

隧道开挖引起上覆岩体移动变形分析及控制措施研究

熊远勋, 李绍聪, 李小刚, 杨兴伟, 冉华, 李金磊

(云南交投集团公路建设有限公司, 云南 昆明 650118)

摘要: 在隧道浅埋大断面施工中, 受开挖断面尺寸和邻近隧道施工扰动的影响, 上覆岩体受力复杂, 极易发生移动和变形, 合理的施工方法和施工错距对改善围岩受力状况、保证隧道施工安全尤为关键。文中在分析上覆岩体位移变形机理的基础上, 采用数值分析方法对浅埋大断面公路隧道采用预留核心土法、台阶法施工时洞内变形和地表变形进行分析比较, 并对洞内外变形进行监测。结果表明, 台阶法施工方便、工序接替快、对围岩扰动少, 当左右幅隧道施工错距为 1 倍洞距及以上时, 可有效减小互相扰动的影 响, 有利于隧道的稳定。

关键词: 隧道; 大断面浅埋隧道; 上覆岩体; 变形分析; 控制措施; 台阶法

中图分类号: U456.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)04-0153-04

隧道越长, 其穿越不同地质地貌的单元越多, 常会碰到不良地质体、破碎带等。隧道穿越浅埋段时, 由于开挖扰动和开挖形成的三带直接连通地表, 稍有不慎, 将引起上覆岩体移动和变形, 甚至引起隧道塌方和失稳。因此, 研究隧道上覆岩体的移动变形规律对控制其移动有着十分重要的意义。该文以跨度为 18 m 的浅埋大断面泥岩隧道为工程背景, 通过理论分析隧道开挖引起上覆围岩移动机理, 利用数值分析方法分析不同施工工法和施工错距下上覆围岩的位移变形规律, 据此提出控制上覆岩体变形的措施, 为类似工程提供参考。

1 开挖引起上覆岩体的移动变形机理

从微观角度思考, 将一次隧道开挖量分解为无限多个 $1 \times 1 \times 1$ 的单元体, 即将复杂的岩土体运动分解为无限多个单元体的运动, 应用随机介质理论分析岩土体总的运动趋势, 即将隧道开挖对上覆岩体的影响等效为无限多个微分单元开挖影响的总和 (见图 1)。

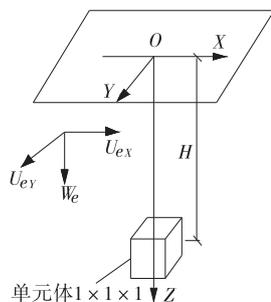


图 1 单元开挖示意图

1.1 单元开挖引起的上覆岩体移动规律

根据随机介质理论, 将因单元开挖引起的上覆岩体的竖向位移形成的沉降槽定义为单元沉降槽, 该方向的运动是一个概率事件, 当隧道开挖量足够大时, 上覆岩体会发生竖向位移。同时引入时间效应, 从单元体开挖时刻算起, 经过时间 t 后, 由单位岩体开挖引起的竖向坐标点的沉降为:

$$W_c(X, Y, Z, t) = \frac{1}{r^2(Z)} [1 - \exp(-Ct)] \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(Z)}(X^2 + Y^2)\right] \quad (1)$$

式中: $r(Z)$ 为单位岩体开挖在竖直方向的影响半径, $r(Z) = Z/\tan\beta$; β 为引起上覆岩体运动的主要影响角; C 为竖向位移速度系数。

单位岩体开挖引起隧道上覆岩体竖向位移的同时, 还会引起水平位移。通过柱坐标系, 引入应变变量, 得出 X 、 Y 方向的分量 U_{ex} 、 U_{ey} 如下:

$$\begin{cases} U_{ex(X,Y,Z,t)} = \frac{X \tan^2 \beta}{Z^3} [1 - \exp(-Ct)] \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{Z^2}(X^2 + Y^2)\right] \\ U_{ey(X,Y,Z,t)} = \frac{Y \tan^2 \beta}{Z^3} [1 - \exp(-Ct)] \cdot \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{Z^2}(X^2 + Y^2)\right] \end{cases} \quad (2)$$

单位开挖引起上覆岩体在某点地层的最大水平移动为:

$$U_{e\max}(X, Y, Z, t) = \sqrt{U_{ex}(X, Y, Z, t)^2 + U_{ey}(X, Y, Z, t)^2} \quad (3)$$

