

DOI: 10.11779/CJGE201803002

基于基床系数法的劈裂注浆过程分析

张乐文¹, 辛冬冬², 丁万涛², 宿传玺², 吴启龙², 王洪波²

(1. 山东大学海洋研究院, 山东 青岛 266237 250061; 2. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 为了揭示劈裂注浆中浆液扩散的动态过程及变化规律, 基于基床系数法, 研究了劈裂注浆过程中尺寸效应对土体变形的影响, 建立了不同土体的劈裂缝宽度方程; 假设浆液按平面辐射圆扩散, 根据浆土应力耦合特性以及质量守恒定律对土体劈裂注浆过程进行了分析, 获得了浆液扩散半径变化方程、浆液压力时空变化方程、劈裂缝宽度时空变化方程, 并对浆液扩散规律与影响因素进行了分析。分析结果表明: 浆液扩散半径随时间不断增长, 但增长速率不断变缓, 与基床系数标准值正相关, 与浆液黏度负相关, 黏性土小于砂土; 浆液压力与时间、基床系数标准值正相关, 绝大部分位置与浆液黏度正相关, 黏性土小于砂土; 劈裂缝宽度与时间正相关, 绝大部分位置与基床系数标准值负相关、浆液黏度正相关, 大部分位置黏性土大于砂土。与现场试验对比分析表明, 理论计算值与实测值差异在可接受范围内, 验证了本理论的合理性。

关键词: 劈裂注浆; 基床系数法; 浆土应力耦合; 过程分析

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)03 - 0399 - 09

作者简介: 张乐文(1972 -), 男, 博士, 教授, 主要从事地质灾害超前预报与防治等方面的教学与研究工作。E-mail: lewenzhang@163.com。

Process analysis of split grouting based on foundation bed coefficient method

ZHANG Le-wen¹, XIN Dong-dong², DING Wan-tao², SU Chuan-xi², WU Qi-long², WANG Hong-bo²

(1. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China; 2. Geotechnical and Structural

Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to reveal the dynamic process and change rules of slurry diffusion in split grouting, the foundation bed coefficient method is employed to study the influence of size effect on deformation of different soils in the process of split grouting. The width equation of split crack of different soils is established. The form of slurry diffusion is supposed to be the horizontal radiation circle. The process of split grouting is analyzed based on the stress coupling effect of slurry and soil and the conservation of mass of slurry. Based on the above analysis, the equations for variations of slurry diffusion radius, temporal and spatial variations of slurry pressure and split crack width are obtained. The rules and influence factors of slurry diffusion are investigated. The analysis results show that the slurry diffusion radius continues to grow along with time, but the growth rate continues to reduce. The slurry diffusion radius is positively related to the standard value of foundation bed coefficient and negatively related to the slurry viscosity. The slurry diffusion radius of cohesive soil is smaller than that of sandy soil. The slurry pressure is positively related to the time and the standard value of foundation bed coefficient. At most positions, there is a positive correlation between the slurry pressure and the viscosity. The slurry pressure of cohesive soil is smaller than that of sandy soil. The split crack width continues to grow along with time. At most positions, the split crack width is negatively related to the standard value of foundation bed coefficient and positively related to the slurry viscosity, and the split crack width of cohesive soil is larger than that of sandy soil. Finally the comparative analysis of the calculated and field test values indicates that the difference of calculated and measured results is acceptable. Obviously, the proposed method is of high rationality.

Key words: split grouting; foundation bed coefficient method; stress coupling effect of slurry and soil; process analysis

0 引 言

注浆法^[1-2]作为加固软弱岩土体和地下水灾害治理的有效手段, 已被广泛应用于隧道、矿山、地基处理等各类工程中, 其中, 劈裂注浆的应用非常广泛^[3-4]。

然而, 现阶段劈裂注浆理论远远落后于工程应用,

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572275); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2017MEE032)

收稿日期: 2016 - 12 - 28

***通讯作者** (E-mail: dingwantao@sdu.edu.cn)

劈裂注浆工程迫切需要准确的、科学的理论指导。

劈裂注浆过程^[5-6]指随时间的增长浆液不断地劈开土体并向前扩展的过程,是一个动态变化的过程,其研究具有相当的复杂性。前人在劈裂注浆方面已做了一定的研究,但是,目前关于劈裂注浆过程的理论研究却鲜有报道。邹金锋等^[3]基于牛顿流体,通过Navier-Stokes方程分析了劈裂注浆的注浆压力衰减和浆液最终扩散半径;张忠苗等^[7]基于幂律流体,对桩底劈裂注浆扩散半径和注浆压力进行了研究;李术才等^[8]根据具体工程,建立了优势劈裂注浆模型,研究了富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法。但上述研究均将劈裂注浆通道考虑成一次劈裂成足够长的劈裂缝且裂缝宽度恒定来进行计算分析,未考虑浆液与土体的耦合特性,更未对劈裂注浆的过程进行分析。张连震等^[6]、张庆松等^[9]利用土体影响深度及土体压缩性来计算土体变形量,考虑了浆土耦合特性。但该文亦未对劈裂注浆的过程进行分析,且计算中土体影响深度这个重要参数为一个未考虑尺寸效应且难以取值的恒定量,与实际存在较大差距。

基于以上问题,本文引入基床系数法^[10],考虑了尺寸效应及不同土体的差异,并进一步考虑浆土应力耦合特性,对不同土体劈裂注浆过程进行了分析。推导了浆液扩散半径变化方程、浆液压力时空变化方程、劈裂缝宽度时空变化方程,并进行了相应的分析。通过与现场试验对比分析,表明了本研究的合理性。

