

大跨度连续梁桥钢混结合段有限元建模方法对比分析

钟奇亨

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 以沪渝蓉高速铁路天门汉北河特大桥为例,建立了模拟与不模拟剪力键的钢混结合段有限元模型,从结构刚度、应力和钢梁传力过程等角度对比了2种模型计算结果的差异。结果表明:是否模拟剪力键对钢混结合段的刚度基本没有影响;2种模型得到的混凝土梁正应力最大相差0.1 MPa,钢梁 von Mises 应力最大相差26.8 MPa,应力差异最大的部位是钢格室隔板的PBL键开孔处;不模拟剪力键模型得到的钢梁顶板、底板和腹板的传力过程更符合实际。

关键词: 钢混结合段;有限元模型;剪力钉;PBL键

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0114-05

Comparative Analysis of Finite Element Modeling Methods for Steel-concrete Composite Segments of Long-span Continuous Beam Bridge

ZHONG Qiheng

(China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Taking Tianmen Hanbei River Bridge of Shanghai-Chongqing-Chengdu High-speed Railway as an example, the finite element models of simulating and not simulating the steel-concrete composite segment with shear connectors are established to compare the differences of two model calculation results from the perspectives of structural stiffness, stress, and force transfer process of steel girder. The results show that whether shear connectors are simulated or not has no effect on the stiffness of the steel-concrete composite segment. The maximum difference of normal stress between the two models is 0.1 MPa. The maximum von Mises stress difference of steel beams is 26.8 MPa. The greatest stress difference occurs at the opening of PBL shear connector of steel cell partition. The force transfer process of the top plate, bottom plate and web plate of the steel girder obtained without simulating the shear connector model is more realistic.

Keywords: steel-concrete composite segment; finite element model; shear studs; PBL shear connector

0 引言

混合梁这种主梁结构形式在梁式桥、斜拉桥、悬索桥等各类桥梁中得到了广泛应用^[1-3]。钢混结合段是混合梁的关键部位,起到了连接钢梁与混凝土梁的作用。目前,钢混结合段的受力分析主要通过模型试验和有限元计算^[4-5]进行。

在钢混结合段中,剪力键具有连接钢材与混凝土的作用。在进行钢混结合段有限元计算时,有2

种处理剪力键的做法:一是用梁单元或者弹簧单元模拟剪力键;二是不模拟剪力键,通过结点耦合的方式连接钢材与混凝土。霍志刚^[6]建立了某斜拉桥钢混结合段中单个钢格室的有限元模型,研究了钢格室板件与剪力钉的受力,模型中采用弹簧单元模拟剪力钉。王小飞^[7]建立了某斜拉桥的钢混结合段有限元模型,研究了钢结构和混凝土的受力状态,模型中钢材与混凝土采用共结点的方式连接。蒲黔辉等^[8]采用局部足尺模型试验与有限元计算相结合的方法,研究了某斜拉桥钢混结合段的传力机理并进行了结构设计参数分析,模型中采用实体单元模拟剪力钉和PBL键。上述研究并未对钢混结合段有限元计算是否需要模拟剪力键展开讨论。

黄彩萍等^[9]进行了武汉二七长江大桥1:3的缩

收稿日期: 2024-04-17

基金项目: 中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研发计划(KY20230135、KY2023090E)

作者简介: 钟奇亨(1992—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

尺模型试验,并分析了是否模拟剪力钉对计算结果的影响,研究表明,模拟剪力钉得到的钢梁正应力更接近试验结果。该研究的侧重点是钢混结合段的传力机理,并未多方面对比 2 种计算模型的差异。此外,该研究开展时间较早,所研究的钢混结合段采用的是无钢格室、无 PBL 键的构造,与当前主流的设钢格室、设 PBL 键的构造存在较大差异。

本文以新建沪渝蓉高速铁路天门汉北河特大桥为例,从结构刚度、应力和钢梁传力过程等角度对比了建立钢混结合段有限元模型时模拟与不模拟剪力钉的差异,对前人研究结果进行了重要补充。其结论可供桥梁钢混结合段计算参考。

1 工程概况

天门汉北河特大桥为双线高速铁路混合连续梁桥,跨径布置为 80 m+160 m+80 m,主梁混凝土区段采用对称悬臂浇筑施工,钢梁采用大节段整体吊装施工。综合考虑结构刚度、钢梁运输条件等因素,主桥中跨 62 m 范围内采用等高度钢梁。钢梁顶设有厚度为 15 cm 的混凝土垫层,钢梁和垫层的总高为 6.495 m。主桥边跨为变高度预应力混凝土梁,中支点处梁高 11.015 m,边支点处梁高 6.215 m,梁高按圆曲线变化。钢梁与混凝土梁均采用单箱单室箱形断面,梁顶宽 12.6 m,梁底宽 7.0 m。主桥结构示意图如图 1 所示。

