

文章编号: 1000-4750(2012)04-0155-06

体外预应力角隅矩形齿块锚固区的 拉压杆模型及配筋设计

林 波, 刘 钊

(东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 针对体外预应力混凝土箱梁桥中的角隅矩形齿块锚固区, 研究了拉压杆模型构形及其配筋设计方法。首先通过应力场分析、传力路径的拓扑优化找形以及抗剪钢筋作用机理分析, 揭示了产生局部拉应力集中的四种作用效应以及锚固力由承压面经角隅齿块向壁板传递过程中的两种荷载传递机制。同时, 利用有限元数值分析结果, 拟合出锚固力在箱梁腹板与翼板间分配比例的计算公式, 在此基础上, 构建两个平面内的精细化桁式拉压杆模型以恰当反映角隅齿块各部位受拉、受压、受剪规律及配筋设计需求。以所提出的拉压杆模型为基础, 并结合美国 AASHTO 桥梁设计规范, 给出了角隅矩形齿块锚固区的配筋设计方法, 设计示例表明该方法具有良好的实用性, 可供工程设计参考。

关键词: 角隅矩形齿块锚固区; 拉压杆模型; 配筋设计; 有限元分析; 混凝土桥梁

中图分类号: U448.35; TU318.1 **文献标志码:** A

STRUT-AND-TIE MODEL AND REINFORCEMENT DESIGN FOR CORNER RECTANGULAR ANCHOR BLOCK OF EXTERNAL TENDONS

LIN Bo, LIU Zhao

(Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The strut-and-tie model (STM) and reinforcement design method for corner rectangular anchor block of external tendons were studied in this paper. The paper investigated the stress concentration and transferring path of the anchor force through stress distribution analysis, topology optimization, cracking pattern observation, and shear friction mechanism application. It is revealed that the stress concentration can be characterized by four typical local actions and the anchor force is transferred into the slab from the anchor plate through the arch and truss mechanism. Meanwhile, the formula for calculating the allocation of the anchorage force between the box girder web and flange was suggested based on the results of finite element analysis. And two individual refined trussed plane STMs were proposed to account for the properties of tension, compression and shear in corner rectangular anchor blocks. Moreover, the reinforcement design method was given through the combination of the proposed STM and AASHTO LRFD Specification. Finally, a worked design example was presented to demonstrate the effectiveness and convenience of the proposed method.

Key words: corner rectangular anchor block; strut-and-tie model; reinforcement design; finite element analysis; concrete bridge

在体外预应力混凝土桥梁中, 体外束常常通过突出于箱梁内壁上的矩形齿块加以锚固, 根据矩形齿块设置位置的不同, 可分为独立矩形齿块和角隅

矩形齿块^[1]。角隅矩形齿块一般设置在箱梁腹板与翼板的交接处, 与附着于壁板(腹板、顶板或底板)上的独立矩形齿块相比, 角隅齿块的布置方式可减

收稿日期: 2010-07-09; 修改日期: 2010-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778038); 教育部博士点基金项目(20070286097); 江苏省交通科学研究计划项目(09Y11)

通讯作者: 林波(1981—), 男, 江苏如皋人, 博士, 从事桥梁结构设计理论研究(E-mail: lbb2002_2001@163.com).

作者简介: 刘钊(1964—), 男, 安徽和县人, 教授, 博士, 从事桥梁结构设计理论研究(E-mail: mr.liuzhao@seu.edu.cn).

小集中锚固力对壁板的不利影响,同时,腹板提供的侧向约束可提高齿块自身的承载能力,因此,在构造空间合适的情况下,角隅矩形齿块往往得到优先采用。

独立矩形齿块和角隅矩形齿块均受到很大的集中锚固力作用,且存在几何形体上的突变,属于力流受扰动区域(D区)。在这些区域,拉压杆模型法被认为是尺寸拟定和配筋设计的有力工具^[2-3],并被 AASHTO、ACI、CEB-FIP、Eurocode 等欧美规范^[4-7]所推荐。笔者于文献[1]中研究了独立矩形齿块基于拉压杆模型的配筋设计方法,由于独立矩形齿块与角隅矩形齿块在整体传力机制上存在较大差异,为此,本文针对角隅矩形齿块展开进一步研究。

