

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.04.015

标准预应力梁孔道注浆的有限元模拟

严秋荣^{1,2}, 徐莹², 孔令云³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067;
3. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400047)

摘要: 对于预应力梁孔道的注浆, 由于注浆孔道狭窄, 浆体在孔道中的流动情况十分复杂。为了解注浆体在孔道中的流动情况, 建立了注浆体三维有限元模型, 首次采用流体力学软件 Fluent 对标准预应力梁孔道注浆过程进行有限元数值模拟分析。结果显示, 在速度云图中, 浆体在孔道平弯段空间和孔道顶面的空间流动缓慢, 可能导致注浆缺陷; 静态压力云图中孔道中间静压大于两端静压, 浆体在水化过程中, 泌水被迫流至 2 个端头, 造成注浆缺陷。分析结果可为注浆无损检测技术提供理论和实际检测数据处理支持。

关键词: 预应力梁; 孔道注浆; 有限元模拟

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)04-093-07

Finite element simulation of duct grouting to standard prestressed concrete beam

YAN Qiurong^{1,2}, XU Ying², KONG lingyun³

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd,
Chongqing 400067, China; 3. Department of civil engineering and architecture,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400047, China)

Abstract: For the duct grouting of prestressed beams, due to the narrow passageways grouting, the paste in the flow condition is very complex. In order to understand the grouting body in flow, the article establishes a three dimension finite element model of the grouting body, and uses the fluid mechanics software Fluent to analyze the grouting process of the standard prestressed beams through the finite element numerical method for the first time. The results show in the speed of cloud, the paste which is in a straight space and passes top space flows slow, may cause grouting defects. In the cloud of duct static pressure, the static pressure in the centre of the duct is greater than those on both ends. When paste is in hydration process, secrete water is forced to flow to the two ends, which causes grouting defects. The analysis results provide theoretical and actual testing data processing support for grouting nondestructive testing technology.

Key words: prestressed concrete beam; duct grouting; finite element simulation

收稿日期: 2013-10-23

基金项目: 科技部开发研究专项资金资助项目(2012EG124042)

作者简介: 严秋荣(1978-), 男, 副研究员, 博士研究生, 主要从事路基工程, 岩土工程、桥梁工程检测等方向研究,
(E-mail) klyyqr@163.com.

预应力桥梁的孔道注浆质量直接关系到桥梁结构的安全性与耐久性。当注浆不饱满时,孔道内存在空气和泌水,施加预应力后的钢绞线暴露于空气和水的酸性环境中,相比普通状态,其腐蚀速度将呈数量级的变化,一旦预应力失效,将会导致桥梁垮塌。

在 20 世纪 50 年代,瑞士大学的 R. H. Evans 教授最早发现并提出孔道注浆质量问题^[1]。在 1985 年 12 月,英国南威尔士 Ynys-y-Gwas 桥突然倒塌,调查认为,预应力孔道注浆严重的不密实直接导致钢绞线的腐蚀是桥梁倒塌的根本原因^[2]。近年来,国内沪宁高速拓宽整修中也发现注浆不饱满和钢绞线锈断等问题,严重地影响到预应力体系的效能。

孔道注浆质量检测是国内外桥梁检测最新的研究方向^[2-4],朱自强^[2]在其论文中对国内外孔道注浆质量的检测方法做了总结和归纳:目前,在预应力孔道注浆质量检测方面常用的方法有地质雷达法、超声波法和冲击回波法,但均存在某些方面的缺陷,除 X 光、 γ 射线法等辐射法外,还没有能够完全准确检测出预应力桥梁孔道注浆质量的方法。

其中,冲击回波法研究最多^[5-7],但又存在效率低、分辨低的问题,同时其测试效果受管壁外混凝土缺陷的影响较大,需进一步深入研究;由于金属预应力管道对电磁波具有屏蔽作用,因而地质雷达也只能用于塑料预应力管道的注浆质量检测,另外,纵横分布的钢筋对雷达信号产生强烈的干扰,检测效果有待进一步验证;对于薄壁工件,超声波透射法有较大的优势,但由于对测试位置的精确要求,箱梁等结构复杂的构件,将不适合使用,且测试费时、对接触面要求高,因而很难得以广泛应用;辐射法虽精度高,但是受测试条件限制和辐射的影响,仅用于室内试验的研究工作中^[2-4]。

综上所述,孔道注浆质量检测的研究基本都处于理论或试验研究阶段。同时,相关的研究大多都着眼于测试的方法上,而对注浆以及浆体流动的过程关注的较少。实际上由于注浆孔道狭窄,浆体在孔道中的流动情况十分复杂,了解注浆体在孔道中的流动情况,对浆体流动的异常点有针对性的采用测试方法,这对提高注浆质量检测的准确性将有较好的帮助。文中对标准预应力桥梁的孔道注浆过程采用流体力学软件 Fluent 进行有限元模拟。

