

# 桩后压浆基桩完整性评价与承载力检测研究

李 佳<sup>1,2</sup>, 肖衡林<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学, 武汉 430068; 2. 浙江交科工程检测有限公司, 杭州 311215)

**摘 要:**在对浙江东部沿海地区某大型高速公路工程 3900 多根采用桩后压浆工艺的桥梁钻孔灌注桩进行分类的基础上,采用超声波法、反射波法、堆载法和自平衡法等检测方法,并结合现行的检测规范,对基桩进行了完整性及承载力检测和评价,并用一定数量的钻芯验证了检测结果,同时对比分析了直管法和 U 管法压浆工艺基桩的施工质量,剖析了桥梁钻孔灌注桩后压浆工艺造成桩身缺陷及承载力不足等现象的成因,还比较了不同检测方法之间的优劣性。研究为钻孔灌注桩后压浆工艺的推广提供了技术支持,也为后压浆工艺桥梁基桩施工质量的检测技术选择提供了建议。

**关键词:**基桩;桩后压浆工艺;完整性;承载力;超声波法;堆载法

**中图分类号:**TU473.1+6

**文献标志码:**A

## 引 言

在我国浙江东部沿海地区,软土地基较为常见,此类型的地基结构具有摩阻力低、承载力弱、湿陷性等特点,会使桥梁下部基桩产生如桩长过长、桩径过大和后期承载力不足等问题,这不仅导致施工难度大,而且费用高。有研究发现采用后压浆技术能有效提高桩端承载力和侧摩阻力,可解决上述问题<sup>[1]</sup>。近年来部分学者对采用后压浆工艺对基桩承载力提升的影响进行过研究,如冯晓平等<sup>[2]</sup>以北京首都机场扩建工程三号航站楼的工程项目为依托,对后压浆技术提高钻孔灌注桩承载力的情况进行了论述,王殿红<sup>[3]</sup>对石家庄某工程中采用灌注桩后压浆法提高 1.8 倍承载力的实践进行了介绍。但这些研究样本较少,且未对基桩完整性检测结果及其成因进行系统的分析研究。

浙江东部沿海地区在建某大型高速公路工程(以

下简称该工程)是浙江省内第一个全线采用后压浆工艺的工程,在我国交通建设行业中被列为全国“品质工程”示范点,其 3942 根桥梁基桩均采用了直管法或 U 管法的压浆工艺。压浆工艺技术在理论上虽然已经成熟,但相关技术规范偏少,在实际施工应用过程中可能因操作不当而不能完全达到预期效果,如某高层建筑的 1A-1#灌注桩,因压浆持荷时间不足造成桩底浆液不扩散,经承载力检测后发现不满足设计要求<sup>[4]</sup>。鉴于此,本文以浙江东部沿海地区在建某大型高速公路工程为依托,对桥梁基桩后压浆技术及其检测技术进行研究,将理论分析和现场试验检测相结合,在桥梁桩后压浆基桩完整性与承载力评价结果的基础上,剖析其成因和存在的问题,探索应对之策,以期为该工程的后续建设提供理论及技术指导,并为基桩后压浆技术及其质量检测方法提供建议。

收稿日期:2018-07-02

作者简介:李 佳(1982-),男,浙江杭州人,高级工程师,硕士,主要从事交通工程结构方面的研究,(E-mail)200801203@qq.com.

## 1 桩端后压浆技术

钻孔灌注桩后压浆技术是成桩时在桩底或桩侧预置压浆管路和压浆装置,待桩身达到一定强度后,通过压浆管路(直管法或U管法)利用高压压浆泵压注以水泥为主剂的浆液,根据浆液性状、土层特性和注浆参数等不同,压力浆液对桩端沉渣、桩侧泥皮及桩周土体起到渗透、填充、置换、劈裂、压密及固结等不同的作用<sup>[5]</sup>,对孔底沉渣和桩侧泥皮进行固化,通过改变土体的物理力学性能及桩土间边界条件,达到提高桩的承载力,减少沉降量,并提高桩身质量和桩承载力可靠性的目的<sup>[6-7]</sup>。桩后压浆工艺总体布置如图1所示。

