

文章编号:1673-2049(2012)03-0104-07

降雨入渗下渭北地坑黄土窑洞稳定性分析

韩佳明, 苏三庆

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:通过试验得到了土层中有竖向节理裂隙和无竖向节理裂隙 2 种黄土物理力学参数随含水率变化的规律。利用硐室围岩应力的表达式和莫尔-库伦强度准则给出了黄土窑洞安全系数的定义, 分析得到重现期为 10 年, 即有效降雨量为 277 mm 时的降雨入渗深度为 286 cm, 计算得到了窑洞安全系数最小值为 1.183。当废弃窑洞覆盖土层中含有竖向节理, 雨水可以直接到达窑洞周围土体, 使含水率增大, 力学参数降低, 计算得到窑洞安全系数最大值为 0.657。同时依据毕肖普条分法得到了分层边坡的计算公式, 稳定安全系数最小值为 5.537。结果表明:降雨量为 277 mm 时, 无竖向节理裂隙的窑洞稳定, 有竖向节理裂隙的窑洞破坏, 边坡均处于稳定状态。

关键词:降雨入渗; 渭北地坑黄土窑洞; 边坡; 稳定性; 含水率; 竖向节理裂隙

中图分类号: TU761.2

文献标志码: A

Stability Analysis of Weibei Pitted Loess Cave Dwellings in Rainfall Infiltration

HAN Jia-ming, SU San-qing

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The law of two kinds of loess physical and mechanical parameters changing with moisture content whether loess with or without vertical joint fissure was obtained through experimental analysis. Safety factor was defined by surrounding rock stress expression and Mohr-Coulomb strength criterion. Rainfall Infiltration depth was 286 cm and the minimum value of safety factor was 1.183 while effective rainfall was 277 mm that return period was 10 years. Rain could directly reach the cave surrounding soil that the mechanical parameters reduced with moisture content increasing and maximum value of safety factor was 1.183 when abandoned cave overlying soil had vertical joints. Meanwhile, stratified slope calculation formulae were obtained by Bishop slice method that the minimum value of stability safety factor was 5.537. Results show that when rainfall is 277 mm, loess cave dwelling is stable without vertical joint fissure and is damaged with vertical joints, and the slope is in the steady state.

Key words: rainfall infiltration; Weibei pitted loess cave dwelling; slope; stability; moisture content; vertical joint fissure

0 引言

为了保证在地坑院窑洞居住村民的安全性,需

要对降雨入渗下窑洞的稳定性进行分析研究。目前,对窑洞稳定性评价有综合分析、经验比拟等定性和结构力学、普氏压力拱理论、有限元数值分析等定

收稿日期:2012-06-17

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(08JK363,09JK570);西安科技大学培育基金项目(2010033)

作者简介:韩佳明(1977-),男,陕西西安人,讲师,工学博士研究生,E-mail:jiaminghan@163.com。

量的方法^[1]。雨水入渗是一个非饱和土体渗流过程,在进行计算分析时如何确定非饱和土的破坏准则显得至关重要。Donald 等对非饱和粗粉土进行了直剪试验,Gibbs 等通过测量非饱和土坝和填方土的孔隙气压力和孔隙水压力来得到抗剪强度,Bishop 等提出了试验中孔隙水压力的量测和轴平移技术^[2],目前,得到公认的非饱和土抗剪强度公式是 Fredlund 提出的双参数模型^[3]。

要考虑降雨入渗对地坑窑洞稳定性的影响,必须将上述理论综合应用才能得以分析,然而土体弹性、非稳态流、渗流与应力场耦合等复杂问题至今还未能很好地解决,因此用试验得到黄土基本物理力学参数,再应用岩土力学进行窑洞稳定分析是一种有效的方法。本文中笔者以渭北地区地坑窑洞为研究对象,通过试验数据拟合并计算出降雨入渗对黄土的物理力学性质影响,应用围岩应力方程和莫尔-库伦强度准则,建立了窑洞的安全系数计算公式,以此分析和评价窑洞的稳定性。

对于地坑院窑洞的安全性分析,还存在边坡稳定的问题,若把雨水入渗层看作是一个土层,那么就需研究分层土体边坡的稳定性。张均锋等^[4]通过试验分析了水位涨落引起分层边坡滑坡的机理,崔凯等^[5-6]研究了差异性风蚀作用下多元层状土质边坡演化机理,但均未考虑层状边坡的理论求解。笔者以毕肖普条分法为基础,分析降雨入渗下形成的层状黄土边坡的稳定性。

