



高等学校**应用型本科**规划教材

工程结构检测技术

主 编 刘培文
副主编 赵卫平
主 审 王宗纲



人民交通出版社
China Communications Press

高等学校应用型本科规划教材

Gongcheng Jiegou jiance Jishu
工程结构检测技术

刘培文 主 编
赵卫平 副主编
王宗纲 主 审

人 民 交 通 出 版 社

前 言

工程结构检测技术是一门涉及学科多,实践性强的专业课。它以真实结构为对象,通过试验检测对结构做出技术鉴定结论,为结构物的竣工验收、改建扩建、维修加固等提供科学的依据。随着新结构、新材料、新工艺的不断涌现,工程结构的试验技术不断完善。结构检测是对原型结构或模型结构直接进行的科学试验工作,包括试验准备、理论计算、现场试验、分析整理等内容的一系列工作。结构原型试验也称之为结构检测,其目的是通过试验,掌握结构在试验荷载作用下的实际工作状态,判定结构的承载力和使用条件,检验设计与施工质量;结构模型试验的目的是研究结构的受力行为,探索结构应力、应变的内在规律等。

本教材共分八章及一个附录,包括静载试验检测技术、动载试验检测技术、超声波检测技术、混凝土强度无损检测技术、桩基动力检测技术、路基路面试验检测技术、电子显微能谱分析技术、工程结构检测实施细则。本教材第一、二、三章由交通运输部管理干部学院刘培文教授编写;第四章由辽宁交通高等专科学校刘存柱教授编写;第五章由内蒙古大学赵卫平教授编写;第六章由内蒙古大学赵卫平教授、交通运输部管理干部学院闫光杰副教授共同编写,第七章由交通运输部管理干部学院邢凤岐副教授编写;第八章由交通运输部管理干部学院罗洪权副教授编写,附录由内蒙古大学贾玉辉副教授编写。全书由刘培文主编,清华大学王宗纲教授主审。

由于作者水平有限,加之时间紧迫,书中疏漏乃至错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2011年8月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 结构检测技术研究对象和任务	1
第二节 结构试验检测的类型	4
第三节 结构检测技术研究内容	6
第二章 静载试验检测技术	10
第一节 静载试验的加载设备	10
第二节 静载试验的量测设备	15
第三节 试验荷载和加载方式	35
第四节 静载试验的基本方法	38
第五节 试验资料的整理	45
第三章 动载试验检测技术	52
第一节 振动测试物理基础	52
第二节 结构激振方法与拾振器布置	71
第三节 测试仪器设备	76
第四节 模态参数测试	112
第五节 结构动力特性测定与实验数据整理	115
第四章 超声波检测技术	122
第一节 超声波检测物理基础	122
第二节 超声波检测仪器与通用技术	147
第三节 混凝土超声检测设备	161
第四节 超声法检测混凝土强度	176
第五节 超声法检测混凝土缺陷	183
第五章 混凝土强度无损检测技术	206
第一节 回弹法	207
第二节 拔出法	219
第三节 钻芯法	223
第六章 桩基动力检测技术	229
第一节 桩基动力检测物理基础	229
第二节 低应变法测试与分析	237
第三节 高应变法测试与分析	250
第四节 声波透射法测试与分析	260

第七章 路基路面试验检测技术	264
第一节 路基路面间接强度(压实度)试验检测	264
第二节 路基路面整体强度(回弹弯沉)试验检测	279
第三节 路基路面设计强度(回弹模量)试验检测	285
第四节 路面面层使用品质(平整度和抗滑性)试验检测	291
第五节 路面施工尺寸(厚度与横坡)试验检测	309
第六节 沥青路面渗水性能检测.....	313
第七节 沥青路面耐久性(车辙)试验检测	315
第八节 路基路面最弱强度(CBR 值)现场测试技术	318
第九节 路基路面自动化测试技术.....	322
第八章 电子显微能谱分析技术	341
第一节 能谱分析物理基础.....	341
第二节 透射电子显微镜.....	347
第三节 扫描电子显微镜.....	364
第四节 能谱仪(电子探针)X 射线显微分析	371
附录 工程结构检测实施细则	377
第一节 静载试验实施细则.....	377
第二节 动载试验实施细则.....	381
第三节 超声法测试桩基完整性和混凝土裂缝及缺陷实施细则.....	383
第四节 应变法桩基检测实施细则.....	388
第五节 钢结构及其联结件无损检测实施细则.....	394
第六节 混凝土内钢筋锈蚀测试实施细则.....	396
第七节 混凝土电阻率和氯离子含量检测实施细则.....	398
第八节 频率法测试斜拉索索力实施细则.....	399
第九节 隧道结构检测实施细则.....	401
第十节 工程环境检测实施细则.....	405
参考文献	408

第一章 绪 论

第一节 结构检测技术研究对象和任务

一、结构检测技术研究对象

工程结构检测是分析工程质量、进行科学研究、出台相关规范、制定质量标准以及质量事故调查的重要手段之一。道路与桥梁以及隧道工程施工中的检测,一般包括工程所用材料与混合料、工程施工中和完工后的结构实体、工程所处的环境和介质的检测。结构检测不仅仅是研究成品结构实体的检测,有时还要分析单个实体原材料的性能和内部结构,包括天然材料和人工合成材料。

随着检测技术的进一步提高,除用直接方法测定材料或结构的技术性质(如钻芯取样试验等)外,还可用间接方法测定其内在质量,如电镜和电子探针检测、静载和动载检测、超声波检测、核子检测等。

