

文章编号: 1000-4750(2011)12-0059-06

## 体外预应力独立矩形齿块锚固区的 拉压杆模型及配筋设计

\*林 波, 刘 钊, 吕志涛

(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独立矩形齿块锚固区, 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、裂缝分布模式试验验证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 3 种作用效应以及锚固力由承压面经独立齿块向壁板传递过程中 2 种荷载传递机制。在此基础上, 提出了一种新的精细化桁式拉压杆模型, 该模型能恰当反映独立齿块各部位受拉、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, 给出了独立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:** 独立矩形齿块锚固区; 拉压杆模型; 配筋设计; 有限元分析; 传力机理分析

**中图分类号:** U448.35; TU318.1 **文献标志码:** A

## STRUT-AND-TIE MODEL AND REINFORCEMENT DESIGN METHOD FOR ISOLATED RECTANGULAR ANCHOR BLOCK FOR EXTERNAL TENDONS

\*LIN Bo, LIU Zhao, LU Zhi-tao

(Key Laboratory of R.C. & P.C. Structures, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The strut-and-tie model (STM) and reinforcement design method for isolated rectangular anchor block with external tendons were studied in this paper. Firstly, through spatial stress analysis, experimental verification based on crack distribution pattern, topology optimization and mechanism analysis on shear reinforcement, the paper revealed that the stress concentration was caused by three typical local actions and the anchor force was transferred to the slab through the arch and truss mechanisms. On this basis, a new refined trussed STM for isolated rectangular anchor block was proposed, which was capable to reflecting the distribution of tension, compression and shear in anchor block. Moreover, the reinforcement design method was given by the combination of the proposed STM and AASHTO LRFD Specification. Finally, a design example was presented to demonstrate the effectiveness and convenience of the proposed method.

**Key words:** isolated rectangular anchor block; strut-and-tie model; reinforcement design; finite element analysis; force-transfer mechanism analysis

在体外预应力混凝土桥梁中, 体外束常常锚固在突出于箱梁内壁的矩形齿块上。与三角齿块锚固

区相比, 矩形齿块上钢束锚固力与壁板平行, 在受力方式上类似于工业厂房中的立柱牛腿, 但矩形齿

收稿日期: 2010-03-30; 修改日期: 2010-07-06

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)

作者简介: \*林 波(1981—), 男, 江苏如皋人, 博士生, 从事桥梁结构设计及理论研究(E-mail: lbb2002\_2001@163.com);

刘 钊(1964—), 男, 安徽和县人, 教授, 博士, 博导, 主要从事桥梁工程研究(E-mail: mr.liuzhao@seu.edu.cn);

吕志涛(1937—), 男, 浙江新昌人, 教授, 硕士, 博导, 中国工程院院士, 主要从事结构工程研究(E-mail: luzhitao@seu.edu.cn).

块锚固区通常受到的作用力更大(锚固力在几百吨量级),所附着的箱梁壁板相对更薄,为此,实际中矩形齿块的纵向长度一般较大,达到齿块高度的2.5倍~3.5倍。

根据矩形齿块设置位置的不同,分为独立矩形齿块(Isolated anchor block)和角隅矩形齿块(Corner anchor block),独立齿块一般附着于箱梁边壁(腹板、顶板或底板)上,角隅齿块则设置在腹板与翼板交接处(图1)。独立齿块与角隅齿块在几何构造以及受力特性上存在差异<sup>[1]</sup>,应予以分别研究,为此,本文的研究首先针对独立矩形齿块展开。

