

石家庄地区无水砂层渗透注浆数值模拟研究

谭志文¹, 李文江², 王庆磊²

(1. 石家庄轨道交通有限责任公司, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:石家庄地铁矿山法施工地段需要穿越大范围中粗砂和粉细砂等无水砂性地层, 这类地层的土体强度低, 自稳能力差, 为保证隧道施工安全, 限制隧道变形及地表沉降, 需进行超前注浆加固。以石家庄地区中粗砂地层为研究对象, 考虑浆液粘度时变性, 配置不同水灰比的水泥浆液进行室内试验, 测试其粘度, 得到不同水灰比的水泥浆液粘度的时间变化函数, 并将粘度时变函数引入到有限元软件 COMSOL Multiphysics 中, 研究不同注浆压力、浆液粘度、介质孔隙率等参数对注浆的影响规律, 优化了注浆设计参数, 研究成果对于指导工程施工, 具有重要借鉴意义。

关键词:超前小导管; 注浆; 粘度; 注浆压力

中图分类号: TU94+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)03-0109-07

0 引言

石家庄市域属华北平原区, 石家庄轨道交通位于太行山山前冲洪积平原, 地层以第四系松散层为主, 是以滹沱河为主要水流作用下, 携带大量粗碎屑物质堆积形成。根据区域地质资料、工程地质调绘、钻探, 场区土层类型复杂, 性质差异较大, 且地下水位较低。其中, 地铁矿山法施工地段洞身需要穿越大范围中粗砂和粉细砂等无水砂性地层。这是一种典型的力学不稳定地层, 由于土体强度低、自稳能力差, 若不采取有效措施, 隧道极易发生坍塌。为保证隧道施工安全, 控制其洞周变形和地表沉降, 必须在拱部位置预先进行小导管超前注浆加固。在注浆工程中, 渗透注浆因为注浆过程中不破坏介质内部的原始结构, 从而对受注介质的扰动比较小, 更有利于控制洞周变形和地表沉降, 因而广泛应用于稳定性要求较高的工程领域尤其是城市地铁工程施工中^[1]。但注浆工程属于隐蔽工程, 注浆设计参数以及施工工艺具有不确定性, 注浆过程中浆液的扩散半径无法方便检测到, 导致工程上难以对注浆效果进行有效评价^[2], 因此, 研究渗透注浆的注浆扩散规律, 优化注浆设计参数, 对于指导工程施工, 具有重要意义。

目前对于渗透注浆的理论研究, 多把浆液视为理想牛顿流体, 浆液粘度为常数, 而实际上, 大部分注浆浆液的粘度是随时间变化的, 若不考虑浆液粘度的时变性对注浆的影响, 将会导致理论或数值计算结果与实际注浆效果有较大偏差^[3]。

以石家庄地区中粗砂地层为研究对象, 配置不同水灰比的水泥浆液进行室内试验, 测试其粘度, 得到不同水灰比的水泥浆液粘度的时间变化函数, 并将粘度时变函数引入到有限元软件 COMSOL Multiphysics 中, 研究不同注浆压力、浆液粘度、介质孔隙率等参数对注浆的影响规律。

1 水泥浆液粘度测试试验

1.1 试验材料及试验方法

水泥采用鹿泉鼎鑫产 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥, 硅灰作为矿物稳定组分, 减水剂采用西卡 Visco-

收稿日期: 2019-04-18 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20190065

基金项目: 石家庄地铁综合施工技术科研项目(GDJT-ZGB-FW006-2015)

作者简介: 谭志文(1967—), 男, 高级工程师, 研究方向为城市轨道交通建设管理。E-mail: tanzhiwensdy@126.com

谭志文, 李文江, 王庆磊. 石家庄地区无水砂层渗透注浆数值模拟研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2020, 33(3): 109-115.

crete 325C 聚羧酸类高效粉状减水剂,并掺入 13% 的膨润土。配制水灰比为 0.6 : 1、0.7 : 1、0.8 : 1 和 1 : 1 这 4 组水泥浆液进行粘度测试。各组分配比为:固定水泥掺量为 1 900 g,硅灰掺量为 100 g,膨润土掺量为 260 g (13%),减水剂掺量为 0.6%。

浆液粘度测试仪器包括高速搅拌机,转速 1 000 转/min、粘度计采用邦西仪器有限公司生产的 NDJ-5S 数显粘度计(如图 1 所示)、电子称、1 000 mL 大量筒及量杯若干。

