

締固め土の侵食特性

田熊勝利*

Erodibility of Compacted Soil

Katsutoshi TAKUMA*

Faculty of Agriculture, Tottori University

1. 緒 言

近年、傾斜地帯での新規造成、道路工事等が盛んになるにつれ、盛土部での締固めによる土壌団粒の崩壊性や雨水による分散性などに起因した種々の問題が派生し、その理工学的性質の把握が必要不可欠となってきた。締固めが土壌団粒の崩壊性並びにその侵食性に及ぼす影響についてはほとんど解明されていないのが現状である。

本研究は、JIS A 1210の締固め試験に準じて求めた最適含水比の結果を基にして、土壌団粒の崩壊性並びに粒子破碎に伴う土の侵食性の変化に検討を加えたものである。

2. 実験内容

実験は case A, Bの供試土条件にて行った。

case AとBの主な実験条件の違いは試料における締固めの有無である。

case A : ①飛散侵食実験の場合、2.0mm目ふるい通過の風乾土を splash-cup¹⁾ に詰め、24時間飽和した後、約15cm water suction にて湿潤させ、その後、実験に供する。

②雨滴と地表流による侵食実験の場合、4.76mm目ふるい通過の風乾土を土槽に充填し、その後、土槽を水平にして下流端の排水孔より給水し、飽和させて後、24時間放置し排水した。

case B : 最適含水比に調整した供試土を splash-cup と土槽へ JIS A 1210の 1.1-a法の突固めエネルギーにて突固め充填した。土の湿潤条件は case Aと同じである。

Table 1に供試土の物理性並びに採取地を示す。配合土作成に使用した土は砂丘砂と八草粘土(カオリン)である。試料は両土を使用して粘土比 (clay ratio, c_r) [粘土分 / (シルト分 + 砂分)] にて 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 2.2, 3.2の粒度に調整して作成した。各配合土に対し、最適含水比 (W_{opt}) にて突固めることにより供試土を作成した。

特殊土の侵食実験に使用した6試料は、粘質土の八草粘土(カオリン)、国頭マージ、赤色土の新宮土、砂質土の福間マサ、火山灰土の鹿児島シラス、大山黒ボクである。

各試料に対して次の実験を行った。

- 飛散侵食実験¹⁾……雨滴径2.4mmの雨滴形成器、容積40cm³、内径5cmの splash-cup、回転テーブルを用いて実験を行った。雨滴の落下高は150cmであった。この実験では、配合土の case B、そして6試料土の case A、Bを行った。
- 雨滴と地表流による侵食実験²⁾……斜面長30cm、幅10cm、深さ5cmの土槽と、tubing tip法による降雨装置を用いて行った。この実験では配合土の case Bと6試料土の case A、Bを行った。なお、降雨強度は50mm/h、斜面勾配は8°、侵食実験の測定時間は30分間であった。
- 締固め試験……試験は100cm²モールドを用いたので、JIS A 1210の1.1-a法の突固めエネルギーと一致させて行った。

*鳥取大学農学部 〒680 鳥取市湖山町南四丁目101

1989年6月30日受理

土壌の物理性 第60号 p.15~23 (1990)

Table 1 Physical properties of the soil samples used

Soil sample	Size distribution(%)			Specific gravity	Consistency(%)		Sampling site	Remarks
	Sand	Silt	Clay		Liquid limit	Plastic limit		
A Sand	98.9	1.1	0.0	2.65	N.P. ^a		Nata, Fukuoka	Sand dune soil
B Yagusa	8.0	18.5	73.5	2.66	84.1	34.0	(goods on the market)	Kaolin
C Kunigami	46.0	16.5	37.5	2.73	33.1	20.5	Nago, Okinawa	Maaaji
D Shingu	34.0	35.0	31.0	2.71	38.1	25.5	Shingu, Fukuoka	Red soil
E Fukuma	67.0	13.0	20.0	2.69	28.8	19.9	Fukuma, Fukuoka	Masa
F Kagoshima	72.0	21.5	6.5	2.42	N.P. ^a		Kagosima	Shirasu
G Sekigane	67.0	25.0	8.0	2.32	73.6	49.3	Sekigane, Tottori	Kuroboku

a non-plastic

- d. 透水試験……100cm採土円筒を用いる簡易型透水試験器にて測定した。実験前の供試土条件はa.とb.の場合と全く同じである。
- e. 団粒分析試験³⁾……4.76mmふるい通過試料土に対して、水中で40分間ふるい分けをする。上下運動の速度は32回/分、振幅は2cmである。
- f. その他の土の物理試験……JIS法に準じて行った。

