

盾构隧道同步注浆充填压力环向分布模型

苟长飞, 叶 飞, 张金龙, 刘燕鹏

(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为明确同步注浆充填压力的大小及分布, 利用流体力学理论对充填过程进行了理论分析。考虑到盾构推进速度较慢及浆液沿环向充填到最远距离所需的时间很短, 假设同步注浆过程中, 浆液仅沿环向充填盾尾间隙, 即形成三维环形薄饼。分别在浆液为宾汉姆流体和牛顿流体条件下, 推导了浆液充填压力沿盾尾间隙环向分布模型; 并讨论了该模型的适用范围及主要参数的确定方法。用实际工程监测数据验证了该模型, 并分析了浆液充填压力的分布规律及影响因素。分析结果表明: 浆液充填压力环向分布模型的计算值与施工现场监测值吻合较好; 浆液充填压力沿环向的变化主要由浆液自重的加压或减压作用、浆液剪切应力的减压作用两方面因素引起; 浆液充填压力的宾汉姆流体计算值略小于牛顿流体计算值。

关键词: 盾构隧道; 同步注浆; 盾尾间隙; 充填压力

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)03-0590-09

作者简介: 苟长飞(1987-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要从事盾构隧道壁后注浆研究。E-mail: gouchangfei1987@126.com。

Ring distribution model of filling pressure for shield tunnels under synchronous grouting

GOU Chang-fei, YE Fei, ZHANG Jin-long, LIU Yan-peng

(Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To define the magnitude and distribution of filling pressure of synchronous grouting, the theory of fluid mechanics is employed to describe the filling process. Considering that the speed of shield driving is very slow and that the required time of the slurry flowing to the furthest position along the ring is very short, and supposing that the slurry fills the shield tail interspace only along the ring, a three-dimensional circular thin cake is formed. A ring distribution of filling pressure for shield tunnels under synchronous grouting is derived under the Bingham fluid and the Newtonian fluid conditions. The application scope of the model and the calculation method of its main parameters are studied. The validity of the model is certified by use of the monitoring results obtained from certain practical engineering cases, and the distribution laws of filling pressure and the relevant parameters are also analyzed. The results show that the calculated values by the proposed model agree well with the measured ones, that the variation of filling pressure along the ring is caused by the slurry weight and the shear stress, and that the calculated values under the Bingham fluid are slightly less than those under the Newtonian fluid.

Key words: shield tunnel; synchronous grouting; shield tail interspace; filling pressure

0 引 言

随着城市地下空间的开发与利用, 盾构施工技术以其对周围环境影响小、成形质量高、安全可靠、施工进度快等优点而越来越多地应用于城市地铁、上下水道、电力通讯及市政公用设施等各种城市隧道施工中^[1-2]。由于盾构壳体具有一定厚度, 壳体内径大于管片衬砌外径, 且掘进过程中存在超挖等原因, 盾尾脱离管片后在管片与地层之间会形成盾尾间隙^[3-4]。盾构施工过程中, 若不对盾尾间隙进行及时处理, 则会造

成地层变形过大, 导致地表沉降超限, 进而对周围建筑物产生影响。因此, 实际工程中, 常采用壁后注浆技术对盾尾间隙进行填充。

壁后注浆是盾构施工的关键环节, 其目的主要有: 防止地层变形; 提高隧道的抗渗性; 保证管片衬砌的早期稳定性, 使外力作用均匀^[5-7]。通常, 如果土体稳定性较好, 盾尾间隙维持时间较长时, 则无需

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178052, 50808020)

收稿日期: 2012-02-29

要求壁后注浆一定与盾构掘进同时进行。但是,当地层是不稳定的均粒系数小的砂质土、含黏性土少的砂、砂砾及软黏土时,应在盾构掘进的同时就向盾尾间隙中注入浆液,即采用同步注浆法^[3]。同步注浆是通过同步注浆系统及盾尾或管片上的注浆孔,在盾构向前推进、盾尾间隙形成的同时进行,浆液在盾尾间隙形成的瞬间及时填充,从而使周围土体及时获得支撑,可有效地防止土体的坍塌,控制地表的沉降^[8]。

近年来众多学者对同步注浆进行了研究。王树清等^[9]研制了水泥-粉煤灰-膨润土-水玻璃系双液塑性同步注浆材料,并探讨了材料组分对注浆材料流动性、凝胶特性、稳定性、强度等的影响。邹翀^[8]结合工程实际,就盾构隧道同步注浆的注浆压力、注浆量、注浆速度、注浆材料及配比、注浆施工工艺等因素进行了分析。张海涛^[10]结合上海西藏南路越江隧道工程进行了浆液材料的室内配比试验,分析了由于盾尾同步注浆所引起的隧道上浮问题。田焜^[11]针对武汉长江隧道地层软硬不均、纵向地质条件变化复杂,隧道长、管径大、断面水压高等复杂条件,研究了集防止管片上浮、抗水分散、抗渗、微膨胀等性能于一体的高性能同步注浆材料设计原则与方法。赵天石^[12]依托上海市西藏南路越江隧道,进行了材料配比和浆液性能试验和现场试拌,并从现场监测数据及数值模拟两方面,分析了同步注浆参数调整对地层位移的影响。张士屹^[13]介绍了盾构法施工中同步注浆原理、工艺、注浆参数,分析了同步注浆中遇到的问题及解决方法、应注意的事项。张景异等^[14]通过对盾构同步注浆系统的工作特性和负载敏感变量泵液系统数学模型的分析,建立了盾构同步注浆系统的状态空间模型,设计了注浆压力与流量精确跟随,同时考虑能源问题的同步注浆最优跟踪控制器。肖立等^[15]通过室内和现场注浆配比试验,得出一种充填性、可注性、保水性良好,早期强度高的单液惰性浆液;并用数值模拟方法分析了同步注浆参数调整对地表位移的影响。宋天田等^[16]分析了盾构隧道盾尾同步注浆的作用机理,以及注浆压力与地层劈裂压力、前方泥水压力、覆土深度,注浆量与填充率、注浆速度的关系。李志明等^[17]分别采用牛顿流体及宾汉流体推导出了土压平衡盾构在黏土地层中同步注浆环向填充及纵向填充的力学模型;并采用该模型对影响同步注浆压力分布的主要因素进行了分析。白云等^[18]采用牛顿流体模型,推导出了四孔注浆的同步注浆盾尾间隙横断面内浆液压力的分布模型。袁小会等^[19]、范昭平等^[20]用宾汉姆流体描述硬性浆液的流变特性,导出了同步注浆过程中注浆压力衰减与

