

1 盾构刀盘选型及设计相关理论

1.1 地层与刀盘选型

刀盘是盾构机实现隧道开挖功能的核心部件，在开挖过程中与土体直接接触，如果刀盘的选型设计不能很好地与地层特性相适应，将导致盾构掘进困难，并产生相关的工程问题。因此，盾构刀盘的选型设计必须根据隧道的地质条件进行针对性设计，即刀盘的地质适应性设计。

1.1.1 风化岩复合地层盾构机刀盘选型

1. 土层特性

风化岩是新鲜岩在风化作用下形成的物质，可划分为全风化、强风化、中等风化和微风化。全风化和强风化岩石强度一般较低，微风化和中等风化岩石强度较高。

2. 盾构机刀盘选型

在这种地层掘进，需要盾构机刀盘具有广泛的适应性，刀盘需要安装滚刀破岩，所以一般选用面板式刀盘。刀盘的开口槽由从刀盘中心部位至外侧弧形面中心对称分布在刀盘上的八条狭长开口组成，一般此种刀盘的开口率为 28%~35%。刀具需要配置滚刀和切削刀。

1.1.2 砂卵石复合地层盾构机刀盘选型

1. 土层特性

砂卵石是一种典型的力学不稳定地层，颗粒之间的孔隙大，没有黏聚力，砂卵石地层在无水状态下，颗粒之间点对点传力，地层反应灵敏，刀盘旋转切削时，很容易破坏原来地层的相对稳定或平衡状态而产生坍塌，引起较大的围岩扰动，使开挖面和洞壁失去约束而产生不稳定。

2. 盾构机刀盘选型

砂卵石复合地层要分为两种情况进行刀盘选型。

(1) 小粒径 < 150 mm。

在(小粒径)砂卵石复合地层中,优先选用辐条式盾构机刀盘,一般采用4根或6根辐条。刀具主要配置切削刀,安装位置主要在辐条两侧。由于隧道断面可能存在全断面卵石层,冲击载荷比较大,所以刀盘支承方式选择中间支承。

(2) 大粒径 > 150 mm。

在(大粒径)砂卵石复合地层中,选用面板式刀盘,由于存在大卵石和大砾石,因此,刀盘的开口应该考虑开挖卵砾石地层的要求,按假设可能出现的最大粒径确定。开口形状和在风化岩中的刀盘开口形式一样。刀盘支承方式也选择为中间支承。刀具主要配置滚刀和切削刀。

1.1.3 软黏土复合地层盾构机刀盘选型

1. 土层特性

软黏土主要由黏粒和砂粒组成。此类土层饱水、稳定性差、无自稳能力,开挖时易坍塌、涌水、涌砂,产生较大的地面沉降。

2. 盾构机刀盘选型

在软黏土地层中,选择辐条式刀盘,由于此种地层自稳性差,可以把刀盘设计为辐条加封板型辐条面板,如用于南京地铁的盾构刀盘。在有限的中心部位尽量增加开口。刀盘的支承方式可以采用中心支承或中间支承。刀盘上需要配置切削刀、刮刀、先行刀。

1.1.4 国内盾构刀盘选型实例分析

盾构机刀盘的结构及其刀具的组合布置,应针对不同的地质条件而变化,下面结合成都地铁1号线、广州地铁2号线、南京地铁、广州地铁3号线所选用的盾构机刀盘的实例,介绍不同的刀盘结构形式和各类刀具的组合情况,如表1-1所示。

表 1-1 四个城市地铁盾构机刀盘技术参数

工程项目	成都地铁1号线 (天府广场—骡马市)	广州地铁2号线 (越秀公园—三元里)	南京地铁 (玄武门—南京站)	广州地铁3号线 (大石南—汉光)	
地质情况	卵石土层,中细砂及少量黏性土层	粉质黏土、砂岩、粉砂岩、混合岩	淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉砂、粉土	粉质黏土,粉砂层,砂岩	
刀盘参数	刀盘直径	φ6 280 mm	φ6 280 mm	φ6 400 mm	φ6 280 mm
	额定扭矩	4 300 kN·m	4 346 kN·m	4 346 kN·m	4 346 kN·m
	开口率	28%	28%	34%	28%
	转速	0~2.5 r/min	0~5.6 r/min	0~2.9 r/min	0~5.6 r/min
	功率	630 kW	945 kW	630 kW	945 kW

