大型不攪乱供試体を用いた堤防・自然河岸の耐侵食強度評価実験

Estimation of resistance to erosion of levee and natural riverbank using
large and undisturbed test pieces

佐々木克也*・藤田光一**・宇多高明***・服部 敦****・平館 治*****

By Katsuya SASAKI, Koh-ichi FUJITA, Takaaki UDA, Atsushi HATTORI and Osamu HIRATATE

The estimation of resistance to erosion of levee and natural riverbank is very important to enhance the safety of levee and natural riverbank against erosion. A new technique by open channel flume experiment with large and undisturbed test pieces is developed to measure critical velocity and rate of erosion. Further a tension test apparatus is newly developed to measure a tensile breaking stress of cohesive soil. The measured results indicate the tensile breaking stress is proportional to the square of critical velocity and well characterizes the erosion process.

keywords: cohesive soil, erosion, critical velocity, rate of erosion,
tensile breaking stress

1. はじめに

自然環境への関心と潤いのある生活空間を求める声が高まっている中で、川づくりにおいても自然を生かしつつ治水上の安全性を確保する河川技術が求められ、多自然型河川工法や緑豊かな堤防などが各地で試みられている。このような川づくりを進める上で必要とされる最も重要な情報の一つは、粘着性土からできている堤防や自然河岸の洪水外力に対する耐侵食強度である。粘着性土の侵食特性に関する従来の研究として、Task Committee on Erosion of Cohesive Materials は¹⁾、粘着性土の侵食に関する既往文献より、限界掃流力と土質指標（粒度分布、塑性指数、間隙率、ベーンセン断強度、三軸圧縮強度など）の関係をとりまとめた。しかし、この研究では様々な粘着性土の限界掃流力を定量的に評価できるまでには至っていない。粘着性土の侵食の力学的な説明を試みた研究として、芦田ら²⁾は、砂礫が粘土により粘着されているとして間隙に粘土を有する砂礫の限界掃流力を定式化した。このモデルにおいて、粘土の粘着力は未知量であり、パールクレイの粘着力を実験により定めている。また、首藤ら³⁾は、粘着性土の塊が剥離して侵食されることに着目し、この現象のメカニズムを力学的に把握するための研究を行った。粘着性土としてカオリンを用いた実験によ

* 正会員 建設省土木研究所河川部河川研究室 研究員
(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

** 正会員 工博 建設省土木研究所河川部河川研究室 主任研究員

*** 正会員 工博 建設省土木研究所河川部河川研究室 室長

**** 正会員 修士 建設省土木研究所河川部河川研究室 研究員

***** 建設省土木研究所河川部河川研究室

り侵食状況を詳細に調べ、力学モデルによって粘着性土の侵食特性を説明することを試みた。しかし、以上の研究では、洪水外力と侵食特性の関係は明確にされていないため、粘着性土の侵食特性を定量的に明らかにすることが必要である。また、これらの研究では、現地河川への適用性、現場材料と実験試料との違いの影響、小規模実験と実現象との侵食スケールの違いの影響などが不明であるため、上記の目的にそのまま適用することはできない。本研究では、現地の堤防・自然河岸の侵食特性を調べるためには現場材料を乱さずに実験を行うこと、実際の洪水時に発生すると考えられる大スケールの侵食現象をも再現する必要があること、さらには侵食限界流速と侵食速度の双方を把握することが重要と考え、新たに侵食試験法を開発した。以下ではこの試験法とその試験結果について報告する。