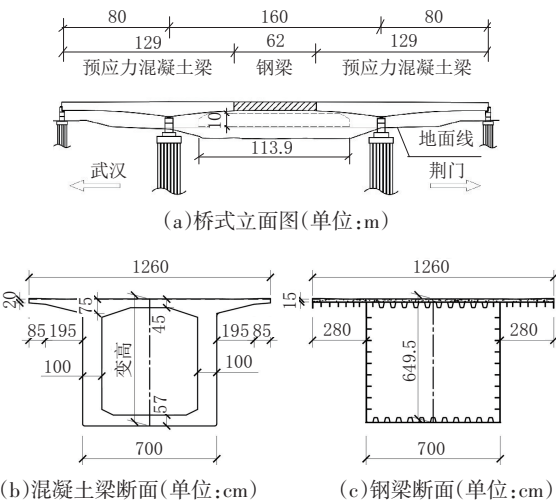


图 1 主桥结构示意图

钢混结合段长 6.0 m,包括长 3.0 m 的钢梁过渡段和长 3.0 m 的结合受力段,其构造如图 2 所示。钢梁顶板、底板与腹板在经过承压板后,由单块钢板变为带钢格室的双壁板。钢格室内布置了剪力钉和 PBL

键,并填充了补偿收缩混凝土。钢梁顶面剪力钉规格为 $\phi 16\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,其余剪力钉规格为 $\phi 22\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,剪力钉标准间距为 125 mm。PBL 键的钢筋直径为 25 mm,钢板开孔直径为 60 mm,标准间距为 250 mm。边跨主梁的预应力钢束穿过钢格室,锚固在承压板上。

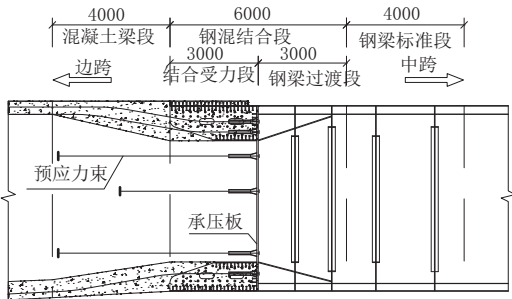


图 2 钢混结合段构造(单位:mm)

2 有限元模型

2.1 模型建立

采用有限元软件 FEA NX 进行计算。为了减小边界条件对计算结果的影响,计算区间长度取 14 m,包括钢混结合段和两端长度均为 4.0 m 的混凝土梁段和钢梁标准段。

2.1.1 模拟剪力键的模型

模拟剪力键的有限元模型见图 3。

各部分的单元类型如下:混凝土结构采用实体单元模拟;钢梁采用板单元模拟;剪力钉和 PBL 穿孔钢筋采用梁单元模拟;预应力束采用杆单元模拟。单元最大边长按 80 mm 控制。

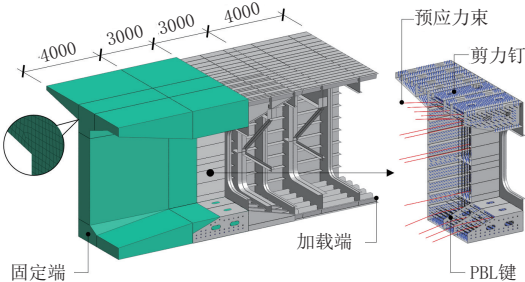


图 3 模拟剪力键的有限元模型(单位:mm)

钢梁与混凝土梁之间的连接处理如下:

- (1)考虑到承压板以传递法向力为主,并且承受了预应力束强大的锚固压力,故假定承压板与混凝土不发生界面滑移,二者采用共结点连接^[10]。
- (2)除承压板以外的其他钢梁板件与混凝土的接触面按照光滑无摩擦考虑,二者仅通过剪力钉和 PBL 键传力。

剪力钉传力的实现方法如图 4(a)所示。PBL 键

传力的实现方法如图4(b)所示。

剪力钉的模拟采用了郑舟军等^[11]提出的方法。采用该方法得到的剪力钉剪切刚度与试验结果相符。具体做法是:将单个剪力钉划分为2个梁单元,单元长度分别为剪力钉总长度的0.42、0.58倍。剪力钉根部的结点与钢板网格采用共结点连接,与混凝土网格分离;剪力钉中部和头部的2个结点与混凝土网格采用共结点连接。而由于PBL键位置的穿孔钢筋与混凝土樁共同发挥抗剪作用^[12],因此将穿孔钢筋与钢板相交位置的结点同时与钢板和混凝土连接。穿孔钢筋的其余结点与混凝土网格采用共结点连接。

