

Analysis on Quality Control Index of Circulation Grouting in the Prestressed Channel

Liqiong Hu¹, Wanglin Li², Hui Luo^{3*}, Kaiwen Xiong³, Jun Zhang⁴

¹Hubei Petrochemical Energy Developments Ltd., Wuhan Hubei

²Hubei Institute of Quality Supervision and Inspection, Wuhan Hubei

³School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan Hubei

⁴Yichang Urban Construction Investment and Development Co., Ltd., Yichang Hubei

Email: *luohui66@hust.edu.cn

Received: Aug.30th, 2017; accepted: Sep. 13th, 2017; published: Sep. 19th, 2017

Abstract

The density of the channel grouting of prestressed beams plays an important role in the bearing capacity and durability of the structure. In order to understand the control indexes affecting the density of circulating grouting, the Fluent is used to simulate the circulating grouting of prestressed beams with the numerical method. The result shows that when the viscosity of slurry and grouting pressure is constant, the longer the channel length is, the smaller the density of grouting is. When the channel length and grouting pressure are constant and the water cement ratio is 0.26~0.28, the viscosity of the slurry has little influence on the compactness of the grouting. When the viscosity of the slurry and the length of the channel are constant, if the grouting pressure is too small, the grouting density is too low. With the increase of grouting pressure, the density of circulating grouting increases remarkably. But when the grouting pressure increases to a certain value, the influence of grouting pressure on grouting density is not obvious. And the minimum grouting pressure and the recommended grouting pressure of the super long channel with different lengths are given through multiple calculations. The analyzed result can provide theoretical support for the construction of circulating grouting in practical project.

Keywords

Prestressed Channel, Circulating Grouting, Computational Fluid Dynamics (CFD), Fluent Model

预应力孔道循环压浆质量控制指标分析

胡利琼¹, 李旺林², 罗 辉^{3*}, 熊凯文³, 张军⁴

¹湖北交投石化能源发展有限公司, 湖北 武汉

²湖北省产品质量监督检验研究院, 湖北 武汉

*通讯作者。

³华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉

⁴宜昌市城市桥梁建设投资有限公司, 湖北 宜昌

Email: *luohui66@hust.edu.cn

收稿日期: 2017年8月30日; 录用日期: 2017年9月13日; 发布日期: 2017年9月19日

摘要

预应力梁孔道灌浆的密实度对结构承载力和耐久性有重要影响, 为了解影响循环压浆密实度的各控制指标, 使用Fluent对预应力梁循环压浆进行数值模拟。结果显示, 压浆料粘度、灌浆压强一定时, 孔道长度越长, 压浆密实度越小; 孔道长度、灌浆压强一定, 且满足实际工程水灰比0.26~0.28时, 压浆料粘度对压浆密实度的影响很小; 压浆料粘度、孔道长度一定时, 若灌浆压强过小, 压浆体密实度过低, 随着注浆压力的提高, 循环压浆的密实度显著提高, 但当注浆压力提高到一定程度以后, 灌浆压强对压浆密实度的改善不明显; 通过多次试算, 得出不同长度超长孔道的最小灌浆压强及推荐灌浆压强。分析结果可为实际工程循环压浆施工提供理论支持。

关键词

预应力孔道, 循环压浆, 计算流体力学, Fluent模型

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

孔道压浆对预应力结构有以下作用: 通过包裹预应力钢筋, 防止其锈蚀; 孔道压浆充满预应力孔道, 增加结构整体性; 预应力钢筋通过孔道压浆体传力, 保证预应力在梁体内传递[1]。

若压浆不密实, 水和空气进入孔道会导致预应力钢筋锈蚀, 预应力降低, 甚至断裂[2]; 预应力孔道内的裂缝与空洞会破坏桥梁的整体性; 孔道局部破损会导致应力集中[3]。

孔道压浆有多种不同的压浆工艺: 传统压浆工艺、真空辅助压浆工艺、以及循环压浆工艺[4] [5] [6] [7]。循环压浆工艺相比其他工艺, 改“堵”为“疏”, 通过浆液在孔道内持续循环的方式排出孔道内空气, 提高压浆密实度[8]。

本文以宜昌市庙嘴长江大桥作为工程依托, 利用计算流体动力学(CFD)分析方法模拟现场孔道循环压浆, 对影响循环压浆质量的各控制指标进行分析, 具体内容如下:

- 1) 在压浆料粘度、灌浆压强一定的条件下, 对循环压浆排出空气进行验证, 并研究孔道长度(分若干级)对压浆密实性的影响;
- 2) 在灌浆压强一定、超长孔道(210 m)的条件下, 研究压浆料粘度对压浆密实性的影响;
- 3) 在压浆料粘度一定、超长孔道(210 m)的条件下, 研究灌浆压强对压浆密实性的影响;
- 4) 在压浆料粘度一定的条件下, 研究超长管道循环压浆最小灌浆压强。

2. 几何模型和数值模型的建立(图 1、图 2)

