

基于实测动刚度的桥桩承载能力评估研究

刘建磊¹, 马 蒙², 李林杰¹, 柯在田¹, 高 岩¹

(1. 中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 提出了适用于批量评估分析的、基于实测动刚度的桥桩承载能力评估方法。结合某公路特大桥大批量桥墩基础评估加固工程, 利用瞬态机械阻抗法对 680 根桥桩进行动测。通过基桩低应变完整性辅助测试及动刚度统计分析, 推算了桥桩承载能力并给出加固建议。研究表明, 对于桩身完整的桥桩, 动刚度与承载能力在统计上具有明显的正相关关系; 对于承受相近设计荷载的桥桩, 测桩样本较大时动刚度值对桥桩完整性评估具有较好可信度。通过抽样取芯分析, 验证了提出的桥桩承载能力评估方法具备较好的可靠性。

关 键 词: 动刚度; 桥桩; 承载能力; 机械阻抗法; 钻孔取芯

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015) 增 2-0571-06

Study of bearing capacity evaluation for bridge piles by measured dynamic stiffness

LIU Jian-lei¹, MA Meng², LI Lin-jie¹, KE Zai-tian¹, GAO Yan¹

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Bearing capacity evaluation is important for existing bridge piles with potential defections. As the pile loading tests and high strain tests are not allowed to perform for some bridges in service, a bearing capacity evaluation method for bridge piles is proposed. This method is based on the measured dynamic stiffness of piles and can be used for evaluating large quantities of piles, according to the following three steps: pre-analysis, general investigation measurement and verification. Combined with a practical engineering that evaluation of a great many piles for a long highway bridge, dynamic measurement for 680 bridge piles are performed by impulse transient response method. Detail statistics for dynamic stiffness of the bridge piles is performed. Combined with the assistant low strain dynamic measurements, the pile bearing capacities are calculated; and reinforcement suggestions for piles are proposed. Finally, in order to validate the estimation method, 80 pile samples are selected to perform the core drilling analysis. Results show that: for integrated piles, the obvious positive correlation can be found between dynamic stiffness and bearing capacity of piles; moreover, the values of dynamic stiffness have good reliability for evaluating the bearing capacity of large number of piles when they bear the similar design loads. By analyzing drilling core samples, it is proved that the evaluation method proposed has good reliability.

Keywords: dynamic stiffness; bridge piles; bearing capacity; mechanical impedance method; core drilling

1 引 言

机械阻抗法作为一种无损动力检测的低应变法, 兴起于 20 世纪六七十年代^[1-3], 具有测试时间短、费用低、仪器携带便捷等优点, 近 20 年来广泛运用于桥墩及建筑物基桩的检测与评估^[4-6]。关于低应变法测定基桩承载力问题, 存在着一定争议^[7-8]。理论上动刚度和承载力所对应的力学状态不同, 而

实际工程中应用这一方法又确实解决了大量桩基工程问题^[9], 刘兴录^[10]认为, 对于完整桩利用动刚度估算桩基容许承载力是可行的, 但估算极限承载力在理论上说不通, 分析结果与实际相差更大。曾利民^[11]研究了该方法的不确定性问题, 认为由于理论的不成熟及检测实际中的影响因素较多, 难以客观地反映实际的桩土特性, 推算的承载力数值不确定性大。郑灿堂等^[12]得到了静刚度-承载力统计曲线,

收稿日期: 2014-10-11

基金项目: 北京交通大学人才基金 (No.2014RC033)。

第一作者简介: 刘建磊, 男, 1982 年生, 硕士, 助理研究员, 主要从事桥梁检测工程与研究工作。E-mail: 48708685@qq.com

通讯作者: 马蒙, 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 主要从事环境振动和振动测试方面的研究工作。E-mail: mameng@bjtu.edu.cn

