

文章编号: 1000-4750(2011)05-0097-08

混凝土箱梁桥的横隔梁拉压杆模型及配筋设计

郑和晖, *刘 钊, 贺志启

(东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏, 南京 210096)

摘 要: 对混凝土箱梁墩顶横隔梁的拉压杆模型构形及其配筋设计方法进行了研究。首先讨论横隔梁力学边界条件的合理简化, 提出了等效计算图式。根据深梁典型拉压杆模型并结合荷载传递路径的分析, 给出了实心及开洞两种横隔梁的拉压杆模型。进一步研究揭示了该区域拉压杆模型构形有以下特点: 对于高宽比为 0.5—1.2 的双支承横隔梁, 高宽比及支承间距决定了模型中水平方向拉压杆间力臂长度及斜压杆倾角; 对于高宽比为 1.2—2 的双支承横隔梁, 模型可由双支承典型深梁及小高宽比双支承横隔梁模型组合而成, 且构形不再受支承间距的影响; 此外, 洞口大小及位置会改变荷载传递路径, 从而也影响到模型中斜压杆的倾角。以该文提出的横隔梁拉压杆模型为基础, 并结合美国 AASHTO 公路桥梁设计规范, 给出了墩顶横隔梁配筋设计方法。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: 混凝土箱梁桥; 横隔梁; 拉压杆模型; 配筋设计; 荷载路径法

中图分类号: U448.35; U442.5 **文献标识码:** A

STRUT-AND-TIE MODELS FOR DIAPHRAGMS OF CONCRETE BOX-GIRDER BRIDGES AND REINFORCEMENT DESIGN

ZHENG He-hui, *LIU Zhao, HE Zhi-qi

(Key Laboratory of RC and PC Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The strut-and-tie model (STM) approach for the reinforcement design of diaphragms in concrete box-girder bridges is studied in this paper. To begin with, an equivalent model for diaphragm is established by simplifying the boundary conditions. Based on the typical STM for a deep beam and on the load path method, the STM for a solid diaphragm and the diaphragm with opening are proposed. Further study about the STM for the diaphragms reveals that: as for the double-bearing diaphragm with depth-to-width ratios between 0.5—1.2, the lever arm between the horizontal tie and strut, the angle of inclined struts are dominated by the depth-to-width ratio and the spacing of bearings; as for the double-bearing diaphragm with the depth-to-width ratio between 1.2—2, the models can be assembled by a kind of prototype models for deep beams and diaphragm models with low depth-to-width ratios, which are no longer influenced by the spacing of bearings. Moreover, the variation of size and location of opening may disturb the load paths, and impact the inclined strut angles for the above models. Applying the proposed STM approach, the reinforcement design of diaphragms can be accomplished by virtue of the AASHTO LRFD specification. Finally, a worked example demonstrates that the proposed method can be a good practical tool.

Key words: concrete box-girder bridges; diaphragms; strut-and-tie model; reinforcement design; load path method

收稿日期: 2009-10-26; 修改日期: 2010-03-15

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)

作者简介: 郑和晖(1984—), 男, 湖北阳新人, 硕士生, 从事桥梁结构设计及理论研究(E-mail: cugseubr@yahoo.cn);

*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);

贺志启(1982—), 男, 湖南衡阳人, 博士生, 从事桥梁结构设计及理论研究(E-mail: hezhiqicleve@163.com).

在混凝土箱梁桥中，墩顶处横隔梁除能增强截面抵抗扭转与畸变的能力外，还主要担负着承受和分布支承反力的作用。实践表明，墩顶处横隔梁出现结构性裂缝的事例屡见不鲜，据文献[1]调查统计，横隔梁出现裂缝的比例高达 86%，裂缝主要孔洞上方、孔洞与腹板之间的竖向裂缝。

在现行设计中，墩顶横隔梁的配筋多根据经验或按浅梁来设计。实际上，当横隔梁高宽比大于某定值时，应视为深受弯构件，若考虑开洞的影响，则横隔梁应力分布更为复杂，传统的截面设计方法已不再适用。为此，一些学者通过弹性有限元分析和拉压杆模型对横隔梁的应力计算和配筋设计方法开展了研究。Sargious 等^[2]研究了单支承条件下横隔梁应力计算的诺模图，刘效尧等^[3]给出了双支承横隔梁在给定高宽比下的横向应力分布图，但都不能直接用于配筋设计。德国的 Schlaich、英国的 Benaim 等基于拉压杆模型法(strut-and-tie models)对该区域的配筋设计进行研究^[4-5]，探讨了横隔梁内拉压杆模型的基本构形，但都处于概念设计阶段，并未形成定量设计方法。

本文在简化墩顶横隔梁力学边界条件基础上，结合有限元应力分析，考虑高宽比、支承方式、开洞位置与大小等多种因素，系统地研究了墩顶横隔梁的拉压杆模型构形原则，并给出相应的配筋设计方法。

1 横隔梁计算图式的建立

在混凝土结构设计中，通常将结构划分为 B 区和 D 区，所谓 D 区即为截面应变呈非线性分布区域，这些部位具有几何构造上的不连续或力流受扰动的特点^[6]。墩顶横隔梁属于梁桥中的典型 D 区，拉压杆模型是解决该类区域配筋设计的有效方法。

