

文章编号: 1000-7598(2012)05-1313-06

晚更新世黄土渗透性的各向异性及其机制研究

梁 燕^{1,2}, 邢鲜丽², 李同录², 徐 平³, 刘树林⁴

(1. 长安大学 公路学院 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075; 4. 中国有色金属工业西安勘察设计院, 西安 710054)

摘 要: 非饱和黄土的渗透性是非饱和黄土性质的重要组成部分。研究黄土不同方向的渗透性对确定其湿陷范围和由于水的渗透引起的黄土滑坡具有很重要的理论意义。研究了黄土渗透性的各向异性特征及其机制。以具有明显各向异性的西安 Q₃ 原状黄土为研究对象, 用 TEN 型张力计测量了黄土试样不同方向的、不同含水率下的吸力; 用变水头渗透试验测量了黄土竖直和水平方向的饱和渗透系数。结果表明, 当体积含水率在 23%~41% 时, 张力计沿不同方向插入土样所测吸力相差不大; 竖直方向的饱和渗透系数是水平方向的 4.02 倍。在吸力测量的基础上, 根据土-水特征曲线, 确定了竖直和水平方向的非饱和黄土的渗透系数。得出在黄土不同方向, 随着吸力的增大或减小, 渗透系数减小或增大; 竖直方向的渗透系数普遍地大于水平方向的渗透系数; 当吸力小于 57 kPa 时, 随着吸力的增大, 竖向渗透系数与水平向渗透系数的差值减小。通过观测黄土的结构, 得出黄土结构对其渗透性有重要影响。

关 键 词: 原状 Q₃ 黄土; 各向异性; 非饱和土; 渗透性; 微观结构; 机制

中图分类号: U 419.1

文献标识码: A

Study of the anisotropic permeability and mechanism of Q₃ loess

LIANG Yan^{1,2}, XING Xian-li², LI Tong-lu², XU Ping³, LIU Shu-lin⁴

(1. Key Laboratory of Education Ministry on Highway Engineering of Special Region, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

4. Xi'an Engineering Investigation and Design Research Institute of China National Nonferrous Metals Industry, Xi'an 710054, China)

Abstract: The permeability of unsaturated loess is an important part of its properties. The research on loess permeability in different directions is particularly important to determine the range of loess collapse and the study of loess landslides caused by the infiltration of water in the loess. So, the anisotropic permeability and mechanism of Q₃ loess are studied. The test samples are the undisturbed Q₃ loess with obvious anisotropy from a building site in Xi'an city. The matrix suctions at different volumetric water contents and in different directions are measured with tensiometer. The saturated hydraulic conductivity is measured by falling head permeability test. The results show, while tensiometer is inserted vertically and paralleling with soil layer into samples, that the suctions are very close as the volumetric water content is between 0.23 and 0.41; and the saturated hydraulic conductivity in vertical direction is 4.02 times as that in horizontal direction. Further, the correlation function between the hydraulic conductivity and suction for unsaturated loess in vertical and horizontal directions is obtained by the soil-water characteristic curve based on the measured suctions. It can be obtained that the hydraulic conductivity reduces/increases with the matrix suction increases/reduces in both directions of the loess. The hydraulic conductivity in vertical is generally higher than that in horizontal. The difference of hydraulic conductivity between vertical and horizontal directions reduces with the matrix suction increases when matrix suction is less than 57 kPa. Structure observation shows that the anisotropy of loess structure has a significant effect on the anisotropic permeability.

Key words: undisturbed Q₃ loess; anisotropy; soil moisture; permeability; microstructure; mechanisms

1 引 言

我国是世界上黄土面积分布最广的国家之一,

黄土和黄土状土的分布面积约为 $64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。典型黄土垂直节理发育, 多为大孔隙, 黄土的渗透性具有明显的各向异性。黄土湿陷、黄土滑坡等均与水

收稿日期: 2011-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40972182)。

第一作者简介: 梁燕, 女, 1968 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: liangyan66888@163.com

