

# 高应变曲线拟合分析方法的探析

宝鹏辉<sup>1</sup>, 杜思义<sup>2</sup>

(1. 徐辉设计股份有限公司, 郑州 450016;  
2. 郑州大学土木工程学院, 郑州 450001)

**摘要:** 高应变法是检测基桩承载力唯一的动测方法, 改善高应变曲线拟合法的拟合质量是提高高应变结果精度的关键环节。本文统计分析国内基桩承载力动静对比的结果, 得出灌注桩、预制桩高应变曲线拟合分析方法的参数变化范围, 在此基础上再进行桩端阻尼模型的优化分析, 以提高高应变分析结果的精度。结果表明: 对于灌注桩, 采用桩端黏滞阻尼模型求出的承载力与静载试验结果的误差最小, 且最大误差不超过 10.0%。对于预制管桩, 采用桩端 Smith 阻尼模型求出的承载力与静载试验结果的误差最小, 且最大误差不超过 9.0%, 这使高应变曲线拟合分析方法的精度提高了 10%。

**关键词:** 土木建筑工程施工; 高应变曲线拟合法; 桩端阻尼模型; 灌注桩; 精度; 预制桩

**中图分类号:** TU473.1+6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-2850(2020)02-0196-08

## Exploration of high strain curve fitting analysis method

BAO Penghui<sup>1</sup>, DU Siyi<sup>2</sup>

(1. Xuhui Design Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China;  
2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** High strain method is the only dynamic test method for detecting the bearing capacity of piles. Improving the fitting quality of the high strain curve fitting method is the key to improving the accuracy of high strain results. In this paper, the dynamic and static comparison results of domestic pile bearing capacity are statistically analyzed, and the parameter variation range of the high strain curve fitting analysis method of cast-in-place pile and precast pile is obtained. On this basis, the optimization analysis of the pile-end damping model is carried out to improve the accuracy of the high strain analysis results. The results show that for the cast-in-place piles, the error of the bearing capacity and static load test result obtained by the pile-end viscous damping model is the smallest, and the maximum error does not exceed 10.0%. For the precast piles, the error between the bearing capacity and the static load test result obtained by the pile-end Smith damping model is the smallest, and the maximum error does not exceed 9.0%, which increases the accuracy of the high strain curve fitting analysis method by 10%.

**Key words:** civil and architectural engineering construction; high strain curve fitting method; pile-end damping model; cast-in-place pile; precision; precast pile

## 0 引言

高应变动测法就是用重锤锤击桩顶, 使桩土之间产生足够大的位移来充分激发桩周阻力和桩端阻力, 进而根据采集的信号来判断桩的竖向抗压承载力和桩身完整性。高应变动测法是以波动理论为基础, 对桩身承载力和桩身结构的完整性进行检测, 具有许多静载试验不具备的优点, 比如费用低、设备简便、检测时间短等<sup>[1-3]</sup>。近几十年, 国内外桩基检测工作者对高应变检测方法做了大量的研究, 推动了高应变

**作者简介:** 宝鹏辉 (1992—), 男, 硕士, 主要研究方向: 结构设计

**通信联系人:** 杜思义, 教授, 主要研究方向: 地基基础、岩土工程检测. E-mail: dsy3227@zzu.edu.cn

检测方法理论和实践的进步。美国学者 GOBLE 等<sup>[4]</sup>在 20 世纪 70 年代首次将应力波理论用于高应变检测方法。之后, RAUSCHE 等<sup>[5]</sup>和 GOBLE 等<sup>[6]</sup>在前人的基础上提出了辐射阻尼模型, 在原有的分析程序基础上作了新的改进。2012 年, RAUSCHE 等<sup>[7]</sup>探讨了采用不同方法得到的桩基承载力的差异, 并提出一些相关建议。赵海生<sup>[8]</sup>针对高应变分析得到的  $Q-s$  曲线与静载荷试验不同这个问题展开了研究, 得出高应变动测计算的  $Q-s$  曲线与静载试验结果的误差及其原因。BRUNO 等<sup>[9]</sup>对模型试验、动测试验、静载试验的结果进行了对比分析, 结果表明动测试验与静载试验基本吻合, 并指出了造成两者对比结果不稳定的原因。赵春风等<sup>[10]</sup>通过现场静动对比试验对各土层的桩侧摩阻力与桩土相对位移进行了研究, 将各土层的弹限应用于实际工程中, 提高了高应变测试极限承载力的精度。李飒等<sup>[11]</sup>对大量管桩的动静试验结果进行了计算分析, 研究发现管桩高应变动测结果基本上在静载试验值的  $\pm 50\%$  的区间波动。

