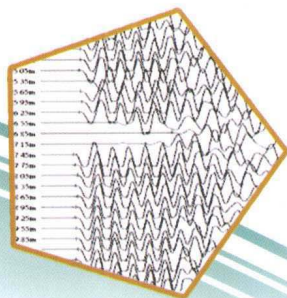


铁路岩土工程 检测技术

杨怀玉 孙树礼 任春山 编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书对桩基工程、加固处理的地基工程、隧道工程、路基及其他土工支挡工程建筑物的检测进行了详细介绍,涉及物探、土工试验、岩土工程原位测试等方法,每种检测方法都介绍了基本概念、原理、仪器设备、现场测试、资料整理与分析等,并给出典型实例和注意事项。

本书共分5篇22章,可供铁路工程检测技术人员参考,也可作为工程建设管理人员、监理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

铁路岩土工程检测技术/杨怀玉,孙树礼,任春山
编著. —北京:中国铁道出版社,2010.12
ISBN 978-7-113-12266-9

I. ①铁… II. ①杨…②孙…③任… III. ①铁路工程:岩土工程-检测 IV. ①U215.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第241856号

书 名:铁路岩土工程检测技术
作 者:杨怀玉 孙树礼 任春山 编著

责任编辑:张苍松 电话:010-51873135
编辑助理:张少涵 孙钟一
封面设计:崔丽芳
责任校对:孙 玫
责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)
网 址:<http://www.tdpress.com>
印 刷:中国铁道出版社印刷厂
版 次:2011年4月第1版 2011年4月第1次印刷
开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:14.75 字数:362千
印 数:1~3 000册
书 号:ISBN 978-7-113-12266-9
定 价:60.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前 言

岩土工程是土木工程的一个分支,岩土工程实体是各类土木工程的基础。铁路岩土工程是铁路工程的重要组成部分,其工程质量与铁路运营安全关系重大。铁路岩土工程检测是铁路工程建设中的重要工作,对控制工程质量、保障工程进度、降低工程投资具有重大意义。

近年来随着大规模铁路建设的开展,铁路检测工作也随之逐步完善,检测技术在不断进步。到目前为止已形成一套包括桩基、加固处理地基、隧道衬砌、路基本体等在内的完整的岩土工程检测体系,为高标准铁路建设提供了强有力的保障。但是不同类型的岩土工程其检测方法和技术也不相同,为了系统地介绍这些技术和方法,我们编写了这本书,旨在为从事铁路工程检测的技术人员提供参考,同时也可作为铁路建设管理人员、监理的参考书。

本书面向被检测的实体:桩基工程、加固处理后的地基工程、隧道衬砌、路基本体及其他土工支挡构筑物进行叙述,共分为5篇22章,涉及物探、土工试验、岩土工程原位测试等方法。每种检测方法都介绍其基本概念、原理、仪器设备、现场测试、资料整理与分析等,并给出典型实例和注意事项。

铁道第三勘察设计院集团有限公司根据多年来的检测工作经验完成了本书的编写。其中1、2.1、2.3由孙树礼编写,2.4.5由任春山编写,3.4、4.1.3、4.1.4、4.1.5、4.2.3、4.2.4、4.2.5、5.1.2、5.2.1由任春山、何振起编写,参加本书编写的还有李跃原、张明启、孙建发、高峰、赵明龙、崔会占、苑志强、李国良、张戎垦、史兴华、王闯、王伍成、訾平华、严学武、江治安、郭士周、张刚、赵林杰、陈宗起、苗伟、黄潘、周宝贵、刘贵忠、李红梅等。其余部分由杨怀玉编写,全书由杨怀玉统稿。

在本书编写过程中得到了铁三院工程测试中心全体检测人员的大力支持,参阅了大量的文献,在此谨向有关专家和作者表示深深地感谢!由于作者水平有限,书中肯定会有错误和不当之处,敬请读者批评指正。来信请寄:yanghuaiyu@tsdig.com。

杨怀玉 孙树礼 任春山

2010年12月

目 录

1 总 论	1
1.1 铁路岩土工程检测技术的基本概念	1
1.1.1 铁路岩土工程	1
1.1.2 铁路岩土工程检测	1
1.2 铁路岩土工程检测的意义和任务	2
1.2.1 铁路岩土工程检测的目的和意义	2
1.2.2 铁路岩土工程检测的任务	3
1.3 铁路岩土工程检测组织与实施	3
1.3.1 岩土工程检测组织	3
1.3.2 岩土工程检测实施	3
1.4 铁路岩土工程检测的发展	4
1.4.1 铁路岩土工程检测的历史与现状	4
1.4.2 铁路岩土工程检测展望	5
2 桩基工程检测	6
2.1 概 论	6
2.1.1 桩的概念、分类及特点	6
2.1.2 各种常用检测方法的特点及适用范围	7
2.1.3 检测方法和检测数量	8
2.2 低应变反射波法	8
2.2.1 测试原理	8
2.2.2 仪器设备	15
2.2.3 现场测试方法	18
2.2.4 资料分析与整理	20
2.2.5 工程实例分析	23
2.3 静载荷试验法	26
2.3.1 单桩竖向抗压静载荷试验	26
2.3.2 单桩竖向抗拔静载荷试验	36
2.3.3 单桩水平静载荷试验	37
2.3.4 工程实例分析	45
2.4 声波透射法	51
2.4.1 基本原理	51
2.4.2 仪器设备	54
2.4.3 现场测试	55

