文章编号：1006－544X（2009）01－0075－06

体外预应力桥梁转向块构造分析及配筋设计

卢春玲[1,2]，王 强[1]

（1. 桂林工学院 土木工程系，广西 桂林 541004；2. 湖南大学 土木工程学院，长沙 410082）

摘 要：建立体外预应力桥梁转向块有限元模型并进行了应力分析，根据分析结果对转向块的构造进行优化并给出设计构造建议。根据体外预应力箱梁桥转向块的主应力矢量图和主应力云图确定转向块配筋设计的B区和D区，运用“弹性应力法”建立了转向块D区设计的拉压杆模型。由平衡条件算出拉杆内力，确定配筋面积及布置，并对配筋后的转向块进行有限元分析。结果表明，用拉压杆模型法进行转向块的配筋设计是合理可行的。

关键词：体外预应力；转向块；设计方法；拉压杆模型法

中图分类号：U443.38 **文献标志码**：A

体外预应力桥梁中的体外预应力筋的转向块是一种特殊构造，它是体外预应力筋除了锚固构造外体外预应力筋在跨径内唯一与预应力受力梁体结构有联系的构件，是体外预应力桥梁中最重要、最关键的结构构造之一。转向块由于承受较大的集中力及与预应力筋的摩擦力，受力复杂，一旦设计不合理、构造措施不当或体外预应力筋定位不准确，将导致转向块受力不合理，并有可能引起预应力筋局部硬化或摩擦损失过大。因此，保证这类结构的强度和抗裂性能，选取合理的构造形式和配筋，成为工程设计过程中的一个十分重要的问题。

1 体外预应力桥梁转向块的构造分析

1.1 转向块初始设计方案概况

1.1.1 *澧潭高速公路第12标白马垄高架桥转向块初始方案概况* 采用C50混凝土，按设计方案要求混凝土需达到95%强度方可张拉。体外预应力束采用6－Φ15.24钢绞线，预留体外预应力钢管内径为110 mm，f_{pk}＝1 860 MPa，E＝1.95×10 MPa，锚下控制应力σ＝1 116 MPa。

体外预应力T梁桥的转向块由标准横隔板加大加厚截面尺寸制成。转向块根据体外预应力转向孔的位置不同有两种：一种是设置在主梁纵向约1/4处，使体外预应力筋从该位置向上弯起的转向块A（此转向块上下厚度不等，在体外预应力筋转向的50 cm高区域内，转向块厚度为60 cm，而其他区域厚度为40 cm）；另一种是设置在梁端，使体外预应力筋从该位置向下弯起的转向块B。转向块布置及尺寸见图1。

1.1.2 *重庆绕城公路南段新滩大桥（右半幅）转向块初始方案概况* 采用C50混凝土，按设计方案要求混凝土需达到95%强度方可张拉。体外预应力束采用27－Φ15.24钢绞线，预留体外预应力钢管内径180 mm，f_{pk}＝1 860 MPa，E＝1.95×10 MPa，锚下控制应力σ＝1 116 MPa。

该体外预应力箱梁桥的转向块为设在箱梁梁体内的肋式转向块，该桥5－5、6－6截面的转向块上下厚度不等，在体外预应力筋转向的50～105 cm高区域内，转向块厚度为160 cm，而其他区域厚度为80 cm。转向块的具体布置及尺寸见图2。

