

异型桥墩承台受力性能分析与裂缝计算研究

戴源, 郭宏伟, 吴康寅, 贾志强, 陈红星

[悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司, 江苏 苏州 215123]

摘要: 随着城市化进程的加速, 异型结构在桥梁工程中的应用日益增多, 对异型桥墩承台的承载机理、破坏模式及力学性能的研究显得尤为重要。结合苏州某大跨径桥梁工程, 系统分析异型承台下群桩基础的桩顶反力分布规律, 对比承台各项力学性能指标, 得出影响其配筋设计的关键因素。通过对比中国《公路桥涵设计规范》(JTG D60—2015)、《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)与欧洲规范在裂缝计算方面的差异, 并借助MIDAS FEA有限元软件对承台非线性受力状态下的裂缝开展进行模拟, 深入阐释了不同计算方法产生差异的原因, 并提出了相应的计算修正方法。研究成果最终应用于实际工程中, 效果良好, 为同类异型承台结构的设计提供参考。

关键词: 异型桥墩承台; 桩顶反力; 主控因素; 裂缝分析; 有限元模拟

中图分类号: U443.2; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0190-04

Analysis and Study on Mechanical Behavior and Crack Calculation of Special-shaped Pier Base Slabs

DAI Yuan, GUO Hongwei, WU Kangyin, JIA Zhiqiang, CHEN Hongxing

[CCDI(SUZHOU) Exploration & Design Consultant Co., Ltd., 215123, China]

Abstract: With the acceleration of urbanization, the application of special-shaped structures in bridge engineering is increasing. It is particularly important to study the bearing mechanism, failure mode and mechanical properties of special-shaped pier base slabs. Combined with a long-span bridge project in Suzhou, the distribution law of pile top reaction of pile group foundation under special-shaped base slabs is systematically analyzed. The mechanical performance indexes of base slab are compared, and the key factors affecting the reinforcement design are clarified. By comparing the differences in crack calculation between the *Code for Design of Highway Bridges and Culverts*, and *Code for Design of Concrete Structures* in China and the European standards, and using MIDAS FEA finite element software to simulate the crack development under the nonlinear stress state of the base slabs, the reasons for the differences in different calculation methods are explained in depth, and the corresponding calculation correction methods are proposed. The research results are finally applied to practical engineering, and the effect is good, which provides a reference for the design of similar special-shaped base slab structures.

Keywords: special-shaped pier base slab; pile top reaction; main controlling factors; crack analysis; finite element simulation

0 引言

随着现代城市建设的快速推进, 桥梁设计常受到空间条件、道路线形与景观要求的多重制约, 异型结构的应用日趋广泛。作为关键受力构件, 异型承台的内力分布复杂, 难以沿用常规方法判断。现行规范主要针对常规结构, 若直接用于异型承台的抗弯、抗剪切、抗冲切、拉压杆及裂缝等方面计算, 其结果与真实受力存在差异, 难以满足精准设计需求。

因此, 采用更精确的方法深入研究异型承台的受力性能与裂缝计算, 对保障工程安全、优化设计及指导施工运维具有重要的现实意义。

1 工程概况

某跨线桥, 主桥跨径 75 m+120 m+75 m, 宽 18.5 m, 采用悬浇箱梁, 桥梁主墩为混凝土墩台, 钻孔桩基础。由于桥梁受道路、高铁、河道、航道及用地等周边环境的制约, 桥墩与承台斜交布置, 见图1。桥墩承台长 20.8 m, 宽 12 m, 高 4.5 m, 桥墩与承台斜交 38°, 承台采用 C40 混凝土, 承台下设置 16 根 1.6 m 钻孔桩。

收稿日期: 2025-11-27

作者简介: 戴源(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁与隧道工程设计工作。

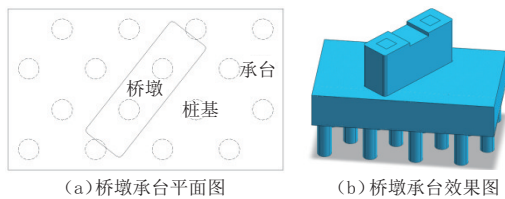


图1 桥墩承台构造图

2 承台受力分析

2.1 桩顶反力分析

对承台进行精确的受力分析,其最重要的前提在于确定桥墩作用于承台顶面的荷载以及桩基反作用于承台底面的力。其中,桥墩作用力主要由上部结构决定,可视为不受承台自身特性影响的外部因素;而桩顶反力分布与大小显著受到承台刚度、桩基布置形式等诸多因素的制约,则是一个内部变量。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[1]计算承台底面单桩竖向力设计值的公式为:

$$N_{id} = \frac{F_d}{n} \pm \frac{M_{xd}y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_{yd}x_i}{\sum x_i^2} \quad (1)$$

