

土体非线性影响的深基坑支护研究综述

高俊合 赵维炳 施建勇

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

摘要 就土体本构模型及参数、非线性分析方法的改进和计算成果三个方面,回顾国内外近 20 年来的研究进展,指出存在的问题及解决的方法,针对基坑开挖特有的应力-应变关系和应变集中现象,单独建立适于基坑开挖分析的土体本构模型;加强软土基坑开挖的非线性分析研究;改进有限元分析方法(如单元剖分等);开展三维问题研究等。

关键词 非线性分析 深基坑支护 本构模型 有限单元法 基坑

深基坑工程对支护结构的整体性状要求很高,必须考虑许多复杂因素的影响,如土的非线性、土与结构相互作用、固结和降水及锚杆与内支撑作用机理等。基坑支护设计三种方法^[1](常规法、弹性抗力法、有限元法)中,只有有限元法可以综合考虑这些因素的影响,因此被广泛地应用于深基坑支护研究设计中。

有限元法的优点是可考虑许多因素的影响,计算结果精确可靠,但也可以根据工程的具体情况,如投资大小、工期和开挖要求等,合理地选择几项主要的因素加以分析,这样既可节约时间和经费,又能满足工程要求。但不论这些因素如何选取,土的非线性是必须要考虑的,它是决定有限元分析成功与否的关键,以下就此着重讨论。

1 土体非线性影响的分析方法

在较高应力水平下把土体作为线弹性体是不合理的,饱和粘土即使在较低的应力水平下也具有明显的非线性。因此,必须进行非线性分析。土体在各种应力状态下都具有塑性变形(即存在非线性)^[2]。土体非线性分

为物理非线性和几何非线性。对于深基坑工程,不会允许土体产生过大的变形,故几何非线性一般不予考虑。

土体非线性分析包括三个方面^[3]:一是土体本构模型及参数确定的改进;二是非线性分析方法的改进,即从数学角度,结合土体有限元分析特点,从计算方法上提高;三是针对深基坑支护开挖的实际情况,如荷载条件、施工条件等,进行模拟分析。而寻求能正确地反映土体应力-应变关系的本构模型及合理地确定其参数,又是非线性分析的关键。

2 土体非线性影响的深基坑支护研究现状

土体非线性分析研究内容很多,不同学者侧重点不同,有的注重本构模型及参数研究;有的则是非线性分析方法本身及计算成果分析。下面就这三个方面进行讨论。

2.1 本构模型及参数

土体本构模型有上百种,常用于深基坑开挖分析的只有几种,如邓肯-张双曲线模型、修正剑桥模型等。深基坑开挖中,土体有其独特的应力-应变关系,许多学者针对这一

第一作者简介:高俊合,男,博士研究生,从事深基坑支护结构设计的理论研究。

特点及具体深开挖工程条件提出或引用了不同的计算模型。

如较早开展土体非线性研究的 Murphy^[4], 用非线性准弹性模型模拟带状粘土在不排水条件下的开挖性状。而 Mana^[5] 则对类似土质条件和排水条件, 用完全弹性-塑性模型。前者的计算效果较好, 板桩变形及支撑荷载的计算值与实测结果较吻合; 而后者计算所得的板桩挠曲形状与实测不符, 尤其是在施工初期, 地表沉降(墙后)也小于实测, 而远离墙后却大于实测。可见本构模型对计算结果影响较大。

文献[6]采用 MIT-E₃ 有效应力模型, 结合 Drucker-Prager 公设及不相关联的流动法则。假定弹性切变模量和体积模量与平均有效侧限压力成正比, 以便考虑土的性质随深度的变化。该模型可考虑应力-应变-强度的各向异性。经研究表明, 对超固结土层的深开挖, 用此模型分析效果较好。其他学者也曾用它对 Boston 粘土(一种超固结土)进行计算模拟。但对于正常固结土是否适宜, 未见报道。

Jardine 等^[7]通过野外及室内试验研究, 提出一种类似于邓肯-张双曲线模型的土体本构关系, 采用完全塑性的 Tresca 破坏准则。但它仅是经验性的, 不能反映土体的弹塑性、非线性、剪胀性等, 且用于开挖分析的效果很不理想。

纵观国内外研究, 更多的学者仍采用常用的邓肯-张双曲线模型和修正剑桥模型, 或是它们的改进形式。

文献[8]是有关支护开挖分析研究考虑因素最多的一篇。作者建议采用邓肯-张双曲线模型和 Mohr-Coulomb 破坏准则, 其理由是: 该模型应用于土体数值分析已很成熟, 实践中积累了不少经验, 模型中有关参数可由常规三轴试验求得。