结构试验是检测材料和实体结构内在质量的一种直接或间接的手段,亦是结构检测技术研究的内容之一。结构试验的种类很多,按照试验的目的与要求分类,可分为科学研究性试验和生产鉴定性试验。

我们知道,土木工程材料不外乎钢材、水泥、木材、石灰、沥青、石材、砂石料和黏土等。在专业上,根据构造或构件的作用性质不同,可分为单体材料、集料和结合料。单体材料也叫个体材料,是指相对来说体积比较大的单个材料,如块状石料、砖等;集料是颗粒状的松散材料,一般情况下不能单独使用,必须辅以其他材料把它们胶结为一个整体,根据集料的颗粒大小,可分为粗集料和细集料;结合料是能够把松散材料联结为一个整体的材料。根据它们的化学成分可分为无机结合料和有机结合料。结合料又可称为胶凝材料或胶结材料,由于本身的物理化学作用,能将松散材料如碎石、砂等联结为一个整体结构。有机结合料是碳氢化合物及其非金属衍生物的混合物;无机结合料是矿物质材料,其按照硬化条件可分为气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料。气硬性胶凝材料只能在空气中硬化,也只能在空气中保持强度或继续提高强度。由于气硬性胶凝材料在水中不能硬化,因此适用于地面上干燥环境中的建筑物。道路工程最常用的气硬性胶凝材料是石灰。水硬性胶凝材料,既可以在空气中硬化,也可以在水中硬化,并且能在水中保持强度和继续提高强度。建筑过程中最常用的水硬性胶凝材料是水泥。应该强调的是,水硬性胶凝材料在水中比在空气中硬化强度要高,因此,对水泥制成品要进行一定时间的洒水养护,否则,会使其制品强度降低或影响其制品的工程性质。使用无机结合料时,必须要加水拌和才能发生一系列的物理化学作用,从而使其具有胶凝性。而由各种材料和混合料形成的实体结构,除结构本身的性能外,同样具备组成结构的原材料的某些特征,利用这个道理可作结构检测分析。

二、材料与结构的常规检测与现代检测

(一) 材料与结构的常规试验检测

材料与结构的常规试验检测中有两大问题:首先,原材料的检测问题。检测方法有传统直接的物理力学试验和现代间接的结构检测技术。物理力学试验,大多数是研究原材料和混合料的选择和评定问题。由于材料是控制工程内在质量的关键因素之一,不同的工程结构对选择原材料的要求并不相同,因此,要对料场材料进行相关的试验,才能确定原材料的可用性,具体试验项目的种类,要根据有关的规范、规程来确定。这里有些试验基本上是根据划分这种材质质量等级或标号所使用的规范和规程赋予的技术指标项目之基础上而规定的。如水泥是依据胶砂抗压、抗折、标准稠度用水量、安定性、细度等指标来划分其强度等级,故试验项目不外乎是上述的指标。如某工程使用强度等级为 C50 的水泥混凝土,而相应的水泥强度等级至少要 62.5 级,则应在所述试验基础上对照国标看出厂的水泥是否达到 62.5 级的要求,如果达到则可以使用;否则,不宜使用。类似这样的问题还有沥青路面施工中的沥青原材料的标号选择等,都是对照划分标号或质量等级的规范或标准来对应试验划分依据的项目,然后从中抉择其可用性。其次,由各原材料组成的实体结构物,在修筑前后的一些试验。例如,钢筋混凝土工程的混凝土混合料修筑前要进行混凝土的配合比设计,这个配合比包括理论配合比、试验配合比和施工配合比。目前理论配合比的计算方法有绝对体积法和假定容重法两种,理论配合比计算前,除对原材料进行必要的试验,如碎石的压碎值、筛分,砂的坚固性、筛分等试验以及水泥的胶砂抗压、抗折、标准稠度用水量、安定性、细度等试验以及外加剂的一些试验外,还要对由以上材料搅拌而成的混凝土混合料进行试验,如对混合料制成试件养生后进行抗压和抗折试验,以确定该工程使用的混凝土强度等级是否达到设计的要求。此外,混合料在浇筑前,要进行可模性、黏聚性、保水性等试验(即坍落度或工作度试验)。如不进行这些试验,虽然可能能够保证混凝土的强度,但在施工中会产生粗、细料分离,模板边角难以填实,入模后继而发生蜂窝、麻面等不良现象。综上所述,可用混凝土抗压、坍落度等试验来间接判断实体钢筋混凝土工程的内在质量(强度)。试验检测的原材料试验有一个取样的过程,取样又包括自然随机取样和压密制样。自然取样通常都用四分法取自自然状态下的试样,如砂、石子、土等;压密制样是指取样后再经过捣实成圆柱体或立方体的规则形状,如混凝土试件、击实试验试件、石灰土试验试件等。

上述原材料或试件的常规试验,从专业模块划分已属于工程材料常规试验范围,限于本书篇幅,将不予叙述。本书主要叙述的是以现代测试技术并以无损检测为主的方法。

(二) 材料与结构检测技术实现的途径

材料与结构检测的技术手段可归纳为两类方法:一类是利用化学分析的办法;另一类是利用物理的办法。因为工程用材料和混合料大多重视其物理性质,故常常采用物理力学的试验方法,这类方法可以包括几种:其一,决定分散材料颗粒粗细组成的检测方法。这一类试验通常有土、石子和砂等材料的筛分法,以及粒径小于 0.1mm 的土的比重计法和移液管法,只要是颗粒状的材料,分析其粗细程度都可以用这种方法。其二,决定半固体物质稠度和黏结性的检测方法,如土的塑液限、沥青材料的针入度和水泥的沉入度等试验。这类试验大多是用一定质量的锥或针,在自身的重力下,在规定的时间内,在特定温度下,以插入这种半固体物质的深度表示。其三,对于结构工程的强度、变形、可靠度方面的检测办

