

大跨悬索桥塔和锚碇的合理设计

张 杰,钱冬生

(西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031)

摘 要: 先寻找构件传力途径,次拟定截面尺寸,再用计算机仿真法进行应力分布的分析;然后修订尺寸,重新分析,直至得到最佳方案。

关键词: 悬索桥;长跨桥;塔;锚碇;桥梁设计

中图分类号: U448.25;U443.38;U443.24

文献标识码: A

文章编号: 1003-4722(2000)04-0020-03

由于结构的主要功能是传力,先剖析其各构件受力特点,参照这些特点拟定截面尺寸,再进行计算机分析,用仿真法将其应力分布搞清楚,借能按经济合理原则,进行优化。又:本文所说大跨悬索桥是泛指主跨为1 000~1 600 m者。

1 塔

受力特点: 仅就其采用钢筋混凝土门架式者讲,在横向,两腿柱斜置,向内倾斜;两腿柱之间,设横系梁3根。主要受力杆件是两条腿柱;从塔顶到加劲梁水平,这是上段,高约120~180 m,主要是受压;从加劲梁水平到基础顶面,这是下段,为抵抗纵向及横向风力,腿柱在纵向和横向均需向下放坡;在基础顶面以上,截面更大,应力更小,这就与基础相接。

就腿柱上段讲,主鞍的作用压力来自恒载和活载,这时,主鞍将因活载而发生纵向位移。应该让主鞍在(恒+活)最大压力下,其压力作用线接近于穿过上段底面的中心。这就是控制情况。主鞍的最大压力往往是400~520 MN,每腿柱受到200~260 MN;在上段底面,每腿柱还需承受自重60~100 MN。就纵向风力讲,在成桥状态,塔的顶部有大缆作支承,风力所致的腿柱弯矩乃较小。就横向风力讲,塔是以门架结构来承受,在横系梁截面高度较大情况下,腿柱所受的弯矩也相对较小。另外,腿柱为斜置,其自重将使腿柱承受弯矩,可以在施工之中,让横系梁对腿柱施压,借使这项弯矩值减小。通过这些考虑,可以肯定腿柱上段主要是受压。就截面尺寸讲,塔柱顶面需考虑主鞍底的尺寸,腿柱上段底面外廓尺寸只需稍稍放大;截面可以用矩形,这可以使施工便利,而并不影响美观。腿柱的壁厚可以向下稍微增加,借以减低自重所生压应力。

就腿柱下段讲,应当考虑在施工状态,当大缆还未

架上塔顶时,纵向受到风力情况。这时,为了不用缆风,腿柱在混凝土向上灌注之中不致发生过大的纵向振动,每需让腿柱在下段纵向放坡。还应考虑在成桥状态,加劲梁所受横向风力通过抗风支座传递给塔,使腿柱下段所受弯矩急剧增加,因此,横向也应放坡。

丹麦大贝耳特东桥的混凝土塔的尺寸较为合理。塔呈门架状,在两条斜腿柱之间,横系梁为两条。该桥主跨是1 624 m。主鞍对塔顶的最大压力是510 MN。腿柱顶面尺寸是6.5 m×7.5 m(横向×纵向),上段高度约180 m,上段底面外廓尺寸是8.0 m×9.0 m,截面为矩形,壁厚为1.5 m(顶面)至2.0 m。下段高度为50 m,下段底面外廓尺寸为13.8 m×15.1 m,壁厚为1.7 m,下段底面的高程为+21.0 m。在此以下,是一承担两腿柱压力的空心截锥混凝土多室体,高度为24.5 m,上口外廓尺寸是56.5 m×15.1 m,下口是61.0 m×18.0 m,再下便是沉井基础。

2 锚碇(上部锚体结构)

受力特点: 锚碇的前部是前墙(或前腿),墙顶设散束鞍;大缆在散束鞍处有一转折角,因此而产生一斜向压力作用在锚体前墙;大缆在转折的同时要散开(要有一散索室),散开的丝股要可靠地锚在锚块混凝土之中;于是,锚块混凝土就受到斜着向上的大缆拉力——斜向力的垂直分力要靠混凝土(及压重)重量来抵抗,水平分力则要靠混凝土的抗剪将它向下传递。

按老观点,是用实体混凝土(重力式)提供重量,凭重量以抵抗大缆的垂直分力。前墙厚度每超过10 m,前墙下部还用实体混凝土矮墙同锚块混凝土相连。散索室形状不规则,只是由前墙,后面的锚块和侧墙所围成,上加顶盖。这样做的结果,是材料用量大,造价高,对材料强度的利用则很不充分。

