

日本上承式 500 m 混凝土坦拱试设计

编译 袁保星,陈宝春

(福州大学土木建筑工程学院,福建 福州 350002)

摘要: 为了探讨大跨度混凝土拱桥的设计与施工方法,以连接长岛与伊唐岛的大桥为假想桥址,进行了一座跨度达 500 m、矢高 40 m、宽 17.4 m 的上承式混凝土拱桥的试设计,对桥梁进行了正常荷载和地震荷载作用下的静动力计算。通过试设计发现,拱肋混凝土的设计强度至少需要 100 MPa。试设计中提出了一种适合该桥作为跨海大桥的施工方法,设计施工周期为 38 个月。

关键词: 拱桥;混凝土结构;坦拱;高强混凝土;试设计

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

文章编号: 1671-7767(2005)04-0005-04

日本土木学会于 1999 年开始组织进行跨度达 600 m 钢筋混凝土拱桥的可行性研究。由于拱桥的结构形式和施工方法与桥位处的地形地质条件有很大的关系,因此,在研究中进行了在假想架设桥址的试设计。由于试设计中要用桥梁所在的路线资料、地形地貌与地质资料等,因此选择一个已修建了桥梁的桥址作为试设计的假想桥址,这样上述这些资料就很容易得到。

在日本,为了跨越河流和连接岛屿,选择一个桥址来修建跨度 600 m 长的其它桥梁是不难的,但要选择一个适合大跨度拱桥的架设桥址,要考虑矢高问题而找一处适合修建高度达 100 m 桥梁的桥址就比较难了。对日本已建的大跨度桥梁分析结果,选择了在鹿儿岛县西北处,连接长岛与伊唐岛的伊唐大桥(跨度组合为 120 m + 260 m + 120 m 的双塔三跨混凝土斜拉桥)的桥址作为大跨度混凝土拱桥试设计的桥址。

同其它跨度为 600 m 的混凝土拱桥试设计一样,这座桥在试设计中也要考虑施工程序和地震动荷载作用下的桥梁结构验算。

1 设计方案

1.1 总体方案

在日本土木学会组织的 600 m 跨度混凝土拱桥的研究中,已进行了矢跨比为 1/6、1/7.5 和 1/10 的试设计。根据伊唐大桥桥址处的地形,跨度选择了 500 m、矢高 40 m 的方案进行试设计。该方案的矢跨比为 1/12.5,是一座典型的坦拱,因为在这个桥位,如果选择较大的矢跨比,则整个路线的高程都

要提得很高。

根据已进行的 600 m 跨度混凝土拱桥的试设计,本桥决定采用上承洛泽式(有推力拱梁组合式)固定拱桥设计方案。结构设计方案见图 1。

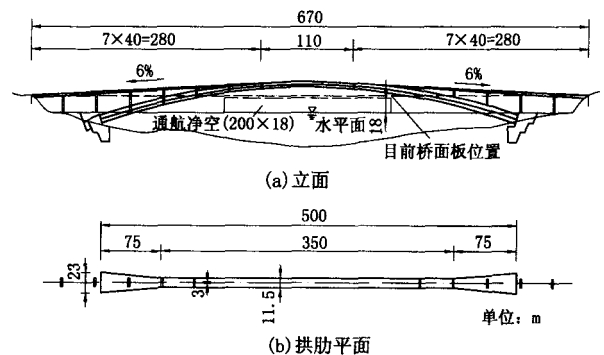


图 1 伊唐大桥总体布置示意

1.2 上部结构

设计时用容许应力限制材料的最大应力,以此定出梁高和构件厚度。根据钢筋混凝土的材料强度,翼缘和腹板的最小厚度应为 50 cm。结构在平面外地震反应的受力分析时,如果拱肋宽度不能满足要求,应根据拱脚和拱顶确定拱肋的最佳宽度。对于该桥,即使采用最佳的拱轴系数,仅在恒载作用下,拱肋截面内的应力也有 40 MPa,采用强度为 $f_{ck} = 60$ MPa 左右的一般混凝土将不能满足容许应力的要求。因此,应采用设计强度为 100 ~ 120 MPa 的高强混凝土。这样不仅可以减小自重,还可以使桥梁的构件尺寸与先前进行的 600 m 跨度拱桥的试设计所确定的构件尺寸相似。拱肋截面和桥面主梁的截面见图 2。

