

Exploration and Practice of
Small and Medium Span SWFC
Continuous Rigid Frame Bridge

中小跨径 SWFC连续刚构桥 探索与实践

◆ 周志祥 唐 亮 陈 燕 王晓东 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

中小跨径 SWFC 连续刚构桥探索与实践

Exploration and Practice of Small and Medium
Span SWFC Continuous Rigid Frame Bridge

周志祥 唐 亮 陈 燕 王晓东 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书针对高海拔、高地震烈度、技术力量薄弱、环境条件艰苦的山区独立中小跨径弯坡斜桥梁建设,提出 SWFC 复合结构连续刚构桥的构想。主要内容包括:山区中小跨径弯坡斜桥梁结构体系与新技术探索、正弯矩区段 SWFC 复合梁的构造及试验研究、负弯矩区段 SWFC 复合梁的构造及试验研究、SWFC 复合梁设计计算方法研究、SWFC 复合结构连续刚构桥细部构造、弯坡斜 SWFC 复合连续刚构桥抗震性能、SWFC 复合结构连续刚构桥施工技术及应用。

重点阐述了 SWFC 复合连续刚构桥从总体构想、改进完善、试验研究、理论分析、细部构造、施工技术至工程应用等逐步深化完善的全过程研究工作。本书可供从事相关工作的工程技术人员、学者及研究生参考使用,也可作为相关专业本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中小跨径 SWFC 连续刚构桥探索与实践 / 周志祥等著

— 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.8

ISBN 978-7-114-14848-4

I. ①中… II. ①周… III. ①跨径—连续刚构桥—研究 IV. ①U448.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 141153 号

书 名: 中小跨径 SWFC 连续刚构桥探索与实践

著 作 者: 周志祥 唐 亮 陈 燕 王晓东

责任编辑: 李 喆

责任校对: 孙国靖

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 大厂回族自治县正兴印务(有限)公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 14.75

字 数: 349 千

版 次: 2018 年 8 月 第 1 版

印 次: 2018 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14848-4

定 价: 56.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

作者简介



周志祥,教授,博士生导师,首批新世纪百千万人才工程国家级人选,交通运输部新世纪十百千人才工程第一层次人选,重庆市首批学术、技术带头人,享受国务院政府特殊津贴;获“全国交通系统优秀教育工作者”等多种荣誉称号,任“中国土木工程学会桥梁及结构工程学会理事”等多种社会兼职;先后承担国家和省部级科技计划项目 30 余项,成功研发横张预应力混凝土桥梁、钢箱—混凝土组合拱桥、混凝土结构裂缝仿生监测系统、山区悬挑结构复合道路、装配式钢桁—混凝土组合连续刚构桥、桥梁面相学及其检测装备等多项新技术;发表论著 150 余篇部,获授权发明专利 40 余项;获得国家科技进步二等奖 2 项,省部级科技成果奖 16 项。

前 言

西藏地区桥梁建设常常面临三个方面的挑战:一是地质构造复杂、生态环境脆弱、地震烈度高;二是高原高寒施工条件极度艰苦,一天中晴、雨、风、雪天气变化无常,施工人员在如此高海拔、低温、缺氧环境下行动反应迟缓,具有本能的尽快离开的潜意识;三是参建施工队伍技术力量相对薄弱,尤其山区独立中小跨径桥梁施工中技术人员更是匮乏。在此条件下,一般选用对环境影响小、抗震性能好的弯坡斜连续刚构桥。但常规预应力混凝土结构弯坡斜连续刚构桥构造相对复杂、施工精度及技术要求高,在此艰苦环境下建造的桥梁很难达到设计结构的要求,导致桥梁结构存在病害隐患,对桥梁的长期安全运营产生不利影响。

为此,作者针对高原高寒、高地震烈度山区独立中小跨径弯坡斜桥梁建设,提出 SWFC 复合连续刚构桥的构想,即在正弯矩区段 T 形梁肋设置受拉底钢板(S-steel)、梁肋侧面设置密间距带肋钢筋网片(W-web)护面与柔性纤维(F-fiber)混凝土(C-concrete)形成的 SWFC 复合结构;在负弯矩区段箱形主梁顶面设置密间距带肋钢筋网片(W-web)护面与高掺量钢纤维(SF-steel fiber)混凝土(C-concrete)形成的 SWFC 复合桥面铺装层。SWFC 复合结构连续刚构桥沿用了普通钢筋混凝土桥梁的施工方式(避免预应力施工),通过常规材料的复合应用达到混凝土桥梁应有的抗裂阻裂性能要求,具有施工简便、安全耐久、抗震性好、造价较低的优点,尤其适合于高海拔、高地震烈度、环境条件艰苦、技术力量薄弱的山区独立中小跨径弯坡斜桥建设。