注浆距离和注浆时间的关系以及注浆时间与扩散距离的关系。

从以上对盾构壁后同步注浆研究的综述可以看出,目前对于同步注浆的研究主要集中在浆液本身的材料特性、变形特性和注浆施工方法上,对于同步注浆浆液扩散机理的研究相对较少:文献^[17~20]以理论分析为主,结合工程实例验证,对同步注浆浆液扩散机理进行了研究。但是,均将管片环外壁和地层界面视为浆液充填扩散过程中沿程阻力的作用面,忽视了盾尾横断面、流动浆液与已注入浆液交界面对浆液充填扩散的阻碍作用。本文在这些研究的基础上,考虑到盾尾横断面和流动浆液与已注入浆液交界面对浆液充填扩散的阻碍作用,分析盾尾同步注浆浆液充填扩散的机理,提出了更为合理的环向分布模型,进而分别推导宾汉流体和牛顿流体的盾构同步注浆浆液充填压力环向分布计算式。

1 同步注浆工艺概述

同步注浆法有3种^[3]:由盾构机尾部的注浆管直接向盾尾间隙注入浆液;利用管片上的前后两个注浆孔交替注入浆液;把管片上注浆孔的位置设置在管片的端头,边推进边注入浆液。

由盾尾注浆管直接向盾尾间隙注浆时(图1),施工中应特别注意注入管不能堵塞。注入结束后应立即清洗注入管,不能有残余浆液。另外,浆液凝胶过快,可塑性保持的时间过短等均会造成注入管的内阻力上升,进而导致注入压力的上升,使注浆管堵塞。

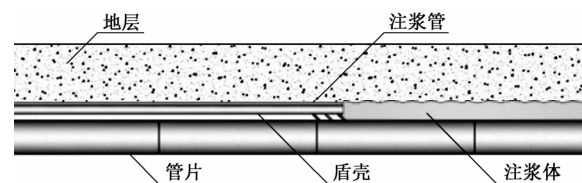


图1 由盾尾注浆管同步注浆

Fig. 1 Synchronous grouting by grouting pipe of shield tail

利用管片上的前后两个注浆管交替注浆时,一般分为3步:第一步组装管片;第二步开始掘进,同时由3环注浆孔注入浆液直到盾尾离开2环注浆孔后约40cm;第三步切换前方切换旋塞,从2环注浆孔注入浆液直到盾尾离开1环注浆孔(图2)。这种方法必须认真清洗切换旋塞,不适用于凝胶时间短的浆液,因此目前已使用不多。

把管片上注浆孔的位置设置在管片的端头,边推进边注入浆液的方法如图3所示。

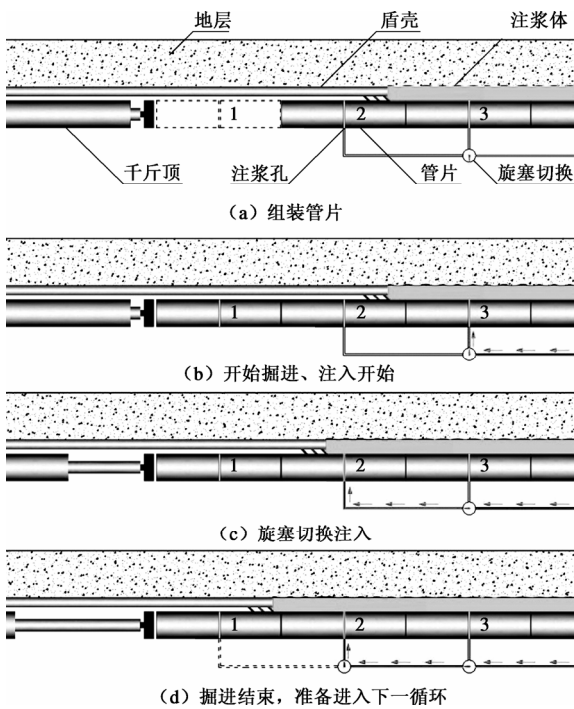


图2 切换式同步注入

Fig. 2 Switching synchronous grouting

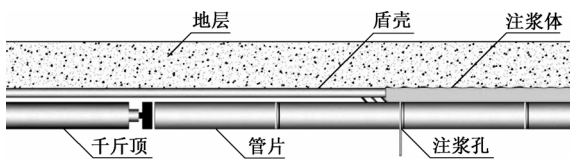


图3 由管片端头注浆孔注入

Fig. 3 Grouting by grouting holes of segment ends

2 浆液充填压力环向分布模型

文献[18]认为浆液压力在盾尾间隙内的形成与消散是两个相对独立的过程,浆液压力的形成过程主要发生在盾尾间隙横断面内,浆液压力的消散过程则主要发生在盾尾间隙纵断面内(隧道轴向方向)。盾构掘进采用盾尾同步注浆时,浆液沿环向充填到最远距离处(2个注浆孔中间的部位)所需的时间约为几十秒^[19],而盾构推进速度很慢,因此,该段时间内形成的盾尾间隙是一个三维环形薄饼空间(图4),以下简称环饼。环饼的厚度(隧道轴向方向,图4中的 δ 所示)数量级一般为 10^{-2} m,环饼的宽度(盾尾间隙厚度,图4中的 b 所示)数量级一般为 10^{-1} m,可见环饼厚度远小于宽度。因此,可将充填时间内形成的盾尾间隙视为一裂隙,裂隙宽度与充填时间内盾构推进的距离相当。在同步注浆过程中,可忽略浆液沿隧道轴向的流动,认为浆液仅沿盾尾间隙环向流动。

