

非饱和土抗剪强度几个问题探讨

姚振兴¹, 魏松^{1,2}, 肖淑霞^{1,2}, 刘建国¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009;

2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 鉴于非饱和土抗剪强度研究中一些值得注意的问题, 回顾了非饱和土基质吸力与抗剪强度关系的部分研究成果; 结合非饱和土应力理论的基本假定, 阐述了研究体积分水率与土体抗剪强度关系的一个新观点; 探讨了应力历史(包括吸力历史)对非饱和土强度的影响, 并从该方面分析了目前等吸力试验方法的不足之处, 认为改善吸力测试技术和提高吸力测试精度应是非饱和土强度特性研究的重要方向之一。以上观点和探讨将有利于所提问题的研究。

关键词: 非饱和土; 基质吸力; 体积分水率; 应力历史; 吸力历史

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0597-04

Discussion on several problems for shear strength of unsaturated soil

YAO Zhe xing¹, WEI Song^{1,2}, XIAO Shu xia^{1,2}, LIU Jia n guo¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In view of the problems in the research of shear strength of unsaturated soils, some research results of the relationship between the shear strength and matrix suction of unsaturated soil were reviewed. According to the basic principle of unsaturated soil stress theory, a new research viewpoint of the relationship between the volatile water content and shear strength of unsaturated soil was proposed. The effects of the stress history (including suction history) on the strength of unsaturated soil were discussed, and the disadvantages of control suction test were analyzed. Improving the suction test technology and accuracy of suction test was considered to be one of the important research directions of the strength characteristics of unsaturated soil. The discussion in this paper can benefit the research of unsaturated soil strength.

Key words: unsaturated soil; matrix suction; volatile water content; stress history; suction history

人们生产生活中遇到的土大多处于地下水位之上, 这类土由于孔隙中含有气相, 因此处于非饱和状态。我国处于高速发展时期, 建设工程中遇到的非饱和土问题逐渐增多, 并且越来越复杂, 如大坝和路基的不均匀沉降、深基坑和高边坡的失稳、膨胀土的湿胀干缩以及黄土的湿陷等^[1]。鉴于非饱和土力学在诸多实际工程中的应用前景非常广阔, 若要解决复杂的非饱和土问题, 需要人们不断地深入了解非饱和土的特性。半个多世纪以来, 国内外众多学者孜孜不倦地对非饱和和膨胀土、湿陷性黄土、黏土和人工填土等展开了深层次的研究, 基于理论和试验两个方面, 不断攫取和应用交叉边缘学科和高新技术, 取得了丰硕的成果。然而由于非饱和土

的复杂性、不同类型土体性质的差异性以及不同工程条件的特殊性, 现有的研究成果尚不能满足实际工程的要求。部分研究成果由于考虑影响因素单一、针对某一类型的土体以及试验条件受限等, 并不能准确和全面地反映非饱和土的特性。因此, 结合工程实际, 不断地归纳、总结和反思研究成果, 拓展研究思路和方法, 对非饱和土力学的发展具有良好的推动作用。

通过总结前人的研究方法和研究成果, 对非饱和土基质吸力与抗剪强度关系部分研究成果进行了综述, 提出了研究体积分水率与土体抗剪强度关系的一个新观点, 探讨了应力历史(包括吸力历史)对非饱和土强度的影响, 并分析了现有

收稿日期: 2014-10-08 修回日期: 2015-04-15 网络出版时间: 2015-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.0834.004.html>

基金项目: 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室暨国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金资助(SLK2011B02; SLK2007A04); 安徽省自然科学基金项目(J2014AKZR0062)

作者简介: 姚振兴(1990), 男, 安徽人, 主要从事水工结构方向研究。E-mail: 761381548@qq.com

通讯作者: 魏松(1970), 男, 安徽人, 副教授, 主要从事岩土工程及水利工程方面研究。E-mail: 910884583@qq.com

非饱和土的控制吸力试验方法存在的问题,文中提出了部分个人见解。

1 基质吸力与土体抗剪强度

传统的土力学主要是依据研究饱和土的特性建立的,饱和土力学的理论已被广泛的应用在岩土工程的各领域中,其发展已经比较成熟,非饱和土在诸多方面与饱和土有着相似的特性,因此,将成熟的饱和土力学理论应用到研究非饱和土问题上,一直是非饱和土特性研究的重要思路之一。

