

创新 探索与跨越

四川省公路学会桥梁专委会2007年技术交流会

论文集



四川省公路学会桥梁专业委员会 编



电子科技大学出版社

创新 探索与跨越

——四川省公路学会桥梁专委会 2007 年技术交流会论文集

四川省公路学会桥梁专业委员会 编



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

创新 探索与跨越: 四川省公路学会桥梁专委会 2007 年技术交流会论文集 / 四川省公路学会桥梁专业委员会编. —成都: 电子科技大学出版社, 2007.11

ISBN 978-7-81114-668-4

I. 创… II. 四… III. 公路桥—桥梁工程—四川省—文集 IV. U448.14-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 164803 号

内容简介

该文集收集了 2007 年四川省桥梁技术交流会交流论文 60 篇, 内容涵盖我省公路桥梁设计、施工、试验研究、理论分析等方面, 这些论文反映了我省桥梁建设的最新动态和技术水平, 可供桥梁专业的科研、设计、施工、管理人员以及高校师生学习、参考。

创新 探索与跨越

——四川省公路学会桥梁专委会 2007 年技术交流会论文集

四川省公路学会桥梁专业委员会 编

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 谢应成

责任编辑: 谢应成

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 四川省地质矿产局测绘队印刷厂

成品尺寸: 210mm×285mm 印张 21 字数 640 千字

版 次: 2007 年 11 月第一版

印 次: 2007 年 11 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-81114-668-4

定 价: 60.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83256027
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。
- ◆ 课件下载在我社主页“下载专区”。

编 委 会 成 员

(以姓氏笔画为序)

卢 伟	庄卫林	孙 云	李 乔
罗凤林	唐永建	曹 瑞	谢邦珠
董武斌	谭 认	臧棣华	

四川省公路学会桥梁专委会

委员名单

(以姓氏笔画为序)

主任委员：庄卫林

副主任委员：孙 云 李 乔 罗凤林 蒋劲松 熊国斌

秘书长：谭 认

委 员：于天才 马盛国 王福敏 兰北章 向中富

刘晓泉 朱良清 刘任彪 伍锡玖 李天斌

李明贵 李荣杰 李水生 陈正贵 陈 列

陈桢友 吴宗奇 吴礼刚 张 琪 张佐安

杨伯超 杨 平 段 政 唐 柳 唐 英

唐承平 郭科祥 夏玉龙 黄道全 曹 瑞

谢尚英 蒋自强 蒋永林 蒲黔辉 魏功叙

顾 问：张联燕 李文琪 范文理 胡玉山 徐君默

崔炳权 谢邦珠 强士中 臧棣华

目 录

理 论 分 析

制动力作用下漂浮体系桥梁的位移响应分析	蒋劲松 蒋建军 (1)
钢—混凝土组合结构在梁桥中的应用	李小珍 刘德军等 (6)
公路桥梁与车辆耦合振动理论与分析模型	李小珍 张黎明等 (11)
路面不平顺对车桥系统动力响应的影响分析	李小珍 张黎明等 (16)
高速铁路系杆拱桥拖拉架设的仿真分析	莫利君 唐继舜 (22)
江津观音岩长江大桥成桥动力特性计算分析	张明金 李永乐等 (25)
结构动力响应中状态空间法研究进展	雷 挺 郑史雄 (28)
牛龙路立交桥牛腿模型试验设计与计算分析	勾红叶 蒲黔辉等 (31)
浅论 ANSYS 在桥梁仿真分析的应用	田 丰 郑史雄 (35)
桥梁断面颤振导数 CFD 识别	庞 伟 郑史雄 (38)
浙江舟山金塘大桥索塔锚固区理论分析与仿真研究	白光亮 蒲黔辉等 (42)
自锚式悬索桥 II 梁剪力滞模型试验研究	周青虎 蒲黔辉等 (45)
三塔连续体系悬索桥的解析分析方法	王 萍 沈锐利等 (49)
大跨度连续刚构桥的非线性稳定分析	汪维安 谭顺坤等 (56)
丹巴梭坡大桥总体计算分析	谢卓君 谢尚英等 (61)
钢—混凝土组合梁在中小跨径悬索桥中的应用	罗 实 谢尚英等 (65)
体外预应力技术力学特性及其在桥梁中的应用	李红英 (69)
混凝土收缩徐变对无背索斜塔斜拉桥成桥后的影响	何颖文 杨 娜等 (72)

设 计 研 究

苏村坝大渡河大桥总体设计	田 波 余 翔 (76)
巫山大宁河泰昌大桥总体设计	朱栓来 田 波等 (81)
西藏角笼坝大桥设计特点	郭晓东 朱栓来 (88)
钢—混凝土组合式拱肋连接部设计分析	王祖华 蒋劲松等 (94)
单向纵坡双塔斜拉桥的特殊问题研究	郭贵全 王崇汉 (99)
大跨拱梁协作体系的创新实践	牟廷敏 范碧琨等 (104)
特大跨连续梁桥箱梁腹板竖向预应力空间效应分析	牟廷敏 林智敏等 (111)
拱桥平竖综合转体施工技术的新发展	牟廷敏 梁 健等 (114)
广东佛山东平大桥的技术进步	牟廷敏 范碧琨等 (123)
特大跨连续梁桥—五通岷江大桥设计	范碧琨 牟廷敏等 (129)
新型钢—砼组合桥面板的研究及应用	牟廷敏 范碧琨等 (135)
大渡河大桥设计及特点	任 剑 蒋自强 (143)
丹巴梭坡大桥东锚碇设计研究	马 马 谢尚英 (148)
清水河大桥桥型选择	谢尚英 王峰君等 (151)

郑开大道南侧箱涵竖向纠偏分析	张贵婷 (154)
悬臂浇筑拱桥的新工艺研究	曹瑞 聂东等 (158)
合江县赤水河大桥 2#墩桩基施工	陈正旭 周光伟等 (162)
钢管砼拱桥双肋同步安装合龙技术	陈正旭 (166)
龙门式浮吊的设计与应用	吴洪朗 (169)
预应力三角斜拉轻型挂篮设计	吴洪朗 张佐安等 (173)

