

文章编号: 1002-0268 (2006) 10-0083-03

关于超长桩有效桩长问题的探讨

丁建文, 刘松玉

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 超长桩的出现给桩基理论与工程实践提出了新的课题与挑战, 针对工程中的实际情况对超长桩提出了有效桩长的问题。运用数学和力学知识, 在假定计算模型的基础上, 从理论上推导了超长桩的有效桩长的计算公式。结果表明, 有效桩长与工作荷载下的桩顶沉降、桩身刚度及桩顶工作荷载有关。并运用有限元程序, 对不同桩长的情况进行了数值模拟计算, 进一步探讨了桩长对单桩承载性状的影响, 结果表明, 当桩长超过一定程度后, 通过增加桩长来提高单桩承载力是十分有限的, 因此无限制地增加桩长是没有意义的。

关键词: 超长桩; 有效桩长; 理论公式; 数值模拟计算

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

Discussion on Effective Length of Super-long Pile

DING Jian-wen, LIU Song-yu

(Transportation College, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

Abstract: With the use of the super-long pile there are new topics and challenges for the theoretical research and engineering practice. The effective length of the super-long pile was put forward in the application of pile-engineering. The calculation formula of effective length was derived in theory with the use of mathematics knowledge and mechanics knowledge based on the calculation model. According to the research the effective length was influenced by the settlement under the working load, the rigidity of the pile and the working load on the top of the pile. Finally, all kinds of different length of piles were thoroughly analyzed with the finite element method. Based on the calculation results of numerical simulation, the bearing-capacity behavior of the pile was further discussed. The result shows that the improvement of the bearing capacity through increasing the length is very limited once the pile length exceeding a certain level. It is useless to increase the length without limitation.

Key words: super-long pile; effective length of pile; formula in theory; calculation of numerical simulation

目前在大型桥梁和高层建筑中, 桩长达到 60~80 m 已较为常见, 但关于超长桩的概念还缺乏统一的认识^[1-3]。根据国内桩基技术水平和学术上的相似看法, 本文对超长桩作了如下界定标准: 桩长大于等于 60 m 或长径比大于等于 60 的桩均为超长桩。

超长桩的出现给桩基理论与工程实践提出了新的课题与挑战。目前有一种令人不安的倾向, 因对超长桩的荷载传递机理研究尚不十分清楚, 一些设计人员在某些工程中盲目增加桩长, 以致造成很大的浪费^[2,4], 因此有必要提出有效桩长的问题。

有效桩长指当桩长超过某一极限值时, 承载力的增加几乎为零, 此极限长度称为有效桩长。关于有效桩长的确定, 国内外并不多见, 文献[5]做了一些有益的探讨。

1 有效桩长理论公式的推导

1.1 基本假定和计算模型

(1) 假定工作荷载 (即单桩容许承载力, 通常为极限荷载的一半, $Q_a=1/2Q_u$) 下, 桩端处位移刚好为零, 但桩端以上桩身均有位移, 此时的桩长即为有

收稿日期: 2005-06-07

作者简介: 丁建文 (1975-), 男, 江苏泰兴人, 硕士, 讲师, 从事桩基础和基坑支护研究. (dddjw@sina.com)

效桩长。

(2) 同时假定桩侧摩阻力呈倒三角形分布, 计算模型如图 1 所示。

图 1 工作荷载下桩侧摩阻力分布图

Fig.1 Side friction resistance distributed diagram under working load

1.2 公式推导

因桩顶沉降等于桩身压缩与桩端沉降之和, 即

$$S_{a0} = S_{as} + S_{ab}, \quad (1)$$

式中, S_{a0} 为工作荷载下桩顶沉降量, mm; S_{as} 为工作荷载下桩身弹性压缩量, mm; S_{ab} 为工作荷载下桩端压缩量, mm。

由于桩端位移为 0; 故将 $S_{ab}=0$ 代入(1)式, 得

$$S_{a0} = S_{as} + 0 = S_{as}. \quad (2)$$

根据材料在拉伸压缩下的基本力学关系有:

$$S_{a0} = \int_0^L \frac{N(z)}{EA} dz = \int_0^L \frac{Q_a - Q_{az}(z)}{EA} dz, \quad (3)$$

式中, $N(z)$ 为桩身轴力, kN; $Q_{az}(z)$ 为工作荷载下桩身 Z 深度以上的桩侧摩阻力, kN; E 为桩身弹性模量, MPa; A 为桩身截面面积, m^2 ; L 为有效桩长, m。

