

钢板组合梁桥面板与主梁连接受力性能研究

季云峰¹, 苏庆田¹, 王晓宇², 马明雷²

(1.同济大学 桥梁工程系, 上海市 200092; 2.上海浦江桥隧运营管理有限公司, 上海市 200231)

摘 要: 针对一座钢板组合梁桥, 通过有限元程序 ANSYS 对组合梁中混凝土桥面板与钢主梁连接进行建模计算分析, 并进一步通过试验研究得到群钉连接件的抗力性能。理论计算结果表明: 在承载能力极限状态组合下, 支点位置附近群钉剪力最大, 焊钉抗剪承载力满足设计要求。抗剪试验结果表明: 相比于单个焊钉推出试件的承载力, 大部分群钉试验试件中单个焊钉平均承载力减少 10%~20%, 但即便是焊钉数量最多的试件, 其平均单个焊钉承载力仍远高于现行规范的设计抗剪承载力。

关键词: 钢板组合梁; 焊钉连接件; 有限元分析; 抗剪试验

中图分类号: U441

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)12-0085-04

0 引言

在钢-混凝土组合结构桥梁中, 混凝土桥面板与钢梁之间采用焊钉连接件进行连接, 为了适应预制混凝土桥面板的安装施工, 往往会在混凝土桥面板上预留群钉孔洞, 使得混凝土桥面板与钢梁之间的焊钉呈非均匀分布。这种非均匀分布的焊钉连接件在组合梁的受力性能与均匀分布焊钉受力性能有较大的不同, 目前规范中还没有有关群钉焊钉连接件的受力性能的计算分析方法和群钉的承载力计算方法, 因此对群钉连接件的受力性能进行研究, 保证实际结构中连接件受力的可靠性具有重要意义。钢板组合结构桥梁常在钢-混凝土结合面布置焊钉连接件来抵抗结合面的剪力, 因为其在大多数情况下均能满足设计的要求。采用群钉连接件连接混凝土桥面板与钢主梁时, 若焊钉布置较密, 可能导致群钉剪力分布不均匀, 承载力存在一定程度的折减^[1]。

本文针对一座钢板组合梁桥, 通过数值模拟, 对组合梁中连接件的受力性能进行计算分析, 在承载能力极限状态下进行焊钉抗剪验算, 并进一步通过抗剪试验研究得到群钉连接件的抗力性能, 为类似工程提供技术经验。

1 混凝土桥面板与钢主梁连接受力性能计算分析

1.1 工程背景

背景工程为 3×35 m 跨径的双幅八主梁钢板组合梁, 上部结构连续, 钢主梁采用 I 形, 梁高 1 650 mm。上翼缘板宽 600 mm, 厚 20~34 mm。下翼缘板宽 650 mm, 厚 25~56 mm。腹板厚度为 16~18 mm, 如图 1 所示。焊钉布置于上翼板, 支点位置焊钉纵桥向间距 0.12 m, 横桥向布置 6 排, 横桥向间距 0.09 m, 如图 2 所示, 其余位置焊钉纵桥向间距为 0.2 m。

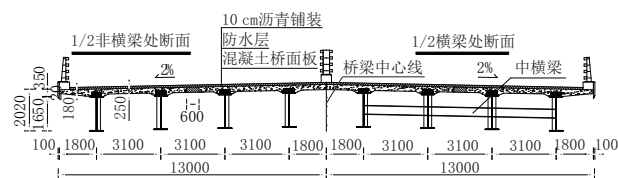


图 1 钢板组合梁桥跨中标准横断面图 (单位: mm)

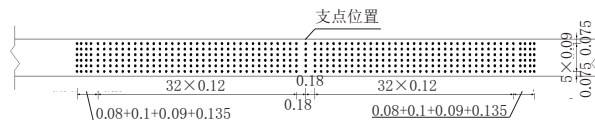


图 2 单根主梁中支点位置剪力钉布置 (单位: m)

