

超大跨度地下矩形隧道结构型式及经济性分析*

刘发前

(上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092)

摘 要:随着城市交通的发展,隧道结构的跨度越来越大,常规结构型式是否适用、其经济指标如何,是亟待研究的课题。笔者对超大跨度矩形隧道的荷载及设计方法进行了简要介绍,并以 3 m 覆土,52 m 跨隧道结构为例,着重讨论了折板拱型结构的力学反应、经济指标,并给出了拱高的合理值。研究发现,顶板自重约占竖向荷载的 40%,相比于常规矩形框架结构,折板拱型结构可节约混凝土及钢筋 35% 左右。然后,提出了空心轻型框架结构,即将顶板做成空心的肋板结构,减少顶板中心部位的混凝土量,减小顶板自重,提高结构的经济效益。分析结果表明,顶板混凝土量可减少 38.9%,底板约 22%,经济性较高,是一种值得推广的结构型式。

关键词:大跨度;矩形隧道;折板拱型;轻型结构;经济性分析

中图分类号:U451 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)03-0792-07

Structural Style and Economic Analysis on
Super Large-span Underground Rectangular Tunnel

Liu Faqian

(Shanghai Municipal Engineering Design General Institute (Group) Limited Company, Shanghai 200092, P.R.China)

Abstract: Due to the increasing of the city traffic amount, the width of the tunnel is increasing. So, it is essential to study whether the traditional structure still suitable be used and its economic effect. The folded-plated structure and light-weighted structure developed from traditional rectangular structure is introduced and their economic effect is analyzed. Besides, the reasonable arc-height of the folded-plated structure is given. For the analysis, the loads applying to the tunnel structure and the design method is introduced, and as an example, a tunnel covered with 3 m thick soil and with the width of 52 m is given to analyze the mechanic effect of the two structures and material saved, compared with rectangular structure. It's found that, for folded-plated structure, the self-weight of the roof amounts 40% of the total vertical load, and about 35% of concrete and rebar could be saved. For the light-weighted structure, the roof of the tunnel is composed of two plates connected with a series of reinforced concrete ribbed plates in transverse direction, so the weight of the roof could be decreased, and finally, the economic return can be got. The example shows that, compared with rectangular structure, the concrete of the roof can be decreased with 38.9%, and the floor with 22.2%, which shows that the light-weighted structure can be further applied. Finally, it can be sure that the rectangular is no longer suitable for large-span tunnel, and the folded-plated structure and light-weighted structure can solve the problem effectively.

Keywords: large-span; rectangular tunnel; folded-plated arch type; light-weight structure; economic analysis

* 收稿日期:2017-12-03(修改稿)
作者简介:刘发前(1981-),男,安徽寿县人,博士,高级工程师,主要从事地下通道工程、地基处理、边坡治理等岩土工程的设计与研究。E-mail:liufa-qian@smedi.com
基金项目:上海市青年科技启明星课题(B类)(14QB1404100)

0 引言

地下空间开发是近些年来土木工程研究的重点,是目前解决地面资源有限、美化社会环境的方向。同时,由于地下空间的抗爆性较好,温度、湿度变化相比地上较小,所以可用于民防和地下贮存功能^[1]。隧道工程起于 1863 年的伦敦地铁,经过一个多世纪的发展,相对已基本成熟。但是,由于地下工程的复杂性和不可预见性,仍有很多问题有待进一步研究,需要具体问题具体分析,城市隧道尤其如此^[2],给工程研究人员带来了很大挑战。

随着城市化的发展和人民生活水平的提高,各城市的汽车年增长量呈逐年增长的态势。在中国部分城市(如上海、北京等),已出台相应政策以减小道路交通压力,大力宣传绿色出行的理念,鼓励民众尽量乘坐公共交通,但是,仍然解决不了交通拥堵的问题。造成交通拥堵的问题,一是因为流量大,二是因为速度慢。前者是难以控制的,后者倒可以通过合理的交通规划来解决。

