

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 1-0129-06

考虑基坑卸载影响的改进弹性抗力法及其应用

应宏伟^{1,2}, 聂文峰^{1,2}, 郭 雷³, 杨永文^{1,2}

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310058; 2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058;

3. 华润置地(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215001)

摘 要: 弹性抗力法是目前实际工程中基坑支护结构变形内力计算的一种主要方法, 该方法借鉴的是计算水平荷载作用下竖直放置弹性桩的地基反力系数法, 但没有考虑开挖卸载对土抗力系数和坑内土体的变形影响, 因而导致变形计算值通常小于实测值。首先在开挖面施加反向自重应力模拟基坑的开挖卸荷, 利用 Mindlin 解得到坑内土体的卸荷应力分布; 在前人的实验研究基础上, 推导了不同卸荷比下考虑卸荷影响的土体水平抗力系数; 将支护结构的变形分解为开挖瞬时的卸载作用和基坑内外水土压力差作用 2 个阶段, 考虑卸载应力路径对坑内土体水平抗力系数以及开挖瞬时变形的影响, 对传统的弹性抗力法进行了改进, 最后将该方法应用于典型三维基坑算例。研究发现, 改进法得到的支护结构水平变形大于传统方法, 而对内力结果影响不大; 基坑平面尺寸越大, 两者的变形结果差别越明显, 改进法更能反映平面尺寸对基坑变形的影响。

关 键 词: 基坑; 卸载; 弹性抗力法; 水平基床系数

中图分类号: TU 471

文献标识码: A

A modified beam-spring model method and its application considering unloading effect during excavation

YING Hong-wei^{1,2}, NIE Wen-feng^{1,2}, GUO Lei³, YANG Yong-wen^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. MOE, Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. China Resources Land (Suzhou) Limited, Suzhou, Jiangsu 215001, China)

Abstract: Beam-spring model method is a primary method for designing of retaining structures in actual excavation projects; it is based on foundation reaction coefficient method for calculating vertical elastic piles acted by horizontal loads. Unfortunately, the current method cannot consider the unloading effect on the soil lateral resistance coefficient and the soil deformation in the pit, so as to lead to underestimate the horizontal deformation of the retaining wall. The distribution of unloading stresses is deduced using the Mindlin solution. On the basis of previous experimental studies, the soil resistance coefficients considering the effect of excavation unloading under different ratios of unloading are derived. The development of deformation of retaining structures is divided into two stages: the first is the instantaneous unloading deformation of the soil in the pit; and the second is the deformation of retaining wall induced by the lateral earth pressure differences on the wall. Then a modified beam-spring model method is presented considering unloading stress paths and unloading deformations. Finally, the method is applied to two typical 3D numerical excavation cases. It is shown that the horizontal displacement of the wall calculated by the modified method is greater while the difference between the internal forces is quite small; the greater the excavation plane size is, the more obvious the differences between the deformation results are. The modified method can better reflect the effect of the size of the base plane on the deformation of the retaining structure.

Key words: excavation; unloading; beam-spring model method; lateral resistance coefficient

1 前 言

目前深基坑支护结构设计中一般采用弹性抗力法计算支护结构的水平变形, 进而预估开挖引起的

周围地表沉降。传统弹性抗力法将支护结构的计算简化为在坑外水平土压力作用下的竖向弹性地基梁问题^[1], 建筑行业中水平抗力系数通常按照基床系数的比例系数 m 与从当前开挖面算起的深度的乘积

收稿日期: 2011-01-19

基金项目: “十一五” 国家科技支撑项目资助 (No. 2008BAJ06B01); 浙江省重点创新团队支持计划资助 (No. 2009R50050)。

第一作者简介: 应宏伟, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 主要从事软黏土力学与地基处理、土工数值分析、地下工程的教学与科研工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn

确定(又称为“m”法)^[2],而且一般沿用平面应变假定。文献[3-5]在平面弹性抗力法的基础上,将支撑结构、支护墙视为空间梁系,将坑内土抗力的贡献视为三维土弹簧,提出了基坑支护结构计算的三维弹性抗力法文献[6]考虑水平面内的分段施工效应进一步完善了三维“m”法,文献[5]引入流变模型考虑软土地基中的 m 值随时间的变化,文献[7]根据软土基坑施工参数和变形实测数据的研究给出了考虑时空效应的等效土体水平抗力系数。

