

高放废物地下实验室岩壁吊车梁优化设计研究

李静

(中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要: 北山高放废物地质处置地下实验室是中国首个研究高放废物地质处置的地下实验室。在该地下实验室-560 m的主试验水平内布置了起重量为5 t的电动单梁起重机岩壁吊车梁。本研究以相关设计规范为依据, 阐述岩壁吊车梁的计算方法及设计步骤, 并提出了对于起重机吨位较小的岩壁吊车梁的优化设计方案。优化方案可有效节省岩壁吊车梁的材料和宝贵的地下空间, 本研究结果对小吨位起重机岩壁吊车梁设计有借鉴意义。

关键词: 岩壁吊车梁; 地下实验室; 刚体平衡法; 优化设计; 高放废物; 地质处置

中图分类号: TU28; TL942 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)03-0106-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2023.11.09

高放废物地质处置地下实验室(以下简称地下实验室), 主要是用来开发和验证高放射性废物的地质处理技术, 可在特定情况下评估场址的适宜性^[1], 是进行地下处置库的研究、测试和验证的核心^[2]。利用地下试验设施, 可探究深层的地理环境及其所承受的压力, 并采集深层的岩石和水样本, 从而在深层地质条件下评估工程防护的持久效果。构建地下实验室也是研究和检验处置库建设、施工、填充和封闭技术的重要途径, 能为处置库的安全性评估和环境影响评估提供必要的基础数据。

岩壁吊车梁不须设置单独柱子或岩台, 可增大厂房的使用面积, 可使桥机快速投入使用; 相对于传统吊车梁, 岩壁吊车梁具有明显的优势, 在厂房项目中得到了广泛应用^[3-6]。北山高水平放射性废物地质处置地下实验室是中国首个高放废物地质处置地下实验室^[7], 其主试验水平位于-560 m处, 该深度处基岩主要为花岗闪长岩, 岩体强度高, 完整性好, 岩石单轴抗压强度平均值约为170 MPa, 岩体质量等级为I级。该处地质条件很适合采用岩壁吊车梁形式, 本次岩壁吊车梁设计是在-560 m地下进行的一次有益尝试, 以

期为起重机岩壁吊车梁在地下实验室的应用提供支撑。

1 工程概况

在地下实验室主试验水平的车辆维修保养区内布置有1台5 t的电动单梁起重机, 起重机最大轮压为30.80 kN, 最小轮压为5.30 kN, 跨度为8 m, 起吊高度为3.47 m, 布置情况见图1。在主试验区域, 岩石结构相对完整, 强度较高, 整体稳定性高。

2 岩壁吊车梁设计

依据《地下厂房岩壁吊车梁设计规范》(NB/T 35079—2016)(以下简称《规范》)进行地下实验室车辆维修保养区岩壁吊车梁设计, 其设计内容主要包括吊车梁材料选取、吊车梁断面确定、锚杆计算、梁体配筋计算、吊车梁构造设计。

2.1 吊车梁材料选取

根据《规范》相关要求确定: 岩壁吊车梁一、二期混凝土强度等级均为C35; 锚杆采用HRB400钢筋; 岩壁吊车梁中的钢筋全部采用HRB400钢筋; 锚杆的胶结材料采用M30水泥砂浆。

