

考虑建筑既有变形的盾构穿越扰动控制标准

葛世平^{1,2,3}, 谢东武^{1,2}, 丁文其^{1,2}, 杨洪杰⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 201103; 4. 上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 上海 201103)

摘要: 市区软土地层中进行隧道施工引起的地层沉降会影响地面既有建筑的安全. 提出考虑建筑既有变形的盾构穿越扰动双控控制标准. 结合上海市轨道交通 11 号线下穿越保护建筑徐汇中学崇思楼工程, 对穿越前崇思楼进行检测, 对崇思楼既有沉降进行分析, 评估崇思楼穿越前状态. 制定考虑建筑既有变形的盾构穿越崇思楼允许变形控制指标. 对穿越进行全程监测, 验证所提出控制指标的合理性.

关键词: 盾构; 穿越; 扰动; 建筑既有变形; 双控控制标准
中图分类号: TU 94.2

文献标识码: A

Undercrossing Disturbance Control Criterion for Shield Tunnel With Consideration of Building Existing Deformation

GE Shiping^{1,2,3}, XIE Dongwu^{1,2}, DING Wenqi^{1,2}, YANG Hongjie⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Shentong Metro Construction Group Co. Ltd., Shanghai 201103, China; 4. Shanghai Shentong Metro Research & Consultancy Co. Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: Ground movements caused by the tunnel construction in soft ground endanger the safety of the existing building. Double control criterion was proposed for shield tunnel undercrossing by taking the existing deformation of building into consideration. For Shanghai Metro Line 11 undercrossed the Chongsi Building, Xuhui Middle School, the deformation of Chongsi Building was detected and analyzed, and the status of the building was assessed. The double control criterion for shield tunnel undercrossing Chongsilou Building was established based on a consideration of the building existing deformation. A management over the section under-

crossing the Chongsi Building proves the feasibility of the deformation control criterion.

Key words: shield tunnel; undercrossing; disturbance; existing deformation of building; double control criterion

隧道施工对地表沉降的影响很早就引起了人们的关注,但盾构施工对地面建筑的影响限于技术发展及理论水平的限制,相关研究较少. Sigl 等^[1]结合新加坡一盾构穿越寺庙工程对相关建筑进行监测,制定监测标准,将沉降标准定为 10 mm,扭曲变形定为 1/500. 但并未提到该寺庙的已有变形. Dimmock 等^[2]为了确定建筑刚度对隧道引起的地表位移的影响,在伦敦 Jubline Line 延长线上两到三层的砖石建筑对隧道施工的持续反应进行了研究. 认为无地表建筑的测点的沉降横断面上是高斯分布,纵断面上是累计概率曲线分布. 受到房屋建筑的限制,水平应变基本可以忽略,且与无地表建筑时的位移趋势毫无关系. Finno 等^[3]提出一种将建筑物的楼板和承重墙分别考虑的复合梁法. Mroueh 等^[4-5]建立完全三维模型,通过对比有无地面建筑开挖隧道土体力学行为,分析采用扩大基础结构对隧道施工引起的地面沉降的影响. Houlsby 等^[6]认为二维模型忽略了隧道推进的进程,不能模拟建筑的实际情况. 建立三维模型对有无地面建筑情况下沉降趋势、结构损伤随隧道推进的发展进行了研究. 结果表明,地表建筑的存在,不仅从沉降量,而且从沉降模式上改变了地表的沉降趋势. 地表结构的存在对地表水平位移趋势也存在重要影响,而这一方面一直是研究者所不重视的地方. Rankin^[7]认为,建筑物的风险状态与建筑

收稿日期: 2010-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878149); 教育部新世纪优秀人才资助项目(NCET-08-0403); 上海申通地铁集团资助项目(STTC-HT-001)

第一作者: 葛世平(1966—),男,教授级高工,工学博士,博士生导师,主要研究方向为软土地下工程与环境保护.
E-mail: geshiping@shmetro.com

