

大跨径混凝土梁桥的体外预应力加固技术

刘士林 许宏元 宋宁 陈常明

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司 西安 710075)

摘要:跨中长期下挠和梁体开裂是大跨径混凝土梁桥的常见病害,采用体外预应力加固技术,受力明确、安全,对抑制跨中下挠、控制裂缝,能起到明显的作用。通过对两座主跨超过200m的刚构桥加固实践的总结,提出了一些预应力体系改善和使用建议,供同行参考。

关键词:大跨径混凝土梁桥 跨中下挠 梁体开裂 体外预应力加固

1 概述

大跨径预应力混凝土连续梁和连续刚构是我国桥梁建设中常见的桥型,数量众多,应用广泛。随着此类桥梁的大量修建,出现问题的桥梁也越来越多,跨中长期下挠和梁体开裂现象已经相当普遍,甚至在一定程度上已经阻碍并制约了大跨径预应力混凝土桥梁的发展。体外预应力加固技术是通过增设体外预应力索对既有混凝土梁体主动施加外力,以改善原结构的受力状况的主动加固方法。由于体外预应力技术具有结构自重轻,预应力筋更换、维护方便,预应力损失和应力变化幅度小,施工工期短,混凝土质量高、耐久性强等优点,已被成功地应用于多座大跨径混凝土桥梁结构的加固维修。

2 大跨径混凝土梁桥常见病害及对策

跨中长期下挠和梁体开裂是大跨径混凝土梁桥的常见病害,准确的分析病害成因是对其制定合理加固方案的基础和前提。

2.1 跨中下挠

大跨径预应力混凝土箱梁桥面临的下挠问题,已具有广泛的普遍性,且下挠程度日趋严重,对大跨径预应力混凝土箱梁桥的结构安全已构成很大威胁,跨中下挠与设计者对混凝土徐变的认知、预应力钢束的合理布置、预拱度设置,施工时对施工质量的控制、对工期的控制、具体的施工方法,及运营阶段活载影响等方面综合因素有关。

2.2 梁体开裂

大跨径混凝土梁桥箱体裂缝按其发展方向可分为:斜向裂缝、纵向裂缝、横向裂缝三类。斜向裂缝多表现为腹板主拉应力裂缝;纵向裂缝是与桥轴方向平行的裂缝,较多地出现在顶底板;横向裂缝则多伴随跨中梁体下挠出现于跨中底板下缘,发展严重的会延伸至腹板,与底板横向裂缝连通成“U”型裂缝。

2.3 加固对策分析

目前梁式桥加固、提高承载力的方法和技术种类繁多,但基本原理却是相同的,都是遵循力学的基本原理,从桥梁结构的外界因素和内在状况改变的角度进行加固补强,提高承载力。从外因角度是通过结构性能改变,提高主梁的承载力,常用的方法有增大截面法、施加体外预应力法、粘贴钢板、粘贴纤维复合材料等;从内因角度则是通过调整内力提高主梁的承载能力,具体方法为改变原桥结构体系,减少主梁承受的荷载内力,但此法风险较大,不适用于特大跨径桥梁的加固。

针对大跨径混凝土梁桥的病害特点,应以适当改善桥梁的桥面线形,缓和并抑制跨中下挠现象;适当提高构件承载能力,抑制裂缝的扩展为加固目标。

粘贴法和增大截面法可以做为辅助的加固手段,用于构件的局部补强,但对处置跨中下挠没有明显效果。采用体外预应力加固技术,受力明确,加固效果好工作可靠,可以减少或限制结构的裂缝和其他变形;对桥梁营运使用的影响较

小,可在不限制通行的条件下完成加固施工;在人力、物力和资金消耗方面也具有明显的经济合理性。

3 体外预应力加固技术体系中的关键点

一套完整的体外预应力钢束体系包括:束体(包括钢束、管道和灌浆材料)、锚固装置、转向装置和减振装置。同时,完善的体外预应力钢束体系还应该建立可靠的防腐系统和可行的使用期检测系统。对大跨径混凝土梁桥加固时,除了选择成熟可靠的体外预应力体系之外,以下一些关键点应引起重视:

(1) 转向块应当设置在刚度大、变形小的区域,并尽量靠近跨中,以增加抵抗下挠的效率(见图1)。钢束下弯角度应尽量大,以提供较大的上拔力,有效抵抗下挠。

(2) 转向块尽可能靠近腹板设置,以便通过在腹板种植钢筋克服体外预应力钢束张拉后产生的剪力(见图2)。转向块与腹板结合区域的面积应根据抗剪需要来确定。

(3) 在墩顶0号块隔板之间设置加劲肋(见图3、图4),以防隔板因体外预应力张拉而开裂。

(4) 体外束在转向块之间或转向块与锚固

端之间未受到约束时,可以产生独立于梁的变形和振动。活载作用下会引起结构与索体产生振动,如果索体的自振频率与整个结构的振动频率相近时,可能出现共振,给整个结构的安全带来隐患。因此体外束的自由长度超过10m时须设置减振装置。

