


混合梁斜拉桥钢混结合段 力学和疲劳性能研究

HUNHELIANG XIELAQIAN GANGHUN JIEHEDUAN
LIXUE HE PILAO XINGNENG YANJIU

王金枝 郭俊峰 编著

 武汉理工大学出版社

WUTP Wuhan University of Technology Press

混合梁斜拉桥钢混结合段 力学和疲劳性能研究

王金枝 郭俊峰 编著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

钢混结合段是大跨度混合梁斜拉桥的关键构造之一,其结构的静力承载能力和抗疲劳性能直接关系到桥梁的安全性和耐久性。本书以理论分析、数值计算和模型试验为手段,研究了钢混结合段的力学和疲劳性能,为混合梁斜拉桥钢混结合段的设计优化提供了依据。

本书共十章,其内容包括:绪论、混合梁斜拉桥全桥整体计算、钢混结合段构造形式和位置的选择、考虑界面滑移的剪力钉群抗剪刚度数值计算、钢混结合段力学性能计算分析、钢混结合段静力模型试验研究、剪力钉传力单元受力分析、钢混结合段抗疲劳分析、钢混结合段疲劳模型试验、总结与展望。

图书在版编目(CIP)数据

混合梁斜拉桥钢混结合段力学和疲劳性能研究/王金枝,郭俊峰编著. —武汉:武汉理工大学出版社,2016.12

ISBN 978-7-5629-5232-9

I. ①混… II. ①王… ②郭… III. ①混合梁-斜拉桥-力学性能-研究
②混合梁-斜拉桥-疲劳-性能-研究 IV. ①U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 201000 号

项目负责人:王利永

责任编辑:王利永

责任校对:余士龙

封面设计:许伶俐

出版发行:武汉理工大学出版社

地址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮编:430070

网址:<http://www.wutp.com.cn>

经销:各地新华书店

印刷:新新城际数字出版印刷技术有限公司

开本:787×960 1/16

印张:13.75

字数:270 千字

版次:2016 年 12 月第 1 版

印次:2016 年 12 月第 1 次印刷

定价:60.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

前 言

混合梁斜拉桥由于其结构受力性能和经济性的优势,在我国的应用越来越多,其中钢混结合段是大跨度混合梁斜拉桥的关键构造之一,其结构的静力承载能力和抗疲劳性能直接关系到桥梁的安全性和耐久性。但由于钢混结合段构造上的特殊性和复杂性,在力学性能、疲劳性能等方面,仍然有许多问题有待研究。

本书以理论分析、数值计算和模型试验为手段,开展了有关混合梁斜拉桥全桥计算、钢混结合段构造形式和位置的选择、剪力钉群抗剪刚度数值计算、混合梁斜拉桥钢混结合段受力分析、钢混结合段静力模型试验研究、钢混结合段疲劳分析和疲劳试验研究等工作,研究了钢混结合段的力学和疲劳性能,为混合梁斜拉桥钢混结合段的设计优化提供了相关依据。

考虑混凝土梁与钢板、剪力钉群与周围混凝土之间的黏结滑移,进行剪力钉群推出试验模型的数值模拟,得到剪力钉群推出试验模型的荷载滑移曲线和抗剪刚度的变化趋势。选取一组剪力钉群推出试验数据,将推出试验结果和数值分析计算值进行比较,验证剪力钉群等效抗剪刚度计算公式可以用于钢混结合段力学性能分析中。

建立混合梁斜拉桥钢混结合段的局部有限元仿真模型,通过全桥整体计算,得到钢混结合段计算施加的最不利荷载组合值,分别考虑最大轴力、最大剪力、最大弯矩、最大扭矩四种最不利工况荷载组合,主要针对钢混结合段钢梁、过渡段钢梁、钢混结合段混凝土梁和过渡段混凝土梁进行分析,得到钢混结合段结构在各最不利工况下的受力情况以及变形位移趋势,定量地得出钢混结合段的应力横向、竖向、纵向分布状况。同时,对剪力钉传力单元进行分析,得到剪力钉剪力的分布规律。

针对钢混结合段构造和受力特点,按照几何、物理以及边界条件相似原则,设计和制作了结合段静力模型,针对模型进行了计算分析,并进行分级加载,分析各测点的应力、挠度分布规律。

根据钢混结合段荷载谱研究得到等效疲劳荷载幅,对钢混结合段的钢结构、混凝土结构、预应力结构和剪力钉结构的疲劳性能进行了分析;设计制作了钢混结合段疲劳试验模型,并对试验模型进行了疲劳分析,对疲劳试验模型进行疲劳加载,得到钢板、混凝土结构和剪力钉上各应变测点应变值随加载次数增加的变化情况,通过疲劳分析和疲劳试验共同评价钢混结合段的疲劳性能。