在黄土中的渗流密切相关。因此,研究黄土渗透性有重要的工程实际意义。

非饱和土的渗透系数在饱和、非饱和渗流分析中非常重要。土壤学者和岩土工程学者用非饱和导水率测定系统^[1]、经验公式^[2-9]、宏观模型^[10]、基于 Hagen-Poiseuille 流动模型^[11-12]、归一化思想^[13]、分形几何模型^[14-15]以及土壤溶液的电导率^[16]为基础,分别研究了渗透系数随基质吸力、饱和度、体积含水率或有效饱和度的变化规律。王铁行^[17]、王辉等^[18]研究了干密度对黄土渗透系数的影响。刘奉银等^[19]建立了湿度和密度双变化条件下的重塑非饱和黄土渗透系数函数,李云峰^[20]研究了洛川黄土渗透性与孔隙性的关系,刘宏泰等^[21]研究了干湿循环对重塑黄土渗透性的影响,赵天宇等^[22]研究了渗透时间、围压和渗透压等渗透条件对膨润土改性黄土渗透系数的影响。但目前研究黄土不同方向渗透性的文献还很少。

黄土在不同方向的渗透性研究对确定黄土湿陷范围,研究由于水的渗入引起的黄土滑坡有重要的理论意义。因此,本文以具有明显各向异性的西安 Q₃ 原状黄土为研究对象,通过扫描电镜 (ESM) 和数码相片观测黄土的微观结构,用 TEN 型张力计测量吸力和用变水头渗透试验测量其饱和渗透系数,研究了西安 Q₃ 原状黄土在竖向和水平方向的渗透性,并分析了其机制。

2 试验方案

试验用土取自西安市东郊雁引路 45 号,取样深度约 10 m,为 Q₃ 黄土。土样土质较均匀,竖向孔隙发育,具有明显的各向异性。土样的天然密度 $\rho = 1.75 \text{ g/cm}^3$,土粒密度 $\rho_s = 2.71 \text{ g/cm}^3$,天然含水率 $w = 13.03\%$,孔隙率 $n = 0.4276$ 。

现场采取大块 (40 cm × 40 cm) 的原状土样,分别测量了水平和垂直方向的不同体积含水率下的吸力。吸力采用 TEN 型张力计测定, TEN 型张力计可以测量 0~100 kPa 范围的吸力。吸力测定试验方法如下:

(1) 将原状黄土先制成边长为 30 cm 的方形试样,用直径约为张力计探头直径的钻头在试样中心打孔,孔深为 8 cm 左右。

(2) 将张力计排气、充满水后,竖直向下插入土样钻孔中,用与土样相同湿度的湿砂填充试验钻孔与张力计间的空隙。等张力计读数稳定后,即测得初始含水率下试样的吸力值。测量水平方向吸力时,将土样翻转 90°,张力计均竖直向下插入土中。

(3) 测定试样的初始吸力后,给试样分级加水,改变试样的含水率;或将土样暴露于空气中,晾一段时间。加水的方法是水膜转移法,用滴定管把所需的水量均匀地滴在试样上。然后,用塑料膜密封至少 7 d,确保土样水分均匀,这时,可进行这一级含水率条件下的吸力量测。如此可分级测量试样在不同含水率条件下的吸力。

黄土的饱和渗透系数采用室内变水头渗透试验测定,使用 TST-55 型渗透仪,试样直径为 61.8 mm,高为 40 mm;扫描电镜 (SEM) 和数码相机拍摄的相片描述土样在竖直和水平方向上的结构特性。

3 试验结果分析

3.1 土-水特性

通过试验测定土样在不同含水率下的吸力,图 1、2 分别为张力计垂直土层面和平行土层面插入土样时的吸力 S 和时间 t 关系曲线。从图 1 可看出,张力计垂直土层面插入土样时,随着体积含水率 θ 的增加 (23% 增加到 38%),稳定后的吸力值不断减小 (由 60.2 kPa 减小到 19.3 kPa),试验数据符合正常规律。

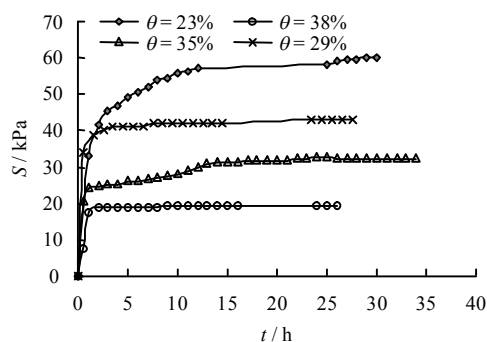


图 1 张力计垂直土层面插入土层时实测吸力与时间的关系
Fig.1 Relations between measured suction and time while tensiometer is inserted sample vertically in soil layer

