

文章编号: 1000-7598-(2006) 04-0625-04

土体劈裂灌浆力学机理分析

邹金锋¹, 李 亮¹, 杨小礼¹, 胡振南²

(1. 中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075; 2. 长沙理工大学 桥桥梁与结构学院, 长沙 410076)

摘 要: 为了在塑性力学和大变形理论的基础上分析土体在劈裂灌浆初始阶段的力学机理, 将劈裂灌浆的初始阶段视为无限土体中的圆孔扩张问题, 并将圆孔周围土体中的应力分布分为 3 个区域。在弹性区中土体服从小变形假设, 在软化区和流动区中土体服从大变形假设。根据应力平衡方程以及应力和应变连续的边界条件, 推导出劈裂灌浆初始阶段的最终扩孔压力和最终扩孔半径的理论解答。同时, 还分析了灌浆压力、最终扩孔半径、土体的泊松比和大变形以及压缩模量之间的相互关系。该理论的计算结果与工程实测结果比较接近, 初步证实了该理论的可靠性。

关 键 词: 劈裂灌浆; 大应变; 半径; 压力; 扩孔

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Mechanism analysis of fracture grouting in soil

ZOU Jin-feng¹, LI Liang¹, YANG Xiao-li¹, HU Zhen-nan²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: In order to analyze the mechanical mechanism of fracture grouting during the early phase by using the theory of large-deformation and plastic mechanics, the early phase of fracture grouting is regarded as the question of cavity expansion in infinite soil. The stress distribution due to the cavity expansion in soil is considered as three zones. The deformation following little deformation in elastic zone and large-deformation in plastic zone is taken into consideration. On the bases of the stress equilibrium equation and continuous boundary condition of stress and deformation, the stress distribution in three zones, the terminal radius and grouting pressure are obtained. According to the compassion, the results of the present theory is very near to the outcome of the engineering practice.

Key words: fracture grouting; large strain; radius; pressure; cavity expansion

1 前 言

劈裂灌浆技术在软土地基、隧道、路基和堤坝的加固中有着广泛的应用^[1~3], 但对其机理的认识目前还依然处于定性^[3]、水力劈裂^[4, 5]以及弹性力学分析阶段^[6], 虽然这些理论对劈裂灌浆的力学分析都做出过不少的贡献, 但对土体(尤其是黏土)的劈裂灌浆机理进行分析还仍然不够完善。由于黏土有显著的应变软化特性, 且在遇到高应力作用时仍表现出大变形特性等原因, 迄今为止, 能够综合考虑上述因素对土体劈裂灌浆的机理进行分析的尚不多见。本文基于土体的大应变和应变软化等特性, 对土体在劈裂灌浆初始阶段的力学特性、土体的变形、压缩模量和灌浆压力之间的关系进行理论分

析, 最终给出劈裂灌浆初始阶段的最终灌浆压力和最终扩孔半径的理论解答, 以期对劈裂灌浆的设计和施工提供更加完善的理论依据。

2 基本假设

根据实验^[3, 7, 8], 劈裂灌浆是一个先压密后劈裂的过程, 浆液和土体的相互作用机理可以分为 3 个阶段: 初始鼓泡压密阶段、劈裂流动阶段和被动土压力阶段。灌浆开始时, 由于浆液所具备的能量不大, 不能劈裂地层, 浆液都聚集在灌浆管的孔口附近, 形成以灌浆管为主体的球形或柱形浆泡。随着后续浆液的不断注入以及灌浆压力的不断增大, 浆泡将逐渐向四周扩张并继续挤压土体。当土体受到压缩而屈服以致于流动破坏时, 土体就会被灌浆压

收稿日期: 2005-03-25

修改稿收到日期: 2005-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50408020) 资助。

作者简介: 邹金锋, 男, 1978 生, 博士研究生, 主要从事软土地基处理及岩土灌浆技术的应用研究。E-mail: zojinfeng_0@163.com

力所劈开,此时浆液的浆泡将互相连通,从而在土体中形成纵横交错的浆脉,土体的承载能力也显著提高,因此,劈裂灌浆初始阶段的整个力学过程主要是土体在受到挤压后的变形、屈服直至最终破坏而被劈裂的过程。基于以上分析,本文假设:

