

文章编号: 1000-7598-(2006) 03-0475-04

压密注浆的能量分析方法

邹金锋, 李 亮, 杨小礼, 王志斌, 何长明

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘 要: 为了能够从能量的角度分析压密注浆的力学机理, 并给出注浆压力的理论解, 将整个注浆过程视为无限土体中的圆孔扩张问题, 根据注浆过程中能耗区土体在注浆压力和静止土压力作用下的应力、应变和体变关系以及注浆扩孔过程中的能量和体变守恒原理, 推导出压密注浆极限注浆压力的理论解答。计算和分析表明, 理论解的计算结果与工程实际比较吻合, 而且球形扩孔的注浆压力比柱形扩孔的注浆压力要小得多, 初步证实了理论解的可靠性。

关 键 词: 压密注浆; 能量守恒; 体变守恒; 极限注浆压力; 扩孔

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Method of energy analysis for compaction grouting

ZOU Jin-feng, LI Liang, YANG Xiao-li, WANG Zhi-bin, HE Chang-ming

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to analyze the mechanical mechanism of compression grouting and give the analytical solution of the ultimate grouting pressure, the process of compaction grouting is considered as the question of cavity expansion in infinite soil mass. The ultimate grouting pressure is given by the law of conservation, in which the volume change of cavity expansion is balanced with the compression of soil and the energy given out from cavity expansion is absorbed by the volume change and shear strain caused in soil. The stress-strain-volume change relationships under the high stresses caused by compression grouting are described. The theoretical values agree with the measured values from the field test; and the conclusion that the grouting pressure of columniation cavity is higher than the sphere cavity is gained.

Key words: compaction grouting; conservation of energy; conservation of volume change; limit grouting pressure; cavity expansion

1 引 言

压密注浆起源于美国, 主要适用于加固中细砂土和能够充分排水的黏土。它已有 40 多年应用历史, 主要应用于沉降建筑物的抬升、桩基承载力提高、土石坝的加固和隧洞掘进时地层位移的控制等方面^[1,2]。它是用极稠的浆液(塌落度 $<25\text{ mm}$)通过钻孔挤向土体, 在注浆处形成圆形浆泡, 浆液的扩散主要依靠对周围土体的压缩。当钻杆自下而上注浆时, 形成柱式注浆液, 浆液完全取代了注浆范围内的土体, 在注浆邻近区域中形成大的塑性变形带, 而在离浆泡较远的区域土体只发生弹性变形, 因而土体密度明显增加。虽然压密注浆的机理^[3]、力学分析及应用^[4, 5]先后被国外的学者探讨过, 但是, 目前对压密注浆的认识还主要是依靠工程经验

和现场试验, 这无疑给工程的应用带来了极大的不确定性, 尤其是注浆压力的控制值, 更不必说在施工前就给出一个有效的估计值了。鉴于此, 本文将在文献[6, 7]的理论基础上, 从注浆扩孔过程中土体的压缩机理出发, 考虑能耗区中的土体在注浆压力和土压力共同作用下的应力-应变-体变关系, 再根据注浆扩孔过程中的能量守恒和体变平衡原理, 解决压密注浆极限扩孔压力的理论解。这对于估算压密注浆极限注浆压力将有着重要的现实意义。

2 扩孔问题的解答

2.1 基本假定

对于压密注浆而言, 当浆液注入均匀土层时, 其受到的阻力会随着土体的逐渐压密而增大^[8]; 当

注浆压力继续增大时,土体受到的压缩区域也会逐步扩大,并将最终达到这样一种状态:(1)注入浆液的全部体积将会被土体的压缩量所平衡,并在浆液继续注入的过程中保持不变,注浆阻力也趋于稳定值;(2)在注浆孔中,浆液之外一定范围内的土体压缩量被注入的浆液体积所补偿,使浆液和土体能形成连续位移;(3)如果注浆系统的能量损失在整个过程中可以忽略,那么注入浆液的能量损失就应该等于其周围土体产生变形所需能量的总和,并以体变为主要形式。

