

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2022.08.032

多隧道平行叠交施工同步注浆相互影响及风险预控

施耀锋

(上海隧道工程有限公司,上海市 200232)

摘要:针对砂性富水地层浅覆土多隧道平行叠交施工过程同步注浆相互扰动影响,及地面渗漏浆等风险预测控制问题,基于同步注浆浆液渗透扩散模型及渗透距离解析方法,研究了同步浆液空间分布特征,及渗透扩散距离与注浆压力的相关性,提出了多隧道注浆相互扰动、防控地面渗漏风险、确保注浆充填效果的注浆压力优化理念,建立了相应的极限注浆压力预测控制方法。理论和方法成功应用于杭州地铁6号线一期SG6-9标段工程施工过程同步注浆风险预控,取得了良好的技术社会效果。研究成果对浅覆土渗透性富水地层多隧道叠交施工同步注浆状态预测和风险控制具有借鉴意义。

关键词:多隧道叠交,同步注浆相互影响,地面渗漏,风险预控,工程应用

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)08-0111-06

0 引言

随着城市化进程加快,大型城市地下交通线路密集化、网络化、空间立体化现象凸显,地下隧道空间相互穿越、叠交建设工程日益增多,软土地层中隧道群施工风险控制和周边环境保全技术难度不断增大。近年来,人们结合工程建设需要,通过施工方案类比分析、原位监测、数值模拟等方法开展了许多有价值的研究。研究的焦点主要集中于:(1)隧道叠交和斜交穿越施工设计方案及局部注浆、加固、卸压等施工技术^[1-3];(2)复杂叠交隧道空间位置的几何设计,开挖顺序及其影响,局部注浆加固技术和方法^[4];(3)基于实测数据反馈结合数值模拟优化施工参数,根据地表位移和隧道变形,模拟优化盾构推进速度和注浆压力等参数^[5-6];(4)注浆渗透扩散特性、作用效果及其对渗透性地层的适应性^[7-10]。这些研究成果为复杂隧道设计和施工提供了技术支持,但对于软土地层多隧道近距离叠交施工卸载条件下,土体及结构多次反复扰动、盾构切削面注浆和同步注浆重复扰动等复杂力学过程,及其可能引发的安全风险等关键技术问题,尚缺乏系统的理论研究,使得多隧道近邻施工技术参数的选用、指标的确定停留在以往经验和工程类比阶段,盾构施工同步注浆对周边地下建构筑物影响、隧道间相互扰动影响及浆液地面渗漏环境影响等风险预控方法还停留在定量分

析、定性使用的阶段。同时,软土盾构隧道的覆土厚度一般为1.5~2.0倍隧道直径(以地铁隧道为例,直径为6 m,覆土厚度为9~12 m),同步注浆过程极易诱发地面渗漏浆等环境问题,严重影响城市的正常运行,甚至危及地面交通和建筑物的安全。迄今为止,盾构同步注浆地面渗漏风险的防控总体上还停留在工程类比阶段,尚缺乏有效的预测理论和精准控制方法。

本文将在考虑渗透性地层盾构同步注浆工艺及浆液流动特性,基于隧道同步注浆渗透距离的理论和方法,从多隧道近邻注浆相互扰动、地面渗漏风险、确保注浆充填效果等方面对杭州地铁6号线与江南大道改造工程公轨并建盾构隧道盾构同步注浆参数实施精准预控,实现渗透性地层多隧道并建同步注浆参数优化、地面环境风险有效预控和隧道工程微扰动施工控制。

1 工程概况

1.1 工程特点

杭州地铁6号线和江南大道改造提升工程采用空间平行叠交布置形式,地铁隧道位于公路隧道上方。地铁隧道分为长河路—江汉路、江汉路—江陵路、江陵路—星民路和星民路—奥体站4个区间,左右线总长度分别为3 940.340 m和3 949.653 m,正线区间采用盾构法施工。江南大道改造提升工程盾构区间段线路出西北、西南工作井后向东进入江南大道,向西走行接至东北、东南工作井。隧道段北线长2 258.6 m,