式中: N_{id} 为单桩反力; F_d 为作用于承台底的竖向力; M_{xd} 、 M_{yd} 为作用于承台的弯矩; n 为桩总数; x 、 y 为桩中心与形心轴的距离。

由式(1)可知,在承台水平向弯矩较小或为零的工况下,桩基反力呈均匀分布。然而,该结论严格建立在“承台为绝对刚性体”的理论假定的前提上。对于实际工程中的异型承台,其刚度分布复杂,在不同的荷载分布、不同的承台厚度及桩基布置等因素耦合影响下,桩顶反力分布往往与该假定情况不完全一致,以致导致桩基反力的实际分布模式及其计算值均会呈现显著差异。

为系统研究桩基反力分布与承台刚度及桩基布置形式之间的内在关联,本文基于所依托的实际工程案例,在保持外荷载总量不变的条件下,通过改变承台高度以模拟不同刚度条件下的受力响应,进而分析桩基反力的分布规律。其中,承台刚度通过宽高比(即承台悬出桥墩部分的宽度与承台高度之比)予以量化;而群桩在承台下的空间位置差异,则通过承台拉压杆模型中压杆倾角的余弦值进行表征。本研究分别选取宽高比为0(理想刚体)、0.5、1、2及3五种承台构造形式开展数值计算,所得结果集中展示于图2。

由图2可知,实际承台刚度下,实际中心位置处的桩反力>刚性体假设桩反力>实际边缘位置的桩

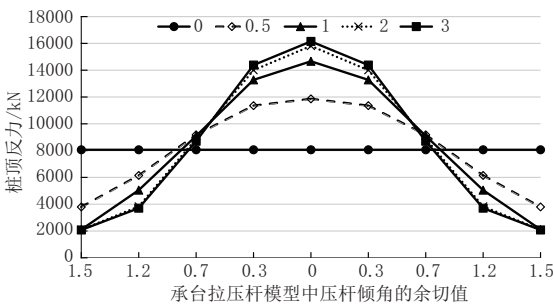


图2 不同刚度承台下群桩桩顶反力分布图

反力,且承台刚度减小时,桩顶反力会越来越趋于钟形分布。

2.2 承台受力分析

根据第2.1节分析,边桩提供的真实反力往往小于理论计算值。因此,在进行承台的抗弯、抗剪、抗冲切及拉压杆等力学性能验算时,若直接采用基于刚体假设所得的桩顶反力来计算各项力学效应,其结果通常会大于承台实际受力情况,从而使设计趋于保守。但是该方法不仅能够包络承台在真实受力状态下的力学响应,还具有计算简便、便于工程应用的优点。基于此点,在开展承台受力分析时,建议首先分析出影响承台力学性能的主要控制因素,进而针对该控制因素展开更为精细化的深入研究,以在保证安全的前提下进一步提升设计的合理性与经济性。

基于本文所依托的工程实例的异型承台,将其各项力学效应的计算值及相应抗力限值汇总于表1。通过分析各指标计算值与限值之比,首先可定量评估其在当前设计中各项指标的安全富余度;进而通过对比该比值的相对大小,即可明确得出控制承台整体力学性能的关键因素。

表1 承台各项指标验算表

验算项	计算值	限值	计算值/限值
抗弯/(kN·m)	91 607	295 235	0.310
抗剪/kN	69 751	179 033	0.390
抗冲切/kN	162 752	379 122	0.429
拉压杆(斜压杆)/kN	56 613	314 963	0.180
拉压杆(拉杆)/kN	32 295	105 440	0.306
裂缝/mm	0.189	0.2	0.945

分析表1的计算结果可知,裂缝控制是该异型承台受力性能设计的首要控制因素。尽管现行规范未对常规承台的裂缝计算做出强制性要求,但对异型承台而言,对其裂缝分布模式及开裂宽度进行精确验算,是实现精准配筋的关键。如此不仅可避免因配筋过量造成的材料浪费,而且还能有效防止因配筋不足导致结构在设计年限内裂缝持续扩展并贯通

