

涉水高墩现浇箱梁支撑体系的承载能力 分析和方案优化

郭涛¹,姚雨晨²,马鸿泽¹,黄晓敏¹,张永春³

(1.昆明理工大学 建筑工程学院,云南 昆明 650500;2.云南赢铸建筑设备租赁有限公司,云南 昆明 650200;
3.中盛弘宇建设科技有限公司 云南分公司,云南 昆明 650051)

摘要:混凝土现浇梁支架虽然属于临时结构,但仍具有承载功能,而且随着桥梁工程的发展,高大支架的受力也越来越复杂,传统的结构力学手算方法已无法全面反映和权衡特殊体型、特殊部位和特殊工况的受力情况。为保证工程的顺利开展,需采用数值方法进行整体承载力计算和方案设计。该文采用Midas/Civil有限元软件,从强度、刚度、稳定性和经济性(用钢量)等方面综合评价满堂支撑、梁式支撑体系的安全性能和通用性。结果表明:①满堂支撑虽然施工简单,用钢量小,下部支撑杆系较多,受力均匀,变形小,最大挠度仅为2.82 mm,但是强度和稳定性不及梁式支撑,对场地要求还高。当应用于高大桥梁时,需整体进行屈曲分析,谨防结构失稳破坏;②梁式支撑虽然不会发生强度和失稳破坏,对场地和地基基本没有要求。但是其用钢量高,施工难度也大,并且因跨中缺乏竖向支撑,变形有所增加。因此,在应用于“预拱度”要求较高的复杂桥梁工程中时,需进行找形分析;③在力学指标均达标的前提下,可以适当调整贝雷梁横向净距或下弦杆加强等措施,以获取经济性。以该工程案例工程为例,贝雷梁净距由80 cm调整到100 cm,可以节省约10%的用钢量。

关键词:桥梁工程;盘扣式满堂支撑;梁式支撑体系;贝雷梁;有限元方法

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

Supporting Capacity Analysis and Construction Scheme Optimization of Support System for Cast-in-Situ Box Girders in High-Pier Wading Bridges

GUO Tao¹, YAO Yuchen², MA Hongze¹, HUANG Xiaomin¹, ZHANG Yongchun³

(1.Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming,Yunnan 650500, China;
2.Yunnan Yingzhu Construction Equipment Leasing Co., Ltd., Kunming,Yunnan 650200, China; 3.Zhongsheng Hongyu
Construction Technology Co., Ltd., Yunan Branch Co., Kunming,Yunnan 650051, China)

Abstract: Although a concrete bridge support system is a temporary structure, it still has a supporting capacity. With the development of bridge engineering, concrete bridges with high piers and long spans are gradually applied in deep reservoir areas, and the forces on scaffolding are more and more complex. Traditional manual calculations in structural mechanics can no longer completely reflect the stress-strain states of scaffolding with irregular configurations, special parts, and uncommon conditions. Thus, it is necessary to use a numerical method to calculate the supporting capacity of scaffolding and design construction schemes. This paper took a concrete wading bridge with high piers as an example. An evaluation method based on the finite element method with the Midas civil software is proposed for analyzing the safety of a support system from the aspects of strength, rigidity, stability, and cost-effectiveness. The results show that although disc-type full scaffold structures are simple in construction, with low steel consumption, various stand bars, uniform stress distribution, and small deformation (a maximum deflection of only 2.82 mm), their strength and stability are not as good as beam support systems. In

收稿日期:2022-11-08

基金项目:云南省交通运输厅科技项目(编号:2021-91)

作者简介:郭涛,男,博士,副教授.E-mail:guotaoy@126.com

addition, they have higher requirements for sites. Therefore, when disc-type full scaffold structures are applied to high-piers and large-span bridges, buckling analysis should be carried out on the whole model to prevent instability and collapse. Conversely, beam support systems usually do not suffer from strength and stability failures and have few requirements for sites. However, they are difficult to construct and require high steel consumption. Furthermore, deformation is increased due to the lack of vertical support in the midspan. Therefore, form-finding analysis must be carried out strictly when they are applied to complex bridges involving the “pre-camber” problem. In addition, on the premise that mechanical indexes are met, measures can be taken to achieve higher cost-effectiveness, such as adjusting the net distance of Bailey beams and strengthening lower chords. In this case, the net distance was adjusted from 80 to 100 cm, which can save about 10% in steel consumption.

