

顶管施工对上部墙体沉降影响分析

曹书文, 赵冬, 张卫喜

(西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为研究托换工程对上部砌体结构的影响,将上部墙体简化为深梁模型,考虑了墙体弹性模量与剪切模量比值的变化、中性轴位置的变化,推导出了将墙体沉降比和应变结合起来的墙体允许沉降公式,该公式可根据上部结构材料性能的变换得到不同允许沉降值,可更灵活的用于顶管施工对上部结构的影响分析。

关键词:顶管;深梁模型;沉降;应变

中图分类号:TU441⁺.6

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)02-0292-05

随着对古建筑保护工作的日益重视以及地铁的兴建和深基坑工程的大量出现,托换技术蓬勃发展,但现有文献主要集中在对托换方法及托换工程的讨论,而对托换工程对上部结构的影响的讨论甚少,本文在结合古建筑保护实例,分析了顶管施工对上部砌体结构沉降的影响。

1 工程背景

延庆观位于开封市西南隅,为纪念全真教祖师王重阳而建,始建于金代,明洪武六年改为延庆观,其斋堂也改称为玉皇阁。玉皇阁自建造以来,经历较大水患十余次,因黄河水富含泥沙,玉皇阁由原来高于原地,“降至”位于现有地面以下 2.85 m 处。勘察表明,开封地下水埋深约 2.0~2.6 m,且玉皇阁距包公湖的直线距离仅 100 m 余,使得玉皇阁基础长期浸于水下,碱蚀严重,承载能力大大降低。为解决玉皇阁的结构病害,确定了整体顶升的保护方案,使之高于现有地面,以便从根本上解决玉皇阁不均匀沉降和地下水导致的结构病害。然而局限于当时的建筑技术条件,玉皇阁墙体下无基础,无法直接进行顶升,需先进行基础托换^[1]。托换过程中由于对原地基的开挖,将会产生应力释放和土体损失,使上部墙体产生竖向不均匀沉降和水平位移,从而使墙体应力发生变化,产生应力集中和变形,若变形较大,则有可能导致上部墙体破坏,故须先对可能产生的破坏进行评估。

2 基于深梁模型的分析方法

顶管施工对地面运动影响的研究,常采用的方法有:(1)经验法;(2)解析法;(3)数值法;(4)半解析半数值法;(5)模型实验法等。由于此阶段仅仅是评估地面运动,经验法即可满足其精度要求。在众多的经验法中,Peak 法是应用最简便、最广泛、影响最大的方法;随机介质理论方法近十多年也被应用于预测隧道施工引起的地表沉降^[2-3]。韩焯^[4]在前人的研究基础上,提出了“刚度修正法”来考虑建筑物对沉降曲线的影响。其基本公式为

$$\delta = \frac{AV_l^s}{\sqrt{2\pi K^s z_0}} \exp\left[-\frac{x^2}{2K^s z_0^2}\right] \quad (1)$$

由于隧道施工、基坑开挖等引起地面沉降对上部结构的影响,从上世纪 50 年代起国内外大量学者就进行了相关研究。我国学者阳军生^[2,3]等在隧道施工引起的地表变形方面做了大量的工作,Burland, J. B.^[5]对由于隧道施工和对基坑开挖对上部结构的影响进行了大量的理论研究和实际测试,且 Burland 的研究在世界范围内具有较大的影响。

收稿日期:2012-10-29 修改稿日期:2013-03-27

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51178387)

作者简介:曹书文(1979-),男,河南漯河人,讲师,博士,主要从事古建筑保护研究及力学教学。

对于由烧结砖砌体墙承重的结构,其破坏多是由于材料承受了太大的荷载而超过了其极限抗拉强度,即墙体的破坏是由于其应变超出了极限拉应变. Burland 和 Wroth 通过分析得出砌体的极限拉应变 $0.5\% \sim 0.75\%$; 其他学者也进行了相应的研究,得出砖砌体墙在拉应变为 $0.2\% \sim 0.3\%$ 时将产生裂缝,且当拉应变为 0.5% 时裂缝能明显看出.

Burland 将砌体结构的一片墙体简化为一个高为 H , 长为 L 的单位厚度的深梁(图 1)^[6]. 对该模型,可能的变形模式为(1)弯曲变形(图 1b); (2)剪切变形(图 1c); (3)弯曲和剪切变形.

