

# 桥梁结构的耐久性和安全性思考

葛耀君 项海帆

(同济大学 中国上海 200092)

**摘要:**随着我国桥梁工程的不断发展,桥梁结构的耐久性和安全性问题已经逐步发展成为关键的问题,本文主要对这两个方面的问题和对策进行了统计和分析。其中,桥梁结构耐久性问题主要反映在混凝土斜拉桥开裂、混凝土梁式桥下挠、正交异性钢桥面疲劳裂缝等三个方面,耐久性设计实践初步涉及到了混凝土梁抗裂、正交异性钢桥面改进和大型桥梁耐久性保障等;通过近年来国内外桥梁破坏事故统计和桥梁破坏原因分析阐述了桥梁结构安全性主要问题,并以大桥灾变监测和控制以及编制基于性能的设计规范作为安全性控制的主要对策。

**关键词:**桥梁结构 耐久性 混凝土梁 正交异性钢桥面 安全性 桥梁事故 灾变控制

## 1 引言

自从18世纪英国人约翰·斯密顿宣称自己是世界上第一位土木工程师后,土木工程师们在每个世纪里都会面临新的历史使命和挑战。19世纪,土木工程师们发明了使用钢和混凝土等建筑材料的有效方法,用来建造桥梁和房屋等土木工程构筑物。20世纪,人们发现这些构筑物的终身养护费用往往比最初的建造费用还要高,所以工程师们开发了桥梁养护和维修的有效方法,并作为结构设计、施工和运行时的一个重要组成部分加以考虑。进入21世纪后,我们将要面临的挑战不仅有大型桥梁的全寿命周期性能,还有在桥梁寿命末期如何减小结构拆除影响的问题,这就是本世纪一个世界性的挑战问题——可持续桥梁工程。随着我国桥梁建设事业的不断发展,这一使命和挑战将会越来越突出,我们必须提前做好准备应对挑战,其中,桥梁工程中最关键的是耐久性和安全性问题。

## 2 耐久性问题

桥梁结构的耐久性是指桥梁抵抗自然风化、化学侵袭、机械磨损以及其它性能退化过程的能力。一个耐久性好的钢结构或混凝土结构,当裸露于正常环境时,能够保持其初始的构件外形、结构质量和服役功能。我国现有的规范规定,桥梁结构的耐久性或使用寿命为100年,但实际上桥梁结构在规定使用期内就不得不重建,部分桥梁甚至在预期的一半寿命内就需要拆除重建。而

这些耐久性不足的桥梁,往往在使用期内首先表现出开裂、变形、下挠等耐久性问题,其中,混凝土斜拉桥的开裂、混凝土梁桥的下挠和正交异性钢桥面的疲劳裂缝是桥梁耐久性研究中最常见也是最需要解决的问题。

### 2.1 混凝土斜拉桥开裂

我国从1975年开始建造斜拉桥,到目前为止已经建成200多座斜拉桥,其中90%以上采用了预应力或钢筋混凝土主梁,即混凝土斜拉桥。据不完全统计,主跨200m以上的大跨度混凝土斜拉桥就有40多座,最大跨度的混凝土斜拉桥是2002年建成通车的主跨500m的荆沙长江大桥。

在大跨度混凝土斜拉桥中,存在混凝土主梁开裂的结构耐久性问题。大量研究表明,混凝土斜拉桥的裂缝有四种典型形式,即顶板裂缝、底板裂缝、腹板裂缝和隔板裂缝。表1列出的8座典型开裂的混凝土斜拉桥,其中,主梁和腹板都出现了大量的裂缝,这些桥梁的使用年限从11年到27年不等,平均使用年限为19年,远小于桥梁结构的预期寿命100年<sup>[1][2]</sup>。混凝土斜拉桥开裂引起的耐久性问题一般可以归结为两大原因:由包括设计、构造、材料和施工中的主观失察因素引起的裂缝以及由包括超载、温度荷载、混凝土收缩和徐变等客观触发因素引起的裂缝。虽然进行了大量的现场调查和案例研究,也曾经解释了个别桥梁开裂的具体原因,但是仍然很难得出混凝土斜拉桥开裂的一般性结论。

