

深厚软基超长大直径钻孔灌注桩承载性状试验研究

魏栋梁^{1,2}, 杨昌正³, 谭晓琦⁴

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074; 2. 云南省交通规划设计研究院, 云南 昆明 650011;

3. 昆明市市政工程质量监督站, 云南 昆明 650011; 4. 云南省公路科学技术研究所, 云南 昆明 650051)

摘要: 为了验证设计所取的参数是否可靠, 采用单桩静载试验方法研究深厚软基超长大直径钻孔灌注桩的承载性状, 对不同荷载作用下桩的沉降量、承载性能、荷载的传递规律和桩侧摩阻力分布规律进行了分析。同时, 基于试验所测得的数据, 结合大理洱海地区具体土层结构、性质特点, 用有限元法对钻孔灌注桩受力性状进行仿真模拟。研究表明, 桩承载能力完全能满足设计荷载要求, 并且尚有较大的富裕承载能力。研究成果对该地区及类似地质条件下超长大直径桩的设计提供有益的参考。

关键词: 桥梁桩基; 深厚软基; 有限元法; 桩土相互作用; 静载试验

中图分类号: TU 412 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)04-0051-06

Test and Research on Load Bearing Properties of Super-Long and Large-Diameter Bored-Pile in Deep Soft Basement

WEI Dong-liang^{1,2}, YANG Chang-zheng³, TAN Xiao-qi⁴

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2. Broadvision Engineering Consultants, Kunming 650011, Kunming 650011, China

3. Municipal Engineering Quality Supervisory Department of Kunming, Kunming 650011, China

4. Yunnan Highway Science and Technology Research Institute, Kunming 650051, China)

Abstract To verify the reliability of the design parameters, single-pile-static-load-test is adopted to study the load bearing properties of the super-long and large-diameter bored-pile in deep soft basement. The study items include the subsiding quantity, load-bearing-capabilities, the load transferring law, and the distribution law of the side friction under different load action. Based on the test results, the paper simulates the load bearing properties on deep soft soil by finite elements in Dali-er-sea area. It is indicated that the carrying capacity of the pile is greater than the design load. The research results are beneficial to the design of the super-long and large-diameter bored-pile under the special or analogous geological conditions in Dali-er-sea area.

Key words pile of bridge; deep soft basement; finite element method; interaction between single pile and soil; static load test

0 引言

桥梁工程中,超长大直径钻孔灌注桩虽已得到了广泛的应用,但其承载机理、桩-土之间的荷载传递机理到目前为止还不是很清楚。在实际工程中,往往是根据基于中短桩研究基础上建立起来的规范进行超长桩的设计,还存在诸多不合理之处,使得桩设计较为保守,其承载力与实测结果有较大出入。因此,研究深厚软基中超长大直径桩的承载性状,对在软基及类似地质条件下桩的设计具有重要的参考价值。

通过对大理兴盛大桥单桩静载试验来研究超长大受力性状和荷载传递特性,并采用有限元法来对

收稿日期: 2009-10-15

作者简介: 魏栋梁(1977-),男,硕士,工程师。主要研究方向:道路和桥梁的设计。E-mail: yczlp@yahoo.com.cn

桩的承载性状作进一步分析.

1 工程概况

大理兴盛大桥位于云南大理市东北部西洱河上游,是连接大理下关城区西洱河两岸的重要桥梁,也是大理州、市乃至滇西路网的重要组成部分,具有分流过境交通和城市交通双重功能.大桥为总长 235 m 的五跨上承式连拱桥,跨径组合为 30+55+65+55+30 m.桥型布置见图 1.

