

文章编号: 1000-582X(2012)10-124-06

克服典型病害的新型预应力混凝土空心板梁设计

袁爱民¹, 周元华¹, 戴航², 孙大松³

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 210096;
3. 江苏省交通规划设计院, 江苏南京 210005)

摘要:提出了一种新型预应力混凝土空心板梁结构形式。采用匹配预制, 界面设置剪力键的方法解决铰缝问题; 采用双向预应力筋布置, 保证桥梁纵向受力的同时, 也防止了梁体纵向裂缝的出现, 并保证匹配界面存在压应力。同时, 采用底板开孔的方法, 减少预应力混凝土空心板梁内外的温差, 采用顶板切槽式拉毛, 保证顶面桥面铺装与预应力混凝土空心板梁的粘结作用。设计算例的有限元分析表明, 匹配预制双向预应力开孔混凝土板梁的底板, 纵桥向和横桥向压应力储备分别大于 2.58 MPa 和 0.16 MPa, 有效的防止了底板纵向裂缝和铰缝病害的产生。

关键词: 预应力混凝土空心板梁; 纵向裂缝; 铰缝; 匹配预制; 剪力键

中图分类号: TU378.2; TU997

文献标志码: A

A new type of prestressed concrete hollow girder design for overcoming the typical diseases

YUAN Aimin¹, ZHOU Yuanhua¹, DAI Hang², SUN Dasong³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;
2. College of civil engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;
3. Jiangsu provincial communication planning and design institute co, LTD, Nanjing 210005, Jiangsu, China)

Abstract: This paper proposes a new type of prestressed concrete hollow girder based on the summaries of the current studies on longitudinal cracks and hinge cracks. The match prefabricated method is used with shear key at interface to solve the problem of hinge cracks, and the two-way prestressing strand techniques are used to assure the longitudinal load-bearing capacity and to prevent the emergence of longitudinal cracks because of pressure existing at the match interface. In order to reduce the temperature difference between the internal and external of the prestressed concrete hollow girder, drilling holes are carried out at the bottom slab of girder every distance. To ensure the adhesive effect between the girder and deck pavement, we designed grooves at the top slab of girders. The finite element analysis results of a design example show that the pressure stress of bottom slab of girder is about 2.58 MPa and 0.16 MPa, which are effective to avoid the appearance of longitudinal cracks and hinge cracks.

Key words: prestressed concrete hollow girder(PCHG); longitudinal cracks; hinge cracks; fabricated by matching; shear key

收稿日期: 2012-04-11

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20100094120013); 江苏省交通运输厅科技支撑项目(08Y08); 中央高校业务经费资助项目(2009B13914)

作者简介: 袁爱民(1974-), 男, 河海大学博士, 副教授, 主要从事桥梁设计理论研究, (E-mail) yuanam@163.com。

预应力混凝土空心板梁(以下简称 PCHG)是高速公路、干线公路上使用最多的桥型,也是里程数最长的桥型。在长期的使用过程中,预应力空心板梁出现了许多问题。笔者对 1 000 多座预应力空心板混凝土梁桥进行了病害统计^[1],结果表明预应力空心板梁的主要病害除了横向裂缝外,还有纵向裂缝和铰缝。纵向裂缝一般沿着预应力筋方向或底板中央出现,铰缝病害则表现为两块板梁的连接处出现渗水、白化,甚至悬挂钟乳石等现象。图 1 就是 PCHG 出现典型纵向裂缝和铰缝病害的情况。