1.2 转向块初始设计方案线弹性有限元分析

以有限元软件ANSYS进行仿真分析，采用8节点六面体Solid45单元对T梁和箱梁转向块进行

收稿日期：2008－04－28

基金项目：广西建筑工程检测与试验重点实验室开放基金资助项目（桂科能07109005－12）；广西教育厅科研项目（桂教科研200807LX194）

作者简介：卢春玲（1978—），女，博士研究生，讲师，研究方向：桥梁与隧道工程，E-mail：luchunling78@sohu.com。

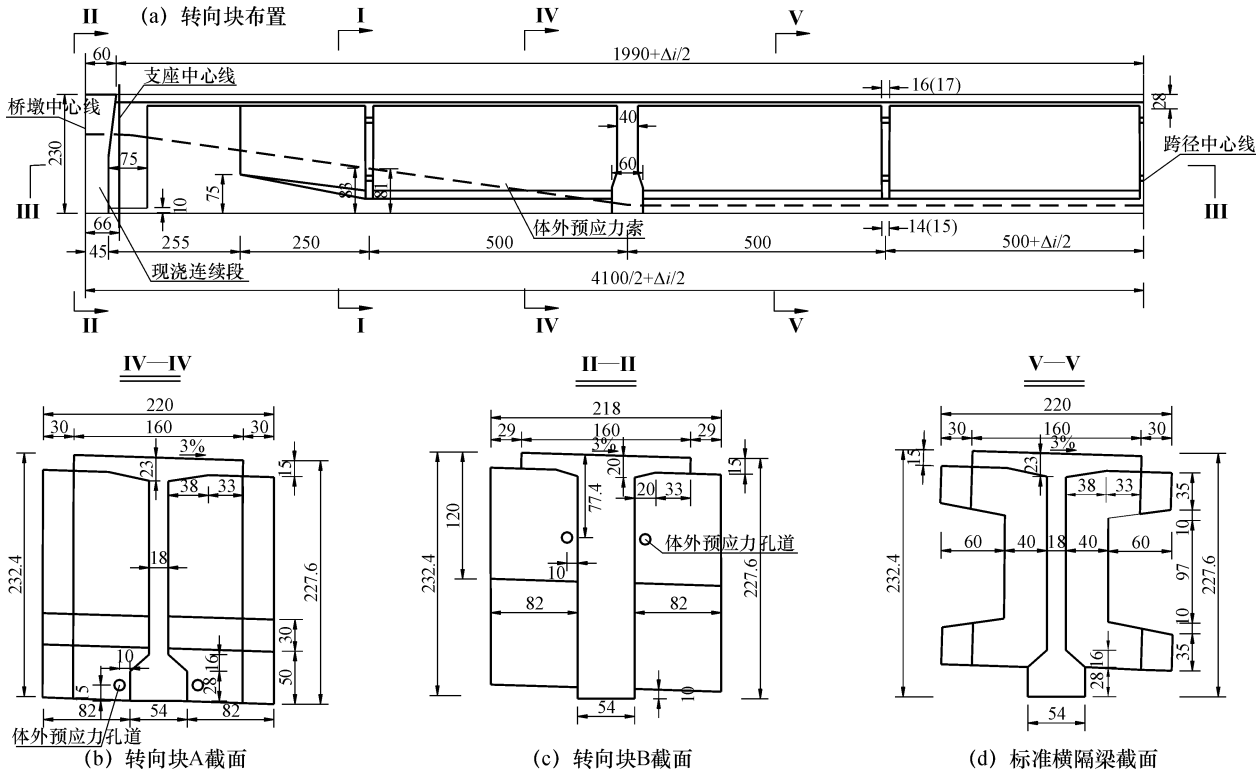


图 1 T 梁转向块的布置详图

Fig. 1 Deviators layout of T beam

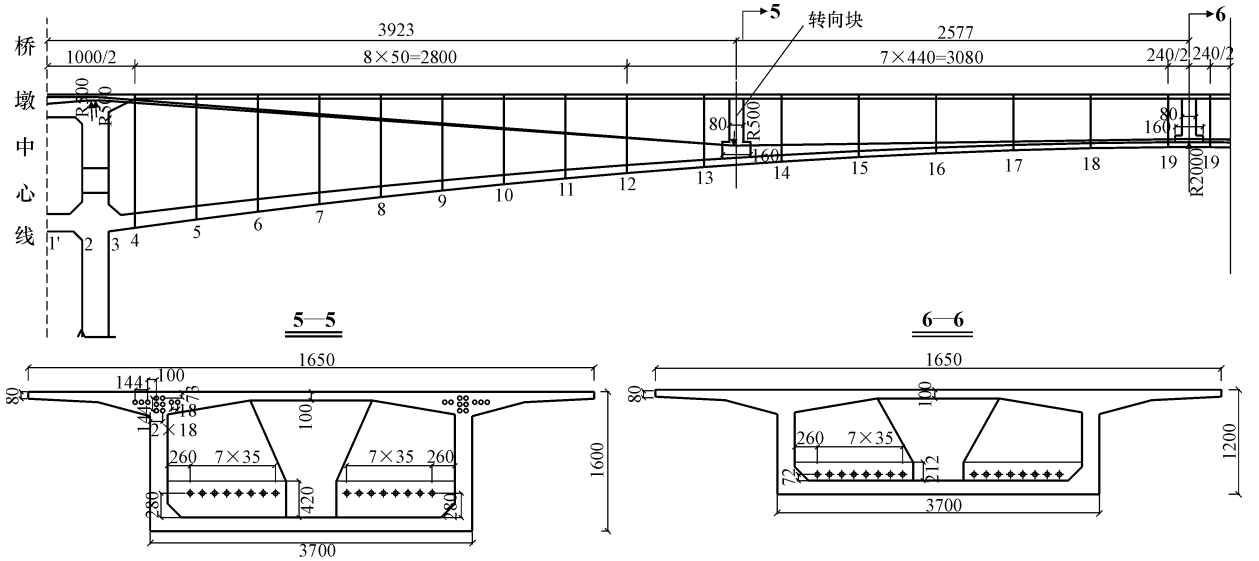


图 2 箱梁中跨转向块布置详图

Fig. 2 Deviators layout of box girder at middle span

