

岩溶地基中超长桩承载力数值计算方法

刘思思,江学良,李珍玉

(中南林业科技大学土木工程与力学学院,湖南长沙 410004)

摘要:针对岩溶地区溶沟、溶洞发育等复杂地层,提出基于最小势能原理的超长桩穿越岩溶地层时的承载力计算方法。首先,构建适用于岩溶地层的桩侧摩阻力计算模型;其次,分别推导了非岩溶地层和岩溶地层中桩身的能量平衡方程,并由此得到桩身单元的位移、轴力计算式;再次,基于最小势能原理推导了桩身的势能增量计算式,并采用黄金分割搜索法作为计算程序的收敛算法。最后,以娄新资水大桥桩基工程为算例,采用文中方法对工程桩进行计算,计算结果表明超长桩穿越岩溶地层时的承载力计算方法合理可行。

关键词:超长灌注桩;岩溶地区;承载力;数值计算;最小势能原理

中图分类号:TU413.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)01-0027-06

Method for calculating bearing capacity of super-long pile in Karst region//LIU Sisi, JIANG Xueliang, LI Zhenyu
(College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: According to complex foundations including channeling and Karst caves in a Karst region, a new method for calculating the bearing capacity of a super-long pile was presented. First, a calculation model of pile lateral friction in Karst stratum was established. Second, energy balance equations of a super-long pile in non-Karst stratum and Karst stratum were deduced, respectively. Based on it, a displacement formula and axial force formula of the pile unit were determined. Third, the pile incremental potential energy formula was derived from the principle of minimum potential energy, with the golden section method as program convergence algorithm. At last, taking an engineering pile in the Zishui Bridge foundation as an example, the bearing capacity was calculated using the method proposed in this paper. Calculation results show that this method is reasonable and practicable, and can provide a scientific reference for research and design in actual projects.

Key words: super-long pile; Karst region; bearing capacity; numerical calculation; minimum potential energy principle

对于超长桩,桩身承载后压缩变形量较大,而桩端阻力相对较小^[1]。在岩溶地区桥梁深水桩基工程中,常常遇到溶沟、溶洞等不良地质。由于溶沟、溶洞的存在,导致桩侧摩阻力分布不连续,施工中抛填的碎石、黏土、水泥无法密实,不能形成摩阻力,且如果桩身穿越较大的溶洞,桩身甚至可能是临空的。针对这种情况,工程中往往通过将桩端嵌入稳定岩层来获得较好的稳定性和较强的承载能力。但是对于超长桩,由于桩顶沉降主要受桩身压缩量的影响,因此在保证基桩稳定性和承载力的同时,还需满足桩顶沉降的要求,这就要求必须对岩溶地区复杂的桩侧摩阻力进行分析。国内很多学者对超长桩的承载性状进行了系统而深入的研究,例如刘铁雄等^[2-5]

分别对岩溶地层中灌注桩和CRG桩进行了试验研究,蔡登山等^[6-8]对岩溶地区基桩的承载机理进行了理论研究,魏刚^[9]建立了桩身承载性状的差分计算方法,但有关超长桩穿越岩溶地层时的承载力及沉降计算理论研究尚不多见。当桩身穿越岩溶软弱地层而嵌入下部稳定岩层时,由于桩侧溶沟、溶洞的存在,桩侧摩阻力的分布不连续,但是桩身位移是沿整个桩身分布的,因此计算中应考虑桩身位移发展对不同地层桩侧摩阻力的影响。基于此,本文提出基于最小势能原理的超长桩穿越岩溶地层时的承载性状计算方法,并通过工程桩的计算对所提出的方法进行验证。