收稿日期:2021-09-22

作者简介:施耀锋(1985—),男,本科,高级工程师,从事工程管理工作。

南线长 2 256.6 m。线位位于江南大道下方,与地铁 6 号线平行布置。四条隧道平行叠交布置,断面位置关系如图 1 所示。

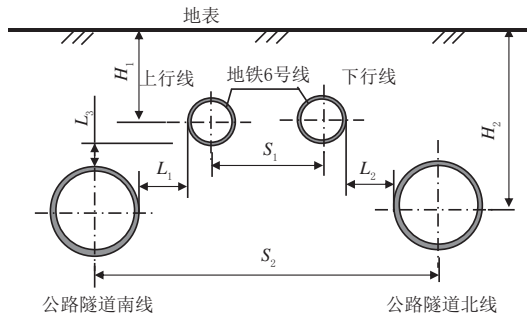


图 1 区间隧道空间位置关系

根据设计资料,对应不同地铁隧道区间,图中几何参量汇总如表 1 所示。

表 1 隧道区间断面几何参数表 单位:m

参量名称	代号	隧道区间		
		长河路站— 江汉路站	江汉路站— 江陵路站	江陵路站— 星民路站
地铁隧道轴线埋深	H_1	12.12~20.25	12.65~20.03	12.51~19.85
公路隧道轴线埋深	H_2	15.18~43.18(南工作井~北工作井)		
上行线与南线隧道平距	L_1	8.8 (最小平距)	6.65~13.47	6.6 (最小平距)
下行线与北线隧道平距	L_2	8.8 (最小平距)	5.86~20.54	7.8 (最小平距)
地铁与公路隧道竖距	L_3	5.28	8.10	4.80
地铁隧道轴线距离	S_1	12.0~17.2	15.0~15.8	15.0~15.6
公路隧道轴线距离	S_2	47.16~52.36	45.07~67.37	46.96~47.56

隧道断面的主要技术参数如表 2 所示。

表 2 盾构隧道断面主要参数

公路隧道		地铁隧道	
名称	技术参数	名称	技术参数
隧道区间埋深/m	17.0~37.5	隧道区间埋深/m	9.02~17.00
盾构外径/m	11.36	盾构外径/m	6.20
管片厚度/mm	500	管片厚度/mm	350
管片宽度/mm	2 000	管片宽度/mm	1 200
盾尾间隙宽度/mm	100	盾尾间隙宽度/mm	50

2.2 工程地质特性

拟建场地为钱塘江冲海积平原地貌单元,整体地形较平坦,地面高程约 5.67~6.76 m,地貌及地表环境比较单一。根据勘探孔揭露的地层结构、岩性特征、埋藏条件及物理力学性质,场地勘探深度以内可分为①③⑥⑧⑩⑫共 6 个大层。其中:①人工堆积、冲积层,主要为第四系全新统人工堆积的①₁杂填土、①₂素填土;③冲海积层,主要为第四系全新统冲海积的③₂砂质粉土、③₃砂质粉土、③₄₋₁砂质粉土、③₄₋₂砂质粉土、③₅砂质粉土夹粉砂、③₆粉砂和③₇₋₁砂质粉土;⑥海积层,主要为第四系全新统海积的⑥

淤泥粉质黏土;⑧湖积层,主要为第四系上更新统湖积的⑧₂层粉质黏土、⑧₃层粉砂;⑩冲湖积层,主要为第四系上更新统冲湖积的⑩₁粉质黏土、⑩₂含砂粉质黏土;⑫冲积层,主要为晚更新统下段河流相沉积的⑫₁粉砂、⑫₄圆砾。根据工程地质资料,通过计算取土体的平均孔隙比为 0.5。

2.3 开挖及同步注浆方式

工程中长河路站—江汉路站区间、江汉路站—江陵路站区间、江陵路站—星民路站区间盾构掘进过程与江南大道快速通道大隧道并行施工。在国内,此类施工情况较少,且施工区域地质情况较差,盾构又多次穿越,对土体多次扰动,一旦施工控制不当就会造成地面沉降甚至坍塌,已建隧道沉降、渗漏水,管片碎裂、位移、错台等风险。为了尽可能减小各隧道盾构施工的相互扰动影响,避免盾构机并排推进,在盾构设备投入数量容许的前提下,拟定隧道施工时间及流程如图 2 所示。