上述研究虽然能考虑支护结构的空间效应和软土的时空效应,但本质上依然继承了常规弹性抗力法的思路,即将支护结构承受水平水土压力直接等效为竖向弹性地基梁承受水平荷载问题。而基坑开挖实际上是一个土体卸荷的过程,基坑变形也应包括开挖卸荷作用和基坑内外水土压力差作用两个作用的影响^[1],现有方法均只包含后者而忽略了开挖卸荷作用的影响,这也是导致软土基坑支护结构变形的实测值往往大于计算值的原因之一。本文考虑开挖卸载对土抗力系数和坑内土体的变形影响,对传统的基坑弹性抗力法进行改进,并应用于典型三维基坑算例,讨论改进法与传统方法计算结果差别。

2 坑内土体卸载应力

用在开挖边界施加反向自重应力场的方法来模拟基坑卸载,为简化起见,本文只讨论矩形基坑情况。荷载的施加有两种方法:一种是将荷载施加在地表,属于 Boussinesq 解课题,可以用相应公式计算;另一种是将荷载施加在地基土内部,可以用 Mindlin 公式求解。对坑内土体而言,显然 Mindlin 解更合理,而且坑内土体以竖向卸荷为主,因此可以进一步简化为在基底平面施加竖向卸荷而忽略坑壁水平卸载的影响。

设基坑长为 A , 宽为 B , 开挖深度为 H , 地基为均质饱和软黏土,土体杨氏模量为 E , 在快速卸荷情况下假定土体体积不变,则泊松比 $\mu = 0.5$, 建立图 1 所示坐标系。袁聚云^[8]给出了基于 Mindlin 公式的矩形均布荷载作用在地基内部时角点下各点土的应力公式,在基底面附加应力 $p = -\gamma H$ 作用下土中任一点 $M(x, y, z)$ 的应力可在文献[8]公式基础上采用角点法计算。

定义卸载比 R 为土体竖向卸载应力和水平卸载应力的比值,则 x 方向卸载比 R_x 、 y 方向卸载比 R_y 分别为

$$R_x = \frac{\sigma_z}{\sigma_x}; R_y = \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \quad (1)$$

定义基坑的长宽比 m 和宽深比 n 分别为

$$m = \frac{A}{B}; n = \frac{B}{H} \quad (2)$$

式中:参数 m 定义基坑的平面形状, m 数值较大时接近条形基坑; n 定义基坑的平面规模, n 越大,基坑相对挖深而言的平面规模越大。

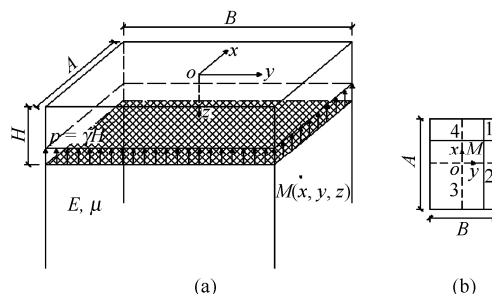


图1 矩形基坑卸荷计算简图
Fig.1 Calculation sketch of unloading of rectangular excavation

图 2 为 $m = 1$ 、 $n = 5$ 和 $m = 1$ 、 $n = 20$ 时基坑长边中面 ($x = 0$) 坑内土体的卸荷应力分布。图中, $b = B/2$, $Z = (z - H)/H$, z 为计算点距基坑底面的深度。

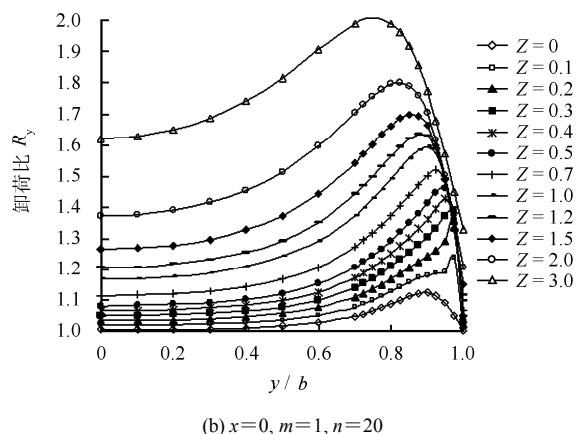
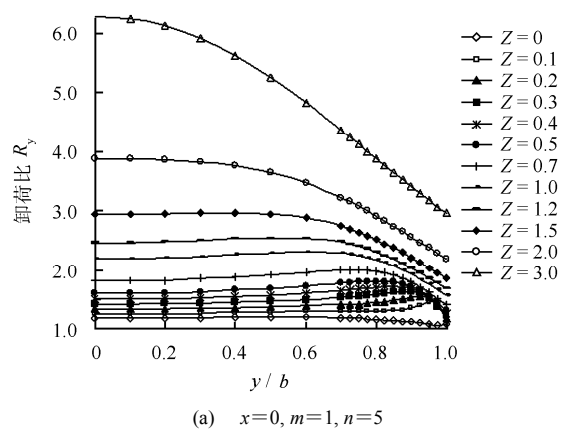


