

模型実験による土の侵食特性の測定

長岡技術科学大学 修士2年 小野 緑
指導教員 大塚 悟

1. はじめに

堤体などの土構造物の被害要因の一つに、パイピングに伴う土の内部侵食が挙げられる。限界動水勾配や限界流速から、浸透流により土粒子が動き出すときの圧力勾配や浸透流速は知られているが、侵食の進行により、水みち発生後から規模拡大に至る侵食特性に関しては、外観からの情報が得られず、未解明な点が多い。

本研究では、地盤中の内部侵食により形成される水みち発生後から規模拡大に至るメカニズムの調査を目的として、新たに装置を開発し、模型実験 (Hole Erosion Test) ¹⁾²⁾ を実施した。実験では、各種計測データから侵食係数を求め、浸透破壊に伴う侵食特性の検討を行った。

2. 試験方法

(1) 試験装置

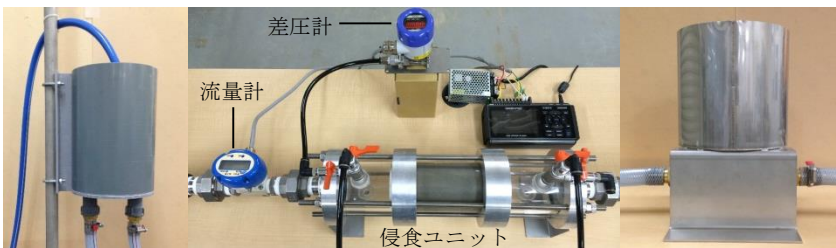
写真-1 は本研究で使用した HET 装置および模型実験の様子を示している。HET 装置は上流タンク、侵食ユニット、下流タンクの3つの部分により構成される。上流タンクは高さ調節が可能であり、下流タンクは侵食ユニットの高さを 0mm として、50mm~100mm の所定の高さに固定する。侵食ユニットはアクリル製の円筒モールドを用い、供試体を設置する中心部分の寸法は内径 80mm、外形 90mm、長さ 150mm である。水が均質に流れるように侵食ユニットの上流側にはハニカムパネル ($\phi=5\text{mm}$)、供試体表面の両側には 2mm 格子状の金属製メッシュパネルを設置した。流量および圧力差の計測には、流量計、差圧計を用い、サンプリング間隔 1s とした。

(2) 供試体作成

試料は東北硅砂 7 号 (土粒子密度 2.62g/cm^3 , 最大乾燥密度 1.62g/cm^3) 及び藤森粘土 (土粒子密度 2.67g/cm^3 , 最大乾燥密度 1.40g/cm^3) の質量比を変化させた混合土を用いた。供試体は事前に配合試験を行う試料で「突固めによる締固め試験 (JGS 0711)」を行い、最適含水比、最大乾燥密度を求めるとともに、想定した締固め度の供試体を作成するため、突固め高さ、層数を調整した。突固めには専用の締固め用円盤と突き棒を用いた。試験には締固め度 95% 以上の供試体を用い、供試体作成直後に直径 6mm の水みち孔を開け、含水比が変化しないように密閉条件の下で養生した。

(3) 侵食試験

予め水みち孔を開けた供試体に上流タンクから水を流し下流タンクから排水する。段階的に上流タンクの高さを調節し、圧力一定時に進行的な侵食が生じているデータを用いる。試験終了は流量がピーク値に達したときか、試料が剥離したときとした。試験終了後に水みち孔にパラフィンをし込み、孔と侵食面の形状、試料の流出量、侵食後の水みち直径を計測した。本研究では 3 所における侵食後の水みち直径から平均をとり、最終的な水みち直径 D_f とした。



(a) 上流タンク (b) HET装置 (c) 下流タンク
写真-1 土壤侵食システム

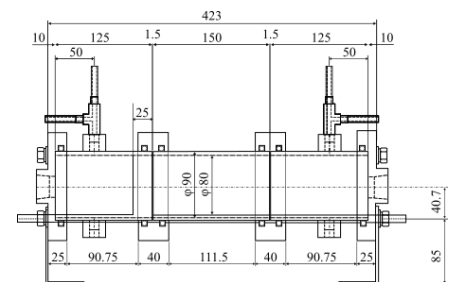


図-1 侵食ユニット

3. HET 結果の検討

本研究は、HET により流量 Q (L/min) と圧力 ΔP (kPa) を実測し、式(1)より土試料の侵食特性の評価を行う¹⁾²⁾³⁾。

$$\dot{\epsilon} = K_{er}(\tau - \tau_c) \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ (kg/s/m²)は侵食率、 K_{er} (s/m) は侵食係数、 τ (kN/m²)はせん断応力、 τ_c (kN/m²) は限界せん断応力を表す。 τ は、実測値(Q と ΔP)を用い、水みち直径の推定式(2)と(3)¹⁾より求めることができる。 $\dot{\epsilon}$ は、(4)より求める。

$$D(t) = \left(\frac{64LQ^2(t)f_b(t)}{\Delta P\pi^2} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2)$$

$$\tau(t) = \frac{D(t)\Delta P}{4L} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{\rho_d}{2} \frac{dD(t)}{dt} \quad (4)$$