Keywords: bridge engineering; disc-type full scaffold structure; beam support system; bailey beam; finite element method

0 引言

在中国大力发展基础设施建设的时代背景下,中国的桥梁建设得到快速发展。据统计,2022年末中国公路桥梁103.32万座、8 576.49万延米^[1]。桥梁领域的飞速发展工程界积累了大量宝贵经验,使中国桥梁施工技术迈入世界一流水平。当前,中国正在加强建设“水陆空立体交通运输网”^[2],桥梁工程仍具有较大的发展潜力和研究价值。目前,桥梁工程中现浇梁的支架技术形式上主要有两种^[3-4]:第一种为满堂支架法,其根据选取的支架材质和规格分为碗扣式支架、盘扣式支架、扣件式支架和门式支架等。满堂支架法在桥梁工程中是一种较为常见的施工方法,具有速度快、施工简单、整体性好等优点,广泛应用于城市立交高架和高速公路桥梁等建设工程中^[5-6]。但是,满堂支架法对桥下的地基要求较高,为防止地基不均匀沉降,不仅需要一定承载力,而且还要求地形平坦且地面须硬化。如遇软弱地基,还需要提前进行地基处理和预压。另外,对于涉水桥、山区桥等桥下不宜于施工的情况,则无法使用传统满堂支撑结构;第二种为梁式支架,此类支架一般应用于桥下不具备满堂支架方案时的特殊地形,如涉水桥、山区桥、跨线桥、陡坡或存在障碍物时,通常采用军用梁、型钢或贝雷梁等结构作为承重主梁,根据现场施工条件搭建出不同跨度,跨越既有障碍物的工作平台。并在承重主梁下配合使用钢管桩、预制桩或钻孔桩等支撑基础,一般情况下,不需要对地基再进行特殊处理。根据不同现场施工条件,满堂支架和梁式支架法在工程中均有广泛应用。

现浇箱梁支架,虽然属于临时结构,不需要像永久支撑钢框架结构或其上部的桥梁结构一样考虑其抗震抗风性能^[7-9],但仍具有承载功能,其承载性能也同样重要。科研及工程技术人员对支架方案和支撑体系的稳定性进行了深入研究。例如,周力毅等^[10]根据实际工程应用,对比了贝雷梁-满堂支撑施工方法与挂篮施工方法,结果表明:贝雷梁-满堂支撑施工方法可以极大地降低施工成本;陆征然等^[11]对高大满堂支撑结构稳定性进行了研究,发现增加混凝土浇筑量会导致支撑结构的自振频率降低,增加垮塌的风险;庄名智等^[12]研究表明:设置剪刀撑对增强整体满堂支撑结构体系的稳定承载力具有良好的效果;梁岩等^[13]对比了满堂支撑体系中盘扣式支架和碗扣式支架的性能,结果表明:盘扣式支架的力学性能普遍优于碗扣式支架的;翟文静等^[14]结合工程实例对贝雷梁结构的抗剪性能进行了分析,指出在抗剪性能满足需求的前提下,在桥梁施工中使用贝雷梁结构可以起到节约成本、缩短工期等效果;刘学明等^[15]研究了贝雷梁布置数量与跨距之间的关系,对贝雷梁布置跨度的最宜距离进行了定量分析。

在工程中,现浇梁支撑体系基于规范简化后,采用结构力学法进行手算和方案设计。随着桥梁建设的发展,桥梁跨度越来越大、高度越来越高、桥下情况也越来越复杂,使得高大满堂支撑、梁式支撑的受力也越来越复杂。传统的结构力学手算方法已无法全面反映和权衡特殊体型、特殊部位和特殊工况的受力情况。因此,对于高大支撑体系,宜采用数值方法进行承载力计算。本文采用Midas/Civil有限元软件对云南省某地形不平坦的涉水高墩箱梁的支撑体

