

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.002

胡少伟, 叶宇霄, 喻江, 等. 水电站厂房组合框架结构静动态服役性态分析研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 8-21. (HU Shaowei, YE Yuxiao, YU Jiang, et al. Research progress of static and dynamic behavior analysis of composite frame structure of hydropower plant[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 8-21. (in Chinese))

水电站厂房组合框架结构静动态服役性态分析研究进展

胡少伟¹, 叶宇霄¹, 喻江¹, 王宇航², 孙岳阳¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:为准确、高效地评估高发频率、高烈变地震区水电站厂房钢-混框架结构静动力服役性态特征,结合模型试验、数值分析、方法评估等研究成果,重点进行了钢管组合柱复合服役性能试验研究与机理分析、钢-混凝土组合楼板服役性能试验与理论分析、钢-混凝土组合节点服役性能与安全承载分析试验研究与机理分析、钢-混凝土组合框架结构静动态服役性能研究、钢-混凝土组合框架结构抗冲击服役性能研究、大型组合框架结构服役性能优化分析。对水电站厂房框架结构服役性态研究方法,以及水电站厂房钢筋混凝土结构、水电站厂房钢-混凝土框架结构服役性态方面的研究进展进行了归纳,总结出钢-混凝土组合结构在水电站厂房框架结构中的发展与工程运用中存在的问题及需要推进的研究工作,旨在进行水电站厂房结构服役性能提升与安全保障技术研究。

关键词:水电站厂房; 钢-混框架结构; 静动力服役性态; 综述

中图分类号: TV31; TV61

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2019)06-0008-14

我国西南、西北等地区具有丰富的水能资源,但又恰为高烈度带地震区域,这为水工建筑物的安全服役埋下了重大隐患,因此,有必要对其进行力学性能分析与评价、运营期间的安全调度与性能评估,以避免强震破坏及引发次生灾害。

2008年“5·12”汶川地震灾后大量调查发现,以混凝土梁、混凝土柱,以及混凝土墙体结构为主的建筑物设施损失严重,许多水电站在受灾后不能开机运行,导致受灾区灾后水源、电力供给等能源保障支援工作也受到严重影响^[1]。水电站厂房作为重要的水工建筑物,其安全运行明显区别于其他工业厂房结构运行的特征,主要表现在:①直接影响到机组的稳定运行,严重的则导致设备停机中断生产;②直接受到大坝局部失稳、漫顶、甚至垮塌等威胁;③水电站厂房为工作人员直接作业源地,振动会造成人的消化系统、神经系统、内分泌系统等紊乱,甚至导致疲劳、恐慌等心理伤害。为此,需对高烈变地震区的水电站厂房结构的静动力服役性能特征进行全面了解,确定安全评估范围,以达到准确、高效地评估高发频率、高烈变地震区水电站厂房建筑物结构安全工作性能的目的。依据收集的国内外相关研究资料,并结合模型试验、数值分析、方法评估等研究成果,分析水电站厂房框架结构的服役性态研究特点。

1 服役性态研究方法概述

1.1 服役性态拟静力分析法

目前,分析水电站厂房结构力学特性的主要研究方法有理论计算、数值仿真及试验研究。从理论方面

收稿日期: 2019-10-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401902); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项基金项目(Y419009, Y417015)

作者简介: 胡少伟(1969—),男,河南开封人,教授,博士,主要从事结构工程与材料研究。E-mail: hushaowei@nhri.cn

分析其应力及稳定性态的方法有:材料力学法、结构力学法和有限元法。材料力学法和结构力学法分析计算比较简单,对于结构复杂的厂房结构过于简化,不能真实反映实际应力状态,尤其是在极端条件下复杂部位的应力状态,求解瞬态动力学问题更是困难。20世纪40年代提出了有限元法,该方法能有效处理材料属性和边界条件复杂的问题,对于解决厂房结构应力分析问题具有以下优点:①有限元模型的建立相比于开展大型物理模型试验、仿真分析易于实现;②有限元模型便于分析厂房结构细节部位的力学性能;③有限元模型便于进行参数敏感性分析,为结构改进优化设计提供支撑;④能针对关键部位进行离散模拟,以便确定关键部位的应力分布;⑤方便进行非线性分析、模态模拟分析。

1.2 服役性态动力分析法

动力学研究手段在科学技术和现代化建设中发挥着关键作用。对于水电站厂房结构的动力分析而言,主要是考虑在极端条件(地震作用)下和机组运行条件(谐振、共振)下,其应力分布、稳定性态等特性。当前,水电站厂房结构动力分析方法主要归纳为以下几种:

(1) 振型分解反应谱法^[2-3]。多质点体系的振动可以定义为各个质点振型的叠加,而每一个振型又是一个单自由度体系。经过内力分解计算,可以得出每一振型相对应的结构应力,进而得出多质点体系的结构应力。

(2) 时程分析法^[4]。根据结构动力方程,选择典型强震记录作为地面运动,按照结构振动模型和恢复力模型,利用数值分析方法求解出其动力方程。时程分析法又分为振型叠加法与逐步积分法。振型叠加法是运用不同阶振型关于质量和刚度矩阵正交的特性,通过正则变换将方程解耦,运用单自由度理论求解各阶振型响应,再将结构各阶振型的响应线性叠加后得到实际响应的一种方法。而逐步积分法是通过直接积分的方式来求解动力微分方程得到结构响应,能够很好地处理线弹性与弹塑性结构的问题。逐步积分法又按数值积分方法分为显式与隐式两种,显式分析法是以上一步和当前步计算结果来求出下一步的结果,主要包括中心差分法、线性加速度法等,其优点是稳定性高,但属于有条件收敛,要求选取的时间步长小,否则会导致数值不稳定;隐式积分法则需要进行反复迭代以求解下一步未知结果,其本质是求解耦联方程组。

(3) 随机分析法。基于随机、复杂的震动问题,推演出结构地震反应的统计特性,或者得到最大概然反应。这一分析方法从随机数学出发,使得抗震设计的安全系数更加接近实际情况,该方法属于非确定性分析法。

(4) 能量分析法^[5-6]。将地震输入以能量的形式传递给发生变形的厂房结构,转换成应变能耗散,该方法直接比较输入能量与能量耗散的关系,进而确定结构在地震作用下的变形、强度,以此作为衡量标准,进行结构设计控制。

地震是一种复杂的随机运动,它在结构内部呈现一种能量传递、转化与消耗的过程,能量的传递、转化和消耗构成了结构地震反应的基本特征。长期以来,在抗震设计中,世界各国均广泛采用振型分解法与底部剪力法等分析设计方法,然而,许多震害分析结果表明,这种仅靠位移延性或地震力作为结构抗震设计和地震破坏评估的单一指标是不合适的,它无法在强震作用下准确评估结构的抗震性能,也不能有效地指导结构抗震设计,更不能合理地分析许多实际震害现象。随着大量地震及试验资料的记录,使得能量反应分析方法有了更好的发展和应用。迄今为止,利用能量法来设计与指导抗震分析时,主要的研究内容有以下4点:①在结构遭遇地震时,地震对结构的作用是一种能量输入的过程,因此,结构在地震作用下的总输入能与其影响因素便成为了能量分析方法的首要问题;②当地震作用将能量输入到结构中以后,在结构内部是一种能量传递、转化与消耗的过程,因此,能量的存在形式、分配状态与其影响因素同样是研究的重点内容;③结构的损伤破坏也能从能量的角度反映,通过地震能量研究,可以找到损伤对应的能量本质,并对其进行深入分析;④将能量分析方法作为一种评估结构损伤破坏的依据,结合结构抗震设计,对其进行指导或建议,也是研究能量分析方法的意義所在。