1 浆体流动的理论计算和模型选择

当前,预应力桥梁工程中使用最多的注浆材料是纯水泥浆。水泥浆体属非牛顿流体,其流变性质接近于宾汉型非牛顿流体^[3,8-9]。为了解其在孔道中的流动状态,首先对宾汉体浆液的流动建立数学模型,进行理论计算。

预应力桥梁注浆孔道中,设孔道半径为 $r < r_0$,在孔内取一以孔轴为对称轴的流体柱,其长度为 dl ,如图 1 所示。在不考虑重力的情况下,该流体柱元素上受力的平衡关系为

$$\pi r^2 dp = -2\pi r \tau dl. \quad (1)$$

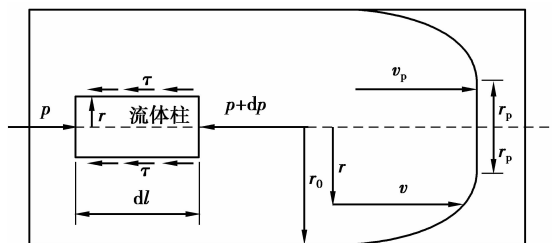


图 1 宾汉体浆液在孔道中流动示意图

流体微元段 dl 两端压力分别为 $p+dp$ 和 p ,段上压差为 dp 。流体柱元素表面上所受剪切应力为 τ ,其方向向左,与流速方向相反。由上式可得剪切应力 τ :

$$\tau = -(r/2)(dp/dl). \quad (2)$$

即柱元素表面上的剪切应力:与柱元素半径 r 和压力梯度 dp/dl 的乘积成正比,但符号相反。而宾汉体浆液流动的本构方程为

$$\tau = \tau_s + \eta_p \gamma, \quad (3)$$

其中: τ 剪切应力; τ_s 静切力; η_p 塑性粘度; γ 剪切速率; $\gamma = -dv/dr$ 。

将式(2)代入式(3)可得

$$\gamma = -\frac{dv}{dr} = \frac{\tau - \tau_s}{\eta_p} = -\left(\frac{1}{\eta_p}\right) \left[\left(\frac{r}{2}\right) \left(\frac{dp}{dl}\right) + \tau_s \right]. \quad (4)$$

式(2)表明,剪切应力 τ 的大小与孔内径向距离成正比,因而在孔中心线附近剪切应力 τ 很小。对于宾汉流体,当 $\tau = -(r/2)(dp/dl) \leq \tau_s$ 时,流体不受剪切作用,即在孔中存在 1 个径向距离 r_p ,在 $0 \leq r \leq r_p$ 处流体相对于邻层流体是静止的,流体呈活塞式整体运动,速度 $v = v_p$;而在 $r_p < r < r_0$ 处,流体相对于邻层流体处于运动状态。由式(2)显然有: $r_p = 2\tau_s / (-dp/dl)$,当孔道中流动为层流时,对于式(4)利用分离变量法求解,并考虑边界条件 $r = r_0$ 时, $v = 0$,则

$$v = \left(\frac{1}{\eta_p}\right) \left[\left(-\frac{dp}{4dl}\right)(r_0^2 - r^2) - \tau_s(r_0 - r) \right], \quad r_p < r < r_0, \quad (5)$$

当 $r_p < r < r_0$ 时,速度直接用上式表示;当 $0 \leq r \leq r_p$ 时,流体呈活塞式整体运动, r_p 为

$$v_p = \left(\frac{1}{\eta_p}\right) \left[\left(-\frac{dp}{4dl}\right)(r_0^2 - r_p^2) - \tau_s(r_0 - r_p) \right]. \quad (6)$$

所以孔道中的速度为截头抛物面形状,其流量为通过剪切区($r_p < r < r_0$)与活塞区($0 \leq r \leq r_p$)流量之和。于是通过半径为 r_0 的单个毛细管的单位时间流量 Q 为

$$Q = \int_{r_p}^{r_0} 2\pi r v dr + \pi r_p^2 v_p. \quad (7)$$

将式(5)和式(6)代入式(7),可以得到通过半径为 r_0 孔道中层流流动的流量 Q 为

$$Q = \frac{\pi r_0^4}{8\eta_p} \left(-\frac{dp}{dl}\right) \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2\tau_s/r_0}{-dp/dl}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_s/r_0}{-dp/dl}\right)^4 \right]. \quad (8)$$

