

内筒回転式土壌侵食試験法について

澤 井 健 二・芦 田 和 男

A TEST METHOD OF SOIL ERODIBILITY BY MEANS OF THE ROTATING INNER CYLINDER

By Kenji SAWAI and Kazuo ASHIDA

Synopsis

A handy test method of soil erodibility is developed. At first, drilling a hole from soil surface, pouring water into the hole, we rotate a cylinder in the water. Then, the side wall of the hole is eroded by the circulating flow.

Measuring the torque driving the cylinder and the shape of the hole, we can obtain the relation between the rate of erosion and the tractive force.

For cohesive soil, this method is much more useful than channel test, although the rate of erosion obtained from the former is somewhat larger than that obtained from the latter.

1. 緒 言

土壌侵食現象は、土砂の剝離と輸送の過程から成っており、外力要因としての気象ならびに地形条件と抵抗要因としての土質ならびに植生条件によって支配されている。従来の土砂水理学は、主に非粘着性材料を対象として土砂の輸送の側面から展開されてきたが、剝離の過程を考える時、粘着性の存在を無視することはできない。もっとも、侵食現象は土壌の表面、すなわち空気あるいは水と土との境界面で生じる現象であり、いわゆる土の粘着力、すなわち土の内部におけるせん断抵抗力が、そのまま侵食抵抗に対応するわけではない。

そこで、土の受食性（侵食され易さ）を表す指標として、種々のものが考えられ、侵食限界条件や侵食速度との対応が調べられてきた¹⁾。しかしながら、侵食機構そのものがまだよく解明されていないことから、限られたデータの範囲内で各パラメータ間の単相関を論じるとどまることが多く、普遍性を有するには至っていない。

ところで、実用的な見地からすれば、必ずしも土質試験によって得られる間接的な資料から受食性を表すことができなくても、何らかの方法によって、直接に侵食限界なり侵食速度なりが把握できれば好都合である。試験区を設けて自然降雨あるいは人工降雨による流亡土量を測定する方法²⁾は、最も直接的な侵食試験法であると言えよう。しかしながら、この方法によって所期の成果を得るためには、多大の時間と労力を要し、短時間のうちに多くのデータを集めるのには適さない。

水路試験も直接的な侵食試験法のひとつであり、等流状態が維持できれば、その解析は容易であるが、人工試料の場合はともかくとして、自然土を対象とする場合には、水路の設置そのものに多くの困難が伴う。

これら、重力流を利用した試験法のほかに、従来、噴流によるもの³⁾や、回転流によるもの⁴⁾があり、比較的手軽に行えるものとして注目される。このうち、噴流によるものは、侵食限界を見出すのには適しているが、ひとたび侵食が生じて土壌表面が変形すると、水流の解析がきわめて困難となる。一方、回転流によるものは、解析は比較的容易であるが、試料の整形が難しく、従来、人工土に対してのみ用いられてき

た。

以上のような事情から、原位置もしくは不攪乱状態で手軽に実施できる侵食試験法の開発が切望されている。

2. 内筒回転式土壌侵食試験法

2. 1 試験装置

上に述べた従来の回転流による侵食試験法は、回転円筒の内部に、静止した円柱供試体を置き、その間を満たす液体の運動によって侵食を生じさせるものであるが、それとは逆に、回転円筒の外側の液体の運動を利用すれば、原位置試験法としての応用が可能となる。すなわち、Fig. 1 に示すように、地表面に円筒孔をくり抜いて水を入れ、その中で円柱を回転させることによって、円筒孔の側壁面を侵食させるのである。この時の外力の支配要素は、円筒孔と円柱の形状、回転速度、水量ならびに水質であり、そのうち容易に変化させることができるのは、回転速度である。そこで、Photo. 1 に示すような、パイプとチャンネルを組み合わせたフレームに、可変速度電子制御モータを付け、その先に直径 7.6 cm、高さ 14.5 cm の円柱を取り付けたものを製作した。モーターの回転数は 250~5,000 rpm で、反射式デジタルタコメータによって測定する。

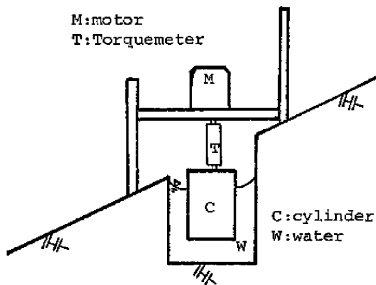


Fig. 1 Setting of the erosion tester on a slope.

