

# 跨海大桥健康监测的关键技术分析

郭 健

(浙江省舟山连岛工程建设指挥部, 浙江舟山 316000)

[摘要] 以舟山大陆连岛工程为背景, 阐述和讨论了在跨海大桥中开展健康监测的重要性和研究现状, 并分析了跨海大桥健康监测和损伤识别所面临的关键技术问题和研究趋势, 提出了考虑非线性效应和荷载激励特征来开展复杂结构损伤识别的研究思路, 以提升通过大型健康监测系统来实现桥梁损伤评估的能力。

[关键词] 跨海大桥; 舟山大陆连岛工程; 健康监测; 损伤识别

[中图分类号] U445.7 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)07-0090-06

## 1 前言

近年来, 随着东海大桥、杭州湾大桥以及舟山大陆连岛工程跨海大桥等跨海大桥的陆续建成, 我国的跨海大桥建设水平已跃居世界前列。

舟山大陆连岛工程连接舟山、宁波两市, 全长 49.96 km(见图 1)。工程包括 5 座跨海大桥, 分别

为岑港大桥、响礁门大桥、桃夭门大桥、西堠门大桥、金塘大桥。其中西堠门大桥采用主跨为 1 650 m 的两跨连续钢箱梁悬索桥, 跨径为世界第二, 仅次于日本的明石海峡大桥(钢桁梁悬索桥); 金塘大桥的主通为钢箱梁斜拉桥, 主跨 620 m, 是我国在外海条件建设的跨度最大的斜拉桥。



图 1 舟山大陆连岛工程 5 座跨海大桥布置图

Fig. 1 Plan of 5 bridges of Zhoushan Islands Link Project

[收稿日期] 2010-05-07

[基金项目] 国家科技计划支撑计划课题(2008BAG07B05)

[作者简介] 郭 健(1973-), 男, 甘肃兰州市人, 高级工程师, 博士, 研究方向为桥梁结构分析及监测、工程控制及管理;  
E-mail: guoj@vip.163.com

跨海大桥一般在建设过程中就要面临诸多的技术挑战,需要解决许多在常规桥梁建设中不会遇到的设计和施工难题,很多建设技术参数已经突破了现有行业规范的考虑范围,桥梁建设技术也在不断的创新中发展。同时对处于复杂海洋环境中的跨海大桥,在其全寿命周期中,结构不仅承受着车辆荷载的作用,而且还会遭受各种可能的突发性因素(如台风、地震、船舶撞击等)的影响,从服役开始就面临着损伤积累的威胁,在其漫长的服役期中,会不断出现损伤、维修、再损伤、再维修,直到服役期结束。严格地讲,桥梁结构的健康状态是在不断地发生着变化。如果能够对跨海大桥结构进行实时的状态监测,针对易损构件进行实时的损伤诊断,就可实时了解结构服役状态,及时完成必要的维护和修复,那么就可避免由于桥梁结构整体失效所造成的工程事故。

## 2 跨海大桥建设的技术研发需要长期的结构监测系统

跨海大型桥梁处于陆海相交的海域环境中,这样的区域一般地质情况复杂,且海上风、浪等自然气候条件恶劣。以舟山大陆连岛工程为例,桥址区的气候同时受到西风带、副热带和热带辐合带天气系统的影响,天气复杂多变,灾害性天气类型多、发生频繁,主要有暴雨、龙卷风、连阴雷暴、飑线、寒潮和雾等,其中尤以龙卷风、飑线、雷暴最为严重,对工程施工和运营安全有影响。环境湿度和盐度高的海洋气候对钢结构的侵蚀风险大。舟山地区是受台风影响频繁的地区,平均每年 2.56 个,台风最早出现在 5 月份,最迟出现在 11 月份,且季风盛行,风力大。其中西堍门大桥处,10 m 高处 100 年重现期的最大风速达 41.12 m/s。西堍门水道潮流一般以不正规半日潮流为主,潮流运动形式大多为往复流,且流速大、有强烈旋涡,实测最大涨落潮漂流流速约 2.66~3.65 m/s,实测最大波高可达 2.1 m,该水道通航繁忙。整个桥址区域地质条件较复杂,地震基本烈度为Ⅶ度,为浙江最高地区。