1 基床系数的确定

1.1 基床系数标准值

基床系数指单位面积地基土在外力作用下产生单位变形时所需的应力,也叫做弹性抗力系数或地基反力系数。可用下式表示:

$$k = \frac{N}{y} \quad (1)$$

式中 k 为基床系数设计值 (MPa/m); N 为土体所受应力; y 为土体变形量。

基床系数类似于土体压缩模量,但是又与压缩模量有所区别。基床系数表示的是工程现场土体的整体压缩特性,在计算现场土体变形量时可以直接使用而不出现压缩层厚度这个不确定的因素。

根据相关规范^[11-12],基床系数的确定以 k_{30} 平板载荷试验方法应用最为广泛且最为准确,常将该方法确定的结果作为基床系数标准值;当难以开展现场载荷试验时,也可利用室内三轴试验、室内固结试验等进行取值,并将试验值修正为基床系数标准值。

1.2 劈裂注浆中尺寸效应修正

由于试验范围和尺寸的局限性,基床系数标准值与真实的现场数据仍存在很大差异,需要对基床系数标准值进行尺寸效应的修正^[10-12]。在劈裂注浆过程中,由于浆液扩散半径是不断变化的,浆液对土体的压缩范围也在不断变化的,其基床系数设计值实质上具有一个动态变化的过程,可用下式表示:

对黏性土

$$k = \frac{0.3}{2R} k_b \quad (2)$$

对砂土

$$k = \left(\frac{2R + 0.3}{4R} \right)^2 k_b \quad (3)$$

式中 k_b 为基床系数标准值 (MPa/m); R 为浆液扩散半径,其随注浆过程的不断进行而不断发生变化,为注浆时间 t 的函数,即 $R=R(t)$ 。

劈裂注浆在黏性土和砂土中均有较多的应用,本文对黏性土和砂土均进行计算分析。

2 基于基床系数法的劈裂注浆过程分析模型

2.1 劈裂注浆过程分析模型与假设

随注浆过程的进行,浆液扩散半径、各位置处浆液压力不断发生变化。同时,由于受浆液压力和扩散半径变化的影响,任一位置处劈裂缝宽度也是在不断变化的(如图1,其中 σ_1 , σ_3 分别为地层中的大、小

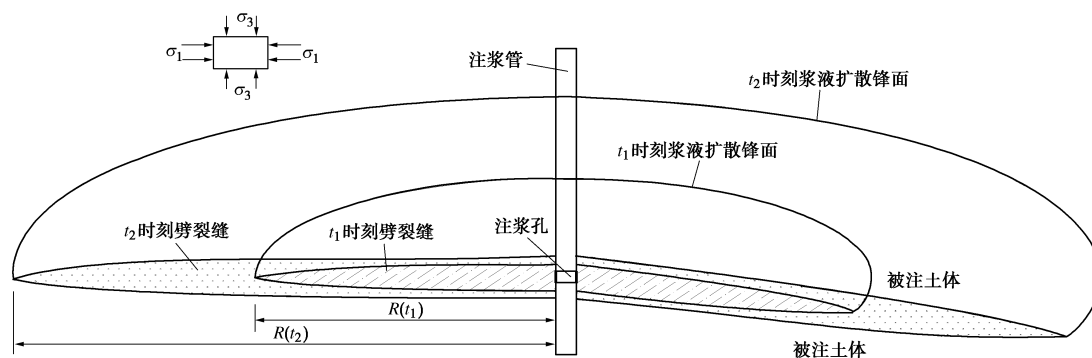


图1 劈裂注浆过程分析模型

Fig. 1 Analysis model for process of split grouting

主应力), 且在扩散锋面位置处劈裂缝宽度为 0。劈裂注浆过程具有明显的时空变化特性。

此外, 由于土体内部结构复杂性、土体渗透性及裂缝侧壁与水平方向夹角等原因都对劈裂注浆过程存在一定影响。基于此, 本文作如下假设:

(1) 假设注浆土体均匀, 且不存在渗透性, 浆液完全在劈裂缝中运动。

(2) 认为土体中最小主应力方向竖直, 最大主应力方向水平, 劈裂缝始终在水平方向, 且具有圆形轴对称特性 (如图 1)。

(3) 认为浆液对土体的压力总是在竖直方向。

(4) 假设浆液在劈裂缝中以层流的形式运动, 忽略劈裂缝宽度变化及注浆孔对流动状态的影响; 浆液侧壁为无滑移边界, 侧壁处浆液流速为 0。

(5) 认为浆液是均质、不可压缩的各向同性体; 注浆过程中流型保持不变。

2.2 基于基床系数法的劈裂缝宽度方程

浆液想要劈裂土体并不断向前扩展, 劈裂缝前端应力必须满足浆液的扩展应力, 根据断裂力学的裂缝扩展理论^[13], 裂缝扩展应力 p_d 为

$$p_d = \frac{G(L/r_0)}{F(L/r_0)} \sigma_3 + \left(1 - \frac{G(L/r_0)}{F(L/r_0)} \right) \sigma_1 + \frac{K_1}{F(L/r_0) \pi L} \quad (4)$$

式中 $G(L/r_0)$, $F(L/r_0)$ 为 L/r_0 的函数, 当 $L/r_0 \geq 10$ 时, $G(L/r_0) = F(L/r_0) = 1$; K_1 为裂缝扩展临界强度因子; L 为劈裂缝长度; r_0 为注浆孔半径。