系进行方案设计,对比分析目前常用的满堂和梁式支撑体系的承载能力与优缺点。并在满足稳定性的基础上,通过调整贝雷梁横向净距,达到有效节约成本的目的,为类似桥梁工程的施工提供参考。

1 工程概况

小(勐养)磨(憨)高速公路曼纳伞大桥位于云南省勐腊县,主桥分为左、右两幅,上部为跨径 5×20 m的连

续现浇箱梁结构,斜交角度 30° 。下部为三柱墩构造,桥墩直径1.5 m,下设直径1.7 m的钻孔灌注桩基础(摩擦桩),桩间距正投影为5.625 m,根据地质情况桥台均为柱式台。桥体采用单箱四室断面,主梁正投影宽度为17.250 m,梁高1.40 m,悬臂1.95 m,顶板、底板厚度均为0.25 m,腹板厚度为0.55 m。顶、底板横坡均与路线横坡一致。上设9 cm厚现浇混凝土和9 cm厚沥青混凝土桥面铺装。主桥立面布置如图1所示。

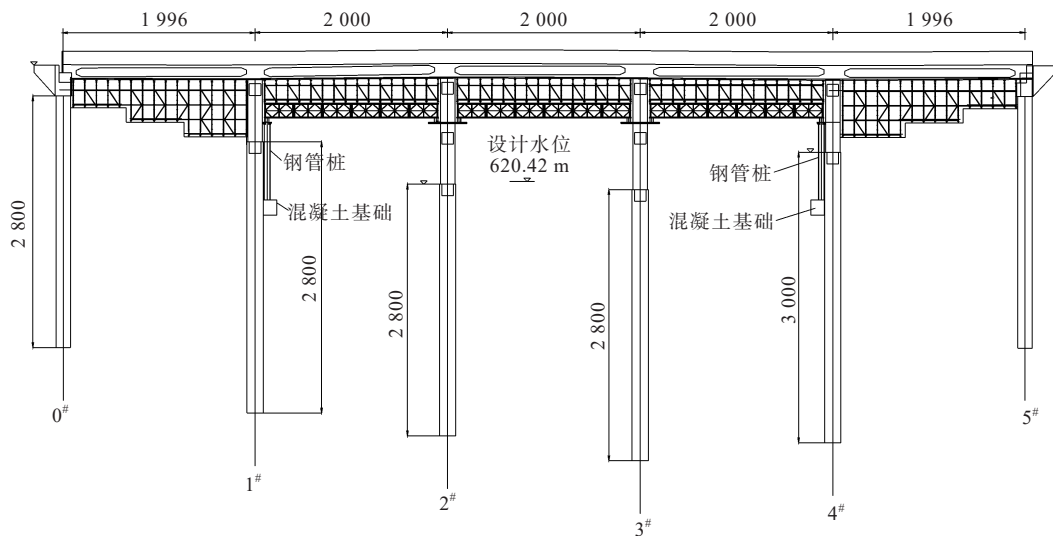


图1 主桥立面图及各跨支撑方案(单位:cm)

Figure 1 Elevation of the main bridge and construction approaches for spans (unit:cm)

2 支架方案设计

根据桥梁跨径总长和单孔跨径来分,该桥等级不高,属于中型桥梁。支架计算难度不大,但由于是涉水桥,汛期施工困难突出,而且桥梁下部地形不平坦,不具备整体满堂支撑的条件。经过讨论和方案比选,将该桥分为边跨和中跨两部分,结合桥梁结构特点、桥下过流和现场环境,拟定了如下支架形式。

2.1 边跨-满堂支撑方案

桥体左、右边跨(第1、5跨)采取满堂支撑体系。① 选用盘扣式支架形式,盘扣立杆顺桥向纵距(跨)为120 cm、横桥向横距为60 cm、120 cm的交错布置形式,竖向每隔1.5 m分层布置剪刀撑和倾撑;② 考虑到河谷地形给场地平整带来的难度较大。为减少挖方量,将其设计为分台开挖、由岸边向河中央逐步过渡的错层布置方式,地面采用10~20 cm厚C20混凝土进行硬化。并且确保每台盘扣架外侧立杆与平台边缘之间的距离不低于50 cm,以防止台阶边缘承

