



## 演讲嘉宾介绍

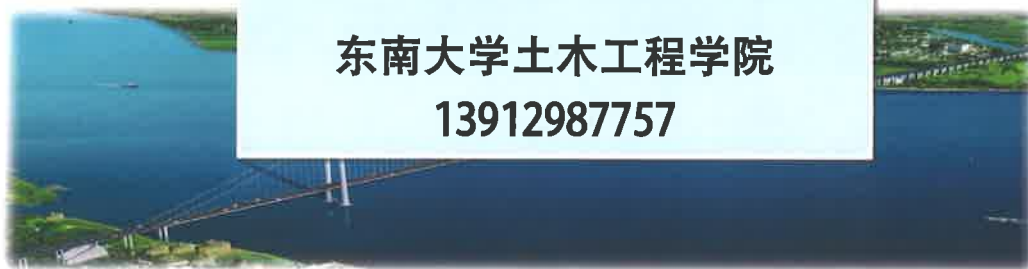
戴国亮，博士，教授、博士生导师，国家一级注册结构工程师和注册土木工程师(岩土)，交通部试验检测工程师，长期从事地下结构工程的教学与科学研究工作。现任国际工程地质与环境协会(IAEG)海洋工程地质技术委员会委员(MEGC,C34)，国际地质灾害与减灾委员会委员，中国建筑学会地基基础分会理事，中国岩石力学与工程学会岩土工程信息技术与应用分会常务理事，中国岩石力学与工程学会青年工作委员会委员，中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基工程专业委员会委员，中国土木工程学会土力学及岩土工程分会软土工程专业委员会委员，江苏省力学学会青年工作委员会委员，南京市土木建筑学会理事等职务。近年来主持和参与过国家973计划项目、国家重点研发计划重点专项项目、国家自然科学基金、国家科技支撑计划项目、交通运输部重大专项、交通运输部西部课题、省自然科学基金等纵向项目19项，主持和参与国际及国家重大工程等横向项目30余项。同时在Canadian Geotechnical Journal、Geotechnical Testing Journal、土木工程学报、岩土工程学报、建筑结构学报等刊物发表论文150余篇，SCI、EI、ISTP收录论文80余篇，出版专著、教材和规程17本。并获得过教育部科技进步二等奖1项、陕西省科技进步一等奖1项、江苏省科技进步二等奖1项，三等奖2项、中国公路学会二等奖1项、山西省科技进步三等奖1项、吉林省科技进步二等奖1项等。

# 桩基自平衡测试法静载试验 及典型案例

**戴国亮 教授**

**东南大学土木工程学院**

**13912987757**





### 报告提纲

- 1 大口径井（桩）基础及自平衡法
- 2 大口径井（桩）基础自平衡法典型案例
- 3 承载力提升技术
- 4

### 大口径井（桩）基础

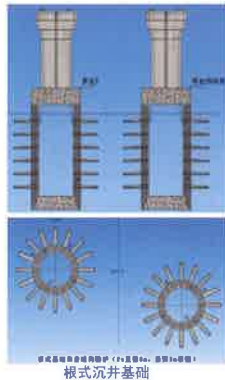
海上风电基础钢管单桩直径达到6m以上



桥梁桩钻孔桩直径达到5.0m（鱼山大桥）



根式沉井基础直径达到8.0m



根式沉井基础

地下连续墙基础直径达到6m\*1.2m

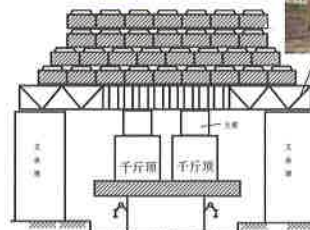


封闭式地下连续墙基础达到10m\*10m



大跨桥梁和高层建筑越来越多，桩基础的应用量随之增大。规范规定**必须**做一定数量的桩基载荷试验，以确定结构的安全度。传统的桩基载荷试验有两种，一是**堆载法**，二是**锚桩法**。

