

桥梁设计中桥墩及基础承载力优化研究

孙旦旦

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074

[摘要]桥墩以及基础是整个桥梁结构受力和承重的主要部件,而桥墩以及基础的受力设计直接影响着桥梁安全可靠与否及经济合理程度等指标,文章以桥梁工程设计过程中如何对桥墩基础承载力进行优化为主线,总结了在桥梁设计中桥墩受力特点及其传力途径、桥墩-基础-地基整体相互作用机理以及极限承载力与变形控制理论等主要理论依据;针对桥墩结构承载力进行了系统的论述,在桥墩截面尺寸优化改进、高性能混凝土及钢筋应用以及抗震能力的设计等几方面提出了桥墩结构承载力系统优化措施;同时研究了桩基础承载力优化设计和复合地基加固技术等方面的基础承载力的关键技术。从计算结果来看,桥梁墩台-基础-地基三者之间具有良好的协同受力效果,在忽略地基塑性和基础脱空的情况下会使墩柱承载力的安全余量被高估;使用UHPC材料使墩柱抗压强度提高到160MPa之后,墩柱受力增大了19.6%,但是过高的强度对于增强墩柱承重能力的作用不大。基于数值仿真对协同承载力做参数敏感性研究,证明该优化措施合理可行。

[关键词]桥墩;基础承载力;优化设计

DOI: 10.33142/sca.v9i5.19757

中图分类号: U443.3

文献标识码: A

Research on Optimization of Pier and Foundation Bearing Capacity in Bridge Design

SUN Dandan

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: Bridge piers and foundations are the main components of the entire bridge structure in terms of stress and load-bearing capacity. The stress design of bridge piers and foundations directly affects the safety, reliability, and economic rationality of the bridge. This article focuses on how to optimize the bearing capacity of bridge piers and foundations in the process of bridge engineering design. It summarizes the main theoretical basis for bridge pier stress characteristics and transmission pathways, the overall interaction mechanism between bridge piers, foundations, and foundations, as well as the ultimate bearing capacity and deformation control theory in bridge design; A systematic discussion was conducted on the bearing capacity of bridge pier structures, and optimization measures were proposed in several aspects such as optimizing and improving the cross-sectional dimensions of bridge piers, applying high-performance concrete and steel bars, and designing seismic resistance; At the same time, key technologies for optimizing the bearing capacity of pile foundations and strengthening composite foundations were studied. From the calculation results, it can be seen that there is a good synergistic force effect between the bridge piers, abutments, foundations, and foundations. Neglecting the plasticity of the foundation and the detachment of the foundation will overestimate the safety margin of the pier column bearing capacity; After using UHPC material to increase the compressive strength of the pier column to 160MPa, the stress on the pier column increased by 19.6%, but the excessive strength had little effect on enhancing the load-bearing capacity of the pier column. Based on numerical simulation, a parameter sensitivity study was conducted on the collaborative carrying capacity to demonstrate the rationality and feasibility of this optimization measure.

Keywords: bridge piers; basic bearing capacity; optimization design

引言

桥墩和基础是桥梁荷载向地面传递的载体,在整个桥梁结构中起到承上启下的作用。它对桥梁安全储备量以及寿命的影响很大,因此要合理规划桥墩以及基础的承载力;

随着当前桥梁跨径不断增加,墩柱越来越高,建筑环境越来越复杂等,传统的经验设计方式已经不能适应现代桥梁的要求了,在地震高烈度地区、软土地带等地质条件较差的情况下,桥墩和基础所受到的约束力表现得非常不正常,

对于浅基平桥墩来说,当受到强烈地震的作用时就会产生拔出作用,使得地基土出现塑性变形,桥墩-地基相互作用的刚度逐渐衰减,采用传统的线弹性分析法很难估算出极限状态时的实际承载能力,必须在最优的设计方案里考虑到桥墩与基础、桥墩与地基之间的相互配合工作。近些年,在 183 根矩形钢筋混凝土墩柱拟静力试验的基础上,用多元回归的方法得到与轴压比、长细比以及配箍特征值等设计参数有关的待定常数。针对超高桥墩使用钢管混凝土组合墩结构,在墩身很高的主墩横桥向两侧开敞梯步,梁端安置粘滞阻尼器来完成耗能减震作用。以上结论为提高桥梁结构承载力有理论依据。本文围绕着理论基础、优化措施、数值仿真三个方面进行系统的研究工作,目的是为桥梁工程设计提供借鉴。

