

盾构壁后注浆对地表沉降影响模拟研究

王冠琼, 刘干斌*, 邓岳保

(宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 结合宁波轨道交通某区间隧道施工, 研究了盾构壁后注浆对地表沉降的影响, 考虑壁后注浆压力消散和浆液固结硬化过程, 采用 FLAC3D 有限元软件对开挖过程模拟计算, 分析了不同注浆量和不同注浆压力下的地表沉降变化规律以及浆液硬化作用对地表沉降和管片位移的影响规律, 并将地表沉降和拱顶位移的计算值和实测值进行对比分析. 结果表明: 本工程最佳注浆量 $4.0\sim 5.0\text{ m}^3$, 最佳注浆压力约 0.3 MPa ; 硬化作用引起的地表沉降占总沉降约 5% , 引起的管片位移占总位移约 15% . 针对宁波土质, 合理确定注浆量和注浆压力能够有效控制地表沉降, 合理配制浆液, 实时监控注浆量、注浆压力和浆液强度, 能够有效控制管片的上浮和变形.

关键词: 注浆量; 注浆压力; 浆液硬化; 地表沉降; 数值模拟

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 03-0097-06

盾构隧道同步注浆就是在隧道内将具有适当的早期及最终强度的材料, 按规定的注浆压力和注浆量在盾构推进的同时填入盾尾空隙内^[1]. 在盾构隧道施工中, 壁后同步注浆是重点工作内容, 其目的有: 尽早填充地层, 减少地基沉降量, 保证环境安全, 确保管片衬砌的早期稳定性和间隙的密封性; 作为衬砌防水的第一道防线, 提供长期、均质、稳定的防水功能; 作为隧道衬砌结构加强层, 具有耐久性和一定强度^[2]. 浆液的力学性质、注浆过程的控制对地层沉降有着重要意义. 浆液注入盾尾后, 与周边土体固结硬化, 强度增加, 同时注浆压力随时间消散, 浆液和周围土体力学性质和状态都发生了变化, 进而对地表和周围地层的变形产生影响.

针对盾构施工过程的有限元模拟和数值分析, 近来有众多学者进行了研究. 张云等^[3]将衬砌周围的土体与注浆情况等效为一环状均匀、等厚的等代层, 并进行了模拟. 万战胜等^[4]针对上海地铁 2 号线工程, 采用 FLAC3D 对盾构隧道开挖后壁后注浆对地表沉降影响进行了模拟, 并将计算结果与实测数据进行了对比分析, 揭示了注浆长期强度

和注浆浆液时间-强度变化对地表沉降的影响规律. 邓宗伟等^[5]以北京市地铁 5 号线试验段为例, 结合 FLAC3D 2.0 软件对盾构隧道壁后注浆的受力特点进行了二次开发, 研究了盾构隧道壁后注浆的作用机理, 探讨了壁后注浆对支护结构和围岩的受力、变形影响的规律. 以上数值模拟方法考虑了注浆长期压力和固结强度的影响, 但没有考虑注浆压力消散、浆体固结硬化和等代层强度的时变性等因素.

笔者拟针对宁波轨道交通某区间, 采用三维有限元软件 FLAC3D 对开挖过程进行模拟计算, 并考虑注浆压力消散以及浆体和等代层固结硬化的时变性, 以此探讨注浆量和注浆压力对地表沉降的影响规律以及浆液硬化作用对地表沉降和管片位移的影响规律, 据此提出控制地表沉降和管片位移的措施.

1 隧道开挖建模过程

1.1 工程简介

宁波轨道交通某区间, 全长 893.65 m , 隧道顶部埋深 16 m , 采用 2 台 $\Phi 6340$ 土压平衡盾构施工,

收稿日期: 2013-12-04.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市重大择优委托项目 (2011C51011).

