

粘着性土の浸食速度に及ぼす粘着力の影響

EFFECT OF SHEAR STRENGTH ON THE EROSION RATE OF COHESIVE SEDIMENT

関根正人¹・藤尾健太²・片桐康博³・西森研一郎³

Masato SEKINE, Kenta FUJIO, Yasuhiro KATAGIRI and Ken-ichiro NISIMORI

1 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

2 学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (同上)

3 学生会員 早稲田大学理工学部 (同上)

Erosion rate of cohesive sediment has been investigated experimentally to understand the effect of some major factors, such as the clay content ratio, the water content ratio, a water temperature and etc., on the erosion rate. Based on the experimental results, a simple erosion rate formula was also developed. In the present study, several check tests were conducted to verify the validity of the previous results. Soil mechanical test was also conducted to evaluate the shear strength of the test sample. Correlation between the shear strength(cohesion) and an erosion rate was explained in the present paper.

Key Words : *cohesive sediment, erosion rate, shear strength, clay and water content ratio, soil mechanical test*

1. 序論

著者らは、砂と粘土からなる粘着性土の浸食機構を力学的に理解し、その浸食速度の予測を目指して一連の実験的検討^{1)~3)}を進めてきている。これまでの検討によって、この浸食機構に影響を及ぼす因子として「粘土含有率」、「水含有率」、「水温」および「砂と粘土の粒径比」などが重要であることを明らかにするとともに、これらが浸食速度に及ぼす影響についても定量的に評価することができた³⁾。主な知見はおおよそ以下の通りである。すなわち、(1)供試体を構成する粘土含有率が20 %程度以上では、浸食速度はこの比によらずほぼ一定の値をとる、(2)供試体中の水含有率が高いほど、また、水温が高いほど浸食速度は大きくなり、この影響は顕著である、(3)砂と粘土の粒径比がある程度以上大きくなると、この比が耐浸食性に与える影響は無視できる、ことなどである。

本研究では、まず、このような成果の妥当性を検証し、あわせて浸食機構を議論する上で必要となる次のような基礎的な実験を行った。すなわち、これまでの

浸食実験の際に用いてきた供試体が、鉛直方向に均質な土質構造ならびに耐浸食性を有しているか、に関しては不明な点が多く、このことを厳密に検討しておくことが必要であるとの判断から、確認のための一連の実験を行った。この結果について説明する。あわせて、前報において誘導した浸食速度式の妥当性についても報告する。

次に、このような粘着性土の耐浸食性を別角度から捉えることを目指して、供試体の土質力学的なせん断破壊試験を行い、その結果について論じている。土質試験法によれば、粘着性土のせん断強度を評価する方法は幾通りかあるが、いずれの方法も「流水による浸食に抵抗する強度」を評価する目的からすると必ずしも妥当とは考えられない。そのため、たとえば、建設省土木研究所(現、国土交通省国土技術政策総合研究所)⁴⁾では、高水敷に堆積し長い時間にわたって圧密を受けた粘着性土の耐浸食性を検討する際に、新たな試験機の開発を行い、その強度を用いた浸食試験結果の整理を行っている。その成果は示唆に富むものであり、大変興味深い。しかし、著者が対象とする粘着性土

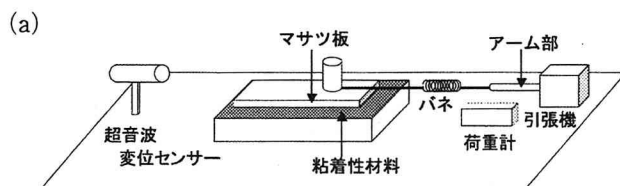
は、主として河口付近に自然堆積したものであるため、大きなせん断強度が期待できず、この試験方法を適用するには不向きである。そこで、本研究では、新たに供試体表層のせん断強度を計測できる試験機ならびに試験法を開発することにした。本論文では、このせん断破壊試験の概要について説明するとともに、この試験により得られる「粘着力 C 」や「摩擦角 ϕ 」と、水路実験から得られる「浸食速度」との関係についても論じている。