(1) 劈裂灌浆的鼓泡压密阶段可以视为圆孔扩张问题,按照平面应变条件来处理。土体周围应力分布分为 3 个区域:流动区(塑性流动区)、软化区(屈服区)和弹性区,如图 1 所示。图中 a 为最终扩孔半径; r_y 为软化区半径; r_f 为塑性流动区半径; P 为作用在圆孔内壁的扩孔压力; P_0 为静止土压力。

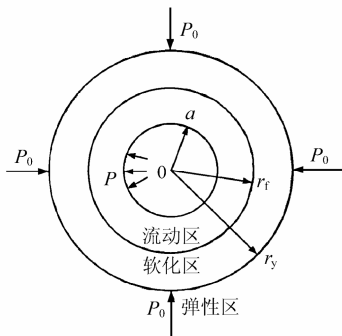


图 1 土体扩孔问题分析示意图

Fig.1 Sketch of cavity expansion analysis for soils

(2) 土体为摩尔-库仑材料,土体的应力-应变关系采用简化的应变软化模型^[9, 10],如图 2 所示。图中 ε_r 为大主应变; σ_r , σ_θ 分别为扩孔过程中的径向和环向应力; σ_1 , σ_3 分别为大小主应力, λ 为土体的软化参数,由实验测定; σ_{cr} 为土体的残余强度; σ_c 为土体的峰值强度; ε_r^p 为软化区内的径向塑性应变。在本文中 σ_r , σ_θ 分别与 σ_1 , σ_3 相对应,应变符号也有相对应关系。在初始屈服阶段, $\sigma_0 = \sigma_c$; 在软化区内, $\sigma_0 = \sigma_c - \lambda \varepsilon_r^p$; 在塑性流动区内, $\sigma_0 = \sigma_{cr}$ 。

根据 MC 屈服准则,土体屈服函数为

$$\sigma_r = M \sigma_\theta + \sigma_0 \quad (1)$$

式中 $M = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$; φ 为岩土材料的内摩擦角。

在软化区内的流动规则为

$$h \varepsilon_r^p + m \varepsilon_\theta^p = 0 \quad (2)$$

式中 ε_r^p , ε_θ^p 分别为软化区内的径向和环向塑性应变; m 为系数。柱形圆孔时, $m = 1$; 球形圆孔时, $m = 2$ 。

在塑性流动区内的流动规则为

$$f \varepsilon_r^p + m \varepsilon_\theta^p = 0 \quad (3)$$

式中 h , f 为材料软化和剪胀特性参数; ε_r^p , ε_θ^p 分别为流动区内径向和环向塑性应变。

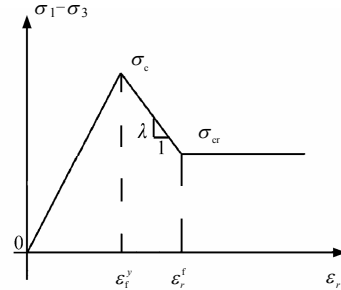


图 2 简化的应力-应变软化模型

Fig.2 Simplified stress-strain softening model

(3) 在弹性区中采用弹性小变形理论,在软化区和流动区中采用大变形理论。因为在弹性区中土体服从小变形理论,由弹性理论可得:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (4)$$

当圆孔由初始半径 r_0 扩张到 r 时,弹性区体积应变的表达式为

$$\varepsilon_v = \varepsilon_r + m \varepsilon_\theta \quad (5)$$

因为圆孔扩张时土体不排水,故其体积不变,即

$$\varepsilon_r = -m \varepsilon_\theta \quad (6)$$

又因在屈服区和破坏区中,土体服从大变形理论,则由塑性理论可知软化半径 r_y ,流动区半径 r_f 分别为^[11~13]

$$r_y = m \frac{a^2}{\varepsilon_r^y}; \quad r_f = m \frac{a^2}{\varepsilon_r^f} \quad (7)$$

3 浆液压缩土体的弹塑性解析解

3.1 弹性区($r \geq r_y$)

根据力学平衡方程,弹性区中土体中的任意一点,其应力有如下关系:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + m \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (8)$$

由轴对称问题的解答,可得弹性区中土体的应力场、径向净位移、极限弹性应变分别为

$$\sigma_r = (p - p_0) \left(\frac{r_y}{r} \right)^{m+1} + p_0; \quad \sigma_\theta = -\frac{(p - p_0)}{m} \left(\frac{r_y}{r} \right)^{m+1} + p_0 \quad (9)$$

$$u = \frac{(1+\nu)(\sigma_{r_y} - p_0)}{E} \frac{r_y}{m} \left(\frac{r_y}{r} \right)^m \quad (10)$$

$$\varepsilon_r^e = -m\varepsilon_\theta^e = \frac{(1+\nu)(\sigma_{r_y} - p_0)}{E} = B \quad (11)$$