第一作者: 王冠琼 (1988-), 女, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 地下工程数值模拟. E-mail: grace880701@163.com

*通信作者: 刘干斌 (1976-), 男, 江西吉安人, 教授, 主要研究方向: 岩土工程. E-mail: liuganbin@nbu.edu.cn

盾构推进速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。衬砌管片脱离盾尾后,根据地面测量数据,进行壁后注浆。盾构衬砌环管片内径为 5500 mm ,衬砌厚度为 350 mm ,环宽 1.2 m ,盾尾孔隙为 70 mm 。衬砌管片用 C50 混凝土,弹性模量 $E=3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.2$ 。本区间场地地基类型主要为河流相、河湖相及海相等,上部软土层厚 $12.3 \sim 28.5 \text{ m}$ 。盾构区间隧道穿越的土层主要为软弱土层,高压缩性、高灵敏性,层面分布不均匀^[6]。地下水位在地面以下 2 m 处,土层平均渗透系数为 $1 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。各土层参数见表 1。

表 1 土层物理参数

层号	土层名称	土层厚度/m	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	内摩擦角/($^\circ$)	压缩模量/MPa	泊松比
① ₁₋₁	杂填土	3	18.0	0.949	19.0	-	-
① ₃	灰色淤泥质粉质粘土	4	16.1	1.231	3.3	2.42	0.32
② ₂₋₂	灰色淤泥质粘土	6	15.8	1.119	11.2	2.56	0.26
③ ₂	灰色粉质粘土夹粉砂	7	17.7	0.857	8.3	4.80	0.35
⑤ ₁	灰绿、草黄色粘土	8	18.2	0.793	28.8	8.89	0.30
⑤ ₃	灰黄色砂质粉土	4	17.6	0.869	-	10.42	0.35

1.2 浆液和等代层的设定

等代层是指衬砌周围由于盾尾空隙的闭合、注浆充填作用和盾构推进对周围地层的扰动等形成的特殊圈层,等代层厚度的计算式为:

$$\delta = \eta \bar{A}, \quad (1)$$

式中: δ 为等代层厚度; $\bar{A}$ 为计算的盾尾空隙,即盾构外径与衬砌外径间差值的一半, m ; η 为系数。

文献[7]对 150 多例盾构法隧道的地表最大沉降量实测值进行了整理分析,得到 η 值的范围可取为 $0.7 \sim 2.0$ 。对硬土层,可取其下限,对极软的土层,可取其上限。对不同土质中的盾构法隧道而言, η 值一般取为:硬粘土 $0.7 \sim 0.9$,密砂 $0.9 \sim 1.3$,松砂 $1.3 \sim 1.8$,软粘土 $1.6 \sim 2.0$ 。

本模型土层为软粘土,因此取 $\eta=2.0$,设定衬砌外围沿径向 14 cm 的环形土体为等代层,其中 7 cm 的注浆间隙设为等代层内层。本模型通过降

低注浆压力和提高等代层强度来实现浆液硬化过程。注浆初期浆液强度低,等代层受压,随着浆液硬化固结,等代层强度增大,径向注浆压力减小,最终浆液压力消散至 0 MPa 。衬砌刚度折减系数为 85% ,衬砌与等代层如图 1 所示。

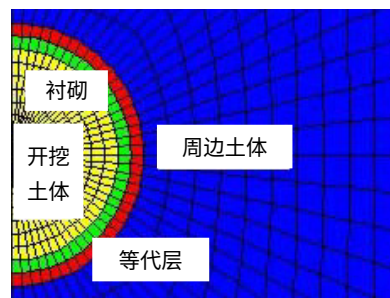


图 1 衬砌与等代层

浆液强度的设定:实际施工采用的浆液胶凝时间一般为 $3 \sim 12 \text{ h}$,根据地层条件、掘进速度,通过现场试验加入促凝剂及变更配合比来调整胶凝时间。本模型设定浆液初凝时间为 4 h ,浆液最初抗压强度为 0.2 MPa ,终凝时间为 12 h ,浆液长期强度为 2.0 MPa 。