2.4.4	资料整理与分析	58
2.4.5	工程实例分析	62
2.5	钻探取芯法	63
2.5.1	概 述	63
2.5.2	钻探及测试设备	64
2.5.3	钻探及测试方法	65
2.5.4	资料整理与质量评定	67
2.5.5	工程实例分析	68
2.6	高应变动测法	70
2.6.1	概 述	70
2.6.2	测试原理	70
2.6.3	仪器设备	75
2.6.4	现场测试方法	76
2.6.5	资料分析与整理	76
2.6.6	静动法简介	78
2.6.7	工程实例分析	80
2.7	机械阻抗法	81
2.7.1	基本原理	81
2.7.2	仪器设备	82
2.7.3	现场测试	83
2.7.4	测试结果的计算与桩身完整性评价	85
2.7.5	工程实例	85
2.8	灌注桩成孔质量检测	87
2.8.1	超声波法检测孔径和垂直度	87
2.8.2	井径仪检测孔径	89
2.8.3	其他测量孔壁方法	89
2.8.4	沉渣厚度测定	90
2.8.5	工程实例	91
3	加固处理后的地基工程检测	94
3.1	概 论	94
3.1.1	地基加固处理的基本概念	94
3.1.2	常用检测方法的特点及适用范围	95
3.1.3	检测方法和检测数量	96
3.2	静力触探	97
3.2.1	概 述	97
3.2.2	静力触探机理	97
3.2.3	静力触探设备	102
3.2.4	现场测试	105
3.2.5	资料整理	107

3.2.6 处理地基岩土设计参数的评价	111
3.2.7 工程实例分析	121
3.3 圆锥动力触探和标准贯入	122
3.3.1 动力触探和标准贯入试验的基本理论	122
3.3.2 动力触探设备和类型	124
3.3.3 现场测试	126
3.3.4 资料整理	128
3.3.5 处理地基岩土参数的计算与评价	130
3.3.6 工程实例分析	138
3.4 弹性波法	141
3.4.1 弹性波测试的基本原理	141
3.4.2 单孔法与跨孔法	141
3.4.3 瑞雷波法	145
3.5 地基载荷试验	151
3.5.1 地基静载荷试验的基本理论	151
3.5.2 试验设备及特点	154
3.5.3 现场测试	155
3.5.4 资料整理	157
3.5.5 处理地基岩土参数的确定	160
3.5.6 特殊载荷试验	163
3.5.7 工程实例分析	166
3.6 其他检测方法	168
3.6.1 十字板剪切试验	168
3.6.2 旁压试验	172
3.6.3 钻探与试验	177
3.6.4 工程实例分析	180
4 隧道工程检测	184
4.1 地质雷达法	184
4.1.1 地质雷达测试原理	184
4.1.2 仪器设备	187
4.1.3 现场测试	188
4.1.4 数据处理与判释	190
4.1.5 工程实例	191
4.2 声波法	193
4.2.1 概 述	193
4.2.2 现场测试	193
4.2.3 资料整理与计算	194
4.2.4 资料分析与判定	196
4.2.5 工程实例	196

5 其他岩土工程构筑物检测	198
5.1 路基本体检测	198
5.1.1 新建路基检测	198
5.1.2 既有路基检测	210
5.1.3 工程实例分析	212
5.2 边坡工程检测	214
5.2.1 挡土墙与片石护坡检测	215
5.2.2 锚杆检测	219
参考文献	226

1 总 论

1.1 铁路岩土工程检测技术的基本概念

1.1.1 铁路岩土工程

岩土工程是以岩土体为工作对象,以土力学、岩体力学、工程地质学、基础工程学等为基础理论,研究各项土木工程中有关土或岩石的利用、整治或改造的一门技术科学,是土木工程的一个分支,属边缘科学。

岩土工程一词来源于英文 geotechnical engineering。在国际上岩土工程作为一门科学技术是在二次世界大战后,经济发达国家土木工程界为适应建设和技术经济高速发展需要而兴起的。在中国岩土工程是 20 世纪 80 年代被提上议事日程,并在工程勘察中率先推行。

