

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.108

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



箱梁与缆索承重桥梁理论 2019 年度研究进展

白伦华, 沈锐利

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:以经典力学理论及有限单元法为主要研究手段,建立各类桥梁结构在各种工况下的解析(近似)解或数值解,探求各类桥梁结构的力学性能,是桥梁结构分析理论的研究范畴。近年来,随着如波形钢腹板箱梁桥、多塔斜拉桥、多塔悬索桥等新的结构形式的出现,桥梁结构分析理论中箱梁的空间分析理论及缆索承重桥梁分析理论两个传统课题取得了长足的进步。为了能够更好地适应当前桥梁建设形势,服务工程实践,回顾了相关研究,对文献内容进行分类分块报道,主要阐述了波形钢腹板箱梁理论、传统箱梁空间分析理论的拓展、多塔悬索桥中塔效应、缆索承重桥梁的极限承载力及钢-UHPC桥面系的相关研究成果,并引申探讨箱梁及缆索承重桥梁理论精细化分析方法存在的不足之处,总结相关的实际工程应用情况,对后续研究提出建议。

关键词:桥梁结构;箱梁;缆索承重桥梁;非线性分析理论

中图分类号:U441 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0067-09

State-of-the-art review of box girder and cable-supported bridge analysis theories in 2019

Bai Lunhua, Shen Ruili

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Based on the main analysis methods including the classic mechanics and the finite element method, to establish analytical solutions and numerical solutions of various types of bridges under different situations to explore the mechanical behavior of bridge structures is the category of the bridge structure analysis theories. In recent years, with the emergence of new structural forms such as corrugated steel web box girder bridge, The space analysis theory of box girder and the analysis theory of cable-bearing bridge have made great progress. To meet the requirements of current bridge construction situations and to better serve the practical engineering, through reviewing related research, the present paper reports literatures into separate parts, and mainly expounds some focus issues including shear lag of box girders with corrugated steel webs, extension of traditional box girder spatial analysis theory, central tower effects of multi-tower suspension bridge, ultimate capacity of cable-supported bridges and steel-UHPC composite bridge deck system, and extends to explore shortages of box girder and cable-supported bridge refined

收稿日期:2020-04-03

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划(2015G002-A)

作者简介:白伦华(1990-),男,博士,助理研究员,主要从事大跨径桥梁理论研究,E-mail: bailunhua@163.com.

沈锐利(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail: rlshen@163.com.

Received:2020-04-03

Foundation item: Science and Technology Research and Development Plan Project of China Railway (No. 2015G002-A)

Author brief: Bai Lunhua(1990-), PhD, assistant research fellow, main research interest: analysis theory of large span bridges, E-mail: bailunhua@163.com.

Shen Ruili(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: rlshen@163.com.

analysis theories. It is summarized the engineering applications of the research theory, and corresponding suggestions are made to the future study.

Keywords: bridge structure; box girder; cable-supported bridge; nonlinear analysis theory

桥梁结构分析理论的基本问题是桥梁体系、构件中力与变形的求解。传统理论主要涵盖了桥梁结构的空分析理论、各类梁桥(包括钢桥、混凝土梁桥及组合梁桥)、拱桥及大跨度桥梁(缆索承重桥梁为主)的静力计算理论,桥梁施工过程的时变力学问题也是桥梁结构分析理论研究的一个方面^[1]。近年来,随非线性理论的成熟及通用有限元软件的应用推广,桥梁精细化分析理论发展迅速,基于三维实体有限元模型的桥梁抗火、船撞、车撞、落石冲击、波浪冲击及桥梁侧翻等方面的研究丰富了桥梁结构理论的范畴^[2]。

论文综述了传统桥梁结构分析理论的研究进展,包括箱梁结构的空分析理论及缆索承重桥梁计算理论两个分支,只包含静力分析。每部分对热点研究问题进行重点阐述,包括波形钢腹板箱梁理论、传统箱梁空分析理论的拓展、多塔悬索桥中塔效应、缆索承重桥梁的极限承载力及钢-UHPC 桥面板,分析存在的不足之处,总结相关理论的工程应用情况,在此基础上提出后续研究的建议。

1 箱梁分析理论

1.1 波形钢腹板箱梁理论

高性能装配式组合桥梁结构在桥梁工程学科工程开发前沿占据重要一席,波形钢腹板的使用对高性能装配式组合桥梁结构的发展创新具有重要的作用^[3]。波形钢腹板箱梁是波形钢腹板应用的主要形式之一,具有材料组合方式、板件连接方式灵活及体外预应力技术协作方便等优点,目前已在滁河大桥、郟城黄河大桥、桃花峪大桥引桥、头道河大桥等工程中得到应用。近年来,相关研究重点关注了几种新型箱梁(图 1)的基本弯、剪、扭及横向受力的分析方法及力学行为。

张紫辰等^[4]与王根会等^[5]对波形钢腹板组合箱梁(底板为钢板)的剪力滞进行了研究,采用能量变分法推导了该结构形式的剪力滞后控制方程,并采用试验模型与有限元模型进行分析对比。Chen^[6]等则通过模型试验、数值模拟及理论推导研究了如图 1(a)所示的波形钢腹板箱梁的剪力滞行为,这种