利用边界条件:

$$\sigma_r(r_y) = \sigma_{r_y}; \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_r = p_0 \quad (12)$$

可得弹性区的极限径向应力为

$$\sigma_{r_y} = \frac{(m+1)Mp_0 + m\sigma_c}{M+m} \quad (13)$$

3.2 塑性区 ($r_f \leq r \leq r_y$)

在该区域内, 径向总应变可以表示为

$$\varepsilon_r^y = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^p \quad (14)$$

利用软化区内的边界条件: $\sigma_r|_{r=r_y} = \sigma_{r_y}$, 可得塑性区中的应力场解答:

$$\sigma_r = \left[\sigma_{r_y} + \frac{\sigma_0}{M-1} \right] \left(\frac{r_y}{r} \right)^{m(1-\frac{1}{M})} - \frac{\sigma_0}{M-1} \quad (15)$$

又因 $\sigma_0 = \sigma_c - \lambda\varepsilon_r^p$, 则有

$$\sigma_r = \left[\sigma_{r_y} + \frac{1}{M-1} \left[\sigma_c - \lambda \left(m \frac{a^2}{r_y} - B \right) \right] \right] \left(\frac{r_y}{r} \right)^{m(1-\frac{1}{M})} - \frac{1}{M-1} \left[\sigma_c - \lambda \left(m \frac{a^2}{r_y} - B \right) \right] \quad (16)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{M} \left[\left(\sigma_{r_y} + \frac{1}{M-1} \left[\sigma_c - \lambda \left(m \frac{a^2}{r_y} - B \right) \right] \right) \left(\frac{r_y}{r} \right)^{m(1-\frac{1}{M})} - \left(\sigma_c - \lambda \left(m \frac{a^2}{r_y} - B \right) \right) \right] \quad (17)$$

3.3 塑性流动区 ($a \leq r \leq r_f$)

在该区域内, 径向总应变可以表示为

$$\varepsilon_r^f = \varepsilon_r^y + \varepsilon_r \quad (18)$$

在流动区内, 由平衡方程式(8)、MC破坏准则(见式(1))及边界条件: $\sigma_r|_{r=a} = p_u$, 可得流动区域内的应力场解答:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \left(p + \frac{\sigma_{cr}}{M-1} \right) \left(\frac{a}{r} \right)^{m(1-\frac{1}{M})} - \frac{\sigma_{cr}}{M-1}; \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{M} \left[\left(p + \frac{\sigma_{cr}}{M-1} \right) \left(\frac{a}{r} \right)^{m(1-\frac{1}{M})} - \frac{M}{M-1} \sigma_{cr} \right] \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

3.4 最终扩孔半径和最终灌浆压力

在 $r = r_y$ 处, 径向应变连续, 联立式(7)和式(11)可得

$$a^2 / r_y = B / m \quad (20)$$

在 $r = r_f$ 处, 径向应变连续, 且 $\sigma_0 = \sigma_{cr}$, 联立式(15)和式(19), 可得

$$\frac{a}{r_y} = \left[\left(\sigma_{r_y} + \frac{\sigma_{cr}}{M-1} \right) / \left(p + \frac{\sigma_{cr}}{M-1} \right) \right]^{\frac{1}{m(1-\frac{1}{M})}} \quad (21)$$

由式(21)可得灌浆压力与土体大变形之间的关系:

$$p = \frac{\sigma_{r_y} + \frac{\sigma_{cr}}{M-1}}{(a^2 / r_y)^{m(1-\frac{1}{M})}} a^{m(1-\frac{1}{M})} - \frac{\sigma_{cr}}{M-1} \quad (22)$$

联立式(20)和式(21)则可得最终扩孔半径:

$$a = \frac{B}{m} \left[\left(p_u + \frac{\sigma_{cr}}{M-1} \right) / \left(\sigma_{r_y} + \frac{\sigma_{cr}}{M-1} \right) \right]^{\frac{M}{m(M-1)}} \quad (23)$$