环境条件对跨海大桥的设计、施工及后期养护都提出了更高的技术要求,其建设过程中面临着诸多的技术挑战,这些凝聚在设计和施工中的关键技术需要在运营期通过健康监测系统的实测数据来进一步分析和研究。主要有:

1) 跨海大桥常常面临恶劣的风环境。高风速

条件下,大跨径桥梁在结构选型和构造设计中必须考虑风致破坏问题,针对结构颤振和涡激共振必须采取有效的措施。例如,著名的美国塔科玛大桥就曾遭受风致破坏。而跨海大桥常常会采用跨越能力强的大跨径悬索桥,悬索桥属柔性结构,抗风问题显得更为突出,所以确保跨海大桥的抗风性能和抗风安全是一个十分关键的技术问题。对实测风环境和结构在风荷载下的反应进行监测十分必要。

2) 跨海大桥位于恶劣的海洋环境中,在这种环境下混凝土结构的腐蚀状况要比其他环境下的严重得多。导致海水中混凝土腐蚀的因素主要包括:钢筋锈蚀、冻害、化学腐蚀、结晶压力以及海洋微生物作用、流水波浪的磨损与冲刷等。因此,防止钢筋锈蚀延长结构使用寿命,确保跨海大桥的耐久性是一个十分突出的问题,也需要长期给予监测和关注。

3) 最近的二十余年,全球发生了许多次大地震,在这几次地震灾害中都有一个共同特点,即由于桥梁工程遭到严重破坏,切断了震区交通生命线,造成救灾工作的巨大困难,使次生灾害加重,导致了巨大的经济损失。因此重大交通工程必须进行地震安全性评价,并根据桥位处不同的地区地震设防要求,确定抗震设防措施。另外,对于处于通航海域的跨海大桥,确保其防船舶撞击的安全性也是一个十分重要的问题。类似地震和船舶撞击等突发灾害的灾后结构评估也需要系统的监测数据作为支撑。

4) 跨海大桥多处于港口及船舶出入频繁区域,海域航道繁忙,为满足通航要求及地形条件的限制,避开深水基础等因素,跨海大桥朝特大跨径方向发展是一个趋势。特大跨径桥梁的全部作用效应中以自重效应占很大成分,因此跨度的增加依赖于材料科学的进步,研发高强轻质材料是跨海大桥发展的一个重要技术难题,如悬索桥钢箱梁所用钢板和缆索系统所用钢丝等都直接支撑桥梁向更大跨度发展,这些新材料和新工艺的耐久性也需要进行长期监测。

5) 由于大型跨海大桥(尤其是斜拉桥、悬索桥)的力学行为和结构特点相对复杂,桥梁结构受多重荷载和环境效应作用,在大桥设计阶段就完全精确地掌握和预测结构成桥后的受力状态是非常困难的。结构理论分析常基于理想化的有限元离散模型,并且分析时常以很多假定条件为前提,试验研究的模拟也可能与实际结构的受力状态不完全相符。因此,通过桥梁健康监测所获得的实际结构的动静

力反应来验证大型跨海大桥的各项设计指标,监测结构安全状态成为一个十分重要的研究方向,可为跨海大桥建设提供更多的技术信息,可为进一步提高设计和施工水平提供参数指标依据。

在跨海大桥建成后,就需要一个完善的结构监测系统来测试结构在运营过程中的各种反应信息,并通过有效的损伤识别方法来了解和分析大桥结构的受力状态和服役能力,来校核和验证设计及施工的合理性和正确性。由于跨海大桥在建设技术上的超前性和结构体系上的复杂性,其对健康监测系统的构建及损伤识别算法的性能也提出了更高的要求。

### 3 跨海大桥健康监测的发展及系统构建

#### 3.1 桥梁健康监测的发展

20世纪40年代到50年代,国外土木结构的损伤检测发展主要是对结构缺陷原因的分析和修补方法的研究,检测工作大多采用以目测为主的传统方法;60年代到70年代,开始注重对结构检测技术和评估方法的研究,多种现代检测技术被应用到土木结构中;80年代以来,土木结构的损伤检测进入了逐步完善的阶段,结构检测方面制定了一系列的规范和标准,结构损伤检测与基于有限元分析和智能评估的损伤识别相结合得到了迅速的发展。我国在20世纪70年代以后,随着结构抗震、抗风研究的发展,才逐步开始结合可靠性评估和安全维修鉴定进行土木工程结构损伤检测的研究<sup>[1]</sup>。后来,计算机技术、信息技术和人工智能等学科的知识不断被应用到结构损伤检测中,人们不仅应用各种检测手段和检测工具在现场对结构进行测试,还应用各种理论方法在计算机上结合有限元计算对结构的损伤状态进行分析,来识别在现场无法察觉的结构损伤,并发展出了一门专门的技术即损伤识别。

