

暗挖拱盖法地铁车站拱部结构矢跨比影响分析^{*}华福才¹ 雷刚^{1**} 刘明明² 杨林³ 罗立娜⁴

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京; 2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 650051, 昆明;
3. 青岛地铁集团有限公司, 266101, 青岛; 4. 广州铁路职业技术学院铁道工程学院, 510430, 广州//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 为研究暗挖拱盖法施工时拱部矢跨比对车站结构的影响, 以青岛某地铁车站工程为例, 基于有限元分析软件 MIDAS GTS, 对比分析站台宽度为 11 m 和 13 m 两种车站结构下, 不同矢跨比对其结构受力与变形的影响。研究结果表明: 当矢跨比从 0.16 增大至 0.24 时拱部施工阶段拱顶弯矩最大, 弯矩先减小后增大, 整体结构施工时拱部与直墙交界处弯矩最大; 两种跨度的车站弯矩分别减少了 42.1% 和 44.6%; 轴力随矢跨比的增大而减小, 矢跨比对拱部施工阶段的影响较大; 矢跨比对结构变形的影响非常明显, 拱顶沉降、拱肩沉降与拱脚净空收敛均减少了 1/3 左右。在考虑整体结构施工与车站结构合理跨高时, 拱部矢跨比越大, 结构越合理。

关键词 地铁车站; 暗挖施工; 拱盖法; 拱部矢跨比

中图分类号 U451^{+.4}

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.006

station with 11 m and 13 m spans are reduced by 42.1% and 44.6% respectively. The axial force decreases with the increase of the rise-span ratio, and the ratio has a greater influence in the arch construction stage. In addition, the influence of rise-span ratio on structure deformation is evident, and the settlement of the vault, the settlement of the spandrel and the clearance of the arch foot are reduced by roughly 1/3. When considering the overall structure construction and the reasonable station structure span height, larger arch section rise-span ratio corresponds to more reasonable structure.

Key words metro station; underground excavation construction; arch-cover method; arch rise-span ratio

First-author's address Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China

Influence Analysis of Arch Structure Rise-span Ratio in Arch-cover Method Underground Excavation Metro Station

HUA Fucui, LEI Gang, LIU Mingming, YANG Lin, LUO Lina

Abstract To study the influence of arch rise-span ratio on station structure in underground excavation arch-cover method construction, taking a metro station project in Qingdao as example, based on MIDAS GTS finite element software, the influence of different rise-span ratios on structure stress and deformation are comparatively analyzed, in the case of two station structures with platform width of 11 m and 13 m respectively. Research results show that when the rise-span ratio increases from 0.16 to 0.24, the bending moment of the vault at the arch construction stage is the largest, and the bending moment first decreases and then increases. During the construction of the overall structure, the bending moment at the junction of the arch and the straight wall is the largest, and the bending moments of the

在地铁车站施工过程中, 存在大量既有市政管线和地铁车站本身所需的各种电路、通风设施等, 需要对其进行合理的规划设计。利用拱盖法施工时, 车站拱部有较大的可利用空间, 若给拱部设计一个合理曲线, 在保证车站结构受力安全的情况下, 能够节省一定的工程成本, 有较好的经济性。

国内外学者对地铁车站结构矢跨比已有一定的研究。文献[1]研究了不同矢跨比对拱部结构内力、层间位移角的影响。文献[2-3]以实际工程设计为例, 利用有限元软件提出不同矢跨比时结构的变形规律。文献[4]通过数值模拟与现场监测结果得出矢跨比与结构滑裂角之间的关系。文献[5]研究了不同地质强度指标对大跨度洞室最小矢跨比的影响。文献[6]对拱顶直墙结构断面进行结构分析, 得出合理的矢跨比范围。

目前, 已有研究主要为在矩形隧道基础上增加矢跨比, 或在地铁车站使用双侧壁导坑法和 CD(中

^{*} 青岛地铁科技创新基金项目(M4-ZH-2020-134); 广东省普通高校重点领域专项课题(2021ZDZX1116); 广东省普通高校创新团队项目(自然)(2022KCXTD052)

