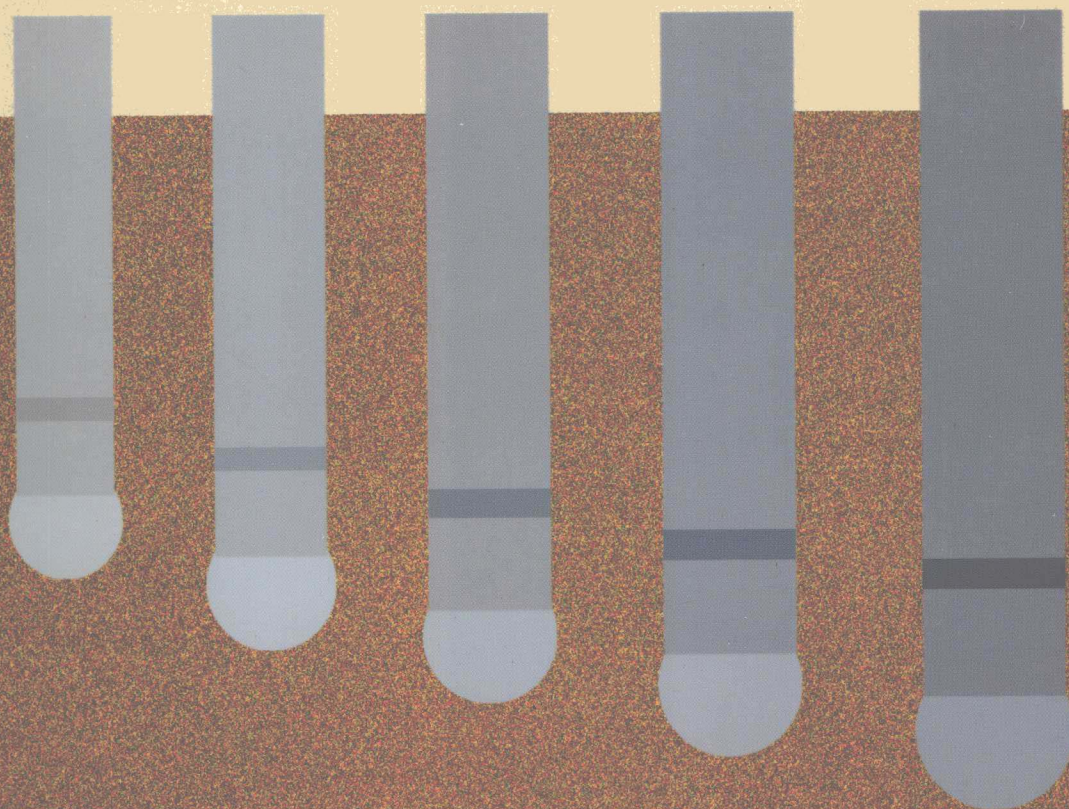


ZHUANGJI JINGYA
SHIYAN YANJIU

桩基静压

试验研究

杨兴其 编著



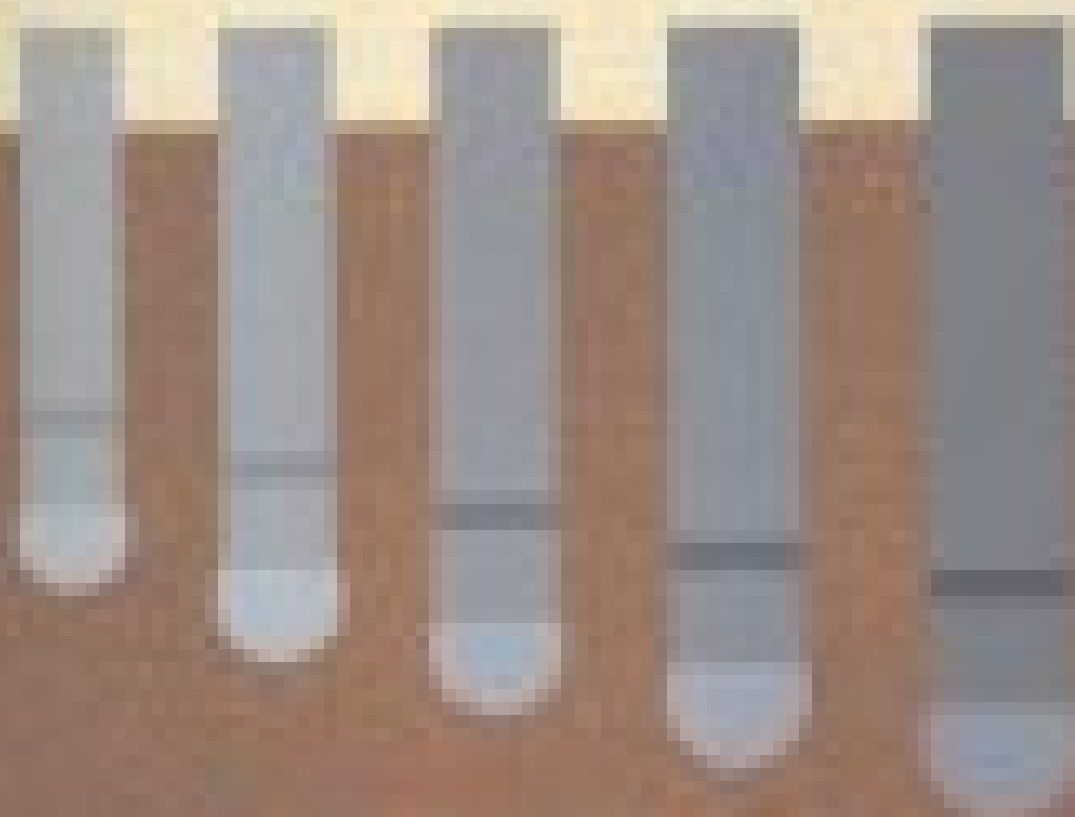
中国铁道出版社

ZHICANGJI JINGYAN
SHIYAN YANJIU

桩基静压

试验研究

张其成 编著



中国水利水电出版社

桩基静压试验研究

杨兴其 编著

中国铁道出版社

2002年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书主要介绍了钻孔灌注桩后压浆技术、自平衡测试法以及黄河中游几座公路大桥钻孔灌注桩静压试验研究成果。

钻孔灌注桩自 20 世纪 60 年代在公路部门应用以来,设计及施工等方面有了很大的发展,但在工程实践中也暴露出许多问题。本书以作者的研究与工程实践成果为基础,收集了大量的工程实例和科学研究资料,进行归纳整理,并融入了作者的工作体会。

本书可供桥梁、建筑等专业的设计、施工、监理及研究人员参考,也可作为高等院校桥梁、建筑和岩土工程专业研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

桩基静压试验研究/杨兴其编著. —北京:中国铁道出版社,2002.5
ISBN 7-113-04663-0

I. 桩… II. 杨… III. 桩基础:桥梁基础—静压力—压力试验
IV. U443.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 024818 号

书 名:桩基静压试验研究

作 者:杨兴其

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)

责任编辑:傅希刚 编辑部电话:(010)51873142

封面设计:陈东山

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:7.5 字数:177千

版 本:2002年6月第1版 2002年6月第1次印刷

印 数:1~2 500册

书 号:ISBN 7-113-04663-0/TU·701

定 价:20.00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,请与本社发行部调换。

联系电话:(010)63545969

序

桩基是桥梁结构基础工程领域中历史最悠久、应用最广泛的基础形式之一。由于它具有承载能力高、施工方便快捷、适应性强等优点,不但普遍用于中小型桥梁基础之中,也被大量用于大型桥梁基础工程之中。

