

埃塞俄比亚阿拜河特大桥设计与分析

弥恒¹, 赵学焘¹, 周卫¹, 陈力²

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 中交一公局集团有限公司, 北京市 100024)

摘要:阿拜河特大桥是埃塞俄比亚建设的第一座大跨径矮塔斜拉桥, 桥梁跨径为(100+180+100) m, 采用塔墩分离—塔梁固结的双索面结构体系, 主梁为斜腹板预应力混凝土箱梁, 该文从结构体系拟定、荷载作用效应、规范计算规定及材料用量指标等方面, 基于 AASHTO 及 CIP 规范, 进行分析计算, 并与中国公路桥梁设计规范的相应结果进行对比, 对于大型海外桥梁设计与建设具有一定的参考意义。

关键词:埃塞俄比亚; 阿拜河; 特大桥; 设计; 分析

1 工程概况

阿拜河特大桥位于埃塞俄比亚阿姆哈拉州首府巴哈达尔市, 为跨径(100+180+100) m 预应力混凝土双索面矮塔斜拉桥(图 1), 设计速度为 80 km/h, 双向六车道, 桥梁宽度为双幅 2×24.7 m, 采用 H 形钢筋混凝土塔, 桥址位于青尼罗河源头塔纳湖湖口, 建成后将成为该国跨越青尼罗河的重要通道及地标建筑。

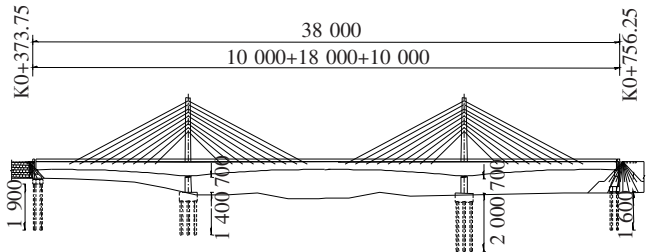


图 1 桥梁总体布置图(单位:cm)

桥梁采用 AASHTO、CIP 及当地规范进行设计, 考虑到规范的适用性, 风力、温度力、地震力等区域荷载采用当地规范确定, 桥梁整体计算及混凝土构件设计采用 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 斜拉索采用 CIP 规范中的 Cable Stays—Recommendations of French Interministerial Commission on Prestressing 进行设计。

2 结构体系拟定

桥梁概念设计为塔墩固结、塔梁分离的结构体系,

在详细设计阶段, 设计团队认为概念设计结构体系存在较大缺陷, 在温度及收缩徐变等效用的作用下, 会在索塔内引起较大的剪力和弯矩, 对索塔受力极为不利; 此外, 由于桥墩高度低、刚度大, 塔墩梁固结(刚构)体系会导致主梁应力较大; 经过综合对比分析, 最终拟定结构体系为塔梁固结、塔墩分离(图 2), 详见表 1。

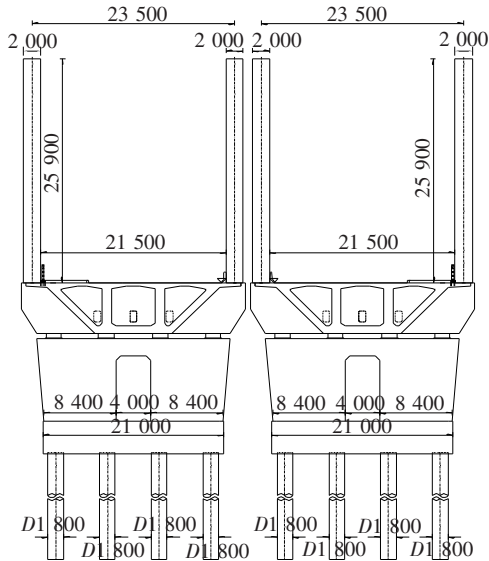


图 2 塔梁固结—塔墩分离结构体系(单位:mm)

3 主梁截面设计及拟定

桥梁单幅箱梁断面组成为 1.6 m(拉索锚固区)+0.5 m(护栏)+5 m(人行道)+3.5 m(绿色走廊)+0.5 m(护栏)+11.5 m(行车道)+0.5 m(护栏)+1.6 m

表1 结构体系对比

项目	结构体系	拒绝/采用原因	主塔根部弯矩/ (kN·m)	主梁最大 拉应力/MPa
概念设计	塔墩固结,塔梁分离	温度、收缩徐变会在主塔内产生较大内力	123 532	不消压
比选方案	塔墩梁固结(刚构)	桥墩高度低,刚度大,梁内应力大	15 221	9.01
推荐方案	塔梁固结,塔墩分离	塔、梁内力适中	12 127	不消压