实体建模。有限元建模时,利用对称性,横向取 T 梁和箱梁的 1/2,T 梁纵向取 3.8 m 范围,箱梁纵向取 3.2 m 范围。固定边界条件限制节点 3 个自由度,对称边界条件限制 1 个方向的自由度。混凝土弹性模量取 3.45×10^4 MPa,泊松比取 0.166 7。转向力等效简化为作用在转向孔道上的均布压力。

由于转向块中体外预应力筋的垂直分力或水平分力有使转向块从梁体拉脱的倾向,故应力分析侧重转向块区域的第一主应力。这里仅列出转向块的第一主应力云图,见图 3。

从图中可以看出 T 梁转向块 A、B 和箱梁转向块除了体外预应力孔道周围应力较大外,其余区

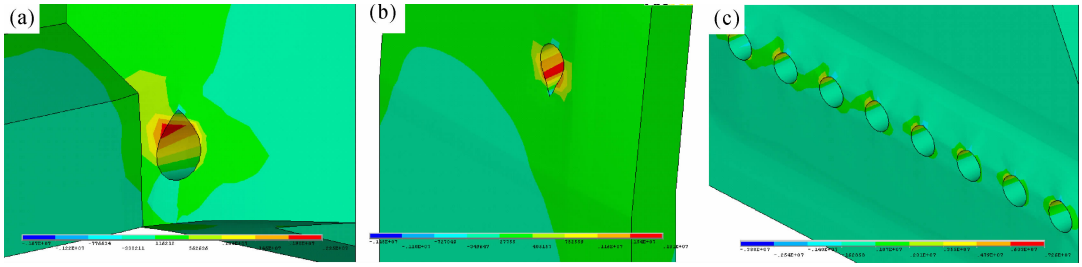


图 3　转向块 A、B(a,b)及箱梁 5 -5 截面转向块(c)第一主应力云图

Fig. 3　Major principal stress contour of Deviator A,B(a,b) and the deviator of box girder at 5 -5 section(c)