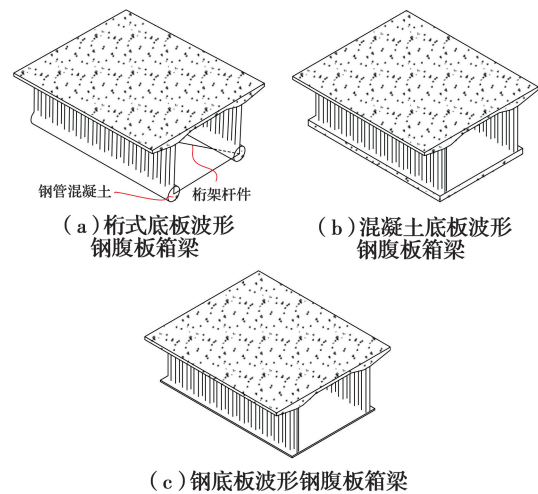


图 1 典型的波形钢腹板箱梁形式(变化底板结构形式)

Fig. 1 Typical box girders with corrugated steel webs including various structures of lower flange

箱梁形式充分利用了钢管混凝土的高承载力优势和桁架的减重功能,是一种轻型波形钢腹板箱梁。李运生等^[7]考虑了曲率影响、截面剪力滞效应、波形腹板剪切效应、扭转和畸变效应,采用能量变分法推导了波形钢腹板简支曲线结合梁在弯扭效应下的解析解,随后通过固定跨度和截面模型研究了曲线半径和圆心角对弯扭效应的影响,得到了跨中挠度、扭转角等畸变角随圆心角的变化规律。姜瑞娟等^[8]提出了基于 3 个广义位移函数的波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应微分方程和基于有限差分法的半解析半数值解法。李丽园等^[9]基于能量变分原理推导了简支箱梁的剪切附加挠度计算方法,结果表明,该方法与 ANSYS 空间有限元模型计算结果及实测结果吻合较好。Zhou 等^[10]提出了一种用于评价波形钢腹板预应力组合箱梁纯扭性能的改进柔性扭转膜模型,该模型可以有效地考虑混凝土受拉强度、受拉软化行为及混凝土的抗剪行为,经过数值模型及试验数据的对比,它的合理性与准确性得到了相应的验证,如图 2 所示。Shen 等^[11]同样建立了用于波纹钢腹板预应力组合箱梁扭转全过程分析的软化膜模型。赵品等^[12]提出了一种预测单箱双室波形钢腹板箱梁横向内力及变形的刚架模型,对比实验结果、传统箱梁框架模型和公路桥规中的简支板与连续板模型

的横向内力计算结果,发现刚架模型计算结果较规范结果偏小。王兆南等^[13]等基于框架分析法建立了波形钢腹板箱梁横向内力解析计算公式,并分析了波形钢腹板厚度、波折角、波长及箱梁宽高比等参数对横向内力的影响规律。

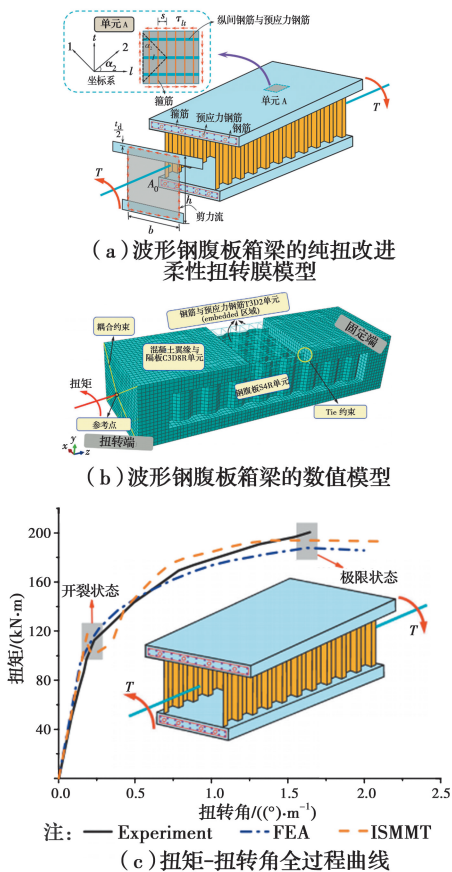


图 2 波形钢腹板组合箱梁的扭转模型及验证情况^[10]

Fig. 2 Pure torsional model of the box girder with corrugated steel webs and its verification^[10]

1.2 传统箱梁空间分析理论

对经典箱梁理论的延伸研究也有一些报道,可以归纳成两条研究主线:1)基于解析法的传统箱梁理论的延伸。如郭增伟等^[14]通过比拟杆法建立了变截面悬臂箱梁的剪力滞求解方法;Li 等^[15]采用能量法建立了适用于任意宽度翼缘的箱梁剪力滞解析法;张玉元等^[16]应用能量变分法建立了以附加挠度为未知量的控制微分方程及边界条件,并导出了简支箱梁和两跨连续箱梁剪力滞附加挠度和翘曲应力的解析解;2)将箱梁空间分析理论与有限元理论结合起来发展箱梁的高等梁单元模型。例如,夏桂云等^[17]利用初参数法和传递矩阵,建立了薄壁箱梁约束扭转分析的有限元列式;Lezgy 等^[18]采用能量原理推导了可考虑剪力滞后及钢混连接界面滑移行为