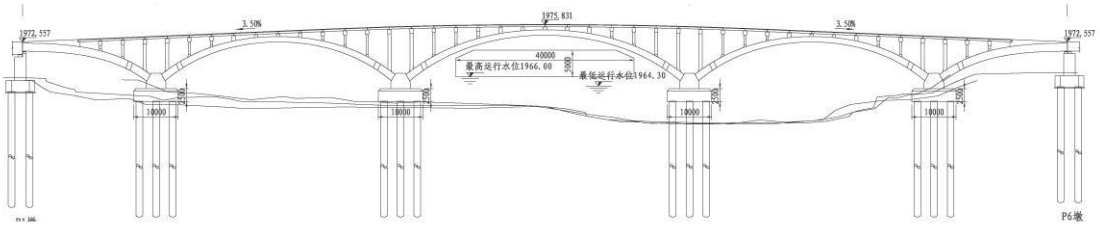


图1 桥型布置图
Fig.1 The array chart of bridge

主桥上部结构采用预应力体外索平衡水平推力的上承式 5 跨连拱桥,主桥下部结构为钻孔灌注桩群桩桩基础,全桥共 196 根,桩径分别为 $\phi 1.5$ m 和 $\phi 1.2$ m 2 种,桩长 80~90 m,桩身混凝土等级为 C25.桥址地质主要为填筑土、第 4 系湖积层淤泥、粘土、亚粘土、亚砂土、细砂及砾砂、圆砾砂土.桩基按规范设计为纯摩擦桩,并对桩周土进行了压浆处理.根据工程设计的需要,将 P₂ 墩 2[#] 工程桩作为试验桩,采用静载方法进行试验.试桩主要参数见表 1,地质资料见表 2.

表 1 试桩主要参数表

Tab 1 Main parameters of piles for test

桥墩	试桩编号	混凝土等级	设计直径 /m	设计桩长 /m	设计容许荷载值 /kN	预估加载值 /kN	备注
P ₂	2 [#]	C25	1.5	87.3	6 851	13 700	已压浆

表 2 桩位各土层主要物理力学指标

Tab 2 Main physical-mechanical index of soil layers

土层编号	土层名称	层厚 /m	土的重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模量 E /MPa	内聚力标 准值 C /kPa	内摩擦力标 准值 φ /($^{\circ}$)	容许承载力 σ_c /kPa	钻孔桩周土极限 摩阻力 τ_i /kPa
1	填筑土	0~1.04	17	/	/	/	70	20
2	淤泥	1.04~32.14	15.5	1.75	15	3	50	12
3	粘土	32.14~43.74	16.5	2.5	23	4	60	30
3 ₂	砾砂	43.74~45.65	19	10	15	15	200	72
4	亚砂土	45.65~47.54	19	8	30	9	140	60
5 ₁	粘土	47.54~51.74	17.5	6.5	40	7	125	38
6	砾砂	51.74~58.74	19	10	20	17	210	65
8	亚粘土	58.74~61.34	19	6	35	7	140	25
9	细砂	61.34~63.54	19	9	25	8	140	30
10	粘土	63.54~67.64	18.5	7	40	7	160	32
11	亚砂土	67.64~71.44	19.5	8	35	11.5	170	50
11 ₁	细砂	71.44~73.34	19.5	8	25	17	150	40
11	亚砂土	73.34~87.30	19.5	8	35	11.5	170	50

2 工程桩试验情况

桩的静载试验是确定单桩轴向承载力、了解桩的受力性状最为可靠的方法。具体做法是按一定要求将荷载分级加到桩上, 在桩下沉未达到某一规定的相对稳定标准前, 每级荷载维持不变; 当达到稳定标准时, 继续加下一级荷载; 当达到规定的终止试验条件时停止加载; 然后再分级卸载至 0

2.1 静载试验情况

试验桩 P_2 预估极限承载力为设计容许承载力的 2 倍, 即 $2 \times 6850 = 13700$ kN, 每级加载为预估极限承载力的 1/10, 每级卸载为预估极限承载力的 1/5。由于现场试验的目的是验证桩基设计的安全性, 而非破坏性试验, 试桩加载未到极限荷载, 只加载到预估极限承载力 13700 kN 后便停止加载, 并开始卸载。设计容许承载力 6850 kN 对应桩的沉降量为 5.26mm, 预估极限承载力 13700 kN 对应桩的沉降量为 27.09mm。试验残余沉降量为 10.84mm, 桩身弹性压缩量为 16.25mm。实测 P-S 曲线、S-logt 曲线如图 2、3 所示。

