

基于荷载传递法的单桩沉降简化计算方法

龙秋亮¹, 雷皓程²

(1.湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410007; 2.中南大学 土木工程学院)

摘要: 基于荷载传递法, 考虑桩侧土体软化特性, 提出一种单桩沉降预测的简化算法。采用内接三折线模型模拟桩侧阻力与桩土剪切位移间非线性关系及软化特性, 采用双曲线模型模拟桩端阻力与桩端位移的非线性关系。根据桩侧及桩端荷载传递模型, 利用简化递推方法可由桩端位移获得桩顶沉降。给定一系列桩端位移, 即可绘制单桩荷载—沉降曲线。最后, 结合实际工程案例, 对上述方法进行验证。

关键词: 单桩; 荷载传递法; 沉降计算; 三折线模型; 双曲线模型

1 引言

针对轴向荷载下单桩沉降计算分析, 科研人员进行了大量理论分析、模型试验与现场试验研究。目前主要通过5种方法计算单桩沉降: ① 荷载传递法。该方法首先将桩根据桩长、土层分布及精度要求等离散, 在节点处利用弹簧模拟荷载—位移关系, 利用 $t-z$ 弹簧模拟桩侧土荷载—位移关系, 利用 $q-z$ 弹簧模拟桩端土荷载—位移关系; ② 剪切位移法。该方法以桩周土体主要承受由桩—土间剪应力产生的剪切变形且桩—土间不产生剪切位移假定为基础, 认为单桩沉降由桩周土剪切变形引起; ③ 有限元法。利用数值计算软件进行建模计算, 但其建模过程复杂, 难以准确定义土体及接触面参数, 且建模中往往要对边界条件进行简化; ④ 弹性理论法。该方法以弹性半空间体假定为基础, 通过集中荷载作用下的 Mindlin 解, 由桩—土位移协调条件建立平衡方程, 进而求解桩身受力和位移, 但其不能精确考虑土的成层性和非线性特性; ⑤ 简化计算方法。

荷载传递法计算思路清晰、过程简便, 可根据地基土实际情况选用不同的荷载传递模型, 桩侧、桩端荷载传递函数可灵活选取, 但应综合考虑地基土的实际情况、计算难易程度及相关参数是否容易获取等因素。传递函数主要通过实测获取和理论推导两种方式建立: ① 通过现场实测数据拟合; ② 根据一定工程经验

结合地基土物理力学性质, 探求具有广泛适用性的理论传递函数。在模拟桩侧土荷载—位移关系中, 双曲线模型应用较广泛, 但不易得出解析解, 故该文采用与双曲线模型较为接近的内接三折线模型作为侧阻模型, 其精度较高且同样可以模拟侧阻应变软化等特点。端阻双曲线模型较侧阻双曲线模型简单, 故该文仍采用双曲线模型模拟端阻荷载—位移关系。

采用三折线软化模型模拟桩侧阻力—桩土相对位移的非线性关系, 采用双曲线模型模拟桩端荷载—位移关系。根据上述桩侧及桩端荷载传递模型, 利用递推方法可从桩端位移计算桩顶沉降和桩顶荷载。最后假设一组桩端位移, 可绘制桩顶荷载—沉降曲线。实例分析及数值模拟分析表明该文提出的模型及算法合理易行。

2 桩侧荷载传递模型

试验室和现场测试结果表明: 当桩周土剪切相对位移增大至极限侧摩阻力对应的极限相对位移后, 侧摩阻力将表现出软化特性。因此, 应采用能描述桩周土应力软化现象的模型以更好地模拟桩土界面处的荷载—位移关系。为简化计算, 该文拟采用双曲线模型的内接三折线作为侧阻荷载—位移传递模型, 其计算量小, 参数求解容易。如图1所示。

当桩—土相对位移 ΔS 小于 S_{u1} 时, 桩侧阻力随相对位移线性增加; 当 $\Delta S = S_u$ 时, 桩侧阻力到达极限

收稿日期: 2019-04-01(修改稿)

基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(编号: 201828)