载力不足和应力集中而发生塌边的情况;③ 盘扣架顶部采用14#工字钢作为主龙骨(分配梁),总长18.6 m,主龙骨顶部纵向布置100 mm \times 100 mm@20 cm的方木作为次龙骨,总长18.0 m;④ 次龙骨顶部铺设15 mm厚多层板底模。具体支撑方案如图1、2所示。

2.2 中跨-梁式支撑方案

该桥施工周期跨越汛期,桥下河流不具备改道和引流条件,施工期内需要同时保证桥下过流和桥上的施工安全。因此,中间第2~4跨采取梁式支撑方案。选用贝雷梁为承重主梁,下部配合使用钢管桩搭建出稳定的跨河工作平台,在此基础上再搭建盘扣架,构造出钢管桩-贝雷梁-盘扣组合的梁式支架施工方案,具体支撑方案如图1、3所示。

① 承重梁部分:采用双拼I56工字钢作为横梁,横梁顶部架设纵向贝雷梁。每条贝雷梁由2片贝雷片组配而成(45 cm的连接片),为保证贝雷梁的整体性顺桥向设置间距60 cm的加箍连接。对比分析了贝雷梁之间净距80 cm和100 cm两种方案;② 承重

梁上部的盘扣架、主龙骨、次龙骨和底模等的步距、构造与边跨满堂支撑方案相同;③在1[#]、4[#]桥墩处,采用钢管桩作为梁式支架的基础,如图3(b)所示。而2[#]、3[#]桥墩位于河道中央,考虑到雨季水流冲刷不利于钢管桩下部独立基础的稳定性,在墩柱两侧采取穿心钢棒($\varnothing 22$ cm)+牛腿的方式与桥墩固结形成横梁的稳定支撑约束,如图3(c)所示。

3 数值计算及方案比选

3.1 有限元建模

采用Midas/Civil有限元软件对整体支撑体系进行三维建模和数值分析,边跨满堂支撑体系有限元模型如图4(a)所示;中跨贝雷梁支撑体系有限元模型如图4(b)所示。

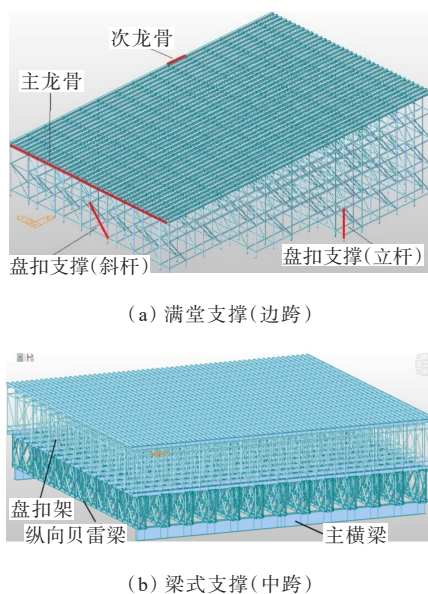


图4 有限元模型

Figure 4 Finite element model

采用杆单元和梁单元建立有限元模型。主、次龙骨、横梁、贝雷梁等上下构件之间的约束方式考虑为“仅受压”的弹性连接方式,刚度为 1×10^6 kN/m。构件纵、横向端部施加法向约束,盘扣立杆底部施加全约束。主要荷载包括结构自重、混凝土湿重 26 kN/m^3 、模板自重 1.2 kN/m^3 、施工人员及设备荷载 3 kN/m^2 、振捣荷载 2 kN/m^2 。根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012),恒、活荷载分项系数分别取1.3和1.5。主龙骨(I14工字钢)材料为Q235钢,盘扣立杆规格 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$,材料为Q345B钢,盘扣斜撑规格 $\varnothing 42 \text{ mm} \times 2.75 \text{ mm}$,材料为Q235钢。