针对角隅矩形齿块锚固区配筋设计的拉压杆模型方法,国内外开展了一些理论和试验研究,其中美国学者 Wollmann G P^[8]、德国学者 Hegger J^[9]等通过弹性有限元分析,研究了锚固力作用下角隅矩形齿块的力流传递规律,在此基础上提出了该区域拉压杆模型的构形方法。然而,这些构形均未能合理确定锚固力在箱梁腹板与翼板间的分配比例,且未能恰当反映角隅齿块各部位受拉、受压及传剪规律,可见,针对角隅矩形齿块锚固区的拉压杆模型,需要寻求一种更为合理的构形方法。

本文通过应力场分析以及传力路径的拓扑优化找形,研究角隅矩形齿块的受力特点,在此基础上结合笔者先前针对独立矩形齿块的研究^[1],提出角隅矩形齿块锚固区拉压杆模型的构形方法,并给出抗裂及抗剪配筋设计。

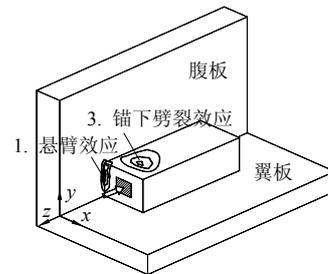
1 角隅矩形齿块锚固区的受力特点

1.1 拉应力的集中分布特征

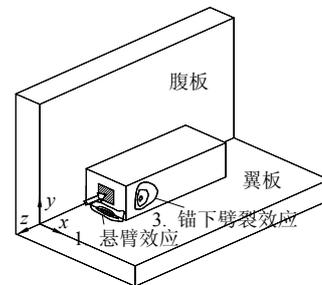
为揭示角隅矩形齿块的抗裂配筋需求,采用三维有限元软件 ANSYS 对角隅矩形齿块锚固区进行空间应力分析。模型中采用 Solid45 单元模拟锚固区混凝土,根据对称性和圣维南原理,模型横向截取 1/2 桥宽,纵向长度约取为齿块长度的 3 倍。在模型的对称面上施加对称约束,其余边界上施加固定约束,锚固力等效为均布荷载施加在垫板范围内的节点上,按照理想弹性材料计算角隅齿块锚固区的应力分布。根据有限元数值分析结果,绘制拉应力等值线(去除量值较小的部分),如图 1 所示。可以发现 4 个部位存在显著的拉应力集中,

分别为:

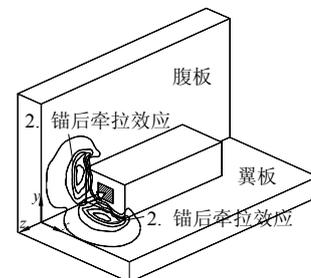
- 1) 齿块锚固面与腹板及翼板交界处的横向(x向)和竖向拉应力集中。
- 2) 锚后壁板内的纵向(z向)拉应力集中。
- 3) 齿块锚下横向及竖向拉应力集中。
- 4) 齿块端面区域的斜向(近似与端面对角线 ab 方向平行)拉应力集中。