收稿日期: 2023-11-27

第一作者简介: 李静(1979—), 男, 河北秦皇岛人, 硕士, 高级工程师, 主要从事建筑结构设计研究。

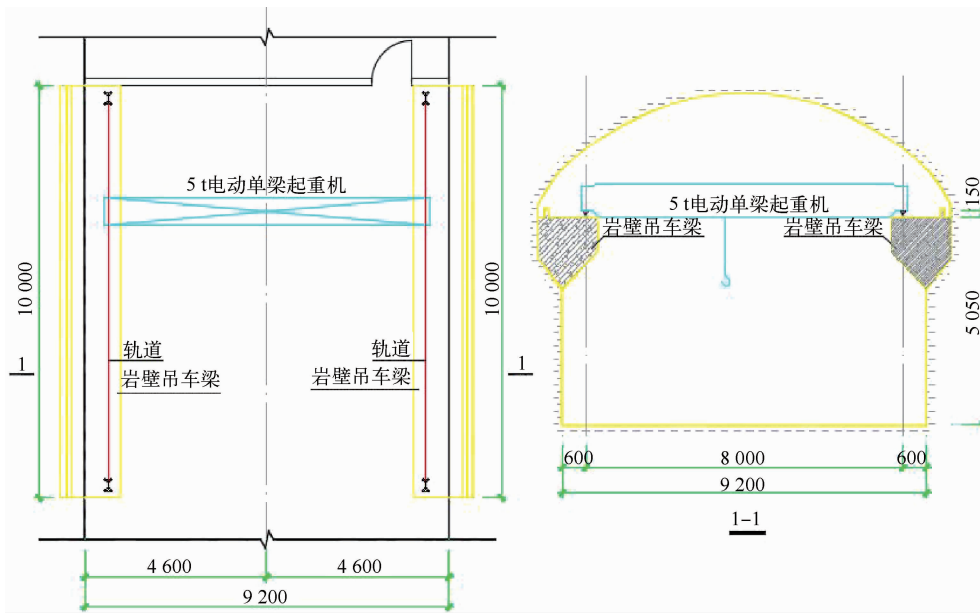


图 1 地下岩壁吊车布置图

Fig. 1 Layout of underground rock crane

2.2 吊车梁断面确定

根据《规范》,满足构造要求的岩壁吊车梁断面尺寸见图 2。梁的顶部宽度计算公式为^{[8]6}

$$B = C_1 + C_2, \quad (1)$$

式中: B —梁的顶部宽度,mm; C_1 —从轨道中心线到上方岩壁边缘的水平距离,mm; C_2 —从轨道的中心线到吊车梁外侧的水平距离,mm,取 300~500 mm。梁的顶部宽度需要同时符合设计和运行的要求。

岩壁角(β)主要由岩石的产态、地质结构、岩壁吊车梁的截面大小、锚杆的配置,以及承载能力等因素决定,一般为 20~40°。岩壁吊车梁外侧高度(h_1),一般应大于 $h/3$ (h 为吊车梁的断面高度),但不能小于 500 mm。岩壁吊车梁的底部倾斜角(β_0)一般设定在 30~45°。根据现有和正在进行的工程岩壁吊车梁的基本设计参数,初步设定岩壁吊车梁的断面高度,使其满足 $a/h < 0.3$ 的要求, a 为从竖向轮压的作用点到下部岩石边缘的水平距离。岩壁厚度(C_3),一般在 600~

900 mm,并需符合 $(0.25 \sim 0.35)h$ 的规定。

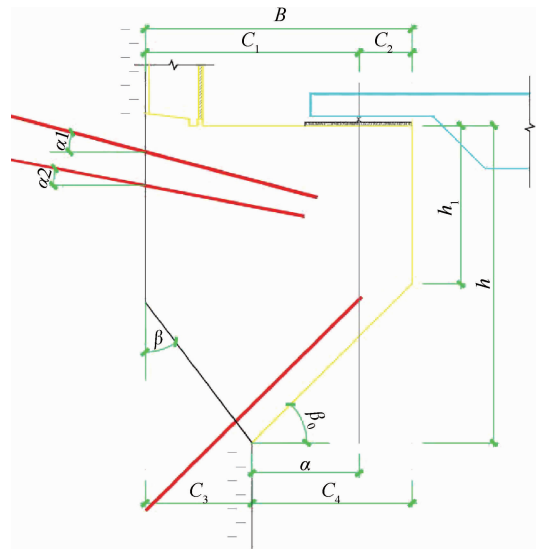


图 2 岩壁吊车梁基本尺寸断面图

Fig. 2 Basic dimension profile of rock crane beam

设计的岩壁吊车梁断面主要参数见表 1。

表 1 岩壁吊车梁断面参数取值

Table 1 Values of section parameters of rock crane beam

顶面宽度/m	岩壁角/(°)	外边缘高度/m	底面倾角/(°)	断面高度/mm	岩壁宽度/m
1.5	37	0.9	45	1 800	0.6

2.3 设计作用组合

岩壁吊车梁所承受的负荷包括桥机的垂直压力、水平方向的负荷、轨道的重量、附属设备的重量、岩壁吊车梁的自身重量、梁上防潮隔墙的重量等。

岩壁吊车梁结构设计必须按承载能力极限状态进行设计,同时由于岩壁吊车梁通常截面大、刚度大,因此可不进行正常使用极限状态的设计。当进行承载能力极限状态设计时,应该考虑持久状况、短暂状况,设计状态的作用(荷载)组合见表2。

