

文章编号: 0451-0712(2005)07-0032-04

中图分类号: U448.23

文献标识码: B

# 轻质高强混凝土在连续刚构桥中的应用分析

郑 勇<sup>1</sup>, 胡大琳<sup>1</sup>, 沈永林<sup>2</sup>

(1. 长安大学公路学院 西安市 710064; 2. 云南省公路勘察设计院 昆明市 650011)

**摘 要:** 通过对主跨为 120 m 的连续刚构桥分别采用普通混凝土和轻质高强混凝土进行试设计, 对上部结构几何尺寸、预应力筋配束等进行优化, 并对结构优化与经济指标进行对比分析。

**关键词:** 连续刚构桥; 高强轻质混凝土; 试设计; 对比分析

大跨径连续刚构桥中结构自重占总荷载比例较大, 轻质高强混凝土能克服普通混凝土自重过大的缺点, 能实现桥梁跨径的进一步提高, 使桥梁上部结构轻型化, 将成为连续刚构桥发展的新趋势。下面分别对采用普通混凝土和轻质高强混凝土的 4 种桥梁模型进行试设计比较, 有关轻质混凝土的相关设计指标参考《轻骨料混凝土桥梁技术规程》(征求意见稿)的文件。

## 1 技术标准

荷载等级: 汽车—超 20 级, 挂车—120;

桥面净宽: 净 11.0 m + 2 × 0.5 m 护栏;

跨径组成: 67 m + 120 m + 67 m;

桥高: 30 m;

地震烈度: 6 度;

温度荷载: 升温 20℃ (以下简称“温 1”), 降温

25℃ (以下简称“温 2”);

支座沉降: 中墩下沉 1.5 cm (以下简称“沉 1”), 边墩下沉 1.0 cm (以下简称“沉 2”)。

## 2 主要材料

混凝土: 普通混凝土连续刚构桥(CC)上部结构采用 C55, 下部结构采用 C40; 轻质混凝土连续刚构桥(LC0、LC1、LC2)上部结构除墩顶 0 号、1 号块及边跨直梁段用 C55 外, 其余均选用 LC55, 下部结构仍采用 C40。

预应力钢材: 纵横向预应力钢材均采用符合国家标准(GB5224-95)的钢绞线, 钢绞线标准强度为 1 860 MPa, 公称直径为 15.24 mm, 公称面积为 140 mm<sup>2</sup>, 弹性模量为  $1.9 \times 10^5$  MPa, 张拉控制应力为 1 395 MPa; 竖向预应力钢材采用符合国家标准 GB 1499-91 有关规定的  $\phi 32$  粗钢筋, 标准强度为

收稿日期: 2004-12-14

年已用于公路系统的重点特大桥梁江苏润扬长江大桥中。为了确保今后的公路大桥的质量、安全和经济合理, 使人不得不把这个方法存在的问题细致地揭示出来, 请大家来讨论研究, 并探讨对所存在的问题有无改正的途径。在没有改进之前, 笔者认为这个桩基测试方法不宜在公路桥梁中采用。

## 参考文献:

- [1] 龚维明, 等. 桩承载力自平衡测试法[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5).
- [2] 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 东南大学. 润扬长江公路大桥特殊条件下大吨位钻孔灌注桩研究[R].

2002.

- [3] 徐风云. 桩承载力自平衡法的可靠性之质疑[J]. 公路, 2004, (7).
- [4] 徐风云, 黄文机. 桩承载力自平衡法存在的几个关键问题[J]. 公路, 2005, (4).
- [5] 孙钧, 高大钊. 对“桩承载力自平衡法的可靠性之质疑”一文的认识[Z]. 2004.
- [6] 王伯惠, 上官兴. 中国钻孔灌注桩新发展[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [7] 交通部公路科学院, 等. 公路桥梁钻孔桩(上)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1978.
- [8] JTJ 024-85, 公路桥梁地基与基础设计规范[S].



