

文章编号: 1002-0268(2006)04-0081-06

公路旧桥加固设计方法研究

王 茜, 王恩营, 徐 岳
(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 结合旧桥加固的特点和项目组多年来从事该领域的经验, 对公路旧桥加固方法和工程实践进行了系统的总结。同时, 对旧桥加固的基本原则、加固工作程序、加固技术经济指标分析方法、加固设计方案的比选原则与要求、常用桥梁结构加固方法、加固工序质量控制与竣工验收方法等进行了深入的研究, 形成了一套系统、规范、可行的公路旧桥加固技术体系。

关键词: 旧桥加固; 基本原则; 加固方法; 质量控制; 技术体系

中图分类号: U445.7*2

文献标识码: A

Researches on Strengthening Design Method of Highway Bridges

WANG Qian, WANG En-ying, XU Yue
(School of Highway, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710064, China)

Abstract: With characteristics and the study group's experience of bridge strengthening for years, strengthening ways of old highway bridges and engineering practice are summarized briefly. And basic principles, working routine, methods of economic analysis, principle and demand of scheme comparison, strengthening ways of bridge structures in common use, ways of quality control and final acceptance, and so on, are studied deeply. A systematized, normative and feasible techniques system of highway bridges strengthening technology is formulated.

Keywords: bridge strengthening; basic principles; strengthening ways; quality control; techniques system

0 概述

通过对国内外桥梁加固方法深入系统地归纳总结分析, 提出了桥跨结构粘贴钢板加固、预应力加固、增加构件加固和改变结构受力体系加固等 18 种加固方法, 墩台与基础中的扩大基础加固、增补桩基加固等 4 种加固方法, 共计 22 种加固方法。对每种加固方法分别从加固特点及适用条件、附加影响、材料要求、力学特点、设计计算、施工工序、构造措施、施工工序质量控制与加固工程质量检验评定方法及评述等 9 个方面进行了研究, 形成了既有理论支撑, 又便于工程应用的桥梁加固技术方法体系。

在本体系中, 通过对于旧桥加固基本原则和加固工作程序的研究, 首次对旧桥加固设计的内容、步骤与要求进行了明确的界定, 提出了桥梁加固应充分利用原结构的使用功能; 加固方案应不少于 2 个, 并应进行方案比选和技术经济评价, 完成加固方案可行性研究报告等关键基本原则。

桥梁加固设计的核心部分是加固设计的计算。其一般步骤为: 加固前原结构检算, 加固方案设计和加固后结构检算。其中, 加固前原结构的计算应以桥梁退化模型为基础, 即计算模型应基于实桥检测结果, 充分考虑桥梁结构体系及材料性能的退化, 计入检算系数, 结构恶化系数的影响; 加固后的桥

收稿日期: 2005-11-08

基金项目: 西部交通建设科技项目 (200131822358)

作者简介: 王茜 (1981-), 男, 陕西岐山人, 博士研究生, 研究方向为桥梁结构理论及桥梁评定. (wsunshine1688@sina.com)

梁结构计算包括加固后结构内力计算和加固后承载能力检算, 均应以加固后的桥梁结构型式和体系为基础确定计算模型。

现以简支梁改变为连续梁体系加固法为例对桥梁加固技术方法体系作简要说明。

1 简支梁改变为连续梁体系加固技术介绍

1.1 特点及使用条件

此方法是将原2跨及2跨以上简支梁的梁端连接起来, 使受力体系由原来的简支转为连续, 减小跨中正弯矩, 提高结构的承载能力, 同时减少了伸缩缝数量, 提高了行车舒适性。这种方法主要适用于多跨简支梁(板)因配筋不足、截面尺寸偏小, 使桥跨中截面抗弯承载能力明显不足及下弯挠度过大的情况。

1.2 附加影响

(1) 由于原多跨简支体系改为连续, 将拆除部分伸缩缝, 剩余伸缩缝因伸缩量不足而需要更换, 并重新计算伸缩量。更换伸缩缝时, 位于伸缩缝两侧后浇筑的混凝土铺装要有一段养生时间。