测试前先安装粘度计,然后取一定量的浆体,按照标准的粘度测试方法进行测试,记录快速搅拌机搅拌完成后的时间为初始时间,测试出的数据为初始粘度值;每隔 5 min 测试一次,记录数据,测试总时间为 30 min。

1.2 试验结果

不同水灰比水泥浆液不同时间动力粘度测试结果见表 1。

表 1 各水灰比水泥浆液各时间的动力粘度

MPa · s

水灰比	时间						
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
0.6 : 1	162	188	213	246	275	322	362
0.7 : 1	69	93	107	115	123	174	187
0.8 : 1	64	71	79	89	101	110	117
1 : 1	42	47	55	60	67	72	78

利用 Matlab 拟合出浆液粘度随时间变化的函数关系,不同水灰比水泥浆液粘度随时间变化的函数曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,对于不同水灰比的水泥浆液,其粘度均随时间增长而逐渐增大,但水灰比越大,水泥含量越小,粘度随时间增长越缓慢,水灰比越小,水泥含量越高,浆液粘度随时间增长越快。且在实际注浆工程中,注浆时间一般维持在 20~40 min,各组水泥浆液在 20~40 min 后的粘度均比 0 时刻初始粘度有大幅提高。以水灰比 0.6 : 1 的水泥浆液为例,初始粘度为 162 MPa · s,20 min 粘度为 275 MPa · s,比初始粘度增大 1.7 倍,40 min 粘度为 495 MPa · s,比初始粘度增大 3.1 倍。因此,无论理论分析还是数值计算,均不能忽视浆液粘度的时变性,否则可能导致计算结果与实际有较大出入。

2 数值计算过程

为研究水泥浆液在介质中的渗透规律,采用 COMSOL Multiphysics 软件进行数值模拟,分析注浆压力、浆液粘度、注浆管径、砂层孔隙率对注浆扩散半径的影响^[4]。

COMSOL Multiphysics 是一款大型通用有限元软件,相比于 ANSYS 等其他有限元软件而言,更加擅于求解有关多物理场耦合的问题,软件内置多孔介质渗透模块,应用达西定律可方便地进行渗透注浆研究^[5]。

2.1 有限元模型

计算模型尺寸 4 m × 4 m,模拟注浆的管口位于模型中央,孔口直径 42 mm。

考虑到渗透注浆的过程实质上就是浆液驱赶空气并填充孔隙的过程,如果多孔介质孔隙中存在一定



图 1 NDJ-5S 数显粘度计

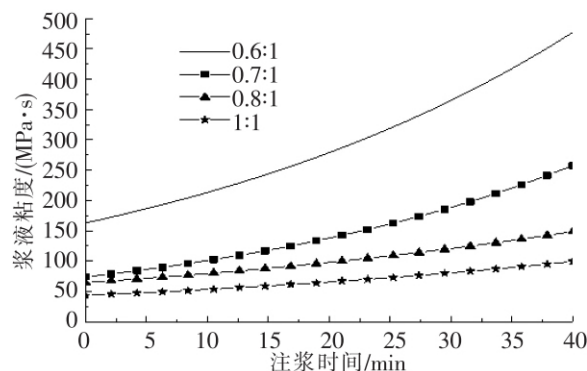


图 2 不同水灰比水泥浆液粘度-时间函数曲线

的初始压力或空气排出通道不畅通,必然会对浆液的渗透扩散产生阻力,进而影响浆液的扩散。因此,计算中给予多孔介质内的空气一定的初始压力 0.1 MPa (约一个标准大气压),考虑多孔介质孔隙的连通性,同时在模型四周外边界赋予 0.1 MPa 的初始压力作为对多孔介质内部空气压力的补充,模型的内边界定义注浆压力。有限元模型见图 3 所示。

2.2 计算工况及参数设置

根据石家庄地铁一号线地勘资料,各类砂层渗透率相差不大,计算设置中取其平均值 1.82×10^{-11} m。为研究砂层孔隙率、注浆压力以及浆液粘度(水灰比)对渗透效果的影响,设置不同组合的荷载工况,各工况见表 2 所示。

