

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.011

水下隧道结构优化设计

蔡 新^{1,2} 李洪煊² 武颖利² 易剑刚²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:基于现代设计理论,研究水下隧道结构断面的优化设计问题.建立以隧道结构断面关键几何尺寸为设计变量,隧道结构造价最低为目标函数,隧道建筑限界、抗浮稳定以及隧道应力为约束条件的优化设计数学模型,采用 ANSYS 有限元优化软件进行寻优搜索,求得隧道结构断面尺寸的最优设计方案.优化设计方案与原设计方案相比,隧道结构断面面积减少了 16%,应力分布更为均匀,变形显著减小,且满足抗浮稳定安全的要求,表明隧道结构优化设计方案经济合理、安全可靠.

关键词:水下隧道;结构分析;优化设计

中图分类号:TV554 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2009)06-0665-04

我国是一个多河流湖泊的国家,许多城市都跨越江河湖泊,解决这些城市的交通问题,除了桥梁方案外,兴建水下隧道是一个较为可行的方案^[1].水下隧道较之桥梁具有不用考虑通航限界、不受浓雾等天气影响、节约土地空间、抗震性能好以及交通顺畅等明显优点,其缺点是水下施工难度大,工作面窄,施工周期长,工程造价高^[2].

目前隧道结构断面设计主要采用典型类比设计法.该法根据围岩等级,在满足建筑限界条件下参照相应隧道设计规范,套用标准断面图,再结合实际工程特点设计出可行的断面形式^[3-5].现阶段隧道结构设计仍停留在选取几个方案进行比较寻优的传统设计阶段^[6-7],且主要针对山岭隧道,对水下隧道结构的断面优化设计研究甚少.本文结合某水下隧道结构工程实例,基于现代设计理论和方法,对明挖顺作法施工的水下隧道结构的断面形式进行优化设计研究.

1 工程背景

某水下隧道工程全长 623.699 m,属于城市次干道设计标准(四级公路),隧道设计车速为 30 km/h.隧道断面设计以建筑限界为主,综合考虑荷载、抗浮稳定、通风等要求.隧道河床段(机动车、非机动车共管段)采用三跨两柱式结构,中间采用钢管混凝土柱支撑,整个断面净宽 18.8 m,其中机动车道净宽 8.6 m,两侧非机动车道净宽均为 4.0 m;机动车道净高 4.0 m,非机动车道净高 2.5 m.隧道结构边墙与咬合桩形成复合墙结构,达到挡土、止水、抗浮、减小差异沉降和保护周边建(构)筑物的多重目的.隧道结构采用明挖顺作法施工,基坑采用钻孔咬合桩围护,利用结构自身顶板做钻孔咬合桩横撑.其结构断面形式如图 1 所示.



图 1 水下隧道结构断面

Fig. 1 Structural section of underwater tunnel

2 水下隧道结构断面优化设计数学模型

2.1 工程结构优化设计的一般表达式

求设计变量

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \tag{1}$$

使目标函数

$F(X) \rightarrow \min(\text{或} \max)$ (2)

满足约束条件

$$\begin{cases} h_j(X) = 0 & (j = 1, 2, \dots, k) \\ G_i(X) \leq 0 & (i = 1, 2, \dots, m) \\ X_i \geq 0 & (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$
 (3)

式中： X ——优化的设计变量序列，代表设计方案； $F(X)$ ——优化的目标函数，如造价最低、质量最小等； $h_j(X)$ 、 $G_i(X)$ ——优化的约束函数，如规范规定的结构在强度、刚度、稳定性等方面的要求和限制； n ——设计变量个数； k ——等式约束的个数； m ——不等式约束的个数^[8]。工程结构的优化设计问题一般都是有约束的非线性规划问题。

2.2 设计变量

由于该隧道为对称结构，现取河床段隧道断面一半进行优化设计分析。图 2 为取一半的三跨两柱式隧道断面图。图 2 中 d_1 为隧道顶板厚度， d_2 为隧道边墙厚度， d_3 为隧道维护桩厚度， d_4 为隧道路面厚度， d_5 为隧道底板厚度， d_6 为人行道底板厚度； h_1 为行车道净空， h_2 为行车道顶板拐角竖直高度， h_3 为人行道净空， m_1 为行车道顶板拐角水平长度， m_2 为人行道顶板拐角水平长度； w_1 为行车道净宽， w_2 为人行道净宽。

