

盾构隧道施工对临近砖石古塔的影响研究

石卫^{1,2}, 王志清³, 刘高阳³, 朱才辉³, 郑俊³, 彭森³

(1. 陕西省城市地质与地下空间工程技术研究中心, 陕西 西安 710068;

2. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068;

3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 城市地下空间开发与规划中地铁建设对临近古建筑的安全带来了严峻挑战。为了开展地铁盾构隧道施工对临近古建筑的影响,以地铁临近的典型古塔施工为背景,基于数值分析方法研究地铁与不同塔体、不同空间位置等因素对古塔的整体倾斜、局部倾斜和拉应力的影响。结果表明:地铁距离古塔越近,埋深越浅时,塔体的整体倾斜值、局部倾斜和拉应力越大,地铁开挖对塔体稳定性影响越大;地铁施工临近不同高宽比的古塔,对其稳定性影响存在显著差异,当地铁与古塔水平间距 $L \leq 3D$ (D 为开挖洞径)时,高宽比 η 增大,塔体整体稳定性下降,当 $5D \geq L > 3D$ 时,且高宽比 $\eta \leq 6.0$ 时,古塔的整体稳定性随着高宽比增加而上升,当 $\eta > 6.0$ 时,古塔整体稳定性随着高宽比增加而下降。临近地铁埋深 $H \geq 15$ m,水平净间距 $L \geq 4.2D$ 时才能保证古塔安全稳定。

关键词: 盾构隧道施工;砖石古塔;稳定性评价;选线

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2025)04—0084—10

Impacts Study of Shield Tunnel Construction on Nearby Masonry Pagodas

SHI Wei^{1,2}, WANG Zhiqing³, LIU Gaoyang³, ZHU Caihui³, ZHENG Jun³, PENG Sen³

(1. Shaanxi Engineering Technology Research Center for Urban Geology and Underground Space, Xi'an, Shaanxi 710068, China;

2. Shaanxi Hydrogeology Engineering Geology and Environment Geology Survey Center, Xi'an, Shaanxi 710068, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Subway construction has brought serious challenges to the safety of ancient buildings in the development and planning of urban underground space. It is of great significance to analyze the influence of subway construction on adjacent ancient buildings to propose disaster prevention and mitigation measures during underground space development. Based on the background of the construction of the subway near the ancient pagoda, this work uses MIDAS/GTS - NX numerical software to analyze the influence of subway, different tower body and different spatial location on the overall inclination, local inclination and tensile stress of the ancient pagoda based on numerical simulation analysis. The results are as follows. The closer the subway is to the ancient tower and the shallower the burial depth is, the greater the overall tilt value, local tilt and tensile stress of the tower, and the greater the impact of subway excavation on the stability of the tower. The subway is close to the construction of the ancient tower with different high span ratios, and there is a significant difference in the impact on its stability. When the horizontal distance between the subway and the ancient tower is $L \leq 3D$, the high span ratio η increases and the overall stability of the tower decreases, when $5D \geq L > 3D$ and the high span ratio $\eta \leq 6.0$, the stability of the ancient tower rises with the increase of the high span ratio, and when $\eta > 6.0$, the overall stability of the tower decreases with the increase of the high span ratio. In order to ensure the safety and stability of the tower, it is recommended that the depth of the adjacent subway is $H \geq 15$ m, and the horizontal net spacing $L \geq 4.2D$.

Keywords: shield tunnel construction; masonry pagodas; stability evaluation; route selection

收稿日期: 2025-03-19

修稿日期: 2025-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279110, 52178355, 52108339); 陕西省公益性地质专项(202406); 陕西省城市地质与地下空间工程技术研究中心开放课题(2024KT-04, 2024KT-01)

作者简介: 石卫(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程地质与城市地质安全等方面工作。E-mail: shiwei_gz@163.com

通讯作者: 朱才辉(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事黄土力学与工程等方面的调查研究工作。E-mail: zhucaihui123@163.com

随着我国轨道交通的迅猛发展,城市地下空间的开发利用已成为社会发展的必然趋势。然而,不可避免地会对古建筑的安全构成威胁。据不完全统计,仅陕西省内古塔的数量就高达300多座,古建筑在城市地铁选址时理应尽可能避开。但受限于城市空间的紧张和快速的开发需求,临近古建筑的地下工程施工日益增多。地铁隧道的建设对古塔的安全产生了不容忽视的影响,可能导致古塔出现开裂、倾斜甚至破坏等严重危害,从而严重影响其使用寿命。因此,合理控制地铁与古塔的空间位置,对于地铁选线的合理规划、文物保护以及文旅价值的开发显得尤为重要。这不仅涉及到工程技术的挑战,也是城市发展与历史文化遗产保护之间协调发展的重要体现。

在砖石古塔的病害、结构稳定性以及倾斜纠偏等领域,国内外学者已经进行了广泛的研究。特别是在隧道施工对古建筑影响的研究方面,如朱正国等^[1]以荣乌高速公路黄土岭连拱隧洞下穿黄土岭口长城为工程背景,运用ANSYS有限元软件分析隧道施工过程中对古城墙体破坏程度,探究隧道下穿古长城的变形规律,研究表明,为保证古长城不被破坏,当控制隧道最终沉降标准定为20 mm,爆破振速为2 cm/s时,长城的局部倾斜值接近1/1000。赵爱军等^[2]以西安地铁隧道为背景,采用修正摩尔库仑模型(MM-C模型)和DP模型来描述复杂加卸载条件下的地层隆沉问题,并深入研究水环境变化下地表沉降规律,认为随着盾构管片渗漏比增大地下水水位逐渐下降,地表下沉量在逐渐增加;董立波^[3]为研究盾构掘进对邻近既有建筑物变形的影响范围,采用Midas/GTS有限元软件,充分考虑土层-结构相互作用,动态模拟盾构掘进过程,得出建筑物远离盾构隧道开挖一侧位移远小于邻近开挖一侧的结论;唐海玥等^[4]、何山等^[5]采用ABAQUS有限元模拟城市地铁盾构施工诱发地层沉降影响,对开挖距离,支护及刚度条件对古建筑地表沉降进行分析,得出实测数据比数值模拟相差5.41%;且推进距离增加3倍时,古建筑地表沉降幅度降低10%;杨国栋^[6]、张帅超等^[7]对城市轨道交通施工及运营期诱发表沉降进行研究,随着地铁隧道的逐渐运行造成的沉降,可能会危及周边古建筑在内的构筑物的安全,并且总结了古建筑及地表沉降的研究成果。

也有部分学者开始关注于如何通过科学的方法和措施来保护和修缮这些古建筑,以应对地铁施工等现代工程活动可能带来的影响,并针对具体塔结构提出了结构处理措施。张逸静^[8]研究了苏州轨