由于注浆过程中, 通常 L 数值比 r_0 大很多, 依据相关文献^[9], 可将上式简化为

$$p_d = \sigma_3 \quad (5)$$

浆液劈裂土体必须首先克服土体中的最小主应力, 即在土体中的附加的应力才能真正有效地使土体产生变形, 劈裂土体。

联立式 (1)、(2)、(5) 并考虑劈裂缝两侧土体变形, 可得黏性土劈裂缝宽度 b 与浆液压力 p 为

$$b = \frac{4(p - \sigma_3)R}{0.3k_b} \quad (6)$$

$$p = \frac{0.3k_b b}{4R} + \sigma_3 \quad (7)$$

可见, 劈裂缝两侧土体变形不仅受浆液压力的控制, 也受浆液扩散半径的影响。对于黏性土, 劈裂缝宽度与浆液压力和浆液扩散半径均呈正相关关系; 浆液压力与劈裂缝宽度呈正相关关系, 与浆液扩散半径呈负相关关系。

联立式 (1)、(3)、(5) 并考虑劈裂缝两侧土体变形, 可得砂土劈裂缝宽度与浆液压力为

$$b = \frac{2(p - \sigma_3)R}{k_b} \left(\frac{4R}{2R + 0.3} \right)^2 \quad (8)$$

$$p = \frac{k_b b}{2} \left(\frac{2R + 0.3}{4R} \right)^2 + \sigma_3 \quad (9)$$

对于砂土, 可知劈裂缝宽度与浆液压力和浆液扩散半径均呈正相关关系; 浆液压力与劈裂缝宽度呈正相关关系, 与浆液扩散半径呈负相关关系。

2.3 基于基床系数法的劈裂注浆过程分析

工程中常用的水灰比为 2.0~10.0 的水泥浆属于牛顿流体, 水灰比为 0.8~1.0 的水泥浆、水泥-水玻璃浆液 (C-S 双液浆) 等则近似属于宾汉流体。宾汉流体由于屈服剪切力的存在, 理论研究复杂, 但是根据表观黏度的定义与测试原理并考虑到宾汉流体的屈服剪切力通常很小, 其影响甚微。因此实际工程中无论是牛顿流体还是宾汉流体, 一般都可以采用下式 (10) 所示的类似于牛顿流体本构方程的形式来近似描述浆液流变性能^[9]。

$$\tau = \mu_b \gamma \quad (10)$$

式中 τ 为浆液内部剪应力; μ_b 为浆液表观黏度, 其多具有时变性, 为时间 t 的函数, 即 $\mu_b = \mu_b(t)$; γ 为浆液剪切速率。

根据本文假设, 近似按平面问题研究, 取其中对称于裂缝中心线的微单元体进行平衡分析 (如图 2, 其中 dp 为浆液压力增量; dr 为微元体长度; h 为微元体半高; v 为浆液流速; r 为半径), 由于许多文献已经进行了相关研究^[2,6], 本文不加以赘述。

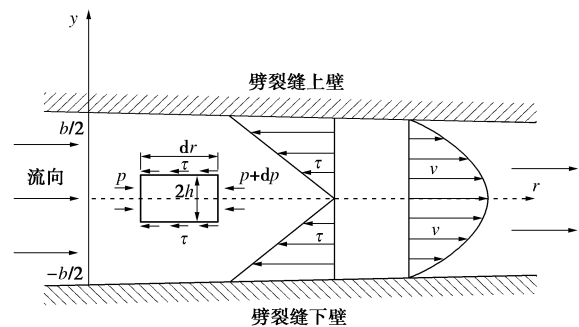


图2 单元体平衡分析

Fig. 2 Analysis of element balance

浆液压力随半径的变化速率可表示为

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{6\mu_b q}{\pi r b^3} \quad (11)$$

式中 q 为注浆速率; 浆液压力 p 为 r 和 t 的函数, 即 $p = p(r, t)$; 裂缝宽度 b 亦可表示为 $b = b(r, t)$ 。

(1) 黏性土分析

根据式 (6) 可得, 劈裂缝宽度随浆液压力的变化速率为

$$\frac{\partial b}{\partial p} = \frac{4R}{0.3k_b} \quad (12)$$

由式 (6) 可知, 裂缝宽度 b 为 p 和 R 的函数,

即 $b=b(p, R)$ 。根据复合函数求导公式, 可得 b 对 r 求偏导公式为

$$\frac{\partial b}{\partial r} = \frac{\partial b}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial b}{\partial R} \cdot \frac{\partial R}{\partial r} \quad (13)$$

将式(11)、(12)代入上式, 其中 $\partial R / \partial r = 0$, 可得裂缝宽度随半径的变化速率如下:

$$\frac{\partial b}{\partial r} = -\frac{80\mu_b q R}{\pi k_b r b^3} \quad (14)$$

利用分离变数法求解上述偏微分方程, 并代入边界条件 $b|_{r=R} = 0$, 可得裂缝宽度变化方程如下:

$$b = \left(\frac{320\mu_b q R}{\pi k_b} \ln \frac{R}{r} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (15)$$

将式(15)代入式(7), 得浆液压力变化方程:

$$p = \left(\frac{\mu_b q k_b^3}{100\pi R^3} \ln \frac{R}{r} \right)^{\frac{1}{4}} + \sigma_3 \quad (16)$$

由于不考虑浆液的压缩性和土体渗透性, 因此, 根据质量守恒定律可知, 劈裂注浆时间 t 内总的浆液注入量等于相应时刻的劈裂缝总体积, 即

$$Q = \int_0^t q dt = 2\pi \int_{r_0}^R r \cdot b dr \quad (17)$$

由于注浆孔半径 r_0 相对于整个注浆扩散区域非常小, 因而可以忽略其影响, 将 r_0 取为 0。将式(15)代入上式, 并移项化简可得如下方程式:

$$qA(t) = \left(\frac{5120\pi^3 q R}{k_b} \right)^{\frac{1}{4}} B(R) \quad (18)$$

