

盾构侧穿邻近古建筑的施工影响分析及 保护措施加固效果的研究

吴昌将^{1,2}, 张子新^{1*}, 丁文其¹, 张登雨¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海建筑设计研究院有限公司, 上海 200041)

摘 要: 结合上海地铁 11 号线侧穿古建筑的实际工程, 采用数值计算和现场实测相结合的方法, 对国内最新型的 MJS 桩基施工预加固与新建隧道侧穿引起的邻近古建筑的沉降进行了深入研究。整个施工力学的全过程对建筑物的影响分为桩基施工扰动阶段、上行线穿越阶段和下行线穿越阶段 3 个阶段。其中先期桩基施工扰动的影响相对显著, 但由于 MJS 桩的保护作用, 上行线穿越影响次之, 下行线穿越影响最小。计算结果表明, 由于桩基施工的预加固与隧道左侧建筑物的存在, 使得地表的沉降槽与传统的形式有较大区别; 同时, 地表的水平位移分布规律也发生了明显的变化。此外, 由于隔离桩的保护, 大大减少了盾构掘进对地表以及建筑物沉降的影响。现场监测与数值计算的结果对比分析也表明两者所反映的规律较一致, 其数值差别较小, 进而验证了数值计算方法的准确性与合理性。

关键词: MJS 桩基; 侧穿; 古建筑; 沉降; 现场实测; 数值模拟

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2012)01 - 0158 - 08

作者简介: 吴昌将(1984 -), 男, 浙江温州人, 工程师, 博士学位, 从事地下结构工程设计与研究。Email: wcj732@sohu.com。

Influences of construction of side-crossing shield tunnel on adjacent ancient architectures and reinforcement effect of protection measures

WU Chang-jiang^{1,2}, ZHANG Zi-xin¹, DING Wen-qi¹, ZHANG Deng-yu¹

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Shanghai 200041, China)

Abstract: Based on the side-crossing construction of Shanghai Metro line No. 11 close to the ancient architectures, numerical simulation and field monitoring are employed to study the settlement of the adjacent ancient architectures induced by the construction of MJS piles and the side-crossing of newly shield-driven tunnel. The influences on the buildings during the whole construction process can be divided into three stages: disturbance of pre-reinforced piles and crossing of up and down lines. The stage of pre-construction of MJS piles has the most remarkable impact. Due to the protection of MJS piles, the stages of crossing of up and down lines have the second largest and the smallest impacts, respectively. In addition, because of the construction of piles and the existing buildings at the left side of the tunnel, the settlement trough differs from the traditional one, and the distribution of horizontal displacement obviously changes. Moreover, due to the protection of isolation piles, the settlement produced by shield driving greatly decreases. Finally, the field monitoring data agree with the numerical results. The accuracy and rationality of the numerical simulation method is validated.

Key words: MJS pile; side-crossing; ancient architecture; settlement; field monitoring; numerical simulation

0 引 言

随着中国轨道交通建设的纵深发展, 地铁盾构穿越城市密集区的机会和范围越来越大, 且沿线一般存在大量地下城市生命线工程和地上敏感建(构)筑物, 盾构已不可避免地需要从其下部或侧边近距离穿越。尤其是在高灵敏度软土地层中的盾构施工对土体产生

的扰动, 会造成较大的地层移动, 引起建筑物基础的不均匀沉降及上部结构的附加变形, 甚至导致建筑物开裂、破坏和倒塌。特别是当穿越悠久而古老的保护

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT1029)

收稿日期: 2010 - 11 - 26

*通讯作者

初始应力形成、土体开挖、开挖面土体应力释放、盾尾注浆压力、注浆层硬化以及衬砌安装等施工过程。针对以上施工过程的各个阶段，对盾构的掘进作了以下简化：①根据地表上的教堂建筑物等超载以及土体自重应力，以模拟土层初始应力场，教堂的木桩基础处于软土层中，年代久远，承载力可能降低，故不考虑木桩基础的模拟；②注浆充填作用采用均质、等厚的等代层和应力释放程度来共同解决，并改变注浆层的刚度参数来模拟不同施工期间的注浆层力学特性；③模拟隧道开挖连续性推进的过程，盾构每推进步长，即每环衬砌步长，而为了减少计算量，本文采用了简化的推进步长，即每步推进 8 环。