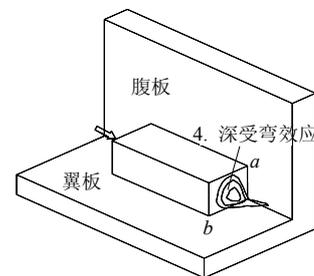
(a) 横向拉应力等值线



(b) 竖向拉应力等值线



(c) 纵向拉应力等值线



(d) 斜向拉应力等值线

图 1 角隅矩形齿块锚固区的 4 种局部作用效应

Fig.1 Four local actions in a corner rectangular anchor block

这里将上述拉应力集中分布特征归因于“悬臂效应”、“锚后牵拉效应”、“锚下劈裂效应”以

及“深受弯效应”。其中，前3种作用效应同样存在于独立矩形齿块锚固区^[1]，第4种作用效应则源于锚固力经角隅齿块同时向腹板和翼板传递过程中内部力流的平衡需求。

1.2 荷载传递路径

通过对结构进行拓扑优化分析，可以较为直观地认清荷载在结构中的最短传力路径。这里采用渐进结构拓扑优化方法对典型尺寸的角隅矩形齿块进行分析。该方法的原理为：从连续体中不断地剔除低应变能密度的元素，当性能指标取得最大值时，可得到结构的最优荷载传递构架^[10]。图2给出了角隅矩形齿块锚固区拓扑优化的分析结果，可以看出，部分锚固力分别通过两个方向的“传力拱”传递至齿块前方腹板和翼板区域，另一部分则通过牵拉作用传至锚后壁板，悬臂效应以及深受弯效应引起的拉力保证了该传力体系的整体平衡。至此形成了锚固力经角隅齿块向壁板传递的“拱机制”，其中，“传力拱”的曲率与锚固点至壁板内表面距离与齿块纵向长度的比值正相关^[11]。

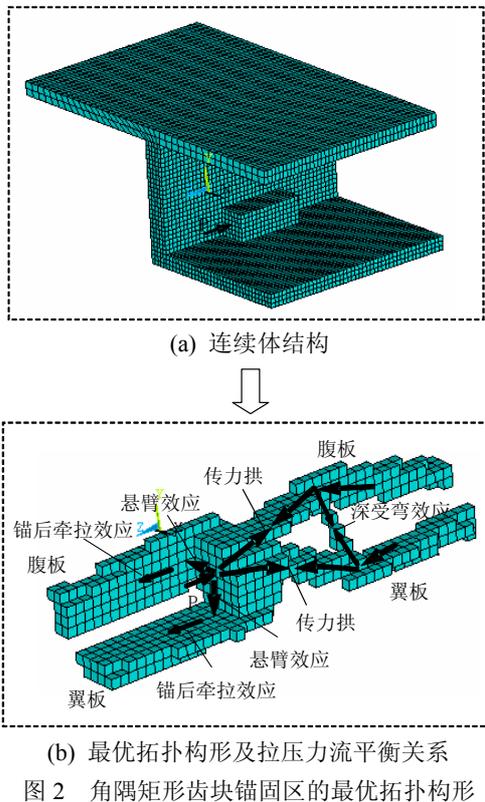


图2 角隅矩形齿块锚固区的最优拓扑构形

2 角隅矩形齿块锚固区的简化拉压杆模型

对锚固力 P 作用下的典型角隅齿块，根据最优

拓扑构形以及内部力流的平衡关系，构建简化空间拉压杆模型如图3所示，其中，将两个方向传递斜向压力的“传力拱”近似采用直线形压杆 $M-B_1$ 、 $M-B_2$ 模拟，悬臂效应以及深受弯效应引起的拉力分别由拉杆 $M-A_1$ 、 $M-A_2$ 和拉杆 B_1-B_2 承担。这里将经角隅齿块传递至腹板和翼板的锚固力大小分别取为 k_1P 和 k_2P ，同时，借鉴独立矩形齿块拉压杆模型构形方法^[1]，参考美国 AASHTO 规范^[4]，将角隅齿块锚后腹板及翼板内牵拉力的大小分别取为 $0.25k_1P$ 和 $0.25k_2P$ ，此时，锚前与锚后分担荷载的比例约为 3 : 1。

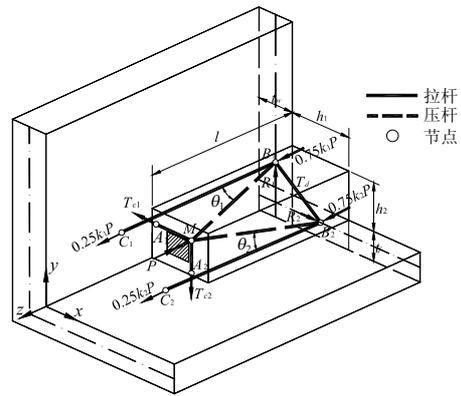


图3 简化空间拉压杆模型

Fig.3 Simplified spatial strut-and-tie model

为便于杆件内力的求解以及进一步构建精细化拉压杆模型，将图3所示简化空间拉压杆模型分解为两个平面内的子模型(图4)，锚固力分别通过这两个模型完成向腹板和翼板的传递。

