

开孔钢板铰缝连接构造受力性能与计算方法研究

王欣南¹, 陈美忠², 赵秋²

(1.中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430052; 2.福州大学 土木工程学院)

摘要: 针对公路空心板混凝土铰缝易损坏现象, 提出开孔钢板连接构造, 在空心板间形成类似于钢制铰缝结构。通过试验验证的空心板间开孔钢板连接构造的推出试验数值模拟方法, 研究了贯穿钢筋直径、开孔钢板厚度和开孔钢板强度变化对新型连接构造的抗剪承载力影响。结果表明: 铰缝抗剪强度随着开孔钢板板厚、强度及贯穿钢筋直径的增大而增大, 增大程度会逐步减小, 开孔板板厚和强度变化对于铰缝抗剪强度的影响小于贯穿钢筋直径变化的影响。最后, 给出开孔钢板连接构造的合理构造和抗剪承载力计算公式。

关键词: 空心板; 铰缝; 开孔钢板; 推出试验; 抗剪承载力; 有限元

装配式混凝土空心板结构被广泛应用于中国的中小跨径桥梁中, 根据2014年进行的中国桥梁调查结果显示, 在所有的桥梁中, 大跨度桥梁所占比例不到10%, 其余为中小型桥梁, 其中60%左右为空心板桥。铰缝使装配式空心板在横桥向连接成为整体, 从而能够共同分担桥上的车辆荷载。铰缝构造设计上的缺陷是导致空心板出现单板受力现象的重要原因之一。为了改善铰缝受力, 在不改变空心板桥力学模式的情况下, 采用承载力高的钢制铰结构是一个较好的选择。可通过在原有的铰缝中增加开孔钢板, 并在孔中穿钢筋来实现, 从而避免铰缝破坏导致的单板受力。该文通过经试验验证的有限元数值模拟方法, 探讨此新型结构的受力性能和计算方法。

1 新型预制板连接构造

针对现有空心板铰缝抗剪承载力不足, 在顺桥向按一定的间距在空心板横断面内预埋开孔钢板, 并在处于铰缝中的钢板开孔中贯穿钢筋, 形成钢制铰结构, 从而提高铰缝的抗剪承载力, 受力模式更加接近铰接板梁法基本假定, 结构形式如图1所示。为了保证空心板中混凝土的连通性, 并且让纵向钢筋和预应力钢筋连续通过, 在满足受力要求的情况下, 可将处于预制板中的钢板进行适当开孔。为了方便钢筋进行穿孔并增强结构整体性, 在开孔钢板边缘开设缺口。另外, 也可以将图1所示的空心板内预埋钢板的下部去掉, 只

在空心板截面上部受压区保留钢板, 这样更有利于该新型结构的整体受力。

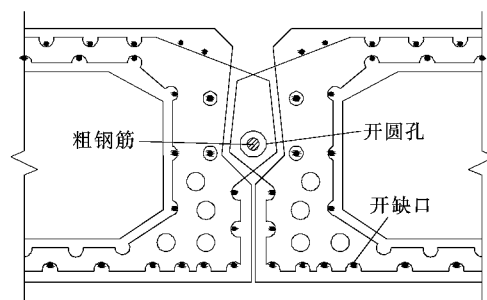


图1 开孔钢板铰缝连接构造示意图

2 新型铰接结构抗剪承载力的数值模拟

空心板铰缝的抗剪承载力研究没有固定的构件形式和研究方法, 由于推出试验的结果偏安全, 且容易操作, 受力较为明确, 国内外对于该类型结构抗剪性能研究大部分采用推出试验形式。空心板铰缝推出试验模型按1:2比例进行缩尺, 试件尺寸如图2所示。

采用有限元软件 Ansys 对新型铰缝进行数值模拟时, 开孔钢板和铰缝混凝土为实体单元, 单元类型为 C3D8R; 钢筋为桁架单元, 单元类型为 T3D2。混凝土选择适用静力问题, 且单项加载的收敛性好的损伤塑性模型。开孔钢板的材性本构采用双折强化弹塑性模型, 钢筋本构关系采用理想弹塑性模型。有限元模型