域的第一主应力都在 0.5 及 1.0 MPa 以下。T 梁转向块 A 的最大主拉应力出现在体外预应力孔道内壁上部孔道与索的接触面附近，最大值 σ_1 = 2.35 MPa；转向块 B 的最大主拉应力出现在体外预应力孔道内壁下部孔道与索的接触面附近，最大值 σ_1 = 1.91 MPa；箱梁 5 -5 截面转向块 8 个孔道内壁的 σ_1 分布情况近似，最大主拉应力出现在最靠近箱梁腹板的体外预应力孔道内壁上部孔道与索的接触面附近，最大值 σ_1 = 7.26 MPa。

从以上关于 T 梁和箱梁转向块的线弹性应力分析，可以得到以下结论：

①当仅考虑体外力筋竖弯，转向块以最大拉应力控制时，危险点在孔道内壁。危险区域为体外预应力转向孔道周围区域。

②通过应力云图可以看出，T 梁和箱梁初始方案的转向块区域的应力不是很大。故考虑转向块体外预应力孔道区域受力不利而在此区域加大转向块厚度的初始设计方案没有必要。所以，在不影响转向孔道内体外筋线型及转向设施布置的前提条件下，根据线弹性应力分析结果，拟将 T 梁和箱梁转向块下部加宽的设计方案优化为上下等厚的设计方案。将 T 梁转向块 B 的厚度减少 20 cm。

1.3　转向块优化方案线弹性有限元分析

1.3.1　*不考虑钢转向孔道的线弹性应力分析*　不考虑钢转向孔道，尺寸优化后 T 梁转向块 A、B 以及箱梁 5 -5 截面转向块的第一主应力云图如图 4 所示。从尺寸优化后转向块 A、B 以及箱梁 5 -5 截面转向块的第一主应力云图可以看出转向块区域除了体外预应力孔道周围第一主应力较初始设计方案增大外，其余区域的第一主应力分布规律和初始设计方案相同且数值也都不大，且最大主拉应力的位置不变。只是其值有所提高，分别提高为 3.65、2.67、9.63 MPa。

1.3.2　*考虑钢转向孔道的线弹性应力分析*　图 5 为考虑钢转向孔道 5 -5 截面转向块第一主应力云图。可以看出考虑钢转向孔道后，转向孔附近第一主应力值减为 3.26 MPa。第一主应力的分布规律基本和不考虑钢转向孔道时相同。

图 6 为 5 -5 截面转向块钢体外应力转向孔道内、外表面的 Mises 应力云图，可以看出：钢体外应力转向孔道内表面的 Mises 应力较外表面大很多，最大的应力分布在转向力作用的上顶面，其值分别为 26.7 MPa，远小于钢材的屈服强度。

由尺寸优化后 T 梁转向块不考虑钢转向孔道第一主应力云图可以看出：T 梁转向块孔道附近的第一主应力不太大，最大为 3.65 MPa，若考虑钢转向孔道后，T 梁转向块孔道附近的第一主应力会更小。为节省篇幅，不在本文列出。

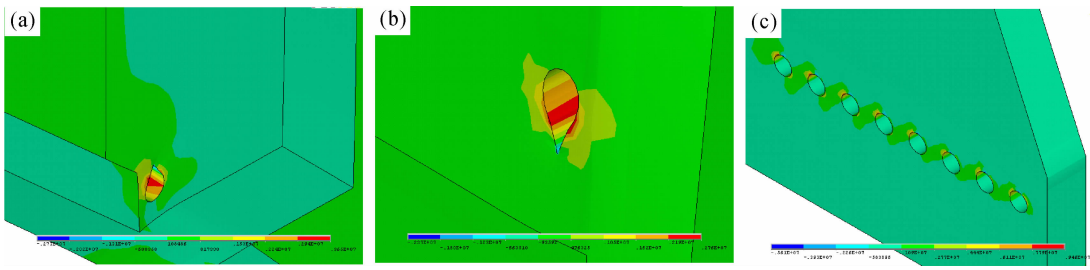


图 4　优化后转向块 A、B(a,b)及箱梁 5 -5 截面转向块(c)第一主应力云图

Fig. 4　Major principal stress contour of optimized Deviator A,B(a,b) and the deviator of box girder at 5 -5 section(c)

