

波形钢腹板 PC 箱梁桥设计及施工优化探讨

熊文豪, 王谦

(中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 介绍了国内波形钢腹板 PC 箱梁桥的常规设计, 结合多年从事波形钢腹板研究及应用实践经验, 就其设计和施工中存在的问题提出了相应的优化方案, 以不断丰富和完善中国波形钢腹板理论体系, 为该先进工艺的推广应用奠定坚实基础。

关键词: 桥梁; 波形钢腹板; PC 箱梁桥; 设计与施工

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0149-03

波形钢腹板解决了传统砼腹板的开裂问题, 降低了结构自重, 提高了桥梁的抗震性能, 其折皱效应使预应力效率得到充分发挥, 省去了砼腹板钢筋绑扎、模板支设、砼浇筑、竖向预应力张拉等相关冗杂工序, 加快了施工速度, 同时采用可重复利用的钢材取代原材料不可再生的砼, 减少了砂石料的过度开采, 解决了旧桥拆除废弃物的处置和环境污染等问题, 更能适应中国节能环保的发展理念, 对于构建绿色交通意义突出。该文参考国内 10 余座波形钢腹板组合箱梁桥的设计和应用案例及相关文献资料, 就波形钢腹板应用中存在的问题进行分析, 提出设计及施工优化方案, 以期推动波形钢腹板 PC 组合箱梁桥的发展。

1 抗剪连接件的优化

剪力键形式主要有嵌入式连接件、型钢连接件、焊钉连接件、Twin-PBL 连接件、Single-PBL+焊钉连接件等(见图 1)。国内学者在抗剪连接件的创新方面取得了显著成果, 如李淑琴等开发了开孔波折板抗剪连接件, 试验显示该抗剪连接件比传统开孔平钢板连接件具有更强的抗剪性能, 且在剪力一定的情况下, 波折钢板与翼缘板之间的焊缝剪应力比开孔平钢板与翼缘板之间的焊缝剪应力低。

翼缘型剪力键设计在很大程度上抑制了波形钢腹板的抗剪屈曲, 增强了波形钢腹板的纵向刚度, 但其刚度过大, 使预应力体系的优越性不能得到充分发挥, 且对顶板及底板砼的徐变和干燥收缩变形约束较大。传统的 Twin-PBL 键两侧开孔平钢板将周围砼由一个整体割裂为 3 个相对独立的条状体, 且平钢板处易造成应力集中的线性分布, 受振动等活荷载影响, 结构物钢-砼接触面处的砼稳定及耐

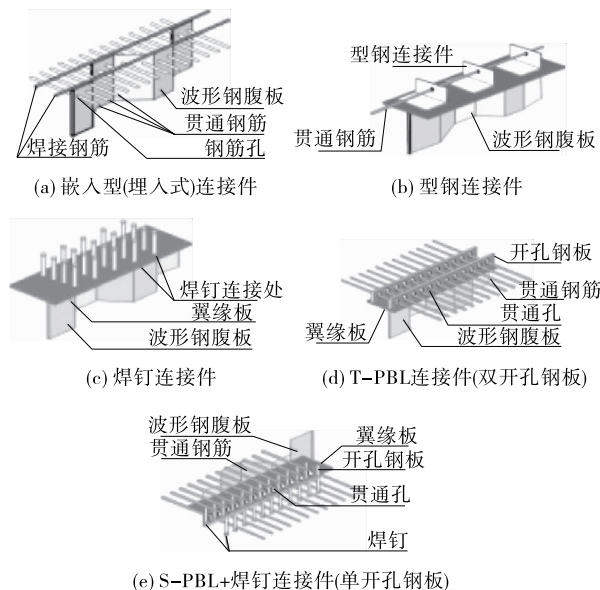


图 1 抗剪连接件的常用连接方式

久性面临严峻考验。实践证明, 下翼缘若采用 Single-PBL+焊钉抗剪连接件, 在节段拼装中定位安装难度异常困难, 因施工调整、加工误差等因素影响, 相邻节段波形钢腹板翼缘板很难实现平齐, 容易造成钢-砼组合处的砼错台, 同时增加波形钢腹板下翼缘板与底板结合处的砼振捣难度, 不利于翼缘下砼的浇筑、振捣和密实。因此, 下翼缘连接部设计中不宜采用 Single-PBL+焊钉抗剪连接件。

