

不同平行距离下盾构施工对邻近砌体结构的变形影响

张治国^{1,2}, 贾延臣¹, 王卫东³

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 重庆交通大学 山区桥梁与隧道工程
国家重点实验室培育基地, 重庆 400074; 3. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘要: 软土盾构施工将导致周边土体位移场改变, 从而诱发邻近建筑产生附加变形甚至局部开裂. 通过建立三维有限元数值模型, 分析了隧道不同施工距离条件下, 浅基础砌体建筑受盾构开挖的影响变形, 重点研究了建筑物的横向水平位移、基础沉降特点、墙体的相对挠曲变形和主拉应变变化规律. 结果表明: 基础相对沉降峰值出现在隧道开挖面位于建筑物中部位置, 绝对沉降峰值则出现在盾构施工完毕时; 随着隧道中轴线与建筑物中轴线之间水平距离的增大, 建筑横墙相对挠曲将依次呈现为下凹形态、“∪”形态以及上凸形态, 且主拉应变在下凹和上凸形态相对挠曲最大时达到峰值; 建筑纵墙主拉应变则因开挖面位置的不同呈现明显差异, 主拉应变最大值出现在开挖面位于建筑物中部位置.

关键词: 盾构; 砌体结构; 相对挠曲变形; 墙体主拉应变

中图分类号: TU 452 **文献标志码:** A

Influences of Shield Excavation on Masonry Structures Considering Different Parallel Distances

ZHANG Zhiguo^{1,2}, JIA Yanchen¹, WANG Weidong³

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University,
Chongqing 400074, China; 3. East China Architecture Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: Shield tunneling in soft soils will inevitably disturb strata deformation, which causes additional deformation and even local cracking for adjacent buildings. Considering the different horizontal distance between the longitudinal axes of tunnels and buildings, the deformation behavior of masonry structures with shallow foundation induced by tunnel excavation was analyzed by establishing a 3D finite element model. Some deflection characteristics were emphasized in the analysis, including the horizontal displacement of foundation, the relative deflection characteristics and the distribution of tensile strain in walls. The results show that when the excavation face moves to the central line of a building, the relative settlement of the building foundation reaches the peak value, while the absolute settlement of the building foundation reaches the maximum value after the excavation is completed. With the increasing of relative distance between tunnel and building center line, the relative flexure of the cross wall will appear successively in the form of sagging deformation,

收稿日期: 2015-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008188); 上海自然科学基金资助项目(15ZR1429400); 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地(CQSLBF-Y15-1)

第一作者: 张治国(1978-), 男, 副教授. 研究方向: 地下工程施工影响与控制. E-mail: zgzhang@usst.edu.cn

“∪” deformation and hogging deformation. When the sagging deformation and hogging deformation arrive at their maximum values, the tensile strain in the cross walls reaches its peak value. The distribution of principle tensile strain in the longitudinal wall varies with the location of excavation face. When the excavation face is located at the central line of the building, the tensile strain in longitudinal walls reaches its peak value.

Keywords: shield tunneling; masonry structure; relative deflection; principle tensile strain in wall

软土地区盾构施工将导致盾构周边土体自由位移场改变,使得邻近建筑自身内部应力重新分布,有些建筑物可能产生较大的变形甚至局部开裂.对于历史性建筑而言,由于年代久远,其梁、柱结构严重老化、损伤,对其容许变形能力有较大的影响.因此,如何全面有效地评估邻近历史建筑受基坑开挖的影响变形是盾构施工急需解决的主要问题.

目前国内外相关学者^[1-15]针对建筑物受隧道和基坑开挖影响进行了研究.其中,Dimmock等^[5]以伦敦地铁开挖为例,研究了建筑物刚度对隧道开挖引起的地层位移的影响. Mirhabibi等^[6]通过相对弯曲刚度的引入,分析了地铁开挖引起的地面沉降与邻近建筑物的相互影响.周奎等^[7]研究了关于隧道施工对邻近人防工事影响的监测方法.魏纲等^[8]通过模拟双线盾构开挖,研究了建筑物的沉降特征、水平位移以及第一主拉应力.柳厚祥等^[9]研究了不同下穿位置隧道施工引起的建筑物挠曲变形以及墙体拉应变变化趋势.郑刚等^[13]建立了基坑开挖中建筑物相对挠曲变形的评估方法.徐长节等^[15]进行了基坑开挖对管线附加变形的分析.

