

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.234



## 桥梁基础工程 2020 年度研究进展

江昕宇<sup>1</sup>, 武守信<sup>1</sup>, 冯君<sup>1</sup>, 李小刚<sup>2</sup>, 李毅<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122)

**摘要:**桥梁基础的作用是将来自桥梁墩台的荷载平稳地传给地基,它是连接桥梁结构和大地持力层的基本结构。与其他建筑物的基础不同,桥梁基础承受上部结构传来的动荷载,通常位于水中或深水激流中,并且有庞大的体型和自重。由此带来的设计、施工和运营维护问题构成了桥梁基础工程领域独特的研究课题,尤其在各种跨海、跨江、跨不良地质区域的桥梁建设中,基础工程的问题尤为突出。本文以国内外桥梁基础工程领域的科研成果为主要依据,总结和评述近一年来在桥梁基础结构形式、基础冲刷、基础施工和基础抗震方面的研究进展,分析和讨论目前桥梁基础工程领域存在的问题,以期指出未来的研究方向和亟待开展研究的课题。分析表明,桥梁基础工程领域的研究应重视以下几个方面:近海岸深水复杂基础的水沙作用理论和输沙机理;适合我国深海地质特点的新型深水基础结构;大型沉井基础下沉和着床关键技术;以及地震作用下的土-基础-结构三者动力相互作用。

**关键词:**桥梁基础;深水基础;冲刷;海洋桥梁;土-基础-结构相互作用

**中图分类号:**U443.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0308-07

### State-of-the-art review of the bridge foundation engineering in 2020

JIANG Xinyu<sup>1</sup>, WU Shouxin<sup>1</sup>, FENG Jun<sup>1</sup>, LI Xiaogang<sup>2</sup>, LI Yi<sup>2</sup>

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

2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, P. R. China)

**Abstract:** The foundation of a bridge is an essential structural part linking the bridge with the ground, and its function is to transmit the loads smoothly from piers and abutments to the supporting strata. Unlike foundations of other civil structures, the foundations of bridges are subjected to dynamic loads coming from the superstructures, usually located in water or even deep water and torrents, and have large volumes and self-weights. Consequently, there are special issues related to the design, construction, and maintenance of bridge foundations need to be addressed, especially those relevant to the bridges crossing wide rivers, deep seawaters, and poor geological terrains. Based on the published journal articles and reports, this paper reviews the progresses in the research and development of bridge foundation types, foundation scour, foundation construction, and seismic resistance of foundations. Existing issues in the research and development of bridge foundations are discussed and the following topics are suggested for future studies: water-sediment interaction theory and mechanisms of sediment transport for scour at deep water foundations; advanced deep-water foundation structures suitable for China's sea bedrock; key techniques for positioning and setting of large caisson foundations; and dynamic soil-foundation-structure interaction under earthquake.

**Keywords:** bridge foundation; deep-water foundation; scour; sea-crossing bridge; soil-foundation-structure interaction (SSI)

桥梁基础的作用是将来自桥梁墩台的荷载平稳地传给地基,它是连接桥梁结构和大地持力层的基本结构。与其他建筑物的基础相比,桥梁基础的特点是:1)承受上部结构传

来的动荷载;2)常位于水中,甚至深水激流之中或不良地质区域;3)体型和自重较大。由于这些特点,桥梁基础工程领域的研究课题侧重于基础的稳定性、基础的冲刷与防护、不

收稿日期:2021-07-25

基金项目:中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司重大科技项目(KY2019-JT-22)

作者简介:江昕宇(1997-),女,主要从事桥梁基础设计和土-结构动力相互作用研究,E-mail:jxy@my.swjtu.edu.cn。  
武守信(通信作者),男,博士,E-mail:swu@swjtu.edu.cn。

良地质区域(黄土、岩溶及膨胀土等)基础的设计和施工、基础的损伤、加固和再利用、基础的地震响应和减隔震措施等方面。对于跨海桥梁,波浪作用和海水对基础的腐蚀是尤其重要的研究课题。

通过对 2020 年中文核心期刊和国际期刊发表的与桥梁基础工程有关的文献进行归纳和分析,针对以下几个方面对近期桥梁基础工程的研究进展进行述评:桥梁基础类型、基础冲刷、深水桥梁基础、不良地质区域基础的设计与施工,以及桥梁基础的抗震。原始文献主要来源于 *Ocean Engineering*, *Geotechnical Engineering*, *Marine Georesources & Geotechnology*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *Engineering Structures*,《桥梁建设》《岩土力学》和《振动与冲击》等。

