

考虑有效孔隙比影响的饱和黏性土中 注浆渗透机理*

寇磊, 徐建国, 王博

(郑州大学 水利与环境学院, 郑州 450002)

摘要: 考虑强结合水膜对黏性土渗透特性的影响,依据土体物理特征参数建立有效孔隙比计算公式;修正经典的 Kozeny-Carman 渗透系数的经验公式,得到适用于黏性土的渗透系数经验计算公式;在此基础上,推导黏性土层中黏度时变性浆液注浆柱面和球面渗透扩散半径和渗透压力的计算公式.通过算例,验证了提出的黏性土渗透系数经验公式的正确性,并对对比分析了不同注浆压力、注浆时间条件下是否采用有效孔隙比、是否考虑浆液黏度时变性对浆液扩散半径的影响.计算结果表明:采用天然孔隙比的扩散半径是采用有效孔隙比的扩散半径的约 1.5 倍,且两者的差距随注浆压力的增大、注浆时间的延长而增大;黏性土的渗透特性必须考虑强结合水膜的影响.

关键词: 强结合水; 有效孔隙比; 渗透系数经验公式; 黏度时变性; 柱面和球面扩散
中图分类号: TU435 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.380050

引 言

注浆技术已经成为解决现代建筑工程、地下工程、矿业工程、石油工程、水利工程及交通工程等建筑物或构筑物防渗、加固和维护施工开挖面稳定等岩土问题首选的技术手段^[1].注浆浆液根据流变特性可以描述为 Newton(牛顿)流体和 Bingham、幂律型等非 Newton 流体^[2-3].当浆液注入岩土等多孔介质后,基于被注介质为均质各向同性、浆液符合 Newton 流体特征和浆液呈层流流动遵循 Darcy(达西)定律等简化假设的基础上,众多学者提出了多种经典的注浆渗透扩散理论,主要有 Maag 球面扩散理论、Raffle-Greenwood 球面扩散理论、柱面扩散理论、袖阀管法理论等^[1],随后进一步建立了 Bingham 流体、幂律型流体浆液的球面、柱面扩散理论^[4-6].由于在注浆过程中浆液的黏度并非保持恒定,郑大为等^[7]根据颗粒均匀砂层的特性,依照柱面理论推导了考虑浆液黏度时变性的扩散公式;韩焯^[8]建立了均匀多孔介质砂土中黏度时变流体扩散半径和压力的计算公式;杨志全等^[9-11]分别推导了黏度时变性 Bingham 水泥浆液的球面、柱面和柱-半球面渗透注浆扩散机制及黏度时变性幂律型水泥浆液的柱面渗透注浆扩散机制.这些研究成果的共同点为:1) 推导过程中都使用了渗透系数这一反映渗透性能的宏观参数;2) 多适用于砂土等粗粒土地层.目前,已有众多关于粗粒土渗透系数的经验公式,如 Kozeny-Carman 渗透系数^[12-13]、Poiseuille 渗透系数^[14]、Darcy 渗透系数^[15]、Terzaghi 渗透系

* 收稿日期: 2017-03-06; 修订日期: 2017-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(51708512;51579226);河南省高等学校重点科研项目(17A560031)

作者简介: 寇磊(1983—),男,讲师,博士(通讯作者. E-mail: klyhe@163.com).

数^[16]等.这些经验公式由于物理意义明确,公式参数确定简便,已在多孔介质渗透性能的研究中得到广泛应用.

流体在岩土等多孔介质中渗流的媒介主要是分布在岩土体内互相连通的流体能在其中流动的孔隙,相对于粗粒土,黏性土颗粒表面吸附形成一定厚度的结合水膜,其占据的孔隙部分不能产生渗流^[17].浆液在地层中渗透扩散与土体的渗透特性密切相关,简单地将粗粒土地层注浆渗透理论中的渗透系数运用于黏性土层,必然存在较大的误差.因此,必须排除强结合水膜对黏性土渗透特性的影响,进而揭示黏性土中注浆渗流机理.

本文通过有效孔隙比考虑强结合水对黏性土渗透性能的影响,修正经典的 Kozeny-Carman 渗透系数公式,得到了适应于黏性土的渗透系数经验公式;在此基础上,建立黏度时变性浆液在黏性土中注浆时柱面和球面扩散半径计算公式,为优化黏性土注浆效果提供了理论依据.