和其他结构形式一样,桥梁基础的发展也与其材料及施工方法的发展密不可分。我国和世界各国一样,早期的桥梁桩基一般采用木桩基础,自20世纪50年代起由于混凝土的普遍应用,钢筋混凝土桩及预应力混凝土桩基础获得迅速发展。到了20世纪60年代初,随着对桩基施工方法研究的深入,在国内外均开始开发钻孔灌注桩这一新的桥梁桩基础形式。由于钻孔灌注桩具有施工设备简单、操作方便、施工噪声小、工期短、造价低、承载能力高等突出优点,它一出现后就得到了广泛的应用和发展,在桥梁基础施工技术上实现了一次令人瞩目的变革。

我国自1963年在河南省安阳冯宿公路桥首次采用钻孔灌注桩基础至今已近40年了。在此期间,钻孔灌注桩基础不但在数量上获得极大发展,而且在其设计理论、施工工艺、测试技术等方面均有了长足的进展。尤其是近年来发展起来的后压浆技术、自平衡测试技术等均为钻孔灌注桩领域的最新成果。后压浆技术通过成桩后的压浆措施使钻孔灌注桩在施工过程中所造成的桩底及桩侧薄弱区得到加强,从而大大提高了桩的承载能力。自平衡测试技术则巧妙地利用所测桩的自身来平衡加载力,省去了传统桩基静压试验方法中庞大笨重的加载装置,显著提高了桩基承载力测试的效率和精度。

本书作者杨兴其高级工程师1984年毕业于西南交通大学铁道工程专业,1987年获中国铁道科学研究院桥梁隧道及结构工程专业工学硕士学位。此后曾长期在河南省交通规划勘察设计院从事公路工程包括多座大型桥梁工程的勘察、设计和监理工作。他在实际工作中接触到大量有关钻孔灌注桩的设计、施工及测试问题,并对这一发源于作者故乡并与作者同龄的桥梁基础形式产生了浓厚的兴趣。他在长年的工程实践中对钻孔灌注桩进行了不懈的探索,努力搜集有关的数据资料,大胆实践,及时总结经验及研究心得,这就为本书的编写打下了良好的基础。作者现任北京至珠海国道主干线河南省新乡至郑州高速公路建设有限公司

总工程师,他在担任这一重任的同时,除完成大量的技术管理工作外,还亲自主持“大直径钻孔灌注桩后压浆技术提高桩基承载力应用研究”课题,并通过该课题取得了不少新的研究成果。本书即是作者上述一系列工作的全面总结。书中首先结合郑州黄河公路大桥、开封黄河公路大桥、东明黄河公路大桥等的基础工程对钻孔灌注桩的一般静压技术进行了介绍,随后详细阐述了钻孔灌注桩的后压浆技术及自平衡测试技术。作者特别结合郑州黄河公路二桥的工程实践系统全面地阐述了该桥的试桩工程,详细介绍了该桥试桩的设计方案、施工工艺、后压浆技术及自平衡测试技术,书中不但描述了上述各项工作一开始的总体规划和布置,还如实介绍了在实施过程中所作的各项改进。作者最后对各项实际测试结果进行了认真的分析和论证,得出了不少具有重要价值的结论。

