

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.171

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 降雨入渗对浅埋黄土隧道稳定性的影响

邓祥辉, 曹卫平, 杨东升

(西安工业大学 建筑工程学院, 西安 710021)

**摘要:**为了研究降雨入渗作用下黄土力学性质劣化对浅埋黄土隧道稳定性的影响,对隧道围岩中的黄土进行了不同含水率和不同围压的剪切、等压三轴试验,结果表明,含水率对黄土力学性质和破坏形态有较大影响。根据试验结果建立了黄土不同含水率的塑性本构关系,对比了计算结果和试验结果,证明了该本构关系能较好地描述黄土的应力-应变规律。对不同降雨强度、不同深度的黄土在雨水入渗影响下的含水率分布规律进行分析,并在数值模拟软件中调用建立的不同含水率的黄土塑性本构关系,计算不同降雨强度下隧道结构的受力和变形,结果表明:考虑降雨入渗后隧道结构变形和受力增加明显,其中,拱顶沉降增幅达到 46%,隧道初期支护应力增加 20%~27%。将浅埋黄土隧道结构变形监测数据与数值模拟结果对比,验证了黄土本构关系的正确性,所模拟的降雨入渗对隧道结构稳定性的影响符合实际工程。

**关键词:**浅埋隧道;黄土隧道;降雨入渗;本构关系;数值模拟;稳定性

**中图分类号:**U451 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)02-0045-11

## Stability analysis of shallow loess tunnel considering rainfall infiltration

Deng Xianghui, Cao Weiping, Yang Dongsheng

(School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of strength reduction of loess induced by rainfall infiltration on the stability of tunnel, direct shear- and triaxial- tests were carried out on loess. The results show that the water content has significant influence on the mechanical behaviors of loess. The elastic-plastic incremental constitutive relation of undisturbed soil was established. By compared with experimental data, the constitutive model was proved to be capable of describing the stress-strain relationship of loess. The distribution characteristic of water content in different depth land under different rain intensity were analyzed. Besides, the constitutive model for loess with different water contents were established so as to calculate the stress and deformation of structure in tunnel under different rain intensities. The results show that when considering rainfall infiltration, the deformation of tunnel and the stress of preliminary support

**收稿日期:**2019-07-05

**基金项目:**国家自然科学基金(51408054);陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM5136);陕西省教育厅科技计划(18JK0402)

**作者简介:**邓祥辉(1976-),男,教授,博士,主要从事地下工程研究,E-mail:xianghuideng@xatu.edu.cn.

**Received:**2019-07-05

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51408054); Natural Science Basic Research Project of Shaanxi Province (No. 2017JM5136); Scientific Research Foundation of Education Department of Shaanxi Province (No. 18JK0402)

**Author brief:** Deng Xianghui (1976-), professor, PhD, main research interest: underground engineering, E-mail: xianghuideng@xatu.edu.cn.

structure are significantly increased. In this situation, the settlement of the tunnel vault increases 46% and the stress of preliminary support structure increases 20%~27%. It is found the elastic-plastic incremental constitutive relation is reasonable and results of the numerical simulation is reliable with comparing the calculated and measured data of tunnel deformation.

**Keywords:** shallow tunnel; loess tunnel; rainfall infiltration; constitutive relation; numerical analysis; stability

中国黄土分布广泛,大量建设工程不可避免地要修建在黄土地区。当隧道穿越浅层黄土中的 $Q_4$ 、 $Q_3$ 期黄土时,由于新黄土孔隙率大、湿陷性显著,隧道施工扰动极易引起各种工程问题<sup>[1-2]</sup>。特别是降雨产生的地表水入渗后,黄土隧道进、出口段以及浅埋段容易发生大变形、局部坍塌,甚至塌方等工程事故。因此,有必要深入研究降雨入渗作用下浅埋黄土隧道的结构稳定性。

目前,考虑降雨入渗对黄土隧道稳定性影响主要涉及三方面的研究:一是黄土渗流理论和模型研究;二是不同含水率的黄土力学特性研究;三是降雨入渗影响范围以及黄土隧道稳定性分析。渗流理论早期主要以 Darcy 定理为基础,将黄土视为孔隙介质。后续研究中,许多学者建立了专门的降雨入渗模型,其中应用最广泛的是 Mein-Larson 模型<sup>[3-4]</sup>。近年来,很多学者将优先流理论应用于黄土地层。如张中彬等<sup>[5]</sup>系统分析了黄土孔隙对优先流的影响,并总结了优先流定量化和数学模拟研究进展,指出受黄土结构复杂性影响,优先流理论在黄土中的应用还有诸多问题。在不同含水率黄土力学特性研究方面,陈正汉等<sup>[6]</sup>以压实黄土为研究对象,系统研究了非饱和土的力学特性在剪切过程中的变化规律,并对非饱和土水气运移的测试方法进行了研究。黄琨等<sup>[7]</sup>通过直剪试验研究了黄土抗剪强度与含水率的关系,发现黏聚力与含水率的关系可以用两段直线表示,当黄土达到一定含水率时,黏聚力急剧降低。梅岭等<sup>[8]</sup>通过试验指出脱水与吸水两种情况中,试样含水率随基质吸力变化的规律有所不同。邓洪亮等<sup>[9]</sup>通过大量浸水试验研究了黄土湿陷性与浸水时间、饱和度、含水率、压力间的关系。近年,在降雨入渗影响范围以及黄土隧道稳定性分析方面也取得了一些进展。如宋孝玉等<sup>[10]</sup>、张常亮等<sup>[11]</sup>进行了现场试验,研究了不同渗流强度、时间等因素的影响,发现新黄土中水分渗流速率较快,影响深度虽然会随降雨强度的提高而增加,但一般不会超过 6 m