2. 実験概要

(1) 浸食実験

実験は、長さ5 m、幅10 cm、高さ10 cmの正方形断面を持つアクリル製循環水路を用いて行った。水路上流端から250 cmの位置の水路底部には、長さ1 mにわたって、幅10 cm、深さ5 cmの凹部(溝)が設けられており、ここに供試体として後述するような粘着性土を設置して通水試験に供する構造になっている。なお、この実験装置の基本構造については、前報^{1)~3)}までのものと同一である。また、本研究では、浸食が進行していく過程において供試体表面の高さを一定に保つため、次のような手順で実験を行った。すなわち、1 cmの高さの枠が3段にわたって積み重なるように配置されている構造の直方体容器(長さ50 cm、奥行き10 cm、高さ5 cm)の中に供試体を入れ、流水によって1 cmの浸食が生じるたびに通水を止め、この外枠を1段ずつ取り外すことにし、供試体自体を持ち上げた後に再び通水実験を継続することにした。これにより、供試体表面の高さを上下流の水路底面の高さとほぼ同一に保つことができる。そして、供試体表面に作用するせん断力が浸食の進行に伴って大きく低下することで浸食速度自体が低下して行くことを防ぐことができる。以下、この実験を「底上げ実験」と呼ぶことにする。このような実験は、事前に初期浸食速度を測定することで、1 cmの浸食に要するおよそその時間を求めておき、この時間を目安に上記の外枠を1段ずつ取り外していくことにすれば、供試体の表面高さを維持しつつ一定の速度で浸食が進行するか否かを確認することができる。ただし、本研究の範囲内で確認されることはなかったものの、浸食速度が供試体の深さ方向に異なる場合には、このような方法が適用できなくなることは言うまでもない。

供試体としては、前報^{1)~3)}までと同様にS.Aクレー(60% 粒径 0.016 mm、比重 2.7)と珪砂3号(同 1.6 mm、同 2.65)に、水を所定の比率で配合し、攪拌機によって均質に練り混ぜたものを水中で一昼夜静置した後に使用している。なお、この静置時間については前



(b)

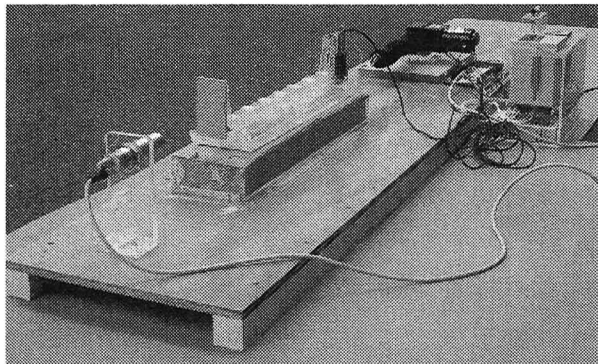


図-1 粘着性土の引張りせん断試験機の概要

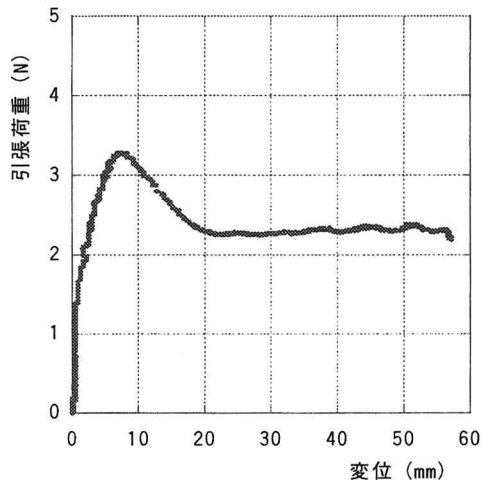


図-2 供試体の荷重と変位の関係の一例：
鉛直荷重11.5 Nの場合

報¹⁾を参照されたい。供試体の浸食速度は、通水開始後所定の時刻に通水を止め、その表面の高さをレーザー式変位センサーを用いて面的に計測することにより求めている。

(2) 供試体の引張りせん断試験

浸食実験で対象としてきた供試体のせん断特性ならびに粘着力 C を求めるため、供試体表層のせん断試験を行った。これは、従来の土質試験法では本研究で注目しているようなせん断強度を評価できない恐れがあるためであり、ここでは新たな引張りせん断試験機の開発を行った。試験機の概要を図-1にまとめて示す。この試験機は、変位を計測する超音波変位センサーと引張り荷重を計測する荷重計(ロードセル)を計測器とし、このほかにコンピュータ制御でバネに変位を与えるアーム部と、供試体上部に置かれた「マサツ板」と