如图 3 所示,沿试件横向宽度方向坐标系方向为 X ,沿试件高度方向坐标系方向为 Y ,沿试件厚度方向坐标系方向为 Z ;模型边界为简支约束,一端释放 Y 方向约束,一端固结。该数值模拟方法通过上述推出试验对其荷载—滑移曲线和破坏模态进行了验证,限于篇幅,验证过程见相关文献[9]。

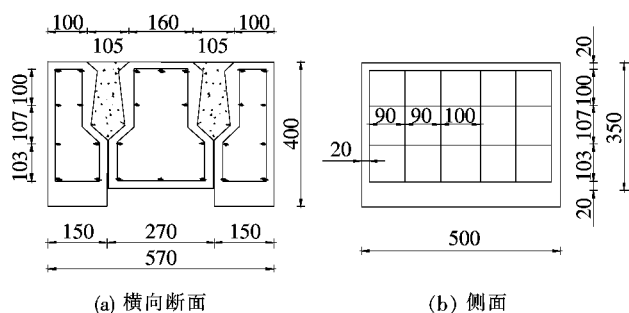


图 2 试验试件尺寸示意图(单位:mm)

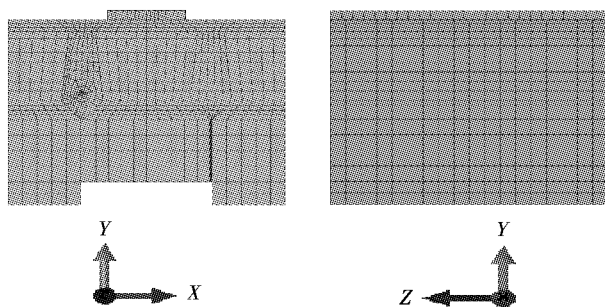


图 3 有限元模型图

3 开孔钢板铰缝连接构造受力性能

为了全面了解新型铰缝结构的受力性能,采用经推出试验验证的数值模拟方法,变化贯穿钢筋的直径、开孔钢板的钢材强度和钢板厚度进行其受力性能分析。

3.1 贯穿钢筋直径

贯穿钢筋穿过两片开孔钢板的开孔,将两个钢板连接在一起,其直径大小将对结构整体性产生重要的影响。选取钢筋直径 8、12、16、20 和 24 mm 进行分析。开孔钢板板厚为 20 mm,钢材为 Q345,保持不变,贯穿钢筋直径变化对铰缝抗剪强度影响如图 4 所示。由图 4 可以看出:在一定的范围内铰缝抗剪强度随着贯穿钢筋直径的增大而增大;当达到一定值时,铰缝抗剪强度提高并不明显。与直径为 8 mm 相比,随着钢筋直径的增大铰缝抗剪强度分别提高了 1.43、1.53、1.68 和 1.79 倍。直径从 8 mm 增大到 12 mm 抗

剪强度提高了 43%,而直径从 20 mm 增大到 24 mm 抗剪强度提高幅度仅 5.6%。

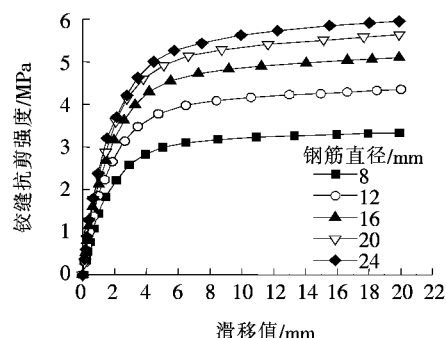
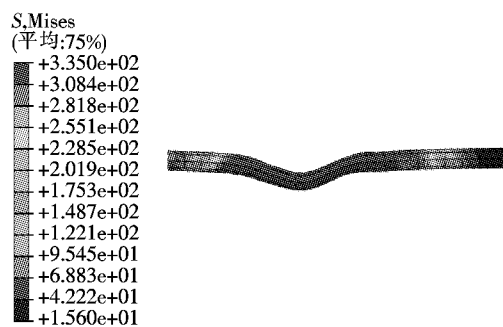
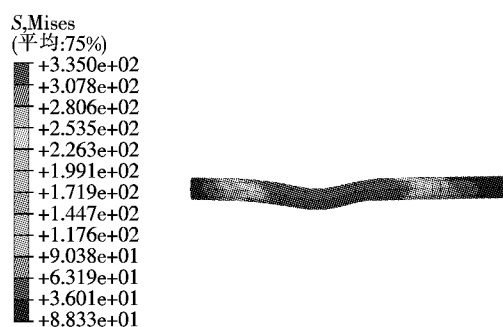