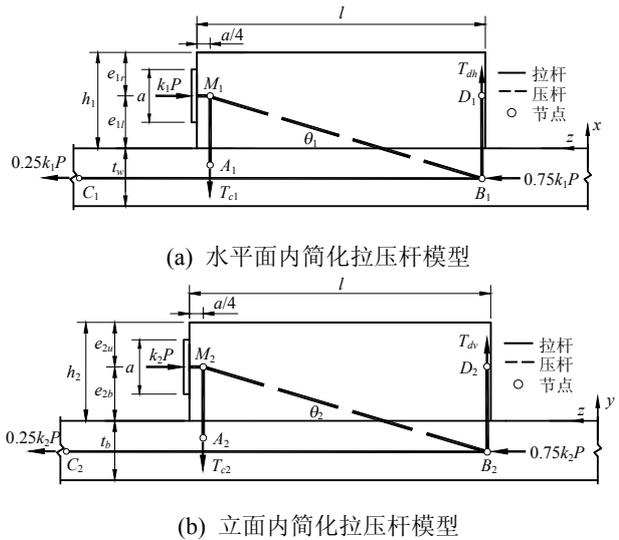


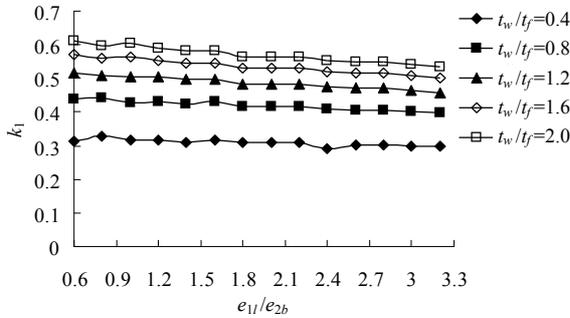
图4 两个平面内的简化拉压杆模型

Fig.4 Two simplified plane strut-and-tie models

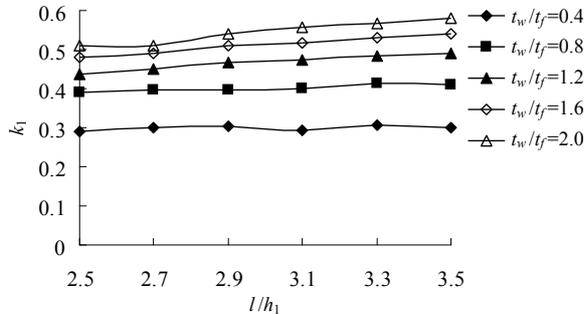
在简化拉压杆模型中，锚固力传递至腹板和翼板的分配比例 k_1 、 k_2 为各杆件内力求解所需关键参

数, 这里采用三维有限元软件对角隅齿块锚固区进行空间应力分析, 在此基础上, 通过对角隅齿块端面处腹板及翼板区域纵向压应力的数值积分计算 k_1 、 k_2 的大小。考虑荷载分配比例 k_1 与 k_2 之和为 1, 给出 k_1 的计算结果如图 5, 图 5 中 e_{1l}/e_{2b} 为锚固点至腹板内表面距离与至翼板内表面距离之比; l/h_1 为角隅齿块纵向长度与横向宽度之比; t_w/t_f 为腹板厚度与翼板厚度之比; H/B 为腹板高度与翼板宽度之比。由图 5 可知, 在上述几何参数实际可能的取值范围内, k_1 的大小对参数 t_w/t_f 取值的变化比较敏感, 而其他几何参数变化时, k_1 的计算结果基本稳定, 为此, 以腹板厚度与翼板厚度之比 t_w/t_f 为自变量, 应用最小二乘原理, 拟合出 k_1 的计算式为:

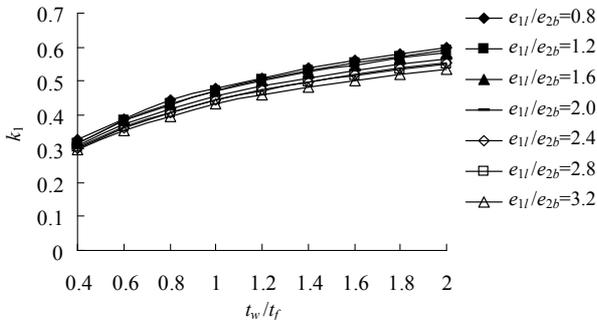
$$k_1 = 0.15(t_w/t_f) + 0.30 \quad (1)$$