3. 配合土の侵食性

配合土試料はcase Bの条件のみでの侵食実験である。

(1) 配合土の締固め試験

Fig. 1に配合土の締固め試験結果より求めた最適含水比と最大乾燥密度(ρ_{dmax})を示す。

最大乾燥密度は粘土比(C_r)の増加とともに急激に増加し、 $C_r=0.2\sim 0.4$ 付近にて最大を示し、その後、 C_r の増加とともに減少する。また、最適含水比は C_r の増加とともに急激に増加し、 C_r が0.1~0.2付近より緩やかな増加曲線に変わる。

(2) 配合土の飛散量と降雨強度

各配合土に関するsplash-cupからの土粒子の飛散侵食の評価値として、飛散容積を用いる。ここに、飛散容積(rate of detachment)は(単位時間当たりの飛散乾燥質量/乾燥密度、 $\text{mm}^3/30\text{min}$)と定義した。なお飛散量はsplash-cup外に飛散した土の質量である。飛散容積と降雨強度との関係の代表例をFig. 2に示す。

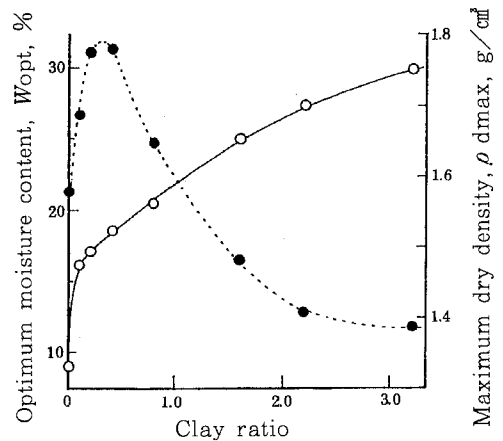


Fig.1 Variation of optimum moisture content (○) and maximum dry density (●) with clay ratio (= % clay / (% silt + % sand)).

Fig. 2に示されるように、飛散容積は同一な雨滴径と速度をもつ降雨強度に対し直線の関係が認められる。試料土は実験前約15cmのwater suctionにて十分に湿らされていたので、飛散は供試土の表面を雨滴が打つと同時に起こると考え、飛散容積と降雨強度の関係を示す直線が原点を通ると仮定した。各直線の回帰係数を飛散比(splash ratio, e_v)と称する⁴⁾。Table 2に各配合土の飛散比を示す。各配合土は決定係数0.85以上であり、0.5%水準で有意である。この飛散比は飛散侵食を問題にするうえで、土固有の侵食評価値である。Fig. 3に

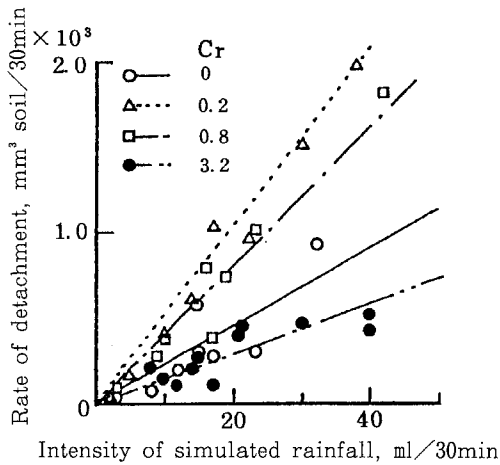


Fig.2 Detachment rate of the mixed soils having different clay ratio (C_r) from the splash-cup exposed to simulated rainfall.