本书编者王金枝讲师,现任教于武汉华夏理工学院,长期从事道路桥梁工程相关的教学与科研工作,主要完成了第一章至第五章、第七章、第八章和第十章的编写工作;编者郭俊峰工程师,现就职于武汉市政工程设计研究院有限责任公司,长期从事道路桥梁工程的设计和科研工作,主要完成了第六章和第九章的编写工作。

在本书的编写过程中,得到了中铁大桥勘测设计院集团有限公司和中铁大桥科学研究院有限公司诸多同仁和老师的帮助,在此一并表示感谢!

编 者
2016.6

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 混合梁斜拉桥的发展进程	(1)
第二节 钢混结合段连接件研究现状	(3)
一、钢混结合段连接件的形式	(3)
二、剪力连接件应用现状	(4)
三、国内外剪力钉的研究进展	(5)
四、群钉连接件研究进展	(10)
第三节 钢混结合段受力分析和试验的发展	(14)
一、钢混结合段结构形式的选择	(14)
二、混合梁斜拉桥钢混结合段研究现状	(16)
三、钢混结合段试验研究现状	(17)
第四节 钢混结合构件疲劳分析和疲劳试验的现状	(18)
一、国内外钢混组合结构的疲劳研究现状	(18)
二、国内外剪力连接件疲劳性能研究现状	(20)
第五节 本书的主要工作内容	(21)
第二章 混合梁斜拉桥全桥整体计算	(22)
第一节 桥梁工程背景	(22)
一、主塔	(24)
二、主梁	(25)
三、斜拉索	(29)
第二节 有限元模型建立	(31)
第三节 合理成桥状态确定的方法和步骤	(34)
一、合理成桥状态下成桥索力值求解方法	(34)
二、确定合理成桥状态的要求	(35)
三、合理成桥状态确定的主要步骤	(36)
第四节 混合梁斜拉桥的合理成桥状态	(40)
一、成桥状态	(40)
二、容许变形	(44)
三、成桥检验	(44)
第五节 小结	(48)

第三章 钢混结合段构造形式和位置的选择	(50)
第一节 钢混结合段位置的选择	(50)
一、结构受力合理	(52)
二、施工方便	(57)
三、经济性	(57)
第二节 钢混结合段结构形式的选择	(57)
一、典型箱梁桥梁钢混结合段的构造分析	(57)
二、钢混结合段的构造形式选择	(61)
第三节 钢混结合段连接件构造形式的选择	(62)
第四节 小结	(64)
第四章 考虑界面滑移的剪力钉群抗剪刚度数值计算	(65)
第一节 剪力钉力学性能计算方法	(65)
一、基本概念	(65)
二、单钉承载力	(67)
三、单钉抗剪刚度和荷载-滑移曲线	(69)
四、纵向受力不均匀系数	(70)
五、群钉承载力	(72)
六、群钉抗剪刚度和荷载-滑移曲线	(73)
第二节 考虑界面滑移的剪力钉群结构的数值模拟	(74)
一、钢-混凝土界面的模拟	(74)
二、材料参数和本构关系	(75)
三、数值计算模型	(76)
第三节 剪力钉群数值模拟结果分析	(77)
一、钢板和混凝土板界面的滑移分布	(77)
二、推出试验模型应力分布	(79)
三、剪力钉群的抗剪承载力和荷载-滑移曲线	(79)
第四节 小结	(80)
第五章 钢混结合段力学性能计算分析	(81)
第一节 钢混结合段的有限元模型	(81)
一、钢混结合段概况	(81)
二、钢混结合段材料参数	(83)
三、结合段长度的选取	(84)
四、结合段边界条件的确定	(84)
第二节 结合段施加荷载的计算	(86)
第三节 结合段分段受力分析	(91)