承台,进而危及结构的正常使用功能与耐久性。因此,对异型承台的裂缝计算理论与方法进行深入研究显得尤为必要。

2.3 裂缝计算

本工程承台属大体积混凝土构件,其水化热引起的温控防裂问题已通过设置冷却管及掺加抗裂剂等工程措施予以解决。因此,本文将从受力性能的角度,对承台的裂缝问题展开研究。

由于承台外排桩中心距墩台边缘大于承台高度,故按悬臂梁体系验算强度后,也按悬臂梁体系验算裂缝。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[1],裂缝宽度计算如下:

$$W_{cr} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{c+d}{0.30+1.4\rho_{te}} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{ss} = \frac{M_s}{0.87A_s h_0} \quad (3)$$

式中: W_{cr} 为裂缝宽度; C_1 为钢筋表面形状影响系数; C_2 为长期效应影响系数; C_3 为构件受力性质影响系数; σ_{ss} 为钢筋应力; E_s 为钢筋弹性模量; c 为保护层厚度; d 为钢筋直径; ρ_{te} 为有效配筋率; M_s 为频遇组合计算弯矩值; A_s 为受拉区纵筋面积; h_0 为截面有效高度。

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[2],裂缝分析如下:

$$\omega_{max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} (1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (4)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} \quad (5)$$

式中: ω_{max} 为裂缝宽度; α_{cr} 为构件受力特征系数; ψ 为钢筋应变不均匀系数; σ_s 为钢筋应力; E_s 为钢筋弹性模量; c_s 为保护层厚度; d_{eq} 为钢筋直径; f_{tk} 为混凝土抗拉强度; $\rho_{te} = A_s / (0.5bh)$,其中 A_s 为钢筋面积, bh 混凝土截面积。

美国的桥梁规范并未直接给出裂缝宽度的计算方法,而是通过钢筋间距间接控制裂缝宽度^[6,8]。欧洲桥梁规范^[7]中计算如下:

$$\omega_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (6)$$

$$\sigma_s - \kappa_1 \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff}) \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (7)$$

$$s_{r,max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \phi}{\rho_{p,eff}} \quad (8)$$

式中: ω_k 为裂缝宽度; ε_{sm} , ε_{cm} 分别为钢筋、混凝土平均应变; $s_{r,max}$ 为裂缝最大间距; $f_{ct,eff}$ 为混凝土开裂前

抗拉强度平均值; $\rho_{p,eff}$ 为有效配筋率; α_e 为钢筋与混凝土弹性模量的比值; σ_s 为钢筋应力; E_s 为钢筋弹性模量; c 为保护层厚度; κ_1 为荷载持续时间的相关影响系数; ϕ 为钢筋直径; k_1 为钢筋粘结特性系数; k_2 为应变分布系数; k_3 为修正系数,取3.4, k_4 为修正系数,取0.425。

三个公式计算结果如下:《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》计算裂缝值为0.187 mm;《混凝土结构设计规范》计算裂缝值为0.053 mm;《欧洲混凝土桥梁规范》^[7]计算裂缝值为0.173 mm。混凝土结构规范公式与其他两个公式计算结果相差较大,分析原因为配筋率 ρ_{te} 的取值,中国桥规在计算 ρ_{te} 时,有效受拉混凝土截面面积取 $2a_s b$;欧洲桥规计算时,有效截面高度取 $\min \{2.5(h-d), (h-x)/3, h/2\}$;混凝土规范内在计算 ρ_{te} 时,有效受拉混凝土截面面积取 $0.5bh_0$ ^[2]。对于桥梁承台这类大体积混凝土的情况,混凝土规范内配筋率的取值相对偏小,若按中国桥规中的 ρ_{te} 取值代入计算,可得修正后的裂缝值见表2。

表2 裂缝计算表

规范	裂缝计算值/mm	修正后裂缝值/mm
《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 ^[1]	0.189	—
《欧洲混凝土桥梁规范》 ^[7]	0.173	—
《混凝土结构设计规范》 ^[2]	0.053	0.156