3.2 刚度分析

图5为满堂支撑方案、梁式支撑方案整体支架的变形云图。

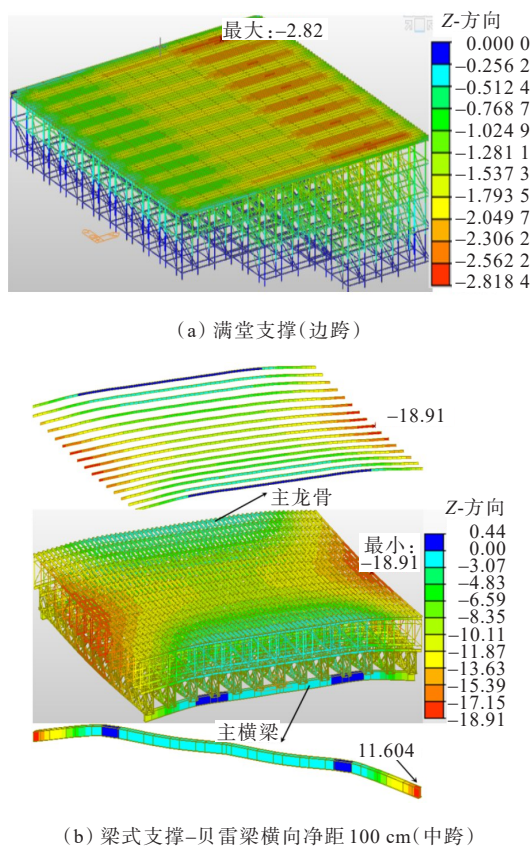


图5 不同支撑方案下支架的竖向变形(单位:mm)

Figure 5 Vertical deformation of structures with different construction schemes(unit:mm)

从图5可以看出:①最大变形均出现于支架顶部的主龙骨和次龙骨构件处;②满堂支架整体竖向变形较小,最大挠度仅为2.82 mm,远远小于梁式支撑方案,如表1所示。说明满堂支架下部支撑杆系较多,受力均匀,刚度较好;③在梁式支撑方案中,由于跨中缺乏竖向支撑,结构刚度稍弱,其竖向变形远大于满堂支撑体系的;④同为贝雷梁支撑体系下,两者结构变形规律相似,但是各构件挠度随贝雷梁之间净距的增加而增大。当贝雷梁横向净距调整为100 cm时,最大挠度为18.91 mm,是80 cm净距的1.38倍,但仍小于允许值,如表1所示。

3.3 强度分析

由表1可知:

(1) 梁式支撑体系下,次龙骨、主龙骨和盘扣等各部分构件应力明显低于满堂支撑体系,说明梁式支撑结构受力较好,强度优于满堂支撑。这是由于

表 1 不同支撑方案下支架的计算结果

Table 1 Calculation results for structures with different construction schemes

	挠度 $\omega_{\max}/$ mm	应力/ MPa											单跨用 钢量/ t
		最小压应力 σ_{\max}^-		最大压应力 σ_{\max}^+				最大剪切应力 τ_{\max}					
	主、次龙骨	盘扣	贝雷梁	次龙骨	主龙骨	贝雷梁	主横梁	次龙骨	主龙骨	贝雷梁	主横梁	钢棒	
满堂支撑	2.82	—82.60	—	9.16	68.50	—	—	1.14	39.20	—	—	—	20.43
梁式支撑-贝雷 梁净距 80 cm	13.66	—55.72	—301.00	3.41	37.26	115.50	102.58	0.40	15.59	67.44	26.07	21.09	66.68
梁式支撑-贝雷 梁净距 100 cm	18.91	—69.93	—413.90	3.49	37.68	127.60	123.66	0.41	16.18	83.07	26.79	22.97	60.92
允许值	$[\omega]=$	$[\sigma]=$	$[\sigma]=$	$[\sigma]=$	$[\sigma]=$	$[\sigma]=$	$[\sigma]=$	$[\tau]=$	$[\tau]=$	$[\tau]=$	$[\tau]=$	$[\tau]=$	
	$l/400=45$	305	305	12	205	305	205	1.9	120	170	120	120	