## 1 桥梁基础结构型式

对位于旱地的桥梁基础或在水深为 5~6 m 以下的浅水基础,基础的构造型式仍然以传统结构型式为主。桩基础仍然是广泛采用的基础形式,在跨江跨河的长大桥梁中所占比例最高,而其中钻孔桩基础应用最为广泛。随着跨海桥梁的建设,深水基础的结构形式受到广泛关注,成为桥梁基础工程中的一个重要研究课题。桥梁深水基础主要有沉井基础、沉箱基础、桩基础、管柱基础及特殊基础等类型。特殊基础包括钟形基础、锁口钢管桩基础、地下连续墙基础、负压筒形基础和浮式基础等。沉井基础一直是广泛采用的深水基础形式,桩基础自 20 世纪 70 年代以后成为我国跨河桥梁的主要基础形式。管柱基础是我国于 20 世纪 50 年代研发成功的一种大型水下基础形式,并于 80 年代后期逐渐被大直径钻孔桩取代。

为了适应深海桥梁基础的建设,近年来对一些新的基础结构形式进行了研究。由沉箱(或沉井)加桩基(或管柱)形成的复合基础为深海桥梁基础提供了一种新的思路。这种沉井-桩复合基础由于桩的约束作用,沉井底部的抗滑移能力增加,从而提高了基础抵抗水平荷载的能力(图 1(a))<sup>[1]</sup>。这一基础形式综合了沉箱(沉井)与桩基(管柱)两种基础的优势,能适应更复杂的水文地质条件。复合基础在美国、日本以及韩国的跨海桥梁中曾经采用过。国内在 20 世纪初曾经有过发展,但是由于涉及两种施工方法,造价较高,在 80 年代后逐步淘汰。在我国未来的跨海桥梁建设中,复合基础仍然是值得重新考虑的一种基础形式。

设置基础是一种在陆地上预制基础部件,然后浮运就位,直接设置在经过处理的海底地基上的大型深水基础(图 1(b))<sup>[1-3]</sup>。设置基础包括沉井设置基础和钟形设置基础。这一类基础的优点是将大量水上现场作业移到岸上进行,减少水上作业时间,可最大程度地减小施工难度,加快施工进度,提高工程质量;而且设置基础承载力高、整体刚度大、抗侧向外力的性能好。设置基础是国外跨海连岛桥梁的一种主要基础结构,在日本、丹麦、美国、英国和加拿大等发达国家的跨海桥梁中广泛应用,例如日本的南、北备赞濑户大桥和明石海峡大桥、加拿大诺森伯兰海峡大桥、丹麦大带海峡

大桥、连接丹麦和瑞典的厄勒海峡大桥、希腊里翁-安蒂里翁桥等均采用设置基础。在我国,设置基础的应用和研究还较少,仅在澎湖望安将军跨海大桥、大连星海湾跨海大桥以及商合杭铁路芜湖长江公铁大桥中采用了设置沉井基础。设置基础不仅是一种基础的结构形式,也是一种施工方法。在深海急流、强震、强风浪、易受撞击等复杂恶劣的海洋环境下建造跨海桥梁,基础结构的整体化、建造的预制化以及施工装备的大型化和自动化是未来的发展方向。目前我国跨江海桥梁深水基础普遍采用的桩基加承台形式在水深达到 50 m 的恶劣海洋环境下,其抗侧向荷载能力已经难以满足要求,施工上也越来越困难,在此情况下,设置基础应该成为一种优先考虑的基础结构形式。

桥梁基础的发展方向是向承载能力更高、抗震性能更好、沉降更小和抗船舶撞击能力更强的形式发展<sup>[4]</sup>。传统的桥梁基础仅仅通过增大桩基截面、改变群桩数量、改变沉井断面面积等方式提高基础的承载能力,对处于恶劣环境下(例如水深、浪高、风大、淤泥深厚、覆盖层浅或没有覆盖层等)的跨海大桥是远远不够的。桥梁基础形式的发展应根据工程所在地质环境、施工设备先进程度、技术人员能力等对现有的基础形式进行优化改进或发展新型基础形式。除了设置基础和复合基础以外,目前正处于发展阶段的基础形式有大直径空心桩基础、大型管柱基础、小型沉井群基础、大直径钢管复合桩基、负压筒形基础以及浮式基础等。其中大直径钢管复合桩基础和负压筒形基础(图 1(c))由于施工速度合理、对环境的影响较小,对于一些水深较大并有覆盖层的跨海大桥具有较大的竞争力。对于海水深度达到上百米的跨海大桥,浮式基础(图 1(d))是未来值得重点研究的一个方向。

