

低応力条件下での土粒子の粒径とせん断抵抗角 の関係についての研究

海堀 正博・徳留 善幸

広島大学総合科学部自然環境研究講座

Study on the Relationship between the Particle Size of Soil and the Angle of Shear Resistance under the Low Normal Stress

Masahiro KAIBORI and Yoshiyuki TOKUDOME

Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima 724, Japan

Abstract : It has been occasionally explained that the angle of shear resistance depends on the soil-particle size. However, the qualitative relationship between the friction coefficient and the particle size is still controversial. To elucidate the effect due to particle size, the samples with some kinds of particle sizes should be prepared by sieving. It is not ideal to get samples by crushing, because the shape of the grain becomes quite different from the original one. Also, the shear experiments should be done under the low stress level, where the particles are not crushed. To obtain the relationship between the particle size of soil and the friction coefficient, the direct shear tests were performed under the low constant normal stress less than ca. 230 gf/cm² with some uniform particles of three sizes. As the result, it is found that the friction coefficient increases monotonously with the increase of the particle size. This concludes that the friction coefficient ($\tan \phi$) can be expressed by only two factors; mean diameter (d_{50}) and relative density (D_r).

Keywords : Angle of shear resistance, Direct shear test, Particle size,
Relative density

はじめに

粒状体の集合物である土のせん断とは、ある面を境に粒子群がずれる現象である。せん断応力がかかったとき、粒状体の集合物はせん断破壊をしないように抵抗力を発揮する。この抵抗力は、粒状体の集合物を一つの塊として押しつける力である拘束力に比例して発揮されることが知られており、この比例係数を摩擦係数と呼ぶ。摩擦係数はせん断機構の基本となる物理定数である。土の場合には、土の種類、密度、構造、応力履歴、せん断様式等によって異なることが報告されている

(Lambe & Whitman, 1979)。本論文では、これら種々の要因のうち、土粒子の粒径とせん断抵抗角の関係を定量的に明らかにするために、一様粒径の土についてせん断抵抗角を実験的に測定し、従来の研究結果と比較することにした。

せん断抵抗角に影響を及ぼす因子についてのこれまでの研究

摩擦係数を角度で表したせん断抵抗角に関しては、それが土の特性であるという共通の認識が一応あったが、これを求めるための試験様式や試験条件によってその値が大きく異なることが早くから指摘されていた(最上, 1969)。したがって、せん断抵抗角の値には試験様式・試験条件を併記することが必要である。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、どの程度定量的にせん断抵抗角が違ってくるのかという研究も盛んに行われてきた(たとえば真井ら, 1959; 真井ら, 1962; 井上, 1964; 山田, 1965; 高岡・守谷, 1968; 最上, 1968; 最上, 1969; Lambe & Whitman, 1979など)。

一方、粒子の粒径がせん断抵抗角の値へ及ぼす影響についての研究もいくつかなされている(たとえば谷本・蔭山, 1957; Kirkpatrick, 1965; 赤司ら, 1984; 三浦ら, 1989)。谷本・蔭山(1957)は、数種類の一様粒径の試料を用いて粒径の差がせん断抵抗角に与える影響の度合いを調べている。試験様式は一面せん断で、用いた応力範囲は $0.3 \sim 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ である。その結果、相対密度が一定でゆるい状態の場合には、粒度の大きなものほど内部摩擦角も大きい、密な状態の場合には、内部摩擦角は粒度によらずほぼ一定の値となった。また、Kirkpatrick(1965)も数種類の一様粒径の試料を用いて粒径の差がせん断抵抗角に与える影響の度合いを調べている。試験様式は排水三軸圧縮試験で、せん断中の体積変化を測定した。その結果、粒径の小さいものほどせん断抵抗角が大きいこと、Taylorの提唱した方法によるダイレイタンスー分のエネルギー補正を実施すると、粒径の差にかかわらずダイレイタンスーの影響分を除いた粒径のせん断抵抗角への影響分はほぼ同じであることなどを報告した。また、赤司ら(1984)のアルミナボールを使った実験によると、直接せん断試験においても、三軸試験においても、粒径の大きいものほどせん断抵抗力が大きくなることが報告されている。また、三浦ら(1989)は粒度組成の異なる数十種類の砂試料を用いて、変形・破壊挙動を三軸圧縮試験によって調べ、影響因子について検討した。その結果、粒子の粒径の大きいものほどせん断変形を受けた場合に破碎しやすいため、内部摩擦角も小さくなることを指摘した。