一、钢混结合部位及附近钢梁段受力分析	(91)
二、过渡段钢梁受力分析	(99)
三、钢混结合部位混凝土梁段受力分析	(108)
四、过渡段混凝土梁受力分析	(117)
五、钢混结合段传力分析	(125)
第四节 小结	(127)
第六章 钢混结合段静力模型试验研究	(129)
第一节 结合段静力试验模型设计	(129)
一、模型试验的相似理论	(129)
二、静力试验模型材料和几何尺寸设计	(130)
三、普通钢筋布置	(131)
四、预应力钢绞线设计	(132)
五、剪力钉设计	(133)
六、试验荷载及约束条件	(135)
第二节 测试方案设计	(138)
一、应力测点布置	(138)
二、变形测点布置	(140)
第三节 钢混结合段模型数值分析	(141)
第四节 试验结果分析	(143)
一、顶面钢板应力分析	(143)
二、底面钢板应力分析	(147)
三、顶面混凝土应力分析	(151)
四、底面混凝土应力分析	(154)
五、腹板混凝土应力分析	(155)
六、竖向变形分析	(156)
七、钢板与混凝土的相对滑动分析	(157)
第五节 小结	(158)
第七章 剪力钉传力单元受力分析	(159)
第一节 钢混结合段传力分析	(159)
一、钢混结合段的传力途径	(159)
二、钢混结合段中剪力钉与混凝土柱传力比	(160)
三、传力问题研究实质	(160)
第二节 数值计算模型	(161)
第三节 传力单元分析	(162)
一、传力单元受力分析	(162)

二、剪力钉抗剪分析	(166)
三、受力和承载能力	(170)
第四节 小结	(171)
第八章 钢混结合段抗疲劳分析	(173)
第一节 钢混结合段各部分的抗疲劳性能	(173)
一、钢结构	(173)
二、混凝土结构	(174)
三、钢绞线	(174)
四、剪力钉	(175)
五、局部荷载下箱形结合段的局部疲劳	(175)
第二节 结合段等效疲劳荷载	(175)
一、车重统计	(176)
二、标准疲劳车辆的影响线加载	(177)
三、桥梁设计寿命内疲劳荷载循环次数确定	(180)
四、结合段疲劳内力幅	(181)
第三节 钢混结合段疲劳分析计算	(182)
第四节 小结	(185)
第九章 钢混结合段疲劳模型试验	(186)
第一节 结合段疲劳试验模型设计	(186)
一、疲劳试验模型设计原则	(186)
二、疲劳试验模型几何尺寸设计	(186)
三、疲劳试验测点布置方案设计	(187)
四、疲劳试验加载方案设计	(188)
第二节 结合段疲劳试验结果分析	(189)
一、钢板应变分析	(189)
二、混凝土应变分析	(190)
三、剪力钉应变分析	(191)
第三节 小结	(193)
第十章 总结与展望	(195)
第一节 总结	(195)
第二节 展望	(198)
参考文献	(199)

第一章 绪 论

第一节 混合梁斜拉桥的发展进程

混合梁斜拉桥是指主梁的边跨或部分边跨采用混凝土材料,主跨采用钢材的斜拉桥。混凝土梁自重较大,位于边跨更能充分发挥其锚固跨的作用;钢箱梁跨越能力大,位于主跨更能提高斜拉桥主跨的跨度^[1]。混合梁斜拉桥采用了钢梁和混凝土梁组合的形式,具有一定的经济性,可以提高混凝土梁的压重能力和钢梁的跨越能力,充分利用了两种材料的刚度和强度特性。钢箱梁与混凝土箱梁结合的结合段位置大多情况下设置在桥塔附近,也有一些混合梁斜拉桥将钢混结合段设置在了中跨处或边跨处^[2-3]。

当主跨跨径为 300~600 m 时,混合梁斜拉桥更能体现其在桥跨结构受力性能和经济上的优势,应用范围很大,最大适用跨径可达 1000 m^[4-6]。随着桥梁工程的不断发展,桥梁跨径越来越大,混合结构的应用越来越广泛,将会出现越来越多的混合梁斜拉桥。

目前,国内外已建成了许多混合梁斜拉桥。

日本生口桥^[7],跨径布置为 $3 \times 50 \text{ m} + 490 \text{ m} + 3 \times 50 \text{ m}$,于 1991 年建成,是日本首座混合梁斜拉桥,钢混结合段位于中跨距索塔中心线 2.65 m 处,由索塔提供支承。中跨钢箱梁为双箱,在钢混结合段处改成单箱形式,混凝土梁采用了单箱预应力混凝土结构,钢梁和混凝土梁的横截面形式不同,因此,混凝土梁从索塔支承点开始采用了实腹式结构,使钢梁和混凝土梁连成整体,以便更好地传递应力。

日本多多罗大桥^[8],桥跨布置为 $270 \text{ m} + 890 \text{ m} + 320 \text{ m}$,为混合梁斜拉桥,于 1999 年建成。由于地形和施工条件的限制,两侧采用了不同的边跨布置。两侧边跨的端部各布置了一段预应力混凝土箱梁,生口岛侧混凝土梁长 105.5 m,大三岛侧混凝土梁长 62.5 m,钢混结合段设置在边跨距索塔 164.5 m 处,钢混结合段的构造形式与生口桥类似。