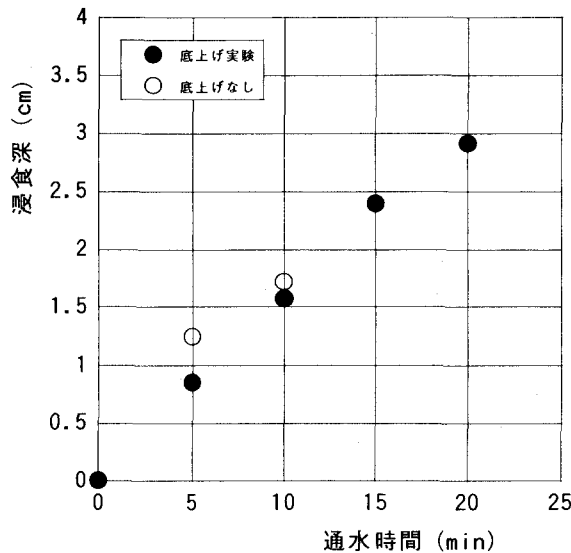


図-3 浸食速度の経時変化：
粘土含有率 80 %，水含有率 50 %

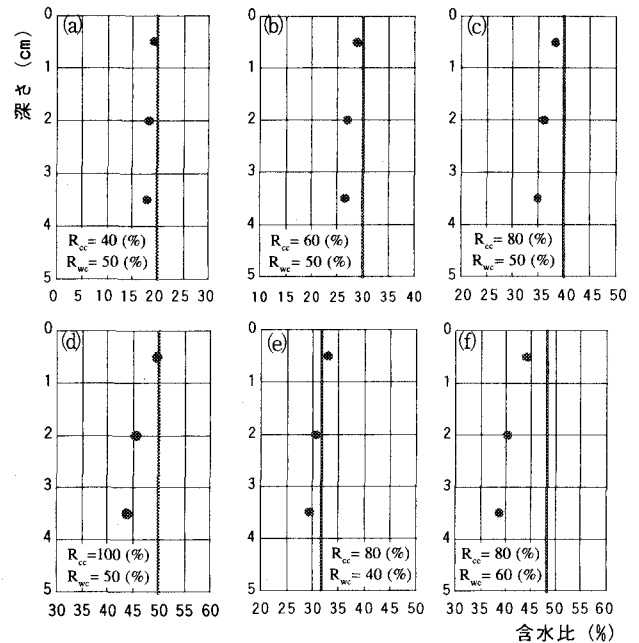


図-4 供試体内の含水比の鉛直分布

からなり，このアーム部とバネおよび「マサツ板」とは高張力の糸で結ばれている。供試体と接触するこの「マサツ板」の底部には，粗度（ここでは60番の耐水性紙やすり）が貼り付けてあり，供試体表面と「マサツ板」とは一体となって変位し，供試体の表層下にせん断破壊面が生じるように留意してある。実験は，モーターを使って一定速度（ここでは0.7 mm/sec）でアームを動かすことでバネに変位を与え，これに応じて生じる「マサツ板」の変位とそれにかかる荷重とをデジタルデータとしてコンピュータに取り込みつつ進められた。図-2には得られた変位－荷重曲線の一例を示す。図のように，供試体はある変位に到るまでせん断を受けた後に破壊を起こし，そのときに最大荷重を記録することから，この最大値からせん断強度を求めることができる。なお，このせん断強度 τ は供試体にかかる鉛直応力 σ によって変化することから「マサツ板」の上部に数種類のおもりを載せて，一連の計測を行った。そして，このデータと

$$\tau = C + \sigma \cdot \tan \phi \quad (1)$$

の関係から供試体の粘着力 C と内部摩擦角 ϕ を推定することにした。なお，この試験の供試体については，浸食実験に供したものと同一の手順で練り混ぜ，一昼夜水中で静置したものをを用いており，その大きさは長さ50 cm，幅13 cm，高さ5 cmである。

本研究では，参考までに，既存の土質試験法として確立されている他のせん断試験についても検討を行った。ただし，粘着性土の浸食過程を解明する上で重要なせん断強度とは，供試体が塊として発揮するものというよりはむしろ供試体表層において発揮されるせん

断強度であること，ならびに本研究で扱う供試体の含水比が液性限界(S.A クレーの液性限界 $w_L = 29.8 \%$)を大きく越えることなどから，一軸，三軸圧縮試験は不向きであると判断した。そこで，ここでは，ベーンせん断試験のみを行うことにした。

