

基础隔震结构健康监测系统的设计 与实现(I):系统设计^①

李万润^{1,2,3}, 郑文智², 杜永峰^{1,2,3}, 李 慧^{1,2,3}

(1.兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室,甘肃 兰州 730050;

2.兰州理工大学 防震减灾研究所,甘肃 兰州 730050;

3.兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,甘肃 兰州 730050)

摘要:在医院、教学楼等建筑中广泛采用隔震技术,能降低地震对上部结构的破坏作用。虽然隔震技术经过几十年的发展已趋于成熟,但环境及其他荷载对隔震结构性能的影响规律、结构设计的合理性以及震后结构状态评估等问题,仍需建立隔震结构健康监测系统对施工、运营期的结构响应进行监测,并对其进行评估与验证。首先,针对基础隔震结构的特点,研究了基础隔震结构的主要监测内容;在此基础上提出基础隔震结构健康监测系统的总体设计要求及原则,根据不同监测对象(整体与局部监测量)给出基础隔震结构传感器布置原则和数据采集系统软硬件设计原则,提出基础隔震结构设计验证与安全评定方法;最后给出基础隔震结构健康监测值得进一步研究的问题。

关键词:基础隔震结构;结构健康监测;系统设计;性能评估

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)01-0094-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.01.0094

Design and Implementation of Structural Health Monitoring System for Base-isolated Structure (I): System Design

LI Wan-run^{1,2,3}, ZHENG Wen-zhi², DU Yong-feng^{1,2,3}, LI Hui^{1,2,3}

(1.Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2.Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3.Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Due to reduce the damaging effect of superstructures subjected to strong earthquakes, isolation technology is widely used in infrastructure construction, such as in hospitals, teaching buildings, and so on. Many significant research achievements have been achieved with respect to base-isolated structures (BISs). Although isolation technology has been maturing over several decades of development, a number of questions remain. The influence on BISs subjected to strong ground motion, and environmental and other loads, the rationality of structure design, and the performance of BISs buildings that have experienced earthquakes must still be verified by structural health monitoring operation. A BIS structural health monitoring system consists of sensory system, data acquisition and transmission system, data processing and control system, structural health data management system, structural health evaluation system, and inspection and mainte-

^① 收稿日期:2015-05-04

基金项目:国家自然科学基金(51578247,51178211,51568041);甘肃省青年科技基金计划(148RJYA004);兰州理工大学建筑工程系七七级校友奖励基金(TM-QK-1307)

作者简介:李万润(1985—),甘肃民勤人,博士,副教授,主要从事结构健康监测研究。E-mail:ce_wrlri@163.com。

通信作者:杜永峰(1962—),甘肃庆阳人,教授,博导,主要从事结构减震控制及结构健康监测研究。E-mail:dooyf@lut.cn。

nance system. Based on site inspections, prior monitoring of dynamic parameters based on BIS characteristics has been proposed. The monitored data should include seismic ground motion, temperature and humidity of the isolation layer, the foundation settlement and wind load (high-rise BISs), horizontal and vertical static displacement of the isolation bearings, vertical strain on the isolation bearings and strain of the isolation layer girder, and horizontal and vertical dynamic displacement of the isolation bearings and acceleration response of the superstructure. Considering the BIS characteristics, in this paper, we propose the primary subjects to be monitored, and consider the general overall design requirements of a BIS health monitoring system. According to different monitoring variables (global and local), we propose basic principles for the sensors selection and layout, and the hardware and software designs of the data acquisition and transmission system. We also present approaches to the design verification and safety performance evaluation. Finally, we address the problems which need to be further studied with respect further study with respect to the influence rule for isolation bearing in the construction process, concrete shrinkage of the superstructure, and setting the site of the post-poured strip; temperature load spectrum and a correlation model of BISs with temperature; how to assess the performance of a BIS while isolation bearing in parallel caused an initial displacement; questions about the fatigue of BISs subjected to earthquakes and wind load; and questions about the rule of progressive and anti-progressive collapses of BISs.

Key words: base-isolated structure; structural health monitoring; system design; performance evaluation

0 引言

近年来地震频发,如尼泊尔 4.25 地震、日本 3·11 地震、中国汶川 M8.0 地震、青海玉树 M7.1 地震^[1]、甘肃岷县漳县 M6.6 地震^[2]等,给人类生命和财产安全造成了巨大损失。由于隔震技术可以有效地减小地震对上部结构的破坏作用,因而在医院、教学楼、公寓等建筑中得到广泛应用。针对基础隔震结构,国内外众多学者进行了研究并取得了丰硕的成果^[3-9]。虽然隔震结构经受了地震考验^[10-12],但地震作用、环境及其他荷载对隔震结构性能的影响规律、结构设计是否合理、震后结构的性能状态评定还需进一步研究。结构健康监测^[13]即利用现场的无损传感与结构系统特性分析(包括结构反应)、探测结构变化,揭示结构损伤与结构性能劣化。结构健康监测系统作为结构的“神经系统”,可以感知结构响应并为其状态评定提供可靠数据,因此在大跨度桥梁、隧道、高耸建筑等结构中得到广泛应用^[14-22]。为了研究基础隔震结构性能退化机理及其震后性能状态评定,国内外学者借鉴其他结构健康监测系统,针对不同研究目标,逐步在隔震结构上安装了结构健康监测系统^[23-27]。虽然国内外学者针对不同的研究目标对隔震结构进行了监测,但都未曾对基础隔震结构健康监测系统的设计、实施方法进行系统研