基于以上分析可作如下假定:(1)土体是均质各向同性的理想弹塑性材料;(2)压密注浆过程相当于在无限土体中的圆孔扩张问题。这样就可以将压密注浆的过程视为无限土体中的圆孔扩张问题来分析,如图 1 所示。其中 P_u 为极限注浆压力; R_u 为注浆压力达到极限注浆压力时的注浆半径; R_p 为土体的塑性区半径,那么,在半径 R_p 以内就为塑性区, R_p 以外的土体仍然处于弹性状态^[1]。浆液压缩土体扩张所消耗的能量主要集中在塑性区域内,浆液排开土体的体积也由该区域中土体的压缩所吸收,本文称该区域为能量耗散区,简称为能耗区。(3)由于边界处的平均法向应力相对较小,其消耗的能量和体积压缩可忽略不计,而且,与所施加的巨大注浆压力相比较,能耗区域内土体的体力可忽略不计。

(4)因为圆孔扩张时土体吸收的能量损失与体变能量损失相比很小,且主要集中在紧靠注浆孔的部位,所以形变能量损失可以忽略不计,只需考虑土体的体变能量损失。

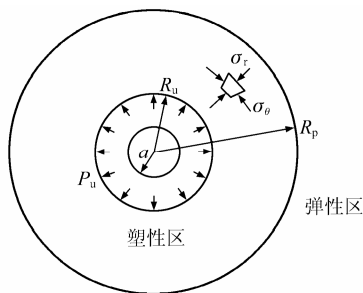


图 1 压密注浆的扩孔示意图

Fig.1 The figure of expansion show in compaction grouting

2.2 能耗区的应力-应变-体变关系

圆孔扩张的平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + m_0 \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

当 $m_0=1$ 时,为柱形孔;当 $m_0=2$ 时,为球形孔。

由 Mohr-Coulomb 强度准则可知

$$\sigma_\theta = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \sigma_r \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1), 得

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2m_0 \frac{\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \frac{\sigma_r}{r} = 0 \quad (3)$$

由应力边界条件 $\sigma_r|_{r=R_p} = P_u$, 可得

$$\sigma_r = p_u \left(\frac{R_u}{r} \right)^{\frac{2m_0 \sin\varphi}{1+\sin\varphi}} \quad (4)$$

在能耗区内, 定义:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{m_0+1} \frac{(m_0+1)+(1-m_0)\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \\ \beta &= \frac{2m_0 \sin\varphi}{1+\sin\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在圆孔扩张问题中, 八面体正应力 p 为

$$p = \frac{\sigma_r + m_0 \sigma_\theta}{m_0 + 1} = \alpha \left(\frac{R_u}{r} \right)^\beta p_u \quad (6)$$

若假设泊松比 $\nu=0.5$, 则八面体剪应力 q 为

$$q = \frac{\sqrt{m_0+2}}{2} (\sigma_r - \sigma_\theta) = \frac{\sqrt{m_0+2}}{2} \beta \left(\frac{R_u}{r} \right)^\beta p_u \quad (7)$$

根据 Vesic 等人的试验结果^[9], 能耗区内的平均正应力与体变关系为

$$\varepsilon_v = A \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^m = A \alpha^m \left(\frac{R_u}{r} \right)^{\beta m} \left(\frac{P_u}{\sigma} \right)^m \quad (8)$$

在一系列平均正应力下, 由纯剪产生的体变为

$$\gamma = B + C \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^n = B + C \alpha^n \left(\frac{R_u}{r} \right)^{\beta n} \left(\frac{P_u}{\sigma} \right)^n \quad (9)$$

式中 A, B, C 分别为已知初始孔隙比和物理性质的某一给定土样的试验常数; σ_0 为试验初始施加的平均法向应力; $\sigma = 100 \text{ kPa}$, 为量纲上所必需的单位应力; m, n 分别为 $0 \sim 1$ 的试验常数^[9]。

根据 Vesic 的试验^[9], 能耗区内的偏应力与偏应变的关系为

$$\varepsilon_r - \varepsilon_\theta = D \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^k = D \alpha^k \left(\frac{R_u}{r} \right)^{\beta k} \left(\frac{P_u}{\sigma} \right)^k \quad (10)$$

式中 D, k 均为视粒状土性质而定的试验常数。

因圆孔扩张课题中, 与八面体剪应力 q 相适应的八面体剪应变为

$$\bar{\gamma} = \frac{2}{3} D \alpha^k \left(\frac{R_u}{r} \right)^{\beta k} \left(\frac{P_u}{\sigma} \right)^k \quad (11)$$

2.3 扩孔过程中的体变平衡和能量守恒方程

首先, 考虑扩孔所消耗的能量与圆孔外围土体

产生的体变和形变所吸收的能量服从能量守恒原理, 设圆孔扩张的体积为 V , 则有

$$Vp_u = \int_{R_u}^{R_p} p\varepsilon_v dv + \int_{R_u}^{R_p} q\gamma dv + \int_{R_u}^{R_p} q\bar{\gamma} dv \quad (12)$$

