

JTJ

中华人民共和国行业标准

JTJ 0xx — 200x

公路桥梁承载能力检测评定规程

Specification for Inspection and Evaluation
of Load-bearing Capacity of Highway Bridge

(送审稿)

200 x - x - xx 发布

200 x - x - xx 实施

中华人民共和国交通部发布

中华人民共和国行业标准

公路桥梁承载能力检测评定规程

Specification for Inspection and Evaluation
of Load-bearing Capacity of Highway Bridge

JTJ 0xx — 200x

(送审稿)

主编部门：交通部公路科学研究所

批准部门：中华人民共和国交通部

施行日期：200X 年 XX 月 XX 日

前 言

随着我国公路交通事业的迅速发展，公路交通量的快速增加以及车辆载重的不断增大，如何准确地检测评定公路桥梁承载能力，对其实际技术状况作出评估，以确保桥梁结构安全，这是公路桥梁养护工作中的一大急需解决的问题。

我国交通部在 1988 年曾颁布了“公路旧桥承载能力鉴定方法（试行）”，该方法采用调查和结构检算，必要时再进行荷载试验的方法对桥梁进行承载能力鉴定。这一方法在过去的十多年中，对我国的桥梁承载能力鉴定起到了重要的指导意义。方法中对桥梁的调查主要针对桥梁表观质量状况进行，并据此专家经验性地给出检算系数（ Z_1 ），用于结构检算分析。随着桥梁检测技术的发展应用，大量的桥梁检测数据如何应用到桥梁承载能力评定工作中，依据“公路旧桥承载能力鉴定方法（试行）”是无法实施的。1999 年，交通部决定在 1988 年试行方法的基础上，修订编制《公路桥梁承载能力检测评定规程》，规程与方法相比主要有以下几方面改进：

(1) 在桥梁调查与检测方面，规程较全面地考虑了现有地桥梁检测方法手段及其检测成果在桥梁承载能力评定中地应用，并注重桥梁检查工作与现行养护规范的衔接。检算系数（ Z_1 ）的确定影响因素既考虑了结构构件的表观质量，也考虑了结构振动特性及强度等指标。针对不同种类的桥梁，考虑具体的检测结果分别引入了恶化系数、截面折减系数和活载影响修正系数，用于修正结构构件承载能力检算结果。

(2) 在桥梁结构检算方面，分桥型给出了结构检算分析方法。

(3) 桥梁承载能力鉴定由于引入了考虑实际检测结果的检算系数、恶化系数、截面折减系数和活载影响修正系数，使承载能力鉴定结果更能反映桥梁的实际状况。

(4) 桥梁荷载试验部分系统归纳整理并提炼了桥梁荷载试验方面的技术成果，主要增加了动力荷载试验结果的评价分析，并对部分参数取值进行了调整。

(5) 本规程围绕桥梁承载能力鉴定，涉及了桥梁调查、检测、检算分析、承载

能力鉴定及荷载试验等各个方面，较完整、系统。对我国地桥梁承载能力检测评定工作有重要地指导意义。

请各有关单位将发现的问题和意见函告交通部公路科学研究所（地址：北京市海淀区西土城路 8 号，邮编：100088），以便下次修订时参考。

主编单位：交通部公路科学研究所

参编单位：长安大学

东南大学

北方交通大学

主要起草人：

交通部公路科学研究所：张劲泉 李万恒 何玉珊 宿 健

程寿山 任红伟

长安大学：徐岳

东南大学：叶见曙

北方交通大学：雷俊卿

目 录

1 总 则	1
2 术语符号	3
2.1 术语.....	3
2.2 符号.....	5
3 桥梁调查与检测	10
3.1 一般规定.....	10
3.2 桥梁调查.....	12
3.3 桥梁一般检查与评定.....	12
3.4 桥梁详细检测与评定.....	17
4 桥梁结构检算	31
4.1 一般规定.....	31
4.2 检算荷载的确定.....	31
4.3 钢结构的检算.....	33
4.4 混凝土梁式结构的检算.....	34
4.5 混凝土及圬式拱式结构的检算.....	38
4.6 索结构的检算.....	47
4.7 桥面系结构的检算.....	49
4.8 桥梁墩台与基础的检算.....	52
5 桥梁承载能力鉴定	57
5.1 桥梁承载能力鉴定基本方法及其工作流程.....	57
5.2 桥梁承载能力鉴定内容.....	57
5.3 桥梁承载能力鉴定计算.....	59
5.4 承载能力检算系数 (Z_1) 的确定.....	64
5.5 承载能力恶化系数 (ξ_e) 的确定.....	66
5.6 截面折减系数 (ξ_c 、 ξ_s) 的确定.....	68
5.7 活载影响修正系数 (ζ_q) 的确定.....	71
5.8 桥梁荷载试验的必要条件.....	73
5.9 桥梁承载能力鉴定报告编制.....	74
5.10 桥梁承载能力鉴定表.....	74

6 荷载试验及其分析	76
6.1 荷载试验	76
6.2 试验计划的制定	76
6.3 试验准备工作	77
6.4 静载试验加载方案与实施	78
6.5 静载试验观测方案与实施	82
6.6 静载试验测试数据实时处理分析	86
6.7 静载试验的加载控制与安全措施	87
6.8 静载试验资料的整理分析	88
6.9 动力荷载试验及其分析	91
6.10 荷载试验成果分析与评定	96
附录一 用回弹法检测桥梁结构混凝土强度的方法	100
附录二 用超声回弹综合法检测桥梁结构混凝土强度的方法	109
附录三 用回弹—取芯综合法检测桥梁结构混凝土强度的方法	118
附录四 用超声回弹综合法结合取芯检测桥梁结构混凝土强度的方法	123
附录五 混凝土中钢筋锈蚀电位的半电池电位法检测	124
附录六 混凝土中氯离子含量的检测	128
附录七 混凝土电阻率的检测方法	134
附录八 混凝土碳化状况的检测方法	136
附录九 混凝土中结构钢筋分布状况的调查	138
附录十 索结构索力测量的振动测量法	143
附录十一 拱式结构考虑开裂引起结构内力重分布的计算分析方法	145
附录十二 有填料拱式拱上建筑与主拱联合作用对主拱圈各截面的弯矩折减系	148
附录十三 通过测定混凝土表面应变确定钢筋拉应力的测点布置	157
附录十四 梁桥最大剪应力测点的布置	159
附录十五 混凝土结构裂缝调查与观测	160
本规程用词说明	130

1 总 则

1.01 为了适应公路交通不断发展的要求，合理利用现有公路桥梁，规范公路桥梁承载能力检测评定方法，正确评定桥梁承载能力，特制定本规程。

【条文说明】

制定本准则的目的：

一、通过对桥梁结构进行检测、检算和荷载试验分析，正确评定现有桥梁的承载能力，为确定现有桥梁的使用条件和应采用的技术措施提供可靠根据。

二、合理利用现有桥梁可资利用的承载潜力，充分发挥现有桥梁的使用价值，在保证结构安全的前提下，使现有桥梁在继续使用期间能够有效地满足公路交通不断发展的需要。

三、为现有桥梁承载能力检测评定工作提供统一的程序、准则和方法，保证承载能力检测评定工作质量，使同类型桥梁的检测评定结果具有一致性和可比性，妥善解决桥梁结构的安全使用问题。

1.02 本规程适用于现有公路常用钢筋混凝土、预应力混凝土、钢和圬工桥梁结构的承载能力检测评定。

【条文说明】

根据调查，国内现有公路桥梁绝大多数为钢筋混凝土、预应力混凝土、钢和圬工结构，因此本规程以这些类型的桥梁作为编写对象。

1.03 现有公路桥梁有下列情况之一时，须进行承载能力检测评定：

- (1) 有明显质量衰退或有较严重病害和损伤的桥梁；
- (2) 技术状况为四类以上者（含四类）；
- (3) 需提高承载能力及使用功能的桥梁；
- (4) 需通行特种荷载的桥梁；
- (5) 缺失技术资料和安全运营资料的桥梁；
- (6) 发生工程质量事故但经技术处理后的桥梁。

【条文说明】

一、对于使用多年的在用桥梁，技术状况在四类以上者（含四类），或因缺少技术资料、安全运营资料；或需提高承载能力、改善使用功能；或因长期受反复荷载的作用及各种不利的自然因素的侵蚀作用，致使桥梁出现不同程度的损伤和病重，须进行承载能力检测评定。

二、对于需要临时通过大件运输等特种荷载的桥梁，以及发生工程质量事故经过技术处理后的桥梁，须进行承载能力检测评定。

1.04 本规程的承载能力检测评定包括四个方面：桥梁缺损状况调查评估、质量状况检测评定、结构检算鉴定和荷载试验鉴定。当根据调查、检测与检算结果尚不能确定桥梁承载能力时，应进行荷载试验鉴定。

【条文说明】

一、桥梁结构承载能力检测评定的内容包括：缺损状况调查评估、质量状况检测、结构检算鉴定和荷载试验鉴定等，这些内容是承载能力检测评定的有机组成部分，后一部分内容是前一部分的补充与深化，一般应根据现有桥梁的技术状况和桥梁改造的具体要求确定承载能力检测评定的具体内容。

二、在进行桥梁结构承载能力检测评定时，应认真做好桥梁缺损状况调查评估和质量状况检测评定工作。一般情况下，根据桥梁缺损状况调查评估以及质量状况检测评定结果，通过结构检算鉴定，对桥梁结构承载能力作出评定。只有根据调查、检测与检算结果尚难以确定现有桥梁结构承载能力时，才可通过荷载试验对桥梁的结构状态和工作性能进行测试评估，确定其承载能力。

1.05 本规程遵循国家和交通部的现行有关标准和规范。

【条文说明】

除按本规程执行外，桥梁承载能力检测评定尚应遵循国家和交通部的现行有关标准和规范。

2 术语与符号

2.1 术 语

2.1.1 桥梁调查 Bridge Investigation

桥梁调查是对桥梁设计、施工、监理、监测、试验、养护及维修加固、桥址水文地质状况及其它历史资料进行的全面了解。它是桥梁基本技术资料的调查、搜集、掌握的过程。

2.1.2 桥梁检查 Bridge Inspection

桥梁检查是对结构及其附属设施的所有构件或部位进行全面系统的检查，记录所有缺损的部位、范围和程度。

2.1.3 荷载试验 Loading Test

荷载试验包括静力荷载试验和动力荷载试验，静力荷载试验是对桥跨结构施加一定量的外荷载，通过测试、计算整理及分析结构或构件控制截面应力和变位等，以了解承载能力状况。动力荷载试验是通过测试结构或构件在动荷载激振和脉动荷载作用下的受迫振动特性和自振特性，以分析判断结构的动力特性。

2.1.4 桥梁技术状况 The Technical Condition(situation) of Bridge

桥梁技术状况是指桥梁结构或构件各个方面的技术特征的总称，如混凝土表面质量、缺损状况、钢筋的锈蚀状况以及强度状况等。

2.1.5 钢筋锈蚀电位 (Corrosion Potential)

钢筋锈蚀的自然电位是把钢筋 / 混凝土看成一个半电池，是钢筋 / 混凝土与参考电极之间的电位差，它反映了钢筋锈蚀的状态和活性。

2.1.6 混凝土电阻率(Resistivity of Concrete)

钢筋混凝土结构中的钢筋锈蚀是一个电化学过程，而钢筋是由混凝土与周围介质隔绝起来的，混凝土的电阻率反映了混凝土的导电性。混凝土电阻率大，若钢筋发生了锈蚀，则发展速度慢，扩散能力弱；混凝土电阻率小，则发展速度快，扩散能力弱。

2.1.7 碳化 Carbonization

混凝土周围的介质（空气、土壤、地下水等）中含有酸性物质，如 CO_2 ， HCl ， SO_2 等，其中大气中的二氧化碳渗透到混凝土表面内与水泥石中的碱性物质发生中性化反应，使混凝土碱性下降，钢筋失去钝化保护，这一现象称为混凝土碳化。

2.1.8 模态参数 (Modal Parameter)

模态参数是指桥跨结构振动的各阶模态所对应的特征频率、振型和阻尼比等。

2.1.9 承载能力检算系数 Check-calculation Coefficient of Bridge Load-bearing Capacity

承载能力检算系数是综合考虑结构构件的缺损状况、构件混凝土强度和其自振特性等宏观影响因素后，对构件理论计算抗力效应给出的一个综合修正系数。在本规程中它以 Z_1 表示。

2.1.10 承载能力恶化系数 Depravation Coefficient of Bridge Load-bearing Capacity

承载能力恶化系数用以考虑鉴定期内桥梁结构质量状况衰退恶化而对结构抗力效应产生的不利影响。

2.1.11 截面折减系数 Section Discount Coefficient

截面折减系数主要是考虑砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构由于材料风化、碳化、物理与化学损伤以及由于钢筋腐蚀剥落造成的混凝土及钢筋有效面积损失对结构构件截面抗力效应的不利影响。

2.1.12 活载修正系数 Live Load redress Coefficient

活载影响系数是考虑了实际桥梁所承受的汽车荷载与标准汽车荷载之间的差异，以及这一差异对结构承载能力所造成的影响。在进行荷载效应组合时可引入活载影响修正系数适当的修正汽车检算荷载效应，以反映桥梁实际承受荷载情况。

2.1.13 典型代表交通量(Characteristic Quantity of Typical Traffic)

通过实桥现场调查换算的有代表性的实际交通量。

2.1.14 大吨位车辆混入率(Heavy Vehicle Ratio)

依据实际调查的重量超过汽车检算荷载主车的大吨位车辆的交通量与实际交通量之比，即大吨位车辆混入率。

2.1.15 荷载效率(Load Ratio)

荷载效率是指试验荷载所产生的荷载效应与相应的设计控制荷载效应的比值。

2.1.16 校验系数(Check Coefficient)

试验实测应力或变形值与试验荷载的计算值之比。

2.2 符 号

- Δ — 相对水平位移
- $s_{测i}$ — 根据实测结果计算的某一构件某一量测断面截面面积
- $s_{设i}$ — 同一构件同一量测断面设计截面面积
- k_{gi} — 截面结构恒载变异系数
- $l_{测i}$ — 某一构件长度或计算跨径实测值
- $l_{设i}$ — 同一构件设计长度或设计计算跨径
- k_{li} — 构件长度或跨径变异系数
- R_{it} — 承重构件或其主要受力部位混凝土的实测强度推定值
- R — 承重构件混凝土极限抗压强度值
- K_{bt} — 推定强度匀质系数
- R_{im} — 承重构件或其主要受力部位测区平均换算强度值
- K_{bm} — 平均强度匀质系数
- \bar{D}_n — 混凝土保护层厚度平均值
- D_{ni} — 结构或构件测量部位测点混凝土保护层厚度
- S_D — 测量部位测点保护层厚度的标准差
- K — 为合格判定系数值
- D_{ne} — 实测保护层厚度特征值
- D_{nd} — 保护层厚度设计值
- f_{mi} — 实测桥梁结构各部件自振频率
- f_{di} — 桥梁结构各部件自振频率计算值
- T_n — 对应于 n 阶自振频率的索的张力（索力）
- f_n — 索的第 n 阶自振频率
- L — 索的计算长度
- n — 索的振动阶数
- W — 单位索长的重量
- g — 重力加速度
- EI — 索的抗弯刚度。对于柔性索， $EI=0$

A'_0 — 杆件弯曲处的净截面积；
 W'_0 — 杆件弯曲处的净截面抵抗矩；
 f_l — 杆件的初弯曲矢度。
 B — 主梁全宽；
 L — 计算跨径；
 D_x 、 D_y — 桥梁纵向和横向的比拟单宽刚度
 M_p — 预制构件的抗弯承载力设计值；
 M_{com} — 完全抗剪连接组合梁的抗弯承载力设计值；
 n_1 — 在剪跨区实际设置的栓钉总数；
 n — 按安全抗剪连接计算得出的剪跨区栓钉总数。
 E_c — 受压弹性模量
 l_n — 横梁的净跨径
 l_c — 横梁支承中心之间的距离
 M_e — 折减后的支点弯矩；
 M — 按理论公式或方法计算的支点负弯矩；
 M' — 折减弯矩；
 q — 盖梁的支点反力在支座两侧向上按 45° 分布于盖梁截面重心轴上的荷载强度；
 R — 盖梁的支点反力；
 a — 盖梁支点反力在支座两侧向上按 45° 扩散交于重心轴的长度。
 EA — 钢管混凝土压缩和拉伸刚度；
 EI — 钢管混凝土弯曲刚度；
 E_c 、 A_c 和 I_c — 分别为混凝土的弹性模量、截面积和抗弯惯性矩；
 E_s 、 A_s 和 I_s — 分别为钢管的弹性模量、截面积和抗弯惯性矩。
 m_c — 荷载横向分布系数
 Sh — 为受压混凝土面积对中性轴的面积矩。
 b_h — 承托宽度；
 $\tan \alpha$ — 承托底面坡度
 b_{mi} — 腹板两侧上顶板（上翼缘）的计算宽度， $i=1,2,3\dots$ 见图。
 b_i — 腹板两侧上顶板（上翼缘）的实际宽度， $i=1,2,3\dots$ 见图。
 ρ_f — 有关简支梁和连续梁各跨中部梁段和悬臂梁中间跨的中部梁段翼缘

计算宽度的计算系数。

ρ_s — 简支梁支点、连续梁端支点及中间支点、悬臂梁悬臂段翼缘计算宽度的计算系数—。

K_0 — 倾覆稳定系数

K_c — 滑动稳定系数

S_d — 荷载效应函数；

Q — 荷载在结构上产生的效应；

γ_{s0} — 结构的重要性系数，当计算跨径 $L < 50\text{m}$ 时； $\gamma_{s0} = 1.00$ ；当 $50\text{m} < L < 100\text{m}$ 时， $\gamma_{s0} = 1.03$ ；当 $L > 100\text{m}$ 时， $\gamma_{s0} = 1.05$ ；

γ_{s1} — 荷载安全系数，对于结构自重，当其产生的效应与汽车（或挂车或履带车）产生的效应同号时， $\gamma_{s1} = 1.2$ ；异号时，则 $\gamma_{s1} = 0.9$ ；对于其他荷载 $\gamma_{s1} = 1.4$ ；

ψ — 荷载组合系数；

R_d — 结构抗力效应函数；

γ_m — 材料或砌体的安全系数；

α_k — 结构的几何尺寸；

R_j — 材料或砌体的极限强度；

Z_1 — 旧桥验算系数。

$M_{\text{稳}}$ — 稳定力矩；

$M_{\text{倾}}$ — 倾覆力矩；

$\sum P_i$ — 作用于基底竖向力的总和；

$(P_i e_i)$ — 作用在桥墩上各竖向力与它们到基底重心轴距离的乘积；

$(T_i h_i)$ — 作用在桥墩上各水平力与它们到基底距离的乘积；

x — 基底截面重心 O 至偏心方向截面边缘距离；

e_0 — 所有外力的合力（包括水浮力）的竖向分力对基底重心的偏心

$\sum P_i$ — 各竖向力的总和（包括水的浮力）；

$\sum T_i$ — 各水平力的总和；

f — 基础底面与地基土之间底摩擦系数
 σ_{\max} — 应力重分布后基底最大压应力；
 N — 作用于基础底面合力的竖向分力；
 a 、 b — 横桥方向和顺桥方向基础底面积的边长；
 $[\sigma]$ — 地基土壤的容许承载力，按荷载及使用情况计入容许承载力的提高系数；
 c_x — 顺桥方向验算时，基底受压面积在顺桥方向的长度；
 c_y — 横桥方向验算时，基底受压面积在横桥方向的长度；
 e_x 、 e_y — 分别为合力在 x 轴和 y 轴方向的偏心距
 $e_0 = M/N$ — 外力对基底截面重心的偏心距；
 N 、 M — 作用于基底的垂直力和外力对基底截面重心的力矩；
 $\rho = W/A$ — 基底截面核心半径， W 为相应于应力较小边缘的截面抵抗矩，
 A — 为基底面积。

 S_d — 荷载效应函数
 Q — 荷载在结构上产生的效应；对重载交通桥梁，汽车荷载效应应计入活载影响修正系数 ξ_q
 γ_{so} — 结构的重要性系数
 γ_{s1} — 荷载安全系数
 ψ — 荷载组合系数
 R_d — 结构抗力效应函数
 R^j — 材料或砌体的极限强度
 γ_m — 材料或砌体的安全系数
 α_k — 结构的几何尺寸
 Z_1 — 承载能力检算系数
 ξ_e — 承载能力恶化系数
 ξ_c — 配筋混凝土结构的截面折减系数
 ξ_s — 钢筋的截面折减系数
 T — 索的计算轴力，对重载交通桥梁，汽车荷载的计算轴力应乘以活载影

响修正系数 ξ_q

A — 索的计算面积

$[\sigma]$ — 允许应力限值

S_i — 加载前测值

S_l — 加载达到稳定时测值

S_u — 卸载后达到稳定时测值

S_p' — 相对残余变位（或应变）

f_0 — 结构的自振频率

f — 有附加质量影响的实测自振频率

M_0 — 结构在激振处的换算质量

M — 附加质量

D_r — 测点阻尼比

m — 在振动衰减曲线上量取的波形数

A_i — 在振动衰减曲线上量取的第 i 个波形的幅值

A_{i+m} — 在振动衰减曲线上量取的第 $i+m$ 个波形的幅值

B_i — 第 i 阶自振频率相应的半功率点带宽，即 0.707 倍功率谱峰值所对应的频率差

f_i — 第 i 阶自振频率

μ_c — 设计采用的冲击系数

μ_t — 行车试验实测的最大冲击系数

η_{dyn} — 动力试验荷载效率

ζ — 校验系数

m_i — 试验荷载作用下，某一量测截面第 i 片主梁或拱肋的荷载横向分布系数

f_i — 试验荷载作用下，某一量测截面第 i 片主梁或拱肋的测点挠度

3 桥梁调查与检测评定

3.1 一般规定

3.1.1 桥梁调查与检测应根据桥梁养护情况，参照本规程规定之项目有针对性的执行。

【条文说明】

通常而言，在桥梁养护过程中对桥梁已经进行了定期检查，对于不同地区，不同等级的桥梁结构进行定期的检查是非常重要的，这样可以尽早发现不安全因素，减少和防止结构的突然破坏，以便对结构的损伤和病害及早进行处理，防止进一步恶化，减少不必要的浪费。同时可以积累桥梁健康状态的资料，便于桥梁运营的管理。本规程规定的桥梁调查与检测可以根据桥梁养护的情况，有目的、有重点的确定桥梁调查和检测的内容。

3.1.2 桥梁调查应对桥梁设计、施工、监理、监测、试验、养护及维修加固、桥址水文地质状况及其它历史资料进行全面调查与了解。

【条文说明】

桥梁调查包括对桥梁设计和建设阶段的资料调查、桥梁运营养护资料调查、桥梁结构受灾后情况调查、桥梁功能改变后和改扩建方面的资料调查。针对以上方面内容，根据桥梁的现状，找出问题可能存在的方面，有针对性的对以上内容展开调查。

3.1.3 桥梁检测分为一般检查和详细检查两部分，一般检查是对结构及其附属设施的所有构件或部位进行全面系统的检查，记录所有缺损的部位、范围和程度。详细检查是依据一般检查的结果，对一些重点部位或典型桥孔采用一些专门技术和检测设备进行深入而细致的检测。

【条文说明】

桥梁一般检查是在桥梁养护的基础上，对桥梁的表观病害及缺损状况等做全面的检查，桥梁一般检查以目视检查为主，由经验丰富的桥梁工程师和桥梁检测技术人员完成，通过桥梁的一般检查对桥梁结构或构件的技术状态作出评价。桥梁详细检查是在桥梁一般检查的基础上，根据病害特征有针对性的对桥梁做进一步的检查，以求更全面准确的掌握桥梁的技术状态，为桥梁承载能力评定提供可靠的依据。

3.1.4 对于多跨或多孔桥梁，应根据桥梁养护检查情况，选择最具代表性的或最不利的桥跨进行全面的检测，以评定其承载能力。

【条文说明】

桥梁养护检查情况是了解桥梁基本状况的重要参考资料，本规程所规定的桥梁检测在内容和目的上是不同于桥梁的养护的定期检查。本规程规定桥梁检测是为了桥梁承载能力鉴定

提供客观、真实可靠的资料。因此，从某种意义上说，本规程的桥梁检测只关心与桥梁承载能力相关的内容，以具有代表性或最不利的桥跨或桥孔作为检测评定对象，能对全桥或整体的评定结果起到控制作用。

3.1.5 桥梁的检测宜分上下部结构，针对构件进行。

【条文说明】

桥梁结构设计时承载能力的计算以构件为分析对象，以控制截面的承载能力情况来反应桥跨结构的承载能力。本规程采取的桥梁的承载能力鉴定方法是考虑检测或试验结果后，针对结构构件进行的以检算分析为主的承载能力鉴定。因此，桥跨结构的检测宜分上下部结构，针对构件进行，以便有效、合理地运用检测结果进行承载能力鉴定工作。

3.1.6 桥梁检测工作一般流程

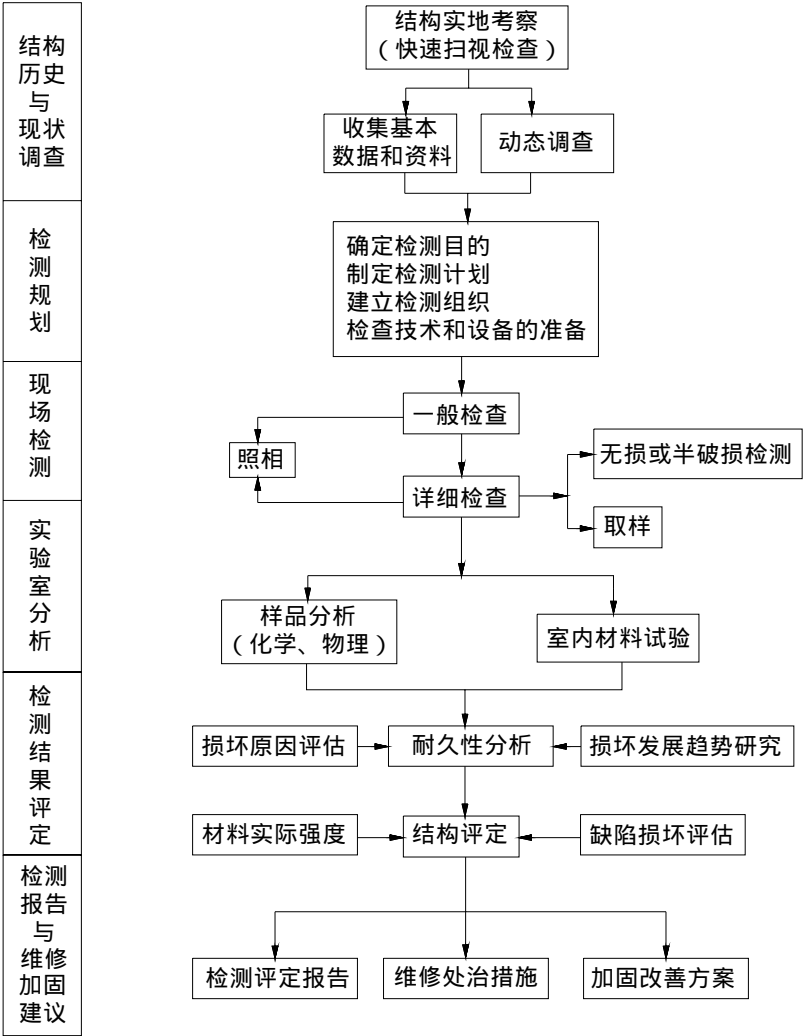


图 3.1 桥梁检测工作一般流程图

3.2 桥梁调查

3.2.1 对需要鉴定的桥梁应进行实地考察，以初步了解桥梁的技术状况和主要存在问题。

3.2.2 全面搜集有关桥梁勘察设计、施工、监理和运营、养护、试验检测以及维修加固等方面的技术资料。

(1) 勘察设计资料，主要包括：桥位地质钻探资料及水文勘测资料、设计计算书及有关图纸、变更设计计算书及有关图纸等。

(2) 施工、监理、监控与竣工技术资料，主要包括：材料试验资料、施工记录、监理资料、施工监控资料、地基与基础试验资料、竣工图纸及其说明、交工验收资料、交工验收荷载试验报告、竣工验收有关资料等。

(3) 养护、试验检测及维修与加固资料，主要包括：桥梁检查与检测、荷载试验资料、历次桥梁维修、加固资料、历次特别事件记载资料等。

3.2.3 应向相关人员调查了解桥梁病害史、使用中的特别事件、限重限速原因、交通状况、今后改扩建计划、水文、气候、环境等方面情况。

【条文说明】

现有桥梁的原始技术资料，是掌握桥梁结构的技术状况、制定桥梁结构技术鉴定工作计划、分析桥梁结构检算及荷载试验结果重要依据之一，应全面细致地进行桥梁原始技术资料的搜集工作。对于由某些原因造成技术资料失散而无法搜集时，应深入调查研究、走访有关单位或当事人员，详尽询问收集有关桥梁技术情况。

3.3 桥梁一般检查与评定

3.3.1 桥梁一般检查要点

3.3.1.1 桥面系应检查

- (1) 桥面铺装的类型和尺寸；
- (2) 桥面铺装的平整程度，有无积水、坑洼、开裂或破损现象；
- (3) 桥面排水管槽有无堵塞、漏水或破损现象；
- (4) 桥面的纵横坡度是否符合设计要求；
- (5) 梁端伸缩缝的构造及破损情况；
- (6) 人行道、缘石、栏杆的构造有无破损或缺件现象。