### 堆载法



堆载试验装置示意图



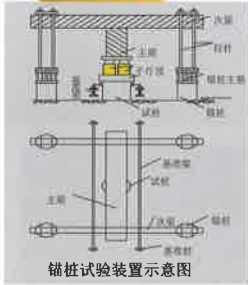


# 2018 第十二届 SUPER PILE WORLD 国际大口径工程井(桩) 高峰论坛

时间：2018年10月17-19日

地点：南京·江苏省会议中心（南京市玄武区中山东路307号）

## 锚桩法



## 传统方法的缺点

- 传统试桩法最大加载吨位一般<2000吨，且费时、费力、不安全
- 在水上试桩、坡地试桩等，试桩都极其困难。

南航江大桥2号墩试桩



坡地测试



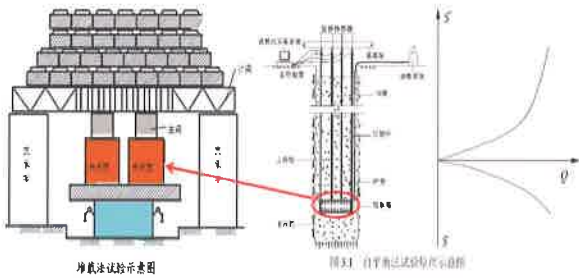
水中测试



大吨位高层建筑测试

九石河桥沿江大桥，墩桩最大吨位为4000吨。

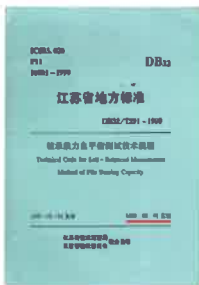
## 自平衡法的起源



## 三类静载方法的比较

类型	吨位	场地	加载设备	测试周期	费用
堆载法	一般1000t以下	平坦开阔，便于运输、吊装配重	复杂	数周至数月	高
锚桩法	一般2000t以下	需要试桩及锚桩施工平台	一般	数周至数月	高
自平衡法	几百吨到数万吨	无要求，特别适用于坡地、水上、基坑底、狭窄场地试桩，以及斜桩、抗拔桩等。	简单	2-3天，可多桩联测	低

## 国内首项自平衡标准（1999年，江苏省）



## 主要标准（均为东南大学主编）





部分专利（东南大学）

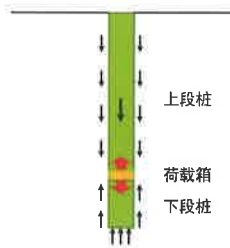


著作（龚维明、戴国亮）



抗压桩

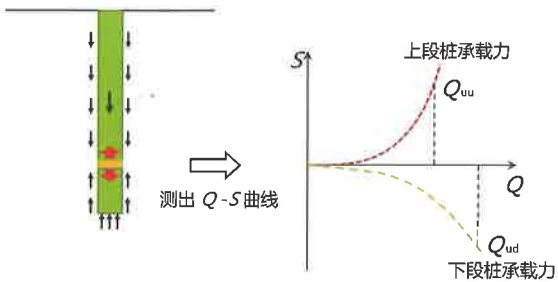
- 将荷载箱埋于桩身下部的平衡点附近。
- 荷载向上、向下同时施加。
- 上段桩产生向下的摩擦力。
- 下段桩产生向上的摩擦力和桩底反力。