隧道工程的实施可将部分交通流置于地下、实现立体交叉、提高交通疏散速度,是解决城市交通环境、社会环境的有效途径之一。但是在交通密集区,隧道的跨度越来越大,尤其是隧道匝道口处,单孔超过 20 m 已屡见不鲜,如南京南站绕城公路地道^[3-4]。然而,人们虽已注意到大跨度地下通道的内力较大,将造成极大浪费,但仍未提出有效解决措施^[5-6]。刘明保等^[7]提出采用预应力技术解决大跨度地下结构的受力问题,并应用于某 15 m 净跨的地下通道中,但是,锚固结构的耐久性保护是设计的难点。张猛等^[8]引入减压平台等措施来解决大跨度地下车库的受力难题,在外侧空间充足的情况下也是值得借鉴的方法之一,但是市政工程中隧道红线控制往往非常严格,也难以推广。史红军等^[9]提出顶板在地下水位上时采用空心楼板结构替代箱型结构,并用于济宁某人行通道。目前,某工程拟设计为双向 14 车道,由于研究不足,初步仍采用常规的单箱双室的矩形框架结构,结构顶板厚度达 1.8 m。本文即以该工程为背景,讨论大跨度矩形隧道的荷载条件及折板拱型结构的效率,并提出轻型框架结构。研究发现,对于该工程情况,顶板自重已超过上覆荷载的 40%;折板拱型结构和轻型框架结构可节约工程量 30% 以上。

1 荷载类型及取值

随着隧道工程的发展,计算方法也在不断改进。对于明、盖挖的地下通道,一般采用荷载结构法和地层结构法(或称弹性地基梁法)^[10]。前者是将结构隔离出来,施加外部荷载并进行荷载组合,取最不利情况下的计算结果作为设计依据。后者将结构下土体视为弹性地基梁,通过施加荷载并取不同荷载组合下的结构最不利情况进行结构的设计。目前,工程设计中多采用后者。所采用的荷载类型及取值方法可简化为以下几项:

- (1) 结构自重,取钢筋混凝土重度×体积。
- (2) 覆土重力,取土体重度×覆土厚度。
- (3) 上覆车行荷载,根据道路等级和覆土厚度确定,一般将轴重扩散为均布荷载^[11],可与覆土重合并为顶板压力荷载。
- (4) 侧墙上水平水土压力,按郎肯土压力或库伦土压力理论,并根据土性特征,确定水土合算或是水土分算^[12]。
- (5) 浮力,按阿基米德浮力定律,按压力水头全值考虑。

设计过程中,应考虑浮力达到最大和完全不考虑浮力两种工况下的结构内力不利值作为设计依据。因此,本文分析亦包含以上两种工况条件。

2 折板拱型结构效率分析

2.1 结构型式对比

明、暗挖施工的地下隧道通常采用钢筋混凝土矩形框架结构(如图 1),主要是因为结构型式简单、传力明确、施工方便。然而,混凝土是一种典型的“强压弱拉”材料,且隧道结构中允许带裂缝(裂缝宽度≤0.2 mm)工作,因此,实际使用中应尽量减少受拉区的范围和拉应力值。拱形结构可有效地减小拉应力值,被广泛应用于山岭隧道、房屋门窗和拱桥结构中。

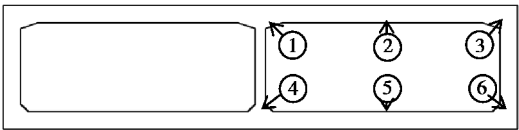


图 1 矩形框架结构标准断面图

Fig. 1 Typical cross-section of rectangular skeleton structure

但是,若将拱形结构应用于地下明挖隧道中,尚存在以下问题:

- (1) 施工困难, 需要做大型钢拱架模板, 经济性差。
- (2) 混凝土浇注困难, 尤其是拱顶处混凝土将对角部产生较大压力, 容易导致脱模漏浆。
- (3) 钢筋要按需预弯, 难度较大。
- (4) 拱矢较高, 导致浅覆土中不适用; 深覆土中亦带来通风面积大等负面效果, 因此, 经济价值有限。

于是, 有人提出将圆弧型结构简化为“折线”型式, 即成折板拱型结构, 如图 2 所示。折板拱型结构构造的确定原则为: 满足结构限界及上方设备预留空间; 管廊处(检修道)应满足人行净高要求。在此基础上可以确定拱高、拱角(结构中心线与水平线的夹角), 不同的拱高、拱角的构造, 所形成的拱效应不同。