土体抗剪强度是非饱和土研究的重要内容,基于饱和土有效应力原理的成功,众多学者不断地追求非饱和土的有效应力公式。基质吸力存在于非饱和土中,它既是区别于饱和土的主要原因,也是反映非饱和土特性的重要因素,因此人们自然而然地考虑把基质吸力作为强度理论的变量。代表性的有效应力公式有两个:第一个为 Bishop 等^[2]在 1960 年提出的非饱和土抗剪强度公式如下:

$$\tau_f = c' + [\sigma - \mu_a + x(\mu_a - \mu_w)] \tan \phi^0 \quad (1)$$

第二个是 Fredlund 等^[3]于 1978 年提出的以正应力和基质吸力为双变量的抗剪强度理论公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_a) \tan \phi^0 + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^0 \quad (2)$$

两式中, c' 为有效黏聚力, μ_a 、 μ_w 分别为土中孔隙气压力和孔隙水压力, $(\mu_a - \mu_w)$ 为基质吸力。不同之处在于 Bishop 公式采用了与饱和度有关的参数 x , 而 Fredlund 公式采用了抗剪强度随基质吸力增大速率的参数 $\tan \phi^0$ 。因为 x 参数物理意义不明确, x 值确定不易,所以在应用上受到限制。相比之下,Fredlund 公式中参数物理意义明确,参数确定方法更加合理,因此被广泛接受和应用。

近年来,国内的学者们也陆续提出了各自的抗剪强度理论。卢肇钧等^[4]认为膨胀力可以取代不易量测的吸力,并于 1992 年提出膨胀力有效应力理论;沈珠江^[5]撰文推广了吸力的概念,将一切增加颗粒之间抗滑阻力的因素都定义为广义吸力,并由此得出了强度与广义吸力的双曲线关系;缪林昌等^[6]根据膨胀土强度特性研究得到了膨胀土强度公式;汤连生^[7]通过粒间吸力研究提出了总有效应力原理;黄秋润^[8]引用了 Bolzon 等^[9]和 Gallipoli 等^[10]提出的非饱和土有效应力并结合土-水特征曲线提出了新的非饱和土强度理论。

研究^[11]表明,黏质砂土的抗剪强度在吸力大小为 0~1000kPa 范围内,随吸力逐渐增大,而增长速率逐渐减小。徐永福^[12]从土体结构模型出发,将基质吸力引起的强度定义为结构强度。黄义等^[13]根据徐永福提出微观孔隙分布规律,进一步推导出结构强度公式,并理论上证明了结构强度存在最大值。孟黔灵等^[14]总结了吸力对强度的贡献受正应力、残余状态、土的类型的影响。扈胜霞等^[15]对于非饱和和原状黄土的试验结果表明,在一定的吸力范围内, ϕ^0 值近似为常数;陈建斌等^[16]对膨胀土的试验结果,也得出类似结论。林鸿州^[17]等对非饱和和粉质黏土、粉细砂和砂质粉土进行了试验,证明了 ϕ^0 总是小于有效内摩擦角 ϕ , 而且是随着基质吸力的增大而逐渐减小的。闫亚景等^[18]对非饱和土重塑黄土的试验结果表明, ϕ^0 值是一个非常数值。

目前,研究得出基质吸力对土体黏聚力具有显著的影响,而对内摩擦角影响程度却出现了不同的研究结果。文献

[19] 试验结果显示基质吸力对内摩擦角影响不大,文献[20]认为可以忽略基质吸力对重塑黄土内摩擦角的影响,而林鸿州等^[17]通过试验得到基质吸力对非饱和粉质黏土、粉细砂、砂质粉土的粘聚力和内摩擦角均有显著影响的结论。

综合以上研究成果,土中基质吸力变化改变了土体强度已成为共识,目前尚不够清楚的是吸力改变对土体强度参数的影响程度如何,不同的试验方法和土的类型均对结果产生影响,这需要开展更多试验研究,探索其基本规律。

2 干密度及含水率与土体抗剪强度

基于前述可见,前人已在实验室内对于基质吸力与土体强度特性的关系开展了大量试验研究,得到了较丰富的研究成果,但是由于受吸力测试技术与测试精度的限制,在工程实践中应用吸力这一参数还不具备良好的条件,采用易测、精度较高的常规参数代替吸力作为主要相关指标应是一重要方法,因此研究非饱和土的抗剪强度与其他参数之间的关系具有重大的工程实践意义。

