

# 混凝土悬臂 公路桥病害诊治

DIAGNOSIS AND TREATMENT OF DISEASES  
IN THE CONCRETE CANTILEVER HIGHWAY BRIDGE

王若林 朱利明 著

普通高等院校土木专业“十二五”规划精品教材

Civil Professional Textbooks for the 12th Five-Year Plan



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

普通高等院校土木专业“十二五”规划精品教材

# 混凝土悬臂公路桥病害诊治

王若林 朱利明 著

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 提 要

本书针对混凝土悬臂公路桥的常见病害,对混凝土悬臂体系公路桥的使用现状和病害诊治实践进行总结,介绍了桥梁检测和监测的 latest 技术理念与实践,以期对该类桥梁的耐久性和承载力的设计、施工、耐久性材料的研发,混凝土桥梁的日常维护技术和管理手段提出建议。

本书可供普通高校土木工程专业本科生选修课使用,也可为工程技术人员提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土悬臂公路桥病害诊治/王若林,朱利明著. —武汉:华中科技大学出版社,2013.12

ISBN 978-7-5609-9582-3

I. ①混… II. ①王… ②朱… III. ①钢筋混凝土桥-悬臂桥-公路桥-病害-诊断 IV. ①U448.145.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 307947 号

混凝土悬臂公路桥病害诊治

王若林 朱利明 著

责任编辑:简晓思

封面设计:张 璐

责任校对:祝 菲

责任监印:张贵君

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中理工大学印刷厂

开 本:850mm×1060mm 1/16

印 张:13

字 数:348 千字

版 次:2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:35.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换

全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务

版权所有 侵权必究

## 总 序

教育可理解为教书与育人。所谓教书,不外乎教给学生科学知识、技术方法和运作技能等,教学生以安身之本。所谓育人,则要教给学生做人道理,提升学生的人文素质和科学精神,教学生以立命之本。我们教育工作者应该从中华民族振兴的历史使命出发,来从事教书与育人工作。作为教育本源之一的教材,必然要承载教书和育人的双重责任,体现二者的高度结合。

中国经济建设高速持续发展,国家对各类建筑人才需求日增,对高校土建类高素质人才培养提出了新的要求,从而对土建类教材建设也提出了新的要求。这套教材正是为了适应当今时代对高层次建设人才培养的需求而编写的。

一部好的教材应该把人文素质和科学精神的培养放在重要位置。教材中不仅要内容上体现人文素质教育和科学精神教育,而且还要从科学严谨性、法规权威性、工程技术创新性来启发和促进学生科学世界观的形成。简而言之,这套教材有以下特点。

一方面,从指导思想来讲,这套教材注意到“六个面向”,即面向社会需求、面向建筑实践、面向人才市场、面向教学改革、面向学生现状、面向新兴技术。

二方面,教材编写体系有所创新。结合具有土建类学科特色的教学理论、教学方法和教学模式,这套教材进行了许多新的教学方式的探索,如引入案例式教学、研讨式教学等。

三方面,这套教材适应现在教学改革发展的要求,提倡所谓“宽口径、少学时”的人才培养模式。在教学体系、教材编写内容和数量等方面也做了相应改变,而且教学起点也可随着学生水平做相应调整。同时,在这套教材编写中,特别重视人才的能力培养和基本技能培养,适应土建专业特别强调实践性的要求。

我们希望这套教材能有助于培养适应社会发展需要的、素质全面的新型工程建设人才。我们也相信这套教材能达到这个目标,从形式到内容都成为精品,为教师和学生,以及专业人士所喜爱。

中国工程院院士 王 思 敬

2006年6月于北京

## 前 言

桥梁在设计、施工、验收、投入运营后,往往受到各种恶劣环境因素的影响(气候、洪水、车辆超速与超载、船舶碰撞、植被垃圾侵蚀以及各种人为破坏和意外事故等)而出现各种病害,严重影响结构的耐久性与承载能力,大大降低了桥梁的功能寿命,甚至成为公路危桥。实践证明,采用适当的检测可以及时获取桥梁的运营状况,通过科学的加固技术可以有效提高旧桥的承载能力及通行能力,并延长桥梁的使用寿命,满足现代化交通运输的需要。

我国在 20 世纪 50 年代末至 80 年代初修建的大跨梁式公路桥中,T 型刚构悬臂体系混凝土桥是主要的桥型之一,数量非常可观,至今仍然是我国公路交通的重要组成部分。经过数十年的运行,这类桥梁多数已出现了不同程度的病害,对此类桥梁的加固维修是保障公路交通正常运营的重要技术保障。

本书针对 T 型刚构桥的常见病害,通过详细分析总结该类桥梁的结构特点、设计方法和施工方法,对桥梁病害产生的原因进行了深刻剖析。本书介绍了国内外针对混凝土旧桥的检测与评估技术,对 T 型刚构悬臂体系混凝土公路桥的加固技术进行了论述和总结。特别介绍了三座具有代表性的 T 型刚构悬臂体系混凝土公路桥的检测评估和加固设计及施工技术,并在书中介绍了桥梁检测和监测的 latest 技术理念与实践,对纤维混凝土在结构加固领域的应用作了介绍。