根据岩土体在土木工程中所起的作用和所处的部位,岩土工程可分为三大类:①作为建(构)筑物的地基;②作为构筑物的环境介质;③作为建筑材料。

在铁路建设项目中,所建造的大部分构筑物都是和岩土体密切相关的工程,其中包括:①作为支撑上部构筑物的桩基工程;②对软弱地基进行加固的地基处理工程;③岩土防护工程;④修筑在岩土体中并以岩土体作为环境介质的隧道工程;⑤以岩土作为建筑材料所形成的路堤本体工程。我们所涉及的铁路岩土工程就是指上述 5 类岩土工程构筑物(表 1.1-1)。

表 1.1-1 铁路岩土工程的分类及特点

作用	种类	岩土问题及特点
地基	桩基工程	作为铁路桥涵、挡土墙、车站房屋及其他构筑物的基础
	处理地基	对作为铁路地基的软弱土层进行加固,提高其强度,减小变形,消除液化
环境 介质	隧道工程	铁路越岭或傍河时,以隧道在岩土体中通过,要保证岩土体的稳定
	防护工程	为保证铁路安全,对铁路线路周围的岩土体进行防护的边坡、支护等工程
材料	路堤工程	保障路堤满足使用要求的岩土材料及填筑

1.1.2 铁路岩土工程检测

在各项土木工程建设中,要想充分利用好岩土体,就必须首先弄清岩土体的工程特性,准确掌握所需的岩土参数。要取得所需岩土参数,就要对岩土体进行相关的测量和试验,并根据测试结果对岩土体的有关特性进行评定。

根据被测岩土试件的几何尺寸、位置等与实际岩土体的关系,对岩土体的测试可分为:室内试验、原位测试和原型监测。

根据测试目的及其在项目建设中所处的阶段可分为:勘探试验、岩土工程检测和岩土工程原型监测。勘探试验主要是指在勘察设计阶段,为了解建设场地岩土的天然工程性质而进行的勘察、试验和测试;岩土工程原型监测主要是指在建设项目的施工和运营阶段对岩土体、地

下水及相关的结构物进行的系统监视和观测；岩土工程检测是指采用特定技术手段对岩土工程设计、治理的效果进行测试、检查和评定的活动。

铁路岩土工程检测就是针对上节中所述的 5 类岩土工程构筑物的性状和效果所做的检测和评价。

按照检测过程对样品是否有损伤,检测可分为:①无损检测;②轻微破损检测(被检测的样品检测后不做处置或简单处理仍可使用);③破坏性试验。

1.2 铁路岩土工程检测的意义和任务

1.2.1 铁路岩土工程检测的目的和意义

岩土工程检测作为取得岩土参数的方法,在土木工程建设的不同阶段有着不同的目的和作用,归纳起来主要有以下三个方面:

- ①验证岩土工程治理是否达到预期效果,为工程验收提供依据;
- ②获取试验性施工的有关数据,为设计提供参数,作为开展全面施工的依据和指导;
- ③为岩土工程反分析提供数据,积累岩土工程设计和治理经验。

首先,岩土工程检测被用来验证岩土工程治理效果,这是目前工程中应用最多的方面。岩土工程大多属于建设项目的基础性工程,岩土工程治理能否达到预期效果往往直接影响工程的安全和使用,因此防止岩土工程不合格品非预期使用是一项十分重要的工作,要做好这项工作,就必须准确地识别岩土工程产品是否合格。岩土工程检测就是通过特定的技术手段,寻找岩土工程治理符合规定要求的证据,为工程验收和放行提供依据。从这个意义上来看,工程建设各方(其中包括施工单位)对检测目的之认识都应该是一致的。由于岩土自身复杂性,且施工多数是在地下不可视的情况下进行的,所以岩土工程治理很难一次达到 100%合格。施工过程中出现少量的不合格品并不可怕,只要我们通过检测把这些不合格品找出来,并进行必要的处置,使最终产品符合规定要求就可以了。

其次,由于岩土体是在自然环境下形成的、性质复杂多变的非匀质体,因此岩土工程很难按勘察→设计→施工这样的程序,一次达到理想的效果,往往需要按信息化设计施工的程序(图 1.2-1)来完成。目前信息化设计施工已在铁路建设中得到广泛应用,规模大的试验段可达到数千米。在这个过程中信息对方案的选定起着重要作用,而检测又是获取信息的重要手段。

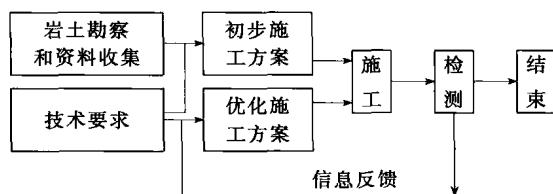


图 1.2-1 信息化施工流程图

另外,目前岩土方面的许多工程问题,还很难从理论上得到满意的解析,在这方面我们所用的知识大多数都是经验的总结。这个过程就是岩土工程反分析,它是通过对岩土体的实践活动,并从中获取岩土体实际表现的性状和效果,进而反求岩土体的特征参数的方法。在这个方法中检测是获取岩土体实际表现性状和效果的重要手段。反分析的结论又可以作为宝贵的

