

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 1-0652-04

软土地基注浆扩散过程数值模拟研究

张志沛, 彭 惠, 饶 晓

(西安科技大学 地质与环境学院, 西安 710054)

摘 要: 廊沧高速公路 K132+177~K132+258 软土地基主要由低液限中、高压缩性黏土层组成, 属于滨海沉积类型, 采用静力注浆方法进行了加固处理, 并在现场分别对全孔一次性和自上而下分段式注浆施工方式进行了试验及室内研究。基于该路段软土地基物理力学性质和注浆试验地表变形观测资料, 利用 FLAC^{3D} 软件对该软土地基在不同注浆方式 (全孔一次性注浆、自上而下分段式注浆) 和在 0.5、1.0、2.0 MPa 注浆压力作用下浆液在土层中的扩散过程进行了分析。其结果表明, 在相同注浆压力作用下, 自上而下分段式注浆效果比全孔一次性注浆效果好, 而注浆压力的增大对浆液在土层中的扩散是有利的, 但压力过大会导致地面冒浆, 应根据现场实际情况选择合理的注浆压力。

关 键 词: 廊沧高速公路; 软土地基; 注浆方式; 注浆扩散过程; 数值模拟

中图分类号: U 416.1+2

文献标识码: A

Numerical simulation study of grouting diffusion process in soft soil foundation

ZHANG Zhi-pei, PENG Hui, RAO Xiao

(College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The soft soil foundation of the section K132+177~+258 of Langfang-Cangzhou Expressway in Hebei province is mainly composed of low liquid limit, middle-high compressibility clay layer, belonging to the type of coastal sedimentary deposit, which is treated mainly adopting static grouting. The test and laboratory studies respectively for grouting construction method of whole pore disposable and top-down segmentation tabulator in field are taken. On the basis of physical and mechanical properties of soft soil foundation and observation data of grouting test surface deformation amount, the diffusion processes of slurry in different grouting construction methods (whole pore disposable and top-down segmentation tabulator grouting) and different grouting pressures (0.5, 1.0 MPa and 2.0 MPa) are studied by using FLAC^{3D}. The results show that the grouting effect of top-down segmentation tabulator grouting is better than whole pore disposable grouting in the same grouting pressure; and the increasing pressure is beneficial to grouting diffusion. But it would result flow-up of grout with the higher pressure. Therefore, we should choose reasonable grouting pressure according to the practical site situation.

Key words: Langfang-Cangzhou Expressway; soft soil foundation; grouting construction; process of grouting diffusion; numerical simulation

1 引 言

廊沧高速公路 K132+177~K132+258 段软土地基为第四系全新统地层, 以冲积为主, 夹有湖沼相及海相沉积层, 主要由软塑状、低液限中~高压缩性黏土层组成, 厚 2.10~5.80 m。软土层含水率 W 为 29.7%~44%; 孔隙比 e 为 0.803~1.164; 压缩系

数 a_{1-2} 为 0.60~0.34 MPa⁻¹, 变形模量 E_s 为 5.9~3.3 MPa。为了节约廊沧高速公路施工工期, 直接快速地加固下伏软弱土层, 提高土体的力学强度和变形模量, 减少总的沉降量, 采用静力注浆法对软土地基进行加固处理, 同时开展了相应的研究工作。

通过对廊沧高速公路软土地基工程地质补充勘探, 取得了科研所需的土体物理力学性质参数,

同时进行了注浆试验工程。注浆试验试验工程的注浆压力为 0.5 MPa, 布孔原则上以三角形方式为主, 孔间距为 2.5 m, 注浆深度为 6.5 m 之间, 注浆段高度为地表下 1.4 m 至注浆深度。通过现场施工, 分别对全孔一次性注浆与自上而下分段式注浆施工方式进行了试验研究。

本文在软土地基性质研究以及注浆试验地表变形量观测资料的基础上, 利用 FLAC^{3D} 软件模拟浆液在软土地基中的扩散过程, 分析研究了软土地基在不同注浆方式以及不同注浆压力条件下的地表隆起与土层应力分布情况^[1-3], 将模拟结果与现场实际观测资料相结合, 为廊沧高速公路软土地基注浆加固提出合理性建议, 可供类似工程参考。

2 注浆扩散过程模拟设计方案

研究表明, 可以施加各向同性的膨胀压力用于模拟压密注浆, 也可以施加各向异性的膨胀压力来实现模拟压密注浆和劈裂注浆^[4]。本次通过采用 FLAC^{3D} 在单元上施加各向同性的膨胀压力, 使单元体积膨胀, 进而模拟注浆的抬升过程, 以分析钻孔内的注浆规律。