因侧摩阻力呈倒三角形分布, 故桩身 Z 深度以上的摩阻力为

$$Q_{az} = \frac{\tau_{a0} + \tau(z)}{2} UZ, \quad (4)$$

式中, τ_{a0} 为工作荷载下桩顶侧摩阻力, kPa; U 为桩身周长, m; Z 为深度, m。

将式(4)代入式(3), 得

$$S_{a0} = \int_0^L \frac{Q_a - \frac{\tau_{a0} + \tau(z)}{2} UZ}{EA} dz. \quad (5)$$

根据相似三角形原理, 桩侧任一深度的侧摩阻力为

$$\tau(z) = \frac{(L-Z)}{L} \tau_{a0}. \quad (6)$$

将式(6)代入式(5), 得

$$S_{a0} = \int_0^L \frac{Q_a - \frac{\tau_{a0} + \frac{(L-Z)}{L} \tau_{a0}}{2} UZ}{EA} dz. \quad (7)$$

根据静力平衡原理 (不考虑桩身自重), 有

$$Q_a = Q_{as} + Q_{ab}, \quad (8)$$

式中, Q_a 为工作荷载, kN; Q_{as} 为工作荷载下桩侧总阻力, kN; Q_{ab} 为工作荷载下桩端阻力, kN。

因假定桩端处位移刚好为零, 即桩端不发挥作用, 故 $Q_{ab}=0$, 代入式(8), 得

$$Q_a = Q_{as} + Q_{ab} = Q_{as} = \frac{\tau_{a0}}{2} UL. \quad (9)$$

将式(9)进行整理, 得

$$\tau_{a0} = \frac{2Q_a}{UL}. \quad (10)$$

将式(10)代入式(7), 得

$$S_{a0} = \int_0^L \frac{Q_a - \frac{2Q_a}{UL} + \frac{(L-Z)}{L} \frac{2Q_a}{UL} UZ}{EA} dz. \quad (11)$$

将式(11)积分并整理, 得有效桩长为

$$L = \frac{3S_{a0}EA}{Q_a}. \quad (12)$$

由于桩基工程一般首先要进行试桩, 故可以根据试桩结果得到的 Q_a 和 S_{a0} 求得有效桩长 L , 然后在工程桩正式施工前可以根据试桩结果、设计单桩承载力要求和求得的有效桩长对桩基进行优化设计, 从而使得桩基工程更为安全经济。

2 实例计算

2.1 试桩结果统计

江阴长江大桥北引桥 29 号墩 1# 试桩^[9] (简称江阴长江大桥 1# 试桩) 与郑州西南绕城高速公路与京珠高速互通立交桥试桩^[7] (简称郑州高速立交试桩) 在工作荷载 ($Q_a=1/2Q_u$) 和极限荷载 Q_u 下的试桩情况统计结果如表 1 所示。

表 1 试桩统计结果

Tab.1 Statistical result of the two test piles

工程名称	桩顶荷载 Q/kN	总侧阻 力 Q_s/kN	端阻力 Q_b/kN	桩顶位移 S_0/mm	桩端位 移 S_b/mm	S_0-S_b S_0
江阴长江 大桥 1# 试桩	$1/2Q_u=9\ 000$	8 913	87	6.74	0.11	98.4%
郑州高速 立交试桩	$Q_u=18\ 000$	17 162	838	45.69	27.2	40.5%
	$1/2Q_u=7\ 500$	7 187	313	5.42	4.16	23.2%
	$Q_u=15\ 000$	12 763	2 237	27.04	23.59	12.8%

2.2 有效桩长计算

(1) 江阴长江大桥 1[#] 试桩

实际桩长 $L=78.5\text{ m}$ ，极限荷载 $Q_u=1.8\times10^4\text{ kN}$ ，在工作荷载 $Q_a=9.0\times10^3\text{ kN}$ 下，实测桩顶沉降 $S_{a0}=6.74\text{ mm}$ ，取桩身弹性模量 $E=4.0\times10^7\text{ kPa}$ ，取折算桩径 $D=1.10\text{ m}$ （设计桩径 1.00 m ，因桩身上部 24 m 有内径 1.20 m ，壁厚 20 mm 的钢护筒，并且竖向荷载下桩身压缩主要是桩身上部的压缩），根据式 (12)，则有效桩长为

$$L=\frac{3\times6.74\times10^{-3}\times4.0\times10^7\times\pi\times1.10^2}{9.0\times10^3}=85.36(\text{m})。$$