道交通4号线对沿线古建筑的影响,并比较了不同隔振屏障的效果,提出了古建筑的安全距离;谷拴成等^[9]对盾构施工过程诱发地表沉降问题预测进行研究,运用了随机介质理论对沉降预测,结合随机介质理论预测得到与实际情况相符合的沉降数据;吴昌^[10]等通过地铁线路研究盾构施工引起周围建筑的倾斜及失稳状态,并且提出了不同的保护措施;杨超通过对贵阳地铁盾构隧道下穿高速铁路会对铁路轨道、路基等构筑物沉降产生影响展开研究,得出盾构机穿越路基和隧道贯通时会引起路基沉降的突变,随着开挖的进行,路基沉降会产生沉降峰值的转移^[11]。郝东阳等研究盾构隧道施工对周边地表及建筑物的影响,得出地质状况、盾构机的定位控制、推进力的分配及灌浆技术等多种因素对邻近地面和结构物下沉有显著影响^[12-13]。任志力^[14]以罗马地铁C线为研究对象,研究了地铁隧道以及车站建设对周边环境的影响,发现在帝国广场站深箱结构采用盖挖逆作法施工,对周边环境的影响较小,并且对斗兽场站进行补偿注浆,可以有效控制沉降。王超等^[15]从地铁振动的级别和振动加速度两方面入手研究了地铁振动对建筑物的影响规律。周勇等^[16]以南昌地铁隧道下穿南昌科技大楼段工程为依托,建立三维有限元模型,研究了地铁在曲线地段运行时引起的振动对邻近建筑的影响。林一修^[17]基于南昌某地铁隧道为研究对象,利用相似理论设计试验并结合Abaqus软件进行数值模拟,研究了盾构侧穿施工对临近摩擦桩的影响,发现桩基水平位移和变形受开挖影响较大,桩基距离隧道越近,所受开挖影响越大,桩基越长受开挖影响越大。这些成果为理解和解决地铁隧道施工对古塔建筑破坏及稳定性的影响提供了重要的科学依据,同时也为地铁选线、文物保护和文旅价值的开发提供了实践指导。

综上所述,地铁隧道施工对临近古建筑的影响因素较为复杂,以往的研究未结合整体倾斜、局部倾斜和最大拉应力综合考虑地铁隧道的空间位置对古建筑的影响,地铁的线路规划中遇到古建筑也存在一定的技术瓶颈。为此,本研究通过MIDAS GTS NX有限元分析软件,研究隧道不同空间位置、不同塔体等因素对古塔的安全影响程度,进而提出适宜的地铁选线控制标准,为地下空间的规划和选址提供科学依据。

1 典型砖石古塔概况

陕西全省现存各种类型的塔300多座,大多数古塔都受到病害侵袭,其中主要病害:塔身倾斜,裂

缝、坍塌,塔砖体出现缺失、松动、剥蚀的病害。本文以小雁塔、净光寺塔、大象寺塔、万寿寺塔等四个典型古塔作为研究对象,开展其在临近地铁施工时对其稳定性影响研究。

(1) 小雁塔位于西安市荐福寺院内,结构为密檐式砖塔,塔底边长为 11.38 m,塔体共分为 13 层,现塔体高 43.4 m,塔基是砖方台做成的,基座长约 23.38 m,高 3.2 m,塔体为空心,呈方锥形,地铁 5 号线距离小雁塔最短距离为 200 m,曾由于地震及其他原因,出现“三开三合”传奇经历,在 1487 年首次开裂,又于 1521 年地震而合拢,第二次于 1556 年开裂,且于 1564 年的华县地震余震中“塔合无痕”,第三次于 1691 年又一次开裂,于 1721 年复合。小雁塔如图 1(a) 所示。

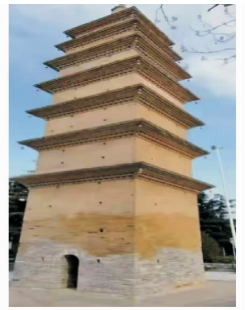
(2) 眉县净光寺塔位于眉县的政府大院,净光寺为阁楼式 7 层砖塔,其中一层为空心,其尺寸为外边长 4 450 mm,内边长为 1 630 mm,墙厚 1 190 mm,上部六层包括塔刹为实心。塔体以 360 mm × 180 mm × 70 mm 方砖及黄泥砌成,塔基主要为夯土,塔基呈方形,边长 4.45 m。塔高 22.44 m,净光寺塔上部出现坍塌迹象;主要病害为:塔身整体向东北方向倾斜,在 1998 年测得向北偏东倾斜 7.525°,在 2001 年 7 月经陕西省文物局立项,对眉县净光寺塔采取“成孔-软化”工程纠偏措施,倾斜矫正量达 31%,原来向北倾斜 1.64 m 的塔体,最终向南纠偏 1.02 m,净光寺塔如图 1(b) 所示。

(3) 合阳大象寺塔始建于宋朝,位于陕西省合阳县。大象寺塔为 13 层密檐式实心砖塔,残高约 28 m,由青砖黄泥砌筑而成,塔基主要由青砖砌筑而成,平面呈方形,底边长 4.80 m。一层西墙有券洞,券洞的洞门宽 0.8 m,高 1.5 m,存在问题有:存在非常严重塔体倾斜,最大倾斜已超过 5°,如图 1(c) 所示。

(4) 西安万寿寺塔位于西安市西光中学高中部的校园,万寿寺塔为 6 层六边形楼阁式砖塔,其中 1~3 层为空心塔体,空心直径为 1.2 m,4~6 层为实心塔体,内部构造不详,塔体主要由青砖和黄泥砌筑而成,塔基主要由砖砌筑而成,对角线长 12.4 m,高 2.8 m。底层边长约为 3.1 m,塔体高度为 23.45 m,主要问题是塔身有向东北方向倾斜的迹象,多年向西北方向倾斜,2011 年 5 月底观测,塔顶出现 1.2 m 偏移量。2011 年 6 月 1 日倾斜值为 2.231 m;对万寿寺塔的纠偏措施同样也采取“成孔-软化”的措施,塔体纠偏后,塔尖南北方向由原来的偏移 1.62 m 缩小为 0.62 m,矫正了 61%;塔尖东西方向回倾 0.52 m,矫正 70%,万寿寺塔如图 1(d) 所示。



(a) 小雁塔



(b) 净光寺塔



(c) 大象寺塔



(d) 万寿寺塔

图 1 典型古塔现状

2 数值分析方法

2.1 数值模型的构建

为探究地铁盾构施工对于不同形制砖石古塔倾斜的影响,针对砖石古塔临近地铁施工开展数值模拟,模型主要包括塔体、土层和地铁三大部分。同时对小雁塔、大象寺塔、净光寺塔、万寿寺塔建立数值模型;隧道直径均为 6 m,夯土采用实体平面应变单元,采用修正莫尔库伦模型,开展的数值模拟采用总应力分析,砖塔体采用弹性模型模拟;根据圣维南原理,影响区域在 3~5 倍塔基宽度,地基长度是基座的 6 倍,小雁塔的底边基座边长为 23.38 m,地基长 140 m;净光寺塔的底边为 4.45 m,取地基长度 27 m;大象寺塔底边为 4.8 m,取地基长度为 30 m;万寿寺塔的底边为 3.0 m,地基长度为 20 m,四个塔体土层深度均取 50 m。在隧道底部设置固定约束于 X、Y、Z 方向位移,模型顶面为自由位移边界,模型正面、背面设置 Y 方向约束,两侧约束为 X 方向固定。