通过统计分析认为该方法在工程中具有较好的应用价值。

桩基承载力是整个桩-土系统承载上部结构能力的综合反映,包含了强度和变形两部分内容。当系统承载力由强度控制时,低应变动测输出参数(如动刚度、导纳等)与强度间并不存在直接的对应关系。然而,当系统承载力由变形控制,由于低应变产生的土的动应变处于弹性变形范围,动刚度客观地反映了桩-土系统的动力特性,动刚度与承载力之间客观存在着相对可比关系。利用类比模拟法^[13-14],借助灰色理论^[15]等方法,可以建立这种相互关系,但该方法在实际应用时多数既有研究上以个别桩为研究对象,通过测定的动刚度直接推算承载力绝对值,在计算过程中会出现2个问题:(1)动刚度的取值受拾振点位置、激振力大小、频率点选取等因素影响较大。(2)依靠经验法选取动静对比系数存在一定的随意性,推算得到的承载力作为一个绝对值,可信度相对较低。

针对上述问题,本文提出了适用于批量评估分析的、基于实测动刚度的桥桩承载能力评估方法,并结合某公路特大桥桥墩基础评估加固工程,利用瞬态机械阻抗法对680根桥桩进行动测。通过规范化统一的动测操作和数据处理,提高动刚度取值的可靠性。通过样本统计分析,动态调整动静对比系数,避免了上述两点潜在问题。同时,辅助以桥桩低应变完整性测试、桥桩取芯等方法对本文提出的评估方法可靠性加以验证。

2 动刚度推算桥桩承载力

2.1 研究思路

根据机械阻抗法推算单桩承载力是利用实测速度导纳曲线低频段近似直线的特性,计算动刚度 K_d :

$$K_d = \frac{2\pi f}{|V/F|} \quad (1)$$

式中: f 为频率; V 为速度响应; F 为激励力; V/F 为速度导纳。

理论上,当激振频率 $f \rightarrow 0$ 时,动刚度趋于静刚度,即 $K_d \rightarrow K_s$ 。实际工程中激振频率不可能为0,故引入动静对比系数 $\eta = K_d/K_s$,推算桩承载力 Q :

$$Q = \frac{K_d S_a}{\eta} \quad (2)$$

式中: S_a 为单桩容许沉降量,本文计算时取4 mm。

本文针对某高速公路数百根桥桩采用3个步骤进行分析(见图1):

① 初步分析,选取少数代表性桥桩进行瞬态机械阻抗法动测和完整性测试,挑选完整桩计算动静对比系数 η ,并动态调整。

② 普查测试,通过实测动刚度推算桥桩承载能力 Q ,并计算设计荷载 P 。进行桥桩评估。当 $Q > P$ 时,桥桩承载力满足要求,反之则承载力不足,需要加固。

③ 验证检测,通过低应变法及取芯法判断完整性,并对桥桩承载力评估结果加以验证。

为了保证提高测试可靠性,减少测试误差和分析误差,测试过程中对落锤高度、拾振点位置进行统一操作。此外,动刚度统一取相同低频段的平均值。

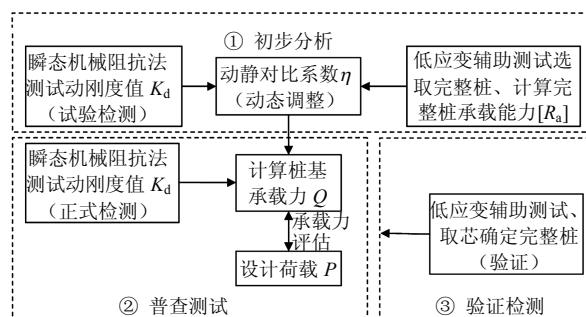


图1 桥桩评估及分析流程

Fig.1 Flow of the bridge pile evaluation and analysis

2.2 确定动静对比系数

由于要确保高速公路的正常通行,现场缺乏对既有桥桩静载试验的条件。为此在初步分析阶段,通过低应变辅助测试选取典型完整桩,并按式(3)确定动静对比系数:

$$\eta = \frac{K_d S_a}{[R_a]} \quad (3)$$

式中: $[R_a]$ 为完整桩容许承载力,取值根据《公路桥涵地基与基础设计规范》^[16]计算。其中,钻孔灌注摩擦桩承载力容许值为

$$\left. \begin{aligned} [R_a] &= \frac{1}{2} u \sum_{i=1}^n q_{ik} l_i + A_p q_r \\ q_r &= m_0 \lambda [f_{a0}] + k_2 \gamma_2 (h-3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