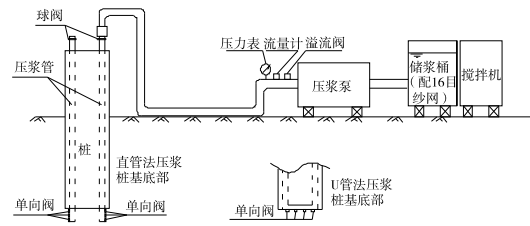


图1 桩后压浆工艺总体布置

## 2 桩后压浆基桩完整性检测

基桩桩身完整性检测目前普遍采用的是低应变反射波法和声波透射法,两种方法各具特点。该工程桥梁桩基进行完整性检测时所采用的方法、基桩数量、钻芯数量等情况见表1。

表1 桥梁桩基完整性检测方法选择及样本分布情况

检测方法	涉及桥梁数量/座	基桩长度/m	基桩数量/根	所占比/%	钻芯数量/根
超声波透射法	34	55.0~110.0	3568	90.5	20
反射波法	34	21.6~55.0	374	9.5	3

从表1可知,基桩总样本数为3942根,其中选用超声波透射法进行完整性检测的有3568根,占比90.5%,其长度介于55.0m~110.0m之间,钻芯数量为20根;选用反射波法进行完整性检测有374根,占比9.5%,其长度介于21.6m~55.0m之间,钻芯数量为3根。由此说明该工程实施完整性检测时已考虑到现场检测条件和设计的要求<sup>[8]</sup>,且有一定数量的钻芯用于检测结果的验证。

### 2.1 超声波法

#### (1) 原理与方法

当超声波在被测基桩混凝土中传播时,它将携带有关混凝土材料性质、内部结构与组成的信息,从而改变声波的各种声学参数,如波速、波幅、频率、波形等;当桩身出现断裂、离析缩颈、夹泥、蜂窝等缺陷时,实测的声速、波幅都会出现不同程度的降低,产生PSD值突变,波形会发生不同程度的畸变<sup>[9]</sup>。《公路工程基桩动测技术规程》<sup>[10]</sup>对于超声波法检测基桩完整性的判定方法见表2。

#### (2) 检测结果与分析

采用超声波透射法检测了3568根桥梁基桩的完整性检,结果见表3,超声波波速、波幅、PSD曲线图与桩底

波列情况如图2所示<sup>[8]</sup>。

表2 超声波法检测基桩完整性的判定方法

类别	特征
I	各声测剖面每个测点的声速、波幅均大于临界值,波形正常
II	某一声测剖面个别测点的声速、波幅略小于临界值,但波形基本正常
III	某一声测剖面连续多个测点或某一深度桩截面处的声速、波幅值小于临界值,PSD值变大,波形畸变
IV	某一声测剖面连续多个测点或某一深度桩截面处的声速、波幅值明显小于临界值,PSD值突变,波形严重畸变

表3 超声波法检测结果

基桩深度/m	完整性类别				备注
	I	II	III	IV	
55.0~75.0	2357	14	3	2	直管法
75.0~95.0	1098	27	8	3	直管法
95.0~110.0	43	4	2	0	主桥主墩U型管法
合计/根	3498	45	13	5	
占比/%	98.2	1.2	0.4	0.2	

从表3可知,完整性为I类的基桩合计3498根,占样本总数的98.2%;II类基桩合计45根,占1.2%;III类基桩合计13根,占0.4%;IV类基桩合计13根,占0.2%。从图2可知,除个别基桩的缺陷信号出现在其桩身部位外,完整性为III类及IV类的基桩缺陷信号基本处在桩底位置。

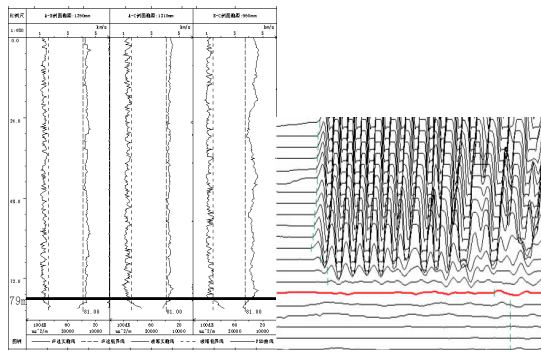


图 2 超声波波速、波幅、PSD 曲线图与桩底波列图

## 2.2 反射波法

### (1) 原理和方法

低应变反射波法是用手锤或力锤、力棒敲击桩顶,一个加速度传感器安装在桩顶平面或桩身侧面,负责接收手锤敲击产生的应力波信号。当桩身阻抗变化时,就会产生早反射波(2L/C 之前)信号(或桩底反射波信号)<sup>[9]</sup>。《公路工程基桩动测技术规程》<sup>[10]</sup>对于反射波法检测基桩完整性的判定方法见表 4,根据反射波的相位、到达时间和幅值来判定缺陷的性质、位置及程度。