施工过程中均未考虑地下水位影响,地铁隧道施工及对临近古塔影响过程的模拟流程如下:

(1) 初始应力平衡模拟:激活自重应力场及约束,位移清零。

(2) 隧道开挖模拟:钝化隧道部位土层,模拟应力释放,开挖期间应力释放率为 30% (删除隧道网格)。

(3) 隧道支护:激活管片及壁后注浆层(添加管片和注浆网格),支护期间应力释放率为70%。

(4) 计算分析古塔的局部倾斜、整体倾斜及拉应力场分布特征,并进行稳定性评价。

2.2 数值分析方案

古塔与隧道空间位置关系见图2。假定砖石古塔与隧道相对水平净间距为 L/D (L 为隧道与塔身净水平间距; D 为地铁隧道开挖洞径),可取 $L/D = 1、2、3、4、5$;同时分析地铁不同埋深 $H = 5\text{ m}、10\text{ m}、15\text{ m}、20\text{ m}$ 对砖石古塔的倾斜及拉应力影响。

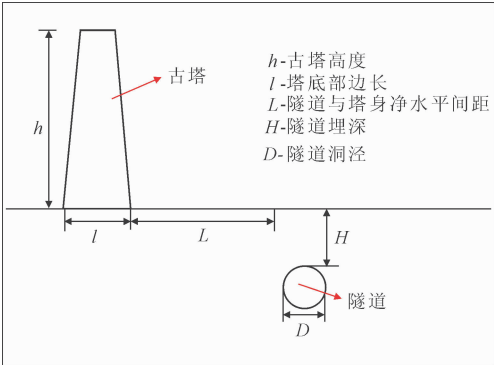


图2 塔体与地铁的空间关系示例

为了分析地铁隧道工程对不同古塔稳定性的影

响,定义高宽比 η 为:

$$\eta = \frac{h}{l} \tag{1}$$

式中: η 为不同塔体高宽比; h 为塔体高度; l 为塔体跨度(塔体底部边长);根据调研结果设置了小雁塔($\eta = 1.8$)、净光寺塔($\eta = 5.0$)、大象寺塔($\eta = 5.8$)和万寿寺塔($\eta = 7.8$)等四类塔体高宽比开展模拟。

2.3 本构参数的选取

不同砖石古塔的典型黄土地层分为:新黄土 Q_3^{col} 、老黄土 Q_2^{col} 、粉质黏土 Q_2^{al} ,具体土层参数见表1^[18],塔体结构参数见表2,塔基结构参数见表3。黄土地层采取修正摩尔库伦模型,割线刚度,卸荷模量参数难以获取,因此,引入割比系数 n 和卸荷系数 α :

$$n = \frac{E_{50}^{\text{ref}}}{E_s} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{E_{ur}^{\text{ref}}}{E_{50}^{\text{ref}}} \tag{3}$$

式中: n 为割比系数; α 为卸荷系数; E_{50}^{ref} 为割线刚度,MPa; E_{ur}^{ref} 为卸荷模量,MPa。

根据以往的工程经验发现:京津区域以及上海区域工程经验取值 $n = 0.9 \sim 2.0, \alpha = 2.0 \sim 9.0$ 之间,本研究选取 $\alpha = 4.5, n = 1.4$ 。

表1 土层参数

古塔名称	名称	厚度/m	E_s /MPa	E_u /MPa	E_{50}^{ref} /MPa	E_{ur}^{ref} /MPa	ν	e	c /kPa	φ /($^{\circ}$)
小雁塔	新黄土 Q_3^{col}	2	2.25	—	3.15	14.17	0.32	0.95	24.0	20.0
	老黄土 Q_2^{col}	11	4.75	—	6.65	29.92	0.31	1.10	21.0	22.0
	粉质黏土 Q_2^{al}	37	11.36	—	15.90	71.56	0.30	0.76	28.0	26.0
净光寺塔	新黄土 Q_3^{col}	8	7.60	—	10.64	42.56	0.33	1.05	21.8	15.9
	老黄土 Q_2^{col}	6	5.40	—	7.56	34.02	0.32	0.98	19.0	19.2
	粉质黏土 Q_2^{al}	36	14.20	—	19.88	89.46	0.30	0.83	31.6	22.3
大象寺塔	新黄土 Q_3^{col}	1	2.92	—	4.08	18.396	0.32	1.01	20.9	16.3
	老黄土 Q_2^{col}	12	13.10	—	18.34	82.53	0.32	0.99	25.2	21.5
	粉质黏土 Q_2^{al}	37	15.20	—	21.28	95.76	0.31	0.71	29.8	23.2
万寿寺塔	新黄土 Q_3^{col}	3	3.10	—	4.34	19.53	0.32	0.90	24.0	18.0
	老黄土 Q_2^{col}	13	6.70	—	9.38	42.21	0.32	1.20	19.9	24.0
	粉质黏土 Q_2^{al}	34	12.10	—	16.94	76.23	0.30	0.72	29.8	28.0

注: E_s 为压缩模量; E_u 为弹性模量; E_{50}^{ref} 为割线刚度,MPa; E_{ur}^{ref} 为卸荷模量,MPa; ν 为泊松比; e 为孔隙比; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

表2 塔体结构参数

名称	厚度/m	E_s /MPa	E_u /MPa	E_{50}^{ref} /MPa	E_{ur}^{ref} /MPa	ν	e	c /kPa	φ /($^{\circ}$)
塔体	—	—	261	—	—	0.15	—	—	—
衬砌	0.3	—	23000	—	—	0.20	—	—	—
注浆层	0.2	—	400	—	—	0.25	—	—	—

表 3 塔基结构参数

名称	$\omega/\%$	$S_r/\%$	I_L	a_{1-2}/MPa^{-1}	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	e	δ_s	σ_c/GPa	σ_b/MPa
小雁塔塔基	—	—	—	—	18.0	—	—	0.125	19.0
净光寺塔塔基	19.7	68	0.06	0.16	18.2	0.795	0.009	—	—
大象寺塔塔基	6.9~14.1	16~31	<0	0.09~0.57	12.7~14.5	1.058~1.348	0.063~0.148	—	—
万寿寺塔塔基	18.2~27.3	40~61	0.04~0.77	0.27~1.59	14.0~16.2	1.081~1.211	0.026~0.075	—	—

