

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.007

花瓶墩受力实用分析方法对比

苗通¹, 戴杰²

(1. 广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510010; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为深入研究花瓶墩实用设计方法, 分别采用撑杆-系杆体系法、拉-压杆模型法对某实体花瓶墩进行了受力分析, 并结合线弹性有限元法对比2种方法的计算结果; 在此基础上, 对花瓶进行了墩配筋设计, 并采用弹塑性有限元法验证了配筋设计的合理性。研究表明: 简化计算方法与有限元模型所得结果相比均偏安全, 2012规范中的拉-压杆模型方法所得结果与有限元结果的差值最小, 在进行初步设计及配筋时, 可作为简化计算依据。

关键词: 桥梁工程; 花瓶墩; 拉-压杆模型; 撑杆-系杆体系; 应力迹线

中图分类号: U443.22

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)05-0042-06

Stress Calculation Methods of Vase Pier

MIAO Tong¹, DAI Jie²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: In order to deeply analyze the practical design method of the vase pier, the stress analysis of a solid vase pier was carried out by using the brace-tie system method and strut-and-tie model, and the calculation results were compared with the linear elastic finite element method. On this basis, the reinforcement design for the vase pier was conducted, and the elastoplastic finite element method was used to verify the rationality of the reinforcement design. The research results indicate that the results obtained from the simplified calculation method are safer than the one from the finite element model results. The result gained from strut-and-tie model method in 2012 standard has the minimum difference with that of finite element method. It can be used as a simplified calculation basis when preliminary design the reinforcement.

Keywords: bridge engineering; vase pier; strut-and-tie models; bracing-tie system; stress trace

随着中国城市交通量的日益增加, 高架桥和跨线桥也日趋增多。在城市桥梁设计与建造中对桥梁景观的要求也越来越高。城市高架桥、跨线桥的墩台设计已由传统的重力式桥墩, 向纤细、美观的轻型桥墩发展, 越来越多形态各异、造型美观的异形桥墩应运而生。花瓶墩因其占地空间小、造型美观、线形流畅, 且便于支座更换, 目前在城市桥梁中得到了广泛的应用。但由于这种桥墩的支座边缘已超过底宽, 与普通桥墩相比受力较复杂, 如何准确把握花瓶墩的受力特点, 并进行相应的计算分析, 成为设计计算中的难点。

目前, 对于花瓶墩的受力计算分析, 主要有撑杆-系杆体系法、拉-压杆模型法、实体有限元法等,

国内外学者也针对该问题进行了大量研究。王志兵^[1]提出了墩顶带拉杆的Y形墩模型, 并给出了墩顶拉力的简化计算公式。蔡纪锋^[2]针对板式花瓶墩的横向受力进行了分析计算, 探讨了模型的简化方法, 并提出了墩顶横向配筋的设计方法。张勇^[3]采用荷载传力路径的方法建立了拉-压杆模型, 提出了适用于薄壁花瓶墩的计算公式, 并分析了设计参数的变化对薄壁花瓶墩受力影响的变化规律。郑楷柱^[4]以花瓶墩有限元分析所得应力流为基础建立带参数的宏观拉压杆模型, 结合最小余能原理确定拉压杆模型未知参数, 并根据力的平衡条件计算出模型各杆件的内力。邓勇诚^[5]在分析花瓶薄壁墩出现开裂的成因, 并对其设计验算和分析的基础上, 提出