孔道截面上平均流速为

$$\bar{v} = \frac{Q}{\pi r_0^2} = \frac{r_0^2}{8\eta_p} \left(-\frac{dp}{dl}\right) \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2\tau_s/r_0}{-dp/dl}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_s/r_0}{-dp/dl}\right)^4 \right]. \quad (9)$$

如果使孔道中流量为零,上式方括号中的量必须为零,由此解出正根:

$$-\frac{dp}{dl} = \frac{2\tau_s}{r_0} = \Lambda, \quad (10)$$

这就是孔道中宾汉流体的启动压力梯度。

渗透速度 $V = \phi \bar{v}$, 并令 $k = \frac{\phi r_0^2}{8\eta}$, $\beta = \frac{\eta_p}{\eta}$, η 为水的粘度(20 °C 时水的粘度为 $1.010 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$), η_p 为浆液的粘度, ϕ 为孔隙度。最终可得:

$$V = \frac{K}{\beta} \left(-\frac{dp}{dl}\right) \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\lambda}{-dp/dl}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\lambda}{-dp/dl}\right)^4 \right]. \quad (11)$$

同时,在选择模型时主要考虑以下几点:流体是否可压、建立特殊的可行的问题、精度的要求、计算机的能力、时间的限制。对于低压力下纯水泥浆的孔道注浆,选用 Fluent 提供的标准 $k-\epsilon$ 模型。

标准 $k-\epsilon$ 模型是个半经验公式,主要是基于湍流动能和扩散率^[10]。 k 方程是个精确方程, ϵ 方程是个由经验公式导出的方程。标准 $k-\epsilon$ 模型需要求解湍动能及其耗散率方程。湍动能输运方程是通过精确的方程推导得到,但耗散率方程是通过物理推理,数学上模拟相似原形方程得到的^[11]。该模型假设流动为完全湍流,分子粘性的影响可以忽略。因此,标准 $k-\epsilon$ 模型只适合完全湍流的流动过程模拟。

标准 $k-\epsilon$ 模型的湍动能 k 和耗散率 ϵ 方程为如下形式:

$$\rho \frac{D_k}{D_t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{u_i}{\sigma_k}\right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M, \quad (12)$$

$$\rho \frac{D_\epsilon}{D_t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{u_i}{\sigma_k}\right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \quad (13)$$

在上述方程中, D_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生, G_b 是用于浮力影响引起的湍动能产生; Y_M 可压速湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响^[12]。湍流粘性系数 $\mu_1 = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 。

在 Fluent 中,作为默认值常数, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, 湍动能 k 与耗散率 ϵ 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

2 标准预应力梁孔道注浆模型建立

取 30 m 标准预应力 T 梁,其预应力孔道布置如图 2 所示,其中 N1,N2,N3 为孔道位置,预留孔道为塑料波纹管孔道,公称内径为 50 mm,外径为 63 mm,内穿 $5 \times 15.2 \text{ mm}$ 预应力钢筋线^[13]。标准 T 梁孔道坐标值如表 1 所示。

