

西安地区单桩荷载传递双曲线模型与工程应用

党发宁, 刘 娜, 何文安

(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘 要: 选用双曲线荷载传递函数分析单桩的荷载传递规律。通过分析各参数对传递函数的影响, 认为桩土间的极限位移是双曲线传递函数的主要参数。然后以西安地区的 26 个工程钻孔灌注桩的现场试桩资料为基础, 利用 Matlab 提供的优化工具箱对荷载传递函数中的参数进行了优化, 得到各工程中的传递函数的参数, 同时发现桩土间极限位移离散程度在各参数中最大, 这与理论分析相一致。最后与工程实例进行了对比验证, 结果表明, 把利用该优化方法得到的双曲线荷载传递函数的参数作为西安地区的经验参数是可靠的。

关键词: 单桩; 荷载传递函数; 双曲线模型; 极限位移

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)09-1428-05

作者简介: 党发宁(1962-), 男, 陕西富平人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程数值仿真分析。E-mail: dangfn@mail.xavt.edu.cn。

Hyperbolic model of load transfer method for single pile in Xi'an area and its engineering application

DANG Fa-ning, LIU Na, HE Wen-an

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: An hyperbolic function was proposed as a load transfer function to analyze the load transfer mechanism of a single pile. By discussing the influence of various parameters on transfer function in this model, it was considered that the limit displacement among pile-soil was a main parameter in transfer function. Based on the test data of bored piles in 26 projects in Xi'an area, the parameters in load transmission function were optimized by using the optimization toolbox in Matlab, and the average values of the function parameters were obtained in every soil layer in every project. It was found that the limit displacement of pile-soil was the most dispersive parameter, which was compatible with the theoretical analysis. Finally, it was shown by the comparison between the calculated results and the actual project that it was feasible to use the average value of the optimal parameter as empirical parameter.

Key words: single pile; load transfer function; hyperbolic model; limit displacement

0 引 言

竖向荷载下单桩的沉降计算是桩基设计的一项重要内容, 目前代表性的计算方法主要有: 荷载传递法、弹性理论法、分层总和法、剪切变形法、有限元法等。其中荷载传递法因具有概念明确、计算简单、实用性强的特点, 而被广泛应用于工程中的单桩计算^[1]。荷载传递法的关键是正确选取能够真实反映桩土相互作用机理的荷载传递函数, 并合理确定其参数。但是即使同一地区, 同一荷载传递函数, 由于其参数选取不同, 计算结果和实际结果有可能也会有很大的差别。所以, 在选定了某一荷载传递函数后, 如何建立地区性的经验参数以减少误差, 是实际工程中的重要问题。西安地区还未见此方面的分析, 有必要进行探讨。本

文就这一问题, 基于双曲线传递函数模型, 讨论各参数对传递函数的影响, 并根据西安地区的实测钻孔灌注桩试桩资料, 采用优化理论对各参数进行优化, 以期建立西安地区的传递函数经验参数。

1 荷载传递法

荷载传递法是用既定的荷载传递函数来分析桩的承载机理。该方法计算参数的选取较为方便, 且对于考虑土的非线性方面, 比其它计算方法更有优势。这种方法的基本概念是把桩划分为许多弹性单元, 每一

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10372078)

收稿日期: 2006-06-22

单元与土体之间用非线性弹簧联系, 桩端处土也用非线性弹簧与桩端联系, 以模拟桩-土间的荷载传递关系。这些非线性弹簧的应力-应变关系, 在桩侧表示桩侧摩阻力 $f(s)$ 与剪切位移 s 之间的关系, 在桩端则表示桩端抗力 τ 与桩端竖向位移 s_b 间的关系, 这一关系一般就称作传递函数。利用荷载传递法的基本微分方程, 便可以分析桩的荷载沉降特性。荷载传递法的基本微分方程为

$$\frac{d^2 s(z)}{dz^2} = \frac{U}{AE} \cdot f(s) \quad (1)$$

式中 U 为桩截面周长; A, E 为桩截面积及弹性模量; $f(s)$ 为桩侧摩阻力函数, 也即传递函数; s 为 z 断面桩身位移。

它的求解分成两种计算方法, 解析法和位移协调法。位移协调法是将桩划分成许多单元体, 考虑每个单元的内力与位移协调关系, 求解桩的荷载传递及沉降量。其计算步骤如下:

(1) 已知桩的特征值(桩长 L 、截面积 A 、弹性模量 E) 以及传递函数 $f(s) - s$ 曲线。

(2) 将桩分成 n 个单元, 每单元长 $\Delta L = L/n$ 的大小取决于要求的计算精度。

(3) 先假定桩端处单元 n 底面产生位移 s_b , 从桩侧传递函数曲线中求得相应于 s_b 时的桩侧摩阻力 $f(s_b)$ 值。

(4) 假定单位面积上桩端阻力 τ 是 s_b 的函数, 即

$$\tau = \tau(s_b) \quad (2)$$

该函数也作为传递函数来处理, 只是参数不同于桩侧传递函数, 由此可计算相应桩端位移 s_b 引起的桩端阻力 $q_n = q_b$

(5) 计算第 n 单元处侧摩阻力后, 进而计算出桩身轴力增量

$$dq = f(s_b) \cdot U \cdot \Delta L \quad (3)$$

(6) 由 q_n 和 dq 的值按下式计算第 n 单元桩身的压缩量

$$ds = (q_n + 0.5 \cdot dq) \cdot \Delta L / (E_p \cdot A_p) \quad (4)$$

利用位移 $s_b + 0.5 \cdot ds$ 重复步骤 (3) ~ (6), 得桩身轴力增量为 d_{q1} , 之后再计算本单元的桩身压缩量, 设为 d_{s1} , 判断 d_q 与 d_{q1} 以及 d_s 与 d_{s1} 之间的误差, 当到达需要的精度时, 把 d_{q1} 的值赋予 d_q , 把 d_{s1} 的值赋予 d_s , 重复此过程, 直到满足精度要求。最后得到 d_q, d_s 。

(7) 由步骤 (6) 得出的结果计算第 $n-1$ 段桩身底处的轴力与位移

$$s_{n-1} = s_n + ds \quad (5)$$

(8) 按上述步骤计算第 $n-1$ 单元, 求得 p_{n-2}, s_{n-2} 值。依次逐个单元向上推移, 直到桩顶第一单元, 即可求得桩顶荷载 Q 及相应的桩顶沉降量 s 值。

(9) 重新假定不同的桩端位移, 重复上述 (2) ~

(8) 步骤, 求得一系列相应的桩身轴力分布图及相应的桩侧摩阻力的分布图, 最后还可得到桩的 $Q-s$ 曲线。

通过以上的分析介绍, 在选择荷载传递函数之后, 通过给定的相关参数, 利用位移协调法即可求得 $Q-s$ 曲线以及桩轴向力和桩侧摩阻力分布, 方便的分析桩基的荷载传递规律。

2 荷载传递函数的选取及参数的确定

用荷载传递法分析单桩承载力与沉降的关键在于选择能真实反映桩-土共同作用机理的传递函数。由于土体的非线性与成层非均质性, 大量的静载试验表明, 桩土之间的传递函数可用双曲线函数来描述, 即

$$f(s) = \frac{as}{b+s} \quad (6)$$

该式的曲线如图 1 所示。

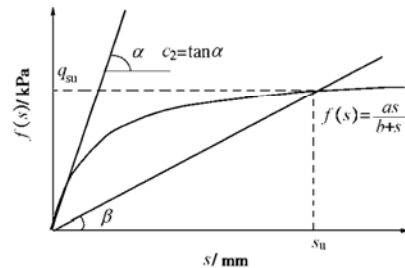


图 1 荷载传递函数

Fig. 1 The function of load transmission

该函数中的 a, b 两个参数可由桩侧(或桩端)产生极限位移(沉降) s_u 时相应的桩侧(或桩端)极限摩阻力 q_{su} (见图 1), 以及考虑了双曲线函数曲线参数 C 来确定。当桩土间位移达到 s_u 时, 认为桩侧土的摩阻力已基本发挥, 即 $f(s_u) = q_{su}$ 不是曲线 $f(s)$ 的渐进线, 由图 1 可知:

$$C_2 = \lim_{s \rightarrow 0} f'(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{as}{b+s} \right) = \tan \alpha \quad (7)$$

$$q_{su} = \frac{as_u}{b+s_u} \quad (8)$$

引入曲线参数 $C = \tan \alpha / \tan \beta$, $C_2 = \tan \alpha$, $\tan \beta = q_{su} / s_u$, 则有

$$C = \tan \alpha / \tan \beta \\ = C_2 / \tan \beta = C_2 \cdot s_u / q_{su} \quad (9)$$