1 桩侧摩阻力与桩端阻力计算模型

1.1 桩侧摩阻力计算模型

如图 1 所示,地基土在桩周发生弹塑性变形时,可将地基土的竖向位移视为弹性剪切位移与塑性剪切位移之和,可得地基深度 z 处地基土与基桩表面剪应变 s 与剪应力 τ 的关系为

$$\tau = \begin{cases} G_e s & s \leq s_e \\ G_{p1} s - G_{p1} s_e + \tau_1 & s_e < s \leq s_{p2} \\ G_{p2} s - G_{p2} s_{p2} + \tau_2 & s_{p2} < s \leq s_{p3} \\ G_{p3} s - G_{p3} s_{p3} + \tau_3 & s_{p3} < s \leq s_{p4} \\ 0 & s > s_{p4} \end{cases} \quad (1)$$

式中: G_e 、 G_{p1} 、 G_{p2} 、 G_{p3} 分别为各阶段土层的弹塑性剪切模量; s_e 、 s_{p2} 、 s_{p3} 、 s_{p4} 分别为各阶段土层的弹塑性剪应变临界值; τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分别为各阶段土层的弹塑性剪应力临界值。

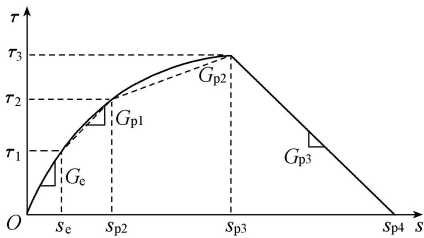


图 1 考虑桩侧摩阻力卸载的多折线模型

为方便推导,设摩阻力的统一计算表达式为

$$\tau = Ks + B \quad (2)$$

其中

$$K = \begin{cases} G_e & s \leq s_e \\ G_{p1} & s_e < s \leq s_{p2} \\ G_{p2} & s_{p2} < s \leq s_{p3} \\ G_{p3} & s_{p3} < s \leq s_{p4} \\ 0 & s > s_{p4} \end{cases}$$
$$B = \begin{cases} 0 & s \leq s_e \\ -(G_{p1} s_e - \tau_1) & s_e < s \leq s_{p2} \\ -(G_{p2} s_{p2} - \tau_2) & s_{p2} < s \leq s_{p3} \\ -(G_{p3} s_{p3} - \tau_3) & s_{p3} < s \leq s_{p4} \\ 0 & s > s_{p4} \end{cases}$$

考虑桩侧摩阻力卸载的多折线模型实际上是在佐藤悟模型基础上进行的改进,从而使之更符合实际情况。一方面,在摩阻力达到极限值之前,增加一两折线用于模拟弹塑性阶段相对位移的增长;另一方面,在摩阻力达到极限值之后,随着相对位移的继续发展,摩阻力将逐渐减小。需要说明的是,虽然考虑桩侧摩阻力卸载的多折线模型在形态上体现了软化阶段,但不一定能使每一土层在计算中都达到软化阶段,这是由桩土相对位移的发展来控制的。

一般来说,靠近桩顶部分的土层桩土相对位移较大,而越往下桩端附近的桩土相对位移较小。因此,通过控制摩阻力达到极限值时的临界相对位移就可以控制土层中有可能出现的软化。

模型软化终点对应的摩阻力等于零,这一观点还不能得到严格的证明。为体现桩土软化过程,可将模型中的参数 G_{p3} 取较小值,从而使摩阻力随位移的发展而减小,从实际计算效果来看,这与一般经验是相符的。

1.2 桩端阻力计算模型

一般地,桩端阻力可采用折线模型和双曲线模型进行计算^[10],见图 2。采用折线模型时,桩端阻力计算式可表示为

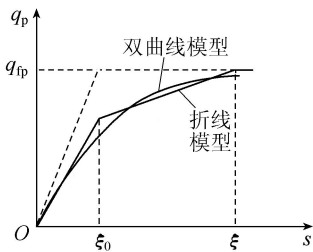


图 2 桩端阻力计算模型

$$q_p = \begin{cases} k_{b1} s_b & s_b < \xi_0 \\ k_{b1} \xi_0 + k_{b2} (s_b - \xi_0) & \xi_0 \leq s_b \leq \xi_f \\ q_{fp} & s_b > \xi_f \end{cases} \quad (3)$$

