

高速铁路桥梁基础单桩动力模型试验研究

Dynamic model tests on pile foundation of high-speed railway bridge

彭雄志¹, 赵善锐¹, 罗书学¹, 王爱玲²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 铁道部科学院 西南分院, 四川 成都 610031)

摘要: 在软土中进行了桩的轴向动静力受压模型试验, 对桩的动承载力、桩动侧阻、动端阻、桩顶竖向累积位移、桩顶振动位移幅值及动刚度进行了分析研究, 得到了软土地区高速铁路桥梁桩基承载力设计值应折减 10%~30% 等结论。

关键词: 桩; 动力特性; 模型试验; 软土; 轴向

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)02-0218-04

作者简介: 彭雄志(1971-), 男, 湖南攸县人, 2000年毕业于西南交通大学获博士学位, 讲师, 从事深基础、土动力学和岩土工程可靠性的教学与研究。

PENG Xiong-zhi¹, ZHAO Shan-rui¹, LUO Shu-xue¹, WANG Ai-ling²

(1. School of Civil Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. The Southwest Branch, China Academy of Railway Sciences, Chengdu 610031, China)

Abstract: Model pile tests under dynamic and static load in soft soil have been done, and research is accomplished on dynamic bearing capacity, dynamic side resistance, dynamic end resistance and dynamic stiffness of pile, accumulation and amplitude of displacement on top of pile. It is concluded that bearing capacity of pile foundation of high-speed railway bridge must be reduced by 10 percent to 30 percent.

Key words: pile; dynamic character; model test; soft soil; axial direction

1 引言*

随着京沪高速铁路建设程序的推进, 出现在沪宁段的深厚软弱地基将对桥梁基础的设计产生重大影响。在普通铁路桥梁基础设计时, 将列车荷载静止摆在桥上, 不考虑其冲击振动对基础的影响。而对普通铁路和准高速铁路桥梁的调查研究发现, 随着列车速度的提高, 传递到基础面处的能量增大很快。由于高速铁路建设在我国尚属首次, 桩基础的承载力在高速列车动力作用下将会有多大的衰减, 沉降如何发展, 动位移振幅有多大等问题, 是铁路建设者必需面对的。为此, 西南交通大学桩基课题组对动静力作用下单桩的行为做了室内动力模型试验研究^[1]。

2 桩的动力模型试验

2.1 试验条件

试验所用土样为京沪高速铁路现场地基上取回的重塑土, $w_L = 31\%$, $w_P = 20\%$, $I_P = 11$, $\gamma = 19.1 \text{ kN/m}^3$, $G_s = 2.76$ 。根据现场勘探试验资料, 地基土多为软塑至流塑状, 试验主要以含水率 w 作为土样的控制指标, 4组试验土样的含水率分别为 28%, 31%, 35% 和 38%。

模型槽长 250 cm, 宽 250 cm, 高 730 cm。试验边界: 长宽方向为 6.8 倍桩径, 桩底下为 10.6 倍桩径。

模型桩采用尼龙棒, 弹模约为 2000 MPa, 制成的桩的应变较易测量, 制作模型桩和贴片均较方便。桩体直径 17 mm, 桩长 600 mm, 入土深度 510 mm。为试验需要, 桩头加工了螺纹使之与轴力传感器及加力头方便地固定起来。制备好的土样放置一段时间, 含水率均匀后再装入模型槽中, 保持桩在槽内居中竖直, 分层均匀装土并使土样达到设计容重。

动静荷载均采用 DTC-306 型振动三轴仪加载。桩顶连有轴力传感器, 并对称安置了一对百分表, 桩身布置了电阻应变片, 桩底埋有小型土压盒。

试验研究了桩顶位移、桩顶荷载、桩身轴力或桩身摩阻力、桩底反力或土压力及以上各量的时程变化。

2.2 试验方法及标准

为更好进行试验, 正式试验前作了预备试验, 摸索试验的动荷载施加标准、稳定标准及破坏标准。

根据桩基受力特点, 首先一次性加上预估桩极限静荷载 p_u 的 40%~60%, 按静载稳定标准, 待其沉降稳定 ($\Delta s \leq 0.1 \text{ mm/h}$) 后, 再按快速加载法逐级施加动载, 桩顶动静荷载比为 0.1, 0.2, 0.3 等, 根据实际所得的桩顶荷载-位移曲线并对照静载的终止加载条件, 确定动力荷载作用下的终止加载条件(下列情况之一): ①某级荷载下 $s_i / s_{i-1} \geq 3$; ②试桩的桩顶动位移幅值达到 0.2 mm; ③桩顶累积位移大于 10 mm。