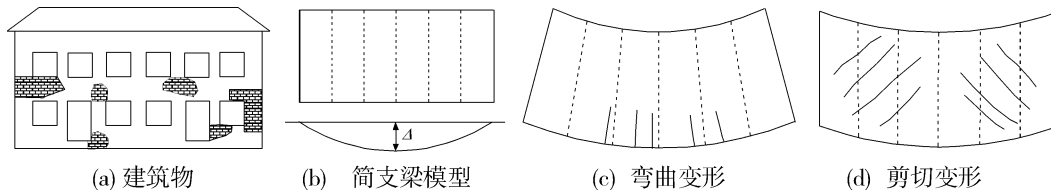


图 1 砌体结构墙体的深梁模型

Fig. 1 The deep model of masonry wall

当仅发生弯曲变形时,设中性轴在梁的中部,最大弯曲变形为 $\epsilon_{b(\max)}$, 且其发生在 $y = H/2$ 处; 当仅发生剪切变形时,设最大剪切变形为 $\gamma_{(\max)}$, 最大主应变为 $\epsilon_{d(\max)}$, 且位于与中性轴 45° 处. 当弯曲变形和剪切变形同时发生时,设最大变形为 Δ , Burland 假设泊松比 $\nu = 0.3$, 当中性轴在梁的中部时:

$$\frac{\Delta}{L} = \left(0.167 \frac{L}{H} + 0.65 \frac{H}{L} \right) \epsilon_{b(\max)} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta}{L} = \left(0.25 \frac{L^2}{H^2} + 1 \right) \epsilon_{d(\max)} \quad (3)$$

Burland 的公式简洁实用,但其未考虑不同建筑的刚度变化和受力时中性轴的变化. 实际建筑物在沉降时,由于建筑物结构形式不同,刚度不同,荷载大小不同,墙体中性轴位置也不同. 若考虑建筑物弹性模量、剪切模量的变化,在 Burland 的公式不将 E/G 消去,而是显式地表示出来,同时考虑受力时中性轴的移动,则上述公式可扩展为

$$\frac{\Delta}{L} = \left\{ \frac{1}{12\lambda} \frac{L}{H} + \frac{3}{2\lambda} \left[\frac{1}{12} + \left(\frac{1}{2} - \lambda \right)^2 \right] \frac{E}{G} \frac{H}{L} \right\} \epsilon_{b(\max)} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta}{L} = \left\{ \frac{3}{\left[3 + 27 \left(\frac{1}{2} - \lambda \right)^2 \right] \frac{E}{G} \frac{L^2}{H^2} + \frac{3}{2}} \right\} \epsilon_{d(\max)} \quad (5)$$

式中 λ 为中性轴到梁底部距离与梁高度的比值.

对 E 和 G 的确定,可以采用实测法和数值模拟方法. 实测法可信度高,但对古建筑而言有时不易进行,而数值模拟方法可以方便地得到结果. 数值模拟方法如下:

弹性模量 E 的确定方法为: (1) 建立砌体结构的简支深梁模型(图 2(a)); (2) 在梁上施加纯弯矩 M ; (3) 模拟深梁在纯弯矩作用下的最大变形 Δ ; (4) 由纯弯曲条件下变形公式得到弹性模量 E 的计算公式 $E = ML^2/(8\Delta I)$, 其中 I 为极惯性矩.

剪切模量 G 的确定方法为: (1) 建立砌体结构的悬臂深梁模型(图 2(b)); (2) 在梁的自由端

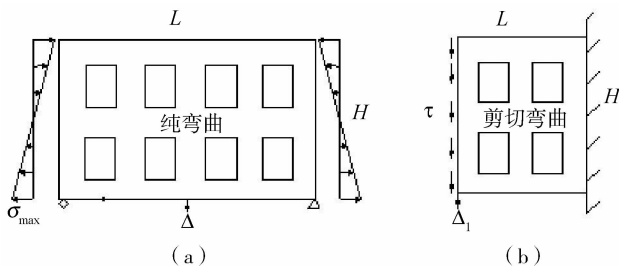


图 2 弹性模量 E 和剪切模量 G 的确定方法

Fig. 2 Determination method for elastic modulus E and shear modulus G

施加剪切应力; (3) 模拟深梁在剪切作用下的最大变形 Δ_1 , Δ_1 包含剪切变形和弯曲变形; (4) 由公式 $\Delta = PL^3/(3EI)$ 确定弯曲变形 Δ_2 的大小,进而得到纯剪切作用下的变形 $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$; (5) 由悬臂深梁变形公式得到剪切模量 G 的计算公式 $G = 1.2PL/(\Delta A)$, 其中 A 为横截面积.

