

文章编号:1674-599X(2022)04-0060-05

中承式提篮拱桥拱肋最优内倾角取值影响分析

王达¹,姚型龙^{1,2},严伟飞³,黄伟³,章贝贝³

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410004;2.深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司,广东 深圳 518000;3.浙江省大成建设集团有限公司,浙江 杭州 310012)

摘 要:为研究最优内倾角与拱桥构造的矢跨比、宽跨比、横撑数量等参数之间的关系,以中承式哑铃形提篮拱桥为工程背景,建立三维有限元精细化模型。考虑几何非线性因素,计算不同构造条件下的稳定安全系数。根据安全系数的变化规律,分析中承式提篮拱桥不同构造参数对最优内倾角取值的影响。研究结果表明:最优内倾角的取值与矢跨比呈负相关,与宽跨比呈正相关,而与横撑数量的相关性不明显。该结论可为类似提篮拱桥工程内倾角的确定提供借鉴。

关键词:提篮拱桥;最优内倾角;稳定系数;有限元分析

中图分类号:U448.22*2

文献标志码:A

Analysis of the optimal inward angle affecting of the arch rib of the semi bearing basket-like arch bridge

WANG Da¹, YAO Xinglong^{1,2}, YAN Weifei³, HUANG Wei³, ZHANG Beibei³

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;
2.Shenzhen General Integrated Transportation and Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 3.Zhejiang Dacheng Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: In order to investigate the relationship between the optimal inclination angle and the parameters such as rise-span ratio, width-span ratio and transverse brace of arch bridge structure, a refined spatial finite element model was established based on a mid-through dumbbell-shaped basket-carrying arch bridge. Considering the geometric nonlinear factors, the stability safety factor under various structural conditions were calculated. The influence of structural parameters of the semi-bearing basket-like arch bridge on the optimal inclination angle was studied according to the change law of the safety factor. The results found that the value of the optimal inclination angle is negatively correlated with the rise-span ratio, positively correlated with the width-span ratio, and has ting correlation with the number of cross braces. The research can provide a useful reference for the determination of the inclination angle of similar basket-carrying arch bridge.

Key words: basket type arch bridge; optimal inclination angle; stability factor; finite element analysis

中承式提篮拱桥不仅外形优美,而且力学性能非常优异。相对于平行拱结构,角度合适的内倾角可以提高拱桥的横向刚度、抗震能力和整体稳定性^[1-3],但内倾角过大又会降低拱桥的稳定性。根据文献[4]规定:中承式提篮拱桥拱肋内倾角宜为

5°~10°。如何使内倾角达到最优值是工程设计需考虑的重要问题。许多学者做了大量相关研究,分析了内倾角对拱桥稳定性的影响。陈宝春^[5]分析了大量工程实例,提出增大拱肋内倾角可提高拱桥的横向稳定性,但倾角过大会降低平面内极限承载力。拱

收稿日期:2020-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51878072)

作者简介:王达(1980—),男,长沙理工大学教授,博士生导师。

肋的内倾角为 10° 时,两者能达到较好地平衡。韦建刚等人^[6]在分析统计数据的基础上,构建了钢管混凝土哑铃型截面提篮型标准拱桥的有限元模型,分析了其极限稳定承载力,认为对于该种标准拱桥的平面外稳定性而言, 9° 是较优的拱肋内倾角。季日臣等人^[7]分析了某大跨径铁路钢管混凝土系杆拱桥的线弹性和极限承载力安全系数的变化规律,得出该拱桥的结构稳定性会随着内倾角变大呈先增大后减小的结论,并确定了其内倾角的最优值。部分学者研究了最优内倾角与其他构造之间的关系,潘盛山等人^[8]通过数值分析,研究了不同构造的下承式X型双肋拱桥的最优内倾角,推导出最优内倾角的近似表达式。

本研究运用 MIDAS Civil 2017 有限元分析软件,以一座中承式哑铃形钢管混凝土提篮拱桥为工

程背景,考虑几何非线性影响因素,建立该桥在不同矢跨比、宽跨比、横撑数量下的有限元模型,计算拱桥的安全系数,再根据安全系数变化规律分析矢跨比、宽跨比、横撑数量这三者对拱肋最优内倾角的影响,并得出不同构造条件下拱桥的最优内倾角,以期为该类拱桥工程最优内倾角的设计提供参考。