(2) 原简支梁一端为固定支座, 一端为活动支座, 改变体系后的多跨连续梁体系的双支座形式会对上下部结构受力及支座本身带来一定影响, 加固时应适当考虑。

(3) 必须充分考虑原桥的地基条件, 防止由于基础沉降等对新形成的连续体系上部结构产生不利影响。

(4) 因为伸缩缝与支座的影响, 建议连续跨数不超过4跨, 具体要依据伸缩缝与支座的计算。

(5) 本加固方案需要凿除部分梁端桥面铺装, 加固后应做好新、旧铺装的连接。

(6) 梁端在变换体系后会有负弯矩, 梁端连接不好会直接影响加固效果。

1.3 力学特点

(1) 一期恒载完全由原简支梁体系承受, 二期恒载与汽车活载由连续梁体系承担, 连续体系在跨内产生的正弯矩比简支梁体系小, 起到卸载及提高承载能力的作用。



图1 双支座连续梁弯矩

Fig.1 Moment curve of continuous beam with double bearing

(2) 体系改变为双支座支撑的连续梁, 减少了

连续梁的负弯矩, 即相对于单支点有消减负弯矩峰值的作用(图1)。

1.4 设计计算

加固设计步骤如下:

(1) 根据现有支座以及伸缩缝计算适宜的连续跨数, 或先定出连续跨数最后验算伸缩缝以及支座是否满足要求。

(2) 计算简支梁恒载、栏杆、人行道荷载。

(3) 计算桥面铺装在体系转变后的连续梁上的内力。

(4) 计算活载在连续梁体系上的内力。

(5) 参考《桥规》进行内力组合, 计算沿梁顶增设的纵向受力钢筋数量, 并根据加固检算进行相关验算。

其中主梁应力、承载能力及变形验算须考虑检算系数及恶化系数的影响。

1.5 施工工序(以T梁为例)

(1) 凿除桥面铺装, 拆除伸缩缝, 梁顶凿毛; 如需要, 可更换部分或全部支座。

(2) 凿开简支梁连接端部上缘混凝土保护层, 使梁端顶层纵向钢筋及箍筋外露; 用新增普通钢筋连接主筋, 布置箍筋及预应力管道。

(3) 将连接处的相邻梁端间隙用微膨胀混凝土浇筑并振捣密实。

(4) 穿预应力钢束、张拉、锚固、压浆、封锚。

(5) 重新安装伸缩缝, 施工桥面系。

1.6 构造措施

要求梁(板)端头结构无破损现象, 且不能伤及原支座(如不更换支座); 为保证桥面铺装与原梁体共同参与结构作用, 梁顶要凿毛, 有条件还要设置抗剪栓钉, 桥面铺装采用收缩较小的混凝土; 梁端间隙截面也要凿毛, 有利于膨胀混凝土的振捣密实; 对于连接钢筋, 焊缝长度应满足规范要求; 新增负弯矩普通钢筋直径不小于16mm, 间距不大于20mm; 箍筋直径不小于6, 间距不大于15mm; 新增负弯矩预应力钢束宜采用扁锚锚固。

1.7 工序质量控制与施工工程质量检验方法

采用简支变连续结构体系加固, 工序质量控制内容与方法参见《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041-2000)。加固施工质量检验内容与方法参见《公路工程质量检验评定标准》(JTJ071-98), 特殊检验内容应视构造要求等具体情况而定。

1.8 评述

内力计算与截面计算方法简单明确, 通过改变体系

大大减少了原结构所承受的内力,加固效果显著,且对桥下净空及原桥景观无影响;施工过程包括凿去桥面铺装及梁端混凝土、增设连续筋、更换伸缩缝及桥面铺装等,工程量较大,加固施工全过程需中断交通。

2 工程实例

2.1 桥梁概况

X 大桥为 4×25 m 预应力混凝土简支梁桥,设计荷载为汽车-超 20 级,挂车-120,桥面宽为净 11.0+2×0.5 m。横隔梁仅设在梁端处。上部结构主梁横断面构造如图 2 所示。

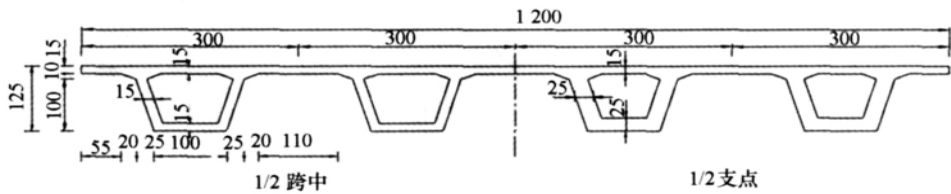


图 2 主梁横断面构造 /cm
Fig.2 Structure drawing of transection of main beam

2.2 原结构检算

结构检算的依据是 X 大桥的施工设计图和实桥检测报告。

(1) 原桥结构内力计算:

混凝土梁式结构的检算主要依据在役旧桥的实测资料和有关数据及各种原桥文件。检算时应根据实桥检测所得的桥梁现状,依据“检算指南”中的相关规定进行相应折减。

根据原设计方案及施工过程,取跨中、四分点、变化点截面(箱梁腹板和底板开始加厚处)和支点截面为控制截面,进行检算。简支梁为静定结构,

通过对原桥进行实桥检测,发现主梁跨中区段的腹板上存在竖向裂缝,缝宽 0.15~0.3 mm,梁底也存在沿钢筋方向的细小裂缝,均有继续发展的趋势。砼保护层碳化、剥落严重,钢筋部分锈蚀。用回弹法测定主梁混凝土强度为 45 号(原设计值为 50 号)。此外,主梁在汽车荷载作用下最大挠度达 4.2 cm,已超出容许变形 0.2 cm。桥梁伸缩缝或阻塞或破损,引起跳车现象。此外,泄排水设施、支座等构件也存在不同程度的破损。可见,原桥的正常使用已经出现了问题,应及时进行维修加固。

所以内力组合仅考虑组合 和组合 。

(2) 计算过程及结果分析

检算时,先进行破坏阶段的截面强度检算,再进行使用阶段的截面应力检算,以确定结构是否满足要求,能否正常使用。按照以上步骤对原桥进行检算,检算结果以受力最不利的边主梁为例进行说明。

以下表中以压应力为正,拉应力为负,弯矩单位为 kN·m,剪力单位为 kN,应力单位为 MPa。

主梁强度检算

各控制截面的计算内力,见表 1。

表 1 X 大桥加固前控制截面内力组合

Tab.1 Internal force of control section under different loading combination before reinforcing X bridge

内 力 组 合		跨 中		四 分 点		变 化 点		支 点
		M ₁₇₈ /kN·m	Q ₁₇₈ /kN	M ₁₇₈ /kN·m	Q ₁₇₈ /kN	M ₁₇₈ /kN·m	Q ₁₇₈ /kN	Q ₁₇₈ /kN
承载能力	组合	5200	172.8	4111	558.5	1401	817.6	967.9
极限状态	组合	4938	165.3	3860	521.4	1301	782.1	885
正常使用	组合	3936.4	123.5	3097.4	426.7	1053.3	631.52	727.4
极限状态	组合	4280.4	150.3	3282.4	447.5	1107.1	666.72	753

截面强度检算:根据承载能力极限状态内力组合的结果,判定截面的受力类型,并进行截面强度检算。根据“检算指南”,检算应基于桥梁现状,依据下式进行

$$S_d(\gamma_g G; \gamma_q \sum Q) \leq \gamma_b R_d(\xi \frac{R_c}{\gamma_c}; \xi \frac{R_s}{\gamma_s}) Z_1(1 - \xi) \quad (1)$$

式中各参数的具体含义见“检算指南”。其中,梁高、混凝土标号、钢筋强度和面积等与原设计值相比,均发生改变,根据“检算指南”,得各折减系数分别为 $\xi=0.93$, $\xi=0.97$, $\xi=0.02$, $Z_1=0.95$ 。

表 2 给出了边主梁根据式(1)计算的截面强度检算结果。

表 2 主梁截面强度检算表

Tab.2 Section intensity check of main beam

截面	跨中	四分点	变化点
受力性质	下拉受弯	下拉受弯	下拉受弯
最大弯矩/kN·m	5200	4111	1401
截面抗力/kN	5095	4020	3018
是否满足	否	否	是

通过对各个主要截面进行强度检算，发现从跨中到四分点之间的截面强度均不能满足要求，说明原桥在使用荷载作用下，其承载能力不能满足荷载标准的要求。

应力限值：根据“检算指南”，正常使用极限状态应力计算公式改变如下

$$\sigma_d < Z_1 \cdot q$$

式中各参数的具体含义见“检算指南”。其中，取 Z_1

=0.95。应力限值见表 3。

表 3 检算应力限值 /MPa

Tab.3 Limited amount of check stress

荷 载	法向压应力	法向拉应力	主压应力	主拉应力	钢筋应力
组合	16.625	2.28	19.95	2.28	- 1148.55
组合	19.95	2.565	21.613	2.565	- 1236.9