墩顶横隔梁主要传递恒活载产生的竖向支反力，是主要受力工况，考虑到边界和荷载条件的复杂性，在简化墩顶横隔梁计算图式时，有以下几点考虑：

- 1) 分析对象为大跨单箱室混凝土直梁桥中高宽比大于 0.5 的墩顶横隔梁，这里的宽度是指横隔梁在横桥向的尺度，并不指它的厚度。
- 2) 沿纵桥向，取墩顶横隔梁节段作为纵向分析对象(图 1)，假定与之相邻梁段荷载(主要为占较大比例的恒载)以均布剪力的形式沿腹板传递至横隔梁，且均布剪力之和近似为横隔梁所受支反力。

- 3) 沿横桥向，均布剪力作用于腹板上，支座反力由墩顶横隔梁及箱梁框架共同承受，忽略箱梁翼缘伸臂部分影响，取图 1(b)所示截面作为横向分析对象。

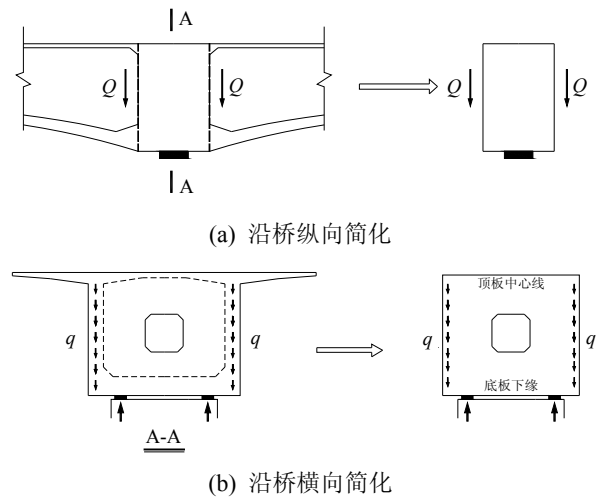


图 1 简化的墩顶横隔梁计算模型

Fig.1 Simplified calculation model for diaphragm at pier

- 4) 进一步将均布剪力作用下的横隔梁计算图式等效为集中力作用下的图式。等效的原则有两点：一是将腹板均布剪力之和等效为顶部集中力；二是基于两种荷载作用下横隔梁上部受拉区合力位置相同的原则，以折减方式得到等效计算图式中横隔梁梁高。

对于跨度和高度分别为 B 和 h 的两个横隔梁，考虑均布剪力及顶部集中力两种工况，其跨中截面横向正应力的分布以及受拉区合力位置如图 2 所示，这时，两种情况的上部受拉区合力点距横隔梁底缘分别为 h_0 和 h_1 。建立 16 个不同高宽比的开洞横隔梁，进行实体有限元分析，求得上部受拉区合力点的位置，据此拟合出 h_0/h 、 h_1/h 与高宽比 h/B 的函数关系：

$$h_0/h = 0.069\ln(h/B) + 0.8944 \quad (1)$$

$$h_1/h = 0.02(h/B) + 0.939 \quad (2)$$

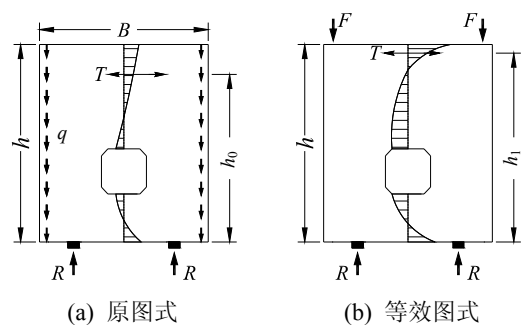


图 2 横隔梁等效计算图式

Fig.2 Equivalent calculation models for diaphragm

根据上述等效原则，图 2 中荷载对应关系为：

$$\sum q = F = R \quad (3)$$

定义 h_d 为等效后的计算梁高，将式(2)中 h 替换成 h_d ，根据 $h_0 = h_1$ 的原则，即可求确定 h_d 的大小。

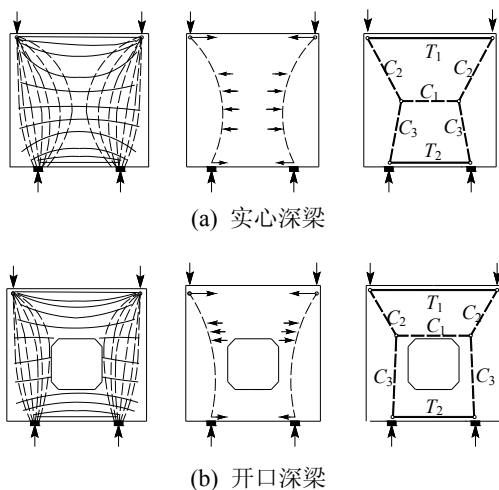
基于此，可在等效计算图式上研究墩顶横隔梁拉压杆构形。由于该等效图式与集中荷载作用下的深梁相似，因而可以借鉴既有的研究成果来指导横隔梁拉压杆模型的构形。