汕头礮石大桥^[9]是正交异性板钢箱梁与预应力混凝土箱梁混合结构斜拉桥,跨径组合为 $2 \times 47 \text{ m} + 100 \text{ m} + 518 \text{ m} + 100 \text{ m} + 2 \times 47 \text{ m}$,于 1999 年建成。钢混结合段设置在边跨距索塔 100 m 处,也在辅助墩的支座中心线上。在此位置上,预应力混凝土箱梁设置端部横隔梁,与钢箱梁的顶板和底板通过剪力钉连接,以便

传递弯矩,箱梁顶底板的 U 形加劲肋在靠近钢混结合段的位置逐渐加高,形成刚度的过渡,U 形加劲肋与承压板固结,端承压板与预应力混凝土箱梁的端横隔板通过混凝土梁内的纵向预应力束连接,通过摩擦传递剪力。

舟山桃夭门大桥^[10]为混合梁斜拉桥,桥跨布置为 $2 \times 48 \text{ m} + 50 \text{ m} + 580 \text{ m} + 50 \text{ m} + 2 \times 48 \text{ m}$,于 2006 年建成。钢混结合段位于中跨距索塔中心线 16.7 m 处,结合段处钢箱梁侧设置了 8 cm 厚的承压板,混凝土箱梁侧设置了预应力钢绞线,钢箱梁和混凝土箱梁之间在端横隔板、顶底板处设置了若干剪力钉以加强锚固。

鄂东长江大桥^[11-12]为混合梁斜拉桥,跨径布置为 $3 \times 67.5 \text{ m} + 72.5 \text{ m} + 926 \text{ m} + 72.5 \text{ m} + 3 \times 67.5 \text{ m}$,于 2010 年建成,钢混结合段设置在中跨距索塔 12.5 m 处^[3],采用有格室后承压板的构造,格室与钢梁段连接处设置 U 形加劲肋。钢混结合段采用了国内混合梁斜拉桥中单用的承压板加剪力钉连接件的结构,用以抵抗结合段中受到的较大的轴力,通过钢梁顶底板上与混凝土梁的连接部分的钢格室传递弯矩,通过格室内的连接件传递剪力。

荆岳长江大桥主桥为 $100 \text{ m} + 298 \text{ m} + 816 \text{ m} + 80 \text{ m} + 2 \times 75 \text{ m}$ 跨径布置的双塔不对称混合梁斜拉桥^[13],主梁宽达 38.5 m,于 2010 年建成。主跨和北边跨主梁为工厂内节段制造钢箱梁,南边跨主梁为节段预制混凝土箱梁,采用节段拼装施工工艺,钢混结合段设置在中跨距索塔 22 m 处。钢混结合段部分钢梁段有 5.5 m,采用了箱形封闭的钢格室结构,内填混凝土;钢格室腹板及抗剪钢板上开有小圆孔,并穿过带有钢筋的 PBL 键;为了使钢混结合段与混凝土梁之间不出现相对滑移的情况,使之共同受力,在钢混结合段部分布置了预应力钢束。

海南洋浦大桥^[14]主桥为 $58.5 \text{ m} + 63 \text{ m} + 58.5 \text{ m} + 460 \text{ m} + 58.5 \text{ m} + 63 \text{ m} + 58.5 \text{ m}$ 跨径布置的混合式结合梁斜拉桥,于 2014 年建成。作为钢梁向混凝土梁传力的过渡构造的钢混结合段,设置在中跨距索塔 10 m 处。洋浦大桥边跨为预应力混凝土梁结构,板肋式截面,预应力混凝土梁全长 190 m,钢混结合段在钢混交接面处设置了厚 8 cm 的承压板,承压板与混凝土梁之间用剪力钉连接,以实现剪力的传递。钢梁全断面伸入混凝土梁内 2.6 m,其中,底板伸入混凝土梁内 3.5 m,同时,在钢梁的顶底板和腹板上设置纵向加强肋,在钢梁段靠近结合面的部分增设两道有多条纵向加劲肋的腹板。

在实际桥梁工程中,与钢梁斜拉桥或混凝土梁斜拉桥相比,混合梁斜拉桥有以下几个方面的优势:

(1) 较好的施工进度和施工条件

混合梁斜拉桥的钢箱梁采用悬臂拼装法施工,钢箱梁各梁段在预制厂完成预制,容易保证质量。钢箱梁节段运抵桥位后再用梁上吊机起吊安装,先拼装钢结构,再浇筑混凝土桥面板,需要的施工时间很短,也很容易保证施工质量^[15-16]。

