深基础，软土地基，支护技术，土力学

第16卷 第3期
1995年9月

岩 土 力 学
Rock and Soil Mechanics

Vol. 16 No. 3
Sept. 1995

95, 16(3)
1-6

软土深基坑支护技术中的若干土力学问题

高大钊

TU473.2

（同济大学地下建筑与工程系，上海 200092）

A

文 摘 评述了软土深基坑支护结构的现有设计方法，分析了墙的刚度和位移对土压力分布的影响，讨论了地下水对侧压力计算的影响、设计参数的测定与选取以及有限元计算中的一些问题，最后对支护结构的安全评价提出了建议。

关键词 基坑开挖；土压力；土的水平抗力系数

中图法分类号 TU 473.2

1-15

1 引 言

沿海软土地区是我国经济比较发达、开放比较早的地区。由于城市土地昂贵，又由于城市交通要求发展地下车库以及地下商场的兴起，高层建筑的高度、地下室层数与基坑开挖深度都有增多的趋势，这种趋势与软土工程地质条件制约之间的矛盾日益突出，深基坑开挖的工程事故明显增多，深基坑支护技术已成为软土地区高层建筑工程建设中的难点和热点。

诚然，施工质量不佳，施工工艺与程序未按设计要求进行，甚至偷工减料，这些都是当前基坑支护失效频率居高不下的重要原因，甚至是直接原因。但在设计中对支护结构受力状态不甚明了，计算简化与实际情况相差过大，过低地估计了某种作用力，给设计造成隐患，也是一个值得充分重视的问题。

支护设计的关键是正确分析支护结构在不同工况时的受力状态与变形情况。首先必须正确地估计作用在支护结构上的侧压力才有可能作结构内力分析，但侧压力的大小不是固定不变的，荷载引起结构变形，而支护结构的变形又使侧压力的大小与分布发生变化，这种相互作用的机理在现行设计方法中无法加以考虑。本文的目的在于提出在支护设计方法的改进中值得重视的若干土力学问题，以期引起同行的兴趣。

2 对现有设计计算方法的讨论

基坑支护设计计算方法大致可分为三类。第一类是常规设计方法；第二类称为弹性抗力法；第三类是有限元方法。

常规设计方法是最常用的方法，其要点是在选择一定的入土深度以满足整体稳定、抗隆起和抗渗要求的前提下用经典土力学理论计算主动土压力和被动土压力（或对计算的土压力

收稿日期：1994-10-05。 高大钊，男，60岁，教授，博士导师。主要从事岩土工程可靠性和软土基本性质研究。

维普资讯 http://www.cqvip.com

作某些经验修正),然后对重力式刚性挡墙验算其抗倾覆、抗滑移稳定性,安全系数沿用设计规范中对普通挡土墙的规定;或者计算柔性挡墙(悬臂式或有支锚结构)的内力,对墙身和支锚结构进行设计。这种方法对于普通挡土墙或开挖深度不深的钢板桩是比较成熟的。但对深基坑,特别是软土中的深基坑支护结构设计就难以考虑更为复杂的条件和难以分析支护结构的整体性状。例如支护结构与周围环境的相互影响,墙体变形对侧压力的影响,支锚结构设置过程中墙体结构内力和位移的变化,内侧坑底土加固或坑内、外降水对支护结构内力和位移的影响,压顶圈梁的作用与设计,复合式结构的受力分析等等。这些问题有时却成为控制支护结构性状的主要因素。

弹性抗力法针对常规方法中挡墙内侧被动土压力计算中的问题提出了改进。其概念是由于挡墙位移有控制要求,内侧不可能达到完全的被动状态,实际上仍处在弹性抗力阶段,因此,引用承受水平荷载桩的横向抗力的概念,将外侧主动土压力作为施加在墙体上的水平荷载,用弹性地基梁的方法计算挡墙的变位与内力。土对墙体的水平向支承用弹性抗力系数来模拟,支锚结构也用弹簧模拟。这种方法可以看作对常规方法的改进,它仍没有解决前一种方法的其余问题。计算与实际符合与否取决于基床系数的选取,通常用 m 法计算,即基床系数 k 随深度比例增长,比例系数为 m 。

有限元方法提供了一种更为合理的设计计算方法,它可以从整体上分析支护结构及周围土体的应力与位移性状,而且可适用于动态模拟计算,不仅为事前设计与方案比较而且亦为信息反馈施工管理提供实时处理的手段。从原理上说,常规方法存在的问题在有限元方法中都可不同程度地得到解决。除了数值分析方法本身的问题以外,用有限元方法的关键是要正确选用计算模型和设计参数;另一个需要研究的问题是安全系数的定义及如何与常规设计的安全系数相匹配。如果后一个问题不解决,有限元方法仍然只停留在辅助手段的水平上而不能成为一种可供实用的工程设计方法。