土体的抗剪强度受含水率的影响显著,申春妮等、黄琨等^[21-22]分别以重塑中粉质壤土和欠固结粉砂为试验土样,均对此作了研究,结果表明,随着含水率的增大,土体抗剪强度逐渐降低,粘聚力和内摩擦角皆呈现减小的趋势,含水率主要影响土体的黏聚力,内摩擦角受其影响程度较小。文献[21]得到土体的黏聚力和内摩擦角均与含水率呈负的线性关系。文献[22]试验表明含水率与土体黏聚力之间的关系曲线为折线,可以用两个直线段来描述,第 2 个直线段斜率大于第 1 个直线段,当含水率逐渐增加到一定值后,粘聚力呈现急剧下降的趋势。为了探索干密度对非饱和土体抗剪强度的影响,申春妮等^[21]进行了一系列的控制干密度的试验,结果表明土体内摩擦角几乎不受干密度的影响,而黏聚力随干密度呈指数增加。黄琨等^[22]试验表明,非饱和土的强度变化是含水率与压实度共同影响的结果,但作者只设计了干密度的一组试样,并没有做多组干密度条件的对比试验研究。刘小文等^[23]通过分析不同干密度对基质吸力的影响规律得出,当含水率较高时,基质吸力对密度状态的变化不敏感,而在含水率较低时,其对密度状态变化敏感性增强。

以上研究成果表明,干密度和含水率与非饱和土的抗剪强度存在紧密的关系,两个参数共同影响了土体的抗剪强度,并且这种影响规律比较复杂。在土力学研究中,土的物理力学状态、土性造成了土体物理力学特性的不同,人们采用一套完整的指标来描述土的物理状态,包括粒度、密度、湿度和构度^[1]。针对某一特定区域的土,粒度基本是不变的,其他物理状态指标都要受到应力的影响而发生变化。在实际的研究中,常简化甚至忽略构度,而更多地考虑密度和湿度对土体强度的影响。在此,笔者仅针对含水率和干密度两个参数对土体抗剪强度的影响,结合非饱和土应力理论的基本假定,提出一些个人观点。

非饱和土是由固、液、气三相组成的多孔介质,其力学性质的复杂程度远大于饱和土,在非饱和土的应力理论研究中,通常会假定土颗粒和水是不可压缩的,若不考虑非饱和土的固、液、气三相相互之间复杂的作用形式,而仅仅采用与体积有关联的参数表示土的三相关系,那么其在宏观量上即

可确定。由土的指标关系知,土体的体积含水率与质量含水率、干密度之间有如下关系:

$$w_v = w_m \cdot \rho_d / \gamma_w \quad (3)$$

式中 w_v 为体积含水率; w_m 为质量含水率; ρ_d 为干密度; γ_w 为水的容重。一般情况下,水的容重不会发生变化,那么体积含水率即是包含了湿度、密度参数的统一指标值。此外,为了描述非饱和土的基质吸力与含水量的关系,学者们采用了土-水特征曲线(SWCC)^[24],该曲线见图1,横坐标表示土的体积含水率,纵坐标为基质吸力,它能够反映出不同体积含水率下土体中的基质吸力大小。综合以上,公式(3)说明了体积含水率可以表示为密度和湿度的统一指标,在物理意义上表达了密度和湿度共同作用的结果;同时,根据SWCC曲线,体积含水率变化又可以反映基质吸力的变化。因此笔者认为,如果结合非饱和土的应力理论的基本假定,研究体积含水率对土体抗剪强度的影响应该有利于问题简化。这是因为,一方面体积含水率包含了密度、湿度综合的变化,研究单一的参数指标更为简单;另一方面吸力参数在工程实践中的应用还不具备良好条件,而体积含水率的测定和应用是比较方便的。根据笔者所及,关于仅考虑体积含水率与非饱和土抗剪强度关系的研究较少,具体有待进一步试验总结规律。

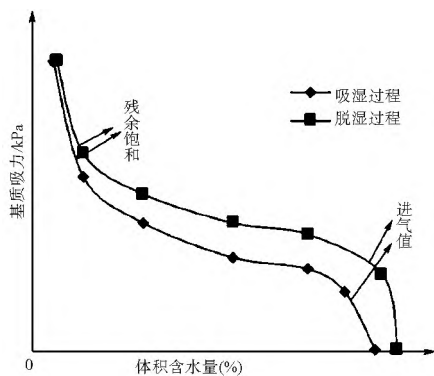


图1 土-水特征曲线^[25]