1.2 钢与混凝土间连接件受力的有限元计算

采用通用有限元程序 ANSYS 对 3 跨连续钢板组合梁桥进行建模分析, 钢结构板件采用 SHELL181 板壳单元模拟, 混凝土板采用 SOLID95 实体单元模拟, 焊钉采用 COMBIN14 弹簧单元模拟, 模型见图 3。钢材采用 Q345D 钢, 混凝土标号为 C40, 焊钉的抗剪刚度为 4.2×10^5 kN/m, 抗拉刚度为 2.5×10^7 kN/m。建立焊钉时, 对受力较大的中支点附近 (纵桥向 $\pm$

收稿日期: 2022-03-02

基金项目: 浙江省公路管理局科研项目 (ZJXL-SGL-201803); 台州市路泽太高架快速路有限公司研究项目 (201807); 上海市道路运输管理局科研项目 (JT2021-KY-013)

作者简介: 季云峰 (1977—), 男, 博士, 讲师, 从事桥梁健康监测、桥梁结构测试等研究工作。

4.5 m 范围)的焊钉按照实际数量进行模拟;其余位置焊钉将横向 6 排等效为一排,相当于通过增大 1 个焊钉刚度的方式将 6 个焊钉等效为 1 个焊钉。

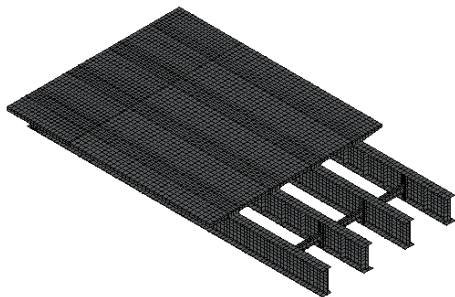


图 3 钢板组合梁节段有限元模型

按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[2]第 4.1.6 条规定进行承载能力极限状态下作用基本组合的计算,考虑结构重要性系数 $\gamma_0=1.1$,得到焊钉剪力及拉拔力包络图如图 4 所示,其数值为一根主梁上横桥向 6 个焊钉合力。纵向剪力、横向剪力以及竖向拉拔力最大值均在中支点位置;就全桥范围来看焊钉受力以纵向剪力为主,横向剪力以及竖向拉拔力在除支点的其他位置较小。

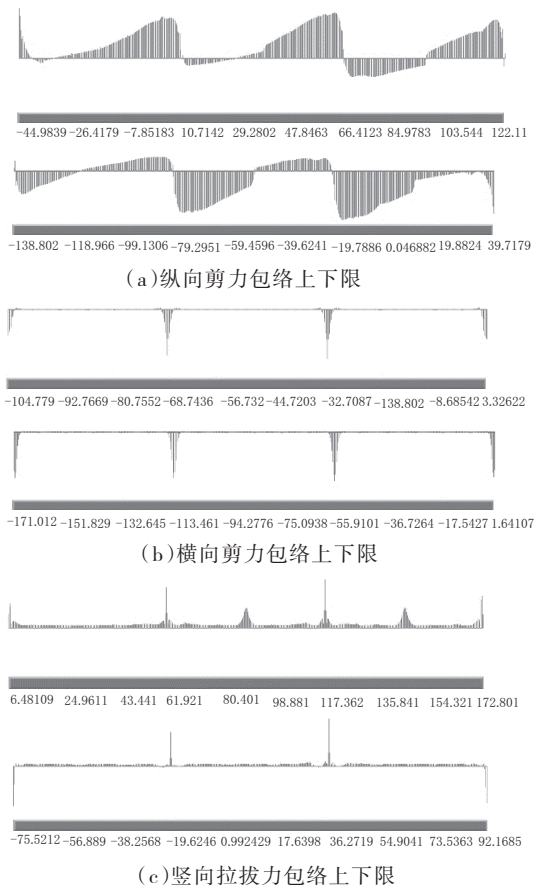


图 4 焊钉剪力及拉拔力包络图(单位:kN)

精确计算中支点各焊钉内力,得出最大单钉内力,提取模型计算结果中焊钉纵向剪力、横向剪力,计算得焊钉剪力合力,焊钉剪力及拉拔力计算值见

表 1。相比等效计算结果,精确计算的单钉剪力及拉拔力最大值超出 20%以上,横向剪力更是超出 70%左右,因此在建立钢板组合梁的有限元模型中时,有必要对钢与混凝土间连接件受力最不利区域的焊钉按实际数量进行模拟,以获得较为准确的单钉最大内力计算结果。

