

超长桩的荷载传递机理

Research on load transfer mechanism of super-long pile

阳吉宝

(上海市民防地基勘察院, 200232)

钟正雄

(同济大学地下建筑与工程系, 上海, 200092)

中图法分类号 TU 473

作者简介 阳吉宝, 男, 1965年生, 1996年毕业于同济大学, 工学博士, 工程师。主要从事桩基优化设计与地基处理研究。

1 前言

随着我国改革开放的深入, 城市建设也随之迅速发展, 特别是上海等地 80 年代以来出现了超高层建筑, 使城市面目大为改观。软土地区超高层建筑的出现, 使超长桩的使用成为必然。超长桩是指桩长大于 50m 的各种类型桩, 主要有钢管桩、混凝土预制桩和钻孔灌注桩。70 年代末, 上海宝钢工程曾使用超长钢管桩, 目前在建的上海浦东金茂大厦桩基础的桩入土深度超过 80m。超长桩已成为软土地区超高层建筑和某些安全等级要求较高的建筑物桩基常用的一种桩型。

超长桩的出现, 给桩基理论研究与实践提出了新的课题与挑战。由于对超长桩的荷载传递机理认识不足, 目前超长桩的设计很难做到经济又合理。为此, 本文用荷载传递法和 Geddes 解析解相结合的混合法对超长桩的荷载传递机理进行初步研究。

2 改进的荷载传递法

荷载传递法又称传递函数法, 它是 Seed 和 Reese 于 1957 年提出的^[1]。这种方法的基本概念是把桩划分为许多弹性单元, 每个单元与土体之间用非线性弹簧联系, 以此来模拟桩土之间的荷载传递关系。荷载传递法的研究已有 40 多年的历史, 由于其概念明确、计算简便等优点而深受工程界的重视。

求解传递函数的方法有两类: 一是解析法, 二是位移协调法。目前应用较多的是位移协调法。位移协调法是用实测方法求得传递函数曲线, 因得到的曲线一般较复杂, 难以用简单的数学关系式描述, 无法直接用解析法求解, 必须根据平衡条件和位移协调原则, 经过反复试算才能求得桩侧摩阻力、轴力和桩顶位移。

单桩桩顶受到竖向荷载后, 其沉降量由下述三部分组成:

1) 桩本身的弹性压缩量;

2) 由于桩侧摩阻力向下传递, 引起桩端下土体压缩所产生的桩端沉降;

3) 由于桩端荷载引起桩端下土体压缩所产生的桩端沉降。

传递函数法由于假定桩侧任何点的位移只与该点上的摩阻力有关, 而与其它点的应力情况无关, 也即忽视了土的连续性。其实, 传递函数法是以桩体为研究对象, 传递函数中的位移是桩身位移, 不考虑土的连续性就不能考虑由于桩侧摩阻力向下传递而引起的桩端土体压缩所产生的桩端沉降。这样就不能准确地分析桩端及桩身下部受力状况与位移。为此必须通过改进才能完善桩体尤其是桩端的受力状况分析。

本文通过引入 Geddes 解来考虑桩侧摩阻力在桩端处产生的桩端位移。用 I_p , I_u 表示桩端阻力和均布桩侧阻力所引起的竖向应力系数。并假定桩侧摩阻力沿桩身呈分段式均布^[1]。

当计算应力点离桩轴线水平距离为 r , 离土表面为 z 时, 令

$$\left. \begin{aligned} n &= r/l; m = z/l; F^2 = m^2 + n^2; \\ A^2 &= n^2 + (m-1)^2; B^2 = n^2 + (m+1)^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