施 工 技 术

液压自爬模系统在西堍门大桥北索塔施工中的应用	陈相 杨如刚 (182)
舟山西堍门大桥上部结构施工	卢伟 邓亨长等 (191)
白沙沟 1#大桥扣塔横移技术	赵丹 郭跃等 (198)
白沙沟 1#大桥拱圈浇筑技术	聂东 张佐安等 (207)
缆索吊装技术的发展及在桥梁工程中的应用	张佐安 (212)
悬浇拱圈挂篮前移施工技术探讨	郭跃 赵丹等 (219)
大跨径悬浇拱桥挂篮荷载试验	裴宾嘉 曹瑞等 (226)
白沙沟 1#桥挂篮加工与制作	裴宾嘉 曹瑞等 (233)
云万高速公路 B 合同段汤溪河特大桥主桥高墩大跨预应力砼连续刚构施工技术	汪碧云 蔡乐军等 (239)
组合式施工方法在连续刚构桥边跨现浇段施工中的应用与前景	汪碧云 蔡乐军等 (247)
浅谈高墩大跨预应力砼连续刚构桥施工质量控制	汪碧云 蔡乐军等 (254)
冲击钻机在大直径桥梁桩基施工中的应用	冯川 于志兵等 (262)
长江防洪敏感区施工栈桥的设计与建造	于志兵 石勇等 (268)
荆岳长江公路大桥北主塔深水基础施工技术	于志兵 石勇 (277)
岩溶发育区大直径钻孔灌注桩施工技术	杨定军 于志兵等 (285)
荆岳长江大桥北主墩水上施工平台建造	罗华平 于志兵等 (291)
荆岳长江大桥 28#主墩特大型分离式双壁钢围堰下沉施工技术	裴宾嘉 石勇等 (298)
宜宾长江大桥索塔拉索锚固区试验	汪捍东 刘洪 (307)
钢筋混凝土连拱桥上部结构拆除施工控制技术研究	石成 李亚东等 (312)

桥 梁 检 测

某立交桥病害检测及承载能力评估	王君明 蒲黔辉等 (316)
西部山区高速公路集成化桥梁健康监测与安全评估系统总体方案设计	吴涤 熊国斌等 (320)

其 他

我省“旧桥加固改造”造价控制问题探讨	龙崇美 (328)
--------------------------	-----------

制动力作用下漂浮体系桥梁的位移响应分析

蒋劲松 蒋建军

(四川省交通厅公路规划勘察设计研究院 成都 610041)

【摘要】 漂浮体系桥梁通常释放对主梁的纵向约束,因此主梁在大于支座摩阻力的制动力作用下会发生纵向位移;当制动力释放后,由于摩阻力反向,主梁会产生残余位移。将制动力当作具有时间特性的动力作用考虑,采用非线性时程计算方法,分析了漂浮体系桥梁在制动力作用下的位移响应,研究了粘滞阻尼器对减小主梁位移的效果。

【关键词】 漂浮体系;制动力;纵向位移;黏滞阻尼器

【中图分类号】 U441

【文献标识码】 A

1 研究背景

漂浮体系主梁能够适应温度变形,减小地震响应,因此被广泛应用于大跨径桥梁上。由于漂浮体系桥梁的主梁与塔、墩之间纵向没有约束,在大于支座摩阻力的制动力作用下就会发生纵向位移;当制动力释放后,由于摩阻力反向,当回复力小于摩阻力时主梁就会产生残余位移。在重庆某试验室中进行一座大桥的动力试验时就发现了这种现象,引起了相关桥梁设计人员的关注,并认为这种现象在所有的漂浮体系桥梁中都有可能发生。目前比较一致的看法是,主梁之所以会产生残余位移,主要原因是吊索提供的顺桥向刚度较小,产生的回复力小于支座摩阻力。但是一直以来都鲜见有人对此问题进行细致的分析和解释。

2 吊索提供的顺桥向刚度

吊索属于具有非保向力特性的构件^[1],其顺桥向的刚度具有非线性的特性。试分析如图1所示吊索,其顺桥向刚度可由公式(1)进行计算:

$$K_{xi} = \frac{dF_i}{dx} \quad (1)$$

第*i*根吊索在竖直状态的长度为 l_i ,主梁发生水平位移 x 。假定主梁发生纵向位移时吊索的上吊点位置保持不动,下吊点只发生纵向位移,利用增量原理可进行以下分析。

忽略高阶增量,吊索的伸长增量为:

$$dm_i = dx \cdot \sin(\theta + d\theta) \approx dx \cdot \sin\theta = dx \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + l_i^2}} \quad (2)$$

吊索的索力增量为:

$$dT_i = EA_i \cdot d\varepsilon = EA_i \cdot \frac{dl_i}{l_i} = EA_i \cdot \frac{x}{x^2 + l_i^2} \cdot dx \quad (3)$$

忽略高阶增量,吊索的水平分力增量为:

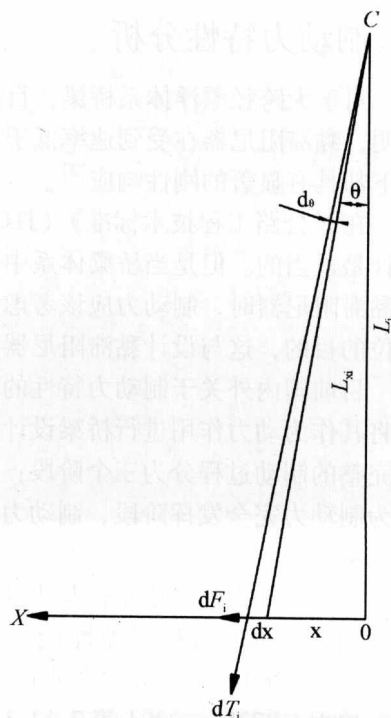


图1 吊索顺桥向刚度分析图示

$$dF_i = dT_i \cdot \sin(\theta + d\theta) \approx dT_i \cdot \sin\theta = EA_i \cdot \frac{x^2}{(\sqrt{x^2 + l_i^2})^3} \cdot dx \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(1),得到第*i*根吊索的顺桥向刚度为:

$$K_{xi} = \frac{dF_i}{dx} = EA_i \cdot \frac{x^2}{(\sqrt{x^2 + l_i^2})^3} \quad (5)$$

对于实际桥梁结构,*x* 值不会很大,根据公式(5),当 $x \rightarrow 0$ 时, $K_{xi} \rightarrow 0$ 。例如某吊索,当 $E = 1.8 \times 10^5 \text{ MPa}$, $A_i = 0.00218 \text{ m}^2$, $l_i = 10 \text{ m}$ 时,可以得到该吊索的顺桥向刚度随主梁纵向位移 *x* 变化的曲线,如图2所示。