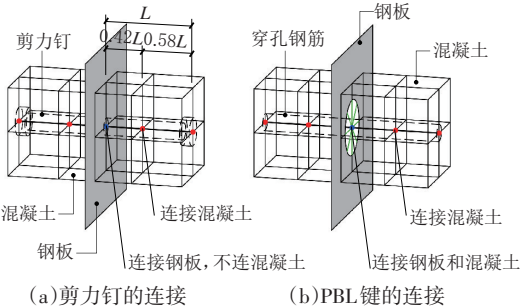


图4 剪力键与混凝土、钢板的连接

2.1.2 不模拟剪力键的模型

不模拟剪力键的有限元模型见图5。该模型的特点是:(1)假定钢板与混凝土之间不发生界面滑移,二者采用共结点连接;(2)模型中不建立剪力钉、PBL键。相应的,原来设置了PBL键的钢板上不开设钢筋通过孔。

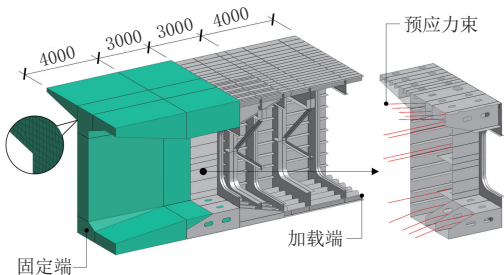


图5 不模拟剪力键的有限元模型(单位:mm)

2.2 计算假定与材料参数

计算假定所有材料均处于弹性工作状态,采用线弹性本构。有限元模型材料的主要参数见表1。

表1 有限元模型材料的主要参数			
材料	容重/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
C55混凝土	26.5	3.6×10 ⁴	0.2
Q345q 钢材	78.5	2.1×10 ⁵	0.3
剪力钉	78.5	2.1×10 ⁵	0.3
PBL穿孔筋	78.5	2.0×10 ⁵	0.3
预应力束	78.5	1.95×10 ⁵	0.3

2.3 边界条件与计算荷载

将混凝土梁端部固定,在钢梁端部形心位置设置刚臂用以加载。

荷载取值与荷载组合按照《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)执行。

考虑了以下荷载:

(1)重力:程序根据材料容重自动加载,重力加速度取9.81 m/s²。

(2)二期恒载:荷载集度为140 kN/m,换算为压强加载,考虑荷载沿横桥向的实际分布。

(3)预应力:锚下控制应力取1 300 MPa。

(4)加载端荷载:从总体计算模型中提取,荷载大小和方向见表2。该荷载取自主力与附加力组合,包括重力、二期恒载、预应力、混凝土收缩徐变、基础变位、列车活载、摇摆力、制动力和温度变化的效应,各类作用的分项系数、组合系数均取1.0。在表中荷载的作用下,混凝土梁顶面拉应力最大。

表2 加载端荷载取值

项目	荷载数值	荷载方向
轴力/kN	260	使主梁受压
剪力/kN	8 800	指向地面
弯矩/(kN·m)	19 000	使上缘受压

3 计算结果对比分析

3.1 主梁变形

主梁全局变形云图见图6;主梁加载端形心处的位移分量见表3。

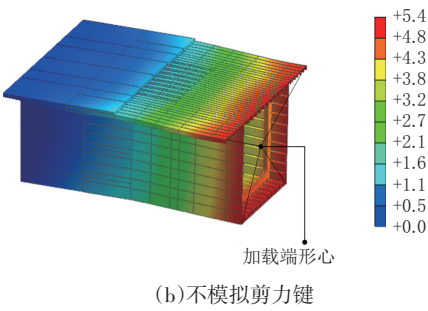
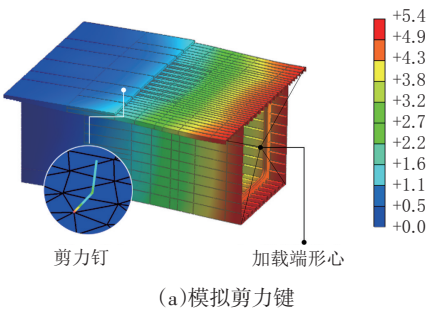


图6 主梁全局变形云图(单位:mm)

表 3 主梁加载端形心处的位移分量

项目	模拟剪力键	不模拟剪力键
轴向位移/mm	-0.53	-0.52
竖向位移/mm	-5.28	-5.24
梁端转角/(10 ⁻⁴ rad)	2.04	2.01