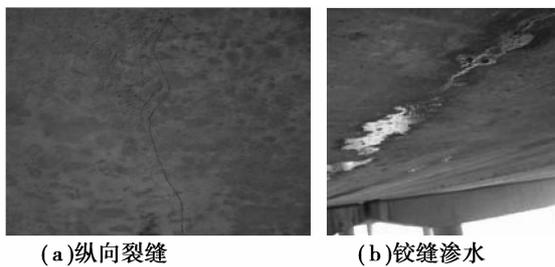


图 1 PCHG 典型病害

预应力混凝土空心板梁成为桥梁领域研究的热点问题之一。Schnell, Jürgen^[2]研究了预应力混凝土空心板梁的整体受力情况,指出了横向配筋与空心板梁宽度之间的关系。Hsu, Thomas TC^[3]提出了一种崭新的预应力混凝土空心板梁抗扭设计方法,该方法已经写进了 ACI 1995 设计规范。Matti Pajari^[4]通过试验和理论分析,研究了支承在梁上的预应力混凝土空心板梁横向剪力传递情况,分析了横向剪切破坏的机理和纵向裂缝出现的原因。

文中针对预应力混凝土空心板梁的典型病害形

式,提出了一种新型的预应力混凝土空心板梁,指出了这种新型结构的特色,并采用这种新型预应力混凝土空心板梁对 1 座桥梁进行了计算分析,验证了新型预应力混凝土空心板梁的科学性和可行性。

1 匹配预制双向预应力开孔混凝土空心板梁概念的提出

解决或预防 PCHG 出现纵向裂缝和铰缝病害,一直以来是困扰广大设计者的难题。横向裂缝的产生、开裂机理及宽度的计算已经得到深入研究,但 PCHG 纵向裂缝的开裂机理及其宽度的计算还仍然处于探索中。目前研究表明,纵向裂缝的出现使主梁的抗扭刚度明显下降,横向连接刚度明显减弱^[5]。其开裂的原因是由于空心板内外的温差、预应力筋的劈裂效应、泊松效应、放张时机及混凝土保护层厚度不足等引起的^[6-8],但这些分析大都停留在定性的分析层次,更深层次、定量的机理分析仍然处于探索和研究之中,防治纵向裂缝的措施也一直没有实质性的突破。

PCHG 在前期的设计中采用小铰缝设计,只传递剪力,不传递其他内力,如图 2(a)所示。其横向分配系数通常是按照苏联桥梁学者乌里茨基的“铰接方法”进行计算。这种铰缝设计存在问题:一是构造不合理,小铰缝的整体刚度与空心板的整体刚度相比相差甚远,无法承受在荷载反复作用下的变形和受力要求。二是施工困难,小铰缝的施工空间非常有限,增加了施工的难度,难以保证铰缝混凝土的密实性。如果空心板梁的侧壁不作凿毛处理,且不配筋,则小铰缝发生破坏是迟早的事情。

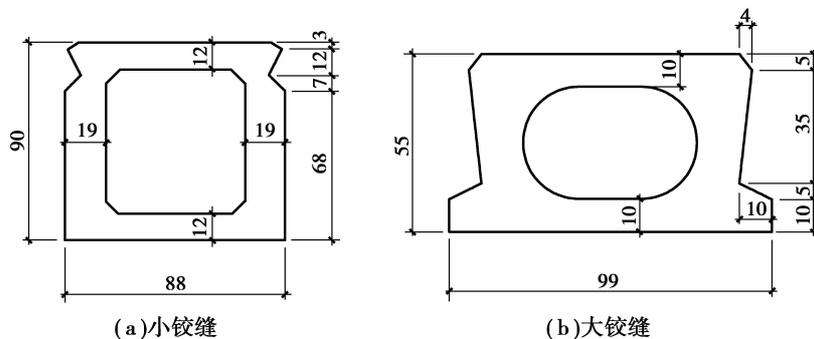


图 2 铰缝的形式

小铰缝的设计流行了将近 30 年,90 年代以后逐渐遭到摒弃,被大铰缝所替代,如图 2(b)所示。为了克服小铰缝的弊端,大铰缝的设计配筋也涌现出多种形式,一方面改善空心板梁下翼缘的配筋,另

一方面对铰缝受压翼缘也采用钢板或 II 形布筋进行加强,如图 3 所示。大铰缝具有整体性较好、抗扭刚度大及横向整体性好等优点,但大铰缝的出现并不意味着铰缝病害的消除,铰缝渗水、白化及由于铰缝