本书由武汉大学王若林和南京工业大学朱利明所著,中铁第四勘测设计研究院有限公司刘文捷参编部分章节。编写分工:朱利明编写第 5、7 章,王若林编写第 1、2、3、4、6、8 章,刘文捷参加编写第 5 章。

本书部分章节的研究内容得到“国家自然科学基金(项目号:51278387)”的资助,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,不妥之处在所难免,衷心期待广大读者批评指正。

著 者

2014 年 4 月

# 目 录

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 第 1 章 绪论 .....              | (1)  |
| 1.1 危桥的判定 .....             | (1)  |
| 1.2 混凝土桥梁结构的耐久性与承载能力 .....  | (3)  |
| 第 2 章 T 型刚构桥简介 .....        | (5)  |
| 2.1 T 型刚构桥的结构特点 .....       | (5)  |
| 2.2 T 型刚构桥的桥跨布置与截面形式 .....  | (6)  |
| 2.3 T 型刚构桥牛腿 .....          | (7)  |
| 2.4 T 型刚构桥的伸缩缝装置 .....      | (11) |
| 2.5 T 型刚构桥的施工方法 .....       | (13) |
| 第 3 章 T 型刚构桥常见病害及成因 .....   | (16) |
| 3.1 桥面系常见病害 .....           | (16) |
| 3.2 T 型刚构悬臂及挂梁常见病害 .....    | (22) |
| 3.3 下部结构常见病害 .....          | (32) |
| 第 4 章 T 型刚构桥病害成因总述 .....    | (37) |
| 4.1 车辆设计荷载标准 .....          | (37) |
| 4.2 混凝土的耐久性 .....           | (38) |
| 4.3 混凝土的收缩和徐变 .....         | (45) |
| 4.4 预应力损失 .....             | (49) |
| 4.5 箱梁剪力滞效应 .....           | (53) |
| 第 5 章 混凝土旧桥的检测与性能评估 .....   | (56) |
| 5.1 国内外桥梁检测与评估技术 .....      | (56) |
| 5.2 桥梁检测与评估的工作程序及项目要求 ..... | (59) |
| 5.3 混凝土旧桥耐久性检测与评级 .....     | (61) |
| 5.4 混凝土旧桥承载能力评定 .....       | (70) |
| 第 6 章 T 型刚构桥加固与改造 .....     | (82) |
| 6.1 悬臂体系桥梁加固设计总述 .....      | (82) |
| 6.2 桥面系加固与改造 .....          | (84) |
| 6.3 混凝土一般缺陷处理 .....         | (86) |
| 6.4 改变结构体系的加固方法与技术 .....    | (87) |
| 6.5 预应力加固法 .....            | (91) |
| 6.6 粘贴钢板加固法 .....           | (97) |

6.7 粘贴纤维增强复合材料(FRP)加固法 ..... (102)

6.8 桥梁结构抗震加固 ..... (121)

6.9 桥梁防船撞设施 ..... (127)

**第 7 章 悬臂体系挂梁混凝土桥检测与加固工程实例** ..... (130)

7.1 广州东江大桥检测与针对性加固 ..... (130)

7.2 广州东江大桥针对性加固 ..... (168)

7.3 施工方案 ..... (173)

**第 8 章 桥梁诊治技术的发展趋势** ..... (175)

8.1 桥梁检测技术的进步 ..... (175)

8.2 成熟的桥梁健康监测系统能提高桥梁安全管理效率 ..... (176)

8.3 基于无线传感器网络的既有桥梁安全监测评估系统 ..... (183)

8.4 高强复合纤维预应力加固体系 ..... (185)

8.5 纤维混凝土 ..... (193)

**参考文献** ..... (199)

# 第1章 绪 论

我国目前的交通主干网络已具有一定规模,但是大部分桥龄达到三四十年的桥梁仍在继续使用。20世纪70—80年代,我国兴建了数量众多的悬臂挂梁式桥梁。经过数十年的运行,多数桥梁已出现了不同程度的病害。为了保证桥梁的正常运行和交通安全,对这些桥梁进行全面的检测和适当的维修加固是非常必要的。实践证明,采用适当的加固技术和拓宽措施可以恢复和提高旧桥的承载能力及通行能力,并延长桥梁的使用寿命,以满足现代化交通运输的需要。所以,应高度重视和加强对公路桥梁的养护、维修、加固、改建和重建工作,尤其应当加强对桥梁检测、承载能力评估和桥梁加固技术的研究与实践工作。

遵照国家规范对桥梁进行设计、施工、验收后,投入运营的桥梁往往由于遭受各种因素(如气候、洪水、车辆超速超载、船舶碰撞、植被垃圾侵蚀、各种人为破坏和意外事故等)的影响而出现病害,严重影响桥梁结构的耐久性与承载能力,大大降低了桥梁的功能、寿命,甚至成为公路危桥。本书针对我国公路桥梁常采用的悬臂挂梁式混凝土(钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土)桥梁的使用现状和病害诊治实践进行总结,以期对该类桥梁的耐久性和承载力的设计、施工,耐久性材料的研发,混凝土桥梁的日常维护技术和管理手段提出建议。