计算表明,2种模型得到的主梁变形基本一致,是否模拟剪力键对主梁的平动和转动刚度基本没有影响。此外,在模拟剪力键的模型中,可以观察到剪力钉发生了剪切变形,最大变形量为 0.136 mm。这说明在设计荷载作用下,钢与混凝土之间发生了微小的界面滑移。

3.2 混凝土梁应力

混凝土梁端部的顺桥向正应力云图见图 7。

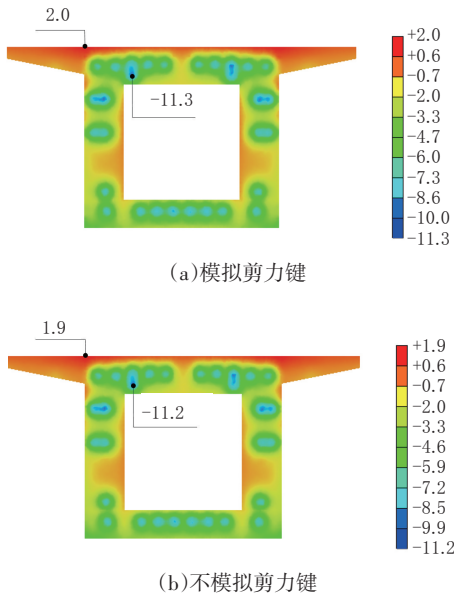


图 7 混凝土梁端横截面正应力云图(单位:MPa)

由于预应力钢束锚固在承压板上,锚头处存在明显的应力集中现象。为了避开锚下应力集中区域,选择距离承压板 400 mm 的横截面对比混凝土应力。计算表明,2种模型得到的混凝土梁最大、最小正应力数值仅相差 0.1 MPa;并且最大、最小正应力出现位置相同。

3.3 钢梁应力

钢梁顶板、底板、腹板、加劲肋和钢格室隔板的 von Mises 应力云图见图 8;各部位最大 von Mises 应力值见表 4。

由图 8 和表 4 可见,在钢梁过渡段,2种模型的钢梁应力大小和分布基本一致,应力最大仅相差 2.0 MPa。在结合受力段,钢梁顶板、底板和腹板应力的最大值接近,差值小于 0.6 MPa;钢格室隔板应力的最大值差异明显,差值达 26.8 MPa。钢格室隔板应力差异

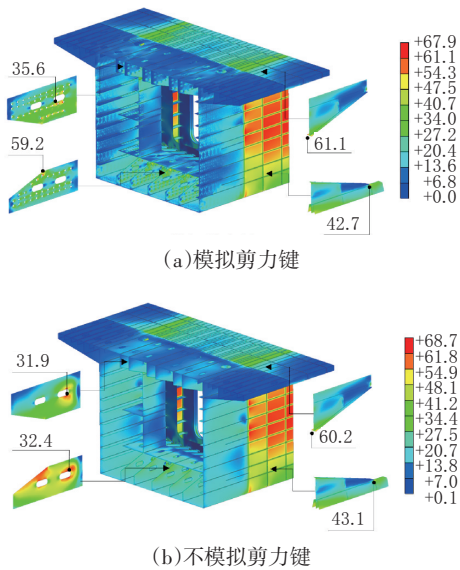


图 8 钢梁 von Mises 应力云图(单位:MPa)

表 4 钢梁各部位最大 von Mises 应力 单位:MPa

结合段分区	部位	模拟剪力键	不模拟剪力键
钢梁过渡段	顶板	40.6	40.8
	底板	60.6	58.6
	腹板	67.9	68.7
	顶板加劲肋	61.1	60.2
	底板加劲肋	42.7	43.1
结合受力段	顶板	18.5	17.9
	底板	44.2	44.3
	腹板	40.7	41.1
	上钢格室隔板	35.6	31.9
	下钢格室隔板	59.2	32.4

大的原因是钢板上开设了钢筋通过孔,导致此处应力集中。此外,在结合受力段,2种模型的钢梁应力云图也显著不同。模拟剪力键的模型,钢梁应力云图呈斑点状,印证了钢材与混凝土通过剪力键传力;不模拟剪力键的模型,钢梁应力云图呈云雾状,印证了钢材与混凝土通过共结点传力。