2. 大型不攪乱供試体を用いた侵食試験

2. 1 大型侵食試験法

現地の材料を乱さずに試験する方法として、地表面を底面とする矩形管水路に流水を生じさせる方法があり、植生の耐侵食強度の把握に成果を上げている⁴⁾。しかし、この方法は発生可能最大流速や測定可能な最大侵食深が小さいので、適用範囲が地表面付近の侵食特性の把握に限られている。そこで本研究では、不攪乱状態で採取した現地の材料を高流速侵食試験装置に据え付けた上で通水させることにより、様々な土質からなる地面の侵食特性（侵食限界流速、侵食形態と侵食機構、流速と侵食速度との関係）を土質別に明らかにすることとした。高流速侵食試験装置の全体像を図-1に示す。この装置では、流速 $V=1.8\text{m/s}$ までは水路勾配 $1/200$ の等流状態の流れにより、それ以上の流速はゲート上流の圧力水頭により $V=8.0\text{m/s}$ まで段階的に発生させることができる。供試体の大きさは、実際の侵食過程において地表面から離脱する土塊1個の大きさよりも十分に大きな平面スケールとするため縦横 1.5m とし、また土の性質の鉛直方向の変化をも許すに十分な厚みとなるよう 0.5m とした。供試体の採取方法としては、鋼製枠を現地の地表面に鉛直に差し込み、周辺の土を取り去った後、底板ですくい取った（図-2参照）。この方法によれば、ほとんど乱さない状態での供試体の採取および試験装置の据え付けが可能である。実験は、高流速侵食試験装置に設置された供試体の表面に低流速より順に作用させ（水深は $8\sim 20\text{cm}$ ）、その過程での侵食深変化を測定した。この際、実験開始前に流量制御により接近流速を定め、実験中に供試体上面の流速の鉛直分布を測定した。侵食深は、供試体表面を縦横断方向に 5cm 間隔（全667点）で測定し、その平均値より求めた。なお、供試体表面が侵食されるにしたがい水路底面より深くなり、流れの乱れにより侵食速度が変化することを防止するため、水路上部より供試体を吊り下げ、侵食された深さ分だけ供試体表面高さを上昇させることによって、いずれの侵食過程でも供試体表面高さが水路底面とほぼ同一となるようにした。これにより、厚さ 0.5m の供試体の各深さでの侵食特性を調べることができる。また、側壁の影響により急激な侵食を受けないように、供試体の幅は侵食試験装置の水路幅に比較して十分

図-1 高流速侵食試験装置

図-2 供試体の採取法

また、側壁の影響により急激な侵食を受けないように、供試体の幅は侵食試験装置の水路幅に比較して十分

広くした。

2.2 供試体の土質特性

供試体は、図-3に示すように堤防築造を想定して河川土工品質管理基準に基づき締固めた盛土箇所3箇所（供試体①、⑤、⑥：凡例右抜き）と、人為的影響を受けていない高水敷3箇所（供試体②-1、②-2、③、④：凡例右黒ぬり）より採取した。供試体の土質特性値を表-1に示す。

表-1 供試体の土質特性

供試体名	湿潤密度 ρ_s (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	粒度 d_{60} (mm)	塑性指数 I_p	締固め特性			粘着力 C kgf/cm ²	ϕ 度
							最大乾燥密度 ρ_{dmax}	最適含水比 ω_s			
① 関東ローム	1.38	0.70	2.95	90.4	0.007	65.9	0.76	84.5	0.40	3.3	
②-1鬼怒川シルト	1.64	1.11	1.40	91.6	0.042	27.1	1.25	31.3	0.33	10.2	
②-2鬼怒川細砂	1.73	1.24	1.18	91.1	0.126	NP	1.41	26.0	—	—	
③ 鬼怒川粘土	1.57	0.94	1.82	97.1	0.002	62.8	1.05	49.0	0.29	2.9	
④ 小貝川	1.15	0.64	3.01	67.9	0.014	49.9	0.92	57.3	0.06	6.6	
⑤ 江戸崎山砂	1.80	1.46	0.84	76.3	0.126	NP	1.53	23.2	0.27	15.8	
⑥ 混合砂	1.84	1.49	0.84	75.8	0.110	17.9	1.67	18.6	0.34	5.7	

2.3 供試体の侵食特性

(1) 侵食深の時間変化

接近流速 V における侵食深 D の経時変化の一例（供試体①）を図-4に示す。全ての供試体において一定流速の下での侵食速度（侵食深の時間変化率）は、ある時間を経るとほぼ一定となる特性がある。このときの侵食速度を E_0 とみると、 E_0 は流速が速いほど大きくなる傾向を持つ。