2 水电站厂房框架结构服役性态研究

2.1 水电站厂房钢筋混凝土结构服役性态特性分析

(1) 厂房结构振动研究概述。机组运行工况下的振动会降低机组运作效率,缩短检修周期,严重时会引起整个厂房结构发生振动,甚至共振。随着水利事业的发展,水轮机和蜗壳尺寸也在不断增大,导致主厂房结构跨度增加,排架柱间距增大,强度和刚度减小,加剧了厂房结构的振动。已有大量研究表明,水电站振动问题相当复杂,既有机组和厂房结构耦合振动问题,又有流体与固体耦合问题,深入研究其机理显得较困难。

水电站厂房结构振动是一个多源耦合、多振共激综合体,其振源可分为机械振源、水力振源和电磁振源。机械振源一般为水轮机组运行所引起,其振动频率以转频形式表现;水力振源主要由带有水势的水流流经蜗壳而导致,表现出不稳定性;电磁振源是由于不平衡电磁力导致。文献[7-8]研究表明水力振源是导致厂房结构振动的主要振源。

水电站厂房结构自振特性分析是其动力研究的基本问题。根据最新《水电站厂房设计规范》(SL 266—2014)^[9]规定“机墩自振频率与强迫振动频率之差和自振频率之比值应大于 20%~30%,以防共振”,需对其进行振动安全复合。有必要对整体厂房结构体系开展全面评价、系统评估振动研究。

2002 年,沈可等^[10-11]结合工程“岩滩水电站厂房结构振动试验”,提出了一种简谐振动模型,对楼板结构进行了模态分析,以及水力激振动力响应分析。2004 年,大连理工大学孙万泉^[12]结合十三陵电站厂房结构,建立动态识别法,对水电站厂房结构进行了有限元分析。陈婧等^[13]基于宜兴抽水蓄能电站,从振动位移、速度、加速度和动应力出发,对地下厂房水力振动加以复合评价研究。2011 年,张燎军等^[14]基于泸定水电站厂房结构,建立了水电站厂房非定常湍流、机组、混凝土结构流固耦合振动法,进行了厂房全流道湍流流固耦合仿真分析。赵玮^[15]根据烟岗电站地面厂房结构,提出了厂房自振和共振解决方案,该方案对厂房结构的设计和研究具有借鉴作用。张龔等^[16]以厂顶溢流布置式厂房结构为对象,建立有限元模型,采用小波分析法,研究了厂房结构的自振特性。尚银磊等^[17]从振源、结构自振特性、动力响应 3 个方面概括了水电站厂房结构振动研究以及应用成果。李志龙等^[18]以引水式水电站厂房结构为对象,建立三维有限元模型,分析了该结构的固有频率与共振特性。文献[19]通过建立水电站厂房三榀钢-混凝土组合排架模型,完成了静载作用下组合节点的力学性能、组合排架柱的组合特性试验,得到了组合排架结构具有良好的整体性能、表现出完美的协同组合特性的结论。

与地震作用相比,水力机械导致的振动问题一般不至于破坏结构物本身,但会影响到运行的仪器设备和工作人员的人体健康。因此有必要进行水电站厂房结构振动安全评价。

(2) 厂房结构动力响应研究概述。采用共振校核法对于简单的振动系统是有效的,但对于振源和振动体频率分布非常广泛的水电站厂房系统却难以精确判别。理论与试验都表明,复杂振动系统的最大动力响应并非一定出现在结构的第一阶自振频率上,而可能出现在某一高阶频率上,因此,必须采用动力响应分析法来计算结构在外部动荷载作用下的位移、应力等力学参数。

2010 年,韩爱萍等^[20]针对大中型水电站地面厂房振动特性分析复核和抗震设计,以地处高地震区的某水电站地面厂房为例,分析了厂房结构的整体动力特性。解凌飞等^[21]采用三维有限元法计算了西津水电站主机间 3 号和 4 号机组段地震作用下的动力响应,对主机间特征点位移和应力进行了安全复核。崔建华等^[22]采用振型分解反应谱法对某水电站副厂房结构进行抗震计算分析,给出了结构自振特性以及在地震作用下的动位移、动应力。鹿宁等^[23]以实际工程项目怒江赛格水电站厂房为研究对象,运用静力弹塑性方法分析了混凝土进入塑性阶段后厂房结构的抗震性能。苏晨辉^[24]以混凝土损伤塑性本构为基础,通过有限元数值模拟、多因素耦合建模,开展了针对水电站厂房的地震响应研究。王飞^[25]通过解析推导和数值模拟研

究了近断层地震动脉冲特性、入射角对水电站厂房地震响应影响规律。

2.2 水电站厂房钢-混框架结构服役性态动力特性分析

相比于建筑领域,组合结构在国内水利工程上的研究起步较晚,经验也不多,缺乏工程实际经验。据统计,当前我国大多数水电站厂房结构还在采用传统的钢筋混凝土结构。钢管混凝土组合结构在我国首个水电站厂房中的运用是2004年底建成的乌江洪家渡水电站厂房排架结构^[26-27];其次,四川甘孜州泸定电站厂房设计采用了钢管混凝土组合柱排架形式,新疆柳树沟水电站上部厂房采用了钢管混凝土组合柱。

2005年,卢羽平等^[28]借助ANSYS软件,对洪家渡水电站厂房钢-混凝土叠合排架柱进行了模态分析和共振校核。2011年,覃丽钠等^[29]进行了矩形钢管混凝土柱在水电站厂房中的应用研究。2013年,张冬等^[30]根据钢管混凝土组合排架柱中钢管和核心混凝土的受力特点和损伤规律,进行了三维有限元静、动力仿真分析,研究了静力、动力条件下钢管、混凝土的塑性损伤规律。吴军中等^[31]采用有限元软件ADINA进行了空心钢管混凝土组合柱抗震性能研究。结果表明,矩形空心钢管混凝土组合柱比实心钢管混凝土组合柱的抗震性能更好。周焯^[32]进行了钢管混凝土柱在水电站厂房结构中的应用研究。方鹏飞^[33]以某水电站厂房钢管混凝土新型组合结构为研究对象,研究了钢管混凝土排架结构动力特性。胡少伟等^[34]以水电站水轮发电机组运行的特征频率为参数指标,分别对矩形截面空心钢管长柱、圆形截面空心钢管长柱、矩形截面钢-混组合长柱、圆形截面钢-混组合长柱4种模型进行模态分析及共振校核研究。

3 水电站厂房钢-混组合框架结构静动态服役性态研究进展

3.1 钢管组合柱复合服役性能试验研究与机理分析

国内缺乏构件的抗扭刚度、扭矩-扭转角全过程曲线以及在往复扭转荷载下受力性能等计算方法的研究,且缺少钢管混凝土组合柱在压弯剪扭复杂荷载下的破坏机制和承载力计算方法研究,胡少伟和王宇航等^[34-38]对钢管组合柱复合服役性能进行了深入研究。

胡少伟团队进行了钢管混凝土组合柱轴压服役性能试验研究,提出了钢管混凝土组合柱轴压服役性能试验模型,开展了圆形截面、方形截面、矩形截面钢管混凝土组合柱轴压服役性能试验,得到了钢管混凝土组合柱核心混凝土温度-时间关系、限制膨胀率-龄期关系和应变-时间关系;开展了钢管混凝土组合柱轴压模型声发射定位识别特征试验,研究了钢管混凝土组合柱轴压过程各个阶段声发射累计能量试验参数,得到了有效表征钢管混凝土组合柱轴压试验各个阶段损伤到破坏声发射累计能量发展趋势及演化规律(见图1~2)^[39-40]。