3.4 钢梁传力过程

钢梁顶板、底板和腹板(均不含加劲肋)的传力规律见图 9。

由图 9 可见:在钢梁过渡段,2种模型的计算结果基本一致;在结合受力段,不模拟剪力键模型的钢板内力衰减后仍然存在残余,其中以钢梁底板内力残余最大;模拟剪力键模型的钢板内力最终衰减为零。造成这种差异的原因是:在不模拟剪力键的模型中,钢板与混凝土始终协调变形,只要混凝土受力,钢板就会存在内力;在模拟剪力键的模型中,钢板与混凝土之间通过剪力键传力,而在钢板边缘没

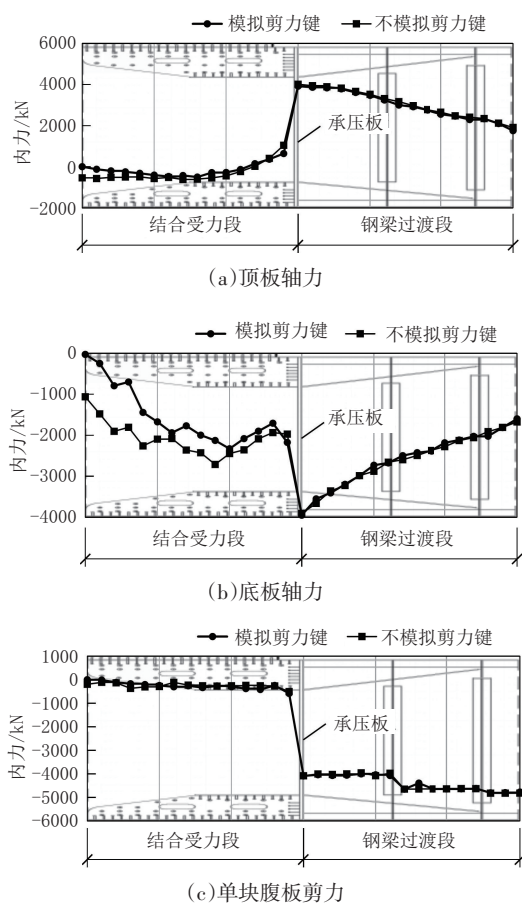


图9 钢梁顶板、底板和腹板的内力变化情况

有剪力键,故此处钢板内力为零。混凝土受力越大的部位,2种模型得到的钢板内力差异就越大。通过与蒲黔辉等^[8]的试验结果对比,不模拟剪力键的模型,其钢板内力更符合实际。

4 结 语

(1)是否模拟剪力键对钢混结合段平动和转动

刚度基本没有影响。

(2)2种模型在钢梁过渡段的应力计算结果基本一致;在结合受力段的应力计算结果差异最大的部位是钢格室隔板。模拟剪力键模型得到的钢格室隔板 von Mises 应力比不模拟剪力键的模型大 26.8 MPa。

(3)2种模型中钢梁顶板、底板和腹板的传力过程在钢梁过渡段基本一致;在结合受力段,不模拟剪力键的模型,其钢板内力在衰减后仍然存在残余,更符合实际情况。

参考文献:

- [1] 邓文中,代彤.重庆石板坡长江大桥复线桥总体设计[J].桥梁建设,2006(6):28-32.
- [2] 陈虎成,张家元,刘明虎,等.石首长江公路大桥主桥总体设计[J].桥梁建设,2017,47(5):6-11.
- [3] 胡建华,向建军,刘榕,等.平胜大桥独塔自锚式悬索桥的设计与关键技术[J].公路,2006(5):99-104.
- [4] 施洲,贾文涛,宁伯伟,等.高铁大跨度斜拉桥主梁钢混结合段力学性能研究[J].铁道学报,2023,45(3):37-46.
- [5] 严来章.混合梁斜拉桥钢混结合段力学行为分析[J].铁道建筑技术,2022(4):28-31,82.
- [6] 霍志刚.混合梁钢混结合段格室受力精细化分析[J].公路,2020,65(7):160-163.
- [7] 王小飞.大跨度四线铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段有限元分析[J].铁道标准设计,2018,62(11):82-87.
- [8] 蒲黔辉,周阳,施洲.铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段受力及参数分析[J].桥梁建设,2016,46(1):12-17.
- [9] 黄彩萍,张仲先,陈开利.混合梁斜拉桥钢混结合段试验与传力机理研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2012,40(1):67-71.
- [10] 杨仕力,施洲,蒲黔辉,等.高速铁路双箱混合梁斜拉桥钢-混结合段力学行为研究[J].铁道学报,2022,44(10):150-160.
- [11] 郑舟军,陈开利.混合梁斜拉桥结合段剪力钉受力机理研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008(4):767-770.
- [12] 贺绍华,方志,张龙,等.混合梁钢-混结合段PBL剪力键的受力性能研究[J].铁道学报,2015,37(10):100-109.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadfloodbridge@163.com