控制顶、底板结构的关键点分别为中墙处支点, 顶(底)板跨中点、侧墙与顶(底)板的角点, 如图 1、图 2 中 1#~6#点。

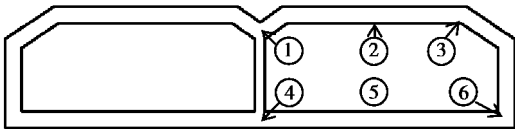


图 2 折板拱型结构标准横断面图

Fig. 2 Typical cross-section of folded-plated arch type structure

2.2 效率分析

2.2.1 “折板拱型”结构的效率

以某 52 m 跨度(结构中心线之间的距离)的地下通道为例, 分析对比矩形框架结构与折板拱型结构的力学反应、经济效应的差异。荷载和边界条件为:

- (1) 覆土厚度为 3 m, 结合地面行车荷载, 作用于顶板上的竖向荷载约为 66 kPa(这里忽略拱型顶板不同覆土厚度带来的差异)。
- (2) 水平水土压力系数取 0.7, 浮力取 74 kPa。
- (3) 采用弹性地基梁模型 3 个方向约束, 水平向取 5 000 kN/m, 竖直向取 10 000 kN/m。
- (4) 结构自重: 钢筋混凝土重度取 25 kN/m³, 忽略结构内铺装自重。

2.2.2 计算模型分别的构造尺寸

- (1) 矩形框架结构: 顶板、侧墙厚度采用 1.2 m, 底板 1.4 m。
- (2) 折板拱型结构, 拱高为 2 m。
- (3) 折板拱型结构, 拱高为 3 m, 相应覆土厚度减小 1 m, 为 2 m。

根据对矩形框架结构的初步分析, 该条件下结

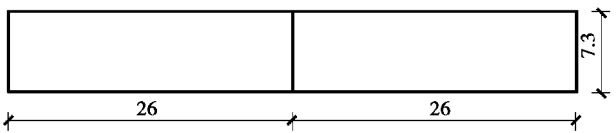


图 3 标准矩形框架结构(板厚=1.2 m, 单位:m)

Fig. 3 Typical rectangular skeleton structure
(thickness = 1.2 m, unit: m)

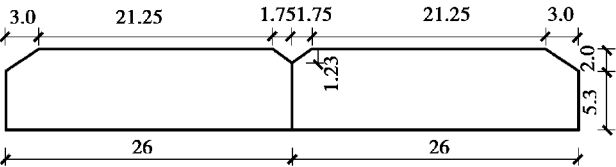


图 4 折板拱型结构(拱高=2 m, 单位:m)

Fig. 4 The folded-plated structure
(arch height = 2 m, unit: m)

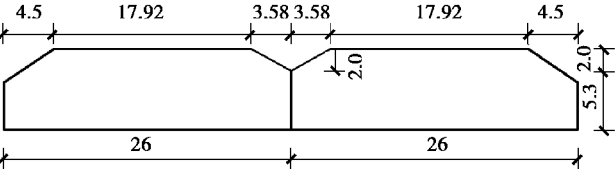


图 5 折板拱型结构断面(拱高=3 m, 单位:m)

Fig. 5 The folded-plated structure
(arch height = 3 m, unit: m)

构顶、底板和侧墙的尺寸均需 1.8 m。计算所得各控制点的弯矩如表 1 所示。

表 1 各控制点弯矩 单位:kN·m

Table 1 Bending moment of the determining points
unit: kN·m

结构型式	点号					
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
矩形, 板厚=1.8 m	7 540	3 658	3 978	6 084	2 755	3 996
折板拱型, 拱高=2 m	4 801	2 812	3 424	3 246	1 316	1 891
折板拱型, 拱高=3 m	3 047	1 991	2 585	2 884	1 241	1 648

由表 1 可见, 按常规矩形框架结构, 在 1 号点处, 弯矩达到 7 540 kN·m, 1.8 m 厚板中配筋约为 2 ϕ 32@100+2 ϕ 32@100; 而在折板拱型结构中, 1 号点弯矩为 4 801 kN·m, 结构厚度为 1.2 m 中配筋为 2 ϕ 32@150+2 ϕ 32@150, 节约混凝土及钢筋达 33% 以上。其余点的计算也表明折板拱型结构至少比矩形框架结构节省钢筋 35% 以上。