目前高应变动测法在基本原理、计算方法、模型假定等方面一直停留在 20 世纪 90 年代水平, 没有突破性进展, 计算结果与静载试验结果误差较大。因此, 进一步改进高应变动测法以提高其检测桩基承载力的精度是非常重要的。

本文采用桩土参数优化、改变桩端阻尼模型等方法, 研究如何提高高应变曲线拟合法分析桩基承载力的精度, 最后得出有益的结论。

## 1 高应变曲线拟合法分析方法的原理

实测曲线拟合法是在 Smith 法和凯司法基础上进行改进, 利用以波动理论编制的计算程序进行分析计算。该方法可以快速计算众多力学参数下的系统响应, 其实质是以实测的力曲线(或速度曲线)作为边界条件输入以波动理论编制的程序中, 通过波动理论公式计算力(或速度)的值。

### 1.1 一维波动方程

假设桩杆为一维连续弹性的均质体, 杆端轴向受力  $F$  作用, 产生轴向位移  $u$ , 质点运动速度  $v = \frac{\partial u}{\partial t}$  ( $t$  为

时间) 和应变  $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}$ 。由图 1 可知, 杆  $x$  处的单元为  $dx$ , 如果  $x$  处的位移为  $u$ , 则在  $x+dx$  处的位移为  $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ 。根据公式推导可得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left( \frac{E}{\rho} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1)$$

其中,  $E$  为弹性模量;  $\rho$  为密度。定义  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  为应力

波在杆中的传播速度, 式 (1) 可写成

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

### 1.2 桩的计算模型

将桩看作连续杆件模型, 如图 2 所示, 桩身被分为  $N_p$  个分段, 各个单元的长度应根据应力波通过各

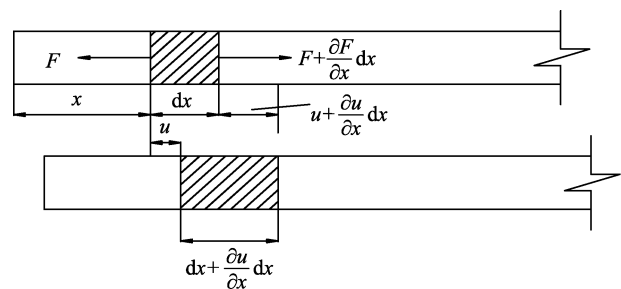


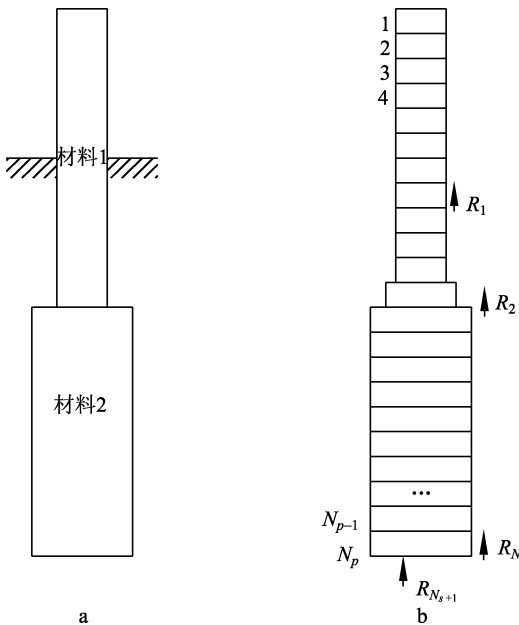
图 1 杆单元的位移

Fig. 1 Displacement of the rod unit

单元的时间相等进行取值,每个单元的弹性模量和截面积的取值与桩的弹性模量和截面积的取值应相等。假定土阻力都作用在每一杆件单元的底部,阻抗只在相邻单元的截面处发生变化。

