

# 电绝缘预应力体系的研究与应用

朱万旭<sup>1,2</sup> 刘平伟<sup>3</sup> 周红梅<sup>1</sup> 庞忠华<sup>1</sup>

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005 2 哈尔滨工业大学土木学院 哈尔滨 150090

3 广西工学院鹿山学院土木工程系 柳州 545006)

**摘要:** 预应力筋是预应力混凝土结构的关键受力部件,直接关系到预应力混凝土结构的安全性、适用性和耐久性。本文主要介绍在后张预应力混凝土结构中通过简单的无损检测方法——测量预应力筋与混凝土钢筋之间的阻抗值来监测预应力筋受到腐蚀的程度。该方法在30米T梁跨海大桥工程中试用,为国内推广应用做出有益的尝试。

**关键词:** 塑料波纹管 电绝缘型锚具 PL3体系 无损检测系统 长期监测

## 1 引言

后张预应力混凝土结构以其安全性、可靠性、耐久性而在公路、铁路方面广泛应用,在传统的后张法结构施工中,采用的是普通金属波纹管和普通锚具,这样的预应力结构长期在侵蚀环境(如碳化、冻融、氯离子侵蚀、化学介质侵蚀等)的作用下,预应力筋内部也会出现损伤甚至逐渐积累,最终达到破坏,并且此过程是不可逆的。

据文献调查报告<sup>[1]</sup>:在1950~1977年期间,世界范围内共发生28起预应力筋锈蚀破坏的工程实例。在1978~1982年间,美国有50幢建筑出现预应力筋锈蚀事故。在美国的50起事故中,由于应力腐蚀或氢脆腐蚀引起的脆性破坏就有10起。在1988年,仅美国和加拿大预应力筋腐蚀事故就有上百起。

预应力筋腐蚀涉及范围广,引起腐蚀损坏的原因各式各样。有来自内在因素,如张拉或锚固不当、预应力筋或锚具的腐蚀防护不当、采用了耐腐蚀敏感的预应力筋等;也有来自外在的因素,如受环境或腐蚀性材料侵蚀的影响等。预应力筋在预应力混凝土结构中占据着重要的作用,它是整个结构受力的关键部位,如果它锈蚀断裂或损坏,将会给结构带来毁灭性的破坏。

## 2 后张预应力筋的腐蚀防护

预应力筋的腐蚀防护一直以来是人们研究的一个热点,在我们以前的施工桥梁和结构中,往往采用常规的传统金属波纹管和普通锚具施工的预应力筋,这样的预应力筋容易受到周围环境氯化物、材料的氢脆、金属电解质、杂散电流、微动疲劳、电接触等腐蚀而发生脆性破坏。

在2000年国际结构混凝土协会(FIB)的技术报告<sup>[2]</sup>中(FIB bulletin 7)提出塑料波纹管在后张预应力筋中的应用,提出塑料波纹管一系列的测试方法和标准,并通过全比例实验来测试实际操作的可行性、水密性、摩擦系数、穿钢绞线的压浆试验、电阻测试,结果表明它提高了预应力筋腐蚀防护能力,减小了摩擦系数,降低预应力筋磨损的风险,隔绝预应力筋发生氢脆的可能性,大大提高了预应力筋腐蚀防护的可能性。

采用塑料波纹管在一定程度上可以提高预应力筋腐蚀防护的能力,有效减少预应力筋失效的发生,是我们近几年采用比较多的一种防护措施。但是,这种防护手段也存在一定的局限性,后张预应力筋的耐久性的问题主要集中在两个方面:一是氯化物等有害杂质的侵蚀;二是缺少一个无损检测预应力筋腐蚀程度的可靠信息。采用塑料波纹管可以减少预应力筋发生腐蚀的风险,但是不能监测预应力筋内部的工况。

