

破碎围岩浅埋偏压隧道衬砌荷载的计算方法

刘小军^{a,b}, 张永兴^{a,b}, 黄 达^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 隧道洞口大都会面临围岩破碎、浅埋和偏压等不良地质地形情况, 现行规范只给出了偏压隧道衬砌荷载的计算方法。对于破碎围岩浅埋偏压隧道, 根据现场情况及实测的衬砌受力和变形特征表明其与规范假定不同, 不宜直接利用规范方法。通过工程实例分析及隧道三维数值分析结果提出了浅埋偏压隧道破碎围岩的破坏模式, 即隧道开挖后深埋侧岩体滑塌下落挤压支护结构使其向外侧变形, 从而外侧支护受到被动土压力。根据提出的破坏模式, 将隧道开挖后围岩主要分为滑塌区和被动区, 在此基础上利用极限平衡法推导出了衬砌荷载的计算公式。将计算得到的结果与现场实测值对比发现, 对于围岩极其破碎且存在较严重偏压的浅埋隧道工程, 提出的计算方法比采用规范方法更接近实际情况。

关键词: 破碎围岩; 浅埋偏压; 破坏模式; 衬砌荷载

中图分类号: TU457; U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)05-0028-06

Load Calculation Method of Shallow Tunnel under Unsymmetrical Loadings in Broken Surrounding Rock

LIU Xiao-jun^{a,b}, ZHANG Yong-xing^{a,b}, HUANG Da^{a,b}

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Tunnel portal section mostly faces unfavorable geologic and topographical conditions, such as broken surrounding rock, shallow and unsymmetrical loadings. The current Chinese code for design of road tunnel provides the load calculation method of tunnel under unsymmetrical. However, according to the mechanic and deformation characteristics of the tunnel lining on site, the assumption is not suitable for the shallow tunnel under unsymmetrical loadings in broken surrounding rock. Therefore, through engineering case analysis and results of three-dimensional numerical analysis, the failure mechanism of shallow tunnel under unsymmetrical loadings in broken surrounding rock is presented firstly, that is, deep buried side broken surrounding rocks slump down after excavation and squeeze the lining, which makes the lining deform outward and bear passive earth pressure. Through the failure mechanism, the surrounding rock mainly includes slumping area and passive area. Then the corresponding formulas are deduced based on limit equilibrium theory. Finally, a case study is adopted to verify the feasibility of the new method. It is show that the new method is more reasonable than the method of current code.

Key words: broken surrounding rock; shallow and unsymmetrical pressure; failure mechanism; load of tunnel lining

收稿日期: 2011-02-20

基金项目: 黔科合重大专项字(2008-6013-04); 国家自然科学基金项目(40902078)

作者简介: 刘小军(1983-), 男, 博士生, 主要从事隧道及岩土工程方面的研究工作, (E-mail) liuyu8345@yahoo.com.cn.

隧道洞口段大都存在浅埋偏压情况,而且隧道洞口段围岩风化严重,极易坍塌失稳,是整条隧道建设的关键部位之一。隧道洞口段的合理支护对于保护隧道围岩及边坡稳定具有重要意义,因此弄清支护结构的荷载来源、定量考虑其荷载大小是非常有必要的。目前,偏压隧道衬砌的设计主要以工程类比法为主,公路隧道设计规范也给出了偏压隧道衬砌荷载的计算方法^[1],其计算模型假定隧道开挖后跨度范围内拱顶岩土体下落,隧道两侧破裂角范围内的上部岩土体对拱顶下落岩土体提供一定的阻力。而实际在隧道监测中发现破碎围岩浅埋偏压隧道衬砌的变形为衬砌深埋侧下沉而浅埋侧向外挤出,因此浅埋侧支护结构承受的应该是被动土压力。同时,观察三维数值分析结果发现隧道拱顶下沉较大区域与规范中假定的塌落区并不一致,而且隧道现场监测得到的结果与规范计算得到结果不同,两者的压力分布情况有较大差异。

