

西部交通建设科技项目

交通编号:

合同号: 2007318 812 32

单位编号:

密 级:

分 类 号:

# 西部地区在役中小跨径桥梁承载力 快速检评技术研究

## 研究报告简本

长 安 大 学

招商局重庆交通科研设计院有限公司

大连理工大学

辽宁省交通厅公路管理局

宁夏公路管理局

重庆市公路局

2011 年 1 月

中文题名	西部地区在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术研究				
英文题名	The Bearing Capacity Rapid Evaluate Technology for in-serve Medium and Small Bridges in Western China				
交通编号		项目来源	西部交通建设科技项目		
单位编号		合同号	2007 318 812 32		
分类号		项目起止年限	2007年8月至2010年12月		
第一完成单位	长安大学		密 级		
项目负责人	王钧利（教授）		报告撰写人	王钧利（教授）	
项目主要参加人	单位	姓名	职 称	职 务	专 业
	长安大学	王钧利	教授	负责人	桥梁工程
		贺拴海	教授		桥梁工程
		赵小星	高级工程师		工程力学
		宋一凡	教授		桥梁工程
		周 勰	副教授		桥梁工程
		赵 煜	副教授		桥梁工程
		王凌波	博士研究生		桥梁工程
		任立冬	硕士研究生		桥梁工程
	招商局重庆交通科研设计院有限公司	唐光武	研究员		固体力学
		黄福伟	研究员		交通运输工程
	辽宁省交通厅公路管理局	周谦	教授级高级工程师		公路与桥梁工程
	宁夏公路管理局	赵会中	高级工程师		公路与桥梁工程
		张东升	高级工程师		公路与桥梁工程

# 目 录

1 研究内容 .....	1
2 主要技术成果 .....	2
2.1 研究成果 .....	2
2.2 项目主要创新点 .....	3
2.2.1 理论创新 .....	3
2.2.2 技术创新 .....	6
3 在役中小跨径桥梁承载力检评技术研究现状调研 .....	6
4 在役中小跨径桥梁优先检测的模糊分级法 .....	7
5 中小跨径桥梁承载力快速检评技术研究 .....	7
5.1 轻荷载荷载试验法 .....	7
5.2 拟静态挠度法 .....	7
5.3 在役中小跨径桥桥承载力快速检测方法—动力法 .....	8
5.4 在役中小跨径桥桥承载力快速检测方法—静力法 .....	8
5.5 在役中小跨径拱桥承载力快速检评方法研究 .....	8
5.6 中小跨径桥梁承载能力快速检测的设备开发或选型、组配 .....	9
5.6.1 简支桥及连续桥 .....	9
5.6.2 对钢筋混凝土拱桥 .....	10
6 模型修正方法及承载力评定研究 .....	11
6.1 钢筋混凝土模型修正方法及承载力评定 .....	11
6.2 预应力混凝土模型修正方法及承载力评定 .....	11
6.3 钢筋混凝土肋拱桥梁模型修正方法及承载力评定 .....	12
7 中小跨径桥梁承载能力快速检评系统 .....	12
7.1 在役中小跨径钢筋混凝土桥梁承载力快速检评系统 .....	12
7.2 在役中小跨径预应力混凝土桥梁承载力快速检评系统 .....	14
8 在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术实桥应用 .....	19

<b>9 在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术应用手册 .....</b>	<b>21</b>
<b>10 结束语 .....</b>	<b>22</b>

# 1 研究内容

本项目主要工作内容（编号：2007 318 812 32），主要由以下八个研究专题组成：

研究专题 1：国内外在役中小跨径桥梁检评技术现状调研

（1）在役中小跨径桥梁承载能力常见传统检测方法的检测内容、标准或规程、检测设备、评价技术及应用现状的调研和分析；

（2）在役中小跨径桥梁结构损伤检测技术的检测内容、检测设备、评价技术及应用现状的调研和分析；

（3）在役中小跨径桥梁承载能力计算模型修正技术及应用现状的调研和分析；

（4）在役桥梁承载力评定系统研究现状的调研及分析；

（5）各类在役中小跨径桥梁承载力评价方法实桥应用情况调研和分析；

（6）对调查获得的各类检评方法进行高度归纳总结，通过有效性分析形成方法的评价。

研究专题 2：在役中小跨径桥梁优先检测的模糊分级法

（1）按中小跨径桥梁存在病害的程度分析主要承重构件承载力下降的因素；

（2）确定承载力下降系数及承载力评价指标；

（3）以桥梁维护单位按《公路桥涵养护规范》所提供的基础数据，建立桥梁承载力指标评价体系；

（4）划分在役桥梁实时承载力优先检测的等级，确定决策承载能力快速检测优先实施的指标范围及等级。

研究专题 3：在役中小跨径桥梁承载力快速检评方法研究

（1）在役中小跨径桥梁承载力影响因素分析；

（2）在役中小跨径梁桥承载力快速检评方法研究；

（3）在役中小跨径拱桥承载力快速检评方法研究；

（4）中小跨径桥梁承载能力快速检测的设备开发或选型、组配。

研究专题 4：模型修正方法及承载力评定技术研究

（1）桥梁结构状态指标研究；

（2）模型修正方法研究；

- (3) 中小跨径桥梁承载能力评定技术研究；
- (4) 中小跨径桥梁承载能力模型修正技术及相关试验验证。

#### 研究专题 5：中小跨径桥梁承载力快速评定系统研究

- (1) 基于静、动力快速检测理论编制承载力快速检评程序框架；
- (2) 基于快速检评方法的数据采集及分析处理软件开发；
- (3) 基于模型修正的桥梁承载力分析系统开发；
- (4) 依据模型试验数据进行系统调试；
- (5) 在依托工程上应用以完成承载力快速评定系统，并进行实桥验证。

#### 研究专题 6：实桥检测应用研究

- (1) 根据检测应用需求和项目实施目的选择典型依托工程 6 座（其中 4 座位于西部地区），并制定检测对比方案；
- (2) 动力法快速检评系统实桥应用，并与传统方法对承载力评定结果进行对比分析；
- (3) 静力法快速检评系统实桥应用，并与传统评定方法对承载力评定结果进行对比分析；
- (4) 依托工程承载能力快速检评系统应用分析。

