

盾构过富水砂层对地表建筑物影响的研究

刘国楠, 张远荣, 肖文海

(中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 广东 深圳 518034)

摘要:结合深圳地铁2号线盾构过富水砂层施工实际,考虑流-固耦合水土本构关系,用FLAC3D软件建立了盾构施工数值分析模型。计算结果与工程实测数据对比验证了数值模型的合理性。进一步研究了盾构过富水砂层对地表不同位置建筑的影响:建筑物基础在隧道正上方时产生沉降最大且较均匀,水平位移最小;盾构机开挖下穿时建筑物差异沉降最大,建筑物倾向盾构开挖方向;建筑物基础横向上离隧道中心一倍隧道埋深时,建筑物水平移动最大,易受剪切破坏,倾向垂直盾构开挖方向,周边地表沉降差最大;建筑物离隧道中心横向距离超过两倍隧道埋深时,盾构开挖对建筑物基础沉降的影响较小,建筑物沉降与其周边地表沉降较均匀。

关键词: 盾构; 富水砂层; FLAC3D; 建筑物影响; 沉降

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)03-0243-06

Influence of Shield Tunneling on the Buildings above in Saturated Sandy Stratum Area

LIU Guo-nan, ZHANG Yuan-rong, XIAO Wen-hai

(Shenzhen Research and Design Institute, China Academy of Railway Sciences, Guangdong Shenzhen 518034, China)

Abstract: A numerical model of shield tunneling construction in the case of line 2 of Shenzhen metro with saturated sandy stratum condition is established using FLAC3D program, considering the fluid-solid interaction constitutive relation. By comparison between the calculated subsidences caused by shield tunneling at saturated sandy stratum and observed results, it is confirmed that the numerical model is rational. A group of analyses for influence of the shield tunneling on the buildings above are taken. The result shows that the maximum settlement and minimum horizontal displacement occur as building lays above tunnel center, in the case the differential settlement of building is the biggest and building inclines to the direction of shield tunneling. The maximum horizontal displacement of building and the differential settlement of ground appear when the building is departed from the tunnel as one time of tunnel depth, in the case the building inclines to the vertical direction of the tunnel. When the building is departed from the tunnel as more than two times of tunnel depth, the building will be less influenced, the numerical simulation result shows that the settlements of building and ground are even and small.

Key words: Shield; Saturated sandy stratum; FLAC3D; Influence on building; Settlement

0 前言

在沿海、沿江地区常遇到地下水量丰富且强透水性的砂层,盾构开挖会引起砂层孔隙水快速渗透

和砂土屈服变形导致地面沉降。当地面有建筑物时,建筑物基础下方的砂层受扰动屈服后,荷载作用促使土体孔压升高,进一步加快孔隙水的渗流,对建

筑物地基的影响问题更为突出。研究富水砂层中的盾构开挖与地面建筑物沉降的关系,有助于在工程中合理选取盾构施工参数,指导盾构机施工操作,确定合理的地层预加固方案。

本文结合深圳地铁2号线某工点工程实际,采用流固耦合水土模型和FLAC3D程序,用数值模拟的方法分析研究富水砂层盾构施工对地面建筑物的影响问题。取得的结果可指导预加固处理设计和盾构施工。

1 工程实例

深圳地铁2号线东角头站至海上世界站区间,双线隧道长约1600 m,场地原属于海漫滩地貌,后填海形成陆地,现为城市闹市区。该区间下有厚度8~10 m的富水粗砂、砾砂层,地下水位在地面下1 m,水量丰富。地面建筑物密集,以天然地基的多层砖混住宅为主。本文选该区间的一段进行盾构施工数值模拟。

