

自锚式悬索桥钢-混结合段受力性能研究

王 博

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 混合梁在自锚式悬索桥中具有广泛应用,其钢-混结合段是影响结构整体受力的关键部位。以主跨 336 m 的上海嘉松大桥为工程背景,建立了考虑相对滑移的钢-混结合段板壳-实体有限元模型,分析了混凝土、钢结构应力及抗剪连接件的剪力分布规律,研究了结合段受力性能,并提出了连接件最大剪力简化计算方法。

关键词: 自锚式悬索桥;钢-混结合段;受力性能;有限元;简化计算方法

中图分类号: U448.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)08-0067-04

0 引 言

自锚式悬索桥加劲梁中跨采用钢梁、边跨采用混凝土梁的混合梁结构,可以有效改善结构体系受力,增强悬索桥的跨越能力,并节约造价,在城市中等跨径桥梁中应用较多^[1]。重庆鹅公岩大桥、湘潭昭华大桥、广州猎德大桥等都采用了此类结构^[2-4]。混合梁的钢-混结合段连接中跨钢梁和边跨混凝土梁,是实现加劲梁协调变形和可靠传力的关键部位。

建设中的上海嘉松大桥(见图 1)桥型采用双塔双索面自锚式悬索桥,跨径布置为 130 m+336 m+130 m=596 m。该桥加劲梁标准段采用钢箱梁,锚固段及锚跨采用混凝土箱梁,钢-混结合段对称设置在主桥边跨两侧第一根吊杆位置附近。本文结合工程实际,建立考虑焊钉和开孔板连接件的结合段有限元模型,分析结合段的应力分布和连接件受力特点,并提出连接件最大剪力估算方法,可供结合段设计参考。

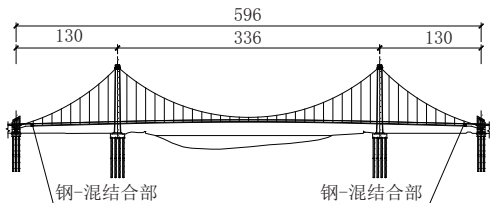


图 1 上海嘉松大桥桥型布置(单位:m)

1 结合段构造特点

钢-混结合段根据构造形式可分为有格室与无

格室两类^[5]。有格室构造相较于无格室构造传力面多,整体性强,混凝土抗裂性好。根据承压板位置,有格室构造可分为后承压板式、前承压板式和前后承压板式。后承压板式构造混凝土梁连续性好、传力清晰,在重庆鹅公岩大桥、鄂东长江大桥、荆岳长江大桥等工程中均得到了良好运用^[6-7]。

上海嘉松大桥结合部(见图 2),分为混凝土梁锚固段、混凝土梁过渡段、钢-混结合段、钢梁加劲过渡段、钢梁标准段五部分,结合段采用有格室后承压板构造。顶、底板格室与钢梁段连接处分别设置内嵌变高度 T 肋的 U 肋和变高度 T 肋,从钢-混结合段向钢梁标准段过渡;格室通过厚度变化的混凝土过渡段与混凝土梁锚固段连接。混凝土梁传递的弯矩和轴力通过顶、底板上设置的钢格室向钢梁传递,剪力通过抗剪连接件在格室内传递。

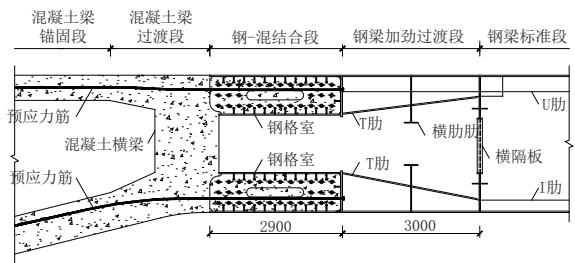


图 2 结合段立面(单位:mm)

钢-混结合段长 2.9 m,结合段在顶、底、腹板处设置钢格室(见图 3),格室高 0.855 m、宽 0.8 m。格室隔板上设置 $\phi 75$ mm 的圆孔,孔中插入 $\phi 28$ mm 的钢筋,混凝土贯通圆孔与隔板、钢筋共同作用,形成开孔板连接件。隔板中间设置混凝土流通孔,以增强格室间联系。格室顶、底板及后承压板上设置 $\phi 22 \times 140$ mm 的焊钉连接件,后承压板采用厚度为 40 mm 的钢板。