刀具形式与数量	中心刀	4把双刃滚刀	6把双刃滚刀或6把宽齿刀	4把	4把双刃滚刀或4把宽齿刀
	17 in 滚刀	32把单刃滚刀	13把双刃滚刀	无	31把单刃滚刀
	切刀	32把	64把	124把	64把
	刮刀	8把	16把	16把	8把
	超挖刀	无	1把滚刀	1把齿型刀	1把滚刀
	齿刀	无	13把	无	31把

注：1 in = 25.4 mm。

四个城市所选用的盾构机刀盘如图 1-1 所示。

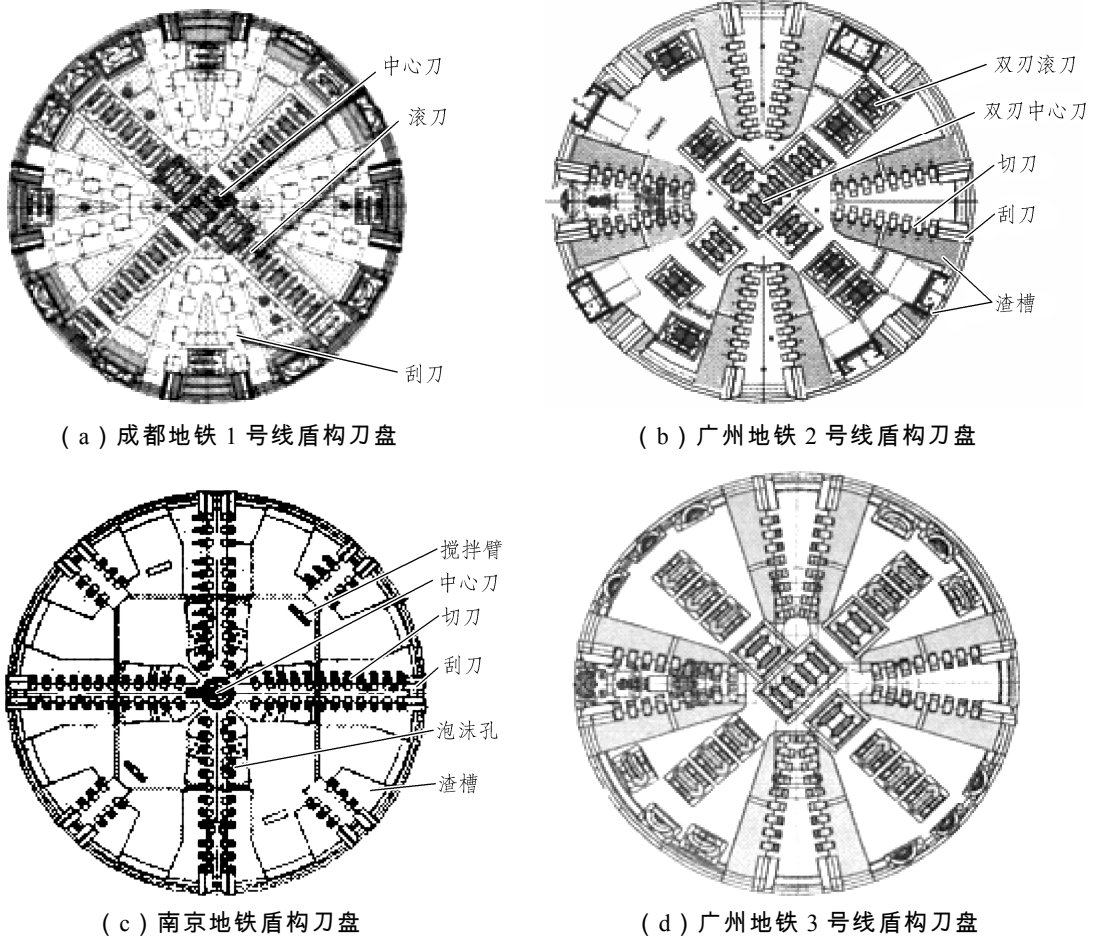


图 1-1 盾构刀盘图

刀盘选型和刀具配置关系到盾构能否顺利掘进，必须根据地质条件认真分析，通过对以上 4 个典型地质条件的地铁施工中所选用的盾构刀盘分析，可以得到以下结论：

(1) 实际施工时会遇到各种复杂的地层，地质资料提供的只是部分钻探资料，还不能完

全准确反映实际的地质情况，会有误差，因此在盾构刀盘选型时必须考虑对地质进行充分分析和研究，刀盘及刀具配置要有一定的富余和能力储备。

(2) 在选用面板式刀盘时，应该注意刀盘的结构：开口率不低于 30%；渣土槽应该尽量靠近刀盘中心；在（大粒径）砂卵石地层中，刀盘磨损严重，应该注意刀盘的选材，以及刚度和强度要求。

(3) 在选择刀盘驱动方式时，通过两种驱动方式的比较，优先选用液压驱动方式。