表1 部分开裂混凝土斜拉桥的裂缝情况

序号	桥梁名称	位置	跨径布置 (m)	建成时间	裂缝数量			
					顶板	底板	腹板	隔板
1	济南黄河大桥	山东	40+94+220+94+40	1982	1386	11	52	1794
2	上海浏港大桥	上海	85+200+85	1982	很多			
3	天津永和大桥	天津	120+260+120	1987	2	2		
4	石门长江大桥	重庆	200+230	1988	233		84	78
5	宁波甬江大桥	浙江	105+97	1992	147			164
6	钱塘江三桥	浙江	72+80+168 × 2+80+72	1996		很多	148	
7	李家沱长江大桥	重庆	169+444+169	1997	很多	很多	很多	很多
8	广东番禺大桥	广东	70+91+380+91+70	1998			很多	

## 2.2 混凝土梁式桥下挠

我国的混凝土梁桥被广泛应用于中等或大跨度桥梁中,主要有预应力混凝土连续梁桥和预应力混凝土连续钢构桥等两种形式,这两种桥型适合于100m到300m跨度的桥梁,其中后者较前者的跨越能力更大些。我国有近60座跨度在200m以上的预应力混凝土梁式桥,虽然重庆长江大桥复线桥的主跨长达330m,但它中间有一段钢梁,属于钢-混凝土混合梁,最大跨度的混凝土梁式桥应该是1997年竣工的270m主跨的虎门大桥副航道桥。

对于大跨度预应力混凝土梁桥,最大的耐久性问题就是主跨的过度下挠,而造成这一变形问题的原因与混凝土梁体开裂有关。结构下挠会导致箱梁底板产生更多的开裂,进而降低结构刚度,最终产生更大的下挠,形成恶性循环。表2给出了国内外9座大跨度预应力混凝土梁桥,其中国内有3座,国外6座,都产生了中跨下挠的现象。下挠持续时间从3年到28年不等,平均为11年,远远小于桥梁的设计寿命100年<sup>[3]</sup>。国内外研究结果表明:混凝土连续梁桥和混凝土连续刚构

桥的主跨下挠并不是中国特有的问题,而是个全世界普遍存在的问题;从结构设计、施工和养护的角度很难避免下挠的发生,目前主要通过设置预拱度的方式加以控制,例如,挪威按照跨度的0.5%预留挠度;一旦下挠发生后很难采取措施使其恢复,例如,美国曾经发生下挠恢复加固施工后导致桥梁坍塌的重大事故。非常期待着中国桥梁工程界在解决这一世界性难题时取得创造性的重大突破。

## 2.3 正交异性钢桥面的疲劳裂缝

二次大战后的1948年,德国工程师首创了各向异性桥面板以代替战前普遍采用的钢筋混凝土桥面板。最初的正交异性钢桥面板是从由纵肋条和横肋条加劲的船舶甲板的构造中移植过来的,其中,面板厚度不足10mm、纵横向加劲采用的是开口断面,用于桥面后发现尽管钢面板表面铺设了沥青混凝土,仍然不能满足车辆局部轮压荷载的要求。50年代起,为了提高刚度首次使用了U形闭口肋、钢面板也加厚到了12mm,并建立了正交异性钢桥面的计算方法。60年代,正交异性钢桥面板在使用过程中出现了由于应力集中引起

表2 国内外部分预应力混凝土梁式桥的下挠情况

序号	桥名	国家	跨径 (m)	建造时间	下挠 (mm)	测量时间	持续时间 (年)
1	Stolma	挪威	301	1998	92	2001	3
2	虎门大桥	中国	270	1997	223	2004	7
3	黄石大桥	中国	245	1995	305	2002	7
4	Koror-Babeldaob	美国	241	1978	1200	1990	12
5	Stovset	挪威	220	1993	200	2001	8
6	Parrotts	美国	195	1978	635	1990	12
7	Grand-Mere	加拿大	181	1977	300	1986	9
8	Kingston	英国	143	1970	300	1998	28
9	三门峡大桥	中国	140	1992	220	2002	10