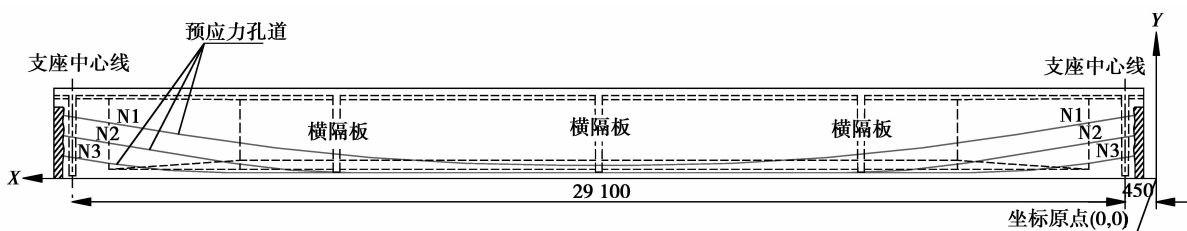


图 2 标准 T 梁立面构造图

表 1 标准 T 梁孔道坐标值

孔道号	坐标轴	锚固点 支承点													
		断面	45	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
N1	Y	1 700	1 666	1 589	1 518	1 448	1 379	1 308	1 237	1 167	1 097	1 026	956	886	816
N2	Y	1 200	1 168	1 091	1 020	950	880	809	739	669	599	528	458	393	322
N3	Y	600	579	531	487	444	400	356	312	269	225	184	150	126	109
孔道号	坐标轴	锚固点 支承点													
		700	750	800	850	900	950	1 000	1 050	1 100	1 150	1 200	1 250	1 300	1 350
N1	Y	745	675	605	535	464	399	343	295	255	244	201	186	180	180
N2	Y	265	217	177	145	122	107	100	100	100	100	100	100	100	100
N3	Y	101	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
孔道号	坐标轴	锚固点 支承点													
		1 650	1 700	1 750	1 800	1 850	1 900	1 950	2 000	2 050	2 100	2 150	2 200	2 250	2 300
N1	Y	180	180	186	201	224	255	295	343	399	464	535	605	675	745
N2	Y	100	100	100	100	100	100	100	100	100	122	145	177	217	265
N3	Y	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	101
孔道号	坐标轴	锚固点 支承点													
		2 350	2 400	2 450	2 500	2 550	2 600	2 650	2 700	2 750	2 800	2 850	2 900	2 955	断面
N1	Y	816	886	956	1 026	1 097	1 167	1 237	1 308	1 379	1 448	1 518	1 589	1 666	1 700
N2	Y	322	393	458	528	599	669	739	809	880	950	1 020	1 091	1 168	1 200
N3	Y	109	126	150	184	225	269	312	356	400	444	487	531	579	600

在 Fluent 软件中,根据孔道坐标图,拟合成预应力孔道曲线方程,建立孔道的几何模型。由于 N1 孔道的曲线段是 3 个孔道中最长的,为了得到较好的有限元模拟效果,取 N1 孔道为研究对象(如图 3~图 5 所示)。

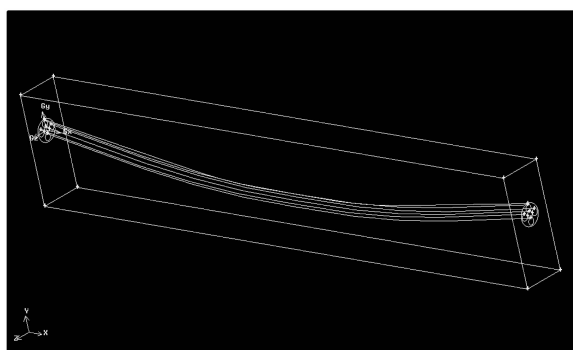


图 3 预应力 T 梁 N1 孔道几何模型

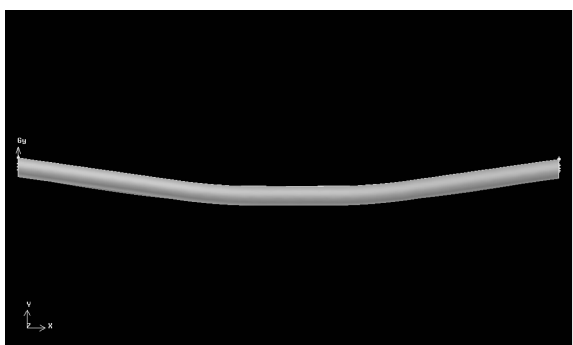


图 4 预应力 T 梁 N1 孔道填充后模型

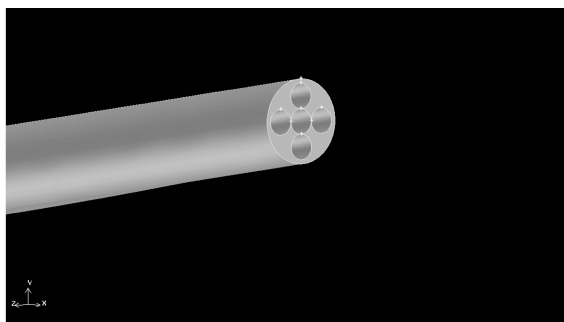


图 5 预应力 T 梁去钢绞线后孔道模型

2.1 计算域及网格划分

Fluent 软件中选取标准 $k-\epsilon$ 模型,流体绕圆柱体的流动阻力要比钝形柱体的绕流阻力小,文中所研究预应力桥梁施加预应力后孔道注浆模型选择圆端翼型体,具体为柱形孔道。计算区域采用非均匀网格,孔道端头附近布置较密集的网格,计算域边界采用较稀疏的网格,最小网格间距小于 1 mm, Re 为 10^6 。

纯水泥浆液为两相流,其在孔道中的流动情况较单相流更为复杂,孔道中除去钢绞线后所剩下的注浆空间较小^[14]。在网格划分中,将张拉后的 5 束钢绞线看做 1 整束钢绞线,设孔道直径为 50 mm,整束钢绞线的直径为 30 mm,梁左侧注浆口,梁右侧为出浆口。