注: ω 为含水率; S_r 为饱和度; I_L 为液性指数; a_{1-2} 为压缩系数; γ 为重度; e 为孔隙比; δ_s 为湿陷系数; σ_c 为抗拉强度; σ_b 为抗压强度。

2.4 古塔稳定性评价方法

古塔作为一种高耸的建筑物,其稳定性的评估主要从两个维度进行考量:一是塔体的倾斜情况,二是塔体的受力状态。在倾斜情况中,细分为整体倾斜和局部倾斜两种情况^[19]。

2.4.1 塔体倾斜程度

(1) 整体倾斜

整体倾斜指的是古塔的顶部横向位移与古塔底部横向位移之差与塔体底部距离的比值,古塔的整体倾斜评价计算如图 3 所示。计算方法如式(4)所示;整体倾斜限值依据表 4 建筑物纠偏设计和施工验收合格标准确定。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{S_{xT} - S_{xB}}{h}$$

(4)

式中: θ 为古塔整体倾斜的角度, ($^{\circ}$); S_{xT} 为古塔顶部横向位移距离, mm; S_{xB} 为古塔底部横向位移距离, mm; h 为古塔高度, mm。

表 4 建筑偏差修正设计及施工验收标准	
建筑高度/m	整体倾斜允许值/($^{\circ}$)
$H_g \leq 20$	$\theta \leq 0.46$
$20 < H_g \leq 50$	$\theta \leq 0.29$
$50 < H_g \leq 100$	$\theta \leq 0.23$

(2) 局部倾斜

局部倾斜指由于塔体并不是完全刚体,以及地基的反作用力 $f_{地}$,在沉降时会产生塔底开裂,其具体计算方法定义为古塔底部两侧竖向位移差值与古塔底部边长的比值。古塔的整体倾斜评价计算如图 3 所示。古塔局部倾斜不允许超过 $0.5‰$ ^[20],局部倾斜计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{S_{y2} - S_{y1}}{l}$$

(5)

式中: ε 为塔体局部倾斜值, $‰$; S_{y2} 为古塔下沉较大一侧的沉降值, mm; S_{y1} 为古塔下沉较小一侧的沉降值, mm; l 为古塔底部边长, mm。

2.4.2 塔体应力

分析塔体应力时,砌体结构规范查得砌体结构

抗压强度标准值为 $f_k = 1.68 \text{ MPa}$,砌体弯曲抗拉强度标准值为 $f_{tmk} = 0.11 \text{ MPa}$ ^[21]。

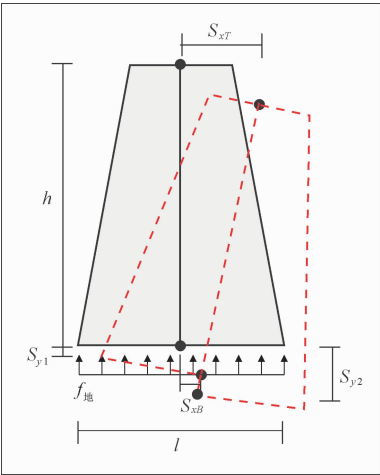


图 3 塔体稳定性评价计算图

3 结果分析

3.1 不同空间位置对小雁塔力学响应

3.1.1 塔体倾斜程度

(1) 整体倾斜

根据前述的数值分析方案,得到小雁塔整体倾斜数值分析结果,见图 4。分析发现,随着地铁隧道水平方向距离塔体越远,倾斜值越小,没有出现向左倾斜的现象,这是由于小雁塔的高宽比较小,且底部有基座为边长 23.38 m 的重心比较靠下。当 $H = 5 \text{ m}$ 、 $L/D = 1$ 时,存在塔体最大倾斜($\theta = 0.22^{\circ}$),小雁塔整体倾斜未超限,当地铁埋深 $H = 5 \text{ m}$ 时,地铁开挖对塔的倾斜影响最大。

(2) 局部倾斜

不同空间位置对小雁塔局部倾斜度影响如图 5 所示,由图 5 可知,地铁距离古塔越近,开挖引起的塔体局部倾斜越大,当地铁埋深 $H = 5 \text{ m}$ 、 $L/D = 1$ 时,小雁塔发生最大局部倾斜,倾斜值 $\varepsilon = 3.91‰ > 0.5‰$;为保证小雁塔局部倾斜不超限($\varepsilon < 0.5‰$),当地铁埋深 5 m 时, $L/D > 3.17$;当地铁埋深 10 m 时,水平净距应超过 $2.95D$;当地铁埋深 15 m 时,应

控制水平净距超过 $2.2D$;当地铁埋深 20 m , $L/D = 2.05$ 时,小雁塔局部倾斜满足规范要求 ($\varepsilon < 0.5\text{‰}$);因此,建议在地铁选线过程中,应确保地铁与小雁塔之间的水平净间距超过 $3.17D$ 。