隧道为单圆盾构衬砌结构,管片外径6.0 m,厚度0.3 m,环宽1.5 m,衬砌分6块,采用错缝拼装。

本文研究段为地面建筑物重点保护段,布置地面和建筑物沉降监测点如图1所示。

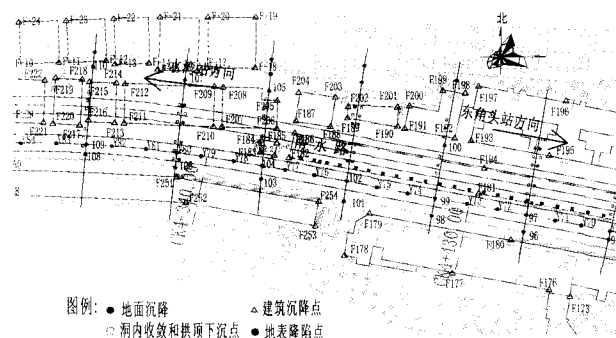


图1 模拟工点平面图

Fig. 1 Layout plane of simulated project.

2 数值模拟方法

2.1 建立数值模型

2.1.1 几何模型

选自东向西里程为ZK4+340 m~+430 m段作为本次数值模拟对象。依据勘察资料,用FLAC3D软件建立场地模型^[1],计算模型尺寸和地层构造如图2所示。定义X方向为横向,Y方向为隧道纵向,Z方向为竖向。

2.1.2 本构模型和结构单元

岩土体实体单元采用摩尔-库伦模型;盾构开

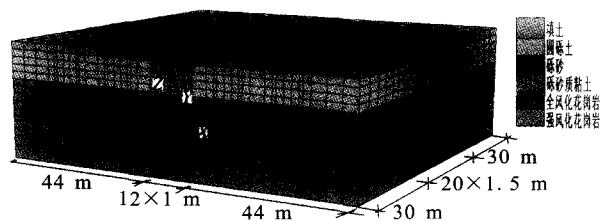


图2 计算模型

Fig. 2 Computational model.

挖的土体单元采用空模型;盾构钢壳采用三维壳体单元;预制混凝土衬砌管片采用衬砌单元;间隙单元采用软单元来模拟,其弹性模量定义为10 kPa;浆液单元弹性模量随凝固时间增加取值从1 MPa增至40 MPa。

分析采用有效应力法,并考虑水土的流-固相互作用。假定孔隙水渗流符合达西定律,可以得出孔隙水渗流的连续性表达式^[2-3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 p \quad (1)$$

式中: k 为土的渗透系数; t 为时间; γ_w 为水的容重。结合土体运动平衡关系、变形几何关系和有效应力下的本构关系可推导出位移和孔压表示的渗流固结协调方程式:

$$\left. \begin{aligned} & -\frac{G}{1-2\nu} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right) - \\ & G \nabla^2 u + \frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{du}{dt} \\ & -\frac{G}{1-2\nu} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right) - \\ & G \nabla^2 v + \frac{\partial p}{\partial y} = \rho \frac{dv}{dt} \\ & -\frac{G}{1-2\nu} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \\ & G \nabla^2 w + \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = \rho \frac{dw}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: G 为砂土的剪切模量; ν 为泊松比; p 为孔隙水压力; ρ 为与饱和度相关的砂土密度; u 、 v 和 w 为单元位移函数; $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 和 $\dot{w}$ 为单元位移速率函数。

2.1.3 边界条件和初始条件

模型底面为不透水边界且所有节点固定;模型左侧和右侧约束水平方向运动,正面和背面约束纵向运动;所有侧面设定为孔压不变的透水边界。场地初始孔隙水压地下1 m为零,以下为静水压力。在模型正上方设定有一座7层楼高的建筑物,基础面积6 m×21 m。基础附近应力 7.5×10^4 Pa。

2.1.4 材料参数

盾构开挖数值模拟部分材料采用的力学参数如 表 1 所示。

表 1 模拟计算参数

岩土名称	孔隙率 $n/\%$	天然含水 量 $w/\%$	渗透系数 $k/[\text{m} \cdot \text{d}^{-1}]$	抗剪强度		弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	饱和密度 $\rho_{\text{sat}}/[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	抗拉强度 T/kPa	膨胀角 $\psi/^\circ$
				内摩擦角 $\varphi/^\circ$	粘聚力 C/kPa					
素填土	33		2	5	10	18	0.3	2.1	0.1	0
圆砾	35	14.7	20	25	1	55	0.35	2.086	0	5
砾砂	43	29.3	15	30	1	65	0.38	1.931	0	5
砂质粘性土	45	32.2	2.70	20	22	88	0.29	1.874	1	0
强风化花岗岩	47	28.6	2.69	24	26	100	0.28	1.878	10	0
中风化花岗岩	46	21.6	2.70	30	15	200	0.3	2.01	800	0

