

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.05.056

考虑桩基极限沉降深度的荷载传递模型的研究

何学会¹, 倪浩², 董林兵²

[1.浙江育才工程项目管理咨询有限公司, 浙江 宁波 315040; 2.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 荷载传递法广泛运用于桩基承载力和沉降分析。通过理论公式推导, 在传统模型上考虑桩径的影响, 并引入沉降计算深度概念, 建立考虑桩基极限沉降深度的荷载传递模型, 以此分析分层厚度(k)和应力比(η)对沉降计算精度的影响。研究发现: 当桩端下土层压缩模量变小时, 需要采用更小的分层厚度; 应力比的设定对极限沉降深度计算有着明显的影响, 若在实际工程应用中主要关注点为桩顶沉降, 则根据压缩层压缩模量选取合适的应力比参数, 若关注点为极限沉降深度, 则尽量减小应力比取值。

关键词: 极限沉降深度; 荷载传递法; 分层厚度; 应力比

中图分类号: U443.15

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)05-0239-05

0 引言

荷载传递法被广泛运用于桩基承载力和沉降分析。袁振^[1]通过理论推导得到桩端桩侧均为三折线传递函数的 $P-S$ 曲线, 并对桩端条件进行了分析; 万志辉^[2]根据现场灌注桩静载荷试验, 拟合得到桩侧阻力-桩土相对位移和桩端阻力-桩土相对位移的荷载传递函数, 分析了超厚细砂地层大直径桩荷载特性的规律; 房凯^[3]对桩端和桩侧采用双曲线的荷载传递模型, 给出了后注浆荷载-沉降曲线的计算方法。这一类研究对桩端阻力-沉降曲线以及桩侧阻力-沉降曲线均采用荷载传递模型刻画, 这样的作法虽也能较好地拟合场地数据, 但其本质上忽略了土体的连续性^[4]。为解决这一问题, 阳吉宝^[5]提出了耦合荷载传递模型与 Mindlin 解迭代计算的混合法, 并成功运用到现场静载荷试验; 万志辉^[6]将混合算法运用到后压浆灌注桩, 通过对比发现考虑土体连续性的荷载传递法比原方法安全可靠。

因此, 本文在混合求解法基础上, 继续优化模型, 主要包括: 耦合考虑桩径影响的 Mindlin 解^[7], 凸显模型的物理意义; 引入沉降计算深度的概念^[8], 通过分层厚度(k)和应力比(η)计算桩基的极限影响深度(Z_n), 得出桩基的 $P-S$ 曲线和 $P-Z_n$ 曲线, 进而分析桩端条件对桩基承载力和沉降的影响。

收稿日期: 2023-08-09

作者简介: 何学会(1965—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事建筑工程、岩土工程等项目技术咨询与监理管理工作。

1 模型建立与迭代求解

荷载传递法现广泛应用于单桩承载力分析以及沉降特性研究中, 其基本原理是将桩视为离散的小段单元(见图 1), 每段单元的侧摩阻力和桩剪切位移量存在一一对应关系。传递函数法的基本微分方程为:

$$\frac{d^2 s(z)}{dz^2} - \frac{U}{EA} \tau(z) = 0 \quad (1)$$

式中: $s(z)$ 为深度 z 处的位移量; $\tau(z)$ 为深度 z 处的桩侧摩阻力; A 为桩身界面面积; E 为桩身土弹性模量; U 为桩截面周长, 等于 $U = \pi d$ 。