(2) 侵食速度と流速との関係

各供試体の E_0 と V の関係を図-5に示す。 E_0 は、流速がある一定以上の速さになると急激に増大する傾向となる。 E_0 の急激な増加をもたらす流速を V_c とみると、各供試体ともに $V < V_c$ の時には供試体の表面から数 cm の幅を持つ小さな薄片状で剥離する侵食現象が見られ、 $V > V_c$ の時には5~20cm程度の大きさを持つ塊状で離脱する侵食形態を示す。以上は、 $V > V_c$ の時の侵食現象のスケールが $V < V_c$ の時に比較してかなり大きくなることを示している。 V_c 値は供試体ごとに異なるため、各供試体の土質特性と侵食速度の関係の評価を試みる。

2.4 土質特性と侵食速度との関係

高流速侵食試験装置により評価された供試体の侵食特性と、従来から行われてきた土質試験結果との比較を考える。粘着性土に関する土質試験結果による評価は、土質試験結果の指標により次の2種類に分けることができる。

①粘着力が発揮される機構を考慮した指標により評価する方法

②機構自体を考慮するのではなく、粘着力自体を測定し、それにより評価する方法

ここでは、①の方法として粘土含有率と間隙比により、また②の方法では三軸圧縮試験結果により、大型侵

図-3 供試体の粒度分布

図-4 供試体①の侵食速度

図-5 侵食速度と流速の関係

食試験から得た結果との関係を検討する。

(1) 粘着力が発揮される機構を考慮した指標により評価する方法

以下に、侵食速度と粘土含有率および間隙比の関係をそれぞれ考察し、これより本方法で考慮することが必要と考えられる土質特性について述べる。

粘着性土の粘着力は、粘土（ $50\mu\text{m}$ 以下の粒子）が接着剤の役割を果たすことによりもたらされると考えられる。したがってある供試体の粘着力は、接着剤の量と強度の両面を表す土質特性により評価されよう。接着剤の量に関する土質特性は、粘土含有率に相当すると仮定できる。粘着性土は、その土が過去に受けた物理的および化学的外力の作用の履歴に対して、土粒子間に作用する内力、すなわち粘着力の作用が釣りあうように土粒子の配列が定められている。この土粒子の配列を土の構造と呼び、これと土の力学的強度の関係についての研究がなされている⁵⁾。これによると同一の間隙比において、土の構造がランダム構造から綿毛化構造へと組織的な構造になるほど、せん断強度を増すことから、土の構造が粘着力を支配する土質特性と考えられる。しかし、土の構造は定性的な土質特性なので、粘着強度の定量的評価にそのまま用いるのは不適切である。そこで、土の構造が組織的になるほど空隙率が大きくなることに着目し、土の構造、すなわち粘着強度を間隙比を用いて評価することとした。間隙比を用いる注意点として粒度分布の違いも間隙比の大小を示す要因となる。そこで、不攪乱供試体の間隙比（ e ）から最大乾燥密度に締固めた間隙比（ e_{min} ）を差し引いた値を用いて、各供試体を比較検討する。 $e - e_{min}$ は、各供試体の粒度分布がもたらす固有の間隙比を、同一の締固め試験により土の構造をランダム構造にした間隙比 e_{min} によって補正した値となるので、各供試体の不攪乱状態の土の構造の評価が可能と考えられる。すなわち、 $e - e_{min}$ の値が大きいくほど、土の構造は組織的になっており、これより粘着強度を発揮していると考えられる。上記の粘着力に関する考察を検証するために、粘土含有率（ $50\mu\text{m}$ 以下の粒子含有率）と E_0 （侵食速度）との関係を図-6に示す。また、 $e - e_{min}$ と侵食限界流速 V_c との関係を図-7に示す。一般に粘土含有率の高い土ほど耐侵食特性を有すると考えられるが、図-6の実験結果においてもこの傾向を示すことが認められる。しかし、20%の粘土含有率を持つ供試体②-1（ Δ 印：自然堆積土供試体）と供試体⑤（ Δ 印：盛土製作供試体）とを比較した場合、自然堆積土供試体の侵食速度がより遅いことがわかる。これは、図-7の表からわかるように、供試体②-1の $e - e_{min}$ の値が供試体⑤より大きく、したがって粘土の粘着強度が大きいためと考えられる。また、盛土製作供試体⑤と⑥（ $\diamond$ 印）とを比較した場合においても侵食速度の相違が認められる。この理由として、供試体⑤は、盛土材料中の粘着性土が全体面積の約10%に及び団粒化している現象が観察結果から確認されている。したがって砂質主体の侵食速度となっている可能性が強い。一方、供試体⑥は、ミキサーを使用して粒度調整を行った土であり、粘土が均一に混合されていること、供試体中に含まれる礫が侵食面に現れた時に粗度要素として流水に作用し、礫周辺の粘着性土に作用する掃流力の低減をもたらしたことから耐侵食性を有してい