2.4 数值计算模型与参数

计算中主要涉及到土层物理力学参数、MJS 桩基参数、管片结构参数、盾构施工参数、以及房屋结构参数。表 1 为依据地质勘察报告提供的地层物理力学计算参数。

根据等效刚度和等效面积原则，将隔离桩基换算成等厚度的隔离墙；同时分段、逐段的变化隔离墙区域的土体参数来反映桩基的施工扰动与桩基施工后的强度增长。参照传统水泥搅拌桩的施工其扰动影响和加固效果，桩基施工扰动阶段隔离桩区域的土体参数取为原来土层的 1/3；在施工完成阶段，即水泥土硬化后，其加固土层的参数取值见表 2。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

土层名称	重度 /(kN·m ⁻³)	压缩 模量 /MPa	泊松 比	c /kPa	φ /(°)
杂填土	18.0	2.00	0.30	7.0	10.0
淤泥质粉质黏土	17.3	2.54	0.32	10.0	16.5
淤泥质黏土	16.7	2.08	0.36	11.0	12.5
黏土	17.5	3.36	0.33	14.0	14.0
粉质黏土	17.9	4.66	0.32	16.0	22.5
粉质黏土	20.0	8.56	0.32	53.0	18.0
粉砂	19.4	12.16	0.32	5.0	37.0

表 2 加固土层、注浆层及衬砌的力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of reinforced soils, grouting layer and lining

名称	厚度 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa
加固土层	1.75	18.0	400	23	1.0
衬砌	0.35	25.0	34.5×10 ³	—	—
注浆层	0.07	25.0	0.9, 4, 400	—	—

隧道采用土压平衡式盾构掘进施工，盾构外径 6.34 m，衬砌外径为 6.20 m，管片结构采用 35 cm 厚度的 C55 混凝土，各环宽度为 1.2 m，注浆层的强度随时间增大而增大，通过对其弹性模量 E 的增大来体现。注浆完成时浆液 E 为 0.9 MPa，1 个开挖步后增大