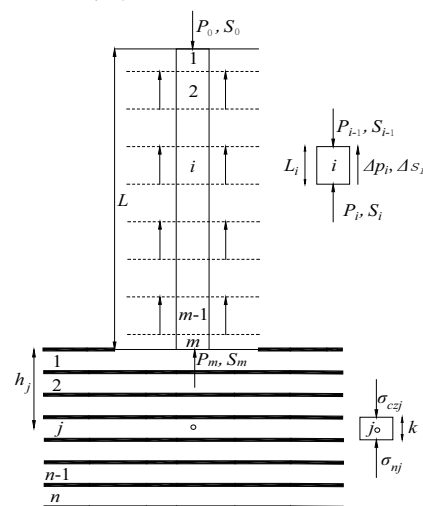


图 1 荷载传递法模型示意图

1.1 轴线方向考虑桩径影响的 Mindlin 解

传统的传递函数模型假定桩侧任一点的位移只与该点的侧摩阻力有关, 这样的做法忽略了土体连续性, 因此, 文献^[5]提出将 Mindlin 解与荷载传递法耦合联立求解, 现《建筑桩基技术规范》为解决应力集

中问题提出了均化应力系数法,其桩端和桩侧附加应力系数 I_p 和 I_{sr} 沿桩身轴线的解析式分别为:

$$I_p = \frac{l^2}{\pi g^2} g \frac{1}{4(1-\mu)}$$

$$\left\{ \begin{aligned} & 2(1-\mu) - \frac{(1-2\mu)(z-l)}{\sqrt{r^2+(z-l)^2}} - \\ & \frac{(1-2\mu)(z-l)}{z+l} + \frac{(1-2\mu)(z-l)}{\sqrt{r^2+(z+l)^2}} - \frac{(z-l)^3}{[r^2+(z-l)^2]^{3/2}} + \\ & \frac{(3-4\mu)z}{z+l} - \frac{(3-4\mu)z(z+l)^2}{[r^2+(z+l)^2]^{3/2}} - \frac{l(5z-l)}{(z+l)^2} + \\ & \frac{l(z+l)(5z-l)}{[r^2+(z+l)^2]^{3/2}} + \frac{6lz}{(z+l)^2} - \frac{6Lz(z+l)^3}{[r^2+(z+l)^2]^{3/2}} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$I_{sr} = \frac{l^2}{2\pi r} g \frac{1}{4(1-\mu)}$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{2(2-\mu)r}{\sqrt{r^2+(z-l)^2}} - \\ & \frac{2(2-2\mu)r^2+2(1-2\mu)z(z+l)}{r\sqrt{r^2+(z+l)^2}} + \frac{2(1-2\mu)z^2}{r\sqrt{r^2+z^2}} - \\ & \frac{4z^2[r^2-(1+\mu)z^2]}{r^2+(r^2+z^2)^{3/2}} - \frac{4(1+\mu)z(z+l)^3-4z^2r^2-r^4}{r[r^2+(r^2+z^2)]^{3/2}} - \\ & \frac{r^3}{[r^2+(z+l)^2]^{3/2}} - \frac{6z^2[z^4-r^4]}{r(r^2+z^2)^{3/2}} - \frac{6z[2r^4-(z+l)^5]}{r[r^2+(z+l)^2]^{3/2}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: μ 为地基土的泊松比; r 为桩身半径; L 为桩长; z 为计算应力点离桩顶的竖向距离。

桩端和桩侧各段阻力在计算应力点引起的附加应力 σ_{sp} 和 σ_{zsl} 分别为:

$$\sigma_{sp} = \frac{P_N}{A} I_p(L, r, z) \quad (4)$$

式中: L 为桩长; r 为半径; $z=h+L$ 其中 h_j 桩端下第 j 段土层离桩端的距离。

$$\sigma_{zsl} = \tau_i I_{sp}(L, r, z) \quad (5)$$

式中: τ_i 为桩侧第 i 段的侧摩阻应力; L_i 为第 i 段桩长; r 为半径; $z_i=h_j+(L_i+L_{i+1}+\dots+L_m)$ 即桩侧第 i 段桩顶离计算点 j 的竖向距离。

1.2 桩侧摩阻的计算过程

大量的实践案例表明:双曲线传递函数模型能较好地拟合场地实测地侧阻力-桩土位移曲线。因此,桩侧摩阻应力计算取下式:

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

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

第 i 段轴向荷载增量为:

$$\Delta p_i = L_i U_i \tau_i \quad (7)$$

第 i 段桩顶荷载为:

$$p_{i-1} = p_i + \Delta p_i \quad (8)$$

1.3 桩端位移的计算过程

桩端位移用分层总和法计算,即

$$S_b = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_{nj}}{E_{sj}} k_j \quad (9)$$

$$\sigma_{nj} = \sigma_{sp} + \sum_{i=1}^m \sigma_{sd} \quad (10)$$

式中: σ_{nj} 、 E_{sj} 、 h_j 为第 j 层附加应力、土层压缩模量、土层厚度。

1.4 桩-土体系的迭代求解过程

在考虑场地工程地质条件的情况下,根据地层将桩身分成 m 段,编号依次为 $i=0,2,3,\dots,m$;为求解压缩层厚度,细化分层桩端下土层,共可分为 n 段,编号依次为 $j=1,2,3,\dots,n$ 。具体计算步骤为:

(1) 给定桩端下土层分段厚度 k ,将桩端下土层划分为 n 层。根据地层资料,将单桩桩侧分为 m 层。

(2) 附加应力计算点深度位于 $j=1$ 层中点。假定一个很小的桩端荷载 P_m ,根据假定的 P_m 和式(2) I_p 计算桩端应力,再带入式(8)计算桩端位移 S_b 。

(3) 假定第 m 段桩身位移为 S_m (初始值假定为 S_0),根据式(7)和式(8),得到第 m 段侧阻增量为 Δp_m 和第 m 段桩顶荷载 p_{m-1} 。

(4) 第 m 段中点的压缩量可表示为:

$$\Delta S_m = (p_m + \Delta p_i / 2) L_i / (EA) \quad (11)$$

对应荷载增量:

$$\Delta p'_m = L_m U \tau(S_m + \Delta S_m / 2) \quad (12)$$

接着计算可得到位移增量:

$$\Delta S'_m = (P_m + \Delta p'_i / 2) L_i / (EA) \quad (13)$$

(5) 迭代计算步骤(3)和(4),满足 $|\Delta S_m - \Delta S'_m| < 10^{-6}$ 或者 $|\Delta P_m - \Delta P'_m| < 10^{-6}$,实现计算收敛,得到第 m 段桩顶荷载和沉降:

$$P_{m-1} = P_m + \Delta P_m \quad (14)$$

$$S_{m-1} = S_m + \Delta S_m \quad (15)$$

(6) 按照上述步骤(3)~(5),直至算到第 1 段,得到桩各段的桩顶荷载和桩顶沉降。

(7) 由式(7)得到各段桩侧摩阻力,利用式(3)得到桩侧各段侧摩阻引起的应力计算点附加应力,再由式(10),得到应力计算点的附加应力和 σ_{nj} 。

(8) 将 σ_{nj} 带入式(8),得到桩端沉降 S_b ,重复计算步骤(3)~(7),得到新的桩顶荷载和桩顶沉降,若已知桩顶荷载,重复计算(3)~(8),直至计算值与实测值相差很小。

(9) 桩端下第 j 层土层土体自重为:

$$\sigma_{csj} = \gamma z \quad (16)$$

式中: γ 为土体重度, kN/m^3 。实际情况下土性往往有较大差异,可按地层进行叠加计算。

应力比 η 为:

$$\eta = \sigma_{nj} / \sigma_{csj} \quad (17)$$

若计算得到的应力比大于预设值 η , 则附加应力计算点位于 $j+1$ 层重点, 并重复计算步骤(2)~(9), 得到满足应力比 η 的桩基沉降极限深度 z_n 以及对应情况下桩端荷载、侧摩阻分布以及桩顶沉降。