并实施了对花瓶墩增大截面和施加预应力的加固。谭平荣等^[6]对花瓶墩的进行了实体计算分析,对比了不同挖槽形式下花瓶墩的受力特性,验证了规范中的简化模型适用性。丁印成等^[7]研究了撑杆-系杆体系、牛腿模型以及弹性应力配筋法在花瓶墩受力计算中的适用性,并分别运用有限元法和弹性应力法进行数值模拟和配筋。张帅锋^[8]对比分析了花瓶墩受力计算中的拉-压杆模型法与有限元法的结果,指出拉-压杆模型的计算结果可满足工程应用的精度。王鑫等^[9]采用有限法对花瓶墩进行了受力分析,分别根据所得弯矩、应力进行了配筋验算,并对这 2 种方法的结果进行了比较。潘一平等^[10]按照杆件中心与应力迹线重合的准则构建了花瓶墩的拉-压杆模型,进而得出花瓶墩墩顶拉力的简易计算方法。陈可^[11]通过对公铁合建双层桥墩的有限元模拟计算分析,指出公路花瓶墩顶部需配置钢筋来抵抗较大横向拉应力。郝芳敏^[12]探讨了拉-压杆模型在桥梁墩系统中的应用范围。许有胜^[13]采用偏心受拉法、拉区应力面积法和拉压杆模型法这 3 种方法对钢筋混凝土花瓶墩极限承载力进行详细分析与对比,指出拉压杆模型法和偏心受拉法计算均可用于花瓶墩承载力分析,而拉区应力法的计算结果偏保守。张杰^[14]在考虑 4 种不利工况下不同传力路径应力分布状况的基础上,研究了非对称上部结构架设的全过程中,花瓶墩的空间受力状态;李新平等^[15]根据有限元法所得应力迹线建立了薄壁花瓶墩的拉-压杆模型,并根据花瓶墩的几何形状,推导出了适用于薄壁花瓶墩的拉力计算实用公式。

上述研究缺乏对花瓶墩计算方法的系统梳理,也未明确界定各种方法的优劣或适用范围,基于此,本文针对花瓶墩的结构特点,结合拉-压杆模型和有限元模型,分析花瓶墩的受力特性,对比分析撑杆-系杆体系法、拉-压杆模型法及线性与非线性有限元法在花瓶墩受力分析中的适用性,以期为此种桥墩的设计计算提供参考。

1 实用分析方法

1.1 拉-压杆模型法

拉-压杆模型起源于桁架模型,是用于混凝土结构设计的一种有效方法。其基本原理为:按照混凝土结构或局部区域是否符合平截面假定,将其分为 B 区(符合平截面假定)和 D 区(不符合平截面假定)B 区的应力可采用常规方法进行计算,而 D 区的截面应力分布具有明显的非线性特征,因此,将该区

域按照应力迹线的走向离散为拉杆和压杆来简化其受力,通过构件内部的力流来表示构件的传力机理。该理论不仅可以解释结构的各个必要方面,还为混凝土结构的设计提供了有效的工具^[16-21]。当在花瓶墩墩顶横桥向按一定间距设置双支座时,墩顶至圆弧过渡段区域受力特征属于混凝土 D 区,因此可采用拉-压杆模型法对花瓶墩进行受力分析。构建拉-压杆模型的方法主要有:应力迹线法、荷载路径法、拓扑优化法等^[22-29]。

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[30](JTG D62—2012)(征求意见稿)(简称 2012 规范)中对上述方法进行了总结,并在 8.2.1 中将独柱式花瓶形墩台按拉-压杆模型进行设计,其受力图示如图 1 所示。其中: h 为盖梁高度; e 为拉杆长度; b 为盖梁宽度; b' 为桥墩宽度; N 为竖向荷载; θ 为拉杆压力线与压杆压力线的夹角。

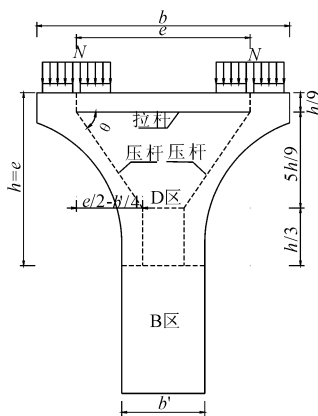


图 1 新规范中花瓶墩拉-压杆模型计算图示

则拉杆的水平拉力 T_d 为

$$T_d = 0.44N(2 - b'/e) \quad (1)$$

压杆的压力 P 为

$$P = \sqrt{T_d^2 + N^2} \quad (2)$$

而后,可据此对花瓶墩进行配筋设计与验算。

1.2 撑杆-系杆体系法

撑杆-系杆体系法为参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[31](JTG D62—2004)(简称 04 规范)8.5.3 中桩基承台承载力计算方法所得。对于以桥轴线横向为轴对称的花瓶墩,在对称荷载作用下,其受力图示如图 2 所示。其中: h_0 为计算高度; $a = 0.15h_0$,为撑杆压力线在 D 区地面作用点至墩边缘的距离; x 为支反力作用点至墩 B 区侧边缘的距离。