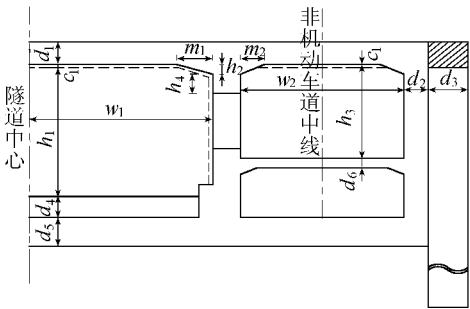


图 2 隧道结构断面(一半)

Fig. 2 Structural section of underwater tunnel (half)

隧道顶板厚度 d_1 、底板厚度 d_5 以及边墙厚度 d_2 等变量对整个隧道的断面面积影响最大，而隧道顶板拐角处的坡度对该处的应力集中亦有较大的影响。本文拟选取该隧道结构的关键几何尺寸为设计变量： $X = (d_1, d_2, d_4, d_5, m_1, m_2, h_2)^T$ ，共 7 个。图 2 中其余几何尺寸量设为预定参数，在优化设计过程中不做调整。

2.3 目标函数

水下隧道结构的造价主要取决于其断面面积，还与施工等环节有关。本文选取隧道结构的断面面积最小为目标函数^[1]。

2.4 约束条件

a. 建筑限界条件。水下隧道结构断面形状应根据交通流量、荷载、抗浮稳定、通风、防水防火防灾和耐久性等因素综合考虑分析确定。该隧道结构断面设计以建筑限界为主。根据 JTG D70—2004《公路隧道设计规范》四级公路设计车速为 30 km/h 时，其断面建筑限界如图 3 所示。车道宽度 $W = 3.25 \times 2 \text{ m}$ ， $L_L = L_R = 0.25 \text{ m}$ ^[9]。

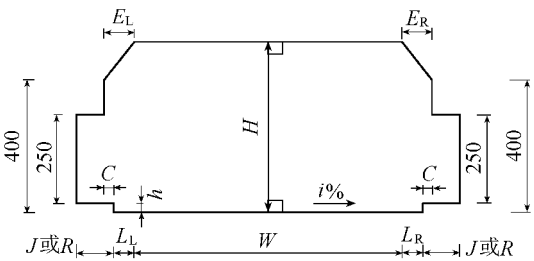


图 3 公路隧道断面建筑限界(单位:cm)

Fig. 3 Building line of road tunnel section (unit: cm)

b. 强度条件。该隧道采用 C30 防水钢筋混凝土，C30 混凝土的抗拉强度标准值为 2.2 MPa，轴心抗压标准值为 20 MPa，弯曲抗压标准值为 22 MPa^[9]。强度约束条件控制隧道内压应力不超过轴心抗压标准值 20 MPa，考虑截面配筋作用，根据一般的实际工程经验，钢筋混凝土的抗拉强度应不超过 4 MPa^[8]。

c. 抗浮稳定。对于水下建(构)筑物，根据规范要求，要进行抗浮稳定安全验算。目前还没有配套的水下隧道结构抗浮稳定计算规范，本文参照 SL 265—2001《水闸设计规范》，选取水下隧道结构正常工况下抗浮稳定安全系数为 1.10 进行抗浮稳定验算^[10]。

3 结构分析计算模型

依据设计方提供的原设计方案的设计参数，充分模拟结构物和地基土体的分层情况，建立隧道结构和周围土体整体平面数值分析模型，如图 4 所示。水平方向为 x 方向(向右为正)，以隧道结构轴线为基准向右取 60 m 作为计算边界；竖直方向为 y 方向(向上为正)，由于围护桩最深处高程为 -21.113 m，考虑到消除边界效应，该方向底部计算边界取到高程 -40.00 m 处。隧道结构的坐标轴方向及其原点见图 5。