通讯作者: 谢东武(1980—),男,工程师,博士生,主要研究方向为软土地下工程与环境保护. E-mail: xdw980829@163.com

当前的最大斜率和最大沉降相关,并推荐采用表 1 对建筑物当前的状态进行评价。

表 1 基于最大斜率和沉降典型值的建筑损坏风险评估^[7]
Tab.1 Typical values of maximum building slope and settlement for damage risk assessment^[7]

风险等级	建筑最大斜率	建筑最大沉降/mm	风险描述
1	$<1/500$	<10	可忽略的风险:不太可能有表面损坏
2	$1/500\sim 1/200$	$10\sim 50$	轻微的风险:不影响重要结构的可能的表面损坏
3	$1/200\sim 1/50$	$50\sim 75$	中等的风险:预料到的表面损坏和可能的结构损坏,可能造成刚性管道损坏
4	$>1/50$	>75	高度的风险:预料到的建筑结构损坏,刚性管道破坏,可能的其他管道的破坏

总结文献[1-7]研究内容,在对盾构施工穿越建筑物方面的研究,重点放在了盾构施工产生的变形对建筑物的影响评价上,而基本未涉及到建筑物的已有变形。目前的建筑损伤评价基本仅考虑施工过程中的沉降槽对建筑物的影响, Son 等^[8]认为,建筑损伤评价主要包括 4 个步骤:①预测无建筑物时地表位移;②考虑建筑刚度对无建筑物时地表位移的影响;③预测土-结构相互影响下建筑的扭曲;④评估损伤水平。损伤水平可通过基于现场调查和合适比例的模型试验建立的准则进行评价。损伤程度难以接受时须考虑保护措施。众所周知,建筑物在其存在的历史过程中由于自重、基础土层的固结及外荷载的影响等因素,会产生持续的、长期的沉降,并在建筑物范围内产生差异沉降。仅考虑盾构扰动的变形并以此为出发点制定建筑物控制指标是非常危险的。

针对以上情况,提出考虑建筑既有变形的盾

构穿越扰动控制指标。依托上海地铁 11 号线穿越历史保护建筑徐汇中学崇思楼工程,通过对盾构施工前崇思楼的前期沉降进行检测,对崇思楼既有沉降进行分析,评估崇思楼穿越前状态。制定盾构穿越崇思楼允许的扰动沉降控制指标。对穿越进行全程监测,结合建筑既有沉降对施工扰动沉降进行研究。

1 建筑物变形控制指标

总的来说,应该认识到邻近施工对建筑的潜在损坏是无法完全避免的^[9]。由于既有建筑自身已经存在较大的变形,相对于已经存在的变形来讲,盾构施工扰动引起的建筑物变形为变形增量,该增量的控制标准制定是盾构施工扰动控制的关键。本文提出考虑建筑既有变形的盾构穿越扰动控制指标,该指标为一增量性质的控制指标。

按照传统的思路,通过制定一个绝对值控制指标来对建筑变形进行控制,超过该指标的建筑变形就是不能接受的,必须采取补救措施,这种方式存在无法考虑建筑物自身特点的弊端。

建筑物全生命周期变形演化的示意图可归总为图 1。图 1a 为建筑物初始状态,不考虑施工误差的情况下建筑物差异沉降为零;图 1b 为盾构穿越前建筑物状态,建筑物修建完毕后因长期的固结不均匀沉降,可能造成建筑物出现差异沉降及可能的开裂;图 1c 为盾构穿越后建筑物状态,其中建筑物既有变形叠加施工扰动造成的沉降形成的沉降槽由建筑物两底边及相连续的地表沉降曲线共同组成,而无建筑物的沉降槽则可能是图中点划线所示的曲线。同样的可推广到建筑物与盾构隧道相对位置不同的情况。