1 有限元模型

1.1 桥梁构造参数

中承式单跨钢管混凝土提篮拱桥如图1所示。拱轴线采用悬链线形式,悬链线系数 m 为1.311,拱肋内倾为 5° ,计算跨径为110 m,桥面宽为6 m,宽跨比为0.055,矢高为25 m,矢跨比为1/4.4。

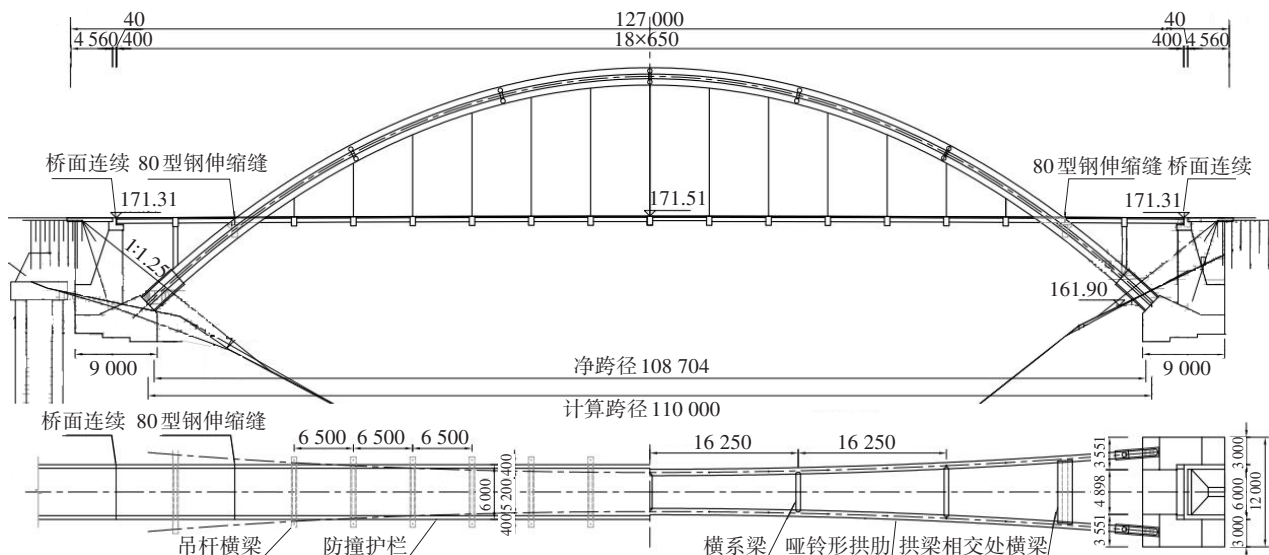


图1 桥跨布置示意(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of bridge span(unit:mm)

全桥共设置13对吊杆,吊杆纵向间距为6.5 m。拱肋截面为哑铃形钢管混凝土截面。全桥共设置2道拱肋,每道拱肋由2根直径为700 mm、壁厚为12 mm的钢管组成,钢管内灌注C50混凝土,上下钢管之间用2道10 mm厚的钢板连接,钢板相隔370 mm,构成哑铃形截面,拱肋总高1.90 m。全桥共设5道哑铃形钢管横撑,横撑间距16.25 m,跨中到两端对称分布,钢管及腹板采用Q345钢材。

桥面系为横纵梁体系,纵梁为先简支后连续结构,横梁总高为1.00 m,纵梁总高为0.60 m,均为预制拼装结构,材料均为C40混凝土。

1.2 有限元模型建立

本研究运用 MIDAS Civil 2017 有限元分析软件,

对该桥建立有限元模型,并进行稳定分析。其中,采用梁单元模拟该桥的拱肋、横撑、立柱及横纵梁;采用桁架单元模拟吊杆。全桥共离散为953个节点和1 077个单元。结构计算有限元模型如图2所示。