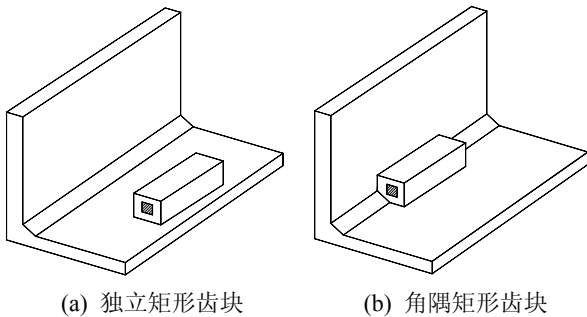


图1 矩形齿块类型

Fig.1 Rectangular anchor block types

体外预应力独立矩形齿块锚固区的应力场比较复杂,是结构中的力流扰动区(也称D区),因此,难以运用传统的以截面分析为基础的方法进行配筋设计,而拉压杆模型法(Strut-and-Tie Model)能够较好地解决这一问题<sup>[2]</sup>。针对独立矩形齿块锚固区的配筋设计,国内外开展了一些研究,不同规范及学者提出了多种拉压杆模型的构形<sup>[3-7]</sup>(图2),其中具有代表性的模型如:单根斜压杆模型、两段折线形压杆模型、模拟压力扩散的劈裂压杆模型以及斜压杆与桁架的组合模型,既有研究对几何构形位置的量化研究尚缺乏充足的理论依据,并且这些构形未能全面且合理地反映锚下压力扩散以及齿块

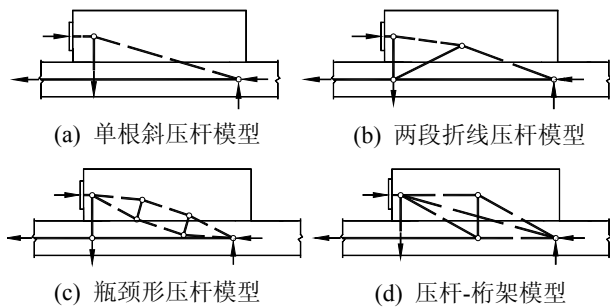


图2 独立矩形齿块锚固区的几类典型拉压杆模型

Fig.2 Several types of typical strut-and-tie models in isolated rectangular anchor block

与壁板间水平剪力的传力机理,美国学者 Wollmann G P<sup>[1]</sup>和德国学者 Jungwirth F 等人的试验研究<sup>[8]</sup>也印证了上述观点。

本文通过应力场分析、传力路径的拓扑优化找形以及裂缝分布模式试验验证3个方面,研究独立矩形齿块锚固区的受力特点,在此基础上提出独立矩形齿块锚固区的拉压杆模型构形方法,并给出抗裂及抗剪配筋设计。

## 1 独立矩形齿块锚固区的受力特点

### 1.1 拉应力的集中分布特征

独立矩形齿块存在几何形体上的突变,在集中锚固力作用下,局部应力分布复杂。采用三维有限元软件 ANSYS 对独立矩形齿块锚固区进行精细化空间应力分析,模型中采用 Solid45 单元模拟齿块混凝土,锚固力则均匀施加在垫板范围内的节点上。按照理想弹性材料计算齿块锚固区的应力分布,据此得到主拉应力等值线(去除量值较小的部分)以及应力迹线,如图3所示。可以发现有3个部位存在显著拉应力集中,分别为:

- 1) 齿块锚固面与壁板交界处的横向拉应力集中。
- 2) 锚后壁板内的纵向拉应力集中。
- 3) 齿块锚下横向拉应力集中。

这里将上述拉应力集中分布特征归因于3种局部作用效应(图3),即“悬臂效应”、“锚后牵拉效应”和“锚下劈裂效应”。

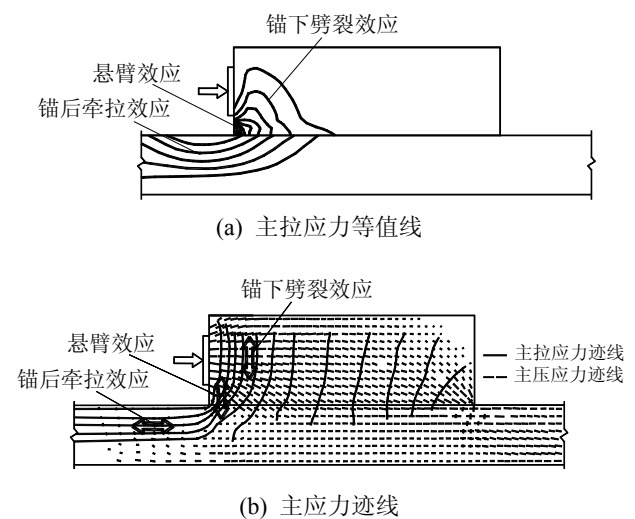


图3 独立矩形齿块锚固区的3种局部作用效应

Fig.3 Three local actions in an isolated rectangular anchor block

### 1.2 荷载传力路径

为揭示集中锚固力在独立矩形齿块内的最短传力路径，这里采用渐进结构拓扑优化方法(ESO)<sup>[9]</sup>，其原理为：从连续体中不断地剔除传力效率不高的单元，最后生成结构的主要荷载传递构架。渐进拓扑优化的目标函数可表示为：