### 1.3 土的计算模型

目前, Smith 土模型仍被广泛采用。假定土是固定的,该模型包括一个线性阻尼器、一个弹塑性弹簧,如图3所示。



注:  $N_{s+1}$  代表桩端

图2 桩的连续杆件模型

Fig. 2 Continuous member model of the pile

a—桩; b—分解成若干单元的桩

a-Pile; b-Pile broken down into some units

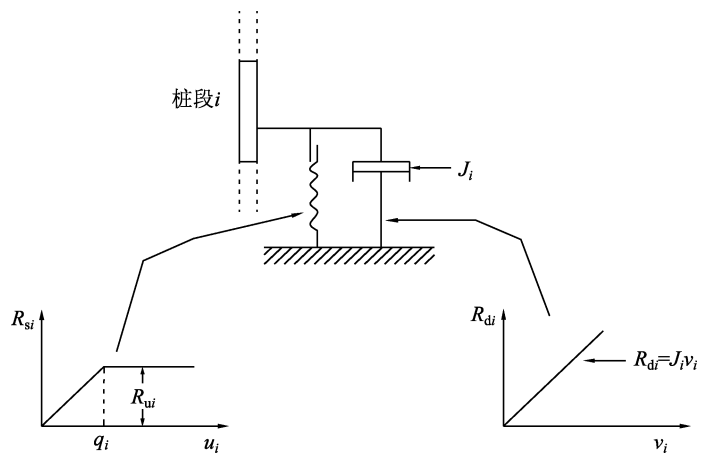


图3 Smith 土阻力模型

Fig. 3 Smith soil resistance model

在重锤作用下,桩土之间产生位移,土会对桩产生阻力,该阻力可分为静阻力和动阻力。土阻力模型中有三个参数:极限阻力  $R_{ui}$ 、弹限  $q_i$ 、黏滞阻尼系数  $J_i$ 。桩段  $i$  的总阻力为

$$R_i = R_{si} + R_{di}, \tag{3}$$

其中,  $R_{si}$ 、 $R_{di}$  分别为随时间变化的土的静阻力、动阻力。

## 2 灌注桩曲线拟合法的改进

曲线拟合法具有多解性,国外实践表明,采用高应变动测法检测基桩承载力与静载试验结果之间的误差在 20% 以内<sup>[12]</sup>。因此,有必要对曲线拟合法拟合出来的承载力误差范围进行优化,来提高曲线拟合法检测基桩承载力的精度。

### 2.1 高应变检测灌注桩承载力结果的统计分析

高应变实测曲线拟合法作为一种间接法,分析计算中的数值模型常常不能准确地反映实际桩土体系,尤其是岩土参数。一般通过动静对比试验,确认动静对比接近 1 的良好拟合结果,得到某个地质条件下的桩土作用参数,将这些参数进行整理得到每个拟合参数的取值范围。本文收集了 50 根灌注桩的动静对

比结果,对这些样本绘制动静测试结果的散点图,曲线拟合法动静对比线性回归分析如图 4 所示。

由图 4 可知,曲线拟合法的线性  $R^2$  为 0.94,根据实测曲线拟合法的结果,对拟合分析所采用的参数值进行提取,得到的参数变化范围如表 1 所示。

由表 1 可知,灌注桩的 Smith 阻尼系数较大,很大部分原因是由灌注桩的特点所决定的。曲线拟合时,根据表 1 的参数变化范围进行取值,一定程度上能有效提高实测曲线拟合法检测灌注桩承载力的精度。

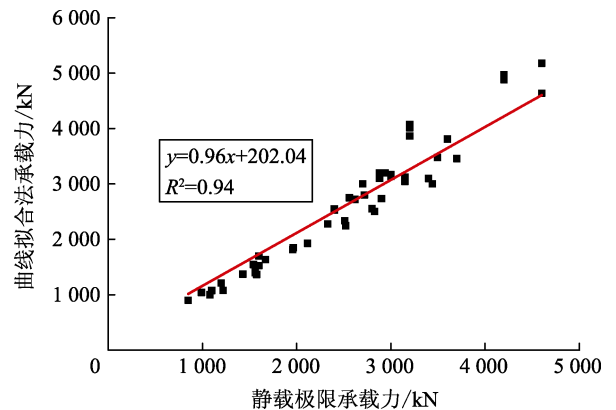


图 4 曲线拟合法动静对比线性回归分析

Fig. 4 Linear regression analysis of dynamic and static contrast by curve fitting method