抗压桩



抗压桩



下笼



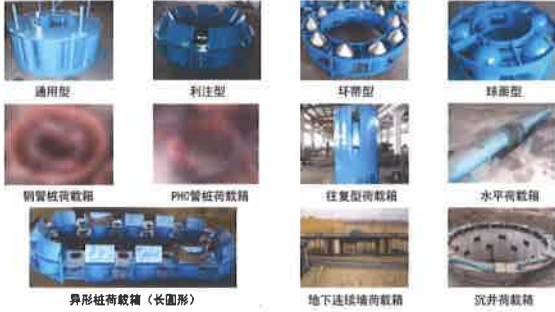


2018 第十二届  
**SUPER PILE WORLD**  
 国际大口径工程井(桩)  
 高峰论坛

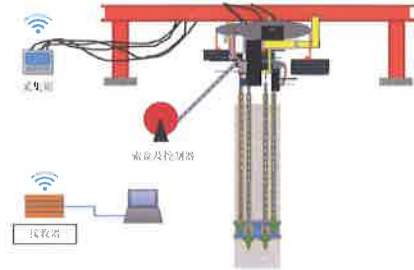
时间：2018年10月17-19日

地点：南京·江苏省会议中心（南京市玄武区中山东路307号）

荷载箱产品



• 东南大学在同一场地做了132个静载对比试验，结果表明自平衡法测试能够达到传统测试法的精度。



荷载箱生产



荷载箱安装



钢筋笼安装



钢筋笼就位





### 下放钢筋笼



a) 起吊



b) 就位



c) 下放

### 灌注混凝土



### 测试准备



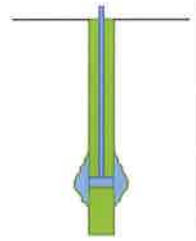
### 现场测试



### 讲解答疑



### 测试后压浆封闭





## 2大口径井(桩)自平衡法典型实例

### 工程应用实例

- 1 望东长江大桥根式基础测试
- 2 淮河特大桥根式基础测试
- 3 马尔代夫跨海大桥
- 4 地下连续墙
- 5 异形桩现场测试

## 2.1 望东长江大桥根式基础测试

### 一 工程概况

望东长江公路大桥是主跨638米五跨半漂浮体系斜拉桥。根据工程需要,对该工程的2个根式基础进行竖向承载力静载荷试验。根式基础直径5.0m、壁厚0.90m。



望东长江公路大桥效果图

## 二 根式基础参数一览表

里程桩号	试桩编号	试桩类型	桩径(m)	桩顶高程(m)	桩底高程(m)	桩长(m)	预估加载值(kN)
K12+530	A	根式基础(带根键)	5.0	+12.401	-34.599	47.00	2×70000
	B	根式基础(带根键)	5.0	+12.401	-34.599	47.00	2×70000

### 加载设备

每个荷载箱由10只千斤顶组合而成,其中5只千斤顶为1组,共计2组,在工地现场组装,用分配筏组成1个加载体。每个千斤顶加载量程为12000kN。



加载设备—环形荷载箱

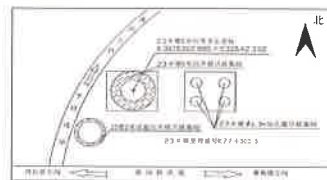
## 三 测试结果

试验日期	(全部根键顶进后10天)	(侧壁压浆后20天)
	2012/12/14	2013/03/02
试桩上段桩的最终加载值 $Q_{up}$ (kN)	37340	51333
试桩下段桩的最终加载值 $Q_{dl}$ (kN)	42000	56000
荷载箱上部桩自重 $W$ (kN)	13200	13200
试桩的修正系数 $\gamma$	0.8	0.8
单桩竖向抗压极限承载力 $F_u$ (kN)	$(37340-13200) \times 0.8 = 22272$	$(51333-13200) \times 0.8 = 31466$

## 2.2 淮河特大桥根式基础测试

### 一、试验综述

#### 基础平面布置图



#### 基础参数表

序号	项目	外径(m)	深度(m)	顶标高(m)	荷载箱底标高	下沉、封底施工阶段	顶入桩施工阶段
5	米根式基础	5	12	21.75	距底端1.0m	2006.04.24-08.25	2007.03.25-04.10
8	米根式基础	8	26	21.75(承台顶)	距底端4.3m	2006.05.13-11.09	2006.12.20-2007.01.09



5m外径根式基础所采用的荷载箱由8个千斤顶组成，4个为一组。每个千斤顶加载量程为4000kN。



5m根式基础荷载箱示意图



5m根式基础荷载箱现场图

8m根式沉井所采用的荷载箱由16个千斤顶组成，2个为一组，共8组1/8圆形荷载箱拼装而成。每个千斤顶加载量程为9000kN。



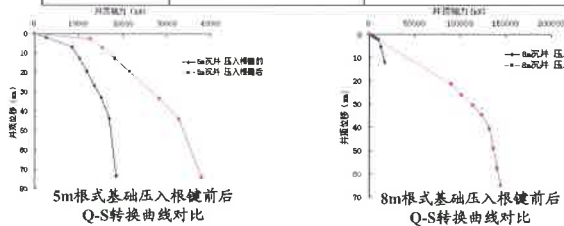
8m根式基础荷载箱示意图



8m根式基础荷载箱现场图

## 二、测试结果

	极限承载力（植入根键前）	极限承载力（植入根键后）
5m根式基础	17478 kN	26994kN
8m根式基础	14581 kN	114697kN



## 2.3 马尔代夫跨海大桥

大桥主桥基础采用 $\Phi 3600\text{mm}$ -- $\Phi 3200\text{mm}$ 钻孔桩，引桥基础采用 $\Phi 1500\text{mm}$ 钻孔灌注桩。

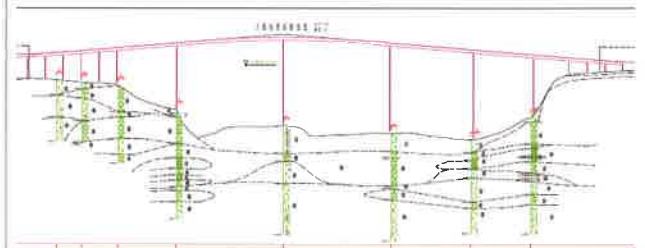


大桥效果图

## 一、工程地质条件

特殊地层条件：珊瑚礁灰岩，特殊性主要体现在如下方面：

- 1) 空间上，颗粒结构的极其复杂和不均匀性；
- 2) 各组构孔隙、孔洞的不均匀性；
- 3) 各组构胶结程度的不均匀性；
- 4) 颗粒易碎性，低围压下颗粒也有破碎；
- 5) 骨架性结构，具有很强的结构性强度。