针对盾构-建筑物相互作用的既有研究成果较少考虑到有、无建筑物时,盾构开挖对地层变形特征的影响,同时较少针对墙体相对挠曲和主拉应变分布的趋势进行研究,因此,本文采用三维有限元法,建立了盾构以及邻近历史建筑物共同作用的模型,分析了浅基础历史建筑受盾构开挖的影响,重点研究了有、无建筑物时,地层滑移线与沉降槽变形特征,纵墙的相对挠曲变形特点和主拉应变分布特点.

1 工程背景

1.1 盾构参数

以上海某处盾构施工为例,隧道轴线埋深取13 m,外直径取7.4 m,内直径取6.8 m;掘进机机身长取7.2 m,机壳厚取0.06 m;衬砌每环宽度和厚度分别为1.2,0.3 m,采用C50混凝土.隧道管片选

用壳单元,其弹模 $E = 21\ 000\ \text{MPa}$,泊松比为0.3,厚度和重度分别取0.3 m, $2\ 500\ \text{kg/m}^3$.机壳采用板单元模拟,弹性模量取为 $250\ 000\ \text{MPa}$,泊松比取0.2,重度取 $7\ 800\ \text{kg/m}^3$,灌浆压力为 $50\ \text{kg/m}^3$.图1为盾构-建筑物模型.

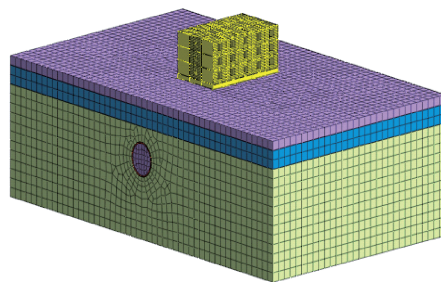


图1 盾构-建筑物数值分析模型网格图

Fig.1 Finite element mesh of the tunnel-building model

施工方案中,采用“刚度迁移法”模拟盾构推进过程,盾构机每向前推进一步作相应变化:杀死该开挖步处的土体单元(内圆和外圆),土体释放应力,在开挖面处施加支护力,激活盾壳单元,在盾壳外侧表面施加摩擦力.随着盾构的掘进,逐渐将盾壳单元属性变为管片单元属性,激活管片,去掉盾壳摩擦力,改为施加注浆压力.实际工程中每环衬砌宽1.2 m,数值模拟时,每步开挖2环.盾壳与土体之间的摩擦力和开挖面支护力均假定为均布力.

1.2 土体参数

施工场地主要分布三层土,土体的本构关系采用修正 Mohr-Coulomb 模型,具体物理力学指标如表1所示.主要参数包括: c , ν , E_s , R_f , E_{50}^{ref} , $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$.其中: R_f 为破坏比,建议取值为0.9; E_{50}^{ref} 建议取值为 $E_i(2 - R_f)/2$, E_i 为初始弹性模量; $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 建议取值与 E_{50}^{ref} 相同; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 建议取值为 $3E_{50}^{\text{ref}}$.

1.3 建筑物参数

盾构施工场地近邻一历史砌体建筑,条形浅基础宽0.75 m,厚0.9 m.建筑物三维尺寸为 $22.5\ \text{m} \times 13.5\ \text{m} \times 9\ \text{m}$,其中楼层共为3层且层高保持一致.门、窗洞口的尺寸分别为 $2.0\ \text{m} \times 1.5\ \text{m}$, $1.8\ \text{m} \times$

表 1 土层物理力学参数
Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil

土层名称	层厚 d/m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	泊松比 ν	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ	割线模量 $E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	破坏比 R_t
素填土	2.0	18.4	4.48	0.32	19	19.0	40	120	0.9
灰色淤泥质粉质粘土	4.0	17.4	2.54	0.32	11	16.0	20	60	0.9
灰色粉质粘土	24.0	18.1	4.66	0.29	15	18.0	30	90	0.9

1.5 m.墙体和楼板采用板单元模拟,墙体为砖砌结构,楼板为混凝土结构,二者材料特性通过弹性模量 E 和泊松比 ν 表示,并加以区分.弹性模量 E 分别取为 230 MPa 和 20 GPa;泊松比 ν 分别取 0.1 和 0.2;厚度分别取 0.24,0.1 m.因为建筑年代久远,故对其梁、柱刚度折减 60% (通过对梁、柱所对应的弹性模量 E 进行折减),折减后梁、柱弹性模量 $E=10\,000\text{ MPa}$,梁、柱尺寸分别为 $250\text{ mm}\times 600\text{ mm}$, $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$.凡沿建筑物短轴方向布置的墙称横墙,而沿建筑物长轴方向布置的墙称纵墙.图 2 为建筑物具体尺寸示意图,图 3 为条形基础布置示意图.

