

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.08.018

# 基于拉压杆模型的梁托牛腿设计分析方法

洪浩

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

**摘要:** 借鉴国外规范,构建了梁托牛腿的拉压杆模型,对梁托牛腿进行受力分析,明确了设计过程中需重点关注验算的拉杆。通过试验验证,表明该拉压杆模型方法可以较为便捷、可靠、有效地预测梁托牛腿的极限承载力,为梁托牛腿的设计提供参考。

**关键词:** 梁托;牛腿;拉压杆模型

**中图分类号:** U443.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2022)08-0062-03

## 0 引言

在城市桥梁设计中,为尽量降低上部结构整体高度以充分利用桥下净空,常采用隐形盖梁加牛腿的结构形式,形成所谓梁托支承上部梁体。

梁托以钢筋混凝土牛腿来承受挂梁经由支座传来的巨大反力,因牛腿高度较小且根部存在截面突变,从而成为了结构受力的薄弱环节。梁托牛腿凹角处存在应力集中,截面应变不符合平截面假定,我国《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)将这类区域称为应力扰动区(D区),建议D区可按照拉压杆模型进行计算,并在附录B提供了拉压杆模型的构建方法及验算内容,但并未给出梁托牛腿的拉压杆构形。在实际工程中,梁托牛腿开裂病害时有发生,危及桥梁的耐久性和安全性<sup>[1-2]</sup>,因此有必要对其设计分析方法进行研究。

## 1 梁托牛腿受力分析方法

梁托牛腿的受力分析方法有截面分析法、实体有限元法、拉压杆模型法3种。

我国工程设计人员常采用前2种方法进行分析验算,相对而言较少采用拉压杆模型法。

### 1.1 截面分析法

《桥梁设计工程师手册》<sup>[3]</sup>详细介绍了梁托牛腿的截面分析法。这种方法实质上基于平截面假定,得到竖截面、45°斜截面和最弱斜截面上对应的内力,再分别按钢筋混凝土轴心受拉或偏心受拉构件进行

验算。45°斜截面验算假定牛腿根部沿45°斜向开裂后,全部斜拉力由钢筋承受。最弱斜截面则是假定按素混凝土截面计算时边缘拉应力最大的一个截面,验算时先求得最弱斜截面位置,再验算截面强度。

截面分析法关注的薄弱截面较易出现病害,在一定程度上反映了梁托牛腿的受力特点,为工程师们提供了一种较为熟悉的验算手段。然而这种方法在D区仍然沿用平截面假定,不能反映梁托牛腿的局部应力集中,其准确性值得探讨。

### 1.2 实体有限元法

受益于有限元计算软件的普及,工程师们也常建立实体有限元模型对梁托牛腿进行分析验算。建立以杆单元模拟钢筋、实体有限元模拟混凝土的模型需耗费大量时间精力,因此工程实践中往往忽略普通钢筋的贡献,按均质材料建立梁托牛腿实体有限元模型,再对薄弱截面的应力域进行积分得到内力,据此内力进行截面配筋<sup>[4]</sup>。

实体有限元法能反映牛腿不符合平截面假定的特征,体现局部应力集中,然而模型的精度和结果的准确性受建模人员的影响较大。工程实践中,若梁托牛腿都采用实体有限元模型进行分析,将耗费大量的资源。

### 1.3 拉压杆模型法

拉压杆模型是从混凝土结构连续体内抽象出的一种简化模型,以塑性下限定理为理论基础,能较好地反映D区的受力机理。美国AASHTO桥梁规范<sup>[5]</sup>、美国ACI 318-08规范<sup>[6]</sup>、欧洲Eurocode规范<sup>[7]</sup>均推荐采用拉压杆模型对D区进行分析设计,并被我国公路桥梁设计规范所采纳。

收稿日期: 2021-10-21

作者简介: 洪浩(1988—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

拉压杆模型以其简洁高效逐渐得到工程师们的接受和运用,然而由于我国设计规范未提供梁托牛腿的拉压杆构形,给使用拉压杆模型进行梁托牛腿的分析设计带来了不便和顾虑。本文基于拉压杆模型对梁托牛腿进行分析验算,并与试验结果进行对比,以作为类似工程设计的参考。

## 2 拉压杆模型的构建与试验验证

### 2.1 试验简介

文献[8]对1组钢筋混凝土梁托牛腿进行试验。试验梁全长3300mm,梁高600mm,梁宽250mm,两端对称设置相同构造配筋的牛腿以便对单个试件进行2次加载,牛腿高300mm。工程习惯于梁托牛腿凹角处配置斜筋,因此这里选取文献[8]中配有斜筋的试件DEB-2.1~2.6进行研究。