以 μ 表示土的泊松比, 则

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left\{ -\frac{(1-2\mu)(m-1)}{A^3} \right. \\ &\quad + \frac{(1-2\mu)(m-1)}{B^3} - \frac{3(m-1)^3}{A^5} \\ &\quad - \frac{3(3-4\mu)m(m+1)^2 - 3(m+1)(5m-1)}{B^5} \\ &\quad \left. - \frac{30m(m+1)^3}{B^7} \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_u &= \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left\{ -\frac{2(2-\mu)}{A} \right. \\ &\quad + \frac{2(2-\mu) + 2(1-2\mu)mn^{-1}(mn^{-1} + n^{-1})}{B} \\ &\quad - \frac{2(1-2\mu)(mn^{-1})^2}{F} + \frac{n^2}{A^3} \\ &\quad \left. + \frac{4m^2 - 4(1+\mu)(mn^{-1})^2 m^2}{F^3} \right\} \end{aligned}$$

$$+ \frac{4m(1+\mu)(m+1)(mn^{-1}+n^{-1})^2 - 4m^2 + n^2}{B^3} + \frac{6m^2(m^4 - n^4)n^{-2}}{F^5} + \frac{6m[bn^2 - n^{-2}(m+1)^5]}{B^5} \} \quad (3)$$

根据桩侧摩阻力实测资料^[3], 目前传递函数通常取下式:

$$\tau(s) = \frac{as}{b+s} \quad (4)$$

式中 $\tau(s)$ 为桩侧摩阻力; S 为桩身位移; a, b 为岩土参数。

式(4)是桩侧与土之间的传递函数, 对于桩端位移用分层总和法计算, 即

$$S_b = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{ni}}{E_{si}} h_i \quad (5)$$

式中 S_b 为桩端位移; n 为受压缩土层总数; σ_{ni} 为第 i 土层的竖向附加应力; E_{si} 为第 i 土层的压缩模量; h_i 为第 i 土层的厚度。

根据桩身受力的平衡条件, 以及弹性理论有

$$\frac{d^2 S(s)}{dz^2} - \frac{U}{EA} \tau(s) = 0 \quad (6)$$

式(6)就是传递函数法的基本微分方程。代入传递函数就可求解在指定桩顶荷载下的桩身各处位移与摩阻力。

在考虑场地工程地质条件的情况下, 可把桩分为若干段, 如 N 段。令各段分界点的编号为 $n=0, 1, \dots, N$ 。在 $n=0$ 处即为桩顶, P_0 即为桩顶荷载, S_0 即为桩顶沉降; 在 $n=N$ 处即为桩端, P_N 为桩端阻力, S_N 为桩端位移。计算时从桩端开始, 具体计算步骤如下:

Step1 假定一个桩端阻力 P_N , 然后用式(2)计算桩端应力, 再用式(5)计算桩端位移。

Step2 对桩最底下一段, 即 N 段进行计算。先假定第 N 段桩身位移为 S_N , 计算 ΔP , 即

$$\Delta P = \Delta L U \tau(S_N) \quad (7)$$

式中 $\tau(S_N)$ 即为桩侧与土之间的荷载传递函数, ΔL 为最底下一段的桩长。

Step3 利用下式计算第 N 段的桩身压缩量, 即

$$\Delta S = (P_N + \Delta P/2) \Delta L / (EA) \quad (8)$$

Step4 再计算 ΔP , 此时位移值取 S_N 和 S_{N-1} 的平均值, 于是

$$\Delta P = \Delta L U \tau(S_N + \Delta S/2) \quad (9)$$

Step5 重复 Step3, Step4 计算, 直到收敛为止, 即 ΔS 和 ΔP 保持不变, 然后计算轴力 P_{N-1} 和 S_{N-1} , 即

$$\left. \begin{aligned} P_{N-1} &= P_N + \Delta P \\ S_{N-1} &= S_N + \Delta S \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Step6 第 N 段计算结束后, 计算第 $N-1$ 段, 并以

P_{N-1} 和 S_{N-1} 作为第 $N-1$ 段的起始轴力和桩身位移, 重复 Step2 ~ Step5 计算, 这样一直计算到桩顶为止。由此可以得到桩顶荷载和沉降。