表2 岩壁吊车梁的作用(荷载)组合

Table 2 Action (load) combination of rock crane beam

设计状态	作用组合	作用类别					
		自重	轨道及附加重力	防潮隔墙重力	桥机竖向轮压		桥机横向水平荷载
					额定载荷时	动载试验时	
持久状况	基本组合	√	√	√	√	√	
短暂状况	基本组合	√	√	√		√	

2.4 受拉锚杆设计

2.4.1 受拉锚杆断面面积计算

岩壁吊车梁的单位梁长上的受拉锚杆断面面积必须达到以下要求^[8-12]。

$$\gamma_0 \phi M \leq 1/\gamma_d [f_y (A_{s1} L_{t1} + A_{s2} L_{t2})], \quad (2)$$

$$A_{s1} L_{t2} = A_{s2} L_{t1}, \quad (3)$$

式中: γ_0 —结构的重要性系数,对于结构安全等级为I级的岩壁吊车梁取1.1,对于结构安全等级为II级的岩壁吊车梁取1.0; ϕ —设计状态的系数,持久状态选1.0,短暂状态选0.95; M —各种荷载设计值,对岩壁吊车梁受压锚杆与岩壁斜面的交汇点的力矩总和, $N \cdot mm$; γ_d —用于计算吊车梁受拉锚杆承载力的结构系数,不应低于1.65; f_y —受拉锚杆抗拉强度设计值, N/mm^2 ; A_{s1} 、 A_{s2} —第1排、第2排受拉锚杆单位梁长的计算断面面积, mm^2 ; L_{t1} 、 L_{t2} —第1排、第2排受拉锚杆,到受压锚杆与岩壁斜面交汇处的力臂, mm 。该吊车荷载较小,因此仅考虑设置1排受拉锚杆。

经计算,在持久状态下 $A_{s1} \geq 111.1 mm^2$,在短暂状态下 $A_{s1} \geq 111.6 mm^2$,最终确定锚杆直径为12 mm,锚孔直径为50 mm(锚孔直径应大于锚杆直径20~40 mm)^[13]。

2.4.2 受拉锚杆在稳定岩体内的锚固长度计算

锚杆在稳定岩体内的受拉长度计算,见式(4)~式(5)^{[8]21}。

$$L_a \geq (\gamma_0 \phi \gamma_d \gamma_b f_y A_s) / (\pi D f_{rb,k}), \quad (4)$$

$$L_a \geq (\gamma_0 \phi \gamma_d \gamma_b f_y A_s) / (\pi d f_{b,k}), \quad (5)$$

式中: L_a —在稳定岩体中,受拉锚杆的锚固长度, mm ; γ_d —受拉锚杆的锚固长度计算结构系数,应大于1.35; γ_b —黏结强度的分项系数,取1.25; f_y —受拉锚杆的抗拉强度设计值, N/mm^2 ; D —锚杆孔的直径, mm ; $f_{rb,k}$ —胶结质材料和孔洞壁之间的黏结强度标准值, N/mm^2 ; $f_{b,k}$ —胶结质材料和锚杆之间的黏结强度标准值, N/mm^2 ; d —锚杆直径, mm ; A_s —单根受拉锚杆的断面面积, mm^2 。