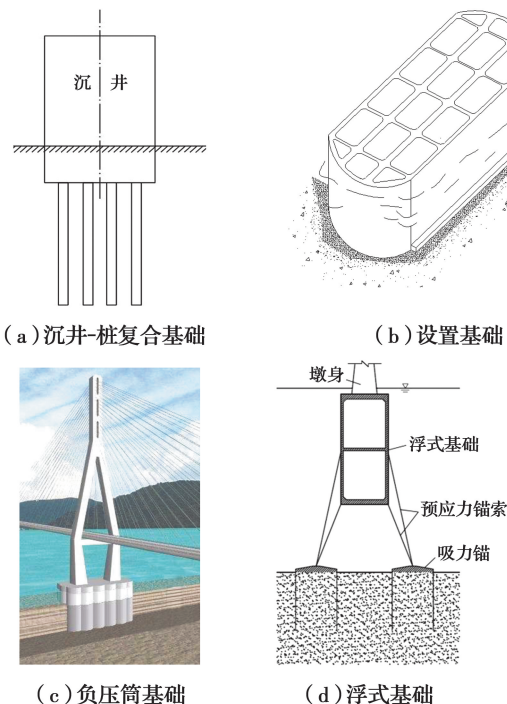


图 1 深水桥梁基础

## 2 浅水桥梁基础的冲刷

在跨江河的桥梁中,基础的冲刷问题是导致桥梁发生破坏的重要原因之一。大多数涉水桥梁的破坏都是由于冲刷使桥梁基础埋深减小,基础承载能力显著下降所致。在桥梁结构中,由于基础冲刷而造成破坏的比例很高。我国多座跨海大桥也出现基础冲刷加快的趋势。从冲刷进程上看,河床除了受自然演变冲刷外,还承受因水下结构物压缩水流引起的一般冲刷及桥梁墩台阻挡水流产生旋涡系统的局部冲刷。在水流动力作用中,桥梁冲刷受基础结构形式、水流特性、河床泥沙运动等多因素影响,目前对其机理认识还十分有限。特别是对于跨海桥梁,因其复杂的基础结构形式、洋流、潮汐、波浪等条件的共同作用,其冲刷机理更为复杂<sup>[5]</sup>。国内外关于桥梁基础冲刷的研究集中在冲刷机理研究、冲刷深度预测、冲刷现场监测方法及冲刷防护措施这四个方

面。在冲刷机理研究方面,桥梁基础冲刷研究主要通过现场调查、试验室观察以及数值模拟进行。张英杰等<sup>[6-7]</sup>通过对渭河及长江上 15 座桥梁进行调查,分析了水深、流速、河床泥沙、桥墩的形状和尺寸等因素对山区桥梁基础局部冲刷的影响。研究发现,不同桥墩形式对局部冲刷造成的影响有明显区别,其中矩形桥墩的影响比其他形式的影响更大;桥墩位置的不同所造成的局部冲刷影响也不同;同时局部冲刷还受季节影响,主汛期的冲刷作用明显大于枯水期。

在冲刷深度预测方面,张大兴等<sup>[8]</sup>通过建立全桥有限元模型,讨论了在最大冲刷深度下桩基础的最不利荷载情况,以及不同冲刷深度下的桥梁基础动力响应情况。雷婷等<sup>[9]</sup>分析比较了冲刷深度的不同计算公式的结果,发现桥梁的局部冲刷计算应结合河流的具体情况。对于简单桥墩,冲刷可以采用规范给出的方法进行,而对于复杂桥墩应采用多种计算公式互相校核。Medina-Cetina 等<sup>[10]</sup>开发了一种概率方法来预测未知桥梁基础的类型,并利用神经网络来预测基础承载力。通过工程实例证明,这一方法可以对冲刷破坏进行风险评估。Bento 等<sup>[11]</sup>提出了一种基于风险的方法来考虑桥梁基础的冲刷,通过计算流量特征和桥梁冲刷深度来模拟河流行为,将桥梁冲刷深度与基础深度之比和优先权因素(脆弱性)相关联,对冲刷风险等级(风险水平)进行定性评估。

在冲刷现场监测方法方面,冲刷监测多采用声呐测深仪、光纤光栅传感器及时域反射计等精密仪器。熊文等<sup>[12]</sup>提出了一种利用时频分析和神经网络对桥梁冲刷动力进行评估的方法(图 2),仅需要加速传感器和数据采集器便可以进行桥梁冲刷动力评估。该方法无论对冲刷深度还是冲刷墩位均具有较高的识别准确度,为常规冲刷损伤评估提供了简便快捷的方法。

在冲刷防护措施方面,周外平<sup>[13]</sup>讨论了桥梁基础埋置深度与地基基础承载力对基础冲刷的影响,总结了桥梁浅基础冲刷的整治方案。刘飞<sup>[14]</sup>对山区公路桥梁冲刷病害情况和加固方法进行了调查分析,结果表明,当山区桥梁基础比较