1 桥墩及基础承载力核心理论基础

1.1 桥墩受力特性与相互作用机制

桥墩除了有竖向支撑作用还有横向抵抗能力。竖向力作用下为轴压或是偏心受压,而横向力的作用下产生弯矩和剪力,表现为压弯构件的特点。上部结构通过支点或者墩梁固节点传递到墩顶再由墩体传到底部,在墩体内产生压应力、弯曲应力以及剪应力。墩梁刚性连接,工字钢连续组合梁和钢筋混凝土桥墩的刚性接头剪力键的传力方式决定了节点的承载能力。实体桥墩是靠混凝土压力来进行传递的,而空心墩或者是柱式墩则是由钢筋来共同受力,形成了钢-混协作的工作模式。桥墩、基础与地基组成一个整体的承载结构,三者之间相互联系。应用考虑基础脱离以及地基塑性的弹塑性地基模型研究结果显示基础脱离以及地基中的塑性导致了非常明显的非线性效应。地基开始产生塑性变形之后,系统的刚度下降,基础转角增大,基底弯矩减小。相对于线性分析而言,在考虑基础脱离和地基塑性之后,双柱式桥墩的位移增大、内力减小。容许地基被脱离及屈服可对桥墩起到一定的保护作用,但是传统的线弹性方法会对内力的要求进行夸大,因此,在优化设计过程中应当充分运用好它们之间的相互影响关

系,既不能过于保守地浪费材料,也不能过分简化而导致不足的情况出现。掌握桥梁墩台的受力特点及其相互作用原理是进行优化设计的前提条件之一。

1.2 极限承载力与变形控制理论

极限承载力理论是桥梁墩台及基础设计的基本准则。轴心受压构件截面受压承载力计算公式为:式中,是轴心受压极限承载力,是稳定系数,是混凝土轴心抗压强度标准值,是混凝土截面面积,是钢筋抗压强度标准值,是全部纵向钢筋截面面积。此公式同时包含了混凝土和钢材的参与受力情况以及长细比较大的稳定性问题。而对于偏心受压构件则需要同时满足截面平衡条件和变形协调条件才能确定其极限承载力,可以使用全截面应力积分方法或者采用等效矩形应力图形的方法进行计算,通过等效集中塑性较假定建立起 RC 墩柱的变形能力同轴压比、长细比和配箍特征值等设计变量之间的对应联系。该理论体系使桥梁墩台在各性能限值条件下产生的变形大小都可以精确计算出来,给基于性能的抗震设计提供依据。变形控制理论指出,不仅要保证桥梁墩台及基底结构的承载力设计达到极限状态下足够的强度安全度,而且还要限制正常使用状态下的变形量,高墩桥梁中墩顶水平位移作为桥梁的设计目标值,在钢管混凝土组合墩的永久状态和 E2 地震作用下都需要满足承载能力极限状态的要求,主墩墩顶水平位移不能超过规定变形允许值,二者之间互相牵扯,在设计时要综合考虑。

2 桥墩结构承载力系统优化方法

2.1 桥墩截面形式与尺寸优化

桥梁墩身截面形状关系到用材量大小、承载能力和施工难易程度等,桥梁墩身截面形状有圆形、矩形、空心矩形、多柱组合式以及钢管混凝土组合截面等几种类型,其截面形状的选择应在满足承载能力、刚度、稳定性和经济性的基础上来确定。空心墩为超高墩身首选截面形式,在相同截面刚度的基础上比实心墩节约了 30%~50%的混凝土用量。对于墩高范围 113~196m 的超高桥墩,应采

表 1 不同截面形式桥墩优化方案对比

截面形式	适用墩高范围	材料用量相对值	截面刚度相对值	施工难度	经济性评价
实心圆形墩	$H \leq 30\text{m}$	1.00	1.00	较低	常规
实心矩形墩	$H \leq 40\text{m}$	0.92	1.15	较低	良好
空心矩形墩	$30\text{m} \leq H \leq 80\text{m}$	0.65	0.88	中等	优
钢管混凝土组合墩	$H \geq 80\text{m}$	0.70	1.20	较高	良好
多柱式框架墩	$H \leq 20\text{m}$	0.85	0.75	中等	良好

注:表格中的数值是以实体圆墩为标准(1.00)作为参考用来调整设计用。

用钢管混凝土组合墩,将墩身较高的主墩横向两边作放坡处理,并使各主墩纵向宽度一致以便于施工。这样的变截面设计既考虑到了结构受力的要求,也考虑到了施工的便利,是截面形状选择的一种成功经验。

