

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.028

基于美国规范的钢-混组合梁桥设计方法分析与应用

杨凯^{1,2},刘婉玥^{1,2},周小伍^{1,2}

(1.安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司,安徽 合肥 230088;2.交通运输部公路交通节能与环保技术及装备研发中心,安徽 合肥 230088)

摘要:基于印度尼西亚雅加达—芝坎佩高速公路改扩建高架桥实际项目,该文针对美国规范相关组合梁的设计方法、加载模式、承载力计算等进行介绍,并对规范条文依据的设计理论进行分析,对截面类型划分进行梳理,为桥梁设计者应用与理解美国AASHTO规范提供参考。

关键词:钢-混组合梁;美国规范;截面类型

中图分类号:U442.51 **文献标志码:**A

0 引言

钢-混组合梁桥由于其优异的结构与建造性能,在部分发达国家得到广泛运用。《AASHTO荷载与抗力系数法桥梁设计规范》(AASHTO LRFD Bridge Design Specification)(以下简称“美国规范”)是美国公路桥梁设计的主要规范^[1],在国际桥梁设计行业具有较高的认可度,在一些亚洲与非洲国家,美国规范也被作为设计的主要依据。本文主要对美国规范中的钢-混组合梁设计方法、荷载模式与组合、分析方法、承载力计算等进行介绍与分析,以期对中国钢混组合梁设计提供参考,对国外工程项目设计提供帮助。

1 规范介绍

1.1 设计方法

美国规范采用LRFD(Load and Resistance Factor Design)的设计方法^[2],即荷载与抗力系数设计法,该方法将具有不确定性的结构抗力和作用效应变异性通过荷载与抗力系数进行考虑,具体表达式见式(1):

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad (1)$$

式中: γ_i 为荷载系数; ϕ 为抗力系数; η_i 为荷载修正系数(与延性、超静定性、运营重要性有关); Q_i 为名义荷载; R_n 为名义抗力; R_r 为乘有系数的名义抗力。

美国规范中定义了4种极限状态^[3]。① 正常使用极限状态:在正常运营的状态下,主要控制结构的变形、应力及裂缝宽度,目的是确保结构在设计期内的性能表现;② 强度极限状态:涉及结构的安全性,指结构达到极限承载力的状态,需要保证结构的强度和稳定性,在特定的荷载组合下保证结构不倒塌;③ 极端事件极限状态:针对地震、车辆及船舶撞击和流冰荷载等状态下的结构安全度;④ 疲劳和断裂极限状态:主要针对钢结构,满足特定荷载循环加载下的结构安全。

1.2 荷载模式与荷载组合

美国规范的活载模式为HL-93^[4],其包含两项组合:① 集中荷载;② 车道荷载。集中荷载分为设计货车荷载与设计双轴荷载。设计货车的荷载模式见图1(a),其前轴重35 kN,中轴与后轴重均为145 kN,前轴与中轴相距4.3 m,后两轴轴距为4.3~9 m;设计双轴的荷载模式见图1(b),两轴轴重均为110 kN,轴距1.2 m,横向轮距1.8 m。设计车道荷载纵向为9.3 kN/m,横向均布在3 m宽的车道上[图1(c)]。

收稿日期:2023-07-04(修改稿)

作者简介:杨凯,男,硕士,工程师.E-mail:894134800@qq.com

对结构进行加载时,应按表1所述方式进行。正弯矩进行两种方式加载:① 车道荷载+一辆设计货车;② 车道荷载+设计双轴,取两种加载计算效应的较大值;负弯矩区(恒载反弯点之间)相较于正弯矩区,还需进行第三种方式加载:③ $0.9 \times$ 车道荷载+ $0.9 \times$ 两辆设计货车,货车后轴距离取4.3 m,两辆货车之间的距离为15 m。

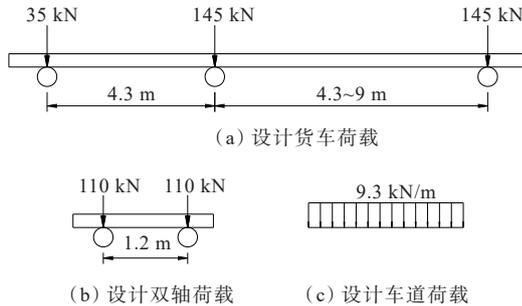


图1 HL-93汽车荷载计算图示

表1 活载加载方式

荷载模型	正弯矩区	负弯矩区	挠度计算	疲劳
车道荷载+一辆货车	✓	✓		
车道荷载+双轴	✓	✓		
0.9车道荷载+0.9两辆货车		✓		
货车			✓	✓
0.25货车+车道荷载			✓	