3.3.1.2 上部结构应检查

- (1) 主梁、主拱、主桁架的构造和实际尺寸；

- (2) 横系梁、腹拱等的构造、位置和实际尺寸；
- (3) 桥跨的上拱度及各部件的位置有否变化；
- (4) 主要构件材料的实际强度；
- (5) 混凝土表面有无蜂窝、麻面、剥落、空洞、露筋等情况，混凝土的碳化深度；
- (6) 钢筋混凝土和预应力混凝土构件的开裂及钢筋锈蚀与削弱程度，主盘保护层厚度；
- (7) 钢构件的平直度、锈蚀、裂纹及高强度螺栓松动、断裂等情况；
- (8) 圬工构件有无开裂、侵蚀、剥离现象，砌缝填料有无脱落现象；
- (9) 连接部位、节点附近有无开裂或脱离现象；
- (10) 各种构件主要开裂部位的裂缝宽度、裂缝长度，并绘制裂缝展开图；
- (11) 主拱拱轴线及跨中、L/4 处矢高的变化；拱脚开裂情况；主拱严重开裂截面，计算时应按应力或内力重分布考虑的位置；
- (12) 系杆拱吊杆锚固端有无锈蚀、松懈等情况。

3.3.1.3 桥梁支座应检查

- (1) 钢板支座是否干涩、锈蚀；底板有否脱空，锚栓有否剪断；
- (2) 摆柱支座各部件的相对位置是否正确，受力是否均匀；
- (3) 活动支座的伸缩及转动是否灵活；
- (4) 橡胶支座有无老化开裂、变形或脱空现象；
- (5) 支承垫石有无损伤及破碎现象。

3.3.1.4 桥梁下部结构应检查

- (1) 墩台的构造及实际尺寸；
- (2) 墩台帽、墩台身材料的实际强度；
- (4) 墩台内部有无开裂与空洞；
- (5) 墩台主要开裂部位的裂缝宽度、裂缝长度；
- (6) 墩台有无沉降、倾斜或滑移等现象；周围新建构造物对墩台的影响；
- (7) 基础的结构类型、尺寸、埋深和防护措施；
- (8) 地基有无冻害、过度冲刷现象。

3.3.1.5 桥梁水文及调治构造物应检查

- (1) 桥梁所在河段的流量、流速、流向、水面纵坡、水位及通航、漂浮物等情况；
- (2) 河道的冲刷及变迁情况；
- (3) 调治构造物设置是否合理、坚固，其工作情况是否正常；
- (4) 锥坡、护坡和导流堤等有无开裂、隆起、塌陷、坡脚损坏等现象；

(5) 桥头引道线形及路肩、边坡、排水沟等状况。

【条文说明】

对于既有混凝土桥梁结构承载能力的评定，桥梁技术状态的评定是一项很必要的内容。混凝土结构的承载能力的劣化在混凝土外观质量上肯定会有所表现。混凝土结构的损伤破坏一般都这样一个过程：混凝土构件裂缝的产生，随着裂缝的进一步发展，钢筋腐蚀，混凝土纵向开裂，保护层剥落，承载力降低，最终导致构件破坏；对于钢结构和索结构，承载能力的退化在构件表观病害上会有所体现，如焊缝的开裂、锚头生锈和锚固区开裂、构件表面防护损坏以及生锈等；对于桥梁墩台与基础、桥面系等部分同样如此，如基础冲刷，桥面铺装损坏严重都会造成相应结构或构件的承载能力降低。因此通过对以上规定的检查要点进行一般检查可以初步判断桥梁的承载能力状况。

混凝土构件中常见的缺损有裂缝、碎裂、剥落、层离、蜂窝、空洞、环境侵蚀和钢筋锈蚀等。钢构件的缺损主要是锈蚀、裂缝、机械损伤、局部变形、焊缝缺陷和防护层损坏等，其中包括由于应力集中和疲劳等引起的裂缝。对于这些常见缺陷通过一般检查即可达到检测目的。一般检查通常以人工目力检查为主辅以必要的简单工具进行。对于特殊结构型式的现有桥梁的细部检查，应针对桥梁的结构特点与构造细节另行拟定。对桥梁的局部构造及各破损部位宜辅以照片加以记录描述。

3.3.2 桥梁一般检查结果评定

3.3.2.1 对桥梁结构构件表观缺陷状况，按 3.3.1 条规定相关检查要点进行一般检查。对典型严重缺损或有代表性缺损，应采用表面测量、无损检测和局部缺陷取试样等详细检查方法，确定其程度及其对结构的影响。

3.3.2.2 桥梁结构构件技术状况，分为良好状态、较好状态、较差状态、坏的状态和危险状态，对应的最终评定标度值为 1、2、3、4 和 5，桥梁结构构件技术状况评定标准见表 3.3.2-1 至表 3.3.2-5。

3.3.2.3 根据桥梁结构构件的检查结果，按照桥梁结构构件技术状况评定标准（见表 3.3.2-1 至表 3.3.2-5）所描述的各种状态的特征，评定出桥梁结构每一承重构件最终评定标度和技术状况。

【条文说明】

桥梁结构构件的表观缺损情况是判断构件承载能力的一个直观的评价指标，为了便于分析和辨别构件表观技术状况的不同程度，根据缺损状况的不同将其分为五个级别，并规定和总结出每个级别所对应的状态特征。根据桥梁检查的结果，判定构件的技术等级，从而实现对其缺损状况的评定。评定标准的制定是根据病害的结构的影响程度和影响的不同方面来考虑的。良好状态和较好状态时，桥梁结构和构件所存在的病害对其功能性产生一定影响；较差状态时，病害已经影响到结构和构件的使用功能，如不及时处理将严重影响其耐久性；坏的状态，桥梁结构承载能力有明显下降的趋势，已不能满足正常的使用功能，必须进行必要的维修和加固措施；危险状态的桥梁结构本身已存在相当程度的安全隐患，必须由专门的机构进行承载能力鉴定。

混凝土及配筋混凝土上部结构外观缺损状况评定标准

表 3.3.2-1

评定标 度值	构件技 术状况	评 定 标 准
1	良好 状态	① 基本上完好无缺，但表面欠清洁。 ② 重点部位有少量裂缝，缝宽在限值范围内，间距大于 50cm，缝长不足截面尺寸的 1/3。
2	较好 状态	① 有剥落、蜂窝麻面和露筋，其累计面积不到构件面积的 3%。 ② 局部网状开裂，面积在 0.5 平方米以下。 ③ 结合面开裂或有纵向裂缝，缝长小于 1/8 结合面长度或跨长。 ④ 缝宽在限值范围内，缝长为 1/3-1/2 截面尺寸，间距大于 30cm。
3	较差 状态	① 剥落，蜂窝麻面和露筋累计面积为构件表面的 3%~10%。 ② 钢筋锈蚀，或混凝土表面有锈迹。 ③ 结合面开裂或有纵向裂缝，缝长为 1/8-1/2 结合面长或跨长。 ④ 渗漏现象，或个别地方有钟乳石状悬挂沉积物。 ⑤ 横向联系松动。 ⑥ 局部网状开裂，面积为 0.5—1.0 平方米。 ⑦ 缝宽在限值范围之内，间距大于 20cm，缝长为截面尺寸的 1/2-2/3。
4	坏 的状态	① 多处局部网状开裂，累计面积大于构件表面积 10%。 ② 剥落、蜂窝麻面和露筋累计面积为构件表面积的 10%以上。 ③ 钢筋锈蚀剥落，或有顺主筋方向裂纹。结合面开裂或纵向裂缝，缝长大于 1/2 结合面长或跨长。 ⑤ 严重漏水，多处有钟乳石状悬挂沉积物。 ⑥ 横向联系严重损坏造成横向刚度明显降低。 ⑦ 重点部位缝宽介于限值与 1mm 之间，缝长大于 2/3 截面尺寸，间距小于 20cm。 ⑧ 异常声音和振动。
5	危险 状态	① 异常变形，如主梁跨中下挠过大、拱顶下沉等。 ② 横向有失稳迹象。 ③ 裂缝大多贯通，缝宽大于 1mm，间距小于 10cm。 ④ 主筋锈断。 ⑤ 混凝土受压区出现压碎裂缝。

砖石上部结构外观缺损状况评定标准

表 3.3.2-2

评定标 度值	构件技 术状况	评 定 标 准
1	良好 状态	① 基本上完好无缺。 ② 表面脏污或生长藓苔。
2	较好 状态	① 砌缝中灌木、杂物丛生。 ② 局部砌缝灰浆脱落或横向开裂。
3	较差 状态	① 砖石表面普遍风化，或砌缝灰浆脱落，或局部有渗漏现象。 ② 缝宽在限值范围内，且缝长小于 1/2 截面尺寸或跨长。 ③ 局部剥落，或一般承重构件出局部砌体松动。 ④ 一般承重构件出现异常变形，如侧墙鼓肚等。
4	坏 的状态	① 多处出现严重渗漏，结构严重风化。 ② 缝宽大于限值，且缝长介于 1/2-2/3 截面尺寸或跨长之间。 ③ 大面积剥落或砌体松动。 ④ 主拱圈局部变形。 ⑤ 个别石块脱落。
5	危险 状态	① 缝宽大于 2mm，缝长贯通截面尺寸或跨长；或发生开合现象。 ② 干砌拱桥出现走动变形。 ③ 局部或相当一些石块脱落。

钢结构外观缺损状况评定标准

表 3.3.2-3

评定标 度值	构件 技术 状况	评 定 标 准
1	良好 状态	涂层略有老化，表面污垢。
2	较好 状态	① 涂层老化，脱落和膨胀面积在 10%以内。 ② 焊接部位涂层裂纹。 ③ 个别节点螺栓松动。
3	较差 状态	① 涂层明显老化，脱落和膨胀面积为 10%~50%。 ② 焊缝开裂后构件裂纹，截面削弱不到 3%。 ③ 个别次要构件出现局部异常变形。 ④ 联结部位铆钉或螺栓损坏不足 10%。 ⑤ 表面锈蚀，截面损失在 3%以下。 ⑥ 行车稍感振动或摇晃。
4	坏 的状态	① 涂层显著老化，膨胀和脱落面积在 50%以上。 ② 焊接开裂或构件裂纹，截面削弱 3%-10%。 ③ 个别主要构件出现异常变形。 ④ 联结部位铆钉或螺栓损坏在 10%-30%之间。 ⑤ 表面严重锈蚀，截面损失为 3%-10%。 ⑥ 钢材变质。 ⑦ 行车振动或摇晃明显或有异常音。
5	危险 状态	① 焊缝开裂、或构件裂纹和锈蚀剥落，截面削弱 10%以上。 ② 较多主要构件出现异常变形，显著影响承载力。 ③ 钢材明显变质，造成结构承载力明显降低。 ④ 联结部位铆钉或螺栓损坏在 30%以上。 ⑤ 结构振动或摇晃显著、有不正常移动。

索结构外观缺损状况评定标准

表 3.3.2-4

评定标 度值	构件 技术 状况	评 定 标 准
1	良好 状态	表面防护完好,锚头无积水,锚固区无裂缝
2	较好 状态	表面防护基本完好,有细微裂缝,锚头无锈蚀,锚固区无裂缝
3	较差 状态	表面防护有少数裂缝,伴有少量锈迹,锚头有轻微锈蚀,锚固区细小裂缝
4	坏 的状态	表面防护普遍开裂,并有部分脱落,锚头锈蚀,锚固区有明显的受力裂缝。
5	危险 状态	表面防护普遍开裂,并有大量脱落,钢索裸露,钢索锈蚀严重,锚头积水锈蚀,锚固区有明显的受力裂缝,裂缝宽度大于 0.2mm。

下部结构外观缺损状况评定标准

表 3.3.2-5

评定标 度值	构件技 术状况	评 定 标 准
1	良好 状态	① 各部件完整，浅基防护处理效果良好。 ② 表面污秽，长有藓苔或植物丛生。 ③ 少量线状短缝，宽度在限值范围之内。 ④ 局部蜂窝麻面、剥落，深度不足 1cm。
2	较好 状态	① 局部网裂，面积不到 1 平方米或较多线状短缝；或缝宽在限值范围内。 ② 砖石表面风化，或局部灰浆脱落。 ③ 少数蜂窝麻面、剥落，深度不足 2cm，面积不到 3%。 ④ 浅基未作防护处理，但未造成冲刷损毁。
3	较差 状态	① 多处局部网裂，面积大于 1 平方米；或大量线状短缝，缝宽超过限值。 ② 多处蜂窝麻面，剥落露筋，深度大于 3cm，面积为 2%-10%。 ③ 砖石表面严重风化，或灰浆大量脱落。 ④ 砌体松动，或严重漏水浸蚀，或局部鼓肚。 ⑤ 浅基础局部浸蚀，或桥基局部有冲刷掏空迹象。
4	坏的 状态	① 表面普遍网裂；或较多线状通缝，缝宽超过限值。 ② 大量蜂窝麻面、剥落露筋，面积大于 10%，或钢筋严重锈蚀。 ③ 大面积砌体松动或鼓肚变形。 ④ 桥基局部冲空或桩基有冲刷磨损现象。 ⑤ 桩基环状冻裂，木桩腐朽或蛀蚀严重。
5	危险 状态	① 墩台不稳定，有滑动、下沉、位移、倾斜及冻害现象。 ② 基础严重冲刷，20%以上基底掏空；或桩基严重冲刷磨损。 ③ 变形大于规范控制值，或裂缝有开合现象。

3.4 桥梁详细检测与评定

3.4.1 桥梁详细检查包括：

- (1) 桥梁几何形态参数测定
- (2) 桥梁结构恒载变异状况调查
- (3) 桥梁结构构件的材质强度检测与评定
- (4) 混凝土中钢筋锈蚀电位的检测
- (5) 混凝土中氯离子含量的测定
- (6) 混凝土电阻率的检测
- (7) 混凝土碳化状况的检测
- (8) 混凝土结构钢筋分布状况的调查

- (9) 桥梁结构固有模态参数的测定
- (10) 索结构索力的测量
- (11) 桥梁墩台与基础变位情况调查
- (12) 地基与基础的检验

3.4.2 桥梁几何形态参数测定

3.4.2.1 对梁式结构，主要测定桥跨结构纵向线形和墩（台）顶的水平变位；对拱结构，主要测定拱轴线、桥面结构纵向线形和墩（台）顶的水平变位；对索塔结构主要测定塔顶水平变位、桥面结构纵向线形和主缆线形。

3.4.2.2 梁式桥跨结构、拱式和索塔结构的桥面结构纵向线形，宜沿桥纵向分断面布设测点，分桥轴线和车行道上、下游边缘线 3 条线，按二等工程水准测量要求进行闭合水准测量。测点应布置在桥跨或桥面结构的跨径等分点截面上。对中小跨径桥梁，单跨测量截面不宜少于 5 个；对大跨径桥梁，单跨测量截面不宜少于 9 个。

3.4.2.3 墩（台）顶的水平变位或塔顶水平位移，可采用悬挂垂球方法进行量测或采用极坐标法进行平面坐标测量。

3.4.2.4 拱轴线和主缆线形，宜按桥跨的 12 等分点分别在拱背和拱腹、主缆顶面布设测点，采用极坐标法进行平面坐标和三角高程测量。

3.4.2.5 桥梁结构几何形态参数的实测数据，可用于确定桥梁结构持久荷载状态的变化或推求判定结构基础变位情况。对超静定结构，宜依据实测的结构几何参数，模拟计算分析确定当前桥梁结构在持久荷载下的内力和变位状况。

3.4.2.6 实测的拱轴线如在拱顶发生下沉，若其主要原因是拱脚发生水平位移所致，则可依据下述公式计算拱脚的相对水平位移：

$$\Delta = \left(\frac{\delta_{\frac{l}{4}}}{\eta_{\frac{l}{4}}} + \frac{\delta_{\frac{l}{2}}}{\eta_{\frac{l}{2}}} \right) / 2 \quad (3.4.2)$$

式中： $\eta_{\frac{l}{4}}$ ， $\eta_{\frac{l}{2}}$ — 分别为推力影响线在 $\frac{l}{4}$ 和 $\frac{l}{2}$ 截面的坐标值；

$\delta_{\frac{l}{4}}$ ， $\delta_{\frac{l}{2}}$ — 分别为实测拱轴线在 $\frac{l}{4}$ 和 $\frac{l}{2}$ 截面的挠度值。

【条文说明】

结构几何形态的变化在一定程度上能反映结构内力的变化情况，如跨中的下挠、墩台沉降等。对于超静定结构而言，结构几何形态的变化造成结构的次内力对结构的影响往往是不可忽略，通过的结构几何形态的观测，反演出结构的内力变化情况。并为分析结构形态变化的原因提供可靠依据。

3.4.3 桥梁结构恒载变异状况调查

3.4.3.1 桥梁结构恒载变异状况调查工作主要有如下几个方面：

- (1) 桥梁总体尺寸的测量，主要包括桥梁长度、桥宽、净空、跨径等。
- (2) 桥梁构件尺寸的量测，主要包括主要构件、次要构件的长度与截面尺寸等。
- (3) 桥面铺装厚度测定。
- (4) 其它附加荷载调查，如过桥管线等。

【条文说明】

桥梁结构恒载变异状况主要表现为结构或构件几何尺寸的变异，因此，此项调查主要针对有关结构或构件几何尺寸方面变异进行。

3.4.3.2 桥梁长度、跨径可在桥面上按桥轴线和车行道上、下游边缘线 3 条线采用进行测量。

3.4.3.3 桥梁宽度沿桥纵向分断面采用钢尺分段测量方法进行量测，量测断面以每跨不少于 3 个断面为宜。

3.4.3.4 构件长度与截面尺寸可采用钢尺进行几何测量，对上部主要承重构件，中小跨径桥梁量测断面单跨不得少于 9 个断面，大跨径桥梁，量测断面单跨不得少于 17 个断面。对桥梁墩台、主塔等下部主要承重构件，量测断面以 3~5 个为宜。对于次要构件，量测断面不宜少于 3 个。

3.4.3.5 桥面铺装层厚度可采用分断面布点钻芯量测，或采用雷达结合钻芯修正的方法测定。采用分断面布点钻芯测量时，量测断面宜布置在墩顶、跨中和 L/4 截面上，每截面钻孔点布设 3 个测点，分设在桥轴线和车行道的上、下游边缘处。

3.4.3.6 根据桥梁结构恒载变异状况调查实测数据，应依据下式计算构件的截面结构恒载变异系数和长度或跨径变异系数：

(1) 截面结构恒载变异系数

$$k_{gi} = \frac{s_{测i}}{s_{设i}} \quad (3.4.3-1)$$

式中： $s_{测i}$ — 根据实测结果计算的某一构件某一量测断面截面面积；

$s_{设i}$ — 同一构件同一量测断面设计截面面积。

(2) 构件长度或跨径变异系数

$$k_{li} = \frac{l_{测i}}{l_{设i}} \quad (3.4.3-2)$$

式中： $l_{测i}$ — 某一构件长度或计算跨径实测值。

$l_{设i}$ — 同一构件设计长度或设计计算跨径。

【条文说明】

由于施工偏差、桥面调坡等原因造成桥梁恒载的变异,从而相对桥梁承载能力造成影响。为准确评定桥梁的承载能力,对恒载的变异情况亦应调查清楚。调查主要对结构构件的截面尺寸、长度或跨径、桥面铺装厚度等进行实测,并与设计值比较。同时还应调查其它附属构造物荷载变异情况。

3.4.4 桥梁结构构件的材质强度检测与评定

3.4.4.1 桥梁结构承重构件的主要受力部位,如主梁、主桁、主拱圈、墩台身、墩台帽等,采用无损检测、半破损检测或截取试样等方法检测其材质强度。

【条文说明】

为减少对结构构件的损坏,应尽量采用无损检测或半破损检测的方法测试材料强度,对混凝土强度,首先考虑采用超声回弹综合法测试混凝土强度,必要时才考虑采用钻芯取样或结合回弹或超声测试的方法测试混凝土强度。钻芯或截取试样的位置及数量以不致影响结构安全为根本目标。

3.4.4.2 钢材强度一般依据设计、施工有关资料确定,仅当无资料可查时应通过调查桥梁修改年代、材料来源、查看结构外观等进行分析判定。

3.4.4.3 钢材强度试验可在结构有代表性的构件上,截取试件,进行强度试验,确定极限强度、屈服点、延伸率、冲击韧性等,必要时还可进行疲劳试验、金相检验和化学成份分析试验等。

【条文说明】

钢材强度通常变异不大,可通过有关资料调查来确定。

3.4.4.3 混凝土强度,应在结构承重构件或其主要受力部位布置测区,根据附录一至附录四的介绍,选择合适的方法进行测定。

【条文说明】

用回弹法(见附录一,适用于只有一个测面的构件,如板梁、行车道板等)、“超声—回弹”综合法(见附录二,适用于有两个测面的构件,如T梁、拱肋及立柱等),测定其强度推定值。必要时也可采用回弹—取芯综合法(见附录三)、“超声—回弹—取芯”综合法测定(见附录四)。

3.4.4.4 在结构上钻、截取试件时,应尽量选择在承重构件的次要部位或次要承重构件上,并应采取有效措施,确保结构安全,对钻、截取试件处,应及时进行加固等修补处理。

3.4.4.5 对混凝土桥梁结构,应根据每一承重构件或其主要受力部位的实测强度推定值和测区平均换算强度值,按下式计算其推定强度匀质系数 K_{bt} 和平均强度匀质系数 K_{bm} ,并可按表 3.3.4 对其强度状态作出评定。

(1) 推定强度匀质系数

$$K_{bt} = \frac{R_{it}}{R} \quad (3.4.4-1)$$

式中： R_{it} — 承重构件或其主要受力部位混凝土的实测强度推定值；

R — 承重构件混凝土极限抗压强度值。

(2) 平均强度匀质系数

$$K_{bm} = \frac{R_{im}}{R} \quad (3.4.4-2)$$

式中： R_{im} — 承重构件或其主要受力部位测区平均换算强度值。

承重构件实测强度状况评定标准 表 3.4.4

K_{bt}	K_{bm}	强度状态	强度评定 标度值
≥ 0.90	≥ 1.00	良好	1
$0.90 \sim 0.95$	≥ 0.95	较好	2
$0.81 \sim 0.89$	≥ 0.90	较差	3
$0.70 \sim 0.80$	≥ 0.85	坏的	4
≤ 0.70	< 0.84	危险	5

【条文说明】

混凝土构件材质强度的评定主要通过推定强度值和平均强度值两方面进行，

3.4.5 混凝土中钢筋锈蚀电位的检测

3.4.5.1 钢筋锈蚀状况检测范围应为主要承重构件或承重构件的主要受力部位，或根据一般检查结果有迹象表明钢筋可能存在锈蚀的部位。

【条文说明】

钢筋锈蚀是一个电化学过程，钢筋锈蚀的自然电位是把钢筋 / 混凝土看成是一个半电池，是钢筋 / 混凝土与参考电极之间的电位差，反映了钢筋锈蚀的状态和活性。通过对钢筋锈蚀电位的测量，从而对钢筋的锈蚀可能性作出判断。

3.4.5.2 混凝土中钢筋锈蚀电位可通过测量铜—硫酸铜参考电极与钢筋—混凝土电极之间电位差确定，检测方法详见附录五。根据检测结果按照表 3.4.5 规定的评判标准判断混凝土中钢筋发生锈蚀的概率或钢筋正在发生锈蚀的活动性。

钢筋锈蚀电位的评判标准

表 3.4.5

评定标度值	电位水平 (mV)	钢 筋 状 态
1	0~-200	无锈蚀活动性或锈蚀活动性不确定
2	-200~-300	有锈蚀活动性，但锈蚀状态不确定，可能坑蚀
3	-300~-400	有锈蚀活动性，发生锈蚀概率大于 90%
4	-400~-500	有锈蚀活动性，严重锈蚀可能性极大
5	<-500	构件存在锈蚀开裂区域
备 注	1、表中电位水平为采用铜-硫酸铜电极时的量测值； 2、混凝土湿度对量测值有明显影响，量测时构件应为自然状态，否则不能使用此评定标准。	

【条文说明】

钢筋的极电位只能说明钢筋是否可能锈蚀，不能提供锈蚀速率的数据。

3.4.6 混凝土中氯离子含量的测定

3.4.6.1 氯离子含量测定应根据构件的工作环境条件及构件本身的质量状况确定测区，测区应能代表不同工作条件及不同混凝土质量的部位，测区宜参考钢筋锈蚀电位测量结果确定。

3.4.6.2 混凝土中的氯离子含量，可采用现场按混凝土不同深度取样，通过对样品进行化学分析的方法加以测定（测定方法详见附录六）。测定结果须能反映氯离子在混凝土中随深度的分布。根据钢筋处的混凝土氯离子含量，可按表 3.3.6 评判标准确定其对钢筋锈蚀的影响程度。

氯离子含量对钢筋锈蚀影响程度的评定标准

表 3.4.6

氯离子含量 (占水泥含量的百分比)	<0.15	0.15~0.4	0.4~0.7	0.7~1.0	>1.0
评定标度值	1	2	3	4	5
诱发钢筋锈蚀的可能性	很小	不确定	有可能诱发 钢筋锈蚀	会诱发钢 筋锈蚀	钢筋锈 蚀活化

【条文说明】

混凝土中的氯离子可诱发并加速钢筋锈蚀，测量混凝土中氯离子含量可间接评判钢筋锈蚀活化的可能性。

3.4.7 混凝土电阻率的检测

3.4.7.1 混凝土电阻率可采用四电极阻抗测量法测定，即在混凝土表面等间距接触四支电极，两外侧电极为电流电极，两内侧电极为电压电极，通过检测两电压电极间的混凝土阻抗获得混凝土电阻率，检测方法详见附录七。

3.4.7.2 混凝土电阻率检测测区应根据钢筋锈蚀电位测量结果确定。对钢筋锈蚀电位测试结果表明钢筋可能锈蚀活化的区域，应进行混凝土电阻率测量。混凝土电阻率对钢筋锈蚀影响程度的评判标准见表 3.4.7。

混凝土电阻率对钢筋锈蚀影响程度的评判标准 表 3.4.7

评定标度值	电阻率（ $\Omega \cdot \text{cm}$ ）	可能的锈蚀速度
1	>20000	很慢
2	15000-20000	慢
3	10000-15000	一般
4	5000-10000	快
5	<5000	很快
备 注	混凝土湿度对量测值有明显影响，量测时构件应为自然状态，否则不能使用此评判标准。	

【条文说明】

混凝土电阻率与含水量有关，混凝土的电阻率是控制混凝土中钢筋锈蚀速率的因素之一，它反应了混凝土的导电性能，而钢筋在混凝土中的锈蚀基本上都属于电化学腐蚀，混凝土在钢筋的腐蚀中起到传递电子的作用，因此混凝土电阻率小，混凝土导电的能力越强，钢筋锈蚀发展速度快。因此，测量混凝土电阻率可间接评判钢筋的可能锈蚀速率，由于钢筋锈蚀的影响因素很多，无法定量的给出钢筋锈蚀速度与混凝土电阻率之间的关系，而只能通过电阻率的大小定性的判断锈蚀的可能性。当电阻率超过 $12000 \Omega \cdot \text{cm}$ 时，不大可能锈蚀，低于 $5000 \Omega \cdot \text{cm}$ 锈蚀的可能性极大。

3.4.8 混凝土碳化状况的检测

3.4.8.1 混凝土结构碳化状况检测的测区可参照钢筋锈蚀电位测试结果布置，确定对钢筋锈蚀电位测试结果表明钢筋可能锈蚀活动的区域，应进行混凝土碳化深度测量。

3.4.8.1 混凝土碳化状况的检测可采用在混凝土新鲜断面观察酸碱指示剂反应厚度的方法（检测方法详见附录八）。混凝土碳化深度对钢筋锈蚀及材料强度均有

一定影响。评判时可取构件的碳化深度平均值与该类构件保护层厚度平均值之比，并考虑其离散情况，进行评价。评判标准见表 3.4.8。

混凝土碳化深度对钢筋锈蚀影响的评判标准 表 3.4.8

评判标度值	1	2	3	4	5
碳化层深度/保护层厚度	<1*	<1	=1	> 1	> 1**
备 注	1、*构件全部实测比值均小于 1； 2、**构件全部实测比值均大于 1。				

【条文说明】

配钢筋混凝土构件中的钢筋通常由于碱性混凝土环境的保护而处于钝化状态，混凝土碳化将造成钢筋失去碱性混凝土环境的保护，当外界条件成熟，钢筋就会发生锈蚀。因此，检测混凝土碳化深度可间接的评判钢筋的可能锈蚀状态。

3.4.9 混凝土结构钢筋分布状况的调查

3.4.9.1 混凝土结构钢筋分布状况的调查包括钢筋位置和混凝土保护层厚度测量，对缺失资料的混凝土桥梁还应包括钢筋直径估测。

3.4.9.2 混凝土结构钢筋分布状况调查的范围，为主要承重构件或承重构件的主要受力部位，或钢筋锈蚀电位测试结果表明钢筋可能锈蚀活化的部位，以及根据结构检算及其它检测需要确定的部位。

3.4.9.3 混凝土结构钢筋分布状况可采用电磁检测方法进行无损检测。具体方法详见附录九。

3.4.9.4 根据某一测量部位各测点混凝土厚度实测值，按下式求出混凝土保护层厚度平均值 \bar{D}_n （精确至 0.1mm）。

$$\bar{D}_n = \frac{\sum_{i=1}^n D_{ni}}{n} \tag{3.4.9-1}$$

式中 D_{ni} 为结构或构件测量部位测点混凝土保护层厚度，精确至 0.1mm，n 为测点数。

3.4.9.5 按照下式计算确定测量部位混凝土保护层厚度特征值 D_{ne} (精确至 0.1mm):

$$D_{ne} = \bar{D}_n - KS_D \tag{3.4.9-2}$$

式中： S_D — 测量部位测点保护层厚度的标准差，精确至 0.1mm；

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{ni})^2 - n(\overline{D_n})^2}{n-1}}$$

K — 为合格判定系数值，按表 3.4.9-1 取用。

混凝土保护层厚度合格判定系数值

表 3.4.9-1

n	10~15	16~24	25
K	1.695	1.645	1.595

3.4.9.6 根据测量部位实测保护层厚度特征值 D_{ne} 与其设计值 D_{nd} 的比值，混凝土保护层厚度对结构钢筋耐久性的影响按表 3.4.9-2 来评判。