图 4 贯穿钢筋直径的影响

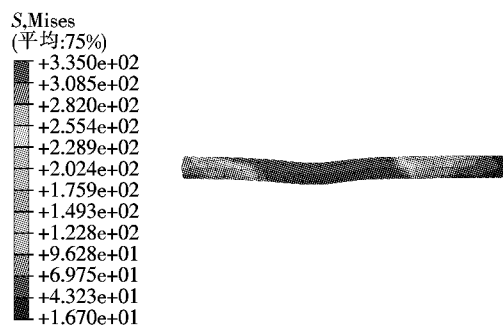
不同贯穿钢筋直径应力云图、开孔板应力云图和铰缝接触面应力云图如图 5~7 所示(因篇幅所限,省



(a) 直径 8 mm

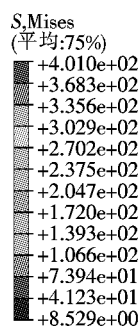


(b) 直径 16 mm

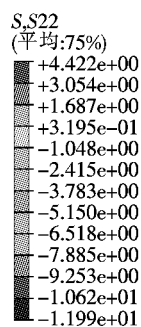


(c) 直径 24 mm

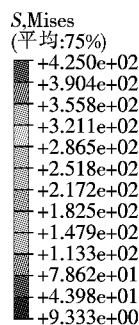
图 5 钢筋应力云图(单位:MPa)



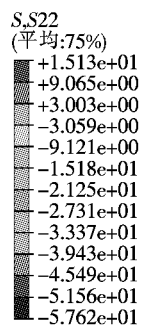
(a) 直径 8 mm



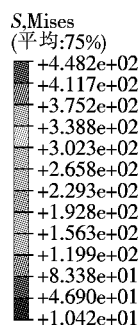
(a) 直径 8 mm



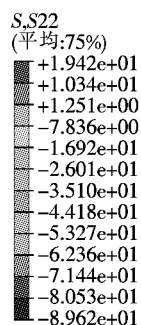
(b) 直径 16 mm



(b) 直径 16 mm



(c) 直径 24 mm



(c) 直径 24 mm

图 6 开孔板应力云图(单位:MPa)

图 7 铰缝接触面应力云图(单位:MPa)

略了直径 12、20 mm 云图),随着贯穿钢筋直径的增大,贯穿钢筋的变形逐渐减小,钢筋屈服范围占总长度的比例也逐渐变小,贯穿钢筋附近开孔板的应力则逐渐变大,铰缝接触面的应力也逐渐变大。这表明随着贯穿钢筋直径的增大,铰缝接触面混凝土破坏提前。由此可知:随着钢筋直径的增大,抗剪承载力提高,该处局部铰缝混凝土更早破坏。

3.2 开孔钢板钢材的板厚

由于开孔钢板的厚度是影响其刚度的重要参数,为了探究开孔钢板厚度变化对铰缝承载能力的影响,保持贯穿钢筋直径 16 mm 和钢材采用 Q345 不变,开孔钢板的厚度分别取 5、10、15 以及 20 mm,并通过其抗剪强度—滑移曲线来判断该参数对铰缝承载能力的影响。各板厚下铰缝连接结构的抗剪强度—滑移曲线

如图 8 所示。从图 8 可以看出:对于弹性阶段,开孔板的板厚对抗剪强度影响不大。当结构进入塑性阶段时,抗剪强度随着板厚的增大而增大,但是增大的幅度逐渐减小。相较于板厚 5 mm,抗剪承载力分别提高了 6.3%、11.2% 和 14.6%。