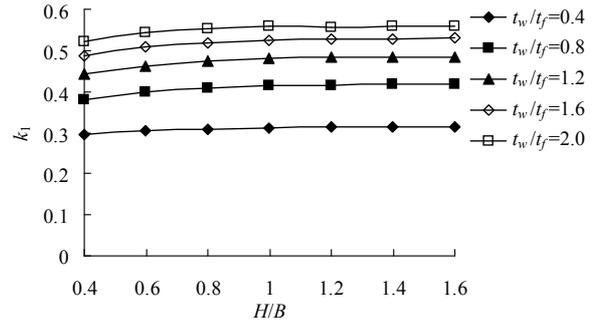
(a) $l/h_1 = 3.0, H/B = 0.8$



(b) $e_{1l}/e_{2b} = 2.4, H/B = 0.8$



(c) $l/h_1 = 3.0, H/B = 0.8$



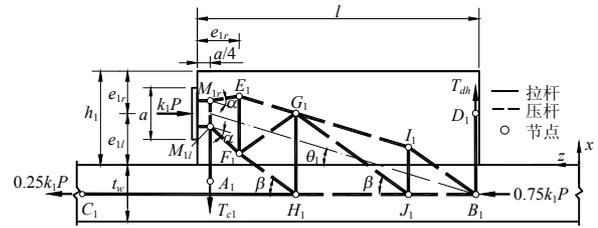
(d) $e_{1l}/e_{2b} = 2.4, l/h_1 = 3.0$

图 5 k_1 的计算结果

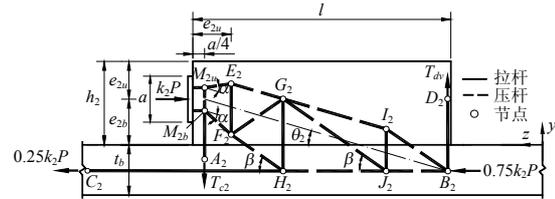
Fig.5 Calculation results of k_1

3 角隅矩形齿块锚固区的精细化拉压杆模型

为增强角隅矩形齿块的纵向抗剪能力, 需配置抗剪钢筋(箍筋)穿过齿块与腹板及翼板的交界区域, 此时, 部分锚固力经由此类钢筋充当受拉腹杆的桁架模型传递至腹板和翼板。为此, 进一步结合角隅矩形齿块的力流传递特征, 构建精细化桁式拉压杆模型(图 6), 以恰当反映两种荷载传递机制以及产生局部拉应力集中的四种作用效应(表 1)。角隅齿块锚固区锚下压力扩散以及纵向剪力在齿块与壁板间的传力机理与独立齿块锚固区相似, 为此, 参考独立齿块锚固区拉压杆模型几何构形的确定方法^[1], 将图 6 所示拉压杆模型中锚下压杆的扩散角 α 以及穿过齿块与壁板交界面的斜压杆的倾角 β 分别取为 26° 和 36° , 同时, 将锚下拉杆 E_1-F_1 以及拉杆 E_2-F_2 至锚固端的距离分别取为锚固点至角隅齿块外侧边缘的距离 e_{1r} 和 e_{2u} 。



(a) 水平面内精细化拉压杆模型 I



(b) 立面内精细化拉压杆模型 II

图 6 两个平面内的精细化拉压杆模型

Fig.6 Two refined plane strut-and-tie models

表 1 局部作用效应及荷载传递机制在模型中的反映

Table 1 Local actions and load transfer mechanisms vs. STM

传力机理分析	模型中的杆件		
	模型 I	模型 II	
悬臂效应	$M_{1l}-A_1$	$M_{2l}-A_2$	
4 种局部作用效应	锚后牵拉效应	C_1-H_1	C_2-H_2
	锚下劈裂效应	E_1-F_1	E_2-F_2
	深受弯效应	B_1-D_1	B_2-D_2
2 种荷载传递机制	拱机制	$M_{1r}-E_1, E_1-G_1$	$M_{2r}-E_2, E_2-G_2$
	桁架机制	G_1-I_1, I_1-B_1	G_2-I_2, I_2-B_2
		F_1-H_1, G_1-I_1	F_2-H_2, G_2-I_2
		G_1-H_1, I_1-J_1	G_2-H_2, I_2-J_2

