

钢—混凝土组合桥梁在云南山区 常规大跨梁桥中的应用

陈军刚, 郭绍成, 陈孔令, 张皓

(云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041)

摘要: 云南山区地形多变、地质复杂、抗震要求高、生态环境脆弱;区域内钢—混凝土组合结构的使用和推广需要考虑的因素很多。该文从山区桥梁特点入手,并以此为基础,分别就钢—混凝土组合结构在云南山区的适用跨径、桥面板选型、截面设计选型意图、施工方法等方面进行说明,并对近几年钢—混凝土组合梁在云南山区的应用推广情况进行了简要介绍。

关键词: 钢—混凝土组合桥梁;山区;常规大跨桥梁;设计;施工;应用与推广

混凝土材料具有较高的刚度和抗压强度,但抗拉强度低;钢材强度高、韧性好,公路桥梁使用中多为薄壁构件,受压区在缺少侧向约束的条件下易发生失稳破坏;钢—混凝土组合结构在受压区保留混凝土翼缘板,受拉区只配置钢梁,二者通过抗剪连接件组合成整体。既不会产生混凝土受拉开裂问题,也不会因钢梁受压侧刚度弱而发生失稳,同时还具备较高的刚度和较轻的自重。组合结构具有良好受力性能的同时,还继承了钢结构和混凝土结构各自在施工性能、耐久性、经济性等方面的优点,在综合效益上具有很大的竞争力。2016年,交通运输部发布了《关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》(交公路发[2016]115号),受到行业内各方面的高度关注,很多省份着手钢—混凝土组合结构相关地区通用图研发工作。云南省地处欧亚大陆东南部,全省39.4万km²的土地上,山地面积约占94%,属于典型西南山区。该文对云南山区桥梁在钢—混凝土组合结构方面的应用和推广进行探讨。

1 云南山区公路桥梁设计特点

1.1 地形复杂

云南地形复杂,大面积土地高低不平,纵横起伏,海拔高异常悬殊。最高点为滇藏交界的德钦县梅里雪山主峰卡格博峰,海拔6740m;最低点在与越南交界的河口县境内南溪河与元江交汇处,海拔仅76.4m,两地直线距离为900km,高低相差6000多m;总

体而言,云南省地形具有波状起伏、高山峡谷相间、地势阶梯梯降、断陷盆地错落等特点。

随着公路建设的不断推进,人口相对集聚的坝区建设已相趋完善;“山、边、高”地区的公路建设正如火如荼,山区高墩大跨桥梁[该文大跨主指40~80m跨径常规梁桥;按现行桥规规定:80~150m跨径也属大跨范围,但此跨径区域内桥梁多进行特殊设计(属非常规桥)或更倾向于采用钢桥面系(属纯钢结构、非组合梁桥),不在该文讨论之列,以下不再赘述]往往难以避免,山高坡陡的地形条件,对施工进场、现场调度更带来了不小麻烦。该地区桥梁结构如何进行合理选型,一直都是工程师们孜孜追求的方向,钢—混凝土组合结构又该如何灵活运用,也是极具探讨性的问题之一。

1.2 地质复杂、抗震要求高

云南省内各时代地层都有分布,出露齐全,层序清晰,发育良好。从地质构造角度来看,云南是一个多种构造带交织复合的地区,呈现出一幅复杂的地壳演变图像,根据各时期洋、陆壳的变迁,几处深大断裂的多期活动,形成了沉积建造、岩浆活动及各构造单元迥然不同的几个部分。省内多条深、大断裂发育,以北西向及南北向最为发育,其中,深断裂主要有哀牢山断裂、小江深断裂带、澜沧江深断裂带3条;大断裂含富宁大断裂、南盘江大断裂、程海—宾川大断裂等在内共计14条,地质条件整体复杂。

云南平均每年发生5级以上地震3次;每2年发生6~6.9级地震1次;每8年发生7级以上大震1

次。在占中国 4% 的国土面积上,释放的地震能量占中国的 23%。全省范围内具有频度高、震级大、分布广、灾情重 4 大特点;频繁的地震使区域具有山体(坡面)破碎、岩体卸荷裂隙发育、岸坡稳定问题突出、生态环境脆弱的特点;针对以上特点进行桥梁设计时,常规中小跨度桥梁(主指 20~40 m 跨度预制 T 梁、小箱梁)已难以满足建设合理需要;山区对桥梁跨越能力、抗震能力均提出了更高的要求。