2009~2012 年,作者对 SWFC 复合连续刚构桥进行了大量的理论分析和初步的试验论证。2013 年西藏自治区交通勘察设计研究院和重庆交通大学联合申报并承担了交通运输建设科技项目“SWFC 复合结构在西藏地区连续刚构桥中的应用技术研究”(编号:2013 318J15390),先后开展了山区中小跨径弯坡斜桥梁结构体系与新技术探索的研究,正、负弯矩作用下 SWFC 复合梁受力性能试验研究,SWFC 复合梁的设计计算方法研究,SWFC 复合结构连续刚构桥的细部构造研究,弯坡斜 SWFC 复合连续刚构桥的抗震性能研究,弯坡斜 SWFC 复合结构连续刚构桥的施工技术与工程应用研究,并对 4 座依托工程桥梁按 SWFC 复合连续刚构桥

进行了设计,其中 SWFC 复合连续刚构桥在国道 317 线(西藏境)珠角拉山隧道及接线工程 K1329 + 092.5 中桥(桥跨布置为 12.5m + 20m + 12.5m)工程中已成功应用。本书阐述了 SWFC 复合连续刚构桥从总体构想、改进完善、试验研究、理论分析、细部构造、施工技术至工程应用等逐步深化完善的全过程研究工作,可供从事桥梁及结构工程相关工作的工程技术人员、学者及研究生参考使用,也可作为相关专业本科生的教学参考书。

本书由重庆交通大学周志祥、唐亮、陈燕和西藏自治区交通勘察设计研究院王晓东共同执笔完成,参加本项目研究工作的还有西藏自治区交通勘察设计研究院的次仁拉姆、曹宏、杨小波、舒天平、周贤斌、穷达、洛桑慈诚、何达辉、次德吉、次仁吉宗,重庆交通大学的范亮、高燕梅、张江涛、王邵锐、罗东、郑佳艳、徐勇老师,以及研究生邓国军、程振宇、庄家智、刘树、付雷、魏文龙、廖小芳、罗爽、王冠衡等,西藏自治区重点公路建设项目管理中心才仁索朗、中交隧道工程局有限公司王军龙在项目依托工程的实施过程中给予了大力帮助。本书的研究先后得到交通运输部、西藏自治区交通运输厅、西藏自治区交通勘察设计研究院、重庆交通大学、西藏自治区重点公路建设项目管理中心、中交隧道工程局有限公司等单位相关专家和领导的支持和帮助,在此谨向所有参与本书工作及给予支持、指导、关心和帮助的单位领导、专家和个人致以真诚的感谢,同时感谢人民交通出版社对本书撰写和出版给予的大力支持。

SWFC 复合结构连续刚构桥是作者及课题组针对实际问题的一种新探索,谬误之处在所难免,真诚恳请读者们批评指正。

周志祥

2018 年 4 月于重庆交通大学

目 录

第1章 山区中小跨径弯坡斜桥新技术探索	1
1.1 山区中小跨径桥梁的适宜结构体系	1
1.1.1 多跨简支梁桥	1
1.1.2 预应力连续梁桥	1
1.1.3 连续刚构桥	2
1.2 弯坡斜预应力混凝土连续刚构桥	3
1.2.1 曲线连续刚构桥与连续梁桥的比较	3
1.2.2 预应力束布置	4
1.2.3 主梁后期结构行为	5
1.3 SWFC 复合连续刚构桥的提出	6
1.3.1 问题	6
1.3.2 SWFC 复合连续刚构桥基本概念	6
1.3.3 SWFC 复合结构连续刚构桥优势	7
第2章 正弯矩作用下 SWFC 复合梁试验研究	8
2.1 带肋钢板—混凝土复合梁的构想	8
2.2 带肋钢板—混凝土复合矩形梁试验研究	9
2.2.1 试验梁设计与制作	9
2.2.2 试验梁的加载及测试方案	12
2.2.3 试验结果与结论	14
2.2.4 试验小结	19
2.3 SWFC 复合 T 形梁的构想	20
2.3.1 增强受拉区 SWFC T 形梁的构想	20
2.3.2 结构优势	21
2.4 SWFC 复合 T 形梁试验研究	21
2.4.1 试验梁设计与制作	21
2.4.2 试验结果及结论	28
2.4.3 试验认识与结论	38
第3章 负弯矩作用下 SWFC 复合梁试验研究	39
3.1 带肋钢板—混凝土复合箱形梁的构想	39
3.2 带肋钢板—混凝土复合工形梁试验研究	40
3.2.1 试验目的和内容	40