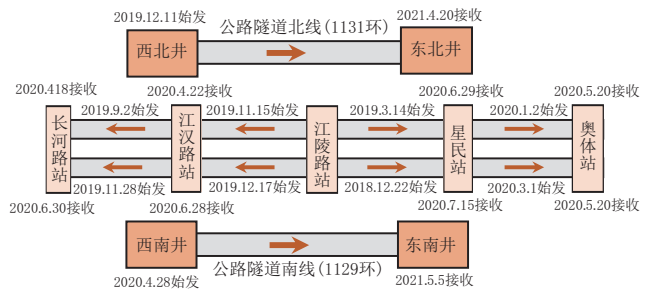


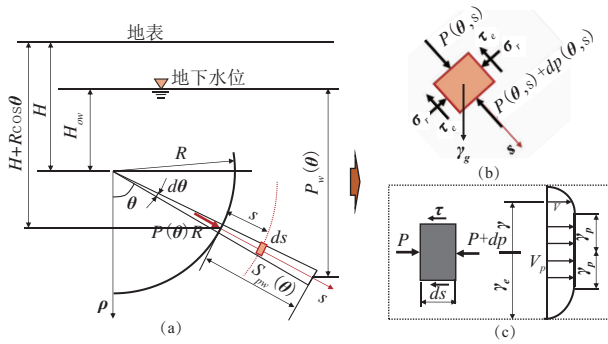
图 2 多隧道盾构施工计划流程

图 2 可见,盾构施工时间和顺序、推进方向的选择一定程度上减缓了盾构机同步并排推进及其相互扰动影响,但仍然无法避免大小盾构的局部同步、迎头推进的状态。尤其当施工进度受到不可预测因素影响而延期时,极有可能出现并排同步的不利工况。因此,多隧道平行叠交施工过程中,盾构开挖相互扰动影响、同步注浆影响等可能引起的隧道轴线偏位、局部土体损失、盾构机背土,从而引发管片位移、错台、破裂的风险隐患难以消除。为有效防范土体多次扰动,施工中除了严格控制盾构推进参数、减少纠偏量和土体损失率外,必须科学控制同步注浆量和注浆压力。

3 同步注浆相互影响分析

3.1 分析方法

为便于理论方法的建立,假定各隧道同步注浆渗透特性相互独立,单一隧道同步注浆渗透模型如图 3 所示。



图中: H_{ow} 为地下水位与隧道轴心的高差,m; $P_w(\theta)$ 为微元体所受的地下水压力,m; $S_{pw}(\theta)$ 为浆液渗透距离,m; r_p 为稳流区断面半径,m; V_p 为稳流速度,m/s; r_e 为等效流管半径,m。

图3 同步注浆浆液渗透理论模型

根据静力平衡和非牛顿流体在流管中的受力及流动特性,隧道断面任意方向同步注浆浆液渗透距离可由式(1)表达:

$$S_{pw}(\theta) = \frac{r_e [p_0 + R\gamma_g(1 + \cos \theta) - \gamma_w(H_{ow} + R \cos \theta)]}{2\tau_e - r_e(\gamma_g - \gamma_w) \cos \theta} \quad (1)$$

考虑孔隙比为 ζ , 流体柱状结构微元体 ds 的孔隙体积为:

$$\Delta V_e = \frac{\zeta_e}{1 + \zeta_e} \Delta V_s = \frac{\zeta_e}{1 + \zeta_e} ds \quad (2)$$

将微元体内所有渗流路径断面等效为一根流管,则等效流管的半径 r_e 满足下列关系:

$$\Delta V_e = \frac{\zeta_e}{1 + \zeta_e} \Delta V_s = \frac{\zeta_e}{1 + \zeta_e} ds = \pi r_e^2 ds, \text{ 则 } r_e = \sqrt{\frac{\zeta_e}{\pi(1 + \zeta_e)}} \quad (3)$$