750 MPa,张拉控制吨位为540 kN。

### 3 结构主要尺寸及预应力钢束布置

#### 3.1 上部结构主要尺寸

各模型均采用直腹板的单箱单室预应力混凝土箱梁结构,箱梁顶宽12 m,底宽6.5 m,单侧翼缘板悬臂长2.75 m。主梁0号块长度7 m,悬臂施工梁段长度分为2.5 m、3 m、3.5 m,中跨合拢段长度为2.0 m,边跨现浇梁段长8.0 m。其他尺寸各模型不尽相同,分述如下。

CC、LC0:根部梁高6.5 m,跨中和边跨端部梁高2.2 m,梁高沿纵向采用2次抛物线变化;底板厚度从跨中到根部为30~65 cm,采用2次抛物线变化;箱梁腹板厚度基本为40 cm和55 cm。

LC1:根部梁高6 m,跨中和边跨端部梁高1.8 m,梁高沿纵向采用2次抛物线变化;底板厚度从跨中到根部为30~60 cm,采用2次抛物线变化;箱梁腹板厚度基本为35 cm和50 cm。

LC2:根部梁高5.8 m,跨中和边跨端部梁高1.4 m,梁高沿纵向采用1.8次抛物线变化;底板厚度从跨中到根部为30~50 cm,采用1.8次抛物线变化;箱梁腹板厚度基本为32 cm和45 cm。

#### 3.2 上部结构预应力配索

纵向预应力:各模型均采用低松弛钢绞线束,设顶板束、下弯束和底板束。

横向预应力:采用3 $\phi$ 15.24钢绞线,以75 cm间隔布置,交错单端张拉锚固。

竖向预应力:采用 $\phi$ 32粗钢筋,间距为50 cm,厚腹板处双肢布置,薄腹板处单肢布置。

#### 3.3 下部结构

各模型下部结构相同,均采用双薄壁箱形墩,两薄壁墩中心距为5.0 m,单箱横桥向宽6.5 m,纵桥向宽2.0 m,横桥向、纵桥向壁厚均为50 cm。

### 4 上部结构计算

#### 4.1 结构离散

本次试设计因不涉及具体的生产任务,且设计模型的墩高较高,相比墩身而言,基础的纵向刚度很大,因此桥墩底面视为固结处理。结构分析采用有限元程序,将主梁离散为83个单元,桥墩离散为40个单元。

#### 4.2 运营阶段荷载组合

运营阶段荷载共进行6组内力组合,分别是:

组合1:恒+汽;

组合2:恒+汽+温1+沉1;

组合3:恒+汽+温2+沉1;

组合4:恒+汽+温1+沉2;

组合5:恒+汽+温2+沉2;

组合6:恒+挂。

以上各荷载组合中,组合1属于组合Ⅰ,组合2~5属于组合Ⅱ,组合6属于组合Ⅲ。

### 5 应力控制

#### 5.1 正应力上限控制

根据《桥规》,在使用荷载作用下,预应力混凝土构件的法向应力(扣除全部预应力损失)应符合下列规定。

荷载组合Ⅰ:  $\sigma_x \leq 0.5 R_a^b = 0.5 \times 39.9 = 19.95 \text{ MPa}$ ;

荷载组合Ⅱ、Ⅲ:  $\sigma_x \leq 0.6 R_a^b = 0.6 \times 39.9 = 23.94 \text{ MPa}$ 。

本试设计各模型主梁截面最大正应力控制情况:各模型中的组合1最大正应力范围为11.66~16.33 MPa,小于容许正应力(19.95 MPa);组合2~组合6的最大正应力范围为10.60~16.67 MPa,亦小于容许正应力(23.94 MPa)。

以上各模型主梁截面最大正应力均满足规范要求,且从应力云图可以看出各模型主梁截面正应力沿跨径分布较为均匀,显示各模型截面尺寸及预应力配束较为合理。

#### 5.2 正应力下限控制

各模型按全预应力进行设计,设计过程中对混凝土正应力下限进行控制,限定其大于0,使之具有一定的压应力储备。

本试设计各模型主梁截面最小正应力控制情况:CC中各组合最小正应力的范围为0.97~1.40 MPa;LC0中各组合最小正应力的范围为0.84~1.21 MPa;LC1中各组合最小正应力的范围为0.98~1.62 MPa;LC2中各组合最小正应力的范围为1.66~2.20 MPa。