3. 結果および考察

(1) 浸食速度データの信頼性の検証

ここではまず，供試体の土質構造ならびに耐浸食性が鉛直方向に一樣であるか否かについて検討した結果を説明する。

前報までに検討してきた粘着性土の浸食過程においては，装置の制約から時間の経過とともに浸食速度が漸減していく傾向にあることがわかった²⁾。この原因としては，これまでの装置の場合には供試体表面の高さを一定に保つ構造になっておらず，浸食が進むにつれて供試体表面の高さが低くなり，浸食面近傍の流速が減少するために作用せん断力が低下してしまうのではないかと推察された。本研究では，このことを裏付けるために行われた「底上げ実験」の結果から説明する。得られた結果を図-3に示す。この実験は，予備実験によって5分間の浸食速度がほぼ1 cm程度となることがわかっている条件を選んで行われたものである。図-3には従来の計測結果（これを「底上げなし」と記す）についてもあわせて示してあるが，図-3より浸食深が通水時間に比例するように増加しており，3 cm程度の浸食が起こる過程においては浸食速度がほぼ一定であることがわかる。このことは，前報で得られた浸

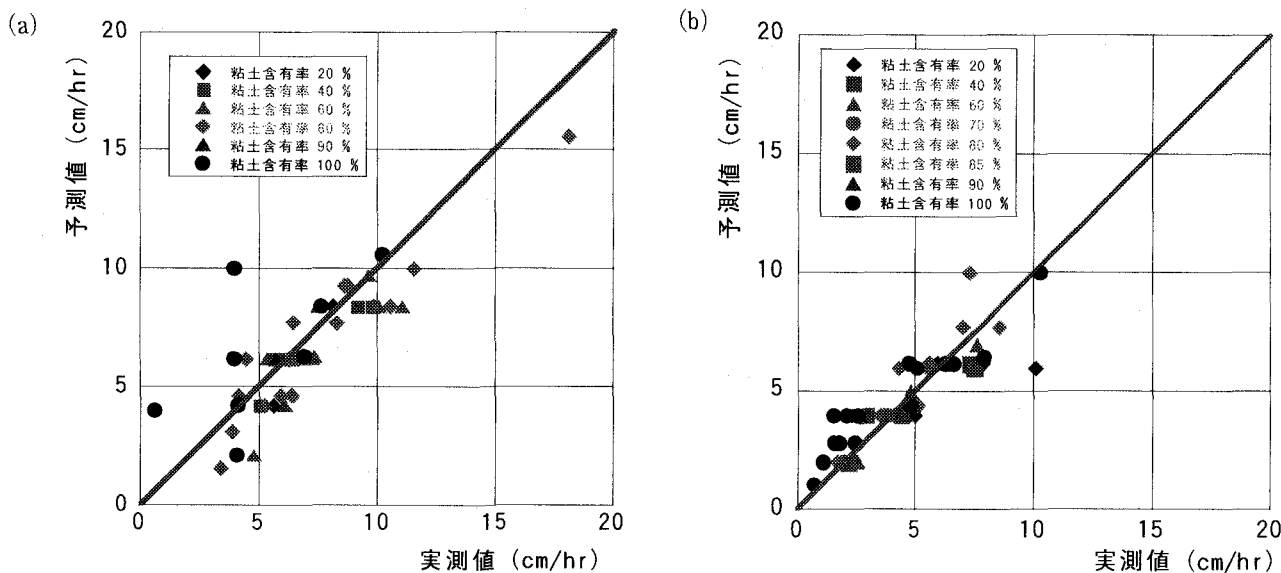


図-5 浸食速度の妥当性の検証：(a) 水温高、(b) 水温低

食速度の低下が供試体の強度の不均一に起因するものではなく、上記の推測通りであったことを示している。さらにあわせて、前報までの検討においては、「通水開始後10分間の初期浸食速度」をもって浸食特性を議論してきたが、このような値によって供試体全体の浸食速度を代表させて考えることの理論的な根拠が得られたと考える。