的疲劳裂缝问题,这种应力集中现象主要来自于构造不良和焊接工艺不当,加上车辆反复经过引起局部集中应力,造成纵肋与面板焊缝以及纵肋与横肋交叉处的疲劳裂缝,前者通过制定严格的焊接工艺——局部打磨和残余应力控制、后者采用改进细部构造——交叉处留空以减少约束,经可能减少应力集中现象,大大改善了正交异性钢桥面的使用性能。到了70年代,欧美各国的正交异性钢桥面构造设计和计算理论已经发展成熟,那个时代建造的一些正交异性钢桥面,至今已经安全使用了30余年<sup>[4]</sup>。

我国在改革开放后的80年代开始试用正交异性钢桥面,最早采用这一桥面形式的是1984年建成的马房北江大桥,是一座64m跨度的公铁两用钢桁架桥,公路桥面首次采用了正交异性钢桥面板。由于与厚重的混凝土主梁或桥面板相比,正交异性钢桥面板是一种轻质结构系统,因此在我国大跨度悬索桥和斜拉桥的发展中,正交异性钢桥面起到了重要的推动作用。1987年建成的东营黄河大桥是我国第一座钢斜拉桥,桥面首次采用了正交异性钢桥面。从90年代开始,随着我国大跨度悬索桥和斜拉桥建设高潮的到来,桥面主梁普遍采用了扁平钢箱梁,正交异性钢桥面得到了大量的应用,例如,以1997年建成的虎门大桥为代表的近10座大跨度悬索桥和以2001年建成的南京长江二桥为代表的近10座斜拉桥。其中,最早建成通车的虎门大桥在通车后不久就发现了桥面沥青铺装问题,于是在南京长江二桥正交异性钢桥面设计中,将虎门大桥12mm厚的面板增加到14mm厚,并引进了美国Chemco公司的环氧沥青铺装,同时加强了对超重卡车的限行。

然而不幸的是,2007年起虎门大桥的正交异性钢桥面逐渐暴露出面板和纵肋焊接处的疲劳裂缝问题,对该桥的正常通行产生了严重的影响,也在中国桥梁界引起了极大的关注。虎门大桥桥面是一个典型的正交异性钢桥面,扁平钢箱梁总宽度为35.6m,中间梁高为3.0m。作为箱梁顶板的正交异性钢面板厚度为12mm,并采用间距为620mm、厚度为8mm的U型肋进行加劲。目

前,在正交各向异性钢桥面内发现了大量的疲劳裂纹,这些裂缝可以分成如图1所示的从A到E的5种类型<sup>[3]</sup>。

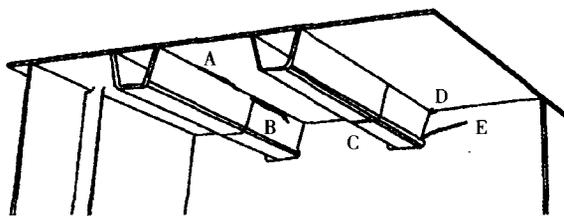


图1 观测到的疲劳裂缝类型

A型裂纹出现在顶板上,沿着顶板与纵向U型肋的焊缝,在U型肋的内侧或外侧,裂缝从钢面板底部一直贯通到顶部。B形裂纹出现在U型肋的腹板上,沿着顶板与纵向U型肋的连接线,且大部分出现在U型肋的弯折处。C形裂纹出现在U型肋节段之间的接缝处。D形裂纹产生于U型肋的腹板上,位于与横隔连接的焊脚处。E型裂纹产生于横隔板上,位于与U型肋相连的焊脚处,这种裂缝从上型箱孔开始沿着横隔水平传播或斜向传播,或者沿焊缝传播。

初步分析发现,正交异性钢桥面板疲劳裂缝的主要原因是频繁的超载,包括车辆密度和车轴重量<sup>[3]</sup>。为此,首先进行了交通量和车辆轴重统计分析,图2给出了每天通过桥面的交通量,可以看出,日交通量从1997年的14928增加到2008年的62439,增长系数为4.2,也就是在过去的11年里,6车道桥面已经经受了1.55亿车次的作用,平均每个车道承受了2.58千万车次的作用,远远超过了疲劳强度。图3给出了车辆轴重的分布,明显显示出有三个轴重峰值,分别为50kN、150kN和400kN,而桥梁的设计轴重是200kN,几乎一半以上的车辆轴重超过设计轴重。进一步的现场调查和实验研究发现,这些裂缝主要发生在重型卡车行驶的两个边车道上,由于卡车超载严重、通行密度又高,而钢面板较薄、沥青铺装破坏后造成路面不平整,加大了冲击作用,因此,这些综合因素导致了正交异性钢桥面在通车不到12年的时间里就因为反反复复的超载而发生疲劳裂缝最终导致疲劳破坏。