## 1.1 危桥的判定

### 1.1.1 危桥的定义

危桥,即处于危险状态的桥梁。具体可划分为三类:一是通行安全不足的危桥,二是桥梁结构承载力不足的危桥,三是抗灾能力不足的危桥。

① 通行安全不足的危桥是指表征桥梁使用功能的主要技术指标(如非主要承重构件的完好程度、桥面的平顺度、行车和行人的安全防护装置或构造物的安全可靠性等)不能满足设计技术标准所规定的最低限度的使用功能性要求,可能危及通行安全的桥梁。

② 承载力不足的危桥是指实际承载力不能满足相关技术标准规定的最低承载力或不满足实际通行荷载要求的桥梁。

③ 抗灾能力不足的危桥是指在突发性灾难或意外事件的状态下,会出现危险状况的桥梁。

### 1.1.2 公路危桥判定的主要技术指标

#### 1.1.2.1 通行安全指标

(1) 桥面适应度

① 高速公路行车道宽:小于引道行车道宽。



- ② 一级公路行车道宽:小于引道行车道宽。
- ③ 二级公路行车道宽:双向,小于 7 m;单向,小于 3.5 m。
- ④ 三级、四级公路行车道宽:双向,小于 6 m;单向,小于 3 m。

### (2) 桥面行车道状况

- ① 伸缩缝损坏:将导致设计最高行车车速下的严重不适。
- ② 桥面铺装破损:高速公路破损深度大于 5 cm,一级公路破损深度大于 5 cm,二级公路破损深度大于 7 cm,三级、四级公路破损深度大于 9 cm。
- ③ 桥面铺装抗滑性:摩擦系数指标低于设计指标 1 到 2 个等级。

### (3) 桥梁防撞护栏状况

- ① 防撞护栏安全等级不满足实际要求。
- ② 防撞护栏严重缺损,不能正常发挥防护作用。
- ③ 人行道栏杆缺失重要构件。

### (4) 桥梁线形指标

桥头接线不满足相应路线等级的线形要求。

#### 1.1.2.2 结构技术状况指标

##### (1) 上部结构承重构件主要表现特征

- ① 行车道板出现严重的横向、纵向受力裂缝,裂缝宽度大于 0.2 mm,裂缝特征呈典型的构件受力开裂特征,且裂缝开裂程度已达到或超出构件的开裂临界特征。
- ② 行车道板集中受力部位(如承压部位)出现受力破坏。
- ③ 主梁、拱肋等上部主要承重构件发生较大的下挠变形或出现不稳定的持续下挠现象。
- ④ 主梁(板)正、负弯矩或弯曲正应力最大部位大量出现弯曲裂缝,且裂缝宽度、间距和裂缝延伸高度超出理论计算值。
- ⑤ 主梁(板)最不利剪力或主拉应力控制截面附近集中出现斜向主拉应力裂缝,或导致主梁有明显的下挠变形。
- ⑥ 拱结构弯矩控制截面(如拱顶、拱脚等)出现典型的弯曲受力裂缝,且裂缝的延伸高度大于截面高度的 1/2。
- ⑦ 拱结构受力集中部位(如拱脚、预制拼装构件连接部位等)出现局部受力破坏。
- ⑧ 缆索结构体系预应力钢索发生锈蚀断丝或出现坑蚀,或其锚固连接部位发生集中受力破坏现象。
- ⑨ 上部结构承重构件的实际承载力为设计承载力的 75% 以下。

##### (2) 下部结构承重构件主要表现特征

- ① 在考虑结构实际检测结果后检算的承载力不满足要求。
- ② 出现超规变位或出现不稳定的持续变位。
- ③ 由于冲刷等原因造成上部结构出现不稳定现象。

#### 1.1.2.3 结构抗灾能力指标

- ① 泄洪能力小于 1/50。

- ② 1/20 洪水造成基础冲刷异常。
- ③ 已出现冲刷造成基底淘空,或桥梁墩台基础埋置深度、桩基入土深度不满足洪水冲刷要求。
- ④ 已出现冲刷,造成桩基础缩颈。
- ⑤ 持力层位于有滑动迹象的地基上。
- ⑥ 可能遭受泥石流冲击的桥梁。
- ⑦ 对有通航要求的桥梁、桥墩(台)及预防设施的抗撞击能力不满足实际通航要求。

## 1.2 混凝土桥梁结构的耐久性与承载能力

### 1.2.1 耐久性与承载能力的定义及二者的相关性

#### (1) 定义

混凝土桥梁结构的耐久性,是指钢筋混凝土结构或预应力钢筋混凝土结构在正常使用和正常维修的条件下,能在规定的设计年限内满足使用要求,即结构抵抗环境中各种因素作用而保持正常使用功效的能力。结构的耐久性是结构必须满足的基本功能之一,既与设计、施工和材料等因素有关,又与使用环境和维护、维修等条件有关。