また、上記のことを裏付けるために、供試体内の含水状態について、これが鉛直方向に様になっているか否かを確認するための試験(ポットテスト)を行った。この試験で用いた供試体は前述のせん断試験に用いたものと同一であり、一昼夜静置の後、同じ手順で作成した供試体の上部、中部、下部からそれぞれ材料を採取して、その含水比を測定した。その結果は図-4に示す通りである。図-4(a)～(d)が水含有率を同一として粘土含有率を変化させたものを、図-4(c), (e), (f)が粘土含有率を同一として水含有率を変化させたものを、それぞれ示している。図中の実線は供試体練り混ぜ時に設定された含水比を表している。ここに、含水比は水含有率との関係で、(含水比)=(粘土含有率)×(水含有率)のように定義される。この図-4より、著者らの浸食実験で対象としてきた供試体の場合には、含水比は初期設定値に比べて若干低下しているものの、鉛直方向には大きく変化しないことがわかる。このように、著者らの実験で用いられてきた供試体は鉛直方向にほぼ均一な構造をしており、その結果として浸食速度が表層におけるものとはほぼ同一の値となっているものとする。ただし、相対的に見るならば、供試体内を砂がわずかに沈下するため、水に接する表層付近ほど砂の存在比率が小さく、その一方で含水比が大きくなる

傾向があるため、供試体の厚さをさらに大きく設定すると、場の不均一性が顕在化してくる恐れがある。

(2) 浸食速度式の検証

前報³⁾において、S.Aクレーに関する浸食速度式の誘導を試みた。この式は、あくまでもS.Aクレーのみを対象として、浸食速度がほぼ一定となる粘土含有率の範囲(20～100%)に対して導かれたものであり、他の鉱物からなる粘着性土あるいは現地河川に堆積している粘着性土に関しては、別途同様の手順を経て対応する予測式を誘導する必要がある。これについては後述する。ここでは、近似的に誘導された浸食速度式の適用性について検証しておきたい。

さて、前報では、浸食速度 E_s (cm/hr)を、断面平均流速 U (cm/sec)および水含有率 R_{wc} の線形関数の重ね合わせとして定式化し、その結果を提示したが、ここでは、実測の抵抗係数を用いて断面平均流速 U を摩擦速度 u^* (cm/sec)に置き換えることで元の式を修正しておくことにする。結果として導かれた浸食速度の近似式は、以下の通りである。

$$E_s = \alpha \cdot (u^* - u_o^*) \cdot (R_{wc} - R_{wc}^*) \quad (2)$$

ここに、 α は水温によらない無次元の定数で11.5、 R_{wc} は夏期には0.22、冬期には0.32となる定数である。また、 u_o^* は4.2 cm/secである。この関係式は、系統的に行った実験データのうち、条件を制御しつつ行った特定のシリーズのものを用いて各要因の影響を把握した上で、導かれたものである。そこで、著者らの全実験データに対して、この予測式の適合性を検証しておくことにする。図-5は、実測値と予測値とを直接比

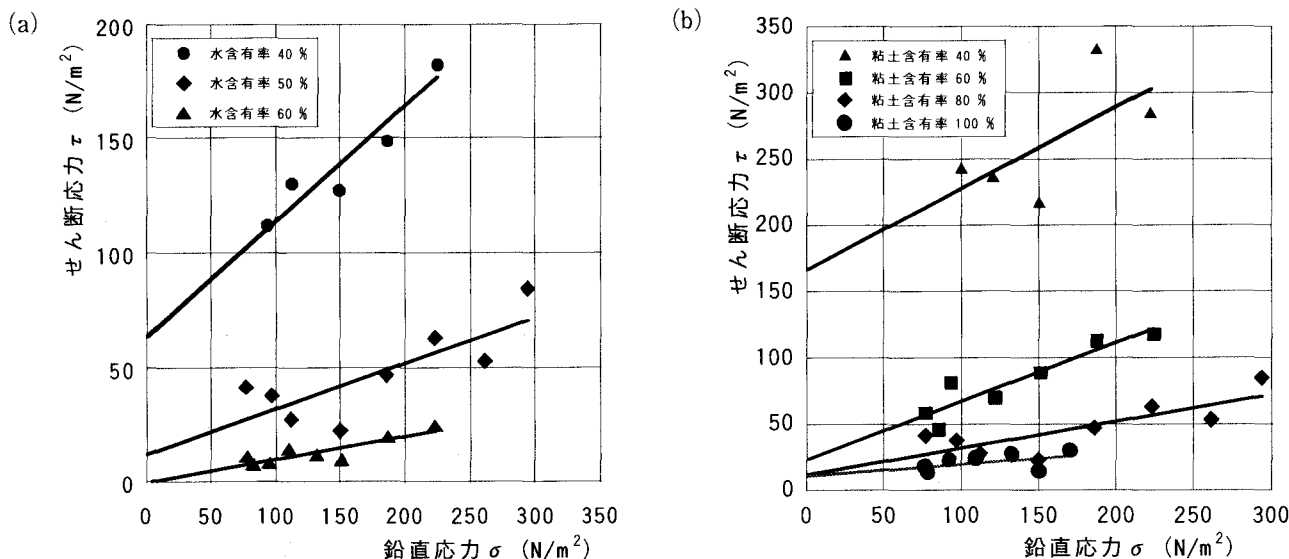


図-6 粘着性土の引張試験結果：(a)粘土含有率80%, (b)水含有率50%
(図中の実線は最小自乗法により求められた関係を示す)