图 2 为张力计平行土层面插入时,吸力随时间 t 的变化规律。测试结果表明,体积含水率 $\theta = 40\%$ 时,稳定后吸力为 27.5 kPa; $\theta = 37\%$ 时,稳定后吸力为 23.0 kPa; 体积含水率由 40% 减小到 37%,实测吸力由 27.5 kPa 减小到 23.0 kPa,与已有认识 (随着体积含水率的减小,吸力增大) 不符,分析试验数据总体变化规律,决定剔除 $\theta = 40\%$ 、 $S = 27.5 \text{ kPa}$ 这组数据。

黄土吸力试验结果见表 1。

根据吸力测试结果,将不同方向的试验结果绘制于图 3,将图 3 中的试验点按直线方程拟合,得

$$\theta = -0.004S + 0.4681 \quad (1)$$

式(1)拟合相关系数 $R = 0.9905$ 。

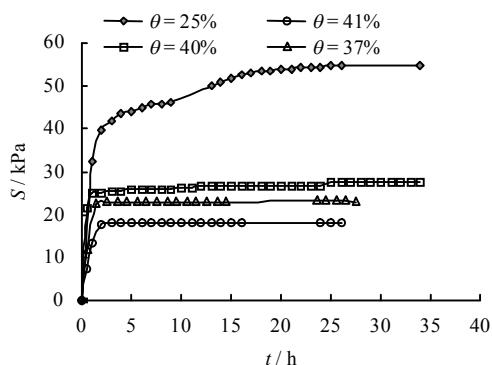


图2 张力计平行土层面插入土层时实测吸力与时间的关系
Fig.2 Relations between measured suction and time while tensiometer is inserted sample in parallel with soil layer

表1 试样在不同方向的实测吸力
Table 1 Measured suctions under different directions

张力计垂直于土层面		张力计平行于土层面	
体积含水率	吸力	体积含水率	吸力
/ %	/ kPa	/ %	/ kPa
23	60.2	25	55.0
29	42.2	37	23.0
35	32.0	40	27.5*
38	19.3	41	18.0

注: 上标“*”表示分析测量数据的变化规律, 该数据明显异常, 舍去。

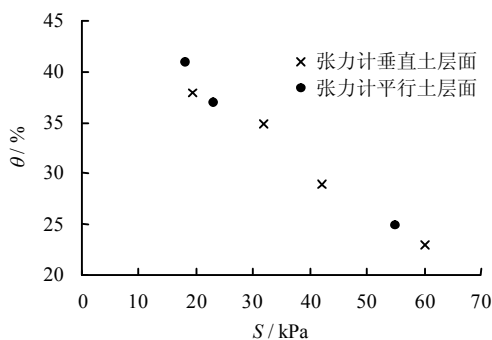


图3 实测吸力与体积含水率关系图
Fig.3 Relation between measured suction and volumetric water content for loess

这说明: 当体积含水率在 23%~41%时, 沿黄土不同方向的体积含水率与吸力间关系, 可以认为是按直线规律变化的, 随着体积含水率的增大, 吸力单调减小。

3.2 渗透系数函数确定

饱和渗透系数试验结果见表2。从表中看出, 西安 Q₃ 原状黄土垂直方向的饱和渗透系数平均值为 2.24×10^{-4} cm/s, 水平方向的饱和渗透系数为 $5.57 \times$

10^{-5} cm/s, 竖直方向的渗透系数是水平方向的4.02倍。可见, 沿黄土的不同方向, 渗透性有显著的差异。

表2 沿土样竖直和水平方向的饱和渗透系数
Table 2 Saturated hydraulic conductivity in vertical and horizontal directions of loess

试验方向	渗透系数/(cm/s)			平均渗透系数 /(cm/s)
	试样1	试样2	试样3	
竖直方向	2.12×10^{-4}	2.36×10^{-4}	$1.07 \times 10^{-4**}$	2.24×10^{-4}
水平方向	3.42×10^{-5}	6.88×10^{-5}	6.40×10^{-5}	5.57×10^{-5}