#### 研究专题 7：制订在役中、小跨径桥梁快速检测技术应用手册

- (1) 适用范围及技术名词注释；
- (2) 主要检测内容及说明；
- (3) 检测方法、仪器设备及其使用；
- (4) 检测数据的判别和分析方法；
- (5) 分类快速检测技术操作规程；
- (6) 不同类型桥梁承载力快速评价方法；
- (7) 快速检评系统实桥应用及评价示例；
- (8) 快速检评系统技术手册编制说明。

## 2 主要技术成果

### 2.1 研究成果

经过三年多的研究攻关，本项目按合同要求完成全部研究内容，取得研究成果有：

- (1) 西部地区在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术研究总报告；
- (2) 分报告之一：国内外在役中小跨径桥梁承载力检评技术现状调研报告；
- (3) 分报告之二：在役中小跨径桥梁优先检测的模糊分级法；
- (4) 分报告之三：中小跨径桥梁承载力快速检测技术；
- (5) 分报告之四：模型修正方法及承载力评定研究；
- (6) 分报告之五：中小跨径桥梁承载能力快速检评系统开发；
- (7) 分报告之六：实桥检测应用研究；
- (8) 分报告之七：在役中小跨径桥梁承载力快速检评应用手册；
- (9) 西部地区在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术研究工作报告；
- (10) 西部地区在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术研究综合文件汇编。

从 2007 年 7 月基础性研究开始至 2011 年 1 月，结合本项目研究，共培养硕士研究生 11 名、博士研究生 2 名。发表学术论文 19 篇。

专利：发明专利一项。

软件登记：5 项。

## 2.2 项目主要创新点

### 2.2.1 理论创新

**创新点一：应用积型均衡函数得出的变权公式进行在役中小跨径桥梁优先检测模糊分级**

(1)采用层次分析法使得每个层次中各个影响因素的权重分配更加合理。

(2)引入模糊隶属矩阵，明确了同一层次因素集相对于评判集的隶属函数关系。

(3)对权重集与模糊隶属矩阵采用加权平均型模糊算子进行运算，综合考虑了各个因素的影响，可以得出每个层次的因素对下一层次因素的模糊隶属关系。

(4)桥梁的各个影响因素的权重并不是一直不变的，所以引入了积型变权公式，使得哪个影响因素损坏的越严重，它的权重就会越大，突出这个因素的重要性，实现了各个因素权重的均衡性，反映了构件评定的实际情况。同时由单一层次的积型变权公式推广到多层次的积型变权公式，使得每一层次的影响因素都能适时地调整自己的权重，使得评定过程更符合实际情况。

(5)传统的养护规范采用单一层次的评定方法，各种病害都集中在一起评定分值。如主梁的混凝土开裂、钢筋锈蚀、混凝土碳化等病害都是采用统一的标准评

定分值，通常倾向于主观判断。工程技术人员如果认为主梁的混凝土开裂情况比主梁钢筋锈蚀情况更严重，那工程技术人员通常会以主梁的混凝土开裂情况来评定主梁的分值，这样往往会把别的病害因素评分值忽略掉，显然是以最严重的病害因素来决定分值的，偏以保守。而变权模糊综合评判法是采用积型变权公式来突出构件的重要病害因素，采用加权平均型模糊算子来综合考虑各个病害的影响，参照各个病害的等级评定标准，让工程技术人员在每个病害因素上都有对应的等级评定标准，评判出病害因素的等级隶属向量。根据最低层次的因素的等级隶属向量逐级向上求出更高一级的因素的等级隶属向量，最终求出桥梁的承载能力等级。

### 创新点二：钢筋混凝土梁桥承载力模型横向分配系数修正技术

在全桥内力计算中，应先根据荷载横向分布系数  $m$  来确定欲求内力主梁所承担的最大荷载值，进而将此单梁单独分析，通过前述单梁承载能力的验算方法即可求出该单梁的承载力。因此，求出桥梁在荷载作用下的横向分布系数就是将全桥评价转化为单梁评价的关键。

由于桥梁在运营后，各片主梁的刚度因桥梁结构的损伤或者其他一些外界因素的影响，各片主梁的刚度是不同的，常用计算横向分布系数的方法（杠杠原理法、偏心压力法、铰接板（梁）法、比拟正交异性板法）不能很准确的反应出桥梁实际的荷载分布。所以提出一种针对在役中小跨径桥梁的横向分布计算方法尤为重要。

本课题提出一种横向分布计算的模型修正法，此法是利用静力试验挠度实测值和有限元模型挠度计算值进行比较，分析两者之间的相关性，利用下式进行分析。

$$\omega(f) = \omega_1(f) + \omega_2(f) + \dots + \omega_n(f) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{ei} - f_{ai}}{f_{ei}} \right)^2 \quad (2.1)$$

式中：  $\omega(f)$ —目标函数；

$n$ —主梁总片数；

$f_{ei}$ —第  $i$  片梁跨中静力试验挠度实测值；

$f_{ai}$ —第  $i$  片梁跨中有限元挠度计算值。



当  $\omega(f) \leq 0.1$  时, 即可认为挠度实测值和挠度计算值相关性好, 模型修正终止, 然后计算模型修正后各片主梁的开裂截面惯性矩  $I'_i$ 。

$$I'_i = \frac{B'_i}{E} \quad (2.2)$$

式中:  $B'_i$ —模型修正后第  $i$  片梁的抗弯刚度;

$E$ —混凝土弹性模量;

$I'_i$ —修正后第  $i$  片梁的开裂截面抗弯惯性矩;

得到修正后开裂截面抗弯惯性矩后, 即使用此修正值计算实桥或者模型桥的横向分布系数。

### 创新点三: 钢筋混凝土梁桥承载力模型修正与快速评定技术

本技术是一种基于静力试验的能够快速准确且定量的评价在役钢筋混凝土梁桥在运营阶段承载力的检评方法。通过对静力测试中参数的选择、分析, 并通过修正结构刚度及配筋率来定量地对在役 RC 桥梁承载能力进行评定。并选用了一种横向分布的模型修正法计算桥梁的横向分布系数, 进而实现通过修正后的横向分布系数将全桥承载能力的评定转化为单梁的承载能力评定。

