

文章编号:1672-6561(2012)02-0097-09

## 秦巴山区软岩地基桥桩承载性状试验研究

曲 直<sup>1</sup>, 姜海力<sup>2</sup>, 刘永军<sup>1</sup>, 李国旗<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西通宇公路研究所有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘 要:** 为了研究软岩地基桥桩的荷载传递性状、破坏机理, 并获取在该地质条件下更为可靠的桩基计算参数, 对秦巴山区软岩地基 3 根钻孔灌注试桩进行竖向静载试验。结果表明: 秦巴山区软岩地基桥桩试桩荷载-沉降曲线呈陡降型, 实测竖向极限承载力为 20 500 kN, 桩的破坏方式为桩身材料强度破坏; 淤泥质亚黏土地层中的碎石起到一定的骨架作用, 增强了此地层桩极限侧阻力, 发挥极限侧阻力所需的桩-土(岩)相对位移为 4~8 mm; 强风化砾岩表现为加工软化型, 发挥极限侧阻力所需的桩-土(岩)相对位移为 3~8 mm; 中风化砂砾岩表现为明显的加工硬化型, 所需的桩岩相对位移大, 且桩极限侧阻力的特征点不明显; 淤泥质亚黏土地层桩侧阻力占总荷载的 60%~70%, 随着桩顶荷载的逐步加大, 该地层桩侧阻力所占比例不断下降, 而嵌岩段桩侧阻力所占比例逐渐上升, 达到 55%~65%, 嵌岩段桩侧阻力沿桩深的分布曲线表现出非线性的特征; 试桩为端承摩擦桩, 桩端阻力约占桩顶荷载的 20% 左右, 且未充分发挥, 在上部结构允许的沉降范围内, 适当增加桩端的沉降有利于端阻力的发挥; 桩侧阻力先于端阻力发挥, 建议单桩承载力设计时分别采用不同的端阻力和侧阻力安全系数。

**关键词:** 秦巴山区; 软岩; 桥桩; 竖向静载; 承载性能; 侧阻力; 端阻力; 材料强度

**中图分类号:** U442.2; TU473.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A

## Laboratory Research on Bearing Behavior of Bridge Piles in Soft Rock Foundation in Qinling-Dabashan Mountains

QU Zhi<sup>1</sup>, JIANG Hai-li<sup>2</sup>, LIU Yong-jun<sup>1</sup>, LI Guo-qi<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Tongyu Highway Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the load transfer behavior and failure mechanism of bridge piles in soft rock foundation and obtain the reliable calculation parameters of piles under the special geological situation, the vertical static load test with three bored piles was done in Qinling-Dabashan Mountains. The results showed that the curves of loads and settlements for test piles descended steeply, the measured vertical ultimate bearing capacity was 20 500 kN, and the failure mode of pile was material strength failure; the gravel in muddy mild clay was positive to ultimate side friction force of pile, the relative displacements between pile and soil (rock) for bearing side friction force were 4-8 mm; strong weathering conglomerate processed was soft, the relative displacements were 3-8 mm; middle weathering glutenite processed was obviously hard, the relative displacements were large, and the feature point of pile ultimate side friction force was not obvious; pile side friction forces in muddy mild clay were 60%-70% of total loads, and the proportion decreased continuously when pile top load increased gradually; the proportion of pile

收稿日期: 2012-04-20

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目(2009 318 812 004)

作者简介: 曲 直(1984-), 男, 河南唐河人, 工学硕士研究生, E-mail: hndxqz@163.com。

side friction forces in rock-socketed increased continuously and reached to 55%-65%, the relationships between side friction forces and depths were nonlinear; test piles were tip-support friction piles, pile tip resistances were about 20% of pile top load and were not adequately born, and increasing the settlement of pile tip appropriately within the allowable range of upper structure was favorable to bear the tip resistance; pile side friction force was born before tip resistance, so it was suggested that various safety coefficients of side friction force and tip resistance were used to design the bearing capacity of single pile.

**Key words:** Qinling-Dabashan Mountains; soft rock; bridge pile; vertical static load; bearing performance; side friction force; tip resistance; material strength

## 0 引言

秦巴山区南接四川、重庆,东临湖北,是连接西北、西南和华中的结合部。随着中国经济的发展以及新一轮西部大开发战略和中部崛起战略的实施,秦巴山区的高速公路建设发展迅速。但秦巴山区位于秦岭—印支褶皱带,在地史时期曾受到加里东、印支、燕山和喜马拉雅等多次构造运动和变质作用,形成了复杂的地质构造、陡峻的地形地貌以及特殊的软弱变质岩系。岩体成因复杂,节理发育,风化强烈,岩性软弱;地面主要为松散的残积、堆积物<sup>[1-2]</sup>。桥梁成为高速公路跨越这些障碍的选择之一。大直径嵌岩桥桩具有承载力高、破坏性静载试验困难且耗资大等特征,制约了人们对其承载机理的认识<sup>[3-6]</sup>。刘松玉等分析了南京地区大直径泥质软岩灌注桩的荷载传递性状,揭示了该地区软岩嵌岩桩主要表现为摩擦桩的特性<sup>[7]</sup>。邢皓枫等对大量嵌岩桩现场试桩资料的统计分析得出,试桩荷载下软岩嵌岩桩承载特性主要表现为端承摩擦桩;嵌岩桩侧阻力与端阻力的发挥是异步的,即侧阻力先于端阻力发挥,建议将侧阻力和端阻力分别取不同的安全系数来设计单桩竖向承载力;嵌岩桩的破坏特征表现为突然破坏,破坏的原因有 2 种:①桩体发生破坏;②桩的嵌岩部分发生破坏,发生破坏的位置有桩岩界面、桩周围岩<sup>[8]</sup>。彭柏兴等运用静载试验研究了湘盆地红层软岩嵌岩桩,结果表明红层软岩嵌岩桩承载性状为端承摩擦桩,桩端阻力和侧阻力不同步发挥,发挥极限侧阻力的桩岩相对位移为 2~6 mm<sup>[9]</sup>。总之,软岩嵌岩桩兼具嵌岩桩的特性和软岩的复杂性<sup>[10-13]</sup>。笔者通过陕南秦巴山区软岩地基中 3 根钻孔灌注桩(S1、S2 和 S3)竖向静载试验的分析,研究了桩的荷载传递性状、破坏模式,为秦巴山区软岩地基合理选用该桩型提供帮助。