先对线、面采用三角形网格单元,在圆周周围进行网格加密,然后采用非结构化网格(Hex/Wedge),对整个流场进行网格划分,在孔道近壁区网格密,其他区域网格逐渐变稀。从而使划分的网格节点在孔道周围既保证质量又满足必备条件;在产生涡街的前后区域内也使用连续的密集六边形蜂窝划分,保证域内生成的网格基本为正三角形,以满足较好的质量;而在流场边缘的区域,参数梯度小,采用较稀疏化的网格,避免计算负担。预应力梁孔道网格划分如图 6、图 7 所示。

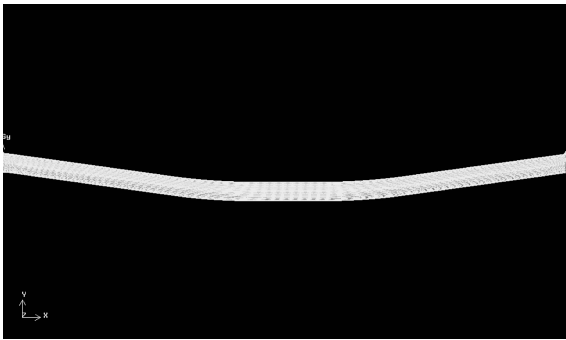


图 6 预应力孔道网格划分图

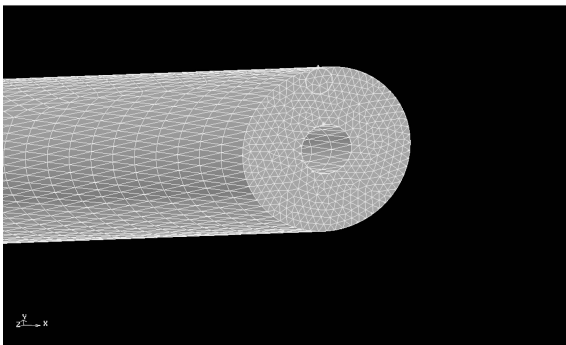


图 7 预应力孔道网格划分局部图

2.2 分析参数及边界条件设置

根据工程类比,孔道进口处采用压强进口边界条件, $P=0.6\text{ MPa}$ 为施加荷载;出口处设为流量出口条件,模型的边界受到 X、Y 和 Z 轴的位移约束。初始条件设流场参考压强 0.58 MPa ,动力粘度 $a=0.010\ 03\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。运动粘度 $\nu=1.003\text{ m}^2/\text{s}$,流场无穷远处均匀来流速度为 U_∞ 。远场为流场无穷远处,平均压强 $P=0$ 。对于刚性孔道表面及流场,采用壁面边界条件^[12],即无滑移条件;设波纹管绝度粗糙度 $k<0.01\text{ mm}$,纯水泥浆的水灰比为 $0.25:1$,则水灰体积比为 $3:4$,水泥颗粒直径为 0.04 mm ,注浆速度为 3 m/s ,注浆所需时间为 $1.080\ 00\text{e}+03\text{ s}$ 。

3 数值模拟结果分析

水泥浆体在孔道中的流动情况如图 8~图 13 所示。从典型时刻的速度云图,可以认为,在理论条件下,浆体在孔道中可以较好的流动,从而达到对钢绞线的裹覆,保护高应力作用下的钢绞线不受腐蚀^[15-17]。但是,理论条件很难完全达到,而在理论模拟下所得到的缺陷,可能在实际中得到无限放大,从而影响注浆效果^[18]。