的极限入渗深度,且极限深度与黄土所处区域密切相关。赖金星等<sup>[12]</sup>基于流固耦合理论,建立了隧道开挖流固耦合模型,分析了塑性区范围与排水方案有关系。Yoo 等<sup>[13-14]</sup>采用流固耦合法分析了地下水渗流情况下隧道施工引起的土体沉降。王浩然等<sup>[15]</sup>通过数值模拟研究了渗流对隧道开挖面稳定上限的影响,分析了渗流对开挖面稳定性影响的因素和破坏模式。

目前,对黄土渗流模型、黄土非饱和特性、降雨入渗影响范围以及黄土隧道稳定性等方面均进行了研究<sup>[16]</sup>,但很少考虑依托实际黄土隧道工程建立基于黄土的弹塑性增量本构关系,也未考虑降雨入渗后饱和黄土地层和含水率增加对隧道稳定性的影响。鉴于此,笔者首先对不同含水率的隧道围岩黄土试样进行三轴试验,建立黄土的弹塑性增量本构关系;然后将建立的本构关系导入 Midas 数值模拟软件,应用渗流-应力耦合模块分析降雨入渗对浅埋黄土隧道稳定性的影响,并进行了工程验证。

## 1 围岩黄土三轴试验

试验黄土试样取自某隧道掌子面的 $Q_3$ 期原状黄土,在新开挖的黄土隧道掌子面中心 $1\text{ m}^2$ 的范围内,将周边土体掏空,将中心未扰动土体完整取出,制成 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的块体。为避免土样的扰动,对土样进行胶带密封、隔水包装运输至实验室,将未破坏的完整土体用削土器削制成高为 $200\text{ mm}$ 、直径为 $60\text{ mm}$ 的圆柱体试验土样。测得自然状态下含水率为 $18\%$ ,饱和含水率为 $30\%$ ,其他物理指标如表1所示。对制备好的土样均匀喷雾加湿,之后放在保湿缸内保湿 $2\text{ h}$ ,称量质量,重复该步骤直至土样含水率达到4种试验含水率( $18\%$ 、 $22\%$ 、 $26\%$ 、 $30\%$ )。为获得非饱和土的应力-应变关系、力学参数及峰值强度等,对试样按含水率的不同进行分组,每组分别进行剪切试验和等压试验。

表 1 隧道围岩黄土试样的初始物理指标

Table 1 Initial physical parameters of undisturbed loess samples

含水率 $\omega/\%$	密度 $\rho/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	干密度 $\rho_d/$ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	孔隙率 $n/\%$
18	1.78	1.49	31	18.5	41

## 1.1 试验参数及试样分组

1.1.1 剪切试验 试件在排水剪切试验前,进行 24 h 的固结。三轴试验中,剪切速率为 0.025 mm/min,最大围压为 300 kPa,最小为 50 kPa,最大和最小围压中 50 kPa 为一档,共进行 6 种不同围压的试验。结束试验条件为:轴向应变达到 15% 或试件完全破坏。此时,可获得试件峰值强度和残余强度。

1.1.2 等压试验 试验控制条件为每隔 24 h 加一级荷载。从 0 kPa 加载至 100 kPa 时,每级荷载为 25 kPa;从 100 kPa 加载至 300 kPa 时,每级荷载为 50 kPa。试验时记录每级压力和体变。

将试样制作成含水率分别为 18%、22%、26%、30% 的 4 组,分别记为 1、2、3 和 4 组。每组按照围压设置需要,进行 6 次剪切试验和 1 次等压试验。每组 7 块试样,用数字 1~7 标记每块试样。共需要 28 块试样。

## 1.2 破坏形态分析

三轴剪切试验中,记录试样的破坏形态,并按含水率进行分组,其中,HT 代表试样破坏前,HTP 代表破坏后。受篇幅限制,只展示破坏规律最明显 3 组试样,如图 1~图 3 所示。

从图 1~图 3 可见,含水率与破坏形态密切相关,即含水率越低试样破坏程度越大;而围压与破坏形态呈正相关,即围压越高,剪切带长度越长,破碎越严重。从试验现象可见:

1) 同一含水率条件下,破坏程度随固结压力的增大而增大。主要原因是固结压力较高时,黄土受挤压而压密,形成新的次生结构,新的黏聚力使剪切破坏更为明显。

2) 在同一固结围压下,含水率越大,破坏程度越小。主要原因是随着含水率增加,颗粒间胶结物间距增大,胶结强度减小;同时,颗粒间吸附水膜变厚,凝聚强度降低和摩擦系数变小,此时试样更容易产生塑性变形而非直接破坏<sup>[17-18]</sup>。当试样含水率增大至饱和时,情况更加明显,试样破坏时基本不会出现剪切面。

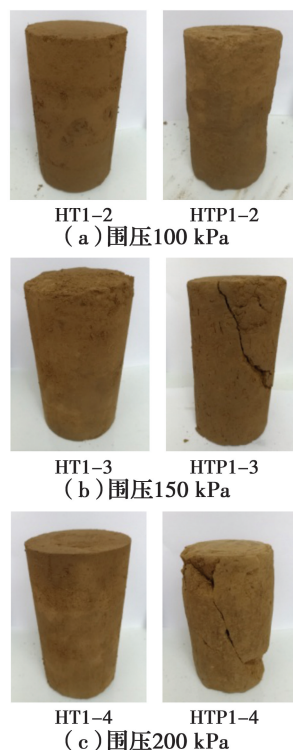


图 1 含水率 18% 试样破坏前后对比

Fig. 1 Comparison of samples with water content of 18% before and after destruction