收稿日期:2005-03-24

编者简介:袁保星(1979-),男,2004年毕业于沈阳建筑大学道路与桥梁专业,工学学士。

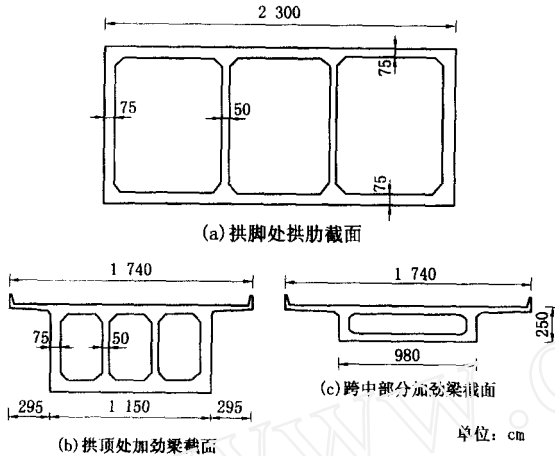


图2 拱肋及主梁截面示意

1.3 拱座

由于拱座直接建造在地基上,其结构尺寸可根据地基反力初步确定。地基反力的容许极限值在设计荷载作用下为 1.0 MPa,在地震荷载作用下为 1.5 MPa。定出拱座结构见图 3,拱座高为 33 m、长和宽为 35 m,混凝土用量为 19 160 m³。

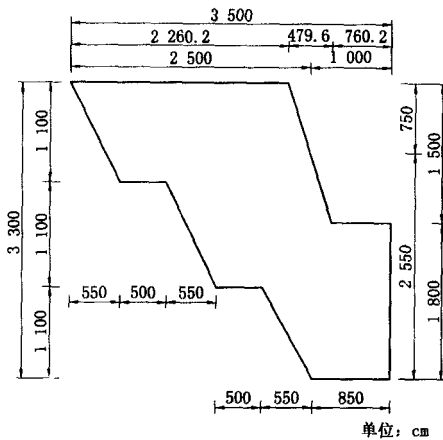


图3 拱座截面示意

2 拟用的施工方案

施工拟采用悬臂拼装与米兰拱(劲性骨架)相结合的方法。从拱座到 1/4 处的拱肋用悬臂拼装的方法架设,然后利用该桥作为跨海大桥的特点,用驳船运输已经拼装好的米兰拱到桥下,吊装上去合龙,最后浇筑米兰拱的混凝土。施工步骤见图 4。

3 在正常荷载下桥梁结构的验算

3.1 计算方法

在该桥梁试设计中,采用梁单元纤维模型建模,并考虑结构的几何非线性。该模型共有 61 个节点和 71 个单元。图 5 为有限元模型。几何边界条件

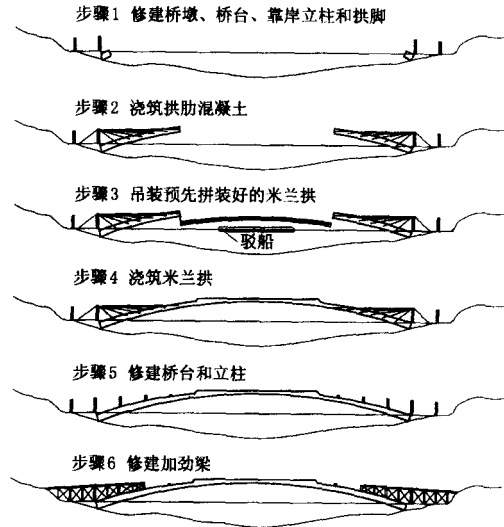


图4 施工步骤

为拱肋两端完全固结,加劲梁两端为铰接,即竖向和绕桥轴转动(梁的扭转)变形约束住,其它变形自由。

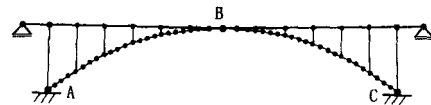


图5 有限元测试模型

对于材料的本构关系,利用了反映钢筋与混凝土滞回性能的应力应变关系。在混凝土本构关系中,对应于混凝土抗压强度(f_c) 100 MPa 时的应变为 4 000 μ ,对应于混凝土应变从最高点下降到零时的最大应变为 12 000 μ 。使用 SD685 的受力钢筋,屈服强度为 685 MPa,假定杨氏模量为 2.04×10^5 MPa。

计算时,采用荷载控制法和位移控制法相结合的方法,即在加载过程中,同时控制图 5 中 B 点的位移和每个节点上与恒载成比例的竖向荷载。在每一级计算中,同时计算结构切线刚度矩阵的特征值,以确认结构有足够稳定性,没有发生屈曲破坏。