法。由于混凝土和圬工结构物用材,往往有一个强度等级(标号)的要求,如混凝土和石料的抗压、抗折试验等用单位面积上承担的力(拉、压、弯、扭的力)来表示,通常要做拉、压、弯、扭试验。其四,利用现代超声波、雷达、核子、光谱等技术基础上的结构检测。即本课程中将要叙述的方法。

从试验仪器的构造机理看,不外乎有以下构造和使用特点:有些压密制件所涉及的仪器,往往对应一定的击实功能,所以仪器制造时,应采用一定的电控设备来控制落锤重力等。这类仪器往往是由电子和机械结合的仪器。

有些试验是测定其变形或压力的;有些则是测定内部缺陷的。传统的变形测定方法有三类:一类是利用应力环结合千分表式;另一类是采用电阻应变片式;再一类是采用电传感器类。测定距离一般用游标式、电子式及表式等。不论是什么样的检测或试验仪器,它们均是由以上所述的原理及相应的各种组件结合而成。试验检测仪器的加压系统,往往采用液压或机械齿轮方式。内部缺陷测定则是借助现代的超声波、地质雷达、激光、计算机等技术来完成,如路面结构检测,钻孔桩的桩基检查,还有金属材料测定等。这类技术多用于测定实体结构的内部宏观和微观结构情况,也是结构检测技术研究的重点。

三、结构检测试验的任务

结构试验是对原型结构或模型结构直接进行的科学试验工作,包括试验准备、理论计算、现场试验、分析整理等内容的一系列工作。结构原型试验也称之为结构检测,其目的是通过试验,掌握结构在试验荷载作用下的实际工作状态,判定结构的承载力和使用条件,检验设计与施工质量;结构模型试验的目的是研究结构的受力行为,探索结构应力、应变的内存规律,为设计和施工服务。随着交通事业的蓬勃发展,新结构、新材料、新工艺的不断涌现,结构工程的试验技术日益受到人们的重视,并不断得到发展和提高。结构试验的任务主要包括以下几个方面。

1. 确定新建结构的承载能力和使用条件

对于重要的结构,在建成竣工后,通过试验考察该结构的施工质量与性能,判定结构的实际承载能力,为竣工验收、投入运营提供科学的依据;对于新型或复杂的结构,通过系统的试验,可以掌握结构在荷载作用下的实际受力状态,探索结构受力行为的一般规律,为充实和发展结构的设计计算理论积累科学的资料。

2. 评估既有结构的使用性能与承载能力

对于既有结构在经营期间,因受水害、地震等自然灾害而损伤,或因设计施工不当而产生严重缺陷,或因使用荷载大幅度增长而严重超过设计荷载等级,通常通过试验来评估既有结构的使用性能与承载能力,为既有结构的养护、加固、改进或限载对策提供科学的依据。

3. 研究结构的受力行为及其一般规律

随着结构工程的不断发展,新结构、新材料、新工艺的推广应用,原有的规范、规程往往不能适应工程实践的要求。为了修改、完善既有的规范、规程,指导设计与施工工作,就需要进行大量的试验。

4. 进行生产鉴定和施工质量事故调查

生产鉴定性试验,一般以原型结构作为试验对象,在现场进行试验,根据一定的规范、标准的要求,按照有关设计文件,通过试验来确定结构的实际承载能力、使用性能和使用条件,检验

设计施工质量,提出结构养护、加固、改建、限载对策,有效地保证结构的安全使用。生产鉴定性试验也称之为结构检测,包括静载试验、动载试验、无损检测与长期监控测试四个方面。在结构试验中,原型试验存在费用高、期限长、测试环境多变等不利的影响因素,如对一些大型结构进行多因素的研究性试验,有时是难以实现的。因此,对原型结构进行模型试验往往成为科技工作者的一种有效工作手段,可以更为方便全面地研究主要影响因素之间的关系,探索结构行为的普遍规律,推动新结构、新材料、新工艺的发展与应用。

第二节 结构试验检测的类型

结构试验检测的类型较多,从方法上来讲,分为静载试验、动载试验和无损检测等;从时间上来看,分为短期试验和长期试验;从进行时期来看,分为结构竣工试验和施工阶段监测控制,等等。下面介绍几种常规的分类方法。

一、按试验检测的用途分类

(一) 研究性试验

研究性试验以科学研究和创造发明为目的,用以验证结构设计计算的各种假定,发展新的设计理论,改进设计计算方法,为发展和推广新结构、新材料及新工艺提供理论与实践的依据。

作为研究性试验对象的试件或试验结构,是专门为研究某种性能而设计制作的,它不一定是具体工程的材料或结构模型,但反映了某类问题的实质。在试验设计时要经过仔细分析,突出研究主要因素而忽略一些次要因素。试件也常常只是具体结构的某一关键性局部构件。研究性试验的试件尺寸一般根据试验的加载设备条件和试验场地的大小而定。不一定和实际结构一样大,而是根据真实结构并按照一定相似关系复制而成的试验代表物,是尺寸比真实结构小得多的缩尺结构。尽管对尺寸效应的问题进行了众多的研究,但是尺寸效应问题仍然是影响结构试验发展的一个主要问题。