$$\text{Min: } \sum_{j=1}^n C_{ej} W_{ej} \quad (1)$$

式中： $C_{ej}$ 为结构中单元 $j$ 的应变能， $C = \bar{\mathbf{P}}^T \bar{\mathbf{U}} / 2$  ( $\bar{\mathbf{P}}$ 为荷载矩阵， $\bar{\mathbf{U}}$ 为位移矩阵)； $W_{ej}$ 为单元 $j$ 的重量； $n$ 为结构单元数。

引入结构的性能指标：

$$PI = \frac{C_0 W_0}{C_i W_i} \quad (2)$$

式中： $C_0$ 、 $W_0$ 、 $C_i$ 、 $W_i$ 分别表示初始状态下以及经过第 $i$ 次优化后，结构的总应变能和总重量。此时，优化的目标在于使得性能指标 $PI$ 取得极大值。

在有限元软件 ANSYS 的基础上，本文通过 APDL 二次开发，实现了渐进拓扑优化功能。这里对典型尺寸的独立矩形齿块进行拓扑优化分析，结构性能指标  $PI$  最大时的拓扑形状以及内部力流的平衡关系如图 4，可见，部分锚固力通过“传力拱”传递到齿块前方壁板区域，另一部分则通过牵拉作用传至锚后壁板，悬臂效应引起的拉力则保证了该传力体系的整体平衡。

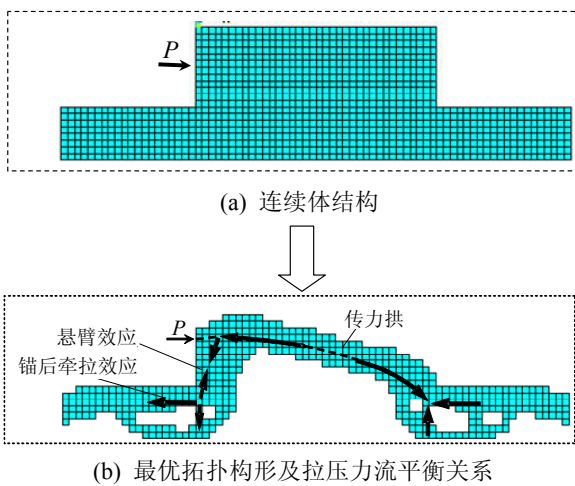


图 4 独立矩形齿块锚固区最优拓扑构形及内部力流平衡关系

Fig.4 Optimal topology for an isolated rectangular anchor block

### 1.3 独立矩形齿块裂缝分布

德国学者 Jungwirth 等通过预应力加载试验<sup>[8]</sup>得到了独立矩形齿块锚固区的裂缝分布模式(图 5)，

裂缝分布密集区域与 3 种局部作用效应(图 3)吻合，同时，弥散裂缝的开展方向显明了锚下集中力经齿块内斜压应力场传至壁板区域的荷载路径(图 4)，由此印证了上述拉应力集中分布特征以及荷载传递路径的分析结果。

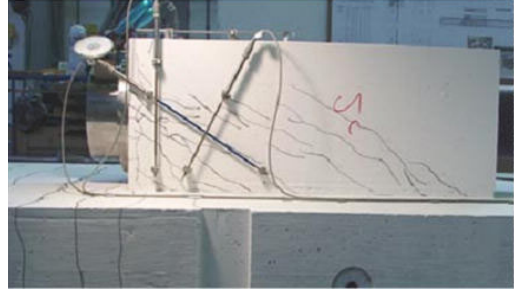


图 5 独立矩形齿块锚固区的裂缝分布  
Fig.5 Crack distribution in an isolated rectangular anchor block