1.3 山区公路及桥梁特点

山区地形复杂,公路多需穿越狭长地段,存在走廊带布局问题,或出现在垭口,或出现在山谷,公路、铁路、水利、电力、通信设施经常要同时利用同一走廊带,选定一条合理的走廊实属不易,故山区公路布线时须把走廊带作为一种不可再生的资源对待,需倍加珍惜。

山区公路走廊带空间布局有限,桥梁与临近铁路、水利、电力、通信、管线在局部路段多有交织或需直接跨越;遵照现行各行业相关规范,均有相邻构造物最小间距的规定,这常常成为公路桥梁孔跨布设的直接依据。山区桥梁跨河、跨既有道路、跨既有管线,与电力输送系统交叉颇为常见,多种构造物在同一狭小空间内,为减小新建结构对既有结构的影响,跨径更大、施工方法更灵活的大跨结构需求愈显强烈。

1.4 桥梁结构选型地区适应性

理论上讲,在外部建设条件一定的情况下,不同桥梁设计方案在满足结构安全、构造需要、经济差异不大的情况下均可实施;但中国地广省多,不同省份/地区需依据各自地形、地质、气象、水文等外部控制条件为设计基础,结合当地建设管理、设计、施工和养护相关参与方的特点,综合考虑后进行桥梁合理选型。

随着各省公路建设领域市场化的不断深入和开放,各设计单位理念的交流进一步加强,地区之间的差异性呈减小趋势,但地区差异性依然存在。例如,对立交区现浇箱梁设计,有采用 20 m 跨钢筋混凝土结构为主者,也有采用 25 m 跨预应力混凝土结构为主的地区;预制小箱梁(T 梁)有以结构连续为主者,也有地区以桥面连续为主。每种结构形式都有其优缺点,只要能科学合理应用,都不失为一种有效的结构形式。长期以来,云南地区结合地区和行业各参与方的特点,形成了立交区以现浇钢筋混凝土结构为主、预制装配式梁以先简支后结构连接为主的结构体系;多年实践表明:这与云南山区的建、管、养特点基本相适应。对于一个地区而言,当新开发一种结构形式时,应尽量进行不同结构类型协同、系统性考虑,尽量实现地区结构

标准化,有利于后期统筹管养一体化建设。

1.5 山区常规梁桥选型特点

根据以上描述可知,云南山区公路常规桥梁主要特点如下:

(1) 地形复杂,坡面较破碎,高墩大跨常规桥梁难以避免。

(2) 地质条件复杂,抗震要求高,上部结构宜轻型化。

(3) 走廊带狭小,多种构造物相互交织,对新建桥梁施工提出了更高要求。

(4) 桥梁选型宜适当考虑与当地业内各参与方特点相适应,利于标准化和管养统筹一体化管理。

2 钢—混凝土组合梁桥结构设计

山区常规梁桥选型时,中小跨径桥梁基本以板梁、预制 T 梁、小箱梁为主;但当桥梁需跨越铁路、较大河流、天然气(石油)管线等敏感构造物时,跨越能力大、结构轻盈、抗震性能好、施工方法灵活、施工周期相对较短的钢—混凝土组合结构往往具有很强的适应性。