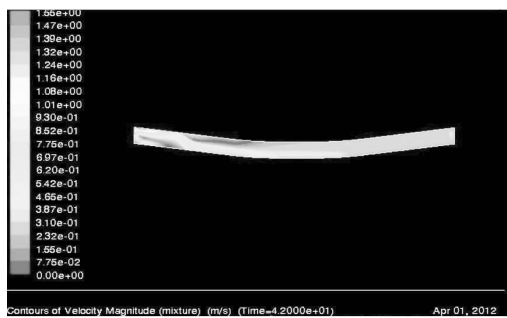


图 8 $t=4.200\ 0\text{e}+01\text{ s}$ 时刻速度云图

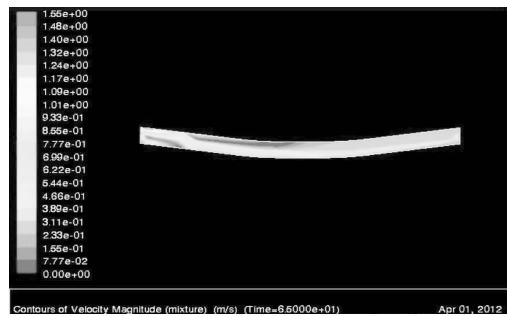


图 9 $t=6.500\ 0\text{e}+01\text{ s}$ 时刻速度云图

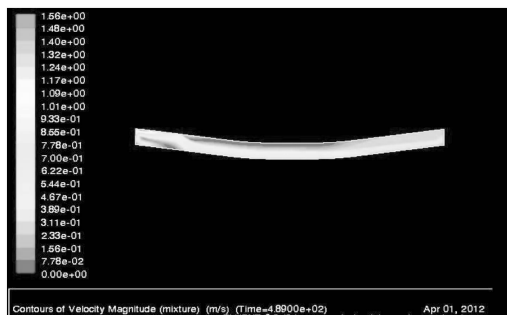


图 10 $t=4.890\ 0\text{e}+02\text{ s}$ 时刻速度云图

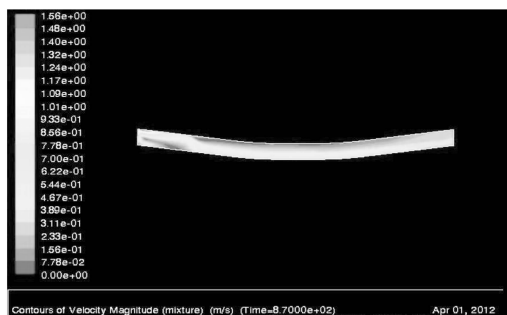


图 11 $t=8.700\ 0\text{e}+02\text{ s}$ 时刻速度云图

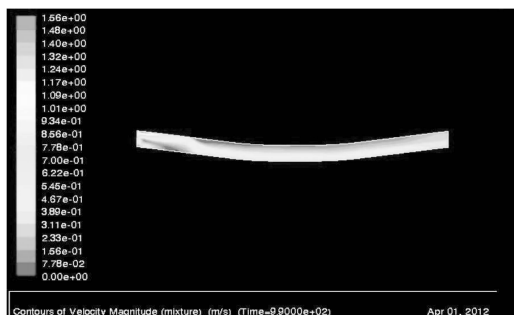
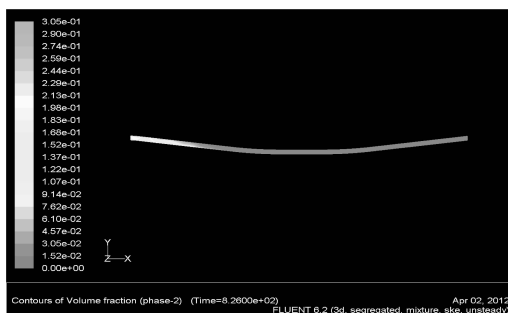
图 12 $t=9.900\ 0e+02$ s 时刻速度云图

图 14 两相流中的固相体积分数的云图

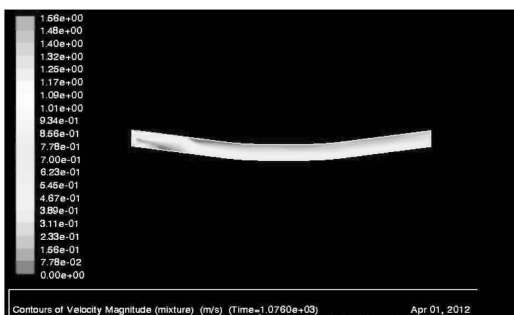
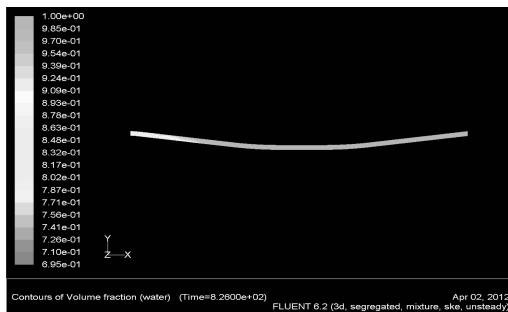
图 13 $t=1.076\ 0e+03$ s 时刻速度云图