以上のように、粒径とせん断抵抗角の関係についてはさまざまな結果が報告されており、まだ結論は出されていない。しかし、せん断様式や応力レベル、試料となる粒状体等の試験条件が異なっていることが、一定の結論に導けない原因であると考えられる。

筆者らは、砂防学的な見地から、せん断にともなって粒子が破碎されるような高い応力条件は必要ないものと判断した。また、河床の土砂が移動する場合を想定する時、そこで起こっている現象は三軸圧縮試験の状況などとは異なり、より直接せん断試験の状況に近いものと判断した。そのような理由から、低い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について再検証することにした。

一面せん断試験の実施

本研究で用いた一面せん断試験機は、崩壊発生現場で土の強度を調べられるように、せん断試験

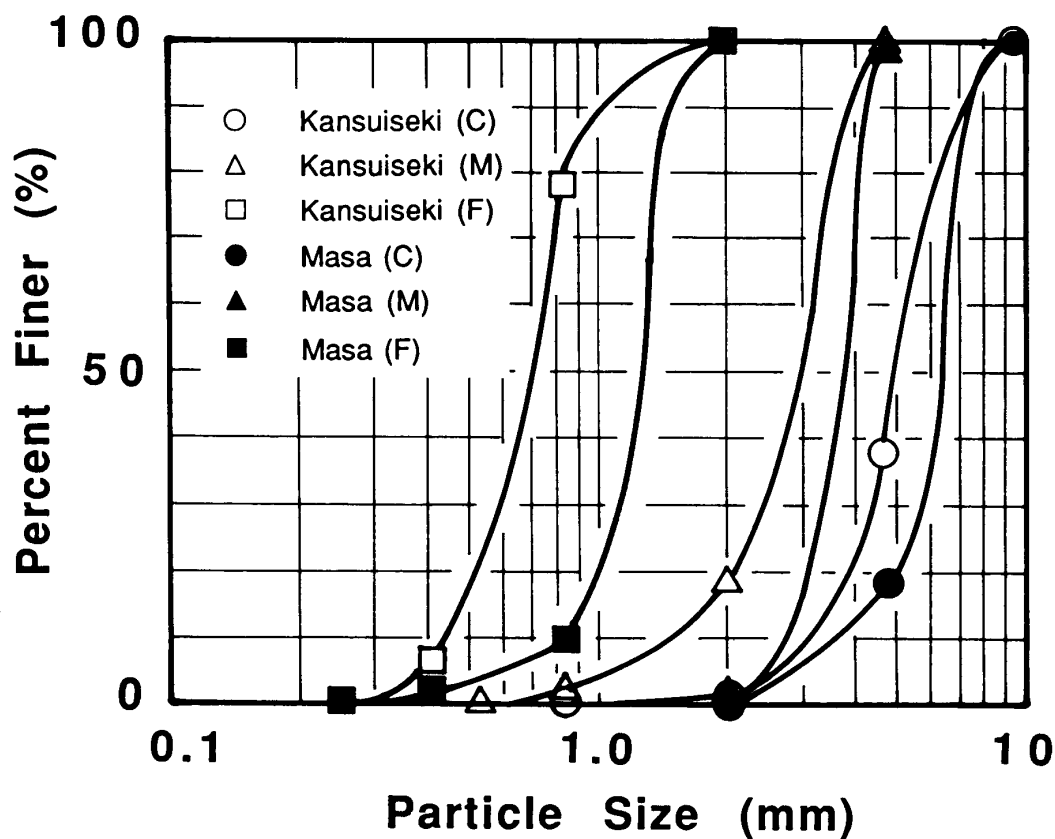


Fig.1 Particle size distribution of samples
(C):Coarse, (M):Medium coarse, (F):Fine

Table 1 Physical properties of samples

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

が現地で容易に実施できるように開発したもので、すでにいくつかの使用例がある (Kaibori & Sassa, 1984 ; 栃木・海堀, 1991)。せん断箱の大きさは200mm×200mm×100mmであり、せん断面が大きいので数mm程度のれきが混じっていても精度良く試験ができる。また、砂防分野でよく必要になる低応力レベルのもとでの試験ができる。ただし、今回はこの試験機を室内実験に用いた。試料として寒水石とまさ土を、粒径を変えてそれぞれ3種類ずつ用意した。試料の粒径加積曲線を Fig. 1 に示す。各粒径ごとに、土粒子比重試験、最大密度・最小密度試験を土質試験法に基づいて実施した。それぞれの結果を Table 1 にまとめて示す。