## 1 试验概况

### 1.1 场地岩土条件

根据内部地质勘察报告,试验区试桩地层具体分布为:①厚度约 8 m 淤泥质亚黏土,处于可塑状态,局部夹有含量(质量分数)为 10%~30% 的碎石;②厚度约 2 m 强风化砾岩,呈粗—巨粒结构,粒径为 20~70 mm,砾岩裂隙发育,岩芯破碎;③厚度约 4 m 中风化砂砾岩为块状构造,泥质胶结,节理裂隙局部发育,粒径 10~30 mm,岩芯呈碎块、短柱状,饱水单轴抗压强度最大为 21.5 MPa,最小为 3.1 MPa,平均为 9.4 MPa,属于软岩。地层空间分布见表 1。

表 1 试验区地层分布

Tab. 1 Strata Distribution of Test Area

| 地层类型   | 各桩地层厚度/m |     |     | 侧阻力/<br>kPa | 端阻力/<br>kPa |
|--------|----------|-----|-----|-------------|-------------|
|        | S1       | S2  | S3  |             |             |
| 淤泥质亚黏土 | 8.1      | 8.1 | 7.8 | 35          | 85          |
| 强风化砾岩  | 1.6      | 1.8 | 2.0 | 195         | 850         |
| 中风化砂砾岩 | 7.3      | 7.3 | 7.5 | 195         | 950         |

### 1.2 试验设计

试验采用锚桩横梁法,静载加荷方式为慢速维持荷载法。试桩设计直径 1 100 mm,有效桩长 13 m;锚桩设计直径 1 500 mm,有效桩长 34 m。加载系统由高压电动油泵、5 台 6 500 kN 油压千斤顶、锚桩、反力梁、反力盒和精轧螺纹钢组成(图 1)。

桩顶沉降采用 4 个正交布置在桩顶附近的精密百分表进行记录,桩身内力采用钢筋应力计法和滑动测微计法测试。根据工程地质勘察报告提供的地层分布情况,在土层的交界面处和深厚土层内部,每个桩身测试断面上等间距布置 3 支钢筋应力计。滑动测微计布置方法为:每米布置 1 个断面,每断面布置 2 个测点,分别将测环和 PVC 套管连接好,并将连接好的测环和套管对称平行固定在钢筋笼内侧。

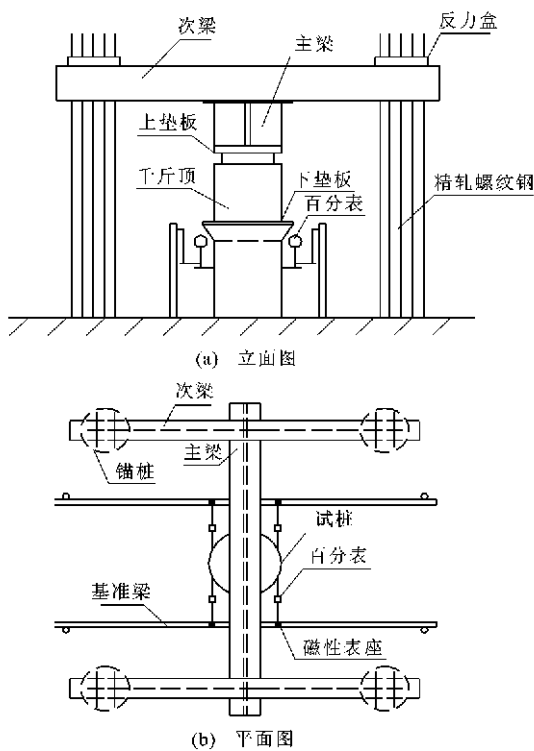


图 1 试验加载装置布置

Fig. 1 Device Layout of Test

试验加载分级、沉降观测、沉降稳定标准、终止加载及卸载条件严格按照《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T F50—2011)<sup>[14]</sup>的要求。

2 参数修正和沉降-荷载曲线分析

2.1 桩径修正

不良地质条件、钻机设备质量问题、泥浆性能不达标和施工操作不当等原因可能造成桩身的缩径或扩径。为了试验分析的准确性,应进行成孔检测(表 2),并采用基桩断面修正系数进行修正

$$\lambda = (\frac{D_j}{D_0})^2 \tag{1}$$

式中: $\lambda$  为基桩断面修正系数; $D_j$  为实测的第  $j$  段桩身直径; $D_0$  为桩身平均直径。

表 2 试桩成孔检测结果

Tab. 2 Testing Results of Completed Holes for Test Piles

| 试桩<br>编号 | 孔深/m |       | 孔径/m  |       |       |       |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 设计值  | 实测值   | 设计值   | 实测最大值 | 实测最小值 | 实测平均值 |
| S1       | 14   | 14.50 | 1.100 | 1.418 | 1.125 | 1.271 |
| S2       | 14   | 14.38 | 1.100 | 1.355 | 1.145 | 1.218 |
| S3       | 14   | 14.25 | 1.100 | 1.572 | 1.350 | 1.480 |

2.2 桩身应变修正

竖向荷载作用下,由桩-土体系的荷载传递方程

可知,桩侧阻力是桩身压缩量的二阶导数的函数,而数值微分计算是不稳定的,试验中桩身应变的误差会在微分过程中被成倍放大,无法保持分析所需的精度,因此需要对直接测量的桩身应变值进行取舍和拟合<sup>[15]</sup>。

