

文章编号:1674-599X(2022)03-0100-07

桥型象限图及一种新基本桥型伞骨桥

余军思

(贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要:为推动基本桥型类型的研究与发展,本研究归纳已有的梁桥、拱桥、斜拉桥及悬索桥四类基本桥型的结构特点,利用梁、墩(塔)的正交性及桥梁结构的对称性,提出桥型象限图。研究表明:桥梁基本桥型有五类,总结第五类基本桥型的构造和结构受力特点,将其命名为伞骨桥;并对其结构进行优化,获得了优化后对应的实桥。通过实桥证实桥型象限图导出的第五类基本桥型的真实性,并验证了桥型象限图的正确性。该结果可为完善桥型研究提供依据。

关键词:基本桥型;对称性;桥型象限图;伞骨桥

中图分类号:U448

文献标志码:A

Quadrant diagram of bridge and a new basic umbrella bridge

YU Junsu

(Guizhou Communication Planning Survey & Design Academy Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

Abstract: In order to promote the development of basic bridge types, the structural characteristic of four basic types of bridges were summarized. Those were the beam bridge, arch bridge, cable-stayed bridge and suspension bridge. The quadrant diagram of bridge was constructed using orthogonality of beam and pier and symmetry of bridge structure. The results show, it was proved that there were only five types of basic bridge. The structure and mechanical characteristic of the fifth type of basic bridge structure was summarized as the umbrella bridge. The structural feature of the umbrella bridge was analyzed and optimized. The corresponding real bridge after optimization was then found. The actual bridge not only verified the authenticity of the fifth basic bridge structure derived from the bridge type quadrant diagram, but also proved the correctness of the quadrant diagram of bridge type proposed in the present study. The research results provide a basis for researching to improve and perfect the bridge type.

Key words: basic bridge type; symmetrical characteristic; the quadrant diagram of bridge; umbrella bridge

随着人类对桥梁结构受力特点的深入研究,最先掌握梁桥(石梁桥、木梁桥)、拱桥(石拱桥、木拱桥)、悬索桥(藤索桥)三类基本桥型结构^[1-2]。建于1956年瑞典的斯特伦松德桥是历史上第一座斜拉桥,被定义为第四类基本桥型。国内外公认的基本桥型已由三类发展到了四类:梁桥、拱桥、悬索桥及斜拉桥。是否存在第五类基本桥型,以及如何直观表达基本桥型之间的联系,均为桥梁基本理论研究

亟需解决的问题。目前,国内外研究主要集中在某一基本桥型或协作体系的桥梁结构在抗震、抗风、跨度、材料和施工等方面^[3-8]所起的作用,但对基本桥型的结构理论研究相对较少。

《现代大跨度桥梁的设计理念与发展》较全面地阐述了桥梁体系^[9],但其对桥梁的分类方法与传统分类(梁桥、拱桥、斜拉桥及悬索桥四类)方法不同。该桥梁体系是以桥梁上、下部主要受力结构的

收稿日期:2021-11-19

作者简介:余军思(1979—),男,贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司研究员。

受力类型进行区分,导出了九类桥型。该论文提出拱桥类的中承式拱桥与下承式系杆拱桥应为两类不同桥型,但两者在传统分类中属于同一类型,均为拱桥。

本研究以四类基本桥梁(梁桥、拱桥、斜拉桥及悬索桥)为基础,以桥梁结构的传力路径为导向,得出直观的桥梁结构图示,总结已有四类桥梁的整桥受力和传力途径,以及共有的正交性和对称性特点,并利用常用的直角坐标系,导出新的基本桥型。

1 基本桥型传力路径

桥梁可克服某一种或多种荷载效应,其结构具有跨越障碍的能力。桥梁结构具备两大属性:①梁具有最大跨越障碍的能力。②墩、台及塔可克服自身和桥面人车等的地心引力。地心引力的方向总是指向地心,竖直向下,故在各类基本桥型结构中,下部结构墩、台、塔为主要受压件,且理论上结构方向为竖直,使传力路径最短。在可修建的尺度范围内,使桥梁获得跨越能力的上部结构梁主要为受弯,且理论上其为水平结构。因此,桥梁的下部墩(塔)与上部梁具有相互正交的几何特点。