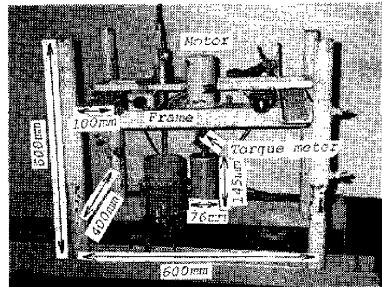


Photo. 1 Erosion tester built as a trial.

また、作用力を直接測定するために、モーターと円柱との間に、ねじりばね式回転トルクメータを付けている。侵食量の検出には種々の方法が考えられるが、ここでは、円筒孔に既知の量の水を入れ、その水位上昇量を測定することによって、孔の断面積を検出し、それと同じ面積をもつ円に置き換えて半径を算出することにした。

透水性の大きな地盤では、浸透量をやや上回る給水を行って、侵食時の水位低下を防ぎ、半径の測定時には、薄手のポリ袋を孔壁面に密着させて、漏水を防止する。また、高い回転速度を与える場合には、遠心力による溢水を防ぐため、円筒孔に上蓋をかぶせる必要がある。

装置全体の重量は、山地斜面等における可搬性を考慮して、約 20 kg とした。

2. 2 円筒孔内の流れ

上述の試験法における円筒孔内の流れは、基本的には Fig. 2 に示すような、共軸円筒間の回転 Couette 流であると考えられるが、内筒の端面や、外筒の底面および蓋、さらには自由表面などの影響が加わって、かなり複雑なものとなる。すなわち、内筒の端面付近の流れは、回転円盤によって生じる流れと類似し、また、これら同心円状の主流のほかに、底面摩擦による遠心力の不均衡や、流線の凸側に向かう負の速度勾配による遠心力不安定などに基づく、種々の 2 次流が混在する。

このうち、まず主流について考察すれば、円筒側面間の流れについて、鉛直方向の変化を省略することにより、

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{v^2}{r} \quad \dots\dots\dots(2)$$

が得られる。ここに、 p は圧力、 ρ は密度、 g は重力加速度、 v は流速、 z は鉛直座標、 r は動径である。

自由水面が存在する場合には、式(1)より、

$$p = \rho g(h - z) \quad \dots\dots\dots(3)$$

であるから、式(2)に代入して、

$$\frac{dv}{dr} = \frac{v^2}{gr} \quad \dots\dots\dots(4)$$

を得る。ここに、 h は水深である。

一方、トルクが半径方向に不変であることより、流速勾配は、

$$\frac{dv}{dr} \cdot \frac{v}{r} = \frac{\tau}{\mu + \rho \epsilon} = \frac{\tau_0}{\mu + \rho \epsilon} \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

と表される。ここに、 τ はせん断力、 μ は粘性係数、 ϵ は渦動粘性係数、添字 0 は外筒における値を表す。

式(5)を、 $r=r_0$ において $v=0$ の条件で積分すると、層流 ($\epsilon=0$) に対しては、直線状の流速分布、

$$v = \frac{\tau_0}{2\mu} \left(r - \frac{r_0^2}{r} \right) = \frac{\tau_0(r - r_0)}{\mu} \quad \dots\dots\dots(6)$$

が得られるが、乱流状態では、内外両壁面近傍にのみ、大きな速度勾配が存在し、その中間には、速度勾配の小さな核領域が形成される。

また、内筒の角速度を ω とすれば、 $r=r_i$ において $v_i=r_i\omega$ であるから、層流状態に対しては、式(6)より、

$$\tau_0 = \frac{2\mu r_i \omega}{r_i - \frac{r_0^2}{r_i}} = \frac{\mu r_i \omega}{d} \quad \dots\dots\dots(7)$$

を得る。ここに、 d は円筒間隔、添字 i は内筒における値を表す。

ところで、底面摩擦を省略すれば、トルク M は、

$$M = 2\pi r^2 h \tau \quad \dots\dots\dots(8)$$

であるから、式(7)、(8)より、トルク係数 $C_M [\equiv |M| / \frac{1}{2} \pi \rho v_i^2 r_i^2 h]$ は、

$$C_M = \frac{2\pi r_i^2 l \mu r_i \omega}{\frac{1}{2} \pi \rho v_i^2 r_i^2 l d} = \frac{4}{R_*} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。ここに、 l は円柱高、 $R_* \equiv v_i d / \nu$ である。

