

文章编号: 1674-9057(2017)03-0429-08

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2017.03.006

论红黏土有效孔隙比的确定方法

李善梅, 刘之葵, 牟春梅, 蒙剑坪, 何添杰, 陈佳雨, 龚 源

(桂林理工大学 a. 土木与建筑工程学院; b. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 红黏土有效孔隙小于实际孔隙, 导致传统 Darcy 渗透公式计算值较实际值偏大, 研究红黏土有效孔隙比的计算方法对红黏土的渗透系数计算具有重要意义。介绍了稠度指标法、起始坡降法、双电层参数法、饱和土样质量法、结合水含量法、 m 指数法以及自行推导的击实度法等 7 种有效孔隙比的计算方法, 并分析了其优缺点。计算不同有效孔隙比方法的 Darcy 渗透系数, 结合 56 组变水头渗透试验结果, 验证了有效孔隙比计算方法在红黏土中的适用性。结果表明, 应根据红黏土渗透性的大小, 选择不同的有效孔隙比计算方法。

关键词: 红黏土; 有效孔隙比; 渗透系数; Darcy 定律

中图分类号: TU43; TU446

文献标志码: A

0 引 言

红黏土广泛分布于北纬 30° 与南纬 30° 之间, 其矿物多为片状或扁平状, 颗粒细小, 由于粘土矿物带电性以及存在大量胶结物, 导致黏土颗粒之间相互咬合形成团聚体。粘土矿物的特殊性, 决定了其孔隙结构较粗颗粒土复杂。黏土中存在的孔隙包括 4 类: 通道孔隙、封闭孔隙、死端孔隙、结合水膜占据的孔隙。其中, 通道孔隙为有效孔隙, 后 3 者为无效孔隙, 孔隙类型如图 1 所示。

设土粒体积为 v_s , 总的孔隙体积 v_v , 封闭孔隙体积 v_f , 死端孔隙体积 v_d , 结合水膜占据的孔隙体积 v_j , 有效孔隙体积 v_u , 则

$$v_u = v_v - v_f - v_d - v_j. \quad (1)$$

根据孔隙比的定义, 可知有效孔隙比

$$e_u = \frac{v_u}{v_s} = \frac{v_v - v_f - v_d - v_j}{v_s}. \quad (2)$$

目前, 无法精确测量及计算 v_f 、 v_d 、 v_j 。有效孔隙比的计算方法均为估算法, 如稠度指标法、起始

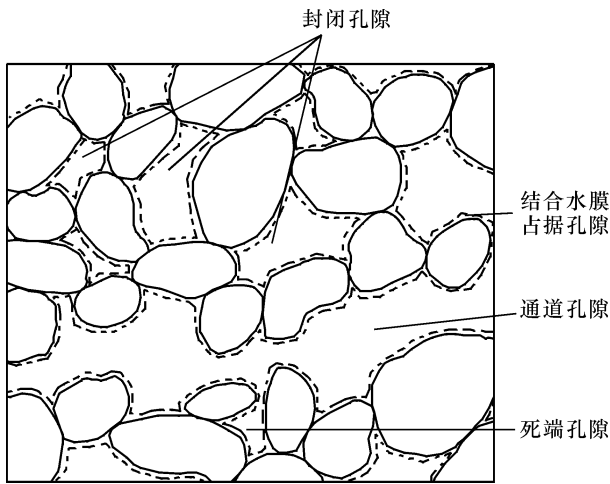


图 1 土体中孔隙类型
Fig. 1 Pore types in soil

坡降法、双电层参数法、饱和土样质量法、结合水含量法、 m 指数法等^[1-4]。以上各种方法均有其优点与不足, 将在下文中进行详细论述。

有效孔隙即为水能在其中流动的孔隙^[5-7]。有效孔隙的大小、分布情况是影响土体渗透性的重要

收稿日期: 2017-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51169004); 广西岩土力学与工程重点实验室基金项目 (2015-A-01); 广西高校科研项目 (KY2015ZD055); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目

作者简介: 李善梅 (1983—), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 岩土工程, 63719794@qq.com。

通讯作者: 刘之葵, 博士, 教授, liuzhikui@126.com。

引文格式: 李善梅, 刘之葵, 牟春梅, 等. 论红黏土有效孔隙比的确定方法[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 429-436.

