

文章编号: 0451-0712(2005)02-0027-05

中图分类号: U443.38

文献标识码: A

部分斜拉桥斜拉索设计方法研究

郑一峰^{1,2}, 黄 侨¹, 张宏伟²

(1. 哈尔滨工业大学交通学院 哈尔滨市 150090; 2. 吉林省公路勘测设计院 长春市 130021)

摘 要: 部分斜拉桥结构体系具有斜拉桥和连续梁桥的双重结构特性,其主要承重构件斜拉索的设计与斜拉桥斜拉索有不同之处,本文介绍了部分斜拉桥拉索、索鞍的构造特点及锚固方式,研究了部分斜拉桥斜拉索静力强度的允许应力 $[\sigma]=0.6 R^b$ 的合理性和以此值作为应力上限的200万次循环荷载作用下拉索的抗疲劳强度。通过两座部分斜拉桥拉索的疲劳试验结果,验证了本文介绍的疲劳强度设计方法的正确性。

关键词: 部分斜拉桥; 斜拉索; 疲劳

部分斜拉桥亦称矮塔斜拉桥,其构造特点是在连续梁中支点处设置矮索塔,其塔高只有斜拉桥索塔高度的一半左右,斜拉索通过矮索塔上设置的转向块——索鞍对主梁产生竖向支反力和水平压力。部分斜拉桥主梁采用刚度较大的箱梁或桁架梁结构,主梁自身能够承受大部分荷载效应(约占70%),而斜拉索只承担部分荷载效应(约占30%),对主梁起到一定程度的帮扶作用。部分斜拉桥是介于斜拉桥和连续梁桥之间的一种新桥型,这种结构体系使其具有斜拉桥和连续梁桥的双重结构特点。

由于部分斜拉桥拉索只承担大约30%的荷载作用,不同于承担全部荷载作用的斜拉桥拉索,活载对部分斜拉桥拉索引起的应力幅值($\Delta\sigma=\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$)较斜拉桥拉索活载应力幅值小很多,根据已建部分斜拉桥的分析计算,其拉索应力幅只有斜拉桥拉索应力幅的1/3~1/4。基于此原因,在国内外公路矮塔

斜拉桥拉索设计中,拉索强度允许应力值大都选取 $[\sigma]=0.6 R^b$,大于斜拉桥拉索强度允许应力值 $[\sigma]=0.4 R^b$, R^b 为拉索材料的标准抗拉强度,其值等于破断强度。

我国《公路斜拉桥设计规范》(JTJ027-96)(以下简称《斜拉桥规范》)中未对部分斜拉桥拉索强度允许应力取值做具体规定,所以有必要对其合理取值进行研究。部分斜拉桥拉索在索塔上部构造设置与斜拉桥不同,对其构造措施应加以分析,确保其安全可靠。

1 索体、索塔上部构造

部分斜拉桥的拉索体系无论从构造设置和受力性能来看均类似于体外索结构,为了充分利用矮塔的有效高度,采用了适合该结构特点的索体系构造。

1.1 索体

收稿日期:2004-09-13

Design of Buttressed Light Type Abutment

CAO Li-min

(Zhejiang Transportation Planning And Design Insititute, hangzhou 310006, China)

Abstract: The buttressed light type abutment consists of abutment cap, side wall, buttress, breast wall, group pile cap, conical slope and skirt wall. The frame, which is formed by buttress, breast wall and side wall bear the horizontal loads, and group pile cap bears the resultant force of vertical and horizontal loads.

Key words: side wall; buttress; breast wall; group pile cap; conic slope; skirt wall

索体采用数根 $\phi 15.24$ 镀锌高强钢绞线平行、紧密排列而成, 每根钢绞线外包热挤压黑色 PE 管, 索体外套白色 PE 管, 形成了多层防腐保护体系, 整个