式(1)可以表达为

$$S_{pw}(\theta) = \sqrt{\frac{\zeta_e}{\pi(1 + \zeta_e)}} \frac{[p_0 + R\gamma_g(1 + \cos \theta) - \gamma_w(H_{ow} + R \cos \theta)]}{2\tau_e - \frac{\zeta_e}{\pi(1 + \zeta_e)}(\gamma_g - \gamma_w) \cos \theta} \quad (4)$$

式(4)可见,同步注浆浆液渗透距离是角度 θ 的函数。任意 θ 角方向,浆液扩散距离与土体孔隙比、浆液粘度系数(终剪力)、水位高度、注浆压力等参数相关。对本文依托工程而言,当选定浆液材料后,浆液粘度系数和土体孔隙比可视为确定的常量,浆液扩散距离的主要影响因素为地下相对水位高度(随隧道埋深而变化)和注浆压力。

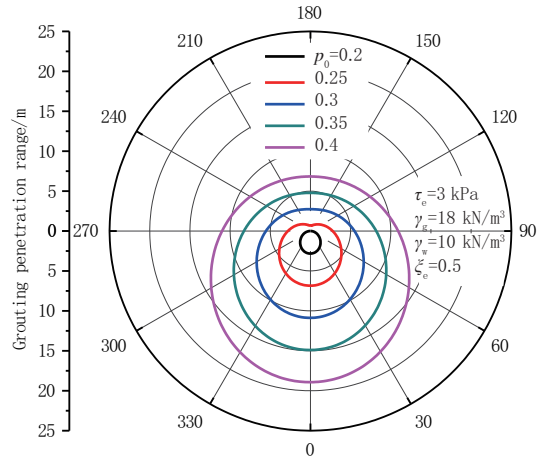
3.2 注浆渗透特性及参数相关性

参照长三角地区某盾构隧道工程施工参数,作浆液扩散距离与注浆压力相关性概要分析。取计算参数如表3所示。

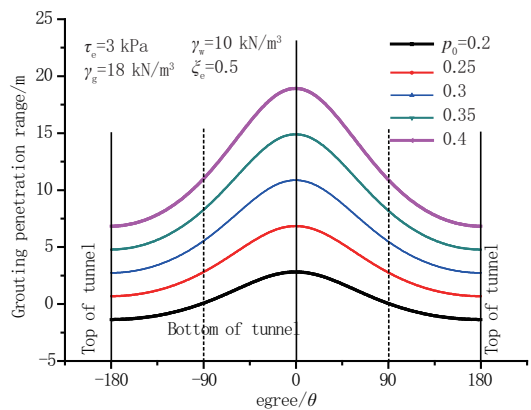
根据式(4)分别计算地下水位高度 $H_{ow}=29\text{ m}$ 和注浆压力 $P_0=\{0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4\}\text{ MPa}$ 条件下盾构隧道同步注浆浆液渗透扩散距离并作其空间分布如图4所示。

表3 模拟计算参数

名称	取值	名称	取值
土体容重 γ	18 kN/m ³	盾构隧道中心埋深	30 m
土体孔隙比 e	0.5	盾构隧道外半径 R	5.68 m
同步注浆压力 p_0	0.2~0.4 MPa	地下水位高度 H_{ow}	29 m
同步注浆浆液比重 γ_g	16 kN/m ³	液浆的终剪力 τ_e	2.0 kPa



(a)隧道断面分布



(b)沿隧道周向展开图

图4 注浆渗透距离随注浆压力变化

图4显示:(1)非牛顿 Bingham 浆液在隧道周边砂性地层中呈现非均匀渗透状态,总体呈椭圆形分布,最大渗透距离位于隧道底部,最小渗透距离位于隧道顶部;(2)注浆压力变化不改变浆液渗透距离沿隧道周向的分布形态,但对渗透距离大小影响显著;随着注浆压力的增加,浆液渗透距离沿径向等比例增大;(3)隧道下部土体中浆液渗透距离大于等于隧道上部渗透距离的3倍,因此下方隧道更容易受上方隧道同步注浆的影响。工程中应根据浆液的粘度特性和土体的渗透性特征,选用合理的注浆压力,确保浆液对盾尾空隙的良好充填,同时避免浆液过度渗透和地表渗漏环境风险。综上所述,在土体和浆液参数不变的条件下,隧道同步注浆过程中浆液的渗透、扩散、分布特征与注浆压力和地下水位等因素具

