

# 中国大跨径混凝土梁桥典型病害剖析 及防治技术简介

赵君黎 冯 茂 李会驰 刘晓娣 翟慧娜 李 雪

(中交公路规划设计院有限公司 北京 100088)

**摘 要:**预应力混凝土梁桥以其结构刚度好、行车平顺、养护简单等一系列优点而备受工程界欢迎。然而近年来,大跨径预应力混凝土梁桥在施工过程或使用阶段,普遍出现各种不同性质的病害,最常见的病害为箱梁开裂和结构长期下挠;这些病害对桥梁的耐久性和营运的安全性构成了威胁,甚至在一定程度上阻碍、制约了大跨径预应力混凝土梁桥的发展。

针对既有大跨径预应力混凝土梁桥的病害,病害成因分析、对桥梁损伤的诊断、损伤桥梁的修复加固方法是该类桥梁应用中亟待解决的问题。本文首先阐述我国现有大跨径梁桥的病害状况;大跨径预应力混凝土梁桥产生这些病害的原因,涉及设计计算、施工工艺、养护管理、材料性质等多个方面,针对各典型病害分析其原因,并给出相应的预防措施,以期对实际工程有所裨益。

**关键词:**大跨径预应力混凝土梁桥 开裂 长期下挠 防治技术

## 前言

预应力混凝土梁桥(包括连续梁桥、连续刚构和刚构-连续组合体系)以其结构刚度好、行车平顺、养护简单等一系列优点而备受工程界欢迎。目前我国已建和在建的跨径超过200m的连续刚构桥已达20多座,跨径在100~200m之间的预应力混凝土梁桥已有100多座;世界范围内共有跨径超过240m的特大跨径连续刚构桥共18座,其中13座在中国,占世界总量的72%。然而近年来,大跨径预应力混凝土梁桥在施工过程或使用阶段,普遍出现各种不同性质的混凝土开裂、长期下挠等病害;这些病害对桥梁的耐久性和营运的安全性构成了威胁,甚至在一定程度上阻碍、制约了大跨径预应力混凝土梁桥的发展。针对既有大跨径预应力混凝土梁桥的各种病害,病害成因分析、对桥梁损伤的诊断、损伤桥梁的修复加固方法是该类桥梁应用中亟待解决的问题。本文阐述我国现有大跨径预应力混凝土梁桥的病害状况,阐释典型病害的诱因,并给出相应的预防措施,以期对实际工程有所裨益。

## 1 中国大跨径混凝土梁桥的典型病害事例

现役大跨PC连续梁、连续刚构桥均是近十几年来才投入运营通车,部分运营状况良好,部分桥梁出现了腹板、底板和顶板开裂,跨中下挠

等病害。开裂和下挠影响结构的正常使用、耐久性以及美观性,还会引起超静定结构的内力重分布,有可能导致结构承载能力的降低,乃至危及桥梁安全。

### 1.1 大跨径混凝土梁桥结构裂缝现状

通过对结构裂缝形式和状态的调查发现,目前大跨径预应力混凝土梁桥结构裂缝的产生位置和形式具有一定的规律性:箱梁裂缝绝大多数集中在分布在顶板、底板、腹板和横隔板的某些部位,这与箱梁的受力特性密切相关,结构裂缝的常见形式和分布如表1所示。从裂缝对结构安全的影响度和出现的频率分析,腹板斜裂缝和顶底板的纵向裂缝是最主要的裂缝形式。

### 1.2 大跨径混凝土梁桥长期下挠现状

除了开裂病害外,大跨径预应力混凝土梁桥的另一常见病害是跨中持续下挠。其特点表现为:1)挠度随时间长期增长;2)结构的长期挠度远大于设计计算的预计值。大跨径预应力混凝土梁桥发生长期下挠的案例屡见不鲜,如表2所示。

另据初步统计分析,大跨径梁桥下挠的年平均速率( $f$ )与跨径( $L$ )之间存在如下关系:  
 $L=100\sim 160\text{m}$ ,  $f=5\sim 10$ (mm/年);  
 $L=160\sim 220\text{m}$ ,  $f=10\sim 20$ (mm/年);  
 $L=220\sim 270\text{m}$ ,  $f=20\sim 30$ (mm/年)。