拉索体系分为 3 段: 梁体锚固段、索体自由段和塔上锚固段, 见图 1 所示。

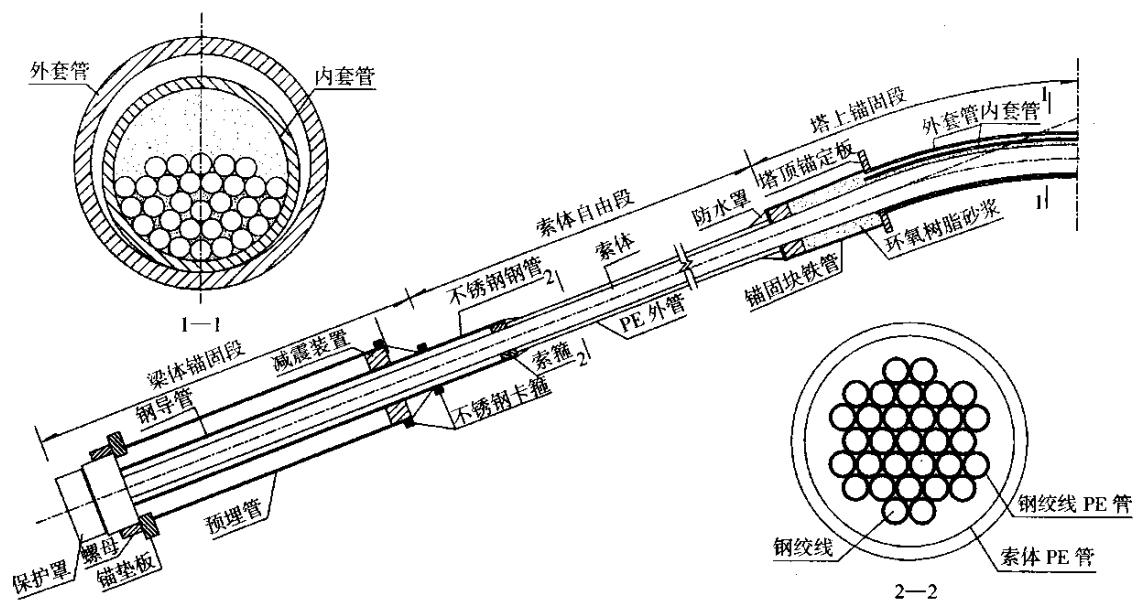


图 1 斜拉索体系示意

梁体与斜拉索的锚固采用 OVM200 群锚体系, 该锚具的 200 万次疲劳强度大于 200 MPa, 因此完全适用于部分斜拉桥的锚固要求, 无疲劳破坏之虑。斜拉索双排单索面布置时, 拉索两端张拉后对称锚固于主梁中室横隔墙上; 斜拉索双索面布置时, 拉索两端张拉后对称锚固于主梁翼板和腹板间的梗腋处。

1.2 索塔上部构造

部分斜拉桥索塔截面和高度较小, 为了充分利用索塔高度, 增大拉索水平倾角和未来换索的需要, 在索塔上部设置索鞍构造, 采用贯通式穿过索塔, 每束拉索在索塔上的竖向间距为 30~70 cm。拉索贯通式穿过索鞍分为两种。

(1) 双套管结构

鞍座采用双套管结构(见图1), 双套管纵向采用圆弧形, 外钢管预埋设于混凝土索塔内, 内钢管置于外钢管内, 内、外钢管壁密贴, 拉索从内钢管集束穿过。在索塔两侧拉索处设置抗滑锚头, 内钢管及抗滑锚头内压注环氧树脂砂浆, 使钢绞线束与内钢管、抗滑锚头固结为一体, 防止拉索在鞍座内滑动, 拉索的不均衡力可通过抗滑锚头直接传到索塔上。此种结构的缺点在于钢绞线穿过内套管时, 不易保证每根钢绞线均相互平行, 有相互交错挤压的现象, 对钢绞

线的受力和疲劳强度均会产生负面影响; 另外, 由于数根钢绞线相互挤压, 重叠在一起, 注浆锚固时钢绞线间缝隙注浆效果不好。

(2) 分丝管结构

鞍座采用分丝管结构, 构造示意图见图 2 所示, 该结构是针对双套管结构的不足之处做以改进, 以分丝管代替双套管, 钢绞线分别穿过每孔分丝管, 在索塔两侧拉索处设置夹片式群锚, 锚头采用注油防腐, 此种锚固方式造价较高。为了克服此缺点, 取消夹片式群锚, 在抗滑锚头内压注环氧树脂砂浆, 由于采用分丝管结构, 拉索的钢绞线间距较大, 环氧树脂砂浆可以和每根钢绞线充分胶结、握裹, 环氧树脂砂浆对锚头内的钢绞线起到防腐作用。