至 4 MPa，2 个开挖步后增大至 400 MPa。地表教堂的结构及荷载参数^[11]的选取参照房屋检测报告。数值计算模型见图 3。

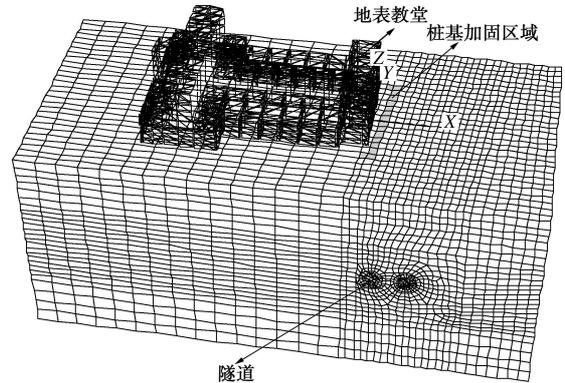


图 3 数值计算模型

Fig. 3 Numerical model

2.5 数值计算结果分析

(1) 地表整体沉降

图 4 为不同施工工况下的地表沉降云图。

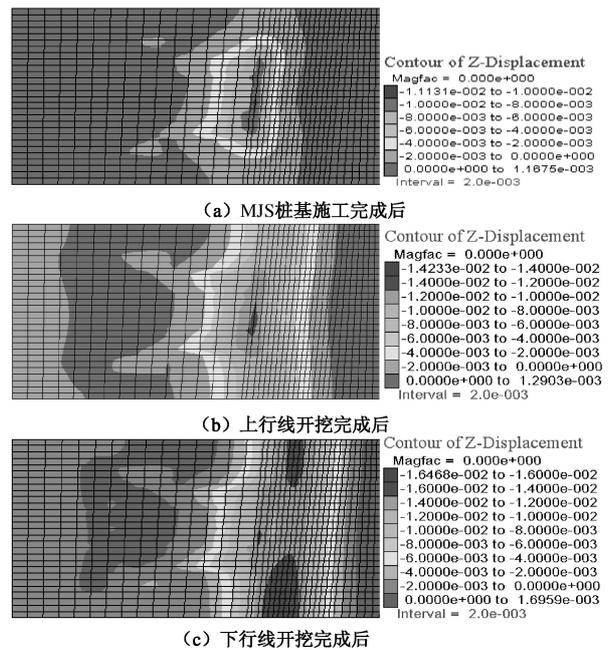


图 4 地表沉降云图

Fig. 4 Ground settlement

由图可知，由于 MJS 桩基的施工扰动，桩基施工处的地层出现较大不同程度的沉降，最大沉降为 11.1 mm，发生在先行施工的桩位处；当上行线隧道开挖后，隔离桩附近的地表沉降增量较少，而离隔离桩较远处地表沉降增量较大；当下行线隧道开挖完成后，隔离桩附近的地表沉降要小于远离桩周的地表沉降。由此可知，MJS 隔离桩的存在，大大减少了隧道推进过程中对教堂附近地表处产生的沉降，使得隧道轴线上方离 MJS 桩基距离近的地表沉降较小，隧道轴线上方远离 MJS 桩基的地表沉降较大，从而减少了盾构

在推进过程中对教堂产生的沉降。因此, MJS 桩基对教堂的隔离保护作用非常明显, 在 MJS 桩基的隔离保护下, 隧道开挖对教堂产生的影响大大的减弱了。MJS 桩基本身的施工虽将会对教堂产生较大的影响, 但相对于通常的高压旋喷桩, 其影响较小。

(2) 横断面位移

为了便于地表变形以及建筑物沉降的分析, 在模型中分别选取 3 个剖面 and 8 个点, 如图 5 所示。其中各个剖面分别经过教堂两侧钟楼的边墙, 而 8 个点均位于钟楼底部承重砖墙的各角点处。下文各曲线中的 xy 坐标参考图 1 中的坐标。图 6~8 分别反映了不同施工工况下的 3 个横断面沉降槽的形状, 以及水平位移分布曲线。

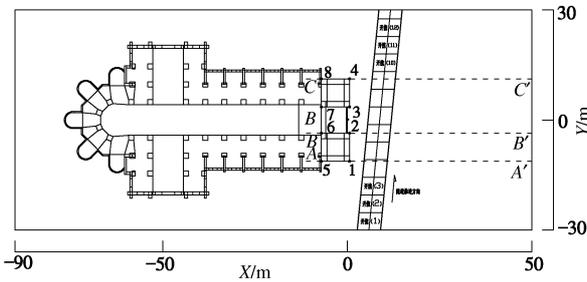


图 5 剖面与监测点位置示意图

Fig. 5 Layout of cross sections and monitoring points

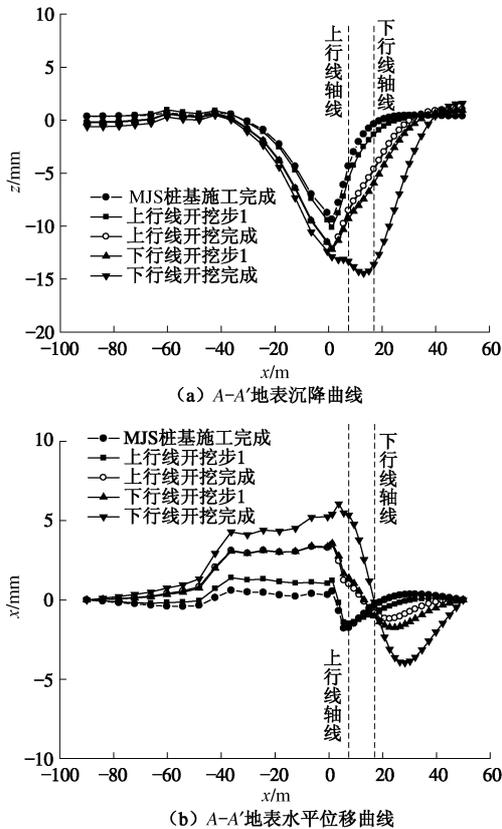
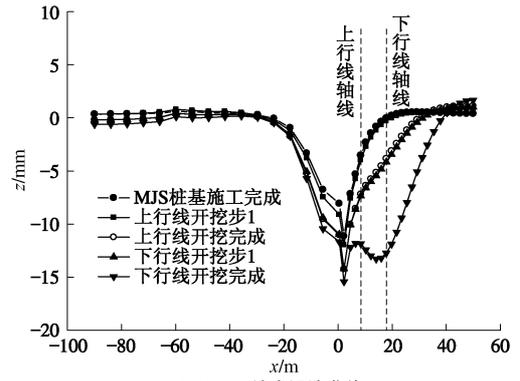
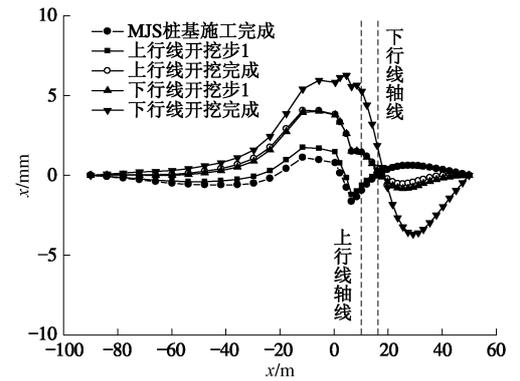