2.1. 标准长度孔道几何模型

宜昌庙嘴长江大桥预应力管道最长达 270 m, 均采用循环压浆。仿真模型选为西坝立交主线桥 XBL2

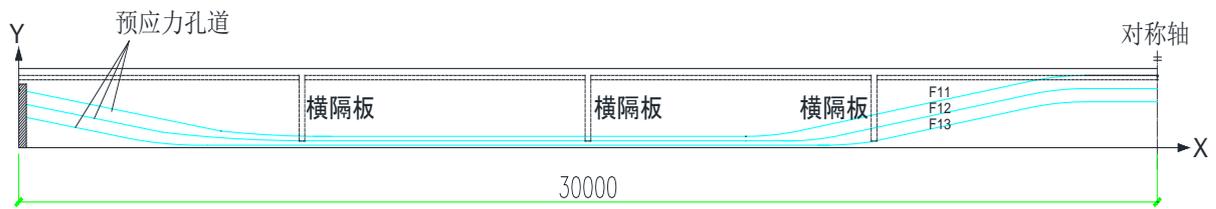


Figure 1. Elevation of standard length prestressed T beam
图 1. 标准长度预应力 T 梁立面图



Figure 2. Prestressed channel F11
图 2. 预应力孔道 F11 示意图

联梁，施工图图号为 S05Q-3-10，其 30 m 标准长度预应力 T 梁预应力孔道布置如图 1 所示，其中 F11、F12、F13 为预应力孔道位置，预留孔道为塑料波纹管孔道，波纹管规格为 SBG-100Y，公称内径为 100 mm，外径为 113 mm，内穿 5 × 15.2 mm 高强度低松弛预应力混凝土用钢筋线。

实际工程中，超长梁由标准长度 30 m 的预应力 T 梁连接而成，因此模型中预应力孔道水平长度为 30 m 的倍数。由于 F11 管道在 Y 方向高差更大，循环压浆难度更高，本次模型选定的预应力孔道为 F11，如图 2 所示。

循环压浆出入口均有一根导管，为避免在截面突变处数值模拟出现失真，设置出入口导管长度均为 0.5 m，管径为 30 mm。

2.2. 数值模型

2.2.1. 网格划分

本次各试算模型网格划分采用结构化网格，最大单元尺寸均设置为 18 mm 四边形网格。

由于不同长度的试算模型均由标准长度预应力孔道连接而成，所有模型均包括出入口、直线下降段、曲线下降段、水平段、曲线上升段、直线上升段(图 3)。由于出入口处截面的突变，网格相对不均匀，从出入口位置到孔道中段，网格会趋向均匀，各曲线段网格也非常平滑。

2.2.2. 网格质量检查

预应力孔道模型网格划分完毕后，进行网格质量检查。检查结果显示网格分布平滑均匀，质量均大于 0.95，达到 Fluent 计算要求。

2.2.3. Fluent 参数设置

预应力孔道模型网格划分完毕后，进行网格质量检查。检查结果显示网格分布平滑均匀，质量均大于 0.95，达到 Fluent 计算要求。

本文通过 Ansys Fluent 16.0 进行孔道灌浆的数值计算，导入 ICEM 划分好的网格并进行网格质量检查，确保没有负体积以后就需要根据研究目的选取计算模型和进行可行性判断，并进行模型各项参数设置。

水泥浆密度：模型中水泥浆的密度参数输入为现场测得数据 2.040 g/cm³。

水泥浆粘度：输入水泥浆粘度模型试算计划值。

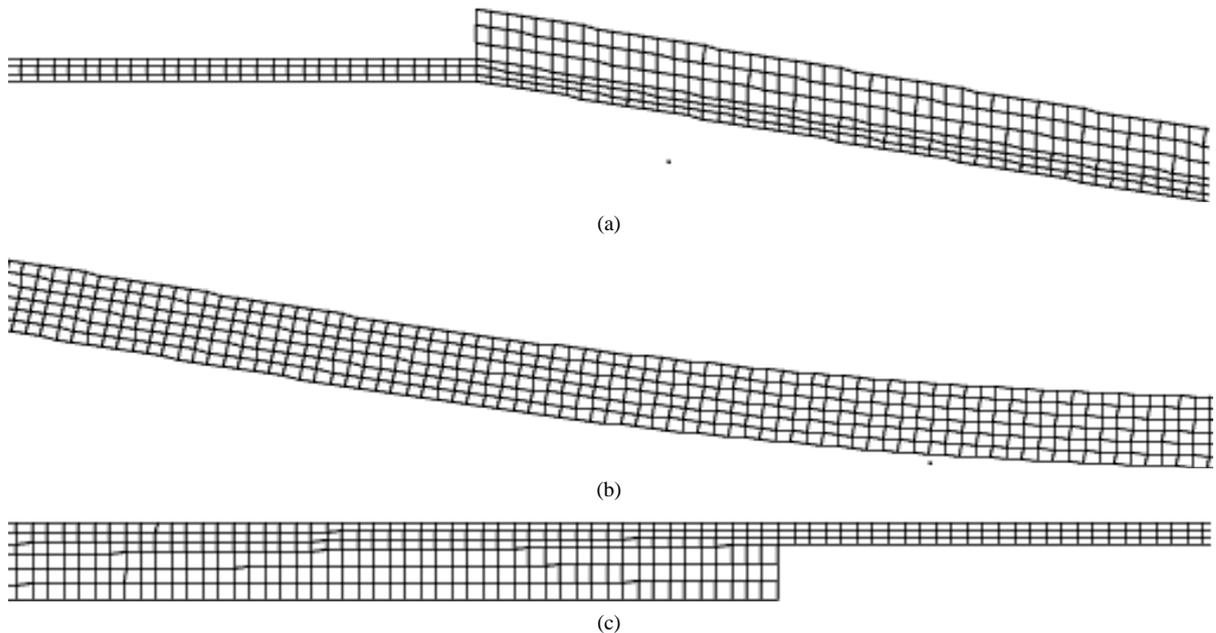


Figure 3. Meshing results at different positions of the model: (a) Entry grid; (b) Curve descent grid; (c) Exit grid
图 3. 模型不同位置网格划分结果: (a) 入口处网格; (b) 曲线下降段网络; (c) 出口处网络