工程地质剖面图





该桥SZ2试桩直径3.6~3.2m，桩顶高程+1.0m，桩底深入⑦1（角砾混砾块）层，桩底高程-86.83m。荷载试验采用**双荷载箱自平衡加载方式**。每个千斤顶加载量程为100000kN。

荷载箱与试桩参数表

桩号	桩径 (mm)	荷载箱编号	荷载箱参数			
			外径 (mm)	内径 (mm)	高度 (mm)	最大加载值 (kN)
SZ2	3200	SZ2-S	2920	1520	560	2×100000
		SZ2-X	2920	1520	560	2×100000

测试顺序：先进行上荷载箱测试，然后进行下荷载箱测试。

现场加工双荷载箱



#### 四、结论与建议

试桩编号	压浆模式	$P_{ui} = \frac{Q_{usi} - W_{sl}}{\gamma_i} + \frac{Q_{usi} - W_{sl}}{\gamma_i} + Q_{usi} \text{ (kN)}$
SZ2	压浆前	$(100000-3607) / 1.0 + (90000-2104) / 1.0 + 95000 = 279288$
	压浆后	$(100000-3607) / 1.0 + (100000-2104) / 1.0 + 95000 = 289288$

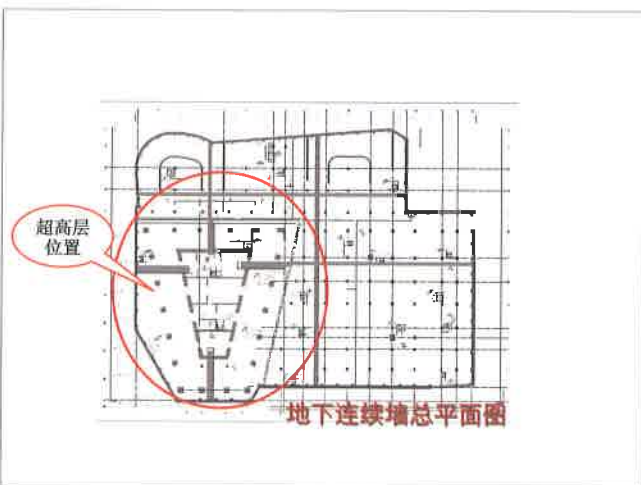
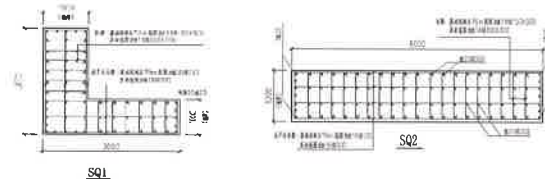
- 试桩采用旋挖清水钻孔施工工艺满足设计要求。
- 结果显示，桩基极限承载力远大于设计计算值170000kN。

#### 2.4 自平衡在地下连续墙中的应用

##### 一、工程概况

南京金茂广场总建筑面积约26.59万m<sup>2</sup>，结构高度285m。塔楼地上69层，地下为5层。塔楼结构采用型钢混凝土框架-钢筋混凝土核心筒混合结构。

地连墙墙深≥32m且进入⑤2岩层≥18m。



#### 2.4 自平衡在地下连续墙中的应用

##### 二、荷载箱布置

共测试三段地连墙，每段地连墙布置18个千斤顶。SQ-1试墙每个千斤顶加载量程为20000kN，SQ2-1、SQ2-2每个千斤顶加载量程为27000kN。

荷载箱参数表

序号	墙号	墙厚 (mm)	荷载箱参数			
			长 (mm)	宽 (mm)	高度 (mm)	最大加载值 (kN)
1	SQ1-	1000	2850+2850	820	700	300000
2	SQ2-1-	1200	5850	1020	700	400000
3	SQ2-2-	1200	5850	1020	700	400000



荷载箱现场焊接



荷载箱吊装



位移计安装

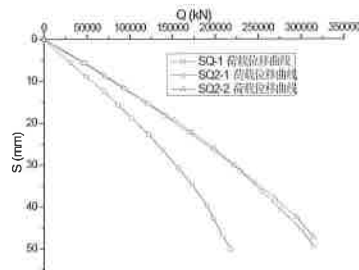


自平衡现场测试



### 三、测试结果

以SQ1试墙实测最大极限承载力为**217143kN**。SQ2-1试墙实测最大极限承载力为**313998kN**。SQ2-2试墙实测最大极限承载力为**313944kN**。