2 横隔梁拉压杆模型构形与参数确定

2.1 横隔梁拉压杆模型构形方法

拉压杆模型是从连续体内抽象出的离散桁架模型，由压杆、拉杆和节点组成，用以反映结构内部的传力机制。利用拉压杆模型法进行设计时，一般先根据圣维南原理将整个结构划分为 B 区和 D 区，并计算 B 区与 D 区交界面的应力分布，确定边界力大小及其作用点位置。借助于有限元分析得到的应力迹线，抽象出荷载路径，将主要拉压应力区简化为直线形的拉杆和压杆，拉压杆位置应大致与主应力方向一致^[6]。

荷载路径法是构建拉压杆模型的基本方法之一。德国学者 Schlaich J 及 Reineck K-H 等运用该方法对集中和均布荷载作用下的深梁拉压杆模型构形进行了研究^[4,7]，图 3 描述了实心及开洞深梁在集中荷载作用下的应力迹线、传力路径及拉压杆模型，可以看出，在实心深梁情况下，支点与集中力作用点之间的力流以弧形传递，两传力路径在横隔



注：实线、虚线分别为拉、压应力迹线；T、C 分别为拉、压杆。

图 3 集中荷载作用下深梁荷载路径及拉压杆模型

Fig.3 Load paths and STMs for deep beams under concentrated load

梁中部通过压杆相连，而在深梁上下缘则都形成拉杆；对于开洞深梁，原先传力路径受到扰动，支点与集中力作用点之间的弧形传力路径外移，如此则使中间水平压杆长度增大，且压杆位置上移到洞口上缘。

图 4 为两种支承方式深梁在均布荷载作用下的拉压杆模型，根据 Schlaich J 等提出的荷载扩散原则，图中斜压杆斜率均取为 1:2，内部横向拉杆或压杆长度可取 0.5 倍跨度。

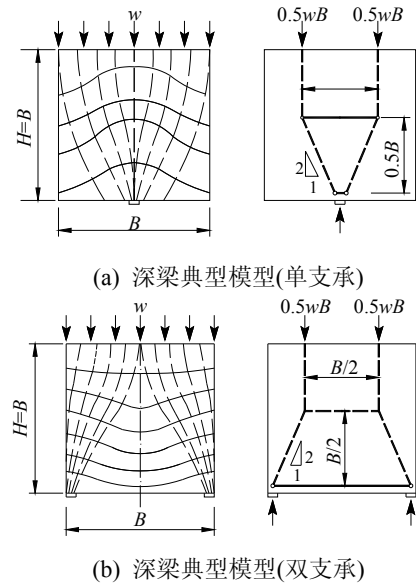


图 4 均布荷载作用下深梁拉压杆模型
Fig.4 Strut-and-tie models for deep beams under uniform load

上述拉压杆模型构形方法都是基于高宽比不大于 1 的深梁所提出的，而大跨度混凝土箱梁桥墩顶横隔梁高宽比可能大于 1，对此种情况，本文提出模型组合方法进行拉压杆模型构形，具体思路是根据圣维南原理将结构划分为上下两个典型 D 区，对应拉压杆模型可由前述几类典型深梁构形组合而成。图 5 为单支承条件下的横隔梁(其中 H 为横

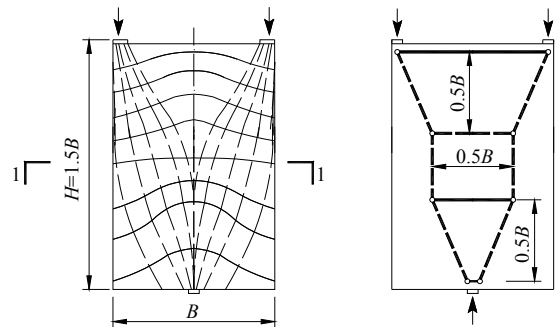


图 5 单支承横隔梁拉压杆模型($H/B=1.5$)
Fig.5 STM for Single supported diaphragm ($H/B=1.5$)

隔梁等效梁高, 与前述 h_d 意义等同, B 为横隔梁宽度), 高宽比为 1.5, 在集中荷载作用下, 截面 1-1 处应力均匀分布, 可在此处确定边界力及其作用点, 因而在该截面上下两部分可采用图 4 两类典型模型组合成统一的拉压杆模型。

2.2 模型参数确定

在前面给出的几种拉压杆模型构形的基础上, 本节进一步研究模型中参数取值。影响墩顶横隔梁拉压杆构形的主要因素有高宽比、支承方式、洞口大小与位置等^[8]。参考实际设计, 箱梁横隔梁高宽比 H/B 取值范围可为 0.5—2, 支承方式分单支承及双支承两种, 其中双支承间距 B_0 与横隔梁宽度 B 之比值范围固定为 0.5—0.9。

1) 实心横隔梁——小高宽比情况。

结合荷载路径, 给出了实心横隔梁小高宽比情况下的拉压杆模型(图 6), 从图 6 中可以看出:

① 单支承条件下, 拉压杆构形较简单, 支点与力作用点之间荷载直线传递, 斜压杆倾角也即图 6 中 ϕ_0 决定拉杆 T_1 内力。

② 双支承条件下, 横隔梁模型与图 3(a)集中荷载作用下的深梁模型相似, 为确定图 6 中水平压杆 C_1 位置及斜压杆倾角, 需首先确定图 6(b)中力臂 z 、水平压杆长度 B_{ef} 大小, 而 z 、 B_{ef} 与横隔梁高宽比、支承间距有关。