图 15 两相流中液相体积分数的云图

3.1 浆体流动速度分析

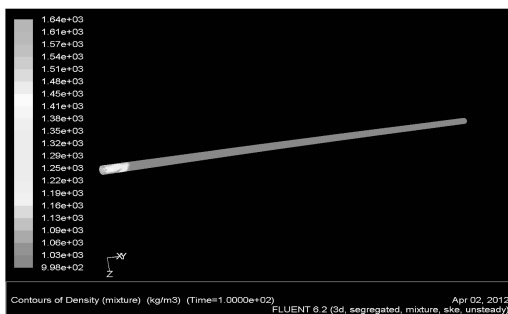
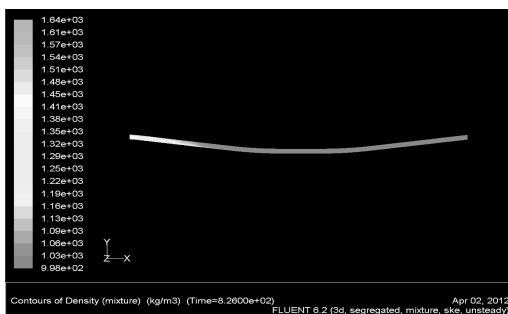
注浆口处于孔道的正上方,实际浆体流入的方向与孔道轴线方向平行。在 $t=4.200\ 0e+01$ s 时,注浆量为 28%,浆体运动到距离注浆口 1/5 梁长位置,如图 8 所示,在注浆口附近,浆体的流速较快,而位于注浆口下方的空间,浆体运动速度较慢,同时,在远离注浆口而贴近孔道上管壁的空间,浆体流速有减小的趋势。在 $t=4.890\ 0e+02$ s 时,注浆量为 54%,浆体运动到距离注浆口 1/2 梁长位置,如图 10 所示,同样,在注浆口附近,浆体的运动较快,而位于注浆口下方的空间,浆体运动速度未有明显变化,而远离注浆口而贴近孔道上管壁的空间,浆体流速有继续减小的趋势。在 $t=1.076\ 0e+03$ s 时,注浆体已经贯通整个孔道,从出浆口流出,如图 13 所示,而位于注浆口下方的空间和直线段孔道正上方的空间的浆体流动依然较缓慢。

3.2 浆体流动各相体积分数的分析

图 14 和图 15 分别为两相流的不同相在 $t=8.260\ 0e+02$ s 时的体积分数的云图,可以看出,液相在孔道中的流动较固相快,这与实际相符合^[19]。由于两相流的流动受形状阻力和摩擦阻力,而在层流时摩擦作用占优势,随着流体运动增强,形状阻力开始占优势,而形状阻力的增加是随着边界层的分离位置的靠前而增加。因此,在孔道中,液相能够优于固相的流动,随着时间的进行,固相在孔道中慢慢向前运动,而在孔道曲线段空间的体积分数的云图较直线段空间大。

3.3 浆体流动密度分析

图 16 和图 17 分别为浆体在典型时刻的密度云图,可见,随着浆体的连续注入,其密度逐渐变小,最后趋于平稳,在孔道两端曲线段空间的浆体密度大于直线段空间,与两相流中各相的体积分数的趋势一致。

图 16 $t=1.000\ 0e+02$ s 时密度云图图 17 $t=8.260\ 0e+02$ s 时密度云图

3.4 浆体流动压力分析

图 18 表示注浆完成时,其内部各处浆体的静态压力云图,从图中可知,浆体注满后,在孔道内部,直线段空间的静压要大于两端曲线段的压力,这也与实际相符,因此,在后期的水化作用时,在两端头容易出现泌水。

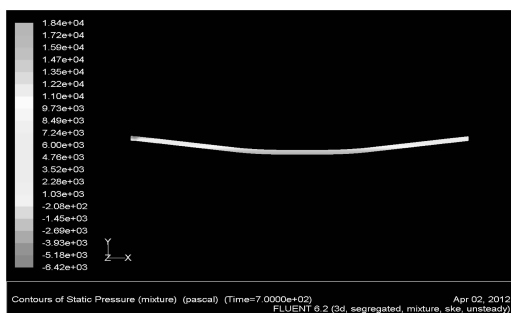


图 18 静态压力云图

结合浆体在孔道中流动的速度、密度、静态压力和各相体积分数等参数,可以得出,在预应力梁的孔道注浆中,其孔道直线段空间和两端头浆体进出口空间出现缺陷的概率较大。因此,通过分析浆体在孔道中流动情况,可以大致了解注浆存在的缺陷。

4 结 论

1)通过应用有限元软件,建立标准预应力梁孔道的三维模型,并对浆体在预应力孔道中的流动进行了分析,由于充分地考虑了浆体流动时的速度、密度、压力等参数,因此计算结果能够较好地反映工程实际。

2)通过对浆体流动时的流速、密度等因素分析,得出浆体在孔道平弯段空间和孔道顶面的空间流动缓慢,会导致注浆缺陷。这可能是由于受拉后的钢绞线在孔道直线段,由于没有定位支架,将会直接贴于孔道上壁,形成注浆流动的盲区。

3)通过对浆体流动时的各相体积分数、压力等因素分析,得出在两端头浆体进出口空间会导致注浆缺陷。这可能是由于浆体在水化过程中,泌水被迫流至两个端头,从而造成注浆缺陷。

参考文献:

[1] 辛公锋,王兆星,刘家海,等. 箱梁预应力孔道压浆密实性检测技术研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(9): 114-117.