图2 卸荷比分布
Fig.2 Distribution of unloading stress

由图 2 可见, R 均大于 1.0, 说明饱和软黏土矩形基坑中坑底土体的竖向卸荷应力均大于水平卸荷应力。同一深度的土体卸荷比分布不均匀, n 较小时基坑中部的 R 值大于坑壁附近, 而 n 较大时坑边卸荷比出现峰值。从图中还可以发现, 同一平面位置的土体 R 随 n 的增大而减小, 随深度增加而增大。

3 考虑卸载应力路径的地基水平抗力系数

一直以来国内外学者通过对土的基床系数 k 的研究发现, k 与土的变形模量 E_0 和泊松比 μ 密切相关。Vesic^[9]按三轴或荷载试验得到的变形模量 E_0 换算水平抗力系数:

$$k = 0.65 \times \sqrt[12]{\frac{E_0 B^4}{E_h I}} \frac{E_0}{(1 - \mu_0^2) B} \approx 1.2 \frac{E_0}{(1 - \mu_0^2) B} \quad (3)$$

式中: E_h 、 I 分别为基础的弹性模量和惯性矩; B 为基础宽度, 若用于计算土体水平抗力, 则指围护结构的单位宽度。

在基坑开挖的过程中, 地基土体主要经受的是卸荷应力路径, 已有研究表明^[10-12]卸荷条件下土体的应力-应变关系仍可以用双曲线描述。

假设土体为各向同性, 根据广义胡克定律可以得到三轴实验下土体的变形模量:

$$E = \frac{(\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3)(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)}{\Delta\sigma_3(\Delta\varepsilon_1 - 2\Delta\varepsilon_3) + \Delta\sigma_1\Delta\varepsilon_1} \quad (4)$$

将卸荷比 $R = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_3}$ 代入式 (4), 则

$$E = \frac{R - 2\mu}{R - 1} E_t \quad (5)$$

文献[11]根据软黏土的室内卸荷应力路径试验研究得到了典型卸荷应力路径下土的变形模量:

$$E = \frac{R - 2\mu}{R - 1} \left[1 + \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)(1 + \sin\varphi)(1 + 2K_0)}{2(1 + 2K_0)(c \cos\varphi + \sigma_1 \sin\varphi)} \rightarrow \left[\frac{-3(1 - K_0)(1 + \sin\varphi)\sigma_m}{+3(1 - K_0)(1 + \sin\varphi)\sigma_m} R_f \right]^2 \right] \sigma_m \bar{E}_{ui} \quad (6)$$

式中: σ_m 为基坑开挖前的平均固结压力; σ_1 、 σ_3 分别为开挖后坑内土体的竖向应力与水平应力; K_0 为静止土压力系数; $\bar{E}_{ui}$ 为无因次卸荷模量系数, 由室内三轴试验可得出不同卸荷比下的 $\bar{E}_{ui}$ 值。

对上海灰色淤泥质黏土, 当 $R = 2.0$ 时, $\bar{E}_{ui} =$

102.5; 当 R 取其他大于 1 的值时, 其值可按式 (7) 近似计算^[11]。

$$\bar{E}_{ui} = 2.676 \arctan R - 67.2 \quad (7)$$

结合式 (3)、(5)、(6) 可建立考虑卸载应力路径的地基水平抗力系数:

$$k_h = \frac{1.2}{(1 - \mu_0^2) B} \frac{R - 2\mu}{R - 1} \left[1 + \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)(1 + \sin\varphi)(1 + 2K_0)}{2(1 + 2K_0)(c \cos\varphi + \sigma_1 \sin\varphi)} \rightarrow \left[\frac{-3(1 - K_0)(1 + \sin\varphi)\sigma_m}{+3(1 - K_0)(1 + \sin\varphi)\sigma_m} R_f \right]^2 \right] \sigma_m \bar{E}_{ui} \quad (8)$$

