

西部交通建设科技项目

交通编号:

合同号: 2007 318 822 31

单位编号:

密 级:

分 类 号:

# 西部地区在役混凝土梁桥结构体系 时变可靠度分析与评价方法的研究

## 研究报告 (简本)

同济大学

长沙理工大学

长安大学

重庆交通科研设计院

上海公路工程质量检测中心

重庆市市政设施管理局

2011 年 12 月

# 目 录

<b>1 前言</b> .....	<b>1</b>
<b>2 研究概况</b> .....	<b>2</b>
2.1 研究目的.....	2
2.2 研究内容和技术路线.....	2
<b>3 国内外研究现状及发展趋势</b> .....	<b>3</b>
<b>4 主要科技成果</b> .....	<b>4</b>
4.1 混凝土梁桥抗力时变模型.....	4
4.2 特定地区随机车辆荷载模型的建立方法.....	4
4.3 在役 RC 梁桥构件的时变可靠度评估方法与关键问题.....	5
4.4 梁桥体系的可靠度分析方法与计算方法.....	6
4.5 多梁式 RC 简支桥体系的时变可靠度评估模型.....	6
4.6 在役桥梁基于时变可靠度的管养策略优化方法研究.....	7
4.7 混凝土梁桥体系时变可靠度专用软件.....	8
4.8 基于时变可靠度理论的在役混凝土简支梁桥性能评价指南.....	8
<b>5 技术创新点及比较分析</b> .....	<b>9</b>
5.1 考虑空间变异性的在役混凝土梁桥构件可靠度评估方法.....	9
5.2 多失效机制在役混凝土简支梁桥的体系模型及相关计算方法.....	9
5.3 简支梁桥体系时变可靠度评估指南.....	10
5.4 基于时变可靠度的体系与网络级管养策略优化方法.....	10
<b>6 研究成果工程应用成效</b> .....	<b>11</b>
<b>7 结语</b> .....	<b>12</b>
<b>8 致谢</b> .....	<b>13</b>

## 1 前言

经过近几十年的快速发展，在役桥梁的数量迅速增加，受到使用、管养等因素影响，其中一些退化加速，桥梁可靠性降低，部分比较严重的桥梁甚至不能保证运营安全，引发一些桥梁安全事故。

加强对在役桥梁的科学管养，必须基于在役结构实际抗力和荷载特性，并科学合理地考虑其退化过程，目前评估过程中对体系时变性的考虑是薄弱环节。从国内外的发展趋势看，体系可靠度、时变可靠度的基本计算方法有所发展但应用不多。在可靠度方法的基础上，开展有关时变可靠度和体系可靠度方法的研究工作，尤其找准这些前沿方法与实际工程应用的切入点是一项具有重要的工程价值和科学意义的研究工作。

鉴于此，交通部组织开展西部交通科技建设项目研究——“西部地区在役混凝土梁桥结构体系时变可靠度分析与评价方法的研究”（合同编号：2007 318 822 31）。项目由同济大学承担，参与单位包括：长沙理工大学、长安大学、重庆交通科研设计院、上海公路工程质量检测中心、重庆市市政设施管理局。项目研究内容由6个子课题组成，研究时间自2007年7月至2010年12月，共计三年五个月。

## 2 研究概况

### 2.1 研究目的

结合前述背景，本项目的研究目的为建立和完善混凝土梁桥体系时变可靠度的主要计算方法及其计算工具；建立基于时变可靠度理论的在役混凝土梁桥结构体系的性能评价指南；建立基于时变可靠度理论的混凝土梁桥管养策略优化方法及依托工程应用。

### 2.2 研究内容和技术路线

根据项目任务书的要求，本项目分6个专题，研究内容包括：考虑西部地区特点的混凝土梁桥材料性能时变模型研究；西部地区桥梁车辆荷载模型研究；混凝土梁桥体系时变可靠度计算方法和评价理论；混凝土梁桥时变可靠度专用软件开发及其工程应用；西部地区在役桥梁基于时变可靠度的管养策略优化方法研究；基于时变可靠度理论的在役混凝土梁桥的性能评价指南等。