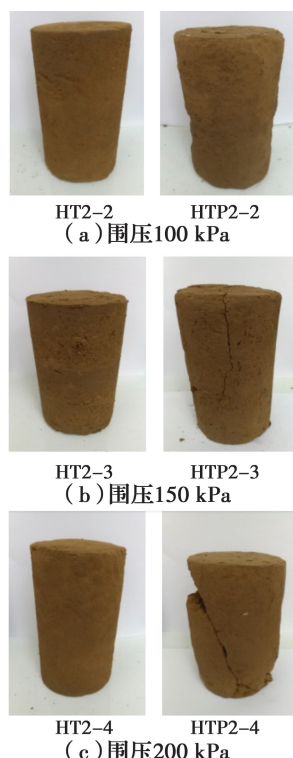


图 2 含水率 22% 试样破坏前后对比

Fig. 2 Comparison of samples with water content of 22% before and after destruction

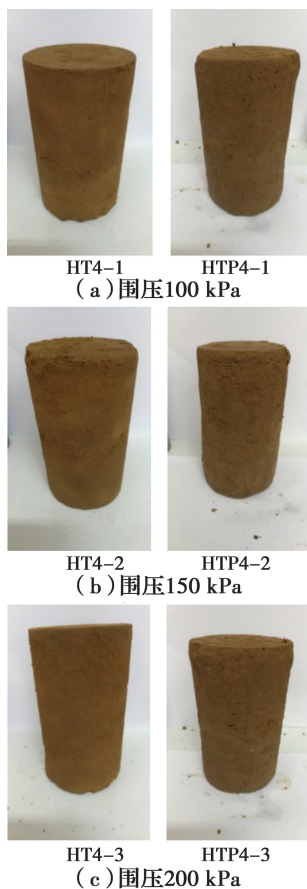


图3 含水率30%试样破坏前后对比

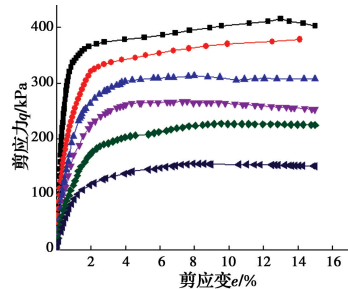
Fig. 3 Comparison of samples with water content of 30% before and after destruction

3) 力学指标均随含水率增大而减小, 弹性模量和黏聚力从自然状态至饱和状态分别降低43%和62%, 而内摩擦角受影响相对较小, 仅降低16%。

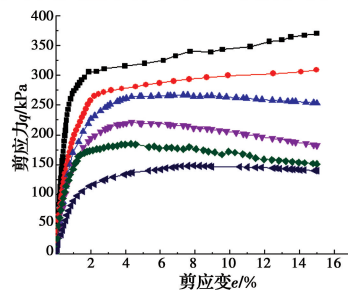
### 1.3 应力-应变关系分析

根据试验情况, 通过三轴仪读取并记录试验过程中的应力、应变值, 绘制应力-应变曲线。每次剪切试验中保持围压 $\sigma_3$ 不变, 增大轴向力 $\sigma_1$ , 与隧道围岩受力过程中的上部受压或下部卸荷情况一致, 剪切试验的应力-应变曲线如图4所示。

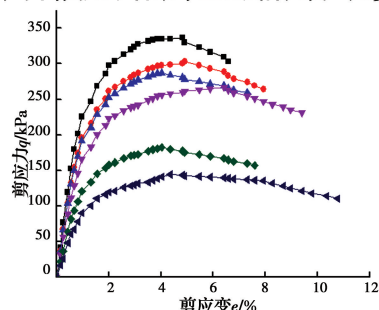
由图4可见, 随着试样含水率的增加, 抗剪强度总体呈逐渐降低的趋势, 但在应力-应变曲线中的直线段, 直线的斜率随着围压增加而变大, 说明围压的大小对黄土的抗剪能力至关重要。从试验过程看, 试样应变达到2%时开始屈服, 当应变达到4%左右时结束。此时抗剪能力基本由围压提供。此外, 试验中围压越大, 屈服的起始应变越小, 说明固结过程虽然提高了试样的抗剪能力, 但对土的结构性产生了一定的破坏, 使其弹性在剪切过程中被更快地消耗。另外, 在相同围压下, 试样弹性模量随着含水率增加而明显降低, 主要原因是原生结构中部



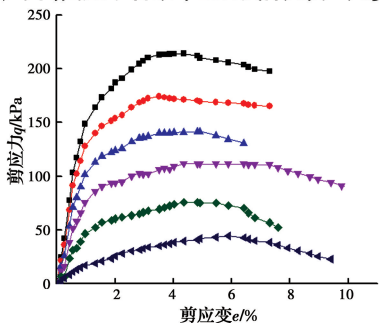
(a) 不同围压下含水率18%试件应力-应变曲线



(b) 不同围压下含水率22%试件应力-应变曲线



(c) 不同围压下含水率26%试件应力-应变曲线



(d) 不同围压下含水率30%试件应力-应变曲线

注: —■— 300 kPa —●— 250 kPa —▲— 200 kPa  
—▼— 150 kPa —◆— 100 kPa —◀— 50 kPa

图4 剪切试验应力-应变曲线图

Fig. 4 Stress-strain curve of shear test

分胶结物质的溶解。但是, 每组试样的弹性应变均能够持续2%左右, 可见, 保持黄土弹性上限的关键因素是黄土的颗粒排列情况, 而含水率的增加对此影响不大。

当含水率超过中值含水率, 达到26%时, 试样的屈服过程明显加快, 即同样剪切量能承受的剪应力大大降低。当试样含水率较大时(后两种含水率), 剪应力在试验中发生了明显降低的过程, 即试样被完全破坏, 塑性也完全丧失的情况。由此可见, 含水率增加的影响贯穿于整个剪应力-应变过程。



## 1.4 土体抗剪参数

通过三轴剪切试验,绘制摩尔应力圆,得不同含水率下土体的抗剪参数如表 2。由表 2 可知,含水率增加对黄土的黏聚力影响非常大,而对内摩擦角的影响较小,含水率增加后试样弹性阶段的抗剪能力大大降低,但此阶段的总应变基本保持不变,这是因为含水率增加主要稀释了黄土的胶结物质,而对颗粒排列扰动较小。