XIN Gongfeng, WANG Zhaoxing, LIU Jiahai, et al. Research on grouting density inspection of box girder prestressed duct [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(9):114-117.

[2] 朱自强,密士文,鲁光银. 金属预应力管道注浆质量超声检测数值模拟[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2012, 43(12):4888-4894.

ZHU Ziqiang, MI Shiwen, LU Guangyin, et al. Numerical simulation of detecting grouting quality of pre-stressed metallic tendon ducts through ultrasonic[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(12):4888-4894.

[3] Phillippe OA. Impact-echo Thickness Frequency Profiles for Detection of Voids in Tendon Ducts [J]. ACI Structural Journal 2002, 99(3):239-247.

[4] 徐莹. 岩土预应力锚固工程注浆无损检测及其应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2012.

[5] Maierhofer C, Krause M, Mielentz F, et al. Complementary application of radar, impact-echo, and ultrasonics for testing concrete structures and metallic tendon ducts [J]. Journal of Transportation Research Board, 2004, 1892:170-177.

[6] Hsiao C, Cheng C C, Liou T, et al. Detecting flaws in concrete blocks using the impact-echo method [J]. NDT & E International, 2008, 41(2):98-107.

[7] Chaudhary M T A. Effectiveness of impact echo testing in detecting flaws in prestressed concrete slabs [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47:753-759.

[8] 吴望一. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社, 1982.

[9] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:47-59.

[10] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004.

[11] 姚熊亮,方媛媛,戴绍仕,等. 基于 LES 方法圆柱绕流三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(5): 22-28.

YAO Xiongliang, FANG Yuanyuan, DAI Shaoshi, et al. Three-dimensional numerical simulation of flow past a circular cylinder based on LES method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(5):22-28.

[12] Piller M, Nobile E, Hanratty T J. DNS study of turbulent transport at low Prandtl numbers in a channel flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 458: 419-441.

[13] 中交公路规划设计院. JTJ D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.

- ZHOU Liang, LIN Jianming, LIN Xiaoping, et al. Temperature adjustment factor for back-calculated modulus of asphalt pavement layer [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39 (11): 1641-1645.
- [9] Chen D H, Bilyeu J, Lin H H, et al. Temperature correction on falling weight deflectometer measurements [J]. Transportation Research Record, 2000, 1716(4): 30-39.
- [10] 管志光, 庄传仪, 林明星. 足尺沥青混凝土路面加速加载动力响应 [J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 24-31.
- GUAN Zhiguang, ZHUANG Chuanyi, LIN Mingxing. Dynamic response based on accelerated loading testing for full-scale asphalt pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 24-31.
- [11] Timm D H, Priest A L. Material properties of the 2003 NCAT test track structural study [R]. Alabama: National Center for Asphalt Technology Auburn University, 2006.
- [12] 庄传仪. 基于加速加载响应的柔性基层沥青路面设计指标与参数研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [13] 罗志刚. 路基与粒料层动态模量参数研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- (编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 99 页)

- [14] 杨天春, 易伟建, 鲁光银, 等. 预应力 T 梁束孔管道压浆质量的无损检测试验研究 [J]. 振动工程学报, 2006, 19(3): 411-415.
- YANG Tianchun, YI Weijian, LU Guangyin, et al. Experimental study of nondestructive testing for grouting quality in prestressed concrete T-beam [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(3): 411-415.
- [15] 吕培文. 基于 CFD 离心泵数值模拟及性能优化 [D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [16] Starkey A, Ivanovic A, Rodger A A, et al. Condition monitoring of ground anchorages by dynamic impulses GRANIT system [J]. Meccanica, 2003, 38(2): 265-282.
- [17] 徐向锋. 孔道压浆性能试验及施工质量的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [18] 冯大斌, 董建伟, 孟履祥. 后张预应力孔道灌浆现状 [J]. 施工技术, 2006, 35(4): 49-51.
- FENG Dabin, DONG Jianwei, MENG Lüxiang. The situation of post-prestressed grouting [J]. Construction Technology, 2006, 35(4): 49-51.
- [19] 李传平, 刘耀武, 张保和. 公路桥梁 140 米长预应力孔道压浆质量控制 [J]. 施工技术, 2005, 34(7): 59-60.
- LI Chuanping, LIU Yaowu, ZHANG Baohe. Quality control of grouting of a 140 meters prestressed duct of road bridges [J]. Construction Technology, 2005, 34(7): 59-60.
- (编辑 陈移峰)