

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.006

地铁车站 T 型楼梯无柱化分析与研究

杨 喜

(广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 针对地铁车站站厅层与站台层之间车站中部设置的 T 型楼梯的通用做法及车站站台中心空间被楼梯梯柱过度分割情况,通过钢筋混凝土板拱桥受力理论及计算方法,对取消梯柱后的 T 型楼梯下部梯段采用折板拱及圆弧拱形结构,利用 MIDAS/Gen 有限元计算软件,对无柱化楼梯结构进行计算并与现行方案进行比较分析,分析研究表明:T 型楼梯取消下部梯柱,下部梯段按 200 mm ~ 400 mm 板拱结构计算能够满足楼梯受力变形及抗震要求;对于无柱 T 型楼梯板拱结构梯板结构高度相对较小,有利于美观及楼梯下部视觉通畅、人员通行。以期对现行地铁车站 T 型楼梯设计提供借鉴及思考。

关键词: 地铁车站; T 型楼梯; 无柱; 板拱; 计算分析

中图分类号: U231.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)03—0030—06

Column-free T type Staircase Analysis in Metro Station

YANG Xi

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China)

Abstract: According to the common practice of setting the T type stair between hall layer and the platform layer of the subway station and the issue that central space of the platform has had to be segmented excessively by the columns of the T type stair, a column-free T structure stair has been introduced in this paper, where folding plate arch and circular arc arch structures are adopted in the lower part of the T type stair to replace the column structure. Based on the force theory and calculation method of the reinforced concrete slab arch bridge, a comparison between the existing structure and the new structure has been made with the analysis from Midas/GEN, and conclusions are as follows: 1) The column-free staircase could meet the force and deformation requirements when the arch type are 200 mm ~ 400 mm; 2) The height of the stair can be shortened because of the non-column board arch structure, which could greatly contribute to a better appearance and a smoother crowd flow under through the stair. This paper could provide reference and suggestion for the future design of T type staircase in the subway station.

Keywords: metro station; T type stair; column-free; plate arch; calculation and analysis

地铁车站一般两层标准车站包含站厅层、站台层两大公共区部分,站厅层及站台层采用楼、扶梯以及垂直电梯连接。两层标准车站站厅层与站台层之间楼扶梯设置方案通常为:

(1) 两端各设置一组上行扶梯及楼梯,中间设置折返跑楼梯。

(2) 一端设置一组上下行扶梯,另一端设置一组上行扶梯及楼梯,中间设置折返跑楼梯。

(3) 两端各设置一组上下行扶梯,中间设置 T 型楼梯。

随着经济和城市建设的发展,各城市新线建设标准也相应提高,两层标准车站在站台两端各设置一组舒适、便捷的上下行扶梯。同时,为保证自动扶梯不能运转时仍能保证站内乘客的疏散,在站台与站厅层公共区中间设置折跑 T 型楼梯,以保证站台层满足 4 个疏散点。T 型楼梯布置如图 1 所示。

T 型楼梯在站台层沿纵向两侧向上至中间楼梯平台,再由楼梯平台横向折向至站台层。楼梯两侧低点最大跨度约为 15 m ~ 20 m,一般为保证楼梯梯板及梁受力简单明确,在中间梯板四角设置梯柱,见

图2。

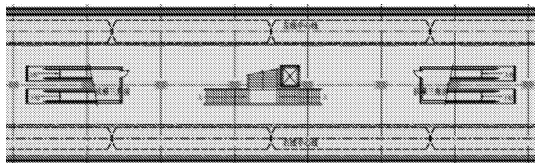


图1 站台层楼梯平面布置



图2 梯柱实景图

这种布置在结构受力上简单明了,但在楼梯处两侧站台之间人行及视觉不通畅,车站站台中心空间被楼梯过度分割,使用功能也较差。

对于楼梯,文献^[1]论述了各种民用建筑中常见楼梯的布置形式及设计;文献^[2-3]中大跨楼梯均采用钢结构形式,并设置截面较高的钢梁。结合以上研究,一般跨度大于4 m的楼梯采用梁式楼梯较为经济,而对于大跨梁式楼梯的结构尺寸均较大。