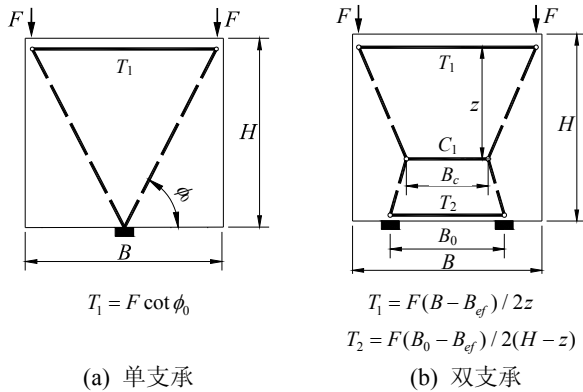
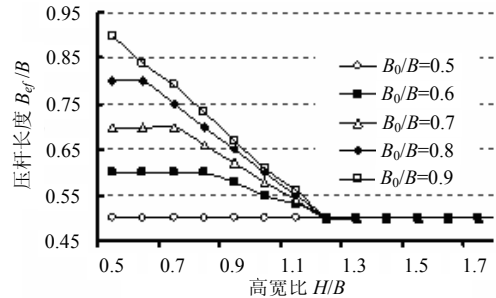


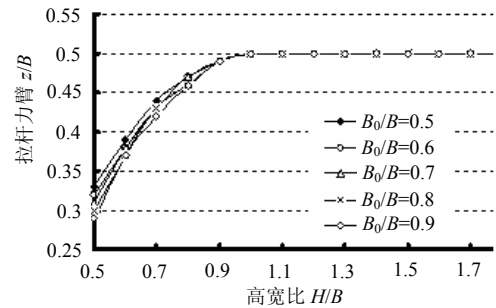
图 6 实心横隔梁拉压杆模型(0.5 ≤ H/B ≤ 1.2)
Fig.6 Strut-and-tie models for solid diaphragms (0.5 ≤ H/B ≤ 1.2)

以横隔梁高宽比及支承间距为参数对横隔梁进行弹性应力分析, 通过对应力进行积分可得模型中拉杆 T_1 、 T_2 及压杆 C_1 内力, 从而也可以得到不同高宽比、支承间距条件下 z 、 B_{ef} 的大小, 它们之间的关系见图 7。可以看出, 随着梁高变大, 水平压杆长度 B_{ef} 变小, 力臂 z 变大; 随着支承间距

变大, B_{ef} 加大, 而 z 则基本不受支承间距影响。当高宽比大于 1.2 时, B_{ef} 不受支承间距影响并稳定于 $B/2$; 当高宽比大于 1.0 时, z 变大并稳定于 $B/2$ 。根据此变化规律, 这里给出定义: 当高宽比小于 1.2 时为小高宽比横隔梁; 当高宽比大于 1.2 时为大高宽比横隔梁。



(a) 高宽比及支承间距对 B_{ef} 的影响



(b) 高宽比及支承间距对 z 的影响

图 7 模型中关键参数

Fig.7 Main parameters of models

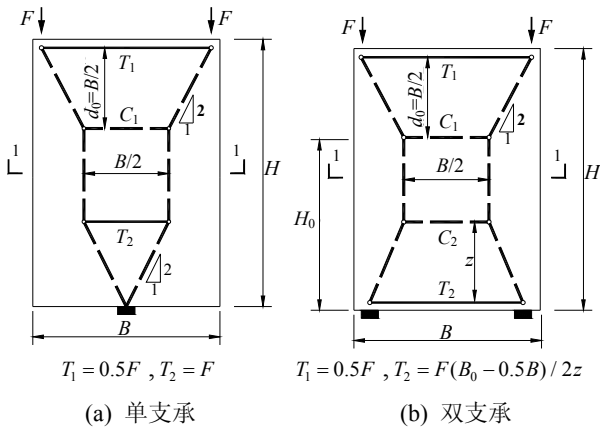
2) 实心横隔梁——大高宽比情况。

从上述变化规律可知, 对于大高宽比情况, 横隔梁上部水平拉压杆之间力臂及斜压杆倾角趋于稳定, 并与图 4(b)双支承深梁典型模型相似, 因而对应的拉压杆模型如图 8 所示。

① 单支承条件下, 横隔梁由上下两个 D 区构成, 参考图 4 深梁模型, 水平拉杆 T_2 与压杆 C_1 长度取为 $B/2$, 拉杆 T_1 与压杆 C_1 、拉杆 T_2 与底缘间距也可取为 $B/2$ 。

② 双支承条件下, 横隔梁拉压杆模型由上下两个典型深梁模型构成。与小高宽比横隔梁相比, 模型中水平压杆一分为二, 压杆长度也随之变小。根据前述典型模型, 拉杆 T_1 与压杆 C_1 间距可取为 $B/2$, 压杆 C_1 长度也可取为 $B/2$; 拉杆 T_2 与压杆 C_2 间距 z 也即图 8(b)中力臂长度, 可根据横隔梁下部梁高 H_0 确定, 具体可查图 7, 另外, 由于截面 1-1 处应力均匀分布, 对于截面号下方部分, 相当于支承间距为 $B/2$ 的小高宽比横隔梁, 因而水平压

