

土 木 研 究 所 資 料

樹林帯の土石流制御効果に関する 水理模型実験報告書

平成2年3月

建設省土木研究所
砂防部砂防研究室

「Copyright © (1990) 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。」

Hydraulic Model Tests on the Debris Flow Control with Sabo Tree Zones

Sabo Division, Sabo Department
Head of Division : Takahisa Mizuyama
Senior Researcher : Michiya Irasawa
Akihisa Fukumoto

Synopsis

Sabo facilities utilizing trees such as Sabo tree zones have been recently adopted positively. But their effects for debris flows have not been evaluated quantitatively and their design method has not been established either.

The effects of sabo tree zones to control debris flows have been studied through hydraulic model tests.

KEY WORD : Sabo, Tree zones, Debris flow, Debris flow Control, Hydraulic model test

樹林帯の土石流制御効果に関する 水理模型実験報告書

砂防研究室 室 長 水山高久
主任研究員 井良沢道也
福本晃久

要 旨

近年、緑の砂防ゾーン等、積極的に樹木を利用した砂防施設が施工されつつある。しかし、樹木が土石流に対してどの程度制御効果を持っているかについては十分な評価がなされておらず、樹木を利用した施設の設計方法も確立されていないのが現状であり、その設計方法の確立が急がれている。

本報告書は、立木の群としての土石流に対する制御効果に関する水理模型実験の結果をとりまとめたものである。

キーワード：砂防、樹林帯、土石流、土石流制御、水理模型実験

は じ め に

近年、環境を考慮した砂防施設や公園機能を有する遊砂地など、周辺の環境を配慮した砂防施設や憩いの場としての砂防設備は社会のニーズになっている。こうした中で、「緑の砂防ゾーン」として樹林帯を砂防設備と位置付け、積極的に樹林を利用する事業が始まっている。「緑の砂防ゾーン」は、樹林を配置することにより土砂流出抑制、分散堆積等の効果を促進するものであり、環境への配慮の面からも注目されている。このような樹林を利用した砂防施設が検討される一方で、砂防効果そのものについては十分検討されておらず、効果の推定方法を確立する必要がある。本報告書は、土石流に対して樹林帯の持つ土石流制御効果についての資料を得るために実施した基礎的研究の成果をとりまとめたもので、建設省中部地方建設局富士砂防工事事務所より「砂防樹林帯の機能に関する実験」として依頼された課題である。

本年度は、昨年度までに実施された立木の衝撃試験、静的引き倒し試験の結果をもとに検討された立木模型を用いて、水理模型実験により樹林帯の密度、間隔、樹径を変化させ樹林帯の群としての土石流の制御効果について検討した。

目 次

はじめに

1. 目 的	1
2. 立木模型の相似則の検討	2
2.1 検討内容	2
2.2 立木の抵抗力	2
2.3 立木の抵抗に関する相似則	3
2.4 立木模型	3
2.5 河床材料	4
2.6 模型縮尺	4
3. 実験概要	10
3.1 模型概要	10
3.1.1 実験水路	10
3.1.2 立木模型	10
3.2 実験内容	11
3.3 測定内容	11
4. 実験結果	22
4.1 ガラス玉を用いた実験の結果	22
4.2 樹林帯がない場合の土石流実験の結果	22
4.3 樹林帯による土石流制御に関する実験結果	22
5. 樹林帯による土石流制御効果	47
5.1 礫の通過率	47
5.2 土石流の減速効果	53
5.3 土砂濃度と立木の抗力係数	61
5.4 土砂堆積の促進効果	66
5.5 樹林帯の規模	74
6. まとめと今後の課題	83
6.1 ま と め	83
6.2 今後の課題	84
参考文献	85

1. 目 的

近年、国民のライフスタイルや価値観の多様化、それに伴う生活環境の整備に対する要請の高度化から、社会生活の基盤である公共施設の分野においてもアメニティ（快適さ）、多様な機能等の要望が強く求められるようになってきている。

こうした中で、土砂堆積域に存在する樹木を利用もしくは新しく樹木を導入して土砂の堆積や流木の捕捉を期待する空間の創出（緑の砂防ゾーン）を図る新しい事業が始まっている。河床勾配の緩和と河幅の増大による土砂輸送能力の減少という遊砂地の持つ効果の他に樹林帯の存在によって水理学的な河床粗度が増加し、流出土砂の樹林帯への衝突によるエネルギーの減少効果も加わり、流れをより減速させ土砂を効果的に堆積させるものである。このように緑の砂防ゾーンの特徴は流出土砂（特に土石流）の堆積区域で立木を利用することであり、樹林帯を利用して遊砂地における堆砂効果を高めたり、土石流の衝撃力を緩和することが環境の面からも望まれている。樹林を砂防施設として利用するにあたっては、その効果を評価し、計画に反映させる必要がある。本研究では昨年度の立木の持つ強度の検討に引き続き、群としての樹林帯の効果に関し水理模型実験によりその機能を明らかにする。

2. 立木模型の相似則の検討

2.1 検討内容

樹木による土砂捕捉効果を検討するための模型実験を行う上で、立木自体の土石流等の外力に対する抵抗力をどのように模型に反映させるかが問題となる。

そこで、昨年度までに実施した立木の衝撃載荷試験及び静的引き倒し試験結果を参考に、立木の持つ抵抗力を検討する。そして、外力に対する立木の抵抗力が原型と模型とで相似する相似則を考え、この相似則を考慮した実験手法・模型縮尺について検討を行う。

2.2 立木の抵抗力

立木の抵抗力は、樹木そのものの強度（せん断、曲げ応力）、根張りの状態（根と土の粘着力）等によるものと考えられる。こうした樹木の強度、根張りの状態は、樹径により変化するものと推察される。このことから、樹径は立木の抵抗を代表する因子と考えられる。

昨年度までに行われたスギ、コナラにおける立木の衝撃載荷試験¹⁾と静的引き倒し試験²⁾結果より、立木の持つ抵抗について整理した。図-2.1に根元径（本検討では、立木の樹径として根元径を採用する）とエネルギー吸収能の関係について示す。エネルギー吸収能は、静的引き倒し試験では荷重～変位曲線において最大荷重が生じる点までの（荷重）×（変位）の総和とし、衝撃試験では、最大変位までの（荷重）×（変位）の総和と定義した。図-2.1より根元径とエネルギー吸収能の相関は低く、また、衝撃試験と静的試験の値についてもバラツキが大きい。

根元径と100%エネルギー吸収能の関係について図-2.2に示す。100%エネルギー吸収能は、図-2.3に示すように実測値を仮定し、荷重と変位の積の総和とした。図-2.2より100%エネルギー吸収能の方がエネルギー吸収能に比べて相関が良く、衝撃試験と静的試験の値についてはあまり差がないことが分かる。

以上の結果並びに土石流の荷重は継続して立木に作用することから、立木が破壊するまでの平均的な荷重（応力）を立木の抵抗力として整理するのがよいと考えられる。そこで試験結果より平均荷重（100%エネルギー吸収能/最大変位）を求め根元径との関係について図-2.4に示した。

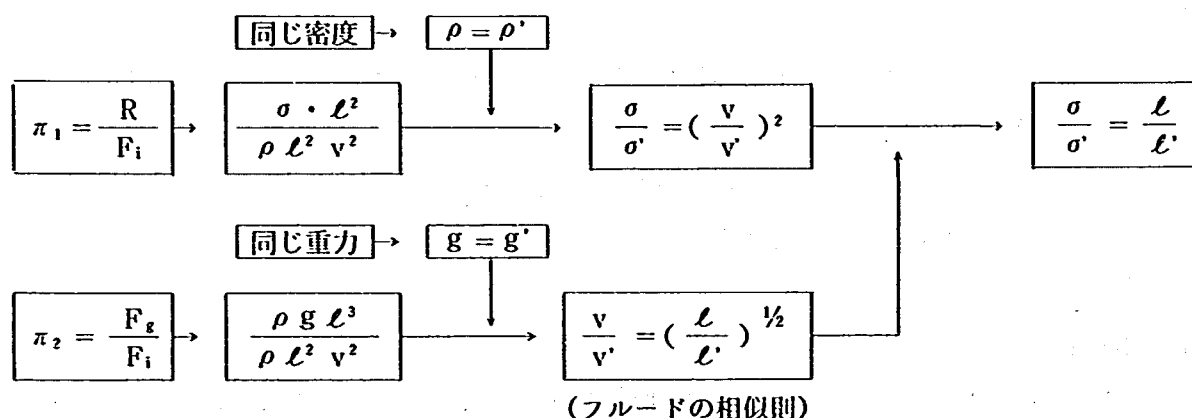
図-2.4の結果より、抵抗力を根元径 ϕ_0 の関数とすると $R = a \cdot \phi_0^2$ となり、係数 a を求めると、

$$\left. \begin{array}{ll} \text{コナラ} & R = 1.872 \times 10^{-3} \phi_0^2 \\ \text{スギ} & R = 1.863 \times 10^{-3} \phi_0^2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

となる。（ R : tonf, ϕ_0 : cm）。なお、式（2.1）より内部応力の値は1.863～1.872 kg/cm²となっており、表-2.1³⁾と比較すると曲げ応力で2倍～6倍大きくなっている。

2.3 立木の抵抗に関する相似則

立木の抵抗を原型と模型の間で相似させるためには、幾何学的相似とフルードの相似則を用いて、立木の抵抗に関する応力の代表値を模型縮尺の比とすれば模型実験が可能となる。相似則の考え方は、以下のとおりである。



ここに、 π_1 、 π_2 ：パイナンバー、 R ：立木の抵抗力、 F_i ：慣性力、 F_g ：重力、 σ ：内部応力、 ρ ：流体の密度、 g ：重力の加速度、 l ：長さの代表値、 V ：流速の代表値である。

したがって、流体中の立木の抵抗に関しては、立木の抵抗に関する応力の代表値が l/l' の比となる立木を用いれば、原型と模型の相似が満足されることになる。

2.4 立木模型

2.2に述べたように原型の立木を幾何学的に相似させ、外力に対する応力が長さの比となる樹木を模型として作製すれば良いことがわかったが、實際上作製するのは困難である。そこで、模型では、応力が相似になるような疑似的な立木を考える必要がある。

その立木模型としては、図-2.5に示すような丸太材に正方形の底板をつけたものを用い、底板に作用する河床砂の自重によって外力に抵抗させることにする。この底板の大きさ B と設置深さ D を選定することにより抵抗に関する応力 σ を相似させる（ $\sigma' = \sigma \cdot \lambda_m$ とする。 λ_m ：模型縮尺）。図-2.5より支点 O における立木の抵抗モーメントは、

$$M_R' = B^3 \cdot D \cdot \rho_s \cdot (1 - \lambda) / 2 \quad (2.2)$$

である。ここに、 M_R' ：立木模型の抵抗モーメント、 B ：立木模型の底板の幅、 D ：立木模型の底板の設置深さ、 ρ_s ：砂の密度、 λ ：河床砂の空隙率である。ただし、立木模型の抵抗モーメントとしては、底板上の砂の重量のみを評価した。

原型の立木の抵抗は、前述したように

$$R = a \cdot \phi_D^2 \quad (2.3)$$

である。立木の抵抗モーメント M_R は、樹木の高さを L とすると、

$$M_R = R \cdot L = a \cdot \phi_D^2 \cdot L \quad (2.4)$$

となる。

原型立木の抵抗モーメントは相似則より、

$$\begin{aligned} M_R' &= a' (\phi_D')^2 \cdot L', \quad \phi_D' = \phi_D \cdot \lambda_m \\ a' &= a \cdot \lambda_m, \quad L' = L \cdot \lambda_m \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

となる。ここに、 λ_m ：模型縮尺、 M_R' 、 a' 、 ϕ_D' 、 L' ：数値の模型値を示す。

立木模型ではこの抵抗モーメントを等しくする必要があり、式(2.2)と式(2.5)より、

$$\begin{aligned} B^3 \cdot D \cdot \rho_s \cdot (1 - \lambda) / 2 \\ = \{ a \cdot \lambda_m \} (\phi_D \cdot \lambda_m)^2 \cdot \{ L \cdot \lambda_m \} = a \cdot \phi_D^2 \cdot L \cdot \lambda_m^4 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

となり、底板の幅B及び深さDが与えられる。

2.5 河床材料

水理現象の相似則として、フルードの相似則を用いるので、土石流の材料及び河床材料は、原型の材料(砂)の粒度分布を相似させ、模型実験を行うことができる。

2.6 模型縮尺

模型縮尺は、できるだけ大きい方が原型と模型との相似性の観点から望ましい。しかし、模型縮尺は実験施設・実験方法によってある程度の制約を受ける。本検討で採用した立木模型を実験で使用する場合、模型製作上及び底板製作上の敷き砂の厚さ等の制約から、 $1/40$ 程度とするのが妥当と考えられる。

また、模型底板の大きさを得るために樹木の高さLが必要となる。砂防研究室で行った現地試験より、立木抵抗に関する高さを地面から枝部の高さの $1/2$ までと仮定し、その樹木と根径の関係をみると(図-2.6)両者の間には、

$$L = 0.07 \phi_D + 5.11 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

の関係があることから、模型の高さを決めた。

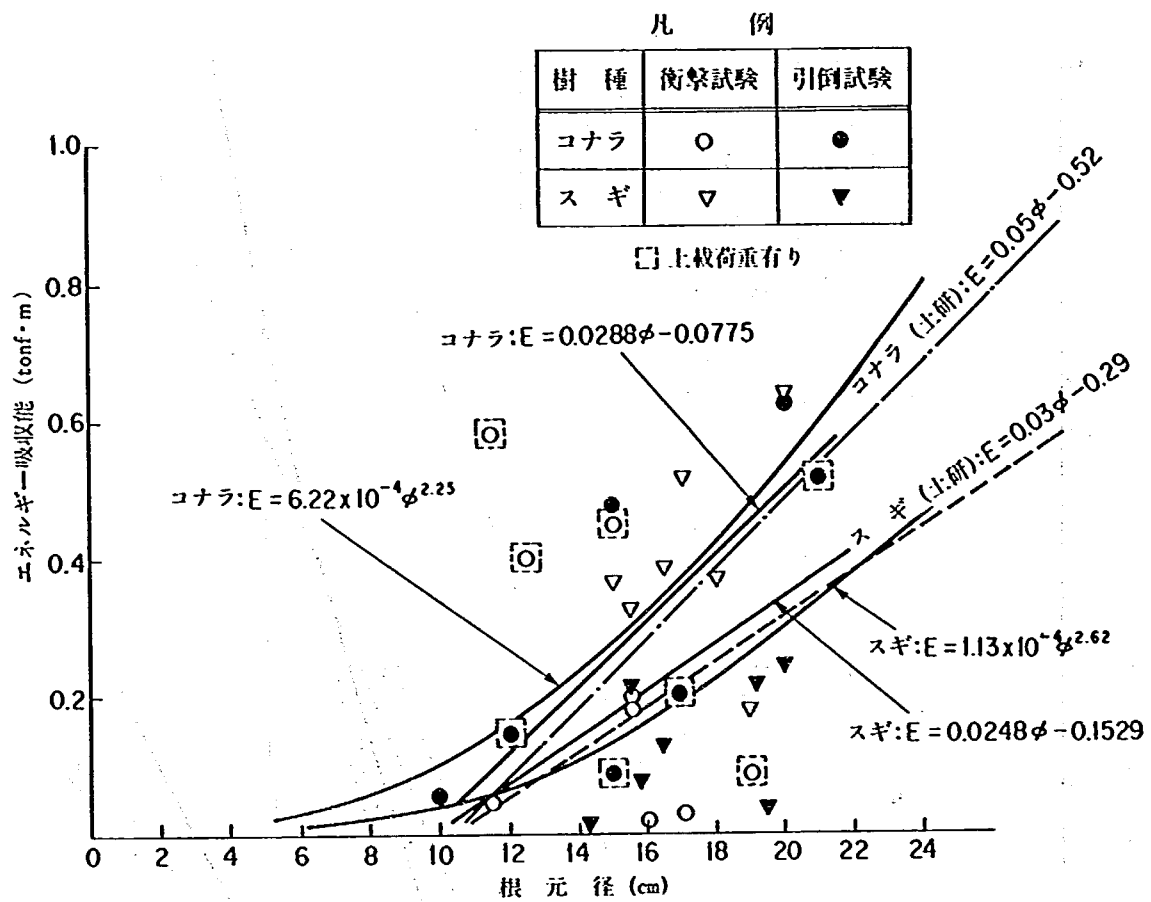


図-2.1 根元径とエネルギー吸収能の関係

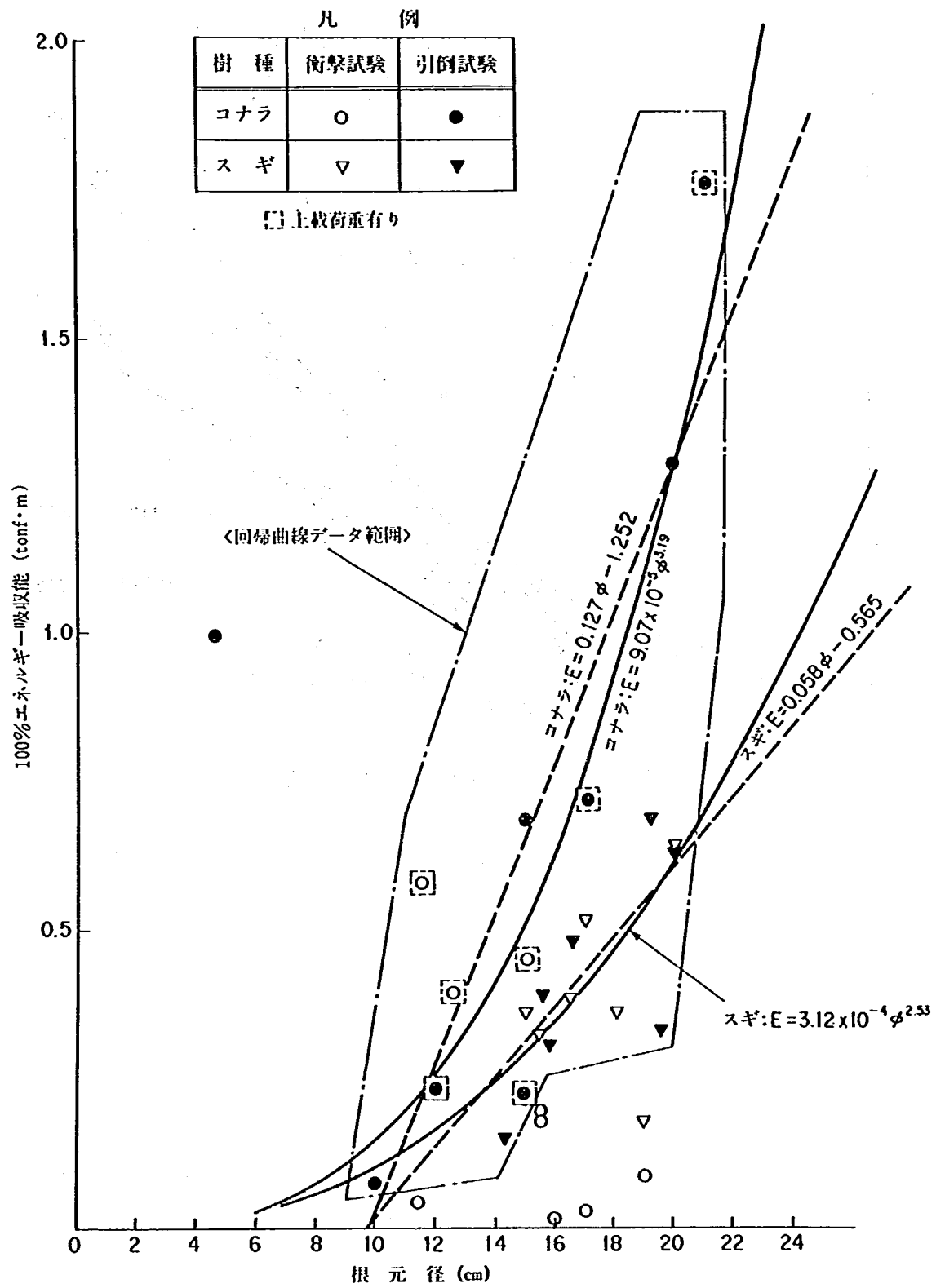


図-2.2 根元径と100%エネルギー吸収能の関係

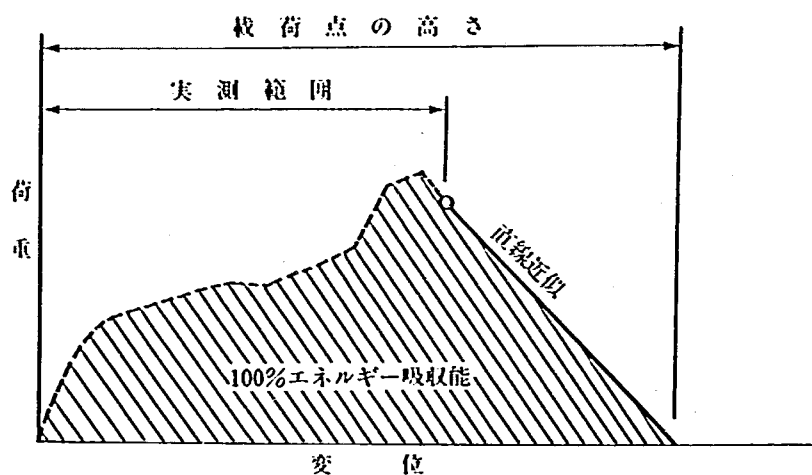


図- 2.3 100%エネルギー吸収能の算定方法

凡 例

樹 種	衝撃試験	引倒試験
コナラ	○	●
ス ギ	▽	▼

□ 上載荷重有り

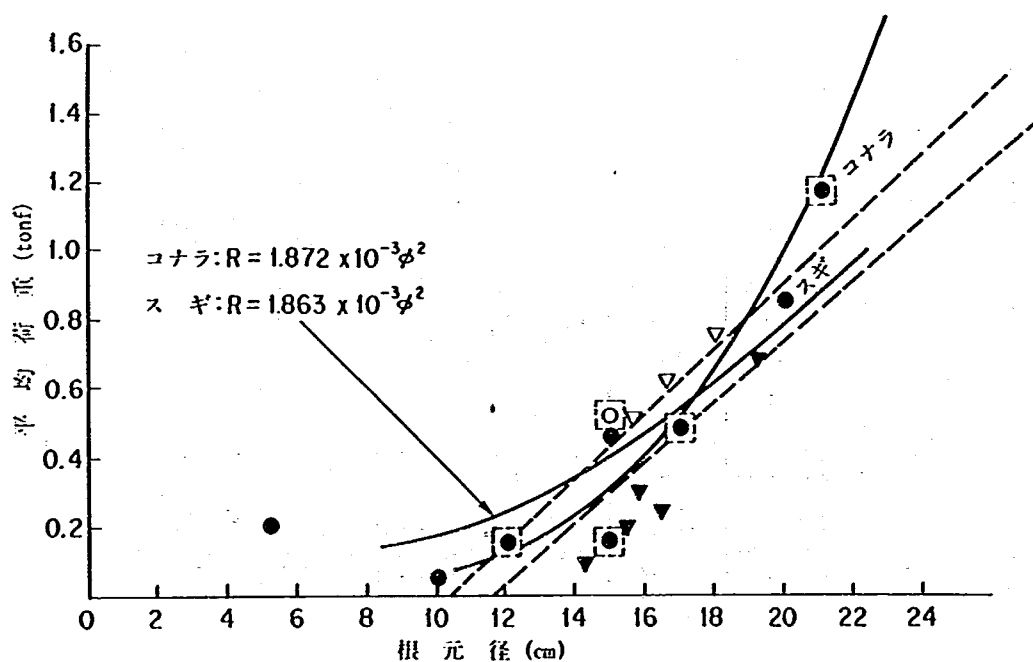


図- 2.4 根元径と平均荷重との関係

表-2.1 木材の強度 (無欠点材, 含水率15%)

(土木工学ハンドブック)

樹 種	気 乾 重 量 (g/cm ³) γ_{15}	曲げに基づく 弾性係数 (10 ⁴ kg/cm ²) E''	圧縮強度 (kg/cm ²) σ_{cs}	引張強度 (kg/cm ²) σ_{ts}	曲げ強度 (kg/cm ²) σ_b	せん断強度 (kg/cm ²) τ_v	ブリネル硬度 (kg/mm ²) H_B	収 縮 係 数 (%)
スギ	0.33~0.41	50~100	260~415	515~750	300~750	40~65	1.5~2.5	24.0
ヒノキ	0.34~0.47	55~115	300~400	850~1,500	510~850	60~115	1.8~3.3	21.6
サシ	0.35	57	310	—	490	43	—	19.7
ヒコウ	0.37~0.52	75~115	350~425	550~1,030	370~850	50~90	2.2~2.9	25.0
ウヤマキ	0.44	82	290	630	690	56	—	20.4
カラマツ	0.41~0.62	60~105	300~610	325~640	320~825	30~110	2.05~3.05	25.8
モシラ	0.36~0.59	50~120	255~550	700~1,420	550~950	45~90	—	29.2
フタバ	0.40	70	360	—	510	62	—	—
フウ	0.47~0.60	65~120	420~690	700~1,400	450~1,050	55~100	1.7~2.1	26.0
ウガヒ	0.40	89	390	1,050	690	49	—	—
アカマツ	0.43~0.65	75~135	370~530	810~1,860	360~1,180	50~120	2.2~5.8	27.4
クロマツ	0.57~0.66	90~115	435~635	325~610	735~930	70~135	—	—
アラマツ	0.50	86	410~710	340~625	570~1,120	60	—	—
アサギ	0.30	49	217~390	290~510	400~600	55	—	23.0
トガサウラ	0.52	82	400~420	400~460	615~710	81	—	—
トドマツ	0.32~0.40	60~90	230~380	460~1,200	350~650	40~65	1.95~3.00	25.0
アカエゾマツ	0.36~0.45	65~110	280~450	850~1,600	380~800	45~95	2.3~3.2	28.9
ベニヒ	0.31~0.52	64~100	255~385	—	318~815	59	—	—
セシマ	0.45	93	390	—	670	68	—	—
ウセンマツ	0.40	72	330	1,270	650	58	—	21.9
スギ	0.55	127	430	1,050	720	73	1.7~2.3	26.0
ヒノキ	0.43	99	360	690	630	75	1.6~2.3	29.3
サシ	0.37	74	290	500	480	—	1.6~2.1	24.2
ヒコウ	0.51	126	350	—	770	86	1.9~2.3	—
ウガヒ	0.40	101	320	780	630	71	—	—
アカスギ(ヒコイ)	0.37	74	300	770	510	60	—	—
ヤナギ	0.43	87	400	—	650	75	—	—
オニグルミ	0.48~0.59	90~115	380~415	695~1,220	610~815	80~145	2.45~3.85	—
サワグルミ	0.40~0.45	38	390	511	435	55~65	—	—
ハシ	0.51	84	410	690	630	65	2.2~2.9	—
マカシ	0.60~0.75	110~145	470~770	1,415~1,890	990~1,455	100~190	3.0~4.2	—
シラカシ	0.75	100	520	1,900	900	120	—	—
ダケ	0.53~0.71	55~85	370~435	530~880	380~980	65~120	3.65~3.85	28.5
オノレカンバ	0.56	100	450	—	900	70	—	—
オノレカンバ	0.84	134	530	2,290	990	100	—	—
アサ	0.72~0.87	125~150	430~585	1,075~2,315	1,045~1,165	135~155	6.7~13.65	—
サ	0.55~0.60	56~115	410	300~505	485~575	75~90	—	—
ブミ	0.53~0.76	65~100	380~520	105~1,025	815~1,015	80~160	2.6~5.2	27.8
モシラ	0.65~0.88	70~115	355~550	700~1,465	725~1,295	95~125	2.4~3.7	—
モシラ	0.77	123	550	1,890	1,150	—	7.8	—
コウ	0.63~0.85	90~100	490~595	740~815	660~910	60~95	—	—
シラ	0.84	127	530	1,300	1,100	95	—	—
ア	0.74~0.95	80~155	665~745	510~705	800~1,605	88~190	13.0	—
イ	0.80~1.00	115~160	795~865	555~925	815~1,535	85~145	—	—
イ	0.82	120	600	1,050~1,170	950	95	—	—
ハル	0.49~0.70	55~95	330~1,175	575~1,215	435~785	53~125	—	—
オケ	0.60	82	410	1,640	850	—	—	—
ケ	0.50~0.86	72~125	485~610	540~1,405	815~1,185	85~210	1.9~2.6	—
イ	0.47	90	430	—	750	75	1.7~2.3	—
イ	0.60~0.97	110~150	365~700	1,770~2,670	965~1,470	75~180	7.45~8.51	—
ヤマ	0.51	103	430	750	860	90	—	—
イ	0.59	120	470	870	950	95	—	—
イ	0.44	93	420	1,190	710	85	1.0~2.5	—
イ	0.60~0.81	65~140	400~985	420~1,415	620~1,030	80~130	5.5~8.95	—
ア	0.45~0.46	—	275~355	430~510	520~810	55~80	—	—
ア	0.42~0.48	60~65	255~260	—	460~490	45~55	—	—
ハ	0.40~0.61	71~100	295~690	315~1,300	520~875	65~105	1.9~3.05	—
シ	0.45~0.93	50~90	325~415	650~670	450~820	80~115	1.3~2.3	—
ヤ	0.56~0.65	85~125	310~870	760~1,480	495~1,310	95~125	2.6	—

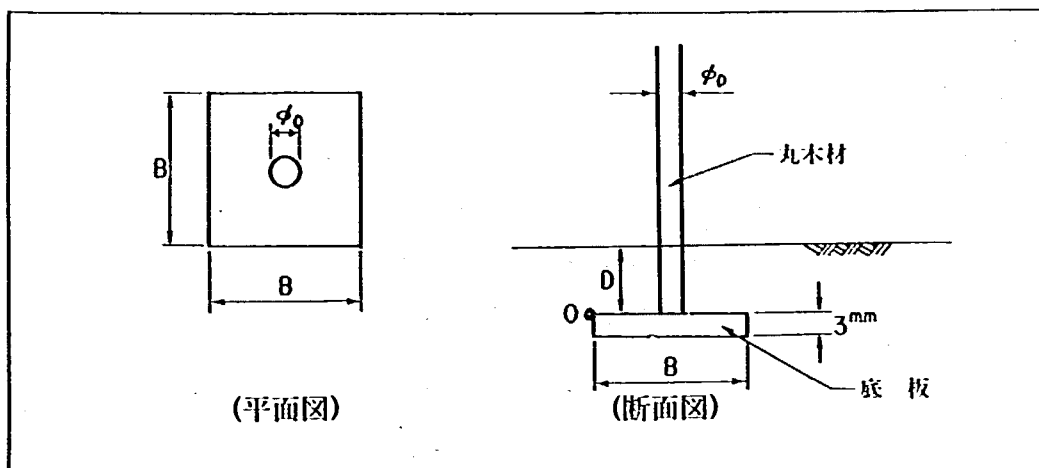


図-2.5 立木模型の概要図

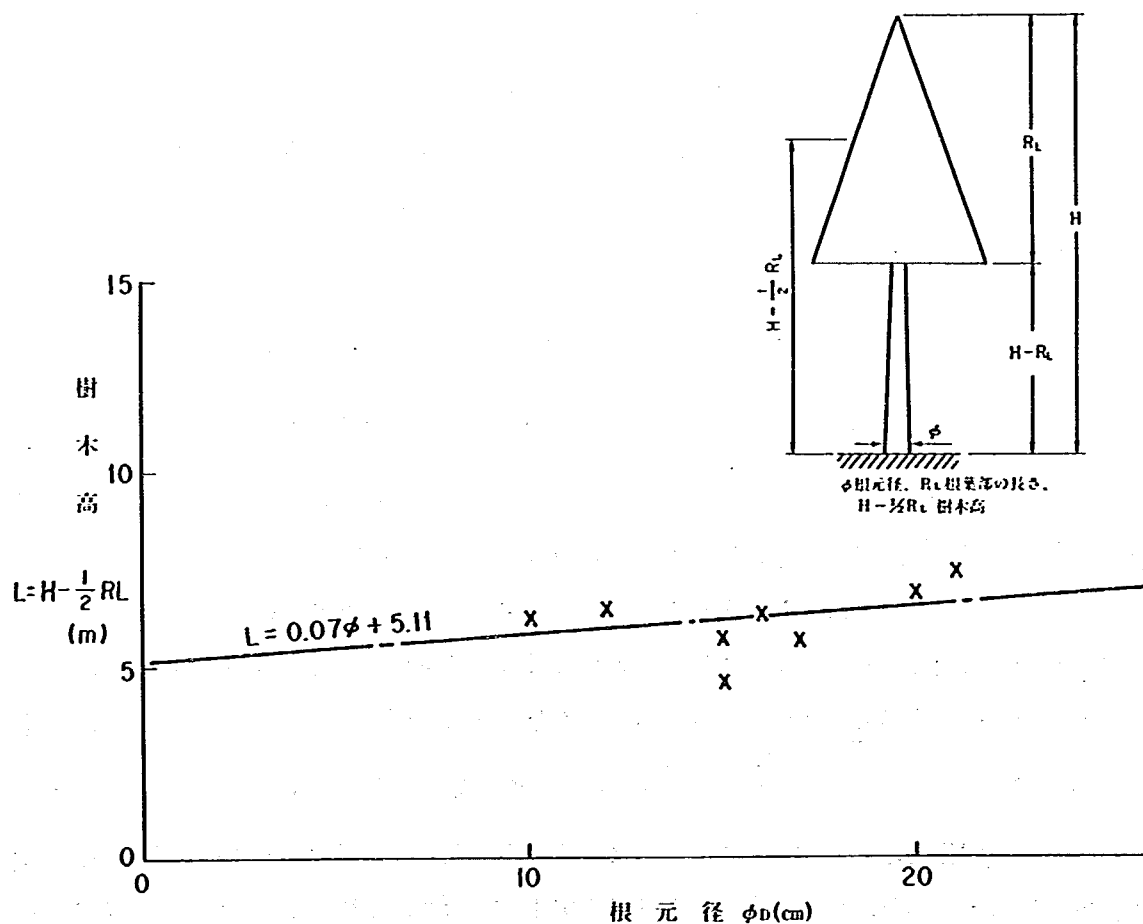


図-2.6 樹木の高度と根元径の関係

3. 実験概要

3.1 模型概要

3.1.1 実験水路

実験水路の概要図を図-3.1に、実験水路を写真-3.1に示す。実験水路は幅30cmで、勾配変化点を有する片面アクリル製の2次元水路である。水中ポンプにより水路上流端の整流槽に給水し土石流を発生させることができる。水路の長さは、上流側水路が3.6m、下流側水路が5.4mである。水路の勾配は、下流側水路を7°とし、上流側水路を15°、20°、25°の3種類とすることができる。

3.1.2 立木模型

立木の模型は第2章の検討結果より縮尺を $1/40$ とし、実験条件及び原型と模型との相似を考慮して図-3.2に示すとおりとした。立木模型の材料は、木製とした。立木の直径は5~9mm、高さは160~190mm、底板の大きさBは40~55mmとした。なお、底板の設置深さDは、実験上の制約から $D=B$ とした。なお、今回用いた立木の強度は、樹林帯に流入する土石流によって破壊されない強度となっている。計算結果を以下に示す。

土石流の流体力によるモーメント M_F は、

$$M_F = \frac{1}{2} \rho_D \cdot C_D \cdot V_m^2 \cdot \phi_D \cdot h \left(\frac{h}{2} + D \right) \quad \text{..... (3.1)}$$

である。ここで、 ρ_D ：土石流の単位体積重量、 C_D ：抗力係数(1.0)、 V_m ：土石流の流速、 ϕ_D ：樹径、 h ：土石流の波高、 D ：砂厚である。流入する土石流の諸元は、表-3.1に示すとおりである。式(3.1)より、上流勾配と立木の強度について計算した結果を表-3.2に示す。

立木の抵抗モーメント M_D は、

$$M_D = \frac{1}{2} (B^2 \cdot D - \phi_D^2 \cdot \pi \cdot D/4) \cdot B \cdot (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot C_* \\ + \frac{1}{2} (B^2 \cdot h - \phi_D^2 \cdot \pi \cdot h/4) \cdot B \cdot (\rho_s - \rho) \cdot C_d \cdot g \quad \text{..... (3.2)}$$

である。ここで、 ρ_s ：砂の密度(2.6g/cm³)、 C_* ：堆積層の砂の容積濃度(0.6)、 ρ ：水の密度(1.0g/cm³)、 C_d ：土石流の濃度、 g ：重力の加速度(980cm/sec²)である。また、立木の比重は、1.0g/cm³とした。式(3.2)より計算した各立木の抵抗モーメントを表-3.2に併記した。

立木模型の配置は、千鳥配置とし水路内に左右対象に設置するものとした。模型立木の底板の寸法を考慮して水路内の配置を考えると図-3.3に示すとおりとなる。図-3.3の配置より樹木占有面積率(樹木の本数を N とすると $\frac{\frac{\pi}{4} \phi_D^2 \times N}{\ell^2}$ で表される)を求めて表-3.3に示す。表-3.3より樹径と樹木占有面積率の関係を示すと図-3.4のようになる。表-3.4⁹⁾に示すように一定面積内において樹木の密度には限界があり、樹木占有面積率は最大で1.0%程度、樹径は20~40cmであることから、①樹木占有面積率1%で樹径の変化による影響を把握する、②立木の配置を同一として、樹木占有面

積率、樹径の変化による影響を把握する、⑨樹径を一定にして、樹木占有面積率の変化による影響を把握することを目的として、図-3.4に示す○、□、▽印の密度、樹径を採用した。

3.2 実験内容

実験ケースの一覧表を表-3.5に示す。上流水路よりガラス玉を落下させ下流水路内の樹林帯に衝突させる実験(36ケース)と、上流水路で土石流を発生させ樹林帯内に流入させる実験(18ケース)の2種類を実施する。

ガラス玉による実験は、礫(実験ではガラス玉を使用)が樹林帯内に進入した場合を想定し、礫の挙動について測定を行うものである。ガラス玉の直径は17mm(原型で68cm)であり、単体はガラス玉1個、群は10個とした。ガラス玉の流下方法は、上流水路に砂を厚さ5cmで平坦に敷き、水路上流端中央にガラス玉を置き初速を与えず流下させた。

土石流による実験は、上流水路に厚さ5cmで砂を平坦に敷き、水路上流端より4.9ℓ/secの水を与えて土石流を発生させ、この土石流が樹林帯により減勢される過程について測定を行った。なお、通水時間は土石流フロント部が勾配変化点に達した時点を0として、全ケースとも30秒間とした。

ガラス玉の実験、土石流の実験ともに、流下物の流速の変化による樹林帯への影響を把握するため、上流水路勾配を15°、20°、25°と変化させた。また、下流水路の砂厚は、立木の強度により40~55mmに変化させた。上下流水路に敷いた砂の粒径を図-3.5に示す。平均粒径 $d_m = 6.3\text{mm}$ 、最大粒径 $d_{\max} = 19.1\text{mm}$ である。実験手順を図-3.6に示す。

3.3 測定内容

(1) ビデオ、35mmカメラによる観察

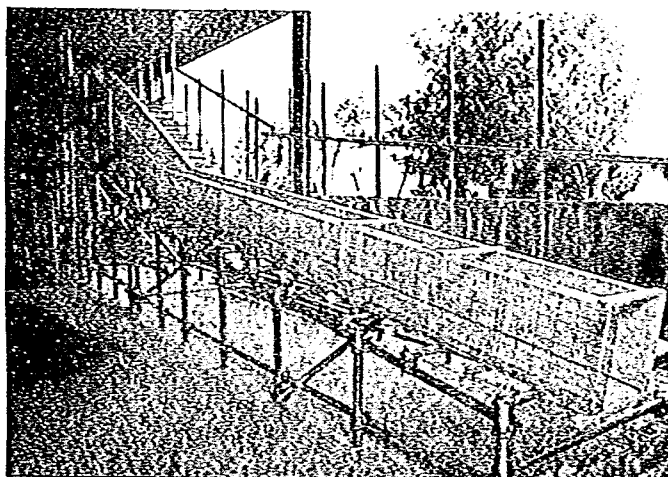
全ケースにおいて側面からはビデオカメラ(4台)及び35mmカメラ(2台)による撮影、水路上から35mmカメラ(3台)による撮影を行った。撮影結果より、ガラス玉、土石流、立木の挙動を読み取った。