2005年国际结构混凝土协会(FIB)对后张预应力的耐腐蚀性能做出了规定(FIB technical bulletin 33),根据预应力体系的耐腐蚀能力的大小划分了三种体系。PL1—传统的金属孔道;PL2—塑料波纹管孔道;PL3—塑料波纹管+电绝缘锚具(EIT)。指出对于在PL1体系中预应力筋易受到的6大因素的腐蚀:来自周围环境的氯化物(氯离子);杂散电流(直流电);金属溶解电解质;材料的氢脆;微动疲劳;电接触。在PL1体系中这些腐蚀因素难以用无损技术进行检测,最终锈蚀引发结构的瞬间破坏,严重的影响结构的安全性和可使用年限。采

用PL3体系能很好的防止和监测预应力筋的腐蚀问题,并且有以下几大优势:整个系统密封性能好,避免氯化物侵蚀预应力筋;隔绝杂散电流接触预应力筋;允许检测,可采用无损检测技术对结构进行控制和监测;增强结构的安全性和耐久性。

在国外,通过试验室试验以及工程应用,在意大利以及瑞士的应用证明在后张预应力中使用PL3体系是成功的,该体系用简单以及可靠的测量手段对结构的腐蚀防护提供了可靠的信息。而在瑞士从1993年起至今约有120座结构(主要是桥梁)安装了电绝缘型锚固体系,国家铁路局(Swiss Federal Railway authorities)和交通部Swiss department of Transport(针对直流电轨道方面)要求必须使用PL3体系。

### 3 可监测体系

可监测体系即为电绝缘预应力锚固体系(PL3体系),它是由电绝缘型锚具、塑料波纹管和无损检测系统组成。电绝缘预应力锚固体系将预应力筋和锚具与外围混凝土隔离开来,最大程度上保证了预应力筋不被腐蚀,并且可以在任意时刻用快速的无损检测方法检测预应力筋的腐蚀情况,保证了桥梁结构在服役年限内的完整性,这是与普通预应力锚固体系的最大区别。

#### 3.1 电绝缘型锚具

电绝缘型锚具由普通锚板、夹片、螺旋筋和ZH型电绝缘锚垫板组成,而ZH型电绝缘锚垫板由芯板、近乎电绝缘的高性能混凝土和塑料喇叭管组成。芯板为中空铸铁或铸钢件,其与工作锚板接触,并将预应力传递给外周的高性能混凝土;高性能混凝土强度在150MPa以上,有效地包络住芯板,并将预应力安全地传递、分散给预应力混凝土构件;喇叭管为电绝缘性和耐久性好的塑料件,起着连接塑料波纹管,隔绝钢绞线和外部钢筋联系的作用。图1为OVM公司开发的ZH型锚垫板产品。

#### 3.2 塑料波纹管

塑料波纹管的作用是封闭和隔绝了预应力钢绞线和普通钢筋的联系,在锚具附近波纹管的连接非常重要,这将是保证钢绞线被密封和绝缘性的重要因素,因此在塑料波纹管、通气孔和排浆孔的连

接需要非常的小心。塑料波纹管的另一大优势是摩擦系数减小了,传统的金属管道摩擦系数为0.3,而塑料波纹管为0.14,磨损现象显著地减少了。

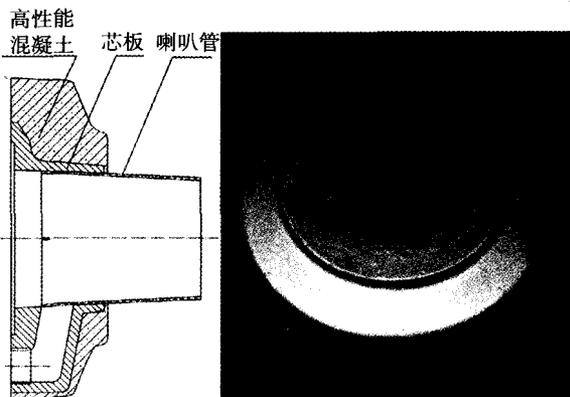


图1 ZH型电绝缘锚垫板

#### 3.3 可随时监测的无损检测系统

此无损检测系统最大的优点是无传感器,钢绞线和混凝土中的钢筋即是传感器;在结构整个寿命期间任何时候都可迅速测量其电阻,实现其质量控制。电阻值在灌浆完成后是不不断的增大,一旦减少时就等于预警腐蚀产生。检测所用的仪表是便携式LCR电桥表。

