

基坑土体自承支护的基本原理

黄 运 飞

(中兵勘察设计研究院 北京 100053)

【摘要】本文从地下工程围岩收敛约束曲线出发,在总结现代围岩支护理论的基础上,导出了基坑土体支护位移曲线,阐述了基坑土体自承支护的基本原理。这种支护体系不再把土体仅当成荷载,而是将其看成一个有机的整体,支护的目的不是去“支撑”不稳定土体,而是以充分发挥土体自支承能力为出发点。

【关键词】自承支护 自支承能力 基坑支护 土体稳定

【Abstract】 This paper proposes the protect-displacement curve of foundation soil based on the covergence constraint curve of the surrounding rock in underground engineering and the modern protect theory. This protect system dose not take soil as only load to protect structure, but take soil and structure as an organic whole. The aim of protect is not to “prop” the unstable soil, but to fully develop the self-bearing capacity of soil.

【Keywords】 Self-bearing protect, Self-bearing capacity, Foundation protect, Soil stability

0 前言

在基坑支护设计中,我们总是把基坑侧壁土体当成荷载,作为支护结构的“对立面”,当成工程的“捣乱分子”,让工程建设者伤透脑筋。作者在工程中时常发现土体自支承能力很大,但是被传统的支护理论与方法埋没了。实际上,土体也是一种材料,有时也可以直接用作支护材料的一部分,虽然这种材料的“支承能力有限”,但总还是有能力的,因此,支护的目的应该是如何充分发挥土体的自支承能力,补强其不足部分。源于这种想法,作者提出了基坑土体自承支护体系。

基坑土体自承支护与传统支护是两个不同的概念,为便于理解,作者将图1中C、D区的支撑能力用于A区的不稳定土体时,则该支护系统为传统支护。而基坑土体自承支护则将着眼点放在提高A区的支承能力上。当A区的自支承能力不能满足稳定性需要时,既可以通过对A区的局部改造,以增强其自支

承能力,也可以借助B区的局部支撑能力。这种分类有何意义?基坑土体自承支护有何优点?其实质是什么?下面做简要分析。

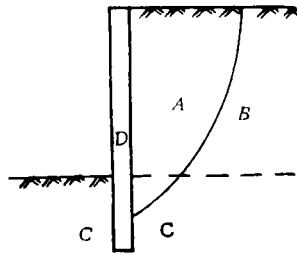


图 1 支护分类示意图

1 新奥法(NATM)与喷锚支护的核心

为便于说明基坑土体自承支护体系的作用原理,先简述一下地下工程支护结构的发展过程及新奥法的核心。

1.1 围岩支护理论及其发展

原处于三向受力状态的围岩,因开挖卸荷作用而发生变形,导致围岩应力重新分

布, 当围岩应力达到或超过围岩强度时, 引起围岩局部发生破坏, 破坏的扩展, 可能导致地下洞室失稳, 因此, 需要在开挖洞室之前对围岩的稳定性进行评价。

一旦围岩发生破坏, 并威胁到洞室的稳定, 就得采取一定的防护措施。在不同的历史时期, 由于人们对围岩变形失稳机理的认识不同, 便出现了不同的支护形式及理论。为了阻止洞室围岩的空间移动或防止碎裂岩块的垮落, 人们很自然地想到用物体把围岩支撑起来, 而木材是天然的廉价支护体, 因而被最先使用。但木材体积大, 支撑力有限, 容易腐烂, 人们自然会寻找一种比它优越的支撑体, 于是金属结构物产生了。然而, 在使用过程中, 人们发现有时用木材支护的效果反而比金属支护好, 按现在的观点来看, 这主要是因为木材的刚度小而使围岩的自承能力得以部分发挥所致。传统支护的目的是利用支护物承担围岩施加的载荷, 在不断实践的基础上, 人们逐渐认识到支护与围岩是共同作用在一起的, 支护结构施作的早晚、支护刚度的大小等都将影响到围岩的稳定, 大约在本世纪60年代新奥法便产生了。

新奥法是奥地利学派创始人米勒(L. Muller)教授等发展的一种隧道施工法(New Austrian Tunnelling Method, 简称NATM), 与其说是一种施工法, 还不如说是一种支理论, 其核心有两点:

(1) 支护结构和围岩不是独立的结构体, 而是一整体结构物。围岩本身不仅仅是载荷也是承载体, 支护的目的不是利用支护物支撑围岩, 而是帮助围岩承担作用于其上的地应力。支护是辅助的, 以协助围岩承压, 提高围岩自承能力为目的。

