

钢管混凝土扇形主塔部分斜拉桥的受力性能与设计优化分析

袁辉辉^{1,2}, 陈如凌¹, 吴庆雄^{1,2}, 杨恒³

- (1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116;
2. 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福建 福州 350116;
3. 中国铁建第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 以福建平潭安海澳大桥主桥为背景, 通过有限元数值模拟方法进行全桥受力性能分析, 探讨了主梁、主梁间横梁、主塔以及斜拉索等主要受力构件的受力特性, 并在原设计方案的基础上提出构造优化措施。结果表明: 车辆荷载作用下部分斜拉桥的主梁受力相比常规连续梁降低约 10%; 通过设置横梁连接可改善原设计方案采用的分离式双幅主梁的整体受力性能, 并建议了主梁间横梁的布置形式和合理尺寸; 为减小施工阶段的钢管初应力并降低主塔重心, 建议主塔钢管内混凝土填充至拱门直线段以上跨径的 $L/8$ 处; 索力变化不影响全桥固有模态, 全桥一阶固有频率为 0.81 Hz, 且设计索力下激起拉索局部振动的频率与全桥固有频率的比值均在 0.90 ~ 1.10 之间, 因此建议采取适当的振动控制措施以减小拉索与全桥可能存在的共振问题。

关键词: 钢管混凝土; 扇形组合塔; 受力性能; 优化分析

中图分类号: TU442.54

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)04—0067—07

Mechanical Performance and Optimal Design Analysis of Partially Cable-stayed Bridge with CFST Fan-shaped Composite Tower

YUAN Huihui^{1,2}, CHEN Ruling¹, WU Qingxiong^{1,2}, YANG Heng³

- (1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou, Fujian 350116, China;
3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: The Anhai'ao Bridge in Pingtan, Fujian Province was taken as the optimization object and the mechanical performance of the full bridge was analyzed by using FEA method. The stress characteristics of the main girders, the crossbeams between the main girders, the main tower and the stay cables were discussed, and the structural optimization measures were proposed based on the original design scheme. The results are as follows. The internal force of the main girder of the partially cable-stayed bridge under vehicle load was about 10% lower than that of the conventional continuous girder bridge. The overall mechanical performance of the separated double girder used in the original design plan can be improved by setting the crossbeam connection, and the layout and reasonable size of the crossbeams between the main girders were also recommended. In order to reduce the initial stress of the steel tube during the construction phase and lower the center of gravity of the main tower, the optimal filling position of the core concrete was recommended to be $L/8$ of the span above the straight section of the arch. The cable force change did not affect the natural mode of the full bridge and the first-order natural frequency is 0.81Hz. Under the design cable force, the ratio of the vibration frequency of the cables to the natural frequency of the full bridge was between 0.90 and 1.10. There-

fore, it is recommended to take appropriate vibration control measures to reduce possible resonance problems between the cable and the full bridge.

Keywords: concrete-filled steel tube; fan-shaped composite tower; mechanical performance; optimization analysis

部分斜拉桥具有桥塔较矮、主梁刚度大、拉索集中及外形美观等特点,是一种结合了梁式桥和斜拉桥各自桥型特点的新型桥型^[1-3]。随着工程建造技术的不断发展和桥梁美学要求的不断提高,为了更好地与桥址环境相协调,外形构造与常规部分斜拉桥具有较大差异的异型部分斜拉桥应运而生^[4],此类桥梁往往采用非常规塔身、斜拉索采用不对称的布置方式等^[5-6]。异型斜拉桥对于跨径的要求越来越高,为减少自重影响,结构形式往往设计更为轻巧,采用钢管混凝土结构作为塔身的拱塔形式近几年也被用于斜拉桥建设中,如辽宁沈阳三好桥^[7]、江苏宜兴荆邑大桥^[8]、贵州荔波官塘大桥^[9]、福建三明台江大桥^[10]等。异型斜拉桥的独特造型带来了结构的复杂性,相比常规部分斜拉桥,此类桥梁并未被广泛修建。另外,由于异型斜拉桥外形差别显著,使得各桥梁的结构受力存在较大差异,相互之间无法有效参照^[11-12]。

目前国内外学者针对部分斜拉桥主要结构参数对于整体受力性能的影响展开了大量研究,郑一峰等^[13]、陈从春等^[14]以漳州战备大桥作为研究背景,建立有限元模型,分析主梁高度、索塔高度、索塔抗弯刚度等主要结构参数对大桥整体受力性能的影响规律,提出了部分斜拉桥的索梁恒、活载分配比名义刚度和塔梁刚度比等概念;孙向东^[15]通过分析多塔部分斜拉桥各设计参数的敏感性,提出边中跨比合理取值范围;刘昊苏^[16]以龙井河特大桥为依托工程,研究了边中跨比值、无索取长度、塔高等关键参数敏感性,并对部分斜拉桥的设计参数的合理范围进行了总结;程利鹏^[17]推导了低塔混合梁斜拉桥主梁轴力与塔高、边中跨长度和主梁荷载集度的关系;刘来君^[18]以东宝河特大桥为工程背景,以主梁挠度为目标,进行结构重度、弹性模型等参数敏感性分析。