1 黏性土的渗透系数计算公式

由于黏性土颗粒在水介质中表现出带电的特性,当两者接触时,会在黏性土颗粒表面形成吸附结合水.结合水因离土颗粒表面的远近不同,受到电场作用力的大小不同.结合水分为强结合水和弱结合水;强结合水丧失液体特性可视为类固态,没有流动性;弱结合水为黏滞状态,受力时能发生变形和移动.

研究表明:当含水率符合 $0 < W \leq W_p$ 时,黏性土体内绝大部分是强结合水,弱结合水很少;当含水率满足 $W_p < W \leq W_L$ 时,黏性土体内大部分是弱结合水,少量是自由水;当含水率 $W > W_L$ 时,黏性土内大量出现自由水^[18].黏性土中强结合水含量的上限约为塑限 W_p 的 0.885 倍^[19].

对饱和黏性土做如下假定:1) 根据黏性土颗粒对强结合水、弱结合水的吸附能力及结合水的运动特性,在外部荷载作用下发生渗流的先后顺序为自由水、弱结合水(外载达到一定值);2) 黏性土颗粒和水均不可压缩;3) 黏性土的强结合水含量在 $0 \sim W_p$ 之间,设强结合水含量 $W_{we} = \omega W_p$,式中, ω 为折减系数, $0 < \omega < 1$.

根据土体三相指标物理公式,黏性土中强结合水的含水量为

$$W_{we} = \frac{m_{we}}{m_s} = \frac{m_{we}}{\rho_s V_s} = \omega W_p, \quad (1)$$

则黏性土体中强结合水的质量为

$$m_{we} = \omega \rho_s V_s W_p, \quad (2)$$

式中, V_s 为土颗粒的总体积, ρ_s 为土颗粒的密度, m_{we} 为强结合水质量.

由于黏性土中强结合水占据的孔隙部分不能产生渗流,将土体中能发生渗流的孔隙部分称为有效孔隙,有效孔隙体积与土颗粒体积的比值称为有效孔隙比.计算黏性土的有效孔隙比时应在孔隙体积中将强结合水体积扣除,得到黏土有效孔隙比 e' 为

$$e' = \frac{V'_V}{V_s} = \frac{V_V - V_{we}}{V_s} = e - \frac{m_{we}}{\rho_{we} V_s} = e - \omega W_p \frac{\rho_s}{\rho_{we}}, \quad (3)$$

式中, e' 为有效孔隙比, V'_V 为有效孔隙体积, ρ_{we} 为强结合水密度.

Kozeny-Carman 提出的粗粒土渗透系数经验计算公式能够反映土体微细观结构特征,其表达式为^[12-13]

$$K = \frac{\gamma_w}{cs^2 \mu_w} \frac{e^3}{1 + e}, \quad (4)$$

式中, γ_w 为自由水的重度, c 为与颗粒形状及水的实际流动方向有关的系数, s 为土颗粒的比表面积, μ_w 为自由水的动力黏滞系数, e 为孔隙比。

将修正后的有效孔隙比 e' 代入式(4)得到适应于黏性土的渗透系数经验公式, 即

$$K = \frac{\gamma_w}{cs^2\mu_w} \frac{e'^3}{1 + e'} \quad (5)$$

2 黏度时变性浆液注浆渗透机理

2.1 基本假定

1) 浆液为不可压缩的均质各向同性 Newton 流体, 且黏度存在时变性, 其变化关系为指数函数, t 时刻浆液的黏度 $\eta_g(t)$ 采用指数函数表示为^[9-10, 20]

$$\eta_g(t) = \eta_{g0} e^{\alpha t}, \quad (6)$$

式中, η_{g0} 为浆液的初始黏度值; t 为注浆时间; α 为时变系数, 由实验测得; $\eta_g(t)$ 为浆液的动态黏度值。

2) 注浆过程中注浆压力能够驱使自由水及弱结合水的移动, 且浆液处于层流状态其流型保持不变, 并忽略浆液本身的重力影响作用。

2.2 理论推导

由于不同流体在地层土体中渗流时渗透率保持不变, 即

$$K_g(t) \frac{\eta_g(t)}{\gamma_g} = K_w \frac{\eta_w}{\gamma_w} = \kappa, \quad (7)$$