研究表明:钢管混凝土在养护初期便能通过膨胀自应力建立起主动紧箍力,产生自应变,但应变峰值与内部混凝土温度最高点会存在时间上的缓滞;不同截面形式的钢管混凝土组合柱在轴压荷载作用下仍均表现出弹性、弹塑性、破坏3个工作阶段,但截面形式的不同以及由此引起的约束效应的差异会影响各阶段荷载范围的大小,圆形试件线弹性阶段占比最大,方形试件次之,矩形试件最小;钢管混凝土组合柱在轴压破坏的各阶段中均显现出明显的声发射参数特征,振铃计数以及能量等参数能直观反映出试件从初期损伤到破坏整个加载过程中的损伤变化规律,因而利用声发射检测技术能很好地表征和预测钢管混凝土短柱轴压破坏各阶段的损伤形态以及演化规律。

胡少伟团队进行了钢管混凝土组合柱轴压承载机理分析,基于钢管混凝土组合柱的膨胀受力特性,在普通钢管混凝土柱轴压承载力计算理论的基础上,运用双剪统一强度理论,建立了同时考虑尺寸效应和膨胀效应圆形截面钢管混凝土组合柱轴压承载能力分析模型,推导得到了圆形钢管组合柱轴压极限承载能力计算式。运用塑性全量理论,考虑钢管对核心混凝土约束效应不均匀性影响,建立了矩形截面钢管混凝土组合柱轴压承载能力分析模型,完成了钢管长边与短边轴压强度差异性分析,得到了矩形钢管组合柱轴压承载能力计算式。

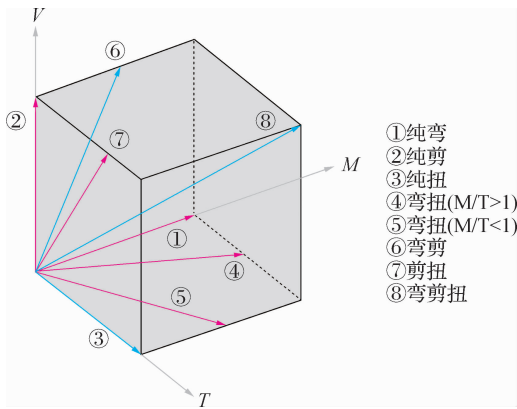


图 1 钢管混凝土柱弯-剪-扭加载路径示意^[39]

Fig. 1 Diagram of bending shear torsional loading path of concrete filled steel tubular column^[39]

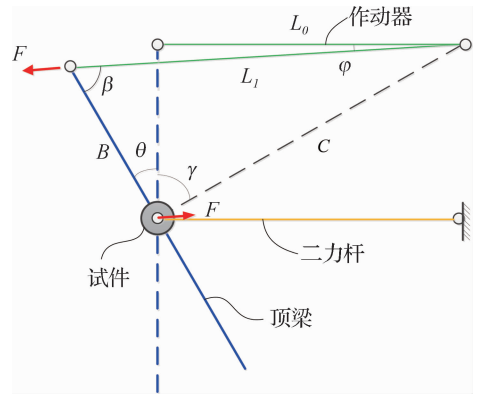


图 2 加载过程大变形几何关系^[40]

Fig. 2 Geometric relation of large deformation during loading^[40]

胡少伟团队与重庆大学王宇航团队合作进行了钢管组合柱压弯剪扭复合服役性能试验研究与安全承载分析^[35-38],王宇航等开展了 10 根钢管混凝土柱试件在纯扭、压弯剪和压弯剪扭荷载作用下的拟静力往复加载及单调加载试验。试验结果表明,钢管混凝土柱在压弯剪扭荷载下具有良好的承载能力和塑性性能,破坏模式取决于弯扭比和剪跨比,在压弯剪及压弯剪扭复合受力下,截面的轴向变形基本满足“平截面假定”,钢管混凝土柱在往复纯扭荷载作用下的骨架曲线与单调纯扭加载曲线基本重合,如图 3~4 所示^[41]。

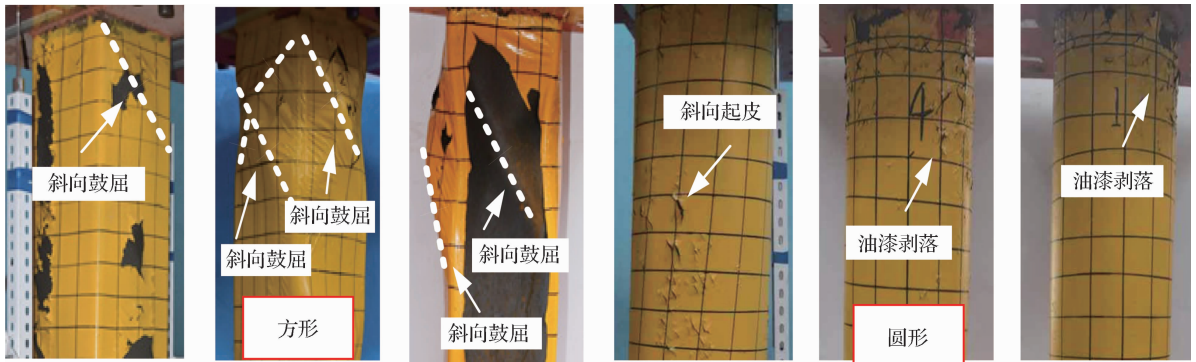


图 3 钢-混组合柱破坏形态

Fig. 3 Failure mode of steel-concrete composite columns

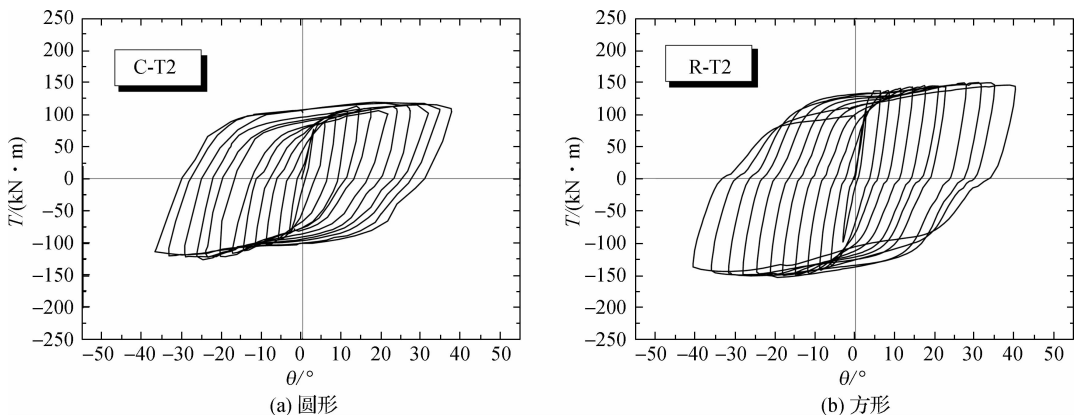


图 4 扭矩-扭转角滞回曲线

Fig. 4 Torque-torque angle hysteresis curve

采用通用有限元程序 ABAQUS 进行了钢管混凝土柱的精细有限元建模及计算分析。在建模过程中重点探讨了材料的本构关系模型,并将计算结果与试验结果比较,验证了有限元模型的准确性,为大量参数分析提供基础。