平潭安海澳大桥是平潭综合实验区环岛公路(金井湾大桥及接线工程)的重要节点工程。该桥的结构形式与以往的部分斜拉桥不同的是,其主塔结构采用五塔柱钢管混凝土拱形塔柱,塔柱之间用弧形钢管横撑连接,组成了一个形似贝壳的扇形主塔。目前国内的异形桥塔有单拱形和双拱形^[19-22],

且材料多采用混凝土或钢结构,但由五根钢管混凝土拱形塔柱组合而成的异型桥塔尚属国内外首次。平潭安海澳大桥的整体造型比较特殊,并且该桥采用了比较少见的双幅桥设计,拉索锚固在两幅主梁的各一端,索力会产生偏心荷载,受力状态比较复杂。因此,本文以位于福建平潭综合实验区的安海澳大桥为工程背景,分析此类新型钢管混凝土扇形组合塔部分斜拉桥的设计理念和结构构造,通过有限元分析方法对结构进行优化设计分析,为原有设计方案提供受力更合理、更完善的构造优化措施,相关研究结果和优化思路可为以后此类异型桥塔部分斜拉桥的设计提供参考,对于推进此类桥型在我国乃至福建沿海地区的工程应用具有重要现实意义。

1 钢管混凝土扇形主塔部分斜拉桥的结构形式

1.1 结构构造特点

平潭安海澳大桥主桥为(80 m + 150 m + 80 m)三跨异型主塔部分斜拉桥,采用塔、墩、梁分离的漂浮结构体系。主梁左右幅分幅布置,双向 8 车道;横坡为双向 2.5%。总体布置如图 1 所示。

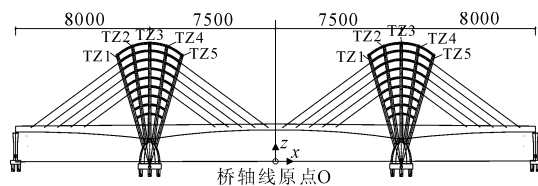


图 1 平潭安海澳大桥主桥立面(单位:cm)

上部主梁结构为预应力混凝土现浇箱梁,采用左右分幅布置,如图 2 所示。以主跨跨中为起点,梁高按二次抛物线 $y = 5 \times (x/71.5)^2 + 3.5$ 变化,跨中及边跨直线段梁高为 3.5 m,主墩墩顶梁高为 8.5 m;单幅箱梁顶面宽度为 23.6 m,主墩墩顶梁段底板宽 10.433 m,边跨及跨中梁段底板宽 13.767 m;箱梁悬臂长度为 4.0 m,顶板厚度为 0.28 m,底板厚度按照二次抛物线从 1.0 m ~ 0.3 m 变化;腹板厚度按照不同位置设置为 0.85 m、0.75 m 和 0.55 m。如图 3 所示,主塔采用钢管混凝土扇形组合塔复合结构,每个桥塔包含 5 片塔柱,塔柱之间采用 17 根 $\phi 1100 \times 28$ mm 的圆钢管横撑连接成整体。桥面以

上高度的塔柱采用规格 $\varphi 1500 \times 28$ mm 圆钢管,桥面以下采用 $\varphi 1900 \times 40$ mm 变截面钢管,塔柱钢管内部灌注 C40 微膨胀混凝土。主墩基础与主塔基础分离,均采用钻孔灌注桩。斜拉索采用 PES7-139 平行钢丝斜拉索。

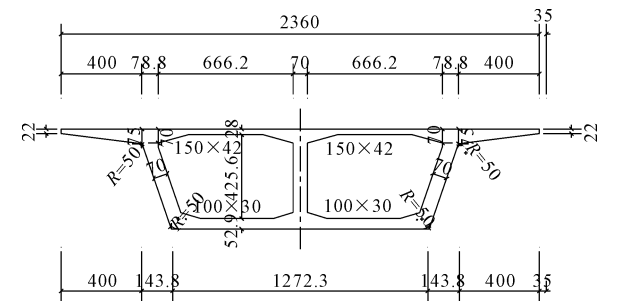
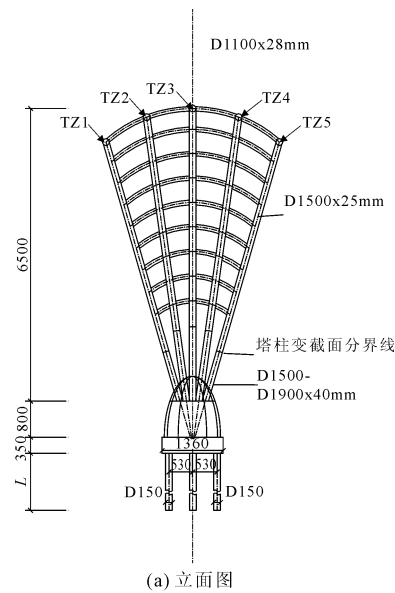
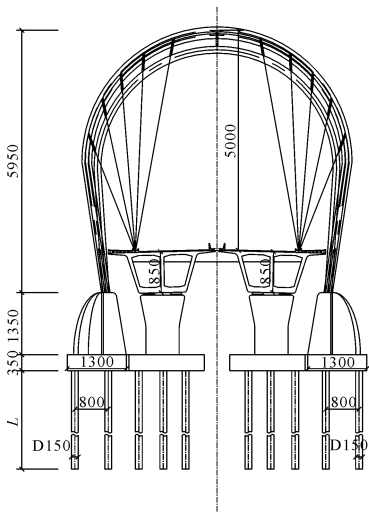


