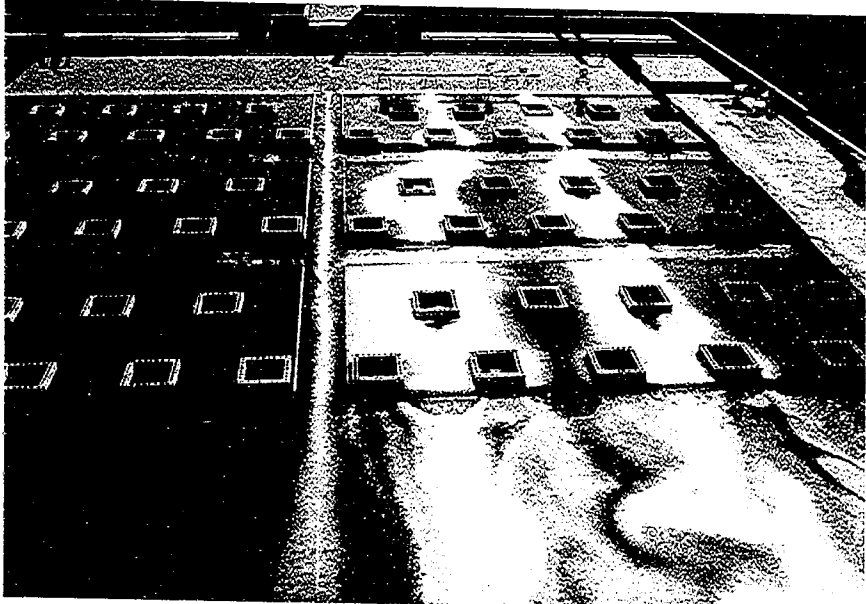
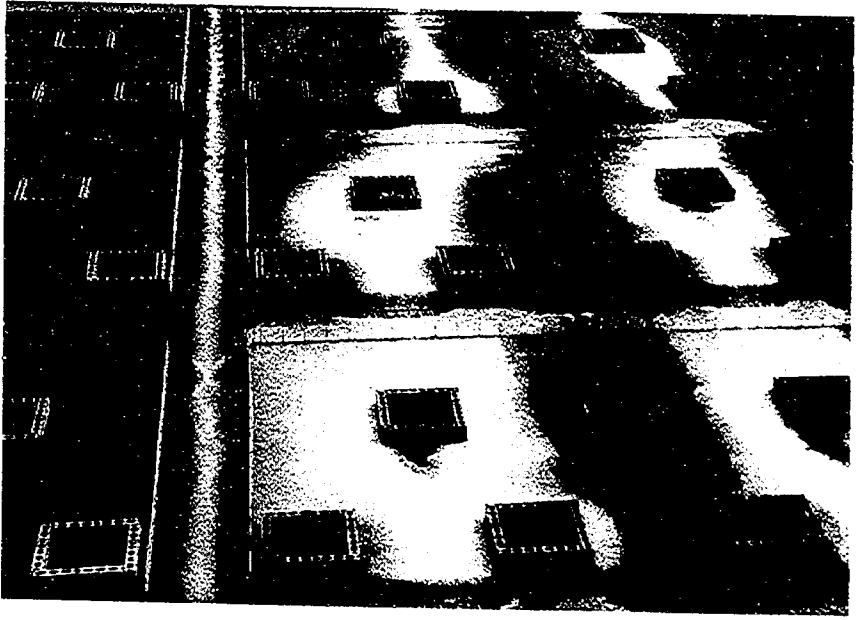
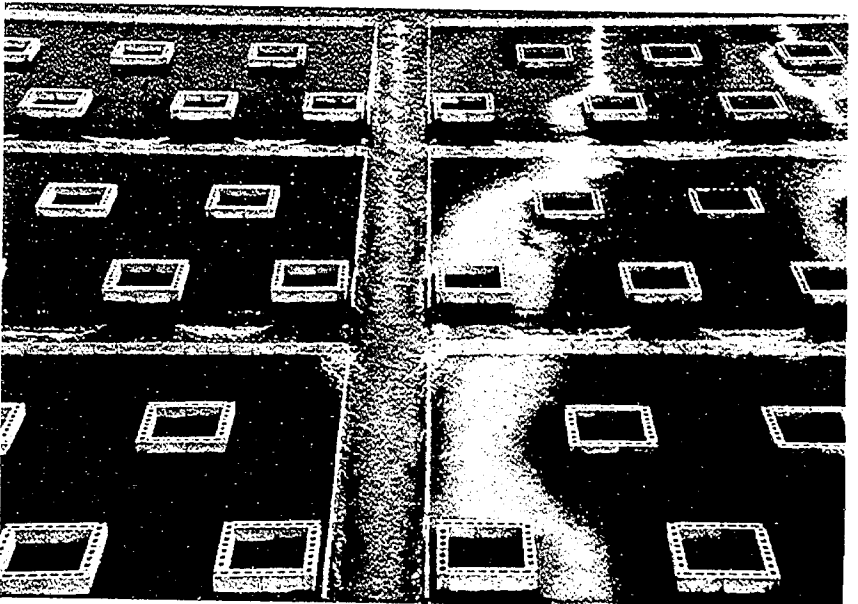