经验来指导岩土工程实践。

1.2.2 铁路岩土工程检测的任务

岩土工程检测的任务主要包括三个方面:①岩土工程特征参数的测试;②对被测试产品进行评判;③根据测试和评判结果从检测方面提出建议。

岩土工程检测的目的不同,其检测任务也不尽相同,但岩土工程特征参数的测试这项任务是共同的。作为验证岩土工程治理是否达到预期效果的检测,必须对治理效果进行评定。如果出现不满足要求的检测结论时,还要从检测角度提出对下一步工作的建议。为设计提供参数(或验证设计参数)的检测,应提出结论和建议。为单纯的实验研究所做的检测,可只提出详细测试结果。

1.3 铁路岩土工程检测组织与实施

1.3.1 岩土工程检测组织

岩土工程检测作为一项为社会提供公证数据的活动,按照我国计量法规的有关要求,检测机构必须经省级以上人民政府计量行政部门计量认证。由于岩土工程检测的复杂性,得出准确检测结论不仅需要准确可靠的测试数据,而且还需要有丰富的实践经验,检测过程不仅需要标准化、规范化,而且也需要有一定的经验;因此有些检测工作还需要专项资质认证。检测机构要完成好检测工作,还必须做到以下三点:①应具有合适的仪器设备,并保证仪器在计量鉴定有效期内使用;②具有称职的测试人员和报告审核人员,有要求时还应取得上岗证书;③机构应有完善的质量管理体系。

1.3.2 岩土工程检测实施

1.3.2.1 岩土工程检测组织方式

按照国际质量管理标准 ISO 9000 有关规定,对产品的检验分为组织交付前的检验,和顾客接受产品前的检验。前者相当于施工单位所做的各种检验工作,是责任者自己所做的检验,其目的是看一看自己的产品能不能满足顾客的要求。后者是业主组织的检验,它代表业主的利益,是业主决定是否接受或放行产品的依据。业主委托的检验对业主来说是进货检验。

铁路工程具有线路长、工点多、工程量大的特点,一般施工划分为若干个标段,为保证工程质量、统一标准,避免施工单位和业主重复检验,突出检测的公证性,作为验收依据的检测宜委托与产品质量责任无关的第三方来承担。作为检测单位应考虑铁路工程的特点,组织充分的仪器设备和称职的人员,组成项目经理部,按项目管理的模式组织实施。

1.3.2.2 岩土工程检测程序

岩土工程的检测程序,应按图 1.3-1 进行。

为做好检测工作,应尽量收集全被检测工程的岩土工程勘察资料、有关的设计文件、施工情况和记录等。检测前应对使用的仪器设备进行检查调试,计量器具必须在计量检定有效期内使用。

1.3.2.3 岩土工程检测方案和检测报告

作为检测单位,接受岩土工程检测委托后,要根据检测目的和委托内容编制检测方案。编制检测方案要充分听取委托单位和设计单位的意见。

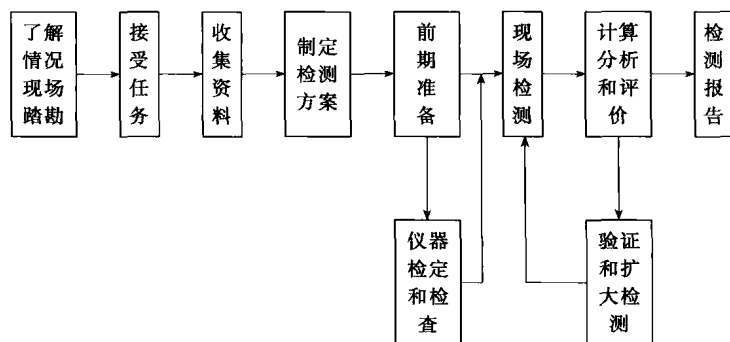


图 1.3-1 检测工作程序框图

检测方案要包含以下内容：工程概况，检测所依据的文件、标准，检测方法，检测数量，抽样方案，人力及仪器设备资源计划，检测日期和进度计划，对出现不同检测结果的应对措施等。方案实施前要通过委托单位的确认。

检测报告是检测的成果，其主要内容应包括：工程概况、检测依据、岩土情况、检测方法、检测过程、资料整理分析、结论、建议及相关测试数据和图表等。

鉴于铁路岩土工程具有规模大，工期长，施工常采用流水作业的特点。因此检测后应及时提交检测中间结果。单个分项工程检测完成后，提交分项工程的检测报告。

1.4 铁路岩土工程检测的发展

1.4.1 铁路岩土工程检测的历史与现状

早在 20 世纪 80 年代以前，铁路工程检测主要由项目执行单位自己来完成。科研和设计单位在其研究项目中进行有关的检测，施工质量检测主要由施工单位自己来完成。方法主要是一些传统的物理、力学试验。