有显著相关性。

4 工程风险预测与控制

4.1 浆液扩散范围随 p_0 变化

从式(4)可知,同步注浆渗透距离的影响参数包括浆液的粘度系数 τ_e 、土体孔隙比 ζ_e 、地下水位 H_{ow} 和注浆压力 P_0 ,在选定同步注浆浆液的前提下,浆液的粘度系数 τ_e 是确定的常数。同时,对于确定的施工场地,土体孔隙比 ζ_e 和地下水位基本保持不变。浆液渗透距离主要受注浆压力 P_0 的影响。

杭州地铁6号线和江南大道改造工程盾构隧道近距离平行叠交施工,且采用盾构多头开挖工序,任何一条隧道的同步注浆均有可能对先建隧道产生扰动影响,甚至形成安全风险。同时,由于地层具有较强的渗透性,隧道覆土厚度小,容易发生地面渗漏浆等严重环境问题。以长河路站—江汉路站区间隧道为例,考虑各隧道单独实施同步注浆,相同的浆液和工程地质条件下,隧道周围土体中浆液的渗透扩散范围如图5所示。

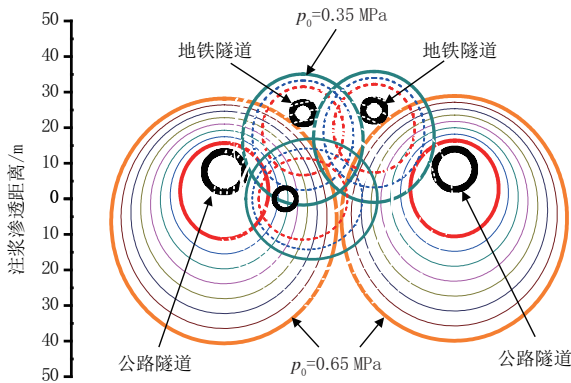


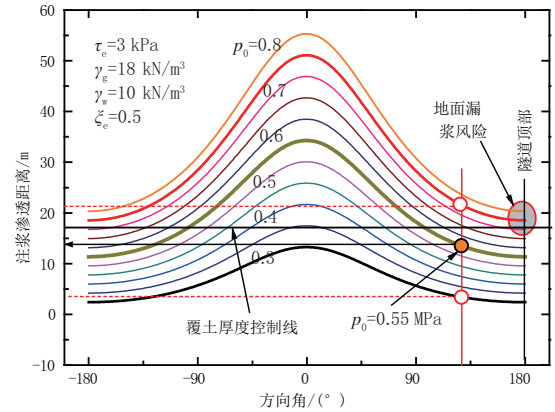
图5 隧道同步注浆渗透空间叠加(128°和-52°)

图5结果显示:(1)任一隧道开挖同步注浆,浆液均有可能扩散到周边的先建隧道;(2)随注浆压力增加,浆液扩散距离相应增大,对近邻隧道结构产生不良影响的风险增大;(3)上部地铁隧道注浆,当 $p_0 \geq 0.35$ MPa 时,浆液扩散面将影响到水平面内的另一条地铁隧道和下部大断面公路隧道(图中蓝色粗实线所示);(4)下部公路隧道注浆压力 $p_0 \geq 0.65$ MPa 时,浆液扩散面将影响斜上方的地铁隧道(图中桔色粗实线所示)。因此,为避免地铁隧道同步注浆对近邻其它隧道影响,注浆压力必须控制在 $p_0 < 0.35$ MPa,公路隧道同步注浆压力必须控制在 $p_0 < 0.65$ MPa。