图 2 平潭安海澳大桥主梁断面布置(单位:cm)



(a) 立面图



(b) 侧视图

图 3 平潭安海澳大桥主塔结构布置(单位:cm)

平潭安海澳大桥所采用的钢管混凝土扇形主塔部分斜拉桥结构上极具创新,斜拉索通过主塔上多层弧形空钢管锚固在两侧主梁上,形成了一个平衡的传力体系。这种受力平衡可以使扇形主塔在恒载作用下不受纵桥向弯矩作用,亦会使恒载作用下塔顶水平控制位移为零。针对组成主塔的 5 根钢管混凝土塔柱,在恒载作用下其主要承受轴向压力作用,可以视为轴压构件。同时,该桥通过在桥塔下部一定区域灌注混凝土,可以提高拱肋薄壁钢管的刚度,拱肋根部塑性铰区域的钢管局部屈曲变形可以得到有效抑制,使得桥塔在轴力和弯矩共同作用下充分发挥其优越的工作性能,一方面相对于钢管混凝土桥塔可以减小结构自重,减小地震作用下的惯性力,主塔承台和桩基的尺寸不用设计得过于保守;另一方面,灌注一定高度的混凝土,可降低主塔结构重心,有利于结构的稳定性。

由于安海澳大桥独特的结构形式,在横风荷载和活载作用下主塔塔柱在横桥向和纵桥向上可能受到较大的弯矩作用,在设计中必须系统分析结构的稳定性,保证施工和运营过程的结构安全。另一方面,混凝土填充高度对主塔结构受力性能、施工性能均具有重大影响。如果混凝土填充高度不足,塔柱塑性铰将会上移至混凝土填充面上部区域,塔柱性能无法得到充分保障;如果混凝土填充高度大而不当,则会浪费材料,增加结构自重,导致主塔承台和桩基保守设计。因此,本文将通过有限元参数分析得到钢管塔柱的合理混凝土填充高度。

1.2 全桥空间杆系有限元模型

为了能够更准确的模拟平潭安海澳大桥的力学行为,需要在有限元中采用合适的建模方法。采用桥梁专业有限元软件 MIDAS/Civil 建立全桥空间杆系有限元模型,主梁、横梁、桥塔均采用梁单元模拟。由于安海澳大桥主桥钢管混凝土塔柱的施工方法是先架设空钢管,待空钢管合拢后再采用对称顶推的方式向管内灌注混凝土,施工中钢管和混凝土有不同受力状态,因此在有限元模型中采用共节点双单元法进行钢管混凝土塔柱模拟,能够比较准确地反映钢管和混凝土两种空间梁单元不同的应力状态,不考虑钢管与混凝土之间的粘结滑移。同时,为了考虑主塔钢管自重和管内混凝土浇筑带来的钢管初应力效应,在进行施工阶段划分时,需将湿重钝化和混凝土强度形成划分为两个步骤。对于线型为直线和曲线共同组成的塔柱,划分了较多的单元,比较准确地模拟了塔柱的线型;斜拉索采用只受拉的索单

元模拟,拉索最大长度为 65.38 m,采用等效弹性模量考虑索的垂度引起的非线性影响。

在 5 根塔柱与塔座交接处添加刚性连接,共同约束于 5 根塔柱理论交接点处;斜拉索与主塔之间的相互作用采用弹性连接模拟,并释放切向约束,模拟拉索与主塔的边界条件;桥墩与主梁之间的支座采用一般弹性连接模拟,主塔底部固结。全桥模型共 1 224 个节点,1 888 个单元,如图 4 所示。

