

# 桥梁加固综述

易刚祥 龙廖乾 谢芳

## 一、桥梁的结构性能

桥梁结构是典型的不可逆结构，受自然因素如腐蚀、冲刷、预应力损失等，非自然因素如意外损伤、超载、开裂等的影响，一旦建成，其结构性能会随运营时间的增长而不断下降，若采取适当加固或提高等级等措施，则其结构性能会提高，桥梁寿命会延长。

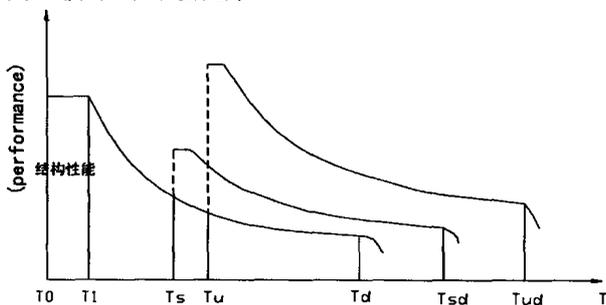


图1 桥梁结构性能随时间的变化

$T_0$ -建成年份； $T_1$ -结构性能下降年份； $T_s$ -加固年份； $T_u$ -提高等级年份； $T_d$ -原桥丧失承载力年份； $T_{sd}$ -加固后桥梁丧失承载力年份； $T_{ud}$ -提高等级后桥梁丧失承载力年份

决定旧桥加固的程序是桥梁检查→预测评估→桥梁加固。

## 二、桥梁的检查

### （一）桥梁检查的分类

1、经常性检查（或称一般检查）。我国规范规定每月一次，由护桥人员进行，以目检为主。

2、定期检查（或称基本检查）。我国规范规定对新建成的新型结构桥梁一年检查一次，对通车3年以内的新桥和其它永久性桥梁5年内至少检

查一次，其中支座和基础应一至三年检查一次，由公路段主管工程师组织有关人员进行，用专用仪器量具较全面地检测桥梁相关部位的缺损，对桥梁技术状况进行评定。

3、特殊检查（或称专门检查）。在地震、洪水、流冰、风灾或超载后进行，由专家及管理部门相关人员进行。

（二）在评定桥梁的承载力而进行的详细检查前，必须掌握并了解下列资料 and 情况：

1、设计图纸、修改设计、施工方案、质量检验、材料检验、竣工图纸等资料。如缺乏需询问设计、施工当事人，力求掌握更多情况。

2、向养护部门了解桥梁通行荷载（如车辆）及养护加固情况，了解桥梁存在的问题及历程。

（三）现场进行详细检查的内容包括：

### 1、结构的实际尺寸

包括截面尺寸、跨径、填料、拱轴线等，采用丈量及测量的方法进行。有完整准确的竣工图时，可以利用其中一部份数据。

钢筋情况不明时，用保护层测定仪，必要时凿开个别截面的保护层，以便较准确地确定钢筋直径。

### 2、材料特性

利用施工时的砼材料试验资料。如缺该资料，可用回弹仪，超声波脉冲法进行。必要时取混凝土芯样做试验来确定。

易刚祥：柳州欧维姆机械有限责任公司 高工

### 3、桥梁的缺陷

- (1) 裂缝—详细记录并绘出裂纹长度和宽度,分析原因,判断是陈旧的还是新发展的;
- (2) 质量缺陷—如混凝土的空洞、蜂窝、剥落、层理、变酥、隆起、露筋,钢筋锈蚀等;
- (3) 上部构造的下沉、变位、拱桥拱轴线干扰;
- (4) 墩台的变位或不均匀沉降,冲刷掏空;
- (5) 排水情况,支座、变形缝等。

将以上资料建立数据文件。

### 三、桥梁的评定

#### (一) 根据桥梁存在的缺陷评定

评定承载能力时,根据两个指标:

##### 1、裂缝

裂缝是缺陷的集中表现,我国规定如表1。虽然裂纹宽度在容许范围内,但有下列情况,即(1)裂缝发展较快,6个月增大0.1mm以上者;(2)裂缝宽度虽不增加,但裂缝数量在显著增加;(3)除裂缝外,还存在其它严重缺陷者,均应进行整修加固。