2.1 基本假定

根据以上分析,为建立盾尾同步注浆浆液充填压

力分布模型,提出以下基本假定:

(1)浆液为不可压缩的均质、各向同性流体,在地下水作用下不发生稀释现象,且浆液不发生堵塞;壁后注浆过程中浆液流型保持不变,始终符合宾汉姆流体或牛顿流体特性,浆液的黏度不随时间变化。

(2)浆液与盾尾、土体、管片接触面为不透水边界,不考虑浆液与土层中水分的相互渗透,在各个过流断面上,流体运动的连续性方程均成立。

(3)充填时间内形成的盾尾间隙为一均匀的环形薄饼(环饼)。环饼的两个饼面,一面为盾尾与新注入浆液的接触面,一面为早期注入浆液体与新注入浆液体的接触面。薄饼的厚度与充填时间内盾构推进的距离相当,见图4。

(4)同步注浆过程中,浆液仅沿环向充填盾尾间隙,即浆液不沿隧道轴向流动;浆液在隧道轴向的扩散由盾尾注浆孔相对于地层和管片衬砌的移动来实现。

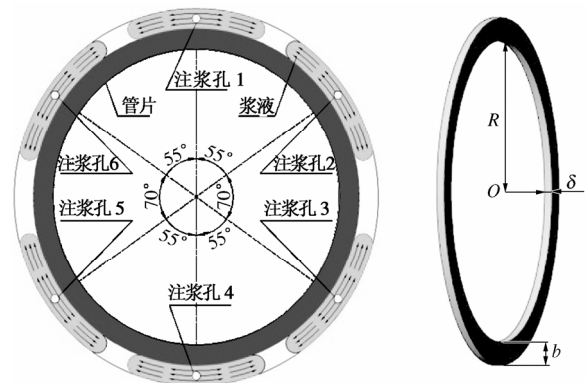


图4 充填时间内形成的盾尾间隙

Fig. 4 Shield tail interspace formed during filling time

2.2 理论推导

根据2.1节中的基本假定,以环饼厚度方向(隧道轴向)为 z 轴,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴建立坐标系,如图5所示。图5中 R 为管片外径, α 为浆液的充填位置偏离竖直方向角度, δ 为薄饼厚度, b 为环饼宽度(盾尾间隙厚度)。当浆液由注浆孔1(偏离竖直方向的角度为 α_1)向下充填时,在充填范围内任取一流体微元,对其进行受力分析。

根据应力平衡得

$$Pbdz - (P + dP)bdz + \rho g \sin \alpha \cdot b \cdot (R + b/2)d\alpha \cdot dz + \tau b(R + b/2)d\alpha - (\tau + d\tau)b(R + b/2)d\alpha = 0 \quad (1)$$

式中, P 为浆液充填压力,为浆液运动的剪切应力, ρ 为浆液密度, g 为重力加速度。由于 $b \ll R$,因而 $R \approx R + b/2$,式(1)可化简为

$$d\tau = \frac{1}{R}(\rho g R \sin \alpha - \frac{dP}{d\alpha})dz \quad (2)$$

对式 (2) 沿 z 方向积分, 并利用边界条件: $z=0$ 时, $\tau=0$, 得浆液流动剪切应力在隧道轴向 z 上的分布:

$$\tau = \frac{z}{R}(\rho g R \sin \alpha - \frac{dP}{d\alpha}) \quad (3)$$

记为 $\rho g R \sin \alpha - \frac{dP}{d\alpha} = B$ (4)

则式 (3) 可简化为 $\tau = \frac{Bz}{R}$ (5)

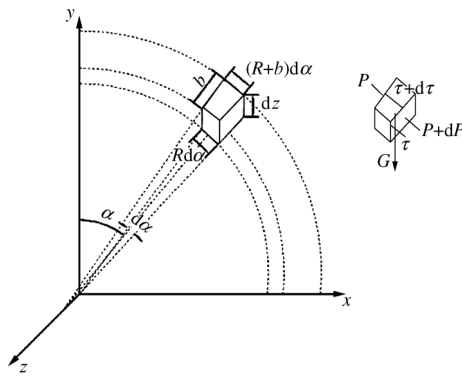


图 5 盾尾间隙充填模型及受力分析

Fig. 5 Force analysis of grouting in shield tail interspace

盾构壁后注浆所用浆液一般为水泥基浆液, 阮文军^[21-22]研究表明: 水泥浆的水灰比 $W/C > 2.0$ 时属于牛顿流体; $W/C=0.8 \sim 1.0$ 时属于宾汉姆流体; $W/C=0.5 \sim 0.7$ 时属于幂律流体。盾构隧道壁后注浆单液浆的水灰比 W/C 在 $1.2 \sim 1.6$ 之间^[3], 理论分析中常将注浆浆液视为宾汉姆流体或牛顿流体, 因此, 下文分别推导宾汉姆流体浆液和流动流体浆液的充填压力分布式。