根据力的平衡条件,由图 2 中的几何关系可知

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_0}{x+a}\right) \quad (3)$$

拉杆的水平拉力 T_d 为

$$T_d = \frac{N(x+a)}{h_0} \quad (4)$$

撑杆的压力 P 为

$$P = \frac{N}{\sin\theta} = \frac{N\sqrt{h_0^2 + (x+a)^2}}{h_0} \quad (5)$$

其后续配筋设计、验算及结构尺寸调整等步骤均与拉-压杆模型相同。

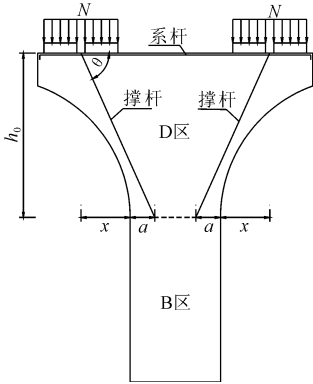


图2 撑杆-系杆体系计算图示

2 实例分析

2.1 工程概况

西安北至机场城际轨道项目摆旗寨站—艺术中心站高架区间桥梁以 25 m、26 m、30 m 跨径的预制简支小箱梁为主。根据线路平纵断面布置,其标准段桥墩采用矩形花瓶墩,其中,A类桥墩墩高 $H \leq 12$ m,墩身截面尺寸 2.2 m × 2.0 m,墩顶截面尺寸 6.7 m × 2.0 m、7.1 m × 2.0 m、7.5 m × 2.0 m,选取 7.1 m × 2.0 m 墩顶,如图 3 所示。本文选取墩高 8 m 的花瓶墩,分别采用拉-压杆模型法、撑杆-系杆体系法、实体有限元法对其进行受力分析,以对比分析各种方法的精度及适用范围。

2.2 有限元模型

采用 ANSYS 17.0 建立的花瓶墩实体有限元模型见图 4。采用 Solid 45 模拟混凝土,不考虑普通钢筋的作用,将混凝土单元内部应力进行积分,认为其内部所承担应力应由钢筋承担。计算得到相应钢筋应力;混凝土弹性模量为 3.4×10^4 MPa,泊松比为 0.2。边界条件为墩底固结。在该桥整体有限元模型中将桥梁上部结构恒载与车辆荷载共同作用所产生的支反力 9 000 kN 以竖向面荷载的形式施加于墩顶支座垫石处。

2.3 有限元计算结果

弹性模型下,有限元模型中内力沿高度方向的分布如图 5 所示。

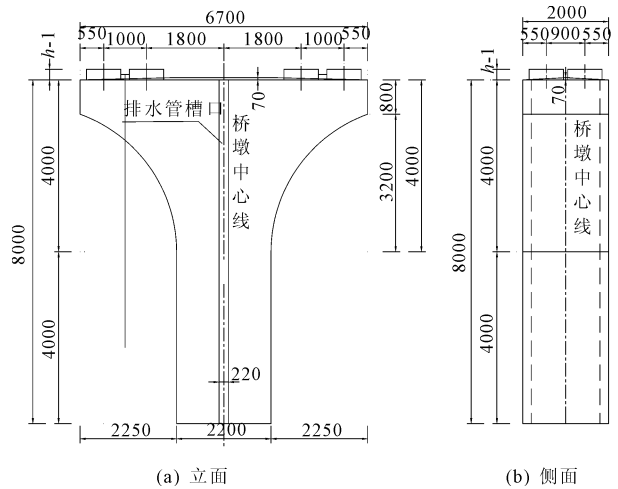


图3 花瓶墩布置形式(单位:mm)