作为人流量大、承担表现城市风貌的地铁车站,无柱化大跨楼梯设计更为人性化和美观。

本文结合T型楼梯下半部分的拱形结构特点,对比钢筋混凝土板拱桥受力特点,对楼梯的结构形式进行无柱化比较分析,并进行计算验证分析。

1 楼梯设计基本概况

1.1 T型楼梯设计参数

T型楼梯设计参数^[4-5]:(1) 踏步高150 mm~165 mm(坡度 $26^{\circ}34' \sim 30^{\circ}0'$);(2) 踏步宽280 mm~300 mm(坡度 $26^{\circ}34' \sim 30^{\circ}0'$);(3) 公共区楼梯每个梯段的踏步级数,应不少于3步,亦应不多于18步;(4) 楼梯休息平台宽:1 200 mm~1 800 mm;(5) 楼梯宽度:乘客使用单向通行楼梯净宽 $\geq 1\ 800$ mm;乘客使用双向通行楼梯净宽 $\geq 2\ 400$ mm。

1.2 结构尺寸

T型楼梯由站厅层至站台层第一个梯段一般宽3.6 m~4.2 m,至楼梯平台沿纵向向两侧下至站台层,楼梯平台板跨约5 m,两侧的梯段宽一般为1.8 m~2.4 m,梯段踏步亦应不多于18步。

站台板至中板顶高度一般约为4.95 m,需设置33个踏步,常用楼梯设计方式为图3所示的方式,

第一种为由站台左右两侧上至平台板处设置18个踏步,后由平台处至中板设置15个踏步。此方案的优点是在纵向占用站台层空间最少,缺点是平台板底距离站台板顶高度为约2.35 m,高度较低。

第二种为站台左右两侧至平台板中间另设置1.2 m~1.8 m宽休息平台,共设置18~24个踏步,后由平台板处至中板设置9~15个踏步。由于单侧梯段设置了两跑,平台板下空间高度可提高至大于3 m,同时下部梯段坡度较为平缓,缺点是应增加休息平台,纵向多占用站台层空间。

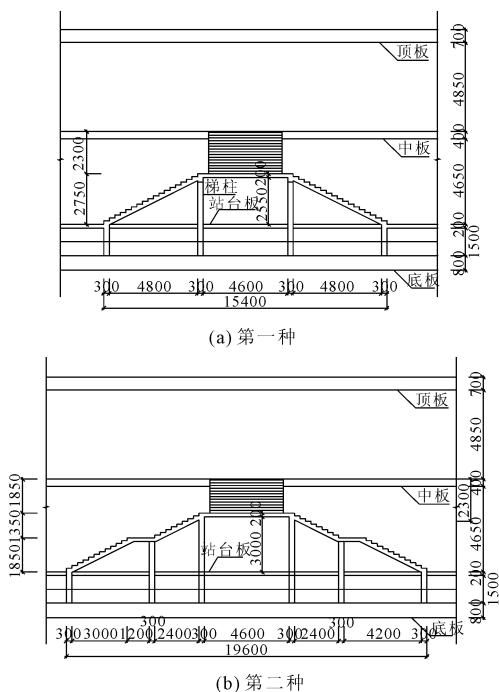


图3 常用T型楼梯设计(单位:mm)

由图3可见楼梯在站台纵向布置长15.4 m~19.6 m,梯柱将楼梯下部空间纵向分割形成2.4 m~4.6 m空间。

2 优化方案与结构布置

2.1 无柱化方案

T型楼梯下半部分取消平台板梯柱即为折板拱结构,若将折板下沿布置成拱圈形式,即类似于传统钢筋混凝土板拱桥。

对于钢筋混凝土板拱桥,姚玲森^[6]论述了拱桥是我国公路上常用的一种桥梁型式,拱桥与梁桥在外形、在受力性能上有本质差别。在竖向荷载作用下,拱的两端支承处不仅有竖向反力,还有水平推力。由于水平推力作用,使拱内弯矩大大减少,但是由于它是一种推力结构,拱脚处的主拱轴力也显著

增大^[7], 支承拱的墩台和地基必须承受拱端的强大推力, 因而要求有良好的地基。板拱结构适用于小跨径拱桥, 无铰拱桥结构的整体刚度大, 构造简单, 施工方便, 维护费用少, 因此在实际中使用最广泛。

板拱桥作为我国一种历史悠久的桥梁型式, 一般使用于公园、景区等景观要求较高的中小跨径桥梁中, 且拱形结构更加均衡匀称、韵律优美、富于内涵^[8], 在地铁车站中设置也较为美观。

由于拱形结构推力较大, 对于在地铁车站中, T 型楼梯底部两端均设置于厚重车站底板上, 能够为板拱拱脚固结提高天然优势, 不需额外设置拱脚基础, 因此拱脚考虑为固结的无铰拱。