2.1 适用跨径与桥面板形式选择

钢—混凝土组合主梁(图 1)具有经济、整体性好、受力可靠、设计与施工简单等优点,因而在常规桥梁中得到了广泛应用。

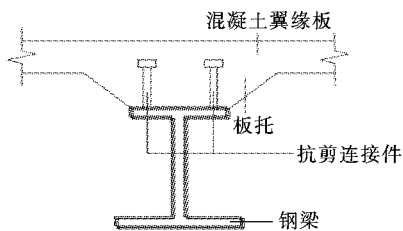


图 1 钢—混凝土组合结构

(1) 适用跨径

钢—混凝土组合梁与钢梁本质差别在于桥面板的选型不同。业界一般认为,跨径小于 60 m 时,采用钢筋混凝土板经济;跨径大于 80 m 时,采用钢桥面板较为合理;跨径为 60~80 m 时,两者可根据技术经济比较后确定桥面板形式。钢桥面铺装一般仅厚 50~70 mm,高温下易软化、老化,对车轮荷载的扩散分布和吸收冲击的能力都较差,一旦发生破损,行车平顺性差、汽车冲击荷载加大、钢桥面板的损伤都将进一步加大;再则,钢桥面板由于其相对复杂的构造、纵横加劲肋交叉多、焊缝多、行车道钢板两个方向刚度的差异性,使其应力变化幅度增大、极易产生疲劳和开裂;钢

桥面铺装、正交异性钢桥面板疲劳开裂问题一直被业界人员所诟病。云南山区气候存在“区域差异大、垂直变化明显”的特点,结合桥梁全寿命周期、区域标准化综合考虑,对于跨径为60~80 m的桥梁,现阶段一般宜按钢—混凝土组合梁结构考虑进行设计。

需要特别说明的是:对于上跨有保通需要重要公路/铁路的桥梁、平曲线半径较小的高墩桥梁,在方案选择时,更宜考虑采用整体刚度大(顶推需要)、施工周期短(干扰期短)的钢箱梁结构;除此之外,一般均可考虑采用钢—混凝土组合结构桥梁。

(2) 混凝土桥面板与组合桥面板

对于组合结构桥面板,可分为混凝土桥面板和钢—混凝土组合板两种主要类型。钢—混凝土组合板(一般采用加劲钢板—混凝土组合板,如图2所示),以下层钢板作上层混凝土的浇筑模板,可以极大方便施工;早在2006年竣工的广东佛山东平大桥上已有相关的研究和应用,但与国外相比,中国的研究及应用还相对落后,特别是基础理论研究方面;与混凝土桥面板相比,组合桥面板还存在结构用钢量增加、与山区变宽/曲线桥梁的施工适应性差等缺点(据初步测算,当钢材价格大于3 500元/t时,组合板从经济角度已基本不具明显优势);因此,在现阶段对钢—混凝土组合结构设计中,暂未对此作进一步考虑,桥面板设计暂按混凝土结构进行设计。

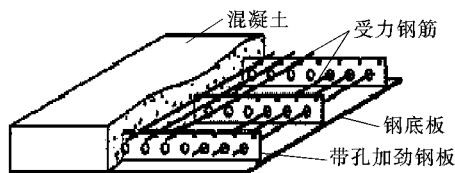


图2 加劲钢—混凝土组合板

(3) 混凝土桥面板的预制与现浇

目前混凝土桥面板可采用预制或现浇两种方式设计,中国一般采用现浇方式为主。具体到云南山区,桥面板浇筑方式的选择主要考虑以下因素:①区域抗震要求高,桥面板采用现场浇注施工,可提高上部结构整体性,利于抗震;②现浇桥面板通过调整桥面板宽度和悬臂长度,可以较好地适应山区桥梁宽度变化和平面线形变化;③混凝土采用现场浇注,无需预制场地,对地形和施工场地的要求相对较低。因此,现阶段云南地区的钢—混凝土组合梁桥面板设计也按现浇桥面板方式考虑。

(4) 连续梁负弯矩预应力施加方式选择

云南地处地震高发区,桥梁上部结构宜按结构连

续进行设计。对于组合连续梁负弯矩产生拉应力问题,常用措施有预加荷载法、调整支点标高法、设置预应力钢筋3种。其中,预加荷载法会增加施工难度、费用和时间;设置预应力钢筋,则由于混凝土收缩、徐变的影响,预应力损失比较明显;结合地区施工特点,云南山区基本选定采用控制桥面板浇筑顺序(先浇筑连续支点两侧一定范围以外区域桥面板,再浇筑中支点范围内桥面板)和调整支点标高法(连续处支点预抛高法)进行支点处纵向预应力施加方法。