围岩压力对于研究隧道稳定具有重要意义,也是利用荷载结构法进行隧道衬砌设计的基础,因此受到国内外众多研究者的重视^[2-7]。对于具有浅埋或偏压特点的隧道,国内外许多学者利用极限分析理论通过模型试验或假定破坏模式的方法对浅埋隧道的稳定性进行了研究^[8-12]。但上述推导都基于圆形洞室给出,且要假定顶板或边墙的支护反力要均匀分布,无法对存在偏压的隧道求解。此外,李亮等首先将破碎围岩分成碎裂介质、块裂介质和板裂介质围岩,通过建立破碎围岩的力学模型求解连拱隧道的荷载理论解^[13];朱正国等认为浅埋侧土体阻碍隧道变形能力较弱,从调整浅埋侧弹性抗力系数的角度分析了偏压连拱隧道衬砌设计的方法^[14];杨小礼等以规范方法为基础,通过考虑水平地震力,对浅埋偏压隧道的松动围岩压力进行了研究^[15]。总之,隧道围岩压力一直受到研究者的广泛关注,但是由于浅埋偏压隧道自身的种种限制,使得理论求解存在诸多困难,目前尚未有文献对破碎围岩浅埋偏压隧道衬砌荷载的计算方法作出研究。

基于现场实测的衬砌受力和变形特征提出了一种较为符合破碎围岩浅埋偏压隧道的围岩破坏模式,并依此破坏模式利用极限平衡法得到了隧道衬砌荷载的计算方法。通过与实测值对比发现对于破碎围岩浅埋偏压隧道而言,其比规范方法更合理。

1 围岩破坏模式

破碎围岩浅埋偏压隧道围岩破坏模式是利用极限平衡法计算围岩压力的关键,确定围岩破坏模式通常需要通过工程实例分析、模型试验或数值计算等手段,工程实例分析得到的破坏模式最符合实际,也可通过观测模型试验过程中岩土体的变形以确定真实的破坏模式,数值计算结果也能直观的观测出近似的破坏模式。采用工程实例分析并参考数值计算结果(如图1)确定浅埋偏压隧道的破坏模式。经分析,浅埋偏压隧道开挖后支护的实际受力情况应为:拱顶深埋侧土体首先滑塌下落,然后作用于内侧支护结构,从而使支护结构挤压浅埋侧岩土体,使外侧支护受到被动土压力,围岩破坏模式如图2所示。