相设置: 第一相为空气, 第二相为水泥浆。

重力: 本模型为二维模型, Y 方面考虑重力影响, 重力方向向下, g 为 9.8 m/s^2 。

液气表面张力: 将此参数输入为 25 摄氏度水的表面张力为 0.072 N/m 。

流态: 层流。

管壁粗糙高度: 将波纹管管壁粗糙高度设置为 5 mm 。

边界条件: 入口边界条件设置为压力入口条件, 入口压强值输入为模型试算计划值; 出口边界条件设定为压力出口条件, 出口压强为 0。进口处, 空气体积分数为 0, 压浆剂体积分数为 1, 出口处为混合相。

边界滑移条件: 无滑移边界条件。

多相流模型: VOF 多相流模型, 一阶迎风算法。

方程求解算法: 采用 PISO 算法。

初始条件: 初始条件设置为整个计算域内初始空气体积分数为 1, 初始压强为 0, 初始速度为 0。

时间步长: 将时间步长设置为 0.001 s , 并设定每 20 个步长保存一次数据。

设置好以上各参数、求解方程及算法就可以开始计算了, 对本文的研究问题, 在计算中需要随时观测的物理量分别为空气的体积分数, 流体的速度、压强, 并保持对各方程的收敛情况进行监测。

3. 计算结果与分析

3.1. 模型试算计划

本次仿真有四项任务, 分别探讨孔道长度、压浆料粘度、灌浆压强对压浆密实度的影响以及超长孔道最小灌浆压强。

研究孔道长度对压浆密实度的影响时, 需要对不同长度的孔道模型进行多次试算, 包括 30 m , 60 m , 90 m , 120 m , 150 m , 180 m , 210 m , 240 m , 270 m , 300 m , 330 m , 360 m 共 12 种长度的管道。压浆

料粘度为施工中现场测出的粘度值为 $0.9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，灌浆压强为施工中常用的 0.75 MPa 。

研究压浆料粘度对压浆密实度的影响时，需要对不同粘度的孔道模型进行多次试算，包括粘度为 $0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $0.6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $0.7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $0.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $0.9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $1.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $1.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $1.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $1.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $1.4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $1.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 等情况。孔道长度选择 210 m ，灌浆压强选择为施工中常用的 0.75 MPa 。

研究灌浆压强对压浆密实度的影响时，需要对不同灌浆压强的孔道模型进行多次试算，规范对超长孔道的灌浆压力要求不要超过 1.0 MPa ，而且过高的压力会造成浆液能量过大、人工操作易失误、管道接口易漏浆等问题，所以试算选择的灌浆压强为 0.5 MPa ， 0.55 MPa ， 0.6 MPa ， 0.65 MPa ， 0.7 MPa ， 0.75 MPa ， 0.8 MPa ， 0.85 MPa ， 0.9 MPa ， 0.95 MPa ， 1 MPa 等情况。孔道长度选择 210 m ，压浆料粘度为施工中现场测出的粘度值为 $0.9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

研究超长孔道最小灌浆压强时，会通过不同长度的超长孔道，比如 360 m ， 330 m ， 300 m 等孔道的多次试算，给出适合此长度的孔道最小灌浆压强，并给出推荐注浆压力。

3.2. 孔道长度对压浆密实度的影响

不同孔道长度情况下的数值计算时，当出浆口连续出浓浆时，可认为压浆结束。

由图 4 可以看出，孔道越长，压浆的密实度越小。当孔道为 30 m ， 60 m ， 90 m ， 120 m 时，压浆密实度的减少效果并不明显，当孔道长度达到 210 m ，压浆密实度急剧降低。原因是孔道长度较短时，流体能量相对充足，随着孔道长度变长，入口能量不足，流体流至管道后部流速偏小，即使最终可以完成压浆，也会出现压浆时间过长、部分气泡无法被水泥浆带出的情况，导致压浆密实度不高。

图 5 为灌浆压强为 0.75 MPa 、水泥浆粘度为 $0.9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时，流体流动到一定时间以后无法继续流动时， 330 m 长度孔道不同位置的体积云图。

由图 5 可以看出，越接近管道出口，气泡分布越多。在 280 m 处，孔道倾斜向下的位置，流体呈自重流动状态，说明水泥浆流到此处时，入口压强对流体的推动力已经不足。因此，对于 330 m 管道， 0.75 MPa 的灌浆压强已经不足。

3.3. 压浆料粘度对压浆密实度的影响

由表 1 可以看出，在孔道长度为 210 m ，灌浆压强为 0.75 MPa 时，在粘度为 $0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 至 $1.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的范围内，随着压浆料粘度的增长，所需压浆时间不断变长，最终压浆密实度不断变小，但是变化幅度较小。压浆料粘度从 $0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 变化至 $1.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时，压浆时间的变化幅度大约为 50 s ，而压浆密实度变化幅度约 0.5% 。