4 角隅矩形齿块锚固区的配筋设计

4.1 设计示例

结合南京长江四桥引桥中某体外预应力节段预制拼装的研究课题，对典型角隅齿块锚固区进行分析，角隅齿块尺寸如图7所示。锚固于角隅齿块上的体外预应力钢束为25根 $\phi^8 15.2$ 钢绞线，张拉控制应力为1209MPa。根据 AASHTO 规范的建议^[4]，按照承载能力极限状态进行角隅齿块锚固区的配筋设计，据此将锚固力设计值取为5078kN，钢筋(HRB335级)设计强度取为 Φf_y (Φ 为强度折减系数，取0.75^[4-5]； f_y 为钢筋屈服强度，取为335MPa)。

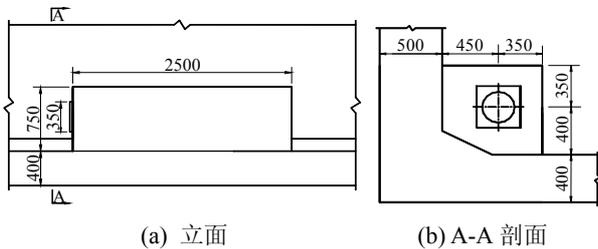
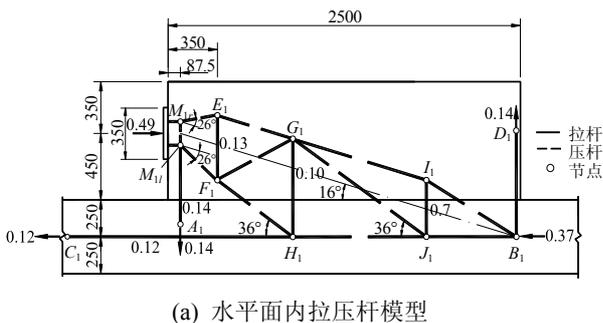
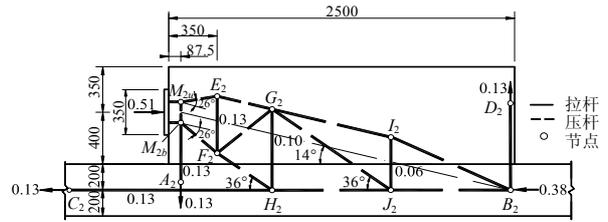


图 7 角隅矩形齿块锚固区的尺寸 /mm
Fig. 7 Dimensions of the anchor block

根据本文提出的构形方法，得到角隅矩形齿块锚固区的拉压杆模型见图8。根据节点平衡要求计算拉杆内力，在此基础上，进行抗裂及抗剪配筋设计，相应配筋量以及钢筋布置情况如表2、表3和图9所示。



(a) 水平面内拉压杆模型



(b) 立面内拉压杆模型

图 8 角隅矩形齿块锚固区的拉压杆模型 /mm

Fig.8 Strut-and-tie models for the anchor block

表 2 抗裂配筋计算

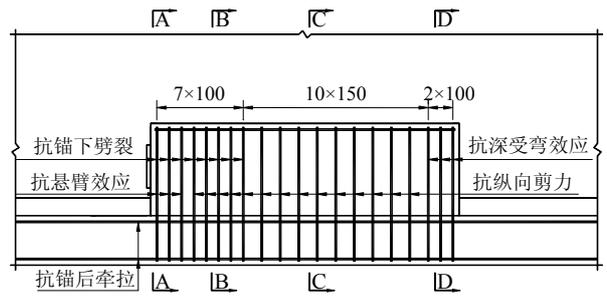
Table 2 Crack-resistance reinforcement calculation

抗裂钢筋中拉力	对应拉杆内力	拉杆内力设计值/kN	需配钢筋量/ mm^2	实配钢筋量/ mm^2
悬臂效应	横向 $T_{M_{1l}-A}$	711	2844	3768
拉力	竖向 $T_{M_{2l}-A_2}$	660	2640	3768
牵拉效应	腹板 $T_{C_1-H_1}$	609	2436	3611
拉力	底板 $T_{C_2-H_2}$	660	2640	4239
劈裂效应	横向 $T_{E_1-F_1} / k_1$	1347	5388	10048
	拉力 竖向 $T_{E_2-F_2} / k_2$	1249	4996	10048
深受弯效应	横向 $T_{B_1-D_1}$	711	2844	3768
	拉力 竖向 $T_{B_2-D_2}$	660	2640	3768