本书内容丰富,叙述细致,分析透彻,数据图表完备,汇集了大量的工程实测资料,不但可作为桥梁基础领域工程技术人员及教育人员的重要参考书,也可供其他基础工程领域技术人员及教育人员参考之用。相信本书的出版将对我国钻孔灌注桩技术的进一步发展起到良好的推动作用。

铁道部科学研究院铁建所 研究员 博士生导师
中国土木工程学会桥梁与结构工程分会副董事长

潘家英

2002年3月15日于北京

前 言

具有中国特色的钻孔灌注钢筋混凝土桩,是河南省公路部门的工程技术人员,从1960年开始试验研究,1963年在河南省安阳冯宿公路桥首次试用,经过不断改进而逐步发展起来的一种桥梁基础形式。河南省交通公路部门的广大职工,在钻孔灌注桩的推广、应用、完善、发展方面做出了重大贡献。

北京至珠海国道主干线新乡至郑州段高速公路,跨越黄河天堑,黄河大桥长9 848 m。为确保项目的顺利实施,为设计部门提供资料、检验设计理论、确定施工工艺、确保质量、推广应用新技术、节约建设成本,河南省交通厅多次召开专家会议,专题讨论郑州黄河公路二桥钻孔灌注桩试桩问题。根据河南省交通厅要求和专家意见,河南省新乡至郑州高速公路建设有限公司在项目开工前组织有关单位实施了“大直径钻孔灌注桩后压浆技术提高桩基承载力应用研究”科研课题。作者根据收集到的大量资料、以往设计研究钻孔灌注桩的经验和主持本课题研究的基础上,完成了本书的编写。

全书共分五章。

第一章“钻孔灌注桩静压试验”,简要介绍了钻孔灌注桩的发展概况,钻孔灌注桩静压试验目的,郑州黄河公路大桥、开封黄河公路大桥和东明黄河公路大桥试桩情况及结果。

第二章“钻孔灌注桩后压浆技术”,从钻孔灌注桩存在的问题出发,对比分析了各种处理措施的优缺点。通过对后压浆技术提高单桩轴向承载力的机理分析,介绍后压浆钻孔灌注桩轴向承载力的几种计算方法,并简要介绍了钻孔灌注桩后压浆施工机具和程序。

第三章“钻孔灌注桩承载力自平衡测试法”,主要介绍20世纪80年代发展起来的钻孔灌注桩“自平衡测试法”的测试原理、计算理论、测试设备和试验方法。

第四章“郑州黄河公路二桥试桩设计”,后压浆技术首次用于直径2.2 m、深62 m的钻孔灌注桩;自平衡测试法首次用于黄河上桥梁,且试验吨位达 $2 \times 22\,667\text{ kN}$;后压浆技术和自平衡测试法首次同时用于高速公路建设。本章详细介绍了试验方案特点。

第五章“郑州黄河公路二桥试桩试验结果分析”,集中反映了本项目的试验和分析成果。

作者在从事本课题研究与本书撰写过程中,得到了河南省交通厅石发亮厅长、刘章土副厅长、李瑞林高工、朱理平处长、刘兴彬处长、张晓冰处长、李强处长,河南省新乡至郑州高速公路建设有限公司李玉亭总经理、张启汉副总经理,河南省交通规划勘察设计院黄裕陵教授级高工等专家与同行的帮助和鼓励;得到了河南省新乡至郑州高速公路建设有限公司专家咨询委员会成员李瑞林高工、潘家英研究员、王鸿烈教授级高工、苗万杰高工、陈厚河高工、陈宝春副教授、许晓峰高工的大力支持。中铁大桥局集团第一工程有限公司欧阳克武高工,东南大学龚维明教授,西南交通大学吴兴序副教授,兰州铁道学院王旭副教授,中国建筑科学研究院祝经成高级工程师,河南省交通规划勘察设计院张世霖教授级高工、张晓伟高工、汤意高工,河南省新乡至郑州高速公路建设有限公司张玉中高工,河南省交通公路工程局崔国喜高工、干英辉工程

师,河南省交通科学技术研究所冯治安教授级高工、张付雄高工等为本书提供了大量的资料。作者对上述提及和未提及的在本书编写过程中给予大力支持与帮助的前辈、专家和同行表示衷心的感谢。

恩师中国铁道科学研究院潘家英研究员在百忙之中审阅了全书并提出了宝贵的意见;中国铁道出版社有关人员为本书的出版付出了辛勤的劳动;作者的妻子白冬梅讲师对作者编写此书给予了大力的支持,在此一并表示衷心的感谢。

对于书中存在的缺点和错误,恳请专家和读者批评指正。

作 者

2002年2月于郑州

目 录

第一章 钻孔灌注桩静压试验	1
第一节 钻孔灌注桩概况	1
一、钻孔灌注桩的产生和发展	1
二、钻孔灌注桩设计	1
三、钻孔灌注桩施工	1
四、钻孔灌注桩质量检测	2
第二节 钻孔灌注桩静压试验	2
一、试验目的	2
二、郑州黄河公路大桥试桩	2
三、开封黄河公路大桥试桩	8
四、东明黄河公路大桥试桩	14
第二章 钻孔灌注桩后压浆技术	21
第一节 提高桩基承载力的措施	21
一、钻孔灌注桩的缺陷	21
二、提高桩基轴向承载力的措施	21
第二节 钻孔灌注桩后压浆原理	24
一、钻孔灌注桩后压浆的含义	24
二、后压浆提高单桩轴向承载力机理分析	24
三、后压浆钻孔灌注桩轴向承载力计算	26
第三节 钻孔灌注桩后压浆工艺	33
一、后压浆分类	33
二、后压浆施工机具	33
三、后压浆施工程序	35
第三章 钻孔灌注桩承载力自平衡测试法	39
第一节 传统桩基静压试验方法	39
一、压重平台反力装置	39
二、锚桩承载梁反力装置	39
三、锚桩压重联合反力装置	40
四、静载加荷方法	40
五、极限承载力的确定	40
第二节 自平衡测试法	44
一、概 述	44