可以看出,常规设计方法仍然是目前支护结构设计的主要方法,但需对它存在的问题加以研究改进;同时发展有限元方法使之实用化、系统化,成为支护结构计算机辅助设计软件系统,供设计与施工管理采用。

3 关于土压力计算的几个问题

无论是常规设计方法或弹性抗力法都需计算挡墙外侧的主动土压力,目前,通常用 Rankine 土压力理论计算。

挡墙外侧的侧压力除了土压力外还存在水压力。计算时有两种处理方法,一种是分别计算主动土压力和水压力,称为分算,显然,计算土压力时用浮容重;另一种称为水土合算,即用饱和容重计算土压力,不再另计水压力。人们发现,合算的侧压力总是小于分算的侧压力,这是因为水压力各向相等的缘故。通常的选用原则是对于砂土或粉土宜用分算,对粘性土宜用合算。

对于粘性土,从概念上弄清水土分算与合算的区别以及正确选用指标是十分重要的。当水土分算时,竖向应力为 $\gamma' Z$(γ' 为浮容重),$\gamma' Z$ 实质上是土的有效自重应力,与应力相匹配,应当采用土的有效抗剪强度指标 $C'\varphi'$ 计算。合算时竖向应力为 γZ,γZ 是总应力,其抗剪强度指标应采用总应力指标。这样,分算结果就不一定总是比合算大。对于砂土,用直剪总应力法求得

维普资讯 http://www.cqvip.com

的固结快剪指标接近于排水剪指标，可用于分算的计算公式中。

当环境条件容许采用坑外降水时，计算中如何反映降水的作用是一个值得研究的问题。如果用总应力法计算，降水前后土的天然容重并没有太大的变化，降水区与地下水位以下土的总应力抗剪强度指标又没有区别，则降水前后，水土合算的主动土压力并不变化，这显然与实际不符合。如果用有效应力法计算，则降水后所减小的侧压力可由下式表示

$$\Delta E = \frac{1}{2}\gamma_w Z_0^2(1 - K'^2)$$

式中　Z_0 为降水的幅度(m)；K'^2 为主动土压力系数，$K'^2 = \mathrm{tg}^2(45 - \frac{\varphi'}{2})$；$\gamma_w$ 为水的密度。

常规设计方法对主动土压力的分布都采用 Coulomb 的简化假定，即土压力沿墙身直线分布，合力作用在墙高的三分之一处。Terzaghi 和 Tschebotaioff 用大尺寸模型试验证实，对于非常刚性的挡墙、墙背填砂的情况，当挡墙绕其顶部转动时，土压力沿深度呈直线分布；而对于其他情况，如绕其墙趾或绕墙中点转动或平移时，试验得到了抛物线型的分布；当墙的位移达到墙高的 1%时，侧压力就由静止状态下降到最小值[1]。

对于刚性挡墙只发生平移或转动的情况，Dubrova 在简化假定的基础上给出了侧压力沿墙高的分布表达式[2]

$$P(Z) = \frac{Z\gamma\cos\psi}{(1 + \sin\psi)^2}[\cos\psi - Z(\frac{d\psi}{dZ})]$$

式中　ψ 为滑动面上的作用力与法线的夹角，对于完全主动状态，$\psi = +\varphi$，完全被动状态，$\psi = -\varphi$。如墙绕其中点转动，墙顶转向填土，则墙顶为完全被动状态，墙趾为完全主动状态，ψ 随深度 Z 的变化为 $\psi = \frac{2\varphi Z}{H} - \varphi$，式中 H 为墙高；φ 为填土的内摩擦角；Z 为从墙顶起算的距离。

柔性挡墙的变形情况则比刚性挡墙要复杂得多，直线分布的假设与实际情况有很大的出入。柔性墙各点位移的大小和方向不完全相同，墙侧土体所处的状态与侧压力的大小也会不同，当开挖深度变化时，同一点的土压力也会发生变化，甚至会发生从主动到被动状态的变化。图 1 所示曲线是对地下连续墙墙背土压力的实测资料。编号为 0 的是初始状态，其余编号均与开挖编号一致。从地面下 14m 处的实测土压力变化可以看出，当开挖深度较浅时该点土压力从静止状态向被动状态方向增大；当开挖到 10.5m 时已发展为主动状态，此时该点墙的位移为 26mm，与开挖深度之比为 2.5×10^{-3}。上述数据说明柔性墙背土压力的分布规律比较复杂，很难用简单的公式来描述。