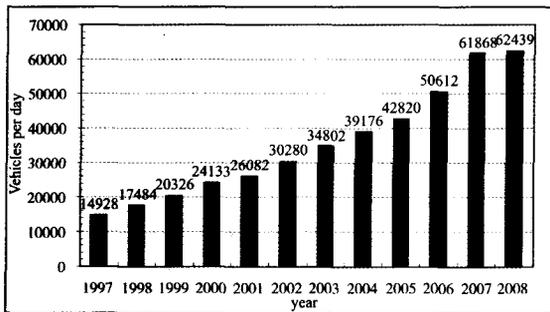


图2 日交通量统计分析结果

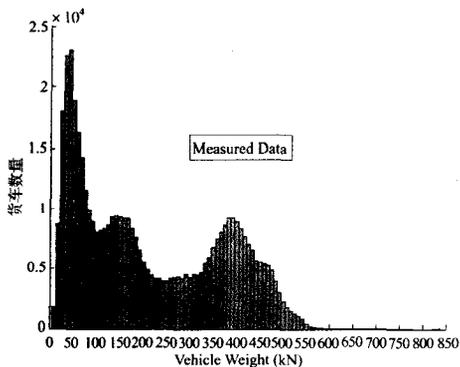


图3 车辆轴重统计分析结果

### 3 耐久性设计

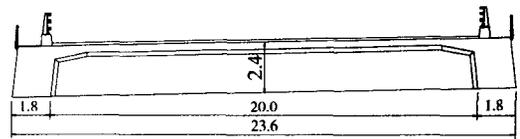
桥梁结构的耐久性设计问题已经开始收到普遍重视,其中包括混凝土梁抗裂、正交异性钢桥面改进和大型桥梁耐久性保障等方面。

#### 3.1 结合梁代替混凝土梁

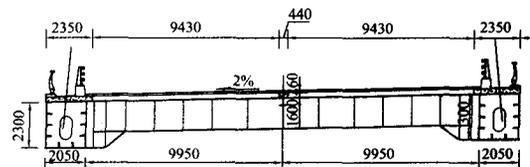
通过以上桥梁耐久性问题的调查研究,我国桥梁工程界正在逐渐关注混凝土斜拉桥的结构耐久性问题。以最近正在接受设计审查的宁波甬江特大桥为例,该桥最初设计方案是跨度为468m的混凝土斜拉桥,截面型式为图4a所示的预应力混凝土双边主肋。在初步设计评审中,专家评审委员会不支持这种双边主肋的混凝土截面桥型方案,主要原因就是它存在已经发现的耐久性问题。根据评委专家的建议,设计方案由原来的混凝土桥面改为结合梁桥面,即两个边钢箱梁加预应力混凝土板,如图4b所示。显然,结合梁中的钢箱梁没有开裂问题,预应力混凝土桥面板开裂可能性很小,并且是可以替换的,这就大大提高了结构的耐久性<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 正交异性钢桥面改进

邓文中先生曾经建议:如果卡车的超载问题难以控制,中国的桥梁设计规范应当正视这一现实,在保证桥面铺装耐久性的前提下,应将两侧重车车道的钢面板厚度进一步加大到16mm。他还提出过一个新的构思:采用热轧大型纵肋,并将肋距增大到800mm,桥面板厚度不小于18mm,而纵肋的跨度可增加到8m到10m,此时可取消横肋而仅保留少量横隔板。超载引起的正交异性钢桥面的疲劳裂缝问题是中国社会发展中的特殊问题,在世界范围内并不具有普遍性,正因为如此,我们中国的桥梁界更需要结合国情自主创新设计,以期在不久的将来成功解决中国式正交异性钢桥面板的耐久性问题<sup>[6]</sup>。