1.4 数值模拟方案

建筑物与隧道走向平行,取二者纵向中轴线之间的水平距离 S 分别为 0,6.75,10.75,15 m,共 4 种位置. D 为隧道直径.地层土层参数如表 1 所示.图 4 为地层-隧道-建筑位置示意图,其中靠近隧道掘进侧纵墙称为背立面纵墙.

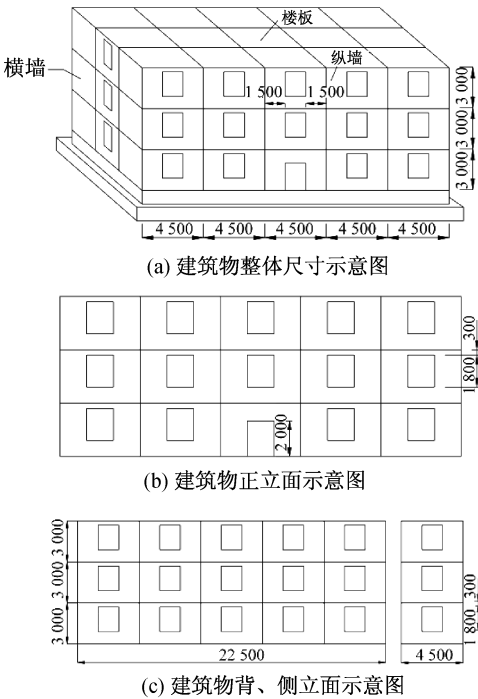


图 2 建筑物尺寸示意图(单位:mm)
Fig.2 Building dimensions (unit:mm)

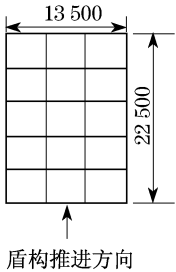


图 3 条形基础布置示意图(单位:mm)
Fig.3 Schematic of the strip foundation arrangement(unit:mm)

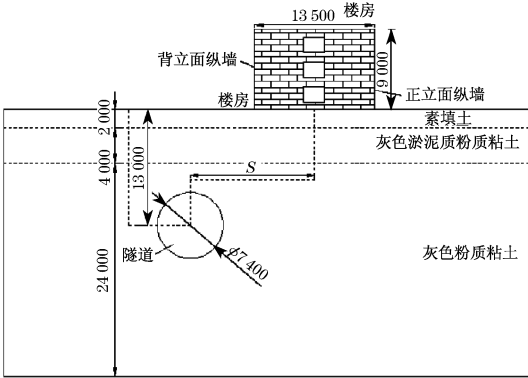


图 4 建筑物尺寸示意图(单位:mm)
Fig.4 Building dimensions(unit:mm)

2 建筑沉降变形特征

2.1 建筑物基础沉降变形规律

盾构施工使得建筑物产生较大的沉降变形,为此研究了不同 S 距离下建筑基础节点随盾构掘进的沉降变形规律.本文涉及的建筑物基础节点如图 5 所示(见下页).

图 6 和图 7(见下页)分别为不同水平距离 S 条件下盾构掘进所引起建筑整体沉降的云图和基础节点沉降曲线图.图 7 中,盾构开挖步骤具体指隧道开挖每环衬砌宽 1.2 m,每一步代表开挖 2 环.

