第 38 卷 第 2 期
2018 年 3 月

长安大学学报(自然科学版)
Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)

Vol. 38 No. 2
Mar. 2018

文章编号:1671-8879(2018)02-0062-07

基于拉压杆模型的节段箱梁接缝边缘配筋计算方法

袁爱民,陆荣伟,徐冬辉

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘 要:为防止节段预制箱梁胶接缝边缘出现斜裂缝而引起的破坏,采用数值分析和拉压杆模型的方法开展研究,揭示此类斜裂缝的开裂机理,提出节段预制箱梁接缝边缘竖向配筋以及腹板中部水平配筋的计算方法。基于笔者以及 Turmo 等所做的试验建立节段预制箱梁纯弯段标准节段有限元模型,进行详细数值模拟分析,得到节段预制箱梁的应力场分布;以应变能最小为优化目标,对节段预制箱梁纯弯段进行拓扑优化分析,明确荷载传递路径。根据以上弹性应力分析和拓扑优化分析结果,建立节段预制箱梁纯弯段标准节段的拉压杆模型并进行验证,定量确定节段预制箱梁边缘的竖向拉力和腹板中部水平拉力的大小,提出节段预制箱梁胶接缝边缘竖向配筋以及腹板水平配筋的计算方法和公式。最后以南京长江四桥引桥标准节段箱梁为例,利用推荐的节段预制箱梁纯弯段标准节段拉压杆模型,对节段箱梁胶接缝边缘竖向配筋及腹板水平配筋进行校核,并给出相应的配筋建议。研究结果表明:利用提出的节段预制箱梁纯弯段标准节段拉压杆模型进行节段箱梁胶接缝边缘竖向配筋以及腹板水平配筋,设计更加合理且具有理论依据,进而验证了节段箱梁接缝边缘配筋计算方法的可行性。

关键词:桥梁工程;节段预制箱梁;胶接缝;拓扑优化;拉压杆模型;配筋设计

中图分类号:U448.213 **文献标志码:**A

Calculation methods for determining reinforcement requirement at edge of epoxy joints of precast segmental box girders based on STM model

YUAN Ai-min, LU Rong-wei, XU Dong-hui

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: In order to prevent the damage caused by diagonal crack near the edge of joints in segmental precast box girder, and study the cracking mechanism for a diagonal crack by means of numerical simulation analysis and strut and tie model method, a calculation method which could determine the requirement of vertical reinforcement at the edge of epoxy joint and horizontal reinforcement at the middle of the web was proposed. Based on the experimental phenomena observed during author's and Turmo's tests, a finite element model for standard segments of precast segmental box girders under pure bending was established, the numerical simulation was carried out in details, and the stress field distribution for a selected segmental box girders was obtained. In order to minimize strain energy as optimization objective, the technique using

收稿日期:2017-09-31

基金项目:江苏省交通科学研究计划项目(2013Y11)

作者简介:袁爱民(1974-),男,安徽宣城人,副教授,工学博士,E-mail:yuanam@163.com。

topological optimization was adopted to explicit the load path of the standard segments of precast segmental box girder under pure bending. Based on the results of the elastic stress analysis and topological optimization analysis mentioned above, a strut-and-tie model for the standard segments of precast segmental box girder under pure bending was established and verified, through which the magnitude of vertical tension force and horizontal web tension force were quantitatively determined, and the calculation methods and formulas were provided for determining the reinforcement requirement at edge of epoxy joints and at the middle of web of the segments. Finally, the research took a segment of the precast segmental box girder from the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge as an example utilized strut-and-tie model which recommended previously fir the standard segment was adopted to check the requirement of vertical reinforcement at edge of the joint and horizontal reinforcement in the web, some corresponding recommendations for reinforcement design was provided. The results show that using the strut-and-tie model for the standard segment to design the reinforcement requirement at the edge of joints and at the middle of web is more reasonable and have the theoretical basis, which further verifies the feasibility of the calculation methods. 8 figs, 24 refs.