4 某主跨240m连续刚构加固工程实例

4.1 桥梁概况

某连续刚构桥建成于1997年,跨径组成为140+240+140,桥梁净宽21.5m;设计荷载:汽-超20级,挂-120、人群-3.5kN/m²;箱梁为三向预应力结构,采用单箱单室截面,顶板宽22m,底板宽11.5m。箱梁跨中及边跨支架现浇段梁高4.0m,箱梁根部及0号梁段梁高13.5m。主墩采用双薄壁墩身,群桩基础(见图5)。

主桥箱梁顶板束采用 $\phi^j 15.24-25$ 钢绞线,设计张拉吨位4888kN,底板束和临时束采用 $\phi^j 15.24-19$ 钢绞线,设计张拉吨位3715kN。纵向预应力钢束均采用两端张拉方式。顶板横向预应力钢束均采用 $\phi^j 15.24-4$ 钢绞线,逐根单端张拉,张拉端与锚固端以间距50cm交错布置。竖向预应力钢筋采用直径32mm的高强精轧螺纹钢及相应YGM型锚具和YGL型连接器。

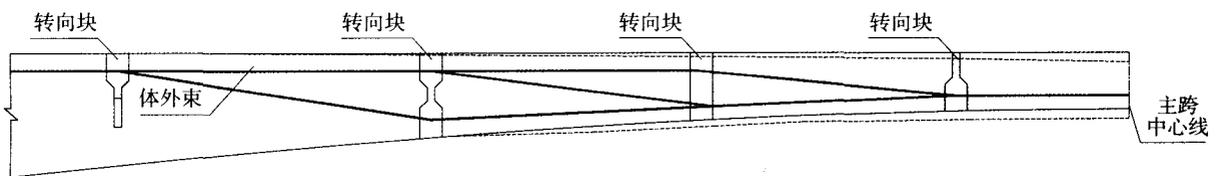


图1 转向块布置位置示意(图中虚线示意变形)