项目总体技术路线如下图：

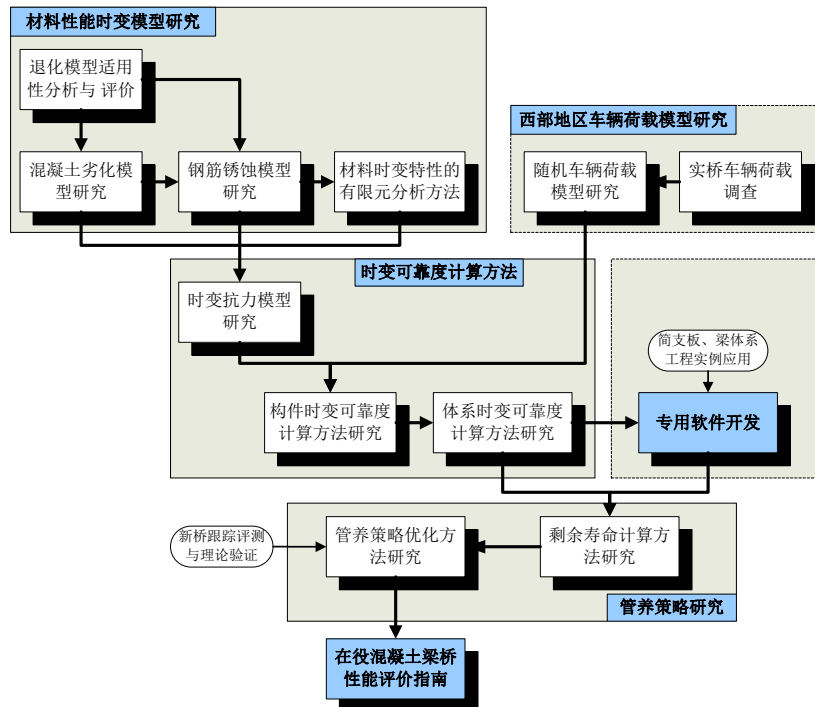


图 2-1 项目总体技术路线

### 3 国内外研究现状及发展趋势

在役混凝土桥梁的安全性和管养优化问题，已引起世界各国的高度关注。

对于在役混凝土梁桥状态评估方法方面，各国已有一些桥梁管养方法与流程指南，包括基于专家评分建立的变权综合评定法、荷载试验评定法、分析计算评估方法、直接概率评价法等。对于荷载和结构状态变化的分析、描述、建模、评估是目前研究的重点。基于可靠度方法是在役梁桥承载能力评估中的主要发展方向，尤为强调在评估方法中对于材料和抗力时变特性以及对结构体系性能的考虑。

在构件可靠度方面，基本计算方法比较成熟，但将其引入在役桥梁评估时，受到在役结构的退化、以及实际作用荷载复杂多变的影响，相关计算方法有待进一步的补充和发展。时变可靠度基本的计算方法清晰，已有大量描述混凝土退化特性及退化后材料性能模型。对这些模型的适用性进行统一的校验和比选，成为混凝土梁桥时变可靠度计算的基础性工作之一。空间变异性的影响也是在役构件可靠度评估中需要关注的问题；考虑空间变异性后，还需要关注构件在时效模式方面可能发生的变化。

在体系可靠度方面，主要问题集中在体系失效识别未能与工程实际结合；同时体系失效计算方法复杂，有待深入研究，提高计算效率。

在桥梁管理方面，目前的管理系统以信息收集和统计为主，退化预测、决策辅助，路网优化等功能快速发展，其中对桥梁性能的评价以定性评估为主，一些最新研究成果，较难与实际工程结合。同时，应用体系时变可靠度作为管养策略优化输入条件的管养系统尚不多见。