杆 C_2 长度也可取为 $B/2$ 。



$T_1 = 0.5F, T_2 = F$ (a) 单支承
 $T_1 = 0.5F, T_2 = F(B_0 - 0.5B) / 2z$ (b) 双支承

图 8 实心横隔梁拉压杆模型 ($1.2 \leq H/B \leq 2$)
 Fig.8 Strut-and-tie models for solid diaphragms ($1.2 \leq H/B \leq 2$)

3) 开洞横隔梁。

根据洞口大小及位置，横隔梁应有不同的拉压杆模型。当洞口位于实心横隔梁拉压杆模型空白区域内时，可认为不影响原有力流传递，因而保持原有构形不变；当洞口较大或位置处于对应实心横隔梁拉压杆模型杆件上时，原有力流将受到影响，此时必须调整某些杆件的位置^[9]，图 9 为受开洞影响的横隔梁拉压杆构型，从图 9 中可以看出：

① 单支承条件下，如图 9(a)，洞口大小直接影响到斜压杆的走向，当洞口足够大时，横隔梁在洞口下方出现短拉杆 T_2 。

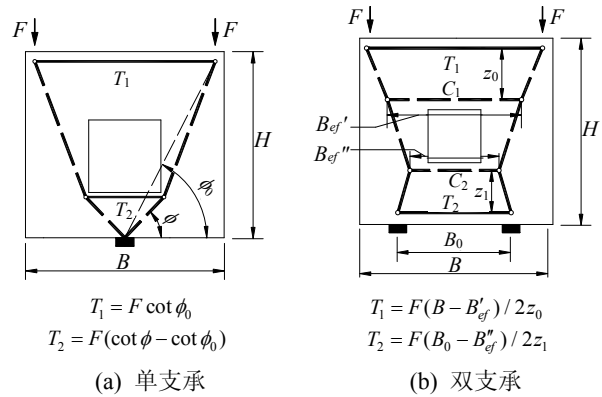
② 双支承条件下，如图 9(b)，洞口位置及大小影响图 6(b)模型中压杆 C_1 的长度及位置，当洞口正好处于压杆 C_1 所处位置时，该杆件分离为洞口上下两压杆即 C_1 与 C_2 ；同时，随着洞口变大，力作用点与支点间力流近似为直接传递，水平压杆 C_1 及 C_2 的长度变大，压杆内力随之变小。通过变化洞口大小及其位置，进行弹性应力分析，可求得横隔梁上下缘杆件内力，拟合压杆 C_1 及 C_2 的长度 B'_{ef} 、 B''_{ef} ，应满足下式：

$$\frac{B'_{ef}}{B} = 1 - \frac{z_0}{z} + \frac{z_0}{z} \cdot \frac{B_{ef}}{B} \quad (4)$$

$$\frac{B''_{ef}}{B} = \frac{B_0}{B} - \frac{B_0}{B} \cdot \frac{z_1}{H-z} + \frac{B_{ef}}{B} \cdot \frac{z_1}{H-z} \quad (5)$$

式中： z_0 、 z_1 分别为洞口上缘至横隔梁顶缘、洞口下缘至横隔梁底缘距离，且 $z_0 \leq z$ ， $z_1 \leq z$ ； z 及 B_{ef} 分别为未开洞情况力臂及横向压杆长度，这两个参数可通过图 7 求得。上下压杆长度 B'_{ef} 、 B''_{ef} 及 z_0 、 z_1 确定后，双支承条件下的开洞横隔梁拉压杆模型

随之确定。另外，当计算所得压杆 C_1 或 C_2 内力较小时，可予以删除，并通过调整其余杆件角度，重新构建简化模型。



$T_1 = F \cot \phi_0$
 $T_2 = F(\cot \phi - \cot \phi_0)$ (a) 单支承
 $T_1 = F(B - B'_{ef}) / 2z_0$
 $T_2 = F(B_0 - B''_{ef}) / 2z_1$ (b) 双支承

图 9 开洞横隔梁拉压杆模型
 Fig.9 Strut-and-tie models for diaphragms with opening

3 配筋设计方法

给定墩顶横隔梁的高宽比、支承方式及洞口大小与位置后，根据前述内容确定拉压杆模型，以此即可进行配筋设计。拉压杆模型法配筋设计步骤主要有^[6]：首先根据平衡条件确定拉压杆模型中各杆件的内力；然后根据拉杆的内力和钢筋的应力限值进行配筋设计，并满足钢筋锚固的构造要求；最后还要对压杆和节点区进行应力验算，并确定其几何尺寸。

3.1 拉杆区域的配筋

从横隔梁拉压杆模型可以看出，单支承条件下，拉杆出现在横隔梁上缘，当高宽比较大时，距离底缘 0.5 倍跨度处会出现横向拉杆，对于开洞横隔梁则在洞口下方也会出现短拉杆；双支承条件下，不同高宽比及支承间距下横隔梁上下缘都可能出现拉杆。以上区域应根据其拉杆内力进行配筋，所需配筋量计算如下：

$$A_s \geq F_t / \phi f_y \quad (6)$$

式中： A_s 为钢筋面积； F_t 为拉杆内力设计值； f_y 为钢筋屈服强度； ϕ 为强度折减系数，美国公路桥梁设计规范^[10](AASHTO LRFD)规定，对于节点及压杆， ϕ 可取 0.75；对于拉杆， ϕ 可取 0.9。

