

# 自平衡试桩法一种等效转换方法

聂如松, 冷伍明, 魏巍

(中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 在对比分析自平衡试桩法与传统的单桩竖向抗压静载试验方法的基础上, 提出了自平衡试桩法的一种等效转换方法。该方法首先对试桩数据进行反分析, 利用 Mindlin 解求出上段桩侧摩阻力在桩周土体引起的附加应力, 然后采用有效应力法得到侧摩阻力系数  $\beta$  与桩土相对位移  $\delta$  的关系, 在此基础上, 利用有效应力法自下而上分析得到竖向抗压静载试桩的  $Q-s$  曲线。整个分析过程考虑了自平衡试桩法与竖向抗压静载试验方法中上段桩在地基中产生的附加应力对侧摩阻力的不同影响, 同时又避免在等效转换过程中引进经验系数, 并通过实例验证了该方法的正确性和可行性。

**关键词:** 自平衡试桩法; 等效转换; 桩基; 附加应力

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0188-04

**作者简介:** 聂如松(1980-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 讲师, 主要从事基础工程、路基工程等方面的研究与教学工作。

E-mail: nierusong97@163.com。

## Equivalent conversion method for self-balanced tests

NIE Ru-song, LENG Wu-ming, WEI Wei

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The difference between the conventional static loading tests and the self-balanced tests are presented, and an equivalent conversion method is proposed to determine the behaviors of pile based on the results of the self-balanced tests. In this method the data obtained from the field tests are carefully analyzed and the Mindlin solution is used to calculate the additional stress in soil which is produced by shaft resistance. Then the relationship between the shaft resistance and the relative movement between pile and soil, that is,  $\beta$  and  $\delta$  is determined. Based on the relationship, the  $\beta$  method is used to calculate the shaft resistance and the axial force from the pile tip to the pile head are obtained. The  $Q-s$  curve of the conventional static loading tests is determined. The additional stress in the soil induced by the shaft resistance of the upper pile is taken into account. The experience coefficients adopted in the other equivalent conversion methods are not the necessities in this method. The correctness and feasibility of the proposed method are validated by examples. It is easy to be programmed and can be referred and used by the colleagues for further researches.

**Key words:** self-balanced test; equivalent conversion; pile foundation; additional stress

## 0 引言

自平衡试桩法由于不像传统的单桩竖向抗压静载试验(下称传统试桩法)需要压重平台或者锚桩反力系统, 而且具有能够适用各种试验场地、能够测试大吨位、试验方便, 费用低廉等优点, 近年来在中国得到了广泛的运用<sup>[1-6]</sup>。然而, 自平衡试桩法不符合桩的荷载传递规律, 在确定桩基承载力时, 需要将测试结果等效转换为传统试桩法的结果。目前常用的转换方法有等位移法<sup>[4]</sup>、等荷载法<sup>[4]</sup>、简化法<sup>[5]</sup>、精确法<sup>[6]</sup>、数值计算法<sup>[7]</sup>等。等位移法的运用具有很大的局限性, 实际上下两段桩很少达到预定的极限状态, 而且位移也很少能够相等; 等荷载法忽略了荷载箱上、下两段

桩的位移协调; 简化法只是对上段桩和下段桩的  $Q-s$  曲线进行简单的整合, 虽然考虑了上段桩侧阻力比传统试桩法偏小而引进经验系数, 但经验系数的确定带有很大的随机性和经验性; 精确法虽然充分利用了自平衡试桩成果, 但没有考虑土中附加应力和桩侧摩阻力相互作用的影响; 数值计算法如有限单元法等计算工作量大, 需要操作人员的素质较高等很难广泛运用。本文在对自平衡试桩法进行详细的受力分析的基础上, 运用 Mindlin 应力解和叠加原理求得桩侧土体的竖

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51108464); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2011QNZT106)

**收稿日期:** 2011-08-02

向附加应力, 结合桩 - 土界面力学关系, 提出一种新的等效转换方法, 编制计算程序, 并用实例证明了该转换方法的正确性和可行性。

1 自平衡试桩法与传统试桩法对比

在对比分析自平衡试桩法和传统试桩法荷载传递规律之前, 作以下四点假定, 下述假定不影响分析的结果:

- (1) 自平衡试桩法中, 荷载箱恰好放在平衡点位置, 上段桩和下段桩的承载力都能达到极限状态;
- (2) 桩植入在同一土层中, 桩的几何尺寸、成桩工艺等因素都相同, 桩侧摩阻力随深度不变, 为恒量;
- (3) 两种试桩法使基桩承载力达到极限状态;
- (4) 无论是压密土体还是捣松土体对桩 - 土界面的力学参数不产生影响。

图1 (a) 为传统试桩法的受力图, 图1 (b) 为自平衡试桩法的受力图。传统试桩法中, 在荷载作用下, 上部桩身首先受到压缩, 一部分荷载往下部桩身传递; 另一部分荷载则在桩与桩周土之间形成侧摩阻力。当荷载进一步增加, 桩侧摩阻力充分调动起来, 桩端阻力开始发挥作用; 荷载持续增加, 桩端阻力达到极限状态, 此时整根桩达到了承载力极限状态, 对应的桩顶荷载为桩的极限承载力。整根桩的轴力图如图1 (a) 中的上大下小的直角梯形。极限侧摩阻力为 $q_{s1}$ , 极限端阻力为 $q_{b1}$ 。

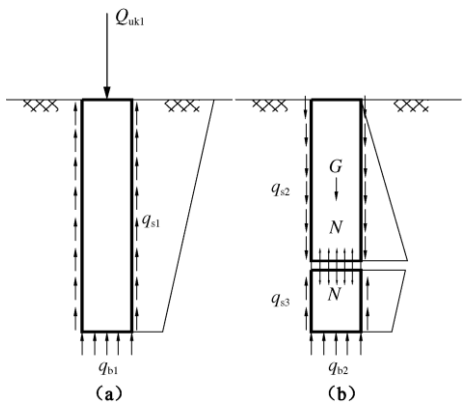


图 1 传统试桩法和自平衡试桩的受力图

Fig. 1 Free-body diagram of piles

自平衡试桩法中, 对荷载箱施加油压, 荷载箱顶板对上段桩施加推力, 底板对下段桩施加方向相反的压力。在推力作用下, 上段桩首先自重, 同时上段桩下部受到压缩, 一部分荷载向上传递, 一部分荷载则被桩与桩周土体之间的侧摩阻力所抵消; 荷载箱中的油压继续增加, 上段桩中轴力继续向上传递, 桩侧摩阻力逐步被调动起来, 及到上段桩侧摩阻力达到极限状态。下段桩的荷载传递规律与传统试桩一致。上段

桩中轴力图为一个正立直角三角形, 桩顶为0, 桩侧极限摩阻力为 $q_{s2}$ ; 下段桩轴力图为上大下小的直角梯形; 下段桩侧极限摩阻力为 $q_{s3}$ , 极限端阻力为 $q_{b2}$ 。

很容易知道,  $q_{s1} > q_{s3} > q_{s2}$ ;  $q_{b1} > q_{b2}$ 。这是因为桩侧摩阻力在桩周土体引起的附加应力以及桩材泊松比效应的结果<sup>[2]</sup>。

2 等效转换方法

等效转换方法包括两个过程: 第一个过程是反分析过程, 就是充分利用自平衡试桩实测结果和试桩场地土层资料, 反求桩 - 土之间的力学参数 (包括桩端阻力、桩侧摩阻力、桩侧摩阻力与桩土相对位移之间的关系等); 第二个过程是正分析过程, 就是利用已获取的准确信息, 推求传统试桩法所能得到的桩顶荷载 - 沉降曲线、桩身轴力以及桩侧摩阻力。

2.1 基本假定

- (1) 假定地基为半无限弹性体, 不考虑成桩对地基初始应力状态的影响;
- (2) 将桩身划分为若干单元 (桩段), 每段桩侧摩阻力用桩段上下截面的轴力差、且用集中力来代替;
- (3) 桩周土中任一点的应力可以利用半无限弹性体集中力课题 Mindlin 解求得;
- (4) 桩侧摩阻力可按照有效应力法来求得;
- (5) 忽略上段桩与下段桩之间的相互影响;
- (6) 忽略桩材泊松比对侧摩阻力的影响。