混凝土桥梁结构的承载能力,是指钢筋混凝土结构或预应力钢筋混凝土结构抵抗外部作用的极限承载能力。混凝土结构承载能力,简而言之,就是结构的抗力不小于结构所承受的荷载效应,其一般表达式为

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1-1)$$

式中,  $\gamma_0$  ——结构重要性系数;

$S$  ——结构效应组合设计值;

$R$  ——结构构件抗力设计值。

#### (2) 二者的相关性

混凝土桥梁结构的耐久性与承载能力是混凝土桥梁结构性能评价中不可分割的两个层面,耐久性的评定指标是评定承载力的主要参数。结构的耐久性下降,必然影响承载能力。因此,目前在混凝土桥梁的性能检测、评定和维护加固技术中,主要的工作是同时进行耐久性和承载能力的测定。而维护加固措施主要是修缮结构病害,提高结构的耐久性,确保承载能力。

### 1.2.2 混凝土桥梁结构耐久性与承载能力的评定

桥梁整体结构是由各个构件组成。因此,混凝土桥梁整体结构的耐久性以构件的耐久性评定为基础,应综合考虑各类构件的重要性系数、损伤程度以及所处的环境条件后进行结构的耐久性等级评定。

在对混凝土桥梁结构进行耐久性检测和评定的基础上,必要时结合荷载试验,对结构的抗力及效应组合进行修正,得到桥梁的残余承载力。

### 1.2.3 影响混凝土桥梁结构耐久性与承载能力的主要因素

总体而言,以下几方面因素对混凝土桥梁结构的耐久性与承载能力产生影响。

##### (1) 设计理论

设计理论包括勘察技术、设计理念、计算手段、施工器具的发展状况。先进而详尽的设计是提高结构耐久性、避免结构“先天不足”的第一控制要素。

##### (2) 施工技术和施工管理

施工环节直接影响设计效果的实现,还影响材料性能的充分发挥。耐久性的降低往往是从施工质量没有得到保证开始的,提高施工技术和严格进行施工管理是提高结构耐久性的重要控制手段。

##### (3) 结构构造工艺

结构构造工艺即细部构造设计,如伸缩缝的构造、桥面排水系统等的构造处理。结构构造工艺设计不合理是造成污水渗流侵蚀桥梁结构的因素之一。

##### (4) 材料的影响

就混凝土桥梁而言,混凝土材料特有的开裂、收缩、徐变、碳化、碱骨料反应以及钢筋锈蚀、材料风化等物理化学损伤,对结构的耐久性和承载能力的影响是伴随桥梁的整个运营周期的。因此,对材料的检测成为对结构耐久性和承载能力测评的重要内容。

##### (5) 环境条件的影响

环境条件包括气候条件、行车条件、船舶撞击、人为破坏、意外事故等。

##### (6) 规范的运营管理

严格的运营管理,即周期性而且规范化的监测、检测、维护、修缮是保证结构耐久性和安全性的重要手段。

#### 1.2.4 混凝土桥梁结构耐久性与承载能力的研究与设计关键

混凝土桥梁结构的耐久性一直是工程界研究和设计的关键。目前,对混凝土桥梁结构耐久性的研究主要集中于以下几方面:

- ① 混凝土桥梁结构耐久性设计方法和设计参数的研究;
- ② 桥梁结构表面防护耐久性材料的研究;
- ③ 跨江海大型桥梁结构混凝土劣化性能与耐久性对策措施的研究;
- ④ 公路常用桥梁合理、耐用结构构造的研究;
- ⑤ 长效可监测拉吊索体系及其更换技术研究;
- ⑥ 控制桥梁结构混凝土质量的耐久性指标体系、检测方法与评价标准的研究;
- ⑦ 混凝土桥梁主要耐久性指标监测方法与长期跟踪监测技术的研究;
- ⑧ 提高混凝土桥梁结构耐久性的施工改进技术与质量控制方法的研究;
- ⑨ 公路常用桥梁预防性养护技术的研究。

## 第 2 章 T 型刚构桥简介

预应力 T 型刚构桥曾经是我国中大型跨径公路桥梁的主力桥型,在我国现役公路桥梁中也占有不小的比例。T 型刚构桥的常见病害是与其结构特点、设计方法和施工方法息息相关的,因此在这里首先对 T 型刚构桥的设计与施工作简要的介绍。

### 2.1 T 型刚构桥的结构特点

提到 T 型刚构桥,就不得不先说说悬臂体系梁桥。悬臂体系梁桥可分为悬臂梁桥和 T 型刚构桥两大类,其各种典型桥型如图 2-1(b)~(d)所示。T 型刚构桥与悬臂梁桥的最主要区别在于:悬臂梁桥只在桥墩的一侧设置挂孔结构,而 T 型刚构桥一般采取对称布置,两侧均设有挂孔,且悬臂端与墩柱是整体浇筑的。作为比较对象,图 2-1(a)所示为简支梁桥。