研究性试验一般都在有专门设备的试验室内进行。因为在试验室内进行试验可以获得良好的工作条件,可以用精密和灵敏的仪器设备进行试验,具有较高的准确度。甚至可以人为地创造一个理想的工作环境,以减少或消除各种不利因素对试验的影响。在试验室既可以对真实结构,也可以对小尺寸的模型试件进行试验,并可以将试件一直进行到破坏为止。

(二) 鉴定性试验

鉴定性试验以直接服务于生产为目的,以具体工程材料或真实结构为试验鉴定对象,经过试验研究,对这些材料或结构是否符合规范和设计要求,作出正确的技术结论。鉴定性试验常用来解决下述几方面的问题。

1. 鉴定结构的设计和施工效果

对一些重要结构与工程,采用新计算理论、新材料或新工艺的结构与工程,在实际结构建成后,要求通过试验,综合地评估结构的设计和施工质量的可靠程度。

2. 判断拟加固结构的承载能力

对一些在计算理论上没有太大问题的结构,由于一些特殊原因,如对已建结构扩建加层或由于生产需要增加使用荷载而改变其工作条件,以及建筑抗震需要提高抗震烈度而进行加固等,需要通过试验进行性能鉴定。确定这些建筑结构的潜在能力,以便提出技术处理意见。

3. 工程质量评价和事故调查处理

对于建筑物遭受地震、火灾、爆炸等灾害后而受损的结构,或是建筑物在建造和使用过程中发生严重缺陷损坏(如施工质量事故,混凝土强度不足,结构过度变形等)往往需要对这些建筑物进行现场试验,通过试验为正常使用与管理、制订修复或加固方案提供技术依据,了解其实际承载能力,并提出技术处理意见。对在预制构件厂或工地现场成批制造的预制构件,在出厂前或现场吊装前,需要按照最新的质量验收规范对构件进行抽样试验,以推断成批的产品质量。

鉴定性试验是针对某一具体建筑物的问题,而不是寻求普遍规律,试验主要在建筑物现场进行。

4. 评估结构的可靠性和剩余寿命

服役结构随着建造年代和使用时间的增长,结构逐渐出现不同程度的老化现象,有的到了老龄期、退化期和更换期,甚至到了危险期。为了保证服役结构的安全使用,防止结构破坏、倒塌等重大事故的发生,需要通过对现有结构进行观察、检测和分析普查后,按相关标准评定结构的安全等级,由此推断出其可靠性和评估其使用寿命中的剩余期限,即剩余寿命。可靠性鉴定大多数是采用非破损检测的试验方法。

5. 鉴定工程结构所处的自然环境

工程结构与其所处环境息息相关。多数情形下,通常工程环境是指与其伴随的矿物和岩石。掌握它们的特征,运用科学的方法,采用宏观和微观相结合、理论和实践相结合的方法,对它们进行观察、分析、鉴定,找出它们的物理化学特征,测定它们的力学性质,测定它们的生成年代,测量它们的分布规律和储量规模,更好地为工程建设服务。

二、按试验检测对结构的影响分

就试验对结构产生的后果来说,结构试验可分为破坏性试验和非破坏性试验。一般情况下,鉴定性试验多为非破坏性试验。但在某些情况下为了达到预定的试验目的,往往需要进行破坏性试验,以掌握试验结构由弹性阶段进入塑性阶段,甚至破坏阶段时的结构行为、破坏形态等试验资料。实际上,原型结构的破坏试验,不论在费用上还是在方法上都存在一些问题,特别是在结构进入破坏阶段后试验是比较困难的。因此,破坏试验一般均以模型结构为对象,在试验室内进行,以便能够较为方便可行地进行加载、控制、量测和分析,从而总结出具有普遍意义的规律,推广应用于原型结构。

三、按试验持续时间的长短分

按试验持续时间的长短,可分为长期试验和短期试验。鉴定性试验与一般性的研究试验多采用短期试验方法,只有那些必须进行长期观测的现象,如混凝土结构的收缩和徐变性能、基础的沉降等,才采用长期试验方法。此外,对于大型结构或新型结构常常采用长期观测或结构定期的检测,以积累这些结构长期使用性能的资料。

结合具体的试验目的及要求,可选用一种或几种试验方法。在选择时应考虑经济成本,一般能用模型代替的,就做原型试验,通过非破坏性试验可以达到试验目的的,就不做破坏性试验。

四、根据试验荷载作用的性质分

根据试验荷载作用的性质,结构试验可分为静荷载试验和动荷载试验。结构静载试验是将静止的荷载作用在结构上的指定位置,测试结构的静力位移、静力应变、裂缝等参量的试验

项目,从而推断结构在荷载作用下的工作性能及使用能力。动载试验是利用某种激振方法激起结构的振动,测定结构的固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数、行车响应等参量的试验项目,从而判断结构的整体刚度、行车性能。静载试验与动载试验虽然在试验目的、测试内容等方面不同,是两种性质的试验,但掌握这两种试验,有助于全面分析掌握结构的工作性能。