3.2 压杆区域的配筋

墩顶横隔梁受力特性类似于深梁，深梁的典型破坏形式表现为由于抗剪能力不足而出现的斜向裂缝，而模型中压杆强度往往控制其抗剪承载能力^[10]，因此横隔梁必须重视压杆强度验算及该区域

的配筋。

1) 压杆及节点强度验算。

压杆及节点强度验算首先要计算其有效抗压强度, 然后按下式验算承载能力:

$$\phi F_u = \phi f_{cu} A = \phi 0.85 \beta f'_c A \leq F \quad (7)$$

式中: 压杆、节点有效抗压强度均可表达为 $f_{cu} = 0.85 \beta f'_c$, 根据压杆或节点类型, β 有不同取值, 具体可参见 AASHT LRFD 规范; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度。

2) 压杆配筋。

考虑到压杆在轴力作用下会产生横向膨胀拉应变, 导致沿压杆轴向产生裂缝, 为此应配置能抵抗横向拉力的钢筋。美国 ACI318-08 规范规定当 f'_c 不大于 40MPa 时, 压杆的横向配筋应满足:

$$\sum \frac{A_{s_i}}{b_s s_i} \sin \alpha_i \geq 0.003 \quad (8)$$

式中: A_{s_i} 为与压杆轴线成夹角 α_i 且贯穿压杆间距为 s_i 的第 i 层钢筋的总截面面积; b_s 为支座支承宽度。

3.3 其它构造配筋

除配置以上受力钢筋外, 还应重视横隔梁其他构造配筋, 如支座区域加强钢筋用以满足局部承压要求; 人孔周边倒角钢筋可控制沿洞口周围出现的放射性裂缝; 表面钢筋可有效减少横隔梁浇筑时因混凝土水化热导致产生的微裂缝。

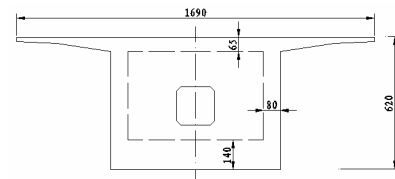
4 配筋实例

某混凝土连续箱梁桥跨径为 68m+105m+59m, 在墩顶 0 号块处设置厚度为 2.5m 的横隔梁, 截面如图 10(a)所示, 混凝土强度等级为 C55, $f_{ck} = 32.4\text{MPa}$, 采用 HRB335 钢筋, $f_y = 335\text{MPa}$ 。

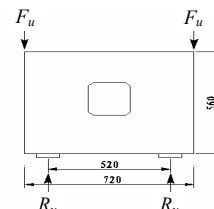
根据横隔梁计算图式的简化, 拉压杆模型法配筋采取图 10(b)所示计算截面, 计算梁宽及梁高分别为: $B = 7.2\text{m}$, $H = h_d = 5.6\text{m}$ 。由结构总体分析得到成桥荷载组合下墩顶支反力 $F = R = 12347\text{kN}$, 其中汽车荷载作用下 $R_q = 1087\text{kN}$, 考虑活载偏心作用, 参考公路桥规规定取偏载系数 1.15 进行适当放大, 即: $F_u = R_u = 1.15 \times R = 14816\text{kN}$ 。

1) 根据横隔梁拉压杆构形方法及相关参数确定如图 10 所示拉压杆模型。在 $H/B=0.78$, $B_0/B=0.72$, $Z_0/B=0.3$ 时, 查图 7, 且根据式(4)及式(5), 得 $B'_{ef} = 0.83B = 6.0\text{m}$, $B''_{ef} = 0.67B = 4.8\text{m}$ 。据此, 可得到拉压杆模型(图 11), 图中实线表示拉杆, 虚

线表示压杆, 数字是在两个单位力作用下拉杆或压杆中的内力值。



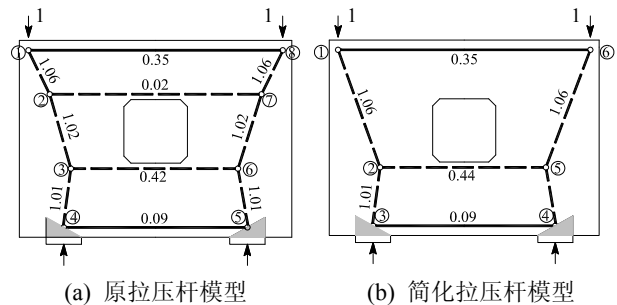
(a) 横隔梁断面



(b) 横隔梁计算截面

图 10 算例横隔梁断面 /cm

Fig.10 Section of diaphragm in design example



(a) 原拉压杆模型

(b) 简化拉压杆模型

图 11 横隔梁算例拉压杆模型

Fig.11 Strut-and-tie models for diaphragm in design example

2) 受拉区内力计算及比较。

建立全桥实体有限元, 通过应力积分求得横隔梁横向受拉区内力; 同时, 根据模型中节点力的平衡条件以及模型几何关系, 可计算得到拉杆内力, 将两者计算结果进行了比较, 结果列于表 1, 从表 1 中可以看出, 其比值分布在 1.14—1.2 范围之内, 可见, 由本文拉压杆模型给出的受拉区内力计算值与有限元分析结果之间相差不大, 且偏于安全。