对全桥所有吊索而言,其总的顺桥向刚度为:

$$K_x = \sum_{i=1}^n K_{xi} = \sum_{i=1}^n EA_i \cdot \frac{x^2}{(\sqrt{x^2 + l_i^2})^3} \quad (6)$$

当主梁发生顺桥向位移时,全桥所有吊索产生的回复力为:

$$F(u) = \int_0^u \sum_{i=1}^n EA_i \cdot \frac{x^2}{(\sqrt{x^2 + l_i^2})^3} \cdot dx \quad (7)$$

对于实际桥梁结构,可以将每根吊索的 $F(u) \sim u$ 曲线求出,然后进行叠加,得到全桥的非保向力构件的回复力与主梁纵向位移的关系曲线图。对于静力作用下的主梁纵向位移,可以在扣除摩阻力后从回复力与主梁纵向位移的关系曲线图中查出主梁的最大位移;同样,在释放静力作用后,根据反向摩阻力值可以从上述曲线上查出主梁的残余位移。

如果将制动力当作静力来考虑,可以根据上述方法进行求解。但是事实上制动力具有时间特性,这一点在以往桥梁设计时没有得到足够重视。

3 制动力特性分析

对于大跨径漂浮体系桥梁,目前通常的做法是在主梁与塔、墩之间用黏滞阻尼器纵向连接。大量试验表明,黏滞阻尼器在受到速率低于 1 mm/s 的作用时受力极小,而在较高速率(例如地震、制动力)的作用下却具有显著的刚性响应^[2]。

在《公路工程技术标准》(JTG B01-2003)中,将制动力作为静力荷载,按此对桥梁墩台进行强度设计是适当的。但是当桥梁体系中含有与速度有关的构件,如漂浮体系桥梁中主梁与塔、墩间纵桥向设置有黏滞阻尼器时,制动力应该考虑为具有时间特性的动力作用;否则黏滞阻尼器不发生作用,也就起不到限位的目的,这与设计黏滞阻尼器的初衷相违背。

目前国内外关于制动力特性的研究多出现在与铁路桥梁有关的文章中,重点研究有效制动力大小等,而将其作为动力作用进行桥梁设计的例子十分少见。对于公路桥梁,汽车制动力具有明显的脉冲特性,一个完整的制动过程分为三个阶段:第一阶段发生在制动协调时间内,制动力从零逐渐增大到最大;第二阶段为制动力完全发挥阶段,制动力基本保持不变;第三阶段发生在制动释放时间内,制动力从最大逐渐减少到零。

汽车制动力的本质特性与机动车的设计、使用、车辆状态均有密切关系,实际机动车辆类型众多,每种车辆的制动距离和制动性能要求都不相同。为简化起见,本文根据《机动车运行安全技术条件》(GB7258-2004),选取“总质量不大于 3500 kg 的汽车”为例对制动力的特性进行分析。

根据 GB7258-2004 第 7.13.1 条,对于制动时初速度为 50 km/h 的“总质量不大于 3500 kg 的汽车”,满载时制动平均减速度 $a \geq 5.4 \text{ m/s}^2$,制动距离 $S \leq 22.0 \text{ m}$,那么根据物理学知识可得:

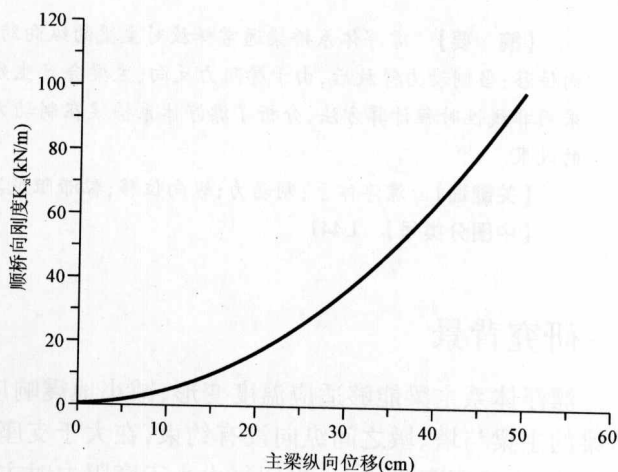


图2 吊索顺桥向刚度随主梁纵向位移变化的曲线图

$$S = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_z^2 \quad (8)$$

制动充分发挥的时间为:

$$t_z \leq \sqrt{\frac{2S}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 22}{5.4}} = 2.85\text{s} \quad (9)$$

根据 GB7258-2004 第 7.14.1 条, 汽车的制动协调时间 (从踩制动踏板到制动力最大所需要的时间) 对液压制动的汽车不应大于 0.35s, 对气压制动的汽车不应大于 0.60s, 分析时偏安全地取用 0.35s。根据 GB7258-2004 第 7.16 条, 汽车制动完全释放时间 (从松开制动踏板到制动消除所需要的时间) 不应大于 0.80s, 分析时取用 0.70s。

综上所述, 对于“总质量不大于 3500kg 的汽车”, 制动全过程三个阶段的时间分别取为 0.35s、2.85s 和 0.70s; 结合《公路工程技术标准》(JTG B01-2003) 中规定的制动力标准值, 就可以将制动力作为一种动力作用来进行桥梁计算了。

4 工程实例

广西南宁大桥为主跨 300m 的曲线梁非对称外倾钢箱拱桥, 主梁采用漂浮体系, 由吊索悬挂于主拱上, 主梁端头与肋间平台 (拱肋横梁) 之间共设置了 4 个黏滞阻尼器以限制顺桥向位移。

如果将制动力作为静力荷载, 不考虑黏滞阻尼器的作用, 计算得到主梁与肋间平台间的相对位移达 0.35m, 大于伸缩缝容许变形量; 显然这种现象是不可能发生的, 也是不可接受的。

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004), 制动力按车道荷载标准值在加载长度上计算的总重力的 10% 计算, 即 700kN, 可得到制动力随时间的变化图如图 3 所示。

