

地下大跨度隧道结构截面受力特性及经济分析

卢厚华

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 随着大跨度隧道建设的增多,各结构形式的横截面是否适用、经济是否合理有待进一步研究分析。常见大跨度隧道横截面形式主要包括矩形框架结构、轻型框架结构、折板拱形结构。以某下穿晋江隧道为背景,研究隧道主线在10 m覆土,17.6 m净跨下,不同截面形式的受力特点,并进行经济性分析。研究发现:对比矩形框架结构,轻型框架及折板拱形结构的弯矩及偏心率整体呈现减小趋势;轻型框架混凝土用量可节省14%;折板拱形结构节省混凝土为21%,采用轻型框结构及折板拱形结构更为经济合理。

关键词: 大跨度;隧道;截面形式;受力特性;经济性分析

中图分类号: U451

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0240-05

Analysis on Mechanical Behavior and Economic Efficiency of Structural Cross-sections of Underground Long-span Tunnel

LU Houhua

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the increase in the construction of long-span tunnels, it is necessary to further study and analyze the applicability and economic rationality of various structural cross-sectional forms. The traditional cross-sectional forms of long-span tunnels mainly include the rectangular frames, lightweight structures and folded-plate arched structures. With a tunnel crossing the Jinjiang River as the background, the mechanical behavior of different cross-sectional forms of the main line of the tunnel under 10 m of soil cover and 17.6 m of clear span is studied, and an economic analysis is conducted. The study finds that compared with rectangular frame structures, both lightweight frame and folded-plate arched structures show a decreasing trend in bending moments and eccentricity. The amount of the lightweight frame concrete can be saved by 14%, and the concrete of folded-plate arched structure can be saved by 21%. The use of the lightweight frame and folded-plate arched structures are more economically reasonable.

Keywords: long-span; tunnel; cross-sectional form; mechanical behavior; economic analysis

0 引言

随着城市的发展和人民生活水平的提高,城市车流量越来越多,交通拥堵压力日益加大。目前解决城市交通拥堵问题主要采用立体交通的形式,即地上采用高架桥,地下采用隧道。隧道可将城市部分地面车流量引入地下,承担着缓解地面交通压力、连接城市重要区域以及实现多种交通方式一体化的关键任务,特别是对于连接江河两岸的区域,隧道是主要的解决方案之一^[1]。因此,地下大跨度隧道的建设日益增多,如南京南站绕城公路地道^[2],乌鲁木齐绕城高速(西线)五一隧道工程^[3],苏州市春申湖

隧道^[4],金鸡山和罗汉山隧道^[5]等。

随着国家节能减排及绿色施工政策的推行下,寻求兼具承载力与经济性的截面形式成为亟待解决的关键课题。为此越来越多的从业人员开始对地下大跨度隧道结构截面形式及经济性进行研究分析^[6-16],如侯圆^[3]分析了在覆土厚度变化下不同结构形式的经济效益;黎翔^[6]等调研分析了大跨度明挖隧道的结构形式;毕强等^[13]对大跨分岔式隧道结构设计关键技术进行了研究;刘发前^[15]研究了3 m覆土下矩形隧道结构形式及经济性指标;杨旭^[16]引入了施工难度系数考虑覆土厚度变化对经济指标的影响。

以上研究为结构设计及施工提供了宝贵的经验,就经济效益而言,主要通过降低顶板自重或减薄覆土层厚度,从而削减上部荷载来实现。这种方式

收稿日期: 2025-06-28

作者简介: 卢厚华(1989—),男,硕士,工程师,从事结构设计工作。

对顶板自重占顶部荷载比例较大或埋深较浅情况效果明显,但是在高覆土、大跨度情况下,顶板自重占顶部总荷载比例较小,减轻顶板自重对顶部总荷载影响不大,因此还需进一步研究。以某下穿晋江隧道为背景,研究 10 m 覆土厚度,17.6 m 净跨下矩形框架结构、轻型框架结构及折板拱形框架结构的受力特性及经济性。

1 工程概况

某过江隧道项目,设计为一级公路兼城市主干道,采用围堰明挖隧道下穿晋江,主线采用双向 8 车道,结构形式为单箱双室,单室最大净跨 17.6 m,最大覆土埋深为 10 m,水位高度为 9.5 m。