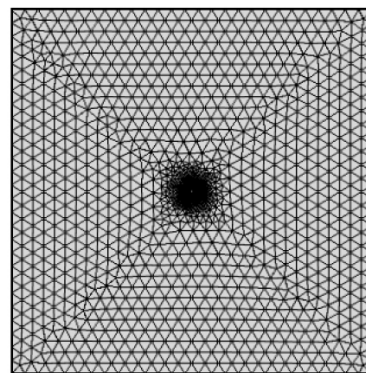


图 3 有限元模型

表 2 计算工况

工况	注浆压力/MPa	水灰比	孔隙率	工况	注浆压力/MPa	水灰比	孔隙率
1	0.1	0.6 : 1	0.4	8	0.4	0.8 : 1	0.4
2	0.2	0.6 : 1	0.4	9	0.4	1 : 1	0.4
3	0.3	0.6 : 1	0.4	10	0.4	1 : 1	0.2
4	0.4	0.6 : 1	0.4	11	0.4	1 : 1	0.3
5	0.5	0.6 : 1	0.4	12	0.4	1 : 1	0.4
6	0.4	0.6 : 1	0.4	13	0.4	1 : 1	0.5
7	0.4	0.7 : 1	0.4				

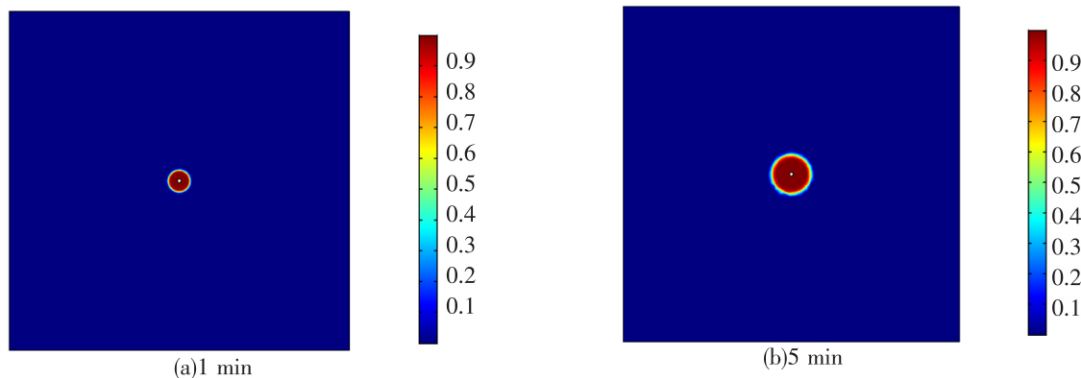
3 计算结果分析

3.1 注浆压力对注浆扩散半径的影响

为研究注浆压力对浆液扩散半径的影响规律,取注浆压力 0.1 MPa、0.2 MPa、0.3 MPa 和 0.4 MPa,浆液水灰比为 1 : 1,介质孔隙率为 0.4。其中,有限元计算中考虑了浆液粘度随着时间的增长,水灰比 1 : 1 的粘度随时间增长函数取室内试验测试结果。

对于 COMSOL Multiphysics 来说,浆液扩散后的充填率可以用饱和度去描述。在两相流达西定律中,饱和度表示多孔介质内某一区域流体的充填比例。饱和度为 1,表示区域全部被其中一相流体填充;饱和度为 0,表示此区域没有该相流体。饱和度介于 0~1 之间,表示此处被两相流体同时填充。因此,可以利用软件两相达西定律模块进行有限元计算,并以饱和度评价浆液的扩散和充填。当浆液的饱和度大于 0.9 时,气体的含量很小,可认为此范围即为注浆加固范围。