20 世纪 80 年代以来，随着我国对外改革开放，经济建设和科学技术的高速发展，铁路岩土工程检测也得到了突破性的进展。80 年代后期出现了数种方法的基桩低应变检测技术。铁道部科学研究院徐慧研究员领导的课题组首先提出用力棒做为低应变反射波法的振源（在此以前敲击主要是用锤和球），这一改进使反射波法检测桩长达 30 m 以上，并能得到明显的桩底反射信号，进而使得这种方法能应用于铁路桥涵等长大基桩检测。后来以力棒为主要激振方式的低应变反射波法以其设备简单、操作方便、测试结果可靠、成本低等特点得到了土木工程界的普遍认同，并在工程中得到了广泛应用。

铁道部还在渭南建立了基桩检测试验基地，并于 1990 年进行首次铁路基桩检测资质认证考试，并给考试合格的单位和个人颁发了检测资质证书。1999 年颁布《铁路工程基桩无损检测规程》。

在 1999 年至 2001 年秦皇岛至沈阳新建铁路客运专线项目中，首次由项目建设指挥部委托与项目施工质量责任无关的第三方，对全线加固处理后的复合地基进行了抽样检测，对桥梁混凝土基桩进行了 100% 的低应变检测，有效地保障了工程质量。

上世纪末开始了铁路隧道衬砌质量、挡土墙砌筑质量无损检测和既有路堤本体的检测。铁道部于 2004 年颁布《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》。

1.4.2 铁路岩土工程检测展望

在岩土工程勘察设计阶段,由于岩土自身的复杂性和规范中有关经验公式、图表的局限性,岩土工程反分析将成为今后获取岩土性状参数的主要方法。在反分析中岩土工程检测将被大量应用。

在岩土工程实施阶段,信息化施工将成为主流,设计和施工间的界限将变得淡漠,二者会有机地结合在一起。施工阶段的检测和施工、运营阶段的监测将成为获取信息的主要方法。

技术可靠、操作简便、经济合理的无损检测方法将成为检测技术的发展方向,用这样的方法可以实现大比例乃至 100%地对岩土工程治理效果的检测,有效地防止不合格品被误用。

在未来的高速铁路建设和既有铁路提速改造项目中,岩土工程检测将会发挥越来越重要的作用。

2 桩基工程检测

2.1 概 论

2.1.1 桩的概念、分类及特点

2.1.1.1 桩的概念

桩是深入土层的柱型构件,桩与连接桩顶的承台组成的深基础被称为桩基础,简称桩基。只有一根桩组成的桩基础是一个特例,叫单桩基础,可没有承台。组成桩基础的每一根桩叫做基桩。桩的作用是将上部结构的荷载,传递到深部较坚硬的、压缩性小的岩土层中。桩基在铁路工程中主要用于桥涵、车站房屋或设施、挡土墙等构筑物的基础。东南沿海软土地区某高速公路,已用混凝土管桩加固路桥过渡段路堤地基,高速铁路也有类似的应用。

2.1.1.2 桩的分类及特点

桩的分类,根据不同的目的有不同的分类法,现就基桩检测所涉及到的概念简述如下。

1. 按成桩方法对土层的影响分类

根据施工方法对桩周土层的挤压程度,可分为挤土桩、部分挤土桩和非挤土桩三大类。

1)挤土桩。也叫排土桩,施工过程中,桩周土被压密或挤开,土的原始结构遭到破坏。这类桩主要包括打入或压入的实心预制桩、封底管桩和沉管灌注桩。

2)部分挤土桩。施工过程对桩周土有挤压作用,但程度小于挤土桩。这类桩主要包括开口管桩、截面较小的型钢桩和预钻孔打入或压入的预制桩。

3)非挤土桩。成桩过程中,将与桩体积相同的土挖出,桩周围的土受扰动较小,但有应力松弛现象。这类桩主要包括各种型式的钻孔和挖孔灌注桩。

2. 按桩身材料分类

根据桩身材料,可分为钢桩、混凝土桩、木桩和组合材料桩。其中应用较多的为混凝土桩和钢桩,混凝土桩又分为就地灌注桩和预制桩。这里不包括如碎石桩之类的散体材料桩和各类土桩、灰土桩、水泥土桩,与此有关内容将在第三篇中介绍。

3. 按桩径大小分类

根据桩截面直径的大小,可分为小桩($D \leq 250 \text{ mm}$)、中等直径桩($250 \text{ mm} < D < 800 \text{ mm}$)和大直径桩($D \geq 800 \text{ mm}$)。