表 4 反射波法检测基桩完整性的判定方法

类别	特征
I	桩端反射较明显,无缺陷反射波,振幅谱线分布正常,混凝土波速处于正常范围
II	桩端反射较明显,但有局部缺陷所产生的反射信号,混凝土波速处于正常范围
III	桩端反射不明显,可见缺陷二次波反射信号,或有桩端反射但波速明显偏低
IV	无桩端反射信号,可见因缺陷引起的多次强反射信号,或按平均波速计算的桩长明显短于设计桩长

### (2) 检测结果与分析

用反射波法检测了 374 根桥梁基桩的完整性,结果见表 5,典型的反射波法检测波形图如图 3 所示<sup>[8]</sup>。

表 5 反射波法检测结果统计表

基桩深度/m	基桩完整性类别				备注
	I	II	III	IV	
10.0~25.0	249	13	0	0	直管法
25.3~45.0	111	1	0	0	未桩后压浆法
合计/根	360	14	0	0	
占比/%	96.3	3.7	0	0	

从表 5 可知,完整性为 I 类的基桩占总样本数的

96.3%, II 类基桩占 3.7%,表明桩后压浆基桩的完整性总体情况良好。从图 3 可知,14 根 II 类基桩缺陷信号全部出现在桩身中上段,桩底端无缺陷信号<sup>[8]</sup>,说明桩端压浆与桩中上部缺陷无必然联系。

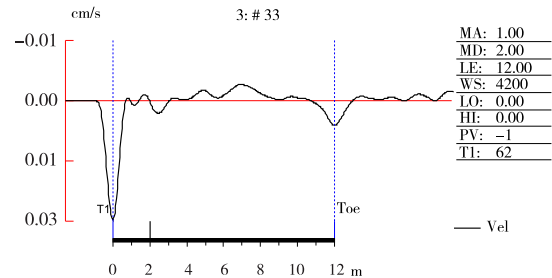


图 3 典型反射波法检测波形图

## 2.3 完整性检测结果成因分析

(1) 直管法后压浆工艺基桩经超声波法检测完整性时,发现完整性为 III 类及 IV 类的缺陷信号基本处在桩底位置,经钻芯法验证,确定缺陷成因主要是压浆工艺造成开塞后声测管(兼做压浆管)周边混凝土离析,且缺陷部位厚度与出浆口长度一致。直管法后压浆工艺单向阀布置示意图如图 4 所示,直管法声测管(压浆管)开塞引起周边混凝土局部离析如图 5 所示。

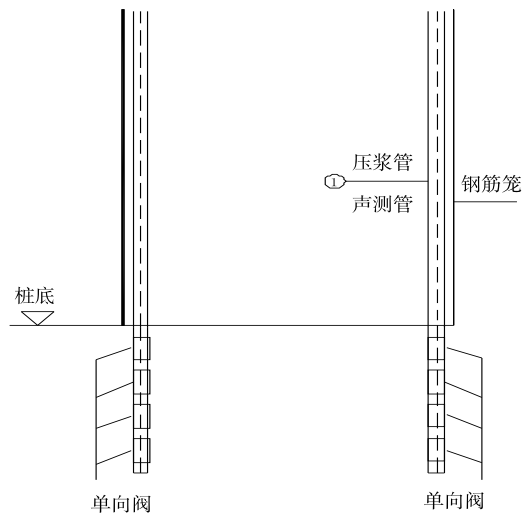


图 4 直管法单向阀布置示意图

(2) U 管法后压浆工艺基桩经超声波法检测完整性时,经钻芯法验证,发现缺陷信号主要由开塞后水泥浆向开塞口上部溢出形成一定厚度的水泥浆介质而引起,超声波穿透水泥浆时波速明显低于穿透混凝土的波速,因此出现桩身局部的波速、波幅明显低于临界



图5 直管法声测管(压浆管)开塞引起周边混凝土局部离析

值,PSD值畸变<sup>[8]</sup>,按规范判为缺陷桩。由此说明,若施工不当采用U管法后压浆工艺可能会对桩端承载力的发挥起负面作用。U管法单向阀布置示意图如图6所示,U管法声测管(压浆管)开塞引起介质变化如图7所示。