主线典型横截面如图 1 所示,各尺寸满足建筑功能的最小净尺寸要求。后续分析中,其他各截面形式均在此基础上进行调整,调整后各截面均不得侵占建筑界限。

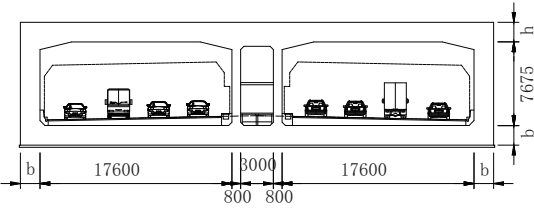


图 1 隧道主线横截面示意图(单位:mm)

2 荷载类型及取值

明挖隧道结构一般长度远大于宽度,结构受力主要表现为平面应变,可采用平面框架单元进行模拟分析。将地基土体视为弹簧,通过施加顶部及侧面荷载,采用弹性地基梁法分析,研究不同荷载组合下结构最不利情况,目前跨江隧道常采用的荷载类型及其取值方法^[17-19]可简化为以下几项。

(1)永久荷载:结构自重(混凝土自重×体积)、设备附加恒载(按实)、静水压力(常水位×容重)、竖向土压力(土体自重×覆土厚)、侧向土压力(静止土压力系数×竖向土压力)。

(2)可变荷载:交通荷载(轮压按覆土厚扩散,同时不小于车道荷载)、水位变化(水位变化高度×容重)、温度荷载^[17](夏季内部升温 10°,冬季内部降温 10°)。

(3)偶然荷载:地震荷载(拟静力法或等效位移法)、爆炸荷载(局部分布荷载)、火灾荷载(按材料弹性模量及强度进行折减)等。

以上各项荷载中,对截面影响比较大的为永久

荷载及可变荷载,文中主要考虑这两项荷载的作用,采用水土分算,分析隧道在满足承载能力、裂缝及挠度^[19]的要求下,不同结构形式内力变化、混凝土及钢筋用量情况。

3 各截面型式受力分析

根据水下隧道规范^[19]要求,各截面形式计算结果均需满足基本组合下承载能力安全、标准组合下 0.2 mm 裂缝及 $L_0/400$ 挠度变形的要求, L_0 为构件计算净跨。后文中的各截面形式采用 MIDAS Civil 模型计算分析,为了突出重点,仅列出对截面起控制作用的内力组合。

3.1 矩形框架结构

矩形框架结构形式简单,计算理论和分析方法成熟,同时矩形框架结构施工方便,因此地下隧道常采用矩形框架结构。矩形框架结构模型如图 2 所示,对各关键截面(编号 1#~6#)计算分析,截面的配筋通常由裂缝控制,满足裂缝的情况下承载力具有一定的安全冗余,因此文中主要列出各截面的内力标准值。

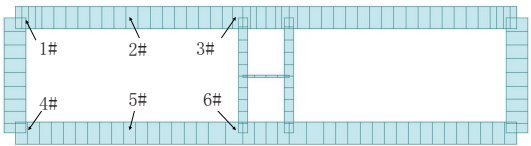


图 2 矩形框架结构计算模型

其他条件不变情况下,矩形框架结构各截面内力标准值随板厚 b 的变化情况如表 1 所示,弯矩 M 、偏心率(e_0/b ,其中 $e_0=M/N$)随 b 的变化情况如图 3 至图 4 所示。随板厚增加顶部荷载也增加,因此弯矩增大;但是弯矩增加的比例相对板厚增加的比例较小,所以偏心率随板厚增加反而减小,这对控制裂缝有利,有助于减小钢筋使用量。

表 1 各截面内力标准值

b/m	内力	1#	2#	3#	4#	5#	6#
1.4	$M/(kN \cdot m)$	5 148	5 575	6 020	3 946	4 665	5 494
	N/kN	1 033	1 033	1 033	1 070	1 070	1 070
1.6	$M/(kN \cdot m)$	5 397	5 939	6 110	4 508	5 363	6 054
	N/kN	1 007	1 007	1 007	1 108	1 108	1 108
1.8	$M/(kN \cdot m)$	5 659	6 317	6 240	5 047	5 965	6 563
	N/kN	987	987	987	1 142	1 142	1 142
2.0	$M/(kN \cdot m)$	5 932	6 717	6 400	5 587	6 501	7 037
	N/kN	970	970	970	1 175	1 174	1 174
2.2	$M/(kN \cdot m)$	6 215	7 143	6 580	6 147	6 995	7 488
	N/kN	954	954	954	1 208	1 208	1 208