主梁总质量为 5670t, 可得到主梁加速度随时间的变化曲线如图 4 所示。

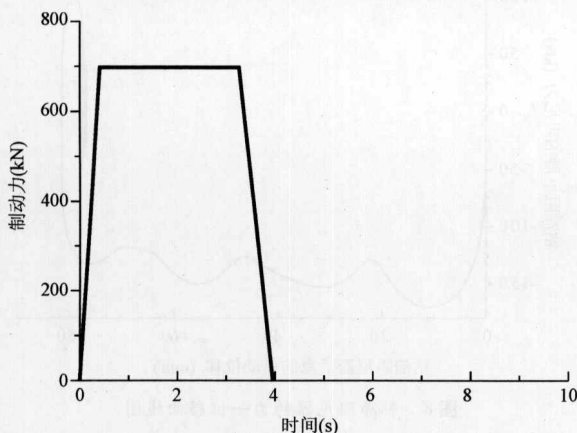


图3 制动力随时间的变化图

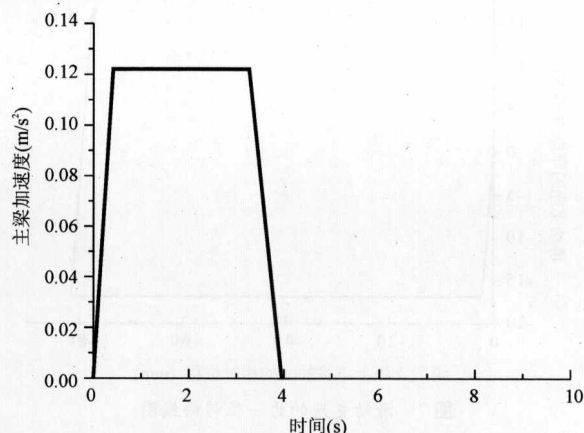


图4 主梁加速度随时间的变化曲线图

直接对主梁施加脉冲式的动力荷载较为困难, 考虑到南宁大桥第一阶模态的周期为 10.53s, 为主梁纵飘; 第二阶及以后的模态周期均小于 2s, 那么在计算制动力作用下的主梁位移时, 可以将主拱、基础当成刚性构件组, 将主梁和吊索当作柔性构件组, 这样就可以将问题转化为对刚性构件组施加动力荷载, 柔性构件组对动力荷载产生响应。因此, 本文采用对基础施加加速度时程的办法, 利用直接积分的非线性时程反应分析法进行计算。计算分以下三部分进行:

- (1) 不考虑滑动支座的摩擦力;
- (2) 考虑滑动支座的摩擦力;
- (3) 放大刚性构件组的刚度。

4.1 不考虑主梁两端滑动支座的摩擦力

当不考虑主梁两端滑动支座的摩擦力时, 在脉冲式的制动力作用下, 主梁与肋间平台的最大相对位移

为 120mm, 随着制动结束, 在吊索非保向力效应作用下, 主梁会逐渐回复, 但回复速度逐渐减慢; 60s 时, 主梁与肋间平台的相对位移还有 60mm 如图 5 所示。

4.2 考虑主梁两端滑动支座的摩擦力

如果计入主梁两端滑动支座的摩擦力, 主梁与肋间平台的最大相对位移减小到 81mm, 比不考虑滑动支座摩擦力时减小了 32.5%; 但是从制动结束后主梁与肋间平台的相对位移情况来看, 主梁的残余位移较大, 约为 77mm 如图 6 所示。

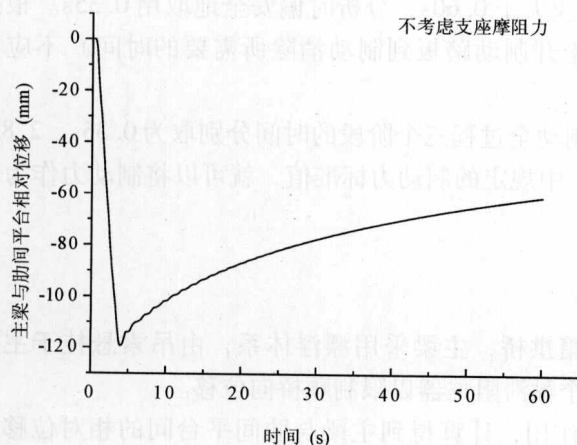


图 5 主梁与肋间平台的纵向相对位移图 (1)

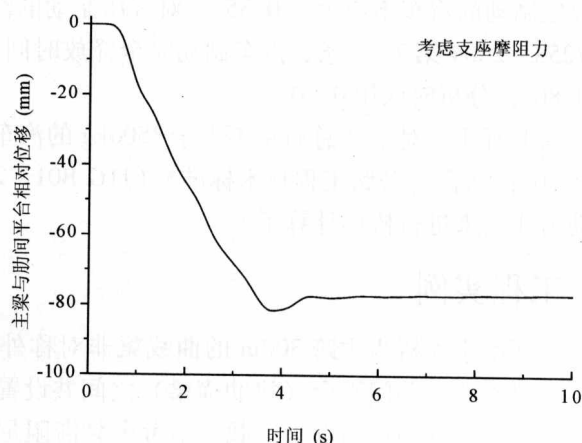


图 6 主梁与肋间平台的纵向相对位移图 (2)

图 7 和图 8 分别是考虑滑动支座的摩擦力时，滑动支座的力—位移曲线和粘滞阻尼器的力—位移曲线。

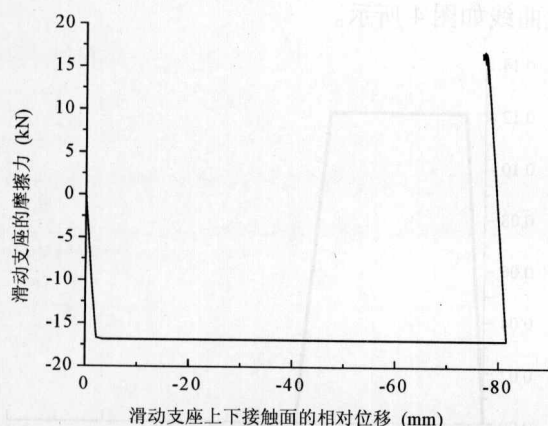


图 7 滑动支座的力—位移曲线图

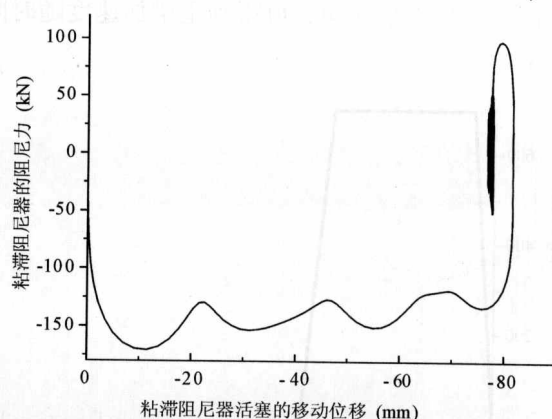


图 8 粘滞阻尼器的力—位移曲线图

如图 7 所示可以看出，在制动力作用下，支座发生滑动；制动结束后，支座还有少量回复，但是吊索非保向力效应随着支座的回复而减小，最终使得主梁偏离平衡位置，留有残余位移。