图 6 $A-A'$ 断面地表沉降与水平位移曲线

Fig. 6 Curves of settlement and horizontal displacement of cross section $A-A'$



(a) $B-B'$ 地表沉降曲线



(b) $B-B'$ 地表水平位移曲线

图 7 $B-B'$ 断面地表沉降与水平位移曲线

Fig. 7 Curves of settlement and horizontal displacement of cross section $B-B'$

从各断面的沉降曲线可知, MJS 桩基施工造成的沉降在整个施工过程中占主要部分, 而上下行线隧道开挖引起的沉降则占次要部分。同时, 当 MJS 桩基施工完成或上行线隧道完成开挖后, 各横断面的最大沉降位于桩基施工的地层处; 随着下行线的开挖, 最大沉降逐渐转移至上下行线轴线之间的中间地表处。上行线左侧地表的沉降值基本上要大于下行线隧道右侧地表的沉降值, 尤其是在教堂承重墙底部, 该位置的沉降值要远大于与其对称的在下行线隧道右侧地表点处的沉降值。这主要是因为地表建筑物的存在, 对地基产生偏压作用, 使得隧道左侧的地基应力比右侧地基应力要高, 在土体开挖后, 土体内部受力不平衡, 需要荷载释放进行应力重分布, 而应力较大的土层区域自然会释放更多的荷载, 因此, 左侧会表现出相对更大的沉降, 所形成的各横断面沉降槽与 Peck 沉降槽曲线有较大差异。此外, 同样由于上行线隧道左侧教堂的存在, 两侧的水平位移曲线并未互为反对称, 上行线左侧地表的横断面各点水平位移曲线呈现不规则状, 有别于传统的抛物线形状, 而不受地表超载影响的右侧地表水平位移曲线仍呈抛物线状, 并且在穿越教堂的区间里, 下行线隧道右侧地表的水平位移略大于左侧地表的水平位移。而且, 教堂建筑物