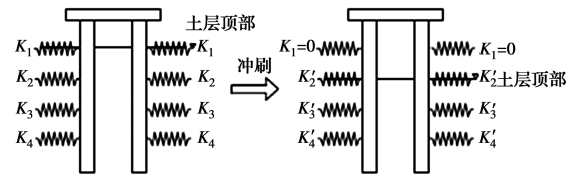


图 2 冲刷发展模型<sup>[12]</sup>

浅时,宜采用清理河床、回填找平后铺砌河床的方式对其进行加固;对于新建山区公路桥梁则可以采用河床铺地的方式进行防护。

## 3 海洋桥梁基础的冲刷

跨海大桥基础经常受到波浪和水流的共同作用,研究波浪和水流联合作用下基础周围的局部冲刷特性、比较冲刷深度和冲刷坑随时间的变化受到研究人员的广泛关注。

跨海大桥基础类型不同,受海水冲刷的影响也不同。由于在水流的作用下,桩基周围土体被清除,故其经常受到海水冲刷的影响。有研究表明<sup>[15]</sup>,土特性的空间变化、冲刷孔几何形状和土的应力会对桥梁桩基产生影响,通过生命周期系统可靠性方法,可以求解冲刷孔几何形状与冲刷应力范围,对冲刷时间效应进行量化。Wang 等<sup>[16]</sup>研究了受不同冲刷(即无冲刷、部分冲刷和完全冲刷)时的液化土中桥梁桩基础的破坏机制。结果表明,冲刷效应不仅对液化场地的阻尼影响较大,还对其桩基的破坏机制产生强烈影响,冲刷前群桩效应主要影响覆盖层中桩的曲率,冲刷后群桩效应主要影响可液化砂土中桩的曲率。

潮流作用下,沉箱周围的局部冲刷已成为影响沿海和近海桥梁工程中基础施工和运营安全的主要因素之一。局部冲刷不仅发生在沉箱沉降到沉积物中的施工阶段,还发生在沉箱悬浮在水中的施工阶段。Xiang 等<sup>[17]</sup>通过实验研究了由具有不同横截面(圆形、正方形和菱形)的沉箱周围的单向和潮流引起的冲刷,结果表明:潮汐冲刷的时空发展比单向冲刷的时空慢;适当选择横截面可以减少沉箱周围的最大冲刷深度;沉箱沉入沉积物中时,最大潮流冲刷深度小于单向潮流,而沉箱悬于水中则产生相反的作用。肖苡轲等<sup>[18]</sup>利用大涡模拟的方法对沉井下沉中的流场进行计算研究,结果表明,伴随着沉井下吃水深度的增加,沉井横向两侧速度场中流速也会增大,相对的水背侧流速减小。

复合沉箱-桩基础作为一种新型深水桥梁基础,在受风、水流、水波以及潜在的船撞船或车辆制动荷载影响时,能抵抗较大的横向动力荷载。有学者<sup>[19]</sup>对 3 种不同类型的深水基础进行了模型测试,包括沉箱、四桩和八桩的沉箱,并且研究了其在各种激励力下的横向非线性动力特性及冲刷深度对地基动力响应的影响,结果表明,激振力和冲刷深度明显影响了基础的振动幅度和共振频率,具有明显的非线性行为。对于复合沉箱-桩基础而言,在冲刷影响下,结构振动频率会减小,而共振频率会增加。Tu 等<sup>[20]</sup>基于 Hardin-Drnevich 模型研究冲刷对地基动力阻抗的影响,提出了一种在冲刷条件下预测复合沉箱基础非线性动力响应的简化方

法,计算结果表明,随着冲刷深度的增加,当考虑土的非线性时,动态阻抗会大大降低。

目前,对跨海桥梁冲刷机理的研究仍然较少。跨海桥梁处于深水、宽阔的海洋环境中,针对各种海洋水动力因素下的冲刷作用机理的研究不多见,对潮流作用下群桩的冲刷机理和理论模型仍然缺乏一致的认识,针对海洋环境下复杂桥梁基础结构(设置沉井基础,群桩基础,管柱基础)的冲刷机理仍需要进一步的深入。

## 4 恶劣地质环境的基础设计

我国西北地区黄土地质较多,这种土质以风力搬运的黄色粉土沉积物为主,成厚层连续分布,掩覆在低分水岭、山坡、丘陵,常与基岩不整合接触,无层理,常含有古土壤层及钙质结核层,垂直节理发育,常形成陡壁。因此,在这种土质修建桥梁具有一定困难。解刚等<sup>[21]</sup>研究了黄土沟谷地区中冲刷深度和边坡土削切对桩基础极限承载力的影响,提出了考虑冲刷效应后斜陡坡桩基的竖向承载力计算公式,为这一类型的工程计算提供参考。杨培伟等<sup>[22]</sup>通过对比原状黄土和强夯黄土沿桩长方向的作用情况,得出黄土经过强夯后会改善桩基的受力行为。

膨胀土具有高分散性及高塑性,吸水后它的膨胀变形不可逆。基坑开挖、基坑回填是进行桥梁基础施工所不可避免的,对处于膨胀土地区的桥梁基础有很大影响。夏伟等<sup>[23]</sup>讨论了膨胀土边坡基坑回填对桥梁基础的影响,结果表明,当回填材料刚度大且基坑坡比大时,降雨后其对桥梁基础的影响较大。