2.2 场地初始模型

在上述模型的基础上,求解出场地初始模型,此状态代表盾构施工前的孔压和场地应力状态。场地地层的初始孔压为静水压力,从地下 1 m 处 0 Pa 线性增大至 3.1×10^5 Pa。图 3 是场地初始模型中心横剖面有效应力分布,在建筑基础下方存在附加应力扩散形式。

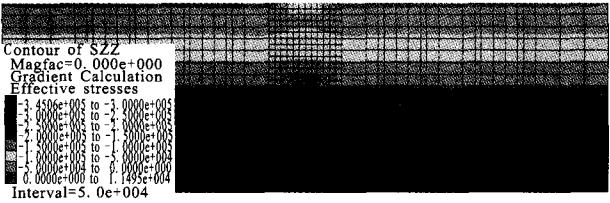


图 3 中心横剖面有效应力

Fig. 3 Effective stress distribution on the cross profile of model center.

2.3 隧道开挖模拟

对盾构开挖施工过程采取分节的方式模拟计算,每节开挖并进行流-固耦合计算后,通过相关单元的变更替换来模拟盾构机推进过程。参考盾构开挖相关技术见文献[4],本文模拟盾构施工时对不同位置单元节点施加的主要荷载如图 4、图 5 所示。

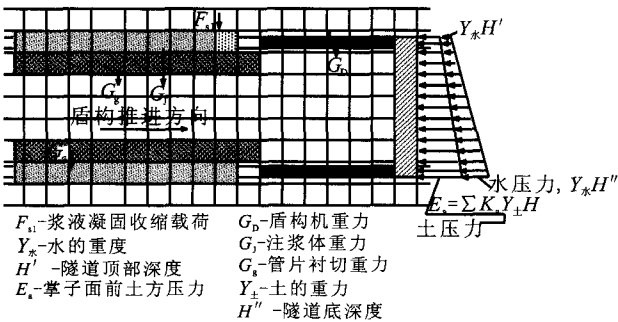


图 4 盾构机荷载示意图

Fig. 4 Sketch of load on the shield.

2.4 模拟结果对比

图 6 标识了地表沉降计算点、实测点与孔压计算点位置,其中 D1、D2、D3 为地表建筑物计算沉降

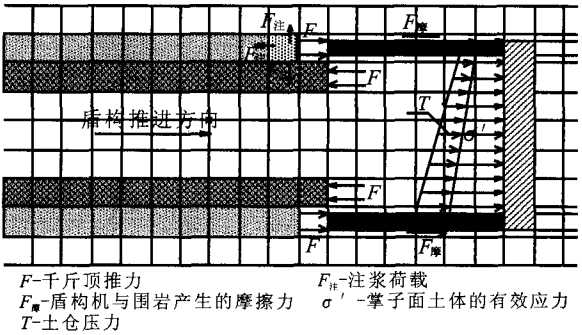


图 5 盾构机施加荷载示意图

Fig. 5 Sketch of shield applied load.

点;H1、H2、H3 为地面沉降计算点;106、107 为地表建筑观测点;Y77、Y78 为地面沉降实测点;A、B、C、E、F、G 为孔压计算点。

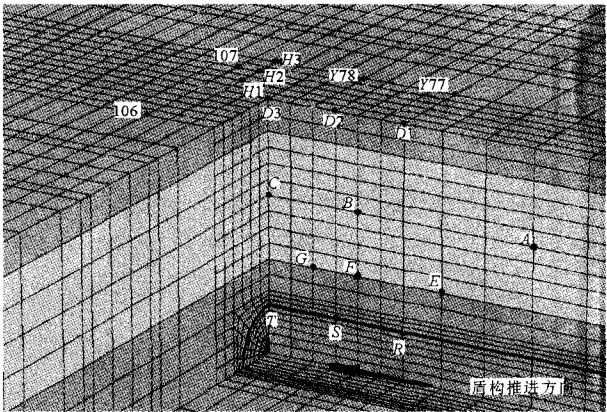


图 6 实测点与计算点位置

Fig. 6 Position of measuring points and calculation points.