由图 7 可知,由于盾构盾顶推力对土体的扰动作用,上方建筑物基础节点 43 率先产生 1 mm 的微

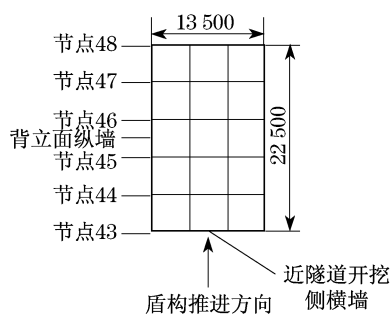


图5 建筑物基础节点示意图

Fig.5 Images of foundation nodes

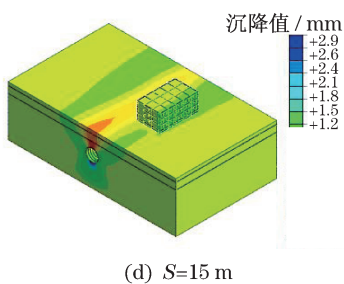
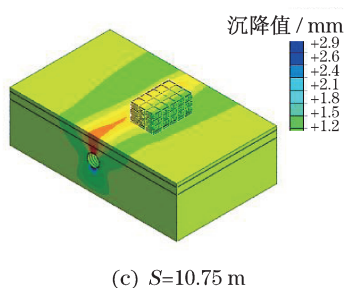
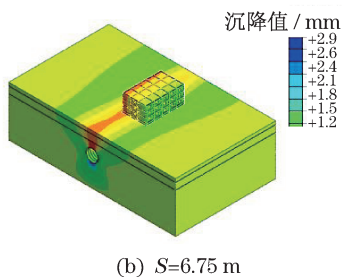
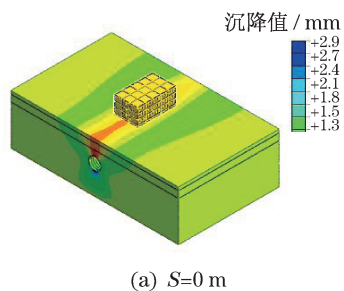


图6 盾构开挖后土体沉降图

Fig.6 Settlement images of soil during tunnel excavation

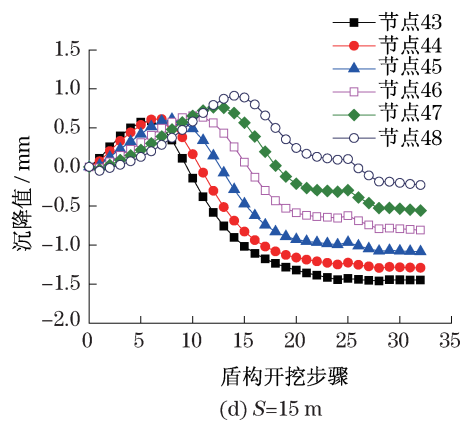
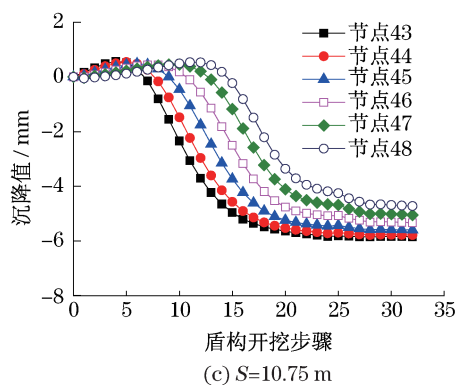
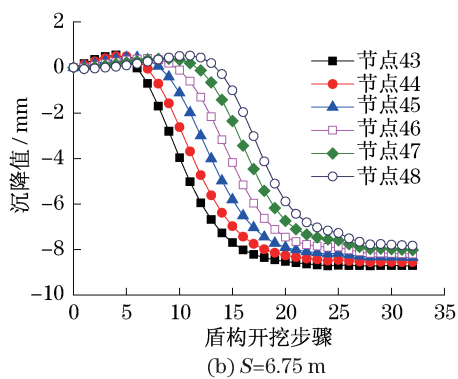
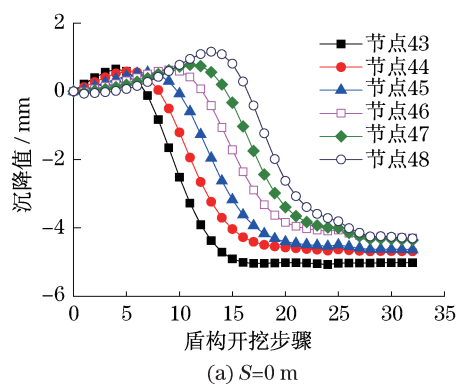


图7 盾构开挖后建筑物基础沉降曲线

Fig.7 Curve of foundation settlement during tunnel excavation

小隆起,主要是由于盾构机挤压和盾壳摩擦力对土体的扰动作用,随后开始沉降.建筑物基础节点的沉降随着盾构的掘进逐渐增大,不同 S 工况下,基础所对应沉降峰值分别为 5, 8.7, 5.8, 1.4 mm. 此外,沿盾构掘进方向,建筑物基础节点的沉降依次减小,开挖过程中节点 43 与节点 48 的差异沉降峰值分别为 6, 7.5, 5, 2 mm. 由此可知,建筑物纵墙下浅基础的沉降随着隧道与建筑物二者中轴线之间的水平距离 S 的增大而先增大后减小. 当纵墙下浅基础与隧道二者的中轴线重合时 ($S = 6.75$ m), 建筑绝对和差异沉降达到最大. 当 $S = 15$ m 时,纵墙下浅基础绝对沉降和差异沉降最小. 不同 S 距离条件下,土体最大沉降则发生在隧道管片顶部位置,其值差异较小,大致为 15 mm.