^{**} 通信作者

隔墙)法等常规工法施工的矢跨比,对于使用暗挖拱盖法施工的矢跨比研究较少。本文以青岛某地铁站工程为例,采用有限元软件 MIDAS GTS 进行数值模拟,研究车站结构矢跨比对结构变形、内力的敏感性影响。研究成果可为后续其他类似地铁站结构设计提供工程参考。

1 工程概况

1.1 车站结构

以青岛某地铁站工程为例,分别分析站台宽度为 11 m 和 13 m 两种车站结构下,不同矢跨比对其结构受力与变形的影响。车站主体为双层圆拱复合式衬砌结构,全包防水型断面。统一各构件尺寸,顶板与侧墙厚为 800 mm,中板厚为 400 mm,柱子尺寸为 800 mm(长)×600 mm(宽)。结构跨度为 19.3 m 与 21.3 m,拱顶埋深为 20 m。车站断面与地层分布示意图如图 1 所示。

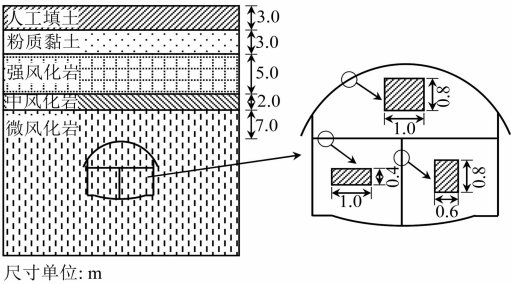


图 1 车站断面与地层分布示意图

Fig. 1 Diagram of station section and stratigraphic distribution

1.2 地层条件

车站分布的地层主要有人工填土、粉质黏土、强风化岩、中风化岩和微风化岩,车站整体位于微风化岩中。衬砌与柱子用 C45 混凝土模拟,中板用 C35 混凝土模拟。各地层与结构物理学参数如表 1 所示。

表 1 各地层与结构物理学参数

Tab. 1 Stratigraphic and structural physical parameters				
名称	厚度/m	弹性模量/GPa	重度/(kN/m ³)	泊松比
人工填土	3	0.006	1 750	0.40
粉质黏土	3	0.040	1 950	0.35
强风化岩	5	3.600	2 200	0.32
中风化岩	2	5.000	2 400	0.25
微风化岩	—	20.000	2 500	0.20
C35	—	31.500	2 400	0.20
C45	—	33.500	2 500	0.20

2 计算方案

2.1 荷载方案

采用有限元分析软件 MIDAS GTS 创建二维平

面结构模型,计算方式采用荷载结构法。施加荷载分为永久荷载和可变荷载。其中,永久荷载有结构自重、地层压力、水压力 and 浮力,可变荷载有地面超载、中板活载等。荷载组合为准永久组合,荷载计算与荷载组合系数参考 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》。单拱结构计算模型如图 2 所示,整体结构计算模型如图 3 所示。