由此可见，江阴长江大桥北引桥 29 号墩 1[#] 试桩实际桩长比较合理。

(2) 郑州高速立交试桩

实际桩长 $L=60\text{ m}$ ，桩径 $D=1.0\text{ m}$ ，根据试桩，在工作荷载下 $Q_a=7.5\times10^3\text{ kN}$ 下，实测桩顶沉降 $S_{a0}=5.42\text{ mm}$ ，设桩身弹性模量 $E=3.6\times10^7\text{ kPa}$ ，根据式 (12)，则有效桩长为

$$L=\frac{3\times5.42\times10^{-3}\times3.6\times10^7\times\pi\times1.0^2}{7.5\times10^3}=61.27(\text{m})。$$

由此可见，郑州高速立交试桩实际桩长基本接近有效桩长。

3 有限元模拟计算

为了进一步研究桩长对单桩承载性状的影响，笔者用有限元程序，对不同桩长的情况进行了数值模拟计算。

3.1 参数取值

桩长分别取 20、40、50、60、70、80、90 m，桩径均为 1 m，其他参数均相同，取值分别如下：

(1) 桩身单元参数。桩身选用线弹性模型，取弹性模量 $E=3.0\times10^7\text{ kPa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ 。

(2) 接触面单元参数。接触面单元取法向刚度 $K=2.0\times10^6\text{ kPa}$ ，切向刚度 $K=1.0\times10^4\text{ kPa}$ 。

(3) 土体单元参数。土体选用弹塑性模型，土层采用双层地基，各层土体计算参数如表 2 所示。

表 2 各土层计算参数

Tab.2 Calculation parameters of each soil strata

土层	深度 Z/m	压缩模量 E/kPa	泊松比 ν	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$
第 1 层	0~60	15 000	0.35	30	30
第 2 层	-60~-100	30 000	0.35	25	35

3.2 结果分析

不同桩长时的 Q-S 曲线如图 2 所示。由图 2 可

见，当桩长从 20 m 增加到 40 m，从 40 m 增加到 50 m 时，桩的承载力显著增大，但当桩长从 60 m 增加到 80 m 时，承载力增加的幅度逐步明显降低，特别是当桩长从 80 m 增加到 90 m 时，承载力增加值十分有限。而且，桩长越长，成孔成桩越困难，对机械设备要求较高，很不经济。

图 2 不同桩长时的 Q-S 曲线

Fig.2 The Q-S curve under different pile length

不少研究^[3,4]也表明，桩长对桩侧阻力和桩端阻力发挥影响较大。当桩长较长时，桩端土对单桩承载力贡献明显较小，荷载主要由桩侧阻力承担；当桩长很长很长时，无论桩端土的刚度多大，桩端阻力均可忽略不计。因此，很长的桩实际上总是摩擦桩，故对于超长桩，用扩大桩端直径来提高承载力是徒劳的；无限制地扩大桩长也是没有意义的，因为当桩长超过有效桩长后，不仅桩端阻力没有充分发挥，就是桩身下部的侧摩阻力也尚未充分发挥。文献[8]提出当桩的长径比 $L/D\geq100$ 时桩端土的性质对荷载传递不再有任何影响，可作为纯摩擦桩。

参考文献：

[1] 俞亚南,冯世挺,宋连峰.软土地区超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J].工业建筑,2002,(11):33-35.
[2] 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,2002,25(1):76-79.
[3] 黄明聪,龚晓南,赵善锐.钻孔灌注桩试验曲线型式及破坏机理探讨[J].铁道学报,1998,20(4):93-97.
[4] 阳吉宝.超长桩的荷载传递机理[J].岩土工程学报,1998,20(6):108-112.
[5] 阳吉宝.确定超长桩有效长度方法[J].建筑科学,1996,(1):37-38.
[6] 唐崇钊,唐太平,方开泽,杨克己.江阴长江公路大桥北引桥 29 号墩钻孔桩试验报告[R].南京:南京水利科学研究院,河海大学江苏河海工程技术总公司,1994.
[7] 郑州西南绕城高速公路与京珠高速互通式立交桥桥梁桩静载试验报告[R].南京:东南大学交通学院,2003.
[8] 邵江,谢红强,周德培,胡德贵.桩的轴向静载-沉降曲线的模拟分析[J].岩土力学,2004,25(7):1107-1110.