端承桩承载力容许值为

$$[R_a] = c_1 A_p f_{rk} + u \sum_{i=1}^m c_{2i} h_i f_{rki} + \frac{1}{2} \zeta_s u \sum_{i=1}^n l_i q_{ik} \quad (5)$$

式中符号详见文献^[16]。

为了确保 η 取值既能真实反映实际情况,又在一定保证概率下对所有待测桥桩具有一定普适性,共完成48个孔位的钻探以全面了解本区域地质变

化情况, 提高 $[R_a]$ 值计算可靠性。同时, 在初步分析阶段对 η 取值进行动态调整。

3 测试与分析

3.1 动刚度测试

现场通过力夯冲击基桩的方式测试并分析动刚度数据。在桩基顶部布设力传感器和低频速度传感器, 可以计算出速度导纳随频率变化的函数:

$$Y_V(f) = \frac{S_{FV}(f)}{S_{FF}(f)} \quad (6)$$

式中: $S_{FV}(f)$ 为力与速度的互功率谱; $S_{FF}(f)$ 为力的自功率谱。

现场测试前, 首先对承台表面的覆盖土进行清理, 清理完成后再采用打磨机对测试点进行磨平处理 (见图 2), 确保传感器采集得到的是垂向振动信号。

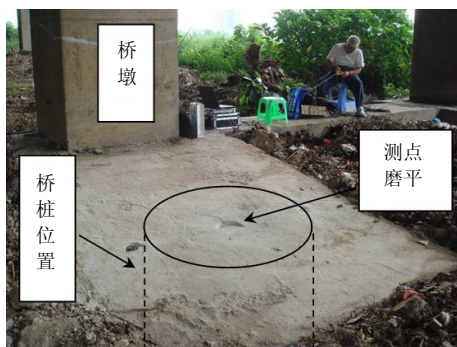


图 2 传感器安装表面测点磨平

Fig.2 Surface rubdown where sensors locate

为增加结构竖向动力响应, 增加动刚度数据的有效性, 减少车辆干扰等因素的影响, 本次检测采用 106 kg 力夯进行冲击激振, 并根据现场环境对干扰信号及时进行规避。为增加机械化程度、提升检测速率, 设计并配备了自动提升及冲击装置 2 套。每根基桩采集 3~5 个循环冲击, 通过多个循环、多测次的平均最终得到基桩动刚度。

图 3 为相同桩长两根邻近桥桩的典型导纳曲线。尽管在 50 Hz 以上频段导纳特性有所差异, 但两根桩在低频都表现出明显的线性段, 为动刚度计算与分析提供了基础。图 4 为 2 根桥桩的动刚度曲线。从图中可以看出, 10 Hz 以下频段动刚度随频率有明显的变化, 10~30 Hz 动刚度值保持了相对的稳定。本次测试的其他桩均表现出相同的特性。因此, 本文计算动刚度时统一按照 10~30 Hz 频段取平均值。