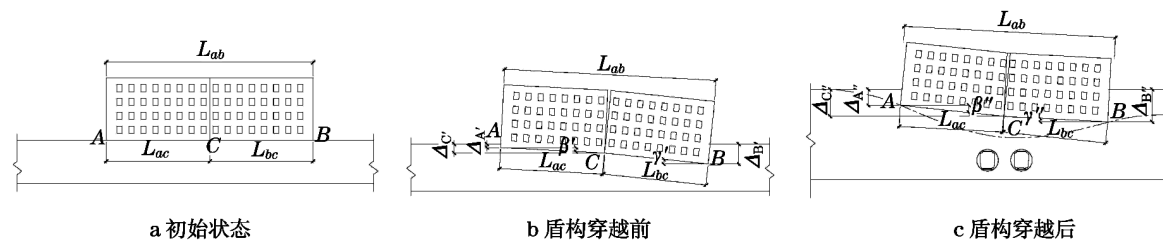


图 1 建筑物变形演化示意图

Fig.1 Schematic diagram of evolution of building deformation

图 1 中符号意义如下: L_{ab} 为垂直推进方向的建筑 AB 段宽度; L_{ac} 为垂直推进方向建筑 AC 段宽度; L_{bc} 为垂直推进方向建筑 BC 段宽度; $\Delta_A, \Delta_B, \Delta_C$ 表示对应 A, B, C 点的沉降;A、B 为建筑物底边两端

点;C 为建筑物底边沉降变形特征点; β 为 AC 与水平线夹角; γ 为 BC 与水平线夹角。带上标“'”及“''”分别表示盾构穿越前、后对应的变形状态。

建筑物的不均匀沉降可能造成穿越前建筑物状

态不同,如可能出现中部下凹或上凸,但不妨碍进行一般化分析.

针对目前的保护建筑多为砌体结构,结合砌体结构的特点,首先提出两个假定:①假定建筑物因土体固结沉降变形及穿越扰动变形增量远小于建筑物几何尺寸;②砌体结构刚度较大,由 C 点所分的建筑区段内不产生挠曲.

AC 段建筑盾构穿越前既有倾斜率:

$$k'_{AC} = \tan \beta' = \frac{\Delta_{C'} - \Delta_{A'}}{L_{ac}} \quad (1)$$

BC 段建筑盾构穿越前既有倾斜率:

$$k'_{BC} = \tan \gamma' = \frac{\Delta_{B'} - \Delta_{C'}}{L_{bc}} \quad (2)$$

盾构施工引起的 AC 段建筑倾斜发展增量:

$$k''_{AC} = \tan (\beta'' - \beta') = \frac{(\Delta_{C''} - \Delta_{C'}) - (\Delta_{A''} - \Delta_{A'})}{L_{ac}} \quad (3)$$

盾构施工引起的 BC 段建筑倾斜发展增量:

$$k''_{BC} = \tan (\gamma'' - \gamma') = \frac{(\Delta_{B''} - \Delta_{B'}) - (\Delta_{C''} - \Delta_{C'})l''}{L_{bc}} \quad (4)$$

则 AC 段最终倾斜率为

$$k_{AC} = k'_{AC} + k''_{AC} \quad (5)$$

BC 段最终倾斜率为

$$k_{BC} = k'_{BC} + k''_{BC} \quad (6)$$

从 β, γ 的变化情况来看,建筑物既有沉降变形对应于沉降槽的反应是不同的,施工扰动形成的沉降槽可能增大对应部位的建筑物的倾斜,也可能减缓建筑物的倾斜,如图 1 所示,由于建筑物呈向一侧倾斜并出现左侧沉降加剧的现象,而盾构从建筑物下方经过的过程中,造成了 AC 段倾斜率增大,而 BC 段倾斜减小的现象,从而盾构穿越施工扰动对 AC 段不利,而对 BC 段则起到了纠偏的作用,因此盾构施工扰动控制分析应针对具体情况进行分析并制定相应区段的控制标准.

根据中华人民共和国行业标准《危险房屋鉴定标准》(JGJ 125—99)^[10]的规定,当上部裂缝宽度大于 10 mm,且房屋局部倾斜率大于 1%时,建筑物处于危险状态.文献[9]给出表 2 的控制标准.