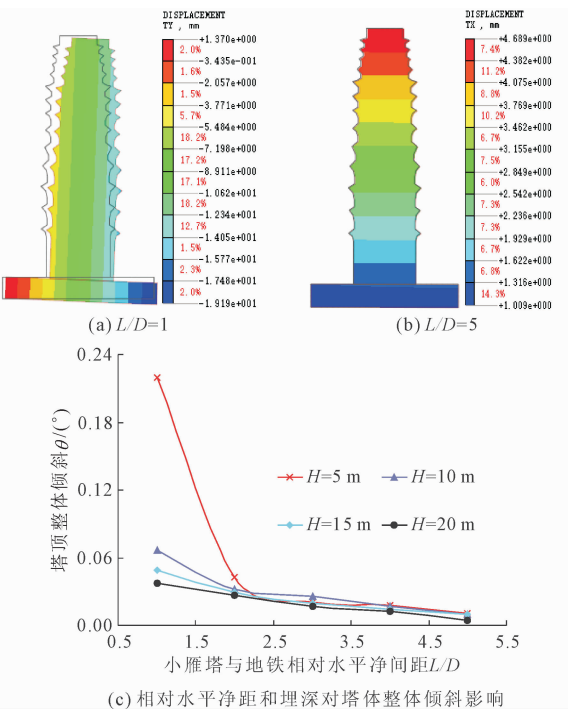


图 4 不同空间位置对小雁塔整体倾斜度影响

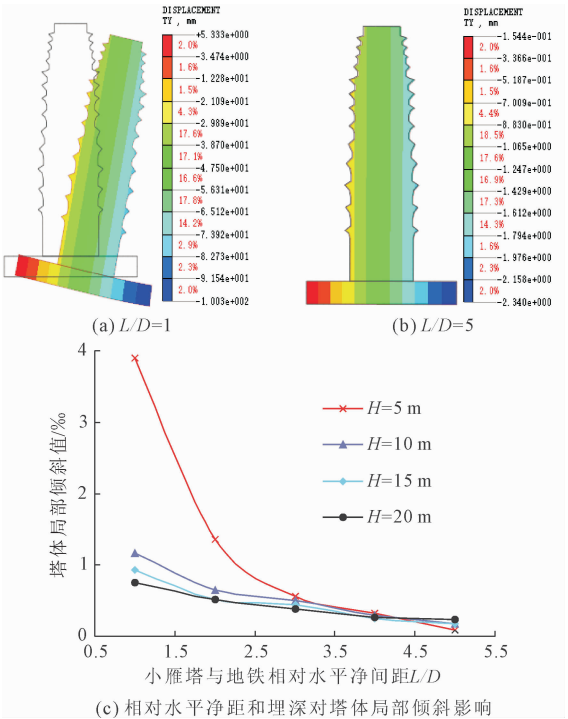


图 5 不同空间位置对小雁塔局部倾斜度影响

3.1.2 塔体拉应力状态

不同空间位置对小雁塔最大拉应力的影响如图 6 所示,由图 6 可知,随着 L/D 及地铁埋深逐渐增加,土体的自承能力发挥作用,拉应力减小,塔顶倾斜减小,当埋深 $H > 10\text{ m}$ 时,小雁塔拉应力均未超限 ($f_{tmk} < 0.11\text{ MPa}$);当地铁埋深 5 m ,且 $L \geq 1.4D$ 时下地铁开挖对小雁塔拉应力满足规范要求,由此地铁选线时,应符合拉应力小于 0.11 MPa ,尽量确保地铁与小雁塔之间的水平净间距超过 $1.4D$ 较为合适。

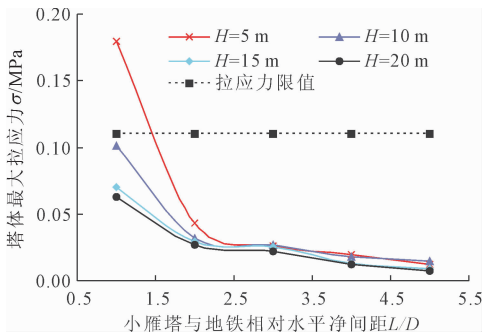


图 6 不同空间位置对小雁塔最大拉应力的影响

3.2 不同空间位置对净光寺塔力学响应

3.2.1 整体倾斜

不同空间位置对净光寺塔整体倾斜度影响如图 7 所示,通过图 7 分析发现,随着地铁距离净光寺塔体水平净间距越远,倾斜值越小,地铁的埋深越大,塔顶的整体倾斜呈减小趋势,当 $H = 5\text{ m}$ 、 $L/D = 1$ 时,塔体最大倾斜是 0.062° (未超限 $\theta < 0.29^\circ$),本研究地铁从右侧开挖,一般塔顶会右倾,但埋深在 10 m 、 15 m 、 20 m , $L/D = 1$ 时塔顶却左倾,可能是由于净光寺塔的高宽比较大,塔底部基座较小,当净光寺塔开挖时,塔体重心上移,会出现塔顶向左倾斜的现象,但净光寺塔的整体倾斜均未超限。

3.2.2 局部倾斜

不同空间位置对净光寺塔局部倾斜度影响如图 8 所示,从图 8 可知,当埋深 $H = 5\text{ m}$ 时,随着相对水平净距的逐渐增大,地铁施工诱发的塔体局部倾斜逐渐减小,当地铁埋深 $H = 5\text{ m}$ 、 $L/D = 1$ 时,净光寺塔的局部倾斜最大 ($\varepsilon = 1.37\text{‰}$),已超限塔体局部倾斜小于 0.5‰ 要求,需对地铁线路选线合理设计;为保证净光寺塔局部倾斜不超限 ($\varepsilon < 0.5\text{‰}$),当地铁埋深 5 m 时, $L > 4.0D$;当地铁埋深 10 m 时,地铁距塔体的水平净距应超过 $3.78D$;当地铁埋深 15 m 时,应控制水平净距超过 $3.18D$;当地铁埋深 20 m , $L/D = 2.81$ 时,净光寺塔局部倾斜满足要求 ($\varepsilon <$

0.5‰);因此,建议地铁合理选线设计上,应确保地铁与净光寺塔之间的水平净间距超过 4.0D。

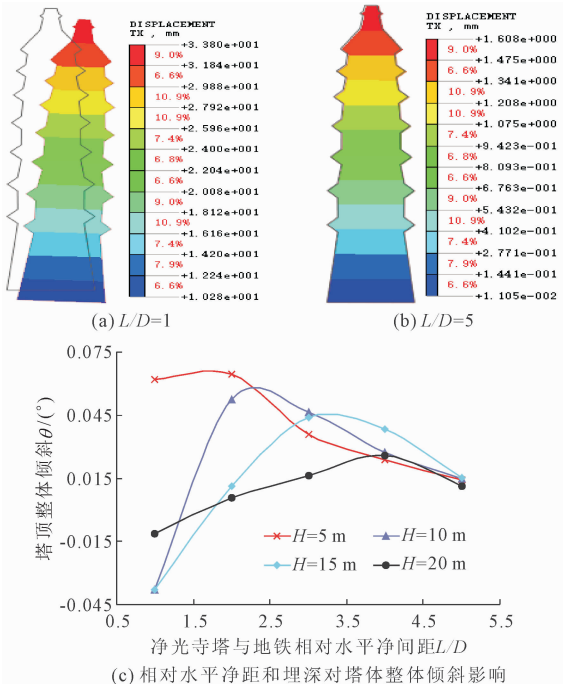


图 7 不同空间位置对净光寺塔整体倾斜度影响

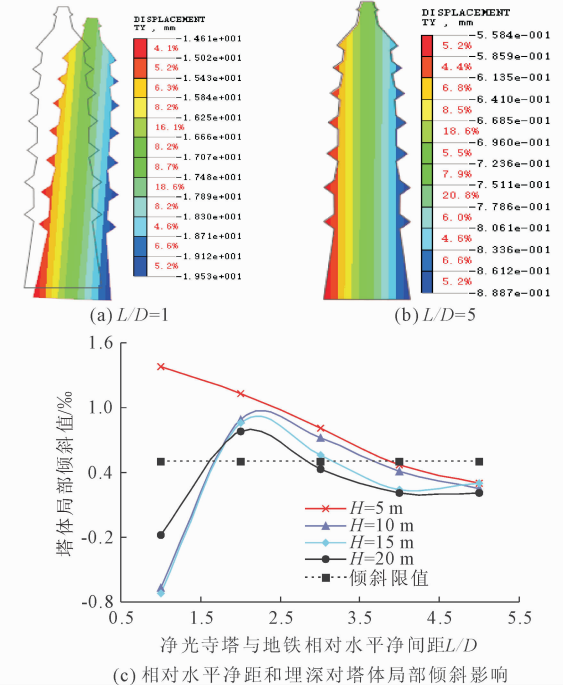


图 8 不同空间位置对净光寺塔局部倾斜度影响

3.2.3 塔体拉应力状态

不同空间位置对净光寺塔最大拉应力的影响如图 9 所示,由图 9 可知,随着 L/D 及地铁埋深逐渐增加,拉应力逐渐降低,当埋深 $H=5\text{ m}\sim 20\text{ m}$ 时,净光寺塔拉应力均未超限($f_{tmk}<0.11\text{ MPa}$);当地铁