(2) 流出土砂量測定

土石流の実験については、水路下流端からの流出土砂を採取し土砂濃度の測定を行った。測定は、流出開始後5秒間隔で行った。このうち上流水路勾配25°について粒度試験を行い、流出土砂の粒径の変化を測定した。

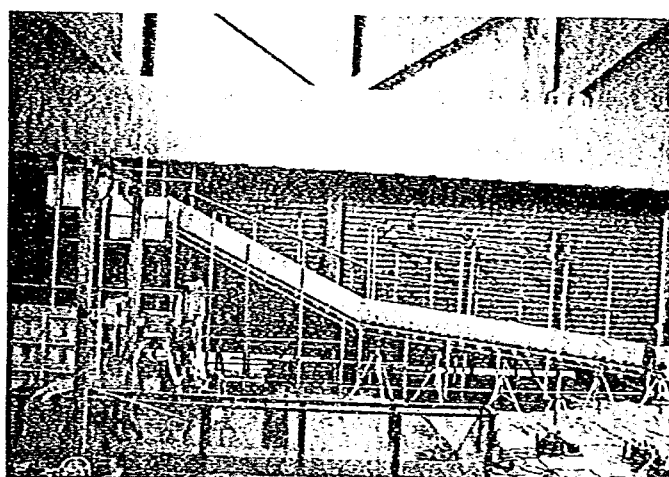
(3) 河床高測定

土石流の実験については、実験終了後河床高の測定を行った。測定結果は、縦断面図として整理した。



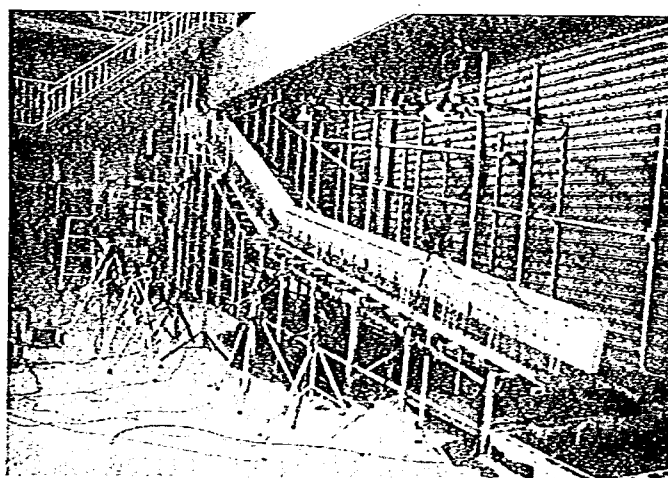
写真－ 3.1 (1)

実験水路
(水路完成時)



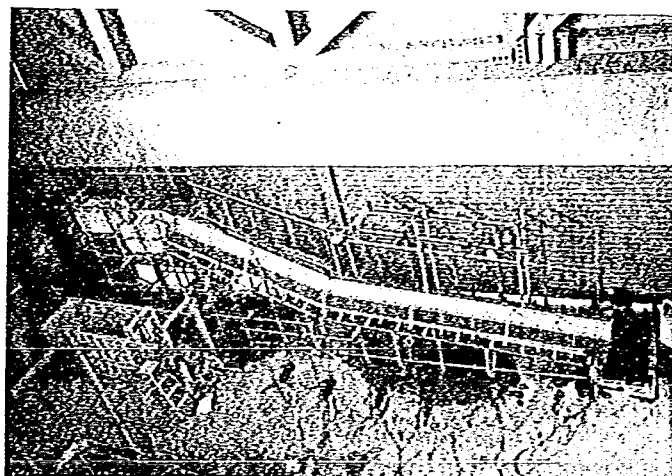
写真－ 3.1 (2)

実験水路
(河床整形終了時)



写真－ 3.1 (3)

実験水路
(実験開始時)



写真－ 3.1 (4)

実験水路
(実験開始時)

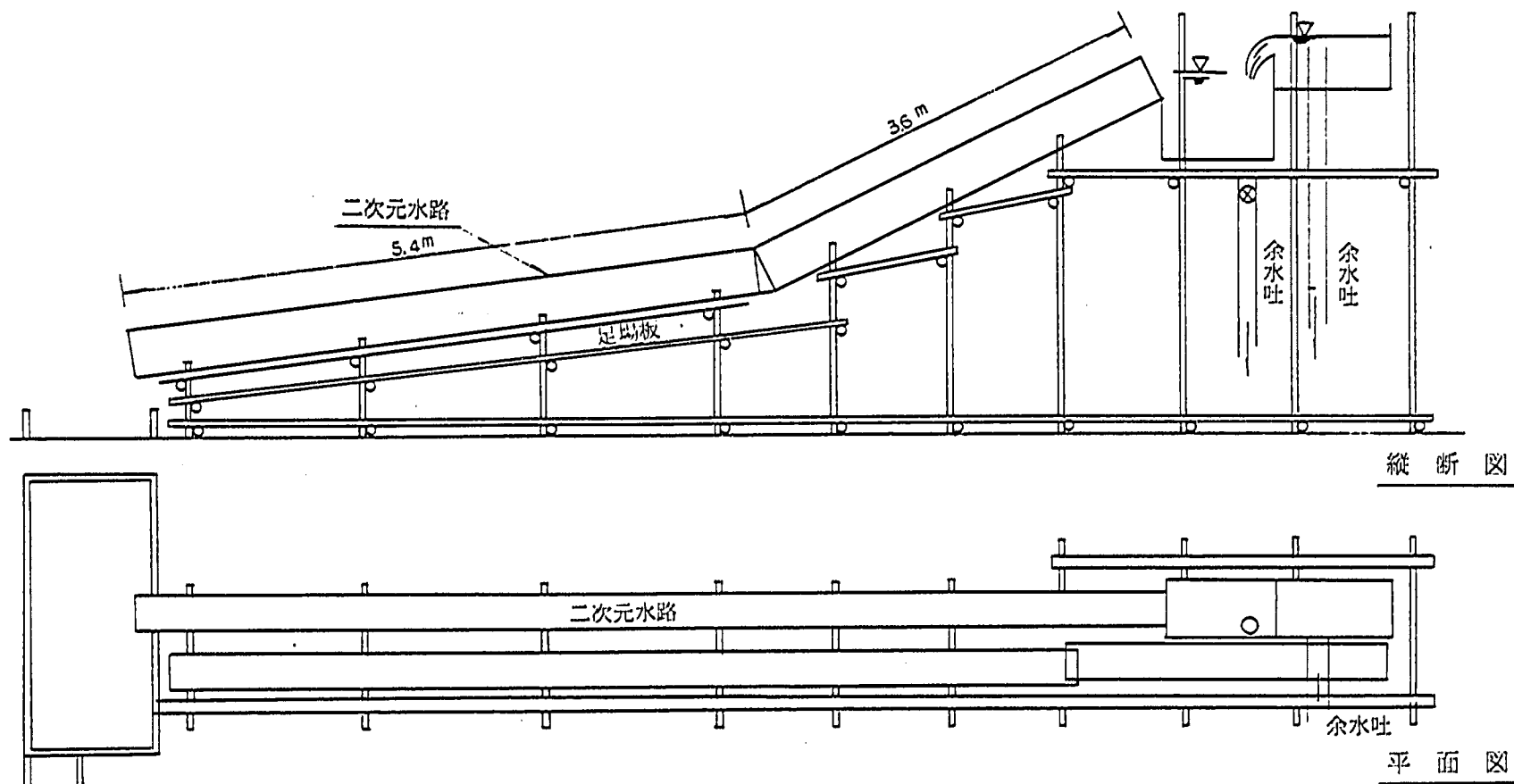


図 - 3.1 (1) 二次元水路模型及び架台概要図

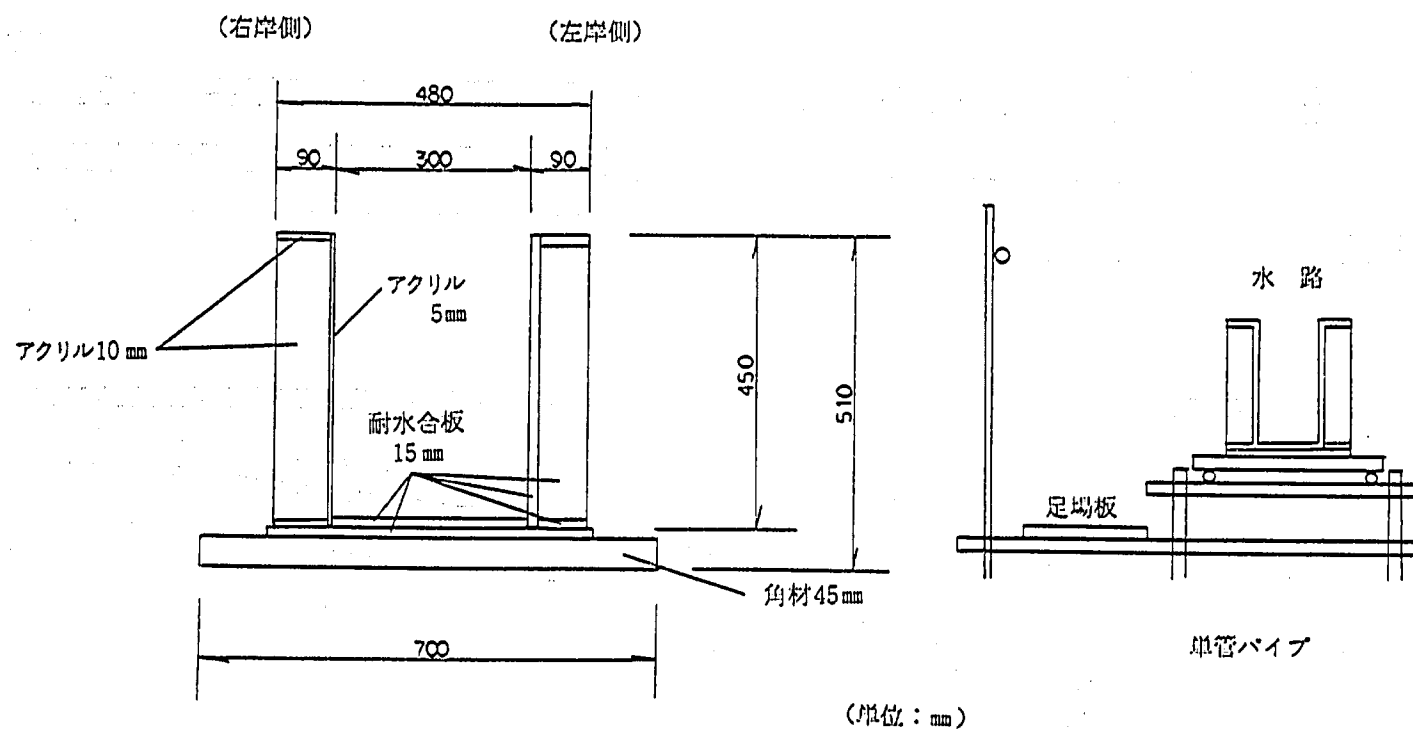


図- 3.1 (2) 二次元水路模型概要図

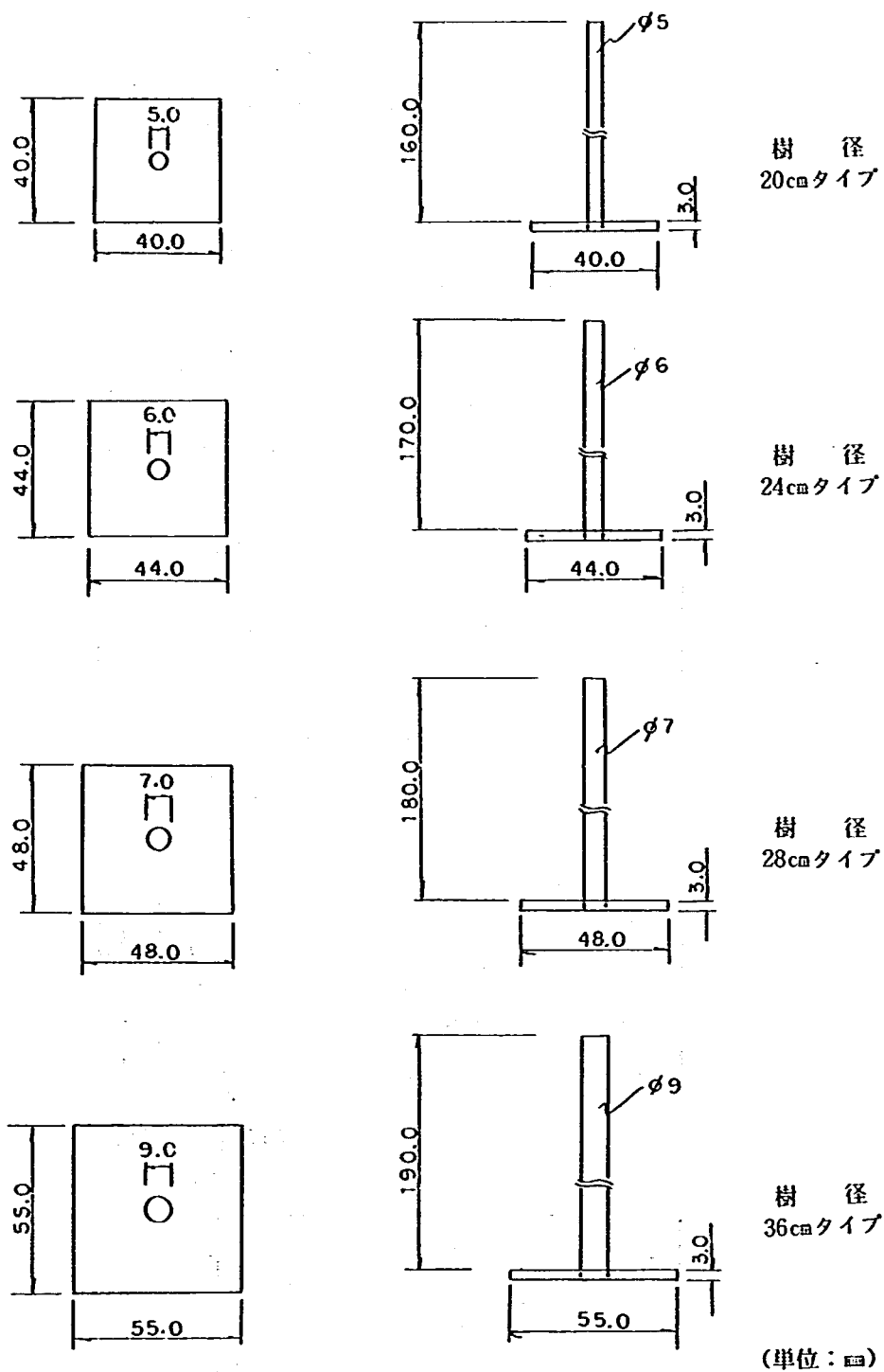


図-3.2 立木模型図

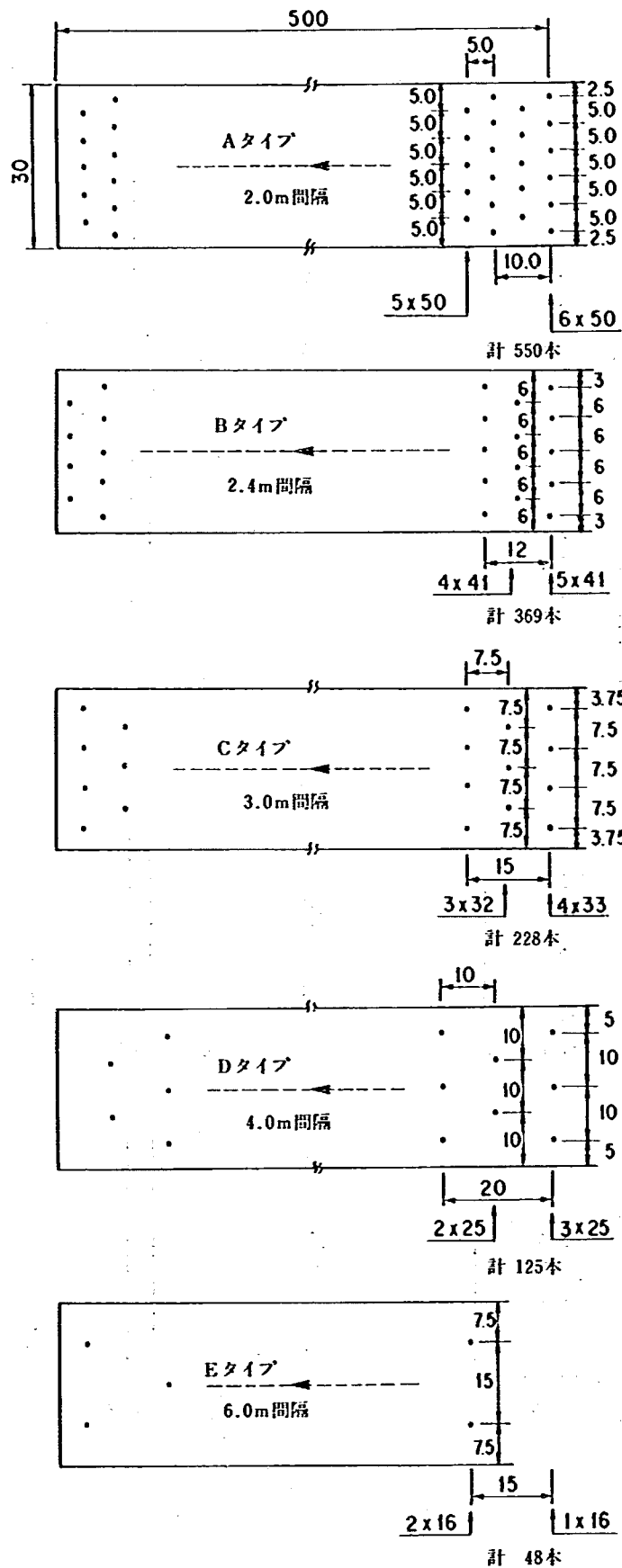


図- 3.3 立木の配置図

表-3.1 ガラス玉及び土石流の流入諸元

上流水 路勾配	ガラス玉	土 石 流				
	流 速	流 速	波 高	土石流量	濃 度	単位体積重量
15°	0.8 m / sec	0.80 m / sec	3.0 cm	7.2 t / sec	31.9%	1.5 g / cm ³
20°	1.8 m / sec	0.95 m / sec	3.3 cm	9.4 t / sec	47.8%	1.8 g / cm ³
25°	2.5 m / sec	1.10 m / sec	3.5 cm	11.6 t / sec	57.8%	1.9 g / cm ³

表-3.2 土石流流体力と立木の抵抗

上流水 路勾配	$\phi_D = 0.5 \text{ cm}$		$\phi_D = 0.6 \text{ cm}$		$\phi_D = 0.7 \text{ cm}$		$\phi_D = 0.9 \text{ cm}$	
	M_F (dyn · cm)	M_D (dyn · cm)	M_F (dyn · cm)	M_D (dyn · cm)	M_F (dyn · cm)	M_D (dyn · cm)	M_F (dyn · cm)	M_D (dyn · cm)
15°	0.40×10^5	3.88×10^5	0.51×10^5	5.49×10^5	0.64×10^5	7.55×10^5	0.91×10^5	1.25×10^6
20°	0.76×10^5	4.28×10^5	0.97×10^5	6.03×10^5	1.21×10^5	8.25×10^5	1.72×10^5	1.35×10^6
25°	1.16×10^5	4.57×10^5	1.48×10^5	6.41×10^5	1.84×10^5	8.75×10^5	2.63×10^5	1.43×10^6

表-3.3 立木の配置と面積密度 (樹木占有面積率)

配 置	樹 径 ϕ_D (cm)	模型にお ける樹径 ϕ_0 (cm)	密 度 (樹木占有 面積率) P (%)	立木の 間 隔 (m)	配 置	樹 径 ϕ_D (cm)	模型にお ける樹径 ϕ_0 (cm)	密 度 (樹木占有 面積率) P (%)	立木の 間 隔 (m)
Aタイプ (550本)	20	5	0.72	2.0m	Dタイプ (125本)	20	5	0.16	4.0m
	24	6	1.04			24	6	0.24	
	28	7	1.41			28	7	0.32	
	*32	8	1.84			32	8	0.42	
	*36	9	2.33			36	9	0.53	
	*40	10	2.88			40	10	0.65	
	*48	12	4.15			48	12	0.94	
Bタイプ (369本)	20	5	0.48	2.4m	Eタイプ (48本)	20	5	0.06	6.0m
	24	6	0.70			24	6	0.09	
	28	7	0.95			28	7	0.12	
	32	8	1.23			32	8	0.16	
	36	9	1.56			36	9	0.20	
	40	10	1.93			40	10	0.25	
	*48	12	2.78			48	12	0.36	
Cタイプ (228本)	20	5	0.30	3.0m					
	24	6	0.43						
	28	7	0.58						
	32	8	0.76						
	36	9	0.97						
	40	10	1.19						
	48	12	1.72						

(注) *印は本実験で採用できない。

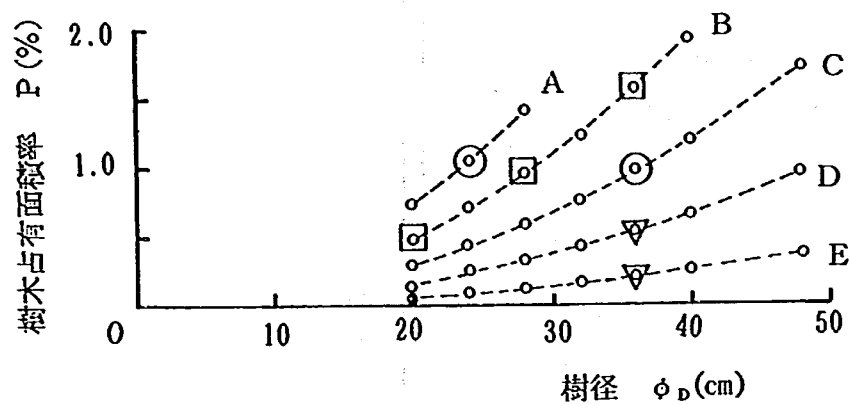


図-3.4 樹木占有面積率と樹径の関係

表-3.4 胸高直径と立木密度⁵⁾

樹 種	胸高直径 (cm)	本数密度 (本 / ha)	樹木占有面積率 (%)
ス ギ	20	2,393	0.751
	30	1,235	0.873
	40	772	0.970
ア カ マ ツ	20	1,591	0.500
	30	818	0.578
	40	511	0.642
カ ラ マ ツ	20	1,348	0.423
	30	669	0.472
	40	407	0.511
ヒ ノ キ	20	2,355	0.739
	30	1,361	0.962
	40	920	1.156

表- 3.5 実験ケース一覧表

CASE	上流水 路勾配	樹 木 占有 面積率 (%)	配 置	立木径 (cm)	ガラス玉	土石流	CASE	上流水 路勾配	樹 木 占有 面積率 (%)	配 置	立木径 (cm)	ガラス玉	土石流
1	15°	0	—	—	単	—	28	15°	1.0	B	0.7	単	—
2	"	0	—	—	群	—	29	"	1.0	B	0.7	群	—
3	"	1.5	B	0.9	単	—	30	"	1.0	B	0.7	—	○
4	"	1.5	B	0.9	群	—	31	20°	1.0	B	0.7	単	—
5	"	0	—	—	—	○	32	"	1.0	B	0.7	群	—
6	"	1.5	B	0.9	—	○	33	"	1.0	B	0.7	—	○
7	20°	0	—	—	単	—	34	25°	0.2	E	0.9	単	—
8	"	0	—	—	群	—	35	"	0.2	E	0.9	群	—
9	"	1.5	B	0.9	単	—	36	"	0.2	E	0.9	—	○
10	"	1.5	B	0.9	群	—	37	15°	1.0	A	0.6	単	—
11	"	0	—	—	—	○	38	"	1.0	A	0.6	群	—
12	"	1.5	B	0.9	—	○	39	"	1.0	A	0.6	—	○
13	25°	0	—	—	単	—	40	20°	1.0	A	0.6	単	—
14	"	0	—	—	群	—	41	"	1.0	A	0.6	群	—
15	"	1.5	B	0.9	単	—	42	"	1.0	A	0.6	—	○
16	"	1.5	B	0.9	群	—	43	25°	0.5	D	0.9	単	—
17	"	0	—	—	—	○	44	"	0.5	D	0.9	群	—
18	"	1.5	B	0.9	—	○	45	"	0.5	D	0.9	—	○
19	15°	1.0	C	0.9	単	—	46	15°	0.5	B	0.5	単	—
20	"	1.0	C	0.9	群	—	47	"	0.5	B	0.5	群	—
21	"	1.0	C	0.9	—	○	48	"	0.5	B	0.5	—	○
22	20°	1.0	C	0.9	単	—	49	20°	0.5	B	0.5	単	—
23	"	1.0	C	0.9	群	—	50	"	0.5	B	0.5	群	—
24	"	1.0	C	0.9	—	○	51	"	0.5	B	0.5	—	○
25	25°	1.0	C	0.9	単	—	52	25°	0.5	B	0.5	単	—
26	"	1.0	C	0.9	群	—	53	"	0.5	B	0.5	群	—
27	"	1.0	C	0.9	—	○	54	"	0.5	B	0.5	—	○

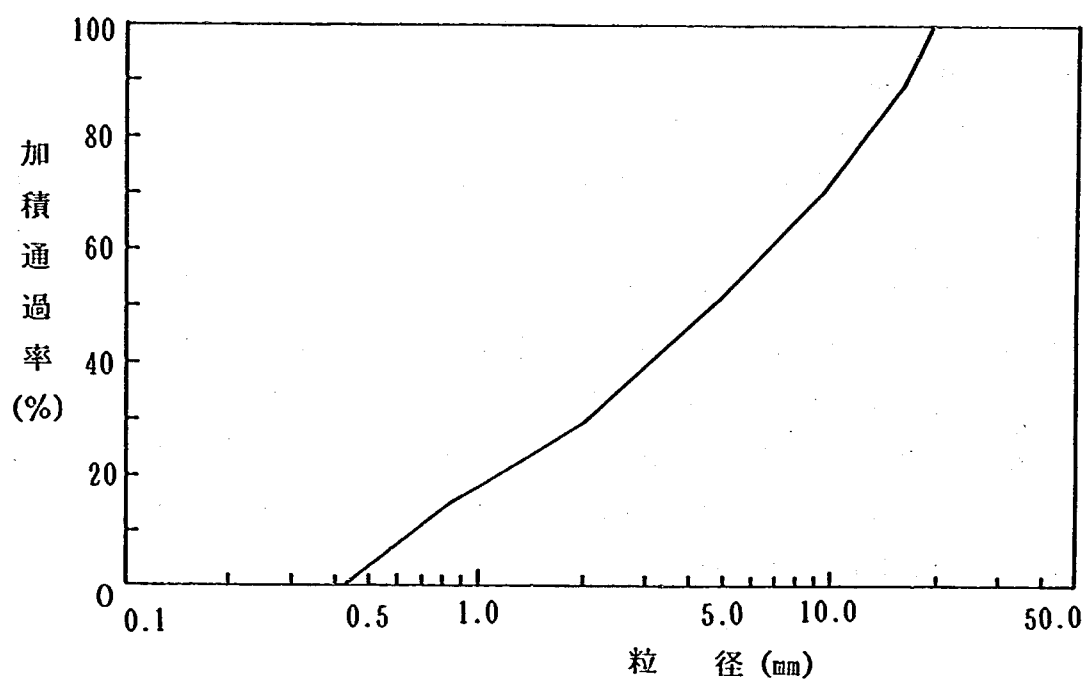


図-3.5 実験砂の粒度分布

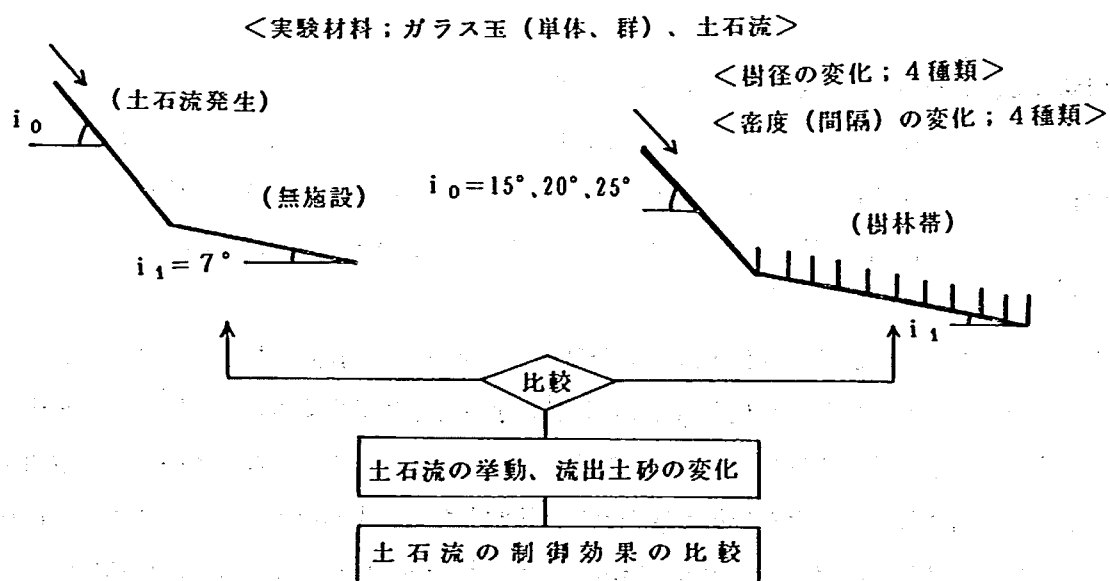


図-3.6 実験による土石流制御効果検討のフロー図

4. 実験結果

4.1 ガラス玉を用いた実験の結果

ガラス玉の軌跡の平面図を図－4.1(1)～図－4.1(6)に示す。図中のガラス玉のプロットは、写真にガラス玉が撮影されている位置であり、2点間の時間間隔は0.25秒である。ガラス玉の軌跡は、無施設時にはほぼ水路に平行にかなり下流まで長距離にわたって描かれるが、樹林帯を設けた場合には樹林帯内でいろいろな方向に描かれ、しかも比較的短距離である。すなわち、礫が樹林帯内に流下すると、立木に衝突して流下が阻害される。また樹木占有面積率が小さいほど、立木間隔が大きいほど無施設時に近い傾向の軌跡を描くことがわかる。立木の配置によるガラス玉の停止距離の関係について図－4.2(1)～図－4.2(2)に示す。なお、樹林帯がない場合の流下距離の平均値は、15°で66cm、25°で113cm、25°で133cmである。図－4.2より樹木占有面積率が大きく、また、立木間隔が小さくなるほど流下距離は短くなることがわかる。

なお、ガラス玉の衝突による立木の破壊は起こらなかった。

4.2 樹林帯がない場合の土石流実験の結果

勾配変化点通過後の土石流の流下過程を図－4.3に、上流水路勾配20°の時の土石流の流下状況を写真－4.1に示す。図－4.3より最高水位（最大波高）は、15°で9.7cm、20°で9.7cm、25°で14.2cmとなっており水路勾配が急になるほど堆積深は大きくなっている。

4.3 樹林帯による土石流制御効果に関する実験結果

各ケースの勾配変化点通過後の土石流の流下過程を図－4.4(1)～図－4.4(7)に示す。また、土石流が樹林帯内を通過する状況を写真－4.2に示す。図－4.4より土石流の最高水位が生じるのは、勾配変化点付近であり、通水開始後3秒～12秒後である。また、樹林帯を設置することにより土石流の堆積勾配は急になっている。

土石流のフロント部の流速の変化を図－4.5(1)～図－4.5(2)に示す。土石流のフロント部の流速は、勾配変化点通過直後に勾配変化と樹林帯の影響により急激に減少する。その際、勾配変化点付近に土砂を堆積させるため、土砂はこれを乗り越えるように流下することになり再び流速は増加する。フロント部が下流に進むにしたがい流速は安定した状態となる。土石流が下流水路に流入した直後の流速の減少は、樹林帯を設けた場合の方が無施設時よりも10～30cm/sec大きく、樹林帯による流速の低減効果が認められる。ただし、立木間隔が大きく、樹木占有面積率が小さくなるとこの傾向は顕著でなくなる。

流出土砂濃度の時間変化を図－4.6(1)～図－4.6(2)に示す。水路下流端からの流出が始まるのは、土石流が勾配変化点を通過後9～10秒後である。樹林帯を設けた場合、無施設時に比べて流出土砂濃度が小さく、樹林による土砂捕捉効果が認められる。樹木占有面積率及び立木間隔による変化につい

ては、バラツキはあるものの面積が大きいほど、また、間隔が小さくなるほど流出土砂濃度が小さくなる傾向がある。流出土砂の平均粒径の時間変化について図-4.7に示す。樹木占有面積率が1.5%程度になると明らかに粒径は小さくなっている。樹木占有面積率の変化あるいは立木間隔の変化による流出土砂の平均粒径の変化については、データのバラツキが多少あるものの、全体的には樹木占有面積率が大きいほど、立木間隔が小さいほど平均粒径が小さくなる傾向を示している。

図-4.8(1)～図-4.8(2)に通水後の河床縦断面図を示す。図中には、樹林帯がない場合についても併記した。樹林帯を設けたことにより土石流の堆積量が増大し、水路下流では洗掘傾向になっている。

図-4.9に立木径と立木先端の変位の関係について示す。図-4.9よりどのケースにおいても立木は変位（傾斜）しており、立木の径が小さくなるほど変位は大きくなっている。なお、今回の実験条件では、表-3.2に示すように流入する土石流フロント部では立木は変位（破壊）しないはずであるが、ここで、立木が変位したのは、勾配変化点での堆積により荷重の作用する高さの変動したためである。

以上の結果から、勾配変化点下流に樹林帯がある場合には、樹林帯が土石流を制御するのに効果があることが分かる。

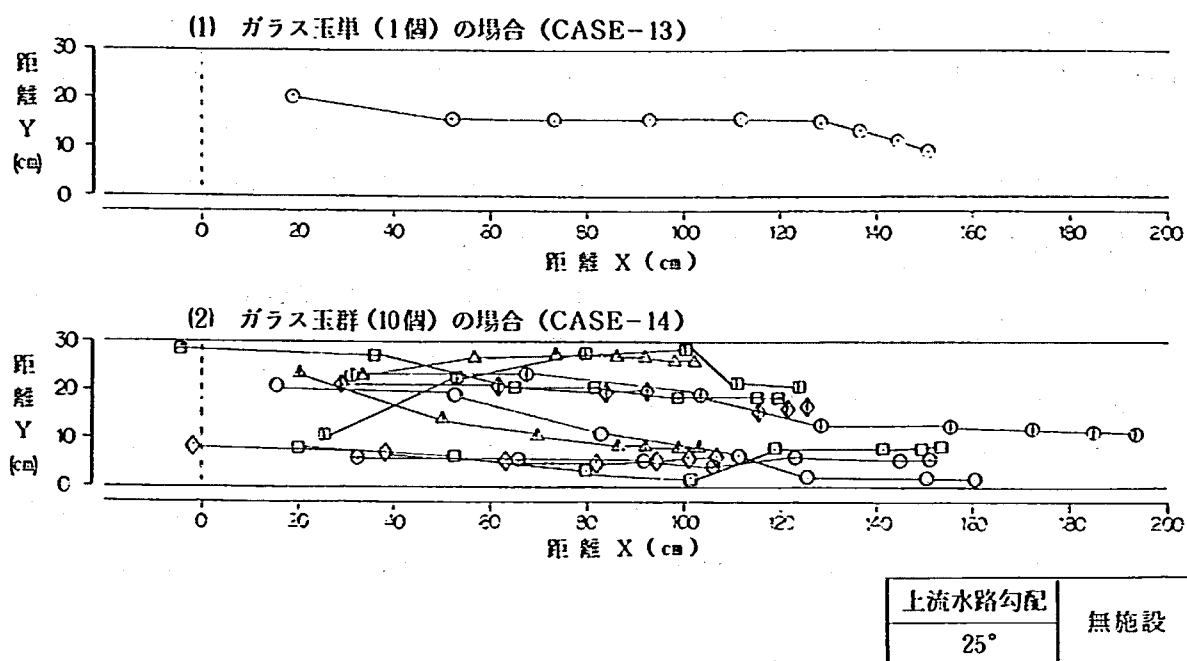


図-4.1(1) ガラス玉の軌跡

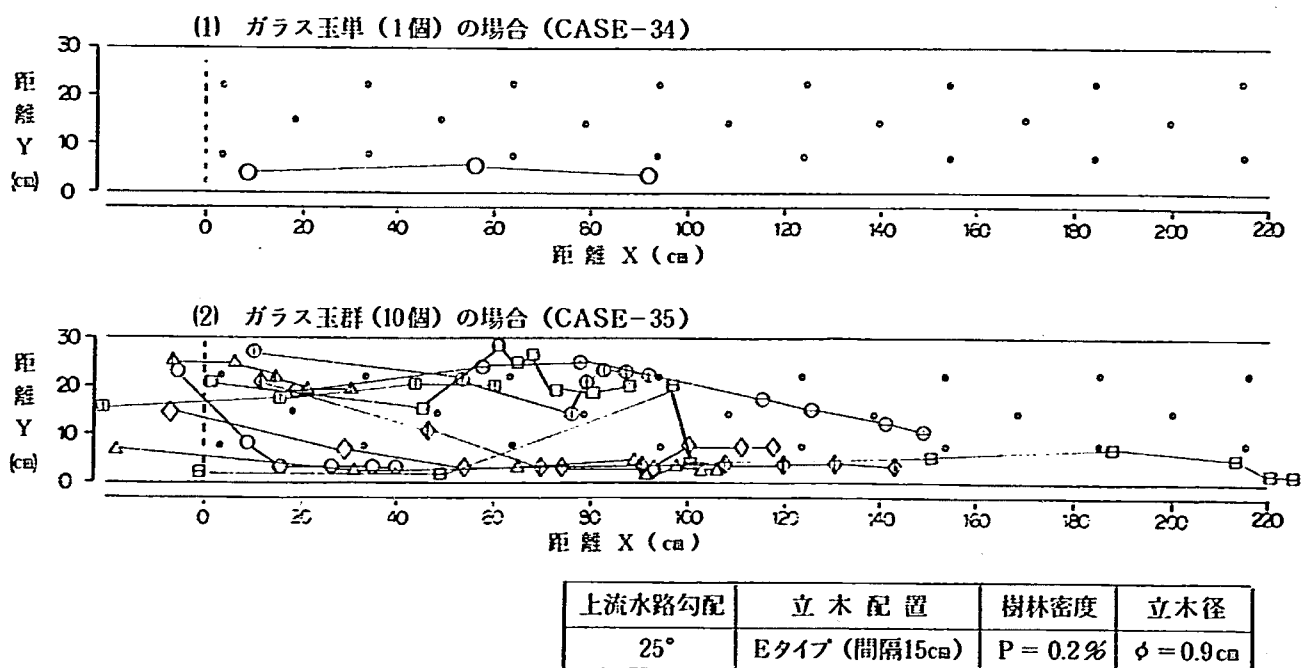
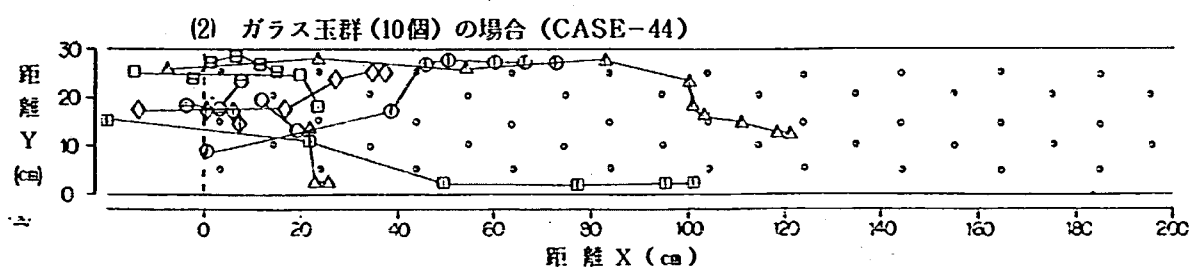
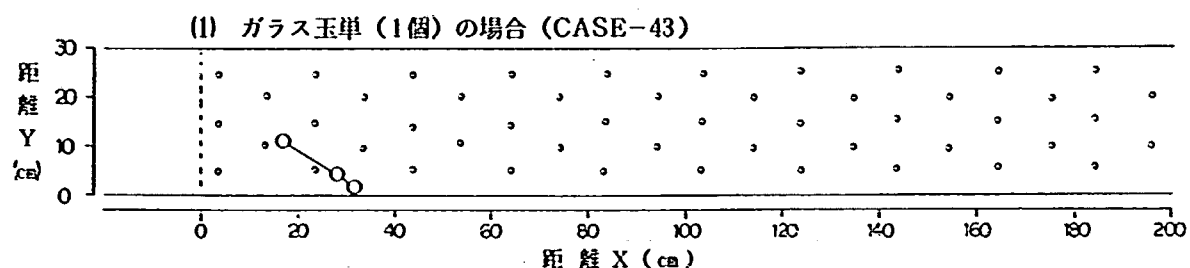
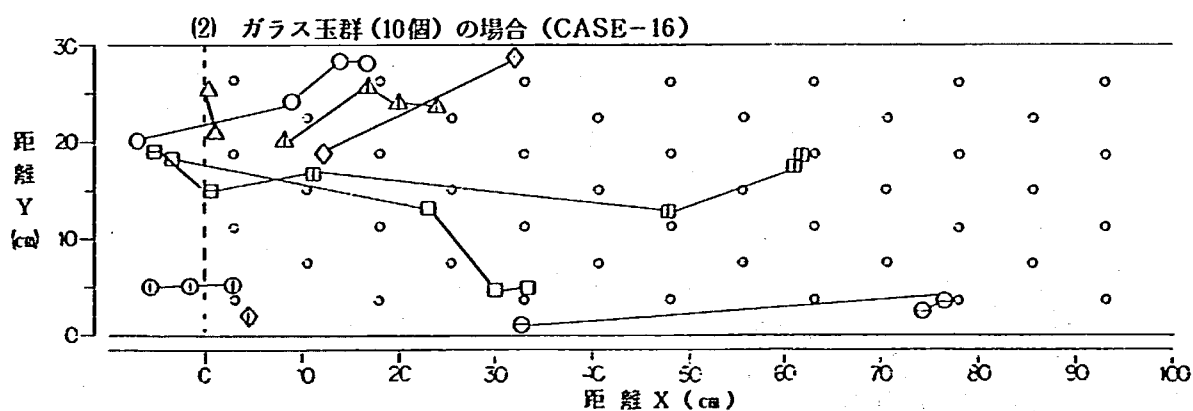
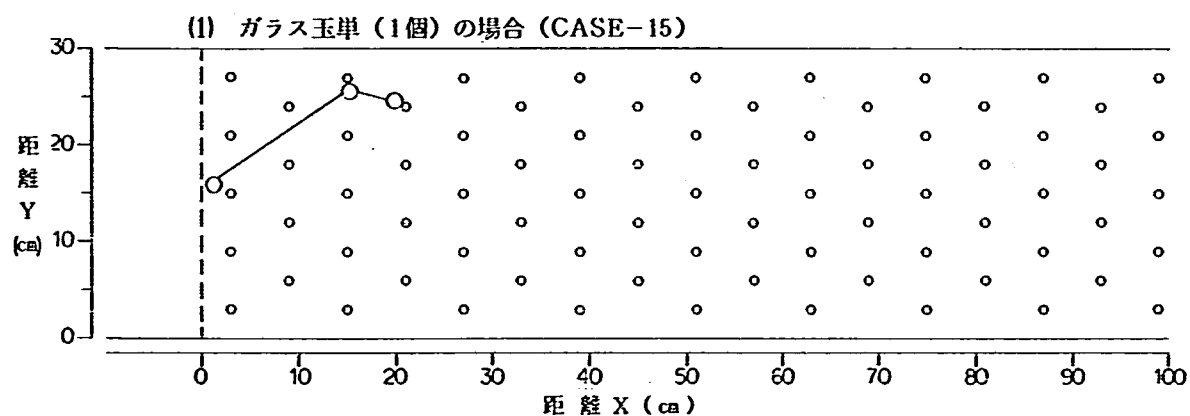