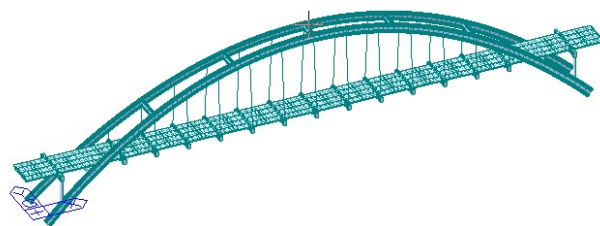


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

为研究拱肋最优内倾角与矢跨比之间的关系,

假定:①该桥的边界条件、拱肋截面特性及材料特性在不同构造条件下保持不变。②以拱肋平面和桥面平面的相交线为旋转轴,通过转动拱肋可改变内倾角。③以桥面平面与拱肋平面相交线的高度 f_0 与拱肋矢高 f 的比值 f_0/f 衡量桥面位置,并保证不同构造条件下 f_0/f 保持不变,原桥 f_0/f 为0.38。④该拱桥工况为恒荷载+活载。恒荷载为桥梁结构自重和二期荷载。其中,钢材容重为78.5 kN/m³,混凝土容重为25.0 kN/m³。活载为车辆荷载,其为主跨满载时,桥梁的稳定安全系数最低^[9]。车道荷载按照文献[10]规定进行布置。

2 拱桥稳定性分析与参数控制

2.1 分析方法

本研究采用几何非线性稳定性的分析方法^[11],分析矢跨比、宽跨比、横撑数量对拱肋最优内倾角的影响,计算各参数条件下拱桥稳定安全系数,分析拱桥稳定安全系数和内倾角之间的关系,选取最优内倾角。

稳定安全系数的计算步骤为:①弹性特征值屈曲分析;②根据第一阶屈曲模态更新模型;③添加非线性分析数据,进行初步计算;④根据结构调整参数,进行进一步的精细计算;⑤提取荷载位移曲线;⑥确定稳定安全系数。

一般以荷载位移曲线出现的第一个极大值点所对应的荷载系数作为拱桥稳定容许承载力的安全系数。根据《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)规定,拱桥整体弹性稳定系数不得小于4.00,计入非线性影响的安全系数不得低于1.75。

2.2 原理分析

弹性特征值屈曲分析时,假设材料的应力与应变始终保持线性关系,不考虑结构大位移的几何变化和材料收缩徐变等非线性因素,属于第一类稳定分析。该分析方法直接求解稳定系数特征值,其力学特征明确、计算简单、方便求解。弹性稳定问题的特征方程为:

$$|\mathbf{K} + \lambda \mathbf{K}_G| = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}$ 为弹性刚度矩阵; $\mathbf{K}_G$ 为几何刚度矩阵; λ 为屈曲荷载系数,又称弹性稳定系数。

计入几何非线性因素时,结构基本平衡方

程为:

$$(\mathbf{K}_0^* + \mathbf{K}_D^* + \mathbf{K}_S^*)\mathbf{d} = \mathbf{p} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{K}_0^*$ 为小位移弹性刚度矩阵; $\mathbf{K}_D^*$ 为初位移刚度矩阵; $\mathbf{K}_S^*$ 为初应力刚度矩阵; $\mathbf{d}$ 为节点位移; $\mathbf{p}$ 为等效节点荷载。

2.3 参数控制

为分析拱桥稳定安全系数的变化规律,内倾角分别取0°、1°、…、14°;矢跨比分别取1/2、1/3、…、1/8;宽跨比1/15、1/18、1/20、1/22、1/25;横撑数量分别取3、4、5、7、11。

3 计算结果与数据分析

3.1 线弹性分析与非线性分析的对比

原桥模型分别进行线弹性与几何非线性屈曲分析,得到线弹性分析稳定安全系数为8.90,几何非线性分析稳定安全系数为7.39。

根据《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)规定要求,在原桥成桥状态下可以保证稳定性,计入几何非线性影响的稳定安全系数比线弹性的稳定安全系数减小了17%。因此,拱桥的稳定分析有必要计入几何非线性的影响,这样更贴近工程实际。

3.2 矢跨比对最优内倾角的影响分析

不改变原桥其他参数,只改变拱桥的拱肋矢跨比参数,分别按1/2、1/3、…、1/8的矢跨比建立有限元模型,并在不同矢跨比有限元模型中计算不同拱肋内倾角对应的稳定安全系数,计算结果及变化趋势如图3所示。