针对传统 T 型楼梯设置的两种方式及折板拱、圆弧拱设置思路, 对楼梯无柱化布置见图 4、图 5。

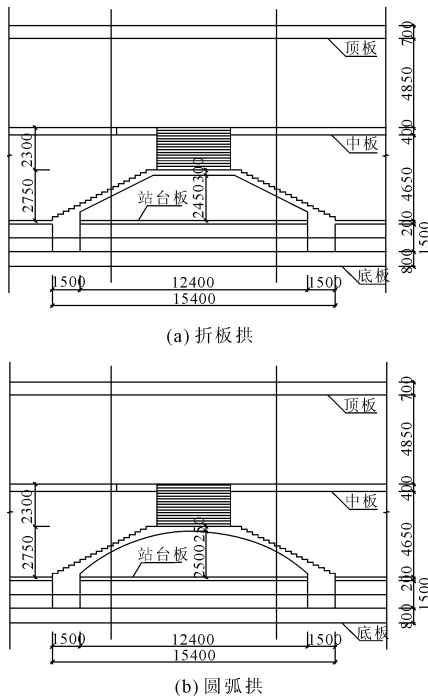


图 4 无柱化方案布置一(单位:mm)

2.2 结构参数拟定

对于楼梯结构尺寸拟定原则: 在《混凝土结构构造手册》^[1] 中建议对板式楼梯的板厚通常取 $L_n/25 \sim L_n/30$ (L_n - 楼梯的水平投影长度), 梁式楼梯梯段梁的高度取 $L_n/18 \sim L_n/12$, 在螺旋板式楼梯中提到当两端固定时, 板厚可适当减薄。依此原则, 对与无柱化的楼梯结构尺寸均较大, 且较大的压缩了楼梯底下空间。

在《公路圬工桥涵设计规范》^[9] (JTG D61—2005) 及板拱桥的设计原则^[6] 中, 拱的矢跨比宜采用 $1/4 \sim 1/8$, 拱顶厚度 h 一般采用跨径的 $1/60 \sim 1/70$ 。

拱脚厚度估算对于中小跨径无铰拱, 可取为 $(1.2 \sim 1.5)h$, 为确保拱圈横向稳定性, 拱圈宽度不宜小于跨径的 $1/20$ 。

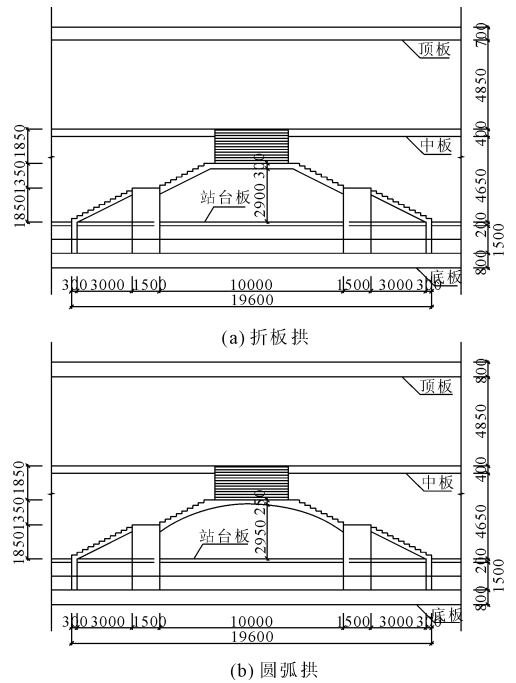


图 5 无柱化方案布置二(单位:mm)

按此原则, 拱顶厚度约为 $200 \text{ mm} \sim 250 \text{ mm}$, 拱脚厚度为 $250 \text{ mm} \sim 400 \text{ mm}$, 无柱化楼梯的矢跨比约为 $1/6 \sim 1/7$, 拱圈宽度即为楼梯宽度约为跨径的 $1/5 \sim 1/8$, 结构尺寸较为合理。受制于楼梯使用功能形式, 且尽量提高平台下通过高度, 为便于施工, 拱轴线采取圆曲线。

3 计算分析及结构设计优化

3.1 模型建立及参数选取

利用 MIDAS/Gen 计算软件, 对 T 型楼梯梁、板、柱进行模拟计算。由于 T 型楼梯上部与中板连接, 下部与底板连接, 将楼梯取出单独计算, 梯柱及梯板与车站中、底板连接模拟为固定支座。梯板采用板单元模拟, 梯梁、梯柱采用线单元模拟, 梯板划分为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 板单元, 见图 6。楼梯结构采用 C30 混凝土。