根据实测裂缝宽度反算钢筋应力,但公式甚多,且不统一,计算结果离散性大,仅适应于梁式桥,见表2。

##### 2、桥台水平位移

表1 裂缝限值表

结构	裂缝部位	最大裂缝宽度限值(mm)	
普通钢筋 混凝土梁	主筋附近竖向裂缝	≤ 0.25	
	腹板竖向裂缝	≤ 0.30	
预应力 混凝土梁	梁体	不允许	
	纵向裂缝	≤ 0.20	
	横隔板	≤ 0.30	
砖、石、 混凝土拱	拱圈横向	≤ 0.30	
	拱圈纵向	≤ 0.50	
	拱波与拱肋结合处	≤ 0.20	
墩 台	墩台帽	≤ 0.30	
	墩 台 身	经常受浸蚀性 环境水影响	有筋 0.20 无筋 0.30
		常年有水,但 无浸蚀性影响	有筋 0.25 无筋 0.35
	干沟或季节性有水河流	≤ 0.40	
	有冻结作用部分	≤ 0.20	

单孔双曲拱桥两桥台水平位移之和一般不大于L/2000。

上部结构在营运中已行驶过相当于设计荷载或以上的车辆,没有发现缺陷,或缺陷在上述容许范围以内,可以认为该桥具有设计承载能力。

表3是我国对运营桥梁技术状况评定的标准。

以上介绍的方法是管理养护部门经常应用的直观评定方法,也只是初步评定的方法,必要时要进行分析计算。

#### (二) 根据结构高度进行评定

只适应于双曲拱,指标为:

$$K = \frac{t}{L/100+35} \quad (1)$$

式中:t—主拱圈截面结构总高度(cm)

L—跨径(m)

当双曲拱主拱圈截面组成基本符合《公路双曲拱桥设计施工技术规范》的要求,设有最少含筋率以上的钢筋,已通过设计荷载或以上的车辆,且裂缝、桥台位移在容许范围以内者,当K=1.1-1.3时,一般能过到汽-15、挂-80的荷载标准;K=1.3-1.5时,一般能达到汽-20、挂-100的荷载标准。

当K值小于上述要求但主拱圈完好时,应进一步通过分析计算来评定。当K值小于上述要求,且出现超过上述规定的容许裂缝时,一般可肯定主拱圈承载能力不足。当作超载评定时,还需进行分析计算。

上述方法可作为管理养护部门评定双曲拱桥主拱圈可能存在的承载力,但也是初步的评定方法。

(三)用检查和分析计算相结合的方法进行评定,这是我国目前采用的主要方法。

1、用实际截面尺寸计算截面的承载力;

2、准确计算实际的恒载内力,从截面承载力中扣除恒载内力;