胡少伟团队进行了钢管组合柱扭、弯、剪承载力与刚度安全评估分析,基于精细化有限元模型参数分析,探讨了各关键因素对钢管混凝土组合柱复合承载力的影响规律,建立了钢管混凝土柱的抗扭承载力、抗弯承载力以及抗剪承载力计算方法,形成了钢管混凝土组合柱扭、弯、剪承载力安全保障分析理论。探明了各关键参数对钢管混凝土组合柱抗扭、抗弯、抗剪刚度的影响规律,提出了钢管混凝土组合柱在纯扭、纯弯和纯剪下的初始刚度和使用阶段刚度计算公式,形成了钢管混凝土组合柱扭、弯、剪刚度安全保障分析理论。

团队进行钢管组合柱压弯剪扭复合服役性能分析,在大量有限元计算结果的基础上,研究了钢管混凝土柱在压弯剪扭复合受力下的承载力相关关系,得到了考虑剪跨比影响的钢管混凝土压弯剪扭承载力相关方程。

胡少伟团队进行钢管组合柱声发射源定位及传播服役特性研究,引入探头能量接受率概念,设计了钢管组合柱声发射源定位及传播模型试验,建立了基于声发射探头所采集信号真实能量值的声发射源定位算法,研究了钢管组合柱不同频率段声发射信号的衰减规律。

3.2 钢-混凝土组合楼板服役性能试验与理论分析

减小楼板自重是减轻房屋总重的最佳途径之一,且开发轻质、高强的楼板结构形式对于降低钢结构造价具有直接影响。目前,已研究、开发出一系列适用于高层钢结构房屋的楼板形式,其中压型钢板-轻骨料组合板拥有许多特点和优势。本团队开展了钢-混凝土组合楼板服役性能试验与理论分析,突破了常规厂房结构楼板的设计与应用现状,实现了型钢与钢筋混凝土楼板超常组合作用与建造效率,完成了组合楼板服役性能试验研究与理论分析。

团队对现有的组合楼板形式进行改进与设计,提出了新型钢-混凝土组合楼板模型,进行了钢-混凝土组合楼板正截面承载力和纵向剪切承载力力学服役性能试验研究,揭示了组合楼板受力变形与破坏规律,如图 5~6^[42]所示。分析了压型钢板厚度、抗剪钢筋间距、楼板总厚度 3 个因素对正截面抗弯和纵向抗剪承载力的影响,建立了压型钢板与混凝土端部滑移测试新方法,研究了组合板不同抗剪连接形式下的组合楼板挠度与滑移变化规律,如图 7^[43]所示。

团队开展了钢-混凝土组合楼板有限元承载能力分析研究,提出了钢-混凝土组合楼板承载能力安全保障分析的组合作用模式及剪切破坏模式,采用受弯承载力塑性设计, m-k 和 PSC 法,给出了适用于 YX-76-344-688 型压型钢板及黏土陶粒轻骨料混凝土组成的组合板受弯承载计算式,如式(1);和纵向剪切安全保障计算公式,如 m-k 法式(2)和 psc 法式(3),本研究方法为此类型压型钢轻骨料组合板的工程设计提供了技术指导^[42-43]。

$$M_y = f_s A_{s1} \frac{x}{2} + A_{s2} \left(\frac{f_s + f_y}{2} \right) \frac{(h_s - h)}{h_s} \left(h_s - h - z_1 + \frac{x}{2} \right) + f_y \left(\frac{A_{s2} h}{h_s} + A_{s3} \right) \left(h - z_2 + \frac{x}{2} \right) \quad (1)$$

$$V_u = m \frac{A_s h_0}{a} + k b h_0 \sqrt{f_c} \quad (2)$$

$$M_u = N_{cu} z + M_{pr} \quad (3)$$

$$N_{cu} = \tau_u b (L_s + L_0) \leq N_{cf} = \min(A_s f_y, f_c h_c b)$$

在此基础上,建立了适用于组合楼板分析的混凝土塑性损伤本构模型,以标准混凝土棱柱体为评估仿真单元,进行了组合板有限元安全保障模拟分析与安全保障评估分析,验证了利用该种分析方法研究钢-混凝土组合楼板安全承载水平可行性,为工程人员设计提供了参考依据。

团队进行了高性能钢-混凝土组合楼板激励响应服役特性分析研究,设计了三榀装配式高性能组合楼板模型,进行了传感器优化布置下的振动激励响应试验,得到了组合楼板的加速度响应特性、应变响应特性,以及竖向位移响应特性的分布规律。

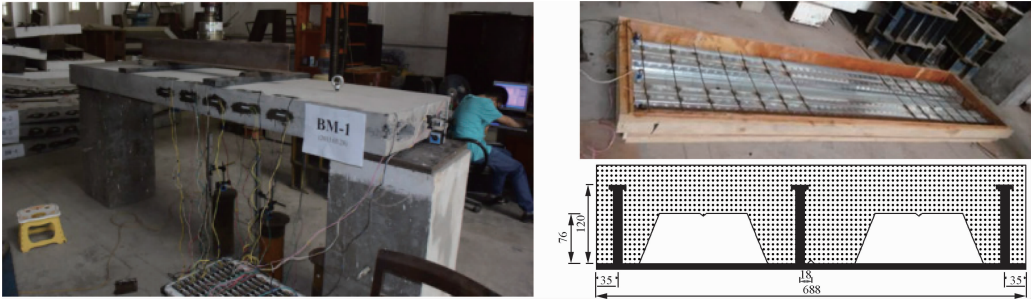


图 5 压型钢板-轻骨料混凝土组楼板^[42] (单位:mm)

Fig. 5 Profiled steel sheeting-lightweight aggregate concrete floor slabs^[42] (unit:mm)

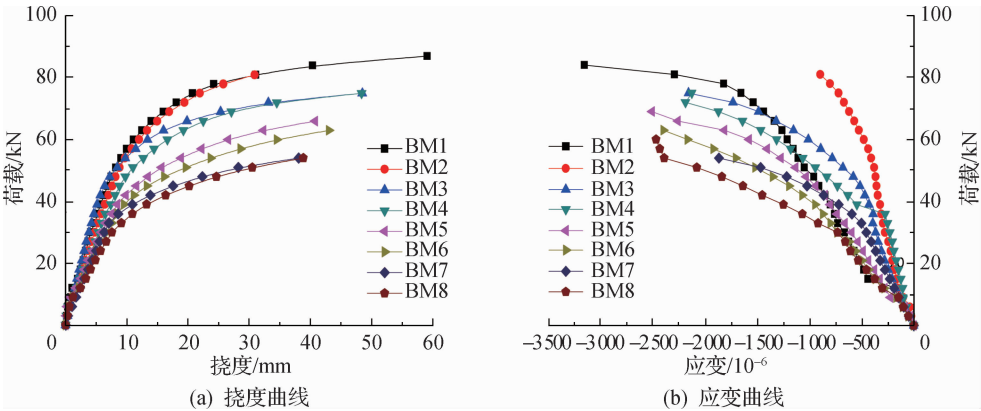


图 6 挠度和应变曲线^[42]

Fig. 6 Deflection and displacement curves^[42]