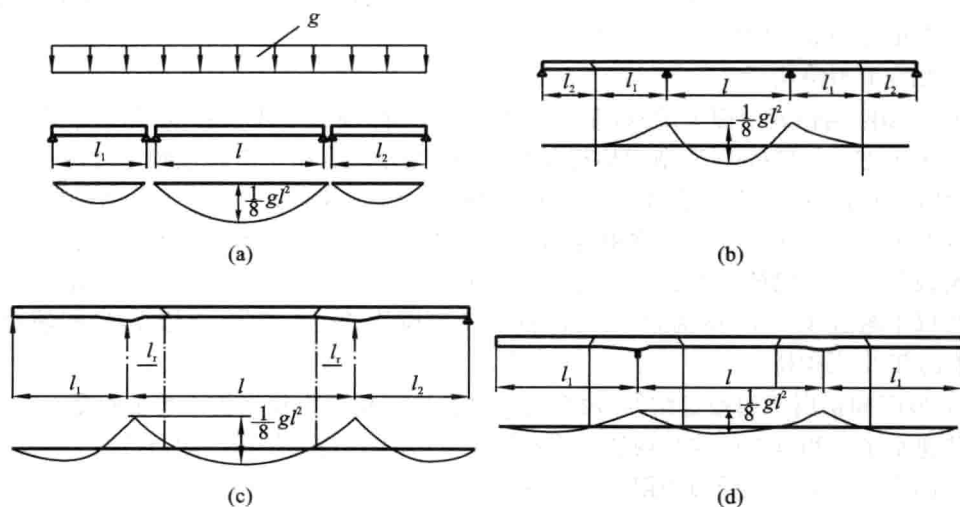


图 2-1 悬臂体系梁桥与简支梁桥力学性质对比图

(a) 简支梁桥; (b) 多孔悬臂梁桥; (c) 单孔悬臂梁桥; (d) T 型刚构桥

在图 2-1 中对比了悬臂梁桥和简支梁桥在荷载作用下梁体截面产生的内力,由此更生动明确地表明在跨距较大的情况下悬臂梁桥所具有的优势。如图 2-1 所示,当跨径  $l$  和恒载集度  $g$  均相同时,简支梁桥的跨中弯矩最大。悬臂梁桥则因为支点附近负弯矩的存在,跨中正弯矩显著减小。就表征材料用量的弯矩图面积大小(绝对值)而言,悬臂梁桥比简支梁桥小得多。再从活载方面来看,如果只在图 2-1 (b) 的中孔布载,则其跨中最大正弯矩仍然与简支梁一样。但对于带有挂梁的多孔悬臂梁桥,活载作用于中间孔上时,只有较小跨径(通常只有桥孔跨径的 0.4~0.6 倍)的简支梁才产生正弯矩,且其值比简

支梁桥小得多。由此可见,悬臂梁桥由于支点附近负弯矩的存在,跨中最大正弯矩显著减小,可以减小梁截面尺寸,减小材料用量和结构自重。

将悬臂梁桥的柱墩与梁体固结后便形成了带挂梁或带铰的结构,成为 T 型刚构桥,如图 2-2 所示。

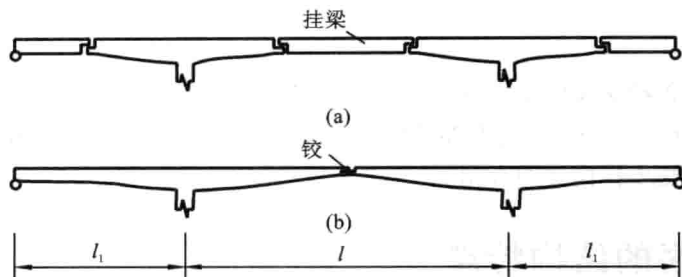


图 2-2 T 型刚构桥

(a)带挂梁的 T 型刚构桥;(b)带铰的 T 型刚构桥

T 型刚构桥由于支点负弯矩的存在,使跨中正弯矩显著减小,从而使结构具有较大的跨越能力。若用预应力混凝土结构,跨越能力可得到进一步的提高。同悬臂梁桥一样,T 型刚构桥在施工阶段和成桥运营阶段的受力状态是一致的,非常适于悬臂施工法施工。当在墩柱一侧的桥跨上布载时,墩柱将承受较大的不平衡力矩,因此墩柱尺寸一般较大。

#### (1) 带挂梁的 T 型刚构桥

带挂梁的 T 型刚构桥属于静定结构,基础的不均匀沉降、混凝土收缩徐变及温度变化等因素都不会对结构产生次应力。与带铰的 T 型刚构桥相比,它的受力性能和变形性能均略差一些,但其受力明确,当挂梁与两岸引桥的简支梁尺寸和构造相同时,能加快施工速度,并产生巨大的经济效益。结构布置以每个 T 型刚构单元与两侧配等长的挂梁最为简单合理,此时刚构两侧恒载是对称的,墩柱中不存在不平衡的恒载弯矩。挂梁的经济长度一般为跨径的 22%~25%。主跨径较大时,取较小的比值,并使挂梁跨径以不超过 35~40 m 为宜。而且,整个 T 型刚构承受负弯矩,上缘受拉,配筋比较简单。

