

土体初始侧压力系数对基坑有限元计算的影响

⑩
44-46

张永进

冯 刚

TK15-1.4
4463

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098) (南京工程兵工程学院 南京 210007)

TK15-1.42

摘要 概述了基坑有限元模拟过程中与土体初始侧压力系数 K_0 有密切关系的开挖荷载计算和土体本构模型两个方面的问题,分析了土体采用邓肯 $E-\nu$ 模型时 K_0 值变化对基坑支护桩体位移的影响规律及其原因,归纳了现有的计算土体初始侧压力系数 K_0 的几种方法,在实际应用时,可根据土体的具体情况,来计算土体的 K_0 值。

关键词 有限元模拟;土体初始侧压力系数;开挖荷载;本构模型;敏感性分析

基坑

目前,应用于基坑分析的方法通常可归纳为经典结构力学方法、弹性抗力法和有限元模拟分析法三种。其中有限元法具有自身的一些优点,如适用性强,可以模拟基坑的分级开挖,可以考虑桩土间的相互作用,可以较好地反映土体应力-应变关系等,因此,有限元法在基坑问题的研究乃至工程设计中逐渐被采用。

尽管有限单元法有许多优点,但它在基坑模拟分析的应用中也存在一些相关问题,如土体本构模型的选取,土体初始侧压力系数 K_0 的确定,开挖荷载的计算,支护桩与土体间的接触性状模拟等。这些问题若处理不当,则会影响有限元法在基坑分析中的使用效果。本文着重分析土体初始侧压力系数 K_0 的选取对有限元计算的影响,并对该影响作出分析,最后提出几种选取 K_0 值的方法。

1 基坑有限元模拟中的几个问题

通过对一个“基坑有限元模拟分析软件”的开发及其在几个工程实例中的应用,笔者认为基坑有限元模拟过程中存在两个主要问题,即开挖荷载的计算和土体本构模型的选取。这两个问题都与土体侧压力系数 K_0 有着密切的联系。

1.1 开挖荷载的计算

目前用于计算基坑开挖荷载的方法很多,归纳起来可以分为两种:一是由开挖单元应力计算开挖荷载,如 Mana^[1] 提出的计算方法;另一种是利用开挖单元结点位移计算开挖荷载的方法^[2]。

以上两种方法都是针对基坑的第二级及以后的开挖荷载提出的,而基坑开挖的有限元模拟都要涉及

第一级开挖荷载的计算问题,这也就是如何确定基坑地层的初始应力问题,其初始应力由以下公式计算:

$$\sigma_z = \gamma z \quad \sigma_x = K_0 \sigma_z \quad \tau_{xz} = 0 \quad (1)$$

式中: σ_z , σ_x 和 τ_{xz} 分别为土体的自重应力、水平向应力和切应力; γ 为土体的容重; z 为应力计算点到原地面的深度。

由此可见,土体侧压力系数 K_0 的取值,影响土体水平应力 σ_x 的大小,从而决定基坑第一级开挖水平荷载的大小。水平荷载对基坑土体的水平位移分布有着决定性的作用,并且土体由第一级开挖所产生的位移及应力分布还会影响以后各级开挖的计算结果。

1.2 土体本构模型的选取

国内外不少学者对应用于基坑有限元分析中的土体本构模型作了深入的研究,一些新的模型陆续被提出,如文献[3]提出的 MT-E3 有效应力模型,文献[4]中提出的 Brick 模型等。但目前比较常用且容易被接受的还是邓肯-张 $E-\nu$ 双曲线模型,该模型使用简单,而且在模型参数的求取方面已积累了不少的经验。