D2 点在盾构施工过程中的沉降发展过程如图 7 中的虚线所示。盾构推进时,该点先隆起,隆起量约 10 mm;盾构开挖通过时地表开始产生沉降,沉降量约 20~30 mm;盾构离开后,地表沉降趋于稳定。该变化规律与地面实测的沉降基本一致(图 7 中实线)。上述对比说明,本文采用的盾构施工对地面沉降影响的数值模拟方法合理可信。

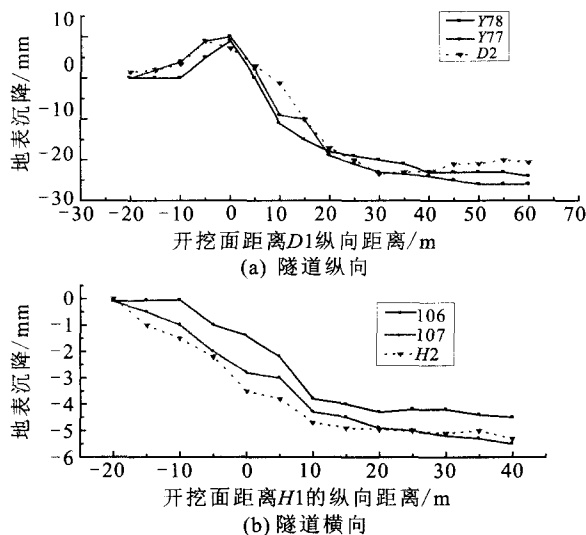


图 7 隧道计算与实测沉降

Fig. 7 Calculated and observed subsidences on the axis and the across section of the tunnel.

纵剖面上深度 6 m 的 B 点和深度为 10 m 的 F 点计算孔压变化曲线如图 8 所示。盾构推进时,掌子面孔隙水压力先上升,盾构完全通过时,孔隙水压力消散,隧道管片安装后,孔隙水压力逐渐恢复且趋于稳定。靠隧道拱顶位置越近,孔压变化越大。

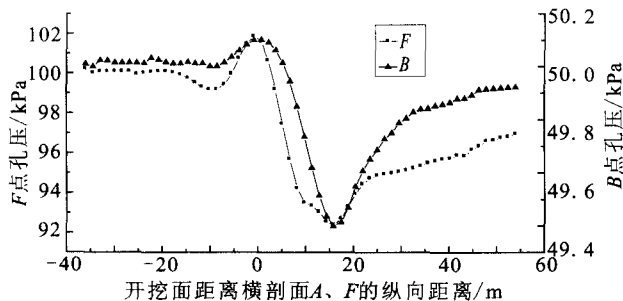


图 8 隧道纵剖面 B 和 F 点孔隙水压力消散变化曲线

Fig. 8 Calculated pore pressures curves at point B and F on the axis section of the tunnel.