2.2 静载试验结果分析

试验结果整理、分析是否正确, 对桩在静荷载作用下性状的了解起着十分重要的作用。

2.2.1 曲线特征

从图 2 可知, P-S 曲线呈典型的缓变型, 当加载至预估极限承载力后, 没有出现向下折段, 且无第 2 拐点。在设计容许承载力至预估极限承载力之间, P-S 曲线呈线性变化, 说明此期间桩处于良好的弹性工作状态, 桩自身的弹性压缩量较大, 占整个沉降量的 60%; 从图 3 可知, S-logt 曲线斜率非常平稳, 无陡增或向下曲折现象。P-S、S-logt 的曲线特征均表明试验桩没有达到极限状态。

2.2.2 桩身轴力的传递规律

各级荷载作用下, 试验桩各断面轴力值沿深度分布规律、随加载变化关系如图 4、5 所示。

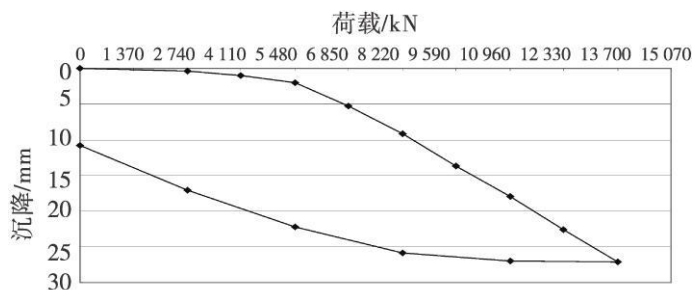


图2 P-S曲线

Fig.2 The P-S curve of the tested pile

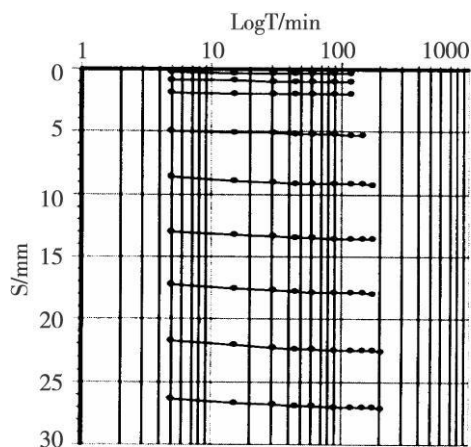


图3 S-logt曲线

Fig.3 The S-logt curve of the tested pile

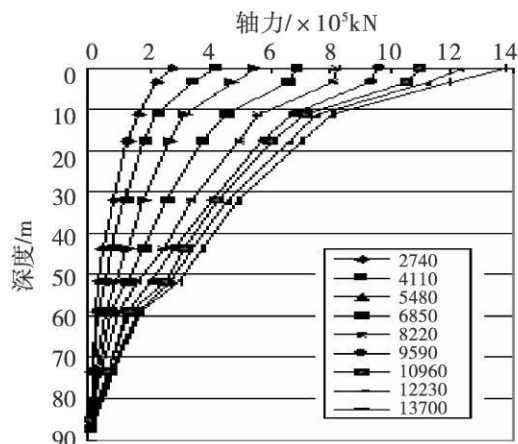


图4 桩身轴力随深度分布图

Fig.4 Distribution chart of the axial loads of the pile along the depth

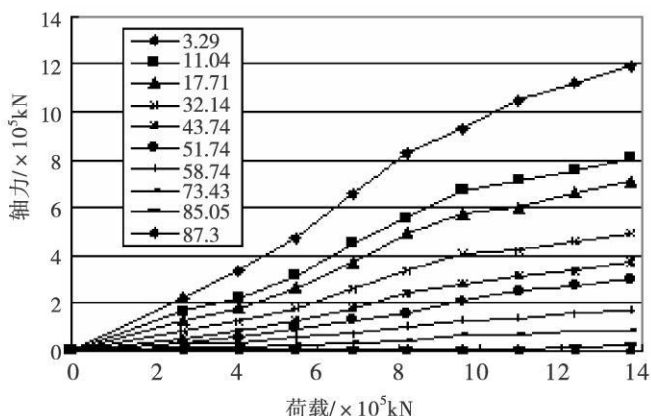


图5 各断面轴力随荷载变化曲线

Fig.5 The axial loads curve of transects adapting to test load

1)由图可知,桩身轴力随深度分布曲线呈上凸状,桩身顶部轴力衰减速率很快,在 58 74m 后呈线性比例衰减至 0 荷载越小,桩身轴力传递速率越快.