3.2 验算结果

通过对截面内力和结构稳定性来分析正常荷载作用下结构的受力性能。假定的验算条件是混凝土的最大应力不大于其抗压强度的 1/3 左右,钢筋的最大应力不大于其屈服强度的 2/3 左右。同时考虑到结构的稳定性,切线刚度矩阵的特征值不能为负数。

图 6 表示图 5 中 B 点的竖向荷载 - 位移曲线(实线)和特征值变化曲线(虚线)。从图 6 可以看出所设计的拱桥的承重能力大约为自身重量的 2.6

倍;在正常荷载作用下结构的行为基本为线弹性;荷载达到最大值时,特征值变为零,然后变为负值。但在正常荷载作用时,特征值始终不为负,说明在正常荷载作用下结构的稳定性能得到满足。

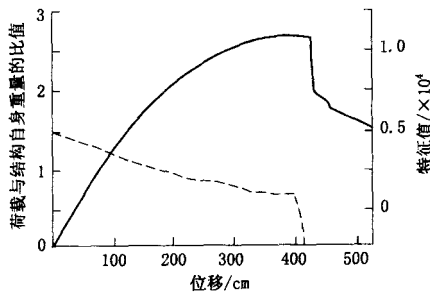


图 6 B 点的荷载 - 位移曲线和特征值

除拱脚截面外,拱肋其余截面均受压,最大压应力为 30 MPa。拱脚处的拉应力也很小,只有几 MPa,拱肋有足够高的抗裂安全度,不会出现裂缝。在正常荷载作用下拱肋内混凝土应力在其抗压强度的 1/3 范围内(即混凝土处于线弹性范围),混凝土的受力性能满足要求。钢筋的最大应力出现在拱顶和拱脚处,大约为 160 MPa,小于钢筋屈服强度的 1/4,受力性能满足要求。

4 地震荷载作用下桥梁结构的验算

应用空间模型计算桥梁在面内及面外地震动反应下的截面内力。确定水平地震系数时要考虑到结构自振周期的影响(对平面内及平面外的地震反应分析时 $k_h = 0.10$)。在地震动荷载作用下结构计算模型及分析方法与在正常荷载作用下的相似。

4.1 静力验算

静力验算分纵桥向和横桥向,结构施加自重后,在每个节点上施加与恒载成比例的地震荷载,以求出结构的荷载 - 位移曲线。与正常荷载下桥梁验算一样,它也要考虑到每级计算时切线刚度矩阵的特征值。

图 7 为拱肋顶部在纵、横桥向的荷载 - 位移曲线(实线)以及切线刚度矩阵的特征值变化曲线(虚线)。在纵向,桥梁最大承载力为自重的 1.2 倍;在横桥向,桥梁最大承载力为自重的 0.3 倍。在两种情况下,切线刚度矩阵的一阶特征值都随着变形的增加而逐渐减小,在纵桥向,荷载达到最大值时特征值变为零;而在横桥向,由于数据误差的影响,荷载达到最大值后特征值才减小为零。特征值的连续变化说明在荷载达到最大值以后,变形依然连续。这个结果说明,在静力作用下,在荷载达到最大值后,

结构仍然表现稳定的变形性能,结构不会突然破坏。最后得到结论,按静力法验算拱在地震荷载作用下的稳定性(屈曲安全性能)满足要求。

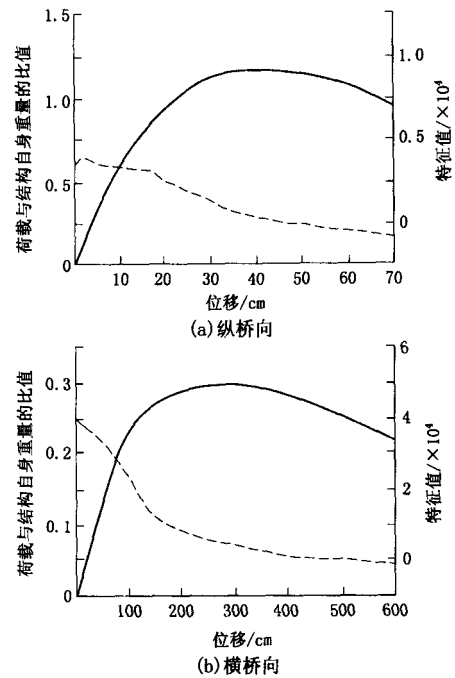


图 7 B 点的荷载 - 位移曲线和特征值曲线

4.2 动力验算

动力验算的时程反应分析中数值积分法使用 Newmark - 法 ($\gamma = 0.25$)。所有构件的阻尼比采用 5%。按照《日本土木工程协会标准规范》规定,采用二级地面波动的内陆型 I 类和海洋型 I 类地震动时程加速度波,地面运动在两个固定端输入,不考虑相位差。地震动的输入方向,根据时程加速度波的作用方向,考虑到 3 种情况:纵桥向输入;横桥向输入;纵、横桥向和竖向同时输入。对 3 个方向同时输入地震波的情况,纵、横桥向以同一波形输入,竖向则以加速度为 1/2 的波形输入。