经验算,本工程受拉锚杆在稳定的岩石内的 $L_a \geq 0.92 m$,取 $L_a = 1.5 m$;其余同前。

2.5 岩壁吊车梁和岩壁结合面处的抗滑稳定验算

对于岩壁吊车梁和岩壁接触面处的抗滑稳定性计算,见式(6)~式(8)^{[8]20}。

$$\gamma_0 \phi S(\cdot) \leq 1/\gamma_d R(\cdot), \quad (6)$$

$$S(\cdot) = (G + F_v + W) \cos \beta + F_h \sin \beta, \quad (7)$$

$$R(\cdot) = [(G + F_v + W) \sin \beta - F_h \cos \beta + \sum f_y A_{si}' \cos(\alpha_i + \beta)] \times$$

$$f_k' / \gamma_t' + c_k' / \gamma_c' \times A + \sum f_y A_{si}' \sin(\alpha_i + \beta), \quad (8)$$

式中: $S(\cdot)$ —沿岩壁斜面上的下滑力, N ; $R(\cdot)$ —沿岩壁斜面上的阻滑力, N ; G —单位梁长上的梁自重设计值, N ; F_v —单位梁长上的竖向轮压设计值, N ; F_h —单位梁长上的水平轮压设计值, N ; W —单位梁长上的附件和轨道的重力,以及梁上的防潮隔墙的重力等的设计数值, N ; β —岩壁角, $(^\circ)$; α_i —第*i*受拉锚杆的倾角, $(^\circ)$; A —单

位梁长上的岩壁斜面的面积, mm^2 ; A_{si}' —第 i 排受拉锚杆单位梁长的实配断面面积, mm^2 ; f_k' —岩壁斜面上的抗剪断摩擦系数的标准值; γ_t' —抗剪断摩擦系数的分项系数, 取 1.7; c_k' —岩壁斜面上的抗剪断黏聚力的标准值, N/mm^2 ; γ_c' —抗剪断黏聚力的分项系数, 取 2.0; γ_d —抗滑稳定结构系数, 这里不应小于 1.65; 其余同前。

经验算, 本工程中岩壁吊车梁与岩壁结合面

的抗滑稳定性达到了规范要求。

2.6 受压锚杆确定

由于岩石挖掘导致的周边地质变化, 使应力释放, 在设计中应按构造设置受压锚杆。为确保受压锚筋的直径达到一定标准^[14], 其直径可参照受拉锚杆并适当减小, 钢筋的强度等级可适当降低。最终确定受压锚杆的直径为 12 mm, 而锚孔的直径设定为 50 mm。锚杆布置情况见图 3。

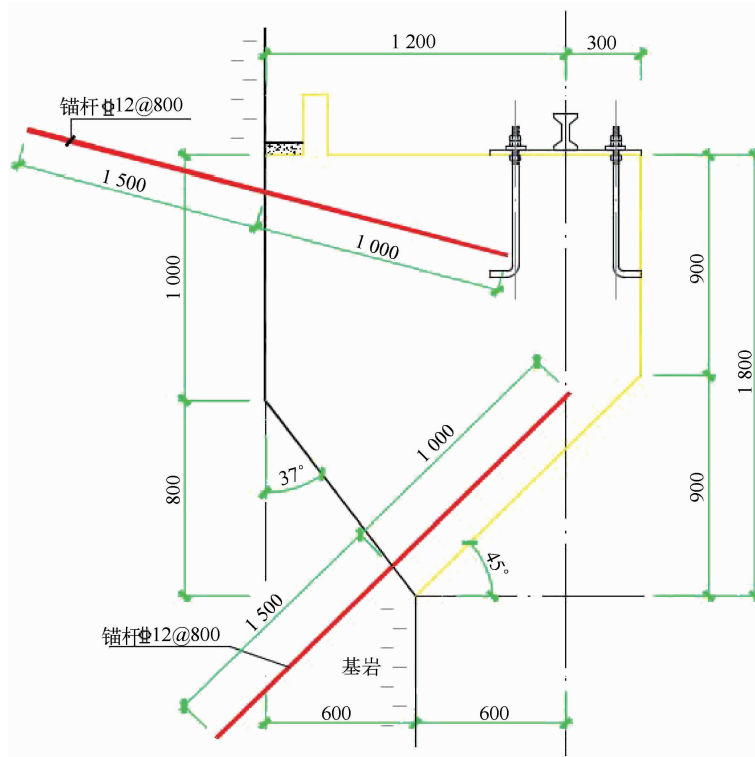


图 3 岩壁吊车梁断面布置图
Fig. 3 Section layout of rock wall crane beam

2.7 梁体配筋计算

2.7.1 吊车梁在单位梁长上的横向钢筋断面面积计算

1) 在剪跨比 $a/h_0 \geq 0.2$ 的情况下, A_{sv} 计算见式(9)^{[8]22}

$$A_{sv} \geq \gamma_0 \psi \gamma_d (F_{va}/0.85f_y h_0 + 1.2F_h/f_y); \quad (9)$$