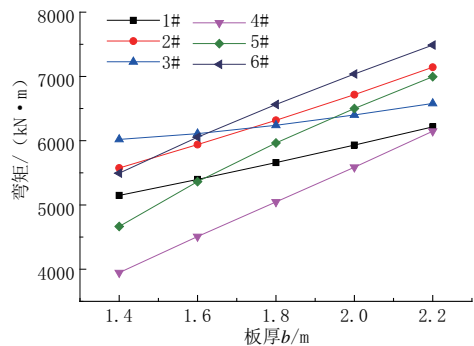


图3 弯矩随板厚变化情况

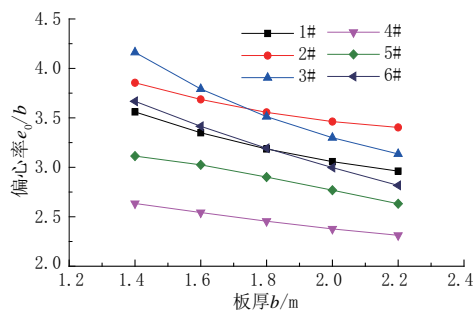


图4 偏心率随板厚变化情况

3.2 轻型框架结构

矩形框架结构型式简单,但截面中心区域混凝土对截面的承载能力发挥有限,参考桥梁空心梁做法,将截面中心区域混凝土掏空以减轻自重,或将其“移”向远离截面中心的边缘处,充分发挥钢筋及混凝土的性能,如图5和图6所示。

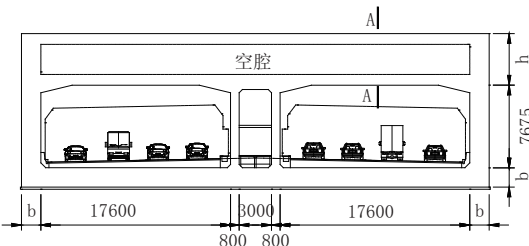


图5 轻型框架截面形式(单位:mm)

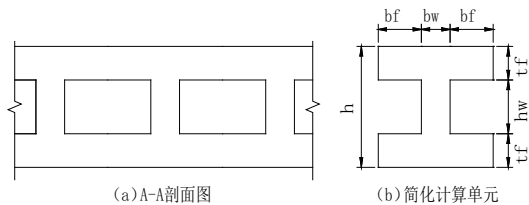


图6 梁单元模型

轻型框架结构的计算模型如图7所示,根据计算结果,基本组合下截面最大剪力为位置1#、3#截面处,最大值为5 394 kN,根据规范^[20]截面所能承受的最大剪力应仅考虑腹板宽度,而前人研究^[15]考虑了翼缘的抗剪,并不符合规范标准。根据规范^[20]仅考虑腹板作用截面最大剪力承载力为5 491 kN,满足要求。

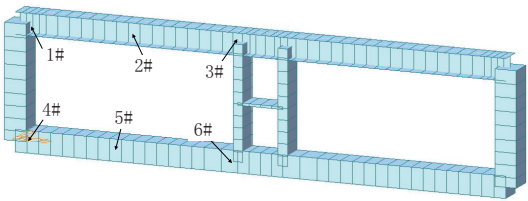


图7 轻型框架结构计算模型

不同腹板高度 h_w 下各截面的弯矩及轴力标准值如表3所示,根据表3绘制的各截面弯矩 M 及偏心率 $[e_0/h(b)]$ 随 h_w 的变化情况如图8至图10所示。由图8可知,1#、2#截面弯矩受 h_w 影响较大,这是由于顶板截面刚度与界面高度的二次方成正比,随 h_w 增加,顶板截面刚度增加较快,侧墙对顶板的转动约束逐渐减弱,因此截面1#的弯矩变小,截面2#弯矩增加;其他截面弯矩受 h_w 变化影响较小,总体呈减小趋势,这是由于 h_w 的增加引起顶部荷载减小占总体比例较小。