的 25 自由度模型梁单元模型;David 等^[19]提出了一种可以准确分析混凝土徐变、截面翘曲及剪力滞后的通用梁理论(GBT);朱力等^[20]提出了曲线钢-混凝土组合箱形梁考虑翘曲、畸变及双向滑移的 22 自由度有限梁单元模型。

对波形钢腹板箱梁及普通箱梁理论的研究主要采用解析法(能量法、比拟杆法等)对材料处于弹性范围内的情况而开展,对影响箱梁空间受力行为的许多因素均有不同程度的考虑,但仍存在方法局限性大、不易应用推广等缺点。文献中建立的有限元模型以板壳/实体有限元模型为主,对箱梁空间模型的探讨及应用不足,如单梁、多梁、梁格模型等空间杆系模型的研究缺乏。这些模型虽在计算精度上存在一定的缺失,但从文献^[17-20]来看,采用箱梁的高等梁理论(通过引入扭转、畸变、翘曲、剪力滞等自由度形成的多自由度梁模型)来研究箱梁的空间效应,箱梁空间杆系模型的计算精度可以得到有效的提高,在兼有高效计算效率的优势下,形成箱梁结构高效精细的计算方法具有较大潜力。但是,还需考虑复杂的全过程受力行为,使箱梁理论进一步对接桥梁结构体系弹塑性分析理论,拓宽分析理论的适用范围。

2 缆索承重桥梁分析理论

2.1 多塔悬索桥的中塔效应

中国海洋桥梁工程的调研报告指出^[21],多塔长联缆索承重桥梁是一种具有显著技术经济环保优势的桥型。多塔悬索桥在该类型桥梁中占有举足轻重的地位。中国已建成 3 座多塔悬索桥,包括马鞍山长江大桥(主跨 1 080 m)、江苏泰州长江大桥(主跨 1 080 m)、武汉鹦鹉洲长江大桥(主跨 850 m)。与传统单主跨悬索桥相比,该桥型的两个主跨在受活载偏一侧的作用下,具有较为明显的“中塔效应”(图 3),具体体现为:采用柔性中间桥塔使桥梁的整体刚度降低,而采用刚性中间桥塔则存在主缆与鞍槽的滑移风险。多塔悬索桥中间桥塔的设计涉及桥塔稳定性、主缆滑移及中塔适宜纵向刚度取值等关键问题。

沈锐利、王秀兰及 Zhang 等学者对多塔悬索桥的中塔效应进行了研究。沈锐利等^[22]构建了主跨 500~1 500 m 范围内的 6 座三塔悬索桥计算模型,

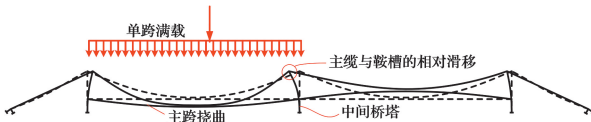
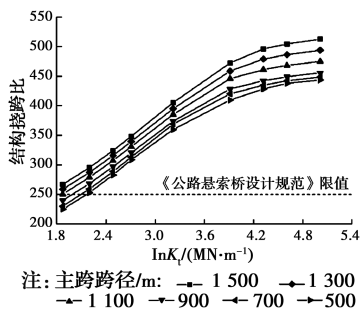


图 3 多塔悬索桥的中塔效应

Fig. 3 Central tower effects of multi-tower suspension bridge

通过改变中塔纵向刚度,对加劲梁竖向挠度及主缆抗滑安全系数进行计算分析,建议了不同竖向刚度要求下中塔纵向刚度的取值范围,如图 4 所示。从图中可以看出,中塔刚度 K_t 的对数值与结构刚度基本呈线性关系。王秀兰等^[23]以挠跨比和主缆抗滑安全系数为控制指标,提出了多塔悬索桥中塔刚度上、下限值的解析算法,给出了跨径在 1 000~2 000 m 范围内的中塔刚度取值范围。Zhang 等^[24]基于分段悬链线理论推导了不等跨多塔悬索桥中间桥塔刚度的解析算法,并对一座跨度组合为 248 m+1 060 m+1 360 m+380 m 的背景桥梁进行了分析,根据计算分析得到中间桥塔的刚度取值范围为 6.615~16.422 MN/m。

图 4 不同中塔刚度对结构刚度的影响^[22]Fig. 4 Effects of central tower stiffness on structure stiffness^[22]

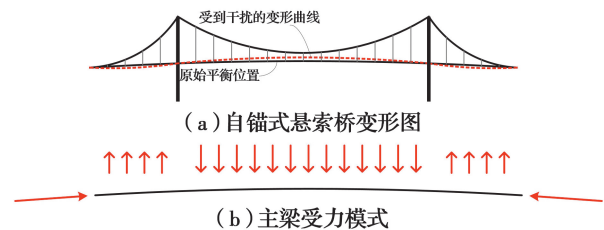
由于桥塔形式多样、分析方法不统一等,现阶段对几座已建多塔悬索桥中塔刚度取值范围并没有完全达成共识,对“中塔效应”的认识存在一桥一议的事实。但自多塔悬索桥建设以来,随相关科学研究的不断深入,逐步认识到多塔悬索桥中间桥塔稳定性特征^[25]、侧向力对主缆抗滑不可忽略的贡献^[26]等,多塔悬索桥中间桥塔(包括主缆抗滑设计在内)的设计正逐步从粗犷、经验、保守的方式转变为精细、科学、合理的方式,相关规范条文也正在积极补充。