1 窑洞及降雨特征

几千年来,陕西三原县北约 30 km 处柏社村村民一直居住在地坑院式窑洞中,这是渭北地坑黄土窑洞的典型代表。在平缓的黄土高原上,先挖建大小不等的长方体形土坑,称为地坑院。然后修筑地面通往地坑的通道,称为慢道。最后在坑四壁挖建各种形式的窑洞,称为地窑,形式有一个方坑四口窑、八口窑、十口窑、十二口窑等多种^[7-9]。目前,柏社村保留地坑院约 200 个,窑洞约 800 口。其中正常居住的窑洞占 38%,闲置并保留基本形体完整而无损伤的窑洞占 57%,残破的占 5%,大多数窑洞破损均由降雨入渗引起。

地坑院宽 4.9~26.4 m,坑深 5.1~7.3 m。其中最大的地坑院东西宽 21.2 m,南北宽 26.4 m;最小的地坑院东西宽 5.4 m,南北宽 4.9 m。窑洞高 2.8~3.6 m,宽 3.0~4.1 m,深 4.9~15.3 m,洞顶覆土层厚度为 3.0~3.5 m,窑拱曲线近似呈椭圆

弧形。

关中地区年平均降雨量为 490 mm,最大年降雨量可达 700 mm,最小只有 250 mm,年际变化大,空间分布存在显著的不同。大降水主要集中在 7,8 月,以 7 月最多,8 月次之,多年降雨量平均值为 229 mm,年际变化范围为 80~460 mm^[10-11]。

Crozier^[12]、王瑞钢等^[13]、陈洪松等^[14]提出了有效降雨量的概念,它包括作物截留的雨水、作物植株蒸腾和株间土壤蒸发掉的降水、有助于作物生长和耕作作业的那部分降水等,可以用来表示真正入渗的雨量。本文中采用重现期为 10 年的有效降雨量 277 mm 作为评价分析的依据。对于非饱和黄土路基边坡存在着一个临界降雨量值,只有降雨量超过此临界值,土坡才有可能产生径流,通常情况下降雨入渗率近似为 100%^[15-19]。因此,可以认为有效降雨量的全部雨水入渗土体。

2 入渗土层的物理力学参数

2.1 含水率

降雨入渗土体属于非饱和土的非稳态流问题,在降雨入渗的整个过程中将导致均质土体分为 2 层,上层土体的含水率会发生变化,下层土体的含水率无变化,这一含水率变化与否的分界线就是入渗深度。在地面到入渗深度范围内,随着入渗深度的增加,含水率有所下降;在入渗深度以下,为初始含水率^[20]。

为了研究不同降雨量与入渗深度的关系,特进行观测试验。选择土质较为均匀的黄土平整地块作为试验场地,喷水模拟不同降雨量,同时测定不同降雨量下土体各深度处的含水率,入渗后含水率和初始含水率相等之处即含水率变化量为 0 时,此处就是入渗深度,见表 1。

表 1 不同降雨量的入渗深度
Tab. 1 Infiltration Depths for Different Rainfalls

降雨量 P_r /mm	入渗深度 Z_i /cm
8	9
10	14
22	25
33	52
60	60

通过对表 1 中的试验数据进行回归分析,得到入渗深度与降雨量的关系方程为

$$Z_i=1.013P_r+5.063 \tag{1}$$

降雨量 P_r 为277 mm时,入渗深度 Z_i 为286 cm。

对于均质的土体,随着降雨入渗的进行,位于土体不同深度处的含水率会随降雨量或入渗深度的变化而变化^[21],见表 2。

表 2 随入渗深度变化的不同土体深度处的含水率
Tab. 2 Moisture Contents of Different Soil Depths Changed with Infiltration Depths

Z_i/cm	$W_1/\%$	$W_2/\%$	$W_3/\%$
300	22.79	19.92	12.97
600	23.95	22.79	21.48
900	24.31	23.58	22.79
1 200	24.49	23.95	23.39
1 500	24.59	24.17	23.73

