

大型深基坑紧邻磁浮高架桥和站场结构施工影响分析

刘建威^{1,2}, 于鹏³, 李德建^{1*}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 长沙市规划设计院有限责任公司;
3. 中国建筑第五工程局有限公司)

摘要:以长沙地铁6号线黄花机场西站基坑邻近既有中低速磁浮线施工为工程实例,在分析借鉴类似工程所采取的位移控制标准、保护措施及实施效果的基础上,运用Midas GTS NX软件建立三维有限元模型,模拟磁浮结构施做和车站基坑分步开挖过程,分析基坑施工过程中磁浮高架桥和站场结构的位移和内力变化,根据计算结果对基坑施工的安全性进行评价,验证采用明挖法的合理性。该文对此类市区复杂环境下大型深基坑的设计和施工进行了较全面分析,提出了有针对性的磁浮线保护方案和施工控制措施。

关键词:中低速磁浮铁路;大型深基坑;邻近施工;沉降控制

长沙磁浮快线为拥有完全自主知识产权的中低速磁浮铁路,于2016年5月开通运营。线路服务于城市轨道交通,全程采用高架敷设,一般地段设计速度为100 km/h, $R=150$ m 小半径曲线段限速40 km/h。随着周边片区开发,磁浮线路保护区范围内工程建设日益增多,可能发生影响其运营安全的情况。长沙地铁6号线黄花机场西站车站基坑及北侧附属基坑均为大型深基坑,将紧邻磁浮高架桥及磁浮站场结构施工。为保证基坑稳定和磁浮线的安全,必须对其施工影响进行分析计算。目前仍未见大型深基坑邻近磁浮线施工的先例,该文通过分析和借鉴类似工程实例所采取的控制标准、工程措施及实施效果,结合Midas GTS NX有限元数值模拟,对车站基坑临近磁浮线施工进行专项分析,提出具体的磁浮线保护方案和有针对性的施工控制措施。

1 工程概况

长沙地铁6号线黄花机场西站全长331.1 m,西端为地下一层,剩余全部为地下两层。车站西端盾构井基坑与磁浮高架26#桥墩水平净距约为12.9 m,与27#桥墩水平净距约为25.5 m,与25#桥墩水平净距约为32.3 m,24#~27#墩上构为(22+38+35) m 钢筋混凝土连续梁;车站主体与磁浮机场站水平距离约

为49.9 m,附属工程(3号出入口)与磁浮机场站水平净距约为17.6 m。磁浮高架桥桥桩为多跨连续梁,墩下为6根 $\phi 1.2$ m 摩擦钻孔桩,桩长22 m。车站西端盾构井基坑深19.5 m、宽24.5 m,围护结构采用 $\phi 1$ m@1.3 m 钻孔桩,竖向设3道支撑,第1道为钢筋混凝土支撑,第2、3道为钢支撑。车站3号出入口基坑位于磁浮机场站的南侧,基坑深11.9 m、宽41 m,围护结构采用 $\phi 0.8$ m@1 m 钻孔桩,竖向设2道钢支撑。车站主体和附属基坑主要位于中风化泥质粉砂岩地层中,均采用明挖法,与磁浮线相对位置关系如图1所示。根据《长沙磁浮快线线路保护区安全管理条例》:高架车站及线路轨道结构外30 m 内为安全保护区范围,故该站基坑施工应进行安全评估。