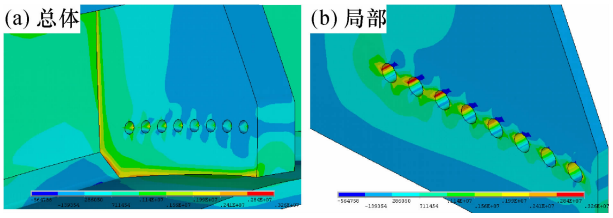


图 5 考虑钢转向孔道 5 –5 截面转向块第一主应力云图

Fig. 5 Major principal stress contour of deviator with steel tube at 5 – 5 section

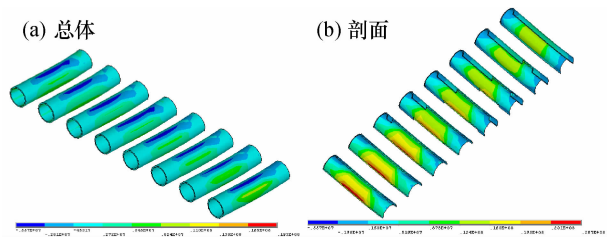


图 6 5 –5 截面转向块钢体外应力转向孔道 Mises 应力云图

Fig. 6 Mises stress contour of external prestressing steel tube of deviator at 5 – 5 section

通过以上分析，可以得到如下结论：

①在不影响转向孔道内体外筋线型及转向设施布置的前提条件下，将下部加宽的肋式和横隔板式转向块优化为等厚的转向块，第一主应力值增幅不大，但却使得转向块施工立模、钢筋布置方便，且减小了材料重量。

②钢转向孔道可以有效地减小转向孔附近的第一主应力峰值。钢转向孔道的 Mises 应力远小于钢材的屈服强度。

③只考虑体外筋竖弯情况下，转向块第一主应力分布为：体外预应力转向孔道周围应力较大，以最大拉应力控制时，危险点在孔道内壁，危险区域为体外预应力转向孔道周围及以下区。

2 体外预应力桥梁转向块配筋设计

在混凝土结构设计中，传统的截面设计法的适用条件是结构的 B 区[1]，B 区是应变分布符合伯努利平面应变线性分布假设的区域，可用常规的方法进行设计。D 区是应变分布复杂的区域，包括几何形状突变附近区域（几何形状不连续）或集中力作用附近区域（静力不连续），如牛腿、梁柱节点区、深梁、开洞梁、预应力锚固区[2]等，仍以截面为对象的设计理论显然是不合理的。而拉压杆模型是混凝土构件受扰区域（应变分布复杂的那部分区域）设计的一种基本方法[3]。拉压杆模型运用初期，主要用于钢筋混凝土深梁、牛腿和缺口梁的配筋设计。后来，拉压杆模型运用范围越来越广，用到了开洞深梁[4]、高桩承台[5]、开洞剪力墙[6]、开洞缺口梁[7]及变截面混凝土梁[8]等的配筋设计。

基于此，对于转向块来说，根据第 1 节线弹性应力分析结果，外预应力转向孔道附近应力分布较为复杂，可视为 D 区，利用拉压杆模型法进行配筋，而传统的配筋方法则不适用。

随着拉压杆理论的成熟和在结构受扰区设计的越来越多地运用，各国把它写进了规范[9-12]。本文根据文献［11］的有关规定，运用拉压杆模型对体外预应力桥梁转向块进行配筋设计。

从体外预应力箱梁桥转向块有限元主应力矢量图 7a 可以看出，转向块上部应力分布较均匀且其值较小，可视为 B 区，按构造配筋即可。体外预应力转向孔道附近应力分布较为复杂，可视为 D 区，利用拉压杆模型法进行配筋。转向块中利用拉压杆模型进行配筋的 D 区如图 7b 所示。

