

## 1. はじめに

大井川上流の支流である東河内川の治山ダムと河川動態との関連についての観測から、砂防（治山）ダムがダム上流の縦断勾配の形成にどのような影響を与えるかの大要については明らかになりつつある<sup>1)</sup>。しかし、洪水時の土砂の移動・堆積プロセスや移動中の土砂の分級が河川形態の形成とどのように関連しているかを現地観測のみによって把握することは困難である。ここに現象の部分的動態を再現する地形実験<sup>1)</sup>の必要性がある。本報告では、東河内川を想定した水路実験によって、洪水時の流送土砂の粒径の違い、砂礫の混合比の違いによるダム上流の縦断形の形成について検討したので、その結果を報告する。

## 2. 実験の方法

**2.1 実験装置** 実験水路は上流端に整流部を持つ幅20cm、長さ5m、深さ23cmの木製水路で下流端から10cmの位置に高さ5cmの堰が設置されている（図-1）。給砂は長さ1.5m、幅0.3mのベルトコンベアで行われ、給砂量はその上に載せる砂礫量とその運転速度によって制御された。給砂地点は水路下流端から4mの地点である。

**2.2 実験条件** 本実験は現実河川の忠実な再現を目的とはしていないが、実験から現象の本質が見通せるものでなければならぬ。そのために実際河川と実験水路の長さの比 $L_r = 100$ でのフルード相似の条件と流砂の条件を相似にするため、流れの強度(transport stage)の比 $(U^*/U^*_{*c})_r = 1$ とする<sup>2)</sup>条件を課した。また、東河内実験溪流観測区間付近の1982年8月洪水時<sup>3)</sup>のような流れを想定し、実験水路の勾配を8.4%に設定し、 $1000\text{cm}^3/\text{s}$ の流量を流した。東河内川の洪水時には砂と数mm～十数mm、数十mm～百数十mm、500～1000mmの礫が流送されるが、本実験では数十mm～百数十mmおよび500～1000mmの成分を分級の極めて良い中央粒径が1mmの砂と5.2mmの礫でそれぞれ代表させ給砂した。

従って、この実験では勾配8.4%、幅20mの河床を $100\text{m}^3/\text{S}$ の洪水が流れ、その中を6～7cmと50cm前後の礫が運搬されている状況を見ていることになる。

**2.3 実験の手順と砂礫の流送状況** 実験は二つのケースからなる。一つのケースは供給砂礫の量、粒径および混合比の違いが堆積勾配の形成に及ぼす影響に関する実験である（表-1）。このケースの実験では、堰上流の水路床が空の状態で定常状態の流れをつくり、そこに砂礫を供給する給砂方式の実験である。水路床を流送する砂礫は、堰上流のプール部分に到達すると堆積を開始する。この堆積上面を流送してきた砂礫は先端部で崩落し水中安息角を形成しながら堆積先端部を堰に向かって前進させる。同時に堆積域は水路上流側へもひろがる。堆積先端部が堰に到達すると砂礫は堰の下流に流出する。その後、供給された砂礫を下流に流送するのみにあつた勾配になるまで天端を支点とする回転的堆積 (rotational aggradation) が起こり、堆積域はさらに上流にひろがる。堆積域がある程度ひろがると、堆積の後端およびその上流の跳水の位置がほぼ固定してくる。この状態は、上流からの砂礫の供給量と堰下流への流出量がほぼみあう動的平衡状態が出現したためと考えられるので、

この時点で給水・給砂を停止し各種測定を実施した。礫で給砂濃度の高い場合は、上流に遡上した跳水の位置が下流に移動し、その後また遡上するということを繰り返しある幅で変動した。跳水の位置が盛んに上流に遡上している時は、堰下流への礫の流出が極端に少なくなっていた。逆にその位置が下流に移動する時は、流れが集中し反砂堆が形成され礫は急激に再移動し一部水路床を露出させた。この状態がある程度続いた後、跳水の位置が一時的に安定するので、この場合はこの時に給水・給砂を停止し、堆積勾配把握のための各種測定を実施した。もう一つのケースは、堰上流に既に形成されている堆積地に清水流を流した場合および砂あるいは礫を流送させた場合に既堆積地の勾配がどのように変化するかをみる実験である(表-2)。前記のケースと同じ手順で平衡状態を出現させ、その後各種条件を与えた場合の堆積勾配の変化を調べた。このケースでも前記ケースの実験と同様、堆積域上流の跳水の位置がほぼ固定した時点で給水あるいは給砂を停止し、同じ各種測定を実施した。