破坏引起的单板受力现象仍然在空心板梁桥中普遍存在。文献[9-11]对此问题作了较为深入的研究,分析结果表明,靠湿接铰缝将 PCHG 连接成整体的空心板梁桥,在汽车荷载作用下,其横桥向产生的最大拉应力达到 1.16 MPa。这种应力幅经常作用在

铰缝处,而铰缝处一般是新老混凝土结合面,粘结力较为薄弱,在反复荷载作用下,易开裂。研究还表明^[12-13],如果对预应力混凝土空心板梁分别采用粘钢、碳纤维和预应力筋对桥梁横桥向进行加固,则预应力筋的加固效果最好。

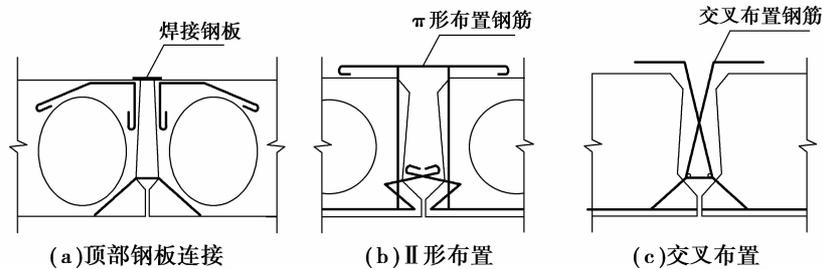


图 3 采用大铰缝时加强钢筋布置

综上所述,预应力混凝土空心板梁的纵向裂缝和铰缝病害仍然普遍存在。文中提出了一种新型 PCHG 结构,即匹配预制双向预应力开孔混凝土空心板梁,如图 4 所示。具体的做法一是采用匹配法预制,用剪力键设计代替传统铰缝设计;二是不仅在梁的纵向布置预应力筋,而且在梁的横向也布置预应力筋;三是在 PCHG 的底板进行开孔;四是在 PCHG 顶板,采用切槽式进行了拉毛处理。

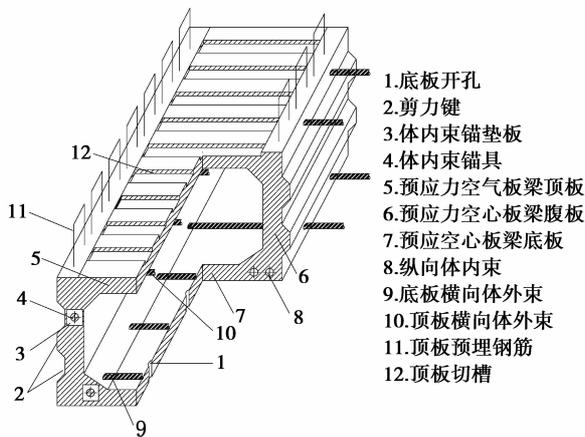


图 4 匹配预制双向预应力开孔混凝土空心板梁

2 匹配预制双向预应力开孔混凝土空心板梁的设计要点

2.1 匹配预制采用剪力键代替铰缝

PCHG 由于存在铰缝病害,导致梁出现“单板受力”现象,从而影响桥梁的使用性能和使用寿命。采用匹配预制、剪力键代替铰缝设计是指在 PCHG 的预制过程中,已经浇好的梁作为下一根预制梁的侧模,不断循环,直至浇完整个跨梁;同时,一根梁与另

一根梁之间,取消原来的大铰缝设计,采用剪力键形式代替。匹配界面采用剪力键形式已经在短线法^[14]和长线法预制节段桥梁中广泛采用,其施工工艺已经比较成熟,将这项技术运用到 PCHG 设计中,不会存在施工方面难题。与短线法或长线法预制节段桥梁不同的是,PCHG 的匹配预制是横桥向的,而前者多为纵桥向进行预制拼装。

采用剪力键代替铰缝设计,避免在铰缝狭小的空间进行配筋,克服了混凝土难以振捣密实以及传统铰缝设计中铰缝刚度和 PCHG 刚度相比较小的矛盾。剪力键的布置可以通长布置,也可以每隔一定的间距布置。剪力键的齿高、齿矩等参数的确定有待更深入的研究。