(4) 从软土地层到硬岩地层随着抗压强度的提高，需要合理配置刀具外，刀盘的推力及驱动扭矩、转速及主轴承的参数也应与之相适应。

(5) 在盾构机刀盘的刀具配置上，不同地质地层需要合理配置不同的刀具。软土地层只需要切削型刀具；软岩地层除配置切削型刀具外，还需要配置双刃滚刀或齿刀；硬岩地层除配置切削型刀具外，还需要配置单刃滚刀或齿刀。

1.2 刀盘载荷相关理论

刀盘载荷分析的相关理论主要包括土压力理论、切刀和滚刀的切削理论。

1.2.1 土压力理论

土压力是作用于盾构上的主要荷载，是进行盾构设计的主要依据，因此如何恰当地估算作用在盾构上土压力的大小及分布，就成了盾构设计和研究的关键问题。作用于盾构上的土压力实际上是周围地层与盾构相互作用面上的接触应力，其大小及分布形式不仅与盾构刚度和地层的物理力学性质有关，还与盾构施工过程、方法，隧道线型，盾构操控情况，盾构的埋深、直径、形状和断面的几何尺寸等诸多因素有关，因此，关于盾构上土压力的研究是隧道工程中十分重要的一个课题。

由于作用于盾构上的土压力受诸多因素的影响，对其进行研究非常困难。从已有的文献来看，按盾构上土压力所采用的原理不同，可将盾构上土压力的确定方法分为三种，即简化计算方法、考虑盾构与地层相互作用的分析方法、现场测量及模型试验方法。