表 1 焊钉剪力及拉拔力计算值 单位:kN

内力	等效 6 钉最大值	等效单钉最大值	最大单钉内力
纵向剪力	138.8	23.1	31.5
横向剪力	171.0	28.5	48.8
拉拔力	172.8	28.8	35.8
剪力合力	—	36.7	49.4

1.3 承载能力极限状态下焊钉抗剪验算

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[3]第 11.4.2 条,承载能力极限状态下连接件应按式(1)进行抗剪验算:

$$\gamma_0 V_{ld} \leq V_{su}$$

式中: V_{ld} 为承载能力极限状态下单个连接件承担的剪力设计值; V_{su} 为单个连接件的抗剪承载力。

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)11.4.4 条,对圆柱头焊钉连接件的抗剪承载力进行计算。焊钉尺寸为直径 22 mm,高 $h=200$ mm, $h/d=10>4$;选用 M4.6 级栓钉,焊钉材料的抗拉强度最小值 $f_{su}=400$ MPa;计算得 $V_{su}=106.4$ kN, $\gamma_0 V_{ld}=1.1 \times 49.4=54.3 \leq V_{su}=106.4$ kN,故本例焊钉按照规范验算满足承载能力要求。

2 焊钉连接件性能测试

2.1 试验模型

为研究焊钉连接件的实际受力性能,设计和制作群钉连接件的标准推出试验,测试群钉连接件的抗剪力学性能。进行五种不同焊钉数量的群钉试验,每种群钉进行 3 个试验试件,共计 15 个试件。为了比较群钉连接件的抗剪承载力随焊钉数量的变化情况,还进行相同规格焊钉连接件的单钉标准推出试验,单钉标准推出试验的个数为 3 个。

试件按照剪力钉横桥向行数以及纵桥向列数分为以下几种规格: 5×5 , 5×4 , 4×4 , 4×3 , 3×3 以及 1×2 (数值分别代表横行数 $\times$ 纵列数)。

抗剪试验采用焊接工字钢及在两翼缘板上通过剪力钉拼接混凝土块,两者间通过焊钉连接的试验方式进行抗剪承载力试验。选取 $\phi 22 \times 200$ mm 的焊钉规格,采用 1 组 3 个的单钉推出试件来研究焊钉

的抗剪承载能力及其变形能力。试件编号 NS2, 结构造见图 5。试件中混凝土 28 d 的立方体抗压强度为 62.1 MPa, 焊钉连接件的极限抗拉强度为 519 MPa。

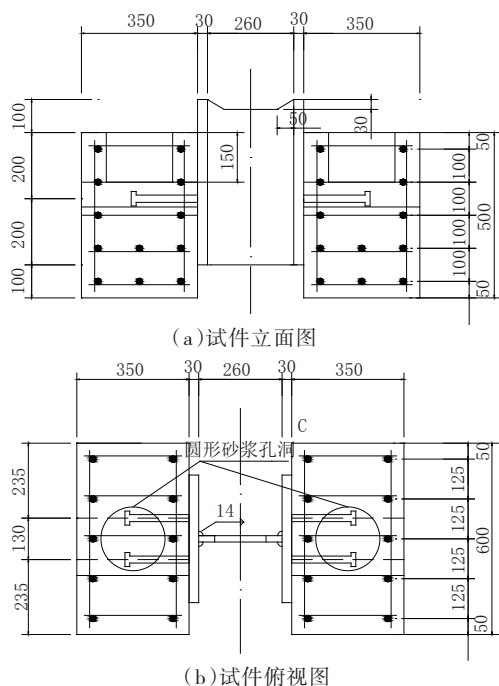


图 5 NS2 模型试件构造图(单位:mm)