本试验采用PL3体系来监测预应力筋的腐蚀问题。根据FIB(国际结构混凝土协会)建议检测系统工作原理图(见图2):

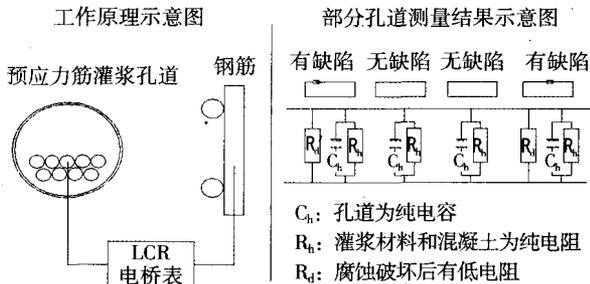


图2 检测系统工作原理图

按照FIB建议,预应力筋张拉灌浆完成后,随着时间的推移,动态电阻值越来越大,呈上升趋势,一旦有下降的趋势则是预示着预应力筋有腐蚀,开始了早期预报提示。

### 4 30米T梁可监测体系试验

#### 4.1 工程背景

本文试验梁所在项目是广西玉林至铁山港高速公路,它位于广西壮族自治区东南部,北起玉林市北流市西琅白坟垌的南面,与岑溪至兴业高速公路相接,终点位于北海市铁山港区,与北海至铁山

港一级公路相接。本项目全长约174.076km,设计时速为120km/h,双向四车道高速公路。由于K162+255白沙头港大桥是跨海大桥,桥区为侵蚀河谷地貌,地势平坦开阔,地表水,地下水发育,微地貌为河道和虾塘,容易遭受海水氯离子的腐蚀,梁板中的钢绞线比其他普通梁板更容易被海水中氯离子腐蚀,所以选用跨海大桥的30mT梁能更好地验证电绝缘锚固体系的可靠性和安全性。试验梁位于白沙头港大桥预制T梁厂内,白沙头港大桥梁板设计为30m预制T梁,采用后张预应力法施工,整个体系采用先简支后连续。

#### 4.2 试验梁的制作

试验梁的制作工艺:梁肋钢筋绑扎→模板安装→翼缘板钢筋绑扎→浇筑混凝土→拆模养生→张拉(强度达到设计要求)→压浆。

钢筋的制作要按照图纸设计要求,保证主筋搭接长度满足要求,焊缝要均匀饱满,骨架筋和水平筋要安装位置准确,间距均匀,波纹管定位钢筋位置要准确,这些都是保证梁板以后安全性、耐久性的重要因素,必须加以控制,钢筋经监理工程师检验合格后方可进行下道工序。

模板要采用定型钢模板,模板拼装平整度要满足规范要求,相邻模板拼装接缝不大于2mm,模板底角支撑要满足牢固、稳定性的要求,施工时安排专人检查,如发现底角支撑有松动,应立即进行加固。

翼缘板钢筋绑扎好后,经检验合格后,然后进行导线的预埋,所选用的导线为 $1\text{mm}^2$ 的铜线。导线的预埋的方法是先在梁体一端翼缘板钢筋处选择两根钢筋,用砂纸打磨除掉钢筋上的浮锈,剥掉导线上的绝缘皮,把裸露的铜丝缠绕在打磨好的钢筋上,然后用锡焊焊接导线,焊接完毕后把AB胶水均匀地涂在导线焊接处,保证粘接牢固,最后用绝缘防水胶带包裹导线连接处。这样处理的目的是可以防止导线接触不良、潮湿、脱落等问题的出现,有效地避免非绝缘性因素造成的影响。然后用同样的方法预埋另一端。图3为T梁翼缘板导线预埋的试验梁。

电绝缘型锚垫板要安装在梁的端部,安装时要把锚垫板用螺栓固定在端头钢模板上,将塑料连接管按缺口对着灌浆口推进到锚垫板内孔,直到配合紧密。图4为预埋电绝缘锚垫板的试验梁。