式中: q_p 为桩端阻力; k_{b1} 、 k_{b2} 分别为桩端土的弹性、塑性抗压刚度系数; s_b 为桩端位移; ξ_f 为桩端土达到极限位移值时的桩端阻力; ξ_0 为桩端土的弹性压缩沉降量界限值; q_{fp} 为桩端阻力极限值。

采用双曲线模型计算时,桩端阻力的表达式为

$$q_p = \frac{s_b}{a_b + b_b s_b} \quad (4)$$

式中: a_b 、 b_b 为实测资料拟合曲线控制参数。

实际应用时,需根据具体情况选择文中所推荐的桩侧摩阻力及桩端阻力计算模型。在没有实测桩侧摩阻力和桩端阻力应力-应变资料时,建议根据地质勘察资料选用较简单的双折线模型;而在有现场实测资料时,可根据实测资料采用较复杂的计算模型进行拟合,比如双曲线模型。

2 岩溶地基基桩能量分析

在桩身某单元顶部与底部各设置节点 i 和节点 $i+1$,见图 3,图中 p_i 、 p_{i+1} 为节点轴力, s_i 、 s_{i+1} 为节点位移, τ_i 、 τ_{i+1} 为节点剪应力, H 为桩长, h 为桩身单元长度, s_0 为桩顶沉降, P 为桩顶荷载。对桩身进行能量分析可知,桩身变形能与外力对桩身所做功之和相等,即

$$U - \sum F_p D = 0 \quad (5)$$

式中: U 为桩身单元弹性变形能; $-\sum F_p D$ 为外力对桩身单元做功之和。

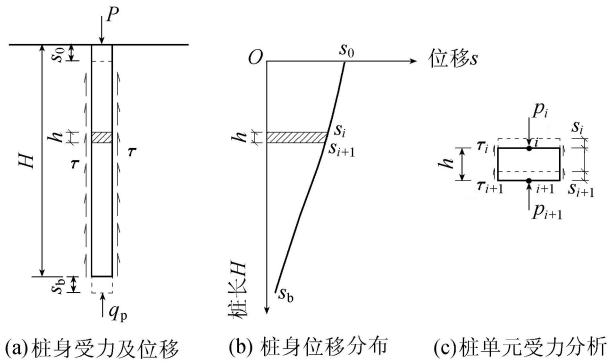


图3 基桩计算模型

2.1 基本假定

为明确分析目标、简化推导过程,作出如下假定:①桩身不产生塑性变形,即桩身弹性模量为常数;②桩身在桩顶荷载作用下不发生屈曲变形,在计算中不考虑基桩的稳定性,只考虑竖向荷载对桩身各单元的作用;③桩侧摩阻力先于桩端阻力发挥,即计算中首先考虑摩阻力对桩顶荷载的分担,只有在桩端产生位移的情况下,才开始考虑桩端阻力对荷载的分担;④桩侧土体不沉降,即土体不会主动产生位移,所有的相对位移均由桩身沉降引起。

2.2 非岩溶地层中桩身能量平衡方程

桩身在地基中的能量传递主要由两部分组成,即桩身变形能与外力做功,其中桩身变形能的差分计算公式为

$$U = \frac{E_p A_p}{2h} (s_i - s_{i+1})^2 \quad (6)$$

式中: E_p 为桩的弹性模量; A_p 为桩身截面积。

引起桩身单元势能发生改变的原因在于外力做功,即重力、轴力、桩侧摩阻力对桩身做功,以 W_G 表示重力做功, W_f 表示桩侧摩阻力做功, W_p 表示轴力做功,则桩身外力做功 $-\sum F_p D$ 为

$$-\sum F_p D = -W_p - W_f - W_G \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} W_p &= p_i s_i - p_{i+1} s_{i+1} \\ W_f &= -2\pi r \int_h \tau_z s_z dz = -\pi r h (K_i s_i^2 + \\ &\quad B_i s_i + K_{i+1} s_{i+1}^2 + B_{i+1} s_{i+1}) \\ W_G &= mg ds = \frac{1}{2} mg (s_i + s_{i+1}) \end{aligned}$$