3、按设计要求计算车辆荷载在该截面上产生

表2 裂缝宽度与钢筋应力关系式

我国《公路桥涵设计规范》	CEB-FIP公式(注1)	Gerly-Lutz公式(ACI)(注2)	G·Wastland公式	冈村氏公式
$\sigma_{\max} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_g}{E_g} \left( \frac{30+d}{0.28+10\mu} \right)$ <p>式中：<math>C_1</math>—与钢筋类型有关的系数； 光面钢筋 <math>C_1=1.4</math> 螺纹钢筋 <math>C_1=1.0</math> <math>C_2</math>—与荷载类型有关的系数； 短期静荷载 <math>C_2=1.0</math> 长期荷载 <math>C_2=1+0.5(N_0/N)</math> <math>N_0</math>—为长期荷载内力 <math>N</math>—为全部荷载内力 <math>C_3</math>—与构件形式有关的系数； 板 <math>C_3=1.15</math> 有腹板受弯构件 <math>C_3=1.0</math> <math>d</math>—钢筋直径(mm)，当设有不同直径的钢筋时 <math>d=4A_g/S</math> <math>A_g</math>—为钢筋面积 <math>S</math>—为钢筋总周长 <math>\mu</math>—含筋率，<math>\mu &gt; 0.02</math> 时取 0.02，<math>\mu &lt; 0.006</math> 时取 0.006 <math>\sigma_g</math>—钢筋应力(MPa) <math>E_g</math>—钢筋弹性模量(MPa)</p>	$\omega = (1.50C + \frac{16\phi}{P_t}) \left( \frac{\sigma_g - 300}{P_t} \right) \times 10^{-5}$ <p>式中：<math>\omega</math>—裂缝宽度(mm)； <math>\sigma_g</math>—钢筋应力(MPa) <math>C</math>—钢筋保护层(mm) <math>\phi</math>—钢筋直径(mm) <math>P_t</math>—受裂缝影响的混凝土断面中钢筋占的百分比 <math>P_t = \frac{100A}{B_t}</math> <math>A</math>—钢筋面积 <math>B_t</math>—对简支弯曲的矩形或T梁(腹板的断面面积bh)。 <math>B_t = 0.25b</math></p>	$\omega_b = 0.03793 \sqrt{t_b AR} (0.1295 \sigma_s - 5)$ <p>式中：<math>t_b</math>—钢筋保护层(mm)； <math>A</math>—以钢筋根数去除以受拉钢筋重心一致部分的混凝土断面的面积(<math>\text{cm}^2</math>) <math>R = \frac{h-kd}{(1-k)d}</math> <math>d</math>—有效高度 <math>kd</math>—中性轴高度 <math>\sigma_s</math>—裂缝处的钢筋应力(MPa)</p>	$\omega = C \phi \left( \frac{l_0}{d A_s l_t} \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \right)^2$ <p>式中： <math>C</math>—裂缝系数 圆钢 <math>C=0.23</math> 异性钢 <math>C=0.16</math> <math>\phi</math>—钢筋直径(mm) <math>d</math>—有效高度(cm) <math>A_s</math>—受拉钢筋断面面积(<math>\text{cm}^2</math>) <math>\sigma_s</math>—钢筋应力(MPa) <math>l_0</math>—断面惯矩(全断面有效)(<math>\text{cm}^4</math>) <math>l_t</math>—中性轴到拉力线的距离(cm)</p>	$\sigma_s = k_2 \eta (60 - \phi)$ <p>式中： <math>\sigma_s</math>—钢筋应力(MPa) <math>\eta</math>—系数 圆钢 <math>\eta = 1.0</math> 异性钢 <math>\eta = 1.4</math> <math>k_2</math>—系数； <math>\omega = 0.1\text{mm}</math>， <math>k_2 = 2.45\text{MPa}</math>， <math>\omega = 0.2\text{mm}</math>， <math>k_2 = 4.90\text{MPa}</math>， <math>\omega = 0.3\text{mm}</math>， <math>k_2 = 7.35\text{MPa}</math> <math>\phi</math>—钢筋直径(mm)</p>

表3 桥梁技术状况评定标准

项目	类别	一类	二类	三类	四类
墩台		1、墩台各部分完好。 2、浅基已作防护处理，效果良好	1、墩台基本完好，仅表面有局部缺陷。 2、浅基未作防护处理，但无冲刷现象。	1、墩台出现缺陷有失稳现象发生。 2、桥基出现局部冲刷。	1、墩台不稳定，有滑动、下沉、倾斜、冻害现象。圯工严重松动，裂缝有开合现象，变形大于计算值。 2、桥基冲刷大于计算值并被严重冲空。
支座		1、各部分清洁完好。 2、活动支座伸缩及转动正常。	1、支座有尘埃堆积，略有腐蚀。 2、支座滑动面干涩。	1、钢支座螺栓松动。 2、橡胶支座开始老化。	1、钢支座上下板开裂，锚栓折断。 2、橡胶支座老化开裂。 3、混凝土支座开裂压碎。 4、活动支座坏死。
砖、石、混凝土、上部结构		1、上部结构完好，无渗水、无污染。 2、裂纹宽度在容许范围以内。	1、上部构造基本完好，仅表面有部分缺陷。 2、裂纹宽度在容许范围以内。	1、钢筋混凝土梁拱有剥落、露筋。 2、石砌拱圈部分变形。 3、裂纹宽度已超过最大限值。	1、钢筋混凝土梁、拱有永久性严重变形，顺主筋方向有纵向裂纹。钢筋已严重锈蚀，其他部位的裂纹已超过0.4mm。 2、石砌拱圈裂纹大于2或发生开合现象。
栏杆人行道		完整清洁	欠清洁，有个别杆件脱落。	多处有明显损坏。	严重歪斜残缺，危及人身安全。
载重能力		符合设计要求。	达到设计要求。	达设计要求的75%以上。	在设计要求的75%以下。

注：1、上下部承重构件为桥梁技术状况主要评定指标，基中有一项不合指标者，按降一类处理。  
2、一类正常保养，二类小修，三类中、大修或加固，四类通过检验确定加固或改建