a) 混凝土双边主肋截面



b) 钢箱梁与混凝土桥面板结合梁截面

图4 宁波甬江特大桥主梁断面型式

#### 3.3 大型桥梁耐久性保障

随着我国社会经济的高速发展,所建造的桥梁工程规模越来越大、系统越来越复杂、功能越来越众多,国际上称之为“超级工程”(super infrastructure)。这些工程的共同特点是:投资巨大、技术复杂、环境影响严重、灾害概率增大(风、浪、地震、海啸、船撞、恐怖袭击等),同时养护、维修、加固难度很大。因此像过去那样只局限于满足结构功能,单一层面上寻求结构安全已经不够了。从上世纪70年代开始,国内外在认真总结经验教训的基础上,除了继续强调结构设计和施工的安全性之外,还逐步讨论了结构耐久性、整体可靠性、构件可换性等,对不同桥梁结构的灾害等级和风险水平进行了分析,提出了耐久性设计的新概念。实质上,结构耐久性设

计所要解决的问题也就是经济、合理的使用年限问题,即结构寿命期问题。

一座大型桥梁要服务100年甚至更长时间,对于投资巨大的超大跨度桥梁或跨海长桥,寿命期应考虑延长至150到200年,考虑到现代科学、经济的高速发展,在结构寿命期内,除了结构本身的老化和衰变的内因外,外因变化也很大。例如要预测桥梁结构百年间的使用要求变化、制定出各种标准进行设计是很难实现的。然而,工程师应能使得结构物适应各种变化,采用各种措施为结构提供补充“体能”的机会。为了实现这个目标,在设计时结构必须具备六大特性,即可检性、可修性、可换性、可健性、可控性及可持续性。工程师必须认识到整体结构的寿命和各个构件的寿命是不完全相等的,例如橡胶支座的寿命不超过20年、斜拉索护套的寿命为10到20年、拉索钢丝的寿命可达40年、钢结构油漆的最长寿命是20年等等。这些自身寿命期低于结构设计寿命期的部件必须要在构造上保证可查、可修、可换、可加强。在外因剧变的情况下,结构的变形要在构造上“可控”,才能够在运营阶段对桥梁进行维修和加固等作业,从而保证结构的耐久性。桥梁设计阶段的耐久性指标要兼顾桥梁的寿命期成本,它是桥梁耐久性的基础;施工阶段的耐久性要求应突出材料和结构的特性;运营和维修阶段的耐久性监测主要通过定期检测与评估,由此决定桥梁的加固和维修,它是桥梁耐久性的保证。

#### 4 安全性问题

如果说桥梁结构的耐久性问题还只是一种不致于立即引起破坏的“慢性病”,加以时日可以进行修复,任其发展有可能导致破坏;但是,桥梁性能的灾害性变化则是一种立竿见影的“急性病”,直接导致桥梁结构的整体或局部破坏,容不得任何修复,后果十分严重。为此,有必要对国内外近年来所发生的桥梁事故进行统计、分析造成事故的原因、找出可能存在的问题、研究解决问题的方法,最终建立起一整套桥梁性能灾变控制的方法和系统。

##### 4.1 桥梁破坏事故统计

桥梁事故的信息数据不论对于责任判定还是

结构设计本身都是非常重要的。国内外由于法律原因和害怕损害相关个人或公司的名誉,事故桥梁或危桥的信息一般是很难获得的,即使得到了也是不完整的。本文中收集到的信息主要来源于互联网、新闻报纸、工程杂志、私人通信和邮件等。虽然所得桥梁破坏信息不一定完善,但相信所收集到的信息再加上国内外的对比,可以得出一些重要的结论。

桥梁破坏事故统计主要针对从2001年到2009年共9年间发生在中国和世界上其它所有国家的桥梁破坏事故。为了消除偶然因素,国内桥梁事故的统计中没有包括2008年5月12日汶川地震中破坏的6100多座桥梁。在这9年间全世界共收集到76起桥梁事故资料,其中,中国的事故桥梁37座、其它国家的事故桥梁总和是39座。需要说明的是,国内桥梁的基数比较大,特别是这段时间内施工建成的桥梁比较多;另外,国外事故桥梁被遗漏统计的可能比较大。所以,绝地事故桥梁数的国内外比较可能意义不大。