则黏度时变性浆液在地层中的渗透系数 $K_g(t)$ 的表达式为

$$K_g(t) = K_w \frac{\gamma_g \eta_w}{\gamma_w \eta_g(t)} = K_w / \beta(t), \quad (8)$$

式中, κ 为土体渗透率, K_w 为地下水在土体中的渗透系数, $\beta(t)$ 为 t 时刻浆液黏度与水的黏度之比, $\eta_g(t)$ 为浆液黏度, γ_g 为浆液重度, η_w 为水的黏度, γ_w 为水重度。

根据式(6), 得到考虑浆液黏度时变性的渗透系数 $K_g(t)$ 为

$$K_g(t) = K_w e^{-\alpha t} \frac{\gamma_g \eta_w}{\gamma_w \eta_{g0}} \quad (9)$$

由于注浆过程中浆液渗透扩散保持层流状态, t 时刻渗流运动方程为

$$\nu = -K_g(t) dP / (\gamma_g dr), \quad (10)$$

式中, ν 为浆液渗流速度, P 为注浆压力, r 为浆液渗流路径。

根据渗流速度公式

$$\nu = q/A$$

得到

$$dP = -e^{\alpha t} \frac{q\gamma_w \eta_{g0}}{AK_w \eta_w} dr, \quad (11)$$

式中, q 为注浆浆液流量, A 为浆液渗流面积。

2.3 柱面注浆渗透扩散

当浆液柱面渗透扩散时, 渗流面积 A 的表达式为

$$A = 2\pi rl, \quad (12)$$

式中, r 为浆液扩散半径, l 为浆液扩散高度。

将式(11)、(12)联立得到

$$dP = -e^{-\alpha} \frac{q\gamma_w\eta_{g0}}{2\pi l K_w \eta_w} \frac{dr}{r}. \quad (13)$$

两端同时积分,根据注浆过程边界条件($r = r_0$ 时, $P = P_0$; $r = R$ 时, $P = P_R$),可得

$$q = e^{-\alpha} \frac{2\pi l K_w \eta_w (P_0 - P_R)}{\gamma_w \eta_{g0} \ln(R/r_0)}, \quad (14)$$

式中, r_0 为注浆管半径, R 为注浆时间为 t 时的扩散半径, P_0 为注浆压力, P_R 为 R 处注浆压力.

对其进行时间 t 积分得到注浆总量 Q ,即

$$Q = \int_0^t q dt = \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \frac{2\pi l K_w \eta_w (P_0 - P_R)}{\gamma_w \eta_{g0} \ln(R/r_0)}, \quad (15)$$

根据注浆总量 Q 和浆液渗流范围内的浆液体积相等,得到

$$Q = \phi \pi R^2 l, \quad (16)$$

式中, ϕ 为土体孔隙率.

式(15)、(16)两式联立得

$$P_R = P_0 - \frac{\alpha}{1 - e^{-\alpha t}} \frac{R^2 \phi \gamma_w \eta_{g0} \ln(R/r_0)}{2K_w \eta_w}. \quad (17)$$

求得注浆扩散半径为

$$R = \sqrt{\frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \frac{2K_w \eta_w (P_0 - P_R)}{\phi \gamma_w \eta_{g0} \ln(R/r_0)}}. \quad (18)$$

2.4 球面注浆扩散

当浆液球面渗透扩散时,渗流面积 A 的表达式为

$$A = 4\pi r^2, \quad (19)$$

式中, r 为浆液扩散半径.

将式(11)、(19)联立得到

$$dP = -e^{-\alpha} \frac{q\gamma_w\eta_{g0}}{4\pi K_w \eta_w} \frac{dr}{r^2}. \quad (20)$$

两端同时积分,根据注浆过程边界条件($r = r_0$ 时, $P = P_0$; $r = R$ 时, $P = P_R$),可得

$$q = e^{-\alpha} \frac{4\pi K_w \eta_w (P_0 - P_R)}{\gamma_w \eta_{g0} (r_0^{-1} - R^{-1})}. \quad (21)$$

对其进行时间 t 积分得到注浆总量

$$Q = \int_0^t q dt = \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \frac{4\pi K_w \eta_w (P_0 - P_R)}{\gamma_w \eta_{g0} (r_0^{-1} - R^{-1})}. \quad (22)$$