注: W_1, W_2, W_3 分别为土体深度为 1, 2, 3 m 处的含水率。

依据表 2 中不同入渗深度下土体中含水率的数值,拟合出入渗深度与土体不同深度处含水率关系

$$W_1=0.001\ 38(Z_i\times10^{-2})+0.227\ 8\quad (2)$$

$$W_2=0.003\ 22(Z_i\times10^{-2})+0.199\ 8\quad (3)$$

$$W_3=0.007\ 81(Z_i\times10^{-2})+0.138\ 4\quad (4)$$

当降雨量为 277 mm 时,1, 2, 3 m 深度处的含水率分别为 22.8%, 20.1%, 14.1%。因此拟合出降雨量为 277 mm 时不同深度处的含水率

$$W=-0.043\ 5(Z\times10^{-2})+0.277\quad (5)$$

式中: W 为降雨量 277 mm 时土体不同深度处的含水率; Z 为土体深度。

对于无竖向节理裂隙的上覆土层,当降雨量为 277 mm 时,入渗深度为 286 cm,此处的含水率为 26.5%,地面处的含水率为 27.7%。应用线性插值理论,上层土体平均含水率为 27.1%,实测下层土体平均含水率为 15%。对于有竖向节理裂隙的上覆土层,整体土层平均含水率为 27.7%。

2.2 重 度

取柏社村黄土土样分别过 5 mm 筛,用烘干法测定其初始含水率。制备一系列不同含水率的土样^[22-24],测出不同含水率土样的重度 γ ,见表 3。

通过表 3 中的实测数据,分别拟合出重度 γ 与含水率 W 的函数关系

$$\gamma=256\ 10W+124\ 30\quad (6)$$

对于无竖向节理裂隙的上覆土层,上层土体平均含水率为 27.1%,依据式(6)可得深度 286 cm 范围内上层土体的平均重度为 $19.3\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。下层土体平均含水率为 15%,依据式(6)可得下层土体的平均重度为 $17.1\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。对于有竖向节理裂隙的上覆土层,整体含水率为 27.7%,平均重度为 $19.5\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

表 3 不同含水率下土样的重度
Tab. 3 Gravitational Densities of Soil with Different Moisture Contents

$W/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
6	13.4
8	14.0
10	15.0
13	15.7
15	17.1
17	17.3
20	18.1
23	18.4
25	18.9
27	19.1
30	19.4

2.3 抗剪强度参数

取柏社村黄土土样分别过 5 mm 筛,用烘干法测定其初始含水率,并制备一系列不同含水率(分别为 6%, 8%, 10%, 13%, 15%, 17%, 20%, 23%, 25%, 27%, 30%)的土样,用三轴试验得到不同含水率土样的粘聚力 c 和内摩擦角 φ ,见表 4。

表 4 黄土力学参数
Tab. 4 Loess Mechanical Parameters

$W/\%$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
6	82	30
8	81	30
10	81	29
13	80	28
15	80	27
17	80	26
20	69	25
23	42	22
25	20	22
27	20	21
30	20	20

通过表 4 中的数据分别拟合出粘聚力 c 和内摩擦角 φ 与含水率 W 的函数关系

$$c=-0.160\ 5W^2+2.595\ 2W+73.11\quad (7)$$

$$\varphi=-0.003\ 3W^2-0.338\ 2W+32.645\quad (8)$$

对于无竖向节理裂隙的上覆土层,依据式(7), (8)可知,上层土体平均含水率为 27.1%,粘聚力 c 为 25 kPa,内摩擦角 φ 为 21°;下层土体平均含水率为 15%,粘聚力 c 为 80 kPa,内摩擦角 φ 为 27°。对于有竖向节理裂隙的上覆土层,整体含水率为 27.7%,粘聚力 c 为 22 kPa,内摩擦角 φ 为 21°。

3 不同降雨量下黄土窑洞稳定性分析

3.1 基本原理

经过柏社村实地测量,窑洞横断面竖向半轴长度 b 约为横向半轴长度 a 的 2 倍,因此将窑洞的几何断面近似为一半椭圆弧是合理的,如图 1 所示,其中, H 为覆土厚度, θ 为角度。分析土体可以分为 2 层,上层为降雨入渗层,深度为入渗深度 Z_i ,下层为初始土层,重度为 γ 。