其次, 考虑圆孔扩张时所排开土体的体积完全被土的压缩所吸收, 则体变平衡方程为

$$V = \int_{R_u}^{R_p} \varepsilon_v dv + \int_{R_u}^{R_p} \gamma dv \quad (13)$$

对于圆孔扩张: $dv = 2m_0\pi r^{m_0} dr$; 又因圆孔扩张时的初始半径 r_0 很小, 故可略去其高次项。其次, 圆孔扩张时土体形变的能量损失很小, 也可以忽略不计, 只需考虑体变能量的损耗。将式(6)~(9)和式(11)代入式(12), 则可得圆孔扩张时的能量平衡方程为

$$\begin{aligned} & \frac{(m_0+1)A\alpha^{m+1}}{(m_0+1)-\beta(m+1)} \left(\frac{p_u}{\sigma}\right)^m \left\{ \left(\frac{R_p}{R_u}\right)^{[(m_0+1)-\beta(m+1)]} - 1 \right\} + \\ & \frac{\sqrt{m_0+2}}{2m_0} \frac{(m_0+1)C\alpha\beta^n}{(m_0+1)-\beta(n+1)} \left(\frac{p_u}{\sigma}\right)^n \cdot \\ & \left\{ \left(\frac{R_p}{R_u}\right)^{[(m_0+1)-\beta(n+1)]} - 1 \right\} + \frac{\sqrt{m_0+2}}{2m_0} \frac{(m_0+1)B\beta}{[(m_0+1)-\beta]} \cdot \\ & \left\{ \left(\frac{R_p}{R_u}\right)^{[(m_0+1)-\beta]} - 1 \right\} - 1 = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

同理, 将式(8)、式(9)代入式(13), 可得圆孔扩张时的体变平衡方程为

$$\begin{aligned} & \frac{(m_0+1)A\alpha^m}{(m_0+1)-\beta m} \left(\frac{P_u}{\sigma}\right)^m \left\{ \left(\frac{R_p}{R_u}\right)^{[(m_0+1)-\beta m]} - 1 \right\} + \\ & \frac{(m_0+1)C\alpha^n}{(m_0+1)-\beta n} \left(\frac{P_u}{\sigma}\right)^n \left\{ \left(\frac{R_p}{R_u}\right)^{[(m_0+1)-\beta n]} - 1 \right\} + \\ & B \left\{ \left(\frac{R_p}{R_u}\right)^{(m_0+1)} - 1 \right\} - 1 = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

联立求解(14)式和(15)式, 则可得压密注浆时的极限注浆压力; 当 m_0 的值分别取 1 和 2 时, 便可得到球形压密注浆和柱形压密注浆时的极限注浆压力。

3 算例

为了验证本文理论的可靠性和有效性, 笔者利用本文理论的计算结果与上海某压密注浆现场进行的压密注浆试验值进行对比。然后通过国外的一些

工程实例, 再次验证本文理论的可靠性和有效性。

根据试验现场的地质条件, 取该场地注浆土层的计算参数分别为: $A=0.00637$, $B=-0.0038$, $C=0.015$, $m=n=0.5$ 。 φ 按式 $\varphi = \varphi_{s1} - 5.5^\circ \lg(\sigma_0/\sigma)$ 随平均正应力 σ_0 衰减^[9]。 $\sigma = 100$ kPa, 为试验初始施加的平均法向应力; $\varphi_{s1} = 36^\circ$, 为 $\sigma_0 = \sigma$ 时的正割内摩擦角。当取 $m_0=2$ 时, 联立式(14)和式(15), 可得压密注浆极限扩孔压力: $p_u = 3.625$ MPa。这与实测到的注浆压力 $p_u = 3.73$ MPa 较为接近, 说明本文理论是正确的。当取 $m_0=1$ 时, 联立式(14)和式(15), 可得压密注浆极限扩孔压力: $p_u = 16.036$ MPa。说明纯粹的柱形扩孔注浆压力要比球形形得大很多。

为了验证本文理论, 笔者还收集了国外一些关于压密注浆最大注浆压力的实测值(见表1)。

表1 一些工程中的最大注浆压力
Table 1 The maximum grouting pressure in some of engineering

项目名称	最大注浆压力/MPa	浆液塌落度/mm
Norwich A47	4.0	75~125
Norwich Castle Mall	3.9	50~100
Didcot	3.0	75
Hockely	2.0	50