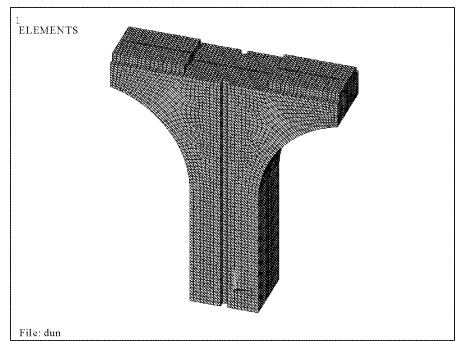


图4 花瓶墩有限元模型

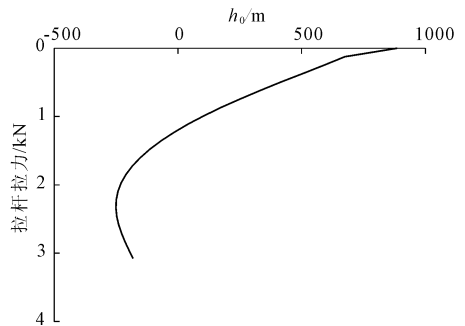


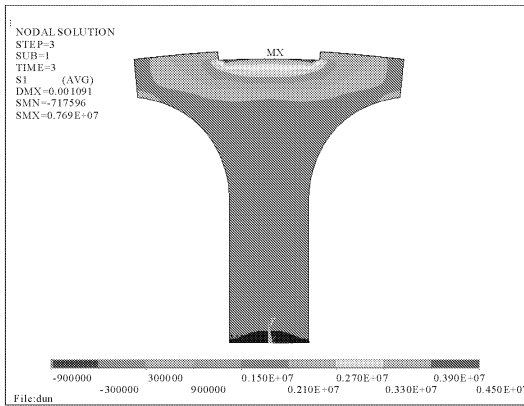
图5 内力沿高度方向的分布

线性弹性情况下,花瓶墩有限元计算结果如图 6 所示,由图 6 可知混凝土名义最大主拉力为 7.7 MPa、主压应力均为 4.9 MPa,最大主拉应力位于墩顶凹槽处,最大主压应力位于圆弧过渡处。

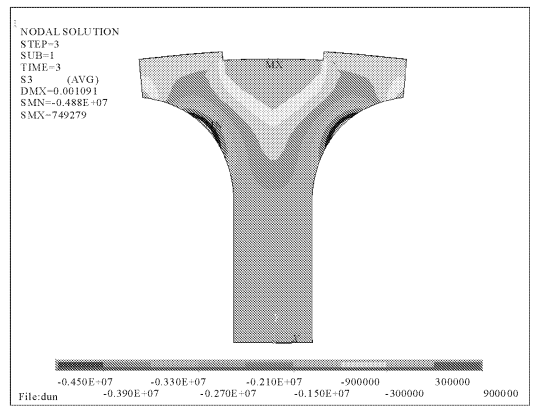
采用弹性有限元模型中的内力积分值,得到混凝土顶部最大内力值,计算钢筋应力为 144.1 MPa。根据上述计算结果对花瓶墩进行配筋,配置 45 根直径为 28 mm 的 HRB400 主拉钢筋,主筋沿竖向布置 3

根,横向间距为 100 mm。考虑模型进行荷载下钢筋未进入塑性,钢筋弹性模量为 2.0×10^5 MPa,泊松比

为 0.3,钢筋布置见图 7。

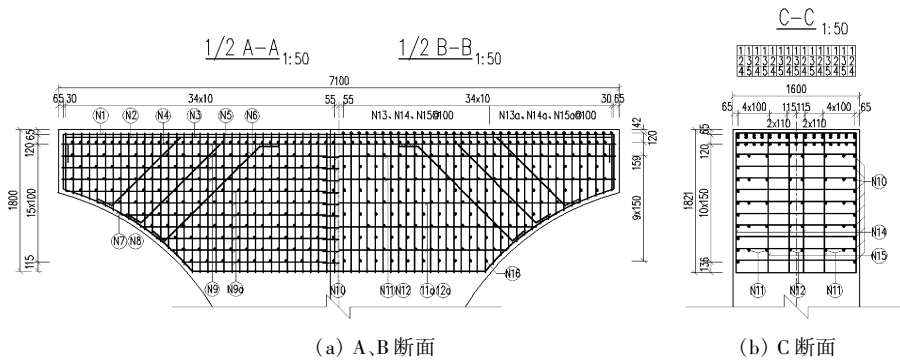


(a) 主拉应力



(b) 主压应力

图 6 线弹性情况下花瓶墩混凝土主应力 (MPa)