Fig. 1 Soil water characteristic curve

3 应力历史(包括吸力历史)与土体抗剪强度

研究表明,土体的强度变化与土的应力历史、土的结构性以及土的初始状态因素有关,应力历史是其中不可忽略的影响因素。文献[26]对不同应力历史条件下的软黏土进行了三轴不排水常剪切速率(UCSR)的试验,得出了有效应力路径的发展既要受剪切速率的影响,又要受到土体剪切前固结状态影响的结论。文献[27]对经历干湿循环试样和未经干湿循环试样的水力学特性进行对比试验研究,结果表明,在保持净应力和吸力相同的条件下,经历干湿循环的试样与未经干湿循环试样的应力比-应变关系和强度是不同的。在其他条件相同时,经历干湿循环的试样比未经干湿循环试样的应力比-应变关系要高、强度大和体变小。分析认为,经过先期的较大压应力或者较高的吸力,土骨架均受力产生收缩变形,土的孔隙比减小,土体强度也就发生了变化。可以认为,应力历史(包括吸力历史)改变了土体的结构,从而对土体的强度特性产生影响。

目前,一般的控制吸力的试验仪器,主要是向压力室提供一定的气压力,高进气值陶土板允许土样中的水通过而不允许气体通过,从而满足控制基质吸力的要求。关于轴平移技术的应用,许多学者提出了质疑。Bocking等^[28]认为,当非饱和土的气相处于封闭状态时,在土样表面施加气压力,孔隙中封闭的气体很难向外逸散,土样的内外气压力肯定会有差异,轴平移技术也就失去了效用。赵成刚等^[29]指出,在实际场地中并不存在大于某一界限值的基质吸力,而轴平移试验技术却掩盖了这一实际情况。文献[30]认为吸力对土本质特性具有唯一性,等吸力试验通过人为改变土中孔隙水压力或者孔隙气压力来保持两者差值稳定的方式是值得考量的。

先忽略轴平移技术的适用范围,单从应力历史(包括吸力历史)对非饱和土体强度的影响方面考虑,等吸力试验是存在一定的问题的。一般情况下,非饱和土承受应力时,试样发生变形,土中固相、气相、液相的相互作用力共同构成了等效应力,随着等效气相力和等效液相力在土中的迁移耗散,变形逐渐稳定,土骨架收缩变形也趋于稳定。等吸力试验强行改变了土中等效气相力和等效液相力的迁移耗散方式,势必对土骨架的收缩变形结果产生影响,从而改变了土体的强度特性。为此笔者建议,在进行等吸力试验时,应认识到目前等吸力试验的不足之处,并且在试验结果中尽可能地分析这种不足带来的影响。同时,在试验中应尽可能去测试吸力而不是控制吸力,改善吸力测试技术和提高吸力测试精度应是非饱和土研究的重要方向之一。

4 结语

(1) 基质吸力存在于非饱和土中,其与土体强度有紧密的关系,但吸力对抗剪强度参数的影响程度目前还不够清楚,不同的试验方法和土的类型均对结果产生影响,这需要开展更多试验研究,探索其基本规律。

(2) 体积含水率与基质吸力关系紧密,可用SWCC曲线表示,同样体积含水率是包含了密度、湿度参数的统一性指标,研究体积含水率对土体抗剪强度的影响应该有利于问题简化,可能具有重要的意义,具体有待进一步试验总结规律。

(3) 土体的强度变化与土的应力历史、土的结构性以及土的初始状态因素有关,应力历史(包括吸力历史),主要是改变了土体的结构,土体强度也随之发生变化。目前一般的等吸力试验存在一定的不足之处,改善吸力测试技术和提高吸力测试精度应是非饱和土研究的重要方向之一。

参考文献(References):

- [1] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 202-264. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 202-264. (in Chinese))
- [2] Bishop AW, Alpan I, Blight GE. Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive soils[A]. ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils[C]. Boulder: University of Colorado, 1960: 503-532.
- [3] Fredlund DG, Morgenstern NR, Widger RA. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Jour-