2.3 桩身混凝土弹性模量校正

桩的弹性模量是分析桩-土(岩)荷载传递性状的一个重要参数,某些试验中直接采用预留混凝土试块的弹性模量是不妥的,会造成人为放大端阻力的结果。大量试验表明,桩的弹性模量非定值,它是与桩身混凝土质量、桩径的变化,桩顶作用荷载和测试技术等因素有关的一个综合参数<sup>[16-18]</sup>,随桩身应变的增加而降低。通过建立试桩弹性模量与标定面应变的线性相关关系来修正桩的弹性模量,可以得到合理的桩土荷载传递性状

$$E_i = a + b\epsilon_i \tag{2}$$

式中: $E_i$ 、 $\epsilon_i$  分别为第  $i$  级荷载作用下桩的弹性模量和应变; $a$ 、 $b$  为系数。

试桩的弹性模量和应变关系见图 2。

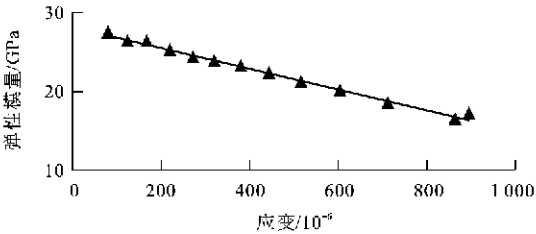


图 2 S1 试桩弹性模量-应变关系

Fig. 2 Relationship Between Modulus of Elasticity and Strain for S1 Test Pile

2.4 荷载-沉降曲线

单桩竖向静载试验的荷载-沉降曲线从总体上揭示了桩-土(岩)体系受压后的荷载反应和桩的破坏模式,因此分析该曲线能直观了解桩的承载特征。

从图 3 可以看出,3 根试桩的荷载-沉降曲线均有明显的转折点,呈陡降型,破坏荷载较接近,S2 试

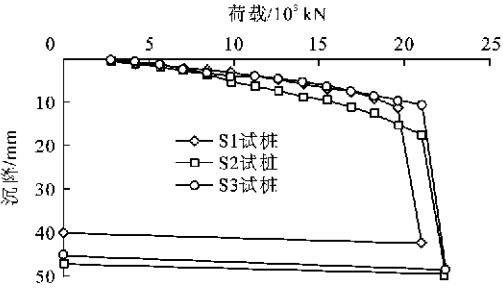


图 3 荷载-沉降曲线

Fig. 3 Curves of Loads and Settlements

桩发生破坏时的沉降较 S1 和 S3 试桩大,3 根试桩在加载至破坏荷载(S1 试桩为 21 000 kN,S2 试桩为 22 400 kN,S3 试桩为 22 400 kN)一段时间后,均听到地下混凝土破碎的巨大声响,同时,桩顶开始迅速下沉,加载系统无法维持所加压力。表 3 整理了 3 根试桩的最大加载量和极限荷载以及对应的桩顶沉降。

表 3 试桩最大加载量和极限荷载以及相应的桩顶沉降

| Tab. 3 Maximum and Ultimate Loads of Test Piles and the Corresponding Pile Top Settlements |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|
| 试桩编号   | S1     | S2     | S3     |
| 最大加载量/kN   | 21 000 | 22 400 | 22 400 |
| 最大加载下的<br>累计沉降量/mm   | 42.229 | 49.639 | 48.267 |
| 极限荷载/kN  | 19 600 | 21 000 | 21 000 |
| 极限荷载下的<br>累计沉降量/mm   | 11.101 | 17.247 | 10.604 |

3 根试桩桩身混凝土的破坏荷载接近所加最大荷载。试验完毕后,对试桩进行钻芯取样,发现 3 根试桩在桩身不同位置(S1 试桩在距桩顶 8.3 m 处,S2 试桩在距桩顶 4.1 m 处,S3 试桩在距桩顶 6.1 m 处)出现了混凝土压裂透水现象。由此可以判定,本试验的 3 根试桩是由于桩身材料强度不足而导致的破坏。

3 根试桩实测极限承载力平均值  $Q_{um}$  为 20 500 kN,试桩的极限承载力实测值与平均值之比  $R_i$  的标准差  $S_n$  小于 0.15,因此取 3 根试桩竖向极限承载力为 20 500 kN。

### 3 软岩地基桩的荷载传递性状

#### 3.1 桩身轴力的发挥性状

本试验以滑动测微计测试结果为主要依据,桩身轴力的测量原理为

$$P_{ij} = A_j E_i \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

式中: $P_{ij}$ 、 $\varepsilon_{ij}$  分别为第  $i$  级荷载作用下第  $j$  段桩身轴力和应变; $A_j$  为实测桩的第  $j$  段横断面面积; $E_i$  为第  $i$  级荷载作用下桩的弹性模量。

在各级荷载作用下,3 根试桩的轴力分布见图 4。从图 4 可以看出,桩身轴力沿桩埋深递减,在桩顶荷载较小时,桩身轴力分布曲线的斜率较大,轴力值递减较慢,例如当加载量  $Q$  为 2 800 kN 时,轴力分布曲线接近于直线。桩顶荷载较大时,轴力分布曲线斜率变小,桩身轴力的递减速度加快,幅值增大。