混凝土保护层厚度对结构钢筋耐久性的影响评判标准

表 3.4.9-2

评定标度值	D_{ne}/D_{nd}	对结构钢筋耐久性的影响
1	>0.95	影响不显著
2	0.85~0.95	有轻度影响
3	0.70~0.85	有影响
4	0.55~0.70	有较大影响
5	<0.55	钢筋易失去碱性保护，发生锈蚀

【条文说明】

混凝土对钢筋的保护作用包括两个方面，一是混凝土的高碱性使钢筋表面形成钝化膜；二是保护层对外界腐蚀介质、氧气及水分等渗入的阻止作用。后一种作用主要取决于混凝土的密实度及保护层厚度。因此，混凝土保护层厚度及其分布均匀性是影响结构钢筋耐久性的一个重要因素。

3.4.10 桥梁结构固有模态参数的测定

3.4.10.1 桥梁结构固有模态参数的测定主要是获取桥梁结构的自振频率、阻尼和振型，桥梁固有模态参数能反映桥梁结构的整体性能和技术状况。

【条文说明】

结构自振特性测试可采用环境随机振动试验方法（脉动试验法），在克服周期性振动干扰的情况下，通过测量桥梁结构各部件在环境随机振动激励下的振动响应信号，进行信号处理分析获得。同时也可根据需要采用激振方式进行。

测量分析系统由传感器、信号放大加工装置、记录和数据处理分析装置组成。系统配置

时应注意必须满足被测桥跨结构模态参数对其幅频特性、相频特性、动态响应范围等参数的要求。试验测量前，应对系统进行校准。

3.4.10.2 测点应布置在桥梁结构各部件模态振型的峰、谷点，并进行多点多方向的测量。信号记录时应保证足够的记录长度，并检查记录信号的有效性。记录结构振动信号时应记录地面随机振动信号。信号处理分析时有关参数的确定应遵循对随机信号分析处理的要求。

3.4.10.3 根据实测的桥梁结构各部件自振频率 f_{mi} 与设计理论计算值 f_{di} 比值可对桥梁结构各部件的整体性能和技术状况作出评定，其评定标准见表 3.4.10-1。

根据实测自振频率评定桥梁结构技术状态的评判标准 表 3.4.10-1

桥梁部件	桥梁上部结构		桥梁下部结构	
评定标度	f_{mi} / f_{di}	技术状况	f_{mi} / f_{di}	技术状况
1	≥ 1.1	良好状态	≥ 1.2	良好状态
2	1.0~1.1	较好状态	1.0~1.2	较好状态
3	0.9~1.0	较差状态	0.95~1.0	较差状态
4	0.75~0.90	坏的状态	0.80~0.95	坏的状态
5	0.75 以下	危险状态	0.80 以下	危险状态
备注	对缺少资料的中小跨径钢筋混凝土或预应力混凝土桥梁，可按下式计算上部结构一阶竖弯自振频率 $f_d = 90.6L^{-0.923}$ （标准差： $\sigma_f = \pm 0.61\text{Hz}$ ）式中：L 为上部结构的计算跨径，单位为米； f_d 单位为 Hz。			

【条文说明】

损伤将导致结构特征频率的变化。特征频率的变化有以下特点：1)特征频率的改变和结构整体特性有关，是一种典型的加权型累加值，而不是局域量；2)特征频率的改变是由结构损伤程度和损伤位置共同决定的，不是由单一因素决定的；3)在损伤位置一定时，损伤程度越大，则频率改变量也就越大；4)在损伤程度一定时，损伤位置对频率改变的影响相当复杂，即一些位置的损伤对某些低频成分的影响大些，另一些位置的损伤则对某些高频成分的影响大些，还有一些位置的损伤及其组合，对结构的某些特定的频率的改变不大，甚至没影响。鉴于以上特征频率改变与损伤的程度之间的特点，在引入特征频率作为动态测试中桥梁结构或构件刚度变化标识量时，要做一些处理。为消除损伤或截面损失位置等其他一些因素的影响，只取一些控制截面的特征频率来作为损伤标识量。并规定取特定阶数的特征频率。在跨中位置，振动的能量主要其中在低阶频率上，在桥墩附近，振动的能量分布比较平均，所取的特征频率的阶数要多一些。

为简单起见，由结构的无阻尼自由振动方程可以推导出特征频率的变特化量 $\delta\omega^2$ 和结构刚度变化 δK 之间的关系：

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \Rightarrow ([K] - \omega^2[M])[\phi] = 0 \quad (1)$$

M 为结构的质量矩阵；C 为结构的阻尼矩阵；K 为结构的刚度矩阵

当结构发生损伤时，假设质量阵 M 和阻尼阵不发生变化，只有 K 发生变化和特征频率变化，而且单元的损伤导致损伤单元的各个元素按同一比例变化。刚度变为 $K + \delta K$ ，特征频率变为 $\omega^2 + \delta\omega^2$ ，带入上式得

$$\delta\omega_j^2 = [\phi]_j^T [\delta K] [\phi]_j \quad (2)$$

假定单元损伤导致单元刚度的各元素按同一比例变化，即

$$\delta[K] = C_1[K] \quad (3)$$

将上式带入（2）式得 $\delta\omega_j^2 = C_1[\phi]_j^T [K] [\phi]_j$

$$\delta\omega_j^2 = C_1 k_j$$

k_j 第 j 阶特征频率

由以上公式可知，桥梁某一阶特征频率的变化幅度与与模态刚度的平方根成正比。因此，可以通过测试桥梁特征频率的变化来反应桥梁结构的整体损伤情况。

3.4.10.4 根据桥梁结构各部件的实测振型和测点阻尼比，可以粗略判断桥梁结构各部件的缺损情况。见表 3.4.10-2。

【条文说明】

结构部件出现缺损，一般会造成振型的变异，变异区段即为缺损所在区段。阻尼比的大小，可以反映混凝土结构有无裂缝的存在以及钢结构工作状态是否正常，

用阻尼比值评定桥梁技术状况的评判标准

表 3.4.10-2

桥梁结构类型	阻尼比值范围（%）	状态描述
普通钢筋混凝土桥	<0.5	无明显裂缝
	>1.0~2.0	有裂缝
预应力钢筋混凝土桥	<1.0	无明显裂缝
	>1.0~2.0	有裂缝
钢桥	≤0.1	正常

【条文说明】

阻尼是对于混凝土或混凝土的累积损伤的内部微裂缝状态水平的宏观指示值，阻尼和材料中的微裂缝的数量之间是相对应的，阻尼和微裂缝的变化通常可以直接监视材料的力学性能和结构状态。因此，有些学者提出，用模态阻尼比 ξ_j 的变化作为损伤标识量。早在五六十年代，在金属结构的动力试验中人们已发现，损伤将导致结构模态阻尼比的显著变化。之所以基于模态阻尼比变化的损伤识别方法没有流行，是因为模态阻尼比 ξ_j 的测试信噪比

$\eta_j = \frac{\Delta \xi_j}{\delta \xi}$ 通常并不太高, $\Delta \xi_j$ 和 $\delta \xi$ 分别是 ξ_j 由损伤引起的变化和 ξ_j 的测试误差。

3.4.11 索结构索力的测量

3.4.11.1 索结构的索力可以通过振动频率测量方法进行测量, 或通过在索股锚下预先安装测力传感器进行直接测量。

【条文说明】

索结构桥梁的索力直接反映结构持久状态下的内力状态, 是评价桥梁安全性和承载能力的主要参数。在承载能力鉴定时, 须对其进行检测评定。

3.4.11.3 振动频率测量方法见附录十, 其测量分析系统由传感器、放大器、数据采集与分析装置组成。系统配置应满足不同索长自振频率对仪器频率响应特性的要求。

3.4.11.4 采用振动频率法测量时, 宜量测索由于自然环境随机激振产生的横向振动响应信号, 通过信号处理分析获得索的前五阶自振频率值, 对两端铰结的索按下述公式计算索力 T 值:

$$T_n = \frac{4WL^2 f_n^2}{n^2 g} - \frac{n^2 EI \pi^2}{L^2} \quad (3.4.11-1)$$

$$T = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 T_n \quad (3.4.11-2)$$

式中: T_n — 对应于 n 阶自振频率的索的张力 (索力);

f_n — 索的第 n 阶自振频率;

L — 索的计算长度;

n — 索的振动阶数;

W — 单位索长的重量;

g — 重力加速度;

EI — 索的抗弯刚度。对于柔性索, $EI=0$ 。

3.4.11.5 对索结构索力测量结果, 可以从索力分布的均匀性及其与设计要求值的比较加以评定。对实测索力值明显高于设计要求值的索, 应检定其安全系数是否满足相关规范要求, 并从上部构造本身和索塔两方面查找原因。

【条文说明】

就索结构而言, 索力是桥梁工程技术人员所关心的问题。索结构桥梁的索力直接反映结构持久状态下的内力状态, 是评价桥梁安全性和承载能力的主要参数。在承载能力鉴定时, 须对其进行检测评定。目前索力测量方法主要采用振动频率, 该法测得的基频误差较大, 采

用前五阶特征频率所计算的索力的平均值作为最终实测值，误差能控制在 5%以内。同时计算索力时需采用合理的换算索长，以考虑减振器对两端约束条件的影响。

3.4.12 桥梁墩台与基础变位情况调查

3.4.12.1 桥梁墩台与基础变位调查应包括以下三个方面：

- (1) 桥梁墩台与基础的竖向沉降、水平变位和转角；
- (2) 相邻墩台与基础的沉降差；
- (3) 墩台与基础的不均匀沉陷、滑移、倾斜和冻拔等。

3.4.12.2 对于设有永久性控制检测点的桥梁墩台与基础，可通过测量永久性控制检测点平面坐标与高程的变化分析其变位。对于无永久性控制检测点的桥梁墩台与基础，可采用几何测量、垂线测量、光学测距等间接测量的方法，或通过测量桥跨结构几何形态系数的变化推定其变位。

3.4.12.3 对桥梁墩台与基础变位的调查应从下列几个方面进行评定：

(1) 墩台与基础变位是否趋于稳定。当怀疑墩台与基础变位尚未稳定，应设立永久控制检测点，进行定期跟踪观测，查明原因，及时进行加固补强处理。

(2) 墩台与基础变位是否超出设计期望值。若超出设计期望值，除应检算评定墩台与基础变位对上部结构的不利影响外，还应对地基基础进行探查，检算评定其承载能力。

3.4.12.4 简支桥梁的墩台与基础沉降和位移，超过以下容许限值，且通过观察仍在继续发展时，应采取相应措施进行加固处理。

- (1) 墩台均匀总沉降（不包括施工中的沉陷）： $2.0\sqrt{L}$ （cm）；
- (2) 相邻墩台均匀总沉降差（不包括施工中的沉陷）： $1.0\sqrt{L}$ （cm）；
- (3) 墩台顶面水平位移值： $0.5\sqrt{L}$ （cm）。

其中：L 为相邻墩台间最小跨径（m），小于 25 米时以 25 米计。

【条文说明】

桥梁基础与墩台的变位，不仅会影响桥梁结构的几何形态，对超静定结构还会影响桥梁结构的内力状态。因此，在对桥梁承载能力进行检测评定时，应注意对桥梁墩台与基础变位的调查与判定。对简支结构，桥台与基础变位除影响结构本身性能，对桥面行车性能会造成不利影响，如桥头跳车、伸缩缝过于分离和抵合等。

3.4.13 地基与基础的检验

3.4.13.1 对桥梁地基的检验应符合下列规定：

(1) 根据桥梁结构的重要性、墩台与基础变位情况以及原岩土工程勘察资料情况，适当补充勘探孔或原位测试孔，查明土层分布及土的物理力学性质，孔位应尽可能靠近基础；

(2) 对于因加固维修需要增加结构自重的桥梁，尚宜在基础下取原状土进行

室内土的物理力学性质试验或进行基础下的载荷试验。

3.4.13.2 对既有桥梁基础可通过目测或挖探等方法，检验其风化、水蚀、剥落、腐蚀、破损及开裂情况，检验基础的埋置深度是否满足洪水冲刷要求，有无过度冲刷现象；对发生倾斜的墩台尚应检验基础的倾斜、弯曲、扭曲等情况；对桩基应检验其入土深度、外露桩基的质量状况、水蚀、缩颈等。

【条文说明】

以上这条基本上规定了桥梁基础的检测要点和可能存在的病害。

3.4.13.3 地基的检验可根据桥梁结构的墩台与基础变位情况、加固要求及场地条件选用合理的方法进行。

【条文说明】

对地基的检验通常采用的方法有：(1) 采用钻探、井探、槽探或地球物理等方法进行勘探；(2) 进行原状土的室内物理力学性质试验；(3) 进行载荷试验、静力触探试验、标准贯入试验、圆锥动力触探试验、十字板剪切试验或旁压试验等原位测试。

3.4.13.4 对既有桥梁基础应从基础完整性、变形特征、承载能力等三方面进行综合评价，确定基础加固的必要性，提出加固方法的建议。

【条文说明】

就桥梁基础完整性而言，主要指桥梁基础所存在的病害状况，变形特征指的是其受力情况，承载能力指的是根据以上两方面的情况对桥梁基础的检算结果。通过的以上三方面的综合分析，评价加固的必要性，确定合理的加固目标，从经济技术上进行比较选择切实可行的加固方法。

3.4.13.5 对既有桥梁地基的评价，应根据地基检验结果，结合桥梁墩台与基础变位情况和当地经验，对地基作出综合评价，提出加固必要性与加固方法的建议。

【条文说明】

基础的承载能力与其地基的承载能力是密切相关的，基础的构造要求往往是从地基承载能力的角度来确定的，如基础埋置深度、桩长及孔径的大小的等。因此在对桥梁地基评价时除对其本身的检验结果进行评价外，还须考虑桥梁墩台与基础的变位情况等受力特征。

4 桥梁结构检算

4.1 一般规定

4.1.1 桥梁结构检算，主要按照交通部颁布的《公路桥涵设计通用规范》（JTJ021-85）、《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》（JTJ022-85）、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTJ023-85）、《公路桥涵地基与基础设计规范》（JTJ024-85）、《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》（JTJ025-86）、《公路斜拉桥设计规范》（JTJ027-96）等其它相关规范（以下简称“规范”）进行,也可采用为科研证实的其他可靠的分析方法。

4.1.2 桥梁结构的检算主要依据设计资料（包括变更设计）或竣工资料进行，对缺失资料的桥梁，可根据桥梁检测结果，参考同年代类似桥梁的设计资料或标准定型图进行检算。

4.1.3 对桥梁结构，着重进行结构主要控制截面、结构薄弱部位的检算。多孔桥结构相同、跨径相等的孔，应选择受力最不利或损坏较严重的孔进行检测与检算。

4.1.4 对梁式结构桥梁，当为水泥混凝土桥面铺装或整体浇筑的水泥混凝土垫层与梁体结合较好时，且按照《公路养护技术规范》（JTJ073-96）对桥面铺装缺损状况进行评定的评定标度小于等于3时，可考虑水泥混凝土桥面铺装（扣除表面2cm磨损层）或整体浇筑的水泥混凝土垫层参与梁体共同受力。

4.1.5 拱桥拱上建筑的联合作用在检算分析时应予以考虑。可根据拱上建筑的类型、完好程度及所检算的截面位置等区别对待。当拱上建筑缺损状况评定标度大于等于3时，可不计拱上建筑的联合作用。

4.1.6 结构检算时，宜参照设计采用的计算状况重新建立计算模型。

4.1.7 对某些空间受力特征较为明显的桥、或模型进行建模，当边界条件发生改变或受力体系出现转换时，应根据桥梁实际对某一复杂受力构件、或对结构局部强度进行检算分析时，可考虑采用空间有限元程序进行结构检算。

4.1.8 在桥梁结构检算时，对竖向预应力取用应根据对其锚固、压浆和漏张等的检测情况，结合桥梁结构或构件表面开裂状况，考虑对竖向预应力有效设计计算值进行合理的折减。

4.2 检算荷载的确定

4.2.1 检算荷载一般应按《公路桥涵设计通用规范》（JTJ021-85）的规定取用。对近期有承重要求（汽车与人群、平板车、履带车）的桥梁，可按交通部颁布的

《公路工程技术标准》(JTJ 001-97) 的荷载等级进行检算。

4.2.2 当桥梁需要临时通过特殊重型车辆荷载，且重车产生的荷载效应大于该桥近期要求达到的标准荷载等级的荷载效应时，可按重型车辆的载重要求直接进行检算。

4.2.3 对结构重力，可根据实际调查的结构重力变异情况，对原设计结构重力进行必要的调整与修正。

4.2.4 对预加应力，应根据对其锚固、压浆、漏张、断丝或滑丝等的检测情况，结合桥梁结构表面开裂和几何参数变化情况，综合确定或通过结构拟合计算分析确定有效预应力设计计算值的合理折减。

4.2.5 对基础变位影响力，应根据桥梁墩台与基础变位情况调查结果、桥梁几何形态参数测定结果，综合确定基础变位最终值，按弹性理论计算基础变位产生的超静定结构附加内力。

4.2.6 对钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁，砖、石及混凝土桥梁，检算时应考虑日照温差引起的温度影响力。对箱形截面的连续结构，可按图 4.2.6 所示的日照温差图式，考虑日照温差引起的温度影响力。

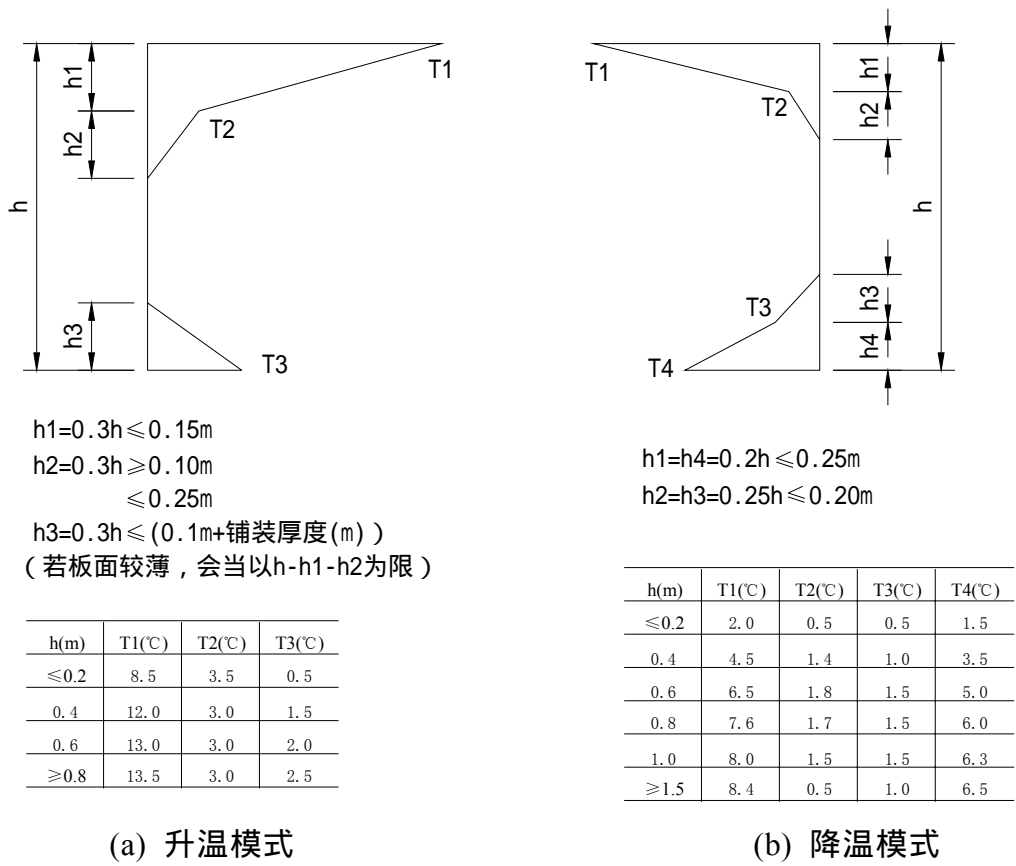


图 4.2.6 箱形截面的日照温差模式

4.3 钢结构的检算

4.3.1 钢结构桥梁检算主要依据《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025-86)进行,对公铁两用的钢结构桥梁,应依据《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB10002.2-99)进行检算。

4.3.2 对于钢材种类不明的桥梁,需在结构有代表性的构件上,截取试件进行强度试验,其基本容许应力 $[\sigma]$ 按屈服点的 0.7 倍取用。

4.3.3 对于板梁结构,其承载能力主要按下列各项检算结果确定:

(1) 按弯矩: 检算跨度中点、腹板接头处、盖板叠接处(叠接盖板第一行铆钉或螺栓截面处)、翼板接头处,以及连续梁支点;

(2) 按剪力: 检算支点中性轴及支点上下翼板锚距、栓距或焊缝强度;

(3) 按稳定性: 检算受压翼板、支点加劲立柱及腹板;

(4) 对桥面系梁: 除按上述各项检算外,尚应进行纵梁与横梁、横梁与主梁的连接检算,以及纵梁与主梁间的横梁区段在最弱截面处的剪应力检算。

4.3.4 对于钢桁梁结构,其承载能力主要按下列各项检算结果确定:

(1) 按杆件截面的强度与总稳定性;

(2) 按连接及接头的强度;

(3) 承受反复应力杆件的疲劳强度;

(4) 联接系的强度与稳定性。

4.3.5 在进行钢桁梁结构的检算时,应考虑偏心连接及杆件损伤的影响

4.3.5.1 在节点处如杆件重心线不交于一点而产生偏心,当偏心不大于杆件高度 5 %时,应检算因偏心而产生的附加应力,此时容许应力可提高 15 %。

4.3.5.2 受压杆件的初弯曲矢度超过 $1/500$ 时,应计算弯曲影响,此时受压杆件的有效面积 A_0 可按式计算:

$$A_0 = A'_0 / (1 + f_1 A'_0 / W'_0) \quad (4.3.5)$$

式中: A'_0 — 杆件弯曲处的净截面积;

W'_0 — 杆件弯曲处的净截面抵抗矩;

f_1 — 杆件的初弯曲矢度。

4.3.5.3 在计算杆件的有效面积时,应考虑杆件的穿孔、缺口、裂缝及锈蚀对截面的削弱,并应计入偏心影响。此时有效面积应用削弱截面处毛截面面积进行计算, A'_0 及 W'_0 分别为削弱处的净截面积及净截面抵抗矩。

4.3.5.4 有两个或两个以上分肢组成的杆件,其中一肢弯曲矢度大于 $1/2$ 毛截面的回转半径时,杆件的有效面积只计不弯曲的分肢面积。

4.3.5.5 杆件的边缘或翼板角钢伸出肢弯曲或压凹,其弯曲矢度超过杆件受伤部

分的回转半径时，在计算中应予考虑，此时有效面积只计不弯曲部分。

4.4 混凝土梁式结构的检算

4.4.1 混凝土板（梁）桥的检算

4.4.1.1 简支板桥应检算跨中截面和四分之一截面及支点截面。简支梁桥应检算跨中截面、第一道中间横隔梁处截面（无中间横隔梁的取四分之一截面）截面尺寸变化处截面和支点截面。对连续板、梁桥，除检算以上截面外，还应包括连续支点截面。对有严重缺损的截面，应列为检算截面。

4.4.1.2 整体式混凝土板的恒载、活载效应计算，一般应采用有限单元法；对规则的矩形板可将其简化为单位宽度的简支梁或连续梁进行恒载内力计算；活载内力的计算可借用“荷载的有效分布宽度”的概念，将车辆荷载简化为单位宽度板条上的横向均匀荷载进行计算。规则的矩形板，也可采用弹性薄板理论或中厚板理论计算其内力和变形。

【条文说明】

对于形状不规则的或加矮肋的整体式混凝土板，采用简化算法误差较大，故宜采用有限单元法计算内力和位移。对有局部缺陷的整体式混凝土板，也应采用有限单元法计算内力和位移。对于无明显缺陷的规则形状板如矩形板，当需计算内力和位移时，需采用弹性薄板理论或中厚板理论或有限单元法；只计算内力时，可采用简化算法。

4.4.1.3 对由主梁、连续桥面板和多道横隔梁所组成的箱形及 T 形截面梁桥，应根据横向联系的方式及强弱选用不同的横向分布计算方法。跨中区域的横向分布应采用偏心压力法、比拟正交异性板、刚接梁法、铰接梁法，支点截面的横向分布应采用杠杆原理法。对满足 $\frac{B}{2L} \sqrt{\frac{D_x}{D_y}} \leq 0.3$ （其中：B——主梁全宽；L——计

算跨径； D_x 、 D_y ——桥梁纵向和横向的比拟单宽刚度）的装配式梁桥，其跨中截面的横向分布可按偏心压力法计算；对横隔梁间距较小的梁桥，应采用比拟正交异性板法计算横向分布；对横隔梁间距较大，纵向湿接缝较宽的装配式梁桥，应按刚接梁法计算横向分布；纵向湿接缝较窄的装配式梁桥，或湿接缝较宽但横向跨中开裂明显的梁桥，应按铰接梁法计算横向分布。

【条文说明】

翼缘板的有效宽度根据理论分析与翼缘板一侧的实际宽度C和横隔梁长度L之比有关，具体结果列于下表，其中 λ 为有效宽度。从中可看出，如取C为横隔梁间距之半，则当 $C/L \leq 0.45$ 时，翼缘板一侧的有效宽度 λ 与C之比为 $\lambda/C \geq 0.459$ ，即此时横隔梁翼缘板的有效宽度占全宽的将近一半，横隔梁的作用较显著，横向分布系数应按刚接板梁法计算。例如对一五梁式T形截面装配式简支梁桥，如梁的间距为2.0米，则 $L=4 \times 2.0=8\text{m}$ ，当设置五道横隔梁时，C约等于计算跨径 L_j 的八分之一，故只有当 $L_j \leq 8 \times 8.0 \times 0.45=28.8\text{m}$ ，方可按刚接板梁法

计算横向分布系数；当设置七道横隔梁法，只有当 $L_j \leq 12 \times 8.0 \times 0.45 = 43.20\text{m}$ ，才能按刚接梁法计算横向分布系数。也就是横隔梁间距与横隔梁长度之比小于等于 0.9 时，可按刚接梁法计算横向分布系数。

C/L	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
λ/C	0.983	0.936	0.867	0.789	0.710	0.635	0.568	0.509	0.459	0.416

行车道板可视为弹性固结在主梁之上的多跨连续板，其内力计算常采用近似方法进行——对于弯矩先算出跨度相同的简支板的跨中弯矩 M_0 ，然后再根据行车道板厚度 t 与主梁梁肋高度 h 的比值加以修正。通常情况下，主梁的肋高 h 比行车道板厚度 t 大的多（至少满足 $L/h \leq 1/4$ 的条件），此时取：

跨中弯矩： $M_{\text{中}} = +0.5M_0$

支点弯矩： $M_{\text{支}} = -0.7M_0$

施工时，相邻两梁常通过现浇湿接缝相接，但新旧混凝土结合处的强度不易得到保证，常易开裂，且承载力较低，故可认为当现浇湿接缝较窄，则两相邻翼缘板结合强度较低，使用时不能保证刚性连接而易成为铰接；反之，当湿接缝较宽时，新旧混凝土结合处所受的弯矩较小，不足以使其开裂而降低刚性。故可人为的取跨中弯矩之一半作为分界，由此确定湿接缝宽度的分界点。由三角形的相似关系有：

$$\frac{0.5L}{1.2M_0} = \frac{0.5L - 0.5b}{(0.7 - 0.5 \times 0.5)M_0}$$

则： $b = 0.375L$ ，即当湿接缝宽度大于 0.375 倍主梁间距时，可按刚接梁法计算横向分布。

4.4.1.4 装配式空心板桥，跨中横向分布按铰接板法计算，支点横向分布系数按杠杆原理法计算。

4.4.1.5 计算弯矩及跨中区域的剪力，全跨均可采用跨中截面横向分布系数；计算梁端附近剪力时，端支点至第一道中间横隔梁（无中间横隔梁或仅有跨中横隔梁时取四分点）之间横向分布系数取支点截面的横向分布系数线性过渡到跨中截面横向分布系数，其他截面均取跨中截面的横向分布系数。

4.4.1.6 不对称的护栏、人行道及铺装等外加重力应在横向分布影响线上布截计算。

【条文说明】

对于预制装配式的混凝土板、梁桥，预制板、梁的自重由各块板、梁承受，横向湿接缝的恒载按相邻板、梁平均分摊，对于对称的护栏及人行道重力可按各板、梁平均分摊计算，准确计算时应在横向分布影响线上布截计算，不对称护栏、人行道及铺装等外加重力应在横向分布影响线上的布截计算。

4.4.1.7 平面弯桥一般可采用数值计算方法进行受力变形分析。对等截面扇形平面弯桥，可选择曲梁受力模式，采用纯扭转或约束扭转理论计算，横截面内力分析采用横向分布理论。

【条文说明】

数值计算方法，如有限元、有限条法等，单元形式主要有梁单元、板单元等。目前计算较多采用梁格法，梁格单元可以采用直梁单元或曲梁单元，该方法计算工作量较小，也能较准确地模拟实际结构，且计算结果为截面内力，比较适合于目前的截面承载力设计与复核。采用板单元或有限单元方法可以较准确地模拟结构的受力行为，但是计算工作量大，且计算结果大多为应力，比较适合于结构的研究分析。

弯桥曲梁模型分析方法具有十分概念清晰，计算简单，与直线桥的分析方法类似等特点，但是该方法对于变截面、变半径弯桥的分析较为困难，且弯桥横向分布理论还有很大的局限性。

4.4.1.8 斜度大于 15° 的预制装配式斜板、斜梁桥，应按斜交桥理论计算荷载效应。斜度大于 15° 的整体现浇斜板、斜梁桥，应按弹性薄板理论或中厚板理论或尼尔森近似算法来计算恒载效应，活载效应计算可以利用斜板的内力影响系数或数值计算的方法或近似计算方法。