2.2 桥梁极限承载力研究

实际桥梁结构的稳定性问题以第二类稳定问题为主,需全面考虑若干非线性因素的影响,特别是几何与材料非线性的影响,属于极限承载力的范畴。桥梁结构应按弹塑性理论分析获得典型的荷载变形

曲线及加载过程中桥梁结构的应力、变形等状态,从而充分把握其极限承载模式,明确桥梁设计的安全储备,以保障全桥的静力安全性。关于桥梁极限承载力的研究主要以在建桥梁为背景而展开,笔者主要论述大跨径缆索承重桥梁极限承载力的研究进展。对拱桥的相关研究情况可参考文献^[27-30]。

吕梁等^[31]以南京长江五桥(三塔斜拉桥)为背景,采用 ANSYS 软件建立全桥杆系有限元模型,分析了桥梁施工阶段稳定系数的变化规律和斜拉索、桥塔、主梁的极限承载力及组合桥塔外包钢壳对极限承载力的影响。Kim 等^[32]采用“成桥状态确定-倒拆形成施工阶段-极限承载力分析”的三步法分析了斜拉桥施工阶段的稳定性。Yu 等^[33]对世界上最长的钢桁架斜拉桥——鸭池河桥面板施工过程稳定性进行了研究,研究了几何非线性、材料非线性、温度变化和静态横向风对结构稳定性的影响。王春江等^[34]采用 ABAQUS 软件建立全桥多尺度有限元模型(跨中段钢箱梁建立局部板壳精细模型)对重庆鹅公岩轨道专用桥(主跨 600 m 的自锚式钢箱梁悬索桥)的极限承载力进行了分析,研究了该桥的整体稳定和局部稳定问题及其相互影响规律,结果发现,箱梁中薄弱的加劲钢腹板会在全桥破坏前屈曲。为进一步完善自锚式悬索桥的稳定理论,白伦华等^[35]用结构稳定性概念定性分析了自锚式悬索桥不会发生面内弹性稳定性的可能(图 5),进而通过在自锚式悬索桥挠度方程中引入位移干扰量,以幂级数干扰位移形式反证其不会出现面内弹性分岔失稳。同时,以重庆鹅公岩轨道专用桥为例,通过数值模型按弹性及弹塑性稳定理论计算分析了桥梁的荷载系数、破坏模式等。

图 5 自锚式悬索桥的稳定性定性分析示意图^[35]Fig. 5 Diagram of qualitative analysis of stability of self-anchored suspension bridge^[35]

从多塔斜拉桥组合桥塔外包钢壳效应^[31]、基于施工过程分析的斜拉桥稳定性计算方法^[32]、自锚式钢箱梁悬索桥柔弱腹板局部屈曲效应^[34]等方面的

研究来看,大跨径桥梁极限承载力的分析理论正在向精细化方向逐步深化,对影响全桥极限承载力的诸多复杂因素考虑得更加全面。然而,桥梁局部-整体破坏精细化分析方法仍有诸多问题亟待解决,如主梁采用钢箱梁形式的桥梁局部-整体相关屈曲问题不够精确,组合结构桥梁中构件不同材料对极限承载力的贡献比不清楚,极限承载力分析所采用的材料本构模型不统一等。下面对主梁采用钢箱梁形式的桥梁局部-整体相关屈曲问题的研究作简单分析。

对于主梁采用钢箱梁形式的大跨径缆索承重桥梁,上述研究按通用有限元程序的梁柱单元理论,没有考虑几何缺陷、残余应力及局部屈曲的影响,这也是当前钢结构桥梁极限承载力分析普遍存在的问题。如何全面计入影响钢桥稳定性的非线性因素,使钢桥的极限承载力分析更加精确是值得探索与研究的问题。文献[34]虽然采用节段板壳有限元来模拟桥梁中容易破坏,但并没有计入几何缺陷、残余应力的影响,也没有相应的试验结果验证,所建立的多尺度模型在自锚式钢箱梁悬索桥的极限承载力分析中仍需进一步校验其准确性及有效性。进一步回顾采用板壳有限元法研究全桥极限承载力的几篇文献报道^[36-38],由于桥梁结构规模庞大,对几何缺陷及残余应力均没有完全模拟,而是采用了不同的简化方式进行处理(图 6),在几何缺陷的考虑上,主要采用了模态引入法,对残余应力的模拟则是通过在单元积分点处添加初应力来实现。但从几种处理残余应力的方式来看,基于板壳有限元模型的钢桥极限承载力分析方法并不成熟,方法之间的差异也缺乏参照对比。对钢桥的局部-整体相关屈曲问题并没有得到很好的解决。对于宽幅箱梁结构,剪力滞后及桥面板横向受力对极限承载力的影响也没有很好地考虑。除此之外,桥塔或主梁采用混凝土的区域,对混凝土的材料行为,如塑性损伤、开裂效应等也不在考虑之中。桥梁局部-整体破坏关系的分析方法可向全面计入钢板结构的局部屈曲、箱梁的空间效应及材料的细观力学行为的桥梁高等二阶分析方法方面发展。