在四类基本桥型中,常规两跨桥梁结构的传力路径如图1所示。从图1可以看出,梁桥、拱桥、悬索桥及斜拉桥的结构传力路径起点均为桥面,与墩及塔垂直正交,证明了桥梁的下部墩(塔)与上部梁之间相互正交的几何关系。各基本桥型4个要素由主要结构构件的简图、受力类型、传力路径、控制性约束及位置组成。

2 桥型象限图

从图1可知,桥梁上部的主要结构梁呈水平,下部的的主要结构墩、塔呈竖直,两者之间相互正交,故可采用直角坐标系对各基本桥型的内部结构进行研究。

从图1中还可以看出:①各基本桥型,均有梁与墩(塔)且两者正交。②桥梁的结构、约束、受力及传力路径均关于纵坐标轴对称,故可取其一半研究。③拱桥的主要结构在桥面以下,悬索桥的主要结构在桥面以上,两者均有梁结构。④悬索桥与斜

拉桥的主要结构均位于梁(横轴)以上,两者均有塔结构。这四项特点,与直角坐标系坐标轴之间的几何关系一致。故可以将梁桥作为坐标轴,将基本桥型中的斜拉桥、悬索桥及拱桥置于直角坐标系对应的象限中,以研究各基本桥型间的关系。

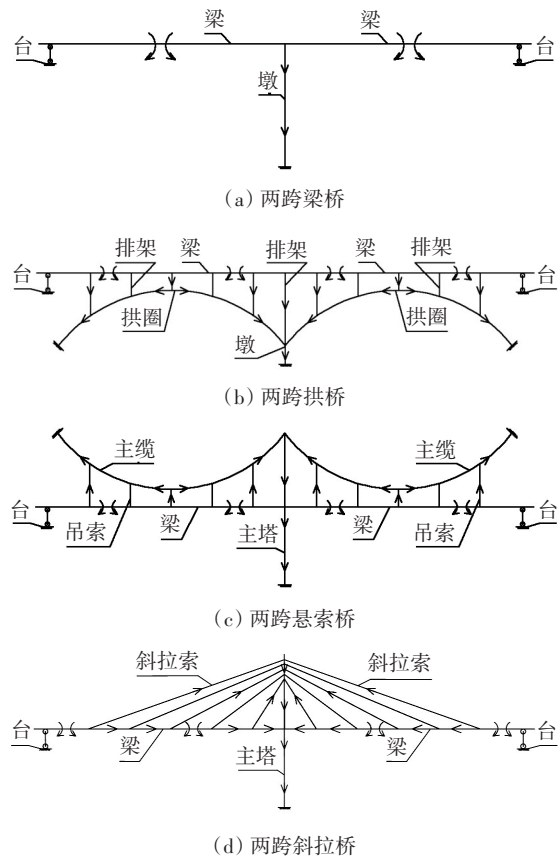


图1 四类基本桥型传力路径

Fig. 1 Schematic diagram of the force transmission path of the four basic bridge type

基于桥梁的梁与墩(塔)之间相互正交的几何关系,以及各基本桥型传力路径与坐标系相互对应的特点,引入基本桥型图示方法,研究各基本桥型的特征及关系,该方法把四种基本桥型置于坐标系的各象限中及坐标轴上,将该图示命名为桥型象限图。

在构建桥型象限图中,梁桥、拱桥、悬索桥及斜拉桥四类基本桥型需遵循以下原则:

1) 四类基本桥型中,各基本桥型的构件数量不同,杆件线形多样化,有曲线、斜线及直线等线形,但四类基本桥型均有水平的梁及竖直的墩(塔)。因此,梁与墩(塔)作为桥型象限图中的横轴和纵轴,即可建立四类不同基本桥型之间的关系。