(1) 计算模型

数值模拟设计模型长 50 m, 宽 20 m, 高 30 m。地下水位线距地表深度为 1.4 m, 注浆深度为 6.5 m。试验工程采用的注浆方式为花管式分段或全段注浆, 因此注浆浆液可近似认为在地下呈柱面扩散, 扩散半径为 1.25 m。该路堤几何模型的生成在 ANSYS 中完成, 网格划分后保存单元和节点几何信息, 然后通过接口程序转化为 FLAC^{3D} 的前处理数据格式。在 FLAC^{3D} 中导入这些数据之后生成的网格模型如图 1 所示。整个模型由四~六面体混合网格单元组成, 共 6 285 个节点, 25 416 个单元。

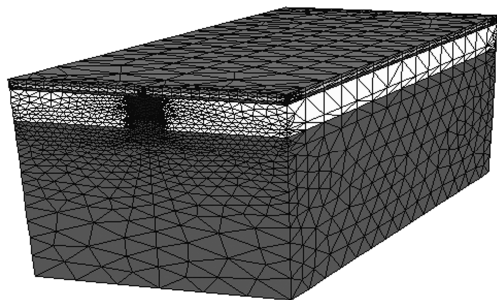


图 1 数值模拟计算模型图

Fig.1 Calculation model of numerical simulation

根据现场注浆试验工程施工的具体情况, 分两

种施工方案进行模拟, 通过观测现场注浆后地面抬升情况来控制模拟注浆过程: ①全孔一次性注浆, 注浆深度为 6.5 m, 1 次完成施工; ②自上而下分段式注浆, 注浆深度为 6.5 m, 分 2 次完成施工, 第 1 次注浆段长为 3.25 m, 第 2 次注浆深度为 3.25 m。

(2) 边界条件

模型边界约束条件设定: ①模型左右边界定为全约束边界, 取 $u = 0$, $w = 0$, $v = 0$, 其中 u 为 X 方向; w 为 Z 方向位移; v 为 Y 方向位移。②模型前后边界定为全约束边界, 取 $u = 0$, $v = 0$, $w = 0$ 。③模型底边界定为全约束边界, 取 $u = 0$, $v = 0$, $w = 0$ 。④模型上边界定为自由边界。

考虑该模型为近似理想的弹塑性模型, 其破坏准则选用 Mohr-Coulomb 准则。

(3) 应力

注浆地层压力主要是施加内应力后所引起的膨胀压力。

(4) 模拟参数

数值模拟所采用的物理力学参数依据土工试验, 同时参考其他文献进行了适当的调整。各土层力学参数见表 1。

表 1 土层物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

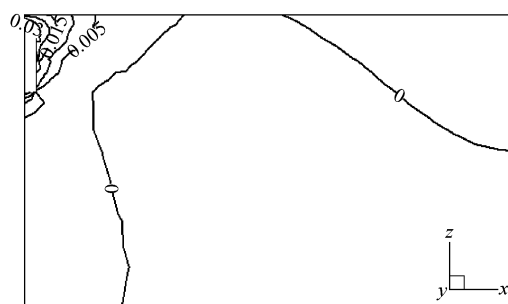
土层	密度 (kg/cm ³)	体积 模量 /MPa	剪切 模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 (°)	抗拉 强度 /kPa
硬壳层	1.57	11.7	5.38	9	10.29	52
	1.65	8.33	3.84	15	13.05	46
	1.83	5.00	2.31	48	12.21	15
粉土	1.95	2.50	1.15	21	21.13	23
粉质黏土	1.88	6.67	3.08	25	25.45	28
黏土	1.93	9.17	4.23	37	29.12	37

3 注浆方式对浆液扩散过程的影响

图 2 为软土地基经全孔一次性注浆后土层垂直位移和水平位移(剖面)等值线图。软土地基经过注浆后, 地表有轻微的隆起, 并且是以注浆区域为中心, 向四周呈同心圆状扩散, 注浆中心地面处水平位移为 2.50 cm, 垂直位移为 3.00 cm。而对土层的影响则是以注浆孔为轴心, 呈陀螺状向四周扩散, 上部土层影响范围较广, 下部土层影响范围急剧收缩, 注浆侧向中心水平位移为 10.00 cm, 垂直位移为 1.50 cm, 表明浆液在上部土层扩散范围较广, 下部土层受多方面影响, 浆液渗透范围急剧缩小。