的活载内力(包括冲击力);

4、将第2项差值除以第3项,即得鉴定系数。

即桥梁结构承载能力验算结果以验算鉴定系数  $K$  表示:

$$K = \frac{R_d(f_{cd} \times f_{sd} \times S) - S_{dG}(r_q \times G)}{S_{dQ}(r_q \times Q)}$$

式中:  $R_d(f_{cd} \cdot f_{sd} \cdot S)$ —按桥梁实际截面尺寸及配筋和实测材料强度设计值计算的结构抗力;

$S_{dG}(r_q \cdot G)$ —按桥梁实际截面尺寸计算的恒载效应组合设计值;

$S_{dQ}(r_q \cdot Q)$ —按拟提高荷载设计标准计算的活载效应组合设计值。

当  $K \geq 1$  说明承载能力足够,可不作加固。

$0.9 < K < 1$  可采用加厚桥面板法加固。

$K=0.7-0.8$  时,可采用加焊钢筋(或粘钢板)或其它改变结构体系方法加固。

$K=0.6-0.7$  时,可采用体外预应力和碳纤维加固组合加固。

#### (四) 荷载试验方法评定

荷载试验是在桥梁问题较多,结构复杂,难于计算分析时采用,即通过标准设计荷载的等效荷载施加到桥结构的指定位置后,通过对桥结构相应的应力、应变进行检测,从而达到检验桥梁结构的设计理论和计算方法是否合理,判断桥梁结构实际的承载等级的目的。

荷载试验分三类:①基本荷载试验:即最大试验荷载为设计标准规定的荷载(包括标准规定的动力系数或荷载增大系数的因素)。②重荷载试验:最大荷载大于基本荷载。③轻荷载试验:最大荷载小于基本荷载但不小于0.5倍基本荷载。

#### 1、静载试验主要内容和观测部位

①结构的最大挠度和扭转变位。

②结构控制截面最大应力(应变),包括混凝土表面和最外缘主筋的应力。

③活动支座和结构连接部位的变位。

④受试验荷载影响的所有支点的沉降,墩台的位移和转角。

⑤桁架结构支点附近杆件及其它细长压杆的稳定性。

⑥裂缝的出现和扩展,包括初始裂缝的出现,裂缝的宽度、长度、间距、位置、方向和形状,以及卸载后的闭合状况。

$$\text{静载试验效率 } \eta_q = \frac{S_{st}}{S \times (1 + \mu)}$$

式中:  $S_{st}$ —试验荷载作用下,被检测部位的内力或变形的计算值;

$S$ —标准设计荷载作用下,被检测部位的内力或变形的计算值;

$\mu$ —按规范采用的冲击系数,平板挂车,履带车,重型车辆取0。

当  $1 \geq \eta_q > 0.8$  为基本荷载试验

$\eta_q > 1.0$  (其上限按具体结构情况和所通行的特型荷载确定)为重荷载试验

$0.8 \geq \eta_q > 0.5$  为轻荷载试验

#### 2、动载试验项目

①桥梁结构动力响应的试验测定,即结构在动荷载作用下的强迫振动的特性,包括动位移、动应力、动力系数等。试验时,一般利用汽车以不同的速度通过桥跨而引起的振动来测定上述各种数据。