2) 拱桥、悬索桥及斜拉桥按各自的传力路径,

以及与梁、塔之间的相互关系,可分别置于不同象限内。

3) 根据拱桥的传力路径及其内部构件与梁构件的相互关系,以梁构件为横坐标轴,其余构件均置于梁构件的下方,发现拱桥基本桥型只可置于直角坐标系中第三或第四象限。同理,悬索桥与斜拉桥基本桥型(梁构件在下,其余构件在梁构件的上方)可置于直角坐标系中的第一或第二象限内。

4) 由于从梁桥作为横、纵坐标轴,其他基本桥型数小于直角坐标系中的象限数。表明还有一类基本桥型至今尚未发现。基于这一假设,将尚未发现的新基本桥型放入第四象限,结合第3点,拱桥基本桥型只能位于第三象限内。

5) 对比图1中拱桥及悬索桥的传力路径,发现拱桥的拱圈为曲线,排架竖直,传力路径向下;悬索桥的主缆同样为曲线,吊索竖直,传力路径向上,两者关于横轴梁对称。因此,为方便找出各基本桥型间的关系,将与拱桥关于横轴对称的悬索桥放入第二象限内。

6) 根据第3点和第5点,悬索桥已位于第二象限,仅剩第一象限。因此,斜拉桥只能置于第一象限。

7) 由第5点可知,拱桥与悬索桥关于横轴对称。为方便利用桥型象限图找出各基本桥型之间的关系,需要拱桥与悬索桥内的拱圈、排架与主缆、吊索数量、位置必须关于横轴对称。

选取构建桥型象限图中四类基本桥型对应的常规两跨桥梁结构,主要基于3点:①具有代表性。②墩(塔)符合要求且有简单的两跨。③特殊、单跨、多跨或多塔的同类基本桥型的桥梁结构,可通过对相应的常规两跨桥型结构内杆件进行镜像、平移、复制、旋转、增加及删除等方式获得。

各基本桥型所对应的特殊、单跨、多跨或多塔的桥梁结构的四要素均未发生改变,故应将其视为和常规两跨桥梁结构相同的基本桥型,归为各自对应基本桥型的坐标象限内或坐标轴上。

遵循桥型象限图的构建原则,以及构建思路,本研究构建4类基本桥型的桥型象限图:以基本桥型中梁桥的梁、墩设为横、纵坐标轴,将图1中拱桥、悬索桥、斜拉桥的一半分别位于第一至第三象限内,新基本桥型位于第四象限,如图2所示。

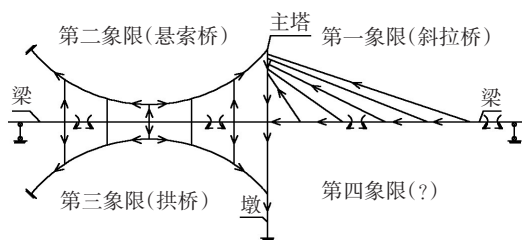


图2 桥型象限图

Fig. 2 Bridge type quadrant diagram

通过分析图2中的桥型象限图,可得出结论为:

1) 第一至第三象限内的基本桥型关于纵轴(主塔、墩)对称,可以得到由单跨变两跨,再变多跨的桥型结构。

2) 第二象限内的悬索桥与第三象限内的拱桥的桥梁中的构件关于横轴(梁)对称,但构件内的传力路径完全相反,形成拉或压的受力方式。

3) 第二象限内的悬索桥与第三象限内的拱桥,均关于横轴(梁)对称,但分属两类不同的基本桥型。

4) 桥型象限图的坐标轴将平面分成4个象限,故桥梁的基本桥型有且只有五类(纵、横坐标轴构成的基本桥型梁桥+4个象限代表的4种不同基本桥型)。

由各基本桥型传力路径及桥型象限图的特点可知:

1) 桥梁有2个基本的能力:跨越障碍能力和克服某一种或多种荷载效应的能力。桥梁可克服地心引力(自重)。图2中的纵轴(主塔、墩)与地心引力方向平行,改变了桥梁的跨越能力(形成类似受力结构的多跨桥梁),但桥梁内的构件受力性质没有改变,故均视为同类基本桥型。

2) 横轴(梁)垂直于地心引力方向。当桥梁构件内的传力路径方向与地心引力方向相同时,构件受压,反之受拉,两种不同传力路径改变了桥梁内构件的受力性质。基本桥型是以桥梁内主要受力构件的受力性质(弯或拉、压等),而非构件位置、外观形状命名。因此,第二象限内的悬索桥与第三象限内的拱桥虽都关于横轴(梁)对称,但为两种不同的桥梁基本类型。

3) 梁与主塔分别垂直、平行于桥梁所受的地心应力线,对应坐标系的横轴与纵轴。且具有稳定结构。因此,梁桥属于最基本、最简单的桥型。

4) 传统观点认为,每座桥梁均可以通过传力路径简图进行受力分析,且与该图唯一对应于桥型象限图中各个象限内、坐标轴的基本类型桥梁。观察桥型象限图,横、纵坐标轴的梁桥与4个象限的桥型已布满,没有多余空间。因此,桥梁的基本类型有且只有5种。

5) 由于图2中的第四象限为空白,推测位于第四象限内的桥型为新基本桥型,其受力模式关于横轴(梁)对称,与第一象限内斜拉桥的结构、受力模式均相反。

3 伞骨桥的提出与优化

3.1 伞骨桥

根据桥型象限图,利用斜拉桥关于横轴梁对称的特点,导出新基本桥型,其结构及受力后的传力路径如图3的第四象限所示。其结构类似中国传统雨伞造型,受力类型与传力路径也一致,故将第四象限内的新基本桥型命名为伞骨桥(可取其一半进行对比),如图4所示。

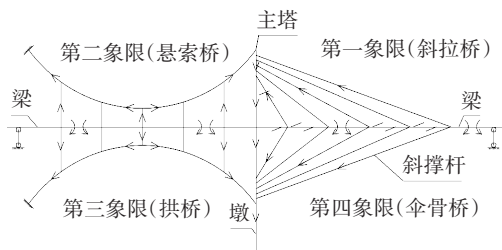


图3 第四象限伞骨桥

Fig. 3 Umbrella bridge in the fourth quadrant



图4 中国传统雨伞及结构传力路径

Fig. 4 Traditional umbrella and structural force transmission path diagram

新基本桥型具备的特点为:

1) 该桥型在构造上没有高于桥面的主塔,只有桥墩。桥面上的主塔与桥面以下的桥墩重叠且关于横轴对称。

2) 与第一象限内斜拉桥的斜拉索对应,该桥型具有多根不关联的斜杆。

3) 由于斜杆构造,大跨度桥须配合高桥墩。

4) 高桥墩有斜杆的侧向约束作用故刚度大,不存在整体稳定问题。因此,高桥墩墩柱的构造尺寸大小可取小值。

5) 该桥型受力与第一象限内斜拉桥的相反,故斜杆的主要受力为受压,属于斜撑杆结构。斜撑杆只能采用受压强度高、刚度大的混凝土或钢结构、钢混组合结构,否则结构整体稳定性差。