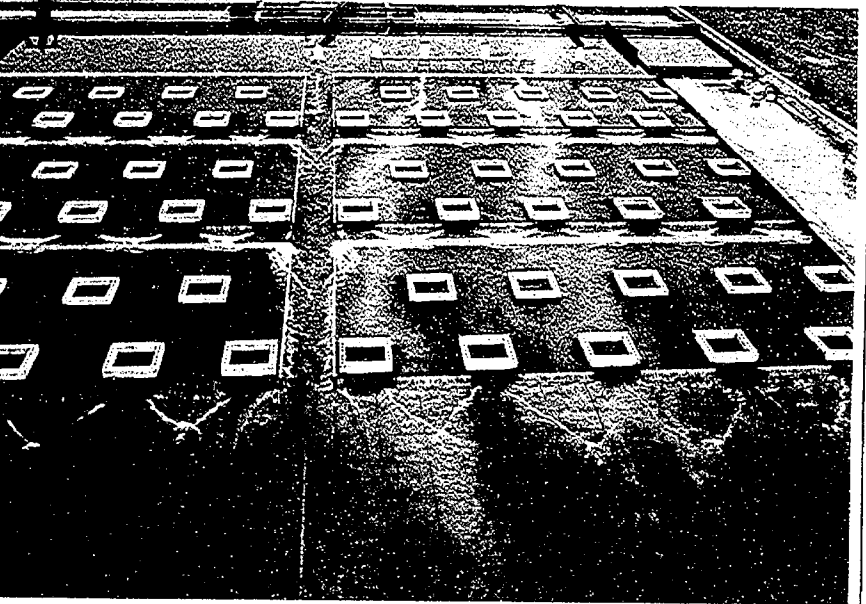
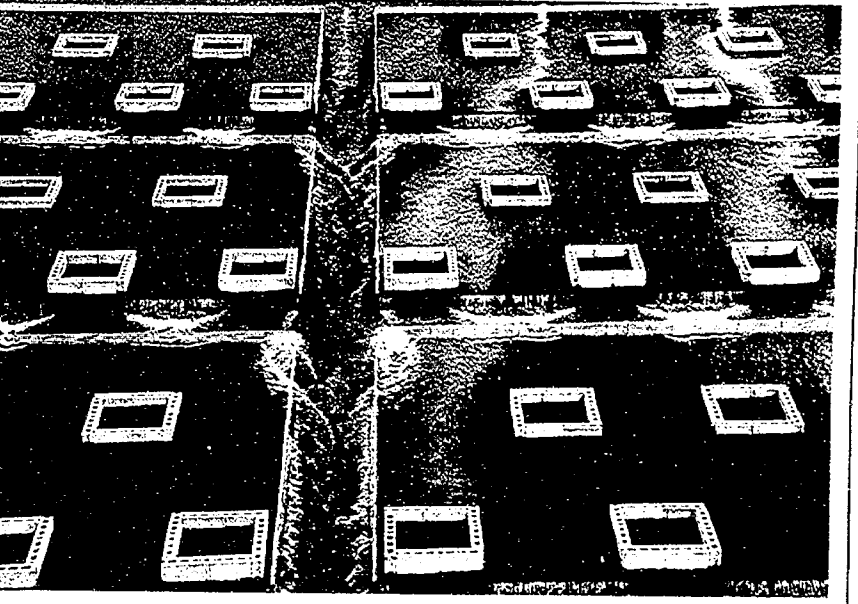