近年来,随着我国大型桥梁工程的兴建,结构健康监测得到了极大的重视,越来越多的人在从事这方面的研究,越来越多的桥梁结构中安装了实时的健康监测系统。国际上出现了针对重要工程结构的长期健康监测系统。长期健康监测系统是由永久性安装在结构上的传感器和数据采集输出等软硬件设备组成的系统,它以结构的荷载、环境、响应等为监测对象,为及时地评价结构的健康状态提供了丰富的资料,可实时地通过现场安装的损伤检测仪器和计算机辅助完成的损伤识别技术对结构的健康状态做出评价。长期在线结构健康监测系统对硬件和软

件都提出了更高的要求,大大推动了损伤检测和损伤识别技术的发展。同时把人工巡检和自动化的数据采集相结合,丰富观测信息,已成为大型桥梁健康监测的一个新趋势。随着测试手段和分析技术的提高,许多国家都开始在一些大跨桥梁中设置健康监测系统,在桥梁结构健康监测和损伤识别方面进行了卓有成效的研究<sup>[2]</sup>。

美国在20世纪80年代中后期开始在多座桥梁上布设传感器,监测环境荷载、结构振动和局部应力状态,用以验证设计假定、监视施工质量和实时评定服役安全状态,例如,佛罗里达州的Sunshine Skyway Bridge桥上安装了500多个传感器,可以通过近距离及远距离两种方式,采集桥梁各阶段的位移、应变、温度信息,并通过这些信息分析结构及材料随时间变化的规律。

丹麦对Great Belt跨海斜拉桥进行了施工阶段及通车首年的监测,目的是通过监测数据来分析关键的设计参数,掌握施工最不利阶段结构的受力状态以及获取运营后对结构进行维修所需的桥梁健康记录。

挪威在主跨530 m的Skarnsundet斜拉桥上安装了全自动的数据采集系统,该系统能对风、加速度、倾角、应变、温度、位移等进行自动监测,以实现对整个桥结构状态实时了解的目的,并能检验设计和施工是否完善。

泰国曼谷RamaIX斜拉桥与韩国Namhae悬索桥分别于1994年和1996年安装了结构整体性安全在线警报系统,该系统能对结构进行远程监测。

香港的几座大跨桥梁、内地的虎门大桥、徐浦大桥、江阴长江大桥、南京三桥、钱江四桥等都安装了健康监测系统,在运营期间对结构进行实时监测。其中香港的青马大桥、汲水门大桥和汀九大桥上安装了当时世界上规模最大的实时安全监测系统,即风与结构健康监测系统。三座桥上的监测系统包括传感器系统、信息收集系统、信息处理和分析系统,传感器系统由约900个各类传感器及有关附件组成。

#### 3.2 大型桥梁结构健康监测系统的构成

桥梁健康监测系统是集结构监测、系统识别及结构评估于一体的综合监测系统,其内容包括荷载监测、几何变位监测、结构响应监测等。整个桥梁健康监测系统就像一个医生,对结构健康状态进行诊断,首先对结构系统输入荷载观测,然后测量结构体系受激励所产生的反应,通过各种测试仪器得到测试数据后,先完成数据处理,再结合数值模型的先验