図-4.1(2) ガラス玉の軌跡



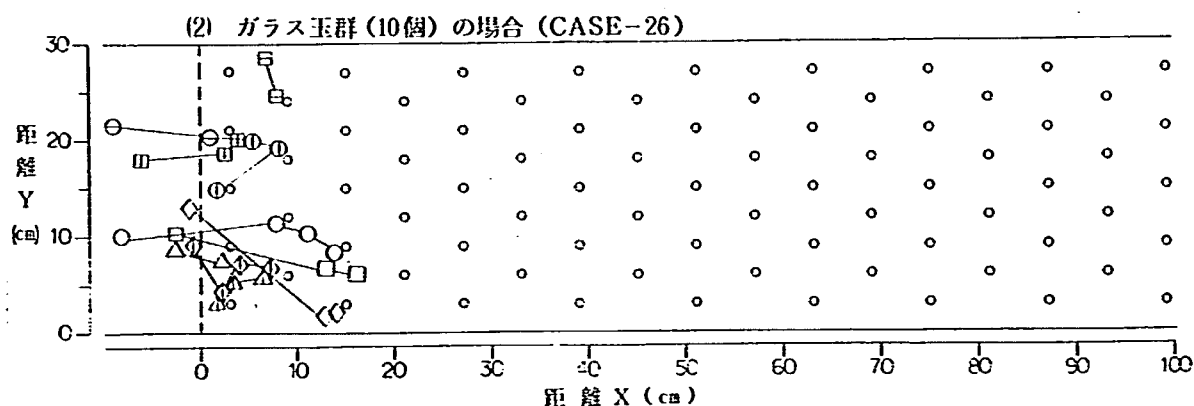
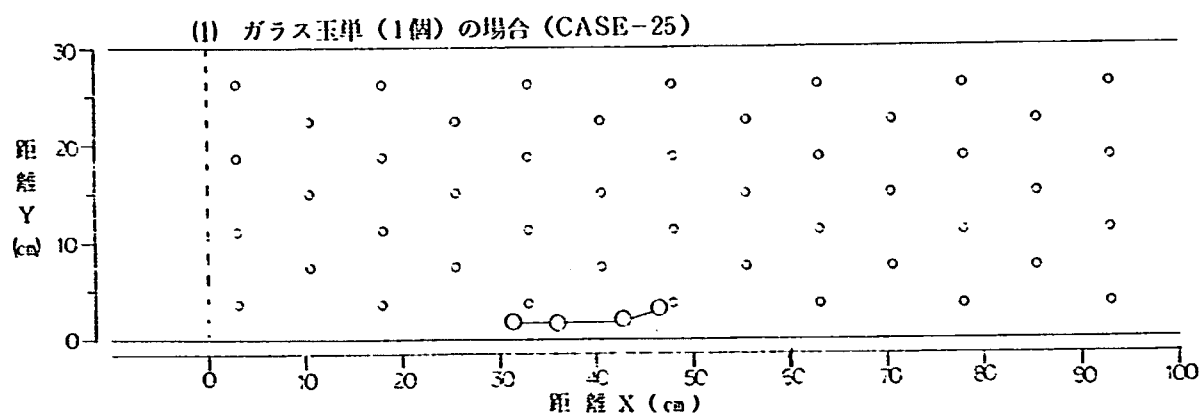
上流水路勾配	立木配置	樹林密度	立木径
25°	Dタイプ (間隔10cm)	P=0.5%	$\phi = 0.9\text{cm}$

図-4.1(3) ガラス玉の軌跡



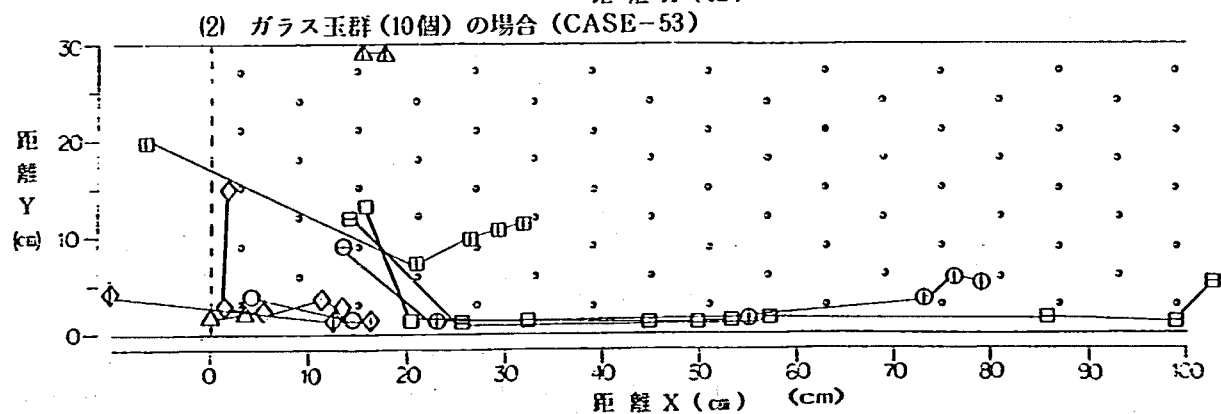
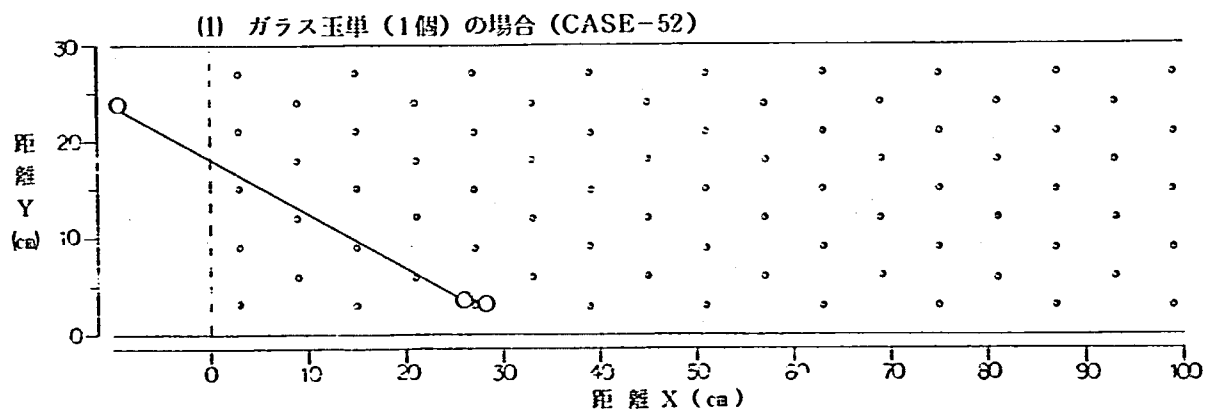
上流水路勾配	立木配置	樹林密度	立木径
25°	Bタイプ (間隔6cm)	P=1.5%	$\phi = 0.9\text{cm}$

図-4.1(4) ガラス玉の軌跡



上流水路勾配	立木配置	樹林密度	立木径
25°	Cタイプ (間隔7.5cm)	P=1.0%	$\phi = 0.9\text{cm}$

図-4.1(5) ガラス玉の軌跡



上流水路勾配	立木配置	樹林密度	立木径
25°	Bタイプ (間隔6cm)	P=0.5%	$\phi = 0.5\text{cm}$

図-4.1(6) ガラス玉の軌跡

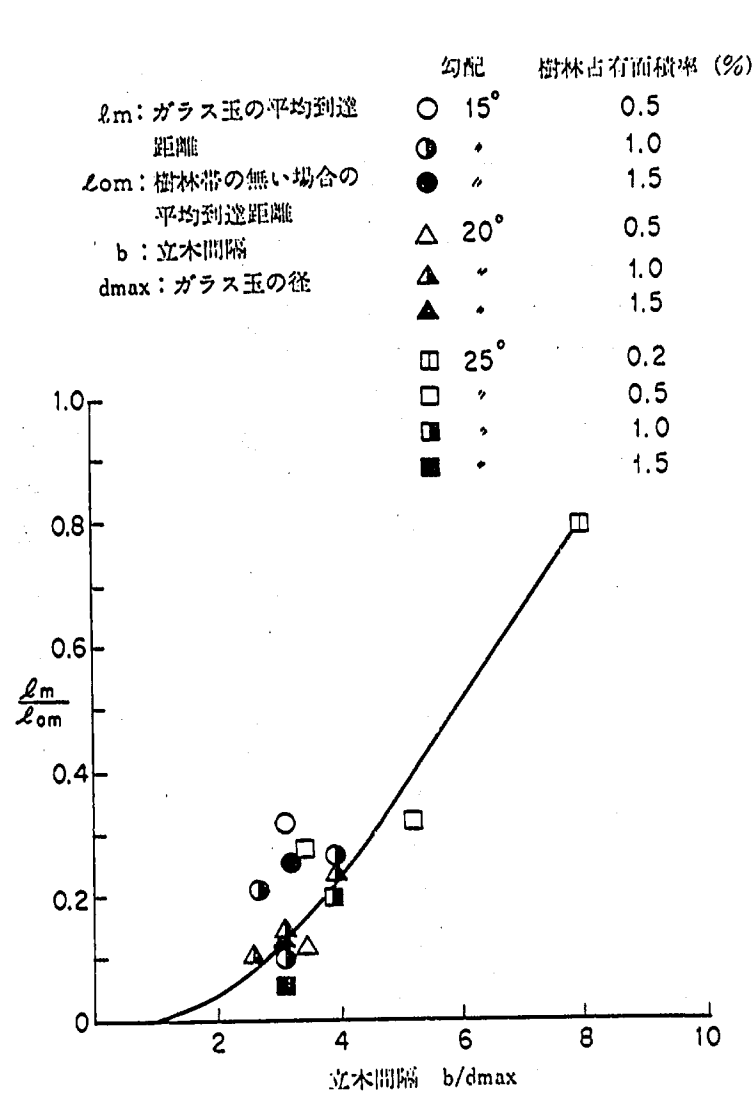


図-4.2(1) ガラス玉の平均到達距離比と立木間隔の関係

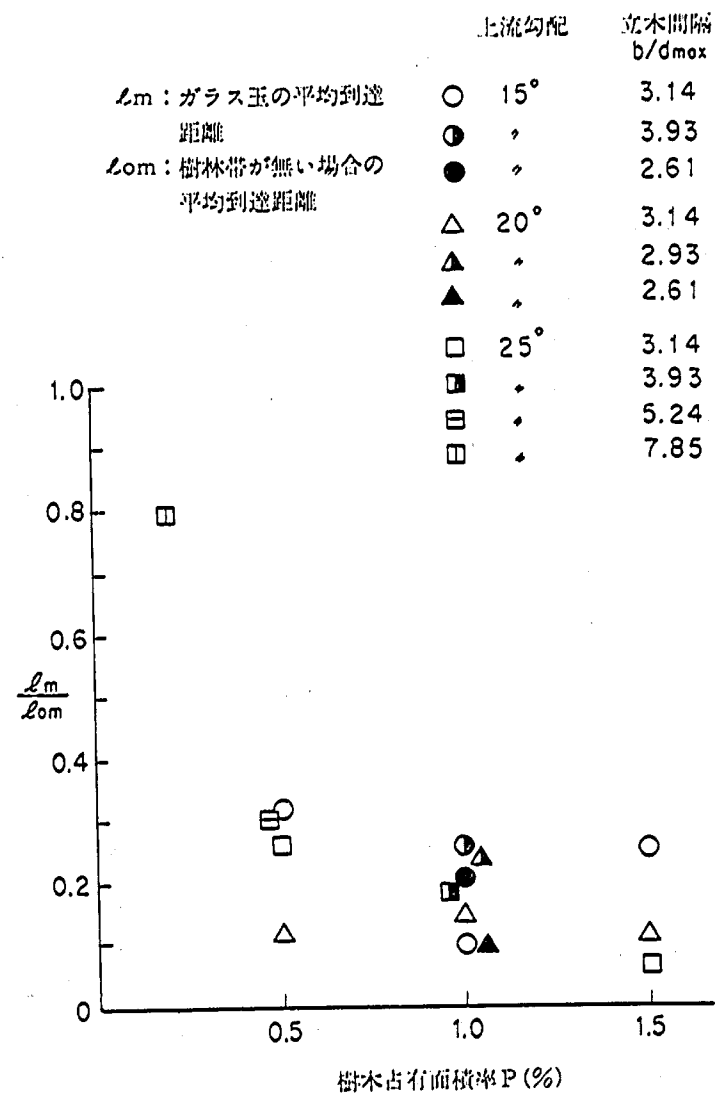
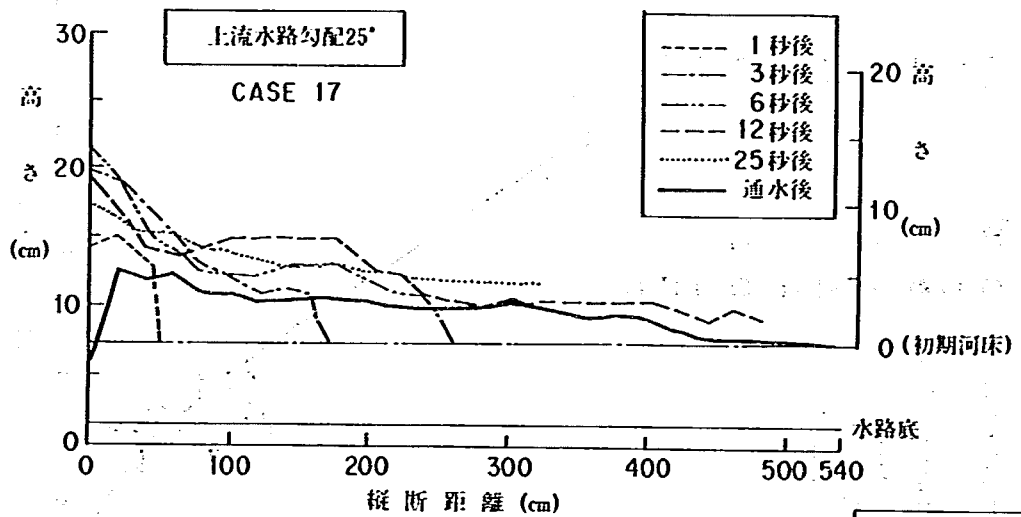
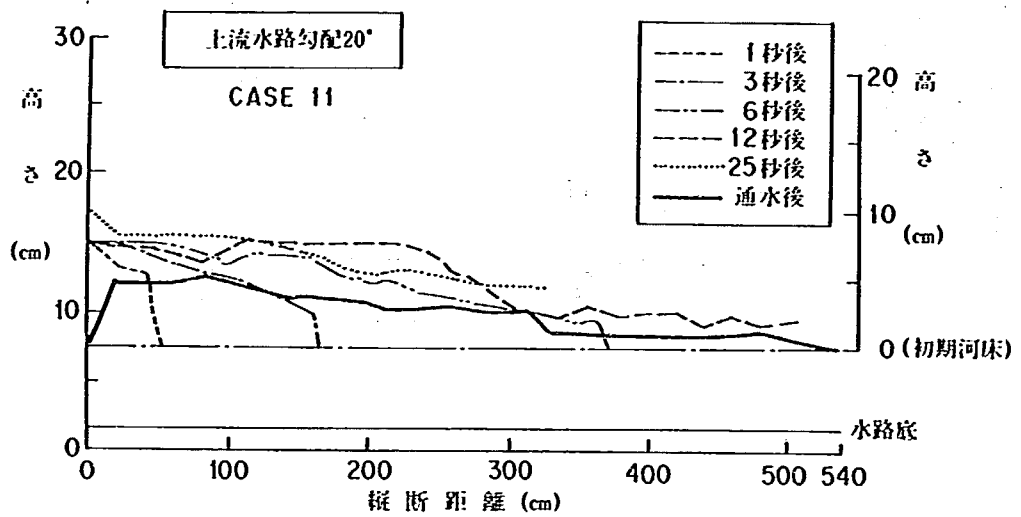
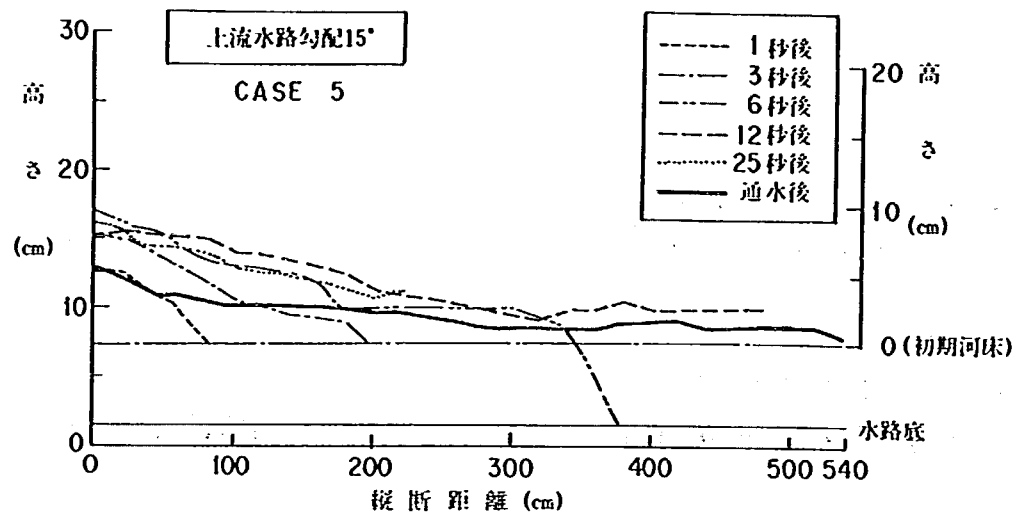
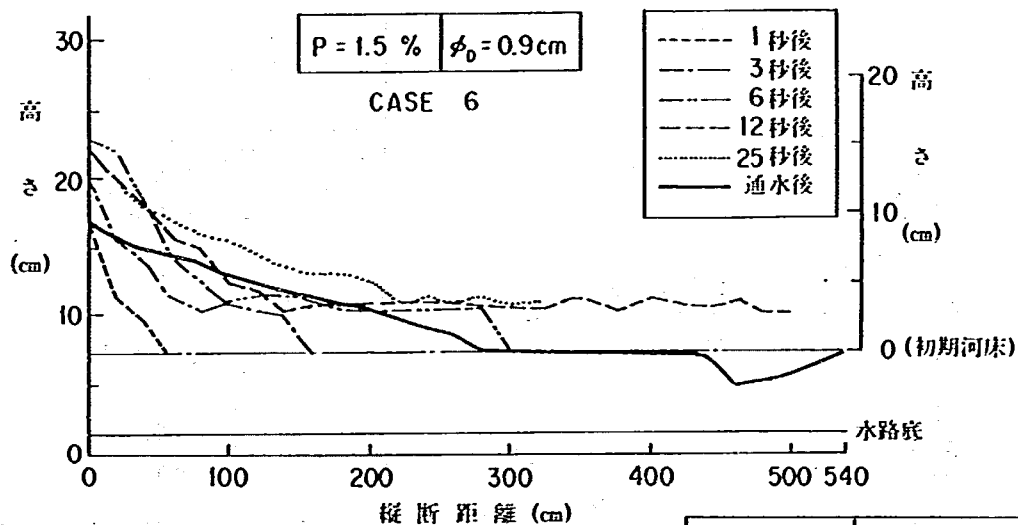
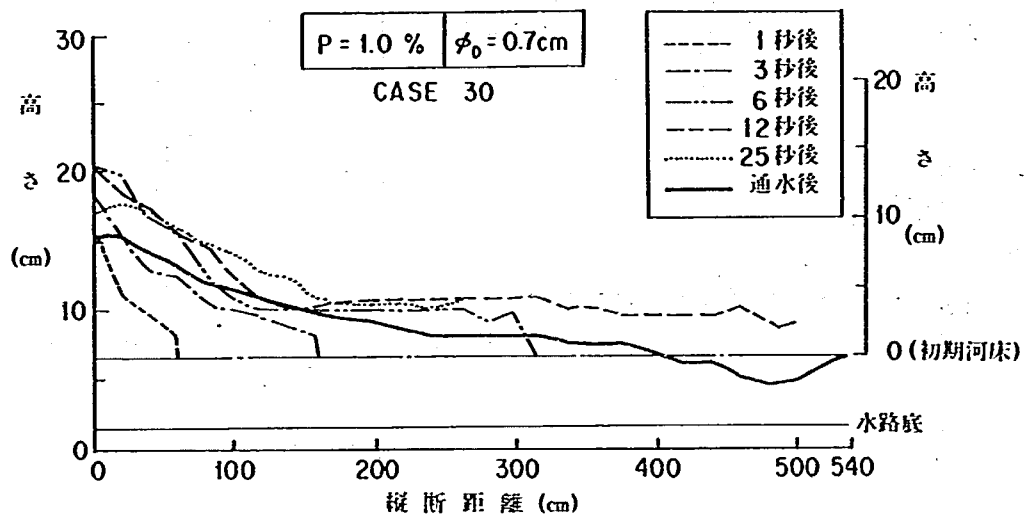
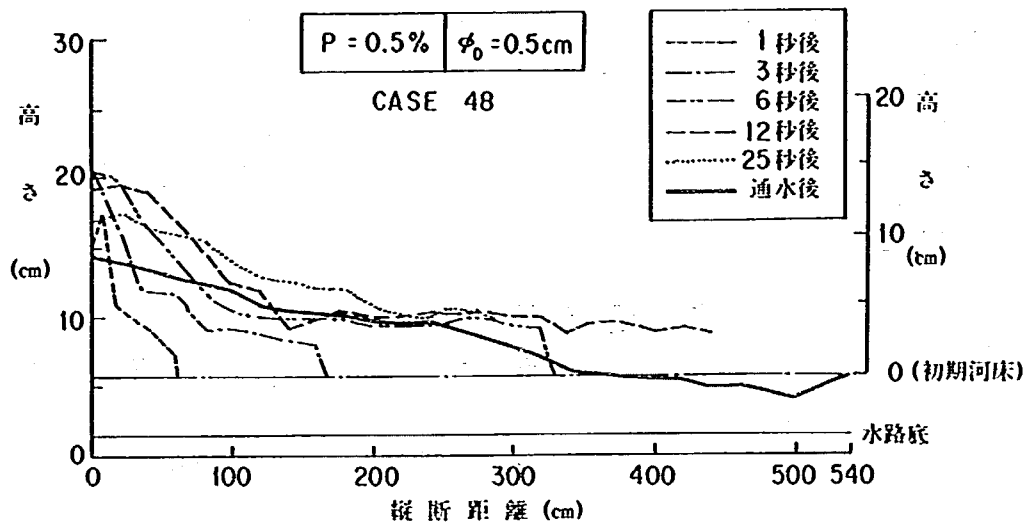


図-4.2(2) ガラス玉の平均到達距離比と樹木占有面積率の関係



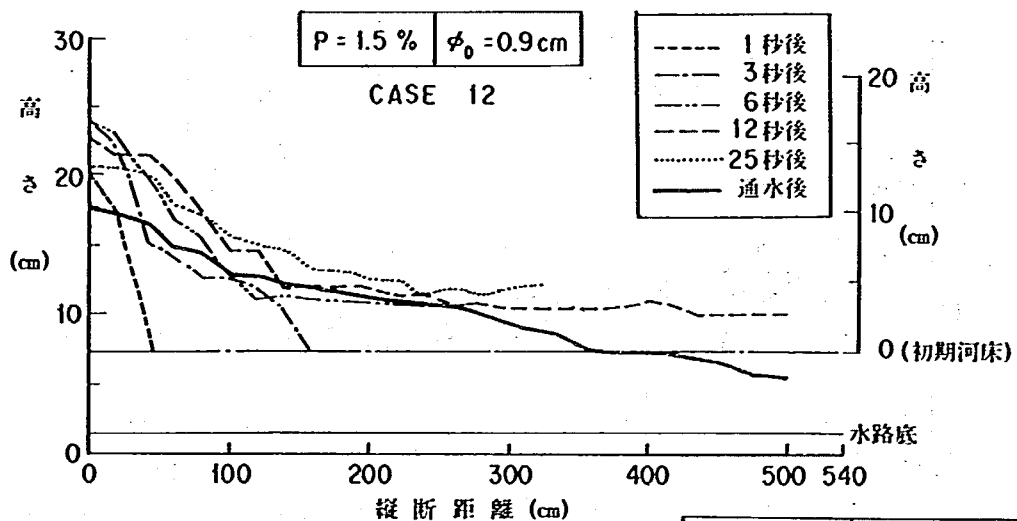
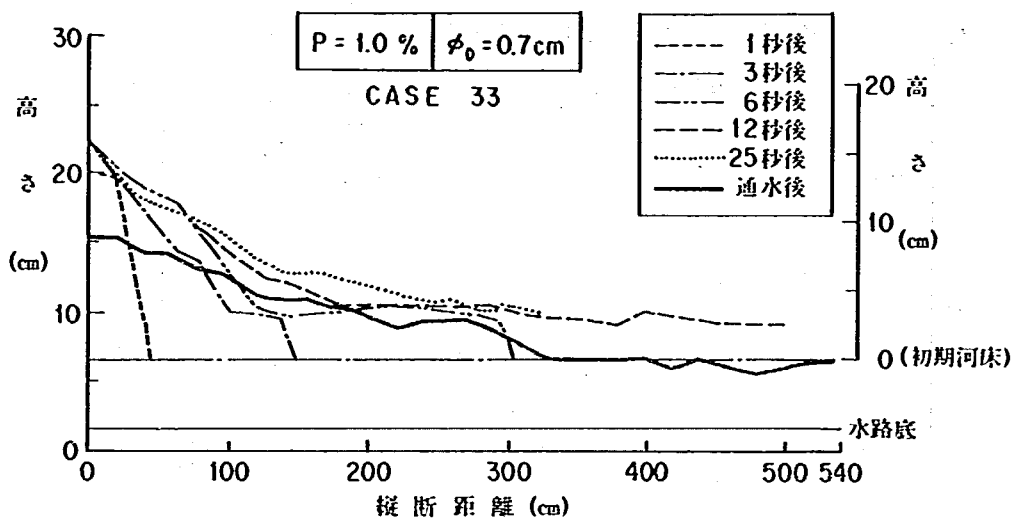
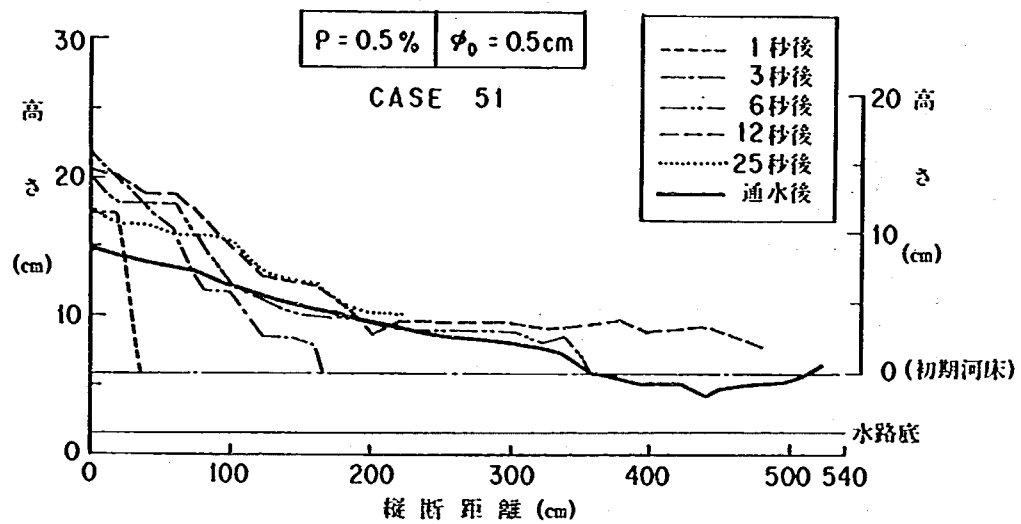
無施設

図-4.3 水面形の時間的变化



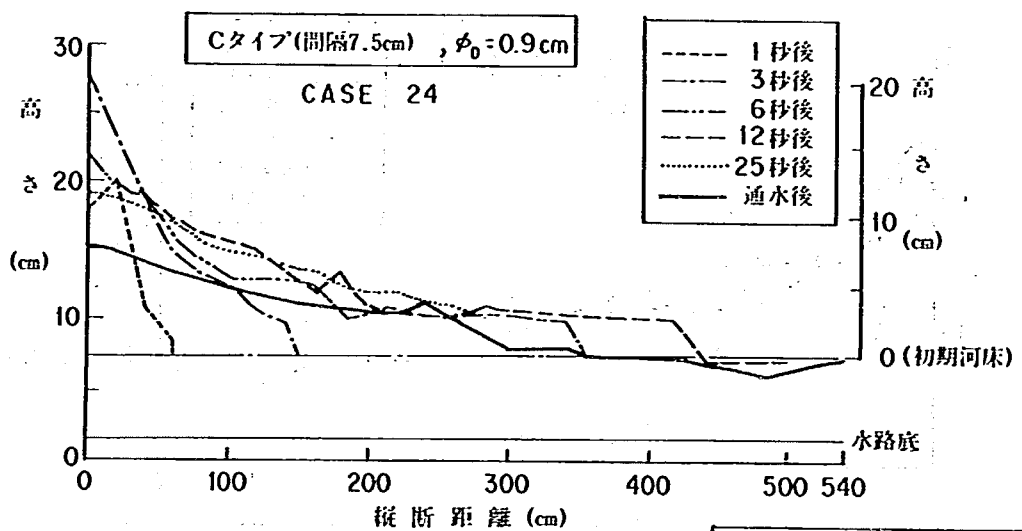
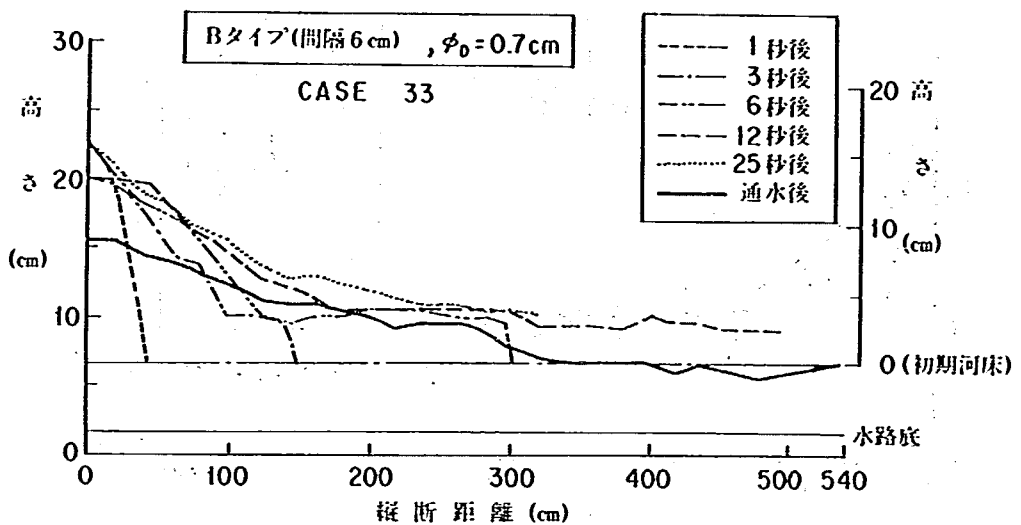
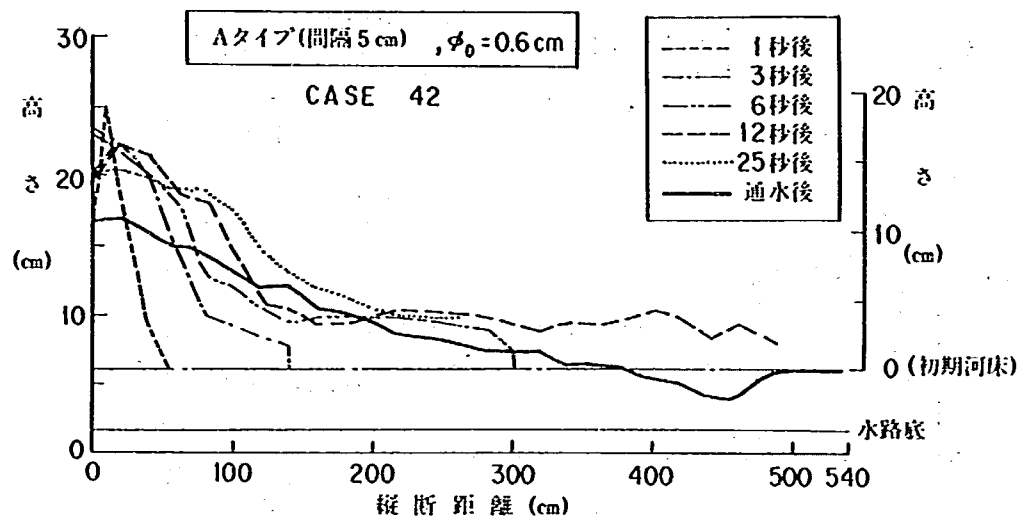
上流水路勾配	立木配置
15°	Bタイプ(間隔6cm)

図-4.4(1) 水面形の時間的变化
— 樹林密度による比較(間隔一定, 径変化) —



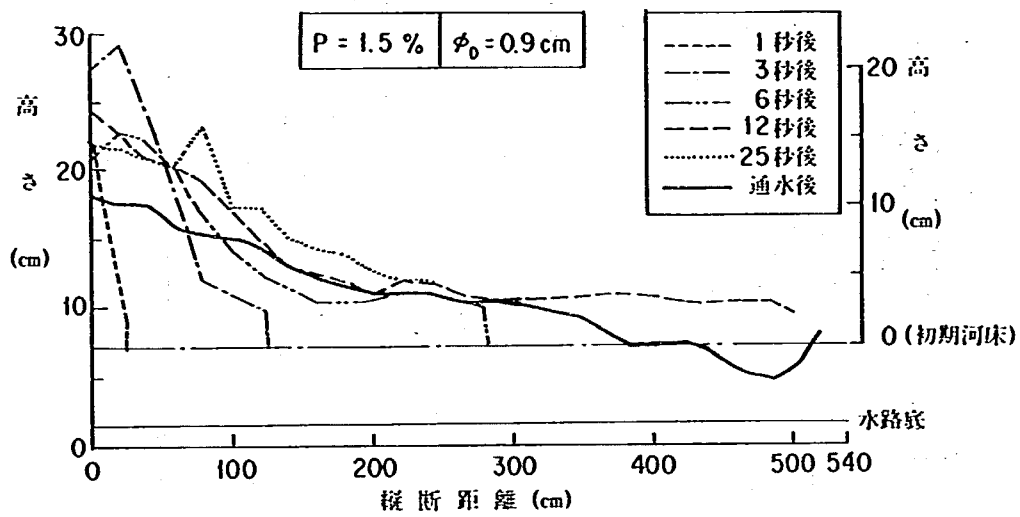
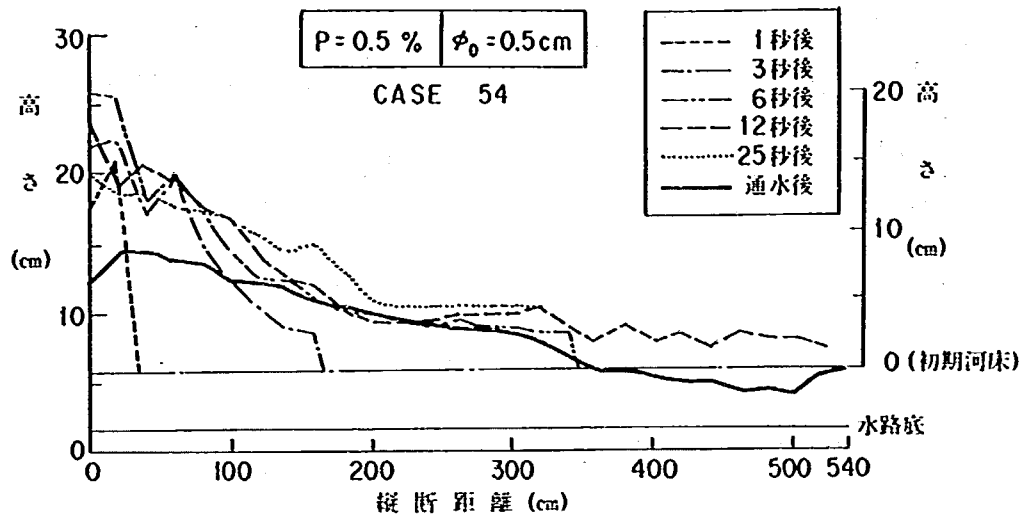
上流水路勾配	立木配置
20°	Bタイプ(間隔6cm)