将式(6)、式(7)代入式(5)可得

$$\begin{aligned} p_i s_i - p_{i+1} s_{i+1} &= \frac{E_p A_p}{2h} (s_i - s_{i+1})^2 + \\ &\quad \pi r h (K_i s_i^2 + B_i s_i + K_{i+1} s_{i+1}^2 + \end{aligned}$$

$$B_{i+1} s_{i+1}) - \frac{mg}{2} (s_i + s_{i+1}) \quad (8)$$

将式(8)进行多项式变换,并使用待定系数法可得

$$\begin{aligned} p_i &= \frac{E_p A_p}{2h} (s_i - s_{i+1}) + \\ &\quad \pi r h (K_i s_i + B_i) - \frac{1}{2} mg \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} p_{i+1} &= \frac{E_p A_p}{2h} (s_i - s_{i+1}) - \\ &\quad \pi r h (K_{i+1} s_{i+1} + B_{i+1}) + \frac{1}{2} mg \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)、(10)即为非岩溶地层中桩身单元顶部与底部的轴力计算式。由式(9)还可确定单元底部位移 s_{i+1} :

$$s_{i+1} = s_i + \left(\frac{E_p A_p}{2h} \right)^{-1} \cdot$$

$$\left[\pi r h (K_i s_i + B_i) - \frac{1}{2} mg - p_i \right] \quad (11)$$

式中: r 为基桩半径; m 为基桩计算单元质量。

2.3 岩溶发育地层中桩身的单元位移计算

由前述分析可知,岩溶地层中由于溶沟、溶洞的存在,桩侧一般为软弱的充填物(如淤泥、松散的碎石等)。在桩身穿越较大的溶洞时,桩侧甚至可能出现临空现象。因此,这部分桩侧摩阻力不计,桩身位移仅由桩身轴力引起,包括桩身上部传递来的荷载及自重。

与非岩溶地层中桩身能量平衡方程的推导过程类似,岩溶发育地层中的桩身能量平衡方程为

$$\begin{aligned} p_i s_i - p_{i+1} s_{i+1} &= \frac{E_p A_p}{2h} (s_i - s_{i+1})^2 - \\ &\quad \frac{mg}{2} (s_i + s_{i+1}) \end{aligned} \quad (12)$$

而该部分桩身单元的位移与轴力计算式分别为

$$s_{i+1} = s_i - \left(\frac{E_p A_p}{2h} \right)^{-1} \left(\frac{1}{2} mg + p_i \right) \quad (13)$$

$$p_{i+1} = \frac{E_p A_p}{2h} (s_i - s_{i+1}) + \frac{1}{2} mg \quad (14)$$

3 基于最小势能原理的求解方法

从能量角度考虑基桩位移真实解的特性,可知在所有的可能解中,基桩位移的真实解一定是使桩身势能增量最小的位移。基于此,可对桩身的势能增量进行分析,从而得到使程序计算收敛的最小势能条件。

3.1 桩身势能增量求解

设基桩在桩顶荷载 P 作用下,某个可能的桩顶沉降解为 s_0 ,与之相关的桩身节点 i 的位移为 s_i ,桩身的势能增量为荷载引起的桩身变形能与势能增量

之和,可表示为

$$\Delta\Pi = U + W_G \tag{15}$$

由式(6)和式(7)可知

$$U = \sum_{i=1}^{n-1} U_i = \frac{E_p A_p}{2h} \sum_{i=1}^{n-1} (s_i - s_{i+1})^2 \tag{16}$$

$$W_G = \sum_{i=1}^{n-1} W_{Gi} = \frac{1}{2} mg \sum_{i=1}^{n-1} (s_i + s_{i+1}) \tag{17}$$