曾国熙等^[5]根据基坑内外土体单元应力变化路径不同的特点,在邓肯双曲线模型的基础上提出了分区考虑土体弹性模量计算的方法,并把饱和软粘土的应力-应变曲线的初始切线模量与应力路径进行归一化处理。基坑分区计算弹性模量的表达式为

$$E_{if} = \bar{E}_i \sigma'_c (1 - R_f S)^2 \quad (2)$$

$$E_{ib} = 2\nu_i \bar{E}_i \sigma'_c (1 - R_f S)^2 \quad (3)$$

式中: E_{if} 和 E_{ib} 分别为基坑内、外土体的切线弹性模量; $\bar{E}_i$ 为归一化应力-应变曲线的初始切线斜率; S

为切应力水平; R_f 为破坏比率; ν_t 为土体切线泊松比; σ_e' 为反映土体应力状态的归一化应力。

文献[6]则利用应力控制式三轴仪, 针对基坑外主动土压力区土体的现场应力路径作了三轴主动压缩试验, 得出了土体在特殊应力路径下(土体的第一主应力 σ_1 不变、土体的第三主应力 σ_3 减小)的应力-应变规律, 并对基坑外土体的弹性模量计算公式进行了如下改进:

$$E_{tB} = \bar{K} P_a \left(\frac{\sigma_1}{P_a} \right)^{\bar{n}} \left[1 - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 + \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_1 \sin \varphi} R_f \right] \quad (4)$$

式中: $\bar{K}$ 和 $\bar{n}$ 为由试验得到的修正 $E \sim \nu$ 模型参数; c 为土体的粘聚力。在有限元分析中无论是采用邓肯双曲线模型, 还是在此基础上修正过的双曲线模型, 在计算弹模时一般都与土体的初始应力状态(土体初始的 σ_1, σ_3 及应力水平 S 值)有关, 这也反映了土体的力学性质不仅与当前的应力状态有关, 而且与它以前所处的应力历史有着密切的关系。式(4)中由 σ_1 来确定相应应力下土体的初始切线弹性模量, 这不仅使土体的应力-应变规律更接近于基坑外土体的实际情况, 也使弹性模量计算过程中对初始应力状态(K_0 的选取)的敏感性有所降低。

2 土体初始侧压力系数 K_0 对基坑位移的影响及其原因分析

土体的初始侧压力系数 K_0 对于有限元的计算结果有着相当大的影响, 这一点已经在土工数值分析中得到证实。图1为一高填土路基中心沉降随 K_0 值变化的影响曲线($\Delta_{0.5}, \Delta_{K_0}$ 分别表示土体初始侧压力系数在 0.5 及 K_0 时路基中心的沉降值)。从图中可以看出, K_0 对第一级填筑完成时的计算沉降有较大的影响, 但到后期(图中为第四级完成时的总沉降) K_0 值对沉降量的影响减小。然而, K_0 值对位移的影响在深基坑开挖这一类卸载土工问题中表现得尤为突出, 见图2。

K_0 值表示初始应力状态下水平应力 σ_x 与竖向应力 σ_z 的比值, 因而它反映了土体初始的应力水

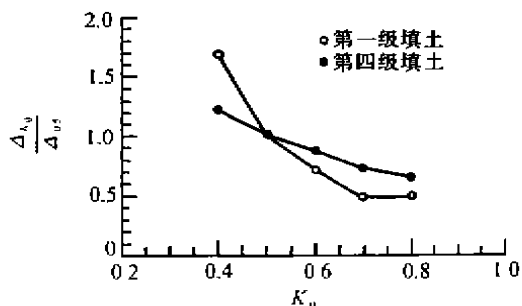


图1 路基沉降随 K_0 变化规律

平。在基坑外主动土压力区的土体单元, 其竖向应力 σ_z 是明了的, 在以后的土体变形中不会有大的变化, 土体单元的初始小主应力 $\sigma_3^0 = K_0 \sigma_z$, 在邓肯 $E \sim \nu$ 模型中是决定初始切线弹性模量 $E_t = \bar{K} P_a \cdot (\sigma_3/P_a)^{\bar{n}}$ 的一个主要的量值。随着基坑开挖深度的加大, 该区域土体的 σ_3 会进一步减小, 按邓肯双曲线模型计算初始切线弹性模量的方法可知, 在以后的计算中初始的 σ_3^0 将成为控制 E_t 大小的一个不变量, 因此 K_0 值的大小就决定了土体单元在以后计算中 E_t 值的大小。但在一般的填土加载问题中, 初始的小主应力 σ_3^0 虽由 K_0 值决定, 但以后的 σ_3 处于增大趋势, 在计算初始切线弹性模量时用小主应力 σ_3 会被以后增大的 σ_3 值取代, 因此, 通过几级加荷后计算位移对 K_0 值的敏感性就大大降低了。