表1 预应力混凝土箱梁桥常见裂缝形态和分布

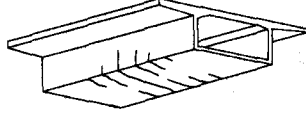
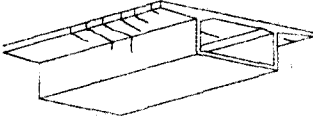
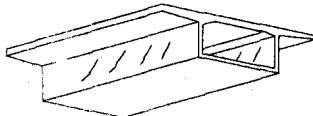
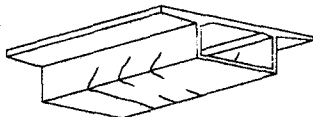
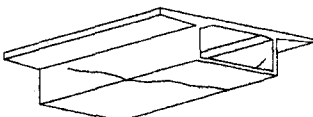
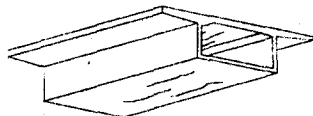
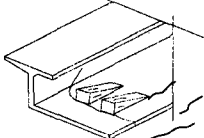
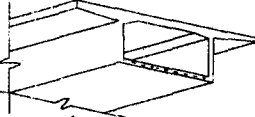
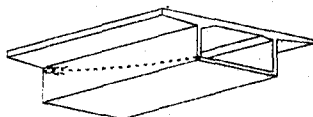
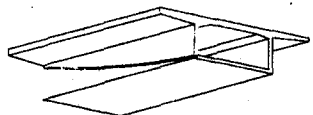
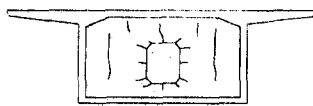
裂缝性质	裂缝形态	常见位置
底板横向裂缝、腹板下缘竖向裂缝		跨中附近底板及腹板
顶板横向裂缝、腹板上缘竖向裂缝		桥墩部位顶板及腹板
腹板中部斜裂缝		L/4跨及梁端附近腹板
与底板横向裂缝贯通的腹板裂缝		剪跨区内的底板及腹板
贯通腹板、底板的螺旋状裂缝		L/4 ~ 3L/4区域的底板及腹板
顶、底板纵向裂缝		跨中附近厚度较薄底板、全桥顶板、板中部、折角附近
齿板局部区域裂缝		齿板与顶、底、腹板交界处，齿板侧面及前端纵向裂缝
底板层间横向裂缝		配有底板正弯束的跨中底板
锚下发散裂缝		钢束锚固处，梁端及齿板
沿预应力管道裂缝		任何预应力管道
横隔板裂缝		横隔板过人孔周边、正上方、两侧

表2 预应力混凝土梁桥长期下挠统计

桥梁名称	桥型	跨径布置(m)	长期下挠(mm)
虎门航道辅桥	连续刚构	150+270+150	260
黄石大桥	连续刚构	162.5+3×245+162.5	335
三门峡黄河公路大桥	连续刚构	105+4×140+105	220
东明黄河大桥	刚构-连续组合体系	75+7×120+75	146
重庆黄花园大桥	连续刚构	137.16+3×250+137.16	74
南海金沙大桥	连续刚构	66+120+66	220
大河铺大桥	连续刚构	100+250+100	256

## 2 大跨径混凝土梁桥裂缝的诱发成因剖析

预应力混凝土梁桥的结构裂缝成因复杂繁多,涉及设计、施工、运营和材料等多个方面,而且多种因素相互影响。某一单项因素或许不会引起箱梁开裂,但是某几个因素叠加时,就会引起箱梁开裂,这增加了裂缝分析的难度。产生裂缝的原因出现频率比较高的有如下几点:

### 2.1 预应力损失

预应力是预应力混凝土梁桥的核心。通过纵向和竖向预应力,施加预压应力。由于预压应力的存在,各混凝土微分体除了承受使用荷载引起的剪应力 $\tau$ 和法向应力 $\sigma$ ,还承受预应力引起的应力 $\sigma_h$ 。当仅有纵向预应力钢束时,应力 $\sigma_h$ 的作用方向是水平的,应力 $\sigma_h$ 和 $\sigma$ 共同作用,保证正截面混凝土拉应力不超限,避免产生弯曲裂缝;当有竖向预应力钢筋和弯起预应力钢束时,应力 $\sigma_h$ 的作用方向是倾斜的,应力 $\sigma_h$ 和 $\sigma$ 、 $\tau$ 共同作用,保证混凝土主拉应力不超限,避免产生斜裂缝。竖向预应力由于其构造原因,预应力损失较大;混凝土收缩徐变特性、钢束自身的松弛特性和施工不当使纵向预应力损失过大。实际钢束的预应力损失较设计计算偏大,结构中的有效预应力引起的应力 $\sigma_h$ 偏小,使(主)拉应力超限而产生裂缝。

### 2.2 预应力布置形式

目前比较流行的一种纵向配直线束的做法,与传统的按受力要求曲线配束不同,它既简化了设计和施工,又减少了摩擦损失,对建立纵向有效预应力有利,而剪应力需配置密排竖向预应力束来克服,竖向预应力束也可起到减少主拉应力

的作用,但效果不大。这是由于竖向直线束太短,几乎建立不起有效预应力。另外剪应力和主拉应力沿纵向是连续分布,配直线束加密排竖向束组合,一定存在一段应力空白区,容易产生斜裂缝。

### 2.3 活载引起的扭转剪应力考虑不足

在较宽的公路桥梁中,活载的偏载会在主梁结构中产生较大的扭矩,从而在腹板中产生扭转剪应力和扭转正应力。在结构分析时,会考虑由于活载偏载引起的结构活载内力增大,将活载内力乘以1.1~1.25的增大修正系数。这一系数对于正应力的修正尚可,但对剪应力的修正明显不足。对于一些桥梁,腹板内的最大剪应力是平均值的1.4~2.0倍。此扭转剪应力与剪力产生的剪应力叠加,从而增大主拉应力值。

### 2.4 箱梁空间效应考虑不足

对于大跨径预应力混凝土梁桥,箱梁桥的空间效应对其力学性能的影响很大。由于箱梁的剪力滞效应,使腹板上下缘纵向拉应力远大于平均应力,对此配筋不足而产生横向裂缝。对于变截面箱梁的底板,由于施加预应力而产生径向力,当底板横向配筋不足时,会在底板横向跨中下缘及横向两侧底板加腋开始的上缘产生纵向裂缝。

### 2.5 温度

在对箱梁桥温度荷载分析中发现,非线性温度应力有时比活载应力还大;尤其是横向温差会引起顶底板的横向拉应力,并达到可观数值。在箱形梁设计中要充分考虑温度荷载效应,保证结构有足够的强度储备。

## 2.6 其他原因

超载是公路交通中普遍存在的问题。当汽车荷载超载时,活载产生的应力相应的增大,导致混凝土开裂。

材料质量引起的裂缝:1)水泥质量和品种不合格;2)骨料不合格(含泥量大的骨料);3)反应性或风化骨料。

施工质量引起的裂缝:1)混凝土搅拌、运输时间过长;2)支架下沉、脱模过早、不均匀下沉;3)接头部位处理不好;4)养生不好,塑性收缩状态开裂;5)养生不好时,温度应力开裂;6)振捣不充分、混凝土沉降引起裂缝;7)由于混凝土的水化热引起的裂缝;8)由于干燥、收缩引起的裂缝。

## 3 大跨径混凝土梁桥下挠的诱发成因剖析

目前国内外比较认同的导致大跨径预应力混凝土梁桥下挠的主要因素如下。

### 3.1 混凝土收缩徐变

混凝土收缩徐变具有很大的不确定性,是影响大跨径预应力混凝土梁桥长期下挠准确预测的最大障碍。其一是收缩的变异性很大,徐变柔量差异可达20%以上,收缩应变更可达35%以上,导致最终收缩量难以确定。