2.3 拱角对结构内力的影响

从表 1 可以看出, 将拱高由原 2 m 提高至 3 m, 顶板弯矩可进一步减少 30% 以上, 表明拱角是决定拱效应大小的主要因素之一。

本节对拱角的效应进行分析。定义靠近中隔墙处折板(折板 1)的水平长度为 l_1 ,高度为 h_1 ;靠近侧墙处折板(折板 2)的长度为 l_2 ,高度为 h_2 。则 $l_1=4.5\text{ m}$ 、 $l_2=4.5\text{ m}$ 的结构横断面如图 6 所示。要保证结构净空不变,折板拱的拱角大小以折板拱水平长度来反映。设计过程中,所关注的共有 8 个点,分别为折板 1 底部的 1 号点、折板 1 顶部的 2 号点、顶板的中点 3 号点、折板 2 顶部的 4 号点、折板 2 底部的 5 号点,底板上位于中隔墙下的 6 号点、底板跨中的 7 号点、底板位于侧墙下的 8 号点(如图 6)。分析中共包括 6 个模型,计算荷载和边界条件与前文一致,计算分不考虑浮力工况和考虑浮力工况 2 种情况。参数为 $h_1=2\text{ m}$ 、 $h_2=3\text{ m}$ 、 l_1 、 l_2 为:

- 模型 1: $l_1=4.5\text{ m}$ 、 $l_2=4.5\text{ m}$;
- 模型 2: $l_1=3.58\text{ m}$ 、 $l_2=4.5\text{ m}$;
- 模型 3: $l_1=2.5\text{ m}$ 、 $l_2=4.5\text{ m}$;
- 模型 4: $l_1=1.5\text{ m}$ 、 $l_2=4.5\text{ m}$;
- 模型 5: $l_1=3.58\text{ m}$ 、 $l_2=3.5\text{ m}$;
- 模型 6: $l_1=3.58\text{ m}$ 、 $l_2=2.5\text{ m}$ 。

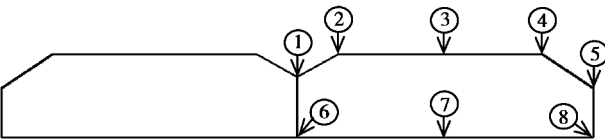


图 6 结构横断面图

Fig. 6 The cross-section of the structure

计算所得弯矩结果汇总于表 2,可见无浮力和有浮力 2 种工况下的变化规律基本相同,且弯矩量值相差不大。由于篇幅所限,以下仅对无浮力工况下的结果进行列举分析。

表 2 弯矩

单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$

Table 2 Bending moment

unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$

模型	工况	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
1	无浮	3 236	1 405	2 202	791	3 118	3 166	1 403	1 419
	浮力	3 146	1 367	2 195	8 32	3 138	3 155	1 477	1 365
2	无浮	3 788	1 605	2 251	702	3 082	2 977	1 352	1 529
	浮力	3 700	1 588	2 244	748	3 106	2 963	1 427	1 470
3	无浮	3 581	2 418	2 319	702	3 119	2 966	1 344	1 576
	浮力	3 492	2 464	2 312	748	3 143	2 952	1 402	1 516
4	无浮	3 335	2 796	2 393	722	3 175	2 977	1 345	1 616
	浮力	3 246	2 919	2 386	768	3 198	2 964	1 419	1 555

续表 2

模型	工况	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
5	无浮	3 901	1 635	2 318	1 249	2 397	2 996	1 329	1 555
	浮力	3 815	1 589	2 311	1 295	2 958	2 983	1 403	1 498
6	无浮	4 051	1 683	2 398	1 825	2 772	3 022	1 313	1 599
	浮力	3 968	1 638	2 394	1 871	2 790	3 010	1 383	1 542