2.2 截面设计

(1) 板梁与箱梁

钢板梁可采用主梁有工字钢、H型钢、焊接工形梁等结构形式。其中,工字钢和H型钢跨越能力小(通常在20 m以下),现阶段在山区推广价值不大,因此,该文所指板梁为跨越能力为40~60 m的焊接工形梁。钢板梁具有结构灵活、构造简单、受力明确、工地连接方便、单个构件重量轻等优点,在一定跨径范围内成为相对经济且采用最多的结构形式之一。但板梁的抗扭刚度和横向抗弯刚度均较小,在运输、安装和桥梁宽跨比小的桥梁应用中须重点关注横向失稳问题。而钢箱梁具有整体性能好、抗扭刚度高、横向稳定好、构件数量少、施工速度快、建筑高度小等特点,在跨高比大的桥梁、曲线弯桥设计中有其独特的优势;但其构造稍复杂、制作费用较钢板梁高,且当跨径较小时,钢箱梁作为一个相对封闭低矮构件,其制作、维护难度会加大。

云南山区主梁选型考量:结合结构特点和云南省同类或类似结构应用情况,按50 m为界进行选型划定;即:当跨径为40~50 m时,按钢板梁进行组合结构设计;跨径为50~80 m时,宜按箱形断面进行设计,其中箱形断面按上端开口槽形断面考虑。

(2) 钢梁横向间距

钢梁横桥向间距是影响组合梁造价的重要因素,钢梁间距的增加,可减少钢梁数量、使钢结构费用降低(混凝土桥面板需加厚,但对总体造价影响不明显);钢梁数量减少同时意味着支座减少,钢梁运输、吊装和养护费用也相应减少。随着高强混凝土和桥面横向预应力技术的发展,更大的钢梁横向间距也在不断实践当中;例如:法国建造的Somme桥,主梁横向间距达10.5 m;过大的钢梁横向间距,往往需在桥面板内设置横桥向预应力;与钢筋混凝土桥面板相比,横向预应力张拉多一道施工工序,工艺稍显麻烦、施工容错度较差(桥面板较薄,且需内置横向预应力波纹管),后期运营加

固、拼宽均显复杂化。综上所述,结合云南地区常规桥梁设计特点(横桥向按钢筋混凝土构件设计考虑),钢—混凝土组合结构桥面板横桥向按钢筋混凝土受力板进行控制设计,并以此为基础,钢梁的数量宜尽可能少,钢筋混凝土面板最大跨径也宜控制在 4.2 m 左右(基本与常规立交区现浇箱梁相同)。

(3) 山区组合结构应用断面

以双向四车道高速公路为例,分别对云南地区所用钢板梁和槽形箱梁组合结构进行简单介绍。

钢板梁:单幅桥跨设置 3 根主梁,端支点设置端横梁,中支点位置设置中横梁,跨间每隔 5 m 设置 1 根中横梁;纵梁间距按 4.25 m 设计,边梁外侧悬臂 1.75 m,不设挑臂,如图 3(a)所示。面板横向支承于纵梁上翼缘,并通过剪力钉与纵梁连接,单向受力,混凝土面板厚取 25 cm,钢梁翼缘板处设置承托,承托处高度为 34 cm,桥面横坡由各纵梁的下缘不同设计标高形成。

槽形箱梁:单幅桥跨设置两根主梁,端支点、中支点位置设置实腹式横梁,跨间每隔 5 m 设置 1 道箱内横撑和箱间横联,横联、横撑均采用空腹式桁架结构。槽形断面底板及上翼缘水平,腹板按一定斜率外倾,为适应桥面横坡,钢槽梁左右两侧腹板不等高,如图 3(b)所示。混凝土桥面板厚 25 cm,桥面板支承间距约