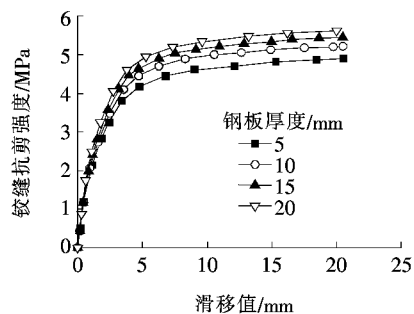


图 8 不同开孔钢板厚度抗剪强度—滑移曲线

开孔钢板的应力云图和铰缝混凝土接触面的应力

云图随着开孔钢板厚度的变化情况如图 9、10 所示。

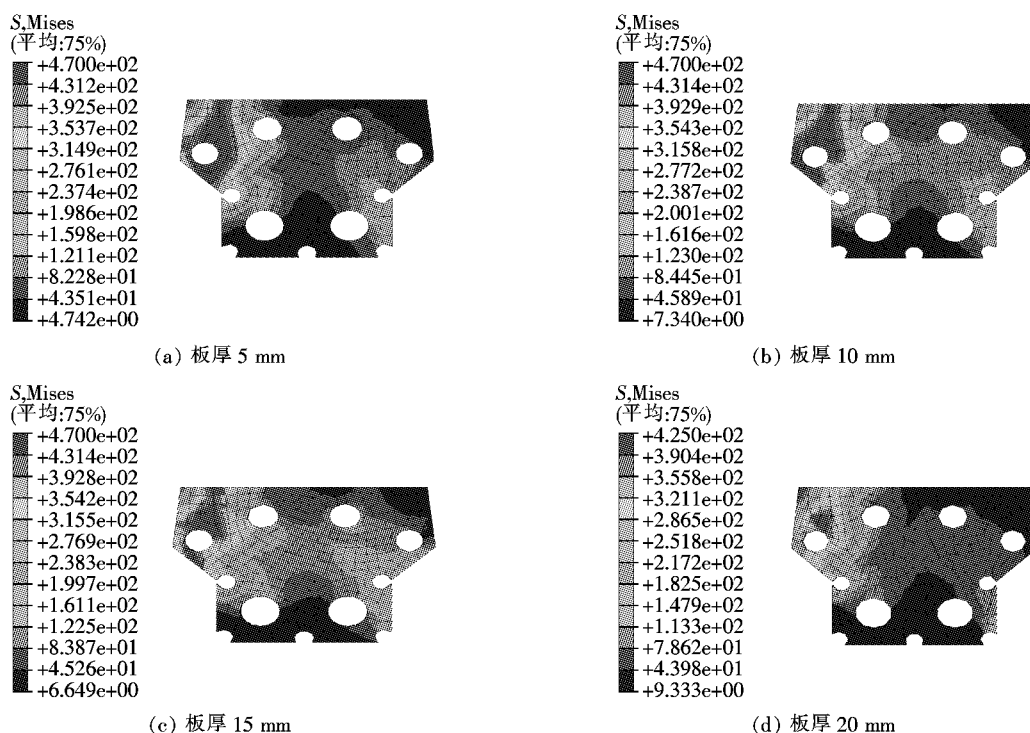


图 9 开孔钢板应力云图(单位:MPa)