达到以下三个位移条件时的静力荷载与循环荷载的总和作为循环荷载下的桩承载力: ①按桩的 $p-s$ 曲线第二拐点确定; ②在动荷加载期间, 桩顶累积动位移值达到 0.1 倍桩径; ③桩顶塑性位移增长速率超过 0.01 mm/min; ④桩顶的动位移幅值相对于本级荷载第一个循环增加 0.02~0.05 mm。其中 ①、②为主要控制指标, 控制桩顶下沉总量和沉降发展趋势; ③、④分别为控制桩的急剧下沉和桩顶动刚度突降情况, 因为桩的急剧下沉和动刚度突降均为动静荷载下桩丧失继续承载的情况, 即桩的承载性能达到极限。

3 桩的动力试验结果及分析

3.1 轴向动力作用下桩的行为概述

一般地, 在桩上施加竖向动荷载, 桩发生强迫振动, 经一定时间后初始加载的影响因阻尼衰减而消失, 剩下稳态振动。桩在轴向动力作用下的行为可分为以下三种情况(如图1所示):

(1) 在较小动荷载作用下, 桩上荷载未达到其动极限承载力, 桩顶累积位移在开始时以较快速度发展, 而后其速度迅速减小, 累积位移趋于稳定, 桩顶位移振幅趋于稳定或略有减小, 即桩土体系获得了强化;

(2) 在较大动荷载作用下, 桩顶累积位移先以较快速度发展, 经一定循环后, 其速度略有减小, 但仍以某速度继续发展, 桩顶位移振幅趋于稳定或稍有增大;

(3) 在相当大动荷载作用下, 桩顶累积位移先以较快速度发展, 经一定循环后依然保持较大速率, 桩顶位移振幅随循环次数的增加而增大, 此时桩处于破坏阶段。

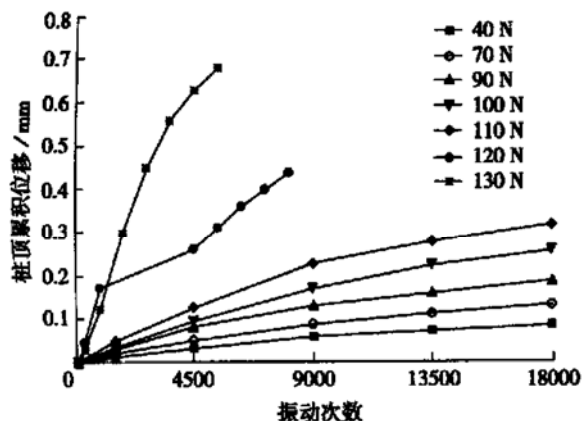


图1 桩顶累积位移与振动次数的关系

Fig. 1 Accumulated displacement of pile top and the number of vibration

3.2 单桩轴向动承载力

本试验中的激振频率模拟了列车速度的影响。施加在结构物上的激振频率随列车速度的增加而增加, 并可近似按 $f = v/L$ 计算其频率, 其中 L 为车辆长度,

v 为列车速度。现场试验资料也表明桩基所受荷载频率较低, 通常不超过 6 Hz。

以 $w = 28\%$, $d = 17$ mm (d 为桩径), $L = 600$ mm 桩为例, 试验结果见表1, 频率的增大对桩的动承载力有较好影响, 使其承载力提高。桩的承载力近似按线性随荷载频率的对数值而增加, 荷载频率每增加 10 Hz, 桩的承载力就能提高 10%~20%^[2]。

表1 试验结果

Table 1 Test results

加载频率 / Hz	桩动承载力 / N	桩顶极限位移 / mm	桩顶位移幅值 / mm
2.0	151.4	0.251	0.121
3.5	197.8	0.447	0.108
5.0	208.7	1.312	0.097

