

文章编号: 0451-0712(2006)07-0025-04

中图分类号: TU44

文献标识码: A

抽水引起岩溶区路基 塌陷的机理分析及其控制

谢忠球¹, 万志清², 钱海涛²

(1. 中南林学院土木建筑工程学院 长沙市 410004; 2. 中国科学院工程地质力学重点实验室)

摘要: 土洞的形成与扩展是产生覆盖型岩溶地面塌陷的前提, 为了研究人工抽水引起的岩溶区路基塌陷的机理, 用解析法分析了土洞扩展的条件, 提出了剥落力的概念, 认为土洞的向上扩展是剥落力大于土体抗拉强度的结果。剥落力 σ_b 是时间和空间的函数, 土洞周边不同的点, 受抽水引起的剥落力是不同的。土洞一旦开始向外围扩展, 由于剥落力越来越大, 所以土洞呈现发展趋势。当抽水使地下水位下降时, 剥落力 σ_b 增大。因此, 岩溶区抽水时必须控制水位降深、流量, 从而最大限度地避免路基土洞和岩溶塌陷的产生。

关键词: 土洞; 扩展条件; 岩溶塌陷; 剥落力; 解析法

岩溶塌陷是岩溶地区最重要的工程地质灾害之一, 其发展过程具有隐蔽性, 发生具有突发性。研究表明, 岩溶塌陷对公路不同部位都有危害, 包括对路基、路面的危害。岩溶塌陷对路基、路面的破坏, 直接造成路面的沉陷、裂缝与塌陷, 给公路的建设和安全运营带来了一系列严重的后果, 研究抽水引起的土洞形成机理, 对于岩溶地区公路设计、施工和养护具有重要的意义。研究覆盖层岩溶塌陷需从土洞的形成和扩展条件着手, 从而揭示其形成机理。

岩溶的形成需具备 3 个条件: 开口面向覆盖层的溶洞、溶隙或断裂裂隙; 一定厚度的覆盖岩土层; 地下水的活动。覆盖层岩溶塌陷是土洞不断发展的结果。影响岩溶塌陷的因素很多, 其中地下水的活动是土洞形成和产生地面塌陷的最活跃因素。大量的实例证明, 在人为的塌陷中, 抽水引起的岩溶塌陷占大多数。土洞的形成和扩展是产生覆盖型岩溶地面塌陷的前提。土洞形成以后, 在地下水流的作下, 会向上扩展, 扩展至一定程度后, 在一定条件下(如停止抽水)可形成土拱, 土洞的发展就处于暂时平衡状态。当继续抽水至改变土拱的平衡状态时, 土洞又继续向上扩展。在松散的砂砾石层中, 当过量过快抽取地下水时, 往往不形成土拱, 土洞快速向上发展直至产生地面塌陷。这就是为什么有的地点在抽水后

几分钟至几小时就产生塌陷的原因。万志清等曾研究了土洞形成的起始条件^[1]。本文用解析法来分析土洞的扩展条件, 进一步研究抽水引起的路基塌陷形成机理, 并对抽水引起岩溶区路基塌陷的控制提出对策。

1 地下水位下降的影响分析

如图 1 所示, 土层厚度为 H_0 , 抽水前岩溶水承压水位为 H , 抽水降深为 S_0 。假设以抽水井为中心产生一土洞, 洞径为 r_0 。设岩溶含水层符合建立承压水径向流微分方程的假设条件: (1) 含水层均质、等厚, 产状水平; (2) 地下水的天然水力坡度近似为 0; (3) 完整单井远离边界, 抽水降落漏斗可无限扩展, 可形成以抽水井轴为对称的圆形漏斗; (4) 抽水时在水位降低的一瞬间, 水立即从含水层中排除; (5) 抽水量为一常数。

根据承压水径向流非稳定运动微分方程:

$$a \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: h 为渗流区内某时刻(t)任一观测点处的动水位, m; x 为观测点到抽水井的距离, m; a 为含水层的压力传导系数, m^2/d ; t 为抽水延续时间, d。