将式(16)、式(17)代入式(15)可得

$$\Delta\Pi = \frac{E_p A_p}{2h} \sum_{i=1}^{n-1} (s_i - s_{i+1})^2 + \frac{1}{2} mg \sum_{i=1}^{n-1} (s_i + s_{i+1}) \tag{18}$$

式(18)即为某个桩顶位移沉降解 s_0 的桩身势能增量计算式。此时,程序的计算目标为求得 s_0 ,使得桩身势能增量取全局最小值,用计算式表示为

$$\Delta\Pi(s_0) = \min \Delta\Pi(s) \tag{19}$$

式(19)即为最小势能收敛条件。使用黄金分割搜索法进行计算,程序终止条件及精度控制将以最后一次搜索的最大可能误差 e_a 小于一个用于控制精度的正数 ε 来实现。

3.2 黄金分割搜索法

分析桩基在某级荷载下势能增量随桩顶位移变化的曲线,可知其为一条先递减后递增的曲线,最小势能即为该曲线的极小值。为求得该极小值对应的桩顶位移,使用黄金分割搜索法作为计算程序的收敛算法。

与二分法类似,使用黄金分割搜索法时,需要先确定一个搜索区域,即确定一个实际的桩顶位移值一定存在于其中的定义域(s_l, s_u),然后在该区域中选择中间点,目的是通过用新值替换旧值以便使势能增量的取值最小。对于二分法,通过选择中点来实现;而对于黄金分割搜索法,需要根据黄金分割率选择两个中间点:

$$s_{01} = s_l + d \tag{20}$$

$$s_{02} = s_u - d \tag{21}$$

其中 $d = (\varphi - 1)(s_u - s_l)$

式中: φ 为迭代步长控制参数, $\varphi \approx 1.618$ 。

分别计算桩顶位移为 s_{01} 和 s_{02} 时桩身的变形,并将计算结果代入式(18)计算势能增量 $\Delta\Pi$ 。可能会出现两种结果:① $\Delta\Pi(s_{02}) > \Delta\Pi(s_{01})$,则 s_{01} 为当次迭代的最优解 s_{opt} ,将 s_{02} 设置成新的边界 s_l ,将旧的 s_{01} 设置成新的 s_{02} ,新的 s_{01} 则根据式(20)计算得出;② $\Delta\Pi(s_{02}) < \Delta\Pi(s_{01})$,则 s_{01} 为当次迭代的最优解 s_{opt} ,将 s_{01} 设置成新的边界 s_u ,将旧的 s_{02} 设置成新的 s_{01} ,新的 s_{02} 则根据式(21)计算得出。

通过以上设置,每次迭代无需重新计算所有的

势能增量值,而只需计算新选择的黄金分割点处的势能增量即可,这样可以大幅度地减少程序的计算量。

每次迭代的最大可能误差 e_a 可用式(22)来表示:

$$e_a = (2 - \varphi) \left| \frac{s_u - s_l}{s_{opt}} \right| \times 100\% \tag{22}$$

需要指出的是,对于整个基桩荷载-位移关系的求解,基于最小势能原理的求解方法不是唯一的方法,甚至也不是最简便、最高效的方法,但最小势能原理作为工程中的普适原理,可为基桩承载性状的求解提供一种合理的途径。在实际的设计和科研工作中,当其他方法的准确性或合理性不确定或受到质疑时,可采用该方法提供验算资料或作为其他方法的佐证。

4 工程算例

根据娄新资水大桥桩基工程的地质勘察资料,对6-2号基桩的工作特性展开了初步分析。结合现场监测及原位取样试验获得的基桩受力特征及桩周、桩端岩土层的力学参数,使用文中方法构建基桩承载力的数值计算模型。桩侧摩阻力及桩端阻力计算模型均采用双折线模型,地基承载力容许值及桩侧摩阻力标准值见表1。发挥极限桩侧摩阻力和极限桩端阻力的位移分别取10~15 mm和20~30 mm。