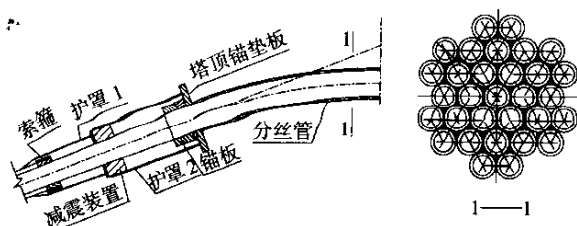


图 2 分丝管构造示意

在索塔上部设置索鞍,拉索贯通式穿过是大多数部分斜拉桥采用的方式。日本最近修建的部分斜拉桥也有采用斜拉索交叉锚固于索塔两侧的构造方法,采用夹片式群锚体系,见图 3 所示,索塔混凝土处于受压状态,索拉力会对索塔产生一定的扭矩。此种构造比上述方式简单,日本的又喜纳大桥采用此种构造形式。

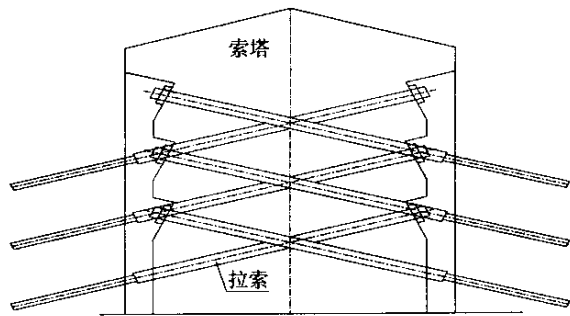


图3 拉索交叉锚固示意

2 斜拉索强度

斜拉索是部分斜拉桥的重要支撑构件,它承受着桥梁的恒载、活载及其他可变荷载和偶然荷载的作用,汽车活载又会引起拉索轴向拉应力的变化,产生应力幅,对斜拉索产生疲劳破坏。所以斜拉索需满足荷载的静力强度要求和汽车活载引起的疲劳强度要求,对上述两种强度应分别进行分析验算。

2.1 静力强度

《斜拉桥规范》中对斜拉桥拉索的静力强度允许应力取值规定为:组合 I 时, $[\sigma] = 0.4 R^b$, 安全系数为 2.5; 组合 II、III、IV 时, $[\sigma] = 0.5 R^b$, 安全系数为 2.0; 组合 V 时, $[\sigma] = 0.52 R^b$, 安全系数略小于 2.0。世界其他国家桥梁规范中拉索静力强度安全系数大都取 2.0~2.5 之间,可以说拉索静力安全储备大于斜拉桥其他上部结构构件的安全储备,其他构件的安全系数一般在 1.67 左右。这主要是由于斜拉桥拉索的活载应力幅大都在 100~200 MPa 之间,所以要求斜拉桥拉索上限应力 $\sigma_{\max} = 0.4 R^b$ 、在 200 万次循环荷载作用下的疲劳强度要大于 200 MPa。如果将拉索的允许应力提高,则在上限应力 $\sigma_{\max} > 0.4 R^b$ 的某一应力状态下,200 万次疲劳强度就不一定能保证达到 200 MPa,所以说疲劳作用对斜拉索静力强度允许应力取值起到制约作用。

美国工程师协会斜拉桥委员会于 1990 年出版的《斜拉桥设计指南》中给出了拉索及钢绞线的

Smith 曲线(见图 6),从图中可以看出,随着上限应力和平均应力的增加,材料抗疲劳强度逐渐降低,两者呈反比关系。Smith 曲线表明:斜拉索的疲劳强度与拉索应力上限 σ_{\max} 、应力幅 $\Delta\sigma$ 、应力循环次数 N 三者有直接关系。