以上は、層流でかつ 2 次流が存在しない場合の解析であるが、Taylor 数 T_a が

$$T_a \equiv \frac{v_i d}{\nu} \sqrt{\frac{d}{r_i}} \geq 41.3 \quad \dots\dots\dots(10)$$

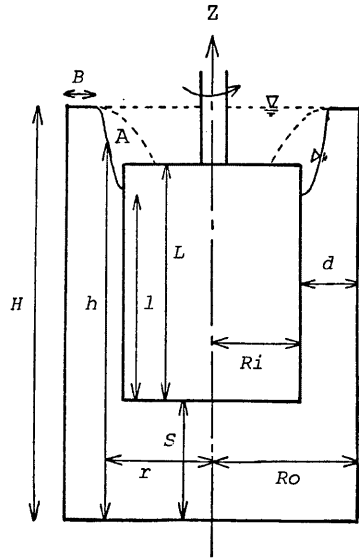


Fig. 2 Definition sketch of the flow between concentric cylinders (inner cylinder rotating).

になると, Taylor 渦を伴うようになってトルク係数が増大し, さらに, 乱流領域では, トルク係数が Reynolds 数の $-1/5$ 乗 に比例することが知られている⁵⁾。

$$C_M \sim R_e^{-0.2} \quad \dots\dots\dots(11)$$

トルク係数の定義より, 上式を変形すれば,

$$M \sim \frac{1}{2} \pi \rho v_i^2 r^2 h \left(\frac{v_i d}{\nu} \right)^{-0.2} \quad \dots\dots\dots(12)$$

となり, ρ , ν , r , d , h が一定のとき, 乱流領域では, トルクは内筒の回転数の 1.8 乗に比例することになる。したがって, 摩擦速度は回転数の 0.9 乗に比例する。この特性は, 回転円板によって形成される流れにも共通であるから, Fig. 2 における, 円筒の側面と端面とを合わせた全壁面に作用するトルクについても, 同様のことが言えよう。ただし, 上蓋の幅 (B) が小さい場合には, 回転数の増加に伴って内筒付近の水位が下がるので, あまり大きなトルクは伝達できない。

さて, 以上の考察に基づいて, 本試験法における流れの特性を検討するため, 土試料の代わりに内径 10 cm, 深さ 14.5 cm の塩化ビニール製容器を用いて, 外筒の中央高さにおける流速分布ならびに水面形状を測定した。結果は, Fig. 3 および Fig. 4 に

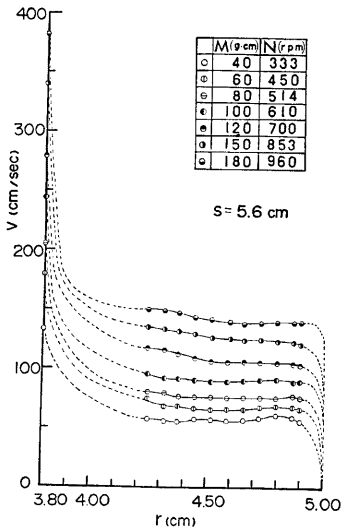


Fig. 3 Velocity distribution at the half depth of the outer cylinder.

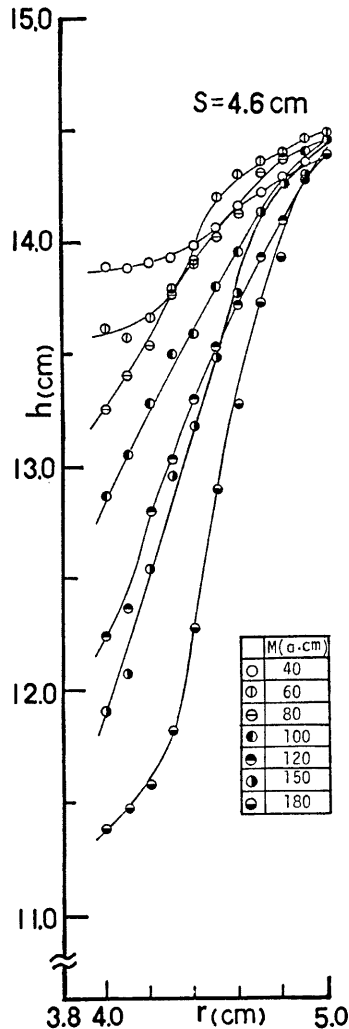


Fig. 4 Water surface profile.