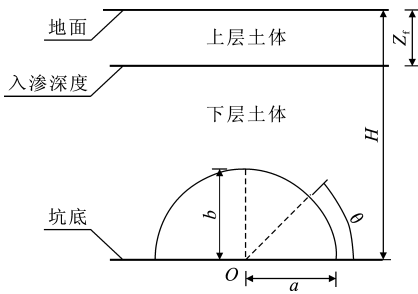


图 1 窑洞几何断面

Fig. 1 Geometric Cross Section of Cave Dwelling

由于窑洞洞室的长度比洞径大得多,故属于平面应变问题。二维应力共同作用下,以原点 O 为中心沿水平半轴逆时针旋转 θ 角度后洞室周围土体切向应力 σ_θ 、径向应力 σ_r 和剪应力 $\tau_{r\theta}$ 可以分别表示为

$$\sigma_\theta = \sigma_v [m(m+2)\cos^2(\beta) - \sin^2(\beta)] + \sigma_h [(1+2m)\sin^2(\beta) - m^2\cos^2(\beta)] - \tau_{hv} [2(1+m)^2\sin(\beta)\cos(\beta)] / [m^2\cos^2(\beta) + \sin^2(\beta)] \quad (9)$$

$$\sigma_r = 0 \quad (10)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (11)$$

式中: σ_v 为竖直方向应力,当未降雨入渗时, $\sigma_v = \gamma H$,当降雨入渗时, $\sigma_v = \gamma Z_i \times 10^{-2} + \gamma(H - Z_i \times 10^{-2})$; σ_h 为水平方向应力, $\sigma_h = K_0 \sigma_v$, $K_0 = \frac{\mu}{1-\mu}$, μ 为泊松比, μ 通常可取 0.3; $m = \frac{b}{a}$; β 为椭圆偏角。

一旦窑洞周围土体内任一平面上的剪应力达到了土的抗剪强度,结构就发生破坏,因此可以采用莫尔-库伦强度准则来判断窑洞是否破坏,其数学解析式为

$$\sin(\varphi) \leq \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cot(\varphi)} \quad (12)$$

式中: σ_1 , σ_3 分别为最大主应力和最小主应力。

当受力满足式(12)时,洞室将被破坏或处于受力极限平衡状态。

3.2 分析过程

窑洞几何断面中竖向半轴通常都是竖直的,即椭圆偏角 $\beta = 0$,由此可根据式(9)求得窑洞周边的切向应力 σ_θ 为

$$\sigma_\theta = \frac{14+4m}{7m} \sigma_v \quad (13)$$

此时剪应力 $\tau_{r\theta}$ 为 0,因此 $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_r = 0$,利用式(12),(13)可得

$$\sin(\varphi) + \frac{7m \cos(\varphi)}{(7+2m)\sigma_v} \leq 1 \quad (14)$$

若满足式(14),洞室将破坏或处于极限平衡状态。由式(14)可得黄土窑洞稳定性安全系数 F 为

$$F = \sin(\varphi) + \frac{7m \cos(\varphi)}{(7+2m)\sigma_v} \quad (15)$$

可见,当 $F < 1$ 时,洞室破坏;当 $F = 1$ 时,洞室处于受力极限平衡状态;当 $F > 1$ 时,洞室稳定。

3.3 实例分析

实测 27 个柏社村地坑窑洞详细尺寸,依据式(15),当重现期为 10 年的降雨量 277 mm 时,计算窑洞的整体稳定安全系数,见表 5。

考虑降雨入渗的安全系数略小于未考虑降雨入渗时的安全系数,说明降雨入渗导致上部荷载增大,增加了洞室周围土体的应力,影响了安全性。但是这种影响较小,不至于破坏窑洞。对于无竖向节理裂隙的窑洞,所有安全系数均大于 1,最小值为 1.183,表明无论在降雨入渗或未降雨入渗下,窑洞结构均稳定。对于有竖向节理裂隙的窑洞,所有安全系数均小于 1,最大值为 0.657,表明在降雨入渗下窑洞结构破坏。

4 地坑院边坡稳定性分析

4.1 基本原理

毕肖普等将土坡整体稳定安全系数 F_s 定义为沿整个滑裂面的抗剪强度 τ_f 与实际产生的剪应力 τ 之比,即

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (16)$$

当 $F_s > 1$ 时,边坡稳定;当 $F_s = 1$ 时,边坡达到极限平衡状态;当 $F_s < 1$ 时,边坡破坏。

如图 2 所示,应用毕肖普条分法可以得到分层边坡稳定安全系数的计算公式为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n c_i l_i + G_i \tan(\varphi_i) / m_{ai}}{\sum_{i=1}^n G_i \sin(\alpha_i) + \sum Q_i E_i / R} \quad (17)$$