究。因此,本文首先针对基础隔震结构的特点,提出基础隔震结构需要监测的物理量;在此基础上,提出基础隔震结构健康监测系统的总体设计要求,根据不同监测对象(整体与局部变量)提出基础隔震结构传感器布置原则以及数据采集系统软、硬件设计原则,并提出隔震结构设计验证及状态评定方法;最后提出基础隔震结构健康监测值得进一步研究的问题,为以后隔震结构健康监测系统的设计以及实施提供依据。

1 基础隔震结构的主要监测内容

基础隔震技术是通过在上部结构和基础之间设置水平刚度明显小于上部结构抗侧刚度的柔性隔震层来耗散地震输入上部结构的能量,最终达到减小上部结构地震响应的目的^[28]。由于在基础与上部结构之间设置了隔震装置,基础隔震结构表现出与非隔震结构不同的特性,这就使得基础隔震结构的健康监测系统有别于大跨度桥梁、隧道、高耸结构等非隔震结构。因此,针对基础隔震结构的受力以及变形特点,基础隔震结构的主要监测内容包括荷载监测与响应监测。

(1) 荷载监测 由于基础隔震结构一般主要采用橡胶隔震支座隔震,而橡胶隔震支座在不同变形、

不同温度情况下的力学性能有所不同。因此,为了更合理地进行隔震设计以及对基础隔震结构在施工与运营期间的性能与状态进行评估,需对作用在结构上的载荷进行监测。监测内容主要包括地震动、风荷载(主要指高层隔震结构)、温度和基础沉降等,并提出相应的计算理论模型,为结构设计与状态评价提供依据。

(2) 响应监测 基础隔震结构的响应监测主要包括施工期响应监测与运营期响应监测:

① 施工期响应监测 基础隔震结构由于在基础与上部结构之间安装了抗侧刚度相对较小的橡胶隔震支座,从而减小了基础对上部结构的约束作用,使得基础隔震结构的施工工序(主要表现为施工荷载的不平衡增加等)以及上部结构混凝土收缩在隔震支座处产生明显的水平与竖向位移^[9,29],而该部分位移在结构施工完成后并不能完全消除。这不仅使得隔震支座的竖向承载面积减小,而且使得水平位移允许值受到限制,影响隔震支座的耗能能力,从而放大地震作用下结构的动力响应^[30]。由于设置隔震支座,降低了基础对隔震层主梁的约束能力,超长复杂基础隔震结构在上部结构混凝土收缩等因素的共同影响下,隔震层主梁产生横向裂缝^[31]。因此,需要对基础隔震结构在施工期间隔震支座的水平位移、竖向位移、隔震层主梁控制部位和重点部位应变等进行监测。

② 运营期响应监测 由于基础隔震结构的特殊性,其运营期监测的主要内容也有别于其他结构,主要包括橡胶隔震支座的水平、竖向静位移(用于掌握橡胶隔震支座在运营期间温度以及其他荷载作用下的位移演化规律)、隔震支座在地震以及风荷载作用下的动位移(用于研究隔震支座在动荷载作用下的力学性能变化规律以及低周应变、高周应力疲劳问题)、上部结构的加速度等。为了验证结构设计的合理性并对隔震结构在运营期间的状态进行评估,需要对隔震结构在运营期间的结构响应进行监测。

2 基础隔震结构监测系统总体设计

基础隔震结构健康监测系统主要是利用现代传感技术、数据传输技术、通信技术、计算机技术对结构在施工、地震、风、环境等荷载作用下的结构响应进行实时监测,利用先进的数据处理技术,对基础隔震结构在施工期与运营期的性能进行评价,为隔震结构施工方案的确定、隔震结构的设计以及性能评价、隔震结构的安全运营管理提供科学依据。基础

隔震结构健康监测系统主要包括施工期监测系统与运营期监测系统。为了实现对基础隔震结构的全过程监测的目标,可以设计一体化基础隔震结构健康监测系统(图1),实现施工期监测系统与运营期监测系统“无缝连接”。部分施工期监测系统在竣工后直接转入运营期监测系统,这既为运营期间隔震结构的性能状态评价提供初始模型,又可以最大限度利用系统资源,减少监测系统的投入。