目前我国采用的控制标准严于国际通用控制指标,考虑历史保护建筑本身长期沉降的发展,造成的局部倾斜已大于 1%,因此本文建议施工扰动控制指标的制定参照国际标准.若倾斜值超过规定范围,则穿越前要采取措施对既有建筑进行加固.

而对于沉降控制,理解为建筑物沉降增量的差异沉降控制而不是建筑物沉降总量的控制,因为上海地区建造在软土上的建筑物的历史沉降量发展远大于 20 mm.同时,依据本文所提出的假定,建筑物差异沉降与建筑物斜率是等价的,因此,表 2 中的斜率与沉降量控制指标可合并为一个斜率控制指标,也不会在使用过程中造成矛盾.故采用既有建筑的斜率增量控制指标与斜率总量控制指标建立考虑既有变形的盾构穿越扰动控制指标,实行增量与总量双控控制指标.

表 2 一般建筑的可使用极限状态控制标准

Tab.2 Range of serviceability limit state for standard structures

损坏等级	建筑物下沉槽平均斜率/%	建筑物最大沉降值/mm
1	<2	<10
2	2~4	10~20

在选择增量控制指标时,结合表 1 所提出的建筑物风险等级中的第一级标准,建筑物斜率为 1/500 时,建筑物不太可能产生表面损坏,基于在既有变形控制指标的基础上进行控制,本文建议增量控制指标要严于表 1 中的第一级标准,建议斜率增量控制为 1/1 000.本文提出的双控控制指标为:①建筑物下沉槽平均斜率总量小于 2%;②建筑物下沉槽平均斜率增量小于 0.1%.

盾构施工扰动指标的确定需要同时满足上述条件要求.此建议从三个方面考虑:

(1) 虽然不同的建筑物对扰动的承受能力不同,但考虑到对建筑物的保护,扰动增量应该不能对建筑物造成明显损害,因此,定义任何状态下施工扰动对建筑物的扰动增量要不大于允许变形总量的 5%;

(2) 对于既有保护建筑,其自身已经发展了较大的变形,处于危房的边缘,扰动增量可能满足要求,但叠加既有变形后可能超过允许变形总量,此时应该采用总量来控制.

(3) 采用总量与增量两个标准进行控制,取其最先满足的标准.限制增量是要求盾构穿越不能对既有状态较好的建筑物造成过大的危害;限制总量则是要求不能对既有处于危险边界的建筑物造成致命损伤.

2 穿越工程概况

2.1 建筑概况

崇思楼始建于 1918 年,是一幢拥有近百年历史的行政办公特色教育综合楼.如图 2 所示.



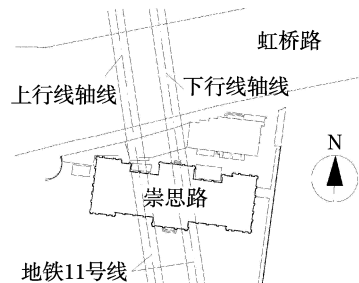
图 2 崇思楼南立面

Fig.2 South facade of Chongsi Building

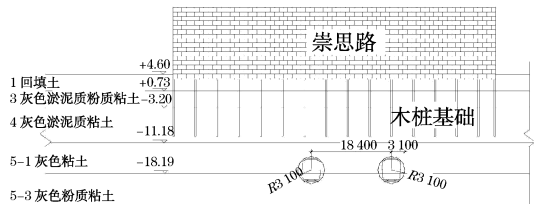
崇思楼主体结构属于砖混结构,隧道穿越的位置为崇思楼内部演讲厅两侧,建筑物内部跨度较大处均采用钢柱进行支撑,建筑内部地面为木板地面.

2.2 轨道交通 11 号线在崇思楼附近的规划

轨道交通 11 号线从徐汇中学崇思楼正下方穿过.盾构外壁距离地表约 14.1 m,盾构间距 17.2 m.盾构区间与崇思楼的相对位置示意图见图 3.



a 盾构隧道与崇思楼平面位置示意图



b 地质剖面图

图 3 轨道交通 11 号线与崇思楼相对位置示意图

Fig.3 Diagram of relative position of Metro Line 11 and Chongsi Building

3 建筑物检测与扰动控制标准的确定

为准确把握建筑物既有变形的情况,在制定施工方案前,对崇思楼进行了全面的检测.