式(1)反映了地下水流向完整井的运动规律, 但

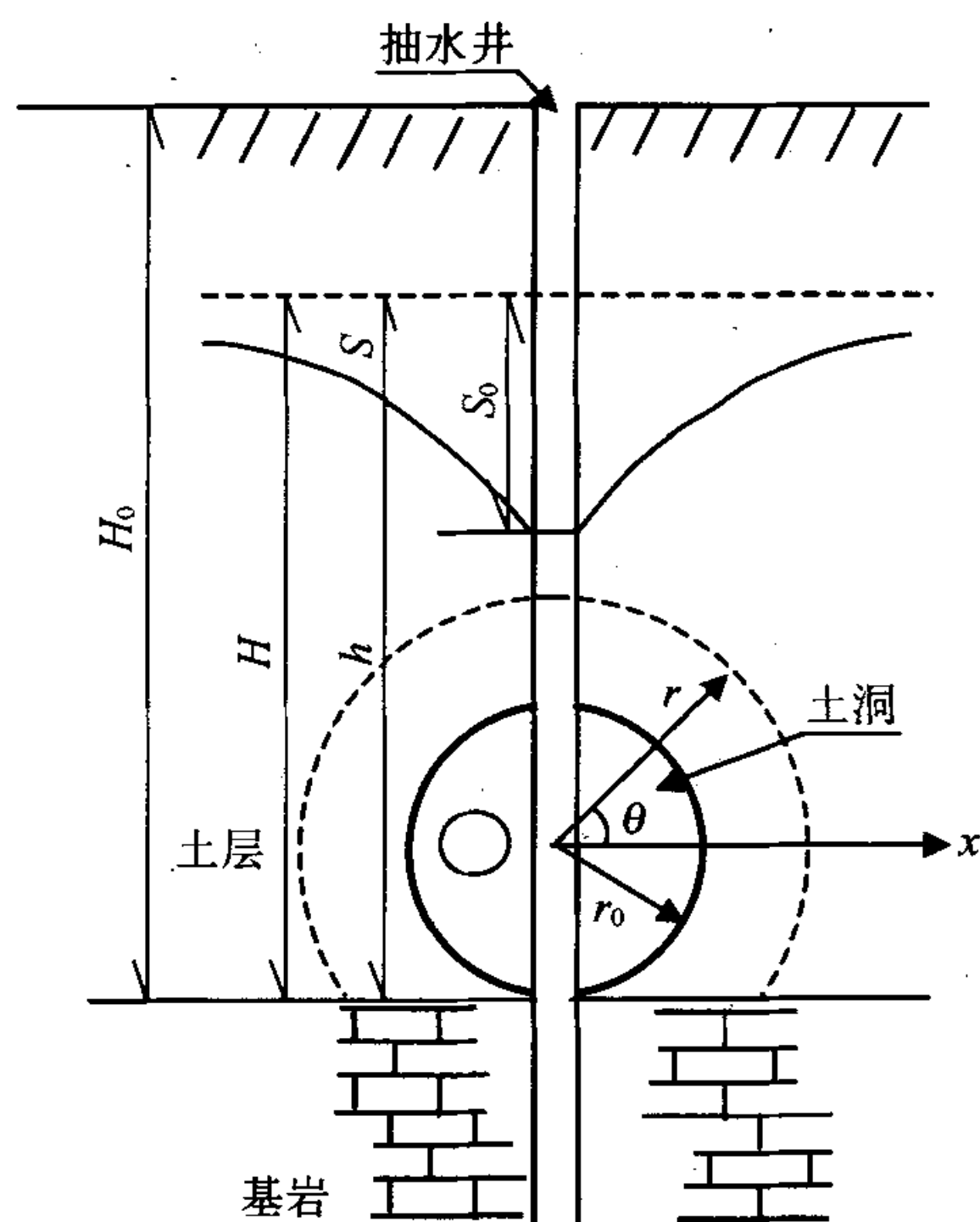


图1 抽水产生土洞示意

方程的解是不固定的。据初始条件(抽水前,任一点的水头值为一常数)和边界条件(抽水开始后,在抽水井影响范围以外各点的水头值为一常数; $x \rightarrow 0$ 时,抽水井可近似为一条汇流线)可解出方程,即泰斯公式:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2)$$