联立式 (7) ~ (9) 得

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{q_{su} \cdot C}{C-1}, \\ b &= \frac{s_u}{C-1}, \\ q_{su} &= \frac{as_u}{b+s_u} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

有关 q_{su} , s_u , C 这 3 个参数与荷载传递函数的关系分别见图 2~4。

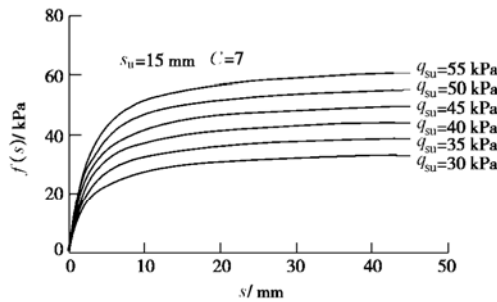


图 2 $f(s)$ 与 q_{su} 的关系

Fig. 2 The relationship between $f(s)$ and q_{su}

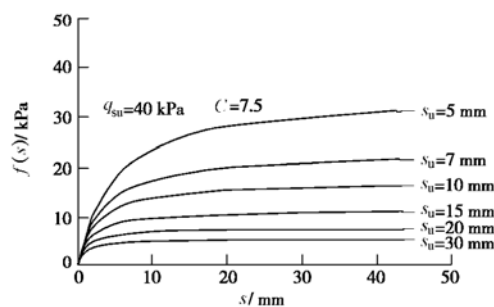


图 3 $f(s)$ 与 s_u 的关系

Fig. 3 The relationship between $f(s)$ and s_u

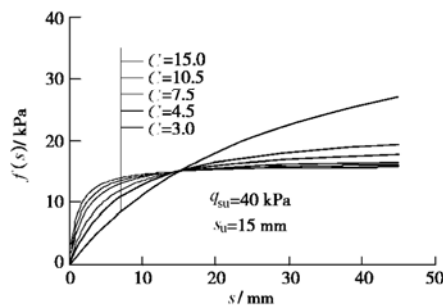


图 4 $f(s)$ 与 C 的关系

Fig. 4 The relationship between $f(s)$ and C

由图 2, 3 可以看出, $f(s)$ 随 q_{su} , s 的增大而增大, 由图 3 看出, $q_{su}=40$ kPa, $C=7.5$ 时, 随着 s_u 的增大, 摩阻力发挥越慢, 荷载传递函数 $f(s)$ 的渐近线也相应减少, 总的来说, 增大 s_u 相当于减小 q_{su} 。由图 4 可知, 当 $s < s_u$ ($s_u = 15$ mm) 时, $f(s)$ 随 C 的增大而增大; 当 $s > s_u$ 时, $f(s)$ 随 C 的增大而减小, 由此可见, q_{su} , s_u 决定 $f(s)$ 的大小, 是影响荷载传递函数的主要因素, 即受桩-土相互作用强弱控制。 C 决定桩阻力发挥的先后问题, 计算表明, 参数 C 的取值对桩的荷载沉降曲线影响很小, 对桩的轴力分布几乎没有影响。从以上分析可得, 参数 s_u , s_{ub} 对于双曲线函数比较敏感, 利用双曲线荷载传递函数时, 合理的确定其参数才能对桩基的受力状态进行正确的分析。