## 2 独立矩形齿块锚固区的简化拉压杆模型

针对锚固力  $P$  作用下的典型独立齿块，根据最优拓扑构形以及内部力流的平衡关系，可以构建简化拉压杆模型(图 6)，其中，将传递斜向压力的“传力拱”近似采用直线形压杆模拟，悬臂效应拉力则由竖向拉杆承担。竖向拉杆与斜压杆交汇于锚下节点(图 6)，该节点为集中型节点，代表锚下局部区域，这里根据 CEB-FIP 的建议<sup>[3]</sup>，将该节点至锚固端的距离取为锚垫板宽度的  $1/4$ ，即  $d_c = a/4$ 。齿块锚后因受到壁板约束作用而承受拉力，锚后承担拉力的大小与锚后牵拉刚度有关，然而，实际结构中，齿块锚固区的构造及受力复杂，根据美国 AASHTO 规范的建议<sup>[10]</sup>，将锚后拉力的大小近似取为锚固力大小的 25%，此时，锚前与锚后分担荷载的比例约为 3 : 1。

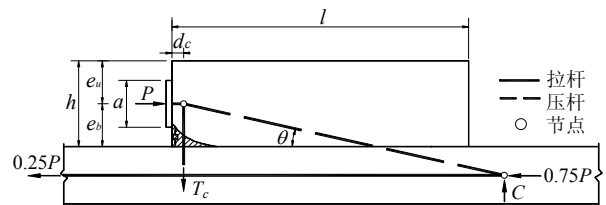


图 6 简化拉压杆模型

Fig.6 Simplified strut-and-tie model

根据模型中节点静力平衡条件，给出斜压杆倾角(压杆方向与水平向夹角) $\theta$ 的计算式为：

$$\theta = \arctan(T_c / P) \quad (3)$$

式中， $T_c$ 为通过对悬臂效应引起拉应力的数值积分

得到的拉力大小。

笔者进行的大量数值分析表明,斜压杆倾角 $\theta$ 的大小主要与 $e_b/l$ 有关( $e_b$ 为锚固点至壁板内表面的距离, $l$ 为齿块纵向长度),且两者间近似成线性关系(图7),为此,拟合出斜压杆倾角 $\theta$ 的计算式为:

$$\theta = 37.8e_b/l + 7.0 \quad (4)$$

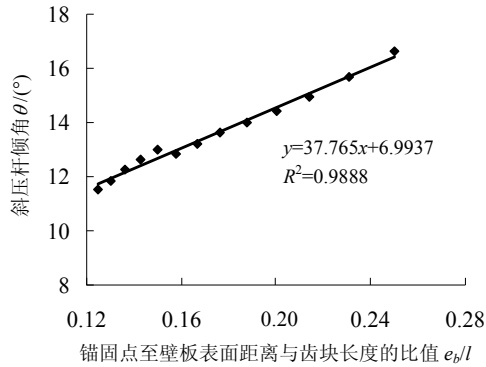


图7  $\theta$  计算式的拟合

Fig.7 Regression equation for  $\theta$

### 3 独立矩形齿块锚固区的精细化拉压杆模型

#### 3.1 精细化拉压杆模型的基本构形

为增强独立矩形齿块锚固区的水平抗剪能力,需配置竖向抗剪钢筋(箍筋)穿过齿块与壁板的交界区域,此时,部分锚固集中力经由此类钢筋充当受拉腹杆的桁架模型传至壁板。进一步结合独立齿块力流传递特征,构建图8所示精细化桁式拉压杆模型,以恰当反映2种荷载传递机制以及产生局部拉应力集中的3种作用效应(表1),可见,若依据此模

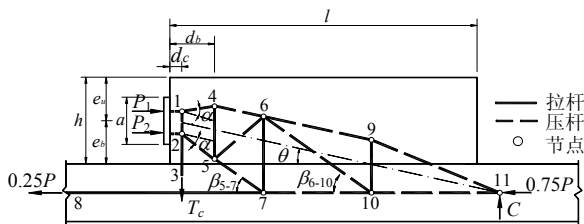


图8 精细化拉压杆模型

Fig.8 Refined strut-and-tie model

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	
三种局部作用效应	悬臂效应	拉杆 2-3
	锚后牵拉效应	拉杆 7-8
	锚下劈裂效应	拉杆 4-5
两种荷载传递机制	拱机制	压杆 1-4、拉杆 4-6
		压杆 6-9、拉杆 9-11
	桁架机制	压杆 5-7、拉杆 6-10
		拉杆 6-7、拉杆 9-10