2 类似工程调研及沉降控制标准

2.1 类似工程调研

车站基坑临近磁浮施工的案例暂未见报道,可参照车站基坑临近既有公路、铁路和工民建施工实例,该文统计了部分实例,如图2、表1所示。

由表1可知:类似大型深基坑工程对于桥桩位移控制在5 mm 内,对于磁浮结构,可进一步加强施工控制措施以实现更高的标准。

2.2 沉降控制标准

根据CJJ/T 262—2017《中低速磁浮交通设计规

收稿日期:2020-01-13

作者简介:刘建威,男,博士,教授级高工, E-mail:27362631@qq.com

* 通信作者:李德建,男,博士,教授,博士生导师, E-mail:dejianli@vip.sina.com

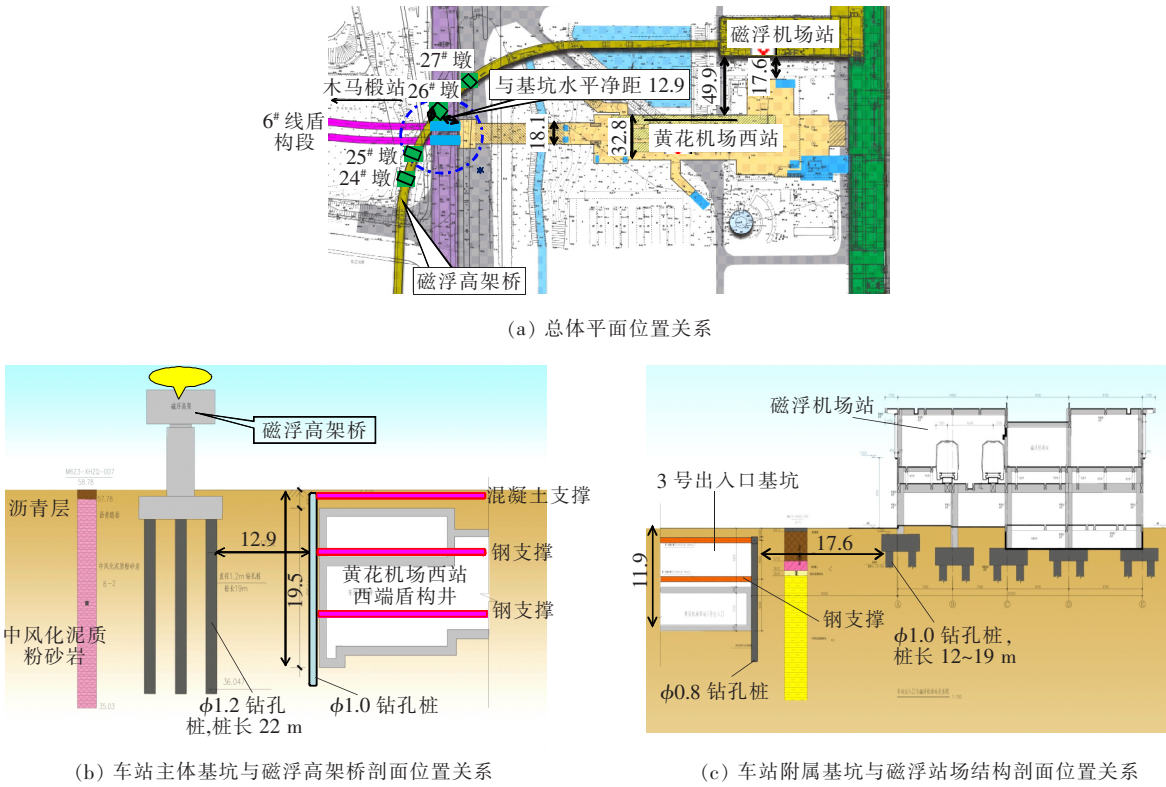


图1 长沙地铁6号线黄花机场西站与磁浮线相对位置关系图(单位:m)