根据注浆总量 Q 和浆液渗流范围内的浆液体积相等,得到

$$Q = 4\pi R^3 \phi / 3. \quad (23)$$

式(22)、(23)两式联立得

$$P_R = P_0 - \frac{\alpha}{1 - e^{-\alpha t}} \frac{R^3 \phi \gamma_w \eta_{g0} (r_0^{-1} - R^{-1})}{3K_w \eta_w}, \quad (24)$$

由于 $R \gg r_0$,则 $r_0^{-1} - R^{-1} \approx r_0^{-1}$.注浆扩散半径为

$$R = \sqrt[3]{\frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha} \frac{3K_w \eta_w (P_0 - P_R) \tau_0}{\phi \gamma_w \eta_{g0}}} \quad (25)$$

2.5 参数确定

对于 Newton 流体,采用旋转黏度计或毛细管黏度计等测量不同剪切速率下的剪切应力值,其中 η_{g0} 值根据如下公式测定:

$$\eta_{g0} = (\tau_2 - \tau_1) / (\gamma_2 - \gamma_1), \quad (26)$$

式中, γ_1, γ_2 和 τ_2, τ_1 分别是在配置不同种类与配比流体、瞬时用黏度计测定的不同剪切速率对应的剪切应力。

土体孔隙率 ϕ 由有效孔隙比 e' 求得,即

$$\phi = \frac{e'}{1 + e'} \quad (27)$$

2.6 适用范围

2.3、2.4 小节提出的公式直接适用于层流状态下考虑黏度时变性的 Newton 流体浆液注浆情况。对于黏度时变性的非 Newton 流体浆液注浆情况,首先计算浆液的动态表观黏度 $\eta_g(t)$, 然后代入 2.2~2.4 小节的公式。如黏度时变性 Bingham 流体,动态表观黏度 $\eta_g(t)$ 为

$$\eta_g(t) = \tau / \gamma = \eta_{g0} e^{\alpha \gamma} + \tau_0 / \gamma, \quad (28)$$

黏度时变性幂律型流体,动态表观黏度 $\eta_g(t)$ 为

$$\eta_g(t) = \tau / \gamma = \eta_{g0} e^{\alpha \gamma} \gamma^{n-1}, \quad (29)$$

式中, γ 为浆液的剪切速率。

3 算 例

3.1 黏性土的渗透系数公式验证

某黏土地层^[18],土颗粒的平均粒径 $d = 0.01 \text{ mm}$,天然孔隙比 $e = 0.607$,土颗粒密度 $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$,结合水密度 $\rho_{we} = 1.8 \text{ g/cm}^3$,自由水密度 $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$,天然土体密度 $\rho = 1.93 \text{ g/cm}^3$,水的黏滞系数 $\eta_w = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,土体含水率 $W_w = 15\%$,塑限 $W_p = 22.5\%$, $\omega = 0.885$, $c = 8$ 。根据天然孔隙比和本文提出的有效孔隙比按式(27)和式(4)、(5)分别计算孔隙率和渗透系数,并与土样渗透试验得到的渗透系数值对比,如表1所示。

表1 孔隙比、孔隙率和渗透系数对比

Table 1 Comparison of void ratios, porosities and permeability coefficients

	void ratio e	porosity ϕ	permeability coefficient $K / (\text{cm/s})$
ref. [18]	0.607	0.377	4.832×10^{-5}
present	0.308	0.235	7.648×10^{-6}

通过对比可知:本文计算结果更加接近土样渗透试验得到的渗透系数值^[18] $K_w = 8.25 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,从而验证了提出的黏性土渗透系数公式的正确性和准确性。

3.2 黏性土中黏度时变性 Newton 流体浆液注浆

3.2.1 是否采用有效孔隙比

考虑浆液黏度时变性,讨论不同注浆压力、不同注浆时间条件下是否采用有效孔隙比对浆液扩散半径的影响。

当注浆时间 $t = 30 \text{ min}$ 时,根据球面注浆扩散公式分别计算采用天然孔隙比、有效孔隙比及其对应渗透系数时在不同注浆压力条件下浆液的扩散半径如图1所示。当注浆压力 $P_0 = 0.3$