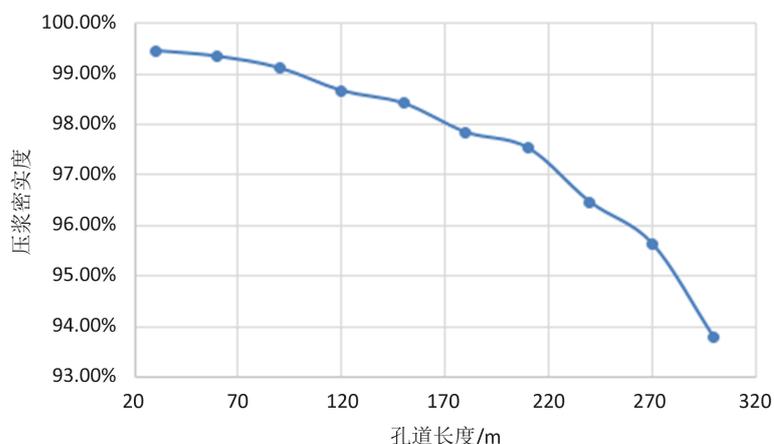
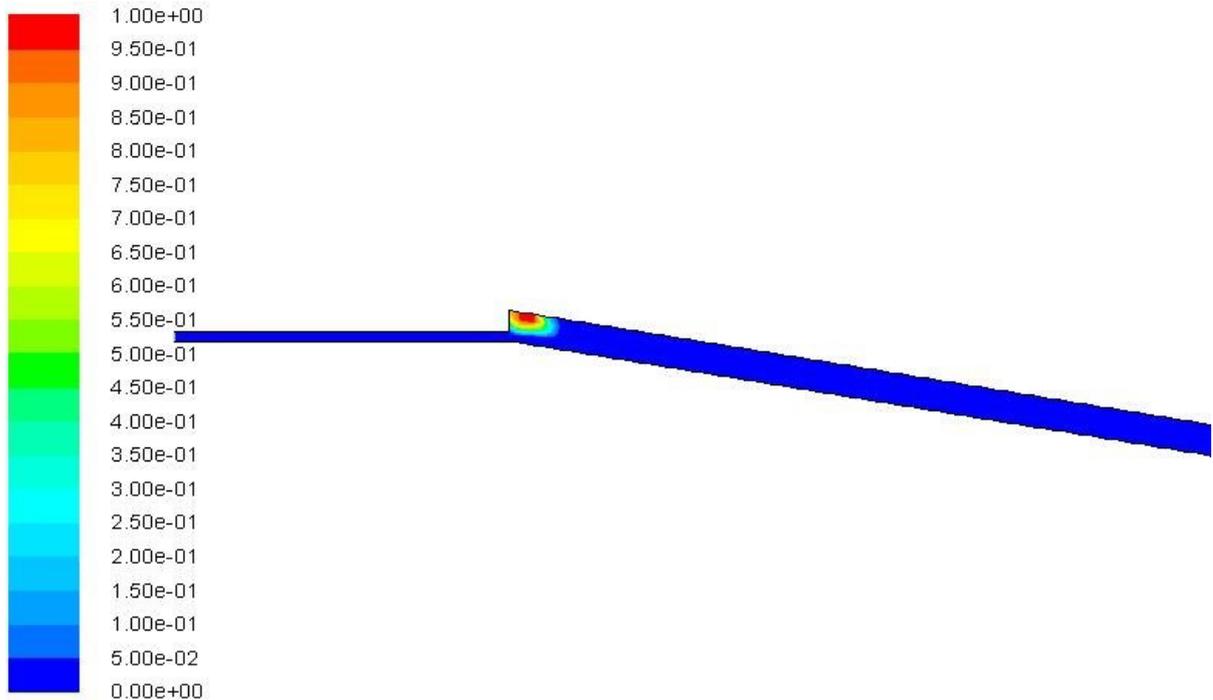