ここで L (m) は動水長さ、 f_b (kg/m³)は摩擦係数、 ρ_d (kg/m³)土粒子の乾燥密度〔本研究では 1600(kg/m³)〕を表す。表 2-1 に試験ケースを示し、図 2-1 から 2-4 にデータ整理図を示す。本文では Case2 について報告する。図 2-1 は流量と圧力の時間変化を示している。一定圧力での侵食開始点を 0s とし、流量ピーク時までを示す進行的な侵食が行われた時間を記録した。約 700s に流量が一時増大し、圧力の低下がみられた。これは急激に水みち直径が拡大することで流量が増大し、供試体の侵食面に作用する圧力が減少したと考えられる。式(2)より求めた水みち直径の時間変化を図 2-2 に示す。HET は試験中の水みち直径 D を直接測定することができないため、流量の計測値と試験前後の水みち直径を基に時間ごとの水みち直径を補完している。式 (3), (4)から求めたせん断応力と侵食率の時間変化を図 2-3 に示す。せん断応力は水みち直径と圧力から求めるため図 2-2 と類似したグラフとなる。侵食率 $\dot{\epsilon}$ は単位面積あたりの侵食量を表し、流量が徐々に増加している間は侵食率が増加し、流量が徐々に収束する増加グラフでは侵食率が減少するのだが、今回は、流量収束前に実験を終了したため、侵食率は増加傾向のみの記録である。図 2-4 はせん断応力 τ と侵食率 $\dot{\epsilon}$ の関係を示している。せん断応力の増加に伴い侵食率が増加していることが進行的な侵食が生じている条件といえる。限界せん断応力 τ_c はこのグラフを線形近似し、侵食率 0 の時点でのせん断応力が限界せん断応力である。表 2 に、試験より得られた侵食係数と限界せん断応力を示す。侵食係数は値が小さいほど侵食に対して強く、値が大きいほど侵食に対して弱いことを意味する。砂の配合比が多いほど侵食係数が大きく、砂の配合比が少ないほど侵食係数が小さかったことから、土の侵食特性を数値化することができた。限界せん断応力に関しては、Case1 が Case2 より大きい値を示した。よって、砂の配合比の多い場合の試験方法の見直しが必要であることが分かった。

4. まとめ

本研究では、土の内部侵食を模擬的に発生させ、土の侵食特性を定量化するため、模型実験装置を開発し、HET を実施した。侵食に関するパラメータとしてせん断応力と侵食率から侵食係数を求めることができた。現在扱っている試験機より高い水圧をかけ、強い供試体の測定を可能にするため、ポンプの導入を検討する必要がある。

参考文献

1) Haghghi, Iman, et al. "Improvement of hole erosion test and results on reference soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139.2 (2012): 330-339. 2) Wan, Chi Fai, and Robin Fell. "Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130.4 (2004): 373-380. 3) Wan, Chi Fai, and Robin Fell. "Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams." *Geotechnical Testing Journal*, vol.27, no.3, (2004):295-303 dams.

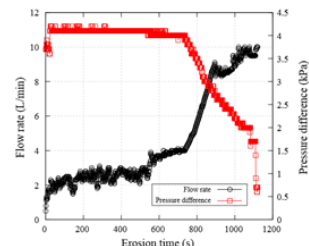


図 2-1 流量と圧力の時間変化

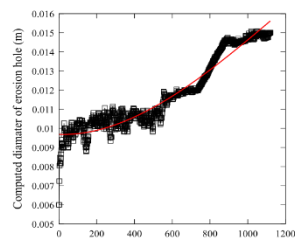


図 2-2 水みち孔の時間変化

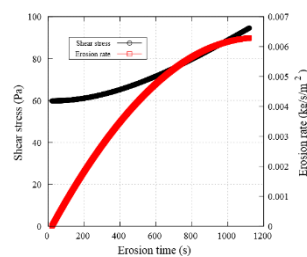


図 2-3 せん断応力と侵食率の時間変化

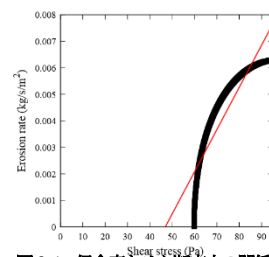


図 2-4 侵食率とせん断応力の関係

表 2-1 試験ケース

ケース	質量比 (砂 : 粘土)	含水比[%]
Case1	2:1	15
Case2	1.5:1	14
Case3	1:1	13

表 2-2 HET 試験結果

ケース	K_{er}	τ_c
Case1	1.4×10^2	65.0
Case2	2.0×10^4	47.9
Case3	7.0×10^5	244