2.3 钢-UHPC 桥面板

正交异性钢桥面板在长期服役过程中暴露出了疲劳开裂和铺装层损坏两个难以解决的问题,严重影响了缆索承重桥梁结构的正常使用。近年来,学者们以新材料新型桥面结构体系为主要方法从根本

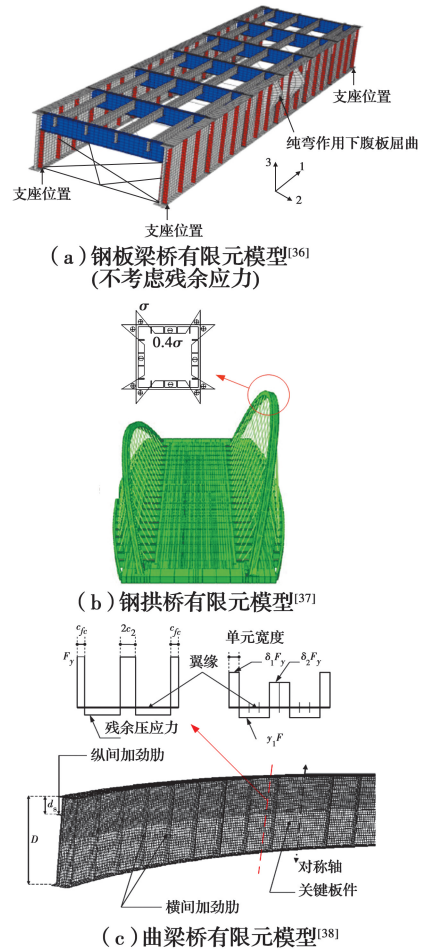


图 6 钢桥板壳有限元模型及残余应力的考虑方式

Fig. 6 Shell finite element models and various considerations for residual stresses

上克服钢桥面系统的顽疾。钢-超高性能混凝土(UHPC)桥面板经过方案提出、试验验证、理论研究及综合工程经济效益对比的系列研究,在缆索承重桥梁结构中已取得了初步的应用^[39]。以湖南大学邵旭东教授团队为代表对钢-UHPC 桥面板的研究较为系统,在静力性能方面,对栓钉、螺栓、短钢筋等连接件的抗剪性能、UHPC 板的抗弯性能等进行了深入的研究^[40-45]。

目前,对钢-UHPC 桥面板的研究主要集中在构造、连接、构件方面,基本力学性能的探究较多,对相关的体系模型计算研究还比较有限。如何在体系模型中充分考虑 UHPC 铺装方式、徐变效应及钢-UHPC 桥面板剪力滞后等的影响,并探讨缆索承重桥梁结构性能,都是值得进一步深入研究的问题^[46-47]。

3 分析理论的工程应用

箱梁与缆索承重桥梁分析理论是与工程实际联

系十分紧密的课题,它们关注桥梁建设中最基本的施工与设计,与桥梁工程建设相生相伴。

1)箱梁理论的应用:箱梁空间分析理论中最为突出的问题是顶底板的剪力滞后效应,通过能量法或比拟杆法重新建立波形钢腹板箱梁的剪力滞计算方法,考察了不同形式中剪力滞效应受构造参数影响的情况,如桁式底板波形钢腹板箱梁中底部桁架管中混凝土的影响、波形钢腹板的褶皱效应等,这些研究结论为该类结构的优化设计提供了指导思路。

2)多塔悬索桥分析理论的应用:目前,有关中塔适宜刚度理论、主缆与中塔塔顶鞍槽滑移理论及抗滑技术及人字形钢桥塔的稳定理论等方面的丰硕成果为中国几座已建及在建的多塔悬索桥提供了理论支撑与技术保障。

3)桥梁极限承载力分析理论的应用:以非线性有限元理论为基础的桥梁极限承载力计算方法具有较多的实现形式,如实体有限元模型、多尺度有限元模型及全杆系有限元模型,以这些模型为载体对斜拉桥、自锚式悬索桥及拱桥进行分析,丰富了各类桥型极限承载力理论的内涵,对一些特殊问题的把握,如多塔斜拉桥中间组合桥塔的承载模式、自锚式悬索桥的面内弹性稳定问题等,不仅有效地消除了设计隐患,也有利于更加客观地认识桥梁结构的非线性物理特征。该理论的发展得益于新的桥梁结构形式的出现,也很好直接指导了桥梁的建设(图 7)。