表 1 受拉区内力计算结果的比较

Table 1 Comparison of forces by two methods in tension zone

区域	实体有限元 (应力积分所得内力/kN)	拉压杆模型 (杆件内力/kN)
顶部	4521	5186
底部	1102	1333

3) 节点、压杆强度验算。

对于压杆 $C_{2,3}$, 由于横隔梁内配置裂缝控制钢筋, $\beta_s = 0.75$, 压杆宽度由下式确定:

$$d_{strut} = l_b \sin \theta + w_l \cos \theta \quad (9)$$

式中: l_b 为支座宽度, 取为 1000 mm; w_l 为拉杆宽

度; θ 为斜压杆与拉杆夹角, 因而, 该压杆强度为: $\phi F_{us} = \phi f_{cu} A_s = \phi \times 0.85 \beta_s f'_c d_{strut} b = 0.48 \times 32.4 \times 1000.5 \times 2500 = 38749.5 \text{ kN}$, 大于 C_{2-3} 内力 (14964 kN)。

支座承压面需单独验算, $\phi F_{um} = \phi 0.85 \beta_n f'_c A_n = 28917 \text{ kN} \geq F_u = 14816 \text{ kN}$; 另外, 还需验算 T_{3-4} 处钢筋的锚固端面: $w_t = F_{3-4} / (\phi 0.85 \beta_n f'_c b) = 32 \text{ mm}$, 表明满足要求。

为验算模型中其它压杆强度, 这里根据杆件内力及有效强度大小推算压杆计算宽度, 从而判断其能否满足承载力要求, 依式(7)进行验算, 结果列于表 2。

表 2 算例中压杆强度验算

Table 2 Summary of strut capacity in design example

编号	压杆内力/ kN	β_s	ϕ	f'_c /MPa	b /mm	d_{strut} /mm	验算 结果
C_{1-2}	15705	0.75	0.7	32.4	2500	434.5	通过
C_{2-3}	14964	0.75	0.7	32.4	2500	414.0	通过
C_{2-5}	6519	0.75	0.7	32.4	2500	180.4	通过
C_{4-5}	14964	0.75	0.7	32.4	2500	414.0	通过
C_{5-6}	15705	0.75	0.7	32.4	2500	434.5	通过

4) 拉杆配筋设计。

由式(6)进行拉杆配筋设计。

对于 T_{3-4} , $A_s = F_t / \phi f_y = 4422.6 \text{ mm}^2$, 选配 15 根 $\phi 22$ 的 HRB335 钢筋, $A_s = 5702 \text{ mm}^2$, 并注意满足端部锚固要求 (即 $w_t = 32 \text{ mm}$)。

对于 T_{1-6} , $A_s = F_t / \phi f_y = 17199.4 \text{ mm}^2$, 选配 50 根 $\phi 22$ 的 HRB335 钢筋, $A_s = 19007 \text{ mm}^2$, 根据深受弯构件钢筋布置规定^[7], 在距上缘 0.2 倍梁高范围内布置。

5) 压杆区域配筋验算。

为控制沿压杆方向出现裂缝开展, 压杆区域配筋率应满足式(8)规定, 以压杆 C_{2-3} 及 C_{4-5} 为例, 在该区域横向及竖向都配置 $\phi 16 @ 150 \text{ mm}$ 的 HRB335 钢筋, 验算结果为:

$$\sum \frac{A_{si}}{b_s s_i} \sin \alpha_i = \frac{402 \text{ mm}^2}{1000 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}} \sin 85^\circ + \frac{402 \text{ mm}^2}{1000 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}} \sin 5^\circ = 0.00307 \geq 0.003,$$

满足要求。

6) 配筋结果。

根据以上分析, 横隔梁普通钢筋布置包括以下几个方面: 横隔梁上下缘受拉区受力钢筋, 支座与洞口间压杆加强钢筋, 支座局部承压加强筋、洞口

周边加强钢筋以及按一般钢筋混凝土构件配筋率所需构造配筋。本例配筋如图 12 所示。

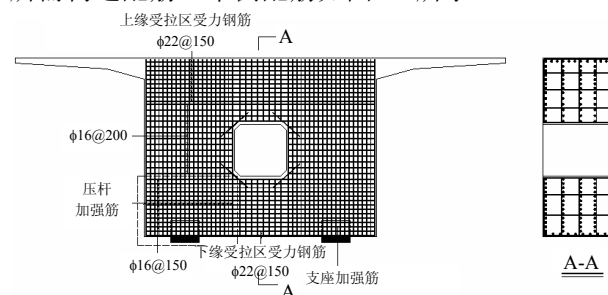


图 12 横隔梁普通钢筋布置图

Fig.12 Layout of main steel reinforcement for diaphragm

5 结论

(1) 结合混凝土箱梁的横隔梁构造, 研究了实心及开洞两类情况的拉压杆模型构形, 同时给出了基于拉压杆模型的配筋设计方法。应用该方法, 仅需给出横隔梁的高宽比、支承方式、开洞大小及位置等参数, 即可形成对应的拉压杆模型。