MPa 时,根据球面注浆扩散公式分别计算采用天然孔隙比、有效孔隙比及其对应渗透系数时在不同注浆时间条件下浆液的扩散半径如图 2 所示。

由图 1 可知,分别采用天然孔隙比、有效孔隙比及其对应渗透系数时,浆液的扩散半径都随注浆压力的增大而增大.当注浆压力 P_0 由 0.1 MPa 增大到 0.5 MPa 时,两种情况下扩散半径都增加了超过 70%.在相同注浆压力下,采用天然孔隙比的扩散半径是采用有效孔隙比的扩散半径的约 1.5 倍,且两者的差距随注浆压力的增大而增大。

由图 2 可知,分别采用天然孔隙比、有效孔隙比及其对应渗透系数时,浆液的扩散半径都随注浆时间的延长而增大.当注浆时间 t 由 10 min 增大到 80 min 时,两种情况下扩散半径都增加了近 80%.在相同注浆时间下,采用天然孔隙比的扩散半径是采用有效孔隙比的扩散半径的约 1.5 倍,且两者的差距随注浆时间的延长而增大。

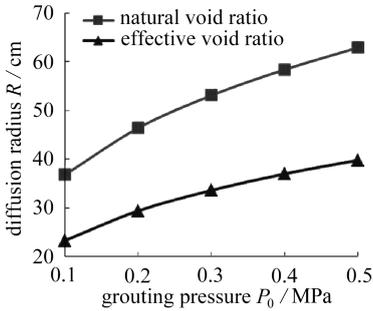


图 1 是否采用有效孔隙比时浆液扩散半径与注浆压力的关系

Fig. 1 Relationship between diffusion radius R and grouting pressure P_0 with or without the effective void ratio

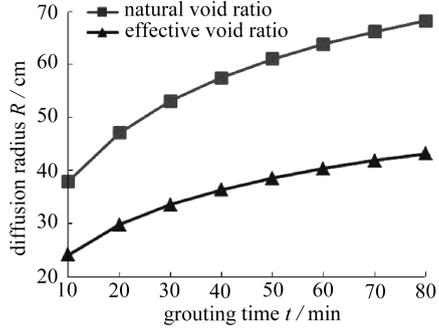


图 2 是否采用有效孔隙比时浆液扩散半径与注浆时间的关系

Fig. 2 Relationship between diffusion radius R and grouting time t with or without the effective void ratio

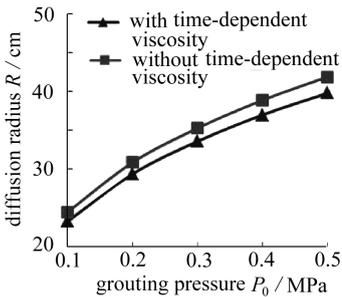


图 3 是否考虑浆液黏度时变性时浆液扩散半径与注浆压力的关系

Fig. 3 Relationship between diffusion radius R and grouting pressure P_0 with or without the slurry time-dependent viscosity

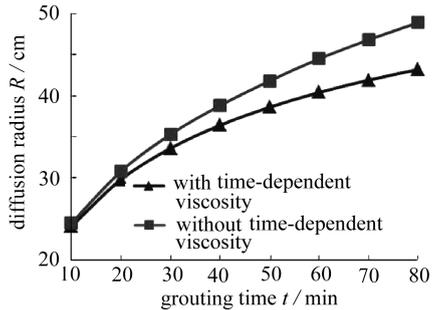


图 4 是否考虑浆液黏度时变性时浆液扩散半径与注浆时间的关系

Fig. 4 Relationship between diffusion radius R and grouting time t with or without the slurry time-dependent viscosity

3.2.2 是否考虑浆液黏度时变性

采用有效孔隙比,讨论在不同注浆压力、不同注浆时间条件下是否考虑浆液黏度时变性时对扩散半径的影响。

当注浆时间 $t = 30 \text{ min}$ 时,根据球面注浆扩散公式分别计算考虑浆液黏度时变性和不考虑时变性时浆液的扩散半径如图 3 所示.当注浆压力 $P_0 = 0.3 \text{ MPa}$ 时,根据球面注浆扩散公式分别计算考虑浆液黏度时变性和不考虑时变性时浆液的扩散半径如图 4 所示.