关于部分斜拉桥拉索的静力允许应力值,我国《斜拉桥规范》中未予规定,国外桥梁规范也未说明。国内外设计建造的铁路部分斜拉桥拉索静力允许应力值 $[\sigma] = (0.4 \sim 0.45) R^b$,与斜拉桥相同,公路部分斜拉桥拉索静力允许应力值 $[\sigma] = (0.5 \sim 0.6) R^b$,大部分采用 $0.6 R^b$,拉索的安全系数为 1.67,与其他构件具有同一水平的安全储备,这是因为铁路活载较公路活载大而引起的应力幅值大所致。公路部分斜拉桥拉索活载应力幅只有斜拉桥的 $1/3 \sim 1/4$,其值与体外索大致相同,体外索的允许应力可取 $0.6 R^b$ 。所以不必具有斜拉桥拉索那样大的抗疲劳强度,如图 6 Smith 曲线所示,适当提高拉索的应力上限则拉索的抗疲劳强度随之降低,也就是说用适度牺牲拉索的抗疲劳强度应力幅来换取应力上限,即静力强度的提高。

2.2 疲劳强度设计

我国《斜拉桥规范》中关于拉索的疲劳强度是采用通过 200 万次的常幅反复加载试验来验证。此种试验的原理就是疲劳设计方法中的无限寿命设计方法,现阶段我国公路、铁路桥梁规范中有关疲劳设计皆采用此方法,无限寿命设计方法的目的就是使构件在活载引起的循环应力作用下能够长期安全使用,不产生疲劳破坏。该方法的强度条件是指定某一最高应力状态下,活载应力幅小于这一最高应力状态下 200 万次拉索疲劳强度。

2.2.1 活载应力幅

公路桥梁正常使用状态下汽车荷载对拉索产生变幅循环荷载效应,是一个随机过程,正是这种使用期间的汽车活载对拉索产生疲劳作用,所以进行拉索疲劳强度设计时,应以正常使用状态下的活载应力幅作为疲劳设计的荷载效应。

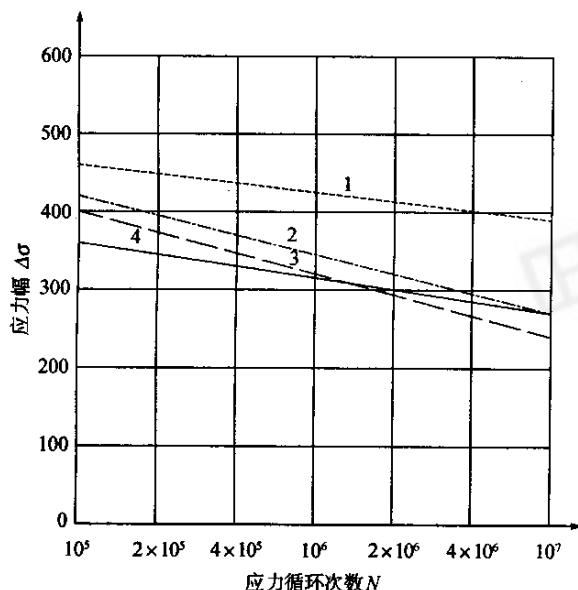
1990 年,由交通部组织在全国 4 条有代表性的国道干线上进行了正常使用状态下的汽车荷载调查,统计分析结果表明:一般运行状态下,汽车活载效应实测统计值仅为设计标准活载效应的 30%,密集运行状态汽车活载效应实测统计值达设计标准活载效应的 55%。显然,不能用公路桥梁规范规定的设计标准活载应力幅进行疲劳强度计算,偏于安全计,

可取 60% 设计标准活载应力幅值进行疲劳强度计算。漳州战备大桥是国内第一座部分斜拉桥, 设计标准活载对拉索产生的最大应力幅为 $\Delta\sigma = 80$ MPa, 而按 60% 折算则只有 $\Delta\sigma = 48$ MPa。兰州小西湖黄河大桥采用的是部分斜拉桥结构, 其设计标准活载对拉索产生的最大应力幅 $\Delta\sigma = 84.5$ MPa, 而按 60% 折算则只有 $\Delta\sigma = 50.7$ MPa。

我国公路桥梁规范中没有对疲劳设计专门制定疲劳车载, 可以借鉴英国 BS5400, 美国 AASHTO 等规范中的疲劳车进行加载求出活载应力幅, 进行疲劳设计验算。