二、测试原理·····	45
三、计算理论·····	46
四、测试设备·····	50
五、试验方法·····	51
第四章 郑州黄河公路二桥试桩设计 ·····	53
第一节 工程概况 ·····	53
一、新乡至郑州段高速公路简介·····	53
二、郑州黄河公路二桥设计·····	56
三、地质条件·····	58
第二节 试验方案 ·····	63
一、试桩设计·····	63
二、钻孔桩施工方案·····	68
三、后压浆技术方案·····	70
四、自平衡测试方案·····	72
五、桩身应力观测方案·····	73
第五章 郑州黄河公路二桥试桩试验及结果分析 ·····	76
第一节 现场施工情况 ·····	76
一、钻孔桩施工·····	76
二、后压浆施工·····	79
第二节 试验成果 ·····	89
一、试验过程·····	89
二、荷载位移曲线·····	91
三、轴力及摩阻力分布·····	92
四、极限承载力和桩侧摩阻力 ·····	108
第三节 结论与应用 ·····	110
参考文献 ·····	111

第一章 钻孔灌注桩静压试验

第一节 钻孔灌注桩概况

一、钻孔灌注桩的产生和发展

具有中国特色的钻孔灌注钢筋混凝土桩,是河南省公路部门的工程技术人员,从1960年开始试验研究,1963年在河南省安阳冯宿公路桥首次试用,经过不断改进而逐步发展起来的一种桥梁基础形式。它具有圬工体积小、载重能力大、设备简单、操作方便等优点,特别是把原先基础工程中最危险、最困难的水下施工改变为水上作业,大大简化了施工、缩短了工期、降低了造价。钻孔灌注桩的问世,可以说在桥梁基础施工技术上进行了一次革命,在全国公路、铁路、建筑、港务、水利、电力、煤炭、环保、国防等部门都得到了广泛的应用和发展。

钻孔灌注桩几乎同期在国内和国际上出现和发展,如今在国内和国际上都得到了广泛的应用。钻孔灌注桩的直径已从最初的60 cm发展到了500 cm,桩的截面从实心发展到了空心、从直杆型发展到了分支型,桩的材料从灌注水下混凝土发展到了填石压浆混凝土,成孔工艺也有了很大发展。

二、钻孔灌注桩设计

钻孔灌注桩的设计是在对地质水文条件的详细勘察和工程判断的基础上,根据荷载情况 and 经济条件选择桩的形式,分析计算后完成。

钻孔灌注桩穿过不同性质的土层将上部结构荷载传递给桩周和桩底土层,形成复杂的桩土共同作用系统。研究荷载传递的方法有弹性理论法、有限元法和传递函数法等。

单桩计算包括:垂直承载力和沉降计算,横向受力和位移计算,验算桩身强度、稳定性及裂缝宽度。

三、钻孔灌注桩施工

常规钻孔灌注桩的施工包括施工准备、钻孔、清孔、灌注水下混凝土等步骤。

施工之前,要制定详细的施工、质量、安全、环保等措施,准备好设备、材料和人员。场地为浅水时,宜采用筑岛法施工;场地为深水时,可采用钢管桩施工平台、双壁钢围堰平台等固定平台,也可采用浮式施工平台。孔位放样、埋设钢护筒或混凝土护筒,并调制好钻孔用泥浆。

根据地质条件、施工队伍技术状况、施工工期要求等选择钻孔工艺。机械成孔分冲击成孔和循环成孔两大类。冲击成孔、冲抓成孔均属半机械化成孔工艺,速度较慢,目前主要用于卵(砾)石地层。循环成孔是全机械化的成孔工艺;循环是指钻孔时的泥浆循环系统而言,通过泥浆泵等设备,将泥浆经高压胶管、水龙头和钻杆中心,由钻头的泥浆喷出口射出冲洗孔底,并与

钻渣混合在一起,借助泥浆的上浮使钻渣不断携带到表面,流入泥浆池中,在钻渣沉淀后,泥浆由泵吸回钻孔中继续循环使用,这种方法称为正循环。与此相反的泥浆循环系统称为反循环,即通过泥浆泵、空气压缩机等设备,将泥浆与钻渣经钻头、钻杆中心及高压胶管,泵吸或空气吸升,喷入泥浆池中,钻渣沉淀而泥浆则经护筒口流回钻孔中再循环使用。反循环钻机又分为三种,即空气吸升式反循环、泵吸式反循环和潜水泵吸式反循环。