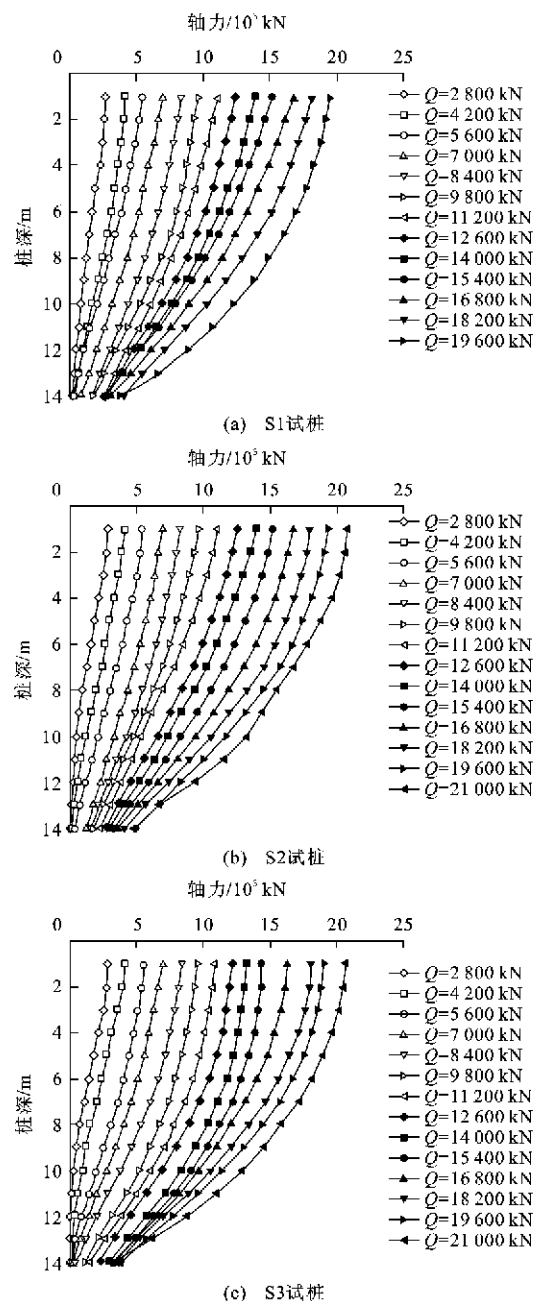


图 4 各级荷载下轴力沿桩深的分布

Fig. 4 Relationships Between Axial Forces and Depths Under Different Loads

#### 3.2 桩侧阻力发挥性状

##### 3.2.1 桩侧阻力沿桩长的分布

桩身两侧点间轴力的差值即为桩侧阻力。桩正是靠这种不断发挥的侧阻力将桩顶的荷载传递到桩周土中。桩侧阻力  $q_s$  计算式为

$$q_s = \frac{P_j - P_{j+1}}{3.14 D_j H_j} \quad (4)$$

式中: $P_j$ 、 $P_{j+1}$  分别为桩身第  $j$  与  $j+1$  断面的桩身轴力; $H_j$  为桩段长度; $D_j$  为桩径实测值。

$q_s$  沿桩身的分布见图 5。从图 5 可以看出,在

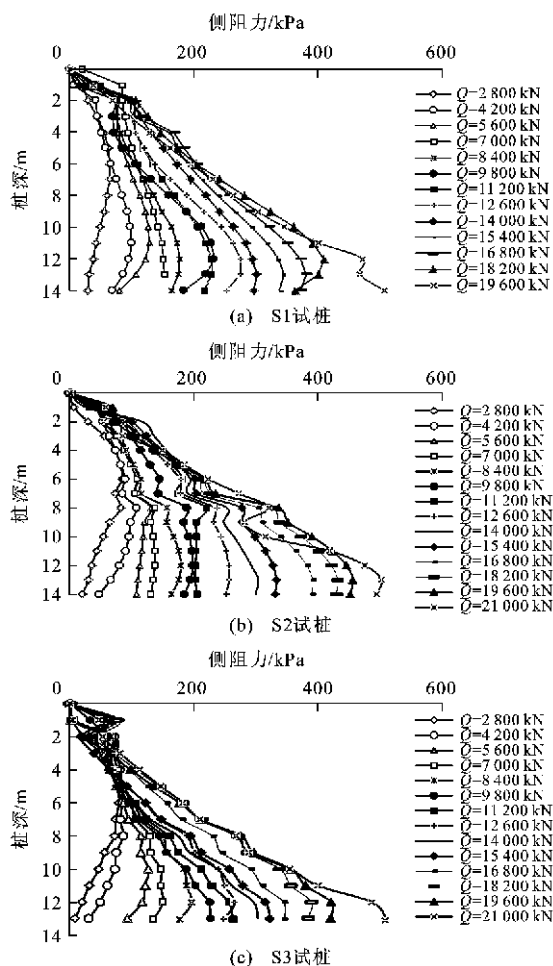


图5 各级荷载下侧阻力沿桩深的分布

Fig. 5 Relationships Between Side Friction Forces and Depths Under Different Loads

桩顶荷载较小时,桩身上部受到压缩而产生相对于土的向下位移,与此同时桩侧表面受到土的向上侧阻力;桩顶荷载通过所发挥出的桩侧阻力传递到桩周土中去,致使桩身轴力和桩身压缩变形沿深度递减,桩侧阻力沿桩深分布曲线表现为“单峰型”,当桩顶荷载为2 800 kN时,桩端处桩侧阻力接近于0;随着桩顶荷载增大,桩身位移和压缩量增大,桩身下部的摩阻力随之逐步调动起来,桩底土层也因受到压缩而产生桩端阻力;桩端土的压缩加大了桩-土(岩)相对位移,从而使桩身摩阻力进一步发挥到极限值。桩侧阻力沿桩身自上而下的发挥具有明显的顺序性。在较大荷载作用下,桩深9 m以下(嵌岩桩段)的桩侧阻力沿桩深分布曲线明显变缓,反映出嵌岩段的桩侧阻力迅速增大。Mattes等运用线弹性理论的分析结果,9 m以下岩层与桩的弹性模量比大于桩周土与桩的弹性模量之比,因此嵌岩段桩的侧阻力大于土中桩<sup>[19]</sup>;另外,与下部桩侧土(岩)的初始法向应力较