2.2 双向预应力筋布置

采用剪力键设计代替铰缝设计,避免了铰缝配筋。而分析表明,并排放置的多片预制梁在公路 I 级荷载作用下,梁与梁连接处(横桥向)会出现较大的拉应力。因此,采用剪力键连接的预应力混凝土板梁在荷载作用下也必然会张开。如果这样就会大大削减 PCHG 整体作用,“单板受力”现象将会再次出现。鉴于这样的情况,匹配法预制的 PCHG 采用双向预应力设计,不仅在桥梁的纵向布置预应力筋,而且在桥梁的横向也布置预应力筋。横桥向布置的预应力筋产生的预应力抵消了汽车荷载作用下桥梁底板中产生的横桥向拉应力,增强了桥梁的整体作用。这不仅保证了 PCHG 匹配界面处存在压应力,而且保证了 PCHG 的底板横桥向也存在预应力,这就防止了 PCHG 纵向裂缝的出现。

横桥向布置的预应力筋必须和纵桥向布置的预应力筋位置错开。在不增加底板厚度,充分保证纵

桥向预应力筋位置的情况下,这给横桥向预应力筋的布置增加了困难。因此,横桥向预应力筋采用体外无粘结筋,紧贴底板的顶面,穿过腹板与底板交界处的预留孔道,锚固于边梁的侧面。

为了防止桥面铺装破坏后,雨水会沿着剪力键逐渐渗透,在冻融反复荷载作用下,引起剪力键的破坏;同时,防止 PCHG 在横桥向预应力作用下,反拱过大,使顶板剪力键处发生张开。需要在 PCHG 的顶板处也布置横桥向预应力筋,采用体外无粘结预应力筋。

2.3 底板开孔

PCHG 内外温差是导致底板、腹板产生纵向裂缝的重要原因,而且在温度梯度作用和骤然遭遇寒潮 2 种工况下,腹板及底板表面的应力最不利。为了保证 PCHG 内外的温差不致过大和保证空气的流动,在 PCHG 的底板,每隔 2 m 布置直径 $\Phi 100$ 的圆孔。圆孔的附近要做好构造配筋,以免引起应力集中。体内纵向预应力筋的布置也应该避开这些区域。

2.4 顶板切槽式拉毛

PCHG 存在铰缝病害的一个重要原因是桥面铺装先破坏。桥面铺装是铰缝的第一道防护屏障,与梁体共同承担着车辆荷载作用。当桥面铺装出现拥包、堆移和剥落后,桥面铺装分担车辆荷载作用丧失,雨水会沿着破裂处渗入到桥面铺装与结构的粘结层,进而渗入到铰缝中,引起铰缝病害。避免发生铰缝病害,必须防止桥面铺装发生破坏。桥面铺装和结构层之间的粘结是新老混凝土结合面,为增加新老混凝土结合面的粘结力,大连理工大学的赵志方^[15]和 Hindo^[16]采用高压水枪法对新老混凝土粘结面进行冲毛处理;武汉理工大学的秦明强^[17]研究了用界面剂处理新老混凝土粘结界面;葡萄牙 coimbra 大学的 Eduardo NBSJ 等人^[18]、Wall JS^[19]、Cleland D J^[20]采用凿毛法、喷砂法切槽法来增加粘结面的粗糙程度、研究不同影响因素对新旧混凝土粘结性能的影响。这些研究结果表明切槽法和植筋法两者组合的效果最好。目前的 PCHG 一般在浇注的过程中就预埋钢筋,省却了植筋的工序,但顶部仅做简单拉毛处理,文中建议采用切槽法代替普通凿毛法,处理混凝土顶板。