#### (2) 带铰的 T 型刚构桥

带铰的 T 型刚构桥属于超静定结构,两个大悬臂在端部用剪力铰连接。剪力铰是一种只能承受竖向剪力而不传递水平力和弯矩的连接构造。当在一个 T 型刚构桥上作用竖向荷载时,相邻的 T 型刚构通过剪力铰共同受力。从结构受力和限制悬臂端变形来看,剪力铰起到了很大的作用。

## 2.2 T 型刚构桥的桥跨布置与截面形式

T 形截面桥梁的跨径布置和梁高尺寸如图 2-3 所示。T 形截面悬臂梁的中支点梁高为  $(1/13 \sim 1/10)l$ ,跨中梁高通常为中支点梁高的  $1/1.5 \sim 1/1.2$ 。而箱形截面悬臂梁的中支点梁高为  $(1/18 \sim 1/12)l$ ,此时的跨中梁高一般为中支点梁高的  $1/2.5 \sim 1/2$ 。

由于 T 型刚构桥的主梁除了在跨中承受正弯矩外,在支点附近还承受较大的负弯矩,因此在进行截面设计时,支点截面的底部受压区往往需要加强,常用截面如图 2-4 所示。图 2-4(a)所示为底部带马蹄的 T 形截面,适用于跨径在 30 m 以内的钢筋混凝土桥梁。图 2-4(b)为底部加宽的 T 形截面,适用于

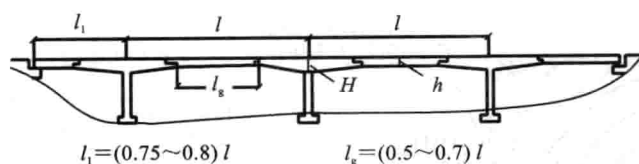


图 2-3 桥跨布置和梁高尺寸

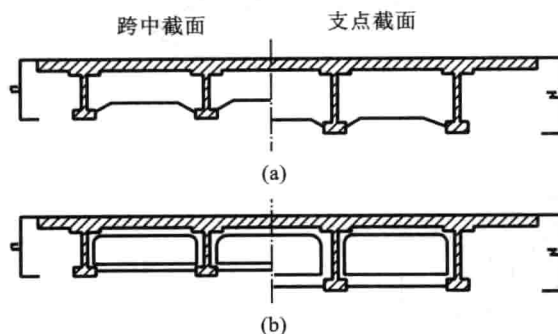


图 2-4 底部加强的截面形式

(a) 底部带马蹄的 T 形截面；(b) 底部加宽的 T 形截面

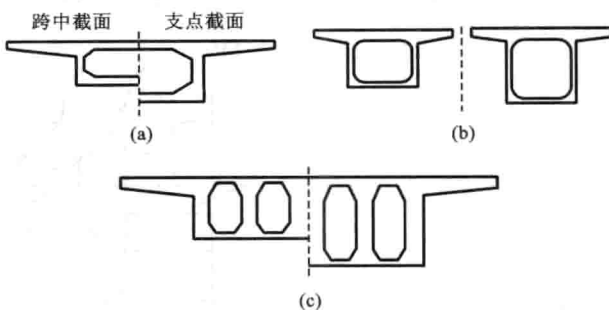


图 2-5 箱形截面形式

跨径为 30~50 m 的预应力混凝土桥梁。当跨径达 50 m 以上时宜采用箱形截面(见图 2-5),箱形截面整体性强,抗扭刚度大,且便于悬臂施工和预应力布置。箱形截面又可分为单箱单室、单箱双室和单箱多室等。采用宽翼缘的单箱单室截面,可以达到用较窄桥墩满足较宽的桥面宽度的要求,从而达到减小下部结构工程量的效果。单箱单室截面加上宽翼板,总宽度可达 22 m 左右,故其应用最为广泛。分离式双箱单室截面多用在宽桥上。这里要说明的是,国内的 T 型刚构桥往往采用箱形截面,挂梁形式各异,以 T 形截面和箱形截面为主。

## 2.3 T 型刚构桥牛腿

悬臂梁桥与 T 型刚构桥的悬臂端和挂梁连接处的局部构造称为牛腿(见图 2-6)。牛腿是整根梁的薄弱环节,出于梁的搭接和支座布置的需要,牛腿部位的梁高一般都存在一半以上的削弱,但同时又要承受较大的竖向荷载,受力情况复杂,各种验算都存在相当的近似性。牛腿角隅处应力集中现象非常严重,需对角隅处的不同断面进行验算。另外,牛腿的构造、钢筋布置、钢束布置也应当尽量合理。为了避免过大削弱牛腿处截面高度,还应尽可能选择高度较小的支座。