- nal, 1978, 15(3): 313-321.
- [4] 卢肇钧. 粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 3-8. (LU Zhaojun. Problems on the research of shear strength of clayey soils[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 1999, 32(4): 3-8. (in Chinese))
- [5] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1-9. (SHEN Zhurjiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(2): 1-9. (in Chinese))
- [6] 缪林昌, 殷宗泽. 非饱和土剪切强度[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 1-6. (MIAO Linchang, YIN Zongze. Shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 1-6. (in Chinese))
- [7] 汤连生, 王思敬. 湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 83-88. (TANG Liansheng, WANG Sijing. Absorbed suction and principle of effective stress in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 83-88. (in Chinese))
- [8] 黄秋润, 吴礼舟. 非饱和土抗剪强度的研究[J]. 成都理工大学学报, 2007, 34(3): 221-224. (HUANG Qirun, WU Lizhou. Study on the shear strength of unsaturated expansive soils[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2007, 34(3): 221-224. (in Chinese))
- [9] Bolzon G, Schrefler B A, Zienkiewicz O C. Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states[J]. Geotechnique, 1996, 46(2): 279-289.
- [10] Gallipoli D, Gens A, Remero E. Role of degree of saturation on the normally consolidated behaviour of unsaturated soils[C]// Pro. 3rd Int. Conf. Unsaturated Soils, Recife, 2002: 113-120.
- [11] Escario V and Juca. 1989. Shear and deformation of partly saturated soils, Proceedings of 12nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Rio de Janeiro, 43-46.
- [12] 徐永福, 傅德明. 非饱和土的结构强度研究[J]. 工程力学, 1999, 16(4): 73-77. (XU Yongfu, FU Deming. Study on the structural strength of unsaturated soils[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(4): 73-77. (in Chinese))
- [13] 黄义, 张引科. 非饱和土土水特征曲线和结构强度理论[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 268-277. (HUANG Yi, ZHANG Yinke. The theory of soil water characteristic curve and structure strength for unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 268-277. (in Chinese))
- [14] 孟黔灵, 姚海林, 邱伦峰. 吸力对非饱和土抗剪强度的贡献[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 423-431. (MENG Qianling, YAO Hailin, QIU Lunfeng. The contribution of matric suction to shear strength of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(4): 423-431. (in Chinese))
- [15] 扈胜霞, 周云东, 刘丰收, 等. 非饱和和原状黄土强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 660-672. (HU Shengxia, ZHOU Yundong, LIU Fengshou, et al. Test study on strength character of unsaturated and undisturbed loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 660-672. (in Chinese))
- [16] 陈建斌, 郝红玉, 卢方伟. 非饱和和膨胀土强度特性试验研究[J]. 土工基础, 2008, 22(6): 76-78. (CHEN Jianbin, HAO Hongyu, LU Fangwei. Testing study on strength characteristics of unsaturated expansive soils[J]. Soil Engineering and Foundation, 2008, 22(6): 76-78. (in Chinese))
- [17] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1931-1936. (LIN Hongzhou, LI Guangxin, YU Yuzhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1931-1936. (in Chinese))
- [18] 闫亚景, 文宝萍, 计博勋. 基质吸力对非饱和和重塑黄土抗剪强度的贡献[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 865-874. (YAN Yajing, WEN Baoping, JI Boxun. Contribution of matric suction to shear strength of unsaturated remoulded loess soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 865-874. (in Chinese))
- [19] Rafael Baker, Sam Frydman. Unsaturated soil mechanics: Critical review of physical foundations[J]. Engineering Geology, 2009, 106: 26-39.
- [20] 党进谦, 李靖. 含水量对非饱和和黄土强度的影响[J]. 西北农业大学学报, 1996, 24(1): 57-60. (DANG Jinqian, LI Jing. Effect of water content on the strength of unsaturated loess[J]. Acta Univ. Agric. Boreali occidentalis, 1996, 24(1): 57-60. (in Chinese))
- [21] 申春妮, 方祥位, 王文和, 等. 吸力、含水率 and 干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347-1351. (SHEN Chunni, FANG Xiangwei, WANG Wenhe, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remoulded unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1347-1351. (in Chinese))
- [22] 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 Kun, WAN Junwei, CHEN Gang, 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))
- [23] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3302-3306. (LIU Xiaowen, CHANG Lijun, HU Xiaorong. Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3302-3306. (in Chinese))
- [24] Fredlund DG, Rahardjo H. 非饱和土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 22-304. (Fredlund DG, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 22-304. (in Chinese))
- [25] 张芳枝, 梁志松, 周秋娟. 非饱和土性状及其边坡稳定性[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. (ZHANG Fangzhi, LIANG Zhisong, ZHOU Qiujuan. Behavior of unsaturated soil and stability of soil slope[M]. Beijing: Chian National Water Resources and Hydropower Press, 2011. (in Chinese))
- [26] 张冬梅, 黄宏伟. 不同应力历史条件下软黏土强度时效特性[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(10): 1320-1326. (ZHANG Dongmei, HUANG Hongwei. Time dependency of undrained behavior of natural soft clay with different pre shearing stress history based on laboratory test[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(10): 1320-1326. (in Chinese))