K_0 值越小, 土体的应力水平就越大, 土体的切线弹性模量 E_t 就越小, 这一点对填土加荷或挖方卸荷问题都是一致的。

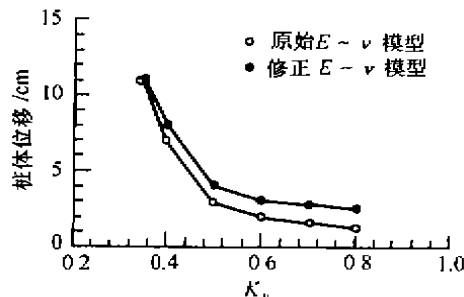


图2 基坑支护桩位移随 K_0 变化规律

从图2中可以看出, 随着 K_0 的增大桩顶的最终水平位移很快减小, 这是弹性模量 E_t 随 K_0 增大而增大的缘故。但若在基坑主动土压力区采用主动压缩三轴试验参数及其相应模型(公式(4)), 桩体位移受到 K_0 的影响程度则会有所减小(图2中的修正 $E \sim \nu$ 模型曲线), 其原因可理解为, 该模型中的初始切线弹性模量 E_t 是由 σ_1 来决定的, 即 $E_t = \bar{K} P_a \cdot (\sigma_1/P_a)^{\bar{n}}$, K_0 的取值不会影响到土体 E_t 值的计算, 只会直接影响到初始应力水平的大小。

3 土体初始侧压力系数 K_0 值的确定

影响土体初始侧压力系数的因素很多, 如土的物理特性、应力历史、结构特性, 测量时的应力路径等。在工程应用中应按基坑场地土质的实际情况, 采用不同的公式来计算土体的侧压力系数 K_0 值。

a. 对正常固结的粘土和砂土可用以下公式计算:

$$K_0 = A - \sin \varphi' \quad (5)$$

式中: A 为与土体性质有关的参数, 砂性土时, 取 $A = 1.0$, 粘土取 $A = 0.95$; φ' 为土体的有效内摩擦角。

b. 考虑土体的应力历史, 对超固结土常用以下

公式来计算:

$$K_0 = (1 - \sin \varphi') (OCR)^{0.5} \quad (6)$$

式中: OCR 为土体的超固结比。

文献[7]在 Schmidt 的基础上总结出了可以描述加载、卸载和再加载的复杂加荷过程下的 K_0 值计算公式:

$$K_0 = (1 - \sin \varphi') \left[\frac{OCR}{OCR^{(1 - \sin \varphi')}} + \frac{3}{4} \left(1 - \frac{OCR}{OCR_{\max}} \right) \right] \quad (7)$$

式中: $OCR_{\max} = \frac{\sigma'_{v\max}}{\sigma'_{v\min}}$, 其中 $\sigma'_{v\max}$ 为历史上承受过的最大应力。

c. 在工程实践中, 由于条件的限制, 土体的 φ' 值不易取得, 常用一些经验公式来求土体的 φ' 值, 如用坦哈姆公式, 级配良好土粒的 φ' 值可表示为

$$\varphi' = \sqrt{12N} + 20 \quad (8)$$

式中: N 为土层的标准贯入击数。由式(8)求得 φ' 后, 可由式(5)~(7)来计算土体的 K_0 值。

在缺少土体室内及现场测试资料的情况下, 可以参照一些行业规范来选取土层的 K_0 值, 如我国的《建筑基础结构设计规范》、《公路设计手册》等。

4 结 语

a. 无论采用应力法还是位移增量法求基坑的开挖荷载, 土体初始侧压力系数 K_0 对计算结果有一定的影响, 尤其是第一级开挖荷载受其影响较大。

b. 土体的初始侧压力系数 K_0 决定了土体的初始应力状态, 对目前土工数值分析中比较常用的邓肯 $E-\nu$ 模型及其改进形式, 由于 K_0 值的不同, 则由模型计算所得的切线弹性模量有较大的差异。