综合转向块 D 区的第一主应力云图和主应力矢量图可得转向块 D 区拉压杆模型如图 8a 所示。其中虚线表示压杆，实线表示拉杆，箭头表示简化的转向力 F。转向力 F 的大小为 325.3 kN。为了施工方便，实际配筋中各孔的配筋是相同的，故计算中取受力最为不利的靠近箱梁腹板的 1 孔利用拉压杆模型进行配筋设计。1 孔的拉压杆模型如图 8b 所示，α 和 β 角度分别为 50°和 30°。

根据转向块D区1孔的拉压杆模型，可以由

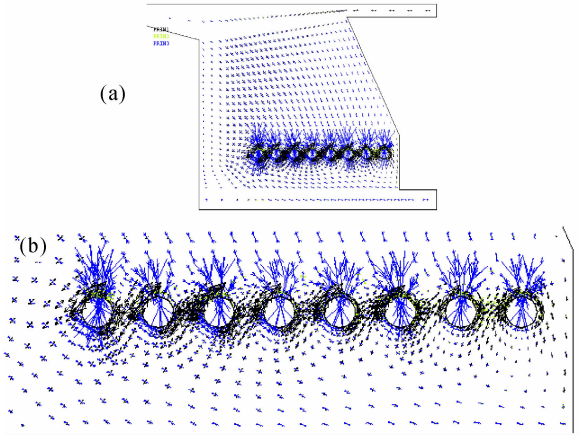


图 7 转向块主应力矢量（a）及配筋设计的 D 区（b）图

Fig. 7 Principal stress vector of deviator (a) and D reign of deviator by reinforcement design (b)

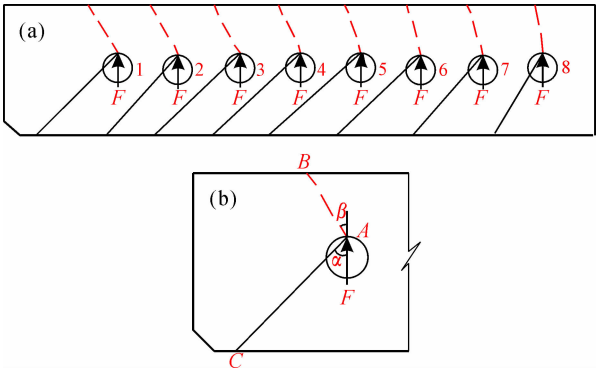


图 8　转向块 D 区的拉压杆（a）及 D 区 1 孔的拉压杆（b）模型

Fig. 8　Strut-and-tie model of D reign of deviator and strut-and-tie model of Hole 1 at D reign of deviator

平衡条件算出拉杆 AC 的内力 $F_{AC}=165.16$ kN。进而计算得到所需的竖向钢筋面积为 787 mm^2。选用 2 根直径为 18 mm 的 HRB335 环向箍筋，从转向块纵向中心线分两排对称布置，每排间隔 20 cm 布置 1 根，箍筋套住体外预应力孔道且伸至箱梁底板内。钢筋面积为 1 018 mm^2。根据规范对最小配筋率的要求和苏通大桥的经验，确定 3 个方向的分布钢筋的配筋率为 2.5%。

3　配筋后转向块的有限元分析

采取钢筋混凝土的分离式模型与整体式模型相结合的方法来建立转向块的钢筋混凝土非线性有限元模型。混凝土采用 Solid65 单元，环向箍筋采用 link8 单元。分布钢筋将其考虑为弥散在混凝土中，利用 Solid65 单元能考虑 3 种不同的钢筋，在单元实常数输入分布钢筋的方位和配筋率来考虑分布钢筋的作用。钢体外预应力转向孔采用 Solid45 单元模拟。