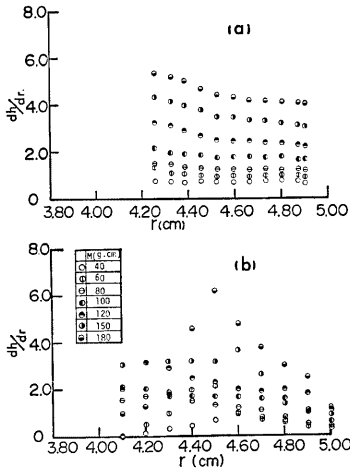


Fig. 5 Inclination of the water surface.
(a) Estimated. (b) Measured.

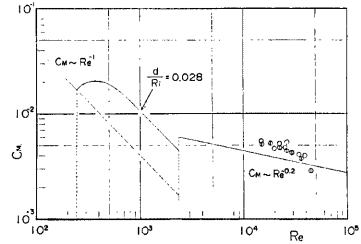


Fig. 6 Moment coefficient in terms of the Reynolds number.

示すとおりである。内外両壁面近傍の流速が測定できていないが、内筒の周速が $v_i = r_i \omega$ でかつ外筒が静止していることを考え合わせると、両壁面のごく近傍に大きな流速勾配が存在し、中間領域では、外側に向かって流速がやや減少するものの、大部分の領域では、内筒の周速の40%程度になっている。この流速分布から、式(4)を用いて推定される水面勾配は Fig. 5 (a) に示すように内側ほど急になるが、実際に測定された水面勾配は、Fig. 5 (b) に示すように、壁面近傍ではかなり緩くなっている。これは、内筒側で上昇し、外筒側で下降する2次流の存在を裏付けているものと考えられる。

Fig. 6 は、トルク係数と Reynolds 数の関係をプロットしたものである。ただし、トルク係数を算出するための半径と水深は、いずれも円筒間の平均値を用い、また、全トルクが円筒側面でもたれているものとしている。図中に描かれた直線は、左からそれぞれ、Taylor 渦の存在しない層流領域、Taylor 渦の存在する層流領域、乱流領域における理論直線を表している⁹⁾。実験範囲は乱流領域に属しており、式 (11) に示した傾向を示しているが、その絶対値は理論値よりも20%程度大きくなっている。この原因のひとつとして、底面の受けもつトルクの影響が考えられるが、容器内の回転円盤に対するトルク係数⁹⁾ から推定されるトルクは、Run 3-4 において約 $4 \text{ g} \cdot \text{cm}$ であり、側面の受けもつトルクの5%にも満たない。したがって、トルク係数を増加させている主な原因は、2次流にあるものと推定される。この試験法に付随する2次流には、底面摩擦に基づく、円筒の高さのスケールで生じるもの、円筒間隔のスケールで生じる Taylor 渦、さらに小さなスケールで生じる Goertler 渦などが考えられるが、侵食に大きく寄与するのは、スケールの大きな弱い渦よりも、むしろスケールは小さくても強度の大きな渦である。とくに、スケールの小さな渦は、必ずしもトルクのような巨視的な量の測定では検出されないので注意する必要がある。

ところで、Goertler 渦は乱流領域にも存在するものであり、その発生条件は、

$$G \equiv \frac{U_\infty \delta_2}{\nu} \sqrt{\frac{\delta_2}{R}} > 7 \quad \dots\dots\dots(13)$$

で表される⁹⁾。ここに、 R は壁面の曲率半径、 δ_2 は境界層の運動量厚、 U_∞ は境界層外縁の流速である。境界層の流速分布が $1/7$ 乗則に従うものとすれば、運動量厚は

$$\frac{\delta_2}{\delta} = \frac{7}{72} \quad \dots\dots\dots(14)$$

となるから、層厚を円筒間隔の1/2、外部流速を内筒の周速の40%にとることによって、パラメータ G を概算することができ、上記の試験法では、回転数が 70 rpm を超えると、Goertler 渦の発生域に属するものと判定される。