表 2 不同含水率试样的抗剪参数

Table 2 Shear parameters of samples with different moisture content

含水率/%	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\phi$ /( $^{\circ}$ )
18	21	21
22	16	19.5
26	13	17.5
30	8	15

## 2 建立本构关系

首先基于 Hooke 定理计算出整个变形中弹性变形和塑性变形;然后假设塑性变形满足 Drucker 公设,通过应力-应变曲线的规律,拟合得到屈服函数和其他所需参数,建立弹塑性增量本构关系。

### 2.1 屈服面的确定

依据 Hooke 定理<sup>[19]</sup>将应变分为弹性应变和塑性应变,可得各应力状态下的塑性应变  $d\epsilon_{ij}^p$  和  $d\epsilon_s^p$

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (1)$$

将试验结果绘制在  $p$ - $q$  坐标中,拟合结果如图 5 所示。从图 5 可见,屈服轨迹大体上呈椭圆状。因此,可用椭圆曲线进行拟合,拟合公式为

$$f = \left[ \frac{p - 0.413h}{0.587} \right]^2 + \left( \frac{q}{0.857} \right) = h^2 \quad (2)$$

式中: $h$  为硬化参数。

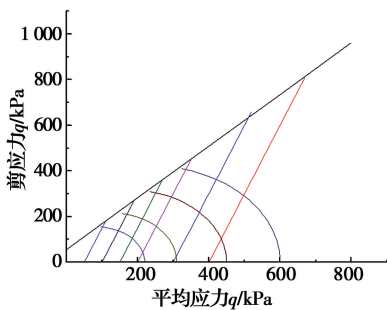


图 5 屈服面拟合图

Fig. 5 Yield surface fitting diagram

### 2.2 硬化参数的确定

硬化参数是确定给定的应力增量条件下会引起多大塑性应变的一条准则,硬化参数一般是塑性功  $W^p$  或塑性应变  $d\epsilon_{ij}^p$  的函数。以塑性功  $W^p$  为变量,计算公式为

$$W^p = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p \quad (3)$$

结合式(2)、式(3),可得到硬化参数与塑性功的关系,如图 6 所示。

根据图 6 的拟合结果,硬化参数曲线可以用驼峰曲线表示,最终表示为

$$h - h_0 = \frac{W^p(a + cW^p)}{(a + bW^p)^2} \quad (4)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$  为试验参数,为围压  $\sigma_3$  的函数,可以通过驼峰曲线的规律计算得到。试验参数计算式为

$$a = 0.0008e^{0.5798\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)} \quad (5)$$

$$b = 0.0011e^{0.8754\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)} \quad (6)$$

$$c = 0.0007e^{0.7123\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)} \quad (7)$$

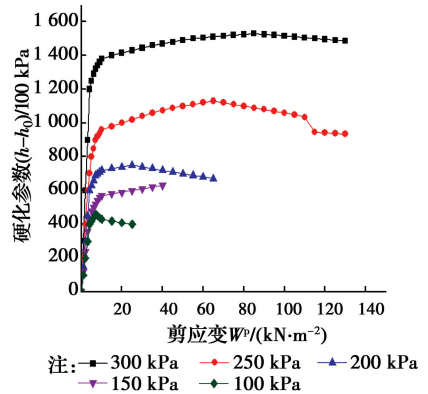


图 6 硬化参数  $h$  与塑性功  $W^p$  关系图

Fig. 6 Relation diagram of hardening parameter

$h$  and plastic work  $W^p$

### 2.3 验证本构关系

将剪切模量  $T$ 、体变模量  $K$ 、屈服曲线  $f$  及硬化参数公式  $h$  代入普遍的弹塑性增量公式得到  $p$ - $q$  坐标系下的本构关系

$$d\epsilon = \mathbf{D}^{-1}d\sigma + d\lambda \left( \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{D}$  为弹性矩阵; $d\lambda$  为塑性因子。

模型验证步骤为:1)根据给定的初始应力,计算初始应变;2)根据应力的增量,得到新的应变状态增量;3)根据新的应变增量对应力状态增量进行修正,由此得到新的应变增量;4)如此循环,确定应力-应变关系<sup>[20]</sup>。对不同条件下试样的应力-应变曲线进

行验证,计算曲线与试验曲线结果呈现相似规律。受篇幅限制,只展示自然含水率、150 kPa 固结围压的验证结果,如图 7 所示。

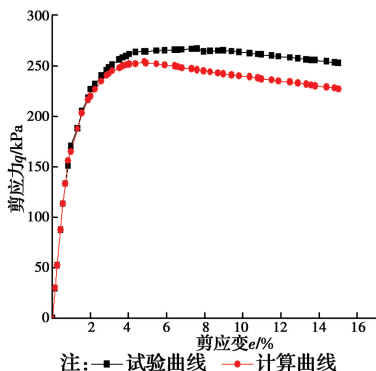


图 7 计算与实测应力-应变关系对比图

Fig. 7 Comparison diagram of calculated and measured stress-strain relationship

由图 7 可见,该本构关系对变形过程中的弹性部分有良好的契合度,屈服过程也与实际变形基本吻合。但由于黄土土样较大,且内部结构由一定差异,导致在剪切过程中试样表现出的力学性能有些差异<sup>[21]</sup>。

## 3 工程应用

### 3.1 依托工程概况

依托工程为西安到大同高速铁路的某黄土隧道,该隧道位于陕西省合阳县境内,该隧道全长 9 359 m,起讫里程 DK711+896~DK721+255。隧道开挖宽度为 14.9 m,高度为 12.7 m,面积 153.7 m<sup>2</sup>,属于大断面隧道,隧道埋深最浅仅 15.0 m。地表至 90 m 深处为 Q<sub>3</sub> 粉质粘土。洞口浅埋段为 V 级围岩,隧道采用三台阶七步法进行开挖施工,支护结构采用复合式衬砌,初期支护采用“型钢钢架+喷射混凝土+钢筋网+锁脚锚管”的型式:27 cm 厚 C25 喷射混凝土;I20a 钢架,0.8 m 纵向间距;Φ42 mm×4 mm 锁脚锚管,长为 4.0 m,纵向间距为 0.8 m。