因素。有效孔隙与土体的渗透性有一定联系。现有的渗透系数经验公式,如太沙基渗透系数公式、中国水利水电科学研究院渗透系数公式、柯森-卡门渗透系数公式、用固结度表示的渗透系数公式、斯托克斯孔隙流渗透系数公式、Darcy 渗透系数经验公式等^[8-11],反映了渗透系数与孔隙比的关系。以上经验公式均源自粗粒土的渗透规律。由于粗粒土中极少存在无效孔隙,所以粗粒土的渗透公式反映水在有效孔隙中渗流的能力。

红黏土团聚体内部、团聚体之间都存在大量的无效孔隙,若直接用现有经验公式计算红黏土的渗透系数,将导致计算结果与实际值偏差较大。可见,有效孔隙比的正确估算是红黏土渗透系数计算的关键。

1 有效孔隙比的计算方法

1.1 现有的计算方法

1.1.1 稠度指标法^[1]

$$e_u = e - \alpha_0 \frac{\rho_s}{\rho_w} w_L, \tag{3}$$

式中: e 为土体的孔隙比; e_u 为有效孔隙比; α_0 为结合水占液限的比例系数,是黏性土中结合水的质量占土体刚好为液限时孔隙水总质量的比例; ρ_s 为土颗粒密度; ρ_w 为水密度; w_L 为液限含水率。

该方法计算简单,但仅考虑了结合水膜占据的孔隙,且式(3)中 α_0 难以确定,液限含水率的试验结果也往往因人而异,这些因素均会引起式(3)计算有效孔隙比的误差。

1.1.2 起始坡降法^[1,12] 由于黏土中的土粒周围存在一层结合水膜,水在黏土中渗流需要克服起始水力坡降。渗透过程中做功的水力坡降称为有效水力坡降

$$i_u = i - i_0. \tag{4}$$

式中: i_u 为有效水力坡降; i 为总的水力坡降; i_0 为起始水力坡降。

为了构建起始水力坡降与有效孔隙比之间的关系,将有效水力坡降分别代入各渗透系数经验公式。

1) 太沙基渗透系数经验公式计算有效孔隙比

$$e_u = e \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)^{1/2}. \tag{5}$$

2) 中国水利水电科学研究院渗透系数经验公

式计算有效孔隙比

$$e_u = \frac{1}{1 - \frac{e}{1+e} \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)^{1/3}} - 1. \tag{6}$$

3) 柯森-卡门渗透系数经验公式计算有效孔隙比

$$e_u = \sqrt[3]{\frac{e^3 \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)}{2(1+e)} + \sqrt{\frac{e^6 \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)^2}{4(1+e)^2} - \frac{e^9 \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)^3}{27(1+e)^3}}} + \sqrt[3]{\frac{e^3 \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)}{2(1+e)} - \sqrt{\frac{e^6 \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)^2}{4(1+e)^2} - \frac{e^9 \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)^3}{27(1+e)^3}}}. \tag{7}$$

4) 固结度渗透系数经验公式计算有效孔隙比

$$e_u = (1+e) \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)^{-1} - 1. \tag{8}$$

5) 斯托克斯渗透系数经验公式计算有效孔隙比

$$e_u = \frac{1}{1 - \frac{e}{1+e} \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)} - 1. \tag{9}$$

6) 达西渗透系数经验公式计算有效孔隙比

$$e_u = \frac{e^2 \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)}{2(1+e)} + \sqrt{\frac{e^2 \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)}{1+e} + \frac{e^4 \left(1 - \frac{i_0}{i} \right)^2}{4(1+e)^2}}. \tag{10}$$

式(5)~(10)计算有效孔隙比的推导过程详见文献[1]。起始坡降法计算有效孔隙比的困难是起始坡降的测量,且计算过程较复杂。

1.1.3 双电层参数法^[11] 该方法认为无效孔隙是双电层占据的孔隙,双电层的厚度可以利用双电层理论计算。

$$e_u = e - \frac{1}{E_0 v} \left(\frac{\lambda' k_0 T}{8 \pi n_0} \right)^{1/2} s. \tag{11}$$

式中: E_0 为电荷静电单位, 4.8×10^{-10} esu; v 为电荷离子价; λ' 为弱结合水膜介质的介电常数,取值 80; k_0 为波尔兹曼常数, $k_0 = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; T 为绝对温度; n_0 为零电位时的离子浓度; s 为黏土颗粒的比表面积。

假设土颗粒为球型,直径为 d ,式(11)可整理为

$$e_u = e - \frac{6}{d E_0 v} \left(\frac{\lambda' k_0 T}{8 \pi n_0} \right)^{1/2}. \tag{12}$$

式(12) 适用于孔隙中溶液离子为单一对称的条件。红黏土中矿物成分多样,其所带电性及电荷量均随环境的变化而改变,传统的双电层理论的适用性有待商榷,故式(11) 与(12) 计算红黏土有效孔隙比尚有待研究。

1.1.4 结合水含量法 该方法认为土体中的无效孔隙为结合水膜占据的孔隙,根据文献[3],笔者推导出有效孔隙比为

$$e_u = \frac{e(1 - P_{bw})}{1 + eP_{bw}} \quad (13)$$

其中: P_{bw} 为土体中结合水的含量。

利用离心试验测量土体中结合水的含量,但是,实际操作中难以判断被离心机分离出来的水中结合水所占的比例,此外,该方法未考虑死端孔隙与封闭孔隙对有效孔隙的影响,理论不严谨。