知识对结构进行诊断,分析结构可能发生的损伤。最后对结构的健康状态进行评估,确定维修和养护

对策。一个完善的结构健康监测系统如图 2 所示<sup>[2]</sup>。

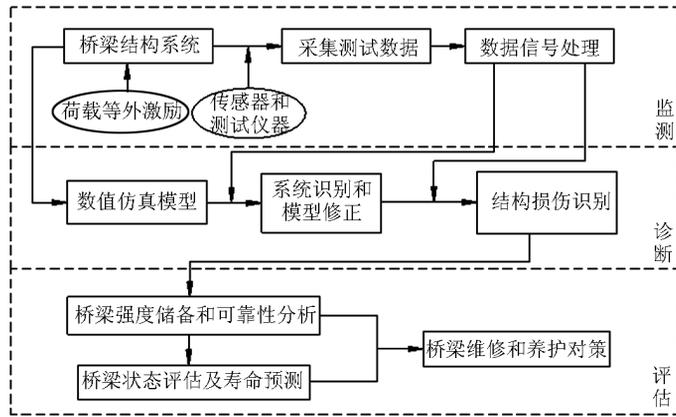


图 2 桥梁健康监测系统的构成

Fig. 2 Composition of bridge health monitoring system

如在舟山连岛工程桥梁健康监测系统中,主要的目的是完成桥梁安全状态的获知,采取的新思路是通过相对灵活和主观的人工巡检和相对固定和客观的传感器监测来获得桥梁结构安全的基本信息,并通过结构状态评估及损伤识别等技术来获得较为直观的桥梁结构安全信息。系统建立的目的是使桥梁的养护管理人员能够及时获得易于理解的桥梁安全状态信息。针对不同的构件危险性分析来采用不同的监测巡检策略,大桥结构总体受力状态的把握,通过布设自动化传感测试系统来获取桥梁受力状态的主要信息。大桥构件及附属设施表观局部损伤的探明主要通过电子化人工巡检定期直接检测。

为确保在大桥运营期对结构进行全方位的结构状态监测,舟山连岛工程中安装了目前世界上最大规模的结构健康监测系统,覆盖金塘和西堍门两座大桥,这个监测系统已在西堍门大桥安装了 350 多个传感器,在金塘大桥安装了近 600 多个传感器,这些传感器包括风速仪、温湿仪、温度计、加速度传感器、GPS、倾斜仪、压力变送器、位移传感器、电阻应变片、索力传感器、支座反力计等。同时,系统中集成了传感测试、信号分析、智能控制、人工智能等目前最新的技术和设备。采用工业以太网和分布式信息融合技术为大桥管养提供智能支持,实现了全方位的结构监测,西堍门大桥的系统布置如图 3 所示<sup>[3]</sup>。

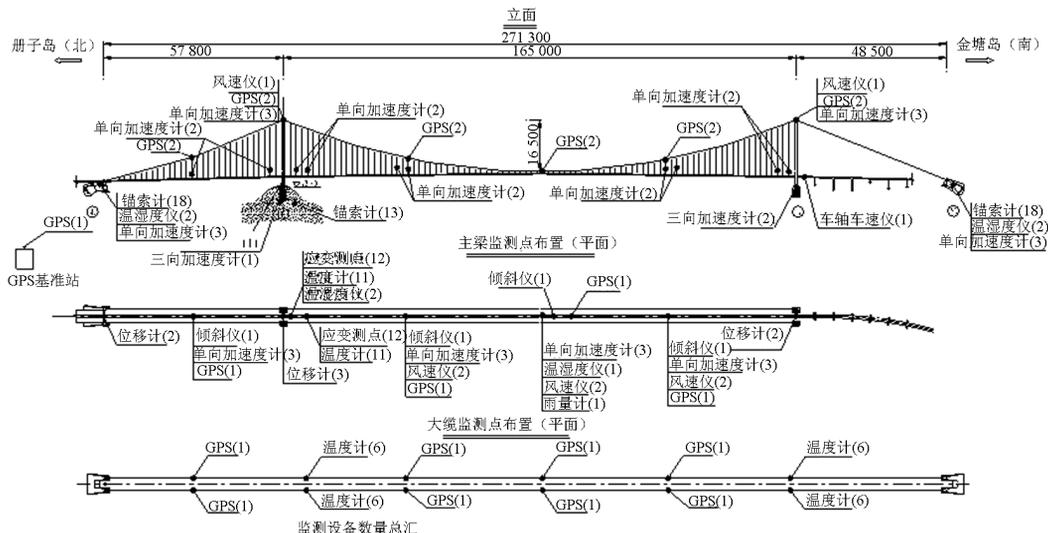


图 3 西堍门大桥结构健康监测系统的布置 (单位:cm)

Fig. 3 Xihoumen Bridge health monitoring system (unit:cm)