### 2.3.1 非腹板部位牛腿计算

非腹板部位牛腿受力可近似按悬臂板计算,悬臂端横梁受力图如图 2-7 所示,其有效工作宽度为  $b + 2e$ ;验算垂直截面 a-b,其高度为  $h$ 。恒载分为两部分:牛腿悬臂部分宽度为  $b + 2e$ ,高度为  $h$  的自重荷载;挂梁及相应桥面铺装所引起的恒载反力作为集中荷载作用于支座处。可变荷载包括车辆荷载、汽车

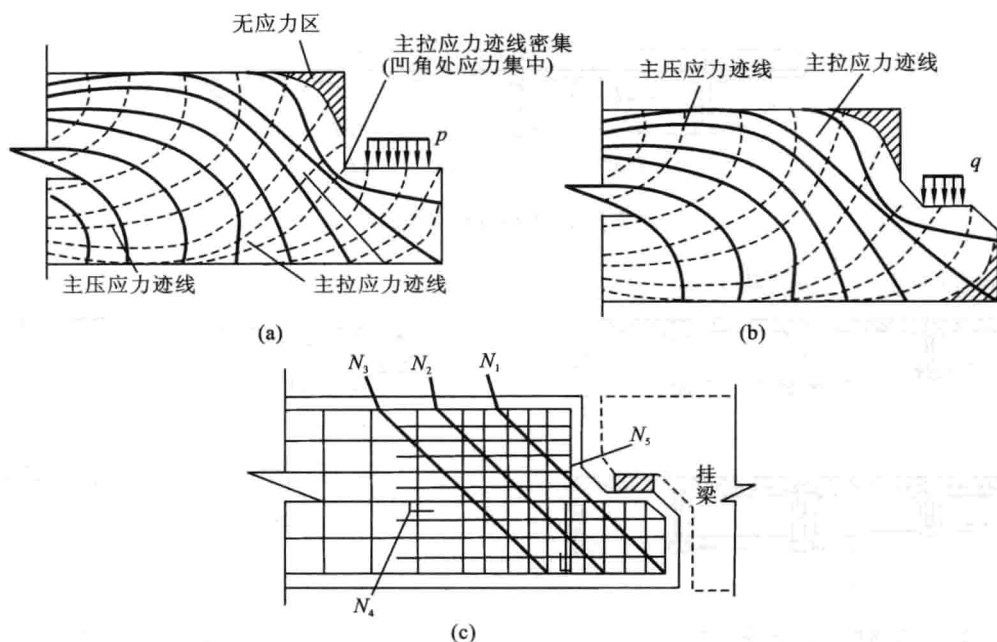


图 2-6 牛腿的构造及受力

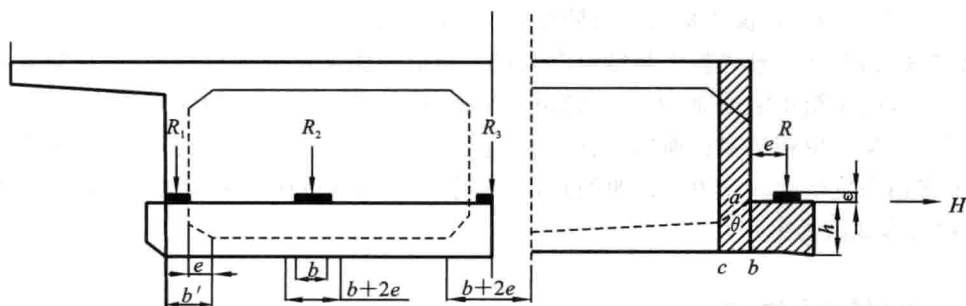


图 2-7 悬臂端横梁受力图示

制动力和支座摩阻力。车辆荷载为作用在挂梁上的汽车(或挂车)车列在纵、横向布置使该支座反力最大时的反力值。汽车制动力和支座摩阻力均为作用于支座顶面的水平力,依据《公路桥涵设计通用规范(JTG D60—2004)》,这两种荷载不同时参加组合。

### 2.3.2 牛腿横端梁计算

对于挂梁的肋数与悬臂梁梁肋(或腹板)片数相互对齐的情况,一般认为挂梁的反力可以直接传给悬臂梁承受,此时悬臂梁端部的横隔板只起横向分布荷载的作用,不承受引起弯矩的局部荷载。

对于挂梁的肋数多于悬臂梁梁肋数或没有对齐的情况,就需要将悬臂梁端部牛腿做成端横梁的形式来传递来自挂梁的支点反力(见图 2-7)。端横梁与端横隔板一起作为一根 L 形截面的横向连续梁进行设计(见图 2-8)。

