



宋一凡 / 编著
贺拴海 / 主审

公路桥梁

荷载试验

与 结构评定

GONGLU QIAOLIANG HEZAI SHIYAN YU JIEGOU PINGDING

人民交通出版社

Gonglu Qiaoliang Hezai Shiyān Yu Jiegou Pingding

公路桥梁荷载试验与结构评定

宋一凡 编著
贺拴海 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了公路桥梁荷载试验及结构性能评定方法,内容包括试验方案拟定、静载试验与动载试验方法、测试过程、试验报告编写及结构承载能力的分析评定。结合大量实桥荷载试验成果,阐述了简支板(梁)桥、连续梁桥、连续刚构桥、钢管混凝土拱桥、斜拉桥、悬索桥、桁架拱桥以及索桁组合结构桥等荷载试验方案、加载工况、测试方法、数据分析与结构性能评定过程。

本书适宜于从事桥梁及其他结构试验与结构评估工作的技术人员参考使用,亦可供大专院校桥梁工程以及其他相关专业的学生学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

公路桥梁荷载试验与结构评定 / 宋一凡编著. —北京:
人民交通出版社, 2002.1
ISBN 7-114-04164-0

I. 公... II. 宋... III. ①公路桥—载荷试验②公
路桥—结构性能—检定 IV. U448.146

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第000366号

公路桥梁荷载试验与结构评定

宋一凡 编著

贺拴海 主审

正文设计:王静红 责任校对:张莹 责任印制:张凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

新世纪印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:13 字数:321千

2002年4月 第1版

2002年4月 第1版 第1次印刷

印数:0001—5000册 定价:23.00元

ISBN 7-114-04164-0

U·03047

前 言

交通运输事业的飞速发展,为公路桥梁建设提供了良好的发展机遇。截止到 20 世纪末,我国已建成永久性公路桥梁 22.5 万余座,总长度达 800 万延米以上。我国依靠自己的技术力量,建成了不同结构形式的大跨径悬索桥、斜拉桥、拱桥、连续刚构桥等,取得了成功的经验。已建成和即将建成的一批大跨径桥梁,技术复杂,科技含量高,施工难度大,标志着我国桥梁技术已进入世界先进行列。

在加快公路桥梁建设的同时,必须依靠科技进步,提高工程建设质量。保证新建桥梁的工程质量,是广大桥梁工程建设者义不容辞的责任。竣工验收最有效、最直接的方法就是桥梁荷载试验。

近年来,随着我国交通运输事业的不断发展,大量低等级公路被改建扩建,服役桥梁能否继续使用已成为公路建设决策部门的一件大事。

20 世纪 70 年代以前修建的大量低标准公路桥梁已达到或接近设计基准期。在风、雨、洪水、冰冻、温度变化和湿度等自然因素侵蚀下,甚至在地震、撞击和超载营运的严重损害下,许多桥梁的结构性能发生了巨大变化,有些桥梁已出现不同程度的损伤,甚至其承载能力已大大降低而逐渐演变为危桥,对这类桥梁急需加以综合评定,以便采取相应的技术改造措施或拆除改建等处理方案。同样,实现对服役桥梁结构承载能力评定的最有效、最直接的方法也就是桥梁荷载试验。

桥梁荷载试验就是对桥梁结构物进行直接加载测试的一种特殊的科学试验工作,是一门实践性很强的专业技术,所涉及的内容比较广泛,需要的基础知识和专业技术也较多。本书以公路桥梁静、动载试验中广泛应用的电测技术为主要内容,详细介绍了公路桥梁静载试验与动载试验中的关键技术与理论分析方法,同时结合几种常见类型的公路桥梁荷载试验成果,详细介绍了公路桥梁荷载试验方案拟定、测试方法、试验数据分析及结构性能评定方法等内容,以满足桥梁结构性能评定需要。