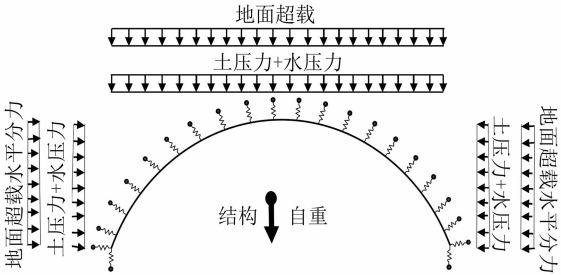


图 2 单拱结构计算模型

Fig. 2 Calculation model of single arch structure

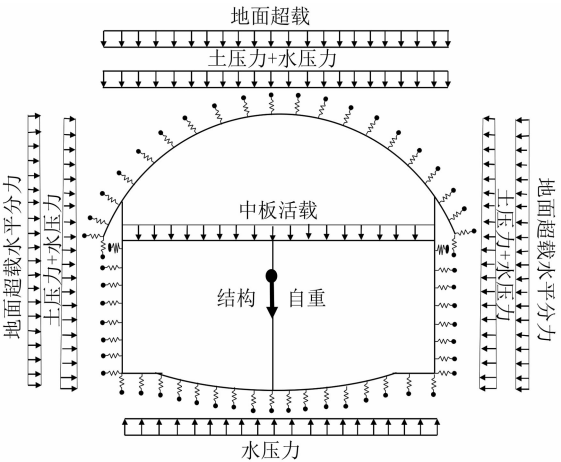


图 3 整体结构计算模型

Fig. 3 Overall structure calculation model

2.2 计算工况

对于站台宽度为 11 m 和 13 m 两种车站结构的模拟,均分为拱盖施工阶段和整体施工阶段。在结构实际跨度应用范围内,设 5 组矢跨比方案,固定仰拱矢跨比,分别研究拱部矢跨比对结构内力及变形的影响。计算工况如表 2 所示。

表 2 计算工况

Tab. 2 Calculation working condition			
工况	拱部矢跨比	工况	拱部矢跨比
1	0.16	4	0.22
2	0.18	5	0.24
3	0.20		

2.3 变形分析点设置

结构变形分析点主要设置在车站拱部位置,分别为拱顶(A点)、左拱肩(B点)、右拱肩(C点)、左拱脚(D点)和右拱脚(E点),如图4所示。

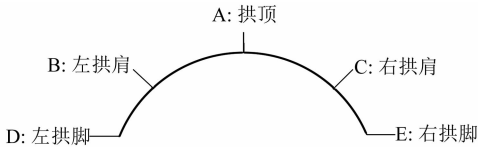


图4 分析点布置示意图

Fig. 4 Layout diagram of analysis points

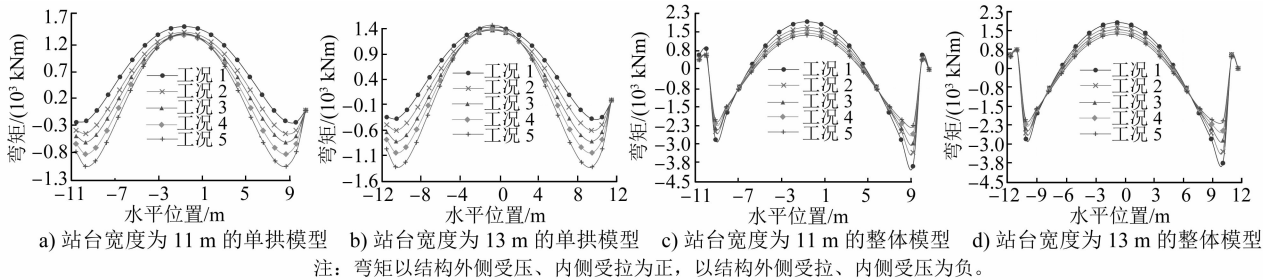


图5 拱部弯矩分析图

Fig. 5 Diagram of arch bending moment analysis

表3 不同工况下的拱部最大弯矩值对比

Tab. 3 Comparison of the maximum arch bending moments under different working conditions

工况	站台宽度为 11 m				站台宽度为 13 m			
	最大弯矩/(kNm)		相比工况 1 的最大弯矩降幅/%		最大弯矩/(kNm)		相比工况 1 的最大弯矩降幅/%	
	整体	单拱	整体	单拱	整体	单拱	整体	单拱
1	3 880	1 554			3 744	1 440		
2	3 317	1 445	14.5	7.0	3 282	1 382	12.3	4.0
3	2 950	1 408	23.9	9.4	2 832	1 378	24.3	4.3
4	2 578	1 393	33.5	10.4	2 461	1 406	34.2	2.4
5	2 245	1 420	42.1	8.6	2 071	1 477	44.6	-2.6