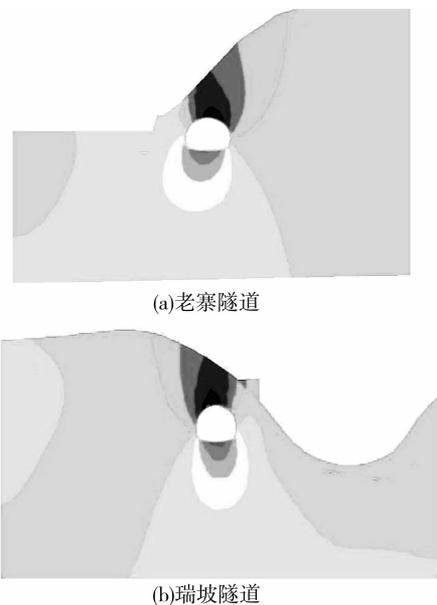


图1 三维数值分析竖向位移图

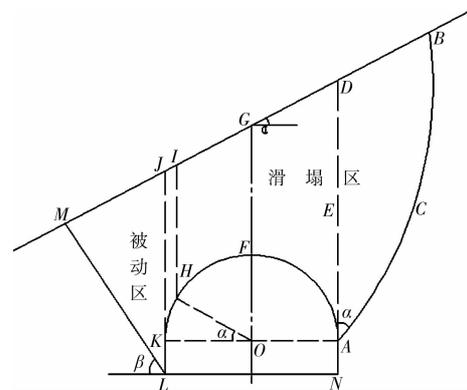


图2 围岩破坏模式

滑塌体范围依据浅埋偏压隧道数值分析结果中竖向位移显著区并通过若干合理假定概化确定,此外由现场实测结果发现深埋侧拱腰存在较大压力,因此

以隧道内侧起拱点为滑塌剪出口。如图2,浅埋偏压隧道坡度为 α , O 为隧道圆心, A 和 K 为两侧墙起拱点。图中 $ACBIH$ 为滑塌区, ACB 为滑面,假定弧 AC 与 AD 的夹角为 α ,当坡度 α 为0时, AC 和 AD 重合。图中 $LKHIM$ 为被动区, OH 与 OK 的夹角为 α ,当坡度 α 为0时, H 点与 K 点重合。 IH 为滑塌区与被动区的分界面。被动区的破裂角 β 按下式计算:

$$\beta = \arctan\left(\sqrt{\tan^2 \varphi + \frac{\tan \varphi}{\tan(\varphi + \delta)} + \tan \varphi}\right) \quad (1)$$

2 衬砌荷载计算方法

根据上述提出的隧道围岩破坏模式,可以利用极限平衡理论来计算作用于支护结构上荷载的大小,计算简图如图3。

为了简化计算且为了使计算不失一般性,在计算滑塌区重力时对滑面弧 ACB 进行近似处理, AC 与 AD 的夹角仍为 α , D 为 AE 的中点,从 B 点作垂线交 D 的水平延长线于 T 。图中 r 为隧道开挖半径, h_1 、 h_2 、 h_4 和 α 已知,由 r 、 h_2 和 α 可以确定 h_3 :

$$h_3 = h_2 - r \sin \alpha + x \tan \alpha \quad (2)$$

$$x = r \sin \alpha \cdot \cot\left(90^\circ - \frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

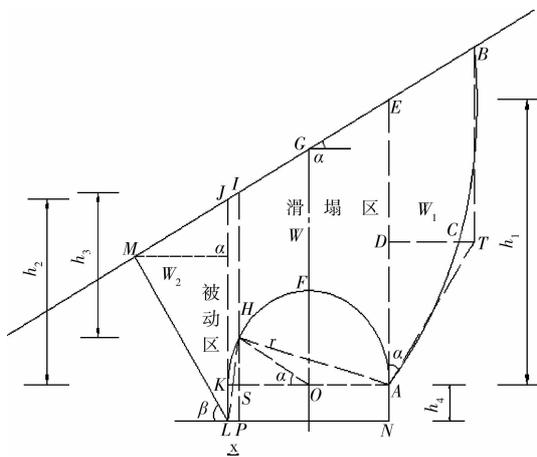


图3 衬砌荷载计算简图

隧道开挖后,滑塌体向临空面下落,滑塌区处于极限平衡时受到的作用力有:

- 1)滑塌区自重 $W + W_1$,其大小和方向已知;
- 2)滑面下方岩土体的反力 R ,其作用方向与 AT 的法线夹角为土的内摩擦角 φ ,且位于法线方向的下方;
- 3)衬砌支护反力 Q ,假设衬砌很粗糙且排水良好^[16], $\delta = 0.67\varphi$,则其作用方向与 AH 的法线方向夹角为 δ ,且位于法线方向的右侧;

4)滑塌区与被动区界面 IH 上的摩阻力 T 。其作用方向与自重方向相反,大小按下式(4)考虑。

$$T = \frac{k\gamma h_3 h'}{2} \tan \theta \quad (4)$$

上式中 k 为侧压力系数, $k = \frac{\mu}{1-\mu}$; h' 是等效高度,考虑地面并不水平,可以近似取 BI 中点到拱顶的高度。 θ 值小于 φ 值,可按《公路隧道设计规范》中的规定取值。

对于 T 的计算,主要考虑到浅埋段岩土体较为破碎,开挖后滑塌区的大部分岩土体更易于且倾向于向临空面下落,所以滑塌区与被动区交界面处的相互挤压作用不甚明显,对作用于衬砌上总的荷载影响有限,所以做如上考虑是可行的。