4 弹性抗力法的改进

基坑开挖过程是开挖面上卸荷的过程, 由于卸荷引起坑底土体产生以向上为主的位移 (必然伴随有水平方向变形), 同时也引起围护墙在两侧水土压力差的作用下而产生水平位移^[1]。为考虑这个过程不妨将基坑水平变形的发展分为开挖卸荷瞬时变形和基坑内外水土压力差作用下变形两个阶段 (见图 3), 而卸荷的影响主要体现在两方面, 一是坑内土体开挖卸荷瞬时水平变形, 二是经历卸荷应力路径对坑内土体水平抗力系数的影响。

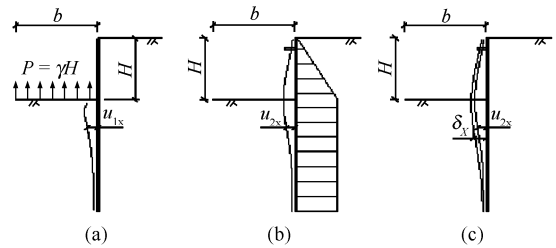


图 3 基坑的两个变形阶段

Fig.3 Two deformation stages of excavation

在基坑开挖瞬时卸荷变形阶段, 假设坑内土体刚刚卸去, 基坑内外水土压力差尚未来得及作用于支护结构上。被动区土体在卸荷 $p = -\gamma H$ 的作用下深度为 z 的某点 x 方向发生水平变形 u_{tx} , 如图 3(a) 所示。由于变形协调, 可以认为基坑围护结构亦产生相同的变形, 不产生土抗力, 假定该工况围护结构亦不产生内力。

u_{tx} 可按式计算:

$$u_{tx} = \frac{1}{E} \int_0^{4/2} (\sigma_x - \mu\sigma_z - \mu\sigma_y) dx \quad (9)$$

式中: E 为考虑卸荷应力路径的变形模量, 由式 (6) 得到。

开挖卸荷结束后, 基坑支护结构在两侧水土压

力差作用下产生 x 方向水平变形 u_{2x} , 如图 3(b) 所示, 此时坑内土体产生的抗力 p_f 可由式 (10) 得到。

$$p_f = k_h u_{2x} \quad (10)$$

式中: k_h 为考虑卸荷应力路径的土体水平基床系数, 可由式 (8) 得到。则坑内土体实际发生的 x 方向水平变形 δ_x 由两部分组成, 见公式 (11) 和图 3(c)。

$$\delta_x = u_{1x} + u_{2x} \quad (11)$$

同理可得到空间问题中 y 方向的水平位移 δ_y 。

5 算例分析

按照前述思路, 考虑基坑各工况瞬时卸荷水平变形和卸荷应力路径对地基水平基床系数的影响, 对文献[6]基于常规弹性抗力法编制的基坑三维全过程分析方法进行改进, 研制了考虑开挖卸载影响的基坑三维梁系有限元分析程序, 结合典型算例, 与常规方法计算结果对比。

设有 2 个长宽比和开挖深度相同, 但宽深比 n 不同的矩形基坑算例, 其平面尺寸为: 算例 1, $A = 90 \text{ m}$, $B = 60 \text{ m}$; 算例 2, $A = 180 \text{ m}$, $B = 120 \text{ m}$, 基坑开挖深度均为 7.0 m , 算例剖面图如图 4 所示。两个算例除平面尺寸不同外, 其余条件均相同。基坑开挖影响深度范围内均为淤泥质土, 土重度 $\gamma = 17.1 \text{ kN/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 6.5^\circ$, 黏聚力 $c = 10.7 \text{ kPa}$, 破坏比 $R_f = 0.89$, 压缩模量 $E_s = 2.18 \text{ MPa}$, 静止土压力系数 $K_0 = 0.65$ 。坑外地面施工荷载取 15 kPa , 采用水土合算法计算围护桩侧压力。常规弹性抗力法时, 水平基床系数比例系数 m 取 1200 kN/m^4 , 改进法中土体卸荷模量系数 $\overline{E_{ui}}$ 值按式 (7) 计算。

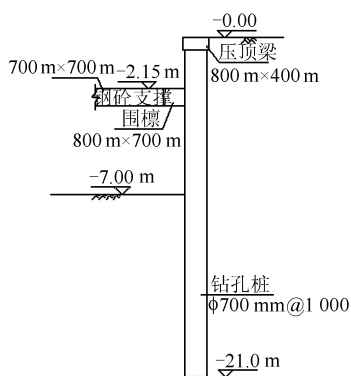


图 4 基坑剖面图

Fig.4 Profile of excavation

算例计算的开挖工况为: 工况 1, 悬臂开挖至 -2.85 m 标高; 工况 2, 设置内支撑, 开挖至 -7.00 m 标高。算例 1、2 各开挖工况的计算结果分别如图 5~8 所示, 各图中的(a)图为本文改进法计算结果, (b)图为常规法计算结果。