由图5和表3可知,在拱部施工阶段,随着矢跨比的增大(矢跨比从0.16增大至0.24),拱部弯矩先减小后增加,拱部最大弯矩出现在拱顶处。站台宽度为11 m的车站拱顶弯矩从1 554 kNm先减至1 393 kNm,减少了10.4%,再增至1 420 kNm。站台宽度为13 m的车站拱顶弯矩变幅较小,矢跨比达到0.22时,弯矩开始增大。在整体施工阶段,拱部弯矩与矢跨比成负相关,最大弯矩出现在拱部与直墙交界点。站台宽度为11 m和13 m车站的最大弯矩分别减少了42.1%和44.6%。

3.1.2 轴力分析

对于站台宽度为11 m和13 m的两种车站结构,在拱盖施工阶段与整体施工阶段,计算获得相应工况下的拱部轴力,拱部轴力分析图如图6所示。

3 矢跨比影响分析

3.1 结构内力分析

通过模拟计算获得工况1—工况5的拱盖内力,并对5种工况的弯矩与轴力进行影响分析。

3.1.1 弯矩分析

对于站台宽度为11 m和13 m的两种车站结构,在拱盖施工阶段与整体施工阶段,计算获得相应工况下的拱部弯矩,拱部弯矩分析图如图5所示。不同工况下,拱部最大弯矩值对比如表3所示。

不同工况下,拱顶轴力对比如表4所示。

由图6和表4可知,在拱部施工阶段,轴力图呈“拱形”,两种车站的拱部轴力与矢跨比成负相关,矢跨比从0.16增加至0.24,最大轴力与最小轴力分别出现在拱脚与拱顶。站台宽度为11 m的车站拱部最大轴力由12 690 kN减至10 664 kN,最小轴力由10 342 kN减至7 681 kN,分别减少了16.0%和25.7%。站台宽度为13 m的车站拱部最大轴力与最小轴力分别减少了15.6%和24.9%。矢跨比对拱顶轴力的影响更大。在整体施工阶段,轴力图呈“W形”,由于直墙受力,拱脚部分的轴力较小、相对变化较小,中间部位轴力与矢跨比成负相关,最大轴力与最小轴力出现在交界点与拱顶处。站台宽度为11 m车站的最大轴力和最小轴力分别减少

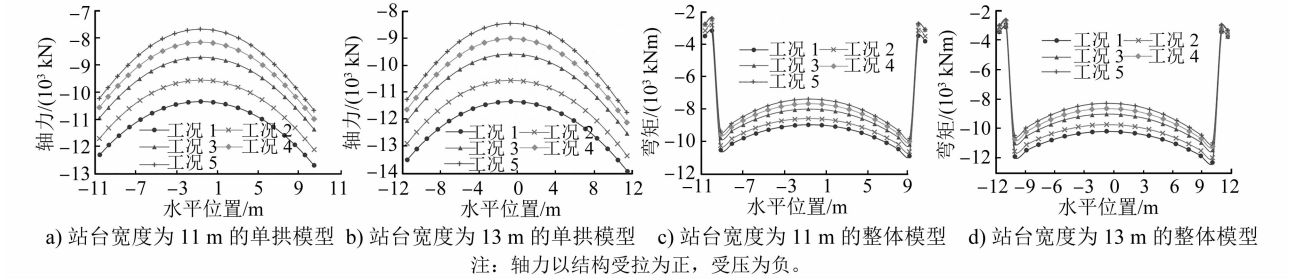


图 6 拱部轴力分析图

Fig. 6 Diagram of arch axial force analysis

表 4 不同工况下的拱顶轴力对比

工况	站台宽度为 11 m				站台宽度为 13 m			
	拱顶轴力/kN		相比工况 1 的轴力降幅/%		拱顶轴力/kN		相比工况 1 的轴力降幅/%整体	
	整体	单拱	整体	单拱	整体	单拱	整体	单拱
1	8 977	10 365			10 201	11 364		
2	8 595	9 585	4.3	7.5	9 744	10 586	4.5	6.8
3	8 010	8 740	10.8	15.7	9 038	9 611	11.4	15.4
4	7 688	8 191	14.4	21.0	8 665	9 038	15.1	20.5
5	7 450	7 713	17.0	25.6	8 307	8 479	18.6	25.4