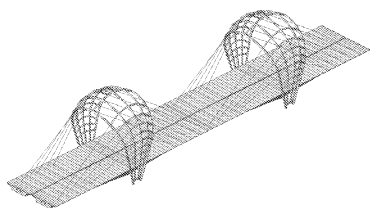


图 4 平潭安海澳大桥主桥有限元模型

2 主要受力构件的设计优化分析

2.1 主梁

2.1.1 部分斜拉桥体系下的主梁受力性能

普通梁桥、部分斜拉桥和斜拉桥之间结构构造上的区别之一就是梁高的不同,普通梁桥主梁是主要受力构件,承受桥面上全部的荷载,因此梁高最高且沿主梁纵向内力变化而变化;对于斜拉桥,拉索承受大部分荷载,主梁只承担少部分荷载,因此梁高较低且纵向不变化;部分斜拉桥中,主梁承受主要荷载,拉索承担部分荷载,因此梁高较普通斜拉桥高,更接近于普通梁桥,但较普通梁桥梁高更低^[2]。图 5 对比了车辆荷载作用下平潭安海澳大桥主桥和相同尺寸连续梁桥的主梁弯矩和挠度。计算挠度时,按现行公路桥梁规范^[23]的有关规定,混凝土取挠度长期增长系数 1.40。可以看出,车辆荷载作用下,部分斜拉桥主梁内力和挠度相比同跨度的连续梁桥明显降低,降低幅度至少 10%,从而说明平潭安海澳大桥主桥部分斜拉桥的主塔通过斜拉索承担了主梁约 10% 的车辆荷载效应。

安海澳大桥主桥原设计方案中主梁跨中截面高 3.5 m,根部截面高 8.5 m,跨中截面高跨比为 1/43,根部截面高跨比为 1/18,无论是跨中处高跨比,还是根部处高跨比,都在连续梁桥范围内。主梁梁高是结构构造的一个重要参数,在结构设计验算通过的情况下,降低主梁梁高可以降低材料成本、增大梁下通航空间、减小结构的自重。因此,以安海澳大桥主梁跨中截面为基准,主梁顶底板的截面形式与优化前设计保持一致,通过减小腹板高度将梁高从 3.5

m ~ 8.5 m 变为 3.15 m ~ 8.15 m。优化后的主梁结构验算表明,在施工阶段、正常使用极限状态和承载能力极限状态和作用下主梁强度和刚度均能满足规范要求。通过对主梁梁高进行优化,降低了约 10% 的主梁高度,可减轻自重约 1 300 t、节约混凝土约 500 m³,主梁受力性能得到改善,产生较好的经济效益。

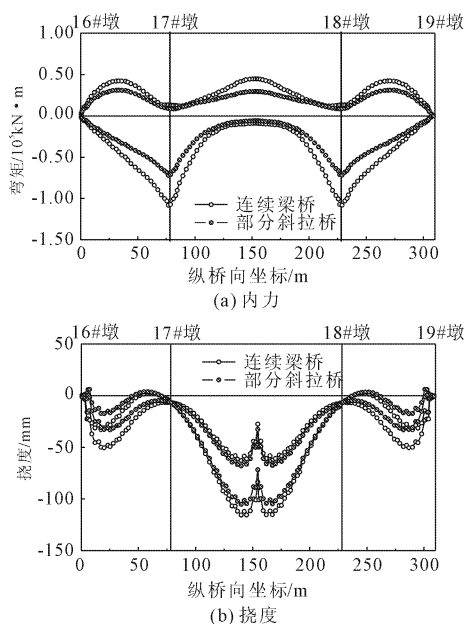


图 5 车辆荷载作用下主梁内力与挠度

2.1.2 分幅主梁间设置横梁的主梁受力性能

在平潭安海澳大桥的初步设计方案中,主桥通过斜拉索和主塔将左右分幅连续梁联系成整体以共同受力。图 6 为双幅部分斜拉桥的受力传递简图,斜拉索在主梁上的锚固点分别位于两幅主梁外侧。在恒载、公路 - I 级汽车荷载和横风荷载等作用下,主梁承受单侧拉索的偏心荷载作用。如图 6(a) 所示,当两幅主梁之间不设置横梁时,偏心荷载由单幅主梁独自承担,增加了桥梁在运营期间倾覆的风险。而如图 6(b) 所示设置横梁后,两幅主梁之间的联系明显增强,偏心荷载由两幅主梁共同承担。

为了考察横梁的作用,分别计算有无设置横梁时主梁的受力性能,计算结果如表 1 所示。与主梁间不设置横梁相比,在汽车荷载和横风荷载共同作用下,设置横梁后主梁面内最大正弯矩减小了 14.83%,最大负弯矩减小了 24.2%,最大剪力减小了 6.18%,扭矩减小了 10.11%,同时结构抗倾覆稳定系数由 11.5 提高至 112.3,说明在分幅主梁间设置横梁可显著提高桥梁的横向稳定性和抗倾覆能力,强化荷载的横向分配,改善主梁的整体受力状态。