【条文说明】

斜交角大小直接关系到斜桥的受力情况，其越大斜桥的特点越明显。经过分析研究，我国《公路桥梁设计通用规范》(JTJ021-89)规定当斜交角小于 15° 时，可以忽略斜交的影响，取板的斜长为计算跨径，按正桥进行计算。预制装配式斜板、斜梁桥，一期恒载一般可由各板、梁自身承受，二期恒载可与活载一样采用《横向铰接斜梁(板)桥的实用算法》一书的“实用计算方法”计算，或其他方法如 G-M 修正法，斜梁格法等。整体式斜板桥的恒载内力可以采用数值方法或尼尔森(Nielsen)近似计算的方法；活载内力计算可以用影响面加载的方法进行，但是，由于规范规定的车列轴重布置的复杂性，对斜桥进行影响面加载是比较困难的。目前常见的做法是：通过模型试验或有限元计的分析，寻找的关键截面上斜板与正板内力差别的规律，求出有关斜交角的修正系数，然后把按正板计算的内力乘以修正系数得到斜桥的内力。《公路桥涵设计手册·梁桥》(上册)中提供了这一方法的计算步骤及各级活载下随斜角的修正系数，可供参考。

4.4.2 组合梁桥的检算

4.4.2.1 组合梁桥结合面结合可靠，跨中荷载横向分布系数按 4.4.1 中的相关条文计算；结合面上有影响整体受力的混凝土开裂，跨中横向分布按杠杆原理法计算。支点截面荷载横向分布应按杠杆原理法计算。横向分布系数沿桥跨的变化规律同 4.4.1 中第 4 条。

【条文说明】

组合梁结合面上连接是否可靠，是决定它能否整体受力变形的关键，当结合面上连接可靠(结合面处混凝土未开裂，混凝土强度足够，未发现错动的迹象)，则可以认为组合梁整体性好，其横向分布同整体截面一样。若发现结合面上有影响整体受力的混凝土开裂，相对错动或剪力键失效，则后浇筑的混凝土层可认为是支撑在预制构件上的连续梁(板)，其横向分布偏安全地按杠杆原理法计算。

4.4.2.2 结合面结合可靠的组合梁桥，应进行两个阶级的承载力检算，检算内容

与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023-85) 8.1 条中相同。

【条文说明】

由于结合面结合可靠,符合组合梁桥的基本假定,故其检算内容与设计规范应相同,但应注意荷载可能与设计荷载有时不同。

4.4.2.3 结合面结合不完全可靠的组合梁桥,可近似按下式计算其受抗弯承载力:

$$M \leq M_p + \frac{n_1}{n}(M_{com} - M_p) \quad (4.4.2)$$

式中: M_p ——预制构件的抗弯承载力设计值;

M_{com} ——完全抗剪连接组合梁的抗弯承载力设计值;

n_1 ——在剪跨区实际设置的栓钉总数;

n ——按安全抗剪连接计算得出的剪跨区栓钉总数。

4.4.3 混凝土箱梁结构的检算

4.4.3.1 对箱壁较厚或沿梁纵向设有足够数量横隔板的箱梁,只需考虑纵向弯曲应力和刚性扭转应力;对少设或不设横隔板的宽箱薄壁梁,还应计算畸变应力和横向弯曲应力。

【条文说明】

在预应力混凝土桥梁中,跨度越大,恒载占总荷的比值越大。因此,一般说在箱梁内对称挠曲的纵向弯曲应力是主要的,而偏心荷载引起的扭转应力是次要的。如果箱壁较厚并沿梁的纵向布置一定数量横隔板而限制箱梁的扭转变形,则畸变应力也不大。横向弯曲应力状态下,特别对箱厚度较薄的情况,验算桥面板(箱梁顶板)与腹板、底板的构造配筋是需要注意的。

4.4.3.2 箱梁的局部如 0#块、锚下、支座处存在明显的损伤,则应进行局部强度、稳定性检算,并应考虑梁的施工方法、加载程序及不同龄期混凝土收缩、徐变对受力的影响。

4.4.3.3 箱梁的剪力滞可采用解析法、半解析法、数值方法及翼缘有效宽度法计算。翼缘有效宽度可采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023-85) 第 4.2.3 条进行计算。

【条文说明】

剪力滞效应在桥梁结构中的影响不容忽视,特别是近年来宽翼缘箱梁的应用相当广泛,已经成为影响设计的重要因素。解析法基本局限于简单的梁截面及结构型式,对于较复杂的截面和结构形式,其作用受到限制。各种数值方法虽能适应各类复杂结构模式,但费工费时,采用其中某种数值方法计算时,应同时采用另一种数值方法或解析法校核。对一般的结构,

可采用《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023-85)中的翼缘有效宽度法计算。

4.5 混凝土及圬工拱式结构的检算

4.5.1 钢筋混凝土拱桥的检算

4.5.1.1 对于上承式钢筋混凝土拱，应考虑活载的横向分布。

(1) 拱上建筑为排架立柱式的双曲拱可采用弹性支承连续梁计算反力的方法近似计算活载的横向分布系数。对于中、小跨径的双曲拱也可采用活载横向分布增大系数的简化计算方法。

(2) 对桁架拱，当桥跨由3片以上桁片组成且跨宽比在3以上时，宜用弹性支承连续法、偏心受压法（适用于宽跨比小于1/3的桁架拱）计算活载横向分布系数，其它情况则可按杠杆原理法计算。

(3) 刚架拱的活载横向分布系数可按弹性支承连续法计算。

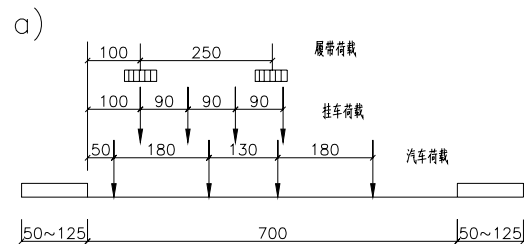
(4) 上承式肋拱的活载可考虑通过拱上排架立柱的盖梁和立柱分配予肋拱。

【条文说明】

公路桥梁的荷载试验与模型试验结果表明，活载的作用在钢筋混凝土拱上确存在着横向分布。根据国内的研究文献，本条文建议了对双曲拱桥、桁架拱桥、刚架拱桥和肋拱桥的拱圈活载横向分布计算的近似方法。

双曲拱桥活载横向分布简化计算法是根据《公路双曲拱桥——上部构造设计计算》一书介绍的方法。它针对一般行车道为净-7米或净-9米，波数在一定范围内的双曲拱桥，根据弹性支承连续梁法进一步简化得到的计算方法。该方法可以得到活载横向分布下各计算单元承受最大的横向分布系数，以这个系数与活载平均分布于各单元的平均数比，称为活载横向分布增大系数 η 。

一般公路的净宽是按标准规定的，为了便于计算应用，现按桥宽和计算单元数算出系数，可直接查找用，见图 4.5.1-1 和图 4.5.1-2。



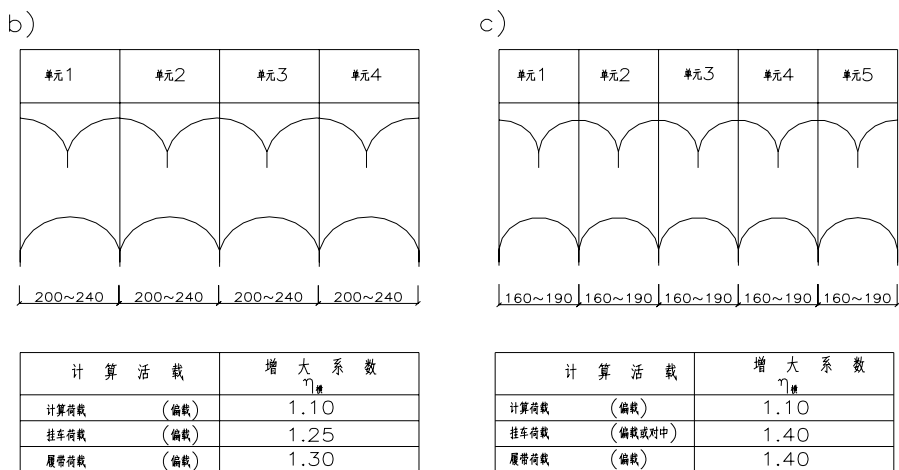


图 4.5.1-1 (尺寸单位: 厘米)

a) 桥面净—7, 双车道 b) 拱宽为 4 个计算单元 c) 拱宽为 5 个计算单元

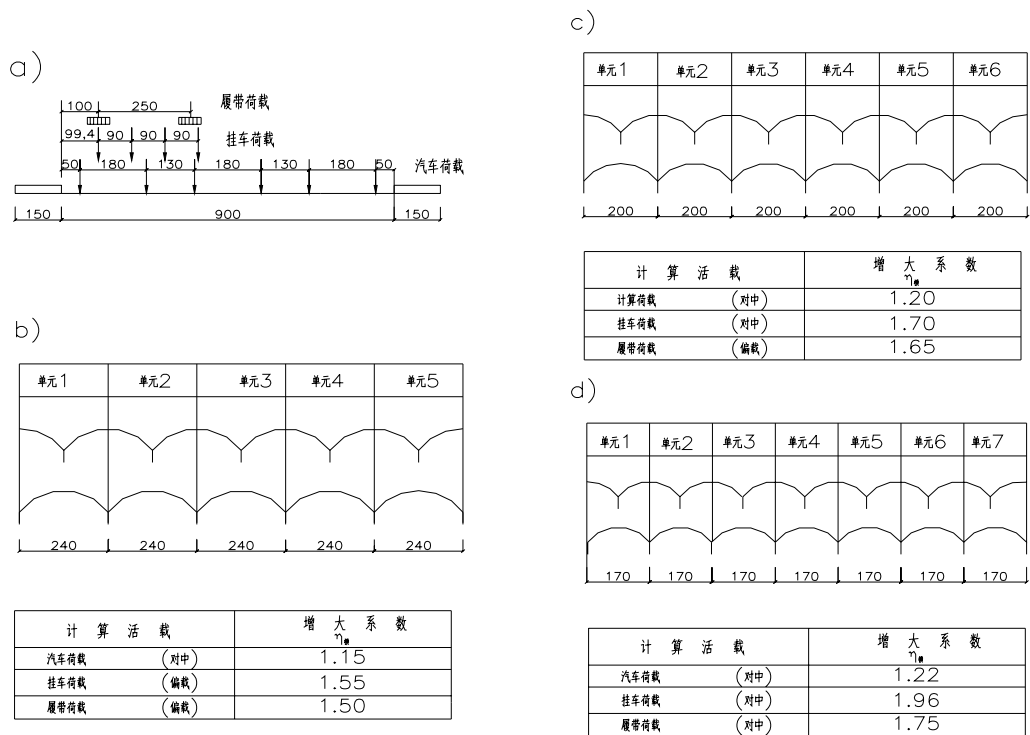


图 4.5.1-2 (尺寸单位: 厘米)

a) 桥面净—9, 三车道 b) 拱宽为 5 个计算单元 c) 拱宽为 6 个计算单元 d) 拱宽为 7 个计算单元

4.5.1.2 在计算拱圈活载作用效应时, 考虑多孔拱桥的连拱作用以及考虑拱上建筑与主拱联合作用的计算方法见第 4.5.3 条和 4.5.4 条。

4.5.1.3 在主拱圈的内力计算中, 应包括年温差温度内力的计算。气象资料应在当地气象部门调查得到。

4.5.1.4 混凝土收缩产生的内力计算可折算成温度额外降低引起拱圈内力, 参考折算值可为:

整体浇筑的混凝土结构的收缩影响，对于一般地区相当于降温 20°C ，干燥地区为 30°C ；整体浇筑的钢筋混凝土的收缩影响，相当于降温 $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ；

分段浇筑的混凝土和钢筋混凝土的收缩影响，相当于降低温度 $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ ；

4.5.1.5 计算年温差温度和混凝土收缩内力时，宜根据实际资料考虑混凝土徐变的影响。如缺乏资料，计算内力可乘以以下系数：

对温度变化影响力 0.7

对混凝土收缩影响力 0.45

4.5.1.6 墩台与基础变位引起超静定拱的附加内力，应结合桥梁竣工测量和养护资料，以及现场调查测量的位移值进行分析后，再进行拱的内力计算。其计算内力可乘以（0.4~0.5）的折减系数。

【条文说明】

在实际旧桥梁中，桥台的水平位移和转角对拱圈受力有影响。相比之下，墩台与基础水平位移对主拱圈内力影响显著，因而墩台位移应在竣工资料基础上，通过现场对桥跨的实地测量来获得桥台位移数据。由于拱桥墩台的位移是在比较长的时间内缓慢发生的，对于钢筋混凝土拱存在混凝土徐变对墩台位移引起内力的影响，参考桥梁设计规范，采用 0.4~0.5 的折减系数来计及这种影响。

4.5.1.7 根据桥梁的实际情况，参考设计计算资料，着重对钢筋混凝土拱的主要控制截面和薄弱部位进行检算。

多孔拱桥的结构型式、尺寸及跨径相同的孔跨，应选择受力最不利与破坏较严重的孔跨进行检算。

4.5.2 圬工拱桥的检算

4.5.2.1 拱上建筑为墙式的空腹圬工拱，如活载（包括人群荷载）布置不超过拱圈外，按活载均匀分布于拱圈全宽计算。

4.5.2.2 圬工拱圈计算温度变化和混凝土收缩内力时，考虑混凝土徐变影响的方法见第 4.5.1.5 条。

4.5.2.3 圬工拱圈由墩台与基础变位引起结构附加内力计算值可乘以（0.4~0.5）的折减系数。

4.5.3 多孔拱桥的连拱效应计算分析

4.5.3.1 多孔拱桥的桥墩与主拱圈的抗推刚度比值大于 37 时可按单孔拱计算，否则，应考虑多孔拱桥的连拱作用。

连拱计算方法宜采用平面杆系有限单元方法或可靠的简化计算方法。

【条文说明】

在荷载作用下的多孔拱桥，桥墩和拱跨结构的结合点（常称拱墩结合点）会产生弹性变形，各拱墩结合点会产生水平位移和转角。考虑各孔拱跨结构与桥墩一起的共同作用，称为

“连拱作用”虑拱墩结点变位的计算，称为“连拱计算”。

一般说来，桥墩越纤细，各拱结点的变位（含水平位移和转角）就越大；反之，桥墩的高度越小，截面刚度越大，各拱结点的变位就越小。只有当桥墩的刚度（相对于拱跨结构的刚度）为无限大时，在荷载作用下，各拱墩结点才不会产生变位，此时，多孔拱桥的拱跨结构才与单孔拱桥（拱脚无变位）的受力相同。在实际拱桥中，桥墩的刚度不可能为无限大，即使采用刚度较大的重力式墩，桥墩的抗推刚度一般不会超过拱圈抗推刚度的 40 倍。计算证明，如要求活载内力的计算误差不超过 5%，则仅当桥墩的抗推刚度是拱圈抗推刚度的 38 倍以上时，多孔拱桥才可以不计连拱作用的影响，近似的按固定拱计算。在实际拱桥中，拱与墩的刚度比如此之小的情况是极少的。因此，对于多孔拱桥检算应考虑连拱效应。

由于桥梁结构计算机分析的发展和运用较快，在连拱分析中除了采用桥梁平面杆系有限元分析法外，在实际工程中还可采用可靠简化法，例如，换算刚度法等。

4.5.3.2 对于多孔圬工拱、双曲拱、肋拱和箱形拱等简单体系拱桥，其连拱计算简图应采用裸拱圈，不考虑拱上建筑的影响；对于多孔桁架拱、刚架拱等，其连拱计算简图应包括拱上建筑。

【条文说明】

在简单体系拱桥中，拱上建筑的影响实际上是存在的。采用简支梁板拱上建筑时，由于拱上建筑的联合作用很小，按裸拱计算的弹性常数与实际情况比较接近；而采用拱式拱上建筑特别是采用实腹式拱上建筑时，由于拱上建筑的联合作用较大，计算弹性常数时不考虑联合作用会导致一定的误差。拱上建筑的影响相当复杂，拱上建筑的计算简图尚未妥善解决，要求准确计算拱跨结构的弹性常数是困难的。目前，在简单体系拱桥中，一律以裸拱的弹性常数代替拱跨结构的弹性常数，不考虑拱上建筑联合作用的影响。对其他类型拱桥（包括桁架拱、刚架拱等），拱跨结构的弹性常数均按其计算简图来确定，即计入拱上建筑的作用。

4.5.3.3 计算拱跨上、下部结构弹性常数时，圬工材料宜取砌体的受压弹性模量 E ；上部结构为钢筋混凝土，宜取受压弹性模量 E_c ，而对钢筋混凝土桩（柱）或桥墩，宜取用 $0.67E_c$ 。

4.5.3.4 等跨无铰连拱中，计算拱中最大活载内力时，以中孔按截面弯矩 M_{\max} 或 M_{\min} 布载最不利。控制拱圈计算的情况一般是拱脚截面按 M_{\min} 布载，孔跨 $3L/8$ 和拱顶按 M_{\max} 布载。计算桥墩时，以边墩为不利。控制边墩计算的情况是边孔按 H_{\max} （墩顶水平力最大）布载控制计算，计算桩柱式桥墩时可近似根据边孔按 M_{\max} （墩顶弯矩最大）布载，求得墩顶的最大弯矩值。

【条文说明】

在采用手算方法计算连拱活载作用产生内力时，可利用连拱等代荷载表，直接在内力影响线上加载。详见王国鼎著《拱桥连拱计算》（第二版）（人民交通出版社，1998 年）。

4.5.3.5 等跨二铰连拱中，计算拱圈最大活载内力时，以中孔按截面弯矩 M_{\max} 布载最不利，一般是拱顶截面和拱跨 $L/4$ 截面。计算桥墩时，以边孔按 H_{\max} （墩顶水平力最大）布载控制计算。

4.5.3.6 在等跨连拱中，恒载、温度变化和混凝土收缩均无连拱作用，上述各项相应的拱圈内力，按固定拱计算。在不等跨连拱中，恒载、温度变化和混凝土收缩产生的拱圈内力，均应考虑连拱作用。桥台变位引起的内力应按连拱计算。

【条文说明】

在多孔连拱中，如各孔跨径相等、矢跨比相同、上部构造又完全一致时，则恒载、温度变化和混凝土收缩的内力与单孔拱无异。如各跨孔径不尽相同、矢跨比不完全相等或者上部构造不完全一致时，则应考虑恒载、温度变化和混凝土收缩的连拱作用。

4.5.4 拱桥结构计入拱上建筑联合作用的计算方法

4.5.4.1 当拱上建筑的结构符合计算所预设的条件时，空腹式拱桥主拱圈截面活载内力的计算应考虑拱上建筑与主拱圈的联合作用。

主拱圈与拱上建筑联合作用的计算属解高次超静定结构的问题，宜采用平面杆系有限单元法进行内力计算，也可以根据具体情况采用简化方法——弯矩折减系数法进行计算。

【条文说明】

对于简单体系拱桥模型试验和理论分析表明，活载作用下具有拱式拱上建筑拱桥表现出明显的联合作用，除了拱上建筑能分担一部分主拱的弯矩外，主要由于拱上建筑的抗推能力约束了主拱的变形，调整了主拱的弯矩。在对拱桥进行主拱圈的检算中，不考虑拱上建筑与主拱圈的联合作用。则对主拱圈在活载作用下的内力状况无法得到符合实际的判断。

对于拱上建筑联合作用的主拱圈活载内力计算，是解高次超静定结构内力的问题，在有条件的情况下，尽可能采用平面杆系有限元程序的计算机计算求解。试验表明，拱式拱上建筑显著降低主拱圈的活载弯矩。即使在拱上建筑开裂之后，活载弯矩值虽比不开裂时略有增加，但比裸拱仍有较显著的折减。选择考虑拱上建筑联合作用的计算图式，应既符合实际又略偏于安全。

拱上建筑的腹拱为实腹拱时。试验研究观测到填料和侧墙也能约束拱圈变形，减小拱圈弯矩。但为了简便，在计算图式中可以忽略填料和侧墙的影响。实际经验和理论分析都表明，边腹拱采用平铰构造后，这样既能保存其抗推刚度对主拱的有利作用，又能避免在降温和墩台位移时对主拱产生不利的影响。这种平铰边腹拱的计算图式，不能用抗推刚度等于零的三铰拱来表达。这是因为平铰仍能传递弯矩，与理想铰不同，故可将边腹拱近似当作具有一定抗推刚度的双铰拱。同样的道理，拱上建筑其他部的裂缝，也根本不同于理想铰。

活载作用下，拱上建筑的联合作用主要表现在对主拱圈的截面弯矩的影响，即减小了主拱的弯矩。弯矩折减系数法是考虑拱上建筑联合作用的简化方法，这种方法以裸拱拱圈计算的截面弯矩为基础，乘以弯矩折减系数即可得到考虑拱上建筑联合作用后主拱圈相应截面的活载弯矩。

4.5.4.2 对于拱式拱上建筑的双曲拱桥，采用弯矩折减系数法计算主拱圈活载弯矩时，可根据主拱圈、腹拱和立柱的基本几何参数，由附录 12 中查找得活载弯矩折减系数 β ，乘以相应的裸拱截面弯矩，即得到考虑拱上建筑联合作用的主拱圈活载弯矩。活载在拱圈截面产生的轴向力仍采用裸拱的计算值，不必修正。

【条文说明】

带拱式拱上建筑的拱桥是高次超静定结构，宜采用有限元法作结构计算。但为了便于工程应用，对双曲拱桥可采用简便的活载内力计算方法——活载弯矩折减系数法。只需根据主拱、腹拱和主柱的基本几何参数，由附录 12 表中查得活载弯矩折减系数，乘以相应的裸拱就算，即得考虑联合作用的主拱活载就算。活载轴向力仍采用裸拱的计算值，不必修正。附录 12 表取自《公路双曲拱桥—上部结构设计计算》一书。

4.5.4.3 计算联合作用的活载弯矩时，在立柱的刚度中应计入垫梁和柱帽影响。计算联合作用的主拱圈活载弯矩时，可根据具体情况考虑活载横向分布系数。

4.5.4.4 对于简支梁板式拱上建筑的空腹式拱桥，不考虑拱上建筑的联合作用。

4.5.4.5 对于拱式拱上建筑的空腹式拱桥，在计算均匀降温、收缩和拱脚向外水平位移产生主拱圈的附加内力时，不考虑拱上建筑的联合作用，仍采用裸拱图式。

【条文说明】

在计算均匀降温收缩和拱座向外水平位移的附加内力时，不考虑拱上建筑联合作用，仍采用裸拱图式。当升温时，由于边腹拱能传递推力，主拱圈弯矩与裸拱有所不同。这时，拱脚正弯矩小于裸拱，拱顶负弯矩大于裸拱。由于拱脚实际是负弯矩控制设计，拱顶是正弯矩控制设计，一般可不考虑升温时的情况。

4.5.5 拱上建筑结构的验算

4.5.5.1 对于拱上建筑为横桥向的钢筋混凝土排架立柱式结构进行验算时，主要检算排架立柱和横梁。

4.5.5.2 当横梁的线刚度 (EI/l) 与立柱的线刚度之比大于 5 时，双柱式横梁可按简支梁计算，多柱式横梁可按连续梁计算；当横梁的线刚度与立柱的线刚度之比等于或小于 5 时，可按刚构计算。以上 E 、 I 、 l 分别为横梁或排架立柱混凝土的弹性模量、毛截面惯性矩、横梁计算跨径或排架立柱高度。

【条文说明】

我国上承式混凝土空腹拱桥的拱上建筑主要是横墙和排架立柱两种型式。对于排架立柱型式，设有钢筋混凝土横梁。本条根据公路桥梁设计规范 (JTJ023—85) 规定沿用，成为排架立柱式拱上建筑计算的简化图式。

4.5.5.3 横梁的计算跨径 l ，取 l_c 和 $1.15l_n$ 两者较小值，其中 l_c 为横梁支承中心之间的距离； l_n 为横梁的净跨径。当横梁作为刚构分析时，横梁跨径可取相邻排架柱中心之间的距离。

【条文说明】

参考混凝土结构设计规范 (GB50010—2002) 条文确定横梁计算跨径的方法。

4.5.5.4 当盖梁按连续梁计算在与柱相交部位的负弯矩时，可考虑排架立柱支承宽度对弯矩折减的影响，折减后的弯矩按下列公式计算，但折减后的弯矩不得小于未经折减的弯矩的 0.9 倍 (图 4.5.5)。

$$M_e = M - M' \quad (4.5.5-1)$$

$$M' = \frac{1}{8} qa^2 \quad (4.5.5-2)$$

$$q = R/a \quad (4.5.5-3)$$

式中 M_e — 折减后的支点弯矩；

M — 按理论公式或方法计算的支点负弯矩；

M' — 折减弯矩；

q — 盖梁的支点反力在支座两侧向上按 45° 分布于盖梁截面重心轴上的荷载强度；

R — 盖梁的支点反力；

a — 盖梁支点反力在支座两侧向上按 45° 扩散交于重心轴的长度。

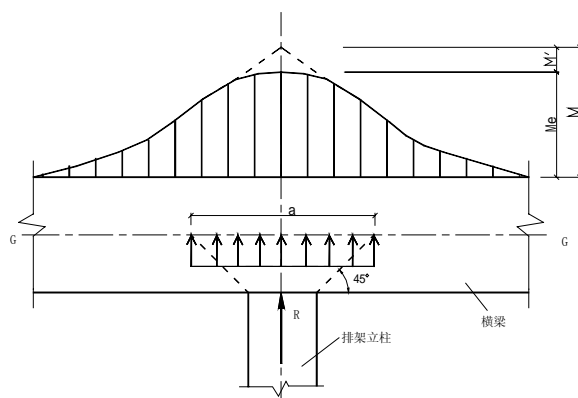


图 4.5.5 柱支承处横梁折减弯矩计算图

【条文说明】

依据我国公路桥梁设计规范（JTJ023—85）条文精神，对盖梁与立柱交接处负弯矩计算值进行折减。

4.5.5.5 当横梁的跨高比 $l/h > 5.0$ 时，按一般钢筋混凝土受弯构件进行检算；当横梁的跨高比为：简支梁 $2.0 < l/h \leq 5.0$ ，连续梁 $2.5 < l/h \leq 5.0$ 时，应作为钢筋混凝土深受弯构件来验算。

【条文说明】

近年来国内外试验表明，当钢筋混凝土梁的跨高比 $l/h > 5$ 时，其受力特性及破坏形态呈一般受弯构件形态，平截面假定成立。钢筋混凝土梁的跨高比 $l/h \leq 5$ 后，不符合平截面假定，故将这类受弯构件称为深受弯构件。在深受弯构件中， $l/h \leq 2$ 的简支梁和 $l/h \leq 2.5$ 的连续梁称为深梁；处于深梁和一般受弯构件之间的梁称为短梁。

钢筋混凝土深受弯构件的截面检算不同于一般受弯构件截面检算方法，具体可参照混凝土结构设计规范（GB50010—2002）和相关文献提供的方法进行。

4.5.6 组合体系拱桥的检算

4.5.6.1 组合体系拱桥是空间结构，可以简化为平面结构来计算构件内力。构件内力的计算宜采用平面杆系有限法计算程序进行。

【条文说明】

我国目前应用较多的组合体系拱桥形式有系杆拱桥、单悬臂梁拱组合拱桥和连续梁拱组合拱桥；从行车道与拱肋的相对位置划分又可分为上承式、中承式和下承式等。

拱肋与纵向加劲梁、拱肋与系杆及吊杆形成单榀的组合系拱，然后数榀组合体系拱再由横梁、风撑等横向构件来形成整体桥跨，因此，按空间结构受力计算可以更好反映实际结构工作情况。对桥跨为正桥且各部尺寸布置对称的组合体系拱桥上可以简化为平面结构来计算内力，即活载作用下考虑荷载横向分布系数及冲击系数求得杆件截面活载内力并与恒载内力、附加内力进行组合后得到杆件检算的内力。

组合体系拱一般外部静定、内部超静定的结构（系杆拱）或内、外均为超静定结构（连续梁拱组合拱桥），计算复杂且工况多，故进行检算时，最好采用成熟的桥梁杆系有限元计算程序来进行内力计算。

组合体系拱桥结构内力计算涉及到杆件的几何特性、材料特征、构造及边界条件，这些基本数据根据桥梁的设计资料、竣工资料及养护管理资料，结合现场实际调查资料来认真确定。

4.5.6.2 在进行组合体系拱桥的结构内力计算时，对于上承式组合拱结构，加劲纵梁截面几何特性计算应包括梁肋和桥面混凝土，即考虑桥面板参予工作。

对于系杆拱，桥面板与横梁一般为传力结构，不考虑参予系杆的共同受力；当桥面板为整体浇筑混凝土，且有可靠的构造使之与纵、横梁及系杆形成整体时，可计入桥面板混凝土参予工作。

【条文说明】

组合体系拱桥特点是在于桥面板是否参予加劲梁或系杆的共同作用，这里必须根据结构的实际构造细节及受力作用来确定。对于上承式组合拱结构，混凝土加劲纵梁与混凝土桥面在构造上一般是形成整体来共同工作，因此成为加劲纵梁截面的一部分计入其截面几何特性计算中。对于系杆拱，若构造上桥面板和横梁做为传力结构，则系杆的截面几何特征不计入桥面板混凝土。

4.5.6.3 组合体系拱桥的拱肋为钢筋混凝土时，计算截面几何特性采用混凝土全截面，不计钢筋的影响；拱肋为钢管混凝土时，可按下列式计算组合截面的刚度：

$$EA = E_c A_c + E_s A_s \quad (4.5.6-1)$$

$$EI = E_c I_c + E_s I_s \quad (4.5.6-2)$$

式中： EA — 钢管混凝土压缩和拉伸刚度；

EI — 钢管混凝土弯曲刚度；

E_c 、 A_c 和 I_c — 分别为混凝土的弹性模量、截面积和抗弯惯性矩；

E_s 、 A_s 和 I_s — 分别为钢管的弹性模量、截面积和抗弯惯性矩。

【条文说明】

组合体系拱桥的拱肋，目前常用的是钢筋混凝土拱肋和钢筋混凝土拱肋。对于前者，依据现行设计规范要求仅考虑混凝土截面的特征，来计算杆件内力，当进行拱肋截面承载能力复核计算时，偏心距增大系数计算应考虑截面配筋的影响。对于后者，严格按钢管混凝土拱为组合受压构件计算，目前设计规范没有相应条文规定。《钢管混凝土拱桥与施工》（陈宝春编著）对中国工程建设标准化协会标准（CECS28:90）、国家建筑材料工业局标准（JCJ01-89）和能源部暂时规定（DLGJ99-91）的方法进行了比较，认为 CECS28:90 的计算公式概念清晰，公式简单，故本条推荐采用，即式（4.5.6-1）和式（4.5.6-2）。

