

明挖超大跨度叠层隧道结构受力分析及断面优化设计

张光伟,孙超,答武强,余祖峰
(中铁第六勘察设计院集团有限公司,天津市300000)

摘要:为探索明挖超大跨度叠层隧道合理断面形式及优化思路,依托望海路快速化改造工程,借助数值模拟手段,分析超大跨度叠层隧道结构受力特点,并对超大跨度叠层隧道断面形式选择、跨度优化及覆土影响进行了研究。结果表明:超大跨度叠层隧道存在顶底板弯矩过大、中板承受拉应力的问题,中板处于偏心受拉的原因为跨度过大及侧向土体对结构约束不足;大跨度明挖隧道微拱形断面受力性能最优,直墙平顶断面劣于直墙折板断面,综合考虑结构受力性能、断面利用率、经济性,对于明挖大跨度叠层隧道推荐采用直墙折板断面;对超大跨度叠层隧道结构而言,跨度的大小贡献了结构内力较大的比重,减小结构跨度对结构受力改善明显,尤其可大幅减轻中板轴力和弯矩,断面一在受力性能及工程用量方面综合优势最大;浅埋条件下,推荐顶板上覆土采用换填泡沫混凝土的方式减少上覆土容重,从而降低隧道结构顶板截面内力,改善顶板受力条件。

关键词:明挖隧道;叠层;超大跨度;受力特征;断面设计

中图分类号:U451

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)02-0241-05

0 引言

自改革开放以来,人口和资源在时空上的高度聚集,我国城镇化进程加速推进^[1]。在此背景下,人们对采用隧道与地下工程解决人类生存与地面环境矛盾的认识也越来越深刻。而随着我国城市面积的扩容及人口的增长,在人口及交通密集区域,双向六车道以及双向八车道的超大跨度明挖隧道屡见不鲜,该类型隧道以箱涵框架结构为主,从较为简单的单层箱型结构逐渐发展为单层双跨、叠层单跨、叠层多跨^[2-3]等多种结构形式,跨度也随之逐渐增大。

针对明挖超大跨度隧道结构受力分析及断面设计,已有部分学者对此做了相关研究。例如:林永贵^[4]借助有限元法建模计算,认为矩形框架最优断面形式为直墙折板式断面,并提出抬高顶板高度、采用空心顶板结构的设计方案以满足结构受力要求;付大喜^[5]分析了三种断面形式的受力特点,并对直墙折板断面形式进行了参数优化;唐鹏^[6]通过对现场实测数据分析,认为大跨度框架式隧道受力薄弱点为结构跨中和边墙拐角处,可通过设置变截面的方法优化结构受力薄弱处的设计;周倩茹^[7]结合深圳妈湾跨海通道工程,分别建立梁、板单元二维模型模拟框架结构受力,发现断面顶板设置折板可以显著优化

顶板受力,但对于底板的内力基本无影响。欧孝夺^[8]认为结构自重与超载贡献了箱型大跨度框架结构内力较大的比重,应严格控制回填及拆模时机。

综合上述研究发现,目前研究主要针对明挖大跨度单层隧道结构,以超大跨度明挖叠层隧道结构作为研究对象的很少。依托深圳望海路隧道工程实例,分析超大跨度叠层明挖隧道结构受力特征,探讨超大跨度叠层明挖隧道的优化设计,为类似工程设计提供参考。

1 工程概况

望海路快速化改造工程西起兴海大道高架,东接沙河西路,地下快速路为双向4~6车道,全长约7.64 km,邮轮大道以东为双向6车道,以西段双向4车道,通过路基段及桥梁改造与兴海大道高架衔接。道路等级为城市快速路(小客车专用),设计速度主线60 km/h(匝道40 km/h)。起点—微波山段主线隧道长约1 528 m,受兴海大道接地点及沿线建筑物限制,隧道在邮轮大道位置平面曲线半径小,矿山法及盾构法均不具备实施条件,本段隧道采用明挖法施工。标准叠层段隧道断面净跨达12.4 m,为叠层双向六车道隧道,因在叠层隧道内设置匝道进出口车道及分合流车道,隧道断面净跨最大达27.6 m,跨度在大跨度明挖隧道里居于前列。超大跨段隧道结构顶覆土厚2.0~3.5 m,计算抗浮水位按最不利工况考虑,取建成后地面标高。