Step7 根据各段桩侧摩阻力, 利用式(3)计算由桩侧摩阻力所引起的桩端沉降。

Step8 重复 Step1 ~ Step7 计算, 求出桩顶荷载和沉降。

Step9 若已知桩顶荷载, 则可通过不断调整桩端阻力, 重复 Step1 ~ Step8 计算, 直到计算的桩顶荷载与实际值相差很小为止。

3 超长桩荷载传递特征

3.1 $P-S$ 曲线特征

桩的 $P-S$ 曲线, 即桩的荷载-沉降关系是桩受力特征的宏观表现。研究桩的 $P-S$ 曲线特征是揭示桩受力机理的重要途径之一。下面根据上述单桩沉降计算方法, 对超长桩的 $P-S$ 曲线线型与桩长 L 、桩径 D 、桩体弹性模量 E 和桩端土层压缩模量 E_s 等的关系进行讨论。

(1) $P-S$ 曲线与桩长 L 的关系

图1给出的是不同桩长条件下的 $P-S$ 曲线。由此可见, 随着桩长的增大, $P-S$ 曲线的第二拐点逐渐向下推移。对于超长桩, 第二拐点向下推移的现象特别明显, 甚至没有第二拐点, 此时桩顶沉降较大。因此, 超长桩极限荷载应根据桩顶沉降确定, 设计桩基时, 按变形控制较为合理。

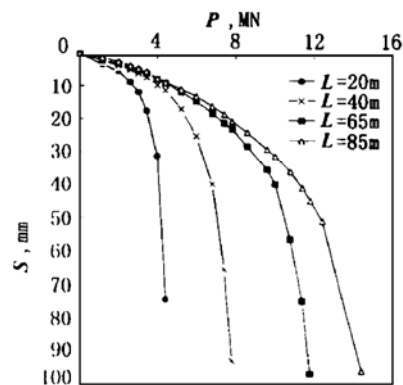


图1 $P-S$ 曲线与桩长的关系

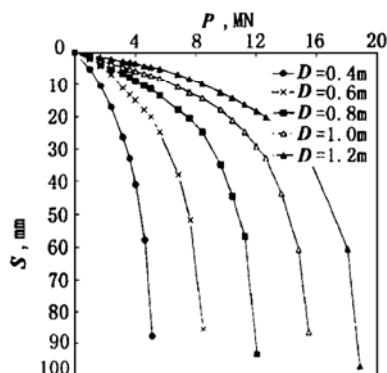
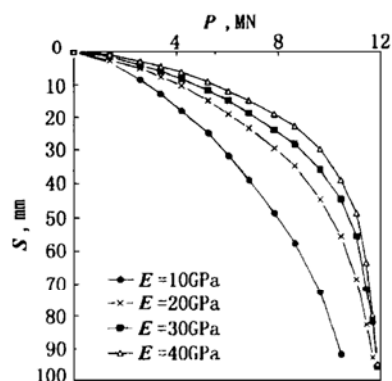
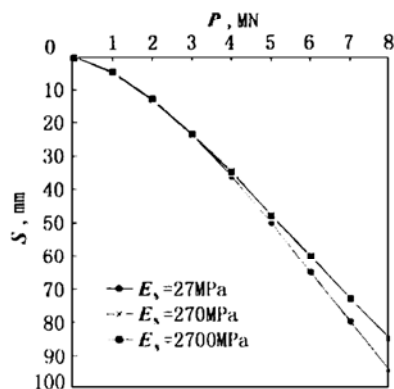
Fig.1 Relation between $P-S$ curve and pile length

(2) $P-S$ 曲线与桩径 D 的关系

图2给出的是桩长为 65m 的桩在不同桩径条件下的 $P-S$ 曲线。可以看出: 随着桩径的增大, 桩的极限荷载相差较大。对于超长桩, 应取适当的桩径才能充分发挥其桩长的作用。