本书共 5 章,第 1、2、3 和 5 章由宋一凡编写,第 4 章由赵煜编写。全书由宋一凡统稿,贺拴海教授主审。

本书在编写过程中参考了大量文献及试验成果,不论书末是否列出,在此一并致谢。为了本书的出版,编辑、校对付出了辛勤劳动,在此表示衷心感谢。

读者在使用本书过程中,如发现不妥之处,请函寄长安大学公路学院编者收(邮编:710064)。

编 者

2001 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 荷载试验的目的和意义	1
1.3 荷载试验的任务	2
1.4 荷载试验的内容和依据	2
1.5 荷载试验的预备工作	4
第 2 章 静载试验方法	6
2.1 试验荷载工况的确定	6
2.2 试验荷载等级的确定	8
2.3 加载方式及设备的选择	9
2.4 测点设置	10
2.5 测试仪器设备	12
2.6 静载试验过程	30
2.7 试验数据分析	33
2.8 桥梁承载能力评定	36
2.9 试验报告编写	39
第 3 章 动载试验方法	41
3.1 桥梁结构激振方法的选择	41
3.2 测点设置	44
3.3 测试仪器设备	46
3.4 模态参数测试	54
3.5 冲击系数测定	57
3.6 索力测试	59
3.7 动力特性试验数据分析	65
3.8 试验报告编写	67
第 4 章 简支梁桥荷载试验与结构评定	69
4.1 荷载横向分布计算方法的选择	69
4.2 主梁荷载内力计算方法	79
4.3 荷载试验方案	79
4.4 荷载纵向布置及截面内力测试	82

4.5	预应力混凝土简支板桥荷载试验与结构评定	99
4.6	钢筋混凝土简支 T 梁桥荷载试验与结构评定	104
第 5 章	其他结构体系桥梁荷载试验与结构评定	119
5.1	预应力混凝土连续梁桥	119
5.2	预应力混凝土连续刚构桥	127
5.3	钢管混凝土拱桥	135
5.4	斜拉桥	146
5.5	悬索桥	158
5.6	钢筋混凝土桁架拱桥	184
5.7	连续索桁组合钢结构桥	193
参考文献	201

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

交通运输事业的飞速发展,为公路桥梁建设提供了良好的发展机遇。截止到 20 世纪末,我国公路总里程达到 140 万公里,居世界第四位;高速公路总里程达到 1.5 万公里,居世界第三位。已建成永久性公路桥梁 22.5 万余座,总长度达 800 万延米以上。据不完全统计,我国已建成的主跨在 200m 以上的公路、城市、公铁两用桥近 100 余座,其中主跨在 400m 以上的有 30 座,主跨在 600m 以上的有 12 座。我国依靠自己的技术力量,建成了不同结构形式的大跨径悬索桥、斜拉桥、拱桥、连续刚构桥,取得了成功的经验。已建成和即将建成的一批大跨径桥梁,技术复杂,科技含量高,施工难度大,标志着我国桥梁技术已进入世界先进行列。

通过大量的工程建设实践,桥梁设计、施工、监理、科研和检测队伍的素质和实力有较大增强,设计、施工装备已具规模,构造工艺都有创新,桥梁技术水平明显提高。自改革开放以来,特别是近十几年来,公路桥梁建设成就巨大。

在加快公路桥梁建设的同时,必须依靠科技进步,提高工程建设质量。保证新建桥梁的工程质量,是广大桥梁工程建设者义不容辞的责任。竣工验收最有效、最直接的方法就是桥梁荷载试验。

近年来,随着我国交通运输事业的不断发展,大量低等级公路被改建扩建,服役桥梁能否继续使用已成为公路建设决策部门的一件大事。

20 世纪 70 年代以前修建的大量低标准公路桥梁已达到或接近设计基准期。在风、雨、洪水、冰冻、温度变化和湿度等自然因素侵蚀下,甚至在地震、撞击和超载营运的严重损害下,许多桥梁的结构性能发生了巨大变化,有些桥梁已出现不同程度的损伤,甚至其承载能力已大大降低而逐渐演变为危桥,对这类桥梁急需加以综合评定,以便采取相应的技术改造措施或拆除改建等处理方案。同样,实现对服役桥梁结构承载能力评定最有效、最直接的方法也就是桥梁荷载试验。