群钉抗剪试验采用焊接箱型钢及在两侧钢板上通过剪力钉拼接混凝土块,两者间通过焊钉群连接的试验方式进行抗剪承载力试验。拟定背景工程组合桥梁中可能的焊钉连接件群钉的数量并考虑试验机的加载能力,设计和制作群钉连接件的标准推出试验,测试群钉连接件的抗剪力学性能。进行五种不同焊钉数量的群钉试验,每种群钉需进行 3 个试验试件,共计 15 个试件,从而比较群钉连接件的抗剪承载力随焊钉数量的变化情况,详见表 2 焊钉纵向间距均为 110 mm,横向间距均为 90 mm,相对于原桥支点处布置略为密集。NS25 试件结构构造见图 6,其余试件构造类型,NS12、NS9 试件混凝土块尺寸稍小。

表 2 群钉连接件试件分组

试件 分组	试件 个数	焊钉规格 /mm	横行数× 纵列数	焊钉数	混凝土块尺寸 (水平长×水平宽× 竖向高)/mm
NS25	3	$\phi 22 \times 200$	5×5	50	$1\,000 \times 350 \times 1\,000$
NS20	3	$\phi 22 \times 200$	5×4	40	$1\,000 \times 350 \times 1\,000$
NS16	3	$\phi 22 \times 200$	4×4	32	$1\,000 \times 350 \times 1\,000$
NS12	3	$\phi 22 \times 200$	4×3	24	$760 \times 350 \times 900$
NS9	3	$\phi 22 \times 200$	3×3	18	$760 \times 350 \times 900$

2.2 加载及测试方案

采用较通用的推出试验方法、即两侧对称加载

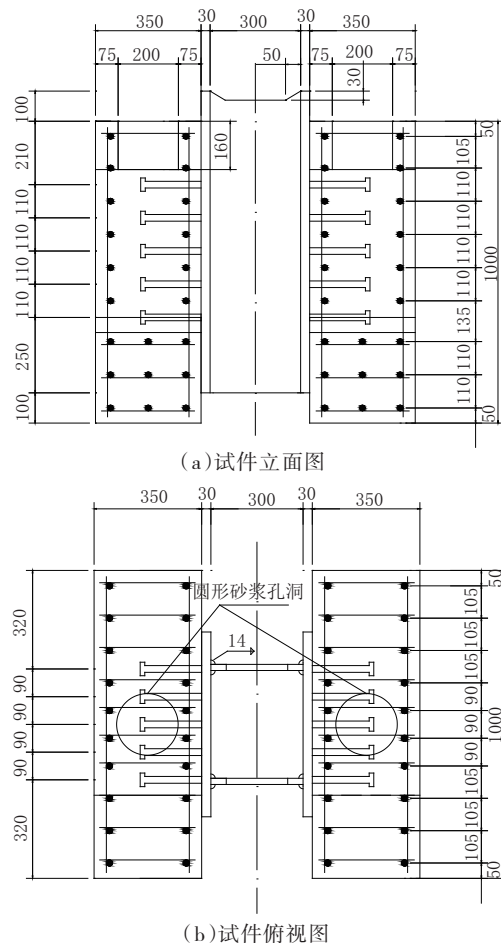


图 6 NS25 模型试件构造图(单位:mm)

的方式,保证均匀给每根连接件施加剪力。通过对工字钢翼缘施加推压力 F ,来测试侧面钢板的连接件的承载性能,如图 7 所示。在试件底部设置细砂垫层,保证混凝土底部均匀受力。位移计布置在左右混凝土块的两个侧面上,一共 4 个面,每个面上布置 2 个位移计,共 8 个,每个面上上下 2 个位移计布置点分别为群钉第一排焊钉高度处以及最后一排焊钉高度处。

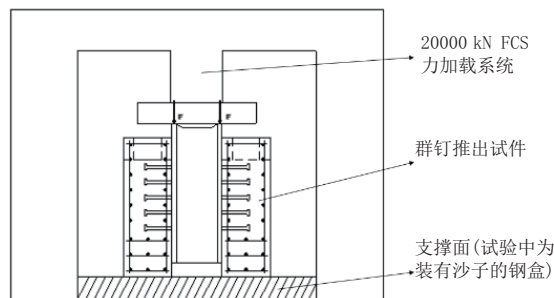


图 7 加载示意图

主要测试内容为(1)测试试件的最大承载力、最大相对滑移量;(2)观察试件混凝土表面裂缝、连接件的断裂等破坏现象。测试仪器及用品有:位移计 8 个,精度为 1/1 000 mm;应变测试仪 1 台;20 000 kN FCS 力加载系统。