式中

$$A(t) = \frac{t}{[\mu_b(t)]^{\frac{1}{4}}} \quad (19)$$

$$B(R) = \int_0^R r \left(\ln \frac{R}{r} \right)^{\frac{1}{4}} dr \quad (20)$$

由于 $B(R)$ 的原函数无法确定, 因此本文采用数值积分的方法求解定积分 $B(R)$ 的近似值。本文将 $0 \sim R$ 区域等分为 1000 段, 并为提高计算精度, 采用了复化 simpson 公式进行数值积分。可以求得其近似值为

$$B(R) \approx \sum_{k=1}^{500} \frac{R}{3000} \left[\frac{(2k-2)R}{1000} \left(\ln \frac{1000}{2k-2} \right)^{\frac{1}{4}} + \frac{(2k-1)R}{1000} \left(\ln \frac{1000}{2k-1} \right)^{\frac{1}{4}} + \frac{2k \cdot R}{1000} \left(\ln \frac{1000}{2k} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \approx 0.381R^2 \quad (21)$$

将极高精度的 Matlab 计算值 (精度为 10^{-10}) 与式(21)求得的近似值进行比较 (见表 1), 可知按 1000 段进行数值积分确定的式(21)亦具有很高的准确度。

表 1 $B(R)$ 值准确性验证表

Table 1 Verification of accuracy of $B(R)$					
R	0.5	1	1.5	2	2.5
Matlab	0.0952738	0.3810952	0.8574644	1.5243811	2.3818456
计算值	23403	95699	16927	86581	04647
$0.381R^2$	0.09525	0.381	0.85725	1.524	2.38125
相对误差 /%	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025	-0.025

将式(21)代入式(18)并移项化简, 可以确定浆液扩散半径与注浆时间的关系, 即浆液扩散半径变化方程, 如下:

$$R(t) = \left(\frac{k_b q^3 [A(t)]^4}{107.89\pi^3} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (22)$$

将上式分别代入式(15)和式(16), 可得任意半径、任意注浆时刻的劈裂缝宽度与浆液压力, 即劈裂缝宽度时空变化方程、浆液压力时空变化方程如下:

$$b(r, t) = \left(\frac{8.42 \times 10^{11} q^{12} [\mu_b(t)]^9 [A(t)]^4}{\pi^{12} k_b^8} \right)^{\frac{1}{36}} \times \left(\ln \frac{k_b q^3 [A(t)]^4}{107.89\pi^3 r^9} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (23)$$

$$p(r, t) = \left(\frac{k_b^8 [\mu_b(t)]^3}{6.76 \times 10^6 [A(t)]^4} \right)^{\frac{1}{12}} \times \left(\ln \frac{k_b q^3 [A(t)]^4}{107.89\pi^3 r^9} \right)^{\frac{1}{4}} + \sigma_3 \quad (24)$$

根据式(23)和式(24)进行劈裂注浆过程分析时, 若令 t 恒定, 那么 r 的取值范围为 $r_0 \leq r \leq R(t)$; 若令 r 恒定, 那么 t 的取值范围为 $t \geq t(r)$, $R(t)$, $t(r)$ 可通过式(22)进行确定。

(2) 砂土分析

砂土与黏性土具有不同的特性, 根据式(3)可知, 即使是在相同的基床系数标准值时, 其基床系数设计值与黏性土也存在很大的差异, 土体的变形也存在很大差异。

由式(8)可得, 砂土中劈裂缝宽度随浆液压力的变化速率为

$$\frac{\partial b}{\partial p} = \frac{2}{k_b} \left(\frac{4R}{2R+0.3} \right)^2 \quad (25)$$

同黏性土计算过程类似, 将式(11)和式(25)代入式(13), 可得劈裂缝宽度 b 对 r 的偏导公式为

$$\frac{\partial b}{\partial r} = -\frac{12\mu_b q}{\pi k_b r b^3} \left(\frac{4R}{2R+0.3} \right)^2 \quad (26)$$

利用分离变数法, 并代入边界条件 $b|_{r=R} = 0$, 可得砂土中裂缝宽度变化方程如下:

$$b=\left(\frac{48\mu_bq}{\pi k_b}\left(\frac{4R}{2R+0.3}\right)^2\ln\frac{R}{r}\right)^{\frac{1}{4}}。 \quad (27)$$

将上式代入式 (9), 并移项化简, 可得浆液压力变化方程如下:

$$p=\left(\frac{3\mu_bqk_b^3}{\pi}\left(\frac{2R+0.3}{4R}\right)^6\ln\frac{R}{r}\right)^{\frac{1}{4}}+\sigma_3。 \quad (28)$$

将式 (27) 代入式 (17), 并进行类似的处理, 可得浆液扩散半径与扩散时间的关系式为

$$qA(t)=\left[\frac{768\pi^3q}{k_b}\left(\frac{4R}{2R+0.3}\right)^2\right]^{\frac{1}{4}}B(R)。 \quad (29)$$

将式 (21) 代入上式并移项化简, 可得砂土中浆液扩散半径与注浆时间的关系方程如下:

$$\frac{t^4}{\mu_b(t)}=\frac{16.183\pi^3}{q^3k_b}\left(\frac{4R^5}{2R+0.3}\right)^2。 \quad (30)$$

上式难以确定其通解, 只能通过隐函数的形式进行表示。联立式 (27) 与式 (30) 可得砂土中劈裂缝宽度时空变化方程, 亦可联立式 (28) 与式 (30) 确定砂土中浆液压力时空变化方程。 r 和 t 的取值范围类似于黏性土分析时的取值, 可通过式 (30) 来确定。