综合模型 1~4,可以分析结构弯矩随 l_1 变化的趋势,综合模型 2、5、6 可以分析结构弯矩随 l_2 变化的趋势。

1#~5#点弯矩与 l_1 变化关系如图 7 所示。由图可见,当拱高一定时,1#~5#点的弯矩随 l_1 均有一定的变化。对于 1#点,当水平段为 3.58 m 时达到最高值,这是因为当水平段较短时(拱角较大),1#点处主要承受压力而致使弯矩变小;2#点随水平段的长度增加逐渐减小,变化非常明显;当水平段长度为 4.5m 时,1#、2#点弯矩均达到最小值。应该说,水平段长度为 4.5 m 是 1#、2#点最合理的选择。3#~5#点的弯矩随水平段的长度变化不是特别明显,3#点持续下降,4#、5#点先减小后增加。

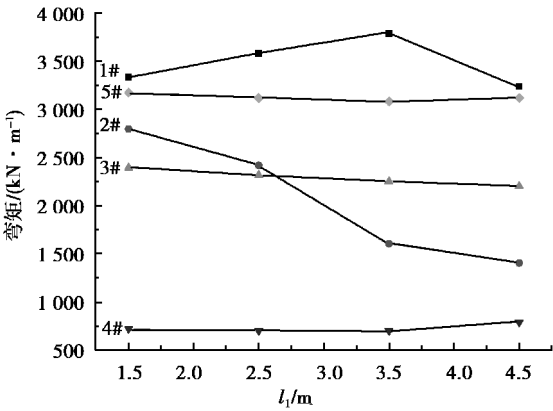


图 7 1#~5#点弯矩与水平长度 l_1 的关系

Fig. 7 Bending moments of points 1#~5# vs. l_1

综合来看,从该图可以看出水平段长度 l_1 取 4.5 m 是比较合理的。

6#~8#点弯矩与 l_1 的变化关系如图 8 所示。由图可见,6#、7#点随水平段长度先减小后增加,而 8#点持续减小,但变化量均很小。而且 6#点由于位于中隔墙部分需做削峰处理,其最合理值应以其余两点控制。从图 7 可见,水平段长度取 3.5~4.5 m 差异不大,各有利弊。综合 1#~5#点的合理取值,建议取 4.5 m。

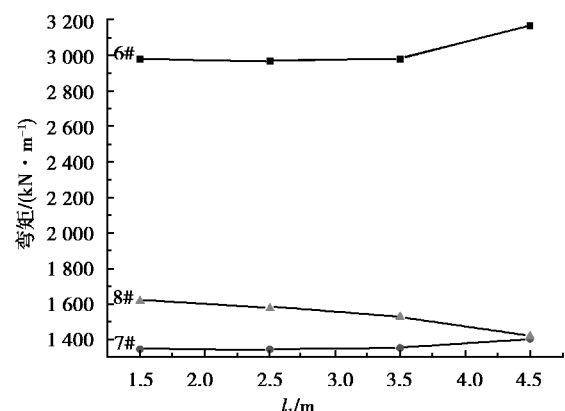


图 8 6#~8#点弯矩与 l_1 的关系(无浮力)

Fig. 8 Bending moments of points 6#~8# vs. l_1
(without buoyancy)

从图 9~10 可以看到,随着水平段长度的增加,除 5#点外,均有不同程度的减小。因为水平段的长度太短,侧墙上的折板呈受压状态更加明显;若水平段太长,又无法起到拱的作用。由图 10 可以看出,水平段长度 l_2 取 3.5 m 比较合适。

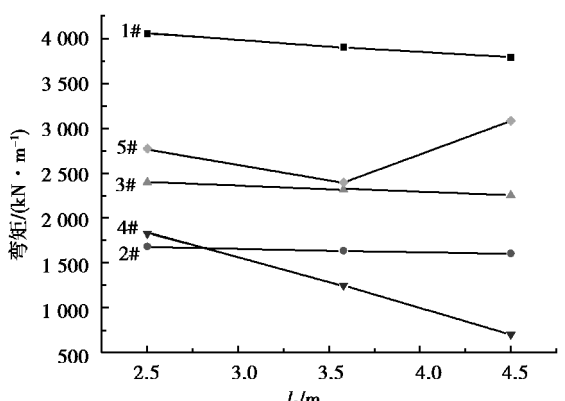


图 9 1#~5#点弯矩与 l_2 的关系(无浮力)

Fig. 9 Bending moments of points 1#~5# vs. l_2
(without buoyancy)