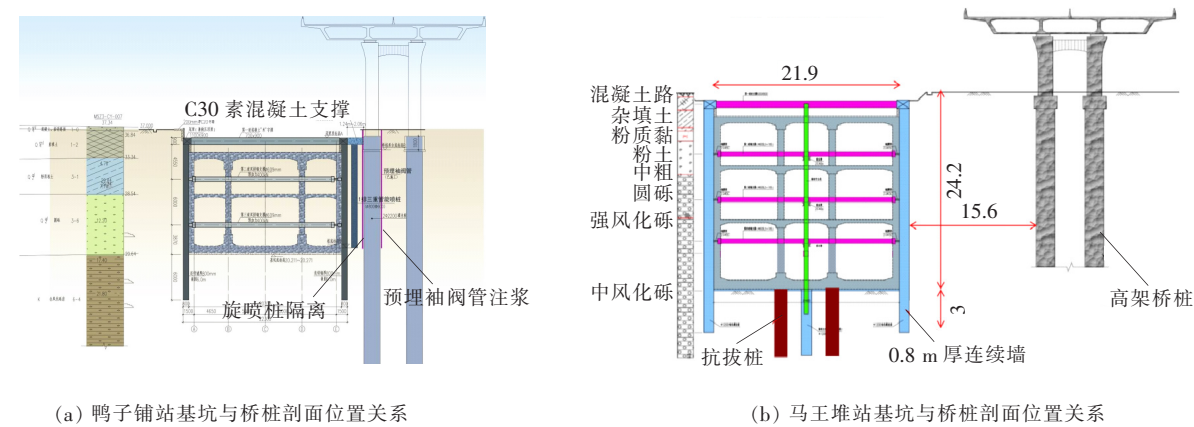


图2 长沙地铁5号线鸭子铺站、马王堆站与万家丽高架桥桩相对位置关系图(单位:m)

范》(简称磁浮规范)第7.4.4条,中低速磁浮轨道结构几何精度应符合表2要求。

根据磁浮规范第8.1.10条:对静定结构,轨道梁桥相邻墩台沉降量之差不应超过5 mm;对超静定结构,还应考虑沉降产生的结构附加影响。根据磁浮结构的安全等级,参照规范和以上类似工程调研结果,考虑到基坑开挖沉降与桥梁自身沉降的累积影响,该项目制定控制标准如下:磁浮高架桥墩台均匀沉降量为5 mm,相邻墩台沉降量之差3 mm;磁浮站场结构水平位移为5 mm、竖向位移为5 mm;相应的内力控制

标准根据磁浮结构设计计算文件取值。

3 计算假定及参数

结合磁浮线结构的设计特点,针对长沙市地铁6号线基坑施工的动态过程开展分析,系统研究基坑邻近磁浮高架桥和站场结构施工对其造成的不利影响,重点分析高架桥的位移和站场结构位移、内力变化情况。采用Midas GTS NX 2018建立有限元模型,车站围护结构、主体结构板、墙、磁悬浮结构板采用二维板

表 1 类似工程调研情况

项目	邻近建筑	相对位置	地质情况	保护性措施	措施效果
鸭子铺站	万家丽高架桥, 桩径 2.2 ~ 2.5 m, 桩长 40 ~ 47 m	风亭基坑深约 10.5 m, 与桥桩最小水平净距 2.4 m	主要地层为粉质黏土层和圆砾层, 基底地层为全风化砾岩	① 加长桥桩和加大配筋; ② 基坑与桥桩间设一排 $\phi 0.8\text{ m}@0.6\text{ m}$ 三重管高压旋喷桩; ③ 桥桩四周预埋 $\phi 0.076\text{ m}@1\text{ m}$ 袖阀管跟踪注浆; ④ 桥桩承台与车站基坑冠梁间设 C30 素混凝土支撑	地面沉降小于 10 mm, 桥桩水平位移为 4.6 mm, 桥桩竖向位移为 4.7 mm
	马王堆站	主体基坑距桥面投影线最近 3.2 m, 距桥桩最近 11.8 m	自上而下为: 杂填土、粉质黏土、粉土、中粗砂、圆砾、强风化砾岩, 基底地层为中风化砾岩	① 加长桥桩和加大配筋; ② 基坑围护结构采用 0.8 m 厚地下连续墙, 嵌固深度取 3 m; ③ 基坑竖向设 4 道支撑, 第 1 道为米字混凝土撑, 其余为钢支撑, 中间设临时立柱	地面沉降小于 10 mm, 桥桩水平位移为 4.1 mm, 桥桩竖向位移为 4.5 mm

表 2 轨道结构几何精度要求

项目	偏差
轨距(两轨面中心距离)	$\pm 3\text{ mm}$
轨排磁极面平面度	$\pm 1.5\text{ mm}/3\text{ m}$
前后高低(10 m 弦矢高)	$\pm 3\text{ mm}/10\text{ m}$
轨向(10 m 弦矢高)	$\pm 3\text{ mm}/10\text{ m}$
轨道接缝允许偏差(竖向/横向)	$\pm 1\text{ mm}/\pm 1\text{ mm}$