1.1.5 饱和土样质量法 该方法是笔者借用文献[2] 孔隙率的计算方法而提出,利用土颗粒、无效孔隙在水中受到浮力作用,而土体有效孔隙在水中不受浮力作用的原理。设 m_1 为饱和土样在干燥状态时的质量, m_2 为饱和土样在浸水状态时的质量, v_0 为土样的总体积, v_u 为有效孔隙体积, w_{sat} 为饱和土含水率,则土样在水中所受浮力作用的体积为

$$v_{浮} = v_0 - v_u, \quad (14)$$

土样所受浮力为

$$F_{浮} = \rho_w \cdot v_{浮} \cdot g; \quad (15)$$

将式(14) 代入式(15), 得

$$F_{浮} = \rho_w \cdot (v_0 - v_u) \cdot g, \quad (16)$$

根据受力平衡原理可知

$$F_{浮} = (m_1 - m_2) \cdot g. \quad (17)$$

有效孔隙比为

$$e_u = v_u/v_s; \quad (18)$$

将式(14) ~ (17) 分别代入式(18), 得

$$e_u = e + 1 - \frac{(m_1 - m_2)(1 + w_{sat})\rho_w}{\rho_w \cdot m_1}. \quad (19)$$

该方法操作简单,但是土样在浸水过程中容易发生损伤,造成误差。

1.1.6 m 指数法^[4] 通过统计大量的实验数据,发现有效孔隙与总孔隙之间存在指数关系

$$e_u = e\left(\frac{e}{1 + e}\right)^m, \quad (20)$$

m 为系数: 砂土中, $m = 0 \pm 0.1$; 粉土中, $m = 1.0 \pm 0.2$; 黏土中, $m = 1.5 \pm 0.5$ 。

1.2 新计算方法的推导——击实度法

对相同的土, 击实度越低, 土样的密度越小, 孔隙比越大, 且有效孔隙所占总孔隙的比例越大。假设在击实过程中, 土颗粒不破坏且不发生不可恢复的变形, 被压缩土样的体积来自土体孔隙被压缩以及细小颗粒滑移错位后释放的无效孔隙的体积之和, 则可认为最大击实度条件下, 土体所有可以压缩的孔隙均被压缩, 即: 最大压实度条件下对应的孔隙均为无效孔隙。记土体的最大干密度为 ρ_{dmax} , 最优含水率 w_{op} , 单位质量土体积 v_s' 为

$$v_s' = \frac{1}{(1 + w_{op})\rho_{dmax}}; \quad (21)$$

单位质量土粒体积 v_s'' 为

$$v_s'' = \frac{1}{(1 + w_{op})\rho_s}; \quad (22)$$

则最大击实度条件下对应的孔隙比为

$$e_{max} = \frac{v_s' - v_s''}{v_s''} = \frac{\rho_s}{\rho_{dmax}} - 1; \quad (23)$$

则有效孔隙比为

$$e_u = e - \frac{v_s' - v_s''}{v_s''} = e - \frac{\rho_s}{\rho_{dmax}} + 1. \quad (24)$$

该方法假设条件合理, 推导过程思路清晰, 其缺点是土体的最大干密度难以精确确定, 但可求得有效孔隙比的近似解。

1.3 7种有效孔隙比计算方法的比较

上述的7种有效孔隙比计算方法中, 前4种方法有不同的名称, 却有相同的本质——考虑结合水膜对无效孔隙的贡献, 忽略存在于红黏土中的大量封闭孔隙及死端孔隙对无效孔隙的贡献。饱和土样质量法利用封闭孔隙及土粒浮力的作用原理, 却无法计算通道孔隙的影响, 依然存在理论缺陷; m 指数法是根据大量试验数据得出的经验公式, 缺乏理论依据, 在红黏土有效孔隙比计算中的应用有待验证; 击实度法来源于细粒土击实性, 理论依据清晰, 计算参数简单, 具有可操作性, 但最大干密度的准确计算是该方法使用的难点。综上所述, 以上7种有效孔隙比的计算方法各有优缺点, 在计算红黏土有效孔隙比中的适用性均有待进一步验证。

2 基于有效孔隙比的 Darcy 渗透系数经验公式

Darcy 渗透系数经验公式是最为常用的渗透系

数计算公式之一, 本文将结合不同有效孔隙比 - Darcy 渗透经验公式计算红黏土的渗透系数, 验证有效孔隙比计算方法在红黏土中的适用性。

Darcy 渗透系数经验公式为

$$k = \frac{\beta \gamma_{wz} d^2 e^2}{\lambda \eta (1 + e)}, \tag{25}$$

式中: β 为土颗粒的球体系数, 当土粒为圆球时, $\beta = \pi/6$; γ_{wz} 为孔隙溶液重度, kN/m^3 ; d 为颗粒的粒径, cm ; λ 为邻近颗粒的影响系数, 一般取 3π ; e 为孔隙比; η 为孔隙溶液的粘滞系数。