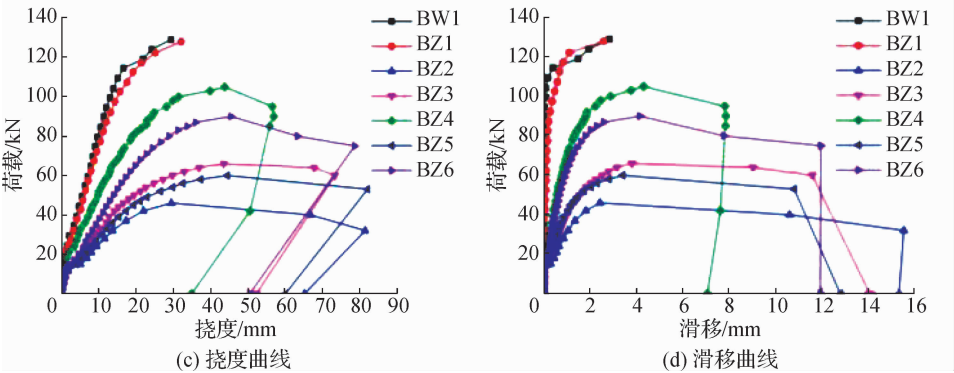
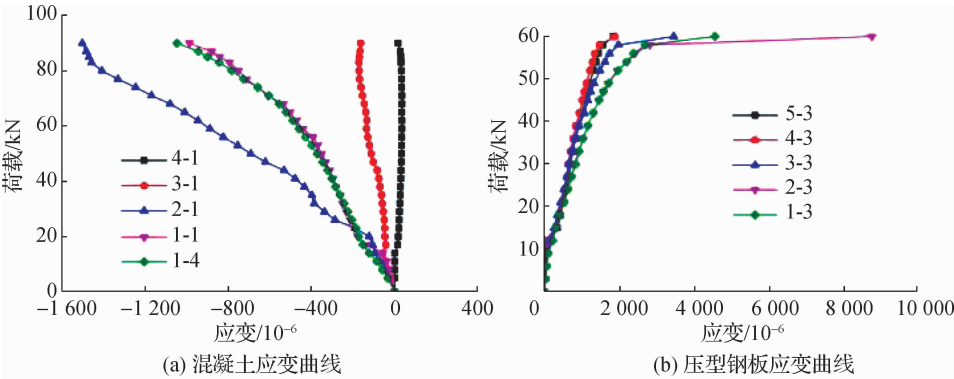


图 7 压型钢板-轻骨料混凝土组楼板挠度与滑移变化规律^[43]

Fig. 7 Variation of deflection and slip of profiled steel sheeting-lightweight aggregate concrete composite slabs^[43]

基于三榀高性能组合楼板激励响应特性试验研究,建立了榀-榀互相关分析函数模型,进行了不同力学性能参数下的榀-榀互相关分析,找到了组合楼板振动激励响应动力性能分布规律。

团队进行了钢-混凝土组合楼板声发射特性试验与时频特征分析,开展了组合楼板破坏性拉拔声发射特性试验,建立了基于实际接收能量值的损伤源定位及识别方法,研究了声发射信号在混凝土板、钢-混凝土组合楼板结构体系中的传播特征及时空分布规律,提高了定位识别精度。

3.3 钢-混凝土组合节点服役性能与安全承载分析

胡少伟团队与重庆大学王宇航团队合作,开展了钢-混凝土组合节点服役性能与安全承载分析研究。突破了常规单个小构件节点缩尺模型研究手段局限性,实现了组合结构受力特性由单个节点单元研究提升到框架整体中节点研究的突破,完成了多功能型钢-混凝土组合节点服役性能与安全评估技术研究。

团队开展了钢管混凝土柱-H形钢梁节点服役性能试验研究,进行了4组(THB节点、STI节点、AH节点及AV节点)12个钢管混凝土柱-H形钢梁节点拟静力试验研究,阐述了常规试验装置中存在的问题及其对试验结果的不利影响,研发了能真实反映节点受力特征的柱端加载试验装置。分析了各种类型节点的破坏特征、延性、耗能性能、强度和刚度退化、轴压比对节点性能的影响,探讨了不同节点构造形式的钢管混凝土柱-H形钢梁节点的抗震性能,明确了THB节点、STI节点、AH节点及AV节点的破坏形态、破坏过程和极限承载力。

团队进行了STI节点、THB节点、AH节点和AV节点三维非线性安全保障与评估分析。建立了隔板单边贯通壁柱节点(STI节点)和穿芯高强螺栓-端板节点(THB节点)的有限元分析模型,分析了STI节点、THB节点各部件应力分布情况、内力传递机制和节点破坏情况,得到了STI节点、THB节点的理论计算滞回曲线均呈饱满梭形的分布特征,揭示了该类型节点承载力、刚度、延性及耗能能力机理,明确了两种类型节点在单调荷载和循环荷载作用下的力学性能。另外,分析了AH节点和AV节点各部件的应力分布情况、内力传递机制和节点破坏情况,明确了AH节点和AV节点的耗能能力和安全评估范围。

团队进行了SSTI节点和THB节点滞回性能安全保障度研究和节点承载力安全评估研究,研究了柱子轴压比和混凝土强度对SSTI节点滞回性能的影响,分析了柱子轴压比、混凝土强度、穿芯高强螺栓预拉力、端板厚度及其加劲肋对SSTI节点滞回性能的影响,明确了影响节点正常使用性能的安全保障因素。研究了轴压比、混凝土强度、穿芯高强螺栓预拉力、端板厚度及其加劲肋对THB节点滞回性能的影响规律,找到了影响节点使用性能的制约因素,提升了该类型THB节点服役安全度。建立了SSTI节点和THB节点的抗剪承载力计算模型,提出了节点的抗剪承载力计算方法,形成了钢管混凝土柱-钢梁节点承载力安全保障分析理论。

团队开展了组合柱-钢梁-牛腿节点组合服役性能试验研究,设计了大型组合柱-钢梁-牛腿节点组合服役性能试验模型,研究了多种类型牛腿在不同工况下的静力力学服役性能,得到了组合柱-钢梁-牛腿节点组合作用下桁架梁纵向分布规律与反拱强化效用,及其关键部位挠度过程曲线关系,如图8所示。

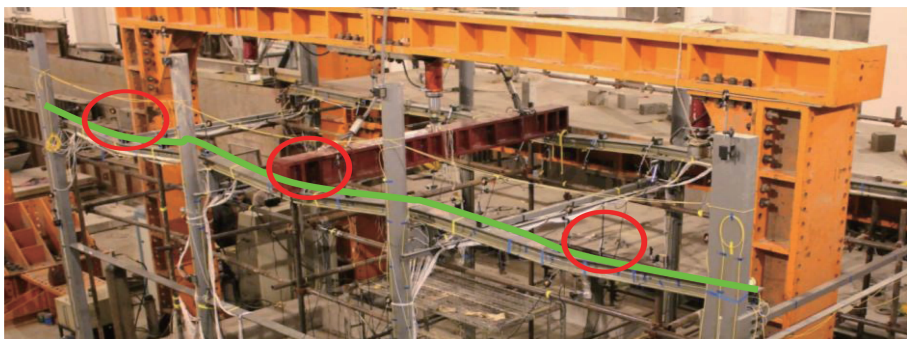


图8 组合柱-钢梁-牛腿节点组合服役性能试验研究

Fig.8 Experimental study on composite service performance of composite column-steel beam-corbel joint

3.4 钢-混组合框架结构静动态服役性能研究

团队进行了钢-混组合框架结构静态整体服役性能试验研究,设计了钢-混凝土组合框架全结构试验模型,完成了三榀组合框架静力整体服役性能试验。研究了接触式与非接触式框架结构中各个组合构件的弯曲分布差异特征,采用光纤测试与降噪分析技术提升了分布式松套光纤进行长距离结构监测成活率及其定量监测与定量评价精度。

团队进行了钢-混组合框架结构静态整体有限元全过程分析,考虑材料非线性和几何非线性双重作用影响,优化了核心混凝土本构模型、钢材双线性模型及二次塑流模型,实现了三榀组合框架全过程静力整体性能有限元全过程分析;找到了分析该类厂房组合框架全结构模型的静力整体性能的分析方法,解决了钢与混凝土组合节点、组合界面之间难以精准化、约束难以精确化的难题,实现了反演分析由构件层次上升到结构体系,由单元节点提升到框架整体的分析突破。