Figure 4. Relation between channel length and grout density

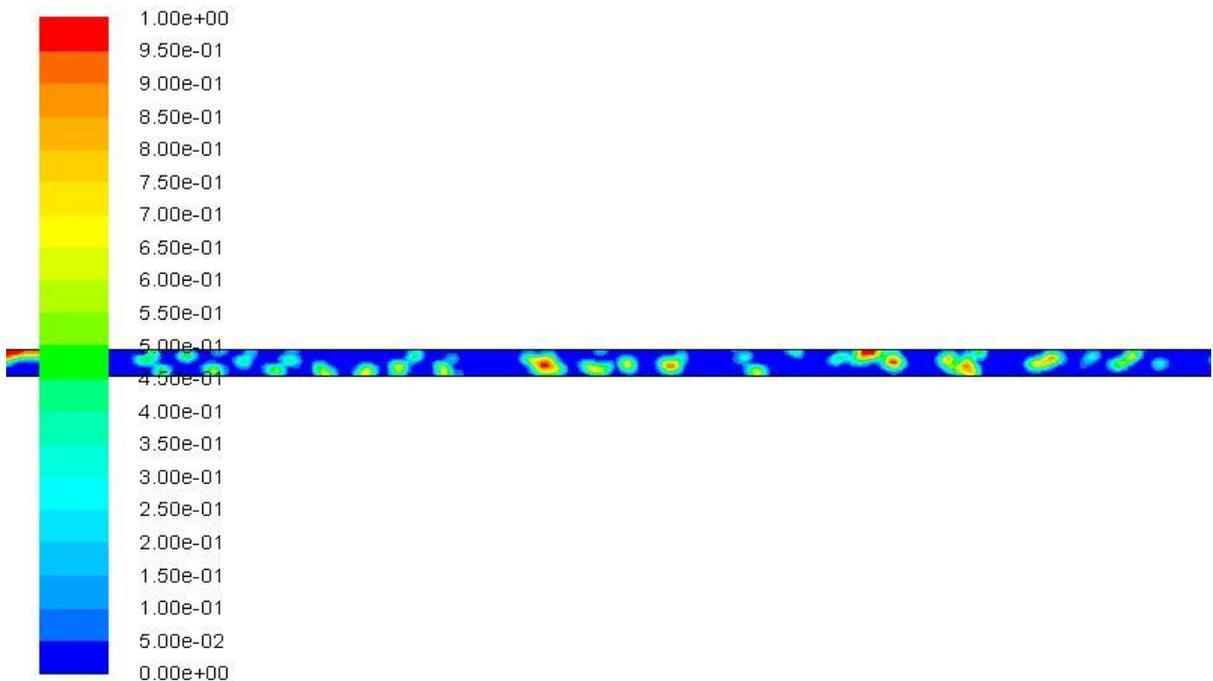
图 4. 孔道长度与压浆密实度的关系曲线图

原因是规范对压浆料的水灰比有限制，在此条件下，压浆料粘度范围为 0.5 Pa·s 至 1.5 Pa·s，相对较小，在水泥浆流动过程中，由粘度导致的能量损耗也相对较小。

为了更好地研究压浆料粘度对压浆密实度的影响，另试算了一个粘度较大的模型。该模型孔道长度为 210 m，灌浆压强为 0.75 MPa 时，粘度为 10 Pa·s，水泥浆流至 190 m 处时，入口处的压强无法继续推动水泥浆向出口流动。图 6 为水泥浆无法继续流动时，孔道不同位置的体积云图。



(a)



(b)