1.2 荷载试验的目的和意义

桥梁结构荷载试验就是对桥梁结构物进行直接加载测试的一项科学试验工作,其目的是通过荷载试验,了解桥梁结构在试验荷载作用下的实际工作状态,从而判断桥梁结构的安全承载能力及评价桥梁的营运质量。对于一些在理论上难以计算的部位,通过荷载试验可达到直接了解其受力状态的目的;通过荷载试验常常有助于发现在一般性检查中难以发现的隐蔽病害;通过荷载试验可以检验桥梁结构的设计与施工质量;通过荷载试验可以确定旧桥结构实际的承载能力,为制定桥梁加固或改建技术方案提供依据。此外,通过对新建桥梁结构的竣工荷载试验以及针对性很强的研究性试验,则可为发展桥梁设计理论和提高施工工艺水平,不断地

积累技术数据并提供科学依据。

桥梁荷载试验是新型桥梁结构性能研究、各类桥梁施工质量与结构承载能力评定工作的重要手段,普及桥梁荷载试验技术,搞好试验工作并作出桥梁结构性能的正确评定,对于推动我国桥梁建设,提高桥梁工程质量,挖掘服役桥梁承载潜能,都具有十分重要的意义。

1.3 荷载试验的任务

桥梁荷载试验的任务是根据试验目的和要求来确定的。一般地说,桥梁荷载试验的主要任务是:

1. 确定桥梁结构的承载能力及营运条件

(1)对于重要的桥梁结构,除在设计阶段即进行必要项目的试验研究外,通常在桥梁建成竣工后,通过荷载试验来鉴定桥梁结构的质量和营运条件,分析判断桥梁的实际承载能力。

(2)对于需改建或加固的桥梁,通过荷载试验可进一步提供桥梁改造技术依据,尤其对于缺少技术资料的旧桥更为重要。

(3)对于新型桥梁及运用新材料、新工艺等的复杂桥梁结构,通过系统的荷载试验,可以了解和掌握结构在荷载作用下的实际受力状态,验证结构计算图式,并探索具有普遍意义的规律,为充实和发展桥梁结构的计算理论和施工工艺积累科学资料。

2. 分析桥梁病害原因及其变化规律

对于遭受到洪水、冰冻、地震、撞击、河床挖坑或冲刷而损伤的桥梁结构,或在桥梁建造或使用期间发现有严重缺陷,如过大的变形或裂缝等,常通过桥梁荷载试验进行综合分析研究,提出合理的整治方案和养护措施。

3. 检验桥梁结构的内在质量

对新型桥梁或加固、改建桥梁进行竣工验收鉴定,以对桥梁结构整体受力性能是否达到设计文件和规范标准的要求作出评价,检验预期的设计效果。

1.4 荷载试验的内容和依据

根据试验荷载的作用性质,桥梁荷载试验可分为静载试验和动载试验。

桥梁结构的静载试验和动载试验,虽然在试验目的和内容上都很不相同,但对承受以车辆荷载为主的桥梁结构来说,这两种性质的荷载试验对于全面分析和了解桥梁结构的工作状态是同样重要的。静载试验可在结构上布置较多的测点,便于更全面的分析结构的受力情况。动载试验则是研究分析桥梁结构在车辆荷载或其他动力荷载作用下的振动特性所必须的。

在桥梁动载试验中,按作用方式可将动力荷载分为冲击荷载、振动荷载和制动荷载。在试验中可根据试验的具体要求来选择荷载方式。

目前,在桥梁设计实践中,对于车辆荷载所产生的动力作用的影响,采用了在结构静力计算的基础上引入活载冲击系数的方法来考虑。以跨长或加载长度作为参数的冲击系数是一个概括了多种影响因素的综合性技术指标。冲击系数的数值范围一般是通过桥梁动载试验,并

经综合分析研究确定的。

1. 荷载试验的主要内容

桥梁的荷载试验是一项复杂而细致的工作,技术含量高,应根据荷载试验的目的进行认真的调查分析,必要时进行相关理论分析。荷载试验的主要内容为:

- (1)荷载试验的方案拟定(包括静载试验与动载试验测试项目);
- (2)荷载试验的测点设置与测试仪器、设备组配;
- (3)荷载试验的加载等级控制与试验过程安全控制;
- (4)试验数据分析与结构性能评定;
- (5)试验报告编写。