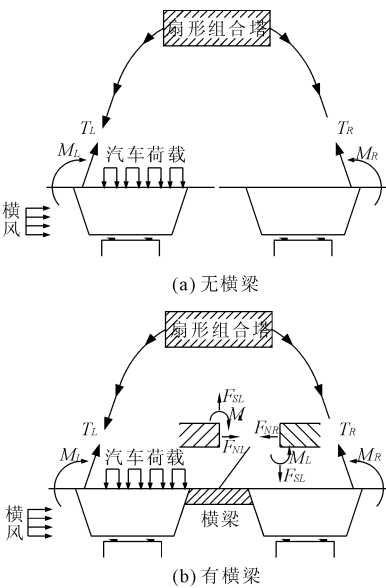


图 6 横梁设置对安海澳大桥受力影响示意图

表 1 横梁设置对安海澳大桥主梁受力的影响

类型	①不设置横梁	②设置横梁	变化量/% [(②-①)/①]
正弯矩/(kN·m)	40170	29641	-14.83
负弯矩/(kN·m)	-100261	-74269	-24.20
扭矩/(kN·m)	14066	12644	-10.11
剪力/kN	3922	3497	-6.18
抗倾覆系数	11.48	112.3	878.20

2.2 横梁

在 2.1 节分析的基础上进一步选择合适的横梁尺寸和横梁布置形式以确定受力合理的横梁布置方案。分别考察不同横梁高度(跨中主梁高度 $H=3.5$ m 的 17%、40%、65%、80% 和 100%)、横梁宽度(两个拉索锚固点距离一半 $L=4.0$ m 的 30%、42%、56%、68% 和 82%)以及横梁布置形式(全桥布置 8 道、12 道、16 道和 20 道)对横梁受力性能的影响,如图 7 所示。

进行横梁高度优化分析时,横梁宽度为 42% L 、布置 20 道索间横梁。由图 7(a)可知,横梁应力随横梁高度增大而减小,且当横梁高度为 60% H 时,横梁最大拉应力等于容许拉应力。因此,双幅部分斜拉桥的横梁高度应不小于 60% H 。

基于横梁高度优化分析的结果,进行横梁宽度优化分析时,横梁高度取 60% H 、布置 20 道索间横梁。由图 7(b)可知,横梁应力随横梁高度增大而减小,且当横梁宽度为 50% L 时,横梁最大拉应力等于容许拉应力。因此,双幅部分斜拉桥的横梁宽度应不小于 50% L 。

基于横梁高度和宽度优化分析的结果,进行横梁布置形式优化分析时,横梁高度取 60% H 、宽度取 50% L 。由图 7(c)可知,正常使用极限状态作用频遇值组合下,受力最不利横梁均出现在边跨靠近主塔处横梁;布置 20 道横梁时,横梁最大拉应力小于容许拉应力。因此,建议全桥横梁布置 20 道,横梁布置形式如图 8 所示。

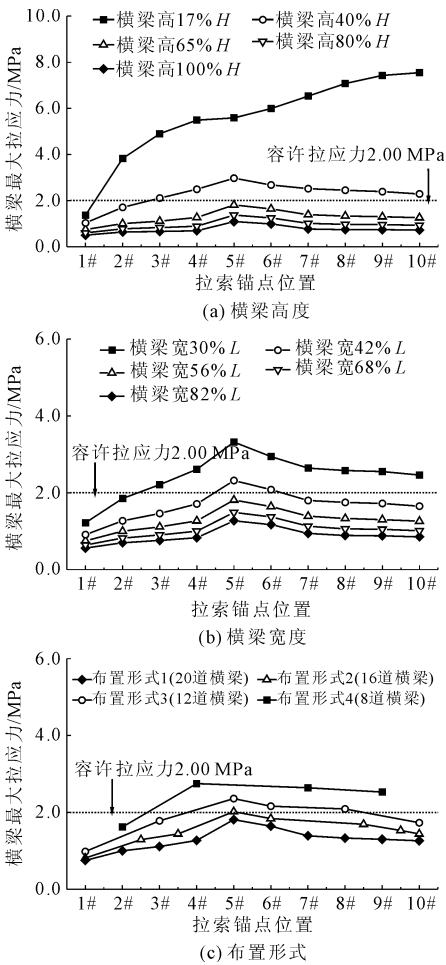


图 7 横梁受力性能的参数化分析

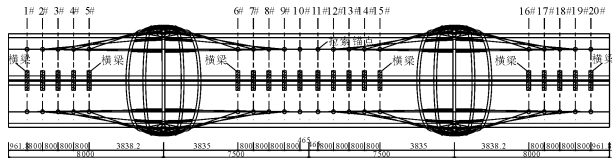


图 8 主梁间横梁合理布置形式

2.3 主塔

架设钢管混凝土扇形主塔时,由于钢管自重和管内核心混凝土浇筑时湿重会导致钢管产生较大的初应力,进而对主塔塔柱的承载能力产生不利影响。因此,有必要对不同填充高度下主塔受力进行对比分析,以选择合适的管内混凝土填充高度。由于斜