应力检算：正常使用阶段混凝土法向应力及主应力检算，结果见表 4、表 5。

表 4 混凝土法向应力检算表 /MPa

Tab.4 Normal stress check of concrete

内力	跨中截面		四分点截面		变化点截面		支点截面	
组合	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘
组合 I	7.3	- 1.44	6.25	- 0.0806	3.33	5.21	1.44	5.7
组合	7.95	- 1.81	6.49	0.286	3.46	5.63	1.44	6.03

表 5 混凝土主应力检算表/MPa

Tab.5 Main stress check of concrete

应 力	跨中截面		四分点截面		变化点截面		支点截面	
	组合	组合	组合	组合	组合	组合	组合	组合
Max σ_d	- 1.44	- 1.81	- 0.243	- 0.212	- 0.484	- 0.506	- 0.382	- 0.386
Max σ_{dn}	7.3	7.95	7.06	7.19	8.06	8.18	6.19	6.17

通过对主梁各截面上下缘混凝土法向应力检算，表明从跨中到四分点，截面下缘出现了拉应力，但由于该桥主梁按照部分预应力混凝土 A 类构件设计，应力并未达到限制值。混凝土最大压应力为 7.95 MPa，符合规定。各截面混凝土主应力值也均符合要求。

表 6 加固前 1# 钢束荷载组合 应力检算

Tab.6 Stress check of 1st bundle reinforcement under load combination before consolidation

点号	最大应力/MPa	是否满足	点号	最大应力/MPa	是否满足
1	- 1161	否	2	- 1148	是
3	- 1144	是	4	- 1141	是
5	- 1150	否	6	- 1155	否
7	- 1159	否	8	- 1163	否
9	- 1160	否	10	- 1162	否
11	- 1165	否	12	- 1163	否
13	- 1167	否	14	- 1169	否
15	- 1172	否	16	- 1174	否

正常使用阶段钢束应力检算：表 6 给出受力最不利的 1# 钢束（离中性轴最远）在荷载组合、作用下的应力检算结果。（将 1# 钢束 30 等分，由

对称性，仅列出一半等分点的检算结果）。

加固前 1# 钢束荷载组合 应力检算的结果满足要求，具体结果从略。

对其它钢束进行检算，均有不满足规定的情况，此不赘述。另外，结构变形和裂缝检算可按照“检算指南”中的方法进行，此处从略。

综上，通过对 X 大桥在使用荷载作用下的各项检算，结果表明，混凝土截面应力均可达到要求，但全桥从 L/4 ~3L/4 之间，截面强度和钢束应力均不能满足要求，主梁挠度也超过限值。

2.3 加固设计

(1) 加固设计方案比选

针对 X 大桥现已查明的病害和存在的缺陷，对如何提高原桥的承载能力，提出了 2 种方案进行比选。方案一是对原桥进行改变结构体系加固。方案二是采用钢板粘贴加固法对原桥进行加固。

经过综合分析比较，方案一不但可以有效提高原桥的承载能力，而且改善了行车的舒适性。同时，方案一较方案二的加固效果持久，对原桥景观也无影响。考虑各方面的因素后，决定采用方案一对原

桥进行维修加固。

(2) 加固设计要点

进行加固计算时，由于发生了体系转变，所以新建的护栏、桥面铺装及活载均由体系转变后的连续梁承担，需要重新计算其产生的内力，同时，还要考虑温度变化、支座沉降等因素产生的次内力，再按照规范要求 进行内力组合，计算抵抗负弯矩所需要的钢筋数量，最后进行强度验算，确定桥梁的承载能力是否满足。(仅给出 支点 1、支点 2、支点 3 处的左、右截面和边跨、中跨跨中截面的计算结果，截面位置如图 3 所示)。由于此时并未改变旧桥主梁截面的几何性质和物理性质，故有关数据仍应依据“检算指南”中的规定予以折减主要步骤为：计算一期恒载及二期恒载在连续梁上的总内力；计算活载在连续梁上产生的内力；进行内力组合，计算负弯矩区段混凝土截面上缘增设的纵向受力钢筋的数量，并进行布置。根据以上内力计算结果，选择荷载组合、进行计算，组合方式为：