図-6 粘土含有率と侵食速度の関係

図-7 間隙比と侵食速度の関係

供試体⑤は、盛土材料中の粘着性土が全体面積の約10%に及び団粒化している現象が観察結果から確認されている。したがって砂質主体の侵食速度となっている可能性が強い。一方、供試体⑥は、ミキサーを使用して粒度調整を行った土であり、粘土が均一に混合されていること、供試体中に含まれる礫が侵食面に現れた時に粗度要素として流水に作用し、礫周辺の粘着性土に作用する掃流力の低減をもたらしたことから耐侵食性を有してい

ると推定できる。

(2) 粘着力と侵食速度との関係

三軸圧縮試験結果から得られた粘着力 C と E_0 の関係を図-8に示す。この図より、盛土製作供試体および自然堆積土供試体ともに C と E_0 の明瞭な関係は認められない。この原因として、三軸圧縮試験は円柱形の供試体を地中で受けていた応力を再現するように側方から液圧をかけた状態で軸方向に圧縮し、その応力と変形を調べる試験法であるため、流水による侵食現象を再現する試験法となっていないことが考えられる。このことにより、土質力学的な粘着力からも土の侵食速度を評価しにくいことがわかる。

3. 簡易侵食試験法の開発

前述のように、一般的な土質試験結果からは粘着性土の侵食特性を定量的に評価できない。このため、粘着性土の侵食現象に着目した簡易試験装置の開発を試みた。前述の大型侵食試験は、現地の侵食特性を評価する上で有効な手段ではあるが、実験規模が大きいくから手間や費用がかかるため、より簡易手法が開発されればその有効性は非常に高いと考えられる。以下では、通水を伴わずに現地の堤防・自然河岸の耐侵食強度を容易に評価することの可能な手法を示す。

3.1 簡易侵食試験法

侵食は、 V_c 以下の流速では供試体表面から破片状で剥離し、 V_c 以上の流速では塊状で離脱する。流速が V_c 以上の場合の侵食は、流水により供試体表面に作用する揚力が供試体表面付近に働く引張り力を上回ったときに破壊されると考えられる。そこで、この引張り破壊応力を測定するための引張り試験器を開発した（写真-1参照）。この引張り試験器は、現地の地表面を縦横高さとも10cmで整形し、鉛直方向にバネばかりで引張った時の破壊応力を計測するものである。

3.2 大型侵食試験結果と簡易侵食試験結果との関係

大型侵食試験で得られた供試体別の V_c と簡易侵食試験器による引張り破壊応力 σ_{tb} の関係を68%の信頼限界とともに図-9に示す。図によると、 V_c は σ_{tb} とかなりよい相関を示し σ_{tb} は V_c の自乗に比例する。一般に流体力は流速の自乗に比例することから、侵食現象は、3.1で述べた揚力による引張り破壊現象と考えることができる。すなわち供試体表面に作用する揚力が σ_{tb} に達したときに侵食されるので、 V_c と σ_{tb} の間には式(1)が成り立つ。

$$\sigma_{tb} = 1/2 \rho C_L V_c^2 \quad (1)$$

したがって、式(1)より C_L を逆算すると $C_L = 0.31$ となり、侵食限界流速と引張り破壊応力の関係この値は河床上の砂粒子の揚力係数 $C_L = 0.34^{(9)}$ とほぼ同程度である。よって σ_{tb} は侵食を支配する粘着力として適切な指標であり、限界掃流力と比例関係があると考えられる。このことは、引張り試験器により土の引張り破壊応力が求められれば、大型侵食試験による V_c をかなり高い精度で予測可能であること