|                                                  | ⑤ 道路部から第2段水平地盤部への流入状況                                                                | ⑥ 道路部から第3段水平地盤部への流入状況                                                                 |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.1$ |   |   |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.2$ |  |  |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.4$ |  |  |

○建ペイ率40%の状況（流れは右から左）

写真A－3.16 Case 8

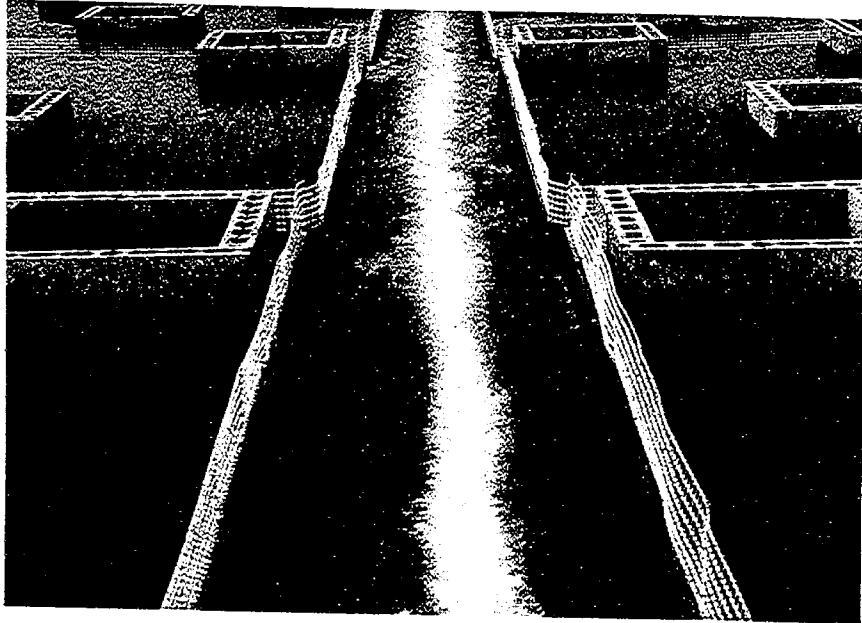
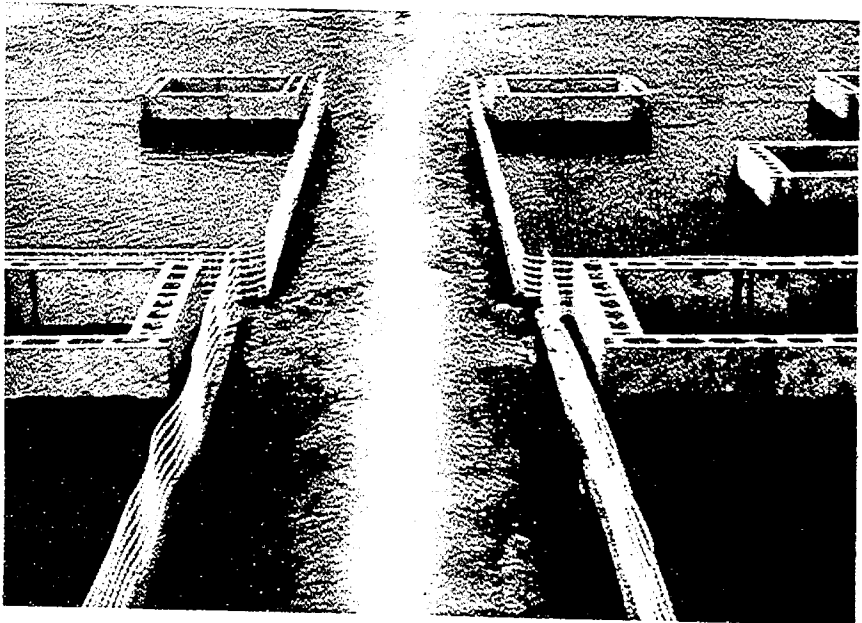
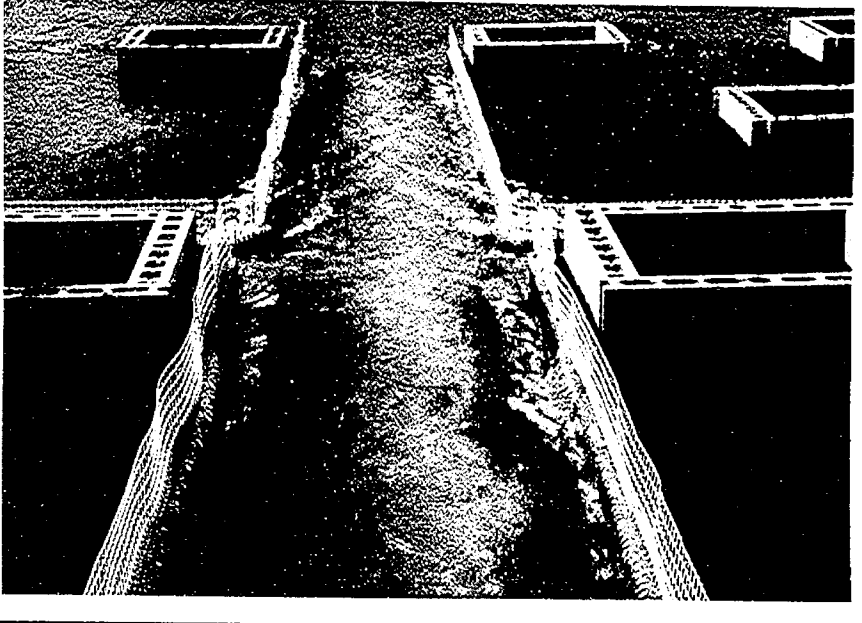
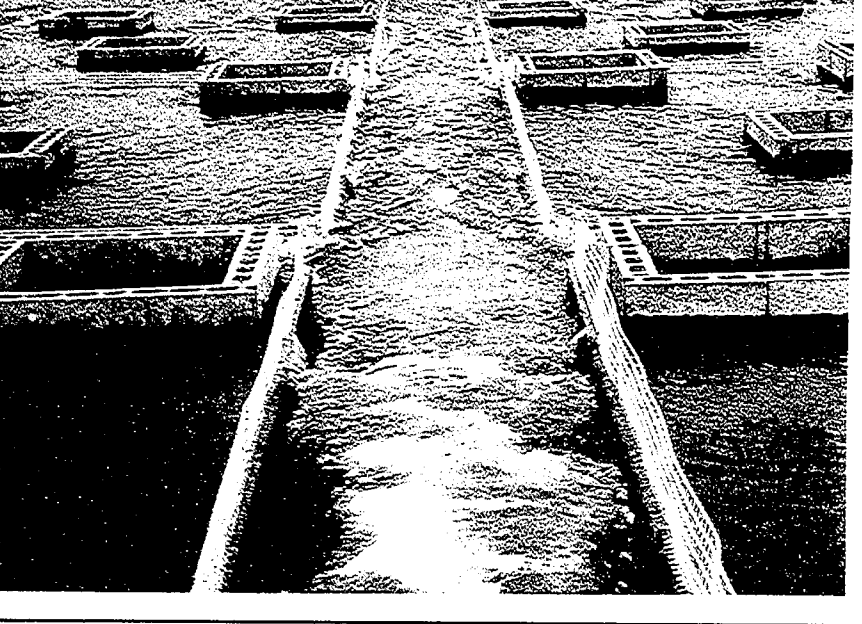
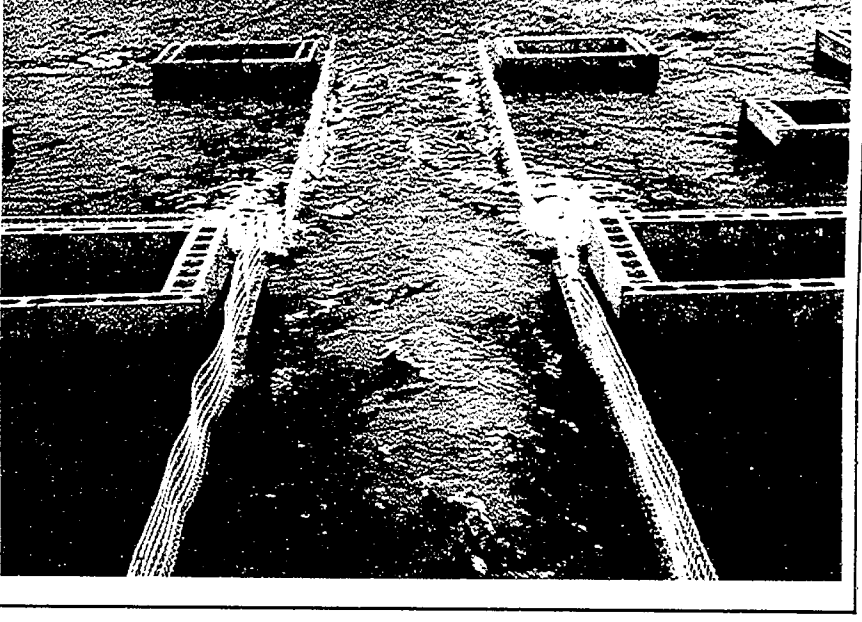