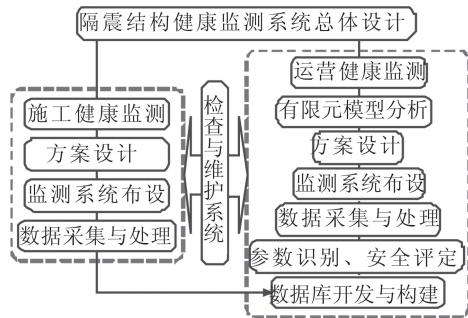


图1 基础隔震结构一体化健康监测系统设计

Fig.1 Integration of structural health monitoring system for BIS

根据基础隔震结构的规模、重要性、投资大小、工作环境及服役期内的性能退化情况,基础隔震结构健康监测系统的自动化、集成化、实时性要求程度等,基础隔震结构监测系统可划分为三个等级:全局实时在线监测系统(一级);局部实时在线和定期实时的监测系统(二级);定期在线监测系统(三级)。一级结构健康监测系统主要用于大型基础隔震建筑结构,如大型基础隔震体育场馆、会展中心等;二级结构健康监测系统主要用于多层隔震建筑结构,如医院、中小学教学楼、通信大楼等;三级隔震结构健康监测系统主要用于一般的隔震建筑^[15]。隔震结构健康监测系统的等级是系统的软硬件设计与选型原则、确定系统集成技术水平的依据。

3 基础隔震结构监测子系统设计

结构健康监测系统包括6个子系统^[21],即传感器系统(sensor system, SS),数据采集与传输系统(data acquisition and transmission system, DATS),数据处理与控制系统(data processing and control system, DPCS),结构健康数据管理系统(structural health data management system, SH-DMS),结构健康评价系统(structural health evaluation system, SHES)及检查与维护系统(inspection and maintenance system, IMS)。各系统间通过集成技术传输网络联系而进行运作,基础隔震结构健

康监测系统如图 2。

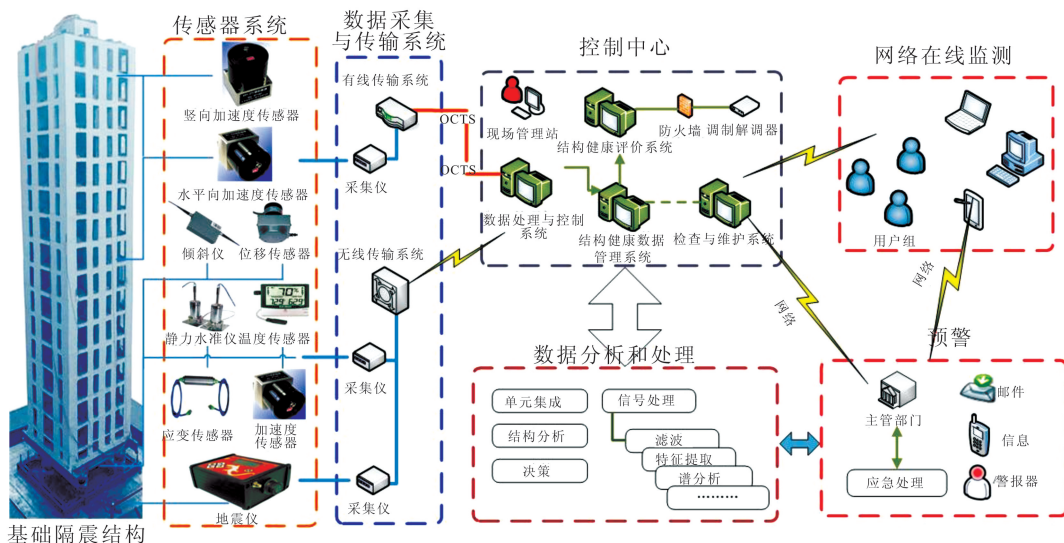


图 2 基础隔震结构健康监测系统

Fig.2 Base-isolated structure health monitoring system

3.1 传感器系统

传感器系统由各种用于测试结构物理特征及周围环境的传感器组成,主要包括温、湿度传感器,位移传感器、应变传感器,地震仪、加速度传感器及静力水准仪等。在传感器选型与优化布置时,应遵循“监测数据完整、系统性能稳定、性价比最优”的主要原则合理地选择传感器类型、数量以及布置位置,以实现相应的监测目标。

3.1.1 传感器选型

传感器的数量、类型与结构重要性、监测目标以及监测环境有关。在实际结构健康监测系统设计时,应先根据实际基础隔震结构的规模、重要性、工作环境确定隔震结构健康监测系统的等级,根据监测内容,进而确定传感器类型、型号及技术性能指标。针对基础隔震建筑结构健康监测系统,常用传感器的选型具体要求如下:

温/湿度传感器:能绝对测量,测量精度满足监测目的的要求,最大量程根据隔震结构建设地区气象局统计的气温最低和最高值确定,并保证一定的冗余度。各温度传感器安装在所需要监测的隔震支座位置附近,以并联方式与网络节点连接,通过网络总线实现与计算机进行通信、对温/湿度的自动远程监测。

位移传感器:根据隔震支座在罕遇地震作用下的最大位移响应确定位移传感器的精度和量程,其精度和量程还应满足规范规定的罕遇地震作用下隔震支座最大水平位移要求。位移传感器主要监测结