单元模拟,车站围护结构中立柱、支撑结构、主体结构梁、柱和磁浮结构桩基和墩身采用三维梁单元离散,土层和磁浮结构承台采用三维实体单元模拟。

3.1 基本假定

- 计算对地层及结构适当简化处理,基本假定包括:
- (1) 初始应力只考虑围岩自重,忽略构造应力。
 - (2) 所有材料均质、连续且各项同性,土体水平成层分布。
 - (3) 围岩为修正摩尔—库仑理想弹性材料。
 - (4) 因中低速磁浮系统振动较小,故不考虑车辆和机械的动力作用。

3.2 参数选取

- (1) 基坑开挖及超载模拟
- 有限元分析中通过单元钝化模拟基坑开挖;地面超载通过作用在基坑外侧地表的均布荷载模拟,取 20 kPa。
- (2) 基坑地层模拟
- 土体采用修正摩尔—库仑模型,其本构关系如图 3 所示。该模型由非线性弹性模型和弹塑性模型组合,模型可以模拟不受剪切破坏或压缩屈服影响的双硬化行为;材料弹性模量可根据加载和卸载设为不同的值,通常卸载时弹性模量设更大的值,以防模型开挖

时由于应力释放引起过大隆起、膨胀现象。

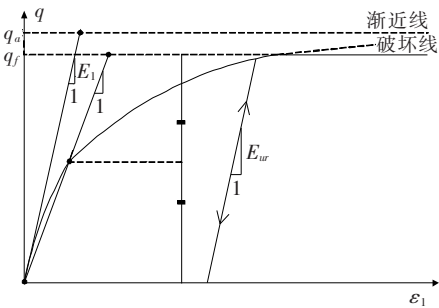


图 3 修正摩尔—库仑模型三轴试验应力—应变关系曲线

4 车站主体基坑邻近磁浮高架桥施工影响分析

4.1 模型建立

根据长沙地铁 6 号线主体基坑与高架桥之间的位置关系,建立长 213 m×宽 149 m×深 45 m 的三维有限元模型如图 4 所示。地层自上而下依次为沥青路面及中风化岩。计算时边界条件为:约束模型底部 Z 方向、前后面 Y 方向和左右面 X 方向三类平动自由度。

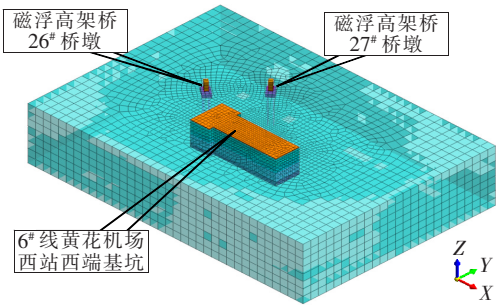


图 4 车站主体基坑邻近磁浮高架桥施工有限元模型

桥墩上施加 1 500 kPa 的均布荷载模拟桥墩上部荷载。

为得到准确的结果,需要进行以下工况的研究:①初始地应力按地层为原始应力状态考虑,磁浮高架桥和地铁车站均未施工;②磁浮高架桥结构施工完成,进行应力平衡计算,作为影响评估的初始状态;③分4步开挖车站主体结构基坑,评价基坑开挖对磁浮高架桥的影响,此工况为最终工序。

4.2 结果分析

计算结果如图 5 和表 3 所示。

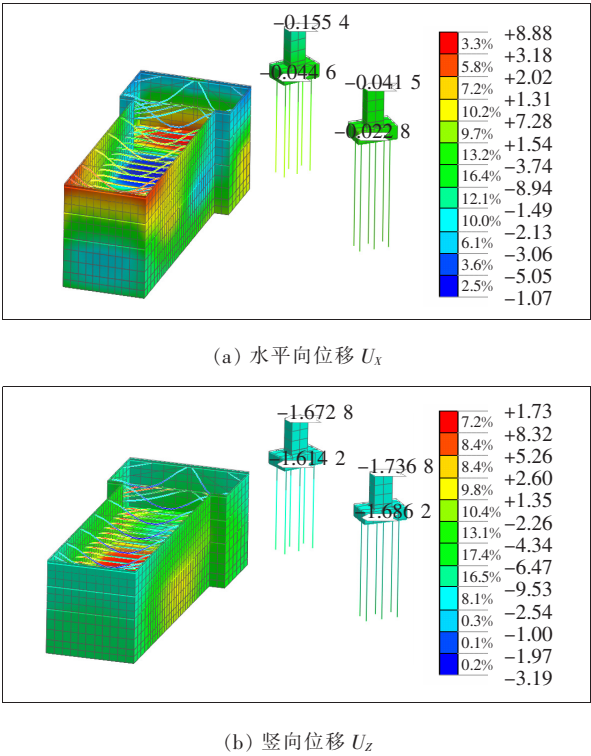


图5 车站主体基坑开挖第3步桥墩及桥桩位移(单位: $\times 10^{-4}$ m)