将式(4)以图示形式表示出来如图 3. 由图中可以看出,在 E/G 不变的情况下,随着 λ 即中性轴到底部距离与梁高度的比值的增大, $\Delta/L\varepsilon$ 的比值逐渐减小,即对某一确定的建筑物而言,所允许的最大沉降也越小. 在 λ 不变的情况下,随着 E/G 的减小, $\Delta/L\varepsilon$ 的比值逐渐减小,即对某一确定的建筑物而言,所允许的最大沉降也越小.

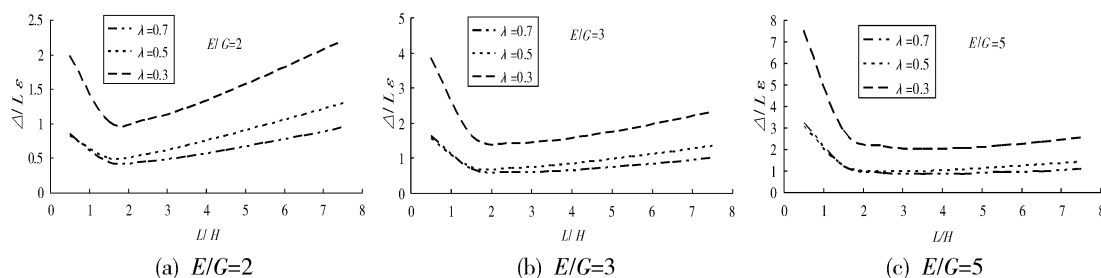


图 3 中性轴高度和 E/G 的影响

Fig. 3 The effect of neutral axis depth and E/G

目前我国《建筑地基基础设计规范》对建筑物地基变形值仅按照建筑类别规定了相应的比值,但对同类建筑物,如砌体结构建筑,其建筑材料、建设时间、墙体分布形式等都各不相同,若统一规定参照某一比值则有失偏颇. 式(4)和(5)可以按照结构参数的变化,由材料的应变值确定出结构的最大沉降,从而在建筑物保护工程中对沉降能有更好的理解.

3 实例分析

为了预估顶管施工对上部阁体沉降的影响,首先考虑自由场地时顶管施工对地面运动的影响. 由于是粗略预估,采用 Peak 法即可满足精度要求. 由 Peak 法公式,得到的地表沉降如图 4. 由图 4 可知,最大沉降 Δ 为 0.032 8 m,玉皇阁单面墙体长 $L=10$ m, $\Delta/L=3.28\%$,超出了《建筑地基基础设计规范》^[6]等的规定,且由于玉皇阁具有 800 年左右的历史,材料性能和整体性能退化较大,故必须进一步按式(4)、(5)考虑其安全性.

由前人研究可知,砖砌体墙在拉应变为 $0.2\%\sim 0.3\%$ 时将产生裂缝,当极限拉应变为 0.5% 时砌体将产生可见裂缝.

对玉皇阁保护工程,对墙体进行模拟得 $E/G=3.2$,考虑沉降时中性轴的变化可得:

$$\Delta/(L\varepsilon) = 2.502$$

即安全的不均匀沉降为: $\Delta = 12.51$ mm

由前面分析可知,最大沉降为 19.4 mm,故沉降将对结构产生破坏,需要在基础托换前先对上部阁体进行加固保护. 对上部阁体的预加固,主要采用四种方式:(1)对上部阁体,从上到下设置 5 道水平钢箍以提高其整体性;(2)在穹拱底部采用预应力钢绞线拉结以抵消其推力;(3)在阁体内部设置满堂红脚手架以承担部分自重;(4)在角部设置加腋撑、石梁下设置型钢弹性支撑、门窗洞口设置钢管支撑以降低其应力.