对软弱土层进行注浆处理后, 其物理力学性质

有了极大地提高, 抗变形能力大大增强, 因而导致应力在注浆区域有了明显的集中现象。注浆过程中土层会产生体积膨胀, 在上覆土层即物理力学性质和结构性能比较好的硬壳层的作用下对注浆区域周围的土体产生了拉应力, 而其他区域则依然以压应力为主。注浆中心地面处最大主应力为 -100 kPa , 最小主应力为 -50 kPa ; 注浆中心底面处最大主应力为 -300 kPa , 最小主应力为 -250 kPa ; 注浆侧向中心最大主应力为 -450 kPa , 最小主应力为 -200 kPa 。注浆过程中产生的塑性破坏区域主要集中在注浆上覆土层, 注浆结束时, 剪切破坏体积为 108 m^3 , 拉张破坏体积为 125 m^3 。



于注浆压力较小, 位移量是缓慢增加的, 但随着注浆的进一步进行, 随注浆压力的增加, 位移量开始显著增加, 这是由于在注浆初期硬壳层对地面隆起的限制作用和封闭作用所引起的。②在相同注浆压力作用下, 自上而下分段式注浆所造成的位移量明显大于全孔一次性注浆所引起的位移量, 这是由于 2 次注浆所引起的, 也反映自上而下分段式注浆效果要好于全孔一次性注浆。

表 2 不同注浆方式不同注浆压力作用下位移量对比表
Table 2 Comparisons displacements of different grouting methods in different grouting pressures

不同注浆压力 计算模拟方案 /MPa	位移/ cm					
	注浆中心地面处		注浆中心底面处		注浆侧向中心处	
	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
全孔 一次 性注 浆	0.5	2.50	3.00	3.00	-2.50	10.0
	1.0	3.50	5.50	4.10	-2.90	11.8
	2.0	6.00	7.00	7.50	-6.44	13.5
自上 而下 分段 式公 段	0.5	2.70	5.00	3.20	-2.75	11.00
	1.0	5.50	6.50	5.00	-3.86	12.50
	2.0	7.00	8.00	10.00	-7.48	15.00

注: 正负号仅代表位移量的方向, 不代表位移量的大小。

5 结 论

(1) 对软土地基进行注浆处理后, 注浆影响区域主要集中在上段土层, 无论是应力场, 还是重力场, 整体上都呈螺旋状。注浆作用会引起地表的抬升(隆起), 以注浆区域中心地面为圆心, 呈同心圆状向四周扩散。

(2) 注浆方式不同, 软土地基加固处理产生的效果不同。对于全孔一次性注浆而言, 注浆中心地面处隆起位移量为 3.00 cm, 而自上而下分段式注浆中心地面隆起位移量达到 5.00 cm, 比全孔一次性注浆增加 66.7%。注浆侧向中心水平位移和垂直位移量分别增加 10%和 33.3%。由此可见, 自上而下分段式注浆效果要好于全孔一次性注浆。

(3) 注浆压力的变化, 必然引起注浆效果的变化。通过对不同注浆压力(0.5、1.0 MPa 和 2.0 MPa)作用下的注浆过程的模拟可知, 注浆中心地

面处隆起位移量随着注浆压力的增加不断增大。注浆压力的增大, 将影响浆液的扩散半径的变化以及地面隆起位移量, 这种现象对浆液在土层中的扩散是有利的, 但如果压力过大会出现冒浆等现象。因此, 在注浆时应根据现场实际情况选取适当的注浆压力, 从模拟结果与现场实际情况表明采用 0.5 MPa 以下的注浆压力较为合理。

参 考 文 献

- [1] 郭广磊. 黏土中压力注浆动态数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [2] 闫常赫. 路基土体注浆离心模型试验研究及数值模拟分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [3] 张金娟. 黏土固化浆液渗透注浆理论与数值模拟在砾砂、卵石土层中的应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [4] 唐智伟, 赵成刚. 注浆抬升地层的机制、解析解及数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1512—1516.
TANG Zhi-wei, ZHAO Cheng-gang. Mechanisms of ground heave by grouting and analytical solutions & numerical modeling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(6): 1512—1516.
- [5] 李向红, 刘建航, 傅德明, 等. CCG 注浆过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 1): 2322—2327.
LI Xiang-hong, LIU Jian-hang, FU De-ming, et al. Numerical simulation study on compaction grouting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(Supp.1): 2322—2327.
- [6] 孙斌堂, 凌贤长, 凌晨, 等. 渗透注浆浆液扩散与注浆压力分布数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1402—1407.
SUN Bin-tang, LING Xian-zhang, LING Chen, et al. Numeric simulation for diffusion and pressure of permeation grouting[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(11): 1402—1407.