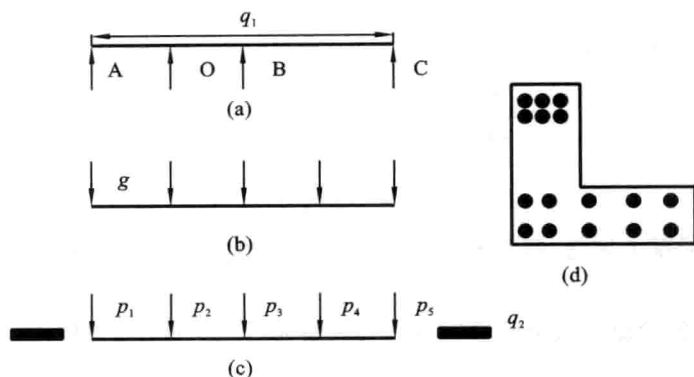


图 2-8 端横梁荷载作用图示

(a)端横梁自重;(b)挂梁恒载;(c)活载;(d)端横梁截面图

### (1) 内力计算

作用荷载:a,端横梁自重  $q_1$ ; b,挂梁恒载  $g$ ; c,活载(汽车  $p$ 、人群  $q_2$ )。

### (2) 钢筋设置

截面验算:a,支点截面 B;b,跨中截面 O。

主拉应力和剪力验算:a,斜筋设置;b,箍筋设置。

## 2.3.3 腹板部位牛腿计算

牛腿截面内力的确定。如图 2-9 所示,在外力  $R$  和  $H$  的作用下,沿任意斜截面 a-c 截取脱离体,考察脱离体的平衡。

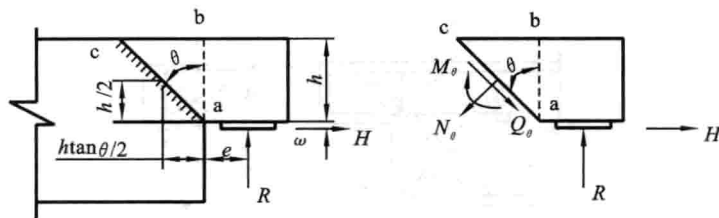


图 2-9 牛腿受力图示

$$N_{\theta} = R \sin \theta + H \cos \theta \quad (2-1)$$

$$Q_{\theta} = R \cos \theta - H \sin \theta \quad (2-2)$$

$$M_{\theta} = R \left( e + \frac{h}{2} \tan \theta \right) + H \left( \frac{h}{2} + \epsilon \right) \quad (2-3)$$

式中, $R$ ——恒载和活载支点反力(对于汽车活载应计入冲击力);

$H$ ——活载制动力或温度变化引起的支座摩阻力,取其大值,当不计附加荷载时  $H = 0$ ;

$\theta$ ——斜截面对竖截面的倾斜角,对于竖截面 a-b,则  $\theta = 0$ ;

$\epsilon$ ——支座垫板高出牛腿底面的高度。



### (1) 竖截面 a-b 的验算

作用于竖截面 a-b 上的内力:

$$\left. \begin{aligned} N_{\theta=0} &= H \\ Q_{\theta=0} &= R \\ M_{\theta=0} &= Re + H\left(\frac{h}{2} + \epsilon\right) \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

注意:对于预应力混凝土牛腿,应考虑预加力的计算,分别对预加应力阶段和使用阶段进行计算。

### (2) 最弱斜截面验算

最弱斜截面是指按纯混凝土截面计算时拉应力  $\sigma$  最大的一个截面。相应的斜截面倾斜角  $\theta$  的正切表达式为

$$\tan 2\theta = \frac{2Rh}{3Re + 3H\epsilon + 2Hh} \quad (2-5)$$

对于预应力钢筋混凝土牛腿最弱斜截面的倾角  $\theta$ ,其正切值为

$$\tan 2\theta = \frac{2Rh - 2N_y h \sin \alpha}{3Re + 3H\epsilon + 2Hh - N_y(2h - 3m) \cos \alpha} \quad (2-6)$$

式中,  $N_y$ ——牛腿部位预压力的合力;

$\alpha$ ——牛腿部位预压力合力对水平线的倾角;

$m$ ——牛腿部位预压力合力与内角竖直线 a-b 的交点至内角点 a 的距离。

### (3) 45°斜截面的验算

为保证钢筋具有足够的抗拉强度,尚需验算假设混凝土沿 45°斜截面开裂后的受力状态,此时全部斜拉力将由钢筋承担(对于预应力混凝土牛腿包括预应力筋)。可近似按轴心受拉构件验算(见图 2-10),则:

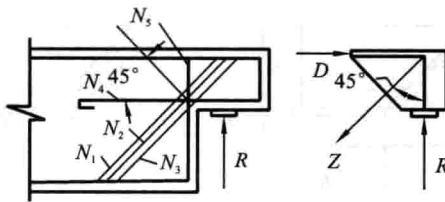


图 2-10 45°斜截面抗拉验算图示

$$KZ \leq R_g (\sum A_{gw} + \sum A_{gh} \cos 45^\circ + \sum A_{gv} \cos 45^\circ) \quad (2-7)$$

式中,  $K$ ——钢筋混凝土轴心受拉构件强度安全系数;

$Z$ ——外力作用下斜截面上的总斜拉力;

$R_g$ ——钢筋抗拉计算强度;

$\sum A_{gw}$ ——裂缝截面上所有斜筋的截面积;

$\sum A_{gh} \cos 45^\circ$ ——裂缝截面上所有水平钢筋的有效截面积;

$\sum A_{gv} \cos 45^\circ$ ——裂缝截面上所有竖向钢筋的有效截面积。