

砂防ダム堆砂勾配決定要因の力学的考察 — 一面せん断試験における粒径の影響 —

広島大学総合科学部 ○徳留善幸・海堀正博

はじめに 砂防ダムの堆砂勾配は元河床勾配の $1/2$ として計画されることが多く、実際の溪流や河川における堆砂勾配が元河床勾配の $1/2 \sim 2/3$ の範囲の値になったことも数多く報告されている。一方、海堀（1992）は昭和63年7月の広島県加計町での土石流調査において、この地域でのダム堆砂勾配が元河床勾配の $1/3$ 程度であったことを報告し、堆砂勾配が元河床勾配に対して小さくなった要因として、Ⅰ．流域面積が 1 km^2 以下と小さいこと、Ⅱ．元河床勾配が $1/7$ 以上の急勾配であること、Ⅲ．堆砂物質の粒径が小さいこと、Ⅳ．土砂移動頻度が小さいことの4つを挙げている。また、海堀（1993）は大山二の沢のダム堆砂地における調査では堆砂勾配は元河床勾配の $1/2$ から $2/3$ の範囲であったことなどを報告し、堆砂勾配に最も影響を与えるのは土砂の供給形態にあるとした。すなわち、大山二の沢のように土砂移動頻度が高いところでは堆砂勾配は元河床勾配に対して $1/2$ から $2/3$ になるが、広島県加計町のように土砂供給頻度が小さいところではダム堆砂勾配は元河床勾配に対して $1/3$ 程度にしかならないこと、またその結果を生むメカニズムが崩れか流れかという土砂の供給形態の違いに由来するものとした。このようにダム堆砂勾配がどのようなメカニズムで決定するかという事はきわめて重要かつ複雑な問題である。今回は堆砂物質の粒径の違いが堆砂勾配決定にどの程度影響しているかをみるべく土のせん断試験を行った。せん断抵抗角が堆砂勾配や河床堆積物の勾配に等しくなることはないが、相互に関連していると考えられる。

一面せん断試験の実施 土のせん断強さ及びせん断抵抗角は、試験様式や試験条件の違いによってその結果が大きく異なることが知られている。試験様式が同じ場合に初期密度や応力履歴、せん断速度などの試験条件によって、どの程度せん断抵抗角が変わってくるかという研究もかなり盛んに行われてきた。また、砂の粒径がせん断抵抗角にどのような影響を与えるかといった研究も多数報告されているが、今なお一定の結論は出されてはいない。試験様式や応力レベル、試験で使われる試料等の試験状態がその原因だと考えられるので、今回は溪流の土砂移動現象を考えて、粒子が破碎されるような高い応力レベルは必要ではなく、三軸圧縮試験が行われるような様式ではなく、直接せん断試験の状況の方が近いということを考慮して、低応力レベルでの一面せん断試験という手法を用いて粒径とせん断抵抗角の関係を検証することにした。本研究では現場一面せん断試験機を用いたが、この試験機を用いたのは、垂直応力が砂防分野で必要になる低応力状態においても正確に試験が行えること、せん断中のせん断箱の体積変化を拘束しないため過分の側面摩擦を生じないこと、せん断箱の大きさが $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ と大きく比較的大きな粒径を含む試料を使用できるなどの理由による。

試料として寒水石とまさ土を用い、それぞれ粒径を変えて3種類ずつ準備した。各試料の粒径加積曲線を図1に示す。また、それぞれの試料において土粒子比重試験、最大・最小密度試験を土質試験法に基づいて行なった。それぞれの結果を表1に示す。各試料各粒径ごとに適当な3段階の締め固め密度を設定して、常にほぼ一定になるように留意して試料を準備した。次に所定の垂直荷重をかけて

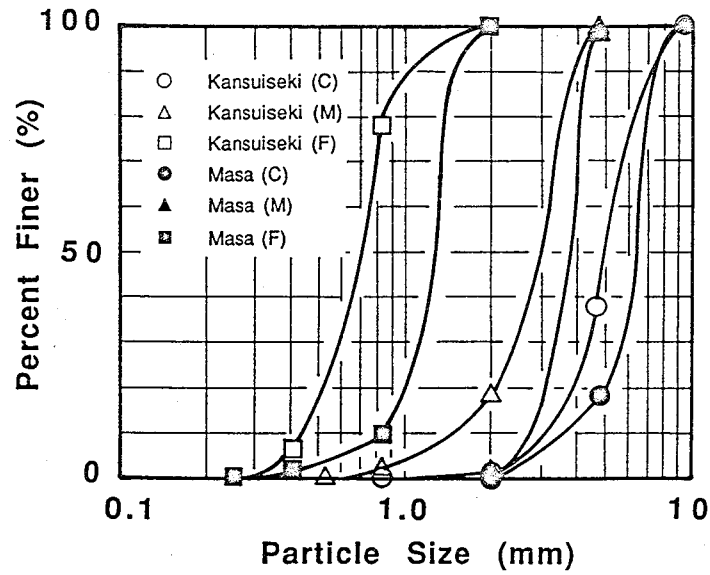


図1 試料の粒径加積曲線

表1 試料の比重及び最大・最小密度

Sample	Kansuiseki			Masa		
	Fine	Medium	Coarse	Fine	Medium	Coarse
Specific Gravity	2.724			2.650		
Max Density (g/cm ³)	1.718	1.688	1.670	1.628	1.575	1.571
Min Density (g/cm ³)	1.384	1.404	1.385	1.296	1.338	1.322