2 参数选取分析

在计算程序中, 分层厚度和应力比是人为给定的经验参数, 因此, 会对桩顶沉降的计算精度产生影响, 本节探讨不同桩端条件下分层厚度和应力比对

$P-S$ 和 $P-Z_n$ 曲线的影响。桩身参数为: 桩长为 50 m, 直径为 1 m, 重度为 25 kN/m^3 , 桩身弹性模量为 35 GPa, 共等分为 5 层, 每层设为 60, 为 2。桩端条件为: 桩端土层的分层厚度为 k , 重度为 18 kN/m^3 , 土层压缩模量考虑 30、20、10、5 MPa 四种情况。

2.1 分层厚度的影响

图 2 给出了分层厚度对 $P-S$ 曲线的影响。对比四种压缩模量情况, 可知随着桩端压缩模量变小, 桩顶沉降量变得越大, 并且在压缩模量较小的情况时, 大的分层厚度无法进行计算, 如当 E_s 为 10 MPa 时, k 为 2 m 无法得到结果, 当 E_s 为 5 MPa 时, k 为 1 m 同样无法计算出结果。因此, 当桩端下土层压缩模量变小时, 需要采用更小的分层厚度进行计算。

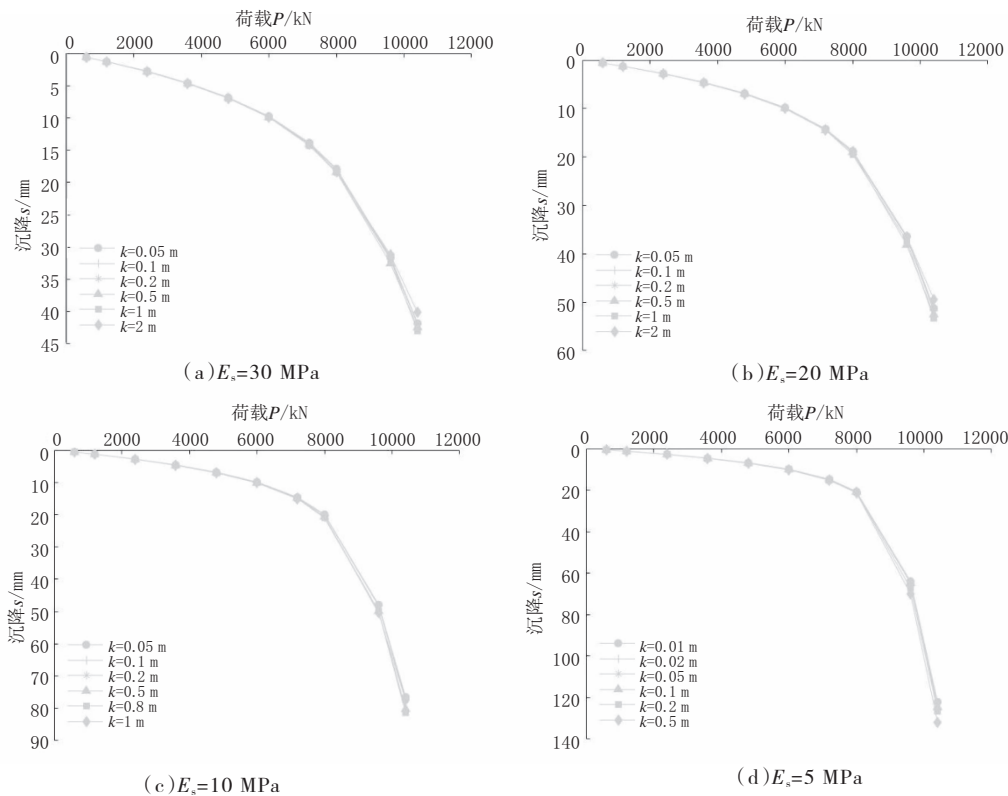


图 2 桩端单层土层不同分层厚度的 $P-S$ 曲线

图 3 给出了分层厚度对 $P-Z_n$ 曲线的影响。对比四种压缩模量情况, 极限计算深度变化幅度不大, 各荷载下 Z_n 分布在 51.5~52.5 m 深度, 因此, 极限沉降深度对桩端土压缩模量不敏感。同时, 在图 4 我们可以发现, 在荷载较小时 $P-Z_n$ 曲线存在水平段, 当分层厚度 k 越大, 水平段越长, 并且在 E_s 等于 30 MPa 和 20 MPa 的曲线中, 可以发现最后一级荷载 k 等于 1 m 对应的极限沉降深度大于 k 等于 2 m 对应的极限沉降深度, 这都说明了采用较大的分层厚度会无法准确计算极限沉降深度。

