

文章编号: 1007-2993(2024)05-0512-07

自平衡试桩理论解析转换方法及工程应用

杨迪¹ 白露² 桑润辉² 江杰²

(1. 中铁建设集团南方工程有限公司, 广东广州 511458; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

【摘要】 提出一种基桩承载力自平衡测试的解析转换方法, 采用有限差分法建立上、下段桩各微段控制方程, 通过编程求解上、下桩身各微段处的内力及变位量, 代入精确转换公式, 将自平衡试桩结果转换为类似传统静载测试荷载 (Q)-位移 (s) 曲线形式, 并求解其极限承载力。结合广西来宾裕达梧桐苑 3 根钻孔灌注桩自平衡法测试工程, 应用该解析转换方法对测试结果进行转换。研究表明, 3 根试桩内力均表现为离加载端较近的土层承担的荷载较大, 轴力由加载端向两端衰减程度逐渐减小, 且侧摩阻力变化特性呈现双曲线分布。就单桩承载力而言, 简化转换方法偏于保守, 而解析转换方法考虑了桩侧各层土的性质差异, 相比精度可提高约 12%。该解析转换方法能准确地反映出上、下段桩身内力分布规律以及桩侧土层承载特性, 且可以高效准确地实现承载力的转换, 在基桩承载力自平衡测试工程领域具有广泛应用前景。

【关键词】 自平衡试桩; 解析转换法; 工程应用; 极限承载力

【中图分类号】 TU473.1

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.002

Analysis Conversion Method of Self-balanced Test Pile and Engineering Application

Yang Di¹ Bai Lu² Sang Runhui² Jiang Jie²

(1. China Railway Construction Group South Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511458, Guangdong, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

【Abstract】 An analytical conversion method for self-balanced test of foundation pile was proposed. The finite difference method was used to establish the control equations for each micro-section of the upper and lower piles, and the internal forces and displacements at each micro-section of the upper and lower piles can be obtained by programmed solution, which can be substituted into the exact conversion formula to convert the self-balanced test pile results into the form of the load (Q) - displacement (s) curves similar to those of the traditional static test and to solve the ultimate bearing capacity. This analytical conversion method was applied to convert the test results in conjunction with the test project of self-balanced method for three drilled piles in Yuda Wutong Court, Laibin, Guangxi. The internal forces of the three test piles all show that the soil layer closer to the loading end bears a larger load, the axial force gradually decreases from the loading end to both ends, and the change characteristics of the lateral resistances show a hyperbolic distribution. In terms of single pile bearing capacity, the simplified conversion method is conservative, while the analytical conversion method takes into account the differences in the characteristics of the soil layers on the pile side, and the accuracy can be improved by about 12% compared to the simplified conversion method. The analytical conversion method can accurately reflect the distribution law of internal force of upper and lower pile body and the bearing characteristics of soil layer on the pile side, and can efficiently and accurately realize the conversion of bearing capacity, which is widely used in the field of self-balanced test engineering of pile foundation bearing capacity.

【Key words】 self-balanced test pile; analytical conversion method; engineering application; ultimate bearing

0 引言

自平衡试桩法是一种高效领先的基桩承载力测试方法, 相比传统的堆载法和锚桩法, 不需要压重平

台或锚桩反力装置, 测试成本较低, 并节约了时间和人力, 被广泛应用于实际项目中评估和测试单桩的承载力^[1-3]。国内外学者近年来对自平衡试桩法进行了

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52068004); 广西重点研发计划项目(AB19245018)

作者简介: 杨迪, 男, 1991年生, 汉族, 河南南阳人, 学士, 工程师, 主要从事城市地下工程。E-mail: 1623189424@qq.com

通讯作者: 江杰, 男, 1979年生, 汉族, 湖北麻城人, 博士, 教授, 主要从事复杂受力环境的桩基础理论与应用方面的教学与研究工作。E-mail: jie_jiang001@126.com

广泛的研究, 1989 年 Osterberg^[4] 率先应用该方法进行测试, 而后自平衡试桩法在美国和日本等国得到了广泛推广和应用。在国内, 李广信引进了这项技术, 并由龚维明开始了自平衡试桩法的推广和应用^[5]。