### 3. 供給砂礫の量、粒径および混合比と堆積勾配の形成

表-1に実験結果を示す。表中の平均堆積勾配は最小自乗法で求めた堆積地の平均河床高の勾配であり、平均河床高は堆積の断面積を堆積幅で除して求めた。図-2は砂礫濃度と平均河床高の勾配を関係を示したものである。砂でも礫でも単一粒径の粒子が流送される場合は、粒子濃度が高いほど堰上流の堆積勾配が大きくなることを示している。また、同じ粒子濃度では礫は砂の場合の数倍以上の堆積勾配をとり、大粒径の粒子ほど堆積勾配が大きいことを示している。以上のように単一粒径粒子の場合は、その濃度と堆積勾配あるいは粒径と堆積勾配との関係は単純であるが、砂礫が混合するとこれらの関係は図中にA, B, C, Dで示したように単純ではなくなる。すなわち、礫濃度が1%の流れに砂を加え砂礫濃度が1.5% (砂の混合比率33%) になるようにすると、濃度が0.5%増加したにもかかわらず堆積勾配は約7%から約5%に減少する(B)。つぎに混合比率が50%になるまで砂を加え砂礫濃度を2%にすると、濃度は増加するが堆積勾配は約3.6%と一そう減少する(C)。さらに混合比率が75%になるまで砂を加え砂礫濃度を3%としても堆積勾配は約3.5%とまだ減少する(D)。

このように混合砂礫では単一粒径の場合と違って、砂礫濃度だけの条件で堆積勾配を考えることは出来ない。砂の混合割合が堆積勾配の形成に大きな役割を果たしている。これは、単一粒径の砂の堆積勾配形成に対する役割がその混合比率を増すごとに顕在化することを示している。もしこの顕在化の程度が単一粒径の砂と礫の性質を混合比率に応じて単純に足し合わせたものなら、単一粒径の砂あるいは礫の堆積勾配形成に対する役割を明らかにするだけで問題は解決する。しかし、今回の実験結果はそのように単純なものではないことを示している。図-2で単一粒径の砂と礫の性質を混合比率に応じて単純に足し合わせると砂礫濃度と堆積勾配の関係はB', C', D' で表わされることになるが、実際はB, C, Dとなり、より小さい堆積勾配となっている。このB', C', D' と実際のB, C, Dとの堆積勾配の差は、砂と礫が混合することによって生じる混合効果、すなわち減摩効果、突出効果、連行効果<sup>4)</sup>による砂礫の易動度(mobility)の増加によってもたらされたといえ、混合効果が堆積勾配の形成に大きな役割を果たしていることを示している。今回の実験では砂の比率が67%以上になると混合砂礫の堆積勾配は単一粒径の砂による堆積勾配とほぼ同じ値をとることを示した。これは、洪水時に細粒成分が多くを占める混合砂礫が流送される場合は、この細粒成分を代表的な単一粒径で置き換え、その単一粒径の堆積勾配から混合砂礫の堆積勾配を推定することの可能性を示している。

図-3は砂礫濃度と堰上流の堆積長の関係を示したもので、流送砂礫の濃度によって堰が上流のどの範囲まで影響を及ぼすかを検討することが出来る。砂礫濃度と勾配の関係と同様、単一粒径の粒子が流送される場合は、粒子濃度が高いほど堆積長が長くなり、堰の影響がより上流までおよぶことを示している。また、堰の影響は流送される粒子径が大きいほど強いことも示している。さらに混合効果の影響は、砂礫濃度と勾配の関係より砂礫濃度と堆積長の関係に強く現れることを示し、勾配よりも堰の影響範囲にその影響が強く現れることを示している。