2.2 计算模型

建立如图 2 所示坐标体系, 根据地层分布和桩身应力传感器的位置将荷载箱以上桩段分割成  $n$  截桩段。

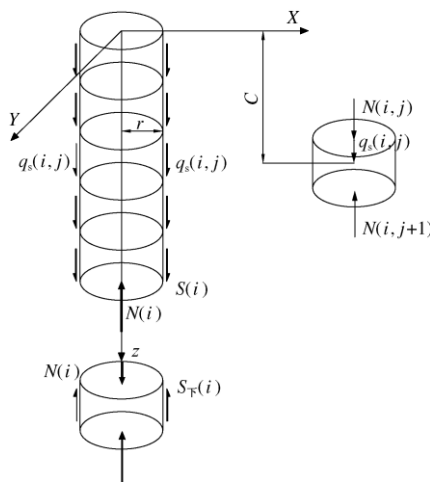


图 2 计算模型简图

Fig. 2 Analytical model

2.3 反分析过程

依据式 (1) 可得到第  $i$  ( $i=1 \sim m$ ) 级荷载任意

截面  $j$  ( $j=1\sim n$ ) 的实测桩身轴向力  $N(i, j)$ , 然后依据式 (2) 可得到第  $i$  级荷载任意一桩段  $j$  ( $j=1\sim n$ ) 的平均侧阻力  $q_s(i, j)$ , 可以形成桩侧摩阻力矩阵  $[q_s(i, j)]$ 。

$$N(i, j) = \frac{\varepsilon(i, j) + \varepsilon'(i, j)}{2} (E_g A_{gj} + E_h A_{hj}) \quad (1)$$

式中  $\varepsilon(i, j)$ ,  $\varepsilon'(i, j)$  为第  $i$  级荷载任意截面  $j$  实测对称布置的应变计应变值;  $E_g$ ,  $E_h$  为钢筋和混凝土的弹性模量;  $A_{gj}$ ,  $A_{hj}$  为第  $j$  截面钢筋与混凝土截面积。

$$q_s(i, j) = \frac{N(i, j) - N(i, j-1)}{\pi d L(j)} \quad (2)$$

式中  $j-1=0$  时, 即桩顶, 轴力为 0;  $d$  为桩的直径;  $L(j)$  为第  $j$  段桩长。

侧摩阻力在地基中任意一点产生的附加应力可以用 Mindlin 解和叠加原理求出。根据 Mindlin 应力公式, 在  $c$  深处作用集中力  $N(i, j) - N(i, j-1)$  时, 地面以下  $z$  处任一点产生的附加应力:

$$\Delta\sigma_z(i, j, k) = \frac{N(i, j) - N(i, j-1)}{8\pi(1-\nu)} \left[ \frac{(1-2\nu)(z-c)}{R_1^3} - \frac{(1-\nu)(z-c)}{R_2^3} + \frac{3(z-c)^3}{R_1^5} + \frac{3(3-4\nu)z(z+c)^2 - 3c(z+c)(5z-c)}{R_2^5} + \frac{30cz(z+c)^3}{R_2^7} \right] \quad (3)$$

式中  $R_1^2 = r^2 + (z-c)^2$ ;  $R_2^2 = r^2 + (z+c)^2$ ;  $\nu$  为泊松比;  $k$  为计算附加应力位置。

利用式 (3) 计算每一荷载等级  $N(i)$  下任意桩段侧阻力在各桩段中点位置对应的桩周土中产生的附加应力  $\Delta\sigma_z(i, j, k)$  ( $k=1\sim n$ ), 对应于每一桩段得到  $n$  个附加应力计算值, 将这  $n$  个附加应力值叠加便得到荷载等级  $N(i)$  下对应于每一桩段的桩周土中附加应力增量

$$\Delta\sigma_z(i, j) = \sum_{k=1}^n \Delta\sigma_z(i, j, k) \quad (4)$$

将  $m$  个荷载等级计算完毕后, 便得到各桩段桩周土附加应力增量矩阵  $[\Delta\sigma_z]$ 。

计算各桩段中点位置对应桩周土中的有效自重应力矩阵  $[\sigma'_z]$ , 然后减去附加应力增量, 得到各桩段桩周土竖向有效应力矩阵

$$[\sigma_z] = [\sigma'_z] - [\Delta\sigma_z] \quad (5)$$

根据计算桩侧摩阻力的有效应力法, 即

$$[q_s(i, j)] = [\beta(i, j)][\sigma_z] \quad (6)$$

可以反求第  $i$  荷载下第  $j$  桩段侧摩阻力系数  $\beta(i, j)$ 。

第  $i$  荷载  $N(i)$  作用下桩 - 土相对位移为

$$\delta(i, j) = S(i) - \sum_j^n \frac{\varepsilon(i, j) + \varepsilon'(i, j)}{2} L(j) \quad (7)$$