(2) 保护岩体本身的强度。要利用围岩自身承压, 就必须在处理地下工程问题时尽一切可能保护围岩原有的完整性和本身的强度, 使岩体本身具有承压的能力。

在技术措施方面, 主要采用喷锚支护。

新奥法对最佳支护时间、支护刚度(多次喷混凝土)、喷锚联合支护、施工监控等作出了合理的解释。但是, 无论是传统支护, 还是新奥法, 它们所采取的支护措施都是被动地承受载荷或与围岩共同作用为一体, 除注浆和砂浆锚杆以外, 所有别的支护方式都是通过对围岩施加径向作用力来起作用的, 只是新奥法通过柔性支护来利用围岩在常规开挖条件下的自承能力。

1.2 围岩收敛约束曲线的物理意义

为了进一步阐明地下工程现代支护原理, 现分析围岩与支护共同作用得到的收敛约束曲线。对于图2所示的圆形地下洞室, 在均匀地应力 p 的作用下, 芬纳给出了理想弹塑性平面应变条件下的支护抗力 p_i 与围岩塑性区大小的理论解为:

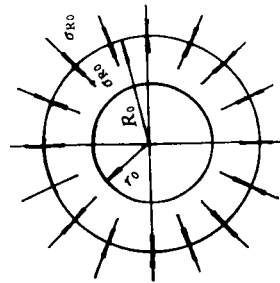


图2 计算模型

$$p_i = (p + c \cdot \cot \varphi)(1 - \sin \varphi) \times \left(\frac{r_0}{R_c} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cdot \cot \varphi \quad (1)$$

及

$$p_i = K_c \cdot u_{cr}, \quad K_c = \frac{2G_c(r_0^2 - r_1^2)}{r_0[(1 - 2\nu_c)r_0^2 + 2r_1^2]} \quad (2)$$

$$p_i = -c \cdot \cot \varphi + (p + c \cdot \cot \varphi)(1 - \sin \varphi) \times \left(\frac{M r_0}{4G u_{r_0}^2} \right)^{\frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (3)$$

式中

p_i ——支护抗力;

c 、 φ ——围岩的粘聚力和内摩擦角;

r_1 、 r_0 、 R_0 ——支护结构内半径、洞室半径及塑性区外半径；

p ——均匀地应力；

G 、 G_0 ——围岩、支护材料的剪切模量；

M ——弹塑性界面上的应力差，

$$M = \sigma_0^p - \sigma_r^p = 2p \sin \varphi + 2c \cdot \cos \varphi;$$

ν_0 ——支护材料的泊松比；

$u_{r_0}^p$ ——围岩塑性区位移；

u_{cr} ——支护结构外径位移，当支护结构施作时，位移没有释放，则 $u_{cr} = u_{r_0}^p$ ，否则应扣除释放位移 u_c ，即 $u_{r_0}^p = u_{cr} + u_c$ 。

根据式 (1) 或式 (2) 可以作出支护抗力 p_i 与围岩塑性区半径或位移关系曲线，即 $(p_i - p_0)$ 或 $(p_i - u_{r_0}^p)$ ，这即为工程界常说的收敛约束曲线，如图 3 所示。从图中曲线 I 可知， p_i 越小，则 R_0 越大；换言之， R_0 越大，则为维持极限平衡状态所需的支护抗力 p_i 就越小，在这种情况下，充分地发挥了围岩的自支承能力。但是必须注意的是，围岩的这种作用是有限的，当 p_i 降低到一定值 ($p_{i, \min}$) 后，塑性区再扩大，围岩就要出现失稳性破坏，为保证围岩稳定，所需要的支护抗力反而增加 (见图 3 中曲线 III)。

图 3 中曲线 II 是根据式 (2) 绘制的，它表明了支护结构施作早晚、刚度大小等对支护抗力大小的影响，从图中可知，支护刚度

越大，则支护抗力越大，而支护设置得越早 (即 u_0 越小)，则塑性区越小，但相应地需要更大的支护抗力。

图 3 对支护体系的支护作用机理作出了合理的解释。在此基础上可进一步理解柔性支护的物理意义，对围岩与支护共同作用给出了十分形象的说明，如何才能达到收敛约束曲线的最佳支护点 $p_{i, \min}$ 。靠传统的衬砌、木材或钢支撑是很难实现的。50 年代喷锚支护问世了，由于它所具有的优越性，不仅解决了合理支护的施工技术，而且通过锚杆与喷层的联合作用，使围岩的自支承能力得以更充分的发挥，此乃 NATM 核心所在。

归纳起来，围岩的现代支护原理主要有如下几点：

(1) 现代支护原理是建立在围岩与支护共同作用的基础上，即把围岩与支护看成是由两种材料组成的复合体。围岩是支护结构的一部分，而支护结构又与围岩共同作用形成一个有机的整体。这与传统支护将围岩只作为荷载而不能承载是截然不同的。