型进行抗裂及抗剪配筋设计,可保证独立矩形齿块锚固区的关键受力部位均可得到配筋的有效加强。

#### 3.2 模型参数确定方法

针对图8所示精细化拉压杆模型的基本构形,将模型参数的确定方法及取值阐述如下:

##### 1) 锚下压杆 1-4 及压杆 2-5 扩散角 $\alpha$ 的确定。

参考美国 AASHTO 规范<sup>[10]</sup>以及美国混凝土结构设计规范 ACI318-08<sup>[11]</sup>给出的瓶形压杆的压力扩散模型(图9),将锚下斜压杆的斜率取为 2:1,即扩散角 $\alpha$ 取为  $\arccot(2.0) \approx 26^\circ$ 。

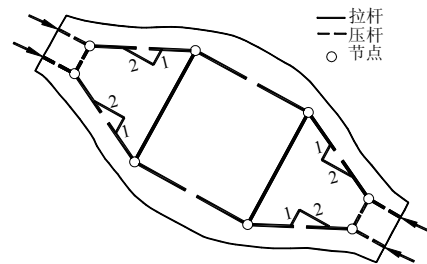


图9 瓶形压杆的压力扩散模型

Fig.9 Dispersion model for bottle-shaped strut

##### 2) $P_1$ 及 $P_2$ 的确定。为使精细化拉压杆模型中

悬臂效应引起拉力的大小与简化拉压杆模型中的对应量值保持一致,根据模型中1号及2号节点力的平衡条件得出 $P_1$ 与 $P_2$ 间需满足的关系(见式(5)、式(6)),结合倾角 $\theta$ 和 $\alpha$ 的取值,即可求得 $P_1$ 及 $P_2$ 的大小。

$$P_1 + P_2 = P \quad (5)$$

$$P_1 \tan(\theta - \alpha) + P_2 \tan(\theta + \alpha) = P \tan \theta \quad (6)$$

3) 锚下拉杆 4-5 位置确定。根据 CEB-FIP 的建议<sup>[4]</sup>,拉杆 4-5 至锚固端距离可取为锚固点至齿块上边缘的距离,即 $d_b = e_u$ 。美国得克萨斯大学 Breen 等人试验研究表明<sup>[12]</sup>,若按上述拉杆位置进行抗劈裂配筋设计,可保证所配钢筋对锚下劈裂裂缝的有效控制。

4) 压杆 5-7 及压杆 6-10 倾角 $\beta$ 的确定。压杆 5-7 及压杆 6-10 用于模拟齿块与壁板交界面间的剪切摩擦机理,为避免荷载传递过程中,齿块与壁板的交界区域发生水平剪切破坏,根据摩擦抗剪理论<sup>[10-11]</sup>,界面上的水平剪力 $V_u$ 与竖向压力 $N$ 间需满足的关系式为:

$$V_u \leq \mu N \quad (7)$$

从拉压杆模型的角度, $V_u$ 和 $N$ 可理解为斜压杆内力的水平分量与竖向分量。为确保锚固力通过上述压杆顺利传递,由式(7)推导出斜压杆倾角 $\beta$ 的

取值不应小于  $\arctan(1/\mu)$ ，对于整浇混凝土，齿块与壁板交界面的摩擦系数  $\mu$  可取为  $1.4^{[10-11]}$ ，此时， $\beta_{\min} \approx 36^\circ$ 。为使构形相对稳定，建议斜压杆倾角  $\beta$  在  $36^\circ$  附近取值，据此可计算抵抗水平剪力所需最小配筋量。

### 4 独立矩形齿块锚固区的配筋设计

#### 4.1 配筋量计算

拉压杆模型中的拉杆内力是抗裂及抗剪钢筋定量配筋设计的依据，所需配筋量计算如下：

$$A_s = T/(\phi f_y) \quad (8)$$

式中： $A_s$  为需配钢筋面积； $T$  为由拉压杆模型计算得到的拉杆内力设计值，计算拉杆内力时，锚固力设计值取控制张拉力的 1.2 倍<sup>[10-11]</sup>； $\phi$  为强度折减系数，取  $0.75^{[10-11]}$ ； $f_y$  为钢筋屈服强度。