自身具有一定的刚度，当考察的横断面穿过教堂时，隧道开挖引起的水平位移会使教堂整体上会表现出一定的平移，因此，横断面水平位移曲线上有一段的水平位移值基本上相等。

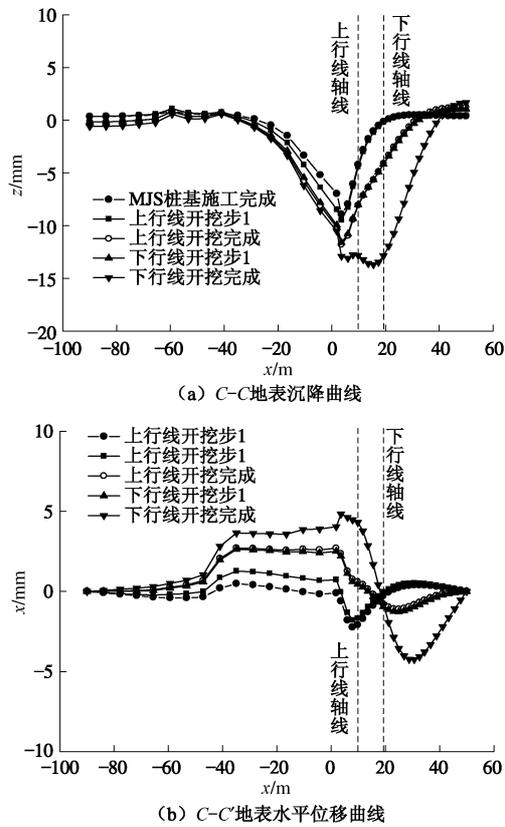


图8 C-C断面地表沉降与水平位移曲线

Fig. 8 Curves of settlement and horizontal displacement of cross section C-C

因此，地表建筑物的偏压作用以及 MJS 桩基的施工对地层的变形分布规律有非常重要的影响。

(3) 纵向地表沉降

同样，可以得到不同开挖荷载步后隧道轴线上、下方纵向地表处的沉降曲线图 9, 10。

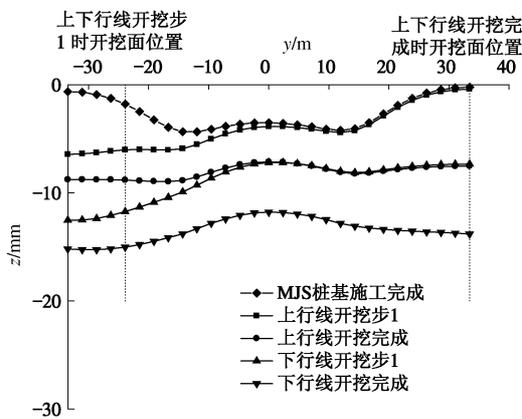


图9 上行线隧道轴线地表沉降曲线

Fig. 9 Curves of ground settlement above tunnel axis of up lines

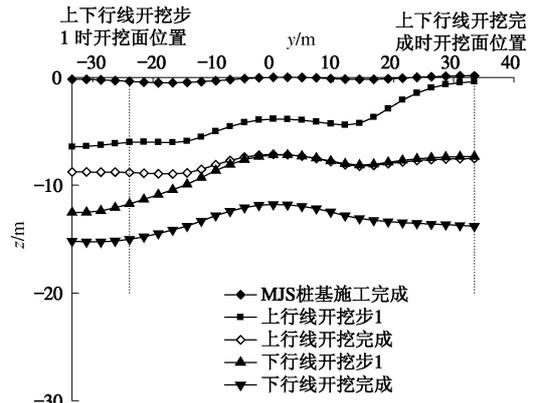


图10 下行线隧道轴线地表沉降曲线

Fig. 10 Curves of ground settlement above tunnel axis of down lines

由各曲线可知，MJS 桩基施工对上行线隧道轴线的地表沉降影响非常大，而对下行线轴线地表的沉降几乎没有影响，这主要是因为各隧道离桩基加固的距离不同所导致的。当下行线盾构掘进完成后，上下行线轴线上方的地表沉降稳定值分别在 14.8 mm 和 15.2 mm。因此，可知上行线隧道轴线的地表沉降主要由桩基施工和隧道开挖共同引起的，而下行线轴线的地表沉降由盾构推进而产生的。

(4) 建筑物沉降

考察教堂主楼两侧钟楼承重墙底部的沉降分析点，并将施工过程的影响分为 6 个区间，其中第 I、II、III 区间为上行线穿越、下行线临近阶段，后三区间为下行线穿越阶段。各监测点的沉降值变化曲线如图 11, 12 所示。

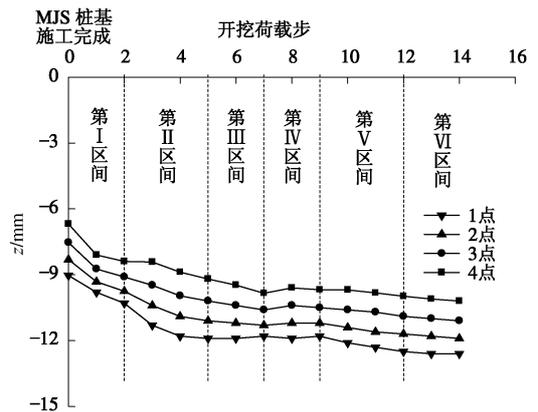


图11 建筑物各点沉降曲线

Fig. 11 Curves of settlement at each point in building

从各曲线来看，MJS 桩基施工完成后造成的沉降大于上下行线隧道开挖产生的沉降；并且离桩基加固区域的距离越近，测点的沉降值就越大。其中，距离隧道最近的 1 点处的沉降受到桩基施工和隧道推进的影响最大，当桩基加固完成后，其沉降约为 9 mm，