表1 地层力学参数 kPa

地层序号	地层名称	地基承载力容许值	桩侧摩阻力标准值
1	漂石	280	130
2	泥质灰岩	250	65
3	中风化灰岩	600	150
5	灰岩	3800	

基于地质勘察资料和施工监测数据可知,6-2号桩的地层及计算模型如图4所示。桩周地层有漂石层、溶洞、中风化灰岩、泥质灰岩和灰岩。计算中,溶洞及溶沟地层不考虑与桩身的接触,其他地层计算参数根据地质勘察资料或取样试验数据对极限桩侧摩阻力及桩端阻力取值。为考虑多层地基及溶洞条件下桩侧摩阻力的特性,将地层根据岩体类别离散为地层单元,并使之与相同深度处的桩身单元对应。地层单元的力学性能按该深度处所属的岩体取值。地层单元与桩身单元的接触利用非线性三折线荷载传递函数计算,溶洞处接触参数取零,仅考虑桩身的压缩;桩端阻力按非线性材料强化模型即如前所述的折线模型进行计算。

经计算,6-2号桩的荷载-沉降曲线如图5所示。由图5可知,当荷载小于20 MN时,6-2号桩的刚性

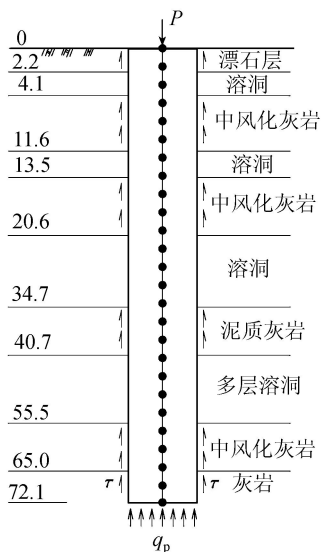


图4 6-2号桩计算模型(单位:m)

系数基本为常数,即基桩沉降线性发展;当荷载超过20 MN时,基桩沉降非线性发展,且随着荷载的增大沉降速度逐渐增大。从图5还可以大致判断出6-2号桩的极限承载力在35 MN左右。6-2号桩在各级荷载作用下的轴力分布曲线如图6所示。由图6可知,桩身穿过溶洞层时,虽然桩身仍受到压缩,但桩身轴力保持不变。同时,虽然6-2号桩的桩端进入了岩性较好的岩层,但桩顶荷载仍主要由桩侧摩阻力承担,这与其他超长桩的工作特点是一致的。6-2号桩在各级荷载作用下的桩侧摩阻力如图7所示。由图7可以更加清楚地看到,在溶洞层桩侧摩阻力是缺失的。此外,6-2号桩侧摩阻力曲线在桩端附近桩身有突变,因为桩身进入完整的灰岩层大约有7 m长,该部分岩层的极限侧阻力及极限相对位移较中风化灰岩中的数值小,所以按嵌岩桩处理。在荷载级别较大时,6-2号桩的桩侧摩阻力曲线出现了钝化现象,表明基桩已接近或达到极限承载力。

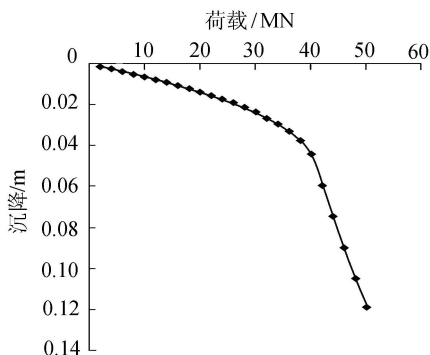


图5 6-2号桩荷载-沉降曲线

综上所述,6-2号桩穿越溶洞后的承载性能与普通超长桩虽然有某些共同点(如桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担),但不可否认两者之间较大的差异。桩侧摩阻力的组成、桩端阻力的发挥模式、桩