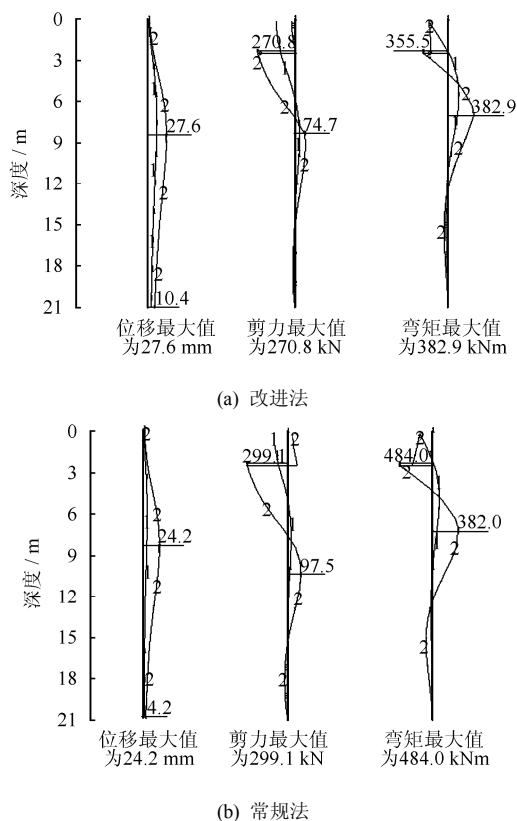


图 5 围护桩水平位移和内力计算结果 (算例 1, 角桩)

Fig.5 Horizontal deformations and internal forces of retaining pile (case 1, pile at corner)

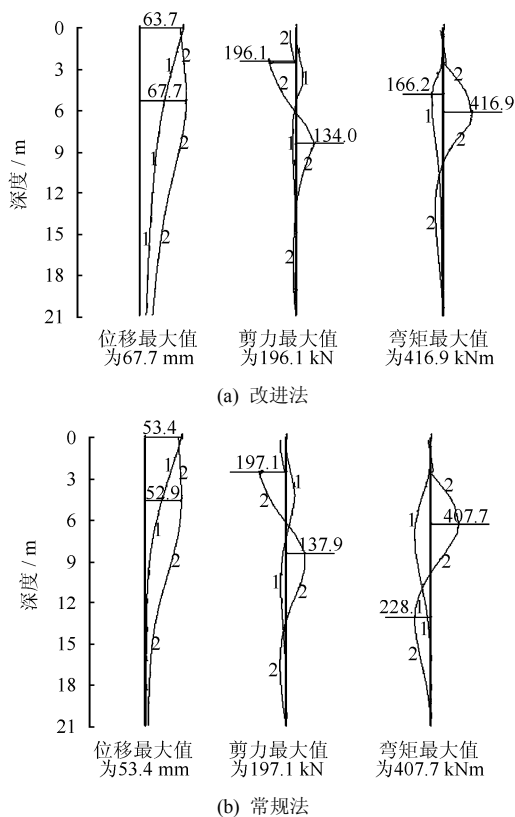


图 6 围护桩水平位移和内力计算结果 (算例 1, 长边中桩)

Fig.6 Horizontal deformations and internal forces of retaining pile (case 1, pile in middle of long side)

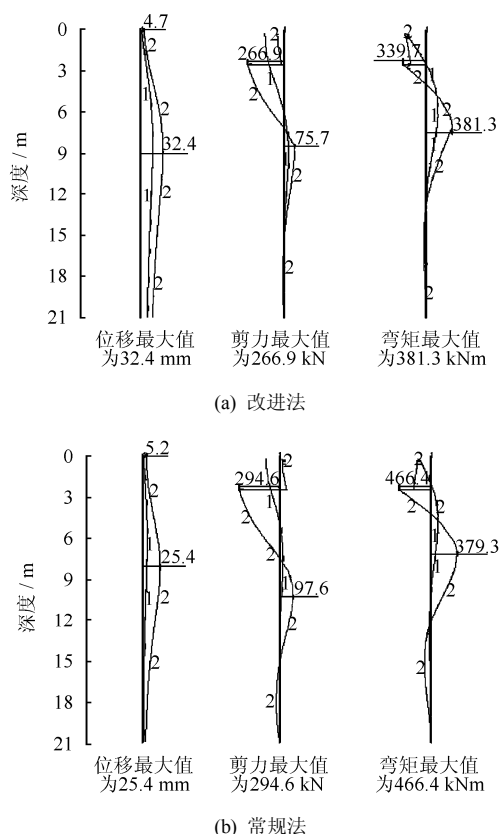


图 7 围护桩水平位移和内力计算结果 (算例 2, 角桩)
Fig.7 Horizontal deformations and internal forces of retaining pile (case 2, pile at corner)