由表2可知,修正后的三者计算结果仍有一定的差异,但较为接近。

3 数值模拟与结果分析

为进一步分析异型承台的裂缝,使用有限元软件 MIDAS FEA 建立承台-桩基-土体耦合模型,见图3。

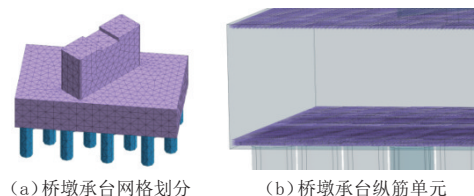


图3 桥墩承台有限元分析模型

首先对承台进行线性分析,混凝土计算应力已超过其强度标准值,可判定结构已开裂,需转入非线性分析。在非线性模型中,设定混凝土受拉本构关系为:当应力超过规范规定的抗拉强度设计值时,判定该处混凝土开裂,相应单元刚度将被调整,应力随之重分布至未开裂区域。

承台裂缝分析结果见图4,数值模拟得到的裂缝宽度为0.088 9 mm,远小于表2计算值。究其原因,如本文第2.1节所述,在桥墩竖向荷载作用下,实际边桩反力小于刚性体假设计算值,而中桩反力则更大,导致承台底面实际弯矩小于计算弯矩,从而引起裂缝宽度减小。因此,采用实际桩顶反力代入裂缝公式计算,结果更为准确。

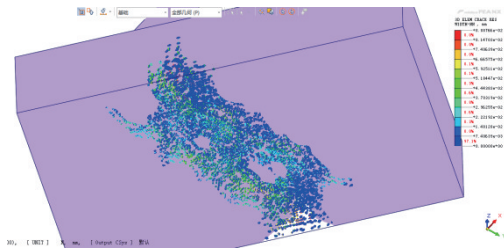


图4 承台裂缝计算结果

另一方面,数值模拟得出的裂缝宽度并非能与规范计算的裂缝宽度完全等同,前者得出的裂缝为力学响应相关的宽度,而规范内的裂缝计算考虑了钢筋形状、长期效应等相关系数的影响。

若将数值模拟得到的桩顶力代入规范公式以计算承台底部裂缝,并将修正数值模拟得到的裂缝乘以公式内的钢筋表面形状系数 C_1 、长期效应影响系数 C_2 ,结果见表3。

表3 裂缝分析对比表

规范	裂缝计算值/mm	配筋率/效应修正后值	桩顶力修正后裂缝值/mm
中国桥规	0.189	—	0.135
欧洲桥规	0.173	—	0.123
混凝土规范	0.053	0.156	0.100
数值模拟	0.088 9	0.132	0.132

根据表3分析可知,在准确获取桩顶作用力并全面考虑钢筋形状、长期效应等因素情况下,数值模拟结果与我国现行桥梁规范的计算结果能够良好吻合;若直接完全套用规范公式进行计算,其结果总体上偏于安全。因此,在初步设计阶段或针对常规通用构件进行设计时,可直接采用规范公式进行计算,在保证安全的前提下兼顾效率。然而,对于特殊构

件或在条件受限的工程场景(如周边环境敏感、承台施工受到严格限制等),则有必要开展精细化设计,可依据数值模拟分析结果,对构件构造进行针对性地优化。

4 结 语

本文通过理论计算与数值模拟,结合具体工程案例对异型桥墩承台的受力与裂缝问题进行了分析。研究了不同异型承台刚度下的群桩桩顶反力分布规律,对比分析了承台各力学指标以得出承台力学性能的主要控制因素;在裂缝计算方面,则以桥梁规范为依据,可根据数值模拟等多方面的分析结果对构造进行适当合理的优化。

参考文献:

[1] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
[2] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范(2015版)[S].
[3] GJG 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
[4] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
[5] TB 10093—2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].
[6] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications(8th Edition)[S]. Washington, D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
[7] Eurocode 2: Design of cOncrete structures—Part 2: Concrete bridges (BS EN 1992: 2005)[S]. European Committee for Standardization.
[8] 黄侨.中美欧混凝土桥梁设计规范对比与分析[M].北京:人民交通出版社,2023.
[9] JTG 3363—2019 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
[10] GB 55008—2021 混凝土结构通用规范[S].
[11] 燕伟.钢筋混凝土梁裂缝宽度的影响因素分析[D].重庆:重庆交通大学,2010.
[12] 关伟.实体矩形桥墩盖梁非线性裂缝分析[J].山西交通科技,2010(5):53-55.
[13] 黄冠杨.混凝土桥墩裂缝成因分析[J].城市道桥与防洪,2020(10):94-96.
[14] 陈仁朋,凌道盛,陈云敏,等.群桩基础沉降计算中的几个问题[J].土木工程学报,2003(10):15-16.
[15] 陈欣,等.基于拉压杆模型的大体积混凝土承台配筋设计研究[D].西安:长安大学,2018.