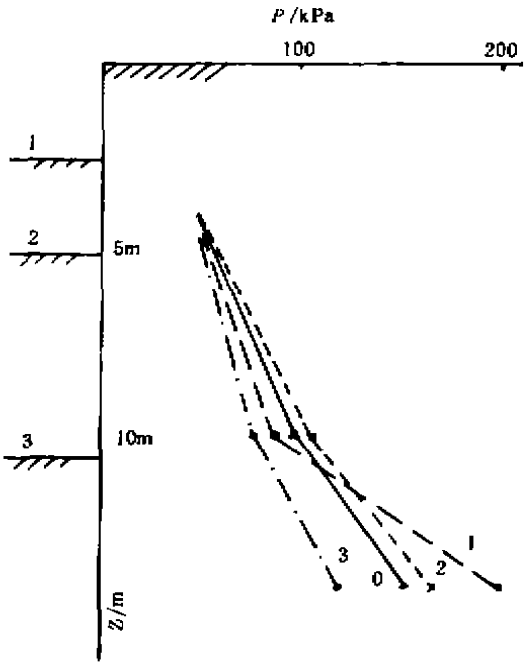


图 1　土压力实测曲线

Fig. 1　The measured earth pressure curve

维普资讯 http://www.cqvip.com

4 关于设计参数

无论何种设计方法，除了计算图式和计算模型要符合实际工况外，关键是设计参数的选用。

常规设计方法需要勘察提供土的抗剪强度指标，按上海市标准地基基础设计规范的规定，采用直剪固结快剪试验，按峰值强度计算 C、φ 值，这种指标适用于计算土压力和整体稳定性；但验算坑基底隆起稳定性时应当用按峰值打七折的方法计算 C、φ 值，因为当用极限荷载公式时应按局部剪切概念取 C、φ 值。

弹性抗力法需用土水平抗力系数的比例系数 m 值。灌注桩基础设计与施工规程给出了 m 值的经验值[3]，对于淤泥或淤泥质土，m 值为 2 500 ～ 6 000kN/m⁴；流塑、软塑状态粘性土，m 值为 6 000 ～ 14 000kN/m⁴；可塑状态粘性土，m 值为 14 000 ～ 35 000kN/m⁴；硬塑、坚硬状态粘性土或中密的中粗砂，m 值为 35 000 ～ 100 000kN/m⁴。这些经验数据是根据 102 根 $d = 30 \sim 100$cm 的试桩结果统计得到的，具有一定的可靠性。但每类土的上、下限相差很大，选用时任意性较大，影响计算结果。如果能用原位测试方法测定场地土的 m 值，就可大大提高支护设计的可靠性。

旁压试验的加荷条件能模拟支护结构对土体的横向加压情况，从测得的横向荷载与土的横向变形关系曲线上可求得土的水平抗力系数 K

$$K = \frac{P_y - P_0}{\varepsilon_y - \varepsilon_0}(\mathrm{kN/m^3})$$

式中 P_y 为临塑压力；P_0 为原位侧向压力；ε_y 和 ε_0 为相应的径向位移，可按旁压仪的水位降求得。在不同深度 Z 处测得不同的 K_z 值后即可求得其相关关系，直线的斜率即为所求的 m 值。

根据上海地区的部分实测数据，分别求得了 28m 深度范围内的浅层粘性土和 28～74m 范围内的深层砂土层的回归方程如下：

浅层粘性土： $K = (0.074 + 0.042Z) \times 10^5$，$r = 0.72$

深层砂性土： $K = [2.635 + 0.328(Z - 28)] \times 10^5$，$r = 0.74$

按实测资料求得粘性土的 m 值为 4 200kN/m⁴，砂性土的 m 值为 32 800kN/m⁴。这两个数值符合规程建议值的一般规律，说明用旁压仪实测水平抗力参数是可行的。

有限元方法能模拟基坑开挖时逐级卸载及修筑基础时重新加载的各种工况，算出土体和墙体的应力和位移值，是一种比较精确而适应性较广的计算方法。但是，计算结果与实际情况的符合程度取决于土的本构模型与计算参数能否反映工程的加载条件与土的实际性状。最好的方法是设计合适的本构模型使之能适应较广的应力路径，但过于复杂的模型难以推广应用。也可设计不同应力路径的参数测定试验，研究的初步结果表明，用 σ_1 不变减小 σ_3 的应力路径试验求得的初始切线模量大于用 σ_3 不变增大 σ_1 的试验结果，而强度值却正好相反。基坑开挖时，墙前、墙后和基坑中部的应力路径是不相同的，由于参数不同，用有限元分析的结果也会有差异。结合深基坑开挖条件，设计与之相适应的本构模型及其参数测定是有待深入研究的课题。