2.2 应力比的影响

图 4 给出了应力比对 $P-S$ 曲线的影响。随着压缩模量的变小, 四种压缩模量情况对应的沉降量均变大, 且应力比设定的越大, 计算得到的桩顶沉降量越小, 且随着压缩模量变小, 各应力比条件下达到最大荷载时沉降量之间的差别越来越大, 见表 1。因此, 当桩端土层压缩系数比较大的时候, 可以选用较大的应力比, 但当桩端土层压缩系数减小时, 相应的应力比也需要变小, 这样才能提高计算精确性。

图 5 给出了应力比对 $P-Z_n$ 曲线的影响。从图可

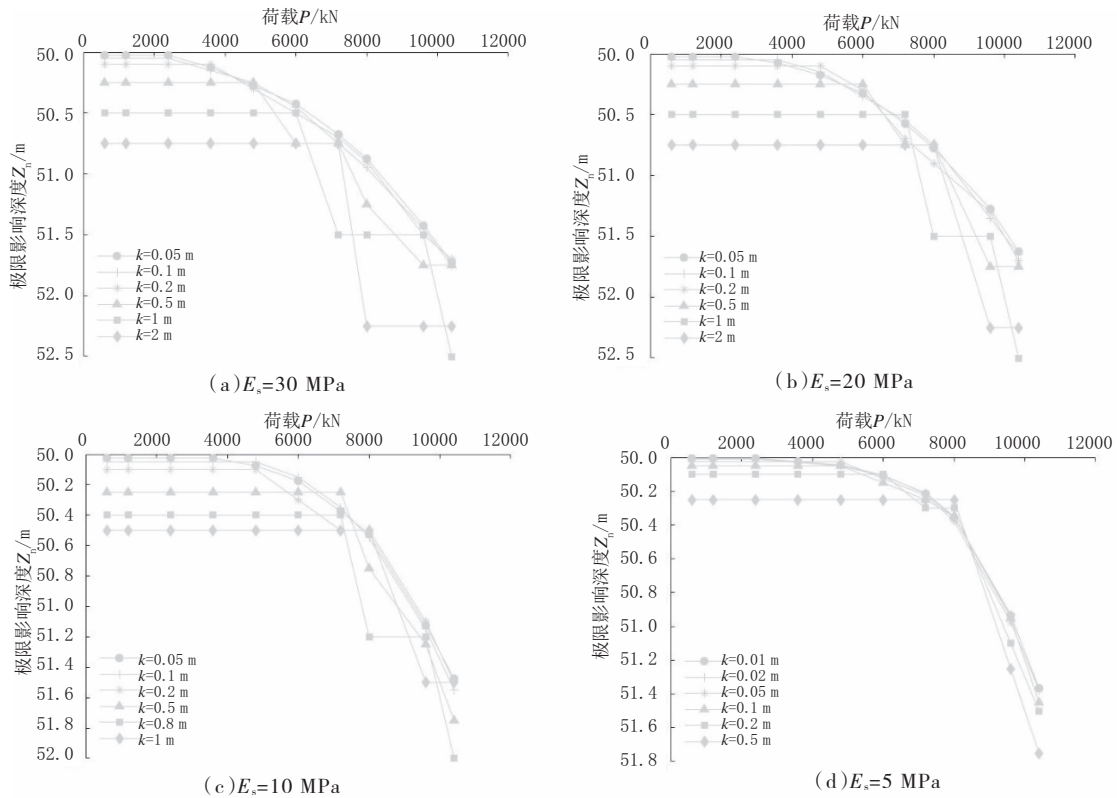


图3 桩端单层土层不同分层厚度的 $P-Z_n$ 曲线

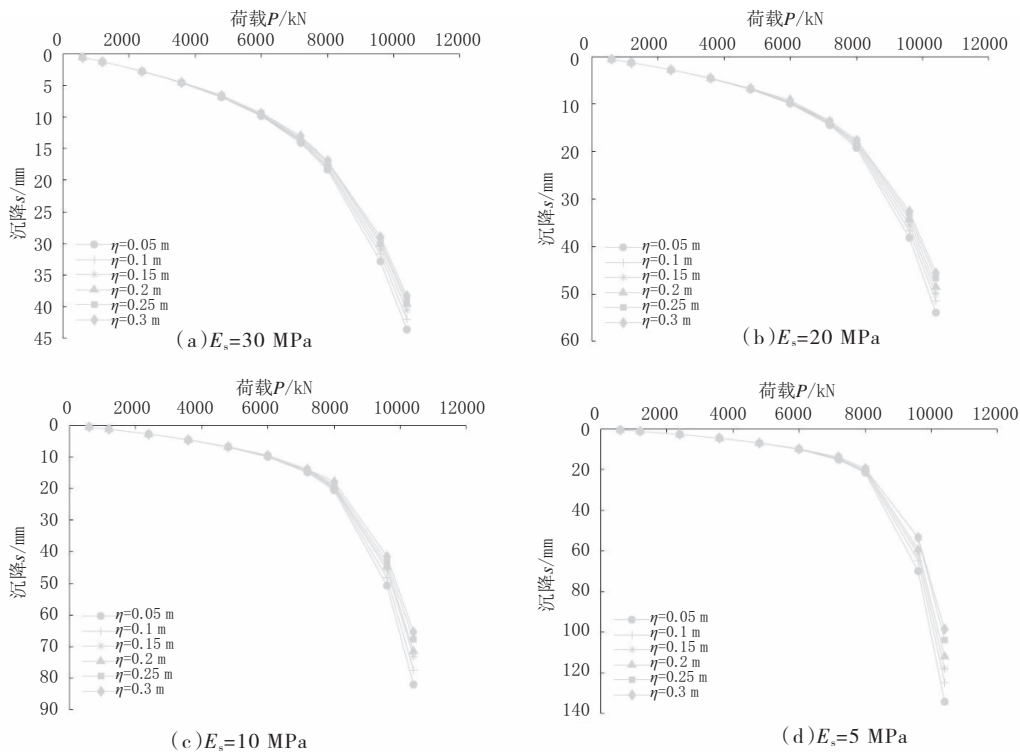


图4 桩端单层土层不同应力比的 $P-S$ 曲线

以发现:(1)当应力比设定的过大时,如为 0.3 时, $P-Z_n$ 曲线中会出现水平段,这会对计算结果带来不可忽略的影响。(2)各压缩模量情况下最大荷载对应的极限沉降深度结果相近,说明了荷载越大的情况下,极限沉降深度对压缩模量越不敏感。(3)应力比

的设定对极限沉降深度计算有着明显的影响,结合对图 5 的分析,若模型关注点为桩顶沉降量,则需要根据压缩模量选取合适的值,若计算结果关注点为极限计算深度,则根据计算能力尽可能减小应力比的选值。

表1 不同压缩模量情况下各应力比对应的沉降量表

E_s /MPa	$\eta_{0.3}$ 的沉降量 /mm	$\eta_{0.5}$ 的沉降量 /mm	差值 /mm
30	38.27	43.59	5.32
20	45.62	53.93	8.31
10	65.34	81.93	16.59
5	98.56	134.08	35.52

3 结语

- (1)通过考虑桩端压缩土层的分层厚度和应力比,可以建立考虑基桩极限沉降深度的荷载传递模型;
- (2)当桩端下土层压缩模量变小时,需要采用更小的分层厚度进行计算才能反映真实情况;
- (3)若在实际场地应用中主要关注点为桩顶沉