表1只是目前收集到的土体压密注浆实测资料的一部分。目前的绝大部分资料中, 压密注浆的最大注浆压力一般都在 3.0~4.0 MPa 之间^[10], 这也进一步证实了本文理论的正确性和可靠性。

借助于作图法可以看出 $\frac{p}{\sigma} - \frac{R_p}{R_u}$ 的关系特点以及球形扩孔与柱形扩孔时注浆压力之间的相互关系, 如图2所示。

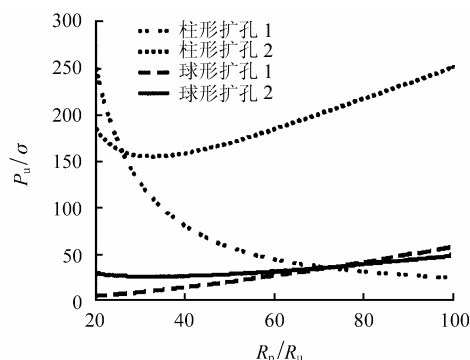


图2 体变平衡和能量守恒方程曲线
Fig.2 Curves of volume balance and energy conservation equations

从图 2 中可以看出: 无论体变平衡或能量守恒方程, p 随 R_p/R_u 先减后增 (柱形扩孔中有一条曲线的趋势不是很明显)。这是因为当孔扩张初期, 需有较大的扩孔压力克服土体剪胀特性等因素的影响, 随后的应变软化特征又使 p 减小。随着土体剪胀倾向减小并向剪缩过渡过程中, p 又由小变大, 土体压缩的范围也逐渐增大。同时还可以看出, 球形扩孔压力比柱形扩孔压力要小得多, 说明柱形扩孔注浆的难度较大。这是因为注浆量相同时, 以球形扩孔时土体产生的体变较柱形扩孔时的小, 所以它所克服的注浆阻力就较小, 而柱形扩孔时情况就不一样, 因为相同的注浆量对于柱形扩孔来说, 它需要土体产生比球形扩孔更大的体变, 所以其需要克服的注浆阻力也较球形大得多, 这也是为什么工程上常采用注浆管自下而上的柱形注浆方式而不采用柱形直接扩孔注浆的原因。

4 结 语

本文借助于能量分析的方法, 从压密注浆的压缩机理出发, 利用扩孔过程中的体变平衡和能量守恒原理, 给出压密注浆的极限注浆压力解答。理论计算和实测值比较接近, 证实了本文理论的正确性, 故该理论可以用于估算压密注浆的极限注浆压力。作图计算表明, 球形注浆形式比柱形注浆形式需要的注浆压力要小得多。经过计算并与工程实例的对比说明, 利用能量的方法分析压密注浆的机理是可行的, 且其结果令人满意。

参 考 文 献

- [1] 邹金锋. 劈裂注浆机理分析及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [2] 罗长军. 紫山灰坝迎灰坡裂缝成因分析及灌浆防治对策[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 666—670.
LUO Chang-jun. Cause analysis of crack formation on the ash-ward slope of Zishan dam and measures of prevention and cure with grouting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 666—670.
- [3] Graf D D. Compaction grouting technique and observations[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE**, 1969, 95(SM5): 1151—1158.
- [4] Warner J, Chmidt S, Reed N, et al. Recent advances in compaction grouting technology[A]. **Proc. Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics[C]**. New Orleans: [s.n.], 1992. 252—256.
- [5] Warner James, Brown Douglas R. Planning and performing compaction grouting[J]. **Journal of the Geotechnical Division, ASCE**, 1974, 100(6): 653—666.
- [6] 张季如. 高应力粒状土中球形孔的扩张问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 209—1 214.
ZHANG Ji-ru. Problem of spherical cavity expansion in granular soil under high stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(8): 1 209—1 214.
- [7] Vesic A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1972, 98(SM3): 265—269.
- [8] 陈愈炯. 压密和劈裂灌浆加固地基的原理和方法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 22—28.
CHEN Yu-jiong. Principles and methods of compaction and fracturing grouting for foundation soil improvement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(2): 22—28.
- [9] Vesic A S, Clough G W. Behavior of granular materials under high stress[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1968, 94(SM3): 661—688.
- [10] 邝健政, 咎月稳, 王杰, 等. 岩土注浆理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2001.