|                                                  | ① 高規格堤防上の越流状況（全景）                                                                    | ② 道路部から水平地盤上への流入状況（全景）                                                                |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.1$ |   |   |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.2$ |  |  |
| 単位幅流量<br>$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$<br>$= 0.4$ |  |  |

○建ペイ率15%＋塀（流れは上から下）

写真A－3.17 Case 10



|                                              | ③ 第1段水平地盤部からの落ち込み状況                                                                  | ④ 第2段水平地盤部からの落ち込み状況                                                                   |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q$ (m <sup>3</sup> /s/m)<br>= 0. 1 |   |   |
| 単位幅流量<br>$q$ (m <sup>3</sup> /s/m)<br>= 0. 2 |  |  |
| 単位幅流量<br>$q$ (m <sup>3</sup> /s/m)<br>= 0. 4 |  |  |

○建ペイ率15%+塀（流れは下から上）

写真A－3.18 Case 10



|                                                        | ⑤ 道路部から第2段水平地盤部への流入状況                                                                | ⑥ 道路部から第3段水平地盤部への流入状況                                                                 |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.1$ |   |   |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.2$ |  |  |
| 単位幅流量<br>$q (\text{m}^3/\text{s}/\text{m})$<br>$= 0.4$ |  |  |

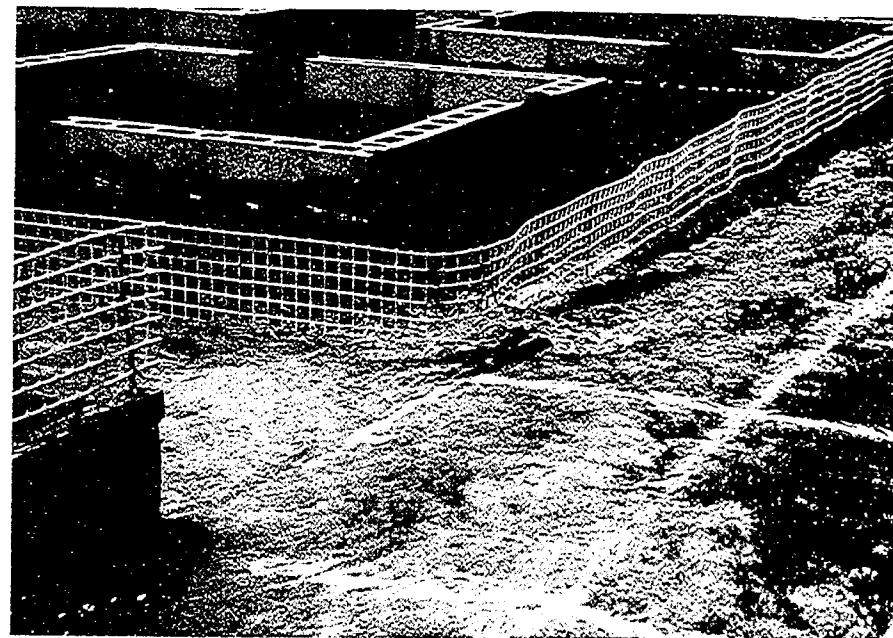
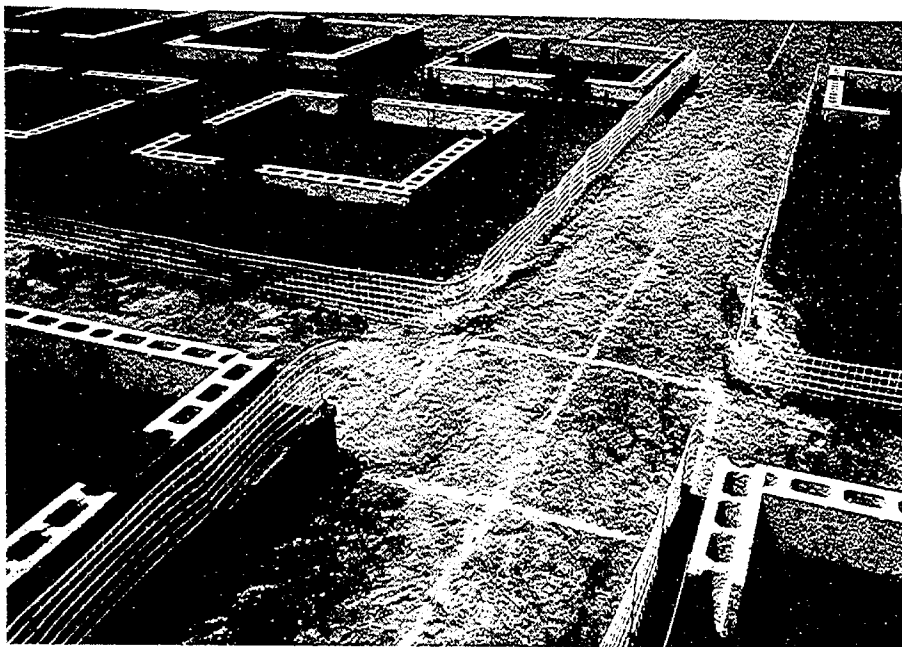
○建ペイ率15%＋塀（流れは右から左）