另外,在工程中应尽量减小土体位移. 土体产生位移的主要因素可概况为:(1)顶管施工时受迎面阻力、箱梁和土体之间的摩擦力和土层损失等多方面的影响,土体产生变形,并产生附加应力,导致上部结构沉降. 此过程主要集中在顶管施工时间范围内;(2)土体固结时孔隙比发生,顶管施工过程中局部开挖及箱梁和土体之间的相互作用使土体的应力状态发生变化,土体体积随着变化. 施工过程中,土体经历了应力释放、体积膨胀和受压变形,部分水从土体中排出,土体中的空隙压力转化为土体颗粒间的有效应力,直至土体变形稳定;(3)箱梁顶面与阁体墙底预留土层厚度也影响阁体沉降. 预留土层受到上部结构自重的作用、箱梁顶进时的剪切作用,故该部分土体大部分甚至全部产生塑性变形,土体承载力降低,且顶进时部分土体被带走或挤出部分土体,使得预留土层密实度降低. 在上部阁体自重作用下产生附加沉降.

由上述分析可知,减小土体位移,可采取如下措施:(1)提高施工质量,尽量减少超挖的发生,以减少土层损失;(2)采用注浆措施降低顶管和土体间的摩阻力;(3)采用不间断施工,缩短施工时间的办法来

减小由于顶管施工结束后土体受扰动,空隙水压力消散产生的主固结和土体骨架蠕变产生的次固结造成的附加沉降;(4)应根据土质状况,选择适当的土层厚度,使之即能有效降低箱梁顶进产生的剪切作用对墙体的剪切破坏,又能避免较大的自身变形。

4 结 语

(1)基于深梁模型,考虑了墙体弹性模量与剪切模量比值的变化、中性轴位置的变化,推导出了将墙体沉降比和应变结合起来的墙体允许沉降公式,该公式可根据上部结构材料性能的变换得到不同允许沉降值,可更好的用于顶管施工对上部结构的影响分析。

(2)得到了墙体弹性模量和剪切模量的理论分析方法,可用于古建筑等不宜进行实测的结构。

(3)分析了顶管施工土体沉降的原因,提出了减小土体沉降的措施和提高结构整体性的参考方法。

参考文献 References

- [1] 陈 平,吴 清,张卫喜. 开封玉皇阁整体顶升保护技术[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011,43(4):470-473.
CHEN Ping, WU Qing, ZHANG Wei-xi. Lifting Yuhuang Pavilion integrally[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2011,43(4):470-473.
- [2] 刘宝琛,张家生. 近地表开挖引起的地表沉降的随机介质方法[J]. 岩石力学与工程学报,1995,14(4):289-296.
LIU Bao-chen, ZHANG Jia-sheng. Stochastic method for ground subsidence due to near surface excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995,14(4):289-296.
- [3] 阳军生,刘宝琛. 挤压式盾构隧道施工引起的地表移动及变形[J]. 岩土力学,1998,19(3):10-13.
YANG Jun-sheng, LIU Bao-chen. Ground surface movement and deformation due to tunnel construction by squeezing shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998,19(3):10-13.
- [4] 韩 焯. 隧道施工引起地层位移计建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.
HAN Xuan. The analysis and prediction of tunneling-induced building deformations[D], Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [5] BURLAND J B, STANDING J R, JARDINE F M. Building response to tunneling. Case studies from construction of the Jubilee Line Extension. Volume 1: Projects and methods[M]. London: Thomas Telford Publishing, 2001.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50007-2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

Effect of pipe jacking construction on the settlements of the upper wall

CAO Shu-wen, ZHAO Dong, ZHANG Wei-xi

(School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The effect of pipe jacking construction on the settlements of is analyzed with the upper masonry structure, the upper wall simplified to a deep beam. The ratio of elastic modulus to shear modulus and the location of neutral axis are considered, and the allowable settlement formulas combined with settlement and strain are deduced, by which the different allowable settlements can be obtained according to different material properties. The formulas can be used to analyze the effect of pipe jacking construction on the settlements of the upper structures flexibly.

Key words: pipe jacking; deep beam; settlement; strain