将测试结果转换成类似于传统静载试验的结果形式是这项技术成果应用的关键问题。目前, 工程中主要采用精确法和简化法^[6] 等来实现结果的等效转换。其中, 简化转换法主要根据转换系数实现对上段桩的转换, 在行业规范^[6] 中也未针对层状地基或特殊土质的转换系数准确取值进行规定。而精确转换法则需要在试桩上设置传感器, 用来测量桩身不同点的内力和位移, 增加了试桩的工作量^[7-8]。另外, 一些学者^[9] 采用三折线模型来假定荷载传递规律, 并推导出在层状地基中上、下段桩的荷载-位移函数解析解, 然后, 拟合各层土的弹塑性发展规律参数, 并结合各土层间边界条件来得到转换曲线, 该方法需要拟合较多的参数, 导致拟合误差较大。

关于自平衡法桩侧荷载传递机理的研究日益深入, Seol 等^[10-11] 提出一种考虑耦合摩阻力与桩端位移影响的荷载传递方法, Niazi 等^[12] 提出了预测自平衡荷载-位移曲线刚度折减模型的方法。此外, Kim 等^[13] 在进行深厚土层中 PHC 桩的应变测量时, 考虑了残余荷载分布等情况, 并分析了自平衡试桩荷载传递规律。Lee 等^[14] 考虑灌注桩的压缩, 提出自平衡试验位移由混凝土弹性压缩和桩体沉降组成, 得到了等效桩身荷载-桩顶沉降曲线。Mission 等^[15] 提出了一种考虑弹性桩缩短的等效荷载-沉降曲线的修正方法, 并用实测的上、下段桩荷载-沉降曲线进行验证。以上研究成果主要关注桩侧荷载传递函数分布规律方面, 然而对于如何将自平衡法测试结果进行等效转换的问题, 仍需要进一步研究。

本文基于自平衡试桩的加载模型, 假定桩侧荷载传递符合 Kraft 模型^[16], 并考虑了上段桩自重的抵抗作用。采用有限差分法, 建立了桩身单元加载位移控制方程, 编程求解出上、下段桩主机加载过程中各微段处的内力和变位量, 将计算结果代入精确转换公式中, 再采用等荷载法进行叠加, 得到传统静压试验的荷载-位移曲线, 并计算极限承载力。最后, 将该转换方法应用于来宾裕达梧桐苑 3 根钻孔灌注自平衡试桩测试工程, 并与简化转换方法进行对比验证。

1 自平衡试桩理论解析方法推导

1.1 自平衡试桩加载机理

自平衡试桩法受力模型见图 1, 对微分单元受力

静力平衡条件:

$$T_{i+1} - T_i + G_i + Q_i - K_{z,i}w_i = 0 \quad (1)$$

式中: T_i 为微单元轴向力; G_i 为微单元自重; Q_i 为微单元所受外力; $K_{z,i}$ 为桩土剪切刚度系数, 与侧摩阻力 τ_i 有关; w_i 为单元 i 的竖向位移。

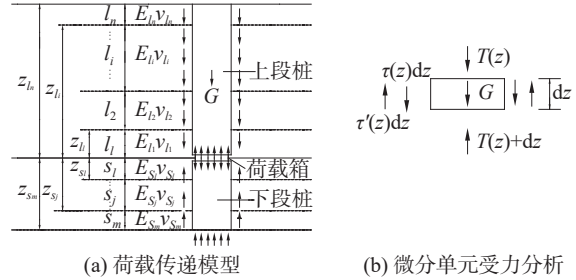


图 1 自平衡试桩加载示意图及微分单元受力模型

根据江 杰等^[17-18] 膨胀土浸水隆起产生的桩侧负摩阻力研究, 认为桩侧负摩阻力荷载传递函数可采用 Kraft 模型。因此, 假设上下段桩侧与桩土相对位移关系均符合 Kraft 荷载传递函数形式(见图 2)。

$$\tau_{v,i} = \frac{w_i G_s}{r_0 \ln \left(\frac{r_m / r_0 - \psi}{1 - \psi} \right)} \quad (2)$$

式中: G_s 为桩侧土剪切模量, $\psi = \tau_{v,i} R_f / \tau_f$; R_f 为应力-应变曲线拟合常数, 可取 0.9~1.0; τ_f 为桩侧极限摩阻力; r_0 为桩的截面半径, r_m 为桩侧土剪切变形可忽略的范围。可得桩侧土的剪切刚度为:

$$K_{z,i} = \frac{2\pi G_s}{\ln \left(\frac{r_m / r_0 - \psi}{1 - \psi} \right)} \quad (3)$$