3 设计算例

某高速公路上一座特大桥的引桥,由多跨筒支空心板梁组成,其标准跨径为 16 m,设计荷载为公路 I 级,桥宽 12 m,单幅单向 3 车道,横截面由 12

片预应力混凝土空心板梁组成,现按照匹配预制双向预应力开孔混凝土板梁进行设计。首先拟定的空心板截面尺寸如图 5 所示。混凝土强度采用 C50,预应力钢绞线采用高强度、低松弛钢绞线,直径 ϕ_j 为 15.24 mm,抗拉强度标准值 $f_{ptk}=1860$ MPa,体内束锚下控制应力取 $\sigma_{con}=0.75f_{ptk}$,体外束锚下控制应力取 $\sigma_{con}=0.55f_{ptk}$ 。纵向预应力筋采用有粘结预应力筋,横向预应力筋采用无粘结预应力筋,均后张法施工。纵向预应力筋的布置可参见《公路桥涵标准图集》^[21],横向体外预应力筋的布置为每隔 2 m,距顶板顶和底板底各 12 cm 处,上、下各布置 1 束。底板每隔 2 m 布置直径 $\Phi 100$ 的圆孔。

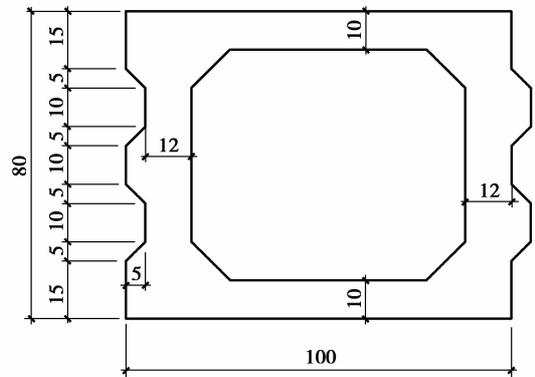


图 5 匹配预制双向预应力混凝土空心板梁截面尺寸

按照上述设计建立一跨空心板梁的整体有限元分析模型,如图 6 所示。模型中混凝土采用实体单元,预应力筋采用桁架单元。2 片空心板梁交界面相同位置节点之间用间隙单元模拟,该单元只能受压,不能受拉,能较好的模拟两片空心板梁连接界面的受力情况。各单元的材料属性分别和《桥规》(JTG D62—2004)相应材料的性质相对应。

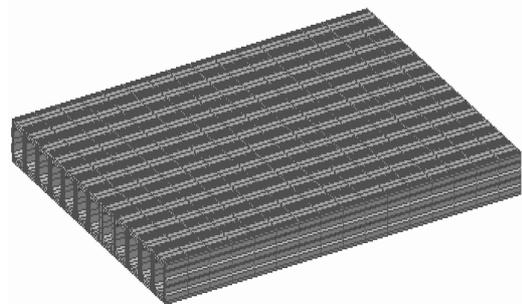


图 6 整体有限元模型

有限元分析结果显示,双向预应力混凝土空心板梁在公路 I 级荷载作用下,其承载能力极限状态基本组合和正常使用极限状态短期组合、长期组合

下底板横桥向和纵桥向的应力分布状况如表 1 所示。从表中可以看出,在车辆荷载作用下,顺桥向无论哪一个工况,梁底的法向应力均为压应力,有 2.58 MPa 以上的储备;横桥向在各种组合作用下,梁底的压应力储备最少为 0.16 MPa。说明横向预应力的布置能够明显减少车辆荷载作用下梁底横向应力的分布,有效的防止梁底纵向裂缝的产生。匹配预制的空心板梁界面存在压应力储备,克服了普

通铰缝设计该处在汽车荷载作用下存在拉应力的情况,避免了铰缝病害的产生。

图 7 中只给出了承载能力极限状态基本组合作用下,双向预应力混凝土空心板梁横桥向应力云图分布。图中表明,底板应力分布在 -0.16 MPa ~ -3.51 MPa 之间,而云图中显示较大压应力和较大拉应力的地方,是由于预应力施加时应力集中造成的。

