

文章编号: 1007-2373 (2011) 01-0110-04

# 盾构隧道壁后注浆对地表沉降影响数值模拟研究

万战胜<sup>1</sup>, 朱岱云<sup>2</sup>, 夏永旭<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 山东工商学院, 山东 烟台 264005)

**摘要** 论文针对上海地铁 2 号线工程, 采用三维数值模拟软件 FLAC<sup>3D</sup> 对盾构隧道开挖后壁后注浆对地表沉降影响进行了模拟计算与实测数据的对比分析研究. 研究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, 所得结论可供盾构隧道设计与施工参考使用.

**关键词** 盾构施工; 壁后注浆; 地表沉降; 数值模拟

**中图分类号** TU91                      **文献标志码** A

## Numerical simulation study of settlement on shield tunnel after grouting of wall formation

WAN Zhan-sheng<sup>1</sup>, ZHU Dai-yun<sup>2</sup>, XIA Yong-xu<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shandong Institute of Business and Technology, Shandong Yantai 214101, China)

**Abstract** For the Shanghai Metro Line 2 project, using three-dimensional numerical simulation software FLAC<sup>3D</sup> the impact of surface subsidence of the shield tunnel excavation and the posterior grouting was simulated and comparatively analyzed with measured data. Research reveals the law of surface subsidence for the long-term strength and grouting time - intensity change. The conclusion could be used and referenced for the design and construction of shield tunnel.

**Key words** shield construction; wall grouting; surface subsidence; numerical simulation

### 1 工程概况

目前, 隧道盾构施工中大多采用同步注浆技术, 决定地层沉降量大小的一个很重要的因素就是壁后注浆效果, 因此, 壁后注浆浆液各时期的强度表现对地层沉降有重要影响. 由于对壁后注浆浆液各时期的强度 (主要是早期强度与后期强度) 进行直接准确的现场实测尚存在困难, 而实践证明, 利用数值模拟方法能够较为准确地研究实际工程问题. 因此, 可以对所要研究的注浆浆液某时期强度值取多个试验值, 分别应用到多次盾构推进数值模拟中, 对各次结果中的地层沉降数据进行比较分析, 从而研究注浆体不同时期强度对地层沉降 (特别是地表沉降) 的影响<sup>[1]</sup>.

结合上海地铁 2 号线开挖 30 d 内地表沉降实测资料, 针对盾构开挖后 30 d 内的地层沉降, 进行模拟研究浆液强度变化对地层沉降的影响. 实测表明, 这一时期的地层沉降量占总沉降量的 60% ~ 80%, 因此, 研究注浆体不同时期强度对开挖后约 30 d 内地层沉降的影响就可以预测其对地层最终沉降的影响程度.

### 2 数值模型建立

FLAC<sup>3D</sup> 可对连续介质进行大变形分析, 能计算非线性本构关系, 可模拟多种不同力学特性的材料; 软件提供了梁、桩、锚杆、壳体等多种结构单元, 因此非常适合于模拟盾构推进的渐进过程. 模型采用 FLAC<sup>3D</sup> 中的圆柱形单元 (cylinder) 模拟隧道, 采用壳体单元 (shell) 模拟等代层, 采用放射状单元 (radcylinder) 模拟隧道周边土体, 采用六面体单元 (brick) 模拟各土层, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 中特有的结构衬砌单元模拟钢筋混凝土衬砌<sup>[2]</sup>.

收稿日期: 2009-06-13

作者简介: 万战胜 (1982-), 男 (汉族), 博士生.

建立坐标系符合右手螺旋法则， $z$ 轴向上， $y$ 轴指向隧道开挖前进方向，隧道中心点为坐标原点，模型单元数为 93 960，结构单元数为 7 600。

所建模型网格见图 1，模型侧面和底面取位移边界条件，侧面限制水平位移，底面固定，限制水平和垂直位移，模型上表面为地表，取为自由边界，边界条件见图 2。为便于对模拟结果进行分析比较，取隧道纵轴上距模型起始端 30 m 处为观测点（如图 3），并设观测点为坐标原点（ $x=0, y=0, z=0$ ），研究中所涉及的距离、位置均为与观测点的相对距离、相对位置<sup>[3]</sup>。