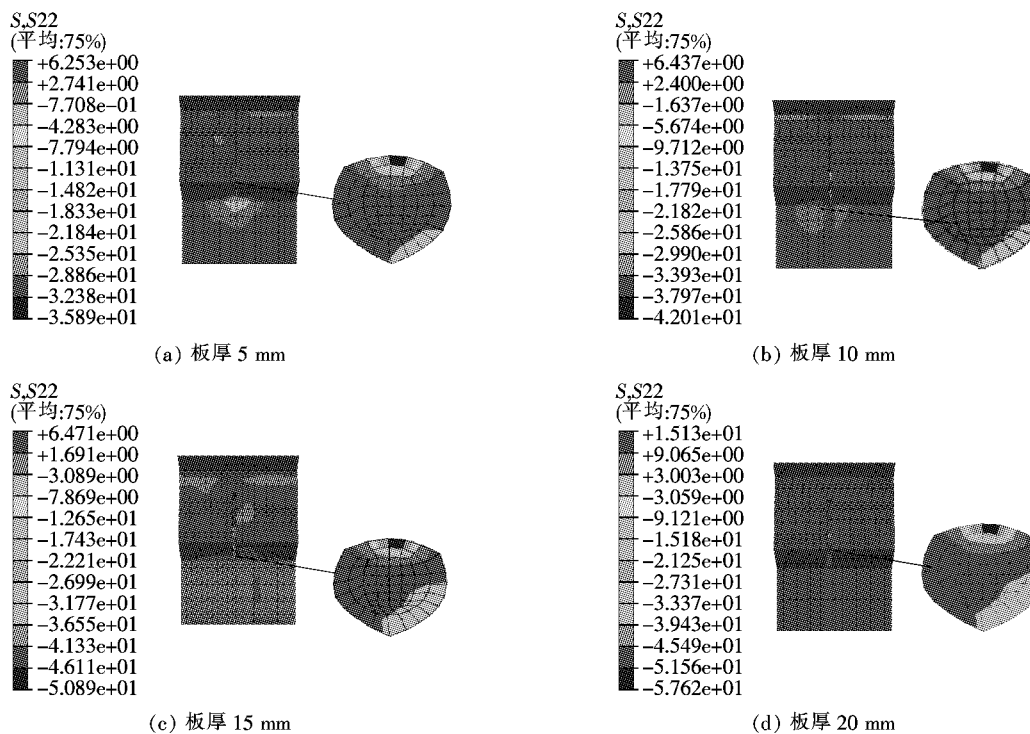


图 10 铰缝接触面应力云图(单位:MPa)

由图 9~10 可知:随着开孔钢板板厚的增大,铰缝贯穿钢筋附近的开孔钢板屈服范围逐渐减小;铰缝接触面的应力逐渐增大,铰缝接触面应力在开孔板板厚

为 20 mm 时最大。说明随着开孔板厚的增大,铰缝接触面破坏提前。

3.3 开孔钢板钢材的强度

以开孔钢板钢材强度为参数,研究不同的钢材强度对铰缝抗剪承载力的影响。保持贯穿钢筋直径为 16 mm 和开孔钢板板厚为 15 mm 不变。根据现行国家标准 GB/T 700《碳素结构钢》和 GB/T 1591《低合金高强度结构钢》,分别取常用的碳素结构 Q235 和 4 种低合金高强度结构钢 Q295、Q345、Q390、Q420。开孔钢板在不同钢强度材料下抗剪强度—滑移曲线如图 11 所示。

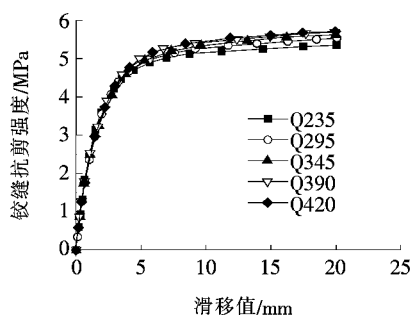


图 11 开孔钢模隔板钢材强度的影响

从图 11 可以看到:对于弹性阶段,开孔板的钢材强度对抗剪强度基本没有影响。当结构进入到塑性阶段时,虽然抗剪强度随着钢材强度的增大而增大,但是增大的幅度比较小。相较于 Q235 钢,铰缝抗剪强度提高分别了 3.2%、15%、6.3%和 6.7%。