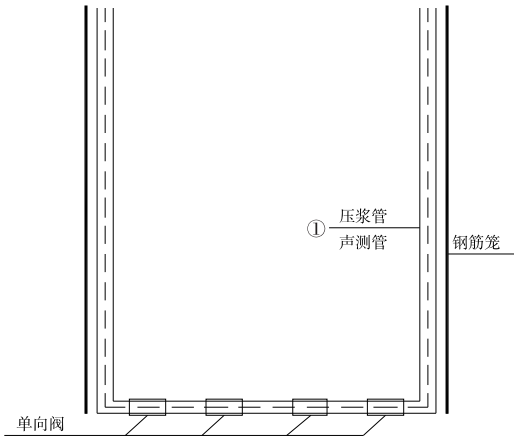


图6 U管法单向阀布置示意图



图7 U管法声测管(压浆管)开塞引起介质变化

(3)直管法后压浆工艺基桩经反射波法检测完整性时,发现14根Ⅱ类桩的缺陷信号全部出现在桩身中上段,桩底端无缺陷信号。其原因可能有以下几点:①因反射波法本身的局限性<sup>[11]</sup>而无法检测到压浆管周围的局部缺陷;②所检桩桩身成孔(成桩)施工质量较好,自身确实无缺陷;③所检桩桩长较短(深度 $\leq 25.0$  m),有利于压浆工艺实施,保证了桩端压浆部位的质量。因此建议桩后压浆的基桩进行完整性检测时优先采用超声波法,避免因检测方法自身的局限等造成误判、漏判,以便更加全面地检测出包括端部在内的整个桩身的质量及其完整性。

### 3 承载力检测

该工程桥梁桩基根数总计3942根,主桥基桩采用U管压浆工艺,接线工程采用直管法压浆工艺。经现场踏勘,综合考虑桩长、设计桩顶最大竖向荷载、基桩轴向受压容许承载力设计值等因素,选定16根基桩采用堆载法、10根基桩采用自平衡法进行承载力检测,共计26根。

根据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/TF50-2011)附录B:对于检验性试验,基桩承载力测试时预估最大荷载可采用设计荷载的2.0倍,该工程在检测中的试验要求最大荷载按设计轴向容许承载力的2.0倍取值。

#### 3.1 堆载法

堆载法是单桩竖向静载试验提供反力的一种方式,即通过以试桩为中心搭设试验平台,码放砂袋、混凝土配重、钢锭等,通过千斤顶加压,给试桩提供竖向压力,从而检验试桩的承载力是否满足设计要求。

选取16根基桩采用堆载法进行承载力检测,基桩参数、试验要求最大荷载及检测结果见表6,典型基桩(满足设计要求)与16-5#基桩(不满足设计要求)的堆载法承载力测试曲线分别如图8、图9所示<sup>[12]</sup>。

表 6 堆载法承载力检测结果统计

现场桩号	桩径/m	桩长/m	摩擦桩/ 嵌岩桩	设计桩顶最大竖向 荷载/kN	设计单桩轴向受压 容许承载力/kN	试验要求最大 荷载/kN	检测结果 /kN
16-5	1.5	41.8	摩擦桩	5176	8651	17302	=13841
19-4	1.5	45.8	摩擦桩	5176	9006	18012	≥18012
44-0	1.6	43.8	嵌岩桩	5176	5176	10352	≥10352
左 19-3	1.5	60.0	摩擦桩	6030	12057	24114	≥24114
左 20-2	2.0	60.0	摩擦桩	6120	12057	24114	≥24114
右 22-2	2.0	58.0	嵌岩桩	6740	6740	13480	≥13480
37-Y2	1.5	55.8	摩擦桩	5400	6742	13484	≥13484
38-Y2	1.5	55.81	摩擦桩	5400	6742	13484	≥13484
12-2	1.6	69.6	摩擦桩	7974	10175	20350	≥20350
13-3	1.3	69.0	摩擦桩	5552	7220	14440	≥14440
L1-5	1.5	48.0	摩擦桩	4875	5815	11630	≥11630
78-6	1.5	48.5	摩擦桩	6215	6450	12900	≥12900
A12-1	1.6	55.0	摩擦桩	5700	5700	11400	≥11400
B1-2	1.6	48.3	摩擦桩	6105	6450	12900	≥12900
C4-1	1.5	41.0	嵌岩桩	5201	5415	10830	≥10830