求出了土体的最终扩孔半径后, 再根据式(21)即可求出土体的软化区半径 r_y 。同理, 由式(23)也可以求得劈裂灌浆初始阶段的最终灌浆压力:

$$p_u = \frac{B}{m} \left(\sigma_{r_y} + \frac{\sigma_{cr}}{M-1} \right) a^{m(1-\frac{1}{M})} - \frac{\sigma_{cr}}{M-1} \quad (24)$$

从上二式中也可以看出, 浆液压缩土体扩孔时的最终扩孔压力和最终扩孔半径与土体压缩模量、泊松比、内摩擦角、残余强度、扩孔形式以及土体的屈服准则等因素有关。

4 算例与分析

4.1 算例

以某铁路回填土路基的劈裂灌浆试验为例验证本文理论的可靠性。在该试验中, 现场实测到的初始灌浆压力一般都在 340~470 kPa 之间, 现场开挖的情况表明最终扩孔半径一般都在 13~37 cm 之间。该回填路基的土体参数值为: $\sigma_{cr}=80$ kPa, $\nu=0.35$, $E=3.0$ MPa, $\varphi=16^\circ$, $p_0=55$ kPa, 取 $m=2$, $a=22$ cm, 利用式(24)可以求得最终扩孔压力 $p_u=403.2$ kPa, 这与实测结果基本吻合, 从而初步证实了本文理论的可靠性。而当取 $m=1$ 时, 可以求得最终扩孔压力 $p_u=157.9$ kPa。柱形扩孔比球形扩孔的灌浆压力小, 主要是因为相同半径的浆液以柱形扩散时挤开土体的体积较球形扩散。当半径相同时, 挤开土体的体积小的缘故, 其需要的灌浆压力也较小。从目前笔者收集到的资料来看, 一般软土地基的劈裂灌浆压力在 300~500 kPa 之间, 对于隧道内突泥或塌方内劈裂灌浆, 在封闭情况下灌浆压

力可以提高。因此本文的理论可以作为劈裂灌浆设计和施工时的理论依据。同样,利用上述计算参数,通过式(23)可以求得在灌浆压力 $P_0 = 450$ kPa 时最终的扩孔半径为 25.1 cm,与现场实例比较吻合。当然,灌浆压力和扩孔半径还与浆液的黏度以及灌浆速率等因素有关,在本文虽然没有体现这些因素,但对于劈裂灌浆的力学机理分析,还是做了有益地探索。

4.2 分析

大变形 a^2/r_y 与压缩模量 E 以及大变形 a^2/r_y 与灌浆压力 P 的关系曲线图如图 3、图 4 所示。

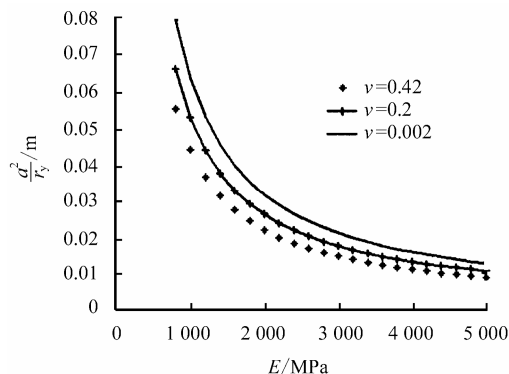


图 3 大变形与压缩模量之间的曲线图

Fig.3 The curve of large-deformation vs. compression module

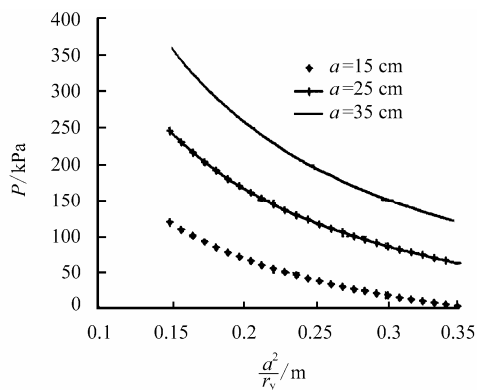


图 4 灌浆压力与大变形之间的曲线图

Fig.4 The curve of large-deformation vs. grouting pressure

从图 3 可以看出,在压缩模量不变的情况下随土体泊松比 ν 的增大,土体发生的变形就越大;反之,则越小。在土体的泊松比不变的情况下,随着压缩模量 E 的增大,土体产生的大变形也就越来越小,反之则越来越大,这与土体的实际工程特性比较吻合。从图 4 可以看出,当土体发生的变形量相同时,随着最终扩孔半径 a 的增大,需要的灌浆压力越大,反之则越小。当灌浆压力相同时,扩孔半径越小,变形量就越小,反之则越大。这更进一步