注: “**”表示该试验数据可疑, 根据 Grubbs 法判断, 将其舍去。

非饱和土渗透系数 $K(\theta)$ 的直接量测常常是很困难的。目前, 常采用基质吸力与含水率的关系曲线(即土-水特征曲线)来间接测定 $K(\theta)$ [23]。具体作法是将土-水特征曲线沿体积含水率轴分成 m 个等分, 可用每一个等分中点的基质吸力由下式计算渗透系数 $K(\theta)$:

$$K(\theta_i) = \frac{K_s}{K_{sc}} A_d \sum_{j=1}^m [(2j+1-2i)(u_a - u_w)_j^{-2}] \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

式中: $K(\theta_i)$ 为用相应于等 i 个等分中点的体积含水率 θ_i 对应的渗透系数; K_s 为实测饱和渗透系数; K_{sc} 为计算的饱和渗透系数; A_d 为调整常数, 与水的密度、表面张力等有关; $u_a - u_w$ 为基质吸力; m 取 10。

按照这一方法, 已知黄土竖直方向的饱和渗透系数 (2.24×10^{-4} cm/s) 和水平方向的饱和渗透系数 (5.57×10^{-5} cm/s), 据吸力实测资料, 用式(2)计算得到沿黄土不同方向的 $K(S)$ 如表3和图4所示。

从图4可看出, 沿黄土不同方向, 随着吸力的增大或减小, 渗透系数减小或增大; 竖直方向的渗透系数普遍大于水平方向的渗透系数; 当吸力小于

表3 计算得黄土渗透系数
Table 3 Calculated hydraulic conductivities of loess

吸力 S / kPa	水平方向渗透系数 / (10^{-4} cm/s)	垂直方向渗透系数 / (10^{-4} cm/s)
0.00	0.56	2.24
12.60	0.49	1.98
17.54	0.43	1.72
22.48	0.37	1.47
27.42	0.30	1.22
32.36	0.24	0.98
37.30	0.19	0.76
42.24	0.14	0.54
47.18	0.09	0.35
52.12	0.04	0.18
57.06	0.01	0.05

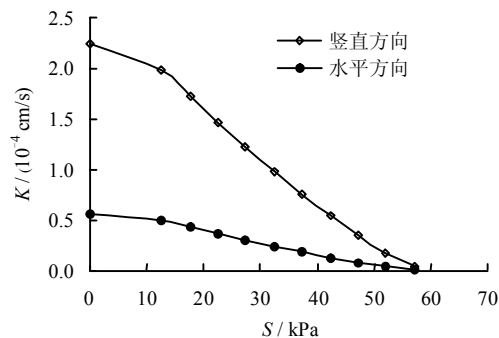


图 4 渗透系数与吸力关系曲线

Fig.4 Curves of hydraulic conductivity vs. suction

57 kPa 时，随着吸力的增大，竖向渗透系数与水平向渗透系数的差值减小。

4 黄土各向异性渗透性的机制

4.1 微观结构的特征

图 5~8 为土样的扫描电镜相片。土层面上可见大直径圆孔，基本单元体呈柱状排列，其间孔隙呈窄深形状，结构规则一些；垂直土层面上可见大直径长孔，基本单元体堆积在一起，可见浅的孔坑，结构不规则。

4.2 细观结构的特征

因为扫描电镜观测范围较小，50 倍扫描电镜相片反映土样的尺寸仅为长 2.57 mm，宽 1.98 mm。倍数越大，观测的土样面积越小。为了反映土样较大面积上的结构，又用数码相机对土样进行了照相，根据数码相片观测，统计了孔径大于等于 0.5 mm 的圆孔数和长孔的数量（长孔指孔径大于等于 0.5 mm，孔长与孔径比值明显大于 1.0 的孔）。图 9、图 10 为沿垂直黄土层面和平行层面的数码相片。

数码相机观测微观结构如表 4 所示，土层面上可见的大孔隙基本均为圆孔（孔径大于等于 0.5 mm），长孔数为 0；垂直土层面方向，圆孔数较少，绝大多数相片有明显可见的长孔，长度多在 2 cm 以下，