2.2.2 拉索疲劳强度

拉索的抗疲劳强度应由疲劳试验获得, 因疲劳试验费时费力, 是一项庞大的试验研究工作, 我国现无系统、完善、权威的拉索疲劳试验数据, 更没有总结出拉索的抗疲劳强度计算公式, 这些都给设计人员带来很大的盲目性。笔者认为: 美国工程师协会斜拉桥委员会于 1990 年颁布的《斜拉桥设计指南》中给出的拉索及拉索组成材料的疲劳试验数据系统全面, 反映了材料本身的抗疲劳性能, 可作为我们设计斜拉索的依据, 见图 4、图 5、图 6。



(1) 直径 7 mm 的单丝 (2) 单丝直径 7 mm 的 19 丝钢束
(3) 直径 15 mm 的绞线 (4) 7 股 15 mm 的绞线钢束

图 4 S-N 曲线

部分斜拉桥拉索的组成材料是钢绞线, 由于制索效应和锚具效应的影响, 拉索的疲劳强度要比钢绞线的疲劳强度低, 瑞士 M·BirKenmaier 指出: 拉

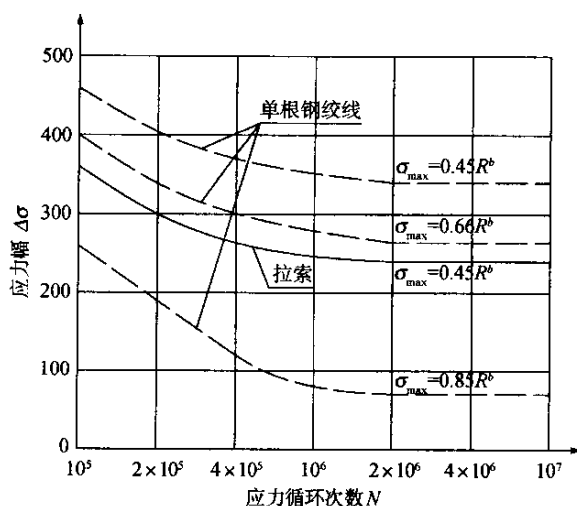


图 5 直径 15 mm 钢绞线和带 Freyssinet 锚具的拉索 S-N 曲线

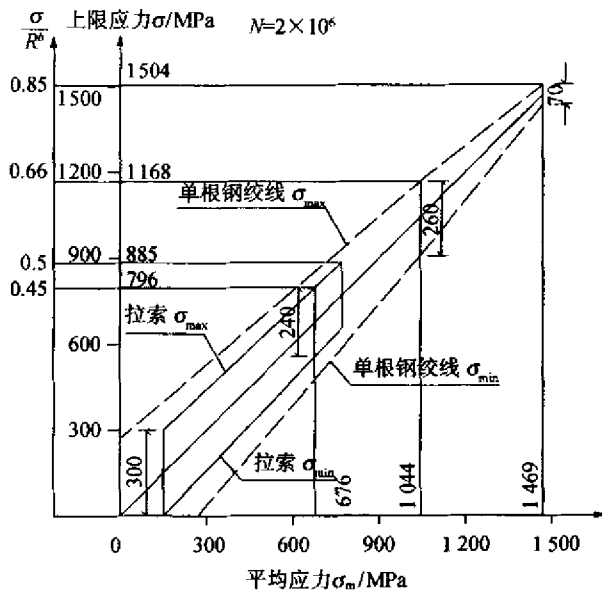


图 6 直径 15 mm 钢绞线和带 Freyssinet 锚具的拉索 Smith 图

索的疲劳强度和钢丝的疲劳强度有下式关系:

$$\Delta\sigma_{\text{拉索}} = \Delta\sigma_{\text{钢丝}} / 1.6 \quad (1)$$

美国后张法协会斜拉桥委员会颁布的《斜拉桥设计、试验与安装条例》中指出:

$$\Delta\sigma_{\text{拉索}} = \Delta\sigma_{\text{钢丝}} - 100 \quad (2)$$

从图 4 中可查出当 $\sigma_{\text{max}} = 0.66 R^b$ 时, 钢绞线的疲劳强度为 260 MPa, 采用式 (1) 计算拉索的疲劳强度 $\Delta\sigma_{\text{拉索}} = 260 / 1.6 = 162.5$ MPa, 采用式 (2) 计算拉索的疲劳强度, $\sigma_{\text{拉索}} = 260 - 100 = 160$ MPa。根据 Smith 图中反映的疲劳强度规律, 当部分斜拉桥拉索的应力上限 $\sigma_{\text{max}} = 0.6 R^b$ 时, 其疲劳强度要大于 160 MPa。