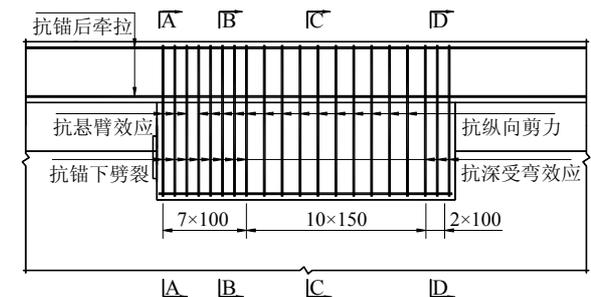
表 3 抗剪配筋计算

Table 3 Shear-resistance reinforcement calculation

抗剪钢筋中拉力	对应拉杆内力	拉杆内力设计值/kN	需配钢筋量/ mm^2	实配钢筋量/ mm^2
横向	$T_{G_1-H_1} + T_{I_1-J_1}$	863	3452	11932
竖向	$T_{G_2-H_2} + T_{I_2-J_2}$	812	3248	11932



(a) 立面



(b) 水平面

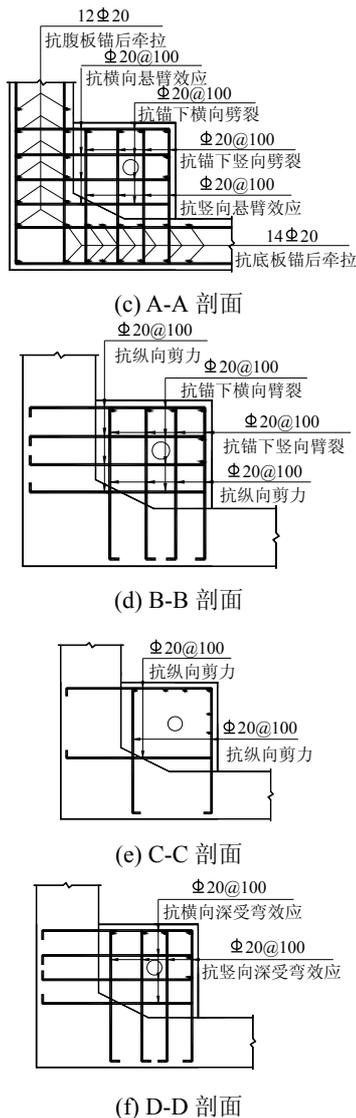


图9 角隅矩形齿块锚固区的钢筋布置 /mm

Fig.9 Reinforcement details of the anchor block

4.2 角隅矩形齿块锚固区的配筋设计建议

根据本文揭示的角隅矩形齿块锚固区的受力特征以及 AASHTO 规范^[4]的相关条款,提出角隅矩形齿块锚固区的配筋设计建议如下:

1) 锚下横向及竖向抗劈裂钢筋应布置于距锚固端约 $2e_{1r}$ 以及 $2e_{1u}$ 范围内,同时保证抗劈裂钢筋的面积重心与对应拉杆位置基本重合,此类钢筋应伸入腹板及翼板内并可靠锚固。

2) 根据配筋计算结果,在靠近锚固面以及齿块端面的区域内配置多层钢筋网片,每层网片内均设置具有可靠锚固措施的横向和竖向箍筋,形成正交的钢筋网以抵抗两个方向悬臂效应以及深受弯效应引起的拉力,两方向的箍筋均应伸入腹板及翼板内并可靠锚固。

3) 锚后腹板及翼板内的纵向抗裂钢筋应集中布置在力筋轴线两侧各一倍齿块宽度范围内,并保证抗裂钢筋的面积重心与力筋轴线一致。

5 结论

(1) 揭示了角隅矩形齿块锚固区的受力特征,包括:产生局部拉应力集中的四种作用效应,即“悬臂效应”、“锚后牵拉效应”、“锚下劈裂效应”和“深受弯效应”,以及2种荷载传递机制,即“拱机制”和“桁架机制”,这些受力特征为有限元数值分析以及拓扑优化所印证,也是构建正确拉压杆模型的基础。