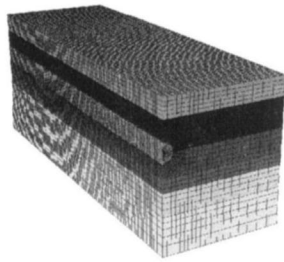


图 1 盾构隧道模型网格  
Fig. 1 Grid model of shield tunnel

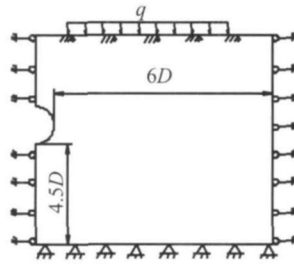


图 2 模型横截面示意图  
Fig. 2 Sketch map of model cross-section

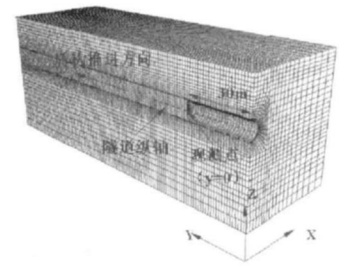


图 3 观测点示意图  
Fig. 3 Sketch map of observation points

### 3 等代层不同时期力学参数的设定

#### 3.1 等代层的设定

目前研究工作中对盾构掘进过程进行数值模拟时，经常将盾尾空隙及其沿隧道径向向外延伸一定范围内的土体考虑为一个闭合圈层，称为等代层。通过改变等代层的物理力学参数，可以较为真实地模拟壁后注浆中注浆体物理力学性质的变化过程<sup>[4-5]</sup>。模拟中对壁后注浆进行数值模拟时，将等代层分为 2 层，内层为盾尾空隙的理论值，厚度为 7 cm，外层为浆液渗入尾隙周围土体从而对其进行加固的影响范围，厚度为 30 cm（见图 4）。

#### 3.2 注浆浆液长期强度对地表沉降的影响研究

浆液长期强度通常指养护 28 d，浆液完全硬化后的抗压强度。对于单液型浆液，经验值为 1 ~ 2 MPa，对于用水玻璃作硬化剂的双液型浆液，认为其长期强度更高，通常可达到 3 MPa，本文分别取长期强度为 2 MPa 和 3 MPa，相应各项力学参数见表 1，对等代层的参数取值，根据隧道实际施工过程中现场量测的地层位移资料运用位移反分析方法借助 ANSYS 有限元程序获取，换算的各项力学参数见表 2。

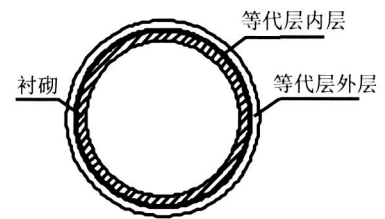


图 4 等代层内外层示意图  
Fig. 4 Sketch map of generation and outside layer for analogue layer

表 1 浆液长期力学参数

Tab. 1 Long-term mechanical parameters of serous fluid

序号	抗压强度 $\sigma_c$ / MPa	应变 $\epsilon_c$ / %	泊松比 $\mu$	弹性模量 $E$ / MPa	体积模量 $B$ / MPa	剪切模量 $G$ / MPa
1	2	1	0.25	200	133	80
2	3	1	0.25	300	200	120

表 2 等代层外层长期力学参数

Tab. 2 The long-term mechanical parameters for the outer layer of analogue layer

序号	泊松比 $\mu$	压缩模量 $E_s$ / MPa	变形模量 $E$ / MPa	体积模量 $K$ / MPa	剪切模量 $G$ / MPa
1	0.2	53.3	48	26.6	20
2	0.2	66.7	60	33.3	25

盾构施工引起地表沉降的大小即与地层情况、地下水、隧道的埋深及截面特性等客观因素相关，也与注浆施工等人为因素相关，地表沉降实测值反映了诸多因素对沉降影响的综合效果，监测中为分离出不同长期

强度注浆液对地表沉降的影响效果,选用地质和施工情况相同的试验段进行不同长期强度注浆液的地表沉降对比实测,图5为取表1浆液长期强度值进行数值模拟所得30m处地表沉降曲线,并与实测曲线进行比较,对结果进行分析,得到如下结论:

1) 长期强度分别取2MPa和3MPa,模拟所得地表沉降曲线与实测曲线都比较符合.上海地铁2号线采用的是单液型浆液,因此,将单液型浆液的长期强度定为1~2MPa是合适的,而且,其现场长期强度值可能更高一些,比如达到2.5MPa.

2) 长期强度分别取2MPa和3MPa,模拟所得地表沉降曲线比较接近,开挖后10d内(即如图盾构推进至25m内),曲线上相对应沉降值之差均在0.5mm左右,之后至开挖后24d(即如图盾构推进至60m),相对应沉降值之差不到2mm.