3.2.2	试验梁的设计与制作	40
3.2.3	加载方案和测点布置	42
3.2.4	试验情况	44
3.2.5	试验结果分析	49
3.2.6	试验小结	58
3.3	HWFC 铺装层增强混凝土工形梁顶板试验研究	59
3.3.1	增强负弯矩下箱梁受拉区性能的探索	59
3.3.2	试验梁的设计与制作	59
3.3.3	加载方案和测点布置	61
3.3.4	试验情况	62
3.3.5	试验结果分析	68
3.3.6	试验小结	74
3.4	HWFC 复合层加固混凝土工形梁的试验研究	75
3.4.1	HWFC 复合层加固增强工形梁试件的设计与制作	75
3.4.2	HWFC 复合层增强工形梁加载试验	78
3.4.3	试验小结	88
第4章	SWFC 复合梁设计计算方法研究	89
4.1	SWFC 复合梁的阻裂机理分析	89
4.1.1	平直钢板增强阻裂机理	89
4.1.2	钢筋的阻裂机理	90
4.1.3	钢筋网片的阻裂机理	90
4.1.4	钢纤维对混凝土的增强机理	91
4.2	矩形带肋钢板—混凝土(SC)复合梁的计算方法研究	92
4.2.1	带肋钢板—混凝土复合矩形梁的开裂弯矩	92
4.2.2	矩形带肋钢板—混凝土(SC)复合梁裂缝宽度计算	95
4.2.3	带肋钢板—混凝土复合矩形梁的抗弯极限承载能力计算	102
4.3	SWFC 增强受拉区的混凝土 T 形梁计算方法研究	103
4.3.1	SWFC 复合梁正截面抗裂性能的估算	104
4.3.2	钢板—混凝土复合 T 形梁抗弯极限承载能力	107
4.4	带肋钢板—混凝土复合工形梁的计算方法研究	109
4.4.1	带肋钢板—混凝土复合工形梁裂缝开展情况	109
4.4.2	带肋钢板—混凝土复合工形梁开裂弯矩计算	112
4.4.3	带肋钢板—混凝土复合工形梁裂缝宽度计算	118
4.4.4	带肋钢板—混凝土复合工形梁的抗弯极限承载能力	121
4.5	顶面设置 HWFC 增强层的混凝土工形梁的计算方法研究	122
4.5.1	HWFC 增强混凝土工形梁开裂弯矩计算方法	122

4.5.2	增强层工形梁裂缝宽度计算方法	125
4.5.3	顶面设置 HWFC 增强层的混凝土工形梁的抗弯极限承载能力	129
第 5 章	SWFC 复合结构连续刚构桥细部构造研究	131
5.1	SWFC 复合连续刚构桥一般构造	131
5.1.1	总体布置	131
5.1.2	主梁各区段截面选择	132
5.1.3	SWFC 连续刚构桥主梁尺寸布置	132
5.2	正弯矩梁段主要构造研究	132
5.2.1	平直钢板构造	133
5.2.2	钢筋的构造	135
5.2.3	平直钢板与箍筋的联结	136
5.3	负弯矩梁段主要构造研究	136
5.3.1	桥面板的抗裂技术处置	136
5.3.2	增强铺装层方案	137
5.4	梁内主筋及钢筋网构造	138
5.4.1	梁内主钢筋构造	138
5.4.2	钢筋网片的合适尺寸布置	141
第 6 章	弯坡斜 SWFC 复合连续刚构桥抗震性能分析	143
6.1	SWFC 复合结构连续刚构桥有限元分析建模方法	143
6.1.1	钢筋混凝土复合材料应力—应变关系	143
6.1.2	钢筋混凝土复合材料构件应力—应变关系的试验研究	144
6.1.3	SWFC 复合梁有限元分析实例验证	145
6.1.4	SWFC 复合连续刚构桥特征区域划分	148
6.1.5	各区域的名义应力—宏观应变关系数字模型	149
6.1.6	有限元分析建模方法小结	150
6.2	SWFC 复合结构连续刚构桥静力特性分析	151
6.2.1	50m 主跨 SWFC 连续刚构大纵坡直线桥	151
6.2.2	40m 主跨 SWFC 连续刚构曲线桥	165
6.2.3	SWFC 连续刚构桥静力特性小结	170
6.3	SWFC 复合结构连续刚构桥的地震响应特性分析	171
6.3.1	西藏地区的地震特点与参数取值	171
6.3.2	SWFC 复合结构连续刚构桥的动力特性分析	172
6.3.3	SWFC 复合结构连续刚构桥在地震下的结构行为分析	175
6.3.4	SWFC 连续刚构桥的地震响应特性小结	190
第 7 章	SWFC 复合结构连续刚构桥施工技术	192
7.1	钢板的制作、运输及安装	192

7.2 混凝土施工质量保证措施	193
7.2.1 混凝土材料要求	193
7.2.2 密实性的施工保证措施	194
7.2.3 混凝土养护	196
7.3 SWFC 连续刚构桥的工程应用探索	196
7.3.1 跨径布置 25m + 40m + 25m 连续刚构桥	197
7.3.2 跨径布置 30m + 50m + 50m + 30m 连续刚构桥	205
7.3.3 跨径布置 12.5m + 20m + 12.5m 连续刚构桥	210
7.3.4 跨径布置 4 × 25m 连续刚构桥	218
参考文献	223

第1章 山区中小跨径弯坡斜桥 新技术探索

1.1 山区中小跨径桥梁的适宜结构体系

目前,针对中小跨径桥梁多采用简支梁桥、连续梁桥及连续刚构桥三种桥型。在山区道路建设中,由于受地形、地物、环保等因素制约,时常需要修建大纵坡、小半径的弯坡斜桥^[1-3]。本书探索山区中小跨径弯坡斜桥的适宜结构体系。