团队进行钢-混组合框架全结构服役性态响应谱评估,提出了加速度人工反应谱模型,开发出计算与“加速度人工反应谱”相关的频率与加速度参数的输出界面,成功实现了对加速度频率响应谱参数的显性化研究。分别考虑受到 x 向水平激励和 y 向水平激励作用,建立了多自由度大型组合框架体系整体结构服役性态响应谱模型,进行了大型组合框架全结构模型的模态分析与服役性态响应谱分析。找到了大型组合框架全结构模型的最大自振频率,提出了用于我国不同烈度地震区服役性态响应谱分析的频率及其对应的加速度等动力参数指标,为水电站厂房组合框架全结构模型的服役性态响应谱动力特性分析提供了参数支持。

团队进行钢-混组合框架全结构服役性能抗震安全评估,改进了人工地震波函数模型,开发出人工地震波生成程序包,实现了模拟真实环境下大型组合框架全结构抗震动力特性安全评估研究。基于开发的人工地震波生成程序包,研究了钢-混凝土组合框架全结构的本构机制、自振特性、 X 方向位移响应特性、 Y 方向位移响应特性、组合效应等动力特征参数关系,完善了厂房主体结构的优化设计、性能提升方面的研究工作。

团队进行了钢-混组合框架高性能组合楼板舒适度性态分析,提出了单人跳跃集中动荷载激励模型(HJ-CDLEM),建立了钢-混组合框架高性能组合楼板舒适度机理方程,解得了考虑时间和空间效应的组合楼板加速度解析表达式。完成了钢-混组合框架高性能组合楼板舒适度试验测试、敏感参数分析以及舒适度性态评估,揭示了激励作用在高性能组合楼板中的响应传播特性及空间分布特征,验证了高性能、超高性能组合楼板体现出的结构性能优势。

3.5 钢-混组合框架结构抗冲击服役性能研究

团队进行了钢-混组合框架结构受振动与冲击作用试验装置研发,提出了 SC-SL 控制阀节流调频转换、压力传感检测模块振动激励反馈控制方法,得到了节流调频模式与荷载激励频率等激励特征参数,研发了一套用于测试结构激励响应特性的可调频空气激励动力性能试验测试方法及其试验装置,提出了一种采用自主研发的斜向冲击装置进行组合楼板斜向冲击试验的方法。分析过程见图 9。



图 9 楼板分析过程
Fig. 9 Floor analysis process

团队进行了钢-混组合框架组合楼板抗冲击服役性能试验研究,提出了钢-混组合板冲击服役性能试验模型,推导出钢-混组合板冲击激励加速度响应函数表达式,研究了钢-混组合板低速冲击作用下的加速度响应时空分布特征。基于高速摄像机及力传感器的数据,进行了冲击荷载下组合楼板与落锤的相对运动过程分析,得出了不同冲击高度下落锤与组合楼板相对运动特征及组合楼板变形过程特征。

团队进行了钢-混组合框架抗冲击性能数值与试验对比分析,根据组合楼板上的应变、位移和加速度传感器,进行了组合楼板的变形分析,得到了与落锤冲击不同的组合楼板变形及动力学特征。根据布置在组合楼板板底、表面和相邻的分布式光纤传感器所得布里渊频移特征,进行了混凝土裂缝的监测,得到了与人工观察相一致的组合楼板裂缝发展特征。

4 水电站厂房钢-混框架结构研究展望

水电站厂房钢-混框架结构中的组合结构是由混凝土、钢筋混凝土、钢材材料所组成的组合构件,自身力学性能比较复杂。目前,国内外学者对其进行了静动力结构分析、抗震性能研究、数值模拟等,但是仍存在许多问题,也缺少相应的技术标准与规程规范,严重影响了该类组合结构在水电站厂房结构中的应用。存在的主要问题如下:

(1) 水电站厂房中涉及的组合结构由不同材料组成,钢管材与混凝土之间混凝土收缩膨胀导致的力学作用机理、组合作用贡献目前没有较完善的理论,待进一步研究,以便更加精确地评估该类组合结构的组合力学特性。

(2) 组合梁柱节点的力学特性和优化设计是该类组合结构运用于水电站厂房中又一核心问题,其受力机理、抗震性能、节点设计值得进一步研究。

(3) 当前大多研究从数值模拟手段出发,如何结合现场试验的测试结果,加以反演整个水电站厂房框架结构的力学特性、动力特性,值得深入探讨。

(4) 由于水电站厂房内运行过程中电磁振动、机械振动、水力振动3个方面导致的振动问题不可避免,而且直接影响到工作人员作业,结构振动引起的激励响应特性及舒适度性态有待进一步研究。

伴随着我国水电事业的日益兴盛,技术标准与规程规范不断完善,智能体系管理不断提升,工程建设中对更精确、更直观、更全面的构建设计具有更加迫切的需求,因此,认为还应该在下面几个方面推进研究工作:

(1) 组合模式多样化,被组合单元的材料性能优化及结构性能提升。基于目前的圆形截面钢管混凝土柱、矩形截面钢管混凝土柱,开展多边形截面、纵向变截面组合柱的力学性能研究,并通过使用性能更加优良的材料,以及更加合理的结构布局,以便更精确地评估该类组合柱的力学特性。

(2) 组合节点形式多样化,进行智能减震节点设计。组合节点的受力性能、破坏模式直接关系到整体结构的安全,为了更系统地了解组合节点的受力性能及抗震行为,有必要对其进行智能化设计,提出智能减震节点模型,对其动力特性、抗震性能、抗灾变性能开展相关研究。

(3) 水电站厂房组合框架结构抗倾覆等极端环境的研究。水电站厂房分为地下厂房和地面厂房两种,地下厂房居于山体内,地面厂房居于坝后,一旦出现山体塌陷、溃坝等极端环境,后果不堪设想,因此,有必要进行相关研究工作。

(4) 大型复杂组合结构体系全过程分析模块的建立。为了改善现有分析程序对大型结构大规模计算所存在计算耗时长、精度低等问题,在软件构建方面还有待于对材料本构模型、非线性分析模块、用户交互模式进行进一步的完善。

(5) 多场激励模式下高性能组合楼板舒适度性态的研究。建立电磁振动、机械振动、水力振动等多场动荷载激励模型,优化高性能材料及组合楼板组合模式,对其进行传播特性及空间分布特征研究,进一步深入探究楼板结构由于振动导致的舒适度性态问题。

5 结 语

依据收集到的国内水电站厂房结构静动力相关研究资料,结合以往模型试验、数值分析、方法评估等研究成果,分析水电站厂房框架结构的服役性态特点。为了满足水电站厂房主体结构大跨度、大宽度的发展需求,适应规范规程高要求、高标准的发展理念,总结和凝练了当前水电站厂房结构静动力服役性态研究进展。旨在反映大型水电站等厂房结构的静动力服役特性分析、精确评估结构整体性能、弥补现有设计规范的不足。对大型大跨组合结构进行进一步静动态性能评估与性态提升,为该组合结构运用于其他类型大型组合结构厂房的设计、建造、维修、加固提供借鉴。

参 考 文 献:

- [1] 李福云, 杨泽艳. 汶川地震灾区大中型水电工程大坝震损分析[J]. 水力发电, 2010, 36(3): 47-50. (LI Fuyun, YANG Zeyan. Seismic damage analysis on large and medium-sized hydropower project in Wenchuan Earthquake-Stricken Area[J]. Water Power, 2010, 36(3): 47-50. (in Chinese))
- [2] YIN Y, HUANG X, HAN Q H. Study on the accuracy of response spectrum method for long-span reticulated shells[J]. International Journal of Space Structures, 2009, 24(1): 27-35.
- [3] 吴雨杭, 尹越, 刘璐. 空间网格结构振型分解反应谱分析合理振型数研究[J]. 空间结构, 2015, 21(4): 25-31, 37. (WU Yuhang, YIN Yue, LIU Lu. Reasonable mode number required in mode superposition response analysis for space frame structures[J]. Spatial Structures, 2015, 21(4): 25-31, 37. (in Chinese))
- [4] 杨志勇, 黄吉锋, 邵弘. 弹性与弹塑性动力时程分析方法中若干问题探讨[J]. 建筑结构学报, 2009(增刊1): 213-217. (YANG Zhiyong, HUANG Jifeng, SHAO Hong. Discussion on linear and nonlinear time history analysis method[J]. Journal of Building Structures, 2009(Suppl1): 213-217. (in Chinese))
- [5] 梁兴文, 田野, 瞿岳前. 基于能量分析法的地震损伤性能智能优化设计[J]. 工业建筑, 2005, 35(6): 6-10. (LIANG Xingwen, TIAN Ye, QU Yueqian. Intelligent optimal design based on energy analysis and seismic damage performance[J]. Industrial Construction, 2005, 35(6): 6-10. (in Chinese))
- [6] 瞿岳前, 梁兴文, 田野. 基于能量分析的地震损伤性能评估[J]. 世界地震工程, 2006, 22(1): 109-114. (QU Yueqian, LIANG Xingwen, TIAN Ye. Evaluation of seismic damage performance based on energy analysis[J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(1): 109-114. (in Chinese))
- [7] 李承军. 抽水蓄能机组压力脉动的测试与分析[J]. 水力发电, 2011(5): 53-55. (LI Chengjun. Tests and analysis on the pressure pulse of pumped-storage unit[J]. Water Power, 2011(5): 53-55. (in Chinese))
- [8] 李炎. 当前我国水电站(混流式机组)厂房结构振动的主要问题和研究现状[J]. 水利水运工程学报, 2006(1): 74-77. (LI Yan. Main problems and state of art of structural vibration of hydroelectric stations in China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(1): 74-77. (in Chinese))
- [9] 中华人民共和国水利部. 水电站厂房设计规范: SL 266—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design code for hydropower house: SL 266—2014[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2014. (in Chinese))
- [10] 沈可. 水电站厂房结构振动研究[D]. 南宁: 广西大学, 2002. (SHEN Ke. Research on structure vibration of hydropower house[D]. Nanning: Guangxi University, 2002. (in Chinese))
- [11] 沈可, 张仲卿, 梁政. 岩滩水电站厂房水力振动计算[J]. 水电能源科学, 2003, 21(1): 73-75. (SHEN Ke, ZHANG Zhongqing, LIANG Zheng. Hydraulic vibration calculation of Yantan hydropower house[J]. Water Resources and Power, 2003, 21(1): 73-75. (in Chinese))
- [12] 孙万泉. 水电站厂房结构振动分析及动态识别[D]. 大连: 大连理工大学, 2004. (SUN Wanquan. Research on structure vibration and identification of hydropower house[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [13] 陈婧, 马震岳, 威海峰, 等. 宜兴抽水蓄能电站厂房结构水力振动反应分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 195-

- 199, 91. (CHEN Jing, MA Zhenyue, QI Haifeng, et al. Research on dynamic response of powerhouse structure of Yixing Pumped-storage Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 195-199, 91. (in Chinese))
- [14] 张燎军, 魏述和, 陈东升. 水电站厂房振动传递路径的仿真模拟及结构振动特性研究[C]//现代水利水电工程抗震防灾研究与进展(2011). 大连: 中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会, 2011. (ZHANG Liaojun, WEI Shuhe, CHEN Dongsheng. Simulation of transmission path and study on structural vibrations of hydropower house[C]//Research and Development on Earthquake Resistance and Disaster Prevention of Modern Water Conservancy and Hydropower Projects, 2011. Dalian: Earthquake and Disaster Prevention Committee of China Hydroelectric Engineering Society, 2011. (in Chinese))
- [15] 赵玮. 烟岗电站厂房结构振动研究[C]//陕西省水力发电工程学会第三届青年优秀科技论文集. 2013. (ZHAO Wei. Study on the structural vibration of powerhouse of Yangang[C]//Proceedings of Excellent Scientific and Technological Papers of the 3rd Youth of Shaanxi Hydraulic Power Engineering Society. 2013. (in Chinese))
- [16] 张龔, 练继建, 刘昉, 等. 基于原型观测的厂顶溢流式水电站厂房结构振动特性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(7): 584-590. (ZHANG Yan, LIAN Jijian, LIU Fang, et al. Vibration characteristics of powerhouse structure of roof overflow hydropower station based on prototype observation[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 48(7): 584-590. (in Chinese))
- [17] 尚银磊, 李德玉, 欧阳金惠. 大型水电站厂房振动问题研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(1): 48-52, 59. (SHANG Yinlei, LI Deyu, OUYANG Jinhui. Review on powerhouse self-oscillation characteristics of a large-scale power station[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14(1): 48-52, 59. (in Chinese))
- [18] 李志龙, 张博. 某水电站厂房结构固有频率及共振分析[J]. 四川水力发电, 2016, 35(5): 116-122. (LI Zhilong, ZHANG Bo. Natural frequency and resonance analysis of a hydropower house[J]. Sichuan Water Power, 2016, 35(5): 116-122. (in Chinese))
- [19] 胡少伟, 喻江, 许毅成, 等. 水电站厂房三榀钢-混凝土组合排架组合特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 92-96. (HU Shaowei, YU Jiang, XU Yicheng, et al. Experimental study on combined performances of three pieces of steel-concrete composite bent frames for hydropower house[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(12): 92-96. (in Chinese))
- [20] 韩爱萍, 陈婧, 马震岳. 水电站地面厂房结构的动力分析与设计优化[J]. 水电能源科学, 2010, 28(7): 70-73, 53. (HAN Aiping, CHEN Jing, MA Zhenyue. Dynamic analysis and design optimization of powerhouse structure for hydropower projects[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(7): 70-73, 53. (in Chinese))
- [21] 解凌飞, 韩晓凤, 唐浩. 西津水电站厂房主机间抗震安全分析[J]. 红水河, 2011, 30(1): 35-39. (XIE Lingfei, HAN Xiaofeng, TANG Hao. Seismic safety evaluation for main powerhouse of Xijin Hydropower Station[J]. Hongshui River, 2011, 30(1): 35-39. (in Chinese))
- [22] 崔建华, 陈琴, 龚亚琦, 等. 高地震烈度下水电站副厂房结构抗震分析[C]//代水利水电工程抗震防灾研究与进展(2013). 西安: 中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会, 2013. (CUI Jianhua, CHEN Qin, GONG Yaqi, et al. Aseismic analysis of auxiliary powerhouse structure of hydropower station under high earthquake intensity[C]//Research and Development on Earthquake Resistance and Disaster Prevention of Modern Water Conservancy and Hydropower Projects, 2013. Xi'an: Professional Committee of Earthquake Resistance and Disaster Prevention, China Society of Hydropower Engineering, 2013. (in Chinese))
- [23] 鹿宁, 李作舟, 邱敏, 等. 基于静力弹塑性法的水电站厂房抗震性能分析[J]. 西北水电, 2014(3): 79-83. (LU Ning, LI Zuozhou, QIU Min, et al. Push-over-based analysis on aseismic performance of powerhouse of hydropower station[J]. Northwest Water Power, 2014(3): 79-83. (in Chinese))
- [24] 苏晨辉. 基于损伤塑性的水电站厂房地震响应分析研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. (SU Chenhui. Study on analysis of seismic response of hydropower house based on CDP model[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [25] 王飞. 近断层地震动斜输入作用下水电站厂房非线性地震响应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019. (WANG Fei. Nonlinear seismic responses of the powerhouse of a hydropower station under near-fault ground motions oblique input[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese))