由图 3 可知,当注浆压力 P_0 由 0.1 MPa 增大到 0.5 MPa 时,考虑浆液黏度时变性和不考虑时变性浆液的扩散半径都随注浆压力的增大而增大.在相同注浆压力下,不考虑时变性时浆液的扩散半径略大于考虑浆液黏度时变性的计算值,两者的差距随注浆压力的增大而略有增大.

由图 4 可知,当注浆时间 t 由 10 min 增大到 80 min 时,考虑浆液黏度时变性和不考虑时变性浆液的扩散半径都随注浆时间的延长而增大;在相同注浆时间下,不考虑时变性时浆液的扩散半径略大于考虑浆液黏度时变性的计算值,两者的差距随注浆时间的延长而略有增大.

4 结 语

通过有效孔隙比考虑了强结合水对黏性土渗透特性的影响,建立了适用于黏性土的渗透系数计算公式;在此基础上,探讨了黏性土层中黏度时变性浆液注浆扩散机理,得到以下结论:

- 1) 相对于粗粒土,黏性土的渗透特性须考虑土颗粒表面形成强结合水的影响.
- 2) 利用土体宏观参数建立有效孔隙比计算公式,修正经典的 Kozeny-Carman 渗透系数公式,得到适用于黏性土的渗透系数经验公式.
- 3) 是否采用有效孔隙比对浆液扩散半径的影响显著,其显著程度随注浆压力的增大、注浆时间的延长而增大.
- 4) 考虑浆液黏度时变性时浆液扩散半径小于不考虑时变性时的计算值,且两者的差距随注浆压力的增大、注浆时间的延长而略有增大.

致谢 本文作者衷心感谢郑州大学青年专项科研启动基金(F0000881)对本文的资助.

参考文献(References):

- [1] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (Group of Injecting Theory and Engineering Cases for Geotechnical Engineering Compilation. *Injecting Theory and Engineering Cases for Geotechnical Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69-73. (RUAN Wenjun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(1): 69-73. (in Chinese))
- [3] 阮文军. 基于浆液粘度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709-2714. (RUAN Wenjun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2709-2714. (in Chinese))
- [4] 杨坪. 砂卵(砾)石层模拟注浆试验及渗透注浆机理研究[D]. 博士学位论文. 长沙: 中南大学, 2005. (YANG Ping. Study on simulation grouting experiment in gravel & mechanism of permeating grouting[D]. PhD Thesis. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese))
- [5] 杨秀竹. 静动力作用下浆液扩散理论与试验研究[D]. 博士学位论文. 长沙: 中南大学, 2005. (YANG Xiuzhu. Study on grout diffusion theory and experiments under static or dynamic loading[D]. PhD Thesis. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese))
- [6] 冯啸. 砂土体渗透注浆的有效性研究[D]. 硕士学位论文. 济南: 山东大学, 2015. (FENG Xiao.