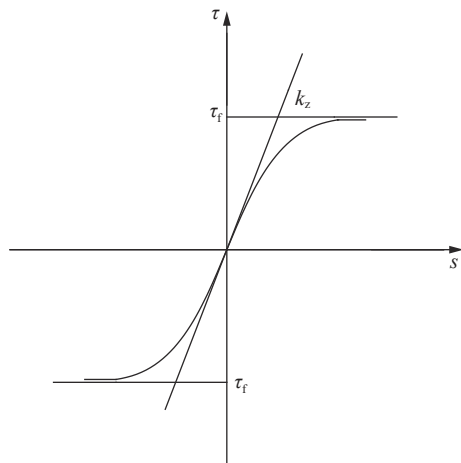


图 2 Kraft 桩土界面模型示意图

1.2 自平衡上段桩荷载传递计算

根据各单元轴力与变形的有限差分关系:

$$T_i = \frac{(E_p A_p)_i}{\Delta L} (w_i - w_{i-1}) \quad (4)$$

$$T_{i+1} = \frac{(E_p A_p)_{i+1}}{\Delta L} (w_{i+1} - w_i) \quad (5)$$

将式(2)、式(3)、式(4)、式(5)代入式(1),整理可得节点*i*的控制方程为:

$$\frac{(E_p A_p)_i}{\Delta L} w_{i-1} - \left[\frac{(E_p A_p)_i + (E_p A_p)_{i+1}}{\Delta L} + K_{z,i} \right] w_i + \quad (6)$$

$$\frac{(E_p A_p)_{i+1}}{\Delta L} w_{i+1} + K_{z,i} w_i = -G_i - R_i$$

做以下代换,令

$$b_i = \frac{(E_p A_p)_i}{\Delta L} \quad (7)$$

$$c_i = - \left[\frac{(E_p A_p)_i + (E_p A_p)_{i+1}}{\Delta L} + K_{z,i} \right] \quad (8)$$

$$d_i = \frac{(E_p A_p)_{i+1}}{\Delta L} \quad (9)$$

$$e_i = K_{z,i} w_i \quad (10)$$

$$p_i = -G_i - R_i \quad (11)$$

可得

$$\left(\begin{array}{cccc} c_0 & d_0 & & \\ b_1 & c_1 & d_1 & \\ & \dots & \dots & \dots \\ & & b_i & c_i & d_i \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & b_{k-1} & c_{k-1} & d_{k-1} \\ & & & & & b_k & c_k & d_k \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} w_0 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_i \\ \vdots \\ w_{k-1} \\ w_k \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} p_0 \\ p_1 \\ \vdots \\ p_i \\ \vdots \\ p_{k-1} \\ p_k \end{array} \right) \quad (18)$$

1.3 自平衡下段桩荷载传递计算

对于下段桩,顶部荷载箱部*j=1*处有

$$\frac{(E_p A_p)_1}{\Delta L} (-w_0 + w_1) = F_n \quad (19)$$

对于下段桩,桩底可以近似看作在均匀弹性地层表面上作用的刚性压块,桩端土体简化为弹簧,其刚度可以用 Randolph^[9]提出的公式:

$$K_{bz} = \frac{P_b}{w_b} = \frac{DE_b}{1-\nu_b^2} \left(1 + 0.65 \frac{D}{h_b} \right) \quad (20)$$

式中: E_b , ν_b 桩端土体的弹性模量与泊松比; h_b 为桩端到基岩的深度。

$$b_{i-1} w_{i-1} + c_i w_i + d_{i+1} w_{i+1} + e_i w_i = p_i \quad (12)$$

假定在荷载箱安装在 $i=k(k \leq n)$, 当 $k=n$ 表示荷载箱安装在桩底部位,在上段桩顶部位有 $Q_1=0$,即:

$$\frac{(E_p A_p)_1}{\Delta L} (-w_0 + w_1) = 0 \quad (13)$$

在上段桩底部荷载箱 $i=k$ 处, $Q_k=-F$, 即

$$\frac{(E_p A_p)_k}{\Delta L} (-w_{k-1} + w_k) = -F_n \quad (14)$$

式中: F 为荷载箱加载大小值。

将式(12)写成矩阵的形式为

$$[K_z + K_c] \{w\} = \{p_z\} \quad (0 \leq i \leq k) \quad (15)$$

式中: $[K_z]$ 为桩身竖向刚度矩阵; $[K_c]$ 为上段桩引起的附加刚度矩阵; $\{w\}$ 为上段桩身单元节点轴向位移列向量,可表示为

$$\{w\} = \{w_0 \ w_1 \ \dots \ w_{k-1} \ w_k\}^T \quad (16)$$

$\{p_z\}$ 为上段桩外部荷载列向量,可表示为

$$\{p_z\} = \{G_i\} + \{Q_i\} = \{\gamma U \Delta L_1 \ \gamma U \Delta L_2 \ \dots \ \gamma U \Delta L_{k-1} \ -F_n + \gamma U \Delta L_k\}^T \quad (17)$$