因此，开展在役桥梁体系时变可靠度及优化策略的研究工作，特别是形成可以指导具体工程实践成果具有重要的理论和实际意义。

## 4 主要科技成果

### 4.1 混凝土梁桥抗力时变模型

项目研究中首先梳理了已有混凝土梁桥典型构件的退化模型,对退化模型的思路通用性作出评价;在比较了国内外近 70 篇文献和分为了西部地区 10 余座在役桥梁实测数据的基础上,特别针对混凝土碳化、混凝土强度、混凝土钢筋锈蚀、锈蚀钢筋屈服强度降低系数、锈蚀钢筋混凝土协同工作系数、氯离子侵蚀、混凝土冻融等几个关键的模型和参数,通过计算结果比较、实桥数据校验等方法,深入分析 30 余个计算模型对于西部地区桥梁结构的实用性,建议了合理的计算假定和参数取值,推荐可用于后续时变可靠度评估的混凝土劣化过程时变模型。

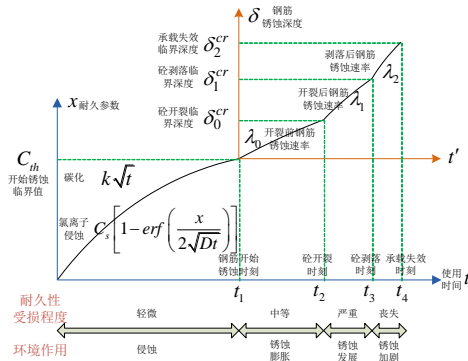


图 4-1 RC 结构的退化模型

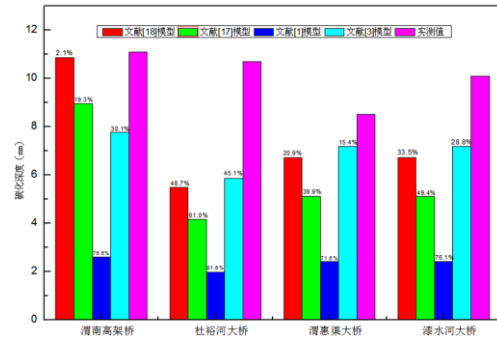


图 4-2 碳化理论计算值与实测值对比

### 4.2 特定地区随机车辆荷载模型的建立方法

项目研究全面调研了国内外近年来关于车辆荷载的相关研究,选用了动态称重方法(WIM)和随机车流模拟技术开展研究工作。对车速、车重、车头时距等车辆荷载相关特性和交通组成、交通流量等车流相关特性进行了统计、分析和拟合,掌握了西部地区现有运营车辆及高速公路运营车流的荷载特性;建立了相关参数模型。利用研究获得的WIM数据,基于Rice公式外推极值方法,得到了各种重现期下的车辆荷载效应,在此基础上比较了不同跨径简支梁(10m-35m)和二等跨连续(75m-135m)关键截面不同重现期下的汽车荷载效应值与设计规范计算值的差异。说明建立特定地点随机车辆荷载模型对评估具有重要意义。研究中总结了基于实测数据,建立特定地点随机车辆荷载模型的方法;特定地点的车辆荷载模型可作为时变可靠度评估过程中车辆荷载时变模型使用。