外参剂、施工方法、张拉龄期等都影响了混凝土最终收缩、徐变量的计算,预计的完成时间也难以准确,如原来预计7年,而实际上十几年后有的桥梁仍不能终止。

早强剂和缓凝剂均是通过化学作用加速或延缓混凝土材料化学反应的过程,文献表明加入早强剂后会影晌混凝土的后期强度。但加入早强剂或缓凝剂后是否影响主要反映混凝土物理特征的弹性模量,以及同样为物理过程的混凝土徐变,目前尚缺乏相关文献报道。由于混凝土徐变本身是较为复杂的过程,可能会造成结构中的应力和变形与实际结构中的有所差异。

### 3.2 预应力

预应力混凝土梁桥的挠度实际上是两部分总体作用方向相反的效应综合平衡的结果。作用效

应一是结构的自重等恒载作用和活载作用;另一个是预应力体系提供的作用效应。预应力体系对挠度的作用效应取决于预应力的布置形式和有效预应力的尺寸。

预应力的布置对桥梁的长期挠度是有较大影响的,国内布束设计时往往考虑控制的是施工和正常使用状态下的结构应力状态是否安全,对布束影响结构长期挠度的问题基本上都没能充分注意到,实际上某些不合适的布束不但不能减小长期挠度,可能还会造成相反的作用。目前国内桥梁设计普遍采用箱梁顶板设悬浇束的布束方式,其对于控制悬臂状态的挠度绝对是有效的。而合理配设悬浇束,使每个施工阶段接近“零弯矩”状态,以此减小收缩徐变对结构长期挠度的影响,也是行之有效的。

预应力混凝土结构中的有效预应力是具有时间相关性的,有实测结果表明8年内预应力的长期损失为成桥时的有效预应力的16%。随时间增长,有效预应力降低,预应力对结构的作用效应降低,使得结构下挠。

### 3.3 箱梁开裂

一旦箱梁开裂,结构的下挠将明显加大,结构的下挠问题情况也将更为复杂和严重。因为混凝土的开裂不但将引发预应力与混凝土收缩徐变的强烈耦合效应(混凝土的开裂将改变断面应力状态和开裂断面形心,徐变规律和预应力对结构的效应也随之变化,反过来又影响结构开裂),而且由于开裂,使结构材料的退化大大加快,一般开裂后下挠会加速增长就是这一原因。

### 3.4 桥梁设计计算方面的不足

国内现有计算手段在处理梁桥箱梁空间效应及长期变形方面存在不足,广为使用的杆系程序导致与实际较多的差异。另外收缩徐变计算模式对结构长期性能计算,特别是对收缩徐变特别敏感的大跨度预应力混凝土梁桥结构,还有很多问题。许多影响结构长期变形的因素未能考虑,如环境温度的影响、有效预应力的时变特性、混凝

土弹模的时变特性,含温度、车载在内的循环反复作用对弹模的时变影响、是否在选用考虑长期性能的收缩徐变模型的基础上用具有95%置信度的收缩徐变数据进行修正、箱梁截面不同厚度板件收缩差的影响等。提出具有普遍适用性的箱形截面梁桥计算方法对指导箱梁设计具有重大意义。

### 3.5 施工方法

对于大跨径预应力混凝土梁桥,一般采用悬臂浇筑施工。施工方法对梁桥长期下挠的影响主要为竖向接缝的质量和混凝土超方问题。

竖向接缝的施工工艺和施工质量对梁桥的结构性能有明显的影响,然而,在设计上通常并没有考虑这些影响,结构分析时均按无缝的理想结构计算。实际施工中相当数量的接缝存在质量问题,其力学性能明显弱于一次性整体浇注的混凝土结构,这就造成了理论计算与实际情况的偏差。这种偏差主要为接缝混凝土的剪切徐变所致,也是目前设计理论中通常未予以考虑的因素。对整体浇注混凝土结构,混凝土的剪切徐变引起的挠度增量通常可忽略不计,但对分节段悬臂现浇法施工连续刚构桥梁,当接缝面剪力较大时,质量不良的接缝会产生较大的剪切变形,在长期荷载作用下产生过大的剪切徐变,由此引起的挠度增量则不应忽略。