以上各模型最小正应力均接近或大于1 MPa,结构在使用过程中不会出现拉应力,保证了结构安全可靠。

#### 5.3 主拉应力控制

根据《桥规》,在使用荷载作用下,预应力混凝土构件的主拉应力应符合下列规定。



荷载组合 I :  $\sigma_{st} \leq 0.8 R_t^b = 0.8 \times 3.28 = 2.62 \text{ MPa}$ ;

荷载组合 II :  $\sigma_{st} \leq 0.9 R_t^b = 0.9 \times 3.28 = 2.95 \text{ MPa}$ 。

试设计中通过合理的纵向及下弯预应力配束,在不计竖向预应力效果时,就将主拉应力控制在较小范围内;计入竖向预应力影响后,整个主梁的主拉应力将很小,从而能保证主梁斜截面的安全可靠。

本试设计各模型在不计竖向预应力时,主梁最大主拉应力情况:各模型中的组合1 最大主拉应力范围为  $1.37 \sim 1.67 \text{ MPa}$ ,小于容许主拉应力 ( $2.62 \text{ MPa}$ );组合2~组合6 的最大主拉应力的范围为  $1.20 \sim 1.84 \text{ MPa}$ ,亦小于容许主拉应力 ( $2.95 \text{ MPa}$ )。

以上各模型主梁主拉应力小于容许的主拉应力,且尚未计入竖向预应力的影响,当计入此影响后,主梁主拉应力将进一步降低,更增大了结构的安全储备。

## 6 试设计成果进行对比分析

### 6.1 轻质混凝土的使用对主梁尺寸的影响

表1~表4 分别给出了各模型主梁主要尺寸的比较,从中可见轻质混凝土的使用可大大减小主梁尺寸。我国普通混凝土连续刚构桥根部梁高与跨径之比多在  $1/15 \sim 1/20$  范围内,使用轻质混凝土后可降低至  $1/20.69$ ,小于国外最小高跨比(为  $1/20.6$ );跨中梁高与跨径之比多为  $1/46.3 \sim 1/73.7$ ,使用轻质混凝土后可降低至  $1/85.71$ ,小于国外最小高跨比(为  $1/85.1$ );底板根部厚度与跨径之比多大于  $1/207.7$ ,使用轻质混凝土后可降低至  $1/240$ ,与国外最小厚跨比(为  $1/248.3$ )接近;腹板最小厚度可减小至  $32 \text{ cm}$ ,基本接近国外最小厚度。

表1 各模型根部梁高比较

模型	根部梁高/m	根部高跨比	国内常用高跨比	国外最小高跨比
CC、LC0	6.50	1/18.46	1/15~1/20	1/20.6
LC1	6.00	1/20		
LC2	5.80	1/20.69		

表2 各模型跨中梁高比较

模型	根部梁高/m	跨中高跨比	国内常用高跨比	国外最小高跨比
CC、LC0	2.20	1/54.55	1/46.3~1/73.7	1/85.1
LC1	1.80	1/66.67		
LC2	1.40	1/85.71		

表3 各模型底板最大厚度比较

模型	根部厚度/cm	根部厚跨比	我国常用厚跨比	国外最小厚跨比
CC、LC0	65	1/184.6	大于1/207.7	1/248.3
LC1	60	1/200		
LC2	50	1/240		

表4 各模型腹板厚度比较

模型	腹板厚度/cm	国外最小厚度/cm
CC、LC0	40(跨中)、55(根部)	30
LC1	35(跨中)、50(根部)	
LC2	32(跨中)、45(根部)	

以上国外最小尺寸皆来自挪威的 RaftSundet 桥,该桥宽仅为  $10.3 \text{ m}$ ,比试设计模型 ( $12 \text{ m}$ ) 小,主跨中间部分用 LC60 等级的 HSLC (密度为  $19.5 \text{ kN/m}^3$ ),比试设计模型 (LC55, 密度  $20.5 \text{ kN/m}^3$ ) 强度更高,密度更小,由此可见本文对主梁尺寸进行了比较充分细致的优化,达到甚至超过了国外水平。若采用质量更好的 HSLC (密度更小,强度更高),则主梁尺寸水平比 RaftSundet 桥更加轻型是完全有可能的。