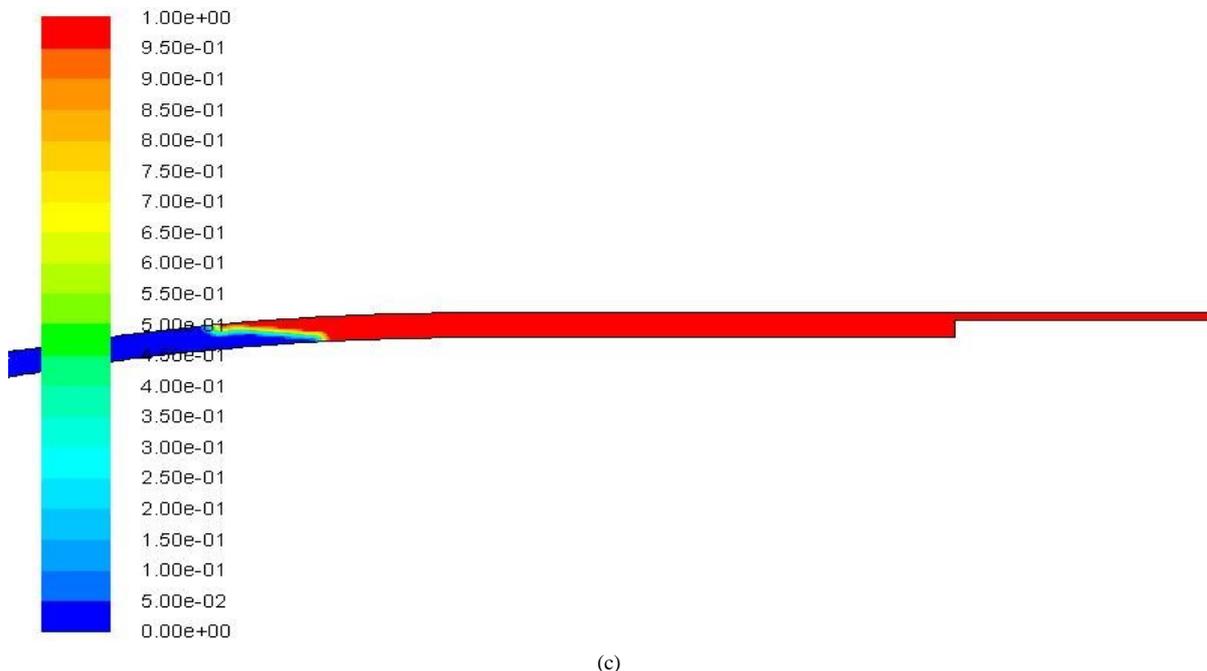


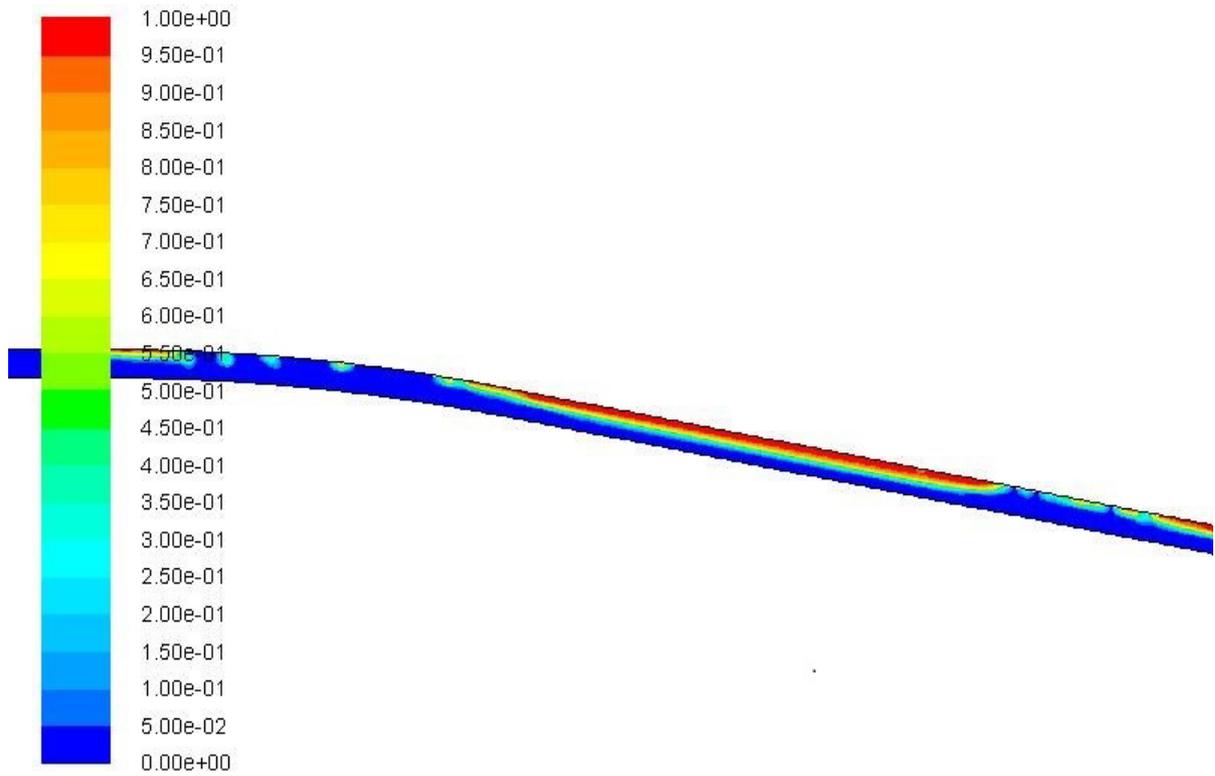
Figure 5. Contour of volume fraction in different position of 330 m channel: (a) Entry; (b) 280 m; (c) Exit
图 5. 330 m 长度孔道不同位置体积云图: (a) 入口处体积云图; (b) 280 m 处体积云图; (c) 出口处体积云图

Table 1. Numerical results of different grout viscosity
表 1. 不同压浆料粘度数值计算结果

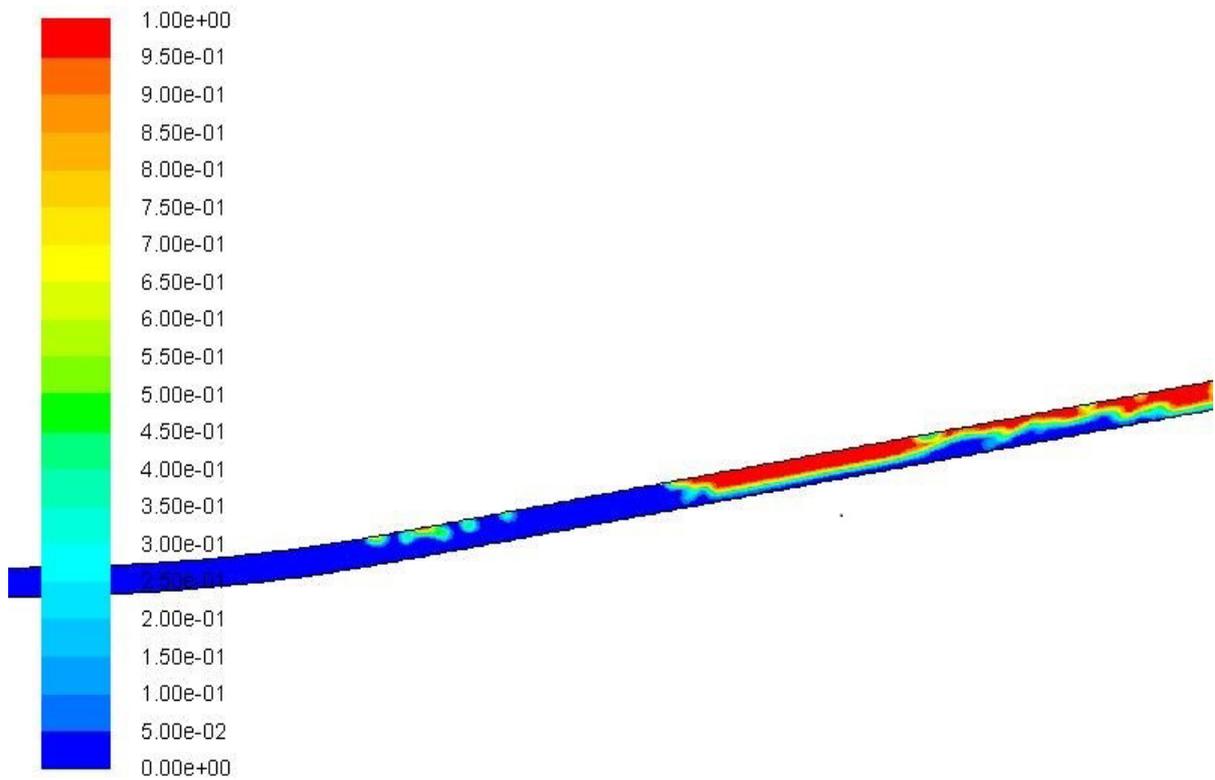
压浆料粘度	压浆时间	压浆密实度
0.5 Pa·s	233.24 s	97.69%
0.6Pa·s	236.89 s	97.65%
0.7Pa·s	241.47 s	97.62%
0.8Pa·s	247.29 s	97.58%
0.9Pa·s	251.24 s	97.54%
1.0Pa·s	256.85 s	97.40%
1.1Pa·s	262.60 s	97.43%
1.2Pa·s	269.76 s	97.36%
1.3Pa·s	274.41 s	97.31%
1.4Pa·s	278.72 s	97.25%
1.5Pa·s	284.58 s	97.17%
10 Pa·s	无法完成压浆	