表3 轻型框架内力标准值

h_w/m	内力	1#	2#	3#	4#	5#	6#
0.8	$M/(kN \cdot m)$	4 867	5 790	6 236	5 382	5 558	5 475
	N/kN	866	866	866	1 265	1 265	1 265
1.3	$M/(kN \cdot m)$	4 031	6 528	6 368	5 145	5 361	5 578
	N/kN	759	759	759	1 372	1 372	1 372
1.8	$M/(kN \cdot m)$	3 431	7 223	6 278	4 984	5 192	5 573
	N/kN	673	673	673	1 464	1 464	1 464
2.3	$M/(kN \cdot m)$	2 976	7 855	6 031	4 876	5 039	5 498
	N/kN	603	603	603	1 539	1 539	1 539
2.8	$M/(kN \cdot m)$	2 606	8 406	5 688	4 799	4 896	5 379
	N/kN	550	550	550	1 598	1 598	1 598

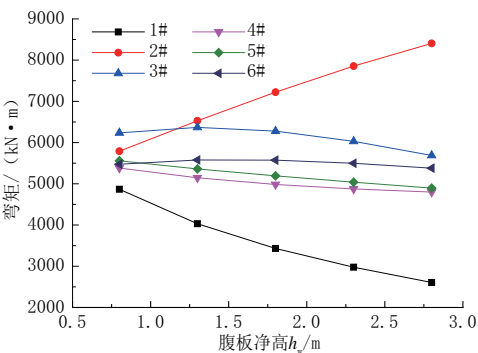


图8 弯矩随腹板净高变化

由图9可知,截面2#在弯矩与截面高度同步增加下,引起偏心率的增加幅度较小;截面1#减小较快,主要是弯矩减小及截面高度增加共同的作用的结果;3#截面主要是截面高度增加引起;其他截面弯矩减小较少,在侧墙及底板厚度 b 不变的情况下,偏心率减小同样较小,总体变化对裂缝控制有利。

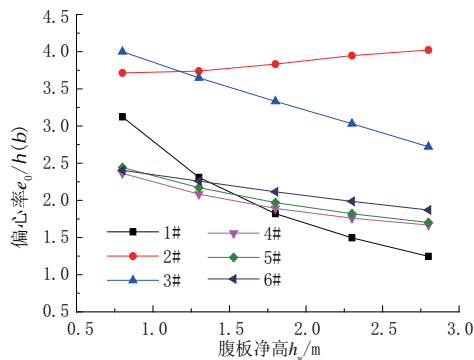


图9 偏心率随腹板净高变化

3.3 折板拱型结构

轻型框架结构是通过增加截面高度来提高承载力。考虑到混凝土是一种“强压弱拉”材料,实际设计中可利用混凝土的这种特性,通过改变结构形式减小受拉区范围和拉应力。参考隧道中圆弧顶面,同时考虑施工难度,将圆弧形简化成“折线”形,即折板拱形结构,如图10所示,图中拱高为 h_1 ,拱长为 l_1 ,相应 MIDAS Civil 计算模型如图11所示。

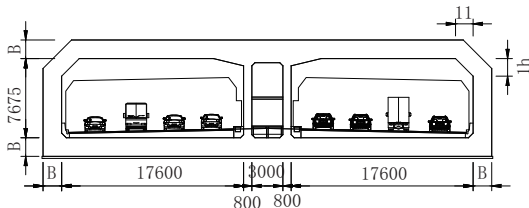


图10 折板拱型截面形式(单位:mm)

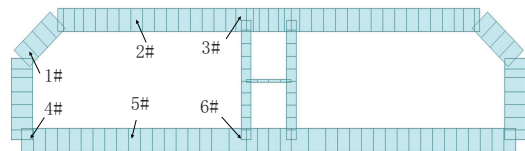


图11 折板拱型结构计算模型

在不影响净空的情况下, l_1 最长可取3.5 m,为控制覆土厚度不变, $h_1=2.5$ m不同 l_1 取值下折板拱形结构弯矩及轴力标准值如表4所示。

根据表4数据绘制弯矩及偏心率随 l_1 的变化情况,如图12~13所示。由图12可知截面弯矩受 l_1 影响较小,总体随 l_1 增加而减小,1#截面弯矩较矩形框架及轻型框架结构减小较多,这是因为结构形式的改变使得1#截面由受弯为主变为压弯为主,受折板拱水平压力影响,3#截面的弯矩增大,故大于矩形框架结构弯矩,相比之下,其余截面的弯矩受 l_1 的影响较小。