図-4.4(3) 水面形の時間的变化
— 樹林密度による比較(間隔一定, 径変化) —



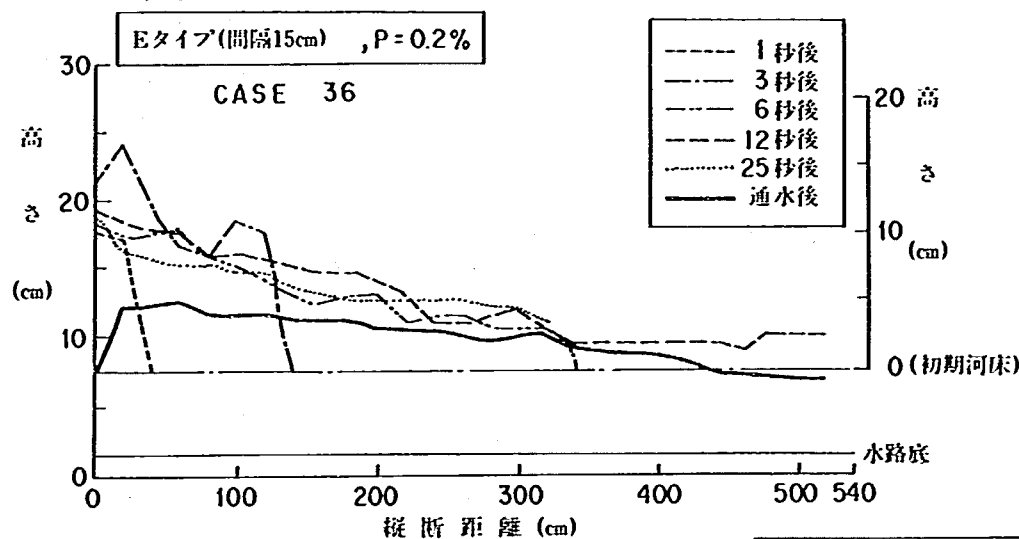
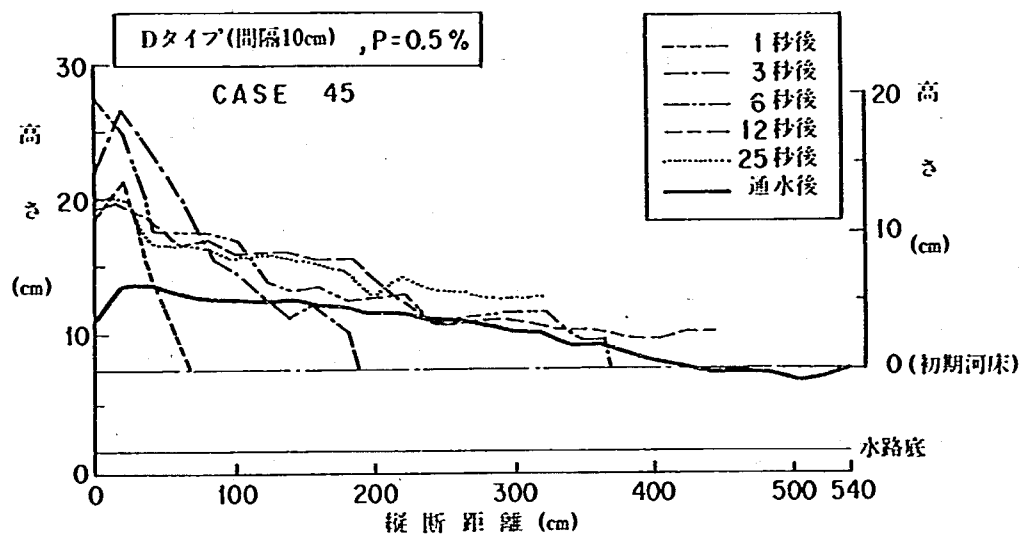
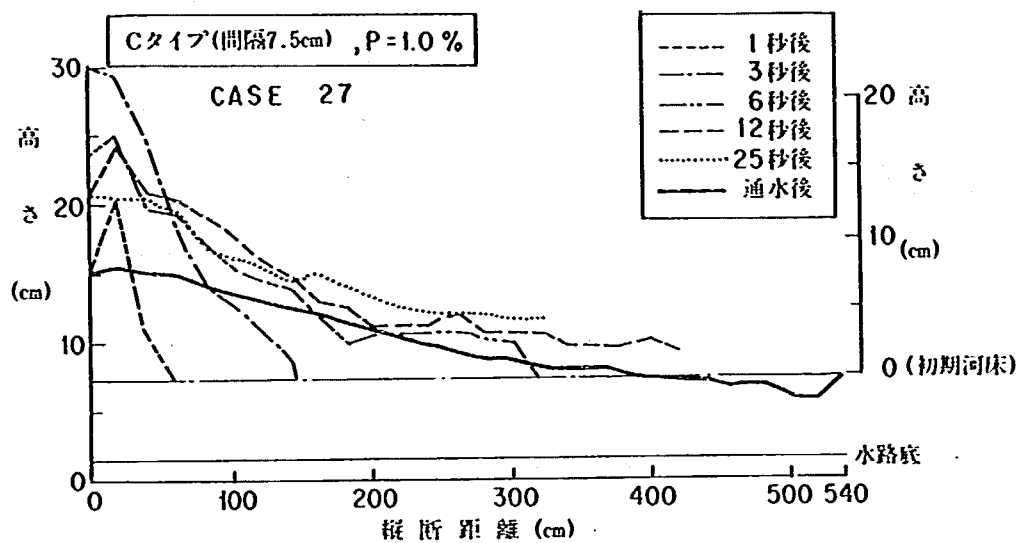
上流水路勾配	樹木占有面積率
20°	P = 1.0 %

図-4.4(4) 水面形の時間的变化
— 立木間隔による比較(密度一定、径変化) —



上流水路勾配	立木配置
25°	Bタイプ(間隔6 cm)

図-4.4(5) 水面形の時間的变化
 — 樹林密度による比較(間隔一定、径変化) —



上流水路勾配	立木径
25	$\phi_0 = 0.9\text{ cm}$

図-4.4(6) 水面形の時間的变化
— 樹林密度及び立木間隔による比較(径一定) —

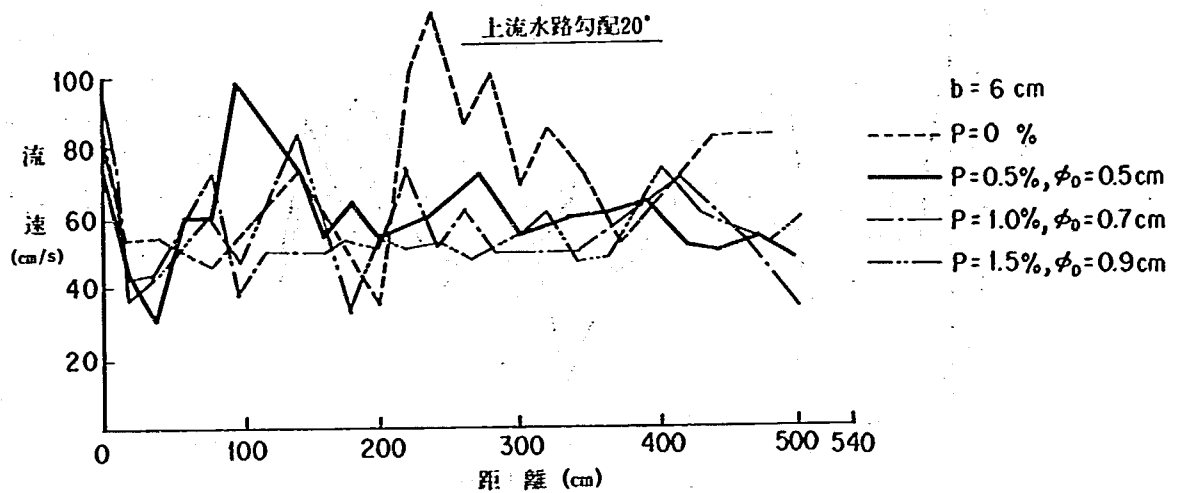
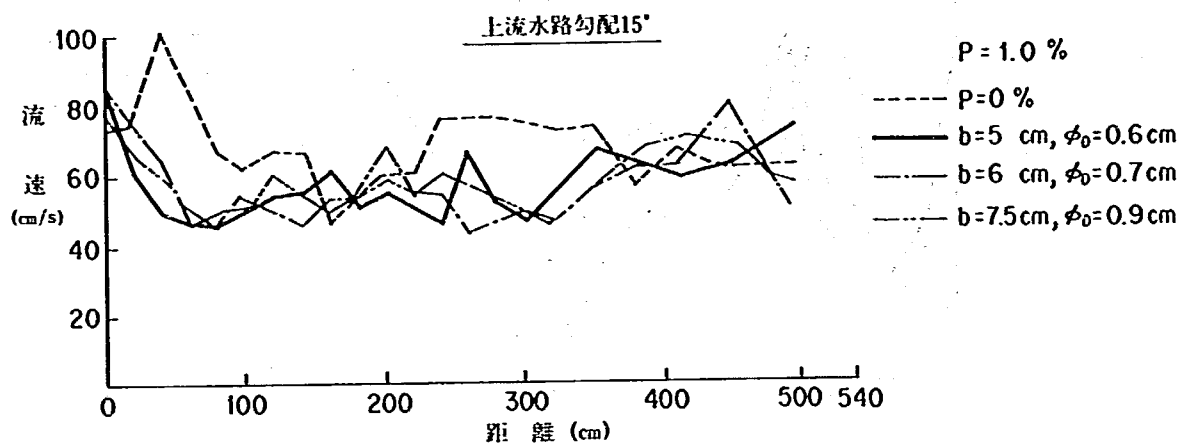
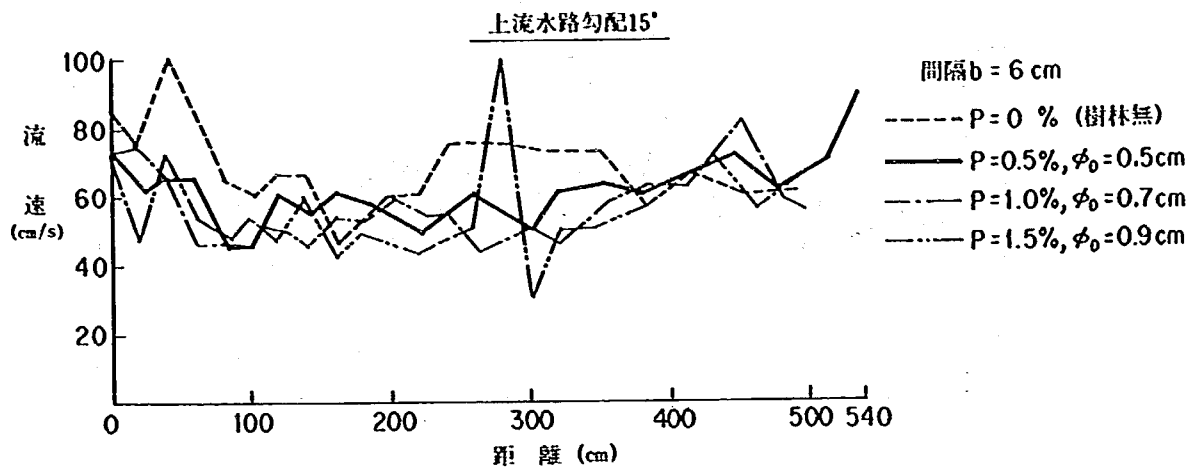


図-4.5(1) 流下距離と土石流フロント部の流速の関係
(勾配変化点を0 cmとする)

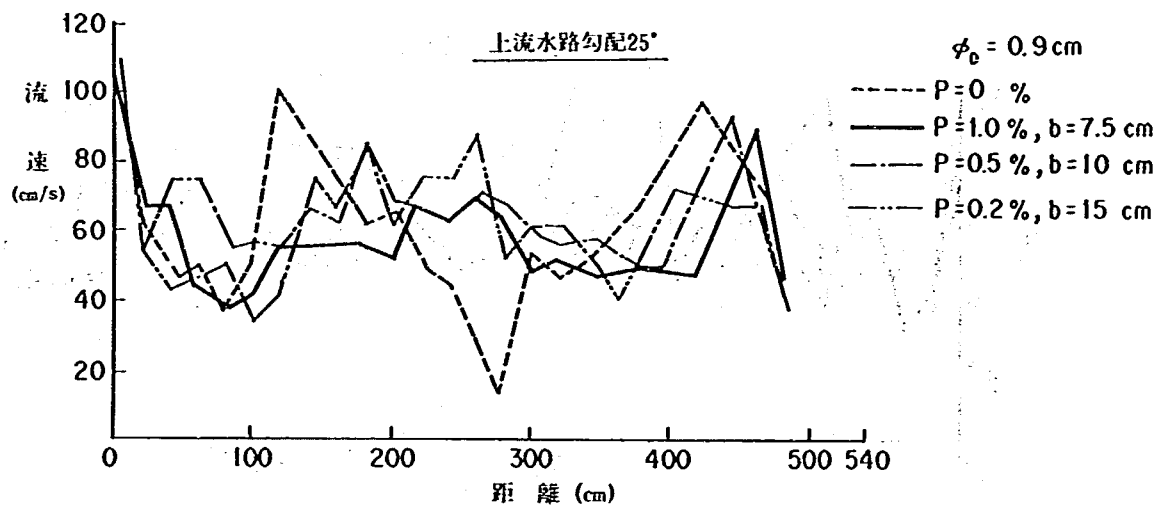
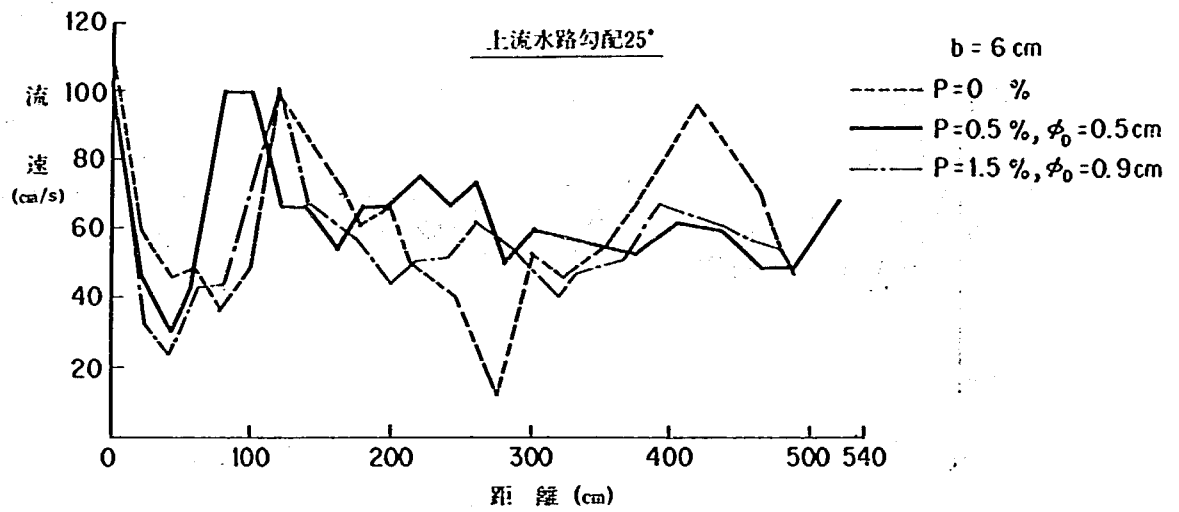
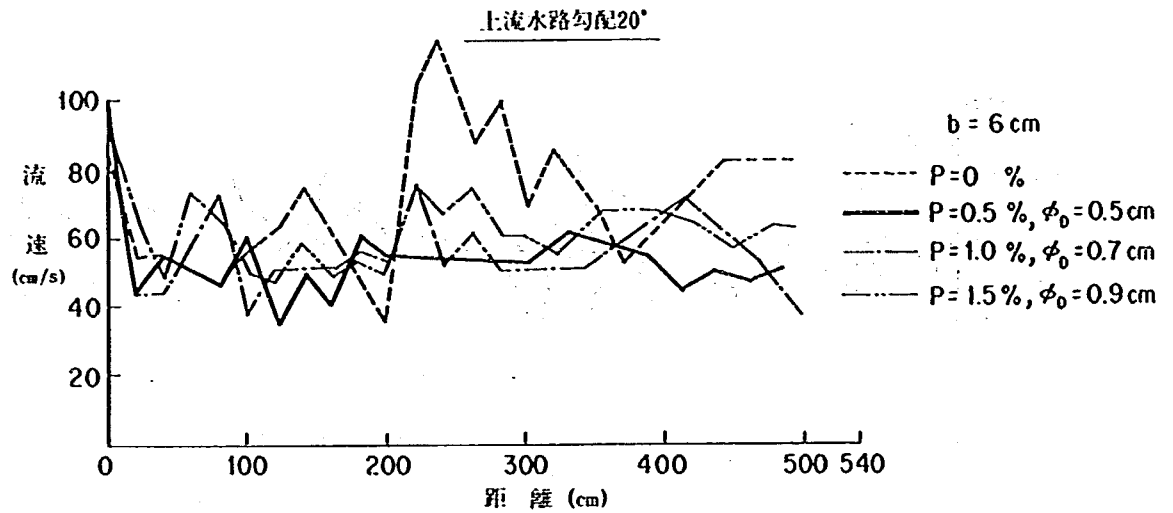


図-4.5(2) 流下距離と土石流フロント部の流速の関係
(勾配変化点を0 cmとする)

樹林密度による変化 (径一定, 間隔変化)

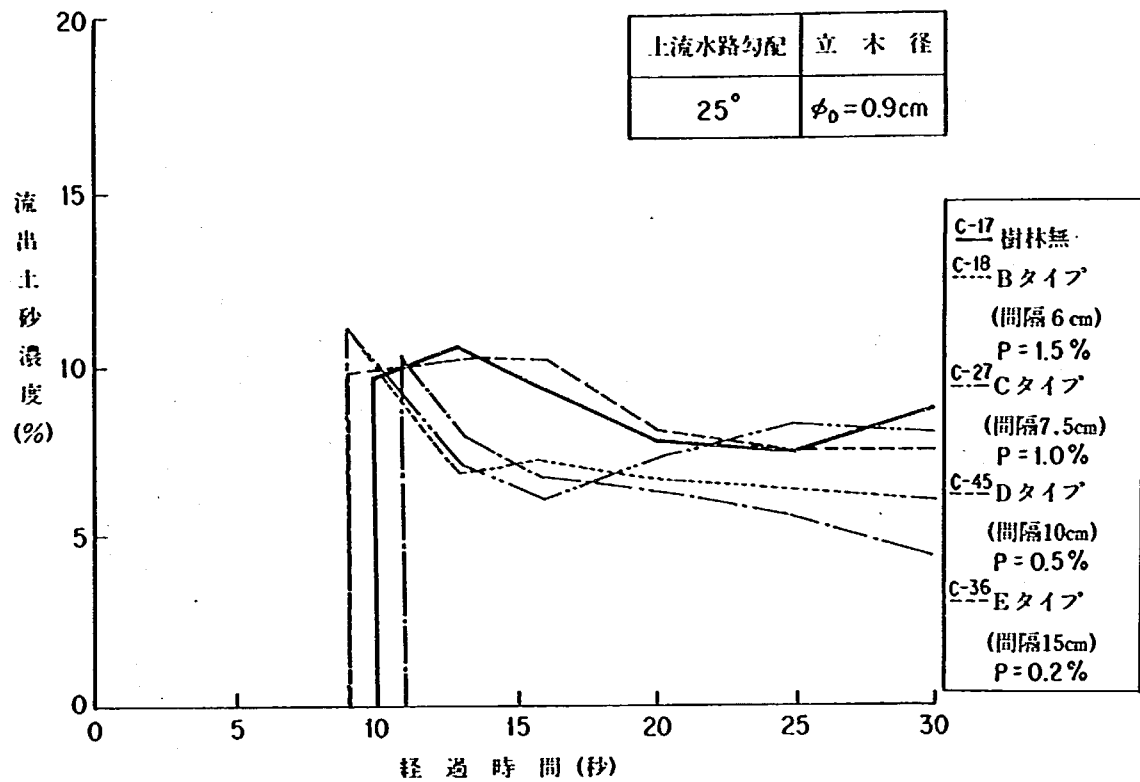


図-4.6(1) 流出土砂濃度の時間的变化

立木間隔による変化 (密度一定, 径変化)

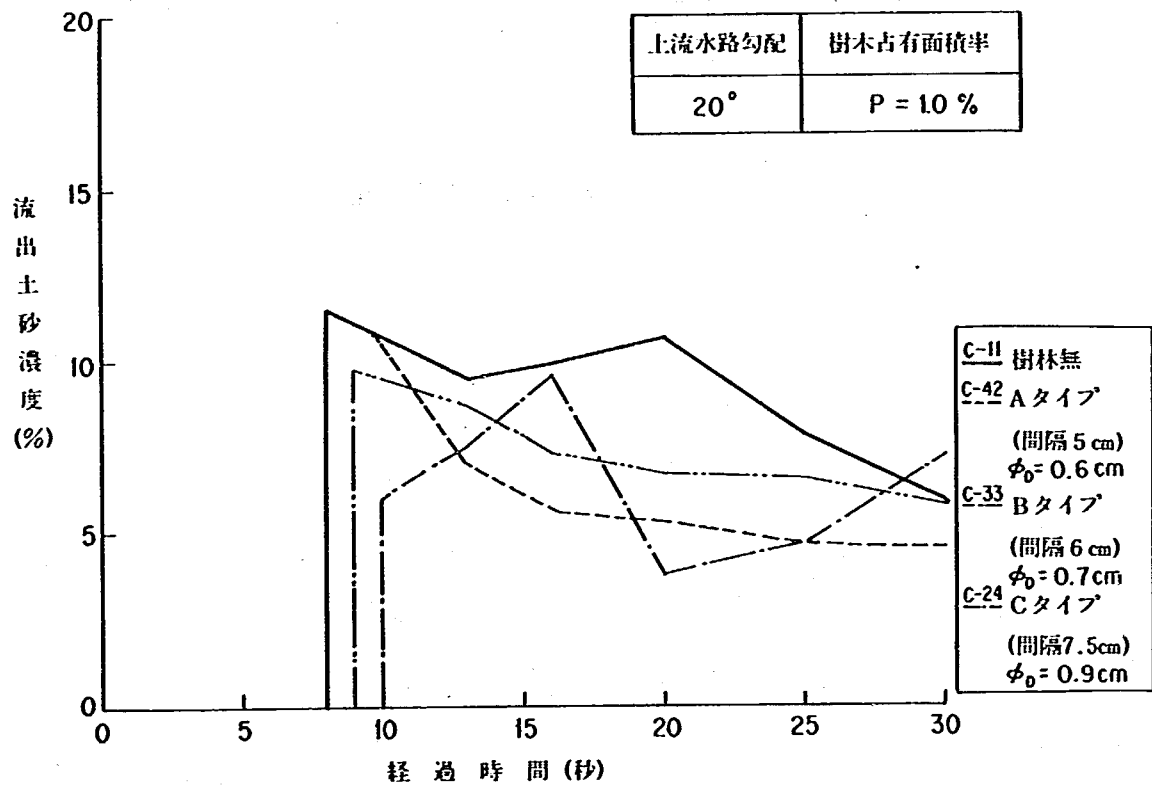


図-4.6(2) 流出土砂濃度の時間的变化

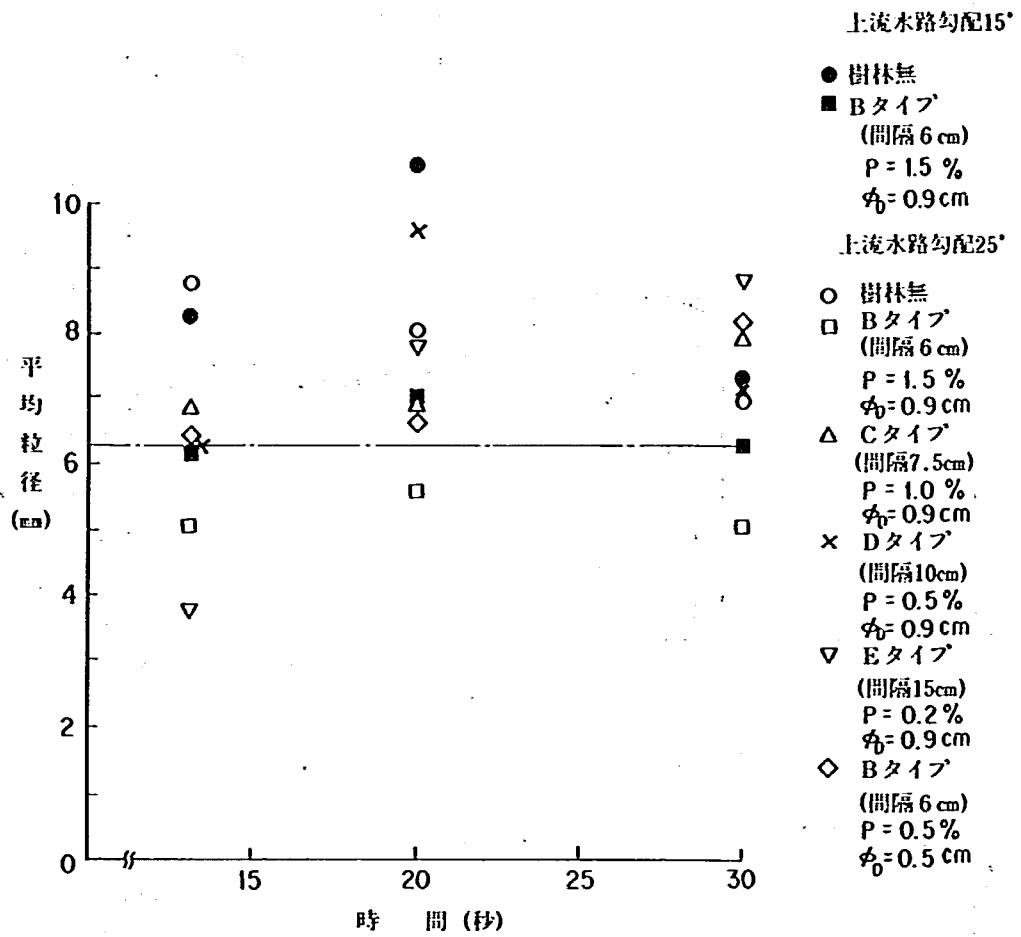
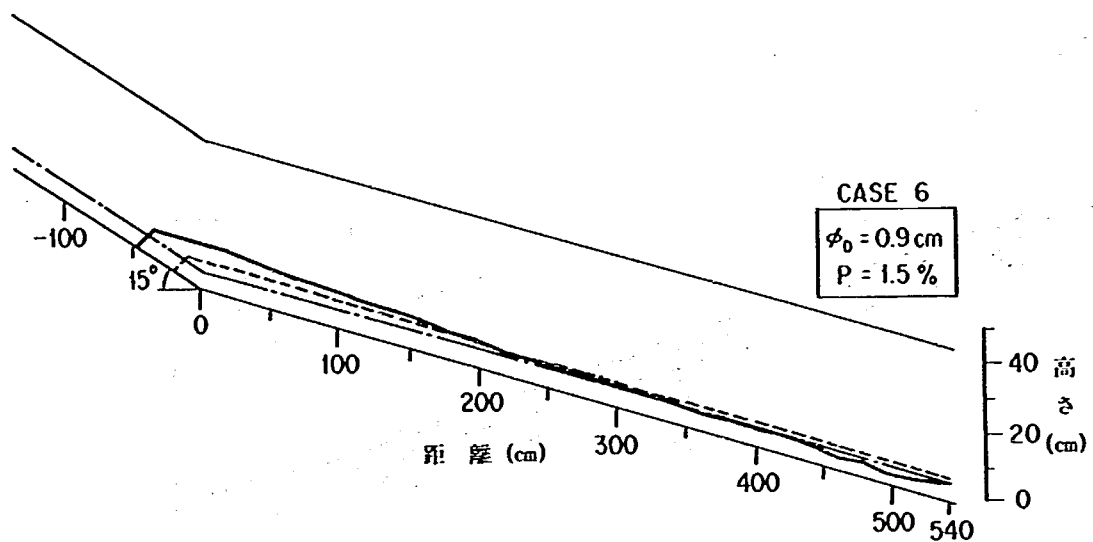
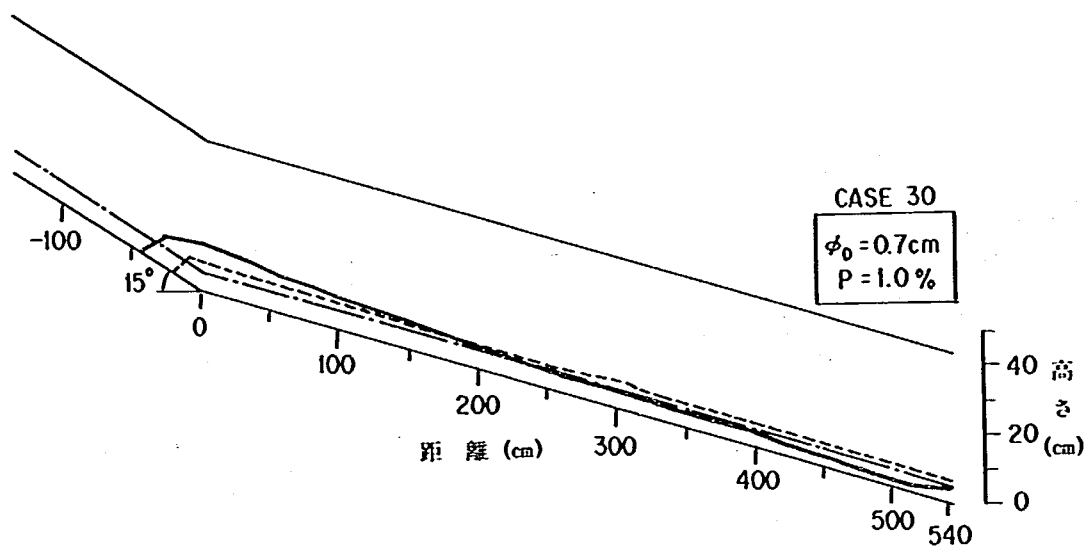
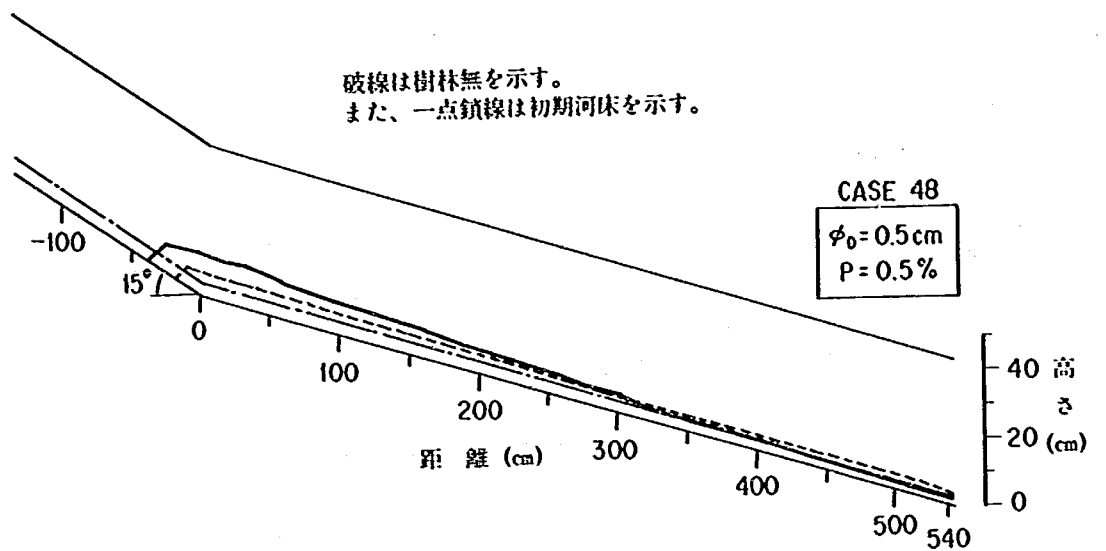
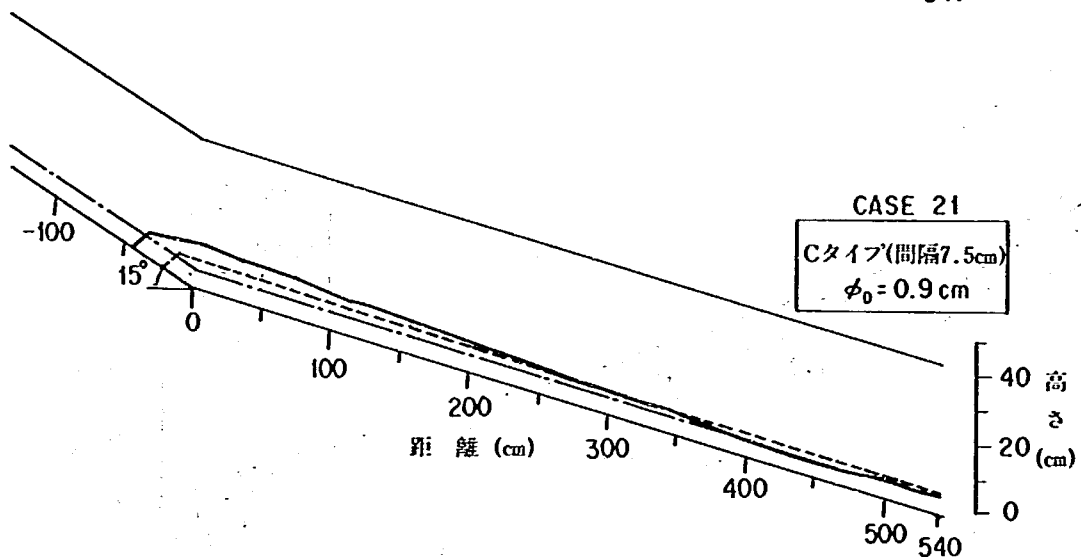
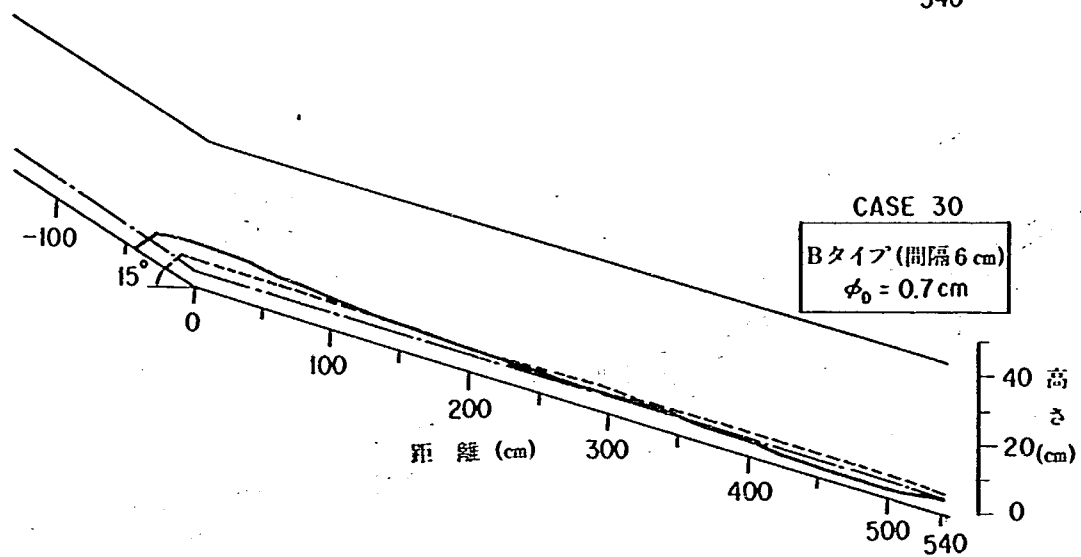
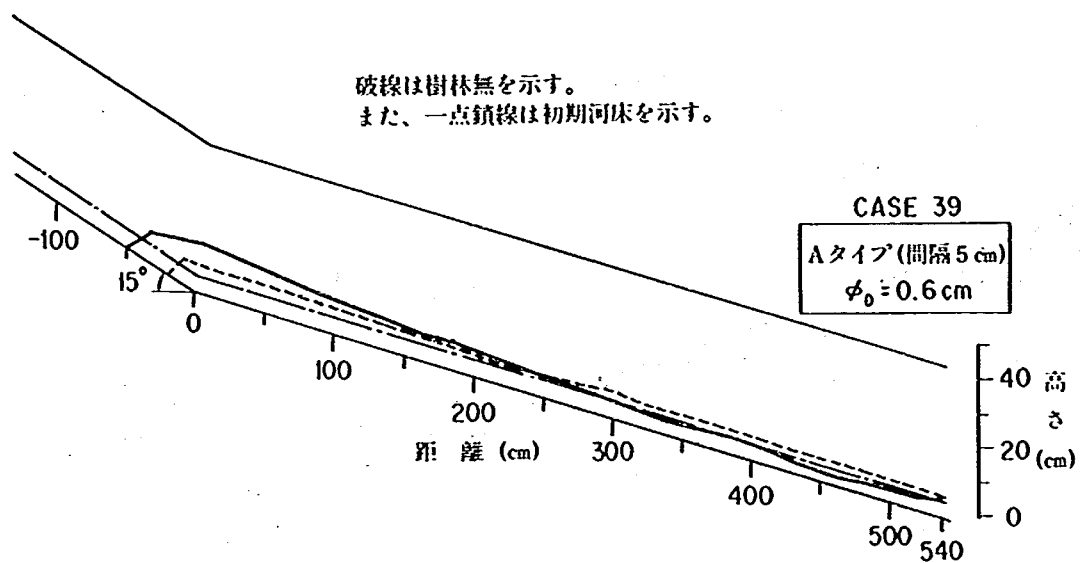


図-4.7 平均粒径の時間変化



上流水路勾配	立木配置
15°	Bタイプ(間隔6cm)