2)当荷载较小时,桩顶荷载完全被各土层产生的桩侧摩阻力抵消,桩底反力为 0.当荷载增大到 8 220 kN 时,下层土层产生剪切变形,桩端反力出现,但很小,仅占总荷载的 0 047% (也可能是在加载过程中某些因素扰动影响产生的).当加载至预估极限荷载后,桩端反力均保持为不变,说明随着荷载增大,沿桩身深度侧摩阻力逐渐产生作用并承担全部荷载,该桩为纯摩擦桩.

3)轴力在地面以下 12m 范围内衰减很快,12m 以下桩身轴力变化逐渐缓慢,说明桩顶原填筑土和淤泥在压浆后,已形成摩阻力很大的土体,并且随着荷载的增大,其摩阻力得到充分的发挥.

2. 2. 3 桩侧摩阻力的分布特性

深厚软基中,桥梁桩基一般均设计为纯摩擦桩,故通过试验得出桩侧摩阻力实测值、了解其分布特性是十分关键的.断面摩阻力随荷载变化曲线、摩阻力沿深度分布规律如图 6 7 所示.

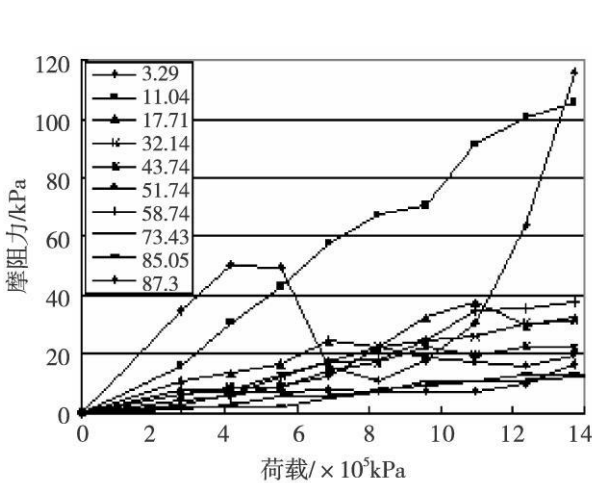


图6 摩阻力随荷载变化曲线
Fig.6 Friction curves adapting to test load

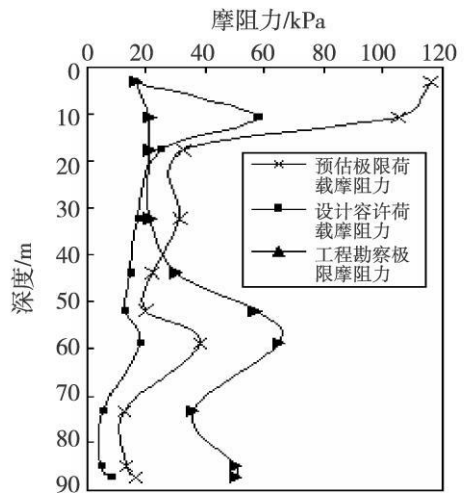


图7 各截面间土层的平均摩阻力分布图
Fig.7 Distribution chart of the average friction

1)从图 6可看出,各截面间土层的平均摩阻力分布曲线呈“R”型趋势.随着桩顶荷载的增加,各土层桩侧摩阻力逐渐变大,但在小范围内有下降波动,桩与土层间产生少许相对滑移.特别是桩顶部分的土体,当荷载增大到一定程度后,出现了较大塑性变形,摩擦阻力随之降低,并产生相对滑移.当继续加大荷载后,下层土体摩阻力发挥作用,桩顶相对下沉量变小,桩顶周围土体又能发挥其承载潜力,桩侧摩阻力随着荷载的增大而增大.