3 劈裂注浆扩散规律及影响因素分析

影响劈裂注浆过程的因素众多, 土体性质、浆液性质、注浆压力、注浆时间、重力作用等都会对其产生很大影响。土体性质中其内部结构差异具有极大的不确定性, 难以预测, 研究中多假设土体内部结构均匀, 此外土体变形性能、应力、渗透性等也具有较大影响; 注浆压力为土体劈裂提供动力, 其主要影响着劈裂的范围; 浆液性质主要包括浆液的流变性能和浆液黏度, 其控制着浆液的运动特性与能量消耗; 注浆时间控制着浆液黏度、浆液扩散范围、注浆量等; 重力作用常使浆液有向下运动的趋势, 其与复杂的土体内部结构的联合作用常常更增加了劈裂注浆预测的难度。为突出本文研究重点及劈裂注浆过程的关键因素, 本部分主要对土体基床系数、注浆时间、浆液参数 (C-S 双液浆)、土体类型进行重点研究和分析。

计算分析时, 注浆材料选用 C-S 双液浆, 注浆速率 $q=20\text{ L/min}$, 注浆孔半径 $r_0=0.05\text{ m}$, 裂缝扩展应力取 100 kPa 。据相关研究^[14-15], 水泥浆水灰比为 1 : 1, 水泥水玻璃体积比为 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1 的 C-S 双液浆的表观黏度拟合曲线如图 3 所示, 其拟合公式如下:

$$\mu_b=\eta t^\lambda, \quad (31)$$

式中, η , λ 为拟合系数, 按上述水泥水玻璃体积比 η 依次为 0.003182, 0.0008427, 0.01864, λ 依次为 2.23,

2.694, 2.066; μ_b 和 t 的单位分别为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 和 s 。

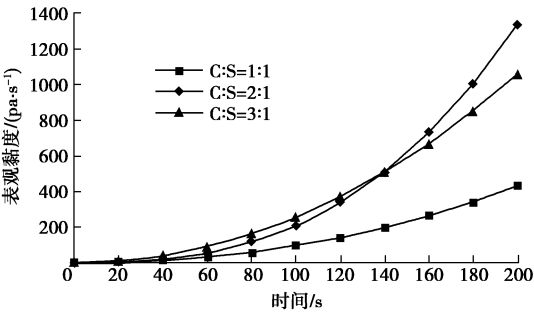


图 3 水泥-水玻璃浆液表观黏度 - 时间拟合曲线
Fig. 3 Fitting curves of apparent viscosity-time of cement silicate slurry

根据拟合公式并结合上图分析可知, 体积比为 1 : 1 的双液浆表观黏度恒小于体积比为 3 : 1 的双液浆表观黏度。因此, 本文以水泥水玻璃体积比为 1 : 1 与 3 : 1 的双液浆来进行对比分析。

主要取下表 2 所示的水泥水玻璃体积比 2 种工况, 和基床系数标准值 2 种工况进行分析。

表 2 劈裂注浆主要计算工况

Table 2 Main conditions of split grouting		
工况	基床系数标准值 $k_b/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	体积比(C : S)
1	5	1 : 1
2	5	3 : 1
3	5	1 : 1
4	10	1 : 1

3.1 浆液扩散半径随时间变化分析

不同工况下, 浆液扩散半径随时间变化曲线如图 4 所示。为了体现不同土体的差异, 图中在原有主要工况基础上, 分别进行了黏性土与砂土的曲线绘制。

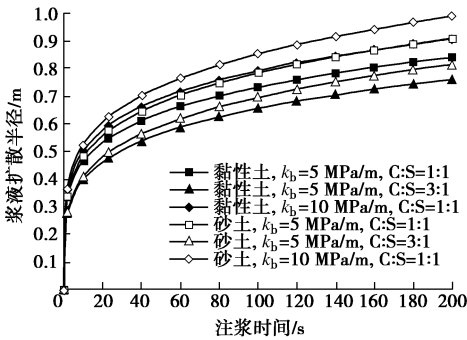


图 4 浆液扩散半径随时间变化曲线
Fig. 4 Variation curves of slurry diffusion radius along with time
分析图 4 可知:

(1) 在定流量注浆时, 浆液扩散半径随时间变化曲线都具有相同的变化趋势, 且均随时间增长而不断增大。在注浆初期, 浆液扩散半径急剧增大, 而后随时间增长, 浆液的扩散速率不断变缓。

(2) 在同一时刻, 浆液的扩散半径随浆液黏度的增大而减小。分析原因为: 浆液黏度越大, 其扩散过程中受到的阻力越大, 浆液的扩散需要更大的注浆压力, 相应的劈裂缝宽度亦越大, 在时间相同时 (即注浆量相同), 势必会造成扩散距离的减小。

(3) 在同一时刻, 浆液的扩散半径随土体基床系数标准值的增大而增大。分析原因为: 土体基床系数标准值越大, 土体的变形越困难, 在时间相同时 (即注浆量相同), 势必会产生较大的扩散距离。

(4) 浆液扩散半径随时间的变化曲线受土体类型的影响, 任意时刻黏性土中浆液的扩散半径小于砂土中浆液的扩散半径。

3.2 浆液压力时空变化分析

不同工况下, 浆液压力时空变化曲线如图 5 所示。为了体现注浆时间以及不同土体的差异, 图中在原有主要工况基础上, 又分别进行了注浆时间 100, 200 s 以及黏性土、砂土的曲线绘制。