表2 試料の密度

		Initial Density (g/cm ³)		
		Coarse	Medium	Fine
Kansuiseki	Dense	1.59 ~ 1.68	1.63 ~ 1.65	1.63 ~ 1.64
	Medium	1.53 ~ 1.54	1.56 ~ 1.58	1.55 ~ 1.58
	Loose	1.42 ~ 1.44	1.46 ~ 1.47	1.46 ~ 1.50
Masa	Dense	1.50 ~ 1.52	1.50 ~ 1.51	1.50 ~ 1.51
	Medium	1.44 ~ 1.45	1.45 ~ 1.47	1.45 ~ 1.47
	Loose	1.36 ~ 1.38	1.37 ~ 1.39	1.35 ~ 1.36

圧密した。圧密終了後せん断に入る直前に試料の初期密度を求めた。ただし垂直応力の最大は230gf/cm²である。その後約一分間に0.5mmの割合のせん断変位で等圧せん断を行った。毛管張力の影響を除去するために飽和状態で試験を行なった。せん断変位が30mmに達したらせん断過程を終了した。

結果と考察 表2はせん断開始直前の試料の密度を示したものである。粒径別に垂直応力 σ とピーク状態のせん断強さ τ の関係を求めたところ、それぞれの粒径が大きくなるに従って直線の勾配が増加しているのが分かった。直線の勾配に当たる摩擦係数 $\tan \phi$ と粒径の関係を表すために横軸に相対密度 D_r 、縦軸に摩擦係数 $\tan \phi$ を粒径ごとにプロットしたのが図2である。図中の直線はどちらの試料も粒径の大きいものほど上にきており、かつ平行とみることができる。このことから相対密度に依存するファクターに粒径が無関係であることが分かる。摩擦係数 $\tan \phi$ は粒子間摩擦及びインターロッキングに起因する成分 $\tan \phi_{cv}$ とダイレイタンスーに起因する成分 $\tan \phi_D$ から成ることが知られているので、

$$\tan \phi = \tan \phi_{cv} + \tan \phi_D$$

と表すことができる。下辺ら(1986)は、Cornforthの実験データを $\phi \sim D_r$ の関係で整理し ϕ_D は D_r の増加にともなって増加するものであり、 ϕ_{cv} は D_r とは無関係な基本的な意味をもつ内部摩擦角で、 $D_r=0$ における ϕ の値に等しく、 ϕ_{cv} に影響を与える因子として粒子の形状・粒径・粒度分布・粒子表面の粗さなどが考えられることなどを報告している。

本研究で用いた寒水石、まさ土は粒径以外の因子の影響はほぼ同じと扱い、粒径が $\tan \phi$ にどのような影響を与えているかを考察してみる。各粒径のパラメーターとして d_{50} (mm)を用いると寒水石の大粒径のものが4.9mm、中粒径のものが3.0mm、小粒径のものが0.7mm、まさ土の大粒径のものが6.2mm、中粒径のものが3.8mm、小粒径のものが1.3mmである。図2によると寒水石及びまさ土の両者とも、 D_r と $\tan \phi$ の関係は直線で近似でき平行であるため、 D_r が1増加するごとに $\tan \phi$ が寒水石では0.0070、まさ土では0.0056だけ増加する。傾きが同じであることから粒径が異なった場合でもダイレイタンスーの $\tan \phi$ への影響の差はみられない。この事は ϕ_D が D_r の増加にともなって増加することから

$$\text{寒水石の場合} \quad \tan \phi_D = 0.0070 D_r$$

$$\text{まさ土の場合} \quad \tan \phi_D = 0.0056 D_r$$

と表すことができる。 $\tan \phi_{cv}$ が $D_r=0$ の時の $\tan \phi$ の値に等しいと考え、図2の直線を延長し $D_r=0$ のときの $\tan \phi$ を $\tan \phi_{cv}$ とした。その結果、寒水石については粒径の大きいものから0.67、0.52、0.67、まさ土については粒径の大きいものから0.63、0.56、0.50となった。 d_{50} と $\tan \phi_{cv}$ の関係を図3に表すと、ほぼ直線に近似できる。図3より