1.1.1 多跨简支梁桥

简支梁桥的一般布置如图 1.1.1 所示,具有以下优点:

- (1) 主梁受力明确,截面构造简单,设计简洁明了。
- (2) 简支梁为静定结构,不会因温度变化、混凝土收缩徐变、预应力等在主梁梁体内产生次内力。
- (3) 简支梁桥的内力不会因地基发生不均匀沉降而变化,对基础的要求较低。
- (4) 对于多跨简支梁桥,相邻各跨的梁体各自单独受力,便于预制、架设,施工简便且工艺成熟,养护费用较低。

虽然简支梁桥具有以上优点,但也存在承受偏载时容易出现垮塌灾害的缺点。对于大纵坡、小半径平曲线的简支梁桥来说,结构自重、汽车荷载或是汽车行驶冲击力均会在桥梁支座处产生较大的水平力,对支座有较高要求,且主梁易发生沿桥梁纵向的滑移而落梁,存在较严重的安全隐患。因此,简支梁桥主要用于小纵坡、直线或大半径平曲线的桥梁。

1.1.2 预应力连续梁桥

连续梁桥的一般布置如图 1.1.2 所示。采用连续梁桥结构方案有以下优缺点:

1) 优点

- (1) 在荷载作用下,由于中间支座截面存在负弯矩,因此其跨中正弯矩比相同跨径简支梁桥小,内力分布较均匀,结构受力更合理。
- (2) 在荷载作用下,主梁变形挠曲线平缓,行车舒适性较好。
- (3) 具备较好的抗震性能。

2) 缺点

- (1) 对于大纵坡连续梁桥来说,结构自重、汽车荷载或是汽车行驶冲击力均会在桥梁支座处产生较大的水平力,对支座有较高要求,而且也存在主梁沿桥梁纵向滑移的安全隐患。
- (2) 连续梁为超静定结构,汽车荷载、基础不均匀沉降等将在结构中产生附加内力^[4]。弯

坡斜连续梁桥空间力学行为复杂,不仅存在截面内的弯矩、剪力,还存在截面外的扭矩。目前还不能够准确估算出结构内部受力情况,致使设计存在缺陷,而这些缺陷使得连续梁桥存在横向侧移、扭转变形、支座脱空等病害。

- (3)对先简支后连续施工,需要墩、梁临时固结,存在体系转换,施工复杂。
 - (4)弯坡斜连续梁桥对施工控制以及施工质量要求高,在建桥条件和技术力量都十分有限的山区,实际桥梁难以达到设计要求;施工中特别是支座的设置很难达到标准,各种优势难以发挥出来,以致后期出现病害的概率较大,桥梁维护和病害处置费用较高。
- 因此,连续梁桥主要用于小纵坡、小半径平曲线的桥梁。