(3) $P-S$ 曲线与桩体弹性模量 E 的关系

图3给出的是 65m 超长桩在不同桩体弹性模量的情况下的 $P-S$ 曲线。由此可见, 在桩体弹性模量较

图2 $P-S$ 曲线与桩径的关系Fig.2 Relation between $P-S$ curve and pile diameter图3 $P-S$ 曲线与桩体弹性模量的关系Fig.3 Relation between $P-S$ curve and elastic modulus of pile图4 $P-S$ 曲线与桩端土层压缩模量的关系Fig.4 Relation between $P-S$ curve and constrained modulus of soil under the pile tip

小的情况下,弹性模量的增加会对 $P-S$ 曲线线型产生较大的影响,但当桩体的弹性模量超过一定值后,弹性模量对 $P-S$ 曲线线型的影响不明显。随着桩体弹性模量减小,桩的 $P-S$ 曲线由突变型变为渐变型。也就是说,桩顶荷载在桩体弹性模量较小的情况下不易向下传递。对超长桩来说,增大桩体弹性模量,有利于提高桩的承载力。

4) $P-S$ 曲线与桩端土的压缩模量 E_s 关系

图4给出的是65m长的桩在不同桩端土层压缩模

量条件下的 $P-S$ 曲线。从图中可以看出,桩体弹性模量 ($E = 27000\text{MPa}$)与桩端土层压缩模量 E_s 之比为10和100时,在相同的桩顶荷载下 $P-S$ 曲线几乎重合。当桩体弹性模量与桩端土层的压缩模量之比为1000时,工作荷载下的 $P-S$ 曲线变化也不大。由此可知,对于超长桩来说,工作荷载下,其桩端土层可压缩性对桩的 $P-S$ 曲线影响比短桩小的多。

3.2 桩端阻力与位移

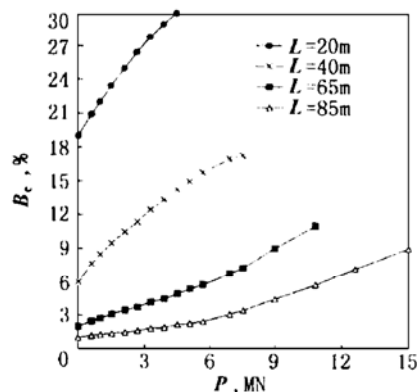
超长桩主要是在桩端持力层埋深较大的情况下使用的,研究桩端阻力和位移将有助于了解桩长的作用,特别是桩端持力层的作用。

(1) 桩端阻力

定义分配系数 B_e 为桩端阻力与桩顶荷载之比。

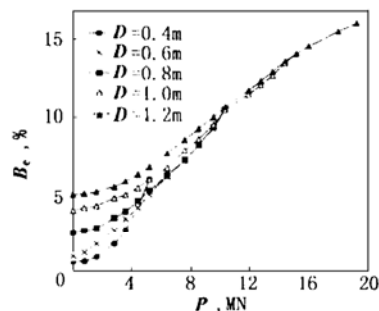
a) B_e 与桩长 L 的关系

图5给出的是 B_e 与桩长的关系。随着桩长的增大, B_e 减小。在桩长一定的情况下,随着桩顶荷载增大, B_e 逐渐增大。工作荷载下,超长桩的 B_e 一般在10%以下。

图5 B_e 与桩长的关系Fig.5 Relation between B_e and pile length

b) B_e 与桩径 D 的关系

随着桩顶荷载增大, B_e 在不同桩径条件下的变化趋势基本一致 (见图6),但桩径较大时, B_e 也较大。说明要想发挥桩端土强度,对于超长桩来说,必须选择一个适当的长径比。

图6 B_e 与桩径的关系Fig.6 Relation between B_e and pile diameter

c) B_e 与桩体弹性模量 E 的关系

图7给出的是65m长的桩的 B_e 与桩体弹性模量的关系。当桩体弹性模量较小时, 桩端荷载上升速度较快, 这样, 桩端土体易发生剪切破坏, 导致桩的承载力减小。同时, 超长桩应有一个较大的桩体弹性模量, 否则, 桩顶荷载难以向下传递。