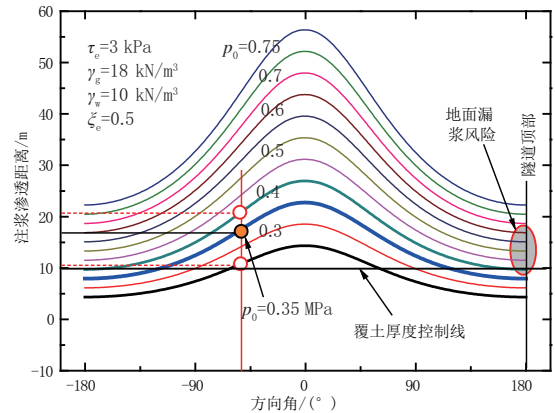
4.2 注浆风险控制方法

根据上述注浆压力对浆液扩散距离和近邻隧道影响的分析,杭州地铁6号线一期SG6-9标段工程

隧道同步注浆应满足地面无渗漏浆、各隧道之间无不良影响、各隧道盾尾间隙完全充填等三项基本技术要求。按设计资料取浆液和工程地质参数,建立基于浆液空间分布随 p_0 变化曲线实施注浆风险综合控制方法如图6所示。



(a)公路隧道



(b)地铁隧道

图6 隧道同步注浆压力控制区间

图6中(a)和(b)分别为公路隧道和地铁隧道同步注浆浆液渗透距离随注浆压力变化的空间分布。图6(a)显示:(1)对应于 $p_0 = 0.3$ MPa,隧道顶部(180°方向)浆液扩散距离约为2 m,隧道盾尾空隙完全充填;(2)对应于大隧道与小隧道轴心连线方向($\theta = 128^\circ$),当 $p_0 = 0.3$ MPa 时,浆液渗透距离为3 m,当 $p_0 = 0.75$ MPa 时,浆液渗透距离为21 m(略大于隧道间外轮廓的最小净距),此时注浆压力可视为风险控制的极限压力值;(3)对应于 $p_0 = 0.75$ MPa,隧道顶部浆液渗透距离约为17.5 m,大于隧道覆土厚度17 m(图中黑色粗实线所示),存在地面渗漏浆的环境风险。若取注浆压力 $p_0 = 0.55$ MPa,隧道径向连线方向上的渗透距离约为14 m(图中桔色圆点所示),基本处于两隧道净距的中点,此时对应于隧道顶部的渗透距离为11 m,确保盾尾空隙完全充填又能有效避免地面渗漏浆的环境风险。

图 6(b)显示:(1)对应于 $p_0=0.25$ MPa,隧道顶部浆液扩散距离为 4 m,该方向盾尾空隙充填有余;(2)对应于大隧道与小隧道轴心连线方向(小隧道坐标系中 $\theta=-52^\circ$),当 $p_0=0.25$ MPa 时,浆液渗透距离为 9 m,当 $p_0=0.35$ MPa 时,浆液渗透距离为 21 m,此时注浆压力可视为风险控制的极限压力值;(3)对应于 $p_0=0.4$ MPa,隧道顶部浆液渗透距离约为 10 m,接近隧道覆土厚度(图中黑色粗实线所示),存在地面渗漏浆的环境风险。若取注浆压力 $p_0=0.35$ MPa,隧道径向连线方向上的渗透距离约为 17 m(图中桔色圆点所示),略大于两隧道净距的一半,此时对应于隧道顶部的渗透距离为 8 m,确保盾尾空隙完全充填又能有效避免地面渗漏浆的环境风险。