4. 按桩的使用功能分类

根据桩所承受荷载的方向,可分为轴向抗压桩、抗拔桩和抗侧压桩。

5. 根据桩的承载性状分类

根据桩的承载性状,轴向抗压桩又可进一步分为摩擦桩、端承桩和端承摩擦桩。

6. 根据成桩方法分类

根据成桩方法可分为预制桩和就地灌注桩,预制桩又可分为打入桩和压入桩。

为了更好地发挥桩土作用,还出现了各种变截面桩,如:夯扩桩、扩底桩、支盘桩等。

2.1.2 各种常用检测方法的特点及适用范围

2.1.2.1 桩基检测方法的分类

1. 按检测内容分类

根据检测的内容不同,桩基检测分为成桩质量检测 and 单桩承载力检测。成桩质量检测对于混凝土灌注桩主要包括成孔质量检测、灌注前混凝土检测和成桩后的桩身质量检测,预制桩则主要包括制桩质量、桩的深度、停打(压)标准、桩位、垂直度和沉桩后的桩身质量检测等。这里我们仅介绍成桩后的检测和钻孔灌注桩成孔质量检测。桩的承载力检测包括单桩竖向抗压、抗拔和水平静载荷试验。

2. 按检测结果的目的分类

根据检测的目的不同,可分为:①为设计提供参数的检测;②选择和确定施工工艺的检测;③施工过程控制的检测;④桩基作为分项工程验收的检测。

3. 按检测对被检桩的损坏程度分类

根据检测对被检桩是否有损坏,可分为无损检测和有损检测两大类,其中有损检测可进一步细分为破坏性试验检测和轻微破损检测。像钻芯法检测混凝土桩身质量,检测虽然对桩身有一定的损伤,但损伤轻微,经水泥砂浆处理后仍可使用。单桩竖向抗压、抗拔静载荷试验通常属无损检测。钢筋混凝土桩单桩水平静载荷试验,加载超过桩的极限承载力时,多数情况属破损检测,不宜在工程桩上直接进行。

4. 按得出检测结论的途径分类

此外,根据检测是否能够直接得到检测结果,检测可分为直接法和间接法。如单桩静载荷试验确定承载力、钻探取芯检测成桩质量属直接法,低应变检测桩身完整性、高应变测承载力属间接方法。

2.1.2.2 常用检测方法的适用范围及特点简述

桩基检测方法很多,工程中常用的 8 类检测方法的适用范围和优缺点见表 2.1-1。

表 2.1-1 桩基常用检测方法的特点

检测方法	适用范围	优点	缺点
低应变反射波法	检测桩身完整性,如果桩身有缺陷,推断缺陷的大致位置	设备简单,操作简便迅速,检测成本低经济合理,检测过程无破损	间接检测,检测及资料分析均需有丰富经验的人员来完成,对检测中出现的个别疑难问题,需要用直接检测法验证
单桩竖向静载荷试验法	检测单桩竖向承载力和刚度,通过桩身应变测试确定桩土作用参数	直接检测,结果可靠性高,检测过程无破损	设备笨重,检测成本高。用锚桩做反力时,不能随机抽样
单桩水平静载荷试验法	检测单桩水平承载力和桩侧土的抗力参数	直接检测,结果可靠性高	设备较笨重,检测成本高,加载至桩的极限时,对桩有破损
声波透视法	检测桩身完整性,如果桩身有缺陷,判断缺陷的位置	结果可靠性高	须在桩上预埋超声测管,对施工有干扰,经济性较差,测管堵塞时无法用该法检测
钻探取芯法	检测桩身完整性及混凝土质量,如果桩身有缺陷,判断缺陷的位置及性质	直接检测,结果可靠性高	对桩有轻微破损,检测后需处理钻孔,一孔之见具有片面性,对细长桩钻孔易偏出桩体
高应变法	检测桩身完整性,判断缺陷的位置,提供承载力参考值	对长大桩检测桩身完整性、发现深部缺陷优于低应变法	对同等条件下的基桩,承载力检测数据离散性大、结果可靠性低

续上表

检测方法	适用范围	优点	缺点
桩孔检测	检测钻孔灌注桩成孔质量	过程控制,可预防质量问题	间接检测,对局部小范围孔径变化误差较大
超声回弹法	检测混凝土预制桩制桩质量	事前控制,无破损,可预防质量问题	间接检测,判断混凝土强度需取得超声参数和强度的对比资料

2.1.3 检测方法和检测数量

制订检测方案除考虑检测项目的共性问题外,还应根据基桩类型、桩长、桩径等特点,合理选择检测方法,计划检测数量。

2.1.3.1 检测方法的选择

检测方法的合理选择是检测准备工作的重要内容,应根据检测目的、基桩情况和各种检测方法的特点合理选择。

为检测桩身质量,对桩长在 30 m 以内的桩应优先选择低应变反射波法,当桩长超过 30 m、且桩底反射信号不明显时,除做低应变检测外,还应辅助做一部分高应变,以检测深部桩身质量。当对桩身质量有疑问时,可用静载荷试验方法验证桩在荷载作用下的可靠性,以此来判定整桩是否可用,对大直径混凝土灌注桩,还可采用钻探抽芯的方法验证。对超过 40 m 的混凝土长桩(多数为灌注桩),低应变法因桩的深部反射信号太弱,判定桩的深部质量是很困难的,应优先采用声波透射法,采用这种方法时应预先筹划,设计时应考虑声测管。对长大钻孔灌注桩,要坚持预防为主的原则,加强过程控制检测,除控制好混凝土质量外,还应成对成孔质量进行检测。