说明在分析土体劈裂灌浆初始阶段的力学机理时需要考虑土体的多种因素。通过上述曲线图的分析亦可知,劈裂灌浆时不能简单考虑土体的 c , ϕ 值,对于土体的压缩性、软化特性、变形特性、最终扩孔半径等因素也应充分地考虑。

5 结 语

将土体中劈裂灌浆的初始阶段视为无限土体中的圆孔扩张问题,假设在弹性区中的土体服从小变形理论,在塑性区和软化流动区中的土体服从大变形理论,利用应力平衡方程、应力和应变连续的边界条件,得出以下结论:

(1) 推导出了劈裂灌浆初始阶段的最终扩孔半径、最终灌浆压力、软化区半径的理论解答以及浆液周围土体中的应力场分布解。

(2) 通过计算并与实际工程中的实测结果对比后得出:劈裂灌浆初始阶段的最终扩孔压力和最终扩孔半径的理论解与实际工程中的实测值比较接近,说明了本文理论结果的可靠性。

(3) 分析表明,本文所得理论中所考虑了的土体压缩性模量、泊松比、内摩擦角、残余强度、屈服准则以及扩孔形式 m 等因素符合土体的实际工程特性,因此本文理论及分析可以作为劈裂灌浆设计与施工过程提供参考。

参 考 文 献

- [1] 周书明,陈建军. 软流塑淤泥质地层地铁区间隧道劈裂灌浆加固[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 222—224.
ZHOU Shu-ming, CHEN Jian-jun. Hydrofracture grouting in soft flowing mucky ground for a metro tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 222—224.
- [2] 张旭芝,符飞跃,王星华. 南京地铁软~流塑淤泥质土层劈裂灌浆试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 67—70.
ZHANG Xu-zhi, FU Fei-yue, WANG Xing-hua. Experiment of fracturing grouting in soft flowing mucky clay in Nanjing tunneling struction[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(1): 67—70.
- [3] 白云,候学渊. 软土地基劈裂灌浆加固的机理和应用[J]. 岩土工程学报, 1991, (3): 89—93.
BAI Yun, HOU Xue-yuan. The fracture grouting mechanism and application of soften soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, (3): 89—93.

- [4] 王士恩, 刘超常. 堤坝土体劈裂灌浆中裂纹的劈裂与扩展理论解[A]. 第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会[C]. 广州: 广东科技出版社, 1998. 286—290.
- [5] Kani KL, 杜建成. 土石坝中的水力劈裂[J]. 成都水利, 1996, (3): 61—67.
- [6] 丁金粟, 孙亚平. 土体水力劈裂力学机理剖析[A]. 第五届土力学及基础工程学术会议论文选集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 534—542.
- [7] 邹金锋. 劈裂灌浆机理分析及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [8] 邝健政, 咎月稳, 王杰, 等. 岩土灌浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [9] 蒋明镜, 沈珠江. 考虑材料软化特性的柱形孔扩张问题[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(4): 10—19.
JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. Unified solution to expansion of cylindrical cavity for geomaterials with strain-softening behaviour[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(4): 10—19.
- [10] 王晓鸿, 王家来, 梁发云. 应变软化岩土材料内扩孔问题解析解[J]. 工程力学, 1999, (5): 71—76.
WANG Xiao-hong, WANG Jia-lai, LIANG Fa-yun. Analytical solution to expansion of cavity in strain-softening materials[J]. **Engineering Mechanics**, 1999, (5): 71—76.
- [11] Cao L F, The C I, Chang M F. Undrained cavity expansion in modified tam clay I: theoretical analysis[J]. **Geotechnique**, 2001, 51(4): 323—334.
- [12] 谢永利. 大变形固结理论及其有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 1994.
- [13] 龚晓南, 李向红. 静力压桩挤土效应中的若干力学问题[J]. 工程力学, 2000, 17(4): 7—12.
GONG Xiao-nan, LI Xiang-hong. Several mechanical problems in compaction effects of static piling in soft clay ground[J]. **Engineering Mechanics**, 2000, 17(4): 7—12.