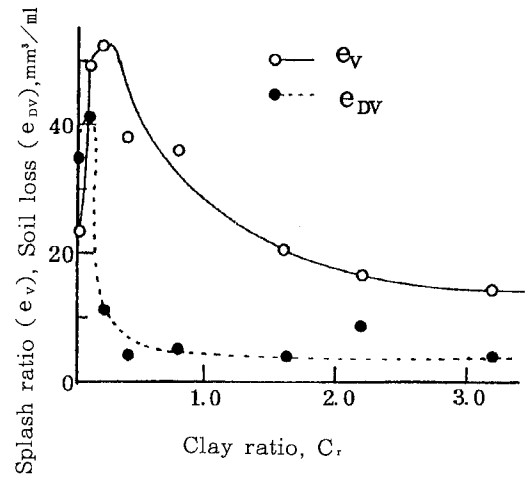


Fig.3 Variation of the splash ratio and the soil loss (the volume of soil which eroded per unit volume of rainfall and thin film flow) with clay ratio.

配合土の飛散比と粘土比との関係を示す。飛散比は粘土比の増加とともに増加し、粘土比0.2~0.4付近にてピークを示し、その後、粘土比の増加とともに減少する。この両者の関係は最大乾燥密度と粘土比との関係と対応

している。粘土比が0から0.2付近までは、砂分が多く飛散し易いが、飛散比は粘土分が増え、粘土比のピークを過ぎると土の粘着力の存在とともに減少してくるものとする。

Table 2 Splash ratio (e_v) for the mixed soils

Clay ratio ^a	Splash ratio ^b (with its standard error)	Coefficient of determination(R^2)	F
	$\text{mm}^3 \text{ soil/ml water}$		
0	22.9 ± 3.45	0.879	16.39**
0.1	49.0 ± 4.54	0.961	29.06**
0.2	52.2 ± 3.52	0.983	151.21**
0.4	37.8 ± 3.08	0.979	31.59**
0.8	35.9 ± 3.00	0.964	42.49**
1.6	20.3 ± 1.81	0.963	61.30**
2.2	16.4 ± 2.09	0.929	18.30**
3.2	14.3 ± 1.84	0.894	14.01**

a Clay ratio: % clay/(% silt+% sand).

b Splash ratio: the volume of soil which splashed per unit volume of rainfall.

** Significant at 0.5% level.

(3) 配合土の侵食量

前項で飛散侵食問題の評価として飛散比にて検討を加えたが、ここでは、雨滴と地表流による侵食について考える。土の侵食性に影響する土の性質としては、①透水性に影響する土の性質、②雨滴と地表流による分離、飛散、輸送する力に抵抗する土の性質の2つの型に分けられるとSmithら⁹⁾は言及している。ここに、①、②の土の性質は土の締固めによりかなり変化するものとする。そして、水は締固め土の性質に対してはどのような影響を与えるのかについて検討する。

Fig. 3 に配合土の侵食量 (soil loss, e_{DV}) と粘土比との関係を示す。ここに、侵食量は供給水の単位体積当たりの流出土容積 (mm^3/ml) と定義した。侵食量と粘土比との関係は飛散比と同様な傾向を示すが、飛散比よりは侵食量の方が粘土比が小さい領域で激しく変化する。粘土比が0.1付近にて侵食量のピークがあり、その後、粘土比の増加とともに急激に侵食量は減少し、粘土比が0.4付近より増加しても侵食量はあまり変化しない。配合土は最適含水比にて締固められていることにより粘土分、すなわち粘着力の増加とともに急激に侵食は減少すると考える。そこで、侵食を評価するうえで、侵食を透水性との関連から検討してみる。

(4) 配合土の透水性と飛散比、侵食量

配合土の性質は締固められることにより透水性に対してもかなり変化することが考えられる。

まず、締固め土の透水係数と粘土比との関係からみると、Fig. 4 に示したように、その両者の関係は双曲線にて示される。小粘土比 (0~0.2) において、その透水係数の変化は大きく、粘土比の増加とともに透水係数は急激に減少する。このことが土の飛散比、侵食量の変化に与える影響は大きい。