通过对试验模型的静力测试, 对不同荷载等级、不同开裂情况下的模型单梁静力试验数据分析, 修正全梁名义配筋率从而计算出全梁的控制弯矩, 定量的评定钢筋混凝土模型梁的承载能力。运用横向分布模型修正法理论, 计算模型桥各片梁在开裂损伤后的荷载横向分布系数, 进而计算模型桥各片梁的名义配筋率, 从而将模型桥的承载能力评定转化为模型单梁的承载能力评定。对所提出的承载力评定方法, 通过快速检评计算软件进行计算分析, 经过单梁和模型桥的试验验证, 该评定方法实用、可行, 该快速检评计算软件准确、可靠。

### 创新点四: 在计算理论刚度时, 计入预应力对其产生的影响, 提出刚度修正公式

分析有效预应力与预应力梁桥抗弯刚度间的数值关系: 直线布束比曲线布束的预应力混凝土梁抗弯刚度受预应力张拉力的影响更大; 曲线预应力束偏心距越大, 试验梁刚度随有效预应力变化越小。在中国规范短期挠度计算方法的基础上提出以布束形式区分的预应力结构开裂前通用刚度修正公式, 并以之作为计算未开裂结构实际抗弯刚度的依据, 开裂后建议继续采用规范方法进行计算。给出预

应力梁实际抗弯刚度与其截面形式、截面尺寸、计算跨径及外荷载位置等因素的拟合方程，据此提出针对中小跨径预应力梁桥的刚度推算方法。

#### **创新点五：预应力梁纵向刚度分段求解方法**

提出预应力梁纵向刚度分段求解方法，反映在役桥梁纵向缺损情况，并提出横纵向交叉刚度网的概念以全面反映桥梁三维实际刚度分配状况。

#### **创新点六：应用名义预应力束面积建立在役预应力梁桥残余承载能力计算方法**

利用结构检测实测挠度和有效预应力，推算截面实际缺损效应，引入反映全桥实际状态的‘名义预应力束面积’概念，配合截面实际中性轴高度，计算在役桥梁残余承载能力结果。采用残余预应力度、残余承载弯矩、消压度和承载度共同评判全预应力梁桥、A类部分预应力梁桥和B类部分预应力梁桥的正常使用承载能力状态。

### **2.2.2 技术创新**

- (1) 桥梁挠度测试用仪器；
- (2) 公路桥梁荷载试验智能设计系统（V1.0）
- (3) 简支多梁横向惯性矩修正系统（V1.0）
- (4) 基于快速检测法评定 RC 梁桥承载力计算系统（V1.0）；
- (5) 中小跨径钢筋混凝土梁桥承载力计算系统（V1.0）；
- (6) 基于挠度的中小跨径预应力混凝土梁桥承载力评定系统（V1.0）。

## **3 在役中小跨径桥梁承载力检评技术研究现状调研**

通过调研发现目前在役中小跨径桥梁承载力检测方法中，还没有切实有效并且为众多桥梁检测评估领域专业人员所广泛认可的在役桥梁结构承载力评定的使用技术。桥梁结构承载能力快速评定是一个世界性的课题，目前仍处于研究阶段。多年来，国内外学者在桥梁结构承载能力评定研究中提出了很多方法，有的方法已经比较成熟，并得到了广泛应用，有的尚处于研究阶段，实际应用目前相对较少。本次研究将本着科学、实用、创新的目标，结合国内外在役中、小跨径桥梁的技术特点，重点研究基于可获取的模态测试数据达到承载能力快速评定的目的。力争在今后中、小跨径桥梁承载力评定过程中逐步取代传统的荷载试验法，并促使这项技术在西部省份乃至全国范围内推广应用。

## 4 在役中小跨径桥梁优先检测的模糊分级法

基于桥梁的一般检查数据提出的桥梁承载能力模糊分级法。根据桥梁的受力特点，以层次分析法建立桥梁承载能力的多层次评估模型，引入串联构件、并联构件和赘余构件概念。结合专家经验和已有研究成果，提出构件病害的评价标准，通过咨询专家经验建立判断矩阵，确立影响因素的权重集。为了考虑不同损伤程度的构件对评估结果的贡献不同，引入变权原理，采用模糊综合评判法对桥梁的承载能力进行评价。引入串联系统模糊评判法则对串联构件进行评估，将以等级隶属向量形式表示的评定结果转换为百分制的评定结果，确定桥梁承载能力的等级划分。最后，结合工程实例分别用公路桥涵养护规范、变权模糊综合评判法进行评分，并与荷载试验结果进行对比，验证研究成果的适应性和准确性。

## 5 中小跨径桥梁承载力快速检评技术研究

### 5.1 轻荷载荷载试验法

本文通过 103 座桥梁的荷载试验实测数据，选取承载力良好的桥梁，按照预应力混凝土梁桥、钢筋混凝土梁桥、钢筋混凝土板桥的类型划分，统计出应变校验系数和挠度校验系数分布范围，进一步完善校验系数常值表。

划分出低于 0.30~0.65 加载效率的加载效率范围为轻荷载，提出轻荷载试验方法。通过轻荷载试验，使得荷载加载重量明显减轻。从试验结果来看，在轻荷载情况下得到的结构校验系数，可得到荷载效率转化后的校验系数，与实测满荷载情况下的校验系数结构对比，误差在 6%左右，满足精度要求。

应用于工程实例，结果表明：轻荷载试验方法能达到传统荷载试验精度的 90% 以上，该方法是可行的。

### 5.2 拟静态挠度法

本课题分析了传统的承载能力评定准则，通过承载能力基本理论和动力学与静力学的有机结合，提出用动态车辆挠度曲线取代静态挠度影响线的荷载试验改良模式—拟静态挠度法，评定中小跨径梁式桥的现有承载能力，并进行了实桥的试验对比验证。结果表明拟静态快速检测方法测试结果达到原荷载试验结果精度的 90% 以上，可采用修正系数，偏安全地对中小跨径梁桥承载力进行评估；在满足检测精度的同时，可减少 30% 左右的经济损耗。