大也有关系<sup>[20]</sup>。嵌岩段桩侧阻力沿桩深的分布表现出非线性特征,与邱喜等的分析结果<sup>[21]</sup>一致。

### 3.2.2 桩侧阻力与桩-土(岩)相对位移的关系

大量研究表明,发挥桩极限侧阻力所需的桩-土(岩)相对位移非固定值,它与桩径大小、施工方法、土(岩)层性质和分布位置有关<sup>[16]</sup>。桩-土(岩)相对位移 $S(z)$ 可用桩顶沉降量减去此测点至桩顶的桩身压缩量来表达,计算式为

$$S(z) = S_0 - \sum_{j=0}^z \epsilon_j H_j \quad (5)$$

式中: $S_0$ 为桩顶沉降量; $\epsilon_j$ 为由滑动测微计测得第 $j$ 段桩身应变; $H_j$ 为测点间距,本试验中 $H_j$ 为1 m; $z$ 为桩的段数。由于滑动测微计的灵敏度较高且具有温度补偿功能,所以测得的桩身应变更接近实际值。各级荷载作用下,各土层桩侧阻力与桩-土(岩)相对位移关系见图6。

从图6可以看出,淤泥质亚黏土层桩极限侧阻力为130~160 kPa,是《公路桥涵地基与基础设计规范》<sup>[22]</sup>推荐值的2~3倍,其主要因为此黏土地层中含有10%~30%(质量分数)的碎石,碎石起到一定的骨架作用,增强了此地层桩极限侧阻力,发挥极限侧阻力所需的桩-土(岩)相对位移为4~8 mm。

强风化砾岩表现为加工软化型,桩极限侧阻力为330~370 kPa,发挥极限侧阻力所需的桩-土(岩)相对位移为3~8 mm,较殷治宁等所测得的强风化泥岩地层所需的相对位移(10~11 mm)<sup>[23]</sup>小。但是发挥极限侧阻力所需的位移与桩径成正比<sup>[20]</sup>,本试验试桩的设计桩径比文献<sup>[23]</sup>的大400 mm,推测本试验所需的相对位移应该较大,而实测强风化砾岩地层发挥桩极限侧阻力所需的位移较文献<sup>[23]</sup>小。其主要因为强风化泥岩的岩性软弱,强度低,与水作用易软化,丧失稳定性,而强风化砂砾岩岩性较好、强度高。由此可见,桩侧岩土性质对发挥极限侧阻力及其所需的相对位移起决定作用。

中风化砂砾岩表现为明显的加工硬化型,所需的桩-土(岩)相对位移大,且桩极限侧阻力的特征点不明显,桩侧阻力比淤泥质亚黏土层和强风化砾岩层高出很多。其主要原因是中风化岩层的风化程度低,岩体完整性较好,压缩性低,刚度较大,与雷孝章等的分析<sup>[24]</sup>相符合。

### 3.2.3 嵌岩段桩侧阻力与桩总侧阻力

各地层桩侧阻力所占桩总侧阻力的比例关系见图7。从图7可以看出,桩顶荷载较小时,淤泥质亚黏土层桩侧阻力所占比例为60%~70%,下部各地

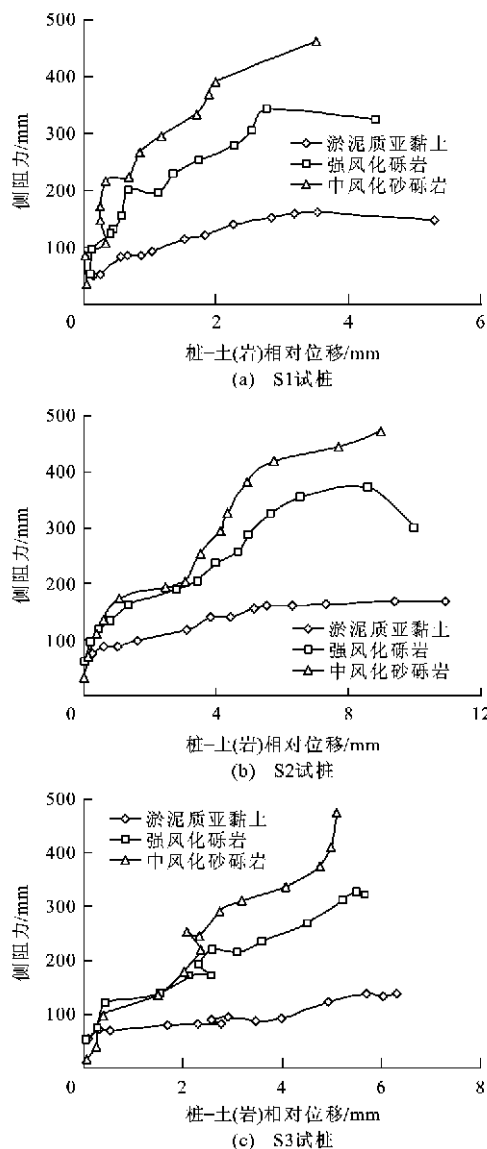


图 6 侧阻力与桩-土(岩)相对位移的关系

Fig. 6 Relationships Between Side Friction Forces and Relative Displacements of Piles to Soil (Rock)

层的桩侧阻力仅占 30%~40%。随着桩顶荷载的逐步加大,淤泥质亚黏土层桩侧阻力所占比例不断降低。其主要因为桩-土(岩)相对位移沿桩身“上部大、下部小”,桩侧阻力沿桩身自上而下发挥。随着桩顶荷载的逐步加大,嵌岩段侧阻力所占比例逐渐上升,达到 55%~65%,提供了主要的桩侧阻力。中风化砂砾岩层桩段桩侧阻力所占比例随荷载增大有不同程度的增长,强风化砾岩段桩侧阻力所占比例在桩顶荷载为 2 800~7 000 kN 时稍有增长,随后稳定在 10%左右,与桩顶荷载大小关系不明显。