在红黏土中, 存在大量电荷以及细小胶结物, 粘土矿物往往以团聚体的形式存在。假设土体团聚体为均质体, 直径为 d 。取 1 g 土, 含水率为 w , 土体密度为 ρ , 土颗粒密度为 ρ_s , 则每个颗粒团聚体的表面积为 πd^2 , 每个颗粒团聚体的体积为 $\pi d^3/6$, 由土力学三相指标定义可知, 1 g 土体中土颗粒的体积为

$$v_s = \frac{1}{(1 + w)\rho_s}; \tag{26}$$

1 g 土体中包含的土颗粒团聚体个数

$$M = \frac{v_s}{\pi d^3/6} = \frac{6}{(1 + w)\rho_s \pi d^3}; \tag{27}$$

1 g 土的比表面积

$$s = \frac{M \pi d^2}{1} = \frac{6}{(1 + w)\rho_s d} \tag{28}$$

由式(28)可以计算土颗粒的平均直径

$$d = \frac{6}{(1 + w)\rho_s s}, \tag{29}$$

又有

$$(1 - n)\rho_s = \rho_d; \tag{30}$$

$$(1 + w)\rho_d = \rho_o. \tag{31}$$

将式(30)、(31)代入式(29), 得

$$d = \frac{6}{(1 + e)\rho_s}. \tag{32}$$

将式(32)代入式(25), 得

$$k = \frac{36\beta \gamma_{wz} e^2}{\lambda \eta \rho^2 s^2 (1 + e)^3}. \tag{33}$$

由于自由水只在有效孔隙中发生渗透, 式(33)可以修改为

$$k = \frac{36\beta \gamma_{wz} e_u^2}{\lambda \eta \rho^2 s^2 (1 + e_u)^3}. \tag{34}$$

分别将前文所述的7种有效孔隙比计算公式代入式(34), 可整理得7种不同有效孔隙比 - Darcy 渗透系数经验计算公式。

① 稠度指标法 - Darcy 渗透系数经验公式。将式(3)代入式(34), 得

$$k = \frac{36\beta \gamma_{wz} \left(e - \alpha_o \frac{\rho_s}{\rho_w} w_L \right)^2}{\lambda \eta \rho^2 s^2 \left(1 + e - \alpha_o \frac{\rho_s}{\rho_w} w_L \right)^3}. \tag{35}$$

② 起始坡降法 - Darcy 渗透系数经验公式。将式(10)代入式(34), 得

$$k = \frac{36\beta \gamma_{wz} e^2}{\lambda \eta \rho^2 s^2 (1 + e)^3} \left(1 - \frac{i_o}{i} \right). \tag{36}$$

③ 双电层参数法 - Darcy 渗透系数经验公式。将式(12)代入式(34), 得

$$k = \frac{36\beta \gamma_{wz} \left[e - \frac{1}{E_o v} \left(\frac{\lambda' k_o T}{8 \pi n_o} \right)^{1/2} s \right]^2}{\lambda \eta \rho^2 s^2 \left[1 + e - \frac{1}{E_o v} \left(\frac{\lambda' k_o T}{8 \pi n_o} \right)^{1/2} s \right]^3}. \tag{37}$$

④ 结合水含量法 - Darcy 渗透系数经验公式。将式(13)代入式(34), 得

$$k = \frac{36\beta \gamma_{wz} (1 + e P_{bw}) e^2 (1 - P_{bw})^2}{\lambda \eta \rho^2 s^2 (1 + e)^3}. \tag{38}$$

⑤ 饱和土样质量法 - Darcy 渗透系数经验公式。将式(19)代入式(34), 得

$$k = \frac{36\beta \gamma_{wz} \left[e + 1 - \frac{(m_1 - m_2)(1 + w_{sat})\rho_s}{\rho_w \cdot m_1} \right]^2}{\lambda \eta \rho^2 s^2 \left[e + 2 - \frac{(m_1 - m_2)(1 + w_{sat})\rho_s}{\rho_w \cdot m_1} \right]^3}. \tag{39}$$

⑥ m 指数法 - Darcy 渗透系数经验公式。将式(20)代入式(34), 得

$$k = \frac{36\beta \gamma_{wz} e^{2m+2} (1 + e)^m}{\lambda \eta \rho^2 s^2 [(1 + e)^m + e^{(m+1)}]^3}. \tag{40}$$

⑦ 击实度法 - Darcy 渗透系数经验公式。将式(24)代入式(34), 得

$$k = \frac{36\beta \gamma_{wz} \left(1 + e - \frac{\rho_s}{\rho_{dmax}} \right)^2}{\lambda \eta \rho^2 s^2 \left(2 + e - \frac{\rho_s}{\rho_{dmax}} \right)^3}. \tag{41}$$