第三节 结构检测技术研究内容

一、结构检测实施的阶段划分

结构检测工作内容多,涉及面广。一般情况下,结构现场检测可分为三个阶段,即准备规划阶段、加载与观测阶段和分析总结阶段。

1. 准备规划阶段

准备规划阶段是结构检测顺利进行的必要条件。该阶段工作包括结构设计文件、施工记录、监理记录、试验资料、结构养护与维护记录等技术资料的收集;结构现状如承重结构构件、支座、基础等部位的表观检查;设计内力计算、加载方案制订、量测方案制订、仪器仪表选用等方面;也包括搭设工作脚手架、设置测量仪表支架、测点放样及表面处理、测试元件布置、测量仪器仪表安装调试等现场准备工作。检测工作的顺利与否很大程度上取决于检测前的准备工作。

2. 加载与观测阶段

加载与观测阶段是整个检测工作的中心环节。这一阶段的工作是在各项准备工作就绪的基础上,按照预定的试验方案与试验程度,利用适宜的加载设备进行加载,运用各种测试仪器,观测试验结构受力后的各项性能指标,如挠度、应变、裂缝宽度、加速度等,并采用人工记录或仪器自动记录手段记录各种观测数据和资料。有时,为了使某一加载、观测方案更为完善,可先进行试探性试验,以便更好地达到原定的试验目的。需要强调的是,对于静载试验,应根据当前所测得的各种技术数据与理论结果进行现场分析比较,以判断受力后结构行为是否正常,是否可以进行下一级加载,以确保试验结构、仪器设备及试验人员的安全,这对于存在病害的既有结构进行试验时尤为重要。

3. 分析总结阶段

分析总结阶段是对原始测试资料进行综合分析的过程。原始测试资料包括大量的观测数据、文字记载和图片等材料,受各种因素的影响,一般显得缺乏条理性与规律性,未必能深刻揭示试验结构的内在行为规律。因此,应对它们进行科学的分析处理,去伪存真、去粗取精,综合分析比较,从中提取有价值的资料。对于一些数据或信号,有时还需按照数理统计的方法进行分析,或依靠专门的分析仪器和分析软件进行分析处理,或按照有关规程的方法进行计算。这一阶段的工作,直接反映整个观测工作的质量。测试数据经分析处理后,按照相关规范、规程以及检测的目的要求,对检测对象作出科学的判断与评价。全部检测工作体现在最后提交的试验研究报告中。

二、结构检测技术研究内容

(一) 电镜和电子探针分析技术

鉴于金属材料在公路建设中的广泛使用,试验检测技术也将仅从宏观的光学显微分析,逐

渐地进入了微观的电子显微分析。微观的电子显微分析通常使用电子显微镜简称为电镜进行。因为电子光束与可见光一样,具有波粒两重性,所以电子束在电子显微镜中,通过电磁透镜聚焦成像。由电子束的波长短确定显微成像的分辨率,可利用投射电子显微镜、扫描电子显微镜和能谱仪(又称电子探针)。

投射电子显微镜的分辨率为 $1.5 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$),放大倍数为几十万倍。特别是电子显微仪器的组合使用,可以获得金属材料在微观尺度上的形貌、成分及结构分析的综合资料。

传统的光学显微镜是用可见光作为光源,而可见光的波长约为 $5000 \text{ \AA}$,根据分辨率的公式,即使采用折射率很高的介质,透镜的数值孔径达到 $1.5 \sim 1.6$,光学显微镜的分辨本领也只达到 $2000 \text{ \AA}$ 的限度。但在实际分析中许多显微组织的形貌尺寸,要想清晰成形,都小于这个限度。例如,其中的退火索氏体在光学显微镜下为球团状的灰色组织,而在电子显微镜下则可以看到细微的层片状特征。基于此,人们利用电镜和电子探针作为分析技术,从金属材料性能判断进入到分析性能产生的原因,进一步寻找和创造新型材料。

(二) 混凝土无损检测技术

混凝土无损检测技术,是在不破坏混凝土内部结构和使用性能的情况下,利用声、光、热、电、磁和射线等方法,测定有关混凝土性能的物理量,推定混凝土的强度、缺陷等的测试技术。混凝土无损检测技术与破坏试验方法相比,具有不破坏结构的构件、不影响其使用性能、可以探测结构内部的缺陷、可以连续测试和重复测试等特点。应用混凝土无损检测技术,可以检测混凝土的强度、弹性模量、裂缝的深度和宽度,可以检查钢筋的直径、位置和保护层厚度,并可以探知混凝土的碳化程度、钢筋的锈蚀程度和混凝土构件的尺寸等参数。混凝土无损检测技术,对于进行施工质量检查与管理,进行既有结构的养护维修管理,评定既有混凝土结构的强度、耐久性 & 损伤程度至关重要。

对于大跨度结构,由于施工周期长,外界因素变化较大,为了确保施工能够准确地实现设计意图,避免一些随机因素如温度、湿度、材料参数、施工误差对结构施工过程和竣工后状态造成过大的影响,就需要在施工过程中对每一施工阶段结构的应力、内力等参数进行实时监测控制,逐阶段与设计目标值进行比较,并预测下一施工阶段这些参量的变化态势,以便必要时修正设计计算参数,采取控制调整措施,以逼近设计目标值,这就是施工控制。施工控制对于大跨度结构的建造具有非常重要的意义。

混凝土结构的一些时效因素如收缩、徐变、基础沉降、温度变化,往往使结构产生附加内力,可能会危及结构的安全。为了能够及时准确地掌握这些时效因素对结构的影响程度,了解这些时效因素对结构影响的变化趋势,就需要在一个相对较长的时期内定期测量结构的应变、内力、裂缝等参量,并对这些参量进行综合分析,以判断结构的实际状态,这类测试称之为长期监控测试。除此之外,对于一些重要结构或新型结构也常常采用定期检测的方法来积累这些结构长期使用性能的资料,以使规范更加完善。