Key words: bridge engineering; precast segmental box girder; epoxy joint; topology optimization; strut-and-tie model (STM); reinforcement design

0 引　言

随着节段预制箱梁在实际工程应用的飞速发展，对节段预制箱梁的研究也越来越多，其中包括节段预制施工技术、节段梁体的整体受力和局部受力分析(转向块、锚固块)、干(胶)接缝抗剪性能研究等[1-3]。节段预制箱梁与普通整体式箱梁的区别是因其由众多节段梁通过预应力筋连接而成，普通钢筋在接缝处是断开的，节段与节段之间通过环氧树脂胶黏结在一起。由于这个典型特征，当梁体受力之后，接缝位置为梁体薄弱处，是裂缝出现、接缝张开的部位。而一旦接缝张开，梁体的应力就会发生重分布[4-6]。

Turmo 等在 2006 年开展了干接缝节段 T 梁接缝传递剪力机理研究，发现在干接缝节段梁体接缝张开后，在梁体受压区下缘会产生斜向裂缝[7]。笔者在节段预制箱梁试验过程中，同样也观察到当胶接缝开裂后，接缝界面出现了向梁体加载点延伸的斜裂缝[8-12]。同时，Turmo 等在试验的基础上通过有限元模拟认为，这种裂缝是由混凝土结构自平衡所产生的剥裂力所致[13-14]。剥裂力是指混凝土在集中力作用下，周围混凝土要保持应变协调而在混凝土体内产生垂直于集中力方向的应力，该拉应力的合力就是剥裂力。为防止这种剥裂力产生裂缝引起梁体破坏，需要在节段接缝边缘布置相应的箍筋或吊筋[15-17]。

目前，国内外研究主要集中于 2 个方面：一方面是研究不同参数条件下(正应力水平大小、接缝类型、接缝构造、键齿尺寸、健齿数等)剪力键的受力性能[18-19]；另一方面是研究节段预制梁的整体受力性能[20]。而对于节段梁体胶接缝张开后，节段边缘出现的典型斜裂缝的配筋设计研究还鲜有报道。为此，本文结合笔者所做相关试验，建立试验节段箱梁有限元模型，开展主应力迹线特征分析和拓扑优化分析，揭示斜裂缝出现机理，进而建立拉压杆模型并验证，最后结合某节段预制箱梁，利用拉压杆模型逐步计算，对胶接缝边缘竖向配筋和腹板中部水平配筋进行校核，并给出设计建议。

1 节段预制箱梁有限元分析

1.1 有限元模型的建立

笔者所做试验梁跨度 5.5 m，每个节段长 50 cm，高 60 cm，上缘宽 150 cm，下缘宽 70 cm，腹板厚 8 cm[8-12]。取试验标准节段进行分析，有限元模型中钢筋混凝土采用 Solid65 实体单元模拟，泊松比取 0.2，密度取 2 600 kg/m^3，弹性模量取 32 500 N/mm^2。节段箱梁上翼缘两侧采用竖向线约束，节段两侧受压区施加水平面荷载，大小等于混凝土抗压强度设计值与受压区面积的乘积。

混凝土应力-应变本构关系取

$$\sigma_c=\sigma_0\left[2\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}-\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2\right]\quad \varepsilon_c\leqslant\varepsilon_0 \tag{1}$$

$$\sigma_c=\sigma_0\quad \varepsilon_0<\varepsilon_c\leqslant\varepsilon_{cu} \tag{2}$$

式中：σ_0 为峰值应力，取 $\sigma_0=0.85f'_c$，f'_c 为混凝土圆

柱体抗压强度；ε_0 为峰值应力对应的应变，取 0.002；σ_c 为混凝土应力；ε_c 为混凝土压应变；ε_{cu} 为混凝土极限压应变，取 0.003 5。

对于四点加载的纯弯节段箱梁，当梁体受力、接缝张开后，节段箱梁上翼缘受压，因此，在施加荷载及边界条件时，在上翼缘节段界面两侧施加对称荷载，并在两侧施加竖向约束。根据笔者试验结果，节段箱梁的受压区高度为 5～15 cm[12]，为了阐明节段箱梁的应力分布规律，取受压区高度为 10 cm。

1.2　节段箱梁应力迹线分析

经过有限元分析，得到节段箱梁的第 1 主应力、第 3 主应力云图，如图 1 所示。可以发现：接缝张开后，在节段边缘会产生较大拉应力，而在节段箱梁底部受力几乎为 0。同时，从图 1(b)还可以看出，构件受压区由加载端向节段中央逐渐向下扩散，向梁体的腹板侧凸出。