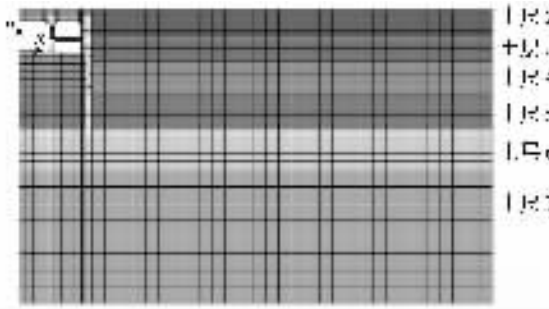


图 4 平面整体结构分析模型



图 5 隧道结构及围护桩结构模型

Fig. 4 Plane integral structure model

Fig. 5 Tunnel structure and armored pile model

模型底部双向约束, x 方向两侧边界设法向约束, 模型顶部为自由边界. 模型采用平面 4 节点等参单元划分, 共 1864 个单元, 1993 个节点. 土体采用 D-P 本构模型, 隧道结构采用线弹性本构模型^[11-12]. 土体参数如表 1 所示, 土层自上而下编号, 隧道结构材料参数如表 2 所示.

表 1 土体参数

表 2 隧道结构材料参数

Table 1 Physical and mechanical parameters for soils

Table 2 Parameters for tunnel structure

土 层	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
土层 2	1.70	13.4	1.0	2.1	0.42
土层 3	1.94	33.7	4.8	3.6	0.38
土层 4	1.88	22.0	2.2	3.2	0.38
土层 5	1.88	17.0	0.9	2.7	0.38
土层 6	1.95	29.3	3.4	3.5	0.35
土层 7	1.84	28.5	1.7	1.7	0.38

材 料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^3$)	弹性模量/ GPa	泊松比
结构混凝土	2.45	27.00	0.1670
等效咬合桩	2.23	13.50	0.2335
等效钢管桩	2.45	29.25	0.1670
等效钢板混凝土	2.45	31.58	0.1670

4 优化设计结果及分析

借助 ANSYS 有限元优化软件的 APDL 参数化语言和优化求解器, 通过参数化建模对所建立的数学模型进行可行域内的寻优搜索. 优化设计计算结果如表 3 所示.

表 3 水下隧道结构断面优化设计结果

Table 3 Optimal design for structural section of underwater tunnel

方 案	隧道断面 面积/ m^2	抗浮安全 系数 K_s	最大拉应 力/MPa	最大压应 力/MPa	竖向位移(向上为正)/mm		d_1/m	d_2/m	d_4/m	d_5/m	m_1/m	m_2/m	h_2/m
					最大	最小							
原 设 计	27.7	1.25	2.81	3.60	-31.1	-28.6	0.80	0.50	0.40	0.70	0.90	0.60	0.30
优化设计	23.2	1.17	4.00	4.74	-10.0	-5.5	0.69	0.40	0.26	0.51	0.99	0.88	0.15

由表 3 可知, 在满足建筑限界情况下, 较之原设计方案, 优化设计方案中 d_1 、 d_2 、 d_4 、 d_5 和 h_2 相应减小, m_1 和 m_2 相应增大. 其中 d_2 、 d_5 和最大拉应力为临界约束.

与原设计方案相比, 优化设计方案的隧道结构断面面积减少了 16%, 竖向最大位移减少了 68%; m_1 和 m_2 相应增大, h_2 相应减小, 隧道顶部边墙拐角处斜率($k = h_2/m_1$)减小, 结构断面形状变化趋缓, 从而减小隧道断面应力集中程度, 应力分布更加均匀. 隧道结构应力略有增大, 但都在混凝土抗压强度和钢筋混凝土抗拉强度范围内, 整体受力更为合理. 经过优化调整, 改善了隧道结构受力和变形的工作性态. 隧道结构断面抗浮稳定性满足规范要求, 且有一定的安全裕度. 表明水下隧道结构优化设计方案是安全可靠、经济合理的.