粘土比と透水係数の関係曲線は粘土比の0~0.2と0.2以上の範囲を考えた場合、粘土比の0.2付近を境にして曲線は変移していると考えてよい。これは透水性に対し粘土比が0から0.2付近までは、砂の影響が強く働き、粘土比が0.2を超えると粘土の影響が徐々に生じてくるものと考えられる。

Fig. 5 に透水性と飛散比 (e_v)、侵食量 (e_{DV}) の関係を示す。飛散比は、高透水性域で透水性の低下とともに増加し、透水係数 10^{-6}cm/s 付近にてピークを示し、その後、透水性の低下とともに急激に減少し、透水係数 10^{-7}cm/s より低透水性域では漸減する。また、侵食量と透水性との関係においても同様な傾向を示すが、侵食量のピークを示す 10^{-6}cm/s の透水係数より高透水性域

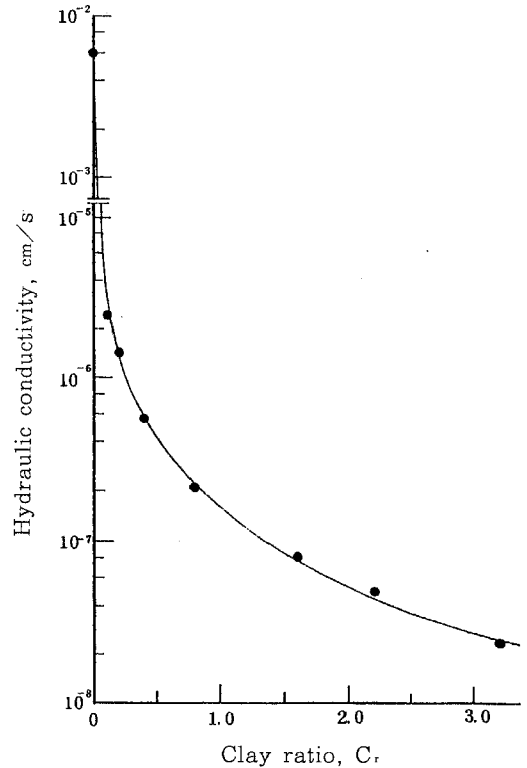


Fig.4 Variation of the hydraulic conductivity of the compacted soils with clay ratio.

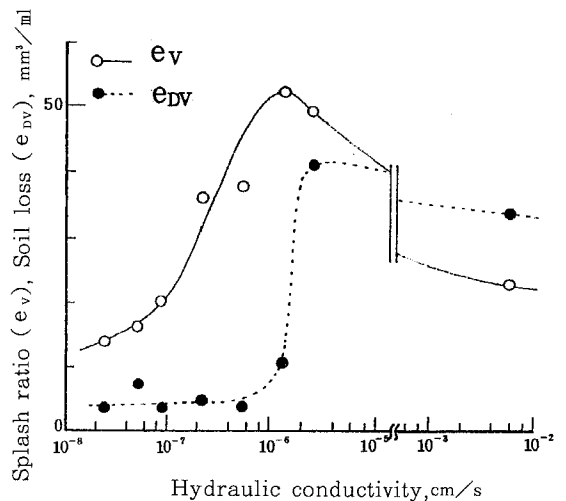


Fig.5 Variation of the splash ratio and the soil loss with hydraulic conductivity of the soils.

では、ほとんど侵食量に変化はないが、かなりの侵食量を示す。そして、低透水性域では急激に侵食量は減少し、一定侵食量となり、低侵食で変化はほとんどみられなくなる。

4. 特殊土の侵食性

土粒子集合体は突固めによって崩壊するが、この崩壊現象は土の粒度組成、並びに土の表面積に変化をもたらすばかりでなく、土の締め具合をより密にする効果を持っている。そのため結果として強度、透水性あるいは圧縮性などの力学的特性並びに侵食性に変化をもたらすことが考えられる。ここでは、侵食特性に注目して検討する。

(1) 土壌団粒の崩壊並びに粒子破碎の程度を示す二、三の指標

土壌団粒の崩壊並びに粒子破碎の程度を示す簡単な指標としては崩壊（破碎）前後の粒径組成変化に注目するもので、次のような指標がある。

a. 粒子破碎量 (S. I.)

