

堤体材料特性に応じた粘性土の限界せん断応力の予測式の提案

埼玉大学 学生会員 ○西川 咲良

埼玉大学 正会員 八木澤 順治

1. 研究背景および目的

粘性土の侵食による問題は、農業、河川、海岸において数多く発生している。特に、河川堤防の越流侵食問題においては、堤体に過度な侵食が発生することによって、堤防決壊の危険性が高まり、水害発生時の被害がより拡大することが考えられる。したがって、粘性土の侵食を適切に評価することは重要である。細粒分を含まない非粘性土の侵食は、既往の研究により精度よく評価することが可能となっている。一方で、細粒分を含む粘性をもつ土壌については、これまでも数多く研究が行われているが、土壌の侵食を正しく示す方法は未だ示されていない。粘性を含む土壌の侵食は、土壌中の水分量や細粒分量、有機物含有量、植生の状態など、数多くの条件の影響を受けている。一般的な式として以下の式(1)のような式がよく用いられている。

$$E_s = k_d(\tau - \tau_c)^\alpha \quad (1)$$

ここで、 E_s :侵食速度(m/s), k_d :侵食係数(m^3/sN), τ :せん断応力(N/m^2), τ_c :限界せん断応力(N/m^2), α :指数(一般的には1と仮定される(例えば Hanson and Simon¹⁾)をあらわす。この式より、侵食係数 k_d と限界せん断応力 τ_c は土壌の状態に影響を受けるパラメータであり、これらを土壌の条件に応じてどのように表すかが重要となる。

Zhu ら²⁾は、既往の研究で提案された粘性土の限界せん断応力の式がまとめられている。たとえば式(2), (3), (4)のような式が提案されている。

$$\tau_c = 0.1 + 0.1779FC + 0.0028FC^2 - 2.34 \times 10^{-5}FC^3 \quad (2)$$

$$\tau_c = 0.493 \times 10^{0.0182FC} \quad (3)$$

$$\tau_c = 0.0013\rho_d^{1.2} \quad (4)$$

ここで、 FC :細粒分含有率, ρ_d :乾燥密度(kg/m^3)をあらわす。これらの式のように、これまで提案されている予測式は単一の土壌パラメータで示されているものが多い。しかしながら、Hanson and Hunt³⁾によ

れば、土壌の侵食性には、細粒分含有率、乾燥密度、含水比がそれぞれ影響を与えるということを明らかにしている。

そこで、本研究では粘性土の侵食をより正確に評価するため、既往研究の侵食実験等のデータを活用し、複数の土壌条件を考慮した τ_c の予測式を提案することを目的とする。

2. 研究方法

本研究では侵食性に影響を与える土質パラメータとして、細粒分含有率(FC)、乾燥密度(ρ_d)、含水比(WC)の3つのパラメータを考慮し、限界せん断応力 τ_c の予測式を作成することとした。粘性土を対象とした侵食実験が実施されている既往研究から、上記のパラメータを系統的に変化させ、 τ_c が明示されている、5つの既往研究を参考にし、得られた計84個のデータセットを用いて τ_c の予測式を導出した。式の導出にあたっては重回帰分析を用いた。表-1に各既往研究での3つの土質パラメータの範囲を示す。

また、得られた τ_c の予測式の検証として、Briaud et al.⁴⁾の実験結果を活用した。Briaud らはEFA装置(erosion function apparatus)を用いて侵食速度 E_s を明らかにしている。式(2)-(4)のように単一パラメータでの τ_c の予測式と比べ、本研究で提案する τ_c の予測式の精度を確かめることとした。

表-1 既往研究での土壌パラメータの範囲

論文	限界せん断応力 τ_c (N/m^2)	細粒分含有率 FC (%)	乾燥密度 ρ_d (kg/m^3)	含水比 WC (%)
Shaikh et. al. (1988)	2.59-11.59	40-100	1110-1420	22.5-41
Benahmed and Bonelli (2012)	10-55	30-95	1500-1920	15-24
Haghighi et al. (2013)	18-43	65-100	1600-1800	19-26
Wan and Fell (2004)	7-63	20-84	1585-1968	15.2-21.2
Ye et al.(2011)	0.369-3.95	10-100	999-1666	21-73

キーワード 土壌侵食, 粘性土, 限界せん断応力, 侵食速度

連絡先 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

3. τ_c の予測式とその精度検証

上述した方法で導出した、複数の土質パラメータを考慮した τ_c の予測式を式(5)に示す.

$$\tau_c = -110.24 + 0.424FC + 0.065\rho_d + 0.045WC \quad (5)$$

図-1 に、式(5)を用いて求めた τ_c と、実際に観測された τ_c の値を比較した結果を示す. 図より $0-10\text{N/m}^2$ と τ_c がやや小さい範囲にデータが集中しているものの、式(5)の重回帰式の決定係数は $R^2=0.82$ であり、十分適用可能であると判断し、式(5)の検証を実施した.