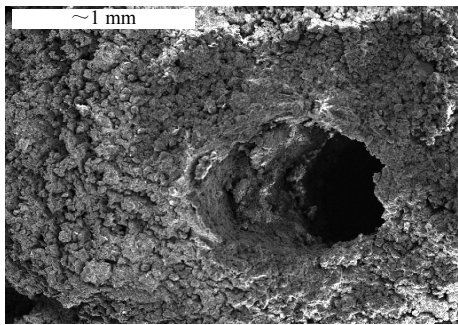


图 5 土层面上的扫描电镜相片（50 倍）
Fig.5 Microscopic photo of specimen in soil layer plane (50 times)

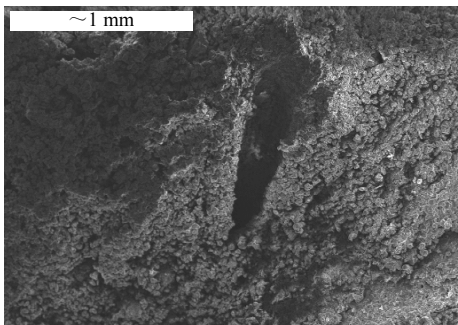


图 6 垂直土层面的扫描电镜相片（50 倍）
Fig.6 Microscopic photo of specimen in vertical plane with soil layer (50 times)

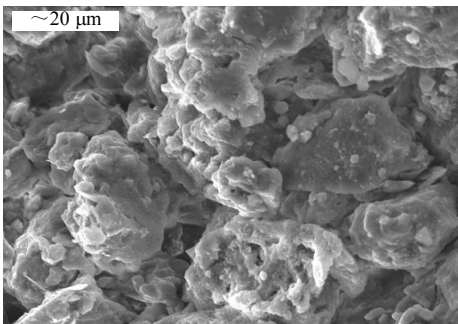


图 7 土层面上的扫描电镜相片（1 500 倍）
Fig.7 Microscopic photo of specimen in soil layer plane (1 500 times)

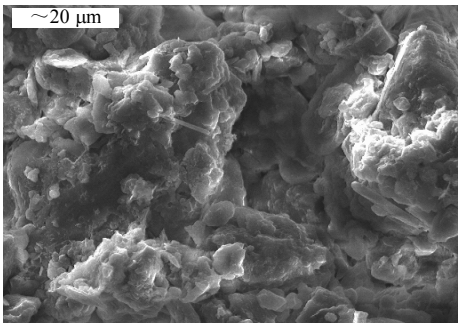


图 8 垂直土层面的扫描电镜相片（1 500 倍）
Fig.8 Microscopic photo of specimen in vertical plane with soil layer (1 500 times)



图 9 沿土层面上的数码相片
Fig.9 Digital photo for loess in soil layer plane



图 10 垂直土层面的数码相片
Fig.10 Digital photo for loess in vertical plane with soil layer

表 4 沿土样不同方向的大孔隙数
(孔径大于等于 0.5 mm, 部分结果)
Table 4 Numbers of macro holes in different directions of loess (when pore diameter larger than or equal 0.5 mm, partial results)

试样 编号	土层面			垂直土层面		
	试样面积 / cm ²	圆孔数	长孔数	试样面积 / cm ²	圆孔数	长孔数
1	16.8	9.0	0.0	18.0	1.0	0.0
2	28.1	5.0	0.0	12.6	1.0	1.0
3	9.0	9.0	0.0	36.0	3.0	0.0
4	18.3	10.0	0.0	18.0	1.0	1.0
5	9.0	3.0	0.0	9.0	0.0	1.0
6	18.0	7.0	0.0	9.0	1.0	1.0
7	18.0	4.0	0.0	12.5	0.0	1.0
8	9.0	2.0	0.0	16.0	2.0	1.0
9	30.0	8.0	0.0	24.0	0.0	1.0
10	21.2	7.0	0.0	20.2	0.0	1.0
11	17.5	4.0	0.0	16.0	0.0	1.0
12	19.2	7.0	0.0	9.0	0.0	1.0
13	17.4	6.0	0.0	16.0	0.0	1.0

尤以近 1 cm 的居多,方向为竖直或与竖直方向成约 45° 方向,说明黄土竖直方向的大孔隙很发育。经统计,在土层面上,土样的平均圆孔数为 0.327 7 个/cm²;垂直土层面方向,平均圆孔数为 0.038 4 个/cm²。土层面上,平均圆孔数接近垂直土层面上的 10 倍,说明沿黄土不同方向结构明显不同。