埋深 $H=5\text{ m}$, $L/D=1$ 时,地铁开挖对净光寺塔的拉应力影响最大($f_{tmk}=0.075\text{ MPa}$),但也仍未超限,当埋深 $H=5\text{ m}$,相对净间距从 1 增加至 5 时,塔体拉应力降低了 40%,由此将地铁选址距离塔体越远,对于降低塔体拉应力是有利的。

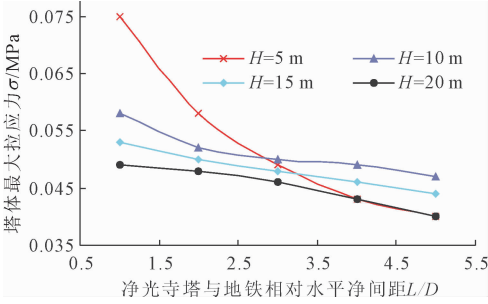


图 9 不同空间位置对净光寺塔最大拉应力的影响

3.3 不同空间位置对大象寺塔力学响应

3.3.1 整体倾斜

不同空间位置对大象寺塔整体倾斜度影响如图 10 所示,由图 10 可知,随着大象寺塔与地铁间水平距离越远,整体倾斜值越小,当地铁埋深 $H=5\text{ m}$ 、 $L/D=1$,最大倾斜值 $\theta=0.065^\circ<0.29^\circ$,整体倾斜均未超限,埋深在 10 m 、 15 m , $L/D=1\sim 2$ 时塔顶会发生左倾斜,可能是由于大象寺塔的高度较大,基座底边仅有 4.8 m ,底部约束不足;地铁开挖后,底部基座约束力不足,塔体重心上移,塔顶向左倾斜,可能会出现“翘首”现象;但大象寺塔的整体倾斜均未超限。

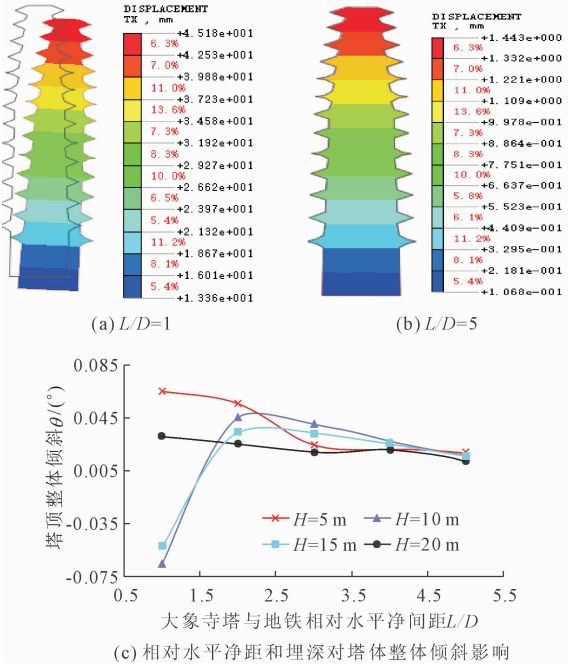


图 10 不同空间位置对大象寺塔整体倾斜度影响

3.3.2 局部倾斜

不同空间位置对大象寺塔局部倾斜度影响如图 11 所示,从图 11 可知,地铁大象寺塔与地铁间水平距离越近,地铁施工导致的塔体局部倾斜越大,当地铁埋深 $H=5\text{ m}$ 、 $L/D=1$ 时,大象寺塔局部倾斜最大 ($\varepsilon=1.01\text{‰}$),已超过局部倾斜 $\varepsilon<0.5\text{‰}$ 的允许范围;为确保大象寺塔局部倾斜不超限,应对地铁选线进行合理设计,当地铁埋深 5 m 时,选线时大象寺塔与地铁间水平距离需超过 $4D$;当地铁埋深 10 m 时,水平净距应超过 $3.78D$;当地铁埋深 15 m 时, $L/D>3.45$;当地铁埋深 20 m 时,大象寺塔局部倾斜均满足规范要求 ($\varepsilon<0.5\text{‰}$);因此,建议在地铁选线过程中,应确保地铁与大象寺塔的 $L>4D$ 。

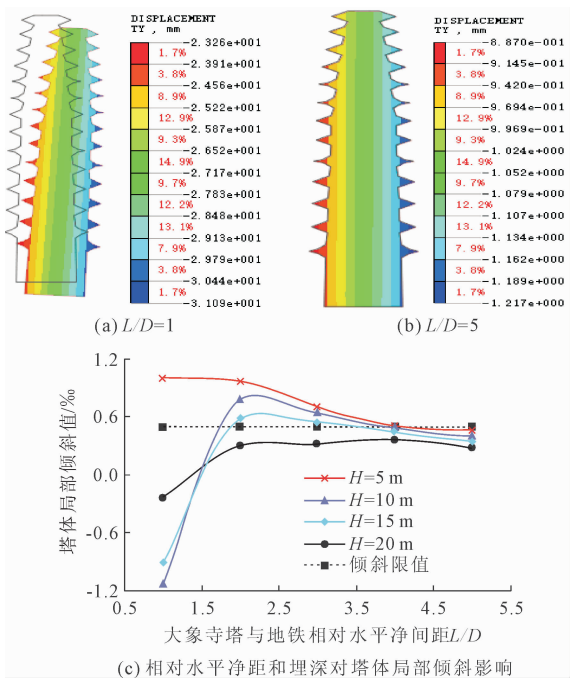


图 11 不同空间位置对大象寺塔局部倾斜度影响

3.3.3 塔体拉应力状态

塔体拉应力状态分析结果见图 12。由图 12 可知,随着 L/D 及地铁埋深逐渐增加,拉应力逐渐降低,当埋深 $H=5\text{ m}\sim 20\text{ m}$ 时,大象寺塔拉应力均未超限 ($f_{tmk}<0.11\text{ MPa}$);当地铁埋深 $H=5\text{ m}$ 、 $L/D=1$ 时,地铁开挖引起的塔体拉应力最大值为 0.057 MPa ,当埋深 $H=5\text{ m}$ 、相对净间距从 1 增加至 5 时,塔体拉应力降低了 29%;当 $L/D=1$ 、地铁埋深从 5 m 增加到 20 m 时,塔体拉应力降低了 38%,由此地铁选线时建议选取离塔体较远距离,对于控制拉应力有促进作用。