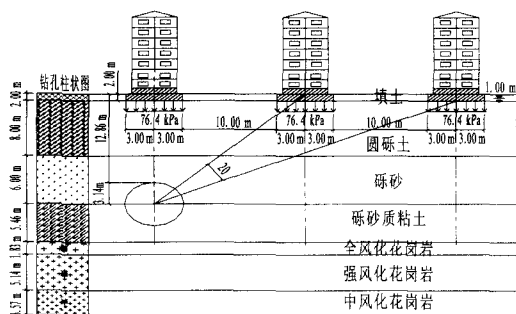
3 对地表建筑物的影响分析

按图 9 所示的天然地基建建筑物位于隧道纵向中心线上方、距隧道一倍埋深、距隧道二倍埋深位置三种工况,分别进行盾构施工影响数值模拟分析。

取模型中间 1/3 作为计算域,在计算时选取部分观测点如图 10 所示。

3.1 工况一

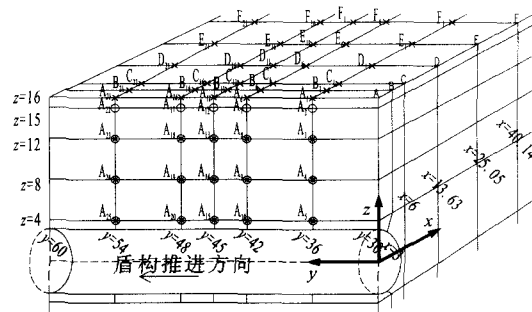
盾构开挖时隧道中心纵剖面孔压分布如图 11 所示。盾构顶推作用使得掌子面前方土体孔压升



注:工况一:当且仅当建筑物基础中心线与隧道中心线水平距离为0时
工况二:当且仅当建筑物基础中心线与隧道中心线水平距离是隧道深度的一倍时
工况三:当且仅当建筑物基础中心线与隧道中心线水平距离是隧道深度的两倍时

图 9 三种计算工况建筑物位置示意图

Fig. 9 Position Sketch of three buildings.



图例: × 沉降记录点 注: x=3, 6, 13, 63, 25, 05, 40, 14 的各纵剖面上
○ 孔压记录点 与 x=0 的纵剖面上, 对应记录点记录相应信息
所有数据单位: 米

图 10 计算模型观测点示意图

Fig. 10 Sketch of measuring points of model.

高,掌子面排水导致盾构上方拱顶土体孔压下降。

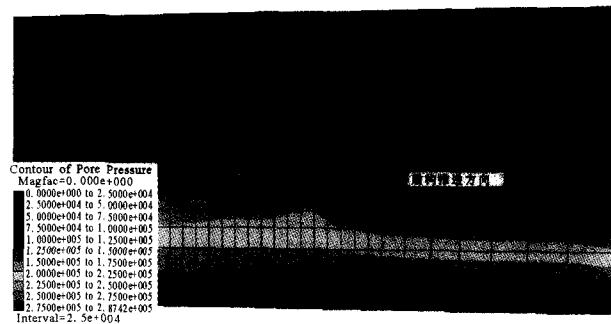


图 11 盾构开挖时隧道中心纵剖面的孔压分布图

Fig. 11 Pore pressure distribution on the axis profile of the tunnel.

隧道中心纵剖面地表各点沉降变化曲线如图 12 所示,从观测点 A6、A11 和 A16 沉降变化曲线可以看出开挖面到达 $Y=45$ m 处时,建筑物基础先微倾斜;继续开挖到过 72 小时后,即基础正下方隧道挖掘完成后,建筑物基础沉降速率加大;经过 120 个小时,即隧道挖掘结束后,两端沉降速率变缓,沉降值相近。

隧道开挖后地层产生变形的原因主要有以下几方面:一是隧道开挖后隧道围岩应力得到一定的释放,产生径向收缩,这也是隧道开挖地层损失的重要原因;二是在富水砂层中由于隧道开挖产生开挖失水,砂土中孔隙水压力减小,有效应力增大,导致土骨架被压缩,发生整体沉降变形;三是隧道开挖对隧道周边的土体产生扰动,导致土体承载力下降,土体发生膨胀、挤密、甚至流动等变形。

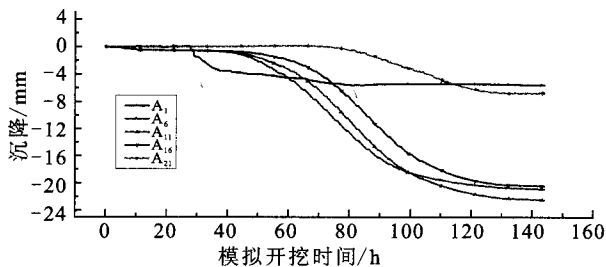


图 12 隧道中心纵剖面地表各点沉降曲线

Fig. 12 Ground settlement curves of some calculation points on the ground surface of axis profile of the tunnel.