3. ベントナイトを用いた侵食実験

3. 1 実験方法

前章に述べた侵食試験法の適用性を検討するために、従来、水路実験によって、侵食速度と摩擦速度の関係がかなり明らかになっている⁹⁾ ベントナイトを用いて、侵食実験を行った。実験は2つのシリーズから成っており、シリーズBはベントナイトだけのもの、シリーズSは豊浦標準砂（粒径 0.27 mm）にベントナイトを10%混合したものを試料としている。試料は、所定の含水比で十分に練り合わせた後、直径12.6cm、高さ13.8cmの罐につめ、直径10.2cm、厚さ2mmの黄銅管によって中心部をくり抜いて、水浸状態で10分間放置する。その後、試験機にセットして、短時間内筒を回転させ、試料整形時の攪乱層を侵食させてから、断面形状を測定し、再び試験機にセットして、所定のトルクで、数mmの侵食が生じるまで内筒を回転させる。

Table 1 は、実験条件を示したものである。表中の w は、水とベントナイトの重量比を表したもので

Table 1 Experimental conditions.

Series	B			S		
Material	Bentonite (100%)			Sand(90%)+Bentonite(10%)		
$w(\%)$	100	150	200	200	250	300
$M(g \cdot cm)$	$N(rpm)$					
0	$T(min)$			—		
10			175 11		170 10	192 3
20		278 10	292 10	—	223 10	250 3
40	360 10	385 10	370 10	348 2	383 3	328 3
60	424 10	486 10	358 10		476 3	392 3
100	613 10	706 10	610 10		589 3	556 3
150	907 10		841 10		653 3	615 3
200	1096 10	1094 10	909 3		1230 3	1036 2
300	1850 10	1858 5	2432 5		1516 2	1356 2
400			1979 3			

Note: $s=6.0$ cm



Photo. 2 Testpiece after erosion.

ある。また、表中、棒線を引いてある欄は、測定を行う前に試料が崩壊してしまったものを表している。

3. 2 実験結果ならびに考案

Photo. 2 は、侵食を受けた試料の一例である。内筒の回転方向は、上から見て反時計回りであり、その方向に試料が剝離した痕跡が数多く見られる。その鉛直方向の間隔は、約 1.5 cm であり、回転円筒と試料の壁面との間隔はほぼ対応していることは、Taylor 渦の存在を暗示する点で興味深い。しかしながら、このような痕跡は常に見られるわけではなく、その高さも必ずしも円周方向に一定でない。また、円筒孔への給水量と水位の関係は、**Fig. 7** に示すように、ほぼ直線状となっており、平均的には深さ方向にはほぼ一様な侵食を受けていることがわかる。これは、侵食をひきおこす流体力そのものが、平均的には深さ方向にはほぼ一様に作用していることを示している。そこで、この試験法における外力は、平均壁面せん断力あるいは平均摩擦速度で評価することにした。

Fig. 8 は、このようにして、ベントナイトあるいはベントナイト・砂混合物の侵食速度とせん断力の関係を求めたものである。図中には水路試験の結果もあわせて記入している（実線）が、これによると、内筒回転法から求めた侵食速度は、同じせん断力の水路試験によるものに比べてかなり大きな値を示しており、特に砂とベントナイト混合物において、それが著しい。

このように、内筒回転によって得られる侵食速度が、水路試験によるものの 2～3 倍程度大きくなる原因としては、次のようなものが考えられる。そのひとつは、既に随所に述べてきた 2 次流の存在である。次に考えられるのは、水路試験では水路底面を侵食させているのに対し、円筒試験では円筒側面（鉛直面）を侵食させていることによる、重力の作用のしかたの違いである。また、水路試験では、侵食された土砂が下流へ流出するのにに対し、円筒試験ではそれが円筒内に残留し、しだいに濃度が増大することも挙げられる。これらの剝離した土砂粒子は、水よりも大きな遠心力を受けるため、外筒側に集まり、壁面を削剥することもあると考えられる。さらに、粘性土の侵食には、電気化学的な作用力が関係し、温度が上昇すると侵食速度も上

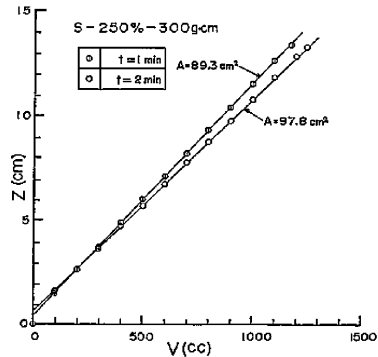


Fig. 7 Measurement of cross section of the hole (for artificial material).