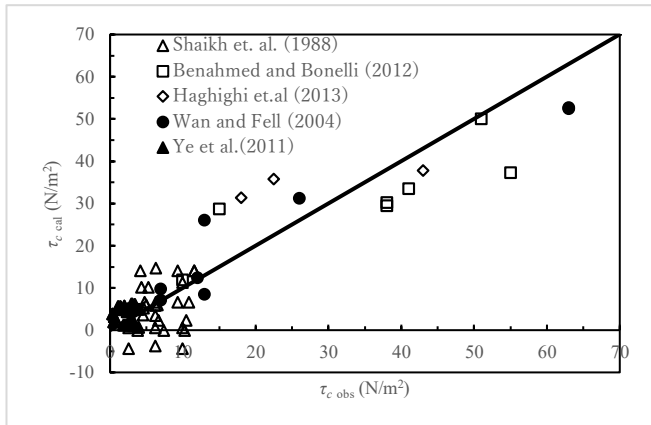


図-1 限界せん断応力の観測値と計算値の比較

検証にあたっては、侵食係数 k_d を与える必要がある. 本研究では、Simon et al.⁵⁾が提案している式(6)を用いた.

$$k_d = 0.0016\tau_c^{-0.84} \quad (6)$$

以上より式(1)を用いて侵食速度 E_{s-cal} を算出する. これと実験で観測された侵食速度 E_{s-obs} を比較する. 図-2 に比較結果を示す. なお図には、単一のパラメータによる式(2), (3), (4)を用いて算出した結果も合わせて示す.

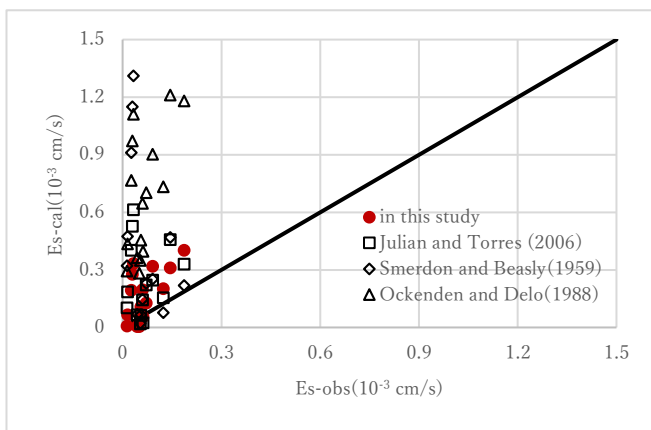


図-2 既往研究の E_{s-obs} と各種 τ_c 推定式を用いた E_{s-cal} との比較

これらの式の適用範囲は表-2 のようになる.

表-2 それぞれの提案式(式(2)–式(5))の適用範囲

論文	細粒分含有率 FC (%)	乾燥密度 ρ_d (kg/m^3)	含水比 WC (%)
Briaud et al.(2008)	67.2-97.3	1264-1700	16.1-38.9
提案式	10-100	999-1968	15-73
Julian and Torres(2006)	5-95	n.a	n.a
Smerdon and Beasley(1959)	15-57	n.a	n.a
Ockenden and Delo(1988)	34-100	50-1400	n.a
			n.a : データ無し

図-2 より、既往の単一パラメータによる予測式では計算値が観測値の 40 倍となることもある一方で、今回の提案式の計算値では最大でも観測値の 10 倍となっており、既往の式と比べると精度がおおむね良いことがわかる. このことから、複数のパラメータを組み合わせることにより侵食速度の予測精度が増すことが確かめられた.

4. 結論

本研究で提案した粘性土の限界せん断応力 τ_c の予測式と単一パラメータでの予測式を Briaud ら⁴⁾での侵食速度の観測値を用いて比較すると、単一パラメータでの予測に比べて複数のパラメータを考慮したほうが予測の精度が増すことが確認できた.

謝辞：本研究は JSPS 科研費 (JP19K04611) の助成を受けた. 記して謝意を表します.

参考文献

- 1) Hanson, G.J., Simon, A. : Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA, Journal of Hydrological Processes 15(1), 23-38, 2001.
- 2) Zhu et al. : Research on cohesive sediment erosion by flow: An overview, Science in China Series E: Technological Sciences 51(11), 2001-2012, 2008.
- 3) Hanson et al. : Lessons learned using laboratory JET method to measure soil erodibility of compacted soils, Applied Engineering in Agriculture 23(3), 305-312, 2007.
- 4) Briaud et al. : Levee erosion by overtopping in New Orleans during the Katrina Hurricane, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE, 134(5), 618-632, 2008.
- 5) Simon et al. : Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools, Geophysical Monograph Series 194, 453-474, 2011.