4.5.6.4 对于组合体系拱桥在使用阶段的恒载内力计算，若组合拱结构现浇或预制拼装分阶段受力时，恒载内力计算时必须考虑实际施工步骤与施加预应力的工况，并考虑不同加载龄期，以及混凝土徐变影响分阶段计算。

【条文说明】

依据设计规范规定，桥梁结构的构件计算应该进行承载能力极限状态和正常使用极限状态的计算。

对于正常使用阶段的杆件自重或恒载产生的内力，必须根据组合体系拱桥施工实际受力阶段来分阶段计算。其原因主要是在施工过程中会发生受力体系的转变，同时混凝土徐变作用造成内力重分布；纵向加劲梁或系杆的预应力分阶段施加将引起杆件混凝土截面应力变化。

对于按承载能力极限状态要求来计算杆件恒载内力，一般可按组合体系拱桥成桥的受力图式来计算。

4.5.6.5 组合体系拱桥的活载横向分布系数。双肋时可采用偏心受压法计算；多肋时可采用修正的偏心受压法或弹性支承连续梁法计算。

【条文说明】

江苏省苏州市斜港桥为系杆拱桥，跨径 100.5 米，桥宽 18.40 米。二榀拱肋及系杆。拱肋为钢筋混凝土，系杆为 $b \times h = 90\text{cm} \times 180\text{cm}$ 的预应力混凝土箱梁。横梁采用预应力混凝土工字梁，与预制桥面板形成组合截面，高度 178cm，横梁间距 670cm。全桥荷载试验实测的荷载横向分布系数与按偏心受压法计算值比较见表 4.5.6-1

荷载横向分布系数 m_c 及相对差值 表 4.5.6-1

横向载位	纵向载位	实测值 m_c	计算值 m_c	相对差 (%)
三车偏载	跨中	2.307	2.25	2.5
	四分点	2.06	2.25	-8.4
二车偏载	跨中	1.66	1.63	1.8
	四分点	1.54	1.63	-5.52
四车偏载	跨中	2.68	2.61	2.7
	四分点	2.58	2.61	-1.1
挂车偏载	跨中	0.841	0.848	-0.8
	四分点	0.738	0.848	-13.0

江苏省常州市奔牛东桥为 3 孔预应力混凝土单悬臂梁拱组合体系桥，上承式，跨径组成为 35m+80m+35m，其中中孔设置跨径 16m 的预应力混凝土挂梁。三榀纵向加劲梁。全桥荷载试验实测的两列汽车偏载时荷载横向分布系数与计算值比较见附表 4.5.6-2

奔牛东桥计算荷载横向分布系数与实测值比较 表 4.5.6-2

荷载横向分布系数	m_c
偏心受压法	0.79
修正的偏心受压法	0.75
6 号截面实测法	0.732

6 号截面为距悬臂端 10 米处截面，表 4.5.6-2 中实测值由截面下缘实测压应变计算的荷载横向分布系数。

以上桥梁荷载试验介绍详见金成棣著《预应力混凝土梁拱组合桥梁——设计研究与实践》一书。

4.5.6.6 吊杆仅按使用阶段进行内力计算。

对横梁内力的计算，当系杆为柔性时，可用平面杆系有限单元法，当系杆为刚性时，宜采用空间杆系有限元法。

4.6 索结构的检算

4.6.1 斜拉桥的检算

4.6.1.1 斜拉桥的检算，应先根据桥梁几何形态参数与索力等的检测结果，计算出各部构件的受力状态作为初始受力状态，然后再进行活载作用下的检算。

【条文说明】

斜拉桥建成通车后，由于车辆荷载、温度和其他环境因素的作用以及材料在某些随时间变化的特性和影响，结构的几何线形和内力状态将会发生变化，故应先通过测试较准确的了解结构的受力、变形状态，作为进一步检算的基础。

4.6.1.2 恒载、活载作用下的内力和变形，可选用平面杆系模式，活载的空间效应可用横向分布或偏载系数来表达。

【条文说明】

与其他桥型的结构内力及变形的分析方法一样，在斜拉桥的内力与变形计算中，一般把空间结构简化为平面结构的计算图式来计算，确定其内力和变形后再乘以荷载横向分布系数，即考虑结构的平面效应；当采用计算机计算时，也可考虑双索面及塔与主梁的共同作用，直接按空间结构来分析，由于斜拉桥多数应用于大跨度桥梁，恒载占很大比例，而空间影响

主要在于活载，因此，不论采用哪种计算图式，对计算的结果影响不大。当然，用精确的计算图式可取得更符合实际的结果。

4.6.1.3 在计算空间荷载（风载、地震力、车辆荷载等）作用下的响应时，应选取用空间杆系模式，并注意实际结构与计算模式间的刚度等效性。

4.6.1.4 若要计算全桥构件的应力分布特性，需选用空间板壳、块体和梁单元的组合模式，但要特别注意不同单元结合面的节点位移协调性。

4.6.1.5 对斜拉桥结构中关键部位（如斜拉索锚固区、塔梁固结区），应进行局部应力有限元分析。

4.6.1.6 必要时，应进行斜拉桥的稳定性检算

【条文说明】

斜拉桥的梁、塔在外荷载作用下，处于压弯状态下，随着外荷载增大，梁、塔压力增大到一定值时，斜拉桥可能产生平面内的压弯失稳或平面外的弯、扭失稳。外荷载作用下的失稳准确分析可以用非线性有限元来计算，而风荷作用下的横向稳定问题还必须考虑结构变形和风力攻角的函数关系。

4.6.2 悬索桥的检算

4.6.2.1 悬索桥的检算，应根据实际几何形态，利用二维平面分析法或空间分析法。

【条文说明】

检算前，应较准确的实测主缆在无风或微风状态下的真实形状，平衡条件根据悬索桥实测的主缆线形位置来确定，由此即可分析主缆及其它构件的受力状态。

4.6.2.2 竖向荷载作用下的二维平面分析，一般应采用有限位移理论，当跨径小于 500m，可采用挠度理论，若跨径在 200m 以下，可采用弹性理论。

4.6.2.3 横向荷载作用下的结构分析，对规则的悬索桥可采用横向膜理论或离散杆系结构的力法和矩阵位移法；也可采用有限位移法。

【条文说明】

悬索桥在横向荷载作用下的结构行为基本上表现为线性，可以用以上介绍的方法，无论是作为膜理论的各种解法，还是作为离散杆系结构的各种力法和位移法，都可以对规则的悬索桥进行计算分析，从适于计算机运算和通用性好及适用性强的角度，用有限位移法为最好。

4.6.2.4 加劲梁需计算最大、最小弯矩及相应的扭矩和最大扭矩，并检算其挠度；桥塔需检算最大弯矩及相应的轴力，并检算其塔顶度位，还应检算桥塔在横向荷载下的强度及纵向荷载下的稳定性；主缆应检算最大索力。

4.6.2.5 为配合加劲梁上各截面的应力检算及检算扭转力矩的影响大小，应对设计活载、风载及结构自振特性进行空间分析。

4.7 桥面系结构的检算

4.7.1 行车道板的检算

4.7.1.1 行车道板的检算，可依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》进行，可分别按连续板、单向板、双向板、铰接悬臂板、悬臂板取计算图式。

4.7.1.2 行车道板的有效分布宽度，可按设计规范取用。结构检算时，T型和I型截面的翼板可取全宽。

4.7.1.3 当梁式桥桥面铺装混凝土与梁体上翼缘结合较好时，可按与行车道板共同受力来检算；或当桥面维修加固后，桥面又新铺设钢筋和混凝土时，亦可按与行车道板共同受力来检算。

4.7.1.4 当桥面由简支梁断开改造为连续桥面时，钢筋混凝土行车道板检算时，除考虑与行车道板共同受力外，还应检算连续桥面的受力和变形。

4.7.1.5 当钢筋混凝土行车道板检算缺乏图纸和配筋资料时，可参考同年代类似桥梁行车道板的图纸及配筋进行承载能力估算；若找不到同类图纸时，可近似估算为：

$$\alpha = 30 \text{ (mm)}$$

$$x = 0.25(h - \alpha) \text{ (mm)}$$

依据下列公式计算受拉钢筋面积：

$$A_g = S_h / (h - \alpha - x)$$

式中： S_h 为受压混凝土面积对中性轴的面积矩。

求出 A_g 后可按规范相关公式进行截面抗弯等计算。

【条文说明】

我国桥规 JTJ023—85 对有效翼缘宽度的计算规定如下：

T型截面受弯构件受压区的翼缘计算宽度，应按下列三者中最小值取用。

(1) 对于简支梁为计算跨径的 $1/3$ ；对于连续梁各中间跨正弯矩区段取该跨计算跨径的 0.2 倍；边跨正弯矩区段取改跨计算跨径的 0.27 倍；各之间支点负弯矩区段则取相邻两跨计算跨径之和的 0.07 倍；

(2) 相邻两梁轴线间的距离；

(3) $b + 2c + 12h$ 。此处 b 为梁的腹板宽， c 为承托长度， h 为不计承托的翼缘厚度。

T型梁单边翼缘的计算宽度，算至承托以外 6 倍板厚。

计算超静定内力时，T型梁翼缘的计算宽度取全宽。

如无更精确的计算方法，箱形梁也可参照 T 型梁的规定处理。

从以上可见，我国现行桥规对箱形梁有效翼缘跨度的计算规定基本是参照了 T 型梁，因此，如果仅仅依靠我国桥规，设计人员还难以充分有效的考虑箱形梁的剪滞效应。

4.7.2 箱梁顶板的检算（分混凝土箱梁、钢箱梁）

4.7.2.1 箱形截面梁翼缘与腹板相连处若设置承托，翼缘厚度可计入承托加厚部

分厚度

$$h_h = \tan \alpha \cdot b_h$$

式中: b_h 为承托宽度; $\tan \alpha$ 为承托底面坡度。

当 $\tan \alpha > 1/3$ 时, 取用 $h_h = b_h/3$ 。

4.7.2.2 箱形截面梁在腹板两侧上顶板(即上翼缘)的计算宽度可按顶板全宽计。对于宽箱梁顶板检算时, 应考虑顶板在横向力与偏心的边缘剪力流作用下, 将产生的剪切扭转变形, 使顶板受压翼缘上的压应力随着离梁肋的距离增加而减小, 即“剪力滞后效应”。对于箱梁在对称荷载作用下的弯曲应力也应考虑剪力滞后效应, 而使弯曲应力在箱梁顶板分布为非均匀的曲线分布。而在剪力滞后效应作用下顶板的内力检算可按有限元电算法进行。

4.7.2.3 对于箱形截面顶板若按极限承载力状态检算时, 可按顶板的有效分布宽度计算。其有效分布宽度 b_{mi} 的计算规定如下:

(a) 简支梁和连续梁各跨中部梁段、悬臂梁中间跨的中部段:

$$b_{mi} = \rho_f b_i$$

(b) 简支梁支点、连续梁端支点及中间支点、悬臂梁悬臂段:

$$b_{mi} = \rho_s b_i$$

式中: b_{mi} 为腹板两侧上顶板(上翼缘)的计算宽度, $i=1,2,3\dots$ 。

b_i 为腹板两侧上顶板(上翼缘)的实际宽度, $i=1,2,3\dots$ 。

ρ_f 为有关简支梁和连续梁各跨中部梁段和悬臂梁中间跨的中部梁段翼缘计算宽度的计算系数, 见图一和表一。

ρ_s 为简支梁支点、连续梁端支点及中间支点、悬臂梁悬臂段翼缘计算宽度的计算系数, 见图一和表一。

当梁高 $h \geq b_i/0.3$ 时, 翼缘计算宽度采用翼缘全宽。

4.7.2.4 钢箱梁顶板的检算。对于悬索桥、斜拉桥所用的钢箱梁的桥面体系检算, 可按正交异性板桥面结构承受车道竖向荷载作用产生的内力。据钢箱梁构造情况计算方法可用 Pelikan-Esslinger 法, 或平面格子梁理论, 利用计算机程序进行计算分析。对于直接支承于横梁和纵肋上的刚桥面板, 应检算在车轮轴荷载作用下产生的局部应力及挠曲值。以满足钢桥面铺装对桥面板的要求。

【条文说明】

为了借鉴国外相对比较成熟的箱梁设计经验, 现将美国、英国和德国规范中有关有效翼缘宽度规定的内容摘录如下, 并将德国规范与我国规范做了分析比较, 以供设计研究人员参考。

1) 美国规范(94版)的规定

在计算有效翼缘宽度时所用的有效跨长, 对简支梁可取实际跨长; 对于连续跨可取永久荷载下两个反弯点之间的距离, 对正弯矩或负弯矩分别取适用的值。

(1) 对内梁, 有效翼缘宽度可取下列三种情况的最小值:

- ① 有效跨长的 1/4;
- ② 混凝土翼板厚度的 12 倍, 加上腹板厚度和大梁顶板宽度的 1/2 这两者中的较大者;
- ③ 相邻梁的平均间距。

(2) 外梁的有效翼缘宽度可取相邻内梁有效宽度的 1/2 加上下列三种情况的最小者:

- ① 有效跨长的 1/8;
- ② 混凝土翼板平均厚度的 6 倍, 加上腹板厚度的 1/2 和主梁顶板宽度的 1/4 这两者中的较大值;
- ③ 悬臂的宽度。

2) 英国 BS5400 的规定

- (1) 在分析结构时, 有效宽度可取翼缘的全宽。
- (2) 在分析使用极限状态下的截面, 且缺乏更精确的计算时, 有效翼缘的宽度应取为腹板的宽度, 并在其每侧各加上力矩零点之间距离的 1/10 (或者为伸出的实际宽度, 如其该实际宽度为较小者)。对于连续梁, 力矩零点可以取在离开支承有效跨度的 0.15 倍距离处。
- (3) 在终极极限状态截面分析时, 有效宽度取翼缘的全宽。

3) 德国规范 DIN1075 的规定

- (1) 在计算梁的弯、剪受力时, 需要考虑翼板的共同作用宽度;
- (2) 当翼缘净悬出宽度 $b \leq 0.3d_0$ (d_0 为腹板高度) 时, 取 $b_m = b$; 当 $b \geq 0.3d_0$ 时, 可由图表确定 b_m ; 在跨间的共同作用宽度是 $b_{mf} = \rho_f \cdot b$, 在支座上则是 $b_{ms} = \rho_s \cdot b$; 对于连续梁的中间支座, 应按相邻跨中较大的跨径计算 ρ_s ; 一般情况下 $b_{mf} \geq b_{ms}$, 如果某一跨当 $b_{mf} \leq b_{ms}$, 那么该跨的共同作用宽度由该跨两支座出的共同作用宽度的连线来确定;
- (3) 对共同作用宽度的计算可忽略设置水平横隔板或横梁、翼板厚度变化、腹板高度变化、活荷载位置变化的影响;
- (4) 在计算预应力产生的主梁应力时, 对于纵向力产生的应力, 按翼板全宽度考虑; 对于弯矩产生的应力, 按翼板共同作用的宽度考虑。

有效翼缘宽度是考虑了梁弯曲时剪力滞后效应, 梁弯曲时翼板的正应力分布不均匀。

4) 以下对我国的规范 JTJ023—85 第 3.2.2 条和德国规范 DIN1075 第 5.13 条作一对比。

我国规范 JTJ023—85 第 3.2.2 条对 T 型梁有若干规定, 具有以下特点:

- (1) 认为翼缘计算宽度只在一定的范围内与跨径有关, 并无直接的函数关系;
- (2) 强调仅当翼板位于受压区时才能计算宽度;
- (3) 当计算超静定内力时, 取全宽作为计算宽度;
- (4) 对于箱形梁, 没有列出相应的算法, 只规定: 如无更精确的算法, 箱形梁也可参照 T 型梁的规定处理。

德国规范 DIN1075 关于共同作用宽度的规定有以下几个特点:

- (1) 规定详细、严密;

- (2) 把共同作用宽度与跨径的关系用函数联系起来： b/l 越小，共同作用宽度系数 ρ_f 或 ρ_s 越大；反之，越小；
- (3) 认为翼板无论在受压区受拉区，均应考虑共同作用宽度；
- (4) 不仅适用 T 型梁，也适用箱形梁；
- (5) 在计算弯曲应力和纵向力产生的应力时，在用不同的共同作用宽度。

从以上可见，德国规范 DIN1075 关于共同作用宽度的规定条文比我国规范有关条文更详细。更合理、更适用与箱形梁桥。

4.7.3 拱上建筑结构的检算

4.7.3.1 应予以考虑拱桥拱上建筑的联合作用，此时拱上建筑应满足联合作用时的受力要求。并根据拱上建筑的类型、完好程度及所检算的截面位置等区别对待联合作用的大小。其联合作用的计算图式选取应视拱桥具体情况而定，按高次超静定结构用电算程序计算。

4.7.3.2 若不考虑拱上建筑与主拱联合作用时，拱上建筑用可按实际受力图式或简化图式计算其局部受力。若为梁板式拱上建筑，拱上建筑可视为沿桥纵向是一个支承在主拱圈上的多跨钢架，行车道纵梁可视为在钢架支承上的多跨连续梁进行检算。若为拱式拱上建筑，可按连拱检算。

4.7.3.3 空腹拱桥拱上建筑为横桥向排架立柱和横梁进行检算时，应考虑活载不均匀分布的影响。当其横梁的线刚度与立柱的线刚度之比大于 5 时，双柱式立柱横梁可按简支梁计算，多柱式横梁可按连续梁计算；当梁的线刚度与柱的线刚度之比等于或小于 5 时，可按刚架计算。对于拱上立柱的检算应同时计算纵向和横向受力并验算其抗力。

4.7.3.4 刚架拱、桁架拱的桥面板可考虑与刚架和桁架拱片联合作用承受桥上活荷载，对桥面板检算时应考虑其承受永久荷载和活荷载的承载能力。

4.8 桥梁墩台与基础的检算

4.8.1 桥梁墩台的检算

4.8.1.1 对承载能力有影响的病害墩台，或当通过特种大型超重车辆认为比较薄弱的墩台，以及其他需要确定承载能力的墩台，均应根据实际情况，进行必要的检算。

【条文说明】

对承载力有影响的病害墩台，是指有倾斜和断裂等病害的墩台。在检算中都要考虑这些病害的影响。

其它需要确定承载能力的墩台,如原来截面就比较小,后因线路抬高又进行加高的墩台;或原来架设钢梁后换架钢筋混凝土梁的墩台,都需要根据实际情况进行必要的检算。

4.8.1.2 在主应力和附加力作用下,墩(台)身截面及基底的倾覆稳定系数 K_0 不得小于 1.5,滑动稳定系数 K_c 不得小于 1.3。

【条文说明】

在检算墩台的倾覆、滑动稳定时,应考虑下列有利因素:墩台两侧土壤的水平摩擦力;梁跨架在墩台上,因其有垂直荷载和梁跨与墩台间的摩阻作用,使墩台受到水平支撑力;按库伦公式计算的土压力偏大;各种荷载最不利组合同时发生的机率极少;对活载布置图式的任意截取和最不利活载图式的选用都采用了较保守的图式。

考虑上述有利因素后本可将倾覆、滑动稳定系数降低一些,但根据第 4.8.2.6 条规定:如偏心超出规定值可进行应力重分布检算墩(台)身及基底的最高压应力是否超出容许压应力值。即使不超过容许压应力值,但由于压力断面过小将会带来不安全因素,因之将倾覆稳定系数在主应力及附加力作用下仍规定为 1.5,即受压断面控制在一半以上较为合宜。滑动稳定系数也不作变动。

4.8.1.3 如墩台发生倾斜,在验算墩(台)身截面和基底的应力、偏心与倾覆稳定时,需考虑斜度的影响。

4.8.1.4 墩(台)身及基础,由于施工不良或某种病害产生环形裂缝时,对裂缝截面需进行应力、倾覆和滑动稳定检算。检算滑动稳定时,圬工间的摩擦系数 $f = 0.6$,当断裂截面中渗入泥砂,其摩擦系数可根据实际情况而定。

(1) 砖石和混凝土块砌体、混凝土及钢筋混凝土墩台的钢筋及圬工材料的检定公式见第 3—43 条至第 3—48 条。检算公式为:

$$S_d(\gamma_{s0}\psi \sum \gamma_{s1}Q) \leq R_d\left(\frac{R_j}{\gamma_m}, \alpha_k\right)Z_1$$

式中: S_d ——荷载效应函数;

Q ——荷载在结构上产生的效应;

γ_{s0} ——结构的重要性系数,当计算跨径 $L < 50\text{m}$ 时; $\gamma_{s0} = 1.00$; 当

$50\text{m} < L < 100\text{m}$ 时, $\gamma_{s0} = 1.03$; 当 $L > 100\text{m}$ 时, $\gamma_{s0} = 1.05$;

γ_{s1} ——荷载安全系数,对于结构自重,当其产生的效应与汽车(或挂车或履带车)产生的效应同号时, $\gamma_{s1} = 1.2$; 异号时,则 $\gamma_{s1} = 0.9$;

对于其他荷载 $\gamma_{s1} = 1.4$;

ψ ——荷载组合系数;

R_d ——结构抗力效应函数;

γ_m ——材料或砌体的安全系数;

α_k ——结构的几何尺寸；

R_j ——材料或砌体的极限强度；

Z_1 ——旧桥验算系数。

(2) 桥墩台倾覆稳定性的检算：

$$K_0 = \frac{M_{\text{稳}}}{M_{\text{倾}}} = \frac{x \sum P_i}{\sum (P_i e_i) + \sum (T_i h_i)} = \frac{x}{e_0}$$

式中： $M_{\text{稳}}$ ——稳定力矩；

$M_{\text{倾}}$ ——倾覆力矩；

$\sum P_i$ ——作用于基底竖向力的总和；

$(P_i e_i)$ ——作用在桥墩上各竖向力与它们到基底重心轴距离的乘积；

$(T_i h_i)$ ——作用在桥墩上各水平与它们到基底距离的乘积；

x ——基底截面重心 O 至偏心方向截面边缘距离；

e_0 ——所有外力的合力（包括水浮力）的竖向分力对基底重心的偏心距。

(3) 桥墩台滑动稳定性的检算：

$$K_c = \frac{f \sum P_i}{\sum T_i}$$

式中： $\sum P_i$ ——各竖向力的总和（包括水的浮力）；

$\sum T_i$ ——各水平力的总和；

f ——基础底面与地基土之间底摩擦系数，若务史册值时可参照表选取

(4) 基底土的承载力验算，验算公式如下：

$$\text{顺桥向：} \sigma_{\max} = \frac{2N}{ac_x} \leq [\sigma]$$

$$\text{横桥方向：} \sigma_{\max} = \frac{2N}{bc_x} \leq [\sigma]$$

式中： σ_{\max} ——应力重分布后基底最大压应力；

N ——作用于基础底面合力的竖向分力；

a 、 b ——横桥方向和顺桥方向基础底面积的边长；

$[\sigma]$ ——地基土壤的容许承载力，按荷载及使用情况计入容许承

载力的提高系数；

c_x ——顺桥方向验算时，基底受压面积在顺桥方向的长度，即 c_x

$$= 3\left(\frac{b}{2} - e_x\right);$$

c_y ——横桥方向验算时，基底受压面积在横桥方向的长度，即 c_y

$$= 3\left(\frac{b}{2} - e_y\right)。$$

其中： e_x 、 e_y ——分别为合力在 x 轴和 y 轴方向的偏心矩。

4.8.2 桥梁地基和基础的检算

4.8.2.1 当桥梁墩台在服役期发生不均匀沉降、滑移或倾斜时，应对地基承载力进行检算，并相应检算对超静定桥梁上部结构内力的影响。

4.8.2.2 桥墩台的地基容许承载力宜通过荷载试验或触探试验等办法实测确定。如无条件实测，可根据地质条件按《公路桥涵地基与基础设计规范》选定各种地基的基本承载力，并根据荷载组合、基础构筑情况及地基被压实与否，适当乘以检定提高系数。对于经久压实的桥梁地基土容许承载力的提高，可按现行《公路桥涵地基与基础设计规范》的规定采用。

【条文说明】

地基基本承载力提高系数的确定是如此考虑的：按《公路桥涵地基与基础设计规范》地基被压实的可提高。按铁道部《钢桥荷载检定规程》规定，建在围堰内的基础，地基的容许承载力可提高 75%。但由于《铁路工程技术规范》改编时，土壤分类较细，且基本承载力都提高了。如软塑状的砂粘土提高 50%；硬塑性的提高 41%；坚硬粘土提高 30%；砂类土提高 29%；其它土类也都有所提高。因此在没有可靠根据时，暂将提高值由 75%变为 35%，以保安全。

当现行荷载所产生的基底压应力小于地基基本承载力时，因地基承载力尚未用完，这时，地基不能认为已被压实，承载力不予提高。反之，当基底压应力大于地基基本承载力时，地基确实产生了较大的压实作用，若此时基础有下沉或倾斜病害，说明地基虽然被压实，但承载力不足，也不能予以提高；只有当基础无下沉或倾斜等病害，才认为地基既被压实，其承载力也足够，方可采用提高系数。

只有当围堰保持完好并有足够的刚度时，才能对基底的土壤起到约束作用，在地基受到较大的压缩时，土壤不致从侧面被挤出，此时地基的基本承载力才能予以提高。

4.8.2.3 位于冻胀土中的墩台基础，应检算切向冻胀稳定性。对墩(台)身及基础的薄弱端面（如墩身与基础连接处、施工接缝处），还需检算其拉应力。

4.8.2.4 各种桩基的检定容许承载力，可按《公路桥涵地基与基础设计规范》计算值提高 20%。

4.8.2.5 填土侧压力。当桥头填土经久压实时，按规范采用的填土内摩擦角 φ 可根

据土质情况适当加大。

4.8.2.6 外力对基底截面重心的偏心 e_0 应符合下列规定：

(1) 在非岩石地基（包括砾、砂、土状的风化岩层）上的墩台，当承受主力附加力时， $e_0 \leq \rho$ ；当土的基本承载力 $\sigma_0 \leq 20$ 吨/平方米时，对桥台 $e_0 \leq 0.8\rho$ 。

(2) 在岩石地基上的墩台，当承受主力附加力时，对节理不发育、较发育和节理发育的硬质岩，对其他岩石地基， $e_0 \leq 1.5\rho$ ；对其他岩石地基， $e_0 \leq 1.2\rho$ 。

(3) 受斜土压力的桥墩，按桥台办理。

(4) 当基底上的合力偏心超出上述规定时，如基础无下沉及倾斜的病害，可按应力重分布验算基底最大压应力。

上述 $e_0 = M/N$ ——外力对基底截面重心的偏心距；

N 、 M ——作用于基底的垂直力和外力对基底截面重心的力矩；

$\rho = W/A$ ——基底截面核心半径， W 为相应于应力较小边缘的截面抵抗矩， A 为基底面积。

注： e_0/ρ （包括斜向弯矩）可按下式计算：

$$\frac{e_0}{\rho} = 1 - \frac{\sigma_{\min}}{N/A}$$

【条文说明】

由于基底截面不能承受拉应力，故《公路桥涵地基与基础设计规范》规定：对于非岩石地基的基底偏心不应超出底面面积的核心半径，如能满足这个要求，即使桥梁在荷载的往返作用下，基础底面也不会与土脱离。对于建在松软地基上的桥台，考虑容易产生不均匀的下沉，所以规定在地基基本承载力小于或等于20吨/平方米时， $e_0 \leq 0.8\rho$ 。对于岩石地基，为了控制基底发生的拉应力区不要太长，以保证受压区有足够的长度，使基底压应力能比较合理的分布，所以规定对节理不发育、较发育和节理发育的硬质岩地基，取 $e_0 \leq 1.5\rho$ ；对其他岩石地基，取 $e_0 \leq 1.2\rho$ 。

在检算旧桥墩台时，考虑到地基已被压实的情况，对于基底偏心的限制条件可以稍加放宽。因此这里规定：当偏心超出上述规定时，即基底出现了受拉区，不论对于什么地基，这时都按应力重分布检算受压区的最大压应力，如最大压应力值小于地基容许承载力，且基础无下沉及倾斜等病害，即说明：虽然偏心超出了规定，但承载力和地基压缩仍是足够的。对这样的基础即可认为满足要求；和墩（台）身截面相同，应力重分布尚应满足关于倾覆稳定系数的规定。

5 桥梁承载能力鉴定

5.1 桥梁承载能力鉴定基本方法及其工作流程

5.1.1 对需要进行桥梁承载能力检测评定的桥梁，应根据桥梁档案资料和桥梁养护管理系统的检查评定结果，选择最不利或有代表性的桥跨结构或构件作为承载能力检测评定的对象，初步判断桥梁结构或构件的承载能力。

【条文说明】

根据桥梁的养护管理情况，初步评价桥梁的承载能力和使用状况。对承载能力有怀疑的桥梁进行进一步检测评定。对同一类或多跨的桥梁，可选择具有代表性或认为最不利的结构作为承载能力检测评定的对象，以减少工作量和工作强度。

5.1.2 针对确定的承载能力检测评定对象，应开展深入细致的桥梁调查与检测工作，并根据桥梁结构或构件的实际检测结果，对分项检测指标作出评判。

【条文说明】

基于桥梁结构或构件的检测评判结果，确定承载能力检算系数、恶化系数和截面折减系数以及活载影响修正系数的合理取值。

5.1.3 依据桥梁结构或构件的设计或竣工技术资料，通过结构检算分析、必要时辅以荷载试验鉴定的方法，对桥梁结构或构件的承载能力及其使用条件作出评价。

【条文说明】

根据主要承重构件的检测情况，应用本规程给出的方法，通过计算分析，对结构承载能力作出评定。当基于检测结果的承载能力评定不足以对结构或构件的承载能力作出鉴定时，可考虑用荷载试验对结构承载能力作出鉴定。