較した結果をまとめたものである。横軸を実測値、縦軸を予測値として、水温の高い夏期と低い冬期とに分けて整理してある。この図より、両者とも傾き1の直線付近にプロットが集まっており、ほぼ実測値が予測値と1対1に対応していることが理解される。このことから、式(2)は、本研究の範囲内で概ね妥当な浸食速度式であるといえる。

(3) 供試体の粘着力と浸食速度との関係

第2章で説明した引張りせん断試験の結果を基に供試体の粘着力と浸食速度との関係について検討する。本論文では、浸食実験における供試体組成を考慮して、粘土含有率80%の下で水含有率を40～60%とした場合と、水含有率50%の下で粘土含有率を40～100%とした場合についての結果を例に説明する。図-6は一連の試験結果をまとめて示したものであり、(a)で水含有率の影響を、(b)で粘土含有率の影響をそれぞれまとめた。なお、参考までに、図-6の同一の記号を連ねた線が縦軸と交わる点での値(切片)が粘着力 C であり、その傾きが $\tan \phi$ である。この結果から、本研究の範囲内では少なくとも次のことが言える。すなわち、

(i) 粘土含有率が一定(すなわち粘土と砂の混合比率が等しい)の下では、水含有率が大きいほど粘着力 C が小さく、摩擦角 ϕ も小さい。

(ii) 水含有率が一定の場合には、粘土含有率が40%の場合に関してばらつきが大きく判断が難しいものの、その他の条件に対しては、粘着力 C に大きな違いは見られない。ただし、摩擦角 ϕ については、粘土含有率が小さいほど(言い換えれば、砂の比率が大きいほど)大きくなる。

この結果と浸食速度との関係についてまとめると、次のようになろう。まず、(i)の点について考えると、これは、粘土含有率が一定の場合には水含有率が大きいほど浸食速度が大きいという浸食実験の結果と符合するものであり、この供試体の粘着力の低下が耐浸食性の低下の直接の原因であると推察される。また、(ii)に関しては、この条件下では浸食速度がほぼ一定であることがわかっており、これは粘着力自体が変わらないことに起因しているものと考えられる。このように、せん断試験により求められる粘着力は、供試体の耐浸食性と強い正の相関性を持つことが理解された。以上をもとに推測すると、前述の浸食速度式の中に現れる水含有率の影響については、粘着力 C についての関数として書き換えられる可能性がある。こうした点に関して、今後さらに広範囲にわたる検討を行い、確認していく予定である。

最後に、あくまで参考データとして、従来型のせん断試験であるベーン試験の結果についても触れておくことにする。同一の供試体を用いたせん断試験の結果として図-7のような関係が得られている。図-7(a)は、粘土含有率を80%とした場合の水含有率とベーンせん断強度との関係を、また、図-7(b)は、水含有率50%として粘土含有率とベーンせん断強度の関係を、それぞれ表している。特に後者については、ベーン羽根を供試体の中央(表面から6 cmまでの範囲)に挿入した場合のデータに加えて、表面下2 cmまでの範囲にのみ入れて計測されたデータについても併記した。さらに、同図中には、参考までに、摩擦速度6.29 cm/sec時の浸食速度も併せて示してある。この図からも、前述のせん断強度と浸食速度との間の傾向を見ることができる。ただし、ここに現れているせん断強度は、耐