如图 8 所示可以看出，制动力主要由阻尼器提供的阻尼力来平衡，制动结束后，随着主梁运动速率的减小，阻尼器提供的阻尼抗力也减小，当主梁停止运动时，阻尼器提供的阻尼力为零。

4.3 放大刚性构件组的刚度

为了减小刚性构件组对主梁振动的影响，将刚性构件组的刚度放大 100 倍。计算结果表明，此时主梁与肋间平台的

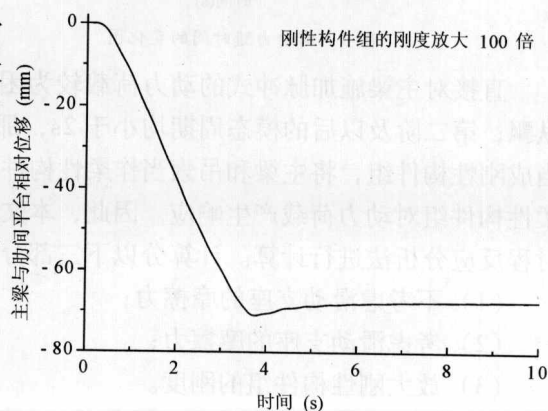


图 9 主梁与肋间平台的纵向相对位移图 (3)

最大相对位移为 71mm, 主梁残余位移为 67mm, 比不改变刚度时仅减少了 10mm 如图 9 所示。

由此说明在进行制动力作用下主梁的位移响应分析时, 漂浮体系桥梁可以拆分成刚性构件组和柔性构件组两类子结构, 大大简化了结构计算。

5 结论

通过对漂浮体系桥梁在制动力作用下的位移响应分析研究, 可以得到以下结论:

(1) 在缺少制动力详细试验资料的情况下, 脉冲式的制动力模式可用来简化计算主梁在制动力作用下的位移响应。

(2) 在制动力作用下, 黏滞阻尼器提供了较大的阻尼力, 能够有效地控制主梁纵向位移, 可用于大跨径漂浮体系桥梁结构中; 从具体工程的数值分析结果看, 上述残余位移不会影响桥梁的正常使用。

(3) 滑动支座的摩擦力对主梁与塔、墩之间的纵向相对位移有两方面的影响: 当主梁在制动力作用下运动时, 滑动支座的摩擦力可以减小主梁与塔、墩之间的相对位移; 但是当制动结束后, 若吊索的非保向力作用不能克服滑动支座的摩擦力, 则会导致主梁留有残余位移。

(4) 本文未详细考察各种不同车辆类型的制动特性, 也未深究多车非同步制动的影响, 今后有必要继续深入研究。

参考文献

[1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001

[2] M. J. N. 普瑞斯特雷, F. 塞勃勒等著, 袁万城, 胡勃等译. 桥梁抗震设计与加固[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997

钢—混凝土组合结构在梁桥中的应用

李小珍 刘德军 卫 星 肖 宁 强士中

(西南交通大学土木工程学院 成都 610031)

【摘 要】 通过对两座典型梁式桥的钢—混凝土接头段的细部构造、受力性能和分析方法进行了介绍,利用有限元软件,对其建立空间有限元模型进行仿真分析,得出了其应力分布和大小。分析表明桥梁断面的剪力主要由腹板的剪力连接器承担,足够的预应力是保证接头段混凝土可靠性的根本保证。钢—混凝土接头段的细部构造设计合理,在设计荷载下,各构件均有较大的安全储备,过渡段刚度变化连续,抗疲劳性能良好。

【关键词】 钢—混凝土组合结构;钢—混凝土接头;刚构桥;连续梁桥;剪力键

【中图分类号】 U441⁺.5

【文献标识码】 A

1 概述

近年来,随着大跨度桥梁的发展,合理利用各种材料的组合性能,提高抵御自然灾害的综合能力,确保寿命期间中的费用最低是桥梁结构设计的发展趋势,钢—混凝土接头就是材料优化的一种具体体现。

目前钢—混凝土接头多用在混合梁斜拉桥中,中跨主梁全部或部分采用钢梁,边跨采用预应力混凝土梁,从而起到了很好的锚固作用,且兼有可降低建桥成本的特点。具体表现为:在中跨主梁采用为钢梁,可减小自重,增加断面承载能力,从而提高跨越能力;在边跨采用混凝土梁,可增加边跨的相对刚度,从而减小中跨的相对变形;采用混凝土边跨也可实现边跨锚墩需压重的目的;混合梁体系斜拉桥在一定程度上可节约造价,如德国舒马赫桥和弗来埃桥、瑞典焦恩桥、日本生口桥和滨名湖桥、法国诺曼底桥、中国汕头礮石桥、广州鹤洞桥、香港汲水门桥等。

钢—混凝土组合结构在梁式桥中的应用相对斜拉桥来说较少,但对于特大跨度的预应力梁式桥来说,难以提高其跨越能力的问题是因自身恒载应力过高,而采用钢—混凝土组合结构,对主跨采用部分钢梁,则有效地解决混凝土梁自重过大的问题,可以增强梁式桥的跨越能力,同时也降低了施工风险,加快了施工进度。对于城市桥梁,如果均采用预应力混凝土梁,由于跨度不大,一般均需要设置较多的临时支架,这将对城市的交通造成很大的影响,而采用钢—混凝土组合结构,对跨主干道的部分采用钢梁,采用无支架施工技术和支架移位技术,对中间段进行一次性整体吊装,可在很大程度上缓解采用预应力混凝土梁而造成城市交通拥堵的难题,同时取得良好的社会效益。