### 3.3 桩端阻力发挥性态

#### 3.3.1 桩端阻力与端沉降

试桩的桩端埋设滑动测微计和振弦式钢筋计来

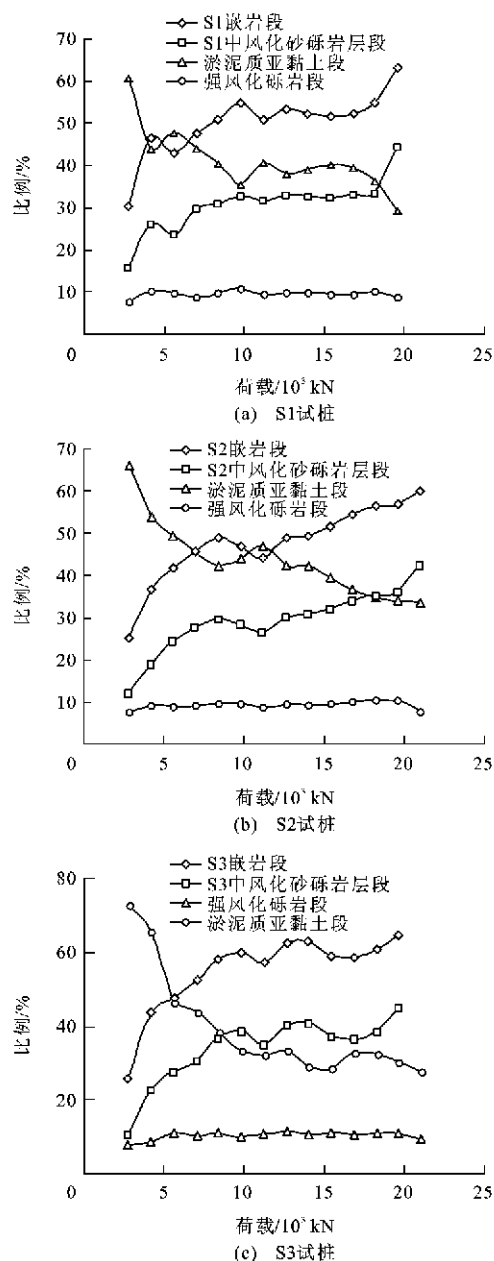


图 7 各地层侧阻力占总侧阻力的比例与荷载的关系

Fig. 7 Relationships Between Loads and the Ratios of Side Friction Forces to Total Side Friction Forces in Different Strata

测量桩端变形,从而计算桩端轴力。基于杆件轴力分析的截面法可知,桩端附近的轴力近似等于端阻力,方向相反。桩端沉降可用下式求得

$$S_{bi} = S_{oi} - \Delta S_i \quad (6)$$

式中: $S_{bi}$ 为桩端沉降; $S_{oi}$ 桩顶沉降; $\Delta S_i$ 为桩身压缩量。桩端阻力与端沉降的关系见图 8。从图 8 可以看出,3 根试桩的桩端阻力与端沉降曲线均为缓变型,桩端沉降均较小,为 4~9 mm。由于试桩桩身材料的破坏,端阻力没有充分发挥。

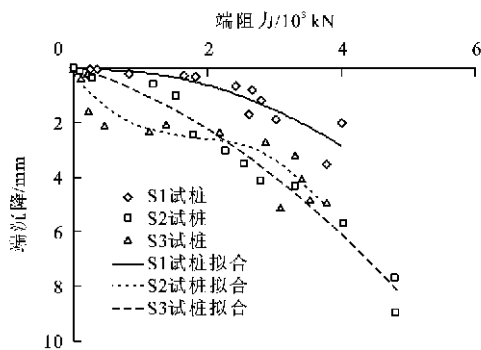


图8 端阻力与端沉降的关系

Fig. 8 Relationships Between Tip Resistances and Settlements

### 3.3.2 桩端阻力发挥

试桩 S1、S2 的实测桩径与桩长均非常接近。在极限荷载作用下,当 S1 桩端沉降 3.5 mm 时,桩端阻力发挥值为 3 769 kN,当 S2 桩端沉降为 8.9 mm 时,对应的桩端阻力发挥值为 4 831 kN,两桩端阻力相差 1 062 kN。对比可知,桩端阻力的发挥需要较桩侧阻力发挥大得多的位移,在上部结构允许的沉降范围内,适当增加桩端的沉降有利于端阻力的发挥,能取得明显的经济效益。

建立桩端阻力与侧阻力分担桩顶荷载比例的曲线见图 9。从图 9 可以看出,3 根试桩的端阻力所占比例为 20% 左右,桩侧阻力所占比例为 80% 左右,可以确定秦巴山区软岩地基上的桩为端承摩擦桩<sup>[25]</sup>。当桩顶荷载为 5 000 kN 以下时,端阻力所占的比例接近于 0;当桩顶荷载为 5 000~10 000 kN 时,桩端阻力所占比例增长较快;当桩顶荷载为 10 000 kN 附近时,端阻力所占比例稳定于 20%,此结论与刘松玉等的研究结果<sup>[7]</sup>接近;经过对比分析,桩端阻力的发挥滞后于桩侧阻力,且其达到极限状态的时效也不同,因此在确定单桩轴向容许承载力时,应选取

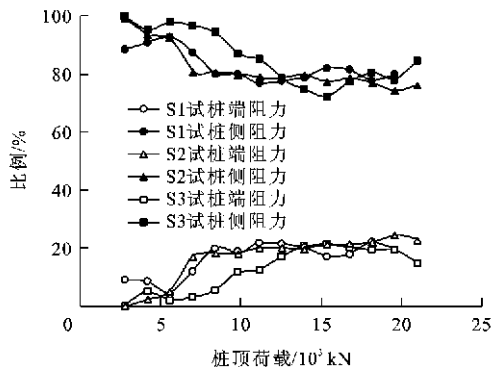


图9 端阻力与侧阻力所占比例随桩顶荷载的变化

Fig. 9 Changes of the Proportions of Tip Resistances and Side Friction Forces with Pile Top Loads