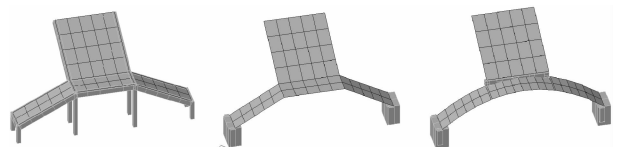


图 6 计算模型图

楼梯主要荷载为自重及人群荷载, 人群活荷载标准值 4 kPa 。C30 混凝土踏步、装修面层 5 cm 厚石

材、两侧扶手、板底 2 cm 粉刷均作为恒荷载输入。荷载参数见表 1、表 2。

表 1 荷载参数表

荷载类型	自重	混凝土 踏步	装修 面层	板底 粉刷	扶手	人群
恒载/kPa	—	1.65	1.65	0.4	0.2	—
活载/kPa	—	—	—	—	—	4

表 2 荷载组合表

单位: kPa

编号	荷载组合验算工况	永久 荷载	可变 荷载	地震 荷载
1	基本组合 (构件强度计算)	1.35	1.4(1.3)	
2	准永久组合 (构件裂缝宽度验算)	1.0	0.8	
3	准永久组合 (构件变形计算)	1.0	0.8	
4	抗震组合 (构件强度计算)	1.2(1.0)		1.3

对于地铁车站结构中构件主要由 0.3 mm 宽度裂缝控制截面配筋,本次计算取表 2 中准永久组合验算分析以上两种无柱化方案结构受力及变形,将折板拱和圆弧拱两种结构形式的位移及内力计算结果与原方案进行对比,通过对取消梯柱情况下两种结构形式梁板的受力变化、结构变形变化、结构尺寸及配筋变化的合理性进行分析。

3.2 受力分析及结构设计

限于篇幅,只对跨度较大的无柱化方案一进行对比分析。首先对方案一对比的三种结构形式根据结构尺寸拟定原则定义材料、建立模型并划分网格,依次施加各部位荷载、边界条件约束,最后进行静力荷载工况计算,准永久组合计算结果见图 7~图 15。

从弯矩图比较可以看出,总体上梁柱结构受力由于梁的刚度影响在板内受力较小;对于无梁柱设置的拱形结构,板受力较为连续,且在固结支座处及上下部梯段连接处内力分布相对较大。

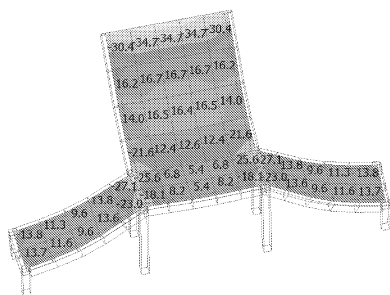


图 7 梁柱结构板弯矩分布图(单位:kN·m)

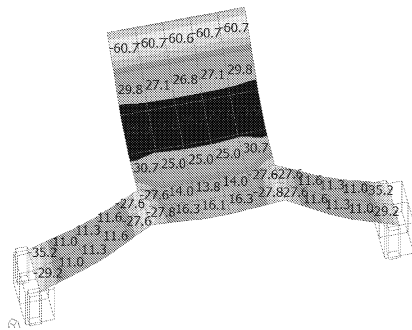


图 8 折板拱结构弯矩分布图(单位:kN·m)

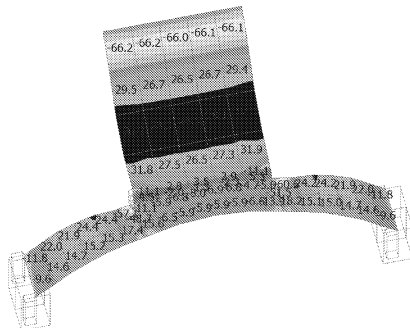


图 9 圆弧拱结构弯矩分布图(单位:kN·m)

对于下部梯段,折板拱形结构弯矩在板端固定支座处增加较大,最大值为 35.2 kN·m;在上部平台两端也相对较大,为 27.6 kN·m。圆弧拱形结构弯矩最大点位于拱腰处,最大值为 24.2 kN·m,在结构拱顶及拱脚处增幅较小。两种拱形结构由于荷载不对称,在上部梯段的一侧弯矩相对较大。

对于上部梯段,两种无柱结构受力基本相似,在荷载及板厚增大的影响下弯矩相对梁柱楼梯增幅接近一倍,最大值为 66.2 kN·m;梯段下沿拱形结构最大值为 31.9 kN·m,相对增加 50%。