按照承载能力极限状态进行配筋设计，在正常使用阶段锚固力作用下，所配钢筋的应力  $\sigma_s \approx 0.56f_y$ 。对桥梁中常用的 HRB335 级钢筋，对应  $\sigma_s$  约为 188MPa。CEB-FIP99 设计建议<sup>[3]</sup>以及 VSL 后张预应力手册<sup>[13]</sup>均指出，正常使用阶段锚固力作用下，若将锚固区钢筋应力水平限制在 200MPa 以内，则所配钢筋可实现对锚固区裂缝的有效控制，保证预应力锚固区使用阶段的性能满足要求。

#### 4.2 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，对典型独立齿块锚固区进行分析，独立齿块尺寸如图 10 所示。锚固于独立矩形齿块上的体外预应力钢束为 22 根  $\phi^{15.2}$  钢绞线，张拉控制应力为 1209MPa。

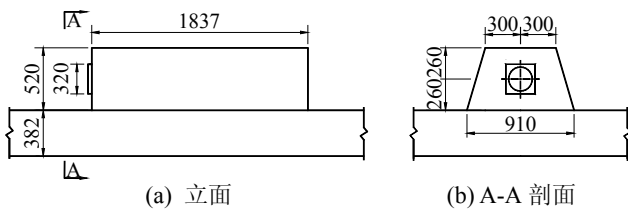


图 10 独立齿块锚固区的尺寸 /mm

Fig.10 Dimensions of the isolated anchor block

根据本文方法得到独立矩形齿块锚固区的拉压杆模型如图 11 所示，根据节点平衡的要求计算拉杆内力，在此基础上，进行抗裂及抗剪钢筋的配筋设计，相应的配筋量以及钢筋布置情况，如表 2 和图 12 所示。

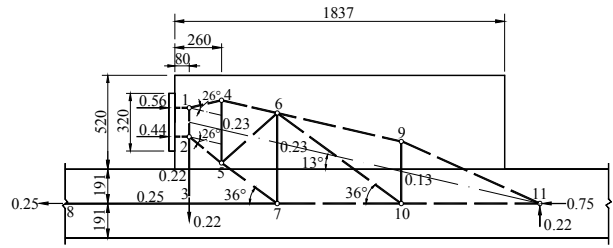


图 11 独立齿块锚固区拉压杆模型 /mm

Fig.11 STM for the isolated anchor block

表 2 配筋量计算

Table 2 Reinforcement calculation

抗裂钢筋中拉力	悬臂效应拉力	牵拉效应拉力
对应拉杆内力	$T_{2-3}$	$T_{7-8}$
拉杆内力大小/kN	983	1117
钢筋屈服强度/MPa	335	335
需配钢筋量/mm <sup>2</sup>	3913	4450
实配钢筋量/mm <sup>2</sup>	5652	6908

抗裂钢筋中拉力	劈裂效应拉力	抗剪钢筋中拉力
对应拉杆内力	$T_{4-5}$	$T_{6-7} + T_{9-10}$
拉杆内力大小/kN	1028	1609
钢筋屈服强度/MPa	335	335
需配钢筋量/mm <sup>2</sup>	4090	6403
实配钢筋量/mm <sup>2</sup>	8164	13816