(2) 充分发挥围岩自支承能力是支护设计的根本点所在。

(3) 充分发挥支护材料的承载能力，即柔性薄型支护、多次支护或封闭支护，以及深入到围岩内部进行加固的锚杆支护，都具有发挥支护材料承载能力的效应。

(4) 通过信息施工法，使设计进一步优化，确保安全可靠。

2 深基坑支护位移曲线及其物理意义

2.1 支护位移曲线

人们常常把土体作为支护结构的荷载——侧土压力来进行各种计算，这种侧土压力是客观存在的，作为工程上的简化处理也是可以理解的，但因此而阻碍了人们对支护作用原理更深层的探讨。即仅把基坑侧壁土体当作荷载，而忽视了土体本身也是一种承载地质结构体。

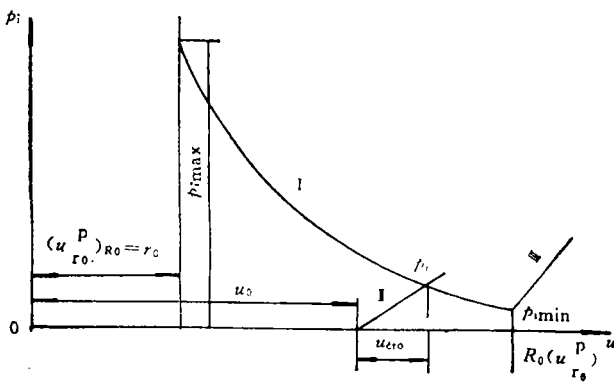


图 3 收敛约束曲线

事实上，侧土压力与支护结构的变形有着密不可分的关系，许多人对此进行了研究，进一步还可得到侧土压力大小与支护结构位移关系曲线，如果把侧土压力换成支护抗力，仿照地下工程围岩收敛约束曲线，我们同样可以得到深基坑工程的支护位移曲线，如图4所示。通过该曲线我们可以对支护与土体共同作用有进一步的理解。图4中几个特征点的物理意义是：

A点——相当于被动侧土压力，要使土体产生此种位移，所需要的支护抗力最大；

B点——为静止土压力点，此点为通过支护抗力的作用，使土体不产生任何横向位移；

C点——为最小抗力点 p_{\min} ，相当于主动侧土压力，当不考虑其它因素时，为支护设计应达到的最佳状态；

D点——当支护抗力不足，边坡土体发生失稳性变形或破坏后，为修复边坡时，所需要提供更大的支护抗力。

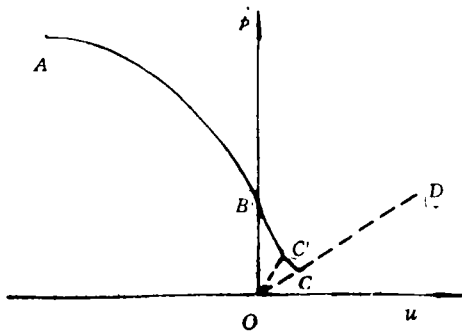


图4 基坑支护位移曲线

同样， OB 、 OC 、 OC' 直线的斜率反映了支护刚度的影响，支护刚度越大，则土体位移越小，相应地所需要的支护抗力也越大，其中 OC 直线为最佳支护刚度，当刚度进一步减小时，此时支护抗力不足以保证边坡稳定，反而为修复边坡需要更大的支护抗力。这就是说，适度柔性的支护因充分发挥了边

坡土体的自支承能力，既节省了支护材料，又保证了边坡的稳定。但支护系统的柔性是有限的，增加柔性时，必然会增大侧壁土体的位移，这常常又是基坑开挖所不允许的，即基坑支护设计中的两种验算标准，一种是基于力或力矩平衡的安全系数方法，另一种即为变形控制设计。从某种意义上讲，后一种设计验算会更困难些。但更具有实际意义。

3 基坑土体自承支护基本原理

3.1 基坑土体自承支护基本原理

通过上述分析，我们可以对基坑土体自承支护的基本原理总结为：

(1) 支护结构与土体是密不可分的，组成一个有机的整体，它们共同作用，互为补充；

(2) 尽可能保持、显著提高、最大限度地利用基坑侧壁土体的自支承能力。当自支承能力不够时，可通过适当的土体改造措施协同、强化土体自支承能力；

(3) 土体变形破坏是有级序的，在边坡中不同部位的土体，其变形破坏的先后次序及大小是有差别的，破坏总是先从一点突破，随后扩展，形成规模，导致基坑失稳。因此，土体改造的重点应放在“突破部位”，并根据突破级序进行合适的不同级序的改造。并应注意改造后“突破部位”的转移。