5.2 桥梁承载能力鉴定内容

5.2.1 桥梁承载能力鉴定主要包括以下四个方面的内容

- (1) 结构或构件的强度与稳定性评定
- (2) 地基与基础评定
- (3) 结构或构件的刚度评定
- (4) 结构或构件的开裂状况评定

【条文说明】

桥梁结构的承载力主要包括以上四个方面,分别满足桥梁承载能力极限状态和正常使用极限状态的要求。因此可根据桥梁技术状况的不同,有选择对以上几个方面做出评定。

5.2.2 对桥梁结构或构件,按本规程要求进行的强度及稳定性检算符合要求,同时桥梁使用状况良好时,可评定桥梁结构或构件的强度及稳定性符合检算荷载要求。否则,应降低检算荷载重新进行检算评定,或进行加固补强与更换处理。

5.2.3 地基与基础的承载力评定应从存在病害的特征出发,应用合理的检算方法对结构的计算分析。

【条文说明】

地基承载力评定应以调查、检算资料为主。当桥梁经过多年营运和洪水考验,墩台未发生明显的不均匀沉陷、倾斜及由此引起的桥面纵横坡变化,墩台未发生明显的水平位移及由此引起的桥梁伸缩缝过度分开或抵拢、拱桥拱顶及拱脚的严重开裂等,且地基与基础经检算通过时,可评定地基与基础承载力符合检算荷载要求。

根据调查,若墩台仍在下沉、滑动、倾斜,则应根据探明的地基情况采取相应的加固措施。

5.2.4 当桥梁结构或构件的技术状况评定值小于 3 时,在检算荷载作用下结构或构件挠度应满足有关设计规范要求即可,当桥梁结构或构件的技术状况评定值大于等于 3 时,结构或构件刚度要求除满足本规程要求,还应考虑桥梁的使用状况。

【条文说明】

当桥梁结构或构件的技术状况评定值小于 3 时,在检算荷载下,砖石及混凝土拱桥最大挠度,不应大于《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》(JTJ 022—85)第 4.2.13 条规定的允许值。钢筋混凝土及预应力混凝土桥检算的最大挠度,不应大于《公路钢筋混凝土及预应力桥涵设计规范》(JTJ 023—85)第 4.2.3 条及第 5.2.27 条规定的允许值。公路桥梁钢结构检算的最大挠度,不应大于《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025—86)第 1.1.6 条规定的允许值。

当桥梁结构或构件的技术状况评定值大于等于 3 时,按本规程要求进行的刚度检算符合要求,同时桥梁使用状况良好时,可评定桥梁结构或构件的刚度符合检算荷载要求。否则,应降低检算荷载重新进行检算评定,或进行加固补强或更换处理。

5.2.5 结构或构件的开裂状况评定,桥梁结构或构件在持久状态下的裂缝宽度一般不应大于表 5.2 的允许值。对裂缝应根据其分布特征及其稳定性区别对待,以确保结构的正常使用功能及其耐久性。

【条文说明】

当结构或构件的强度及稳定性、地基与基础、刚度检算符合要求但裂缝宽度超过表 4.2 的规定时,应采取防护措施以保证结构的耐久性。当裂缝发展严重(裂缝宽度大于表 4.2 允许值,裂缝间距小于计算值,高度大于计算值,出现典型受力临界裂缝)或裂缝仍在持续发展时,应认为结构或构件的开裂状况不符合要求。此时从上部构造本身和地基基础两方面查

明原因，采用有效措施加固补强。

裂 缝 限 值 表 表 5.2

结构类别	裂 缝 部 位			允 许 最 大 缝 宽 (mm)	其 它 要 求
钢 筋 混凝土梁	主筋附近竖向裂缝			0.25	
	腹板斜向裂缝			0.30	
	组合梁结合面			0.50	不允许贯通结合面
	横隔板与梁体端部			0.30	
	支座垫石			0.50	
预应力 混凝土梁	梁体竖向裂缝			不允许	
	梁体纵向裂缝			0.20	
砖、石、 混凝土拱	拱圈横向			0.30	裂缝高小于截面高一半
	拱圈纵向			0.50	半裂缝长小于跨径 $\frac{1}{8}$
	拱波与拱肋结合处			0.20	
墩 台	墩台帽			0.30	不允许贯通墩台身截面 的一半。
	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 侵蚀性影响	有筋	0.25	
			无筋	0.35	
		干沟或季节性有水河流		0.40	
	有冻结作用部份			0.20	
备 注	表中所列除特殊要求外适用于一般条件。对于潮湿和空气中含有较多腐蚀性气体等条件下的缝宽限制应要求严格一些。				

5.3 桥梁承载能力鉴定计算

5.3.1 持久状态桥梁结构承载能力极限状态鉴定计算

5.3.1.1 对砖、石及混凝土桥，应对《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》（JTJ 022-85）第三章第 3.0.1 条荷载效应不利组合设计值小于或等于结构抗力效应设计值的方程式改变如下：

$$S_d(\gamma_{so}\psi\sum\gamma_{sl}Q)\leq R_d\left(\frac{R^j}{\gamma_m},\alpha_k\right)Z_1\xi_c \quad (5.3.1-1)$$

式中： S_d — 荷载效应函数；

Q — 荷载在结构上产生的效应；对重载交通桥梁，汽车荷载效应应计入活载影响修正系数 ξ_q ；

γ_{so} — 结构的重要性系数；

γ_{s1} — 荷载安全系数；

ψ — 荷载组合系数；

R_d — 结构抗力效应函数；

R^j — 材料或砌体的极限强度；

γ_m — 材料或砌体的安全系数；

α_k — 结构的几何尺寸；

Z_1 — 承载能力检算系数，见表 5.4.4；

ξ_c — 截面折减系数，见表 5.6.2-4。

5.3.1.2 对配筋混凝土桥梁，应对《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023-85) 第一章第 1.0.5 条荷载效应不利组合设计值小于或等于结构抗力效应设计值的方程式改变如下：

$$S_d(\gamma_d G; \gamma_q \sum Q) \leq \gamma_b R_d(\xi_c \frac{R_c}{\gamma_c}; \xi_s \frac{R_s}{\gamma_s}) Z_1 (1 - \xi_e) \quad (5.3.1-2)$$

式中： S_d — 荷载效应函数；

G — 永久荷载（结构重力）效应；

γ_g — 永久荷载（结构重力）安全系数；

Q — 可变荷载及永久荷载中混凝土收缩、徐变影响力效应，基础变位影响力效应；对重载交通桥梁，汽车荷载效应应计入活载影响修正系数 ξ_q ；

γ_q — 荷载 Q 的安全系数；

R_d — 结构抗力函数；

γ_b — 结构工作条件系数；

R_c — 混凝土强度设计采用值；

γ_c — 在混凝土强度设计采用值基础上的混凝土安全系数；

R_s — 预应力钢筋或非预应力钢筋强度设计采用值；

γ_s — 在钢筋强度设计采用值基础上的钢筋安全系数；

Z_1 — 承载能力检算系数，见表 5.4.4；

ξ_e — 承载能力恶化系数，见表 5.5.2-2；

ξ_c — 配筋混凝土结构的截面折减系数，见表 5.6.2-4；

ξ_s — 钢筋的截面折减系数，见表 5.6.3。

【条文说明】

桥梁结构承载能力极限状态是指结构或构件达到最大承载能力或不适于承载的变形。当桥梁结构出现以下状态之一时，即认为超过了承载能力极限状态。

(1) 整个桥跨结构或结构的一部分作为刚体失去平衡（如失稳、倾覆等）

(2) 结构构件或连接处因超过材料强度而破坏（包括疲劳破坏）

(3) 构件或结构构件丧失稳定（如压杆的压屈失稳等）

(4) 结构转变为机动体系

(5) 由于材料的塑性变形或形变过大，或由于截面开裂而引起过大的几何变形等，致使结构或结构构件不能继续承载和使用。（如大跨连续梁、连续刚构桥跨中的下挠等）。

本方法主要是基于桥梁外观检查和有关无损检测结果对桥梁的承载能力作出评定。首先根据桥梁外观检查结果对其技术状况进行评定，通过对桥梁构件缺损技术状况的检测评定，构件材质强度变异和模态参数（特征频率）的变化情况对结构的影响，综合对桥梁的技术等级进行评定，通过专家调查确定不同技术等级桥梁所对应的检算系数 Z_1 ；考虑裂缝、机械磨损、混凝土碳化以及钢筋锈蚀引起的结构有效截面折减，引入混凝土折减系数 ξ_c 和钢筋截面折减系数 ξ_s ；结合无损检测的各项结果，从耐久性的角度考虑以上方面对桥梁结构承载能力的影响，并在承载能力评定中引入承载能力恶化系数 ξ_e 来反应这一影响；通过对桥梁荷载历史的调查，分析和评价桥梁结构的超载状态，并用活载影响系数 ζ_q 对作用效应中活载分项系数加以调整。

本规程所采用的方法是在公路桥梁设计规范的基础上，结合旧桥的特点，引入桥梁检算系数、耐久性恶化系数、截面折减系数和活载修正系数分别对极限状态方程中结构抗力效应和荷载效应进行修正，并通过比较以判定结构或构件的承载能力状况。

5.3.1.3 对钢结构，在进行结构构件的强度、总稳定性验算时，应对《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025-86) 第一章第二节第 1.2.15 条、第 1.2.16 条、第 1.2.17 条所列公式右项乘以表 5.4.5-1 所列的钢结构桥梁的承载能力检算系数 Z_1 值

【条文说明】

公路工程钢结构设计主要是依据公路桥涵钢结构及木结构设计规范 (JTJ025-86) 进行的。其钢结构或构件承载能力的计算方法采用的是容许应力法。结构或构件的安全储备是通过安全系数来度量的，只用一个指标表示结构的安全程度。因此在对钢结构及其钢构件的承载能力评定时，为确保评定结果不低于设计规范所规定的安全水平，在对钢结构或钢构件的状态方程中直接引入折减系数 Z_1 ，而且钢结构的材质比较均匀，结构构件的表观技术状况能比较全面的反应结构承载能力的退化状况，检算系数 Z_1 是通过对钢结构的技术状况评定

利用专家经验得到的,用它对结构或构件的承载能力进行修正可以比较准确的、真实的反应当前状况桥梁的承载能力。

5.3.1.4 对索结构,索的强度可按按下式计算:

$$\frac{T}{A} \leq Z_1[\sigma] \quad (5.3.1-3)$$

式中: T — 索的计算轴力,对重载交通桥梁,汽车荷载的计算轴力应乘以活载影响修正系数 ξ_q ;

A — 索的计算面积;

$[\sigma]$ — 允许应力限值;

Z_1 — 承载能力检算系数,见表 5.4.5-2。

5.3.2 持久状态桥梁结构正常使用极限状态鉴定计算

5.3.2.1 对砖、石及混凝土结构、配筋混凝土结构和钢结构桥梁,当桥梁结构或构件的技术状况评定值 $D \geq 3$ 时,应按下述方法,进行持久状态桥梁结构正常使用极限状态鉴定计算。

【条文说明】

一般而言,当桥梁结构或构件的技术状况评定值 $D \geq 3$ 时,桥梁接近坏的状态和危险状态,桥梁的正常使用功能已有明显的下降。为确保桥梁运营过程中的安全和恢复其正常使用功能,有必要对持久状态桥梁结构正常使用极限状态的承载能力进行计算。

5.3.2.2 对砖、石及混凝土拱桥,短期荷载作用下的变形:

$$f_d < Z_1 f_L \quad (5.3.2-1)$$

式中: f_d — 考虑活载影响修正系数后的短期荷载变形计算值;

f_L — 《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》(JTJ 022-85)第 5.2.13 条规定的变位限值;

Z_1 — 承载能力检算系数,见表 5.4.4。

5.3.2.3 对钢筋混凝土桥梁,应对《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 023-85)第一章第 1.0.6 条正常使用极限状态计算公式改变如下:

(1) 限制应力

$$\sigma_d < Z_1 \sigma_L \quad (5.3.2-2)$$

式中: σ_d — 计入活载影响修正系数的截面应力计算值;

σ_L — 应力限值;

Z_1 — 承载能力检算系数,见表 5.4.4。

(2) 短期荷载作用下的变形

$$f_d < Z_1 f_L \quad (5.3.2-3)$$

式中: f_d — 计入活载影响修正系数的短期荷载变形计算值;

f_L — 变位限值;

Z_1 — 承载能力检算系数, 见表 5.4.4。

【条文说明】

桥梁正常使用极限状态是指桥跨结构或结构构件达到正常使用或耐久性性能指标的某项规定限值。根据桥梁是否能够满足当前运营状况及正常使用的条件, 对桥梁的整体技术状况作出评价。对已有桥梁正常使用极限状态的评定一般进行下列三项校核:

1) 限制应力 $\sigma_d < [\sigma]$

2) 短期荷载作用下的变形 $f_d < [f]$

3) 荷载组合作用下的裂缝宽度 $\delta_d < [\delta]$

5.3.2.4 对钢结构, 短期荷载作用下的变形:

$$f_d < Z_1 [f] \quad (5.3.2-4)$$

式中: f_d — 计入活载影响修正系数的短期荷载变形计算值;

$[f]$ — 允许变形值;

Z_1 — 承载能力检算系数, 见表 5.4.5-1。

5.3.3 持久状态桥梁地基与基础鉴定计算

5.3.3.1 经久压实的桥梁地基土, 在墩台与基础无异常变位的情况下, 容许承载能力的提高, 按《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85) 第二章第二节规定采用。

5.3.3.2 当桥头填土经久压实时, 按《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85) 采用的填土内摩擦角 ϕ 可根据土质情况适当放大 $5 \sim 10^\circ$, 但最大不得超过 50° 。

5.3.3.3 对桩基础, 应根据桩基的实际检验结果, 按《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85) 第四章规定, 进行桩基承载能力和桩身强度计算。

【条文说明】

桥梁持久状态地基与基础鉴定计算主要还是参照《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85) 相关规定进行。

在经过运营阶段之后桥头填土不同于桥梁设计状态的填土, 其内摩擦角随着其压实程度的不同有了一定的变化, 在计算主动土压力和被动土压力时, 可考虑内摩擦角变化对其的影响。

对于桩基计算其承载能力时, 主要考虑其病害影响, 比如冲刷造成桩基入土长度的变化, 侵蚀造成混凝土剥落等, 在应用《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ 024-85) 相关规

定进行承载能力计算时应予以考虑。

5.4 承载能力检算系数（ Z_1 ）的确定

5.4.1 承载能力检算系数 Z_1 是根据结构或构件的实际技术状况，对结构或构件的抗力进行折减或提高。

【条文说明】

桥梁承载能力检算系数是通过桥梁技术状态构件的缺损状况的调查、混凝土强度的检测以及结构模态参数的测试情况，主要是依据专家经验综合的判断结构构件潜在承载能力情况。桥梁技术状况的评定引入了模糊评判中状态特征值的概念，通过对各个检测指标权重进行专家调查，应用层次分析法，确定最终的权重比例，通过对各检测指标的得分，确定桥梁技术状态的特征值 D 和桥梁技术状态的类别，选取相应的检算系数。

5.4.2 砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构的承载能力检算系数（ Z_1 ），应综合考虑桥梁结构或构件外观缺损状况、材质强度和桥梁结构固有模态等的检测评定结果加以确定。

5.4.3 根据表 5.4.3 推荐的权重，按下式计算确定结构构件技术状况评定值 D ：

$$D = \sum \alpha_j D_j \quad (5.4.3)$$

式中： α_j — 某一项检测指标的权重值， $\sum_{j=1}^3 \alpha_j = 1$ ；

D_j — 结构或构件某项检测指标的评定标度值，见表 3.3.2-1 至 3.3.2-5、表 3.4.4 和表 3.4.10-1。

推荐用于确定桥梁承载能力检算系数的检测指标权重值 表 5.4.3

检测指标名称	桥梁外观质量	混凝土强度	结构模态参数
权重 α_j	0.4	0.3	0.3

5.4.4 根据结构或构件技术状况评定值，按表 5.4.4 选用桥梁承载能力检算系数 Z_1 值。

砖、石及混凝土与配筋混凝土结构桥梁的承载能力检算系数 Z_1 值 表 5.4.4

结构或构件技术状况评定值 D	受弯构件	轴心受压	轴心受拉	偏心受压	偏心受拉	受扭构件	局部承压
0	1.15	1.20	1.05	1.15	1.15	1.10	1.15
1	1.10	1.15	1.00	1.10	1.10	1.05	1.10
2	1.00	1.05	0.95	1.00	1.00	0.95	1.00
3	0.90	0.95	0.85	0.90	0.90	0.85	0.90
5	0.80	0.85	0.75	0.80	0.80	0.75	0.80
备注	1、小偏心受压可参照轴心受压取用承载能力检算系数 Z_1 值； 2、检算系数 Z_1 值，可按技术状况评定值 D 线性内插。						

5.4.5 钢结构和索结构桥梁的承载能力检算系数 Z_1 值，可按表 5.4.5-1 和 5.4.5-2 选用。

钢结构桥梁的承载能力检算 Z_1 系数值 表 5.4.5-1

Z_1 值	结构技术状况	桥 梁 状 况	结构技术状况评定值
0.95~1.05	良好状态	焊缝完好，各节点铆钉、螺栓无松动；构件表面完好，无明显损伤，防护涂层略有老化、污垢。	1
0.90~0.95	较好状态	焊缝完好，少数节点有个别铆钉、螺栓松动变形；构件表面有少量锈迹，防护涂层油漆变色、起泡剥落，面积在 10% 以内。	2
0.85~0.90	较差状态	少数焊缝开裂，部分节点有铆钉、螺栓松动变形；构件表面完好，有少量锈迹，防护涂层油漆明显老化变色并伴有大量起泡剥落，面积在 10%~20% 以内。个别次要构件有异常变形，行车稍感振动或摇晃。	3
0.80~0.85	坏的状态	焊缝开裂，并造成截面削弱。联结部位铆钉、螺栓松动变形，10%~30% 已损坏；构件表面锈迹严重，截面损失在 3%~10% 以内，防护涂层油漆明显老化变色并普遍的起泡剥落，面积在 50% 以上。个别主要构件有异常变形，行车有明显振动或摇晃并伴有异常声音。	4
0.80 以下	危险状态	焊缝开裂严重，造成截面削弱在 10% 以上。联结部位 30% 以上铆钉、螺栓已损坏；构件表面锈迹严重，截面损失在 10% 以上，材质特性明显退化；防护涂层油漆完全失效。主要构件有异常变形，行车振动或摇晃显著并伴有不正常移动。	5

索结构桥梁的承载能力检算 Z_1 系数值 表 5.4.5-2

Z_1 值	结构技术状况	桥 梁 状 况	结构技术状况评定值
1.00~1.10	良好状态	表面防护完好，锚头无积水，锚固区无裂缝。	1
0.95~1.00	较好状态	表面防护基本完好，有细微裂缝，锚头无锈蚀，锚固区无裂缝。	2
0.90~0.95	较差状态	表面防护有少数裂缝，伴有少量锈迹，锚头有轻微锈蚀，锚固区细小裂缝。	3
0.85~0.90	坏的状态	表面防护普遍开裂，并有部分脱落，锚头锈蚀，锚固区有明显的受力裂缝。	4
0.85 以下	危险状态	表面防护普遍开裂，并有大量脱落，钢索裸露，钢索锈蚀严重，锚头积水锈蚀，锚固区有明显的受力裂缝，裂缝宽度大于 0.2mm。	5

5.5 承载能力恶化系数 (ξ_e) 的确定

5.5.1 承载能力恶化系数 ξ_e 是考虑鉴定期内桥梁结构质量状况进一步衰退恶化产生的不利影响，通过承载能力恶化系数 ξ_e 来反映这一不利影响可能造成的结构抗力效应的降低。

【条文说明】

在进行桥梁结构或构件承载能力鉴定时，对配筋混凝土结构，尚应考虑鉴定期内桥梁结构质量状况进一步衰退恶化产生的不利影响。在进行结构强度和稳定性检算时，引入承载能力恶化系数是为了使结构在质量状况进一步衰退到某一阶段时，评价结果仍能够维持在一定的可靠性水平之上。

5.5.2 根据耐久性恶化各项检测指标的检测结果，应用表 5.5.2-1 规定方法计算出某一构件恶化状况评定值 E 。

推荐的配筋混凝土桥梁结构或构件检测指标
影响权重及其恶化状况评定方法

表 5.5.2-1

序号	检测指标名称	权重 α_j	综合评定方法
1	混凝土表面缺损	0.32	某一构件恶化状况评定值 E 按下式计算： $E = \sum_{j=1}^7 E_j \alpha_j$ 式中： E_j — 结构或构件某一检测评定指标的评定标度值； α_j — 某一检测评定指标的影响权重， $\sum_{j=1}^7 \alpha_j = 1$ 。
2	钢筋自然电位	0.11	
3	混凝土电阻率	0.05	
4	混凝土碳化深度	0.20	
5	混凝土保护层厚度	0.12	
6	氯离子（Cl ⁻ ）含量	0.15	
7	结构混凝土强度推定值	0.05	

【条文说明】

对配筋混凝土结构，根据桥梁结构或构件表面缺损状况、构件材质强度、钢筋锈蚀电位、混凝土电阻率、混凝土中氯离子含量、混凝土碳化深度、钢筋保护层厚度等的检测评定结果，采用考虑各检测指标影响权重的综合评定方法，按表 5.5.2-1 计算确定桥梁结构或构件的恶化状况评定值 E 。然后根据不同环境条件，按表 5.5.2-2 取用承载能力恶化系数 ξ_e 值。

5.5.3 根据某一构件恶化状况评定值 E 及桥址的环境特征，按表 5.5.2-2 确定配筋混凝土桥梁的承载能力恶化系数 ξ_e 。

配筋混凝土桥梁的承载能力恶化系数 ξ_e 值 表 5.5.2-2

恶化状况 评定值 E	环境条件			
	干燥 不冻 无侵蚀性介质	干、湿交替 不冻 无侵蚀性介质	干、湿交替 冻 无侵蚀性介质	干、湿交替 冻 有侵蚀性介质
1	0.00	0.02	0.05	0.06
2	0.02	0.04	0.07	0.08
3	0.05	0.07	0.10	0.12
4	0.10	0.12	0.14	0.18
5	0.15	0.17	0.20	0.25
备注	恶化系数 ξ_e 按结构或构件恶化状况评定值线性内插。			

【条文说明】

桥梁结构或构件的功能与材质状况的退化与其所处的环境是密切相关的,在评价桥梁的病害及现状对承载能力的影响时,必须考虑其所处环境的不同。根据环境作用对桥梁结构或构件的侵蚀程度以及对相关病害的加速作用的不同,将其分为表 5.5.2-2 中的四种情况。

5.6 截面折减系数 (ξ_c 、 ξ_s) 的确定

5.6.1 截面折减系数主要是考虑砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构由于材料风化、碳化、物理与化学损伤以及由于钢筋腐蚀剥落造成的钢筋有效面积损失对结构构件截面抗力效应的影响。

【条文说明】

对砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构,由于材料风化、碳化、物理与化学损伤(如混凝土剥落、疏松、掉棱、缺角、桩基与墩柱由于冲蚀引起的剥落缩颈等)引起的结构构件有效截面损失,以及由于钢筋腐蚀剥落造成的钢筋有效面积损失,对结构构件截面抗力效应的影响。在检算结构抗力效应时,可用截面折减系数计及这一影响。

5.6.2 砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构的截面折减系数,可按下述方法确定:

(1) 首先通过对桥梁进行检测,确定砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构材料风化、碳化、物理与化学损伤等三项检测指标的评定标度。材料风化的评定标度见表 5.6.2-1,物理与化学损伤的评定标度见表 5.6.2-2,碳化的评定标度见表 3.4.8。

(2) 根据各检测指标的评定标度,按下式计算确定结构或构件截面损伤的综合评定值 R :

$$R = \sum_{j=1}^N R_j \alpha_j \quad (5.6.2)$$

式中: R_j — 某项检测指标的评定标度值,见表 5.6.2-1、5.6.2-2、3.4.8;

α_j — 某项检测指标的权重值, $\sum_{j=1}^N \alpha_j = 1$, 见表 5.6.2-3;

N — 对砖、石结构, $N=2$; 对混凝土及配筋混凝土结构, $N=3$ 。

(3) 然后,依据截面损伤的综合评定值,按表 5.6.2-4 取用截面折减系数 ξ_c 。

砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构材料风化评定标准 表 5.6.2-1

评定 标度	材 料 风化状况	性 状 描 述
1	微风化	手搓构件表面，无砂粒滚动摩擦的感觉，手掌上粘有构件材料粉末，无砂粒。构件表面直观较光洁。
2	弱风化	手搓构件表面，有砂粒滚动摩擦的感觉，手掌上附着物大多为构件材料粉末，砂粒较少。构件表面砂粒附着不明显或略显粗糙。
3	中度风化	手搓构件表面，有较强的砂粒滚动摩擦的感觉或粗糙感，手掌上附着物大多为砂粒，粉末较少。构件表面明显可见砂粒附着或明显粗糙。
4	较强风化	手搓构件表面，有强烈的砂粒滚动摩擦的感觉或粗糙感，手掌上附着物基本为砂粒，粉末很少。构件表面可见大量砂粒附着或有轻微剥落。
5	严重风化	构件表面可见大量砂粒附着，且构件部分表层剥离或混凝土已露粗骨料。

砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构物理与化学损伤评定标准 表 5.6.2-2

评定标度	性 状 描 述
1	构件表面较好，局部表面有轻微剥落。
2	构件表面剥落面积在 5%以内。损伤比较均匀，深度较浅，与截面损伤发生部位构件最小尺寸之比小于 0.02
3	构件表面剥落面积在 10%以内，剥落一般仅发生在表层，局部最大深度在 1cm 以内或损伤最大深度与截面损伤发生部位构件最小尺寸之比小于 0.04。
4	构件表面剥落面积在 15%以内，剥落深度较大，局部最大深度在 2cm 以内或损伤最大深度与截面损伤发生部位构件最小尺寸之比小于 0.10。
5	构件表面剥落面积在 20%以内，局部保护层混凝土剥落，最大深度在 2cm 以上或损伤最大深度和截面损伤发生部位构件最小尺寸之比大于 0.10。

推荐的砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构
材料风化、碳化及物理与化学损伤影响权重值 表 5.6.2-3

结构类别	检测指标名称	权重值 α_j
砖、石结构	材料风化	0.20
	物理与化学损伤	0.80
混凝土及配筋 混凝土结构	材料风化	0.10
	碳化	0.35
	物理与化学损伤	0.55

砖、石及混凝土结构与配筋混凝土结构的截面折减系数 ξ_c 值 表 5.6.2-4

截面损伤 综合评定值 R	截面折减系数 ξ_c
$1 \leq R < 2$	0.98~1.00
$2 \leq R < 3$	0.93~0.98
$3 \leq R < 4$	0.85~0.93
$4 \leq R < 5$	0.85 以下

5.6.3 配筋混凝土结构中,发生腐蚀的钢筋的截面折减系数 ξ_s ,可按表 5.6.3 选用。

配筋混凝土的钢筋截面折减系数 ξ_s 值 表 5.6.3

评定标度	性 状 描 述	截面折减系数 ξ_s
1	沿钢筋出现裂缝, 宽度小于限值。	0.98~1.00
2	沿钢筋出现裂缝, 宽度大于限值, 或钢筋锈蚀引起混凝土发生层离。	0.95~0.98
3	钢筋锈蚀引起混凝土剥落, 钢筋外露, 表面有膨胀薄锈层或坑蚀。	0.90~0.95
4	钢筋锈蚀引起混凝土剥落, 钢筋外露、表面膨胀性锈层显著, 钢筋断面损失在 10%以内。	0.80~0.90
5	钢筋锈蚀引起混凝土剥落, 钢筋外露、出现锈蚀剥落, 钢筋断面损失在 10%以上。	0.80 以下

【条文说明】

钢筋锈蚀对结构的危害是很大的,通常钢筋锈蚀都伴有体积膨胀,使混凝土沿钢筋出现爆裂,造成钢筋与混凝土之间的粘结力破坏钢筋截面减少,结构构件承载力降低,变形和裂缝增大等一系列不良后果,并随时间的推移,锈蚀会逐渐恶化,最终可导致钢筋混凝土梁的破坏。

有关试验研究表明,混凝土梁内的钢筋锈蚀,主要使梁的以下力学性能发生变化:

- 1) 梁的强度降低;
- 2) 梁的延性性能退化;
- 3) 钢筋与混凝土之间的粘结性能破坏;

梁的加载全过程及破坏形态发生变化;随着锈蚀量的增加,梁的垂直裂缝间距变大,接近支座处斜裂缝逐渐与受拉主筋方向的纵向裂缝联接,其破坏形态由适筋延性破坏转为钢筋粘结撕裂的脆性破坏。

就钢筋混凝土而言,钢筋的锈蚀程度的不同在混凝土构件的表观现象是不同的。根据锈蚀对结构所造成的影响对钢筋的状况作出评判。

5.7 活载影响修正系数 (ζ_q) 的确定

5.7.1 通过实际调查重载交通桥梁的典型代表交通量、大吨位车辆混入率、轴荷分布,按下式确定活载影响修正系数 ζ_q 值:

$$\zeta_q = \sqrt[3]{\zeta_{q1}\zeta_{q2}\zeta_{q3}} \quad (5.7.1)$$

式中: ζ_q — 活载影响修正系数;

ζ_{q1} — 对应于交通量的活载影响修正系数;

ζ_{q2} — 对应于大吨位车辆混入率的活载影响修正系数;