对于软土、淤泥土层等不良土质的影响,周敦等<sup>[24]</sup>通过分析高烈度软土场地桥梁基础在冲刷和地震共同作用下的响应,建立了失效概率模型,得出了联合分布下的作用效应分项系数。任连伟等<sup>[25]</sup>分析了煤矿采动离地表不同距离工作面对桥梁基础的影响,总结了对桥梁基础影响最小的停采工作面。刘彦峰等<sup>[26]</sup>对某深厚淤泥土层悬索桥沉井基础下沉阻力进行施工监测,总结得出其侧壁土压力沿深度方向呈增长趋势(图3),沉井底面支撑力受深度影响较小,而刃脚底面反力值受深度影响较大。

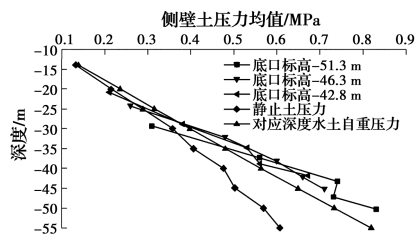


图3 侧壁土压力沿深度变化曲线<sup>[26]</sup>

## 5 基础施工问题

岩溶地段基础施工技术研究在近年来有较快的进展。目前,桩基础在岩溶地区应用最为广泛,是岩溶地区最常见的公路桥梁基础。桩的类型有摩擦桩、嵌岩桩、扩大基础与桩基础混合等。岩溶地段桩基施工在成孔过程中易出现漏

浆、塌孔、卡钻等事故,风险较大,我国技术人员提出了许多关于岩溶处理方面的创新技术。

钻孔桩或灌注桩为岩溶地区的主要桩型,当荷载较大且岩层埋藏深度较小时,可选择嵌岩桩。溶蚀裂隙造成基岩完整性低、岩石承载力不足,为确保桥梁不受其影响,应适当扩大桩基础底部截面积<sup>[27]</sup>。杨胜文等<sup>[28]</sup>总结了桩基在不同地质条件下的溶洞处理技术方案,并探讨了各方案的优缺点。多溶洞地区桩基的主要施工方案有抛填片石处理法、灌注砂浆法、旋喷帷幕法及钢护筒跟进施工法。抛填片石处理法适用于较小溶洞,当溶洞出现漏浆现象时,可采取回填和冲击;灌注砂浆法适用于溶洞层数较多且因其漏浆而易出现塌方的地区,然而,一旦溶洞空间较大而引起混凝土用量过多;对于高度超过8 m的溶洞宜采用旋喷帷幕法;当溶洞内漏水情况严重,采用其他方法无法形成泥石护壁时,可采用钢护筒跟进施工法。

对于深厚卵石层中的桥梁桩基础,需要克服卵石颗粒之间结构松散、胶结强度低等缺点。在桥梁基础施工桩基成孔过程中容易出现塌孔及孔壁渗漏等问题。高清材等<sup>[29]</sup>通过对深厚卵石层进行地质勘察,提出在桩基施工时应结合施工方式添加相应絮凝剂,以降低卵石层的扰动并且避免出现渗漏,或考虑大直径漂石及粉砂胶结层对桩基成孔的影响。

沉井基础在下沉和就位过程中遇到的沉井倾斜、旋转、刃脚遇阻以及井壁或隔墙的开裂问题是沉井基础施工中需要克服的关键问题。尤其是随着桥梁跨度的不断增加,沉井基础的平面尺寸越来越大,大型沉井基础的精确下沉和着床面临更大挑战。国内外学者从现场监测、室内模型试验、理论分析和数值模拟等多方面对沉井基础下沉和就位过程的姿态控制、沉井侧壁以及底部受力开展了大量的研究<sup>[30-33]</sup>。然而,由于施工现场沉井周围土的力学特性高度不均匀,对沉井和土之间的相互作用机理缺乏清楚的认识,在理论上还难以建立控制沉井精确下沉和就位的数学力学模型。对于巨型沉井基础,由于其体积庞大,沉井的自重、构造以及材料的空间力学性能分布与其他中小型沉井基础有着显著区别,而沉井周围和底部土的力学特性更加不均匀,由此造成沉井结构下沉控制和姿态调整更加困难。

施洲等<sup>[34]</sup>基于工作分解结构-风险分解结构(WBS-RBS),对沉井基础的施工过程进行风险评估,以实际工程为例,成功识别出了风险源,为实现沉井基础施工分项工程智能化风险评估提供了参考。秦顺全等<sup>[35]</sup>为解决超大型沉井基础体积和自重大带来的一系列问题,提出了新型沉井基础方案。通过研究其下沉机理,发现影响沉井基础下沉的主要因素是基础截面端阻力与井壁侧摩阻力。张程然等<sup>[36]</sup>通过建立哑铃型组合围堰结构数值三维模型与施工期间现场数据进行对比,得出组合围堰结构受到水流冲击比较大的区域,通过测量水压力以提高计算精度,为组合围堰结构的施工监测提供了参考。