(4) 通过信息施工技术，使设计施工得以进一步优化。

3.2 施工方法及特点

实现上述支护原理的主要技术措施是喷锚支护、土钉墙、水泥土墙及注浆等。这几种方法的主要特点如下：

(1) 喷锚支护 是在地下工程新奥法的基础上发展起来的，其基本原理是充分利用基坑侧壁土体固有力学强度，变土体荷载为支护结构体系的一部分。喷射混凝土在高压空气作用下高速喷向土层表面，先期骨料嵌入表土层内，并为后继料流所充填包裹，在喷层与土层间产生“嵌固层效应”，并随开挖逐步形成全封闭支护系统；喷层与嵌固层

同具有保护和加固表土层,使之避免风化和雨水冲刷、浅层坍塌、局部剥落,以及隔水防渗等作用。锚杆(索、管等)内锚固段深固于滑移面之外的土体内部,其外锚固端同喷网联为一体,可把边壁不稳定体“危机”转移到内锚固段及其附近并消除于无形。钢筋网可使喷层具有更好的整体性和柔性,能有效地调整喷层与锚杆内应力分布。喷锚网主动支护土体,并与土体共同工作,具有施工简便、快速、及时、机动、灵活、适用性强、随挖随支、挖完支完、安全经济等特点。其工期一般比传统工法短,工程造价低10%~30%。支护最大垂直坑深,目前国内已达18m,建成淤泥(局部少量杂填土)基坑深达10m。

(2) 土钉墙 土钉墙是以短而密的土钉安设或打入基坑边壁土体内,将土体加固成为能自稳的重力坝式的挡土墙结构。作为围护基坑及边坡的一类方法,土钉墙形成于70年代,发展于80年代。美、法、德国都曾对土钉墙作过较多的试验研究、理论分析和工程应用。

总的来说,该方法在国外享誉很高。近10余年来,我国也有不少工程专家和学者在关注和研究这一方法。孙家乐等提出的插筋补强技术与土钉墙的原理大同小异,可视为同一类支护形式。

土钉墙与深基坑喷锚支护在某些施工工艺上有相似之处。例如,它也完全不要桩、板、墙、管、撑,它也常与喷网相结合;它的土钉类型一般有两种:钻孔注浆土钉和直接打入或射入土钉,而前者与喷锚网支护中的非预应力锚杆施工工艺也是类似的。

但土钉墙与喷锚支护无论是在锚杆的构造与作用机理,还是设计方法与使用条件上均有所不同。从构造上讲,锚杆一般分为内锚固段、外锚固段和自由段即张拉段,土钉则不分段。锚杆一般较长,其内锚固段一般位于滑移线以外的稳定土体内,土钉一般较短(3~10m),钉的内端大都置于滑移线以

内或附近;锚杆设置间距相对较大,土钉则要密得多。从工作原理看,在较好的土层中,锚杆以平衡不稳定土体压力为主,在特殊不良地质体中则以改造介质物理力学性质为主,而设置土钉旨在建立一种新的稳定地质体:土钉墙。土钉墙与喷锚网支护工作原理并不完全相同,设计计算方法因而有些差异。

从应用范围看,专家们认为,土钉墙不适用于流砂、杂填土、软土、淤泥等粘结力较低的介质;工程实践表明,锚杆(管、索栓)在此类介质中则是可行的。从两者的构造不难看出,土钉墙在其适用范围内,经济效益将比深基坑喷锚支护更好。

(3) 水泥土墙与注浆 这两种方法的原理是一致的,都是通过对土体的原位加固来提高土体的自支承能力。最近十几年来,水泥土挡墙及防渗帷幕发展很快,尤其在沿海软土地区,已成为一种重要的基坑支护手段。而注浆这种传统方法,由于注浆效果不容易控制,应用并不十分广泛,一般是作为一种辅助手段。应该注意的是水泥土墙和注浆法的双重作用,既可以大幅度地提高土体强度,也可以防渗隔水,因此在有地下水的基坑支护中,应充分认识到这种技术的优越性,以优化支护设计。

4 结束语

基坑土体自承支护体系的核心在于充分利用土体的自支承能力,其途径有两条:一是加固土体,补强其不足部分,进一步还指明了加固部位应选择“突破点”,并应根据土体变形破坏的级序采取相适应的加固级序;二是采用柔性支护,即让基坑土体充分变形,以使其自支承能力得以正常发挥,这只有在一定的环境条件下可行,因很多基坑开挖对侧壁土体位移是有严格要求的。

参考文献

- 1 黄运飞编著.深基坑工程实用技术.北京:兵器工业出版社,1996

收稿日期:1996-10-11