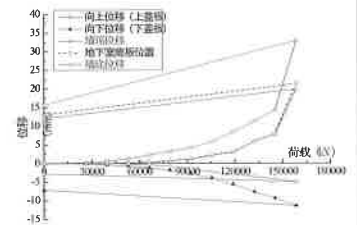


转换后各试墙荷载位移Q-s曲线

### 三、测试结果

以SQ2-1试墙为例，详细介绍测试结果。

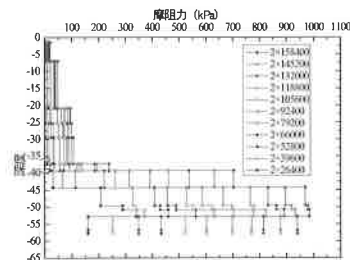
根据现场测试结果，实测荷载箱向上、向下位移曲线如右图所示；将荷载转为桩顶等效荷载位移，SQ2-1试桩实测最大极限承载力为313998kN，对应位移为49.43mm。



SQ2-1试验墙加载位移曲线

### 三、测试结果

随着加载等级的增加，桩侧的摩擦力逐渐发挥出来。由于地表以下40m范围内主要为粉质粘土，极限侧摩阻力低于100kPa，明显低于桩端以上18m范围的凝灰岩岩层的侧阻力。



SQ2-1试验墙侧摩阻力图

### 三、测试结果

下表是实测以及按照规范计算的侧阻力、端阻力占桩顶荷载的比值。试桩的侧阻力在墙的承载力构成中占主要部分，桩端阻力承担不到30%的桩顶荷载。由于端阻力未达到极限，试墙实际极限承载力会远大于32000kN。

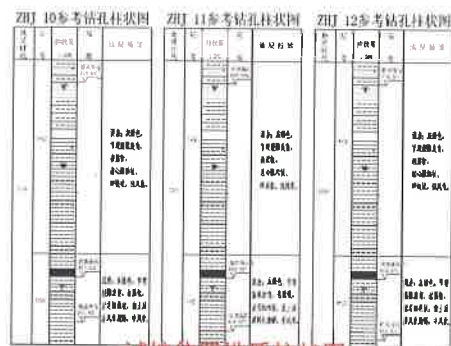
工况	实测结果		《建筑桩基技术规范》		《南京地区建筑地基基础设计规范》	
	数值	比例	数值	比例	数值	比例
桩侧阻力 (kN)	234848	74.79%	293727	75.95%	311143	83.76%
桩端阻力 (kN)	79150	25.21%	92987	24.05%	60329	16.24%
桩顶荷载 (kN)	313998	—	386714	—	371472	—



## 2.5 自平衡在异型桩中的应用

### 一、工程概况

遵义市昆明路唯一国际9#楼为坡地建筑，上段建筑与下段建筑分段界面设于903.100（绝对标高）处。上段建筑相对标高±0.000相当于绝对标高903.000，高度为98.90m，总层数34层；下段建筑相对标高±0.000相当于绝对标高863.500，下段建筑高度为39.9m，总层数为11层。框支剪力墙结构。



试桩位置地质柱状图

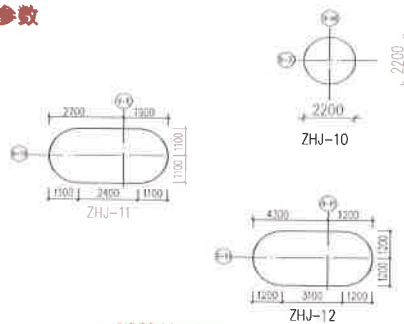
### 二、试桩参数

共测试三根桩，ZHJ-10、ZHJ-11、ZHJ-12型各一根

试桩参数表

桩号	桩顶标高 (m)	桩长 (m)	桩径 (mm)	边长 (mm)	单桩竖向承载力特征值 (kN)	受力形式
ZHJ-10	876.55	35	2200	—	24617	抗压
ZHJ-11	876.55	37	2200	2400	38000	抗压
ZHJ-12	876.55	45	2400	3100	45000	抗压