### 2.2 桩端阻尼模型

为能够很好地描述桩端动阻力,研究引入三种桩端阻尼模型,分别为黏滞阻尼模型、Smith 阻尼模型、混合模型(即在极限桩端阻力完全激发前采用 Smith 阻尼模型,之后采用黏滞阻尼模型)。如果桩端与土层存在桩端间隙,当桩端接触到底层时,土将有可能产生很大阻尼力,此时动阻力就会过高,静阻力过低,增大了曲线拟合法检测基桩承载力的误差范围,而根据不同情况采用合适的桩端阻尼模型可以减小误差。

表 1 灌注桩实测曲线拟合法参数变化范围

Tab. 1 Range of parameters by the measured curve fitting method of cast-in-place pile

参数	数值	含义	参数	数值	含义
SS	0.80~1.30	桩侧 Smith 阻尼系数	UN	0.30~1.00	桩侧卸载水平
ST	0.40~1.05	桩端 Smith 阻尼系数	CS	0.35~1.00	桩侧卸载弹限比
QS	1.00~2.50	桩侧弹限	CT	0.25~1.00	桩端卸载弹限比
QT	1.00~3.00	桩端弹限			

各种桩端阻尼模型的计算公式如下。

黏滞阻尼模型:

$$R_d = Jv; \tag{4}$$

Smith 阻尼模型:

$$R_d = Jv(R_s / R_u); \tag{5}$$

混合模型:

$$\begin{cases} R_d = Jv(R_s / R_u), & R_i < R_u, \\ R_d = Jv, & R_i = R_u, \end{cases} \tag{6}$$

其中,  $R_d$  为桩端动阻力;  $R_s$  为桩端静阻力;  $R_u$  为桩端极限阻力;  $J$  为桩端阻尼系数。

不同的桩型采用合适的桩端阻尼模型,可以有效提高曲线拟合法拟合基桩承载力的精度。本文通过工程实例研究不同桩端阻尼模型对曲线拟合基桩承载力的影响。

### 2.3 灌注桩的案例分折

该工程属新建项目,站址位于河南省洛阳市。本次试验对象是 6 根混凝土灌注桩,对这 6 根桩进行静载试验和高应变试验,并进行对比分析。静载试验的结果如表 2 所示。

表2 静载试验结果

Tab. 2 Static load test results

桩号	桩长/m	桩径/mm	强度	极限承载力/kN	桩号	桩长/m	桩径/mm	强度	极限承载力/kN
5	15	600	C30	2 560	12	20	600	C30	2 880
6	15	600	C30	2 720	13	20	600	C30	2 700
7	15	600	C30	2 940	14	20	600	C30	2 880

根据勘察公司提供的详细资料,该工程地基土主要由第四系冲洪积黄土状粉质黏土与粉质黏土构成。各层主要特征分述如表3所示。

表3 各土层特征

Tab. 3 Characteristics of various soil layers

层号	土层名称	土层厚度/m	土层性质	承载力特征值/kPa
①	黄土状粉质黏土	1.00~8.10	硬塑, 具中压缩性	150
① <sub>1</sub>	黄土状粉质黏土	1.00~4.50	可软塑, 具中压缩性, 均匀性较差	80
②	粉质黏土	1.00~6.30	硬塑(局部可塑), 具中压缩性	170
③	粉质黏土	2.00~6.50	可软塑, 具中压缩性	150
③ <sub>1</sub>	粉质黏土	0.70~3.30	可软塑, 具中压缩性	100
④	粉质黏土	1.50~6.50	硬塑(局部为可塑), 具中压缩性	200
⑤	黏土	0.50~6.70	硬塑(个别为可塑), 具中压缩性	230

注: 层号中的下标1代表同一类土, 但是土的性质不同

高应变实测曲线拟合法可能多解, 但是在一些限制条件下, 曲线拟合法的解会缩小到一定区间, 与静载试验结果对比会得到误差范围。《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)<sup>[13]</sup>中, 判定桩承载力时, 实测曲线拟合法应满足下列要求:

- 1) 采用的力学模型能够与实际的桩土力学性状相差不大, 且模型参数应该有合理的范围。
- 2) 拟合分析时, 参数的取值应该在合理的范围内, 不能随意取值。
- 3) 曲线拟合时间长度应该合理, 不能过长或过短, 不小于  $t_1 + 2L/c + 20$  ms; 如果是柴油锤, 不小于  $t_1 + 2L/c + 30$  ms (其中  $t_1$  为传感器测得力的时间,  $L$  为传感器以下的桩长,  $c$  为波速)。
- 4) 为保证各土层的承载力能够充分激发出来, 各单元土的最大弹性位移不能超过相应桩单元的最大计算位移值。
- 5) 贯入度的计算值和实测值保持在很小的误差范围内。

根据上述规范, 加上一些限制条件, 就会得到一个区间解。拟合质量系数是用来评估计算曲线和实测曲线之间的差别的。上海市《建筑基桩检测技术规程》(DGJ08—218—2003)<sup>[14]</sup>规定: 对于钻孔灌注桩, 拟合完成时的拟合质量系数不宜大于5; 对于混凝土预制桩和钢桩, 拟合质量系数不宜大于3。而对于贯入度的计算值与实测值之间的误差, 没有明确规定。此次曲线拟合法规定拟合质量系数不大于5, 计算贯入度与实测贯入度之间的差值不大于5%, 参数取值在经验范围内, 在满足各项规范要求的条件下对桩端阻尼模型进行优化的曲线拟合方法称为曲线拟合改进法。

本次选取所测桩型均为灌注桩, 将采集曲线导入程序中, 首先进行自动拟合, 然后根据工程地勘资料进行人工调整, 合理地调整参数取值。当满足曲线拟合改进法的条件时, 停止拟合, 此时的桩侧阻力和桩端阻力的总和即为单桩极限承载力。改变不同的桩端阻尼模型时, 重复以上操作, 可以求出采用不同桩端阻尼模型时灌注桩承载力的变化范围。最后与静载试验结果进行对比, 求出承载力的误差范围。本次选取6根信号良好的灌注桩, 对这6个实测曲线进行曲线拟合, 将最后结果汇总到表4中。



表 4 采用不同桩端阻尼模型时灌注桩承载力的变化范围

Tab. 4 Variation range of bearing capacity of the cast-in-place piles with different pile-end damping models

桩号	桩长/m	桩径/mm	桩端黏滞阻尼模型承载力的区间/kN	桩端 Smith 阻尼模型承载力的区间/kN	混合模型承载力的区间/kN	静载极限承载力/kN
5	15	600	2 350~2 800	2 300~2 900	2 150~2 950	2 560
6	15	600	2 500~2 900	2 450~3 050	2 400~3 150	2 720
7	15	600	2 700~3 200	2 600~3 300	2 550~3 400	2 940
12	20	600	2 600~3 150	2 550~3 150	2 400~3 250	2 880
13	20	600	2 450~2 950	2 400~3 050	2 250~3 100	2 700
14	20	600	2 550~3 150	2 500~3 250	2 450~3 350	2 880

由表 4 可知, 改变桩端阻尼模型, 曲线拟合改进法求得桩的承载力区间范围也会发生变化, 表明改变桩端阻尼模型会影响最后结果的精确度, 应根据不同的条件采用合适的桩端阻尼模型。当采用 Smith 阻尼模型时, 曲线拟合改进法求得的承载力与静载试验得出的结果最大误差达到 13.3%; 当采用混合模型时, 曲线拟合改进法求得的承载力与静载试验结果之间的最大误差达到 16.7%; 而采用黏滞阻尼模型时, 曲线拟合改进法求得的承载力与静载试验结果的最大误差不超过 10.0%。因此, 对于这种地质条件下的灌注桩, 采用黏滞阻尼模型比较合适, 能有效提高曲线拟合法分析灌注桩承载力的精度。

### 3 预制桩曲线拟合法的改进

对于预制桩, 采用与灌注桩相同的方法进行研究, 将参数取值范围进行优化, 在满足规范要求、拟合质量系数不大于 3 的条件下对桩端阻尼模型进行优化。通过工程实例研究预制桩采用不同桩端阻尼模型对曲线拟合基桩承载力结果的影响。

#### 3.1 高应变检测预制桩承载力结果的统计分析

搜集了国内 33 根混凝土预制管桩的动静对比结果, 对这些样本绘制动静测试结果的散点图, 其线性回归分析如图 5 所示。

由图 5 可知, 曲线拟合法的线性  $R^2$  为 0.97, 说明混凝土预制管桩动测值与静载试验有较强的相关性。根据良好的拟合结果, 可以得到这种地质条件下的桩土作用参数, 将这些参数取值进行整理得到每个参数的取值范围, 汇总于表 5 中。