5 结 论

- a. 运用现代设计理论, 在满足隧道建筑限界和抗浮稳定以及强度约束的条件下, 对水下隧道结构断面进行优化设计是可行有效的.
- b. 优化设计方案隧道结构断面面积有较大幅度减小, 其经济效益显著.
- c. 优化设计方案隧道结构断面抗浮稳定满足规范要求, 竖向位移显著减少, 应力分布更加均匀, 结构安

全可靠.

参考文献：

[1] 张丙强 ,蔡雪峰 ,李俐勋.单洞四车道公路隧道优化研究[J].华东公路 ,2007(4):57-60.(ZHANG Bing-qiang ,CAI Xue-feng ,LI Li-xun.The optimization of single-hole and four-lane road tunne[J].East China Highway ,2007(4) 57-60.(in Chinese))

[2] 李利平 ,李术才 ,徐帮树 ,等.海底隧道施工设计及其数值优化研究[J].山东大学学报 :工学版 ,2008 ,38(4):63-68.(LI Li-ping ,LI Shu-cai ,XU Bang-shu ,et al.Numerical optimization study on the construction of a sub-sea tunnel[J].Journal of Shandong University :Engineering Science ,2008 ,38(4) 63-68.(in Chinese))

[3] 朱永全 ,宋玉香.隧道工程[M].北京 :中国铁道出版社 ,2005.

[4] 李世辉.隧道支护设计新论[M].北京 :科学出版社 ,1999.

[5] 朱汉华 ,尚岳全.公路隧道设计与施工新法[M].北京 :人民交通出版社 ,2002.

[6] 刘元雪 ,蒋树屏.环保型隧道结构优化与工程应用[J].后勤工程学院学报 ,2007 ,23(4):11-15.(LIU Yuan-xue ,JIANG Shu-ping.Optimizing and engineering practice of an environment friendly tunnel structure[J].Journal of Logistical Engineering University ,2007 ,23(4) 11-15.(in Chinese))

[7] 刘尧军 ,高桂凤 ,冯卫星.大跨公路隧道断面优化设计研究[J].辽宁交通科技 ,2004(2) 48-50.(LIU Yao-jun ,GAO Gui-feng ,FENG Wei-xing.Study on optimizate design of cross section of the large-span highway tunnel[J].Liaoning Communication Science and Technology ,2004(2) 48-50.(in Chinese))

[8] 蔡新 ,郭兴文 ,张旭明.工程结构优化设计[M].北京 :中国水利水电出版社 ,2003.

[9] JTG D70—2004 ,公路隧道设计规范[S].

[10] SL265—2001 ,水闸设计规范[S].

[11] 曹云钦 ,王小林.浅埋偏压连拱隧道中墙优化分析[J].岩土工程学报 ,2006 ,28(4):537-540.(CAO Yun-qin ,WANG Xiao-lin.Optimal analysis of mid-board of shallow double-arch tunnels under unsymmetrical pressure[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,2006 ,28(4) 537-540.(in Chinese))

[12] 余晓琳 ,彭立敏.双连拱隧道内轮廓优化设计模型及其应用[J].中南公路工程 ,2006 ,31(1):79-82.(YU Xiao-lin ,PENG Li-min.Optimum design model of inner outline of double multi-arch tunnel and its application[J].Journal of Central South Highway Engineering ,2006 ,31(1) 79-82.(in Chinese))

Optimal design of structure of underwater tunnels

CAI Xin^{1 2} , LI Hong-xuan² , WU Ying-li² , YI Jian-gang²

(1. College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Based on modern design theories , the optimal design of structural sections of an underwater tunnel was studied. A mathematical model for the optimal design was established , which uses the key geometric dimensions of the structural sections as the design variables , the minimum construction cost of the tunnel structure as the objective function , and the tunnel building line , anti-floating stability and tunnel stresses as the constraint conditions . The optimal design scheme for the tunnel section was determined with the finite element software ANSYS. Compared with the original design scheme , the optimal design scheme shows a decrease of 16% in the area of the tunnel section , the distribution of stresses is more uniform , the displacement of the tunnel significantly decreases , and the anti-floating stability is also satisfied. It follows that the optimal design scheme for the tunnel section is economical , rational , safe and reliable.

Key words :underwater tunnel ; structural analysis ; optimal design