整体上看,由于仪器技术和通信技术的提高,以及各种检测手段的不断发展,目前桥梁健康监测系统中的硬件水平和获取原始测试数据的能力已不是至关重要的技术难题,而目前面临的挑战是,对于大型复杂桥梁,如何用有限的传感器和检测手段去获取相对无限的结构状态信息,同时面对海量的监测数据和多源结构状态信息,如何进行有效的综合利用,通过信息管理系统和管理决策系统能够智能化地为桥梁管理服务。

#### 4 跨海大桥损伤识别的特点分析及方法选择

面对桥梁健康监测系统所提供的大量监测数据信息,目前的损伤识别方法在工程应用上还难以令人满意。在桥梁结构损伤识别领域,发展比较快,研究比较多的是基于振动的结构损伤识别方法。起初,人们首先想到的是找到一种不随结构系统输入变化,而对系统参数变化敏感的结构动力特征,来识别结构损伤前后的系统参数变化情况。因此结构固有频率、振动模态等动力指纹被采用来进行损伤识别。这种基于测试频率的方法被 Adams 和 Cawley 首次提出来进行损伤识别<sup>[4]</sup>。由两种最初的基于频率和基于模态的损伤识别方法不断改进,目前已经发展出了多种不同的损伤识别方法,如基于模态曲率、模态应变、模态应变能等以及频率和模态组合的方法。针对具体的研究对象,这些方法都展示出了各自独到的特色<sup>[5]</sup>。随后,随着计算机技术的发展和交叉学科理论的渗透,研究人员先后发展了基于神经网络的方法、基于遗传算法的方法、基于统计理论的方法、基于小波分析的方法和基于信息融合的方法等。结果表明,这些方法应用于常规的桥梁结构损伤识别分析,比传统的方法有优势,能得到更理想的识别结果<sup>[6]</sup>,特别是基于小波分析的方法更显示了它在结构损伤识别中的独到之处<sup>[7]</sup>。但是在大型跨海桥梁中,健康监测系统往往规模巨大,测点和传感器数量多,针对单一易损构件采用统一的损伤识别方法可能无法满足复杂的结构损伤状态识别,因此,需要针对不同的可能致损荷载和不同类型的可能结构损伤来发展有不同损伤识别目的的算法,以实现跨海大桥中复杂结构的分布式损伤识别。

从系统认知的角度看,桥梁结构损伤识别问题是一个系统辨识过程,就是在一定外激励输入下,在

系统输出数据的基础上,确定所测结构系统参数变化的过程,也就是一个“黑匣”认知问题。结构损伤识别的目的就是通过获得结构系统的输入(荷载激励用)和输出(结构响应)信息,应用各种算法来认识结构系统的参数变化情况。如果把桥梁结构当作一个线性系统来进行参数识别,目前已有较成熟的损伤识别方法。然而,实际桥梁结构,特别是跨海大桥在多数情况下并不能完全作为一个线性系统,如大型跨海大桥,其在局部构件损伤过程中完全是一个时变的非线性系统。但是,由结构检测发展来的结构损伤识别方法,过去一般不考虑结构损伤的过程,只是针对损伤前后的结构检测信息来识别损伤,而且大多数损伤识别方法都假设结构处于线性范围,并不考虑损伤发展的非线性特性。这些方法在简单桥梁结构和模型试验中都取得了比较好的损伤识别效果,但是无法真正应用到大型跨海桥梁和实际工程中。实际上,大型桥梁结构由于材料的非弹性变形、边界条件渐变、支座及节点连接的非线性等因素,再加上大跨桥梁本身的结构非线性,使得结构在荷载和环境温度等因素作用下,成为一个非线性结构系统,无法应用线性系统损伤识别的经典方法。如 Farrar 在对美国 40 多座桥梁的测试分析中,就发现当一座桥梁中的一个重要板梁刚度下降了 96.4%,导致整个桥梁的截面刚度减少了 21% 时,结构的频率损伤指标在损伤前后却并没有明显的变化<sup>[8]</sup>。另外,由于实际结构的荷载激励测试很困难,且代价昂贵,因此大多数损伤识别方法常常通过不考虑系统输入(激励力),仅考虑系统输出(结构响应)来完成损伤识别,以逃避结构外激励不易观测的困难,如基于环境激励的结构脉动测试就试图从响应数据的统计分析上了解结构参数信息。而实际上,不同的外激励荷载决定了不同的结构损伤方式和损伤机理,同样也需要采取不同的损伤识别技术,放弃系统输入端的信息,仅凭系统输出端的信息必然会降低对结构系统的认识能力。并且极端荷载所造成的结构突然损伤与致损荷载作用过程有着天然的和必然的联系,这也要求在跨海大桥的结构损伤识别中必须考虑荷载激励本身的特征信息。