2) 在剪跨比 $a/h_0 < 0.2$ 的情况下, A_{sv} 计算见式(10)

$$A_{sv} \geq \gamma_0 \psi \{ [\beta_s (\gamma_d F_v - f_t b h_0)] / [(1.65 - 3a/h_0) f_y] + 1.2(\gamma_d F_h) / f_y \}; \quad (10)$$

式中: A_{sv} —单位梁长度上的横向钢筋的计算断面

面积, mm^2 , 它是由需要承受垂直力的受拉钢筋以及需要承受水平拉力的锚固钢筋构成的总断面面积; γ_d —在计算梁体横向钢筋承载力时的结构系数, 不得低于 1.2; F_v —单位梁长上的吊车竖向轮压设计值, N ; F_h —单位梁长度上的吊车横向水平荷载的设计值, N ; a —竖向轮压作用点与梁下部岩壁边缘之间的水平距离, mm , 安装偏差为 20 mm; f_y —吊车梁中横向钢筋的抗拉强度设计值, N/mm^2 ; h_0 —岩壁吊车梁断面的有效高度, mm 。

经验算, 本工程岩壁吊车梁单位梁长上的横向钢筋确定为 18@100, $A_{sv} = 2\,545 \text{ mm}^2$ 。

2.7.2 吊车梁的横向水平箍筋总断面积计算

岩壁吊车梁的横向水平箍筋总断面积计算^{[8]23}

$$A_{sh} \geq \gamma_0 \phi (1 - \beta_s) (\gamma_d F_v - f_t b h_0) / [(1.65 - 3a/h_0) f_{yh}] \quad (11)$$

式中： A_{sh} —吊车梁横向水平箍筋总断面积， mm^2 ； b —单位宽度， mm ，取 1 000 mm ； f_t —混凝土的抗拉强度设计值， N/mm^2 ； f_{yh} —在岩壁吊车梁的高度范围内，横向水平箍筋的抗拉强度设计值， N/mm^2 ； β_s —用于调整受力钢筋配筋量的系数，其取值范围为 0.4~0.6；其余同前。

经验算，本工程岩壁吊车梁的横向水平箍筋确定为 12@300， $A_{sh} = 566 \text{ mm}^2$ 。岩壁吊车梁配筋情况见图 4。

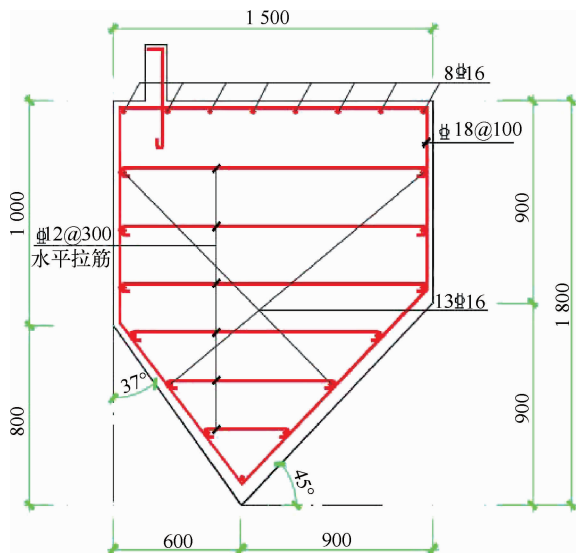


图 4 岩壁吊车梁梁体配筋图

Fig. 4 Reinforcement diagram of rock crane beam

2.8 吊车梁构造设计

本工程岩壁吊车梁构造设计内容主要包括：1) 设计伸缩缝及施工缝。根据本工程岩壁吊车梁的长度、地质情况，该岩壁吊车梁可不设置伸缩缝及施工缝。2) 挡水反沿。在岩壁吊车梁顶面设置