- Research on the effectiveness of the sand body permeation grouting[D]. Master Thesis. Jinan: Shandong University, 2015.(in Chinese))
- [7] 郑大为, 张彬, 王笑冰. 粘度渐变型浆液渗透注浆灌注均匀砂层计算方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(S1): 5086-5089. (ZHENG Dawei, ZHANG Bin, WANG Xiaobing. A study on calculation method of penetration theory for conforming sand layer[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(S1): 5086-5089.(in Chinese))
- [8] 韩焯. 考虑黏度时变性的宾汉姆浆液注浆扩散机理研究[D]. 硕士学位论文. 济南: 山东大学, 2014. (HAN Ye. Study on the mechanism of grouting diffusion of Bingham grouts with viscosity variation[D]. Master Thesis. Jinan: Shandong University, 2014.(in Chinese))
- [9] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 基于考虑时变性的宾汉姆流体的渗透注浆机理研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, **43**(S1): 67-72. (YANG Zhiquan, HOU Kepeng, GUO Tingting, et al. Study on penetration grouting mechanism based on Bingham fluid of time-dependent behavior[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2011, **43**(S1): 67-72.(in Chinese))
- [10] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 黏度时变性宾汉体浆液的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(9): 2697-2703. (YANG Zhiquan, HOU Kepeng, GUO Tingting, et al. Study of column-hemispherical penetration grouting mechanism based on Bingham fluid of time-dependent behavior of viscosity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(9): 2697-2703.(in Chinese))
- [11] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 流变参数时变性幂律型水泥浆液的柱形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(7): 1415-1425. (YANG Zhiquan, NIU Xiangdong, HOU Kepeng, et al. Columnar diffusion of cement grout with time dependent rheological parameters[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(7): 1415-1425.(in Chinese))
- [12] KOZENY J. Uber kapillare leitung des wassers im boden[J]. *Royal Academy of Science, Vienna, Proc Class I*, 1927, **136**: 271-306.
- [13] CARMAN P C. Fundamental principles of industrial filtration-a critical review of present knowledge[J]. *Transactions of Institution of Chemical Engineering*, 1938, **16**: 168-188.
- [14] SCHEIDEGGERS A E. Theoretical models of porous matter[J]. *Producers Monthly*, 1953, **17**(10): 17-20.
- [15] DARCY H. *Recherches Expérimentales Relatives au Mouvement de L' Eau Dans les Tuyaux* [M]. Mallet-Bacheher, 1857.
- [16] TERZAGHI K. *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*[M]. Vienna: Franz Deuticke, 1925.
- [17] 吴凤彩. 粘性土的吸附结合水测量和渗流的某些特点[J]. 岩土工程学报, 1984, **6**(6): 84-93. (WU Fengcai. Some characteristics of measurement and seepage of adsorbed water layer for cohesive soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, **6**(6): 84-93.(in Chinese))
- [18] 王学武. 基于有效孔隙比的粘土渗流固结及水土压力综合算法的研究[D]. 博士学位论文. 西安: 西安理工大学, 2012. (WANG Xuwu. Research on the seepage, consolidation, and synthesis algorithm of water and earth pressures in clay based on the effective void ratio[D]. PhD Thesis. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.(in Chinese))
- [19] 李文平, 于双中, 王柏荣, 等. 煤矿区深部黏性土吸附结合水含量测定及其意义[J]. 水文地质工程地质, 1995(3): 31-34. (LI Wenping, YU Shuangzhong, WANG Borong, et al. The meas-

- uring of adsorbed bound water of the typical deep clay soil in coal mining area and its significance[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1995(3): 31-34. (in Chinese))
- [20] 叶飞, 苟长飞, 刘燕鹏, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液时变半球面扩散模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1789-1794. (YE Fei, GOU Changfei, LIU Yanpeng, et al. Half-spherical surface diffusion model of shield tunnel back-filled gouts[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2012, 40(12): 1789-1794. (in Chinese))

Research on Grouting Infiltration Mechanism for Time-Dependent Viscous Slurry Considering Effective Void Ratios in Saturated Clay

KOU Lei, XU Jianguo, WANG Bo

(School of Water Conservancy & Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, P.R.China)

Abstract: The calculation formula of effective void ratios was established according to the characteristic parameters of soil in view of the influence of the strong bound water layer on the permeability characteristics of clay. The empirical formula of permeability coefficients of clay was obtained through modification of the empirical formula of the Kozeny-Carman permeability coefficient. Based on the permeability coefficient of clay, the formulas for calculating the cylindrical and spherical diffusion radii and grouting pressures of time-dependent viscous slurry in saturated clay were derived. The empirical formula of permeability coefficients of clay was validated, then the diffusion radii with different grouting pressures and grouting times were compared between cases with or without the effective void ratio, and between cases with or without the time-dependent slurry viscosity. The results show that the diffusion radius with the natural void ratio is over 1.5 times larger than that with the effective void ratio, and the difference between them increases with the grouting pressure and the grouting time, so the permeability of clay is under the significant effects of the strong bound water layer.

Key words: strong bound water; effective void ratio; empirical formula of permeability coefficient; time-dependent viscosity; cylindrical and spherical diffusion

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(51708512;51579226)

引用本文/Cite this paper:

寇磊, 徐建国, 王博. 考虑有效孔隙比影响的饱和黏性土中注浆渗透机理[J]. 应用数学和力学, 2018, 39(1): 83-91.

KOU Lei, XU Jianguo, WANG Bo. Research on grouting infiltration mechanism for time-dependent viscous slurry considering effective void ratios in saturated clay[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, 39(1): 83-91.