钻孔深度达到设计标高后,检查孔深和孔径。根据设计要求、钻孔方法、机具设备条件和地层情况,选择使用换浆、抽浆、空压机喷射、砂浆置换等清孔方法进行清孔。

钢筋骨架吊装就位后,灌注水下混凝土,一般采用钢导管法灌注。

四、钻孔灌注桩质量检测

钻孔灌注桩施工技术复杂,相互紧密衔接的工艺流程多,施工队伍的管理水平和人员素质参差不齐,且多在水下及地下进行,通常易出现缩颈、夹泥、断桩或沉渣过厚等多种形态复杂的质量缺陷,影响桩身的完整性和单桩的承载能力,因此有必要进行桩身质量检测。

钻孔灌注桩成孔质量检测包括桩位偏差检查、孔径检查、孔深检查、桩孔倾斜度检查和孔底沉淀土厚度检查。桩基混凝土质量检测方法分为破损法检测和无破损法检测两大类:破损法检测有钻取芯样法;无破损法检测又分为辐射法(如超声脉冲法、放射性元素法)、动测法(如机械阻抗法、水电效应法)、电法(如电阻率法)等。桩基承载力检测有静载试验法(包括静压试验、静拔试验和静推试验)、动测法(如机械阻抗法、水电效应法、反射波法、锤击贯入高应变法)等。

第二节 钻孔灌注桩静压试验

一、试验目的

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024—85)规定的钻孔灌注桩的单桩轴向受压容许承载力 $[P]$ 按下式计算:

$$[P] = 0.5(Ul\tau_p + A\sigma_R) \quad (\text{kN})$$

式中 U ——桩的周长(m);

l ——桩在局部冲刷线以下的有效长度(m);

τ_p ——桩壁土的平均极限摩阻力(kPa);

A ——桩底横截面面积(m^2);

σ_R ——桩尖处土的极限承载力(kPa)。

应用上式计算时,先按各土层之物理力学性能确定土壤名称,依据规范选取 τ_p 、 σ_R ,进而计算桩的极限承载力,确定桩的容许承载力。各土层实际的 τ_p 、 σ_R 与土层深度、钻孔灌注桩成孔成桩工艺等有关,仅凭土层之物理力学性能来确定不确切,因此有必要进行基桩静压试验来确定各土层对钻孔灌注桩桩壁的摩阻力,以验证设计桩长,为设计提供参数和依据。

二、郑州黄河公路大桥试桩

1. 大桥设计及地质条件

郑州黄河公路大桥是国道 107 线跨越黄河的主要交通工程,全长 5 549.86 m,1986 年 12 月建成通车。设计荷载:汽车—超 20 级,挂车—120,人群荷载 3.5 kN/m^2 ,地震烈度为七度。全桥计 137 孔,自南向北桥孔布置为 $28\times 20\text{ m}+62\times 50\text{ m}+47\times 40\text{ m}$,桥面总宽 18.5 m。上部构造为预应力混凝土 T 形简支梁,桥面简易连续;下部构造为钻孔灌注桩基础,双柱式桥墩(桩径 2.2 m 和 1.5 m),框架式桥台(桩径 1.5 m)。直径 2.2 m 钻孔灌注桩在我国公路建桥史上为首次采用。

由地质钻探资料知,在钻孔深度内的土层大致分为三层:第一层自地表面至标高 71.0 m,主要为黄色细砂、粉砂并含有大量朽木和贝壳碎片的近代黄河冲积层。第二层以灰色中砂为主,在标高 30~70 m 之间,层间明显地表现为砾石薄层—粗砂—中砂—细砂和粉砂—黏土和亚黏土多韵律沉积特征,属洪积层。第三层在标高 10~30 m 之间,包括两个亚层,上亚层为单一黏土层,属湖相沉积,下亚层为洪积砂和少量砾石。

2. 试桩设计

试桩地点在黄河北岸马庄引水渠以南与生产堤之间,紧邻 ZE-12 号地质钻孔附近,在桥轴线上游 59.7 m 处,两根试桩由东向西排列,试桩中心间距 4.5 m。两根试桩之主要参数如表 1—1 所示。

表 1—1 试桩参数

编 号	试桩性质	加载吨位 (kN)	设计直径 (cm)	钻头直径 (cm)	平均成孔直径 (cm)	桩全长 (m)	桩入土长 (m)
1	垂直荷载	15 000	100	96	110.2	62	60.92
2	垂直荷载	18 500	100	96	103	62	60.92

两根试桩桩尖落入硬黏土层,桩身为 C35 水下卵石混凝土,水灰比为 0.45,以木钙为添加剂。为使上部桩身截面应力均匀,并能布置下 4 个 500 t 油压千斤顶进行加载,因此在桩顶以上布设了 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ 、高 1.5 m 的桩头。试桩中配制了双层主筋,并埋设了 3 根直径为 63.5 mm 的超声波检测钢管直通桩尖。

在桩身预埋的传感器元件为差动式 KL-22 型和 KL-28 型钢筋计、自制的直径 16 mm 钢筋应变计,在桩尖测力筒中预埋纸基式电阻丝应变片。量测元件埋设在土层分界处,全桩计分 14 个断面埋设(图 1—1)。一根桩在同一断面上布设 2 种元件(差动式钢筋计和自制应变计)计 4 个测点,以资互相校核比较。

3. 试验程序

试桩施工工艺与工程桩相同。试桩的钻孔机具采用 SPJ-300 型正循环旋转钻机,钻机的功率 48 kW 约为(65 马力),承受最大扭矩是 $989\text{ kN}\cdot\text{m}$,在黏土层钻进时转速选用 40 r/min,其线速度为 2.01 m/s。钻孔过程中以泥浆护壁,1 号试桩采用膨润土泥浆,比重为 1.1~1.23(最高达 1.43),2 号试桩采用邯郸黏土拌制泥浆护壁,比重为 1.06~1.2。清孔后的泥浆比重在 1.1 以下。1 号试桩成孔至浇注混凝土时间间隔为 27 d,2 号试桩为 15 d。