2)图 7表明,桩侧摩阻力有随着桩顶荷载的增加而变大的趋势,但摩阻承载力主要在地表以下 60m 范围内.于地面以下约 47m 后,压浆的桩周土实测极限摩阻力均比工程地质勘察报告中所提供的值小 1. 4~ 4 倍,说明此范围内的土体并没有充分发挥其承载能力,也说明了该桩还有较大的富裕承载能力.

3 极限承载力的确定

由于现场试验加载未到极限荷载,采用 P- S 曲线拐点法、P- S 曲线坐标变换确定法和沉降速率等方法均无法判断桩的极限承载能力,能否准确预测桩的极限承载力对结构的安全性和经济性具有很大的影响.本次试验较为保守地以桩顶总沉降量为 40 mm 时对应的荷载为极限荷载,并采用有限元法和双曲线法综合比较来确定桩的极限承载能力.

3. 3. 1 有限元法

在进行有限元分析时,桩周压浆土体相关参数的确定,采用了反算的方法,即将参照设计钻孔灌注桩几何尺寸建模,以实测的数据试算不同压浆土体的相关参数,使其得出的荷载 - 位移曲线与静载试验结果接近.

1) 计算参数的选取. ①土: 桩周土特性采用地勘资料所提供的参数. 压缩模量 E_s 是室内土工试验中, 土在完全侧限条件下的竖向附加压应力与相应的应变增量之比值. 它与有限元分析中材料弹塑性模型中弹性阶段对应弹性模量有相关性, 但不能直接将压缩模量作为弹性模量. 参考相关资料后, 研究中采用 $E = 1.5E_s$. ②桩: 桩身材料由水下混凝土制成, 其受荷变形远小于土体, 在荷载作用下基本处于弹性工作状态, 故其材料定义为弹性材料. 分析时依据设计考虑桩内钢筋的影响, 其弹性模量取值范围为 $2.81e4\text{MPa} \sim 3.08e4\text{MPa}$. ③压浆体: 压浆体的材料特性及渗透范围按经验值取. 其材料特性为弹性材料, 弹性模量取 $1.0e3\text{MPa}$. 压浆渗透范围为: 桩周取 0.3m , 桩底取 0.2m . ④桩-土界面采用三维接触面单元 (target170和 conta173).

2) 建模. 桩-土共同作用分析建模时, 对象为轴对称, 取其 $1/4$ 建模分析. 土体范围: 桩周土取 20 倍的桩径, 桩端以下土体取一倍桩长. 桩与土体模型均采用 8 节点等参实体单元即 solid45 单元. 对称面采用对称约束, 圆弧侧面及模型底部施加固定约束. 有限元模型如图 8 所示.