为确定单桩承载力,有条件时应优先采用单桩静载荷试验,尤其是为设计提供依据的检测。竖向抗压静载荷试验反力装置的选择,从抽样是否具有随机性来考虑,应优先选择堆载法,这样就可以选择桩身质量检测中有疑问的桩。当通过桩身质量检测认定桩身质量良好,且具备做深孔静力触探的条件时,可采用静力触探确定的桩土作用参数来估算单桩承载力,用这种方法判定的单桩承载力,其可靠性不会低于高应变法。有经验的检测单位,也可采用高应变法估算单桩承载力。

综上所述,铁路基桩因岩土条件复杂多变,其检测不能简单地选用一种方法,而应该根据具体情况,选用一种主导检测方法,再辅助一定比例的其他方法,采用综合手段进行检测。

2.1.3.2 检测数量的确定

铁路桥梁具有动荷载大、重心高、墩台基础水平向尺寸相对较小等特点,因此对变形控制,尤其是对倾斜的控制要求较高,进而对基桩质量要求也较高。如有可能采用低应变反射波法和声波透射法检测,应尽量达到所有基桩全部检测。为验证或确定设计参数的承载力检测其数量应充分尊重设计单位的意见;为确定桩身质量有疑问桩是否可用而进行的承载力检测,其数量应根据具体需要而定。制订检测方案时,承载力检测可按桩身质量检测数量的 1% 考虑。对钻孔灌注桩,应按检测桩数的 1% 计划钻探抽芯检测,以验证可能出现的对桩身质量有疑问的桩,具体实施时可根据具体情况考虑增减。

2.2 低应变反射波法

2.2.1 测试原理

低应变反射波法是用力棒或手锤敲击桩头产生弹性纵波,弹性波沿桩身向下传播,遇到波

阻抗界面时产生反射和透射。透射波继续向下传播,反射波到达桩顶时,引起桩顶质点振动,通过检测桩顶质点振动信号,来分析判定桩身质量。

2.2.1.1 振动和波动的基本概念和理论

1. 物体的弹性与振动

从固体弹性理论来看,处在平衡状态下的物体中的微粒(以下简称质点)是以一定的排列方式分布,并在其平衡位置做微小的往复运动,这种运动称作质点的振动。设相邻质点的平衡位置的间距为 r_0 ,当物体受到外力作用时,物体中质点的距离将变为 $r=r_0+\Delta r$,其中, Δr 为质点间距改变量。质点的应变为 $\epsilon=\Delta r/r_0$ (图 2.2-1)。质点离开平衡位置,积蓄了势能,同时质点间存在着使其势能最小,恢复到平衡位置的作用力。当外力作用取消后,物体的质点开始在恢复力的作用下向原平衡位置移动,在此过程中势能转化为质点的动能,到平衡位置时,势能和恢复力为零,动能最大。质点在惯性力作用下继续向相反方向移动,如此形成质点振动,其振动状态可用图 2.2-2 的质量-弹簧振子来表示。通常振动过程中能量会逐渐耗散,质点最终将恢复到间距为 r_0 的原平衡位置。组成物体质点间的这种相互作用,宏观上反映为物体的弹性,即在一定的应变范围内,物体所受的应力与应变成正比。