6) 第一象限内斜拉桥的梁在斜拉索范围内,主要受压兼顾受弯,为压弯结构;而第四象限内新基本桥型的梁在斜撑杆范围内,主要受拉兼顾受弯,为拉弯结构。

7) 由于梁底有多对斜撑杆,使主跨跨中受弯段长度减少,可以避免大跨度梁桥出现跨中下挠的问题。

8) 两跨单墩、多跨、多墩伞骨桥在最大斜撑杆与梁的相接处至桥台之间的局部区段为受弯梁结构,其构造、受力需按梁结构考虑。

3.2 伞骨桥结构优化

结合图3与图1,得到常规两跨单墩伞骨桥的传力路径,如图5所示。

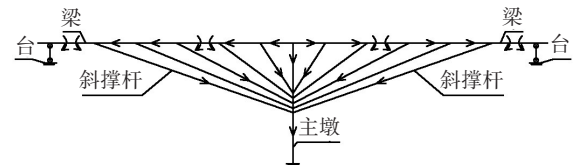


图5 伞骨桥基本桥型传力路径

Fig. 5 Sketch of the basic bridge transfer path of the umbrella bridge

新基本桥型与斜拉桥关于横轴梁对称,其他特殊、多跨或多墩伞骨桥的桥梁结构,可通过对常规两跨单墩桥型结构的内杆件进行镜像、平移、复制、旋转、增加、删除等方式获得。这些特殊、多跨或多墩伞骨桥的桥梁结构,虽特殊复杂,但基本桥型四要素未发生改变。因此,将其和常规两跨桥梁结构均视为相同的基本桥型,归纳于第四坐标象限内。

从图5可以看出,常规伞骨桥构造复杂,施工困难,需对其构造进行优化。

1) 在各斜撑杆范围内的主梁,其结构主要为拉弯结构,以拉为主,故可将此部分主梁尺寸大小尽量减小,设置为等高或变高结构。若采用预应力混凝土结构,则预应力可按直束布置,并采用简单的整体现浇一次成型施工工艺。

2) 每个墩顶除斜撑杆间的主梁,边、中跨其余主梁均为受弯结构。当跨径较小时,为方便施工,主梁可采用等高梁;当跨径较大时,为使主梁的抗弯、抗剪^[10]满足要求,主梁应采用变高梁。

3) 当桥梁为多墩结构时,除主跨的每个墩顶和斜撑杆间的主梁外,其余主梁为受弯压或弯拉结构,压力或拉力均为可变效应引起的超静定次内力^[11]。

4) 为减少斜撑杆与梁、墩交点处的局部应力集中,大跨径桥梁可在斜撑杆的顶、底节点部位设置与梁、墩间必要的局部曲线结构,以及箱壁加厚等减少应力集中的措施。

5) 受斜撑杆自重影响,斜撑杆为压弯结构。为减小长斜撑杆变形,可将斜撑杆设计为略向上的曲线。

6) 主墩可为单柱主墩或双肢薄壁主墩。当主墩为双肢薄壁主墩时,每个主墩在每对斜撑杆与主墩相交处,需设置双肢薄壁主墩间压杆横梁,以抵消每对斜撑杆下端的水平分力。

7) 每增加一对斜撑杆,会增加与斜撑杆相接的梁与墩的节点数,且使节点处的构造、受力及施工复杂化。因此,需减少伞骨桥内的斜撑杆对数。为保证优化后桥梁结构满足基本桥型的四要素,每个主墩上的斜撑杆数不得少于一根。否则,伞骨桥会由于基本桥型四要素中的主要结构(无斜撑杆)、构件内主要受力类型(梁内只受弯而不兼受拉或压)、主要构件(梁与斜撑杆间)传力路径的改变,变成另一种基本桥梁类型。

8) 大跨径伞骨桥具有适应高桥墩的特点。由于纵桥向受各斜撑杆约束,桥墩总高度虽大,但其自由长度却小,高桥墩的安全稳定系数高。

9) 采用抗压强度高、刚度大的斜撑杆。靠近墩顶的一对斜撑杆与主梁形成稳定的三角形结构。因此,取消墩顶一对斜撑杆与墩的相交点以上的部分墩顶竖直结构,简化墩顶构造,便于施工,减少工程量,节省造价。