图 11 为土样沿不同方向的孔 ($d \geq 0.5$ mm) 统计图,在土层面上,测量圆孔数的标准差为 0.109 7;在垂直土层面上,测量圆孔数的标准差为 0.039 7,这说明在土层面上,圆孔数分布的离散程度比垂直土层面上的大。

通过观测分析得知,黄土样品基本单元体为粒状体。宏观上看,单元体围绕长孔(虫孔或根系形成的孔洞)排列;从细微上看,为疏松的单粒排列,属于接触联结。

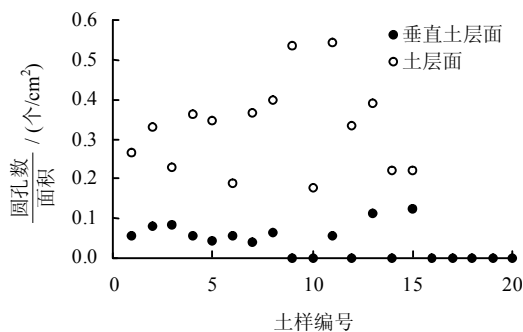


图 11 沿土样不同方向的圆孔数统计图
Fig.11 Numbers of round holes in soil layer plane and vertical plane with soil layer

4.3 结构对黄土渗透特性各向异性的控制作用

黄土是第四纪风积物,粒径以 10~50 μm 的粗粉砂占优势,西安 Q₃ 原状黄土粒径为 20~30 μm 。

随着黄土中含水率增大(吸力减小),土体孔隙中的水所占体积增大,气体体积减小,土孔隙中水的连通性增强,水在其中渗流的阻力减小,渗透系数增大;反之,土中含水率减小,即吸力增大,渗透系数减小。

从黄土样的微观结构可知,与水平方向相比,竖直方向基本单元体排列较规则,其间孔隙延伸较深,水有较畅通的渗流通道;加之,有沿竖直方向延伸的较多的长孔(大孔隙),长孔延伸 1~2 cm,连通性好,而没有沿水平方向延伸的长孔。因此,当土的含水率相同,即沿不同方向吸力大体相同时,竖直方向的渗透性比水平方向的大。试验表明,黄土竖直方向的饱和渗透系数是水平方向的 4 倍多。

因为小孔隙比大孔隙具有更大的吸力,因此,随着含水率的减小(吸力增大),水逐渐储存在小孔隙中。从宏观上看,竖向和水平向的结构有较大的差别,特别表现为竖直方向有大孔隙;从细观上看,除去大孔隙,竖直和水平向孔隙大小的差异较小,因此,随着含水率的减小,水逐渐储存在小孔隙中,这意味着竖直方向与水平方向的渗透系数差别也减小;反之,随着含水率的增大(吸力减小),水平与竖直方向的渗透系数差异增大。