了 10.0%和 17.7%。站台宽度为 13 m 车站的最大轴力和最小轴力分别减少了 10.8%和 18.7%，矢跨比对拱顶的影响更大。

3.2 结构变形分析

图 7 为站台宽度为 11 m 和 13 m 的两种车站拱盖施工阶段与整体施工阶段相应测点的沉降值与净空收敛值。

由图 7 可知,拱顶沉降、拱肩沉降与拱脚净空收敛都随着矢跨比的增大而减小,结构变形均明显减少。拱部施工阶段:① 站台宽度为 11 m 的车站拱顶沉降从 66.95 mm 减至 46.97 mm,减少了 29.8%;拱肩

沉降从 47.83 mm 减至 30.11 mm,减少了 37.0%;拱脚净空收敛从 36.18 mm 减至 24.56 mm,减少了 32.1%。② 站台宽度为 13 m 的车站拱顶沉降、拱肩沉降与拱脚净空收敛分别减少了 27.2%、37.4%和 32.2%。整体施工阶段:① 站台宽度为 11 m 的车站拱顶沉降从 38.81 mm 减至 21.12 mm,减少了 30.7%;拱肩沉降从 16.71 mm 减至 10.67 mm,减少了 36.1%;拱脚净空收敛从 11.00 mm 减至 6.80 mm,减少了 38.2%。② 站台宽度为 13 m 的车站拱顶沉降、拱肩沉降与拱脚净空收敛分别减少 26.3%、32.6%和 34.7%。矢跨比对三者的影响都比较明显。

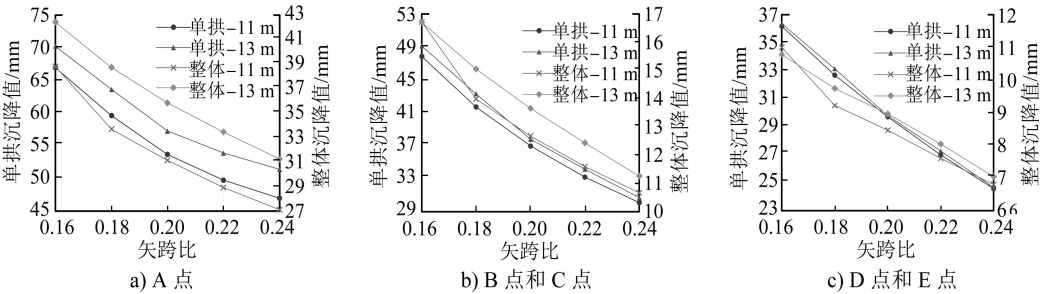


图 7 拱部结构分析点沉降值

Fig. 7 Subsidence value of arch structure analysis points

4 结语

1) 随着矢跨比的增大,在拱部施工阶段,拱部

弯矩先减小后增大,车站跨度越大越先出现拐点;在整体施工阶段,弯矩一直减小,且对拱部与直墙交界处影响较大,平均每个工况达到了 10.5%和

11.2%。

2) 从结构轴力分析可知,在两个施工阶段的拱部轴力均随着矢跨比的增大而减小,但矢跨比对拱部施工阶段的影响更为明显,约为整体施工阶段的 1.5 倍。

3) 矢跨比增大对拱部沉降、拱肩沉降及拱脚净空收敛的影响都非常明显,站台宽度为 11 m 和 13 m 车站在两个施工阶段的结构变形都减少了 1/3 左右。

4) 考虑车站工程的整体施工,在结构合理跨高范围内,矢跨比越大,拱部曲线越合理。

下一步可以针对拱部矢跨比与仰拱矢跨比进行组合研究,并对不同组合的配筋等进行验算,分析相应组合的材料成本,综合受力和成本等各因素,比选出地铁车站结构断面设计矢跨比的最优组合。