(1) 宾汉姆流体

浆液为宾汉姆流体时, 剪切应力为

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma = \tau_0 - \mu \frac{dv}{dz} \quad (6)$$

式中, τ_0 为静切力, μ 为塑性黏度系数, γ 为剪切速率, v 为浆液流动速度。

将式 (6) 代入式 (5) 得

$$dv = \frac{1}{\mu}(\tau_0 - \frac{Bz}{R})dz \quad (7)$$

令 $\tau_0=Bz/R$, 得宾汉姆体的流核半径:

$$r_p = \frac{\tau_0 R}{B} \quad (8)$$

在 $|z| < r_p$ 范围内, 流体不受剪切作用, 即流体相对于邻层流体是静止的, 流体呈活塞式整体运动; 在 $r_p < |z| < \delta/2$ 范围内, 流体相对于邻层流体处于运动状态, 见图 6。

对式 (8) 沿 z 方向积分, 根据边界条件: $z=\delta/2$ 时, $v=0$, 得浆液速度在 $r_p < |z| < \delta/2$ 范围内速度分布:

$$v = \frac{1}{\mu} \left[\frac{B}{2R} \left(\frac{\delta^2}{4} - z^2 \right) - \tau_0 \left(\frac{\delta}{2} - z \right) \right] \quad (9)$$

用 r_p 替代式 (10) 中的 z , 可得 $|z| < r_p$ 范围内的浆液流动速度:

$$v_p = \frac{1}{\mu} \left[\frac{B}{2R} \left(\frac{\delta^2}{4} - r_p^2 \right) - \tau_0 \left(\frac{\delta}{2} - r_p \right) \right] \quad (10)$$

综合式 (9) 及 (10) 可得到浆液速度沿 z 方向的分布:

$$v = \begin{cases} \frac{1}{\mu} \left[\frac{B}{2R} \left(\frac{\delta^2}{4} - r_p^2 \right) - \tau_0 \left(\frac{\delta}{2} - r_p \right) \right] & (-r_p \leq z \leq r_p) \\ \frac{1}{\mu} \left[\frac{B}{2R} \left(\frac{\delta^2}{4} - z^2 \right) - \tau_0 \left(\frac{\delta}{2} - z \right) \right] & (r_p < |z| \leq \frac{\delta}{2}) \end{cases} \quad (11)$$

同时可得截面上的流量为

$$q = b \int_{-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\delta}{2}} v dz = \frac{b}{\mu} \left[\frac{2B}{3R} \left(\frac{\delta^3}{8} - r_p^3 \right) - \tau_0 \left(\frac{\delta^2}{4} - r_p^2 \right) \right] \quad (12)$$

将式 (9) 代入式 (12), 得关于 B 的一元三次方程:

$$B^3 - \left(\frac{3R\tau_0}{\delta} + \frac{12R\mu q}{b\delta^3} \right) B^2 - \frac{4R^3\tau_0^3}{\delta^3} = 0 \quad (13)$$

由式 (13) 可解出 B 的值。

由式 (4) 可得

$$dP = (\rho g R \sin \alpha - B) d\alpha \quad (14)$$

对式 (14) 沿 α 方向积分, 并利用边界条件: 在注浆孔处 $\alpha = \alpha_1$, $P = P_1$ (P_1 为注浆孔 1 的注浆压力, 见图 4), 得浆液由注浆孔 1 向下填充时的充填压力分布式:

$$P = P_1 + \rho g R (\cos \alpha_1 - \cos \alpha) + B(\alpha_1 - \alpha) \quad (15)$$

同理, 可得浆液由注浆孔 1 向上填充时的充填压力分布式:

$$P = P_1 + \rho g R (\cos \alpha_1 - \cos \alpha) - B(\alpha_1 - \alpha) \quad (16)$$

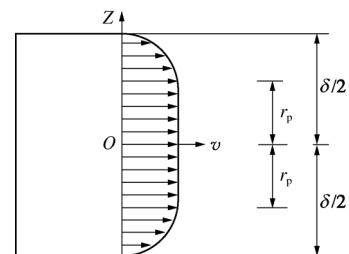


图 6 宾汉姆流体流速分布

Fig. 6 Circumferential flowing model of Bingham fluid

(2) 牛顿流体

浆液为宾汉姆流体时, 剪切应力为

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dz} \quad (17)$$

将式(17)代入式(5)得

$$dv = -\frac{Bz}{\mu R} dz \quad (18)$$

对式(18)沿z方向积分,根据边界条件:z=δ/2时,v=0,得浆液扩散速度分布(图7):

$$v = \frac{\rho g R \sin \alpha - \frac{dP}{d\alpha}}{2\mu R} \left(\frac{\delta^2}{4} - z^2 \right) = \frac{B}{2\mu R} \left(\frac{\delta^2}{4} - z^2 \right) \quad (19)$$

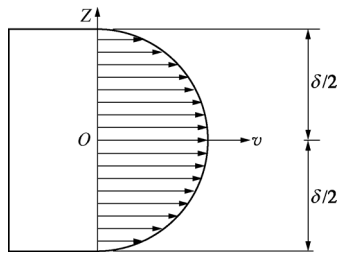


图7 牛顿流体流速分布

Fig. 7 Circumferential flowing model of Newtonian fluid

同时,可得截面上的流量为

$$q = b \int_{-\frac{\delta}{2}}^{\frac{\delta}{2}} v dz = \frac{Bb\delta^3}{12\mu R} \quad (20)$$

由式(20)可得

$$B = \frac{12R\mu q}{b\delta^3} \quad (21)$$

将式(21)代入式(4)得

$$dP = \left(\rho g R \sin \alpha - \frac{12R\mu q}{b\delta^3} \right) d\alpha \quad (22)$$