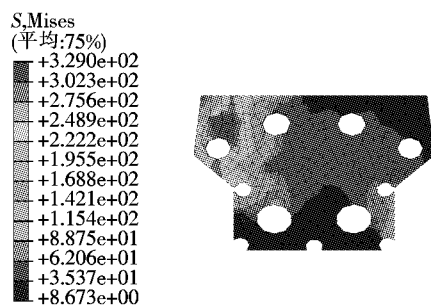
开孔板应力云图、铰缝混凝土应力云图如图 12、13 所示。由图 12、13 可知:随着开孔板钢材强度的提高,铰缝开孔附近开孔板的屈服区域逐渐收缩,而铰缝接触面的应力逐渐增大。说明随着开孔板钢材强度提高,铰缝接触面破坏时间点提前。这正解释了随着开孔板钢材强度的提高,铰缝抗剪强度提高并不明显的原因。

3.4 合理构造分析

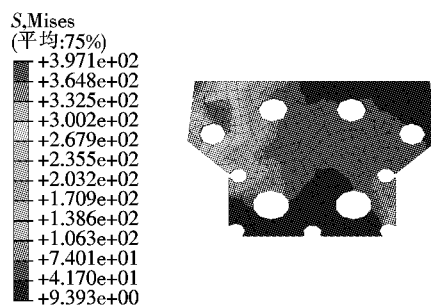
综合上述分析的结果可知:铰缝抗剪承载力受贯穿钢筋影响较大,当贯穿钢筋直径增大到 16 mm 后,继续提高贯穿钢筋直径铰缝抗剪强度提高逐渐变小。因此从经济性考虑,贯穿钢筋直径以 16 mm 为宜。开孔钢板板厚和强度对于铰缝抗剪强度的影响相较于贯穿钢筋直径的影响较小。虽然两个参数变化都是随着参数的增大而增大,但是增大幅度并不明显。因此从经济性和铰缝抗剪强度综合考虑,开孔钢板的板厚取 15 mm,钢材强度以 Q345 为宜。

4 抗剪承载力计算方法

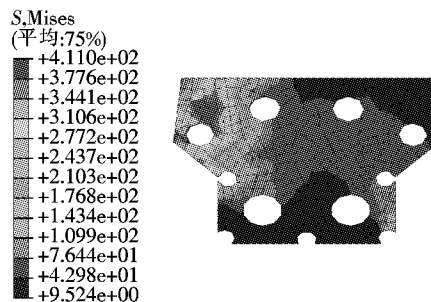
由于贯穿钢筋直径大小显著影响着铰缝抗剪强



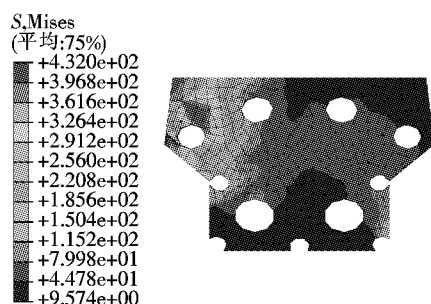
(a) Q235



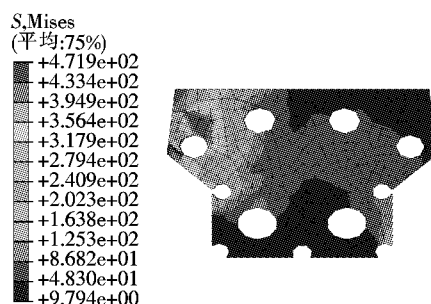
(b) Q295



(c) Q345



(d) Q390



(e) Q420

图 12 开孔板应力云图(单位:MPa)