上段桩控制方程可以表示为

$$\frac{(E_p A_p)_n}{\Delta L} (-w_{n-1} + w_n) = K_{bz} w_n \quad (21)$$

式中: $\{w\}$, $\{p_z\}$ 为下段桩身单元节点轴向位移列向量和外部荷载列向量,可以表示为

$$\{w\} = \{w_1 \ w_2 \ \dots \ w_j \ \dots \ w_n\}^T \quad (22)$$

$$\{p_z\} = \{G_j\} + \{Q_j\} = \left\{ F_n \ 0 \ \dots \ 0 \ -\frac{dE_b}{1-\nu_b^2} \left(1 + 0.65 \frac{d}{h_b} \right) w_n \right\}^T \quad (23)$$

对于下段桩将式(18)写成矩阵的形式为

$$[K_z] \{w\} = \{p_z\} \quad (1 \leq j \leq n) \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} c_1 & d_1 & & & & \\ b_2 & c_2 & d_2 & & & \\ & \dots & \dots & \dots & & \\ & & b_j & c_j & d_j & \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & b_{n-1} & c_{n-1} & d_{n-1} \\ & & & & & b_n & c_n & d_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_j \\ \vdots \\ w_{n-1} \\ w_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_j \\ \vdots \\ p_{n-1} \\ p_n \end{Bmatrix} \quad (25)$$

对上、下段桩建立独立矩阵方程,对上述解析理论利用 MATLAB 编程求解可得到上、下段桩在各级荷载箱加载下沿桩身的竖向位移、轴力、侧摩阻力。

2 转换过程

2.1 精确转换原理

图 3 表示精确转换法计算原理图,将桩身分成 n 段,荷载箱处作为起点,对于任意一微段,通过计算得到该点的内力 $Q(i)$ 和位移量 $s(i)$ 的值。

$$Q(i) = Q(0) + \sum_{m=1}^i q(m) \{U(m) + U(m+1)\} q(m) / 2 \quad (26)$$

$$s(i) = s(0) + \sum_{m=1}^i \frac{Q(m) + Q(m+1)}{E_p(m)A_p(m) + E_p(m+1)A_p(m+1)} h(m) \quad (27)$$

式中: $Q(0)$ 为 $i=0$ 处桩的轴向力, kN, 即荷载箱加载值; $s(0)$ 为 $i=0$ 处桩的位移, m, 即荷载箱向上变位量; $q(m)$ 为 m 处的桩侧摩阻力, kPa。

上段桩等效转换桩顶 $i=n$ 时的荷载和位移为

$$Q(n) = Q(0) + \sum_{m=1}^n q(m) \{U(m) + U(m+1)\} q(m) / 2 \quad (28)$$

$$s(n) = s(0) + \frac{h(n)}{E_p(n)A_p(n) + E_p(n-1)A_p(n-1)} \cdot \left\{ 2Q(0) + \sum_{m=1}^{n-1} q(m) [U(m) + U(m+1)] h(m) + q(n) [U(n) + U(n-1)] h(n) / 2 \right\} \quad (29)$$

2.2 转换方法

利用等荷载法将上段桩的等效转换结果和下段桩承载力进行叠加,得到整段桩的承载力。

$$Q_u = Q_u'_{\text{上}} + Q_u'_{\text{下}} \quad (30)$$

式中: $Q_u'_{\text{上}}$ 为上段桩荷载箱加载极限承载力转换值; $Q_u'_{\text{下}}$ 为下段桩荷载箱加载极限承载力。

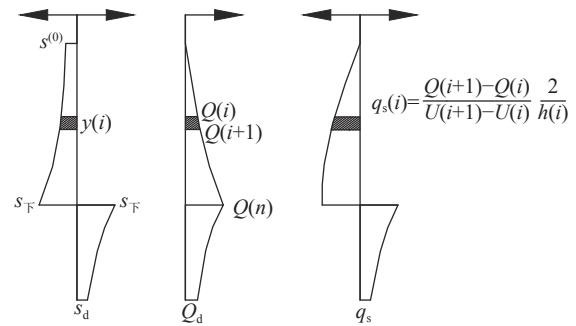


图 3 精确转换法原理

3 方法应用与分析

根据广西来宾裕达梧桐苑工程项目,通过自平衡试桩法对该项目钻孔灌注桩基础三根试桩极限承载力进行测试,利用上述自平衡试桩解析转换方法和简化转换(转换系数法)对加载测试数据进行转换,分析各试桩的承载能力,并对每级加载下桩身轴力、侧摩阻力内力变化特性进行分析。结合实际工程数据,对自平衡试桩解析转换方法在实际工程中的适用性和准确性进行研究。