为了区分不同桥型的事故发生情况,表3给出了从砖石拱桥到混凝土悬索桥共7种类型的桥梁破坏事故。所统计的国内事故桥梁中,混凝土梁桥最多、占了一半以上,其次是混凝土拱桥和砖石拱桥、两项之和占27%,还有8%的桥梁无法识别其桥型<sup>[7]</sup>。在国外的事故桥梁中,由于资料来源问题,大部分桥梁都无法判断其桥型和材料,在已知桥型的事故中,钢梁桥有6座、混凝土梁桥有4座、混凝土悬索桥有2座、还有1座钢拱桥。

本文中将桥梁破坏事故简单分成两种情况,即整体倒塌和局部失效。为了区分是在运营期间或施工阶段发生的破坏事故以及整体倒塌或局部失效,表4给出了桥梁的破坏阶段及破坏类型。国内桥梁事故28起发生在运营期间、9起发生在施工阶段,国外桥梁事故25起发生在运营期间、11起发生在施工阶段、另有3起未知,这一现象基本符合现役桥梁的数量远大于施工期桥梁的数量的统计规律以及施工阶段没有运行荷载作用以至于安全性应当更高的原理;另外,在整体倒塌

表3 国内外事故桥梁类型及数量

桥梁类型	材料	破坏数量		百分比	
		国内	国外	国内	国外
拱桥	砖石	4	0	11	0
拱桥	混凝土	6	0	16	0
拱桥	钢材	1	1	3	3
梁桥	混凝土	21	4	56	10
梁桥	钢材	0	6	0	15
斜拉桥	混凝土	1	0	3	0
悬索桥	混凝土	1	2	3	5
未知	未知	3	26	8	67
总计		37	39	100	100

表4 国内外桥梁破坏阶段及类型

破坏类型	施工阶段		运营阶段		未知	
	国内	国外	国内	国外	国内	国外
部分倒塌	4	8	12	15	0	1
整体倒塌	5	2	16	10	0	1
未知	0	1	0	0	0	1
总计	9	11	25	25	0	3

和局部失效两类破坏类型中,国内事故桥梁的比例是1:0.76,国外事故桥梁的比例是1:1.92,国内事故桥梁的整体倒塌比例远大于国外事故桥梁,显示出破坏性更大,这也必须引起高度的重视<sup>[7]</sup>。

#### 4.2 桥梁破坏原因分类

桥梁破坏的主要原因可以分成两种主要类型,即主管失察原因和客观触发原因。主管失察启动原因具体是指在设计、构造、施工、养护及材料中的人为失误,而客观触发原因具体来源于外部干扰,例如,超载、撞击、洪水、强风、爆炸、火灾、滑坡和恐怖袭击等等,如表5所示<sup>[7]</sup>。

在国内已知原因的33座事故桥梁中,一半以上是由主管失察原因引起的,其中,施工因素最多、不良养护其次;不到一半的事故桥梁是由于客观触发原因引起的,其中,超载最多、船撞和洪水其次。在国外已知原因的32座事故桥梁中,正好一半是由主管失察原因引起的,也是施工因素最多、不良养护其次;在一半由客观触发因素引起的事故中,超载也是最多但少于中国、洪水其次、船撞和强风再次。由此可以得出国内外桥梁破坏原因及其事故分布基本相同,都必须狠抓施工问题和超载问题。

#### 5 灾变控制措施

在国内外最近发生的桥梁破坏事故中,大约有一半是由于主管失察的原因所造成的,另一半是因为客观触发的原因而导致的,一般可以归结为自然或人为的灾害所引起的,还没有包括汶川地震中遭到破坏的桥梁。国内外已经将重大灾害和恐怖袭击列为桥梁与结构工程中的两种高风险因数。

在国际上,联合国曾发起的“国际减灾十年(1990~2000年)”,促进了全球联合的高科技减灾行动,世界上160多个国家分别成立了国家减灾委员会。近十余年来,国际组织和各国减灾委员会设立了诸如“联合国全球灾害网络”、“欧洲尤里卡计划”、“日本灾害应急计划”、“全球分大区的台风监测计划”以及“美国飓风、洪水预报及减轻自然灾害研究”等数以百计的防灾减灾研究项目,取得了许多重要研究成果,为二十一世纪防灾减灾的深入研究奠定了基础。尤其值得一提的是,美国自然科学基金会从2000年开始启动NEES计划(Network for Earthquake Engineering Simulation),历时五年,总共投入8300万美元,于2004年11月建成了一个连接美国