建模以里程桩号 DK711+910 断面根据隧道工程地质情况和当地的降雨强度为例,设置地表渗流量,分析降雨入渗的深度,应用本文建立的本构模型以及调整入渗深度范围内的围岩参数,采用有限元软件 Midas 进行渗流-应力耦合模拟和分析降雨入渗对黄土浅埋段结构稳定性的影响。

需要说明,在隧道结构设计中初期支护与围岩是主要承载结构,二衬作为安全储备,故数值计算中不

考虑二衬结构。为使 2D 模型有效地反应三台阶施工中的空间效应,结合实际施工情况使用 Midas GTS NX 的施工阶段助手功能及荷载生产时步,设置开挖过程释放 40% 的总荷载,分 5 次释放,总时长为 12 h;初期支护施作过程一次性释放 30% 的总荷载,总时长为 4.8 h;喷射混凝土硬化过程释放 30% 的总荷载,分 5 次释放,硬化时长为 24 h。另外,试验所得的黄土本构关系已包含着该地区黄土中孔隙和裂隙的影响,对其也不再进行专门的模拟计算。

### 3.2 建立模型

3.2.1 网格划分 隧道工程实际最浅埋深为 15 m,其他 3 侧边界取至距最大开挖线上圆心 70 m 处建立 2D 网格,网格节点共 4 884 个,单元共 4 872 个。

#### 3.2.2 边界条件

##### 1) 位移约束

模型的左、右边界在 X 方向固定,底部边界在 X 和 Y 方向均不能产生位移。

##### 2) 静力荷载约束

隧道埋深为 15 m,属浅埋隧道,初始应力场仅考虑自重应力,因此,对模型在 Y 向施加竖直向下的、大小为 1 倍自重的约束。

##### 3) 渗流边界条件

查阅关中地区的历史气象资料,最大历史 24 h 降雨量接近于 150 mm,故数值计算针对极端降雨情况(大暴雨及以上,24 h 降雨量大于 100 mm)进行模拟。根据降雨强度,在模型中加载相应的曲面流量,分别为 0.13、0.15、0.11 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d。

根据室内渗流试验得出,地表黄土的饱和渗透系数为 0.851 m/d,地表渗流速度大于降雨速度,因此,本模型的渗流边界条件等于曲面流量。

#### 3.2.3 模型参数

##### 1) 支护参数

支护材料与实际工程相同,参数如表 3 所示。支护结构中喷射混凝土、钢架、锁脚锚管均采用弹性梁单元模拟,仰拱回填混凝土用网格单元模拟。

表 3 支护结构力学参数

Table 3 Mechanical parameters of support structure

项目名称	弹性模量 E <sub>0</sub> /GPa	标号/ 型号	截面/ cm <sup>2</sup>	容重 γ/ (kN·m <sup>-3</sup> )	泊松比
喷射混凝土	23.0	C25	2 700	22.0	0.2
型钢钢架	210.0	I20a		78.5	0.2
锁脚锚管	210.0	Φ42		78.5	0.2
仰拱回填混凝土	29.5	C25		23.0	0.2

2) 围岩参数

渗流分析中需要输入黄土的非饱和参数来计算渗流场,初始渗透系数等参数通过室内试验得到。通过将三轴试验中试样的自然、中值和饱和含水率,可得到水土特征曲线和渗透系数曲线(具体曲线不

再列出)。

将得到的本构关系式(8)编译为 Fortran 语言,再将其导入计算软件的材料属性中的本构关系自定义功能模块。力学参数通过三轴试验数据计算得到,如表 4 所示。

表 4 不同含水率下的围岩力学参数

Table 4 Mechanical parameters of surrounding rock under different water content

含水率/%	黏聚力 C/kPa		内摩擦角 $\varphi/(\circ)$		变形模量 $E_0/\text{MPa}$		容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
	Q <sub>3</sub> 粘质黄土	Q <sub>2</sub> 粉质粘土	Q <sub>3</sub> 粘质黄土	Q <sub>2</sub> 粉质粘土	Q <sub>3</sub> 粘质黄土	Q <sub>2</sub> 粉质粘土	
18	21.0	83	21	25	53.2	68.8	18.7
22	16.0	60	19.5	23	48.8	64.8	19.4
26	13.0	46	17.5	19	40.3	51.2	20.0
30	8.0	33	15	16	30.5	39.1	20.4

3.3 模拟结果与分析

3.3.1 降雨影响范围分析 首先,计算不考虑降雨情况下所建模型的含水率整体分布情况,然后在计算模型自然含水率分布的基础上,考虑降雨强度分别为 0.11、0.1 和 0.15 m/d 且降雨历时为 1 d 时,计算模型含水率分布情况。最上层模型的计算结果如图 8 所示。

的现场试验结果大致相同。取每 1 m 厚度土层含水率的平均值并近似等效为 18%、22%、26%、30% 中最接近的值,以此模拟降雨对围岩性质的影响,调整方案如表 5 所示。

表 5 降雨影响后的围岩参数

Table 5 The parameter of surrounding rock after the influence of rainfall

深度/m	降雨强度/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	含水率/%
0~1	0.13	26
	0.15	30
	0.11	30
1~2	0.13	22
	0.15	26
	0.11	30
2~3	0.13	18
	0.15	22
	0.11	26
3~4	0.13	18
	0.15	18
	0.11	26
4~5	0.13	18
	0.15	18
	0.11	22