3.1 工程概况

根据现场钻探揭露深度范围内土层性质和室内土工试验结果,结合区域地质资料进行综合分析,场地土层的分布主要为黏性土和黑云母花岗岩,土层性质分布见表 1,土层分布情况示意图见 4。

3.2 自平衡加载测试方法

E32#、E35#、E36# 三根钻孔灌注桩桩体参数如表 2 所示,自平衡静载试验加载时采用了慢速法加载,共分 10 级进行加载,每级荷载为预计极限荷载的 1/10。在每级加载完成后,当压力传感器仪表盘上数据稳定后,记录荷载数据和位移数据。每级荷载作用下持续了 1 h。在此期间,每隔 5, 10, 15, 30, 45, 60 min 分别读取一次数据。在每级加载作用后的 30 min 内,达到了稳定后进行下一级的加载。根据

表1 土层物理力学性质参数

自上而下土层类别	厚度 h/m	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	重度 γ/(kN·m ⁻³)	泊松比 ν	弹性模量 E/MPa
软塑状黏土	3.50	38	18	19.5	0.38	5.80
黏土	4.00	40	18	19.3	0.35	6.34
砾质黏性土	5.30	38	37	23.3	0.305	6.84
全风化黑云母花岗岩	2.80	14.2	37	23.3	0.25	10.4
强风化黑云母花岗岩	5.36	16.5	37	22.5	0.24	12.3
中等风化黑云母花岗岩	7.94	16.5	36	23.1	0.19	16.1

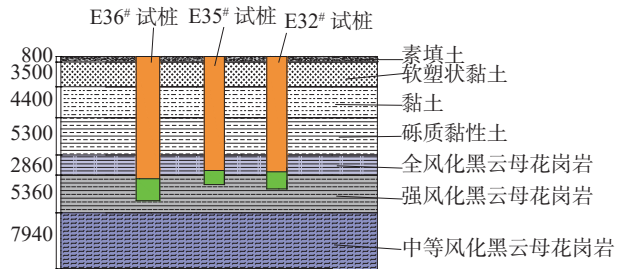
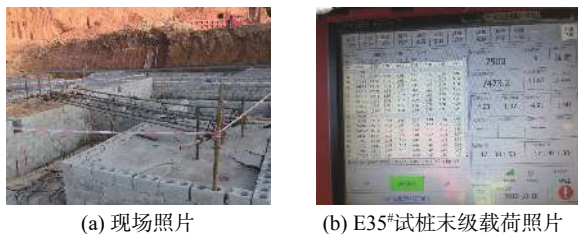


图4 试验土层分布示意图(单位:mm)

《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》(JGJ/T 403—2017)的要求,当荷载或位移达到标准时结束加载。现场自平衡法静载荷载试验桩测试见图5。

表2 桩体参数

桩号	桩长L/m	荷载箱距桩底距离s/m	桩径d/cm	混凝土等级	重度γ/(kN·m ⁻³)	弹性模量E/MPa	单桩竖向抗压承载力特征值/kN
E32#	18.82	1.2	120	C35	25	3.15×10 ⁴	7200
E35#	18.21	1.0	120	C35	25	3.15×10 ⁴	7200
E36#	20.50	1.6	120	C35	25	3.15×10 ⁴	7200



(a) 现场照片 (b) E35#试桩末级荷载照片

图5 E35#静载试验桩测试图

3.3 测试结果分析

3.3.1 试桩 Q-s 曲线

E32#、E35#、E36#三根自平衡法静载试验检测结果如表3所示,荷载-沉降(Q-s)曲线和沉降-时间对数(s-lgt)曲线见图6,利用简化转换法(转换系数λ取0.83)计算三根试桩的极限承载力均大于其基桩承载力特征值。

表3 自平衡法静载试验承载力检测结果

检测桩号	试验上板最大位移/mm	试验下板最大位移/mm	最大试验荷载/kN	加载时长/min	极限承载力计算/kN	单桩承载力特征值2倍/kN
E32#	9.26	3.23	2×7500	1170	14676.19	≥2×7200
E35#	4.41	2.00	2×7400	1200	14566.67	≥2×7200
E36#	8.83	7.63	2×7500	1320	14686.43	≥2×7200