図-4.8(1) 通水終了後河床縦断面図



上流水路勾配	樹木占有面積率
15°	P = 1.0 %

図-4.8(2) 通水終了後河床縦断面図

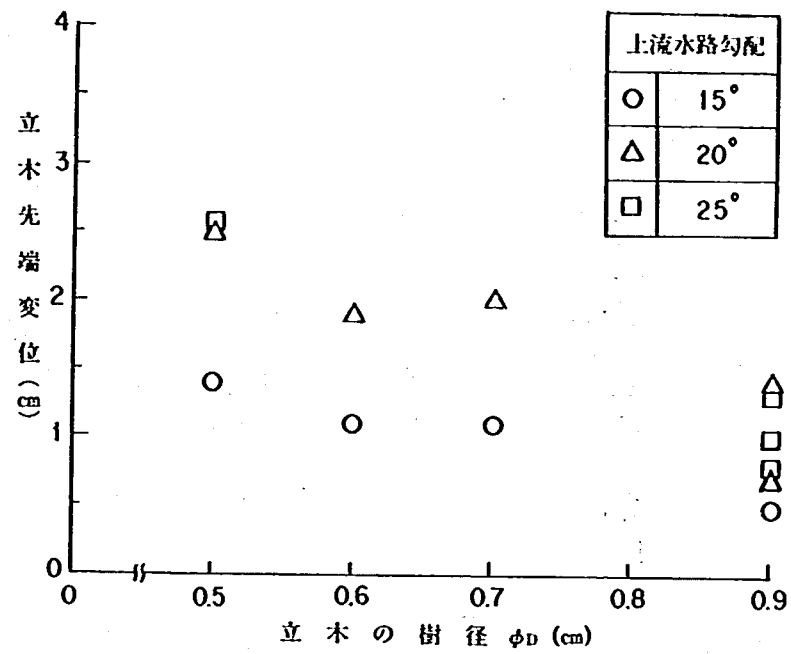
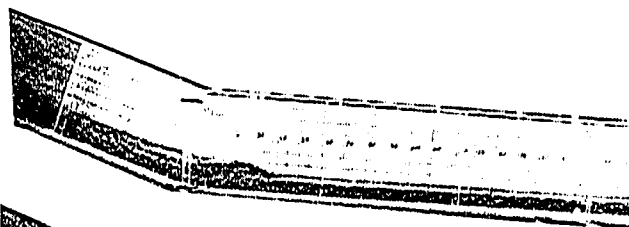
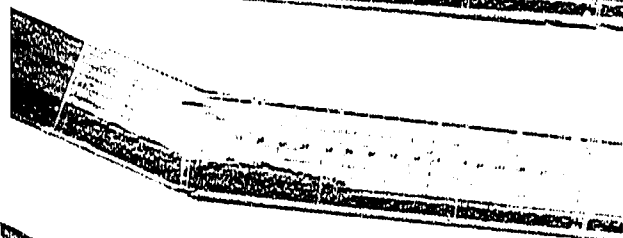


図-4.9 立木径と立木先端変位の関係

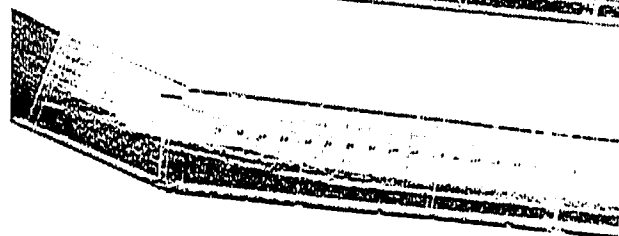
C-17-1
0.7 sec



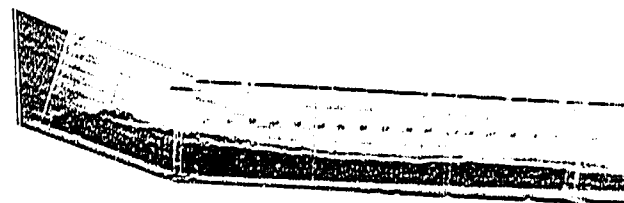
C-17-2
1.6 sec



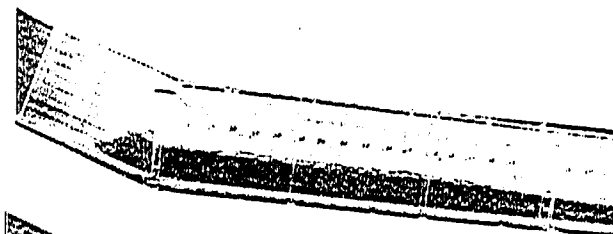
C-17-3
4 sec



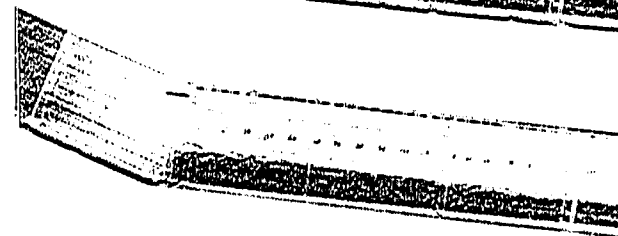
C-17-4
15 sec



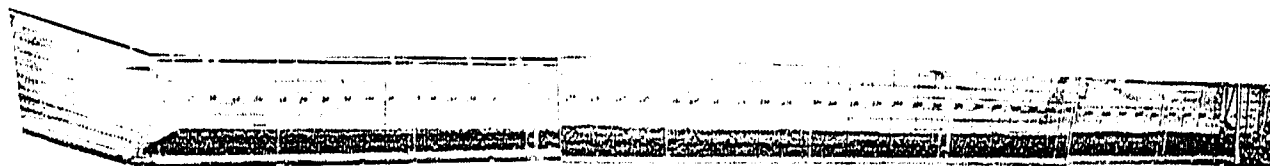
C-17-5
25 sec



C-17-6
30 sec



通水後
側面



通水後
上面

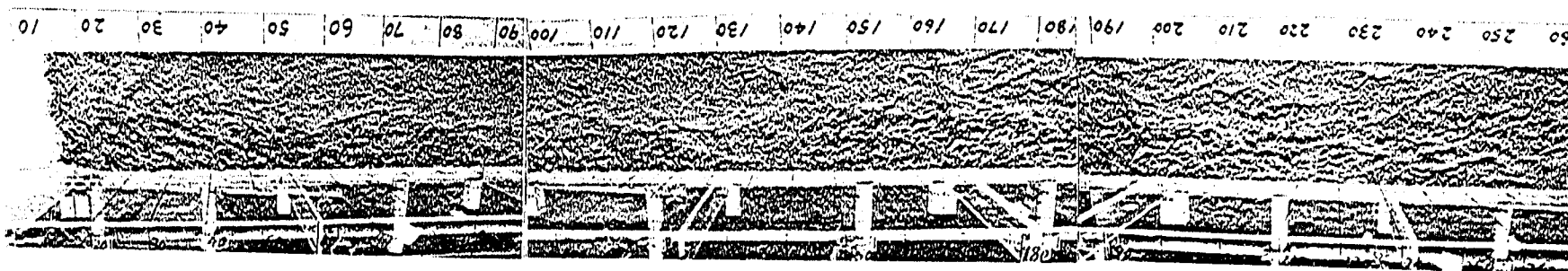
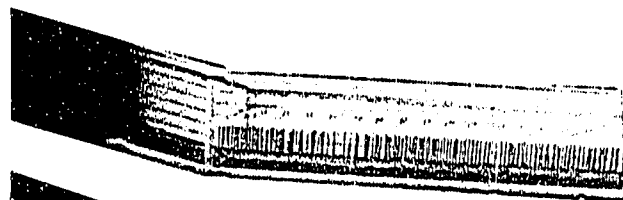


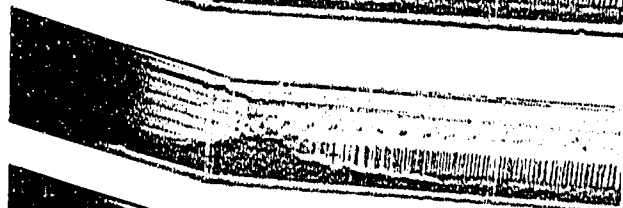
写真 - 4.1 流況写真

CASE	上流水路勾配	樹木占有面積率	立木配置	立木径	ガラス玉	土石流
17	25	0%	—	—	—	○

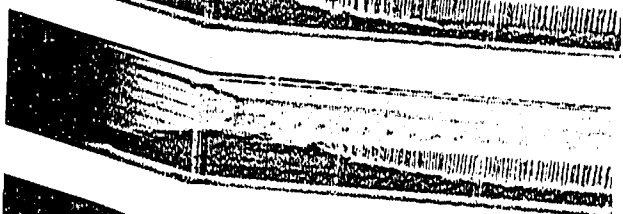
C-42-1
0 s.c



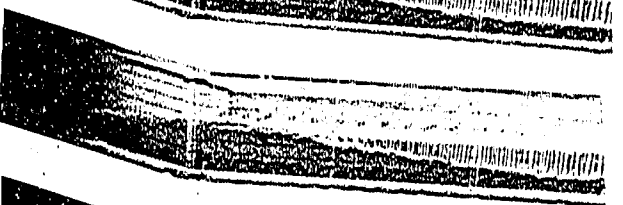
C-42-2
2.0 s.c



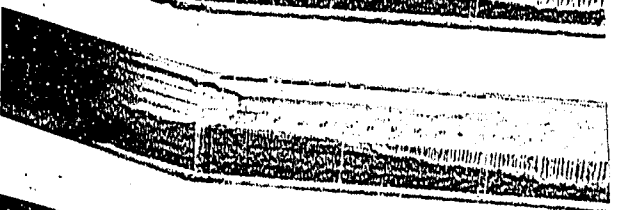
C-42-3
5 s.c



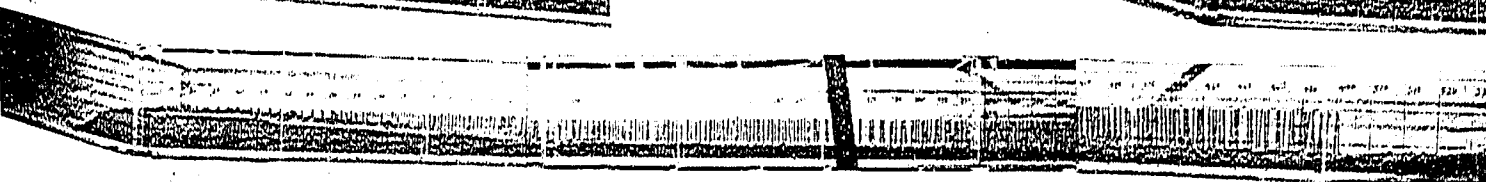
C-42-4
10 s.c



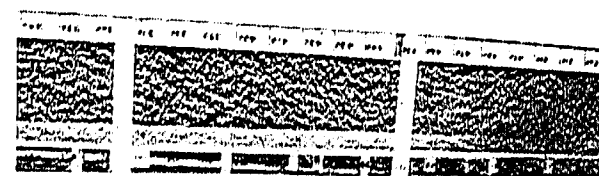
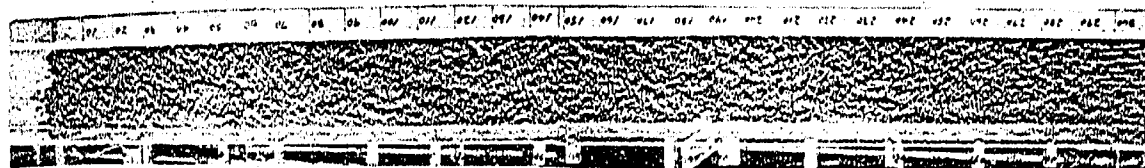
C-42-5
15 s.c



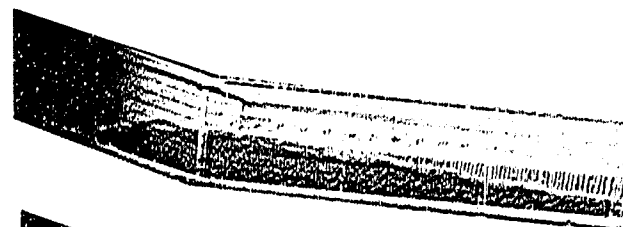
通水後
側面



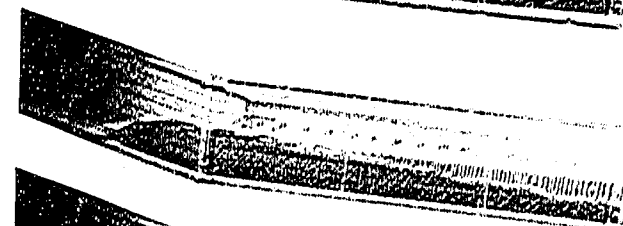
通水後
上面



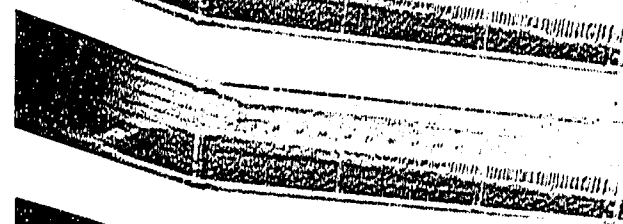
C-42-6
20 s.c



C-42-7
25 s.c



C-42-8
30 s.c



C-42-9
通水後

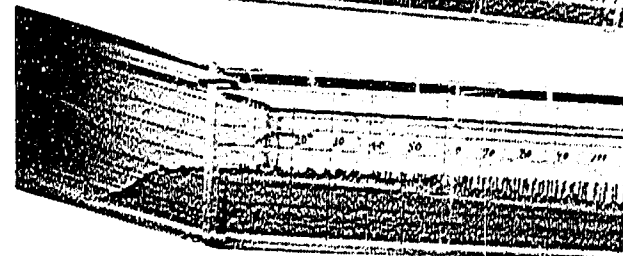
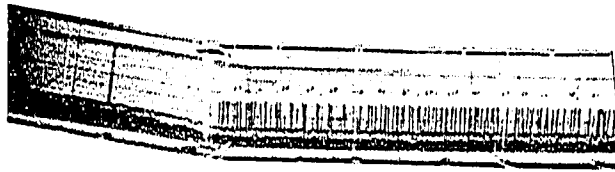


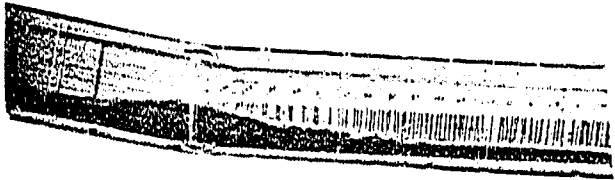
写真 - 4.2(1) 流況写真

CASE	上流水路勾配	樹木占有面積率	立木配置	立木径	ガラス玉	土石流
42	20	1.0 %	Aタイプ (間隔 5 cm)	0.6 cm	—	○

C-30-1
0 s.c



C-30-2
4 s.c



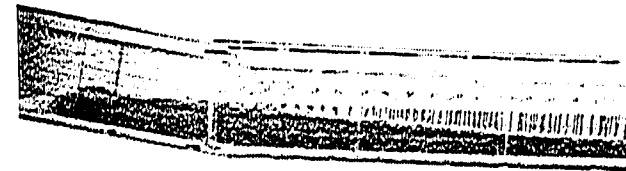
C-30-3
7 s.c



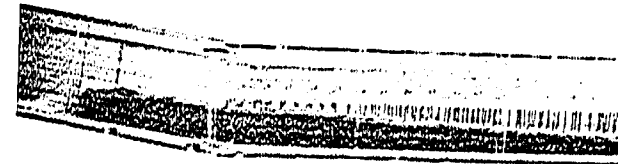
C-30-4
10 s.c



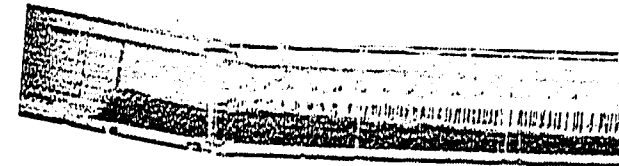
C-30-5
15 s.c



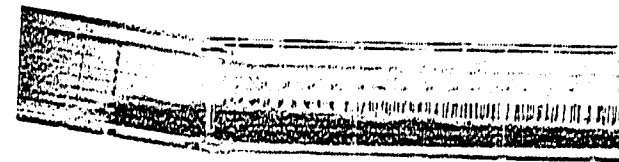
C-30-6
20 s.c



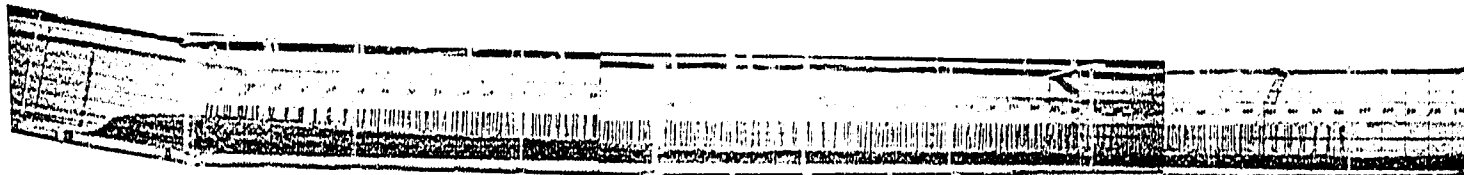
C-30-7
25 s.c



C-30-8
30 s.c



通水後
側面



通水後
上面

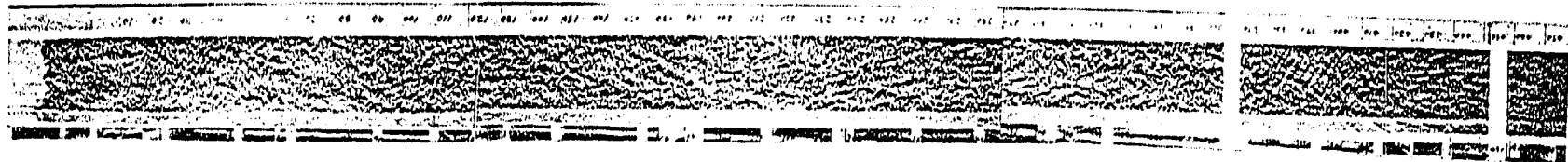
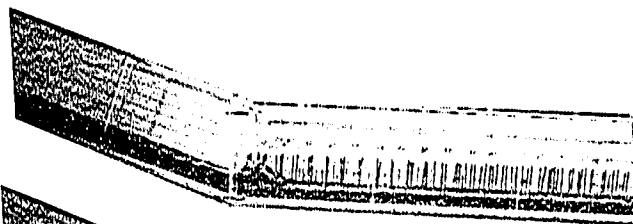


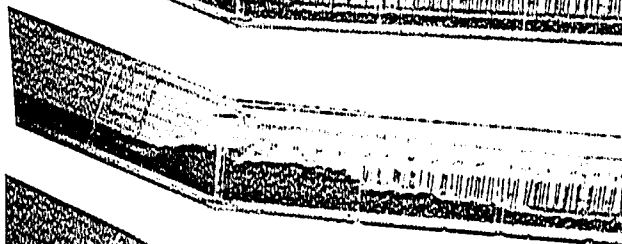
写真-4.2(2) 流況写真

CASE	上流水路勾配	樹木占有面積率	立木配置	立木径	ガラス玉	土石流
30	15	1.0%	Bタイプ(間隔6cm)	0.7cm	—	○

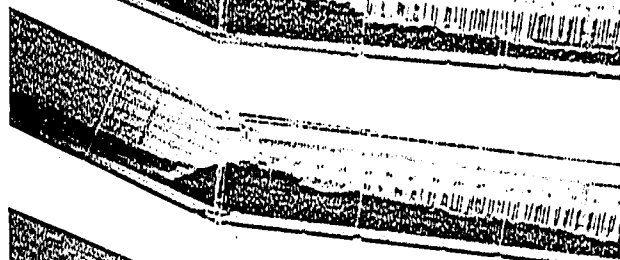
C-27-1
0.3 sec



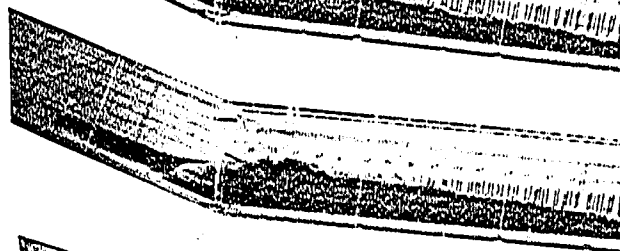
C-27-2
2.8 sec



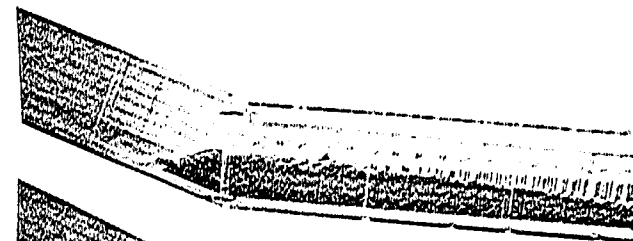
C-27-3
6 sec



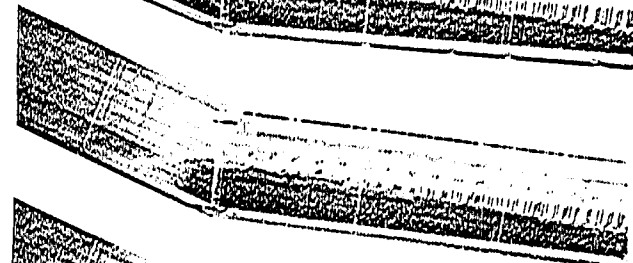
C-27-4
10 sec



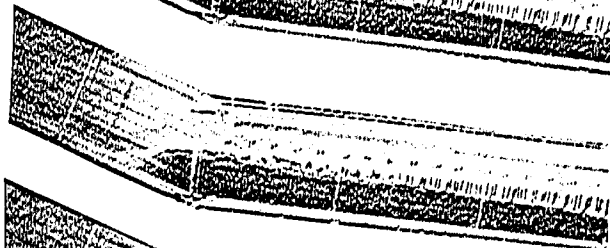
C-27-5
15 sec



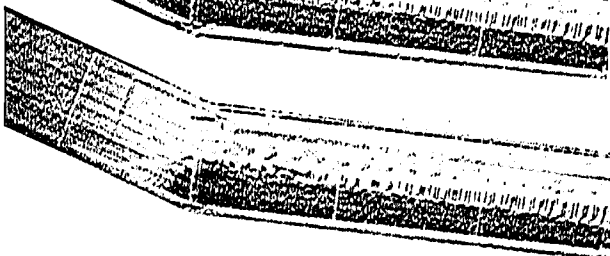
C-27-6
20 sec



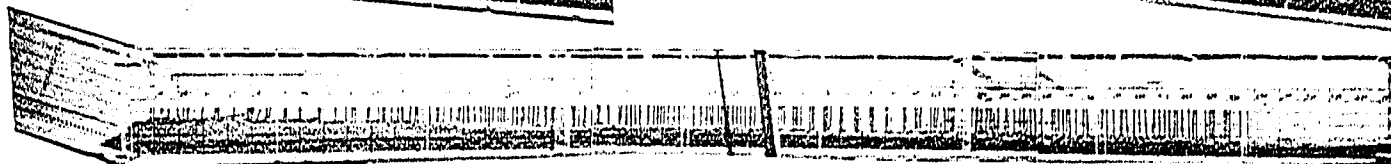
C-27-7
25 sec



C-27-8
30 sec



通水後
側面



通水後
上面

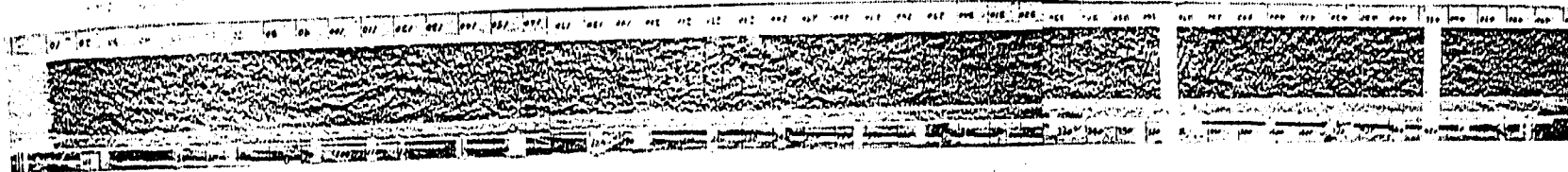
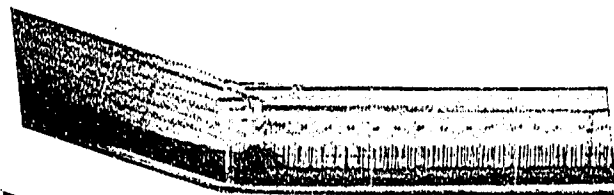


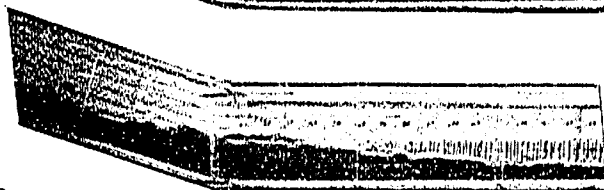
写真-4.2(3) 流況写真

CASE	上流水路勾配	樹木占有面積率	立木配置	立木径	ガラス玉	土石流
27	25	1.0%	Cタイプ(間隔7.5cm)	0.9cm	—	○

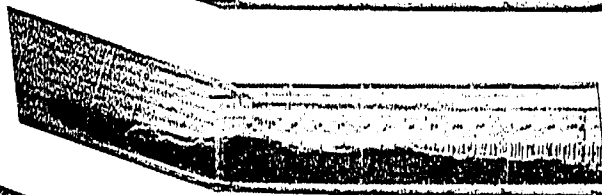
C-54-1
0.4 sec



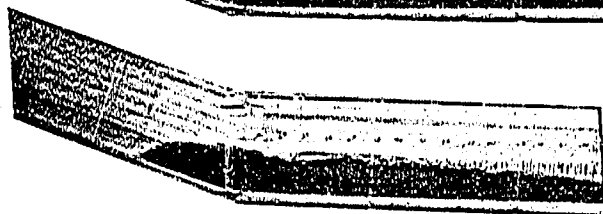
C-54-2
3 sec



C-54-3
8 sec



C-54-4
10 sec



C-54-5
15 sec



C-54-6
20 sec



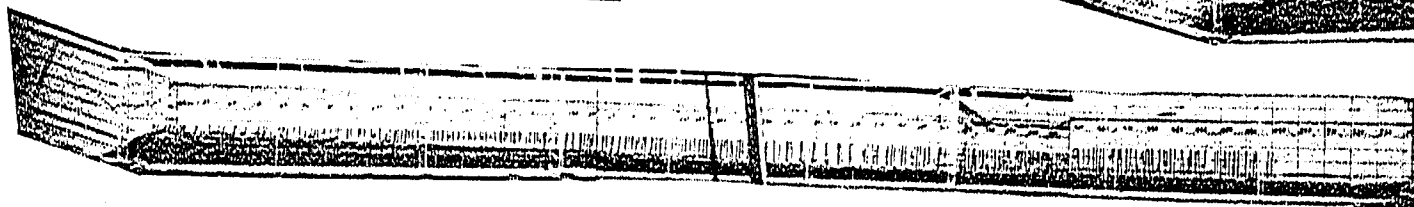
C-54-7
25 sec



C-54-8
30 sec



通水後
側面



通水後
上面

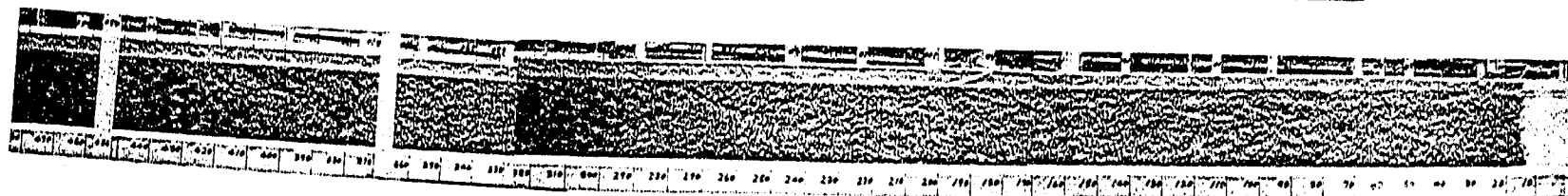


写真 - 4.2 (4) 流況写真

CASE	上流水路勾配	樹木占有面積率	立木配置	立木径	ガラス玉	土石流
54	25	0.5%	Bタイプ (間隔 6 cm)	0.5 cm	—	○

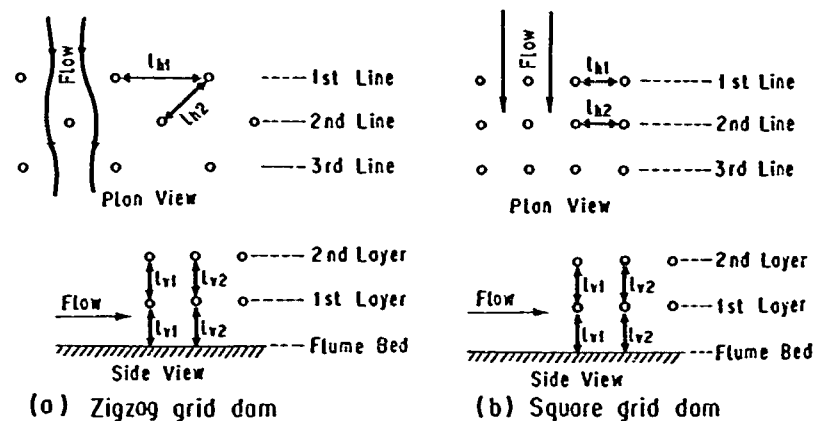
5. 樹林帯による土石流制御効果

5.1 礫の通過率

4.1 でガラス玉（礫）による流下・堆積の実験結果を述べた。樹林帯の設置により礫の通過率が減少していることから、ガラス玉（礫）の樹林帯での通過率について、芦田・江頭らの式⁶⁾を用いて考察する。

(1) 樹林帯における礫の通過モデル

芦田・江頭らは透過型砂防ダムにおける石礫の通過モデルとして、次のように考えた。



図－5.1 芦田・江頭の通過モデル図

図－5.1 は透過型砂防ダムにおける格子部材の平面及び側面における形状を表している。土砂の捕捉は石礫が部材に衝突あるいは接触した時に起こり、これ以外の場合には通過するものと考えた。そして第1列および第2列の部材を通過した土石は、全て通過するものとして、透過ダムにおける石礫の通過率を次のように導いている。

$$P = \frac{Q_{s.o.}}{Q_{s.d.}} = \sum_{i=1}^n f_i P_{1i} P_{2i} \quad (5.1)$$

ここに、 f_i は粒径 d_i の含有率、 n は粒径階の分割数である。 P_{1i} 、 P_{2i} はそれぞれ第1列、第2列における土石の通過率、 $Q_{s.o.}$ ；流出土砂量、 $Q_{s.d.}$ ；流入土砂量である。

$$\left. \begin{aligned} P_{1i} &= (\ell_{h1} - d_i) (\ell_{v1}) / \ell_{h1} \ell_{v1} \\ P_{2i} &= (\ell_{h2} - d_i) (\ell_{v2}) / \ell_{h2} \ell_{v2} \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

ここに ℓ_{h1} 、 ℓ_{v1} および ℓ_{h2} 、 ℓ_{v2} はそれぞれ第1列および第2列を構成する部材の水平距離、鉛直距離である。

この考え方を用いて、礫の樹林帯での通過モデルについては、図－5.1 の横部材を取り除いたものと考えることにより、第1列目における粒径 d の礫の通過率は次式のように考えられる。

$$P_1 = (\ell_{h1} - d) / \ell_{h1} \quad (5.3)$$

第2列目 …… 第k列目も同様に与えられる。したがって、樹林帯のk列目の隙の通過率を $P^{(k)}$ とすれば、次式のように与えられる。

$$P^{(k)} = P_1 P_2 P_3 \cdots P_k \cdots \quad (5.4)$$

(2) 樹林帯におけるガラス玉（隙）の通過率

(5.3) 式 および (5.4) 式を用いて、本実験での各立木配置タイプでの通過率は、以下のように計算される。ただし、水平距離 ℓ_h は立木間の純間隔（図中で 4.4 cm）であり、第2列目以降は千鳥型の配置であるため、純斜距離（図中で 5.0 cm）を用いた。

例えば、立木配置Aタイプ（間隔 5 cm）、 $\phi = 0.6$ cm の場合

$$\ell_{h1} = 5.0 - 0.6 = 4.4 \text{ cm}$$

$$\ell_{h2} = \ell_{h3} \cdots = \ell_{hk} = \sqrt{2.5^2 + 5^2} - 0.6 = 5.0 \text{ cm}$$

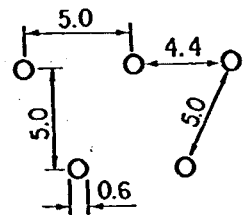
$$P_1 = \frac{4.4 - 1.7}{4.4} = 0.614$$

$$P_2 = P_3 \cdots P_k = \frac{5.0 - 1.7}{5.0} = 0.660$$

$$\text{したがって} \quad P^{(1)} = 0.614$$

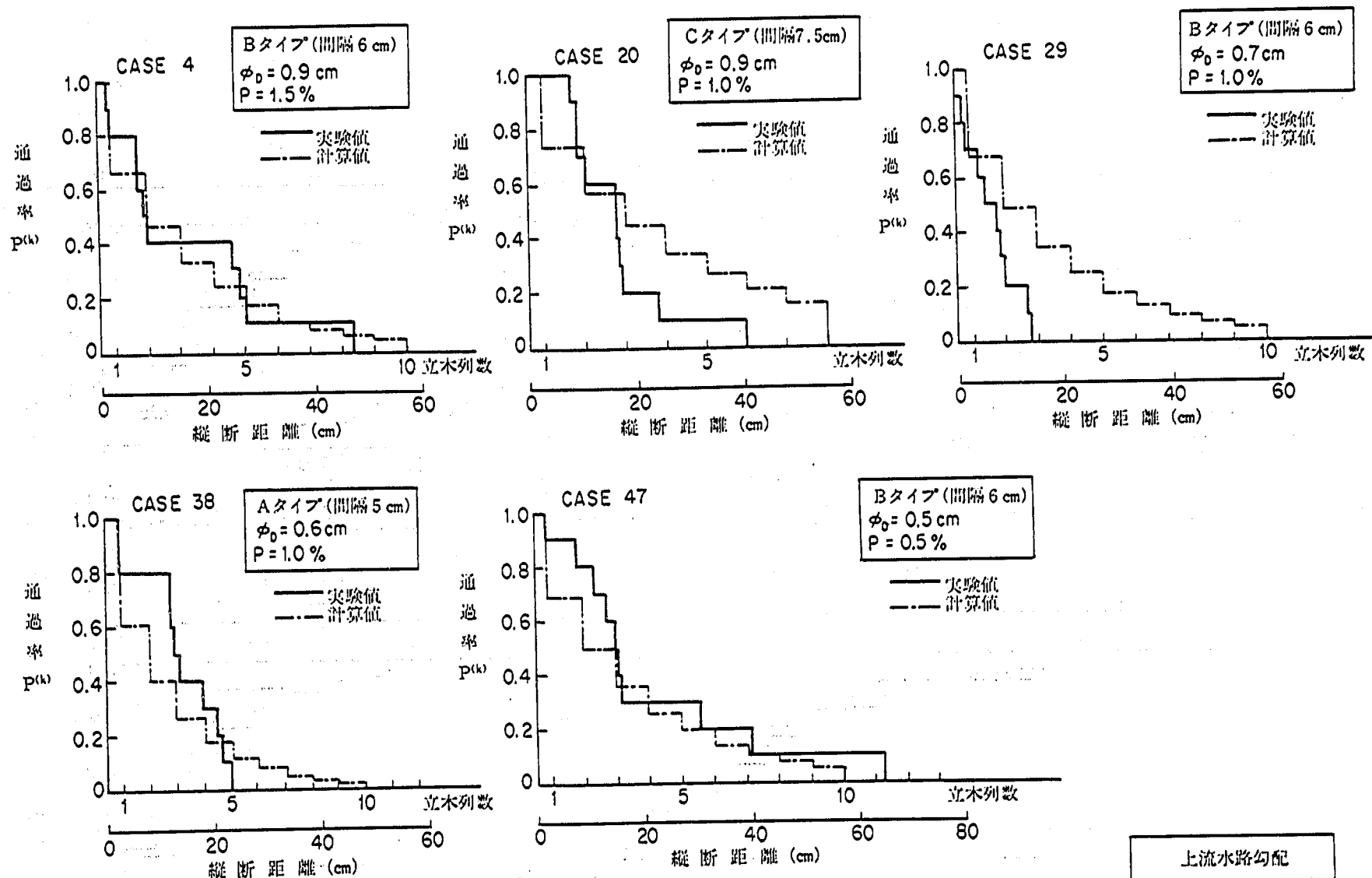
$$P^{(2)} = 0.614 \times 0.660 = 0.405$$

$$P^{(3)} = 0.405 \times 0.660 = 0.267$$



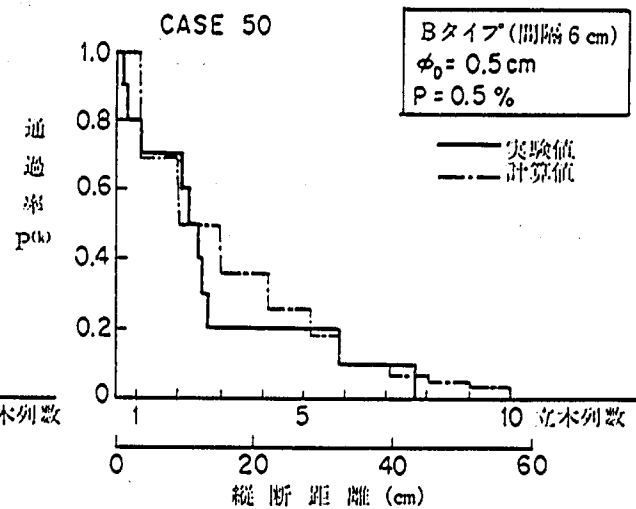
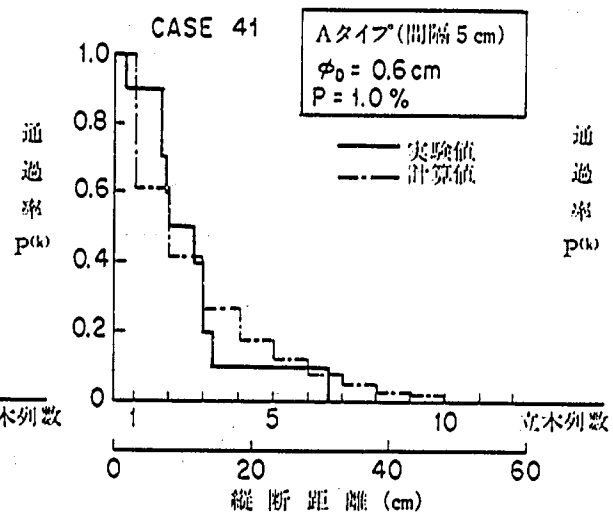
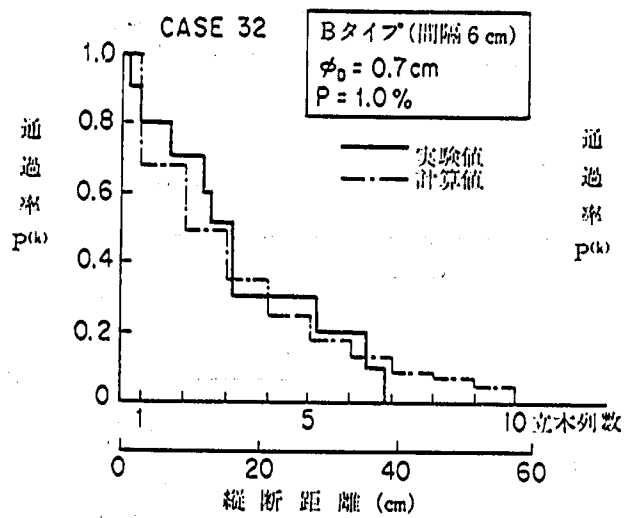
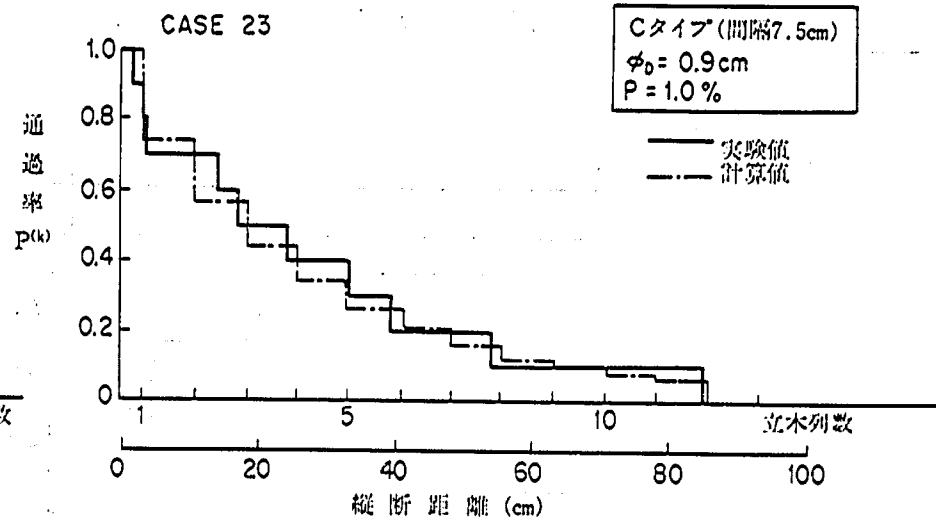
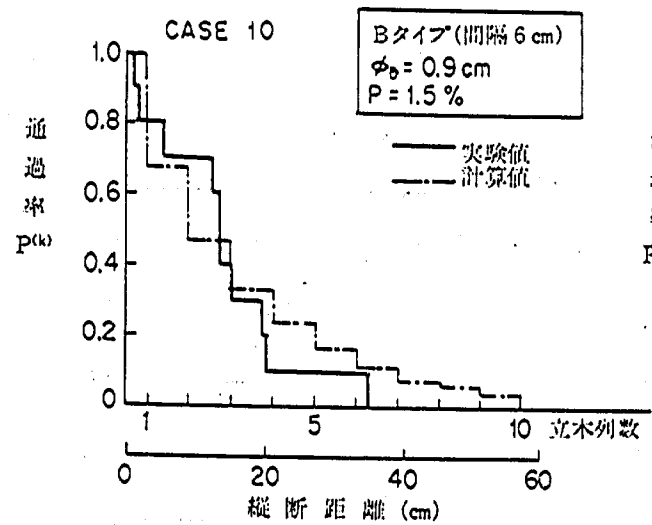
のように計算される。