箱梁 5－5 截面典型构造转向块在配置了分布钢筋及环向箍筋后的第一主应力云图如图 9 所示。

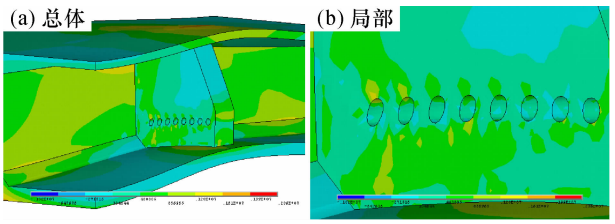


图 9　配筋后箱梁 5－5 截面转向块第一主应力云图

Fig. 9　Major principal stress contour of the reinforcement concrete deviator of box girder at 5－5 section

最大第一主应力为 2.36 MPa（从局部放大图看，最大值位置位于顶板处，并应计入）虽然略高于混凝土设计抗拉强度，但由于仅存在于受力最为不利、最靠近箱梁腹板的转向孔转向力作用处，最大值范围很小，深度很浅，即使发生细小开裂亦不会引起结构破坏。而在其他转向孔周围的第一主应力都在 1.6 MPa 以下。

图 10 所示为箱梁 5－5 截面典型构造转向块环向箍筋的轴向应力云图。可以看出：环向箍筋最大的轴向应力为 32 MPa，位于最靠近箱梁腹板的转向孔左上侧。各孔环向箍筋轴向应力分布情况大致相同，但离箱梁腹板越远，各孔箍筋两侧拉应力越小。最靠近箱梁腹板的 1 号转向孔的受力箍筋的轴向拉应力最大，其轴向应力如图 10b 所示。可以看出，1 号转向孔环向箍筋左右两侧钢筋的轴向应力均为正值，即为拉应力。左侧的钢筋拉应力较右侧钢筋大。左侧钢筋的拉应力在其上端达到各孔受力箍筋的最大拉应力值，其值为 32 MPa，远小于钢筋的屈服强度。

图 11 为钢体外应力转向孔道内表面的 Mises 应力图，可以看出：钢体外应力转向孔道内表面的 Mises 应力较外表面大很多，最大的应力和最小的应力分布在转向力作用的顶面，其值分别为 42.2 和 －10.8 MPa，均远小于钢材的屈服强度。

综上所述，考虑了分布钢筋、环向箍筋、体外预应力钢转向孔道的箱梁转向块非线性有限元应力分析表明：转向块混凝土第一主应力除在受

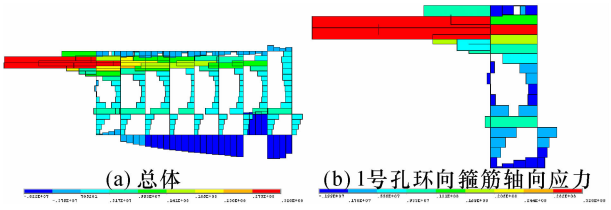


图 10　转向孔处受力环向箍筋的轴向应力图

Fig. 10　Axial stress of the circular binders at turning holes

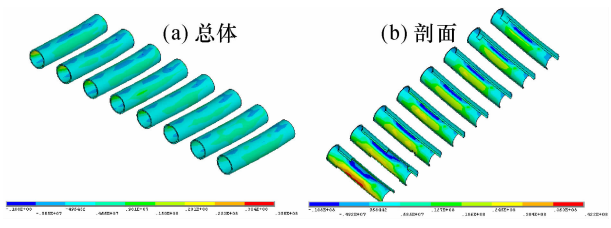


图 11　钢体外应力转向孔道 Mises 应力云图

Fig. 11　Mises stress contour of external prestressing steel tube

力最为不利的最靠近箱梁腹板的转向孔转向力作用处很小范围内拉应力超过了混凝土的抗拉强度设计值外，其余各处均不超过混凝土的抗拉强度设计值；环向箍筋和钢体外应力转向孔道的应力均远小于钢筋和钢材的屈服强度。这检验了配置体外预应力钢转向孔道、分布钢筋和环向箍筋的典型构造转向块是安全的。证明用拉压杆模型法进行转向块配筋设计是合理可行的。