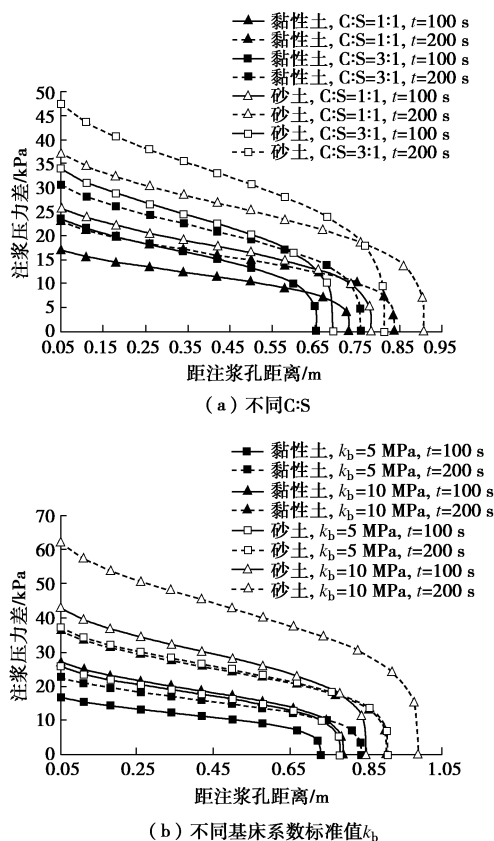


图 5 浆液压力时空变化曲线

Fig. 5 Temporal and spatial variation curves of slurry pressure

分析图 5 可知:

(1) 在定流量注浆时, 浆液压力时空变化曲线都具有相同的变化趋势, 且均随距注浆孔距离的增大而减小, 在扩散锋面位置处衰减至裂缝扩展应力; 在浆液扩散锋面位置附近衰减速率最快, 在注浆孔附近位

置处衰减速率次之, 在两者中间位置处衰减速率较小且近乎恒定。分析原因为: 根据式 (11), 浆液压力衰减速率与距注浆孔距离的一次方及劈裂缝宽度的三次方成反比, 劈裂缝宽度具有更大的影响; 在扩散锋面位置附近, 劈裂缝宽度较小, 其影响占绝对优势; 在注浆孔附近位置, 其距注浆孔的距离占较小的优势; 而在中间位置, 两者的影响近于平衡。

(2) 在定流量注浆时, 浆液扩散半径范围内任一位置的浆液压力均随注浆时间的增大而增大。且在相同的时间间隔内, 黏性土浆液压力增量较砂土要小。

(3) 随浆液黏度的增大, 自注浆孔至近浆液扩散锋面的绝大部分位置处的浆液压力也增大; 但由于扩散距离较小, 因而在近浆液扩散锋面位置附近, 浆液压力急剧衰减而使浆液压力变小。

(4) 随基床系数标准值的增大, 由于土体变形更加困难, 浆液扩散半径范围内任一位置处的浆液压力均增大。

(5) 浆液压力时空变化曲线受土体类型的影响明显, 任意位置处的黏性土的浆液压力均小于砂土。

3.3 劈裂缝宽度时空变化分析

不同工况下, 劈裂缝宽度时空变化曲线如下图 6。图中亦在原有主要工况基础上, 分别进行了注浆时间 100, 200 s 以及黏性土、砂土的曲线绘制。分析图 6 可知:

(1) 在定流量注浆时, 劈裂缝宽度时空变化曲线的变化趋势与浆液压力时空变化曲线的变化趋势类似, 均随距注浆孔距离的增大而减小, 在扩散锋面位置处衰减为 0; 浆液扩散锋面位置附近衰减速率大于注浆孔附近位置处衰减速率, 两者中间位置处衰减速率最小且近乎恒定。分析原因为: 在注浆时间确定时, 浆液扩散半径亦确定, 根据式 (6) 和式 (8), 此时劈裂缝宽度与浆液压力具有一一对应的关系。

(2) 在定流量注浆时, 劈裂缝宽度亦均随注浆时间的增大而增大。且在相同的时间间隔内, 黏性土中劈裂缝宽度增量要比砂土中大。

(3) 随浆液黏度的增大, 劈裂缝宽度在自注浆孔至近浆液扩散锋面的大部分位置处也增大; 在浆液扩散锋面位置附近的较小范围内劈裂缝宽度变小, 这也与相应的浆液压力时空变化曲线相吻合。

(4) 随基床系数标准值的增大, 由于土体变形更加困难, 在自注浆孔至近浆液扩散锋面附近的绝大部分位置处劈裂缝宽度减小; 但由于扩散距离较大, 因而在浆液扩散锋面位置附近, 劈裂缝宽度增大。

(5) 在自注浆孔至近浆液扩散锋面附近的绝大部分位置处, 黏性土中劈裂缝宽度大于砂土中劈裂缝宽度, 仅在浆液扩散锋面附近的较小位置处黏性土中的

劈裂缝宽度小于砂土中的劈裂缝宽度。分析原因：黏性土受尺寸效应的影响较强，劈裂缝宽度较大，但由于黏性土的扩散距离较小，因而在浆液扩散锋面位置附近的较小范围内，由于劈裂缝宽度的急剧衰减而使黏性土中劈裂缝宽度小于砂土。