发挥桩侧极限摩阻力所需的桩身相对位移 s_u 与桩径、施工工艺、土层性质及其分布有关^[2]。对于预制桩, 有学者认为其极限位移可取桩径的 0.5%~1%。对于钻孔桩, 由于桩周土受到扰动, 使得剪切滑移面性质较为复杂, 极限位移变化范围也比较大。当水泥浆渗入桩表面土中形成硬壳层, 滑移面将发生于硬壳外侧, 使侧摩阻力提高, 极限位移减小; 当采用泥浆护壁成孔时, 如果泥浆过稠, 在桩表面形成泥皮, 此时滑移面发生在泥皮内, 使侧摩阻力显著降低, 极限位移增大。当用双曲线函数作为荷载传递函数时, 文献[3]中给出了双曲线模型中不同类型桩的 s_u , C 一个经验取值范围, 同时文献[4]中指出西安地区灌注桩双曲线传递函数中参数取值为桩侧极限位移 s_u 取 3~14 mm, 对应的系数 C 取 6~9, 桩端极限位移 s_{ub} 取 20~30 mm, 对应的系数 C_b 取 4~8。

3 西安地区参数的优化与应用

3.1 参数优化的思路

实际工程中的桩, 往往不是置身于均匀岩土中, 因此合理选取荷载传递函数中的岩土参数就成为难点, 本文采用优化方法来合理选取荷载传递函数的参数。

因为在大多数荷载试验资料中, 多数只是含有桩顶的荷载沉降曲线, 而没有桩的轴力分布, 所以本文在一般的桩基试验资料的基础上, 以拟合荷载沉降曲线为思路, 对西安地区中的桩基工程中的上述参数进行优化, 以提高该双曲线传递函数模型在该区预测桩的荷载沉降曲线的精度。其具体思路是: 首先假定桩周土体为均匀土层, 根据工程地质勘察报告以及工程规范^[5], 确定出桩周各土层及桩端土中的参数 q_{su} , 桩侧与桩端参数 s_u , C , s_{ub} , C_b 的合理范围, 此处 s_u , C 分别为桩侧极限位移和曲线参数, s_{ub} , C_b 分别为桩端处的极限位移和曲线参数。给定一组假定的初始桩端位移 s_{bi} , 计算出桩顶处的荷载 Q'_i 与沉降 s_i , 再依据实测的桩顶荷载沉降曲线严格按内差法算得对应于沉降 s_i 时的桩顶荷载 Q_i , 令偏离度 $\alpha_i = |Q'_i - Q_i| / Q_i$, 建立如下目标函数

$$f_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \alpha_i, \quad (11)$$

其中 m 为假定的初始桩端位移的总数, s_i 为对应于桩端位移 s_{bi} 的桩顶位移, Q_i 为通过荷载试验实测的对应于桩顶沉降 s_i 的桩顶荷载, Q'_i 为通过位移协调法计算所得的对应于沉降 s_i 的桩顶荷载。

在给定的各参数范围内, 求出一组参数, 遍历所有的 α_i , 使目标函数 f_1 尽可能在给定的参数范围内达

到最小。但是目标函数 f_1 的优化结果只能保证 Q_i 与 Q'_i 两值总的偏离程度达到最小, 而不能体现某一 α_i 偏离 f_1 的大小, 即不能具体反应 α_i 在 f_1 附近的离散程度, 所以再建立另一个目标函数

$$f_2 = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\alpha_i - f_1)^2} \quad (12)$$

使目标函数 f_2 尽可能在给定的参数范围内与 f_1 同时达到最小。

由此, 形成了两个目标函数。并依据计算软件 Matlab 提供的优化工具箱中的用于多目标规划的 Fgoalattain 函数, 通过编写 Matlab 程序, 在给定的各参数范围内, 得到各工程中的参数优化结果。

3.2 参数优化的结果

利用上述优化方法, 在上文中确定了西安地区双曲线荷载传递函数各参数合理范围的基础上, 针对西安地区湿陷性黄土的地层分布(主要为黄土 Q_3^{col} 、 Q_2^{col} 以及粉质黏土 Q_2^{al}), 结合该地区 26 个钻孔灌注桩工程中实测桩基资料^[6], 所取工程实例都采用旋挖孔成孔工艺、桩长集中在 26~30 m、桩径在 0.8~1.0 m 之间, 对双曲线传递函数的各参数进行了优化, 得到了各工程中的参数优化结果(见表 1)。