1#截面由于轴力的增加及弯矩的减小,偏心率减小较多;随 l_1 增加折板拱水平分力逐渐增大,2#、3#截面轴力也逐渐增加,在界面弯矩变化不大的情况下,偏心率逐渐减小;其他截面偏心率受 l_1 影响较小。

表4 不同 l_1 取值折板拱型结构内力标准值

l_1/m	内力	1#	2#	3#	4#	5#	6#
1.0	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	4 223	5 938	6 962	6 212	6 077	6242
	N/kN	2 729	886	886	1 291	1 291	1 291
1.5	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	4 300	5 827	6 791	6 053	6 010	6 207
	N/kN	2 569	1 003	1 003	1 227	1 227	1 227
2.0	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	4 315	5 732	6 669	5 946	5 963	6 178
	N/kN	2 411	1 109	1 109	1 182	1 182	1 182
2.5	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	4 287	5 652	6 583	5 878	5 930	6 151
	N/kN	2 264	1 208	1 208	1 152	1 152	1 152
3.0	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	4 228	5 581	6 523	5 839	5 906	6 127
	N/kN	2 133	1 303	1 303	1 131	1 131	1 131
3.5	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	4 149	5 504	6 482	5 821	5 889	5 328
	N/kN	2 019	1 394	1 394	1 118	1 118	1 118

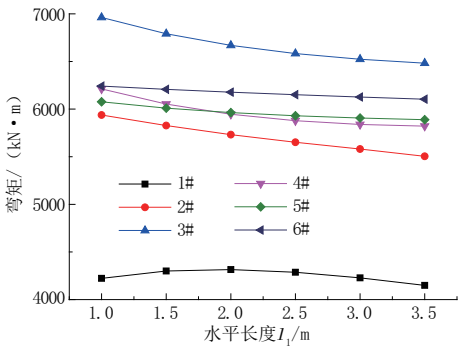


图12 弯矩随拱长变化情况

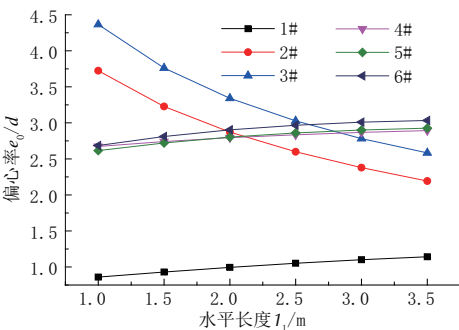


图13 偏心率随拱长变化情况

4 对比分析

考虑到实际施工方便,所采用的最大钢筋直径不超过40 mm;同时考虑到钢筋层数较多会引起混凝土浇筑不密实等工程质量问题,文中算量时控制钢筋层数不超过三层。采用较大截面时,虽然钢筋用量较小,但混凝土用量较大,大体积混凝土不仅会引起水化热的问题,同样会增加施工难度。

综合考虑施工难度及造价因素,在满足规范^[19]要求变形、裂缝及承载力情况下,参考前人钢筋的布置方式^[21],统计矩形框架结构、轻型框架结构及折板拱形结构单位纵向长度的最小用量值,同时将钢筋用量折算成混凝土用量^[16]列入,具体如表5所示。

由表中可知在 $l_1=3.5\text{ m}$, $h_1=2.5\text{ m}$ 时的折板拱形结构用量最小,矩形框架结构混凝土及钢筋用量最多,轻型框架结构次之。与矩形框架结构相比,轻型框架结构节省用量约14%,折板拱型结构节省混凝土约21%。

表5 单位纵向长度各类型用量最小值

结构型式	截面尺寸 / m	C40/m ³	HRB400/t	折算C40总量/m ³
矩形框架	$b=1.8$	201.80	37.33	500.47
轻型框架	$h=1.8$	191.78	34.11	430.53
折板拱型	$l_1=3.5, h_1=2.5$	192.59	25.33	395.23

根据表5,每种结构型式最优用量对应的弯矩及轴力标准值如表6所示。根据表6绘制的弯矩及偏心率变化情况,如图14和图15所示。由图可知,与矩形框架相比轻型框架结构弯矩变化较小,除截面4#略微增加外,其他各截面弯矩均呈现减小趋势,最大减小量为16.5%,截面1#、4#、5#、6#偏心率减小,最大减小量为25%,截面2#、3#增加,最大增加13.9%,各变化总体而言对结构有利。