1. 盾构垂直土压力的确定

在简化计算方法中，一般将作用于盾构上的土压力分为垂直土压力、水平土压力、盾壳底部的垂直地基反力和由盾构偏转引起的被动地基抗力，如图 1-2 所示。

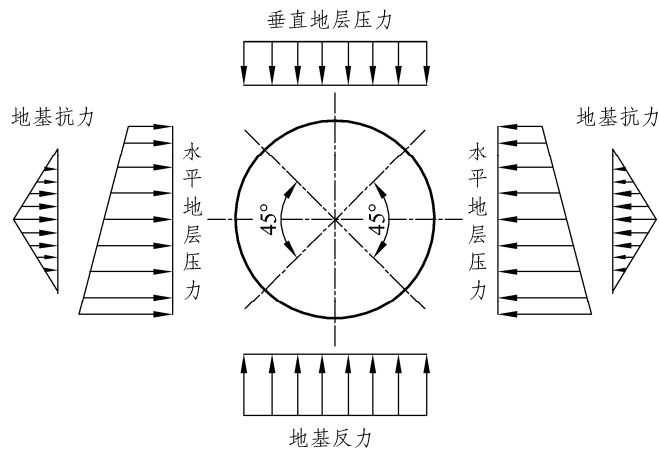


图 1-2 盾构周围受力示意图

简化计算方法^[1]人为地将作用于盾构上的土压力划分为以上四部分，再对各部分提出一些具体的计算公式，从而解决了计算上的问题，其优点是概念清楚，便于应用。但该方法的显著不足在于它无法涉及施工过程及盾构刚度等因素对土压力大小和分布的影响，认为不论盾构的刚度和土层的性质如何，盾构所受到的土压力的分布形式都是同样的，这与一些现场实测的结果有差异。

各国盾构隧道规范对于盾构土压力的理论计算有不同的计算方法，由于这些计算方法是在不同的假设条件下获得的，各有一定的适用条件和局限性。目前，盾构隧道土压力的计算理论常用以下两种：一种是假定作用在盾构上的土压力为盾构（隧道）上全覆土重理论；另一种是考虑土体抗剪强度的松弛土压力理论，其中应用较多的有太沙基松弛土压力和普氏土压力。

(1) 全覆土重理论。

盾构隧道规范^[2]规定：将垂直土压力作为作用于盾构顶部的均布荷载考虑（见图 1-2），其大小宜根据盾构隧道的覆土厚度，隧道的断面形状、外径和围岩条件等来确定。

对埋置较浅的隧道，根据刚体静力平衡条件，认为盾构上垂直地层压力是上覆土柱的重量减去两侧地层对柱体产生的反向摩擦力，在软黏土等较差的地层中，此摩擦力常被假定为零，即

$$P_{e1} = P_0 + \sum \gamma_i H_i + \sum \gamma_j H_j \quad (1-1)$$

- 式中 P_{e1} ——盾构拱顶处垂直土压力；
 P_0 ——上覆荷载；
 γ_i ——处于地下水位以上的 i 号地层土的容重；
 H_i ——处于地上水位以上的 i 号地层土的厚度；
 γ_j ——处于地下水位以下的 j 号地层土的容重；

H_j ——处于地下水位以下的 j 号地层土的厚度。

此计算方法在软土地层中较为合适。资料表明，上海软黏土层中修建隧道时所测得的土压力数据显示，在隧道拱顶部分土压力随着时间的延长而增加，最后十分接近于上覆全部覆土重量。但当隧道的埋深较大或土质较硬时，由于拱效应不可忽略，若按全部覆土重计算土压力，结果显然是不合理的。现场测试结果表明，硬黏土地层中，特别是砂土层中盾构（或衬砌）承受的荷载比它上面的土柱重量小得多。

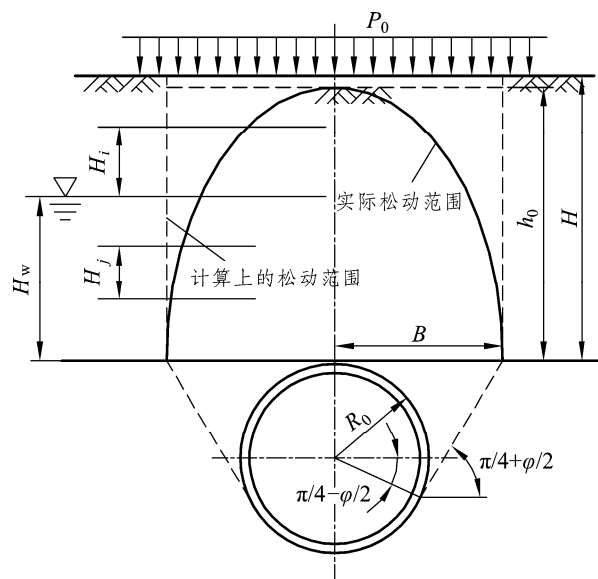
当覆土厚度大于盾构外径时，地基产生拱效应的可能性比较大，可以考虑在设计计算时采用松弛土压力。关于松弛土压力的计算方法，一般多采用太沙基松弛土压力的公式。