混凝土超方的误差在合理范围内时不会对结构自重内力产生较大影响。当箱梁混凝土超方较多时,显然加大了箱梁自重作用效应,应该在箱梁检算中给以考虑。

## 4 裂缝防治技术

预应力混凝土梁桥箱梁开裂具有普遍性,其成因涉及设计、施工、管养和材料等多个方面,而设计是源头,是工程的灵魂,在很大程度上决定了工程的质量,本文从设计角度出发,给出在设计过程中应注意的事项,以尽可能减少和消除裂缝的产生。

### 4.1 合理的结构形式

在结构设计方面,应根据箱梁空间受力状况及施工方法的可行性,进行桥梁的构造设计:结构设计参数的拟定应注重箱梁截面布置,箱梁顶底板和腹板尺寸及桥跨布置的合理性;预应力钢束设计应注重空间束布置及锚固区构造设计,以避免箱梁局部出现抗剪盲区 and 应力集中。

### 4.2 结构效应的准确分析

当前预应力混凝土箱梁桥的分析方法见表3。方法1、2和3为杆系有限元模型,将结构的空空间受力特性合理地简化到平面计算中,可以获得结构或构件的内力和应力,用于承载能力计算和应力验算;方法4为空间有限元模型,直接获得

表3 预应力混凝土箱梁桥的分析方法

箱梁计算方法	纵向弯曲	自由扭转	约束扭转翘曲	畸变翘曲	畸变横向挠曲	剪力滞	横向弯曲	不满足平面假定的空间效应
方法1 纵向:三自由度直梁单元 横向:框架计算	√		采用放大系数估算				√	
方法2 纵向:(六)七自由度空间梁单元 横向:框架计算	√	√	√	√	√		√	
方法3 纵向:平面梁格 横向:框架计算	√	√	√	√			√	√
方法4 空间块单元及板单元计算	√	√	√	√	√	√	√	√

应力,而没有内力。对于预应力混凝土梁桥的设计计算,常采用前三种方法;但是由于箱梁桥的空间效应对其力学性能的影响很大,在设计箱梁时,必须注重其空间应力状态的分析,特别是箱梁关键部位的局部应力精细化分析,单纯采用杆系方法并不能对结构的空问效应准确分析。

#### 4.3 加强设计应力控制

应力控制是一个涉及因素很多的复杂问题,它受诸多不定性因素的影响,在设计计算中难以真实反映,更难以预见得到施工的准确程度和有效性。所以,应力控制应该留有一定的安全储备,不能单凭计算结果不作任何分析而且偏紧的去控制。

#### 4.4 设置合理的预应力

预应力的和布置形式对于控制预应力混凝土梁桥的裂缝出现有较大影响。

合理布置腹板内纵向预应力弯束,让预应力提供的抗剪能力沿纵向有一个连续分布,并尽可能多地将预应力束布置在腹板内,建立起足够的纵向有效预应力和弯起束提供的竖向预应力,有效减少或消除主拉应力,减少或消除腹板裂缝。

设置竖向预应力能显著的减少或消除主拉应力,但由于竖向预应力钢筋一般长度较短,而且钢筋的张拉延伸量很小,如果有微小的压缩变形,将造成很大的预应力损失,加上锚固系统的一些问题,施工很难保证准确有效的预应力度。可以在施工工艺上加以改进,如采用超张拉或二次张拉等,保证有效的预应力度。

合理设置横向预应力是减少顶板纵向裂缝的有效途径。顶板中的横向预应力有效抵消顶板中的主拉应力,避免顶板开裂。

#### 4.5 重视普通钢筋的配设

大跨径混凝土箱梁桥的普遍开裂问题,不仅是使用阶段应力和变形计算的问题,而且与极限阶段配筋设计理论密切相关。以箱梁腹板为例,当腹板混凝土承受的主拉应力超过其受拉强度准则后,混凝土将会开裂产生斜裂缝,原先混凝土承受的主拉应力将全部传给钢筋:垂直方向的箍