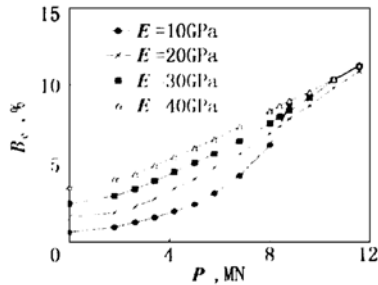
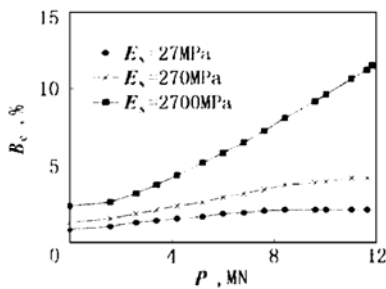
图7 B_e 与桩体弹性模量的关系Fig.7 Relation between B_e and elastic modulus of piled) B_e 与桩端土层压缩模量 E_s 的关系

图8给出的是桩长为65m的桩的 B_e 与桩端土层压缩模量的关系。可以看出, 随着桩端土层的压缩模量增大, 桩端阻力增大; 对于超长桩, 桩端阻力与桩顶荷载之比一般小于15%。

图8 B_e 与桩端土层压缩模量的关系Fig.8 Relation between B_e and constrained modulus of soil under the pile tip

2) 桩端沉降

为研究桩顶沉降与桩端沉降之间的关系, 定义 S_e 为桩端沉降与桩顶沉降之比。

a) S_e 与桩长 L 的关系

图9给出的是 S_e 与桩长的关系。随着桩长增加, 桩顶沉降组成由桩端沉降为主逐渐转变为以桩身压缩为主。可见桩长对控制建筑物的沉降有着重要的作用。

b) S_e 与桩径 D 的关系

图10给出的是桩长为65m的桩在不同的桩径条件下, S_e 与桩径的关系。随着桩径的减小, S_e 上升速度加快。对于超长桩, 桩径较小不易于桩顶荷载的传递。

c) S_e 与桩体弹性模量 E 的关系

图11给出的是桩长为65m桩的 S_e 与桩体弹性模量的关系。随着桩体弹性模量的增大, 桩端沉降量增

大, 桩顶荷载得以向下传递。对于超长桩, 在相同的桩顶荷载下其 S_e 明显大于 B_e 。

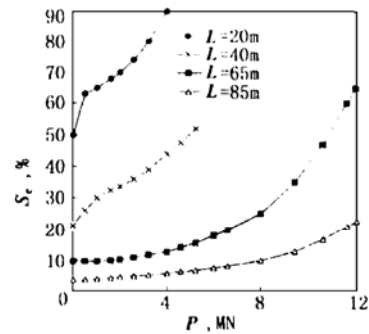
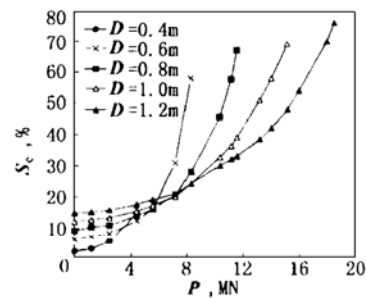
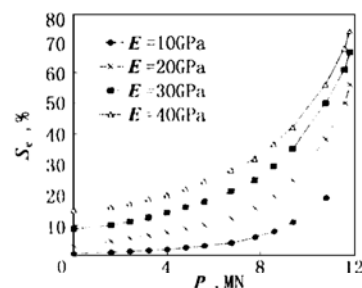
图9 S_e 与桩长的关系Fig.9 Relation between S_e and pile length图10 S_e 与桩径的关系Fig.10 Relation between S_e and pile diameter图11 S_e 与桩体弹性模量的关系Fig.11 Relation between S_e and elastic modulus of piled) S_e 与桩端土层压缩模量 E_s 的关系

图12给出的是桩长65m的桩的 S_e 与桩端土层压缩模量的关系。随着桩端土层压缩模量的增大, S_e 减小, 对于超长桩, 相同的桩顶荷载下其 S_e 明显大于 B_e 。工作荷载下, 超长桩的桩顶沉降仍以桩身压缩为主。