隧道开挖完成后, 其沉降稳定在 12.6 mm 左右。这也表明了在上下行线开挖的过程中, MJS 桩基加固对教堂起着明显的隔离保护作用, 大大减少了隧道推进过程中的建筑物沉降, 但是 MJS 桩基的施工期间却对地表建筑物产生的沉降影响也是非常明显的, 因此在桩基施工期间时, 尤为需要注意对建筑物周围土层的扰动影响。

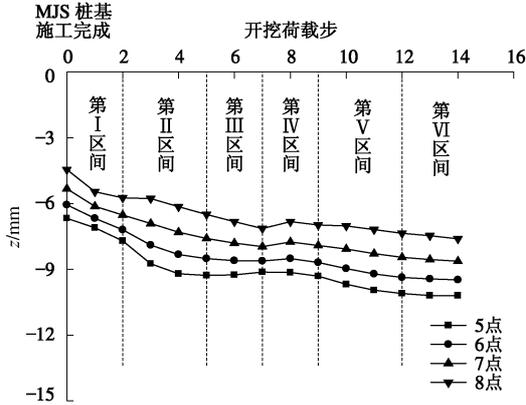


图 12 建筑物各点沉降曲线

Fig. 12 Curves of settlement at each point in building

3 mm 左右 (个别测点除外), 离隧道越远的测点, 沉降变化量越少。③第三阶段, 上行线远离教堂, 下行线穿越教堂, 可认为这期间教堂建筑的沉降基本上是由于下行线穿越施工所引起的。该阶段, 离隧道较远的测点很快进入稳定状态, 而离隧道较近的测点如 F3~F7 仍有少量的沉降变化。同时, 各测点也表明了下行线开挖对地表产生的影响略小于上行线产生的影响。④第四阶段, 上下行线开挖面均已远离教堂, 教堂建筑进入了后期沉降阶段, 该阶段的沉降主要是由于周围地层土体的固结和蠕变引起的, 沉降时间往往持续多年以上。

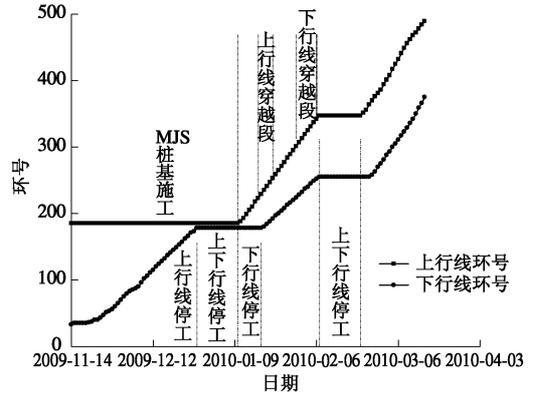


图 13 施工进度图

Fig. 13 Construction schedule

3 现场实测及与数值计算对比分析

3.1 现场实测分析

为了验证前文数值模拟参数选择的合理性及计算结果的准确性, 以及具体地分析实际工程中的桩基施工与盾构推进过程对地表建筑物的影响程度, 根据现场监测的数据进行了实测结果分析。图 13 给出了现场施工的进度情况。根据现场的施工进度情况, 可以将现场施工对徐家汇天主教堂的影响分为 4 阶段: ① MJS 桩基施工阶段对教堂的扰动影响; ② 上行线穿越对教堂的影响; ③ 下行线穿越对教堂的影响; ④ 施工完成后工后长期的沉降阶段。本文主要侧重分析前 3 个阶段的。

各测点沉降曲线变化如图 14 所示。结合实际施工工况对建筑物的沉降影响, 仍可将各测点的沉降发展曲线分为 4 个阶段: ① 第一阶段, 上下行线均停工, MJS 桩基施工, 期间的沉降由 MJS 桩基施工扰动引起的。该阶段的沉降速率是最为明显, 尤其是距离桩基最近的测点 F3~F6, 其中 F3 的沉降在桩基施工完成后达到 6.04 mm, 沉降量最大。② 第二阶段, 下线路线临近教堂并停止施工, 上行线穿越教堂, 期间教堂建筑物的沉降基本上是由于上行线穿越施工所引起的。这阶段各测点位移变化表现为先少量隆起后下沉的特点, 主要是由于盾构临近时开挖面的土体受到盾构支护压力的作用后使得地表有些许的隆起量, 而后盾构穿越间地表开始下沉。各测点的沉降变化量基本上在