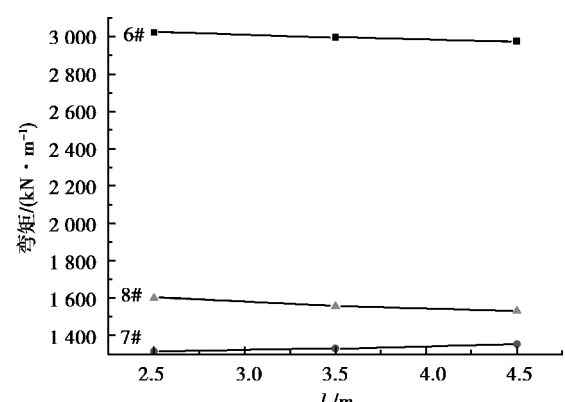


图 10 6#~8#点弯矩与 l_2 的关系(无浮力)

Fig. 10 Bending moments of points 6#~8# vs. l_2
(without buoyancy)

3 轻型框架结构

由前面的分析可以看出,对于大跨度隧道,顶板厚度较大,其自重为竖向荷载的主要部分之一。如 3 m 厚覆土、1.8m 厚顶板情况,顶板自重占总竖向荷载的比率为 $1.8 \times 25 / (1.8 \times 25 + 66) = 40.5\%$ 。因此,通过增加结构厚度来解决大跨度结构的受力问题,其效率越来越低。

梁板结构在受弯时,应力呈三角形分布,弯矩主要由贴近梁上、下表面的混凝土承担。因此,将顶板作为空心板可有效降低结构自重,同时又不会大幅降低抗弯能力。参考桥梁工程中空心箱梁的概念,在隧道顶板内预留若干条沿隧道横向的孔洞,每隔一段距离设置一条加强肋板,如图 11~13 所示。常规隧道计算可以认为是长大但结构不变的型式,如图 11 所示。结构受力分析可考虑为平面应变单元,其主要受力方向是横剖面方向,顶板作为梁单元考虑。针对此,可以考虑将顶板做成空心箱梁的结构型式,针对 25 m 长度的一节段,其 1-1 剖面如图 12 所示。

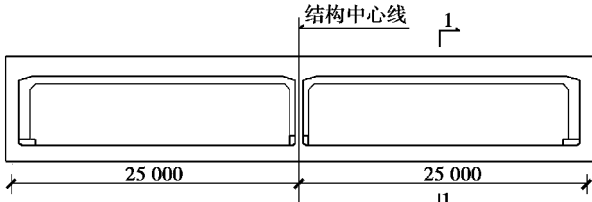


图 11 隧道结构横断面图(单位:mm)

Fig. 11 Cross-section of tunnel (unit: mm)

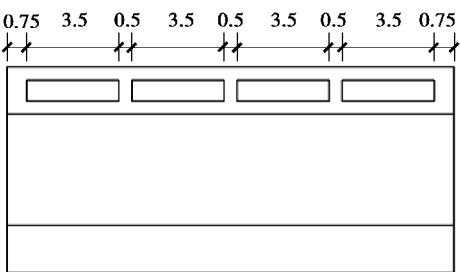


图 12 纵断面图(1-1 断面,单位:m)

Fig. 12 Vertical section of tunnel (section 1-1, unit: m)

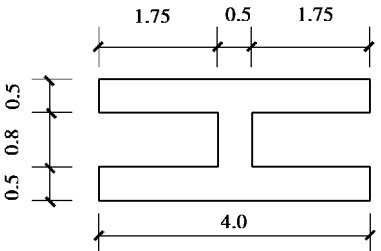


图 13 梁单元计算模型(单位:m)

Fig. 13 Computation model of the beam element (unit: m)