不同的桩端阻力和侧阻力安全系数<sup>[16]</sup>。

## 4 单桩承载力分析

构件正常工作必须满足强度、刚度、稳定性的要求,对于竖向静载试验中的试桩,首先体现在强度和刚度。桩基强度破坏的方式有 2 种:地基强度破坏和桩身材料强度破坏;刚度破坏表现在桩顶的最大沉降超出了上部结构的允许值。利用单桩竖向静载试验,当试桩是由于地基强度不足导致破坏时,可测得地基土强度所确定的单桩竖向极限承载力;当试桩是由于桩身材料强度不足导致破坏时,可测得桩身材料强度所确定的单桩竖向极限承载力,此时地基承载能力没有完全发挥出来,桩基础设计应考虑最不安全的情况,即取地基强度所确定的承载力等于桩身材料强度所确定的承载力<sup>[26-29]</sup>。因此,不论基桩发生何种方式的强度破坏,《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)所提供的单桩竖向受压承载力容许值都是由地基强度所确定的单桩竖向极限承载力在考虑必要安全系数后的值<sup>[30]</sup>,出于安全考虑,需要对地基强度所确定的单桩竖向极限承载力进行桩身强度验算。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)<sup>[31]</sup>,按桩身材料所确定的极限承载力(19 170 kN)小于 3 根试桩的实测极限承载力平均值(20 533 kN),与试桩桩身材料破坏的判断一致。由此可见,设计时应综合考虑地基强度和桩身材料强度相匹配,做到合理利用地基强度与节约桩身材料。

## 5 结 语

(1)秦巴山区软岩地基桥桩试桩荷载-沉降曲线呈陡降型,实测竖向极限承载力为 20 500 kN,桩的破坏方式为桩身材料强度破坏。

(2)桩侧阻力随着桩顶荷载的增大沿桩身自上而下发挥,有明显的顺序性;嵌岩段桩侧阻力沿桩深的分布表现出非线性的特征;嵌岩段桩侧提供了 55%~65% 的桩总侧阻力;强风化砾岩和中风化砂砾岩的桩极限侧阻力建议值分别为 350 kPa 和 450 kPa,中风化砂砾岩端阻力容许值建议取 1 000 kPa。

(3)淤泥质亚黏土地层中的碎石起到一定的骨架作用,增强了此地层极限桩侧阻力,发挥极限侧阻力所需的桩-土(岩)相对位移为 4~8 mm;强风化砾岩表现出加工软化现象,发挥极限侧阻力所需的桩-土(岩)相对位移为 3~8 mm;随着桩顶荷载的

不断增大,中风化砂砾岩表现出加工硬化现象,极限侧阻力特征点不明显;岩体的风化程度越高,桩的极限侧阻力越小;桩侧岩土的性质对桩极限侧阻力的发挥及其所需的桩-土(岩)相对位移起决定性作用。

(4)本试验的3根试桩为端承摩擦桩,桩端阻力约占总荷载的20%,桩侧阻力承担了80%左右的桩顶荷载。试桩端阻力与桩端沉降曲线呈缓变型,适当增加桩端位移有利于端阻力的发挥;桩端阻力的发挥滞后于桩侧阻力,确定单桩轴向容许承载力时,应选取不同的桩端阻力和桩侧阻力安全系数。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 孙果梅,况明生,曲 华. 陕西秦巴山区地质灾害及防治对策[J]. 陕西地质,2004,22(2):78-83.  
SUN Guo-mei, KUANG Ming-sheng, QU Hua. Countermeasures Against Geologic Disasters in Qinling-Dabashan Mountains[J]. Geology of Shaanxi, 2004, 22(2):78-83.
- [2] 范立民,何进军,李存购. 秦巴山区滑坡发育规律研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(1):44-48.  
FAN Li-min, HE Jin-jun, LI Cun-gou. Study on Development Patterns of Landslide in Qinling-Dabashan Mountains[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1):44-48.
- [3] 冯忠居,魏 炜. 大直径钻埋预应力空心桩结构承载力计算[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(3):49-53.  
FENG Zhong-ju, WEI Wei. Bearing Capacity of Large Diameter Bored Hollow Pile of Prestressing Force Concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3):49-53.
- [4] 冯忠居,谢永利. 大直径钻埋预应力混凝土空心桩承载力的试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(2):50-54.  
FENG Zhong-ju, XIE Yong-li. Simulation Test of Large-diameter Bored Hollow Pile of Prestressing Force Concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(2):50-54.
- [5] 李 晋,冯忠居,谢永利. 大直径空心桩承载性状的数值仿真[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(4):36-39.  
LI Jin, FENG Zhong-ju, XIE Yong-li. Numerical Simulation of Large Diameter Hollow Pile Bearing Performance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4):36-39.
- [6] 王 昆. 嵌岩灌注桩在大桥主墩基础施工中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2005,22(2):38-39.  
WANG Kun. Application of Drilling Concrete Pile in the Basic Construction of Great Bridge's Primary-pier[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2005, 22(2):38-39.
- [7] 刘松玉,季 鹏,韦 杰. 大直径泥质软岩嵌岩灌注桩的荷载传递性状[J]. 岩土工程学报,1998,20(4):58-61.  
LIU Song-yu, JI Peng, WEI Jie. Load Transfer Behavior of Large Diameter Cast-in-place Pile Embedded in Soft Rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4):58-61.
- [8] 邢皓枫,孟明辉,罗 勇,等. 软岩嵌岩桩荷载传递机理及其破坏特征[J]. 岩土工程学报,2011,33(增2):355-361.  
XING Hao-feng, MENG Ming-hui, LUO Yong, et al. Load Transfer Mechanism and Failure Characteristics of Piles Embedded in Soft Rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2):355-361.
- [9] 彭柏兴,王星华,雷金山. 湘浏盆地红层嵌岩桩荷载传递性状试验研究[J]. 工程地质学报,2009,17(3):401-407.  
PENG Bai-xing, WANG Xing-hua, LEI Jin-shan. Static Loading Study of Bearing Capability Behavior of Rock-socket Pile in Red Beds Soft Rock in Xiangliu Basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(3):401-407.
- [10] 龚成中,何春林,戴国亮. 坝陵河大桥深嵌岩桩竖向承载力试验[J]. 建筑科学与工程学报,2011,28(4):43-47.  
GONG Cheng-zhong, HE Chun-lin, DAI Guo-liang. Experiment on Vertical Bearing Capacity of Deep Rock-socketed Pile for Baling River Bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4):43-47.
- [11] 余子明. 嵌岩桩竖向承载力计算[J]. 筑路机械与施工机械化,2011,28(10):96-99.  
YU Zi-ming. Calculation of Rock-socketed Pile's Vertical Bearing Capacity[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2011, 28(10):96-99.
- [12] 姜 蓉,李昌宁. 软土地基 CFG 桩加固技术[J]. 交通运输工程学报,2004,4(3):4-7.  
JIANG Rong, LI Chang-ning. CFG Pile Strengthening Technology of Soft Ground[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3):4-7.
- [13] 谢新宇,王奎华,陈春雷,等. 温州城南立交桥引桥软基加固工程实例分析[J]. 中国公路学报,1998,11(3):64-71.  
XIE Xin-yu, WANG Kui-hua, CHEN Chun-lei, et al. Case Study on Improving Soft Clay Subgrade of Chengnan Bridge Approach at Wenzhou[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(3):64-71.