图3 T梁翼缘板导线预埋的试验梁

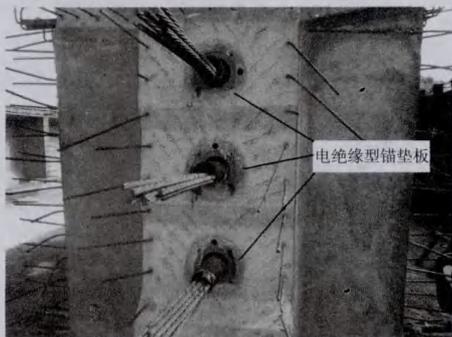


图4 预埋电绝缘锚垫板的试验梁

混凝土的浇筑采用搅拌站集中拌合,砼运输车运输混凝土,混凝土塌落度控制在10~12cm,浇筑过程中应该注意混凝土的和易性,发现混凝土中有骨料离散的现象,混凝土应废弃不得再次使用,这是保证混凝土质量的关键。浇筑应从梁体一端到另一端,浇筑完成24h小时后拆模,拆模后要覆盖水养,养生要达到规范规定时间。

张拉时采用油表读数和伸长量双重控制,张拉完成后切掉端头多余钢绞线,然后在钢绞线上预埋导线,方法和翼缘板钢筋预埋导线类似。

压浆采用真空压浆,施工过程控制浆体稠度为30~50s,压浆完成后,等到浆体强度达到设计要求时才能移运和吊装。

#### 4.3 试验结果及分析

本次试验选用四片T梁做试验梁,每片试验梁两孔道一个采用PL3体系,一个采用PL2体系。每片梁的波纹管内径采用的是 $\phi 85\text{mm}$ 的内径,每个孔道的钢绞线是10根,钢绞线采用的是公称直径为15.2mm的钢绞线,标准强度为1860MPa,导线接在锚具端头钢绞线任意两根上,每片试验梁翼缘板和电绝缘锚具处都接导线(如图5所

示)。每片试验梁长度29.6m,重量达70t左右。检测所用仪器为1KHz频率的便携式LCR电桥表,检测时导线翼缘板钢筋导线和锚具处钢绞线导线分别连接LCR电桥表两端(如图6所示),检测结果如图7~10。

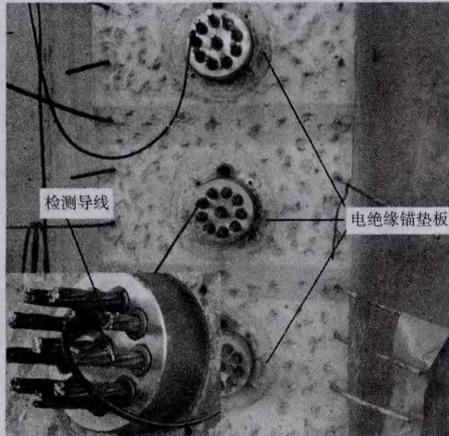


图5 预应力筋导线连接



图6 30米T梁耐久性监测系统连接测试图

由图7至图10中可以看出,试验梁8个孔道的电绝缘锚固体系(PL3体系)的孔道电阻值呈振荡上升趋势;1个孔道的电绝缘锚固体系(PL3体系)的孔道电阻值基本维持在 $7.5\Omega$ 左右。而普通锚固体系(PL2体系)的电阻值基本都在 $20\Omega$ 以下浮动。

根据瑞士在2007年<sup>[3]</sup>,针对不同条件下使用电绝缘型锚具的实际电阻值做出的规定,当电阻 $R > 20\Omega$ 时,预应力筋与混凝土中钢筋不接触,不存在微动疲劳。试验梁中测出PL3体系有8个孔道的电阻 $R$ 都是大于 $20\Omega$ 的,且随着灌浆后时间的推移,电阻值呈上升趋势,说明预应力筋与混凝土中钢筋不接触,不存在微动疲劳;有一个孔道的电阻值 $R$ 是小于 $20\Omega$ 的,基本维持在 $7.5\Omega$ 左右,说明预应力筋和混凝土中的钢筋是金属接触