各試料各粒径ごとに適当な3段階の詰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ながら実験試料を準備した。次に、所定の垂直荷重をかけ圧密した。用いた垂直応力は最大230gf/cm²である。圧密終了後、せん断過程に入る前の実験試料の初期密度を求めた。その後、約1分間に0.5mmの割合のせん断変位で等圧せん断を実施した。せん断変位が30mmに達したら、せん断を終了し、結果を図に表した。

Table 2 はせん断開始直前の試料の密度を表したものである。Fig. 2 と Fig. 3 は垂直応力-せん断強度の関係を表したものである。従来より知られているように、密度の増加とともに明らかに直線の勾配が増加している。また、まさ土でも寒水石でもそれぞれ3枚ずつの図を比較すると、直線の勾配が粒径の増加とともに大きくなっている。この直線の勾配の正接である摩擦係数 $\tan \phi$ と粒径の関係を明らかにするために、横軸に相対密度 D_r をとり、縦軸に摩擦係数 $\tan \phi$ をとり、粒径ごとにプロットしてみると、Fig. 4 のようになる。Fig. 4 の直線は、寒水石についてもまさ土についても粒径が大きいものほど上の位置に描かれているが、各々は平行であると見ることができる。このことから摩擦係数 $\tan \phi$ を構成する要因として、相対密度に無関係な部分と相対密度に比例する部分に分けることができ、直線の傾きが同じことから、後者が粒径には無関係であることなどがわかる。従来より、摩擦係数 $\tan \phi$ は、粒子間摩擦およびインターロッキングに起因する成分 $\tan \phi_{cv}$ と、ダイレイタンシーに起因する成分 $\tan \phi_D$ から成ることが知られており、

$$\tan \phi = \tan \phi_D + \tan \phi_{cv} \quad \dots (1)$$

と表すことができる。

下辺ら (1986) は、公開されている過去の実験データを用いて、 $\phi \sim D_r$ 関係で整理し、 ϕ_D は D_r の増加に伴って増加するものであること、 ϕ_{cv} は D_r とは無関係な基本的な意味を持つ内部摩擦角で、 $D_r = 0$ における ϕ の値に等しいこと、 ϕ_{cv} に影響す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等を報告している。

本研究で用いた寒水石およびまさ土については、粒径以外の因子の影響はほぼ同じであると考えられ無視できる。粒径のパラメーターとして中央粒径 d_{50} (mm) を用いることにする。寒水石の中央粒径 d_{50} は、小粒径のものが0.7mm、中粒径のものが3.0mm、大粒径のものが4.9mm、また、まさ土の中央粒径 d_{50} は、小粒径のものが1.3mm、中粒径のものが3.8mm、大粒径のものが6.2mmである。Fig. 4 によると、寒水石でもまさ土でも D_r と $\tan \phi$ の関係は互いに傾きが等しい3本の直線で近似でき、 D_r が1増加するごとに、 $\tan \phi$ が寒水石では0.0070だけ、まさ土では0.0056だけ増加する。3本の直線が互いに平行であることから、粒径の異なる試料であってもダイレイタンシーの $\tan \phi$ への影響の差は見られない。 ϕ_D が D_r の増加に伴って増加することから、

$$\text{寒水石については、} \tan \phi_D = 0.0070 D_r \quad \dots (2-1)$$

$$\text{まさ土については、} \tan \phi_D = 0.0056 D_r \quad \dots (2-2)$$

と表すことができる。 $\tan \phi_{cv}$ が $D_r = 0$ における $\tan \phi$ の値に等しいと考え、図の直線を外挿した $D_r = 0$ 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小さいものの

Table 2 Initial density of samples before shearing

		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

ら順に、 $\tan \phi_{cv} = 0.39, 0.52, 0.67$ 、また、まさ土については粒径の小さいものから順に、0.50, 0.56, 0.63となった。横軸に中央粒径 d_{50} 、縦軸に $\tan \phi_{cv}$ をとって、この関係を表すと Fig. 5 のようにほぼ直線で近似できる。すなわち、

$$\text{寒水石については、} \tan \phi_{cv} = 0.068 d_{50} + 0.335 \quad \dots (3-1)$$

$$\text{まさ土については、} \tan \phi_{cv} = 0.026 d_{50} + 0.464 \quad \dots (3-2)$$

という関係式が得られた。

以上の結果から、摩擦係数 $\tan \phi$ は、寒水石については、

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \tan \phi_D + \tan \phi_{cv} \\ &= 0.0070 D_r + 0.068 d_{50} + 0.335 \quad \dots (4-1) \end{aligned}$$