3.2 动刚度与承载力关系

对测试的 680 根桥桩进行了分析计算, 测试

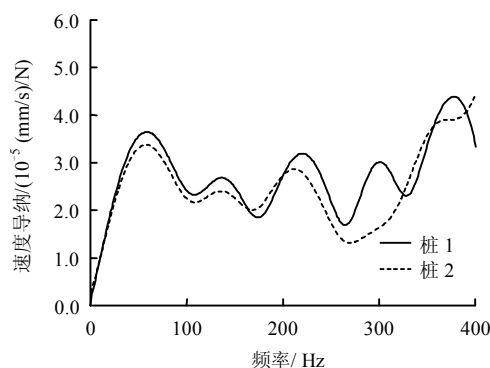


图 3 典型速度导纳曲线

Fig.3 Typical admittance curves

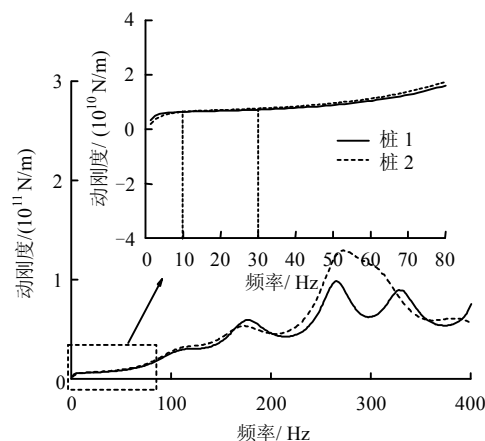


图 4 典型动刚度曲线

Fig.4 Typical dynamic stiffness curves

得到每一根桥桩的动刚度, 利用式(4)或式(5)估算其容许承载力。图 5(a)为 680 根桥桩动刚度与估算承载力关系。总体上, 容许承载力随动刚度增加有增加趋势, 但动刚度在 4~8 GN/m 范围内的测试样本估算的容许承载力离散性大。究其原因, 估算的容许承载力是基于桥桩完整的假定, 而实际检测有相当一部分桥桩存在不同程度的缺陷, 使得动刚度与承载力的关系存在较大的离散性。为了尽可能排除上述因素影响, 对上述 50%以上样本进行低应变完整性测试, 从中挑选出 188 根桩身完整的典型样本桥桩, 按照设计荷载不同分 2 组分析动刚度与承载力关系, 见图 5(b)。对比分析可以发现, 桩身完整的桥桩动刚度与承载力之间的正相关关系较图 5(a)更明显。

按设计荷载 4 000~5 000 kN (样本组 1) 及约 8 000 kN (样本组 2), 将样本分为 2 组, 图 6 给出了各测试样本区间内的动刚度平均值及最大、最小值。从图中可以看出, 除计算承载力在 7 000~8 000 kN 区间内动刚度平均值略有降低外, 总体上动刚度呈现出随完整单桩承载力增加而增加的趋势。可见, 对于桩身完整的桥桩, 当测试动刚度值