对式(22)沿α方向积分,并利用边界条件:在注浆孔处α=α₁,P=P₁(P₁为注浆孔1的注浆压力,见图4),得浆液由注浆孔1向下填充时的充填压力分布式:

$$P = P_1 + \rho g R (\cos \alpha_1 - \cos \alpha) + \frac{12R\mu q}{b\delta^3} (\alpha_1 - \alpha) \quad (23)$$

同理,可得浆液由注浆孔1向上填充时的充填压力分布式:

$$P = P_1 + \rho g R (\cos \alpha_1 - \cos \alpha) - \frac{12R\mu q}{b\delta^3} (\alpha_1 - \alpha) \quad (24)$$

(3) 通用公式

记ρgR=A,根据式(1)~(24)的推导,可将浆液由k号注浆孔填充盾尾间隙的充填压力分布式表示为

$$P = P_k + A(\cos \alpha_k - \cos \alpha) \pm B(\alpha_k - \alpha) \quad (25)$$

式中“±”表示浆液向下填充取“+”,浆液向上填充取“-”。当浆液作宾汉姆流体考虑时,由式(13)求解B;当浆液作牛顿流体考虑时,由式(21)求解B。

当各孔注浆量相等时,相邻两孔的浆液交界面距

两注浆孔距离相等,即α=(α_k+α_{k+1})/2。k号注浆孔向下填充和(k+1)号注浆孔向上填充至交界面的压力相等,因此按两种情况将α=(α_k+α_{k+1})/2代入式(25)可得

$$P_{k+1} = P_k + A(\cos \alpha_k - \cos \alpha_{k+1}) \quad (26)$$

式(26)可用来计算各个注浆孔之间的合理压差。由上式可知,各孔注浆量相等时,各注浆压差与其对应的地层应力差等。

2.3 参数确定

对同步注浆压力环向分布模型中主要参数的确定如下:

(1) 浆液流动环饼厚度δ

浆液流动环饼厚度δ反映了流动的浆液在盾尾间隙内沿隧道轴向的分布范围,即认为自盾尾横断面往后延伸δ范围内的浆液处于环向流动状态,此范围以外的浆液处于静止状态。参数δ的大小与浆液性质、盾构掘进速度、注浆压力等众多因素有关,可通过室内模型试验或者现场监测确定。根据2.1节中的基本假设,参数δ的近似值,可通过浆液充填时间与盾构推进速度计算得到

$$\delta = v_{\text{盾}} \cdot t_0 \quad (27)$$

式中,v_盾为盾构掘进速度,t₀为盾尾同步注浆时浆液填充盾尾间隙所需的平均时间。

(2) 截面流量q

假设盾尾有n个注浆孔同时注浆,每个注浆孔向上、下充填的流量q相等,且由同步注浆的总注入量决定,则有

$$q = \frac{\pi \left[(R+b)^2 - R^2 \right] v_{\text{盾}} m}{2n} \approx \frac{\pi R b v_{\text{盾}} m}{n} \quad (28)$$

式中,m为注入率。

张凤祥等^[3]考虑了压密系数、土质系数、施工损耗系数、超挖系数。施工损耗的浆液残留在注浆管内,并未进入盾尾间隙,与浆液在盾尾间隙内的压力分布无关。因此,计算浆液截面流量时可不计施工损失系数。

2.4 适用范围

同步注浆过程中,浆液仅沿环向填充盾尾间隙,而不沿隧道轴向流动的基本假定,是在盾尾同步注浆的前提下提出的。同步注浆法有3种,但文中的浆液充填压力环向分布模型仅适用于由盾构机尾部的注浆管直接向盾尾间隙注入浆液,而不适用于通过管片注浆孔向盾尾间隙进行同步注浆的情况。

3 实例分析

根据Bezuijen等^[23]对荷兰鹿特丹的索菲亚(Sophia)

铁路隧道的监测数据, 对上节中的理论公式进行验证。

3.1 工程概况

索菲亚铁路隧道位于鹿特丹东南约 20 km 处, 由两个衬砌外径 9.5 m 的盾构隧道组成, 双洞间距为 10 m, 混凝土管片衬砌厚度为 0.4 m, 隧道穿过 3 条地下河和莱茵河的一个分支, 监测位置隧道所穿越地层主要为砂土层。注浆孔布置方式及注浆压力见表 1, 注浆计算的主要参数: 掘进速度为 0.00072 m/s, 管片外半径为 4.725 m, 盾尾间隙厚度为 0.16 m, 浆液密度为 2190 kg/m³, 塑性黏度为 2 Pa/s, 动切力为 15 Pa。

表 1 Sophia 隧道注浆孔布置

Table 1 Layout of grouting holes for Sophia rail tunnel		
注浆孔序号	位置 $\alpha / (^\circ)$	注浆压力/kPa
1	0	200
2	55	230
3	125	340
4	180	370
5	235	340
6	305	230

3.2 压力分布计算

注浆方式为典型的六孔注浆, 假设每个注浆孔向上、下充填的流量相等, 注入率为 150%, 则截面流量为

$$q = \frac{\pi[(R+b)^2 - R^2]v_{\text{盾}}}{2n} = 4.3453 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}.$$

根据文献[19]的研究结果, 浆液充填盾尾间隙到达环向最远处的时间约为几十秒。因此, 参数 δ 暂取 30 s 盾构推进的距离为 $\delta = 0.0216 \text{ m}$ 。

将 q , δ 及表 1, 2 中的相关参数分别代入宾汉姆流体、牛顿流体压力分布公式, 计算得到浆液充填压力沿盾构环向的分布。浆液充填压力计算值与实测值的对比如图 8 所示。