截面尺寸优化主要包括墩身壁厚、截面边长(或直径)、变截面坡度等的设计。矩形 RC 桥墩的轴压比、长细比、配箍特征值是对抗变形能力强弱的主要设计因素,在优化时要合理选取轴压比(一般不大于 0.3~0.4),防止由于轴力过大造成的脆性破坏;而长细比的选取既要保证结构的安全度又要节约材料,对通常情况下的桥墩来说,其长细比较好在 20~40 之间。

2.2 高性能材料应用与配筋设计优化

高性能材料使用是提高桥梁墩柱承载力的有效方法。超高性能混凝土(UHPC)拥有超高强度、高耐久性的特点,在桥梁墩柱中使用能够大大缩小构造截面大小,降低重量。UHPC 的抗压强度由原来的 100MPa 提高到现在的 160MPa,桥梁墩柱承载能力提高了 19.6%,但是抗压强度高却对于增加桥梁墩柱承载力的作用不大了,最佳的设计参数是 UHPC 抗压强度取值 130MPa。由此可见,材料强度并不是越大越好,要适当考虑强度、延性和造价之间的关系。配筋方面的优化包含纵向钢筋配筋率、箍筋布置方式以及配箍率特征值的选择。不锈钢配筋率由 0.8% 提高到 1.6%,桥梁墩台耗能增加 72%,适当调整配筋率可以对桥梁墩台抗震起到增强作用。纵向钢筋配筋率范围一般是 0.8%~2.5%,过小,则强度不够;过大则先发生混凝土压碎而不是钢筋屈服,降低了延性;箍筋的作用就是约束核心混凝土、提高了抗剪能力以及使延性好。优化设计应注意以下几点:一是加密区长度以及箍筋间距要符合抗震规范的规定;二是采用复合箍筋或者是螺旋箍筋可以增大约束效果;三是配箍特征值 λ_v 与轴压比有协调作用,轴压比越大,则需要的配箍特征值就越大。

3 基础承载力关键技术优化

3.1 桩基础承载力优化设计方法

桩基础是最常用的桥梁基础类型,在软土地基、深水环境中以及高烈度地震区均有很大的优越性。桩基础的承载力是由桩侧摩擦力与桩端阻力共同构成的,如何使得其发挥最大的承载作用就是对二者所占的比例进行调整优化;而桩基础的设计优化首先要考虑的是桩型的选择。钻孔灌注桩适用各种地基土壤,成孔直径较大,承载能力较强,但是对施工的质量控制提出了较高的要求;预制桩质量可靠,施工进度快,但是受到桩机设备能力以及地层情况的影响。异型截面桩是通过加大桩端与土层之间接触面

积以提高桩的极限承载力的一种形式,它的截面周长会随着内凹边的数量以及角度的不同而有所增大,可以达到等截面方形桩的 1.01~1.78 倍左右,极限承载力能够达到等截面方形桩的 1.05~1.92 倍左右。该种新型桩型给桩基的设计提出了新的方案。在对桩长及桩径的选择上除了考虑承载能力的要求外也应当考虑到沉降量和成本的问题。加大桩径可以大幅度地加大桩的端部强度,但是增加了大量混凝土;延长桩长会使得桩侧摩擦力得到更大的利用,但是桩长过长会带来更大的弯矩以及施工的困难。选择适当设计方案时应结合地质剖面,将桩端放置在承载力较高的持力层上并合理地发挥浅层土层的侧摩阻力效果。桩基础布置优化主要指桩的数量以及间距还有布置方式的选择。群桩效应会导致每根桩的受力效果减弱,桩距过小则会引起桩-土-桩之间的交互影响。对群桩布置来讲应该做到桩距至少为桩径的三倍,摩擦桩则可以适当增加桩距使侧向摩阻力更好发挥作用。

3.2 复合地基与地基加固技术应用

对于天然基础承载力不足或者变形过大的问题,可以通过复合地基或者进行地基处理提升基础承载力。低强桩复合地基通过改变桩长、改变桩距等思想可以使沉降逐步过渡而减少桥梁跳车的程度,同时也减少了沉降及深部土体水平位移量从而降低桥头和桩基的水平作用力。复合地基优化设计是指桩身材料选用,桩距大小调整以及桩土应力比控制。桩身强度应与桩间土保持一致,桩距过小会增加成本;过大则不能起到很好的加固作用。适当的褥垫层厚度(100~300mm)可以调节桩土荷载分配情况使桩间土更好地发挥其承载能力。基础加固技术有排水固结法、深层搅拌法、高压喷射注浆法等,需结合地基土质特点、加固深度、施工环境等因素进行比较确定,针对厚层软弱土、集中荷载作用下地基宜采用桩-网或者桩-板组合地基,通过设置刚性承台或铺设土工格栅来使荷载得到良好地分散。