2. 荷载试验的依据

公路桥梁荷载试验应以国家和交通部颁布的有关公路桥涵的法规、技术标准、设计规范为依据进行,对于某些新结构以及采用新材料、新工艺的桥梁,无相关条款规定时,可以借鉴国外或国内其他行业的相关规范、规程的有关规定。我国结构工程的标准和规范可以分为:

(1)综合基础标准,如《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—92),是指导制定专业基础标准的国家统一标准。

(2)专业基础标准,如《公路工程技术标准》(JTJ 001—97)、《公路工程可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999),是指导专业通用标准和专业专用标准的行业统一标准。

(3)专业通用标准。

(4)专业专用标准。

公路桥梁荷载试验主要涉及的专业通用标准和专业专用标准有:

专业通用标准:

公路桥涵设计通用规范(JTJ 021—89)

公路砖石及混凝土桥涵设计规范(JTJ 022—85)

公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTJ 023—85)

公路桥涵地基与基础设计规范(JTJ 024—85)

公路桥涵钢结构及木结构设计规范(JTJ 025—86)

公路工程抗震设计规范(JTJ 004—89)

公路工程质量检验评定标准(JTJ 071—98)

公路旧桥承载能力鉴定方法(试行)(1988)

专业专用标准:

公路斜拉桥设计规范(试行)(JTJ 027—96)

公路悬索桥设计规范(正在制定)

大跨径公路桥梁抗风设计规范(正在制定)

大跨径公路桥梁抗震设计规范(正在制定)

需要说明的是,上述专业通用标准和专业专用标准有的正在修订之中,进行荷载试验时应按新颁布的标准执行。

1.5 荷载试验的预备工作

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、分析总结阶段。

计划与准备阶段的工作是顺利地进行桥梁荷载试验的必要条件。桥梁荷载试验与桥梁设计和工程施工的关系十分密切,现代桥梁工程技术对试验技术和试验计划与组织工作提出了更高的要求,因此,这一阶段的工作是大量而细致的。实践证明,整个试验工作的成败在很大程度上取决于试验前的准备工作。

计划与准备阶段的工作内容主要有: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的环境条件,拟定试验方案及试验程序,确定试验组织及人员组成,测试系统的构成,仪器的组配及标定,必要的器材准备等工作。

荷载试验正式进行之前应做好下列准备工作:

1. 试验孔(或墩、塔)的选择

对多孔桥梁中跨径相同的桥孔(或墩、塔)可选 1~3 孔具有代表性的桥孔(或墩、塔)进行加载试验。选择时应综合考虑以下因素:

- (1)该孔(或墩、塔)计算受力最不利;
- (2)该孔(或墩、塔)施工质量较差、缺陷较多或病害较严重;
- (3)该孔(或墩、塔)便于搭设脚手架,便于设置测点或便于实施加载。

选择试验孔的工作应与制定计划前的调查工作结合进行。

2. 搭设脚手架和测试支架

脚手架和测试支架应分开搭设互不影响,脚手架和测试支架应有足够的强度、刚度和稳定性。脚手架要保证工作人员的安全,方便操作。测试支架要满足仪表安装的需要,不因自身变形影响测试的精度,同时还应保证试验时不受车辆和行人的干扰。脚手架和测试支架设置要因地制宜、就地取材、便于塔设和拆卸,一般采用木支架或建筑钢管支架。当桥下净空较大或为深水河流而不便搭设固定脚手架时,可考虑采用轻便活动吊架,两端用尼龙绳或细钢丝绳固定在栏杆或人行道缘石上。整套设置使用前应进行试验以确保安全,活动吊架如需多次使用可做成拼装式以便运输和存放。

目前国内部分地区已拥有桥梁专用检测车,其突出特点是快速、灵活、方便、安全,可作为桥梁荷载试验移动脚手架使用。

晴天或多云天气下进行荷载试验时,阳光直射下的应变测点应设置遮挡阳光的设施,以减小温度变化造成的测试误差。雨季进行荷载试验时,则应准备仪器、设备等的防雨设施,以备不时之需。

桥下或桥头用活动房或帐篷搭设临时实验室,安放数据采集仪器等,并供测试人员临时办公和看管设备之用。

3. 静载试验加载位置的放样和卸载位置的安排

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。如加载工况

较少、时间允许,可在每次工况加载前临时放样。如加载工况较多,则应预先放样,且用不同颜色的标志区别不同加载工况时的荷载位置。如试验荷载采用载重汽车,一般以汽车后轴或中轴控制荷载位置。