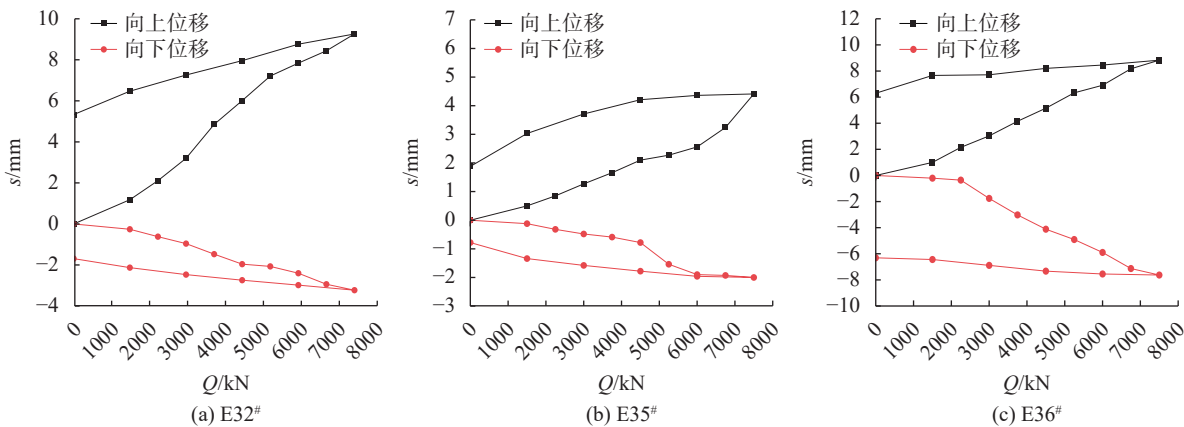


图6 各试桩两种加载 Q-s 曲线图

3.3.2 试桩内力分析

针对 E32#、E35#、E36#三根钻孔灌注桩在自平衡加载工况下的情况,通过自平衡理论解析计算结果,

得出了荷载箱在各级加载情况下,各试桩身各点处的轴力(见图7)。

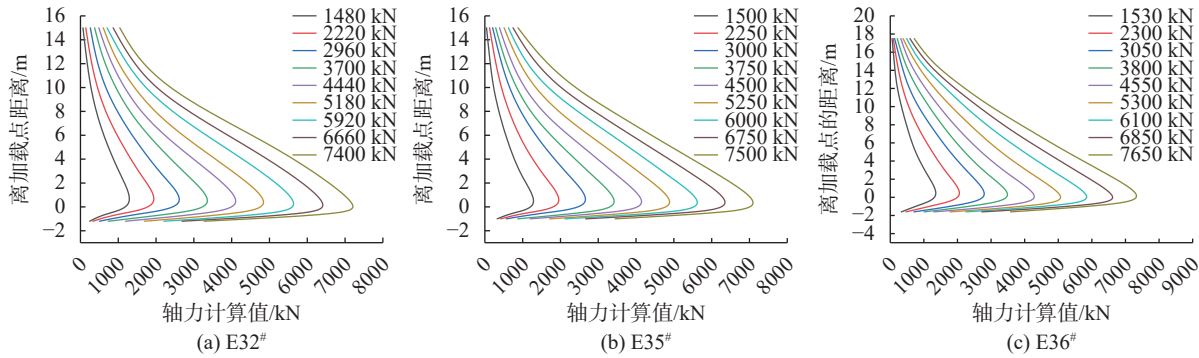


图 7 各试桩各级荷载下试桩轴力分布图

此外,按式(31)计算得到桩身侧摩阻力的分布情况。相关的分布曲线如图 8 所示。

$$q_{si} = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{\pi d L_i} EA \quad (31)$$

式中: q_{si} 为第 i 段侧摩阻力; d 为桩直径; L_i 为第 i 段桩身长度。

可以看出, E32#、E35#、E36# 三根试桩桩身轴力曲线图均表现出相同的趋势, 上段桩靠近加载端桩周三个土层(地下 -17.620 ~ -7.000 m, 占上段桩长 60.27%) 的曲线较疏, 在此范围内轴力曲线衰减了 48.67% ~ 56.85%, 该部分土层大约承受了荷载箱加载传来荷载的 75%; 桩顶部位的其他土层大约承受

了荷载箱传来荷载的 25%。E36# 试桩当加载至第八级 7650 kN 时, 向上相对位移突然变大呈陡变状进入塑性软化, 较前六级的加载侧摩阻力出现极不稳定状态, 靠近加载端的土层的曲线较疏, 距离加载端 2.35 m 迅速增加达到峰值 146.3 kPa, 在此峰值点以上的土层(-16.550 ~ -7.540 m) 的曲线逐渐由疏变密, 该部分土层桩侧摩阻力从峰值衰减了约 77.67%。而下段桩每级加载下的侧摩阻力趋势也呈现距离加载端达到峰值后迅速衰减至桩底, 可见侧摩阻力的发挥和作用形式和加载方向无关, 负摩阻力与正摩阻力的桩土作用表现形式相同, 仅是摩阻力方向不同。