注浆量的设定:注浆量的确定是以单位建筑孔隙为基础,并考虑了浆液材料向土体中渗透、超挖、地层、线路及掘进方式等因素,以保证达到充填密实的目的^[8]。一个管片注浆量的计算为:

$$Q = [\pi / 4 (D_1^2 - D_2^2)] m \alpha, \quad (2)$$

式中: D_1 为隧道外径, D_2 为管片外径, m 为盾构推进长度, α 为注浆率(软土地层注浆率一般为 $180\% \sim 250\%$,但即使注浆率达到 $180\% \sim 250\%$,对于地质地层参数变化大的地段,浆液对开挖空隙的填充率有可能达不到完全填充^[9])。根据(2)式得到一环管片注浆量应取 $2.98 \sim 4.13 \text{ m}^3$,考虑到地质地层参数变化大的地段,注浆量还应适当增大。

注浆压力的设定:本模型采用均匀注浆,实际盾构施工中注浆压力应略大于各注浆点位置的静止土压力,通常注浆压力可取 $1.1 \sim 1.2$ 倍的静止土压力^[10]。由此得到注浆压力应取 $0.302 \sim 0.445 \text{ MPa}$ 。

1.3 数值计算模型

采用 FLAC3D 有限元软件进行数值模拟,选取 $1/2$ 隧道与周边部分土体(图 2), X 方向 20 m , Y 方向 120 m , Z 方向 32 m 。隧道中心轴线处 X 坐标为 0 ,沿 Y 轴方向开挖一环为 1.2 m ,共计算开挖 100

环。本模型共划分 120 000 个单元, 125 342 个节点。采用修正剑桥模型进行计算, 同时考虑力场与渗流场的作用, 并考虑土体自重和孔隙水压力作用下的自应力平衡。土体和等待层采用弹塑性材料模拟, 混凝土管片采用线弹性材料。衬砌采用 liner 结构单元, 将一环内相互连接的管片视为整体的圆环, 厚度为 350 mm。将衬砌外围沿径向 14 cm 的环形土体设为等代层, 等待层采用 shell 结构单元。

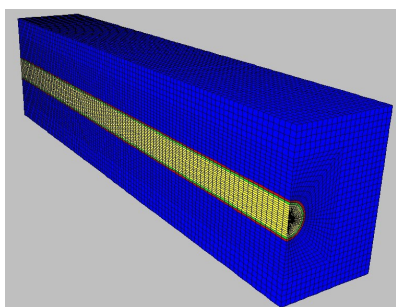


图2 隧道开挖模型

模型边界条件: 在 $X = 0$ m 和 $X = 20$ m 处对 X 方向位移加以约束, 在 $Y = 0$ m 和 $Y = 120$ m 处对 Y 方向位移加以约束, 在 $Z = -16$ m 处对 Z 方向位移加以约束。地下水位在 -2 m 处, 饱和度设为 1.0。设 $Z = 14$ m 处为透水边界, 其固定孔隙水压力 $P_p = 0$ 。

2 考虑浆液硬化的壁后注浆影响分析

2.1 注浆量对地表沉降的影响

在施工过程中, 一般采用注浆压力和注浆量双指标控制(注浆压力达到设定值, 注浆量达到设计值 85%以上), 实际施工中影响地表沉降的主要注浆参数是注浆量、注浆压力与浆液强度, 其中注浆量的大小对地表沉降起关键作用。图3为注浆压力 0.3 MPa 作用下, 不同充填率和注浆量下地表横向沉降计算值与实测值曲线。