构拐角、刚度突变的位置及受力复杂位置的隔震支座水平位移。其工作环境与加速度传感器相比更为恶劣,需要较强的抗外界干扰能力,耐久性、鲁棒性好,并保证有足够的冗余度。

应变传感器:能绝对测量,精度满足监测目的的要求,最大量程根据所用的混凝土、隔震橡胶垫极限应变值确定,且工作条件满足建设地点的环境条件,抗外界干扰强,鲁棒性、耐久性好。对长期处于潮湿、易腐蚀及高电磁干扰的结构应变进行监测时,优先采用光纤光栅应变传感器;

加速度传感器:考虑到基础隔震结构基本周期较长,结构响应主要以低频成分为主,建议采用低频加速度传感器。为保证采集到的响应信号不出现频率混叠,传感器的采样频率应满足采样定理的要求,建议取结构最大频率的 2~4 倍,保证能采集到结构在地震作用下的结构动力响应数据;同时,传感器应具有较强的抗外界干扰能力,鲁棒性、耐久性好。

除以上常用传感器外,根据不同的监测目的,可选用其他类型的传感器对所关心的物理量进行监测,但均需要考虑传感器的工作环境、测量精度、量程以及抗干扰性能。

3.1.2 传感器测点布置

基础隔震结构主要通过橡胶隔震支座发生变形而耗散输入上部结构的能量,进而保证上部结构的安全。因此在布置基础隔震结构健康监测系统的传感器时,除考虑按常规结构布置外,还需在隔震层布置专门的传感器,这是基础隔震结构有别于大跨度

桥梁、非隔震建筑结构健康监测系统之处。在对传感器进行布置时,遵循“测试数据与位置对结构输入与响应敏感”的原则,选择传感器测点的最优布置方案。Penny 等^[18]提出了评价各种传感器布置方法优劣的五条量化准则:模态保证准则(Modal Assurance Criterion)、修正模态保证准则(Modified Modal Assurance Criterion)、SVD(Singular Value Decomposition)比、模态所测动能及 Fisher 信息阵的值。在实际设计中,应综合考虑基础隔震结构特点以及监测目的进行选取。以下从荷载、局部响应和整体响应三个方面对基础隔震结构传感器测点布置进行阐述:

荷载监测:对于结构的输入——地震动来讲,一般采用加速度数字地震仪监测,并布设于隔震层以下结构基础中心位置。对于大型超长复杂隔震结构,在经济条件容许的情况下,可以布置两个地震仪对地震数据进行监测,以考虑行波效应;隔震支座附近的温度场主要采用温度传感器进行监测,布置在隔震层温差较大的位置,例如室内外交界处;针对高层基础隔震结构,风荷载影响较大时还需对风荷载进行监测,主要采用风速风向仪以及风压传感器进行监测,布设于结构顶层主风向位置;此外,还需考虑基础不均匀沉降对基础隔震结构隔震支座的影响,主要采用静力水准仪监测,主要布设于荷载较大以及基础可能发生沉降的位置,例如结构角点和基础形心位置。

局部响应监测:基础隔震结构的局部响应主要包括隔震支座水平位移、竖向位移与隔震层主梁应变。隔震支座水平和竖向位移均采用位移传感器进行监测,主要布设于结构角点及平面凹凸不规则结构的凹入或凸出角点位置;隔震层主梁应变宜采用光纤光栅应变传感器监测,主要布设于跨度大、受力复杂、与隔震支座直接相连的主梁上。

整体响应监测:结构整体响应主要是加速度,因此采用加速度传感器监测。由于上部结构主要以平动为主,测点主要布设于上部结构一层及顶层,考虑结构平面不规则、扭转不规则等因素,主要布设于结构平动、扭转效应显著的结构纵、横向角点位置。

3.2 数据采集与传输系统

数据采集和传输系统作为连接监测系统硬件设备和软件系统的枢纽,是实现结构参数识别和安全评价的基础。各类传感器信号是结构的“神经脉冲”,由数据采集系统进行信号调理、采集,通过数据传输系统,将其传输到数据处理系统和数据管理系

统。

3.2.1 数据采集系统

基础隔震结构健康监测系统所需监测的物理量较多,数据量大,传感器类别较多(如电压、电荷、应变、电阻、电流、光信号等),在设计数据采集系统时,应考虑采集软、硬件与传感器的输出信号、精度等性能参数相匹配。对于多种特征信号同时采集,简单协议和接口标准的数据采集硬件将不能满足监测要求,可采用基于 ISA、PCI、PXI 等局部总线标准以及基于 CAN、LonWorks 等现场总线的数据采集硬件。数据采集系统流程图如图 3。