现采用梁单元来模拟本结构模型,分析截取 4 m 长范围。顶板采用平“H”形结构(如图 13),底板和侧墙采用 4 m×1.4 m 的梁单元,荷载条件与前

述计算完全一致,计算模型如图 14 所示,计算结果见表 3。同样,将顶板、侧墙、底板均采用 1.0 m×1.8 m 模型,弯矩计算结果也列于表中供参考对比。

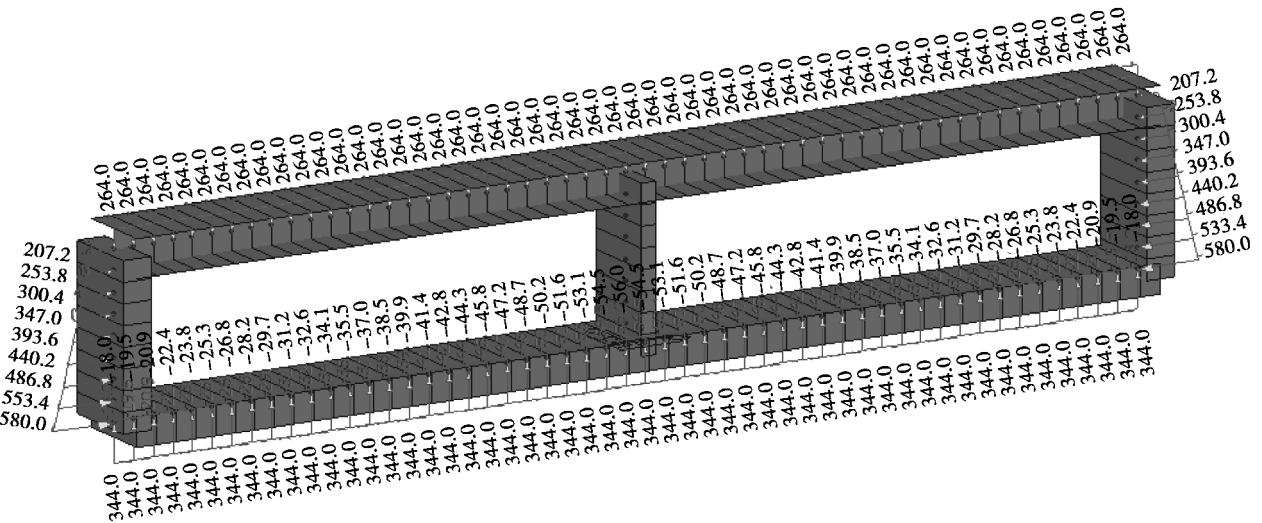


图 14 隧道计算模型

Fig. 14 The computation model of the tunnel

表 3 结构弯矩		单位:kN·m		
Table 3 Bending moments of structure		unit: kN·m		
		中隔墙角部	跨中	侧墙角部
轻型结构	顶板	25 767/4=	13 558/4=	11 160/4=
		6 439.3	3 389.5	2 790
	底板	17 770.1/4=	5 709.2/4=	9 615.8/4=
		4 442.5	1 427.3	2 404
矩形框架	顶板	7 569.5	3 659	3 772
	底板	6 047.5	2 742	4 022.6

可见,顶板弯矩降幅为分别为 15%、7.4%和 26%;底板弯矩的降幅分别为 26.5%、47.9%和 40%。需要说明的是,由于轻型结构类似于“工”字形,翼缘上的钢筋无法做成弯起钢筋,导致钢筋量的降幅不会达到弯矩降幅值。但是,可以肯定的是,其钢筋量还是比较节约的。

另外,“H”形顶板的最大剪力为 5 423.6 kN、4 300.4 kN,而混凝土自身可提供的抗剪力为:

$$0.7 \times f_t \times b \times h = 0.7 \times 1.57 \times (4\,000 \times 500 + 4\,000 \times 500 + 800 \times 500) = 4\,835.6\text{ kN}$$

式中: f_t 为混凝土的抗拉强度; b 、 h 分别为梁单元的宽度和高度。混凝土自身已基本将达剪力值,结合箍筋即可满足抗剪要求。

底板的最大剪力为 5 340.5 kN,而混凝土自身可提供的抗剪力为:

$$0.7 \times f_t \times b \times h = 0.7 \times 1.57 \times (4\,000 \times 1\,400) = 6\,154.4\text{ kN} > 5\,340.5\text{ kN}$$