250 mm 高的挡水反沿，反沿内侧采用水泥砂浆找坡，以确保硐室侧壁渗水不影响吊车梁使用。3) 锚杆防腐。在锚杆距孔口 500 mm 范围的杆体上涂抹沥青并缠裹塑料布，形成自由段和防腐层。4) 岩壁吊车梁钢筋。确定岩壁吊车梁横向钢筋和横向水平箍筋的直径、间距，使其满足《规范》要求。

3 岩壁吊车梁优化设计

3.1 优化方案

按照《规范》设计的岩壁吊车梁能满足地下实验室吊车的使用要求。但本项目所采用的起重机吨位较小，根据《规范》确定的岩壁吊车梁断面尺寸偏大，不但会浪费材料，也占用了宝贵的地下空间。为此，笔者对岩壁吊车梁断面尺寸的确定方法进行优化，先按照工业厂房中牛腿断面尺寸的确定方法来设计该岩壁吊车梁断面，然后再按照《规范》进行锚杆设计、梁体配筋计算及吊车梁构造设计。

3.1.1 吊车梁断面确定

工业厂房中牛腿断面尺寸确定主要从裂缝控制要求、牛腿的外侧高度 (h_1)、竖向力 (F_{vk}) 所导致的局部压应力方面来控制^[15]。裂缝控制要求见式(12)。

$$F_{vk} \leq \beta (1 - 0.5 F_{hk} / F_{vk}) f_{tk} b h_0 / (0.5 + a/h_0) \quad (12)$$

式中： F_{vk} —在牛腿顶面作用的竖向力，基于荷载效应的标准组合来确定； F_{hk} —在牛腿顶面作用的水平拉力，基于荷载效应的标准组合来确定； β —裂缝控制系数，对于支承吊车的牛腿取 0.65，对其他牛腿取 0.80； a —竖向力作用点与下柱边缘之间的水平距离，考虑 20 mm 的安装误差； b —牛腿的宽度； h_0 —牛腿和下柱连接部位的垂直截面之间的有效高度， $h_0 = h_1 - a_s + c \tan \alpha$ ；其余同前。

牛腿的外侧高度，不能低于 $h/3$ ，也不能低于 200 mm 。在牛腿顶部的承压表面上，竖向力所导致的局部压应力应该保持在 $0.75 f_c$ 以下。

根据以上原则，确定本工程岩壁吊车梁断面的主要参数见表 3。

表 3 岩壁吊车梁断面参数优化取值

Table 3 Optimum value of section parameters of rock crane beam

顶面宽度/m	岩壁角/(°)	外边缘高度/m	底面倾角/(°)	断面高度/m	岩壁宽度/m
1.3	34	0.5	38	1.2	0.4

3.1.2 吊车梁锚杆及配筋计算

在重新确定岩壁吊车梁断面尺寸的基础上,根据《规范》进行锚杆设计、梁体配筋计算。

1)锚杆直径计算。在持久状态下, $A_{s1} \geq 138.5 \text{ mm}^2$;在短暂状态下, $A_{s1} \geq 140.3 \text{ mm}^2$ 。最终确定锚杆直径为14 mm,锚孔直径为50 mm。

2)抗滑稳定性。经验算,本工程岩壁吊车梁与岩壁结合面的抗滑稳定性达到了规范要求。

3)受拉锚杆的锚固长度。经计算,受拉锚杆在稳定岩石内的锚固长度 $L_a \geq 1.07 \text{ m}$,取 $L_a =$

1.60 m。

4)单位梁长的横向钢筋断面面积(A_{sv})。经计算,岩壁吊车梁单位梁长上的横向钢筋确定为14/16@100, $A_{sv} = 1775 \text{ mm}^2$ 。