また、まさ土については、

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \tan \phi_D + \tan \phi_{cv} \\ &= 0.0056 D_r + 0.026 d_{50} + 0.464 \quad \dots (4-2) \end{aligned}$$

なる関係式としてまとめられ、さまざまな要因が複雑にからみあって成り立っている摩擦係数 $\tan \phi$ が、相対密度と中央粒径というふたつのパラメーターで表現できることがわかった。

考 察

粒径がせん断抵抗角に及ぼす影響についてのこれまでの研究結果では、粒子の粒径とせん断抵抗角が正の相関をもつもの、負の相関をもつもの、どちらでもないものの3つが報告されている。本研究結果はこのうちの第一番目の結果と一致するものであったが、他の2つの場合との結果の違いはどうして発生したのかを考えてみたい。

まず、実験試料についてみてみると、粒径の違いを数種類の異なる砂やれきが用いられているもの（谷本・蔭山, 1957）、人工的に破碎することにより粒径の差を作っているもの（三浦ら, 1989）、サンプリングしてきた砂やれきをふるいにより粒径ごとに分けているもの（Kirkpatrick, 1965；

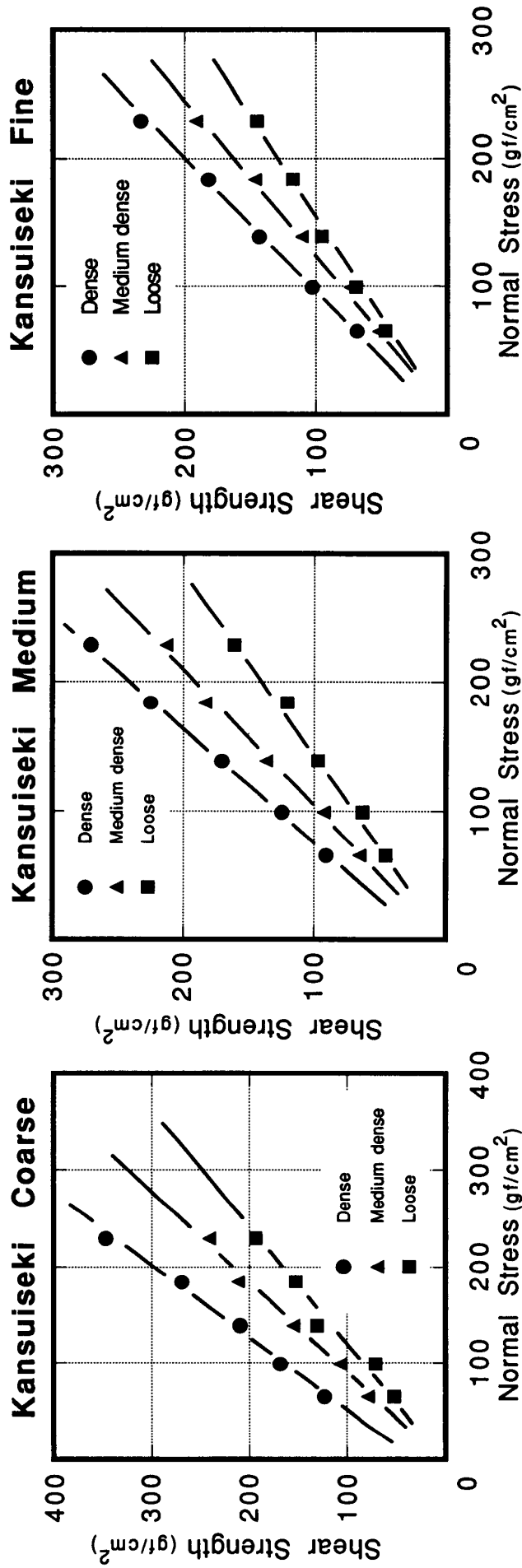


Fig.2 Relationship between normal stress and shear strength for Kansuiseki

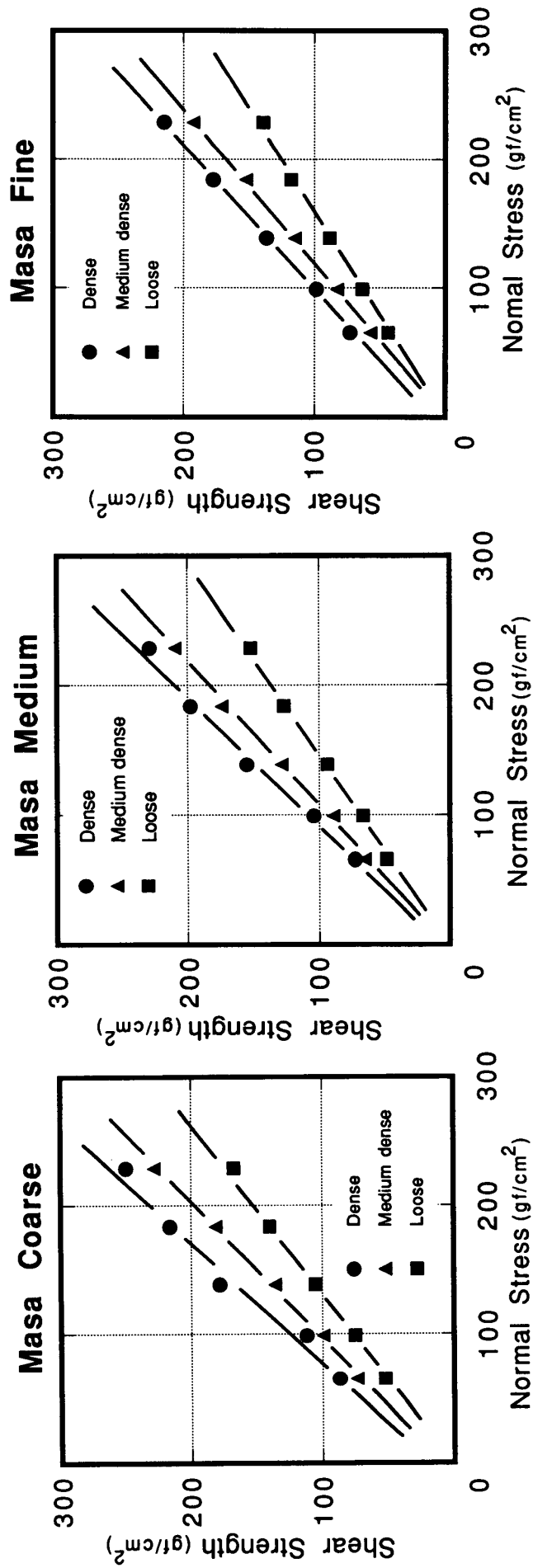


Fig.3 Relationship between normal stress and shear strength for Masa

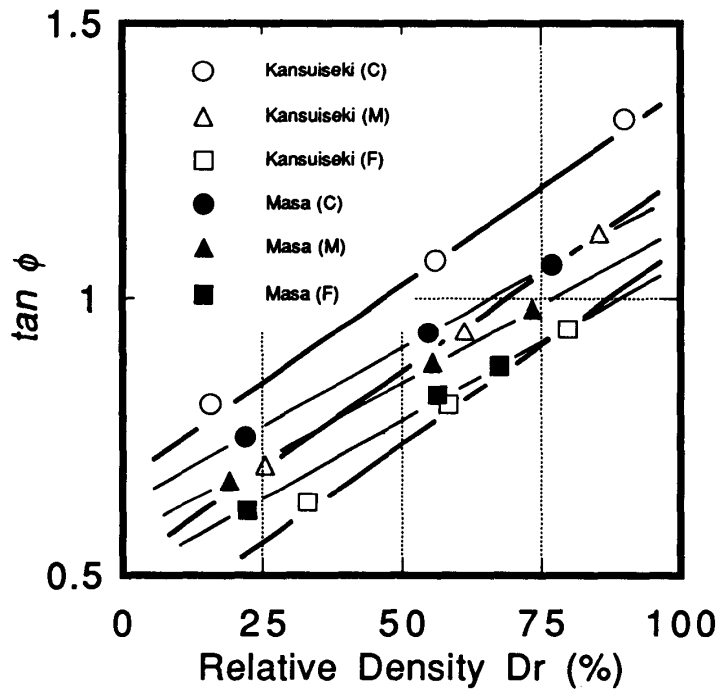


Fig.4 Relationship between relative density D_r and friction coefficient $\tan \phi$
(C):Coarse, (M):Medium coarse, (F):Fine