土样含水率 w 对桩动承载力 Q 的影响较大, 以 $f = 3.5$ Hz, $d = 17$ mm, $L = 600$ mm 桩为例, 含水率为 28%, 31%, 35% 和 38% 时, 测得的桩动承载力 Q 分别为 197.8, 104.8, 58.3 和 45.0 N, 可见试验土样含水率超过 31% 处于流塑时桩的动承载力值下降很快。

为了对循环荷载作用下桩承载力变化的总趋势有一个较全面认识, 将试验达到极限时作用于桩上的静荷载 Q_{av} 、循环荷载 Q_c 、最大荷载 Q_{max} 和最小荷载 Q_{min} 作为其特征量记录下来, 用桩的极限静承载力 Q_{us} 加以归一化^[3,4], 其中 $Q_{max} = Q_{av} + Q_c$, $Q_{min} = Q_{av} - Q_c$ 。图2中 s 线以下为试验区, 0 线为桩单向受压与拉压双向受力的分界线。试验点距离 s 线越远表示因动力作用桩的承载力降低越大, 从散点趋势可以看出桩承载力 Q_{uc}/Q_{us} 随着 Q_{av}/Q_{us} 的增大而减小, 动载引起的减小幅度约为 10%~30%。

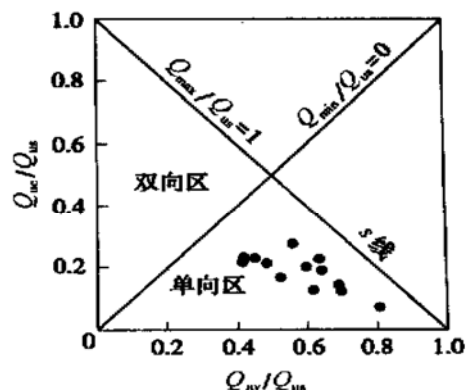


图2 模型桩的归一化承载力曲线

Fig. 2 Normalized bearing capacity of model pile

3.3 桩侧动摩阻力

以 $w = 28\%$, $d = 17$ mm, $L = 600$ mm 的桩为例, 分别承受静载、动载而达到极限承载力时的桩身轴力、桩侧土摩阻力随深度的变化如图3所示。在桩身受力过程中, 桩身轴力随深度减小, 因桩长径比为 30, 且地基

土软弱, 桩底阻力很小。由轴力分布可得桩侧阻力分布, 如图 3(b), 桩侧土动摩阻力是抛物线型分布, 比较集中在桩的上部, 形成上面大、下面小的分布。这样一个分布与静力时桩侧土摩阻力的分布曲线基本形态一样, 而动力时比静力时桩身摩阻力更加不均匀, 即动摩阻力主要集中在桩侧上部 1/3 范围。

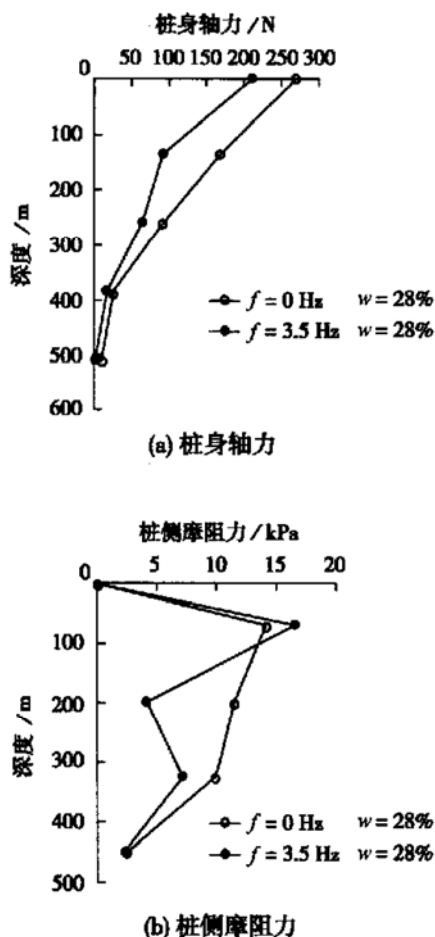


图 3 桩身轴力与桩侧摩阻力随深度的分布

Fig. 3 Distribution of axial force and side resistance of pile

3.4 桩的动端阻

以 $w = 28\%$, $f = 5.0 \text{ Hz}$ 时的桩为例, 动端阻值与桩顶动位移 s 的关系如图 4 所示。刚开始时, 随着 s 增长, 动端阻值几乎呈线性递增; 但当 s 达到某一临界值时, 动端阻值充分发挥出来, 其增长速度减慢, 此值对应的端阻为极限端阻值。