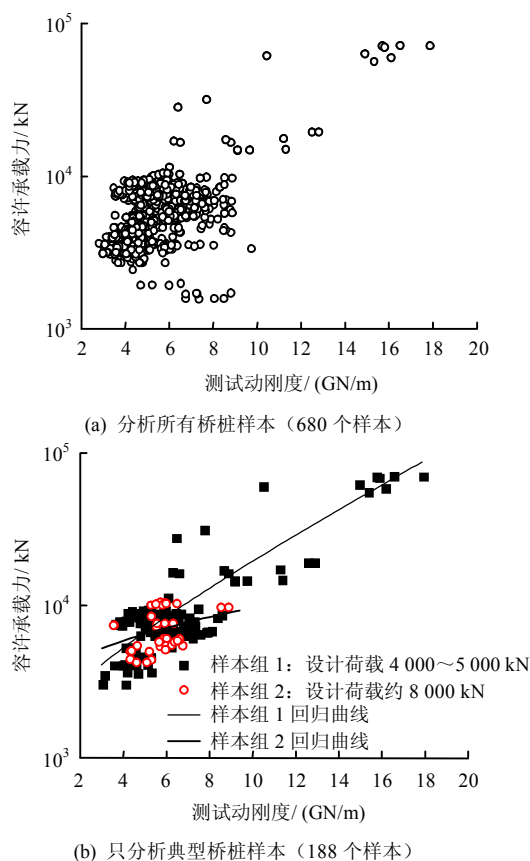


图5 动刚度与承载力关系
Fig.5 Relations between dynamic stiffness and bearing capacity

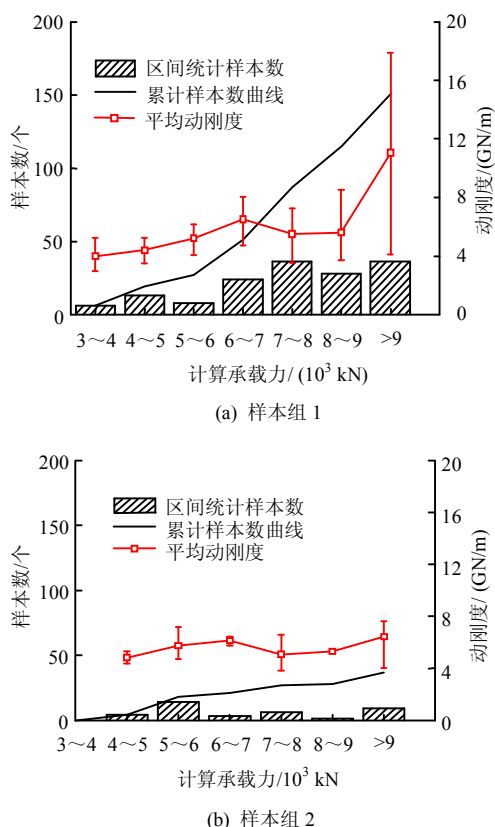


图6 承载力各样本区间中平均动刚度
Fig.6 Averaged dynamic stiffness for different analysis intervals of bearing capacity

较同类型桥桩明显偏小时, 动刚度指标在判别桥桩承载力不足方面具有预警作用。

3.3 动静对比系数

在图1所示初步分析阶段, 通过典型桩进行动静对比系数的初步研究和动态调整, 确定了摩擦桩和普通端承桩的动静对比系数 η 均取为4.66, 对于桩长径比超过20的端承桩, η 取2.3。

在普查测试阶段, 利用图5(b)所示188个桩身完整的典型桥桩样本对初步设定的 η 值进行验证。如图7所示, (1) 超过90%的摩擦桩 η 值小于4.66, 对于基桩承载力推算来说是偏于安全的; (2) 桩长径比在20以下的端承桩 η 值均小于4.66; (3) 桩长径比大于20的端承桩, 除3个样本 η 值略大于2.3以外, 其余也均在2.3以内。总体来看, 初步分析阶段动态调整后的动静对比系数取值可以满足实际基桩承载力的评估。

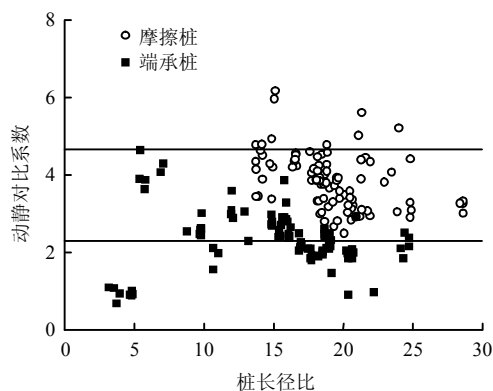


图7 典型桥桩动静对比系数统计分析 (188个样本)
Fig.7 Typical dynamic-static coefficient statistical analysis of bridge piles (188 samples)

3.4 桥桩承载力评估

采用章节2.1所述方法对所研究的全部680个样本进行承载力评估, 图8为桥桩推算承载力 Q 与设计荷载 P 关系曲线。统计得到, 约54%的桥桩由于 $Q < P$, 需要加固。分析发现, 需要加固的桥桩可以分成两类: 一类是桥桩自身设计荷载大(如相当一部分设计荷载值在8000 kN附近), 由测试动刚度推算的承载力不能满足设计荷载要求, 这类加固与桥桩自身是否存在缺陷关系不大; 另一类桥桩设计荷载在4000~5000 kN范围内, 由于桥桩自身缺陷, 导致测试动刚度明显偏小, 从而推算得到的承载力不能满足设计荷载。