基于图 6 分析结果,建立依托工程同步注浆压力控制施工流程如图 7 所示。

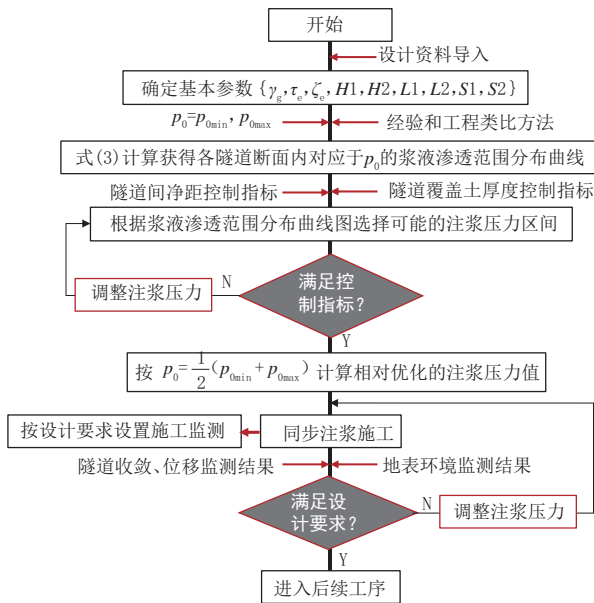


图 7 同步注浆压力精确控制施工流程

4.3 同步注浆控制效果示例

杭州地铁 6 号线一期 SG6-9 标段工程为地铁隧道与大断面公路隧道平行叠交建设,区域地质条件复杂、隧道间距小、同步注浆相互影响大、地面渗漏浆风险高且具有不确定性,科学选取合理的注浆压力才能确保浆液对盾尾空隙的完全充填,同时有效预控地面渗漏浆等技术风险。

基于上述理论和方法并严格按照图 7 所示的施工控制流程,对杭州地铁 6 号线和江南大道改造工程隧道实施同步注浆压力控制,在盾尾间隙注浆充填、地面环境风险管理、隧道轴线控制和结构变形控制等方面取得了良好的技术效果。以公路隧道为例,600~720 环(共计 120 环,隧道长度 240 m)注浆压力

控制如图 8 所示。

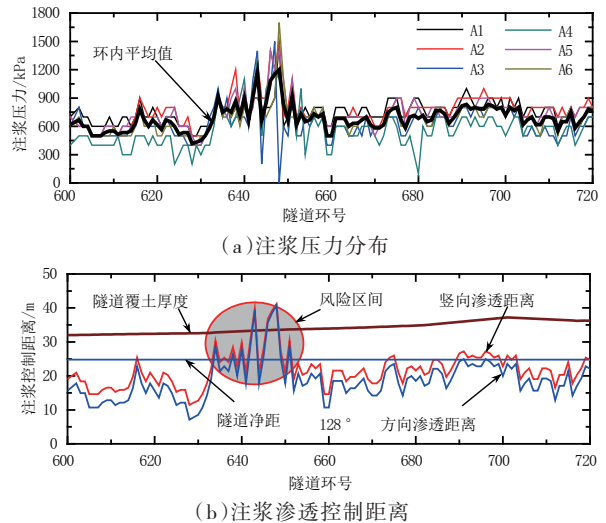


图 8 公路隧道注浆压力与渗透距离控制效果

图 8(a)为公路隧道 600~720 环注浆压力分布,其中, {A1, A2, A3, A4, A5, A6} 分别为隧道顶部顺时针 $\{30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 330^\circ\}$ 方向注浆孔位,黑色粗实线为环内 6 个注浆孔注浆压力的平均值。图中,考虑隧道埋深沿轴向的变化,分区段计算并选用与埋深相匹配的注浆压力,对应于 600~635 环,注浆压力的平均值约为 550 kPa;随后,根据坡度变化作了相应压力调整(635~650 环);压力调整趋于平衡后,650~720 环取基本稳定的压力 700 kPa(平均值)。结果显示,对应注浆压力,注浆渗透距离呈现相应变化特征,600~635 环区间内浆液渗透距离平均值约为 20 m,远小于隧道覆土厚度并小于上下隧道净距,注浆施工无风险;图 8(b)为注浆控制距离,650~720 环区间内,浆液竖向渗透距离平均约为 23 m,不存在地面渗漏浆风险,但上下隧道轴心连线上浆液渗透距离接近两隧道净距,存在对上部地铁隧道产生不良扰动风险。而对应于 635~650 环,由于注浆压力调高,浆液渗透距离接近该区间隧道覆土厚度,局部超过隧道覆土厚度,超过了上下隧道净距,存在地面冒浆和对地铁隧道严重扰动的风险,后续工程中进行压力调整,将注浆压力平均值调低至 700 kPa(压力调整过程如图 9(a)所示),使浆液渗透距离降低至安全值。取得了良好的技术和社会效益。

5 结论

考虑杭州地铁 6 号线和江南大道改造工程盾构多隧道长距离叠交、浅覆土和强渗透富水地质条件,同步注浆可能引发地表渗漏环境影响、各隧道间浆液相互渗透影响等安全隐患,利用基于虚拟柱状结