从表 6 和图 8 可知,除 16-5#基桩外,其他 15 根基桩在最大试验荷载作用下,总沉降量均在规范规定的允许范围之内<sup>[13]</sup>,其 Q-S 曲线均属平缓型、S-lgt 曲线均属平直型,说明绝大多数基桩的承载力都能满足设计要求。

kN。根据沉降随时间变化的特征确定,单桩竖向抗压极限承载力应取 S-lgt 曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载值<sup>[13]</sup>,16-5#基桩的单桩竖向抗压极限承载力实际为 13 841 kN,低于试验要求的最大荷载 17 302 kN,表明其承载力不满足设计要求。

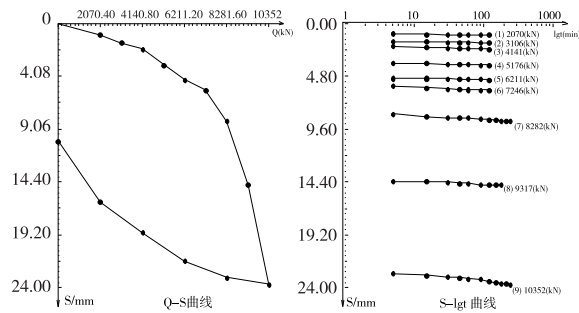


图 8 典型基桩堆载法承载力测试曲线

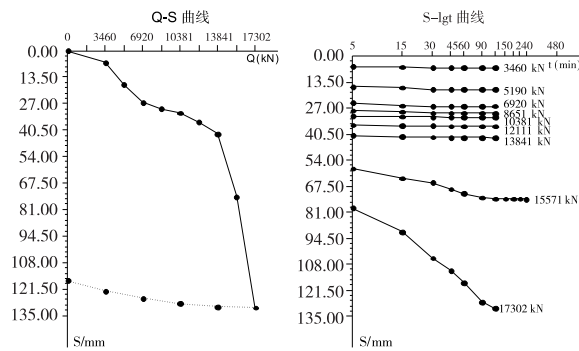


图 9 16-5#基桩堆载法承载力测试曲线

从表 6 和图 9 可知,16-5#基桩试验要求的最大荷载为 17 302 kN,但实际检测到的最大荷载只有 13 841

### 3.2 自平衡法

自平衡检测系统组成及受力示意图如图 10 所示。

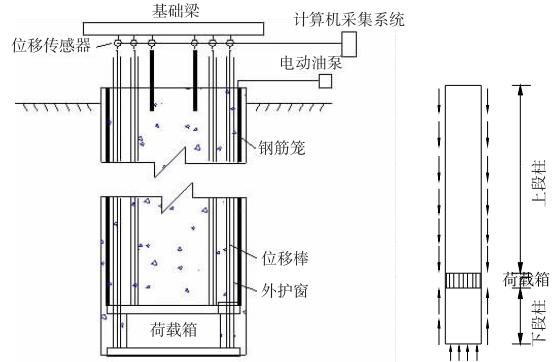


图 10 自平衡检测系统组成及受力示意图

从图 10 可知,自平衡试桩法的主要装置由加载系统、数据采集系统、荷载与位移的量测装置组成。其检测原理是将特制的加载装置荷载箱,在混凝土浇筑之前和钢筋笼一起埋入桩内相应的位置,将加载箱的加压管以及所需的其他测试装置从桩体引到地面,然后灌注成桩。加压泵在地面向荷载箱加压加载,使得桩体内部产生加载力,通过对加载力与这些参数之间的关系之计算和分析,从而获得桩基承载力。

与传统的堆载法试验比较,自平衡法有独特的优势,例如装置较简单,占用场地空间小,不需要运入数百吨或数千吨物料,不需构筑笨重的反力架,可多根桩同时测试,试验准备工作省时、省力、安全。当遇到水上试桩、超长桩、坡地或狭窄场地试桩、斜桩、嵌岩桩等,或当设置传统的堆载平台或锚桩反力架特别困难或检测费用巨大等情况时,自平衡法更具优势。

算,单桩极限承载力为单桩设计容许承载力的 2.01 ~ 2.17 倍之间,该工程按设计轴向容许承载力的 2.0 倍加载。按检测计划,综合考虑桩长、试验要求最大荷载及因水上试桩检测不便等原因,选取 10 根基桩采用自平衡法进行承载力检测,基桩参数、试验要求最大荷载及检测结果见表 7,基桩自平衡法承载力测试曲线如图 11 所示<sup>[14]</sup>。