福本⁶⁾は土の粒度分布を対数正規型と仮定し、土粒子の破碎がその個数と表面積の増大を招くという事実に基づき、破碎前の表面積 $S_w(\text{cm}^2/\text{g})$ に対する破碎後の表面積 S_w' の比が、近似的に次のように表現できると考えた。

$$\frac{S_w'}{S_w} = \left(3\sqrt{2}\right)^{S. I.} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、S. I. は次式にて求める。

$$S. I. = 2(P_2' - P_2) - (P_1' - P_1)(P_1' + P_1 - 2) \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 P_1' と P_2' は破碎前の1回目と2回目の加積通過率和の百分の一、同様に P_1 と P_2 は破碎後のものである。S. I. を粒子破碎量と定義している。

b. 団粒係数⁷⁾

この係数は土壌の団粒化の程度を表す。一定量の団粒の全表面積は、団粒の大きさが減少するとともに増加するので単位質量当たりの全表面積は土粒子の分散の尺度に用いることができる。団粒係数は次式から求める。

$$\text{団粒係数} = \frac{1 \times 10^6}{\sum \frac{\text{各階級の団粒百分率}(\%)}{\text{各階級の団粒平均直径}(\text{cm})}}$$

締め前後の団粒係数の値を求めることにより、土壌団粒の崩壊の程度を把握できるものとする。

c. その他

a, b以外にも団粒崩壊ではなく、粒子破碎の程度を示す指標は数多く提案されているが、ロック材、粗粒の砂礫に関するものであり、本報にて使用した試料とはかなり異なると考えられるのでここでは省略する。

(3) 土の飛散量と降雨強度

case A, Bの場合における6試料土の飛散量と降雨強度との関係をFig. 6に示す。その両者の関係は配合土と同様であり、6試料土とも直線関係を示す。直線は原点を通ると仮定し、各直線の回帰係数（飛散比、 e_v ）を求める。Table 3に6試料土の飛散比を示す。各試料土とも決定係数0.85以上であり、0.5%水準で有意である。Fig. 6、Table 3にて示されるように締固めることにより、八草粘土、国頭マージ、新宮土は、かなり飛散比が減少することが分かる。特に、八草粘土は10分の1以下となる。

一般的に粘質土系の飛散比の減少は大きく、砂質土系になるにつれ飛散比が減少どころか増大している。このことは粘質土の場合、最適含水比にて締固めることにより、土粒子の粘着力の増大と土壌表面が滑らかになること等によるものと考えられる。一方、砂質土の場合、粘着力の増加は考えられず、突固めエネルギーによる密度増加に伴う透水性の低下等が考えられる。透水性については後述することとして、密度増加についてはマサで1.27、シラス1.02、そして黒ボクでは1.19とあまり水締めの時よりは増加しておらず、むしろ土壌団粒の崩壊並びに粒子破碎の結果、締固めが細粒土の増加を促し飛散量増加を生じるものとする。

(4) 飛散比、侵食量と透水性

Fig. 7に、土の飛散比（ e_v ）と透水係数との関係を示す。最適含水比にて締固めることにより、各試料土の透水性は著しく低下する。透水性低下が飛散比に及ぼす影響、すなわち飛散侵食への締固め効果は八草粘土、国頭マージと新宮土ではかなりあるが、マサ、火山灰土では認められない。

次に、Fig. 8に侵食量（ e_{ov} ）と透水係数との関係を示す。侵食においては締固め効果があるのは八草粘土のみである。マサはほとんど変化なく、その他の試料の侵食量は締固めることにより増加を示している。これらのことは突固めることにより土壌団粒の崩壊並びに粒子破碎による細粒土の生成等の結果、浸透量が減り、地表流量の増加に一因があるものとする。土の侵食性を締固め試料土について透水性の低下との関係から述べたが、この透水性の低下に関連して土壌団粒の崩壊並びに粒子破碎について検討する。