写真A－3.19 Case 10

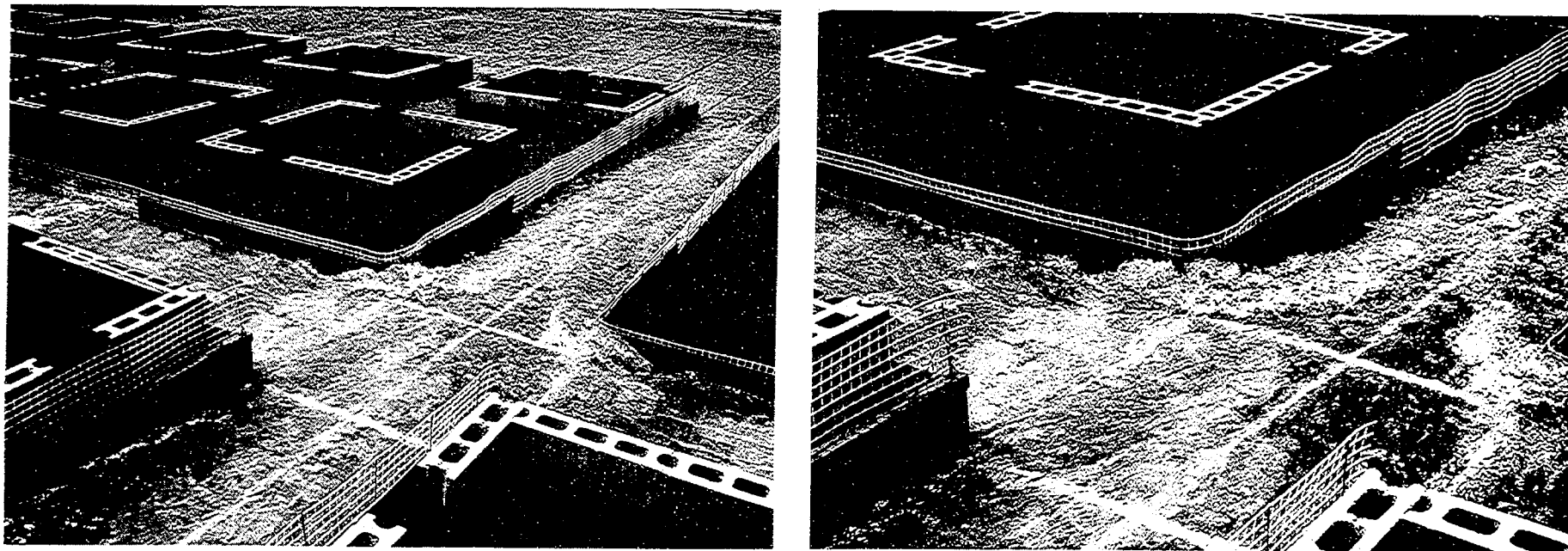


#### 4. 十字路近くの水平地盤上の流速を低減させる工夫

写真 A-4.1 には、Case 11（建ぺい率 40% + 塀）で  $q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  の時の十字路（第二平行道路）の流況を示す。この図を A-3.15（付録 3）と比較すればわかるように、塀があることによって直交道路から水平地盤への水の流入がかなり防がれ、塀の角（かど）での水位の盛り上がりもそれほど大きくない。写真 A-4.2 には、こうした塀の効果をさらに強化することを狙って、同じ実験条件で、十字路の角付近だけ塀を不透過（高さ 1.2 m）にした時の流況が示されている。この写真を写真 A-4.1 と比較すればわかるように、不透過の塀により直交道路から水平地盤への水の侵入は完全に防がれている。しかし、塀の角（かど）での水位の盛り上がりは塀の高さ（1.2 m）に達している。このことは、塀の透過度を小さくすることによって水平地盤の防護効果は高まるが、その分、塀を高くかつ強くする必要が出てくることを意味している。以上から、水平地盤防護の目標程度によって、最適な塀の構造が変わってくると考えられる。



写真A-4.1 第2平行道路の十字路付近の流況  
(建ぺい率40%+塀： $q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )  
(塀：フェンスタイプ 図-2.6 参照)



写真A-4.2 第2平行道路の十字路付近の流況  
(建ぺい率40%+塀： $q = 0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )  