同様に各配置タイプおよび各立木径についてガラス玉の通過率を計算した結果と実験値を比較して図-5.2 (1)～図-5.2 (4) に示す。図より計算値と実験値とバラツキはあるもののほぼ一致している。ただし、ガラス玉が10個と少ないことと、河床の抵抗を考慮していないため、この結果については、さらに検討する必要がある。



上流水路勾配
15°

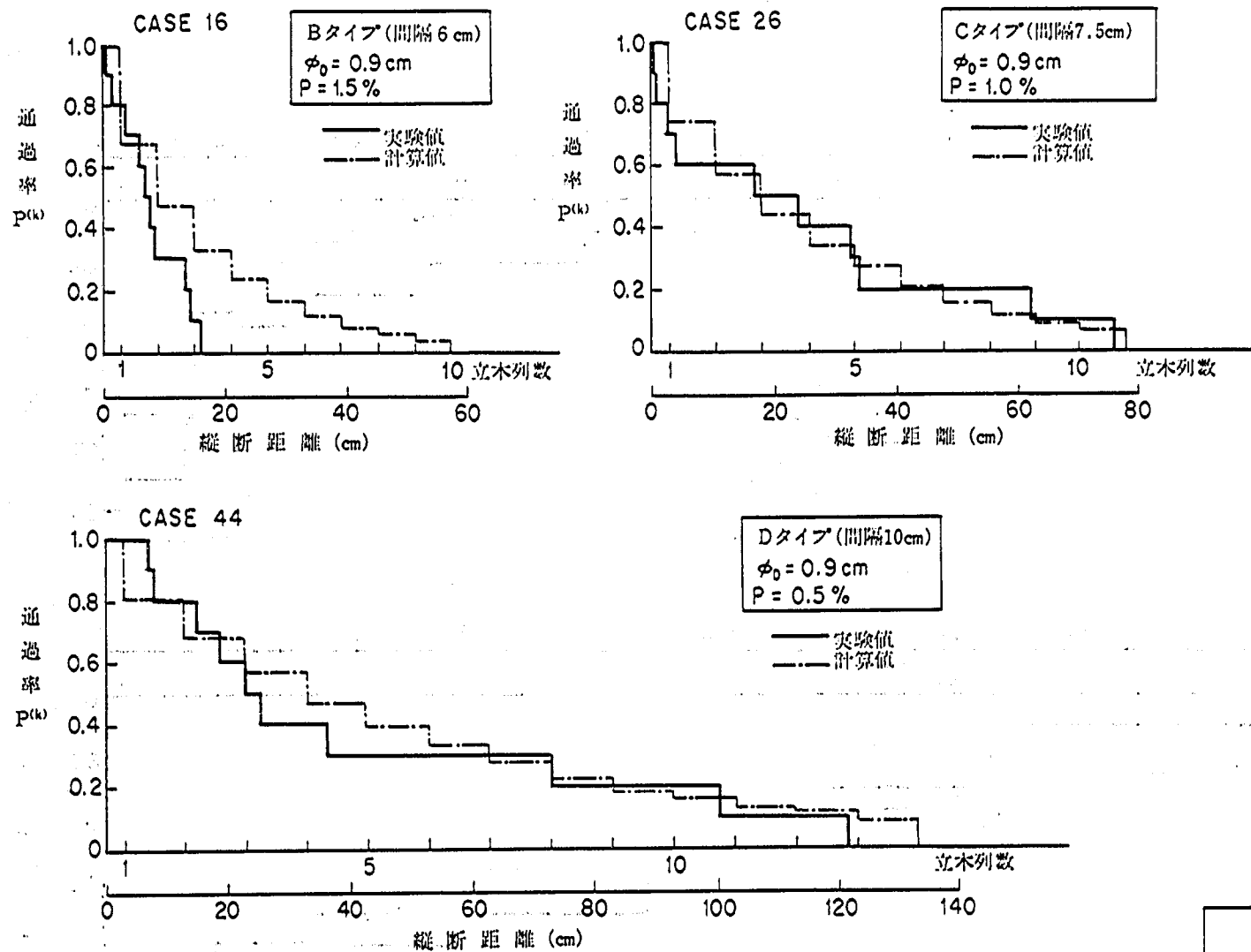
図-5.2(1) ガラス玉(礫)の通過率



上流水路勾配

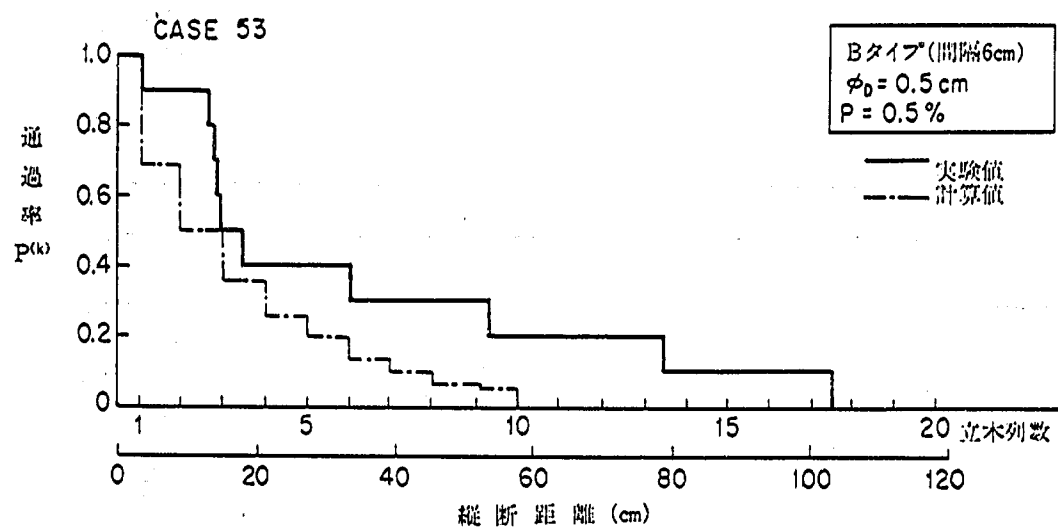
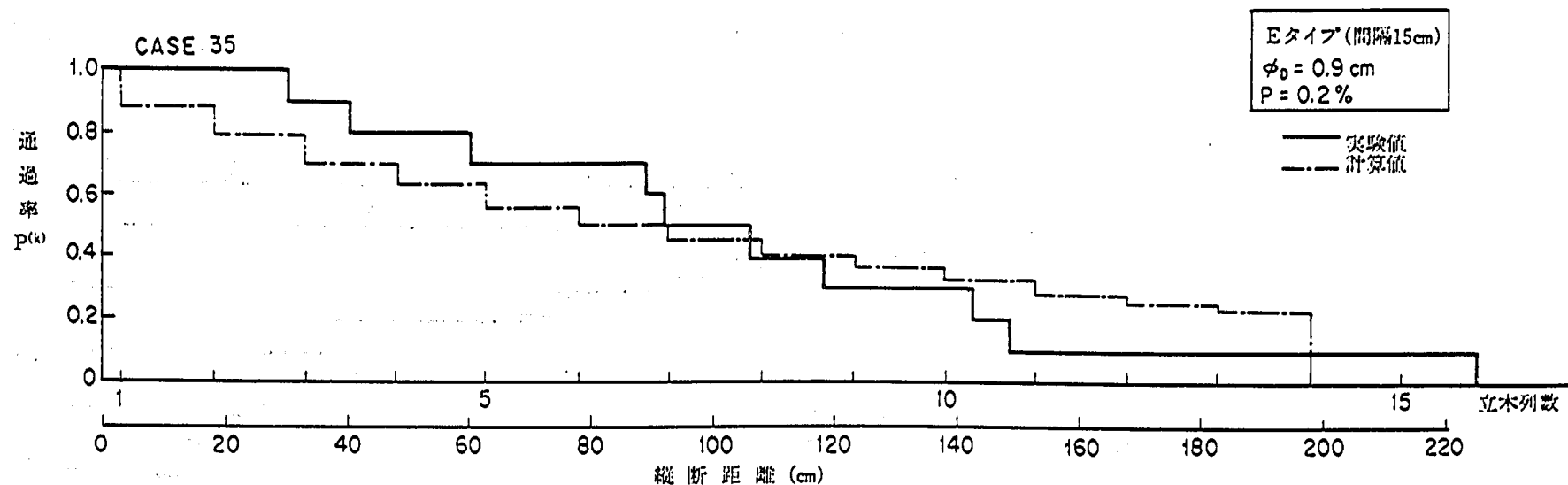
20°

図-5.2(2) ガラス玉(礫)の通過率



上流水路勾配
25°

図- 5.2 (3) ガラス玉(礫)の通過率



上流水路勾配
 25°

図-5.2(4) ガラス玉(礫)の通過率

5.2 土石流の減速効果

(1) 減速効果

4.3 で述べたように、上流水路から発生・流下した土石流の流速は、河床勾配の変化および樹木による抵抗により減速することが認められた。

すなわち、図-5.3に示すように土石流は樹林帯に突入すると、流入部付近で河床勾配の変化、樹木の抵抗により急激に減速し(A領域)、その後流速が回復して、樹林帯内の流速がほぼ一定となる(B領域)。B領域では樹木の抵抗により流速が流入流速あるいは樹木の無い場合のB領域の流速より小さくなる。なお、A領域の長さは、勾配の変化の割合、あるいは樹木の密度、間隔により変化すると考えられるが、本実験では勾配変化点より0.5~1.0mであった。

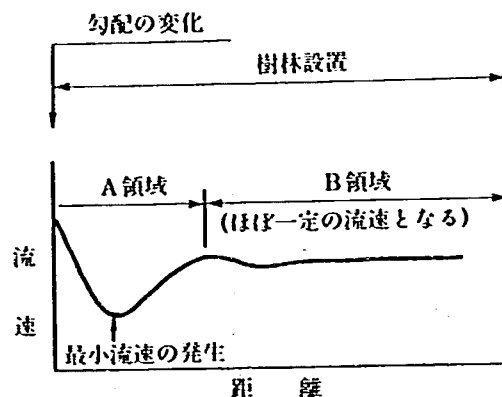


図-5.3 流速の変化の概念図

図-5.4および図-5.5は樹林帯内の流速(A領域の最小流速 V_{min} 、B領域の平均減速 V_m)と流入流速 V_{in} の比を樹木占有面積率 P および樹木の純間隔 b_s (流れ方向に直角な樹林の隙間の幅)と最大粒径 d_{max} の比 b_s/d_{max} について整理したものである。また図-5.6は勾配変化による流速の減勢効果について整理した。

図-5.4~図5.6より、

- ① 図-5.4より、流速の減速効果は、樹木占有面積率 P による影響は小さく、勾配による影響が大きい。
- ② また図-5.5より、流速の減速効果は b_s/d_{max} が小さくなると大きくなることがわかる。 b_s/d_{max} が2~4の範囲で流速は大きく減速し、 b_s/d_{max} が4以上となると減速の割合が小さくなり効果がなくなる。
- ③ 図-5.6よりA領域の V_{min} の減速効果は、B領域の V_m の減速効果より大きくなっている。

図-5.7、図-5.8に樹林帯内の流速を樹林帯が無い場合の流速で除して、 P と b_s/d_{max} について整理した。図より、減速の割合は図-5.4、図-5.5と同様の傾向を示しており、樹林帯による流速の減速効果が明確に示されている。

(2) 抵抗則

(1)で述べたように、樹林帯により流速の減速が認められた。そこで、樹林による減速効果を樹林の持つ抵抗によるものとする。

図-5.3に示すB領域内の流速($U = V_m$)と波高(h)を調べ、抵抗則を検討する。図-5.9に U/U_* と h/d_m との関係を示す。

図には、次に示す掃流域、土砂流域、土石流域の抵抗則と比較した。

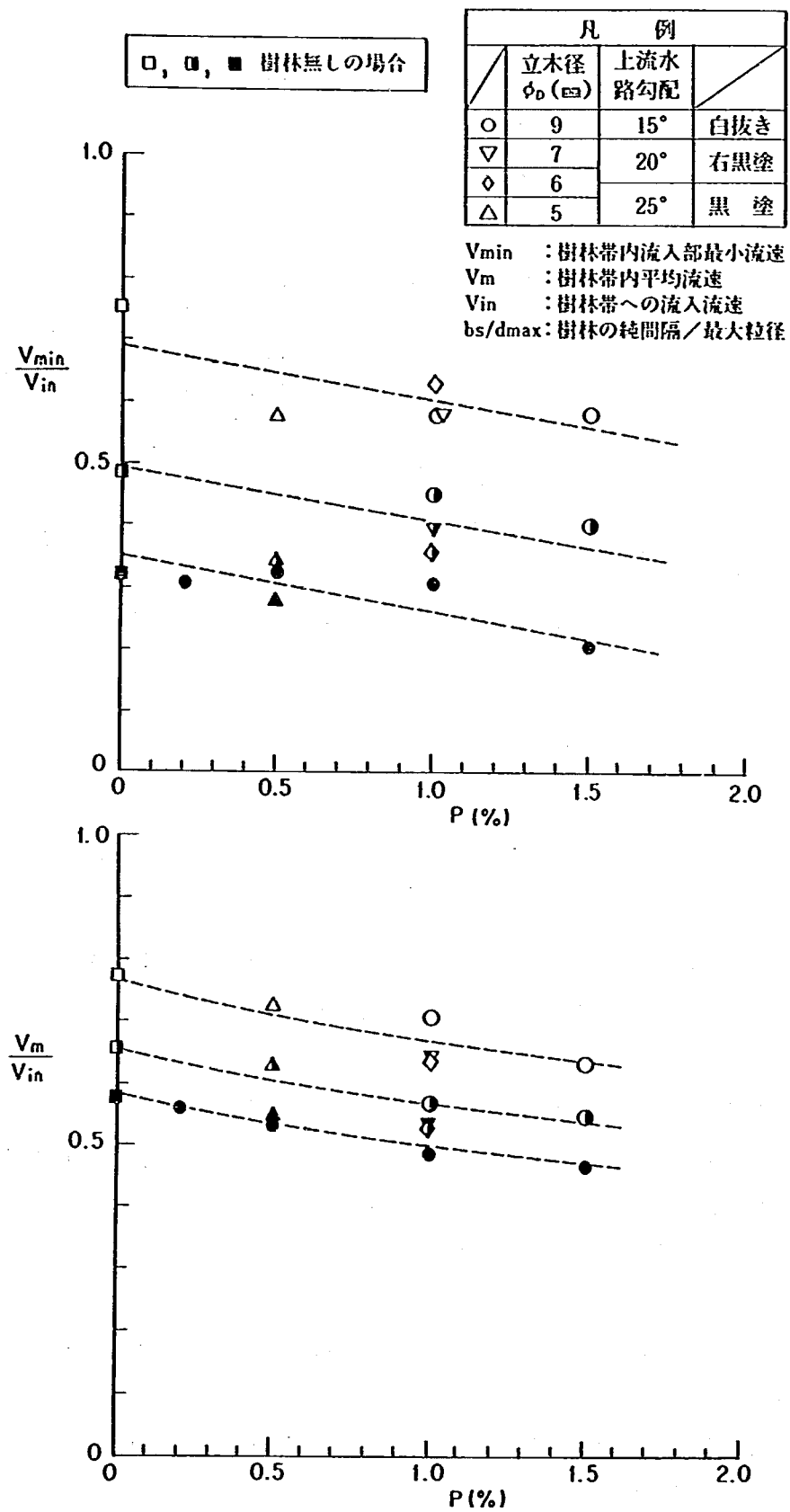


図-5.4 樹林帯による土石流流速の減速効果

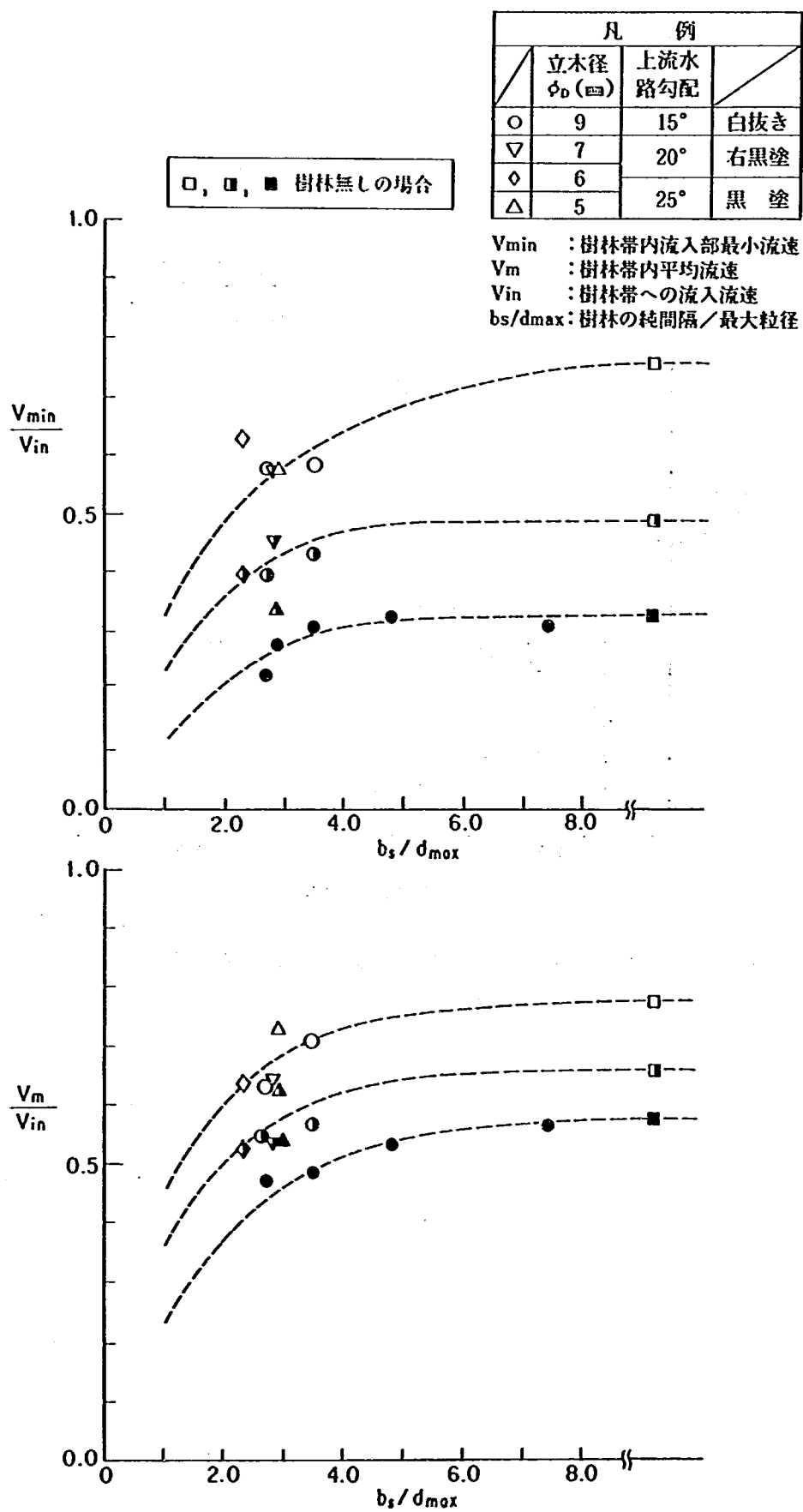


図-5.5 樹林帯による土石流流速の減速効果

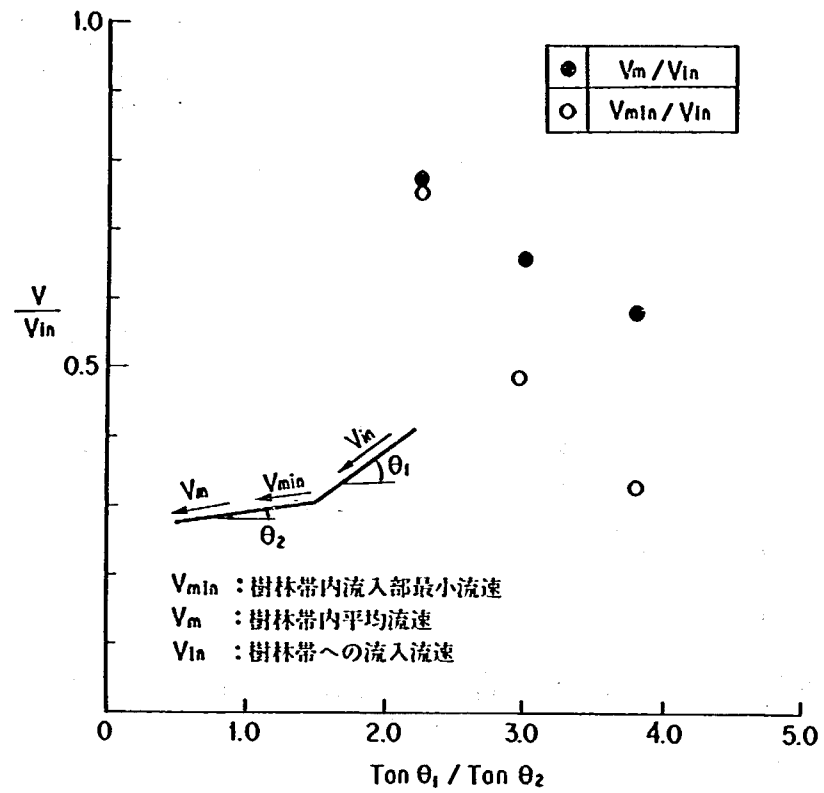


図- 5.6 勾配変化（樹林無し）による流速の変化

凡 例			
	立木径 ϕ_D (cm)	上流水 路勾配	
○	9	15°	白抜き
▽	7	20°	右黒塗
◇	6	25°	黒 塗
△	5	25°	黒 塗

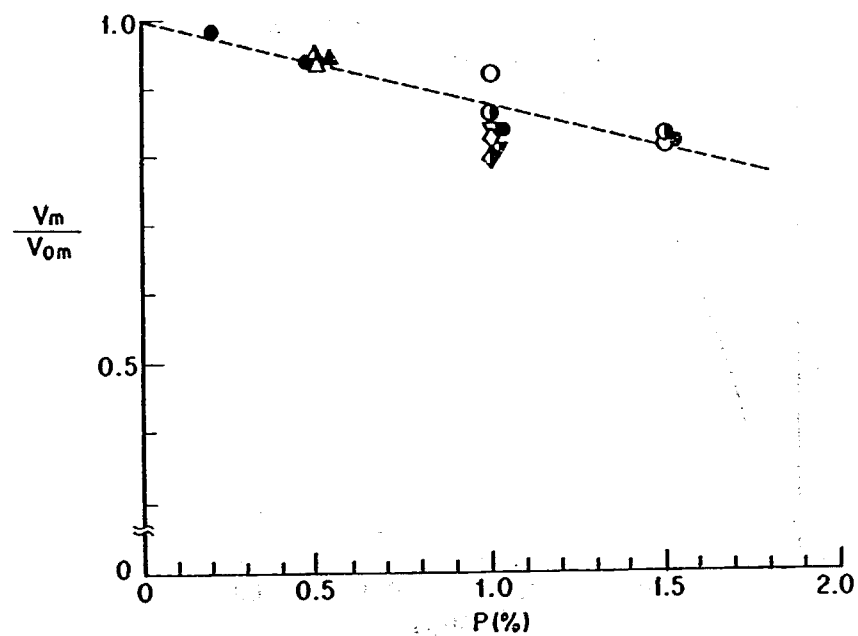
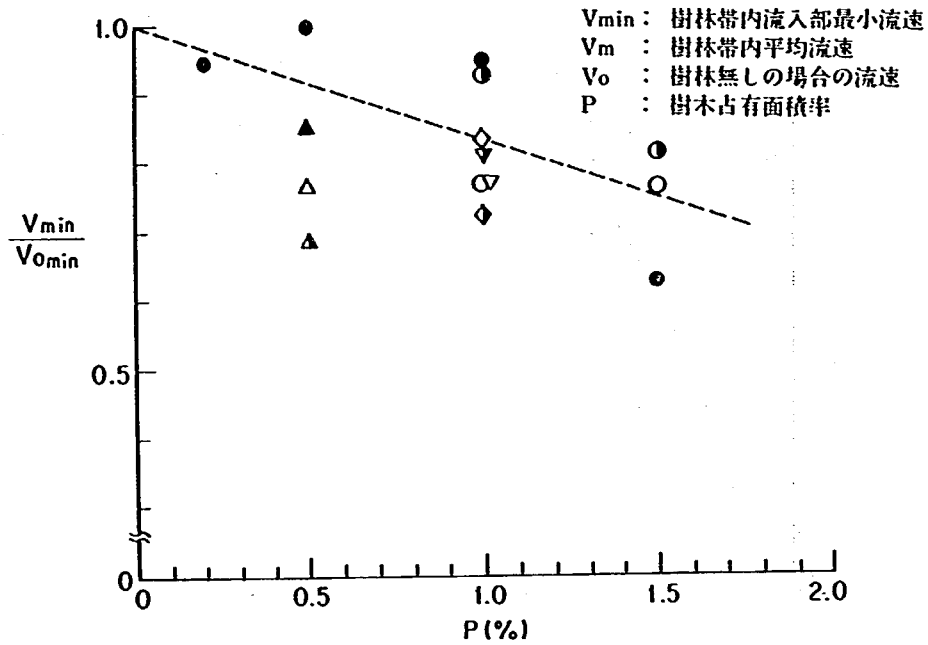


図- 5.7 樹林帯による土石流流速の減速効果

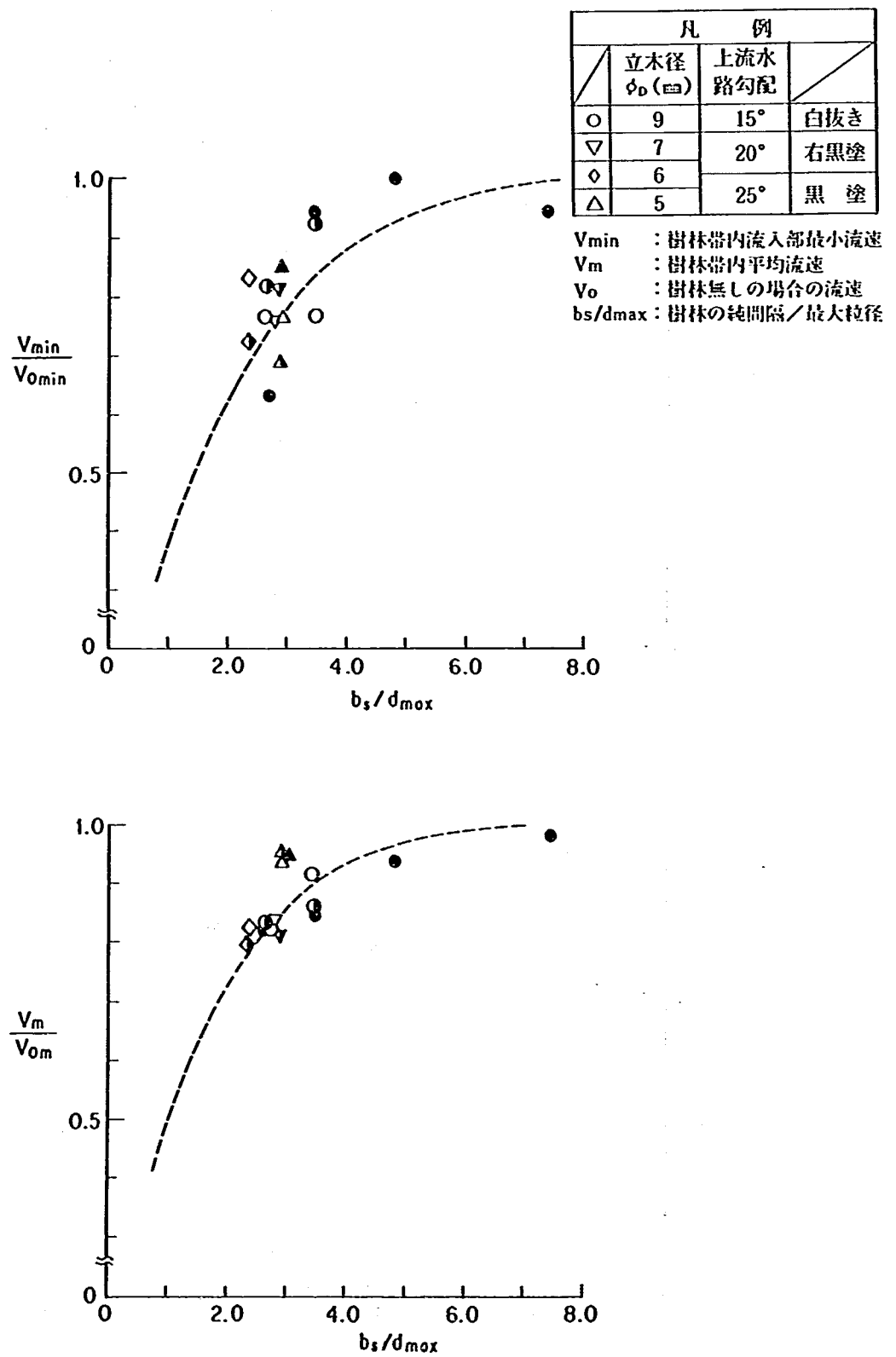


図-5.8 樹林帯による土石流流速の減速効果

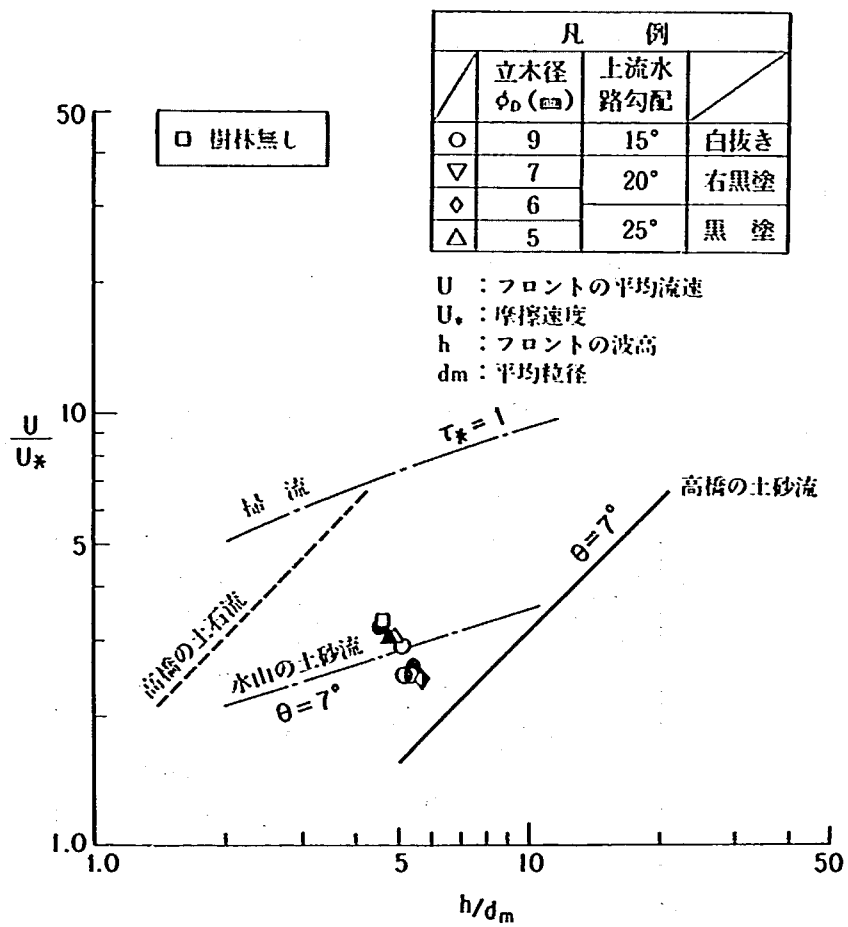


図-5.9 フロントの移動速度

<掃流の抵抗則 芦田・道上¹¹⁾>

$$\frac{U}{U_*} = 6.0 + 5.75 \log \left[h / \{ d (1 + 2 \tau_*) \} \right] \quad \text{..... (5.5)}$$

<土石流の抵抗則>

・高橋の式⁸⁾

$$\frac{U}{U_*} = (0.23 + 0.65 \tan \theta) h / d \quad \text{..... (5.6)}$$

・水山による⁹⁾

水山は土砂流のフロントの移動速度を実験的に図-5.10 で与えている。

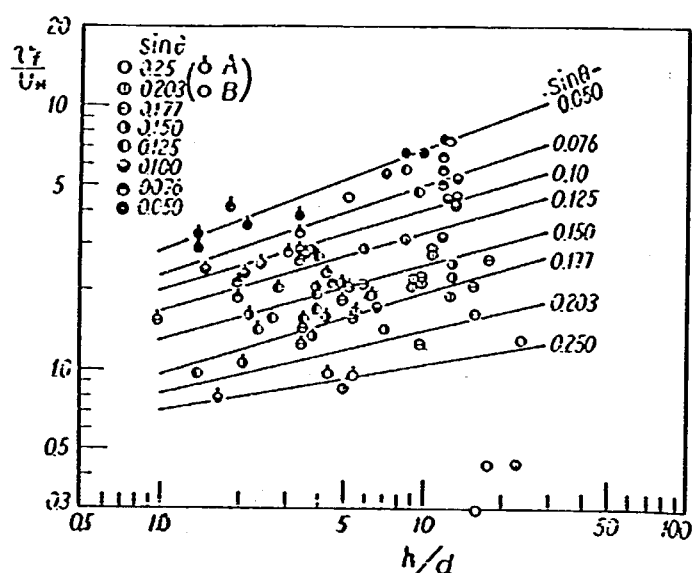


図-5.10 水山による土砂流の抵抗則

<土石流の抵抗則 高橋の式¹⁰⁾>

$$\frac{U}{U_*} = \frac{2}{5} \left\{ \frac{1}{a_i \sin \alpha} \left[(C_d + (1 - C_d) \frac{\rho}{\sigma}) \right] \right\}^{1/2} \left[\left(\frac{C_*}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right] \left(\frac{h}{d} \right) \quad \text{..... (5.7)}$$

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)} \quad \text{..... (5.8)}$$

($a_i \sin \alpha = 0.02$ とする)

ここに、 τ_* : 無次元掃流力、 θ : 河床勾配、 C_d : 土砂濃度、 ρ : 水の密度、 σ : 砂礫の密度、

C_* : 堆積層の砂礫の容積濃度、 ϕ : 砂礫の内部摩擦角、である。

図-5.9より樹林の設置により抵抗が増加していることがわかる。また実験値は水山の土砂流の抵抗則の領域にある。

5.3 土砂濃度と立木の抗力係数

(1) 樹林帯内を流下する流れの土砂濃度

図-5.11に樹林帯内を流下する流れ(B領域のフロント部)の土砂濃度を示す。図より流入時の土砂濃度は、樹木占有面積率Pが大きくなると減少する。樹林の無い場合の土砂濃度(C_d)は、高橋の土石流濃度式(5.8式)において $\theta = 7^\circ$ (下流水路勾配)とした計算値とほぼ一致している。また水山⁹⁾の土砂流式(5.9式)において $\theta = 7^\circ$ の値にも近い値となっている。

・水山の土砂流式⁹⁾

$$C_d = \frac{5.5 \tan^2 \theta}{1 + 5.5 \tan^2 \theta} \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

(2) 立木の抗力係数

土石流先端部の力のつり合いより、段波内の土砂濃度を C_d とし、段波到達域内での作用せん断力と抵抗力を求めると、次のようになる。

作用せん断力 τ 、波高 h とすると¹⁰⁾,

$$\tau = g \sin \theta [(C_d h) (\sigma - \rho) + h \rho] \quad \dots\dots\dots (5.10)$$

河床の抵抗力は

$$\tau_L = g \cos \theta [(C_d h) (\sigma - \rho)] \tan \phi \quad \dots\dots\dots (5.11)$$

樹林による抵抗力¹¹⁾は

$$\tau_D = \frac{1}{2} \rho \beta C_D U^2 \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

$$\beta = \frac{h \phi_D}{\ell^2 - \pi \phi_D^2 / 4} \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

と表される。ここに ϕ_D ; 樹径, ℓ ; 樹木間隔, C_D ; 抗力係数である。

(5.10), (5.11), (5.12), (5.13)式より、土砂濃度 C_d および抗力係数 C_D は次のようになる。

$$g \sin \theta [(C_d h) (\sigma - \rho) + h \rho] = g \cos \theta [C_d h (\sigma - \rho)] \tan \phi + \tau_D$$

両辺を $h g \cos \theta$ で割ると

$$\rho \tan \theta - \frac{\tau_D}{g h \cos \theta} = C_d (\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)$$

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)} - \frac{\tau_D}{g h \cos \theta (\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)}$$

$$= \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)} - \frac{\rho \beta C_D U^2}{2 g h \cos \theta (\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)}$$

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)} - \frac{\rho \beta C_D F_r^2}{2 \cos \theta (\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)} \quad \dots\dots\dots (5.14)$$

$$C_D = \frac{2 \rho \cos \theta \tan \theta - 2 C_d \cos \theta (\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)}{\rho \beta F_r^2} \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

ここで F_r ; フルード数である。

(5.14) 式より土石流の土砂濃度は樹林帯へ流入することにより減少することになる。また立木の抵抗係数は、土砂濃度が与えられると (5.15) 式より求めることができる。