以上4个作用在滑塌体上的力在滑塌体处于极限平衡时形成平衡力系,可绘出如图4(a)所示的力矢三角形。根据正弦定律有:

$$Q = \frac{\sin(90^\circ - \varphi - \alpha)}{\sin\left[90^\circ + \varphi + \frac{\alpha}{2} - \delta\right]} (W + W_1 - T) \quad (5)$$

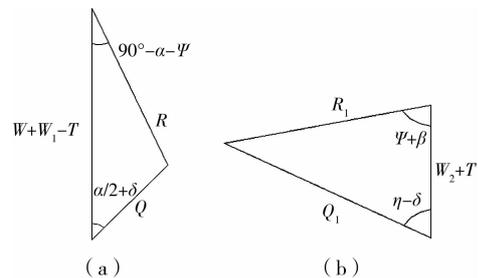


图4 计算力矢三角形

被动区处于极限平衡时受到的作用力有:

- 1)滑塌区自重 W_2 ,其大小和方向已知;
 - 2)破裂面下方岩土体的反力 R_1 ,其作用方向与 LM 的法线夹角为土的内摩擦角 φ ,且位于法线方向的上方;
 - 3)衬砌支护反力 Q_1 ,假设衬砌很粗糙但排水良好, $\delta = 0.67\varphi$,则其作用方向与 LH 的法线方向夹角为 δ ,且位于法线方向的上侧;
 - 4)滑塌区与被动区界面 IH 上的摩阻力 T 。
- 被动区处于极限平衡时,可绘出如图4(b)所示的力矢三角形。根据正弦定律有:

$$Q_1 = \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\sin[180^\circ - (\varphi + \beta + \eta) + \delta]} (W_2 + T) \quad (6)$$

$$\eta = \arctan\left(\frac{h_4 + r \sin \alpha}{x}\right) \quad (7)$$

通过图3计算简图中的几何关系可以求得各部

分岩土体的自重如下:

$$W_1 = \frac{\gamma h_1^2}{8} \tan \alpha (3 + \tan^2 \alpha) \quad (8)$$

$$W = \frac{\gamma}{2} [r(h_1 + h_2 + x \tan \alpha) (1 + \cos \alpha) - \pi r^2 + y] \quad (9)$$

$$W_2 = \frac{\gamma}{2} [(2h_2 + x \tan \alpha) \cdot x - y + z(h_2 + h_4)^2] \quad (10)$$

上式中

$$y = r^2 \left(\frac{\alpha \pi}{180^\circ} - \sin \alpha \cos \alpha \right) \quad (11)$$

$$z = \frac{\cos \alpha \cdot \sin(90^\circ - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (12)$$

至此,隧道衬砌荷载只剩下内侧边墙的荷载 Q_2 没有确定,由于上部滑塌体的荷载基本由衬砌承担,此处考虑反力 R 的竖向分解力在 DT 范围内均匀分布,大小为 q ,内侧边墙 AN 按有超载 q 的静止土压力理论计算,静止土压力系数也取为 k 。

$$q = \frac{R \sin(90^\circ - \alpha - \varphi)}{\frac{h_1}{2} \tan \alpha} \quad (13)$$

$$R = \frac{\sin(\frac{\alpha}{2} + \delta)}{\sin[90^\circ + \varphi + \frac{\alpha}{2} - \delta]} (W + W_1 - T) \quad (14)$$

$$Q_2 = \frac{k(q + q + \gamma h_4) h_4}{2} \quad (15)$$

上面得到的是合力,实际上衬砌受到的应该是分布荷载。对于荷载的分布形式,可以做如下考虑: Q 的分布可以将其沿水平向和垂直向分解,垂直分解的力在 AS 距离内按直角梯形分布,斜边与边坡角度一致。水平分解力作用在 OF 高度内,按倒梯形分布。同样,将 Q_1 沿水平向和垂直向分解,垂直分解的力在 KS 距离内按梯形分布,斜边与边坡角度一致。水平分解力作用在 HP 高度内,按倒直角梯形分布,斜边与水平向的夹角为 β ; Q_2 按梯形分布。