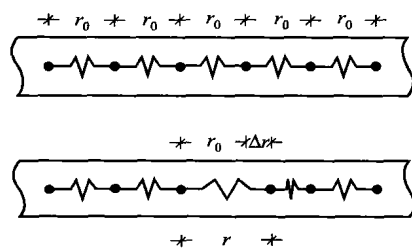


图 2.2-1 质点弹性变形

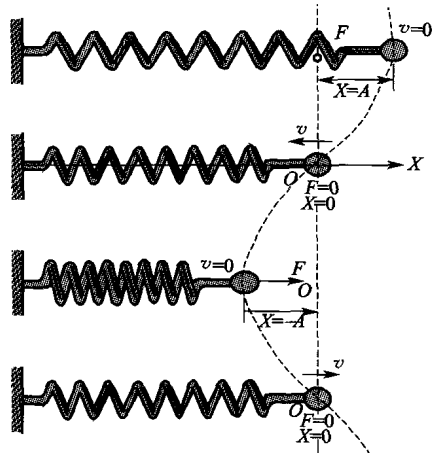


图 2.2-2 质弹体系的振动

质量-弹簧振子的振动是一种最简单的谐振动,振动质点的位置与时间的关系符合正弦(或余弦)函数。基桩动测中单质点振动是不存在的,都是由多个质点组成的振动系统。通常振动质点除了受恢复力作用外,还受到周围质点和介质的阻力,这种受到阻力的振动叫阻尼振动,有阻尼的振动在外作用力去掉后,质点振动很快就会停止。瞬态激振基桩动测,在激励作用结束后,桩头质点的振动就是一种阻尼振动,其波形图见 2.2-3。振动阻尼是普遍存在的,为了获得稳定的振动,就要在物体上施加一个周期性的外力,这种受周期性外力作用的振动叫受迫振动,基桩低应变检测中的稳态机械阻抗法就是一种受迫振动。

2. 弹性波的基本概念

如果弹性体内某一质点 A 受到外界扰动离开其平衡位置时,A 点周围的质点就将对 A 作用一个弹性力以对抗这一扰动,使 A 回到平衡位置,并在平衡位置振动。由牛顿第三定律可知,在 A 偏离平衡位置的同时,A 点周围的质点也受到 A 所作用的弹性力,于是周围质点也离开各自的平衡位置开始振动。就这样振动便一个质点接一个质点向周围传播,这种现象就叫

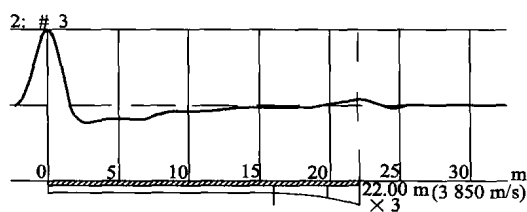


图 2.2-3 反射波法桩顶质点振动曲线

弹性波动。所以振动和波动是密切相关的,振动是产生波动的根源,波动是振动的传播。

质点振动方向与波的传播方向平行的弹性波为弹性纵波。波在传播过程中,振动质点的位置随时间的变化可由正弦函数来表示,同一时刻振动相位相同点的集合叫波振面,波振面为平面的波动叫平面波。我们在基桩低应变检测中所涉及的波就是弹性平面纵波。

3. 平面应力波在一维弹性杆件中传播的微分方程

对于桩体来说,它的长度远大于它的直径,从而可视为一维弹性杆件,当在桩顶施加一个瞬态作用力后,弹性波就会沿桩身传播,当满足下列基本假设时,其传播规律服从一维波动方程。

- 1) 材料均匀各向同性,应力应变为线弹性,服从虎克定律;
- 2) 直杆等截面;
- 3) 纵波沿杆长方向传播,波振面为平面,与杆的横截面平行,横截面上应力分布均匀,且为轴向力,其他方向的应力分量均为 0;
- 4) 忽略横向变形的影响。

图 2.2-4 所示的一根长度为 l 的弹性直杆,取杆的轴线为 x 轴,设变形前杆的截面积 A 、质量密度 ρ 、弹性模量 E 及其他材料性能参数均与坐标无关,杆上各质点的振动参数仅与质点的位置 x 和时间 t 有关,各截面振动位移可表示为 $u(x, t)$ 。在杆的 x 处取一微分单元 dx ,设某一时刻任一截面 x 处质点位移为 u ,应力为 σ (受压为正), $x+dx$ 处质点位移和应力分别为 $u + \frac{\partial u}{\partial x}dx$ 和 $\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x}dx$ 。显然

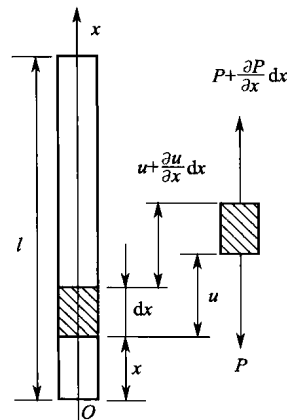


图 2.2-4 直杆的纵向振动

单元 dx 的长度变化量为 $\frac{\partial u}{\partial x}dx$,单元应变为 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 。由虎克定律可知,作用在 dx 单元两侧的应力分别为:

$$\sigma = E\epsilon = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.2-1a)$$

$$\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x}dx = E \frac{\partial u}{\partial x} + E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}dx \quad (2.2-1b)$$

单元 dx 的质量为 $\rho A dx$,运动加速度为 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$,所受的合力为 $A d\sigma = AE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}dx$,根据牛顿第二定律可知:

$$AE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}dx = (\rho A dx) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

整理上式得:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2.2-2a)$$

式 2.2-2 即为弹性平面纵波在一维弹性杆件中传播的微分方程,其中 c 为纵波传播速度, $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 。考虑到 $\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ (v 为质点的振动速度), $\frac{\partial \sigma}{\partial x} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$,波动微分方程还可表示为:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0 \quad (2.2-2b)$$

2.2.1.2 应力波传播中的反射和透射

1. 杆件中的波阻抗界面