收稿日期: 2022-12-08

基金项目: 上海市科技计划项目(21DZ1202900)

作者简介: 王博(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

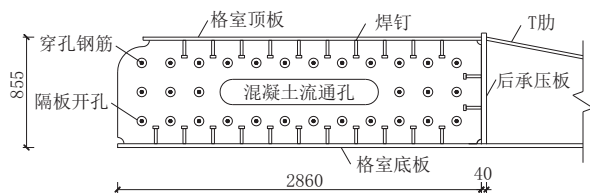


图3 钢格室立面(单位:mm)

2 计算模型的建立

采用 ANSYS 建立实体-板壳有限元模型。由于结构横桥向对称,横桥向取 1/2 桥宽建模,纵桥向建立包括:19.4 m 长混凝土梁锚固段、2.9 m 长钢-混凝土结合段、3.0 m 长钢梁加劲过渡段及 6.0 m 长钢梁标准段的共计 31.3 m 长的有限元模型(见图 4)。其中混凝土采用 Solid95 实体单元模拟,钢结构采用 Shell181 板壳单元模拟,预应力钢筋采用 Link8 桁架单元模拟,开孔板及焊钉连接件采用 Combin14 弹簧单元模拟。混凝土与钢结构之间设置接触单元,模拟二者间的承压和剥离状态。建立边界条件时,横桥向采用对称约束,钢梁标准段采用固端约束,混凝土梁锚固段采用支座约束,同时施加对应支座反力及吊杆力。

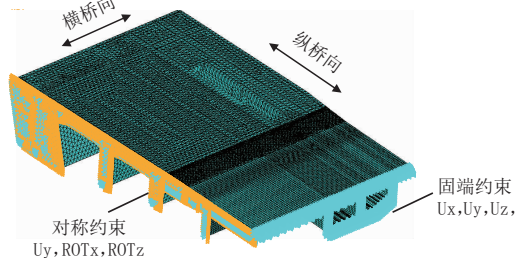


图4 有限元模型

3 计算结果与分析

3.1 混凝土应力分析

最不利荷载工况下,混凝土纵向应力计算结果见图 5。从混凝土梁端至结合段后承压板位置,混凝土梁纵向应力由局部受到约 1.5 MPa 拉应力变化为全截面受压;压应力最大值约 14.5 MPa,出现于混凝土梁过渡段底板转角处。腹板纵向应力基本为压应力,从梁端到结合段应力逐渐增大。结合段混凝土除预应力筋锚固点外均处于受压状态,压应力最大值约 10.6 MPa,出现于结合段混凝土底板靠近承压板处;腹板压应力下缘明显大于上缘,呈现压弯受力特性。

3.2 钢结构应力分析

钢结构应力计算结果见图 6。底板纵向应力最大值约 130 MPa,出现于吊点横隔板和底板连接处;沿

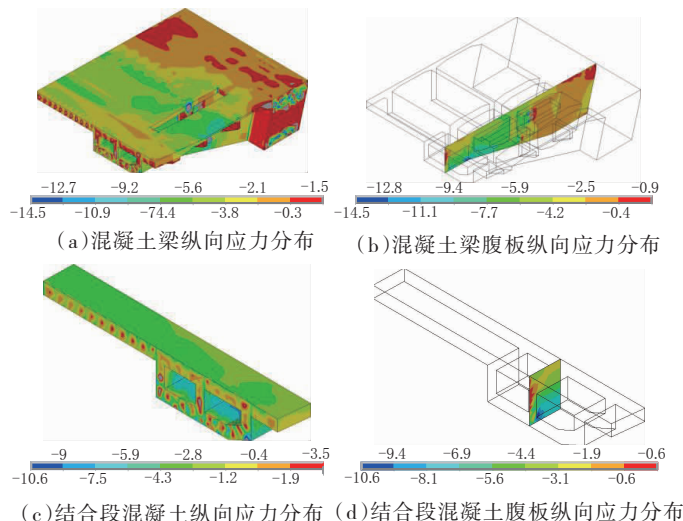


图5 混凝土纵向应力图(单位:MPa)

纵桥向钢结构应力逐渐增大,且中间箱室应力大于边箱。承压板处 Mises 应力最大值约 105 MPa,由预应力筋锚固引起,下格室承压板应力大于上格室,呈现负弯矩受力特征。开孔板纵向应力最大值约 105 MPa,出现于与承压板连接处,应力沿顺桥向从混凝土梁侧向钢梁侧逐渐增大。过渡加劲肋纵向应力最大值约 135 MPa,出现于过渡加劲肋末端截面变化处,底板处加劲应力大于顶板,总体应力过渡较为平顺。