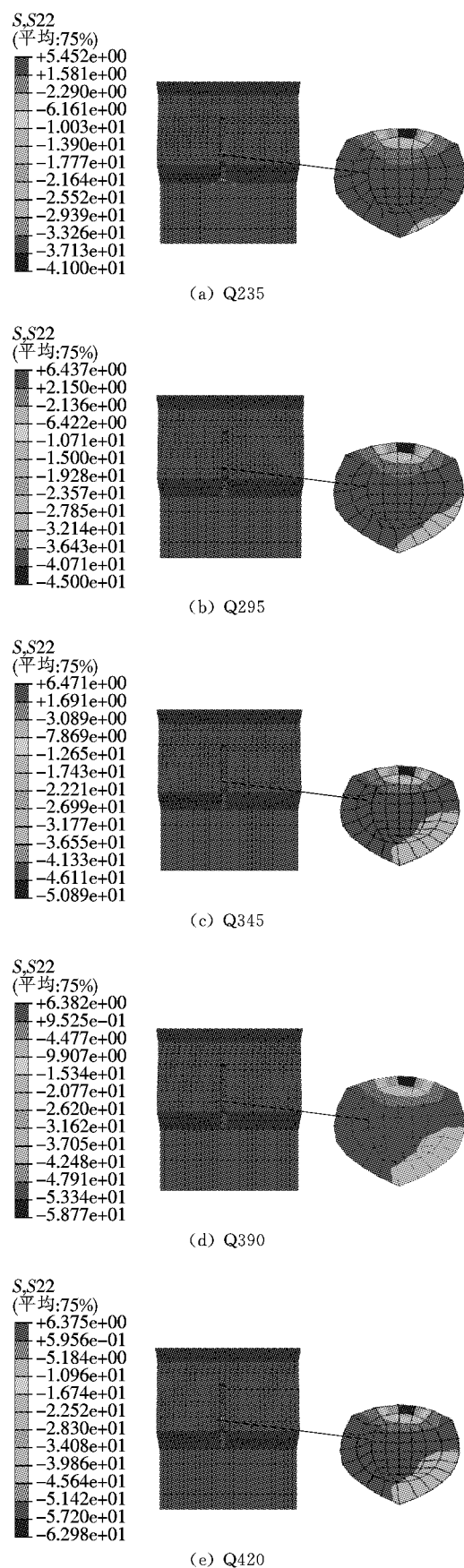


图 13 铰缝接触面应力云图(单位:MPa)

度,因此该文利用 Abaqus 数值模拟参数分析结果,以贯穿钢筋直径为参数进行铰缝抗剪强度公式拟合,拟合结果如图 14 所示。从铰缝抗剪强度拟合曲线的结果来看,该拟合结果的相关系数为 0.76,吻合程度良好。当贯穿钢筋直径较小时(直径小于 12 mm),拟合值偏大;当直径较大时(直径大于 12 mm),拟合值会稍微偏小。

拟合公式:

$$\frac{V_u}{1\,000} = 1\,030 + \frac{A f_y}{243} \quad (1)$$

式中: V_u 为铰缝抗剪强度(N); f_y 为钢筋屈服强度(MPa); A 为钢筋面积(mm^2)。

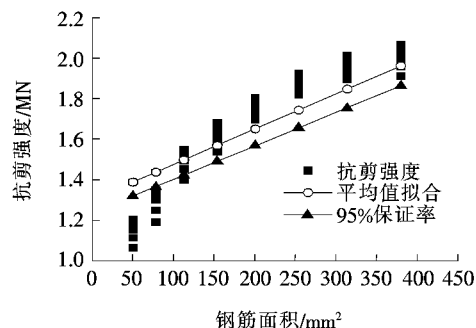


图 14 铰缝抗剪强度随贯穿钢筋直径分布变化规律

5 结论

(1) 铰缝抗剪强度随着开孔钢板板厚、强度及贯穿钢筋直径的增大而增大,但增大幅度逐渐减小。开孔板板厚和强度变化对于铰缝抗剪强度的影响小于贯穿钢筋直径变化的影响。

(2) 从经济性和铰缝抗剪强度综合考虑,贯穿钢筋直径取 16 mm、开孔钢板的板厚取 15 mm、钢材强度选 Q345 为宜。

(3) 通过对开孔钢板连接的铰缝抗剪强度进行拟合,拟合结果的相关系数为 0.76,吻合程度较好。当贯穿钢筋直径较小时(直径小于 12 mm),拟合值偏大;当直径较大时(直径大于 12 mm),拟合值稍偏小。

参考文献:

- [1] 杜红静.装配式空心板桥横向加固结构分析方法研究[D].长安大学硕士学位论文,2012.
- [2] 陈宝春,陈友杰.桥梁工程[M].2版.北京:人民交通出版社,2013.
- [3] 赵志方,赵国藩,黄承逵.新老混凝土粘结的拉剪性能研究[J].建筑结构学报,1999(6).