4 工程实例

浦东某大厦桩基采用钢管桩, 桩入土深度78m, 桩截面为 $\phi 914.4\text{mm} \times 20\text{mm}$, 现根据上述计算方法对此进行计算分析, 并与现场静载试验的测试结果进行对比。

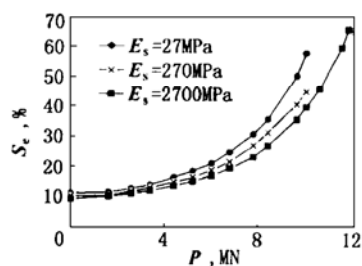
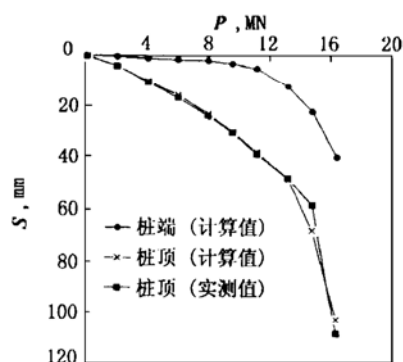
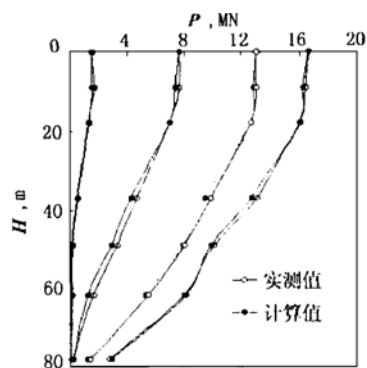
图 12 S_e 与桩端层压缩模量的关系Fig. 12 Relation between S_e and constrained modulus of soil under the pile tip图 13 $P-S$ 曲线 (计算和静载试验)Fig. 13 $P-S$ curve (calculated and measured)

图 14 计算的桩身轴分布

Fig. 14 Calculated axial load of pile

从图 13, 14 可以看出, 用荷载传递法和 Geddes 解相结合的混合法分析超长桩的荷载传递机理具有一定的合理性。在桩顶荷载较小的情况下, 桩侧摩阻力所产生的桩端沉降很小, 在极限荷载下桩侧摩阻力所产生的桩端沉降则较大, 约是桩端总沉降的 50%, 极限荷载下的桩端阻力是桩顶荷载的 15% 左右。对于超长桩其桩顶沉降主要为桩身压缩量, 桩顶以下 0.5 倍桩长范围内的桩侧摩阻力较大, 不论从提高承载力还是从减小沉降量的愿望出发, 都应提高桩体上半部的刚度, 如对钢管桩的上半部采用灌注砼等措施以提高桩身强度。

5 结 论

通过上述讨论, 软土地区超长桩的荷载传递机理具有下列特征:

1) 桩顶沉降对超长桩桩侧摩阻力的发挥有较大的影响, 超长桩的承载力应以桩顶沉降控制来取值。

2) 工作荷载下, 超长桩的桩端阻力与桩顶荷载之比小于 10%, 极限荷载下, 其值小于 20%。

3) 工作荷载下, 桩顶沉降以桩体压缩为主, 随着桩顶荷载增大, 桩顶沉降由以桩体压缩为主逐渐转向以桩端沉降为主。

4) 工作荷载下, 超长桩为纯摩擦桩或端承摩擦桩。

在本文编写过程中, 曾得到导师、同济大学教授赵锡宏先生, 顾问导师、华东建筑设计院许惟阳先生的指导, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- 1 刘金砺. 桩基础设计与计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 95 ~ 106.
- 2 陆培俊. 关于土的变形计算. 同济大学学报, 1997, 25 (1): 39 ~ 45.
- 3 阳吉宝. 超长桩荷载传递机理与桩箱 (筏) 基础优化设计研究 [博士学位论文]. 同济大学, 1996.