(2) 根据有限元数值分析结果,拟合出锚固力在箱梁腹板与翼板间分配比例的计算公式。该计算式能够合理反映箱梁截面几何参数的变化对荷载分配比例的影响规律。

(3) 所提出的两个平面内的精细化桁式拉压杆模型,能恰当反映角隅矩形齿块各部位受拉、受压、受剪规律以及配筋设计需求。

(4) 提出了角隅齿块锚固区的配筋设计建议。

(5) 设计示例表明,所提出的拉压杆模型及其配筋设计方法具有良好的实用性,可供工程设计参考。

参考文献:

- [1] 林波, 刘钊, 吕志涛. 体外预应力独立矩形齿块锚固区拉压杆模型及配筋设计[J]. 工程力学, 2011, 28(12): 59-64.
Lin Bo, Liu Zhao, Lü Zhitao. Strut-and-tie model and reinforcement design method for isolated rectangular anchor block for external tendons [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(12): 59-64. (in Chinese)
- [2] Schlaich J, Schäfer K, Jennewein M. Toward a consistent design of structural concrete [J]. Journal of the Prestressed Concrete Institute, 1987, 32(3): 74-150.
- [3] 刘钊, 吕志涛, 惠卓, 等. 拉压杆模型在混凝土梁桥中应用与研究进展[J]. 中国工程科学, 2008, 10(10): 14-21.
Liu Zhao, Lü Zhitao, Hui Zhuo, et al. Review of application and research on strut-and-tie models for concrete bridges [J]. Engineering Sciences, 2008, 10(10): 14-21. (in Chinese)
- [4] AASHTO LRFD bridge design specifications (3rd ed.) [S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.

(参考文献[5]-[11]转第167页)

- 709—714.
- Li Shirong, Zhang Jinghua, Zhao Yonggang. Thermal post-buckling of functionally graded material Timoshenko beams [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2006, 27(6): 709—714. (in Chinese)
- [11] 李世荣, 范亮亮. 功能梯度梁在热冲击下的动态响应 [J]. *振动工程学报*, 2009, 22(4): 371—378.
- Li Shirong, Fan Liangliang. Dynamic responses of functionally graded material beams under thermal shock [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2009, 22(4): 371—378. (in Chinese)
- [12] Zhang D-G, Zhou Y-H. A theoretical analysis of FGM plate based on physical neutral surface [J]. *Computational Materials Science*, 2008, 44: 716—720.
- [13] Abrate S. Free vibration, buckling, and static deflections of functionally graded plates [J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66: 2383—2394.
- [14] 马连生, 欧志英, 黄达文. 不同梁理论之间简支梁特征值的解析关系 [J]. *工程力学*, 2006, 23(10): 91—95.
- Ma Liansheng, Ou Zhiying, Huang Dawen. Analytical relationships of simply-supported beam's eigenvalues using different beam theories [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(10): 91—95. (in Chinese)

(上接第 160 页)

- [5] ACI Committee 318. ACI 318M-08, Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. American Concrete Institute, 2008.
- [6] Euro International Committee for Concrete and International Federation for Prestressing. Practical design of structural concrete [M]. London: SETO, 1999.
- [7] The European Committee for Standardization (CEN). Eurocode-2, Design of concrete structures-concrete bridges [S]. London: British Standards Institution, 1992.
- [8] Wollmann G P. Anchorage zones in post-tensioned concrete structures [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2002.
- [9] Hegger J, Neuser J U. Verankerung externer Spannglieder an Querträgerscheiben [J]. *Beton und Stahlbetonbau*, 2004, 99(3): 186—194.
- [10] Liang Q Q, Xie Y M, Steven G P. Topology optimization of strut-and-tie models in reinforced concrete structures using an evolutionary procedure [J]. *ACI Structural Journal*, 2000, 97(2): 322—332.
- [11] Kim D, Kim W, White R N. Arch action in reinforced concrete beams—A rational prediction of shear strength [J]. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(4): 586—595.