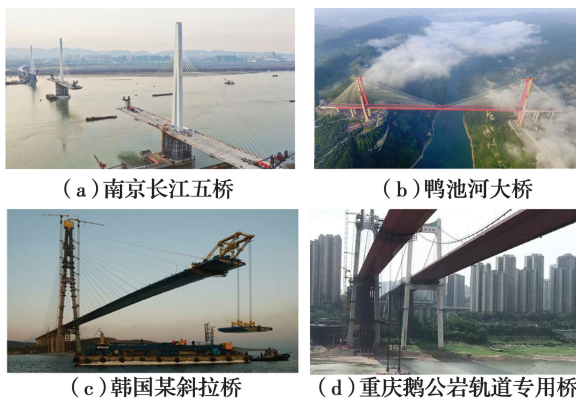


图 7 大跨度桥梁极限承载力理论的工程应用实例

Fig. 7 Applications of ultimate capacity theories of the large span bridge

4)钢-UHPC 桥面系技术理论的应用:钢-UHPC 技术已在中国 17 座桥梁得到了应用^[39],涵盖多种桥梁结构形式,涉及自锚式悬索桥、地锚式钢桁梁悬索桥、拱桥及斜拉桥等缆索承重桥梁体系,为

新型大跨径组合结构桥梁体系发展奠定了良好的实践基础。

4 结论与展望

新型桥梁结构体系,如波形钢腹板箱梁桥、多塔悬索桥、多塔斜拉桥、腹板易屈曲钢箱梁自锚式悬索桥、超高性能混凝土组合桥梁等,催化了桥梁结构分析理论——箱梁与大跨径桥梁理论的发展,波形钢腹板箱梁理论得到了进一步的完善,多塔悬索桥中塔效应问题在更广的参数范围内被讨论,经典桥梁极限承载力理论应用到更多的实际工程中。结合先前关于箱梁与缆索承重桥梁分析理论的讨论,对后续研究提出以下建议:

1)针对箱梁,构件的竖向弯曲、扭转及弯扭耦合效应的研究还需进一步积极开展与完善,需要考虑材料非线性的影响,这些理论属于薄壁构件理论,可以与传统梁理论进行接轨,形成高等梁柱有限元单元,建立高效、精细的箱梁模型,用于构件压弯剪扭复杂力学行为的全过程分析。

2)将箱梁的高等梁理论进一步融入到缆索承重桥梁的非线性分析理论中,同时,应充分重视如混凝土的开裂、钢混组合结构的界面行为及钢板的局部屈曲等力学行为,使桥梁体系杆系模型更加精细。

3)缆索承重桥梁的精细化分析理论还需囊括局部关键区域的分析方法,如悬索桥锚跨区域索股的应力分析、自锚式悬索桥锚固段受力的精细化模拟方法、多塔悬索桥中塔主缆与索鞍相对滑移的精细化计算方法等。

4)随着海洋桥梁工程事业的推进,非等跨三塔悬索桥、超三塔悬索桥等不同类型多塔悬索桥的理论研究需迫切开展。

5)针对 UHPC 铺装方式、徐变效应及钢-UHPC 桥面板剪力滞后等,建立并完善钢-UHPC 桥面缆索承重桥梁的体系分析计算方法。

参考文献:

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论 [M]. 2 版. 北京:人民交通出版社, 2013.
XIANG H F. Advance theory of bridge structures [M]. 2nd edition. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 中国公路学报编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
Editorial Department of China Journal of Highway

- and Transport*. Review on China's bridge engineering research: 2014 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(5): 1-96. (in Chinese)
- [3] 葛耀君. 桥梁工程:科学、技术和工程[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(8): 1-5.
GE Y J. Bridge engineering: Science, technology and engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(8): 1-5. (in Chinese)
- [4] 张紫辰, 金学军, 甘亚南. 波纹腹板钢箱组合梁竖向弯曲力学性能[J]. *中国铁道科学*, 2019, 40(6): 52-59.
ZHANG Z C, JIN X J, GAN Y N. Vertical bending mechanical properties of box composite girder with corrugated steel webs [J]. *China Railway Science*, 2019, 40(6): 52-59. (in Chinese)
- [5] 王根会, 樊江, 操俊林, 等. 新型组合箱梁竖向弯曲力学行为的研究[J]. *铁道工程学报*, 2019, 36(9): 23-30, 48.
WANG G H, FAN J, CAO J L, et al. Research on the vertical bending mechanical behaviors of new composite box girders [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, 36(9): 23-30, 48. (in Chinese)
- [6] CHEN Y Y, DONG J C, XU T H, et al. The shear-lag effect of composite box girder bridges with corrugated steel webs and trusses [J]. *Engineering Structures*, 2019, 181: 617-628.
- [7] 李运生, 陈留剑, 刘蓓, 等. 波形钢腹板曲线结合梁弯扭效应的解析解推导及参数分析[J]. *铁道学报*, 2019, 41(1): 101-108.
LI Y S, CHEN L J, LIU B, et al. Analytical solution derivation and parametrical analysis of bending-torsional effects of curved composite beam with corrugated steel webs [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(1): 101-108. (in Chinese)
- [8] 姜瑞娟, 肖玉凤, 吴启明, 等. 基于能量变分法的波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(Sup1): 271-277.
JIANG R J, XIAO Y F, WU Q M, et al. Study on shear-lag effect of composite box girder bridges with corrugated steel webs based on energy variance method [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(Sup1): 271-277. (in Chinese)
- [9] 李丽园, 周茂定, 冀伟, 等. 基于剪切附加挠度的波形钢腹板组合箱梁挠度计算[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(2): 296-302.
LI L Y, ZHOU M D, JI W, et al. Deflection calculation of composite box girder with corrugated steel webs based on shear additional deflection [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(2): 296-302. (in Chinese)
- [10] ZHOU C, LI L F, WANG L H. Improved softened membrane model for prestressed composite box girders with corrugated steel webs under pure torsion [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 153: 372-384.
- [11] SHEN K J, WAN S, MO Y L, et al. A softened membrane model for prestressed concrete composite box girders with corrugated steel webs under pure torsion [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2019, 22(2): 384-401.
- [12] 赵品, 叶见曙. 波形钢腹板箱梁桥面板横向内力计算的框架分析法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(5): 940-944.
ZHAO P, YE J S. Frame analysis method of transverse internal force in bridge deck of box girders with corrugated steel webs [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(5): 940-944. (in Chinese)
- [13] 王兆南, 张元海. 单箱双室波形钢腹板组合箱梁横向内力研究[J]. *铁道学报*, 2019, 41(12): 106-112.
WANG Z N, ZHANG Y H. Research on transverse internal force of single box double cell composite box girder with corrugated steel webs [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(12): 106-112. (in Chinese)
- [14] 郭增伟, 李龙景, 张俊波. 变截面悬臂箱梁剪力滞效应的比拟杆分析方法[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(8): 72-80.
GUO Z W, LI L J, ZHANG J B. Theoretical analysis for shear-lag effect of variable box section cantilever girder based on bar simulation method [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(8): 72-80. (in Chinese)
- [15] LI X Y, WAN S, MO Y L, et al. An improved method for analyzing shear lag in thin-walled box-section beam with arbitrary width of cantilever flange [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 140: 222-235.
- [16] 张玉元, 张元海, 张慧, 等. 考虑边界约束影响的薄壁箱梁剪力滞翘曲应力分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(5): 1042-1053.
ZHANG Y Y, ZHANG Y H, ZHANG H, et al. Analysis on shear lag warping stress of thin-walled box girders with boundary constraint effect [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(5): 1042-1053. (in Chinese)