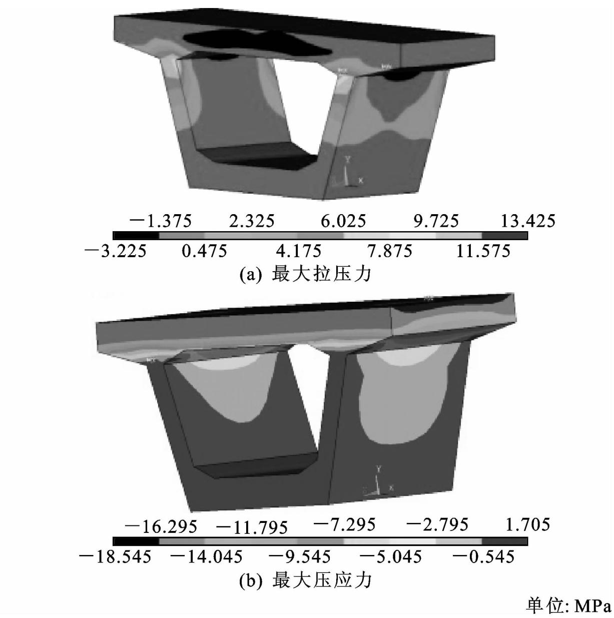

图 1　节段主应力云图

Fig. 1　Principal stress nephogram of segment

节段箱梁主压应力矢量和主拉应力矢量如图 2 所示。从图 2 可以看出：主压应力主要集中在顶板区域，并略微向下扩张；主拉应力主要出现在节段接缝边缘与受压区下缘附近。

腹板竖向正应力沿节段梁体水平方向的变化趋势如图 3 所示。图 3 中：σ 为沿腹板水平方向竖向应力；x_1、x_2 为腹板水平方向拉压应力变化节点的坐标；x 为沿腹板水平方向的坐标。

上述分析表明，节段在四点加载的情况下，纯弯节段边缘出现拉应力主要是剥裂力所致。

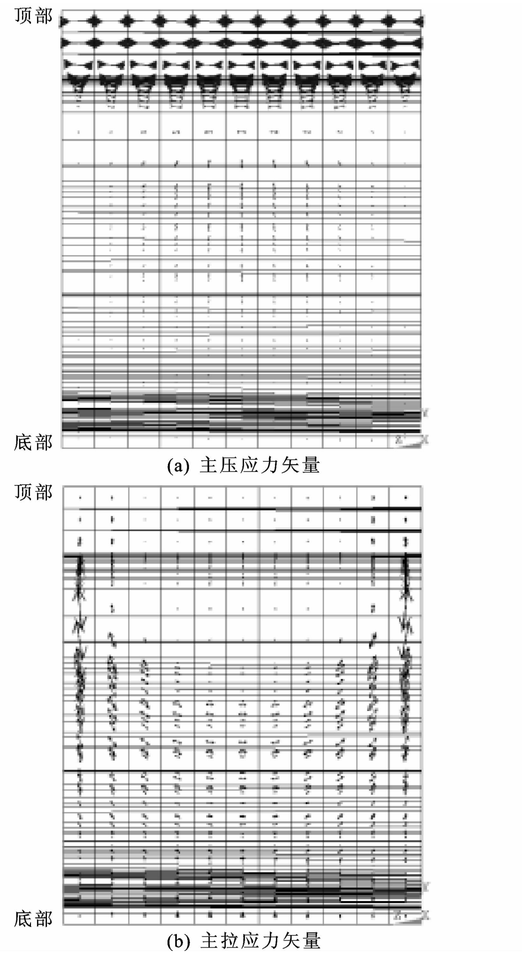

图 2　节段主应力矢量

Fig. 2　Principal stress vector of segment

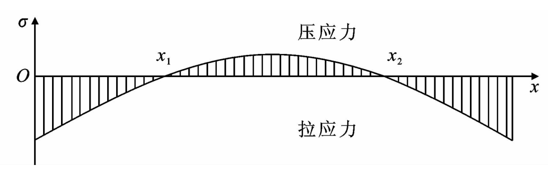

图 3　沿腹板水平方向的竖向应力

Fig. 3　Vertical stress of web along horizontal direction

1.3　节段箱梁拓扑优化分析

为了进一步明确节段箱梁的荷载传递路径，对标准节段进行拓扑优化分析。拓扑优化原理为：从连续体中不断剔除传力效率低的单元，最后生成结构的主要荷载传递骨架。拓扑优化以应变能最小为目标函数[11]，应变能计算式为