### 5.3 在役中小跨径桥桥承载力快速检测方法—动力法

动力法评定技术主要研究钢筋混凝土简支梁带裂缝工作阶段的使用性能，它与传统的静载试验法相比在快速简便上具有不可比拟的优势。从动力法评定技术在九座公路旧桥中的应用来看，动力法预测结果和荷载试验结论基本一致，故以实测 $\omega_1$ 来换算动刚度，从而由静、动力参数相关关系预测公路旧桥的承载力是完全可行的。由室内模型试验的到的回归公式具有普遍意义，其精度满足实际应用要求。

动力法评定的准确性将受多种因素的影响，在对实桥的承载力进行评估时，可从以下几点提高预测精度：主梁尺寸、材料特性等应以实测值为准；对裂缝参数进行详尽统计；提高结构实测基频的精度。

### 5.4 在役中小跨径桥桥承载力快速检测方法—静力法

从静载试验目的、内容、从测试截面选取、测点布置和试验荷载的计算等方面阐述了静载试验的过程，并对试验结果进行了分析。最后根据静载试验结果，认为被检测箱梁的受拉区应力、挠度和裂缝开展情况均满足相关规范要求，承载能力满足设计要求。试验包括：控制截面在试验荷载作用下的应变(应力)，控制截面在试验荷载作用下的挠度，梁体裂缝在试验荷载作用下的开展情况。

在基于静态测量数据的结构损伤检测方法中，结构的静态特性参数主要有结构静态位移、应变等。结构发生损伤时，会引起结构刚度的变化，从而使结构位移、应变等参数发生相应的变化，通过对结构位移、应变等参数的测量，分析上述参数相对于结构完好时的改变情况实现结构损伤检测。静态测量信息量较少，基于静态测量数据的损伤检测方法的研究目前还处于发展阶段。但由于基于静态测量数据的损伤识别只需要结构的刚度特性即可对结构进行评估，而结构的静态测量数据与结构的刚度有关，因此如果有足够的测量数据就不难推算结构的刚度，从而对结构的损伤进行识别，识别的结果易于对结构损伤进行精确定位，且具有较高的精度和稳定性，同时静态数据测量所需的设备相对较便宜、测试精度较高，结构的精确变形或应变可以经济、准确的获得。

### 5.5 在役中小跨径拱桥承载力快速检评方法研究

传统荷载试验的主要检测参数为挠度及应变，由于本课题的研究思路是通过实测挠度来完成对拱肋的抗弯刚度进行修正，在修正过程中只用到了挠度这一实

测参数，基于在役中小跨径拱桥的技术特点，选取跨中挠度作为实测参数对拱肋的抗弯刚度进行修正。由于分析过程中只用到实测挠度这一参数。因此，实桥测试中，只需测试拱肋的挠度，加载位置应使挠度达到最不利。考虑到拱桥对于挠度不敏感的特点，选取跨中挠度作为实测参数。实际加载位置按跨中挠度达到最不利即可。实桥测试过程中可以不进行应变测试，挠度的测点也大大减少，极大地提高了荷载试验的效率，最终达到在役中小跨径拱桥承载力快速检评目的。

固有频率是结构模态参数中最容易获得的，且识别精度高，频率测量的误差较振型和阻尼小。随着结构刚度的降低，结构的固有频率将会增大。利用这一特性，很多研究者将固有频率作为结构损伤识别的标识量。通过比较，认为结构固有频率对结构损伤探测是一个很好的依据。

针对中小跨径钢筋混凝土拱桥的技术特点，结合固有频率容易获取、且识别精度高、测量误差小、测试速度快的特点，本课题选取固有频率作为检测参数，进行中小跨径钢筋混凝土拱桥承载力快速评定研究。

## **5.6 中小跨径桥梁承载能力快速检测的设备开发或选型、组配**

根据前述的检测方法和检测设备，给出推荐方案：

### **5.6.1 简支桥及连续桥**

方案一：桥梁挠度的测量采用机电百分表，应力应变的测量则采用应变片和日产TDS—602数据采集仪，混凝土强度检测仪采用回弹法的回弹仪，混凝土裂缝宽度的测量采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度的测量采用塞尺。

方案二：桥梁挠度的测量用全站仪测量法的徕卡全站仪，应力应变仍然采用电测法里面的应变片和日产TDS—602数据采集仪测量，混凝土强度检测仪采用回弹法的回弹仪，混凝土裂缝宽度的测量采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度的测量采用塞尺。

方案三：桥梁挠度的测量用精密水准仪测量法中的国产精密水准仪，应力应变仍然采用电测法里面的应变片和日产TDS—602数据采集仪测量，混凝土强度检测仪采用回弹法的回弹仪，混凝土裂缝宽度的测量采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度的测量采用塞尺。

方案四：桥梁挠度用倾角仪测量法的QY倾角仪，应力应变的测量采用电测法中的应变片配合日产TDS—602数据采集仪测量，混凝土强度强度检测采用回弹

仪，混凝土裂缝采宽度采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度的测量采用塞尺。

方案五：桥梁挠度用光电法中的BJQN型光电图像式挠度检测仪，应力应变采用光测法中的非接触式视频测量仪，混凝土强度检测采用超声波检测里面的混凝土超声波检测仪，混凝土裂缝宽度采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度采用智能型深度检测仪。

方案六：桥梁挠度用倾角仪测量法里面的QY倾角仪，应力应变采用光测法中的非接触式视频测量仪，混凝土强度检测采用回弹法里面的回弹仪，混凝土裂缝宽度采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度采用塞尺测量。

以上六套方案均可以使用，其中方案五最为可靠、高效的检测方案，但是造价高。对于桥下的净空有限制，不能搭设稳定支架的桥梁，方案一不能满足测量要求。方案二及方案三在测量时误差相对较大，因此需要对结果进行修正。

### 5.6.2 对钢筋混凝土拱桥

方案一：桥梁挠度的测量采用机电百分表，应力应变的测量则采用应变片和日产TDS—602数据采集仪，混凝土强度检测仪采用回弹法的回弹仪，混凝土裂缝宽度的测量采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度的测量采用塞尺。

方案二：桥梁挠度的测量用全站仪测量法的徕卡全站仪，应力应变仍然采用电测法里面的应变片和日产TDS—602数据采集仪测量，混凝土强度检测仪采用回弹法的回弹仪，混凝土裂缝宽度的测量采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度的测量采用塞尺。