- [17] 夏桂云, 李传习, 杨美良. 薄壁箱梁约束扭转的有限元分析及弯扭力矩新算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 85-92.
XIA G Y, LI C X, YANG M L. Finite element analysis of restrained torsion and new algorithm of flexural-torsional moment for thin-walled box girder [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2019, 46(1): 85-92. (in Chinese)
- [18] LEZGY-NAZARGAH M, VIDAL P, POLIT O. A sinus shear deformation model for static analysis of composite steel-concrete beams and twin-girder decks including shear lag and interfacial slip effects [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 134: 61-70.
- [19] HENRIQUES D, GONÇALVES R, CAMOTIM D. A visco-elastic GBT-based finite element for steel-concrete composite beams [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 145: 106440.
- [20] 朱力, 李明杰, 陈超, 等. 曲线钢-混凝土组合箱形梁的约束扭转、畸变和界面双向滑移效应[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(Sup1): 299-307.
ZHU L, LI M J, CHEN C, et al. Constrained torsion, distortion and bidirectional interface slip effects of curved steel-concrete composite box beams [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(Sup1): 299-307. (in Chinese)
- [21] 高宗余, 阮怀圣, 秦顺全, 等. 我国海洋桥梁工程技术发展现状、挑战及对策研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 1-4.
GAO Z Y, RUAN H S, QIN S Q, et al. Technical status, challenges, and solutions of Marine bridge engineering [J]. Engineering Science, 2019, 21(3): 1-4. (in Chinese)
- [22] 沈锐利, 侯康, 王路. 三塔悬索桥结构竖向刚度及主缆抗滑需求[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 474-480.
SHEN R L, HOU K, WANG L. Requirements of vertical stiffness and anti-slip safety for three-pylon suspension bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(3): 474-480. (in Chinese)
- [23] 王秀兰, 柴生波. 三塔悬索桥中塔适宜刚度[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(4): 353-358.
WANG X L CHAI S B. Stiffness value of the middle tower in triple-tower suspension bridges [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(4): 353-358. (in Chinese)
- [24] ZHANG W M, YANG C Y, WANG Z W, et al. An analytical algorithm for reasonable central tower stiffness in the three-tower suspension bridge with unequal-length main spans [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109595.
- [25] 张兴标, 沈锐利, 张松涵, 等. 多塔悬索桥中间桥塔结构顺桥向弹性稳定简化分析方法[J]. 世界桥梁, 2016, 44(6): 69-73.
ZHANG X B, SHEN R L, ZHANG S H, et al. Simplified method for analyzing longitudinal direction elastic stability of intermediate tower structure of multi-tower suspension bridge [J]. World Bridges, 2016, 44(6): 69-73. (in Chinese)
- [26] 王路, 沈锐利, 王昌将, 等. 悬索桥主缆与索鞍间侧向力理论计算方法与公式研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 87-96.
WANG L, SHEN R L, WANG C J, et al. Theoretical calculation method and formula for lateral force between main cable and cable saddle for suspension bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12): 87-96. (in Chinese)
- [27] LI Z C, ZHENG J X. Nonlinear buckling mechanism of an arch subjected to a symmetrically-placed point load [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(11): 4781-4789.
- [28] SARHOSIS V, FORGÁCS T, LEMOS J V. A discrete approach for modelling backfill material in masonry arch bridges [J]. Computers & Structures, 2019, 224: 106108.
- [29] 施洲, 张勇, 张育智, 等. 大跨度铁路下承式钢桁梁柔性拱桥稳定性研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(4): 52-58.
SHI Z, ZHANG Y, ZHANG Y Z, et al. Study on stability of long-span railway through bridge with steel truss girder and flexible arch [J]. China Railway Science, 2019, 40(4): 52-58. (in Chinese)
- [30] HU C F, HUANG Y M. In-plane nonlinear elastic stability of pin-ended parabolic multi-span continuous Arches [J]. Engineering Structures, 2019, 190: 435-446.
- [31] 吕梁, 崔冰, 钟汉清, 等. 南京长江五桥主桥结构非线性稳定性研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 40-45.
LYU L, CUI B, ZHONG H Q, et al. Study on nonlinear stability of structure for main bridge of fifth Changjiang river bridge in Nanjing [J]. Bridge Construction, 2019, 49(4): 40-45. (in Chinese)
- [32] KIM S, WON D, KANG Y J. Ultimate behavior of steel cable-stayed bridges during construction [J].