目前,沉井基础的下沉和就位已经成为我国长大桥梁基础施工中的控制性工序。对沉井下沉问题的研究应该从沉

井基础与场地土相互作用的力学机理出发,建立井壁和周围土相互作用的力学模型,采用数值模拟的方法对沉井的下沉进行精确的预测和监控。由于大型沉井周围土的力学性能空间变化很复杂,沉井-土相互作用力学模型应该综合不同尺度的物理力学模型。对于刃脚处遇到硬质胶结土层或大孤石的情况,应采用离散单元和有限单元混合建模,从而可以准确地预测沉井的倾斜和旋转,并及时提出解决方案。

## 6 桥梁基础的抗震研究动态

桩基是桥梁在地震荷载作用下的易损部分,特别是部分嵌土桩基。Liu等<sup>[37]</sup>通过对桩基础进行一系列的准静力循环加载试验,揭示了不同桩型布置下部分埋设群桩基础的地震破坏机理,主要探讨了承台旋转与群桩地震之间的相互影响,发现随着群桩排数的增加,群桩效应对桩基础抗震的贡献有增大的趋势。对于循环荷载作用下的群桩,由于承台旋转会引起桩身轴向荷载的变化,故其可以在设计中控制群桩基础的延性。对于采用群桩基础的拱桥,桩基的布置形式对结构地震响应有很大影响<sup>[38]</sup>。Wu等<sup>[39]</sup>研究了地震-流体联合流场中的群桩效应以及地震-波浪联合流场中的群桩效应。对于跨海大桥基础,当群桩效应系数为0.69时,单桩水动力干扰效应明显,且角桩的水动力大于中心桩。这一研究表明,当有针对性地对截面进行加固处理时,能提高群桩基础的整体抗震性能,并且对桩身水动力影响的认识有了实质性的进展,对改进跨海桥梁结构的抗震设计具有重要意义。何静斌等<sup>[40]</sup>基于振动台模型试验研究了强震区近断层桩基的加速度响应、桩顶相对位移、弯矩和基础的损伤情况,为强震区桩基础抗震设计提供了有价值的参考。

在地震荷载作用下,桥梁基础类型和布置方式对桥墩的地震响应具有一定影响。考虑土-结构相互作用时,桥墩加速度明显降低,特别是对桩基础而言,由于辐射阻尼的作用,桥墩的能量耗散较大;对沉箱基础而言,忽视运动学影响可能是有利的,也可能是不利的。尽管沉箱在桥梁工程中广泛使用,但是沉箱基础在静力和动力领域的研究比桩基和浅基础少<sup>[41]</sup>。Mucciacciaro等<sup>[42]</sup>在考虑场地地震活动、输入运动特征以及沉箱和桥墩的几何形状等因素的情况下,提出了预测地震作用下桥墩弯矩的解析公式。

为了降低地震作用对桥梁的破坏程度,对桥梁基础减震、隔震特性的研究十分活跃。但是,对于基础庞大、造价昂贵的大跨度深水桥梁,隔震支座和减振器技术的减震效果有限。为解决这一问题,有学者<sup>[43]</sup>提出了深水隔振基础。对于位于砂砾层或砂层的桥梁基础,在基础基底下采用带阻尼的隔震材料,分散地震能量,从而大大减少地震反应,有效地保护桥梁和基础。基于砂石或沙垫层的沉箱基础适用于地震多发地区。Tu等<sup>[44]</sup>通过对砂砾石缓冲层的沉箱基础进行横向动力响应的谐波水平激励试验研究,结果表明,砾石垫层比砂石垫层更能有效地耗散振动能量并隔离振动(图4)。陈天尧<sup>[45]</sup>对比桥梁基础隔震模型与非隔震模型在地震下的响应,结果表明,基础隔震支座在多遇地震条件下绝大部分可

减轻地震影响;在罕遇地震下,隔震支座的作用可以发挥到最大。



图4 砾石垫层隔震模型<sup>[44]</sup>

## 7 结论

随着我国大跨度海洋桥梁建设的兴起和快速发展,以及高速铁路网和公路网向艰险复杂山区的持续延伸,桥梁基础工程领域不断遇到新的问题、面临新的挑战。高速、重载、大跨度、不良地质、多变气候以及复杂的气象和海洋环境对桥梁基础的承载力、耐久性和施工技术提出了越来越高的要求。本文对近一年来桥梁基础工程领域出现的一些新问题和针对这些问题的研究进展进行了扼要述评。研究进展表明,深水基础的构造形式和施工技术正在不断进步,但是对跨海桥梁,设置基础是未来值得研究的一种基础形式;对桥梁基础的冲刷虽然进行了很多研究,但得到的进展仍然很有限;对于海洋桥梁,仍然缺乏足够的实测数据和令人满意的理论模型;对大型沉井基础的下沉和就位的精确控制有待发展有效的土-沉井相互作用的分析;在桥梁基础的抗震研究方面,对土-基础-桥梁的动力相互作用缺乏足够的模型试验以量化理论模型中的参数,因而对强震作用下大跨度桥梁的抗震设计难以有效地考虑地基土对地震波的反射和行波效应。