本试验采用载重平台法进行加载。将铁路 32 m 跨径旧钢板梁加固增强抗剪能力后作承载托架,在其上铺满 45 号工字钢及 38 kg/m 钢轨,组成一个 $12\text{ m}\times 12\text{ m}$ 的加载平台,台上堆放混凝土预制块重物,以提供反力荷载(图 1—2)。试桩桩头上布置了 4 台 YQ-500A 型油压千斤

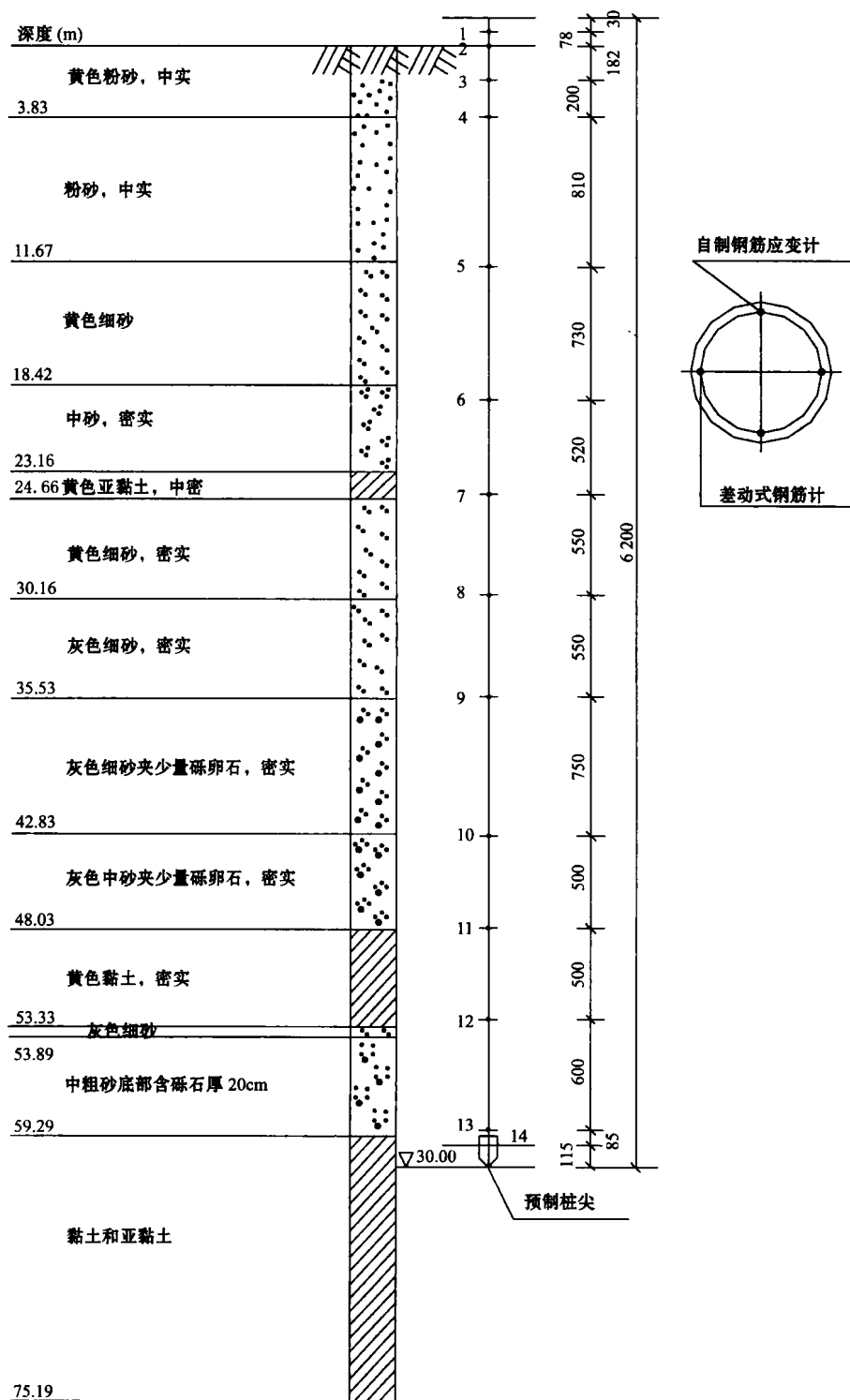


图 1-1 土层情况及试桩测点断面图

顶,支承于钢板梁跨中。4台液压千斤顶并联到高压油泵上同步工作,试验前对千斤顶和油压表均进行了标定。加载过程中,以2台SBQ-2型水工用比例电桥和2台YJ-5型静态电阻应变仪通过桩内预埋传感器进行应变量测;桩的沉降采用钢丝挠度仪和百分表同时量测。