Chang-Yu Ou 等^[9]通过对大量实例分析, 认为粘土可用修正剑桥模型, 而砂土则宜采用邓肯-张双曲线模型, 不同土层可分别采用不同的模型。

曾国熙等人的研究^[10]开创了国内深基坑开挖非线性有限元分析的历史。作者为考虑应力路径的影响, 把饱和软粘土的应力-应变曲线, 按固结应力 σ_c' 进行归一化, 建立模量方程:

$$E_{tF} = \bar{E}_{tF} \sigma_c' (1 - R_f S)^2$$

$$E_{tB} = 2\nu_t \bar{E}_{tB} \sigma_c' (1 - R_f S)^2$$

式中 E_{tF} 和 E_{tB} 分别是深基坑开挖中两种典型应力路径下, 归一化应力-应变曲线的初始切线斜率; S 为应力水平; R_f 为破坏比; ν_t 为泊松比。上述的模量方程实际上是对邓肯-张双曲线模型的改进。

由上述可知, 多数学者都是针对某一问题提出或引用一个模型进行计算, 而用不同模型对同一问题对比分析的工作做得极少, 仅见于文献[11]。文献[11]中作者对硬粘土开挖问题采用两种本构模型: 线弹性塑性 Mohr-Coulomb 模型和非线性 Brick 模型。对墙体变形、支撑荷载和地面沉降等分别预测并比较。两种模型的比较可参见下文附表, 从总体来说, 非线性 Brick 模型较好。

赵维炳、施建勇等在他们开发的“支护结构分析”软件中指出: 邓肯-张的 E_t - ν_t 模型及 E_t - B_t 模型、修正剑桥模型和殷宗泽椭圆-抛物双屈服面模型都是可供选择的, 但未给出各种模型的比较和各自的优缺点。^①

2.2 非线性分析方法的改进

传统的分析方法有增量法、迭代法和增量迭代法。其中增量法, 因其能较好地模拟开挖中荷载逐级释放的过程, 而大量地应用于支护分析中。有些学者还研究并应用了一些新的非线性分析方法。

Borja^[12]针对修正剑桥模型用于逐级开挖的问题, 提出应力-点积分法的非线性分析方法。该方法在土体不破坏时, 无条件地收敛, 且具有很高的计算精度。适于平面应变问题、轴对称问题和三维问题。可考虑排水,

① 赵维炳、施建勇等, 深基坑结构设计软件的开发, 江苏省土木建筑学会地基基础学术年会论文集。

也可考虑不排水。该方法适用性较广,但作者未将该方法与其它方法比较。

隐含积分法是由文献[13]用于深基坑开挖分析的,它把切向劲度矩阵线性化,具体步骤如下。

a. 由弹性预测值给出 t_{n+1} 时刻修正应力和内部变量的第一次估计值。

b. 用隐含的欧拉向后差分法解塑性修正问题。

c. 用(全)牛顿法迭代地求一致逼近值。

该方法最初由 Wilkins 提出, Simo 和 Taylor 等作了进一步改进, Borja 也曾多次用该方法求解土体其它弹塑性问题。

当然,还有最近提出的非线性分析方法,限于篇幅,这里不再列举。总的说来,非线性分析方法本身的改进研究明显少于本构模型的研究,因为前者涉及复杂的数学问题。实际计算中,还是前述的增量法用的较多。

2.3 计算成果

支护结构的变形、支撑荷载和地面沉降等常被用来描述支护开挖的性状,因此,这些指标的计算值与实测值接近程度是衡量非线性有限元分析效果的主要因素。每一位研究者,总是要给出这些指标计算值与实测值的比较结果,以检验所采用的本构模型和计算方法。这里,针对几个较有价值的计算成果作一介绍。

文献[7]有关板桩插入深度及土体和板桩刚度的研究具有一定的理论意义和实际应用价值。文中指出,当板桩的插入深度满足最小值要求时,继续增加插入深度对减小侧向位移几乎没有效果。增加板桩刚度能一定程度地减小板桩上部侧向位移,但由此将引起弯矩的显著增加。土体刚度增大使板桩的侧向位移和弯矩减小。这些都与工程实践的结论一致。作者还分析了杭州一工程实例,计算的土体侧向位移和土压力值与实际观测结果较接近,现场观察到的基坑外地面裂缝也落在预估的破坏区内。这说明,所采用的计算模型、参数和计算方法基本上反映了实

际规律。

Wong^[14]等对粘土开挖中的墙体侧向变形及其影响因素作了较深入的探讨。这些因素包括:土的不排水强度、基坑尺寸(宽度和深度)、墙体刚度及其贯入深度、下硬卧层距离坑底深度,得出了很有意义的计算成果。

不同种类的模型计算结果的比较,国内外研究的都很少。事实上,这是很有意义的。Ng 等^[11]用反分析法研究了非线性对硬粘土深开挖的影响,文中还考虑了墙体设置效应。两种模型(非线性 Brick 模型和弹塑性 Mohr-Coulomb 模型)的比较详见附表。