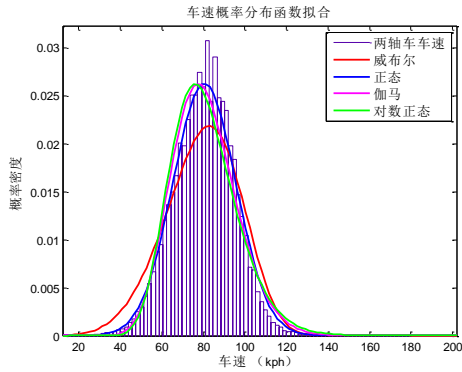


图 4-3 两轴车车速分布拟合

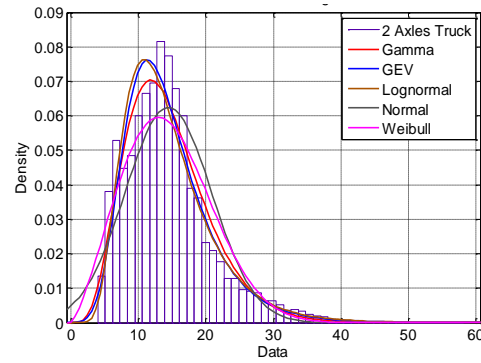


图 4-4 2 类车车重分布拟合

### 4.3 在役 RC 梁桥构件的时变可靠度评估方法与关键问题

项目研究以承载能力极限状态为目标，按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG D62-2004），建立了混凝土简支梁桥中常见受力构件各功能主要失效模式及其相应的功能函数库。在一般构件可靠度求解方法的基础上，提出了考虑抗力和荷载效应时变条件下的在役桥梁构件可靠度计算方法

特别是针对时变过程可能出现的底层参数和结构抗力的空间变异性问题，开展了相关算法的研究。底层参数和退化空间变异性均对构件可靠度产生影响。在役结构退化后的材料性能呈空间各异随机场分布，基于材料均匀假设的单一控制截面评估方法不再适合。研究利用相关系数方法，建立了考虑参数空间变异的评估方法，提高了评估精度。目前的评估方法中，认为梁桥破坏是由于纯粹的一种功能失效，弯剪相互独立，互不影响。研究中利用数值方法研究了弯剪耦合作用对构件极限状态的影响，研究表明：纯弯、纯剪处的抗力只反映了梁桥部分性能，弯剪耦合区域的抗力规律对桥梁实际的运营安全有重要影响；考虑弯剪耦合作用，可明确将失效模式分为弯曲破坏、剪切破坏、弯剪耦合破坏，便于有针对性的制定结构修固计划，可进一步保证构件安全。

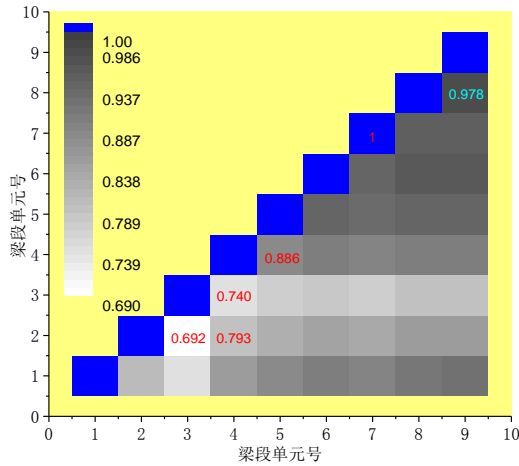


图 4-6 考虑空间变异性的概率评估

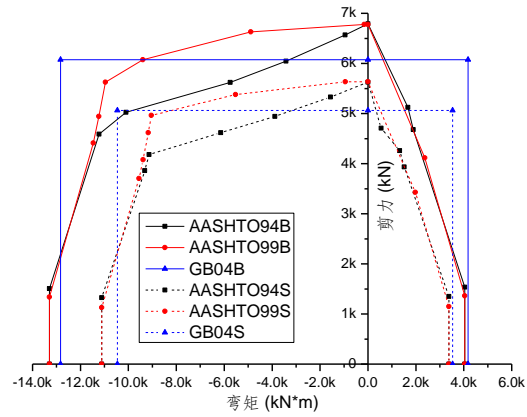


图 4-7 AASHTO 规范和我国 GB04 规范对弯、剪抗力的考虑

#### 4.4 梁桥体系的可靠度分析与计算方法

体系的时变可靠度评估应能够科学反映结构承载的安全性以及结构传力机理在寿命周期内的随机性、变化性，以及变化的延续性。研究进一步明确了梁桥体系时变可靠度评估的基本要求和方法，明确了整体评估理论体系。研究针对所建立的多梁式 RC 简支桥体系的时变可靠度评估模型，对现有体系可靠度算法进行比选与改进，深入研究了自适应重要抽样法、充分考虑相关系数影响的 PCM 和 IPCM 方法、基于失效边界特性的体系可靠度计算方法等三种体系可靠度分析的计算方法，大大丰富了计算工具。