#### 4. 既堆積地への給水・給砂による堆積勾配の変形

表-2に実験結果を示す。これは、ケース1の実験(表-1)で形成された堆積地に流量 $1000\text{cm}^3/\text{s}$ の清水流を流下した際の形成勾配、さらに含砂(礫)流を流下した際の形成勾配を示したものである。図-4は、清水流の流下によって既堆積地の勾配がどのように変化したかをみたものである。単一粒径であれ混合粒径であれ、給砂して平衡状態に達した後に清水流を流下すると堆積勾配は減少する。この勾配の減少は動的平衡が清水流の流下により静的平衡に移行するためと考えられるが、この減少の程度は単一粒径であれば粒径によって、混合粒径であれば混合比率によって大きく異なる。すなわち単一粒径であれば、礫では動的平衡勾配と静的平衡勾配の差がそれほど大きくないが砂では非常に大きくなることを示している。また、混合粒径では砂の混合比率が50%まではその差は礫と同程度で小さいが、67%になると一変して砂と同程度なり非常に大きくなることを示している。この動的平衡勾配と静的平衡勾配の差がいわゆる砂防ダムの量的調節効果と考えられるので、これからみると、単一粒径では粒子径が小さいほど調節効果が大きく、混合粒径では細粒な粒子の混合割合がある程度以上になると急激に調節効果が大きくなることを示している。しかし、この実験では、流下した清水流の流量は $1000\text{cm}^3/\text{s}$ と現実の流れに換算すると大洪水に相当するものであり、通常いわれている中小洪水でどのように変化するかは今後の検討課題である。

#### 5. おわりに

以上みてきたように、砂礫の混合効果の理解なくしては、堆積地の勾配形成およびその変形を予測できないということは明かである。したがって、砂防ダムの土砂調節機能を論ずるためには、まず砂礫の混合効果についての理解を深める必要があるという結論に到達する。

なお、本研究にあたっては、文部省科学研究費補助金(平成2,3年度一般研究C、課題番号 02660152)の一部を使用した。

#### 引用文献

- 1)高山茂美,池田 宏,眞板秀二,伊勢屋ふじこ(1990):河川における混合砂礫の流送機構の研究 文部省科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書(課題番号62460235)
- 2)池田 宏(1990):混合粒径砂礫の流送機構に関する大型水路実験,文部省特定研究報告書
- 3)眞板秀二(1988):破碎帯流域における荒廃溪流の動態に関する砂防学的研究,筑波大学演習林報告,第4号
- 4)池田 宏(1984):二粒径混合砂礫の流送に関する水路実験,筑波大学水理実験センター報告,第8号

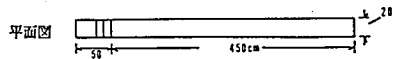
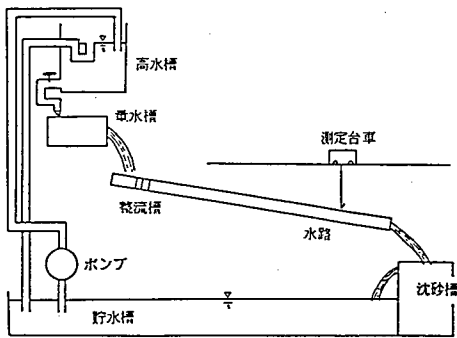
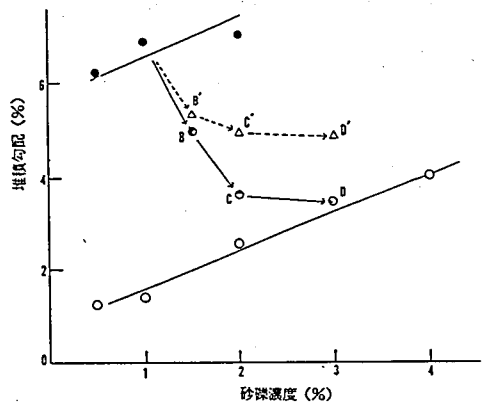
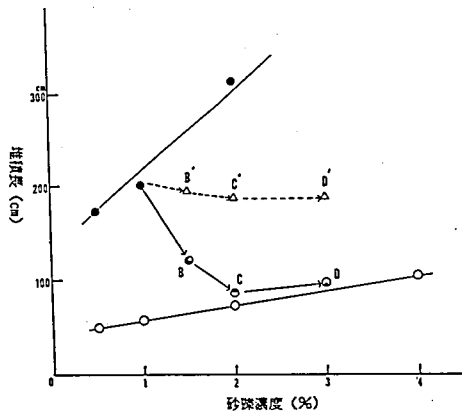