混凝土强度的无损检测方法根据其原理可分为三种。

1. 非破损法

非破损法是以混凝土强度与混凝土某些物理量(如波速、密度等)之间的相关性为基础,测试这些物理量时,不影响混凝土结构或构件的任何性能,然后根据相关关系推算被测混凝土的标准强度换算值,并据此推算出强度标准值的推定值或特征强度。属于这类方法的有回弹性、超声法、超声回弹综合法、射线吸收、散射法、成熟度法等。

2. 半破损法

半破损法以不影响结构或构件的承载能力为前提,在结构或构件上直接进行局部破坏性试验,或直接钻取芯样进行试验,然后根据试验值与混凝土标准强度或标准构件强度的参比物进行比对,按统计方法推算出被测结构实体的强度标准值或特征强度。属于这类方法的有钻芯法、拔出法、拔脱法和板析法。

3. 综合法

综合法是采用两种或两种以上的无损检测方法,获取多种物理参量,并建立强度与多项物理参量的综合相关关系,以便从不同角度综合评价混凝土的强度。

随着科学技术与公路交通建设的发展,对公路建设的网络规划、安全运输提出了更高的要求。特别是金属材料在公路建设中的广泛使用,确定了公路建设使用的材料分析,也从宏观的光学显微分析逐渐地进入了微观的电子显微分析,从材料性能判断进入到分析性能产生的原因,进一步寻找新材料和创造更多新型材料,达到扩大材料使用功能的阶段。

(三) 结构荷载试验检测技术

结构静载试验检测,以结构静载试验的基本理论和基础为契机,借助结构动力特性和动载响应的方式进行常规试验与分析的技术。结构的振动试验涉及的范畴很宽,如模拟地震试验、抗风试验、疲劳试验等。

结构的动力特性(振型、频率和阻尼比)是结构承载力评定的重要参数,同时也是识别结构工作性能和结构抗震分析的重要参数。

结构振动问题涉及振源(输入)、结构(系统)和响应(输出)。在结构振动的输入、系统和输出中,知其中两者可以求第三者,所以结构的动载试验可以划分为三类基本问题:其一是测定动荷载的动力特性,即引起结构产生振动的作用力数值、方向、频率和作用规律;其二是测定结构的动力特性,即结构或构件的自振频率、阻尼比、振型等结构模态参数等;其三是测定结构在动荷载作用下的强迫振动响应,即结构动位移、动应力、冲击系数等。

(四) 混凝土超声波检测技术

混凝土超声检测目前主要是采用“穿透法”,其基本原理是用一发射换能器重复发射一定频率的超声脉冲波,让超声波在所检测的混凝土中传播,然后由接收换能器将信号传递给超声仪,由超声仪测量接收到的超声波信号的各种声学参数,并转化为电信号显示在示波屏上。研究表明:在混凝土中传播的超声波的波速、振幅、频率和波形等波动参数与所测混凝土的力学参数,如弹性模量、泊松比、剪切模量以及内部应力分布状态有直接的关系,也与混凝土内部缺陷如断裂面、孔洞的大小及形状的分布有关。因此,当超声波在混凝土中传播后,它携带了有关混凝土的材料性能、内部结构及其组成的信息,准确测定这些声学参数的大小及变化,可以推断混凝土的强度和内部缺陷等情况。

相对单一物理量的超声波检测技术,综合采用多项物理参数,能较全面地反映构成混凝土强度的各种因素,并且还能抵消部分影响强度与物理量相关关系,因而它比单一物理量的无损检测方法具有更高的准确性和可靠性。目前已被采用的综合法有超声回弹综合法、超声钻芯综合法、声速衰减综合法等。

(五) 桩基动力检测技术

桩基的承载力和完整性检测是桩基质量检测中的两项重要内容,按具体检测项目的方式,宏观上可以分为以下三种检测方法。

1. 直接法

直接法是通过现场原型试验直接获得检测项目结果或为施工验收提供依据的检测方法。在桩身完整性检测方面主要是钻孔取芯法,即直接从桩身混凝土中钻取芯样,以测定桩身混凝土的质量和强度,检查桩底沉渣和持力层情况,并测定桩长。

2. 半直接法

半直接法是指在现场原型试验基础上,同时基于一些理论假设和工程实践经验并加以综合分析,才能最终获得检测项目结果的检测方法。

3. 间接法

间接法依赖直接法已取得的试验成果,结合土的物理力学试验或原位测试数据,通过统计分析,以一定的计算模型给出经验公式或半理论、半经验公式的估算方法。

(六) 路基路面检测技术

路基路面结构检测主要是外形质量检测和内在质量检测两个方面。路基路面试验检测通常采用机械和物理的方法,同时也有地质雷达测试技术等新型技术方法。

路面的破坏有结构内部破坏和表面功能性破坏两类。结构内部的破坏主要表征为材料或结构抵抗变形的能力不足引起的,故目前表征路面整体强度高低的办法有两种:一种是一定荷载下的变形;另一种是一定变形下的荷载。前者的试验方法就是通常所用的弯沉试验等相关方法;后者的试验方法就是通常的 CBR 法试验等相关方法。因为,结构的强度在一定程度上取决于其密实度大小,故施工中的压实度试验就是间接测定路基路面结构层强度的一种方法。