(a) A、B 断面

(b) C 断面

图 7 钢筋布置

根据上述配筋情况,进行弹塑性有限元分析,即在有限元模型中加入钢筋,并计入混凝土开裂行为及其开裂后应力的重分布,在材料进入极限状态后考虑其非线性行为,即混凝土单元中心与钢筋节点位移始终保持一致。其中混凝土部分采用 Solid 65 单元模拟,采用 Link 8 单元模拟钢筋,钢筋单元与混凝土间采用约束平衡方程进行耦合,如图 8 所示。根据铁路桥梁规范选取 C40 混凝土开裂应力为 2.7 MPa。其中混凝土开裂后,张开裂缝的剪力传递系数为 0.5,闭合裂缝的剪力传递系数为 0.95。由于本模型计算为正常使用阶段,不存在材料进入极限使用状态,因此不进行压碎计算。钢筋亦采用弹性模型,弹性模量为 2.0×10^5 MPa,泊松比为 0.3。

承担,钢筋最大拉应力达到了 120 MPa。

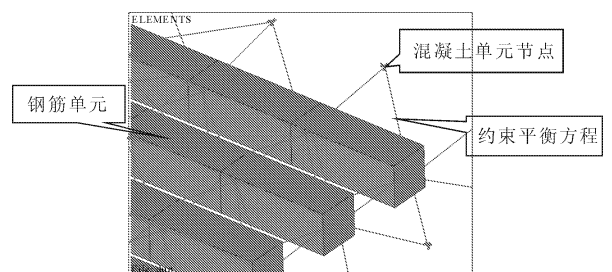


图 8 钢筋与混凝土的连接

配置钢筋后,且在弹塑性情况下,当荷载达到最大荷载 9 000 kN 的 50%时,混凝土发生开裂,且裂缝随着荷载的增加持续增加。

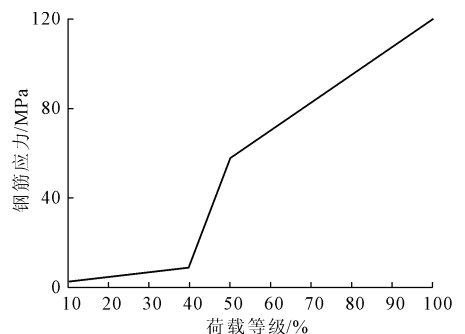
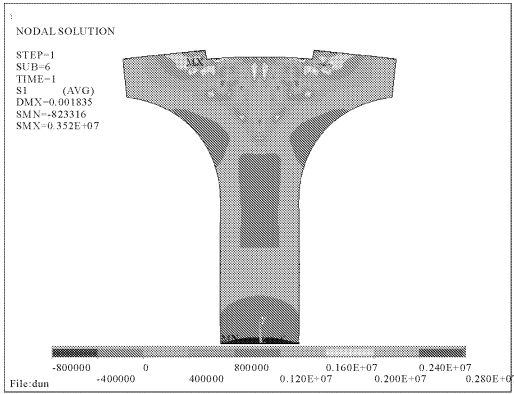