#### 4.5 多梁式 RC 简支桥体系的时变可靠度评估模型

多梁式简支梁桥上部结构主要考虑主梁和横向联系。体系模型的基本模型单元应以多梁破坏模式为基础，同时考虑横向联系失效时可能引起的单梁破坏模式。多梁失效模式主要针对延性的弯曲失效机制，而脆性的剪切失效机制将导致构件失效即结构承载功能丧失。可采用如下图的基本拓扑单元模型，研究中还进一步完善了该模型的相关算法。



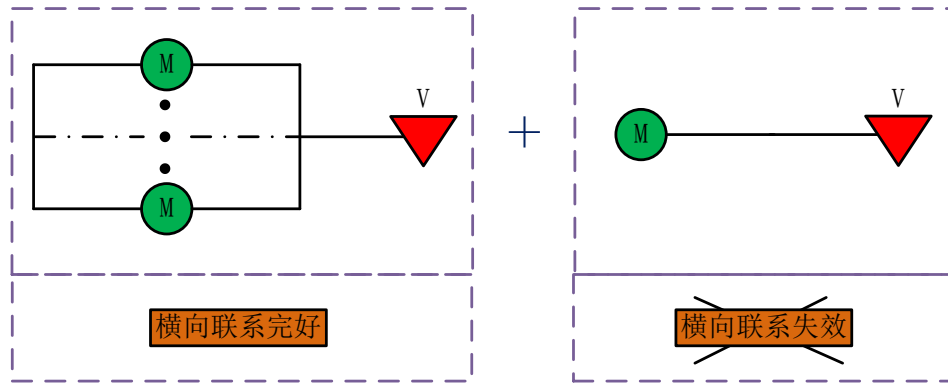


图 4-8 多失效机制评估模型的基本拓扑单元

根据上述一般模型和定量分析方法，结合实验与数值分析，建立了简支 T 梁桥上部结构的评估模型。装配式板桥通过铰接缝连接，主梁间的相互协作明显弱于 T 梁体系。考虑到轴距与板宽之比，因此建议并联主梁根数偏载取 2，中载取 3。

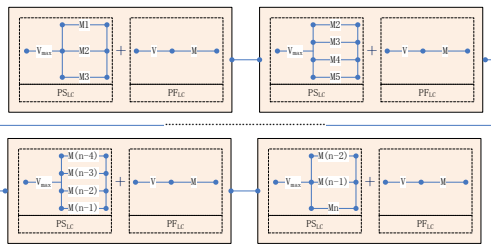


图 4-9 简支 T 梁桥体系模型

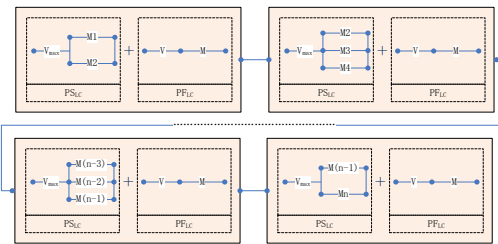


图 4-10 简支板梁桥体系模型

在分别建立简支梁桥上部结构和下部结构的体系模型后，可用串联的方式将两者连接起来，形成新的体系模型。

#### 4.6 在役桥梁基于时变可靠度的管养策略优化方法研究

将时变可靠度技术集成到管养技术中是本项目研究成果应用的重要内容之一。项目在这方面的研究成果主要包括：研究基于时变可靠度的在役桥梁剩余寿命的确定方法，使得管养者的意愿集成到管养优化过程中，解决了工程应用中的难题，发展了剩余寿命期内单独桥梁管养策略优化方法；针对管养策略优化问题，实现了基于穷举算法的维护策略下的管养效果优选，发展了基于可靠度的桥梁网络养护策略优化方法。研究了综合考虑桥梁时变可靠度和道路网络连通性的优化方法，计算效率高，可供网络级桥梁管养策略优化使用。