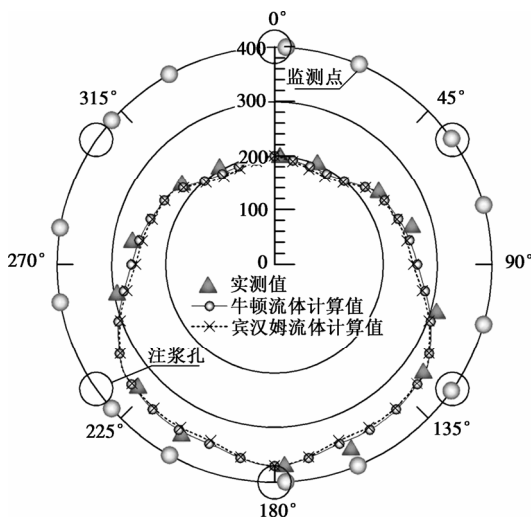


图 8 计算值与实测值对比

Fig. 8 Comparison between calculated and measured values

由图 8 可知, 理论计算结果与现场实测压力值具有较好的吻合度, 且宾汉姆流体和牛顿流体计算所得的浆液充填压力曲线很接近。但是, 总体上宾汉姆流体的计算值略小于牛顿流体。

3.3 压力分布规律

由 2.2 节的理论公式及 3.2 节的浆液充填压力分布计算结果可知, 浆液由注浆孔注入盾尾间隙沿环向充填的过程中, 其压力沿环向的变化主要由两方面因素引起: 浆液自重的加压或减压作用 (参数 A)、浆液剪切应力的减压作用 (参数 B)。当浆液由注浆孔向上充填时, 浆液自重和剪切应力均起减压作用, 由此导致浆液充填压力随着远离注浆孔而减小; 当浆液由注浆孔向下充填时, 浆液剪切应力仍起减压作用, 而浆液自重却起增压作用, 由此导致浆液充填压力随着远离注浆孔的变化变得复杂。

浆液向下充填时, 需分情况讨论:

(1) 浆液自拱顶注浆孔 ($\alpha = 0^\circ$) 向下充填: 由于拱顶浆液自重沿环向的分力很小, 浆液剪切应力的减压起主要作用, 浆液充填压力随着向下远离注浆孔而减小; 但随着浆液远离注浆孔, 浆液自重沿环向分力逐渐增大, 很快自重的增压作用便超过剪切应力的减压作用, 导致浆液充填压力开始增大。因此, 浆液自拱顶注浆孔向下充填时, 浆液充填压力先减小后增大。

(2) 浆液非拱顶注浆孔 ($\alpha = 55^\circ, 125^\circ, 235^\circ, 305^\circ$) 向下充填时: 由于浆液自重沿环向的分力较大, 自重力的增压作用大于浆液剪切应力的减压作用, 浆液充填压力始终随着向下远离注浆孔而增大。

4 孔注浆时, 一般在偏离竖直方向 45° 处设置注浆孔, 不存在拱顶注浆孔。因此, 自注浆孔向上充填时, 浆液充填压力随着向上远离注浆孔而减小; 自注浆孔向下充填时, 浆液充填压力随着向下远离注浆孔而增大。

上文提到, 总体上宾汉姆流体的计算值略小于牛顿流体, 这主要是由两种流体的流变特性不同引起的。宾汉姆流体是典型的塑性流体, 在外部施加的剪切力很小时, 浆液只产生类似于固体的弹性; 当剪切力达到破坏结构 (超过静切力) 后, 浆液才发生类似于牛顿流体的流动。可见, 宾汉姆流体比牛顿流体具有较高的流动阻力, 其充填过程中产生的压力损失比牛顿流体大, 因而造成其浆液充填压力计算值小于牛顿流体。

3.4 影响因素分析

由上文分析可知, 浆液充填压力分布主要由浆液自重 (参数 A) 和浆液剪切力 (参数 B) 两方面因素

决定。

浆液自重对其压力分布的影响机理较为清楚：当浆液由注浆孔向上充填时，浆液自重减压作用；当浆液由注浆孔向下充填时，浆液自重起增压作用；浆液密度越大，增压或减压的速度越快。影响参数 B 的因素较多，其机理复杂，因此下文对影响参数 B 的因素进行讨论。

将式 (28) 分别代入式 (13) (21) 中得

$$B^3 - \left(\frac{3R\tau_0}{\delta} + \frac{12\pi R^2 \mu v_{\text{盾}} m}{\delta^3 n} \right) B^2 - \frac{4R^3 \tau_0^3}{\delta^3} = 0 \quad (29)$$

$$B = \frac{12\pi R^2 \mu v_{\text{盾}} m}{\delta^3 n} \quad (30)$$

由式 (29) (30) 可知，参数 B 与隧道半径 R 、浆液黏度 μ 、盾构推进速度 $v_{\text{盾}}$ 、浆液注入率 m 、浆液流动饼环厚度 δ 等因素有关，当浆液为宾汉姆流体时，还与静切力 τ_0 有关；与盾尾间隙厚度 b 无关。盾构推进速度 $v_{\text{盾}}$ 和浆液注入率 m 通过影响单位时间内的注浆量来影响参数 A ，因此直接用单位时间内的注浆量（或截面流量 q ）来反映盾构推进速度 $v_{\text{盾}}$ 和浆液注入率 m 对参数 B 的影响更为直接，由式 (29) 和式 (30) 的推导仅为说明盾尾间隙厚 b 对参数 B 无影响。