1.2 隧道开挖引起的上覆岩体移动

隧道开挖破坏了岩体原来的应力平衡,导致应力重新分布,其最直观的结果就是上覆岩体移动,并由隧道拱顶向上发育至地表。对于圆形、椭圆形和矩形断面,设开挖断面为 Ω ,开挖断面最终为 ω (见图2)。根据叠加原理,最终地表下沉量为开挖范围 Ω 引起的下沉减去收缩范围 ω 引起的沉降,即:

$$W(X) = W_{\Omega}(X) - W_{\omega}(X) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\varepsilon)^2\right] d\varepsilon d\eta \quad (4)$$

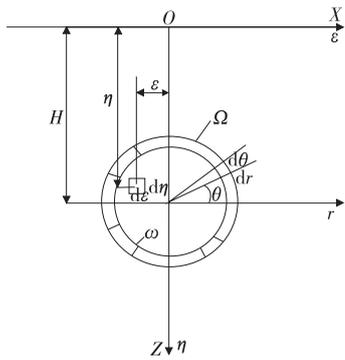


图2 隧道任意横断面开挖示意图

为计算方便,将式(4)通过二重积分换元法转换到极坐标系中:

$$W(X) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan\beta}{Z_1 - r \sin\theta} \exp\left\{-\frac{\pi \tan^2\beta}{(Z_1 - r \sin\theta)^2} [X - (X_1 + r \cos\theta)]^2\right\} r dr d\theta \quad (5)$$

式(5)中相关变换公式为:

$$\varepsilon = X_1 + r \cos\theta, \eta = Z_1 - r \sin\theta$$

同理,对隧道开挖引起的上覆岩体的水平位移求解,可得:

$$U(X) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{[X - (X_1 + r \cos\theta)] \tan\beta}{(Z_1 - r \sin\theta)^2} \exp\left\{-\frac{\pi \tan^2\beta}{(Z_1 - r \sin\theta)^2} [X - (X_1 + r \cos\theta)]^2\right\} r dr d\theta$$

2 数值模拟分析

2.1 模型建立

根据地质勘察及设计资料,选取隧道进口浅埋段K0+775—835为研究对象。考虑模型边界影响,根据圣维南原理,模型上表面取至地表,设为自由边界,向下取至隧道底部54m即3倍洞跨处,设为固定边界,限制其垂直位移和水平位移;隧道左右

幅外边界取3倍洞跨,模型侧面为位移边界,限制水平位移。模型高82m,宽144m,纵向长度为72m,隧道埋深为20m,左右幅隧道净距为12m,锚固范围为3m,以2m为一个循环。模型采用理想弹塑性模型、Mohr—Coulomb强度准则。数值模型见图3,材料的物理力学参数见表1。

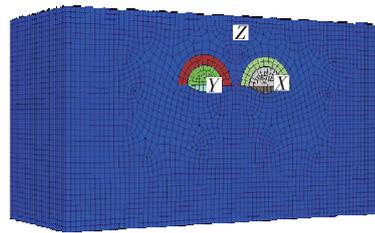


图3 数值计算模型

表1 材料的物理力学参数

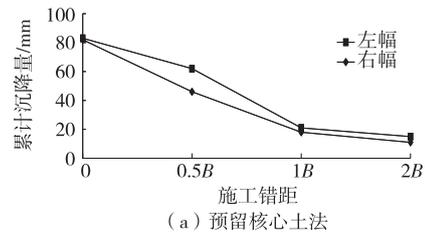
材料类型	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
强风化泥岩	0.18	29	1 790	1 400	0.39
喷射砼	1.98	50	2 200	2 200	0.20
围岩加固圈	0.80	31	1 960	1 900	0.29

2.2 施工顺序及左右幅隧道错距分析

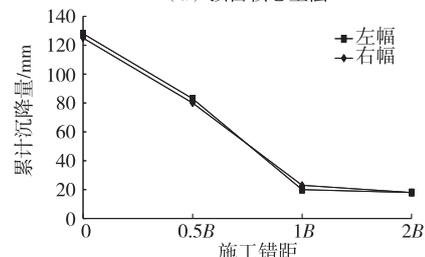
通过FLAC^{3D}数值分析研究隧道采用预留核心土法、上下台阶法,在左右幅错距为0、0.5B、1B和2B(B为隧道洞径)下施工时上覆岩体竖向和水平方向的移动规律。

2.3 上覆岩体竖向位移

在不同施工错距下采用上述两种开挖方法时上覆岩体竖向位移见图4。由图4可知:上覆岩体竖



(a) 预留核心土法



(b) 台阶法

图4 开挖方法和施工错距与上覆岩体竖向位移的关系

向位移一般发生在隧道左幅左边墙至右幅右边墙正上方直至地表的区域,施工过程中应加强这一区域的超前支护和变形监测。左右幅隧道施工错距较小时,上覆岩体的竖向位移会相互叠加,沉降量急速增大。随着左右幅隧道施工错距的增大,由开挖引起的上覆岩体沉降量逐渐减小;错距为 $1B$ 时,沉降量大幅下降;错距为 $2B$ 时,相较于错距为 $1B$ 时沉降量并未明显减小。由此推断左右幅隧道施工错距为 1 倍洞距时相互扰动影响较小,能较有效地控制上覆岩体的移动。可选取施工步骤最简单的施工方法,即上下台阶开挖法,以减少工期。