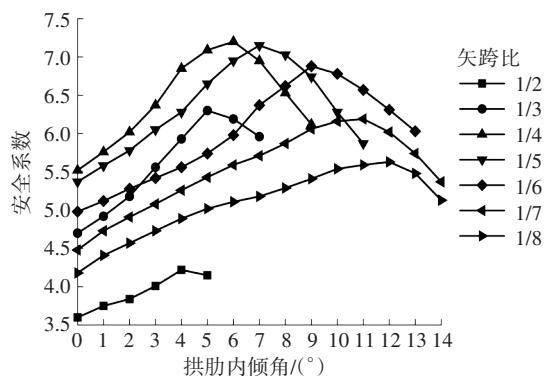


图3 各矢跨比安全系数变化趋势

Fig. 3 The change trend diagram of the safety factor of each rise-span ratio

从图3可以看出,当矢跨比小于1/4时,拱桥的

稳定安全系数随矢跨比的增大而增大,并在矢跨比为 1/4 时取最大值,之后安全系数随矢跨比的增大而减小,表明内倾角对拱桥稳定安全系数影响显著。当矢跨比为 1/4 时,拱桥最优内倾角的安全系数比平行拱的安全系数提高了 30.4%。在其他参数不变的情况下,拱肋最优内倾角的取值随矢跨比的增大持续减小。不同矢跨比的最优内倾角见表 1。

表 1 不同矢跨比的最优内倾角

Table 1 The optimal inclination angle under the conditions of each rise-span ratio

矢跨比	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8
最优内倾角/(°)	4	5	6	7	9	11	12

3.3 宽跨比对最优内倾角的影响分析

原桥其他参数保持不变,只改变拱桥的拱肋宽跨比,分别按 1/15、1/18、1/20、1/22、1/25 的宽跨比建立有限元模型,并在不同宽跨比的有限元模型中计算不同拱肋内倾角对应的稳定安全系数,计算结果及变化趋势如图 4 所示。

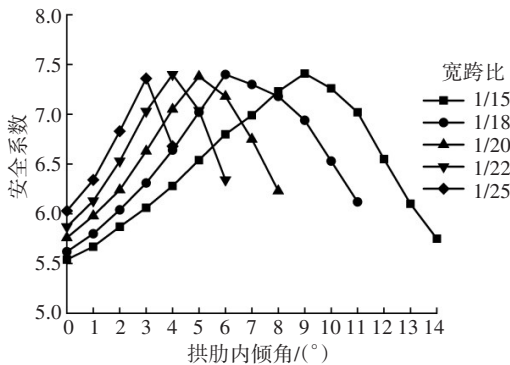


图 4 各宽跨比安全系数变化趋势

Fig. 4 Trend of safety factors of various width-span ratios

从图 4 可以看出:① 拱桥为平行拱结构或拱桥内倾角较小时,拱桥的稳定安全系数随着宽跨比增加而减小,这个结论与邓安泰^[12]的研究结果基本一致。这是由于拱桥的横向联系较弱,桥宽的增大减小了拱桥刚度,此时拱桥容易发生侧倾。但随着拱桥内倾角增大,横撑缩短,拱桥横向联系加强,宽度较大的拱桥稳定性会更好。② 最优内倾角对稳定安全系数的影响随宽跨比的增大而增大。当宽跨比为 1/15 时,最优内倾角的安全系数比平行拱的安全系数提高了约 34%。③ 随着宽跨比的减小(即拱桥越来越窄),拱肋内倾空间越来越小,拱肋最优内倾角也越来越小。不同宽跨比的最优内倾角对应的稳定安

全系数相差不大。不同宽跨比的最优内倾角见表 2。

表 2 不同宽跨比条件下最优内倾角

Table 2 Optimal inclination angle under various width-span ratio conditions

宽跨比	1/15	1/18	1/20	1/22	1/25
最优内倾角/(°)	8	6	5	4	3

3.4 横撑数量对最优内倾角的影响分析

原桥其他参数保持不变,只改变拱桥横撑数量,按 3、4、5、7、11 等横撑数量建立有限元模型,并在不同宽跨比的有限元模型中计算不同拱肋内倾角对应的稳定安全系数,计算结果及变化趋势如图 5 所示。

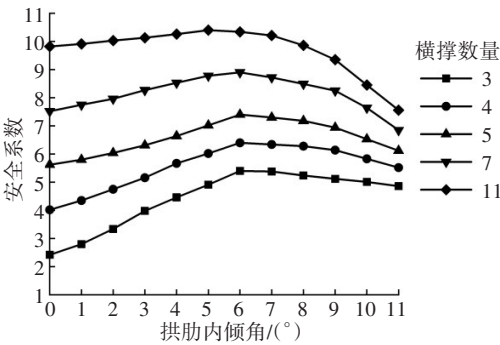


图 5 各横撑数量安全系数变化趋势

Fig. 5 The change trend diagram of the safety factor under the various number of transverse braces