进一步将设计荷载在4000~5000 kN范围的摩擦桩进行动刚度统计分析, 如图9所示。从图中可以看出, 几乎所有不满足承载力的桥桩动刚度值

明显偏小。因此, 动刚度与承载力具有较强的正相关性。

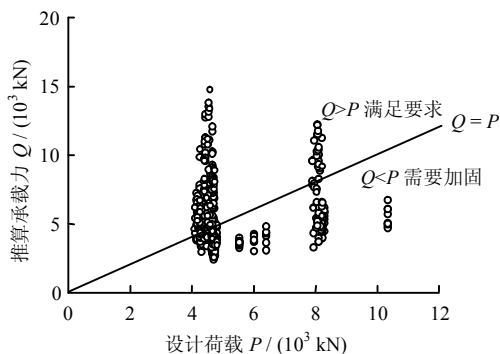


图 8 桥桩推算承载力与承受荷载关系 (680 个样本)

Fig.8 Relations between calculated bearing capacity and bearing design loads (680 samples)

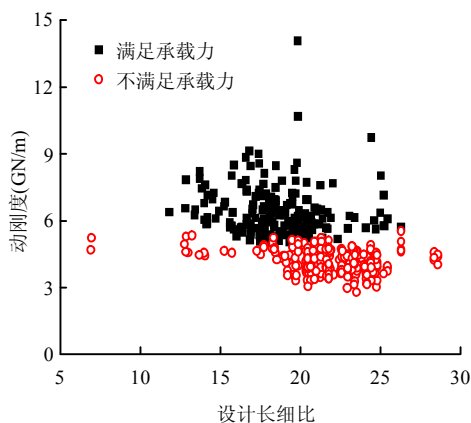


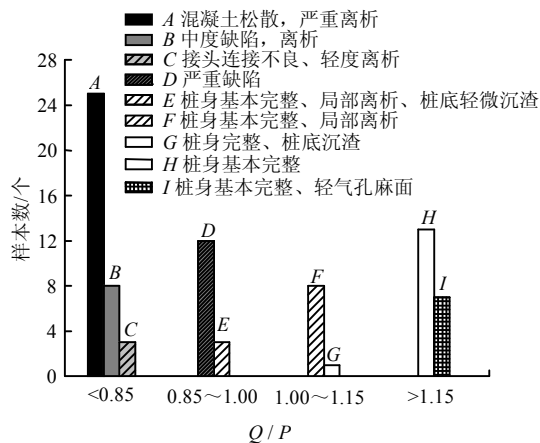
图 9 摩擦桩动刚度统计

Fig.9 Dynamic stiffness statistics of friction piles

4 取芯验证分析

为了验证本文评估方法的有效性, 选取 80 根桥桩样本进行取芯验证。所选取桥桩涵盖端承桩和摩擦桩两种支承形式。根据推算承载力与设计荷载间不同关系, 对取芯结果分类统计见图 10。图中每张照片左上角对应桩顶芯样、右下角对应桩底芯样。从图中可以发现, Q/P 数值越小, 桩身缺陷越明显, 完整性越差; Q/P 数值越大, 桩身缺陷越轻微, 完整性越好。

在 $Q/P < 1$ 的 51 根桥桩中, 有 45 根桩身缺陷严重, 占 88.2%; 在 $Q/P > 1$ 的 29 根桥桩中, 桩身完整性较好或只有轻微离析、气孔麻面的有 21 根, 占 72.4%, 其余 8 根桩身局部离析或桩底有轻微沉渣。总体上, 取芯结果与承载力评估结论一致, 验证了基于实测动刚度推算承载能力的方法在一定程度上具备较高的可靠性。