表 5 窑洞的整体稳定安全系数
Tab. 5 Stability Safety Factors of Cave Dwelling

H/m	a/m	b/m	m	F_1	F_2	F_3
6.75	1.695	3.310	1.953	1.314	1.273 945	0.623 857
6.30	1.905	3.230	1.696	1.296	1.253 943	0.639 243
6.30	1.685	3.250	1.929	1.363	1.317 270	0.640 145
6.30	1.650	2.920	1.770	1.318	1.274 685	0.624 549
6.30	1.450	2.800	1.931	1.363	1.317 855	0.618 472
6.15	1.605	3.210	2.000	1.403	1.353 846	0.645 164
6.50	1.650	3.420	2.073	1.375	1.330 008	0.638 700
6.20	1.550	2.930	1.890	1.365	1.318 888	0.629 345
6.20	1.655	2.956	1.786	1.335	1.290 451	0.630 649
6.20	1.901	3.240	1.704	1.311	1.267 352	0.644 232
6.20	1.525	3.380	2.216	1.452	1.401 160	0.650 515
6.50	1.550	3.080	1.987	1.353	1.309 188	0.623 878
6.50	1.720	3.460	2.012	1.359	1.315 218	0.640 349
6.50	1.615	3.300	2.043	1.367	1.322 936	0.633 638
6.75	1.750	3.600	2.057	1.340	1.298 648	0.635 322
6.19	1.450	3.350	2.310	1.477	1.424 499	0.649 660
7.10	1.760	3.260	1.852	1.251	1.215 990	0.608 797
7.10	1.900	3.260	1.716	1.216	1.182 561	0.608 797
6.30	1.900	3.440	1.811	1.329	1.285 858	0.648 452
5.70	1.550	3.000	1.935	1.451	1.396 048	0.656 904
6.20	1.660	3.300	1.988	1.392	1.344 547	0.646 956
7.00	1.720	3.360	1.953	1.286	1.249 199	0.616 349
6.20	1.675	3.460	2.066	1.413	1.364 329	0.653 992
6.50	1.930	3.350	1.736	1.284	1.244 140	0.635 769
6.40	1.665	3.260	1.958	1.358	1.313 213	0.636 184
6.30	1.690	3.200	1.893	1.353	1.308 040	0.637 881
6.70	1.440	3.100	2.153	1.369	1.326 010	0.616 840

注： F_1 为未降雨入渗的稳定安全系数； F_2, F_3 分别为无竖向节理裂隙和有竖向节理裂隙降雨量为 277 mm 时的稳定安全系数。

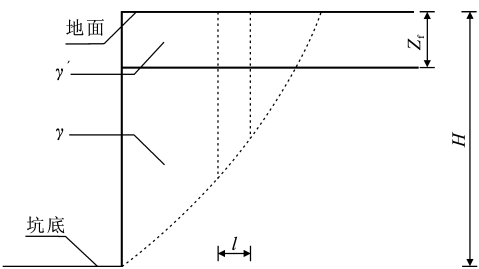


图 2 边坡几何断面

Fig. 2 Geometric Cross Section of Slope

式中： c_i 为第 i 土条的粘聚力； l_i 为土条宽度； G_i 为土条质量； α_i 为土条底部的坡角； Q_i 为土条的水平作用力； E_i 为法向条间力； R 为滑弧半径，一般在 F_s 达到最小值情况下采用试算法得到； $m_{ai} = \cos(\alpha_i) + \frac{\tan(\varphi)\sin(\alpha_i)}{F_s}$ 。

因为在 m_{ai} 内也有 F_s 这个因子，所以在计算时，

一般可先假定 $F_s = 1$ ，求出 m_{ai} ，再求出 F_s ，然后用此 F_s 求出新的 m_{ai} 及 F_s ，如此反复迭代，直至假定的 F_s 和计算出的 F_s 非常接近为止。图 2 中， γ' 为上层土体的重度。

4.2 边坡稳定分析

依据边坡稳定分析的基本理论，当重现期为 10 年的降雨量 277 mm 时，取土条宽度为 1 m，应用式 (17) 计算边坡的整体稳定安全系数，见表 6。

表 6 边坡的整体稳定安全系数
Tab. 6 Stability Safety Factors of Slope

H/m	F_1	F_2	F_3
5.0	10.313	9.132	8.203
5.6	9.225	8.252	7.307
6.2	8.364	7.544	6.604
6.8	7.664	6.955	6.034
7.4	7.092	6.472	5.537