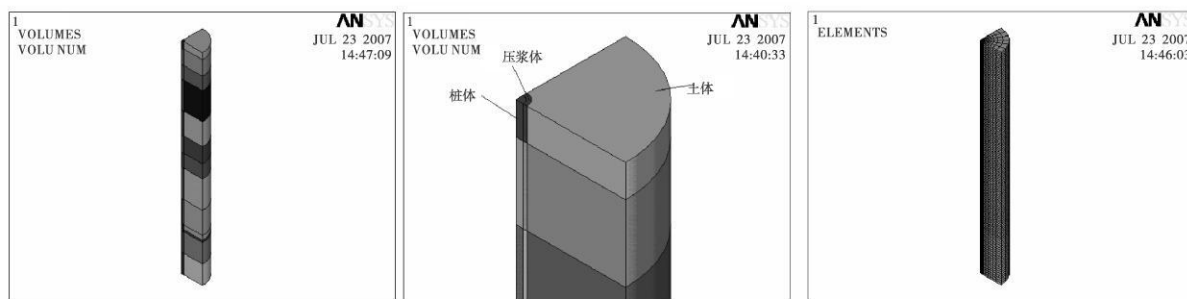


图8 桩土相互作用有限元模型

Fig.8 The finite element model of the interaction between single pile and soil

(3) 计算结果分析

采用有限元法计算出桩的极限荷载为 17810kN . $P-S$ 曲线、 13700kN 级桩身轴力分布曲线和桩侧摩分布曲线的计算与实测结果比较如图 9~ 11 所示.

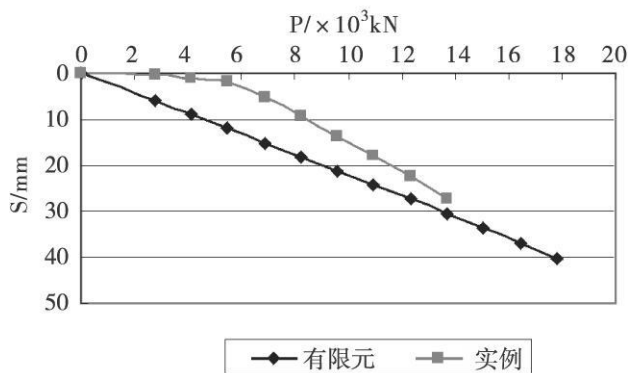


图9 P-S曲线
Fig.9 The P-S curve

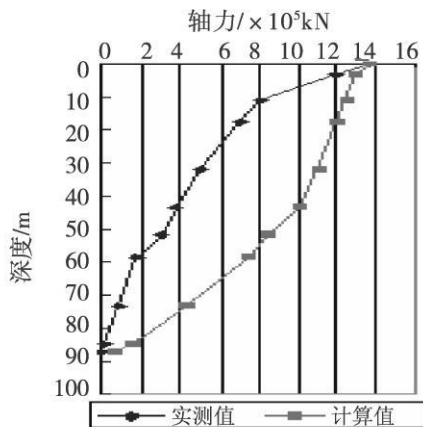


图10 13700kN级荷载时桩身轴力分布曲线
Fig.10 The axial loads distribution curves of the pile along the depth in 13700kN grade

从图 9 可看出, 计算值和静载试验得到的 $P-S$ 曲线基本规律是一致的. 由于有限元计算时并不考虑静摩擦与动摩擦的区别, 且有限元模型参数的选取不可能与工程实际情况完全相同, 故计算值与实测值必然存在差别. 用有限元法计算得的 $P-S$ 曲线要比静载试验得到的要陡, 即在相同荷载作用下产生的沉降更大. 特别是在开始阶段, 有限元法计算的沉降量明显大于实测值.

由图 10 可知, 计算的轴力传递速率要比实测的快, 但其基本趋势一致. 实际工程中, 桩表面并非理论上的光滑、圆形, 而是凹凸不平, 这样势必增加桩侧摩阻力, 从而使桩身轴力衰减较快.

由图 11 可看出, 计算摩阻力与实测摩阻力基本趋势一致, 采用有限元法计算出的桩底极限荷摩阻力与实测的桩顶极限荷摩阻力大小较吻合. 主要是压浆后, 桩周土体性状得到改善, 使得桩周土体接近均质土, 其极限摩阻力大小相等.

通过比较, 验证了采用有限元法来分析桩承载性状的可行性. 在工程实践中, 用试验及有限元法来综合研究桩的工作性状是合理、经济而有效的.

3. 3. 2 双曲线法

根据静荷载试验实测数据, 采用由马来西亚陈风克 (Chin FunKee, 1972 年) 提出, 假定桩的 $P-S$ 曲线为双曲线和我国学者陈宗岳按最小曲率半径导出的 P_u 计算式外推出桩的极限承载能力分别为 14 231. 25 kN 和 13 478. 75 kN.