## 4.7 混凝土梁桥体系时变可靠度专用软件

对课题主要技术与方法实现了程序化,对繁琐的时变体系可靠度计算工程进行程序封装,给用户方便的使用界面,以推动混凝土梁桥结构体系时变可靠度的实际应用。

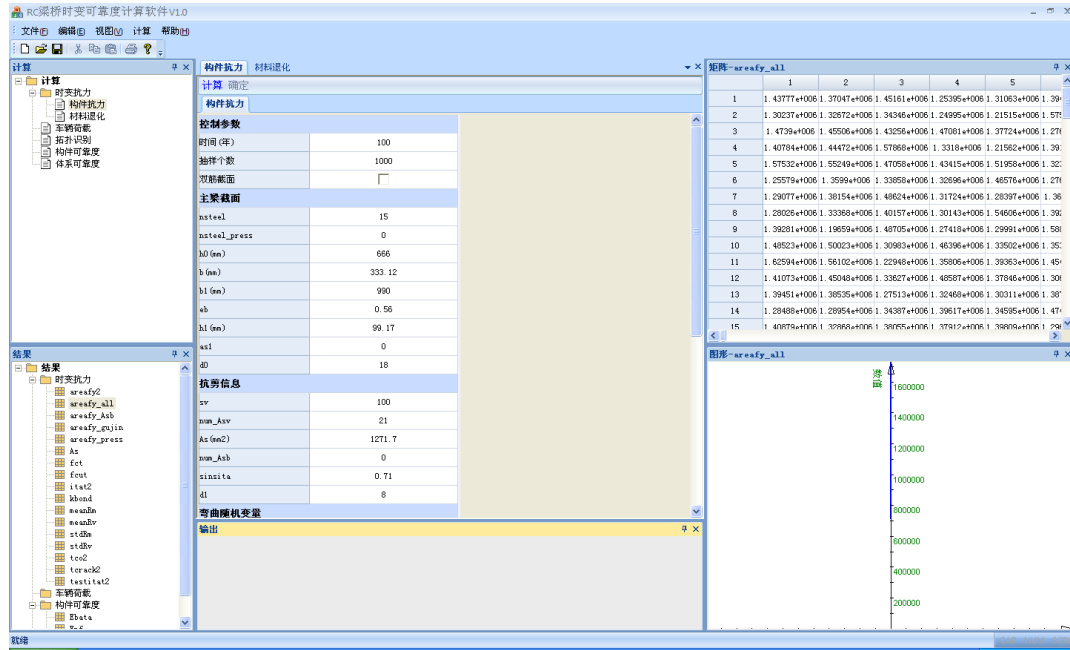


图 4-11 专用软件界面

## 4.8 基于时变可靠度理论的在役混凝土简支梁桥性能评价指南

为系统总结本课题的研究成果,同时为在役混凝土梁桥的评估工作提供有效的指导,课题编写了《基于时变可靠度理论的在役混凝土简支梁桥性能评价指南》。

## 5 技术创新点及比较分析

### 5.1 考虑空间变异性的在役混凝土梁桥构件可靠度评估方法

对于在役构件不均匀退化后可能产生的结构参数、材料特性、工作模式等方面的不确定性问题，研究中引入多维随机场方法，采用相关矩阵方法量化表达桥梁性能退化过程的不均匀性，科学描述了钢筋混凝土构件退化过程的不确定性和空间变异性；建立了弯剪复合抗力概率模型，实现了弯剪耦合失效模式的可靠度计算；通过上述工作，进一步完善了钢筋混凝土构件时变可靠度计算方法，提高了构件评估的准确性。该方法的另一个特点是：计算所需要的基本参数可以与目前的无损检测结合起来，为这一方法的实用性推进提供了便利条件。