如图 13 所示,受建筑物基础附加应力的影响,由于基础下方土体受到扰动和外荷载共同作用导致基础沉降较大,其沉降量是周边地面沉降量的 7~10 倍。基础下沉和地表土体向中间靠拢。

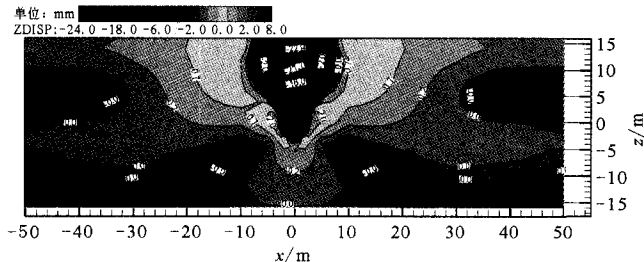


图 13 模型中心横剖面竖向位移等值线图

Fig. 13 Z-disp. contours in cross section of the tunnel.

3.2 工况二

工况二建筑物基础位置在隧道右侧斜上方 45° 方向上,该方向恰是隧道开挖后围岩剪应力主方向,另外基础荷载产生的剪应力主方向在左下方 45° 方向上。两个荷载的剪应力主方向相向使基础与隧道之间的土体容易受剪切破坏,塑性破坏区域甚至贯通。图 14 所示该部位的土体横向和竖向变形较大,由于该部位土体向基础左下方移动,势必挤压基础左侧土体和隧道正上方土体的向上隆起,这些部位土体的隆起值比右边土体的隆起值大。因基础偏离隧道,最大沉降量减小。

3.3 工况三

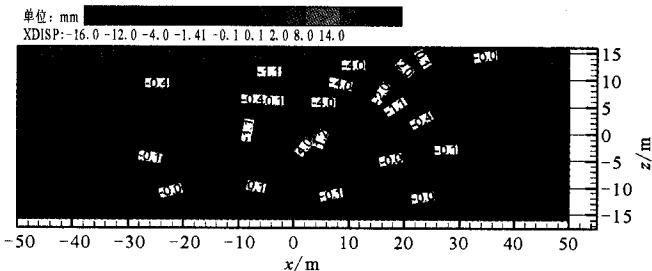


图 14 模型中心横剖面横向位移平面等值线图

Fig. 14 X-disp. contours in the cross section of the tunnel.

由于工况三的基础偏离隧道较远,相比工况一与工况二而言,基础下方土体受隧道开挖影响较小,基础附近孔压变化较小。基础下方土体附近的横向位移值比工况一大,比工况二小。如图 15 所示计算结果表明基础竖向最大沉降值约 5 mm。

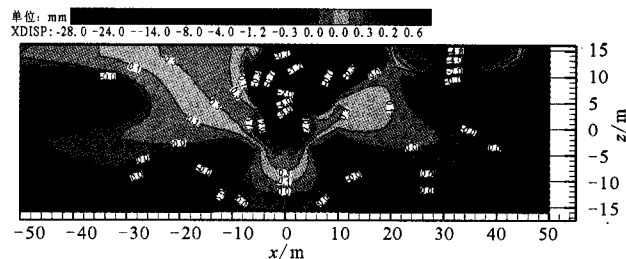


图 15 模型中心横剖面竖向位移平面等值线图

Fig. 15 Z-disp. contours in the cross section of the tunnel.

3.4 三种工况下影响比较分析

三种工况下,竖向位移分布规律的共同点是基础下方土体沉降随深度增加沉降逐渐减小,基础中心的沉降比基础边缘的沉降大。

如图 16 所示,工况一、工况二及工况三的基础中心最大沉降分别为 22.9 mm、7.01 mm 和 5.3 mm。工况一基础沉降大,基础两侧附近土体隆起值也较大,工况二的基础左侧附近土体的隆起值比右侧附近土体的隆起值大 2~3 mm。由于工况三的基础中心离隧道中心线较远,盾构开挖对该工况基础两侧土体影响较小,基础两侧土体隆起值相近,量值较小。

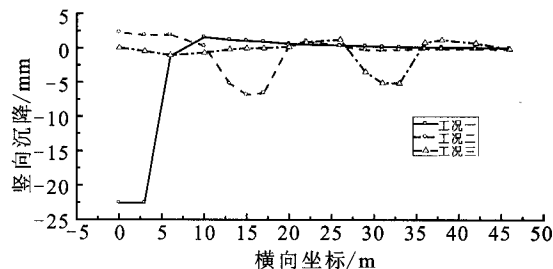


图 16 隧道横剖面上地表沉降曲线

Fig. 16 Ground settlements in the cross section of the tunnel.