- [26] 慕洪友, 吴基昌. 洪家渡水电站地面厂房设计[J]. 贵州水力发电, 2002, 16(3): 30-32. (MU Hongyou, WU Jichang. Design of ground powerhouse of Hongjiadu Hydropower Station[J]. Guizhou Water Power, 2002, 16(3): 30-32. (in Chinese))
- [27] 陈本龙, 慕洪友, 李清石, 等. 洪家渡水电站发电厂房设计回顾[J]. 贵州水力发电, 2006, 20(2): 27-29. (CHEN Benlong, MU Hongyou, LI Qingshi, et al. Review of powerhouse design of Hongjiadu hydropower station[J]. Guizhou Water Power, 2006, 20(2): 27-29. (in Chinese))
- [28] 卢羽平, 张燎军, 冉懋鸽. 洪家渡水电站厂房矩形钢管混凝土叠合柱抗震分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2005, 26(1): 35-38. (LU Yuping, ZHANG Liaojun, RAN Maoge. Aseismatic analysis of rectangular concrete filled steel tube composite column of Hongjiadu Hydropower Station powerhouse[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2005, 26(1): 35-38. (in Chinese))
- [29] 覃丽钠, 李明卫. 矩形钢管混凝土柱在水电站厂房中的应用[J]. 贵州水力发电, 2011, 25(6): 12-16. (QIN Lina, LI Mingwei. Application of concrete-filled rectangular steel tube column in hydropower plant building[J]. Guizhou Water Power, 2011, 25(6): 12-16. (in Chinese))
- [30] 张冬, 张燎军, 吴军中. 某水电站厂房空心钢管混凝土排架柱动力损伤情况分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 102-105, 146. (ZHANG Dong, ZHANG Liaojun, WU Junzhong. Dynamic damage analysis of hollow concrete-filled steel tubular bent frame column in hydropower house[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12): 102-105. (in Chinese))
- [31] 吴军中, 张燎军, 张晓莉. 空心钢管混凝土组合柱抗震性能研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 116-119. (WU Junzhong, ZHANG Liaojun, ZHANG Xiaoli. Discussion on seismic performance of hollow concrete-filled steel tubular combination column[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2): 116-119. (in Chinese))
- [32] 周烨. 钢管混凝土柱在水电站厂房结构中的应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013. (ZHOU Ye. The application of concrete-filled steel tube column in workshops of hydropower station[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013. (in Chinese))
- [33] 方鹏飞. 水电站厂房钢管混凝土排架结构对抗震性能的影响研究[J]. 技术与市场, 2015, 22(5): 84-85. (FANG Pengfei. Study on the influence of concrete filled steel tubular bent structure on seismic performance of hydropower station[J]. Technology and Market, 2015, 22(5): 84-85. (in Chinese))
- [34] 胡少伟, 许毅成, 张润, 等. 基于水轮机特征频率的组合长柱振动特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(6): 10-18. (HU Shaowei, XU Yicheng, ZHANG Run, et al. Analysis of vibration performance of combined long columns based on characteristic frequencies of hydrogenerator[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(6): 10-18. (in Chinese))
- [35] 王宇航, 王雨嫣, 胡少伟. 海洋结构 CFRP 环向约束钢管混凝土柱在压弯扭荷载下的力学性能研究[J]. 工程力学, 2019, 36(8): 96-105. (WANG Yuhang, WANG Yuyan, HU Shaowei. Study on the mechanical properties of CFRP circumferentially confined concrete filled steel tube column of marine structure under compression-bending-torsion combined load[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(8): 96-105. (in Chinese))
- [36] 尹阳阳, 胡少伟, 王宇航. 自重对混凝土三点弯曲梁断裂性能的影响[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 48-56, 108. (YIN Yangyang, HU Shaowei, WANG Yuhang. Influence of self-weight on the fracture properties of three-point bending concrete beams[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(7): 48-56, 108. (in Chinese))
- [37] WANG Y H, WANG W, YU J, et al. Ultimate bearing capacity correlation of steel tube confined RC column under combined compression-bending-torsion load[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 145: 106408.
- [38] 王宇航, 王维, 周绪红, 等. 压-弯-扭耦合荷载作用下钢管约束钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增刊1): 185-189. (WANG Yuhang, WANG Wei, ZHOU Xuhong, et al. Experimental study on seismic behavior of steel tube confined reinforced concrete columns subjected to combined compression-bending-torsion[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(Suppl1): 185-189. (in Chinese))
- [39] 王宇航. 曲线梁桥钢管混凝土桥墩的扭转效应研究[D]. 北京: 清华大学, 2013. (WANG Yuhang. Study on torsion effect in concrete filled steel tube piers of curved girder bridges[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese))
- [40] 王宇航, 李硕, 周绪红, 等. 弯-剪-扭耦合荷载作用下钢管混凝土短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11): 1-12. (WANG Yuhang, LI Shuo, ZHOU Xuhong, et al. Study on mechanical behavior of concrete filled steel tubular short columns under compound bending-shear-torsion load[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11): 1-12. (in Chinese))

Chinese))

- [41] 王宇航,郭一帆,刘界鹏,等. 偏压荷载下钢管混凝土柱的抗扭性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(7): 50-61. (WANG Yuhang, GUO Yifan, LIU Jiepeng, et al. Experimental study on behavior of concrete filled steel tube columns under torsion and eccentric compression[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(7): 50-61. (in Chinese))
- [42] 孙岳阳,赵新铭,赵林,等. 压型钢板—轻骨料混凝土组合楼板受弯承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(16): 70-73, 29. (SUN Yueyang, ZHAO Xinming, ZHAO Lin, et al. Experimental study on flexural bearing capacity of profiled steel sheet-light-weight aggregate concrete composite slabs[J]. Building Structure, 2017, 47(16): 70-73, 29. (in Chinese))
- [43] 孙岳阳. 压型钢板—轻骨料混凝土组合楼板正截面受弯性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016. (SUN Yueyang. Research on normal section flexural property of lightweight aggregate concrete composite slabs with profiled steel sheet[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese))

Research progress of static and dynamic behavior analysis of composite frame structure of hydropower plant

HU Shaowei¹, YE Yuxiao¹, YU Jiang¹, WANG Yuhang², SUN Yueyang¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China*)

Abstract: In order to accurately and efficiently evaluate the static and dynamic behavior of steel-concrete frame structure in hydropower station in high frequency and high intensity earthquake area, this research focuses on the composite service performance test and mechanism analysis of steel tubular composite columns, the service performance test and theoretical analysis of steel-concrete composite floors, the service performance and safety bearing analysis test and mechanism analysis of steel-concrete composite joints, the static and dynamic service performance research of steel-concrete composite frame structure, the impact service performance research of steel-concrete composite frame structure, and the large-scale combination optimization analysis of service performance of frame structure. In this paper, the research methods of the service behavior of the frame structure of the hydropower station, the research progress of the reinforced concrete structure of the hydropower station and the steel-concrete frame structure of the hydropower station are summarized. This paper also summarizes the development of steel-concrete composite structure in the hydropower plant frame structure, the existing problems in the engineering application and the research work to be promoted, which is to study the service performance improvement and safety guarantee technology of the hydropower plant structure.

Key words: power house of hydropower station; steel-concrete frame structure; static and dynamic service behavior; summary