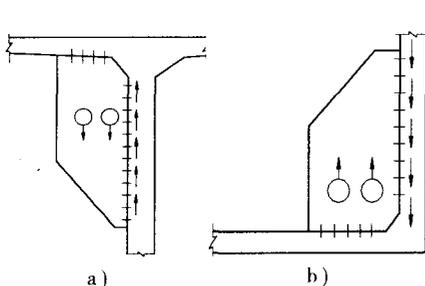


图2 转向块示意

a) 顶板转向块状 b) 底板转向块

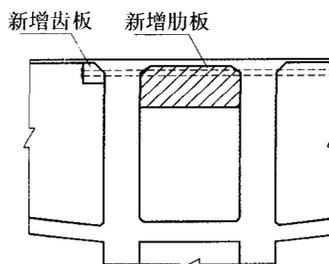


图3 0号块立面

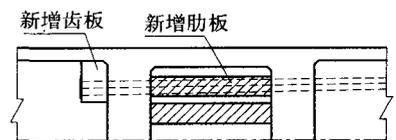


图4 0号块平面

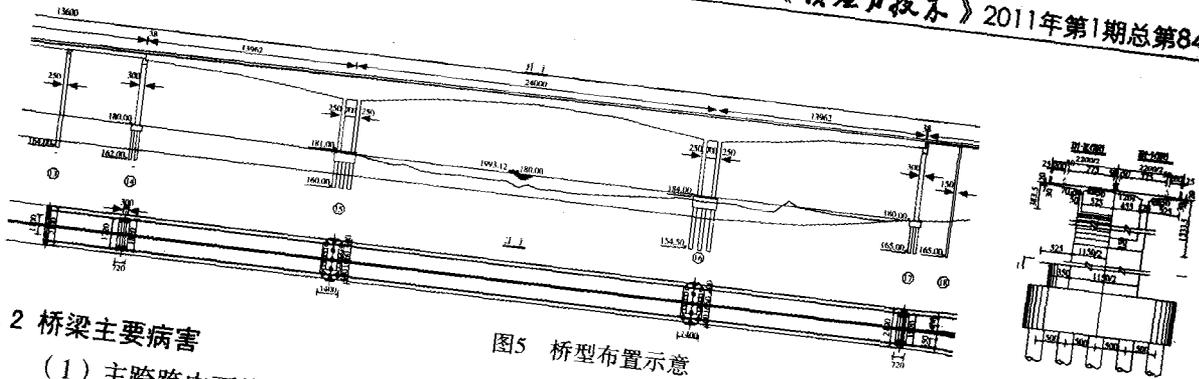


图5 桥型布置示意

4.2 桥梁主要病害

(1) 主跨跨中下挠量达到33cm, 并仍然在持续发展。

(2) 主跨跨中段箱梁底板底面裂缝横向贯通底板, 箱梁顶板底面纵向裂缝较多, 上、下游腹板与底板交界处均发现3mm宽纵向裂缝, 80~160m范围内上、下游腹板斜裂缝共32条, 裂缝宽度均超过规范允许值。

(3) 箱梁根部及跨中段漏水较严重, 跨中部分区域长期积水。

(4) 两边跨端部箱梁顶板裂缝较多, 端横隔板裂缝较多。

(5) 在整个主桥范围内, 发现箱内顶板在距腹板30~100cm范围内存在较多纵向裂缝, 其在纵桥向的分布没有规则。

(6) 箱梁内部分区域发现保护层偏薄、露筋现象, 部分外露的钢筋已发生锈蚀。

4.4 桥梁加固内容及要点

为确保该桥的耐久性及安全运营, 结合此桥现阶段结构计算情况以及裂缝分布的基本状况, 提出以下加固设计目标及措施。

4.1 加固设计荷载标准

设计荷载: 汽-超20级, 挂-120、人群- kN/m^2 ;

4.2 主要加固设计目标

(1) 适当改善主桥的桥面线形, 缓和跨中下挠现象;

(2) 提高箱梁顶板横向抗弯能力, 抑制裂缝的扩展;

(3) 加强腹板截面抗剪能力, 抑制裂缝的扩展;

4.4.3 增设体外纵向预应力钢束

预应力束设置在主桥中跨, 两端分别锚固于两零号块横隔板边跨侧。整个中跨共设置12根 $\phi 15.2mm$ 的体外预应力钢束, 每个腹板对应6束(见图6), 锚下控制应力为1116MPa。

4.5 加固效果的理论分析与比较

因本桥设计于1995年, 当时所采用桥规为《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021-89)及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023-85), 本桥加固前后验算均依据旧规范执行。主桥加固前、后结果见表1。

上表可知, 加固后结构受力得到了明显改善, 体现在下述几个方面:

(1) 支点截面及跨中截面的极限承载能力安全储备提高;

(2) 跨中截面下缘的应力储备提高了约3.7MPa;

(3) 加固后, 理论上主梁跨中将向上产生约2.6cm的位移。

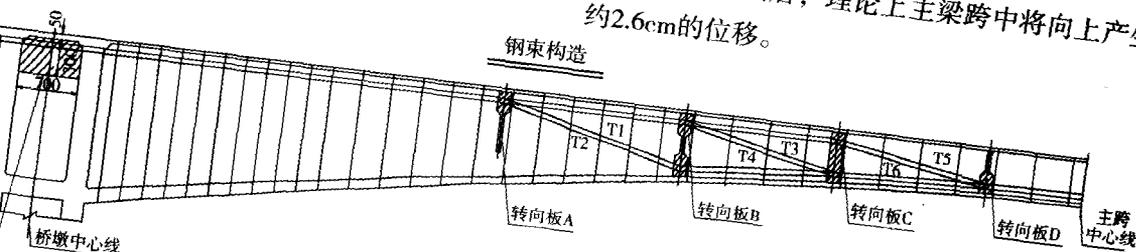


图6 体外预应力布置图立面

表1 主桥加固前、后验算结果一览表

项目	加固前	加固后
中跨跨中下缘最小正应力 (MPa)	-0.35	3.41
中跨跨中上缘最小正应力 (MPa)	5.34	6.21
最大主压应力 (MPa)	16.2	15.9
跨中最大弯矩 (kN.m)	178911.7	143808.7
支点最小弯矩 (kN.m)	-5203242.4	-4979867.8
跨中挠度 (位移) (cm)	33 ↓	2.6 ↑

注: 1、表中所列最大主拉应力为竖向预应力按50%考虑时的计算结果;