从轴力图比较可以看出,总体上无柱结构轴力相对于梁柱式楼梯结构增加较大,符合拱形结构轴力增大的受力特点,同时由于荷载不对称在下部拱形结构中也能充分体现。

对于下部梯段,圆弧拱形结构较折板结构轴力稍大,最大值为 660.5 kN,轴力由拱部至拱脚渐变,圆弧拱形结构受力也更为合理。

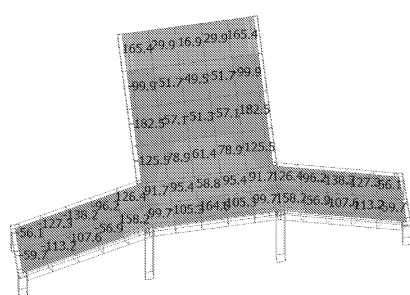


图 10 梁柱结构轴力分布图(单位:kN)

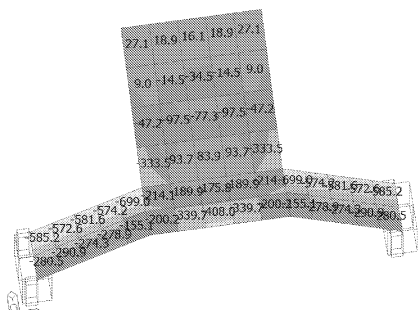


图 11 折板拱结构轴力分布图(单位:kN)

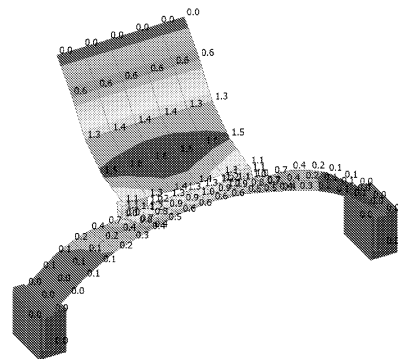


图 15 圆弧拱结构变形位移(单位:mm)

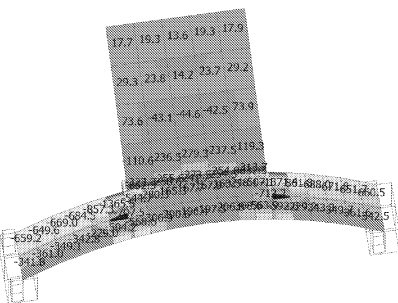


图 12 圆弧拱结构轴力分布图(单位:kN)

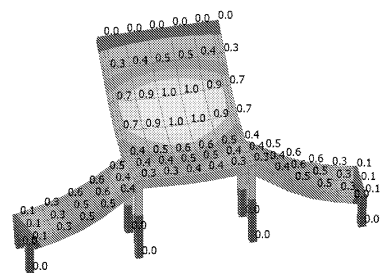


图 13 梁柱结构变形位移(单位:mm)

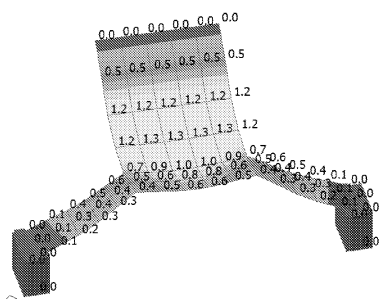


图 14 折板拱结构变形位移(单位:mm)

对于上部梯段,两种无柱结构受力方向、分布基本相似,主要呈现上部受拉下部受压。

从位移图比较可以看出,三种结构的最大位移均位于上部梯段的下侧,梁柱结构为 1.0 mm,折板拱型结构为 1.3 mm,圆弧拱型结构为 1.6 mm,均能满足挠度计算要求。拱形结构的下部梯段位移变化相对于原结构变化较小,最大值为 0.9 mm。由于上部荷载的偏压影响,下部结构位移并不对称,荷载大的一侧位移偏大,且向荷载大的一侧倾斜。

综合以上分析,对于拱形结构楼梯方案上部最大弯矩为 66.2 kN·m,对于下部的拱形结构最大弯矩为 35.2 kN·m,梯板厚度设计为 200 mm~400 mm,均能满足计算要求,同时挠度计算和符合楼梯计算要求。