(2) 太沙基理论。

太沙基 (Terzaghi) [3] 最早针对埋设管道建立了松弛土压力理论，后来推广到隧道土压力的计算。太沙基首先假定隧道两侧土体发生主动破坏，斜向上发展到拱顶高度，并垂直发展到地面。从假定中可知，拱顶滑动土体的宽度一般大于隧道外径。太沙基在推导松弛土压力时考虑了滑动土柱体的两侧抗剪强度。太沙基土压力的概念及其参数 [4] 如图 1-3 所示。

太沙基松弛土压力计算公式是通过干砂进行脱落实验并模型化后推导出来的。太沙基以干砂进行脱落实验 [4]，如图 1-4 所示。当板 ab 一下落，板上部的砂就塌落下来，但作用于滑动面的抗剪力支撑着它，于是板 ab 上的土压力减小，而 a 和 b 左右的土压力增加，板 ab 上就起了拱。如增大板 ab 的宽度使砂塌落，滑动面将变为 ad 和 bc 。太沙基将此种状况模型化（见图 1-5），并推导出垂直土压力的理论公式。由距地表深 z 处某一微小单元垂直方向力的平衡条件得

$$2B\gamma dz = 2B(\sigma_v + d\sigma_v) - 2B\sigma_v + 2Cdz + 2K_0\sigma_v dz \cdot \tan\varphi \quad (1-2)$$



注： H 为覆盖土层厚度， $H = \sum H_i + \sum H_j$ ； H_w 为拱顶至地下水位线高度。

图 1-3 松动土压力

令 $z = 0$ ，得式 (1-2) 的解为

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma - C/B)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 \tan \varphi \cdot z/B}) + P_0 e^{-K_0 \tan \varphi \cdot z/B} \quad (1-3)$$

- 式中 σ_v ——土沙基竖向松弛土压力；
 $2B$ ——滑动土柱宽度；
 C ——地基土的黏聚力；
 φ ——内摩擦角；
 γ ——土的容重；
 K_0 ——滑动面上的侧压力系数，通常取 1。

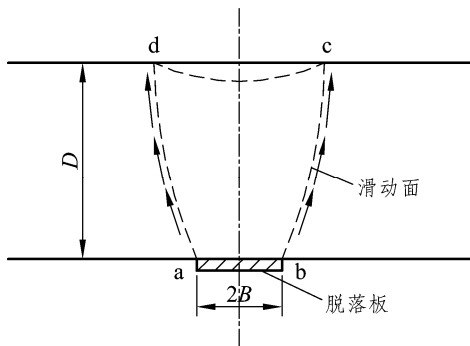


图 1-4 脱落实验

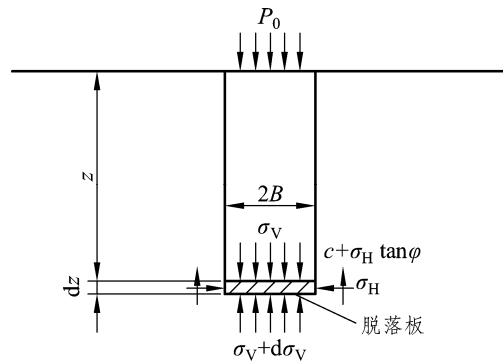


图 1-5 模型化图

将这一理论应用于盾构断面 (见图 1-3)：

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma - C/B)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 \tan \varphi \cdot H/B}) + P_0 e^{-K_0 \tan \varphi \cdot H/B} \quad (1-4)$$

$$B = R \cot \left(\frac{\pi/4 + \varphi/2}{2} \right) \quad (1-5)$$

$$h_0 = \frac{B(1 - C/B \cdot \gamma)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 \tan \varphi \cdot H/B}) + \frac{P_0}{\gamma} e^{-K_0 \tan \varphi \cdot H/B} \quad (1-6)$$