根据桩自平衡静载试验极限承载力  $QU$  计算公式计

表 7 自平衡法承载力检测结果统计表

现场桩号	桩径/m	桩长/m	摩擦桩/嵌岩桩	设计单桩轴向受压容许承载力/kN	试验要求最大荷载/kN	$S_{上}$ /mm	$S_{下}$ /mm	检测结果 /kN
12-5	1.50	26.00	嵌岩桩	24375	$2 \times 24400$	21.31	8.96	52136
18-4	1.50	34.86	摩擦桩	24375	$2 \times 24400$	24.32	9.92	51367
6-2	1.50	71.00	嵌岩桩	13492	$2 \times 14500$	19.77	12.24	29340
9-2	1.50	73.00	摩擦桩	14463	$2 \times 14500$	18.97	12.64	29175
15-6	1.50	77.00	摩擦桩	7844	$2 \times 8500$	19.48	12.70	17539
28-2	2.00	77.50	嵌岩桩	16733	$2 \times 17000$	31.53	27.64	34120
01-03	2.00	112.0	摩擦桩	26270	$2 \times 28000$	2.87	2.78	56613
02-04	2.00	110.0	摩擦桩	25733	$2 \times 26000$	10.13	10.43	52230
26-4	2.00	90.00	摩擦桩	24107	$2 \times 24100$	11.22	4.20	48398
22-4	2.00	83.00	摩擦桩	21814	$2 \times 22000$	13.58	3.97	44176

从表 7 和图 11 可知,各桩加载到试验要求最大荷载时,向上、向下总位移量均在规定的允许范围内<sup>[14]</sup>,  $Q_{上} - S_{上}$ 、 $Q_{下} - S_{下}$  曲线呈缓慢变化,无明显陡降段,

$S \sim \lg t$  曲线呈平缓规则排列,且在各级荷载下桩变形成较快稳定。

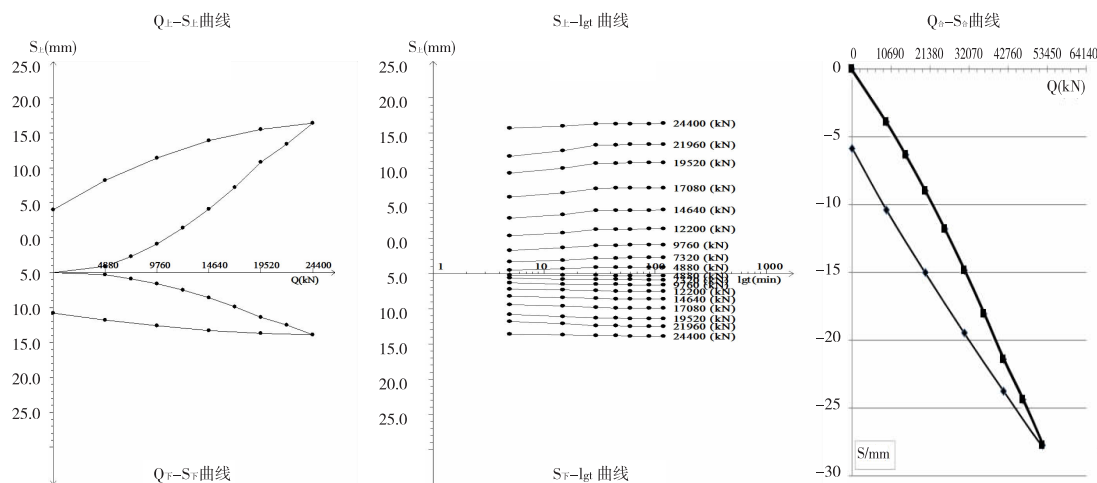


图 11 基桩自平衡法承载力测试曲线

#### 4 结束语

以浙江东部沿海地区某大型高速公路工程的 3942

根桥梁基桩完整性及承载力的检测结果为依托,结合现有桩后压浆工艺的利弊分析,对基桩完整性及承载力的检测方法和基桩压浆工艺的选择及应用方面的经验进

行总结如下:

(1)与直管法相比,采用U型管法的压浆工艺更能提高浆液均布在桩身底端的机率,但若成孔深度未达到设计标高,则会造成设计桩长不足,不能达到设计验算过的理论单桩轴向设计承载力,从而引起结构安全隐患<sup>[15]</sup>。

(2)采用直管法的压浆工艺在压浆过程中可能造成压浆管(兼做声测管)出浆口周边混凝土离析,采用超声波法完整性检测时会将其判为缺陷部位,且缺陷厚度即出浆口高度,此时需要结合其他方法综合判定。

(3)因不同的工程地质条件有差异,不可能有相同的压浆参数,采用后压浆工艺时一定要按照适用于该工程的规范、标准对水泥浆强度、压浆压力、压浆总量及持续时间进行质量控制,并要保证各压浆管畅通。

(4)由于反射波法自身检测原理的局限性及对桩身材质变化的不灵敏性<sup>[16]</sup>,加之检测人员水平的参差不齐,建议在对桩后压浆的基桩进行完整性检测时不首选该方法。

(5)由于自平衡法检测基桩承载力的原理决定,采用该方法加载完成后,往往不能将加载结果直接套用传统试验规程来进行类比,得出安全性结论,而是将加载结果转换以后,才能套用传统试验规程进行类比,得到的承载力往往偏大,得出安全性结论的过程也较为间接。堆载法相对于自平衡法来说,在检测基桩承载力时更为直观准确,建议在现场具备检测条件时用堆载法或锚桩法来实施检测。

总之,钻孔灌注桩后压浆技术具有提高单桩承载力、提高生产率、节约建设资金等优点,在具备施工、地质等条件的工程中推广有着重要的意义和广阔的前景,但若与具体工程配套的压浆工艺不成熟,势必造成桩身质量缺陷,而检测人员在检测基桩完整性及承载力时应综合考虑多方面因素<sup>[17]</sup>,才能得到最正确有效的数据,从而保证工程的质量与安全。

#### 参考文献:

[1] 赵佩胜,于亮,王维.钻孔灌注桩桩底沉渣压浆处理技术[J].地下空间与工程学报.2009,5(1):129-132.

- [2] 冯晓平,段敏,吴春秋.后压浆提高钻孔灌注桩承载力的试验研究[J].建筑科学,2006,22(4):10-12.
- [3] 王殿红.采用压浆法大幅度提高单桩承载力的探索与实践[J].建筑工程技术与设计,2015(27):1960,1484.
- [4] 林明慧,陈志坚.超长直径钻孔灌注桩后压浆试验及应用[J].勘查科学技术,2016(5):25-29.
- [5] 宇文斌.后插钢筋笼灌注桩后压浆工艺的应用[J].岩土工程技术,2017,31(4):211-216.
- [6] 李昌馥,龚维明,戴国亮,等.大直径钻孔灌注桩桩端后压浆试验研究[J].公路,2004(5):55-59.
- [7] 戴国亮,龚维明,薛国亚,等.超长钻孔灌注桩桩端后压浆效果检测[J].岩土力学,2006,27(5):849-852.
- [8] 李佳.浙江省乐清湾大桥及接线工程桥梁基桩完整性检测报告[R].浙江交科工程检测有限公司,2016.
- [9] 许峰,李佳,张海丰.低应变反射波法在实际工程中的应用及常见问题解析[J].公路工程,2012,37(4):167-169,184.
- [10] 中华人民共和国交通部.JTG/T F81-01-2004 公路工程基桩动测技术规程[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [11] 刘豪杰.低应变法检测基桩完整性的局限性研究[J].工程质量,2015,33(8):51-54.
- [12] 李佳.浙江省乐清湾大桥及接线工程桥梁基桩承载力检测报告[R].浙江交科工程检测有限公司,2016.
- [13] 中华人民共和国建设部.JGJ106-2014 建筑基桩检测技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [14] 中华人民共和国交通部.JT/T 378-2009 基桩静载试验自平衡法[S].北京:人民交通出版社,2009.
- [15] 曾庆辉.混凝土灌注桩后压浆关键技术及承载力[J].辽宁工程技术大学学报,2018(1):114-119.
- [16] 吴江,王立军,吴潇.PIT法检测桩身结构完整性的波形判读[J].宁夏工程技术,2006,5(1):364-366.
- [17] 李佳,吴宗土,包寅杰.基桩桩身完整性检测与承载力检测方法选择的重要性分析[J].中国水运,2014,14(4):345-347. (下转第67页)