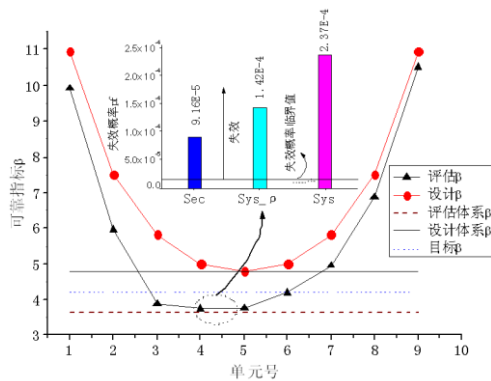


图 5-1 是否考虑退化的空间变异得到评价结果的比较

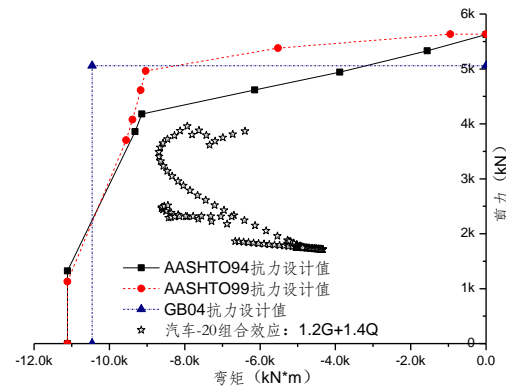


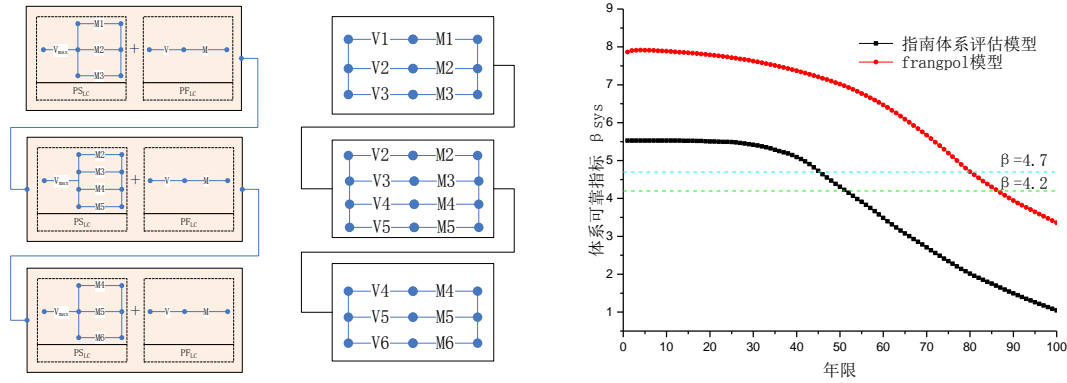
图 5-2 AASHTO 规范抗力设计值、我国规范抗力设计值与荷载效应的比较

### 5.2 多失效机制在役混凝土简支梁桥的体系模型及相关计算方法

目前用于体系可靠度分析的体系未能全面体现简支梁桥的各种失效模式，其串并联结构多数基于桥梁的物理连接形式，而未能体现结构在失效过程中的特性。

基于全概率公式，全面考虑主梁及横向联系对体系的作用，建立了一种新的体系拓扑基本单元，可以考虑体系失效的随机性和时变性，同时可以考虑体系时变的随机性。基于这一拓扑单元，提出了混凝土简支梁桥考虑多重失效机制的体系评估模型。

研究提出的多重失效机制在役混凝土简支梁桥体系模型及相关算法，体现了简支梁桥在运营过程中的各种可能破坏模式，为准确评估体系性能提供了有效工具。



b) 本文模型

b) Frangopol 模型

c) 不同体系计算结果比较

图 5-3 6 片 T 梁简支梁桥不同体系模型比较

### 5.3 简支梁桥体系时变可靠度评估指南

为了便于在实际工程中应用，通过对研究成果和工程应用经验的总结，编写了“基于时变可靠度理论的在役混凝土简支梁桥性能评价指南”。指南包括了简支梁桥评估常用的抗力相关模型、作用相关概率及时变模型、构件时变可靠度计算方法和关键问题、体系模型的建立及体系时变可靠度的计算方法等。