方案三：桥梁挠度的测量用精密水准仪测量法中的国产精密水准仪，应力应变仍然采用电测法里面的应变片和日产TDS—602数据采集仪测量，混凝土强度检测仪采用回弹法的回弹仪，混凝土裂缝宽度的测量采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度的测量采用塞尺。

方案五：桥梁挠度用光电法中的BJQN型光电图像式挠度检测仪，应力应变采用光测法中的非接触式视频测量仪，混凝土强度检测采用超声波检测里面的混凝土超声波检测仪，混凝土裂缝宽度采用裂缝宽度检测仪，裂缝深度采用智能型深度检测仪。

以上推荐的四套方案均可以量测钢筋混凝土拱桥，其中方案五的检测效率最高、检测结果精确可靠，方案一及方案二的性价比较高、检测数据可靠，检测规

程也较为成熟，为广大检测人员所接受。

## 6 模型修正方法及承载力评定研究

### 6.1 钢筋混凝土模型修正方法及承载力评定

此部分研究提出了一种基于静力试验的检测方法，此法是通过静力测试，对钢筋混凝土桥梁的刚度及相关检测参数进行研究，提出通过修正 RC 梁桥名义配筋率的方法进而得到桥梁的承载力的计算方法。并在此理论方法的基础上通过 C++ Builder 编程平台对计算过程程序化，编制出一个针对钢筋混凝土梁桥承载力的计算程序。并通过对钢筋混凝土空心板梁及全桥的模型试验研究分析中，验证承载力评定方法的可行性及计算程序的可靠性及准确性。对于在大量在役带损伤钢筋混凝土桥梁的评价中，具有很高的实用价值。

### 6.2 预应力混凝土模型修正方法及承载力评定

(1) 对分析桥梁结构短期刚度常用的直线双线性法、有效惯矩法、曲率积分法、《PPC 建议》法、公路桥梁设计规范方法等进行对比研究，采用中国规范的计算公式并反推桥梁结构的抗弯刚度；对计算有效预应力时常用的基于灵敏度分析法、基于建模分析法、基于静力分析法、基于动力分析法及检测有效预应力时常用的直接法、SSRHT 法、形状记忆合金技术、声发射技术和静力学原理检测技术等对比分析，建议采用预应力钢索张力测试仪检测在役桥梁有效预应力。

(2) 提出预应力梁桥的抗弯刚度受张拉力影响的观点，通过对室内模型试验及 ANSYS 软件仿真结果分析的探讨，分析有效预应力与预应力梁桥抗弯刚度间的数值关系，在中国规范短期挠度计算方法的基础上提出预应力结构通用的刚度修正公式，并作为计算结构实际抗弯刚度的依据。给出预应力梁实际抗弯刚度与其截面形式、截面尺寸、计算跨径及外荷载位置等因素的拟合方程，据此提出针对中小跨径预应力梁桥的刚度推算方法。

(3) 从传统荷载试验中实测静力性能参数的方式出发，以常用横向分布系数计算方法为分析手段，提出不考虑校验系数影响的基于挠度绝对值的刚度分解法和考虑校验系数影响的基于挠度比值的刚度分解法。两种方法修正后的纵梁刚度均符合在役桥梁实际刚度分布状态，基于挠度绝对值的刚度分解法更为简单。

### 6.3 钢筋混凝土肋拱桥梁模型修正方法及承载力评定

结合在役中小跨径拱桥结构简单、截面应力易于用数学表达式表示且内力与应力的关系式较为简单等特点，以满足实桥工程评价需求精度为目标，拟采用测量误差最小准则或传递误差最小准则算法，重点研究在检测过程中的最优测点布置及最小测点数量问题，从而达到检测参数的快速获得及筛选的目标。

针对中小跨径拱桥的共同特点，以检测实施过程中突出方法快速无损的优点为核心，实施静力参数检测。

在静态测试中重点对优化控制断面在移动活载下的竖向挠度影响线进行检测，通过实测和理论影响线的对比，建立起结构整体损伤程度与静力特性参数的相关关系。

整桥测试得到的结构静力特征反映的是由各片拱肋组合而成的全桥综合等效刚度，而在桥梁承载力检测及使用性能评估中，往往是某片单肋的特征制约了全桥的系统状态。依托模型试验实测的挠度参数、模态参数分析，结合荷载横向分布静力分解的概念，研究出整桥力学模型分解为拱肋力学模型的合理简化模式，达到空间复杂问题简化为平面的简单问题的目的，使全桥承载能力评估转化为拱肋承载力评定。

## 7 中小跨径桥梁承载能力快速检评系统

### 7.1 在役中小跨径钢筋混凝土桥梁承载力快速检评系统

根据基于静力试验RC梁桥承载能力评定理论，即通过刚度和配筋率修正进而评定桥梁承载能力的理论方法为基础，通过Borland C++ Builder 编程平台编制了基于静力—挠度的在役中小跨径钢筋混凝土梁桥承载能力评定系统。见图7-1。点击进入系统即可进入本计算系统主界面如图7-2所示。针对钢筋混凝土梁桥常用的板梁、T型梁及空心板截面梁提供了各自的截面数据输入界面。如图7-3~7-5。为了使钢筋混凝土梁桥承载能力评定可应用于更多类型的截面梁，本系统提供了其他截面特性计算界面，同时为了使应用本系统对全桥承载能力评价更为快速，本程序提供了计算横向分布系数界面。在静力测试得到相应检测参数后，即可根据本系统为钢筋混凝土桥梁承载能力评定提供计算手段。定量的为桥梁的承载能力评价提供计算支持。