注浆压力 0.1 MPa,各时刻介质中流体的饱和度见图 4 所示。



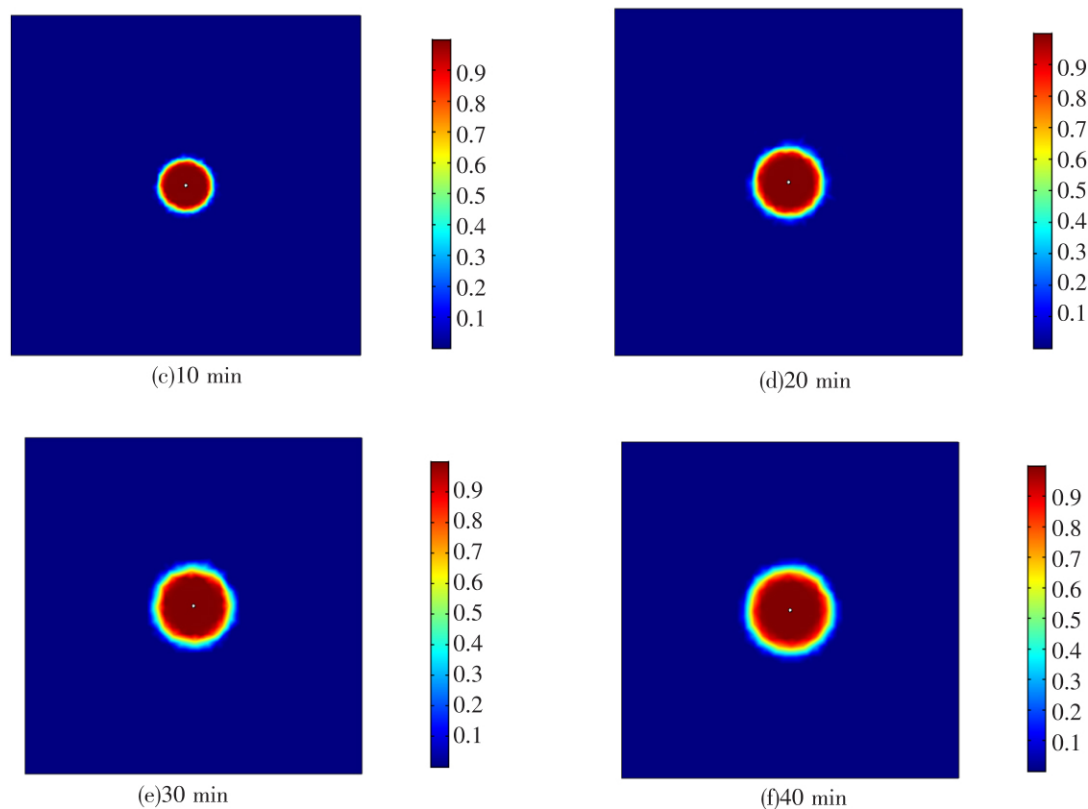


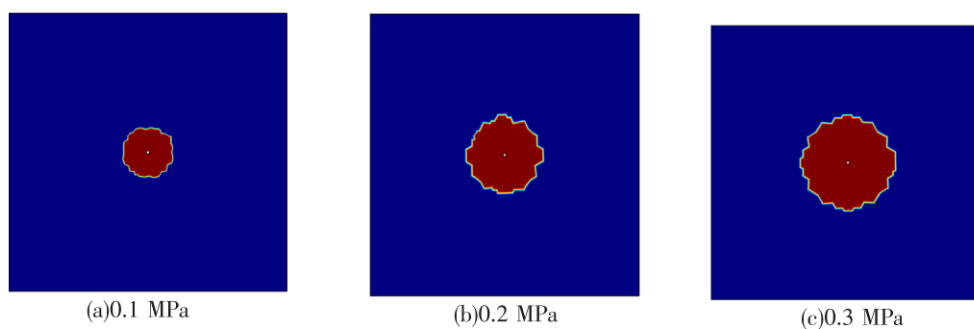
图 4 渗透注浆各时刻流体饱和度

在注浆初期,浆液注入量不大,因而水泥浆液扩散范围较小,集中于孔口处。随着注浆时间的增长,浆液持续注入介质中,水泥浆液扩散范围不断加大,表明水泥浆液正处于在介质内不断扩散的状态之中。

还可以看出,在注浆开始不久的一段时间内,浆液的扩散过程比较迅速;随着时间的推移,浆液的扩散的速度越来越慢,扩散范围逐渐稳定下来。从 0 min 到 10 min,浆液扩散半径是 21.6 cm;10 min 到 20 min,浆液扩散半径增加了 6.4 cm;20 min 到 30 min,浆液扩散半径增加了 3.8 cm;从 30 min 到 40 min,浆液扩散半径增加了 1.3 cm。30 min 以后,浆液扩散半径基本不再增加,表明此时浆液扩散达到极限。

在当前计算条件下,水泥浆液扩散到 30 min 时达到极限,这是因为浆液的粘度是随着注浆时间的增长而增大的,而浆液的粘度越大会使得浆液的流动阻力越大,导致浆液的流动性变差。

利用 COMSOL Multiphysics 的参数化扫描功能,可以得到注浆压力分别是 0.2、0.3、0.4、0.5 MPa 情况下的水泥浆液渗透扩散过程的数值解。不同注浆压力下浆液扩散云图见图 5 所示,不同注浆压力下浆液的最终扩散半径见表 3。