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i^2 l_i}{2E_i A_i} \tag{3}$$

式中：Π 为拉压杆模型的应变能；T_i、l_i、E_i、A_i 分别为第 i 个拉杆的内力、长度、弹性模量、面积。

当拉压杆模型拉杆的应变能最小时 $\min(\Pi)$，模型最合理。

有限元模型经过多次迭代，得到不同优化率的拓扑优化模型，结果如图 4 所示。

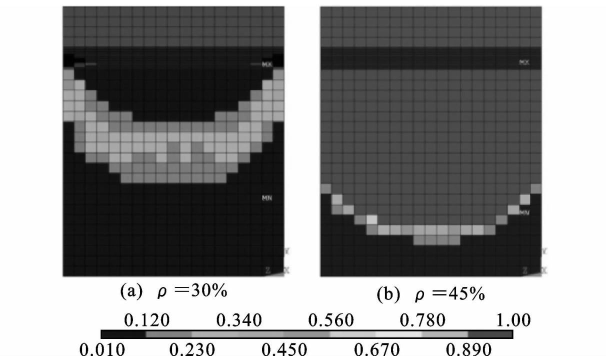

图 4　节段拓扑优化过程

Fig. 4　Optimal topology process for segment

由拓扑优化过程可知：当优化率 ρ 为 30%时最先除去的是受力最小的底部区域，说明在接缝张开后，底板混凝土受力几乎为 0；当优化率 ρ 为 45%时，可以看到接缝边缘和腹板中部区域存在明显的拉应力区域，这与应力矢量[图 2(b)]是一致的。

2　节段箱梁接缝边缘的配筋设计

2.1　接缝边缘配筋设计的拉压杆模型建立

拉压杆模型是解决复杂区域配筋计算的有力工具[21-23]。结合应力云图、应力矢量图和拓扑优化分析结果，在节段主应力矢量图受拉区配置拉杆，在受压区配置压杆，最终建立的拉压杆模型如图 5 所示。

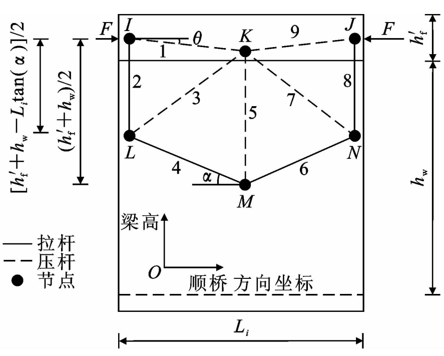

图 5　标准节段边缘配筋计算拉压杆模型

Fig. 5　Strut-and-tie model for reinforcement design on edges of standard segments

图 5 中：I、J、K、L、M、N 为单元节点编号；L_i 为计算节段的长度；h_w 为箱梁腹板高度；h_f' 为箱梁悬臂根部高度；θ、α 分别为 1# 压杆、4# 压杆与水平线的夹角。

2.2　接缝边缘配筋设计的拉压杆模型验证

Turmo 等也对试验梁进行了有限元模拟，整个梁体在弯矩作用下接缝张开后的主拉应力矢量如图 6 所示[7]。若在主拉应力较大处布置拉杆，主压应力较大处布置压杆，得到的拉压杆模型见图 6。

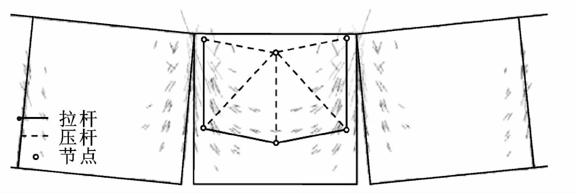

图 6　Turmo 等试验的拉应力矢量[7]

Fig. 6　Principal tensile stress vector analyzed by Turmo[7]

从图 6 可以看出：Turmo 等模拟的节段梁体在弯矩作用下接缝张开后的主拉应力矢量与本文有限元分析结果一致，建立的拉压杆模型也与本文提出的拉压杆模型一致，这进一步验证了本文所提出拉压杆模型的适用性。