4 转向块配筋设计建议

通过转向块的配筋设计，给出布置单层体外预应力转向孔道转向块的配筋设计建议：

（1）体外预应力箱梁桥多采用肋式、横隔板式转向块。转向孔的周围及下部区域的应力较大且分布较为复杂，可视此区域为 D 区，即结构受扰区，对这一区域建立拉压杆模型进行配筋设计。转向块上半部应力分布较均匀且其值较小，可视此区域为 B 区，按构造要求配筋即可。

（2）由于转向块的各孔应力分布相似，对于转向块 D 区的配筋计算，可以简化为对单个体外预应力转向孔道的配筋计算。

（3）可采用弹性应力分析和的方法快捷准确地建立转向块 D 区的配筋设计的拉压杆模型。

（4）根据转向块 D 区配筋设计的拉压杆模型中拉杆内力，可确定每个转向孔所需配置的环向箍筋数量。注意应将环向箍筋与底板中的纵向钢筋相互连接，共同工作。

（5）转向块 D 区除需配置环向箍筋外，还应根据最小配筋率的要求和工程实践经验确定转向块分布钢筋的配筋率，并在整个转向管道部分设置围住所有环向箍筋的闭口箍筋。

参考文献：

[1]李传习,卢春玲.结构受扰区的拉压杆模型设计法[J].桂林工学院学报,2007,27(2):204－207.

[2]卢春玲,王强.体外预应力桥梁锚固块构造分析及拉压杆模型法配筋研究[J].公路交通科技,2007,24(11):71－76.

[3] 张文学，马军海，陈伟. 混凝土结构非规则区 STM 设计理论 [J]. 工业建筑，2007，37 (6)：52－54.

[4] Maxwell B S，John E. Experimental evaluation of strut-and-tie modeling applied to deep beam with opening [J]. ACI Structural，2000，97 (1)：142 －148.

[5] 杨双双，周建凡，彭少民. 六桩厚承台的传力模式分析 [J]. 武汉理工大学学报，2007，27 (10)：124－126.

[6] 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 (7)：815 － 823.

[7] 黄祥海，梁书亭，朱筱俊. 预制装配式框架干式企口连接中缺口梁的受力性能分析 [J]. 工业建筑，2007，37 (10)：46－49.

[8] Tan K H. Design of non-prismatic RC beams using strut-and-tie models [J]. Journal of Advanced Concrete Technology，2004，2 (4)：249 － 450.

[9] CSA Technical Committee. CSA A23.3－94，Design of Concrete Structures [S]. Canadian Standards Association，Rexdale，Ontario，1994.

[10] AASHTO LRFD Bridge Specifications [S]. American Association of State Highway and Transportation Officials，2nd ed.，Washington DC，1996.

[11] ACI Committee 318，Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318－05) and Commentary (ACI 318R－05) [S]. American Concrete Institute，Farmington Hills，Michigan，2005.

[12] prEN 1992－1－PRIMA PARTE. Eurocode 2：Design of concrete structures-Part 1：General rules and rules for buildings [S]. Final Draft，2001.

Structure Analysis and Reinforcement Calculation of Deviator for External Prestressing Bridge

LU Chun-ling[1,2]，WANG Qiang[1]

(1. *Department of Civil Engineering*，*Guilin University of Technology*，*Guilin* 541004，*China*；
2. *College of Civil Engineering*，*Hunan University*，*Changsha* 410082，*China*)

Abstract：Affer the finite element models are established to analyze the stress of the deviator zone of the external prestressing bridge，the conformation of the deviator is given according to the finite element analysis. Based on the principal stress vector diagram and principal distribution diagram，Reign B and D of the deviator of external prestressing bridge are determined. Strut-and-tie model of Reign D of the deviator is established by "elasticity stress method". The forces of strut-and-tie are calculated through balance qualification. The areas of the reinforcement are calculated and the reinforcement locations are determined. The finite element models are used to analyze the stress of the deviator with the reinforcement. The method of reinforcement designs for the deviator of external prestressing bridge by the strut-and-tie model is practical.

Key words：external prestressing structural；deviator；design method；strut-and-tie model