线段混凝土自重作用下对塔柱钢管初应力影响较小,同时管内混凝土的填充可降低主塔的重心,增强结构的稳定性,因此斜线段选择全填充,并以斜线段和弧线段交界位置的跨径为基准,分析当对称填充位置为与塔柱基准位置跨径 L 比例为 0 、 $1/8$ 、 $1/4$ 、 $1/3$ 、 $3/8$ 和 $1/2$ 时主塔的受力情况,如图 9 所示。

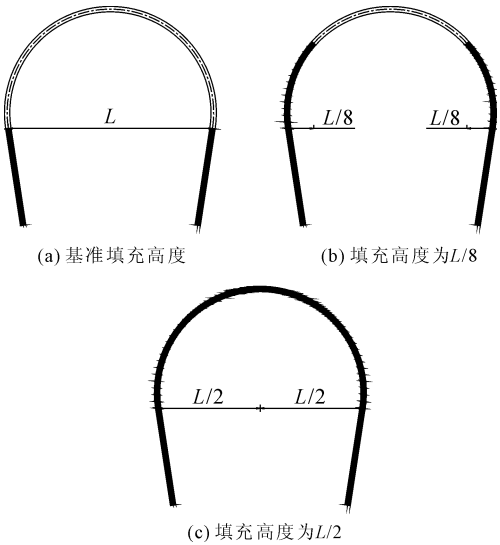


图 9 不同混凝土填充高度的塔柱示意图

不同填充高度下,单根塔柱初应力及混凝土强度形成后的整体钢管和交界点处钢管应力变化趋势如图 10 所示。可以看出,对于不同管内混凝土填充位置,钢管的受力规律基本一致。随着填充高度增加,钢管受力增大,钢管应力在斜线段和弧线段交界点处最大;交界点往上至弧线段高度的约 $2/3$ 处,钢管应力逐渐减小;接着直至塔顶,钢管应力又逐渐增大。对于受力最不利的斜线段和弧线段交界点处截面,当填充位置从 $0L$ 变化到 $L/8$ 时,钢管应力变化趋势较小;当填充位置从 $L/8$ 变化到 $L/2$ 时,钢管应力显著增加,呈线性递增变化。因此,平潭安海澳大桥主塔塔柱管内混凝土的合理填充位置应选择至 $L/8$ 处,也即是交界点往上至弧线段高度约 $2/3$ 处。

2.4 斜拉索

部分斜拉桥的斜拉索,可以看作是连续梁的体外索,索塔作为体外索的转向点,能够有效的增大预应力偏心距。对于一般斜拉桥来说,斜拉索采用钢绞线拉索或者平行高强钢丝拉索,在塔上和梁上分设置锚固端和张拉端,而部分斜拉桥一般是在塔上采用鞍座式结构。正是由于特殊的结构形式,导致部分斜拉桥受力有别于一般的斜拉桥,索力设置与一般的斜拉桥有所不同^[24]。因此,对于拉索的优化设计,本节主要探讨不同索力情况下,全桥的固有频

率和拉索的局部振动,分析拉索和全桥的共振问题,得到拉索索力的优化建议。

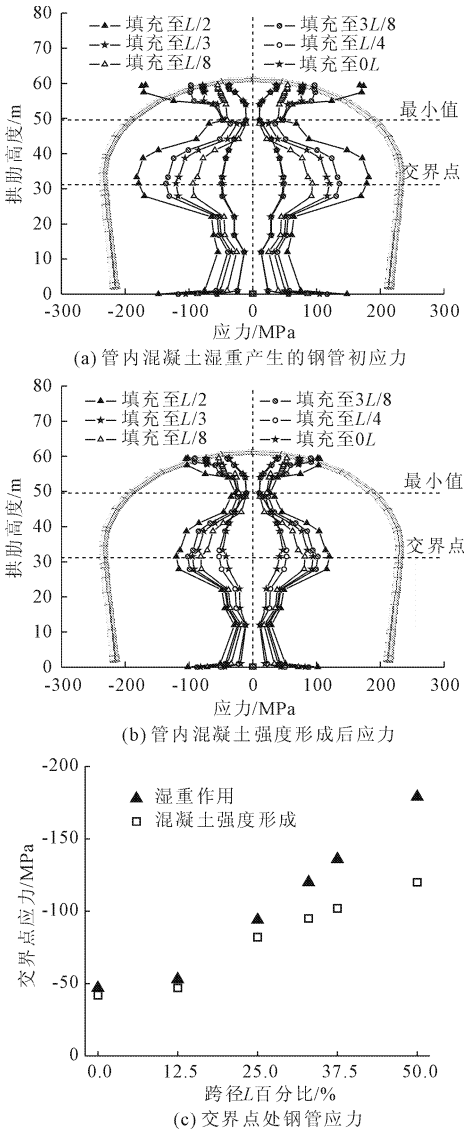


图 10 不同填充高度塔柱钢管应力变化趋势图

一般斜拉桥的索力可以取拉索容许应力值的 40% ,但是由于部分斜拉桥的拉索的疲劳应力幅比一般斜拉桥小,部分斜拉桥的索力可以提高到拉索容许应力的 $45\% \sim 50\%$ 之间。因此,本次分析分别取拉索索力为拉索容许拉应力限值的 0% 、 30% 、 50% 、 70% 和 90% ,结构安全系数取 3.0 。