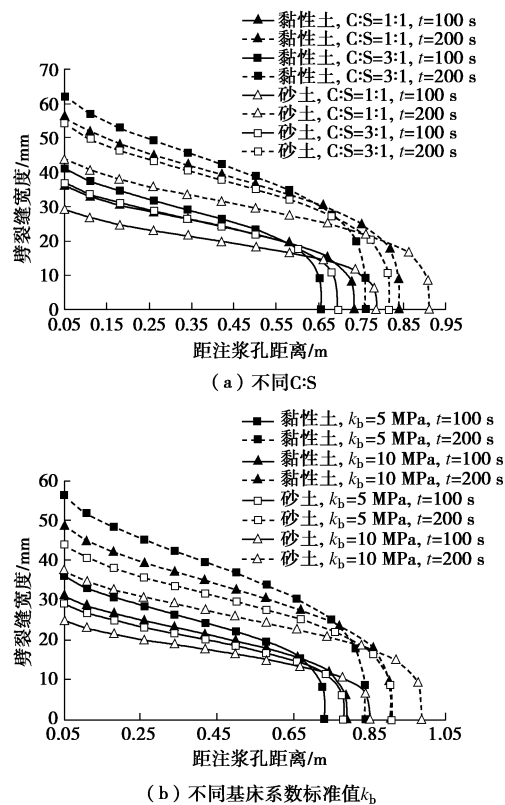


图6 劈裂缝宽度时空变化曲线

Fig. 6 Temporal and spatial variation curves of split crack width

4 现场试验分析

4.1 工程概况

南京地铁三号线元门站（原滨江路站）毗邻长江，距离江边约400 m，采用明挖顺作法施工，设计底板埋深为22.0 m，底板标高-12.0 m。2014年1月，在基坑开挖过程中坑底发生涌水，涌水量达130 m³/h，严重影响施工进度。

结合相关资料与现场勘察，区域内发育有多条断裂，其中长江以南的沿江断裂与本标段近垂直相交，对该工程具有影响巨大。标段内地质结构复杂，岩体破碎且软弱，性质不均，地下水丰富，富水层厚度达16 m。基底以下主要为软-流塑粉质黏土、粉砂、细砂（土体主要参数见表3），具有较高的渗透性，且与长江水存在一定的水力联系。分析涌水原因为：长江水通过砂土层向基坑进行补给，并冲破覆土进入基坑，产生涌水。

表3 基底土体主要参数

Table 3 Main parameters of bottom soils of foundation pit					
名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率 $w/\%$	孔隙比 e	基床系数标准 值 $k_b/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	平均厚 度/m
粉砂、细砂	19.3	29.0	0.798	10	4.91
粉质黏土	18.4	34.8	0.993	14	4.13
粉砂、细砂	19.4	25.7	0.744	26	18.27

4.2 现场试验设计

经研究，拟对设计底板以下区域进行注浆加固，以消除基坑进一步开挖带来的隐患。为使该工程能够有效、顺利的进行，前期进行了一定的现场试验。根据工程问题并结合现场实际，采用模袋注浆来隔离设计底板深度以上未开挖土体并对设计底板以下岩土体进行注浆加固。

以t-2注浆孔为例，采用水泥-水玻璃双液浆进行现场注浆试验，其中水泥浆水灰比为1:1，水泥水玻璃体积比为3:1，注浆速率控制在40~70 L/min，注浆终压为0.5 MPa。钻孔直径75 mm，孔深12 m（设计底板深度以下6 m），设计扩散半径1.5 m。

4.3 对比分析

注浆过程中对注浆时间以及对应的注浆压力进行记录，注浆后在离注浆孔0.5 m的位置处进行取芯（见图7），取芯深度在设计底板以下4~6 m处。



图7 试验岩芯图

Fig. 7 Rock core of tests

根据土体参数等相关勘察资料并考虑基坑开挖状况，确定取芯位置处土体的裂缝扩展应力为约92 kPa。由于劈裂位置集中在砂土中，且基底土体亦绝大多数为砂土，因此计算时按砂土进行；基床系数标准值近似采用各土层平均值16.67 MPa/m。

对达到注浆终压的时间以及取芯位置处劈裂缝宽度的计算值与实测值进行对比，见下表4。

注浆压力随时间变化的计算曲线与实测曲线对比，见下图8。

由表4可知，注浆时间的实测值在计算值范围内，可以认为是相对准确的；而劈裂缝宽度计算值大于实测值，将实测值的平均值与计算值进行比较可得其误

差范围为 81.2%~85.6%；由图 8 可知，注浆压力随时间变化的计算曲线与实测曲线具有类似的变化趋势，各时刻平均误差的范围为 35.2%~57.5%。由于劈裂注浆过程的复杂性且理论研究远落后于工程实际，国内外一些研究认为注浆工程中理论值与实测值相对误差在-50%~100%之间都是可以接受的^[16]。实际注浆过程中，由于土体内部结构的复杂性，浆液将会不断劈开地层中的薄弱带，逐渐形成多条空间分布复杂的劈裂缝，这可能是导致计算值与实测值差异的主要原因。

表 4 实测值与计算值对比表

Table 4 Comparison between measured and calculated results			
值	注浆终压 p_0/MPa	注浆时间 t/min	劈裂缝宽度集中范围 b/mm
实测值	0.5	25.8	64.5~91.7
计算值	0.5	23.34~30.51	141.52~144.99

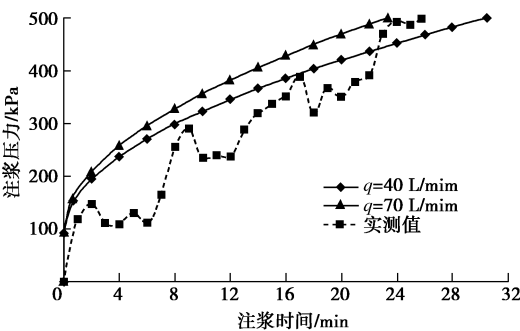


图 8 实测与计算 $p-t$ 曲线对比

Fig. 8 Comparison between measured and calculated $p-t$ curves

5 讨 论

- (1) 实际上土体的应力-变形曲线并非是一条直线。因此，通过基床系数法进行劈裂注浆过程分析中的非线性问题仍需进一步研究。
- (2) 实际上受浆液压力作用，土体中存在剪应力，浆液扩散半径之外的土体亦会产生一定变形。对于相关问题仍需进行深入研究。
- (3) 由于土体内部结构的差异性、注浆过程中主应力方向的改变以及浆液重力作用等原因，实际裂缝的展布通常具有一定空间复杂性。因此，仍需对劈裂缝空间展布问题以及相应的浆液扩散机制进行研究。
- (4) 实际地基土常有层状或者其它更复杂的分布形式，在劈裂注浆中如何将各土层基床系数进行合理、准确的应用也值得进一步研究。