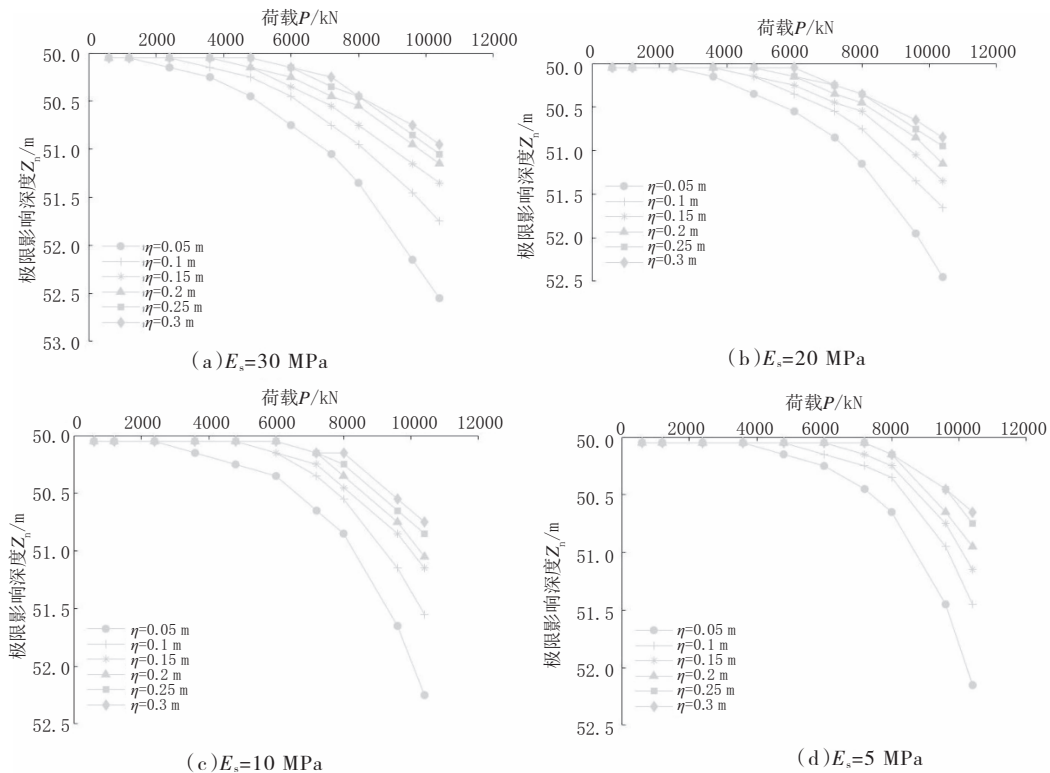


图5 桩端单层土层不同应力比的 P-Zn 曲线

降,则根据压缩层压缩模量选取合适的应力比参数;若关注点为极限沉降深度,则尽量减小应力比选值。

参考文献:

[1] 袁振,陈锦剑,王建华.桩端条件对灌注桩荷载传递特性的影响[J].岩土力学,2006,27(8):1398-1402.

[2] 万志辉,戴国亮,龚维明.超厚细砂地层大直径后压浆桩荷载传递计算与分析[J].岩土力学,2018,39(4):1386-1394.

[3] 房凯,张忠苗,刘志军,等.基于荷载传递法的后注浆桩荷载沉降关系预测[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(12):95-99.

[4] 张忠苗.桩基工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.

[5] 阳吉宝,钟正雄.超长桩的荷载传递机理[J].岩土工程学报,1998,20(6):108-112.

[6] 万志辉,戴国亮,龚维明,等.基于自平衡法后压浆灌注桩荷载传递函数的变化分析[J].土木工程学报,2017,50(8):98-104.

[7] 邱明兵,刘金砺,秋仁东,等.基于 Mindlin 解的单桩竖向附加应力系数[J].土木工程学报,2014,47(3):130-137.

[8] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com