参考文献

- [1] 李岩龙. 砂卵石地层不同结构型式大跨无柱地铁车站的抗震动力响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 107.
LI Yanlong. Seismic dynamic response analysis of large-span non-column metro station with different structure forms in sandy pebble stratum[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 107.
- [2] 冯云, 陈文艳. 软土地区复杂环境下大跨全无柱叠合拱车站

结构创新实践[J]. 隧道与轨道交通, 2021(增刊 1): 27.

FENG Yun, CHEN Wenyan. Practice of structural innovation of long-span all-column-free composite arch station in complex environment of soft soil area[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S1): 27.

- [3] 韩向阳, 李成学, 张顶立. 隧道衬砌结构截面内力的影响因素分析[J]. 岩土工程界, 2005(9): 30.
HAN Xiangyang, LI Chengxue, ZHANG Dingli. Analysis of influencing factors of internal force of tunnel lining section[J]. Geological Engineering World, 2005(9): 30.
- [4] 李淑, 张顶立, 李志佳. 北京地铁浅埋暗挖区间隧道塌陷机理[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(1): 24.
LI Shu, ZHANG Dingli, LI Zhijia. Study on mechanism of collapse based on shallow buried subway tunnel of Beijing[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(1): 24.
- [5] 徐全, 吴家耀, 褚卫江. 60 m 大跨度洞室最小矢跨比研究[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(1): 119.
XU Quan, WU Jiayao, CHU Weijiang. The research on the smallest rise-span ratio of large span cavern[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(1): 119.
- [6] 方志斌. 地铁车站暗挖出入口合理断面形式设计[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(8): 230.
FANG Zhibin. Design of reasonable section form of underground excavation entrance of subway station[J]. China Water Transport, 2016, 16(8): 230.

(收稿日期: 2022-04-27)

(上接第 27 页)

- [3] 何川, 张建刚, 杨征. 武汉长江隧道管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 85.
HE Chuan, ZHANG Jiangang, YANG Zheng. Model test study on the mechanical characteristics of segment lining for the Wuhan Yangtze River Tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 85.
- [4] 郑光辉, 庞小朝, 王康任. 基于整环足尺试验的盾构隧道破坏机制及纵缝外弧面变形分析[J]. 隧道建设(中英文), 2021(增刊 2): 165.
ZHENG Guanghui, PANG Xiaochao, WANG Kangren. Failure mechanism of shield tunnel based on full-scale experiment and analysis of longitudinal joint's outboard deformation[J]. Tunnel Construction, 2021(S2): 165.
- [5] 耿萍, 郭翔宇, 王琦, 等. 盾构隧道纵向接头局部足尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 92.
GENG Ping, GUO Xiangyu, WANG Qi, et al. Feasibility study on local full-scale experiment's boundary of longitudinal joint of shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 92.

- [6] 张厚美, 张正林, 王建华. 盾构隧道装配式管片接头三维有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(4): 566.
ZHANG Houmei, ZHANG Zhenglin, WANG Jianhua. 3-D FEM analysis on prefabricated segment joints of shield tunnel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(4): 566.
- [7] 张力, 封坤, 方若全, 等. 盾构隧道原型管片接头抗弯性能试验[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 220.
ZHANG Li, FENG Kun, FANG Ruquan, et al. Experiment study on flexural performance of prototype segment joint of shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 220.
- [8] 金跃郎, 丁文其, 姜弘, 等. 大断面矩形盾构隧道管片接头极限抗弯承载力试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 143.
JIN Yuelang, DING Wenqi, JIANG Hong, et al. Test on ultimate bearing capacity of segment joint in shield tunnel with large rectangular cross-section[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 143.

(收稿日期: 2022-06-27)