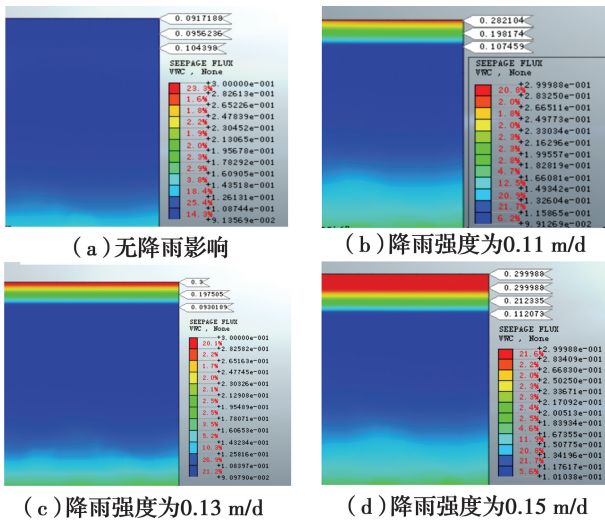


图 8 体积含水率分布

Fig. 8 Volumetric moisture content distribution

由图 8 可见,自然状态下含水率分布受地下水影响随深度增加而略微增大。考虑不同降雨强度时,随着降雨强度增大,2 m 深度内土层会不断接近饱和;超过 2 m 后,含水率随深度增加而减小;当深度达到 5 m 左右时,含水率随深度不再增加,但处于非饱和状态。从结果看,计算结果与文献[11]所做

注:表中用含水率代替具体的围岩参数,不同含水率的具体参数见表 2。

3.3.2 隧道结构稳定性分析 在得到降雨入渗的影响深度后,对正常情况下隧道施工进行模拟。分别对 3 种降雨情况下隧道施工过程进行分析,得到



不同情况下隧道的受力与应变情况,结果如图9~图11所示(受篇幅限制只展示无降雨和最强降雨两种边界条件计算结果)。

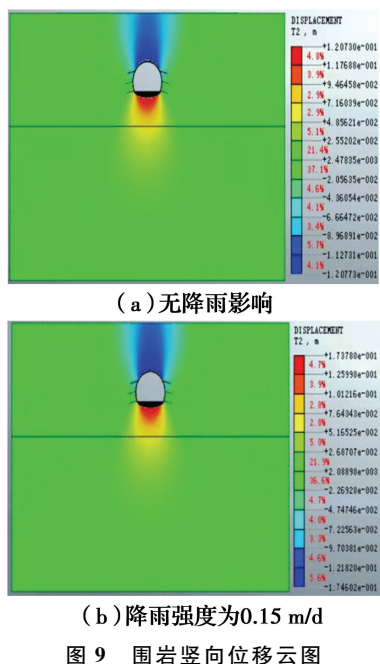


图9 围岩竖向位移云图

Fig. 9 Vertical displacement cloud chart of surrounding rock

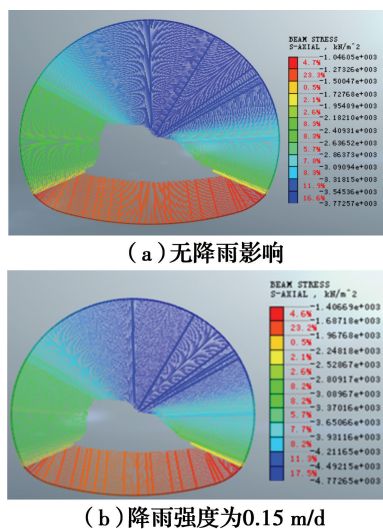


图10 隧道喷射混凝土应力

Fig. 10 Shotcrete stress of the tunnel

由图9可见,围岩的最大竖向位移发生在隧道拱顶上方围岩。不考虑降雨时,拱顶最终沉降为12 cm。考虑降雨入渗后,土体黏聚力降低,导致围岩位移大幅所增加。当降雨强度分别为0.11、0.13和0.15 m/d时,拱顶最大沉降值分别为13.5、14.7和17.5 cm,说明降雨入渗对浅埋大断面黄土隧道沉降的影响非常大,且随着降雨强度的增大而影响

增强。

由图10可见,不考虑降雨时,初期支护结构中喷射混凝土结构最大应力为3.77 MPa。当降雨强度为0.11、0.13和0.15 m/d时,喷射混凝土最大应力分别为4.27、4.39和4.77 MPa。喷射混凝土应力相对于不考虑无降雨时增加26%,说明降雨对该隧道初期支护喷射混凝土应力的影响比较明显。

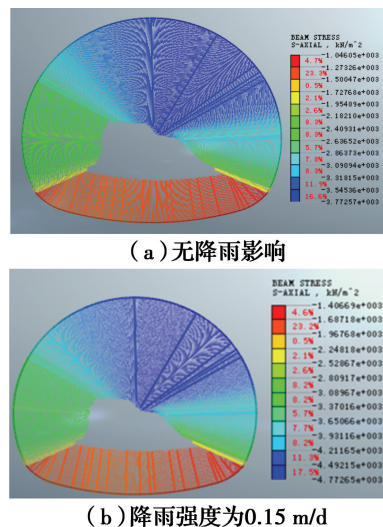


图11 隧道钢架应力

Fig. 11 Steel frame stress of tunnel

由图11可见,初期支护结构中钢架应力与喷射混凝土应力规律类似,不考虑降雨时,最大应力为34.4 MPa。当降雨强度为0.11、0.13、0.15 m/d时,钢架应力分别为38.9、40.0、43.6 MPa,应力最大值相对于不考虑降雨时增加了27%。降雨对钢架应力的影响依旧明显。

在钢架受弯方面,最大弯矩主要分布在隧道拱腰位置。考虑降雨对钢架受力有明显的变化,不考虑降雨时弯矩最大值为24.9 kN·m。当降雨强度为0.11、0.13和0.15 m/d时,弯矩分别为27.1、28.8和29.9 kN·m,最大值比不考虑降雨时增加20%。