式(35) ~ (41) 为用不同有效孔隙比计算方法表达考虑有效孔隙比的 Darcy 渗透系数经验公式。

3 红黏土渗透试验及有效孔隙比计算方法验证

3.1 渗透试验

本组试验所用的红黏土取自桂林理工大学雁

山校区教工宿舍三期工程工地。红黏土风干，碾碎，过 2 mm 筛，用去离子水调制不同含水率的土样，装入保鲜袋密封，放入保湿缸中，静置 24 h 后取出，用千斤顶压制不同密度、不同含水率的 $\Phi 6.18\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 环刀样，依次编号。将 1 ~ 23 号土样固定在饱和器上，利用蒸馏水饱和。为了比较离子类型及浓度对红黏土渗透性的影响，利用不同溶液对红黏土进行渗透。分别配制浓度为 0、0.05、0.1、0.2 mol/L，种类包括 CaCl_2 、 NaCl 、 AlCl_3 、 HCl 、 NaOH 、 NaF 、 NaNO_3 、 Na_2CO_4 、 Na_3PO_4 、尿素、 Na_2SO_4 、 NaH_2PO_4 等的不同溶液。按照《土工试验规程》（SL 237—1999）中的变水头试验方法安装试样，分别利用已配置好的溶液进行变水头渗透试验，测试溶液、土样初始密度及含水率对红黏土渗透性的影响。1 ~ 12 号土样进行不同浓度溶液的变水头渗透试验；13 ~ 23 号土样进行蒸馏水的渗透试验。1 ~ 12 号土样，按照浓度由低到高依次对土样进行渗透试验，试验编号也由低到高。如 1 号土样，先用浓度为 0 的溶液即蒸馏水进行渗透试验，试验编号记为 1，待蒸馏水渗透试验结束后，土样保持不变，以浓度为 0.05 mol/L CaCl_2 溶液替换蒸馏水，渗透速度稳定后测试 0.05 mol/L CaCl_2 溶液在土样中的渗透速度，试验编号记为 2；待 0.05 mol/L CaCl_2 溶液在土样中的渗透试验结束后，按照相同的方法依次做 0.1、0.2 mol/L CaCl_2 溶液在土样中的渗透试验，试验编号分别记为 3、4。其他溶液的渗透试验方法及试验编号以此类推。土样型号及试验项目如表 1 所示。

试验过程中，发现 0.1、0.2 mol/L NaF 溶液以及 0.2 mol/L Na_3PO_4 溶液在土样中难以下渗，无法测试其渗透系数。同时，按照表 1 的参数，进行平行试验，测试不同溶液渗透后土的密度、含水率、比重，计算土样的孔隙比。

3.2 渗透试验结果及分析

对 23 个试样进行渗透试验，共计 56 组渗透试验结果。1 ~ 12 号土样的盐溶液渗透系数计算结果如图 2；13 ~ 23 号土样的蒸馏水渗透系数计算结果如图 3 所示；按照试验编号排序，56 组试验所得渗透系数如图 4 所示。

由图 2、图 3 可知，所测得红黏土的渗透系数分布范围为 $10^{-9} \sim 10^{-4}\text{ cm/s}$ ，受土样含水率、压实力、溶液浓度及类型等多项因素的共同作用。

表 1 试样规格及试验项目				
Table 1 Soil sample size and test items				
试验 编号	土样 编号	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水 率/%	渗透溶液浓度及类型
1 ~ 4	1	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L CaCl_2
5 ~ 8	2	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L NaCl
9 ~ 12	3	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L AlCl_3
13 ~ 16	4	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L HCl
17 ~ 20	5	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L NaOH
21 ~ 22	6	1.33	28	0、0.05 mol/L NaF
23 ~ 26	7	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L NaNO_3
27 ~ 30	8	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L Na_2CO_3
31 ~ 33	9	1.33	28	0、0.05、0.1 mol/L Na_3PO_4
34 ~ 37	10	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L 尿素
38 ~ 41	11	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L Na_2SO_4
42 ~ 45	12	1.33	28	0、0.05、0.1、0.2 mol/L NaH_2PO_4
46	13	1.37	28	蒸馏水
47	14	1.33	28	蒸馏水
48	15	1.29	28	蒸馏水
49	16	1.24	28	蒸馏水
50	17	1.2	28	蒸馏水
51	18	1.16	28	蒸馏水
52	19	1.44	34	蒸馏水
53	20	1.44	31	蒸馏水
54	21	1.44	28	蒸馏水
55	22	1.44	25	蒸馏水
56	23	1.44	22	蒸馏水

注：干密度与含水率均为压制土样时的初始参数。

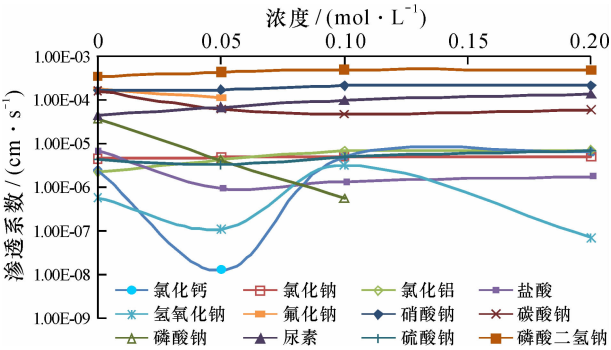


图 2 渗透系数试验结果 (1)

