

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.08.024

基于增设 PBL 锚固件的新型外露式钢柱脚设计研究

李琪群

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:为满足设计中外露式钢柱脚在桥梁工程中的刚性连接承载力需求,归纳整理了工程设计中外露式钢柱脚刚性连接的常用计算规定,基于西安某人行天桥工程桥墩的受力需求提出了一种增设 PBL 锚固件的新型外露式钢柱脚设计,并进一步在工程实例中计算分析了该新型外露式钢柱脚的承载能力结果及特性。结果表明:同等尺寸下,新型外露式钢柱脚刚性连接时可以提供更高的侧拉锚固力,但需配合更高的基面混凝土抗压强度,具备一定的施工便利性,但对施工精度要求较高。

关键词:新型外露式钢柱脚;PBL 构件;刚性连接

中图分类号:U443.4

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)08-0098-03

0 引言

外露式钢柱脚多用于除高层建筑外的大部分中小规模钢结构^[1]。近年来,随着城市建设的快速发展和钢结构桥梁的大规模采用,外露式钢柱脚在城市桥梁,特别是人行桥这类轻型钢结构桥梁中青睐采用该种柱脚形式。外露式钢柱脚的结构设计决定着桥梁下部结构的受力性能及美观性。因此,其研究具有重要的理论和实践意义。

国内外关于外露式钢柱脚的研究已经进行了多年。墩柱与基础柔性连接时,外露式钢柱脚具有施工简便、有效缩短工期的优点^[1];刚性连接多采用埋入式或外包式钢柱脚^[2],但其构造复杂、施工工期较长,难以适应城市桥梁景观性效果。城市人行桥梁钢结构桥墩常采用外露式钢柱脚的连接形式,对于独柱墩等需要刚性连接的结构形式,常规的外露式钢柱脚构造难以满足其连接性能的需求。因此,对于外露式钢柱脚的刚性连接可行性的研究十分必要。

本文旨在通过探讨采用 PBL 构件(开孔型钢剪力件)作为锚固件等构造措施,来增强外露式钢柱脚的刚性连接性能,以满足实际工程对于钢结构桥墩柱脚各种工况下的承载力要求。同时,本文将为优化外露式钢柱脚的设计和应用提供技术支持和参考。

收稿日期:2023-08-30

作者简介:李琪群(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

1 外露式钢柱脚计算锚固件拉力计算方法

综合《钢结构设计手册》^[3]、《高层民用建筑钢结构技术规程》^[4]、《钢结构(上册)——钢结构基础》^[5]、《钢结构连接节点设计手册》^[6]等计算规定,均是基于材料弹性假定和柱脚理想刚性的计算。对于刚性连接外露式柱脚,在竖向轴力 N 、横向弯矩 M 和横向剪力 V 共同作用下,承载力验算内容包含三个方面:

(1)柱脚基面混凝土抗压承载力验算,即混凝土最大受压应力 σ_c 验算:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_c = \frac{N}{LB}(1+6e/L) \leq \beta_c f_c \quad \text{当 } e = L/6 \\ \sigma_c = \frac{2N}{3B(L/2-e)} \leq \beta_c f_c \quad \text{当 } L/6 < e \leq (L/6+l_1/3) \quad (1) \\ \sigma_c = \frac{2N(e+L/2-l_1)}{Bx_n(L-l_1-x_n/3)} \leq \beta_c f_c \quad \text{当 } e > (L/6+l_1/3) \end{array} \right.$$

式中: L 为柱脚底板的长度,mm; B 为柱脚底板的宽度,mm;柱脚受力偏心距 $e = \frac{M}{N}$,mm; l_1 为锚固件中心

距离受拉区边缘的距离,mm; β_c 为底板下混凝土局部承压时的轴心抗压强度设计值提高系数,按《混凝土结构设计规范》(GB 50010)的规定采用; f_c 为底板下混凝土的轴心抗压强度设计值; x_n 为底板受压区高度,mm,可按下式试算获得:

$$x_n^3 + 3(e-L/2)x_n^2 - \frac{6nA_e^*}{B}(e+L/2-l_1)(L-l_1-x_n) = 0 \quad (2)$$