4.2.1 单方向输入

图 8、图 9 是分别是在纵、横桥向分别输入内陆型类和海洋型类地震动时,拱顶的时程反应位移曲线(实线)。在两条曲线中,虚线表示不同时程的切线刚度矩阵的一阶特征值。为了避免混凝土达到最大拉力后切线刚度快速下降结构特征值可能出现负值的情况,将混凝土达到最大拉力时的切线刚度取为零。

在纵桥向内陆型类和海洋型类地震荷载作用下,结构的最大响应位移都是 3 cm,这比在正常荷载下 40 cm 的位移小得多。在时程反应分析中,切线刚度矩阵的一阶特征值不会变为负数,变化也

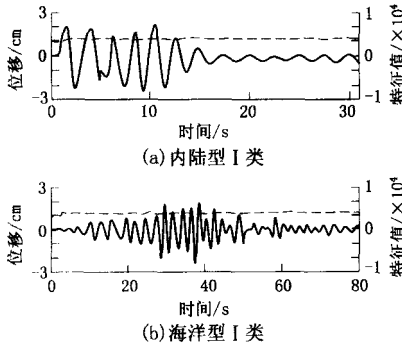


图 8 纵桥向时程响应位移曲线和特征值曲线

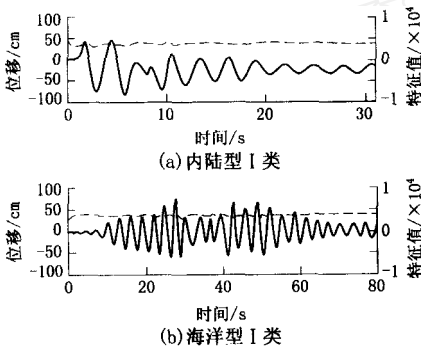


图 9 横桥向时程响应位移曲线和特征值曲线

非常小。所以,在纵桥向地震荷载作用下,桥梁结构是稳定的,非线性也不明显,切线刚度矩阵可认为没有变化。在横桥向输入两种地震荷载时,结构最大响应位移为 80 cm,同样比在正常荷载下大约 300 cm 的位移小很多。在时程反应分析中,切线刚度矩阵的一阶特征值不会变为负数,变化也非常小。然而,在输入 100gal 左右加速度的海洋型类地震动波 40 s 后,结构的响应位移会增大很多。它的原因是在加速度过去 40 s 后,地震波的作用最强,这一点必须被重视。不过在单向地震波荷载作用下,该桥都不会出现被压溃而迅速破坏的情况,而且拱桥结构几乎一直都处于线弹性阶段。

4.2.2 三方向输入

图 10、图 11 分别是同时在纵、横桥向和竖向输入内陆型类和海洋型类地震动的时程加速度波时,拱顶的响应位移曲线(实线)。其中在纵桥向的图中,虚线表示的是切线刚度矩阵的一阶特征值。

在输入内陆型类时,纵、横桥向和竖向的最大响应位移分别是 3 cm、100 cm 和 25 cm,这些位移比在最大静力荷载作用下产生的位移均小得多。在时程反应分析中,切线刚度矩阵的一阶特征值不会变为负值,而且变化不大。在输入海洋型类时,纵、横桥向和竖向的最大响应位移分别是 3 cm、150 cm 和 40 cm,其横桥向的位移比在内陆型类的情