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、塔)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,也可将荷载停放在桥孔上,但一般应停放在距试验孔较远处,以不影响试验测试为度。

4. 试验人员组织及分工

桥梁荷载试验是一项技术性较强的工作,最好能由专门的桥梁试验技术人员来承担,也可由熟悉这项工作的技术人员为骨干组织试验队伍来承担。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运用所分管的仪器设备,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桥梁荷载试验的规模等具体情况考虑。

5. 其他准备工作

荷载试验的安全设施、供电照明设施、通讯联络设施、桥面交通管制等工作应根据荷载试验的需要提前进行准备。

如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,按试验要求对车辆型号、轴距和轴重力等参数进行测试并记录。

第 2 章 静载试验方法

2.1 试验荷载工况的确定

为了满足鉴定桥梁承载力的要求,试验荷载工况的选择应反映桥梁结构的最不利受力状态,简单结构可选 1~2 个工况,复杂结构可适当多选几个工况,但不宜过多。在进行各荷载工况布置时,可参照截面内力(或变形)影响线进行,一般设两三个主要荷载工况,同时可根据试验桥梁结构体系的具体情况再设若干个附加荷载工况,但主要荷载工况必须保证。下面给出常见桥型的试验荷载工况。

1. 简支梁桥试验荷载工况

(1) 主要工况

跨中最大正弯矩工况。

(2) 附加工况

$l/4$ 截面最大正弯矩工况;

支点最大剪力工况;

桥墩最大竖向反力工况。

2. 连续梁桥试验荷载工况

(1) 主要工况

主跨支点最大负弯矩工况;

主跨跨中最大正弯矩工况。

(2) 附加工况

边跨最大正弯矩工况;

主跨桥墩最大竖向反力工况;

主跨支点最大剪力工况。

3. 悬臂梁桥(T形刚构桥)试验荷载工况

(1) 主要工况

墩顶支点最大负弯矩工况;

锚固孔跨中最大正弯矩工况。

(2) 附加工况

墩顶支点最大剪力工况;

挂孔跨中最大正弯矩工况;