(2) 分析表明, 对于常见的双支承横隔梁, 当高宽比为 0.5—1.2 时, 高宽比及支承间距决定了模型中拉压杆力臂大小及斜压杆倾角; 当高宽比为 1.2—2 时, 支承间距不再影响构形, 对应横隔梁模型可由深梁基本模型组合而成; 此外, 洞口大小及位置会改变荷载传递路径, 从而影响斜压杆倾角。从配筋方面看, 上述三个参数决定了出现在横隔梁上下缘拉杆区域的配筋量; 另外, 洞口大小及位置还影响到支座及洞口周围的压杆强度, 也决定了该区域合理的配筋率。

(3) 所提出的混凝土箱梁桥横隔梁的拉压杆模型及其配筋设计方法, 主要针对竖向荷载工况, 具有良好的实用性, 可用于工程设计。

参考文献:

- [1] 王国亮, 谢峻, 傅宇方. 在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(8): 52—56.
Wang Guoliang, Xie Jun, Fu Yufang. Investigation research on crack of long-span prestressed concrete box girder bridges in service [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(8): 52—56. (in Chinese)
- [2] Sargious M A, Hawk H, Dilger W H. Box girder bridge diaphragms with openings [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1979, 105(1): 54—61.
- [3] 刘效尧, 赵立成. 梁桥(下)[M]. 北京: 人民交通出版

- 社, 2001: 417—424.
- Liu Xiaoyao, Zhao Licheng. Beam bridge (vol.2) [M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 417—424. (in Chinese)
- [4] Schlaich J, Schafer K. Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models [J]. *The Structural Engineer*, 1991, 69(6): 113—125.
- [5] Benaim R. The design of prestressed concrete bridges concepts and principles [M]. New York: Taylor & Francis e-Library, 2007.
- [6] 刘钊, 吕志涛, 惠卓. 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. Review of application and research on strut-and-tie models for concrete bridges [J]. *Engineering Sciences*, 2008, 10(10): 14—21. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] Hallak G. Optimum design of box girder diaphragms [D]. Leeds: University of Leeds, 1991.
- [9] Guan Hong, Doh Jeung-Hwan. Development of strut-and-tie models in deep beams with web openings [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2007, 10(6): 697—711.
- [10] AASHTO LRFD Bridge design specifications [S]. 4th ed. The American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.

(上接第 96 页)

- [5] Zhang Jie, Liu Haiqing. Research on closure scheme of long-span box arch bridge [C]// Radic J, Chen Baochun. Proceedings of Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Span Arch Bridges, Brijuni Islands, Croatia, 2008: 261—268.
- [6] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994. Jiang Jianjing. Nonlinear and finite element analysis of reinforced concrete structure [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1994. (in Chinese)
- [7] ANSYS 公司. ANSYS 非线性分析指南[Z]. 北京: 美国 ANSYS 公司北京分公司, 1998. ANSYS Company. Advanced analysis guide of ANSYS [Z]. Beijing: ANSYS Software(Beijing) Company Limited, 1998. (in Chinese)
- [8] 赵振铭, 陈宝春. 杆系与箱型梁桥结构受力分析及程序设计[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1997. Zhao Zhenming, Chen Baochun. Analysis and program of link and boxed girder bridge [M]. Guangzhou: South China University of Technology, 1997. (in Chinese)
- [9] 吴文清, 叶见曙, 万水, 胡成. 波形钢腹板-混凝土组合箱梁截面变形的拟平截面假定及其应用研究 [J]. *工程力学*, 2005, 22(5): 177—180, 198. Wu Wenqing, Ye Jianshu, Wan Shui, Hu Cheng. Quasi plane assumption and its application in Steel-concrete composite box girders with corrugated steel webs [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(5): 177—180, 198. (in Chinese)
- [10] Johnson R P, Cafolla J. Corrugated webs in plate girders for bridges [J]. *Structures and Buildings*, 1997, 122(2): 157—164.
- [11] 黄卿维, 陈宝春. 钢筋混凝土箱拱面内受力全过程试验研究[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(3): 394—400. Huang Qingwei, Chen Baochun. Experimental study on mechanic behaviors of reinforced concrete box arch under in-plane loads [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2009, 37(3): 394—400. (in Chinese)
- [12] 黄卿维. 钢腹板-混凝土拱面内受力性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2009. Huang Qingwei. Research on in-plane mechanical behaviors of concrete arch with steel webs [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2009. (in Chinese)
- [13] 陈宝春, 韦建刚, 林英. 管拱面内两点非对称加载试验研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(1): 43—49. Chen Baochun, Wei Jiangang, Lin Ying. Experimental study on tubular arches under unsymmetrical two concentrically in-plane loads [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(1): 43—49. (in Chinese)
- [14] 吴明东. 拱的极限荷载[J]. *重庆交通学院学报*, 1983, 2(4): 36—45. Wu Mingdong. Limit load of arches [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 1983, 2(4): 36—45. (in Chinese)