组合：恒载+汽车；

组合：恒载+汽车+温度影响力+基础变位影响力+混凝土收缩、徐变影响力；

组合：恒载+挂车。

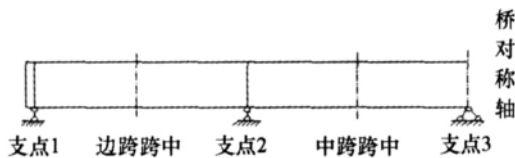


图 3 截面位置示意图

Fig.3 Sketch map of section position

表 7 列出承载能力极限状态荷载组合的内力。

体系转变后承载能力极限状态荷载组合、的内力值从略。

进行强度验算与应力验算，检验加固效果是否可靠。均可按照“检算指南”中的方法进行计算。表 8 给出强度计算与验算结果。表 9 给出 1# 钢束荷载组合应力验算结果。其他钢束应力验算皆满足要求。各截面应力验算也满足要求。

验算结果表明，各个截面的强度、应力和钢束应力均满足要求，裂缝和变形也均在限值内，因而该加固方法能有效地提高桥梁的承载能力。

2.4 施工工艺要点和要求

原桥维修加固的施工过程分为以下几个阶段：

(1) 凿除原桥面铺装和简支梁端部上缘混凝土，拆除伸缩缝，并将梁顶凿毛。先将第 1、2 跨及 3、4 跨间隙用膨胀混凝土填塞密实，以备支点负弯矩区

段下缘受压，达到设计强度后，张拉负弯矩区预应力钢束并压注水泥浆。

表 7 体系转变后承载能力极限状态荷载组合

Tab.7 Load combination of ultimate limit state of bearing capacity after system changed

截面	内力性质	最大剪力	最小剪力	最大弯矩	最小弯矩
		/kN	/kN	/kN	/kN
支点 1 左	剪力	147.1	18.38	18.38	147.1
	弯矩	- 16.46	- 3.675	- 3.675	- 55.18
支点 1 右	剪力	841.4	248.7	436.3	695.5
	弯矩	- 3.785	- 2.45	- 3.675	- 55.18
边跨跨中	剪力	75.46	- 222.3	1.668	- 70.25
	弯矩	3090	3129	4019	1047
支点 2 左	剪力	933.7	379	381.5	798.1
	弯矩	- 2267	- 513.4	- 500.2	- 2558
支点 2 右	剪力	897.6	328.7	329	641.3
	弯矩	- 2253	- 511.5	- 500.2	- 2558
中跨跨中	剪力	171.5	- 157.3	100.1	53.47
	弯矩	2776	2640	3565	830.1
支点 3 左	剪力	943	249.1	249.1	806.2
	弯矩	- 1807	- 25.27	- 25.27	- 2066
支点 3 右	剪力	930.8	257.8	280.3	648.7
	弯矩	- 1854	- 25.21	- 25.27	- 2066

表 8 加固后截面强度验算结果/MPa

Tab.8 Check result of sectional intensity after consolidating

截面	类型	性质	计算弯矩	抵抗弯矩	是否满足
支点 1	上拉受弯	最大弯矩	- 3.674	- 2562	是
		最小弯矩	- 55.18	- 2562	是
边跨跨中	下拉受弯	最大弯矩	4897	5095	是
		最小弯矩	1232	5095	是
支点 2	上拉受弯	最大弯矩	- 2227	- 6113	是
		最小弯矩	- 2227	- 6113	是
中跨跨中	下拉受弯	最大弯矩	4950	5095	是
		最小弯矩	949.4	5095	是
支点 3	上拉受弯	最大弯矩	- 1623	- 6113	是
		最小弯矩	- 1623	- 6113	是

表 9 加固后 1# 钢束荷载组合 应力验算/MPa

Tab.9 Stress check of 1st bundle reinforcement under load combination after consolidating

点号	最大应力	是否满足	点号	最大应力	是否满足
1	- 1146.7	是	2	- 1114.4	是
3	- 1107.7	是	4	- 1093.5	是
5	- 1089.7	是	6	- 1085.9	是
7	- 1081.1	是	8	- 1075.4	是
9	- 1068.8	是	10	- 1065.0	是
11	- 1065.0	是	12	- 1066.9	是
13	- 1070.7	是	14	- 1074.5	是
15	- 1077.3	是	16	- 1073.5	是