5 结 论

(1) 西安 Q₃ 原状黄土具有明显的各向异性,基本单元体为粒状体,接触联结,疏松的单粒排列。

(2) 使用张力计测量了原状 Q₃ 黄土不同含水率下沿不同方向的吸力,发现当体积含水率在 0.23~0.41 范围内时,两个方向的吸力相差不大。

(3) 通过测量土样竖向和水平方向的饱和渗透

系数,发现竖直方向的饱和渗透系数是水平方向饱和渗透系数的4.02倍,黄土结构的各向异性对渗透性有明显的影响。

(4)在吸力测量的基础上,用间接法得到了相应的渗透系数函数,并进一步解释了结构影响各向异性黄土渗透性的机制。

参考文献

- [1] 赵彦旭,张虎元,吕擎峰,等.压实黄土非饱和渗透系数试验研究[J].岩土力学,2010,31(6):1809—1812.
ZHAO Yan-xu, ZHANG Hu-yuan, LÜ Qing-feng, et al. Experimental study of unsaturated permeability coefficient of compacted loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1809—1812.
- [2] HUANG S Y. Evaluation and laboratory measurement of the coefficient of permeability in deformable, unsaturated soils[D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1994.
- [3] ARBHABHIRAMA A, KRIDAKORN C. Steady downward flow to a water table[J]. **Water Resources Research**, 1968, 4(6): 1249—1257.
- [4] PHILIP J R. Linearized unsteady multidimensional infiltration[J]. **Water Resources Research**, 1986, 22(12): 1717—1727.
- [5] AHUJA L R. A numerical and similarity analysis of infiltration into crusted soils[J]. **Water Resources Research**, 1973, 9(4): 987—994.
- [6] CAMPBELL G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. **Soil Science**, 1974, 117(6): 311—314.
- [7] DAVISON J M, NIELSEN D R, LARUE M E. Field measurement and use of soil-water properties[J]. **Water Resources Research**, 1969, 5(6): 1312—1321.
- [8] BICALHO K V, ZNIDARCIC D, KO H Y. Air entrapment effects on hydraulic properties[C]//Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000. Denver: [s. n.], 2000: 517—528.
- [9] TAIBI S, BICALHO K V, SAYAD-GAIDI C, et al. Measurements of unsaturated hydraulic conductivity functions of two fine-grained materials[J]. **Soils and Foundations**, 2009, 49(2): 181—191.
- [10] MUALEM Y. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach[J]. **Water Resources Research**, 1978, 14(2): 325—334.
- [11] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. **Water Resources Research**, 1976, 12(3): 513—522.
- [12] MUALEM Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soil: prediction and formulas[C]//Methods of Soil Analysis. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 799—823.
- [13] LOBBEZOO J P, VANAPALLI S K. A simple technique for estimating the coefficient of permeability of unsaturated soils[C]//Proceedings of 55th Canadian Geotechnical Conference. Niagara Falls: [s. n.], 2002: 1277—1284.
- [14] 徐永福,黄寅春.分形理论在研究非饱和土力学性质中的应用[J].岩土工程学报,2006,28(5):635—638.
XU Yong-fu, HUANG Yin-chun. Fractal-textured soils and their unsaturated mechanical properties[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(5): 635—638.
- [15] CIHAN A, TYNER J S, PERFECT E. Predicting relative permeability from water retention: a direct approach based on fractal geometry[J]. **Water Resources Research**, 2009, 45: W04404.
- [16] DOUSSAN C, RUY S. Prediction of unsaturated soil hydraulic conductivity with electrical conductivity[J]. **Water Resources Research**, 2009, 45(10): W10408. doi: 10.1029/2008 WR007309.
- [17] 王铁行,卢靖,张建锋.考虑干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(11):2364—2368.
WANG Tie-hang, LU Jing, ZHANG Jian-feng. Experimental study of permeability coefficient of artificially compacted unsaturated loess considering influence of density[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2364—2368.
- [18] 王辉,岳祖润,叶朝良.原状黄土及重塑黄土渗透特性的试验研究[J].石家庄铁道学院学报(自然科学版),2009,22(2):20—22.
WANG Hui, YUE Zu-run, YE Chao-liang. Experimental investigation of permeability characteristics of intact and reshaped loess[J]. **Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Science)**, 2009, 22(2): 20—22.
- [19] 刘奉银,张昭,周冬.湿度和密度双变化条件下的非饱和黄土渗气渗水函数[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1907—1914.
LIU Feng-yin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong. Density-saturation-dependent air-water permeability function of unsaturated loess[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(9): 1907—1914.
- [20] 李云峰.洛川黄土地层渗透性与孔隙性的关系[J].西安地质学院学报,1991,13(2):60—64.
LI Yun-feng. Relationship between the permeability and the porosity of Luochuan loess layer[J]. **Journal of Xi'an College of Geology**, 1991, 13(2): 60—64.
- [21] 刘宏泰,张爱军,段涛,等.干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J].水利水运工程学报,2010(4):38—42.
LIU Hong-tai, ZHANG Ai-jun, DUAN Tao, et al. The influence of alternate dry-wet on the strength and permeability of remolded loess[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 2010(4): 38—42.
- [22] 赵天宇,张虎元,严耿升,等.渗透条件对膨润土改性黄土渗透系数的影响[J].水文地质工程地质,2010,37(5):108—112,117.
ZHAO Tian-yu, ZHANG Hu-yuan, YAN Geng-sheng, et al. Influence of penetrative conditions on permeability of modified loess soil by bentonite[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2010, 37(5): 108—112, 117.
- [23] FREDLUND D G, RAHADJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1993.