的,有可能塑料波纹管有缺陷、管道连接处密封性能差或者喇叭管连接处灌浆不密实,有较大孔隙致使预应力筋和钢筋接触。在测试的PL3体系的9个孔道中,有8个孔道的电阻值满足基本的隔离要求,有一个孔道不满足基本的隔离要求。

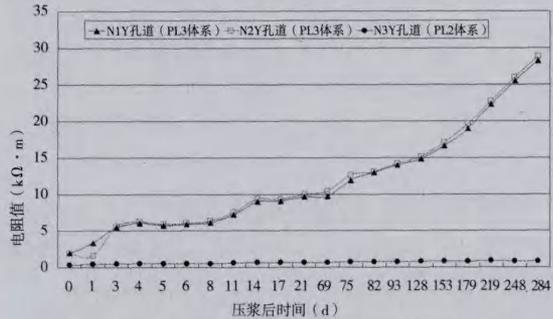


图7 左幅22-6#T梁N1、N2、N3孔道电阻测试值

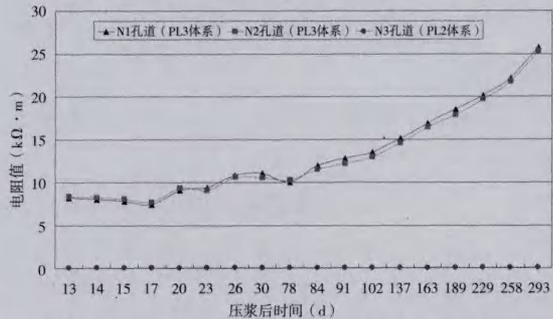


图8 右幅22-1#T梁N1、N2、N3孔道电阻测试值

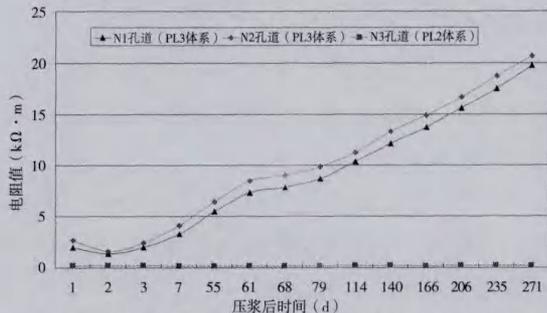


图9 左幅21-1#T梁N1、N2、N3孔道电阻测试值

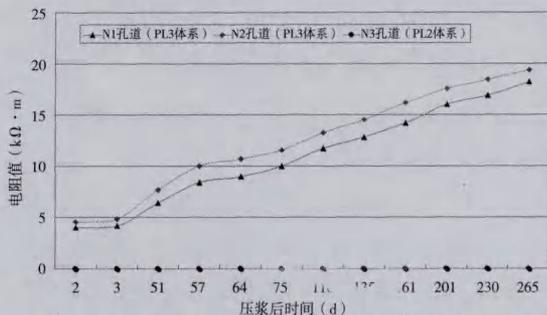


图10 左幅20-1#T梁N1、N2、N3孔道电阻测试值

(下转第40页)

表11  $f_4$ -积累历程

积累历程 $L$ (km)	$\lambda_{\max, f_4}$		
	无润滑聚四氟乙烯	润滑的聚四氟乙烯	双金属表面
$L \leq 1.0$	1.0	1.0	由实验确定
$1.0 < L \leq 2.0$	1.2	1.0	

## 5 加强桥梁减隔震支座的性能检测及其生产准入制度的必要性

如上述说桥梁减隔震支座的等效水平刚度和等效阻尼比是桥梁减隔震设计的基本参数,因此,减隔震支座性能参数的可靠性和稳定性是保证桥梁减隔震设计计算的可靠性和可信性的关键。为此,在国外采用减隔震支座时,严格要求对所使用的支座产品,按产品数量的10~20%进行基本隔震性能的出厂验收检验,以确保一旦发生地震时,支座能按桥梁减隔震设计计算时采用的性能参数工作,发挥正常的减隔震效果。这对于确保地震条件下桥梁的安全至关重要。