桥墩最大竖向反力工况。

4. 连续刚构桥试验荷载工况

(1) 主要工况

主跨墩顶最大负弯矩工况；

主跨跨中最大正弯矩工况。

(2) 附加工况

墩顶支点最大剪力工况；

边跨最大正弯矩工况；

桥墩(台)最大反力工况。

5. 无铰拱桥试验荷载工况

(1) 主要工况

拱顶最大正弯矩工况；

拱脚最大负弯矩工况。

(2) 附加工况

拱脚最大水平推力工况；

1/4 截面最大正弯矩和最大负弯矩工况；

1/4 截面正负挠度绝对值之和最大工况。

6. 两铰拱桥试验荷载工况

(1) 主要工况

拱顶最大正弯矩工况；

拱脚最大水平推力工况。

(2) 附加工况

1/4 截面最大正弯矩和最大负弯矩工况；

1/4 截面正负挠度绝对值之和最大工况。

7. 斜拉桥试验荷载工况

(1) 主要工况

主梁中孔跨中最大正弯矩工况；

主梁墩顶支点最大负弯矩工况；

主塔塔顶纵桥向最大水平变位与塔脚截面最大弯矩工况。

(2) 附加工况

中孔跨中附近拉索最大拉力工况；

主梁最大挠度工况；

辅助墩最大竖向反力工况。

8. 悬索桥试验荷载工况

(1) 主要工况

加劲梁跨中最大正弯矩工况；

加劲梁 $l/8$ 截面最大正弯矩工况；
主塔塔顶纵桥向最大水平变位与塔脚截面最大弯矩工况。

(2) 附加工况

加劲梁最大竖向挠度工况；
主缆锚跨索股最大张力工况；
加劲梁梁端最大纵向漂移工况；
吊杆(索)活载张力最大增量工况。

9. 组合体系桥试验荷载工况

(1) 主要工况

根据组合体系所呈现的主要力学特征,结合上述各类桥梁主要工况综合确定。

(2) 附加工况

根据组合体系所呈现的主要力学特征,结合上述各类桥梁附加工况综合确定。

此外,对桥梁施工中的薄弱截面或缺陷修补后的截面,或者旧桥结构损坏部位、比较薄弱的桥面结构,可以专门进行荷载工况设计,以检验该部位或截面对结构整体性能的影响。

对于梁式结构(简支梁、连续梁、T 构、连续刚构等)的最大挠度工况,一般与最大正弯矩工况相同。

使用车辆加载而又未安排动载试验项目时,可在静载试验项目结束后,将加载车辆(多辆车则相应地进行排列)沿桥长慢速行驶一趟,以全面了解荷载作用于桥面不同部位时结构的承载状况。

2.2 试验荷载等级的确定

1. 控制荷载的确定

为了保证荷载试验的效果,必须先确定试验的控制荷载。控制桥梁设计的活荷载有下列几种:

- (1) 汽车和人群(标准计算荷载);
- (2) 挂车或履带车(标准验算荷载);
- (3) 需通行的特殊重型车辆。

分别计算设计时所采用的控制荷载或由试验目的所决定的荷载对结构控制截面产生的内力(或变形)的最不利值并进行比较,取其中最不利者对应的荷载作为控制荷载。

荷载试验应尽量采用与控制荷载相同的荷载,而组成控制荷载(标准设计荷载)的车辆是由运管车辆统计而得的概率模型。当客观条件所限,采用的试验荷载与控制荷载有差别时,为保证试验效果,在选择试验荷载的大小和加载位置时采用静载试验效率 η_q 进行控制。

2. 静载试验效率

静载试验效率为:

$$\eta_q = \frac{S_s}{S} \quad (2-2-1)$$

式中: S_s ——静载试验荷载作用下控制截面内力计算值;

S ——计入冲击系数 $(1 + \mu)$ 的控制荷载作用下控制截面最不利内力计算值;

其中： μ ——按规范采用的冲击系数，平板挂车、履带车和重型车辆取 $\mu = 0$ 。

η_q 值可采用 0.8 ~ 1.05，当桥梁的调查、检算工作比较完善而又受加载设备能力所限， η_q 值可采用低限；当桥梁的调查、检算工作不充分，尤其是缺乏桥梁计算资料时， η_q 值应采用高限。总之，应根据前期工作的具体情况来确定 η_q ，一般情况下 η_q 值不宜小于 0.95。

荷载试验宜选择在温度稳定的季节和天气条件下进行。当温度变化对桥梁结构内力的影响较大时，应选择温度内力较不利的季节进行荷载试验，否则应考虑用适当增大静载试验效率 η_q 来弥补温度影响对结构控制截面产生的不利内力。

当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，可适当增大静载试验效率 η_q 。

2.3 加载方式及设备的选择

1. 静载加载分级与控制

为了加载安全和了解结构应变和变位随试验荷载增加的变化关系，对桥梁荷载试验各主要工况的加载应分级进行，而且一般安排在开始的几个加载程序中执行。附加工况一般只设置最大内力加载程序。

1) 分级控制的原则

(1) 当加载分级较为方便时，可按最大控制截面内力荷载工况均分为 4 ~ 5 级。

(2) 当使用载重车加载，车辆称重有困难时也可分成 3 级加载。

(3) 当桥梁的调查和验算工作不充分，或桥况较差，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，车辆荷载应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载位置前分次对控制测点进行读数监控，以确保试验安全。

(4) 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。

(5) 根据具体条件决定分级加载的方法，最好每级加载后卸载，也可逐级加载达到最大荷载后逐级卸载。

2) 车辆荷载加载分级的方法

(1) 逐渐增加加载车辆数。

(2) 先上轻车后上重车。

(3) 加载车位于内力影响线的不同部位。

(4) 加载车分次装载重物。

以上各法亦可综合采用，以方便加载分级实施。

3) 加卸载的时间选择

为了减少温度变化对试验造成的影响，加载试验时间以 22:00 至早晨 6:00 为宜，尤其是采用重物直接加载，加卸载周期比较长的情况下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 20min。