3.5 桩顶累积位移

以 $w = 28\%$, $f = 3.5 \text{ Hz}$ 时的桩为例, 桩顶累积位移与桩顶荷载的关系如图 5 所示。当桩顶荷载较小时, s 增长较缓慢; 随着桩顶荷载的进一步增长, s 增长加快, 并达到极限位移; 当桩顶荷载大于动承载力, s 急剧增长, $s-Q$ 曲线上出现陡降段, 此时土已破坏。单位动力荷载下的塑性累积位移与桩荷载水平也相关, 见图 6, 即桩顶塑性累积位移速率随桩顶荷载的增长而增长。

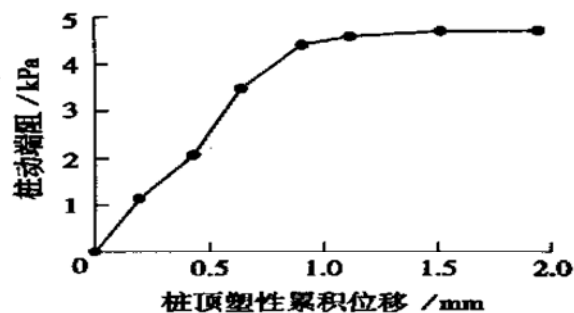


图 4 动端阻随桩顶位移的逐渐发挥

Fig. 4 Relationship between dynamic end resistance and top displacement of pile

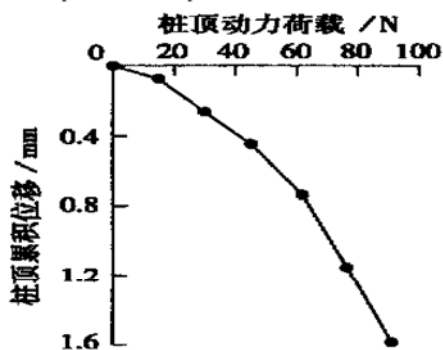


图 5 桩顶位移与桩顶动荷载关系

Fig. 5 Relationship between top displacement and dynamic top force of pile

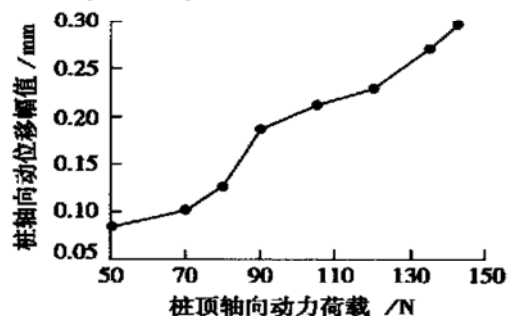


图 6 桩顶动位移幅与动力荷载关系

Fig. 6 Amplitude of top displacement and dynamic load of pile

当施加一定大小的桩顶荷载时, 桩顶累积位移 s 与加载次数的关系如图 1 所示。当循环荷载动幅值 Q_c 较小时, s 增长率随循环次数 N 的增加而增大, 但随着 N 增大到一定值, s 的增长明显缓慢, 桩土体系基本稳定; 当循环荷载动幅值 Q_c 较大时, s 增长非常显著, 变形以较快速度加速累积而最后导致桩破坏; 在此二者之间尚存在过渡形态, 即累积变形一定速度增长而桩不破坏, 这与抗拔桩所得结果相似^[3]。

当桩达到动力极限承载力时, 得到桩顶的动力累积位移极限值 s_{du} 。 $w = 28\%$ 时的桩顶极限位移 s_{du} 与加载频率的关系见表 1, 试验表明桩顶极限位移 s_{du} 随加载频率增大而增大, 这也说明在一定的荷载水平时, 荷载频率的增加对桩顶累积位移有不利影响。

3.6 桩顶动位移幅值和动刚度

桩顶动位移幅值 ρ_e 是指荷载某一次循环时轴向动位移的最大值与最小值之差。桩在轴向荷载下的动刚度表示桩-土系统产生单位桩顶位移所需施加的外力,以 K_e 表示,即 $K_e = 2Q_e / \rho_e$, 其中 Q_e 为循环荷载半幅值。