表3 车站主体基坑施工过程桥墩及桥桩最大位移

开挖步骤	桥墩/mm			桥桩/mm		
	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z
第1步	0.24	-0.15	-1.94	0.17	-0.12	-1.91
第2步	0.05	-0.04	-1.79	0.07	-0.06	-1.76
第3步	-0.15	0.09	-1.74	-0.04	0.04	-1.69
开挖完成	-0.38	0.28	-1.67	-0.17	0.17	-1.61

由图 5、表 3 可知:①车站主体基坑施工影响了地应力场的分布情况,地层出现应力损失,引起磁浮高架桥的位移;②基坑邻近磁浮高架桥的施工完成后,高

架桥最大竖向沉降量为 1.67 mm,小于控制值 5 mm,由于该段磁浮高架桥为连续梁结构,该结构类型对于抵抗外部变形有利;③基坑邻近磁浮高架桥施工过程中,磁浮道床受到不利影响,道床根据变形量大小进行适当微调后,可达到满足高标准运行的变形控制要求。

5 车站附属基坑开挖对磁浮站场结构的影响分析

5.1 模型建立

为尽量真实模拟地铁施工对磁浮结构的影响,数值模拟计算时按照磁浮站场结构图设置其桩基、承台和立柱等结构,以确保计算精度满足要求。考虑此次基坑深度以及平面的影响范围,模型尺寸及边界条件如下:模型三维尺寸采用长 300 m \times 宽 180 m \times 深 50 m;模型外侧土体四周约束其 XY 向、底部约束其 Z 向平动自由度,土体表面为自由边界。地层自上而下依次为素填土、粉土、强风化泥质粉砂岩和中风化泥质粉砂岩。施工工况模拟同主体基坑,开挖步骤设为 2 步,计算模型如图 6 所示。

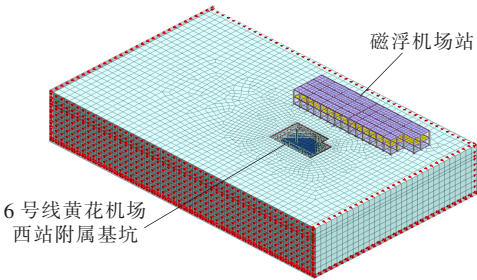


图6 车站附属基坑(邻近磁浮站场结构)施工有限元模型

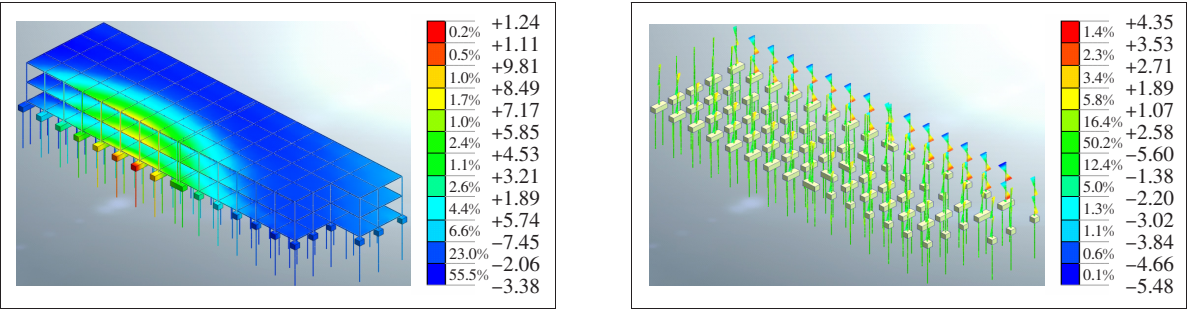
5.2 结果分析

计算结果如图 7 和表 4 所示。

由图 7、表 4 可知:①由于长沙市地铁 6 号线黄花机场西站附属基坑的开挖,磁浮站场结构侧向土压力发生变化,引起站场结构产生偏向基坑方向的位移;②由于站场结构离基坑较远且地质条件相对较好,站场结构的整体刚度较大,其最大水平位移为 0.25 mm,最大竖向位移为 0.12 mm;③基坑开挖引起的站场结构位移和结构内力变化很小,基本在可控范围内。