图 7-1 承载能力评定系统起始界面

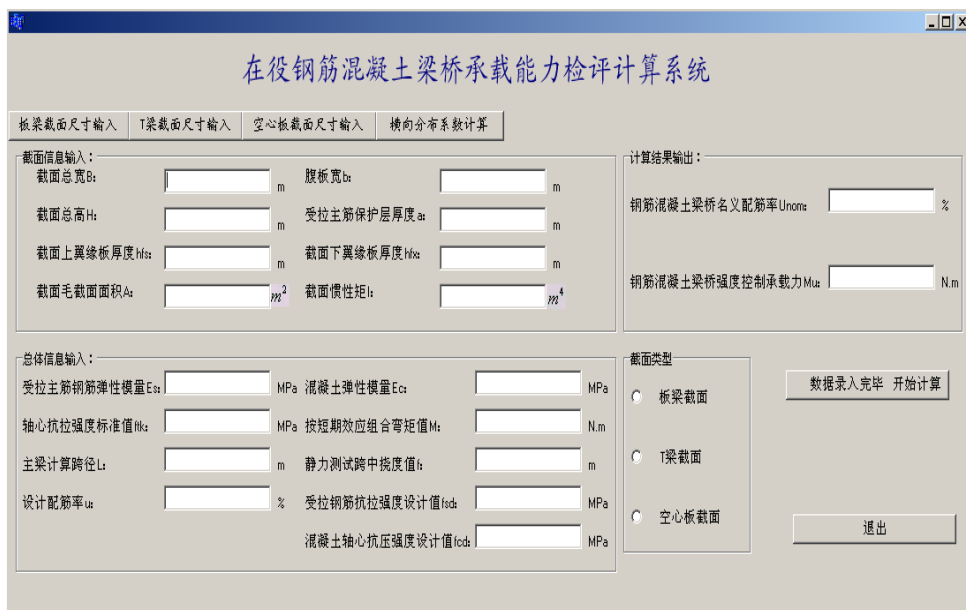


图 7-2 钢筋混凝土梁桥承载能力检评计算系统主界面

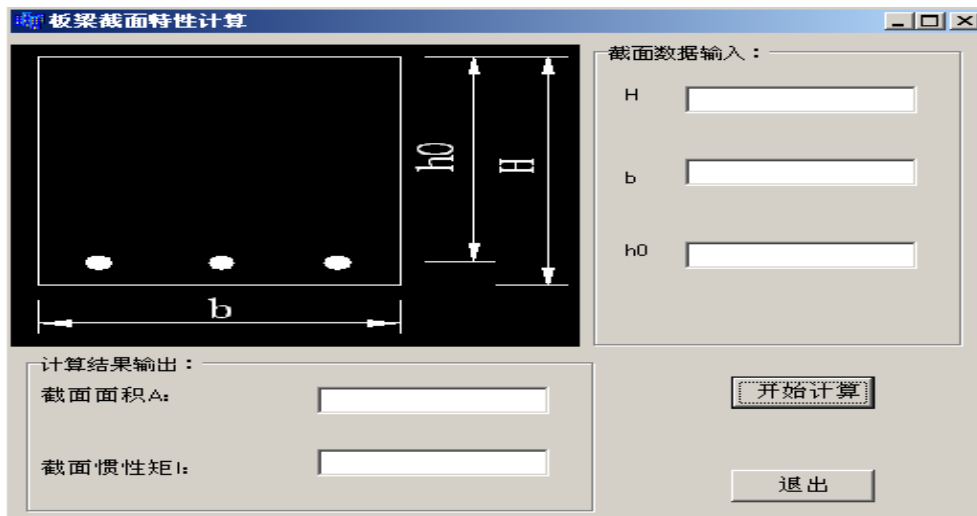


图 7-3 板梁截面尺寸输入及截面特性计算界面

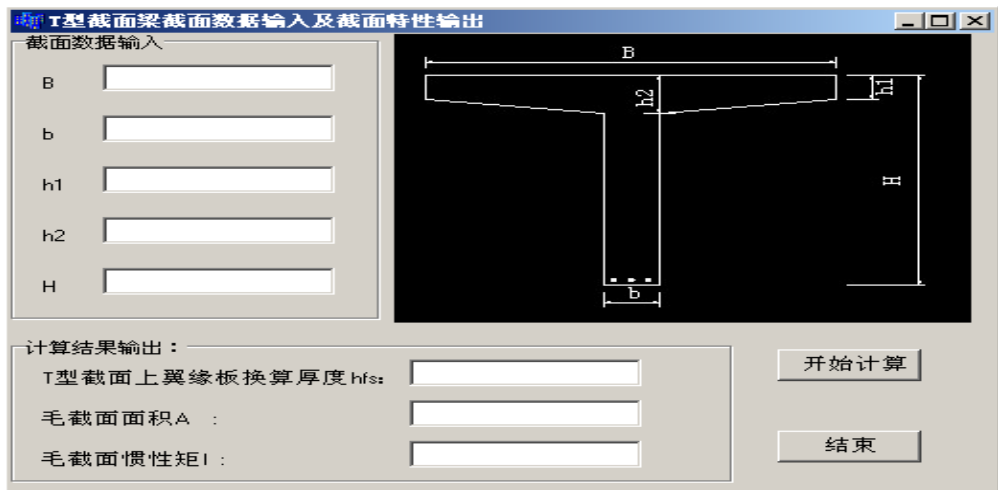


图 7-4 T 梁截面尺寸输入及截面特性计算界面

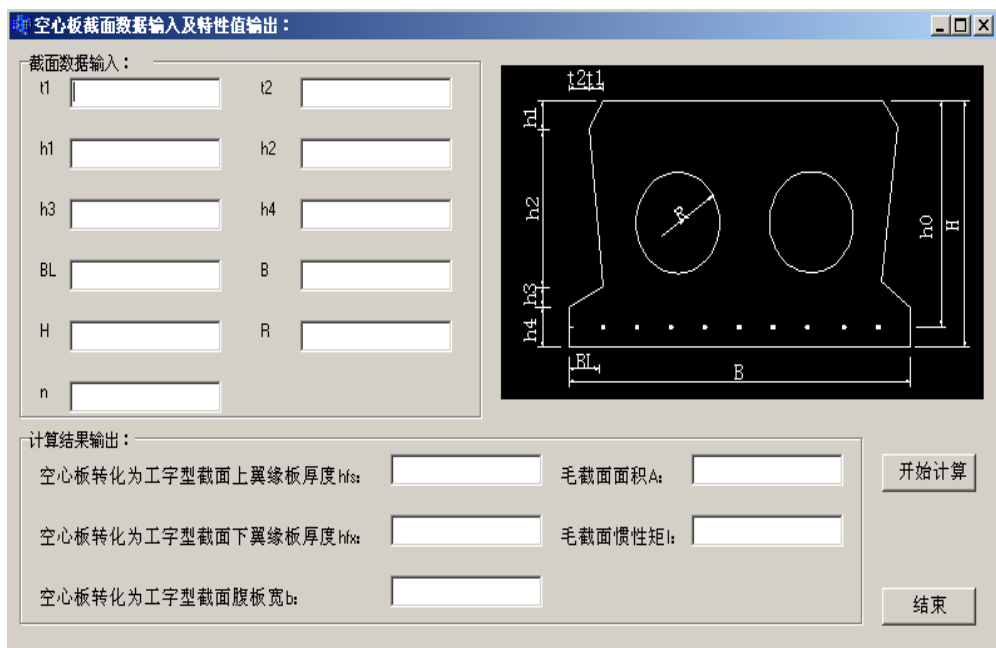


图 7-5 空心板截面尺寸输入及截面特性计算界面

## 7.2 在役中小跨径预应力混凝土桥梁承载力快速检评系统

为提高桥梁检测及评定效率，缩短在役桥梁承载能力计算时间，笔者编制了基于静力—挠度的中小跨径在役预应力梁桥承载能力评定系统（如图7-6所示）。该系统包含中小跨径预应力简支梁桥从荷载试验方案设计到承载能力计算全过程的四个子系统，分别为公路桥梁荷载试验方案智能设计系统（如图7-7~图7-10所示）、简支梁刚度分解系统（如图7-11~图7-12所示）、简支梁纵向刚度分段求解系统（如图7-13所示）及在役预应力梁桥承载能力计算系统（如图7-14~图7-15所示）。