通过优化,得出两主墩伞骨带一对斜撑杆的三跨连续伞骨桥桥型,如图6~7所示。其中,图6的单柱主墩墩顶进行了优化,图7的双肢薄壁主

墩的墩顶未优化。墩顶未优化的单柱主墩和墩顶优化了的双肢薄壁主墩,可根据本研究思路读者自行导出。

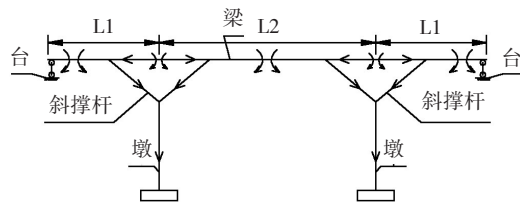


图6 单柱主墩伞骨桥

Fig. 6 Single column main pier umbrella bridge

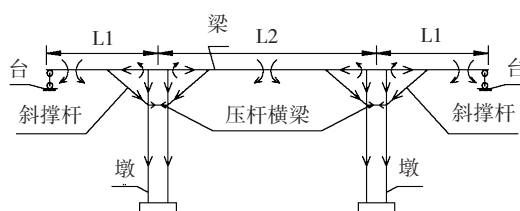


图7 双肢薄壁主墩伞骨桥

Fig. 7 Double-limb thin-walled main pier umbrella bridge

3.3 伞骨桥对应实桥

本研究以现有的四类基本桥梁为基础,以桥梁结构整桥内的传力路径为导向,构建出桥型象限图,并利用桥型象限图的对称性,导出第四象限内的第五类基本桥型——伞骨桥。该桥结构复杂,施工难度大。因此,优化该桥结构,最终得出伞骨桥最简单的两种桥型型式,如图6~7所示。

为验证本研究构建的桥型象限图的正确性,以及两种伞骨桥的真实性,需找到实桥来证明。通过收集国内外已建实桥,找到了伞骨桥的两种最简单桥型对应的已建实桥,如图8~9所示。其中,图8中最大主跨64 m,单柱主墩,墩顶优化;图9的最大主跨290 m,双肢薄壁主墩,墩顶未优化。



图8 西班牙跨米纽河桥

Fig. 8 The bridge over the Minho river in Spain



图9 贵州水盘高速北盘江特大桥

Fig. 9 The Beipanjiang special bridge in Guizhou Shuipan expressway

西班牙跨米纽河桥和贵州北盘江特大桥实桥的桥型与导出的两种最简单的伞骨桥型式一致,且两座实桥的上、下部的主要受力构件的构造与优化后的伞骨桥构造吻合。因此,两座实桥的存在,不仅验证了由桥型象限图导出的位于第四象限内的第五类基本桥型伞骨桥的存在,以及其优化结果的真实性和正确性,也证明了本研究桥型象限图的正确性。

4 结论

根据梁桥、拱桥、斜拉桥及悬索桥最基本的四类桥型,分析基本桥型之间的内在联系,构建出既满足传统四类基本桥型受力特点,又可导出第五类基本桥型(伞骨桥)的桥型象限图。得出结论为:

1) 提出了桥型象限图中四类基本桥型之间的联系。

2) 通过分析桥型象限图中的四类基本桥型,利用关于横轴梁对称性特点,导出并发现第四象限中的第五类基本桥型(伞骨桥)。

3) 传统的桥梁均可通过简化平面内传力路径来分析受力特征。利用桥型象限图中的直角坐标系,证明了桥型象限图的基本桥梁类型有且只有五类。

4) 伞骨桥的基本桥型由桥型象限图导出。作为桥型象限图的最后一块拼图,拼装完成后,展示了桥型象限图视角下完整的桥梁基本结构体系,建立了五类基本桥型的图示及理论。

5) 对桥型象限图的其他作用作进一步探究时发现,桥型象限图对各基本桥型的组成结构、受力复杂的协作体系桥梁和超大跨径桥梁研究等发挥了重要的指导作用。

参考文献(References):

[1] 刘弋, 薛金科. 现代世界桥梁发展综述[J]. 才智, 2010(14): 34. (LIU Yi, XUE Jinke. A summary of the

development of modern bridges in the world [J]. Intelligence, 2010(14): 34. (in Chinese))