作者简介: 龙秋亮, 男, 高级工程师。

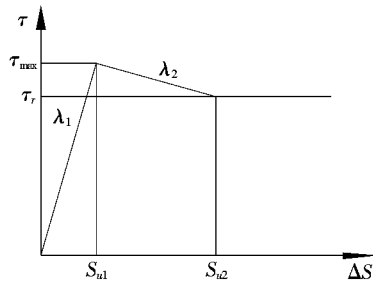


图 1 桩侧土侧摩阻力—相对位移曲线

侧阻力 τ_{\max} ; 当 $S_{u1} < \Delta S \leq S_{u2}$ 时, 侧摩阻力将出现软化特性, 其随着相对位移的增大而减小直至残余侧阻 τ_r 。桩周土界面侧摩阻力与相对位移的相互关系用分段函数近似表示:

$$\tau(\Delta S) = \begin{cases} \lambda_1 \Delta S, & \Delta S \leq S_{u1} \\ \lambda_1 S_{u1} + \lambda_2 (\Delta S - S_{u1}), & S_{u1} < \Delta S \leq S_{u2} \\ \tau_r, & \Delta S > S_{u2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ_{\max} 为极限侧摩阻 (kPa); τ_r 为残余侧摩阻 (kPa); S_{u1} 为极限侧摩阻力对应的极限桩土相对位移 (弹性界限位移) (mm); S_{u2} 为侧摩阻力刚达到残余侧阻时对应的相对位移 (弹塑性界限位移) (mm); λ_1 为桩侧土初始抗剪刚度系数 (kPa/mm); λ_2 为桩侧土软化抗剪刚度系数 (kPa/mm)。

以上 6 个参数均可通过现场试验实测数据统计分析获得。在缺少现场试桩数据的情况下也可根据经验取值。其中, 张乾青对现场实测数据统计分析表明: 不同土层中桩侧土弹性界限相对位移 $S_{u1} = 5 \sim 25$ mm; 侧阻软化率 $\tau_r / \tau_{\max} = 0.83 \sim 0.97$ 。

3 桩端荷载传递模型

采用双曲线函数模型以模拟桩端土荷载—位移关系, 如图 2 所示。

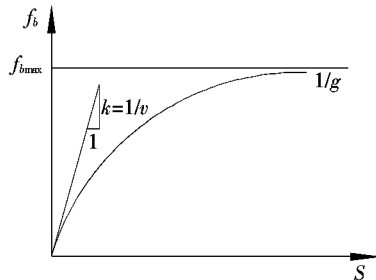


图 2 桩端土荷载—位移曲线

该函数模型表达式如下:

$$f_b(s) = \frac{s}{v + g \cdot s} \quad (2)$$

式中: $f_b(s)$ 为桩端沉降为 s 时对应的桩端阻值 (kPa); s 为桩端位移 (mm); v, g 为经验参数。

(1) 参数 v

当 $\Delta s = 0$ 时, 对式 (2) 求导可得到式 (3):

$$\left. \frac{s}{v + g \cdot s} \right|_{s=0}' = \left[\frac{v}{(v + g \cdot s)^2} \right]_{s=0} = \frac{1}{v} = k \quad (3)$$

Randolph 和 Wroth 建议, k 的取值可以通过式

(4) 确定:

$$k = \frac{4G_b}{\pi r_0 (1 - v_b)} \quad (4)$$

式中: r_0 为桩身半径 (m); v_b 为桩端土泊松比; G_b 为桩端土剪切模量 (kPa)。

联立式 (3)、(4), 可得:

$$v = \frac{1}{k} = \frac{\pi r_0 (1 - v_b)}{4G_b} \quad (5)$$

(2) 参数 g

对式 (2) 在 $s \rightarrow +\infty$ 时取极限, 则桩端极限承载力 $f_{b\max}$ 可表示为:

$$f_{b\max} = \frac{1}{g} \quad (6)$$

$f_{b\max}$ 值受桩端土层特性、桩的形状和桩的形成技术特点等因素影响, 故 $f_{b\max}$ 的值较难确定。目前, 确定桩端土极限承载力 $f_{b\max}$ 方法有多种, 如静力触探法、标准贯入法、经验法或参考规范取值, 当有现场试桩实测数据时也可通过反分析给出。Randolph 提出了一个表达式以估算 $f_{b\max}$ 的值, 该表达式如式 (7) 所示:

$$f_{b\max} = P_L [1 + \tan \varphi \tan (45^\circ + \varphi / 2)] \quad (7)$$

式中: φ 为桩端土内摩擦角 ($^\circ$); P_L 为球孔极限应力 (kPa), 由式 (8) 计算:

$$P_L = P_0 + c_0 \left[1 + \ln \left(\frac{G_b}{c_0} \right) \right] \quad (8)$$

式中: c_0 为黏聚力 (kPa); P_0 为深度 z_0 处原位土应力 (kPa)。

联立式 (6)、(7)、(8), 即可求得参数 g 。

4 计算方法

基于上述桩侧三折线模型及桩端双曲线模型, 该文将通过递推方法由桩端沉降计算单桩桩顶沉降和桩顶荷载。具体计算步骤如下:

(1) 将单桩分为 n 段 (土层底部编号为 1, 顶部编号为 n), 且假定侧摩阻力在每个分段中均匀分布, 即每个分段中轴力沿桩身方向线性分布。

(2) 任意给定一桩端沉降 s_{b1} 。

(3) 由式(2)计算单桩第 1 段下表面荷载 P_{b1} 。

(4) 由式(9)计算桩段 1 总侧阻力:

$$P_{s1} = 2\pi r_0 \tau_1 L / n \quad (9)$$

式中: L 为单桩桩身长度; n 为分段数; r_0 为桩身半径; τ_1 为桩身侧阻力, 由式(1)计算。

(5) 由式(10)计算桩段 1 上表面荷载:

$$P_{t1} = P_{b1} + P_{s1} \quad (10)$$

(6) 由式(11)计算桩端 1 平均轴向力:

$$P_1 = \frac{P_{b1} + P_{t1}}{2} \quad (11)$$

(7) 由式(12)计算桩段 1 压缩量:

$$\epsilon_1 = \frac{P_1}{EA} \cdot \frac{L}{n} \quad (12)$$

(8) 由式(13)计算桩段 1 上表面沉降:

$$s_{t1} = \epsilon_1 + s_{b1} \quad (13)$$

(9) 根据相邻两段轴力和位移的连续性, 计算上一段下表面处的轴力和位移:

$$P_{b2} = P_{t1} \quad (14)$$

$$s_{b2} = s_{t1} \quad (15)$$

式中: 下标第一位表示桩段上下表面, 其中 b 为下表面, t 为上表面; 下标第二位表示桩身分段数。

(10) 重复步骤(4)~(9), 直至得到桩顶荷载 P_m 和桩顶沉降 S_m 。

(11) 假设一系列桩端沉降, 则可绘制单桩桩顶荷载—沉降曲线。

5 算例验证

茅草街大桥位于湖南省益阳市南县茅草街轮渡口(属湖相洞庭湖软土地区), 其桩基础均为钻孔灌注桩。某试桩桩径 $D=1$ m, 桩长 $L=60$ m, 采用 C30 混凝土, 其混凝土弹性模量实测值为 3.47×10^4 MPa。

该文在对试桩荷载—沉降计算分析中, 桩侧模型计算参数 τ_{\max} 、 S_{u1} 均采用文献[15]中的取值; 参数 τ_r 按 $0.85\tau_{\max}$ 取值; 参数 λ_1 取 S_{u1} 与 τ_{\max} 之比值; 参数 λ_2 根据经验和实测数据取值; 桩端参数 v 、 g 由该文式(5)~(8)并参考相应规范计算取值。计算参数及地基土物理力学参数具体取值见表 1。最后编制 Matlab 计算程序进行计算。

表 1 茅草街大桥地基土物理力学性质参数

土层	厚度/ m	$\tau_{\max}/$ kPa	$\tau_r/$ kPa	$S_{u1}/$ mm	$S_{u2}/$ mm	$\lambda_1/$ (kPa · mm ⁻¹)	$\lambda_2/$ (kPa · mm ⁻¹)
淤泥质黏土	12.5	38	32	1.5	1.5	4.5	1.0
黏土	9.1	50	43	3.1	3.1	8.5	1.0
细沙 A	11.6	50	43	7.0	7.0	5.5	0.9
砂砾石	2.9	40	34	11.6	11.6	3.4	1.1
砂卵石	5.0	70	60	12.8	12.8	7.1	1.2
细沙 B	3.9	110	94	12.9	12.9	16.1	0.9
泥质粉砂岩	15.0	58	49	12.9	12.9	25.3	1.0

注: 桩端参数: $v=1/1400$ mm/kPa, $g=1/6\ 000$ kPa⁻¹。

如图 3 所示, 由该文提出的桩侧、桩端荷载传递模型及计算方法所得的荷载曲线与实测沉降数据拟合良

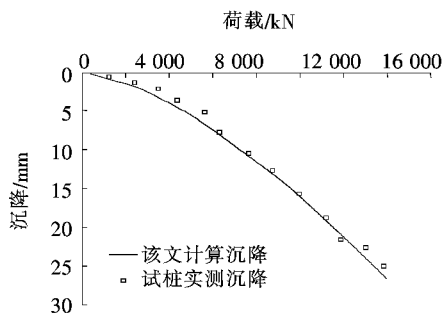


图 3 试桩荷载—沉降曲线对比

好。当荷载大于 6 000 kN 时, 实测荷载—沉降速率加大, 该文计算曲线在 6 000 kN 附近也表现出此规律; 当荷载大于 12 000 kN 之后, 实测荷载沉降速率突然减小, 表现异常, 可能是在 12 000 kN 之后, 单桩达到极限承载力造成测量误差所致。