式中: A_e^* 为受拉侧锚固件的总有效面积; n 为钢材的弹性模量与混凝土弹性模量之比。

(2)当底板下混凝土受压应力分布使得锚栓受拉,即当 $e > (\frac{L}{6} + \frac{l_1}{3})$,则需开展柱脚锚固件的抗拉承载力验算,锚固件总拉力

$$T_a = \frac{N(e - L/2 + x_n/3)}{L - l_1 - x_n/3} \leq f_t^a A_a \quad (3)$$

式中: f_t^a 为锚固件的抗拉强度设计值,其余符号同上。

(3)柱脚水平抗剪承载力验算,水平抗剪承载力按式(4)计算:

$$\begin{cases} V_{fb} = 0.4 N \geq V & \text{当 } e \leq (L/6 + l_1/3) \\ V_{fb} = 0.4 (N + T_a) \geq V & \text{当 } e > (L/6 + l_1/3) \end{cases} \quad (4)$$

2 锚固增强新型外露式钢柱脚方案

本次研究实例以某项目钢结构人行天桥设计为依托,项目因空间限制,柱脚尺寸受限,遂开发增强锚固新型外露式钢柱脚。

新型外露式柱脚不再采用锚栓作为主要的锚固受拉构件,而是转而采用PBL构件(穿筋开孔槽钢)作为主要锚固受拉构件,辅以锚栓,设计如图1所示。该锚固件锚固工作原理如下。

(1)槽钢全熔透焊接于柱脚底板之下,对齐柱脚加劲肋布置。

(2)槽钢锚固件底端部焊接端板,用于在承台中扩散槽钢端部拉力,大幅增强端部的可靠锚固^[7],如图1、图2所示。

(3)槽钢开孔,于现浇承台中穿入承台横向钢筋,保证槽钢锚固件中段的剪力传递,如图1所示。

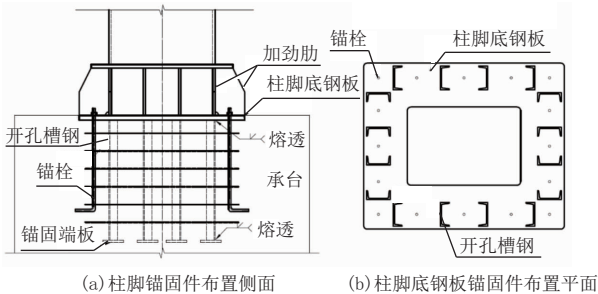


图1 锚固增强新型外露式钢柱脚设计示意

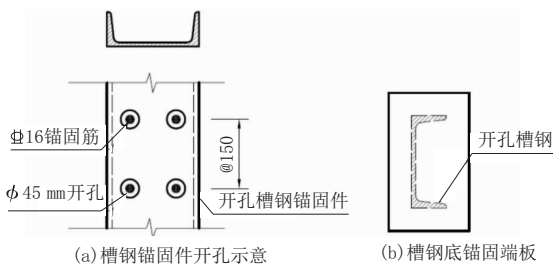


图2 槽钢锚固件锚固构造示意

实际构件如图3所示。

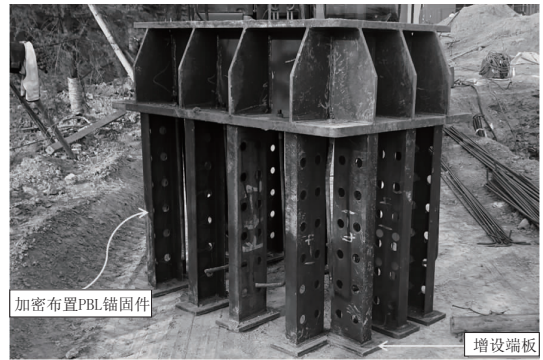


图3 槽钢锚固件实际构件

3 工程实例计算分析

以A线107#桥墩(后称A107墩)为例,外露式钢柱脚矩形钢管尺寸为1 200 mm(横桥向)×900 mm(顺桥向)。采用MIDAS Civil有限元软件开展静力工况下内力计算,可得内力结果见表1,各工况下横桥向偏心距0.728 m,顺桥向偏心距达1.224 m。

本工程计算采用MIDAS Civil有限元软件,经静力、地震时程计算分析,获取柱底内力,以A107墩为例,静力工况下顺桥向弯矩最大,内力计算结果见表1。

表1 各工况下A107墩底柱脚内力计算结果

计算工况		内力计算结果				
构件	工况	N/kN	顺桥向 Q _x /kN	横桥向 Q _y /kN	横桥向 M _y /kN·m	顺桥向 M _x /kN·m
A107墩柱脚	顺桥向静力	5 640.1	1 197.0	-684.7	-3 172.7	6 906.3