综上所述,结构检测是一门直接服务于工程实践的技术学科,涉及结构的设计计算理论、试验测试技术、仪器仪表性能、自动数控技术、数理统计分析、现场试验组织等方面,具有较强的综合性、应用性和复杂性。进入 21 世纪以来,随着结构工程的飞速发展,新结构、新材料、新工艺的不断涌现,结构荷载的不断增大,以及大批既有结构进入老化期,因此结构检测工作就越显重要,并对其提出了更高、更全面的要求;同时,随着自动化技术的不断发展及计算机的普及应用,使得测试技术、分析手段也取得了长足的进步。总之,结构检测将进一步推动结构技术的蓬勃发展,为确保结构安全、进行科学维护起到更加重要的作用。

第二章 静载试验检测技术

结构静载试验是用物理力学方法,测定所研究的结构在静荷载作用下的反应,从而分析、判定结构的实际应力分布和工作状态,了解结构构件实际所具有的强度和安全储备,以及刚度、抗裂性能等。

结构静载试验的项目是多种多样的,在实际工作中,根据不同的试验目的,结构静载试验一般分为科学研究性试验(简称研究性试验)和生产鉴定性试验(简称鉴定性试验)两大类。

本章以结构静载试验的基本理论和基础知识为重点,主要阐述预制混凝土构件的检验性试验方法。

第一节 静载试验的加载设备

一、设备要求与堆载方式

(一) 设备要求

结构静载试验,除少数在实际荷载下实测之外,绝大多数是在模拟荷载作用下进行。由于试验的目的不同,对加载设备的要求也不一样,产生模拟荷载的方法可以很多,但无论采用何种方法,加载设备必须满足以下基本要求:

(1) 等效原则。试验荷载的作用,应符合实际荷载作用的传递方式,能使被试验结构、构件再现其实际工作状态的边界条件,使截面或部位产生的内力与设计计算等效。

(2) 稳定加载。产生的荷载值应当明确,满足试验的准确度,除模拟动力作用之外,荷载值应能保持相对稳定,不会随时间、环境条件的改变和结构的变形而变化。保证荷载量的相对误差不超过 5%。

(3) 设备可靠。加载设备本身应有足够的强度和刚度,并有足够的储备,保证使用安全可靠;加载设备不应参与结构工作,以致改变结构的受力状态或使结构产生次应力;应能方便调节和分级加(卸)载速率,分级值应能满足精度要求。

(4) 推陈出新。尽量采用先进技术,满足自动化的要求,减轻劳动强度,方便加载,提高试验效率和质量。

加载设备种类很多,有重物、液压、气压、机械和电液伺服加载系统以及和它们相配合的各种试验装置等。下面重点介绍重物、液压、电液伺服加载系统。

(二) 堆载方式

静载试验前要预先堆载,然后采用液压或机械千斤顶逐级加载。堆载方式常用重物荷载。例如,铁块、混凝土块、砖、水、砂石甚至废构件等;有时也采用地锚桩替代堆载。

重物可以有规则地放置于结构上,作为均布荷载,如图 2-1 所示;也可以通过荷载盘、水箱、木箱、纤维袋、铁锭、石块和杠杆等加集中荷载或改变作用方向,如图 2-2 所示。

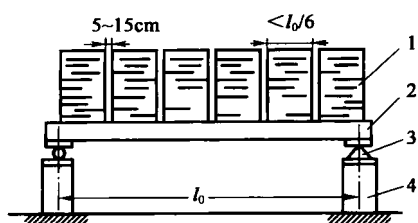


图 2-1 重物加均布荷载

1-重物;2-试验板;3-支座;4-支墩

杠杆应具有足够刚度,杠杆比一般不宜大于 5。3 个支点应在同一直线上,避免杠杆放大比例失真,保证荷载稳定、准确。现场试验,杠杆反力支点可用重物、桩基础、墙洞或反弯梁等支承。

当施加均布荷载时,可借助水来施加,通过水的高度计算、控制荷载值,如图 2-3 所示。当结构变形大时,应注意水荷载的不均匀所产生的影响。

用重物荷载进行破坏试验时,应特别注意在试验过程中的安全,一般在试件底部或荷载盘底下,应加可调节的托架或垫块,并随时与试件或盘底保持 5cm 左右间隙,以备破坏时托住,防止倒塌造成事故。

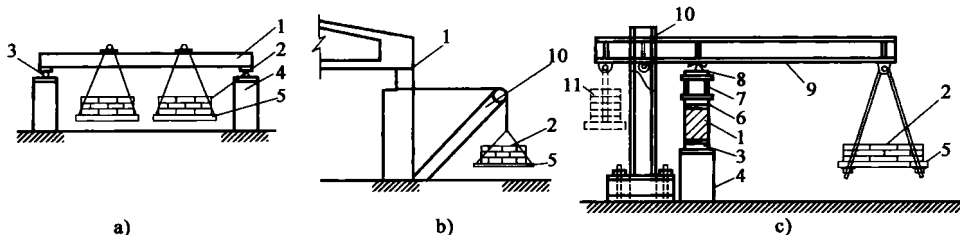


图 2-2 重物加集中荷载

1-试件;2-重物;3-支座;4-支墩;5-荷载盘;6-分配梁支座;7-分配梁;8-加载支点;9-杠杆;10-荷载支架;11-杠杆平衡重

二、加压系统

(一) 液压加载系统

液压加载系统是结构试验中最常用的加载设备,主要用油管将油箱、油泵、阀门、液压加载器等连接起来,配以测力计和支撑机构组成。为方便操作,还常把阀门、测力计等组装在一个控制柜内。图 2-4 所示即为一个常用垂直荷载的单点液压加载装置形式。