表5 国内外桥梁破坏原因及数量

主要原因	具体原因	破坏数量		百分比	
		国内	国外	国内	国外
主管失察原因	设计	1	2	2.7	5.1
	构造	1	0	2.7	0
	施工	8	9	21.6	23.1
	养护	6	5	16.2	12.8
	材料	1	0	2.7	0
客观触发原因	超载	9	5	24.3	12.8
	撞击	3	2	8.1	5.1
	洪水	3	3	8.1	7.7
	强风	0	2	0	5.1
	爆炸	0	1	0	2.6
	火灾	0	1	0	2.6
	滑坡	1	1	2.7	2.6
	恐怖袭击	0	1	0	2.6
	未知	未知	4	7	0.8
总计		37	39	100	100

15个主要从事地震工程研究的机构和实验室的网络系统,该系统的建成标志着美国的地震工程研究从此可以在一个新的平台上进行。

在我国,1997年颁布“防震减灾法”,旨在防御与减轻地震灾害,保护人民生命和财产安全,保障社会经济建设顺利进行。为配合联合国发起的“国际减灾十年(1990-2000)”行动,国务院成立了由28个部委局组成的“中国国际减灾十年委员会”,后更名为“中国国际减灾委员会”,协调组织重大防灾减灾综合行动,实施了一系列重大防灾减灾项目。重大工程的防灾减灾均列入国家自然科学基金的“十五”、“十一五”优先资助领域。近年来,由国家自然科学基金委员会、地震局、建设部联合与美国国家自然科学基金委员会共同签署了“中美地震科学技术合作议定书”,推进我国防灾减灾研究的国际交流与合作。2005年9月,中国工程院院士联名致信国务院总理,建议国家启动“地震工程科技行动计划”,加大重大工程防灾减灾基础研究的投入。国务院十分重视,立即批示国家基金委给予关注。2008年汶川地震后,党中央和国务院更是加大了地震等自然灾害的防灾减灾研究的支持力度。

国家自然科学基金委于2007年批准启动了我

国土木工程领域唯一的一项重大研究计划——

“重大工程的动力灾变”,该研究计划历时8年,研究经费预算1.5亿元,共资助培育项目60个、重点项目26个和重大项目3个。该计划主要针对长大桥梁、超大建筑和高大水坝等三种重大工程、强地震和强/台风两种动力作用;通过现场实测与理论研究,深入探索强地震动场和强/台风场等空间灾害场作用的基本特性和分布、传播及致灾规律,建立空间灾害场作用的理论预测模型;通过试验模拟与数值模拟,深入研究材料、构件和结构在复杂的强地震动场或强/台风场的空间多维动力作用下的非线性动力行为和强耦合作用,发展灾变过程模拟的系统化、精细化的建模理论及数值实现方法;建立重大工程动力灾变数值模拟集成系统,进一步揭示重大工程在空间灾害场作用下的损伤演化机理与破坏倒塌机制。实现对空间灾害场作用从经验描述到科学预测、对动力灾变过程从简化分析到精细化模拟的重点跨越,为保障我国超大尺度重大工程(千米级大桥、五百米级高层、三百米级高坝等)的安全建设和运营奠定理论基础、提供技术支撑,使我国在成为重大工程建设大国的同时,成为解决相关重大科学问题的强国。(下转第19页)

(2) 通过总结前述的主跨240m连续刚构桥的工程经验, 本桥对体外预应力加固体系从四个方面进行了完善:

1) 可测: 即索力可检测, 在体外预应力钢束的直线段处安装磁通量传感器, 以量测体外预应力束直线段关心位置处的单根钢束索力。

2) 可调: 即张拉力可调节, 在体外预应力体系的锚具上加上锚杯和螺母的设计, 可以在使用期对体外预应力做必要的调整。

3) 可增: 在锚固处和转向块上预留备用孔道和张拉空间, 在需要增加体外预应力时即可穿束张拉。

4) 可换: 采用可更换的锚固系统以确保必要时重新更换体外索。

## 6 结语

(上接第9页)