美国规范的整体温度作用有A、B两种方式:① 方式A基于桥梁的传统设计方法,采用设计时假定的基本施工温度与上限或下限之间的温差计算温度效应;② 方式B根据气候分区选取最高和最低有效温度标准值。钢-混组合桥梁可选用方式A或者方式B进行计算。美国规范的梯度温度模式与中国桥规类似,只是数值上有所差别,且需要根据不同的区域选择对应的温度数值。

美国规范规定了5种强度极限状态与4种正常使用极限状态,对于钢-混组合梁的常规计算,常用的两种组合为:强度极限状态I(无风时车辆正常行驶的基本荷载组合)与正常使用极限状态II(旨在控制钢结构屈服的荷载组合),其组合系数见表2。

表2 美国规范常用组合荷载组合系数

状态	自重	铺装	收缩徐变	汽车荷载	沉降	梯度温度	均匀温度
强度状态I	1.25	1.5	1.25	1.75	1.0	—	0.5/1.2
正常使用II	1.00	1.0	1.00	1.30	—	—	1.0/1.2

1.3 分析方法

组合梁的计算一般将混凝土桥面板换算成钢材。在计算钢梁应力时,美国规范将组合梁截面分为3类:① 钢梁截面,即桥面板未与钢梁结合之前的截面,此时施加的荷载由钢梁单独承受;② 短期组合截面,用于承受短期荷载,如活载、风荷载、温度等;③ 长期组合截面,用于承受恒荷载。

短期截面与长期截面的区别在于将混凝土换算成钢梁时,采用的不同弹模比:短期截面采用弹模比 n ,按式(2)计算;长期截面考虑混凝土徐变影响,采用弹模比 $3n$ 。

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (2)$$

式中: E_s 为钢材弹性模量; E_c 为混凝土弹性模量。

对于中小跨度的组合梁,不使用预应力钢束,允许负弯矩区桥面板带裂缝工作是一种较为通用的设计方法^[5-7],美国规范亦采用该方法。基于该方法,截面抗弯刚度分为未开裂截面刚度 EI_{un} 和开裂截面刚度 EI_{cr} 。计算开裂截面惯性矩 I_{cr} 时,计入混凝土板有效宽度内的纵向钢筋的作用,不考虑受拉区混凝土对刚度的影响。

与《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)不同的是,在计算内力时,美国规范认为混凝土桥面板在整个跨度内都充分有效,此时不考虑截面开裂对刚度的影响。根据所得到的内力计算应力时,此时须使用开裂惯性矩 I_{cr} 。开裂截面对内力的影响,在美国规范中可以通过弯矩调幅实现,见图2, M_{rd1} 与 M_{rd2} 分别为支座1与支座2处的重分布弯矩,其值小于弹性弯矩的20%。

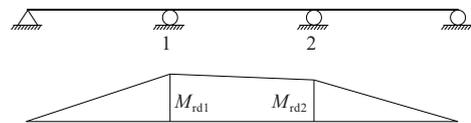


图2 典型弯矩重分布图解

2 承载能力计算

美国规范截面承载能力的计算考虑的截面塑性发展,首先需要对截面进行分类,判断截面是否具有塑性发展能力,然后确定截面失效方式。以正弯矩区截面抗弯为例,根据 $M-\Phi$ 曲线,将截面分为4类:

① 超密实截面,全截面达到塑性,并可形成塑性铰(形成内力重分布);② 密实截面,全截面达到塑性,但不能形成塑性铰;③ 非密实截面,截面边缘应力达到材料设计强度;④ 细长截面,在截面边缘应力达到设计值前,截面发生屈曲。美国规范中一般将正弯矩区的抗弯截面设计为密实截面。参照正弯矩区截面分类,对腹板、负弯矩区受压翼缘同样进行分类,美国规范中涉及到的常用截面分类见表3。