收稿日期:2022-03-22

作者简介:张光伟(1994—),男,硕士,工程师,从事隧道与地下工程研究工作。

起点—微波山段场区地勘揭示,土层类别由上到下依次为填石、素填土、淤泥、含黏性土砾砂、强~中风化岩花岗,隧道基底主要位于块状强风化花岗岩岩层。地下水位的变化受季节、大气降雨和海水潮汐等因素影响,详勘测得场地混合稳定水位埋深为1.2~5.2 m。

2 叠层隧道结构受力特征分析

2.1 叠层隧道结构受力特征

以“直墙平顶”断面形式为例,拟定研究段隧道断面结构尺寸见图1,计算参数见表1。

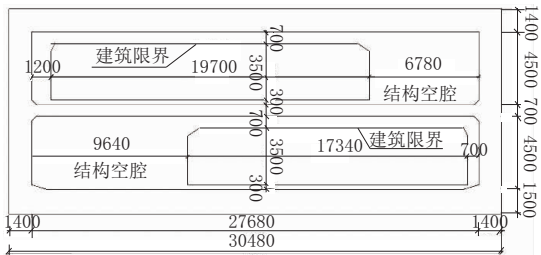


图1 “直墙平顶”断面(单位:mm)

表1 计算参数

计算参数	取值
埋深 h/m	2
侧土压力系数	0.52
土容重	20 kN/m^3
路面回填层荷载 $/\text{m}$	8 kPa
地面、侧墙超载 $/\text{m}$	20 $\text{kPa}/10 \text{ kPa}$
车辆荷载 $/\text{m}$	20 kPa

计算结果见图2。

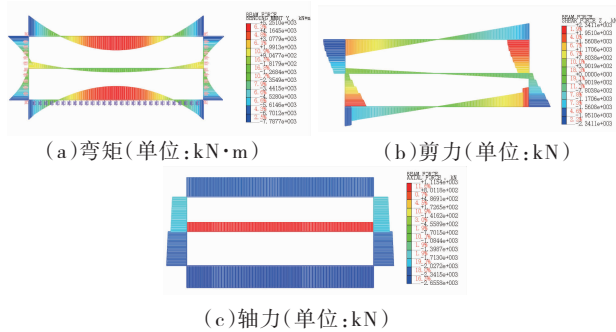


图2 “直墙平顶”断面内力图

由图2可知,大跨度隧道结构受力左右对称,其规律较明显。最大弯矩值出现在板跨中及墙板交界处,顶板跨中最大值为5 250 $\text{kN}\cdot\text{m}$,按照正常使用极限状态要求(最大裂缝宽度0.2 mm)计算出的钢筋截面面积为22 231 mm^2 ,远超施工钢筋排布极限;最大剪力值在两侧边墙与顶底板交界处;结构顶、底板、侧墙构件均处于偏心受压状态,中板处于偏心受拉状态。超大跨度叠层隧道存在顶底板弯矩过大、中