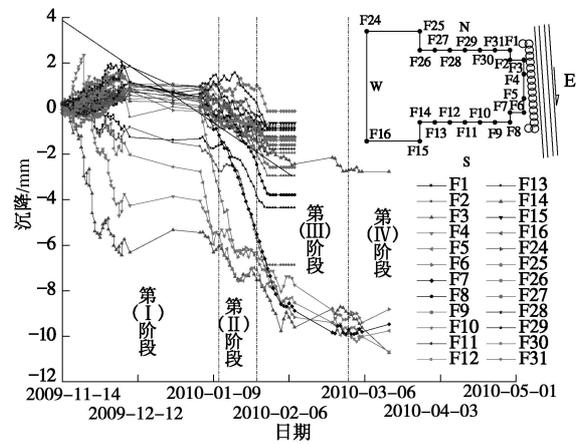


图 14 各测点沉降曲线

Fig. 14 Curves of settlement at each point

3.2 数值模拟与现场实测对比

表 3 给出了各测点数值计算与现场实测的对比情况。由表可知: ① 从规律上看, 针对地表存在教堂且考虑 MJS 桩基施工的情况, 数值模拟与现场实测的结果在规律上是较一致的, 表现在现场施工对教堂各部分的沉降影响可以分为 MJS 桩基施工扰动阶段、上行线穿越阶段、下行线穿越阶段 3 个阶段 (暂不考虑工后沉降阶段), 其中 MJS 桩基施工产生的影响最为主要; 同时, 在上下行线穿越时, MJS 桩基对教堂的隔

表3 数值计算与现场实测结果对比

Table 3 Comparison between numerical results and field monitoring data

mm

项目	施工阶段		F2	F3	F4	F5	F6	F7
数值 计算 (有 MJS)	桩基施工	累计沉降	-6.67	-9.03	-8.31	-7.53	-6.69	-4.45
		沉降增量	-2.46	-2.77	-2.99	-3.07	-3.15	-2.69
	上行线穿越	累计沉降	-9.13	-11.8	-11.3	-10.6	-9.84	-7.14
		沉降增量	-1.07	-0.80	-0.60	-0.50	-0.36	-0.47
		累计沉降	-10.2	-12.6	-11.9	-11.1	-10.2	-7.61
现场 实测 (有 MJS)	桩基施工	累计沉降	-2.76	-6.04	-5.54	-5.55	-3.62	-1.18
		沉降增量	-2.95	-1.48	-0.78	-1.54	-2.97	-4.35
	上行线穿越	累计沉降	-5.71	-7.52	-6.32	-7.09	-6.59	-5.53
		沉降增量	-1.17	-1.49	-3.49	-2.62	-2.59	-4.18
		累计沉降	-6.88	-9.01	-9.81	-9.71	-9.18	-9.71
数值 计算 (无 MJS)	上行线穿越	沉降增量	-9.88	-11.52	-11.15	-10.77	-9.88	-6.65
		累计沉降	-9.88	-11.52	-11.15	-10.77	-9.88	-6.65
	下行线穿越	沉降增量	-4.18	-4.48	-4.23	-3.96	-4.18	-3.25
		累计沉降	-14.06	-16.0	-15.38	-14.73	-14.06	-9.90

离保护较为明显。②从沉降数值的对比出发,各测点的沉降数值差别均较小,结果较一致。当桩基施工完成后,数值计算与实测所得的最大沉降,均发生在 F3 点,其值分别为-9.03 mm 与-6.04 mm;当上行线穿越完成后,数值计算与实测所得的最大沉降仍发生在 F3 点处,其值分别为-11.8 mm 与-7.52 mm,但是该阶段最大沉降增量的测点却有所不同,数值计算的最大沉降增量发生在 F5 点处,为-3.07mm,实测的最大沉降增量发生在 F7 点处,为-4.35 mm;当下行线完成穿越后,数值计算所得的最大沉降发生在 F3 处,为-12.6 mm,最大沉降增量发生在 F2 处,为-1.07 mm,而实测的最大沉降发生在 F4 点处,为-9.81 mm,最大沉降增量产生在 F7 处,为-4.18 mm。当然,数值计算与现场实测的结果存在着一定的差别,但是以上的现场实测数据分析一定程度上验证了数值模拟方法的可靠性与结果的准确性。