②测定桥跨结构的自振特性如自振频率、振型和阻尼特性等。

③测定动荷载本身的动力特性,主要测定引起桥梁振动的作用力或振源特性如动力荷载(包括车辆制动力、振动力、撞击力等)的大小、频率及作用规律。

④疲劳性能试验:主要测定结构中构件的疲劳性能。

#### 四、桥梁加固

##### (一) 加固的基本要求

1、经济性:一般说,加固费用比新建费用节

省一半时，应优先考虑加固。

2、不中断交通或尽量减少中断交通。

3、对已发现的缺陷要一次性加固好，不留后患。

4、对原有结构的损伤尽可能减至最低。

5、技术可靠、耐久、养护方便。

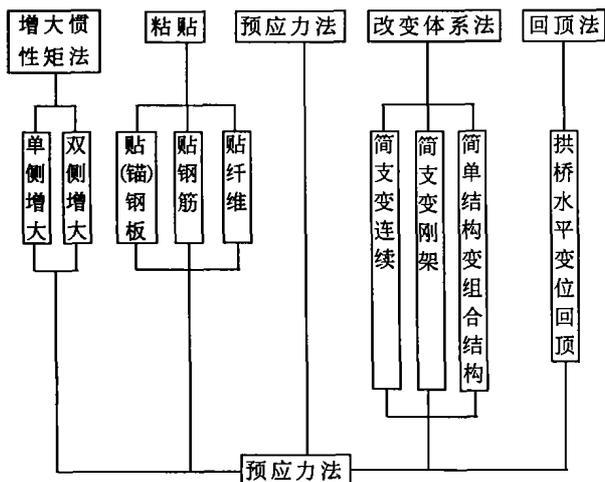


图 2 桥梁加固方法示意

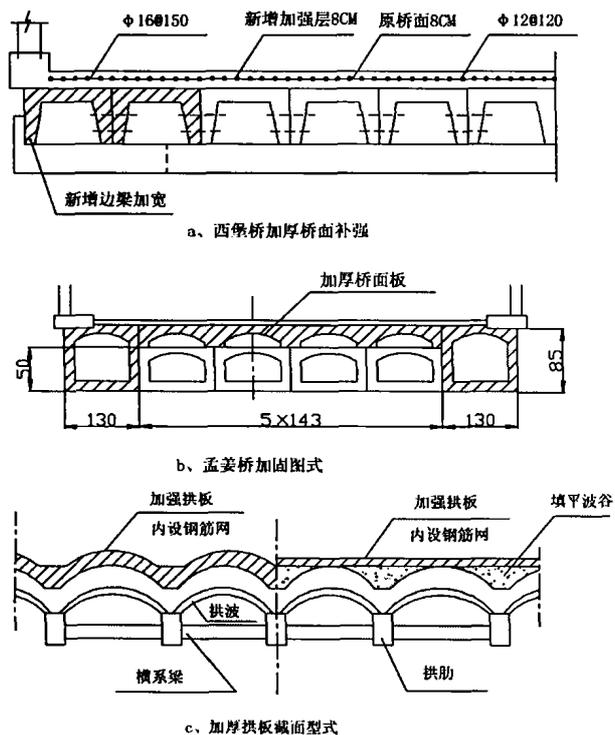


图 3 原结构上部加大截面

(二) 加固方法

目前桥梁维修加固的方法经统计有六类，即①增大惯性矩法；②粘贴；③预应力法；④改变体系法；⑤回顶法；⑥综合法。其示意见图2。

(1) 增大惯性矩法

①在原结构上部增大其惯性矩，但要注意新增结构所增加的恒载，最好的做法是用原设计作为传力结构，新浇一层板与原上部结构共同作用，则能在不增加恒载的前提下，较大地提高结构承受活载的能力。见图3。

②在原结构的下部增大惯性矩，但要注意新旧截面成为共同起作用的组合截面，其方法可采用在梁下翼缘或提高拱肋上每隔一定间距打孔，穿上钢筋并与新增截面钢筋联成整体；或者露出原结构主筋，在其上连接新增截面的钢筋。要保证新旧结合良好。见图4。

(未完待续)

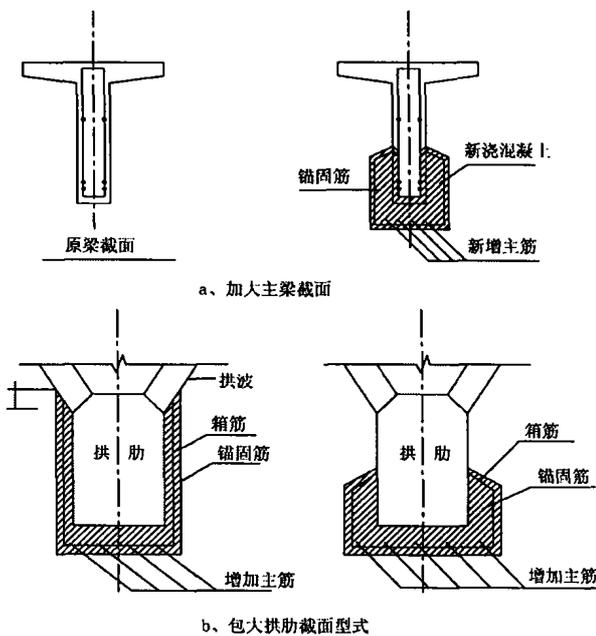


图 4 原结构下部加大截面