- 式中 h_0 ——土的松动高度；
 $2B$ ——滑动土柱宽度；
 R ——盾构 (衬砌) 的外半径；
 C 、 φ 和 γ ——地基土的黏聚力、内摩擦角和土的容重。

但在 $P_0/\gamma \leq H$ 的情况下，则采用简化式：

$$h_0 = \frac{B(1-C/B \cdot \gamma)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 \tan \varphi \cdot H_1 / B}) \quad (1-7)$$

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma - C/B)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 \tan \varphi \cdot H_1 / B}) \quad (1-8)$$

式中 H_1 ——换算覆盖厚度。

在计算松弛土压力时，如果考虑土的黏聚力，松弛土压力会变得很小甚至为负值，所以在公式的应用方面要加以注意。一般来说，当垂直土压力按照松弛土压力计算时，多设定一个土压力的下限值。在下水道、电力及通信隧道中，一般将其相当于隧道外径 2.0 倍厚的覆土压力作为土压力下限值，铁路隧道则以隧道外径 1.0~1.5 倍的覆土厚度的土压力值或采用 200 kN/m² 的值作为土压力下限值^[5]。

一般，在砂性土中，当覆土厚度大于 1~2D (D 为盾构外径) 时，多采用松弛土压力。在黏性土中，如果由硬质黏土 ($N \geq 8$) 构成的良好地基，当覆土厚度大于 1~2D 时，多采用松弛土压力。

对于中等固结的黏土 ($4 \leq N < 8$) 或软黏土 ($2 \leq N < 4$)，将盾构 (隧道) 之上的全覆土作为土压力考虑。

由以上理论可知垂直土压力的计算方法主要围绕盾构上覆土重压力如何折减问题及折减的幅度来展开。

太沙基公式目前广泛应用于隧道工程的松弛土压力的计算中，但是也存在以下几点值得商榷的地方：

① 破坏模式：太沙基公式是基于滑动面为垂直面的假定推导得出的，而根据离心模型试验结果显示，滑动面是从隧道两侧向外倾斜微小的角度延伸至地面，而非完全垂直面。

② 破坏区域的宽度：太沙基根据滑动门试验的结果，滑动破坏区域的宽度 $2B$ 按式 (1-5) 取值，它比隧洞直径大，是由于包含了自隧洞水平直径附近向两侧土体中延伸的主动破坏区域的宽度。但式 (1-5) 并未经隧洞试验和现场实测试验验证。

③ 侧压力系数：土侧压力系数取值不同，可导致计算的松弛土压力差值很大。因此，在使用太沙基公式时，存在一个如何选择侧压力系数的问题。太沙基根据滑动门中心线土压力测量的结果，建议滑动面上的侧压力系数取值为 1.0，是值得商榷的。有限元数值分析的计算结果表明， K_0 的取值范围应该大约从静止土压力系数到 3，并且随着土体内摩擦角的增加而减少。

④ 应力均匀分布的假定：太沙基在推导松弛土压力公式过程中，假定滑动土柱内垂直应力在水平方向为均匀分布，是为了公式推导方便。但根据拱效应特征，土内的主应力轨迹为拱形的，可以推断其应力分布无论是在垂直方向和水平方向都不会是均匀的，采用均匀的假定可能会带来大的误差。

(3) 普氏理论。

苏联学者普罗托吉雅柯诺夫也以散体介质理论为基础，认为在松散介质中开挖隧道后，

在其上方形成抛物线的平衡拱（压力拱），拱下土体以平均压力作用于盾构（衬砌）上，盾构（衬砌）受到的垂直地层压力公式为

$$p_v = \gamma \cdot h \quad (1-9)$$

式中 h ——压力拱高度（m），其计算公式为

$$h = \frac{1}{f} \left[b + h_0 \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right] \quad (1-10)$$