2.3　节段箱梁接缝边缘的配筋设计计算方法

结合图 6，采用本文提出的拉压杆模型进行边缘配筋及箱梁腹板中部配筋设计的计算步骤如下。

步骤 1，确定 1# 压杆的方向。

取节点 I 进行内力平衡分析，有

$$\begin{cases} F=F_1\cos(\theta) \\ T_2=F_1\sin(\theta) \end{cases} \tag{4}$$

式中：F_1 为 1# 压杆的内力；T_2 为 2# 拉杆的内力；F 为节段箱梁上部混凝土受压区合力，可由节段的内力平衡条件[10]求得，即

$$A_{p,e}f_{p,e}+A_{p,i}f_{p,i}=A_p'(f_{pd}'-\sigma_{p0}')+F \tag{5}$$

式中：$A_{p,e}$为体外预应力筋的面积；$f_{p,e}$为体外预应力筋极限强度；$A_{p,i}$为体内预应力筋面积；$f_{p,i}$为体内预应力筋极限强度；A_p' 为受压区预应力筋面积；f_{pd}' 为受压区预应力筋设计强度；σ_{p0}'为受压区混凝土消压时预应力筋应力。

T_2 可由图 3 的拉应力积分得到，即

$$T_2=\int_0^{x_1}\sigma t\,\mathrm{d}x \tag{6}$$

式中：t 为杆的内力。

将式(6)代入式(4)，求得试验中 3 根梁的 1# 压杆的角度分别为 2.223°、2.051°、2.019°，平均值为 2.097°。实用计算时，建议取 2°。

步骤 2，确定 1# 压杆和 2# 拉杆的内力。

在节段箱梁的接缝处建立平衡方程，求出 F，并将 $\theta=2°$ 代入式(4)，可得 1# 压杆和 2# 拉杆的内力为

$$\begin{cases} F_1=F/\cos(\theta) \\ T_2=F\sin(\theta)/\cos(\theta) \end{cases} \tag{7}$$

步骤 3，确定节段接缝边缘的配筋。

节段箱梁边缘所需竖向钢筋面积 A_{sv} 为

$$A_{sv} \geqslant T_2/(\Phi f_y) \tag{8}$$

式中：Φ 为钢筋强度折减系数，规范[24]推荐采用 0.75；f_y 为钢筋屈服强度。

步骤 4，确定节点 M 的位置。

从图 6 可以看出，腹板主拉应力主要出现在腹板的中央部位。因此，为了计算方便，节点 M 的位置取腹板高度 h_w 的一半，即 $h_w/2$ 处。

步骤 5，确定 L 节点的位置。

L 节点位置必须根据拓扑优化的结果来确定。拉杆 i 的面积 A_i 为

$$A_i \geqslant T_i/(\Phi f_y) \tag{9}$$

式中：T_i 为拉杆 i 的内力。

将式(9)代入式(3)，可得

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i^2 l_i}{2E_i A_i} = \frac{\Phi f_y}{2E} \sum T_i L_i \tag{10}$$

令 $\eta = \tan(\alpha)$，要使式(10)最小，必须满足

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \eta} = 0 \tag{11}$$

求解(11)式，可得

$$\eta = \tan(\alpha) = \frac{h_w + h_f' - L_i \tan(2^\circ)}{2L_i} \tag{12}$$

步骤 6，确定箱梁水平方向配筋。

节段箱梁腹板水平向配筋可由 4# 拉杆的水平方向投影确定，即

$$A_{sh} \geqslant T_4 \cos(\alpha)/(\Phi f_y) = \mu T_2/(\Phi f_y) \tag{13}$$

$$\mu = \cos(\alpha) / \left[\cos(\alpha) \left(\frac{h_f' + h_w}{L_i} - \tan(\alpha) - \tan(2^\circ) \right) + \sin(\alpha) \right] \tag{14}$$

式中：A_{sh} 为箱梁水平向需配钢筋面积；μ 为系数。

3　算例分析

以南京长江四桥引桥采用的 60 m 跨的节段预制箱梁为例，对标准段接缝边缘进行分析，建立的拉压杆模型如图 7 所示。节段长度为 4 m，体内体外各 6 根预应力束，强度等级 f_{pk} 均为 1 860 MPa，体外束为 Φ15.2～Φ19，体内束为 Φ15.2～Φ15，经式(5)计算得等效节点外力 F 为 6.64×10^3 kN。

步骤 1，采用本文提出的拉压杆模型对其标准节段进行边缘竖向配筋设计，其中压杆下斜角度 θ 取 2°。

步骤 2，根据式(7)计算拉杆内力。

$$T_2 = F\sin(\theta)/\cos(\theta) = 6.64 \times 10^3 \times \sin(2^\circ)/\cos(2^\circ) = 231.87 \text{ kN}$$