(拉索锚固区),总宽度为 24.7 m。

箱梁根部梁高 5.8 m,跨中梁高 3 m,梁高按照 1.8 次抛物线渐变。箱梁顶板厚为 280 mm,跨中处底板厚为 300 mm,支点处底板厚为 850 mm,跨中段落边腹板厚为 400 mm,中腹板厚为 500 mm,支点处边腹板厚为 800 mm,中腹板厚为 1 100 mm。箱梁支点断面及跨中断面见图 3、4。

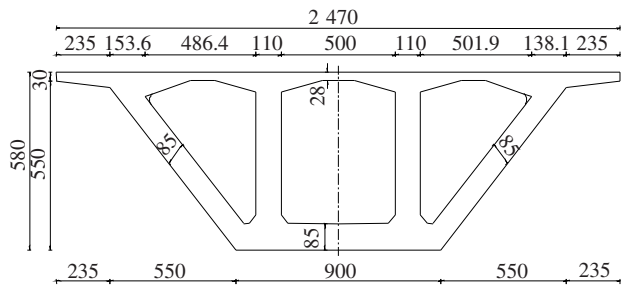


图3 箱梁支点断面(单位:cm)

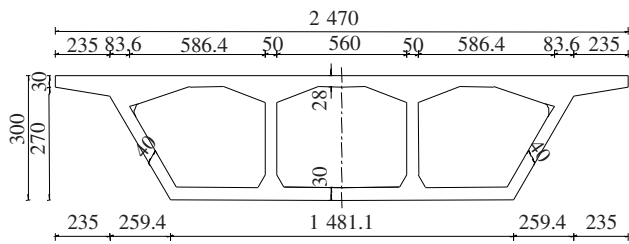


图4 箱梁跨中断面(单位:cm)

4 材料选用

4.1 混凝土

上部箱梁采用 C55 混凝土,主塔采用 C50 混凝土,下部结构采用 C40 及 C45 混凝土,均为立方体抗压强度。

《AASHTO LRFD Bridge Design Specifications》(以下简称美国规范)中,设计采用的混凝土强度称为名义强度 f'_c ,采用的是圆柱体抗压强度,圆柱体试件尺寸通常为 $\phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。文献[4]中,给出混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 与混凝土圆柱体抗压强度 f'_c 的

相对关系为 $f'_c = 0.8 f_{cu}$,在抗弯承载力验算时,可取混凝土强度设计值为 $0.85 f'_c$ 。

4.2 普通钢筋

普通钢筋采用美国规范中的 G420 和 G300 钢筋,屈服强度分别为 420、300 MPa,需要注意的是,美国规范在进行截面验算时,普通钢筋可直接取其屈服强度作为设计值,进行相应的抗弯承载力计算,无须除以类似中国规范中的材料安全系数。

4.3 预应力钢绞线

预应力钢绞线采用美国规范中的 Grade270 低松弛钢绞线,极限强度为 1 860 MPa,在承载力计算中,与普通钢筋类似,无须除以材料安全系数,但应按照应变协调关系确定钢束的应力。

5 汽车荷载

5.1 美国规范中的汽车荷载取值

美国规范中的汽车荷载称为 HL-93 荷载,对于整体纵向计算,由以下 3 种荷载构成:

(1) 车辆荷载,前轴重 35 kN,中轴和后轴重 145 kN,前一中轴轴距 4.3 m,中一后轴轴距 4.3~9 m,需要考虑冲击系数。

(2) 双轴荷载,共 2 轴,轴重 120 kN,纵向双轴距为 1.2 m,需要考虑冲击系数。

(3) 车道荷载,荷载纵向集度为 9.3 kN/m,双轴纵向距离 1.2 m,不考虑冲击系数。

荷载效应应取以下规定的最不利值:

(1) 双轴荷载与车道荷载同时作用。

(2) 车辆荷载与车道荷载同时作用。

(3) 对于反弯点之间的负弯矩和内墩反力,取 2 个车辆荷载加车道荷载总效应的 90%,此时车辆荷载中一后轴的轴距应取 4.3 m,2 个车辆荷载之间的纵向距离为 15 m。

5.2 汽车荷载效应计算对比

建立有限元模型,进行单车道汽车荷载效应计算,结果见表 2。

表 2 单车道汽车荷载效应

	边跨最 大弯矩/ (kN·m)	支点最 大弯矩/ (kN·m)	中跨最 大弯矩/ (kN·m)	中支点 反力/ kN
HL-93	16 946	-28 079	16 528	2 370
公路-I级	17 679	-27 144	17 426	2 439

由表 2 可知:汽车荷载正弯矩计算效应美国规范小于中国规范,负弯矩计算效应美国规范大于中国规范,支点反力基本持平。

5.3 车道横向折减系数

美国规范的横向车道折减系数详见表 3,与中国规范不同,美国规范在确定横向车道折减系数时,人行道也需考虑在行车道的数目内(例如:布载 2 条行车道,1 条人行道,则车道横向折减系数需按 3 条车道考虑,即取值为 0.85)。