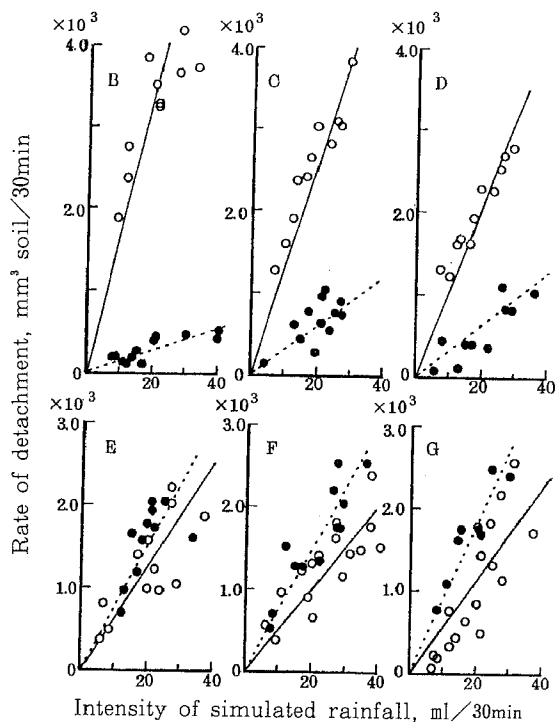


Fig.6 Detachment rate of the soil samples from the splash-cup exposed to simulated rainfall.

(○ : uncompact soil, ● : compacted soil)

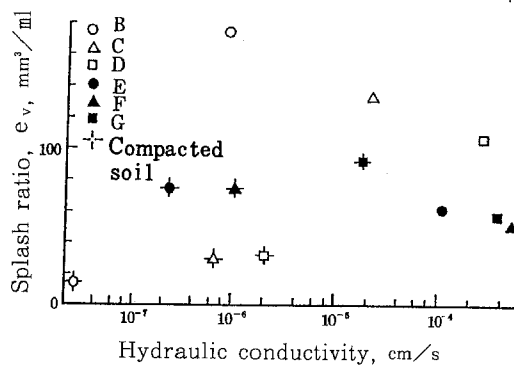


Fig.7 Relationship between the splash ratio and the hydraulic conductivity of the soils.

Table 3 Splash ratio (e_v) for the soil samples

Soil sample	Case A ^a			Case B ^b		
	Splash ratio ^c (with its standard error)	R ²	F	Splash ratio ^c (with its standard error)	R ²	F
	mm ³ soil/ml water			mm ³ soil/ml water		
B Yagusa	174.1 ± 12.29	0.917	10.84**	14.3 ± 1.84	0.894	14.01**
C Kunigami	132.8 ± 6.05	0.985	186.68**	29.6 ± 2.87	0.914	13.61**
D Shingu	106.6 ± 5.28	0.988	191.03**	32.0 ± 3.92	0.894	16.56**
E Fukuma	62.6 ± 5.47	0.928	23.54**	74.6 ± 4.89	0.960	34.89**
F Kagoshima	50.7 ± 3.57	0.945	24.91**	74.1 ± 4.58	0.970	38.21**
G Sekigane	57.4 ± 5.43	0.873	26.43**	91.7 ± 4.36	0.981	44.78**

a Case A : uncompact soil.

b Case B : compacted soil.

c Splash ratio : the volume of soil which splashed per unit volume of rainfall.

** Significant at 0.5% level.

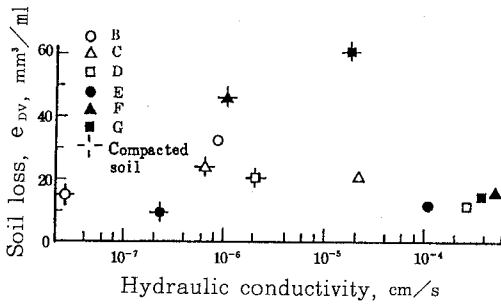


Fig.8 Relationship between the soil loss and the hydraulic conductivity of the soils.