赤司ら, 1984) などさまざまである。このうち、三浦ら (1989) の結果を見ると、実験方法は三軸圧縮試験であるが、粒子の粒径の大きいものほど内部摩擦角が小さくなることを報告し、その原因を大きい粒子ほどせん断にとまって破碎されやすいためとしている。しかし、むしろ粒径の異なる試料を作製する過程で人工的に破碎したことにより、小粒径の試料ほど角ばったものが多くなった結果、内部摩擦角も小粒径のものの方が大きくなった可能性が高いものと思われる。粒径の大きさだけの影響を見ようとするならば、同じ試料で粒径別にふるい分けをする手法で準備するべきであろう。また、赤司ら (1984) が直径10mm、20mm、40mmのアルミナボール試料で行った実験結果は、直径60cmの試料箱の一面せん断試験からは粒径と内部摩擦角の間に明確な正の相関を得ている。

次に、試験手法についてみると、主として直接せん断試験だけによるもの (谷本・蔭山, 1957)、三軸圧縮試験だけによるもの (Kirkpatrick, 1965 ; 三浦ら, 1989)、両者を用いたもの (赤司ら, 1984) などに分けられる。直接せん断試験の中でも一面せん断試験では特に、あらかじめ決まった位置にせん断面を形成させることが大きなせん断強度の発生につながる場合が多く、そのためせん断抵抗角も三軸試験結果から得られるものに比べて大きくなりやすいことが知られている。そのために、たとえば詰め固め密度という因子の影響が三軸圧縮試験よりも一面せん断試験を使った場合の方が大きく現れやすいことが知られている。粒径の因子についても同様に影響の現れやすさの違いがあるものと考えられるので、両試験法によって粒径の大きさの影響を見た場合、一面せん断に比べて、相対的に三軸圧縮では影響が小さいかもしくはほとんどないという考察になってしまうものと思われる (赤司ら, 1984)。

次に、試験に用いた応力レベルについて検討してみる。谷本・蔭山 (1957) は垂直応力が0～1.5kgf/cm²の範囲で、粒径とせん断抵抗角との間に正の相関関係を得ている。また、アルミナポー

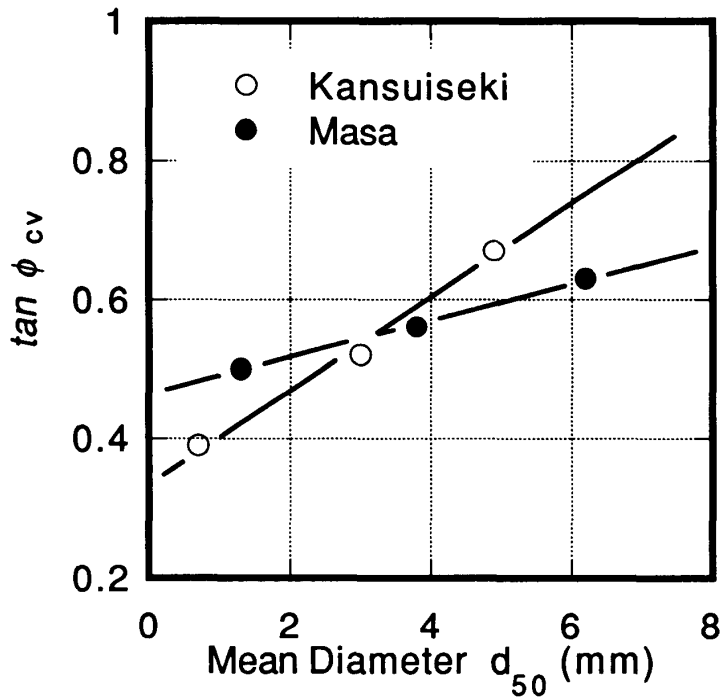


Fig.5 Relationship between mean diameter d_{50} and $\tan \phi_{cv}$

ルを使った場合に、赤司ら（1984）は $0 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$ の応力範囲で、同様に正の相関を得ている。一方、れきを使った赤司ら（1984）の実験によると、応力範囲が $0 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ では粒径の差の影響はほとんど出ていない。また、三浦ら（1989）は砂を使って $0 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ の応力範囲で実験した結果、負の相関関係を得ている。これらの結果は、粒子自体が破碎されやすいものであれば、応力レベルが大きいものほど、また粒子の大きさが大きいものほど破碎の影響が出やすいために、粒子の粒径とせん断抵抗角の間に特に関係が認められなかったり、あるいは負の相関が現れたりするものと考えられる。