降雨入渗的边坡整体稳定安全系数略小于未考虑降雨入渗时的整体稳定安全系数,表明降雨入渗导致上部荷载增大,增加了边坡的应力,但是这种影响较小,不至于产生滑坡。随着降雨量和边坡深度的增大,整体稳定安全系数减小。无论边坡土层有无竖向节理裂隙,整体稳定安全系数均大于1,当边坡深度为7.4 m时,边坡整体稳定安全系数取最小值5.537,表明在降雨入渗下边坡结构稳定。

5 结 语

(1)考虑有竖向节理裂隙和无竖向节理裂隙2种情况,利用非饱和黄土地下硐室的应力计算公式,结合莫尔-库伦强度准则,计算降雨量277 mm情况下的安全系数,据此来判断黄土窑洞的稳定性。对于无竖向节理裂隙的地坑黄土窑洞均安全稳定,安全系数最小值为1.183;对于有竖向节理裂隙的地坑黄土窑洞均破坏,安全系数最大值为0.675。

(2)在毕肖普条分法的基础上得出分层边坡稳定的计算方法,降雨量277 mm的情况下,无论土层有无节理裂隙,所有边坡安全系数均大于1,整体稳定安全系数最小值为5.537,地坑黄土边坡安全稳定。

(3)降雨引起窑洞坍塌主要是由于雨水沿竖向节理贯入,导致局部含水量增高,引起土体的强度降低。这与当地实际情况相一致,由于经常居住的窑洞上覆土层被用来碾压粮食,因此土体较为密实,无节理裂隙,而且窑洞上部地面有一定的排水坡度,所以降雨入渗对结构稳定性影响不大。但是对常年无人居住的窑洞,由于疏于管理,窑洞上覆土层节理裂隙较多,导致雨水下渗深度较大,窑洞周围土体强度降低,因此结构易于破坏。

参考文献:

References:

[1] 彭建兵,李庆春,陈志新,等.黄土洞穴灾害[M].北京:科学出版社,2008:254-298.
PENG Jian-bing, LI Qing-chun, CHEN Zhi-xin, et al. Loess Cave Disaster[M]. Beijing: Science Press, 2008: 254-298.

[2] 弗雷德隆德 D G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 256-305.
FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. Translated by CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, CHEN Yu-tong, et al.

Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 256-305.

[3] 刘永涛, 李宗利. 降水入渗对黄土窑洞稳定性的影响[J]. 人民黄河, 2010, 32(5): 98-100.
LIU Yong-tao, LI Zong-li. Infiltration of Precipitation on the Stability of Loess Cave [J]. Yellow River, 2010, 32(5): 98-100.

[4] 张均锋, 孟祥跃, 朱而千. 水位变化引起分层边坡滑坡的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2676-2680.
ZHANG Jun-feng, MENG Xiang-yue, ZHU Er-qian. Testing Study on Landslide of Layered Slope Induced by Fluctuation of Water Level [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2676-2680.

[5] 崔凯, 谌文武, 张景科, 等. 多元层状边坡土体风蚀速率与微结构参数关系[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2741-2746, 2752.
CUI Kai, CHEN Wen-wu, ZHANG Jing-ke, et al. Relationships Between Microstructure Parameters and Wind Erosion Rate of Multivariate Layered Soil in Slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2741-2746, 2752.

[6] 崔凯, 谌文武, 韩文峰, 等. 多元层状陡立土质边坡差异性风蚀效应研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1421-1426.
CUI Kai, CHEN Wen-wu, HAN Wen-feng, et al. Effects of Differential Wind Erosion for Multivariate Layered Steep Soil Slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1421-1426.

[7] 周卓燕, 刘培岩, 周卓琳. 新型下沉式窑洞——洛阳市冢头村特色窑洞规划构想[J]. 建筑学报, 2007(5): 30-31.
ZHOU Zhuo-yan, LIU Pei-yan, ZHOU Zhuo-lin. New Sunken Cave Dwelling—the Planning Concept of Characteristic Cave in Zhongtou Village of Luoyang City [J]. Architectural Journal, 2007(5): 30-31.

[8] 童丽萍, 韩翠萍. 传统生土窑洞的土拱结构体系[J]. 施工技术, 2008, 37(6): 113-118.
TONG Li-ping, HAN Cui-ping. Earth-arched Structural Systems of Primitive Earth-sheltered Dwelling [J]. Construction Technology, 2008, 37(6): 113-118.