2、表中所列结构抗力值已按《公路旧桥承载能力鉴定方法》进行折减, 折减系数为 $Z1=0.95$ 。

4.6 加固效果评价

4.6.1 加固施工监控主要结论

(1) 体外预应力张拉过程中, 主梁变形、控制截面混凝土应力正常, 变化规律和数值与理论分析结果一致。

(2) 主梁上挠20mm, 符合设计预期值。

(3) 跨中底板压应力增加2.25MPa, 压应力储备提高。

(4) 跨中底板横向裂缝有不同程度的闭合

4.6.2 荷载试验结论

主跨跨中截面加固后强度满足正常使用要求; 主桥实测自振频率均大于相应的理论计算值, 结构刚度和结构总体动力特性有一定改善。

4.6.3 加固施工结束一年后后定期检测结论

(1) 桥梁加固竣工一年来桥梁跨中挠度由2007年12月时的33cm恢复到了27.5cm, 大桥加固后跨中下挠趋势得到了有效抑制, 桥面线型明显改善;

(2) 箱内大部分裂缝封闭后未见开展;

5 某主跨210m连续刚构加固工程实例

5.1 桥梁概况

该桥建成于2006年, 主桥为(122+210+122)m预应力混凝土连续刚构, 主桥全长为454m, 桥面设2.7%的单向纵坡, 桥上无竖曲线。桥面横坡为双向2%。桥梁全宽22.5m, 设计荷载: 汽-超20级, 挂-120; 主桥箱梁为三向预应力结构, 采用单箱单室截面, 顶板宽22.5m, 底板宽11m, 箱梁顶面翼缘板设置2.0%的双向横坡。箱梁跨中及边跨支架现浇段梁高(箱梁梁高均已腹板外侧为

准)3.5m, 箱梁根部及0号梁段梁高(桥梁中心线处)12.5m。主墩采用双薄壁墩身, 群桩基础。

主桥箱梁顶板及腹板束采用 $22\phi^{j}15.24$ (原设计为 $25\phi^{j}15.24$)钢绞线, 底板束和临时束采用 $25\phi^{j}15.24$ 和 $22\phi^{j}15.24$ 钢绞线。纵向预应力钢束均采用两端张拉方式。顶板横向预应力钢束均采用 $4\phi^{j}15.24$ 钢绞线, 逐根单端张拉, 张拉端与锚固端以间距70~75cm交错布置。竖向预应力钢筋采用直径32mm的高强精轧螺纹钢, 施工时为了增加腹板抵抗主拉应力的安全储备, 已将竖向预应力筋的张拉力由42.2t调整为54.2t。

5.2 桥梁检测及荷载试验情况

(1) 2008年检测时, 桥梁通车运营不足三年, 经测量主跨跨中残留预拱度最大值不到2.7cm, 剔除测量时均匀升温引起的挠度变化, 则原中跨设置预拱度值基本用尽。

(2) 该桥桥面铺装为水泥混凝土铺装, 桥面铺装平整度较差。桥面铺装成“网”状开裂。2006年6月在超车道及行车道部位加铺1cm金刚砂防滑层, 防滑层脱落、破损严重。

(3) 箱梁边跨28号块~边跨合拢段及中跨28号块~中跨合拢段的箱梁底板底面存在纵向裂缝, 裂缝沿箱梁中心线左右对称分布, 平均间距15~25cm。

(4) 箱梁顶板存在纵向裂缝, 裂缝集中在箱梁中心线附近, 沿箱梁中心线对称向两侧间距15~30cm分布。箱梁中心线附近裂缝较宽, 向两侧逐渐变细。

(5) 箱梁边跨28号块~边跨合拢段及中跨20号块~中跨合拢段的腹板存在斜向裂缝, 斜裂缝呈跨中(高)至支点(低)走向, 与箱梁底板夹角 35° ~ 45° 。裂缝间距25~45cm。

(6) 横隔板上横梁裂缝多为竖向裂缝, 裂缝沿隔板中心线左右对称分布, 靠近隔板中心线处部分裂缝向上延伸到箱梁顶板。

5.3 加固处置设计

5.3.1 主桥增设体外预应力

新增8束 $19\phi^{s}15.2mm$ 的体外预应力钢束, 每个腹板对应4束。并预留4束 $19\phi^{s}15.2mm$ 的体外预应力孔道, 每个腹板对应2束(见图7)。