(5.15) 式を用いて、実験値をもとに抗力係数 C_D を求め、図-5.12では、水山・天田¹²⁾ の実験による抗力係数と比較し、図-5.13では秋草ら¹³⁾ の実験値と比較した。抗力係数 C_D の値はバラツキが大きい、秋草らの実験結果と同程度の $C_D = 0.5 \sim 1.2$ の範囲となっている。また、水山、天田らの結果より大きな値となっている。

凡 例			
	立木径 ϕ_D (mm)	上流水 路勾配	
○	9	15°	白抜き
▽	7	20°	右黒塗
◇	6	25°	黒 塗
△	5		

C_d : 樹林帯内の土石流濃度

P : 樹木占有面積率

C_d : 高橋の土石流濃度式の値

($\rho=1.0$, $\sigma=2.6$, $\phi=40^\circ$; $\phi=7^\circ$)

$C'd$: 水山の土砂濃度式の値

C_{d0} : 樹林帯が無い場合の土砂濃度

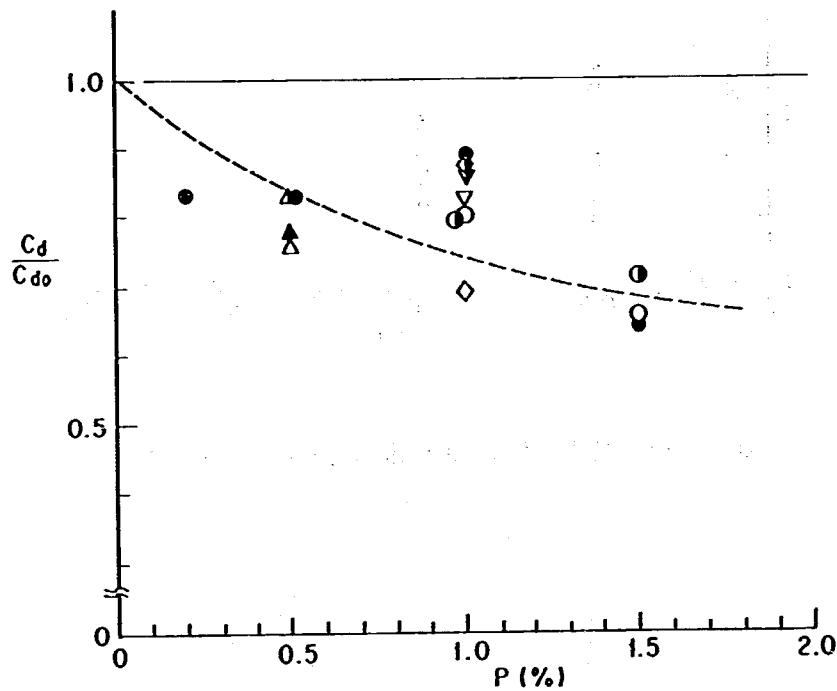
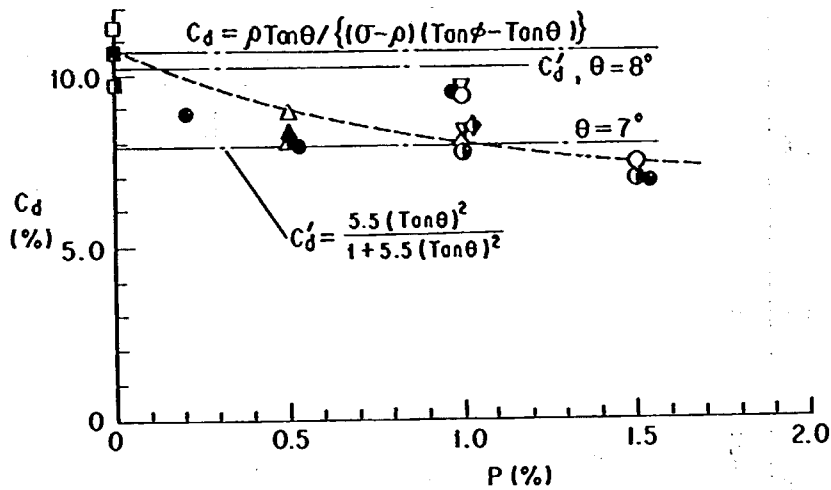


図-5.11 樹林帯による土石流濃度の変化

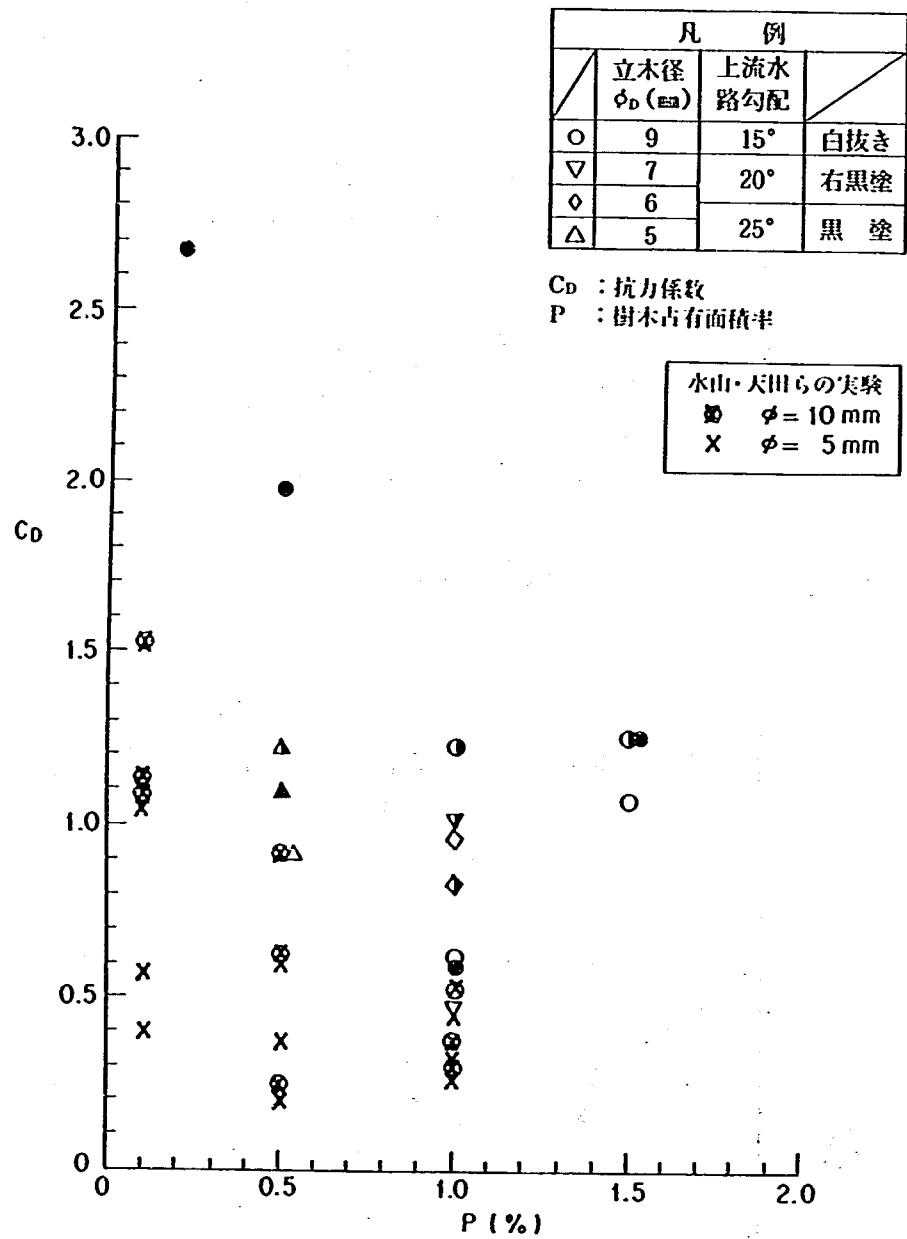


図- 5.12 抗力係数 C_D と樹木占有面積率 P の関係

凡 例			
	立木径 ϕ_D (mm)	上流水 路勾配	
○	9	15°	白抜き
▽	7	20°	右黒塗
◇	6	25°	黒 塗
△	5		

C_D : 抗力係数
 Re : レイノルズ数

x 秋草らの実験値

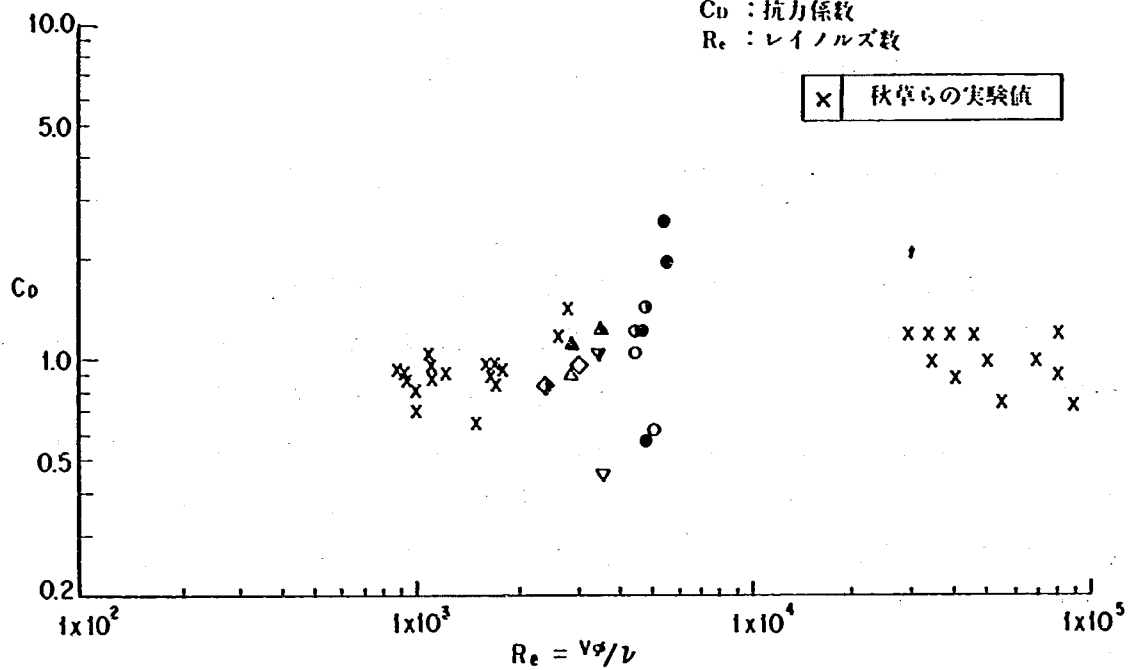


図-5.13 立木の抗力係数

5.4. 土砂堆積の促進効果

実験結果をもとに、樹林帯による土砂堆積の促進効果およびそれによる影響についてまとめる。図-5.14に樹林帯流入部の最高水位 h_{max} (時間的、距離的ににおける最大堆積深+水深を示す) と樹木占有面積率 P と b_s/d_{max} (b_s : 流れ方向に直角な樹林の隙間幅, d_{max} : 最大粒径) との関係を示す。

図-5.15に本実験終了後の河床状態(30秒間通水後)における最大堆積深 Δh_{max} の P と b_s/d_{max} との関係を示す。図-5.16に実験終了後において土砂堆積を生じている区間長(堆積長) L の P と b_s/d_{max} との関係を示す。また図-5.17に樹林帯下流部の最大洗掘深 ΔD_{max} の P と b_s/d_{max} との関係を示す。なお図-5.18(1), (2)には樹林帯部から流出する土砂の平均粒径 d_{out} (流出開始当初及び実験終了直前のデータ) の P と b_s/d_{max} との関係を示す。

図-5.14～図-5.18により樹林帯による土砂堆積の促進効果を検討する。

(1) 最高水位

図-5.14により最高水位は、 P が大きいほど、 b_s/d_{max} が小さいほど大きくなる傾向がある。 P との関係を見ると、立木径によって増加傾向が異なり、あまり明確ではないが、同一密度では立木径が小さい方が最高水位は大きくなるようである。 b_s/d_{max} との関係を見ると、立木径による影響は明確ではなく、最高水位の変化に対して、 b_s/d_{max} が支配的な因子であることがわかる。実験結果によると、樹林帯に土石流が流入した場合、樹林帯がない場合に比べ、最高水位が $b_s/d_{max} = 2 \sim 3$ で $1.5 \sim 1.7$ 倍、 $b_s/d_{max} = 4 \sim 5$ で $1.4 \sim 1.5$ 倍となり、 $b_s/d_{max} = 7$ では樹林の影響がほとんどないことがわかる。

(2) 最大堆積深

図-5.15より最大堆積深は最高水位と同様の傾向があり、 P が大きいほど、 b_s/d_{max} が小さいほど大きくなる傾向がある。 P との関係を見ると、立木径による増加傾向が異なり、同一密度では立木径が小さい方が最大堆積深は大きくなる。

b_s/d_{max} との関係を見ると、実験値はほぼ同一直線上になり、立木径による変化が認められず、最大堆積深は b_s/d_{max} により表現されることがわかる。実験結果によると、樹林帯の有無による最大堆積深は、 $b_s/d_{max} \approx 2$ で樹林帯の無しの場合の2.5倍程度、 $b_s/d_{max} = 6 \sim 8$ で樹林帯による影響がほとんど認められなくなる。

また堆積深と樹木占有面積率の傾向は水山ら¹⁴⁾による実験結果と一致している。

(3) 堆積長

図-5.16に示す堆積長は土石流流下後の後続流により土砂の堆積区間が樹林によりどの程度生じるかを示した。

堆積長は P が大きいほど、 b_s/d_{max} が小さいほど短くなる傾向がある。 P との関係を見ると、立木径により堆積長の減少傾向が異なり、同一密度で立木径が小さい方が堆積長は短くなるようである。 b_s/d_{max} との関係を見ると、 b_s/d_{max} が小さくなるほど堆積長は短くなり、立木径による変化が小さくなっている。実験結果によると、堆積長は樹林帯無しの場合に比べ、 $b_s/d_{max} = 2 \sim 3$

で6~7割程度、 $b_s/d_{max} = 6 \sim 8$ で8割程度短くなっている。

(4) 最大洗掘深

樹林帯を設置すると、樹林部での土砂捕捉効果が大きくなる一方で、樹林帯の下流側で洗掘が生じるようになる。なお、樹林の無い場合には、河床の洗掘は認められない。

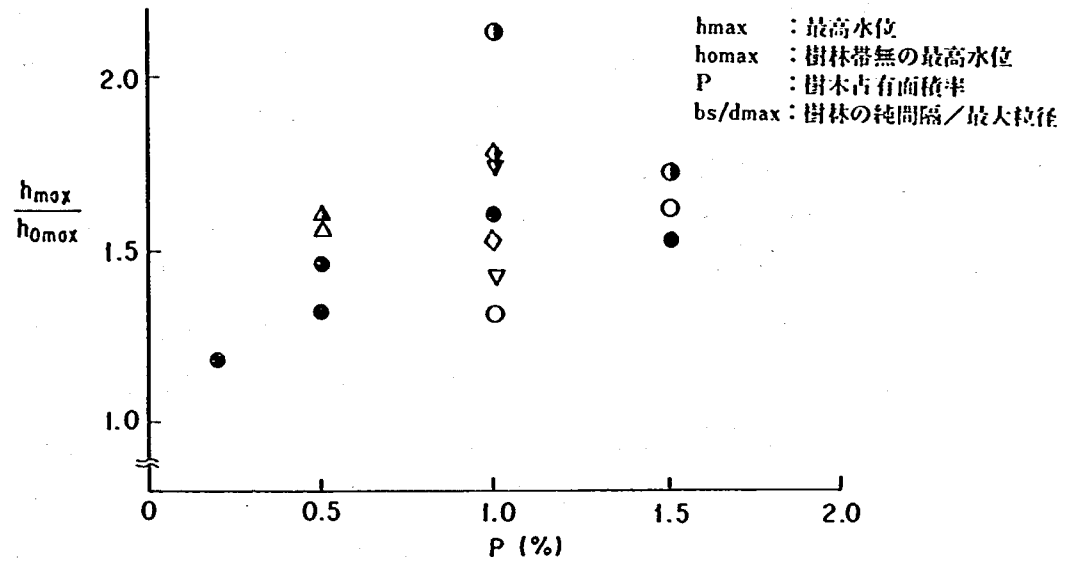
図-5.17より樹林帯下流側の最大洗掘深は、 P が大きいほど b_s/d_{max} が小さいほど大きくなる。最大洗掘深も b_s/d_{max} が支配的であり、 b_s/d_{max} との関係において立木径の変化はほとんど認められなくなる。実験結果により最大洗掘深は $b_s/d_{max} = 2 \sim 3$ で最大粒径の1.0~1.5倍、 $b_s/d_{max} = 4 \sim 8$ で最大粒径の0.2~0.5倍となる。また洗掘を生じる長さは0.5~1.0m程度である。

(5) 樹林による流出土砂のふるい分け効果

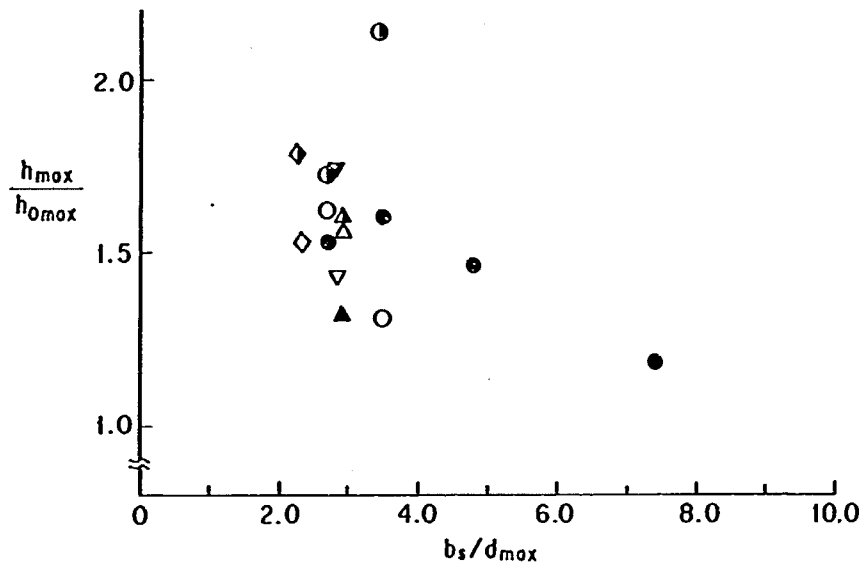
図-5.18より流出初期(土石流先端部)の流出土砂の平均粒径は、樹林の無い場合河床砂の平均粒径より若干大きくなり、土石流先端部に大きな粒径が集中して流下することを示している。しかし、樹林を設置した場合には、流出土砂の平均粒径が河床砂と同程度か若干小さくなる傾向がある。したがって樹林の無い場合に比べ、樹林帯内で大きな粒径が堆積していることを示している。

後続流流下時の場合には、樹木占有面積率が小さいと流出土砂の平均粒径が河床砂に比べて大きく、土石流先端部の流出土砂と同様の傾向を示している。樹木占有面積率が1.5%では、樹林下流側の河床砂が洗掘されて流出することから、流出土砂の平均粒径が河床砂の平均粒径と同程度となっている。

凡 例			
	立木径 ϕ_D (mm)	上流水 路勾配	
○	9	15°	白抜き
▽	7	20°	右黒塗
◇	6	25°	黒 塗
△	5		

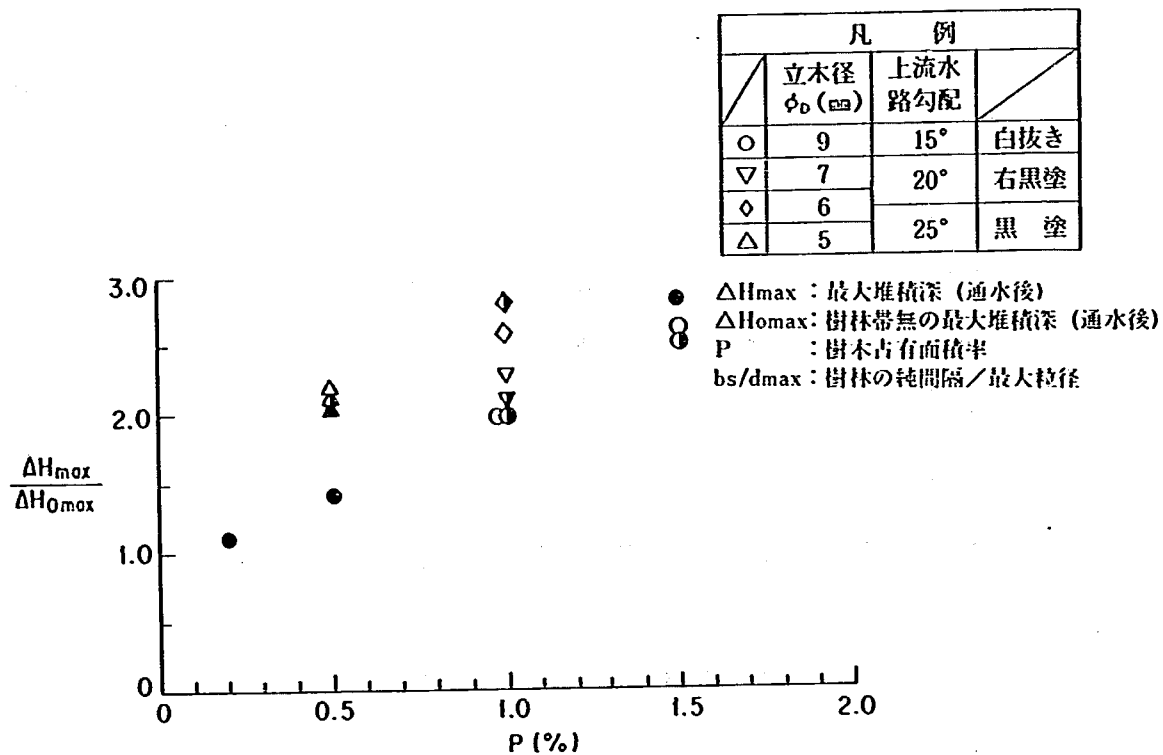


(1) 樹木占有面積率と最高水位の関係

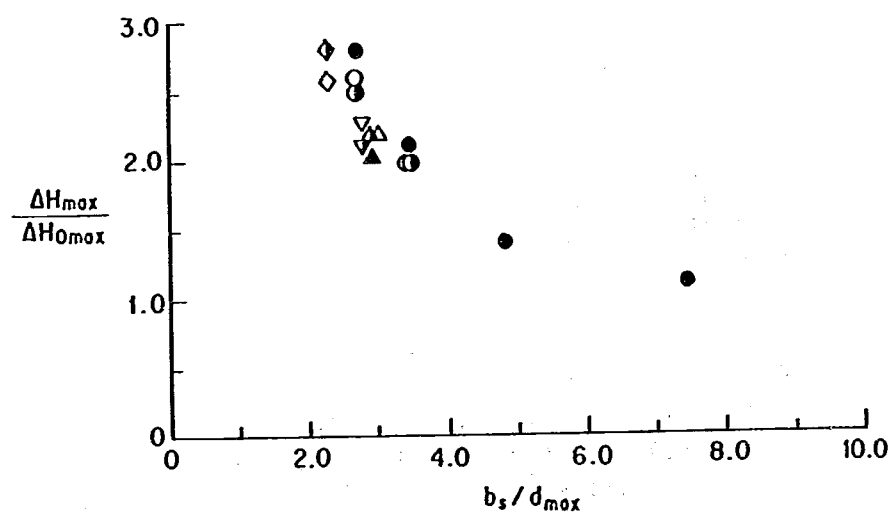


(2) 樹林の純間隔と最高水位の関係

図- 5.14 最高水位の変化

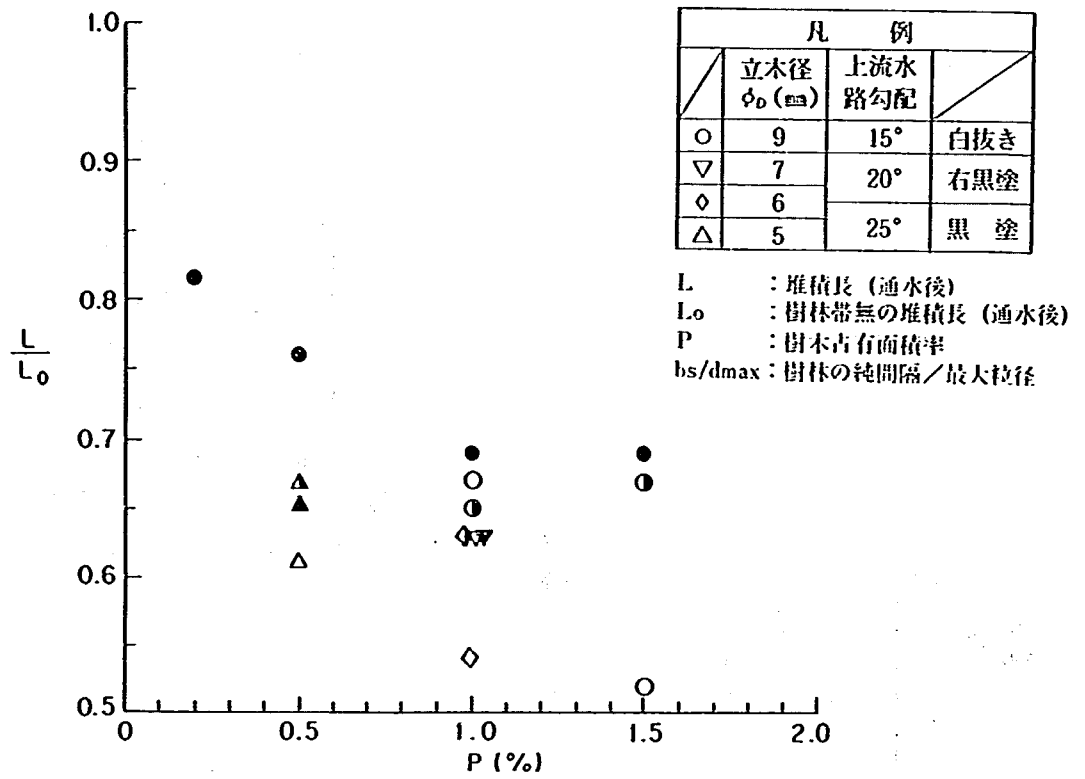


(1) 樹木占有面積率と最大堆積深の関係

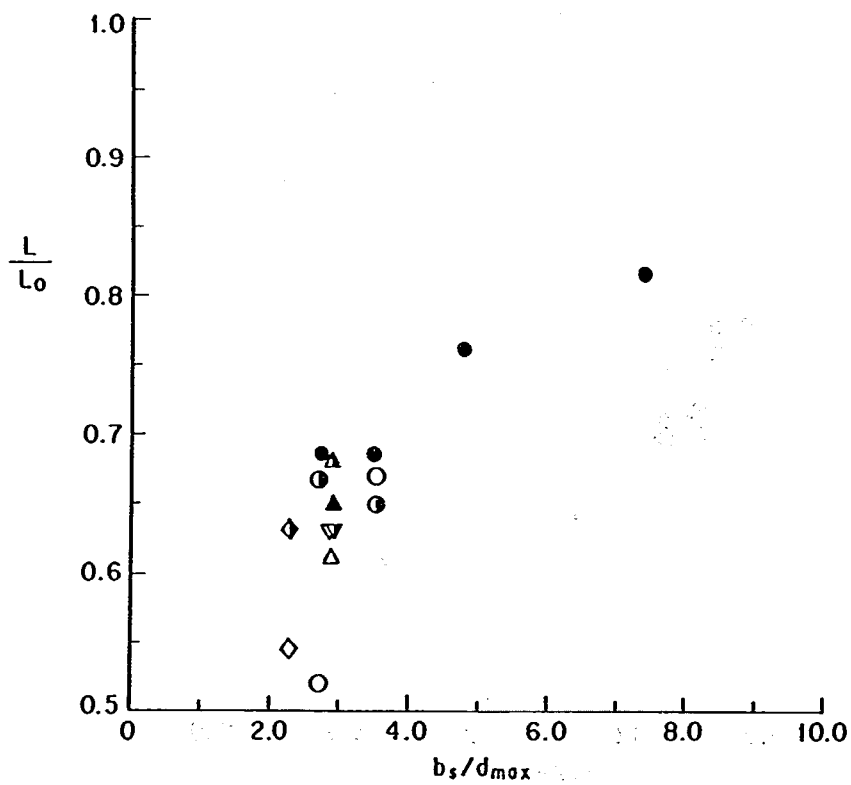


(2) 樹林の純間隔と最大堆積深の関係

図-5.15 最大堆積深の変化

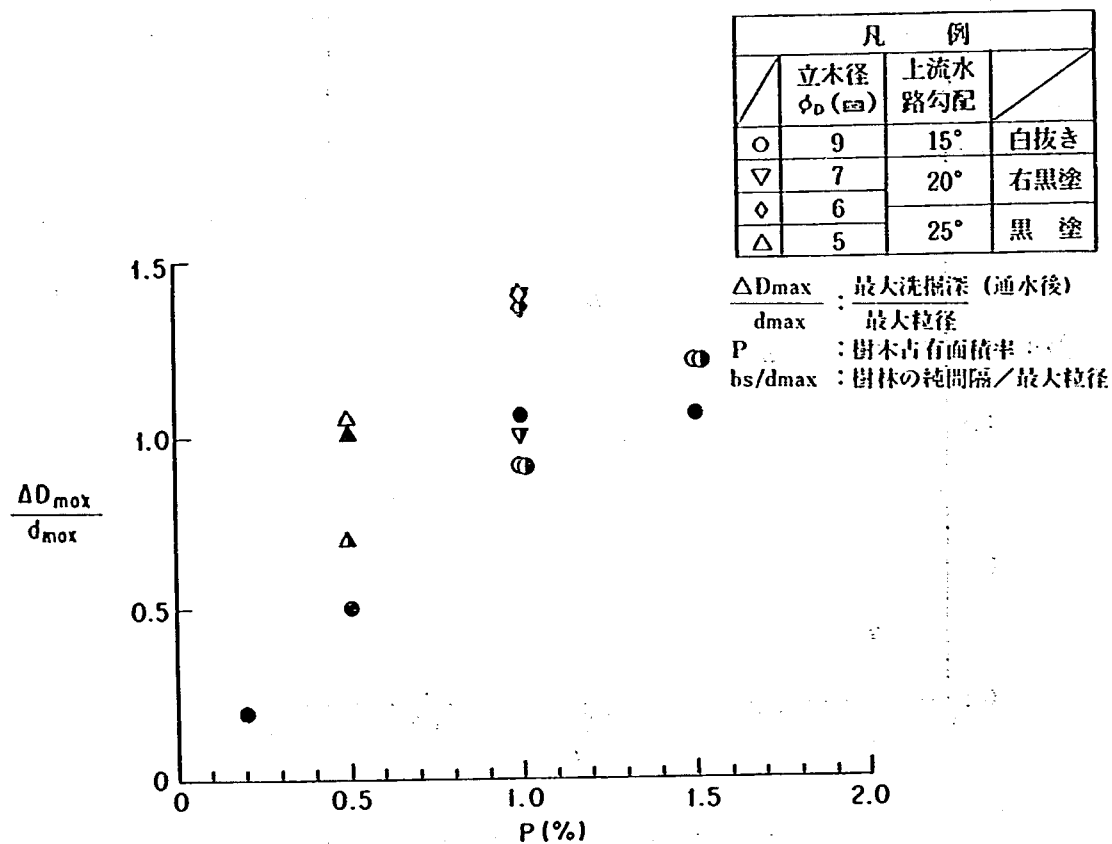


(1) 樹木占有面積率と堆積長の関係

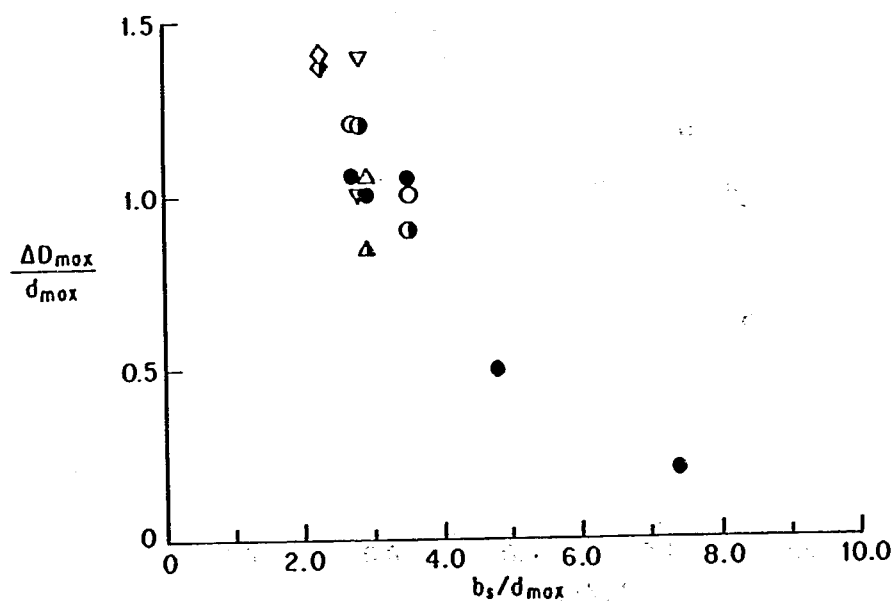


(2) 樹林の純間隔と堆積長の関係

図- 5.16 堆積長の変化

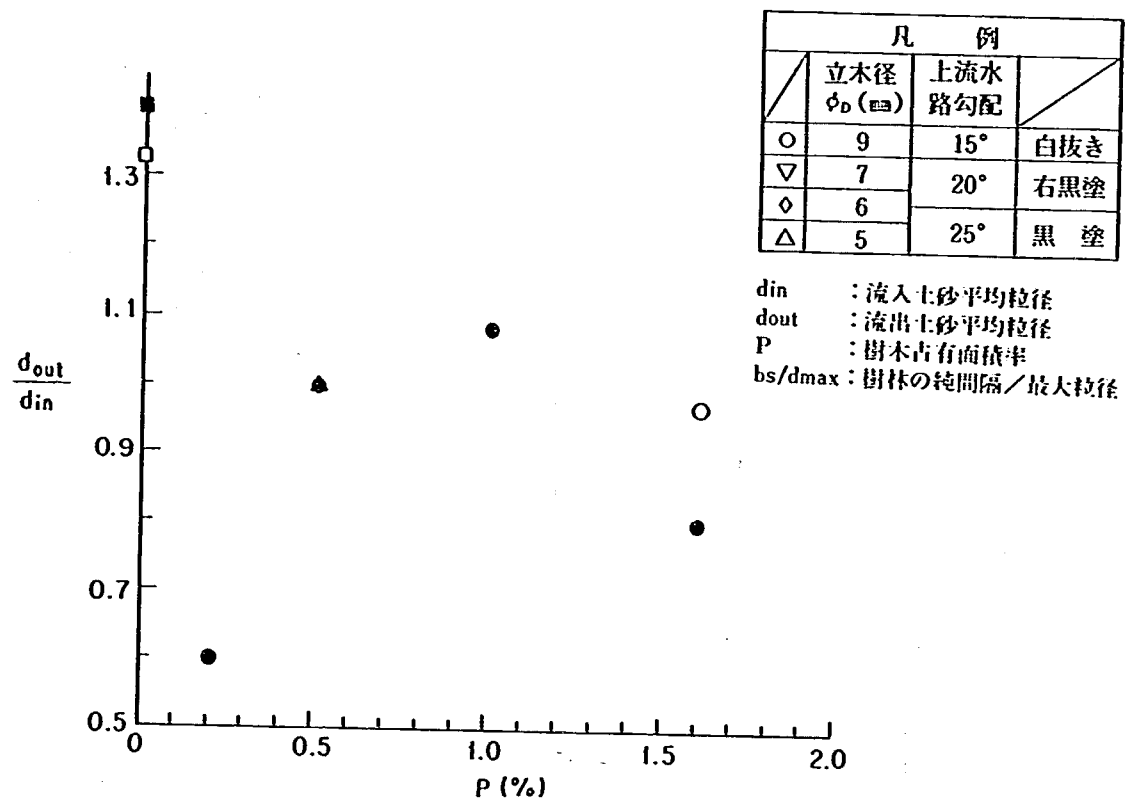


(1) 樹木占有面積率と最大洗掘深の関係

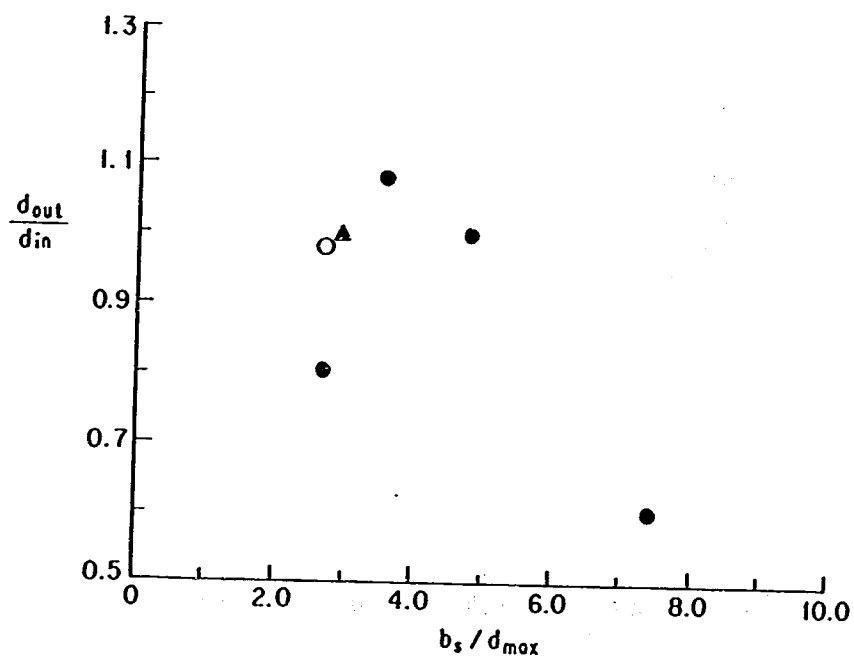


(2) 樹林の純間隔と最大洗掘深の関係

図-5.17 最大洗掘深の変化

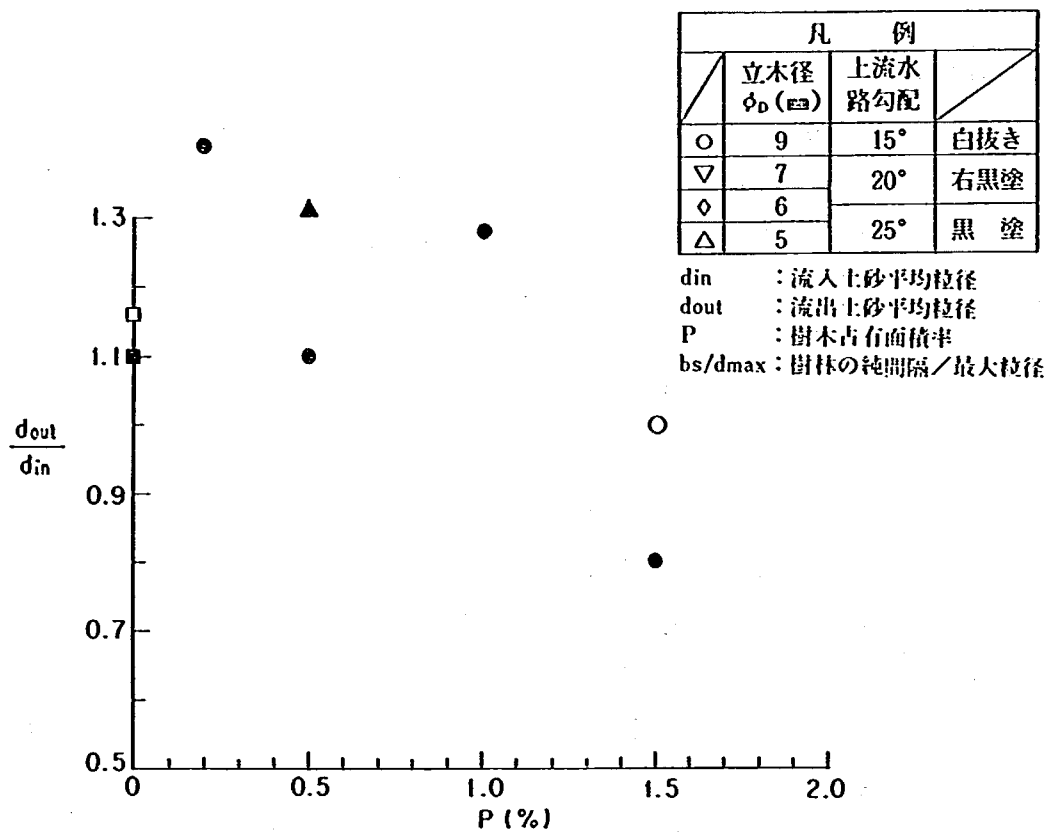


(1) 樹木占有面積率と流出土砂の平均粒径の関係

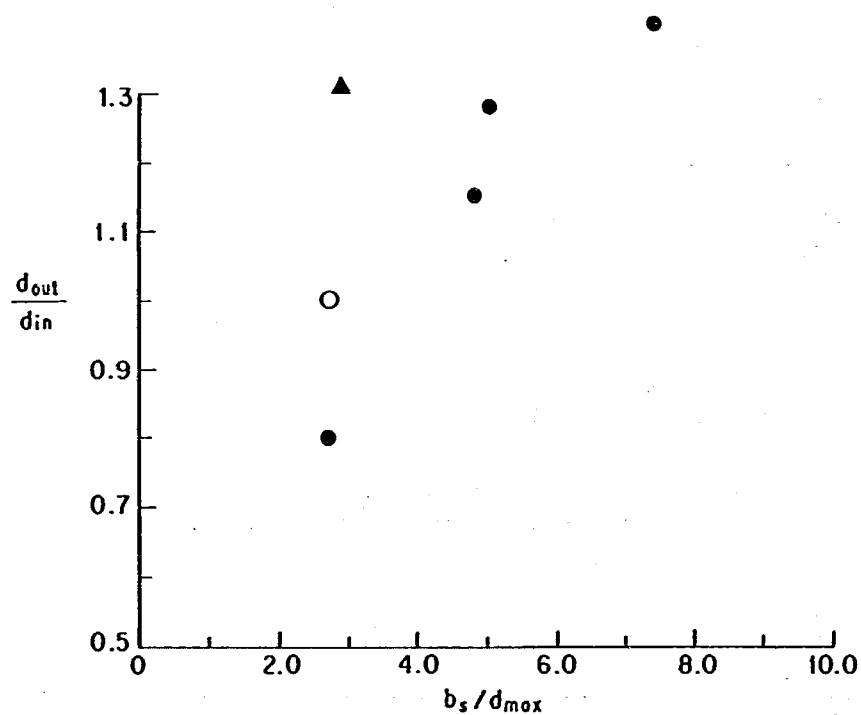


(2) 樹林の純間隔と流出土砂の平均粒径の関係

図-5.18(1) 流出土砂の平均粒径の変化(流出開始当初)