筆者らの実験では、ふるい分けによって3つの粒径に違えた試料を用いており、粒径の大きさの影響以外の粒子の形や質等には違いがないように注意した。このことから、実験結果は真に粒径の大きさの差に由来するものが得られている。また、応力レベルについては、表層崩壊や河床の土砂移動で必要になる応力レベルを想定して、垂直応力で $0 \sim 230 \text{ gf/cm}^2$ 、せん断応力で $0 \sim 400 \text{ gf/cm}^2$ の範囲を用いており、粒子自体が破碎されることによる影響が出ず、この点でも真に粒径の大きさの差に由来する結果が得られている。せん断様式の差は無視できないので、本実験結果の妥当性は用いられたものと同様な一面せん断試験に限られる。ゆえに、せん断抵抗角に粒径がどの程度定量的に影響するかを表した第3節の(4-1)式および(4-2)式は、それぞれ寒水石とまさ土について、せん断応力範囲が $0 \sim 400 \text{ gf/cm}^2$ の等圧一面せん断試験様式について非常に有効な関係であると言える。

今後はさらに異なる試料を用いた場合の関係式を求め、それらの関係式中の係数の大きさ等を粒子ごとに限定して関係づけできるようにしたいと考えている。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、広島大学総合科学部砂防学研究室の元専攻生中井真司氏（現復建調査設計株式会社勤務）および矢田雅大氏（現広島県福山農林事務所勤務）には室内実験において多大の協力をしていただいた。ここに記して心より感謝いたします。

文 献

- 赤司六哉・高田 真・江藤義孝・山下伸二・相場 明（1984）：粒状材料のせん断機構の違いによる強度比較について。第19回土質工学会研究発表会講演集，(社)土質工学会，365-368。
- 井上広胤（1964）：砂の直接せん断に関する研究。土木学会論文集，101，15-24。
- Kaibori, M. & Sassa, K. (1984): Tragbares Gelaenderrahmenschergeraet - Einige Versuchsergebnisse und Vergleich mit gewoehnlichen Scherversuchen-. Int. Symp. INTERPRAEVENT, 2, 263-274.
- Kirkpatrick, W.M. (1965): Effects of Grain Size and Grading on the Shearing Behaviour of Granular Materials. Proc. 6th Int. Conf. SMFE, 1, 273-277.
- Lambe, T.W. & Whitman, R.V. (1979): Soil Mechanics, SI Version. Ch.11, Shear Strength of Cohesionless Soil. J. Wiley & Sons, New York, 137-150.
- 真井耕象・北郷 繁・土岐祥介（1959）：各種せん断試験の比較。土と基礎，7(3)，27-33。
- 真井耕象・北郷 繁・土岐祥介（1962）：各種せん断試験の比較(第2報)。土と基礎，10(2)，14-19。
- 三浦均也・土岐祥介・長谷川敬寿（1989）：粒度組成の異なる砂の変形・破壊挙動。第24回土質工学会研究発表会講演集，(社)土質工学会，539-542。
- 最上武雄（1968）：レキの内部摩擦角と常数kについて。土と基礎，16(11)，29-37。
- 最上武雄（1969）：土質力学。第5章，土のせん断，技報堂出版，東京，479-622。
- 下辺 悟・館松 司・酒井左武郎（1986）：砂の内部摩擦角に関する2，3の考察。第21回土質工学会研究発表会講演集，(社)土質工学会，261-264。
- 高岡恭三・守谷正博（1968）：乾燥砂の直接せん断試験の実用性について。土と基礎，16(5)，11-21。
- 谷本喜一・蔭山平八郎（1957）：砂質土のせん断抵抗について。土と基礎，5(4)，10-14。
- 栃木省二・海堀正博（1991）：豪雨による林道・作業道での崩壊とその特徴－広島県北西部豪雨災害現場におけるケーススタディー。広島大学総合科学部紀要IV，16，1-18。
- 山田清臣（1965）：砂のせん断に関する一斉試験。土と基礎，13(2)，89-94。