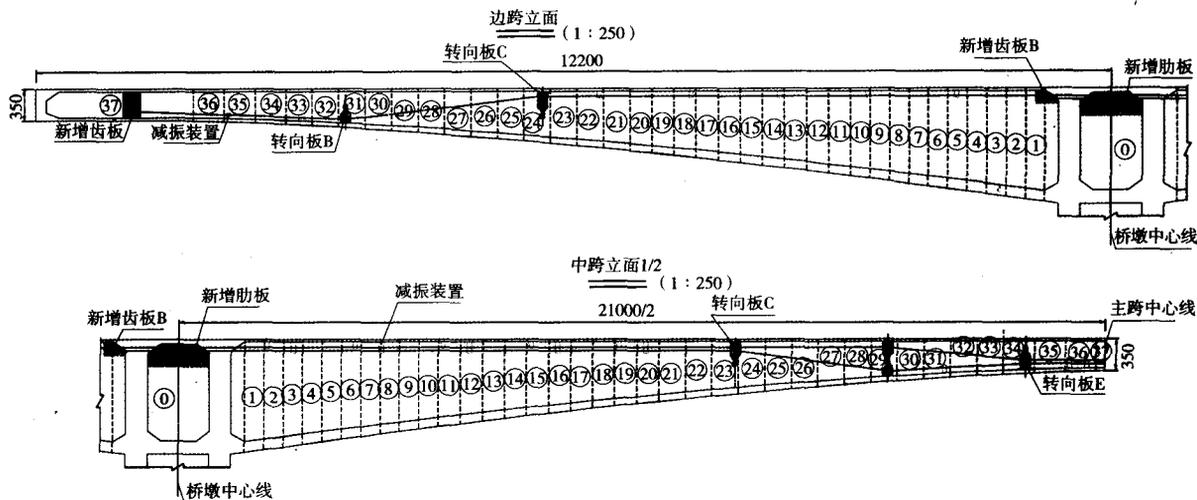


图7 体外预应力钢束布置图立面

5.3.2 裂缝处理

由于裂缝的产生、发展及长期存在,使得潮湿空气进入结构内部,从而引起结构内部钢筋的锈蚀,最终导致结构的承载能力降低,影响到结构的正常运营甚至安全运营,因此,对结构目前存在的裂缝进行相应的处理及控制非常必要。但鉴于裂缝宽度的不同对结构的影响也有所不同,此处共分两种情况对桥梁的裂缝进行灌浆(或封闭)处理:裂缝宽度 $\geq 0.2\text{mm}$ 的采用压浆法进行修补;裂缝宽度 $< 0.2\text{mm}$ 的裂缝采用封闭法进行修补。

5.3.3 桥面铺装处理

凿除原桥的桥面铺装,在箱梁顶板上植筋,并架设钢筋网,然后重新浇筑桥面铺装。通过植筋,增强新浇筑混凝土与原箱梁混凝土的连接,保证新浇筑桥面铺装与原箱梁共同工作,通过植筋,使桥面铺装参与受力,增加箱梁的高度,使主梁刚度增加。

5.3.4 箱梁腹板开裂处理

根据计算分析,修补腹板表面裂缝,并对边跨21号~28号梁段箱梁腹板增加厚度,对边跨29号~37号、中跨19号~36号梁段箱梁腹板粘贴钢板的措施进行加固处理。

5.3.5 箱梁底板、顶板开裂处理

对边、中跨底板上的纵向裂缝采用压浆修补后,粘贴碳纤维布进行补强,抑制边、中跨底板纵向裂缝的发展。

顶板纵向裂缝:采用灌浆封闭措施处理后,粘贴碳纤维进行补强,粘贴范围为中跨30号~合拢段梁段顶板底面及边跨25号~边跨现浇段顶板下缘。

5.4 加固效果的理论分析与比较

主桥加固前后的应力、受力及变形情况进行比较见下表。

表2 主桥加固前、后验算结果一览表

项目	加固前	加固后
边跨现浇段下缘最大正应力 (MPa)	8.37	10.29
边跨合拢段上缘最小正应力 (MPa)	2.78	2.70
边跨合拢段下缘最小正应力 (MPa)	4.25	6.04
中跨跨中下缘最小正应力 (MPa)	1.16	4.02
中跨跨中上缘最小正应力 (MPa)	6.2	6.33
1/4附近最大主拉应力(74单元) (MPa)	-2.84	-2.41
最大主压应力 (MPa)	19.09	20.01
跨中挠度(位移) (cm)	2.37↑	4.10↑

注:表中所列最大主拉应力为竖向预应力按30%考虑时的计算结果;

加固主要效果:

- (1) 边跨合拢段下缘及跨中截面下缘的应力储备分别提高了约1.79MPa和2.86MPa;
- (2) 主梁的最大主拉应力降低约0.43MPa;
- (3) 加固后,理论上主梁跨中将向上产生约1.73cm的位移。

5.5 本桥加固特点

- (1) 因施工时不能完全中断交通,更换桥面铺装时采用抗干扰混凝土。

(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 4th 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