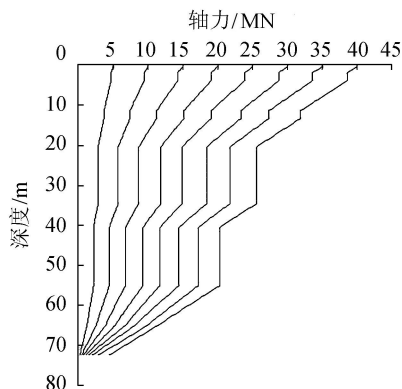


图6 6-2号桩轴力分布曲线

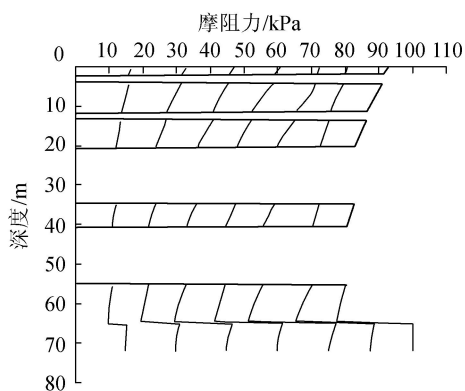


图7 6-2号桩侧摩阻力分布曲线

身变形及承载模式等均不同。计算时应注意区分岩溶地基与普通岩土地基的区别。

以上计算均基于实测地质勘察资料及岩土体取样试验实测参数完成,由于在计算中使用的模型及接触计算方法与实际情况仍有差异,且岩溶地区桩基础的设计计算理论还不完善,因此更为准确、合理的计算模型及接触处理方法仍有待进一步探讨。

5 结 语

本文针对岩溶地区溶沟、溶洞发育等复杂地层,提出基于最小势能原理的超长桩穿越岩溶地层时的承载力计算方法。算例计算结果表明,桩侧摩阻力软化折线计算模型能够反映超长桩的桩侧摩阻力发展特性;基于能量原理推导的桩身单元计算差分方程及相应的计算程序能够用于岩溶地基的超长桩承载力的计算;基于最小势能原理推导的桩身势能增量计算式及黄金分割搜索法能够使计算趋于收敛,即文中计算方法具有合理性与科学性,其计算结果可为相关的科研和设计工作提供参考。