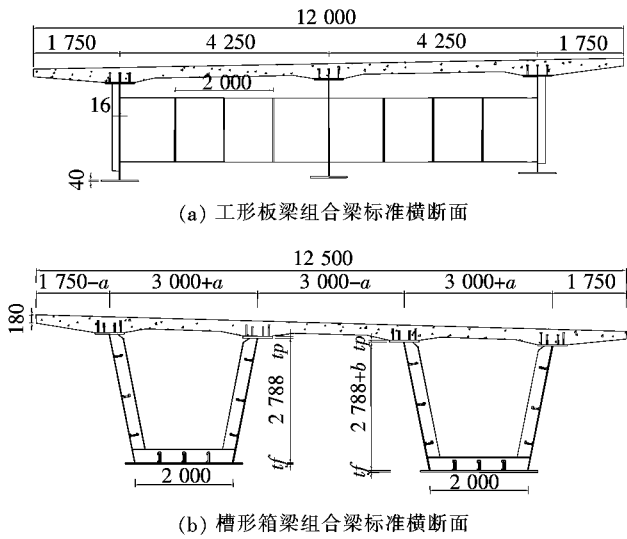


图 3 钢—混凝土组合梁典型设计断面(单位:cm)

3 m。对于连续梁中支点,两侧各 5 m 范围内钢结构底板铺设 40 cm 厚混凝土,底板混凝土在钢结构架设完成后、桥面板施工前铺设。

2.3 云南山区推广与应用情况

随着云南高速公路建设向“山,边,高”地区不断推进,更加复杂的地形、地质条件为钢—混凝土组合结构运用提供了广阔空间,钢—混凝土组合结构合理推广也为山区公路桥梁建设注入了新活力。表 1 为云南地

表 1 云南地区钢—混凝土组合结构桥梁典型应用案例

项目名称	桥名	跨径布置	桥长/m	截面形式	施工方法
元蔓高速	右幅 K106+854 稿吾卡 2 号大桥	(65+3×70+65) m 组合钢箱梁	349.16	槽形箱梁	顶推法
	左幅 K106+827 稿吾卡 2 号大桥	(65+3×70+65) m 组合钢箱梁	349.16	槽形箱梁	顶推法
	K108+146 错磨平寨 2 号大桥	4×65 m 组合钢箱梁	540.32	槽形箱梁	顶推法
	K108+775 错磨平寨 3 号大桥	2×(50+60+50) m 组合钢箱梁	660.16	槽形箱梁	顶推法
	右幅 K121+580 长滩 2 号大桥	(50+3×65+50) m 组合钢箱梁	303.16	槽形箱梁	顶推法
	左幅 K121+582 长滩 2 号大桥	(50+3×65+50) m 组合钢箱梁	303.16	槽形箱梁	顶推法
	右幅 K129+310 麻子河 2 号大桥	(2×60)+(60+2×70+60) m 组合钢箱梁	385.12	槽形箱梁	顶推法
	左幅 K129+310 麻子河 2 号大桥	(2×60)+(60+2×70+60) m 组合钢箱梁	385.12	槽形箱梁	顶推法
	冷墩互通	2×(65+70+65) m 组合钢箱梁	408.08	槽形箱梁	顶推法
	K137+668 蔓耗元江大桥	(3×65 m)+(65+70+65) m+30 m 组合钢箱梁	878.16	槽形箱梁	顶推法
香丽高速	K71+306 元阳大桥	(60+2×70+60)+(60+70+2×65) m 组合钢箱梁	1 060.32	槽形箱梁	顶推法
	红石哨右幅	(61.25+65+61.25)+(61.25+2×65+61.25) m 组合钢箱梁	446.08	槽形箱梁	顶推法
	红石哨左幅	(61.25+65+61.25)+(61.25+2×65+61.25) m 组合钢箱梁	446.08	槽形箱梁	顶推法
	松鹤大桥右幅	(37.25+40+37.25) m+4×40 m 组合钢板梁	280.58	钢板梁	顶推法
	松鹤大桥左幅	(37.5+40+37.5) m+(37.5+2×40+37.5) m 组合钢板梁	276.08	钢板梁	顶推法

续表 1

项目名称	桥名	跨径布置	桥长/m	截面形式	施工方法
新鸡高速	左幅 K15+258 甲介山 1 号特大桥	41×40 m 组合钢板梁	1 649	钢板梁	节段吊装
	右幅 K15+278 甲介山 2 号特大桥	42×40 m 组合钢板梁	1 689	钢板梁	节段吊装
泸弥高速	核桃沟 1 号大桥	3×(4×40 m)组合钢板梁	978	钢板梁	节段吊装