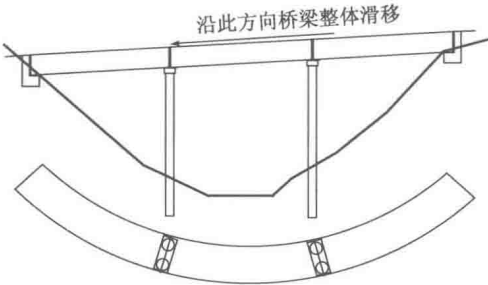


图 1.1.1 简支梁桥一般布置图

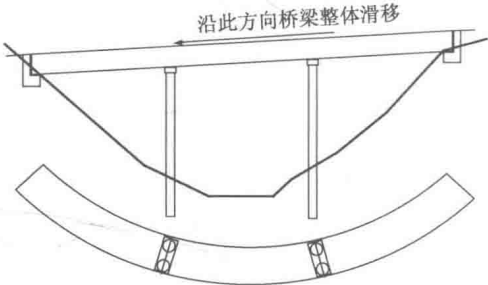


图 1.1.2 连续梁桥一般布置图

1.1.3 连续刚构桥

连续刚构桥的一般布置如图 1.1.3 所示。山区大纵坡、小半径平曲线的中小跨径桥梁采用连续刚构桥有以下优缺点：

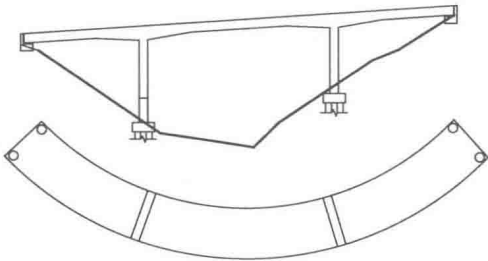


图 1.1.3 连续刚构桥一般布置图

- 1) 优点
 - (1)与连续梁类似,在荷载作用下,由于墩顶存在负弯矩,跨中正弯矩较小,内力分布均匀,桥面线形连续,行车舒适性较好。
 - (2)上部结构与桥墩固结,不需设置支座,就能够保证上部结构与墩协同工作,主梁不存在滑移风险。
 - (3)连续刚构桥的施工技术日趋成熟,大跨径的连续刚构桥需设计为变高截面形式,而中小跨径可设计为等高截面形式;在建桥条件和技术力量都十分有限的山区,施工相对容易。
 - (4)具备较好的抗震性能。
- 2) 缺点
 - (1)墩梁固结使桥梁对温度变化、混凝土收缩和徐变等因素产生的次内力较为敏感。
 - (2)弯坡斜连续刚构桥采用空间预应力束,不仅存在主梁面内弯矩和剪力,还存在主梁面外的扭矩,空间力学行为复杂,目前还不能够准确估算出预应力混凝土结构内部受力情况。由此会产生设计缺陷,而缺陷的存在使得连续刚构桥会产生横向侧移、扭转变形等病害。

从上述分析可看出,对于大纵坡、小半径平曲线的中小跨径弯坡斜桥,采用简支梁桥与连

续梁桥建桥方案均不可避免地存在主梁沿桥梁纵向滑移的风险,故此类桥梁适宜采用连续刚构桥方案^[4,5]。

1.2 弯坡斜预应力混凝土连续刚构桥

1.2.1 曲线连续刚构桥与连续梁桥的比较

对于桥梁建设来说,“弯、坡、斜”三项特性里,“弯”是最让设计者头疼的事,因为相对于坡、斜来说,弯对桥梁受力及构造的影响最大。城市里的高架桥、高速路上的匝道桥等一般都具有“弯、坡、斜”的特性,其截面形式以箱形为主。因为箱形截面一般都采用闭口、薄壁构造,所以箱形梁具有抗扭刚度大、内力分布较均匀的优点^[6]。除此之外,和T形截面梁相比,箱形梁的截面利用率高。所以,一般的弯、坡、斜桥都是以曲线箱梁桥为主。因此,有必要对曲线箱梁桥的受力进行进一步分析。

1) 曲线箱梁桥

从结构受力上来说,曲线箱梁桥和一般弯梁桥的受力特点相同:由于主梁平面曲率的影响,箱梁截面在竖向弯曲的同时会使梁体产生扭转,而箱梁扭转时又会不同程度地加剧主梁的挠曲变形。主梁弯、扭之间的耦合作用使箱梁受力具有以下特点:

(1) 由于弯梁桥在受载时存在不同程度的弯扭耦合现象,所以主梁内缘挠度通常情况下会小于外缘挠度。当主梁平面曲率半径越小、桥面越宽时,弯桥的弯扭耦合效应会更大,因此主梁在相同截面形式、相同受载的情况下弯桥的变形比同跨径的直线桥要大。

(2) 主梁即使在对称荷载作用时梁体也会产生一定程度的扭转变形,箱梁扭转变形将使主梁内、外缘应力出现较大的差别。

(3) 和一般直线桥相比,弯梁桥主梁扭转会使内侧支座的受力大于外侧,当扭转现象严重时主梁外侧支座甚至会出现脱空现象,这时通常需要将外侧支座设成拉、压双向受力形式。

(4) 弯桥箱梁中每隔一定距离就需要设置刚度较大的横隔板,因为箱梁中的横隔板除了具有增强截面整体性的作用外,还是保持全桥稳定的重要构件。

(5) 弯桥中布置的预应力会对支座反力有较大的影响,所以在设计时应慎重对待预应力的计算和布置。

2) 曲线连续刚构桥

(1) 整体性好

曲线连续刚构桥因为采用墩梁固结构造,所以比一般曲线箱梁桥的整体性要好。墩梁固结使得主梁的纵、横向刚度都相应提高,桥梁整体刚度的大小与其受力性能息息相关,桥梁建成通车之后能否正常运营首先是依赖其自身承载力,倘若承载力满足通行要求,那么平时只需要加以日常养护即可。然而假如桥梁承载力满足要求,但是变形很大,行车振动剧烈,这会给人感官上带来一定不安全性。此外,混凝土桥梁较柔也会影响运营之后的耐久性。

(2) 无须设置偏心支座

曲线连续箱梁桥一般会根据需要在跨中合适的位置设置偏心支座,以此来抵抗主梁的扭矩。偏心支座若设置不合理,在桥梁建成之后的运营过程中会使主梁受力偏离最初的设计

理念,从而带来一定的病害。曲线连续刚构桥因为采用墩梁固结构造而避免了这一难题。

(3) 矩形墩的优点

连续刚构桥因为在墩梁连接处需要固结处理,截面形式一般都为矩形截面。矩形墩对曲线连续刚构桥的受力有很大的好处,主要有以下几点:①和普通连续刚构桥薄壁墩一样,曲线连续刚构桥的薄壁墩同样能够充分适应主梁在纵桥向的变形,能够部分消除温度等因素引起的附加内力对主梁带来的影响;②矩形墩需要抵抗主梁弯曲时所产生的扭矩,此时墩在横桥向呈弯梁的受力特性,只需要根据计算在受拉侧布置足够的受拉钢筋即可,同时也可以考虑在受拉侧布置预应力钢束以抵抗拉力。可见,曲线连续刚构桥不需设置偏心支座,解决了普通曲线箱梁桥上的一大难题,这一举措不仅增加了主梁的整体性,而且还免去了昂贵的支座费用,同时也对桥梁的耐久性带来了很大的好处。