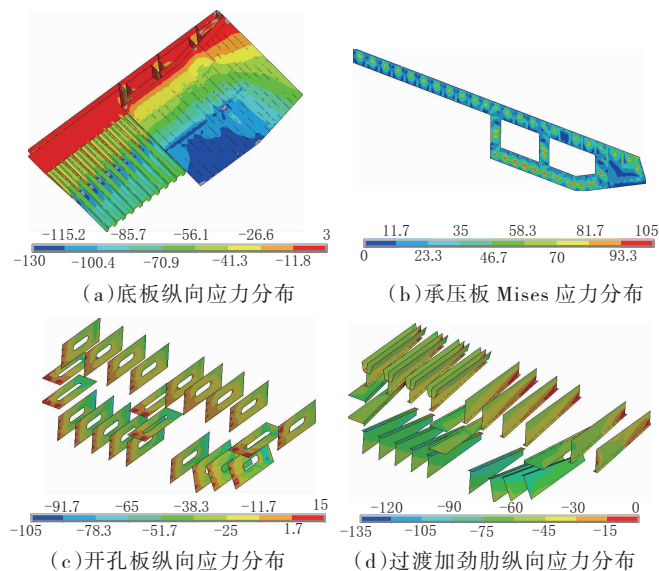
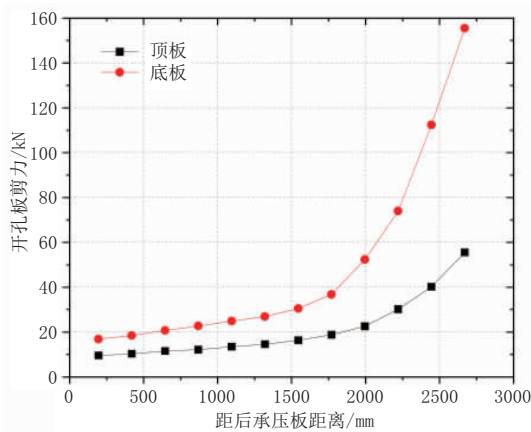


图6 钢结构应力图(单位:MPa)

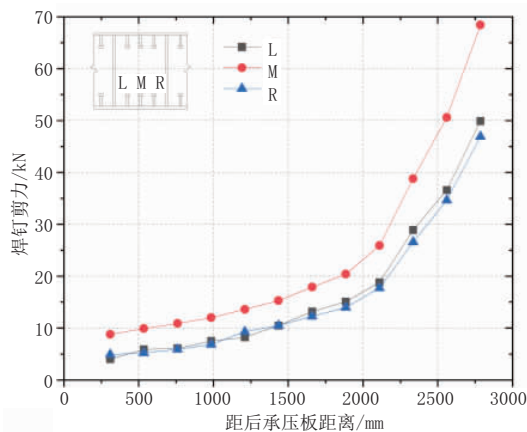
3.3 连接件受力分析

开孔板和焊钉连接件剪力分布见图 7。结合段处混凝土和钢结构的相对滑移在靠近承压板处较小,远离承压板处较大,故连接件剪力靠近承压板处较小,远离承压板处较大。在格室横向,靠近开孔板处相对滑移较小,焊钉受力较小,远离开孔板处相对滑移较大,焊钉受力较大。

开孔板和焊钉连接件的最大剪力分别约为 155 kN



(a) 开孔板剪力分布



(b) 焊钉剪力分布

图7 连接件剪力图(单位:kN)

和 68 kN,最大剪力在其所在列的占比分别为 26.2% 和 23.4%。开孔板和焊钉连接件混合使用时,开孔板连接件承受大部分剪力,由于焊钉刚度小,所受剪力较小,主要用于防止结合段处混凝土与钢结构可能出现的相对剥离。

3.4 传力比例分析

选取结合段 11 个截面对正应力进行积分运算,得到混凝土和钢结构的轴力传递比例,见图 8。混凝土结构承担的轴力从承压板到结合段末端大致呈线性增大,钢结构承担的轴力线性减小;结合段钢结构轴力通过承压板向混凝土传递了约 58%,剩余约 42%的轴力通过连接件逐步传递至混凝土,结合段传力平顺。