6 结论

(1) 在深入分析桩土界面非线性接触特性的基础上, 考虑桩侧土应变软化特性, 采用软化三折线模型模拟桩侧荷载—剪切位移关系, 采用双曲线模型模拟桩

端土荷载一位移关系,利用递推方法,提出了一种单桩沉降计算的简化方法。

(2) 提出的模型和计算方法能较准确描述地基土的力学性质并有效预测单桩桩顶沉降,该文计算模型较桩侧双曲线模型简单,便于工程设计、施工人员掌握。

参考文献:

- [1] Kraft L M, Ray R P, Kagawa. Theoretical $T-Z$ Curves [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1982, 11 (107): 1 543—1 561.
- [2] Randolph M F, Wroth C P. An Analysis of the Vertical Deformation of Pile Groups[J]. Géotechnique, 1979, 29 (4): 423—439.
- [3] Comodromos E M, Papadopolou M C, Rentzeperis I K. Pile Foundation Analysis and Design Using Experimental Data and 3—D Numerical Analysis [J]. Computers & Geotechnics, 2009, 36(5): 819—836.
- [4] 邹春华.单桩计算的弹性理论法及其改进[D].西南交通大学硕士学位论文,2007.
- [5] Zhang, Q. Q, Zhang, M. Z. A Simplified Nonlinear Approach for Single Pile Settlement Analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(11): 1 256—1 266.
- [6] 崔广芹.基于现场单桩载荷试验结果的桩土参数识别方法[D].西安建筑科技大学硕士学位论文,2011.
- [7] 张乾青,李连祥,李术才,等.成层土中单桩受力性状简化算法[J].岩石力学与工程学报,2012(z1).
- [8] 魏杰.静力触探确定桩承载力的理论方法[J].岩土工程学报,1994(03).
- [9] 赵春风,蒋东海,崔海勇.单桩极限承载力的静力触探估算方法研究[J].岩土力学,2003(S2).
- [10] 李家奇,赵晓豹,李晓昭等.不同地区砂土中桩端承载力计算方法的比较[J].地下空间与工程学报,2009(5).
- [11] 刘俊龙.用标贯击数估算单桩极限承载力[J].岩土工程技术,2000(2).
- [12] JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [13] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].
- [14] Randolph M F. Science and Empiricism in Pile Foundation Design[J]. Geotechnique, 2003, 53(10): 847—875.
- [15] 赵明华,邹新军,刘齐建.洞庭湖软土地区大直径超长灌注桩竖向承载力试验研究[J].土木工程学报,2004(10).

投稿须知

1. 征稿范围:国内外公路概况;国外公路考察见闻;公路路线设计;路基路面工程;桥梁与隧道工程;材料试验与应用;交通工程与管理;公路景观与环保等。

2. 稿件要求:① 请提供 word 文档。文稿以 6 000 字左右为佳;② 投寄本刊的稿件,直接发至 E-mail: zhongwaigonglu@vip.163.com(本刊唯一投稿邮箱),本刊审稿周期 1~2 个月。若被采用,本刊将 E-mail 通知作者。3 个月未收到通知,作者可另行处理。请勿一稿多投,否则后果自负;③ 题目应简洁明晰,字数不能多于 20 个中文字;④ 作者单位必须注明邮政编码。第一作者须注明出生年、性别、学历、职称、研究方向、电子信箱和联系电话;⑤ 摘要、关键词。摘要请务必按“研究目的、方法、结果、结论”四要素写。关键词:3~8 个;⑥ 基金项目必须写明基金项目名称和编号;⑦ 图表。图表要与文中相对应,(示例:***如表 1 所示)。图表要有图名和表名。除照片外,其余图均需提供 excel 或 origin 或 cad 源文件。表格采用三线表。所有图、表中的字体为小 5 号或 6 号;⑧ 文后必须要有参考文献。参考文献参考格式如下:[1]期刊:作者姓名(列三位,等(姓在前,名在后)).文章题目[J].刊名,出版年份(期);[2]专著:作者姓名(列三位,等).专著名称[M].版本(第一版不标注).出版地:出版单位,出版年;[3]论文集:作者姓名(列三位,等).题名[C].论文集名,出版年;[4]学位论文:作者姓名.题名[D].单位[硕士(博士)学位论文],年份;[5]专利:专利申请者姓名(列三位,等).题名:国别,专利号[P].公告日期或公开日期[引用日期];[6]技术标准:标准代号 标准名称[S].

《中外公路》编辑部