- [14] JTG/T F50—2011,公路桥涵施工技术规范[S].  
JTG/T F50—2011, Technical Specification for Construction of Highway Bridge and Culvert[S].
- [15] 王遇国,梅志荣,张季超.单桩承载性状试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(1):7-11.  
WANG Yu-guo, MEI Zhi-rong, ZHANG Ji-chao. Experimental Researches on Bearing Characteristics of a Single Pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 7-11.
- [16] 洪毓康,陈强华.钻孔灌注桩的荷载传递性能[J].岩土工程学报,1985,7(5):22-35.  
HONG Yu-kang, CHEN Qiang-hua. Load Transfer Behaviour of Bored Piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(5): 22-35.
- [17] 冯忠居,谢永利,李哲,等.大直径超长钻孔灌注桩承载性状[J].交通运输工程学报,2005,5(1):24-27.  
FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, LI Zhe, et al. Bearing Property of Large-diameter Over-length Nonplacement Pile[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(1): 24-27.
- [18] 杨帆,王耀,任健,等.跨海大桥钻孔灌注桩施工技术[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(5):78-81.  
YANG Fan, WANG Yao, REN Jian, et al. Construction Technology of Bored Pile for Sea-crossing Bridge[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2011, 28(5): 78-81.
- [19] MATTES N S, POULOS H G. Settlement of Single Compressible Pile[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1969, 95(1): 189-208.
- [20] 刘金砺.桩基础设计与计算[M].北京:中国建筑出版社,1990.  
LIU Jin-li. Pile Foundation of Design and Calculation [M]. Beijing: China Architecture Press, 1990.
- [21] 邱喜,尹崇清.大直径嵌岩桩承载特性的现场试验分析[J].建筑科学,2009,25(1):73-77.  
QIU Xi, YIN Chong-qing. Analysis of Field Test on Bearing Capacity Characteristics of Large-diameter and Rock-socketed Piles[J]. Building Science, 2009, 25(1): 73-77.
- [22] JTG D63—2007,公路桥涵地基与基础设计规范[S].  
JTG D63—2007, Code for Design of Ground Base and Foundation of Highway Bridges and Culverts[S].
- [23] 殷治宁,卞国炎,朱先祥.泥岩地基钻孔灌注桩承载力试验评价[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2004,27(9):1038-1042.  
YIN Zhi-ning, BIAN Guo-yan, ZHU Xian-xiang. Experimental Assessment of Bearing Capacity of the Cast-in-situ Bored Pile in Mudstone Foundation[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2004, 27(9): 1038-1042.
- [24] 雷孝章,何思明.嵌岩桩极限侧阻力研究[J].四川大学学报:工程科学版,2005,37(4):7-10.  
LEI Xiao-zhang, HE Si-ming. Study on Ultimate Resistance of Rock-socket Pile[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2005, 37(4): 7-10.
- [25] 《桩基工程手册》编写委员会.桩基工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1995.  
Editorial Committee of Pile Foundation Engineering Manual. Pile Foundation Engineering Manual [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995.
- [26] 王海鹏,单炜,王平,等.季冻区摩擦单桩承载力计算分析[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(2):52-56.  
WANG Hai-peng, SHAN Wei, WANG Ping, et al. Calculation and Analysis of Friction Pile Bearing Capacity in Season Frozen Area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(2): 52-56.
- [27] 薛新华,魏永幸,赵晓彦.基于模糊控制的单桩竖向极限承载力预测[J].建筑科学与工程学报,2010,27(4):25-30.  
XUE Xin-hua, WEI Yong-xing, ZHAO Xiao-yan. Predicting of Vertical Ultimate Bearing Capacity of Single Pile Based on Fuzzy Control[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(4): 25-30.
- [28] 刘忠,沈蒲生,陈钺.惯性荷载和地震荷载作用下单桩横向非线性动力响应简化分析[J].中国公路学报,2005,18(3):66-69.  
LIU Zhong, SHEN Pu-sheng, CHEN Cheng. Simplified Analysis for Lateral Nonlinear Dynamic Response of Single Pile Under Inertial and Seismic Loads[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 66-69.
- [29] 王奎华,吴文兵,叶良,等.基于极限平衡理论的楔形桩承载力计算方法[J].建筑科学与工程学报,2009,26(4):108-113.  
WANG Kui-hua, WU Wen-bing, YE Liang, et al. Calculation Method of Bearing Capacity of Tapered Pile Based on Limit Equilibrium Theory[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 108-113.
- [30] 王晓谋.基础工程[M].北京:人民交通出版社,2003.  
WANG Xiao-mou. Foundation Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [31] JTG D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].  
JTG D62—2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts[S].