2.2 建筑物横墙相对挠曲变形规律

如图 8 所示, $O'A'$ 为建筑物横墙所在位置, $O'B'$ 为纵墙所在位置, $O'C'$ 为建筑物垂直高度方向. A, B 为横、纵墙的变形截止点. 曲线 OFA 为建筑物横墙实际沉降曲线, 虚线 OGA 为建筑物横墙名义沉降曲线 (即横墙两端点连接形成的直线). 将建筑横墙相对挠曲变形值以建筑物横墙实际沉降曲线与建筑物横墙名义沉降曲线所对应的值的差值为基准.

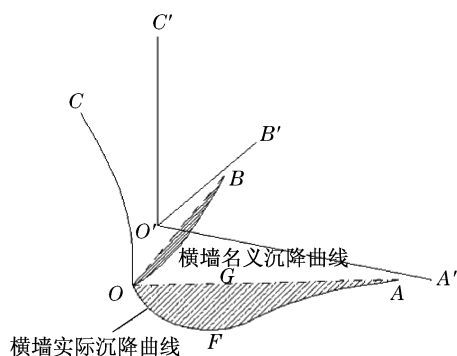


图 8 横墙挠度曲线计算示意图

Fig. 8 Calculation of the flexure deformation of transverse wall

由图 9 建筑物横墙相对挠曲变形曲线可知, 当 $S = 0$ m 时, 建筑物横墙相对挠曲变形呈现为下凹形态, 最大相对挠曲变形为 2.3 mm, 发生在隧道中轴线正上方. 当 $S = 6.75$ m 时, 此时横墙相对挠曲呈现为“∞”形态, 其变形特点为: 横墙近隧道侧的相对挠曲依然呈现为下凹形态, 相对挠曲最大值为 0.4 mm, 横墙远隧道侧将跨越地层沉降槽变形的上凸区域, 这使得建筑物横墙远隧道侧呈现为微弱的上凸形态相对挠曲, 其值为 0.3 mm. 当 $S \geq 10.75$ m

时, 横墙整体相对挠曲将呈现为单纯的上凸形态, 最大相对挠曲值发生在 $S = 10.75$ m 时, 位于横墙中部位置, 其值为 0.85 mm.

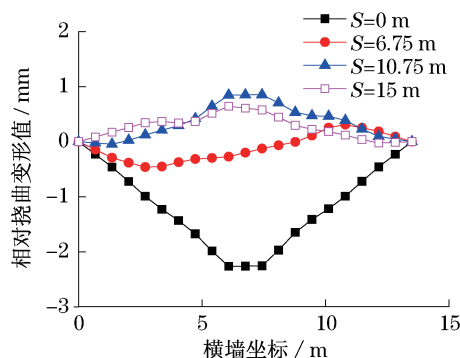


图 9 建筑物横墙相对挠曲变形曲线

Fig. 9 Relative deformation curves of the transverse wall

2.3 建筑物水平位移变化规律

图 10 为建筑物顶部横向水平位移监测点示意图. 随着 S 的增大, 建筑逐渐远离隧道, 受隧道开挖地层沉降槽的影响, 建筑物将发生沿垂直隧道开挖方向 (横向) 上的水平位移. 最大水平位移主要出现在建筑物结构顶部位置. 横向水平位移随着盾构开挖步骤的增加逐渐增大. 图 11 (见下页) 为不同水平距离 S 条件下建筑物横向水平位移曲线. 当 $S = 0$ m 时, 建筑物基础几何尺寸小于地表沉降槽宽度时, 隧道开挖对建筑沉降产生较大影响, 但建筑物产生的横向水平位移很小. 当 $S = 6.75$ m 时, 纵墙浅基础与隧道二者的中轴线重合, 此时其横向水平位移最大, 其值为 7.8 mm. 当 $S = 10.75$ m 时, 建筑物局部将跨越地层沉降槽右半部分, 横向水平位移亦较大, 其值为 6.1 mm, 此时建筑物发生局部倾斜较 $S = 6.75$ m 时有所减小. 当 $S \geq 15$ m 时, 建筑物绝大部分将不再位于沉降槽范围内, 此时, 建筑物主要受自重影响, 受地层沉降槽影响较小, 横向水平位移仅为 1 mm.