図-1 実験水路の概要



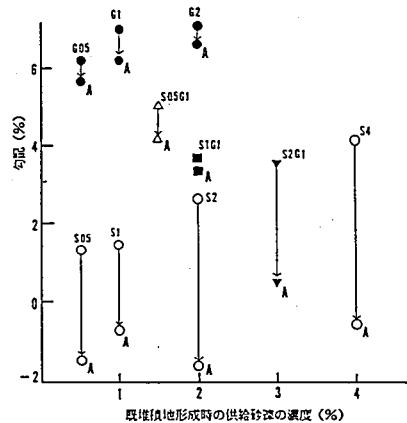
○：砂 ●：礫  
 B：混合砂礫（砂：礫=0.5：1） C：混合砂礫（砂：礫=1：1）  
 D：混合砂礫（砂：礫=2：1）  
 B'、C'、D'：単一粒径の砂と礫の性質を混合比率に応じて単純に足し合わせた場合

図-2 砂礫濃度と平均河床高の勾配



○：砂 ●：礫  
 B：混合砂礫（砂：礫=0.5：1） C：混合砂礫（砂：礫=1：1）  
 D：混合砂礫（砂：礫=2：1）  
 B'、C'、D'：単一粒径の砂と礫の性質を混合比率に応じて単純に足し合わせた場合

図-3 砂礫濃度と堆積長



○：砂、S05～S4の既堆積地の勾配、Aは清水流下後の勾配  
 ●：礫、G05～G2の既堆積地の勾配、Aは清水流下後の勾配  
 △：混合砂礫（砂：礫=0.5：1）、S05G1の既堆積地の勾配、Aは清水流下後の勾配  
 ■：混合砂礫（砂：礫=1：1）、S1G1の既堆積地の勾配、Aは清水流下後の勾配  
 ▼：混合砂礫（砂：礫=2：1）、S2G1の既堆積地の勾配、Aは清水流下後の勾配

図-4 清水流の流下による既堆積地の勾配変化

表-1 ケース1の実験結果

	砂礫供給濃度 (%)		流量 (cm <sup>3</sup> /s)	砂礫量 (g/s)		平均堆積勾配 (%)	堆積長 (cm)
	実験RUN名	実験RUN名		砂	礫		
単一粒径	0.5	S05	1000	5	0	1.25	50
	1	S1	1000	10	0	1.42	58
	2	S2	1000	20	0	2.58	72
	4	S4	1000	40	0	4.11	103
混合粒径	0.5	G05	1000	0	5	6.19	172
	1	G1	1000	0	10	6.97	200
混合粒径	2	S05G1	1000	5	10	5.00	120
	2	S1G1a	1000	10	10	3.63	86
	2	S1G1b	1000	10	10	3.63	92
	3	S2G1	1000	20	10	3.50	95

注) 水路勾配は8.4%

表-2 ケース2の実験結果

実験対象堆積地形成実験RUN名	ケース2の実験RUN名	流量 (cm <sup>3</sup> /s)	供給砂礫量 (g/s)		平均堆積勾配 (%)	堆積長 (cm)
			砂	礫		
給水の	S05	S05V	1000	0	-1.47	37
	S1	S1V	1000	0	-0.70	35
	S2	S2V	1000	0	-1.59	40
	S4	S4V	1000	0	-0.55	38
のみ	G05	G05V	1000	0	5.66	128
	G1	G1V	1000	0	6.20	138
	G2	G2V	1000	0	6.61	115
	S05G1	S05G1V	1000	0	4.18	88
給砂	S1G1a	S1G1aV	1000	0	3.35	73
	S1G1b	S1G1bV	1000	0	2.68	69
	S1G1c	S1G1cV	1000	0	2.83	70
	S2G1	S2G1V	1000	0	0.48	56
給砂	S1G1cV	S1G1cV+S1	1000	10	2.61	73
	S1G1dV	S1G1dV+G1	1000	0	6.30	167

注) 水路勾配は8.4%