钟豪等的研究表明嵌入式抗剪连接件是一种安全可靠的抗剪连接件形式, 适于用作下翼缘抗剪连接件, 既能节省钢材, 省去下翼缘板与波形钢腹板之前的焊接, 方便波形钢腹板的加工制造, 又利于底板与波形钢腹板间钢-砼结合部砼的施工质量控制。国内波形钢腹板组合箱梁桥上翼缘多采用 Twin-PBL 连接件, 下翼缘则采用嵌入式连接件(见表 1)。

表 1 国内大跨度波形钢腹板 PC 箱梁桥抗剪连接件形式

项目名称	跨径组合/m	上翼缘连接件	下翼缘连接件
德商高速鄂城黄河大桥	70+11×120+70	Twin—PBL	嵌入式
邢衡高速南水北调大桥	70+120+70	Twin—PBL	Single—PBL+焊钉
武西高速桃花峪大桥	75+135+75	Twin—PBL	嵌入式
南京长江四桥滁河大桥	53+96+53	Twin—PBL	嵌入式

2 现浇段 0[#]、1[#] 块钢筋的优化设计

对于大跨度悬臂浇筑波形钢腹板组合箱梁桥, 0[#]、1[#] 块是悬浇体系中局部承压、弯拉、扭转、剪切等综合内力作用的受力构件, 且 0[#]、1[#] 块为波形钢腹板内衬砌部分, 该部分的设计及施工水平直接关系到大跨度波形钢腹板组合箱梁桥的钢混组合作用水平和波形钢腹板在根部剪力作用下的屈曲稳定等, 其设计尤为重要(见图 2)。

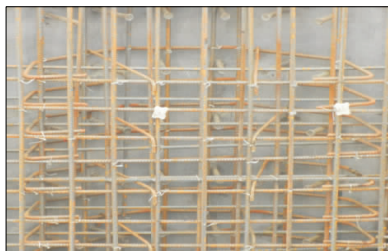


图 2 内衬砌局部加强钢筋

0[#] 块顺桥向和横桥向 4 块波形钢腹板在设计中宜使其构成空间组合体系, 形成有效对拉组合以消除单块钢腹板边缘极限受力状态。4 块钢腹板宜通过开孔钢板贯穿通长钢筋形成纵向约束、横向紧固的空间稳定体系(见图 3), 使 1[#] 块横桥向、顺桥向 4 块波形钢腹板形成闭合整体并与衬砌形成系统共同抵抗弯拉、剪切等结构内力作用, 从而确保钢混组合结构的承载能力和整体稳定性。



图 3 波形钢腹板贯穿通长钢筋设计

对于波形钢腹板组合箱梁桥这种特殊结构, 波形钢腹板贯穿钢筋剪力传递作用异常重要, 在实际施工中应作为施工难点和重点加以控制。贯穿钢筋

及剪力钉的设计有效控制了钢板与砼材料间发生的水平剪切力, 其施工质量高低直接决定桥梁运营后两种材料之间是否会产生相对位移。

波形钢腹板设计应重视抗剪连接件处局部加强钢筋的布置, 而实际设计中往往将重点放在抗剪连接件的抗剪能力验算上, 忽视了钢—砼结合部处砼的局部承压问题, 造成抗剪连接件处局部加强钢筋设计严重不足甚至遗漏, 导致应力集中处出现素砼受力, 不符合钢—砼结合部局部承压设计理念, 更不利于结构的耐久性和承载力安全。因此, 必须高度重视抗剪连接件钢—砼结合处的局部加强设计(见图 4、图 5)。



图 4 Twin—PBL 连接件局部加强部位



图 5 Single—PBL 连接件局部加强部位

3 墩顶现浇段的优化设计

国内个别项目中 0[#] 块采用满堂支架或托架施工方法, 1[#] 块则采用挂篮悬浇施工方法, 这种设计方法欠科学, 也不利于结构的整体安全。波形钢腹板的内衬砌处于 1[#] 块甚至 2[#] 块中, 内衬砌在波形钢腹板中承担较大部分的剪力传递, 应一次性浇筑