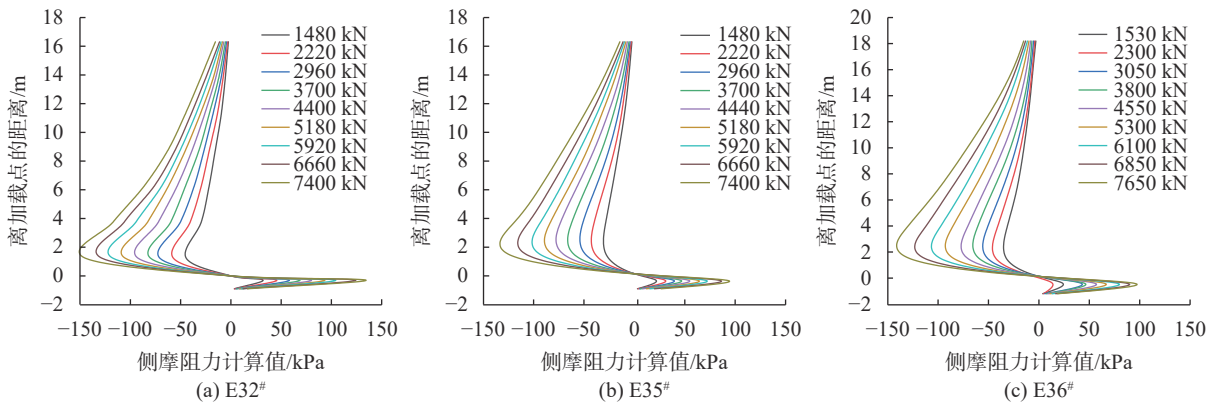
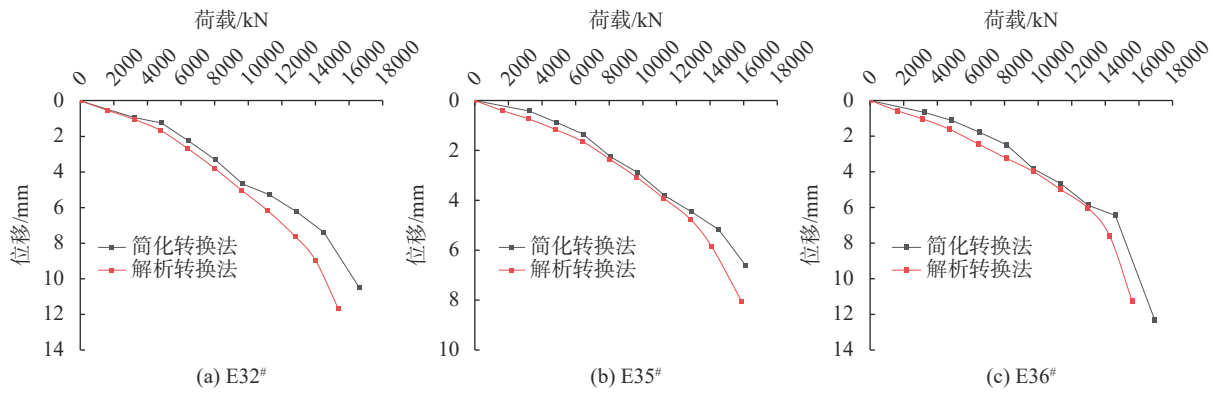


图 8 试桩各级荷载下桩侧摩阻力分布图

3.3.3 等效转换结果

通过对三根试桩进行计算, 得到上、下段自平衡测试中的等效转换 $Q-s$ 曲线。同时与简化转换法计算结果见 图 9。计算得到 E32#、E35#、E36# 试桩极限承载力分别为 14521.22 kN, 14468.43 kN, 14510.05 kN; 可以看出 $Q-s$ 曲线为典型的缓变型, 表现出摩擦桩的特征, 荷载较小时等效转换位移缓慢增加, 随着荷载增加, 位移增长幅度逐渐增加, 直到最后一级极限荷载位移发生突变, 终止加载。就单桩承载力而言, 由于实际工程中各种土的性质比较复杂, 对于超长大大直径桩来说, 桩侧各种土层性质差异较大, 利用简化