3.4. 灌浆压强对灌浆密实度的影响

由图 7 可以看出, 在压浆料粘度为 0.9 Pa·s, 孔道长度为 210 m 情况下, 灌浆压强相对较小时, 灌浆压强从 0.6 MPa 提高至 0.65 MPa 时, 压浆的密实度提高的幅度并不大, 此时灌浆压强刚刚能使压浆料完全流出管道, 但是不能更好的保证压浆质量; 灌浆压强从 0.65 MPa 变化至 0.8 MPa 时, 压浆密实度提升较快; 当灌浆压强从 0.85 MPa 变化至 1 MPa 时, 灌浆压强的提高对压浆密实度的增加影响比较小。



(a)



(b)

Figure 6. Contour of volume fraction in different position of 210 m channel: (a) 170 m; (b) 185 m
图 6. 210 m 长度孔道不同位置体积云图: (a) 170 m 处体积云图; (b) 185 m 处体积云图

循环压浆过程中，若注浆压力过小，会导致压浆密实度低，甚至压浆失败。随着注浆压力的提高，循环压浆的密实度会有显著的提高，但当注浆压力提高到一定程度以后，对压浆密实度的影响不明显，而且过高的灌浆压强会造成压浆设备负荷过高。因此，压浆需要适当的灌浆压强。

3.5. 超长孔道循环压浆最小灌浆压强

本次模型中通过对不同长度的超长孔道，比如 120 m, 150 m, 180 m, 210 m, 240 m, 270 m, 300 m, 330 m, 360 m 等进行多次试算，给出此长度孔道的最小灌浆压强和推荐灌浆压强。

压强范围为 0.4 MPa 至 1.0 MPa，不同长度的孔道模型的灌浆压强分级计算，从 1.0 MPa 开始计算，每级间隔 0.05 Mpa，直至显示压浆无法完成。

为提高计算精度，将最小灌浆压强每级间隔改为 0.01 MP，则最后使计算成功的最小灌浆压强为此长度孔道的控制精度为 0.01 MPa 时的最小灌浆压强，计算结果如表 2 所示。

由图 8 可以看出，随着灌浆压强的增长，压浆密实度逐渐增大，但是灌浆压强增大到一定程度后，压浆密实度的增长逐渐平稳。因此给出灌浆压强推荐区间，此区间的下界由压浆密实度决定，要求压浆密实度不得小于 97.5%，区间长度为 1 Mpa。根据此定义，适合不同孔道长度的推荐灌浆压强如表 3 所示。

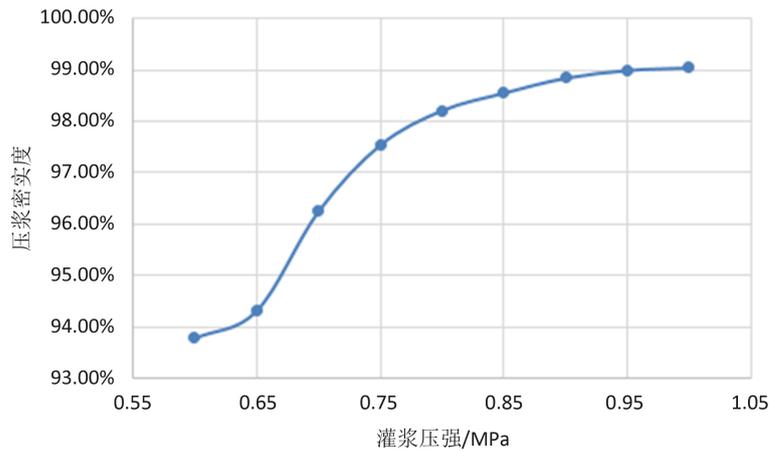


Figure 7. Relation between grouting pressure and grouting density
图 7. 灌浆压强与压浆密实度的关系曲线图

Table 2. Minimum grouting pressure of overlength channel
表 2. 超长孔道的最小灌浆压强

孔道长度	最小灌浆压强
120 m	0.48 MPa
150 m	0.5 MPa
180 m	0.51 MPa
210 m	0.56 MPa
240 m	0.59 Mpa
270 m	0.63 Mpa
300 m	0.7 Mpa
330 m	0.82 Mpa
360 m	0.94 Mpa