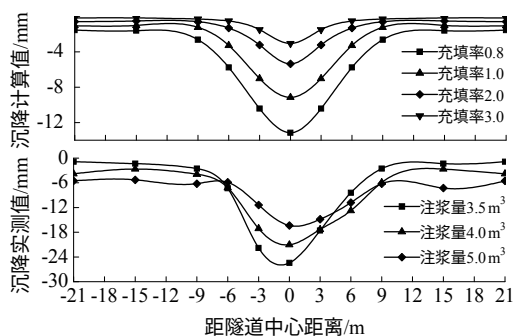


图3 不同充填率和注浆量下横向沉降计算值与实测值

计算值取注浆率分别为 0.8、1.0、2.0、3.0 时对比。实测值取工况为注浆压力 0.3 MPa、出土量 37 m³、土压力设定值 0.25 MPa 时, 注浆量分别为 3.5 m³ (相当注浆率 2.0)、4.0 m³ (相当注浆率 2.5)、5.0 m³ (相当注浆率 3.0) 的 3 个断面实测值作对比分析。

从图3可知, 注浆量不同地表横向沉降有明显差异, 最大沉降值随注浆量增大而减小, 且注浆量越大沉降槽越平缓。可见, 注浆量可以有效弥补土体损失, 控制隧道上部土体和周边土体的下沉, 有效防止地表下沉。图3中计算值与实测值变化规律较一致, 但在距离隧道中线 -21~-9 m 和 9~21 m 处变化规律有所不同。随着注浆量增大, 此段地表沉降计算值变小, 实测值却变大。这主要是实际工程中盾构推进速度不同引起, 注浆量为 3.5、4.0、5.0 m³ 时, 盾构推进速度分别为 26、33、36 mm·min⁻¹。盾构推进速度较慢对沉降槽周边土体的扰动较小, 周边土体的地表沉降就越小, 因此要注意对推进速度的控制。综上可得, 注浆量对地表沉降影响很大, 合适的注浆量能有效控制地表沉降, 本工程最佳注浆量为 4.0~5.0 m³。

2.2 注浆压力对地表沉降的影响

分别对注浆压力 0.2、0.3、0.4 MPa 下的隧道开挖过程进行计算, 图4为不同注浆压力下, 开挖至 $Y=60$ m 时竖向沉降云图。

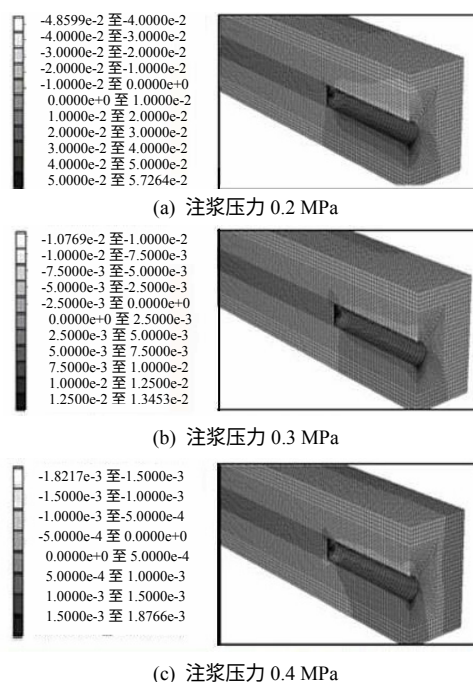


图4 注浆压力竖向位移计算云图

图 5 显示开挖过程中隧道周围的土体向隧道方向移动, 隧道上部土体在重力作用下向下移动, 隧道底部土体受开挖完成后卸荷过程的影响向上移动产生隆起。注浆压力越大, 地表沉降越小, 隧道上部的土体向隧道方向的沉降也越小, 隧道底部的土体产生的隆起也越小。提取 $Y=60\text{ m}$ 断面处地表沉降值, 此断面在不同注浆压力下的横向地表沉降计算值如图 5 所示。