筋将承受主拉应力的垂直分量、梁高范围内的水平钢筋承受主拉应力的水平分量。故在截面的配筋设计中,水平钢筋同样应作为抗剪受力钢筋进行设计,而不是仅作为构造钢筋。

### 5 控制下挠的防治技术简介

在处理大跨度预应力混凝土梁桥长期挠度的措施方面,目前国内提出的主要防治方法如下。

#### 5.1 恒载“零弯矩设计”理论

在恒载作用下,结构处于轴压状态,结构在混凝土长期收缩徐变作用下,只会发生轴向缩短,而不会发生弯曲下挠,这样就能极大地减少梁桥的持续下挠绝对值,这种理论称为恒载“零弯矩设计”理论。在设计中,通过设置预应力来平衡恒载。大跨径梁桥一般采用悬臂施工,大致经过双悬臂施工、合拢施工、桥面浇筑、运营和混凝土徐变等几个步骤,只有在所有的阶段都实现恒载“零弯矩”的要求,跨中持续下挠才能根本改善。

#### 5.2 跨中梁段的选择

恒载“零弯矩”方法是用预应力手段来平衡恒载,使主梁内的不平衡弯矩降到最小程度。但是由于构造、工艺等原因,主梁内的弯矩在各个截面不能全部为0。因此长期挠度的产生是不可避免的,采用何种措施有效控制长期挠度是设计中的一项重要任务。

1) 保证跨中梁高。在弯矩值一定的情况下,控制挠度的关键因素是增大主梁的抗弯刚度。如果在跨中保证一定的梁高,则可以有效增大截面抗弯惯性矩,增大抗弯刚度,减小跨中挠度。2) 跨中部分箱梁采用预制拼装。混凝土的弹性模量是随时间而增大的,在目前的大跨径梁桥的悬臂施工中,由于早强剂的使用,混凝土强度3天达到设计强度要求,但弹性模量没有达到,这时张拉预应力、施工下一节段,是造成挠度增大的一个重要原因。跨中部分节段采用预制拼装,预制节段在预制场存放较长时间,其混凝土收缩徐变已经完成,有效提高弹性模量,这样运营中后期挠度值也相应减小。

(下转第25页)

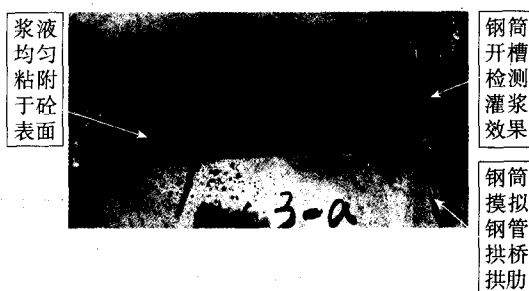


图7 浆液充填密实效果图

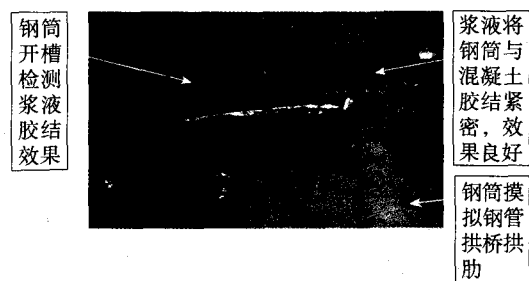


图8 浆液胶结效果图

高强度、高渗透、耐低温、高柔性环氧树脂类灌注胶能很好的使钢管与混凝土粘结在一起(如图8),使钢管与混凝土共同作用,极大地改善了拱肋受力特性,延长桥梁的使用寿命。

(上接第11页)