$$u = \frac{x^2}{4at}$$

式中: S 为观测点处的水位降深值, m ; Q 为抽水井流量, m^3/d ; T 为含水层的导水系数, m^2/d 。

由图1可知:

$$h = H - S = H - \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3)$$

下面来对式(2)和式(3)进行讨论。

(1)水力梯度的变化规律。

将式(3)对 x 求导就得到水力梯度的表达式:

$$J = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \frac{1}{x} \cdot e^{-\frac{x^2}{4at}} \quad (4)$$

由式(4)可看出如下规律。

①在同一过水断面上(x =常数),随着时间值 t 增大, e^{-u} 值增大, J 值也增大。任一过水断面上地下水的水力梯度,随 t 值增大, J 值也增大,整个降落漏斗的坡度不断变陡。

②在同一时刻(t =常数),不同过水断面上的水力梯度 J ,越靠近抽水井附近,即 x 越小,水力梯度越大,因而产生的动水压力也越大,这可解释为什么塌

陷多发生在抽水井附近的原因。在抽水初期, e^{-u} 远远小于1,随着 x 值的增大, e^{-u} 值逐渐减小, $1/x$ 也逐渐减小,因而水力坡度 J 也逐渐减小,最终趋近于0。抽水后期,当 $t \rightarrow \infty$, $e^{-u} \rightarrow 1$,则式(4)可近似为:

$$J = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \frac{1}{x} \quad (5)$$

式(5)表明,在抽水后期,地下水的水力坡度 J 仅为距离 x 的函数,且与 x 成反比,而与 t 值无关。在抽水影响范围内,各点的水力坡度均已达到各自的极值,形成了稳定的降落漏斗,这时地下水由非稳定状态变为稳定状态。在影响范围以外,水力坡度为0。

(2)水位下降速度的变化规律。

将式(2)对 t 求导就得到抽水影响范围内,地下水位下降速度的计算公式:

$$V_t = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \frac{1}{t} \cdot e^{-\frac{x^2}{4at}} \quad (6)$$

由式(6)可看出如下规律。

①在同一时刻,当 x 增大时, e^{-u} 减小, V_t 也相应减小。这说明距抽水井愈近,地下水位下降速度愈快,远离抽水井的水位下降慢。

②在同一过水断面上, t 值增大时, V_t 值的变化受 $1/t$ (与其中 t 成反变化)和 e^{-u} 制约(与其中 t 成正变化)。随抽水时间的增长,当 $t \rightarrow \infty$, $e^{-u} \rightarrow 1$, $1/t$ 趋近于0。这说明在同一过水断面上的地下水位下降速度,随着抽水时间延续逐渐变小,最终趋近于0。

这可解释为什么塌陷多发生于抽水初期,因为抽水初期,水位下降速度快,打破了原有的平衡,即相当于给土层一个突然的触发作用。

③在抽水影响范围内,随着抽水延续时间 t 值的增大,当 $e^{-u} \rightarrow 1$ 时,式(6)可近似为:

$$V_t = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \frac{1}{t} \quad (7)$$

式(7)表明,当抽水时间延续很长时,水位下降速度仅为时间的函数,而与距离无关。即在抽水影响范围内,各点的水位呈等速下降,其下降速度随时间增大而减小,当 $t \rightarrow \infty$, $1/t \rightarrow 0$, $V_t \rightarrow 0$,这时地下水由非稳定运动状态转变为稳定运动状态。在影响范围以外,水力坡度为0。

2 土洞扩展条件的解析解

如图1所示,土洞最初形成的部位一般有2个:一是靠近基岩面;二是粘性土与砂类土交界处或地下水位频繁变动带附近。严格地讲,对第一种情况不适用于 Vesic(1974年)关于球形孔扩张问题^[3];对第