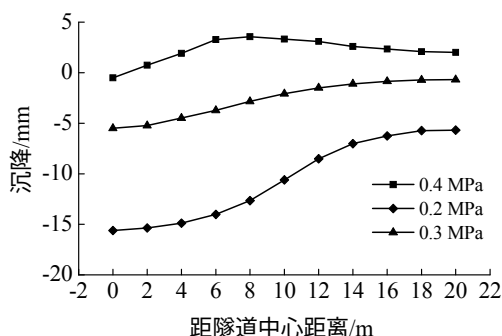


图 5 不同注浆压力下的横向沉降计算值

从图 5 可以看出, 注浆压力不同, 地表横向沉降有明显差异, 注浆压力越大地表沉降越小, 部分地表产生隆起。注浆压力为 0.3 MPa 时, 沉降槽曲线变化最为平缓, 最大沉降为 5.49 mm ; 注浆压力为 0.2 MPa 时, 沉降较大, 最大沉降为 15.32 mm ; 注浆压力为 0.4 MPa 时, $X=6\sim 8\text{ m}$ 处产生隆起 4.56 mm , 这是因注浆压力过大, 土体向周边挤压, 隧道上部土体无法达到平衡造成。

综上分析, 合理的注浆压力能有效控制地表沉降和管片变形。在均匀注浆形式下, 最佳注浆压力为 0.3 MPa 左右, 与本工程实际注浆压力相符。

2.3 浆液硬化作用的影响

2.3.1 浆液硬化对地表沉降的影响

浆液硬化作用可分为 2 部分: 注浆压力的消散以及浆体的固结硬化, 两者共同作用。浆液硬化过程引起周边土体和等代层的固结硬化, 进而对地表沉降产生影响。

图 6 为 0.3 MPa 注浆压力下, 隧道开挖完成后 $Y=60\text{ m}$ 横断面的长期地表沉降曲线。对比图 6 中 2 组计算值可知, 地表沉降考虑硬化最大沉降为 50.86 mm , 比不考虑硬化下沉 2.79 mm , 硬化作用占地表总沉降的 5.1% 。由此可得, 浆液硬化对地表沉降的影响较小, 约占 5% 。因此, 对地表沉降

的控制主要通过调节注浆量和注浆压力来实现。

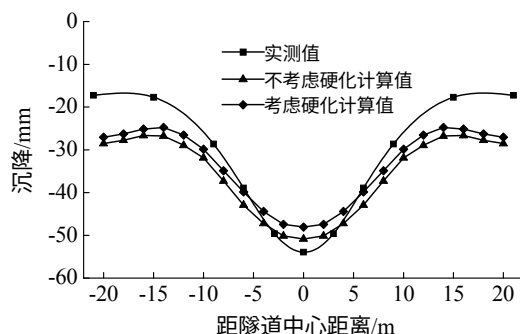


图 6 $Y=60\text{ m}$ 横断面长期地表沉降

对比图 6 中考虑硬化的计算值和实测值可发现: (1) 2 组数据趋势相同, 地表沉降实测值最大沉降为 53.96 mm , 计算值小于实测值 3.1 mm 。(2) 计算得到的地表沉降曲线比实测平缓, 沉降槽宽度较大。其主要原因为: 本模型采用均匀注浆, 工程实际采用非均匀注浆且考虑重力的作用, 管片上半环注浆压力较小, 因此地表沉降实测值比计算值大。由于模型边界条件的设定使土体不能完全符合半无限空间体, 孔隙水压力的消散、渗流固结受到限制, 因此最终地表沉降的计算值小于实测值, 计算值沉降槽宽度较大。

2.3.2 浆液硬化对管片位移的影响

盾构隧道施工中, 对于刚脱离盾尾的管片, 经常会出现局部或整体上浮, 表现为管片错台、裂缝、破损, 乃至轴线偏位等现象^[11]。图 7 为 0.3 MPa 注浆压力下, $Y=60\text{ m}$ 处管片脱离盾尾后, 拱顶沉降的变化曲线