$$\text{寒水石について} \quad \tan \phi_{cv} = 0.068 d_{50} + 0.335$$

$$\text{まさ土について} \quad \tan \phi_{cv} = 0.026 d_{50} + 0.464$$

という関係式がえられた。以上の結果から摩擦係数 $\tan \phi$ は

$$\text{寒水石に関して} \quad \tan \phi = 0.0070 D_r + 0.068 d_{50} + 0.335$$

$$\text{まさ土に関して} \quad \tan \phi = 0.0056 D_r + 0.026 d_{50} + 0.464$$

という関係式でまとめられた。摩擦係数 $\tan \phi$ が相対密度 D_r と中央粒径 d_{50} という二つのパラメーターで表現できたわけだが、それぞれの係数などは粒子の種類によって変わり得るものである。また、得られた摩擦係数を実際の堆砂勾配と比較してもかなり大きくなり、かりに残留状態における摩擦係数

をとってみても堆砂勾配よりもまだ大きくなる。この原因としては間隙水圧の影響が考えられるが、
 今後は異なった試料を用いて関係式を求め、ダム堆砂勾配の決定要因を定量的に探っていきたい。

<文献> 海堀(1992)：広島大学総合科学部紀要。 / 海堀(1993)：平成5年度砂防学会研究発表会
 概要集。 / 下辺ら(1986)：第21回土質工学会研究発表会講演集。

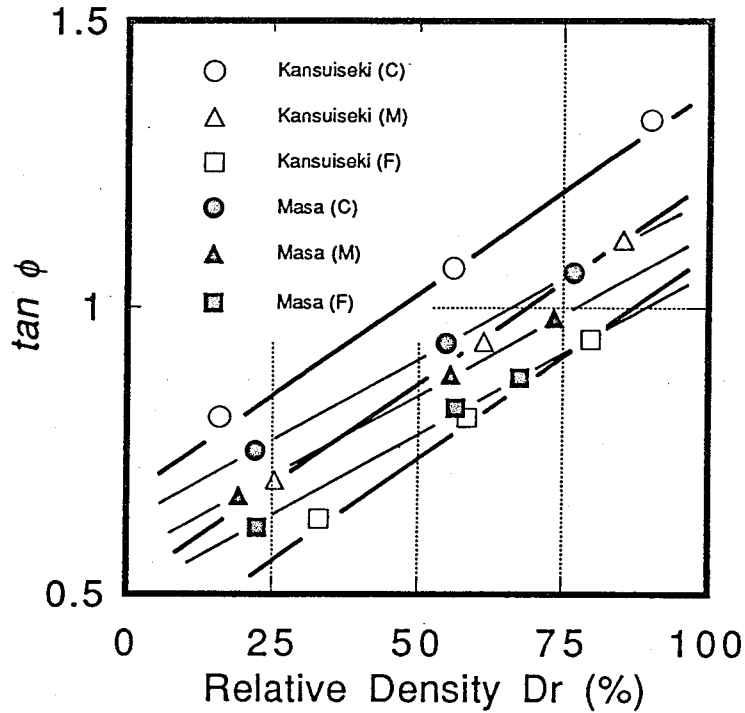


図2 相対密度と $\tan \phi$ の関係

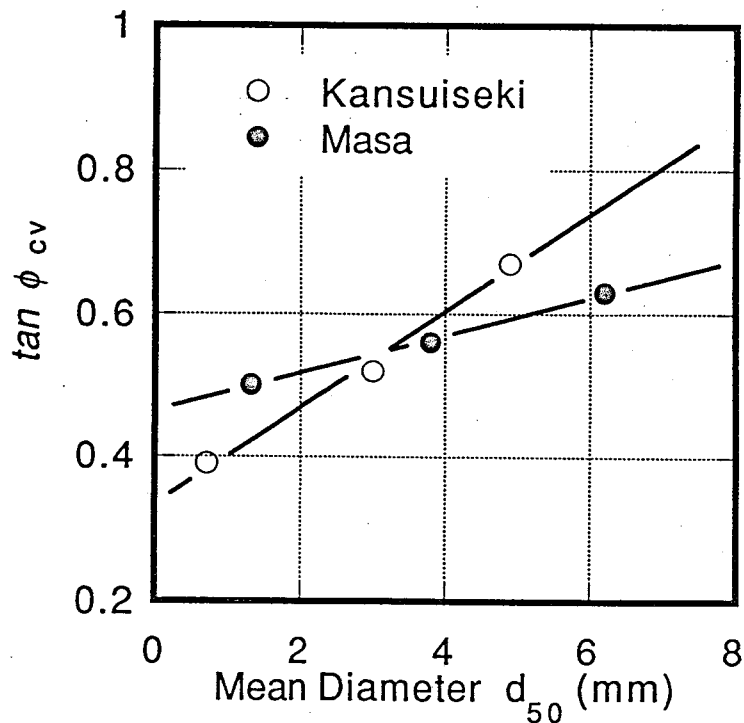


図3 中央粒径と $\tan \phi_{cv}$ の関係