4 承载力数值模拟与协同优化分析

4.1 桥墩-基础-地基协同承载力参数敏感性分析

数值模拟也是研究桥梁墩-基础-地基整体共同承载能力的方法之一,基于大型通用 FEA 软件开展 3D-FEM 分析,可以解析荷载传递特性,着重探究重要构件间的传递规律,在构建精细网格的三维有限元模型,可通过模拟材料非线性、接触面非线性和几何非线性来展示共同承载过程。参数敏感性分析找出影响承载的重要参数,主要分析的参数有:桥梁墩的轴压力与长细比以及配筋率;桥墩基础的埋置深度、尺寸大小和形式种类;地基土的弹性模

量、内摩擦角、黏聚力等等。经分析得出结论：地基土的塑性形变对桥梁墩-基础系统整体共同承载性能起着重要作用。参数灵敏度研究可以指引优化设计的方向，在有限的优化资源前提下对重要的参数进行优化。

4.2 不同荷载组合与水文工况下承载性能模拟

桥梁墩台及基础结构在运行过程中会受到多种荷载共同作用，包括恒载、活载、风载、温差载、地震以及水流冲刷等。不同荷载组合条件下桥梁墩台与基础结构的承重能力仿真计算是对优化设计是否合理正确的检验过程。水环境条件直接影响桥梁基础的承重能力。由于水流冲刷会使基础埋深变浅、土体侧向约束减弱，在极端情况下会造成基础悬空、承重能力急剧衰减。承重能力仿真过程中需要建立不同的冲刷程度工况来研究冲刷给桥梁基础带来的影响。通过分析得出，在基础脱离与地基发生塑性形变的过程中会出现明显的非线性效应，考虑到基础脱离与地基塑性后，桥墩-地基组成的整体刚性逐渐弱化。模拟计算结果与理论值比较是检验优化策略有效性的手段之一。比较可见，传统的理论计算方法对桥梁墩基础以及地基之间的协同工作所起的效果存在低估的问题，而忽略了由于地基的塑性变形而产生的内力再分配现象。由数值模拟得出的优化策略来检验其可行性和合理性，可以更为精确地判断出优化的效果如何，给实际工程设计施工提供参考。

5 结语

本文研究表明有如下几个主要结论：首先，桥梁墩台基础和地基作为一体化受力单元，其相互影响的程度决定着整体结构的承载能力，在工程计算时忽略地基塑性和基

础拔出的传统方法会造成过大的墩内力和过小的结构位移，因此设计时要重视这种非线性的影响。其次，对于墩身承载力设计可以从截面形式、高性能材料以及抗震角度进行。对于高度较高的桥墩来说空心墩和钢管砼组合墩具有很大的优越性，超高性能混凝土需要兼顾强度和延展性的问题，配筋设计时要重视箍筋对核心混凝土的约束效果。最后，对基础承载力的设计应当因材施教。对于桩基础来说应该合理选择侧摩阻力和端阻力的比例问题，在桩基承台结构上异形桩的设计也是一个很好的思路。复合地基采用不同桩长以及不同桩距的设计使得其沉降可以平顺连接，第四，数值计算是对承载能力进行优化分析的好方法，通过参数敏感性分析与多种工况下的求解比较可以使其更具有合理性。桥梁设计中桥墩和基础承载能力的优化涉及材料学、结构学、工程地质、施工等多个学科领域，本文的研究成果可供类似桥梁工程参考应用，但还需根据具体情况作出具体分析，达到安全及经济的最佳组合。

[参考文献]

- [1]李章鹏,董超,李明硕,等.复合筋增强 UHPC 预制节段拼装桥墩抗震性能研究[J].邵阳学院学报(自然科学版),2025,22(4):44-53.
- [2]钟川剑,王戈,蒋建军,等.金阳河特大桥超高桥墩设计关键技术[J].世界桥梁,2024,52(5):15-23.
- [3]蒋德,陈臻林.基于方形截面的异形桩设计与竖向承载性能[J].科学技术与工程,2025,25(31):13567-13576.

作者简介：孙旦旦（1993—），女，汉族，吉林长春人，中级工程师，毕业于吉林大学土木工程（路桥）专业，本科，现主要从事桥梁设计。