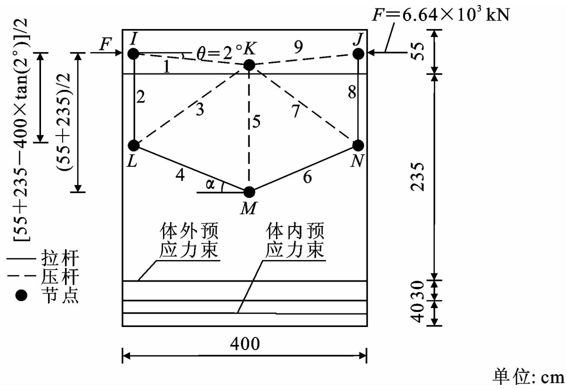

图 7　标准节段边缘配筋计算拉压杆模型(实例)

Fig. 7　Strut-and-tie model for reinforcement design on edges of standard segments (example)

步骤 3，确定节段接缝边缘配筋量。

$$A_{sv} \geqslant T_2/(\Phi f_y) = 231.87 \times 10^3/(0.75 \times 330) = 936.85 \text{ mm}^2$$

下页图 8(a)为南京长江四桥引桥标准节段接缝边缘配筋分布，如果考虑接缝边缘截面范围配筋，则接缝边缘截面配筋量为 4 根直径 Φ16 的二级钢筋(总面积为 804 mm²)，不满足受力要求，建议增加 2 根直径 Φ10 的二级钢筋(总面积为 961 mm²)，以满足受力要求，如图 8(b)所示。如果考虑接缝边缘 $h_w/5$ 截面范围配筋，节段接缝边缘斜裂缝长度接近 $h_w/5$[8-12]，查阅设计图纸，发现接缝边缘 $h_w/5$ 截面范围($h_w/5 = 47$ cm)配筋量为 12 根直径 Φ16 的二级钢筋(总面积为 2 413 mm²)，满足受力要求，无需再配钢筋。

步骤 4，确定 M 节点位置。

取节段中央与腹板高度一半的交点作为 M 节点的位置。

步骤 5，确定 L 节点位置。

将 $h_w = 235$ cm，$h_f' = 55$ cm，$L_i = 400$ cm 代入式(12)，可得

$$\eta = \tan(\alpha) = \frac{235 + 55 - 400 \times \tan 2(^\circ)}{2 \times 400} = 0.35$$