(1) 樹木占有面積率と流出土砂の平均粒径の関係



(2) 樹林の純間隔と流出土砂の平均粒径の関係

図-5.18(2) 流出土砂の平均粒径の変化(実験終了直前)

5.5 樹林帯の規模

前節までの検討で樹林帯内で流れが土砂流化することが期待できることがわかった。ここでは、ある規模の土石流を堆積させる樹林帯の長さ（規模）について検討する。

高橋¹⁹⁾によると、勾配が変化する地点における土石流の堆積形状は、次のように求められる。集合流動の発生限界勾配 $\tan r$ は非粘着性材料では (5.16), (5.17) 式で与えられる。

$$\tan r = \frac{C_*(\sigma - \rho)}{C_*(\sigma - \rho) + \rho(1 + h_0/d)} \tan \phi \quad \dots\dots\dots (5.16)$$

$$\tan r = \frac{C_*(\sigma - \rho) \tan \phi}{C_*(\sigma - \rho) + [1 + 0.52(q_0^2/gd^3)^{1/3}]} \quad \dots\dots\dots (5.17)$$

<一様幅流路における堆積過程； $\theta \leq r$ の場合>

ここに h_0 ；堆積層上の水深 q_0 ；堆積層上の流量 d ；粒径 $\tan \phi$ ；内部摩擦角である。

下流水路勾配が緩く、かつ流動性のあまり強くない土石流が流出する場合、先端到達距離は短く、先端部が勾配変化点へ到達した直後から堆積過程が始まると考えてよい。上流の急勾配の水路を流下してきた土石流は、下流の堆積物に出会うとジャンプしてそれを乗り越え、勾配 r で堆積するものと考えて図-5.19 のような形状をとるものとして考える。

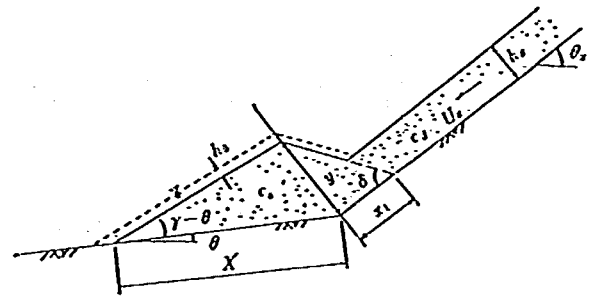


図-5.19 堆積高さが低い場合の堆積形状

図-5.19を参照して砂礫保存の式を導くと

$$\frac{1}{2} X^2 A = q_r \frac{C_{du}}{C_*} t \quad \dots\dots\dots (5.18)$$

となる。ただし

$$A = \frac{\tan(r - \theta)}{\tan(r - \theta) \tan(\theta_u - \theta) + 1} + \frac{1}{\tan \delta \cos^2(\theta_u - \theta)} \left[\frac{\tan(r - \theta)}{\tan(r - \theta) \tan(\theta_u - \theta) + 1} \right]^2 \quad \dots\dots\dots (5.19)$$

である。(5.18) 式から

$$X = \sqrt{\frac{2q_r C_{du}}{C_* A}} t \quad \dots\dots\dots (5.20)$$

$$y = \frac{1}{\cos(\theta_u - \theta)} \frac{\tan(r - \theta)}{\tan(r - \theta) \tan(\theta_u - \theta) + 1} \quad \dots\dots\dots (5.21)$$

$$x_1 = \frac{y}{\tan \delta} \quad \dots\dots\dots (5.22)$$

が得られ、時刻 t を与えれば、 X , y , x_1 が求まり、土石流の堆積形状を求めることができ、樹林帯を設置する長さも求められる。

樹林を設置すると (5.16) 式あるいは (5.17) 式で与えられる集合流動の発生限界勾配 $\tan r$ すなわち樹林帯内の堆砂勾配 $\tan(r - \theta)$ が異なると考えられる。

そこで実験値を用いて r を検討し、堆砂形状を検討する。

(1) 集合流動の発生限界勾配 $\tan r$

表-5.1 に実験結果による堆砂形状の諸元を示す。なお、表は土石流の流下条件の下での実験値として土石流が勾配変化点に到達した時点より 1 秒後、3 秒後、6 秒後について示している。

図-5.21, 図-5.22 は実験により得られた $\tan r$ と (5.17) 式で計算される $\tan r_0$ との比を樹木占有面積率 P および樹林の純間隔と最大粒径との比 (b_s/d_{max}) について調べたものである。

図より、 $t = 1$ 秒後の ($\tan r/\tan r_0$) の値はバラツキが大きく明確ではないが、 $t = 3$ 秒後、 $t = 6$ 秒後の ($\tan r/\tan r_0$) の値は次のような傾向が認められる。

- ① ($\tan r/\tan r_0$) は P が大きいほど、 b_s/d_{max} が小さいほど大きくなる傾向がある。
- ② ($\tan r/\tan r_0$) と P との関係についてみると、立木径が小さいほど大きくなる傾向が認められ、($\tan r/\tan r_0$) と P との関係では立木径がパラメーターとなる。
- ③ ($\tan r/\tan r_0$) は b_s/d_{max} との関係についてみると、立木径による変化があまり認められず ($\tan r/\tan r_0$) は b_s/d_{max} との関係が密なことがわかる。
- ④ 樹林の無い場合の ($\tan r/\tan r_0$) の値はほぼ 1.0 となり実験結果の妥当性を示している。

以上の結果より図-5.23 に ($\tan r/\tan r_0$) を b_s/d_{max} の関数として表されるものとして考え、最小 2 乗法により関数形を求めると次式のようになる。

$$\tan r/\tan r_0 = 4.60 (b_s/d_{max})^{-2.591} + 1 \quad \dots\dots\dots (5.23)$$

ここに $\tan r$; 樹林帯内での集合流動の発生限界勾配

$\tan r_0$; 樹林帯無しの場合の集合流動の発生限界勾配

b_s ; 樹林の純間隔

d_{max} ; 堆積土砂の最大粒径

である。

(2) 堆砂形状の検討

実験で得られた r を用いて (5.18) ~ (5.22) 式により堆砂形状を求め、その計算値と実験値とを比較した。

図-5.24 に到達距離の比較を、図-5.25 に堆砂高と堆砂長との比較を示す。図より多少のバラツキはあるものの計算値と実験値は比較的よく一致しており、土石流の堆砂形状が $\tan r$ を (5.23) 式で与えることで (5.18) ~ (5.22) 式により求められることを示している。

(3) 樹林帯の設置長さ

土石流の規模が与えられ、樹林の間隔を設定して土石流の堆積長を上記の方法で計算し、この長

さを樹林帯の設置長さとすればよいと考えられる。なお、樹林間隔をあまり小さく計画すると、樹林帯の下流側で洗掘を生じることが確認された。下流側には何らの洗掘防止対策を施し、樹林帯内の立木の流出を防止することが必要である。

表-5.1 (1) 土石流の堆積形状 (実験値)

上流堆積勾配 $\delta=12^\circ(\theta_u=15^\circ)$, $\delta=20^\circ(\theta_u=20^\circ)$, $\delta=25^\circ(\theta_u=25^\circ)$ 計算値堆積勾配 $r_o=10.5^\circ$

CASE	上流水路 勾 配	樹木占有 面 積 率 P (%)	樹 林 の 純 間 隔 bs/d _{max}	立 木 径 (cm)	時刻 t	堆積勾配 (r)	到達距離 X (cm)	堆 積 高 y (cm)	x ₁ (cm)	$\frac{\tan r}{\tan r_o}$
5	15°	0	—	—	1	12.0°	80	5.25	24.7	1.15
				—	3	10.3	155	8.2	38.6	0.982
				—	6	9.2	245	9.4	44.2	0.875
6	15°	1.5	2.68	0.9	1	16.5	55	9.2	43.3	1.60
				"	3	15.4	85	12.6	59.3	1.49
				"	6	14.5	130	15.6	73.4	1.40
21	15°	1.0	3.47	0.9	1	16.4	57	9.4	44.2	1.59
				"	3	12.9	115	11.8	55.5	1.24
				"	6	12.3	153	12.6	59.3	1.18
30	15°	1.0	2.79	0.7	1	17.5	60	10.0	47.0	1.70
				"	3	12.8	120	12.2	57.4	1.23
				"	6	13.6	135	13.8	64.9	1.31
39	15°	1.0	2.32	0.6	1	21.9	52	11.5	54.1	2.17
				"	3	17.2	80	14.4	67.7	1.67
				"	6	14.3	130	15.0	70.6	1.38
48	15°	0.5	2.89	0.5	1	19.7	60	11.8	55.5	1.94
				"	3	17.3	105	15.4	72.5	1.68
				"	6	13.7	140	14.6	68.7	1.32
11	20°	0	—	—	1	14.9	55	7.6	20.9	1.44
				—	3	9.6	165	7.6	20.9	0.91
				—	6	8.6	375	7.6	20.9	0.78
12	20°	1.5	2.68	0.9	1	22.9	45	12.8	35.2	2.28
				"	3	14.9	120	16.6	45.6	1.44
				"	6	13.7	152	16.6	45.6	1.32
24	20°	1.0	3.47	0.9	1	24.6	60	12.7	34.9	2.47
				"	3	15.3	140	20.4	56.0	1.48
				"	6	10.7	230	14.8	40.7	1.02
33	20°	1.0	2.79	0.7	1	27.4	43	16.0	44.0	2.80
				"	3	14.0	130	16.0	44.0	1.35
				"	6	14.2	150	16.0	44.0	1.37
42	20°	1.0	2.32	0.6	1	35.3	45	19.0	52.2	3.83
				"	3	21.4	95	16.1	44.2	2.12
				"	6	14.7	143	17.0	46.7	1.42
51	20°	0.5	2.89	0.5	1	43.2	35	11.6	31.9	5.08
				"	3	13.4	145	16.2	44.5	1.29
				"	6	12.6	187	14.3	39.3	1.21

表- 5.1 (2) 土石流の堆積形状 (実験値)

上流堆積勾配 $\delta = 12^\circ (\theta_u = 15^\circ)$, $\delta = 20^\circ (\theta_u = 20^\circ)$, $\delta = 25^\circ (\theta_u = 25^\circ)$ 計算値堆積勾配 $r_o = 10.5^\circ$

CASE	上流水路 勾 配	樹木占有 面 積 率 P (%)	樹 林 の 純 間 隔 bs/d _{max}	立 木 径 (cm)	時刻 t	堆積勾配 (r)	到達距離 X (cm)	堆 積 高 y (cm)	x ₁ (cm)	$\frac{\tan r}{\tan r_o}$
17	25°	0	—	—	1	21.6	50	7.7	16.5	2.14
				—	3	13.1	130	12.3	26.4	1.26
				—	6	10.0	263	14.0	30.0	0.953
18	25°	1.5	2.68	0.9	1	37.0	26	15.0	32.2	4.07
				"	3	16.1	125	21.8	46.8	1.56
				"	6	12.5	192	15.5	33.2	1.20
27	25°	1.0	3.47	0.9	1	27.8	56	13.0	27.9	2.85
				"	3	15.8	145	22.5	48.3	1.53
				"	6	12.3	208	17.7	38.0	1.18
36	25°	0.2	7.42	0.9	1	31.9	40	11.6	24.9	3.36
				"	3	12.5	140	16.6	35.6	1.20
				"	6	10.0	255	10.8	23.2	0.95
45	25°	0.5	4.79	0.9	1	23.6	67	14.0	30.0	2.36
				"	3	11.5	188	19.0	40.7	1.10
				"	6	10.5	282	20.2	43.3	1.00
54	25°	0.5	2.89	0.5	1	49.4	35	15.2	32.6	6.31
				"	3	13.4	165	16.8	36.0	1.29
				"	6	12.1	218	20.2	43.3	1.16

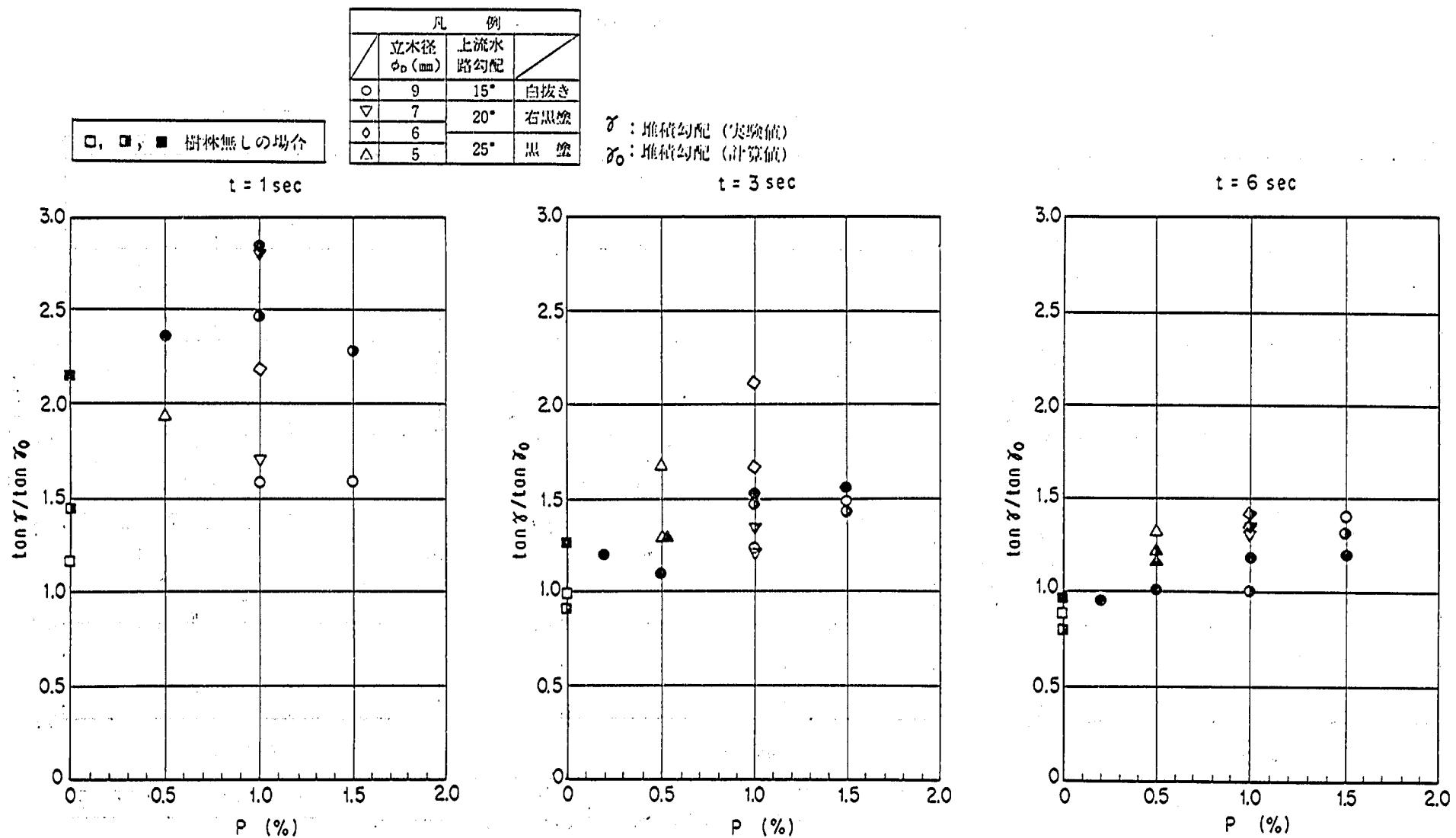


図-5.21 樹木占有面積率 P と $\tan \gamma / \tan \gamma_0$ の関係

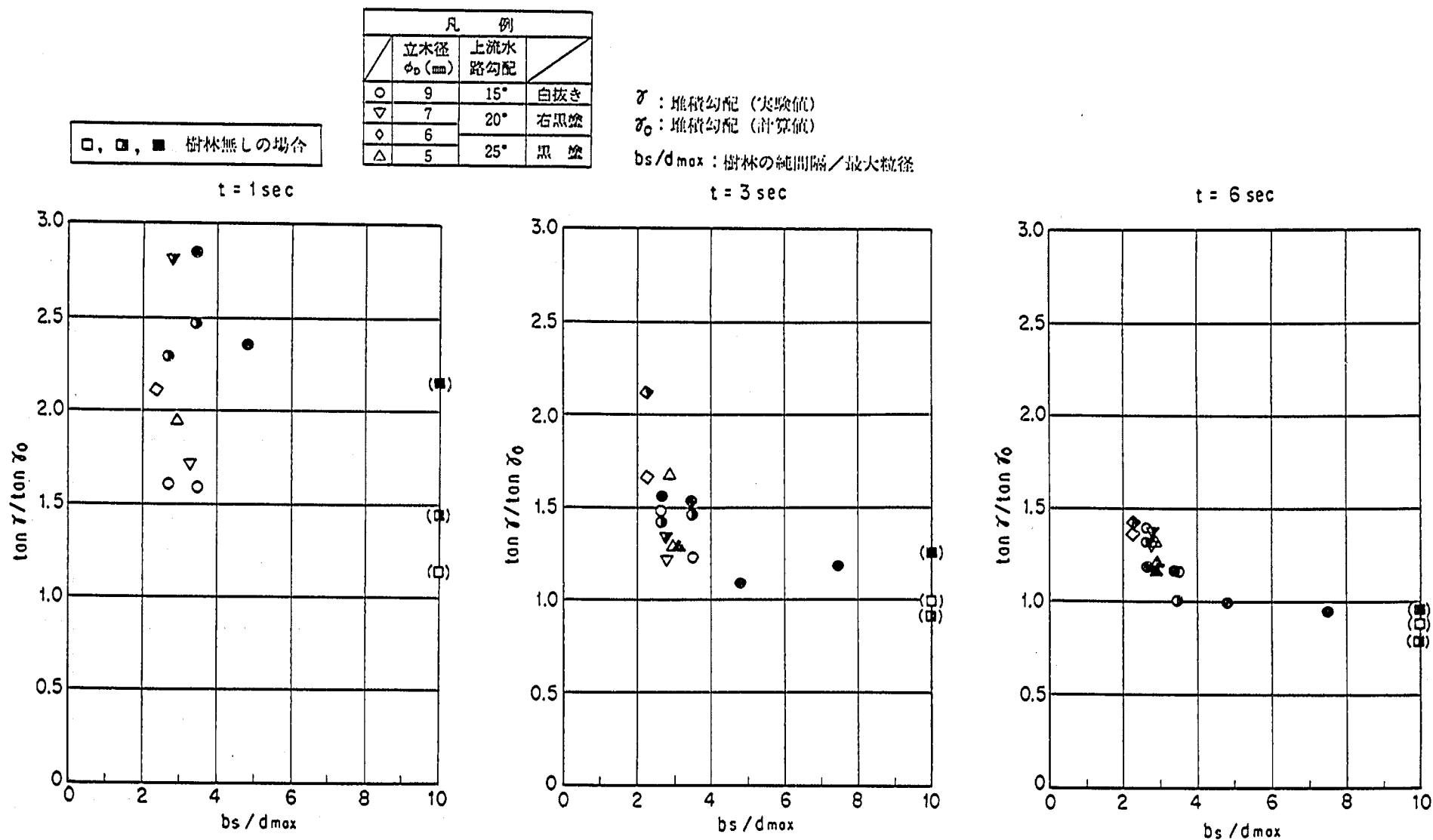


図-5.22 樹林の純間隔 bs/d_{max} と $\tan \gamma / \tan \gamma_0$ の関係

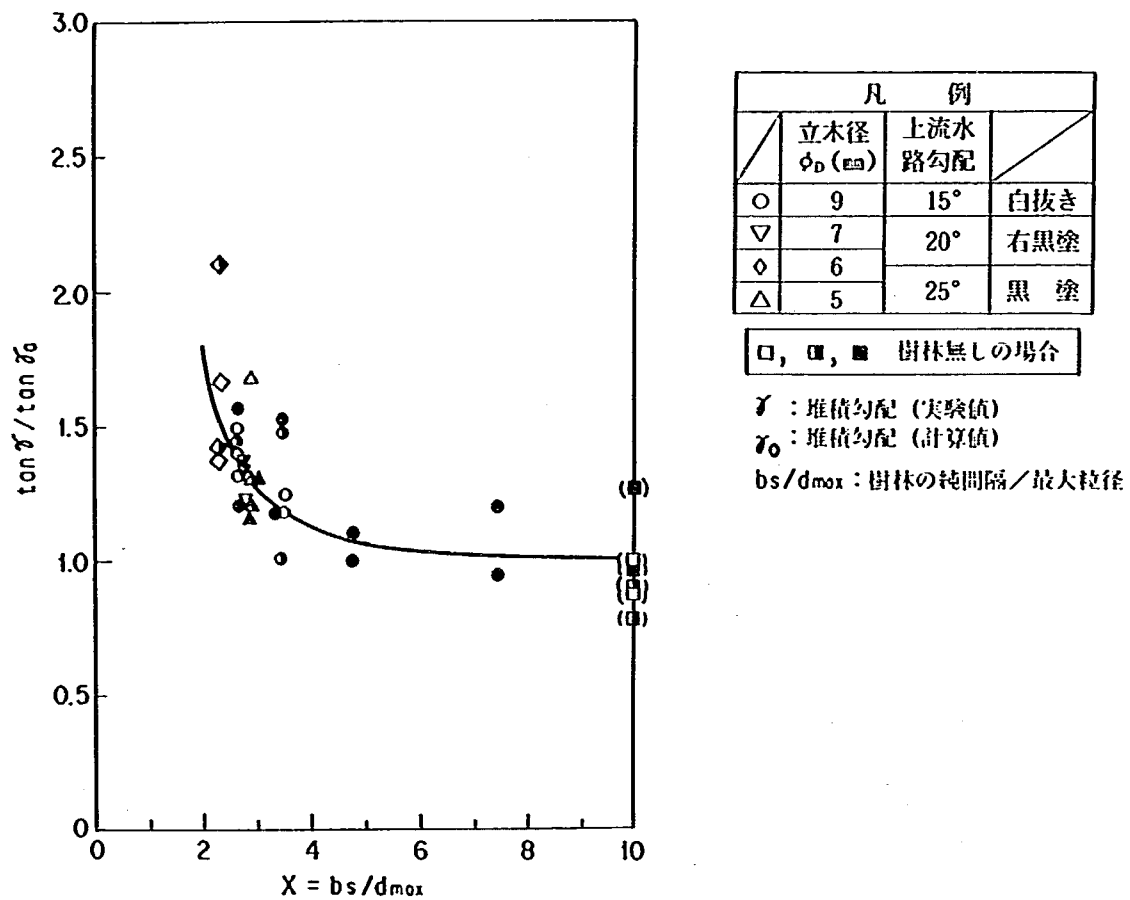


図-5.23 樹林の純間隔 bs/d_{max} と $\tan \gamma / \tan \gamma_0$ の関係

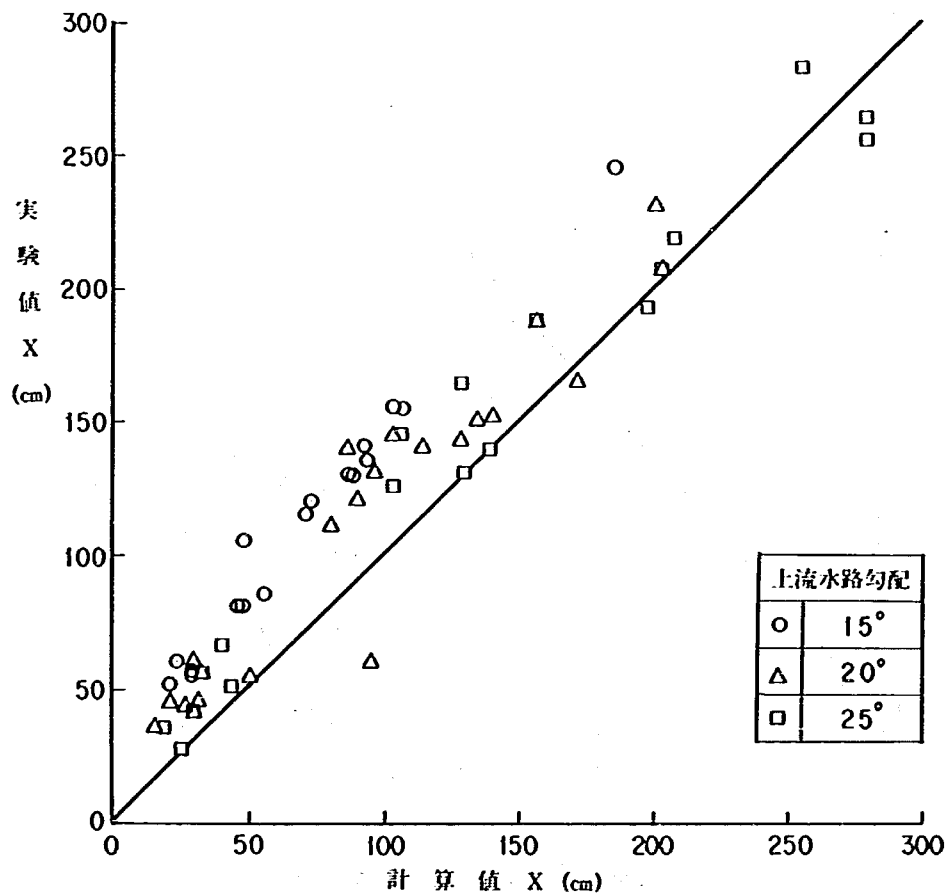


図-5.24 到達距離 X の計算値と実験値の関係

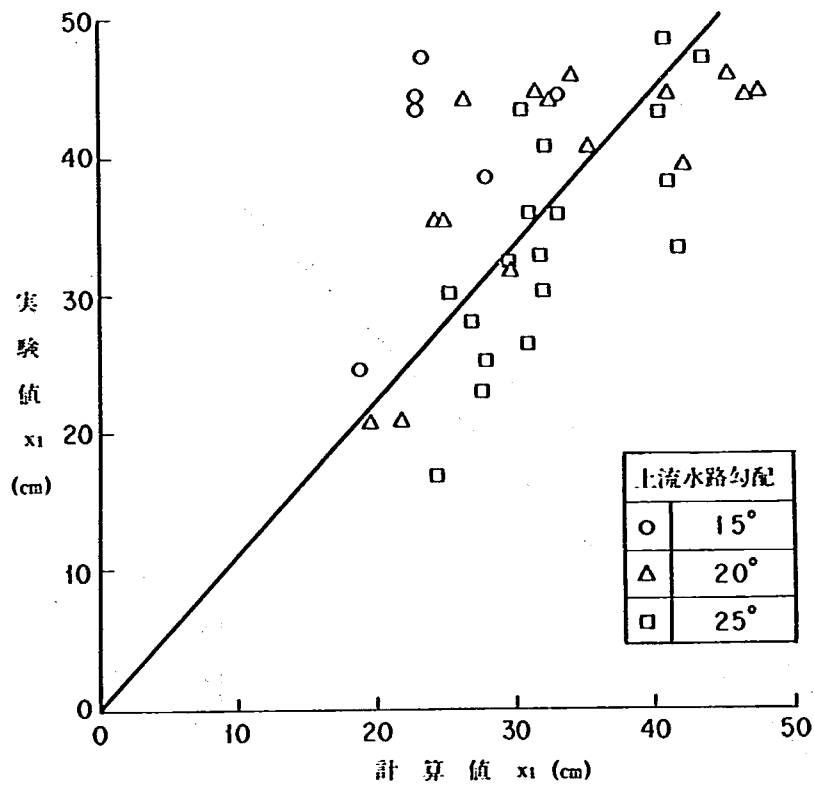
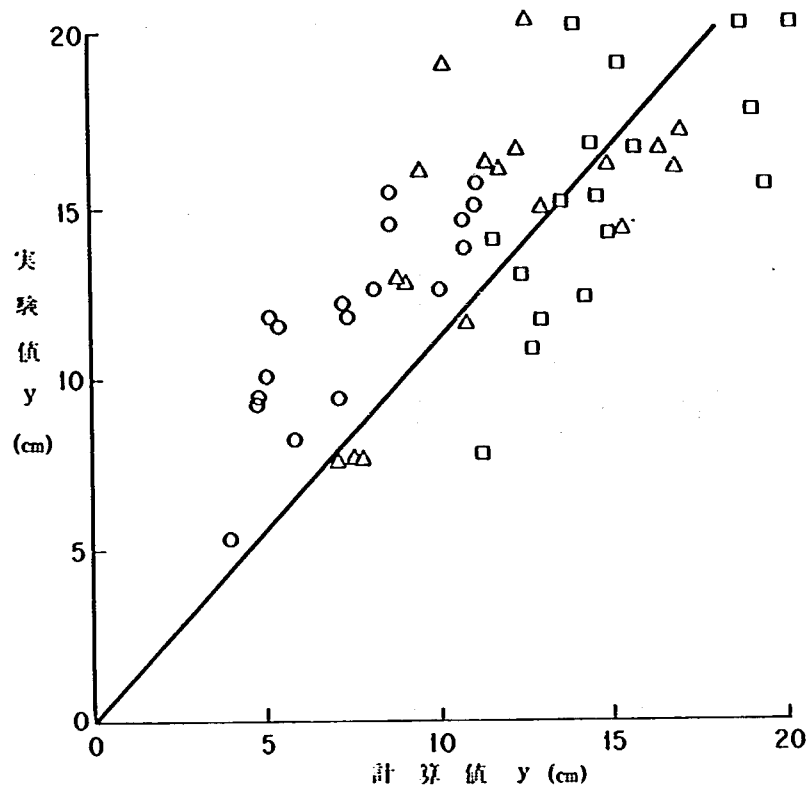


図-5.25 堆積高 y 及び x_1 の計算値と実験値の関係

6. まとめと今後の課題

6.1 まとめ

(1) 礫の通過率

樹林帯による礫の通過率は、芦田・江頭のモデルによる計算値とほぼ一致する実験結果が得られた。しかし、礫数が少ないことと、河床の抵抗を考慮していないことから実験条件を変えて更に検討する必要がある。

(2) 土石流の減速効果

- ① 土石流のフロント部の流速は、勾配変化点付近で急速に減速し(A領域)、その後流速が若干回復し、ほぼ一定となる(B領域)ことがわかった。
- ② 樹林帯がない場合に対するA, B領域の流速の低減率は、勾配変化が大きくなる程、樹林の純間隔(b_s/d_{max})が小さくなる程大きくなることがわかった。

(3) 土砂濃度と樹林帯の抗力係数

- ① 樹林帯内を流下する流れの土砂濃度は、樹木占有面積率が大きくなるにしたがい減少することがわかった。
- ② 樹林帯内での土砂濃度は、

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} - \frac{\rho \beta C_b F_r^2}{2 \cos \theta (\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)}$$

$$\beta = \frac{h \phi_D}{\ell^2 - \pi \phi_D^2 / 4} \quad \dots \dots \dots (6.1)$$

ここに、 C_d :土砂濃度、 ρ :水の密度、 σ :砂の密度、 ϕ :内部摩擦角、 θ :河床勾配、
 F_r :フルード数、 β :樹林の密度にかかわる係数、 h :波高、 ϕ_D :立木の径、
 ℓ :立木の間隔、 C_b :立木の抗力係数である。

と表されるとして、この式より樹林帯の抗力係数 C_b を求めたところ抗力係数は0.5~1.5の範囲となり、秋草らの研究結果とほぼ同様の値となった。

(4) 土砂堆積の促進効果

- ① 土石流の最高水位(瞬間の最大堆積高+流動深)は、樹木占有面積率が大きいほど、 b_s/d_{max} が小さいほど大きくなる傾向がある。また、実験結果より最高水位は、 b_s/d_{max} に大きく影響されることがわかった。樹林帯の無い場合に比べて b_s/d_{max} が2~3では1.5~1.7倍となり、 b_s/d_{max} が7以上では、樹林帯の影響がなくなることがわかった。
- ② 樹林帯で土砂堆積が促進されるため、樹林帯の下流側では、河床洗掘が生じる。この最大洗掘深は、 P が大きいほど b_s/d_{max} が小さいほど大きくなる。
- ③ 土石流フロント部の流出土砂の平均粒径は、樹林帯の無い場合に比べて小さくなる傾向があることがわかった。このことは、樹林帯により、土石流中の大きな礫が捕捉されたことによるもの

と考えられる。

(5) 土石流の堆積過程

土石流の堆積勾配は、樹林帯があることにより大きくなることがわかった。その関係は、実験結果より、

$$\frac{\tan r}{\tan r_0} = 4.60 (b_s/d_{max})^{-2.591} + 1 \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

$$\tan r_0 = \frac{C_* (\sigma - \rho) \tan \phi}{C_* (\sigma - \rho) + \rho [1 + 0.52 (q_0/gd^3)^{1/3}]} \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

で表されることがわかった。この式を用いて樹林帯内での土石流の堆積勾配を求め、高橋の堆積過程のモデルを用いて土石流の堆積過程が計算できる。

(6) 樹林帯の規模

土石流の流入条件、土砂量、樹林の純間隔が与えられると、(6.2)式、(6.3)式 及び高橋の堆積過程のモデルを用いて土石流の堆積長が推定でき、樹林帯の長さを求めることが可能である。ただし、樹林の間隔を小さく計画すると、下流側での河床洗掘が生じることから、洗掘防止対策や、立木の流木防止対策をする必要がある。

6.2 今後の課題

これまでの樹林帯による土砂堆積効果を評価する研究は、立木の抗力係数を用いて、(6.1)式のような形で土砂の堆積促進効果を表現している。本研究では、土石流の堆積勾配が樹林帯により大きくなる((6.2)式)、すなわち見かけの内部摩擦角が増大することによるものと考えた。今後は、樹林帯の存在による堆積促進効果を、より理論的に評価するための研究が望まれる。

また、本研究では、1次元的な検討しかなされていない。実際の緑の砂防ゾーンの効果を土石流の氾濫堆積シミュレーションなどで評価しようとする場合には、横方向の流れに対する樹林帯の効果も評価した2次元的な検討も必要となる。

参 考 文 献

- 1) 水山高久, 石川芳治, 鈴木浩之: 立木の衝撃緩衝効果に関する試験報告書, 土木研究所資料 第2560号, 1988年2月
- 2) 水山高久, 栗原淳一, 鈴木浩之: 立木の衝撃緩衝効果に関する試験報告書(III), 土木研究所資料 第2737号, 1989年2月
- 3) 農業土木学会: 農業土木ハンドブック, 改訂三版, pp.1181, 1976
- 4) 江守一郎: 模型実験の理論と応用(第二版), 技報堂出版, 1985
- 5) 東京農工大学農学部林学科編: 林業実務必携(第三版), 朝倉書店, pp.174~182, 1987
- 6) 芦田和男, 江頭進治, 栗田三津雄, 荒巻 浩: 透過性砂防ダムの土石流調節効果, 京都大学防災研究所年報, No 30 B-2, pp.441~456, 1987
- 7) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集 206, pp.59~69, 1972
- 8) 高橋 保: 土石流の停止・発生機構に関する研究(3), 京都大学防災研究所年報, No 25 B-2, pp.327~348, 1982
- 9) 水山高久: 土石流から掃流に変化する勾配での流砂量, 新砂防, 116, pp.1~6, 1980
- 10) 高橋 保: 土石流の発生と流動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, No 20 B-2, pp.405~435, 1977
- 11) 玉井信行, 池田裕一, 小平 卓, 広沢祐輔, 浅枝 隆: 円柱杭による堆砂効果と平衡断面形状, 土木学会第43会年次講演会概要集II, pp.304~305, 1988
- 12) 水山高久, 天田高白, 栗原淳一, 小林幹男: 樹林帯の抵抗特性と土砂堆積促進効果, 新砂防Vol.42, No 4(165), pp.18~22, 1989
- 13) 秋草 勲, 吉川秀夫, 坂上義次郎, 芦田和男, 土屋昭彦: 水制に関する研究, 土木研究所報告第107号, pp.42~43, 1960
- 14) 水山高久, 中野陽子, 鈴木浩之: 樹林帯の抵抗特性と土砂堆積促進効果, 新砂防 Vol.42, No 4, pp.34~36
- 15) 高橋 保, 吉田 等: 土石流の停止・発生機構に関する研究(1), 京都大学防災研究所年報, No 22 B-2, pp.315~328, 1974

樹林帯の土石流制御効果に関する
水理模型実験報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2837号
平成2年3月(1990)

水山高久, 井良沢道也, 福本晃久

要 旨

近年、緑の砂防ゾーン等、積極的に樹木を利用した砂防施設が施工されつつある。しかし、樹木が土石流に対してどの程度制御効果を持っているかについては十分な評価がなされておらず、樹木を利用した施設の設計方法も確立されていないのが現状であり、その設計方法の確立が急がれている。

本報告書は、立木の群としての土石流に対する制御効果に関する水理模型実験の結果をとりまとめたものである。

キーワード: 砂防, 樹林帯, 土石流, 土石流制御, 水理模型実験

郵便はがき

四十一円切
手をはって
下さい。

305-□□

建設省土木研究所
砂防研究室 行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2837 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印