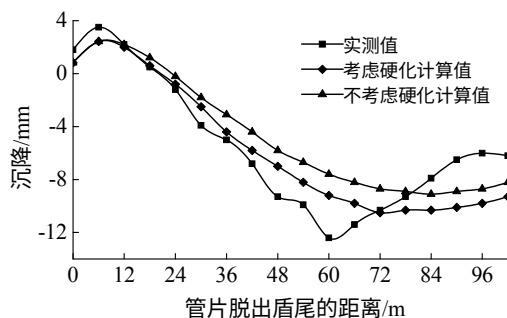


图 7 $Y=60\text{ m}$ 处拱顶位移变化曲线

2.3.3 浆液硬化对管片位移的影响分析

由图 7 中 2 组计算值可知, 管片脱离盾尾后, 拱顶先上浮后下沉, 随着浆液固结硬化拱顶处又呈现极少量的上浮, 最后达到稳定。由于初期浆液

压力和注浆量对管片的上浮产生影响,拱顶先产生 2.4 mm 上浮量。拱顶下沉阶段主要由注浆压力消散引起,此阶段硬化引起的沉降为 2.2 mm,占最大沉降的 20.9%。考虑硬化作用下拱顶最终沉降为 9.3 mm,硬化作用产生沉降 1.41 mm,占管片最终沉降的 15.1%。由此可得,浆液硬化对管片位移影响较大,在下沉阶段硬化作用引起的位移占最大沉降 20%左右,且位移值较大;硬化作用引起的位移占管片最终沉降的 15%左右。因此,合理配制浆液,能够有效控制注浆压力的大小、浆液压力消散和硬化的速度以及浆液的最终强度,同时,在施工中实时监控注浆压力和浆液强度,能够有效控制管片的位移和隧道的纵向变形。

2.3.4 计算值与实测值比较分析

由图7中考虑硬化计算值和实测值2组数据对比发现:(1)2组数据趋势基本相同,都是先上浮后下沉,然后再次有少量上浮最后达到稳定。拱顶最大沉降计算值大于实测值1.9 mm;达到稳定后,实测值最终沉降6.2 mm,计算值最终沉降9.3 mm。(2)计算值曲线较平缓,且计算值的变化比实测值明显滞后。(3)管片最终都为下沉状态,且最终沉降的计算值远远大于实测值。其主要原因有:实际情况下覆土层厚度不断变动,与模型设置有差异,使拱顶位移计算值与实测值产生偏差。本模型设置注浆压力随着时间线性变化,但文献[12]以上海地铁某区间为例,发现浆液消散规律为曲线,前期消散速率很快,2.1 h后速率变得很慢,最终稳定在初始注浆压力的60%左右,因此实测曲线下沉阶段的速率比计算值快的多,曲线较陡。本模型设置等代层强度随时间线性增加,但文献[13]发现浆体固结应变的增加呈曲线状态,前期增加很快,30 min左右就稳定至20%左右,浆体固结速率对等代层强度增加速率有较大影响,因此实测拱顶再次上浮阶段的速率比计算值快。在施工过程中,有很多因素会影响管片位移,如开挖面掘进参数设置不当,使得推进油缸上下压力差偏大,导致脱离盾尾的管片向推力小的一侧移动。背衬注浆不充分时,管片顶部存在空隙,使管片产生上浮。注浆浆液凝固时间比较长,后配套拖车走行在浆液还未完全凝固的管片上时,管片产生位移,因此后期拱顶位移实测值产生明显上浮,与计算值相差较大。考虑

到以上因素的综合影响,本模型的数值模拟结果是合理的。

3 结论

考虑壁后同步注浆压力消散和浆体固结硬化对隧道开挖过程的影响,对宁波轨道交通某区间的开挖过程进行了数值模拟。通过将计算结果与实测值对比,研究地表沉降和管片位移的变化规律,得到以下结论:

(1) 不同注浆量作用下地表沉降差异明显,注浆量越大,地表沉降越小,且注浆量越大沉降槽越平缓,合理确定注浆量能有效控制地表沉降。根据实测值的对比分析可得本工程最佳注浆量为4.0~5.0 m³。

(2) 不同注浆压力作用下地表沉降差异明显,注浆压力越大,地表沉降越小,压力过大地表会产生隆起;为有效控制地表变形,确定合适的注浆压力非常重要。据模拟计算:当注浆压力为0.3 MPa时,地表沉降曲线较平缓,地表沉降与实测结果较接近,本工程最佳注浆压力为0.3 MPa左右。