目前,我国桥梁支座的生产厂家众多,大多未配备相应的减隔震支座的检测设备,单纯依靠有限的几家检测单位对送样支座进行性能检测,是完全无法保证按交通行业标准的要求,对20%的支座产品进行出厂检验的要求,完全无法保证在实桥上使用支座的性能可靠性。

为了严格贯彻交通行业标准要求,凡是桥梁减隔震支座的生产厂家,必须尽快配备相应的伺

服双轴试验设备,以满足支座产品出厂检验的要求,提供合格的减隔震支座的产品。

目前我国公路桥梁支座实行生产许可证制度,对控制常用的桥梁支座产品质量起了一定的作用。但由于生产许可证准入门槛过低,造成入围的厂家过多(100多家),缺少必要的产品质量监督手段,造成公路桥梁支座产品质量问题严重。因此,建议对桥梁减隔震支座实行严格的准入制度时,准入的生产厂家的规模、技术力量、质量控制能力和检测手段,必须具备较高的水平,同时应将减隔震支座的伺服双轴试验设备作为必备的检测手段之一。只有这样才能保证在公路桥梁上使用到合格的减隔震支座。如果减隔震支座像目前公路桥梁上使用的板式橡胶支座一样,生产厂家众多,产品原材料混杂(常常掺有再生橡胶),出厂产品无严格的质量检验,工程抽检只对送样支座负责,很可能由于采用了不合格的减隔震支座,对桥梁带来更大的安全隐患。因此,建议建立严格的桥梁减隔震支座生产准入制度,并严格控制准入门槛。

(上接第29页)

随着灌浆后时间的推移,浆体和混凝土由于水化作用而逐渐变干,电阻值 $R$ 会随着时间的增长而变大。但电阻值 $R$ 的增长幅度及大小与电绝缘锚固体系(PL3体系)的绝缘程度有关,即PL3体系的绝缘密封程度越高,测得电阻值 $R$ 就会越大,同时随着时间推移,增长的幅度也会加大,这种趋势会在结构寿命期内一直继续。

而普通锚固体系(PL2体系)的电阻值基本都在 $20\Omega$ 以下浮动,预应力筋和混凝土中的钢筋是存在接触的,用监测孔道电阻值的方法是无法判断和掌握PL2体系预应力筋的腐蚀信息的。可见,通过监测PL3体系的孔道电阻值是一个简单、可靠且有效反映预应力筋腐蚀信息的方法。

## 5 结论与建议

电绝缘锚固体系在30米T梁中的试验研究,经检测,阻值是呈上升趋势的,对于国内后张预应力筋的腐蚀防护和可监测提供了一种新的方法

和经验,可根据电阻测量值建立起简单的早期预警系统,识别预应力筋的腐蚀风险。

建议在预应力混凝土工程中容易受腐蚀的有代表性部位,采用PL3体系。

### 参考文献

- [1] 李青松, 蒋得稳. 预应力混凝土结构耐久性初探[J]. 混凝土, 2008(8): 37-40
- [2] "Corrugated plastic ducts for internal bonded post-tensioning", Fib Technical Report Bulletin Nr.7, International Federation for Structural Concrete (2000)
- [3] B.Elsener, "Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons", Tailor Made Concrete Structures-Walraven & Stoelhorst (eds)©2008 Taylor & Francis Group, London, 231-236.
- [4] Vehovar,L; Kuhar V.; Vehovar A. "Hydrogen-Assisted Stress Corrosion of Prestressing Wires in a Motorway Viaduct" [J]. Engineering Failure Analysis, Vol.5, No1, 1998, pp.21-27
- [5] M. Della Vedova, L. Evangelista, "Protection against corrosion and monitoring of post-tensioning tendons in prestressed concrete railway bridges in Italy", Proceedings of the first workshop of COST 534 on NDT Assessment and New Systems in Prestressed Concrete Structures 13. October 2004, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zurich, Switzerland
- [6] 刘平伟, 朱万旭, 周红梅等. 一种后张预应力筋腐蚀防护和监测的新方法. 第十五届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会[C]. 2010年12月, 104-107