板承受拉应力的问题,结构断面设计不合理、且存在安全隐患。

2.2 中板偏心受拉原因分析

(1)结构跨度过大。

以“直墙平顶”断面形式为例,在结构高度不变的情况下,通过对比分析不同跨度结构受力情况,归纳不同跨度隧道结构轴力变化规律见图3。

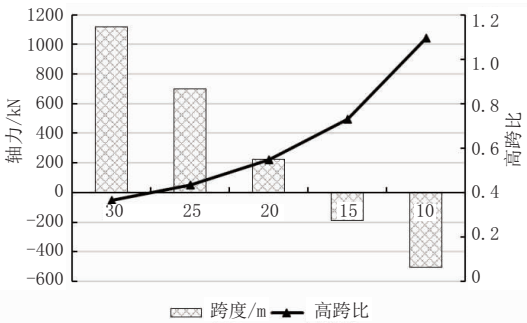


图3 不同跨度下中板轴力

由图3知隧道结构侧墙高度不变的情况下,结构中板轴力值随着跨度增加,构件由偏心受拉向偏心受压转变;随着跨度增加隧道结构高跨比逐渐减小,结构愈加“扁坦”,中板轴力逐渐增大。分析其原因,扁平隧道结构左右侧墙变形呈现对称的“8”字形,中板约束了左右侧墙中部凸起变形,承受侧墙的牵引,中板结构偏心受拉;随着跨度的减小,顶底板刚度逐渐增加,跨中竖向变形显著减小,其对侧墙的“牵引”作用减弱,牵引作用不足以抵消侧墙水土压力作用,中板由偏心受拉向偏心受压转变。

(2)侧向土体对结构约束不足。

将侧墙土体对结构约束作用简化为仅受压的弹簧,以“直墙平顶”断面形式为例,通过对比分析不同地基反力系数下结构受力情况,归纳结构轴力变化规律见图4。

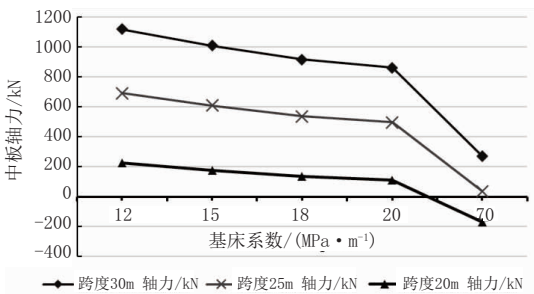


图4 不同基床系数下中板轴力

由图4可见,结构高跨比不变的情况下,随着基床系数增加,侧向土体对结构变形约束作用更加明显,中板轴力值随基床系数增大逐渐减小,构件由偏心受拉向偏心受压构件转变。结构中板轴力值随着地基反力系数变化明显,分析其原因,在结构高跨比

不变的情况下,随着基床系数增加,侧向他土体对结构变形约束作用更加明显,侧墙的凸起变形受到抑制,中板轴力逐渐向偏心受压转变。

3 断面结构形式选择

根据顶、底板形式不同,大跨度明挖隧道结构断面形式主要有直墙拱形断面、直墙微拱形断面、直墙折板断面、直墙平顶断面^[5]等类型,其中直墙平顶断面在实际工程中应用最多。而直墙拱形断面虽然受力性能出众,但是存在断面利用率低浅覆土情况下拱矢高受限^[9-10]及钢筋绑扎困难等问题。考虑到依托工程大跨段覆土厚度无起拱条件,本次设计采取其余 3 种断面形式优化设计,具体断面形式及尺寸参数见图 5。

定义隧道断面利用率为建筑限界面积与断面内轮廓面积的比值,则三种断面的利用率分别为 0.484,0.487 和 0.414。“直墙折板”断面利用率高于“直墙平板”断面,“直墙微拱”断面利用率最低。

由表 2 可知,三种断面结构形式顶、底板均处于偏心受压状态,中板处于偏心受拉状态;断面结构受力左右对称,最大弯矩值均出现在顶底板跨中及墙板交接位置;微拱形断面顶、底板受力性能明显优于另两种断面,结构断面尺寸和配筋面积最经济,直墙折板断面顶板受力明显优于直墙平顶断面,三种断面形式中板内力差距较小。