因此,跨海大桥结构损伤识别应该更多地针对具体的结构系统外激励特征,如深入研究强风荷载的特征风谱,并考虑损伤过程和个别易损构件的损伤机理来开展研究,走精细化的分布式损伤识别的

研究道路,并且更多地从现场实测数据分析中提升技术方法的精确性,用信息融合的手段来解决系统庞大、信息冗余的问题,从而提高结构损伤识别技术的可靠性和工程可应用性。

## 5 结语

鉴于跨海大桥在建设技术方面的超前性、探索性和工程本身的重要性,同时考虑到其所服役的自然环境的相对恶劣性,去构建一个完善的健康监测系统,采取有效的损伤识别方法以实现桥梁结构状态的监测和诊断,并对可能出现的损伤和灾害进行预测、评估,这已经成为目前大型跨海桥梁建设的客观需求,同时也是桥梁健康监测研究蓬勃发展的自身要求。然而大型跨海桥梁健康监测的研究还面临很多需要进一步解决的问题。

1) 优化传感器测点布置是损伤信息来源的重要保障。目前,传感器的类型多样,精度各异,它们能采集到结构运动物理量、力学物理量、状态物理量等信息。如何在大系统中合理布置这些不同类型和一定数量的传感器,还需要针对具体的跨海大桥的健康监测策略和所采用的损伤识别方法进行研究。

2) 实际的跨海大桥在自然环境中,监测数据受许多不确定因素的影响,如温度效应、动力特性的波动等,这些因素引起的测试信号变化与损伤引起的信号变化耦合在一起,使得损伤识别面临挑战,还有测试仪器精度和设备干扰也会使得信息失真。因此如何克服环境因素的影响甄别出反应结构损伤状态

的信息还需要进一步研究。

3) 在大型健康监测系统中,如何结合易损构件的危险性给各测试参数设定合理的预警指标阈值是个关键问题,这个技术实际上涉及到整个系统中结构分析的精确度、数据监测和损伤识别的准确性以及桥梁管理决策的科学性。在目前已有的监测系统中还没有很好地解决这个问题。

## 参考文献

- [1] 陈长征. 结构损伤检测与智能诊断[M]. 北京:科学出版社, 2001
- [2] 郭健. 基于小波分析的结构损伤识别方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004
- [3] 中交公路规划设计院有限公司. 舟山大陆连岛工程西堠门大桥、金塘大桥结构运营监测综合管理系统研发实施总体方案[R]. 2007
- [4] Cawley P, Adams R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies[J]. *Journal of Strain Analysis*, 1979, 14(3):49-57
- [5] Pandey A K, Biswas M. Damage detection in structures using changes in flexibility[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 169: 3-17
- [6] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B. A summary review of vibration-based damage identification methods[J]. *The Shock and Vibration Digest*, 1998, 30(2): 92-105
- [7] 郭健,顾正维,孙炳楠,等. 基于小波分析的桥梁健康监测方法[J]. *工程力学*, 2006, 23(12):129-135
- [8] Farrar C R, Baker W E, Cone T M, et al. Dynamic characterization and damage detection in the I-40 Bridge over the Rio Grande[R]. Los Alamos, 1994

# Key technique analysis of health monitoring of trans-oceanic bridges

Guo Jian

(Zhejiang Provincial Construction Headquarters of Zhoushan Islands Link Project, Zhoushan, Zhejiang 316000, China)

[Abstract] Taking Zhoushan Mainland-Islands Link Project as an example, the importance and research status quo of health monitoring study of trans-oceanic bridges were discussed. Then, the key techniques and study direction were analyzed, and the study idea of structural damage identification considering nonlinear effect and load feature were presented to improve bridge damage evaluation ability by a comprehensive health monitoring system.

[Key words] trans-oceanic bridge; Zhoushan Mainland-islands Link Project; health monitoring; damage identification