由以上分析可见,虽然降雨入渗深度影响范围仅5 m左右,但因埋深较浅,隧道上部围岩自稳能力受到很大影响,导致地表水入渗对隧道稳定性造成很大影响。主要表现在围岩变形和结构受力增大两个方面:考虑降雨入渗与不考虑降雨时,隧道初期支护结构应力涨幅在20%~27%,而围岩变形涨幅达到了30%。因此,强降雨会对浅埋大断面黄土隧道的稳定性造成很大影响。



### 3.4 现场测试与验证

为了进一步验证本文提出的黄土弹塑性增量本构关系以及数值模拟结果的准确性,对依托工程隧道断面 DK711+910 进行变形监测。隧道沉降监测点布设在拱顶,由于隧道采用三台阶七步法开挖,净空收敛分别在上、中、下台阶布设测线,测试方案如图 12 所示。变形监测共计 30 d,其中,晴天 10 d,雨天 6 d,多云及阴天 14 d,最大降雨等级为中雨(10~25 mm/d)。

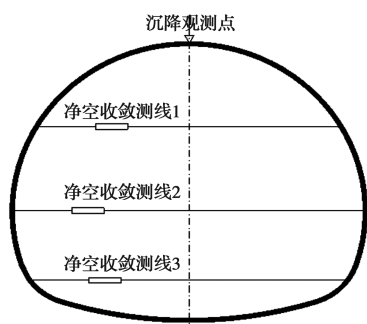


图 12 隧道变形测试方案

Fig. 12 Deformation test scheme of the tunnel

对 DK711+910 断面变形数值模拟结果与实测拱顶沉降和净空收敛值进行对比分析,并绘制成时态曲线,如图 13、图 14 所示。图 13 中,分别绘制了降雨强度为 0.15、0.13、0.11 m/d,不考虑降雨的数值模拟结果以及实测拱顶沉降时态曲线。图 14 中,绘制了上述 5 种工况下,3 条测线的净空收敛时态曲线。

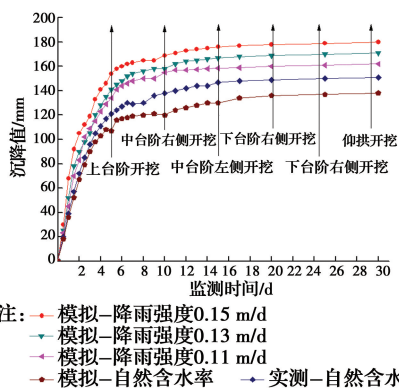
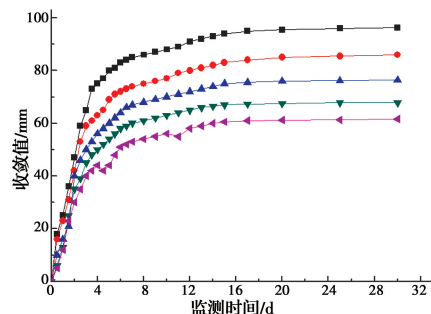


图 13 拱顶沉降结果对比

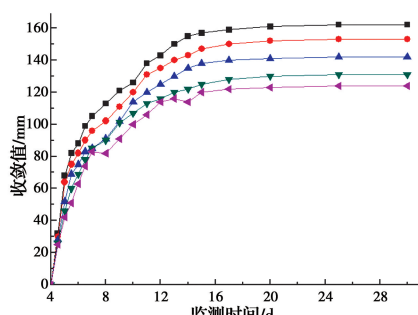
Fig. 13 Comparison of vault settlement values

从图 13 可见,数值模拟的 4 种工况与实测拱顶沉降的趋势基本一致。考虑降雨时,不同开挖步的拱顶沉降均大于实测值,不考虑降雨时拱顶沉降值为 138.0 mm,而实测值为 147.8 mm,误差仅为 6.7%,实测拱顶最终沉降量与不考虑降雨情况下的

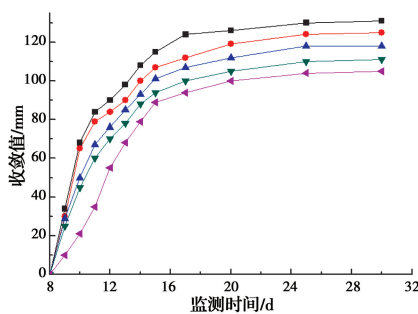
数值模拟值比较接近。



(a) 测线1



(b) 测线2



(c) 测线3

注:—■—模拟—降雨强度0.15 m/d  
—●—模拟—降雨强度0.13 m/d  
—▲—模拟—降雨强度0.11 m/d  
—◆—模拟—自然含水率  
—▼—实测—自然含水率

图 14 净空收敛结果对比

Fig. 14 Comparison of clearance coverage values

由图 14 可知,实测 3 条净空收敛测线的实测值与不考虑降雨情况下的数值模拟结果也比较接近。其中,测线 1、2 和 3 实测值分别为 62.3、121.5、99.4 mm,与模拟结果的误差分别为 9.3%、4.9%和 10.9%。总体来看,无论是拱顶沉降,还是净空收敛,实测值与数值模拟值误差均较小。与测试结果的对比表明,本文建立的黄土弹塑性增量本构关系能比较准确地反映不同含水率黄土地层的力学特性,建立的本构关系合理,数值模拟结果与实测误差较小。

## 4 结论

以某大断面黄土隧道为工程依托,通过室内三

轴试验,建立了黄土弹塑性增量本构关系,并将此本构模型应用在隧道稳定性数值模拟中,考虑4种降雨入渗条件对浅埋黄土隧道稳定性进行了分析。主要结论如下:

1)三轴试验中,试样的破坏程度随含水率增加而降低;当含水率不变,围压增大后,压密使试样生成新的次生结构和黏聚力,使剪切破坏更为明显。另外,力学指标均随含水率增大而减小,弹性模量、黏聚力和内摩擦角从自然状态至饱和后分别降低43%、62%和16%。