2.4 上覆岩体水平位移

不同开挖方法和施工错距下上覆岩体水平位移见图 5。由图 5 可知:在相同施工错距下,采用预留核心土法和台阶法施工时,上覆岩体最大水平位移区域为左右幅隧道拱腰部位。若施工不当,该区域易产生应力集中,进而引起岩体变形,使上层岩柱产生拉伸变形。随着左右幅隧道施工错距的增大,水平位移逐渐减小。施工错距为 $1B \sim 2B$ 时,采用预留核心土法、台阶法施工时左右幅拱腰围岩的最大收敛量分别为 13、15 mm,都能满足隧道施工围岩控制要求。

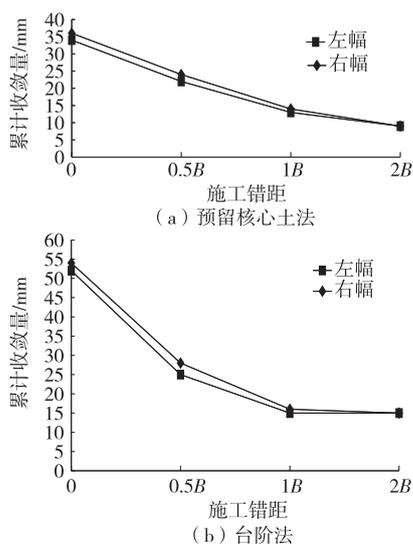


图 5 开挖方法和施工错距与上覆岩体水平位移的关系

2.5 上覆岩体弯曲规律

采用预留核心土法、台阶法开挖时,不同施工错距下上覆岩体的沉降见图 6(其中监测点布置见图 7)。由图 6 可知:左右隧道施工错距越小,沉降槽越深,弯曲曲率越大,上覆岩体越不稳定。错距大于 1 倍洞距时,无论采取哪种开挖方法,沉降槽弯曲曲率都

较小,可认为施工错距超过 1 倍洞距时有利于上覆岩体的稳定。施工方法不同、施工错距相同时,当左右幅隧道施工错距大于 1 倍洞距时,选取施工步骤较简单的台阶法施工,既有利于隧道的稳定,又可提高施工效率。

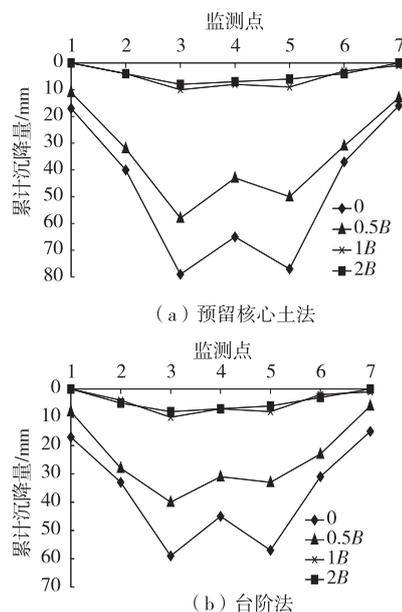


图 6 开挖方法和施工错距与上覆岩体沉降的关系

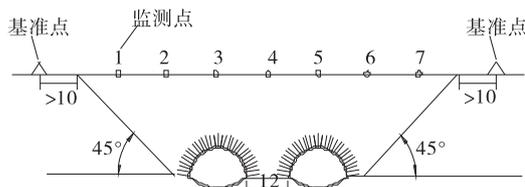


图 7 地表沉降监测点布置(单位:m)

3 隧道开挖监控量测分析

3.1 监测方案

为准确把握隧道围岩的稳定状态,同时为修正开挖方法、初期支护参数、二次衬砌仰拱施作时间提供依据,在隧道洞内外埋设监测点(见图 7、图 8),对施工中地表和洞内变形进行监测。

