

内部浸食の構成式と実験結果への適用性の検討

京都大学大学院 学生会員 ○赤木 俊文
京都大学大学院 正会員 木元 小百合

1. はじめに

内部浸食はその名の通り地盤内部で生じる浸食である。特に間隙水の流れに起因する地盤中の細粒分の移動現象については実験とモデリングの両面から研究が進められている。間隙水による土粒子移動の多相混合理論に基づいたモデルいくつか提案されている¹⁾。これらのモデル中では土粒子が流動化する条件および流動化する速さを規定する構成式が必要となる。これらの構成式の多くは土粒子の流動化条件と速さを動水勾配に依存させているが、木元ら(2016)²⁾はより物理的合理性を有するとして多相混合理論における固相-液相間の相互作用力を変数とした内部浸食の構成式を提案している。本研究は木元ら(2016)による構成式を、特に土粒子流動化の速度に関して改良を行い、実験結果への適用性を高めたものである。

2. 内部浸食の構成式

提案するモデルでは内部浸食速度が次式で与えられる。

$$\dot{m}^S = -\alpha \left(\frac{R}{R_{cr}} \right) \exp \left\{ -\beta \left(1 - \frac{m_{er}^S}{m_{er0}^S} \right) \right\} m_{er}^S \quad \text{if } R \geq R_{cr} \quad (1) \quad m_{er0}^S = r_{er} m_0^S, \quad m_{er}^S = m^S - (1 - r_{er}) m_0^S \quad (2)$$

ここに、 m^S と m_0^S は土粒子の質量とその初期値、 R と R_{cr} は固相-液相間の相互作用力の大きさとその限界値である。 α は材料パラメータ、 r_{er} は土粒子の内浸食を受け得る土粒子の割合を表し、一般には動水勾配や R などの浸食を駆動する力、有効応力に依存して変化する。相互作用力 R はダルシー流を仮定すると $P = -(n\rho^L g/k^L)w^w$ で与えられる。 ρ^L は間隙流体の密度、 g は重力加速度、 n は間隙率、 k^L は透水係数である。 R が限界値を超えると、式(1)に従って浸食速度が与えられる。相互作用力の大きさ R はダルシー流を仮定することで流量と結びつく。本モデルの特徴は次の2点である。(1)浸食速度を相互作用力 R と限界値との比に比例させる。(2)浸食速度を m_{er}^S だけでなく $\exp\{-\beta(1-m_{er}^S/m_{er0}^S)\}$ に比例させる。まず(1)は内部浸食を伴う浸透実験で見られる、浸食開始時に不連続的に浸食速度が増加する挙動を表現するためである。(2)については、図1に示すKe and Takahashi (2014)³⁾による suffusion 試験結果 (Suffusion: 細粒分の移動現象)から作成した浸食土粒子割合 - 浸食速度関係が根拠となる。浸食速度の対数値と浸食土粒子割合の関係が比較的良く直線で近似できることが分かる。図2に実験の概要図を示す。彼らの試験では粒径が極端に異なるケイ砂3号-8号混合砂試料に対して透水試験を行い、ケイ砂8号が流出している。この試験では供試体上部から流入させる水の流量を図3のように制御している。示したグラフはケイ砂含有率15%、25%、35%の試料に対する実験結果である。 m_{er}^S の項を残したのは、 $m_{er}^S \rightarrow 0$ のとき、連続的に $\dot{m}^S \rightarrow 0$ となる方が自然と考えたためである。

3. 要素シミュレーションと実験結果との比較

先に述べたKe and Takahashi(2014)による suffusion 試験への適用性を検討する。図3に示した流量を入力として、式(1)、(2)による要素シミュレーションを行った。シミュレーションでは内部浸食の構成式、土粒子の質量保存則(式(3))、Kozeny-carmanの式(式(4))、を用いる。

$$\dot{e} = -(1+e^2) \frac{\dot{m}^S}{\rho^S} \quad (3) \quad \frac{k^L}{k_0^L} = \frac{1+e_0}{1+e} \frac{e^3}{e_0^3} \quad (4)$$

ここに e および e_0 は間隙比、 ρ^S は土粒子密度、 k^L および k_0^L は透水係数とその初期値である。表1に用いた提案モデルに用いた材料パラメータを示す。図4に排出土粒子割合の時刻歴を示す。(a)は従来モデルによる結果、(b)は今回提案するモデルである。 r_{er} は実験における排出土粒子割合の最終値と合うように決定した。(b)では比較のためとして $\exp\{-\beta(1-m_{er}^S/m_{er0}^S)\}$ を導入しない($\beta=0.0$)の計算結果も示している。従来のモデルに比較して、提案したモデルは各ケースとも実験結果を良く表現できている。特にCase-25、Case-35に関して

キーワード 内部浸食, 浸食速度, 内部浸食構成式

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂CクラスターC1棟 587

は同一の α, β で表現実験結果を表現することができた. また Case-25, Case-35 では $\exp\{-\beta(1-m_{er}^S/m_{er0}^S)\}$ の効果が大きいことも分かる.