成型(见图 6),故 0[#]、1[#] 块宜采用支架或托架现浇施工方法。该方法的优点:能确保内衬砼的整体施工质量;0[#]、1[#] 块一次浇筑成型,可为挂篮安装提供更为宽阔的作业平台(见图 7),从而有效缩短节段施工工期;更有利于 0[#]、1[#] 块波形钢腹板横桥向、顺桥向的整体连接,有利于保证结构安全。



图 6 现浇 0[#]、1[#] 块一次浇筑成型



图 7 支架现浇段便于挂篮拼装平台

4 竖曲线影响下的波形钢腹板箱梁桥设计

考虑到现场安装精度和便利性,波形钢腹板设计应考虑竖曲线的影响。受梁高、纵坡等因素的影响,单块波形钢腹板并非标准件,而是在上翼缘和下翼缘表现为不同坡度以满足变截面连续箱梁的顺滑衔接及过渡,不应采用以波形钢腹板某一点为旋转中心调整波形钢腹板倾斜角度的方法实现安装(该方法在纵坡变化、线形调整、纵向搭接、精确定位等方面均存在不科学之处),而应在波形钢腹板纵向采用搭接贴角焊的方法。在大跨度挂篮悬浇箱梁结构中,波形钢腹板节段间的搭接长度设计值宜大于 12 cm(见图 8),但受波形钢腹板制作误差、安装误差、线形调整等因素的影响,国内较多工程采用 10 cm 搭接长度,这对波形钢腹板的安装极为不利(见图 9),个别节段搭接长度极小,焊缝处应力集中问题更为严重,若采用贴角焊+高强螺栓的连接方式,螺栓孔距离波形钢腹板边缘过小时更不利于整体受力。

5 纵坡影响下的墩顶临时固结设计

在大跨度连续梁桥施工中,在合龙前其结构为

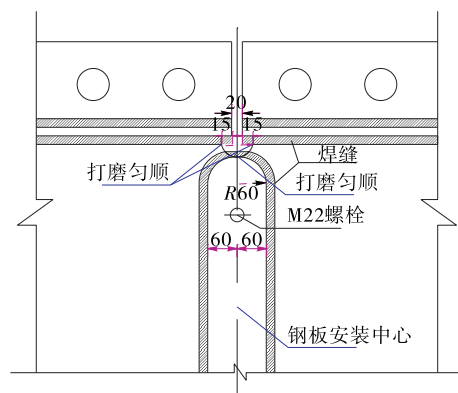


图 8 节段间搭接长度 12 cm(单位:mm)

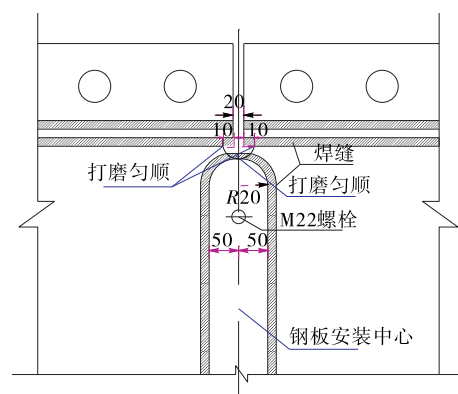


图 9 节段间搭接长度 10 cm(单位:mm)

几何可变体系,施工中会存在不平衡力矩,墩顶临时固结是为了承担该不平衡力矩、充分传递上部结构荷载至墩身和基础而设置的。T 构施工中墩顶临时固结作用甚大,然而国内文献中均未对临时固结进行详细论述。为此,下面结合多年实践经验就墩顶临时固结进行探讨。

波形钢腹板设计图纸中墩顶临时固结形式多样,大多采用墩旁钢管支撑、墩顶硫磺砂浆支垫、预应力固结(一般采用精轧螺纹钢和预应力钢绞线)等形式。其中:钢管支撑加工简便,安装快捷,但在高墩施工时需消耗大量钢材且工期长,投入颇大,若在水中作业,还涉及到水下拆除钢管支撑等问题,欠经济;硫磺砂浆因其材料特性需高温熔化方可拆除,且预埋于硫磺砂浆内的电阻丝在长期重载作用下极易失效而导致电路不通,拆除困难,欠科学;预应力固结中采用精轧螺纹钢,与采用预应力钢绞线相比,同等锚固力作用下精轧螺纹钢的用量远大于预应力钢绞线,且精轧螺纹钢外露部分需施作钢筋砼防腐,增加了后期拆除难度和投入。相较而言,钢绞线的优