表 3 截面类型划分

部位	截面类型	分类标准
正弯矩区	超密实截面	截面塑性发展能力
	密实截面	
	非密实截面	
	细长截面	
负弯矩区	密实翼缘	是否发生局部屈曲
	非密实翼缘	
	细长翼缘	
	受压翼缘	
受压翼缘	密实支撑长度	是否发生横向扭转屈曲
	非密实支撑长度	
	细长支撑长度	
	细长支撑长度	
腹板	密实腹板	是否发生剪切屈曲
	非密实腹板	
	细长腹板	

2.1 抗弯承载力验算

对于密实截面,截面的抗弯承载力按式(3)计算,抗弯系数取1.0;对于工字形组合梁,截面的抗弯承载力按式(4)计算。式(4)相比于式(3), $f_t S_{xt}/3$ 是为考虑横向弯矩对主梁承载力的影响,如风荷载引起的弯矩。对于非密实截面,则需要验算钢梁的上缘应力与下缘应力。

$$M_u \leq \phi_f M_n \tag{3}$$

$$M_u + \frac{1}{3} f_t S_{xt} \leq \phi_f M_n \tag{4}$$

式中: M_u 为计算弯矩; ϕ_f 为抗弯系数; M_n 为组合截面名义抗弯承载力; f_t 为翼缘横向弯矩应力; S_{xt} 为截面弹性抗弯模量。

2.2 抗剪承载力验算

截面抗剪主要由钢梁腹板承担,美国规范该假定与中国规范一致。根据美国规范,腹板可设计为加劲腹板与无加劲腹板。加劲腹板(图3)需要满足:① 无纵向加劲肋,内板段横向加劲肋间距 d_0 不超过 $3D$,端板段不超过 $1.5D$;② 设置纵向加劲肋且横向加劲肋间距不超过 $1.5D$,否则腹板被视为无加劲腹板。

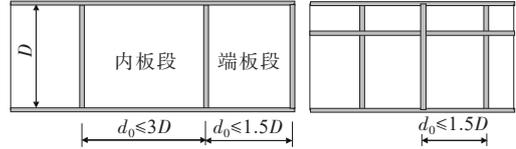


图 3 加劲腹板示意图

美国规范对抗剪承载力的计算规定较为细致,需根据腹板截面类型选取相应的计算参数。以无加劲腹板为例,根据腹板高厚比的不同,根据式(5)计算,可以得到不同的计算结果,腹板抗剪承载力与腹板高厚比的关系见图4。

$$V_u \leq 0.58 \phi_v C F_{yw} D t_w \tag{5}$$

式中: ϕ_v 为抗剪系数; F_{yw} 为腹板抗剪强度; D 为腹板高度; t_w 为腹板厚度; C 的取值与腹板的截面类型有关。

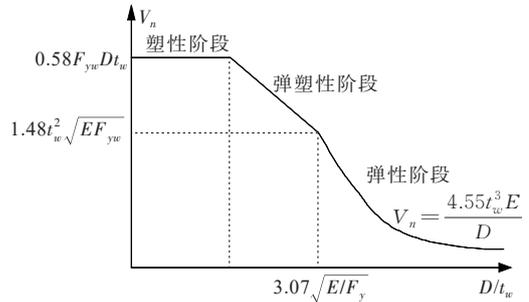


图 4 无加劲腹板抗剪承载力与腹板高厚比关系

对于加劲腹板,其计算原理与无加劲腹板相同,需要根据腹板构造,确定 C 值。另外对于内板段,如果上下翼缘对腹板约束较强,抗剪承载力的计算需要考虑腹板拉力场作用,见图5,拉力作用的详细计算参见美国规范具体条文。

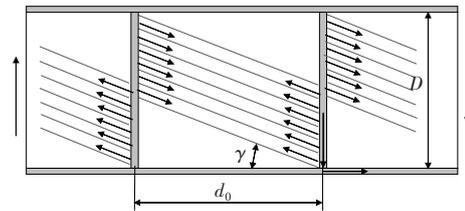


图 5 腹板拉力场原理示意图

3 正常使用状态验算

正常使用状态需要满足应力与挠度要求。在计算负弯矩应力时,首先假定正负弯矩区混凝土板全部有效,如果算得的混凝土拉应力小于 $2f_t$ (f_t 为混凝土抗拉强度设计值)时,计入负弯矩区混凝土贡献,否则不计入负弯矩区混凝土贡献。同时为控