下部贝雷梁结构抗弯截面模量较高,发挥了其承载优势,为体系内上部主龙骨、次龙骨等结构减轻了负荷。从图6中也可看出:梁式支撑方案下,主龙骨的弯矩明显低于满堂支撑。

(2) 随着贝雷梁横向净距的增加,梁式支撑体系

内各构件所受最大正应力、切应力均呈增长趋势,但均小于允许值。贝雷梁结构作为梁式支撑体系的主要承力构件,应力值均大于其余构件。其中,其应力指标中比较突出的是压应力,最大压应力产生位置如图7所示。

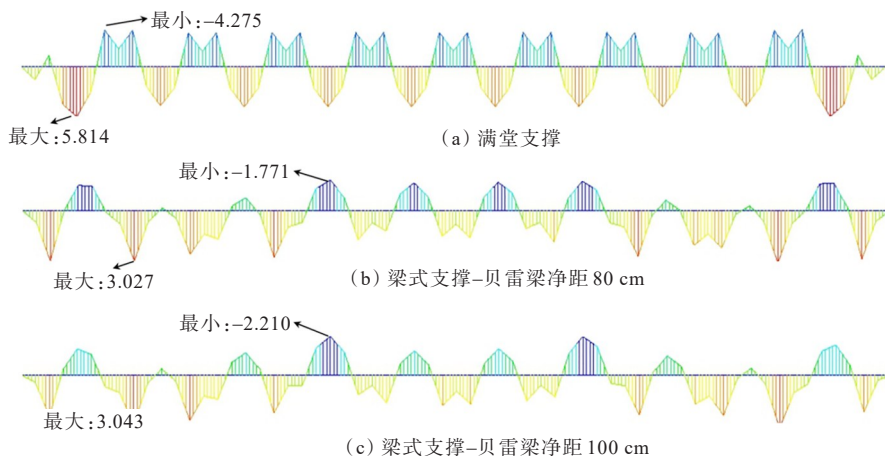
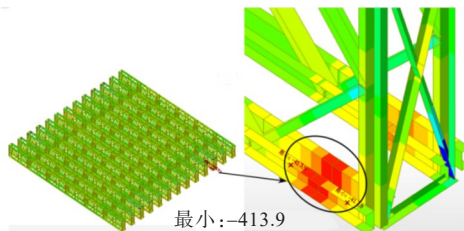
图 6 不同支撑方案下主龙骨的最大弯矩对比(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)Figure 6 The maximum bending moments of main frame works with different construction schemes (unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

图 7 贝雷梁端部最大压应力位置(单位: MPa)

Figure 7 The maximum compressive stress of Bailey beam (unit: MPa)

从图7可以看出:最大压应力主要发生在下悬杆与横梁接触的支点处,主要是由于该位置横梁底部

施加了刚性约束,弹性分析时产生应力集中,导致该部位压应力激增。实际工程中,不存在绝对的刚性约束,因此该压应力虽然超出了钢材的屈服应力允许值,但该值是失真的,参考意义不大,不应作为整体结构的控制指标。

3.4 盘扣架压杆稳定性分析

依据《建筑施工承插型盘扣式钢管支架安全技术规程》(JGJ 231—2021)压杆杆长和长细比(柔度)为:

$$l_0 = \begin{cases} h' + 2ka & \text{顶部立杆段} \\ \eta h & \text{非顶部立杆段} \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda = l_0 / i \quad (2)$$

式中: l_0 取较大值; h' 为支架立杆顶层水平杆步距,宜比最大步距减少一个盘扣的距离,本案取 $h'=1\text{ m}$; k 为悬臂端计算长度折减系数,可取0.7; a 为支架可调托座支撑点至顶层水平杆中心线的距离(m)。本案满堂支撑时取 $a=0.85\text{ m}$,梁式支撑时取 $a=0.3\text{ m}$; η 为模板支架立杆计算长度修正系数,可取1.15; h 为模板支架立杆中间层水平杆最大竖向步距,本案取1.5 m; i 为截面回转半径。