通过静力分析可知,随着索力的增大,主塔塔柱的轴力、弯矩、应力均相应增加;当索力分别从 0% 变化到 30% 、 50% 变化到 70% 和 70% 变化到 90% 时,主塔塔柱钢管的最大拉应力分别增大 15 MPa 、 18 MPa 和 18 MPa ;当索力从 30% 变化到 50% ,仅变化 4 MPa ,变化幅度较小。因此,建议拉索索力取拉索容许拉应力限值的 $30\% \sim 50\%$ 。

通过基本动力特性分析可知,不同索力情况下,全桥固有模态和自振频率基本相同,说明索力变化不影响全桥固有模态,全桥一阶固有模态为 0.81 Hz;在设计索力下,激起拉索 S3、S5 在副不稳定区域振动的频率和激起拉索 S1 在主不稳定区域振动的频率,与全桥固有频率的比值均在 0.90 ~ 1.10 之间,如图 11 所示,说明拉索 S1、S3、S5 与全桥可能发生共振。同理,当索力为 30% 时,拉索与全桥产生共振的为拉索 S1、S3 和 S5;当索力为 50% 时,拉索与全桥产生共振的为拉索 S1 和 S3;当索力为 70% 时,拉索与全桥产生共振的为拉索 S3;当索力为 90% 时,拉索与全桥产生共振的为拉索 S1 和 S2,均会产生共振问题。因此,建议通过加设阻尼器来控制斜拉索局部振动,避免拉索与全桥发生共振现象。

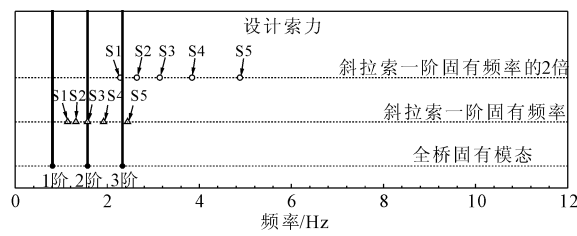


图 11 设计索力下斜拉索局部振动和全桥固有频率对比图

3 结 论

平潭安海澳大桥主桥在国内外首次采用了由五根钢管混凝土拱形塔柱组合而成的异型桥塔,造型美观但受力复杂。为确保大桥安全、顺利的建设,本文以在建的平潭安海澳大桥主桥为工程背景,分析钢管混凝土扇形主塔部分斜拉桥的设计理念和结构构造,并通过有限元分析方法对此类新型桥梁结构体系进行优化设计分析,得到主要结论如下:

(1) 钢管混凝土扇形主塔部分斜拉桥的主塔通过斜拉索承担了主梁约 10% 的车辆荷载效应,据此以跨中截面为基准,对主梁高度进行优化,将梁高从 3.5m ~ 8.5m 降低到 3.15m ~ 8.15m,优化后的主梁结构验算均能满足规范要求,主梁梁高降低后可以降低材料成本、增大梁下通航空间、减小结构的自重。

(2) 在车辆荷载作用下,双幅主梁间设置横梁可显著提高钢管混凝土扇形主塔部分斜拉桥的横向稳定性和抗倾覆能力,强化荷载的横向分配,改善主梁的整体受力状态。经参数分析,建议主梁间的横梁布置 20 道,且横梁高度应不小于跨中主梁高度的

60%、横梁宽度应不小于拉索锚固点距离 25%。

(3) 考虑钢管自重和管内核心混凝土湿重引起的钢管初应力对主塔塔柱承载能力的不利影响,发现不同管内混凝土填充高度作用下,钢管的受力规律基本一致,而塔柱最优的混凝土填充位置建议选择至 $L/8$ 处,也即是交界点往上至弧线段高度约 $2/3$ 处。

(4) 多肢钢管混凝土扇形组合塔部分斜拉桥的斜拉索设置时,建议拉索索力取拉索容许拉应力限值的 30% ~ 50%,并通过加设阻尼器来控制斜拉索局部振动,避免拉索与全桥发生共振现象。

参考文献:

- [1] Gábor Pál. Feasibility study for new danube bridge in Paks, Hungary [J]. Procedia Engineering, 2016, 156: 320-325.
- [2] 耿 波,王福敏,魏思斯. 重庆东水门长江大桥设计关键技术[J]. 桥梁建设,2017,47(4):90-95.
- [3] Khawaja Ali, Hiroshi Katsuchi, Hitoshi Yamada. Comparative study on structural redundancy of cable-stayed and extradosed bridges through safety assessment of their stay cables [J]. Engineering, 2021, 7(1):111-123.
- [4] 刘世明,李晓克,赵顺波. 独塔部分斜拉桥结构设计研究[J]. 河南大学学报(自然科学版),2016,46(6):724-731.
- [5] Kasuga A. Extradosed Bridges in Japan [J]. Structural Concrete, 2006, 7(3):91-103.
- [6] 周勇军,田瑞欣,吴领领. 异形人行景观斜拉桥力学分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(12):4909-4915.
- [7] 王 昕. 沈阳三好斜拉桥主桥钢拱塔竖转施工技术 [J]. 公路,2009(2):6-13.
- [8] 杨 明,黄 侨,陈晓强,等. 双套拱斜拉桥拱塔竖转提升测控技术[J]. 桥梁建设,2010(4):32-36.
- [9] 苟祖宽. 荔波官塘大桥双斜拱塔无支架原位拼装方案研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2014,31(3):116-120.
- [10] 栗怀广,郑凯锋,文曙东,等. 横向拱塔斜拉桥的拱轴线逐段设计算法研究 [J]. 工程力学,2009,26(2):131-136.
- [11] 惠兴智. 斜拉桥预应力混凝土索塔锚固结构受力性能分析[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(2):219-223.
- [12] 黄超凡,黄永辉,张石波. 粘结滑移对组合梁斜拉桥受力变形特性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(4):18-22.
- [13] 郑一峰,黄 侨,张连振. 部分斜拉桥结构参数分析 [J]. 公路交通科技,2006(6):60-65,84.

- quake SV – waves[J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105192.
- [3] 李 泽, 张小艳, 王均星. 基于刚性块体系统的岩质边坡稳定性下限法研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1534-1540.
- [4] 张坤勇, 杜 伟, 王乾坤. 基于修正关口 – 太田模型的归一化变形量开挖边坡失稳判据[J]. 土木工程学报, 2019, 52(11): 86-96.
- [5] 龙赛琼, 陈焕美, 蒋文鹏, 等. 考虑边坡不同演化阶段的岩土体抗剪强度参数反分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1): 16-21.
- [6] 王如宾, 徐卫亚, 孟永东, 等. 锦屏一级水电站左岸坝肩高边坡长期稳定性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3105-3113.
- [7] 张信贵, 许胜才, 易念平. 基于流固耦合理论的饱和 – 非饱和土开挖边坡稳定性分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 10-19.
- [8] 李 宁, 郭双枫, 姚显春. 再论岩质高边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 397-406.
- [9] 水利水电工程边坡设计规范: SL 386—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [10] Xu Q, Liu H X, Ran J X, et al. Field monitoring of groundwater responses to heavy rainfalls and the early warning of the Kualiangzi landslide in Sichuan Basin, southwestern China[J]. Landslides, 2016, 13: 1555-1570.
- [11] 张卢明, 周 勇, 岳建国, 等. 川北地区龙马溪组页岩深层滑坡抗震稳定性及整治工程效果评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4): 59-64.
- [12] 水工建筑物抗震设计规范: SL 203—97[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [13] 汪华斌, 李建梅, 金怡轩, 等. 降雨诱发边坡破坏数值模拟两个关键问题的解决方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 777-784.
- [14] 马 冲, 邢天海, 郑有雷, 等. 近断层地震动对边坡稳定性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 49-53.
- [15] 鲁志强, 陈 伟, 徐伟然, 等. 裂隙水作用下水利岩质边坡抗倾覆动力稳定性研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(5): 165-169.
- [16] 罗青海. 比较两种折减法在岩质边坡稳定性分析中的差异[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 213-216.
- [17] 平瞳其, 罗先启, 郑安兴. 地震作用下裂隙对岩质边坡稳定性影响分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 600-606.

(上接第 73 页)

- [14] 陈从春, 周海智, 肖汝诚. 矮塔斜拉桥研究的新进展[J]. 世界桥梁, 2006(1): 70-73, 80.
- [15] 孙向东. 四塔矮塔斜拉桥宽幅脊梁空间设计方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 340-343.
- [16] 刘昊苏, 雷俊卿. 矮塔斜拉桥上部结构构件刚度敏感性研究[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(4): 122-127.
- [17] 程利鹏, 孙 斌, 肖汝诚. 低塔混合梁斜拉桥边中跨布置研究[C]//第二十一届全国桥梁学术会议论文集(上册), 2014.
- [18] 刘来君, 倪富陶, 张筱雨, 等. 预应力混凝土矮塔斜拉桥参数敏感性分析[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 142-144.
- [19] 邬晓光, 殷任宏, 李 渊. V 形双拱独塔斜拉桥结构特性[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2018, 30(1): 43-47.
- [20] 董宇航, 张谢东, 郭子会, 等. 蝴蝶兰异形拱塔斜拉桥受力研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(3): 520-524.
- [21] 张 悦. 异形桥塔独塔斜拉桥设计与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [22] 刘梦伟. 双拱塔斜拉桥结构分析与参数优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [23] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [24] Kou C H, Wu T T, Lin P Y. Optimization of Cable Force of Extradosed Bridges[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 587-589: 1577-1580.