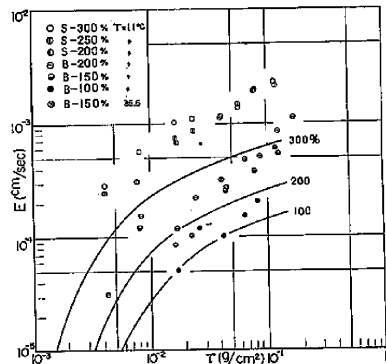


Fig. 8 Rate of erosion related to the tractive force (for artificial material).

昇するという報告があるが⁴⁾、著者らが行った実験では、水温が11℃の場合と35.5℃の場合とでそれほど顕著な差は見い出せなかった。

今後、これらの点をさらに詳細に解明していきたいと考えている。

なお、シリーズSで含水比が200%の試料は、試験機にセットして給水しただけで崩落しており、この試験法の適用範囲外にあることを示している。

4. 自然土への適用

前章においては、ベントナイトと標準砂という比較的均一な材料で、しかも試験前に人工的に練り混ぜた状態の試料を対象としたが、自然状態の土は不均一で、攪乱を与えると強度の変化することが多い。したがって、本試験法を適用するためには、まず、未攪乱状態で円筒孔を作れるか否かが問題となる。

そこで、防災研究所宇治川水理実験所河川総合実験施設内の盛土斜面に対して、本試験法の適用を試みた。この斜面は、昭和46年に、山土 ($d_{50}=0.54$ mm, $d_{10}=0.06$ mm) をローラーで転圧しながら、勾配 1/14 に盛ったもので、その後、100 mm/hr 前後の人工降雨を通算 200 時間程度被っている。2 mm 以上のれきの混入率は7%, 5 mm 以上のものは2%に過ぎないが、直径 10 cm, 深さ 10 cm 程度の孔を掘ろうとすると、10 mm を越えるようなれきに2~3回遭遇し、壁面の整形に約20分間を要した。

Fig. 9 は、侵食の前後における、孔への給水量と水位の関係を表したものであり、前章の例と異なって、ある深さから半径が急に変わっている。これは、穿孔時に上方が広がっていたことによるが、土の侵食抵抗が深さ方向に異なることを表しているものと考えられる。**Fig. 10** は、この試験法における侵食速度とせん断力の関係をプロットしたもので、前章の場合ほど明確な相関は見られないが、侵食抵抗の概略は把握することができよう。

次に、本試験法の実際問題への応用として、野洲川放水路における粘性土河床の受食性調査を行った⁷⁾。この放水路は、河口から約5 km 地点で分流する、南流と北流の中間に開削が進められているもので、近日中に通水が開始される予定である。河口から 1.5~3.8 km の区間が粘性土になっており、その侵食特性を調べるため、既にいくつかの水路試験が行われてきた⁸⁾⁹⁾。その結果、この区間の材料は、乱さない状態では、約 30 cm/sec の摩擦速度 (暫定高水流量 3500 m³/sec に対応) に対して 0.9 cm/hr 程度の侵食しか受けないが、ひとたび攪乱を与えると、侵食抵抗が極端に低下することがわかり、さらに詳細な調査を行うことになったのである。しかしながら、緒言にも述べたように、原位置あるいは未攪乱状態での水路試験の実施には多くの困難を伴うので、今回の調査には、回転円筒法を用いることにした。

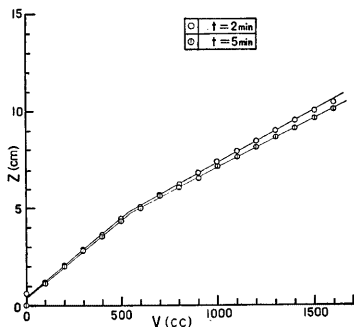


Fig. 9 Measurement of cross section of the hole (slope).