3) 开挖后15d左右(即如图盾构推进至40m处),2条曲线上相对应的沉降值之差开始出现较快增长的情况.对应于40m、50m和60m的沉降值之差分别为0.75mm、1.43mm和1.86mm,2条曲线也由大致平行变为较快分离,这说明浆液长期强度对地表沉降的影响在开挖30d之后才开始逐渐显现.

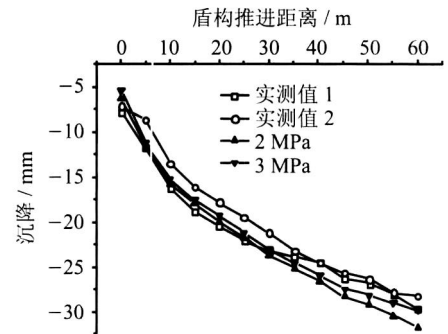


图5 采用不同长期强度模拟所得观测点处地表沉降曲线

Fig. 5 The surface settlement simulation curve of observation points used different long-term strength

### 3.3 注浆浆液时间-强度变化曲线对地表沉降的影响研究

壁后注浆后浆液经历凝胶-固结的过程,其抗压强度值也在不断发生变化,那么浆液强度随时间变化的特征曲线必然会对地层沉降产生影响.目前,关于盾构注浆浆液时间-强度变化曲线的文献报导比较少,而与注浆浆液接近的采用LW水溶性聚氨酯化学灌浆材料的水泥类浆液在地基加固处理中已有多年的使用历史,施工资料丰富.本文以LW浆液的时间-强度变化曲线为参考,取单液缓凝型浆液的早期强度和长期强度,设置3条如图6所示的时间-强度变化曲线(各曲线强度变化数值见表3),以此研究注浆体时间-强度变化曲线对地表沉降的影响<sup>[6-7]</sup>.

表3 3组浆液强度变化值

Tab. 3 The change values of intensity in 3 group serous fluid

序号	抗压强度 $\sigma_{e1}$ / MPa	抗压强度 $\sigma_{e2}$ / MPa	抗压强度 $\sigma_{e3}$ / MPa
1	0.05	0.05	0.05
2	0.15	0.1	0.3
3	0.25	0.12	0.8
4	0.6	0.3	1.2
5	0.8	0.38	1.6
6	2	2	2

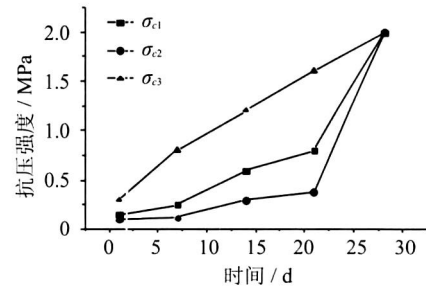


图6 浆液强度变化曲线

Fig. 6 Serous fluid intensity curve

通过模拟计算,由采用不同浆液时间-强度变化曲线进行模拟所得观测点处地表沉降曲线(图7),可得如下结论:

1) 采用图6所示2条不同浆液时间-强度变化曲线 $\sigma_{e1}$ 、 $\sigma_{e2}$ ,模拟所得地表沉降值相差很小,图7上对应同一推进距离处的沉降值之差平均小于0.5mm.对比2条时间-强度变化曲线,20d之前的强度值 $\sigma_{e2}$ 虽然较 $\sigma_{e1}$ 明显减小,但是强度增长方式基本相同,都是在前20d时间内增长较缓慢,增长速度较低,后8d时间突然加速,出现一个跳跃,这说明在浆液早期强度和长期强度不变的情况下,强度增长方式基本相同的情况下,单纯存在强度值的差别,对地表沉降影响很小.

2) 采用图6中浆液时间-强度变化曲线 $\sigma_{e3}$ 模拟所得地表沉降曲线较 $\sigma_{e1}$ 、 $\sigma_{e2}$ 曲线差别明显,其最大沉降值为30.03mm,而 $\sigma_{e1}$ 曲线最大沉降为31.66mm,二者相差1.6mm. $\sigma_{e3}$ 曲线上抗压强度大致呈线性增长,这说明浆液强度线性增长方式较 $\sigma_{e1}$ 、 $\sigma_{e2}$ 曲线上强度由平缓突然增大式的增长方式能够更好地控制地表沉降.