2.3 焊钉材性试验

焊钉规格为 $\phi 22$,其材性试验依照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)^[4]中所述的方法进行,测试得其屈服强度为460.7 MPa,极限强度为506.5 MPa。

2.4 焊钉连接件试验结果及焊钉破坏形态

各个组别的连接件的试验结果如表3所示。随着群钉接头试件焊钉数量的增多,单钉的平均承载力呈下降趋势,但即便是焊钉数量最多的NS25(50个焊钉)试件,其单钉承载力仍远远高于现行规范的设计抗剪承载力;相比于单钉推出试件的承载力而言,群钉平均承载力有所减少,除NS9试件以外,单钉平均承载力减少10%~20%;NS12试件和N16试件平均承载力相差不大,NS20试件和N25试件平均承载力相差不大,故焊钉沿剪力方向的纵列数增加造成的承载力折减明显大于横行数的增加所引起的;此外随着焊钉数量的增加,群钉推出试件极限相对滑移量基本呈下降趋势,整体刚度呈增加趋势,NS25试件极限相对滑移平均值相较NS2试件减少约30%。

表3 群钉接头试件抗剪承载性能试验结果

试件分组	极限承载力平均值 /kN	单钉承载力平均值 /kN	滑移平均值 /mm
NS2	788.6	197.2	10.1
NS9	3443.6	191.3	9.099
NS12	4237.7	176.6	9.186
NS16	5726.8	179.0	8.134
NS20	6657.7	166.4	7.523
NS25	7997.0	160.0	7.075

2.5 混凝土桥面板与钢主梁连接受力性能评价

根据本文1.2节到1.3节中的计算结果可知,在承载能力极限状态下,单个焊钉设计剪力值最大剪力设计值为54.3 kN,根据规范计算所得承载力为106.4 kN;由推出试验结果可知,单钉推出试件的单钉承载力最小为178.8 kN,平均值为191.3 kN,对于焊钉数量最多的NS25试件,其单钉承载力最小值为156 kN,平均值为160.6 kN。即所有推出试件单钉承

载力均远高于现行规范的设计抗剪承载力,对于单钉承载力最小的NS25试件,单钉最小承载力是规范设计抗剪承载力的1.5倍,是设计剪力的2.7倍。由此可知,采用 $\phi 22 \times 200$ mm的焊钉连接件能够满足设计规范的要求,且具有足够的安全储备。

3 结 论

根据上述理论计算与试验结果分析,得到如下结论:

(1)在承载能力极限状态组合下,支点位置附近群钉剪力最大,且各个焊钉剪力分配不均,纵向剪力绝对值最大为31.5 kN,横向剪力绝对值最大为48.8 kN,剪力合力最大为49.4 kN,支点上方焊钉出现较大拉拔力,最大值为35.8 kN。焊钉抗剪承载力在承载能力极限状态下满足设计要求。

(2)相比于单钉推出试件的承载力而言,群钉平均承载力有所减少,除NS9试件以外,群钉试验试件中单钉平均承载力减少10%~20%;焊钉沿剪力方向的纵列数增加造成的承载力折减明显大于横行数的增加所引起的。

(3)随着焊钉数量的增加,群钉推出试件极限相对滑移量基本呈下降趋势,整体刚度呈增加趋势,NS25试件极限相对滑移平均值相较NS2试件减少约30%。

(4)随着群钉试件焊钉数量的增多,单钉的平均承载力基本呈下降趋势,但即便是焊钉数量最多的NS25试件,其平均单钉承载力仍远远高于现行规范的设计抗剪承载力,且具有足够多的安全储备。

参考文献:

- [1] Xue D, Liu Y, Zhen Y, et al. Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge[J]. Steel Construction, 2012,74(8):1-7.
- [2] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [4] GB/T 228—2002,金属材料室温拉伸试验方法[S].