図-8 粘着力と侵食速度の関係

写真-1 引張り試験器

図-9 引張り破壊応力 σ_{tb} (gf/cm²)

を意味している。同様に図-10には各供試体の侵食速度と引張り破壊応力との関係を示す。引張り破壊応力 σ_{tb} は引張試験器により、また侵食速度 E_0 は大型侵食試験の結果である。図中には接近流速も示す。この図によれば、 σ_{tb} と流速が得られれば、侵食速度 E_0 の予測が可能である。

各供試体の侵食速度と引張り破壊応力および流速の関係を無次元化して図-11に示す。供試体の単位面積当たりの侵食面に作用する流体力 σ_F は ρV^2 に比例し、また、引張り破壊強度は、図-9に示した関係より限界掃流力と比例関係にある。このことから、図-11の横軸は、流体力と限界掃流力の比を表している。また、 $V \propto (\sigma_F / \rho)^{1/2}$ が成立するので、図-11の縦軸は、流速の次元に換算した流体力と侵食速度の比を表している。これによると、 E_0 / V と $\rho V^2 / \sigma_{tb}$ の関係は、引張り破壊強度が弱い供試体（供試体①、②-2、⑤）では図中に示した直線によって表せるが、引張り破壊強度が強い供試体（供試体③、⑥）では侵食速度が小さく実験誤差も多く含まれると思われるデータを除くと上記の直線より傾きが急な破線および一点破線になる。直線の切片は、流体力と限界掃流力のそれぞれを流速の自乗と引張り破壊応力で代表したことに伴う係数に関係する。これに対し、直線の傾きは、侵食の形態と過程、すなわち離脱する供試体の塊の大きさとそれが離脱する頻度を決定する力学的なメカニズムに関係すると考えられる。実験時の観察によれば、引張り破壊応力が強い供試体の侵食は、大きな塊状に離脱することによって生じており、このような侵食形態は、引張り破壊応力の弱い供試体には見られない。このような侵食形態の差異を、直線の傾きが反映していると推定される。

4. まとめ

大型侵食試験法の開発により、現地の堤防・自然河岸の耐侵食強度を定量的に評価することが可能となった。大型侵食試験は手間と費用がかかるため、本研究ではこれに止まらずより簡便な簡易侵食試験器の開発を行った。この結果、引張り破壊応力を測定することにより、大型侵食試験結果とほぼ同等な結果を得ることができた。今後は、実河川のデータを追加してより普遍の結果が得られるよう研究を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) The Task Committee on Erosion of Cohesive Materials: Erosion of cohesive sediments, J. of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 94, No. HY4, Proc. Paper 6044, pp. 1017-1049, 1968.
- 2) 芦田和男・江頭進治・加本 実: 山地流域における侵食と流路変動に関する研究(1), 京都大学防災研究所年報, 第25号, B-2, pp. 349-361, 1982.
- 3) 青木美樹・首藤伸夫: 粘性土堆積層の洗掘現象に関する実験的研究, 第26回水理講演会論文集, pp. 87-92, 1982.
- 4) 福岡捷二・藤田光一: 堤防法面張芝の侵食限界, 水工学論文集, 第34巻, pp. 319-330, 1990.
- 5) 土壌物理研究会: 土の物理学, 森北出版, pp. 72-96, 1979.
- 6) 池田駿介: 移動床河川の湾曲部における二次流と動的横断平衡河床について, 土木学会論文報告集, 第299号, pp. 55-65, 1974.

図-10 侵食速度と引張り破壊応力の関係

図-11 無次元侵食速度と引張り破壊応力の関係