c. 对填土加荷一类的土工问题, 第一级加荷时的计算结果对 K_0 值有较大的敏感性, 但随着加荷级数的增加, 计算结果对 K_0 值的敏感性有所下降。

d. 对基坑开挖一类的挖方卸荷问题, 计算结果对 K_0 值敏感性比一般的填土加荷问题大, 且随着开挖级数的增加, 计算结果对 K_0 值的敏感性并不减小; 但若在基坑外的主动土压力区使用式(4)的计算模型及相应的参数, 则计算结果对 K_0 值的敏感程度有所减小。

e. 土体的初始侧压力系数 K_0 值对基坑有限元模拟分析有较大的影响, 在实际应用时可根据土体的具体情况, 按式(5)~(8)来计算土体的 K_0 值。

参考文献

- 1 Mana A I. Finite element analysis of deep excavation behavior; [dissertation]. Stanford: Standford University, 1976

- 2 钱家欢, 殷宗泽. 土工数值分析. 北京: 中国铁道出版社, 1991
- 3 Youssef M A Hashash. Ground movement prediction for deep excavations in soft clay. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(6): 474 ~ 486
- 4 Charles W W Ng, et al. Effects of modeling soil nonlinearity and wall installation on back-analysis of deep excavation in soft clay. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(10): 687 ~ 695
- 5 曾国熙, 潘秋元, 胡一峰. 软粘土地基基坑开挖性状的研究. 岩土工程学报, 1988, 10(3): 13 ~ 22
- 6 张永进. 悬臂式支护基坑主动土压力区土体变形及其对主动土压力影响的研究. [学位论文]. 南京: 河海大学, 1997
- 7 李作勤. 影响粘土静止侧压力的一些问题. 岩土力学, 1995, 16(1): 9 ~ 16

(收稿日期: 1997-09-22 编辑: 张志琴)

· 简讯 ·

美国的治水方略

——保护漫滩湿地、保护森林, 建立科学预报系统

近几年美国几乎年年发生洪灾, 每次损失为数十至数百亿美元不等。为了防范洪灾, 美国政府制定了一系列新的防洪战略和措施并已取得了一定的效果。它们概括起来就是: 加强宣传教育, 提高公民的防洪意识; 制定切实可行的法规, 保护漫滩湿地; 建立科学的预报系统; 绿化环境, 保护森林, 防止水土流失。

美国政府和科学家在对密西西比河 1993 年特大水灾进行反思后得出了这样的看法: 由于水库必须经常保持高位蓄水以供发电所需, 因此水库蓄洪能力是有限的。为了有效地防洪抗洪, 必须管理好漫滩湿地、保护好堤坝, 维持泄洪通道的畅通, 提高建筑的防洪抗洪能力。

依靠法规保护好漫滩湿地是防洪减灾的重要一环。漫滩是靠近江河湖泊的低地部分, 它的主要作用是在洪水到来时帮助吸收洪水, 减轻洪水的力量。漫滩生长有多种植物, 使雨水在进入江河湖泊之前先滤去泥沙, 从而减少对江河湖泊的阻塞, 减慢河床增高的速度。在美国, 从联邦政府到州政府和地方政府都制定有保护漫滩湿地的法规, 禁止盲目和过度开发漫滩资源, 从而有效地保护了漫滩湿地的数量、完整性及生物多样性。

建立科学和可靠的预报系统, 在洪水来临前提早疏散居民, 这有助于减轻洪水带来的破坏和损失。美国目前的洪灾预报系统由数据自动收集系统、卫星数据传输系统、电脑预报系统、自动报警装置等几部分组成。

绿化环境、保护森林、减少水土流失, 对于防洪非常重要。美国的森林覆盖率达陆地面积的三分之一, 全国到处都是绿荫, 几乎看不到裸露的土地。这除了美国的自然环境优越、有利于植物生长以外, 主要还是得益于全国上下重视植树造林和保护森林。美国法律规定任何树木包括私人住宅基地上的树木都不得随意砍伐, 修房造屋和筑路修桥也要尽可能地避开森林, 而且每砍一棵树就必须再种上一棵树。实践证明, 森林在蓄水、防止水土流失以及调节气候等方面起着不可替代的作用。

(摘自《上海译报》1998 年 10 月 5 日 C 版)