4. 結論と今後の課題

本研究では新たな内部浸食の構成式を提案し, suffusion 試験の要素シミュレーションを行い, 構成式の適用性を検討した. 今回対象とした実験に関しては, 提案した構成式により実験結果を良く表現できることが分かった. 今後は他の実験にも同様に適用可能か検討していく予定である.

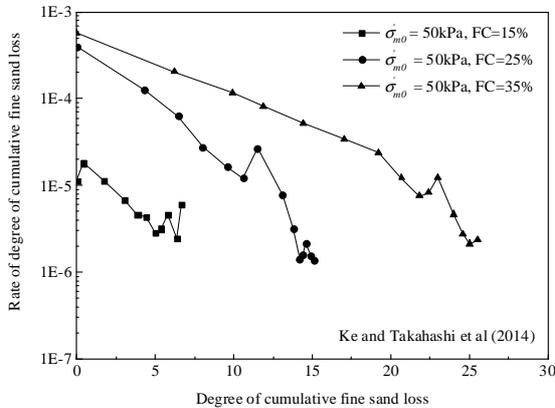


図1 排出土粒子の割合 - 排出土粒子速度の関係 (Ke and Takahashi 2014)

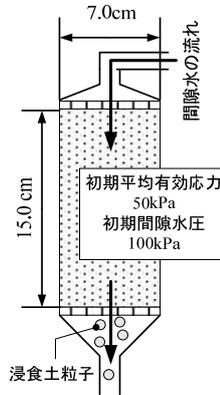


図2 suffusion 試験の概要

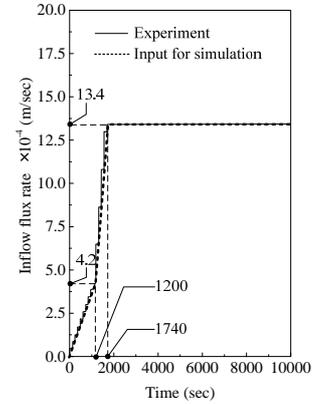


図3 水の単位面積あたりのフラックス時刻歴

表1 提案モデルの材料パラメータ

材料パラメータ名称	Case-15(FSC=15%)	Case-25(FSC=25%)	Case-35(FSC=35%)
初期間隙比 e_0	0.68	0.61	0.59
初期透水係数 k_0^W (m/s)		1.0×10^{-4}	
材料パラメータ α (1/s)	1.0×10^{-4}		5.0×10^{-3}
材料パラメータ β	0.2		3.8
限界相互作用力 R_{cr} (kN/m ³)		13.0	
内部不安定な土粒子の含有率 r_{er}	0.066	0.151	0.255

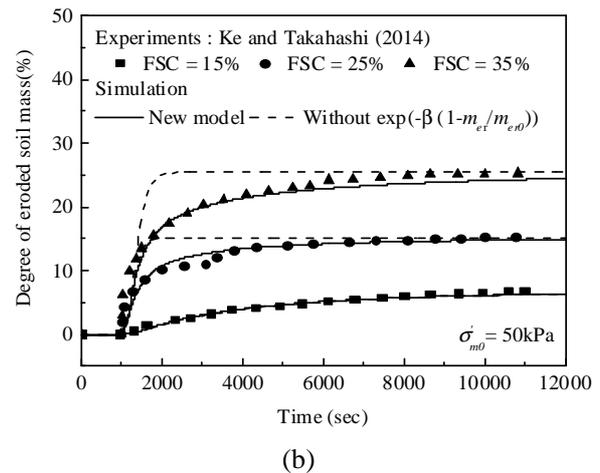
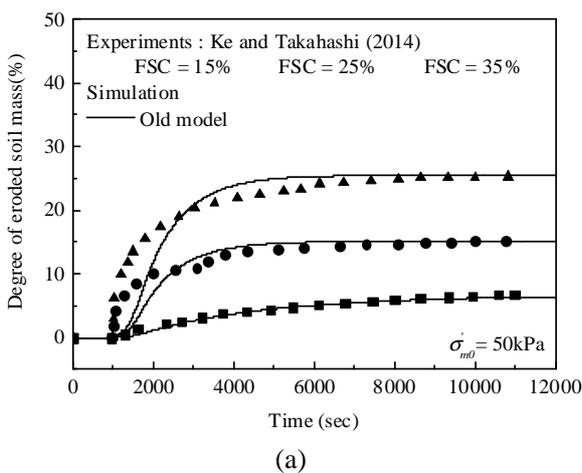


図4 排出土粒子割合の時刻歴

参考文献

1) Steeb, H., Diebels, S., and Vardoulakis, I. *Proceedings of International Symposium on Trends in Application of Mathematics to Mechanics, STAMM*, pp.519-528, 2004. 2) 木元小百合, Benjamin Loret, 岡二三生, 赤木俊文. 日本材料学会第 65 期学術講演会, 2016. 3) Ke, L., & Takahashi, A. *Soils and Foundations*, 54(4), pp.713-730, 2014.