2 梁式桥钢—混凝土接头受力性能

对梁式桥来说,在荷载作用下其主梁钢—混凝土接头主要承受弯矩和剪力作用,但为了使钢—混凝土接头在弯矩作用下混凝土不至于产生较大拉应力,设计了预应力钢筋,使接头处产生轴向压力,因而在钢—混凝土接头处也有轴力。钢—混凝土接头之间的内力传递主要通过承压板、PBL 剪力键或剪力钉以及钢壁面与混凝土之间黏结摩阻三种途径来进行。这三种途径对压应力、拉应力以及剪应力等的传力机理各不相同,承压板及 PBL 剪力键或剪力钉的传力作用是主要的,且较容易掌握,而钢壁面与混凝土之间的黏结摩阻由于有较大的不确定因素而难以掌握,因此通常认为内力的传递主要由承压板和 PBL 剪力键或剪力钉来完成,钢壁面与混凝土之间的黏结摩阻只当做强度的安全余量来看待。在轴力、弯矩和剪力的作用下,钢—混凝土接头处将产生轴向压应力、轴向拉应力和剪应力,其各自的传力机理如下:

(1) 轴力由承压板及 PBL 剪力键或剪力钉共同来传递。

(2) 原则上接头部位在运营过程中应始终有预应力作用, 如在最不利于荷载工况下预应力筋产生的轴向压应力小于弯矩产生的轴向拉应力, 则出现的拉应力主要由 PBL 剪力键或剪力钉来抵抗。

(3) 剪应力主要由 PBL 剪力键或剪力钉来传递。PBL 剪力键是一种新型的剪力连接器, 它由带孔的钢板组成, 在钢板孔中横穿钢筋, 浇注混凝土, 形成贯穿钢板的钢筋混凝土柱。PBL 剪力键的作用机理主要有三个方面: 一是依靠孔中混凝土的抗剪作用承担沿钢板的纵向剪力; 二是依靠孔中的混凝土的抗剪作用承担钢与混凝土的分离力; 三是与型钢连接件相同, 依靠钢板受压承担面外的横向剪力。这种剪力连接器具有承载能力高, 线性阶段刚度高, 破坏阶段延性好等显著特点。

3 钢—混凝土组合结构有限元分析方法

由于钢—混凝土组合结构构造复杂, 钢与混凝土两种材料之间传力复杂, 要较准确地了解各部分的应力大小和分布, 一般只能借助于有限元分析和模型试验。对于大跨度桥梁, 如果全桥均进行精细有限元分析, 现在的计算机能力往往难以满足其要求, 一般都取出钢—混凝土接头段进行局部精细分析。考虑到结构本身的特性和有限元分析的能力, 一般进行如下简化:

(1) 由于混凝土与钢板间的黏结摩擦作用机理十分复杂, 难以用有限元来准确模拟, 并且该作用对结构是有利的, 故在有限元模型中不模拟该作用, 而将其作为结构的安全储备。

(2) 贯穿钢筋被混凝土握裹, 其相互作用机理除了黏结摩擦外还有接触相互作用, 接触问题本身就是一个高度非线性问题, 要在一个如此庞大复杂的模型中同时兼顾这个高度非线性问题, 现有的计算机资源是远远不够的, 因此在对结构作用机理进行进一步分析后, 决定将混凝土与贯穿钢筋之间进行耦合, 通过耦合点区域的应力分布来反映钢筋与混凝土之间的作用情况。

(3) 贯穿钢筋与 PBL 板 (开孔钢板) 同样存在接触相互作用问题, 处理方式是将贯穿钢筋与 PBL 板耦合。

(4) 剪力钉与混凝土的相互作用复杂, 一般均简化成混凝土与钢板共同作用, 不考虑剪力钉的相对滑移。

混凝土是由粗骨料与水泥加水拌和而成的混合材料, 硬化后的水泥中包含少量的自由水、空隙, 因此严格的说混凝土不是一种均质材料, 其本构模型非常复杂, 并且具有很大的离散性。鉴于这些特点, 在混凝土的本构方程上, 采用现在有限元计算较为常用的多线性等向强化模型 (MISO), 即采用多条折线来模拟混凝土的本构关系。钢材作为一种金属材料, 其力学模型相对容易把握, 一般可以采用双线性随动强化模型 (BKIN)。为了得到较精确的结果, 一般对混凝土结构采用 8 节点块体单元, 对钢板采用 4 节点壳单元, 对贯穿钢筋采用梁单元, 对预应力筋采用杆单元。

4 钢—混凝土组合结构工程应用实例

4.1 重庆石板坡长江大桥复线桥

重庆石板坡长江大桥复线桥为主跨 330m 的预应力混凝土连续刚构桥, 为同类桥型世界第一。主跨 330m 范围内, 两端各采用 111m 预应力混凝土梁, 中部 108m 为钢梁, 采用钢—混凝土接头连接混凝土梁与钢梁。该处理方法有效地解决了大跨度预应力混凝土连续刚构桥因恒载应力过大, 而难以提高跨越能力的问题, 不但有效降低了自重, 并且中段整体吊装不但保障了质量, 还大大缩短了施工周期, 而且还有效地改善了因混凝土收缩徐变对大跨结构后期线型变化的不良影响。

石板坡长江大桥复线桥钢—混凝土接头采用了填充混凝土后板式 (如图 1 所示)。通过将钢箱梁端部的顶板、底板和腹板做成双壁板, 将填充的混凝土与紧邻的混凝土箱梁段的顶板、底板和腹板通过 PBL 剪力键、预应力钢筋、普通钢筋等得到很好的连接, 再稍往前延伸将其与混凝土横隔板连接, 预应力短束钢筋锚固在混凝土箱梁的横隔板和钢箱梁的横隔板上, 预应力长束钢筋锚固在混凝土横隔板后梁段的顶板、底板的齿块上。