结合表 1 和表 5 可知, 预制管桩的阻尼系数比灌注桩的阻尼系数小, 而弹限值比灌注桩的弹限值大, 很大部分原因是由预制桩的特点所决定的。

#### 3.2 预制桩的案例分折

河南省新乡市某电厂, 地形平坦开阔。本次试验对象为 3 根预应力高强度混凝土 (prestressed high-strength concrete, PHC) 管桩, 静载试验的结果如表 6 所示。

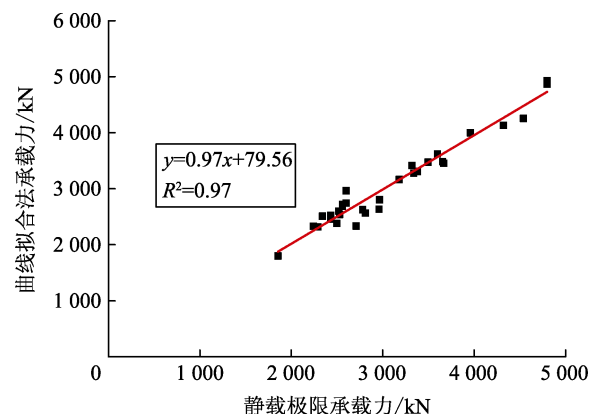


图 5 预制管桩动静对比线性回归分析

Fig. 5 Linear regression analysis of dynamic and static contrast of precast pipe piles

表 5 预制桩实测曲线拟合法参数变化范围  
Tab. 5 Range of parameters by the measured curve fitting method of precast pile

参数	数值	参数	数值
SS	0.60~1.05	UN	0.50~1.00
ST	0.20~0.80	CS	0.35~1.00
QS	2.50~6.00	CT	0.35~1.00
QT	2.50~7.00		

表6 某电厂的静载试验结果

Tab. 6 Static load test results of a power plant

桩号	桩长/m	桩身外径/mm	桩身内径/mm	极限承载力/kN
S6-1	19	600	380	3 120
S7-1	20	600	380	3 120
S8-1	21	600	380	3 120

根据委托方提供的地质资料, 地层自上而下大致分为5层, 各土层主要特征如表7所示。

表7 各土层特征

Tab. 7 Characteristics of various soil layers

层号	土层名称	土层厚度/m	土层性质
①	粉土	6.64	稍密~中密, 湿, 含铁锰质斑纹, 干强度低, 韧性低, 无光泽
②	粉质黏土	6.13	硬塑状, 含铁锰质斑纹和钙质结核, 干强度中等, 韧性中等
③	粉土	6.49	中密~密实, 湿, 含铁锰质斑纹, 干强度低, 韧性低, 无光泽
④	粉质黏土	6.14	可塑~硬塑, 干强度中等, 韧性中等
⑤	细砂	18.85	密实状, 主要矿物成分为石英、长石和云母, 颗粒级配较均匀

本次拟合采用曲线拟合改进法, 改变不同的桩端阻尼模型, 曲线拟合法求解出承载力的区间范围, 最后与静载试验结果对比分析。采用与灌注桩曲线拟合方法相同的步骤得出3根桩的承载力结果, 并汇总于表8中。

表8 采用不同桩端阻尼模型时预制桩承载力的变化范围

Tab. 8 Variation range of bearing capacity of precast piles with different pile-end damping models

桩号	桩长/m	桩径/mm	桩端黏滞阻尼模型承载力的区间/kN	桩端 Smith 阻尼模型承载力的区间/kN	混合模型承载力的区间/kN	静载极限承载力/kN
S6-1	19	600AB110	2 650~3 550	2 900~3 350	2 850~3 450	3 120
S7-1	20	600AB110	2 650~3 600	2 850~3 350	2 700~3 500	3 120
S8-1	21	600AB110	2 600~3 600	2 850~3 400	2 650~3 550	3 120