混凝土自身亦可满足抗剪要求。

顶板上混凝土可节约为:

$$\frac{3.5 \times 0.8}{4.0 \times 1.8} = 38.9\%$$

底板、侧墙由 1.8 m 减至 1.4 m,可节约混凝土量约为 22.2%,经济效益较高。

4 结论

超大跨度隧道是目前发展的趋势,然而目前相关研究远远不够。现在常规明、暗挖隧道仍然采用矩形框架结构断面,造成超大跨度隧道中结构板厚度较大,势必造成很大浪费,且大体积混凝土浇筑质量难以保证。本文对折板拱型断面结构进行了分析,以 52 m 宽隧道为例进行计算,发现可节约材料 33%以上,并给出了拱高为 3 m 情况下合理的拱角,供将来设计参考。另外,还提出了轻型框架结

构,对文中案例可节约顶板混凝土量 38.9%,底板约 22.2%,经济性较高,是一种值得推广的大跨度隧道结构型式。

参考文献(References)

- [1] 袁红,戴志中,刘新荣,等.重庆主城区地下空间利用发展阶段研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):1-5,13.(Yuan Hong,Dai Zhizhong,Liu Xinrong,et al.Development phase of underground space utilization in chongqing urban district [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10(1):1-5,13.(in Chinese))
- [2] 张京,胡鹏,李国峰.城市隧道结构设计研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(增1):1679-1682,1745.(Zhang Jing,Hu Peng,Li Guofeng.Structural design and research of city tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10(Supp.1):1679-1682,1745.(in Chinese))
- [3] 刘发前,卢永成.超大跨度基坑的设计问题及其处理[J].建筑施工,2012,34(9):869-871.(Liu Faqian,Lu Yongcheng.Design attentions to super long-span foundations pit and consequent treatment[J]. Building Construction,2012,34(9):869-871.(in Chinese))
- [4] 刘发前,肖元亭,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.(Liu Faqian,Xiao Yuanting,Kang Xiaowen,et al.Study on the combined design of retaining system of deep excavation for super large-span tunnel and metro line [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10(4):908-912.(in Chinese))
- [5] 李国英,尚书侠.城市下穿地道工程设计[J].山西建筑,2007,33(22):283-284.(Li Guoying,Shang Shuxia.Design for city tunnel engineering[J]. Shanxi Architecture,2007,33(22):283-284.(in Chinese))
- [6] 付钢,王磊.超浅埋拱过街地道的设计与施工方案优化[J].地下空间与工程学报,2006,2(增2):1425-1431.(Fu Gang,Wang Lei.Optimum process for design and construction of a super-shallow overburden multi-arch underpass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2006,2(Supp.2):1425-1431.(in Chinese))
- [7] 刘明保,聂永明,乐贵平,等.某明挖大跨区间预应力密排框架箱形结构的抗裂控制[J].建筑科学,2012,28(增1):308-311.(Liu Mingbao,Nie Yongming,Le Guiping,et al.Crack control of a open-cut large cross section pre-stressed close-packed framework box structure[J]. Building Science,2012,28(Supp.1):308-311.(in Chinese))
- [8] 张猛,朱炳寅.北京海关地下车库大跨混凝土结构设计[J].建筑结构,2011,41(增1):674-676.(Zhang Meng,Zhu Bingyin.Beijing customs underground garage long span concrete structure design [J]. Building Structure,2011,41(Supp.1):674-676.(in Chinese))
- [9] 史红军,高瑞,李晶晶,等.深埋空心楼板式人行地下通道结构设计[J].工程建设与设计,2014(7):123-126.(Shi Hongjun,Gao Rui,Li Jingjing,et al.Structural design of pedestrian underpass buried deep in the hollow flat slabs[J]. Construction and Design for Project,2014(7):123-126.(in Chinese))
- [10] 冯紫良,章曾焕.新奥法设计施工与管理[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.(Feng Ziliang,Zhang Zenghuan.New Austrian tunnelling method design construction and management [M]. Beijing: China Architecture and Building Press,2005.(in Chinese))
- [11] 中交公路规划设计院.公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2004)[S].北京:人民交通出版社,2004.(China Communications Highway Planning and Design Institute.General code for design of highway bridges and culverts (JTG D60-2004) [S]. Beijing: China Communications Press,2004.(in Chinese))
- [12] 陈希哲,叶菁.土力学地基基础[M].北京:清华大学出版社,2013.(Chen Xizhe,Ye Jing.Soil mechanics and geotechnical engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2013.(in Chinese))