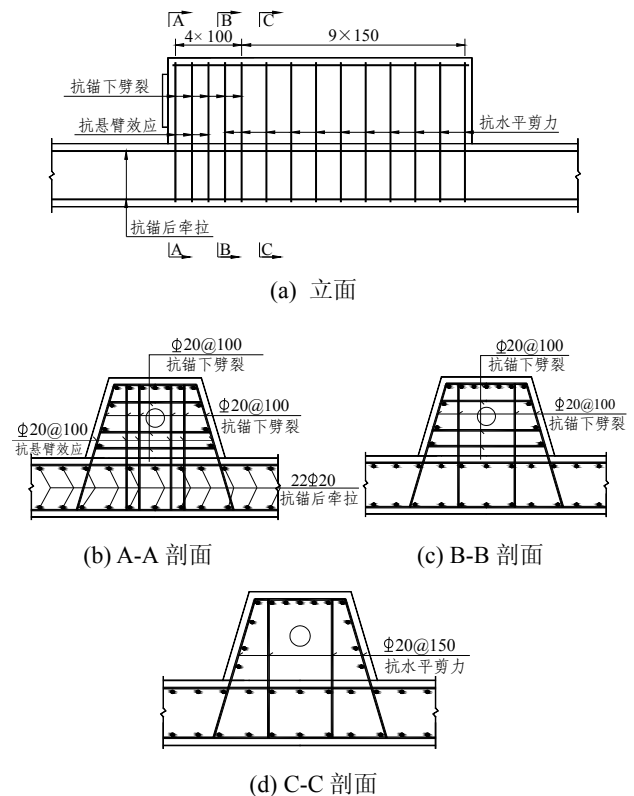


图 12 独立齿块锚固区内的钢筋布置 /mm

Fig.12 Reinforcement detailing of the isolated anchor block

#### 4.3 独立矩形齿块锚固区的配筋设计建议

根据本文揭示的独立矩形齿块锚固区的受力

特征以及 AASHTO 规范的相关条款<sup>[10]</sup>, 提出独立矩形齿块锚固区的配筋设计建议如下:

1) 锚下抗劈裂钢筋应布置于距锚固端约  $2e_u$  范围内, 同时保证抗劈裂钢筋的面积重心与拉杆位置基本重合, 此钢筋应伸入壁板内并可靠锚固。

2) 根据配筋计算结果, 在靠近锚固面的区域内配置多层钢筋网片, 每层网片均设置具有可靠锚固措施的横向钢筋, 以抵抗悬臂效应引起的拉力, 此外, 这些钢筋可同时起到抵抗劈裂力的作用。

3) 锚后纵向抗裂钢筋应布置于锚固点两侧各一倍齿块宽度范围内, 并保证抗裂钢筋面积重心与力筋轴线一致。

## 5 结论

(1) 揭示了独立矩形齿块锚固区的受力特征, 包括: 产生局部拉应力集中的 3 种作用效应, 即“悬臂效应”、“锚后牵拉效应”和“锚下劈裂效应”, 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、拓扑优化和试验裂缝分布模式所印证, 也是构建正确拉压杆模型的基础。

(2) 所提出的桁式拉压杆模型, 能恰当反映独立齿块各部位受拉、受压、受剪规律以及配筋设计需求。

(3) 提出了独立矩形齿块锚固区的配筋设计建议。

(4) 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, 亦可为相关规范的修订提供参考。

### 参考文献:

[1] Wollmann G P. Anchorage zones in post-tensioned concrete structures [D]. Austin, Texas: The University of Texas at Austin, 2002.

- [2] 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, Lu 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)
- [3] Euro International Committee for Concrete and International Federation for Prestressing. Practical design of structural concrete [M]. London: SETO, 1999.
- [4] The european committee for standardization (CEN). Eurocode-2: Design of concrete structures-concrete bridges [S]. London: British Standards institution, 1992.
- [5] 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.
- [6] Reineck K H. Examples for the design of structural concrete with strut-and-tie models [M]. SP-208, Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2002.
- [7] Hegger J, Neuser J U. Verankerung externer spannglieder an querträgerscheiben [J]. Beton-und Stahlbetonbau 99, 2004, Heft 3, 186—194.
- [8] Jungwirth F. Untersuchungen zur Krafteinleitung über Zwischenverankerungen bei externen Spanngliedern [D]. Leipzig: Universität Leipzig, 2001.
- [9] Liang Q Q, Uy B, Steven G P. Performance-based optimization for strut-tie modeling of structural concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(6): 815—823.
- [10] AASHTO LRFD bridge design specifications (3rd ed) [S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [11] ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318M-08) [S]. American Concrete Institute, 2008.
- [12] Breen J E, Burdet O, Roberts C. Anchorage zone reinforcement for post-tensioned concrete girders [R]. Austin, Texas: The University of Texas at Austin, 1991.
- [13] Rogowsky D M, Marti P. Detailing for Post-tensioned [R]. Switzerland: VSL International Ltd, 1996.