图 9 钢筋应力随荷载的变化

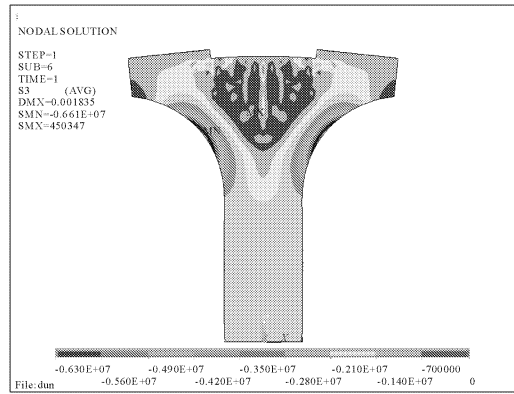
钢筋应力随荷载的变化如图 9 所示。由图 9 结果可以看出,结构在前后均保持良好的线性行为。开裂前钢筋与混凝土共同工作,开裂后拉力由钢筋

配置钢筋后,且在弹塑性情况下,混凝土主应力如图 10 所示,最大主拉力为 2.5 MPa、主压应力均为

6.6 MPa,最大主拉应力为开裂边缘处,最大主压应力位于圆弧过渡处。



(a) 主拉应力



(b) 主压应力

图 10 弹塑性情况下花瓶墩混凝土主应力 (MPa)

2.4 计算结果分析与对比

将上述几种简化计算方法所得结果与有限元计算结果进行对比,如表 1 所示,可知:3 种简化计算方法与有限元模型所得结果相比均偏于安全,其中 2012 规范拉-压杆模型方法所得结果与有限元结果的差值最小,在进行初步设计及配筋时,可作为简化计算依据。

表 1 拉-压杆内力计算结果 单位:kN

计算方法	拉杆拉力	压杆压力
2012 规范拉-压杆模型	3524	5716
04 规范撑杆-系杆模型	3826	5907
文献[15]中的方法	3993	
有限元法	2605	

04 规范撑杆-系杆模型方法中 h_0 取值为 2 m。当 h_0 发生变化时拉杆中的拉力变化规律如图 11 所示。由图 11 可知,二者成反比例关系。

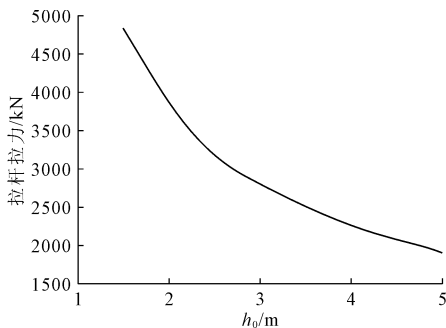


图 11 拉杆拉力与 h_0 关系曲线

将有限元中计算拉杆力代入 04 规范撑杆-系杆模型,可得弹性阶段下对应 h_0 为 1.9 m,弹塑性下对应 h_0 为 3.2 m。结合弹性与弹塑性模型下计

算结果可知混凝土受压区高度得到明显提升。

结合弹性与弹塑性模型下计算应力结果可以看出,混凝土采用弹性模型分析下,应力均匀,最大压应力为 4.9 MPa,计入开裂后,混凝土最大压应力增至 6.6 MPa。计入开裂后,应力重分布对混凝土结构存在较大的应力影响。

由此可知:混凝土开裂后主压应力迹线逐渐向下移动,由于钢筋的存在,承担了大部分拉力,同时由于受压区高度的提升,降低了相应的钢筋应力。对结构而言,开裂后有利于结构受力,采用弹性有限元法偏安全。

3 结 语

(1) 线弹性有限元模型中,因未考虑钢筋的作用,拉应力全部由混凝土承担,且主要由结构顶部 0.5 m 范围的部分来承担。

(2) 加入钢筋且考虑弹塑性的情况下,混凝土开裂前结构状态与 04 规范中 $h_0 = 2$ m 的撑杆-压杆模型相近,开裂后与 $h_0 = 3$ m 模型近似,混凝土开裂后主压迹线逐渐向下发展。

(3) 采用 2012 规范拉-压杆与弹性有限元方法均较合理,且由于配置了受拉钢筋,考虑结构开裂后其受力状态反而更有利。

参考文献:

- [1] 武志兵.薄壁墩墩顶拉力简化计算[J].山西交通科技,2009(4):64-65.
- [2] 蔡纪锋.高架桥钢筋混凝土花瓶状薄壁墩内力计算[J].市政技术,2010,28(3):76-81.
- [3] 张勇.拉压杆理论在薄壁花瓶墩中的应用研究[D].广州:华南理工大学,2010.