转换法时将桩侧土按均质土转换系数取平均值的方法则忽略土层承载特性的差异, 得到的转化结果偏于安全, 在桩基设计能保证桩的承载能力, 但对于分析试桩工作性能和极限承载力则不够精确。解析转换方法考虑了桩侧各层土的性质差异, 具有完整的解析理论且能较好地反映自平衡试桩上、下段桩的荷载沉降特性以及桩侧摩阻力和桩身轴力分布规律, 计算精度可提高约 12% 左右, 因此本文转换方法在自平衡试桩工程领域具有一定的适用性和准确性, 对自平衡法试验的机理和测试结果精度均有较大的提升。

图9 各试桩两种转换方法 $Q-s$ 曲线对比图

4 结论

(1)通过来宾裕达梧桐苑3根钻孔灌注桩对本文理论解析方法进行验证和应用,并与简化转换方法进行对比可得,简化转换法测试结果偏于保守,本文解析转换方法考虑了桩侧各层土的性质差异,计算精度可提高约12%左右,在该工程具有很好的应用。

(2)本文解析转换方法能充分反映试上、下段的承载特性及桩身轴力和桩侧摩阻力的分布特性和传递规律,具有一定的适用性和实际应用价值,在实际的自平衡试桩桩基承载力工程中得到广泛应用。

(3)本文对单一及层状地层中解析转换方法进行应用研究,该方法也适用于特殊土层和扩底桩等类型,更需设置多组试验及数值工况对其进行验证。

参 考 文 献

- [1] 朱建民,殷开成,龚维明,等.中美欧自平衡静载试验标准若干问题探讨[J].岩土力学,2020,41(10):3491-3499.
- [2] XING H, WU J, LUO Y. Field tests of large-diameter rock-socketed bored piles based on the self-balanced method and their resulting load bearing characteristics[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, 23(12): 1535-1549.
- [3] 欧孝夺,白露,吕政凡,等.自平衡试桩 $Q-s$ 曲线理论解析方法研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(2):399-408.
- [4] OSTERBERG J. New device for load testing driven piles and drilled shafts separates friction and end bearing[J]. *Piling and Deep Foundations*, 1989, 1(6): 421-427.
- [5] 龚成中,何春林,龚维明,等.基于自平衡试桩法大直径嵌岩桩尺寸效应分析[J].岩土力学,2012,33(8):2403-2407.
- [6] JGJ/T 403—2017 建筑基桩自平衡静载试验技术规范[S].
- [7] OU X, BAI L, JIANG J, et al. Research on analytical conversion method of self-balanced test pile results. [J] *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2021, 26(14), 7209-7225.
- [8] 欧孝夺,白露,吕政凡,等.黏土地基中自平衡试桩 $Q-s$

s 曲线解析转换方法与室内模型试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(2):631-642.

- [9] XI X Z, CHEN L Z, LIU W. An analytical solution to transform O-cell pile test data into conventional load-settlement curve[C]. *GeoShanghai 2010 International Conference*, 2010: 192-199.
- [10] SEOL H, JEONG S. Load-settlement behavior of rock-socketed drilled shafts using Osterberg-Cell tests[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(7): 1134-1141.
- [11] SEOL H, JEONG S, KIM Y. Load transfer analysis of rock-socketed drilled shafts by coupled soil resistance[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(3): 446-453.
- [12] NIAZI FAWAD S, MAYNEPAUL W. Axial pile response of bidirectional O-cell loading from modified analytical elastic solution and downhole shear wave velocity[J]. *NRC Research Press*, 2014, 51(11):1284-1302.
- [13] KIM S R, CHUNG S G. Equivalent head-down load vs. Movement relationships evaluated from bi-directional pile load tests[J]. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2012, 16(7): 1170-1177.
- [14] LEE J S, PARK Y H. Equivalent pile load-head settlement curve using a bi-directional pile load test[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(2): 124-133.
- [15] MISSION J L C, KIM H J. Design charts for elastic pile shortening in the equivalent top-down load-settlement curve from a bidirectional load test[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(2): 167-177.
- [16] KRAFT L M, RAY R P, KAGAWA T. Theoretical $t-z$ curves[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1981, 107(11): 1543-1561.
- [17] 江杰,王顺苇,欧孝夺,等.黏土地基中桩顶扭矩-竖向荷载加载路径下单桩承载特性分析[J].岩土力学,2020,41(11):3573-3582.
- [18] 江杰,王顺苇,欧孝夺,等.膨胀土地基中单桩受扭非线性分析[J].工程力学,2020,37(11):219-227.
- [19] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1978, 104(12): 1465-1488.