3 拉索疲劳试验

铁道部大桥局桥科院对漳州战备大桥的拉索进行了疲劳试验。共制造了 3 个拉索组装件。拉索采用 12 ϕ 15.24 钢绞线制成,锚头采用夹片式群锚体系。钢绞线的 $R^b=1\,770\text{ MPa}$,疲劳试验应力上限 $\sigma_{\max}=0.55\,R^b=973.5\text{ MPa}$,试验应力幅 $\Delta\sigma=100\text{ MPa}$,200 万次循环加载,试验结果表明:拉索未出现断丝现象,锚具也无松脱破坏现象,完好无损。

厦门安银湖大桥是一座 80 m+80 m 的部分斜拉桥,拉索采用韩国进口环氧涂层钢绞线和 VSL SSI2000 体系锚具组装件,疲劳试验拉索试件采用 5 ϕ 15.24 钢绞线制成。钢绞线的 $R^b=1\,860\text{ MPa}$,疲劳试验应力上限 $\sigma_{\max}=0.6\,R^b=1116\text{ MPa}$,试验应力幅 $\Delta\sigma=100\text{ MPa}$,200 万次循环加载,试验结果与漳州战备桥试验结果一致。

4 结语

由于部分斜拉桥自身结构的特点,决定斜拉索体系在构造和强度方面与斜拉桥拉索体系存在不同。斜拉索在索塔上部交叉锚固的方法在国内部分斜拉桥中没有应用,应在实验研究的基础上加以推广。

通过国内外拉索材料的疲劳试验证明,最大上限应力 $\sigma_{\max}=0.6\,R^b$ 是合理的,不会对拉索产生疲劳

破坏。关于拉索的疲劳作用问题应进一步加强研究,向疲劳可靠度方向发展。应加强对我国现有公路桥梁正常使用状态下的荷载状况研究或实际应力监测,建立拉索的荷载应力幅,对拉索材料应进行大量的疲劳试验,建立 $S-N$ 曲线。通过疲劳强度理论和可靠度理论来研究拉索的疲劳问题。

参考文献:

[1] JTJ 027-96,公路斜拉桥设计规范[S].
[2] 王凯,郑宏扬,李敏. 漳州战备大桥主桥斜拉索设计[J]. 桥梁建设,2002,(1).
[3] 张多平,李承根. 部分斜拉桥斜拉索的设计[J]. 桥梁建设,2002,(3).
[4] 欧阳永金,刘世忠,石占良. 同安银湖大桥斜拉索体系[J]. 世界桥梁,2003,(1).
[5] 党志杰. 斜拉索的疲劳抗力[J]. 桥梁建设,1999,(4).
[6] 铁道部大桥局桥梁科学研究所. 漳州战备大桥斜拉索组装件疲劳试验[R]. 2001.
[7] 苏善根,鲍卫刚,等译. 斜拉桥设计指南[J]. 国外公路,1993,(1).
[8] 文武松,彭旭民,党志杰,编译. 斜拉索设计、试验与安装条例[J]. 国外桥梁,1997,(3).
[9] 川崎秀明,山内明夫,等. またきな大桥の设计与施工[J]. 桥梁と基础,2000,(7).

Research on Cable Design of Partially Cable-Stayed Bridge

ZHENG Yi-feng^{1,2}, HUANG Qiao¹, ZHANG Hong-wei²

(1. School of Science and Engineering on Communication, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Highway Reconnaissance and Design Institute of Jilin Province, Changchun 130021, China)

Abstract: The cable design of partially cable-stayed bridges is quite different from that of cable-stayed bridges, because of its dual structural properties both embodies cable-stayed bridges and continuous beams. The structural characteristic and anchorage ways of cable and cable saddle are mainly introduced, the rationality of tolerated stress of static strength $[\sigma]=0.6\,R_y$ and the anti-fatigue strength under 2 million circled load by regarding this tolerated stress as the upper limitation are also developed. At last, correctness of the design methods about fatigue strength via the fatigue experimental results of two partially cable-stayed bridges are verified.

Key words: partially cable-stayed bridge; cable; fatigue