ζ_{q3} — 对应于轴荷分布的活载影响修正系数。

【条文说明】

活载影响系数是考虑了实际桥梁所承受的汽车荷载与标准汽车荷载之间的差异,在桥梁的运营过程中,特别是在一些有特殊意义的路线上的桥梁,如在矿区以及港口地区,经常有一些大吨位的车辆通过,而且超载现象也很严重。而我们对桥梁承载能力评定的一个主要目的就是看它是否能满足当前状态下的交通荷载。因此我们在评定桥梁承载能力时,有必要对其荷载特征进行分析,找出与标准荷载的差异,研究这种差异对桥梁承载能力的影响。

引入活载影响修正系数的目的:对于频繁通行大吨位车、超重运输严重及交通量严重超限的重载交通桥梁应考虑实行运营荷载状况对结构承载能力所造成的不利影响。在进行荷载效应组合时可引入活载影响修正系数 ζ_q 适当的提高汽车检算荷载效应,以反映桥梁实际承受荷载情况。

汽车荷载分布的特征主要表现在三个方面:1、交通量;2、期望值;3、轴重的频遇值。交通量反应了桥梁所承受的荷载总量,通常可以用典型代表交通量来表示。期望值桥梁荷载的平均水平。轴重频遇值反应荷载超过某一水平的频繁程度。通过以上三个方面基本可以反应了实

际汽车荷载的分布特征，因此通过对这三方面的调查便能表征出实际汽车荷载与设计荷载分布模式之间的差别。由于荷载分布模式的变化从而导致出现相同等级的荷载的发生概率有所改变。

对于各等级公路《公路工程技术标准》都给出了相应的交通量适用范围，通过对实际各类车辆交通量的调查。并换算成典型代表交通量 Q_m 与《公路工程技术标准》规定的最大适用交通量比较，然后按上表确定活载影响修正系数 ζ_{q1} 。

在对车辆荷载统计分析的过程中，数据的采集和整理是个很关键的步骤。我们必须对能够反映车辆荷载特征的参数进行采集。他们包括：车辆的车重，轴重，轴距以及通过测点的时刻，并统计出不同重量等级，不同轴数的交通量。并且还应该采用人工测量方法测得车辆自然堵塞状况下的有关参数，专门进行整理，具体做法如下：

车重：以车辆为统计单元，记 W_i 为一天中通过同一测点的第 i 辆车重，记 W 为这一天所有通过该测点的车重 W_i 的集合，即：

$$W=\{W_i:i\in(\text{同一测点同一天通过的车辆})\}$$

轴重：以轴重为统计单元，记 Z_i 为一天中通过同一测点的第 i 辆轴重，记 Z 为这一天所有通过该测点的轴重 Z_i 的集合，即：

$$Z=\{Z_i:i\in(\text{同一测点同一天通过的车辆})\}$$

5.7.2 根据实际调查的典型代表交通量 Q_m 与设计交通量 Q_d 之比，按表 5.7.2 选用对应于交通量的活载影响修正系数 ζ_{q1} 值：

对应于交通量的活载影响修正系数 ζ_{q1} 表 5.7.2

Q_m / Q_d	活载影响修正系数 ζ_{q1}
$1 < \frac{Q_m}{Q_d} \leq 1.3$	1.0~1.05
$1.3 < \frac{Q_m}{Q_d} \leq 1.7$	1.05~1.10
$1.7 < \frac{Q_m}{Q_d} \leq 2.0$	1.10~1.20
$2.0 < \frac{Q_m}{Q_d}$	1.20~1.35

5.7.3 依据实际调查的重量超过汽车检算荷载主车的大吨位车辆的交通量与实际交通量之比，即大吨位车辆混入率 α 。按下表 5.7.3 取用对应于大吨位车辆混入率的活载影响修正系数 ζ_{q2} 值：

对应于大吨位车辆混入率的活载影响修正系数 ζ_{q2} 表 5.7.3

α	活载影响修正系数 ζ_{q2}
$\alpha < 0.3$	1.00~1.05
$0.3 \leq \alpha < 0.5$	1.05~1.10
$0.5 \leq \alpha < 0.8$	1.10~1.20
$0.8 \leq \alpha < 1.0$	1.20~1.35
备 注	活载影响修正系数可按大吨位车辆混入率 α 值线性内插

5.7.4 根据实际调查的轴荷分布，确定后轴重超过汽车检算荷载之最大轴荷所占的百分数 β ，按下表 5.7.4 取用对应于轴荷分布的活载影响修正系数 ζ_{q3} 值：

对应于轴荷分布的活载影响修正系数 ζ_{q3} 表 5.7.4

β	活载影响修正系数 ζ_{q3}
$\beta < 5\%$	1.00
$5\% \leq \beta < 15\%$	1.15
$15\% \leq \beta < 30\%$	1.30
$\beta \geq 30\%$	1.40

5.8 桥梁荷载试验的必要条件

当通过桥梁调查检测与检算分析尚不足以鉴定桥梁承载能力时，可采用荷载试验测定桥梁在荷载作用下的实际工作状况，结合桥梁调查、检测与检算来评定桥梁的承载能力。荷载试验方法详见第五章。

【条文说明】

对于是否有必要进行荷载试验，应根据检算的主要指标超限情况加以确定。一般在下列情况下，可考虑进行荷载试验：

一、桥梁的施工质量合格，使用状况良好，主要检算指标虽不符合要求，但超限幅度较小：钢结构在 15% 以内；配筋混凝土梁式结构，在 25% 以内；砖石及混凝土与配筋混凝土拱式结构，在 30% 以内。

二、桥梁的施工质量很差，可能存在安全隐患，仅用调查、检测与检算分析难以确定其实际承载能力。

三、桥梁在运营过程中损坏严重，可能影响桥梁承载能力。

四、缺乏设计、施工资料或桥梁的结构受力不明确，不便准确进行桥梁承载能力检算。

五、为科研或积累资料的需要。

5.9 桥梁承载能力鉴定报告编制

5.9.1 经过鉴定的桥梁应撰写桥梁承载能力鉴定报告，报告内容应简明扼要。报告主要项目如下：

- (1) 桥梁概况
- (2) 鉴定目的
- (3) 桥梁调查与检测情况
- (4) 桥梁结构检算情况
- (5) 荷载试验及资料整理分析（未作荷载试验的桥梁略去此项）
- (6) 桥梁承载能力分析评定
- (7) 桥梁承载能力的鉴定结论及处置建议

5.9.2 桥梁承载能力鉴定报告应附有必要的原始资料、图表、照片，列出参加试验的单位和人员，注明试验日期，并有鉴定负责人签字。

5.10 桥梁承载能力鉴定表

5.10.1 鉴定报告应填写桥梁承载能力鉴定表，存入桥梁技术档案，便于今后有关单位查考使用。

5.10.2 桥梁承载能力鉴定表格式如表 5.10.2。

【条文说明】

其中桥梁概况栏着重填写与桥梁承载能力有关的情况。附加条件栏为按鉴定的承载能力投入运营时，桥梁应采取的加固、养护、检查等保证措施，以及对通行车辆的车速、车间距、运行线路等的限制条件。

桥梁承载能力鉴定表

表 5.10.2

路线名称			桥位里程		
桥 名		桥 长		净 宽	
跨径及孔数					
结构形式	上部结构			跨径及孔数	
	下部结构				
桥梁概况：					
鉴定原因：					
原设计承载能力					
鉴定的承载能力	标准荷载				
	特殊荷载				
鉴 定 方 法			鉴定有效期限		
附加条件：					
鉴定单位			鉴定负责人		
鉴定日期					

6 荷载试验及其分析

6.1 荷载试验

6.1.1 荷载试验目的是为了了解结构在荷载作用下的实际工作状态，综合分析判断桥梁结构的承载能力和使用条件。

6.1.2 荷载试验分为静力荷载试验与动力荷载试验种。一般情况下，桥梁荷载试验应按三个阶段进行，即计划与准备阶段、加载与测试阶段、分析与总结阶段。

【条文说明】

桥梁的荷载试验是一种比较直观鉴定桥梁承载力的方法，而且比较为广大工程技术人员所接受。就静载试验而言，主要是通过向桥梁结构上施加与设计荷载或使用荷载基本相当的外载，采用分级加载的方法，利用检测仪器测试桥梁结构的控制部位与控制截面在各级试验荷载作用下的挠度、应力、裂缝、横向分布系数等特性的变化，将测试结果与结构按相应荷载作用下的计算值与有关规范规定值作比较，从而评定桥梁结构的承载能力。通过校验系数来说明结构潜在的承载力，相对残余变形反映了结构的工作状态。但是静载试验费时，费钱，费力，而且还必须中断交通，因此多在特别需要时才使用。

动力荷载试验主要是通过对结构进行脉动测试、汽车的行车、跳车、刹车激振或其他方式的激振试验，测试桥梁结构上各控制部位的动挠度、动应变、模态参数（自振频率、振型、振型阻尼比、应变模态），然后通过模态参数识别结构的损伤。如结构的构件机械磨损，结构的刚度损失以及构件的裂缝等。动载试验反映了桥梁的整体工作性能，它是由桥梁结构的振型、自振频率、校验系数、阻尼比等表现出来的。

6.2 试验计划的制定

6.2.1 计划与准备阶段，应收集研究试验桥梁的有关技术文件，考察试验桥梁的现状和试验环境条件，制定荷载试验计划，确定试验组织及人员组成，确定测试系统的构成、仪器的组配及标定等。

【条文说明】

计划与准备阶段对桥梁的荷载试验是很重要的一部分工作，它将直接影响到试验的成败与否。根据桥梁现状与结构形式特点确定合理的测试项目，以及仪器仪表的安装等都会影响到试验的结果，并确保仪器在试验过程中正常工作。

6.2.2 在制定荷载试验计划时,应考虑荷载试验能够弥补桥梁调查和检算的不足,使桥梁承载能力鉴定工作进一步深化。荷载试验计划的主要内容包括:

- (1) 试验目的与任务
- (2) 试验准备工作
- (3) 加载方案与实施
- (4) 观测方案与实施
- (5) 加载试验的控制与安全措施
- (6) 加载试验资料的整理
- (7) 试验成果分析与评定

【条文说明】

桥梁荷载试验是一项复杂而又细致的工作,应在桥梁调查和检算的基础上,确定试验项目、加载方案、测点布设、观测方案、安全措施等内容,仔细考虑试验的全过程,预计可能出现的问题及其处理方法,制定切实可行的试验计划。

6.3 试验准备工作

6.3.1 试验孔的选择应结合桥梁调查与检算工作一并进行。对多孔结构中跨径相同的桥孔(或墩)可选择 1~3 个具有代表性的桥孔进行荷载试验。选择时应综合考虑以下条件:

- (1) 该孔(或墩)计算受力最不利;
- (2) 该孔(或墩)施工质量较差,缺陷较多或病害较严重;
- (3) 该孔(或墩)便于搭设脚手架及设置测点或试验加载实施;

6.3.2 试验前应对观测脚手架搭设及测点附属设施设置、静载试验加载位置的放样与卸载位置的安排和试验人员的组织与分工做详细的计划安排。

【条文说明】

脚手架的搭设要因地制宜、牢固可靠,方便布置安装观测仪表,同时要保证不影响仪表和测点的正常工作,且不干扰测点附属设施。在不便搭设固定脚手架的情况下,可考虑采用轻便灵活的吊架、挂篮或专用的桥梁检查设备(检查车、检查架等)。

在安装挠度、沉降、水平位移等测点的观测仪表时,一般需要设置木桩、支架等测点附属设施。测点附属设施除要满足仪表的安装要求外,还应保证其自身不受被测试结构变形、位移的影响,并能承受试验时可能产生的其它外界干扰,如试验人员行走等。

阳光直射的应变测点,应设置遮挡阳光的设施,以减少温度变化造成的观测误差。

观测脚手架与测点附属设施应分开搭设、互不影响。观测脚手架及测点附属设施应有足够的强度、刚度和稳定性,以保证测试人员的安全和测试结果精确可靠。

静载试验前应在桥面上对加载位置进行放样，以便于加载试验的顺利进行。如加载程序较少，时间允许，可在每程序加载前临时放样。如加载程序较多，则应预先放样，且用不同颜色的标志区别不同加载程序时的荷载位置。

静载试验荷载卸载的安放位置应预先安排。卸载位置的选择既要考虑加卸载方便，离加载位置近一些，又要使安放的荷载不影响试验孔（或墩）的受力，一般可将荷载安放在桥台后一定距离处。对于多孔桥，如有必要将荷载停放在桥孔上，一般应停放在距试验孔较远处以不影响试验观测为度。

桥梁的荷载试验是一项技术性较强的工作，应由有资质的公路桥梁检测机构或专门的桥梁试验队伍来承担。桥梁试验队伍一般由桥梁结构工程师、专业技术测试人员、仪器仪表工程师、熟练技术的不同专业、不同层次的人员组成。试验时应根据每个试验人员的特长进行分工，每人分管的仪表数目除考虑便于进行观测外，应尽量使每人对分管仪表进行一次观测所需的时间大致相同。所有参加试验的人员应能熟练掌握所分管的仪器设备，否则应在正式开始试验前进行演练。为使试验有条不紊地进行，应设试验总指挥 1 人，其他人员的配备可根据具体情况考虑。

6.3.3 根据加载进行的项目和桥址处的交通状况应作好加载试验的安全措施、加载方式的选择、供电照明设施、通讯联络设施、桥面交通管制等方面的准备工作。

【条文说明】

荷载试验大多选择在夜间进行，而且对一些跨径较大的桥梁通讯照明，应根据试验的需要提前进行准备。若采用汽车车辆作为试验荷载，应提前预约租用汽车并确定载重物及装载方法，按试验要求对车辆型号、轴距、轴重力等参数进行测试并记录。对于旧桥而言，需要中断交通，因此更应加强试验前的准备工作。

6.4 静载试验加载方案与实施

6.4.1 加载试验项目的确定

6.4.1.1 试验控制截面应根据具体的测试项目而定，在满足鉴定桥梁承载能力的前提下，加载试验项目应抓住重点，不宜过多。主要桥型的内力或位移控制截面可参见表 6.4.1 进行确定。

【条文说明】

在满足鉴定桥梁承载能力的前提下，加载试验项目应抓住重点，不宜过多。一般应有 2～3 个主要内力或位移控制截面。此外，可根据桥梁具体情况可设置几个附加内力控制截面。

主要桥型的内力或位移控制截面

表 6.4.1

序号	桥型	内力或位移控制截面	
1	简支梁桥	主要	1、跨中截面最大正弯矩和挠度； 2、支点截面最大剪力。
		附加	1、L/4 截面最大正弯矩和挠度； 2、墩台最大垂直力。
2	连续梁桥、连续刚构	主要	1、跨中最大正弯矩和挠度； 2、内支点截面最大负弯矩； 3、L/4 截面最大弯矩和挠度。
		附加	1、端支点截面的最大剪力； 2、L/4 截面最大弯剪力； 3、墩台最大垂直力； 4、连续刚构固结墩墩身控制截面的最大弯矩。
3	悬臂梁桥、T 型刚构	主要	1、锚固跨跨中最大正弯矩和挠度； 2、支点最大负弯矩； 3、挂梁跨中最大正弯矩和挠度。
		附加	1、支点最大剪力； 2、挂梁支点截面或悬臂端截面最大剪力。
4	拱桥	主要	1、拱顶截面最大正弯矩和挠度、拱脚截面最大负弯矩； 2、刚架拱上弦杆跨中最大正弯矩。
		附加	1、拱脚最大水平推力； 2、L/4 截面最大正、负弯矩及其最大正、负挠度绝对值之和； 3、刚架拱斜腿根部截面最大负弯矩。
5	刚架桥(包括框架、斜腿刚构和刚架—拱式组合体系)	主要	1、跨中截面最大正弯矩和挠度； 2、结点截面的最大负弯矩。
		附加	1、柱脚截面最大负弯矩、最大水平推力。
6	钢桁桥	主要	1、跨中、支点截面的主桁杆件最大内力； 2、跨中截面的挠度。
		附加	1、L/4 截面的主桁杆件最大内力和挠度； 2、桥面系结构构件控制截面的最大内力和变位； 3、墩台最大垂直力。
7	斜拉桥与悬索桥	主要	1、主梁最大挠度； 2、主梁控制截面最大内力； 3、索塔塔顶水平变位； 4、主缆最大拉力，斜拉索最大拉力。
		附加	1、主梁最大纵向漂移； 2、主塔控制截面最大内力； 3、吊索最大索力。

6.4.1.2 对桥梁的薄弱截面、损坏部位，可根据桥梁调查与检算情况，确定是否设置内力控制截面及安排加载试验项目。

【条文说明】

桥梁结构或构件的薄弱截面、损伤严重的部位往往是结构或构件失效的关键断面，因此

根据桥梁检查、检算情况，对那些有怀疑但又不能明确对其承载能力作出判断的截面，在进行荷载试验时安排加载项目以进一步确定其承载能力，比如那些具有明显受力裂缝、混凝土剥落严重等截面。

6.4.2 试验控制荷载的确定

6.4.2.1 荷载试验应以设计荷载等级相应的活载效应控制值或有特殊要求的荷载效应值作为试验控制荷载。

【条文说明】

根据桥梁需要鉴定承载能力的荷载：汽车+人群（标准荷载）、平板挂车或履带车（标准荷载）、需通行的重型车辆，分别计算其对控制截面产生的最不利荷载效应（内力和位移），用产生最不利荷载效应较大的荷载作为试验控制荷载。

6.4.2.2 确定静力荷载试验各测试项目的荷载大小和加载位置时，采用静力荷载试验效率 η_q 进行控制。为保证试验效果荷载效率 η_q 应介于 0.85~1.05 之间。静力试验荷载的效率按下式计算：

$$\eta_q = \frac{S_s}{S \cdot (1 + \mu)} \quad (6.4.2)$$

式中： S_s — 静力试验荷载作用下，某一加载试验项目对应的加载控制截面内力或变位的最大计算效应值；

S — 控制荷载产生的同一加载控制截面内力或变位的最不利效应计算值；

μ — 按规范取用的冲击系数值；

η_q — 静力试验荷载的效率，应介于 0.85~1.05 之间。

【条文说明】

荷载试验应尽量采用与控制荷载相同的荷载。但由于客观条件的限制，实际采用的试验荷载与控制荷载会有所不同。为保证试验效果，在确定试验荷载大小和加载位置时，采用静力荷载试验效率 η_q 进行控制。

当温度变化对桥梁结构内力影响较大时，应选择温度内力较不利的季节进行荷载试验。否则，应考虑采用适当增大静力试验荷载效率 η_q 的方法，来弥补温度对结构控制截面产生的不利内力。

当试验控制荷载为挂车或履带车而采用汽车荷载加载时，考虑到汽车荷载的横向应力增大系数较小，为了使截面的最大应力与控制荷载作用下截面最大应力相等，可适当提高静力荷载试验效率 η_q 。

6.4.3 试验荷载的加载分级与控制

6.4.3.1 为了获取结构试验荷载与变位的相关曲线以及防止结构意外损伤，对主要

控制截面试验荷载的施加应分级进行,对于附加控制截面一般只设置最大内力加载程序加载。

6.4.3.2 加载级数应根据荷载量和加载最小荷载增量而定。试验荷载应按控制截面最大内力或位移分成 4~5 级施加。受条件所限时,至少也应分成 3 级施加。

6.4.3.3 荷载试验应选择温度较为稳定的时间段进行,加载试验时间一般以晚 10 时至晨 6 时为宜。

【条文说明】

(1) 试验荷载应按控制截面最大内力或位移分成 4~5 级施加。受条件所限时,至少也应分成 3 级施加。

(2) 当桥梁的调查和检算工作不充分或桥梁技术状况较差时,应尽量增多加载分级。如限于条件加载分级较少时,应注意每级加载时,车辆荷载逐辆缓缓驶入预定加载位置,必要时可在加载车辆未到达预定加荷位置前,分次对控制测点进行读数以确保试验安全。

(3) 在安排加载分级时,应注意加载过程中其他截面内力亦应逐渐增加,且最大内力不应超过控制荷载作用下的最不利内力。

(4) 根据具体条件决定分级加载的方法,最好每级加载后卸载,也可逐级加载达最大荷载后逐级卸载。在安排加载分级时,应注意加载过程中其它截面受力情况,使其最大内力不超过控制荷载作用下的最不利内力。

(5) 车辆荷载加载分级可采用逐渐增加加载车数量、先上轻车后上重车、加载车位于内力影响线的不同部位、加载车分次装载重物等方法,或这些方法综合运用。

(6) 加卸载的时间选择与控制。为了减少温度变化对试验造成的影响,加载试验时间以晚 10 时至晨 6 时为宜。尤其是采用重物直接加载,加卸载周期比较长,只能在夜间进行试验。对于采用车辆等加卸载迅速的试验方式,如夜间试验照明等有困难时,亦可安排在白天进行试验。但在晴天或多云的天气下进行加载试验时,每一加卸载周期所花费的时间不宜超过 20 分钟。

6.4.3.4 加载时间间隔必须满足结构变位稳定对时间的要求,在上一荷载阶段内结构变位相对稳定后,方可进入下一荷载阶段。

6.4.3.5 同一级荷载内,结构最大变位测点在最后 5 分钟内的变位增量小于第一个 5 分钟变位增量的 15%,或小于量测仪器的最小分辨值时,则认为结构变位达到相对稳定。但当进行主要控制截面最大内力加载程序时,加卸载稳定时间应不少于 15 分钟。

【条文说明】

加卸载稳定时间取决于结构变位达到稳定所需的时间

当拱上建筑或桥面系参与主要承重构件的受力时,若因连接较弱或变形缓慢而造成测点观测值稳定时间较长,如结构的实测变位(或应变)值远小于计算值,则可将加载稳定时间定为 20~30 分钟。

加载分级的计算。根据各加载分级按弹性阶段计算加载各测点的理论计算变位(或应变),以便对加载试验过程进行分析和控制。计算采用的材料弹性模量,如已作材料试验则

用实测值，否则可按规范选用。

6.4.4 加载设备的选择

6.4.4.1 静载试验加载设备可根据加载要求及具体条件选用。一般有以下两种加载方式：装载重物的可行式车辆和重物直接加载。

【条文说明】

选用装载重物的可行式车辆（汽车或平板车）加载时，装载的重物应置放稳妥，以避免车辆行驶时因摇晃而改变重物的位置。

选用重物直接加载时，一般可按控制荷载的着地轮迹先搭设承载架，再在承载架上堆放重物或设置水箱进行加载，如加载仅为满足控制截面内力要求，也可采取直接在桥面堆放重物或设置水箱的方法加载。承载架的设置和加载物的堆放应安全、合理，能按要求分布加

重物直接加载准备工作量大，加卸载所需周期一般较长，交通中断时间亦较长，且试验时温度变化对测点的影响较大，因此宜于安排夜间进行试验。

6.4.4.2 试验前应采取可靠的方法对加载物或加载车重量进行称量，采用重物加载时，根据加载分级情况，分别称量记录各级荷载量；采用汽车加载时，应详细记录各车编号、车重、轴重和轴距。

【条文说明】

可根据不同的加载方法和具体条件选用称重法、体积法及综合法等称量加载物的重力。

采用称重法时，若采用重物直接在桥上加载，可将重物化整为零称量后按逐级加载要求分堆置放，以便加载取用。当采用车辆加载，可将车辆逐轴开上称重台进行称量，也可采用便携式轮重秤逐轮进行称量。

采用水箱或采用在桥面直接堆放重物加载时，可通过测量水体积或堆放重物的体积与容重来换算加载物的重力。

采用综合计算法时，应根据车辆出厂规格确定空车轴重，再根据装载重物的重力及其重心将其分配至各轴。装载物最好采用规则外形的物体整齐码放，或采用松散均匀材料在车箱内摊铺平整，以便准确确定其重心位置。

无论采用何种方法确定加载物重力，均应做到准确可靠，其称量误差最大不得超过 5%。最好能采用两种称量方法互相校核。

6.5 静载试验观测方案与实施

6.5.1 静载试验的基本观测内容如下：

- (1) 结构的最大挠度和扭转变位，包括桥梁上、下游两侧的挠度差及水平位移等；
- (2) 结构控制截面最大应力（或应变），包括混凝土表面应力和最外缘钢筋应力等；
- (3) 支点沉降、墩台位移与转角，活动支座的变位等；

- (4) 桁架结构支点附近杆件及其它细长杆件的稳定性;
- (5) 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、方向和性状,以及卸载后的闭合状况;
- (6) 温度变化对结构控制截面测点应力和变位的影响。

【条文说明】

桥梁静载试验的观测项目主要包括三个方面:1、应力观测;2、变位观测;3、荷载试验现象观测。应力应变观测主要是针对试验所进行的各测试截面所对应的测试项目,试验现象观测主要是对试验过程中结构或构件表面的开裂状况进行检查、有无异常的振动和响声等。除此之外还应对试验所处的环境进行观测,如环境温度等。

6.5.2 根据桥梁调查和检算的情况,综合考虑结构特点和桥梁技术现状等,可适当增加相应的观测内容。

【条文说明】

- (1) 桥跨结构挠度沿桥长或沿控制截面桥宽的分布;
- (2) 结构构件控制截面应变分布图,要求沿截面高度分布不少于5个应变测试点,包括最边缘和截面突变处的测点;
- (3) 控制截面的挠度、应力(或应变)的纵向和横向影响线;
- (4) 行车道板跨中和支点截面挠度或应变影响面;
- (5) 组合构件的结合面上、下缘应变;
- (6) 支点附近结构斜截面的主拉应力;
- (7) 控制断面的横向应力增大系数、横向分布系数。

6.5.3 试验测点的布设必须能够反应结构或构件最不利受力特征,同时应能满足分析和推断结构工作状态最低的需要,确保实测数据的可靠性。

【条文说明】

静载试验的测点布设应满足分析和推断结构工作状态最低的需要,测点的布设不宜过多,但要保证观测质量。主要测点的布设应能控制结构最大应力(应变)和最大挠度(位移),并有选择的在桥梁横向布置相应的测点,以反应桥梁的横向受力特征。对重要的测点宜采用两种不同测试方法校对测量。

6.5.4 挠度观测测点布置:对于整体式梁桥,一般对称于桥轴线布置;对于多梁式桥,可在每梁底布置一个或两个测点。

6.5.5 截面抗弯应变测点应设置在截面横桥向应力分布较大的部位,沿截面上、下缘布设,横桥向测点设置一般不少于3处,以控制最大应力的分布。对于剪切应变测点应采取设置应变花的方法进行观测,最大剪应力截面设置参见附录十四。

【条文说明】

截面应力测点应考虑横向分布的影响,横桥向应力测点的布置应能反映横向应力的分

布特征。为了方便,对于梁桥的剪应力也可在截面中性轴处主应力方向设置单一应变测点来进行观测。梁桥的实际最大剪应力截面应设置在支座附近而不是支座上,具体设置位置参见附录十四。

6.5.6 当采用测定混凝土表面应变的方法来确定钢筋混凝土结构中钢筋承受的拉力时,考虑到混凝土表面已经和可能产生的裂缝对观测的影响,因而测点的位置应合理进行选择见附录十三,如凿开混凝土保护层直接在钢筋上设置拉应力测点,则在试验完后必须修复保护层。

6.5.7 当结构横向联系构件质量较差,联接较弱时则必须测定控制截面的横向应力增大系数或横向分布系数。

【条文说明】

简支梁跨中截面横向应力增大系数的测定,既可采用观测跨中沿桥宽方向应变变化的方法,也可采用观测跨中沿桥宽方向挠度变化的方法来进行计算或用两种方法互校。

6.5.8 试验测试截面位置应布置相应的温度测点

【条文说明】

选择与大多数测点较接近的部位布置 1~2 处气温观测点。此外,根据需要可在结构主要控制截面布置结构温度测点,以观测结构温度变化对测点应力和变位的影响。布设于结构上的温度测点应能反映结构温度的内外表面差异、向阳与背阴面差异、迎风面与背风面差异以及上面与下面的差异。

6.5.9 试验所用仪器仪表数据采集设备应经过计量单位检定,同时应满足试验对精度、量程等方面的要求。

【条文说明】

按以下几方面要求选用测试仪器、仪表:

- (1) 所用仪器、仪表数据采集设备应是经过计量检定的;
- (2) 选择仪器仪表应从试验的实际需要出发,选用的仪器仪表应满足测试精度的要求,一般要求不大于预计测量值的 5%;
- (3) 在选用仪器仪表时,既要注意环境条件,又要避免盲目地追求精度,应根据实际情况,慎重选择和比较,采用符合要求又简易的量测装置;
- (4) 量测仪器仪表的型号、规格,在同一试验中种类愈少愈好,尽可能选用同一类型或规格的仪器仪表。
- (5) 仪器仪表应当有足够的量程,以满足测试的需要。

6.5.10 静载试验常用的仪器仪表的使用精度和测量范围见表 6.5.10。

静载试验常用仪表及适用范围

表 6.5.10

量测内容	仪表名称	最小分划值	适用量测范围	备 注
应变	千分表	2×10^{-6}	$50 \sim 2000 \times 10^{-6}$	需配附件
	杠杆引伸仪	2×10^{-6}	$50 \sim 200 \times 10^{-6}$	需配附件
	手持应变仪	5×10^{-6}	$100 \sim 20000 \times 10^{-6}$	需配表脚
	电阻应变仪	1×10^{-6}	$50 \sim 5000 \times 10^{-6}$	需贴电阻片
位移 或 挠度	千分表	0.001mm	0.1~0.8mm	需配表座及吊架
	百分表	0.01mm	0.3~8mm	需配表座及吊架
	百分表(长标距)	0.01mm	0.3~25mm	需配表座及吊架
	挠度计	0.1mm	>1mm	需配表座及钢丝
	精密水平仪	0.1mm	>2mm	需配特制水准尺
	电阻应变位移计	0.01mm	0.3~25mm	需配表座
	经纬仪	0.5mm	>2mm	需配短尺
倾角	水准式倾角仪	2.5″	20″~1°	需固定支架
裂缝	刻度放大镜	0.05mm	0.05~5mm	

6.5.11 仪表的检查与安装调试

6.5.11.1 试验需用的所有仪表均应在测试前进行检查,并按仪表本身的要求进行标定和必要的误差修正。安装完毕后, 应进行系统调试, 并在条件允许的情况下, 尽快进行荷载试验。

