

土质地层浅埋地下结构设计中的土压力计算

张中安

罗富荣

(深圳市地下铁道股份有限公司) (铁道部隧道工程局)

【提要】以北京电力隧道(作为铺设电缆之用)为例,探讨土质地层中浅埋地下结构设计中的土压力取值问题。

【关键词】土质隧道 浅埋 隧道设计 土压力

1 计算模型

对喷射混凝土支护结构的设计模型国内外尚无统一的标准方法,当前多采用以弹塑性理论为基础的数值解法,同时结合工程类比法和监控量测进行修正。

对喷射混凝土支护结构,理论上似乎按“连续介质模型”进行“地层—支护结构”体系的数值计算更精确,也更能模拟地下结构的实际工作状态,但在实际上由于不能对围岩物理力学性能准确取值,因此,一般“地层—支护结构”体系的数值计算仅能作为辅助设计,而对土质地层条件下的浅埋结构应用“荷载—结构”模型进行支护结构设计,倒是能比较符合地下结构的实际情况。我们不妨分析一下地下结构的工作条件和工作状态,就不难看出采用“荷载—结构”模型计算土质条件浅埋地下结构的合理性:

(1) 土质地层中浅埋地下结构,其荷载相对来说是比较明确的。断面一致的管状结构(例如地下结构)通常可以简化为二维受力状态的结构。作用在隧道结构上的地层压力,粗略地取等于未扰动地层的原始应力,而对土质地层中的浅埋结构,常把覆盖层全部土柱重量作为垂直荷载。在“荷载—结构”计算模型中,隧道结构顶部一定范围内产生无弹性抗力的“脱离区”,除了“脱离区”以外,隧道结构侧部和底部可视为弹性地基梁,地基抗力可用径向、切向的弹簧来代替。(2) 喷混凝土初期支护(还不包

括二次构筑衬砌),由于其设计厚度较大,且有钢格栅与喷混凝土共同作用,因此初期支护的结构刚度是相对较大的,实际上它已不再是“柔性支护”,再加上土质地层和喷混凝土之间存在的材料性能上的巨大差异,用“连续介质”模型分析,地层与结构体系的共同作用很难在单元特性中体现,势必会产生较大误差,影响计算结果的可信度。

2 土压力计算

浅埋隧道土压力的计算可参照《公路隧道设计规范》及《铁路隧道喷锚构筑法技术规则》中的有关规定进行。本文将以北京电力隧道为例,说明土质地层条件下作用于浅埋地下喷射混凝土支护结构上的土压力的计算方法。

2.1 北京电力隧道深、浅埋分界深度计算

《公路隧道设计规范》规定:用矿山法施工的深埋隧道,围岩压力按松弛荷载考虑,其垂直均布压力可按式计算:

$$q = 0.45 \times 2^{6-s} \gamma \omega \quad (1)$$

式中: s ——围岩类别;

γ ——围岩体积重量;

ω ——宽度影响系数, $\omega = 1 + i(B_t - 5)$;

B_t ——隧道宽度(m);

i ——当 $B_t < 5$ m 时 $i = 0.2$;

当 $B_t = 5 \sim 15$ m 时, $i = 0.1$ 。

深埋和浅埋隧道的分界,一般先求出荷载等效高度值,再结合地质条件、施工方法等因素综合判定。

荷载等效高度的判定式为：

$$H_p = (2 \sim 2.5) h_q \quad (2)$$

$$h_q = q/\gamma = 0.45 \times 2^{6-\omega} \quad (3)$$

式中： H_p ——深、浅埋隧道分界深度；

h_q ——荷载等效高度。

把北京电力隧道相关参数： $B_t = 2.54 \text{ m}$ ， $s = 2$ ， $\omega = 1 + 0.2(2.54 - 5) = 0.508$ 代入上述公式，可得： $h_q = 3.66 \text{ m}$ ；推出 $H_p = 7.32 \sim 9.14 \text{ m}$ 。

即对北京地区的电力隧道来说，判断隧道深埋和浅埋的分界深度为 $7.32 \sim 9.14 \text{ m}$ ，分界深度的平均值为 8.23 m （相当于覆土层厚度）。