### 二、试桩参数

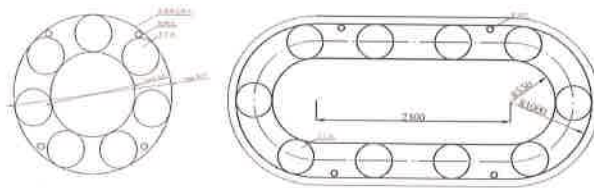


试桩桩型图

### 三、荷载箱布置

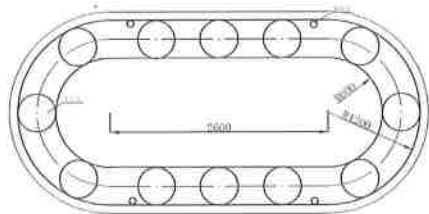
荷载箱参数表

试桩编号	桩尺寸 (m)		桩长 (m)	荷载箱参数			
	桩径	边长		外径 (mm)	内孔 (mm)	高度 (mm)	最大加载值 (kN)
ZHJ-10	2200	—	35	2000	1080	660	550000
ZHJ-11	2200	2400	37	2000	1100	660	836000
ZHJ-12	2400	2600	45	2200	1300	660	990000



ZHJ-10荷载箱尺寸图

ZHJ-11荷载箱尺寸图



1:10  
2018.10.17  
2018.10.17  
2018.10.17  
2018.10.17

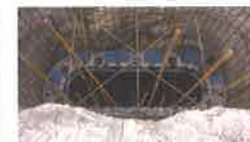
**ZHJ-12荷载箱尺寸图**



荷载箱现场焊接



荷载箱吊装



自平衡现场测试

#### 四、测试结果

根据实测结果，ZHJ-10桩实测竖向抗压承载力**55048 kN**；ZHJ-11桩实测竖向抗压承载力**79796 kN**；ZHJ-12桩实测竖向抗压承载力**92778 kN**。

### 2.6 封闭式地下连续墙

#### 1 依托工程概况

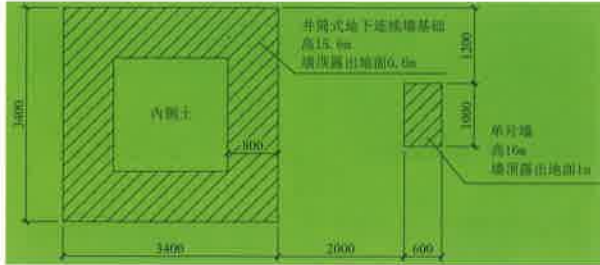
- ▶ 本项目采用晋陕边界黄土高原上国道209线河津~临猗一级公路的一座跨线桥梁作为依托工程。原方案拟采用钻孔灌注桩基础，现结合科研项目采用地下连续墙基础。
- ▶ 经过各参加单位的共同努力，克服重重困难，于2005年3月11日至26日圆满完成现场荷载试验。



桥址区现场情况

#### 2 试验对象

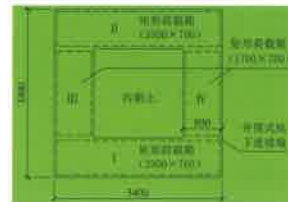
- ▶ 本次试验主要是研究黄土地区地下连续墙竖向及水平向承载性能。
- ▶ 模型墙包括一井筒式地下连续墙和一单片墙，对井筒式地下连续墙进行竖向荷载试验，对单片墙进行水平荷载试验。
- ▶ 井筒式地下连续墙断面尺寸为3.4m×3.4m，墙厚0.8m，墙高15.6m，其中埋深15m，墙顶露出地面0.6m。
- ▶ 单片墙截面尺寸为1.0m×0.6m，墙高16m，墙顶露出地面1m。