(4) 纵桥向抗推刚度较大

在“弯、坡、斜”的复杂环境中,由于纵桥向坡度的影响,主梁在自重、活载作用下会产生向低处滑动的趋势。在一般曲线箱梁桥中,这部分下滑力将由主梁各个部位设置的支座承担,这对支座的耐久性极为不利。而连续刚构桥采用墩梁固结构造,当桥墩不是很高时能够很好地承担主梁在纵坡环境下产生的下滑力,减轻了端支座的负担,增强了支座的耐久性。

综上所述,在高烈度地震区对于大纵坡、小半径平曲线的桥梁宜采用连续刚构桥。

1.2.2 预应力束布置

(1) 现在的连续刚构桥一般采用三向预应力设计,竖弯曲预应力束、横竖预应力束以及长短预应力束相结合的预应力布置方案,使得主梁构造更为复杂。在曲线桥梁里,预应力的设计、布置与直桥相比难度更大,预应力钢束的定位、管道灌浆等同样比直桥复杂。由此可见,曲线连续刚构预应力束的施工难度大,对预应力损失估计难以准确把握,桥梁力学行为更不可控,从而会造成钢束在成桥时的状态和设计的理想状态相差较大,难以避免产生结构裂缝,而预应力钢丝对裂缝的敏感性会使得桥梁存在耐久性问题的隐患^[8]。

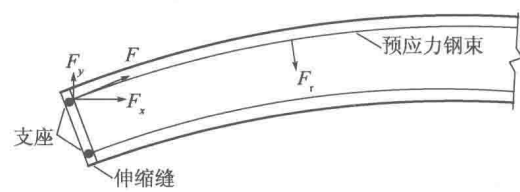


图 1.2.1 曲线梁桥预应力作用示意图

从图 1.2.1 中可以看出,普通预应力弯梁桥的钢束预拉力 F 可分解为横桥向的 F_y 与顺桥向的 F_x ,其中 F_y 可使主梁端部向曲线外侧移动,伴随着混凝土收缩徐变的发展,主梁的外移趋势将不断加剧,这对主梁端支座提出了更高的要求。弯梁桥中的预应力筋在巨大拉力的作用下会有绷直的趋势,这将使得预应力筋会对主梁产生强大的径向作用力 F_r ,过大的径向作用力会使主梁腹板发生崩裂现象。

(2) 复杂的预应力束布置及构造方案对施工控制以及施工质量方面的要求较高,在建桥条件和技术力量都十分有限的边远山区,如西藏地区,施工队伍很难满足如此高的施工技术要求,实际桥梁与设计的理想结构存在偏差,而这种偏差的存在将直接导致桥梁后期病害隐患。故有必要针对西藏边远高寒山区大纵坡、小半径弯坡斜连续刚构桥研究出一种施工简便、按普通钢筋混凝土结构施工,避免采用预应力技术,又能达到预应力混凝土结构的抗裂阻裂性能的结构方案。

1.2.3 主梁后期结构行为

弯坡斜连续刚构桥沿整个跨长的各个控制截面除承受弯矩和剪力外,还承受了主梁面外的扭矩,桥梁空间力学行为复杂,从而预应力布置不同于一般直桥,且更为复杂。在曲线桥梁中预应力筋不仅存在竖向曲率,还会有平面曲率。对于在高海拔、高寒、高地震烈度的山区如西藏地区,大纵坡、小半径平曲线的中小跨径弯坡斜连续刚构桥存在如下不利状况:

1) 预应力损失大及预应力筋“脆断”

预应力混凝土连续刚构桥纵向预应力钢筋布置如图 1.2.2 所示,主梁中除了在正弯矩区段和负弯矩区段分别需布置底板和顶板预应力钢筋外,在正、负弯矩共同作用区段内,顶、底板均需要布置预应力筋。预应力筋可以根据受力需要在跨径内截断后锚固,也可弯出梁体锚固在梁顶和梁底。

对于中小跨径连续刚构桥,由于其正、负弯矩各分布区段长度较短,且弯矩值变化较大,梁底及梁顶承受正、负弯矩的预应力筋布置需要在短距离范围内完成,这将直接导致预应力筋构造及锚固复杂,竖向曲率较大,在墩顶区段尤为突出。由于主梁存在平面曲率,使得纵向预应力筋存在竖向曲率的情况下同时还存在平面曲率。