另外，按《铁路隧道喷锚构筑法技术规则》的规定，对Ⅲ类围岩，若覆土厚度小于或等于3.5倍隧道开挖宽度，则认为是浅埋隧道，据此推导出的北京电力隧道深、浅埋分界深度为：

$$H_p = 3.5 B_t = 8.89(\text{m})$$

从上面的分析可知，两规范对深、浅埋隧道分界深度的规定基本上是一致的。计算所得的等效荷载高度 $h_q = 3.66 \text{ m}$ 也与大量的塌方统计资料及实测结果一致。

2.2 电力隧道土压力的计算

电力隧道土压力计算图式示于图1。

当隧道覆土厚 H 小于或等于等效荷载高度 h_q 时，把全土柱重量视为隧道均布垂直压力 q

$$q = \gamma H \quad (4)$$

侧向压力 e 若按均布考虑时，其值为：

$$e = \gamma (H + H_t/2) \tan^2(45^\circ - \phi/2) \quad (5)$$

式中： e ——侧向均布压力；

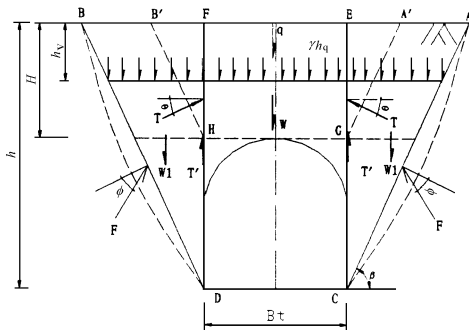


图1 土压力计算图式

ϕ ——土体计算摩擦角 ($31^\circ \sim 42^\circ$)。

当隧道覆土厚大于 h_q 、小于 H_p ($h_q \leq H < H_p$) 时，为便于计算，做如下假定：假定土体中形成的破裂面是一条与水平面成 β 角的斜直线（图1）；EFHG土体下沉，带动两侧三棱土体（图1中FDB及ECA）下沉，整个ABDC下沉时，又要受到未扰动土体的阻力；斜直线AC或BD是假定的破裂面，计算时采用了考虑内聚力 c 的计算摩擦角 ϕ ；另一滑面FH或EG则并非破裂面，因此，滑面阻力要小于破裂滑面的阻力。若该滑面的摩擦角为 θ ，则 θ 值小于 ϕ 值，无实测资料时， θ 可按 $(0.5 \sim 0.7) \phi$ 取值。

设图1中隧道上方覆土体EFHG的重力为 W ，两侧三棱土体FDB或ECA的重量为 W_1 ，未扰动土体对整个滑动土体的阻力为 F ，当EFHG下沉时，两侧受到的阻力为 T 或 T' 。由图1可见，作用在HG面上的垂直压力总值 $Q_{\text{浅}}$ 为：

$$Q_{\text{浅}} = W - 2T' = W - 2T \sin \theta \quad (6)$$

三棱体自重为：

$$W_1 = (1/2) \gamma \cdot h^2 / \tan \beta \quad (7)$$

由图1，根据正弦定理可得：

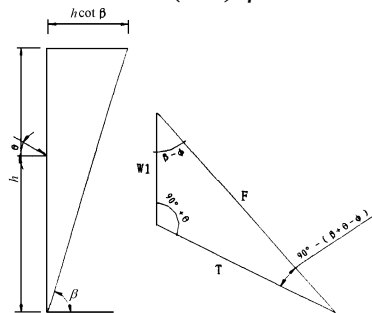
$$T / \sin(\beta - \phi) = W_1 / \sin[90^\circ - (\beta - \phi + \theta)]$$

即

$$T = W_1 \sin(\beta - \phi) / \sin[90^\circ - (\beta - \phi + \theta)] \quad (8)$$

将(7)式代入(8)式，则有：

$$T = (1/2) \gamma \cdot h^2 \lambda / \cos \theta \quad (9)$$



$$\lambda = (\tan\beta - \tan\phi) / \{ \tan\beta [1 + \tan\beta(\tan\phi - \tan\theta) + \tan\phi\tan\theta] \} \quad (10)$$

$$\tan\beta = \tan\phi + \sqrt{(\tan^2\phi + 1)\tan\phi / (\tan\phi - \tan\theta)} \quad (11)$$