二种情况,当土洞上下土层厚度远大于洞径(一般要求大于3倍洞径)时,可近似采用球形孔扩张问题的塑性平衡方程求解。虽然如此,作为定性分析,以寻求土洞扩展的规律,这里还是利用文献[4]中对于土洞的简化假定:(1)土层为各向同性;(2)洞径相对于土层厚度来说很小;(3)不考虑在基岩面附近应力应变在三维域的变化,而把土洞假想为球对称问题;(4)为了满足球对称问题的条件,假定土层中水平和垂直应力相等。基于上面的假设(不考虑基岩刚性层的影响),球对称问题也适合于基岩面上的半球形土洞。

土洞中受到承压水的作用,由于水压力的作用,在土洞周围形成一塑性区,将土洞理想为一球形,假设洞中受到均匀的内水压应力,大小为平均应力:

$$P_u = \gamma_w(H + H - 2r_0)/2 = \gamma_w(H - r_0)$$

土洞形成后再次抽水前,由于内水压力作用已使土洞周围挤压扩张,因此土洞的半径 r_0 就是对应于 P_u 作用的半径。由于土洞形成之初洞径相对于土层厚度要小得多,这样一来可用球形孔扩张问题来求解塑性区的应力,如图2所示。采用球坐标,其平衡微分方程为:

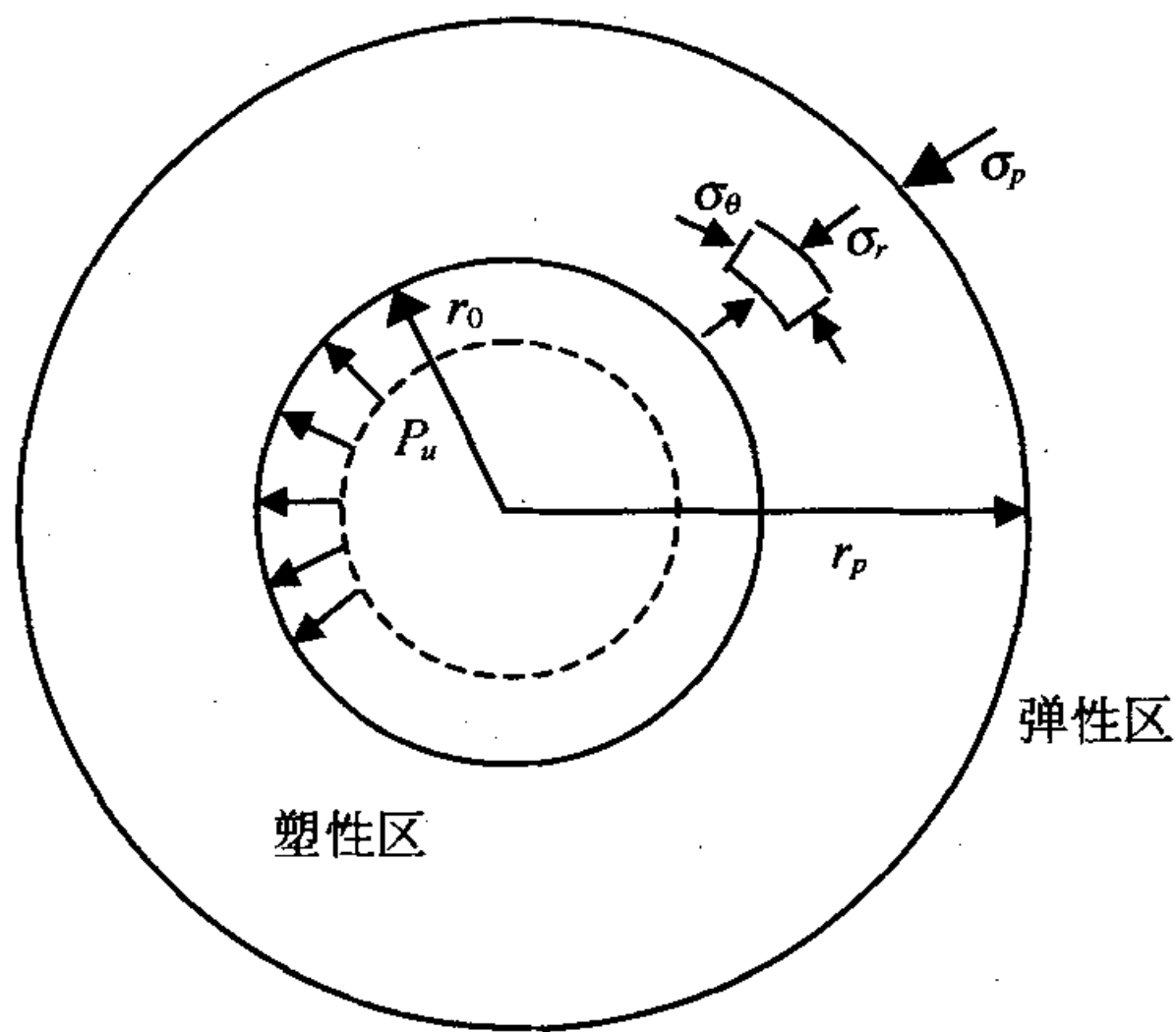


图2 土洞受岩溶承压水作用形成塑性区示意

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (8)$$

几何方程为:

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{du_r}{dr} \\ \epsilon_\theta &= \frac{u_r}{r} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: u_r 为径向位移。

对Mohr-Coulomb准则,屈服条件为:

$$(\sigma_r - \sigma_\theta) = (\sigma_r + \sigma_\theta) \sin \varphi + 2c \cos \varphi \quad (10)$$

式中: c 、 φ 分别为土的内聚力和内摩擦角。

解式(10)方程得:

$$\sigma_r = (P_u + c \cot \varphi) \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (11)$$

将 $P_u = \gamma_w(H - r_0)$ 代入式(11)得:

$$\sigma_r = [\gamma_w(H - r_0) + c \cot \varphi] \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (12)$$

由 $\sigma_\theta = \sigma_r \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}$,可很容易地解出 σ_θ 来。

抽水使水位下降 S ,则土洞内水压力相应地减小,这时 $P_u = \gamma_w(H - S - r_0)$,代入式(12)得:

$$\sigma_r = [\gamma_w(H - S - r_0) + c \cot \varphi] \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (13)$$

另一方面,抽水使水位下降 S ,将在土洞周边产生应力的增加量:垂向有效应力增量 $\Delta \sigma = \gamma_w S$,其在径向上的分量为 $\gamma_w S \sin \theta$,单位宽度水流产生的渗透应力为 $n \gamma_w J \times 1 = n \gamma_w J$ (n 为孔隙度)。按不利情况考虑,设渗透应力与土洞的径向一致,则增加的应力之和为:

$$\Delta \sigma = \gamma_w S \sin \theta + n \gamma_w J$$

这里定义 $\Delta \sigma - \sigma_r$ 为剥落力,用 σ_b 表示,即:

$$\sigma_b = \Delta \sigma - \sigma_r$$

当 $\sigma_b \geq [\sigma_t]$ 时,土洞顶部周围将产生剥落,土洞开始向外围扩展。 $[\sigma_t]$ 为土的抗拉强度。则有:

$$\sigma_b = \gamma_w S \left[\sin \theta + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right] + n \gamma_w J - [\gamma_w(H - r_0) + c \cot \varphi] \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} + c \cot \varphi \quad (14)$$

将式(2)中的 S 代入式(14)中,并考虑到 $x = r \cos \theta$,得:

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \gamma_w \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \left[\sin \theta + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right] + \frac{n \gamma_w Q}{2\pi T} \cdot \\ &\quad \frac{1}{r \cos \theta} \cdot e^{-u} - [\gamma_w(H - r_0) + c \cot \varphi] \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} + c \cot \varphi \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{式中: } u = \frac{r^2 \cos^2 \theta}{4at}.$$

将式(15)做积分变换,并对 e^{-u} 按泰勒级数展开得:

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{\gamma_w Q}{4\pi T} \left(-0.5572 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} \right. \\ &\quad \left. - \frac{u^4}{4 \times 4!} + \dots \right) \left[\sin \theta + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right] + \frac{n \gamma_w Q}{2\pi T} \cdot \frac{1}{r \cos \theta} \\ &\quad \cdot e^{-u} - [\gamma_w(H - r_0) + c \cot \varphi] \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} + c \cot \varphi \end{aligned} \quad (16)$$