图 7-6 承载能力评定系统总界面

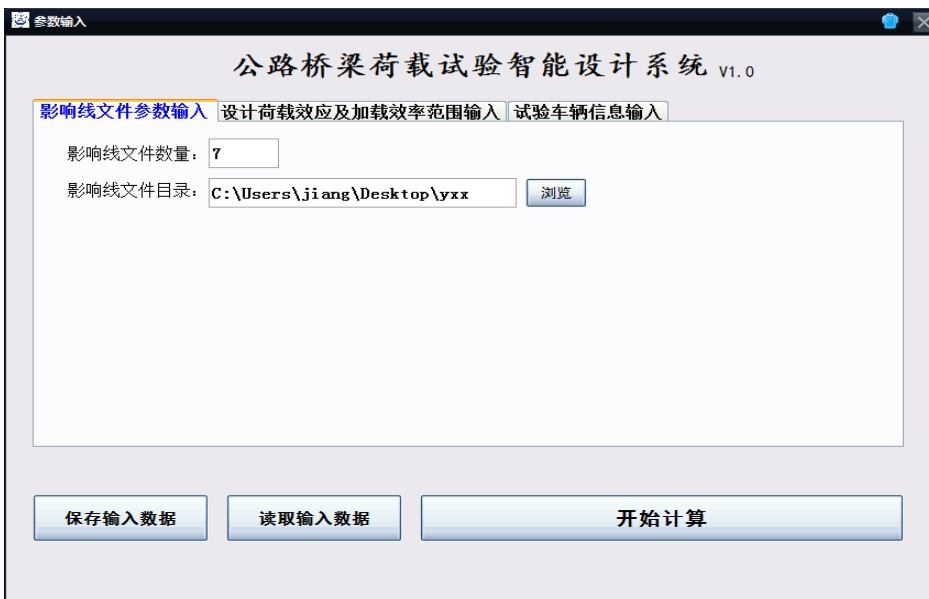


图 7-7 荷载试验方案智能设计系统界面 1



图 7-8 荷载试验方案智能设计系统界面 2



图 7-9 荷载试验方案智能设计系统界面 3



图 7-10 横向刚度分解系统界面 1



图 7-11 横向刚度分解系统界面 2



图 7-12 横向刚度分解系统界面 3



图 7-13 纵向刚度分段求解系统界面

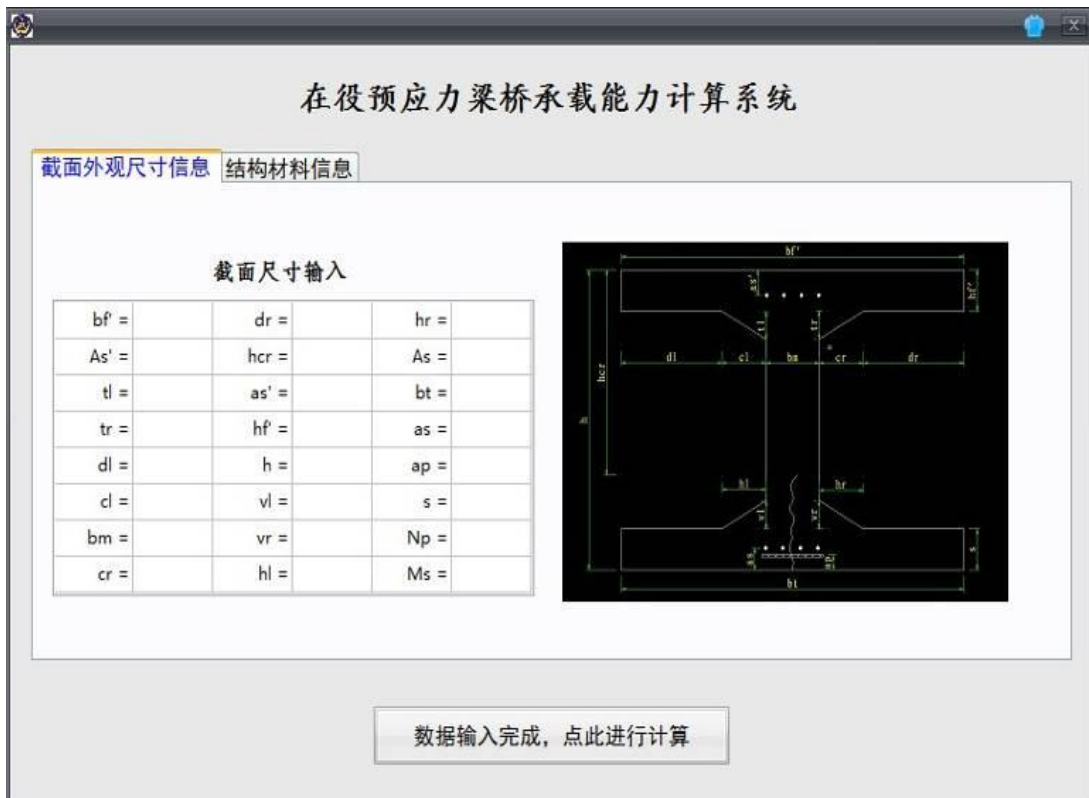


图 7-14 承载能力计算系统界面 1



图 7-15 承载力计算系统界面 2

## 8 在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术实桥应用

为了是研究成果的科学性和实桥应用的适用性和可靠性，课题组排除困难，使课题的依托工程由原计划的 5 座桥梁，增加到 17 座中小跨径桥梁做为课题成果应用实桥，包括钢筋混凝土梁桥、预应力混凝土梁桥、钢筋混凝土拱肋拱桥。具体见表 8-1。