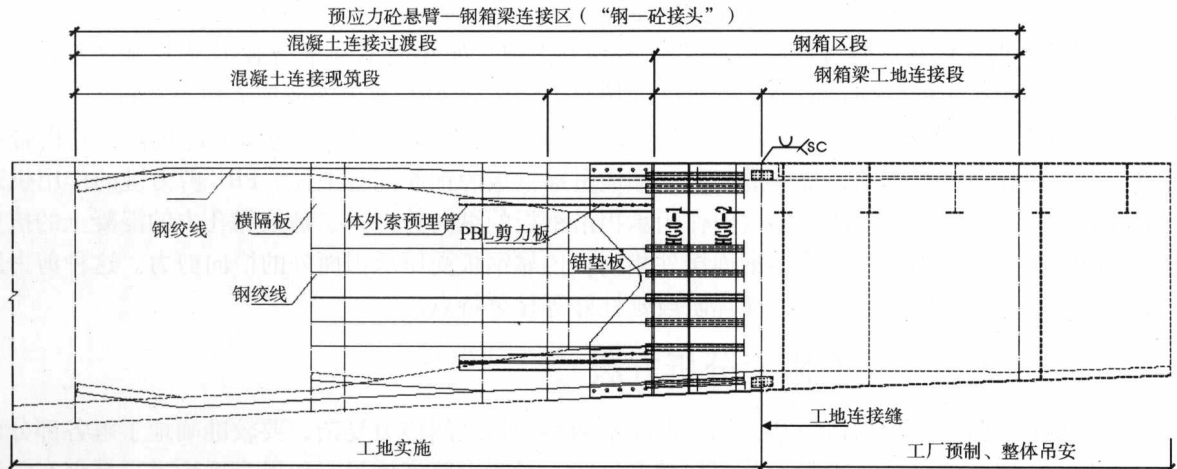


图1 重庆石板坡长江大桥钢—混凝土接头图

由于实桥为对称结构，有限元仿真分析模型则取实桥结构的一半，施加对称边界，这样可以节省计算机资源且能够采取较细的网格来提高计算的精度。有限元模型共有节点70 783个，单元71 663个，三维单元离散图如图2所示。

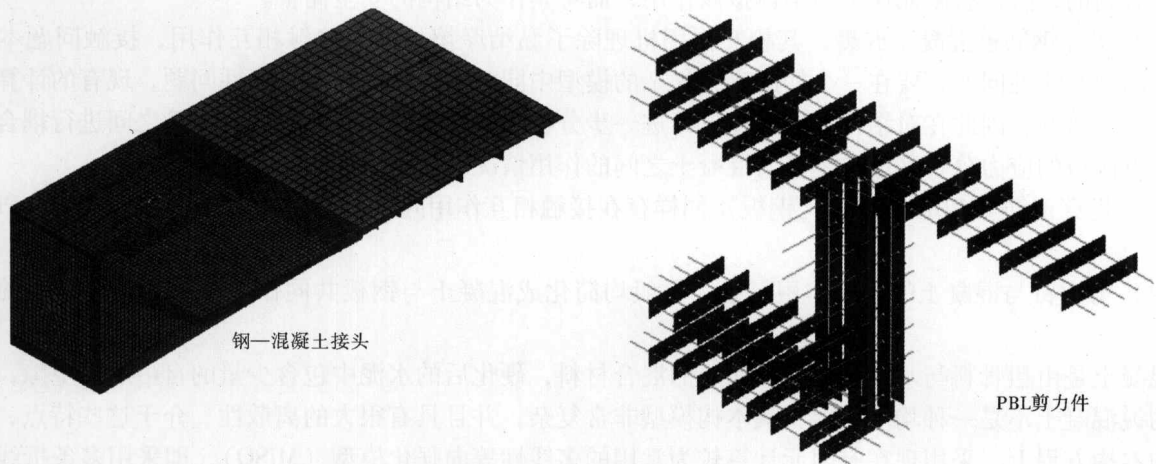


图2 空间有限元模型图

试验模型采用工字型悬臂梁模型，从实际结构中取出钢—混凝土接头段腹板以及部分顶底板，并将顶底板向腹板的另一侧延伸，各构件之间的连接方式和实际结构一致。考虑到经济和试验条件的因素，采用1:1的尺寸不可能完全模拟整个结构，故横向只从实际结构中取出一部分并加以修改。对纵向，经过比较分析，在基本不受模拟边界条件与实际情况差异带来影响的前提下，取出钢—混凝土接头及其附近的部分构件作为试验模型的基本结构，然后将基本结构沿纵向对称，得到完整的试验模型。其试验布置如图3所示。

有限元分析和试验表明：在使用极限状态正弯矩、负弯矩和疲劳荷载工况下，模型整体处于线弹性工作状态，钢结构、混凝土结构以及钢—混凝土均未出现裂缝。表明钢—混凝土接头总体设计良好，结构

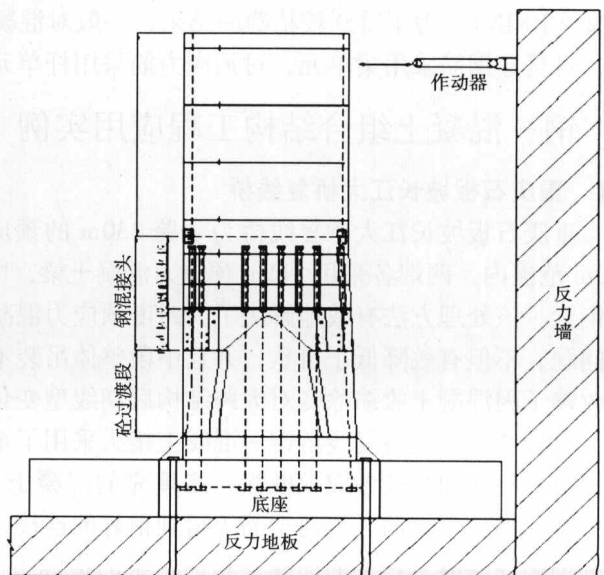


图3 试验布置示意图

性能满足设计疲劳荷载和设计使用极限状态的相关要求。腹板上的 PBL 剪力件在竖向剪力的传递中起主要作用,约承担截面全部剪力的 70%;局部预应力作用下,钢—混凝土接头混凝土结构在顶板和底板呈较大的压应力,腹板压应力较小,接头顶底部受压变形大,腹板受压变形小,截面呈现中部外凸变形状态,表明顶底板的压应力储备高于腹板,有利于提高结构的抗裂性能;在 200 万次等效疲劳荷载作用下,钢—混凝土接头始终未发现可见裂缝,在整个试验过程中,加载值和各测点位移及应变呈良好线性关系,表明试件疲劳性能良好,可承受设计的疲劳荷载。

4.2 北京奥林匹克跨五环连续梁

北京奥林匹克跨五环连续梁桥为三跨连续梁桥,跨径布置为 36.5m + 52m + 36.5m。为了减小施工时对北京五环交通的干扰,对中跨采用钢—混凝土组合结构,中部为 33m 钢混凝土结合梁,两端为 9.5m 长的混凝土箱梁,接头段长 1.5m。钢混凝土结合梁顶板采用混凝土板,腹板与底板均为钢梁,腹板顶部采用剪力钉与顶板混凝土连接。接头段为混凝土实心截面,其腹板与底板外包钢板与钢箱梁一致,形成外包钢箱梁;为了使接头段与两端过渡均匀,在接头两端设置了过渡段(见图 4)。