从图 5 可以看出:① 拱桥稳定性受横撑数量的影响很大,拱桥的稳定安全系数随横撑数量的增加而增大。横撑数量由 3 根增加到 11 根时,拱桥的极限承载力安全系数增大了一倍以上。② 最优内倾角对稳定安全系数的影响也与横撑数量有关,横撑越多,最优内倾角对稳定安全系数的提升越小。这说明当横向横撑数量足够多时,拱桥的失稳形式将由平面外失稳转为平面内失稳,增加拱肋内倾角会降低平面内极限承载力。因此,对于横向刚度足够大的拱桥,不宜设置内倾角。③ 横撑数量对最优内倾角的取值影响不大。不同横撑数量的拱肋最优内倾角见表 3。

表 3 各横撑数量条件下最优内倾角

Table 3 The optimal inclination angle under the various number of transverse braces

横撑数量/个	3	4	5	7	11
最优内倾角/(°)	6	6	5	5	5

3.5 不同构造条件下最优内倾角的取值

本研究根据构造矢跨比、宽跨比对最优内倾角取值的影响规律,得到可供工程参考的最优内倾角,见表4。

表4 最优内倾角取值表

Table 4 Value table of optimal inclination angle (°)

矢跨比	宽跨比				
	1/15	1/18	1/20	1/22	1/25
1/2	5	3	2	1	0
1/3	6	4	3	2	1
1/4	7	5	4	3	2
1/5	9	7	6	5	4
1/6	11	9	8	7	6
1/7	13	11	10	9	8
1/8	14	12	11	10	9

4 结 论

本研究通过有限元模型分析某中承式提篮拱桥在不同构造参数下的稳定安全系数,并在计算结果基础上分析了矢跨比、宽跨比和横撑数量对中承式提篮拱桥拱肋最优内倾角取值的影响,得到结论为:

1) 最优内倾角对拱桥稳定性的影响与矢跨比、宽跨比和横撑数量这些构造参数有关。拱肋最优内倾角的取值与矢跨比、宽跨比相关,与矢跨比呈正相关,而与宽跨比呈负相关。最优内倾角的取值与横撑数量关联很小,可忽略不计。

2) 对于宽度较大、横向联系较弱的拱桥,应该设置较大的拱肋内倾角,可以缩短横撑,加强整体稳定性;对于横向联系较大,失稳形式为平面内失稳的拱桥,则不宜设置内倾角。

3) 设计中承式提篮拱桥工程,应重点考虑矢跨比与横撑数量的选用,结合宽跨比,设置拱肋最优内倾角,可以使拱桥获得最大承载力。

参考文献(References):

[1] 户东阳,卢三平,何旭辉,等. 拱肋内倾角对大跨度钢箱提篮拱桥动力特性及地震响应影响的分析[J]. 中外公路,2012,32(6):137-142. (HU Dongyang, LU Sanping, HE Xuhui, et al. Analysis of the influence of arch rib inclination angle on dynamic characteristics and seismic response of long-span steel box basket arch bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2012,32(6):137-

142. (in Chinese))

[2] 隋伟宁,李航,王占飞,等. 内倾角对中承式钢箱提篮拱桥抗震性能影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(5):796-804. (SUI Weining, LI Hang, WANG Zhanfei, et al. Effect of leaning angle on seismic performance of half-through steel box basket-type arch bridges [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2019,35(5):796-804. (in Chinese))

[3] 陈淮,张广坡,王艳,等. 中、下承式拱桥自振特性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2008,5(5):32-36. (CHEN Huai, ZHANG Guangpo, WANG Yan, et al. Dynamic property analysis of half-through and bottom-through arch bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2008,5(5):32-36. (in Chinese))

[4] 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司. 公路钢管混凝土拱桥设计规范:JTG/T D65-06—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015. (Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd. Specifications for design of high way concrete-filled steel tubular arch bridges: JTG/T D65-06—2015 [S]. Beijing: China Communications Press,2015. (in Chinese))