对应于墩柱尺寸,柱脚底钢板尺寸为1 700 mm(横桥向)×1 400 mm(顺桥向),可根据图4,分别确定顺桥向及横桥向尺寸参数L、B取值。槽钢取用型号[20b,锚固件中心距离受拉区边缘的距离 $l_1 = 125$ mm,则柱脚偏心距顺桥向 $e = 1 224$ mm $> (\frac{L}{6} + \frac{l_1}{3}) = (\frac{1 400}{6} + \frac{125}{3}) = 275$ mm,横桥向 $e = 563$ mm $> (\frac{L}{6} + \frac{l_1}{3}) = (\frac{1 700}{6} + \frac{125}{3}) = 325$ mm,均属于大偏心距工况。柱脚钢材规格采用Q345qD,其弹性模量为 2.06×10^5 MPa;钢材的弹性模量与混凝土弹性模量之比取 $n = 6.0$ 。

3.1 承载力分析

3.1.1 柱脚基面混凝土抗压承载力验算

新型外露式钢柱脚增设[20b型钢作为锚固件,其中A107墩柱脚横桥向和顺桥向均按单排4根

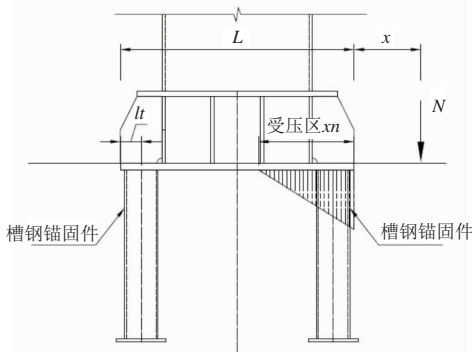


图4 槽钢锚固件外露式钢柱脚受力及尺寸参数示意

[20b 钢, 并穿插布置 5 根 Q345 规格 M60 锚栓方式布置锚固件, 如图 1 所示, 则单侧受拉侧锚固件的总有效面积均为 $A_e^a=4 \times 3\ 283+5 \times \pi \times 30^2=27\ 269\ \text{mm}^2$, 则底板下受压区高度 x_n 根据式(2)计算可得, 顺桥向 $x_n=579\ \text{mm}$, 横桥向 $x_n=1\ 151\ \text{mm}$ 。进而通过式(1)计算得, 混凝土最大受压应力顺桥向 $\sigma_c=19.0\ \text{MPa}$, 横桥向 $\sigma_c=7.6\ \text{MPa}$, 则按最不利的顺桥向配置基面混凝土标号, 初定采用 C40 并且查表得, 混凝土局部承压时的轴心抗压强度设计值提高系数 β_c 。按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)的规定: 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 1.0; 当混凝土强度等级为 C80 时, 取 0.8; 其间按线性内插法确定。则 $\beta_c=1.0$, 可得混凝土最大受压应力 $\sigma_{c\max}=19.0\ \text{MPa} \leq \beta_c f_c=1.0 \times 19.1=19.1\ \text{MPa}$, 满足柱脚基面混凝土抗压承载力验算要求。

由理论计算公式(1)也可推知, 基面混凝土抗压承载力验算仅与外部受力及柱脚尺寸有关, 在柱脚尺寸不增加的情况下, 基面混凝土承载力需进一步提升, 本例计算结果已逼近材料极限, 进而可知, 新型外露式钢柱脚需要配合较高强度基面混凝土。

3.1.2 柱脚锚固件的抗拉承载力验算

已知受拉锚固件布置形式, 又锚栓的抗拉强度设计值 $f_{t1}^a=160\ \text{MPa}$, 槽钢抗拉强度设计值 $f_{t2}^a=275\ \text{MPa}$, 则 $f_{t1}^a A_{e1}^a+f_{t2}^a A_{e2}^a=160 \times 14\ 137/1\ 000+275 \times 4 \times 3\ 283/1\ 000=2\ 262+3\ 611.3=5\ 873.2\ \text{kN}$ 。又受拉侧锚固件的总拉力由式(3)可得, 顺桥向 $T_a=3\ 741.3\ \text{kN}$, 横桥向 $T_a=455.7\ \text{kN}$, 因此单侧锚固件 $T_{a\max}=3\ 741.3\ \text{kN} < f_{t1}^a A_{e1}^a+f_{t2}^a A_{e2}^a$, 满足要求。如图 1 所示, 角点位置的锚固件为锚栓, 基于平截面弹性假定, 线性叠加双向受力的拉拔力 $T_a=3\ 741.3/(14\ 137+4 \times 3\ 283) \times 14\ 137/5+455.7/(14\ 137+4 \times 3\ 283) \times 14\ 137/5=435.2\ \text{kN} < f_{t1}^a A_{e1}^a/5=160 \times 14\ 137/1\ 000/5=452.4\ \text{kN}$, 综上, 柱脚锚固件满足抗拉承载力的验算要求。