Fig. 2 Result of permeability coefficient Test 1

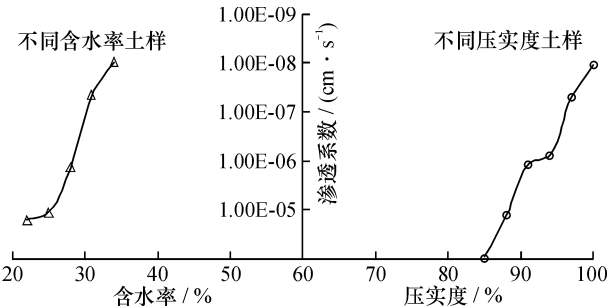


图 3 渗透系数试验结果 (2)

Fig. 3 Result of permeability coefficient Test 2

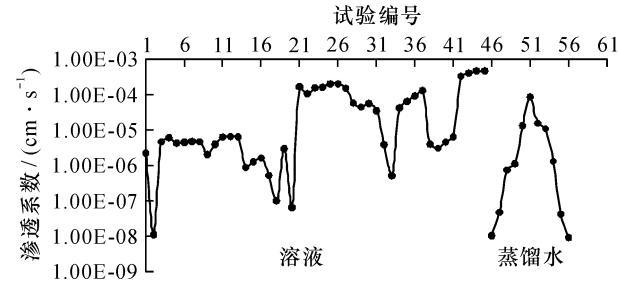


图4 渗透系数试验结果

Fig. 4 Result of permeability coefficient test

(1) 盐溶液对渗透系数的影响。1~12 号土样的初始密度、含水率、制样方法相同,如图 2 所示,红黏土的渗透性受盐溶液的浓度及类型的影响。如 1 号土样用蒸馏水所测得的渗透系数为 2.3×10^{-6} cm/s; 土样保持不动,将溶液改为 0.05 mol/L CaCl_2 溶液,待渗透速度稳定后测得其渗透系数降低为 1.17×10^{-8} cm/s。溶液对红黏土渗透系数的影响主要是通过离子作用改变红黏土扩散层厚度,使黏土颗粒团聚或分散,改变原有孔隙的性质,进而改变其渗透性。其影响规律为:离子浓度降低、价位减小,黏土颗粒扩散层变厚,土颗粒分散,渗透系数减小;反之,土颗粒聚凝,渗透系数增大。限于篇幅与内容范围,各种离子对红黏土的渗透性影响机理不在本文论述之列。

(2) 土样初始含水率及初始密度对渗透性的影响。如图 3 所示,蒸馏水渗透作用下,含水率相同的土样的渗透系数随土样密度的减小而增大;相同干密度的土样,随含水率的减小渗透系数先降低后增高。由黏土的击实性可知,干密度越大,土中孔隙越小;击实功相同的条件下,含水率越接近最优含水率,土越容易击密实,渗透系数越小。

3.3 红黏土有效孔隙比计算方法验证

有效孔隙比无法测试,可根据有效孔隙比 - Darcy 定律计算渗透系数与实测值最接近的原则,确定红黏土有效孔隙比计算方法。

利用有效孔隙比 - Darcy 定律计算渗透系数,须计算各土样的孔隙比、液限、比表面积,再将相应参数代入有效孔隙比 - Darcy 定律渗透系数计算公式。

3.3.1 红黏土孔隙比的计算 根据渗透试验过程中平行试验测试的土样密度、含水率、比重,结合土的三相比例指标换算公式,计算渗透后土样的孔隙比,结果如图 5 所示。

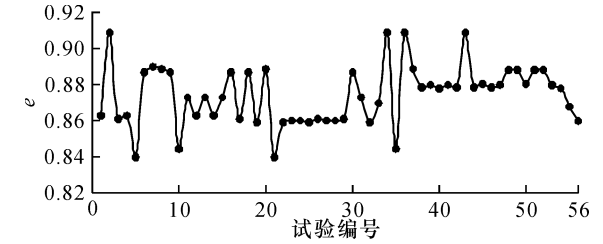


图5 土样孔隙比
Fig. 5 Void ratio of soil

比较图 4、图 5 发现,孔隙比的大小不一定与渗透系数成正相关关系,如 33 号试验的渗透系数为 5.35×10^{-7} cm/s,孔隙比为 0.889 9,而 45 号试验渗透系数为 $4.723 5 \times 10^{-4}$ cm/s,孔隙比为 0.878。可见,孔隙比越大,渗透系数并非越大,进一步说明红黏土有效孔隙比的准确计算对渗透性计算的重要性。

3.3.2 红黏土液限及比表面积试验 将各渗透土样烘干、磨碎,过 0.5 mm 筛,利用液塑限测定仪测试不同浓度溶液渗透后红黏土的液塑限;同时,利用亚甲基蓝滴定法测试其比表面积。不同浓度溶液渗透后红黏土的液限以及比表面积试验结果分别如图 6、图 7 所示。