表 3 横向车道折减系数取值

车道数量	横向车道折减系数	
	美国规范	中国规范
1	1.20	1.20
2	1.00	1.00
3	0.85	0.78
4	0.65	0.67

根据规范规定,阿拜河桥共可布载 3 条行车道,1 条人行道(5 m 宽专用人行道 1 条+3.5 m 宽城市绿色走廊一条,偏安全计,按照 8.5 m 宽专用人行道合并考虑),则可能的布载情况如表 4 所示。

表 4 阿拜河桥布载取值

布载 工况	布载车 道数量	布载人行 道数量	美国规范 布载取值	中国规范 布载取值
1	3	1	1.95 倍单车道 效应+1 倍人 群荷载效应	2.28 倍单车 道效应+1 倍 人群荷载效用
2	3	0	2.55 倍单车道 效应	2.28 倍单车 道效应

该桥人行道布载宽度较宽,根据计算,工况 1 的布载情况为最不利布载,按此进行设计计算。

6 荷载效应组合

表 5 列出汽车荷载效应为主要活载效应时美国、

中国规范的主要荷载效应组合系数对比。

表 5 荷载效应组合系数对比

规范	极限状态	荷载效应组合系数			
		一期 恒载	二期 恒载	汽车 效应	温度 梯度
美国 规范	承载极限状态	1.25	1.5	1.75	-
	使用极限状态	1.0	1.0	1.0(0.8)	0.5
中国 规范	承载极限状态	1.2	1.2	1.4	-
	使用极限状态	1.0	1.0	1.0 (0.7/0.4)	1.0(0.8)

注:① 美国规范括号内外分别是组合 3、1 对应的组合系数;② 中国规范括号内外分别为永久值系数和标准组合对应的组合系数。

7 混凝土正应力限值

按照美国规范中节段施工桥梁的规定进行正应力控制,美、中规范混凝土应力限值如表 6 所示。

表 6 混凝土正应力限值(节段施工桥梁)

规范名称	构件类型	压应力限 值/MPa	拉应力限 值/MPa
美国规范	非接缝处	$0.6\varphi_w f'_c$	$0.50\sqrt{f'_c}$
	桥梁接缝处	$0.6\varphi_w f'_c$	$0.25\sqrt{f'_c}$
中国规范	全预应力	$0.5f_{ck}$	0

阿拜河桥为箱梁,按照 $\varphi_w = 0.93$ 进行计算,美、中规范对应 C55 混凝土的应力限值如表 7 所示。

表 7 C55 混凝土正应力限值

规范名称	混凝土强度/ MPa	压应力限 值/MPa	拉应力限 值/MPa
美国规范	$f'_c = 44(f_{cu} = 55)$	24.55	3.32/1.66
中国规范	C55($f_{cu} = 55$)	17.75	0

由以上分析可见,混凝土应力限值方面,美国规范的要求较为宽松。

8 索塔设计

该桥采用变截面 H 形桥塔,塔高 25.9 m,索塔横桥向宽度 2 m,索塔顶部纵向宽度 3 m,索塔根部纵桥向宽度 4 m。根据 CIP 规范,结构设计时需要考虑一根斜拉索意外断索的工况,相关荷载的组合系数为:

1.1 恒荷载+1.35 二期荷载+0.75 活荷载+ α 拉索索力。 α 为动力系数,取值范围为 1.5~2.0,该桥取为 2.0。根据 CIP 规范计算结果,索塔设计中起控制作用的为断索工况,需要按此工况进行配筋设计,结果如表 8 所示。

表 8 索塔承载能力极限状态设计荷载(最大值)

工况	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
正常工况	58 938	1 123	13 846
1 号索断索	53 085	5 901	54 708
9 号索断索	53 646	14 072	63 826

9 主梁纵向整体计算

主梁采用悬臂对称施工,每个施工节段长 3.5 m,顶板钢束采用 15-17(根-丝,下同)及 15-19 两种型号,底板钢束采用 15-19 及 15-22 两种型号,采用通用有限元程序建立模型,详细模拟悬臂施工、体系转换及成桥阶段,主梁及索塔采用铁木辛哥梁单元,考虑剪切变形的作用,拉索采用桁架单元。

表 10 主梁正应力验算

位置	AASHTO LRFD 规范				中国规范			
	压应力	规范限值	拉应力	规范限值	压应力	规范限值	拉应力	规范限值
跨中截面	12.18	24.55	2.69	-1.66	10.50	17.75	2.68	0
墩顶截面	16.13	24.55	7.04	-1.66	15.20	17.75	7.05	0