[9] 姚仰平, 屈珊, 冯兴, 等. 下沉式窑洞结构的变形分析[J]. 工业建筑, 2011, 41(9): 43-48.
YAO Yang-ping, QU Shan, FENG Xing, et al. The Deformation Analysis of Structure of Sunken Cave [J]. Industrial Construction, 2011, 41(9): 43-48.

[10] 许新田, 宁志谦, 陶建玲, 等. 陕西夏季区域性大降水

- 天气的综合分析[J]. 陕西气象, 2007(4):10-15.
- XU Xin-tian, NING Zhi-qian, TAO Jian-ling, et al. Analysis of Shaanxi Summer Regional Rainfall Comprehensive[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2007(4):10-15.
- [11] 许新田, 郭大梅, 陶建玲, 等. 2002 年 6 月 8 日陕西暴雨高低空急流特征及地面中尺度系统分析[J]. 陕西气象, 2006(2):14-19.
- XU Xin-tian, GUO Da-mei, TAO Jian-ling, et al. Analysis of Shaanxi Rainstorm High and Low Altitude Jet characteristics and Ground-scale Systems Analysis[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2006(2):14-19.
- [12] CROZIER M J. Landslides Causes, Consequences and Environment[M]. London: Croom Helm, 1986: 185-189.
- [13] 王瑞钢, 闫澍旺, 邓卫东, 等. 基于平均降雨量的路堤稳定可靠性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(11):1733-1738.
- WANG Rui-gang, YAN Shu-wang, DENG Wei-dong, et al. Reliability Analysis of Highway Subgrade Stability Based on Mean Rainfall Amount[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11):1733-1738.
- [14] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征[J]. 生态学报, 2005, 25(10):2491-2498.
- CHEN Hong-song, SHAO Ming-an, WANG Ke-lin. Desiccation of Deep Soil Layer and Soil Water Cycle Characteristics on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10):2491-2498.
- [15] 王协群, 谢妮, 邹维列, 等. 降雨条件下不同土质非饱和路基边坡响应特性[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(8):107-110.
- WANG Xie-qun, XIE Ni, ZOU Wei-lie, et al. Field Trial for Characteristics of Matrix Suction and Infiltration of Slope of Unsaturated Subgrade Under Artificial Rainfall[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(8):107-110.
- [16] 谢永利, 胡晋川, 王文生. 黄土公路路堑边坡稳定性状离心模型试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5):1-7.
- XIE Yong-li, HU Jin-chuan, WANG Wen-sheng. Centrifugal Model Test for Stability Characteristics of Highway Cut Slope in Loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5):1-7.
- [17] 陈鹏, 徐博侯. 基于因素敏感性的边坡稳定可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4):42-48.
- CHEN Peng, XU Bo-hou. Reliability Analysis of Slope Stability Based on Factors Sensitivity[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4):42-48.
- [18] 刘志, 夏蕾. 水泥稳定湿陷性黄土压实度影响因素分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10):107-108, 114.
- LIU Zhi, XIA Lei. Analysis on Influential Factors of Compaction Degree of Cement-stabilized Collapsible Loess[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10):107-108, 114.
- [19] 石刚. 黄土地基承载力的试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(11):51-54.
- SHI Gang. Experimental Research on Bearing Capacity of Loess Foundation[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(11):51-54.
- [20] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(4):447-450.
- CHEN Shan-xiong, CHEN Shou-yi. Analysis of Stability of Unsaturated Soil Slope Due to Permeation of Rainwater[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4):447-450.
- [21] 刘钟森. 黄土边坡稳定性分析的有限元方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- LIU Zhong-sen. Loess Slope Stability Analysis of Finite Element Method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006.
- [22] HAN J M, SU S Q. Analysis of Pitted Courtyard Cave Dwellings Stability in Baishe Village when Rainfall Infiltration[J]. Advanced Materials Research, 2011, 250-253:2468-2472.
- [23] HAN J M, SU S Q. Effect of Rainfall Infiltration on Loess Pitted Courtyard Cave Dwellings Stability[J]. Advanced Materials Research, 2012, 430-432:1992-1995.
- [24] HAN J M. Study on Safety Factor of Loess Cave Dwellings with Pitted Courtyard in Different Rainfall Infiltration[J]. Advanced Materials Research, 2012, 446-449:1555-1558.