(2) 良好的静力和动力性能^[17]

在静力性能上,混合梁斜拉桥的自重介于钢箱梁斜拉桥和混凝土梁斜拉桥之间,斜拉索的荷载与恒载工况下的比值较小,应力变幅与钢箱梁相比大为减小,通常不会产生斜拉索的疲劳问题。混合梁的徐变、收缩影响与混凝土梁相比显著降低,斜拉桥线形比较稳定。在动力性能上,当其他参数基本相同时,混合梁梁重、固有振动频率和材料阻尼系数大于钢梁,其抗风性能较优于钢梁斜拉桥^[18]。

(3) 可以在一定程度上减小主跨的内力与变形

当斜拉桥主跨长度增加时,主梁的内力和变形随着增加。采用混合梁斜拉桥的结构形式时,边跨混凝土梁比中跨钢梁的刚度大,可以在一定程度上减小主跨的内力与变形。

(4) 受力合理兼顾美观的布局

当斜拉桥跨径较大时,若边跨用钢梁,同时减小边跨跨径,边跨支点产生负反力是必然的。为了消除支点负反力的危害,通常情况下会采用在边跨钢梁里布置压重的方法。混合梁斜拉桥边跨采用了自重比较大的混凝土梁,本身就起到了一定的压重作用,可以消除支点负反力的现象,同时也可以增大主跨长度,减小边跨跨径,形成受力合理兼顾美观的布局。

(5) 具有较好的经济性

采用边跨混凝土梁中跨钢梁的布置,充分利用了钢材和混凝土材料的刚度和强度等特性,具有一定的经济性,节约桥梁建设资金。

钢混结合段是混合梁斜拉桥一个比较重要的构件,因此对钢混结合段的力学性能的分析研究十分必要。但由于钢混结合段中剪力连接件形式的选择、剪力连接件的布置方式、钢混结合段的结构形式、材料的选择及几何尺寸等因素的影响,钢混结合段的力学性能没有统一的规律可循。为了更加深入地了解钢混结合段的力学性能及传力规律,需对混合梁斜拉桥钢混结合段的力学性能进行理论和试验的研究。

第二节 钢混结合段连接件研究现状

一、钢混结合段连接件的形式

钢混结合段剪力连接件的主要作用是使钢材和混凝土材料之间紧密贴合,减轻在荷载作用下钢和混凝土的变形不一致产生的相对滑移现象,使钢与混凝土共同工作。剪力连接件的选择对钢混结合段的力学行为及安全可靠性起着至关重要的作用。

剪力连接件通常选用型钢连接件、钢筋连接件、开孔钢板连接件(又称 PBL 连接件)、栓钉型连接件等几种形式。

型钢连接件常用贴角焊缝焊接到钢板上形成剪力连接件,这种形式的剪力连接件有很大的抗剪强度,但当达到剪力件的抗剪强度时,有可能会产生钢板与混凝土完全分离的现象。

钢筋连接件是将螺纹钢筋焊接在钢板上形成剪力连接件的形式,其中的螺纹钢筋承担钢板与混凝土间的剪力作用。

开孔钢板连接件是近几年出现的一种比较新颖的剪力连接件。它由开孔钢板构成,孔内可穿钢筋也可不穿钢筋,钢板孔内的钢筋和混凝土可以防止钢梁和混凝土间的相对滑移。开孔钢板可以直接焊接在钢梁上,连接件施工方便,整体受力性能较好。

栓钉型连接件(也称为剪力钉),其抗剪承载力高,抗掀起能力好,栓钉和钢板间焊接施工方便。剪力钉连接件的受力性能和施工性能均较好,在已建成的混合梁斜拉桥钢混结合段中广泛应用。本书主要对钢混结合段剪力钉连接件的力学性能的计算进行深入研究。