(下转第605页)

- 究[J]. 混凝土, 2010, 254(12): 111-113. (YANG Jur cheng, GUO Lei, HE Ding, et al. Study on concrete's temperature control measures for the inverted siphon project in winter[J]. concrete, 2010, 254(12): 111-113. (in Chinese))
- [10] 季日臣, 严娟, 苏小凤. 混凝土箱形渡槽日照高温下结构安全研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 90-92, 109. (JI Ri chen, YAN Juan, SU Xiaofeng. Structural safety research of concrete box aqueduct under solar radiayion with high temperature[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 90-92, 109. (in Chinese))
- [11] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. (ZHU Borfang. Thermal stress and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Water Power Press, 1998. (in Chinese))
- [12] 朱伯芳, 吴龙坤, 李玥, 等. 混凝土坝施工工期坝块越冬温度应力及表面保温计算方法[J]. 水利水电技术, 2007(8): 34-37. (ZHU Borfang, WU Long sheng, LI Yue, et al. The thermal stress and superficial thermal insulation of concrete dam under construction in winter in temperature control of cold regions [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007(8): 34-37. (in Chinese))
- [13] 张晓飞, 陈尧隆, 李守义, 等. 寒冷地区混凝土坝表面保温效果研究[J]. 河北农业大学学报. 2010, 33(1): 98-103. (ZHANG Xiaofei, CHEN Yaolong, LI Shouyi, et al. A study of the effect of superficial insulation RCC dam in cold area[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2010, 33(1): 98-103. (in Chinese))
- [14] 毛松鹤. 混凝土箱形输水桥日照温度场及温度应力研究[J]. 山西建筑, 2012(33): 190-191. (MAO Songhe. The solar radiation temperature field and thermal stresses research of concrete box water bridge [J]. Shanxi Architecture, 2012(33): 190-191. (in Chinese))

(上接第 596 页)

- [14] 蔡健民. 福建水资源的特点与面临的挑战[J]. 水利科技, 2003, 25(3): 1-3. (CAI Jianmin. Fujian water characteristics and challenges[J]. Hydraulic Science and Technology, 2003, 25(3): 1-3. (in Chinese))
- [15] 王惠文, 黄薇. 成分数据的线性回归模型[J]. 系统工程, 2003, 21(2): 102-106. (WANG Huiwen, HUANG Wei. A simple linear regression model based on the compositional data systems engineering[J]. 2003, 21(2): 102-106. (in Chinese))
- [16] 福建省水利厅. 福建省水资源公报[R]. 2010. (Ministry of water resources in Fujian province. Water Resources Bulletin [R]. 2010. (in Chinese))
- [17] 福建省统计局. 福建统计年鉴[G]. 中国统计出版社, 2010. (Department of statistics of Fujian province. Statistical Yearbook in Fujian province[R]. China statistics press, 2010. (in Chinese))
- [18] 陈佳贵, 黄群惠. 工业发展、国情变化与经济现代化战略[J]. 中国社会科学, 2005(4): 56-61. (CHEN Jiagui, HUANG Qunhui. Industrial development, conditions change and economic modernization strategy [J]. Social Sciences in China. 2005, 25(4): 56-61. (in Chinese))

(上接第 600 页)

- [27] 张俊然, 许强, 孙德安. 吸力历史对非饱和土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2810-2814. (ZHANG Juran, XU Qiang, SUN De'an. Effect of suction history on mechanical behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2810-2814. (in Chinese))
- [28] Bocking K A, Fredlund D G. Limitations of the axis translations technique[C]// Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils. Denver: ASCE, 1980: 117-135.
- [29] 赵成刚, 李舰, 刘艳, 等. 非饱和土力学中几个基本问题的探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1825-1831. (ZHAO Chenggang, LI Jian, LIU Yan, et al. Discussion on some fundamental problems in unsaturated soil mechanics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1825-1831. (in Chinese))
- [30] 谢定义, 冯志焱. 对非饱和土有效应力研究中若干基本观点的思辨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 170-173. (XIE Dingyi, FENG Zhiyan. Consideration of some fundamental view points in studying effective stress of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 170-173. (in Chinese))