[2] 李伯岩, 张维琪. 中国桥梁发展史浅析[J]. 林业科技情报, 2007, 39(4): 87-88. (LI Boyan, ZHANG Weiqi. Bridge development history in China [J]. Forestry Science and Technology Information, 2007, 39(4): 87-88. (in Chinese))

[3] 汪志雄, 张志田, 郅凯, 等. π 型开口截面斜拉桥弯扭耦合涡激共振及气动减振措施研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(1): 52-57, 94. (WANG Zhixiong, ZHANG Zhitian, QIE Kai, et al. Bending-torsion coupled vortex induced resonance of π -type open section cable stayed bridge and aerodynamic vibration reduction measures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(1): 52-57, 94. (in Chinese))

[4] 谢肖礼, 杨创捷, 邱辰, 等. 1 000 m级中承式拱桥试设计研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 487-498. (XIE Xiaoli, YANG Chuangjie, QIU Chen, et al. Trial designing study of half-through arch bridge with main span of 1 000 m [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(4): 487-498. (in Chinese))

[5] 张丰, 颜东煌, 陈常松. 大跨度组合梁斜拉桥成桥状态参数敏感性分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 91-97. (ZHANG Feng, YAN Donghuang, CHEN Changsong. Parameter sensitivity analysis of the long-span composite girder cable-stayed bridge in the finished bridge state [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 91-97. (in Chinese))

[6] 王路, 侯康, 沈锐利, 等. 三塔以上悬索桥关键力学行为及结构成立特征[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 391-397. (WANG Lu, HOU Kang, SHEN Ruili, et al. Key mechanical behaviors and structural establishment characteristics of suspension bridge with more than three pylons [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 391-397. (in Chinese))

[7] 占玉林, 许俊, 侯之瑶, 等. 钢桁-混凝土连续刚构协作体系桥梁顶推效应研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(6): 14-19. (ZHAN Yulin, XU Jun, HOU Zhiyao, et al. Effect of jacking force on combined steel truss and concrete continuous rigid-frame bridge [J]. Bridge Construction, 2020, 50(6): 14-19. (in Chinese))

- [8] 刘小燕, 邹爱平, 朱杰, 等. 大跨度桥梁挂篮施工风险评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(4): 16-22. (LIU Xiaoyan, ZOU Aiping, ZHU Jie, et al. Risk assessment of hanging basket construction of long-span bridge[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4): 16-22. (in Chinese))
- [9] 林元培. 现代大跨度桥梁的设计理念与发展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(S2): 1080-1083, 1098. (LIN Yuanpei. The design concept and future development of modern long span bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(S2): 1080-1083, 1098. (in Chinese))
- [10] 鲍卫刚, 周泳涛. 预应力混凝土梁式桥梁设计施工技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (BAO Weigang, ZHOU Yongtao. Technical guide for design and construction of prestressed concrete beam bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 周先雁, 王解军. 桥梁工程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008. (ZHOU Xianyan, WANG Jiejun. Bridge engineering [M]. Beijing: Peking University Press, 2008. (in Chinese))
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)
-
- (上接第78页)
- 2020(4): 52-56. (in Chinese))
- [14] 楼晓明, 周文海, 简文彬, 等. 岩石破碎机理的微差爆破最佳延时控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2): 158-163. (LOU Xiaoming, ZHOU Wenhai, JIAN Wenbin, et al. Millisecond blasting optimal time delay control based on rock breaking mechanism[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2): 158-163. (in Chinese))
- [15] LI X H, ZHU Z M, WANG M, et al. Numerical study on the behavior of blasting in deep rock masses [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103968.
- [16] 凌同华, 欧阳雄志, 刘建伟, 等. 爆破振动下双洞隧道衬砌动力响应分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 20-27. (LING Tonghua, OUYANG Xiongzi, LIU Jianwei, et al. Dynamic response analysis of double tunnel lining under blasting vibration [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 20-27. (in Chinese))
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)