(2) 浇筑第 2、3 跨连续段接头混凝土, 达到设计强度后, 张拉负弯矩区预应力筋并压注水泥浆。

(3) 拆除相邻简支梁之间的支座, 主梁支承在新设的永久支座上, 完成体系转换, 形成 4 跨连续梁。

(4) 重新安装伸缩缝, 布置新铺桥面钢筋, 浇筑整体桥面混凝土并养生至设计强度。

2.5 加固完成后的养护要点

(1) 简支梁梁端之间的连接要可靠, 防止连接点拱起, 引起桥面破坏和钢筋锈蚀。

(2) 新浇筑的桥面混凝土应养生至设计强度。

(3) 伸缩缝应经常养护, 同时保持桥面清洁, 及时排除积水, 保证桥面坚实、平整、清洁。

3 结语

桥梁的加固和维修是国内外桥梁界不可回避的问题, 于是寻找合理、适用的加固和维修方法成为

亟待解决的课题。本加固设计方法体系与以往只注重加固方法在实践中应用相比, 分别对加固原则、加固方案比选、加固方案技术经济评价、工序质量控制与竣工验收及加固后评价方法等进行了深入的研究, 完善了旧桥加固理论体系, 使得公路旧桥加固技术更加系统化、规范化。

参考文献:

[1] 徐岳, 王亚君, 万振江. 预应力混凝土连续梁桥设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
[2] 徐彝. 桥梁检测与维修加固百问 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
[3] 交通部公路科学研究院, 长安大学, 等. 公路旧桥承载能力评定方法研制报告 [R]. 2004.
[4] 交通部公路科学研究院, 长安大学, 等. 公路旧桥加固成套技术应用指南 [Z]. 2004.
[5] 交通部公路科学研究院, 长安大学, 等. 公路旧桥加固示范工程实例 [Z]. 2004.

(上接第 70 页)

结构的耐久性综合评价以组成该结构的各类构件的耐久性评定结果为依据, 综合考虑各类构件的权重系数, 将各构件代入公式可得

$$E_{\text{总}} = \sum_{j=1}^m E_{\text{总}j} \quad q = 3 \times 0.23 + 5 \times 0.24 + 5 \times 0.07 + 5.22 \times 0.26 + 5.22 \times 0.12 + 4 \times 0.02 + 3 \times 0.05 + 4 \times 0.01 = 4.49$$

结构整体的耐久性综合评价标准如表 14 所列, $E_{\text{总}} = 4.49$, $4 \leq E_{\text{总}} < 5$, 结构耐久等级评定标度为 2, 结构整体耐久性状况较差。

表 14 结构整体的耐久性综合评价标准

Tab.14 Criteria for synthetic endurance evaluation of the whole structure

$E_{\text{总}}$ 范围	$1 \leq E_{\text{总}} < 2$	$2 \leq E_{\text{总}} < 3$	$3 \leq E_{\text{总}} < 4$	$4 \leq E_{\text{总}} < 5$	$E_{\text{总}} \geq 5$
结构耐久等级评定标度	5	4	3	2	1
结构耐久性状况	好	较好	一般	较差	很差

3 结论

采用混凝土旧桥表观损伤、强度、钢筋锈蚀电

位、氯离子含量、钢筋分布及保护层厚度、混凝土碳化深度、电阻率、内部缺陷和表层损伤等的检测方法, 与评价指标及结构或构件的耐久性综合评定方法对某钢筋混凝土 T 型梁桥进行检测评定, 经结构检算与承载能力分析, 评定结果符合结构实际状况。因此, 以上方法是科学的、可行的。

参考文献:

[1] 张劲泉. 公路旧桥检测评定与加固技术研究及推广应用 [Z]. 交通部 2001 年度西部交通建设科技项目 (2001 318 223 58).
[2] 周新刚. 混凝土结构的耐久性与损伤防治 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999.
[3] 王有志, 徐鸿儒, 任锋. 钢筋混凝土梁式桥的安全性评估系统研究与开发 [J]. 交通部 2001 年度西部交通建设科技项目 (2001 318 223 58).
[4] 赵振宇, 徐用懋. 模糊理论和神经网络的基础与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
[5] ALLEN C ESTES, DAN M FANGOPO. Repair Optimization of Highway Bridges Using System Reliability Approach [J]. Journal of Structural Engineering, 1999 (7).