$$\alpha = \arctan(0.35) = 19.29^\circ$$

因此，L 节点的位置为沿着节段边缘，距 i 节点的距离 d_{Li} 为

$$d_{Li} = \frac{235 + 55}{2} - 200 \times \tan(\alpha) = 75 \text{ cm}$$

步骤 6，确定箱梁腹板的水平配筋。

L 节点与 M 节点的竖直距离 d_{LM} 为

$$d_{LM} = 200 \times \tan(\alpha) = 70 \text{ cm}$$

因此，需在箱梁腹板中部沿梁高方向 70 cm 范围内配置水平钢筋，且

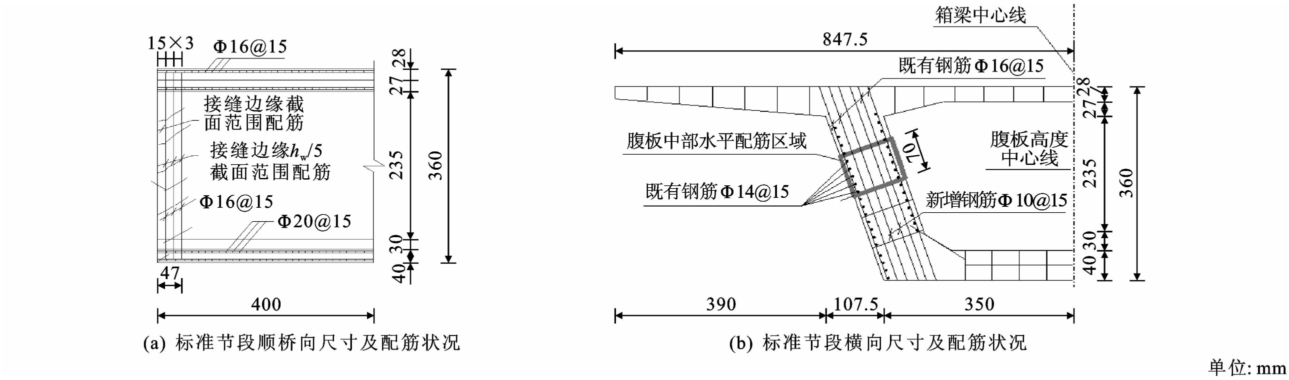

图 8　标准节段配筋

Fig. 8　Reinforcement layout of standard segment

$$\mu=\cos(19.29°)\left\{\cos(19.29°)\cdot\left[\frac{55+235}{400}-\tan(19.29°)-\tan(2°)\right]+\sin(19.29°)\right\}^{-1}=1.45$$

$$A_{sh}\geqslant 1.45\times 936.85=1\ 357.6\ \mathrm{mm}^2$$

图 8(b)中某标准节段腹板中部沿梁高方向 70 cm范围内水平配筋量为 10 根直径 Φ14 的二级钢筋(总面积 1 540 mm^2)，满足受力要求，无需再配钢筋。

4　结　语

(1) 根据剥裂力产生机理，结合笔者所做相关试验，建立有限元模型对节段箱梁纯弯段标准节段进行弹性应力分析和拓扑优化分析，建立了节段箱梁胶接缝边缘配筋及腹板水平配筋的拉压杆模型。

(2) 根据提出的标准节段拉压杆模型，建立了节段箱梁胶接缝边缘配筋以及腹板水平配筋计算方法和公式。

(3)利用建立的拉压杆模型及配筋计算方法，对南京长江四桥标准节段胶接缝边缘竖向配筋和腹板水平配筋进行了校核，验证了本文方法的可行性，为接缝边缘配筋和腹板中部水平配筋提供了理论依据，为设计提供了参考。

(4)将本文方法运用到连续梁桥或连续刚构桥负弯矩区靠近支座附近的节段预制梁边缘配筋设计中时，接缝承受弯、剪、压综合作用，比本文研究的纯弯段受力更复杂，需进一步研究。

参考文献：

References：

[1] ALGORAFI M A，ALI A A A，OTHMAN I，et al. Experimental study of externally prestressed segmental box girder under torsion[J]. Engineering Structures，2010，32(11)：3528-3538.

[2] LI Guo-ping，ZHANG Chun-lei，NIU Chang-yan. Experimental study on shear behavior in negative moment regions of segmental externally prestressed concrete continuous beams[J]. Journal of Bridge Engineering，2013，18(4)：328-338.

[3] 刘　钊，武焕陵，种艾秀，等. 南京长江第四大桥节段预制拼装箱梁足尺模型试验[J]. 桥梁建设，2011(3)：9-12，16.
LIU Zhao，WU Huan-ling，CHONG Ai-xiu，et al. Full-scale model test for precast and assembled segmental box girder of the Fourth Nanjing Changjiang River Bridge[J]. Bridge Congstruction，2011(3)：9-12，16.

[4] 陈　黎. 预制节段式混凝土桥梁干接缝抗剪性能研究[D]. 广州：广东工业大学，2013.
CHEN Li. Research on shear behavior of dry joints in precast segmental concrete bridge[D]. Guangzhou：Guangdong University of Technology，2013.

[5] 李国平. 预制节段式预应力混凝土梁接缝截面抗剪承载力计算方法[C]//中国土木工程学会. 第十一届后张预应力学术交流会论文集. 北京：中国土木工程学会，2011：128-134.
LI Guo-ping. Calculation method of shear capacity of prestressed concrete beam joint in prestressed concrete section[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of 11th Post-tension Prestressed Academic Exchange. Beijing：China Civil Engineering Society，2011：128-134.

[6] 邹琳斌，姜海波，危春根，等. 节段施工混凝土箱梁接缝抗剪性能有限元分析[J]. 工业建筑，2011，41(11)：92-95.
ZOU Lin-bin，JIANG Hai-bo，WEI Chun-gen，et al. Finite element analysis of shear behavior of joint

structure in segmental construction concrete box girder[J]. Industrial Buildings,2011,41(11):92-95.

[7] TURMO J,RAMOS G,APARICIO A C. Shear behavior of unbonded post-tensioned segmental beams with dry joint[J]. ACI Structural Journal,2006,103(3):409-416.