3.1 棱线倾斜测量

为确定被检测房屋的倾斜变形情况,对被检测房屋外墙可测棱线的垂直度进行了测量,测量结果见图 4 与表 3,图 4 所示为 5.5 m 高度处的建筑轮廓

测量结果(放大 200 倍).

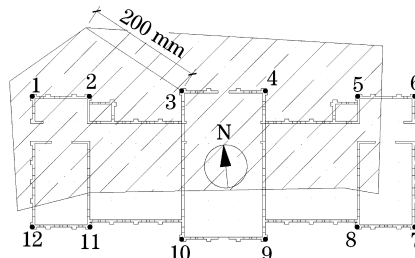


图 4 崇思楼倾斜轮廓与原建筑轮廓对比

Fig.4 Contrast of tilt outline with original outline of Chongsi Building

表 3 崇思楼倾斜率统计表

Tab.3 Statistical chart of gradient of slope of Chongsi Building

测点	倾斜方向	倾斜率/‰ (2008年12月测)	倾斜率/‰ (2004年测)	倾斜率增量/‰
1	向北	2.4		
	向西	3.6		
2	向北	5.1	5.26	-0.16
	向西	15.3	14.55	0.75
3	向北	10.0	9.82	0.18
	向西	15.3	14.55	0.75
4	向西	0.6	0.70	-0.10
	向北	6.0	5.61	0.39
5	向西	9.8	9.29	0.51
	向北	8.0	9.12	-1.12
6	向西	5.1	4.56	0.54
	向北	5.3	5.61	-0.31
7	向西	5.8	8.42	-2.62
	向北	6.2	6.49	-0.29
8	向西	2.2	8.42	-6.22
	向北	3.1	2.81	0.29
9	向西	3.7	5.26	-1.56
	向北	2.9	2.45	0.45
10	向西	2.7	5.26	-2.56
	向北	5.5	5.79	-0.29
11	向北	2.5	0.70	1.80
	向西	2.4	4.03	-1.63
12	向北	2.5	0.70	1.80
	向西	2.4	4.03	-1.63

测量结果表明,目前被检测房屋有向北向西方向的倾斜,各测点向北平均倾斜率为 5.18‰,最大倾斜率达到 10‰,各测点向西平均倾斜率为 5.12‰,最大倾斜率达到 15.3‰.

3.2 底层窗台相对高差测量

底层窗台高差测量结果见图 5,测量结果包括原始施工误差和测量误差(设高程最低点为 ±0).N 表示北立面墙,S 表示南立面墙,下标表示对应的点位,需要注意的是测量结果为所有测点相对于 ±0 基

点的高差而不是绝对沉降量,绝对沉降量可能更大.

测量结果表明,崇思楼整体呈南高北低、东高西低,与倾斜测量结果基本一致.

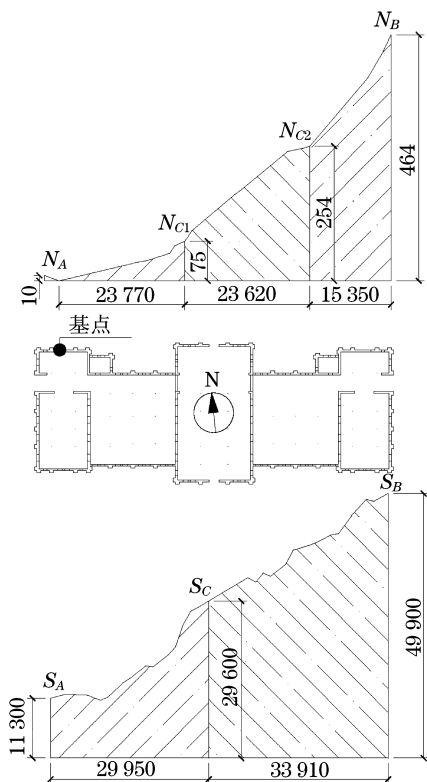


图 5 相对高差测量结果(单位:mm)

Fig.5 Relative altitude of measuring points (unit:mm)

3.3 当前建筑评价

从现场检测结果结合前述内容分析,崇思楼局部差异沉降较小,无较大的裂缝,仅一处裂缝宽度超过 5 mm(为 8 mm).虽局部最大倾斜率达 15.3‰,在穿越施工开始前,认为崇思楼仍处于安全状态.