表 1 西安地区 26 个工程的参数优化结果

Table 1 Optimized results of the parameters of 26 projects in Xi'an area

工程名称	C	s_u/mm	C_b	s_{ub}/mm
工程 1	7.5132	8.4868	6.1387	19.9868
工程 2	5.8668	7.4695	4.9919	23.8658
工程 3	6.0008	4.9867	4.9951	20.0008
工程 4	5.9920	9.1772	5.7388	19.9920
工程 5	6.0001	5.0000	5.0000	20.0001
工程 6	6.0000	3.0000	4.0000	20.0000
工程 7	6.0000	3.0000	4.0000	20.0000
工程 8	6.0000	3.0000	4.0000	20.0000
工程 9	5.9951	3.0007	4.0008	19.9853
工程 10	7.6268	4.7035	4.5445	25.2276
工程 11	5.0331	6.9892	4.9836	20.0665
工程 12	6.0876	3.0000	4.0000	20.2920
工程 13	5.9943	5.0044	5.0030	19.9845
工程 14	6.6632	6.3930	3.8893	21.6872
工程 15	5.0000	7.0000	5.0000	20.0000
工程 16	5.9597	5.3781	5.1530	20.0478
工程 17	4.9939	7.0006	5.0019	19.9856
工程 18	6.0060	2.9785	3.9883	20.0060
工程 19	6.9020	3.5151	4.1941	21.1582
工程 20	6.0000	3.0000	4.0000	20.0000
工程 21	6.8781	3.6617	3.9525	22.6211
工程 22	5.9926	3.0032	4.0032	19.9828
工程 23	6.0211	3.0729	3.9983	20.0665
工程 24	6.2322	2.9513	3.9513	20.6605
工程 25	5.9964	3.5211	4.0003	19.9887
工程 26	6.0018	2.9827	3.9926	20.0018
平均值	6.1060	4.6645	4.4816	20.6000

从表中可以看出, 参数优化的结果浮动不大, 桩侧极限位移最大为 9.1772 mm, 最小为 2.9513 mm, 与文献[3]的结果很相近, 其他参数的浮动范围为: C 为 4.9939~7.6268, s_{ub} 为 19.9828~25.2276 mm, C_b 为 3.8893~6.1387; 各参数平均值为: $s_u=4.6645$ mm, $C=6.106$ mm, $s_{ub}=20.6$ mm, $C_b=4.4816$ 。并且可以发现, 与参数 C , C_b 相比, 参数 s_u , s_{ub} 的取值变化较大, 但也仅有几例工程偏离其平均值较大, 大多数工程中的 s_u , s_{ub} 都在平均值左右浮动, 这也说明, 对于某一个工程, 其桩长、桩径或者地质条件有差异时, 桩土相互作用的强弱也就会不同, 荷载传递函数中的极限位移将会因此发生改变, 相应的改变了各土层的荷载传递函数, 进而桩的受力性状也就发生了变化, 其取值将会随着不同桩土系统发生变化。相对于参数 C , C_b 来说, 参数 s_u , s_{ub} 在双曲线函数中的重要程度更大些, 这与前文的理论分析相一致。

3.3 优化参数的验证与应用

为了验证优化结果是否可以精确预测桩基的荷载沉降关系, 从表 1 中抽取部分工程, 利用优化后的参数, 绘制了荷载沉降曲线计算值与实测值的对比关系, 见图 5。从图中发现, 在利用优化后的参数计算桩顶荷载沉降时, 可以较好的拟合实测的桩顶荷载沉降曲线, 说明该优化方法所得的结果具有较高的精度, 能达到令人满意的程度。

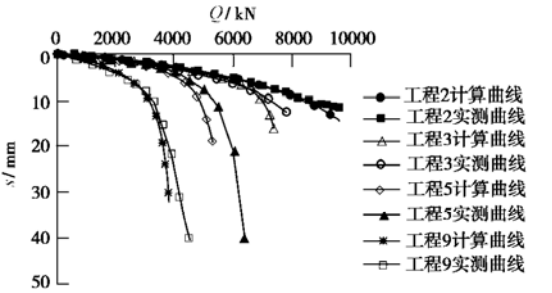


图 5 优化后荷载沉降计算值与实测值对比

Fig. 5 The comparison between the actual and the calculated curve by use of optimized parameters