(1) 桩顶动位移幅值与循环次数

根据试验结果绘制出循环次数 N 与桩顶动位移幅值 ρ_e 的关系曲线,如图7所示。在一定的动荷载作用下,桩顶动位移幅值 ρ_e 不随循环次数 N 而改变,始终保持为常数。

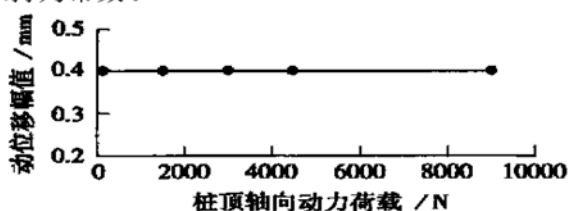


图7 桩顶动位移幅值与循环次数

Fig. 7 Amplitude of top displacement and the number of vibration of pile

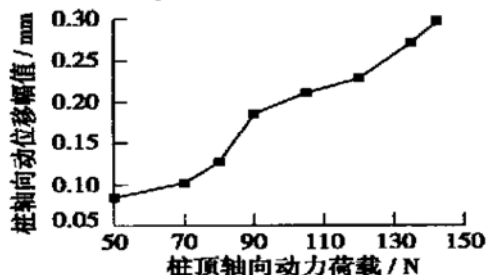


图8 动荷载与振动位移幅值

Fig. 8 Dynamic load and amplitude of displacement

桩上静力 150 N、动力 70 N、土样含水率 28% 的模型试验中不同频率时的桩顶位移幅值见表1。可见,随动力荷载频率增大桩顶位移幅值减小,即动刚度随荷载频率增大而增大。图8是桩上静力 150 N、荷载频

率为 2.0 Hz、土样含水率 28% 的模型试验结果,可以看到,桩顶动位移幅值随着动荷载的加大而增大。

4 结 论

(1) 轴向受压桩在循环动荷载作用下发生强迫振动,在其上静载一定时,存在一个极限动载值。桩的极限动承载力随动荷载频率增大和黏土含水率的减小而提高。在高速铁路列车动力荷载作用下,模型试验得到软土中桩的极限承载力的动静比约为 0.7~0.9。

(2) 在动力荷载作用下,桩动侧摩阻沿深度呈抛物线状减小,其减小的幅度随着深度的增大而减小,动侧摩阻较静侧摩阻更进一步向桩的上部约 1/3 桩长范围内集中,桩侧摩阻动静比随含水率的增大而增大。

(3) 软土含水率是影响桩动承载力大小的主要因素,若能对现场软土通过各种措施加强排水固结,改良地基,将有效提高桩的动承载能力。

(4) 桩的动刚度随频率的增大而增大,不随循环次数而改变,荷载大小不同时桩的动刚度不相等。

(5) 试验中桩的动端阻力随桩顶沉降增大而逐渐发挥,完全发挥的位移约为 0.1 桩径,端阻与总阻比一般小于 5%,最大不超过 8%。

参考文献:

- [1] 彭雄志. 轴向循环荷载作用下桩的动力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
- [2] Bttrrum L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils[A]. Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Moscow, 1973. 111-159.
- [3] 陈竹昌. 轴向循环荷载下确定黏土中桩承载力的方法[J]. 海洋工程, 1990, 8(3): 72-81.
- [4] Poulos H G. Cyclic stability diagram for axially loaded piles[J]. ASCE, 1988: 877-895.

致本刊编委及各位审稿人

为感谢审稿人的辛勤劳动,本刊向所有审稿人均按时寄送微酬。但由于种种原因,汇款单被退回的情况时有发生。本刊除向这些审稿人致谢、致歉外,希望尚未收到审稿费的各位,将本人的准确地址通知本部,以便重新补寄审稿费。

由于编委和部分学科专家手中审阅的稿件过于集

中,以致影响了编委们的正常工作和休息,本部深感歉意! 在此恳请编委和学科专家们向本刊推荐年轻的学科带头人,以加快本刊稿件的审阅周期并分担老同志的工作量。扩大稿件的审阅范围,是学科发展的需要,也是新人成长的必然结果。

再次向本刊审稿人致以深深的谢忱!

本刊编辑部