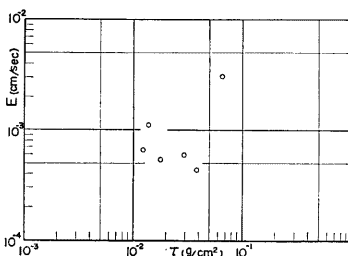


Fig. 10 Rate of erosion related to the tractive force (slope).

本試験法は、元来、原位置試験用として考案したものであり、野洲川においても、予備試験は現地で行ったが、2mの深さまでの受食性の鉛直分布を調べるには、ボーリングによって未攪乱試料を採取する方が能率的である。そこで、直径15 cmの鋼管によって採取した試料を、鋼管ごと20 cmの長さに切断し、その中央に直径10.2 cmの円筒孔をくり抜いて、一昼夜以上水浸状態においたものを供試体とした。

先に述べたベントナイトや山土は、比較的受食性が大きく、低い回転数で試験を実施することができたが、野洲川放水路の粘性土はこれらに比べると抵抗が大きくて、高い回転数を与えないと侵食が生じない。ところが、これまでの例のように蓋をせずに回転数を高くすると、遠心力によって水があふれ出すので、中央に直径6 cmの穴をあけたアクリル製の蓋を取り付けた。

Fig. 11は、そのような状態で得られた侵食速度とせん断力の関係の一例であり、この地点では、地表面から約1 mより上層が、非常に侵食され易いことがわかる。12ヶ所のボーリング試料について同様の試験を行い、この区間の受食性分布が求められたが、詳細は省略する。

なお、本試験法と並行して行われた、一軸圧縮試験では、下層の土よりもむしろ上層の土の強度が大きくなっており、土塊としての強度からは侵食抵抗を評価できないことが判明した。

5. 結 語

本研究は、原位置もしくは不攪乱状態で、手軽に実施できる粘性土の侵食試験法について考察したものであり、新しい試験法を開発するとともに、その適用性についていくつかの検討を行ってきた。得られた成果を要約して、結語とする。

1° 粘性土の受食性は、その攪乱状態によって非常に異なるが、著者らが開発した内筒回転式土壌侵食試験法は、試験機や供試体の作成が容易で、試料を乱すことなく、しかも手軽に実施することができる。

2° 巨れきを含有する材料や、粘着性の乏しい材料に対しては、本試験法は適用できないが、粘性土に対しては、かなり広く用いることができる。

3° 本試験法によって得られる侵食速度は、同じせん断力を有する開水路流れによるものより若干大きい、相対的な侵食特性を把握するには充分である。今後さらに詳細な検討を行って、精度を高めていきたいと考えている。

なお、本研究を進めるにあたって、京都大学大学院渡辺弘昌君ならびに4回生斉藤修君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Task Committee on Erosion of Cohesive Materials: Erosion of Cohesive Materials, Proc. ASCE, Vol. 94, No. HY4, 1968.
- 2) 種田行男：降雨による流亡土量の予測に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究報告集録，1977.
- 3) 田中 茂：山腹斜面の安定に関する研究，第2回災害科学総合講演会，1965.
- 4) Ariathurai R. and K. Arulanandan: Erosion Rates of Cohesive Soils, Proc. ASCE, Vol. 104,

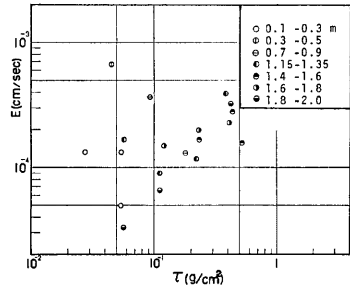


Fig. 11 Rate of erosion related to the tractive force (River Yasu).

No. HY2, 1978.

- 5) Schlichting, H.: **Boundary-Layer Theory**, Sixth Edition, McGraw-Hill, 1968.
- 6) 芦田和男・田中健二：粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，第17号 B，1974.
- 7) 芦田和男・澤井健二：野洲川放水路粘性土河床における受食性に関する調査，財団法人防災研究協会，1979.
- 8) 建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所・近畿技術コンサルタンツ株式会社：野洲川放水路河床変動実験業務報告書，1977.
- 9) 芦田和男・澤井健二：粘着性河床の侵食に関する研究，財団法人防災研究協会，1977.