6.5.11.2 试验现场仪表、设备应有必要的保护措施, 以免仪器、设备受损和遗失。

6.5.11.3 试验仪器、仪表的安装人员应具有一定的经验, 要根据现场温度, 湿度等条件选择贴片及防潮工艺, 尽量选用与观测应变部位相同的材料制作温度补偿片。补偿片应尽量靠近应变片设置。

【条文说明】

(1) 采用千分表观测结构表面应变时, 在不影响观测的前提下, 应尽量使千分表轴线靠近结构表面, 以减小测试误差。

(2) 仪表、设备容易受到碰撞扰动的部位应加保护设备、系保险绳或设置醒目的标志, 以保证仪表正常工作。

(3) 仪表安装工作一般应在加载试验前完成, 但亦不应安装过早, 以免仪器受损和遗失。注意仪表安装位置和方法的正确与否。安装完毕应由有测试经验的人员进行检查, 有时可利用过往车辆来观察仪表工作是否正常。

(4) 仪表安装完毕后, 一般在加载试验之前应对各测点进行一段时间的温度稳定观测。中间可每隔 10min 读数一次, 观测时间应尽量选择与加载试验相同的气候条件或选择加载试验前夕。这一观测成果用于衡量加载试验时外界气候条件对观测造成的误差影响范围。或

用于测点的温度影响修正。

6.5.12 试验观测与记录

6.5.12.1 采用人工读表时，仪表的测读应准确、迅速，并记录在专门的表格上，以便于资料的整理和计算。

6.5.12.2 采用计算机自动采集系统读数记录时，应利用系统实时监测功能对控制点的应变或位移进行监控，对测试结果异常现象应及时查明原因并采取补救措施。

【条文说明】

记录者应对所有测点量测值变化情况进行检查，看其变化是否符合规律，尤其应着重检查第一次加载时量测值变化情况。对工作反常的测点应检查仪表安装是否正确，并分析其他可能影响其正常工作的原因，及时排除故障。对于控制测点应在故障排除后，重复一次加载测试项目。

6.5.12.3 每次观测应记录相应的工况、观测项目、时间及温度。

【条文说明】

仪器安装完毕后，一般在加载试验之前应对各测点进行一段时间的温度稳定观测，中间可每隔 10 分钟读数一次。观测时间应尽可能选择与加载试验相同的外界气候条件或选择加载试验前夕。这一观测成果用于衡量加载试验时外界气候条件对观测造成误差的影响范围，或用于测点的温度影响修正。

6.5.13 裂缝观测

6.5.13.1 加载试验中裂缝观测的重点是结构承受拉力较大部位及原有裂缝较长、较宽的部位。在这些部位应量测裂缝长度、宽度，并在混凝土表面沿裂缝走向进行描绘。

6.5.13.2 加载过程中观测裂缝长度及宽度的变化情况，可直接在混凝土表面进行描绘记录，也可采用专门的表格记录（见附录十五）。

6.5.13.3 加载至最不利荷载及卸载后应对结构裂缝进行全面检查，应仔细检查是否产生新的裂缝、裂缝闭合情况，并将最后检查情况填入裂缝观测记录表。

6.6 静载试验测试数据实时处理分析

6.6.1 在加载试验过程中，应对结构变位（应变）较大的测点进行稳定观测，并将最后一个 5 分钟的增量与第一个 5 分钟的增量进行比较，以判定结构变位（应变）是否稳定。

6.6.2 试验前，应通过分级加载计算确定各荷载工况下主要控制截面测点的应变或变位理论计算值，加载过程中应及时将理论值与实测值进行比较。

6.6.3 对结构变位或应变较大的测点，应实时绘制测点变位或应变与荷载的关系曲线，以分析结构所处的工作状态。

6.6.4 对于技术状况较差的桥跨结构，应实时绘制桥跨结构挠度纵桥向或横桥向分布曲线，以分析桥跨结构的整体工作性能。

【条文说明】

对静载试验数据的实时处理能够使试验人员及时了解和判断结构的工作状态，从而更好的控制试验的进行。

6.7 静载试验的加载控制与安全措施

6.7.1 试验加载过程中，应有专门人员统一指挥加载的实施，及时掌握各方面情况，根据试验数据的实时处理分析以及有无试验现象等情况，安全有序实施加载计划。

6.7.2 当试验过程中发生下列情况应中途终止加载，及时找出原因，在确保结构及人员安全的情况下可继续试验。

- (1) 控制测点应力值已达到或超过理论计算的控制应力值时；
- (2) 控制测点变位（或挠度）超过规范允许值时；
- (3) 由于加载，使结构裂缝的长度，缝宽急剧增加，新裂缝大量出现，缝宽超过允许值的裂缝大量增多，对结构使用寿命造成较大的影响时；
- (4) 拱桥加载时沿跨长方向的实测挠度曲线分布规律与计算值相差过大或实测挠度超过计算值过多时；
- (5) 发生其它损坏，影响桥梁承载能力或正常使用时。

【条文说明】

试验指挥人员在加载试验过程中应随时掌握各方面情况，对加载进行控制。既要取得良好的试验效果，又要确保人员、仪表设备及桥梁的安全，避免不应有的损失。应严格按设计的加载程序进行加载，荷载的大小，截面内力的大小都应由小到大逐渐增加，并随时作好停止加载和卸载的准备。

对加载试验的控制点应随时观测，随时计算并将计算结果报告试验指挥人员，如实测值超过计算值较多，则应暂停加载，待查明原因再决定是否继续加载。试验人员如发现其它测点的测值有较大的反常变化也应查找原因，并及时向试验指挥人员报告。

加载过程中应指定人员随时观察结构各部位可能产生的新裂缝，注意观察构件薄弱部位是否有开裂、破损，组合构件的结合面是否有开裂错位，支座附近混凝土是否开裂，横隔板的接头是否拉裂，结构是否产生不正常的响声，加载时墩台是否发生摇晃现象等等。如发生这些情况应报告试验指挥人员，以便采取相应的措施。

6.8 静载试验资料的整理分析

6.8.1 试验资料的修正

6.8.1.1 测值修正。根据各类仪表的标定结果进行测试数据的修正，如机械式仪表的校正系数，电测仪表的率定系数，灵敏系数，电阻应变观测的导线电阻影响等等。当这类因素对测值的影响小于 1%时可不予修正。

6.8.1.2 温度影响修正。按下式进行温度修正计算：

$$S = S' - \Delta t \cdot K_t \quad (6.8.1-1)$$

式中：S — 温度修正后的测点加载测值变化；

S' — 温度修正前的测点加载测值变化；

Δt — 相应于S'观测时间段内的温度变化 ($^{\circ}\text{C}$)。对应变宜采用构件表面温度，对挠度宜采用气温；

K_t — 空载时温度上升 1°C 时测点测值变化量。如测值变化与温度变化关系较明显时，可采用多次观测的平均值。 $K_t = \frac{\Delta S}{\Delta t_1}$ ，式中：

ΔS 为空载时某一时间区段内测点测值变化量； Δt_1 为相应于 ΔS 同一时间区段内温度变化量。

【条文说明】

由于温度对测试的影响比较复杂，通常采取缩短加载时间，选择温度稳定性较好的时间进行试验等办法，尽量减小温度对测试精度的影响。需要时，一般可采用综合分析的方法来进行温度影响修正，即利用加载试验前进行的温度稳定观测数据，建立温度变化（测点处构件表面温度或空气温度）和测点测值（应变和挠度）变化的线性关系。

6.8.1.3 支点沉降影响的修正。当支点沉降量较大时，应修正其对挠度值的影响，修正量 C 可按下式计算：

$$C = \frac{l-x}{l} \cdot a + \frac{x}{l} \cdot b \quad (6.8.1-2)$$

式中：C — 测点的支点沉降影响修正量；

l — A 支点到 B 支点的距离；

x — 挠度测点到 A 支点的距离；

a — A 支点沉降量；

b — B 支点沉降量。

6.8.2 静力荷载试验的各测点实测变位（挠度，位移，沉降）与应变的计算按下式进行。

- (1) 总变位 (或总应变): $S_t = S_I - S_i$
 (2) 弹性变位 (或弹性应变): $S_e = S_I - S_u$
 (3) 残余变位 (或残余应变): $S_p = S_t - S_e = S_u - S_i$

其中: S_i — 加载前测值;

S_I — 加载达到稳定时测值;

S_u — 卸载后达到稳定时测值。

6.8.3 测点实测应力计算

6.8.3.1 在单向应力状态下, 测点应力可按下式进行计算:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (6.8.3-1)$$

式中: σ — 测点应力;

E — 构件材料的弹性模量;

ε — 测点实测应变值。

6.8.3.2 在主应力方向已知的平面应力状态下, 测点应力可按下述公式进行计算:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \quad (6.8.3-2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \quad (6.8.3-3)$$

式中: E — 构件材料的弹性模量;

ν — 构件材料的泊松比;

ε_1 、 ε_2 — 相互垂直方向的主应变;

σ_1 、 σ_2 — 相互垂直方向的主应力。

6.8.3.3 在主应力方向未知的平面应力状态下, 采用应变片测量其应变时, 测点应力可按下述公式进行计算:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu}A + \frac{E}{1+\nu}\sqrt{B^2 + C^2} \quad (6.8.3-4)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu}A - \frac{E}{1+\nu}\sqrt{B^2 + C^2} \quad (6.8.3-5)$$

$$\tau_{\max} = \frac{E}{1+\nu}\sqrt{B^2 + C^2} \quad (6.8.3-6)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{2}tg^{-1}\frac{C}{B} \quad (6.8.3-7)$$

式中: σ_1 、 σ_2 — 测点主应力;

τ_{\max} — 测点最大剪力;

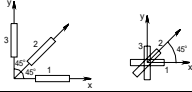
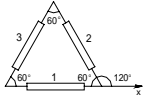
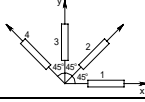
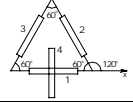
φ_0 — 主应力方向角;

E — 构件材料的弹性模量;

ν — 构件材料的泊松比；
 A 、 B 、 C — 应变花的计算参数。

应变花计算参数表

表 6.8.3

应变花名称	应变花形式	A	B	C
45°直角应变花		$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2}$	$\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}$	$\frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}$
60°等边三角形应变花		$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3}$	$\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3}$	$\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}}$
扇形应变花		$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{45} + \varepsilon_{90} + \varepsilon_{135}}{4}$	$\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}$	$\frac{\varepsilon_{135} - \varepsilon_{45}}{2}$
伞形应变花		$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2}$	$\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}$	$\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}}$

6.8.4 横向增大系数 η ，可用实测的变位（或应变）最大值 $S_{e\max}$ 与横向各测点实测变位（或应变）平均值 $\overline{S_e}$ ，按下式进行计算：

$$\eta = \frac{S_{e\max}}{\overline{S_e}} \quad (6.8.4)$$

6.8.5 荷载横向分布系数，可根据量测截面实测的各主梁或拱肋的测点挠度，按下式进行计算：

$$m_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (6.8.5)$$

式中： m_i — 试验荷载作用下，某一量测截面第 i 片主梁或拱肋的荷载横向分布系数；

f_i — 试验荷载作用下，某一量测截面第 i 片主梁或拱肋的测点挠度；

n — 主梁或拱肋的根数。

6.8.6 主要测点的校验系数及相对残余变形的计算

6.8.6.1 对加载试验的主要测点（即控制测点或加载试验效率最大部位测点）可按下列式计算校验系数 ζ ：

$$\zeta = \frac{S_e}{S_s} \quad (6.8.6-1)$$

式中：S_e— 试验荷载作用下量测的弹性变位（或应变）值；
S_s— 试验荷载作用下的理论计算变位（或应变）值。

【条文说明】

S_e 与 S_s 的比较，可用实测的横截面平均值与计算值比较，也可考虑荷载横向不均匀分布而选用实测最大值与考虑横向增大系数的计算值进行比较。横向增大系数最好采用实测值，如无实测值也可采用理论计算值。

6.8.6.2 对加载试验的主要测点，应按下式计算其相对残余变位（或应变）：

$$S'_p = \frac{S_p}{S_t} \times 100\% \quad (6.8.6-2)$$

式中：S'_p——相对残余变位（或应变），S_p、S_t意义同前。

6.8.7 试验曲线的整理

6.8.7.1 列出各加载工况下主要测点实测变位（或应变）与相应的理论计算值的对照表，并绘制出其关系曲线。

6.8.7.2 绘制各加载工况下主要控制点的变位（或应变等）与荷载的关系曲线。

6.8.7.3 绘制各加载工况下控制截面应变（或挠度）分布图、沿纵桥向挠度分布图、截面应变沿高度分布图等。

【条文说明】

试验曲线能够非常直观的反应试验的结果，通过曲线来表示实测应变和理论计算值的比较情况、各控制点主要控制点的变位（应变）与荷载的历程曲线、挠度分布以及截面应变沿高度的分布情况。通过这些曲线可以一目了然的对试验结果进行评价，找出异常点、结构的工作状态是否处于弹性状态、判断应变分布是否符合平截面假定等，有针对性的分析产生这些情况的原因、在结果中是否具有普遍性，从而对结构作出客观准确的评价。

6.8.8 裂缝发展情况

6.8.8.1 当裂缝数量较少时可根据试验前后观测情况及裂缝观测表对裂缝状况进行描述。

6.8.8.2 当裂缝发展较多时应选择结构有代表性部位描绘裂缝展开图，图上应注明各加载程序裂缝长度和宽度的发展。

6.9 动力荷载试验及其分析

6.9.1 动力荷载试验是为了测定桥梁结构的自振特性或在动力荷载作用下的受迫振动特性。其试验项目主要包括脉动试验、行车试验、跳车激振试验。

【条文说明】

检验桥梁结构在动力荷载作用下的受迫振动特性，如桥梁结构动位移、动应力、冲击系数的行车试验。桥梁结构的自振特性，如结构或构件的自振频率、振型和阻尼比等主要是应用脉动试验或跳车激振试验加以测定。

6.9.2 脉动试验是指在桥面无任何交通荷载以及桥址附近无规则振源的情况下，测定桥跨结构由于桥址处风荷载、地脉动、水流等随机荷载激振而引起的桥跨结构微小振动响应。

6.9.3 行车试验的试验荷载，一般采用接近于检算荷载（标准荷载）重车的单辆载重汽车来充当。试验时，让单辆载重汽车分偏载和中载两种情形，以不同车速匀速通过桥跨结构，测定桥跨结构主要控制截面测点的动应力和动挠度时间历程响应曲线。

6.9.4 跳车激振的试验荷载，一般采用近于检算荷载（标准荷载）重车的单辆载重汽车来充当，试验时，让单辆载重汽车的后轮在指定位置从高度为 15cm 的三角形垫木突然下落对桥梁产生冲击作用，激起桥梁的振动。

【条文说明】

跳车激振的试验荷载是通过车辆下落所产生的脉冲能量引起的结构振动，在其他指定位置拾取结构的振动响应，对结构的模态特征参数进行识别。因为频响函数矩阵中的任一列包含了全部的模态参数，因此通过在固定点激振，在各点拾振（可同时多点拾振，也可分组拾振，或单点拾振）的方法获取结构的模态参数。

6.9.5 动力荷载试验的测试系统，一般可采用电磁式测试系统、压电式测试系统、电阻应变式测试系统或光电式测试系统。在选择测试系统时，应注意选择测振仪器的技术指标，使传感器、放大器、记录装置组成的测试系统的灵敏度、动态范围、幅频特性和幅值范围等技术指标满足被测结构动力特性范围的要求。测试仪表精度应不大于预计测量值的 10%。

6.9.6 试验前，应对测试系统进行灵敏度、幅频特性、相频特性线性度等进行标定。当采用分部标定法进行测试系统标定时，如分别标定传感器、放大器和记录仪的灵敏度为： K_S 、 K_F 、 K_R ，则测试系统总的灵敏度 K 可按式计算：

$$K = K_S K_F K_R \quad (6.9.6)$$

6.9.7 动载试验常用的仪器仪表的使用精度和测量范围见表 6.9.7。

动载试验常用仪器及技术参数

表 6.9.7

测量内容	测量系统		数据采集分析系统		备注
	仪器名称	适用范围	仪器名称	技术参数	
应变	电阻应变计及动态应变仪	1、测量范围：±10000μ ϵ ； 2、频率响应：0~10kHz； 3、可用于行车试验、跳车试验。	1、由计算机与相应软件构成的采集系统； 2、磁带记录仪。	1、输入电压范围 0~±5（10）V； 2、频率响应：0 ~ 5 kHz； 3、采样频率不低于 1 kHz； 4、可监视信号质量。	可预埋或后装
	光纤应变计及调制解调器	1、测量范围：±10000μ ϵ ； 2、频率响应：0~10kHz； 3、可用于行车试验、跳车试验。			
位移	电阻应变式位移计及动态应变仪	1、测量范围：±10000μ ϵ ； 2、频率响应：0~10kHz； 3、可用于行车试验、跳车试验。			接触式测量，需要表架
	光电位移测量装置	1、测量距离：500m； 2、测量范围：±2.5 m（当最大测距时）； 3、频率响应：20Hz； 4、可用于行车试验、跳车试验。			非接触式测量
动力特性参数	磁电式拾振器及放大器	1、测量范围：位移±20mm；加速度±0.5g； 2、频率响应：0.3~20Hz； 3、可用于行车试验、跳车、脉动试验。			
	应变式加速度计及动态应变仪	1、测量范围：±0.5g； 2、频率响应：0~100Hz； 3、可用于行车试验、跳车试验。			
	压电式加速度计及电荷放大器	1、测量范围：±100g； 2、频率响应：0.5~1kHz； 3、可用于行车试验、跳车试验，高灵敏度的也可用于脉动试验。			
	伺服式加速度计及放大器	1、测量范围：±0.5g； 2、频率响应：0~100Hz； 3、可用于行车试验、跳车、脉动试验。			

6.9.8 测点布置应按照动载试验的要求和目的，结合桥梁结构形式综合确定。在变位和应变较大的部位应布置测点，用于测记结构振动响应测点应尽可能避开振型的节点。

6.9.9 测定桥梁结构振型，可采用下述两种方法中的一种：

(1) 在所要测定桥梁结构振型的峰、谷点上布设测振传感器（拾振器），用放大特性相同的多路放大器和记录特性相同的多路记录仪，同时测记各测点的振动响应信号。

(2) 将结构分成若干段，选择某一分界点作为参考点，在参考点和各分界点分别布设测振传感器（拾振器），用放大特性相同的多路放大器和记录特性相同的多路记录仪，同时测记各测点的振动响应信号。

6.9.10 动载试验资料的整理分析

6.9.10.1 行车试验的动力试验荷载效率可按下式计算：

$$\eta_{dyn} = \frac{S_{dyn}}{S} \quad (6.9.10-1)$$

式中： S_{dyn} — 动力试验荷载作用下控制截面最大内力或变位计算值；

S — 标准汽车荷载作用下控制截面最大内力或变位计算值
(不计汽车荷载冲击系数)。

6.9.10.2 实测的活载动力增大系数 $(1 + \mu)$ ，可根据测记的测点动挠度或动应变时间历程曲线进行整理分析，按下式计算：

$$1 + \mu = \frac{S_{max}}{S_{mean}} \quad (6.9.10-2)$$

式中： S_{max} — 在动力荷载作用下该测点最大挠度（或应变）值；

S_{mean} — 相应的静载作用下该测点最大挠度（或应变）。

$$S_{mean} = \frac{1}{2}(S_{max} + S_{min}) \quad (6.9.10-3)$$

式中： S_{min} 为与 S_{max} 相应的最小挠度值（或应变值）。

6.9.10.3 实测的活载冲击系数 μ 可按下式计算：

$$\mu = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{mean}} \quad (6.9.10-4)$$

式中： S_{min} 、 S_{max} 的意义同式 6.9.10-2、6.9.10-3。

6.9.10.4 根据不同车速的活载冲击系数或动力增大系数，绘制活载冲击系数或动力增大系数与车速的关系曲线，并求出活载冲击系数的最大值。

6.9.10.5 结构自振频率，可根据桥梁跳车激振试验测记的测点余振响应信号分析而得，也可根据脉动试验测记的测点随机振动响应信号分析而得，还可根据行车试验测记的测点动挠度或动应变余振曲线分析而得。

【条文说明】

在进行桥梁模态分析，应考虑桥面附加质量的影响。如跳车激振试验，当激振荷载对结

构振动具有附加质量影响时，可按下式对结构自振频率进行修正：

$$f_0 = f \sqrt{\frac{M_0 + M}{M_0}} \quad (6.9.10-5)$$

式中： f_0 — 结构的自振频率；

f — 有附加质量影响的实测自振频率；

M_0 — 结构在激振处的换算质量；

M — 附加质量。

6.9.10.7 桥梁结构的阻尼比，可根据跳车激振试验或行车试验测记的测点余振相应信号（振动衰减曲线），按下式进行计算：

$$D_r = \frac{1}{2m\pi} \ln \frac{A_i}{A_{i+m}} \quad (6.9.10-6)$$

式中： D_r — 测点阻尼比；

m — 在振动衰减曲线上量取的波形数；

A_i — 在振动衰减曲线上量取的第 i 个波形的幅值；

A_{i+m} — 在振动衰减曲线上量取的第 $i+m$ 个波形的幅值。

【条文说明】

有阻尼振动结构的振型可用式 $y_r(t) = e^{-\xi_r w_d t} (c_1 \cos w_d t + c_2 \sin w_d t) = a e^{-\xi_r w_d t} \sin(w_d t + \alpha)$ ，

$\frac{y_r}{y_{r+m}} = e^{\xi_r w_d m T}$ ，此时 $T = \frac{2\pi}{w_d}$ 。当阻尼较小时， $\frac{w_r}{w_d} = 1$ 。 $\frac{y_r}{y_{r+m}} = e^{\xi_r w_d m T} = e^{\xi_r 2m\pi}$ ，

$\ln\left(\frac{y_r}{y_{r+m}}\right) = \ln(e^{\xi_r w_d m T}) = 2m\pi\xi_r$ ，则阻尼比可通过上式求得。

6.9.10.8 桥梁结构阻尼比也可根据频谱分析得出的测点自功率谱图，用半功率点带宽按下式计算：

$$D_r = \frac{B_i}{2f_i} \quad (6.9.10-7)$$

式中： B_i — 第 i 阶自振频率相应的半功率点带宽，即 0.707 倍功率谱峰值所对应的频率差；

f_i — 第 i 阶自振频率。

【条文说明】

幅频特性曲线为：

$$|Y| = \frac{1/k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{w}{\Omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{w}{\Omega_n}\right)^2}}, \text{ 半功率点所对应频率}$$

$$w_a = \Omega_n \sqrt{1 - 2\xi}, w_b = \Omega_n \sqrt{1 + 2\xi}, \quad \xi = \frac{\omega_b - w_a}{2\Omega_n}, \text{ 半功率点 } w_a, w_b \text{ 所对应的峰值为}$$

$$0.707 \frac{1}{2k\xi}, \text{ 峰值为 } \frac{1}{2k\xi}。$$

6.10 荷载试验成果分析与评定

6.10.1 根据静载试验实际加载载位与加载量，按公式 6.4.2 求得静载试验效率 η_q ， η_q 应不小于 0.95。

6.10.2 结构工作状况评定分析

6.10.2.1 校验系数 ζ 是评定结构工作状况，确定桥梁承载能力的一个重要指标。一般要求校验系数 ζ 值不大于 1。不同结构形式的桥梁其 η_q 值一般不同， ζ 值的常值范围可参见表 6.10.2-1。

桥梁校验系数常值表

表 6.10.2-1

桥梁类型	应变（或应力）校验系数	挠度校验系数 ζ
钢筋混凝土板桥	0.30~0.70	0.40~0.80
钢筋混凝土梁桥	0.40~0.80	0.50~0.90
预应力混凝土桥	0.50~0.90	0.60~1.00
圬工拱桥	0.60~1.00	0.60~1.00

6.10.2.2 实测的结构或构件主要控制截面应变沿高度分布图符合平截面假定，主要控制测点的相对残余变位(或应变) S_p/St 不大于 20%。

【条文说明】

实测的结构或构件主要控制截面应变沿高度分布图符合平截面假定，实测的控制点变位或应变与荷载的关系曲线接近于直线，说明桥梁结构或构件处于良好的弹性工作状况。

主要控制测点的相对残余变位(或应变) S_p/St 越小，说明结构越接近弹性工作状况，一般要求 S_p/St 值不大于 20%。当 S_p/St 大于 20% 时，应查明原因，如确系桥梁强度不足，应酌情降低桥梁的承载能力。

结构残余应变或变形与试验施加的荷载量以及加卸载的时间有关，对于混凝土结构而

言，其材料特性不表现完全的弹性行为，具有一定的粘弹性特征，其变形（应变）与其应变速率有关，因此每级加、卸载时要确保结构处于稳定状态。

6.10.2.3 同一截面横向各测点试验加载计算应力或变位可应用实测横向分布系数或横向增大系数对其进行修正。

【条文说明】

可将实测的横向分布系数或横向增大系数应用到桥梁结构的计算分析中。主要控制截面在控制荷载作用下的横向增大系数 η 或荷载横向分布系数 m ，反映了桥梁结构荷载横向不均匀分布的程度及结构横向联结的工作状况。 η 值或 m 值越小，说明荷载横行分布越均匀，结构横向联结越可靠； η 值或 m 值越大，说明荷载横行分布越不均匀，结构横向联结越薄弱，结构受力越不利。

5.10.2.4 实测的活载冲击系数应满足下列条件：

$$\mu_t \eta_{dyn} \leq \mu_c \quad (6.10.2-1)$$

式中： μ_c — 设计采用的冲击系数；

μ_t — 行车试验实测的最大冲击系数；

η_{dyn} — 动力试验荷载效率，见式 6.9.10-1。

5.10.2.5 行车试验实测的桥跨结构最大变位控制测点的垂直振幅标准值 A_{ct} （等于局部离差平方的二次根）宜小于表 6.10.2-2 所列限值。

桥跨结构振幅标准值限值表 表 6.10.2-2

桥 型 及 跨 度	允许振幅标准值(mm)
跨度 20m 以下的钢筋混凝土梁桥	0.3
跨度为 20~45 m 的预应力混凝土梁桥	1.0
跨度为 60~70 m 的连续梁桥和 T 型刚构	3.0~5.0
跨度为 30~125 m 的钢梁桥和组合梁桥	2.0~3.0

6.10.2.6 实测的简支梁桥桥跨结构的一阶竖弯自振频率一般应大于 3.0Hz，否则认为桥跨结构的总体刚度较差。

6.10.3 裂缝及其扩展情况的评定分析

6.10.3.1 在试验荷载作用下，裂缝的高度不应超过设计计算值，裂缝间距接近或大于设计计算值，裂缝扩展很快趋于稳定，不允许出现典型受力临界裂缝。

6.10.3.2 在试验荷载作用下裂缝扩展宽度不应超过设计标准的许可值，并且卸载

后其扩展宽度应闭合到设计标准许可值的 1/3。

6.10.3.2 在试验荷载作用下裂缝宽度不应大于表 5.2 规定的允许值，试验荷载卸除后，所有裂缝宽度不应大于表 5.2 规定的允许值。

6.10.4 结构的强度、刚度及稳定性评定分析

6.10.4.1 当结构工作状况、裂缝及其扩展情况等评定分析结果满足第 5.10.2 和 5.10.3 条的有关规定时，可采用荷载试验实测的主要挠度测点和主要应力测点的校验系数（两者中取较大者），按表 6.10.4-1 确定桥梁承载能力检算系数 Z_2 ，然后用 Z_2 代替 Z_1 按第 5.7 条和 5.8 条的有关规定重新进行承载能力极限状态、正常使用极限状态鉴定计算，若计算结果符合要求，则可评定桥梁承载能力满足检算荷载要求。

经过荷载试验的承载能力检算系数 Z_2 值表 表 6.10.4-1

ζ	Z_2
0.4 及以下	1.30
0.5	1.20
0.6	1.15
0.7	1.10
0.8	1.05
0.9	1.00
1.0	0.95
备 注	1、对主要挠度测点和主要应力测点和校验系数，两者中取较大值； 2、 Z_2 值，可按 ζ 值线性内插。

6.10.4.2 在试验荷载作用下，主要挠度测点的实测挠度值不超过表 6.10.4-2 所列限值。如试验控制为标准验算荷载，则主要挠度测点的实测挠度值不应超过表 6.10.4-2 所列限值的 1.2 倍。

标准计算活载作用下桥跨结构的挠度限值表 表 6.10.4-2

桥梁类型	计算活载挠度限值	
圬工拱桥	一个桥跨范围内正、负挠度的最大绝对值之和不大于 $1/1000$	
钢筋混凝土 与预应力混 凝土桥	梁桥主梁跨中	$1/600$
	梁桥主梁悬臂端	$l_1/300$
	桁架、拱	$1/800$
	斜拉桥预应力混凝土主梁	$1/500$
	悬索桥预应力混凝土加劲梁	$1/500$
钢 桥	简支或连续桁架	$1/800$
	简支或连续板梁	$1/600$
	斜拉桥钢主梁	$1/400$
	悬索桥钢加劲梁	$1/400$
备 注	1、 l 分别为简支梁的计算跨径、桁架、拱的计算跨径、斜拉桥的中跨计算跨径、悬索桥中跨的计算跨径； 2、 l_1 为悬臂长度； 3、试验荷载作用下，如一个桥跨结构范围内有正、负挠度，则表列限值为正、负挠度的最大绝对值之和的限值。	

6.10.5 地基与基础的评定分析

6.10.5.1 当试验荷载作用下墩台沉降，水平位移及倾角较小，符合上部结构检算要求,卸载后变位基本回复时，认为地基与基础在检算荷载作用下能正常工作。

6.10.5.2 当试验荷载作用下墩台沉降，水平位移、倾角较大或不稳定，卸载后变位不能恢复时，应进一步对地基、基础进行探查、检算，必要时对地基基础进行加固处理。