3.3.3 有效孔隙比 - Darcy 定律计算红黏土渗透系数 将试验温度、粘滞系数、溶液重度、比表面积、液限、土样高度、孔隙比等各参数分别代入

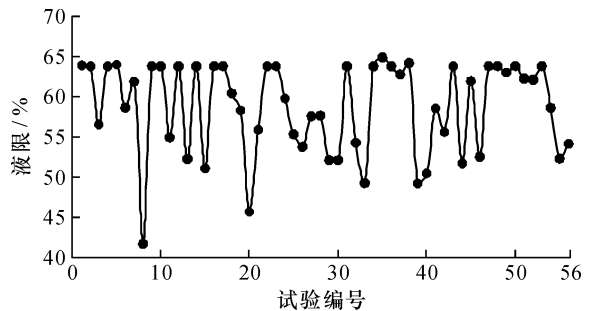


图6 土样液限
Fig. 6 Liquid limit of soil

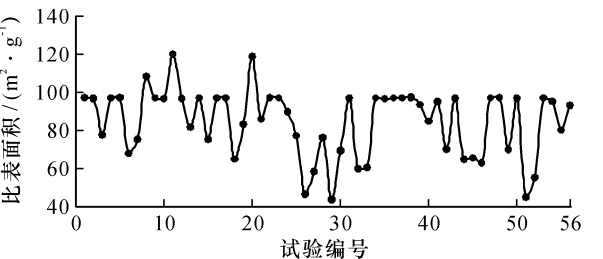


图7 土样比表面积

Fig. 7 Specific surface area of soil

式(33)、(35)、(37)、(39)、(40)、(41)，计算不同有效孔隙比 - Darcy 渗透系数。为了直观对比更明显，将渗透系数实测值由小到大排列，结果如图 8。

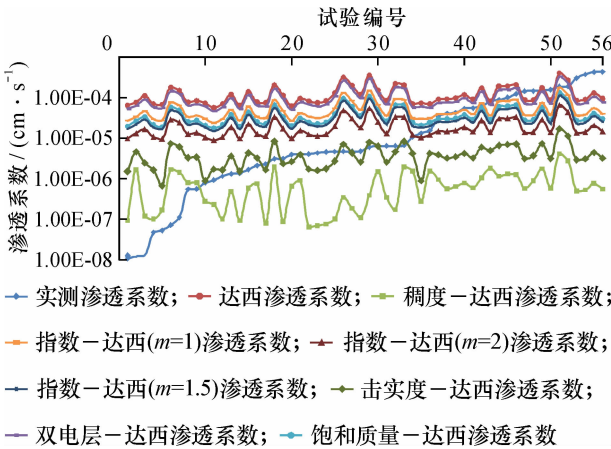


图 8 考虑有效孔隙比的 Darcy 渗透系数
Fig. 8 Darcy permeability coefficient considering effective void ratio

在此，称未考虑有效孔隙比修正的 Darcy 定律为传统 Darcy 定律。由图 8 可知：

(1) 双电层法 - Darcy 定律与传统 Darcy 定律的渗透系数计算结果基本一致。在低渗透性($k < 8 \times 10^{-5}$ cm/s)红黏土中，这两种方法计算的渗透系数数值大于实际值，最高可达 4 个数量级，两种方法均不适宜计算红黏土渗透系数；在中等渗透性(8×10^{-5} cm/s $\leq k < 1.5 \times 10^{-4}$ cm/s)红黏土中，双电层 - Darcy 定律渗透系数计算结果与实测结果吻合度高；在高渗透性($k \geq 1.5 \times 10^{-4}$ cm/s)红黏土中，传统 Darcy 定律计算值与实测值较吻合。

(2) 饱和土样质量法与 m 指数法修正的 Darcy 定律计算的红黏土渗透系数结果相当；当渗透系数满足 1.0×10^{-5} cm/s $\leq k < 8 \times 10^{-5}$ cm/s 时， m 指数法计算结果与实测值更吻合。

(3) 在较密实的红黏土中，击实度 - Darcy 定律及稠度指标 - Darcy 定律计算渗透系数值与实测值最接近；当 5×10^{-7} cm/s $\leq k < 1.0 \times 10^{-5}$ cm/s 时，前者计算结果与实测值的拟合度高；当 $k \geq 1.0 \times 10^{-5}$ cm/s 时，后者优于前者。

(4) 对比分析各种有效孔隙比 - Darcy 定律计算的渗透系数值与实测值，结果表明：在高渗透性红黏土中，无效孔隙对渗透系数的影响最小，可以忽略不计，即有效孔隙等效于总孔隙；中等渗透性红黏土中，结合水膜占据的孔隙对无效孔

隙比的贡献较大，死端孔隙及封闭孔隙的贡献较小；低渗透性红黏土中，结合水膜占据的孔隙对无效孔隙比的贡献较小，死端孔隙及封闭孔隙的贡献较大。

红黏土有效孔隙比计算方法应根据渗透系数的分布范围进行确定，具体选择方法如表 2。

表 2 红黏土有效孔隙比计算方法选择方案 Table 2 Selection method of calculation method for effective void ratio of red clay	
渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	有效孔隙比计算方法
$\geq 1.5 \times 10^{-4}$	等效于总孔隙比
$8.0 \times 10^{-5} \leq k < 1.5 \times 10^{-4}$	双电层法
$1.0 \times 10^{-5} \leq k < 8.0 \times 10^{-5}$	m 指数法
$5.0 \times 10^{-7} \leq k < 1.0 \times 10^{-5}$	击实度法
$< 5.0 \times 10^{-7}$	稠度指标法