(塀：フェンスタイプ 図-2.6 参照、ただし角の部分に  
不透過高さ1.2mの塀を据付け)

# 高規格堤防上の越流水の挙動

ISSN 0386-5878

— 高規格堤防の水理設計のために(2) —

土木研究所資料第 3220 号

平成 5 年 11 月 (1993)

宇多高明, 藤田光一, 布村明彦

## 要 旨

高規格堤防の設計においては, 超過洪水時に発生すると予想される越流に対して十分な強度を持たせることが最も重要な設計要件の1つとなる。高規格堤防の裏のりでは通常の土地利用が前提になっていることから, 堤防越流時の裏のり上の流れは通常堤防(超過洪水対策を考えない堤防)に比べて相当複雑になる。このため, 上記の設計においては, 越流水の挙動についての十分な理解が必要である。そこで, 典型的な高規格堤防の形態を数種想定し, それらの直角越流模型を作成し, 堤防上の越流水の挙動を調べる実験を行った。その結果から, 堤防形態と越流特性との関係を明らかにし, また, 越流水の挙動に関して高規格堤防の設計上留意すべき点を示した。

キーワード: 高規格堤防, 越流, 水理設計, 土地利用形態, 超過洪水対策

郵便はがき

五十円切手  
をはいて下  
さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

河川部河川研究室  
行

No. \_\_\_\_\_

No. \_\_\_\_\_

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第 3220 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印