### 3 施工情况

➤ 施工顺序如下: 先对单片墙 I 成槽, 将钢筋笼与荷载箱入槽就位, 随即浇筑混凝土, 完成单片墙 I 的施工。

在单片墙 I 混凝土开始浇筑的同时, 对单片墙 II 成槽。待单片墙 I、II 施工完成后, 以相同工序施工单片墙 III、IV。相邻两片墙之间刚性连接。



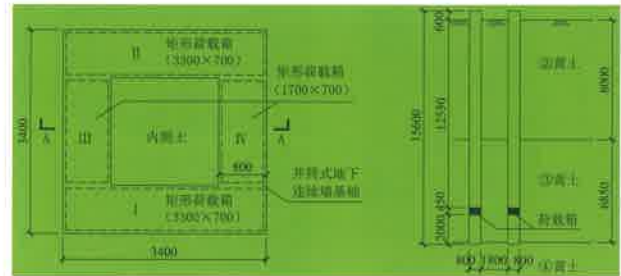
### 4 竖向载荷试验

#### 加载设备

➤ 距端部2m处设置4个荷载箱, 2个尺寸为3300mm×700mm, 另2个尺寸为1700mm×700mm, 高均为450mm, 行程均为220mm。



➤ 高压油泵: 最大加压值为60MPa, 加压精度为每小格0.5MPa。



平面图

荷载箱布置示意图

A-A

#### 加载装置及安装

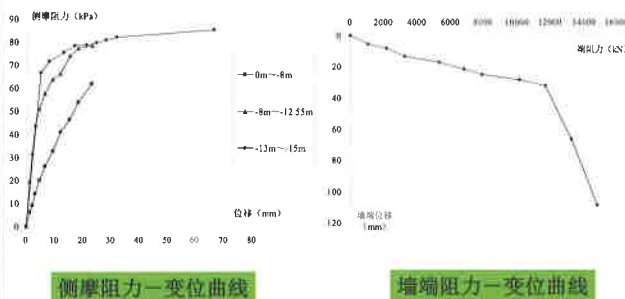


#### 试验墙施工

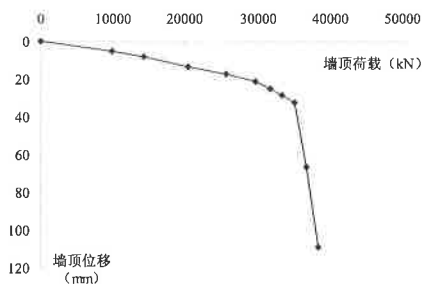




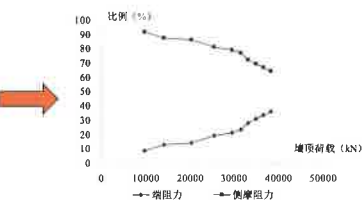
### 测试结果



### 测试结果



### 侧摩阻力和端阻力发挥比例



极限侧阻力、极限端阻力地质报告提供值与实测值的比较

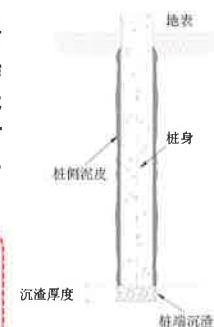
层号	土层名称	地质报告极限侧阻力 $[\xi]$ (kPa)	地质报告极限端阻力 $[\sigma_q]$ (kPa)	实测极限侧阻力 $[\xi]$ (kPa)	实测极限端阻力 $[\sigma_q]$ (kPa)
②	黄土	30	—	—	—
③	黄土(荷载箱上部)	50	—	74.7	—
③	黄土(荷载箱下部)	50	716	85.1	1377



### 3承载力提升技术(桩侧桩端组合压浆技术)

钻孔灌注桩因桩长和桩径可以灵活选取, 施工不受季节限制, 对环境污染较小, 承载潜能大, 成桩质量可靠等优点, 该形式在各种基础中应用越来越广泛。但实际工程中钻孔灌注桩也存在一些问题, 主要表现在以下几个方面:

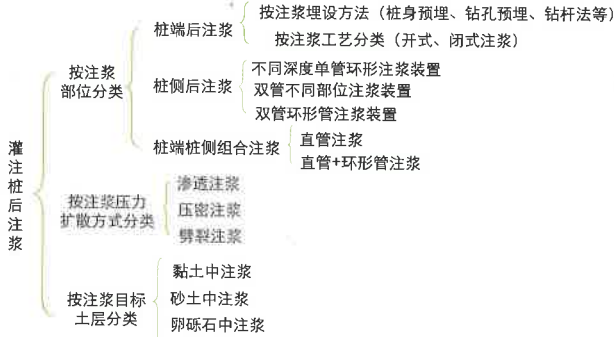
1. 桩侧泥皮及应力松弛问题;
2. 桩端沉渣及持力层扰动问题;
3. 桩身灌注混凝土质量问题;
4. 钻孔灌注桩竖向承载力离散性问题。



泥浆护壁钻孔桩泥皮沉渣

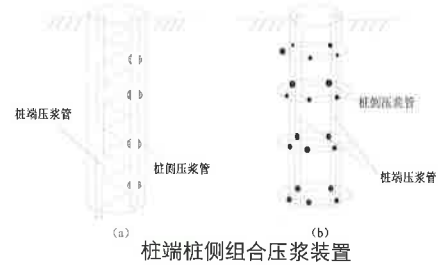


后注浆技术分类



桩端桩侧组合压浆 (Combined Grouting of Pile-end and Side)