当地下水的流速 $V=KJ$ 大于临界流速时,土中细颗粒将被水流带走,于是在土中形成一系列水力裂隙,在土洞周围的塑性带也会出现这样的裂隙,从而形成一系列相对薄弱的“土块”。当土洞周边这些相对薄弱的“土块”处的剥落力 σ_b 大于土的抗拉强度时,该处的土块就首先被剥离母体,土洞向外扩展。

由式(16)可看出,剥落力 σ_b 是时间和空间的函数,土洞周边不同的点,受抽水引起的剥落力是不同的。离抽水井越近,即 r 越小, σ_b 越大,说明离抽水井近的土洞容易扩展;土洞的顶部和底部的剥落力 σ_b 也不同,靠近洞顶部,即 θ 越大, σ_b 越大,说明洞顶比洞的侧壁容易向外扩展;抽水时间越长, σ_b 越大,土层被剥落的时间越长,当抽水延续时间很长,使得 $u \leq 0.01$ 时,式(16)中的级数自第三项起,后面各项的绝对值很小,可忽略不计;同时,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e^{-u} \rightarrow 1$,经变换后,式(16)变为:

$$\sigma_b = \frac{\gamma_w Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2 \cos^2 \theta} \left[\sin \theta + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right] + \frac{n \gamma_w Q}{2\pi T} \cdot \frac{1}{r \cos \theta} - [\gamma_w (H - r_0) + c \cot \varphi] \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} + c \cot \varphi \quad (17)$$

对砂砾类土, $c=0$, 式(17)变为:

$$\sigma_b = \frac{\gamma_w Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2 \cos^2 \theta} \left[\sin \theta + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \right] + \frac{n \gamma_w Q}{2\pi T} \cdot \frac{1}{r \cos \theta} - \gamma_w (H - r_0) \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} \quad (18)$$

由式(16)~(18)可看出,随着土洞的不断扩大(r_0 增大),剥落力 σ_b 也增大,也就是说当土洞一旦开始向外围扩展,由于剥落力越来越大,所以土洞呈现加速发展趋势。这一结论与 Thomas M. Tharp (2001 年)的研究结果^[4]一致。他认为随水位下降,洞周围径向应力减小,水位的持续下降,使得洞周某处孔隙水压力超过径向应力与抗拉强度之和(即本文的 $\sigma_b \geq \sigma_r + [\sigma_t]$),这将导致洞周薄层土剥落;剥落之后,将暴露另一层新的具有更大张应力的面,也将剥落。一旦初始破坏开始,破坏将快速向周围传播,直至达到新的平衡或扩展到地表。Tharp (1999 年)^[5]的一篇文章中给出了一个例子:考虑一埋深为 2 m、洞宽为 2 cm 的土洞,土层为粘性土,标准贯入击数为 10,其不排水无侧限抗压强度为 0.15 MPa,该洞扩展到地表需要 13.6 年,但在最初一半时间里土洞只扩展了 10 cm,然后从 1.0 m 扩展到 2.0 m 只用了 0.7 年。这说明土洞的发展是呈加速发展趋势的。

由式(16)~(18)还可看出,岩溶水承压水位越高,剥落力 σ_b 越小,原因是地下水对洞壁起到了顶托作用。而一旦抽水开始,水位下降,使得这种作用变小甚至消失,土层中增加的有效应力及动水压力将使土洞周围土层开始剥落。

由上述分析可见,虽然对土洞的一些假定不甚合理,但作为定性分析土洞的扩展规律还是可行的。

当地下水位下降至土洞顶板以下时,式(16)~(18)不再适用。

3 结语

(1)剥落力 σ_b 是时间和空间的函数,土洞周边不同的点,受抽水引起的剥落力是不同的。离抽水井越近, σ_b 越大,说明离抽水井近的土洞容易扩展,公路附近应严禁抽取地下水。