由式 (2)、(7) 可以得到侧摩阻力  $q_s(i, j)$  与桩 - 土相对位移  $\delta(i, j)$  的关系, 对于桩侧摩阻力发挥不充分的桩段, 可以根据地质钻孔资料基于某种简单模型等方式进行外延, 在此基础上, 根据式 (6) 可以获得  $\beta(i, j)$  与  $\delta(i, j)$  的关系。

## 2.4 正分析过程

对上段桩, 采用自下而上的分析过程。分析过程中, 桩周土的竖向有效应力矩阵为

$$[\sigma_z]' = [\sigma'_z] + [\Delta\sigma_z] \quad (8)$$

根据反分析得到的  $\beta(i, j) - \delta(i, j)$  的关系曲线, 求第  $i$  ( $i=1\sim m$ ) 级荷载任意桩段  $j$  ( $j=1\sim n$ ) 的侧摩阻力  $[q'_s(i, j)]$ 。

$$[q'_s(i, j)] = [\beta(i, j)][\sigma_z]' \quad (9)$$

在求  $\beta(i, j)$  的过程中, 需要考虑下段桩的位移, 桩 - 土相对位移  $\delta(i, j)$  为下段桩位移  $S_{\text{下}}(i)$  和从  $1\sim j-1$  桩段的压缩量之和, 从而根据  $\beta(i, j) - \delta(i, j)$  的关系曲线通过插值获得  $\beta(i, j)$ 。

桩顶荷载  $Q(i)$  为

$$[Q(i)] = [N(i)] + \left[ \pi d \sum_{j=1}^n [q'_s(i, j)] L(j) \right] \quad (10)$$

桩顶沉降  $S_0(i)$  为

$$[S_0(i)] = [S_{\text{下}}(i)] + \left[ \sum_{j=1}^n \frac{[N(i, j-1) + N(i, j)]}{2(E_g A_{gj} + E_h A_{hj})} L(j) \right] \quad (11)$$

式中,  $N(i, j) = N(i) + \sum_{j=1}^n q'_s(i, j) L(j)$ 。

## 3 计算实例

以文[1]中 N2AT 试桩注浆后试桩结果为例, 采用本文方法和精确法进行等效转换。计算参数如表 1 所示, 计算结果如图 3 所示。

表 1 计算参数表

Table 1 Parameters of soils and pile

桩体			土体			
直径 /m	混凝土 $E/\text{GPa}$	钢筋 $E/\text{GPa}$	分层代号	土层名称	重度 $/(kN \cdot m^{-3})$	泊松比
1.5	31.6	200	2-3	粉、细砂	18.1	0.3
			4-2	强风化岩	20.5	0.3
			4-3-3	弱风化泥质粉砂岩	21.0	0.3

在分析过程中, 反分析得到  $\beta(i, j) \sim \delta(i, j)$  的关系, 对侧摩阻力未充分发挥的桩段没有进行外延, 目的是为了与精确法进行对比。从图 3 中可以看出, 本文所提出的等效转换方法得到的转换  $Q-s$  曲线与精

确法得到的转换  $Q-s$  曲线基本一致, 都是属于缓变型。对比两种方法的转换结果, 可以看出, 本文方法得到的等效荷载大于精确法得到的等效荷载, 其极限承载力提高了 16%, 显然可以知道本文所提出的方法考虑了桩周土体中产生的附加应力对桩侧摩阻力的影响, 而且在转换过程中, 不需简单法或者数值计算法针对不同桩周土体除以一个经验系数。

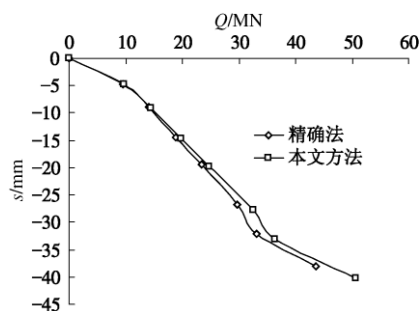


图 3 N2AT 试桩等效转换  $Q-s$  曲线图

Fig. 3  $Q-s$  curves

本文所提出的方法有以下几点优点:

(1) 可以充分利用测桩试验成果, 在得到侧摩阻力和桩土相对位移关系基础上, 采用曲线拟合等方法综合确定两者之间的关系, 对侧摩阻力未充分发挥的桩段, 可以根据地质钻孔资料基于某种模型进行外延。可以充分发挥常规的竖向压桩静载试验所取得的成果, 具有较大的灵活性。

(2) 不需要对上段桩侧摩阻力的大小在转换过程中引进经验系数。本方法考虑了桩周土体附加应力对桩侧摩阻力的影响。尽管桩周土体附加应力与桩侧摩阻力的关系在反分析过程和正分析过程中都需要迭代过程才能求出, 但是, 本文所采用的简单的计算过程易于实现, 而且与迭代计算结果相差不大。

(3) 正分析过程虽然没有考虑上段桩与下段桩的相互作用, 但是, 在分析时, 对上段桩采用从下而上的分析过程, 真实再现常规竖向压桩静载试验的荷载传递规律。事实上, 自平衡测桩方法比传统方法保守主要体现在两个方面: ①荷载传递方面, 本文第一节已经有比较详细的分析; ②桩顶沉降方面, 自平衡试桩方法使桩端位移在桩侧摩阻力充分发挥之前提前发挥, 使得各种等效转换方法得到的桩顶位移比同等条件下的传统试桩法得到的桩顶位移大。

## 4 结 语

在对比分析自平衡试桩法与传统的单桩竖向抗压静载试验的基础上, 提出了一种等效转换方法, 并通过实例证明了该方法的正确性和可行性。该方法考虑了桩周土体附加应力对桩侧摩阻力的影响, 避免了对

上段桩侧摩阻力的大小在转换过程中引进经验系数, 而且易于编程实现。为自平衡试桩法的广泛应用提供理论支持和为同行开展自平衡试桩法的理论研究提供参考和利用。

## 参考文献:

- [1] 聂如松, 冷伍明, 李 箐, 等. 东江大桥嵌岩桩承载性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1410 - 1415. (NIE Ru-song, LENG Wu-ming, LI Qing, et al. Load transfer mechanism of rock-socketed piles of Dongjiang Rive Bridge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1410 - 1415. (in Chinese))
- [2] 聂如松, 冷伍明, 杨 奇, 等. 桩 - 土间剪切应力的传递探讨[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 799 - 804. (NIE Ru-song, LENG Wu-ming, YANG Qi, et. Discussion of the shear stress between pile and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 799 - 804. (in Chinese))
- [3] 聂如松. 关于“由 O-cell 试桩结果确定整桩的性能”的讨论[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(3):480 (NIE Ru-song. Discussion on “Determination of pile behaviors based on O-cell test results of piles”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 480. (in Chinese))
- [4] 鲍育明, 刘亚文, 李志成, 等. 自平衡法在桩基承载力检测中的应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, **4**(3): 49 - 52. (BAO Yu-ming, LIU Ya-wen, LI Zhi-cheng, et al. Application of self-balanced method for pile bearing capacity test[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2003, **4**(3): 49 - 52. (in Chinese))
- [5] 龚维明, 蒋永生, 翟 晋. 桩承载力自平衡测试法[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(5): 532 - 536. (GONG Wei-ming, JIANG Yong-sheng, ZHAI Jin. Self-balanced loading test for pile bearing capacity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(5): 532 - 536. (in Chinese))
- [6] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 等. 桩承载力自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2002, **23**(1): 82 - 88. (GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, JIANG Yong-sheng, et al. Theory and practice of self-balanced loading test for pile bearing capacity[J]. Journal of Building Structures, 2002, **23**(1): 82 - 88. (in Chinese))
- [7] 郑英杰, 张克绪, 张尔其, 等. 由 o-cell 试桩结果确定整桩的性能[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1416 - 1422. (ZHENG Ying-jie, ZHANG Ke-xu, ZHANG Er-qi, et al. Determination of pile behaviors based on o-cell test results of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1416 - 1422. (in Chinese))