这一指南与现有设计规范中基本设计计算方法的理论基础基本保持一致，且注意了体系在役结构评估特点，便于在具体的评估实践中应用。

### 5.4 基于时变可靠度的体系与网络级管养策略优化方法

研究提出了基于时变可靠度的剩余寿命计算方法，进而提出了剩余寿命期内的管养策略优化系列方法；同时考虑到在多座桥梁组成的道路网路中各个桥梁的体系可靠度可能不同，研究提出了网络级桥梁管养策略优化方法。

本次研究架构的评估体系中用时变可靠指标代替传统的状态评分指标，从目前的构件级别提升到体系与网络级别，形成了新的评估和管养优化体系，有利于管理部门根据具体情况制定中长期管养策略，提高管养的科学指导性。

## 6 研究成果工程应用成效

本项目的依托工程分别处于干旱少雨的西北地区、潮湿多雨的西南地区，以及我国东部的上海地区，相应地代表了我国几种不同地区的气候自然条件。目前本课题征集到的依托工程见表 6-1。

表6-1 依托工程桥梁基本信息表

桥名	桥址	结构形式	跨径组合	通车时间
内环线高架桥 (30m T 梁)	上海市内环线 高架道路	简支“T”梁桥	30 (m)	1994 年
内环线高架桥 (22m 空心板)	上海市内环线 高架道路	简支板梁桥	22 (m)	1994 年
冲压厂高架桥	重庆市市区高架	多跨简支板梁桥	10×16+10×20 (m)	2001 年
魁星桥	重庆市市区高架桥	多跨简支“T”梁桥	11×24 (m)	1999 年
石坪立交桥	重庆市市区高架桥	多跨简支箱梁桥	8×16 (m)	2000 年
苦水河桥	宁夏省道 302 线	多跨简支“T”梁桥	6×20 (m)	1997 年
小河桥	宁夏省道石平线	多跨简支“T”梁桥	2×8+13 (m)	1991 年

对依托工程开展了体系时变可靠度的评估以及管养策略优化等应用研究工作，主要的应用体现在：

- 1) 通过对依托工程桥梁现场情况的调查，获得了材料退化的检测数据，修正抗力与荷载的相关计算参数和概率模型。
- 2) 通过对车辆荷载的调查，修正了评估过程的车辆荷载参数，验证了通过实地采集数据生成评估模型的具体方法。
- 3) 对依托工程桥梁开展了体系时变可靠度评估，提供了当前桥梁状态评估结果，给出了未来桥梁可靠性变化趋势，为制定后续管养对策提供了更多的参考。
- 4) 为部分桥梁提供了管养策略优化，供制定后续管养措施时参考。

## 7 结语

本项目建立了在役混凝土梁桥体系时变可靠度评估框架，形成了多梁式简支梁桥体系时变可靠度评估方法。项目研究形成研究报告 10 本、专著 1 本、发表论文 22 篇、培养研究生 9 名、形成软件著作权 1 项、编写指南 1 部、在 7 座桥中进行了工程应用。研究成果具有实用性和创新性，社会经济效益显著。

为保证这些研究成果的延续性，并使研究成果得到深化，建议在后续课题中开展如下方面的研究：

- 1) 进一步开展其他桥型体系时变可靠度问题的探索与研究。
- 2) 建议继续开展更多数量的实体工程的应用，积累数据和测试经验，尽早将时变体系可靠度评估方法纳入在役桥梁状态评估规程或规范。

## 8 致谢

感谢交通部西部交通建设科技项目管理中心对本课题研究所提供的经费支持和细致的课题管理,感谢各子课题单位对本课题研究给予的的大力配合和鼎力帮助。