Fig. 9 に、case A、Bの団粒分析の結果を示す。各試料土とも締固めにより細粒土(0.1mm以下)が増加している。特に15%以上増加している試料土はマサ、黒ボクであり、10%以上の試料はマージ、シラスである。この結果黒ボクの侵食量は大幅に増加している。この団粒分析を基にして粒子破碎量、団粒係数及び風乾率を求めてみるとTable 4のようになる。

八草粘土を除いて、各試料土は W_{opt} にて突固めることにより数値的にも土壌団粒の崩壊あるいは粒子破碎は起っている。例えば、国頭マージの場合、団粒係数が大幅に減少している。このことは、突固めエネルギーにて団粒崩壊がかなりあり、締固め効果が大きいことが予測される。実際に飛散比はかなり減少を示しており、侵食量はわずかな増加である。これは透水性とも関連しているが、その他に最適含水比にて締固めているため粒子間の結合も強く、雨滴による分離に対してはかなり強固になることが推測される。一方、雨滴と地表流に対しては、透水性の低下に伴う地表流量の増加、そして、マージの原土は、砂分が50%近くを占めていることなど、地表流による分離と輸送に対しては弱くなると考える。

各試料土の粒子破碎量、団粒係数及び風乾率と侵食(飛散比、侵食量)との関係について定量的なものは実験試料が少なく確たるものは見いだせなかった。

一般に飛散侵食では粘土質系に対して締固め効果があり、砂質土系はあまりみられない。侵食に対しては透水性とも関連しているが、締固め効果は、八草粘土を除いてあまりみられない。これらの見解は勾配8°以下の緩傾斜地に対してのみ言及されることである。

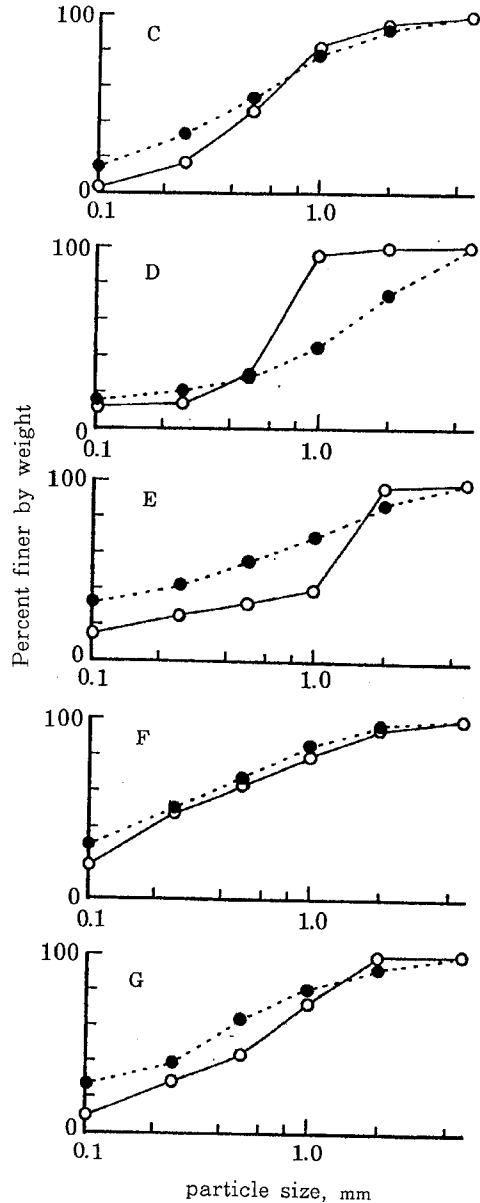


Fig.9 Analysis of water-stable aggregates of the soils.