预应力钢束与管道摩擦引起的预应力损失是弯梁桥预应力损失的重要部分。对于弯桥,预应力钢筋由于纵、横向曲率的存在,使得其预应力摩擦损失比直桥显著增大。在文献[6]中预应力筋与管道壁之间的摩擦引起的预应力损失按下式进行计算:

$$\sigma_{l1} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}] \quad (1.2.1)$$

式中: σ_{l1} ——因摩擦引起的预应力损失;

μ 、 k 、 x ——钢筋与管道的摩擦系数、管道每米长度的局部偏差对摩擦的影响系数及管道长度;

θ ——从张拉段到计算截面间管道平面曲线的夹角之和,即曲线包角。

三维曲线 θ 的计算式为 $\theta = \sqrt{\theta_H^2 + \theta_V^2}$,一般直桥的预应力钢束曲线包转角计算仅包含竖向平面内的弯曲角 θ_V ,而在弯桥中不仅存在 θ_V ,还存在水平面内的弯曲角 θ_H ,弯曲角越大,预应力损失越大。

钢材的力学性能会随温度的变化而发生改变。当温度下降时,钢材的强度略有提高,同时其塑性和冲击韧性有所降低,即钢材的脆性随温度降低而逐渐增大。当温度低到某一特定温度时(冷脆临界温度),钢材的冲击韧性急剧下降,钢材的破坏特征明显地由塑性破坏变为脆性破坏。西藏属于高寒地区,预应力钢筋处在高应力、低温的条件下,发生脆断现象的概率更大。

钢筋的脆断和预应力的损失,使得主梁结构在后期不可避免地出现受拉区混凝土开裂的现象,从而降低了结构的安全和耐久性。

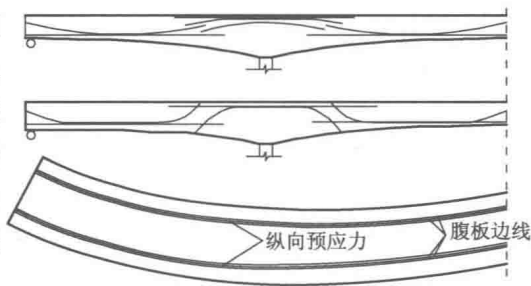


图 1.2.2 预应力混凝土连续刚构桥纵向预应力布置示意图

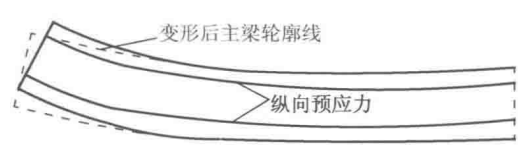


图 1.2.3 弯桥“爬移”现象

2) 爬移

预应力混凝土连续弯刚构桥,在预应力、混凝土收缩、徐变、温度及曲线行车作用等综合因素的影响作用下,可能会产生侧向变位,弯桥有变直的趋势,即“爬移”现象,如图 1.2.3 所示。

侧向变位的存在,轻则导致梁端伸缩缝的剪切破坏,影响其使用寿命,严重的则会导致支承结构破坏、梁体滑移和翻转。为保证桥面板在温度、汽车荷载作用下的正常使用以及避免腹板主拉应力过大使得腹板发生破坏,在连续弯刚构桥中还需设置横向及竖向预应力。

1.3 SWFC 复合连续刚构桥的提出

1.3.1 问题

西藏地区桥梁建设常常面临三方面的挑战:一是地质构造复杂、生态环境脆弱、地震烈度高;二是高原高寒施工条件极度艰苦,一天中晴、雨、风、雪天气变化无常,施工人员在此高海拔低温缺氧环境下行动反应迟缓,具有本能的尽快离开的潜意识;三是参建施工队伍技术力量相对薄弱,尤其山区独立中小跨径桥梁施工中技术人员更是匮乏。为此,一般宜选用环境影响小、抗震性能好的弯坡斜连续刚构桥。但常规预应力混凝土结构弯坡斜连续刚构桥构造相对复杂,施工精度及技术要求高,在此艰苦环境下建造的实际桥梁很难达到设计理想结构的要求,导致桥梁结构存在病害隐患,对桥梁的长期安全运营产生不利影响。

1.3.2 SWFC 复合连续刚构桥基本概念

为了解决曲线连续刚构桥出现的复杂预应力束设计与施工存在偏差问题,在采用带肋钢板增强混凝土的基础上,作者提出一种新型结构——SWFC 复合连续刚构桥,如图 1.3.1 所示。即在连续刚构桥正弯矩区段的底面设置平直钢板(S-steel),直接将箍筋底边与平直钢板进行焊接,再穿入纵筋形成钢筋骨架;在连续刚构桥的墩顶负弯矩区段和部分梁受拉区的表层配置密间距带肋钢筋网片(W-web),同时该区段采用高掺量钢纤维(F-fiber)混凝土(C-concrete)进行桥面铺装。对于截面而言,SWFC 复合连续刚构桥采用箱形截面与π形截面混合使用,综合考虑连续刚构桥的受力需要和施工简便,在正弯矩区段采用π形截面梁,墩顶负弯矩区段采用箱形截面梁。SWFC 复合连续刚构桥的其余构造跟普通钢筋混凝土连续刚构桥相同,例如设置变截面、钢筋骨架等。采用 SWFC 复合结构可提高混凝土结构的抗裂和阻裂性能。