项目研究提出的在役中小跨径桥梁优先检测的模糊分级法，按中小跨径桥梁存在病害的程度分析主要承重构件承载力下降的因素，以桥梁维护单位按《公路桥涵养护规范》所提供的基础数据，引入积型均衡函数推导出的变权公式，对桥梁构件的权重进行调整，采用串联系统模糊评判法评判串联构件的等级隶属向量则确定建立桥梁承载力指标评价体系，对在役中小跨径桥梁承载力提出优先需要进行快速检测判断实施的指标范围及等级，桥梁管理部门维护决策提供依据，并与养护规范评定结果做对比，证明课题研究成果具有良好的适用性和可靠性。

表 8-1 依托工程项目

序号	依托工程名称	地点	结构形式
1	三殿桥	陕西省西安市	现浇预应力混凝土连续箱梁
2	穆将王立交桥	陕西省西安市	三联现浇钢筋混凝土连续箱梁
3	小峪河中桥	陕西省西安市	预应力空心板
4	汤浴河中桥	陕西省西安市	预应力空心板
5	大峪河桥	陕西省西安市	三跨预应力混凝土连续箱梁
6	大沙沟桥	宁夏回族自治区石嘴山市	钢筋混凝土简支 T 梁
7	清水河桥	宁夏回族自治区同心县	20m 钢筋砼装配式简支 T 型梁桥
8	太子河大桥	辽宁省鞍山市海城县	30m 的后张法预应力砼简支梁
9	五家子桥	辽宁省京沈线彰武县	19.5m 的钢筋砼简支 T 梁
10	碧流河桥	辽宁省庄林线上	4 孔净跨 30m 的实体板拱桥
11	暖泉桥	盖梁线 K10+291 处	6 孔空腹式双曲拱桥
12	曲河桥	京哈线 K393+539.9 处	4 孔净跨径 20m 的圬工拱桥
13	马前寨桥	黑大线 K1156+758	钢筋混凝土带翼缘空心板
14	中寨子桥	黑大线 K1158+334	钢筋混凝土带翼缘空心板
15	下寨子东桥	黑大线 K1161+000	钢筋混凝土带翼缘空心板
16	下寨子西桥	黑大线 K1163+765	钢筋混凝土带翼缘空心板
17	高砬子桥	黑大线 K1164+519	钢筋混凝土带翼缘空心板

通过依托工程的验证，中小跨径钢筋混凝土梁桥承载力计算系统（V1.0）能够通过静力测试结果，运用横向分布模型修正法理论，计算模型桥各片梁在开裂损伤后的荷载横向分布系数，进而计算模型桥各片梁的名义配筋率，从而将模



型桥的承载能力评定转化为模型单梁的承载能力评定。对所提出的承载力评定方法，通过快速检评计算软件进行计算分析，经过单梁和模型桥的试验验证，该评定方法实用、可行，该快速检评计算软件准确、可靠。

基于挠度的中小跨径预应力混凝土梁桥承载力评定系统（V1.0）可以以加载试验中实测静力性能参数的出发，以常用横向分布系数计算方法为分析手段，给出简支梁纵向刚度分段求解方程组，并以此作为求解预应力梁桥刚度纵向分布、反映实际结构纵向损伤分布状况及损伤程度的依据。引入名义预应力束面积的概念综合反映当前结构的平均工作性能，并结合结构实际刚度和实测有效预应力值计算残余承载能力，增加反映实际结构有效预应力和承载能力储备度的消压度和承载度的概念，建立适用于各类预应力结构的残余承载能力分级评价指标体系。

基于快速检测法评定 RC 梁桥承载力计算系统（V1.0）通过结合桥梁外观调查（裂缝统计特征）与动力试验中实测的桥梁结构振动参数（固有基频）由动力分解法将整桥的评定问题转化到单梁抗弯承载力评定。本技术的特点是通过实桥外观检测和评定，建立起实桥裂缝统计样本；利用汽车行驶激励或汽车越过障碍物激励、环境激励等方法，实测并采集分析桥梁结构的模态参数。按照“结构基频和裂缝特征→刚度→名义配筋率→抗弯能力”的技术途径，利用快速评定专用软件对钢筋混凝土实际桥梁承载能力进行评定。

经过 17 座实桥试验验证，证明课题研究成果实用、可行，该快速检评计算软件准确、可靠。

## 9 在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术应用手册

本课题从在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术设备的选型、组配方案及检测设备的操作规程等方面编制了完善的技术应用手册，该手册包括分类快速检测技术操作规程，不同类型桥梁承载力快速评价方法，快速检评系统实桥应用及评价示例。该技术应用手册具有可操作性，各项检测过程细化到操作规程的深度，并附有检测评价示例，可作为桥梁养护管理人员在中小跨径桥梁承载力检测及评定工作中的使用。

## 10 结束语

本项目从立项到完成经历了四年的时间，作为针对西部地区在役中小跨径桥梁承载力快速评定技术研究的专项研究项目，课题组认为研究成果的特点是系统性和工程适用性，尤其是用于指导在役中小跨径混凝土桥梁承载力检测技术的《在役中小跨径桥梁承载力快速检评技术应用手册》凝聚了课题组全体成员的心智与汗水，是项目研究成果精华的集中体现。

本项目共提交九本报告，一本应用手册。由于课题组成员水平有限，在报告中肯定有不少错误和疑问之处。在此恳请专家提出批评改正意见。