由表 1 计算出这 26 个工程各优化参数的平均值, 并把它作为在西安地区双曲线传递函数的一组经验参数, 用来预测统计资料以外的 4 个钻孔灌注桩工程桩基荷载沉降, 其计算值与实测值的对比见图 6。

从图 6 中可以看出, 把优化结果的平均值作为西安地区的经验参数, 对该地区相同桩型桩基荷载沉降进行计算时, 可以较好的预测其荷载沉降关系, 说明本文的结果可以作为一个地区经验参数, 以指导该地区的桩基设计。

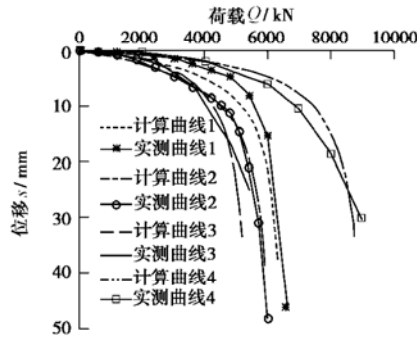


图6 用经验参数计算荷载沉降与实测值对比

Fig. 6 The comparison between the actual and the calculated curves by use of empirical parameters

4 结 论

(1) 用传递函数的双曲线模型分析桩的 $Q-s$ 曲线时, 参数选取与计算精度有着直接的相关。各参数对传递函数的影响程度是不同的, 极限位移 s_u , s_{ub} 的影响大, 是传递函数中的主要指标, 而常数 C 只是影响桩端阻力发挥先后问题。

(2) 可以依据经验选取参数, 并且在不考虑桩周各土层差异的基础上, 通过实测试桩资料对参数进行优化, 提高计算精度, 更好的再现桩的荷载沉降关系。本文依据西安地区的钻孔灌注桩桩基资料, 对该地区的参数进行优化, 得到该地区的参数取值范围以及平均值。其结果经过工程实例验证, 可以较好的拟合实测桩基荷载沉降曲线, 说明了优化方法和桩周土层简化分析的可行性, 所得结果的平均值可以作为西安地区钻孔灌注桩的一个参考参数, 以指导该地区的钻孔灌注桩设计。

(3) 可以把本文的优化方法扩展到其他桩型和其他地区, 建立不同桩型不同地区的荷载传递函数经验

参数。

参考文献:

- [1] 聂更新, 陈 枫. 用荷载传递函数法计算单桩承载力[J]. 土工基础, 2004, 18(2): 29 - 32. (NIE Geng-xin, CHEN Feng. Using load-transmission function method in single pile bearing[J]. Soil Engineering and Foundation, 2004, 18(2): 29 - 32. (in Chinese))
- [2] 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, 1999. (Committee for Compiling the Pile Foundation Handbook. Pile foundation handbook[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995. (in Chinese))
- [3] 王春青, 朱彦鹏. 单桩轴向荷载沉降曲线的一种优化解法[J]. 建筑技术开发, 2003, 30(6): 24 - 25. (WANG Chun-qing, ZHU Yan-peng. A optimal method of axial load-settlement curve of friction single pile[J]. Building Technique Development, 2003, 30(6): 24 - 25. (in Chinese))
- [4] 魏 静, 王建华, 李永林. 西安地区单桩桩土相互作用数值模拟分析[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(3): 63 - 66. (WEI Jing, WANG Jian-hua, LI Yong-lin. The numerical simulation analysis of pile-soil interaction of single pile in XI'AN area[J]. Journal of Chang'an University (Earth Science Edition), 2003, 25(3): 63 - 66. (in Chinese))
- [5] JGJ94—94 建筑桩基技术规范[S]. (JGJ94—94 Technical code for building piles[S]. (in Chinese)).
- [6] 姚仰平, 高永贵, 韩 昌. 西安地区桩基静载荷实验资料汇编[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. (YAO Yang-ping, GAO Yong-Gui, HAN Chang. Data compilation of the plate loading test of piles in Xi'an area[M]. Xi'an: Shan'xi Science and Technology Press, 1999. (in Chinese))