表6 不同结构类型内力标准值

类型	内力	1#	2#	3#	4#	5#	6#
矩形框架	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	5 659	6 317	6 240	5 047	5 965	6 563
	N/kN	987	987	987	1 142	1 142	1 142
轻型框架	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	4 867	5 790	6 236	5 382	5 558	5 475
	N/kN	866	866	866	1 265	1 265	1 265
折板拱型	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	4 149	5 504	6 482	5 821	5 889	6 104
	N/kN	2 019	1 394	1 394	1 118	1 118	1 118

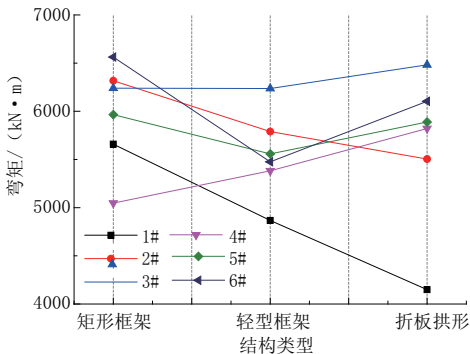


图14 不同结构类型弯矩变化

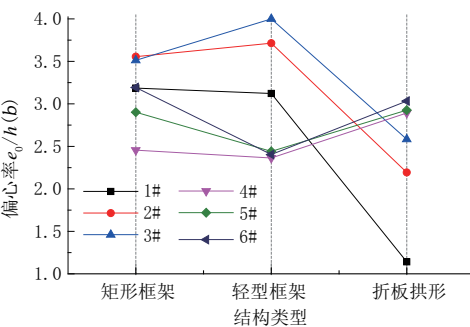


图15 不同结构类型偏心率变化

与矩形框架相比,折板拱形结构弯矩变化较大,截面3#、4#弯矩增加,最大值在4#截面,增加约29.8%,截面1#、2#、5#、6#弯矩减小,最大减小幅度55%;由图15可知,折板拱型框架除截面4#外偏心率增加11%外,其他各截面偏心率呈减小趋势,最大减小量76%。

5 结 语

通过以上分析可知,结构形式的改变对各截面弯矩及偏心率均产生不同影响。对比矩形框架结构,轻型框架及折板拱形结构在弯矩及偏心率整体呈现减小趋势,在绝大多数非地震工况控制的情况下,弯矩的减小可以带来用量的减小,特别是在由裂缝控制配筋的情况下,弯矩及偏心率的减小可以很大程度上节省钢筋的用量。

综上,与矩形框架结构相比,轻型框架结构用量节省14%;折板拱形结构节省混凝土为21%,在满足结构安全及使用要求的情况下,采用轻型框结构或折板拱形结构更为经济合理。

绝大多数情况下,地下建筑在地震工况下受力较复杂,但绝大情况对配筋不起主导作用,因此文中未考虑抗震性能的影响;同时在相同环境情况下,防水、抗渗及裂缝等耐久性设计会对隧道寿命产生较大影响,文中仅研究了裂缝对配筋的影响作用。除此之外还应考虑施工条件的影响,上文中考虑了钢筋直径及排数对施工的影响。实际设计时需综合考虑施工技术、场地环境条件、耐久性等多种因素对结构的影响,权衡结构安全性与经济性,合理选择大跨度隧道结构截面形式。

参考文献:

[1] 王梦恕.中国隧道及地下工程修建技术[M].北京:人民交通出版社,2010.

[2] 刘发前,肖元亨,康晓雯,等.超大跨度地道与下穿地铁共建的围护设计研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(4):908-912.

[3] 侯圆,惠小记,王勇.超大跨度地下矩形隧道结构形式及经济性分析——以乌鲁木齐绕城高速(西线)工程五一隧道工程为例[J].工程技术研究,2022,7(18):129-131.

[4] 郭红敏,贾志强.大跨度深埋城市隧道横截面结构型式及应用——以苏州市春申湖隧道为例[J].城市道桥与防洪,2020,260(12):216-219;25.

[5] 何以群.基于结构受力和工程造价的八车道隧道内轮廓截面的选定[J].福建建材,2015,168(4):1-5.

[6] 黎翔,刘明高,孙烨.大跨度明挖隧道截面与结构形式调研与分析[J].特种结构,2023,40(3):66-75.

[7] 周倩茹.大跨度城市明挖隧道闭合框架计算研究分析[J].城市道桥与防洪,2019,240(4):202-205.

(下转第299页)