3. 3. 3 容许承载力乘以安全系数法

先以回弹曲线割线斜率法确定桩的容许承载力, 再乘以安全系数来确定桩的极限荷载. 自 $P-S$ 曲线原点作一斜线平行于卸载回弹曲线的割线, 斜线与 $P-S$ 曲线的交点对应的荷载为容许荷载. 据此法可求得本次试验桩的极限承载能力为 $2 \times 8 756 = 17 512 \text{ kN}$.

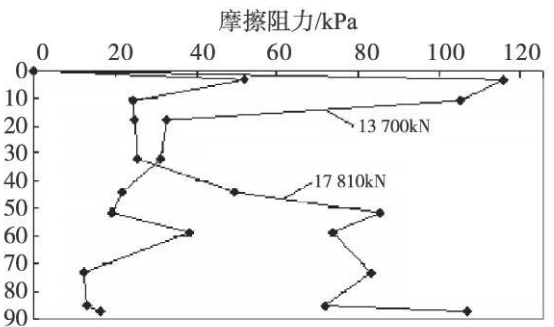


图11 摩阻力分布曲线

Fig.11 Distribution curves of the friction

表 3 不同计算方法的极限荷载值

Tab 3 The limit value of the different calculation methods

方法	有限元法	双曲线法	容许承载力乘安全系数法
极限荷载 /kN	17 810	14 231. 25	13 478. 75

3. 3. 3 极限荷载的确定
上述各种方法计算出桩的极限荷载如表 3 所示.

按双曲线最小曲率半径导出的 P_u 值显然与试验实测值不符, 而有限元法与容许承载力乘安全系数法所计算得的结果较为吻合. 故建议此次静载试验桩的极限承载力为 17 810 kN, 其值为预估极限荷载的 1. 3 倍.

4 结 论

- 1) 采用静载试验法和有限元法对大理兴盛大桥超长大直径桩的受力状况进行分析, 以掌握该地区大直径超长大桩的工作性状, 并对大桥桩基安全性进行客观的评价, 为该地区超长大直径桩的设计提供有益的参考.
- 2) 试验结果表明, 桩身质量较好, 其承载能力完全能满足设计荷载要求, 并且尚有较大的富裕承载能力.
- 3) 软基超长大直径桩在较大荷载的作用下, 桩身弹性压缩量占整个桩顶沉降量的绝大部分, 极限承载力主要由桩顶的沉降量来控制.
- 4) 按相关规范设计桩的容许承载力较为保守, 未能充分发挥超长大直径桩的承载潜力. 在实际工程应用中, 对超长大直径桩的设计仍需进行大量深入细致的研究.

参考文献:

[1] 赵明华. 桥梁桩基计算与检测 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000
 [2] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵地基与基础设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
 [3] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代. 深厚软土非嵌岩超长桩受力性状试验研究 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 64- 69.
 [4] 简政, 刘用暖. 桩-土三维等厚度接触单元模型及其工作性状 [J]. 水利学报, 2002, (11): 113- 118
 [5] 高文华, 杨林德. 板-土三维等厚度接触单元模型及其应用 [J]. 同济大学学报, 1999, 27(3): 297- 300
 [6] 胡立明. 第四系土层大直径超长桩的承载特性 [J]. 华东地质学院学报, 2000, 23(1): 35- 38
 [7] 程晔. 超长大直径钻孔灌注桩承载性能研究 [D]. 博士论文, 2005.
 [8] 方鹏飞. 超长桩承载性状研究 [D]. 博士论文, 2003
 [9] 朱向荣, 方鹏飞, 黄洪勉. 深厚软基超长桩工程性状试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 76- 79.
 [10] 蒋建平, 高广运, 汪明武. 大直径超长桩有效桩长的数值模拟 [J]. 建筑科学, 2003, 19(3): 27- 29.