- International Journal of Steel Structures, 2019, 19(3): 932-951.
- [33] YU X M, CHEN D W, BAI Z Z. A stability study of the longest steel truss deck cable-stayed bridge during construction [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(4): 1717-1724.
- [34] 王春江, 戴建国, 臧瑜, 等. 自锚式钢箱梁悬索桥静力稳定性分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(2): 47-51.
WANG C J, DAI J G, ZANG Y, et al. Analysis on static stability of self-anchored suspension bridge with steel box girder [J]. Bridge Construction, 2019, 49(2): 47-51. (in Chinese)
- [35] 白伦华, 沈锐利, 张兴标, 等. 自锚式悬索桥的面内稳定性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(5): 1500-1508.
BAI L H, SHEN R L, ZHANG X B, et al. In-plane stability of self-anchored suspension bridge [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(5): 1500-1508. (in Chinese)
- [36] ELLOBODY E. Interaction of buckling modes in railway plate girder steel bridges [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 115: 58-75.
- [37] HU X K, XIE X, TANG Z Z, et al. Case study on stability performance of asymmetric steel arch bridge with inclined arch ribs [J]. Steel and Composite Structures, 2015, 18(1): 273-288.
- [38] ISSA-EL-KHOURY G, LINZELL D G, GESCHWINDNER L F. Computational studies of horizontally curved, longitudinally stiffened, plate girder webs in flexure [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 93: 97-106.
- [39] 邵旭东, 曹君辉. 面向未来的高性能桥梁结构研发与应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 41-58.
SHAO X D, CAO J H. Research and application of high performance bridge structures toward future [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 41-58. (in Chinese)
- [40] 邵旭东, 张瀚文, 李嘉, 等. 钢-超薄 UHPC 轻型组合桥面短钢筋连接件抗剪性能研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 39-51.
SHAO X D, ZHANG H W, LI J, et al. Research on shear performance of short rebar connectors in steel-ultra thin UHPC lightweight composite deck [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 39-51. (in Chinese)
- [41] 邵旭东, 罗军, 曹君辉, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 61-75.
SHAO X D, LUO J, CAO J H, et al. Experimental study and crack width calculation of steel-UHPC lightweight composite deck structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3): 61-75. (in Chinese)
- [42] 贺耀北, 邵旭东, 刘榕, 等. 斜拉桥双边工字钢-UHPC 桥面板组合梁静力性能研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(1): 47-52.
HE Y B, SHAO X D, LIU R, et al. Study on static behavior of twin I-steel-UHPC bridge deck composite girder of cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2019, 49(1): 47-52. (in Chinese)
- [43] 裴必达, 李立峰, 邵旭东, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥面板实桥试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(1): 76-84.
PEI B D, LI L F, SHAO X D, et al. Research on field measurement of steel-UHPC lightweight composite deck [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(1): 76-84. (in Chinese)
- [44] 邵旭东, 郭程, 曹君辉. 钢-STC 轻型组合桥面螺栓连接接头区域设计[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 57-66.
SHAO X D, GUO C, CAO J H. Design of bolted joint region for steel-STC lightweight composite bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(1): 57-66. (in Chinese)
- [45] 邵旭东, 郑晗, 黄细军, 等. 钢-UHPC 轻型组合桥面板横向受力性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 70-77, 85.
SHAO X D, ZHENG H, HUANG X J, et al. Transversal mechanical behavior of steel-UHPC lightweight composite bridge deck system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 70-77, 85. (in Chinese)
- [46] 邓富颢. 多塔斜拉桥新体系及徐变次内力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
DENG F H. Research on new system of multi-tower cable-stayed bridge and internal force of creep [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [47] 蒋雨骏. 现浇 STC 桥面铺装施工方案对悬索桥成桥状态影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
JIANG Y Q. Study on the influence of the construction schemes of cast-in-place STC bridge deck pavement on the finished dead state of suspension bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)