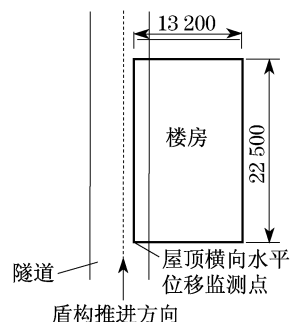


图 10 建筑顶部横向水平位移监测点 (单位: mm)

Fig. 10 Horizontal displacements monitoring points at the building top (unit: mm)

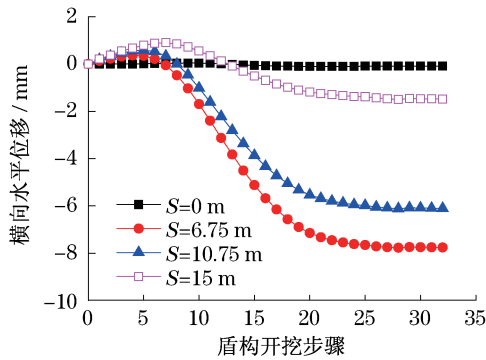


图 11 盾构开挖后建筑横向水平位移图

Fig. 11 Horizontal displacement diagram of the building during tunnel excavation

随着隧道掘进距离的增加,建筑物最大纵向水平位移逐渐增大,且最大值发生在建筑条基与地层的接触处.以条基 48 节点为例,图 12 为建筑物条基节点 48 的纵向水平位移图.由图可知,当 $S = 0$ m 时,基础节点 48 的纵向水平位移峰值为 2.84 mm.当 $S = 6.75$ m 时,此时基础节点 48 的纵向水平位移达到最大,峰值为 3.21 mm,原因在于建筑物纵墙浅基础中轴线与隧道中轴线重合,隧道中轴线正上方土体受隧道扰动影响最大.沿隧道中轴线向两边扩展,地层沉降槽的影响区域逐渐减小,当 $S = 10.75$ m 和 $S = 15$ m 时,基础节点 48 的纵向水平位移随着 S 的增大逐步减小,其值分别为 2.86 mm, 2.16 mm.

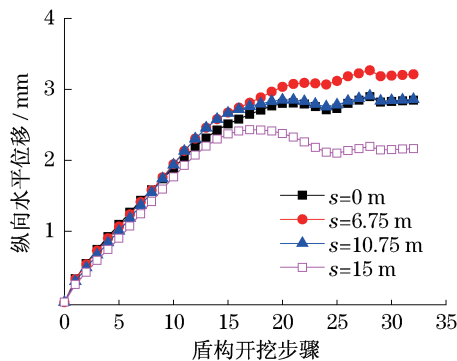


图 12 盾构开挖后建筑纵向水平位移图

Fig. 12 Longitudinal horizontal displacement diagram of the building during tunnel excavation

2.4 建筑物横墙主拉应变分布规律

以近隧道开挖侧最外侧的横向外墙(如图 13 所示)为例,当距离 S 不同时,建筑横墙受地层沉降槽的影响,将产生不同形态的相对挠曲,因此对应每一种挠曲形态,横墙主拉应变 ϵ 分布特点呈现明显差异,如图 14 所示.

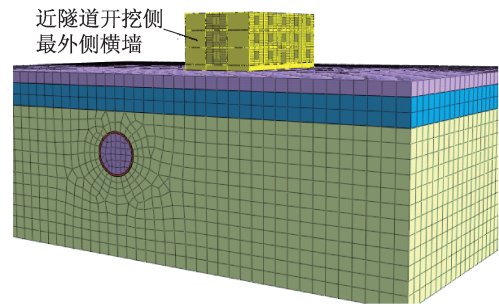


图 13 外横墙平面标识图

Fig. 13 Flat marking graph of the outer transverse wall

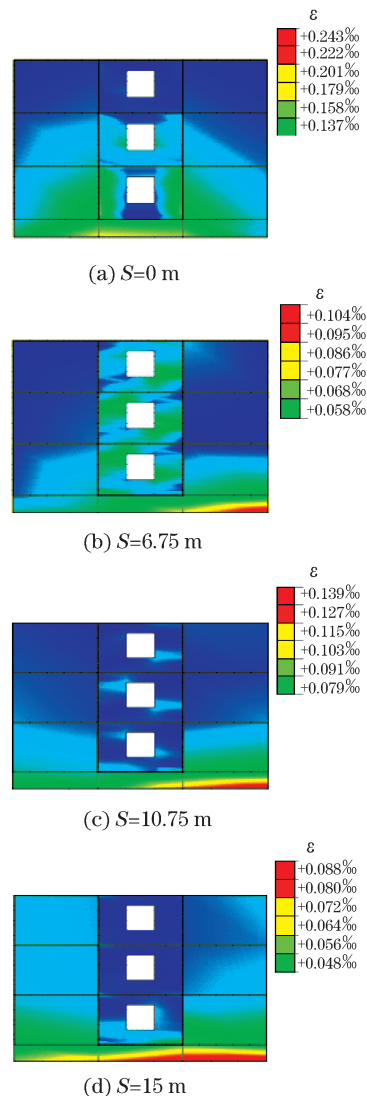


图 14 建筑物横墙主拉应变云图

Fig. 14 Nephogram of principal tensile strain in the transverse wall

当 $S = 0$ m 时,建筑物横墙发生下凹形态的相对挠曲,故墙体产生集中于其中部位置的正“八”字形态的主拉应变,有如下规律:a. 应变较为集中区域发生在门、窗与墙交接处;b. 首层墙体所对应应变值