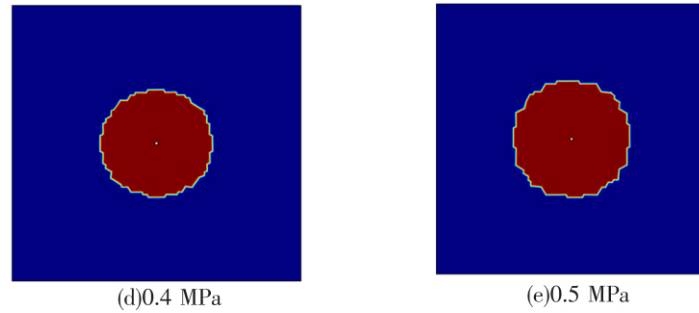


图 5 不同注浆压力下浆液扩散云图

表 3 不同注浆压力下浆液的最终扩散半径

注浆压力/MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
扩散半径/cm	24.4	28.6	33	35.5	39.2

可以看出,注浆压力越大,最终得到的浆液的扩散范围也就越大。注浆压力是浆液在介质内渗透扩散的驱动力,随着注浆压力增大,浆液渗透扩散的驱动力也增大,因此浆液的扩散范围也增大。

在实际工程施工中,注浆管间距一般为 $0.2\sim 0.4\text{ m}$,为保证注浆加固效果,一般要求注浆后形成的结石体能相互咬合。根据以上计算,在水灰比 $0.6:1$,介质孔隙率 0.4 的情况下,注浆压力控制在 0.1 MPa 即可满足工程要求。

3.2 水灰比(浆液粘度)对注浆扩散半径的影响

在注浆压力 0.4 MPa ,砂层孔隙率 0.4 条件下,对比分析不同水灰比浆液的渗透扩散过程,进而得出水灰比(浆液粘度)对浆液渗透扩散过程的影响规律。不同水灰比下浆液渗透后最终的饱和度如图 6~图 9 所示,不同水灰比下浆液最终扩散半径见表 4。

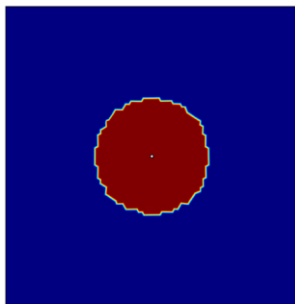
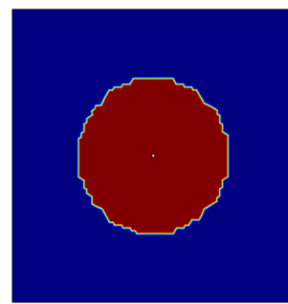
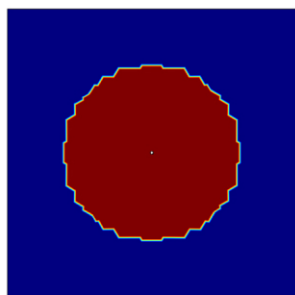
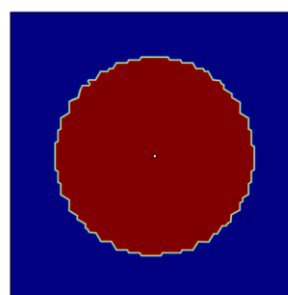
图 6 水灰比 $0.6:1$ 浆液饱和度图 7 水灰比 $0.7:1$ 浆液饱和度图 8 水灰比 $0.8:1$ 浆液饱和度图 9 水灰比 $1:1$ 浆液饱和度

表 4 不同水灰比下浆液的最终扩散半径

水灰比	0.6 : 1	0.7 : 1	0.8 : 1	1 : 1
扩散半径/cm	18.2	24.3	29.1	35.5

可以看出,在当前注浆条件下,随着水灰比的增大,水泥浆液的扩散半径逐渐增大。总体来说,水灰比越大,浆液粘度越小,渗透阻力越小,浆液的扩散半径越大。

3.3 介质孔隙率对注浆扩散半径的影响

取孔隙率为 0.2、0.3、0.4,对不同孔隙率下的渗透扩散过程进行数值模拟。其他注浆参数为浆液水灰比 1 : 1,注浆压力 0.4 MPa。不同孔隙率浆液饱和度如图 10~图 12 所示,不同孔隙率下浆液最终扩散半径见表 5。