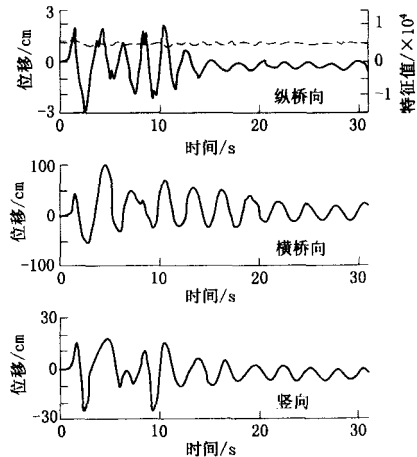


图 10 输入内陆型类地震动时响应位移曲线和特征值曲线

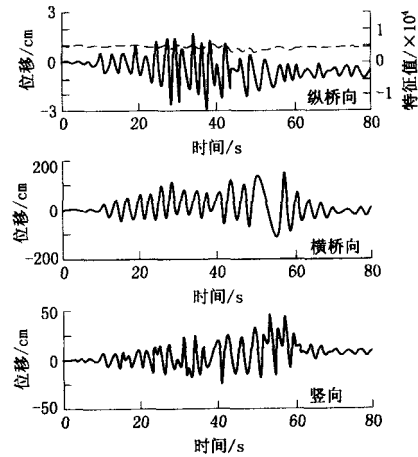


图 11 输入海洋型类地震动时响应位移曲线和特征值曲线

况下要大很多。在横桥向的位移达到最大值时,切线刚度矩阵的一阶特征值减小。从这里可以看出,结构进入了非线性阶段。然而,这时的最大响应位移也只有最大静载时的 1/2。与单向输入地震波一样,当输入加速度 100gal 的地震波 40 s 后,横桥向响应位移达到最大。

从分析结果可以看出,地震荷载作用下,所设计的桥梁满足抗震性要求和动力稳定性要求。

5 结论

通过对大跨度混凝土拱桥的试设计研究,得出以下结论:

- (1) 在日本如果采用坦拱形式,是可以找到合适的桥址修建大跨度上承式拱桥的。
- (2) 跨度为 500 m 和矢高为 40 m 的坦拱桥,拱肋混凝土的抗压设计强度至少应为 100 ~ 120 MPa。

(下转第 12 页)

(5) 开孔板连接件承载力计算式采用 $Q_a = 1.4 d^2 \sigma_c / f$, 其中 d 为开孔板的孔径, σ_c 为混凝土设计强度, 承载力修正系数 $\gamma = 0.7$, 安全系数 $f = 2.1$;

(6) 开孔板中的贯通钢筋依据试验以及考虑施工的方便性, 从极限状态安全性的角度加以设置。

4 结 语

混合梁在普通斜拉桥中得到了广泛的应用, 近几年来在低塔斜拉桥、连续梁桥中也有不少使用的。后两种桥型的主梁受力具有其各自特点, 不能照搬普通斜拉桥的设计方法, 需要进行大量的模型试验与数值分析研究。本文介绍了低塔斜拉桥所采用的前后承压板接合方式、以及用开孔板连接件代替焊

钉连接件的接合部设计新技术, 为解决混合梁设计的关键技术问题提供一个新思路。

参 考 文 献:

- [1] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] 陈开利, 余天庆, 习 刚. 混合梁斜拉桥的发展与展望. 桥梁建设[J], 2005, (2): 1 - 4.
- [3] 中須 誠, 伊藤正人, 谷中 慎, 等. 木曾川 揖斐川 複合 造接合部の設計と施工[J]. プレストレストコンクリート, 2000, 42(1): 37 - 45.
- [4] 望月秀次, 安藤博文, 宮地真一, 等. 鋼・PC混合 (新川) の設計と施工[J]. プレストレストコンクリート, 2001, 43(1): 82 - 89.

Development of Design Technique for Joint Parts of Hybrid Girder

LIU Yu-qing

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The application of steel girder to main span and concrete girders to side spans of a cable-stayed bridge or continuous girder bridge, and jointing of the two kinds of the girders in a reasonable way at their appropriate places will greatly improve the performance of the bridge and will easily realize long spans, and the design of joint parts of the girders is often one of the critical design techniques for the bridge. In this paper, the structural types and features of the joint parts and the latest development of the design technique for the parts are dealt with.

Key words: hybrid girder; joint part; design method; summarization

(上接第 8 页)

(3) 研究表明, 在正常荷载和地震荷载作用下, 坦拱桥满足结构的稳定性要求。

(4) 通过在驳船上吊装预先拼装好的米兰拱可以缩短跨海大桥的施工周期。

参 考 文 献:

[1] Kazuto Kamisakoda, Hikaru Nakamura, Atsushi Naka-

mura. Studies on Long-Span Concrete Arch Bridge for Construction at Ikarajima in Japan [M]. Arch Bridges IV Advances in Assessment, Structural Design and Construction, 2004. 548 - 557.

[2] 日本土木学会. コンクリート長大アーチ 一支間 600 m クラス—の設計・施工[M]. 东京: 日本土木学会, 2003.