结合我国深海桥梁战略和川藏铁路桥梁的建设,桥梁基础工程领域未来的研究应重视以下几个方面:

1)研究近海岸深水复杂基础的水沙作用理论和输沙机理。目前对于桥墩水流冲刷试验和三维数值模拟已经进行了相当多的研究,但缺乏对水沙作用理论的研究和冲刷机理的分析。对于跨海桥梁,不同基础形状的水流冲刷机理需要通过水沙作用理论给予正确的解释,从而建立有效的冲刷预测模型,并为三维数值模拟提供正确的理论依据。

2)研究适合于我国深海地质特点的新型深水基础结构,提高桥梁基础施工的整体化、预制化、机械化和智能化。尤其重视发展大型设置基础,借鉴海上石油钻井平台和贮油平台基础以及海上灯塔基础的构造形式,提高大型桥梁深水基础的设计和施工能力,制定和完善大型深水桥梁基础的设计和施工规范,探索深水基础的破坏机理。

3)开展大型沉井基础下沉和着床关键技术研究。对于复杂地质环境下大型乃至巨型的沉井基础,应重视对沉井下沉和着床的全过程力学行为研究和理论建模,尤其是通过模

型试验建立沉井壁和周围土相互作用的物理模型,准确考虑非均匀土体对沉井偏移和旋转的影响。对于刃脚处遇到硬质胶结土层或大孤石的情况应研究建立不同的物理模型。

4)地震作用下土-基础-桥梁三者动力相互作用的试验研究仍然是今后研究的重点,尤其应重视对各种桥梁基础形式的土-基础动力相互作用的研究。目前,对于浅基础的地震响应,土-基础的动力相互作用研究较多,但对于桩基础和沉井基础在地震作用下的土-基础-结构的动力相互作用缺乏足够研究。多数情况下,采用桩基础的桥梁在设计中并不考虑土-基础动力相互作用。对于深水基础,土-基础-水-结构的动力相互作用尤其值得研究,特别是对于深海地基土的动力阻抗函数需要进行理论分析和试验验证,以明确土-基础-水-结构动力相互作用对于跨海桥梁地震响应的实质性影响。

#### 参考文献:

- [1] 李军堂,秦顺全,张瑞霞. 桥梁深水基础的发展和展望[J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 17-24.
- [2] 姜宏,周翰斌. 跨海桥梁深水设置基础建造技术进展[J]. 广东公路交通, 2019, 45(1): 31-37.
- [3] 刘自明. 桥梁深水基础[M]. 北京:人民交通出版社, 2003.
- [4] 龚维明,王正振,戴国亮,等. 长江大桥基础的应用与发展[J]. 桥梁建设, 2019, 49(6): 13-23.
- [5] 郭健,蒋兵. 近30年桥梁基础冲刷研究进展及关键问题[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 1-16.
- [6] 张英杰,魏松. 山区桥梁基础局部冲刷调查分析[J]. 吉林水利, 2020(7): 56-58, 62.
- [7] 张英杰. 山区桥梁基础局部冲刷分类及危险性评价研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2020.
- [8] 张大兴,王洁光,李斌,等. 桥梁基础冲刷对结构静动力特性的影响分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(3): 203-206.
- [9] 雷婷,任建民,陶虎,等. 桥墩基础局部冲刷计算方法的对比研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(5): 61-68.
- [10] MEDINA-CETINA Z, YOUSEFPOUR N, BRIAUD J L. Probabilistic evaluation of unknown foundations for scour susceptible bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(10): 04020074.
- [11] BENTO A M, GOMES A, VISEU T, et al. Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations [J]. Engineering Structures, 2020, 223: 111115.
- [12] 熊文,张愉,李飞泉,等. 基于时频分析与神经网络的桥梁冲刷动力评估[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(4): 397-404.
- [13] 周外平. 铁路桥梁浅基冲刷防护方案探讨[J]. 铁路工程技术与经济, 2020, 35(1): 33-35.
- [14] 刘飞. 山区农村公路桥梁墩台的病害分析与冲刷防护加固设计[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(1): 111-112.
- [15] WU Z Y, LUO Z. Life-cycle system reliability-based approach for bridge pile foundations under scour conditions [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(2): 412-423.
- [16] WANG X W, JI B H, YE A J. Seismic behavior of pile-group-supported bridges in liquefiable soils with crusts subjected to potential scour: Insights from shake-table tests [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(5): 04020030.
- [17] XIANG Q Q, WEI K, QIU F, et al. Experimental study of local scour around caissons under unidirectional and tidal currents [J]. Water, 2020, 12(3): 640.
- [18] 肖苡轲,吴启和,高宁波. 基于大涡模拟的圆端形沉井下沉过程水力特性研究[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(8): 1-5.
- [19] TU W B, HUANG M S, GU X Q, et al. Nonlinear dynamic behavior of laterally loaded composite caisson-piles foundation under scour conditions [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(10): 1265-1280.
- [20] TU W B, HUANG M S, GU X Q, et al. Experimental and analytical investigations on nonlinear dynamic response of caisson-pile foundations under horizontal excitation [J]. Ocean Engineering, 2020, 208: 107431.
- [21] 解刚,刘海鹏,赵宝俊,等. 考虑冲刷效应的黄土沟壑区桥梁桩基极限承载力计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(4): 108-115.
- [22] 杨培伟,龚勇. 湿陷黄土地区桥梁基础桩土作用数值分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(4): 178-180.
- [23] 夏伟,杨立功,李建东,等. 基坑回填对膨胀土边坡桥梁基础影响研究[J]. 水道港口, 2020, 41(4): 469-475.
- [24] 周救,赵威,石雄伟,等. 高烈度软土地场桥梁地震与冲刷联合作用效应研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(8): 88-98.
- [25] 任连伟,刘鹏飞,顿志林,等. 煤矿采动影响下国道桥梁基础变形规律及稳定性研究[J]. 岩土力学, 2020 (Sup2): 1-9.
- [26] 刘彦峰,刘少成,黄锐. 深厚淤泥土层大型沉井基础下沉阻力研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48(3): 58-62.
- [27] 刘洋. 岩溶地区公路桥梁基础设计研究[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(3): 131-132, 134.
- [28] 杨胜文,项道,张平,等. 多溶洞地区桥梁桩基施工技