根据式(1)、(2)求得满堂支撑和梁式支撑时的柔度 λ 分别为108.95、91.54。

参照《建筑施工承插型盘扣式钢管支架安全技术规程》(JGJ 231—2021)中的不同组合风荷载时立杆的稳定性计算公式,对不同支撑方案下盘扣架中立杆的稳定性进行验算:

$$N \leq \varphi f A \quad (3)$$

式中: φ 为轴心受压构件的稳定系数;由柔度查规范可得满堂支撑和梁式支撑时的柔度分别为0.417 0、0.535 8; A 为截面面积; f 为强度允许值,取305 MPa。

得到盘扣架立杆轴力结果如图8所示。

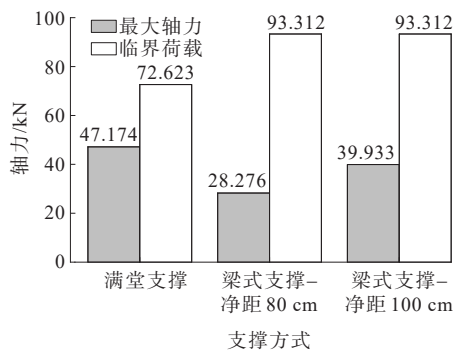


图8 盘扣架立杆轴力

Figure 8 Axial force of standards in disc lock scaffolds

由图8可以看出:满堂支撑和梁式支撑体系下,盘扣架中立杆的稳定性都能得到保证。但是,满堂支撑体系的临界荷载最小,而立杆轴力则最大,安全因数为1.54,而梁式支撑-贝雷梁净距80 cm和100 cm的安全因数分别为3.30和2.34。可见,从压杆稳定性方面考虑,梁式支撑要优于满堂支撑。

3.5 讨论

基于上述结果,可知满堂支撑方案和梁式支撑方案的承载能力均能满足要求。对这两种方案进行承载能力综合评价,结果如表2所示。

表2 不同判别角度下支撑方案的对比

Table 2 Comparison of supporting capacity of different construction schemes

判别角度	满堂支撑	梁式支撑
刚度	✓	
承载能力		✓
强度		✓
稳定性		✓
施工难易度	✓	
经济性(用钢量)	✓	
对场地、地基要求		✓

从表2中可看出:两种支撑体系各有优缺点,须结合场地和结构特点进行选定。满堂支撑的受力均匀,变形小,其刚度优于梁式支撑的,经济性也最好,但是其强度和稳定性不及梁式支撑的。虽梁式支撑的强度和稳定性优于满堂支撑的,但用钢量较大,经济性差和施工难度大。

4 结论

(1) 满堂支撑虽然施工简单,用钢量小,受力均匀,变形小,但是其强度和稳定性不及梁式支撑的,而且对场地和地基要求高。在工程计算和设计中,尤其要注意验算其稳定性,谨防结构失稳破坏。

(2) 梁式支撑体系,强度和稳定性较佳,通常不会发生强度和失稳性破坏。对场地和地基也基本没有要求。但是,其不仅用钢量高、施工难度通常也大,而且因跨中缺乏竖向支撑,变形有所增加。因此,在运用于涉及“预拱度”的复杂桥梁工程时,必须严格进行找形分析。

(3) 虽然与满堂支撑体系相比,梁式支撑体系存在更大的位移变化,且随贝雷梁横向净距的增大,最大位移仍会进一步增大,但在满足刚度条件的前提下,可以适当调整,增加贝雷梁的净距,以获取经济性。以本案为例,贝雷梁净距由80 cm调整到100 cm,在力学指标均达标的前提下,可以节省约10%的贝雷梁材料,在满足工程需要的同时,有效地降低了施工成本和工期。

参考文献:

References:

- [1] 交通运输部.2022年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2022-06-16)[2022-10-21].https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
Ministry of Transport. Statistical bulletin of transport