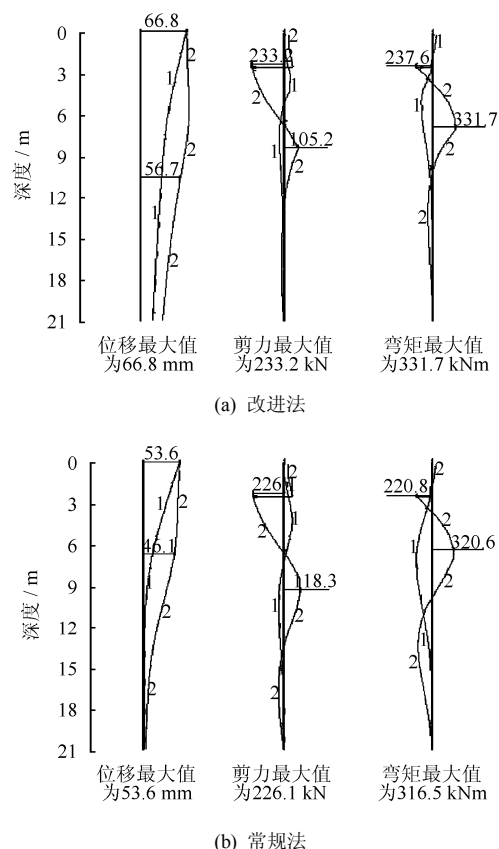


图 8 围护桩水平位移和内力计算结果 (算例 2, 长边中桩)
Fig.8 Horizontal deformations and internal forces of retaining pile (case 2, pile in middle of long side)

从计算结果可知, 本文改进法得到的最大围护桩变形较传统法的结果略大, 而两种方法得到的内力结果则相差不大。改进法得到的围护桩底端位移明显大于常规法, 且在基坑中部的围护桩表现更明显; 当宽深比越大时, 桩端位移越明显。当基坑深度相同而平面尺寸不同时, 平面尺寸越大, 改进法和常规法得到的基坑中部围护桩的最大位移都略大, 但改进法得到的桩端位移增大更明显, 导致围护桩变形曲线的包络面积越大, 亦即基坑对周围的影响越大, 这一结论与基坑三维实体有限元计算结果和大量现场实测结果吻合, 因此改进法可以更好地反映基坑的空间效应。

6 结 语

本文利用 Mindlin 解得到坑内土体的卸荷应力分布, 在前人实验研究基础上, 推导了考虑卸荷应力路径的土体水平抗力系数, 将支护结构的变形分解为开挖瞬时的卸载作用和基坑内外水土压力差作用两个阶段, 考虑卸载应力路径对坑内土体水平抗力系数以及开挖瞬时变形的影响, 对传统的弹性抗力法进行了改进。

改进法得到的围护桩水平变形尤其是桩端变形大于传统方法, 而对内力结果影响不大; 基坑平面尺寸越大, 两者的变形结果差别越明显, 改进法更好地反映了平面尺寸对基坑变形的影响。

参 考 文 献

- [1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 中国建筑科学研究院. JGJ120-99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑出版社, 1999.
- [3] 范益群, 钟万勰, 刘建航. 时空效应理论与软土基坑工程现代设计概念[J]. 清华大学学报, 2000, 40(增刊 1): 49-53.
- [4] FAN Yi-qun, ZHONG Wan-xie, LIU Jian-hang. The space-time effect theory and the concept of current soft-soil foundation design[J]. *Journal of Tsinghua University*, 2000, 40(Supp.1): 49-53.
- [5] 王建华, 范巍, 王卫东, 等. 空间 m 法在深基坑支护结构分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1332-1335.
- [6] WANG Jian-hua, FAN Wei, WANG Wei-dong, et al. Application of 3D m-method in analysis of retaining structures of deep excavation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(Supp.): 1332-