虎门二桥悬索桥浅滩区钢箱梁吊装施工技术

朱小金, 武尚伟, 王博, 郭雷刚, 杜海峰

(中交二公局第五工程有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为解决悬索桥浅滩区钢箱梁的安装就位, 创新性地采用了荡移的施工技术, 提高了功效, 减少了对航道的影响, 取得了良好的经济效益和社会效益, 对类似工程的施工具有很好的借鉴意义。

关键词: 悬索桥; 浅滩区; 钢箱梁吊装

1 工程概况

虎门二桥于广州市南沙区东涌镇与广州市南二环段对接, 沿线跨越珠江大沙水道、海鸥岛、珠江坭洲水道, 于东莞市沙田镇与广深沿江高速公路连接。主线全线均为桥梁工程, 总长度 12.891 km, 包括两座悬索桥——主跨 1 200 m 的大沙水道桥和主跨 1 688 m 的

坭洲水道桥, 采用双向八车道的高速公路标准, 设计速度 100 km/h, 桥梁宽度 40.5 m。

主跨 1 200 m 的大沙水道桥为双塔单跨悬索桥, 跨径布置为 (360+1 200+480) m, 矢跨比为 1:9.5。主缆横桥向中心间距 42.1 m, 吊索顺桥向标准间距 12.8 m。全桥共有钢箱梁段 94 榀, 标准节 88 片, 最长梁段为 E 类, 重量 347.6 t。大沙水道桥主桥布置见图 1, 钢箱梁标准断面见图 2, 钢箱梁工程概况见表 1。

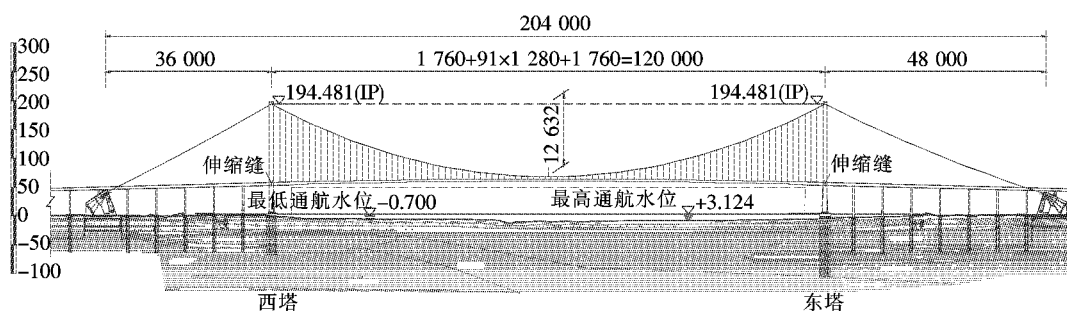


图 1 大沙水道桥主桥布置图(除标高单位为 m 外,其余单位:mm)

- *****
- [4] Mattock A H, And Hawkins. Shear Transfer in Reinforced Concrete—Recent Research[J]. PCI JOURNAL, 1972,17(2):55—75.
- [5] Annamalai G B. Shear Strength of Post-Tensioned Grouted Keyed Connections[J]. PCI Journal, 1990,35(3):64—73.
- [6] Gaston J R, And Kriz, L. B. Connections in Precast Concrete Structures — Scarf Joints [J]. PCI JOURNAL, 1964,9(3):37—59.

- [7] 宋宇峰,孙勇,杨立坡.空心板梁桥铰缝受力特性与破坏模式的试验与理论研究[J].中外公路,2018(2).
- [8] 叶见曙,刘九生,俞博.空心板混凝土铰缝抗剪性能试验研究[J].公路交通科技,2013(6).
- [9] 庄茁,由小川.基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [10] 赵秋,陈美忠,陈孔生.开孔钢板铰缝连接构造推出试验与数值模拟[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2017(4).

收稿日期:2018-05-15

作者简介:朱小金,男,大学本科,高级工程师.E-mail:272386315@qq.com