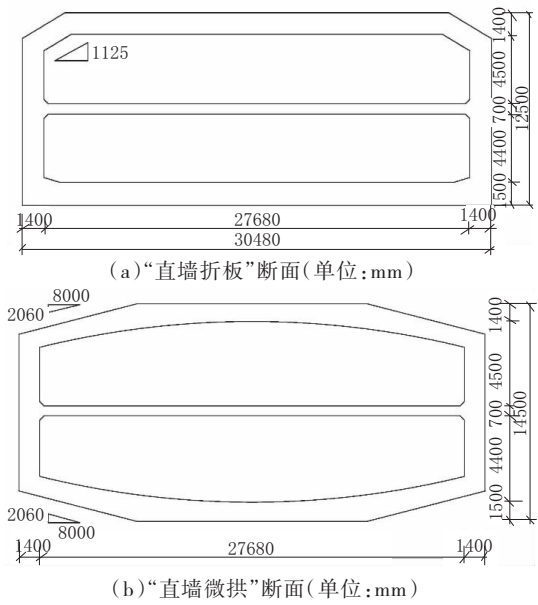


图 5 2 种断面形式

就施工难度及经济性方面而言,微拱形断面工程量<直墙折板形断面<直墙平顶断面,微拱形断面最具优势。但微拱形断面结构除拱顶和底部板厚较薄外,需加大顶、底部的空间 2.2 m,增加造价的同时断面利用率低;同时微拱形断面形式存在浇筑及支模困难等问题,大大降低其实用性。

基于上述分析,本次设计选用直墙折板断面。

4 跨度优化

随着跨度的增加顶底板刚度逐渐减小,叠层隧

表 2 3 种断面形式结构内力

断面形式	位置	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	配筋面积/mm ²	裂缝/mm	工程量
直墙平顶	顶板	跨中	4 345	18 212(10@32+10@36)	0.196	延米混凝土: 137.5 m ³
		支座处	4 976	20 347(10@32+20@28)	0.186	
	中板	跨中	1 375	18 463(30@28)	0.187	
		支座处	2 107	24 115(30@32)	0.197	
	底板	跨中	5 199	18 463(30@28)	0.189	
		支座处	5 316	18 463(30@28)	0.196	
直墙折板	顶板	跨中	3 552	14 193(10@32+10@28)	0.182	延米混凝土: 134.4 m ³
		支座处	3 342	12 309(20@28)	0.194	
	中板	跨中	1 372	18 463(30@28)	0.196	
		支座处	2 042	24 115(30@32)	0.198	
	底板	跨中	5 290	18 463(30@28)	0.193	
		支座处	5 230	18 463(30@28)	0.190	
直墙微拱形	顶板	跨中	1 887	8 038(10@32)	0.175	延米混凝土: 131.8 m ³
		支座处	2 383	9 813(20@25)	0.190	
	中板	跨中	1 398	18 463(30@28)	0.196	
		支座处	2 054	24 115(30@32)	0.198	
	底板	跨中	3 899	16 077(20@32)	0.193	
		支座处	5 084	20 347(10@32+20@28)	0.195	

注:轴力为负值代表结构受压,正值代表结构受拉。

道顶底板承受小荷载即会产生较大的截面内力,为保证结构安全性,一般通过增加板厚和配筋量满足正常使用极限状态要求,但一味增加板厚和配筋量是不合理的也是不经济的。同时中板处于偏心受拉状态,裂缝宽度受限的情况下中板配筋尤其大,在中板板厚难以增加的条件下钢筋排布无法实现。

望海路明挖隧道在明挖隧道内设置进出口匝道,隧道需从标准单洞双线六车道过渡到双线八车道加宽断面分合流车道,由于隧道叠层布置,跨径净跨最大达 27.68 m,结构覆土为 2.0~3.5 m。以覆土 2 m 断面为例,以最大跨度断面为例,拟定 3 种超大跨断面减跨形式,分别在计算模型的顶、底板及侧墙上选取跨中和支座位置内力值进行分析。具体断面设置见图 6,结构内力见表 3。