表 1 公路 I 级荷载作用下双向预应力混凝土空心板梁底板应力分布

应力	工况		
	基本组合/MPa	长期组合/MPa	短期组合/MPa
顺桥向应力 σ_x	$-2.58 \sim -10.5$	$-3.67 \sim -8.80$	$-3.59 \sim -8.77$
横桥向应力 σ_y	$-0.16 \sim -3.51$	$-0.36 \sim -2.38$	$-0.32 \sim -2.12$

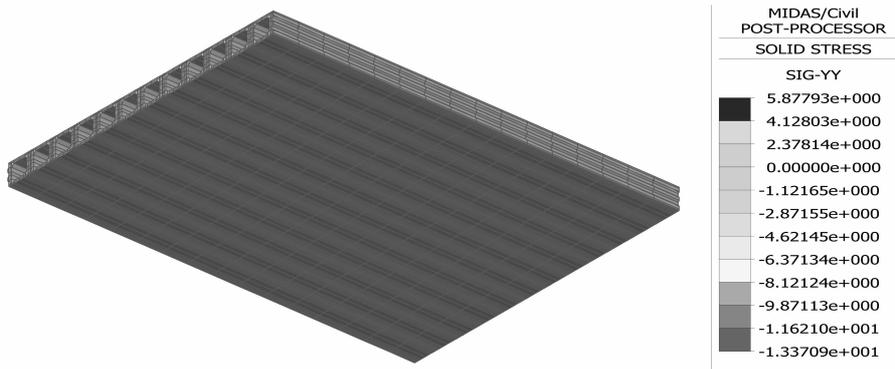


图 7 承载能力极限状态基本组合作用下应力云图

4 结 论

1) 针对 PCHG 的纵向裂缝和铰缝病害,提出一种新型 PCHG,即匹配预制双向预应力开孔混凝土空心板梁。它采用匹配预制设置剪力键代替铰缝设计,避免铰缝病害;施加横向预应力,减小 PCHG 在车辆荷载作用下横桥向应力的分布,防止纵向裂缝的产生,克服剪力键连接界面易开裂的问题;在预应力混凝土的底板开孔,保证空心板梁内外温度一致;并在顶部采用切槽法开槽增加梁体与桥面铺装的粘结。

2) 有限元分析表明,施加横向预应力的空心板梁在车辆荷载作用下,横向应力明显减小,无论是承载能力极限状态基本组合,还是正常使用极限状态短期组合和长期组合,至少存在 0.16 MPa 的压应力,保证了匹配界面存在压应力的同时,防止了底板纵向裂缝和铰缝病害的出现。

3) 虽然提出了一种新型 PCHG 结构,但旨在抛砖引玉,引起同仁对这种结构的关注。由于采用横向预应力和匹配预制剪力键,这种新型空心板梁的横向分布系数的计算采用铰接板梁法已经不再合适,桥梁设计计算理论将是接下来需要重点研究的内容。另外,新型预应力空心板梁设计还有不成熟的地方,譬如:匹配界面剪力键布置的疏密、尺寸大小、上、下横向体外预应力筋布置的间距以及实现这种梁体预制的成套关键施工技术等,仍有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 江苏省交通科学研究院. 江苏省内高速公路上预应力砼空心板梁桥典型病害统计分析[R]. 南京, 2009.
- [2] Schnell J, Florian P, Ackermann D, et al. Load bearing capacity of prestressed hollow core slabs on flexible support[J]. Beton-und Stahlbetonbau, 2007,