(2)洞的顶部和底部的剥落力 σ_b 也不同,越靠近洞顶部, σ_b 越大,说明洞顶比洞的侧壁容易向外扩展。

(3)抽水时间越长, σ_b 越大,土层被剥落的时间越长。随着土洞的不断扩大,剥落力 σ_b 也增大,也就是说当土洞一旦开始向外围扩展,由于剥落力越来越大,所以土洞呈现加速发展趋势。当抽水使地下水位下降时,剥落力 σ_b 增大,这解释了为什么抽水容易产生地面塌陷的原因,必须严格控制抽水时间。

(4)影响土洞扩展的剥落力值与抽水降深、水力梯度成正比,因而抽水过程中水位降深、流量必须得到控制,从而最大限度地控制土洞的产生。

参考文献:

- [1] 万志清,等. 土洞形成的机理及起始条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8).
- [2] 杨健. 鞍山市岩溶地面塌陷机制及其环境地质质量评价[D]. 长春: 长春科技大学, 1999.
- [3] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [4] T M THARP. Cover-collapse sinkhole formation and piezometric surface drawdown[A]. Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology[C]. Beck & Herring (eds), 2001.
- [5] T M THARP. Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes [J]. Engineering geology, 1999, 52.

文章编号: 0451-0712(2006)07-0029-06

中图分类号: U416.1; TU449

文献标识码: A

厦门集美大道高塑性粘土工程特性研究

颜永龙

(厦门市公路局 厦门市 361009)

摘 要: 通过对厦门集美大道高塑性粘土工程特性的室内试验分析研究, 得出高塑性粘土高稳定强度、低缩量的最佳状态, 使其在施工中得以实施, 并能满足高等级公路路基设计的要求。

关键词: 高塑性粘土; 工程特性分析; 击实功; 含水量; 最佳状态

厦门集美大道锦圆~兑山段路线总长 5.4 km, 路基填土总数量约为 120 万 m^3 , 其中 K2+500~K3+100 段开挖土方数量约为 24 万 m^3 。该路段挖方土体属于高塑性粘土, 在重型击实标准下, 其浸水 CBR 值不能满足 150 cm 以下路堤填料强度 CBR 值 >3.0 的规定^[2]。本工程附近优质填筑土源较为紧缺, 且在福建省东南沿海及至全国许多地域高等级公路建设中频繁出现类似的高塑性粘土, 如简单地否定其在高等级公路路基填筑中的应用, 既浪费了资源又增加了投资, 因此决定对这段挖方土体开展专

题科学研究, 以探寻高塑性粘土稳定性差的本质原因。在此基础上, 对症下药, 探索其在不掺改良剂的前提下, 通过控制土的压实功、改进施工工艺, 解决稳定强度小这一影响其路用性能的关键技术问题。

1 研究的技术路线和依据

高塑性粘土是天然稠度小于 1.1、液限大于 40%、塑性指数大于 18 的湿性土、高液限土、红粘土、膨胀土等不稳定筑路材料的总称。

高塑性粘土的液限大、塑性指数高、水稳定性极

收稿日期: 2006-03-23

A Study on Mechanism of Karst Collapse of Subgrade Induced by Pumping and It's Control

XIE Zhong-qiu¹, WAN Zhi-qin², QIAN Hai-tao²

(1. School of Civil Engineering, CSFU, Changsha 410004, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing, China)

Abstract: The forming and expanding of a soil cavity are the base of the overburden karst collapse. For the purpose of the study of mechanism of karst collapse induced by pumping, the conditions of soil cavity expanding are analyzed by analytical method, and the concept of spalling force is put forward. The spalling force is the function of the time and space, the spalling forces caused by pumping water are different at different point around the soil cavity. When the soil cavity propagated outwards, the soil cavity become a accelerating development trend because of the increasing spalling forces. When pumping water makes the underground water drop, the spalling force increases. Therefore, the factors of pumping such as depression depth of water level and flow volume must be controlled in karstic area, so that the forming of soil cavity and the karst collapse of subgrade can be avoided.

Key words: soil cavity; condition of expanding; karst collapse; spalling force; analytical method