3.4 盾构穿越崇思楼扰动控制标准的确定

从图 5 可知,北立面墙的既有沉降曲线基本可以分为三段: AC_1 、 C_1C_2 、 C_2B ,对应三段的斜率分别为:

$$k_{AC_1} = 75/23\ 770 = 0.3\%$$

$$k_{C_1C_2} = (254 - 75)/23\ 620 = 0.75\%$$

$$k_{C_2B} = (464 - 254)/15\ 350 = 1.4\%$$

南立面墙的既有沉降曲线较一致,考虑到隧道由其正下方穿过,隧道所形成的沉降槽远离隧道沉降越小,据隧道穿越位置将其分为两部分进行考虑:

$$k_{AC} = (296 - 113)/29\ 950 = 0.6\%$$

$$k_{CB} = (499 - 296)/33\ 910 = 0.6\%$$

根据允许增量斜率和允许总量斜率计算容许沉降差,见表 4.从表 4 可知,对于崇思楼目前的状态,

对比增量控制指标与总量控制指标,认为应采用增量控制指标,同时也说明崇思楼目前的状况仍较好.对于采用增量控制指标后对应的警示指标与预警指标如何制定,或是否采用多级预警指标等则根据施工控制技术的水平和客观条件确定.

表 4 考虑崇思楼既有变形的盾构穿越扰动控制指标

Tab.4 Disturbance control criterion for shield tunnel underpassing Chongsi Building with a consideration of the existing deformation

立面墙	对应立面墙部位	增量差异沉降/mm	总量差异沉降/mm
北立面墙	AC_1	23.8	400.4
	C_1C_2	23.6	293.4
	C_2B	15.4	97.0
南立面墙	AB	30.0	416.0
	CB	33.9	475.2

4 穿越过程监控量测

施工过程中为控制扰动造成的地表沉降,及时采取控制措施,在崇思楼布设了沉降测点,测点布设平面图如图 6 所示,F 表示房屋测点.为分析方便,并结合本文前面部分的分析,将北立面墙和南立面墙上所布设的测点归为两个监测横断面.从平面图上看,虽然所定义的两个监测横断面与隧道轴线有一定夹角,但考虑到施工进度约一天 5 环(6 m,每环长度 1.2 m)的进尺来看,忽略同一断面测点在时间上的滞后效应应该不会造成大的误差.

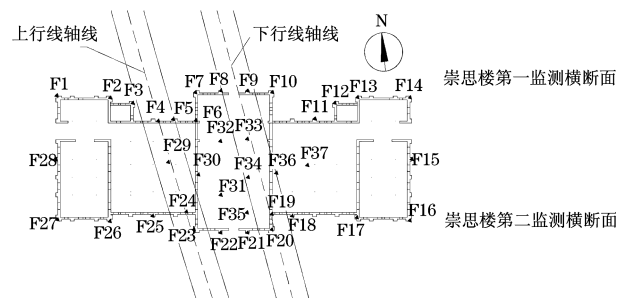


图 6 监测点平面布置图

Fig.6 Plan of monitoring points

4.1 崇思楼对应监测断面测值分析

如图 7 和图 8 所示,对应的两个监测横断面的横向沉降槽.第一监测横断面最大沉降值 13.29 mm,第二监测横断面最大沉降值 12.54 mm.而从最大沉降值与隧道轴线的相对位置来看,沉降最大值并不出现在两隧道之间或特定某一隧道的上部,而

结合平面图进行对比可发现,沉降值的发展同时受到了盾构和建筑物的影响.