### 6.2 轻质混凝土的使用对材料用量及造价的影响

各模型主梁主要的材料用量见表5、表6。从表中可见,轻质混凝土的使用可减小混凝土的用量 (LC2 比 CC 降低  $15.3\%$ );结构尺寸相同时轻质混凝土的使用可大大降低预应力钢材用量 (LC0 比 CC 降低  $15.4\%$ );即使结构尺寸减小较多,预应力钢材用量仍比普通混凝土桥小 (LC2 为 CC 的  $0.997$  倍)。

表5 各模型主梁混凝土及预应力钢材数量

模型	普通混凝土/ $\text{m}^3$	轻质混凝土/ $\text{m}^3$	混凝土总量/ $\text{m}^3$	主梁自重/kN	预应力钢材/t
CC	2 779.4	—	2 779.4	72 264	167.1
LC0	436.3	2 343.1	2 779.4	59 377	141.4
LC1	387.7	2 196.1	2 583.8	55 100	152.1
LC2	353.5	2 001.2	2 354.7	50 216	166.6

注:表中混凝土未计横隔板,钢材只计纵向预应力。

表6 各模型主梁主要材料与CC模型的比值

模型	混凝土总量	主梁自重	预应力钢材
CC	1	1	1
LC0	1	0.822	0.846
LC1	0.930	0.762	0.910
LC2	0.847	0.695	0.997



轻质混凝土单位造价仅比普通混凝土高约5%~7%,而轻质混凝土的使用却使混凝土与预应力钢材的用量明显减小,因此主梁造价将明显降低;加之主梁随着轻质混凝土的使用和结构尺寸的优化减小,主梁自重将显著降低(LC2比CC降低30.5%),在结构自重占总荷载效应绝大部分的大跨径桥梁中,必将大大减少下部结构及基础工程量,从而进一步节约工程造价;若再考虑施工节段重量的减轻可减少挂篮自重以减小悬臂施工难度、或增大施工节段长度以减少工期的因素,则将愈加节约投资,增大经济效益。根据国外经验,工程总造价一般可降低10%~20%,且跨径越大投资节约越多。即使采用进口的轻集料,仍可使工程造价降低5%~10%。随着研究开发的不断深入,轻质混凝土的成本必将进一步降低,轻质混凝土的应用也将进一步给工程带来更好的经济效益。

## 7 结语

(1)轻质混凝土的使用可减小上部结构尺寸。主梁根部高跨比可降至1/20.6以下,跨中高跨比可降至1/83以下,根部底板厚跨比可降至1/250,腹板最小厚度可降至32 cm。

(2)轻质混凝土的使用可节约上部结构混凝土

及预应力钢材用量,降低工程造价。结构尺寸相同时,轻质混凝土的使用可使预应力钢材用量减少15.4%;经过尺寸优化,混凝土用量最多可减少15.3%;即使结构尺寸减小较多,轻质混凝土桥预应力钢材用量仍比普通混凝土桥小。

(3)轻质混凝土的使用可显著降低主梁自重,经尺寸优化最大可降低30.5%。上部结构重量的减轻,一方面可减小基础工程量;另一方面也可降低施工难度,或可增大施工节段长度以减少工期,这些将会进一步节约工程投资。

## 参考文献:

- [1] 马保林. 高墩大跨连续刚构桥[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [2] JTJ 021-89,公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] JTJ 023-85,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [4] 中国工程建设标准化协会标准. 轻骨料混凝土桥梁技术规程(征求意见稿). 2002.
- [5] 叶征伟,胡大琳. 预应力高强轻质混凝土大跨径连续刚构桥研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2004.
- [6] 周军生,宋桂峰. 挪威 Raft Sundet 桥简介[J]. 国外公路,2000,(5).

# Analysis of Application of High-Strength Light-Weight Concrete to Continuous Rigid Frame Bridge

ZHENG Yong<sup>1</sup>, HU Da-lin<sup>1</sup>, SHEN Yong-lin<sup>2</sup>

(1. Highway Institute, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Highway Survey and Design Institute of Yunnan Province, Kunming 650011, China)

**Abstract:** Respectively using common concrete and high-strength light-weight concrete, a continuous rigid frame bridge with main span of 120 m is tried to design, their geometry dimensions of superstructure and setting style of prestressed bars are optimized, and the structure optimization and the economic index analyzed.

**Key words:** continuous rigid frame bridge; high-strength light-weight concrete; try to design; comparing analysis