把求得的 T 值代入(6)式,可求得作用在HG面上的总垂直压力 $Q_{\text{浅}}$:

$$Q_{\text{浅}} = W - 2T\sin\theta = W - \gamma h^2 \lambda \tan\theta \quad (12)$$

有些规范或教科书提到,由于考虑到GC、HD $\ll$ EG、FH,且衬砌与土之间的摩擦角也不同,故摩阻力不计隧道部分而只计洞顶部分,即在计算中用覆土厚度 H 代替埋深 h ,则(12)式变为:

$$Q_{\text{浅}} = W - \gamma H^2 \lambda \tan\theta \quad (13)$$

对北京电力隧道来说,GC、HD并不是远远大于EG、FH,隧道高度与覆土厚度之比(EG/GC或FH/HD)一般在50%~30%之间,而且喷射混凝土与地层之间的摩擦角实际上也远远大于衬砌与地层之间的摩擦角(这主要是因为是在高压风的作用下,使喷射混凝土与土体相互嵌合)。因此,在计算垂直压力总值 $Q_{\text{浅}}$ 时,若不计隧道部分摩阻力将使设计的垂直压力过大,从而导致设计的结构过于安全,造成浪费。

通过对大量实测资料的分析及工程类比,我们认为选择(12)式进行地下结构垂直压力的计算是相对合理的。

由于

$$W = B_t H \gamma$$

故

$$Q_{\text{浅}} = B_t H \gamma - \gamma h^2 \lambda \tan\theta = H \gamma (B_t - h^2 \lambda \tan\theta / H)$$

$$q = Q_{\text{浅}} / B_t = \gamma H [1 - h^2 \lambda \tan\theta / (H B_t)] \quad (14)$$

为了确定隧道结构上的垂直压力,还必须划定地层类别,合理选择地层的物理力学参数。

北京地区电力隧道穿越第四系粉质粘土或

粘质粉土层,个别地段穿越粉细砂层,地质条件较好,自稳能力较强。参照“铁路隧道围岩分类标准”,我们认为北京电力隧道所穿越的地层大部分可划为Ⅲ类。对个别有水、软土地段,为确保施工安全,一般都需要对地层进行加固处理。通过超前注浆等加固措施,大部分地层应能达到Ⅲ类围岩标准。

取 $\gamma = 20.2 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 30^\circ$, $\theta = 0.5\phi = 15.0^\circ$, $B_t = 2.54 \text{ m}$, $H_t = 2.92 \text{ m}$ 。

代入上述各式,有:

$$\tan\beta = \tan 30^\circ + \sqrt{(1 + \tan^2 30^\circ) \tan 30^\circ (\tan 30^\circ - \tan 15^\circ)} = 2.155$$

$$\lambda = (2.155 - \tan 30^\circ) / \{ 2.155 [1 + 2.155 \times (\tan 30^\circ - \tan 15^\circ) + \tan 15^\circ \tan 30^\circ] \} = 0.40$$

按(14)式,分别计算隧道覆土层厚度 $H = 3、4、5、6、7、8、9、10 \text{ m}$ 共8种情况,得表1所示的隧道顶部垂直压力结果。

表1 不同覆土层厚度条件下
隧道顶部垂直压力取值 m

覆土层厚度	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
隧道顶部垂直压力 (以土柱高度表示)	3.00	1.98	2.35	2.64	2.85	2.97	3.00	2.96

把以上分析结果进行归纳整理,从结构偏于安全考虑,最终对北京电力隧道的顶部垂直压力取值确定以下原则:

若覆土层厚度大于3.66 m(按规范所得的等效荷载高度),则隧道结构顶部垂直压力均按3.66m土柱荷载计算;

若覆土层厚度小于或等于3.66 m,则隧道结构的顶部垂直压力均按实际覆土产生的荷载计算。

改回日期:2000-12-25

(责任审编 邵根大)