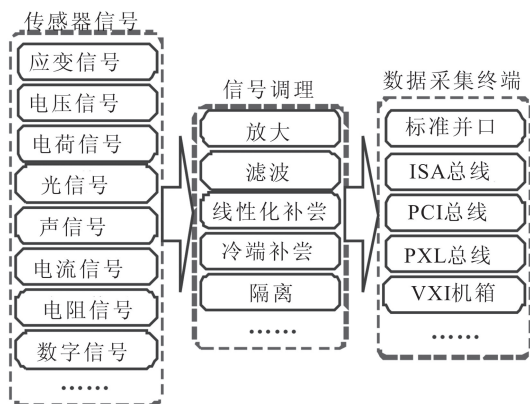


图 3 数据采集系统流程图

Fig.3 Flow chart of the data acquisition system

考虑数据采集系统的高效运作,可根据采集系统的要求选择合适的软件开发平台,例如基于 LabVIEW 开发平台。对于大型基础隔震结构,当采用分布式采集系统时,建议设立数据采集子站,各子站之间通过有线连接进行通讯、交互。

3.2.2 数据传输系统

数据传输系统是将传感数据传输至数据处理系统和数据管理系统的“桥梁”,数据传输包括现场传输和远程传输两部分。对于现场传输,可采用有线或无线传输技术将传感器信号传输至服务器。对于远程传输,需要直接或间接基于 Internet 网络,将采集数据传输至数据处理系统与数据管理系统。为保证数据的精确、可靠传输,不受外界信号的干扰,应尽量采用抗干扰性能较好的传输设备。采用有线方式传输时,应尽量采用屏蔽性能好的数据传输线;采用无线传输时,应对信号进行调制,避开干扰信号频段。

3.3 数据处理和控制系统

数据处理与控制系统主要负责控制数据采集、处理、传输、汇集、归档、备份、显示及运算,并通过网

络控制各数据采集子站。数据处理与控制系统通过对实测数据进行校准、信号处理、数据质量和可靠性测试等过程,以多种方式对数据进行处理、编译,从而完成数据-信息-结构参数的转化,并对数据库中的大量测试数据进行抽取、转换、分析和模型化处理,将经过处理和分析的数据传送到结构健康数据管理系统,为后续健康监测数据分析和结构状态评价提供数据基础。

数据处理包括常规数据处理和紧急数据处理。

常规数据处理是指对长期荷载(如隔震层温度荷载、风荷载、基础沉降等)、结构响应(如隔震支座静水平位移和竖向位移、隔震层主梁应变、上部结构加速度响应等)数据进行分析,掌握监测数据的内在规律,建立结构设计荷载理论模型。掌握结构在不同荷载作用下的响应规律,建立结构激励与响应之间的关系,为结构设计、状态评估以及预警提供依据。

紧急数据处理是指对地震、台风等突发荷载作用下的结构响应(如隔震支座动水平位移和竖向位移、上部结构的加速度响应等)数据进行分析。除了进行与常规数据相同的分析外,还需对隔震层以及上部结构的响应数据进行重点分析。基于结构输入与输出数据,识别隔震支座在地震作用下的物理参数,掌握隔震支座在动力荷载作用下的非线性性能,为结构设计、灾后状态评估提供依据。

3.4 结构健康数据管理系统

有效的数据管理是保证隔震结构健康监测系統发挥作用的保证。数据管理系统是基础隔震结构健康监测系统的“仓库”,包括静态数据库和动态数据库,存储和管理基础隔震结构监测系统的所有监测数据,并提供给数据处理系统进行数据处理分析。针对基础隔震结构监测的物理量较多、数据量大的特点,数据管理系统应满足以下功能:(1)快速、高效存储各类传感信号数据,实现大量关联数据的充分共享,为数据处理、分析及结构健康评价提供稳定“秩序”;(2)针对采集的实时数据,能够实现实时显示数据与分析结果,并查看关键数据点;(3)实现各系统之间的数据传递、交换与共享;(4)数据管理系统是基础隔震结构监测系统监测数据安全存储的保证,数据库需具备防火墙和加密功能。基础隔震结构健康监测系统的数据库结构如图 4。

3.5 结构健康评价系统

结构健康评价系统是整個隔震结构健康监测系统的核心,主要完成以下功能:(1)施工阶段分析,主

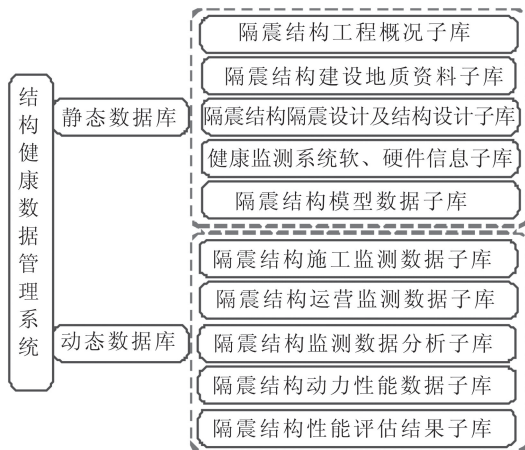


图 4 数据管理子系统数据库结构

Fig.4 Database structure of the data management system

要保证结构构件施工定位的准确性;(2)施工过程优化仿真分析,主要检验施工方案的可行性;(3)施工各阶段隔震支座状态评价及性能分析,其目的是掌握施工过程中隔震支座的变形规律;(4)结构运营期间的结构动力特性分析;(5)结构运营期间有限元模型的建立及修正;(6)结构运营期间的状态评估。