另外,针对有、无 MJS 桩基加固的对比情况来看,在有桩基加固的情况下,各测点的数值较无加固的情况下要小,如 F3 测点,其沉降从-12.6 mm 增大为-16.0 mm。因此,桩基预加固还是起到较明显的隔离保护作用。

4 结 论

本文结合上海地铁 11 号线侧穿古建筑的实际工程,采用数值计算与现场监测相结合的方法,分析了盾构推进及相应加固措施对地层及古建筑的影响,得出主要结论如下:

(1) 教堂的存在和 MJS 桩基的预加固对隧道开

挖后引起的地表沉降槽和水平位移分布形式产生了明显的变化。

(2) MJS 桩基施工扰动对地表及建筑物的沉降影响最为显著,上行线穿越阶段的影响次之,下行线穿越的影响较小。在隔离桩的保护作用下,隧道开挖产生的地表与建筑物的沉降可以得到有效的减少。所以,在施工过程中尤其要注意桩基施工期间对地层的扰动影响。

(3) 数值计算结果与现场实测结果较一致,验证了数值计算方法的准确性与合理性。因此,采用数值计算方法预测盾构施工对建筑物的影响规律在实际工程中具有指导意义。

参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecanica de suelos, A. C., 1969: 225 - 290.
- [2] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield driven tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991. (in Chinese))
- [3] 徐前卫, 尤春安, 李大勇. 盾构近距离穿越已建隧道的施工影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 95 - 98. (XU Qian-wei, YOU Chun-an, LI Da-yong. Analysis of construction influence of shield tunnel machine passing over old nearby tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,

- 25(S0): 95 - 98. (in Chinese))
- [4] 于宁, 朱合华. 盾构施工仿真及其相邻影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 292 - 296. (YU Ning, ZHU He-hua. The simulation of shield tunnel construction and analysis of its influence upon surrounding environments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 292 - 296. (in Chinese))
- [5] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 755 - 760. (ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. 3D finite element simulation on deformation of soil mass during shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 755 - 760. (in Chinese))
- [6] 姚天宇, 单炜, 王森岭, 等. 由地铁隧道工程引起地表横向沉降的预测分析[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(6): 103 - 106. (YAO Tian-yu, SHAN Wei, WANG Sen-ling, et al. Prediction of transverse subsidence of ground surface induced by subway tunneling excavation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2006, 34(6): 103 - 106. (in Chinese))
- [7] 姜忻良, 贾勇, 王涛. 近距离平行隧道盾构施工对老隧道影响的数值分析[J]. 天津大学学报, 2007, 40(7): 786 - 790. (JIANG Xin-liang, JIA Yong, WANG Tao. Numerical simulation of influence of shield tunneling on short-distance parallel existing tunnel[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(7): 786 - 790. (in Chinese))
- [8] 姜忻良, 崔奕, 赵保建. 盾构隧道施工对邻近建筑的影响[J]. 天津大学学报, 2008, 41(6): 725 - 730. (JIANG Xin-liang, CUI Yi, ZHAO Bao-jian. Influence of shield tunnel construction on neighboring building[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(6): 725 - 730. (in Chinese))
- [9] 徐礼华, 艾心荧, 余佳力, 等. 厦门机场路隧道施工对砌体结构建筑的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 583 - 592. (XU Li-hua, AI Xin-ying, YU Jia-li, et al. Analysis of impact of tunnel construction on masonry buildings in Xiamen airport road[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 583 - 592. (in Chinese))
- [10] 贺美德, 刘军, 乐贵平, 等. 盾构隧道近距离侧穿高层建筑的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 603 - 608. (HE Mei-de, LIU Jun, LE Gui-ping, et al. Study of impact of shield tunneling side-crossing on adjacent high buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 603 - 608. (in Chinese))
- [11] GB5009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 2001. (GB5009—2001 Load code for the design of building structures[S]. 2001. (in Chinese))

本期广告索引

- 封2 北京金土木软件技术有限公司
 封3 北京理正软件设计研究院有限公司
 封4 国网电力科学研究院南京南瑞集团公司
 后插1 广州中海达卫星导航技术股份有限公司
 后插2 台州市建元工程勘察仪器有限公司