4 连接件最大剪力简化计算方法

连接件最大剪力是控制结合段连接件设计的关键因素,但最大剪力值的计算往往依赖大型板壳-实体有限元模型,计算过程复杂、耗时长且灵活性低。为此,本文根据结合段受力特性提出连接件最大剪力简化计算方法。

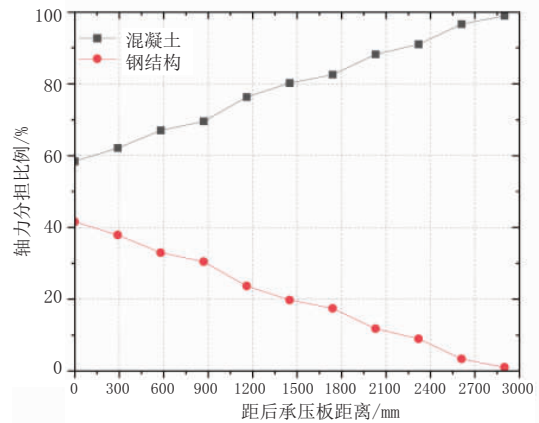


图8 结合段传力比例

4.1 基本假定

结合段连接件最大剪力计算的基本假定包括:

- (1) 结合段受力变形后,平截面假定成立;
- (2) 结合段格室处于轴心受力状态,忽略局部弯矩作用;
- (3) 结合段连接件受力后处于弹性工作状态;
- (4) 结合段连接件传力比例不超过 50%,首排连接件剪力占比不超过 30%。

4.2 计算过程

根据上述基本假定,连接件最大剪力计算示意图见图 9。

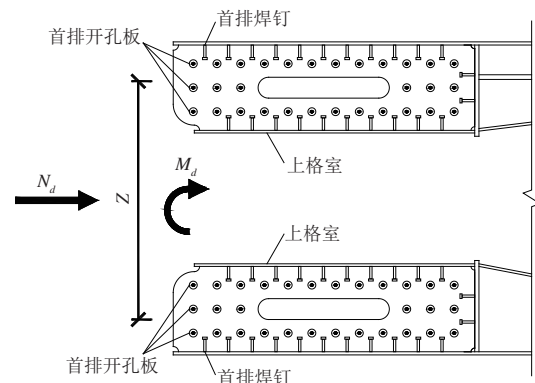


图9 连接件最大剪力计算图示

根据力学原理和结合段受力特性建立式(1)~式(3):

$$V_d = k_1 \times k_2 \times \left(\frac{N_d}{n_a} + \frac{M_d}{Z \times n} \right) \quad (1)$$

$$n_a = n_s + n_x \quad (2)$$

$$n = \text{Min}(n_s, n_x) \quad (3)$$

式中: k_1 为结合段连接件传力比例,可取 0.5; k_2 为首排连接件剪力占比,可取 0.3; N_d 为结合段轴力设计值; M_d 为结合段弯矩设计值; n_a 为首排连接件总个数,多种连接件需等效为同种连接件; n_s 为中性轴以上首排连接件个数; n_x 为中性轴以下首排连接件个数; Z 为上下格室中心距。

将结合段最不利荷载工况下轴力 238 433 kN、弯矩 -137 008 kN·m(负值代表截面下缘受压)及开孔板连接件和焊钉连接件相互等效后的相关参数代入式(1)可得开孔板和焊钉连接件的最大剪力分别为:

$$V_{d\text{开}} = k_1 \times k_2 \times \left(\frac{N_d}{n_a} + \frac{M_d}{Z \times n} \right) =$$

$$0.5 \times 0.3 \times \left(\frac{238\,433}{367} + \frac{137\,008}{2.4 \times 120} \right) = 168.8 \text{ kN}$$

$$V_{d\text{焊}} = k_1 \times k_2 \times \left(\frac{N_d}{n_a} + \frac{M_d}{Z \times n} \right) =$$

$$0.5 \times 0.3 \times \left(\frac{238\,433}{931} + \frac{137\,008}{2.4 \times 217} \right) = 77.9 \text{ kN}$$

对比简化计算方法与有限元分析方法结果可知,简化计算方法开孔板和焊钉连接件最大剪力分别约 169 kN、78 kN,均大于有限元分析方法的 155 kN、68 kN,安全系数分别为 1.09、1.15,简化计算方法可以较准确估算连接件最大剪力且偏安全。