梁托牛腿试件配筋见图1,纵向钢筋sH、sF1端部采用焊接钢板进行锚固,试件配筋信息见表1。钢筋抗拉强度极限值 $f_u$ 见表2,DEB-2.1~2.6的混凝土圆柱体抗压强度依序为40.2MPa、33.3MPa、33.3MPa、36.9MPa、37.1MPa和38.3MPa。

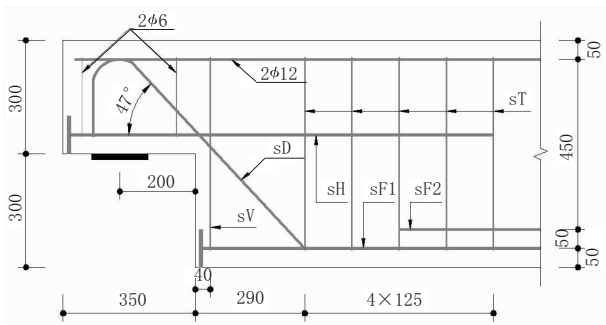


图1 梁托牛腿试件配筋图(单位:mm)

表1 试件配筋信息 单位:mm

试件编号	sH	sV	sD	sF1	sF2	sT
DEB-2.1	3φ10	3φ8	2φ10	4φ20		2φ8
DEB-2.2	4φ12	4φ10	2φ12+ 1φ10	4φ25	4φ16	4φ8
DEB-2.3	3φ12	2φ12	2φ12	4φ25		2φ8+ 2φ6
DEB-2.4	4φ10	2φ12	2φ12+ 1φ16	4φ25	4φ16	4φ8
DEB-2.5	2φ8+ 2φ6	2φ8	2φ16+ 1φ12	4φ25	4φ16	4φ8
DEB-2.6	4φ16	2φ8	2φ16+ 1φ12	4φ25	4φ16	4φ8

试验中,对两端的牛腿各加载1次,分别命名为T1、T2。其中DEB-2.3和DEB-2.6在一端加载时,另一端牛腿根部区域发生了损伤,因此这2个试件仅进行了单端加载。配有斜筋的试件破坏过程均表现为牛腿根部区域斜向裂缝的开展与钢筋sH、sV、sD

表2 钢筋抗拉强度极限值 $f_u$  单位:MPa

钢筋直径	DEB-2.1	DEB-2.2~2.3	DEB-2.4~2.6
φ6		680.1	718.2
φ8	708.9	672.1	673.5
φ10	655.0	654.3	656.2
φ12		658.5	640.1
φ16		672.8	638.3
φ20	655.5		
φ25		695.9	650.9

的屈服。

### 2.2 拉压杆模型的构建

美国ACI规范设计示例<sup>[9]</sup>提供了梁托牛腿的一种拉压杆构形,但该实例未考虑配置斜钢筋的情况。这里沿用其构形并做适当简化,阐明其构形方法,并将其应用扩展到配置斜筋的情况,以便于工程运用。

梁托牛腿拉压杆模型的构形基于以下原则:

(1)拉杆CF布置于受拉区纵向钢筋sF1的形心,压杆BE距受压区边缘0.1倍梁高,拉杆EF布置于箍筋sT的形心。

(2)拉杆AD布置于水平钢筋sH的形心,起于荷载加载中心点、止于第1根箍筋sT。

(3)拉杆BC布置于竖向钢筋sV的形心。

(4)斜钢筋sD的作用,按其在水平和垂直方向上的投影面积进行等代换算,分别计入拉杆AD、BC。

(5)根据静力平衡条件补充各节点间的压杆。

根据上述原则构建的梁托牛腿拉压杆模型见图2。图中实线为拉杆、虚线为压杆。依据拉压杆模型的内力平衡条件,可以求解杆件内力并验算杆件及节点强度,此处不赘述。

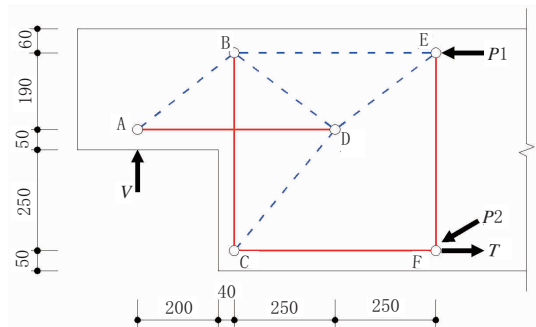


图2 梁托牛腿的拉压杆模型(单位:mm)

### 2.3 验证分析

试验及工程实例表明,妥善设计的梁托牛腿一般表现为拉杆AD、BC的受拉破坏,凹角处斜向裂缝的出现与开展亦可归因为这2根正交拉杆提供的斜向强度不足。因此,本文构建的拉压杆模型中,最为关键的杆件为拉杆AD、BC,其受到的拉力分别为:

$T_{AD}=1.263\ 16V$ ,  $T_{BC}=1.0V$ (式中: $V$ 是加载竖向力,其最大值为试件极限承载力 $V_u$ )。

以拉杆钢筋的截面积乘以钢筋抗拉强度极限值,可以得到拉杆的强度,据此可以预测试件的极限承载力。杆件强度和试件极限承载力预测值见表3。表中 $R_{sH}$ 、 $R_{sV}$ 、 $R_{sD}$ 分别为钢筋sH、sV、sD的强度; $R_{AD}$ 、 $R_{BC}$ 为拉杆AD、BC的强度; $V_c$ 为试件极限承载力预测值。几种强度之间的关系见式(1)~式(3)。

$$R_{AD} = R_{sH} + R_{sD} \cdot \cos 47^\circ \quad (1)$$

$$R_{BC} = R_{sV} + R_{sD} \cdot \sin 47^\circ \quad (2)$$

试件极限承载力预测值为:

$$V_c = \min(R_{AD} / 1.263\ 16, R_{BC}) \quad (3)$$

表3 杆件强度与试件极限承载力预测值 单位:kN

试件编号	$R_{sH}$	$R_{sV}$	$R_{sD}$	$R_{AD}$	$R_{BC}$	$V_c$
DEB-2.1	154.6	107.0	102.8	224.7	182.3	177.9
DEB-2.2	297.6	205.5	200.5	434.4	352.1	343.9
DEB-2.3	223.2	148.8	148.8	324.7	257.7	257.1
DEB-2.4	206.0	144.7	273.0	392.2	344.3	310.5
DEB-2.5	108.2	68.0	328.9	332.6	308.6	263.3
DEB-2.6	513.2	68.0	328.9	737.5	308.6	308.6

为验证本文拉压杆模型方法的有效性,将试件极限承载力预测值与试验值进行对比,结果见表4。由表4可见,本文极限承载力预测值与试验值较接近,具有较好的精度。

表4 试件极限承载力预测值与试验值对比

试件编号	试验值 $V_u$ /kN	预测值 $V_c$ /kN	$V_c / V_u$
DEB-2.1(T1)	194.9	177.9	0.913
DEB-2.1(T2)	199.6	177.9	0.891
DEB-2.2(T1)	321.8	343.9	1.069
DEB-2.2(T2)	329.8	343.9	1.043
DEB-2.3(T1)	240.5	257.1	1.069
DEB-2.4(T1)	311.9	310.5	0.995
DEB-2.4(T2)	309.4	310.5	1.004
DEB-2.5(T1)	265.1	263.3	0.993
DEB-2.5(T2)	294.9	263.3	0.893
DEB-2.6(T1)	328.1	308.6	0.941
	平均值		0.981
	标准差		0.065
	变异系数		0.066

我国公路桥梁设计规范中,拉杆强度验算时采用普通钢筋抗拉强度设计值,而非本文预测时采用的抗拉强度极限值,因此本文提供的拉压杆模型分析方法能满足工程设计的精度要求,并给出了偏于安全的下限承载力预测。

### 3 结语

(1)以受力机理明确的拉压杆模型为基础,借鉴国外规范拉压杆构形,对梁托牛腿进行了受力分析,明确了设计过程中需重点关注验算的拉杆。

(2)本文拉压杆模型方法可以较为便捷、可靠、有效地预测梁托牛腿的极限承载力,为梁托牛腿的设计提供了参考,具有一定的理论意义和实用价值。

(3)拉压杆模型本质上是一种满足塑性下限定理的承载能力极限状态设计方法,不能直接用于正常使用极限状态的验算,目前仅能通过规定构形原则、进行材料强度折减、限定最小配筋率等方式,来隐含对裂缝控制等的要求。实际上,如何将拉压杆模型直接用于正常使用极限状态的验算,仍是困扰国际学界的难题,亟待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 蒲黔辉,勾红叶,张君华.城市立交桥牛腿开裂及加固的模型试验[J].西南交通大学学报,2008,43(5):648-653.
- [2] 罗伟斌,蒙方成,叶丙波.箱型桥梁牛腿结构分析及裂缝产生机理研究[J].西部交通科技,2014(6):49-53.
- [3] 上海市政工程设计研究总院.桥梁设计工程师手册[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [4] 赏锦国,戴公连.箱梁牛腿横向应力分布规律及有效宽度计算[J].中外公路,2002,22(3):59-62.
- [5] AASHTO LRFD, Bridge design specifications (8th edition) [S].
- [6] ACI 318-08, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary[S].
- [7] BS EN1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings[S].
- [8] MATA-FALCON J, PALLARES L, MIGUEL P F. Proposal and experimental validation of simplified strut-and-tie models on dapped-end beams[J]. Engineering Structures, 2019, 183: 594-609.
- [9] ACI SP-208-2003, Examples for the design of structural concrete with strut-and-tie models[S].