若在油泵出口接上分油器,可组成一个油源供多个加载器同步工作系统,适应多点同步加载要求。分油器出口再接上减压阀,则可组成同步异荷加载系统,满足多点同步异荷加载需要。图 2-5 为同步液压加载系统组成原理图。

油泵压力应与整个系统相适应,容量及流量分别满足加载器总油量和加载速率的要求。

加载器常用的有两种,双油路加载器和间隙密封加载器,如图 2-6 所示。同一系统的加载器要规格一致,活塞与缸体摩阻力相同,放置高差不超过 5m,才能保证荷载同步。加载器最大加载能力和行程宜分别大于试验荷载和加载点可能产生的位移量。普通千斤顶也可用于单点或多点非同步加载,但使用手摇千斤顶时不可倒挂安置。

荷载值可用测力计、荷载传感器或压力表测定。用压力表时,应整个系统率定后使用,避免油路摩阻力的影响。

支承机构要求有足够大的强度及刚度。加载架常用钢制,横梁可沿立柱上下调节,如图 2-4 所示。试验台座为 1m 以上至几米厚的刚性钢筋混凝土结构,台面形式现有槽道式、地锚式、孔洞式和以上某几种相组合的形式。

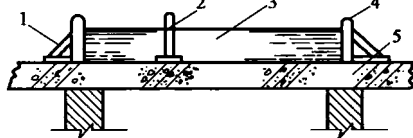


图 2-3 水作为均布荷载

1-侧向支撑;2-标尺;3-水;4-防水胶布或塑料布;5-试件

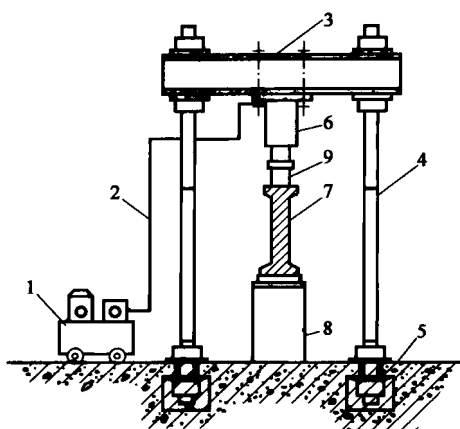


图 2-4 单点液压系统加载装置

1-油泵;2-油管;3-横梁;4-立柱;5-台座;6-加载器;
7-试件;8-支墩;9-测力计

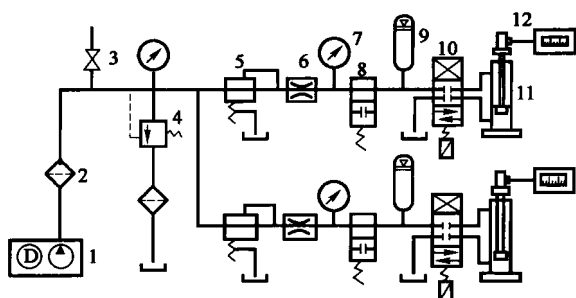


图 2-5 同步液压加载系统

1-高压油泵;2-滤油器;3-截止阀;4-溢流阀;5-减压阀;6-节流
阀;7-压力表;8、10-电磁阀;9-蓄能器;11-加载器;12-测力器

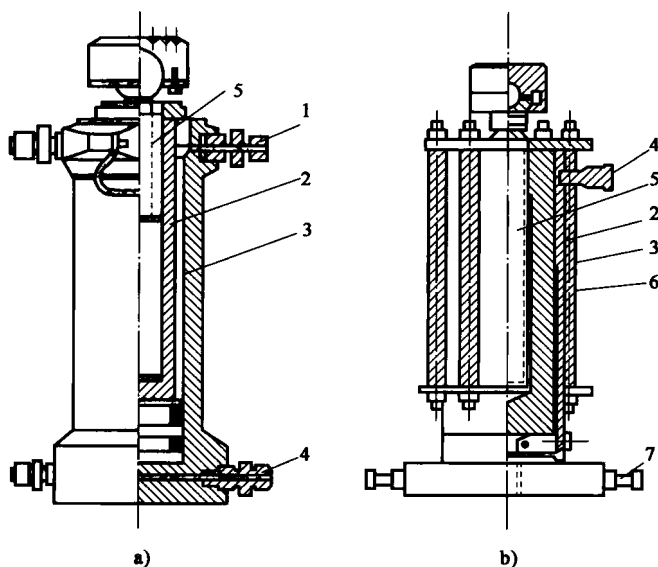


图 2-6 液压加载器

a) 双油路加载器; b) 间隙密封加载器

1-回程油管接头;2-活塞;3-油缸;4-高压油管接头;5-丝杆;6-拉簧;7-吊杆

(1)槽道式。对加载架的固定调节较为方便,但应注意加载架在试验中可能松动滑移。

(2)地锚式。虽无滑移可能,动、静载试验均可使用,但加载点调节灵活性差,常需另加横梁调整。

(3)孔洞式。使用类似地锚式,但台面下有地下室,通常可放置动力源系统,使台面有较好的工作台。

当用一个加载器施加两点或两点以上荷载时,常通过分配梁实现,如图 2-7 所示。分配梁应为单跨简支形式,刚度足够大,质量尽量小,配置不宜超过两层,以免使用中失稳或引进误差。