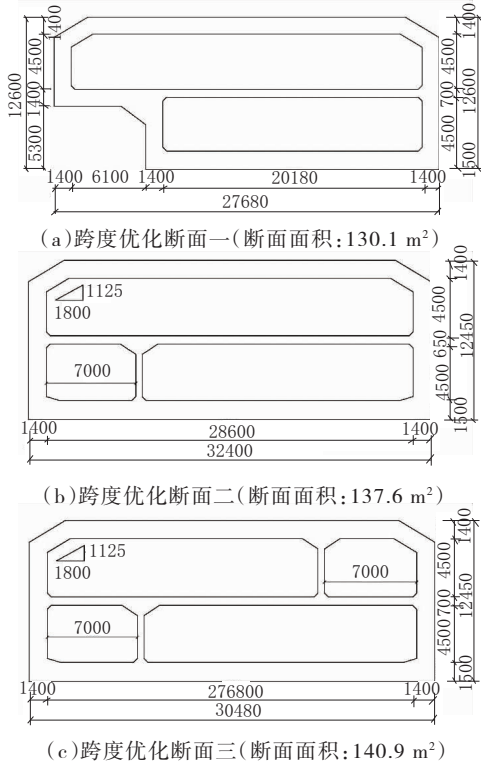


图 6 3 种跨度优化断面(单位:mm)

三种超大跨断面结构减跨形式对结构跨度做了一定程度的削弱,断面一、二减少了中板和底板跨度,断面三减少了中板和顶、底板跨度。

由表 3 内力计算结果可知,各断面板厚不变的情况下,跨度优化设计后顶板弯矩小幅度增加,中、底板挠度和弯矩降幅明显,尤其是中板弯矩降幅达 50%以上;在跨度优化断面形式中,中板仍承受拉应力,处于偏心受拉状态,结构轴力均较直墙折板形式减小;断面一中、底板受力性能较断面二更优,但顶板弯矩较其余断面更大;断面三和断面二相比,顶底板受力差距较小,断面三中板由于传递顶板荷载,受

力大幅度增加。

表 3 不同断面形式结构内力

断面形式	位置	弯矩/(kN·m)	轴力/kN
跨度优化断面一	顶板 跨中	3 740	-1 132
	顶板 支座处	4 260	
	中板 跨中	593	1 602
	中板 支座处	1 328	
	底板 跨中	2 484	-1 212
	底板 右支座处	1 342	
跨度优化断面形式二	底板 左支座处	3 323	-1 132
	顶板 跨中	3 629	
	顶板 支座处	3 687	836
	中板 跨中	638	
	中板 支座处	1 298	-1 570
	底板 右支座处	2 900	
跨度优化断面三	底板 左支座处	4 013	271
	顶板 跨中	3 394	
	顶板 支座处	3 686	-1 536
	中板 跨中	1 054	
	中板 支座处	1 550	1 507
	底板 右支座处	3 350	
	底板 左支座处	2 650	1 485

注:轴力为负值代表结构受压,正值代表结构受拉。

对超大跨度叠层隧道结构而言,跨度的大小贡献了结构内力较大的比重,跨度优化措施对结构受力改善明显;综合来讲,断面一在受力性能及工程用量方面综合优势最大。

5 覆土影响及优化措施

为改善结构受力条件,进一步进行断面结构优化,根据现有文献资料^[11-12],设计方多通过加高侧墙结构高度(抬高顶板)以减小覆土的厚度,高度整体加高后,顶板受力将会减小,侧墙及底板的受力基本不变。依托工程由于线位影响,顶板最小覆土仅 2 m,顶板无抬高条件。顶板上覆土采用部分换填泡沫混凝土的方式减少容重,改善顶板受力。在顶、底板埋深不变的情况下,选用轻质混凝土(泡沫混凝土),密度等级为 A10,即干密度标准值为 100 kg/m³强度等级为 CF0.9,即抗压强度不小于 0.9 MPa^[13-14]。本次设计选用埋深 3.5 m 断面,分别换填 1.0、1.5、2.5 m 厚的轻质混凝土进行结构受力分析。