### 4 结论

依据盾构隧道壁后注浆浆液（主要是单液缓凝型浆液）长期强度的实验数据及工程经验取值，利用数值模拟方法，研究了注浆体长期强度和时间-强度变化曲线对地表沉降的影响，得到以下一些规律：

- 1) 浆液长期强度对地表沉降的影响在开挖后 30 d 内不如早期强度那么明显，之后长期强度对后续沉降的影响才逐渐显现。
- 2) 在浆液长期强度不变的情况下，强度增长方式不变，单纯改变强度值，对地表沉降的影响很小，浆液强度线性增长方式较由平缓突然增大式的增长方式能够更好地控制地表沉降。

当前对于各种注浆浆液强度的试验情况报道较少，相关数据较难找到，因此，对浆液不同时期强度取值影响地层沉降的研究需要在更大的范围内对其进行进一步监测和模拟研究。

### 参考文献：

[1] 张凤翔, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. 3-5 .  
 [2] Itasca Consulting Group Inc. FLAC<sup>3D</sup> User Manuals Version 2.1 [Z]. Minneapolis, 2002.  
 [3] 吴兆宇. 上海地铁 10 号线盾构监控技术 [C] //2003 上海国际隧道工程研讨会论文集. 上海: 同济大学出版社, 2003 : 376-381 .  
 [4] 刘波, 陶龙光, 叶圣国. 地铁隧道施工诱发地表变形预测与反分析系统研究 [C] //全国第九届土力学与岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003 : 1346-1349 .  
 [5] 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 (2) : 388-392 .  
 [6] 丁文其, 杨德林, 朱合华. 盾构隧道施工中材料形态的模拟 [J]. 同济大学学报, 1999, 27 (4) : 468  
 [7] 朱合华, 丁文其. 盾构隧道施工过程模拟分析 [J]. 岩石力学与工程学报. 1999, 18 (4) : 860-864 .

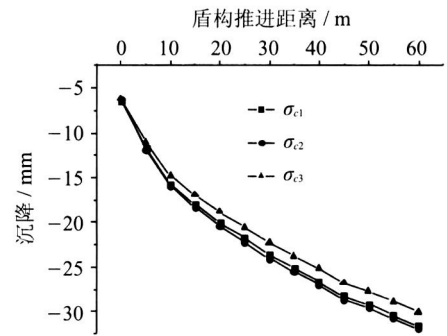


图 7 采用不同浆液时间-强度变化曲线进行模拟所得观测点处地表沉降曲线  
 Fig. 7 The surface settlement curve of observation point used the different serous time-intensity curve to

[责任编辑 杨 屹]

(上接第 104 页)

### 4 结论

- 1) 舟桥系统在移动简谐荷载作用下 1/3 次亚谐共振的振幅随着阻尼比、温差的增大而减小，随着荷载幅值的增大而增大，说明温差和阻尼对系统 1/3 次亚谐共振具有抑制作用。
- 2) 对于一组固定的参数，有一个荷载范围、最小温差值、最大阻尼值，系统荷载在这一范围内时，才会发生 1/3 次亚谐共振，否则系统就不会发生 1/3 次亚谐共振。
- 3) 系统的幅频响应曲线、振幅-荷载响应曲线、振幅-温差响应曲线、振幅-阻尼比响应曲线均具有多解。
- 4) 速度反馈增益能有效减小 1/3 次亚谐共振幅频响应曲线的幅值和共振区域的大小，对于荷载、温差和阻尼对 1/3 次亚谐共振的影响也有很好的控制作用。

### 参考文献：

[1] 张军, 徐小敏, 刘俊. 带式舟桥动力响应的解析研究 [J]. 振动与冲击, 2006, 10, 25 (S) : 833-835 .  
 [2] Wu J S, Shih P Y. Moving-load-induced vibrations of a moored floating bridge [J]. Computers and Structures, 1988, 66 (4) : 435-461 .  
 [3] Seif M S, Inoue Y. Dynamic analysis of floating bridges [J]. Marine Structures, 1998, 11 (1-2) : 29-46 .  
 [4] 胡海岩. 应用非线性动力学 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000 .  
 [5] 彭震, 杨志安. Winkler地基梁在温度场中受简谐激励 3 次超谐共振分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 10, 26 (5) : 239-242 .

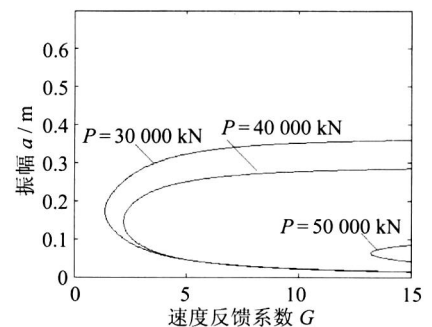


图 11 不同荷载振幅-速度反馈响应曲线  
 Fig. 11 Amplitude- velocity feedback gain response curves for different Load

[责任编辑 杨 屹]