附表 计算值与实测值的比较

指 标	Brick-WIM	Mohr-Coulomb -WIM	Mohr-Coulomb -WIP
墙体最大挠曲 (顶部 + 160%)	- 6%	+ 8%	+ 24%
弯 矩	- 32%	- 56%	+ 10%
支撑最大荷载	+ 21%	+ 5%	+ 176%
沉 降	形状吻合较好	形状吻合较差	形状吻合较差

注: + 表示高于实测值; - 表示低于实测值; WIM 表示考虑墙体设置效应; WIP 表示不考虑墙体设置效应。

3 存在的问题及今后的研究方向

3.1 本构模型

首先,所采用的模型基本上都是把通常状态的土体本构关系硬搬到处于卸荷状态的基坑开挖问题上,而通常状态的本构模型自身并不完善^[15]。况且,开挖中的土体有其特有的应力-应变关系,严格地讲,应单独建模。

其次,国内外学者的研究多针对硬粘土、超固结土及砂土,而我国经济发达、基建发展很快的沿海地区多是软土,以正常固结土为主。所以,建立软粘土特有的应力-应变关系模型和提出适于软土地区基坑开挖的非线性分析方法有着重要的现实意义。

最后,大多数学者的研究都集中在讨论墙体变形、支撑荷载等问题上,而对土体中就应变集中及由此导致的土体侧向变形,讨论得极少。如果说,前几个表述支护开挖性状的参数可以较好地模拟的话,那么对于应变

集中问题,现有的各种土体本构模型都无能为力。目前,急需一个有效的模型来解决这一问题。Finno^[16]分析后认为,通常的模型不能反映应变软化,这与沈珠江的观点不谋而合。Finno 还建议,可采用 Bazant 的基于微力学概念的破坏过程或 Vardoulakis 的不连续介质概念来模拟。

3.2 计算参数及计算方法

土体参数及结构的参数并未受到充分的重视,这一点由前面的论述可以看出。这些计算参数一般是由室内试验获得,实践表明,由于种种条件的限制,由室内所得参数与实际相差甚远。因此,参数的确定方法上还有待进一步改进。现有的非线性分析方法基本上能满足要求,但仍需进一步提高。

3.3 其它方面

通常是把基坑剖面看作对称的,单元剖分计算只取一侧。这样固然可以减少计算工作量,但由于基坑两侧的荷载条件和边界条件一般是不同的,尤其是采用内支撑时,它可传递荷载,这更加剧了两侧的不对称性。另外,现有的深基坑支护研究都是作为平面问题处理的,而从理论上讲,应是空间三维问题。

参考文献

- 1 高大钊. 软土深基坑支护技术中的若干土力学问题. 岩土力学, 1995, 16(3): 1~6
- 2 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算. 北京: 水利电力出版社, 1994
- 3 朱百里, 沈珠江. 计算土力学. 上海: 上海科学技术出版社, 1990
- 4 Murphy D J, Clough G W, Woolworth R S. Temporary excavation in varied clays. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, 101(1): 279~295
- 5 Mana A I, Clough G W. Prediction of movements for braced cuts in clay. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, 107(3): 759~778
- 6 Whittle A J, Hashash M A, Whitman R V. Analysis of deep excavation in Boston. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(1): 69~90
- 7 Jardine R J, Fourie A B, Burland J B. Studies of the in-

fluence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction. Geotechnique, 1986, 36(3): 377~396

- 8 Tsui Y, Cheng Y M. A fundamental study of braced excavation construction. Computers and Geotechnics, 1989, 8: 39~64
- 9 Chang-Yu Ou, Ching-Her Lai. Finite-element analysis of deep excavation in layered sandy and clayed soil deposits. Canada Geotechnique Journal, 1994, 31: 204~214
- 10 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
- 11 Ng C W W, Ling M L. Effects of modeling soil nonlinearity and wall installation on back-analysis of deep excavation in stiff clay. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(10): 687~695
- 12 Borja R I. Analysis of incremental excavation based on critical state theory. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(10): 964~985
- 13 Hashash Y M A, Whittle A J. Interaction of the modified Cam-Clay Model in non-linear finite element analysis. Computers and Geotechnics, 1992, 14: 59~83
- 14 Wong K S, Brom B B. Lateral wall deflections of braced excavations in clay. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(6): 853~869
- 15 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95~97
- 16 Finno R J, Harahap I S, Sabatini P J. Analysis of braced excavations with coupled finite element formulations. Computers and Geotechnics, 1991, 12: 91~114

(收稿日期: 1996-05-20 编辑: 许宇鹏)

· 简 讯 ·

英国 Wallingford 水文研究所经 3 年的研究开发, 最近研制成功一种可探测河流水能的软件, 用于英联邦和西班牙河流水能潜力探测。计划今后 3 年将推广用于欧洲其他国家。阿尔巴尼亚、斯洛伐克、印度、菲律宾和菲济等国家对 HydrA 也很感兴趣。HydrA 英联邦版本已于 1997 年 3 月正式发行。

(熊莉芸供稿)