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] 刘铁雄,彭振斌. 岩溶地区大直径灌注桩承载力试验研

- 究[J]. 岩土工程界, 2001, 4(10): 3-5. (LIU Tiexiong, PENG Zhenbin. Large-diameter piles bearing capacity test in Karst area[J]. Geotechnical Engineering World, 2001, 4(10): 3-5. (in Chinese))
- [3] 黄生根, 梅世龙, 龚维明. 南盘江特大桥岩溶桩基承载特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 809-813. (HUANG Shenggen, MEI Shilong, GONG Weiming. Testing study on bearing behavior of piles for NanPan River great bridge in Karst area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 809-813. (in Chinese))
- [4] 唐孟雄, 陈如桂, 陈伟. CRG 桩在岩溶地层的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3441-3448. (TANG Mengxiong, CHEN Rugui, CHEN Wei. Experimental study on CRG piles in Karst strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup2): 3441-3448. (in Chinese))
- [5] 金书滨, 黄生根, 常仲昆. 岩溶地区桩基承载性能试验研究[J]. 中国岩溶, 2005, 24(2): 147-155. (JIN Shubin, HUANG Shenggen, CHANG Zhongkun. Test for bearing behavior of pile in Karst area[J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(2): 147-155. (in Chinese))
- [6] 蔡登山, 王邦楣. 岩溶地区钻孔桩受力机理研究[J]. 桥梁建设, 2002(6): 16-19. (CAI Dengshan, WANG Bangmei. Study of mechanism of loading on bored pile in Karst district[J]. Bridge Construction, 2002(6): 16-19. (in Chinese))
- [7] 伍四明, 石汉生, 朱照宇. 广佛放射线岩溶对桩基的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3559-3564. (WU Siming, SHI Hansheng, ZHU Zhaoyu. Effects of Karst on pile foundations of Guangzhou Foshan lines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup2): 3559-3564. (in Chinese))
- [8] 胡柏学, 杨明辉, 袁铜森, 等. 基于变形控制得岩溶区基桩承载力研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(8): 11-15. (HU Baixue, YANG Minghui, YUAN Tongsen, et al. Study on bearing capacity of piles in Karst based on settlement control[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(8): 11-15. (in Chinese))
- [9] 魏刚. 基于能量法差分方程的基桩承载力数值计算方法[J]. 公路工程, 2010, 35(6): 1-4. (WEI Gang. Pile bearing capacity numerical calculation method based on energy difference equation[J]. Highway Engineering, 2010, 35(6): 1-4. (in Chinese))
- [10] 赵明华, 刘齐建, 曹喜仁, 等. 按桩顶沉降量控制超长灌注桩竖向承载力研究[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 92-96. (ZHAO Minghua, LIU Qijian, CAO Xiren, et al. Evaluation of vertical bearing capacity of super-long bored single pile by the pile head settlement[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 92-96. (in Chinese))

(收稿日期: 2012-04-25 编辑: 骆超)

(上接第 21 页)

- [7] 杨敏, 闵思明, 王福军. 双蜗壳泵压力脉动特性及叶轮径向力数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 83-88. (YANG Min, MIN Siming, WANG Fujun. Numerical simulation of pressure fluctuation and radial force in a double volute pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 83-88. (in Chinese))
- [8] 柴立平, 潘兵辉, 石海峡, 等. 高速部分流泵整机非定常流动数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4): 303-306. (CHAI Liping, PAN Binghui, SHI Haixia, et al. Numerical simulation of unsteady flow in high-speed partial emission pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 303-306. (in Chinese))
- [9] 康伟, 祝宝山, 曹树良. 离心泵螺旋形压水室内流场的大涡模拟[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 62-65. (KANG Wei, ZHU Baoshan, CAO Shuliang. Large Eddy Simulation of the flow through the spiral casing of a centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 62-65. (in Chinese))
- [10] 刘厚林, 任芸, 谈明高, 等. 双流道泵内压力脉动的 CFD 计算及测试[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 277-281. (LIU Houlin, REN Yun, TAN Minggao, et al. CFD calculation and test of pressure fluctuation in double-channel pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4): 277-281. (in Chinese))
- [11] 王春林, 易同样, 吴志旺, 等. 混流式核主泵非定常流场的压力脉动特性分析[J]. 动力工程, 2009, 29(11): 1036-1040. (WANG Chunlin, YI Tongxiang, WU Zhiwang, et al. Analysis on pressure fluctuation of unsteady flow field in mixed-flow main coolant pump[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(11): 1036-1040. (in Chinese))
- [12] 耿少娟, 聂超群, 黄伟光, 等. 不同叶轮形式下离心泵整机非定常流场的数值研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 27-31. (GENG Shaojuan, NIE Chaoqun, HUANG Weiguang, et al. Numerical study of unsteady flow in centrifugal pump with different type of impellers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 27-31. (in Chinese))
- [13] 祝磊, 袁寿其, 袁建平, 等. 阶梯隔舌对离心泵压力脉动和径向力影响的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊1): 21-26. (ZHU lei, YUAN Shouqi, YUAN Jianping, et al. Numerical simulation on pressure fluctuations and radial hydraulic forces in centrifugal pump with step-tongue[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Sup1) 21-26. (in Chinese))

(收稿日期: 2012-04-25 编辑: 周红梅)