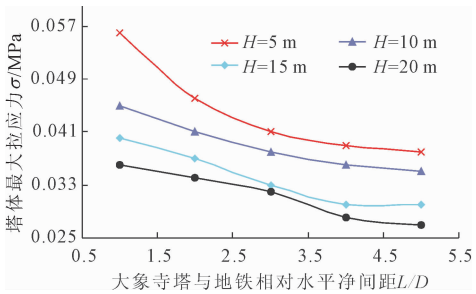


图 12 不同空间位置对大象寺塔最大拉应力的影响

3.4 不同空间位置对万寿寺塔力学响应

3.4.1 整体倾斜

不同空间位置对万寿寺塔整体倾斜度影响如图 13 所示,由图 13 可知,随着地铁距离塔体水平净距越远,塔顶倾斜值越小;当地铁埋深 $H=10\text{ m}$ 、 $L/D=1$,最大倾斜值 $\theta=0.085^\circ<0.29^\circ$,整体倾斜均为超限,埋深在 $5\text{ m}\sim 15\text{ m}$ 时塔顶会发生左倾斜,可能是由于基座底边仅有 3.0 m ,底部约束不足;地铁开挖后,当底部基座约束不够时,塔体重心上移,塔顶向左倾斜;但万寿寺塔的整体倾斜均未超限。

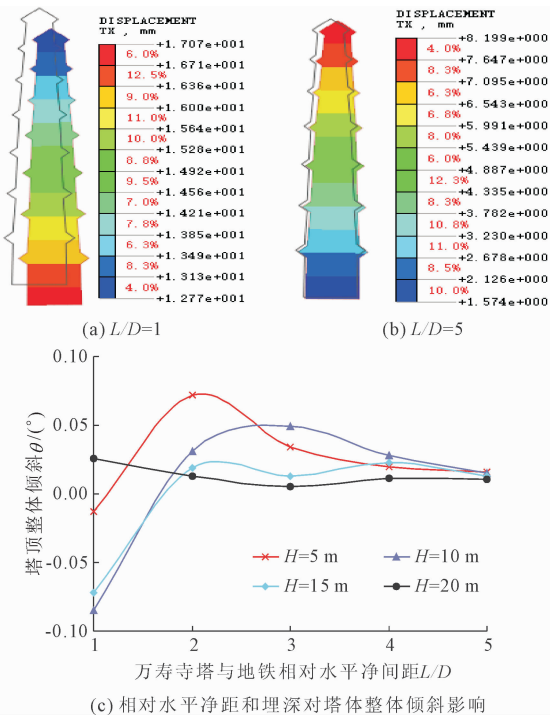


图 13 不同空间位置对万寿寺塔整体倾斜度影响

3.4.2 局部倾斜

不同空间位置对万寿寺塔局部倾斜度影响如图 14 所示,从图 14 可知,地铁万寿寺塔与地铁间水平距离越近,地铁施工导致的塔体局部倾斜越大,当地铁埋深 $H=10\text{ m}$ 、 $L/D=1$ 时,大象寺塔局部倾斜最

大 ($\varepsilon = 1.477‰$), 已超过局部倾斜 $\varepsilon < 0.5‰$ 的允许范围; 为确保万寿寺塔局部倾斜不超限, 应对地铁选线进行合理设计, 当地铁埋深 5 m 时, 万寿寺塔与地铁间水平距离需超过 4.17 倍地铁洞径; 当地铁埋深 10 m 时, 水平净距应超过 3.94D; 当地铁埋深 15 m 时, $L/D > 1.62$; 当地铁埋深 20 m 时, 万寿寺塔局部倾斜均满足规范要求; 因此, 建议在地铁选线过程中, 为确保局部倾斜满足规范要求, 应控制地铁与万寿寺塔之间的水平净间距超过 4.17D。

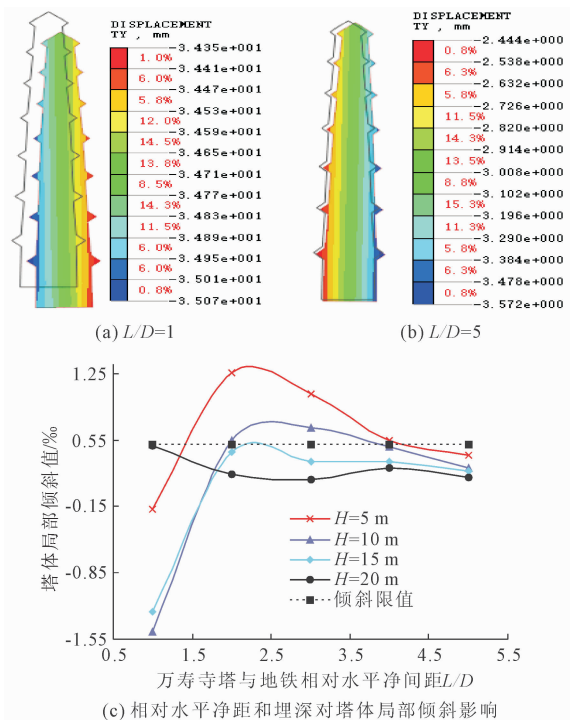


图 14 不同空间位置对万寿寺塔局部倾斜度影响

3.4.3 塔体拉应力状态

不同空间位置对万寿寺塔最大拉应力的影响如图 15 所示, 由图 15 可知, 随着 L/D 及地铁埋深逐渐增加, 拉应力逐渐降低, 当埋深 $H = 5\text{ m} \sim 20\text{ m}$ 时, 塔体拉应力均未超限 ($f_t \text{ mk} < 0.11\text{ MPa}$); 当地铁埋深 $H = 5\text{ m}$, $L/D = 1$ 时, 地铁开挖引起的塔体拉应力最大值为 0.065 MPa, 当埋深 $H = 5\text{ m}$ 、相对净间距从 1 增加至 5 时, 塔体拉应力降低了 20%; 当 $L/D = 1$ 、地铁埋深从 5 m 增加到 20 m 时, 塔体拉应力降低了 30.7%, 由此地铁在万寿寺塔附近选线时建议选取离塔体较远距离, 可以更好的控制拉应力满足要求。

3.5 高宽比对古塔稳定性影响对比分析

从上述计算结果可知, 塔体的高宽比 η 不同, 地铁临近施工对其影响规律存在较大差异, 现以地铁埋深为 $H = 5\text{ m}$ 的浅埋工况为例, 对比分析地铁

与古塔不同水平距离下, 不同高宽比 η 的塔体的稳定性, 如图 16 所示。由图 16 可知: 当地铁与小雁塔水平间距 $L \leq 3D$ 时, 随着高宽比 η 逐渐增大, 塔体形制呈现“高耸”结构, 整体倾斜和拉应力逐渐递增, 对于“高耸”塔体, 近距离地铁施工对其影响较大, 易出现整体倾斜和张拉破坏的整体失稳现象; 当地铁与小雁塔水平间距 $5D \geq L > 3D$ 时, 且高宽比 $\eta \leq 6.0$ 时, 随着高宽比增加, 整体倾斜和拉应力呈减小趋势, 当 $\eta > 6.0$ 时, 整体倾斜和拉应力呈现增加趋势, 对于超高型的古塔建筑, 应注意地铁施工对其产生的扰动。