### 5.3 体外索的引用

梁桥悬臂施工合拢后,继续施工桥面系 $g_2$ (二期恒载),在进入运营阶段后承受均布活载 $g_p$ 。这两项统称为连续结构图式的后期均布恒载 $\Sigma g$ 。后期均布恒载也会产生不小的跨中挠度 $f_p$ ,这一挠度是大跨梁桥长期下挠的一个重要组成部分。而传统的“预抬高”和“悬臂施工零弯矩法”都只适用于合拢前的跨中标高问题,但这两种手段都不能阻止梁后期挠度的发生。近年来不少桥梁为了控制后期挠度 $f_p$ 的增长,在箱梁内都设置了体外索。体外索的配设原则是使其所产生的弯矩 $M_R$ 应与后期均布荷载 $\Sigma p$ 所产生的 $M_p$ 相平衡,而不仅仅是前期预应力的一种补充。通过合理配设体外索,解决后期均布荷载产生长期下挠,避免梁桥下挠的产生。

由于目前对大跨度预应力混凝土梁桥长期挠度的原因仍然存在大量不明确的地方,特别是缺乏强健的长期挠度预测计算方法的支持,防治的效果往往不佳,控制量度的准确性也难以把握。

(3) 本文通过相似模型试验分析,针对钢管混凝土拱桥拱肋核心混凝土的脱空状况,采用新型的低粘度、高强度、高渗透、耐低温、高柔性环氧树脂类灌注胶能有效地解决拱肋混凝土脱空的桥梁病害问题,为今后的钢管混凝土拱桥加固提供一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 秦荣, 谢肖礼等. 钢管混凝土拱桥钢管开裂事故分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3):74-77
- [2] 蒋燕兮. 低粘度高强度改性环氧树脂化学灌浆材料的研究[J]. 粘合剂, 1990, 2:20-22
- [3] 蒋燕兮, 邓天宁. 低粘度高强度有弹性环氧树脂化学灌浆材料的应用[J]. 中国胶粘剂, 1992, 1(3):50-53
- [4] 裴洋, 张大琦. 钢管混凝土拱桥中钢管与混凝土相互作用问题[J]. 山西建筑, 2009, 35(3):318-319
- [5] 赵伟, 朱红. 复配型环氧树脂地层灌浆材料的研制[J]. 2003, 32(4):433-439
- [6] 刘福生, 张彬. 浅谈钢管混凝土拱桥及质量检测的研究现状[J]. 黑龙江交通科技, 2008, (12):105-107
- [7] 王亚超, 张晋, 隋晓. 中承式钢管混凝土系杆拱桥拱肋灌浆方案研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(32):13-14
- [8] 杨敏. 钢管混凝土系杆拱桥的常见病害及处治方法[J]. 城市道桥与防洪, 2008, (7):137-138
- [9] 杨世聪, 王福敏等. 核心混凝土脱空对钢管混凝土构件力学性能的影响[J]. 重庆交通大学学报, 2008, 27(3):360-486

### 6 结束语

通过大量理论和技术研究,混凝土主梁容易开裂、下挠的技术难点将被攻克,更多的科技创新和技术措施将引导大跨径梁桥又好又快地发展。可以预见预应力混凝土梁桥的跨径有进一步增大趋势,上部结构将不断轻型化、高强度。成熟的工艺、工法以及造价优势将使预应力混凝土梁桥在桥梁家族中继续占领优势,大跨径预应力混凝土梁桥将是我国未来桥梁建设的主力军之一。

### 参考文献

- [1] 大跨径预应力混凝土梁桥设计施工技术指南.
- [2] 徐栋. 桥梁体外预应力设计技术[M]. 人民交通出版社, 2008
- [3] 刘桂生, 刘慧敏. 大跨径箱梁桥裂缝成因分析及控制措施[J]. 公路, 2006
- [4] 朱汉华等. 预应力混凝土连续箱梁桥裂缝分布与防治[M]. 人民交通出版社, 2006
- [5] 谢峻等. 大跨径预应力混凝土箱梁桥长期下挠问题的研究现状[J]. 公路交通科技, 2006
- [6] 王国亮等. 在用大跨度预应力混凝土箱梁桥裂缝调查研究[J]. 公路交通科技, 2008, 8
- [7] 柳磊. 大跨径预应力混凝土箱梁桥开裂与下挠成因分析[D]. 同济大学硕士论文, 2009