- [4] 郑楷柱.花瓶墩的拉压杆模型设计方法研究[J].中国建材科技,2011,20(3):39-41.
- [5] 邓勇诚.花瓶薄壁墩预应力加固技术研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [6] 谭平荣,宋宇鹏.实体花瓶墩的应力分析及配筋计算[J].公路,2013(8):132-135.
- [7] 丁印成,张茜茜,王彤凝.花瓶墩墩顶受力特性分析[J].低温建筑技术,2014,36(5):97-100.
- [8] 张帅锋.花瓶式桥墩墩顶拉力计算分析[J].北方交通,2014(2):43-45.
- [9] 王鑫,马利君,雷洋.针对花瓶墩柱墩顶处的有限元分析方法[J].特种结构,2015,32(5):37-39.
- [10] 潘一平,刘淑敏,巩美杰.基于拉-压杆模型的花瓶墩墩顶拉力简易估算方法[J].现代交通技术,2015,12(4):42-44,88.
- [11] 陈可.公铁合建双层桥墩计算分析[J].交通科技,2016(3):47-50.
- [12] 郝芳敏.拉压杆模型在桥墩系统的适用性和应用范围研究[D].太原:太原理工大学,2016.
- [13] 许有胜.钢筋混凝土花瓶墩系梁强度计算比较研究[J].福建交通科技,2017(3):89-92.
- [14] 张杰.大跨预制箱梁分幅架设施工过程中花瓶形桥墩空间受力分析[J].中外公路,2017,37(4):156-161.
- [15] 李新平,周晶,张勇.薄壁花瓶墩的拉力计算实用方法[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2011,36(2):32-37.
- [16] 方从启,刘朝山.混凝土结构设计的拉-压杆模型方法—I:模型建立[J].混凝土,2009(9):5-9,13.
- [17] 刘朝山,方从启.混凝土结构设计的拉-压杆模型方法—II:设计[J].混凝土,2009(11):7-9.
- [18] 王田友,苏小卒.钢筋混凝土结构的拉压杆模型设计方法及现状[J].四川建筑科学研究,2004,30(3):18-20.
- [19] 张元元,李继祥,刘建军.钢筋混凝土拉压杆理论研究与应用探讨[J].武汉工业学院学报,2005,24(3):72-77.
- [20] 陈晓宝,王成刚,滕育梅.结构混凝土拉压杆模型法配筋设计[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2001,24(2):160-165.
- [21] 解伟,王小兵,李树山,等.钢筋混凝土牛腿拉压杆模型受剪承载力分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(1):55-59.
- [22] 万鹏,郑凯锋.基于可视化荷载路径的结构混凝土拉-压杆模型[J].应用力学学报,2004,21(4):125-128.
- [23] 刘霞,易伟建.优化方法建立钢筋混凝土梁压杆-拉杆模型[J].工程力学,2013,30(9):151-157.
- [24] Kumar P. Optimal force transmission in reinforced concrete deep beams[J]. Computers & Structures, 1978,8(2):223-229.
- [25] Bruggi M. Generating strut-and-tie patterns for reinforced concrete structures using topology optimization[J]. Computers & Structures, 2009,87(23/24):1483-1495.
- [26] Xie Y M, Steven G P. Evolutionary structural optimization for dynamic problems[J]. Computers & Structures, 1996, 58(6):1067-1073.
- [27] 易伟建,刘霞.遗传演化结构优化算法[J].工程力学,2004,21(6):66-71.
- [28] 蔡坤,张洪武,罗阳军,等.三维连续体结构仿生拓扑优化新方法[J].工程力学,2007,24(2):15-21.
- [29] 陈林,逮静洲,徐娜,等.SIMP拓扑优化的拉压杆模型研究[J].烟台大学学报(自然科学与工工程版),2013,26(3):212-216.
- [30] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG D62—2012[S].北京:人民交通出版社,2012.
- [31] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG D62—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.