(下转第 187 页)

- of RC beam[J]. Engineering Structures, 2013, 48(3).
- [32] Zhu W, François R. Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam[J]. Construction and Building Materials, 2014, 51(2).
- [33] Azad A K, Ahmad S, Azher S A. Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams[J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(1).
- [34] Yang S-Y, Liu X-L, Leng Y-B. Prediction of flexural deformation of a corroded RC beam with a polynomial tension-stiffening model[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(6).
- [35] Zhong J, Gardoni P, Rosowsky D. Stiffness degradation and time to cracking of cover concrete in reinforced concrete structures subject to corrosion [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 136(2).
- [36] 吴庆, 袁迎曙. 基于钢筋锈蚀的混凝土梁承载能力退化预计模型[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(4).
- [37] Ballim Y, Reid J. Reinforcement corrosion and the deflection of RC beams: an experimental critique of current test methods[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(6).
- [38] Almusallam A A, Al-Gahtani A S, Aziz A R, et al. Effect of reinforcement corrosion on flexural behavior of concrete slabs[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1996, 8(3).
- [39] Yoon S, Wang K, Weiss W J, et al. Interaction between loading, corrosion, and serviceability of reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(6).
- [40] Zila Rinaldi, Stefania Imperatore, Claudio Valente. Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11).
- [41] 李富民, 袁迎曙, 王波, 等. 锈蚀钢绞线预应力混凝土梁受弯承载力评估[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2).
- [42] 朱尔玉, 刘椿, 何立. 预应力混凝土桥梁锈蚀后的受力性能分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(2).

收稿日期: 2016-04-25

(上接第 151 页)

势非常明显, 其钢束用量少, 且拆除简单, 若采用环氧涂层成品索, 还可解决钢绞线的防腐问题, 更便于后期拆除。

6 结语

中国于 2005 年建成国内第一座波形钢腹板箱梁桥浈河大桥, 经过 10 余年的研究, 已逐步向大跨径组合结构发展。但在波形钢腹板组合结构体系的理论研究、试验论证和创新优化等方面仍有待研究, 还需通过大量工程实践不断丰富和完善这种新型结构理论体系, 从而推动钢-砼组合结构实现跨越式发展, 为化解国内钢铁产能过剩、环保形势严峻等重大问题探索新的出路。

参考文献:

- [1] 李淑琴, 万水, 陈建兵. 一种新型抗剪连接件试验研究[J]. 桥梁建设, 2009(4).
- [2] 苏立超. 波形钢腹板箱梁桥剪力键形式的优化设计[J]. 交通标准化, 2012(1).
- [3] 钟豪, 徐君兰, 顾安邦, 等. 波纹钢腹板 PC 组合箱梁的抗剪连接键分析[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(3).
- [4] 杜斌, 包太, 黄春晖, 等. 大跨径悬臂浇筑连续箱梁墩顶临时固结结构设计研究[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2013, 30(4).
- [5] 苏立超. 大跨度波形钢腹板组合箱梁桥关键技术研究[J]. 公路与汽运, 2014(2).

收稿日期: 2016-05-09

(上接第 174 页)

- [5] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [6] 王磊, 张旭辉, 张建仁. 局部无压浆 PC 构件抗弯性能试验及计算方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(10).
- [7] 王兴奎. MIDAS 与 ANSYS 在桥梁检测中的应用实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [8] 白杨. 灌浆与张拉力对预应力砼梁的性能影响分析

- [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [9] 徐向锋, 叶见曙, 钱培舒. 后张法预应力混凝土梁的孔道压浆研究[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2004 年全国桥梁学术会议论文集[C]. 2004.
- [10] 周明伟. 预应力混凝土箱梁后张法施工孔道压浆质量控制[J]. 山西建筑, 2012, 38(17).

收稿日期: 2016-08-04