大型桥梁的防灾减灾离不开桥梁结构的健康监测和安全控制, 这方面的研究在国际上目前已经成为热点, 这主要与发达国家的基础设施建设阶段与相关学科的研究进展有关。健康监测和安全控制的特点是学科交叉性强、新技术成分高、应用投入大。目前的主要研究难点在于桥梁结构的复杂性使得结构损伤识别理论进展缓慢, 结构状态评估方法也鲜有突破, 大部分研究和应用更侧重于监测技术和系统的应用, 桥梁状态的评估仍采用传统的方法。我国大规模的桥梁工程建设虽然时间不长, 但由于建设规模大、发展速度快以及设计规范、施工质量等方面的问题, 暴露出许多结构安全性、耐久性和功能性方面的隐患。

## 6 结论与建议

为了保证桥梁工程安全性和耐久性设计理念的贯彻落实, 首要的工作是制定相应的设计、施工和养护的规范、规程、标准和指南。实际上, 规范和标准的制定也反映了一个国家的建设水平。在经历了1923年到1963年的容许应力法和1963年到2003年的极限状态法之后, 从2003年起, 发达国家已经着手致力于基于性能的设计规范(performance-based design code)的制定, 以提高基础设施, 特别是重大基础设施的设计和建造水平。制定和编制建立在耐久性要求、全寿命

(1) 设计方法不完善、施工质量缺陷、运营期间超载、缺乏日常养护维修等因素综合作用导致大跨径混凝土梁桥出现长期下挠和梁体开裂的病害。针对病害成因, 明确加固目标, 采用体外预应力预应力加固设计, 通过设置转向块来适应预应力块的转向, 受力明确、可靠, 对抑制跨中下挠、改善主梁受力状况、控制裂缝开展作用明显、效果显著。

(2) 一次的加固并不能保证“一劳永逸”。采用体外预应力技术加固后的桥梁, 仍然需要定期进行检测和评估, 并将预应力加固体系做到“可测”、“可调”、“可增”、“可换”, 使加固后桥梁处于“可控”状态, 以便有效的控制和延长桥梁的使用寿命。确保桥梁的耐久性和安全性。

设计和安全性控制之上的基于性能的桥梁工程设计规范和标准, 应当成为我国21世纪桥梁工程的重要任务之一。

桥梁工程界必须务实地统计桥梁破坏事故、分析造成事故原因、找出可能存在问题、研究解决问题方法, 形成一整套桥梁健康监测、养护管理和安全控制的理论、方法和系统; 并积极开展结构耐久性(如疲劳、锈蚀、开裂等)现场检测技术与评估方法研究和基于健康监测系统的桥梁结构状态评估理论方法及其桥梁养护管理系统研究; 顺应21世纪国际桥梁的新潮流——“安全、适用、经济、美观、耐久、环保”。

### 参考文献

- [1] 刘学. 预应力混凝土斜拉桥主梁裂缝分布研究[D]. 同济大学硕士学位论文(导师陈惟真), 2009年.
- [2] 陈惟真等. 济南黄河公路大桥健康监测和技术评价[R]. 同济大学桥梁工程系技术报告, 2008年.
- [3] GE Y.J. and XIANG H.F., "Towards Sustainable Development of Bridge Engineering: Chinese Lessons and Experiences", Keynote Paper in the Proceedings of the IABSE Symposium on Sustainable Infrastructure, Bangkok, Thailand, 2009.
- [4] 项海帆. 世界桥梁发展中的主要技术创新[J]. 广西交通科技, 28卷第5期, 2003年. pp.1-7
- [5] GE Y.J. and XIANG H.F., "Bridging Capacity Innovations on Cable-Supported Bridges" [C]. Keynote Paper in the Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Seoul, Korea, 2008, pp. 53-62
- [6] 项海帆等. 《中国桥梁史纲》[M]. 同济大学出版社, 2009年.
- [7] 葛耀君, 项海帆. 桥梁工程可持续发展的理念与使命[R]. 第十九届全国桥梁学术会议论文集大会报告, 2010年, 上海. pp.15-31