式中 h_0 ——隧道高度，m；

f ——普氏系数，对松散土和黏性土可取 $f = \tan \varphi$ 。

显然，对不能形成压力拱的松软地层或埋深太浅的隧道，普氏理论是不适用的。

以上计算理论都无一例外地将盾构（衬砌）作为刚体，即不考虑盾构（衬砌）变形的作用，因此它们不能评价盾构刚度、施工过程等对垂直地层压力的大小和分布的影响。

2. 盾构水平土压力的确定

根据日本《隧道标准规范（盾构篇）及解说》中对水平土压力的计算规定，水平土压力作用在盾构（衬砌）两侧，是沿其横断面水平方向作用的分布荷载。其大小根据垂直土压力与侧向土压力系数来计算。

$$\sigma_H = K \cdot \sigma_v \quad (1-11)$$

式中 K ——侧向土压力系数。

规范规定，在难以得到地基抗力的条件下，可以选择考虑施工条件的静止土压力系数作为侧向土压力系数， $K = K_0$ ；在可以得到地基抗力的条件下，使用主动土压力系数作为侧向土压力系数， $K = K_a$ ；也可以上述静止土压力系数为基础考虑适当地减少进行计算。侧向土压力系数不但应该考虑土的性质，也要考虑与设计方法和施工方法的关系进行决定。但是要进行恰如其分的设定是非常困难的，一般可根据表 1-2 所示的范围，根据与地基抗力系数的关系进行确定。

表 1-2 侧向土压力系数（ K ）和地基抗力系数（ k ）

土与水的计算	土的种类	K	$k / (kN/mm^3)$	N 值大致范围

土水分离	非常密实的砂性土	0.35 ~ 0.45	30 ~ 50	$N \geq 30$
	密实的砂性土	0.45 ~ 0.55	10 ~ 30	$15 \leq N \leq 30$
	松散的砂性土	0.55 ~ 0.60	0 ~ 10	$N \leq 15$
	固结黏性土	0.35 ~ 0.45	30 ~ 50	$25 \leq N$
	硬的黏性土	0.45 ~ 0.55	10 ~ 30	$8 \leq N \leq 25$
	中硬黏性土	0.55 ~ 0.65	0 ~ 10	$4 \leq N \leq 8$
土水一体	中硬黏性土	0.55 ~ 0.65	5 ~ 10	$4 \leq N \leq 8$
	软黏土	0.65 ~ 0.75	0 ~ 5	$2 \leq N \leq 4$
	超软黏土	0.70 ~ 0.85	0	$N \leq 2$

从以上分析中可知，侧向土压力系数（ K ）和地基抗力系数（ k ）要在充分考虑地基条件和隧道用途之后，慎重地进行确定。

3. 地基抗力

地基抗力是指作用于盾构（或衬砌）上的全部荷载中，独立设定的设计计算用地基反力的总称，不同于主动施加的地基荷载。通常，地基抗力的考虑方法有两种：一种方法是认为地基抗力与地层位移无关，将地基反力认为是与作用荷载相平衡的反作用力，一般预先对其分布形状进行假定；另一种方法则认为地基抗力从属于地基的位移。例如文克勒（Winkler）的假定等，认为地基抗力是由于盾构（衬砌）向围岩方向位移而产生的地层反力。

地基抗力会由于采用的计算方法的不同而不同，作为实例，列出了修正惯用法和梁-弹簧模型计算方法中是如何考虑地基抗力的。

在惯用算法中，规定垂直方向的地基抗力与地基位移无关，取与垂直荷载相平衡的均布反力作为地基抗力。另一方面，作用在隧道侧面的水平方向的地基抗力，则是伴随盾构（衬砌）向围岩方向的变形而产生的。故在盾构（衬砌）水平直径上下各 45° 中心角的范围内，采用以水平直径处为顶点，三角形分布的地基抗力。作用于水平直径点上地基抗力的大小与盾构（衬砌）向围岩方向的水平位移成正比关系进行计算。在使用惯用算法进行设计计算时，水平方向的地基抗力系数可根据土质条件，参考表 1-2 进行取值。