(3) 浆液硬化作用对地表沉降影响较小,占最大地表沉降的5%左右。

(4) 浆液硬化作用对管片位移影响较大。开挖过程中,管片先上浮后下沉再少量上浮,在下沉阶段硬化作用占拱顶最大沉降20%左右,且位移值较大。硬化作用引起的管片位移占管片最终位移的15%左右。

(5) 合理配制浆液,能够有效控制注浆压力的大小、压力消散和浆液硬化的速度以及浆液的最终强度。在施工中实时监控注浆压力和浆液强度,能够有效控制管片的位移和隧道的纵向变形。另外,合理确定注浆量和注浆压力能够有效地控制地表沉降。

参考文献:

- [1] 邹翀. 盾构隧道同步注浆技术[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(1):26-30.
- [2] 徐小华. 盾构管片壁后注浆作用机理的数值解析[J]. 西部探矿工程, 2008(1):169-172.
- [3] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3):388-392.
- [4] 万战胜, 朱岱云, 夏永旭. 盾构隧道壁后注浆对地表沉

- 降影响数值模拟研究[J]. 河北工业大学学报, 2011, 40(1):110-113.
- [5] 邓宗伟, 陈建平, 冷伍明. 盾构隧道壁后注浆作用机理的计算研究[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(6):114-117.
- [6] 宋成辉. 软土地层地铁盾构通用环管片结构设计研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4):733-740.
- [7] 藤田圭一. 从基础工程角度看盾构掘进法——地层的沉降与松动[J]. 隧道译丛, 1985(5):49-63.
- [8] 魏纲, 魏新江, 洪杰. 盾构隧道壁后注浆机理及其对周边环境的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, S1:299-304.
- [9] 何炬, 杨有海, 陈达. 深圳地铁盾构施工注浆机理与参数分析[J]. 低温建筑技术, 2009(10):108-109.
- [10] 江玉生, 宋晓兵, 江华. 土压平衡盾构施工中同步注浆与地表沉降的关系[EB/OL]. [2011-08-03]. <http://epub.cnki.net/kns/detail/detail.aspx?FileName=SZJS201108001060&DbName=CPFD2011>.
- [11] 胡欣雨, 张子新. 一般应力状态下泥浆渗入对泥水盾构开挖面土体剪切强度影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5):1027-1036.
- [12] 张莎莎, 戴志仁, 白云. 盾构隧道同步注浆浆液压力消散规律研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(3):40-48.
- [13] 袁小会, 韩月旺, 钟小春, 等. 盾尾注浆硬性浆液固结变形数值计算模型构建[J]. 岩土力学, 2012, 33(3):925-932.

Numerical Simulation of Ground Settlement Considering Slurry Hardening Effect after Grouting of Wall Formation

WANG Guan-qiong, LIU Gan-bin*, DENG Yue-bao

(Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to study the effect of wall back grouting on ground subsidence, the process of excavation is simulated with a three-dimensional finite element software FLAC3D, in which the Ningbo rail transit subway tunnel construction is combined, and the wall back grouting pressure dissipation and slurry concretion process is considered. The ground surface subsidence under varying grouting pressure and the slurry hardening effect on the law of ground settlement are analyzed. Comparisons between the calculated value of surface subsidence and the corresponding measured value are made. The results show that, considering the soil characteristics in Ningbo, the grouting pressure can effectively be used to control the surface settlement, and the engineering optimum grouting amount is $4.0\sim 5.0\text{ m}^3$, the engineering optimum grouting pressure is about 0.3 MPa, the surface hardening induced settlement in total settlement is about 5%, and induced segment displacement in total displacement of about 15%. The good combination of slurry, real-time monitoring of grouting pressure and grout strength can effectively control the floating of segment and deformation.

Key words: grouting volume; grouting pressure; slurry hardening effect; ground settlement; numerical simulation

(责任编辑 史小丽)