由计算结果可知, 同等布置空间下, 如不增大锚栓直径, 相比于仅设单排锚栓, 新型外露式钢柱脚抗拉承载力提升 62.6%。

3.1.3 水平抗剪承载力验算

柱脚轴向力 $N=5\ 640.1\ \text{kN}$, 顺桥向和横桥向剪力分别为 $1\ 197.0\ \text{kN}$ 和 $684.7\ \text{kN}$, 则根据式(4), 剪力柱脚水平抗剪承载力顺桥向为 $V_{tb\text{顺}}=0.4 \times (5\ 640.1+3\ 741.3)=3\ 752.6\ \text{kN}$, 大于 $1\ 197.0\ \text{kN}$, $V_{tb\text{横}}=0.4 \times (5\ 640.1+455.7)=2\ 438.3\ \text{kN}$, 大于 $684.7\ \text{kN}$, 水平抗剪承载力验算均满足要求, 并且富余较大。

由式(4)可知, 刚性连接柱脚的水平抗剪力仍采用铰接柱脚的模式: 由柱脚底部与其接触的混凝土之间的摩擦力或者是专门设置抗剪键来承受, 而锚栓本身不参与抗剪^[8]。PBL 锚固件本身可作为抗剪键提供额外的抗剪力, 因此新型外露式钢柱脚的抗剪承载力相比传统外露式钢柱脚具有一定优势, 式(4)偏于保守。

3.2 施工特性分析

本项目新型外露式钢柱脚采用如下工序进行快速施工: (1)工厂预制钢柱脚构件, 如图 3 所示; (2)承台绑扎钢筋时同步进行钢柱脚构件的定位及固定; (3)浇筑承台混凝土并养护至目标强度; (4)复核柱脚位置、标高无误后, 拧紧柱脚锚栓; (5)进行后续的桥墩墩柱拼装工作。

通过上述施工工序描述可知, 相比于传统柱脚, 新型外露式钢柱脚无需额外的工序, 保留了传统外露式钢柱脚的施工便利性。但新型外露式钢柱脚在承台须在钢筋绑扎阶段对其精准定位及较为可靠的固定, 并且应在承台后续混凝土浇筑、振捣、养护过程中避免造成柱脚偏移, 进而防止后续墩柱拼装位置偏差。

4 结 语

本次研究在传统外露式钢柱脚的尺寸构造下, 通过在柱脚底板增设穿筋开孔槽钢(PBL 构件)锚固件的措施, 改造为新型外露式钢柱脚, 在设计研究过程中得到以下重要结论, 为后续设计工作提供参考。

(1)基面混凝土抗压承载力验算仅与外部受力及柱脚尺寸有关, 新型外露式钢柱脚需要配合较高强度的基面混凝土。

(2)在同等布置空间下, 新型外露式钢柱脚在保证基面混凝土强度下, 大幅提升了钢柱脚的锚固抗拉承载力, 满足下部结构复杂受力条件下构件的刚

(下转第 110 页)

(2)构建的数据库涵盖不同蓄水期的数据,能够精准反映早期水位变动导致的工程结构形变,并具备未来形变预测能力。通过迭代优化过程,反演误差控制在15%以内。

(3)数字孪生系统嵌入了连续全面的形变数据库,实时根据实测水位更新各点位的形变数据。一旦监测到形变超出设定阈值,系统将自动触发预警机制,启动风险管理控制程序。

参考文献:

- [1] 李强,季广平.水利工程施工中的质量与安全措施分析[J].水能经济,2017(2): 242.
- [2] 张士辰,彭雪辉.我国水库大坝安全管理应急预案存在的主要问题与对策[J].水利发展研究,2015(9): 25-29.
- [3] 罗军刚,赵杰,王蕾,等.基于综合集成平台的突发事件应急管理及决策[J].水利信息化,2011(1): 29-34.
- [4] 彭雪辉,周克发,王晓航.水库大坝突发事件应急预案编制关键技术[J].中国水利,2008(20): 45-47.
- [5] 程翠云,钱新,王玉秋,等.水库大坝突发事件应急预案可行性评价方法初探[J].水利水运工程学报,2009(1): 71-75.
- [6] 王光谦,刘家宏.黄河数字流域模型[J].水利水电技术,2006(2): 15-21.
- [7] 王井腾,孙祥鹏,张文明,等.珠江防汛“四预”平台建设及应用[J].中国水利,2022(22): 39-42.
- [8] 吕娟,张大伟.智慧防洪对水利业务模型的功能需求与技术实现构想[J].中国水利,2022(8): 65-66.
- [9] 张道军.复杂水环境资源系统智能管理、预测和决策的研究[D].大连:大连理工大学,2002.
- [10] 徐军杨,陈思,李斌,等.数字孪生永宁江洪水预报模型构建及系统应用[J].水利信息化,2023(2): 1-8.
- [11] 孔宪京,周扬,邹德高,等.高面板堆石坝面板应力分析及抗挤压破坏措施[C]//现代水利水电工程抗震防灾研究与进展(2011年).北京:中国水力发电工程学会,2011.
- [12] 徐斌,邹德高,孔宪京,等.高土石坝坝坡地震稳定分析研究[J].岩土工程学报,2012,34(1): 139-144.
- [13] 牛广利,李天旸,杨恒玲,等.数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J].长江科学院院报,2023,40(3): 181-185.
- [14] 蒋亚东,石焱文.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].科技通报,2019,35(11): 5-9.
- [15] 张建云,王光生,张建新,等.Web洪水预报调度系统开发及应用[J].水利水电技术,2005,36(2): 67-70.
- [16] 黄艳,杨国俊,王勤思,等.数字孪生三峡建设关键技术难点与解决方案[J].中国水利,2023(19): 27-34.
- [17] 覃扬扬,郭俊,刘懿,等.数字孪生流域知识图谱构建及其应用[J].水利水电快报,2023(11): 115-120.
- [18] 杜军凯,游进军,仇亚琴,等.面向“四预”的水资源智能业务应用体系研究[J].水利发展研究,2023,23(8): 1-6.
- [19] 李胜阳,姚亮,王迎春,等.西北山区流域融雪水资源“四预”应用系统技术研究[J].水利信息化,2023(1): 8-13.
- [20] 蔡运忠,程扬,梁爱萍,等.数字孪生水利工程建设管理平台研发及应用[J].水利发展研究,2023,23(8): 19-23.
- [21] 邹德高,尤华芳,孔宪京,等.接缝简化模型及参数对面板堆石坝面板应力及接缝位移的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1): 3257-3263.
- [22] 孔宪京,陈楷,邹德高,等.一种高效的FE-PSBFE耦合方法及在岩土工程弹性分析中的应用[J].工程力学,2018,35(6): 6-14.

(上接第100页)

性连接。

(3)新型外露式钢柱脚的抗剪承载力相比传统外露式钢柱脚具有一定优势,采用传统抗剪理论公式验算结果偏于保守。

(4)新型外露式钢柱脚采用预制装配式的建造模式,仍保留了外露式钢柱脚施工快捷、简便的特性,但对施工精度要求较高。

参考文献:

- [1] 赵培兰.钢结构柱脚的形式及设计原则[J].太原城市职业技术学院学报,2013(11):169-170.
- [2] 刘卫辉,郭洁,贺志坚,等.钢结构柱脚设计要点综述[J].建筑结构,2019(增刊2): 674-678.
- [3] 但泽义.钢结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [4] JGJ 99—2015,高层民用建筑钢结构技术规程[S].
- [5] 陈绍蕃,顾强.钢结构(上册)——钢结构基础[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [6] 李星荣,秦斌.钢结构连接节点设计手册(4版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [7] 杨勇,陈阳.PBL剪力连接件抗剪承载力试验研究[J].工程力学,2018,35(9):89-96.
- [8] 王艳君,左凌霄,路泽超.对外露式钢结构刚性柱脚设计探讨[C]//北京:工业建筑出版社,2020:328-331.