4) 加载分级的计算

根据各荷载工况的加载分级，按弹性阶段计算结构各测点在不同荷载等级下的理论计算

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,如已做材料试验的用实测值,未做材料试验的可按规范规定取值。

2. 加载设备的选择

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:

(1) 可行式车辆。

可选用装载重物的汽车或平板车,也可就近利用施工机械车辆。选择装载的重物时,要考虑车厢能否容纳得下,装载是否方便。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。

采用车辆加载优点很多,如便于调运和加载布置,加卸载迅速等。采用汽车荷载既能做静载试验又能做动载试验,这是目前较常采用的一种方法。

(2) 重物直接加载。

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,能按要求分布加载重量,并不使加载设备与桥梁结构共同承载而形成“卸载”现象。

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,因此宜安排在夜间进行试验。

此外,其他一些加载方式也可根据加载要求因地制宜采用。

3. 加载物重力的称量

可根据不同的加载方法和具体条件选用以下方法对所加重物的重力进行称量:

(1) 称重法。

当采用重物直接在桥上加载时,可将重物化整为零称重后按逐级加载要求分堆置放,以便加载取用。

当采用车辆加载时,可将车辆逐轴驶上称重台进行称重。如没有现成可供利用的称重台,可自制专用称重台进行称重。

(2) 体积法。

如采用水箱加载,可通过量测储水体积来换算储水的重力。

(3) 综合计算法。

根据车辆出厂规格确定空车轴重(注意考虑车辆零配件的更换和添减,汽油、水、乘员重力的变化),再根据装载重物的重力及其重心将其分配至各轴。装载物最好采用外形规则的物体整齐码放,或采用松散均匀材料(如砂子等)在车厢内摊铺平整,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。

2.4 测点设置

1. 主要测点的布设

布设的测点不宜过多,但要保证观测质量。有条件时,同一测点可用不同的测试方法进行

校对。一般情况下,对主要测点的布设应能控制结构的最大应力(应变)和最大挠度(或位移)。几种常用桥梁体系的主要测点布设如下:

(1)简支梁桥

跨中挠度,支点沉降,跨中截面应变。

(2)连续梁桥

跨中挠度,支点沉降,跨中和支点截面应变。

(3)悬臂梁桥(T形刚构桥)

悬臂端部挠度,支点沉降,支点截面应变。

(4)无铰拱桥

跨中与 $l/4$ 处挠度,拱顶、 $l/4$ 和拱脚截面应变。

(5)斜拉桥

主梁中孔跨中挠度,支点沉降,跨中截面应变;塔顶纵桥向最大水平位移,塔脚截面应变。

(6)悬索桥

加劲梁跨中与 $l/8$ 和 $3l/8$ 处挠度,支点沉降,跨中与 $l/8$ 和 $3l/8$ 处截面应变;塔顶纵桥向最大水平位移,塔脚截面应变。

(7)组合体系桥

根据组合体系所呈现的主要力学特征,结合上述各类桥梁的主要测点布设综合确定测点位置。

挠度(变位)观测点,对于整体式梁桥,一般对称于桥中轴线布设,截面设单点时,布置在桥中轴线上,截面设双点时,布置在梁底或梁顶面两侧,其横向间距尽可能大一些;对于多梁式桥,可在每梁底布置一个或两个测点;对于索塔,一般布置在索塔纵桥向对称面相应位置。截面抗弯应变测点应设置在截面横桥向应力可能分布较大的部位,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。

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可能产生的裂缝对观测的影响,测点的位置应合理进行选择。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。

2. 附加测点的布设

根据桥梁调查和检算工作的深度,综合考虑结构特点和桥梁目前状况等可适当加设以下测点:

- (1)挠度沿桥长或沿控制截面桥宽方向分布;
- (2)应变沿控制截面桥宽方向分布;
- (3)应变沿截面高度分布;
- (4)组合构件的结合面上、下缘应变;
- (5)墩台的沉降、水平位移与转角,连拱桥多个墩台的水平位移;
- (6)剪切应变;
- (7)其他结构薄弱部位的应变;
- (8)裂缝的监测。

一般应实测控制截面的横向应力增大系数。当结构横向联系构件质量较差,连接较弱时,则必须测定控制截面的横向应力增大系数。简支梁跨中截面横向应力增大系数的测定,既可