如图 17 所示,工况一基础中心在隧道中心线的位置上,场地条件对称,横向位移量值很小;工况二的基础在隧道右上斜 45° 方向上,基础横向位移较大,方向指向隧道中心纵剖面;工况三的基础中心线远离隧道中心线,横向位移介于工况一和工况二之间。

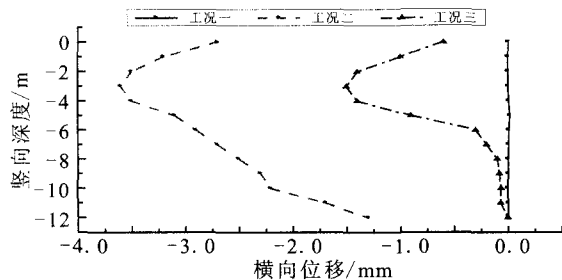


图 17 基础中心下方地层横向位移沿深度分布图

Fig. 17 Lateral displacement curves with depth under the foundation.

如图 18 所示,工况一基础下方竖向沉降近 23 mm,从地下 6 m 开始减小。从地下 10 m 到 12 m,由于土体受隧道开挖脱空的影响较大,土体竖向位移值逐渐增大。工况二和工况三的基础下方竖向位移从基础底部开始逐渐减小,到地下 5 m 处竖向沉降基本稳定在 2 mm 以内。

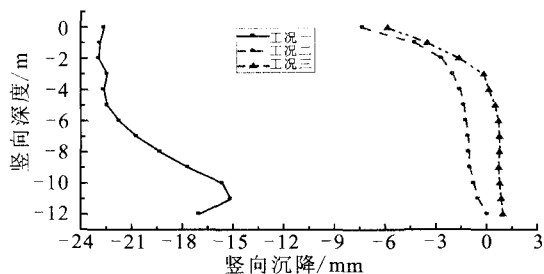


图 18 基础中心下方地层竖向位移沿深度分布图

Fig. 18 Vertical displacement curves with depth under the foundation.

4 结语

根据深圳地铁 2 号线盾构过富水砂层施工实例,借鉴相关文献[5]盾构数值模拟经验,用 FLAC3D 建立与工程相符的数值模型。在相对隧道的三个典型位置上分别设定同样的建筑物,比对盾构过富水砂层后建筑物受到的影响得到以下结论:

(1) 在富水砂层上的建筑物下穿盾构开挖隧道时,由于砂层的强透水性和易液化的特性,建筑物工后沉降明显,盾构开挖过程重点监测建筑物下方砂层降水和孔压变化,沿开挖方向在建筑物上密集布置差异沉降监测点。

(2) 对于横向偏离隧道中心一倍隧道埋深的建筑物,工后建筑物水平移动最大,易受剪切破坏,盾构开挖下穿时,应加强建筑物在垂直隧道开挖方向上的差异沉降和地表的差异沉降的监测。

(3) 建筑物基础中心离隧道中心横向距离超过两倍隧道埋深时,盾构开挖对建筑影响较小,重点监测建筑物下方砂层降水即可。

[参考文献]

- [1] LAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua User's Guide [M]. Intasca Consulting Group Inc, 2008.
- [2] 陈仲颐 周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [3] FLAC3D Fluid-Mechanical Interacting Manual [M]. Intasca Consulting Group Linc, 2008.
- [4] 陈馈,洪开荣,吴学松. 盾构施工技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2009.
- [5] 张海波,刘国楠,高俊合. 盾构近距离掘进对桥梁桩基的影响分析[J]. 铁道建筑, 2007, 08: 37-40.