要大于其他楼层墙体的应变值;c.横、纵墙体连接位置的应变较为明显;e.横墙与基础连接处应变集中现象明显,横墙最大主拉应变为 $0.08‰$ 。

当 $S = 6.75\text{ m}$ 时,横墙相对挠曲变形呈现为“ ∞ ”形态,其特点为:近隧道端为下凹形态相对挠曲,远离隧道一侧将发生微弱上凸形态相对挠曲,因此横墙主拉应变主要分布于建筑物横墙的中部位置,且每层窗间墙主拉应变集中现象明显.主拉应变最大值出现在建筑物横墙远离隧道端基础与墙体相交处,其值为 $0.1‰$ 。

当 $S \geq 10.75\text{ m}$ 时,建筑物横墙相对挠曲呈现上凸形态.横墙上凸形态的相对挠曲在 $S = 10.75\text{ m}$ 时达到最大,此时每层窗间墙主拉应变集中现象明显,主拉应变最大值依旧出现在建筑物横墙远离隧道端基础与墙体相交处,但应变值有所增大,为 $0.14‰$ 。当 $S = 15\text{ m}$ 时,建筑物横墙受盾构开挖土体扰动影响很小,因此主拉应变值亦较小,主拉应变最大值出现在建筑物横墙远离隧道端基础与墙体相交处,其值仅为 $0.08‰$ 。

2.5 建筑物纵墙主拉应变分布规律

建筑物纵墙主拉应变的分布规律因盾构的开挖掘进存在明显的差异,故以 $S = 6.75\text{ m}$ 时建筑物背立面纵墙为例,提取了背立面纵墙主拉应变矢量图,如图15所示。

由图15可知,盾构机掘进时,由于地层损失,开挖面前方一定区域内将产生土体沉降槽.当盾构机开挖至距离建筑 11.55 m (图15(a))时,建筑物受土体沉降槽的影响较小,建筑物纵墙只在近隧道端与基础交接部位产生较小的拉应变,其值为 $0.025‰$ 。

当盾构机开挖至距离建筑 4.35 m (图15(b))时,建筑物受土体沉降槽的影响明显,此时建筑物纵墙主拉应变亦随之增大,各层应变较为集中区域均发生在门、窗与墙交接处,其应变方向大致呈 45° ,其值为 $0.05‰$ 。

当盾构机开挖至建筑纵前端正下方时(图15(c)),建筑物纵墙主拉应变值进一步增大,拉应变分布区域明显扩大,应变方向大致呈 45° ,最大值出现在建筑物纵墙紧邻盾构机一侧的门、窗与墙交接处,其值为 $0.12‰$ 。

当盾构机开挖至纵墙中部正下方时(图15(d)),其基础绝对沉降最大,建筑物纵墙主拉应变值亦达到最大,拉应变分布区域主要集中于纵墙中部及其两侧位置,应变方向大致呈 45° ,集中区域为门、窗与墙交接处,其值为 $0.17‰$ 。