Table 3. Recommended grouting pressure of overlength channel
表 3. 超长孔道的推荐灌浆压强

孔道长度	推荐灌浆压强
120 m	0.7 MPa~0.8 MPa
150 m	0.7 MPa~0.8 MPa
180 m	0.75 MPa~0.85 MPa
210 m	0.75 MPa~0.85 MPa
240 m	0.8 MPa~0.9 MPa
270 m	0.85 MPa~0.95 MPa
300 m	0.95 MPa~1.0 MPa
330 m	孔道过长, 无法高质量压浆
360 m	孔道过长, 无法高质量压浆

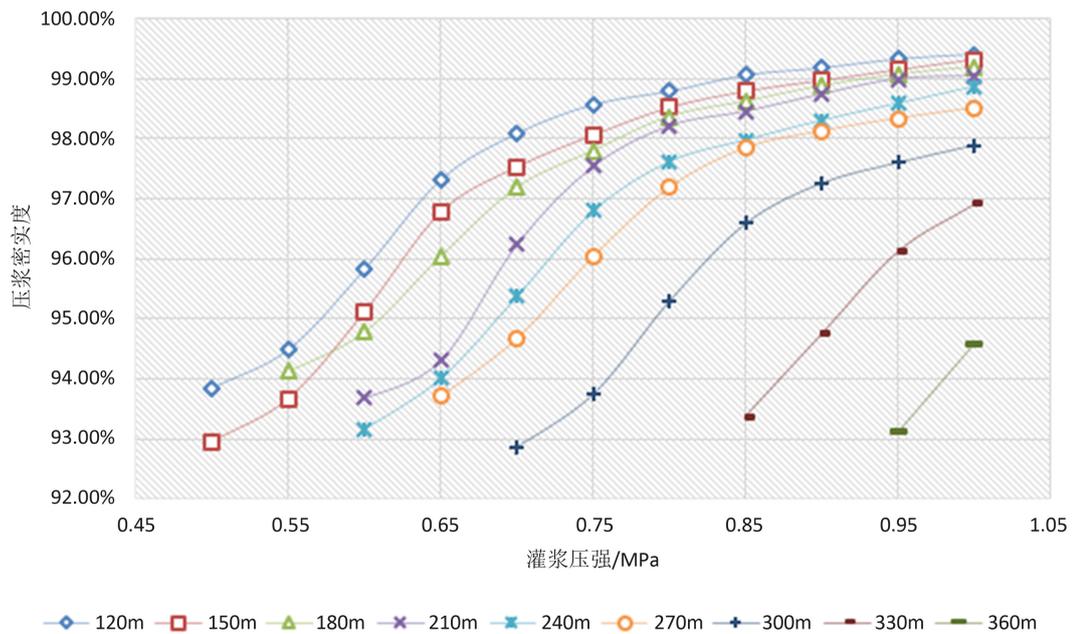


Figure 8. Relation between grouting pressure and grouting density of different channel length
图 8. 不同孔道长度灌浆压强与压浆密实度的关系曲线图

当孔道过长, 达到 330 m 及 360 m 时, 由于规范对灌浆压强的限制, 在规范限制范围内的灌浆压强无法满足此类长度的高质量压浆。因此, 在实际工程中, 尽量减少 300 m 以上孔道的循环压浆。

4. 结论

- 1) 在压浆料粘度、灌浆压强一定的条件下, 孔道长度越长, 压浆密实度越小, 当孔道过长时, 可能压浆失败;
- 2) 在孔道长度、灌浆压强一定, 压浆成功的条件下, 且满足实际工程水灰比 0.26~0.28 的要求, 浆料粘度范围一般为 0.5 Pa·s 至 1.5 Pa·s。在此粘度范围内, 压浆料粘度对压浆密实度的影响很小;
- 3) 在压浆料粘度、孔道长度一定, 压浆成功的条件下, 若灌浆压强过小, 压浆体密实度过低, 随着注浆压力每一次的提高, 循环压浆的密实度显著提高, 但当注浆压力提高到一定程度以后, 灌浆压强对

压浆密实度的改善不明显, 并且灌浆压强太大会造成压浆设备负荷过高。因此, 需要适当的灌浆压强。

4) 考虑到实际工程的需要, 通过多次试算, 得出不同长度超长孔道的最小灌浆压强及推荐灌浆压强。

参考文献 (References)

- [1] 张波. 预应力孔道压浆施工中常见问题的防治[J]. 科技信息, 2009(29): 108-108.
- [2] 漆亮, 巢春根. T型梁与之工程中智能张拉压浆系统应用[J]. 江西建材, 2014(22): 199-199.
- [3] 夏涛. 我省大型桥梁若干典型病害处治技术探讨[J]. 湖南交通科技, 2003, 29(3): 56-58.
- [4] 孙振华. 简述智能压浆系统及高性能管道灌浆材料优点[J]. 科学之友, 2012(17): 28-29.
- [5] 王燕. 浅析智能压浆技术在桥梁施工中的应用[J]. 江苏科技信息, 2015(2): 62-63.
- [6] 李海涛, 王昊平. 循环智能压浆对比试验及压浆质量影响因素分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014(12): 345-348.
- [7] 黎人伟. 智能预应力施工工艺在桥梁施工中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- [8] 徐向锋. 孔道压浆性能试验及施工质量的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2005.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3431, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojtt@hanspub.org