二、剪力连接件应用现状

目前较多的应用是将剪力连接件用于钢混组合梁中^[19-22],也有用于钢混组合拱结构中^[23]或其他结构构件中^[24-25]。

1999年,Zhaohui Huang^[26]将剪力连接件用于组合钢框架建筑中,采用计算模型分析和试验验证的方法,分析了火灾中高温条件下剪力连接件力学性能的变化对组合钢框架建筑整体变形等性能的影响情况,并对比了常温下的数据。2002年,OKUBO Nobuhito^[27]将剪力钉用于钢混组合梁中,并计算了加入预应力对带剪力钉的钢混组合梁的变形和受力的影响。2012年,A. Bouchair^[28-29]将双头剪力钉用于钢混组合梁中,并在四组带有双头栓钉试件的推出测试基础上,用一个数值模型来模拟一个推出试验的结构性能,同时考虑了混凝土的非线性、剪力钉间距以及翼缘板厚度发生变化时对结构受力的影响等,并用三维软件进行了进一步的分析。2013年,Alex M. Remennikov^[30-32]将剪力连接件用于钢-混-钢夹芯梁中,为了减少在钢-混-钢夹芯梁中剪力连接件的数量,提出使用一种非复合的夹芯梁来提高其承载力和抗冲击力。2014年,V. V. Degtyarev^[33-34]将剪力钉群用于连接钢结构桥面和混凝土板,形成钢-混凝土组合桥面板,以建立的模型为基础进行参数分析,分析了栓钉个数、纵向抗剪强度、钢桥面板高度、钢板厚度、钢桥面板屈服强度、组合板下混凝土的厚度、混凝土抗压强度、桥面板跨度、组合板强度和栓钉强度等对钢-混凝土组合板结构的力学性能的影响。

在国内,剪力钉群的组合结构也广泛应用于各种结构中,特别是近几年创新性地用在了一些新型的结构中。2008年,王茜^[35]在钢-混凝土组合结构基础上发展出了组合桥塔这种新型桥塔形式,从试验、数值和理论三个方面对钢桥塔与组合桥塔的受力性能进行了研究。2010年,范亮^[36]将钢混组合结构用于竖转拱桥中,剪力连接件采用了PBH剪力联结构造,进行了PBH剪力联结构造抗剪性能试验研究。2011年,李勇^[37]将钢混组合结构用于钢-混凝土组合桥梁工程中,从桥梁美学、空间理论、模型试验及工程应用等方面,对钢混组合桥梁进行了研究。2012年,张俊光^[38]提出了将钢混组合结构用于PBL加劲型方钢管混凝土组合柱这种新型结构,对PBL加劲型方钢管混凝土组合柱的轴压受力性能和破坏机理进行了研究。2013年,张茜^[39]创新性地提出了将钢混组合结构用于索塔锚固体系,形成钢锚板式钢混组合索塔锚固体系,对钢锚板式钢混组合索塔锚固体系的传力机理进行了弹塑性有限元数值分析和模型试验研究。

剪力连接件不仅仅可以使用在混合梁斜拉桥结构中,也可以用于钢-混凝土组合梁桥、钢-混凝土组合桥面板和钢-混凝土组合拱桥等结构中。剪力连接件作为钢-混凝土组合结构中的重要构件,其布置方式、几何尺寸和材料的选取等因素都会对剪力连接件的效果造成影响,这对剪力连接件的承载力和抗剪刚度等力学性能的计算研究显得尤为重要。

三、国内外剪力钉的研究进展

剪力连接件(以下简称连接件)是钢-混凝土组合结构中主要的传力部件,它对钢与混凝土协调变形、共同受力起重要的保证作用。国内外研究学者对于剪力连接件的抗剪能力、荷载-滑移关系、钢板厚度、栓钉几何尺寸、栓钉间距和采用的材料等参数的关系进行了一定的研究^[40-46]。

剪力钉的承载能力研究主要包括抗剪承载力研究、抗拉拔承载力研究以及抗剪力和拉拔力同时作用的承载力研究。一般结论认为,影响剪力钉的抗剪承载力的因素包括剪力钉根部直径、头部的高度、屈服强度、混凝土的抗压强度和弹性模量等,不同的研究者根据他们的试验结果给出了大量有关单个剪力钉抗剪承载力的经验公式。国内外对连接件的相关研究主要是采取试验的方法,以确定其力学性能。目前获得连接件受力性能的方法主要有梁式试验和推出试验两种方法。梁式试验中连接件受弯剪作用,推出试验中连接件受力性能更为接近纯剪,Slutter和Driscoll经过试验比较分析,认为推出试验的结果基本为梁式试验的下限。因此各国规范都推荐使用推出试验的结果。一般通过推出试验可测得每根连接件的最大剪切作用力、最大剪切作用力对应的滑移值、最终滑移值、荷载-滑移曲线等力学指标,通过荷载-滑移曲线又可获得连接件的抗剪刚度。

关于剪力钉抗剪承载力公式,各国学者研究较多,研究手段主要还是借助推出试验。早期如美国 AISC、英国的 CP117 等,剪力钉极限抗剪承载力考虑为剪力钉横截面积与混凝土圆柱体强度平方根的乘积再乘以一调整系数,此时的公式并没有考虑混凝土的弹性模量,随着混凝土材料的发展,该公式的弊端逐渐体现出来。