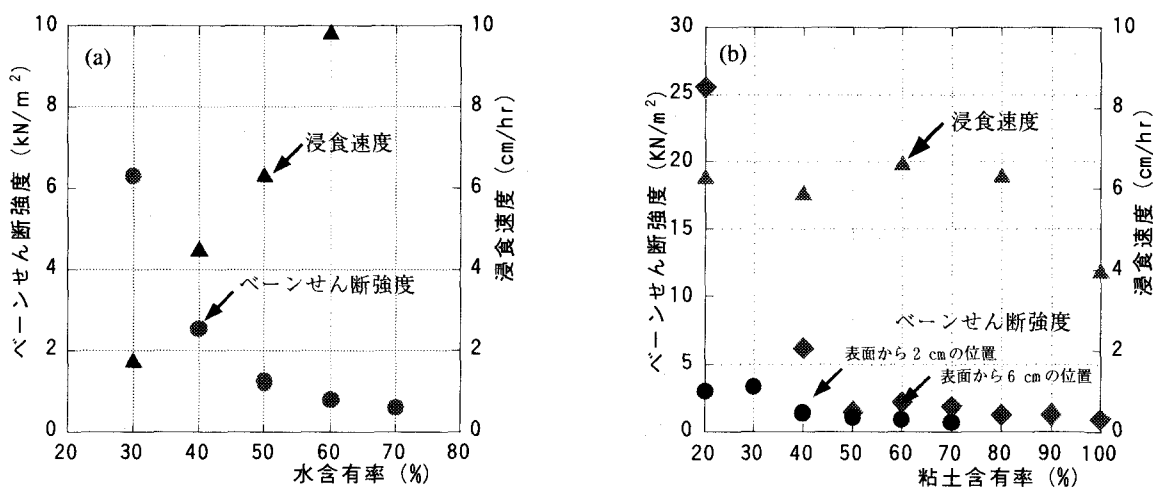


図-7 粘着性土のペーンせん断試験結果：(a)粘土含有率80%, (b)水含有率50%

浸食性と直結する表層の値ではなく、ある厚さにわたって発揮される強度であり、前述の粘着力 C と比較すると2オーダーも大きな値となっていることに注意を要する。また、粘土含有率が40%以下になると、浸食実験における傾向とは異なり、ペーンせん断強度が急激に増加している。これは、砂の割合が増加し砂粒子同士がかみ合うようになって(インターロッキング)、せん断抵抗が大きくなったからにはほかならず、本論文で重要視している粘着力に起因するせん断抵抗とは明らかに異なるものである。

5. 結論

本研究では、著者らのこれまでの研究において明らかになった知見の検証を行うとともに、粘着性土表層の引張りせん断試験を行いその粘着力を求め、これと浸食速度との関係について説明した。本研究により明らかになった成果を以下に列挙し、結論とする。

(1) 粘着力と浸食速度とは当然のことながら強い相関関係をもつことがわかり、式(2)を粘着力の影響を陽に表す浸食速度式へと書き換えていくことも可能ではないかと考える。

(2) 水含有率を同一とすると、粘土含有率40~100%の範囲内で浸食速度が一定となる理由は、粘着力が概ね等しくなるためと考えられる。

(3) 粘土含有率を一定とすると、水含有率が大きいほど浸食速度が増加するが、これは粘着力の低下により説明できる。

今後は、更なる実験を通じて粘着力と浸食速度との関係を定量化するとともに、現地河川に堆積した粘着

性土を対象とした浸食実験ならびにせん断試験を行い、その結果を整理していく予定である。さらに、こうした現地材料に対する一連の試験方法の確立についても考えていくつもりである。現地材料に関しては、流域毎にそれぞれ固有の鉱物ならびに粒度組成をもつと推定される。この場合には、必要に応じて流域毎に粘着性土の浸食速度式を用意しておく必要があるが、この基礎となる試験法を確立していくことが将来に向けて重要であると考えている。

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費基盤研究B(研究代表者：関根正人)の助成を受けて行われた。また、本研究で用いた引張りせん断試験機の開発に当たり技術的なアイデアの提案とその製作は佐竹宣憲氏((有)佐竹設計事務所)によりなされた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 関根正人, 熊谷利彦, 尾藤文人：粘着性土の浸食機構に関する基礎的研究, 水工学論文集第43巻, pp.659-664, 1999.
- 2) 関根正人, 飯塚暢明, 高部一彦：粘着性土の浸食特性に関わる諸要因の影響, 水工学論文集第44巻, pp.747-752, 2000.
- 3) 関根正人, 飯塚暢明, 藤尾健太：粘着性土の浸食速度予測に向けた実験的研究, 水工学論文集第45巻, pp.667-672, 2001.
- 4) 建設省土木研究所河川研究室：洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動, 土木研究所資料, 第3489号, 1998.

(2001.10.1受付)