桩端桩侧组合压浆桩侧和桩端均进行压浆。



后压浆对桩承载力提高机理

桩端压浆提高桩基承载力主要表现在以下几方面：

1. 压浆对桩端土体的加固作用；
2. 压浆形成桩端扩大头
3. 浆液上返对桩侧的加固作用



桩端扩大头

后压浆对桩承载力提高机理



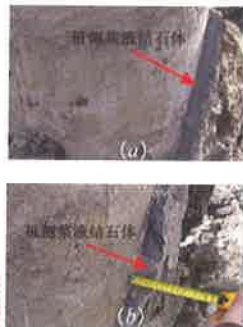
注浆前后桩端土的变化

后压浆对桩承载力提高机理

桩侧压浆对桩承载力提高机理

- 一是加固桩周土层，在高压注浆作用下，水泥浆液渗透到桩侧壁的土体中，并与桩侧土体固化胶结；
- 二是提高侧摩阻力，桩侧后压浆的水泥浆液，可以改善和消除桩孔护壁泥皮，充填挤密桩身混凝土与桩侧周围土体间的间隙和桩身混凝土固化缩径形成的间隙。

增强了桩侧混凝土与桩周土体之间的黏结力，提高了桩侧土体强度，从而提高了桩侧摩阻力，使桩的水平承载力大大提高，基础的水平位移大大减小。



桩侧浆液结结石体

后压浆对桩承载力提高机理



桩侧注浆开挖效果图



智能化后注浆

后注浆技术虽然优点突出，但目前的机具设备多样，施工技术 & 质量控制标准不够规范，从而导致工程应用中的注浆后承载力提高幅度离散性很大。课题组在研究后压浆技术的基础上，开发了**桥梁灌注桩智能化后注浆系统**，建立了标准、规范的注浆智能化设备和系统，并且能保证后注浆施工质量和实施效果。

智能化后注浆

**自动控制系统及数据传输设备**：水、水泥用量通过流量计与电脑相连，直接通过电脑程序自动控制，注浆过程中注浆压力及水泥浆流量通过压力传感器、流量计与电脑连接，通过程序实时监控，数据可以实时上传。



(a) SBL靶式流量计 (b) XK3101称重计 (c) JSDC-60压力传感器

智能化后注浆

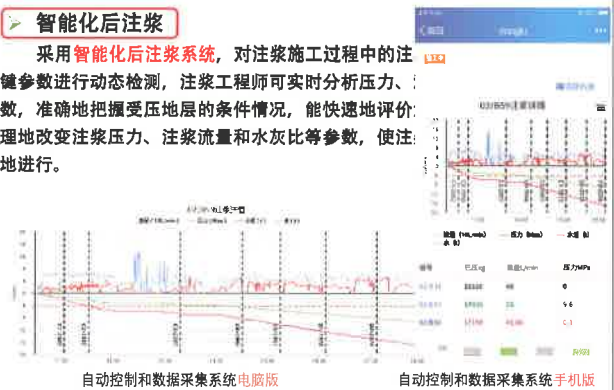
**注浆数据采集系统**是按照“双控多分流”的方式进行控制并完成。“双控”是指系统计量与控制上料量，并且同时记录与监控出浆的瞬时水泥浆流量，总水泥浆流量，实时压力与注入的水泥量。



自动控制系统中心

智能化后注浆

采用**智能化后注浆系统**，对注浆施工过程中的关键参数进行动态检测，注浆工程师可实时分析压力、流量、数据，准确地把握受压地层的条件情况，能快速地评价、合理地改变注浆压力、注浆流量和灰水比等参数，使注浆地进行。



自动控制和数据采集系统电脑版

自动控制和数据采集系统手机版

石首长江公路大桥桩基础中应用

**石首长江公路大桥**：石首长江公路大桥主桥推荐采用主跨820米斜拉桥方案，工程规模大，技术含量高，属于世界级桥梁工程。桥址区揭露的地层均为第四系松散沉积物，桥位区基岩埋深在250m以下，钻探180m未见基岩，基本全为**细砂地层**，属于超厚软弱地层，地质条件较差。



石首长江公路大桥效果图

石首长江公路大桥桩基础中应用

**桩端桩侧组合注浆技术**应用于超厚粉细砂地层桥梁钻孔桩中（主桥索塔基础设计采用超长大直径钻孔灌注桩，桩径为2.0m、2.2m，桩长为90m~120m；引桥试桩采用大直径钻孔灌注桩，桩径为1.5m、1.8m、2.0m，桩长为40m~54m）。

表4.4 引桥试桩参数

试桩编号	桩径 (mm)	桩长 (m)	桩端持力层	试桩编号	桩径 (mm)	桩长 (m)	桩端持力层
SSSZY01	2000	50	细砂	SSSZY05	1800	54	细砂
SSSZY02	2000	50	细砂	SSSZY06	1800	54	细砂
SSSZY03	2000	52	细砂	SSSZY07	1500	40	细砂
SSSZY04	2000	52	细砂	SSSZY08	1500	40	细砂