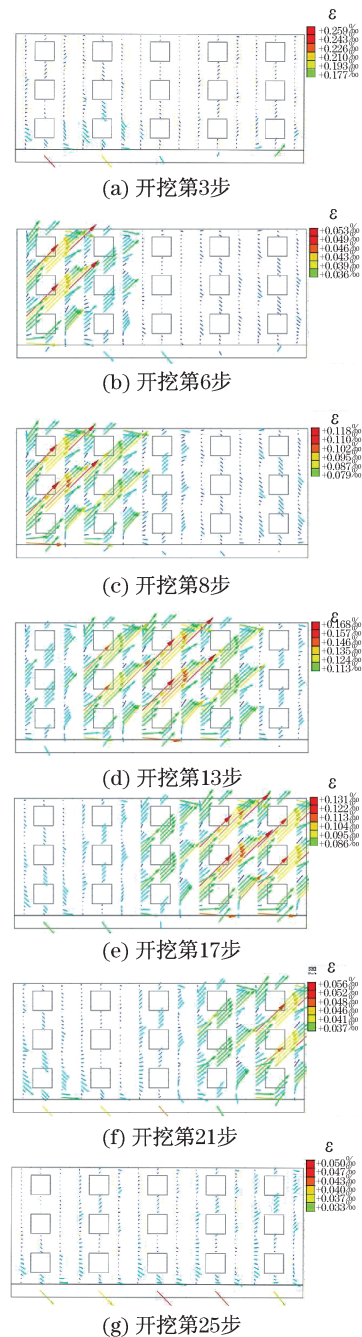


图15 开挖面不同位置时纵墙主拉应变矢量图

Fig.15 Vectors of principal tensile strain in the longitudinal wall at different locations of excavation face

当盾构机即将穿越建筑时(图15(e)),建筑物纵墙主拉应变值有所减小,拉应变主要集中区域则由纵墙中部转移到纵墙后端各层门、窗与墙交接处,应变方向大致呈 45° ,其值为 $0.13‰$ 。

当盾构机即将穿越建筑至开挖完毕时(图15(f),(g)),建筑物纵墙主拉应变值逐渐减小,拉应变主要集中区域从纵墙后端各层门、窗与墙交接处转移至纵墙与基础交接部位,最大值仅为 $0.05‰$ 。

3 结 论

为了研究不同施工距离条件下盾构施工对邻近历史建筑变形影响,本文进行了三维有限元数值模拟分析,得出以下主要结论:

a. 建筑物横向水平位移和纵墙浅基础的沉降值随着隧道与建筑物相对水平距离 S 的增大先增大后减小. 当纵墙下浅基础与隧道二者中轴线重合时,建筑物横向水平位移和沉降最大. 当隧道开挖面位于建筑物中部位置时,建筑物相对沉降量最大,但绝对沉降量并没有达到最大值. 当隧道开挖完成之后,建筑物绝对沉降量最大,此时相对沉降量较小.

b. 随着隧道与建筑物二者纵向中轴线之间的水平距离 S 的增大,建筑物横墙相对挠曲均逐步由下凹形态转变为“ $\cap$ ”形态,最终表现为上凸形态. 当 $S = 0$ m 时,横墙下凹形态的相对挠曲最大,当 $S = 10.75$ m 时,横墙上凸形态的相对挠曲最大.

c. 随着隧道与建筑物二者纵向中轴线之间的水平距离 S 的增大,建筑物横墙主拉应变最大值出现在其下凹和上凸形态相对挠曲最大时. 建筑物纵墙主拉应变则因开挖面位置的不同呈现明显差异,其最大主拉应变随盾构的掘进先增大后减小,峰值出现在盾构开挖至建筑物中部正下方位置.

参考文献:

- [1] BOSCARDIN M D, CORDING E J. Building response to excavation-induced settlement [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(1): 1-21.
- [2] BURLAND J B, WROTH C P. Settlement of buildings and associated damage [C] // Proceedings of Conference on Settlement of Structures. London: Pentech Press, 1974: 611-654.
- [3] 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): 162-177.
- [4] SCHUSTER M, KUNG G T C, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1823-1835.
- [5] DIMMOCK P S, MAIR R J. Effect of building stiffness on tunnelling-induced ground movement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(4): 438-450.
- [6] MIRHABIBI A, SOROUSH A. Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 29: 40-51.
- [7] 周奎, 刘奕斌, 余金鑫. 隧道开挖对近接既有人防工程影响的监测方法 [J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(1): 91-96.
- [8] 魏纲, 魏新江. 双线盾构施工对邻近框架建筑物影响的研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 339-343.
- [9] 柳厚祥, 任志勇, 陈思宇. 隧道不同位置下穿施工引起邻近建筑物的变形分析 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 128-137.
- [10] 王浩然, 王卫东, 徐中华. 基坑开挖对邻近建筑物影响的三维有限元分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S2): 1512-1517.
- [11] 王卫东, 徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 32-38.
- [12] 郑刚, 李志伟. 基坑开挖对邻近任意角度建筑物影响的有限元分析 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 615-624.
- [13] 郑刚, 李志伟. 不同围护结构变形形式的基坑开挖对邻近建筑物的影响对比分析 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 969-977.
- [14] 李佳宇, 陈晨. 坑角效应对基坑周围建筑物沉降变形影响的研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2238-2246.
- [15] 徐长节, 金飏, 孙凤明, 等. 桩基施工及基坑开挖对邻近建筑物联合影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 809-813.

(编辑: 丁红艺)