2)与实测结果的对比表明,建立的本构关系比较合理。新的本构关系中屈服函数采用椭圆函数拟合,由于椭圆函数不可能与实际屈服曲线完全契合,导致应力-应变曲线中塑性变形开始后计算应力均小于实际应力,但整个曲线与实际变形曲线契合效果良好。

3)在依托工程中,随着降雨强度的增加,地表2 m深度内的土层会逐步接近饱和,而2~5 m深度土层虽然含水率增加,但处于非饱和状态。考虑降雨入渗作用时,围岩变形明显增加。其中,考虑最强降雨与不考虑降雨入渗作用时,隧道拱顶沉降值从12 cm增大到17.5 cm,增加46%;隧道初期支护结构中喷射混凝土最大应力值增加26%,钢架应力和弯矩分别增加27%和20%。

#### 参考文献:

- [1] WU X P, CHU H D, WANG L M. Comparative research on lower bound depth of collapse loess [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 2016, 169(1): 67-72.
- [2] 邵生俊, 王丽琴, 邵帅, 等. 黄土的结构屈服及湿陷变形的分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1357-1365. SHAO S J, WANG L Q, SHAO S, et al. Structural yield and collapse deformation of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1357-1365. (in Chinese)
- [3] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain [J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384-394.
- [4] SWEENEY D J. Some in-situ soil suction measurements in Hong Kong's residual soil slopes [C]//Proceedings of the 7th Southeast Asian Geotechnics, Hong Kong, 1982: 91-106.
- [5] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. 土

壤学报, 2015, 52(3): 477-488.

ZHANG Z B, PENG X H. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 477-488. (in Chinese)

- [6] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 9-20.

CHEN Z H, XIE D Y, WANG Y S. Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 9-20. (in Chinese)

- [7] 黄琨, 万军伟, 陈刚, 等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2600-2604.

HUANG K, WAN J W, CHEN G, et al. Testing study of relationship between water content and shear strength of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2600-2604. (in Chinese)

- [8] 梅岭, 姜朋明, 李鹏, 等. 非饱和土的土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 124-128.

MEI L, JIANG P M, LI P, et al. Soil-water characteristic curve tests on unsaturated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 124-128. (in Chinese)

- [9] 邓洪亮, 尹金宽, 谢向文, 等. 宁夏非饱和黄土浸水后变形特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(Sup2): 98-102.

DENG H L, YIN J K, XIE X W, et al. Study on distortion characteristics of unsaturated loess in Ningxia when inundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Sup2): 98-102. (in Chinese)

- [10] 宋孝玉, 李永杰, 陈洪松, 等. 黄土沟壑区不同下垫面条件农田降雨入渗及产流规律野外试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(4): 65-72.

SONG X Y, LI Y J, CHEN H S, et al. A field experiment study on farmland rainfall, infiltration and runoff under different underlayer surface conditions in hilly areas of loess plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(4): 65-72. (in Chinese)

- [11] 张常亮, 李萍, 李同录, 等. 黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 728-734.

ZHANG C L, LI P, LI T L, et al. In-situ observation on rainfall infiltration in loess [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(6): 728-734. (in Chinese)

- [12] 赖金星, 樊浩博, 来弘鹏, 等. 软弱黄土隧道变形规律现场测试与分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 2003-2012, 2020.  
LAI J X, FAN H B, LAI H P, et al. In-situ monitoring and analysis of tunnel deformation law in weak loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 2003-2012, 2020. (in Chinese)
- [13] YOO C, LEE Y, KIM S H, et al. Tunnelling-induced ground settlements in a groundwater drawdown environment- A case history [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 29: 69-77.
- [14] YOO C. Interaction between tunneling and groundwater: numerical investigation using three dimensional stress-pore pressure coupled analysis [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 240-250.
- [15] 王浩然, 黄茂松, 吕玺琳, 等. 考虑渗流影响的盾构隧道开挖面稳定上限分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1696-1704.  
WANG H R, HUANG M S, LÜ X L, et al. Upper-bound limit analysis of stability of shield tunnel face considering seepage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1696-1704. (in Chinese)
- [16] 邵生俊, 杨春鸣, 焦阳阳, 等. 湿陷性黄土隧道的工程性质分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1580-1590.  
SHAO S J, YANG C M, JIAO Y Y, et al. Engineering properties of collapsible loess tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1580-1590. (in Chinese)
- [17] 陈存礼, 张登飞, 张洁, 等. 等向应力下原状黄土的压缩及增湿变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1736-1747.  
CHEN C L, ZHANG D F, ZHANG J, et al. Compression and wetting deformation behavior of intact loess under isotropic stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1736-1747. (in Chinese)
- [18] 蒋明镜, 胡海军, 彭建兵. 结构性黄土一维湿陷特性的离散元数值模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1121-1130.  
JIANG M J, HU H J, PENG J B. Simulation of collapsible characteristics of structural loess under one-dimensional compression condition by discrete element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1121-1130. (in Chinese)
- [19] RAJABI K, HOSSEINI-HASHEMI S. On the application of viscoelastic orthotropic double-nanoplates systems as nanoscale mass-sensors via the generalized Hooke's law for viscoelastic materials and Eringen's nonlocal elasticity theory [J]. Composite Structures, 2017, 180: 105-115.
- [20] 张玉, 邵生俊, 赵敏, 等. 平面应变条件下结构性黄土本构模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 485-496.  
ZHANG Y, SHAO SJ, ZHAO M, et al. Experimental study on constitutive models of structural loess under plane strain conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 485-496. (in Chinese)
- [21] 田堪良, 王沛, 张慧莉. 考虑结构性的原状黄土应力-应变关系的探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1893-1898.  
TIAN K L, WANG P, ZHANG H L. Discussion on stress-strain relation of intact loess considering soil structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1893-1898. (in Chinese)

(编辑 胡玥)