从图 7 可知,换填上覆土为轻质混凝土后,隧道顶板结构承受竖向荷载减小,受力条件得到明显改善,顶板结构承受内力随换填比例增加逐渐减小。可

见,在抬高顶板高度条件受限的情况下,换填上覆土为轻质混凝土不失为有效优化顶板受力条件的措施,考虑地上路面铺装厚度和抗浮需要要求,换填层宜控制在1~1.5 m。

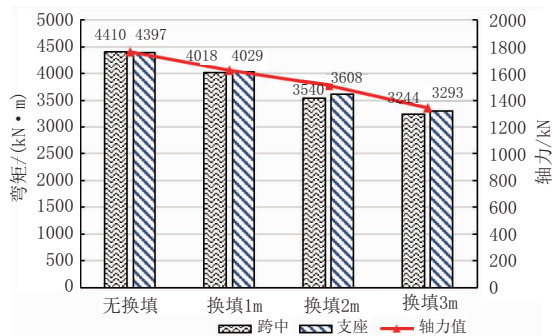


图7 顶板内力

6 结论及建议

(1)超大跨度叠层隧道存在顶底板弯矩过大、中板承受拉应力的问题;其中中板受拉原因归因于跨度过大及侧向侧向土体对结构约束不足。

(2)在受力性能上,明挖隧道框架结构微拱形断面优于直墙折板断面,直墙折板断面优于直墙平顶断面。综合考虑结构受力性能、断面利用率、经济指标,对于明挖大跨度叠层隧道推荐采用直墙折板断面。

(3)超大跨度叠层隧道结构而言,跨度的大小贡献了结构内力较大的比重,跨度优化措施对结构受力改善明显;综合来讲,断面一在受力性能及工程用量方面综合优势最大。

(4)在不具备抬高顶板的浅埋条件下,推荐顶板

上覆土采用换填泡沫混凝土的方式减少上覆土容重,从而降低隧道结构顶板截面内力,改善顶板受力条件。

参考文献:

- [1] 朱合华,丁文其,乔亚飞,等.简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战[J].地学前缘,2019,26(3):22-31.
- [2] 何小龙,程勇,郭小红,等.港珠澳大桥珠海连接线工程拱北隧道设计[J].土工基础,2013,27(1):21-24,40.
- [3] 宋晓龙.大断面双层明挖隧道装配现浇组式衬砌抗震性能分析[D].天津:天津大学,2018.
- [4] 林永贵,马辉,杨春山.高速公路深覆土超大跨明挖隧道断面形式研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(S1):303-309.
- [5] 付大喜.城市大断面明挖隧道断面形式研究[J].隧道建设,2017,37(8):1026-1031.
- [6] 唐鹏.大跨框架式明挖暗埋湖底隧道结构受力特征研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [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(4):202-205.
- [8] 欧孝夺,吴红营,黄颂扬,等.超大断面箱形明挖隧道施工监测与力学特性分析[J].土木工程学报,2013,46(7):133-140.
- [9] 张子龙,姜谟男,于海,等.大跨度暗挖地铁车站拱盖法施工力学响应分析[J].现代隧道技术,2021,58(3):139-146.
- [10] 彭海中.拱盖法关键技术在地铁施工中的应用[J].工程技术研究,2021,6(12):33-35.
- [11] 杨旭.明挖法隧道标准矩形结构与折板拱结构选取分析[J].北方交通,2021(3):78-82.
- [12] 林永贵,陈文明,汪传智.浅深覆土超大断面明挖隧道关键技术[J].公路,2019,64(8):235-241.
- [13] CJJ/T 177—2012,气泡混合轻质土填筑工程技术规程[S].
- [14] CJJ/T 177—2012,气泡混合轻质土填筑工程技术规程[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com