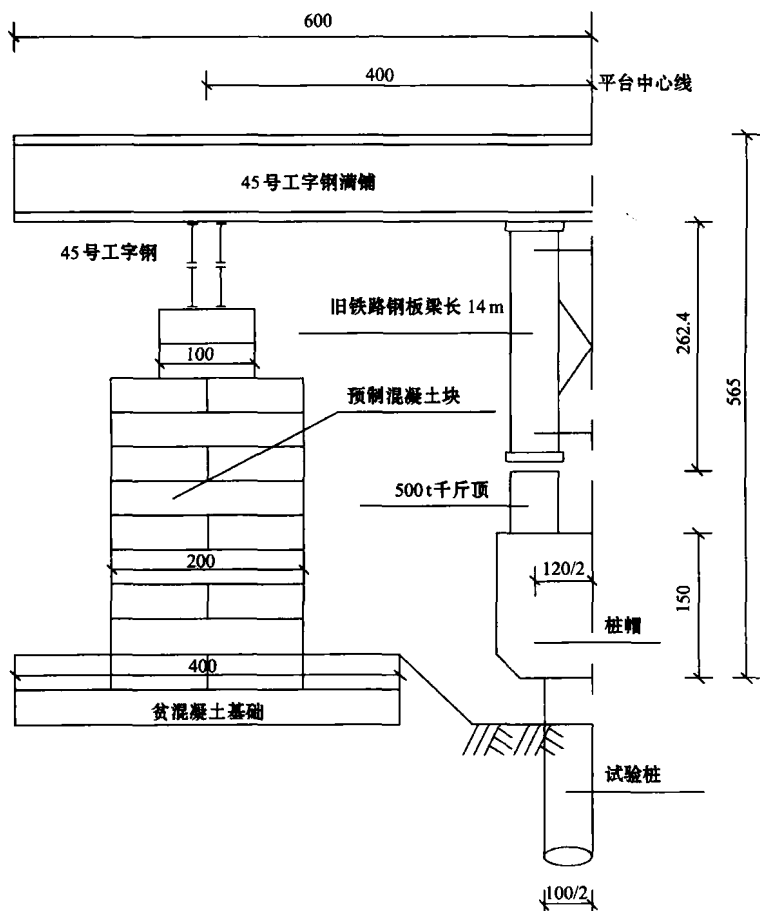


图 1—2 加载平台图

试验中,两根试桩均采用单循环加载方式,一次逐级加载至最大值,然后分级卸载至零。

1号试桩加载分10级,卸载分5级:0kN→2400→3800→5200→6600→8000→9400→10800→12200→13600→15000→12200→9400→6600→3800→0。2号试桩加载分13级,卸载分6级:0kN→3800→5200→6600→8000→9400→10800→12200→13600→15000→16400→17200→18000→18500→15000→12200→9400→6600→3800→0。每级加载后,每隔20min作一次沉降观测,当最后连续三次观测值之和小于0.1mm时视为桩沉降稳定,即可进行下一级加载。卸载时,桩的回弹稳定标准与加载沉降的稳定标准相同。

试桩的破坏标准:①某级荷载的沉降增量大于前等级荷载沉降量的5倍;②总沉降量大于40mm后,沉降增量大于前级之2倍,且24h仍不稳定者;③加载后期,桩的沉降随荷载直线比例增长,且总沉降大于75mm时。

4. 试桩结果及分析

通过预留弹模试块和在桩身顶部标定断面实测桩的弹性模量,两根试桩的实测混凝土弹性模量和混凝土强度分别为:1号试桩 $E = 2.6 \times 10^4$ MPa、 R 大于35 MPa,2号试桩 $E = 2.84 \times 10^4$ MPa、 R 大于35 MPa。