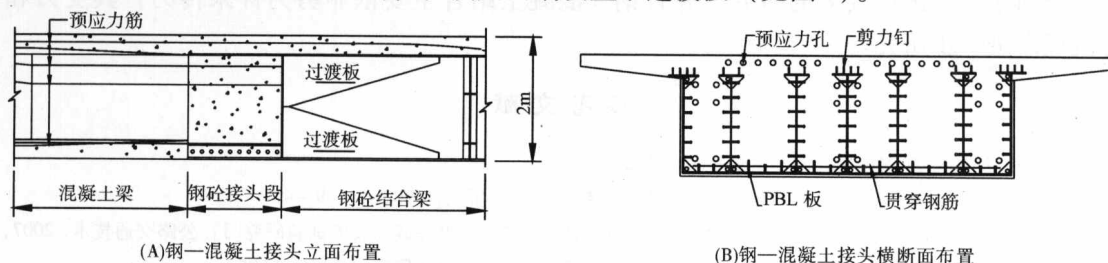


图 4 北京奥林匹克跨五环连续梁钢—混凝土接头构造图

为保证结构过渡连续,混凝土段的纵向钢筋和预应力束均伸入接头段。接头段顶板的上层纵向钢筋与横向钢筋焊接。接头段端横隔板在预应力筋通过位置处开孔,以便在此处锚固预应力筋。接头段钢板与混凝土的连接,采用 PBL 剪力键和剪力钉相结合的方式,在底板布置 PBL 剪力键,其余各处均布置剪力钉。

按照圣维南(S. Venant)原理在原桥钢—混凝土接头附近截取一段 7.5m 长的梁段进行局部分析。采用大型有限元程序对结构进行仿真分析,三维单元离散图如图 5 所示。仿真分析采用两种工况:工况 1 为接头处最大剪力 + 最大弯矩,工况 2 为接头处最大剪力 + 最小弯矩。仿真分析结果如表 1 所示。

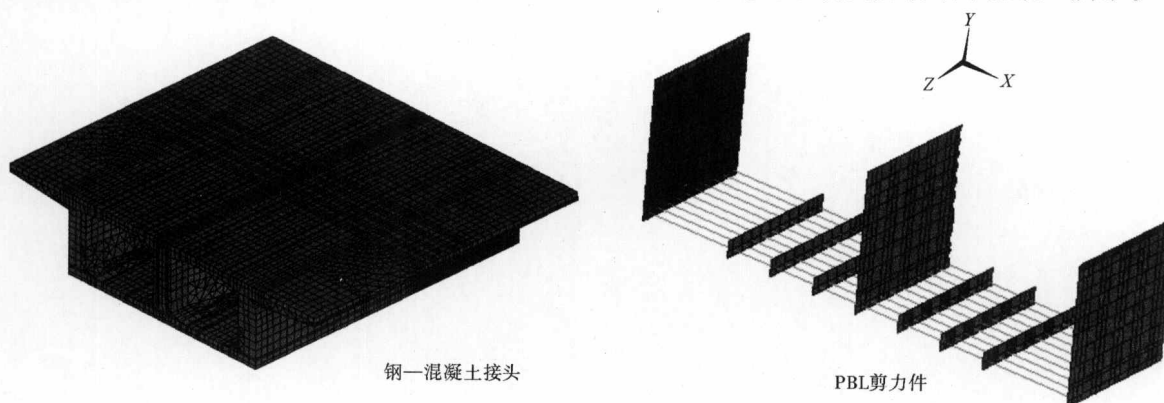


图 5 钢—混凝土接头有限元模型图

仿真分析表明:各工况下构件的最大应力都没有超出材料的容许强度。结合段与支座端混凝土梁连接处,混凝土应力变化连续,结合段混凝土处于较低的应力水平;各构件应力均以受压为主,拉应力只出现在结合段与钢箱梁连接处,且在此处钢板出现较大的局部应力,各钢构件的最大应力均出现在此连接处。在钢箱梁过渡段纵向隔板开口处,上缘为较大压应力区域,而下缘部分出现拉应力,开口处应力变化过大,建议纵向隔板不做开口,通高布置。

表 1 各构件最大 Von - Mises 应力值表 (单位: MPa)

构件名	PBL	底板	端板	纵向腹板	纵向隔板	顶板	过渡板	混凝土最大	混凝土最小
工况 1	102	26.7	186	102	52.1	107	119.0	3.24	-20.2
工况 2	121	36.1	189	121	52.8	109	76.5	4.48	-23.3

6 结束语

钢—混凝土组合结构以其独特的构造与技术特点显示出其强大的生命力,在梁式桥中也得到了广泛的应用。梁式桥以承受弯矩、剪力为主,通过对接头段施加足够的预应力,可使接头段有足够的轴压力来保证接头段混凝土不出现过大的拉应力,剪力主要靠腹板的剪力连接器来承担。虽然现在的计算理论和有限元方法已能够进行较精细的分析,但与实际仍有一定的差距,很多还需要试验进行验证。钢—混凝土组合结构是两种材料组合在一起,材料特性具有较大的差值,在钢—混凝土结合面,是结构刚度的变化面,处理不当易出现问题,需进行较多的研究。并且钢—混凝土结合主要依靠剪力件来传力,其受力和力的分布、传力机理需进一步研究。

参考文献

- [1] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005
- [2] 杨义东, 李涛译. 钢—混凝土组合结构桥在日本的发展趋势[J]. 国外桥梁, 1998, (4): 39 - 42
- [3] 田军伟, 郑罡, 唐光武等. 重庆石板坡长江大桥复线桥钢—混凝土接头模型静载与疲劳试验研究[J]. 公路交通技术, 2007, (4)
- [4] 西南交通大学. 重庆石板坡长江大桥加宽改造工程钢—混凝土接头试验设计研究报告[R]. 2005
- [5] 西南交通大学. 北京奥林匹克跨五环连续梁钢—混凝土接头分析报告[R]. 2007
- [6] 刘安双, 刘雪山, 代彤等. 重庆石板坡长江大桥复线桥钢—混凝土接头设计[J]. 桥梁建设, 2007, (2): 35 - 38