瑞士在 20 世纪 30 年代最早进行了钢-混凝土组合梁中机械连接件的相关研究。从这一时期到 50 年代,桥梁及房屋建筑组合结构的剪力连接件主要采用的是螺旋筋和锚筋,后来随着研究的深入,它们逐渐被剪力钉和槽钢连接件取代。20 世纪 50 年代,Viess 和 Thubrlimann 等人采用推出试验方法对剪力钉连接件的受力性能进行了系统的研究。Viess 在 1956 年报告了剪力钉抗剪连接件的试验结果,并提出了确定抗剪连接件承载力的经验公式,认为剪力钉抗剪连接件的有效承载力由剪力钉的抗拉屈服强度所决定,或者由混凝土的非弹性大变形所控制。同时定义有效抗剪强度为某一荷载,在这一荷载的作用下荷载-滑移关系变成非线性。如果这点不能被有效地确认,那么抗剪连接件的有效抗剪强度被定义为相当于残余滑移为 0.076mm 时所对应的荷载。该有效抗剪强度公式主要是根据静力推出试验以及梁式试验得出的,并于 1957 年被列入 AASHTO 的条款中。

1965 年,Slutter 和 Driscoll 对比了不同试验者的推出试验和梁式试验的数据,得出推出试验的结果是梁式试验结果下限的结论。但梁中连接件的受力性能可以通过推出试验反映,一般情况下能够以推出试验的结果作为制定规范的依据。研究还发现,如果抗剪连接件的总体抗剪强度能够抵抗混凝土的极限抗压强度,那么钢梁与混凝土板交界面滑移量的大小将不会对组合梁正截面极限弯矩产生很大的影响。此外,研究还表明,钢-混凝土组合梁的极限承载力与剪力钉的极限抗剪能力有明确的关系,如果剪跨段内的剪力钉极限抗剪承载力之和可以满足极限荷载下的平衡条件,那么理论上的极限抗弯强度是可以达到的。如果抗剪连接件的数量能满足理论上的极限抗弯强度,那么滑移对荷载-挠度曲线的影响将不会很大。

20 世纪 60 年代后期,J. W. Fisher 等人通过大量试验,提出了经验公式,发现考虑了混凝土弹性模量后,计算公式能够考虑的轻骨料混凝土中剪力键承载力普遍比普通混凝土中承载力低 20% 的现象。加拿大《钢结构设计规范》(S16. 1—1974)制定时采用了该式,但加入了承载力最大值限制条件,认为剪力钉承载力不能随混凝土强度无限增加,仍受剪力钉本身控制。1971 年,Ollgard 等^[47]较早地开始了剪力连接件的抗剪强度研究,但是仅仅针对轻混凝土和普通混凝土中的剪力连接件。1975 年,Johnson^[48]对组合梁部分连接设计进行了研究。1976 年,Moffatt 和 Lim^[49]研究了组合梁在完全抗剪连接以及部分抗剪连接情况下的基本力学性能,Moffatt 和 Lim 采用了有限元的方法,这种方法也是许多研究学者常用的分析方法。

20世纪80年代初,我国还没有剪力钉焊接的专用设备,即使有工程应用到组合梁,组合梁的设计也只能采用较早期的连接件形式——槽钢和弯筋连接件。从1984年开始,我国原郑州工学院、冶金部建筑科学研究院等先后研制出国产的剪力钉焊接设备,为剪力钉连接件的推广奠定了基础。郑州工学院从1986年开始,通过推出试验对剪力钉进行了系统研究。

1981年颁布的《组合结构》规范则开始把混凝土、剪力钉对承载力的影响分开考虑,规定计算承载力取两者的较小值。欧洲规范4和AASHTO采用的公式形式与《组合结构》类似,不过调整了系数。BS5400则以表格形式给出了剪力钉抗剪承载力。我国在《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)首次引入了剪力钉承载力计算公式。值得一提的是,此时剪力钉强度取的是抗拉设计强度,而《组合结构》规范和AASHTO采用的是剪力钉屈服强度,欧洲规范4采用的是剪力钉极限抗拉强度,因此公式是偏保守的。日本公路桥梁设计规范中则干脆没有考虑混凝土因素。

1996年,N. Gattesco^[50]为了找到荷载与滑移量之间的关系,进行了四组连接件的性能测试试验,每组对应不同的加载方式,进行拟合分析得出荷载-滑移曲线,下面公式为加载荷载比与滑移量之间的关系:

$$\frac{Q}{Q_u} = \alpha \cdot \sqrt{1 - e^{-\frac{\beta \cdot s}{\alpha}}} + \gamma \cdot s \quad (1.1)$$