5 结 语

本文结合工程实际,对自锚式悬索桥钢-混结合段进行有限元计算和分析,研究结合部受力性能,提出连接件最大剪力简化计算方法,主要得出以下结论:

(1)最不利荷载工况下,混凝土梁纵向最大应力出现于混凝土梁过渡段底板转角处,需加强此处配筋设计;结合段混凝土纵向最大应力出现于混凝土底板靠近承压板处,应加强格室混凝土振捣质量;结合段混凝土均处于受压状态,应力下缘明显大于上

缘,呈压弯受力特性。

(2)钢结构纵向应力沿纵桥向逐渐增大,主梁中间箱室底板应力大于边箱,应力横向分布不均匀,开孔板连接件与承压板连接处及过渡加劲肋末端均出现局部应力集中,钢结构总体应力水平较为合理。

(3)结合段连接件最大剪力均出现于远离后承压板的结合段末端,最大剪力在其所在列的占比均不超过 30%,隔板上的开孔板连接件承受大部分剪力,顶底板上的焊钉连接件受力较小,主要用于防止结合段处混凝土与钢结构可能出现的相对剥离。

(4)结合段钢结构与混凝土之间的轴力传递大致呈线性变化,承压板传递约 58%的轴力,其余通过连接件传递,轴力分担比例较为合理,传力平顺。

(5)在结合段连接件最大剪力简化计算的基本假定下,采用简化计算方法,可以较准确估算连接件最大剪力且偏安全。

参考文献:

- [1] 黄琼.钢-混凝土混合梁自锚式悬索桥受力性能与计算方法研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [2] 郭济.大跨径自锚式悬索桥混合梁结合段受力分析[J].上海公路,2018(3):28-33.
- [3] 陈泉.自锚式悬索桥加劲梁钢混结合段和锚固段受力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [4] 孙叔禹.广州猎德大桥主桥设计[J].山西建筑,2007(22):299-300.
- [5] 刘玉擎.混合梁接合部设计技术的发展[J].世界桥梁,2005(4):9-12.
- [6] 刘荣.斜拉桥混合梁结合段合理设计研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [7] 丁望星,姜友生.荆岳长江大桥主梁钢混结合段设计[C]//全国斜拉桥关键技术论文集(2012),2012.
- [8] 田乙,吴文兵,张霖,等.堆载-真空联合预压下的未打穿竖井地基固结理论[J].岩土工程学报,2022,44(3):533-540.
- [9] 林伟岸,江文豪,詹良通.考虑真空加载过程及堆载随时间变化下砂井地基的普遍固结解析解[J].岩土力学,2021,42(7):1828-1838.
- [10] 黄鹏华,王柳江,刘斯宏,等.真空堆载预压联合电渗竖向排水地基非线性固结解析解[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):206-216.
- [11] 詹良通,张斌,郭晓刚,等.废弃泥浆底部真空-上部堆载预压模型试验研究[J].岩土力学,2020,41(10):3245-3254.
- [12] 李波,程文亮,项存平,等.大面积堆载预压处理深厚软基工后沉降预测研究[J].岩土工程学报,2021,43(S2):162-165.
- [13] 王光.高速公路软土区段桩基路堤沉降及稳定性分析[J].建筑安全,2019(9):75-77.
- [14] 帅宇轩.临清高速强夯加固软土地基效果分析与评价[D].北京:北京交通大学,2020.
- [15] 何敏.浅析公路工程软基处理技术及质量控制[J].四川水泥,2016,(2):198-198.
- [16] 舒晓武.高速公路加宽工程技术及应用研究[D].天津:天津大学,2006.
- [17] 王涛,韩焯,赵先宇,等.FLAC^{3D}数值模拟方法及工程应用-深入剖析FLAC^{3D}5.0[M].北京:建筑工业出版社,2015.
- [18] 杨天琪.临清高速公路河谷区多层软土强夯加固地基路基隆陷分析与预测[D].北京:北京交通大学,2021.
- [19] 陈育民,徐鼎平.FLAC/FLAC^{3D}基础与工程实例[M].武汉:中国水利水电出版社,2013.
- [20] 刘学力.FLAC^{3D}在软土基坑开挖计算中的应用[J].路基工程,2008(6):166-168.
- [21] 董超强.塑料排水板堆载预压法处理超软土地基固结沉降与稳定性控制研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [22] 张社荣.塑料排水板加固软基工期优化及数值仿真[J].中国农村水利水电,2007(2):40-42,47.

(上接第 60 页)

2020,37(4):33-37.