- 术[J]. 山西建筑, 2020, 46(22): 117-119.
- [29] 高清材, 张国超. 桥梁基础工程中深厚卵石层工程勘察及技术分析[J]. 土工基础, 2020, 34(2): 140-144.
- [30] 魏湛力. 大型陆地锚碇沉井下沉结构受力分析及关键技术[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(2): 16-21.
- [31] 施洲, 李佳奇, 秦搏聪, 等. 大型沉井基础初沉阶段受力特性及开裂控制[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 9-18.
- [32] 朱劲松, 孟庆领, 祁海东, 等. 大型沉井基础侧壁摩阻力分布特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1136-1143.
- [33] 杨膨铭, 黄跃. 超大平面沉井结构受力特性模拟及施工监控分析[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(6): 50-54, 71.
- [34] 施洲, 刘东东, 纪锋, 等. 基于 WBS-RBS 的超大型沉井基础施工风险评估[J]. 铁道建筑, 2020, 60(8): 37-42.
- [35] 秦顺全, 谭国宏, 陆勤丰, 等. 超大沉井基础设计及下沉方法研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 1-9.
- [36] 张程然, 祝兵, 张振, 等. 深水基础哑铃型新型组合围堰结构计算方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 1957-1969.
- [37] LIU T F, WANG X W, YE A J. Roles of pile-group and cap-rotation effects on seismic failure mechanisms of partially-embedded bridge foundations: Quasi-static tests [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 132: 106074.
- [38] 李科, 文继涛, 张康. 丘陵地区混凝土无铰拱桥基础抗震优化设计研究[J]. 城市道桥与防洪, 2020(9): 61-65, 13.
- [39] WU A J, YANG W L. Numerical study of pile group effect on the hydrodynamic force on a pile of sea-crossing bridges during earthquakes [J]. Ocean Engineering, 2020, 199: 106999.
- [40] 何静斌, 冯忠居, 董芸秀, 等. 强震区桩-土-断层耦合作用下桩基动力响应[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2389-2400.
- [41] CONTI R, DI LAORA R, LICATA V, et al. Seismic performance of bridge piers: Caisson vs pile foundations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130: 105985.
- [42] MUCCIACCIARO M, GEROLYMOS N, SICA S. Seismic response of caisson-supported bridge piers on viscoelastic soil [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 139: 106341.
- [43] HUO S L, LI X J, GONG W M, et al. Numerical analysis of the seismic response of a vibration-isolated foundation in deep water [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 510: 052010.
- [44] TU W B, HUANG M S, GU X Q. Dynamic behavior of laterally loaded caisson foundations based on different cushion types: An experimental and theoretical study [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2020, 21(7): 565-579.
- [45] 陈天尧. V型刚构加拱组合桥梁基础减隔震研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.

(编辑 黄廷)