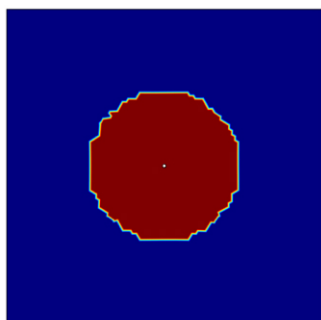


图 10 孔隙率 0.2 浆液饱和度

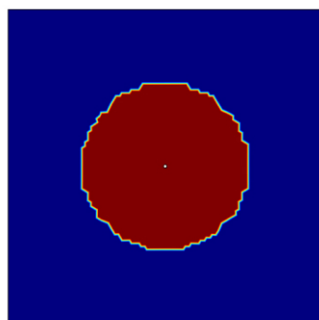


图 11 孔隙率 0.3 浆液饱和度

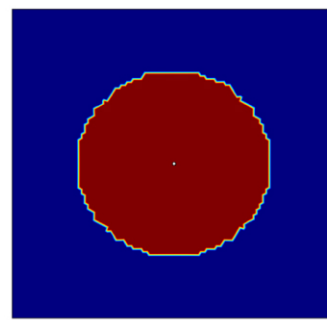


图 12 孔隙率 0.4 浆液饱和度

表 5 不同孔隙率下浆液的最终扩散半径

孔隙率	0.2	0.3	0.4
扩散半径/cm	21.5	28.8	35.5

可以看出,随着孔隙率增大,注浆扩散半径逐渐增大。孔隙率对注浆扩散半径的影响明显。

4 结论

(1)不同水灰比下水泥浆液均表现出粘度随时间增长趋势,呈现粘度时变性特点。水灰比越大,水泥含量越少,浆液粘度越小;反之,水灰比越小,水泥含量越多,浆液粘度越大。

(2)采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 进行渗透注浆模拟时,可以利用饱和度表征浆液的含量和充填程度。

(3)注浆压力、浆液水灰比以及介质孔隙率对注浆扩散半径有显著影响。注浆压力越大,注浆扩散半径越大;浆液水灰比越大,注浆扩散半径越大;介质孔隙率越大,注浆扩散半径也越大。但注浆压力不能大于地层自重应力,否则会导致地面隆起;而浆液水灰比也不能无限增大,过大的水灰比使浆液稀薄,水泥颗粒容易聚集成团,影响注浆效果。因此,施工中应根据工程环境、导管间距等合理选择注浆压力和浆液水灰比,以达到预期的注浆加固效果。

参 考 文 献

- [1]关宝树.隧道工程理论与实践[M].北京:人民交通出版社,1990.
- [2]杜书光.城市地铁隧道超前小导管预加固技术简介[J].中国科技财富,2010(8):64.
- [3]马海龙,杨敏,夏群.对基于渗透注浆理论公式的探讨[J].工业建筑,2000,30(2):47-50.
- [4]中铁隧道集团有限公司科学技术研究所.DBJ 01-96-2004 地铁暗挖隧道注浆施工技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [5]王杰,杜嘉鸿.岩土注浆技术的理论探讨[J].长江科学院院报,2002,17(6):82-86.

Numerical Simulation of Seepage Grouting in Anhydrous Sand in Shijiazhuang Area

Tan Zhiwen¹, Li Wenjiang², Wang Qinglei²

(1. Shijiazhuang Rail Transit Co. Ltd, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The construction area of Shijiazhuang subway mining method needs to pass through the anhydrous sand strata such as coarse sand and fine sand in a large range. This kind of stratum has low strength and poor self-stability. In order to ensure the safety of tunnel construction and control the deformation around the tunnel and surface subsidence, it is necessary to carry out advance grouting reinforcement. In this paper, medium coarse sand stratum in Shijiazhuang area was taken as the research object, and the time-varying slurry viscosity was taken into consideration. Cement slurry with different water-cement ratios was used for indoor tests to test its viscosity. The time-varying function of cement slurry viscosity with different water-cement ratios was obtained, and the time-varying function of viscosity was introduced into the finite element software COMSOL Multiphysics. The influence law of different grouting pressure, slurry viscosity, medium porosity and other parameters on grouting were studied, and the grouting design parameters were optimized. The research results have important reference significance for guiding engineering construction.

Key words: advanced small catheter; grouting; viscosity; grouting pressure