对于基础隔震结构的安全性能评价主要包括基于构件性能的安全评价和基于结构整体的安全评价。

3.5.1 基于构件的安全评价

基于构件性能的安全评价主要包括:(1)隔震支座的水平位移是否超过规范允许值;(2)隔震支座的竖向应力是否超过支座竖向极限应力值;(3)基础沉降量是否满足规范允许值;(4)隔震层梁的裂缝宽度是否满足规范的允许值。各类构件参数须满足以下规定^[32]:

$$u_0 + u_{\max} \leq [u], \sigma_{\max} \leq [\sigma_0], s_{\max} \leq [s],$$

$$\omega \leq [\omega_{\lim}], \epsilon \leq [\epsilon_{\lim}] \quad (1)$$

$$(\sigma_{\max})_t \leq ([\sigma_0])_T \quad (2)$$

式中: u_0 为隔震支座水平静位移; $u_{\max}$ 为罕遇地震作用下隔震支座水平最大位移值; $\sigma_{\max}$ 为隔震支座竖向最大应力值; $s_{\max}$ 为单个支墩最大竖向沉降量; ϵ 为隔震支座的水平剪应变; ω 为隔震层梁裂缝最大宽度; t 为即时监测数据; T 为历史同期监测数据; $[\cdot]$ 为规范规定的相应参数的允许值。根据结构以及构件的重要性等级,确定相应的预警值,当监测数据超过预警值时,系统发出预警。

3.5.2 基于结构整体的安全评价

基于结构整体的安全评价主要包括:(1)结构罕遇地震作用下位移是否满足规范允许值;(2)结

构加速度响应是否满足风振舒适度要求^[33]。整体结构动力参数应满足以下规定:

$$u_{\max} \leq [u], a_{\max} \leq [a_{\lim}] \quad (3)$$

式中: $u_{\max}$ 为罕遇地震作用下结构水平最大位移值; $a_{\max}$ 为结构顶点风振加速度最大值; $[\cdot]$ 为规范规定的相应参数的允许值。根据结构的重要性等级,确定相应的预警值,当监测数据超过预警值时,系统发出预警。

3.6 检查与维护系统

检查与维护系统是保证其他各分系统正常运作的必要条件,也是保证监测数据可靠性的重要基础。系统主要用于检查和维护传感器、数据采集模块、数据传输网络、供电、显示设备,以及外界不确定荷载对监测系统的干扰,监测设备在运行过程中发生故障、性能退化等问题,对其进行定期检查,以确保监测系统正常运作。

3.7 健康监测系统集成技术

各分系统的软硬件相互协调工作是基础隔震结构健康监测实现结构安全性能评价目标的根本保证。利用集成技术将各个分系统集成为一体的基础隔震结构健康监测,实现各分系统协调高效运作。集成技术主要是通过公共平台专门软件实现对六个分系统的实时控制,即该专门软件作为整个基础隔震结构健康监测系统的“神经中枢”,协调、整合各分系统功能,“控制”、“调用”、“指挥”各分系统的高效运行。同时,协调监测系统的全部软硬件稳定运行,基于以太网、局域网和互联网等数据传输方式,实现各类监测数据的稳定、快速传输、交互与通讯^[15]。

4 结论与展望

基础隔震结构因其可以减小地震对上部结构的破坏作用而得到广泛应用,基础隔震结构健康监测对于验证隔震结构的设计、隔震结构的灾后状态评估具有重要意义。本文针对基础隔震结构的特点,系统研究了基础隔震结构健康监测系统的组成与设计方法,为以后隔震结构健康监测系统的设计提供参考。在此基础上,针对基础隔震结构,提出以下值得深入研究的问题:

(1) 由于基础隔震结构在基础与上部结构之间设置抗侧刚度相对小的橡胶隔震支座,降低了基础对上部结构的约束作用(与抗震结构相比),施工过程中、上部结构混凝土的收缩、后浇带的设置会对隔震支座产生较大影响,其影响规律还需进一步深入研

究;

(2) 基础隔震结构一般采用橡胶隔震支座,该支座由橡胶与钢板硫化而成,属于温度敏感性材料,一些学者已对温度对隔震支座的影响进行了研究,但在设计规范中还未曾考虑温度对隔震支座的影响,因此应借助长期结构健康监测系统得到的温度数据,建立温度荷载谱以及温度与隔震支座位学性能相关性模型,为隔震结构设计提供依据;

(3) 隔震设计时均采用单个隔震支座的参数来分析结构动力响应,而且该模型主要是在单个隔震支座试验以及振动台试验的基础上得到的,对于实际结构中隔震支座的力学性能如何,是否与试验室模型一致,需要利用结构健康监测数据对其进行分析与验证。而且多个隔震支座并联后的性能如何也需要进一步讨论;