构的同步注透扩散理论模型及浆液渗透扩散距离的解析解,建立盾构隧道同步注浆压力控制和相互扰动风险综合防控技术并在工程中成功应用。

(1)盾构同步注浆浆液渗透距离在隧道断面内呈椭圆状非均匀分布,多隧道平行叠交施工时,隧道相对位置直接关系对相互扰动状态和程度。

(2)在确定浆液参数和一定工程地质条件下,同步注浆浆液渗透距离与注浆压力成正比,注浆压力存在对应的合理取值区间,小于该区间的注浆压力将存在盾尾环状空隙充填缺陷和隧道长期稳定的风险隐患;过高的注浆压力容易诱发地面冒浆和隧道施工相互扰动影响。

(3)本文建立的多隧道叠交施工同步注浆风险预测控制技术,基于严密的力学理论,相关理论和技术环节中出对隧道近邻区域土体和盾构隧道几何特性等未进行任何力学条件约束,结果和结论适用于任意半无限区间盾构隧道同步注浆问题。

参考文献:

- [1] 朱继文.盾构法隧道与下立交长距离叠交的设计与施工技术探讨[J].城市道桥与防洪,2010(7):95-99
- [2] 林枫.地铁盾构叠交隧道关键技术施工对策[J].天津建设科技,2018,28(4):75-76
- [3] 陈凯.多孔叠交隧道盾构施工关键技术研究[J].隧道建设,2017,37(6):742-747
- [4] 李建高,王长虹.富水软弱地层中麻花型盾构隧道群施工关键技术[J].隧道建设(中英文),2019,39(10):1678-1689
- [5] 范建军.软土地层盾构隧道上部开挖卸载扰动位移特性及灾变研究[D].上海交通大学,2015
- [6] 熊聪聪,叶伟涛,刘志.基于实测数据的多线近距交叠隧道盾构施工参数优化[J].铁道建筑技术,2019,S1.041,176-180
- [7] 邵海龙,何新,商洪峰.复合地质条件下盾构施工同步注浆研究与应用[J].山西建筑,2015(1):184-186.
- [8] 朱东元,钟小春,王红飞.盾构隧道壁后注浆浆液组分对其渗透性影响研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2016,33(1):27-30.
- [9] Ding L, Ma L, Luo H, et al. Wavelet Analysis for Tunneling Induced-Ground Settlement Based on a Stochastic Model[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26(5): 619-628
- [10] 王俊,方勇,何川.盾构隧道施工对砂性地层的扰动及管片受荷特征[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):156-162.

(上接第98页)

- [4] 杨增文.寿光市水资源可持续利用研究[D].济南:山东农业大学,2008.
- [5] 苏菲·巴尔波.海绵城市[M].夏国祥,译.桂林:广西师范大学出版社,2015.
- [6] 张剑,赵军,武龙.半干旱地区海绵城市建设研究[J].阴山学刊(自然科学版),2018,32(1):72-75.
- [7] 住房和城乡建设部.海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[Z].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [8] 周建国.济南市“海绵城市”建设管理问题研究[D].济南:山东大学,2016.
- [9] 迈克·怀特.雨水公园:雨水管理在景观中的应用[M].张光磊,张瑞莉,译.桂林:广西师范大学出版社,2015.
- [10] 杨建辉.晋陕黄土高原沟壑型聚落场地雨洪管控适地性规划方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [11] 王欢.基于海绵城市理念的公园规划方法探讨[D].北京:北京林业大学,2016.
- [12] 那健.城市雨水利用模式研究与工程示范[D].西安:西安理工大学,2017.
- [13] 张伟,王家卓,车哈,等.海绵城市总体规划经验探索——以南宁市为例[J].城市规划,2016,40(8):44-52.
- [14] 马洪涛,周丹,康彩霞,等.海绵城市专项规划编制思路与珠海实践[J].规划师,2016,32(5):29-34.
- [15] 吕红亮,于德森,熊林.海绵城市专项规划编制技术思路与要点探讨——以天津市海绵城市建设专项规划为例[J].建设科技,2016(15):20-23,27.
- [16] 马伯.雨洪韧性视角下海绵城市建设控制指标的多层级分解研究[D].长沙:湖南大学,2019.