桩顶荷载(P)—沉降量(S)曲线见图1—3,各级荷载下轴向力—深度关系曲线见图1—4和图1—5,各阶段各断面的桩侧摩阻力见图1—6和图1—7。

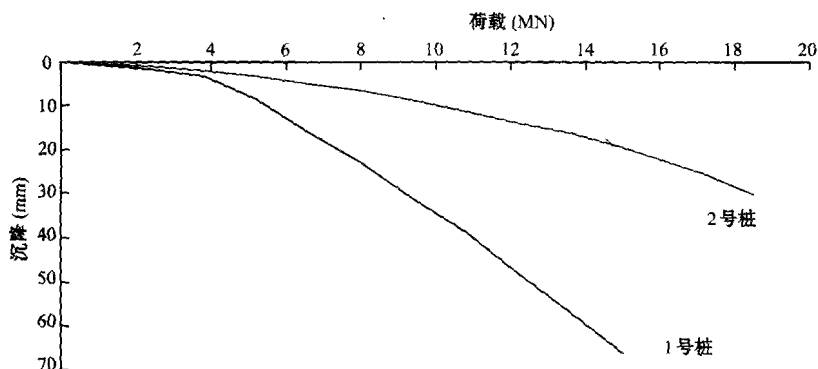


图1—3 荷载—沉降曲线

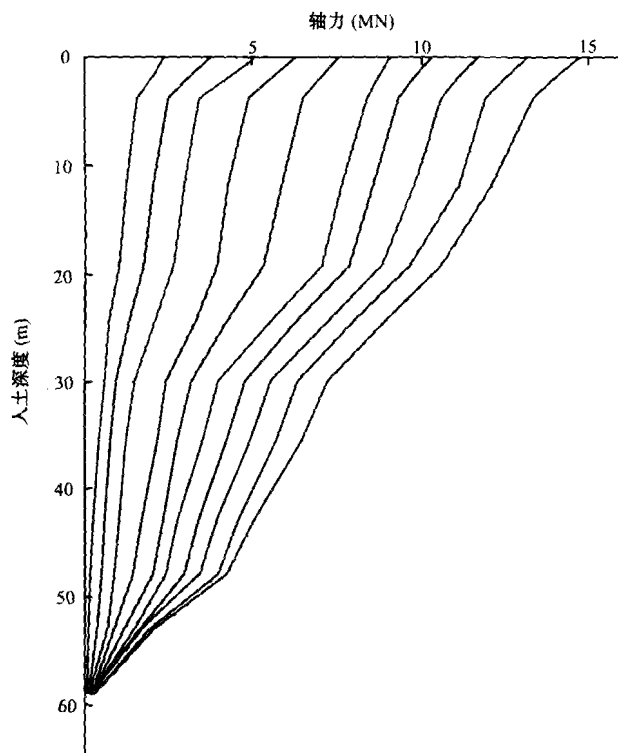


图1—4 1号试桩桩轴力沿深度分布图

从试验结果看,1号试桩加载至15000 kN时总沉降量为66.34 mm,2号试桩加载至18500 kN时总沉降量为30.05 mm,从沉降速率、增长率、沉降量来衡量均未超出标准,未压至

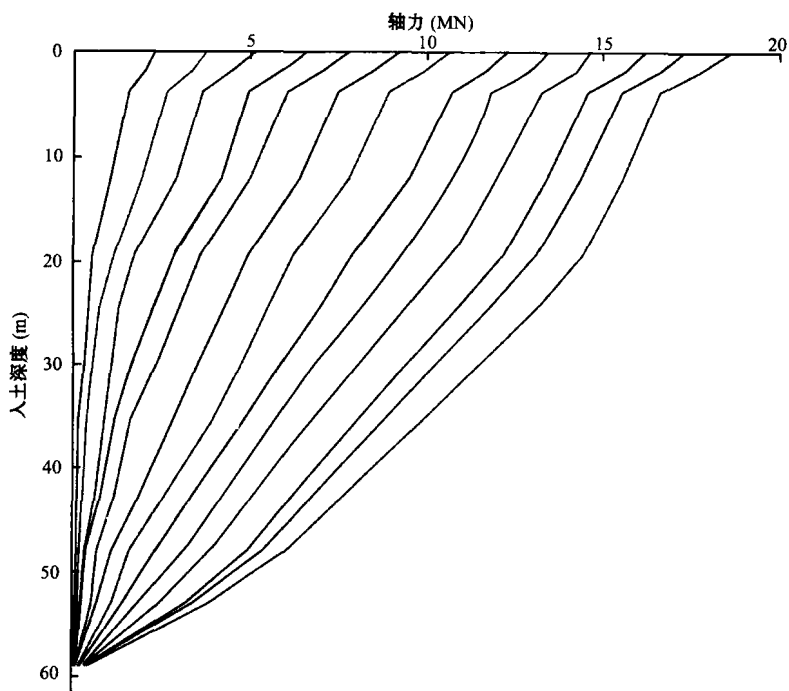


图 1—5 2 号试桩桩轴力沿深度分布图

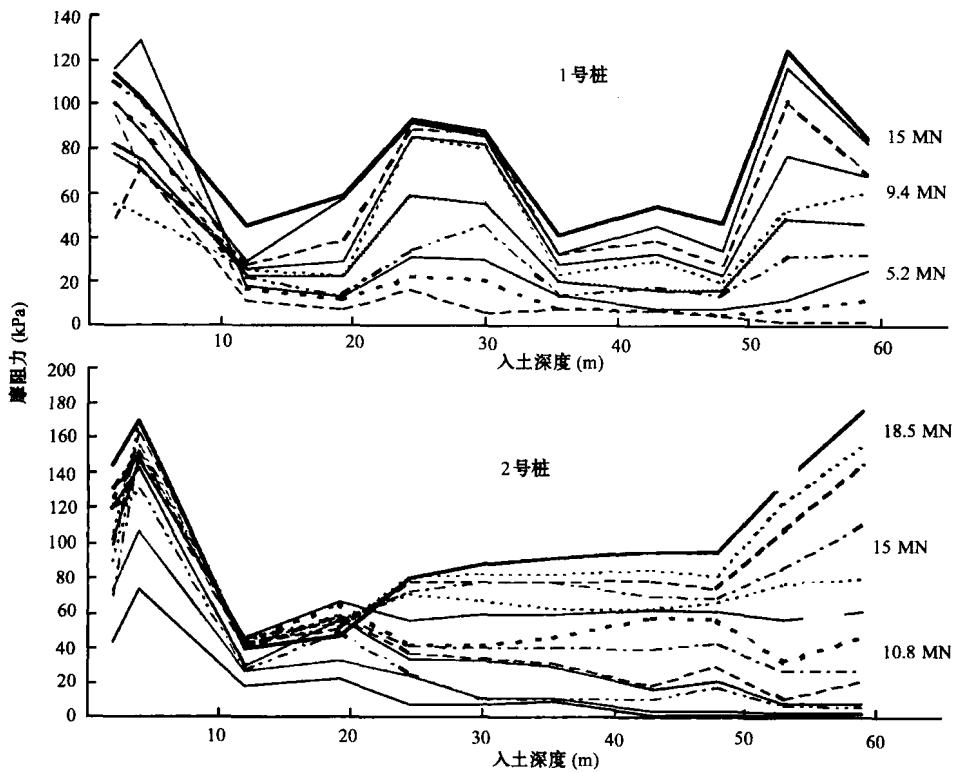


图 1—6 桩周摩阻力—桩深曲线