参数 B 随着隧道断面面积 (πR^2)、浆液黏度 μ 、盾构推进速度 $v_{\text{盾}}$ 、浆液注入率 m 的增大而增大，且呈线性关系；随着浆液流动环饼厚度 δ 的增大而减小，且与其三次方成线性关系。可见，浆液流动环饼厚度 δ 对参数 B 的影响最为显著。另外，关于 δ 对浆液分布的影响，并无现成研究成果可参考。因此，下文着重讨论 δ 对参数 B 的影响。

当 δ 分别取 0.01 ~ 0.03 m (间隔 0.0025 m)，其余参数不变时，分别在宾汉姆流体和牛顿流体模型下，计算出对应的参数 B 。 B 与 δ 的关系曲线见图 9。

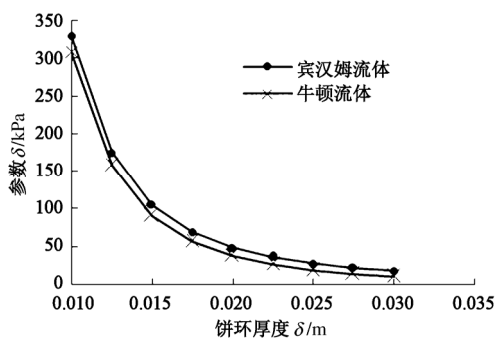


图 9 B 与 δ 的关系曲线
Fig. 9 Relationship between B and δ

由图 9 可知，宾汉姆流体和牛顿流体计算所得的参数 B 相差不大，均随浆液流动环饼厚度 δ 的减小而

增大；当 δ 小于 0.01 m 时，参数 B 急剧增大；当 $\delta > 0.03$ m 时，参数开始 B 趋近于 0；宾汉姆流体计算所得的参数 B 略大于牛顿流体的参数 B 。由此反映出：浆液剪切力造成的压力沿程阻力损失随着浆液流动环饼厚度 δ 的增大而减小；当 $\delta > 0.03$ m 时，浆液剪切力造成的压力沿程阻力损失极小，可忽略不计；宾汉姆流体的沿程阻力损失略大于牛顿流体，这主要是由两种流体的流变特性不同引起的。可见，浆液流变特性对同步注浆环向压力分布有影响，在计算浆液充填压力分布时，应根据试验确定合适的流变模型。

δ 分别取 0.015, 0.020, 0.025 和 0.03 m 时，宾汉姆流体计算所得的浆液充填压力与实测值的对比如图 10 所示。由图 10 可知，当 $\delta = 0.015$ m 时，计算值和实测值相差较大，误差已超出可接受范围；当 δ 分别取 0.020, 0.025 和 0.03 m 时，计算值和实测值较接近，误差处于可接受范围。结合图 9 的分析，可推测出参数 δ 的取值大致在 0.02 ~ 0.03 m 之间，精确值需通过试验手段确定。

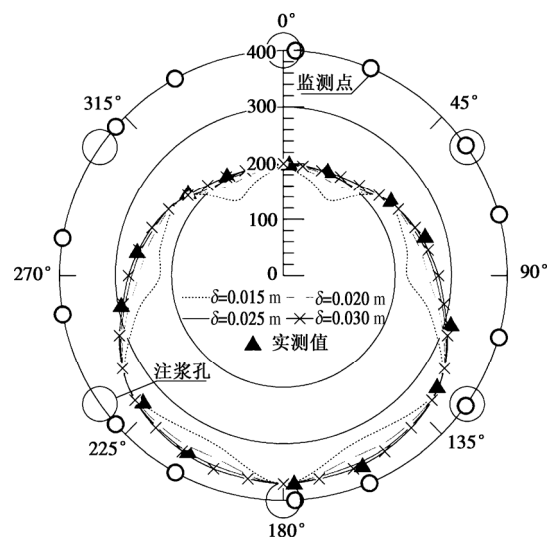


图 10 不同 δ 值下宾汉姆流体浆液充填压力
Fig. 10 Ring distribution of filling pressure under different δ values

4 结 论

通过对盾尾同步注浆浆液充填压力环向分布模型的理论推导及相关参数的分析，得出以下结论：

(1) 基于宾汉姆流体和牛顿流体的同步注浆浆液充填压力环向分布模型可反映浆液的黏度、密度，注浆孔分布及各孔注浆压力，隧道半径及盾尾间隙厚度，浆液流动环饼厚度 δ 等对盾尾同步注浆浆液充填压力环向分布的影响。

(2) 浆液由注浆孔注入盾尾间隙沿环向充填的

过程中,其压力沿环向的变化主要由两方面因素引起:浆液自重的加压(向下充填)或减压(向上充填)作用,浆液剪切应力的减压作用。

(3) 浆液由注浆孔向上充填或由非拱顶注浆孔向下充填时,浆液充填压力随着远离注浆孔而减小;浆液自拱顶注浆孔向下充填时,浆液充填压力随着远离注浆孔先减小后增大。

(4) 盾尾同步注浆浆液充填压力环向分布模型采用宾汉姆流体和牛顿流体计算所得的浆液充填压力曲线十分接近。但宾汉姆流体比牛顿流体具有较高的流动阻力,其充填过程中产生的压力损失比牛顿流体大,因而导致其计算值略小于牛顿流体。

参考文献:

- [1] 江玉生,王春河,江华,等. 盾构始发与到达——端头加固理论研究与工程实践[M]. 北京:人民交通出版社,2011. (JIANG Yu-sheng, WANG Chun-he, JIANG Hua, et al. Theoretical research & engineering practice of ground improvement at TBM launching & break through area[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 王晖,李大勇,夏广红. 盾构机盾尾注浆施工中存在的问题及其对策分析[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2004, 17(1): 40 - 45. (WANG Hui, LI Da-yong, XIA Guang-hong. Analysis of problems arising from and measures taken in the construction of grouting at the tail of the shield machine[J]. Chinese Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2004, 17(1): 40 - 45. (in Chinese))
- [3] 张凤祥,朱合华,傅德明. 盾构隧道[M]. 人民交通出版社: 2004. (ZHANG Feng-xiang, ZHU He-hua, FU De-ming. Shield tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 地盘工学会. 盾构法的调查·设计·施工[M]. 牛清山,陈凤英,徐华,译. 北京:中国建筑工业出版社,2008. (The Japanese Geotechnical Society. Survey, design and construction of shield tunnel[M]. NIU Qing-shan, CHEN Feng-ying, XU Hua, trans. Beijing: China Architecture and Building Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [5] PARK K. H Elastic solution for tunnelling-induced ground movements in clays[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(4): 310 - 318.
- [6] PHIENWEJ N. Ground movements in shield tunnelling in bangkok soils[C]// Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Hamburg, 1997: 1469 - 1472.
- [7] RAMASAMY N. Soft ground tunnelling in Bangkok subsoils[D]. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1992.
- [8] 邹翀. 盾构隧道同步注浆技术[J]. 现代隧道技术, 2003, 1(40): 26 - 30. (ZOU Chong. Simultaneous grouting technique for shield-driven tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 1(40): 26 - 30. (in Chinese))
- [9] 王树清,蔡胜华,蒋硕忠. 盾构法隧道施工同步注浆材料研究[J]. 长江科学院院报, 1998, 4(15): 28 - 30, 38. (WANG Shu-qing, CAI Sheng-hua, JIANG Shuo-zhong. Study on simultaneous grouting material for shield tunnel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 4(15): 28 - 30, 38. (in Chinese))
- [10] 张海涛. 盾构同步注浆材料试验及隧道上浮控制技术[D]. 上海:同济大学,2007. (ZHANG Hai-tao. Study on the proportioning of tail void grouting material and up floating control of shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [11] 田焜. 高性能盾构隧道同步注浆材料的研究与应用[D]. 武汉:武汉理工大学,2007. (TIAN Kun. Study and application on high property grouting material used in synchronous grouting of shield tunnelling[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [12] 赵天石. 泥水盾构同步注浆浆液试验及应用技术研究[D]. 上海:同济大学,2008. (ZHAO Tian-shi. Study on mortar material and application of tail void grouting of slurry shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [13] 张士屹. 盾构法施工同步注浆施工工艺[J]. 西部探矿工程, 2009, 21(4): 164 - 167. (ZHANG Shi-yi. Synchronous grouting process of shield[J]. West-China Exploration Engineering, 2009, 21(4): 164 - 167. (in Chinese))
- [14] 张景异,赵婷婷,张大伟. 盾构同步注浆系统最优控制研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2011, 1(38): 37 - 39. (ZHANG Jing-yi, ZHAO Ting-ting, ZHANG Da-wei. Optimal control on synchronous grout of shield[J]. Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition), 2011, 1(38): 37 - 39. (in Chinese))
- [15] 肖立,张庆贺,赵天石,等. 泥水盾构同步注浆材料试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 1(7): 59 - 64. (XIAO Li, ZHANG Qing-he, ZHAO Tian-shi, et al. Study on mortar material of tail void grouting in slurry shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,

- 2011, **1**(7): 59 – 64. (in Chinese))
- [16] 宋天田, 周顺华, 徐润泽. 盾构隧道盾尾同步注浆机理与注浆参数的确定[J]. 地下空间与工程学报, 2008, **4**(1): 130 – 133. (SONG Tian-tian, ZHOU Shun-hua, XU Run-ze. Mechanism and determination of parameters of synchronous grouting in shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, **4**(1): 130 – 133. (in Chinese))
- [17] 李志明, 廖少明, 戴志仁. 盾构同步注浆填充机理及压力分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1752 – 1757. (LI Zhi-ming, LIAO Shao-ming, DAI Zhi-ren. Theoretical study on synchronous grouting filling patterns and pressure distribution of EPB shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1752 – 1757. (in Chinese))
- [18] 白云, 戴志仁, 张莎莎, 等. 盾构隧道同步注浆浆液压力扩散模式研究[J]. 中国铁道科学, 2011, **32**(4): 38 – 45. (BAI Yun, DAI Zhi-ren, ZHANG Sha-sha, et al. Study on the grout pressure dissipation mode in simultaneous backfill grouting during shield tunneling[J]. China Railway Science, 2011, **32**(4): 38 – 45. (in Chinese))
- [19] 袁小会, 韩月旺, 钟小春. 盾构隧道壁后注浆压力分布模型[J]. 西南交通大学学报, 2011, **46**(1): 18 – 25. (YUAN Xiao-hui, HAN Yue-wang, ZHONG Xiao-chun. Pressure distribution model of simultaneous backfill grouting of shield tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, **46**(1): 18 – 25. (in Chinese))
- [20] 范昭平, 韩月旺, 方忠强. 盾构壁后注浆压力分布计算模型[J]. 公路交通科技, 2011(3): 95 – 100. (FAN Zhao-ping, HAN Yue-wang, FANG Zhong-qiang. Calculating model of backfill grouting pressure distribution for shield tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011(3): 95 – 100. (in Chinese))
- [21] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **21**(1): 69 – 73. (RUAN Wen-jun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **21**(1): 69 – 73. (in Chinese))
- [22] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(15): 2709 – 2714. (RUAN Wen-jun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(15): 2709 – 2714. (in Chinese))
- [23] BEZU IJEN A TALMON A M, KAALBERG F J, et al. Field measurements of grout pressures during tunnelling of the Sophia rail tunnel[J]. Soils and Foundations, 2004, **44**(1): 39 – 48.