4 抗震分析

在车站的震害形式方面,杨林德^[10]通过阪神地震中大量中柱两端发生了严重的剪切破坏,提出构建强柱弱梁的结构体系,并加强结构的抗侧力构件。

地铁车站抗震方面上,周灿朗等^[11]对反应位移法分析结果中地震工况下内力设计值比静力作用下内力设计值小,抗震工况不起控制作用,结构按裂缝控制的配筋率大。

刘庭金等^[12]在车站结构的相对水平位移计算中,在峰值加速度为 0.2g 时,车站结构横断面方向中、底板最大相对水平约 8 mm;同时在车站结构地震损伤分析中,有柱车站损伤较为严重的部位主要集中在中柱与顶底纵梁节点、侧墙与顶底板节点,中板与侧墙、中板与中柱节点也有一定程度的损伤。但在 T 型楼梯与底、中板连接处的损伤较不明显。

对拱桥的抗震性能方面,尹志雨^[13]进行了分析表明拱脚为抗震薄弱环节。

楼梯下部梯段两端均设置与厚重底板上,对于无柱的拱形结构,原梁柱结构两端的梯柱变为对抗震有利的体量较大的拱脚支座。由于 T 型楼梯下端固支与底板,上端固支与中板,按多遇地震作用下的抗震变形验算,对于地铁车站作为钢筋混凝土框架结构其楼层内最大的弹性层间位移角限值应符合 1/550^[14],对上部梯段上沿施加一强制位移 8 mm,由表 2 中抗震组合进行构件强度计算。对于折板拱结构最大内力分别位于拱脚处 95 kN·m 及上下梯段连接的角部局部为 191 kN·m;对于圆弧拱结构最大内

力分别位于拱脚处 $195 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 及上下梯段连接的转角处 $197 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。经计算该工况在拟定结构尺寸下构件强度计算满足要求。对于跨度较大且抗震要求高的地区,可考虑在T型楼梯上部设置滑动支座^[15]。

5 结 论

T型楼梯的设置不仅需要满足功能需求,同时也需尽量减小压缩站台楼梯两侧有限的公共空间,且尽量提高楼梯底下的通过及视野空间。通过以上方案比较及计算分析,T型楼梯取消下部梯柱,下部梯段按 $200 \text{ mm} \sim 400 \text{ mm}$ 板拱结构计算能够满足受力及变形要求,且有利于美观及楼梯下部视觉通畅、人员通行。同时在设计 and 施工过程中应考虑必要的措施,保证拱形结构受力及施工安全:

(1) 对于结构偏压情况,需考虑抗扭设计。

(2) 上下梯板与支座交接处弯矩和扭矩较大,应力集中,中板、底板、拱脚应预留足够的钢筋搭接长度。

(3) 对于抗震计算中拱脚及上下梯段连接部位转角处内力较大,需加强抗震构造措施。

(4) 支架变形及混凝土的收缩徐变对拱圈受力存在一定影响,结构分段、模板拆除等施工要点需按拱形结构的施工要求施作。

参考文献:

[1] 中国有色工程有限公司. 混凝土结构构造手册[M]. 4

版.北京:中国建筑工业出版社,2012:376-415.

- [2] 鲁小飞,杨旭晨,孙会郎,等.温岭博物馆结构设计[J]. 建筑钢结构进展,2014;16(4):39-45.
- [3] 常为华,王国华,宫贞超,等.复杂空间楼梯竖向地震作用分析与振动控制[J]. 建筑结构,2017,47(18):83-87.
- [4] 城市轨道交通技术规范:GB 50490—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:12-13.
- [5] 地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:66-67.
- [6] 姚玲森.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [7] 张彦君.某实腹石拱桥结构承载能力分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):221-225.
- [8] 贾艳敏,唐军斌,于广龙.园林中拱桥的景观设计研究[J].桥梁建设,2013,43(1):94-98.
- [9] 公路圬工桥涵设计规范:JTG D61—2005[S].北京:人民交通出版社,2005:18-20.
- [10] 杨林德.隧道与地下空间抗震防灾的若干思考[J].隧道建设,2013,33(9):707-714.
- [11] 周灿朗,龙喜安.地铁地下车站抗震性能分析方法[J].华东交通大学学报,2016,33(3):13-22.
- [12] 刘庭金,郑月昱,林伟波,等.有、无柱地铁地下车站地震响应对比分析[J].隧道建设,2017,37(4):421-427.
- [13] 尹志雨.大跨度上承式钢管混凝土拱桥地震响应分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):128-132.
- [14] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016:43-44.
- [15] 赵均,侯鹏程,刘敏,等.混凝土框架楼梯设置滑动支座的结构模型振动台试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(3):53-59.