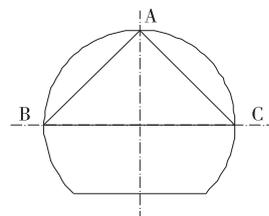


图 8 隧道洞内监测点布置

3.2 台阶法平行施工监测数据分析

在平行施工的段落布置洞内和地表沉降监测点,对平行施工过程中岩体变形进行监测。如图9、图10所示,隧道进口监测断面K0+780的拱顶沉降和地表沉降的累计量均超过控制值,上覆岩体的竖向和横向位移都较大,而上覆岩体的运动速率和弯曲率仍在增加。结合数值分析和监控量测数据分析,造成洞内变形和地表沉降过大的原因是隧道断面大,左右幅隧道平行施工,应力与变形叠加,应力向左右幅隧道掌子面集中,对中间岩柱产生较大拉伸变形,引起上覆岩体变形过大,隧道处于极不稳定状态。左右幅隧道平行施工不利于上覆岩体的稳定,隧道开挖中应尽量避免平行施工。

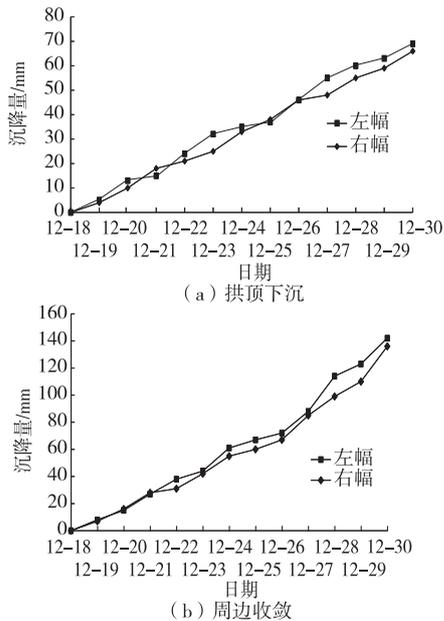


图9 K0+780洞内监测点位移-时间关系曲线

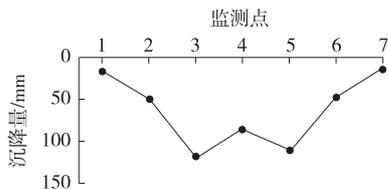


图10 K0+780断面上覆岩体位移-时间关系曲线

3.3 台阶法错距施工监测数据分析

根据数值模拟结果,施工错距为1B及以上时,隧道施工相互扰动影响小。以监测断面K0+800为例,隧道洞内监测点位移见图11,1B和2B施工错距下隧道地表沉降见图12。由图11、图12可知:左右洞施工错距超过1B时,采用台阶法施工,可有效控制上覆岩体的移动变形。

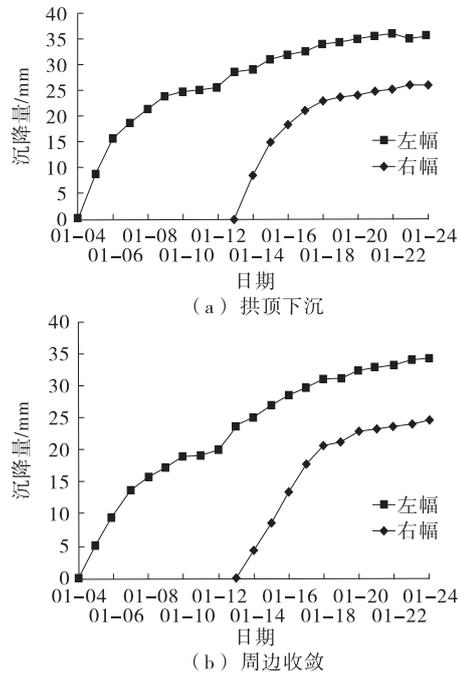


图11 K0+800洞内监测点位移-时间关系曲线

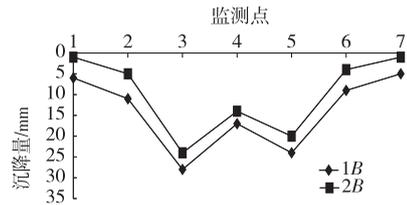


图12 K0+800断面上覆岩体位移-时间关系曲线

4 结论

(1) 浅埋大断面公路隧道开挖引起的上覆岩体竖向位移和荷载变形在隧道拱部变化最大,最大水平位移发生在左右幅隧道拱腰处,掌子面前方开挖扰动范围最大为0~1B,相应区域应加强超前支护、监控量测,减小开挖扰动强度和扰动频率,提高岩体的稳定性。

(2) 在一定条件下,台阶法施工由于工序少、速度快、应力扰动小等优点,在控制地表沉降和洞内变形中具有明显优势。

(3) 隧道左右幅开挖错距为1倍洞距及以上时,可有效减小互相扰动的影。选用台阶法施工既可有效控制上覆岩体的移动变形,又可加快施工速度。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部.中国隧道工程学术 Research 综述·2015[J].中国公路学报,2015,28(5):1-65.