综上所述，计算红黏土的有效孔隙比，击实度法适用范围最广， m 指数法适用范围最窄。当红黏土为松散状态时，建议不考虑无效孔隙对有效孔隙的影响；当土样密实时，推荐使用稠度指标法计算有效孔隙比；当土样的密实度介于其间，根据土样的渗透性确定有效孔隙比计算方法。

4 结 论

(1) 在高渗透性红黏土中，结合水膜占据的孔隙对无效孔隙的贡献最大；低渗透性红黏土中，死端孔隙与封闭孔隙对无效孔隙贡献最大；松散红黏土中，无效孔隙对有效孔隙的影响可忽略。

(2) 在红黏土有效孔隙比计算中，击实度法适用范围最广， m 指数法适用范围最窄。

(3) 双电层法计算有效孔隙比的结果偏大，可用于计算较松散红黏土的有效孔隙比；饱和质量法与 m 指数法计算渗透系数结果较接近；击实度法与稠度指标法可用于计算较密实的红黏土的有效孔隙比。

(4) 根据红黏土的渗透系数确定有效孔隙比的计算方法，建议按以下规律选择：当 $k < 5.0 \times 10^{-7}$ cm/s 时，采用稠度指标法；当 5.0×10^{-7} cm/s $\leq k < 1.0 \times 10^{-5}$ cm/s 时，采用击实度法；当 1.0×10^{-5} cm/s $\leq k < 8.0 \times 10^{-5}$ cm/s 时，采用 m 指数法；当 8.0×10^{-5} cm/s $\leq k < 1.5 \times 10^{-4}$ cm/s 时，采用双电层法；当 $k \geq 1.5 \times 10^{-4}$ cm/s 时，忽略无效孔隙对有效孔隙的影响。

参考文献:

[1] 党发宁, 刘海伟, 王学武, 等. 基于有效孔隙比的黏性土渗透系数经验公式研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (9): 1909 – 1917.

[2] 杨杨, 程娟, 郭向阳. 关于透水混凝土的孔隙率与透水系数关系的探讨[J]. 混凝土与水泥制品, 2007(4):1 – 3.

[3] 朱伟, 徐浩青, 王升位, 等. CaCl_2 溶液对不同黏土基防渗墙渗透性的影响 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (5): 1224 – 1230, 1236.

[4] Ren X W, Zhao Y, Deng Q L, et al. A relation of hydraulic conductivity – void ratio for soils based on Kozeny – Carman equation [J]. Engineering Geology, 2016, 213: 89 – 97.

[5] Koponen A, Kataja M, Timonen J. Permeability and effective porosity of porous media [J]. Physical Review E, 1997, 56 (3): 3319 – 3325.

[6] Yokoyama T, Takeuchi S. Porosimetry of vesicular volcanic products by a water-expulsion method and the relationship of pore characteristics to permeability [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2009, 114 (B2): 1205 – 1222.

[7] Nishiyama N, Yokoyama T. Estimation of permeability of sedimentary rocks by applying water-expulsion porosimetry to Katz and Thompson model [J]. Engineering Geology, 2014, 177 (14): 75 – 82.

[8] 杨进良. 土力学 [M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 67 – 75.

[9] 陈国兴, 樊良本. 土质学与土力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 65 – 76.

[10] 李广信. 高等土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 190 – 195.

[11] 苑莲菊, 李振栓, 武胜忠, 等. 工程渗流力学及应用 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001: 14 – 19.

[12] 齐添, 谢康和, 胡安峰, 等. 萧山黏土非达西渗流性状的试验研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2007, 41 (6): 1023 – 1028.

Determination method of effective void ratio for lateritic soil

LI Shan-mei, LIU Zhi-kui, MU Chun-mei, MENG Jian-ping, HE Tian-jie,
CHEN Jia-yu, GOGN Yuan

(a. College of Civil Engineering and Architecture; b. Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The effective porosity is smaller than the actual pore in the lateritic soil. Thus the calculation result is larger by the traditional Darcy formula than the actual value. So it is important to study the calculation method of the effective void ratio of the lateritic soil. The consistency index method, initial gradient method, double layer parameter method, saturated soil quality, combined water content method, m index method, and the compaction degree method derived in this paper were introduced. Their advantages and disadvantages were analyzed. The applicability of the modified formula of Darcy permeability coefficient based on the effective void ratio in the lateritic soil was verified based on the experimental data of 56 groups of variable head permeability. The results show that the effective void ratio should be calculated by different methods according to the permeability of the lateritic soil.

Key words: lateritic soil; effective void ratio; permeability coefficient; Darcy formula