由表8可知, 采用黏滞阻尼模型时, 曲线拟合改进法求得的承载力与静载试验得出的结果最大误差达到16.7%; 当采用混合模型时, 曲线拟合改进法求得的承载力与静载试验结果之间的最大误差达到15.0%; 而采用 Smith 阻尼模型时, 曲线拟合改进法求得的承载力与静载试验结果的最大误差不超过9.0%。因此, 对于这种地质条件下的管桩, 曲线拟合改进法采用桩端 Smith 阻尼模型比较合适, 能有效提高曲线拟合法分析预制桩承载力的精度。

## 4 结论

1) 统计分析国内基桩承载力动静对比结果, 得出国内灌注桩、预制桩高应变曲线拟合分析方法的参数区间, 结果可为工程检测人员提供参考。

2) 对于灌注桩, 曲线拟合改进法采用桩端黏滞阻尼模型求出的承载力与静载试验结果之间的最大误差最小, 不超过10.0%; 对于预制桩, 曲线拟合改进法采用桩端 Smith 阻尼模型求出的承载力与静载试验结果之间的最大误差最小, 不超过9.0%。

3) 曲线拟合改进法是提高基桩承载力检测结果准确性的一个方面, 实测曲线质量的保证是曲线拟合改进法的前提。

**[参考文献] (References)**

- [1] 刘明贵, 余诗刚, 汪大国. 桩基检测技术指南[M]. 北京: 科学出版社, 1995.  
LIU M G, SHE S G, WANG D G. Technical guidelines for pile foundation testing[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)
- [2] 柳祖亨, 顾利平, 骆英, 等. 桩基振动分析与质量检测[M]. 南京: 东南大学出版社, 1995.  
LIU Z T, GU L P, LUO Y, et al. Pile foundation vibration analysis and quality testing[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1995. (in Chinese)
- [3] 黄建辉, 徐天平. 桩基高应变检测分析技术[J]. 广东土木与建筑, 2006 (10): 54-56.  
HUANG J H, XU T P. Technique of foundation pile high-strain test and analysis[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2006(10): 54-56. (in Chinese)
- [4] GOBLE G G, RAUSCHE F, MOSES F. Dynamic studies on the bearing capacity of piles, Phase III[R]. Cleveland: Case Western Reserve University, 1970.
- [5] RAUSCHE F, GOBLE G G, LINKINS Jr G E. Dynamic determination of pile capacity[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 367-382.
- [6] GOBLE G G, RAUSCHE F, LINKINS Jr G E. The analysis of pile driving-A state-of-the-art[C]//International Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles. Stockholm: MBS, 1980: 131-161.
- [7] RAUSCHE F, BEJIM J W. Analyzing and interpreting dynamic measurements taken during vibratory pile driving[C]//Proceedings from Testing and Design Methods for Deep Foundations. Kanazawa: IS-Kanazawa, 2012.
- [8] 赵海生. 高应变法模拟  $Q-s$  曲线误差分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24 (12): 2129-2135.  
ZHAO H S. Errors study on  $Q-s$  curve of pile simulated by high strain dynamic testing method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2129-2135. (in Chinese)
- [9] BRUNO D, RANDOLPH M F. Dynamic and static load testing of model piles driven into dense sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(11): 988-998.
- [10] 赵春风, 李尚飞, 张志勇, 等. 高应变测试法中弹限取值的研究及工程应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43 (2): 119-124.  
ZHAO C F, LI S F, ZHANG Z Y, et al. Study and engineering application of quake in high-strain dynamic test[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(2): 119-124. (in Chinese)
- [11] 李飒, 徐保照, 李怀亮, 等. 基于概率分布高应变动测结果可靠性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1423-1430.  
LI S, XU B Z, LI H L, et al. The study of the reliability of high strain dynamic testing based on probability distribution[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(5): 1423-1430. (in Chinese)
- [12] 董平, 胡德昭, 曹健. 高应变动力试桩拟合法误差来源分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2001, 37 (1): 104-113.  
DONG P, HU D Z, CAO J. An analysis on error sources in the curve match method of high strain dynamic testing on pile[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 2001, 37(1): 104-113. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ 106—2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [14] 上海市建筑科学研究院. DGJ08—218—2003 建筑基桩检测技术规程[S]. 上海: 上海市建设和管理委员会, 2003.  
Shanghai Research Institute of Building Sciences. DGJ08—218—2003 Technical specification for testing of building foundation piles[S]. Shanghai: Shanghai Construction and Management Commission, 2003. (in Chinese)