6 结 论

- (1) 基于基床系数法，考虑了尺寸效应及不同土体的差异，并进一步考虑浆土应力耦合特性，对不同

- 土体劈裂注浆过程进行了分析。推导了浆液扩散半径变化方程、浆液压力时空变化方程、劈裂缝宽度时空变化方程。
- (2) 随时间增长浆液扩散半径不断增长，但增长速率不断变缓。浆液扩散半径与浆液黏度呈负相关，而与基床系数标准值呈正相关，且黏性土要小于砂土。
- (3) 浆液压力时空变化曲线与劈裂缝宽度时空变化曲线具有类似的趋势；两者都随时间增长而增大，且均在大部分位置与浆液黏度呈正相关，仅在浆液扩散锋面附近较小位置呈负相关。
- (4) 浆液压力与基床系数标准值呈正相关，黏性土中浆液压力小与砂土；劈裂缝宽度在绝大部分位置处与基床系数标准值呈负相关，在浆液扩散锋面附近较小位置呈正相关，黏土中绝大部分位置劈裂缝宽度大于砂土，在浆液扩散锋面附近较小位置小于砂土。
- (5) 根据工程现场试验，对注浆时间、劈裂缝宽度以及注浆压力变化曲线的计算值与实测值进行对比，其差别在可接受范围内，验证了理论的合理性。

参考文献:

[1] 张庆松, 韩伟伟, 李术才, 等. 灰岩角砾岩破碎带涌水综合注浆治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2412 - 2419. (ZHANG Qing-song, HAN Wei-wei, LI Shu-cai, et al. Comprehensive grouting treatment for water gushing analysis in limestone breccias fracturezone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2412 - 2419. (in Chinese))

[2] 邝键政, 咎月稳, 王 杰, 等. 岩土工程注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (KUANG Jian-zheng, ZAN Yue-wen, WANG Jie, et al. Theory and project example of grout in geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))

[3] 邹金锋, 李 亮, 杨小礼. 劈裂注浆扩散半径及压力衰减分析[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 314 - 319. (ZOU Jin-feng, LI Liang, YANG Xiao-li. Penetration radius and pressure attenuation law in fracturing grouting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 314 - 319. (in Chinese))

[4] 李 鹏, 张庆松, 张 霄, 等. 基于模型试验的劈裂注浆机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3221 - 3230. (LI Peng, ZHANG Qing-song, ZHANG Xiao, et al. Analysis of fracture grouting mechanism based on model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3221 - 3230. (in Chinese))

[5] 张忠苗, 邹 健, 贺静漪, 等. 黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12):

- 1818-1824.(ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian, HE Jing-yi, et al. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1818 - 1824. (in Chinese))
- [6] 张连震, 李志鹏, 张庆松, 等. 基于土体非线性压密效应的劈裂注浆机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(7): 1483 - 1493. (ZHANG Lian-zhen, LI Zhi-peng, ZHANG Qing-song, et al. Split grouting mechanism based on nonlinear characteristics of compression process of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(7): 1483 - 1493. (in Chinese))
- [7] 张忠苗, 邹健. 桩底劈裂注浆扩散半径和注浆压力研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(2): 181 - 184. (ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian. Penetration radius and grouting pressure in fracture grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(2): 181 - 184. (in Chinese))
- [8] 李术才, 张伟杰, 张庆松, 等. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(3): 745 - 751. (LI Shu-cai, ZHANG Wei-jie, ZHANG Qing-song, et al. Research on advantage-fracture grouting mechanism and controlled grouting method in water-rich fault zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(3): 745 - 751. (in Chinese))
- [9] 张庆松, 张连震, 刘人太, 等. 基于“浆-土”界面应力耦合效应的劈裂注浆理论研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 323 - 330. (ZHANG Qing-song, ZHANG Lian-zhen, LIU Ren-tai, et al. Split grouting theory based on slurry-soil coupling effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 323 - 330. (in Chinese))
- [10] TERZAGHI K. Evaluation of coefficients of subgrade reaction[J]. Géotechnique, 1955, **5**(4): 297 - 326.
- [11] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001. (in Chinese))
- [12] GB50307—2012 城市轨道交通岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (GB50307—2012 Code for geotechnical investigations of urban rail transit[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))
- [13] 酆正能, 张纪奎. 工程断裂力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012. (LI Zheng-neng, ZHANG Ji-kui. Engineering fracture mechanics[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012. (in Chinese))
- [14] 李术才, 刘人太, 张庆松, 等. 基于黏度时变性的水泥-玻璃浆液扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(12): 2415 - 2421. (LI Shu-cai, LIU Ren-tai, ZHANG Qing-song, et al. Research on C-S slurry diffusion mechanism with time-dependent behavior of viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(12): 2415 - 2421. (in Chinese))
- [15] 李术才, 韩伟伟, 张庆松, 等. 地下工程动水注浆速凝浆液黏度时变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(1): 1 - 7. (LI Shu-cai, HAN Wei-wei, ZHANG Qing-song, et al. Research on time-dependent behavior of viscosity of fast curing grouts in underground construction grouting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [16] 阮文军. 基于浆液黏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 Wen-jun. 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))