制裂缝发展,钢筋应在板宽范围内均匀布置,其中的2/3应设置在上层,每一排中钢筋的距离不应超过305 mm,在连续梁的负弯矩区内,纵向钢筋的配筋率不应小于1%,钢筋的屈服强度不低于400 MPa。

4 工程实例

印度尼西亚雅加达—芝坎佩高速公路改扩建高架桥基于美国规范进行设计,全长36.84 km^[8],其中标准结构为60 m等高筒支窄幅钢箱组合梁,主梁由开口钢箱梁与现浇桥面板组成,断面布置图见图6。

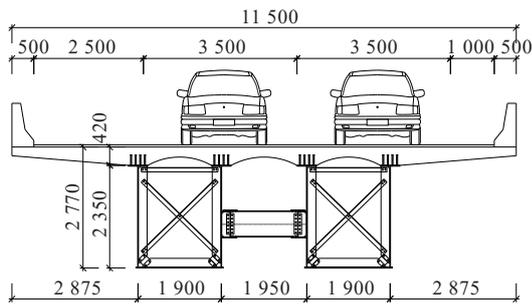


图6 结构断面图(单位:mm)

钢主梁梁高2.35 m,箱宽2.0 m,两主梁间距3.85 m。箱间联系横梁7.5 m一道。横撑由 $\angle 100 \times 10 \times 10$ 角钢与腹板和底板加筋肋组成。为确保施工期间的钢梁稳定,设置由 $\angle 100 \times 10 \times 10$ 角钢组成的平联。梁段划分与具体尺寸见表4,上下翼缘采用等厚设计,不同梁段采用不同等级钢材以适应梁段受力变化。

表4 结构尺寸

梁段	梁段长度/m	钢材等级	上翼缘/mm		腹板/mm		下翼缘/mm	
			宽	厚	宽	厚	宽	厚
BG1	11	SM520	450	21	2 307	16	2 000	22
BG3	12	SM570	450	21	2 307	20	2 000	22
BG5	12	SM570	450	21	2 307	20	2 000	22
BG4	12	SM570	450	21	2 307	20	2 000	22
BG2	11	SM520	450	21	2 307	16	2 000	22

组合截面在跨中的抗弯计算与支点处抗剪计算结果见表5,计算结果均满足美国规范设计要求。

表5 按美国规范承载力验算结果

验算工况	验算位置	截面类型	设计值	承载力
抗弯承载力	跨中截面	密实截面	5 721 kN·m	9 556 kN·m
抗剪承载力	支点截面	细长腹板	6 305 kN	10 700 kN

5 结论

(1) 美国规范设计内力通过弹性分析的方法得到,连续梁负弯矩区桥面板开裂对内力分布的影响可通过弯矩调幅实现。

(2) 美国规范的承载力计算考虑塑性发展,根据截面分类不同采用不同的计算公式,截面分类依据构造进行确定。

参考文献:

- [1] LRFD bridge design specifications: AASHTO LRFDUS[S]. AASHTO, 2020.
- [2] 梁程亮.中美混凝土桥梁设计规范对比与分析研究[D].南京:东南大学,2015.
- [3] 刘城.基于美国组合钢板梁桥通用图的中美桥梁设计规范对比[D].西安:长安大学,2019.
- [4] 王磊,陈鹏飞,张旭辉,等.钢筋混凝土公路桥梁承载力评定的中美规范对比分析[J].中外公路,2017,37(6):93-98.
- [5] 陈军刚,郭绍成,陈孔令,等.钢-混凝土组合桥梁在云南山区常规大跨梁桥中的应用[J].中外公路,2019,39(2):193-197.
- [6] 陈洪伟,贺国栋,王甜.多梁式工形截面钢混组合梁桥荷载横向分布的参数分析[J].中外公路,2021,41(3):161-165.
- [7] 熊先勇,傅亚军,黄蓂.钢-混组合梁斜拉桥钢主梁安装方法分析与误差控制[J].中外公路,2023,43(3):126-133.
- [8] 殷亮.印度尼西亚雅加达至芝坎佩高架桥方案设计[J].现代交通技术,2019,16(2):43-46.