5)横向水平箍筋总断面积(A_{sh})。岩壁吊车梁横向水平箍筋为12@300, $A_{sh} = 339 \text{ mm}^2$ 。

3.2 岩壁吊车梁断面选取的经济性

岩壁吊车梁断面选取进行优化设计后,材料用量变化情况见表4。

表4 岩壁吊车梁优化设计材料变化

Table 4 Material change for optimal design of rock crane beam

项目	单位长度混凝土用量/ m^3	受拉锚杆直径/mm	锚杆受拉锚固长度/m	A_{sv}/mm^2	A_{sh}/mm^2
原设计	2.06	12	1.5	2545	566
优化设计	1.13	14	1.6	1775	339
材料变化百分比/%	-45.1	+16.7	+0.7	-30.3	-40.1

由表4可看出,经过优化设计后,岩壁吊车梁断面满足地下实验室吊车使用要求,吊车梁的混凝土用量、梁体钢筋用量大幅下降;受梁截面减小导致拉锚杆力臂减小的影响,受拉锚杆材料用量略有增加。优化后的岩壁吊车梁经济性显著提高,也节省了地下实验室的巷道空间,有利于高放试验工作的开展。

4 结论

对于吊车吨位较小的岩壁吊车梁,在确定梁断面尺寸时,可按照工业厂房中牛腿断面尺寸的确定方法设计,得到的断面尺寸更为合理;然后再按照《规范》进行锚杆设计、梁体配筋计算及吊车梁构造设计。优化后的岩壁吊车梁减少了材料用量,提高了经济性,节省了地下实验室巷道内的宝贵空间。

参考文献:

[1] 王驹,苏锐,陈亮,等.论我国高放废物地质处置地下实验室发展战略[J].中国核电,2018,11(1):109-115.
 [2] 张强勇,郑阳,吴冬,等.高放废物地质处置地下实验室施工风险评价[J].地下空间与工程学报,2018,14(6):1684-1691.
 [3] 郑小东.水电站地下厂房岩壁吊车梁设计与施工技

术[J].江西水利科技,2014,40(4):272-276.
 [4] 夏磊,褚丽,徐凌,等.大亚湾反应堆中微子实验站1#实验厅岩壁吊车梁设计[J].科技,2009(21):718-719.
 [5] 赵学昌,邓加林,罗志文.漫滩水电站二期工程地下厂房岩壁吊车梁设计[J].水力发电,2007,33(5):72-74.
 [6] 王洁,张敏.新疆下板地下电站岩壁吊车梁设计[J].地下水,2012,34(1):126+152.
 [7] 侯佳鑫,吴亚东,徐阳杰,等.沉浸式地下实验室三维数据可视化系统研究[J].系统仿真学报,2018,30(7):2700-2706+2714.
 [8] 国家能源局.地下厂房岩壁吊车梁设计规范:NB/T 35079—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
 [9] 姚德生,周宏民,张忠辉.地下厂房岩壁吊车梁设计[J].水利水电工程设计,2022,41(2):26-28+56.
 [10] 李佳男,赖国伟.国内外现行水工混凝土结构设计规范中关于分项系数的取值方案研究[J].中国农村水利水电,2013(12):108-113+116.
 [11] 石广斌,刘有全,李敬昌.岩壁吊车梁稳定性刚体极限平衡分析法之商榷[J].西北水电,2008(5):15-17+21.
 [12] 朱红.某水电站地下厂房岩壁梁设计[J].湖南水利水电,2013(3):18-21.
 [13] 国家能源局.水电水利工程岩壁梁施工规程:DL/T 5198—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.

- [14] 苗双平. TBM 组装洞岩壁梁岩台缺陷处理技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(5): 89-91.
- [15] 中国有色工程有限公司. 混凝土结构构造手册: 第 4 版[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

Optimal Design of Rock Crane Beam for High-level Radioactive Underground Research Laboratory

LI Jing

(The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Beishan underground research laboratory is the first laboratory in China to study the geological disposal of high-level radioactive waste. A rock crane beam was arranged in the main test level (−560 m) of the underground laboratory. Based on the relevant design standards, the calculation and design steps of rock crane beam were expounded. On this basis, the optimal design scheme of rock crane beam with small crane tonnage was proposed. After adopting this scheme, the material consumption and precious underground space of rock crane beam can be effectively saved, which has practical reference significance for the design of rock crane beam of small tonnage crane in the future.

Key words: rock crane beam; underground laboratory; rigid equilibrium method; optimal design; high-level waste; geological disposal