收稿日期: 2000-10-24

作者简介: 张 杰(1957-),男,副教授,1982年毕业于浙江大学土木系,1987年在西南交通大学桥梁工程专业取得硕士学位。

随着结构混凝土的发展和受力特点的明确,就不应该再使用实体结构,而是按照受力特点,采用结构混凝土,形成杆件系统,合理地选择其尺寸。这才可以达到优化的目的。见图1。假定两根大缆的合计拉力 T 是 600 MN,其在散索鞍处的倾角是 19° ;让大缆散开后的中心线倾角是 40° ,并将散索鞍反力置在大缆转折角(内角)中分线上,则该反力与竖向线的夹角是 $1/2(50^\circ + 90^\circ + 19^\circ) - 50^\circ = 29.5^\circ$ 。散索鞍反力 $P = 2T\cos(29.5^\circ + 50^\circ) = 218.7$ MN。散索鞍是在每大缆设置一个,则每一前腿所受的压力只是 109.4 MN。若用 C40 混凝土,容许应力是 12 MPa,则每一前腿截面积只需 $109.4 \text{ MN} / 12 \text{ MPa} = 9.1 \text{ m}^2$ 。采用矩形空心薄壁截面是很合宜的。后腿轴线倾角 40° ,其上段为散索室,斜长可取 32 m;其下就是锚块混凝土,斜长取 18 m,底面斜面积可取 $14 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ (宽 \times 高),其上口斜面积将是 $10 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ 。按平均截面积为 172 m^2 计,锚块混凝土每块的体积是 3096 m^3 。按两个锚块,其比重为 2.5 t/m^3 计,锚块共重 153.45 MN;缆力 T 是 600 MN 在散开段,其竖向上拔力为 $600 \text{ MN} \sin 40^\circ = 386 \text{ MN}$;在锚块混凝土之上,加压重 $386 \text{ MN} - 153.45 \text{ MN} = 232.55 \text{ MN}$,就可以使上拔力完全被克服。水平分力是 $600 \text{ MN} \cos 40^\circ = 459.60 \text{ MN}$,一方面在前腿和后腿下部各用一纵向水平杆相连系,另一方面考虑水平力通过基础结构向下传递。

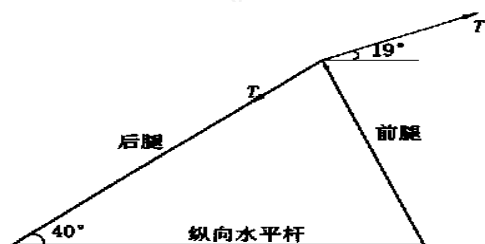


图1 锚体上部结构受力特点

上述构造都是就传递纵向力讲的。由于锚碇的主要功能是将大缆力传递到基底,而大缆力是位置较高的两条纵向力,在每一大缆之下采用上述三杆件人字状构造(前腿、后腿、纵向水平杆)便是经济合理的。为了形成空间结构,并抵挡偶然因素所产生的横向力,还需在上述三杆件的三个交点(散索鞍紧下方,前腿下端,后腿下端)加设三道横向杆。

同实体(重力式)结构相比,采用这种杆件系统的优点就是材料用量省,材料强度可以有效发挥,造价可以降低。其重量显然要比实体结构为轻。但就安全讲,只要其在增添压重(填砂)后有足够的重量使稳定性有保证,结构的重量并不是必需的。可以用仿真法将各构件各部分在荷载之下的各种应力等值线图逐个求出,看一

看这种杆件系统在强度上是否安全,在材料利用上是否更为有效。

3 锚碇(其基础部分)

使基础失效的位移是三种:下沉、滑动和倾覆。在60年代以前,大跨悬索桥和大跨拱桥都要求将基础落在岩层,不发生可察觉的这三种位移。从1964年建成韦拉扎诺桥开始,悬索桥锚碇可以搁在软质地基上,允许下沉,严格限制滑动,尽量减少倾覆量。办法则是采用大面积基底(并让基底面有一斜坡,前高后低,借使在地基土水平摩阻力的计算中可以将斜坡之下的土重量计及)。

软质地基的特点,在于其承载压应力较低,而地基土则具有可压缩性。但其基底面较易整平,可以让基底面为一巨大的长条状矩形平面。在施工过程中,可以观测得到:由于其后端锚块较重,开始时是向后倾斜;在大缆及加劲梁就位过程中,由于缆力增大,锚碇就变为向前倾斜;随着这一倾斜变化,锚碇的散索鞍位置将向前位移。对锚碇的倾斜进行控制,主要靠调整其重量的分布。为在施工中避免开始阶段的向后倾斜,可以让后腿重量(指压重)是在缆力增大之后再灌注。关于滑动,只是对基底面进行这项验算。验算式是:

$$\text{有效重量} \times \text{摩阻系数} = \text{水平作用力} \quad (1)$$

安全系数是用于摩阻系数,一般取 1.3 ~ 2.0。就上述例题讲,后腿及前腿的水平作用力合计值是 $T\cos 19^\circ = 600 \text{ MN} \times 0.945 = 567.30 \text{ MN}$ 。若极限摩阻系数是 0.6,安全系数取 1.5,容许摩阻系数是 $0.6 / 1.5 = 0.4$ 。所需的有效重量便是 $567.30 \text{ MN} / 0.4 = 1420 \text{ MN}$ 。若软质土容许承载力是 0.4 MPa,所需底面积便是 $1420 \text{ MN} / 40 \text{ MPa} = 3550 \text{ m}^2$ 。而,

$$\text{有效重量} = \text{各种重量} - \text{水浮力} - \text{大缆竖向分力} \quad (2)$$

大缆竖向分力 $= T\sin 19^\circ = 600 \text{ MN} \times 0.326 = 195.34 \text{ MN}$ 。如果上部锚体结构重量是 800 MN,则其应由基础结构提供的有效重量是 816 MN。假设基础结构全用混凝土,假定其扣去浮力的比重是 1.4 t/m^3 ,则由此而需要的基础混凝土数量只是 58300 m^3 。倘使所用混凝土超过这数,则并不能使我们在安全方面得到实际益处。

硬质地基的特点,在于其承载压应力较高(容许值一般在 1.0 MPa 之上),地基的压缩性可以忽略,但岩面起伏往往较大。就基底抵抗滑动所需的有效重量来推算基底面积,如前所述,有效重量是 1420 MN,若地基容许承压是 1000 kN/m^2 ,则所必需的基底面积仅是 1420 m^2 。为适应岩面起伏不平,在增添地质钻探孔、较早地予以探明之外,似宜采用分离的较小基础,并用上

部锚体结构将几个小基础连成一体;适当地考虑万一发生的不均匀沉陷,假定某些数值据以进行内力分析并配置钢筋,则在实际不均匀沉陷很小的情况下,其强度安全当有足够的保证。关于滑动一事,若覆盖层开挖必须在不排水条件下进行,那就对岩面泥质的清除必须十分注意;可以先用水下混凝土封底,再往水下混凝土之下压浆,靠混凝土与岩层的粘接来提供摩阻力;这时,预先堵塞周边隙缝,防止压浆流失,是十分重要的。如若岩面起伏出乎意料,则可采用成排的钻孔桩,在孔内置旧钢轨,凭钢轨抗剪将水平力传至桩的下段,凭孔壁的承压以抵抗水平作用力。为改善钻孔桩上段受力情况,可

以在上面开挖部分将桩变为墙,而在上面不开挖部分则可对其由桩所围住的覆盖层压浆。

为了安全和经济,仍应进行计算机仿真分析。这时,周围地基土被动的应力分布是一前提条件。目前,只能凭借土力学试验数据及理论给出几种合理假定,再对每种假定分别进行分析计算,要求各验算都能通过。相对于老办法讲,计算费用要贵一些。但相对于工程费用讲,计算费用就是微薄的。从其可以找到更好的解决方案讲,从其可以使对事物的了解搞得更透彻一些讲,从其有利于科技进步讲,这笔计算费用是值得花的。

Rational Design of Long Span Suspension Bridge Towers and Anchorages

ZHANG Jie, QIAN Dong-sheng

(Civil Engineering School, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China)

Abstract : Finding the stress transfer in members, trying to proportion their dimensions, get the stress distribution by Structural Simulating Method, then, change some dimensions and repeat the analysis until the optimum solution being got.

Key words : suspension bridge, long span bridge, tower, anchorages, bridge design

(上接第 19 页)

固技术规范[S].

[5] 侯发亮,刘小明.混凝土构件粘钢加固粘接应力及锚固长度[J].武汉水利电力大学学报,1992(6):587-593.

[6] 侯发亮,关喜才.抗震结构粘钢加固动力计算、试验与实践

[J].四川建筑科学研究,2000(1):24-27.

[7] 蒋元驹,韩素芳.混凝土工程病害与修补加固[M].北京:海洋出版社,1996.

The Application of Steel - bonded Strengthening Technology in Enhancing the Carrying Capacity of Existing Bridges

HOU Fa-liang¹, XU Zhi-jian², SUN Fu-hang², LIU Xiao-ming³

(1. Wuhan Yangtze River Strengthening Technology Ltd. For Construction Structures, Wuhan 430072, China;

2. Tianjin Investigation Design and Research Institute of Water Resources and Hydropower Ministry of Water Resources, Tianjin 30022, China;

3. Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan 430072, China)

Abstract : Chengbi River Bridge and Yongle Bridge, originally designed as rigid-framed bridges for truck-load 20 and trailer-load 100 tons, are now in defective conditions with a lot of crackings. In need of transporting oversized and heavy members (with total weight of 4 252 kN), the strengthening technology with bonded steel plates are used to enhance their carrying capacity to large extent. This paper mainly introduce the design and construction technology of the bonded-steel strengthening method.

Key words : arch bridge, rigidframe bridges, steel-bonded strengthening, bearingcapacity, bridge reinforcement