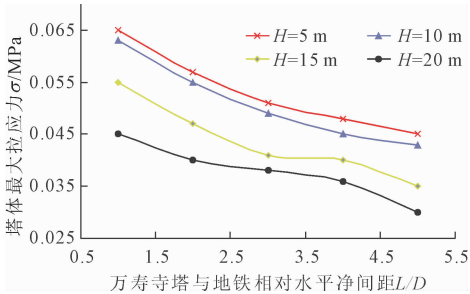


图 15 不同空间位置对万寿寺塔最大拉应力的影响

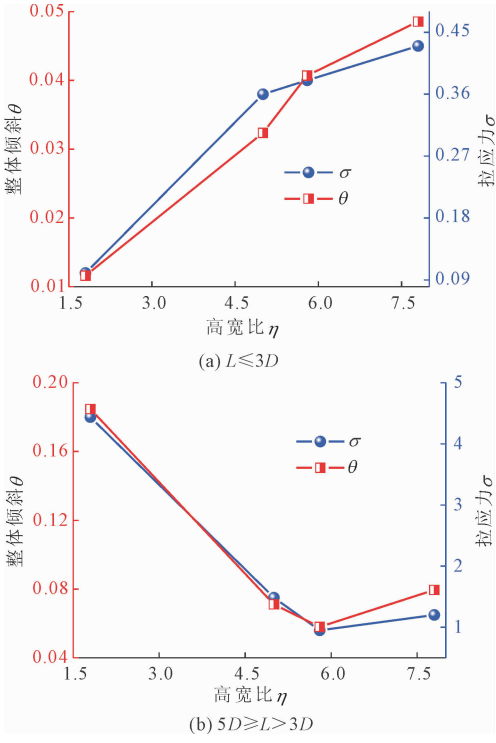


图 16 不同高宽比对古塔稳定性影响

4 结 论

本文以小雁塔、净光寺塔、大象寺塔、万寿寺塔四个砖石古塔为研究背景, 基于 MIDAS 有限元分析

软件,针对临近塔体的地铁盾构施工对其整体倾斜、局部倾斜、塔体拉应力状态等问题开展研究,得到如下结论:

(1) 地铁临近施工对不同高宽比下古塔的稳定
性影响存在显著差异,当地铁与古塔水平间距 $L \leq 3D$ 时,高宽比 η 增大,塔体整体稳定性下降,当 $5D \geq L > 3D$ 时,且高宽比 $\eta \leq 6.0$ 时,古塔
的稳定性随着高宽比增加而上升,当 $\eta > 6.0$ 时,古塔整体稳定性随着高宽比增加而下降,对于超高型的古塔建筑,应注意地铁施工对其影响。

(2) 随着塔体与地铁间水平距离减小,地铁埋
深越浅时,塔体拉应力和整体倾斜值逐渐增大,当地
铁埋深 $H \geq 15\text{ m}$,且与小雁塔水平间距 $L \geq 3.2D$,与
净光寺塔、大象寺塔、万寿寺塔的水平净间距 $L \geq 4.2D$,可满足古塔安全稳定性,在实际施工中应结
合塔体的整体倾斜,局部倾斜,最大拉应力的控制标
准,对地铁进行综合选线。

参考文献:

[1] 朱正国,方智淳,马超义,等. 浅埋偏压连拱隧道穿越
古建筑施工控制研究[J]. 铁道工程学报,2021,38
(05):71-76,108.

[2] 赵爱军,曾华,樊鑫尚,等. 黄土地层地铁隧道水环
境变化对地表沉降影响研究[J]. 水利与建筑工程学
报,2024,22(5):1-9,16.

[3] 董立波. 盾构掘进施工对上部建筑结构沉降影响分析
[J]. 江西建材,2021(1):108-110.

[4] 唐海玥,靳炳强. 城市地铁隧道施工对古建筑沉降的
影响研究[J]. 公路工程,2020,45(3):149-152,160.

[5] 何山,郭剑锋,韩全吉. 山岭隧道微差爆破技术在周
边建筑物保护中的应用[J]. 科技通报,2019,35(1):
15-18.

[6] 杨国栋. 地铁盾构隧道施工对地表沉降的影响分析
[J]. 现代交通技术,2022,19(6):69-73.

[7] 张帅超. 隧道盾构施工对地表沉降及临近建筑物影响
的正反分析研究[D]. 西安:西安理工大学,2024.

[8] 张逸静,陈甦,王占生. 城市轨道交通引起的地面振
动传播研究[J]. 防灾减灾工程学报,2017,37(3):

388-395.

[9] 谷拴成,李敏,王兵强. 西安地铁盾构施工地表沉降
影响因素研究[J]. 河南理工大学学报(自然科版),
2014,33(4):527-533.

[10] 吴昌将,张子新,丁文其,等. 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[J]. 岩土
工程学报,2012,34(1):158-165.

[11] 杨超,刘远明,刘凯,等. 贵阳地铁盾构隧道下穿
高速铁路沉降规律[J]. 科学技术与工程,2025,25
(5):2100-2110.

[12] 郝东阳. 软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地
表及建筑物沉降的影响[J]. 工程技术研究,2024,9
(15):29-31.

[13] 刘万杰. 复合地层盾构隧道穿越建(构)筑物施工控
制技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2021.

[14] 任志力,汤永净. 罗马地铁 C 线施工对既有建筑沉降
的影响[J]. 施工技术(中英文),2023,52(9):50-55.

[15] 王超,宋波,卢晨虎等. 地铁振动对自由场地及
砌体建筑影响实测分析评价[J]. 建筑结构,2022,52
(S1):1062-1069.

[16] 周勇,严登平,任永忠. 明挖地铁车站对临近桩基
的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):
81-85.

[17] 林一修. 富水砂层中地铁隧道侧穿施工对邻近摩擦
桩基承载性能影响研究[D]. 上海:华东交通大学,
2024.

[18] 陈平,陈一凡,张卫喜. 宰堵千秋未寂寥—古塔建筑
纠偏与加固工程案例[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[19] 朱才辉,刘钦佩,周远强. 古建筑砖—土结构力学性能
及裂缝成因分析[J]. 建筑结构学报,2019,40(9):
175-186.

[20] 王士民,彭小雨,陈兵,等. 上软下硬地层盾构隧道
围岩应力释放率研究[J]. 隧道建设(中英文),2022,
42(4):594-601.

[21] 孙祁究,马贵红,王健舟,等. 基于位移反分析的深埋
隧道围岩应力释放率分析[J]. 公路与汽运,2025,41
(2):124-127,134.