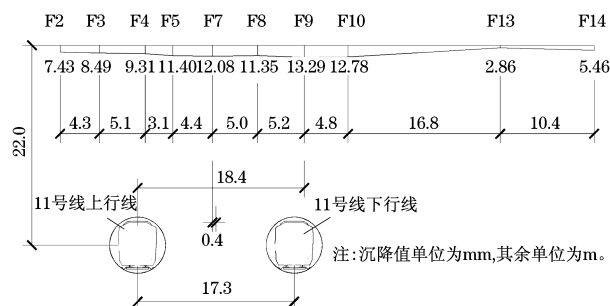


图 7 崇思楼监测点沉降横断面(断面一)

Fig.7 Settlement trough of Chongsi Building measured points (Section 1)

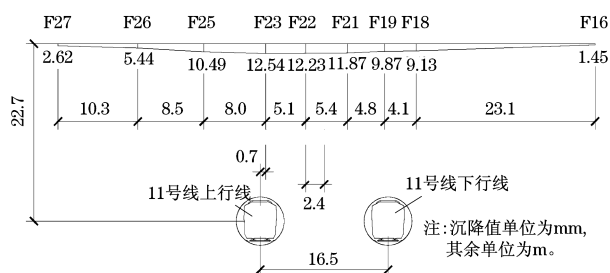


图 8 崇思楼监测点沉降横断面(断面二)

Fig.8 Settlement trough of Chongsi Building measured points (Section 2)

4.2 考虑已有变形的崇思楼安全性评价

崇思楼原有最大差异沉降为 499 mm,盾构施工过程中的沉降发展最大值为 13.29 mm.断面一测点最大沉降差 10.43 mm,断面二测点最大沉降差 11.09 mm,最大沉降值和最大差异沉降值均小于表 4 中所给出的控制指标,因此,可以认为盾构 11 号线下穿越崇思楼的扰动较小,未对崇思楼造成有害影响,施工控制是成功的.

5 结论

通过考虑建筑既有变形,对盾构穿越扰动控制标准的制定进行了研究,主要有如下结论:

(1) 总结国内外研究进展,认为在穿越施工过程中必须考虑地表建筑的既有变形,在此基础上制定变形控制标准,才能满足建筑保护的需要;

(2) 提出盾构穿越施工过程中考虑建筑既有变形的总量与增量双控控制指标,为盾构穿越前制定施工方案及应急预案,穿越过程中及时预警反馈提供依据;

(3) 所提出的方法在轨道交通 11 号线下穿越崇思楼工程中进行了应用,结合崇思楼自身特点认为采用增量控制指标更适合对穿越过程中对该建筑进行保护.

由于在 11 号线下穿越过程中,崇思楼同步进行了修缮,因此,穿越后无法对其进行再次检测以便与施工前检测结果进行对比评价,这是一个较大的遗憾.

参考文献:

- [1] Sigl O, Atzl G. Design of bored tunnel linings for Singapore MRT North East Line C706[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(4): 481.
- [2] Dimmock P S, Mair R J. Effect of building stiffness on tunneling-induced ground movement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 438.
- [3] Finno R J, Voss F T, Rossow E, et al. Evaluating damage potential in buildings affected by excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Journal, 2005, 131(10): 1199.
- [4] Mroueh H, Shahrou I. A simplified 3D model for tunnel construction using tunnel boring machines [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 38.
- [5] Mroueh H, Shahrou I. A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 245.
- [6] Housby G T, Burd H J, Augarde C E. Analysis of tunnel-induced settlement damage to surface structures [C] // Proceedings of the 12th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Amsterdam: [s. n], 1999: 147 - 152.
- [7] Rankin W J. Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects [C] // Engineering Geology of Underground Movements. London: Geological Society, 1988: 79 - 92.
- [8] Son M, Cording E J. Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 162.
- [9] ITA/AITES Report 2006 on settlements induced by tunneling in soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22: 119.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 125—99 危险房屋鉴定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. JGJ125—99 Standard of dangerous building appraisal [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.