- 102(7):456-461.
- [3] Hsu T T C. ACI shear and torsion provisions for prestressed hollow girders[J]. ACI Structural Journal, 1997,94(6):787-799.
- [4] Pajari M. Shear resistance of PHC slabs supported on beams. II: analysis [J]. Journal of Structural Engineering, 1998,124(9):1062-1073.
- [5] Pajari M, Koukkare H. Shear resistance of PHC slabs supported on beams I: tests[J]. Journal of Structural Engineering, 1998,124(9): 1050-1061.
- [6] 邱利锐. 混凝土空心板梁底板纵向裂缝对结构受力的影响分析[J]. 铁道建筑, 2009(3):53-55.
QIU Lirui. Impact analysis of longitudinal cracks in bottom plate of concrete box-beam to structure [J]. Railway Engineering, 2009(3): 53-55.
- [7] 赵卫国, 薛文. 先张法预应力混凝土空心板梁纵向裂缝分析[J]. 公路, 2006(10):52-53.
ZHAO Weiguo, XUE Wen. Research of longitudinal cracks of pretensioning prestressed concrete box-beam [J]. Highway, 2006(10):52-53.
- [8] 吕长荣, 周世军. 装配式简支空心板梁纵向裂缝分析[J]. 华东公路, 2006(5):55-58.
Lü Changrong, ZHOU Shijun. Rresearch of longitudinal cracks of prefabricated simple-supported box-beams[J]. East China Highway, 2006(5):55-58
- [9] 邓大伟. 某桥预应力空心板梁裂缝原因分析及处理[J]. 城市道桥与防洪, 2009(7):180-182.
DENG Dawei. Cause analysis and treatment of crack in presstressed hollow plate beam of a bridge[J]. Urban Roads Bridges&Flood Control, 2009(7):180-182.
- [10] 赵曼, 王新敏, 赵雅克. 板梁桥“单板受力”的数值分析[J]. 中国安全科学学报, 2004,14(11): 25-29.
ZHAO Man, WANG Xinmin, ZHAO Yake. Numerical analysis on “single plate bearing” of plate girder bridge [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14 (11): 25-29.
- [11] 黄民水, 朱宏平. 空心板梁桥“单板受力”病害机理及其加固处治研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2008,36(2):118-121.
HUANG Minshui, ZHU Hongping. Study on mechanism and reinforcement processing of “single slabbearing” disease of hollow core slab beam bridge [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 36 (2): 118-121.
- [12] 陈建华. 空心板梁桥单片梁受力分析及预防措施[J]. 中外公路, 2007,27(3):118-121.
CHEN Jianhua. Force analysis and precautionary measures of single beam in box-beam bridges [J]. Journal of China&Foreign Highway, 2007, 27 (3): 118-121.
- [13] 杨永灿, 张学峰, 马晔. 预应力空心板梁纵向开裂受力分析及加固维修[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2009(8):39-40.
YANG Yongcan, ZHANG Xuefeng, MA Ye. Force analysis and strengthening maintenance of prestressed concrete box-beam with longitudinal cracks[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Applied Technology version, 2009(8): 39-40.
- [14] 何旭辉, 马广. 预应力混凝土箱梁短线法节段预制线形控制[J]. 桥梁建设, 2009(5):64-67.
HE Xuhui, MA Guang. Geometric shape control of precasting of PC box girder segments by short-line match method [J]. Bridge Construction, 2009 (5): 64-67.
- [15] 赵志方, 赵国藩, 刘健, 等. 新老混凝土粘结抗拉性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001,22(2):51-56.
ZHAO Zhifang, ZHAO Guofan, LIU Jian, et al. Experimental study on adhesive tensile performance of young on old concrete [J]. Journal of Building Structures, 2001,22(2):51-56.
- [16] Hindo K R. In-place bond testing and surface preparation of concrete [J]. Concrete International, 1990,(12):46-48.
- [17] 秦明强, 水中和, 张建国. 新旧混凝土界面结合状态研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006,28(12):34-37.
QIN Mingqiang, SHUI Zhonghe, ZHANG Jianguo. Research on the interfacial bonds between the new and old concretes [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006,28(12):34-37.
- [18] Eduardo N B S J, Branco F A B, Silva V D. Concrete-to-concrete bond strength. influence of the roughness of the substrate surface [J]. Construction and Building Materials, 2004,18(9):675-681.
- [19] Santos P M D, Julio E N B S. Factors affecting bond between new and old concrete [J]. ACI Material Journal, 2011,108(4):449-456.
- [20] Cleland D J, Long A E. The pull-off test for concrete patch repairs[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 1997, 122 (4): 451-460.
- [21] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵标准图:装配式预应力混凝土斜空心板桥上部构造(后张法钢绞线)[M]. 北京:人民交通出版社, 2004.