[8] YUAN Ai-min,DAI Hang,SUN Da-song,et al. Behaviors of segmental concrete box beams with internal tendons and external tendons under bending[J]. Engineering Structures,2013,48:623-634.

[9] YUAN Ai-min,HE Yu,DAI Hang,et al. Experimental study of precast segmental bridge box girders with external unbonded and internal bonded posttensioning under monotonic vertical loading[J]. Journal of Bridge Engineering,2015,20(4):04014075.

[10] 袁爱民,程磊科,周元华,等.节段预制 PC 箱梁弯剪变形和开裂规律试验研究[J].中国科技论文,2013,8(5):422-425.
YUAN Ai-min,CHENG Lei-ke,ZHOU Yuan-hua,et al. Experimental investigation of deformation and crack variation rules of segmental pre-stressed concrete box beams under bending and shearing[J]. China Sciencepaper,2013,8(5):422-425.

[11] 袁爱民,吴闻秀,孙大松,等.体内体外混合配束节段预制箱梁受弯性能试验[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(5):73-81.
YUAN Ai-min,WU Wen-xiu,SUN Da-song,et al. Experimental on flexural behavior of segmental precast concrete beam with internal tendons and external tendons[J]. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2015,35(5):73-81.

[12] 袁爱民,何 雨,戴 航,等.不同加载方式及配束比下节段预制箱梁受力性能试验[J].长安大学学报:自然科学版,2016,36(1):51-61.
YUAN Ai-min,HE Yu,DAI Hang,et al. Force bearing performance test of performance of the precast segmental bridge beams with different tendon ratios under different loads[J]. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2016,36(1):51-61.

[13] TURMO J,RAMOS G,APARICIO A C. FEM study on the structural behaviour of segmental concrete bridges with unbonded prestressing and dry joints: Simply supported bridges[J]. Engineering Structure,2005,27(11):1652-1661.

[14] TURMO J,RAMOS G,APRICIO A C. FEM modelling of unbonded post-tensioned segmental beams with dry joints[J]. Engineering Structure,2006,28(11):1852-1863.

[15] 李国平.节段式体外预应力混凝土桥梁的构造[C]//中国土木工程学会.第九届后张预应力学术交流会论文集.北京:中国土木工程学会,2006:78-84.
LI Guo-ping. Construction of segmental external prestressed concrete bridges[C]//China Civil Engineering Society. Proceedings of 9th Post-tension Prestressed Academic Exchange. Beijing:China Civil Engineering Society,2006:78-84.

[16] HE Zhi-qi,LIU Zhao. Optimal three-dimensional strut-and-tie models for anchorage diaphragms in externally prestressed bridges[J]. Engineering Structures,2010,32(8):2057-2064.

[17] O'CALLAGHAN M R. Tensile stresses in the end regions of pretensioned I-beams at release[D]. Austin: University of Texas at Austin 2007.

[18] ISSA M A,ABDALLA H A. Structural behavior of single key joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering,2007,12(3):315-324.

[19] JIANG H,CHEN L,MA Z J,et al. Shear behavior of dry joints with castellated keys in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering,2015,20(2):04014062.

[20] 袁爱民,何 雨,程磊科,等.节段预制桥梁胶接缝剪切性能试验研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2014,33(6):22-26.
YUAN Ai-min,HE Yu,Cheng Lei-ke,et al. Study on shear behavior of glued joint structure in segmental precast concrete beam[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University:Natural Science,2014,33(6):22-26.

[21] 郑和晖,刘 钊,贺志启.混凝土箱梁桥的横隔梁拉压杆模型及配筋设计[J].工程力学,2011,28(5):97-104.
ZHEN He-hui,LIU Zhao,HE Zhi-qi. Strut-and-tie models for diaphragms of concrete box-girder bridges and reinforcement design[J]. Engineering Mechanics,2011,28(5):97-104.

[22] 林 波,刘 钊,吕志涛.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[J].工程力学,2011,28(12):59-64.
LIN Bo,LIU Zhao,LU Zhi-tao. Strut-and-tie model and reinforcement design method for isolated rectangular anchor block for external tendons[J]. Engineering Mechanics,2011,28(12):59-64.

[23] ONG K C G,HAO J B,PARAMASIVAM P. A strut-and-tie model for ultimate loads of precast concrete joints with loop connections in tension[J]. Construction and Building Materials,2006,20(3):169-176.

[24] ACI Committee 318—08,Building code requirements for structural concrete and commentary[S].