3 工程算例对比

3.1 工程概况

老寨隧道是厦蓉高速公路贵州境内的一段隧道,地处贵州高原东南部山区向广西丘陵过渡的斜坡地带,隧道区地貌类型属剥蚀型低山沟谷地貌。老寨隧道左幅隧道出口段埋深较浅,围岩为覆盖层、中厚至厚层状强、弱风化岩体变余砂岩、局部含角砾,岩体节理裂隙发育,风化强烈,岩体破碎,呈碎石状松散结构,开挖后自稳能力差,处理不当易出现大坍塌或塌至地表,隧道出口段自然横坡较陡,隧道开挖将产生偏压。

3.2 计算参数及结果

取老寨隧道 $ZK38+850$ 断面的几何参数及力学参数进行计算对比。围岩容重 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$,该断面深埋侧和浅埋侧的高度 $h_1 = 22.7 \text{ m}$, $h_2 = 8 \text{ m}$,其它参数依次为: $h_4 = 3 \text{ m}$, $r = 6.7 \text{ m}$, $\alpha = 48^\circ$, $h_3 = 5.49 \text{ m}$, $\varphi = 27^\circ$, $\theta = 19^\circ$, $\beta = 49^\circ$, $\eta = 74^\circ$, $\delta = 18^\circ$, $\mu = 0.35$ 。经计算,得到计算结果如下表 1,荷载示意图如图 5;按照规范方法计算结果如下表 2,荷载分布图如图 6。

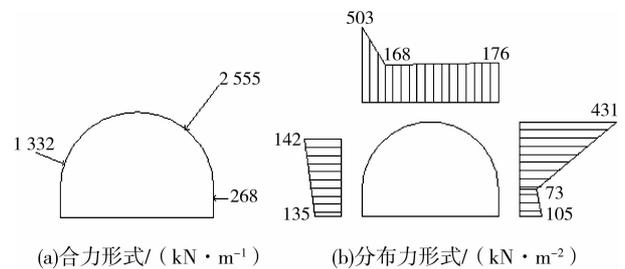


图 5 荷载示意图

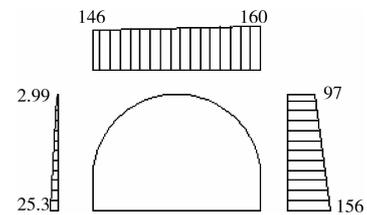


图 6 规范方法荷载示意图/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)

表 1 该文方法计算结果

$W/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$W_1/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$W_2/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$T/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$R/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$Q/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$Q_1/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$q/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$Q_2/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
2 452	6 057	789	231	6 605	2 555	1 332	135.7	267.7

表 2 规范方法计算结果

$Q/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$q_1/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$q_2/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$e_1/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$e_2/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$e_1'/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$e_2'/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)
2050	145.5	160.4	96.96	155.74	2.99	25.3

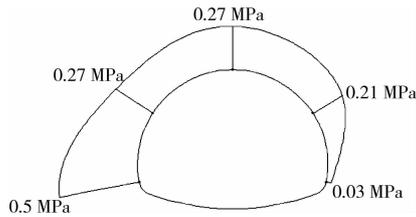


图 7 ZK38+850 断面围岩与初支接触压力图

3.3 计算值与实测值对比

如图 6,由规范方法计算得到的压力显示深埋侧拱脚会有较大压力,浅埋侧拱脚压力很小,而现场 3 个断面实测值均显示隧道深埋侧拱脚围岩压力不大,整个浅埋侧支护明显受到较大压力,如图 7。该文方法与实测值在数值上相比也不是很一致,但是规律相似,因为对浅埋侧按被动区考虑更接近实际情况。

为了对比规范方法和方法,利用 MIDAS 对初期支护采用荷载结构法进行了计算,MIDAS—GTS 可以很方便的输入各种不同的荷载分布形式。计算分 3 种工况,工况 1 为规范方法,工况 2 为方法合力形式,工况 3 为方法分布力形式,得到浅埋侧的位移如下表 3,表中节点如图 8 所示。实测值选取的是 ZK38+857 断面的变形值,该断面变形值较大,现场曾出现 ZK38+862~ZK38+855.7 断面的初期支