- industry development in 2022[EB/OL]. (2022-06-16) [2022-10-21]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
- [2] 交通运输部. 交通运输标准化“十四五”发展规划[EB/OL]. (2021-10-15) [2022-10-20]. https://www.mot.gov.cn/zhuanti/shisiwujtysfzgh/202201/t20220112_3636127.html. Ministry of Transport. Transport standardization development plan for “the 14th five-year” plan[EB/OL]. (2021-10-15) [2022-10-20]. https://www.mot.gov.cn/zhuanti/shisiwujtysfzgh/202201/t20220112_3636127.html.
- [3] 王树良. 圆拱形斜拉桥桥塔超高支架稳定性分析[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 142-148.
- WANG Shuliang. Stability analysis of tower super-high support of the circular arch cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 142-148.
- [4] 牛和祥. 盘扣式满堂支架法现浇施工结构优化研究[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(12): 84-86.
- NIIU Hexiang. Study on structural optimization of cast-in-place construction of pantoon-type full frame method [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2020, 43(12): 84-86.
- [5] 陈颖. 钢管桩支架体系在软基路段现浇箱梁中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- CHEN Ying. Application research of steel pipe pile support system in cast-in-place box girder of soft foundation section[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [6] 高则彦. 城市高架桥现浇箱梁跨河支架设计与施工[J]. 城市道桥与防洪, 2015(3): 109-111, 13.
- GAO Zeyan. Design and construction of crossing-river bracket for cast-in-site box girder of urban elevated bridge [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015(3): 109-111, 13.
- [7] 尹丽丹, 马宁. 黏弹性复合防屈曲支撑钢框架结构抗震抗风性能分析[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(1): 16-23.
- YIN Lidan, MA Ning. Analysis of seismic and wind-resistant performance of viscous-elastic buckling-restrained braced frame[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(1): 16-23.
- [8] 黄佳梅, 易伟建. 近场脉冲地震下考虑模型不确定性的桥梁时变抗震分析[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 99-108.
- HUANG Jiamei, YI Weijian. Time-dependent seismic performance of bridges considering modeling uncertainties under near-field pulse-like ground motions [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(1): 99-108.
- [9] 王一光, 郑元勋. 某小半径现浇箱梁桥墩梁连接方式受力性能分析[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 64-68.
- WANG Yiguang, ZHENG Yuanxun. Finite element analysis of mechanical performance of a small radius cast-in-place box girder bridge pier-beam connection method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 64-68.
- [10] 周力毅, 黄贇萍, 周鑫. 采用加强型贝雷梁基础的桥梁支架施工工艺[J]. 公路工程, 2012, 37(5): 152-155.
- ZHOU Liyi, HUANG Ganping, ZHOU Xin. Using enhanced bailey girder bridge bracket construction technology of foundation[J]. Highway Engineering, 2012, 37(5): 152-155.
- [11] 陆征然, 郭超, 李幅昌, 等. 水平冲击荷载作用下高大满堂支撑架动力性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(增刊1): 68-77.
- LU Zhengran, GUO Chao, LI Guochang, et al. Study on dynamic performance of tall and full-house support frame under horizontal impact load[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(sup 1): 68-77.
- [12] 庄明智, 方圣恩. 半刚性钢框架稳定理论的扣件式钢管满堂支撑体系极限承载力分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 557-562.
- ZHUANG Mingzhi, FANG Sheng'en. Ultimate load-carrying capacity analysis of fastener steel tube full-hall formwork support systems on stability theory of semi-rigid steel frame[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 557-562.
- [13] 梁岩, 高杰, 陈全兴. 现浇混凝土箱梁满堂支撑体系方案优选分析[J]. 施工技术, 2016, 45(24): 64-67, 87.
- LIANG Yan, GAO Jie, CHEN Quanxing. Supporting system scheme optimizing analysis of cast-in-situ concrete box girder[J]. Construction Technology, 2016, 45(24): 64-67, 87.
- [14] 翟文静, 张茂华. 贝雷架在桥梁快速施工中的应用[J]. 四川建筑, 2010, 30(3): 167-169.
- ZHAI Wenjing, ZHANG Maohua. Application of bailey frame in bridge rapid construction[J]. Sichuan Architecture, 2010, 30(3): 167-169.
- [15] 刘学明, 刘世忠. 钢管柱-贝雷梁支架体系施工工艺及设计检算[J]. 铁道建筑, 2016, 56(9): 43-46.
- LIU Xueming, LIU Shizhong. Construction technology and design calculation of steel tube column-bailey beam supporting system[J]. Railway Engineering, 2016, 56(9): 43-46.