维普资讯 http://www.cqvip.com

5　关于安全系数

按常规方法设计时，有两类安全系数问题。第一类问题的抗力和荷载都是由土体或墙体材料重量引起的，如土压力、抗滑力、墙体重力矩等等；第二类问题的荷载由土体引起的，但抗力是由墙身材料强度构成的，如墙身配筋、抗弯或抗冲剪切验算、支撑验算等。

第一类问题按现行岩土工程有关规范的规定选用相应的总安全系数，设计参数均取用标准值。

第二类问题按现行钢筋混凝土结构设计规范的规定设计，荷载与抗力都应取设计值。规范规定的混凝土强度和钢筋强度都是设计值，即标准值除以大于1的抗力分项系数。但是，由土体产生的侧向压力，包括由侧向压力产生的弯矩和剪力都是标准值，其值小于设计值。这种状况使设计表达式两边不相匹配，如不加以调整，结果偏于危险，使安全度大幅度降低。调整的办法是将按常规方法求得的墙身最大弯矩 M 乘以分项系数 γ_s（γ_s 可取1.2）得到弯矩设计值 M_s，然后按规范规定配筋。

引起上述问题的原因是岩土工程规范尚未采用概率极限状态设计原则，仍采用总安全系数，这与结构规范的规定不一致，给设计工作带来困难。可见，支护设计的可靠性研究应提到日程上来，一方面对深大基坑的各种可能失效模式进行可靠性分析、寻求最易失事的失效模式，为设计和采取施工措施提供依据；另一方面为常规设计提供各类荷载和抗力的分项系数，使设计原则趋于统一。

有限元分析将土体和墙体都作为变形体，分析开挖卸荷条件下土体和墙体各点的应力和位移，属于变形分析的范畴。在求得了各点的应力和位移之后如何评价支护体系的整体安全度是一个尚未解决的问题。将任一点的剪应力和该点的抗剪强度进行比较可以评价该点的局部安全度或局部失效概率。但从整体来说，如何评价尚需建立安全度的评价准则。至于如何用变形控制方法建立安全度的评价准则比强度控制更为困难，但确是一个值得研究的问题。

6　结　语

（1）软土深基坑支护技术的发展对土力学研究提出了许多有待研究解决的课题。这些问题的研究对于既安全又经济地设计支护结构、减少工程事故是十分重要的。

（2）当采用水土分算或水土合算方法计算侧向压力时，应考虑竖向应力是有效应力还是总应力而采用相应的抗剪强度指标。

（3）土压力的分布是一个比较复杂的问题，尤其是柔性挡墙，可用有限元方法加以分析与研究，并通过实测资料验证，逐步完善计算方法。

（4）用弹性抗力法计算内侧土体的抗力时，水平抗力系数的选用至关重要，建议用旁压试验测定 m 值。

（5）用有限元方法计算支护结构时，无论模型或参数都要能反映不同应力路径的影响；建立可供实用的安全度评价准则是有限元方法在工程设计中推广应用的关键。

（6）采用常规方法设计墙身时，要对墙体内力进行调整，使之与材料强度设计值相匹配，以

维普资讯 http://www.cqvip.com

消除两种设计原则不匹配的影响。

参 考 文 献

1 Leonards G A. Foundation engineering. McGraw-Hill Book Company, New York, 1962

2 Scott J D, Wilson N E and Bauer G E. Analysis and performance of a braced cut in sand with large deformation. Canadian Geotechnical Journal, 1972, 9(4)

3 工业与民用建筑灌注桩基础设计与施工规程(JGJ4-80). 北京:中国建筑工业出版社,1980

Some Soil Mechanics Problems on Supporting Technique of Deep Excavation in Soft Soils

Gao Dazhao

(Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract In this paper, the routine design method is reviewed for retaining structure of deep excavation in soft soils. An analysis has been made for the influence of the wall rigidity on the earth pressure distribution. The effect of underground water on the lateral pressure, as well as the determination of design parameters and the finite element method used in supporting structure design are discussed. At last, the safety evaluation on supporting structure is proposed.

Key words excavation ; earth pressure ; coefficient of soil horizontal reaction