[5] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,1999. (CHEN Baochun. Design and construction of concrete filled steel tubular arch bridge [M]. Beijing: China Communications Press,1999. (in Chinese))

[6] 韦建刚,陈佳炜,谢志涛. 钢管混凝土哑铃形截面提篮型标准拱桥的构建与分析[J]. 福州大学,2019,47(5):663-668. (WEI Jiangang, CHEN Jiawei, XIE Zhitao. Construction and analysis of a standard arch bridge with dumbbell-shaped cross-section of concrete-filled steel tube [J]. Fuzhou University, 2019, 47 (5) : 663-668. (in Chinese))

[7] 季日臣,石明星. 大跨径铁路钢管混凝土系杆拱桥稳定性分析[J]. 振动与冲击,2011,30(8):87-91. (JI Richen, SHI Mingxing. Stability analysis of long span railway CFST tied-arch bridge [J]. Journal of Vibration and Shock,2011,30(8):87-91. (in Chinese))

[8] 潘盛山,张哲,黄才良. 下承式X型双肋拱内倾角度对横向稳定性影响研究[J]. 大连理工大学学报,2008,48(6):845-850. (PAN Shengshan, ZHANG Zhe, HUANG Cailiang. Research on lateral stability influenced by inclined angle of through X-type double ribs arch bridge [J]. Journal of Dalian University of Technology,2008,48(6):845-850. (in Chinese))

[9] 王青. 大跨度铁路钢桁梁柔性拱桥的弹性稳定性[J]. 交通科学与工程,2018,34(4):16-21. (WANG Qing. (下转第71页))

- 2020, 57(5): 99-103, 135. (ZHOU Zhong, CHEN Yun, MIAO Linwu. Study of equivalent layered method based prediction model for deformations caused by construction of new tunnels undercrossing existing tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(5): 99-103, 135. (in Chinese))
- [14] O'REILLY M P, NEW B M. Settlement above tunnels in the United Kindom-their magnitude and prediction [C]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1982(82): 173-181.
- [15] 韩焯. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (HAN Xuan. The analysis and prediction of tunnelling-induced building deformations [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [16] 姜忻良, 赵志民, 李园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1542-1544. (JIANG Xinliang, ZHAO Zhimin, LI Yuan. Analysis and calculation of surface and subsurface settlement trough profiles due to tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1542-1544. (in Chinese))
- [17] 孙玉永, 周顺华, 宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 500-506. (SUN Yuyong, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei. Distribution of deep displacement field during shield tunneling in soft-soil areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 500-506. (in Chinese))
- [18] 欧阳文彪, 丁文其, 谢东武. 考虑建筑刚度的盾构施工引致沉降计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 155-160. (OUYANG Wenbiao, DING Wenqi, XIE Dongwu. Calculation method for settlement due to shield tunnelling considering structure stiffness [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 155-160. (in Chinese))
- [19] 王剑晨, 刘运亮, 张顶立, 等. 下穿施工影响下既有隧道和地层的位移解析解[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S2): 678-683. (WANG Jianchen, LIU Yunliang, ZHANG Dingli, et al. The displacement solution of existing tunnel and ground by traversing construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S2): 678-683. (in Chinese))
- [20] 于群. 盾构隧道近距离下穿既有隧道影响规律的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. (YU Qun. Study on the influence law of shield tunnel under-passing the existing tunnel at short distance [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [21] 张盛红. 盾构隧道下穿施工对上部既有隧道的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. (ZHANG Sheng hong. Study on the effect of shield tunnel undercrossing construction on the upper existing tunnel [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese))

(责任编辑: 罗容; 校对: 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)

(上接第64页)

- Static elastic stability of long-span railway steel truss flexible arch bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(4): 16-21. (in Chinese))
- [10] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (CCCC Highway consultants Co., Ltd.. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [11] 吴海军, 唐海陶, 何立. 大内倾角钢箱提篮拱几何非线性稳定性分析[J]. 公路与汽运, 2021(1): 95-98, 103. (WU Haijun, TANG Haitao, HE Li. Geometric nonlinear stability analysis of steel box basket arch with large inclination angle [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(1): 95-98, 103. (in Chinese))
- [12] 邓安泰. 铜瓦门大桥稳定性分析与研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003. (DENG Antai. On the stability of tongwamen bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003. (in Chinese))

(责任编辑: 罗容; 校对: 李脉 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)