(1) 分类统计



(2) 典型芯样照片

图 10 取芯结果分析

Fig.10 Analysis of drilling core samples

5 结 论

(1) 桩身完整的桥桩, 动刚度与承载能力间具有较明显的正相关关系, 动刚度越大, 相对承载能力越高。

(2) 承受设计荷载水平相近的桥桩, 动刚度值对评估桥桩完整性具有较高的可信度, 测试动刚度值越低, 桥桩出现不同程度缺陷的可能性越高。

通过抽样取芯分析, 验证了本文提出的桥桩承载能力评估方法在一定程度上具有较好的可靠性。在工程上缺乏静载试验条件以及当需要对桥桩进行批量评估时, 本文方法具有较好的适用性。但是, 如果评估桥桩样本过少, 则利用该方法推算的承载能力可靠度较低。

参 考 文 献

- [1] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic

- models for infinite media[J]. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, 1969, 95: 895—911.
- [2] NOVAK M. Dynamic stiffness and damping of piles[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1974, 11(4): 574—598.
- [3] DAVIS A G, DUMM C S. From theory to field experience with the non-destructive vibration testing[J]. **Proceedings of Institution of Civil Engineers**, 1974, 57(4): 571—593.
- [4] PHOON K K, CHOW Y K, CHOW W F, et al. Low strain integrity testing of piles: Three-dimensional effects[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(11): 1057—1062.
- [5] THAM L G, CHU C K, LEI Z X. Analysis of the transient response of vertically loaded single piles by time-domain BEM[J]. **Computers and Geotechnics**, 1996, 19(2): 117—136.
- [6] MASOUMI H R, DEGRANDE G, HOLVMAN A. Pile response and free field vibrations due to low strain dynamic loading[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, 29(5): 834—844.
- [7] 徐攸在. 动力测定桩承载力的方法[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 74—83.
- XU You-zai. Determination of pile bearing capacity by dynamic test[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(1): 74—83.
- [8] 唐念慈. 关于“动力测定桩承载力的方法”一文的讨论[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(4): 91—95.
- TANG Nian-ci. Discussion on “Determination of pile bearing capacity by dynamic test”[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(4): 91—95.
- [9] 范明均, 陈龙珠. 关于用小应变振动法预测桩的承载力[J]. 浙江大学学报, 1992, 26 (增刊): 101—106.
- FAN Ming-jun, CHEN Long-zhu. On prediction of pile capacity with a low-strain vibration test[J]. **Journal of Zhejiang University**, 1992, 26 (Supp.): 101—106.
- [10] 刘兴录. 动力试桩若干问题的讨论[J]. 建筑科学, 1988, 4 (5): 37—42.
- LIU Xing-lu. Discussion on dynamic testing of piles[J]. **Building Science**, 1988, 4 (5): 37—42.
- [11] 曾利民. 论用动刚度计算单桩承载力的不确定性[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(4): 61—66.
- ZENG Li-min. On the impropriety of computing pile bearing capacity by dynamic rigidity[J]. **Journal of Building Structures**, 1998, 19(4): 61—66.
- [12] 郑灿堂, 王扬, 许尚杰, 等. 稳态机械阻抗法动测单桩承载力[J]. 水利水电技术, 1997, 28(8): 50—52.
- ZHENG Can-tang, WANG Yang, XU Shang-jie, et al. Pile bearing capacity measurement by steady mechanical impedance method[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 1997, 28(8): 50—52.
- [13] 赵抚民, 刘恒军, 刘明宇, 等. 用类比模拟法研究小应变法动测桩极限承载力的问题[J]. 南昌大学学报, 2001, 23(3): 26—38.
- ZHAO Fu-min, LIU Heng-jun, LIU Ming-yu, et al. Study on ultimate bearing capacity of pile by the small strain method of dynamic testing[J]. **Journal of Nanchang University**, 2001, 23(3): 26—38.
- [14] 赵抚民. 低应变法动测桩承载力的应用前景探讨[J]. 南昌水专学报, 2002, 21(2): 21—25.
- ZHAO Fu-min. Research on application prospect for estimating pile bearing capacity by low strain dynamic testing[J]. **Journal of Nanchang College of Water Conservancy & Hydroelectric Power**, 2002, 21(2): 21—25.
- [15] 高云霞. 灰色理论在低应变预测桩极限承载力中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [16] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.