式中 Q ——剪力钉连接件的剪力;

Q_u ——剪力钉连接件的极限抗剪承载力;

s ——钢和混凝土界面之间的滑移量;

α, β, γ ——系数,取值分别为: $\alpha=0.97, \beta=1.3 \text{ mm}^{-1}, \gamma=0.0045 \text{ mm}^{-1}$ 。

由公式可以得到,拟合到的荷载-滑移曲线仅仅用系数表示了荷载比与滑移量之间的关系,未考虑到剪力钉的尺寸等因素对荷载-滑移曲线的影响,因此这也将是今后研究的一个方向。

崔玉萍对部分剪力连接钢-混凝土结合板进行了研究,指出剪力连接件的承载力与组合梁混凝土翼缘的横向配筋率 ρ_t 有关,组合梁的极限抗弯能力随 ρ_t 的增大而增大。还有以胡夏闽为代表的科研人员,也对剪力连接件受剪承载力的确定、组合梁中剪力连接件的设计方法、考虑剪力钉连接件抗力分项系数的影响对受剪承载力设计公式的修正等方面进行了一系列的试验研究与理论分析,同时对剪力钉在受拉状态下的受力性能与格构式试件中剪力钉的极限承载力进行了较系统的试验研究,取得了一些剪力连接件的设计成果。这些成果为制定我国《钢结构设计规范》中有关剪力连接件计算的条文提供了依据。

我国新颁布的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003),在原规范公式基础上引入强屈系数 γ ,提高了剪力钉承载力设计值。当然上述诸公式均没考虑横向钢筋,

并且采用了剪力键横截面面积与混凝土特性相乘的形式,物理意义不是很明确。2004年,William K. Saari^[51]通过对栓钉剪力连接件的推送试验得到剪力钉几何尺寸等因素对抗剪强度的影响,同时得到一个单一剪力钉的名义剪切强度的计算式,可由下列表达式给出:

$$Q_u = 0.5A_s \sqrt{f'_c E_c} \leq A_s f_u \quad (1.2)$$

式中 f'_c ——混凝土的抗压强度;

E_c ——混凝土弹性模量;

A_s ——剪力钉的横截面面积;

f_u ——剪力连接件规定的最小极限抗拉强度。

2005年,Ehab Ellobody^[52]为了准确描述混合梁中栓钉剪力件的结构性能,采用有限元的方法计算了栓钉的抗剪强度,绘制了荷载-滑移曲线,得到了破坏形式,并用试验结果进行了验证。分析表明,可以通过改变钢结构的抗剪强度、栓钉的直径和高度以及混凝土的强度来改变栓钉剪力件的抗剪强度。2006年,Dennis Lam^[53-55]用标准程序的试验方法进行了72组全尺寸的内置双头栓钉的空心板的推出试验,分析了试验研究结果,并找出影响连接件的强度和延性的参数,主要有混凝土强度、配筋率、栓钉尺寸、空心板厚度等,同时给出钢混结合板中计算剪力连接件承载力的设计公式:

$$Q_u = 0.29\alpha\beta\epsilon d^2 \sqrt{f_{ck} E_c} / \gamma_v \quad (1.3)$$

或

$$Q_u = 0.8f_u \frac{\pi d^2}{4\gamma_v} \quad (1.4)$$

式中 γ_v ——安全系数,极限状态取1.25;

α ——剪力钉高度的影响系数,取 $\alpha = 0.2(h/d + 1) \leq 1.0$;

β ——空心板中填充空隙的影响系数,取 $\beta = 0.5(g_i/71 + 1) \leq 1.0$,同时, $g_i \geq 30$;

ϵ ——考虑横向钢筋的影响系数,取 $\epsilon = 0.5(\varphi/20 + 1) \leq 1.0$,其中 φ 为横向钢筋直径;

d ——剪力钉直径;

f_{ck} ——混凝土抗压强度标准值。

2011年,João Paulo C. Rodrigues^[56]进行了推出试验,研究了PBL剪力连接件在高温条件下的抗剪性和延展性。同年,Jawed Qureshi^[54-55]建立了一个三维有限元模型,利用参数分析研究和验证剪力钉的位置和压型钢板厚度对焊接在现代压型钢板上双头栓钉的强度和延展性的影响,进行了240个推出试验,分析了钢板厚度、剪力钉位置、混凝土强度和横向间距对双头栓钉的强度和延展性的影响。