(4) 隔震支座在水平方向主要承受地震以及风荷载(高层基础隔震)的作用,故风荷载作用下隔震支座和支座连接构件的高周疲劳问题以及强震作用下的低周疲劳问题也需进一步研究;

(5) 由于施工过程以及温度等因素的影响,隔震支座易产生初始位移,这部分位移会对隔震结构的隔震性能产生较大影响,因此研究隔震支座存在初始位移情况下的隔震结构性能具有重要的现实意义;

(6) 隔震结构连续性倒塌规律以及抗倒塌问题。

参考文献(References)

- [1] 田秀丰,张璇,姚凯,等.玉树 7.1 级地震强震动流动观测记录初步分析[J].地震工程学报,2014,36(2):274-280.
TIAN Xiu-feng, ZHANG Xuan, YAO Kai, et al. Preliminary Analysis of Mobile Observation Records for the Aftershocks in the Yushu M7.1 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 274-280. (in Chinese)
- [2] 黄旭涛,温瑞智,任叶飞,等.2013 年 7 月 22 日岷县漳县 6.6 级地震强震记录及特征分析[J].地震工程学报,2013,35(3):489-496.
HUANG Xu-tao, WEN Rui-zhi, REN Ye-fei, et al. Strong Motion Records and Its Characteristics in Minxian - Zhangxian Ms6.6 Earthquake on July 22, 2013[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 489-496. (in Chinese)
- [3] 周福霖.工程结构隔震减震研究进展[M].北京:地震出版社,2004.
ZHOU Fu-lin. Advances in Structural Vibration Isolation and Reduction[M]. Beijing: Seismological Press, 2004. (in Chinese)
- [4] 焦美菊,孙利民,李清富.基于监测数据的桥梁结构可靠性评估[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(10):1452-1457.

- JIAO Mei-ju, SUN Li-min, LI Qing-fu. Bridge Structural Reliability Assessment Based on Health Monitoring Data[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(10): 1452-1457. (in Chinese)
- [5] LOH Chin-Hsiung, WENG Jian-Huang, CHEN Chia-Hui, et al. System Identification of Mid-story Isolation Building Using Both Ambient and Earthquake Response Data[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2013, 20: 139-155.
- [6] 李慧, 包超, 杜永峰. 近场地震作用下不规则层间隔震结构的动力响应分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 51-55.
- LI Hui, BAO Chao, DU Yong-feng. Dynamic Response Analysis of Irregular Story Isolation Structures under Near-field Earthquake Conditions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 51-55. (in Chinese)
- [7] 李慧, 王亚楠, 杜永峰. 近场脉冲型地震动作用下 TMD-基础隔震混合控制结构的减震效果分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 208-212.
- LI Hui, WANG Ya-nan, DU Yong-feng. An Effectiveness Analysis on Hybrid Control System of Tuned Mass Damper-base Isolation under Near-fault Pulse-like Ground Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 208-212. (in Chinese)
- [8] 李慧, 刘迪, 杜永峰. 近场多脉冲地震动作用下组合隔震结构抗震性能分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 563-568.
- LI Hui, LIU Di, DU Yong-feng. The Seismic Behavior Analysis of Near-field Multi Pulse Ground Motion on Composite Isolated Structure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 563-568. (in Chinese)
- [9] 杜永峰, 杜英满, 陈斌. 某超长隔震结构建造过程非荷载变形模拟与监测[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(1): 91-97.
- DU Yong-feng, DU Ying-man, CHEN Bin. Non-load Deformation Simulation and Monitoring of a Super-long Isolated Structure in the Construction Process[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2014, 36(1): 91-97. (in Chinese)
- [10] Nagarajaiah S, SUN Xiao-hong. Response of Base-Isolated USC Hospital Building in Northridge Earthquake[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(10): 1177-1186.
- [11] 许宏洲. 隔震结构体系的地震反应和抗震可靠度研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2004.
- XU Hong-zhou. Research on Base Isolation Structure Earthquake Response and Aseismic Reliability[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2004. (in Chinese)
- [12] Boroschek R L, Retamales R, Aguilar A. Seismic Response of Isolated Structures Subjected to $M_w 8.8$ Chile Earthquake of February 27, 2010[C]//Seminar in Technological Advances and Lessons Learned in the Last Large Earthquakes and Tsunamis. CISMID. Paper No M-2. Lima, Perú, 17-18 de Agosto, 2012.
- [13] Housner G W. Structure Control: Past, Present and Future[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9): 897-971.
- [14] 李惠, 周文松, 欧进萍, 等. 大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 46-52.
- LI Hui, ZHOU Wen-song, OU Jin-ping, et al. A Study on System Integration Technique of Intelligent Monitoring Systems for Soundness of Long-span Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 46-52. (in Chinese)
- [15] 李惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(I): 系统设计[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 39-44.
- LI Hui, OU Jin-ping. Design and Implementation of Health Monitoring Systems for Cable-stayed Bridges (I): Designs Methods[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 39-44. (in Chinese)
- [16] 李惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(II): 系统实现[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 45-53.
- LI Hui, OU Jin-ping. Design and Implementation of Health Monitoring Systems for Cable-stayed Bridges (II): Implementations[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 45-53. (in Chinese)
- [17] 缪长青, 李爱群, 冯兆祥, 等. 润扬大桥结构健康监测系统设计研究[J]. 世界桥梁, 2006(3): 63-66.
- MIAO Chang-qing, LI Ai-qun, FENG Zhao-xiang, et al. Design and Research of Structural Health Monitoring System for Runyang Bridge[J]. World Bridges, 2006(3): 63-66. (in Chinese)
- [18] 李宏男, 李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 82-90.
- LI Hong-nan, LI Dong-sheng. Safety Assessment, Health Monitoring and Damage Diagnosis for Structures in Civil Engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(3): 82-90. (in Chinese)
- [19] 刘胜春, 张顶立, 黄俊, 等. 大型盾构隧道结构健康监测系统设计研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 741-748.
- LIU Sheng-chun, ZHANG Ding-li, HUANG Jun, et al. Research and Design on Structural Health Monitoring System for Large-scale Shield Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 741-748. (in Chinese)
- [20] 于凯, 左自波, 王颖铁, 等. 基于远程实时监测的高烈度区沉管隧道施工可视化系统[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 759-764.
- YU Kai, ZUO Zi-bo, WANG Ying-yi, et al. Visualization System of Immersed Tube Tunnel Construction Based on Remote Real-time Monitoring[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 759-764. (in Chinese)
- [21] Ni Y Q, Xia Y, Liao W Y, et al. Technology Innovation in Developing the Structural Health Monitoring System for Guangzhou New TV Tower[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2009, 16(1): 73-98.
- [22] 李万润. 基于模型修正与时序分析的结构损伤识别方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- LI Wan-run. Damage Identification Based on Model Updating and Time Series Analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [23] 金星, 韦永祥, 陈学良, 等. 隔震建筑结构的强震观测与初步分