SWFC 复合连续刚构桥本质上是把连续刚构桥的正弯矩区段和负弯矩区段根据其受力特性采用不同的抗裂阻裂增强构造进行处理,以充分发挥钢材抗拉、混凝土抗压的材料性能。正弯矩区段的截面构造图如图 1.3.2 所示。

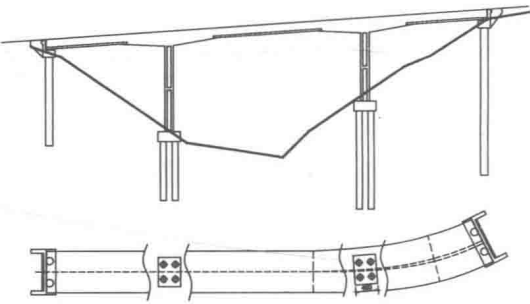


图 1.3.1 SWFC 复合连续刚构桥示意图

SWFC 复合结构中带肋钢板对混凝土的加强作用与带肋钢板—混凝土复合结构相同。在普通钢筋混凝土中,大间距的钢筋对混凝土的增强为“线”加强,对混凝土裂缝向外扩展的制约作用很小。但在 SWFC 复合结构中,采用密间距的钢筋网片增强受拉区表层混凝土,纵、横向间距很小,约等于钢筋直径,故钢筋网片对混凝土的加强可看成面加强。

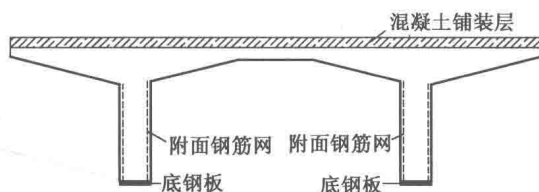


图 1.3.2 正弯矩区段截面构造示意图

钢筋网片的存在使得在保护层外出现的边裂缝不能向内部扩展,裂缝的唯一发展方式为内部裂纹,如图 1.3.3 所示,而内部裂缝的扩展受到钢筋网片以及周边混凝土的约束,扩展相对困难和迟缓,促使结构的抗裂和阻裂性能得到提高。

墩顶负弯矩区段构造示意图如图 1.3.4 所示。此复合结构中,钢纤维均匀分散在混凝土基体中,使混凝土形成结构致密且基本无薄弱区域的均匀整体,优化了混凝土的性能^[7-10]。钢纤维的存在显著改善了混凝土抗裂性能,能提高混凝土的开裂弯矩,并延缓裂缝的开展^[12]。

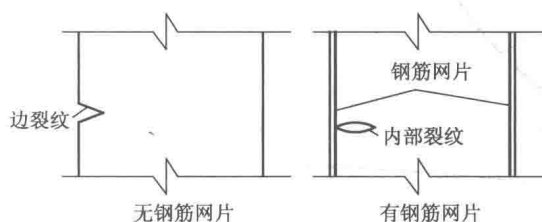


图 1.3.3 钢筋网片阻裂机理

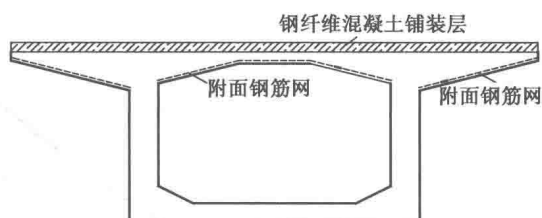


图 1.3.4 负弯矩区段截面构造示意图

1.3.3 SWFC 复合结构连续刚构桥优势

SWFC 复合结构连续刚构桥与常规预应力混凝土连续刚构桥相比具有以下优势:

(1) SWFC 复合结构连续刚构桥沿用了普通钢筋混凝土的施工方式,通过常规材料的复合应用达到混凝土桥梁应有的抗裂阻裂性能要求,避免复杂的预应力施工,对环境条件艰苦、技术力量薄弱的施工队伍具有施工简便的优点。

(2) 由于采用普通混凝土的施工方式,工艺简单,技术成熟,施工质量易于把控,施工好的结构与设计的理想结构吻合度高,后期运营后出现的各种病害相对较少,因此结构安全耐久。

(3) 连续刚构桥本身就具有良好的抗震性能。

(4) 在与预应力钢筋混凝土相同配钢率的前提下,SWFC 组合结构可以减少预应力钢束的使用,施工更简单,需要的也是一些常用设备,因此造价较低,具有较好的经济性。

从 SWFC 复合连续刚构桥的优势可以看出,在建桥条件和技术力量都十分有限的边远、高寒、高地震烈度、生态环境脆弱的山区修建中小跨径、大纵坡弯坡斜连续刚构桥,采用 SWFC 组合结构形式具有施工简便、造价较低、条件适应性好,结构安全耐久、抗震性好的特点。