区近几年高速公路桥梁中应用钢—混凝土组合结构的典型实例,截至目前,云南地区高速公路建设中,对钢—混凝土组合结构使用总里程(单幅计)已超过 20 km。

3 钢—混凝土组合梁桥施工方法

3.1 工地连接形式选择

钢结构连接方法主要有铆钉连接、螺栓连接、焊接 3 类。铆钉由于连接构造复杂、用钢量大、施工麻烦、打铆噪声大、劳动条件差等原因,现阶段钢结构设计中一般不再考虑采用,此处亦不再赘述;连续形式选型时,主要针对螺栓连接和焊接两种方法进行比较。

螺栓连接需在板件上开孔、拼装时需对孔、被连接板件需互相搭接/增设拼接板、连接构造耗材费工;一般在跨中钢桁加劲梁、铁路桁式桥梁中颇为常见。铁路桥由于活载占比大、疲劳强度要求高,设计板厚大(运输、吊装和施工中不易变形,方便对孔、高强螺栓摩擦面工作性能有保证)、行业内标准化程度相对较高,这在一定程度上对螺栓工地可靠连接打下了基础。常规公路桥梁钢结构体量往往较小、钢板较薄,施工队伍技术水平参差不齐,施工重视度、组织、保障往往不够,施工质量随机性较大;且施工单位进场后,为了施工方便或节点板处产生轻微变形(影响对孔和高强螺栓工作性能)等原因,现场多有要求设计方进行“栓改焊”的情况发生;这在一定程度上也反映了施工现场对小规模公路常规桥梁钢结构现场连接方法选取的一种态度,也是焊接连接对公路桥梁适应性的一个侧面反映。

工地焊接具有构造简单、制造方便、连接刚度较大、密封性好、生产效率高优点;往往成为公路常规钢结构桥梁的实施选择;但工地焊接往往也受操作空间、焊接姿势、气候等因素限制,焊接作业、质量检查也常有其不便之处;若采用相关措施后,实施工地焊接效果可达基本良好;因此,云南山区常规公路桥梁钢结构之间连接,现阶段通常考虑为工地焊接连接。

3.2 施工方法选择

钢—混凝土组合结构桥梁施工可采用的方法有:

(少)支架安装、大节段吊装、顶推施工等,方法灵活,适应性强。在地势相对平缓的坝区,桥下高度一般较低,钢结构可采用支架安装、(大)节段吊装均可,施工单位可根据自身既有的设备和机械灵活选择。在山区,对于高墩桥梁、下穿道路有保通需要的桥梁、“两隧夹一桥”的桥梁,桥下水流湍急或水质敏感区桥梁施工,均可采用顶推施工法。总体来看,钢—混凝土组合结构由于钢结构的介入,对复杂地形、高墩、预制场地缺少、大型吊装设备无实施条件的山区总体适应良好,从既有设计桥梁来看(表 1),目前主梁架设以顶推施工为主。

4 结论

针对云南山区钢—混凝土组合结构在常规桥梁的应用,分别对建设条件、结构选型、应用推广、施工方法等方面进行了相关介绍,主要结论如下:

(1) 山区地形复杂、走廊带狭小、多种构造物相互交织,钢—混凝土组合结构具有跨越能力大、对山区线形适应性好、施工方法灵活等优点,在山区桥梁中可应用度较广。

(2) 对于地质条件复杂、抗震烈度高地区,上部结构宜轻型化,钢—混凝土组合结构也不失为一种强竞争力的结构形式。

(3) 山区组合桥梁桥面板宜采用现浇钢筋混凝土桥面板结构,增加与山区曲线桥梁的协调性。

(4) 50 m 跨以内桥梁采用钢板梁组合结构,50 m 以上桥跨主梁采用槽形钢箱梁结构;主梁数量宜综合桥面板设计厚度考虑,数量宜尽量少。

(5) 钢主梁现场连接以焊接为主;钢—混凝土组合结构上部结构架设以顶推施工为主。

参考文献:

- [1] 云南省交通规划设计研究院.山区高速公路勘察设计技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- [2] 邢昕,冯克岩.钢混组合桥面板的发展概况及设计维护要点[J].城市道桥与防洪,2012(4).
- [3] 聂建国.钢—混凝土组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2011.