由表 10 可见:美国规范计算的正截面压应力极值略大于中国规范,主要原因为美国规范的温度梯度作用效应较大;在拉应力方面,截面均不消压,且计算结果接近,原因为荷载组合系数、温度梯度效应及人群荷载的取值不同,抵消了汽车荷载横向折减系数取值不同引起的差异,使两国规范拉应力计算结果趋同。

在拉、压应力限值方面,美国规范的要求均较为宽松,使主梁的材料用量更为节省,计算结果详见表 10。

10 斜拉索验算

该桥采用的斜拉索为满足相关试验规程的 1 860 MPa 镀锌钢绞线,1~3 号索采用 43 根 D15.2 mm (1×7),4~9 号索采用 55 根 D15.2 mm (1×7),根据 CIP 规范,斜拉索应力限值在正常使用极限状态

9.1 承载能力极限状态验算(ULS)

采用 AASHTO LRFD 进行作用效应及承载能力极限状态(ULS)分析及计算,并采用中国规范进行对比校核,详细的效应及承载力计算结果见表 9。

表 9 主梁抗弯承载力验算 kN·m

位置	AASHTO LRFD 规范		中国规范	
	设计值	承载力	设计值	承载力
跨中	278 209	566 601	285 953	399 993
墩顶	761 786	-1 959 573	831 877	-1 447 516

由表 9 可得:对于抗弯承载力,美国规范的计算结果较中国规范大,主要是因为美国规范的抗弯承载力计算与中国规范不同,无须除以材料安全系数,普通钢筋应力直接采用钢筋屈服强度,预应力钢束应力采用值基本接近钢束极限强度,混凝土应力采用值为 $0.85f'_c$ 。因此,在承载力计算方面,中国规范较为保守,而采用美国规范进行设计,则较为经济,钢材及钢绞线用量更省。

9.2 正常使用极限状态验算(SLS)

选取跨中及墩顶截面位置,进行应力分析(表 10)。

(SLS)应小于 0.6 倍的斜拉索强度,承载能力极限状态(ULS)应小于 0.75 倍的斜拉索强度,以中跨内索和外索为例,索力极值及规范限值见表 11。

11 材料用量对比

由于美国规范在承载力计算和应力限值方面要求均较中国规范宽松,该桥基于美国规范进行了设计优化,取得了较好的经济效益(表 12)。由表 12 可见:该桥的材料用量均低于中国类似跨径桥梁。

12 结论和建议

(1) 对于类似该桥的宽幅低墩矮塔斜拉桥,塔梁固结-塔墩分离体系是较为合适的结构受力体系,不

表 11 拉索应力及规范限值

MPa

拉索位置	正常使用极限状态(SLS)			承载能力极限状态(ULS)	
	索塔端应力	CIP 规范限值	中国规范限值	索塔端应力	CIP 规范限值
中跨内索	868	1 116	1 116	1 164	1 395
中跨外索	798	1 116	1 116	1 061	1 395

表 12 材料用量对比

桥名	跨径/ m	混凝土指标/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	预应力指标/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	钢筋指标/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	斜拉索指标/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
东宝河某大桥	120+216+120	1.41	79.80	236.51	33.90
汉江某大桥	125+220+125	1.31	73.36	270.85	25.82
滦河某大桥	115+200+115	1.24	64.00	269.66	27.50
该项目	100+180+100	1.23	54.13	217.00	24.60

会由于温度、收缩徐变等效应,在塔内或梁内产生过大内力,主梁和索塔受力均匀。

(2) 对于该桥跨径而言,单车道的 HL-93 正弯矩效应比中国规范公路-I 级小,负弯矩效应比中国规范公路-I 级大,支点反力基本持平。

(3) 美国规范需要考虑人行道对车道横向折减系数的影响,对于该桥而言,美国规范的车道横向折减更大,结构设计更加经济。

(4) 根据 CIP 规范的相关规定,断索工况控制主塔设计。

(5) 正常使用极限状态下,美国规范的混凝土应力限值较为宽松,中国规范较为保守。

(6) 同等跨径和结构形式下,采用美国规范进行矮塔斜拉桥上部设计时,材料用量较低,经济指标较好。

参考文献:

- [1] GREGG FREDRICK, BRUCE V. JOHNSON, M. MYINT LWIN, et al. AASHTO LFRD Bridge Design Specifications—2014[S].
- [2] Takeshi Suzuki, Robert Geddes, Les Sampson, et al. ERA Bridge Design Manual—2013[S].
- [3] Robert Chaussin, Yves Bournand, Alain Chabert, et al. Cable Stays—Recommendations of French Interministerial Commission on Prestressing—2002[S].
- [4] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [5] JTG C3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [6] 贡金鑫,魏巍巍,胡家顺.中美欧混凝土结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.