6 结论及防治

综合分析长沙地铁 6 号线车站基坑邻近磁浮线附近的工程地质资料,结合基坑施工特点、开挖段与磁浮



(a) 竖向位移 U_z (单位: $\times 10^{-4}$ m) (b) 桩基和立柱弯矩(单位: $\times 10^2$ kN·m)

图 7 车站附属基坑开挖完成后站场结构位移及内力图

表 4 车站附属基坑开挖完成后站场结构最大位移及内力

项目	土体最大水 平位移/mm	站场结构最大 水平位移/mm	站场结构最大 竖向位移/mm	站场结构最大 轴力/kN	站场结构最大 弯矩/(kN·m)
开挖前	0	0	0	3 472.1	547.9
开挖后	5.84	0.25	0.12	3 472.2	3 472.2

高架桥及其站场结构的位置关系,对所开展的系列三维数值模拟结果进行分析,认为车站基坑施工对周围环境影响较小,磁浮高架桥和站场结构的变形和内力变化均在可控范围内,证明车站基坑采用明挖法在技术上是可行的。考虑到施工工艺等未知影响因素,另采取了以下防治措施以增大安全储备:

- (1) 加强车站基坑支护,采用“围护桩+内支撑”的支护形式,支撑为“1道混凝土撑+2道钢支撑”。
- (2) 围护桩施工时,合理制定施工措施,防止由于塌孔引起周边环境出现沉降。
- (3) 分层开挖、及时支撑、严禁超挖,钢支撑应有防脱措施。
- (4) 基坑施工前须对相应建筑进行调查,对其现有裂缝、破损处拍照留底。
- (5) 施工期间加强监测,包括围护结构和地下水位,并根据监测结果决定是否采取补充注浆等措施。

参考文献:

[1] 曾国保. 中低速磁浮交通的适应性及工程化发展方向[J]. 铁道工程学报, 2016(10).

[2] 刘建威,于鹏,李德建. 多重地铁线和桥桩附近新建地下通道影响分析[J]. 中外公路, 2018(3).

[3] 吴忠强,卜昌富. 紧邻磁浮车站的大型建筑深基坑逆作法

施工[J]. 建筑施工, 2008(6).

[4] 张弛. 大直径顶管穿越磁浮线路变形影响实例分析[J]. 土工基础, 2017(1).

[5] 谢贻军,钱德玲,魏雪云. 紧邻地铁站的超大深基坑逆作法变形规律研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014(10).

[6] 孙永玉,周顺华,向科. 近距离下穿既有隧道的盾构施工参数研究[J]. 中国铁道科学, 2010(1).

[7] 万飞,谭忠盛,陈岩. 新建隧道近距离上跨既有有线施工方案研究[J]. 北京交通大学学报, 2013(1).

[8] CJJ/T 202-2013 城市轨道交通结构安全保护技术规范[S].

[9] 刘钊,李子春,刘国楠. 花岗岩残积土的修正摩尔库伦模型参数取值研究[J]. 铁道建筑, 2017(3).

[10] Liu Jianwei, Li Dejian, Yu Peng. Study on Optimization Algorithm of Tuned Mass Damper Parameters to Reduce Vehicle - Bridge Coupled Vibration [J]. PLoS ONE, 2019, 14(4): 1-26.

[11] 任晓博. 中低速磁浮车辆—轨道—桥梁耦合振动仿真分析[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2018.

[12] 郭晓航,谢小林,贾坚. 软土深基坑逆作开挖差异沉降控制研究[J]. 岩土工程学报, 2012(s1).

[13] 刘建威,李德建,于鹏. 连续箱梁桥同步顶升时的横向位移差分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018(1).