(○ : uncompact soil, ● : compacted soil)

Table 4 Parameters used for estimating the index of erodibility

Soil sample	S.I. ^a	Coefficient of aggregation		Air-dry ratio	
		A	B	A	B
B Yagusa		96.2	-	121.6	-
C Kunigami	1.795	363.6	201.8	66.6	129.1
D Shingu	9.237	274.0	252.5	126.8	124.2
E Fukuma	3.206	236.8	130.4	80.6	122.8
F Kagoshima	0.708	165.9	128.6	150.4	172.4
G Sekigane	2.131	259.0	144.2	111.8	173.0

a S.I. : the amount of particle breakage (Eq.(1)).

5. 総括

土壤団粒の崩壊性や雨水による分散性、輸送性などに起因した種々の問題が派生することが予測される。本報は、締固めに伴う土壤団粒の崩壊性、粒子の破碎性並びにその水食性に及ぼす影響について検討を加えたものである。

締固め配合土の侵食性は透水性の変化とともにかなり変化する。すなわち飛散比（降雨量の単位体積当たり飛散した土量）は透水性の低下とともに増加し、透水係数 10^{-6}cm/s 付近でピークを示し、その後急激に減少する。また、水食量はピークを示す 10^{-6}cm/s の透水係数より高透水性域ではほとんど水食量に変化はないが、高水準の水食量を示す。一方、低透水性域では急激に水食量は減少し、その後一定となり、ほとんど低水食で変化がみられなくなる。

特殊土の侵食特性について、締固めることにより粘土質系の飛散比が大きく減少し、砂質土系になるにつれ飛散比が増大する。これは、締固めにより粘土質では土粒子の粘着力の増大と土壤表面が滑らかになること等による。一方、砂質土では突固めエネルギーによる密度あるいは細粒土増加に伴う透水性の低下が考えられる。水食量では、締固め効果があるのはカオリンのみである。マサ土の水食量はほとんど変化なく、他試料のそれは締固めることにより増加を示している。このことは、締固めることにより土壤団粒の崩壊並びに粒子破碎による細粒土の生成等の結果、浸透量が減り、地表流量が増加することに一因がある。

結局、飛散侵食では粘土質に対して締固め効果があり、砂質土はあまりみられない。雨滴と地表流による侵食に対しては透水性とも関連し、締固め効果はカオリンを除いてあまりみられず、とくに火山灰土ではほとんどないと考える。

引用文献

- 1) 藤川武信、内田勝利：土性と飛散侵食について、農土論集, 90, pp.1-8 (1980)
- 2) 内田勝利：乱した土の初期侵食性, 土壤の物理性, 44, pp. 9-13 (1981)
- 3) 土質工学会編：土の試験実習書, 土質工学会, 東京 (1988) p. 77
- 4) Mazurak, A.P. and Mosher, P.N. : Detachment of soil particles in simulated rainfall, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 32 (5), pp.716-719 (1968)
- 5) Smith, D. D. and Wischmeier, W. H. : Rainfall erosion, Advances in Agronomy, 14, pp.109-148 (1962)
- 6) 福本武明：締固めたマサ土の密度に関する粒子破碎の影響, 土質工学会論文報告集, Vol. 12 (3), pp.55-63 (1972)
- 7) 土壤物理研究会編：土壤物理用語事典, 養賢堂, 東京 (1978) p. 44

Summary

Particle breakage and effect on erodibility associated with compaction, were investigated. Ero-dibility of compacted mixed soil changed markedly along with the changes of permeability. The splash ratio (the volume of soil which splashed per unit volume of rainfall) and the amount of soil loss increased with the decrease of permeability. A peak was observed when the hydraulic conductivity was about 10^{-6} cm s, followed by a rapid decrease.

Erodibility characteristics of specific soils were as follows: there was a remarkable decrease of the splashing ratio in clayey soils, and an increase in sandy soils. Effect of compaction on the amount of soil loss was observed only in kaoline. Changes in the amount of soil loss in the Masa soil were not appreciable while in samples of other soils, soil loss increased by compaction. Com-paction affected splash erosion in the case of clayey soils unlike in sandy soils. Permeability was related to erosion associated with rainfall and runoff. The effect of compaction was not significant in soils except for Kaolin, and, in particular no effect was observed in volcanic ash soils.