- 析[J].地震工程与工程振动,2007,27(6):181-188.
- JIN Xing, WEI Yong-xiang, CHEN Xue-liang, et al. Strong Motion Observation for a Base-isolated Building and Its Primary Analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(6): 181-188. (in Chinese)
- [24] 金星, 韦永祥, 张红才, 等. 基于强震观测的隔震结构地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(2): 19-28.
- JIN Xing, WEI Yong-xiang, ZHANG Hong-cai, et al. Analysis of Seismic Responses of a Base-isolated Building on the Basis of Strong Motion Observation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(2): 19-28. (in Chinese)
- [25] 范雁, 张季超, 许勇. 广东科学中心 E 区隔震支座监测预警指标研究与应用[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 1): 103-107.
- FAN Yan, ZHANG Ji-chao, XU Yong. Study and Application of the Early-warning Index for Isolation Bearings Monitoring in Guangdong Science Center E Area[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Supp 1): 103-107. (in Chinese)
- [26] 陈洋洋, 谭平, 陈建秋, 等. 汶川灾后重建的隔震建筑远程实时监测[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(4): 76-82.
- CHEN Yang-yang, TAN Ping, CHEN Jian-qiu, et al. Remote Real-Time Monitoring for Seismic Isolated Buildings in the Wenchuan Post-disaster Reconstruction[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsen, 2013, 52(4): 76-82. (in Chinese)
- [27] 朱文正, 张季超. 基于智能传感技术的广东科学中心隔震系统实时监测研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(5): 40-45.
- ZHU Wen-zheng, ZHANG Ji-chao. Real Time Monitoring of Isolation System of Guangdong Science Center Based on Intelligent Sensor Technology[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(5): 40-45. (in Chinese)
- [28] 王亚楠, 李慧, 杜永峰. TMD-基础隔震混合控制体系在近场地震作用下的能量响应与减震效果分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 204-209.
- WANG Ya-nan, LI Hui, DU Yong-feng. Energy Response and Anti-vibration Effect Analysis for a Base-Isolated Structure with TMD under Near-field Earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(4): 204-209. (in Chinese)
- [29] 李慧, 谢文清, 杜永峰, 等. 某超长隔震结构在温度及收缩作用下的变形研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(1): 40-44.
- LI Hui, XIE Wen-qing, DU Yong-feng, et al. Study on the Deformation of a Ultra-long Base Isolated Structure under Temperature and Shrinkage[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(1): 40-44. (in Chinese)
- [30] 董云菲. 考虑支座非载荷初始位移的超长复杂隔震结构抗震性能分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- DONG Yun-fei. Seismic Performance Analysis of Irregularly Super-long Isolated Structure Considering Initial Unloaded Displacement Isolators[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [31] 魏仲彬. 施工期隔震层钢筋混凝土梁内力分析与裂缝模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- WEI Zhong-bin. Internal Force Analysis and Fracture Simulation of Reinforced Concrete Beam in the Isolation Layers during Construction[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of PRC. GB50011-2010, Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ3-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of PRC. JGJ3-2010, Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)