护发生严重变形,在 2 h 内向洞里突出 0.6 cm,整个型钢拱架向左侧挤压变形明显,浅埋侧拱腰变形最大处达到了约 60 cm,与方法的计算值较为接近。而工况 1 的计算值明显偏大,这是由于规范方法没有考虑浅埋侧被动土压力的影响,过大的估计了衬砌的内力和变形。各工况衬砌变形图如图 9 所示。

现场衬砌出现变形过大或严重破坏的因素有很多,包括围岩自身性质、施工扰动以及降雨等,但概括来讲就是外界条件弱化甚至是破坏了围岩的自稳能力,在这种情况下采用荷载结构法进行衬砌设计的关键在于确定围岩失稳范围和分析其对支护的作用模式。通过计算发现方法与实测值基本接近,说明确定的滑塌体范围和提出的破坏模式是较为合适的。

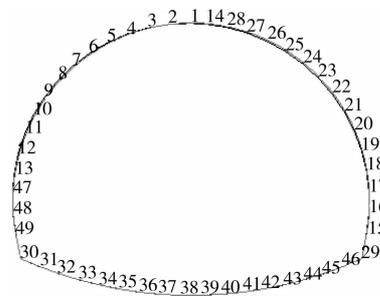


图 8 数值分析计算节点

表 3 数值分析与实测位移结果

节点编号	工况 1		工况 2		工况 3		实测位移值/m
	DX/m	DY/m	DX/m	DY/m	DX/m	DY/m	
7	-1.621	0.419	-0.679	0.251	-0.410	0.098	0.332
8	-1.574	0.372	-0.625	0.195	-0.402	0.090	0.426
9	-1.480	0.296	-0.551	0.135	-0.380	0.073	0.549
10	-1.336	0.204	-0.466	0.081	-0.345	0.051	0.575
11	-1.144	0.113	-0.381	0.040	-0.297	0.028	0.563
12	-0.915	0.035	-0.296	0.012	-0.239	0.008	0.398

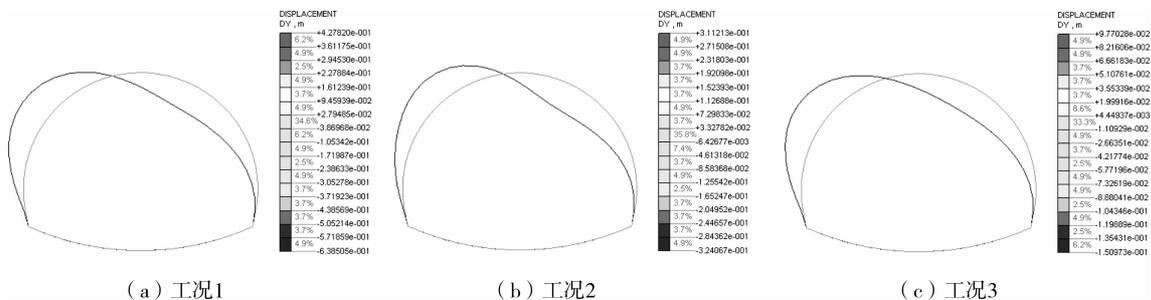


图 9 数值分析衬砌变形图

4 结 语

规范给出的偏压隧道衬砌荷载的计算思路直接源自水平地面浅埋隧道的计算方法,与破碎围岩浅

埋偏压隧道的实际破坏情况不符。提出的方法虽做了一些假定,存在一定的不足,如滑塌区与被动区之间摩擦力的计算方法,由于其对最终结果的影响不大,该文并未深入探讨,还需进一步改进。但是通过

对依托工程计算对比发现对于破碎围岩浅埋偏压隧道而言,本文方法较规范方法更接近实际情况。所以,通过上述分析仍可以得到以下结论:

1) 现场实测的衬砌受力和变形特征表明破碎围岩浅埋偏压隧道浅埋侧支护承受被动土压力。

2) 破碎围岩浅埋偏压隧道围岩的破坏模式为拱顶偏深埋侧岩土体由于难以自稳而首先滑塌下落,而浅埋侧围岩由于支护的挤压达到被动极限状态而破裂。

3) 通过与实测值比较,基于上述破坏模式提出的计算方法比规范方法更符合实际,可供围岩极其破碎且偏压较严重的类似工程设计时参考。

最后需要指出的是,在实际应用中若浅埋侧岩体非常薄,不足以形成被动区,则不宜使用方法,此时规范方法也不再适用。

参考文献:

- [1] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 王明年,郭军,罗禄森,等. 高速铁路大断面深埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 中国铁道科学,2009,30(5):53-58.
WANG MING-NIAN, GUO Jun, LUO Lu-se, et al ed. Calculation method for the surrounding rock pressure of deep buried large sectional loess tunnel of high-speed railway[J]. China Railway Science, 2009, 30(5):53-58.
- [3] JIANG Y, YONEDA H, TANABASHI Y. Theoretical estimation of loosing pressure on tunnels in soft rocks [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16:99-105.
- [4] BROWN E T, BRAY J W, LADANYI B, et al. Ground response curves for rock tunnels[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109:15-39.
- [5] LEE C J, WU B R, CHEN H T. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006(21):119-132.
- [6] 王德荣,甄树新,汪新红,等. 深部坑道围岩压力与变形分析[J]. 岩土力学,2007,28(3):570-576.
WANG DE-RONG, ZENG SHU-XIN, WANG XIN-HONG, et al. Analysis of pressure and deformation of wall rock near deep tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(3):570-576.
- [7] 邵生俊,邓国华. 原状黄土的结构性强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2008,41(11):93-98.
SHAO SHENG-JUN, DENG GUO-HUA. The strength characteristics of loess with different structures and its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11):93-98.
- [8] YANG XIAO-LI. Upper bound limit analysis of active earth pressure with different fracture surface and nonlinear yield criterion[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 47(1):46-56.
- [9] DAVIS E H, GUNN M J, MAIR R J. The stability of shallow tunnel and underground openings in cohesive material[J]. Geotechnique, 1980, 30(4):397-416.
- [10] LECA E, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material[J]. Geotechnique, 1990, 40(4):581-606.
- [11] 杨峰,阳军生. 浅埋隧道围岩压力确定的极限分析方法[J]. 工程力学,2008,25(7):179-184.
YANG FENG, YANG JUN-SHENG. Limit analysis method for determination of earth pressure on shallow tunnel[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 179-184.
- [12] 杨小礼,王作伟. 非线性破坏准则下浅埋隧道围岩压力的极限分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2010,41(3):1090-1095.
YANG XIAO-LI, WANG ZUO-WEI. Limit analysis of earth pressure on shallow tunnel using nonlinear failure criterion [J]. J. Cent. South Univ: Science and Technology, 2010, 41(1):299-302.
- [13] 李亮,郭乃正,傅鹤林,等. 破碎围岩中连拱隧道载荷计算理论解[J]. 中国铁道科学,2004,25(4):50-54.
LI LIANG, GUO NAI-ZHENG, FU HE-LIN, et al ed. Theoretical load solution to chain tunnel inside broken surrounding rock [J]. China Railway Science, 2004, 25(4):50-54.
- [14] 朱正国,刘志春,孙明磊,等. 偏压连拱隧道围岩压力及结构计算[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2010,29(1):75-78.
ZHU ZHENG-GUO, LIU ZHI-CHUN, SUN MING-LEI, et al ed. Calculation of surrounding rock pressure and structure of multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2010, 29(1):75-78.
- [15] 杨小礼,黄波,王作伟. 水平地震力作用下浅埋偏压隧道松动围岩压力的研究[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010,41(3):1090-1095.
YANG XIAO-LI, HUANG BO, WANG ZUO-WEI. Numerical simulation of construction sequence for shallow embedded bias tunnels with small clear distance [J]. J. Cent. South Univ: Science and Technology, 2010, 41(3):1090-1095.
- [16] 王成华. 土力学原理[M]. 天津:天津大学出版社, 2002.